

论文题目：分布式水文模型在湟水流域的适用性研究

学科专业：水文学及水资源

研究生：王亚军

签名：王亚军

指导教师：黄强 教授

签名：黄强

摘 要

本文采用分布式水文模型对湟水流域水循环过程、土壤侵蚀过程以及污染物质的产生和输移过程等进行模拟，不仅从时间尺度上，而且从空间分布上对流域的产流、产沙和产污特性作出了定量评价。通过模型模拟有效地解决了水量的连续变化和伴生水质演变过程的统一问题，从而可以对流域的水量水质进行综合评价，为湟水流域水资源管理和生态环境的治理规划提供可靠的依据。

论文采用流域 DEM 对生成河网和子流域划分；对土壤类型和土地利用进行了重分类，建立了土壤数据库；利用实测数据对模型参数率定，并对关键性参数进行了敏感性分析；应用研究区面积达到 15600 多平方公里，率定后的模型满足了模型验证的判断标准。

利用率定好的模型进行了模拟计算，结果分析表明：流域的降雨和产流大部分集中在西宁以上的集水区域，流域泥沙、非点源污染负荷主要产生于西宁以下、民和以上的集水区域。不同水平年流量、泥沙量和非点源污染负荷量差别显著，随降雨径流特别是暴雨径流过程产生的泥沙、非点源污染负荷主要集中在汛期，尤其是 7 月份。从各土地利用的产出对比分析来看，耕地的硝酸盐氮和可溶性磷贡献比最高；山地中低覆盖度草地产沙模数最高，相应有机氮和固相磷的贡献比较高。最后利用模型对流域的水质水量进行综合评价，结果表明湟水流域的污染状况非常严重，仅仅以代表性河长评价结果没有考虑到水质与水量相结合的过程，某种程度上掩盖了湟水流域水资源污染程度的严重性。表明 SWAT 模型可以适用于湟水流域内水资源的综合评价研究。

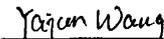
关键词：分布式；水文模型；湟水流域；适用性

*论文得到水利部“948”项目（编号：200748）的资助

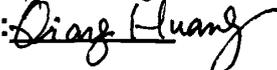
**Title: STUDY ON APPLICABILITY OF SWAT IN HUANGSHUI RIVER
BASIN**

Major: Hydrology and Water Resources

Name: Yajun WANG

Signature: 

Supervisor: Prof. Qiang Huang

Signature: 

Abstract

Distributed hydrological model — Soil and Water Assessment Tool(SWAT) is applied to simulate water recycle process, soil erosion process, and the transfer process of polluting materials in Huangshui River Basin. So we can make a quantitative assessment on water yield、sediment yield and pollutant yield of the basin as well as their spatio-temporal distribution. And with the help of SWAT, we can unify the continuous change of water quantity with the evolvement of associated water quality, so the comprehensive assessment on water quantity and quality of the basin would be carried out.

Firstly the network of rivers and subbasin are identified from DEM of the basin. Then the soil-type and landuse are reclassified, the data base of soils is set up. Parameters of the model were calibrated and the model is tested by observed data and the critical parameters are tested by a sensitive analysis. In consideration that the study area is about 15600 km^2 large, the goodness of fit of the model is satisfied.

The simulated outcome by the calibrated model shows that over 70 percent precipitation and 65 percent runoff of the basin focus on the upperreaches of Xining station, while 80 percent sediment yield and 70 percent non-point source pollutants come from the watershed area which locate between Xining station and Minhe station. The difference of water yield, sediment yield and loadings of non-point source pollutants in different hydrologic years is dramatic. The sediment and loadings of non-point source pollutants caused by rainstorm focus on flood season especially in July. Each land cover represented in the model yields different results. Tilt contributes the most of nitrate and soluble phosphorus yield. RNGB (the mountain range brush) and SWRN (the mountain range grasses) contributes the most sediment yield accompanying the highest ORG_N and SED_P yield. Finally the model is applied to make comprehensive assessment on the basin's water quantity and quality. The outcome showed that the water pollution of the Huangshui River is very serious, which was covered in some degree by the river length evaluating method that didn't consider of the integration of water quantity and

quality. The results indicate that SWAT model can be applied to comprehensive evaluation analysis of water resources in Huangshui River Basin.

Key words: distribution; hydrological model; Huangshui River Basin; applicability

* The paper has gained the support from “948” project (serial number: 200748) of Ministry of Water Resources.

独创性声明

秉承祖国优良道德传统和学校的严谨学风郑重声明：本人所提交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的成果。尽我所知，除特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人的研究成果。与我一同工作的同志对本文所研究的工作和成果的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并已致谢。

本论文及其相关资料若有不实之处，由本人承担一切相关责任

论文作者签名：王亚军 2008年3月25日

学位论文使用授权声明

本人王亚军在导师的指导下创作完成毕业论文。本人已通过论文的答辩，并已经在西安理工大学申请博士/硕士学位。本人作为学位论文著作权拥有者，同意授权西安理工大学拥有学位论文的部分使用权，即：1) 已获学位的研究生按学校规定提交印刷版和电子版学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文，可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索；2) 为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文或解密后的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所或在校园网上供校内师生阅读、浏览。

本人学位论文全部或部分内容的公布（包括刊登）授权西安理工大学研究生部办理。

（保密的学位论文在解密后，适用本授权说明）

论文作者签名：王亚军 导师签名：董强 2008年3月25日

1 绪论

1.1 湟水流域概况

湟水流域(仅为青海省境内、且不包括大通河流域,下同)地处青海省东部,是青藏高原一个特殊的自然地理单元和生态系统。湟水是黄河的一级支流,发源于青海省海北藏族自治州海晏县包呼图河北部的洪呼日尼哈,其流域呈树叶状(图 1-1),西北高、东南低,干流自西北流向东南,在甘肃省永登县傅子村注入黄河。青海省境内民和站以上流域面积 15620km²,多年平均年径流量为 21.6 亿 m³,多年平均流量为 65.7m³/s。

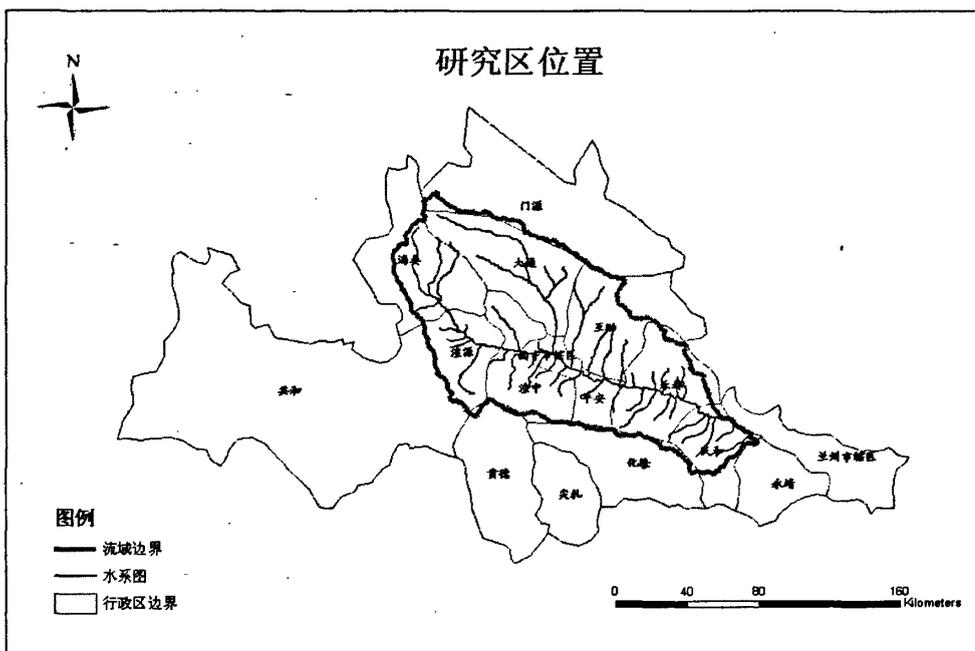


图 1-1 研究区位置

Fig.1-1 Area of study

湟水流域水汽主要来自印度洋孟加拉湾上空的西南暖湿气流。因流域深居内陆,水汽到达该流域时,含量大大减弱,流域多年平均降水量为 486.6mm,属半干旱地区,而且在地区分布上很不均匀,年降水量变差系数在 0.15~0.30 之间,从上游至下游逐渐增大。西宁至民和之间的湟水干流狭长环状封闭地区,年降水量介于 250~350mm 之间,周围山区在 600mm 以上。降水量年内分配极不均匀,全年的降水量主要集中在汛期(6~9 月),占全年降水量的 65%以上,而 10 月至翌年 2 月降水量仅占全年的 10%左右,3~5 月降水量约占全年降水量的 25%^[1]。

湟水流域的蒸发量随海拔高度升高而逐渐减少,其分布规律与降水量的分布规律相反,自东南向西北逐渐减少,变化幅度一般在 750~1000mm 之间。多年平均水面蒸发量为 889.3mm,主要集中在春末夏初的 5~7 月,其间的水面蒸发量占全年总量的 40%左右,而冬季 10 月至翌年 2 月的水面蒸发量仅占年总量的 10%左右。流域内干旱指数(年蒸发能力

与年降水量之比)变化不大,一般在 1.25~3.53 之间,且从上游至下游递增。

流域形状西宽东窄,地势自西北向东南逐渐降低,最高达 4900m,最低处位于甘肃、青海两省交界的湟水谷地约为 1650m,相对高差达 3250m。流域内地形复杂多样,有高山、中高山,又有黄土覆盖的低山丘陵和河谷平原。依据地形、气候、土壤、植被及农业生产的特点,习惯上划分为脑山、浅山、川水三个区域。脑山为湟水各支流源头山区,地势较高,土壤多为黑褐土,土地肥沃,在地势平坦的沟底、谷地、山梁等地,多辟为耕地,一般植被较好,降水量较多,是青海省降水量最多的地区之一。径流补给以降水为主,另有部分地下水和融冰雪水。较大洪水主要由暴雨产生,水土流失不严重,河水含沙量较小。浅山为湟水各支流中下段及湟水干流河谷以上的两岸(部分河谷除外)山区,多为光秃的小山,土壤以栗钙土及沙壤土为主。沟谷极为发育,沟道短小,坡度大。多悬谷、滑坡、崩塌等地貌形态,植被不良,流域蓄水能力很差,水土流失较为严重,汛期如遇雷雨即山洪暴发,河水陡涨陡落,且挟有大量泥沙^[2]。川水为湟水河谷及两岸各支沟中下段河谷地区,地势相对低平,土地肥沃,大都为自流灌溉的农田,占湟水流域面积的比重很小,除水土流失比浅山较轻外,其余情况基本与浅山相似。

1.1.1 研究背景及意义

湟水流域水资源及与水相关的生态环境问题已成为该地区经济与社会持续发展和生态环境改善的突出矛盾。因此,加强湟水流域的水资源综合研究,了解水资源的变化趋势,掌握流域的产流、产沙、产污的机制和时空分布特性,从而对流域水循环过程、土壤侵蚀过程、污染物产生与输移过程进行综合评价,并以此作为流域水资源统一规划、管理与生态环境治理规划的依据,这对于合理利用湟水流域有限的水资源,改善湟水流域的水资源及生态环境状况是非常必要的。

基于以上要求,研究湟水流域水资源可利用量,其目的是为提高湟水流域水资源承载力、实施水资源优化配置。对流域内水资源及与水相关的土地、环境资源进行综合规划和管理,开展湟水流域土壤侵蚀与水源地污染源防治对策研究,调查泥沙与污染来源,提出保护措施,从而保障水资源可持续利用,改善流域的生态环境,为支撑经济社会持续发展提供依据。

近几年来,SWAT 模型在我国得到了比较多的应用,尤其是在西北寒区,有了很多成功的研究例子。刘昌明、王中根等曾利用 SWAT 模型对黑河流域的日径流进行模拟,取得了良好的效果;刘昌明、郝芳华等利用 SWAT 模型对黄河源区的土地利用变化和气候变化所引起的水文变化效应做了定量分析^{[46][47][48]};陈军峰、陈秀万等利用 SWAT 模型的水量平衡模块揭示了梭磨河流域气候变化与土地利用变化对流域产流的影响;除了对水量的模拟研究之外,张思聪、万超等利用 SWAT 模型对潘家口水库进行了不同水平年的面源污染负荷计算,并分析了不同农业管理措施对水库面源污染负荷的影响^{[49][50][51]}。因此本文拟选用分布式水文模型作为研究工具。

利用分布式水文模型,在 GIS、RS 技术的支持下,通过分布式水文模型模拟湟水流域

水循环过程、土壤侵蚀过程以及污染物质的产生和输移过程。从而不仅可以从时间尺度上,而且可以从空间分布上对流域的产流、产沙和产污特性做出定量评价,在此基础上,初步探讨模型模拟水量的连续变化和伴生水质的演变过程,从而可以对流域的水量水质进行综合评价。从而为湟水流域水资源的统一规划管理,治理流域水土流失、防治面源污染等生态环境治理措施提供依据。

1.1.2 湟水流域的水资源问题

湟水流域是青海省政治、经济、文化的中心和工农业生产基地,也是该省经济最发达的地区。全省近 60%的人口,52%的耕地和 70%以上的工矿企业分布于湟水流域,粮食产量占全省的 62%,工业产值占全省的 66%。这里人口众多,劳力富余,土地肥沃,光热资源丰富,农业开发历史悠久,产业门类相对齐全,矿产资源丰富,在青海经济发展中起着龙头作用。湟水流域东接兰州,西通柴达木盆地,南连川藏,北达河西走廊,在柴达木盆地开发和青海经济发展中占着“强东拓西”的战略位置,肩负着经济建设与战略转移的重任,是国家开发大西北的重要窗口。

但是,随着该流域人口的增加和国民经济的发展,水资源的供需矛盾日趋突出。流域水资源的问题已成为流域经济与社会持续发展和生态环境改善的突出矛盾,主要表现在以下几个方面^[3]:

a. 水资源匮乏

流域属半干旱的高原大陆性气候,水资源短缺。水资源的主要补给来源是大气降雨,河川径流与降水直接相关。流域多年平均降雨量 450mm,平均水面蒸发量 800—1300mm,属半干旱区,这是水资源匮乏的主要原因。流域水资源量为 21.6 亿 m^3 ,人均占有水量 750 m^3 ,每公顷占有水 7070 m^3 ,远远低于全国平均水平,目前耕地灌溉率不足 30%,属水资源贫乏的地区。相差悬殊,再加上人口、耕地、城镇、工矿的分布不协调,缺水比较严重,农业上仍未摆脱“靠天吃饭”的局面。

b. 水资源丰枯悬殊时空分布不均

由于降水时空分布不均,造成流域水资源时空分布不均。一是河川径流的年内分配过于集中,6—9 月份径流量占全年径流量 65%—85%,每年 10 月至翌年 5 月河川径流枯竭,再加上冬季河水冻结,常出现春旱,特别是每年 4—6 月,为农业用水高峰期,出现“卡脖子旱”,不仅影响农灌,而且还影响工业供水和城镇生活供水。二是径流年际变化也很大,湟水民和站 1950—1998 年 49 年资料统计,年径流的最大年份 1961 年为 33.7 亿 m^3 ,最小年份 1991 年为 7.10 亿 m^3 ,年最大最小相差 4.8 倍。湟水干流连续丰水年、枯水年的现象也十分突出。三是流域水资源的空间分布不均衡,上游水资源多于下游。

c. 水土流失严重,河流含沙量大

湟水流域地处青藏高原和黄土高原的过渡带,生态系统非常脆弱,植被覆盖率较低,水土流失严重,是青海省水土流失最严重地区。目前流域水土流失面 12218 km^2 ,占流域面积 15620 km^2 的 74.8%,大部分属强度侵蚀区。由于水土流失严重造成的多沙河流这一

特性, 增大了流域水资源开发利用的难度。

d. 流域水污染日趋严重

湟水水污染产生和水环境日趋恶化是上个世纪流域出现的重大环境问题。近五十年来现代工业产业的产生和发展是导致水环境恶化的根本原因, 而且可能还有恶化趋势。湟水谷地是工矿和乡镇企业最多最集中的地区, 一般是大耗水、高耗能、重污染类型。八十年代以来大型的金属镁、电解铝、金属硅等能源高耗能工业基地在湟水谷地相继建成, 加剧了流域水污染。主要污染物有氨氮、挥发酚、六价铬、汞等。湟水干流西宁至民和段 130km 属于污染最为严重的地区^[4]。

另外, 农林业施用农药、化肥的残留物大量滞留于土壤中, 由于降雨产流过程中的冲刷或侵蚀或者灌溉等, 使得大面积上的污染物进入水体造成污染, 形成了流域的面源污染。湟水又是黄河上游的最大支流, 湟水流域已成为黄河流域的重大污染源之一, 水污染直接威胁着整个黄河流域经济持续发展和生态环境状况的改善。

e. 流域缺乏统一规划、管理和综合利用

新中国成立后, 对湟水流域水资源的开发利用提出过一些规划, 由于当时条件的制约, 没有依据水资源特点、国民经济各部门用水需求和既要开发利用又要保护原则进行统筹规划和利用, 因而造成在开发利用上的各自为政, 单方面的注重经济效益, 而忽视了流域的生态环境保护, 造成大量的水土流失以及严重的水污染现状。由于流域内水资源管理机构尚未建立, 导致流域水资源管理滞后, 水资源开发利用上无政府主义状态未得到控制。长期以来, 流域的管理还紧紧停留在区域管理模式上, 各地只考虑本地区眼前利益和局部利益, 加剧了流域水资源供需矛盾以及生态环境的恶化。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 水文模型发展现状

水文模型的发展阶段如图 1-2 所示。早在 20 世纪 60 年代, 世界范围的大规模工程建设促进了工程水文学的发展与成熟, 如观测水文学、统计水文学以及降雨径流模拟技术等日臻完善。这一时期的降雨径流模拟技术, 如 Sherman(1932) 的单位线法和 Nash (1957) 的瞬时单位线和线性水库法等, 大都采用降雨径流应答关系即经验性的“黑箱”模型的分析方法^{[5][6]}, 20 世纪 60~80 年代, 随着科学技术的进步, 进入流域水文模型即概念性集总式“灰箱”模型的开发阶段, 代表性模型有美国的 Stanford 模型 (Crawford & Linsley, 1966) 和 HEC—1 模型 (U. S. Army Corps of Engineers, 1968)^{[7][8][9]}, 我国 20 世纪 70 年代开发的新安江蓄满产流模型和陕北超渗产流模型等^[10]。所谓流域水文模型是将整个流域作为研究单元, 考虑流域蓄满产流、超渗产流及汇流等概念, 并根据河川观测径流量来率定模型参数、模拟流域产汇流过程。这些概念集总式“灰箱”模型虽然比经验性“黑箱”模型前进了一大步, 但是无法给出水文变量在流域内的分布, 满足不了流域水资源规划管理实践中对各种水循环因素信息的需要, 基于这样的认识, 国外开始了分布型水文数学模

型的研究^{[11][12][13]}。

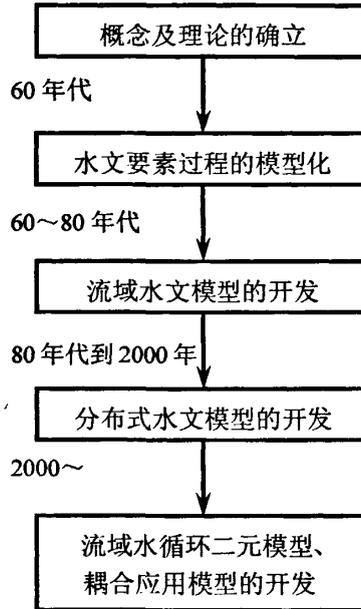


图 1-2 水文模型的发展阶段

Fig.1-2 Stage of hydrology distributed model

由于地球环境变化及下垫面变化,流域产汇流规律发生了变化,因此在预测未来水资源变化时传统的水文统计回归外延法已经很难使用。此外,集总式流域水文模型无法给出水文变量的空间分布,满足不了规划管理实践中对流域内各个位置的水位水量情报的需要。20世纪80年代以来,随着计算机技术、地理信息系统和遥感技术的发展,考虑水文变量空间变异性的分布式流域水文模型的研究受到重视,由丹麦、法国及英国的水文学家(Beven等,1980年;Abbott等,Bathurst,1986年)^{[14][15][16][17]}研制与改进的SHE模型(System Hydrologic European)是一个典型的分布式水文模型,研制者鉴于常用的降雨径流模型不适合解决流域中人类活动对于产流、产沙及水质影响等问题,而研制了该模型,其主要水文物理过程均用质量、能量或动量守恒的偏微分方程的差分形式来描述,当然也采用了经过一些独立实验研究得来的经验关系。在SHE模型中,流域在平面上被划分成许多网格,这样便于处理模型参数、降雨输入以及水文响应的空间分布性;在垂直面上,则划分成几个水平层,以便处理不同层次的土壤水运动问题。SHE模型现在也有很多不同的版本,比如MIKESHE等,并在许多流域得到检验和应用。

1980年,英国的Morris进行了IHDM(Institute of Hydrology Distributed Model)的研究,根据流域坡面的地形特征,流域被划分成若干部分,每一部分包含有坡面流单元,一维明渠段以及二维(在垂面上)表层流及壤中流区域。1987年,Even等人及1989年Calver等人对IHDM模型进行了改进。1985年,美国农业部农业研究中心的Alonso和De Coursey考虑到土地利用与管理将会影响到一个小流域的水文循环与化学循环,于是设计了SWAM模型(Small Watershed Model)^{[18][19]}。

1994年, Jeff Arnold 为美国农业部(USDA)农业研究中心(ARS)开发了 SWAT 模型(Soil and Water Assessment Tools)^{[20][21][22][23][24][25]}。SWAT 是一个具有很强物理机制的、长时段的流域水文模型。它能够利用 GIS 和 RS 提供的空间信息, 模拟复杂大流域中多种不同的水文物理过程。模型可采用多种方法将流域离散化(一般基于栅格 DEM), 能够响应降水、蒸发等气候因素和下垫面因素的空间变化以及人类活动对流域水文循环的影响。SWAT 模型一经推出, 便得到了良好的模拟效果, 同时经过不断的修改和完善, 现在已经成为广泛应用的流域尺度的分布式水文模型, 在北美、欧洲及加拿大等地区得到了较大规模的推广。

在我国分布式水文模型的研究起步较晚。1995年, 沈晓东等在研究降雨时空分布与下垫面自然地理参数空间分布的不均匀性对径流过程影响的基础上, 提出了一种在 GIS 支持下的动态分布式降雨径流流域模型, 实现了基于栅格 DEM 的坡面产汇流与河道汇流的数值模拟。1997年, 黄平等分析了国外一些具有物理基础的分布式水文数学模型的不足, 提出了流域三维动态水文数值模型的构想。2000年, 黄平等又建立了描述森林坡地饱和与非饱和带水流运动规律的二维分布式水文数学模型, 并用有限元数值方法求解模型。2000年, 郭生练等建立了一个基于 DEM 的分布式流域水文物理模型, 用来模拟小流域的降雨径流时空变化过程。任立良等进行了流域数字水文模型(分布式新安江模型)研究, 并基于 DEM 考虑流域空间的变异性, 建立数字高程流域水系模型。2002年, 张成才等进行了基于 DEM 模型的流域参数识别方法研究。牛振国等建立了基于 DEM 的区域参考作物蒸散量的分布式模型^{[27][28][29][30][31][32][33][34][35]}。

以上模型的研究与应用, 极大地促进了流域分布式水文模型的发展。同时近年来, 将分布式流域水文模拟技术与地理信息系统(GIS)、数字高程模型(DEM)和遥感、航测及雷达等遥测技术相结合, 从而可以为水资源评价、洪水预报调度、污染物运移和土壤侵蚀流失以及水生态等各种实际问题提供更多的技术支持。

1.2.2 分布式水文模型的发展趋势与应用前景

随着分布式水文模型的研究的进一步深入, 国际上分布式流域水循环模拟技术有以下几个发展趋势^{[38][39][40]}:

- (1) 与水资源评价、水污染以及水生态等专业模型的耦合与集成, 如美国 USDA 开发的 SWAT 模型, USGS 正在研制的 MMS 系统, 欧洲开发的 SHE/SHETRAN 模型等;
- (2) 将分布式水文模型与雷达降雨预报相结合的进行短期洪水预报的研究;
- (3) 将分布式水文模型与区域气象模型(RCM)相耦合提高暴雨洪水预见期的研究;
- (4) 无观测资料或观测资料缺乏流域的水文预测(国际水文学会 2002 年将其定为未来 10 年的研究计划)。

我国广大地区的地理环境要素如地形、土壤、植被、气候及耕作制度等与欧美国家有较大差异, 很难直接应用国际上较为成熟的分布式水文模型, 因此, 应加快开发适应我国自然地理特征与气候特点的各类基于 GIS 的耦合式应用系统。

分布式水文模型作为一个工具,研究开发它的目的是为了用来解决生产实际问题,服务于社会经济的可持续发展。尽管分布式水文模型仍然存在着这样那样的问题需要进一步探索解决,但是它所具有的相比传统集总式水文模型的优势,决定了它具有广阔的应用前景。任何科学技术都需要在实践应用中取得进一步的发展,在发展中服务于生产实践,分布式水文模型也不例外。目前,分布式水文模型不局限径流模拟,它已经开始并将进一步通过学科交叉在流域资源综合管理、环境保护和生态建设等领域发挥作用。

a. 水资源动态评价与调配管理

迄今为止,国内外水资源评价方法与实践均是基于“实测—还原”的狭义水资源一元静态评价模式。但是随着人类活动日益加剧,还原比例越来越大,受资料条件等可观因素的限制和选取还原参数时人为主观随意性的影响,应用还原法难以获取“天然”与“人工”二元驱动力作用下的水资源量“真值”。因此传统的水资源评价方法和评价手段亟待改进。而分布式水文模型结合“土壤—植被—大气通量交换模型(SVATS)”,可以进行包括土壤水在内的水资源全口径层次化评价,为研究植被生态需水以及农业节水潜力与节水措施效果评价创造了条件。另外,分布式水文模型在水资源管理中所需要的径流预报、土壤墒情预测、积雪融雪预测以及地下水位预测等方面也有很大的应用潜力。

b. 分布式洪水预报与流域整体防洪

随着我国城市化进程的加快和社会经济的进一步发展,为保障洪水发生时的人民生命财产安全和减少洪涝灾害损失,分布式洪水预报与流域整体防洪日显重要。应用分布式水文模型直接根据雨量站测雨或者雷达测雨预报洪水,将能够延长洪水预报的预见期,为防洪决策赢得宝贵的时间。

c. 土壤侵蚀、面源污染与流域生态环境

水是物质运移的重要载体。分布式水文模型提供时空分布的水文变量与通量的信息,实际上是解决水的流畅问题,为坡面土壤侵蚀、面源污染以及山体滑坡等的模拟计算与对策效果分析创造了条件。水体中的污染负荷包括溶解态负荷和颗粒态负荷,其中,颗粒态负荷取决与土壤泥沙的运移。因此,应用分布式水文模型研究面源污染及河流水体污染需要与水力学、泥沙动力学和环境水力学等许多学科进行交叉合作才能实现。上一节所介绍的MIKE SHE、SWMM和SWAT模型尽管模型结构和模拟方法不同,但均进行了这方面的探索,并且都在不同程度上具备了流域环境和生态分析功能。分布式水文模型预期会在流域生态环境建设中进一步得到引用。

1.2.3 分布式水文模型的有效性评价及相关的应用

分布式水文模型于90年代中期正式推出,迄今为止,模型的有效性已经得到了多项研究项目的证明。其中,关于模型的有效性,美国环境保护署(EPA—Environmental Protection Agency)专门对其进行了评价。

1996年,美国环境保护署为了研究杀虫剂对饮用水和食物的污染,组织了各方面的专家选择了包括SWAT模型,Ann-AGNPS模型,BASIN-HSDF模型在内的多个流域尺度

的模型，对模型的性能、模拟精度进行了全方位的评价。

模型的评价分两个步骤进行，第一步采用了美国环境建模工作组（Environmental Modeling work Group）和 EPA 的传输模型比较的标准评价模式，由模型的开发者就模型的组成、功能、适用范围进行判断性的说明。第二步选择了美国印第安那州白河流域的 Kessinger Ditch 和 Sugar Creek 两个流域^{[41][42][43]}（设有相应的观测站）进行模拟实验，以评价模型的模拟精度。

在模型评价中，SWAT 模型的功能和有效性得到了确定。最后评价意见为^{[44][45]}：“模型的优点：SWAT 模型反映了当前流域土壤侵蚀与非点源污染建模技术的进步。模型经过测试证明了模型的有效性；不足之处：模型的使用需要多方面的学习，需要使用者具有水文学知识和 GIS 处理的训练；由于模型需要大量的输入数据和众多的结果输出分析，模型的使用需花费大量的人力和时间”。在这个评价报告中对于 SWAT 模型在美国 15 个流域（流域面积：地块大小~40407km²）应用的有效性也进行了证明。

SWAT 模型已经比较广泛地应用到美国国家项目（如 HUMUS 项目）、大的区域性项目（如：NOAA's Coastal Assessment Framework）和许多不同尺度的研究项目中。研究内容涉及到流域水平衡，河流流量预测和非点源污染等诸多方面。

1.3 研究目标、内容和工作路线

本次论文的研究目标，着重于利用 SWAT 分布式水文模型，在 GIS、RS 技术的支持下，区别于传统的水资源评价模式，通过采用 SWAT 模型模拟湟水流域水循环过程、土壤侵蚀过程以及污染物质的产生和输移过程。从而不仅可以从时间尺度上，而且可以从空间分布上对流域的产流、产沙和产污特性做出定量评价，在此基础上，初步探讨通过模型模拟水量的连续变化和伴生水质的演变过程，从而可以对流域的水量水质进行综合评价。

论文的主要研究内容是基于 SWAT 模型模拟湟水流域的径流、泥沙和水质，将流域的径流性水资源解析为水循环过程的各个要素，利用模型进行流域水循环要素的时空变化规律评价；利用模型分析不同的土地利用和下垫面状况对流域产流、产沙以及面源污染产出的影响，并且对径流、泥沙和非点源污染三者之间的相互影响关系进行了模拟和分析；从而对湟水流域的水资源进行综合评价。本文的研究过程主要包括以下两部分内容：

► SWAT 模型应用前期准备工作：

- (1) SWAT 模型模拟所需资料的收集、整理；
- (2) 基于 DEM 的流域数字河网与子流域划分；
- (3) 对流域土地利用与土壤类型的重分类，并建立土壤物理化学属性数据库；
- (4) 利用实测数据模型参数进行率定，并对关键性参数进行了敏感性分析；

► SWAT 模型后期应用分析工作：

- (5) 研究湟水流域的水循环要素在空间和时间上的分布特性；
- (6) 研究湟水流域土壤侵蚀和非点源污染负荷的时空分布特性；
- (7) 研究不同土地利用类型对流域产流、产沙以及非点源污染产出的影响；

(8) 基于模型进行湟水流域水资源量计算，并对流域的水质水量进行综合评价。

模型模拟计算的主要路线见下图：

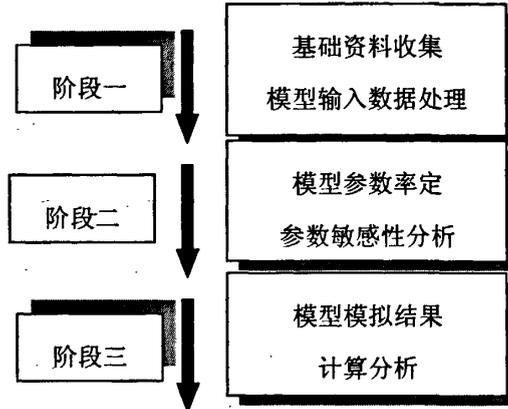


图 1-3 模型计算流程图

Fig.1-3 Procedure flow of calculation model

利用模型进行计算首先要收集研究区的资料，包括研究区内的主要气象站点及气象数据、主要的水文站点和河流的径流、泥沙和水质等数据以及地形、土壤、土地利用等信息。然后进行资料的处理，准备模型计算所需的数据。

模型的参数率定是通过调整模型参数来调整模型的计算结果使之与实测结果逼近的一个过程。模型的率定可以使该模型的计算更符合流域的实际情况，计算结果更准确。在模型参数率定时关键是找到关键性的参数，并对参数的敏感性作出分析。

模型参数率定完成后就可以利用模型进行所需资料计算，并对计算结果进行分析，得出流域径流、泥沙以及其他水循环因素产出的时空分布特征。然后针对拟定的目标，进行综合研究，得出结论。

2 分布式水文模型的基本原理

2.1 分布式水文模型 (SWAT) 简介

2.2.1 分布式水文模型 (SWAT) 基本特点

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型是美国农业部 (USDA) 开发的流域尺度的分布式模型, 它具有很强的物理基础, 适用于具有不同的土壤类型、不同的土地利用方式和管理条件下的复杂大流域, 并能在资料缺乏的地区建模。SWAT 的功能十分强大, 能够用来模拟径流过程, 模拟和分析水土流失, 非点源污染, 农业管理等问题。用于模拟预测长期对于具有多种土壤类型、土地利用和管理条件的大面积复杂流域的径流、泥沙负荷和营养物流失的影响。

SWAT 模型就其本质而言是地理过程的高度量化模型:

► SWAT 是一个集成和系统化的模型体系, 就它的前身 SWRRB 模型而言, 就有 198 个方程、36 个子程序和 2680 个程序语句组成, SWAT 模型有 732 个方程, 子程序和程序语句就可想而知了。SWAT 模型就是通过整个庞大的模型体系把环境中的绝大多数地理因素和相当多的地理过程联系起来的。

► SWAT 已不是一个单纯的水文模型。它可以模拟流域内部的多种地理过程, 这些过程包括: 地表径流、入渗、侧渗、地下径流、回流、融雪径流、土壤温度、土壤湿度、蒸散发、产沙、输沙、作物生长、养分流失、流域水质和农药/杀虫剂等。这种方式的优点在于即使在那些没有监测数据比如水文数据的流域也可以利用这个模型。而且可以方便地研究不同土地利用、管理方式以及气候气象条件对于水质变化的影响。

► SWAT 模型模拟的对象在空间上超出了一般的较单纯的小流域, 超出了通常只具有单一土地利用、单一土壤和单一管理实践的地块大小的区域, 而是同时可用来模拟大的、复杂的、包括许多不同地理性质区域(亚区)的流域。实际上流域可大到几千、几万平方公里。该模型是基于连续时间的模型, 而非基于事件。它是一个长期的产出模型, 可以模拟几年、十几年甚至几十年的过程, 在该模型模拟连续的时间过程时, 可以选择天、月、年作为计算步长。但是不适合模拟详细的、单一事件的洪水过程。

目前 SWAT 模型目前已经被包含在美国环保局推荐使用的流域水量、泥沙、水质评价软件包 BASINS (Better Assessment Science Integrating point and Non-point Sources) 中 (<http://www.epa.gov/waterscience/basins/basinsv3.htm>)。该模型自开发以来在北美及世界上其他地方如欧洲、澳洲有了许多的应用实例, 并在应用中得到了不断的发展。SWAT 模型得到广泛使用的一个重要原因是它的源代码是可以公开的, 而且每作修改后就会公布新的源代码。最新的程序、源代码及程序文档可以在 <ftp://ftp.brc.tamus.edu> 或 <http://www.brc.tamus.edu/swat/> 下载, 世界各地的使用者在模型的网上论坛 <http://sslgtw01.tamu.edu/swat/default.asp> 讨论及解答模型使用中碰到的问题。

2.2.2 分布式水文模型 (SWAT) 的发展过程

SWAT模型最直接的前身是SWRRB模型 (Simulator for Water Resource in Rural Basins) (Williams et al., 1985; Arnold et al., 1990), 它综合了几个ARS开发的模型特点。另外的一些对于SWAT的发展有重要贡献的模型是CREAMS(Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems)(Knisel, 1987), GLEAMS模型(Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems)(Leonard et al., 1987)和EPIC模型(Erosion-Productivity Impact Calculator)(Williams et al., 1984)^{[52][53][54]}。

在80年代后期, 印第安事务局(the Bureau of Indian Affairs)需要一个模型来评估在亚里桑那和新墨西哥的印第安保留土地地区的水资源管理对于下游地区的影响。尽管SWRRB可以方便的利用到几百平方公里的流域上, 面临的问题却是如何来模拟一个有几千平方公里的流域的河流。对于这样大的一个面积, 需要把流域分成几个面积在几百平方公里的子流域。在SWRRB模型中, 子流域的划分只限于十个, 而且各子流域的产流产沙量是直接输出到流域出口的。由于这些局限发展了ROTO模型(Routing Outputs to Outlet)(Arnold et al., 1995), 该模型可以把由多个SWRRB模型运算的结果通过河道输移计算得到流域产流产沙量, 这样就克服了SWRRB划分子流域的限制。尽管这个方法是非常有效的, 但是多个SWRRB模型的输入和输出文件的数据量是非常大的, 需要计算机相当大的储存空间^{[59][60][61]}。另外, 每个SWRRB模型需要独立运行, 然后输入到ROTO中进行河道演算。为了克服这些缺点, SWRRB和ROTO模型结合到一个模型中, 就是SWAT模型。SWAT模型不仅可以模拟较大的区域, 同时保留了SWRRB模型的许多优点。

自从SWAT模型在90年代早期开发出以来, 它也经历了多次修改和补充。在不同的版本之间重要的改进如下^{[65][66]}:

- **SWAT94.2:** 引入了多水文响应单元 (Multiple HRUS) 。
- **SWAT96.2:** 添加了自动施肥与灌溉作为管理选项; 增加了植物截留; CO₂模块增加到作物生长模型中来研究气候变化; 增加了Penman-Monteith潜在蒸腾方程式; 引用了QUAL2E中的河道中包含营养物的水质方程; 河道中杀虫剂的输移过程。
- **SWAT98.1:** 改进了溶雪模块; 河道中水质运算得到了提高; 扩展了营养元素的循环程序; 增加了放牧、施肥等作为管理选项; 修正模型使适应于南半球。
- **SWAT99.2:** 改进了营养物质循环; 增加了河岸储存功能模块; 增加了SWMM模型中的U. S. G. S利用的城市建设/冲刷方程。
- **SWAT2000:** 增加了细菌的输移程序; 使用了Green & Ampt入渗公式; 改进了天气生成器; 允许每天的太阳光照、相对湿度、风速直接读入或生成; 允许潜在ET值可以读入或生成; 改进了高程处理过程; 增加了马斯京根法。

2.2 子流域划分

对大多数的流域来讲, 河网、地形和气象条件都较复杂, 土壤类型、土地利用等变化

将影响流域的水文响应,因此模型计算时需要将流域分为一些计算单元。流域的划分方法很多,各有其优点和不足,最常用的有网格(grid)、山坡(hillslope)和子流域(subbasin)三种。子流域(图 2-1)是模型所采取的最主要的划分方法。子流域的数量取决于对象流域的大小、输入数据的空间详细程度以及所要求的输出信息的空间详细程度。

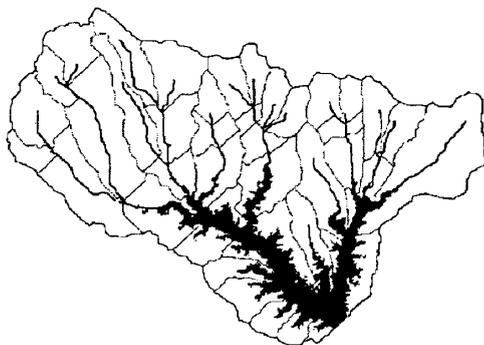


图 2-1 子流域划分图

Fig.2-1 Drainage subbasin

对于每一个子流域又可以根据其中土壤类型、土地利用和管理措施的组合情况,进一步划分为单个或多个水文响应单元。水文响应单元是一种单一的土壤类型、土地利用和管理措施的组合,但是并不需要在空间上真正连接在一起。水文响应单元成为模型中最基本的计算单位。每一个水文响应单元又可以有冠层、积雪层、土壤、浅层含水层和深层含水层。

SWAT 模型单独计算每个子流域上的产水产沙量及营养盐的输出。每个子流域的输入信息可以分为几类:气象数据;水文响应单元信息;地下水运动数据;主河道参数。水文响应单元是指子流域内具有特定土地利用和土壤类型的组合的地块。然后由河网将这些子流域连接起来,通过河道演算得到在流域出口处的产水产沙量及营养物质含量。

2.3 分布式水文模型 (SWAT) 结构及计算方法

无论利用 SWAT 来研究什么问题,水文现象总是流域内其他现象背后的驱动力。水文模拟的准确程度直接决定了其他水循环要素的准确度。在 SWAT 模型中将水文循环分成了两个阶段。一个阶段是陆面水文循环(图 2-2),在这个水文循环过程中,主要是确定流向主河道的水量、泥沙量、营养成分及化学物质(杀虫剂负荷量)多少的各水分循环过程;另一个部分是和汇流相关的各水文要素的循环过程,即水分、泥沙等特质在河网中向流域出口的输移运动。除了水量,SWAT 还可以对河流以及河床中化学物质的迁移转化进行模拟(图 2-3)。

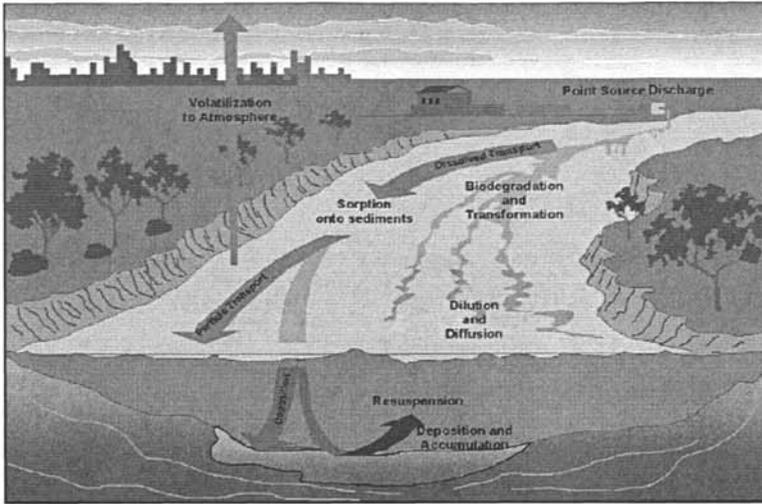


图 2-2 SWAT 模型陆面水文过程图
Fig.2-2 Hydrologic process of SWAT model

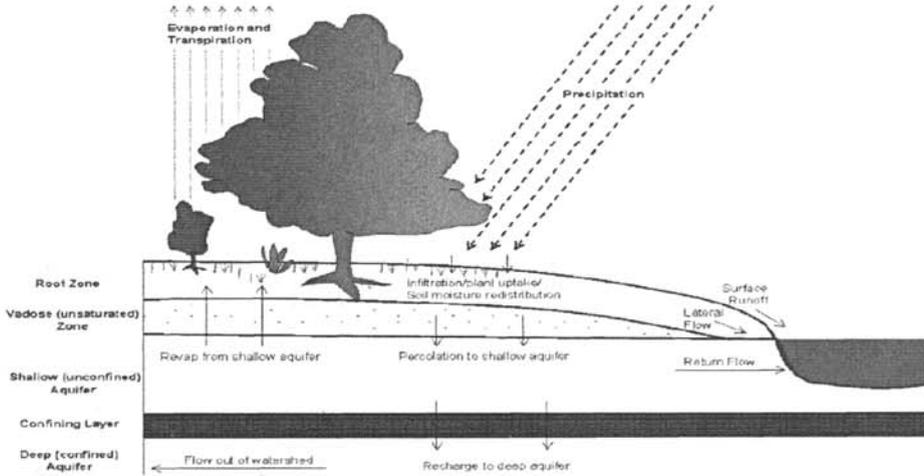


图 2-3 SWAT 模型河道中水、沙、污染物输移过程图

Fig.2-3 Discharge process of water, sediment and pollutant in river of SWAT model

在 SWAT 模型中，对水文循环的模拟计算是基于如下的水量平衡方程：

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})_i \quad (2.1)$$

其中， SW_t 是最终的土壤含水量 (mm)， SW_0 是土壤初始含水量 (mm)， t 是时间 (d)， R_{day} 是第 i 天的降水量 (mm)， Q_{surf} 是第 i 天的地表径流 (mm)， E_a 是第 i 天的蒸发量 (mm)， W_{seep} 是第 i 天壤中流流量 (mm)， Q_{gw} 是第 i 天的地下水出流量 (mm)。

由于对象区域被分割为若干子流域，每一个子流域又进一步划分为若干水文响应单元，这样蒸发腾的计算可以对不同的作物和土壤分别进行。地表径流是先对每一个水文响应单元分别计算，再通过汇流得到流域的总径流量。

SWAT 主要由气象、水文、土壤温度、植物生长、营养成分、杀虫剂、土地管理、河

道汇流和水库汇流等部分组成，各部分的功能和计算原理如下。

2.3.1 水文气象过程

a. 气象过程

SWAT 所需的气象数据包括日降水量、最高最低气温、太阳辐射量、风速和相对湿度。这些数据可以直接从观测数据输入，或者由 SWAT 附带的天气产生器模型产生。气象部分包括气象数据的产生、雪和土壤温度的处理。

气象数据产生模块的功能是基于月气象数据，为每一个子流域产生日气象数据，用于模型计算。所产生的子流域的数据在子流域之间都是独立的，没有空间上的相关关系。降水数据的产生 SWAT 模型是利用 Nicks 提出的方法来产生计算所需要的日降水数据^{[57][58]}。这一模块还可以用来填补观测数据中的缺测。

气温和太阳辐射量的产生采用状态分布的方法来产生最高和最低气温，以及太阳辐射量。产生器中引入一个连续方程来考虑温度和辐射量随干燥和降雨天气条件的变化。当模拟降雨天气情况时，最高温度和太阳辐射量被下调；反之，在模拟晴天情况时，则上调。但是调整后的数据应控制在保持月平均最高温度和月平均太阳辐射量也输入值相同。

风速的产生利用一个改进的指数方程，根据月平均风速来产生日风速数据。相对湿度的产生相对湿度模块根据月平均湿度，利用一个三角分布来模拟日平均相对湿度。如气温和辐射量的处理一样，通过调整日平均相对湿度来反映湿润和干燥天气的影响。积雪融雪根据平均日气温，SWAT 把降水分为降雨、冰冻水或雪。积雪和融雪分别采取如下的方法计算。

(1) 积雪。积雪覆盖部分已经从一个简单的均匀覆盖模型升级到了一个更为复杂的可以考虑由于日照、漂移、地形和土地覆盖而引起非均匀性覆盖的问题。用户需要定义一个雪深的阈值。当雪深大于它时积雪将覆盖整个区域，而当积雪深度小于此值时，积雪覆盖将按照面积减少曲线而非线性减少。

(2) 融雪。融雪由气温和积雪温度、融雪速率和雪的覆盖面积决定。在最大气温超过零摄氏度的天气，积雪将被融化，计算采用一个积雪温度和融雪的基温或阈值之间的关系。像降雨一样，融雪可以产流，下渗。对于融雪，降雨的能量取为零，假定融雪在 24h 内均匀分布来计算径流的峰值。

(3) 标高带。模型中每一个子流域可以最多分为 10 个标高带。积雪覆盖和融雪对于每一个标高带分别计算模型。通过把子流域划分为标高带，模型能够评价降水和温度的地形变化引起的积雪覆盖和融雪的不同。

(4) 土壤温度。土壤温度将影响到水分的运动和土壤中残留物的分解。模型可以计算土壤表面、各土层的中心的温度。土壤表面的温度是地表覆盖的积雪、植物和残留物，裸露土壤的表面温度以及前一天的土壤表面湿度的函数。土壤层中心的温度由表面温度、多年平均气温和土壤温度不再受气候变化影响的深度来计算。这一深度，称为阻尼深度，其值大小取决于土壤的空重和含水量。

b. 水文过程

对任一水文响应单元, SWAT 所考虑的各种水文运动包括冠层截留、入渗、再分配、蒸发蒸腾、表层土壤侧向流、地表径流、径流总量、峰值、河道支流、输送损失、回归流等。

(1) 冠层截留。当使用径流曲线数法计算表面径流时, 冠层截留部分包含在地表产流计算中。但是用 Green—Ampt 等方法来计算入渗和产流时, 冠层截留需要单独考虑。SWAT 允许用户输入的对应于最大叶面指数时冠层的最大蓄水能力, 这一数据, 结合不同时期的叶面指数可以计算出生长期任一时刻的最大蓄水能力。当计算蒸发时, 冠层截留首先被蒸发。

(2) 入渗。由于模型采用的计算地表产流的径流曲线数法是以日为时间步长的, 直接用于模拟入渗是不可能的。进入土壤中的水量通过降雨量与表面径流之差得出。虽然利用 Green—Ampt 方法可以用于直接计算入渗量, 但是需要更小的时间单位的降雨数据。

(3) 土壤水分的再分配。再分配指降雨灌溉引起的在地表的入渗停止后, 土壤水分的进一步运移。SWAT 采用储留方式来计算根系层中通过每一层土壤的水分通量。当土壤含水量超过田间持水率而且下层土壤尚未达到饱和状态时, 土壤水分将进一步下渗。土壤水分通量与土壤导水率有关。当某一土壤层的温度低于零摄氏度时, 该层土壤中水分的再分配就停止。

(4) 蒸发蒸腾。蒸发蒸腾包括河面、湖面、裸地以及植物表面的蒸发; 植物通过叶子的腾发; 冰或雪面的升华。模型分别计算土壤和植物的蒸发。土壤水分的潜在蒸发量由潜在腾发量和叶面指数(定义为植物叶面积面积和水文响应单元面积的比值)来估算。土壤水分的实际蒸发量是利用土壤深度和土壤含水量的指数关系来估算; 植物腾发量通过与潜在腾发量、叶面指数的非线性关系系数来估算。SWAT 提供了三种方法来计算潜在腾发量, 即 Hargreaves 法、Priestley-Taylor 法和 Penman-Monteith 法。

(5) 侧向流。表层土壤中的侧向流, 或叫中间流是来自于地表以下, 地下水以上部分的径流。地表(0~2m)土层中的侧向流与水分再分配同时计算。采用动力蓄水模型来计算每一土壤层的侧和流。该模型考虑了土壤导水率、地形坡度和土壤含水量的变化。

(6) 地表径流。在 SWAT 模型中提供了两种方法计算地表径流量: SCS 曲线(the Soil Conservation Service curve)方法; GREEN-AMPT 入渗法。本次计算中使用的是日平均降雨数据, 不符合 GREEN-AMPT 入渗法计算的要求, 所以选用 SCS 曲线方法计算, 这里仅介绍 SCS 曲线方法。地表径流采用美国农业部水土保持局(soil Conservation Services)研制的小流域设计洪水模型—SCS 模型进行模拟, 目前该模型在美国及其他一些国家得到了广泛的应用, 在我国也有一些介绍和应用。CN (curve number)值是 SCS 模型的主要参数, 可将前期土壤湿润程度、坡度、土壤类型和土地利用现状等因素综合在一起, 用量的指标来反映下垫面条件对产汇流过程的影响, 是反映降雨前流域特征的一个综合参数。方程如下 (SCS, 1972) [62]:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (2.2)$$

Q_{surf} : 径流量(mm H₂O);

R_{day} : 日降雨量(mm H₂O);

I_a : 初始的损耗包括表层土的储存、截流及径流产前的入渗(mm H₂O);

S : 迟滞因子(mm H₂O), 和土壤、土地利用、坡度、土壤含水量等有关。

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (2.3)$$

CN是该天的曲线系数。 I_a 通常约等于0.2S。方程2.2可以写为:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)} \quad (2.4)$$

当 $R_{day} > I_a$ 时, 有地表径流产生。

SCS曲线系数和土壤的渗透性、土地利用及降雨前土壤含水量等因素有关。在SWAT模型用户手册中给出了常见土地利用和土壤组合的曲线系数参考值。

(1) 池塘。子流域中的池塘截留表面径流并蓄水。池塘远离干流, 其汇流面积为整个子流域的一部分, 并且没有来自于上游子流域的入流。池塘蓄水量是池塘蓄水能力、日入流量和出流量、渗漏量、蒸发量的函数。计算池塘蓄水量所需要的输入数据有池塘的蓄水能力以及相应的水面面积。当实际蓄水量低于蓄水能力时, 对应的水面积则通过与蓄水量的非线性曲线来估算。

(2) 回归流。SWAT中把源于地下水的河道径流叫做回归流、或基流。模型中把地下水分为两个含水层, 一个是浅层水含水层, 它为本流域内的河流提供回归流; 另一个是深层承压水层, 为流域外的河流提供回归流。通过根系层的下渗水分被分成两部分, 分别补给浅层和深层地下水。浅层含水层中的水分还可以在非常干旱的情况下补充非饱和和带土壤水分的不足, 或直接被作物吸收。

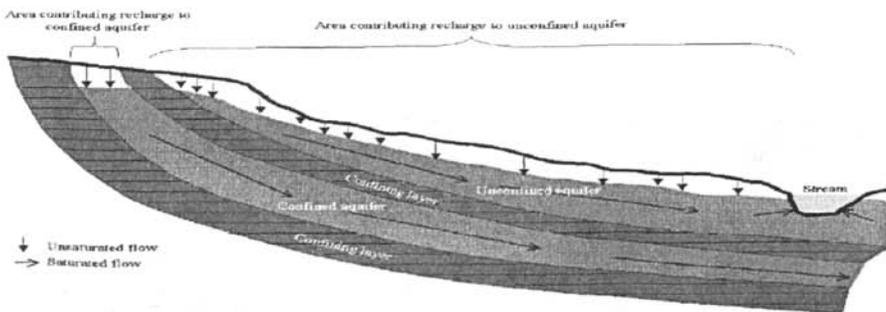


图 2-4 SWAT 模型地下径流过程图

Fig.2- 4 Groundwater runoff process of SWAT model

SWAT模型采用下列方程式计算流域基流(即地下径流):

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \cdot \exp(-a_{gw} \cdot \Delta t) + W_{rchrg} \cdot [1 - \exp(-a_{gw} \cdot \Delta t)] \quad (2.5)$$

式中, $Q_{gw,i}$ 为第*i*日进入河道的基流补给量(mm), $Q_{gw,i-1}$ 为第(*i*-1)日进入河道的基流补给量(mm), t 为时间步长(d), W_{rchrg} 为第*i*日蓄水层的补给量(mm), a_{gw} 为基流的消退系数。其中补给流量由下式计算:

$$W_{rchrg,i} = [1 - \exp(-1/\delta_{gw})] \cdot W_{seep} + \exp(-1/\delta_{gw}) \cdot W_{rchrg,i-1} \quad (2.6)$$

式中, $W_{rchrg,i}$ 为第*i*日蓄水层补给量(mm), δ_{gw} 为补给滞后时间(d), W_{seep} 为第*i*日通过土壤剖面底部进入地下含水层的水分通量(mm/d)。

2.3.2 土地覆盖和植被生长过程

SWAT 利用一个单一植物生长模型来模拟所有类型的植被覆盖。该模型可以区分单年生或多年生植物。单年生植物的生育期从播种开始到收获为止,或者是植物的积热单位等于潜在积热单位时结束。多年生植物一年四季都维持根系的活动,只是在冬季植物将冬眠。它们在平均日气温超过最小、或基础温度会复苏。植物生长模型的功能是用来计算水分和养分从根系层的迁移、腾发以及生物生产量。

(1)潜在生长。某一天的植物生物量的潜在增长定义为在理想状态下其生物量的增加。某一天的潜在生物量增加取决于所截获能量以及植物从能量转化为生物量的效率。能量截获是太阳辐射量、植物叶面指数的函数。

(2)潜在与实际腾发量。潜在腾发量的计算方法在关于蒸发蒸腾部分介绍过了,实际腾发量是潜在腾发量和可利用土壤水分的函数。

(3)养分摄取。植物生长所需的氮和磷通过供需分析方法估算。其中,每一天植物生长所需的氮和磷为其在植物各部分的实际浓度与最优浓度的差。植物各部分的最优浓度随生长阶段而变化。

(4)生长限制。由于环境的限制植物不可能达到潜在生长和产量。模型中可以考虑由于水分、养分和温度限制对植物生长的影响。

2.3.3 土壤侵蚀与营养物质输移过程

a. 土壤侵蚀过程

在土壤侵蚀过程中泥沙、面源污染物质等被从陆地输移到水体中。研究土壤侵蚀过程对于水土保持、降低非点源污染物的输出等具有重要意义。

由降雨和径流引起的土壤侵蚀计算利用MUSLE模型(the Modified Universal Soil Loss Equation)。在USLE方程中,认为土壤侵蚀量是降雨能量的函数,预测年总产沙量。而在MUSLE方程中用径流因子代替降雨能量因子。这样的改变提高了产沙量预测的精度,不再需要输移比(delivery ratio)参数,而且这样修改后的方程就可以用来计算单次暴雨过程。泥沙量的产生包括两个连续的过程,一是土壤颗粒的剥蚀过程,然后是泥沙在径流中的输

移。USLE方程中降雨能量因子只能反映土壤颗粒的剥蚀过程，所以需要输移比来描述泥沙的输移过程。径流的流量和流速不仅反映了降雨能量因子，更好地反映了泥沙的输移过程。MUSLE模型方程如下：

$$S_{ed} = 11.8 \times (Q_{surf} \times q_{peak} \times area_{hru})^{0.56} \times K_{USLE} \times C_{USLE} \times P_{USLE} \times LS_{USLE} \times CFRG \quad (2.7)$$

- S_{ed} : 一天内的产沙量(tons);
- Q_{surf} : 一天内的地表径流量 (mm H₂O/ha);
- q_{peak} : 峰值流量(m³/s);
- $area_{hru}$: 水文响应单元的面积(ha);
- K_{USLE} : USLE 方程中的土壤可侵蚀性因子;
- C_{USLE} : USLE 方程中的作物经营管理因子;
- P_{USLE} : USLE 方程中的土壤侵蚀防治措施因子;
- LS_{USLE} : USLE 方程中的地形因子;
- $CFRG$: 土壤的糙度因子。

b. 营养成分输移过程

SWAT 可以追迹几种不同形式氮和磷在流域中的迁移和变化。营养成分通过地表径流和向流进入河道进而被输送到下游。

(1)氮成分。植物利用的氮通过植物生长部分介绍过的供需分析方法来估计。除了作物生长使用之外，硝酸氮和有机氮会随着水分中物质的迁移而从土壤中消失。地表径流、侧向流和下渗水分中硝酸氮的含量通过水量和相应各层中平均浓度来估算。对每一次洪水，伴随着泥沙的有机氮的输送采用负荷方程来计算^[63]。根据表层土壤中有面氮的浓度、泥沙沉积量和增值比，利用负荷方程来估算日有机氮的损失。增值比是沉积物中有机氮的浓度与土壤中有机氮浓度的比。

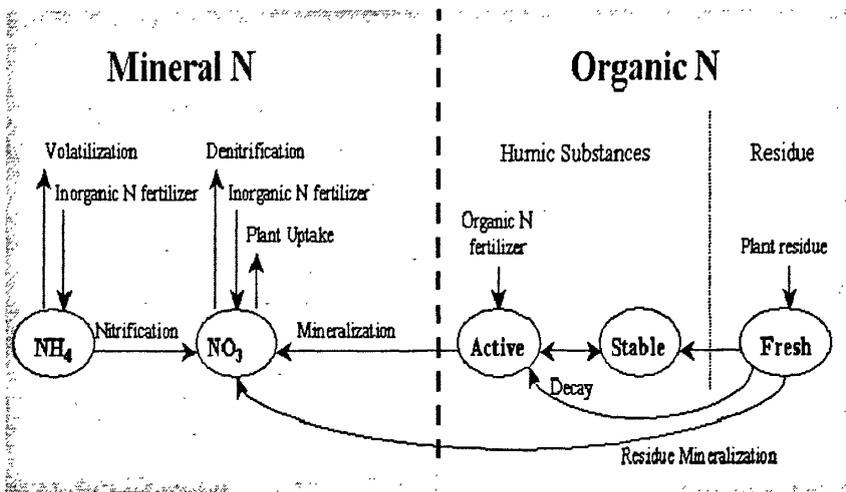


图 2-5 土壤中各形态氮的相互转化关系
Fig.2-5 Interaction conversion of N in soil

土壤中各种形态的氮之间有着复杂的相互转化关系，正确地模拟土壤中各形态氮的转

化关系对于环境模拟模型至关重要。在SWAT模型中将各种形态的氮划分为五部分，它们之间的相互转化关系见图2-5^[64]。其中起主导作用的是硝酸盐氮和有机氮，因此模型计算使用者只需输入土壤中硝酸盐氮和有机氮的含量，其他部分的计算由程序完成。

(2) 磷成分。植物利用的磷通过植物生长部分介绍的供需分析方法来估计。除了作物生长使用之外，溶解性磷和有机磷会随着水分中物质的迁移而从土壤中消失。磷不是一种移动性营养成分，径流和在地表层 10mm 土壤中溶解性磷的相互作用并不充分。随径流而流走的溶解性磷根据表层 10mm 土壤中磷的浓度、径流量和区分因子来计算。磷随着泥沙的输送，采用与前面介绍的有面氮输送的相同计算方法估算。

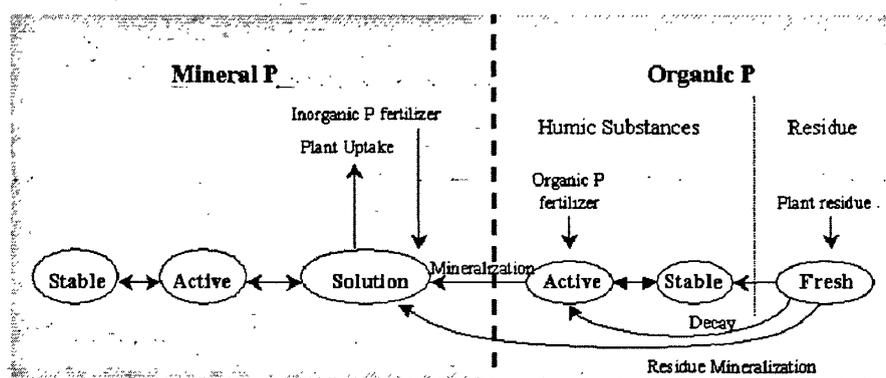


图 2-6 土壤中各形态磷的相互转化关系

Fig.2-6 Interaction conversion of P in soil

在土壤中磷存在的三种主要形式是：①和腐殖质结合的磷；②不溶无机磷；③在土壤溶液里植物可以吸收的可溶性磷。土壤中的磷增加主要通过施肥、植物体死亡等；由于植物吸收和土壤侵蚀会使得土壤中的磷丢失一部分。图2-6表示了磷循环的各个重要组成部分。磷和氮相比，它的可溶性是有限的。磷和其他的一些离子往往形成一些不能溶解的化合物。这样就在土壤表层形成了一层容易被地表径流冲走的磷。

(3) 杀虫剂。SWAT 并不计算由于杂草、危害性昆虫以及其他害虫的存在对植物生长的影响，但是可以模拟各个水文响应单元中使用的杀虫剂在流域中的运移情况。模型可渗到土壤和含水层中。描述杀虫剂运移的方程借用了 GLEAMS 中相应的部分。杀虫剂的运移受控于溶解度、半降解、土壤有机碳吸附系数。植物叶子上和土壤中的杀虫剂按照其半降解系数呈指数降解。水和泥沙对杀虫剂的输送，对每一次洪水运行计算。杀虫剂随土壤水分下渗在土壤中的迁移对每一层土壤进行估算。

2.3.4 流域管理措施

1) 对任一水文响应单元，用户可以定义其中的管理措施，如定义生育期的开始和结束，指定耕地的时间以及施肥、杀虫和灌溉的时间和用量等。在生育结束时，生物量可以从所在的水文响应单元中取出作为收获量，也可以作为残留物继续放在地表。除了这些基本管理措施外，放牧、自动施肥、灌溉，以及各种设想的用水管理情景都可以作为方案选择。在最新的版本中，增加了用于计算城区沉积和营养负荷量的模块。

2) 作物轮作。在 SWAT 中, 轮作特指不同年间管理措施上的变化, 这种轮作变化可以是 1 年, 也可以是几年。对任一水文响应单元。一年中其地表覆盖或作物可以变化多次, 但是同一时间只能为一种植物覆盖。

3) 水利用。农业用水和乡镇供水是两种最典型的用水方式。水文响应单元的用水可以为来自本流域或流域外的任何水源。水分不仅可以在流域之间, 在水库、河道和子流域之间也可以相互转换调用。

2.3.5 主河道与水库汇流过程

a. 主河道汇流过程

主河道的汇流计算包括四部分, 即水、沙、营养成分和有机化学物。

(1) 河道径流演进。随着水向下游的流动, 一部分水会由于蒸发和通过河床的水分传递, 或者是用于农业或人类生活用水的河道取水而不断减少。同时, 河道中的水受到降雨、点源排放而得到补充。这些因素都在模型中得到考虑。

在 SWAT 模型中利用曼宁公式计算河道内流量和流速。对于如下断面的河道, 流量及流速计算公式如下:

$$q_{ch} = \frac{A_{ch} \cdot R_{ch}^{2/3} \cdot slp_{ch}^{1/2}}{n} \quad (2.8)$$

$$v_c = \frac{R_{ch}^{2/3} \cdot slp_{ch}^{1/2}}{n} \quad (2.9)$$

- | | |
|---|---|
| q _{ch} : 河道中的流量 (m ³ /s); | A _{ch} : 断面面积 (m ²); |
| R _{ch} : 给定深度下的水力半径 (m); | slp _{ch} : 河道的坡度 (m/m); |
| n : 河道的粗糙系数 ; | v _c : 流速 (m/s)。 |

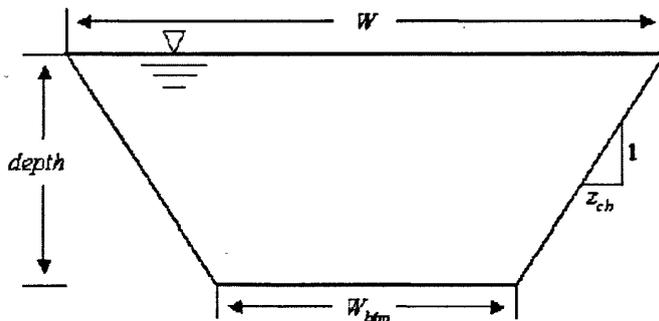


图 2-7 河道的梯形断面
Fig.2-7 Trapezoidal channel

SWAT模型为河道内演进计算提供了两种方法: 河段变蓄量法(Variable Storage Routing Method)和马斯京根法。这两种方法都是动力波模型的变形, 因为本次研究工作采用的是马斯京根法, 所以这里仅介绍马斯京根法。

马斯京根法把河道中的水体看作是柱体和楔体的组合，见下图2-8。

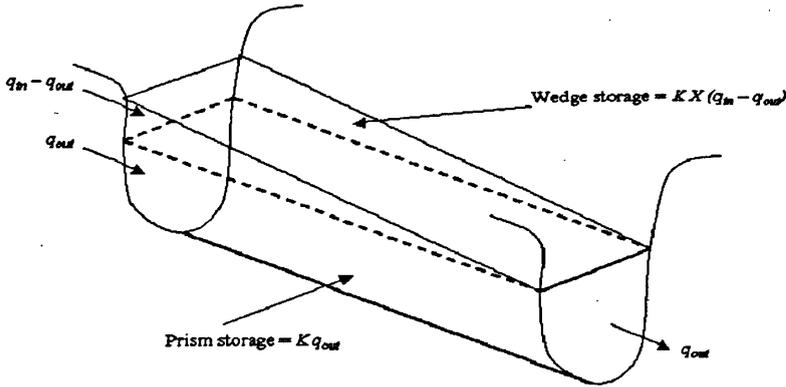


图 2-8 河段由柱体和楔体的组成示意图

Fig.2-8 Schematic diagram of channel

按照曼宁公式的定义，水流断面面积和给定河段的出流是成比例关系的。柱体的体积可以表示为出流的函数 $K \cdot q_{out}$ 。同样，楔体的体积也可以表示为 $K \cdot X \cdot (q_{in} - q_{out})$ ， X 是衡量一个河段出流和入流相对重要性的权重。这样河段中总的蓄量为：

$$V_{stored} = K \cdot q_{out} + K \cdot X \cdot (q_{in} - q_{out}) \quad (2.10)$$

V_{stored} ：总蓄量 ($m^3 H_2O$)； q_{in} ：入流量 (m^3/s)；

q_{out} ：出流量 (m^3/s)； K ：河段的时间常数 (s)；

X ：权重因子。

$$上式也可写为：V_{stored} = K \cdot (X \cdot q_{in} + (1 - X) \cdot q_{out}) \quad (2.11)$$

(2) 泥沙输送。在河道的泥沙输送过程中，沉积和冲刷是同时存在的。在 SWAT 以前的版本中，采用了河流动力 (stream power) 来估计河流的沉积和冲刷。河力被 Bagnold (1977) 定义为水的密度、流量和水面坡度的乘积。Williams 在此基础上采用河道坡降和流速的函数来确定河力。在现在的版本中，这些方程被进一步简化，河道输沙能力的计算采用流速峰值的函数来表示。

(3) 营养成分输送。河道中营养成分的变化由河道水质模块来模拟。河道水质模型的动力学部分取之于 QUAL2 (Brown and Barnwell, 1987) 模型^[65]。模型可以追迹溶解性和附着在泥沙颗粒上的营养成分在河流中的迁移变化。溶解性的成分随水传输，附着在泥沙颗粒上的成分可以随泥沙沉降在河床上。

(4) 河道中杀虫剂的输送。尽管一个水文响应单元中可以有无数种杀虫剂，由于复杂性，只模拟一种杀虫剂在河网中的迁移。如同对营养成分的处理一样，把河道中杀虫剂总负荷量划分为溶解性的和附着在泥沙颗粒上的两部分。溶解性的杀虫剂随着水流而传播，而附着在泥沙颗粒上的杀虫剂受泥沙输送和沉降的影响。溶解性的杀虫剂的转化由一阶降解关系来描述。模型中考虑河道中主要的过程包括沉降、死亡、搅乱、蒸发、扩散和转化。

b. 水库的汇流计算

水库的水量平衡包括入流、出流、降雨、蒸发、渗漏和分洪。

(1) 水库出流量。模型提供三种方式来估算水库的流出量，即用户可以输入实测的放流流量，指定放流流量，或者指定月放流目标。

(2) 泥沙输送。来自于上游河道的泥沙或者是子流域中地表径流的产沙，通过汇流输送到水库入流口。水库中泥沙含量采用简单平衡方程来估算。平衡项目包括入流、出流和水库蓄水的水量和含沙量。泥沙在水库中的沉降情况取决于泥沙的平衡含量和泥沙中值粒径的大小。水库出流中的泥沙量为流出水库的水量和泄水当时水库中的泥沙含量的乘积。

(3) 水库中的营养成分。SWAT 提供一种简化的方法来计算水库中氮和磷营养成分的平衡。模型假设：①库水完全混合，②磷是控制型营养成分，③库水的富营养程度由总磷来衡量。①假定忽略了库水的分层和温度跃层中浮游植物的激增；在非点源污染为主的情况下②假设通常是成立的；③假设意味着在总磷和生物量之间存在某种关系。磷的平衡方程包括库水、入流、出流的磷浓度，以及磷的总损失率。

(4) 水库中的杀虫剂。水库中杀虫剂的平衡计算采用 Chapra (1997) 的方法，并假定为充分混合的情况。整个系统被分为充分混合的沉积层和位于其上面充分混合的表面水层。水中和沉积层中的杀虫剂分为溶解态和粒子态^[66]。模型所考虑的主要过程是负荷的流入、流出、转化、挥发、沉淀、扩散、扰动和死亡。

2.4 AVSWAT2000 简介

使用 SWAT 模型这样一个大流域尺度上的水环境模拟模型需要很多的时间、技术经验和费用来处理输入数据、运行模型和分析计算结果。因为流域本质上的时空差异性，GIS 技术在收集、储存流域模拟模型需要的输入数据方面是一个非常必要和有效的工具。利用 GIS 可以表达更多的流域信息，如地形、土壤、气候、土地利用、不同的管理措施等，而且可以更直接地表现流域内人类活动对于水文特性的影响。

正是基于以上考虑，在不同的平台上发展了 SWAT 模型不同的 GIS 界面。AVSWAT2000 是把 SWAT 模型和 GIS 软件 ArcView 相结合的一个 GIS 界面，作为前处理工具和结果分析工具，图 2-9 为该界面的主管理面板。它是 GIS 软件 ArcView 的一个扩展模块，由 Avenue 语言编写而成。因为该扩展模块是在空间分析模块和对话框设计模块的基础上编写的，所以安装及运行时需要这两个模块。在 AVSWAT 中提供了对流域 DEM 的投影分析、子流域划分、流域总体参数计算、各子流域参数输入、修改程序数据库文件、建立使用者的数据库文件、模型调试及最后结果分析等功能。由此看来，SWAT 模型和 GIS 的结合应该是第一章中提到的第二种结合方式，即部分结合方式，由 GIS 处理工具提供输入文件，调用模型进行计算，然后读入计算结果进行分析。

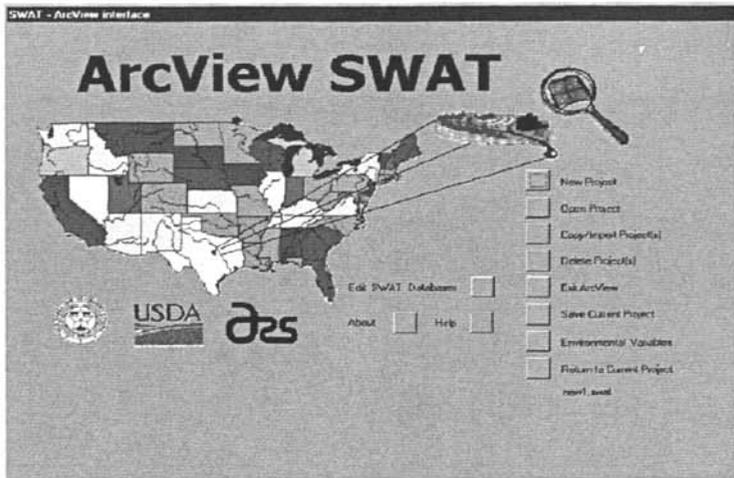


图 2-9 AvSwat2000 界面的管理面板

Fig.2-9 Interface of AvSwat2000

3 分布式水文模型 (SWAT) 模型计算基础数据

3.1 分布式水文模型 (SWAT) 基本数据收集

分布式流域水文模型需要详细的输入及验证数据,本文广泛收集了湟水流域的河流水系、水文气象、自然地理信息,并辅以电子地形图、土壤图、土地利用图、河网等 GIS 数据(表 3-1)。按照信息类型主要划分为以下 3 类:

表 3-1 SWAT 模型输入数据
Table 3-1 Input data of SWAT model

数据类型	涉及主要参数	数据来源
DEM	海拔高程、坡度、坡向、坡长、形状参数等	1: 25 万数字化地形图
土壤	密度、水传导率,田间持水率、水文组等	1: 100 万数字化土壤图
土地利用	叶面指数、径流曲线数、曼宁系数等	1: 10 万数字化土地利用图
气象	气温、降水、相对湿度、辐射、风速等	湟水流域相应气象数据值 (中国气象局)
径流与泥沙数据	逐日实测流量,逐月、逐年还原天然流量, 逐月、逐年输沙模数及输沙量	湟水流域相应水文观测站 值

(1) 水文气象信息:

- 1980~2000 年系列 35 个雨量站逐日雨量过程;
- 1980~2000 年系列西宁、民和两个水文站逐日实测流量信息,逐月、逐年还原天然径流信息;
- 1980~2000 年系列湟源、大通、门源、西宁、湟中、乐都、民和七个气象站逐日最高、最低气温,相对湿度、太阳辐射、风速等信息。

(2) 泥沙与水质信息:

- 1980~2000 年系列,西宁、民和两个泥沙观测站逐月、逐年输沙量与输沙模数信息;
- 由于对于面源污染的监测并没有完全展开,对于非点源污染负荷的水文断面监测数据不多,仅有民和一个站 1998 和 2000 年的水质观测值。

(3) 下垫面等 GIS 数据信息:

- 1986 年、1996 年和 2000 年三个时段的湟水流域 1: 10 万土地利用图;
- 湟水流域陆地 1: 25 万电子地形 (DEM) 图;
- 湟水流域 1: 100 万土壤分类图及土壤属性特征信息。

需要注意的是,在 AvSwat2000 界面里需要的 GIS 数据,通过 ArcView 和 ArcGIS 等 GIS 软件处理的过程中,所有的 GIS 数据转换到同一坐标系下,坐标系相关参数如下:

投影: Custom Albers Equal-Area Conic 椭球体: Krasovsky
中央经线: 东经 171.25 度 参考纬度: 北纬 41.5 度

标准纬线 1: 北纬 41 度纬线

标准纬线 2: 北纬 42 度纬线

北偏移: 0 度

东偏移: 0 度

3.2 DEM 的水文分析

流域的地形可以用流域的 DEM 数据（数字高程模型）来描述。利用 DEM 数据进行水文分析的方法已经比较成熟。下图 3-1 是 DEM 的水文分析的一般过程：

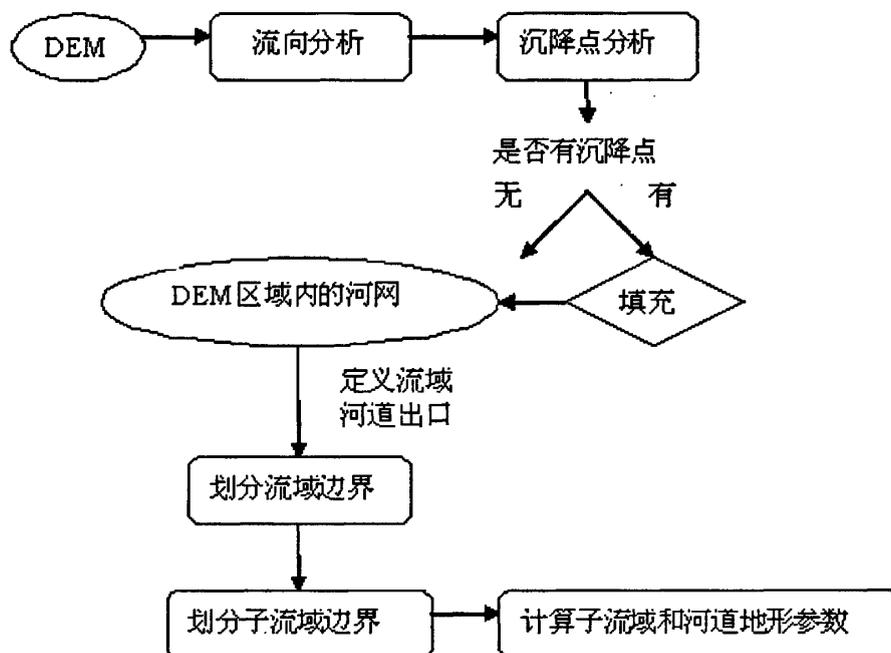


图 3-1 DEM 水文分析过程

Fig.3-1 Hydrologic analytic process of DEM

3.2.1 DEM 数据分析

本文利用 1: 25 万的 DEM 数据计算子流域的地形参数（图 3-2）。

SWAT 模型应用 TOPAZ (Topographic Parameterization) 自动进行数字地形分析的软件包，基于 D8 方法、最陡坡度原则和最小给水面积闭值的概念^[67]，对输入栅格型 DEM 进行处理，定义流域范围，划分子流域，确定河网结构和计算子流域参数(图 3-3)。比如坡度、坡长等，还可以通过汇流分析来生成河网。生成河网的疏密决定了子流域的大小和分布。河网的一些特征，比如河床的坡度、河道的长度等，也可以通过 DEM 分析得到。网格大小 100m×100m。划分子流域，确定河网结构和计算子流域参数(图 3-3)。比如坡度、坡长等，还可以通过汇流分析来生成河网。生成河网的疏密决定了子流域的大小和分布。河网的一些特征，比如河床的坡度、河道的长度等，也可以通过 DEM 分析得到。网格大小 100m×100m。

研究区1: 25万数字地形图

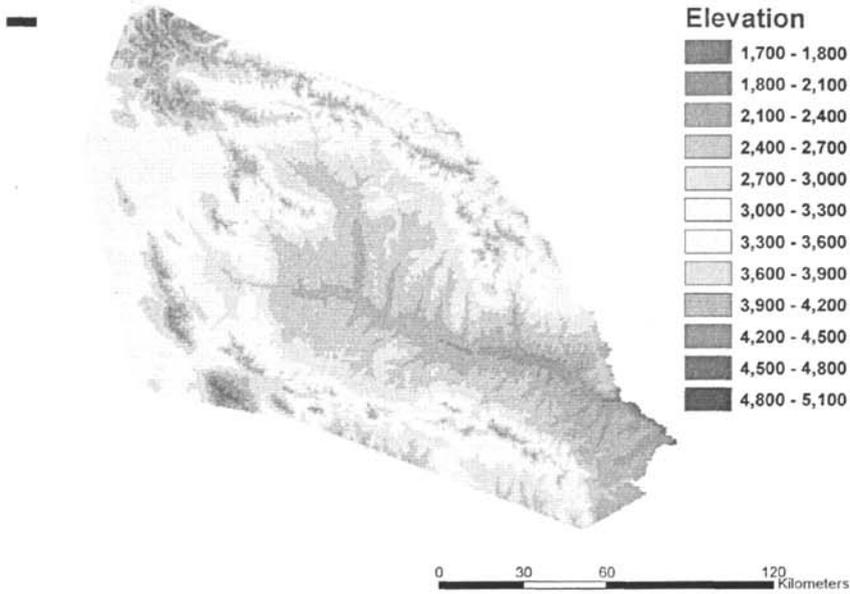


图 3-2 湟水流域 1: 25 万 DEM 图

Fig.3-2 1:250000 DEM map of Huangshui drainage basin

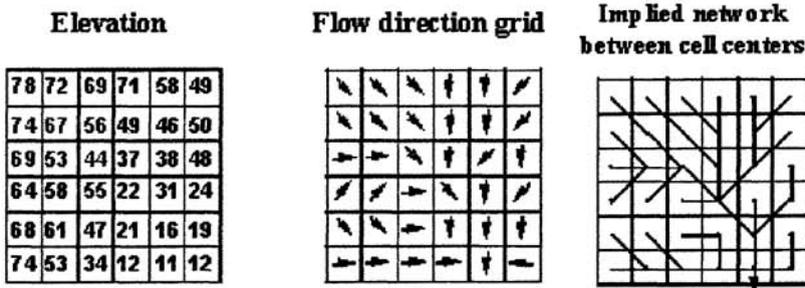


图3-3 利用栅格进行水文分析的原理示意图

Fig.3-3 Hydrologic analytic using mesh

3.2.2 河网与子流域的划分

子流域划分时采用的河道阈值面积为 12000ha，河道阈值面积是生成河网时河道上游最小的汇流面积。河道阈值面积越小，河网越密，子流域的数目越大。在工作中曾试过取河道阈值面积 5000ha，但子流域的个数太多了，将近 500 个，在计算流域地形参数及河道参数时由于数据量太大而导致计算无法进行。子流域个数越多，对流域地形的空间变化考虑的更多，但是随着流域个数的增多，需要更多的数据作为支持，比如土壤的物理、化学性质等数据。从计算效率和该研究区的实际出发，取河道阈值面积 12000ha，子流域的个数为 73 个，还是能从空间细节上代表该研究区的。

河网与子流域划分图

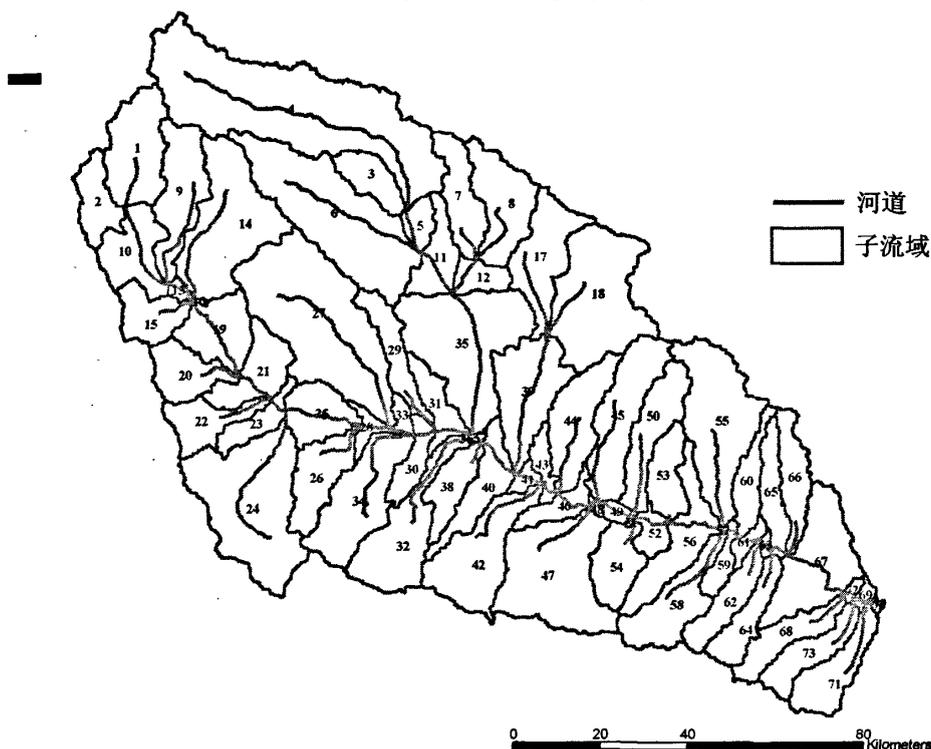


图 3-4 研究区河网与子流域划分

Fig.3-4 Drainage of river network and subbasin

3.3 研究区的土壤与土地利用类型划分

3.3.1 土壤类型划分

在本次论文工作中，研究区的土壤图是通过湟水流域边界切割青海省 1: 100 万的数字土壤图得到（图 3-5）。

模型中需要的土壤的数据可以分为两类：一类是土壤的物理特性数据；一类是土壤的化学性质数据。土壤的物理特性数据决定了水份及空气在土壤中的运动状况，对陆地上的水文循环有重要的影响。而土壤的化学性质数据则决定了土壤中初始状态下的各种化学成分含量。本文选择从土壤的物理特性方面将研究区所涉及到的土壤类型分为 32 亚类，各种类型土壤的物理特性数据按照类型输入到数据库文件 UserSoil.dbf 中。下表 3-2 是研究区内的土壤类型及在数据库文件中的名称从面积百分比（图 3-6）可以看出，湟水流域土壤分布中，栗钙土土型最多，占到总面积的 33.60%；次之是黑钙土土型，占总面积的 19.46%；然后是灰钙土土型和高山草甸土型，各占 16.72%和 12.48%；其余多种土壤类型只占 18.70%。经过对湟水流域的实地考察与实验分析，并得到青海省水文水资源勘测局的技术支持，辅以南京土壤数据库的实测土壤剖面属性，从而初步确定了湟水流域土壤属

性的物理数据，供 SWAT 模型作为基本输入数据。

研究区1: 100w土壤类型图

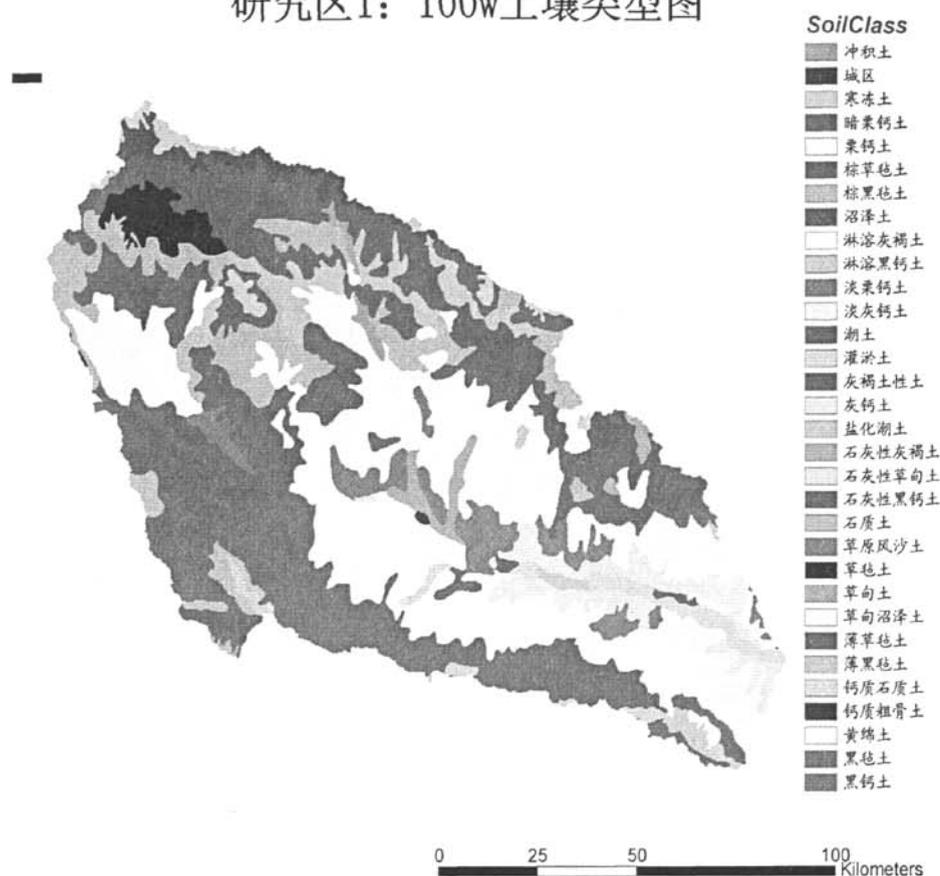


图 3-5 研究区 1: 100 万土壤类型分布图

Fig.3-5 1:1000000 soil type distribute in study area

表3-2 研究区内土壤类型

Table 3-2 Soil type in study area

分类编号	模型中名称	土壤类型	模型中代码	面积比例 (%)
11123	LRHHT	淋溶灰褐土	1	1.61%
11124	SHXHHT	石灰性灰褐土	2	0.17%
11125	HHTXT	灰褐土性土	3	1.21%
12101	HGT	黑钙土	4	6.13%
12102	LRHGT	淋溶黑钙土	5	3.79%
12103	SHXHGT	石灰性黑钙土	6	9.54%
12111	ALGT	暗栗钙土	7	1.93%

3 分布式水文模型计算基础数据

12112	LGT	栗钙土	8	27.45%
12113	DLGT	淡栗钙土	9	4.22%
13111	HGT	灰钙土	10	18.72%
13112	DHGT	淡灰钙土	11	0.15%
15101	HMT	黄绵土	12	1.27%
15123	CJT	冲积土	13	0.48%
15142	CYFST	草原风沙土	14	0.04%
15181	SZT	石质土	15	0.24%
15184	GZSZT	钙质石质土	16	1.26%
15194	GZCGT	钙质粗骨土	17	0.00%
16101	CDT	草甸土	18	9.94%
16102	SHXCDT	石灰性草甸土	19	5.05%
16141	CT	潮土	20	0.22%
16145	YHCT	盐化潮土	21	0.24%
17101	ZZT	沼泽土	22	0.26%
17104	CDZZT	草甸沼泽土	23	1.38%
19112	GYT	灌淤土	24	1.48%
20102	CZT	草毡土	25	1.96%
20103	BCZT	薄草毡土	26	1.63%
20104	ZCZT	棕草毡土	27	0.49%
20112	HZT	黑毡土	28	5.13%
20113	BHZT	薄黑毡土	29	2.50%
20114	ZHZT	棕黑毡土	30	2.81%
20171	HDT	寒冻土	31	0.66%
22101	CQ	城区	32	0.06%

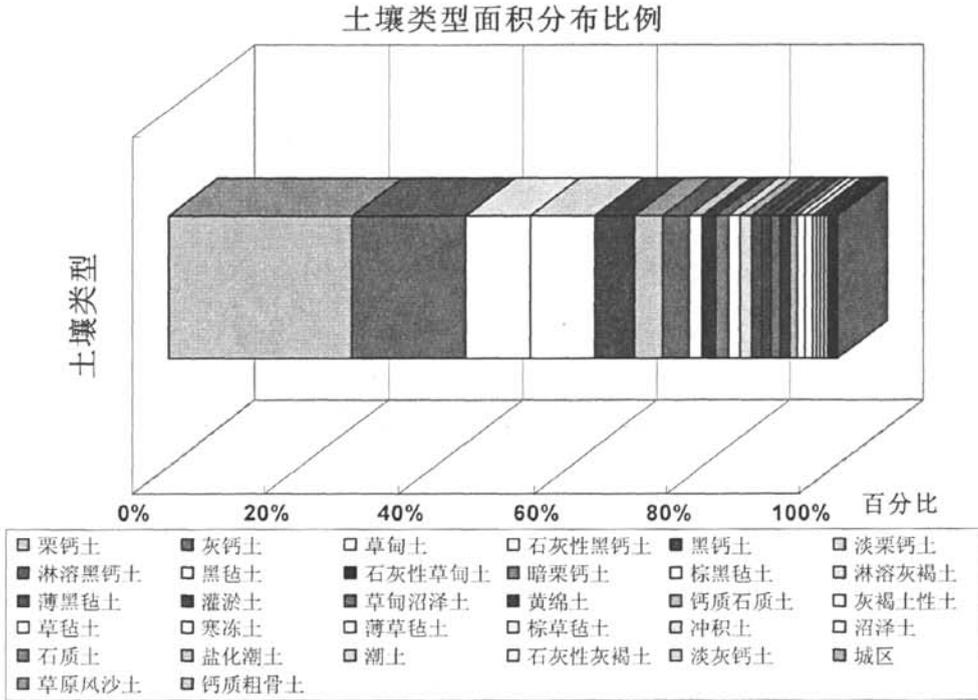


图 3-6 各种类型土壤百分比

Fig.3-6 The percent of soil type

3.3.2 土地利用类型划分

流域内的土地利用图是 SWAT 最重要的 GIS 输入数据之一，它决定了流域内各种土地利用覆盖及农作物的数量和分布。

按照土地资源分类系统，编码和土地利用类型的对应关系如下（表 3-3）。流域内的植被是水文循环中的重要一环，植被在降雨的截留、陆面水份的蒸发中都起重要作用；而且伴随着植物生长、死亡过程的是流域内各种营养物质的循环过程。从一个连续长时间段的流域模拟模型来看，流域内各种植物的生长模拟是非常必要的。

SWAT 模型中的植物生长模拟模块是 EPIC 植物生长模型的一个简化版本。在 EPIC 模型中，植物的生长是基于每天积累的热量单位，光合作用生成的潜在生物量利用 Monteith 方法计算，利用收获指数来计算产出量，植物的生长会因为温度、水份或者氮、磷等养分而受到抑制。而且人们也可以对不同的作物进行不同的管理来影响作物的生长。要进行植物的生长模拟，按照国内的土地资源系统分类已经不能满足模拟计算的要求，需要有更详细的土地利用分类，比如到物种。在 SWAT 模型的土地利用/作物生长数据库文件 crop.dat 中包含了各种常见植物生长参数表。表 3-4 是使用的土地利用重分类前后的对照表。

3.4 水文响应单元 HRU 划分

在 SWAT 模型的 94.2 版本中引入了水文响应单元 (Hydrologic Response Unit) 的概念。

HRU 是同一个子流域内有着相同的土地利用类型和土壤类型的地区，这样的地区有着相同的水文响应特性。

表3-3 土地利用分类编码与土地利用类型
Table 3-3 Classification code and type of soil utilization

编码	土地利用类型	编码	土地利用类型
111	水田（山地）	41	河渠
112	水田（丘陵）	42	湖泊
113	水田（平原）	43	水库坑塘
121	旱地（山地）	46	滩地
122	旱地（丘陵）	51	城镇用地
123	旱地（平原）	52	农村居民点
21	有林地	53	其他建设用地
22	灌木林	61	沙地
23	疏林地	63	盐碱地
24	其他林地	64	沼泽地
31	高覆盖度草地	65	裸土地
32	中覆盖度草地	66	裸岩石砾地
33	低覆盖度草地		

表 3-4 土地利用重分类前后代码对照表
Table 3-4 Reclassification code parallel table of soil utilization

编码号	SWAT 代码	土地利用	编码号	SWAT 代码	土地利用
21	FRST	混合林	52	URMD	居民点
22	FRST	山地灌木林地	53	URMD	居民点
23	FRST	混合林	61	URML	未利用地
24	ORCD	果园	64	WETL	湿地
31	RNGE	高覆盖度草地	65	URML	未利用地
32	RNGB	中覆盖度草地	66	URML	未利用地
33	SWRN	低覆盖度草甸	67	URML	未利用地
41	WATR	水域	113	SOYB	大豆
42	WATR	水域	121	SWHT	春小麦
43	WETL	湿地	122	WWHT	冬小麦
46	WETL	湿地	123	CORN	玉米
51	URMD	居民点			

子流域内划分 HRU 有两种方式,一种方式是选择一个面积最大的土地利用类型和土壤类型组合作为该子流域的代表;另一方式是把子流域划分为多个不同土地利用类型和土壤类型组合的水文响应单元。在 SWAT 模型中的水文响应单元没有考虑空间位置,只是个水文计算上的概念,它可能是子流域内的一块区域,也可能是分布在子流域内不同地方的几个地块。水文响应单元概念的引入是为了考虑到流域内更多的空间变异性,使模型能够反映不同的土地利用和土壤类型在蒸发、产流、入渗等水文条件,由于考虑了更多的空间物理特性因而可以提高产出预测的精确度。当一个子流域内有多个 HRU 时,对每个 HRU 分别进行陆地水文过程计算,然后在流域出口把子流域内所有 HRU 的产出进行相加。所得子流域的产出在河道中进行输移计算。图 3-7、3-8,表 3-5 给出了重分类后的各土地利用的面积百分比:

表 3-5 土地利用类型重分类后面积百分比
Table 3-5 The percent of soil type reclassification

土地利用类型	80 年代面积百分比	90 年代面积百分比	土地利用变化
RNGB	26.35%	26.94%	0.59%
SWRN	19.37%	17.81%	-1.56%
FRST	18.05%	18.61%	0.56%
RNGE	10.52%	10.46%	-0.06%
WWHT	9.65%	9.65%	0.00%
CORN	9.09%	9.13%	0.04%
URML	2.94%	3.20%	0.26%
URMD	2.36%	2.47%	0.11%
WETL	1.33%	1.39%	0.06%
WATR	0.19%	0.19%	0.00%
SWHT	0.13%	0.13%	0.00%
ORCD	0.02%	0.02%	0.00%
SOYB	0.01%	0.01%	0.00%

本论文中采用了将每个子流域划分成多个水文响应单元的方法。划分水文单元之前先进行土壤图和土地利用图的 overlay 操作,确定在每个子流域内土地利用类型和土壤类型的分布情况。每个子流域内土地利用和土壤类型也许很多,从计算效率上考虑,某土地如果它的土地利用类型或土壤类型在子流域中占的面积特别小,那么这块区域是可以忽略的。在计算中使用了两个最小面积比阈值来控制模型中模拟的土地利用类型和土壤类型。

在子流域的水文响应单元计算中首先需要选择土地利用的面积比阈值。如果子流域中

某种土地利用的面积比小于该阈值，则在模拟中不予考虑。剩下的土地利用类型的面积重新按比例计算，以保证整个子流域的面积 100% 得到模拟计算。

比如在一个子流域内有这些土地利用类型：35%的玉米；30%的草地；21%的林地；10%的果园；4%的居民点。

如果土地利用面积比阈值设为 20%，那么在子流域中只为玉米、草地、林地创建水文响应单元。需要模拟的土地利用的面积重新计算如下：

➤玉米： $(35\% \div 86\%) \times 100\% = 41\%$

➤草地： $(30\% \div 86\%) \times 100\% = 35\%$

➤林地： $(21\% \div 86\%) \times 100\% = 24\%$

其中 86% 是原来玉米、草地、林地占的总面积比。

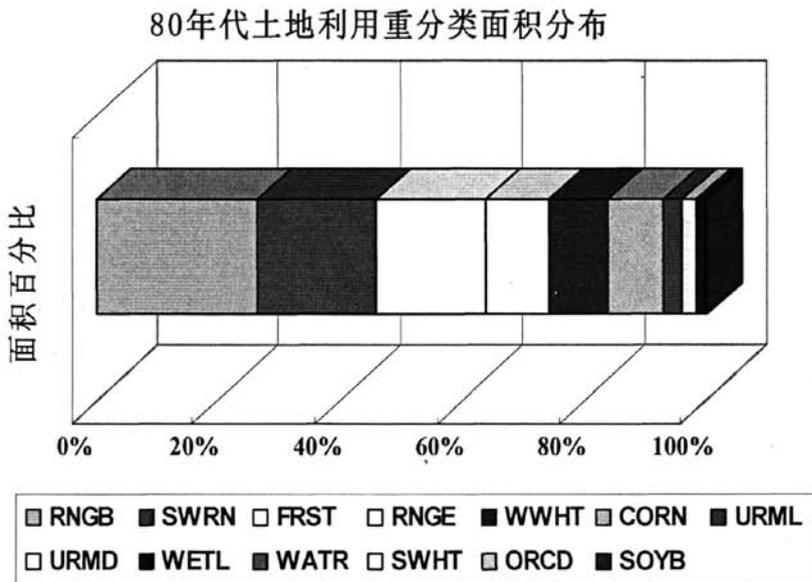


图 3-7 80 年代土地利用重分类面积比

Fig.3-7 The percent of soil utility reclassification in 80's

第二需要确定在某种土地利用类型中土壤类型的面积比阈值。对于某种土地利用类型来说，小于该面积比阈值的土壤类型在计算中不予考虑，该土地利用类型的其他土壤类型比例按上面的方式重新调整。

这次研究中采用的土地利用类型的面积比阈值为 25%；土壤类型的面积比阈值为 25%。通过减少阈值，研究区的水文响应单元数增大到 186 个，HRU 的平均面积是 83 平方公里。但是这些 HRU 在大小分布上变化很大。

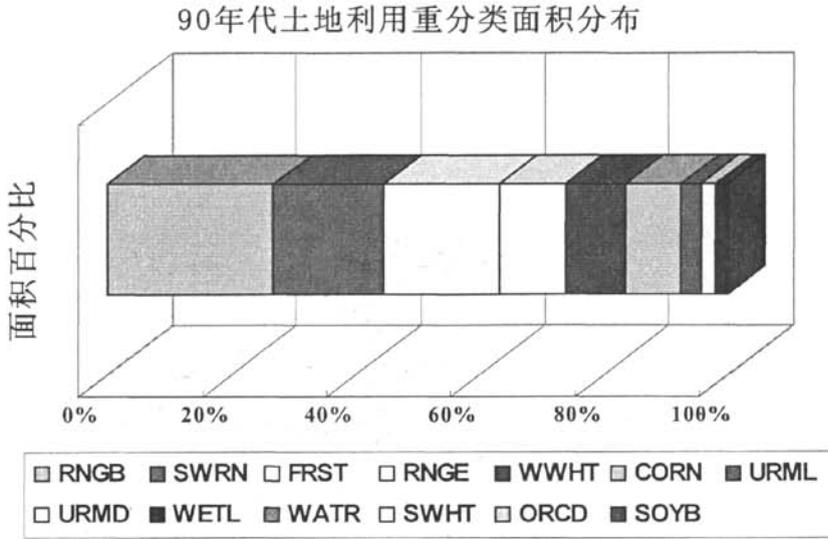


图 3-8 90年代土地利用重分类面积比
Fig.3-8 The percent of soil utility reclassification in 90's

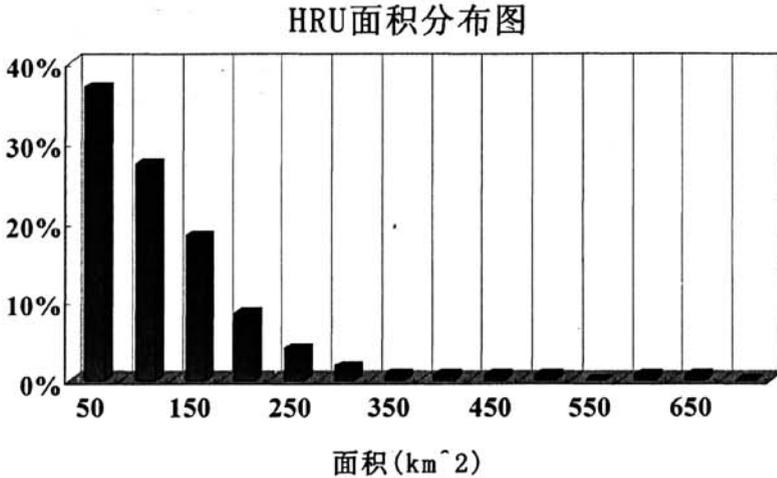


图3-9 HRU面积分布图
Fig.3-9 HRU area distribution

图3-9表示了湟水流域内所有的水文响应单元在不同面积范围上的个数百分比和从0到700平方公里上水文响应单元个数的分布曲线。

可以看出，在0~50平方公里之间的HRU个数有38%多，50~100平方公里之间的HRU个数接近30%，100~150平方公里之间的HRU个数有18%左右，150~200平方公里之间的HRU个数有10%左右。也就是说，在0~100平方公里之间的HRU个数有90%多。

在划分HRU之后，各土地利用类型之间的比例发生了变化，下面表示了划分HRU之后各土地利用的面积百分比。

表 3-6 划分 HRU 后土地利用面积比

Table 3-6 The area percent of soil utilization of HRU

土地利用类型	RNGB	SWRN	FRST	RNGE	WWHT	CORN
百分比 (%)	32.35	22.37	18.05	10.52	8.65	8.09

由于划分 HRU，在子流域中占比例较小的土地利用类型的比例会有所降低，而比例较高的土地利用类型会有些增加。和划分 HRU 之前的土地利用类型面积比例相比可以发现，RNGB、SWRN 的面积有所增加，特别是 RNGB 的比例增加了 5.8%。而 CORN、WWHT、RNGE 和 FRST 的面积比例略有所降低。原来面积比例较小的 WETL、SOYB、WATR、SWHT 和 ORCD 没有划分到 HRU 中，在模型计算中没能对这些土地利用类型进行模拟计算。

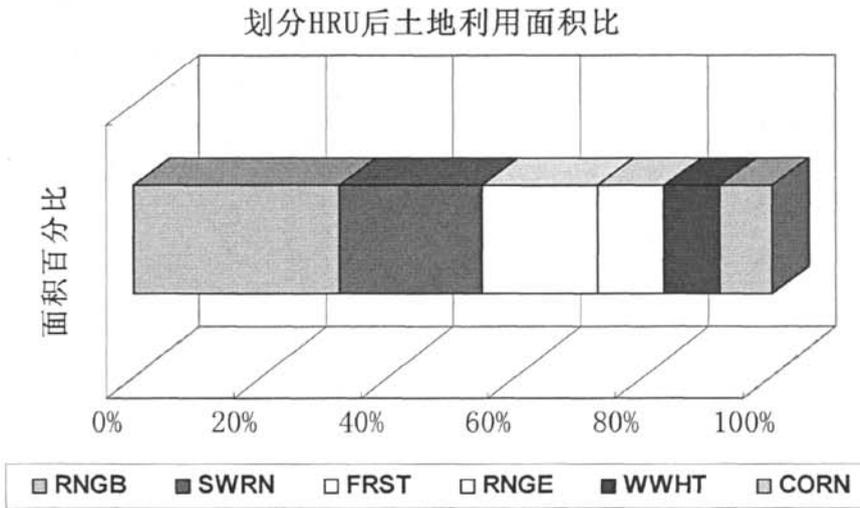


图 3-10 划分 HRU 后土地利用面积比

Fig.3-10 The area percent of soil utilization of HRU

3.5 研究区气象数据

模型的流域内气象数据输入是流域内其他过程模拟的驱动力，也是最重要的数据输入之一。SWAT 模型需要的气象数据包括日平均的降雨量、最高和最低大气温度、太阳辐射、风速和相对湿度。在本次工作中利用了 1980 年到 2000 年的日平均数据。其中降雨量、大气温度、风速和相对湿度是在七个站点的实测数据，太阳辐射数据是通过经验公式计算而得。

表 3-7 使用的研究区内的气象站点
Table 3-7 Weather shack in study area

名字	纬度(度)	经度(度)	海拔高度(m)
湟源	36.68	101.27	2724.6
大通	37.03	101.53	2612.5
门源	37.38	101.62	2714.6
西宁	36.63	101.78	2262.4
湟中	36.50	101.53	2717.7
乐都	36.48	102.42	1975.4
民和	36.33	102.80	1787.6

下图 3-11 表示了各气象站点在研究区的分布及控制区域。

湟水流域气象站分布图

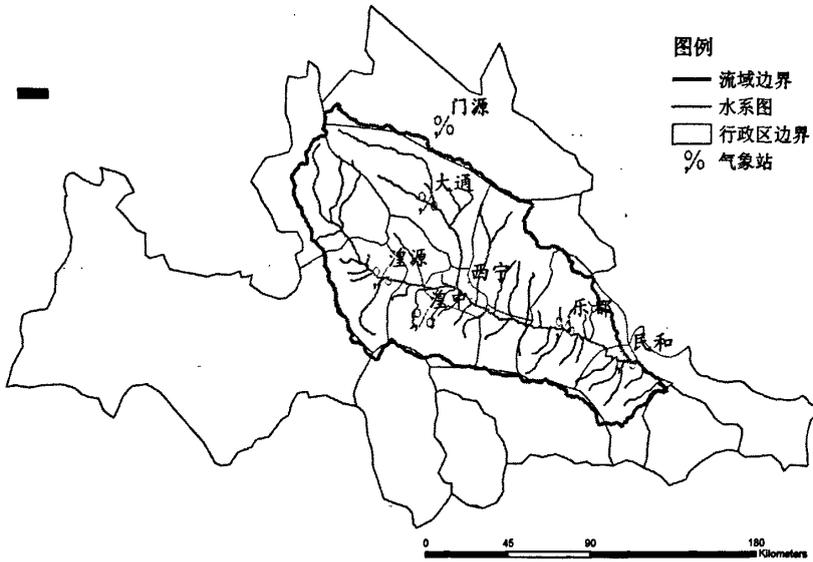


图 3-11 气象站的位置及控制区域

Fig.3-11 Position and control area of weather shack

4 模型的参数估算与模型适用性分析

4.1 模型参数估算

SWAT 模型对输入的基础数据空间离散化处理后,所生成的离散地域元的属性进行说明和定值的方法,称之为空间参数化(parameterization)。通俗地讲,就是按照模型运行的输入要求,将一个个划分得较小的空间单元的属性进行说明和定值的一系列方法。

最好的是参数化方法,就是模型输入全部采用实测数据,但这种要求即使在一些发达国家也是不可能实现的。即使某些项目具有观测数据(如:雨量站观测的降雨量数据),这些数据也只能代表所在地点的个别情况,存在着如何换算、校正到每个离散单元的问题。对于更多的项目,流域内部并没有直接相关的数据,如何采用适宜的方法计算和估计出来,这些都是空间参数化研究中需要解决的问题。

SWAT 模型运行需要的输入数据主要可以分为地形、气象、地面覆盖、土壤、水质、水库、农业管理措施等多种类型,每个类型下又包括多项内容。按照参数尺度划分,某些内容的参数化是在子流域尺度上或以子流域为单位实现的,如:地形数据和气象数据;某些内容的参数化是在水文响应单元的尺度下或以水文响应单元为单位实现的,如:由土壤和地面覆盖数据综合生成的径流曲线数。按照参数化过程划分,某些内容的参数是伴随着 AVSWAT2000 的物理进程自动生成的,如地形参数化进程,植被覆盖、土地利用参数化进程;但是有些参数,并不能由 SWAT 根据物理意义自动生成,必须由使用者进行参数估算后输入模型,对模型模拟起决定性作用的参数主要分为以下三类:①土壤层物理、化学属性参数;②地下水层参数;③河道汇流参数;④气象参数等。

4.1.1 土壤物理属性参数估算

土壤物理属性控制着土壤内部水和空气的运动,对于每个水文响应单元的水循环过程产生着很大的影响,是模型输入的必要参数。

a. 土壤质地采样数据

SWAT 模型运行时需要土壤剖面分层质地含量数据,每个土壤剖面可以最多分到 10 层。模型要求的土壤质地采样指标采用了美制标准,和我国第二次土壤普查标准有着一定的差异。

在这种情况下,需要在两种标准之间进行转换,关于这个问题,梁音等人也进行了介绍,可以利用对数和二次方程进行计算机转化,也可以利用半对数纸图解的办法。由于湟水流域的土壤类型构成比较简单,而且在划分 HRU 之后,很多面积比例很小的土壤类型可以忽略不计。表 4-1 列举了三类主要土壤类型,在三个典型取样点的土壤质地采样数据。

表 4-1 湟水流域典型土壤质地采样数据
Table.4-1 Data of typical soil sampling in Huangshui watershed

土壤名称	取样深度 (mm)	粒径 (mm) 含量				取样点
		>2	2~0.05	0.05~0.002	0.002~0	
栗钙土	0~250	8.10%	26.10%	35.44%	30.36%	民和
	250~800	9.02%	27.40%	32.30%	31.28%	
	800~1500	9.45%	26.03%	34.25%	30.27%	
黑钙土	0~160	10.29%	23.21%	30.70%	35.80%	湟中
	160~300	7.01%	12.00%	43.60%	37.39%	
	300~830	9.92%	17.80%	43.27%	29.01%	
	830~1500	9.25%	23.25%	54.80%	12.70%	
灰钙土	0~90	11.90%	33.10%	34.30%	20.70%	乐都
	90~250	15.85%	33.04%	32.54%	18.57%	
	250~500	11.45%	33.24%	34.45%	20.86%	

b. 土壤水文、水传导等物理属性的参数化

SWAT 模型需要各类土壤的水文、水传导属性作为输入值, 包括: ①每类土壤所属的水文单元组 (Soil Hydrological Group); ②植被根系深度值; ③土壤表面到底层深度。按土壤层分层输入的数据有: ④土壤表面到各土壤层深度; ⑤土壤容重 (moist bulk density); ⑥有效田间持水量 (available water capacity); ⑦饱和的导水率 (saturated hydraulic conductivity); ⑧每层土壤中的粘粒、粉沙、沙粒、砾石含量; ⑨USLE 方程中的土壤可蚀性 K; ⑩田间土壤反照率 (albedo)。

第①问题和第⑦问题是密切联系的, 下面还要继续讨论。第⑧问题, 从上面的讨论中可以看出, 已经基本解决。②、③可以从土壤数据库中所包含的数据中分析得到。对于第⑩问题, 目前没有好的办法解决, 反照率随自然条件而异, 季节变化范围很大, 植物的生长, 植被特性的变化都可使反照率改变, 以至反射率的精确计算成为极复杂的问题。我们按照 SWAT 指定的缺省值, 统一赋值为 0.10。

对于土壤可蚀性 K 值, 表示土壤本身的抗蚀能力, 这个参数非常重要, 影响着泥沙模拟的精度, 按照常规 K 值需要试验获得, 在研究中暂时无法办到。南京土壤所梁音、史学正先生以土壤亚类为基础, 依据第二次普查资料建立了我国丘陵区各土种的理化性质数据库, 应用土壤可蚀性方法, 计算出了各土种的土壤可蚀性 K 值和我国丘陵区土壤的平均 K 值 (0.228), 本文 K 值取平均 K 值 = 0.228, 真实的参数需要通过模型校验进行参数率定。

土壤容重、有效田间持水量、饱和的导水率也需要试验测定, 经过多方资料分析, 采用了 Saxton 的研究成果 (<http://wilkes.edu/~boram/soilwatr.htm>), 他通过土壤数据库的分析, 研究了土壤质地含量和土壤物理属性之间存在的统计关系, 其计算值和实测值有很好的拟和关系。图 4-1 为 Saxton 开发的计算程序界面, 只要输入土壤中沙和粘粒的含量, 就可

以计算出相应的土壤物理属性。

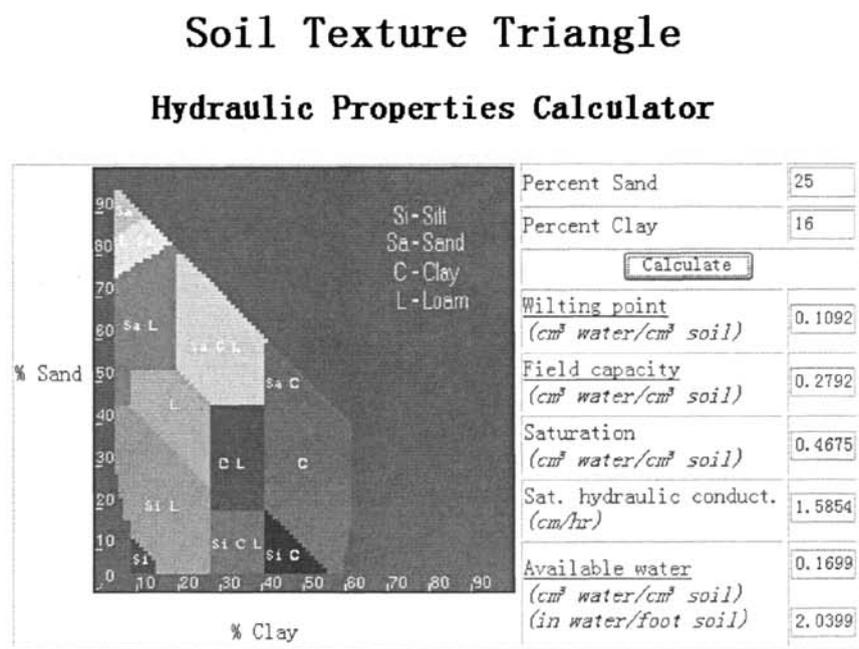


图 4-1 土壤物理属性计算界面

Fig.4-1 Interface of hydraulic properties calculator

c. 土壤水文单元组和径流曲线数的计算

前文已经介绍过 SWAT 模型中的产流模拟采用了美国土壤保护署 (5011 Conservation service) 开发的 SCS 径流曲线数模型, 这个模型有两个关键的参数就是水文单元组和径流曲线数。美国自然资源保护署 (Natural Resource Conservation Service) 在土壤入渗特征的基础上, 将各类土壤分成 4 组, 每组土壤在相似的降雨和地面覆盖下具有相似的径流特征。

表 4-2 土壤水文单元组的划分

Table 4-2 elements of soil hydraulic

土壤水文单元组	土壤上层 0.5m 饱和导水率 (mm/hr)
A	>110
B	11~110
C	1.1~11
D	<1.1

土壤水文单元组的分类, 具有一定的复杂性, SWAT99 手册中, 水文单元组分类标准依据各类土壤表层 0.5m 的饱和的导水率大小, 分成 A、B、C、D 四组。分组的标准如表 4-2 所示。在 SWAT2000 的使用手册中, 对分组的标准又进行了更新, 提出了更多的概念性的说明。可见, 即使在美国, 对于土壤水文单元组的划分也具有一定的模糊性。在国内的文献中, 更没有看到有价值的参考资料。实际工作中, 对于不同土壤类型的水文单元组

划分首先依据表 4-2 的标准进行了确定, 然后又仔细分析了土壤质地采样数据, 和美国土壤数据库的土壤数据进行了对比, 进行了调整。

径流曲线数 (runoff curve number) 是 SCS 模型的重要参数, 表示为土壤渗透性, 地面覆盖及先期土壤水分条件的函数。不同的地面覆盖和土壤水文分组条件决定了径流曲线数的值。结合湟水流域实际条件, 参考美国土壤保护署就各种土地组合给出了相应的径流曲线数 (表 4-3)。

表 4-3 水文土被组合下的径流曲线数
Table.4-3 Runoff curve number of differ hydraulic soil

土地利用	覆 盖		水文土壤组			
	处理或实践	水文条件	A	B	C	D
休耕	直行耕作	—	77	86	91	94
作物 耕作	直行耕作	差	72	81	88	91
	直行耕作	好	67	78	85	89
	等高耕作	差	70	79	84	88
	等高耕作	好	65	75	82	86
	等高和梯田	差	66	74	80	82
	等高和梯田	好	62	71	78	81
	小粒 作物	直行耕作	差	65	76	84
直行耕作		好	63	75	83	78
等高耕作		差	63	74	82	85
等高耕作		好	61	73	81	84
等高和梯田		差	61	72	79	82
等高和梯田		好	59	70	78	81
密植豆类或 轮作草地	直行耕作	差	66	77	85	89
	直行耕作	好	58	72	81	85
	等高耕作	差	64	72	83	85
	等高耕作	好	55	69	78	83
	等高和梯田	差	63	73	80	83
	等高和梯田	好	51	67	76	80
牧场或 放牧地		差	68	79	86	89
		一般	49	69	79	84
		好	39	61	74	80

	等高耕作	差	47	67	81	88
	等高耕作	一般	25	59	75	83
	等高耕作	好	6	35	70	79
草地		好	30	58	71	78
树林		差	45	66	77	83
		一般	36	60	73	79
		好	25	55	70	77
农场		—	59	74	70	77
道路(碎石) (硬面)		—	72	82	78	89
		—	74	84	90	92

4.1.2 土壤化学属性参数估算

研究区内土壤类型较多, 各类土壤的养分含量差异很大。即使在同一地方, 同一类型的土壤, 由于长期的人为活动, 土壤养分含量也不尽相同。根据青海省水文水资源勘测局提供的资料, 将研究区内主要土壤类型养分情况介绍如下:

(1) 高山草甸土: 分布在海拔 3200~3800m 之间的高山上。由于温度低, 降水多, 土壤湿度大, 多生长蒿草、苔草, 复盖度在 60% 以上。表层根系密结, 土壤中有机物积累大于分解, 一般有机质含量为 6%~10% 之间, 全氮 0.4~0.6%, 全磷 0.06%~0.12%, 全钾 1.5~2.51%, PH 值为 8.0 左右。

(2) 黑钙土: 主要分布海拔 2600~3300m 之间。该土的原始植被以灌丛草甸类型为主, 种类繁多, 植株茂密, 根系错综交结, 植物体每年在土壤中积累大量有机物质和矿质养分, 所以黑土层厚, 腐殖质含量高, 结构良好, 含有机质 2.0%~4.01%, 全氮 0.14~0.26%, 全磷 0.08~0.15%, 全钾 1.96%, PH 值为 8.4 左右, 适于种植青稞、小麦等多种作物。

(3) 栗钙土: 主要分布在湟水两岸的浅山坡地和水地、脑山的部分地区, 海拔 2270—3000m 之间, 地形开阔, 气候温和, 土层深厚, 质地上下均一, 结构不明显。由于受地带性干旱气候的影响, 有机质分解快, 含量低, 一般有机质含量为 0.50%~2.03%, 全氮 0.08%~0.14%, 全磷 0.05%~0.14%, 全钾 1.84%, PH 值为 8.5 左右。该类土壤是流域耕作面积较大的一类土壤, 由于气温较高, 适宜种植小麦、玉米、油菜等多种作物。

(4) 灰钙土: 主要分布在海拔 1800—2300m 的湟水河谷及邻近的低山丘陵地带。本区处在干旱、半干旱的暖温带, 植被属干旱草原类型, 覆盖度在 20% 左右, 其成土母质为第四纪黄土, 土壤熟化程度较高, 质地多为轻壤、中壤, 透水透气性好, 保水保肥能力强; 但由于耕种年代久, 忽视养地, 有机质含量低, 一般有机质含量为 0.50%~1.30%, 全

氮 0.05%~0.12%，全磷 0.05%~0.13%，全钾 1.54%，PH 值为 8.3 左右。

在 SWAT 模型中需要输入营养物质土壤初始值含量包括硝酸盐氮、有机氮、可溶性磷和有机磷。输入时按照各子流域的水文响应单元进行输入，相应子流域没有数据的取附近子流域的数据。

另外，在缺少数据时，使用了这么几个经验关系：

- 硝酸盐氮取总氮的 1.5%；
- 有机氮的含量为有机质的 1/14；
- 有机磷的含量为有机氮的 1/8；
- 取速效磷的量为土壤中可溶性磷的含量。

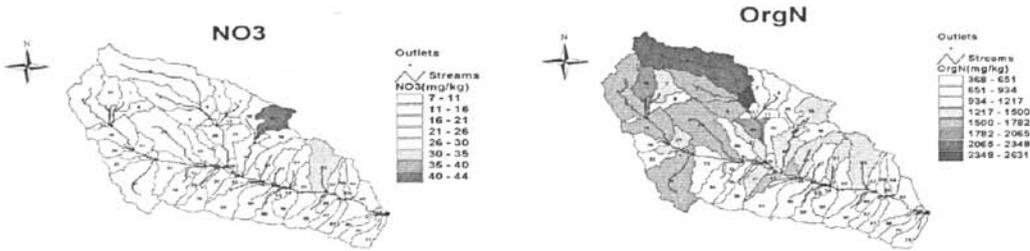


图 4-2a 土壤表层初始的硝酸盐氮浓度

图 4-2b 土壤表层初始的有机氮浓度

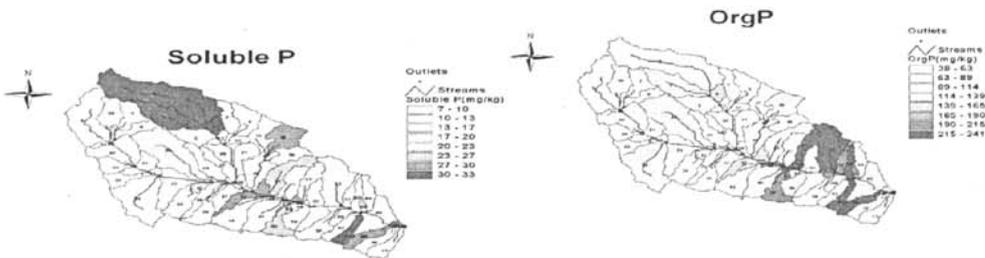


图 4-2c 土壤表层初始的可溶性磷浓度

图 4-2d 土壤表层初始的有机磷的浓度

图 4-2 土壤表层初始化学物质浓度

Fig.4-2 Initial chemical element density on soil surface

4.1.3 地下水层参数估算

在第二章介绍了 SWAT 模型将地下水分为两个含水层，一个是浅层水含水层，它为本流域内的河流提供回归流；另一个是深层承压水层，为流域外的河流提供回归流。由于湟水流域枯季的径流量主要由浅层地下水回归补充河道径流，所以正确的估算地下水层参数显得尤为重要。但是除了初始地下水埋深采取了青海省水文局所提供的实测值之外，其他 SWAT 所定义的地下水层参数，在湟水流域并没有实测值，故只能初步采用缺省值，然后在模型校核过程中对参数进行率定（参看本章 4.2，4.3）。

4.1.4 河道汇流参数估算

汇流包括坡面汇流和河道汇流，河道汇流过程中考虑了河水与地下水的水量交换，即地下水以基流的形式补给河水或河水以渗漏的形式补给地下水。

坡面汇流采用运动波模型计算，需要输入的主要参数是糙率，又称 Manning 系数。它反映边界表面粗糙度对水流阻力的影响，边界表面越粗糙，Manning 系数越大。坡面汇流计算的 Manning 系数取计算单元内各类土地利用 Manning 系数的面积调和平均值。参照王国安、李文家《水文设计成果合理性评价》，经过模型调试，各类土地利用 Manning 系数的取值见表 4-4。

表 4-4 坡面汇流 Manning 系数参考值
Table 4-4 Manning coefficient overland flow

土地利用	林地	草地	农田	裸地	城市地面	水域
Manning 系数	0.3	0.1	0.2	0.05	0.02	0.01

河道汇流的需要输入的主要参数也是糙率，它影响到河道汇流速度。本文采用的 Manning 系数根据各端面实测洪水反演值（水文年鉴），并参考王国安、李文家《水文设计成果合理性评价》设定。

4.1.5 气象数据参数估算

由于湟水流域地形复杂，地势自西北向东南逐渐降低，最高达 4900m，最低处的湟水谷地约为 1650m，相对高差达 3250m。高程的剧烈变化，对气象要素空间分布的影响很大。而湟水流域的积雪、融雪、冻土径流的模拟都与气象因素有着非常大的关系，所以必须确定这些气象要素随高程变化的关系。本文根据所选的 7 个气象站的气象资料，分析温度、降雨日平均值与高程的关系。

由以上两图可以看到，湟水流域的多年日平均降雨量和多年日平均温度两个参数与海拔高度的相关性非常高。气温随着海拔高程升高而降低，降雨量随着海拔升高而升高。从而确定了模型的两个重要参数：海拔高程日降水梯度，0.9mm/km；海拔高程气温梯度，-4.9℃/km。这两个参数的正确估算对于湟水流域冰川融雪径流和地下径流的模拟起着关键的作用。

4.2 模型参数率定

在第二章介绍 SWAT 模型的特点时，曾经指出 SWAT 模型是基于物理机制的分布式水文模型，所有的参数均具有物理意义，理论上讲可以根据观测实验数据和遥感、GIS 等数据或者某些经验数据进行估算而无需率定。但是同时由于 SWAT 模型是一个集成和系统化的庞大模型体系，由大量的方程，子程序和程序语句构成，涉及到的参数是非常多的，不仅某些参数无法直接通过观测实验获得，同时这些参数在每个计算单元内仍然具有空间变异

性,模拟计算时往往使用其单元内平均参数或者有效参数,实际上并不能达到最精确的模拟效果,因此通常仍然需要对模型进行参数校核与验证。

模型的参数率定过程是指,通过调整模型的参数使得模型结果与实测数据相项匹配的过程。通过模型的率定调参可以提高模型的精确度,让模型更适合研究区的实际情况。选用相对误差指标 R_e 、相关系数 r^2 和 Nash-Sutcliffe 模型效率系数 E_{ns} 作为模型模拟精度的判断标准。下面简要介绍 Nash-Sutcliffe 方法。

使用 Nash-Suttcliffe 系数 E_{ns} 来衡量模型模拟值与观测值之间的拟合度,其表达式为:

$$E_{ns} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_{avg})^2} \quad (4.1)$$

式中: Q_m 为观测值, Q_p 为模拟值, Q_{avg} 为观测平均值, n 为观测的次数。

当 $Q_m = Q_p$ 时, $E_{ns} = 1$; 如果 E_{ns} 为负值,说明模型模拟值比直接使用测量值的算术平均值更不具代表性。

按如下顺序进行参数率定:首先是进行基流量部分的率定,然后进行总体水量部分的率定,同时要兼顾每年 3、4 月份融雪径流部分的参数率定,最后进行输沙量与非点源污染营养物质部分的率定。参数率定时从上游的站点西宁站开始,从上至下到民和站,逐个进行参数率定,这样避免率定下游的站点时会影响上游的站点。

西宁站位于湟水流域的中游,由图 4-5 可以看到,该站主要控制湟水流域海晏、大通、湟源以及湟中的大部分区域,面积为 9022km^2 ;民和站位于湟水流域在青海省的出口,控制着整个上游流域面积 15620 km^2 。

4.2.1 基流的估算

河道中的水量有两个来源:地表径流和地下水补给。地下水的补给部分在水量过程线中表现为基流部分。模型校核时,首先对实测径流进行基流分割,从而分别对地表径流和基流进行参数率定。

传统的基流分割法包括图解法和分析法。图解法主观性较强,在计算两次连续降雨或多次连续降雨时效果较差;分析法依赖迭代曲线拟合算法,且参数较多,难以确定其误差来源。近年来人们将数字滤波应用于基流的分割。数字滤波能通过滤波器把输入系列通过一定的运算变换成输出系列。



图 4-5 水文站控制区域示意图

Fig.4-5 Control area of hydrometric station

滤波法较图解法更加客观，操作容易，执行速度快，且参数较少。Nathan 和 McMahon 首次采用 Lyne-Hollick 算法对流量过程进行分析和处理，从流量过程中分割出基流。本文采用该方法将实测径流划分为直接径流和基流两部分。基于 Lyne-Hollick 算法的滤波方程为：

$$q_t = \beta q_{t-1} + (1 + \beta)(Q_t - Q_{t-1})/2 \quad (4.2)$$

式中： q_t 为 t 时刻过滤出的快速响应（即直接径流信号，以日为时间步长）； Q_t 为实测河川总径流；从总径流中过滤出快速响应，即可得出基流 b_t ：

$$b_t = Q_t - q_t \quad (4.3)$$

本文的基流部分计算是利用 USGS 的 Baseflow 程序在实测的日平均流量数据基础上得到的。输入 1980~2000 年日流量资料，运行下载的 bflow.exe 程序。即可得到逐日基流量以及基流参数 F_r 、退水个数、 α_{gw} 系数和退水天数，基流参数计算结果如表 4-5 所示。

表 4-5 滤波分割基流参数值

Table.4-5 filter separation runoff value

基流系数 F_{r1}	基流系数 F_{r2}	基流系数 F_{r3}	退水天数	α_{gw} 系数	基流天数
0.68	0.52	0.42	11	0.019	42

图 4-6 是利用 bflow 程序分割计算的民和站 1983 年的基流变化过程。

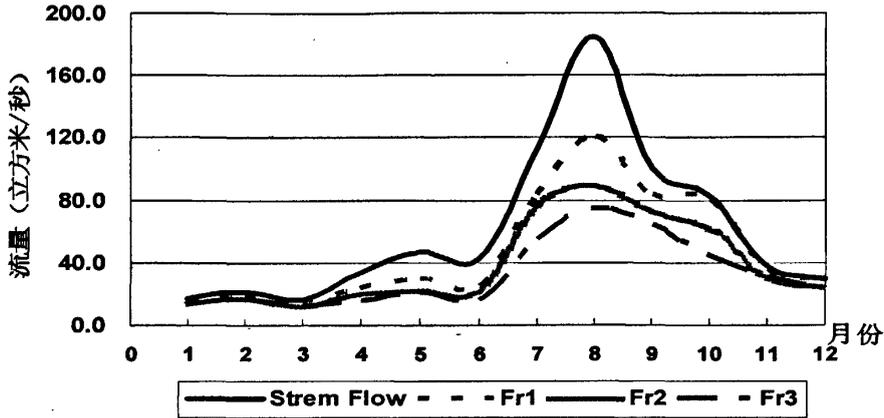


图 4-6 滤波分割的民和站 1983 年基流变化过程
Fig.4-6 Runoff process separated by filter at Minghe station 1983

4.2.2 模型流量部分参数率定准则

流量部分率定分为河道径流、地表径流和基流的率定，同时考虑到湟水流域有一部分位于高海拔地区，需要考虑融雪径流参数的率定。

a. 地表径流参数率定

模型中计算的河道径流量输出到结果文件.rch 中。但是模型中并没有直接给出河道径流中地表径流和地下径流量。按照下面式 4. 4 计算地表径流：

$$surq = \frac{\sum_{i=n}^m \left(surq_i \times \frac{area_i}{\sum_{i=n}^m area_i} \right)}{\sum_{i=n}^m \left(wyld_i \times \frac{area_i}{\sum_{i=n}^m area_i} \right)} \times tq \quad (4.4)$$

式中：i：水文站点控制的子流域的编号；

surq_i：子流域内地表径流的出流量；

area_i：子流域的面积；wyld_i：子流域的总产流量；

tq：水文站处的水量；surq：水文站处地表径流形成的水量。

之所以没有直接利用子流域的地表产流是因为在汇流过程中会有蒸发、输移损失等。

► 主要参数率定准则：

将实测值和计算值比较，如果计算值太高（太低则相反）：

- (1)降低 SCS 曲线的曲线系数 (soil curve number)；
- (2)增大土壤的有效田间持水能力(soil available water capacity)；
- (3)降低土壤蒸发补偿系数(soil evaporation compensation factor)。

此外,除了上述主要影响地表产流量的参数外,影响地表水文过程线形状的变量有控制输移损失的河道水力传导率(CH_K在.rte中)及Manning系数(CH_N在.rte中)。

b. 地下径流参数率定

浅层蓄水层补给流量是地下径流的主要构成部分,这种水流补给时间最长,流量过程线涨落变化最小,是湟水流域11月至次年3月河道主要补给方式。浅层蓄水层水量补给来自土壤母质层水的下渗,补给延迟天数为输入参数,决定着补给的快慢。当浅层蓄水层含水量超过浅层蓄水层对河道补给的阈值时,计算其对河道的贡献水量。地下径流回归因子控制浅层蓄水层回归流出流的快慢。

按照下式4.5计算地下径流:

$$gwq = \frac{\sum_{i=n}^m \left(gwq_i \times \frac{area_i}{\sum_{i=n}^m area_i} \right)}{\sum_{i=n}^m \left(wyld_i \times \frac{area_i}{\sum_{i=n}^m area_i} \right)} \times tq \quad (4.5)$$

式中:

- i: 水文站点控制的子流域的编号;
- gwqi: 子流域内地下径流的出流量;
- areai: 子流域的面积;
- wyldi: 子流域的总产流量;
- tq: 水文站处的水量;
- gwq: 水文站处地下径流形成的水量。

之所以没有直接利用子流域的地下径流是因为在汇流过程中会有蒸发、输移损失等。

➤ 主要参数率定准则:

将实测值和计算值比较,如果计算值太高(太低则相反):

- (1) 增加地下水的再蒸发系数(revap coefficient)(GW_REVAP在.gw中);
- (2) 降低浅层含水层中地下水再蒸发的地下水深度阈值(REVAPMN在.gw);
- (3) 增加在浅层含水层中基流产生的地下水深度阈值(GWQMN在.gw中);

此外,除了上述主要影响基流流量的参数外,影响水文过程线形状的变量基流alpha系数(ALPHA_BF在.gw中)和地下水补给延迟天数(GW_DELAY在.gw中)。

c. 融雪径流参数率定准则

每年的3~4月开始是冰川积雪融化时期,融雪径流的计算采用温度一度日因子的方法。降雪不立即产生径流,当积雪的温度超过融雪温度临界阈值时,产生融雪。融雪模型考虑的参数是度日因子、积雪覆盖率、融雪温度和日最高气温。每日的度日因子不同,可

通过最大融雪度日因子、最小融雪度日因子和时间正弦函数计算。融化的雪水按等量液态降水模拟其径流过程。

另外应该注意到在地表水、地下水和冰川融雪的模拟过程中，产流量是相互影响的，因此在实际的调试中三者也是交替进行的，要注意协调好这些参数之间的关系。

4.2.3 模型流量部分率定结果与分析

本文主要依据上面所述的径流参数率定准则，选用1980~1989年湟水流域西宁、民和两站的天然（实测还原值）年径流系列和月系列对模型进行参数率定；选用1990~2000年相应两站的天然（实测还原值）年径流系列和月系列对模型进行验证。采用相对误差指标 R_e 、相关系数 r^2 和 Nash-Sutcliffe 模型效率系数 E_n 作为参数率定的判断标准。

a. 年系列结果与分析

表4-6是湟水流域民和站的年天然流量模拟结果，但是在1988年，模拟结果与实测结果出现了较大偏差，1988年年均降雨量达到了20年来的峰值，模型体现了降雨所带来的效果，模拟流量也达到了20年来的最丰流量，可是还原天然流量却比较低，并没有随降水显著增长（图4-7），由于这并不影响其他年份的模拟情况，故留待以后再做研究。

在不考虑1988年之后，民和、西宁两水文站段面的天然年径流模拟结果见图4-8，图4-9，模型验证分析结果见表4-6。

由模拟过程图和模型验证结果可以看到，西宁、民和站年天然径流模拟效果良好，除1988年之外的年天然径流模拟值基本与实测还原值吻合，可以进行月天然径流的模拟和参数率定。

b. 月系列结果与分析

由模拟过程图和模型验证结果可以看到，西宁、民和站天然月径流模拟效果也达到了不错的效果，参数率定判断指标都符合模型验证的标准。但是相比年径流的模拟结果，月模拟效果在某些方面存在着不足：

(1) 年径流反映的流域的水资源变化过程，主要反映在水量的模拟上，基于SWAT模型的湟水流域年水资源量模拟效果良好，较好的反映了该流域的水资源变化趋势；

(2) 月径流除了水量的体现，还包括了对流域水文过程线的反映，由于湟水流域基于地表、地下、融雪三方面的产流机制，因此在某些产流因素参数无法确切掌握的情况下，对基流、融雪产流以及洪峰流量的模拟效果略有不佳，主要体现在以下三个方面：

➤ 基流量较基流分割值（见本章4.2.1）偏低20%左右，主要由于土壤温度参数无法正常率定的影响；

➤ 融雪产流偏高且持续时间过长，影响了地表产流的模拟进程，主要由于积雪覆盖参数和融雪参数无法正常率定，以及气象数据空间插值不均的影响；

➤ 洪峰流量的模拟效果不佳，由于SWAT采用马斯京根法模拟河道洪水演变过程，而SWAT模型的最小步长为 d ，而湟水流域的洪水产生多为大强度降雨，因此以 d 为步长的降雨输入数据满足不了洪水流量的模拟精度需要。

但是,总的来说,本文通过选用数量较多且代表性较强的降雨站,通过温度与降雨数据的高程分布插值计算,较好的降低了参数时空分布不均对模型模拟产生的影响,对于确实难以掌握的重要参数,通过多次的调参,演算,还是得到了不错的结果,并取了最好的一次参数率定结果作为模型模拟输出量。

表 4-6 湟水民和站 1980~2000 年均流量模拟结果

Table 4-6 1980~2000 Mean annual discharge simulation at Minghe station

率定过程	年份	实测还原流量 (m ³ /s)	模拟流量 (m ³ /s)	年均降雨 (mm)
参数校核	1980	47.5	44.3	397.1
	1981	75.1	80.5	544.6
	1982	55.9	59.7	432.8
	1983	77.4	84.6	530.0
	1984	57.9	65.2	471.6
	1985	74.4	78.2	586.6
	1986	75.1	70.6	496.2
	1987	68.9	72.0	482.2
	1988	81.8	118.2	617.0
	1989	109.3	111.2	591.0
参数验证	1990	68.2	57.8	462.5
	1991	40.0	37.5	356.4
	1992	64.6	74.2	585.3
	1993	75.5	86.5	537.3
	1994	59.0	51.0	523.3
	1995	62.2	54.8	464.2
	1996	63.8	55.6	462.7
	1997	59.1	67.1	497.5
	1998	63.5	68.4	506.3
	1999	66.3	59.4	494.5
	2000	53.9	51.2	437.2
平均值	66.6	69.0	498.9	

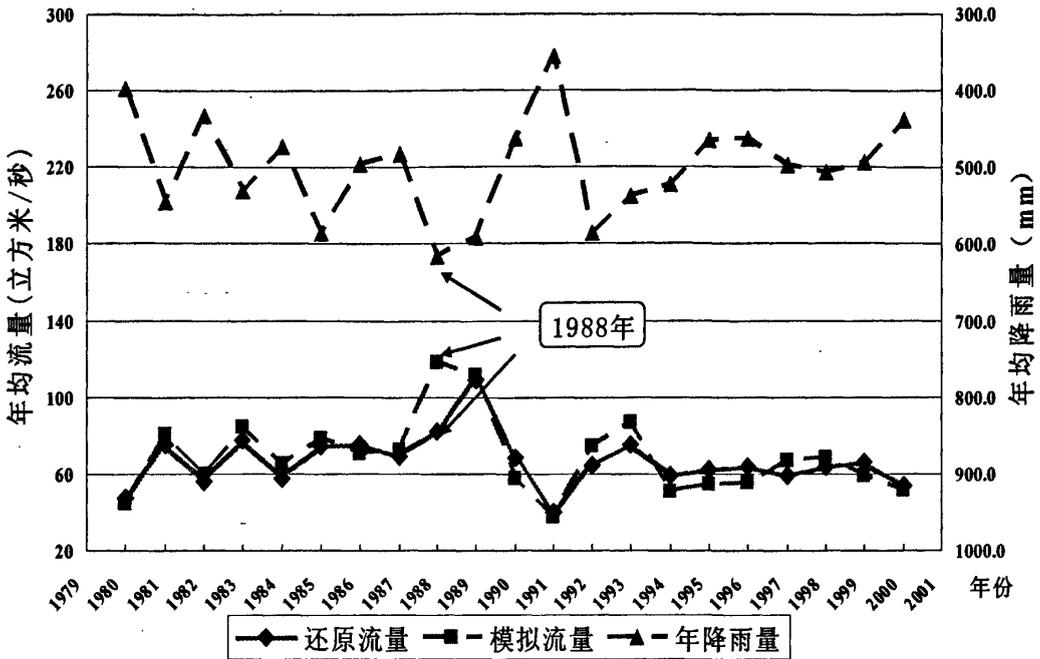


图 4-7 湟水流域 1980~2000 年系列天然径流校验过程
Fig.4-7 Natural yearly flow from 1980 to 2000 in Huanshui drainage basin

表 4-6 湟水流域 1980~2000 年系列天然径流模拟验证结果
Table 4-6 Natural yearly flow simulation from 1980 to 2000 in Huanshui drainage basin

水文站	相对误差	相关系数	Nash-Sutcliffe效率
西宁站	1.5%	0.81	0.795
民和站	1.8%	0.84	0.809

4.2.4 模型泥沙部分参数率定

a. 泥沙参数率定准则

在 SWAT 模型中认为河道中泥沙有两个来源：一部分是来自于水文响应单元或子流域，一部分来源于河道中的冲刷。

(1) 子流域内的产沙量；

在 SWAT 模型中计算坡面侵蚀使用的是 MUSLE，因此在子流域内影响产沙量的因子包括了 MUSLE 中的几个关键性因子。

主要调整的参数如下：

K_{USLE}: USLE 方程中的土壤可侵蚀性因子；

C_{USLE}: USLE 方程中的作物经营管理因子。

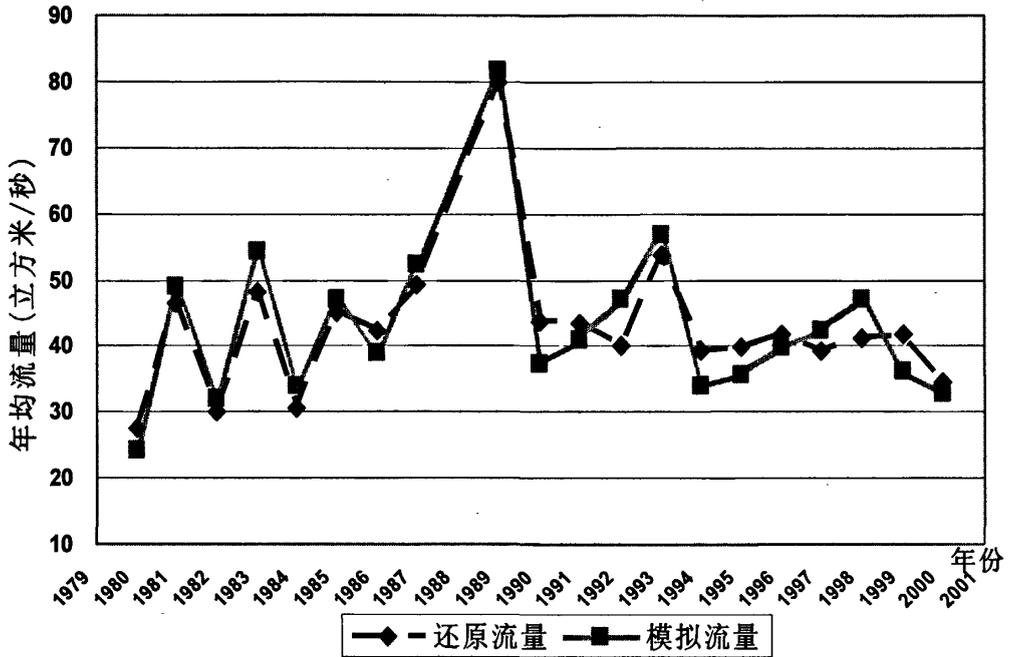


图4-8 湟水流域西宁站1980~2000年系列天然径流模拟
Fig.4-8 Natural yearly flow simulation from 1980 to 2000 at Xingnin station

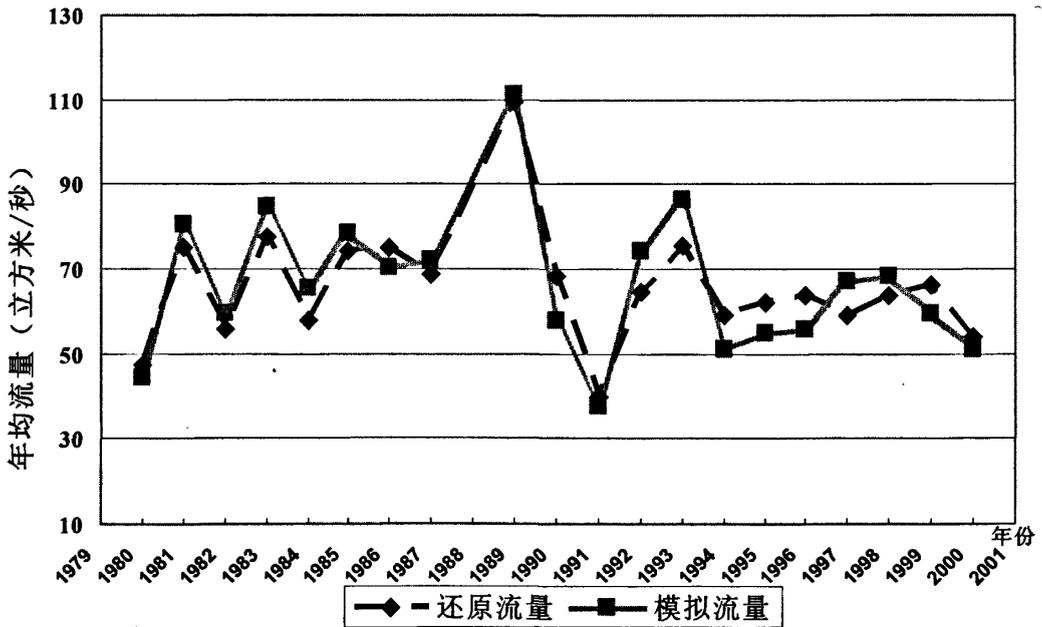


图 4-9 湟水流域民和站 1980~2000 年系列天然径流模拟
Fig.4-9 Natural yearly flow simulation from 1980 to 2000 at Minghe station

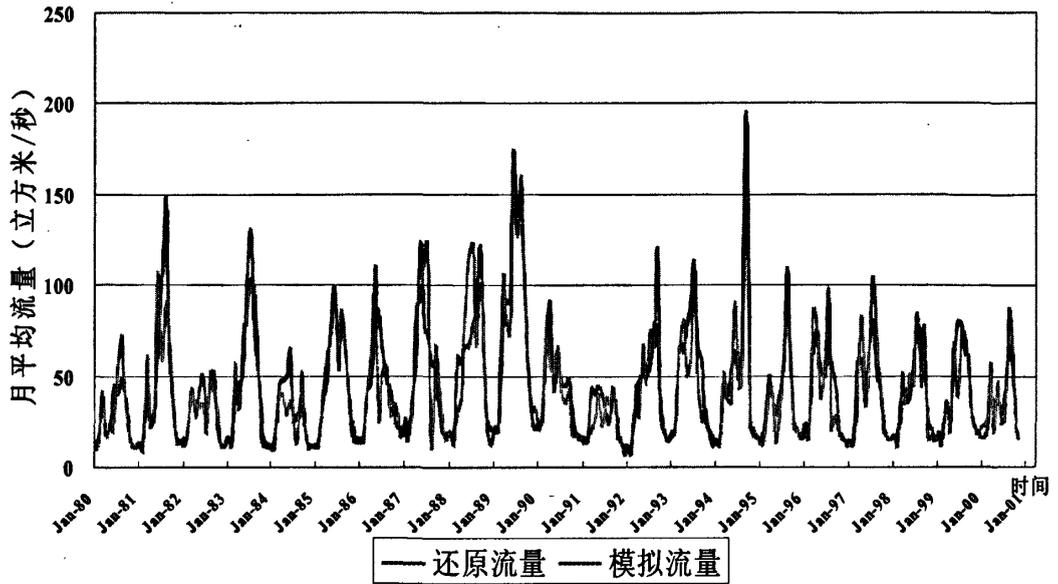


图 4-10 湟水流域西宁站 1980~2000 年天然月径流模拟
Fig.4-10 Natural monthly flow simulation from 1980 to 2000 at Xingnin station

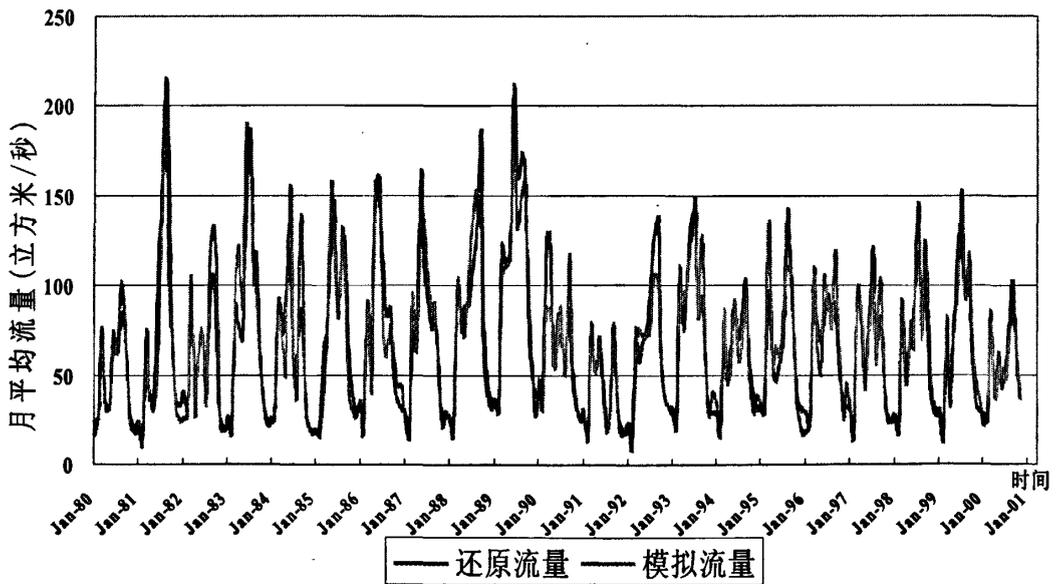


图 4-11 湟水流域民和站 1980~2000 年天然月径流模拟
Fig.4-11 Natural monthly flow simulation from 1980 to 2000 at Minghe station

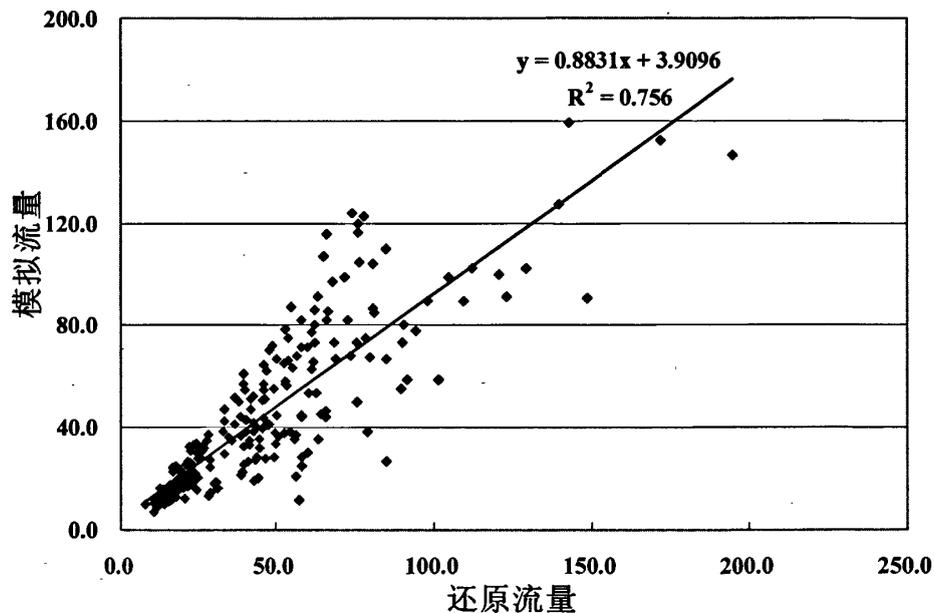


图 4-12 西宁站 1980~2000 年天然月径流模拟与实测还原值相关性分析

Figure 4-12 Correlation analysis of Natural monthly flow simulation and measured from 1980 to 2000 at Xingnin station

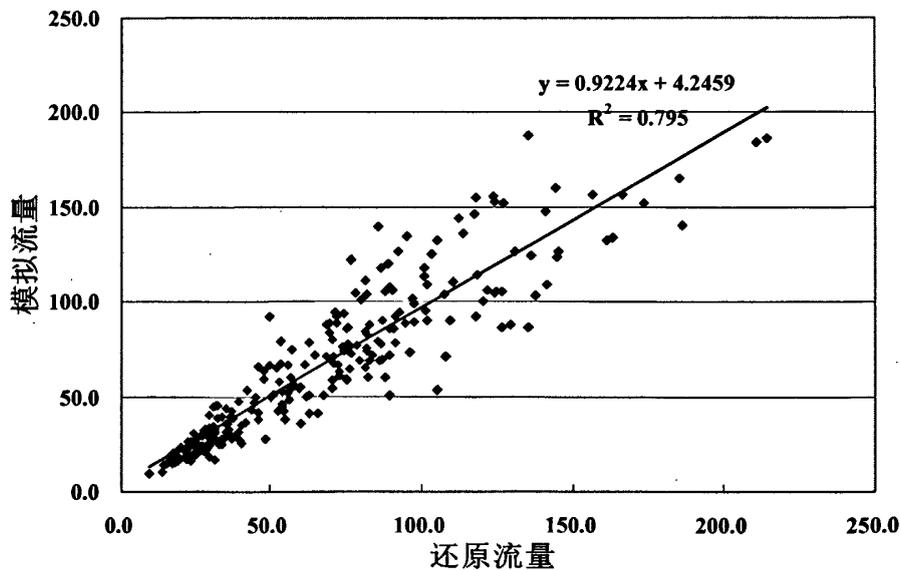


图 4-13 民和站 1980~2000 年天然月径流模拟与实测还原值相关性分析

Fig. 4-13 Correlation analysis of Natural monthly flow simulation and measured from 1980 to 2000 at Minghe station

(2) 河道中河床的冲刷和泥沙的沉积。

河道中河床的冲刷是因为一次较强的暴雨过程或者是因为河床的不稳定。

主要调整的参数如下：

c_{sp} : 挟沙能力计算的待定线性系数；

sp_{exp} : 挟沙能力计算的待定幂指数；

K_{CH} : 河床的可侵蚀系数 (cm/hr/Pa)；

C_{CH} : 河床的覆盖系数。

考虑到实际的河道是有不少泥沙淤积的，所以降低了 C_{CH} ，增加了 K_{CH} 。而且调整了 c_{sp} 和 sp_{exp} ， c_{sp} 从 0.001 调整为 0.003， sp_{exp} 从 1 调整为 1.5。如下为泥沙部分的率定结果。

表 4-7 湟水流域 1980~2000 年天然月径流模拟验证结果

Table 4-7 Natural monthly flow simulation from 1980 to 2000 in Huanshui drainage basin

水文站	相对误差	相关系数	Nash-Sutcliffe效率
西宁站	2.5%	0.756	0.709
民和站	2.8%	0.795	0.735

b. 泥沙率定结果与分析

西宁、民和站水文断面 1980~2000 年年输沙量模拟结果见表 4-8，图 4-12。

表 4-8 湟水流域 1980~2000 年年输沙量模拟结果

Table 4-8 Yearly sediment load simulation from 1980 to 2000 in Huanshui drainage basin

年份	西宁 (万吨)		民和 (万吨)	
	实测	模拟	实测	模拟
1980	203	230.7	649	528.0
1981	514	883.4	1950	2562.3
1982	148	232.0	547	680.9
1983	238	250.2	1460	1290.9
1984	115	183.7	981	1277.1
1985	137	228.8	1020	1374.0
1986	168	195.0	1440	1207.1
1987	140	147.1	985	832.9
1988	161	245.0	856	1445.8
1989	546	571.5	1180	966.9
1990	193	319.8	456	492.6

1991	63	97.2	345	381.3
1992	249	395.9	1044	1466.4
1993	253	369.3	921	1073.3
1994	276	404.6	1432	1450.5
1995	412	645.5	845	946.3
1996	202	213.1	768	543.1
1997	243	212.3	1900	1356.9
1998	254	278.0	890	807.2
1999	178	148.8	1960	1656.5
2000	89	150.8	490	605.4

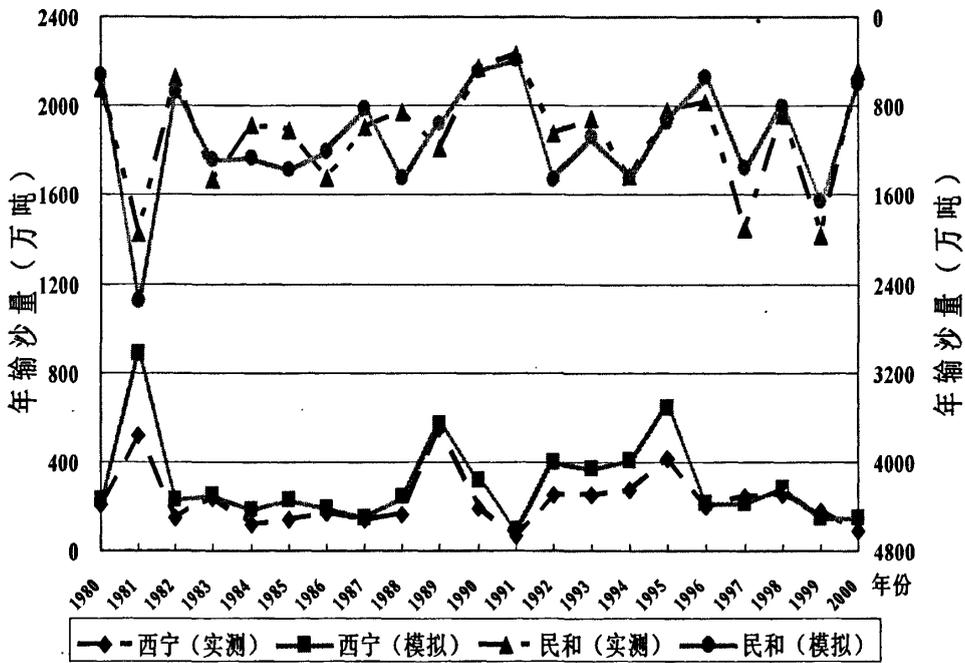


图 4-14 湟水流域 1980~2000 年年输沙量模拟

Fig.4-14 Yearly sediment load simulation from 1980 to 2000 in Huanshui drainage basin

表 4-9 湟水流域 1980~2000 年年输沙量模拟验证

Table 4-9 Yearly sediment load simulation from 1980 to 2000 in Huanshui drainage basin

泥沙测站	相对误差	相关系数	Nash-Sutcliffe效率
西宁站	24.3%	0.726	0.629
民和站	4.8%	0.715	0.676

针对月泥沙量, 本文选取了1993年(平水年)和1989年(丰水年)进行月输沙量校核, 结果见图4-15、图4-16:

由以上年、月输沙量模拟过程图和模型年模拟参数率定验证结果(表4-9)可以看到, 西宁、民和站年、月输沙量参数率定判断指标符合模型验证的标准。但是相比起径流模拟, 相对误差显得稍大一些, 主要体现在以下几点:

(1) 由于SWAT模型对土壤侵蚀计算采取的是MUSLE经验模型, 该模型针对的是某个地块的土壤侵蚀计算, 在对流域尺度上的土壤侵蚀量计算精度较差;

(2) 从年模拟过程来看, SWAT模型对于产沙量较小的西宁以上流域, 模拟值系统偏高10%左右; 而在民和站, 相对误差明显降低。由于MUSLE主要是针对暴雨的土壤侵蚀量进行模拟, 故更适用于产沙模数更高的区域模拟。

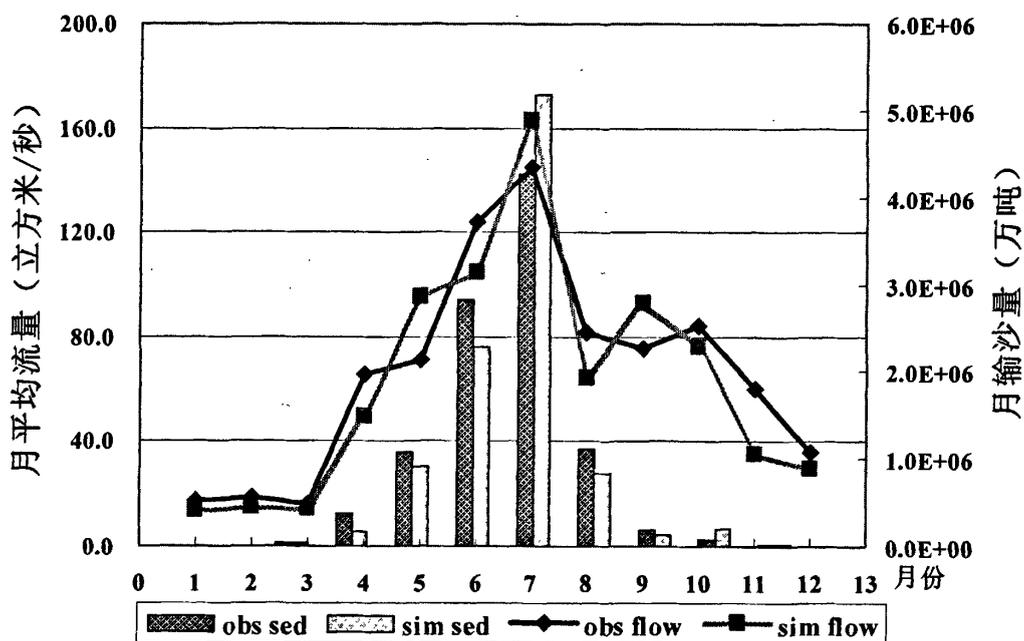


图4-15 平水年民和站月输沙量模拟与实测值对比

Fig.4-15 Monthly sediment load simulation and measured from 1980 to 2000 at Minghe station in mean yearly discharge year

- 1) 泥沙的模拟受水量影响很大, 由于汛期洪水的模拟精度限制, 导致汛期泥沙的模拟精度也受到了影响。

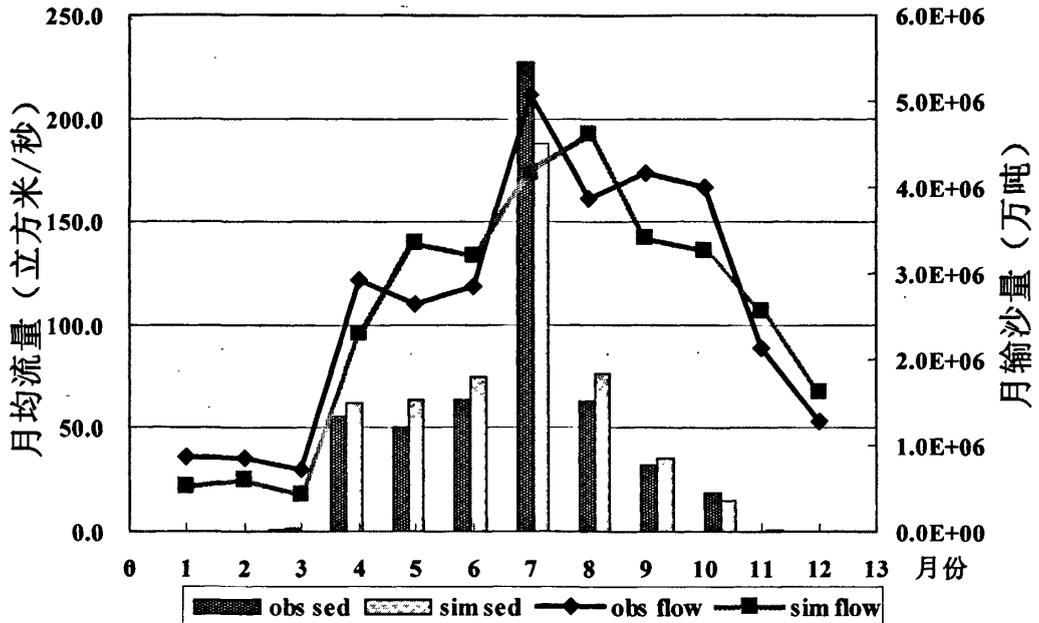


图4-16 丰水年民和站月输沙量模拟与实测值对比

Fig.4-16 Monthly sediment load simulation and measured from 1980 to 2000 at Mnghe station in highest yearly discharge year

4.2.5 模型水质部分参数率定

a. 水质参数率定准则

在 SWAT 模型中关注的营养物质包括硝酸盐、有机氮、可溶性磷及有机磷等。在本次计算中, 根据获得的观测资料对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、TP、TN 作为指标进行了参数率定。各种形态的 N 和 P 之间是相互转化的, 这些在 SWAT 模型中都有考虑。因此, 在率定时参数的变化会引起多个输出的变化。对参数的选取应综合各指标与观测值的比较结果。水质部分的参数率定分为两部分: 地表产流过程营养负荷的参数率定及河道中各营养物之间转化的参数率定。

1) 地表产流过程影响 N 和 P 负荷的参数;

NPERC0: 地表径流中氮的浓度与下渗水流中氮的浓度比, 调整为 0.350;

CMN: 活跃态有机氮的矿化速度, 调整为 0.005;

PPERC0: 地表径流中磷的浓度与下渗水流中磷的浓度比, 调整为 15.5;

PHOSKD: 磷的土壤分离系数, 指表层 10mm 土壤中可溶性磷的浓度和地表径流中可溶性磷的浓度之比, 调整为 135;

PSP: 磷有效性指数, 可溶性磷加入到土壤中后, 由于和土壤之间的相互作用, 可溶性磷的浓度迅速降低, 然后变化缓慢, 磷的有效性指数指经过最初的降低后剩余可溶性P的比例, 该参数调整为0.5。

2) 河道汇流过程中氮、磷在河道中转化的参数。

BC3: 在20°C时有机氮转化为氨氮的速度常数 (day^{-1}) , 调整为0.035;

BC1: 在20°C时氨氮生物氧化速度常数 (day^{-1}) , 调整为0.360;

BC2: 在20°C时亚硝酸盐氮的生物氧化速度常数 (day^{-1}) , 调整为3.200;

BC4: 在20°C时有机磷的矿化速度常数 (day^{-1}) , 调整为0.04;

b. 水质参数率定结果与分析

由于对流域营养物质流失的监测工作展开时间较晚, 在本次工作中, 选取了民和站1998和2000年较为完整的实测数据, 通过将点源污染造成的负荷量分割之后, 就可以得到实测的非点源污染负荷量指标, 并按年总非点源污染负荷量作为标准进行参数调整。

表4-10表示了1998年和2000年各水质指标计算值和观测值, 除各种形态的氮的比较外, 也比较了三种形态氮的总负荷。相对误差最大的是2000年的亚硝酸盐氮, 由于亚硝酸盐氮占总氮的比例很小, 这样的结果是可以满足计算要求的。同时也可以看到, 在近20年来的最枯年份2000年内, 各非点源污染指标都降到了最低水平, 具体分析见5.3。

表4-10 民和站水质模拟值与观测值(单位: kg)

Table 4-10 Water quality simulation and measure at Minghe station

年份	指标	硝酸盐氮	氨氮	亚硝酸盐氮	三氮	总磷
1998年	观测值	2143059	792928	24879	2960866	894579
	计算值	2583500	714240	34783	3333523	684576
	相对误差	21%	-10%	38%	13%	-23%
2000年	观测值	828043	217952	19931	1065927	82151
	计算值	989000	261493	28386	1278879	101659
	相对误差	19%	20%	45%	20%	24%

4.3 参数敏感性与模型适用性分析

4.3.1 分布式水文模型 (SWAT) 参数敏感性分析

SWAT模型是一个基于物理意义的分布式水文模型, 更多的使用了物理化学方程来描述流域内的各种物理化学现象, 例如植物的生长, N、P的转化等等。上百个参数取值的准确性决定了模型的可靠性。由于参数太多以及模型的空间特性, 确定每个参数的准确值是相当困难的, 只能使得重要的参数尽可能的准确。在本次工作中, 在模型的率定调参之后, 对以上章节所总结出的一些对于模型输出有重要影响的14个参数进行了敏感性分析。计算区域选取民和站水文断面的流量、泥沙和水质数据。计算时段选用了1990~1995年。

相对敏感性时选取6次不同的计算结果。利用相邻的两次计算结果计算相对敏感性的一个值, 然后取5次的平均值。计算参数的敏感性如下式:

$$S = \sum_{i=1}^5 \frac{1}{5} \left[\frac{(Q_{i+1} - Q_i)/Q_b}{(P_{i+1} - P_i)/100} \right] \quad (4.6)$$

S——参数的相对敏感性（无量纲）；

P_i ——第 i 次计算参数相对于率定后模型参数的调整百分率（-10%~10%）；

P_{i+1} ——第 $i+1$ 次计算参数相对于率定后模型参数的调整百分率（-10%~10%）；

Q_b ——率定后模型的输出结果；

Q_i ——第 i 次计算模型的输出结果；

Q_{i+1} ——第 $i+1$ 次计算模型的输出结果。

一些重要参数的敏感性分析见表 4-8。

表 4-10 14 个重要参数的敏感性分析结果

Table 4-10 Sensitive analysis of 14 important parameter

参数	流量	泥沙量	有机氮	有机磷	硝酸盐氮	可溶性磷
基流 alpha 系数	0.0029	0.0144	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
土壤中植物可利用水量	-0.7572	-1.0433	-1.79175	-2.3415	-0.6077	-0.3893
生物混合系数	-0.0445	0.0558	0.2120	0.1206	-0.2433	-0.6132
最小作物管理因子	0.0000	0.1671	0.3633	0.4351	0.0000	0.0057
河道覆盖系数	0.0000	0.5346	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
河道可侵蚀系数	-0.0001	0.5098	-0.0533	-0.0404	0.0021	0.0013
SCS 曲线系数	0.2171	1.3181	2.5951	3.4867	2.7588	2.5436
土壤蒸发补偿系数	2.4138	1.4162	1.0123	0.6917	0.6425	0.8382
基流产生的最小深度	-0.0031	-0.0025	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000
氮下渗系数	-0.0055	0.0623	0.2631	0.3375	0.6846	-0.0328
磷的土壤分离系数	0.0000	0.0000	-0.0786	-0.0446	0.0025	-0.9138
磷下渗系数	0.0000	0.0000	0.0259	0.0664	-0.0005	0.2239
浅水层再蒸发的最小深度	0.0061	0.0024	-0.0002	0.0001	0.0000	0.0000
再蒸发系数	-0.0390	-0.0069	0.0005	0.0005	0.0000	0.0000
坡长	-0.0011	0.0793	0.3396	0.4164	-0.0051	0.0118
坡度	0.0005	0.3373	1.3252	1.5298	0.0041	0.0055

基流 alpha 系数(Alpha Baseflow Factor),也称为基流回退系数(Baseflow Recession Constant),对水文过程线有重要影响,但是对流量、产沙量、非点源污染物负荷量的影响较小。

土壤中植物可利用水量(Available Water Capacity),指在田间持水量时植物可利用的水量,一般是通过土壤从田间含水量到植物永久凋萎点时释放的水份。该值反映了土壤的蓄水能力,所以对流域的产流产沙特性有重要影响,也因此影响了非点源污染物的产出

特性。该系数越大，土壤蓄水能力越强，所以流域产流量降低，影响到产沙量降低，从而各非点源污染物的负荷量降低。

由于土壤中的生物活动，土壤中的一部分生物死亡残体、土壤养分等会重新在各土层间混合而引起土壤养分含量的变化。土壤中的生物活动和当地的自然地理条件有关，非耕地相对耕地较高。生物混合系数(Biological Mixing Efficiency)是指混合深度内的各土层中被重新混合物质占该土层中总含量的比例。生物混合系数越大，土壤表面越疏松，侵蚀性越强，所以产沙量相对较高，导致固相的氮、磷负荷增加；生物混合系数增大，降低了表层土壤的养分含量，液相的氮、磷负荷降低。

USLE 方程中的作物管理因子(Cover and Management Factor)定义为种植作物的土地在相同条件相对于清理干净后连续的休耕地地块产沙量的比例。该值越大，产沙量越高，固相的氮、磷营养负荷也相应较高。

河床上的植被覆盖可以降低河道水流流速，因而降低了水流对河床的侵蚀能力。河床的覆盖系数(Channel Cover Fator)定义为某种植被覆盖下河床在相同条件下相对于没有植被覆盖的河床水流冲蚀之比。河床覆盖系数越高，河道冲刷可能性越严重，所以河道输沙量越高。

河道可侵蚀系数(Channel Erodibility Fator)和 USLE 中土壤的可侵蚀系数定义类似。河道的可侵蚀性和河床、河岸的土壤性质有关。可侵蚀系数越高，河道的可侵蚀性越强，河道冲刷越严重，导致河道输沙量增加。

SCS 曲线系数增加，地表产流量增加，所以产沙量增大，相应地各固相、液相非点源污染物负荷增加。

土壤蒸发补偿系数(Soil Evaporation Compensation Factor)是为了调整土壤中因为毛细作用、土壤裂隙等对于各土层蒸发量的影响而提出的。该系数增加，土壤深层的蒸发量减少，产流量增加，产沙量增加，相应地各固相、液相非点源污染物负荷会增加。

氮的下渗系数(Nitrogen Percolation Coefficient)表示了径流中的氮含量和下渗水流中氮含量的比例，该参数对氮负荷具有重要影响。氮的下渗系数越大，径流中的氮含量越高。

磷的土壤分离系数(Phosphorus Soil Partitioning Coefficient)是为了表示土壤颗粒对于可溶性磷的吸附作用而引入的。磷的土壤分离系数越大，表明土壤对可溶性的磷吸附能力越强，所以非点源污染物中可溶性磷的负荷量越低。

磷的下渗系数(Phosphorus Percolation Coefficient)定义类似氮的下渗系数，对磷负荷的产出有重要影响。该系数愈大，磷负荷愈高。

坡长和坡度对产沙量有重要影响，坡长愈长，坡度愈大，产沙量愈高，所以固相的氮、磷负荷愈高。

4.3.2 分布式水文模型(SWAT)适用性分析

数学模型只是对真实世界所作的粗略模拟，模型的准确性和可靠性是有限的。模型模

拟精确度最高的是模拟小区域不透水的集水面上径流的水文模型，误差在百分之几左右；可靠性最差的是模拟大流域的水质模型，误差可能达到一个数量级甚至更大^[7]了水量、泥沙与污染物负荷模拟的精确大致范围。根据非点源污染产出的特点，首先需要率定的是水文部分，然后是泥沙，最后才是污染物的迁移。在水文部分或者侵蚀部分出现的误差，会转移并且扩大到其他有关部分。所以可能的误差从水量、泥沙到非点源污染物逐渐增加。

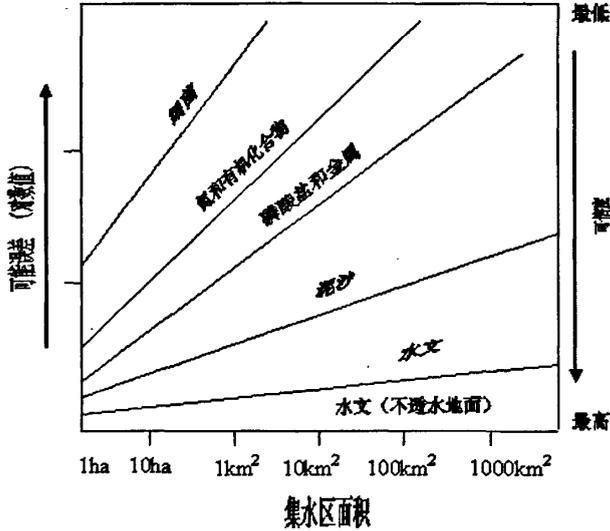


图 4-17 非点源污染模型的可靠性和可能误差

Fig.4-17 Error and reliability of non-point pollution model

该研究区的面积有 15620 平方公里，在这样一个较大流域进行流域产流、产沙以及面源污染的模拟计算是一件复杂的工作。由于基础数据的误差及模型本身的局限性，模型的计算结果与实际情况会有一定的偏差。从模型的率定结果看，主要站点的水量误差在 10% 以内，泥沙量误差在 20% 以内，各主要非点源污染物的误差在 25% 以内。这样的结果表明率定后的模型具有一定的精确度，可以适于该研究区内水资源的综合评价研究。

5 基于模型的湟水流域水资源综合评价

5.1 现状水资源评价方法

水资源评价是水资源科学开发、利用、规划、管理和保护的基础。我国现行的水资源评价具有以下四个特点^[72]：①以径流性水资源为评价口径，包括地表径流和地下径流两大部分；②以天然水资源量为评价对象，具体通过还原方法来实现；③以分离评价为基本模式，包括水量水质分离评价，地表地下水分离评价等；④采取分区集总式的评价。

随着水资源开发利用程度的加深，对于水资源评价的要求也不断提高。传统水资源评价方法在实践中暴露出来的问题也越来越突出，主要表现在以下几个方面：①单一的径流性水资源评价口径过于狭窄，难以全面反映水资源的多元有效性，如土壤水、积雪量等有效水资源未能反映出来；②人类活动的加剧，对依靠还原方法来实现天然水资源量的计算，难免会有一定的影响，还原结果容易失真；③分离评价模式难以适应水资源综合规划需求，如地表水和地下水的分离评价难以满足地表地下水联合调配实践需求；④分区集总式评价在水资源形成演化各要素的分布式特征描述方面存在一定的局限性，对于分布式水资源开发利用指导方面存在一定的局限性。⑤在地表水环境评价方面，以分离评价为基本模式，导致水量水质分离评价^{[73][74][75][76][77]}。因此，为了更科学的评价湟水流域水资源演变过程，同时也基于 SWAT 模型取得了较高的模拟精度，得到了验证的基础上，本文选用了该模型进行湟水流域水循环过程、土壤侵蚀过程和非点源污染过程进行模拟，对流域多元水循环过程的时空分布规律进行评价，对流域产沙和污染的空间分布特性进行评价，并分析流域径流、泥沙和非点源污染三者产生机制之间的关系，最后运用水质水量联合评价方法对流域的水资源进行综合评价。

5.2 流域水循环要素时空演变规律评价

5.2.1 流域水循环要素的时间演变规律分析

基于 SWAT 模型的水文循环原理，将降雨分解为冰川融雪和直接降雨，并将水量产出分为地表径流和地下径流，其中地表径流又包括了壤中流、融雪径流等。利用率定好的模型对 1980~2000 年湟水流域的水循环过程进行了计算（表 5-1），依据模型的物理意义，将降雨解析为多种水循环要素结构产出，对湟水流域近 20 年来的水资源演变过程进行分析。

由图 5-1 可以看到，从 1980~2000 年际变化过程来看，蒸发和径流均随着降水增大而增大，但是从相关性分析（图 5-2）来看，蒸发量与降雨量的相关性并不是很强，随降雨增加的比率小于径流。而蓄变量的变化则反映了流域丰水年土壤蓄水，枯水年耗水的客观规律。另外，分析这 20 年来，水循环要素的变化趋势，通过图 5-1 可以看到，降水、蒸发、径流随时间的相关性都很小，并没有构成趋势性变化过程。

表 5-1 湟水流域 1980~2000 年模拟水资源收支平衡过程

Table 5-1 Simulated water resource benefit-cost process in the 1980-2000 Huangshui watershed

年份	水量平衡要素 (mm/a)				径流构成要素 (mm/a)		
	降水	蒸发	径流	蓄变量	地表径流	地下径流	融雪产流
1980	397.1	271.5	91.2	-34.4	39.2	52	11.4
1981	544.6	388.6	175.7	19.7	94.6	81.1	15.1
1982	432.8	330.9	128.8	26.9	62.3	66.5	11.9
1983	530	371.5	184.1	25.6	98.3	85.8	15.8
1984	471.6	357.4	136.2	22	65.5	70.7	12.6
1985	566.6	386.6	141	-39	69.2	71.8	14.6
1986	496.2	365.1	145.3	14.2	65.4	79.9	13.2
1987	482.2	345.4	158.2	21.4	76.7	81.5	13.5
1988	617	368	237.3	-11.7	138.7	98.6	20.2
1989	591	353.9	228.9	-8.2	130.5	98.4	22.3
1990	462.5	337.4	123	-2.1	55.2	67.8	11.9
1991	356.4	254.5	77.2	-24.7	32.4	44.8	8.6
1992	585.3	426.5	160.7	1.9	82.1	78.6	12.7
1993	537.3	378.7	161.3	2.7	84.7	76.6	14.7
1994	523.3	422	119.1	17.8	56.9	62.2	10.9
1995	464.2	375.1	119	29.9	52.4	66.6	10.8
1996	462.7	340.9	114.5	-7.3	59.2	55.3	10.4
1997	497.5	382	128.3	12.8	62.6	65.7	12.9
1998	506.3	383	140.8	17.5	69.1	71.7	12.8
1999	494.5	385.6	119.5	10.6	59.4	60.1	11.8
2000	437.2	312.1	105.4	-19.7	47.4	58	10.5
平均	498.9	360.8	142.6	3.6	71.5	71.1	14.7

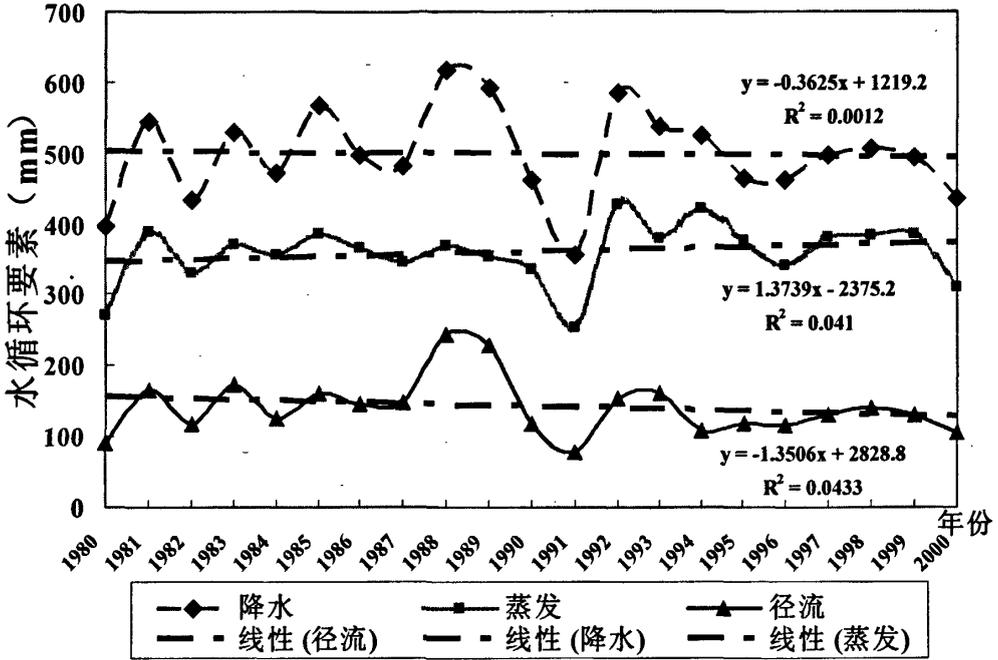


图 5-1 湟水流域年均降水、蒸发和径流的模拟变化过程线
 Fig.5-1 Simulation process of Average annual rain-fall, runoff, evaporation in Huangshui watershed

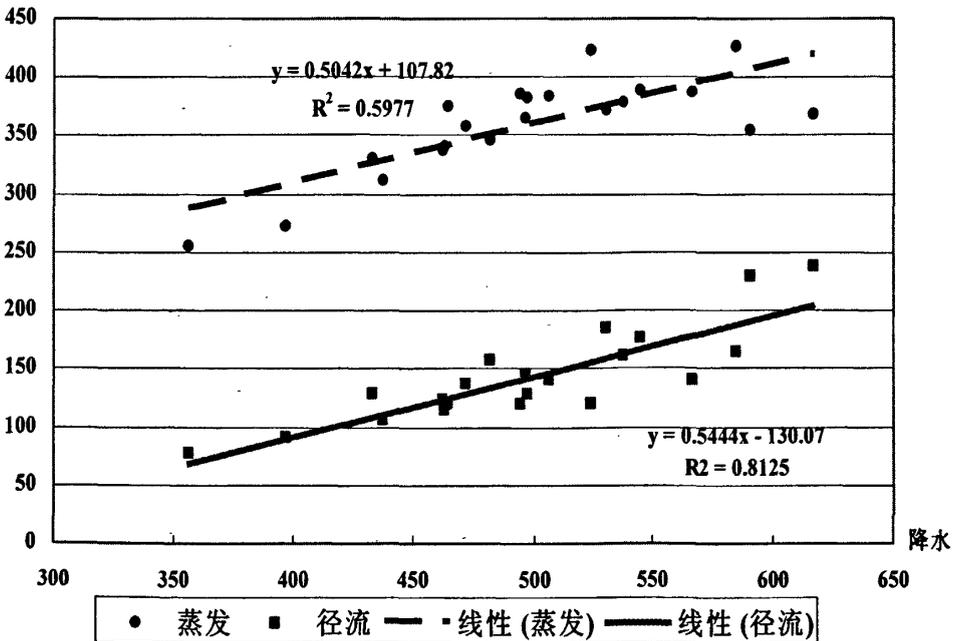


图 5-2 年均蒸发、年均径流与年均降水模拟值相关性分析图
 Fig.5-2 Correlation analysis Simulation process of Average annual rain-fall with runoff and evaporation

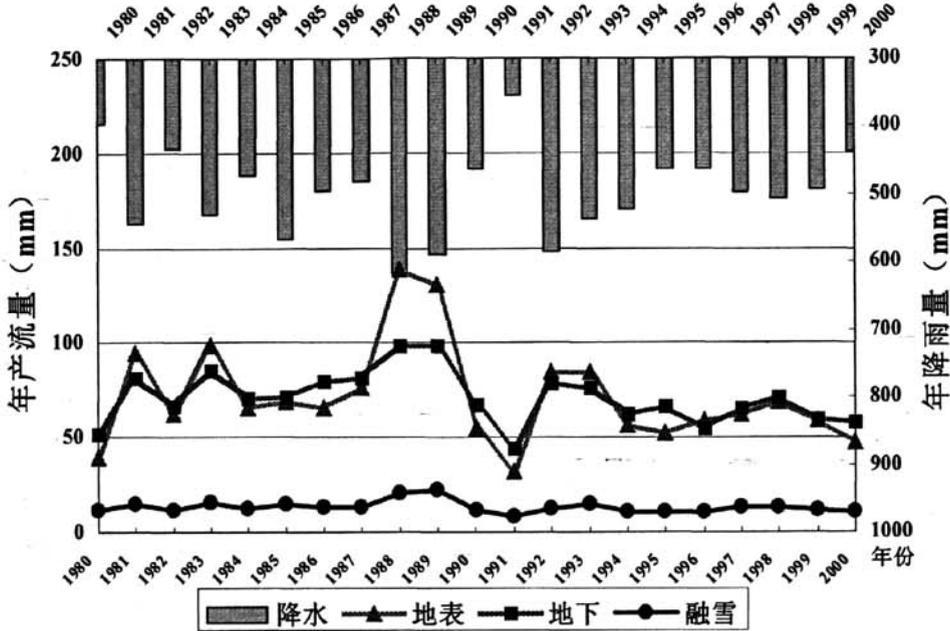


图 5-3 年地表产流、地下产流、融雪径流与年均降水的模拟变化过程

Fig.5-3 Simulation process of Annual surface runoff, groundwater runoff and snow melt runoff

图 5-3 表明，从与降雨的相关性来看，地表径流最大，其次是地下径流，最小为融雪产流，保持在一个稳定的值左右。从产流结构组成上看（图 5-4），在丰水年和较丰水年，天然河川径流主要由地表产流构成，在平水年，地表产流和地下产流持平，在枯水年和较枯水年天然河川径流构成以地下径流为主。

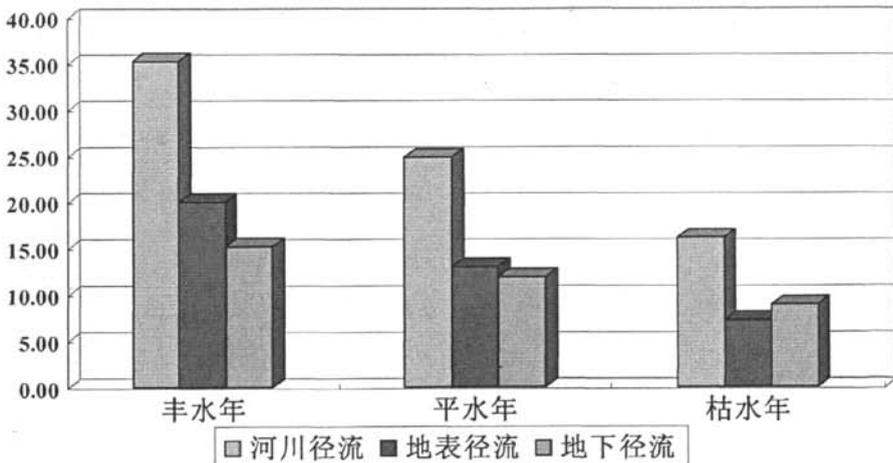


图 5-4 水平年河川径流产出结构分析

Fig.5-4 Construction analysis of river runoff

5.2.2 基于模型的流域水资源总量评价

本文利用 SWAT 模型对湟水流域水资源量评价的口径，与传统水资源评价口径一致，

即水资源总量等于地表水资源量与不重复的地下水资源之和。即以模型计算的天然径流量，代替依靠人工还原产生的流域天然径流量。由于湟水流域地处黄土高原丘陵沟壑区，水资源总量按单一山丘区类型计算，即：

$$W = R_m + Q_m - R_{gm} \quad (5.1)$$

式中：

R_m ：山丘区河川径流量；

Q_m ：山丘区地下水排泄量；

R_{gm} ：山丘区合川基流量。

其中， R_m 值取模型模拟的流域出口民和站年天然径流量； R_{gm} 按式 4.5 分区计算各子流域地下径流产出；并汇总计算民和站的年河川基流量； Q_m 取浅层地下水含量，在 SWAT 模型输出格式内表现为每个子流域计算时段内的浅层地下水入流量(GW_RCHG 在 .sbs 文件中)，即式 5.1 中的地下水排泄量。按照式 5.2 计算流域的浅层地下水排泄量：

$$GW_RCHG = \sum_{i=1}^n (GW_RCHG_i \times area_i) \quad (5.2)$$

需要注意的是，水资源量计算过程中，降水入渗补给的地下水排泄量中没有补给到地表水的那一部分，其最后排泄方式为潜水蒸发或人工开采。显然，这部分地下水最后只存在于平原区，因为山区的地下水大部分会转化为地表水，属于地下水与地表水的重复量即河川基流，少部分才会转化成平原区的地下水，而湟水流域主要位于黄土高原地区，湟水流域的不重复地下水主要分布于西宁盆地平原地区，所以在利用式 5.2 计算时，大部分子流域的不重复地下水值都很小，浅层地下水渗流几乎全部形成了基流补充河川径流。基于 SWAT 模型计算的 1980~2000 年水资源总量计算结果见表 5-2。

由表 5-2 可以看出，1980~2000 年近 20 年来，湟水流域民和出口端面年均天然径流量为 22.04 亿 m^3 ，年均不重复地下水资源量为 1.56 亿 m^3 ，水资源总量为 23.60 亿 m^3 。

5.2.3 流域水循环要素的空间特性分析

利用率定好的模型对 1980~2000 年内两个不同的水平年进行了计算，分别选取 1989 年（丰水年）和 1993 年（平水年）。通过模型计算每个子流域的年降雨量（mm）、年蒸发量（mm）、年融雪径流（mm）、年地表产流（mm）、年地下产流（mm）以及年总产流量（mm）。见图 5-5，5-6。

表 5-2 基于模型的湟水流域水资源总量评价 (单位: 亿立方米)

Table 5-2 water resource evaluate based on model

年份	河川径流量	河川基流量	浅层地下水补充量	不重复利用地下水量	水资源总量
1980	14.09	8.03	9.34	1.31	15.40
1981	27.15	12.53	14.51	1.98	29.13
1982	19.90	10.27	12.08	1.81	21.71
1983	28.44	13.26	14.47	1.21	29.66
1984	21.04	10.92	12.77	1.84	22.89
1985	21.78	11.09	13.02	1.92	23.71
1986	22.45	12.34	13.68	1.34	23.79
1987	24.44	12.59	13.81	1.21	25.66
1988	36.66	15.23	16.99	1.75	38.42
1989	35.37	15.20	16.41	1.21	36.57
1990	19.00	10.48	12.39	1.91	20.92
1991	11.93	6.92	8.69	1.77	13.70
1992	24.83	12.61	14.44	1.83	26.66
1993	24.92	11.37	13.06	1.68	26.60
1994	18.40	9.61	11.30	1.69	20.09
1995	18.39	10.29	12.10	1.81	20.19
1996	17.69	8.54	9.76	1.22	18.91
1997	19.82	10.15	11.16	1.01	20.83
1998	21.75	11.08	12.34	1.26	23.02
1999	18.46	9.29	10.25	0.96	19.43
2000	16.28	8.96	10.91	1.95	18.24
平均	22.04	10.99	12.55	1.56	23.60

由丰水年和平水年两个水平年各水循环要素产出空间分布图可以看到:

(1) 降水: 湟水流域降雨分布并不均匀, 从流域上游到下游, 降雨量逐步递减, 西宁以上的集水区域, 年降雨量(包括降雪量)占整个流域的70%以上, 尤其以大通地区为主, 年均降雨量达到800mm左右, 约占全流域的30%左右, 而下游普遍降雨偏少, 只有300mm左右。

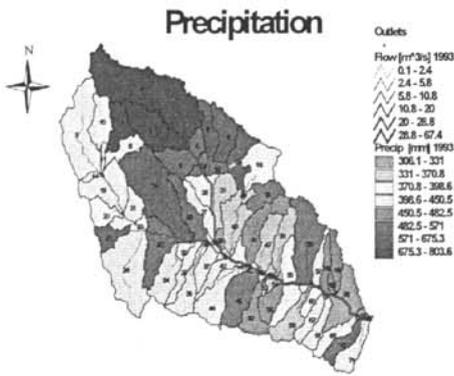


图 5-5a 子流域降雨量分布

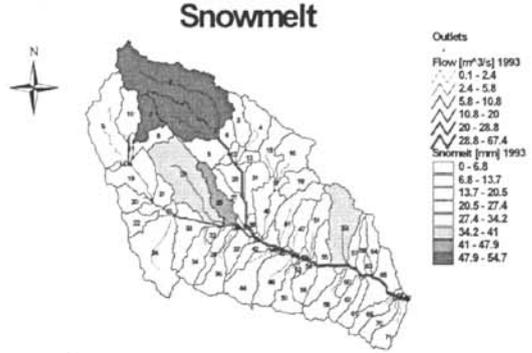


图 5-5b 子流域融雪径流分布

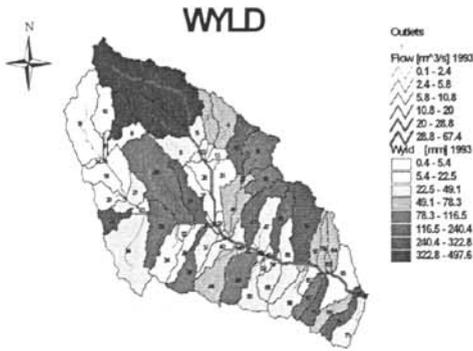


图 5-5c 子流域总产流分布

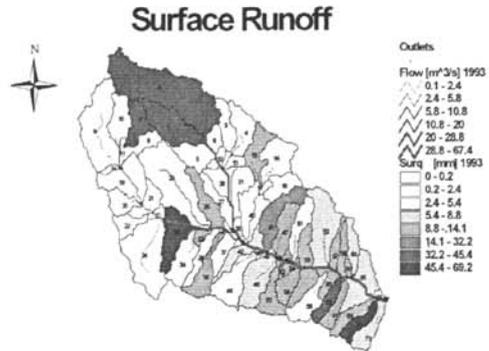


图 5-5d 子流域地表产流分布

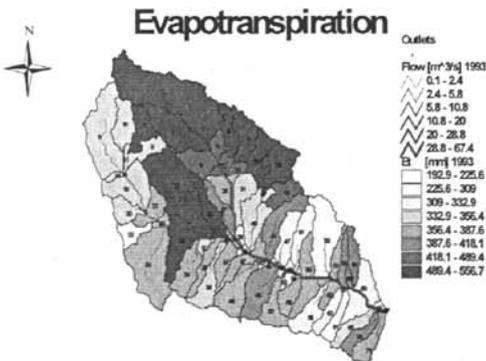


图 5-5e 子流域实际蒸散发分布

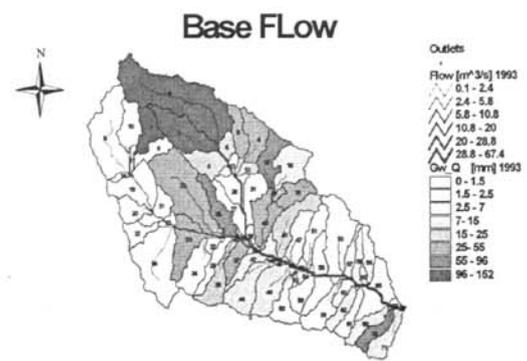


图 5-5f 子流域地下产流分布

图 5-5 湟水流域平水年 (1993 年) 水循环要素产出空间分布图

Fig.5-5 distribution of water cycle in 1993 Huangshui watershed

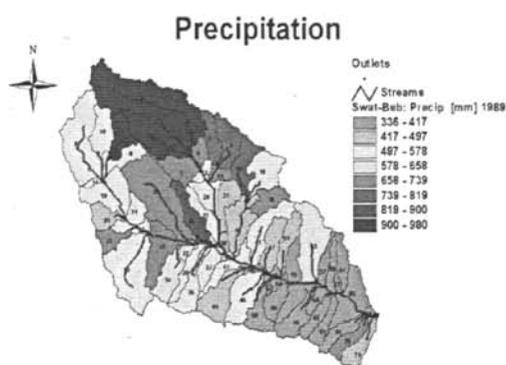


图 5-6a 子流域降雨量分布

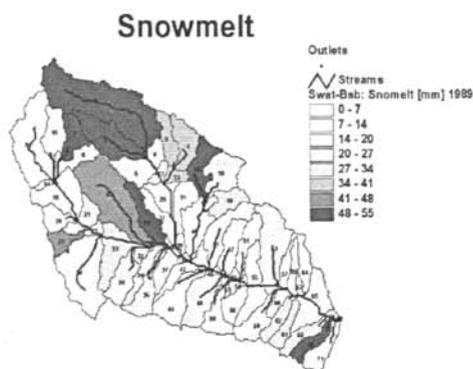


图 5-6b 子流域融雪径流分布

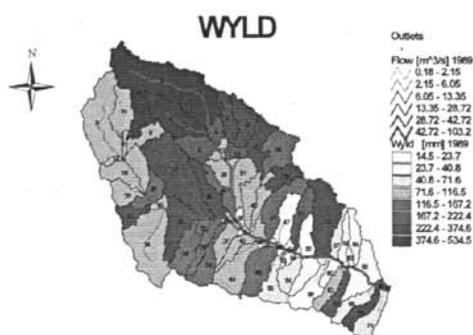


图 5-6c 子流域总产流分布

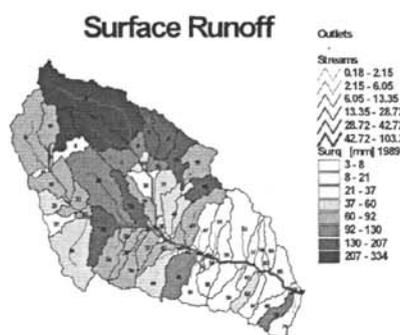


图 5-6d 子流域地表产流分布

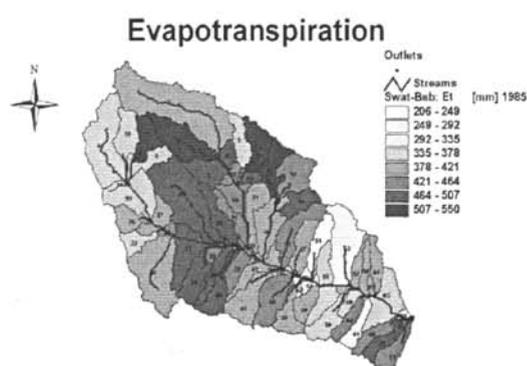


图 5-6e 子流域实际蒸散发分布

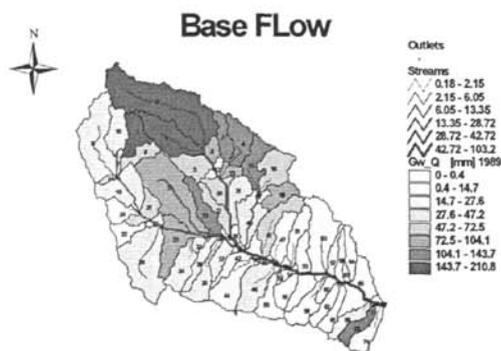


图 5-6f 子流域地下产流分布

图 5-6 湟水流域丰水年（1989 年）水循环要素产出空间分布图

Fig.5-6 distribution of water cycle in 1989 Huangshui watershed

(2) 产流：湟水流域产流受降雨分布的影响，在空间分布上与降雨分布基本一致，西宁以上的集水区域，年产流总量（包括融雪径流）占整个流域的 65% 左右。

(3) 蒸发：湟水流域的主要蒸发带，位于流域中上游地区，主要集中在湟中、西宁和大通、互助地区一带，由于受高原太阳辐射强、干旱少雨的影响，年实际蒸发量很大，约占年均降雨量的 70% 以上。

5.3 流域土壤侵蚀与非点源污染综合评价

5.3.1 土壤侵蚀与非点源污染负荷时间特性分析

利用率定好的模型对 1993 年（平水年）、1989 年（丰水年）两个水平年进行了月系列模拟计算，每年的逐月平均流量、泥沙量及非点源污染负荷量见表 5-3、5-4。图 5-8 则表示了各水平年内逐月泥沙和非点源污染物随流量的变化过程。图 5-7 表示了土壤侵蚀与污染负荷各指标月内值占全年总值的百分比，计算结果为两个水平年的平均结果。

表 5-3 丰水年 1989 年逐月计算结果

Table 5-3 monthly calculation in 1989

月份	流量(m ³ /s)	泥沙量 (tons)	ORG_N(kg)	NO ₃ _N(kg)	NH ₄ _N(kg)	NO ₂ _N(kg)	ORG_P(kg)
1	22.4	1204	450	2769	1596	14	81
2	25.4	1543	528	2475	1986	12	95
3	28.0	30234	26480	124099	44156	620	6389
4	95.9	1489034	754517	349254	118245	1935	44671
5	140.2	1520345	1360173	448751	192917	4441	68416
6	134.0	1800345	1561957	594879	164960	4712	188021
7	174.0	4509043	5656278	1952713	776357	16291	1068744
8	192.3	1823434	657667	531533	76307	1658	99460
9	142.3	850345	215173	85035	17007	425	25510
10	136.3	350345	56782	23356	4671	117	7007
11	107.1	7845	5780	3853	1070	58	347
12	67.5	3215	2394	1596	819	24	144
总量	105.4	12386933	10298178	4120314	1400090	30306	1508884

表 5-4 平水年 1993 年逐月计算结果
Table 5-4 monthly calculation in 1993

月份	流量 (m ³ /s)	泥沙量 (tons)	ORG_N (kg)	NO ₃ _N (kg)	NH ₄ _N (kg)	NO ₂ _N (kg)	ORG_P (kg)
1	31.2	2141	898	4278	1596	21	121
2	27.6	4152	1276	5176	1986	26	157
3	29.9	46183	54750	94876	20491	474	4512
4	89.6	175038	155487	227894	65579	3279	9329
5	93.3	902729	564578	184789	96197	5772	13847
6	108.6	2286656	1805879	329527	143176	7943	216705
7	124.3	4979076	6081547	1250187	775094	17102	729786
8	147.9	1042697	407667	257976	91595	605	48920
9	82.9	122645	58925	52896	8100	78	3536
10	126.5	203903	159875	13323	2665	134	4796
11	50.0	18830	6249	3125	860	52	375
12	26.8	5622	3247	1624	819	28	195
总量	77.4	9789672	9300378	2425670	1208157	35514	1032279

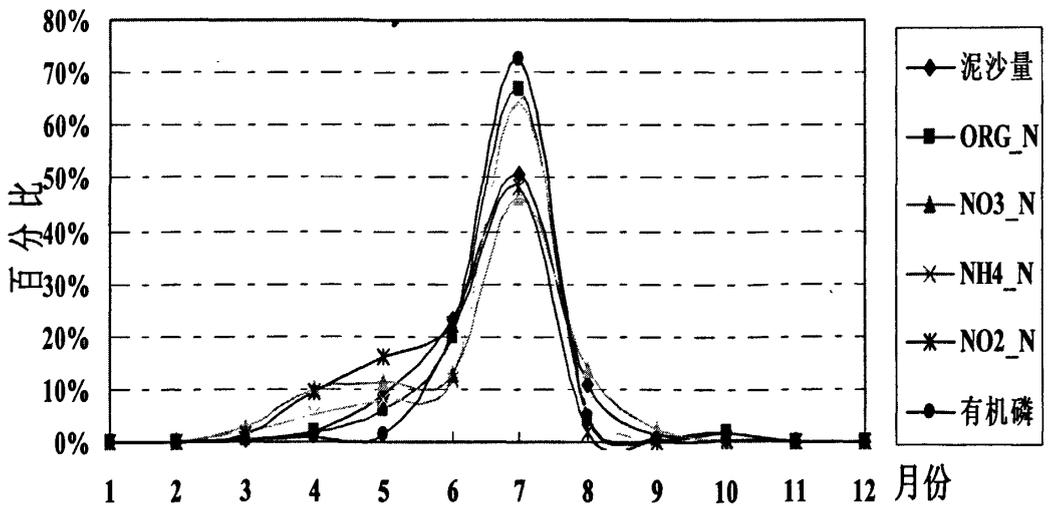


图 5-7 土壤侵蚀与非点源污染负荷量月内值占全年总值比例图
Fig.5-7 Proportion of soil erosion and non-point pollution

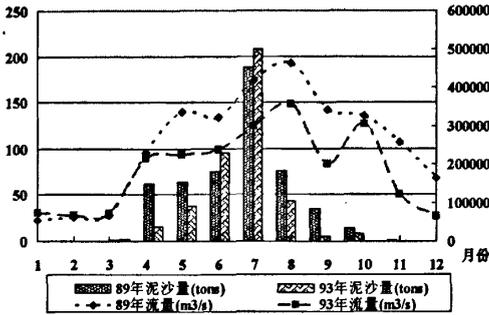


图 5-8a 水平年逐月流量和泥沙量

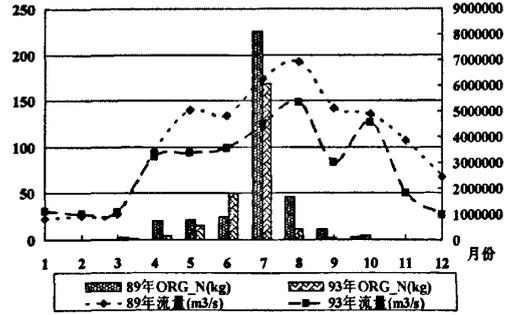


图 5-8b 水平年逐月流量和有机氮负荷量

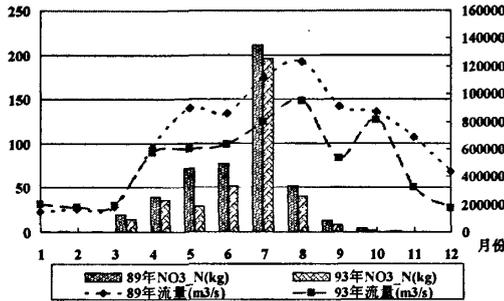


图 5-8c 水平年逐月流量和硝酸盐氮负荷量

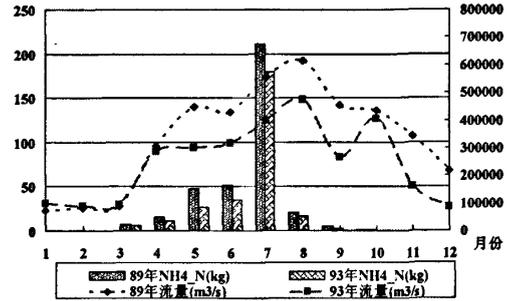


图 5-8d 水平年逐月流量和氨氮负荷量

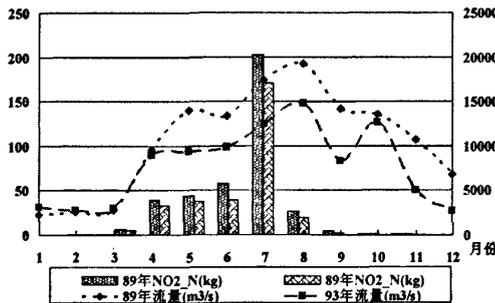


图 5-8e 水平年逐月流量和亚硝酸盐氮负荷量

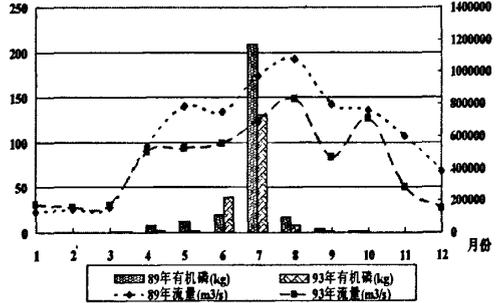


图 5-8f 水平年逐月流量和有机磷负荷量

图 5-8 水平年土壤侵蚀与非点源污染负荷量随流量变化过程图

Fig.5-8 Process of soil erosion and non-point pollution with flow

非点源污染物的产生往往是伴随着降雨径流过程特别是暴雨过程产生的,所以非点源污染负荷主要集中在汛期产生。从以上图表中可以看出,在湟水流域内,土壤侵蚀和非点源污染负荷时间分布特性有以下几点:

(1)从图 5-8 看到,湟水流域的汛期为 6~10 月份,其中最主要的降雨过程集中在 7、8 月份,相应地这两个月份的产流量也最大;尤其是 7 月份,平水年和丰水年的泥沙量都达到了峰值,各项非点源污染负荷量也是在 7 月份达到了峰值。

(2)但是从图 5-7 可以看到,针对不同的非点源污染负荷指标的时间分布特性并不完全相同。其中有机氮、氨氮和有机磷的 60%~75% 以上集中在 7 月份。比较泥沙量和非点源

污染负荷过程会发现,这三项指标在7月份的产出比例是高于泥沙量所占全年比例(50%)的。这主要是因为有机氮和有机磷主要是附着在泥沙颗粒上进行输移的,在7月份,暴雨相对集中,流域产沙能力达到峰值,汛期输沙量和有机氮与有机磷污染负荷存在明显的指数相关关系,同时,由于氨氮的产生与有机氮的矿化和泥沙中的氮的扩散相关性很强,那么在泥沙和有机氮产出最多的月份,氨氮的产出也是达到了峰值,故以上三项指标产出比例极高。

(3)相对于有机氮、氨氮和有机磷的集中产出不同,硝酸氮和亚硝酸氮只有40%左右集中在7月份,因为硝酸氮和亚硝酸氮主要是溶解于径流中进行营养物质的输移,只要有径流,就有硝酸氮物质的溶解和输移过程,由于流域3月份就有较大量的融雪径流产生,所以,也造成了硝酸氮较早的流失。

(4)同时还可以从图5-7中看到,在7月份过后,各项非点源污染负荷及泥沙相对水量的比例都会明显下降,但非点源污染负荷下降的比例更多,这说明经过汛期较强的暴雨径流过程后,土壤中的养分含量大大降低了,由此可见湟水流域暴雨所产生的土壤侵蚀与营养物质流失问题十分严重。

5.3.2 流域土壤侵蚀和非点源污染空间特性分析

利用率定好的模型对1980~2000年内两个水平年进行了计算,分别选取1989年(丰水年)和1993年(平水年),通过模型计算每个子流域的年均输沙模数(t/ha)。图5-9表示了水平年内各子流域的每公顷产沙量空间分布,图5-10表示了平水年各子流域非点源污染负荷量空间分布,表5-5表示了流域西宁以上集水区与下游集水区的产沙量对比。

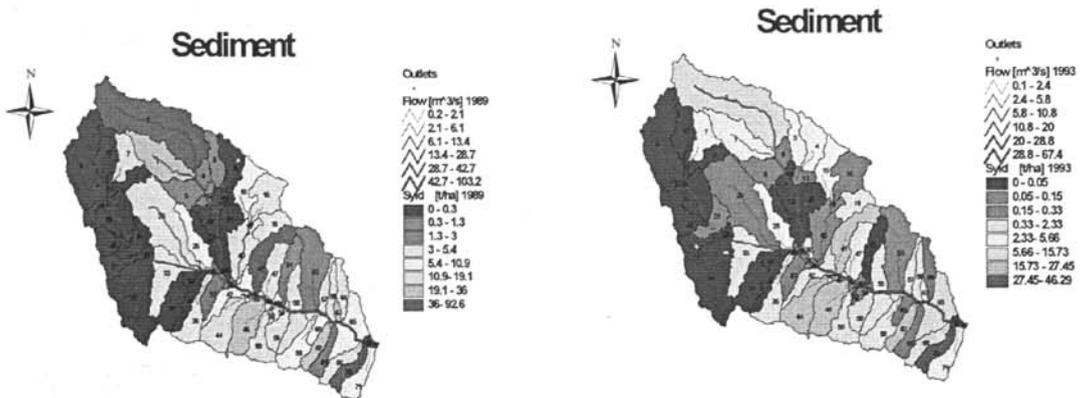


图 5-9a 丰水年子流域土壤侵蚀空间分布

图 5-9b 平水年子流域土壤侵蚀空间分布

图 5-9 水平年子流域土壤侵蚀空间分布

Fig.5-9 Distribution of soil erosion in 1993 sub-basin

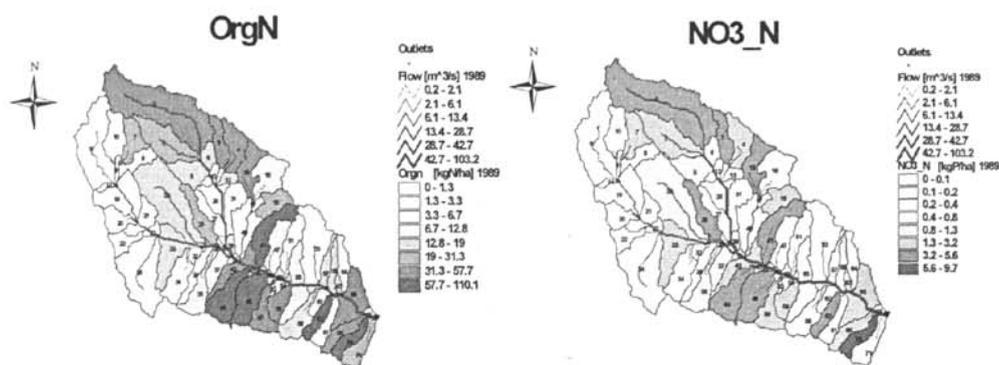


图 5-10a 丰水年子流域有机氮产出空间分布 图 5-10b 丰水年子流域硝酸盐氮产出空间分布

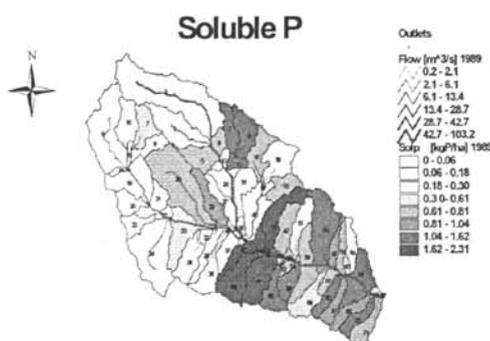


图 5-10c 丰水年子流域可溶性磷产出空间分布

图 5-10 丰水年子流域非点源污染负荷量空间分布

Fig.5-10 Distribution of soil erosion in 1993 sub-basin

由图 5-9 可以看到, 丰水年和平水年, 子流域土壤侵蚀程度空间分布状况比较一致, 流域西宁站以上的集水区域, 土地利用类型主要是 FRST (林地) 和 RNGE (高覆盖度草地), 湟水流域 80% 以上的林地集中在该区域, 土壤类型以高山草甸土和黑钙土为主, 属于粘性土壤, 抗侵蚀性很强。因此除了大通县所包括的 1、2、7 子流域的土壤侵蚀模数相对较大, 其他子流域土壤侵蚀模数都很小, 平水年整个集水区域的年输沙量仅占湟水流域的 30% 左右; 而西宁站以下, 民和站以上的集水区域, 土地利用类型主要以 RNGB (中覆盖度草地)、SWRN (低覆盖度草地) 以及部分农田 WWHT (小麦) 为主, 土壤以栗钙土和淋溶性灰钙土为主, 该土壤类型的抗侵蚀性很差, 所以下游大部分子流域输沙模数都很高, 在丰水年, 部分子流域的输沙模数高达 100t/ha, 平水年该集水区域的年输沙量约占湟水流域的 70% 左右。

由表 5-5 可以看到, 由于平水年和丰水年降雨在西宁以下区域变化并不显著, 所以该区域的平均输沙模数在两个年份相差不大, 但是由于在丰水年时期, 西宁以上区域, 降雨比平水年明显增加, 暴雨增多, 造成土壤侵蚀程度显著超过平水年。

表 5-5 湟水流域西宁以上集水区与下游集水区输沙模数对比
Table 5-5 Catchment sediment load up and down Xingnin station

集水区域	面积 (km ²)	平均输沙模数 (t/km ²)		年输沙量 (万 t)	
		1989 年	1993 年	1989 年	1993 年
西宁以上	9022	545	267	492	241
西宁到民和	6598	967	948	638	625

综合图 5-9 和 5-10 来看, 流域的非点源污染负荷的空间产出分布规律如下:

(1) 有机氮的产出和土壤中的有机氮含量、土壤的可侵蚀性及雨强有关。对比图 5-9a、图 5-10a 和图 4-2b 可以发现, 有机氮产出较大的地区, 与有较高初始有机氮含量的地区和高泥沙量产出的地区大致相同。湟水干流在流出西宁之后, 进入下游各县境内, 由于下游区域泥沙量的高产出, 导致河道内有机氮含量迅速增高, 并一直持续到民和站。

(2) 耕地的硝酸盐氮由于施肥等原因, 含量较高, 因此耕地比例较高的子流域硝酸盐氮产出量较大。湟水流域上游湟源、以及下游平安、互助、乐都以及民和等县由于每年都对农田施用一定的尿素, 约和 25kg/亩, 所以该区域的硝酸盐氮产出较大, 与硝酸盐氮类似, 氨氮的产出也类似图 5-10b。

(3) 流域磷的产出, 分为有机磷和无机磷。磷和氮相比, 它的可溶性是有限的, 磷和其他的一些离子往往形成一些不能溶解的化合物。这样就在土壤表层形成了一层容易被地表径流冲走的磷。所以可溶性磷的产出主要依靠耕地施肥, 耕地产出的可溶性磷占整个研究区总产出的 90%以上, 所以耕地面积比例较高的地区可溶性磷的产出较高。湟水流域主要施用的磷肥为磷酸二氢, 主要施用区域为湟水中下游的平安、乐都、民和等县的小麦和玉米种植区域, 见图 5-10c。

5.3.3 下垫面对流域土壤侵蚀及非点源污染负荷分析

不同土地利用有着不同的产出特性, 这不仅因为它们本身特性的区别, 而且和它们在流域中的分布也有很大的关系, 每种土地利用往往和某种地形或某种特定的土壤类型相联系, 在重新划分 HRU 之后, 基于不同土地利用和土壤属性组合在研究区平均坡度见表 5-7, 可以看出 FRST (林地) RNGB (山区中密度灌木林地) 和 RNGE (山地中低密度草丛) 的坡度较高, SWRN (低地中低密度草甸) 次之, CORN (玉米) 和 WWHT (小麦) 的坡度较小。

在 SWAT 模型中利用土地利用和土壤类型组合成水文响应单元 (HRU) 作为计算单元, 在划分水文响应单元的过程中不同土地利用和土壤类型的比例发生了变化 (见第二章分析), 因此在 SWAT 模型中利用的各土地利用比例和实际土地利用 GIS 数据中的比例是不同的。

表 5-6 主要土地利用类型的平均坡度
Table 5-6 Mean slope of main soil utilization

土地利用类型	RNGB	SWRN	FRST	RNGE	WWHT	CORN
百分比 (%)	32.35	22.37	18.05	10.52	8.65	8.09
坡度 (度)	14.4	11.5	17.8	13.6	5.2	3.8

在以年为时间单位的计算中, 每个水文响应单元产流、产沙计算结果输出到. sbs 文件中, 这样可以统计以上不同土地利用类型的产出比例, 并进行比较。不同类型的土地利用上各种产出量占流域总产出的比例见表 5-7、5-8 和图 5-11, 5-12, 计算结果取 1980~2000 年系列计算结果的平均值。

表 5-7 不同下垫面水循环要素产出百分比
Table 5-7 Percentage water cycle under differ underlying surface

土地利用	面积	地表径流	地下径流	总产流
RNGB	32.35%	23.34%	27.34%	25.19%
SWRN	22.37%	15.78%	19.45%	17.35%
FRST	18.05%	31.49%	24.59%	28.75%
RNGE	10.52%	13.52%	14.97%	14.28%
WWHT	8.65%	8.24%	7.14%	7.57%
CORN	8.09%	7.64%	6.58%	6.89%

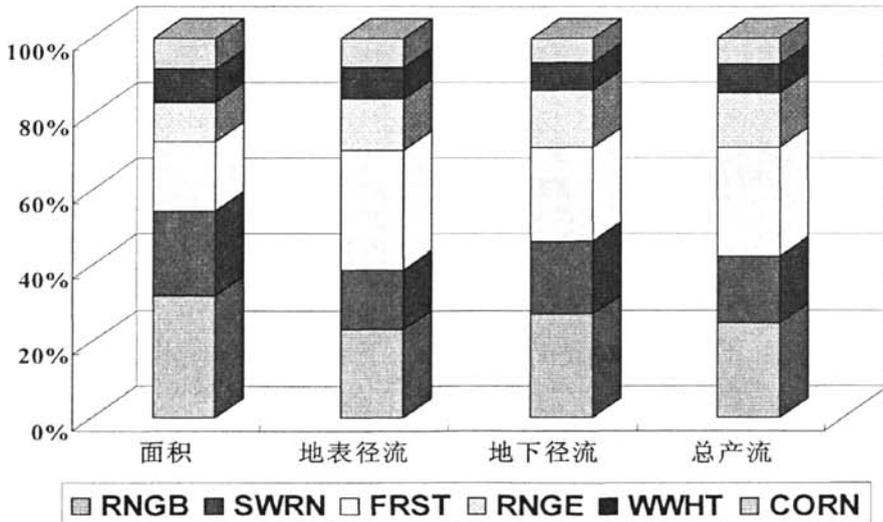


图 5-11 不同下垫面水循环要素产出比例比较

Fig.5-11 Proportion of water cycle under differ underlying surface

由图 5-11 可以看到, 不同下垫面水循环要素产出机制是不一样的, CORN (玉米) 和 WWHT (小麦) 两种农作物的地表径流和基流产出比例变化较小, 均与所占的面积比例比较

一致，但是 FRST（林地）面积只占整个流域的 18.05%，而总产流量占到全流域的 29% 左右，其中地表产流占全流域的 32% 之多，而占全流域面积 60% 的 RNGB 与 SWRN（中低覆盖度草地）产流量只有全流域的 42%。这主要是因为，FRST 和 SWRN 主要集中在湟水流域的上游，靠近流域边界的高海拔山地，包括大通、湟源、海晏的大部分地区，该区域降雨量最为丰富，每年有冰川融雪补充径流，而且由于下垫面主要以 FRST（林地）和 RNGE（高覆盖度草地）为主，土壤层蓄水能力好，参看表 4-3，CN 值也比较高，使得地表产流偏多。

表 5-8 不同下垫面土壤侵蚀与非点源污染负荷产出百分比

Table 5-8 percentage of soil erosion and non-point pollution under differ underlying surface

土地利用	总产流	产沙量	有机氮	硝酸盐氮	可溶性磷
RNGB	25.19%	30.18%	32.27%	16.47%	1.50%
SWRN	17.35%	41.53%	39.48%	14.28%	2.47%
FRST	28.75%	6.42%	9.54%	21.65%	4.89%
RNGE	14.28%	8.87%	9.54%	9.01%	2.41%
WWHT	7.57%	6.47%	4.75%	18.79%	46.59%
CORN	6.89%	6.89%	4.39%	19.80%	42.21%

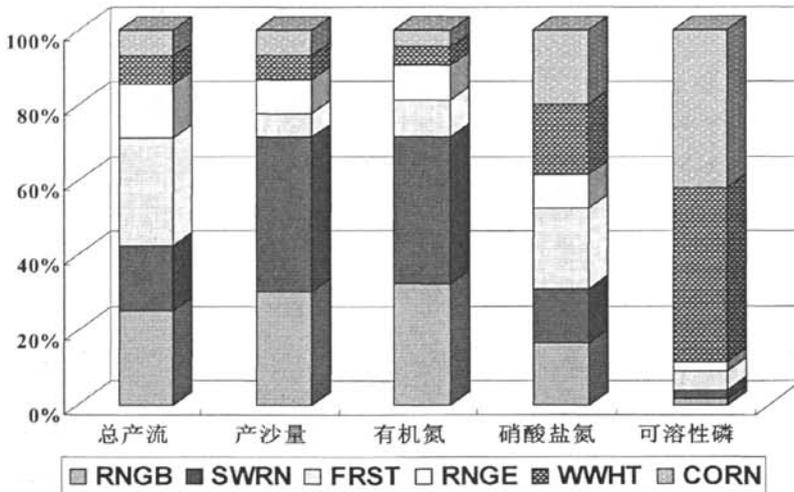


图 5-12 不同下垫面土壤侵蚀与非点源污染负荷产出比例比较

Fig.5-12 Proportion of soil erosion and non-point pollution under differ underlying surface

由图 5-12 可以看到，不同下垫面土壤侵蚀与非点源污染负荷产出机制也是不一样的，RNGB 和 SWRN（中低覆盖度草地）主要集中在湟水流域中下游的互助、平安、乐都、民和四县，虽然该区域降雨量仅占整个流域的 35%，产流量仅占全流域的 42%，可是由于下垫面土壤类型以淋溶性灰钙土、淋溶性灰褐土以及粗质栗钙土为主，抗侵蚀性都很低，土

壤的平均侵蚀模数达到了 20t/ha, 是上游区域的 4 倍以上。有的地方甚至达到了 100t/ha 以上。所以即使在降雨强度较低的情况下, 对地表土壤层的侵蚀作用也很明显, 总的产沙量达到了全流域的 72%, 从而造成了湟水流域大量的泥沙问题。有机氮、固相磷的产出和土壤中的有机质含量、土壤的可侵蚀性及雨强有关, 它们主要是附着于泥沙颗粒进行输移, 所以有机氮产出较大的地区, 与有较高初始有机氮含量的地区和高泥沙量产出的地区大致相同。RNGB 和 SWRN 丛因为坡度相对较高, 覆盖较低, 单位面积的产沙量较高, 相应有机氮和固相磷的贡献比较高。耕地的硝酸盐氮、可溶性磷等由于施肥等原因, 含量较高, 因此耕地比例较高的子流域产出量较大。耕地(主要是小麦和玉米)面积只有 20%多, 硝酸盐氮和可溶性磷的贡献比例分别为 40%和 90%以上。

5.4 湟水流域水量水质综合评价

5.4.1 现状水环境评价

湟水流域现状水资源评价是该研究依据《地面水环境质量标准》(GB3838-88)、《污水综合排放标准》(GB 8978-88), 采用单因子评价法, 以单项参数的最高类别作为定级依据, 对该流域 1990-1995 年的水质状况进行评价。干流属 I、II 类水质的河长占评价河长的 47.8%; 属 IV 类水质的河长占评价河长的 31.4%; 支流北川河, 属 III 类水质; 支流沙塘川, 属 IV 类水质。I、II 类水质均在石崖庄断面以上, 其中绝大部分处在人口稀少和工农业用水需求量少的海晏县、湟源两县, IV、V 类水质主要分布在社会经济发达, 人口密集的中游和下游地区, 即西宁市和大通、平安、乐都及民和四县。

但是这种水环境评价方法, 还是沿用的水质水量分离评价方法, 其中地表水质评价中, 通常采用代表河长法来表征河流水质状况。由于忽略了河流流量的大小, 客观上造成了干流污染 10km 和小支流污染 10km 的评价效果一样, 这显然是不符合科学评价要求的。为了在评价结果中综合反映河流水量与相对应水质的综合贡献, 本文拟选取西宁和民和两个水文断面, 进行湟水流域的水质水量联合评价。

5.4.2 模型的水量水质联合评价

水资源质量数量联合评价的主要困难在于, 如何将水量的连续变化过程与水质的迁移过程和河流湖泊的自净过程有机的结合起来。本文采用了分布式水文模型 SWAT, 该模型较好的耦合了流域水文循环过程、土壤侵蚀过程、泥沙输移过程以及污染物迁移转化模型, 有效的解决了水量的连续变化和伴生水质演变过程的统一问题。适用于对湟水流域水量水质联合评价。

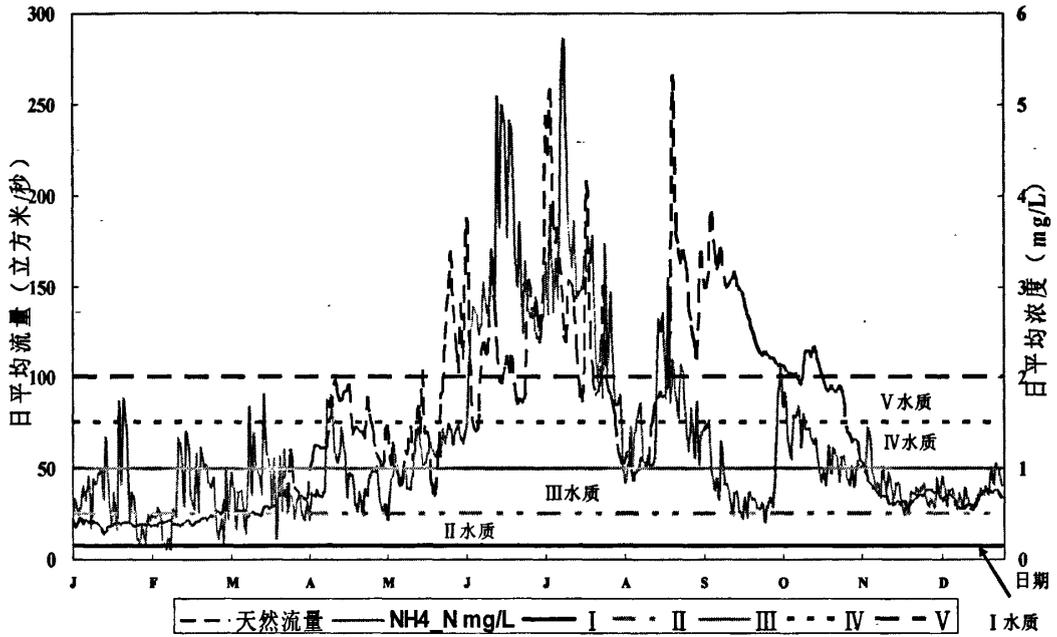


图 5-13a 湟水流域民和站日平均流量与日 NH₄_N 平均浓度变化过程

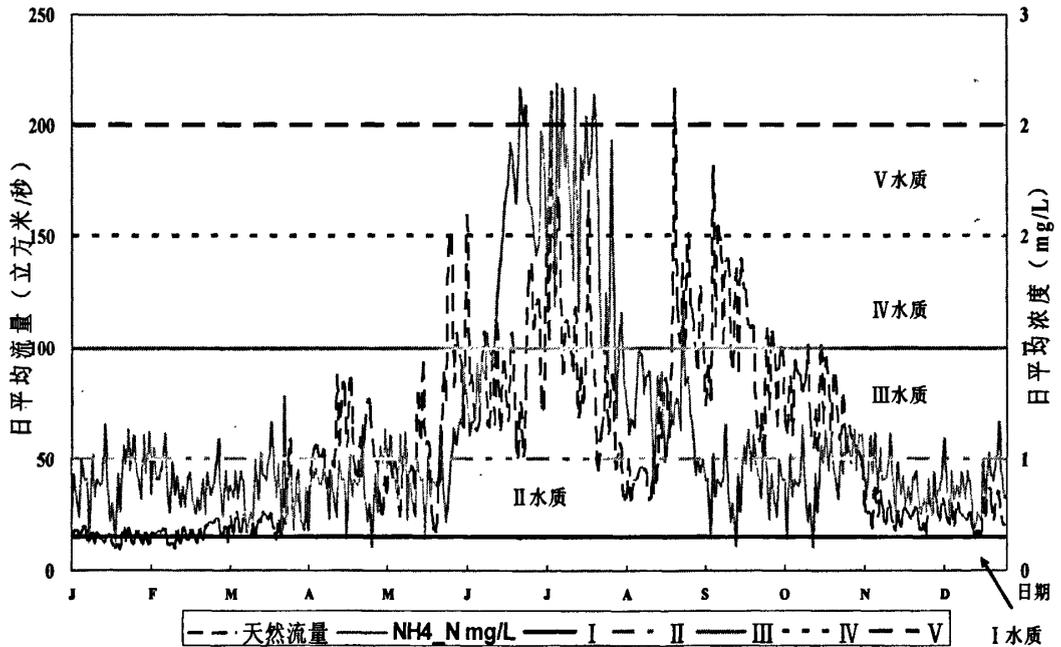


图 5-13b 湟水流域西宁站日平均流量与日 NH₄_N 平均浓度变化过程

图 5-13 湟水流域逐日 NH₄_N 污染指标随流量变化过程

Fig.5-13 Daily process NH₄_N pollution index and flow

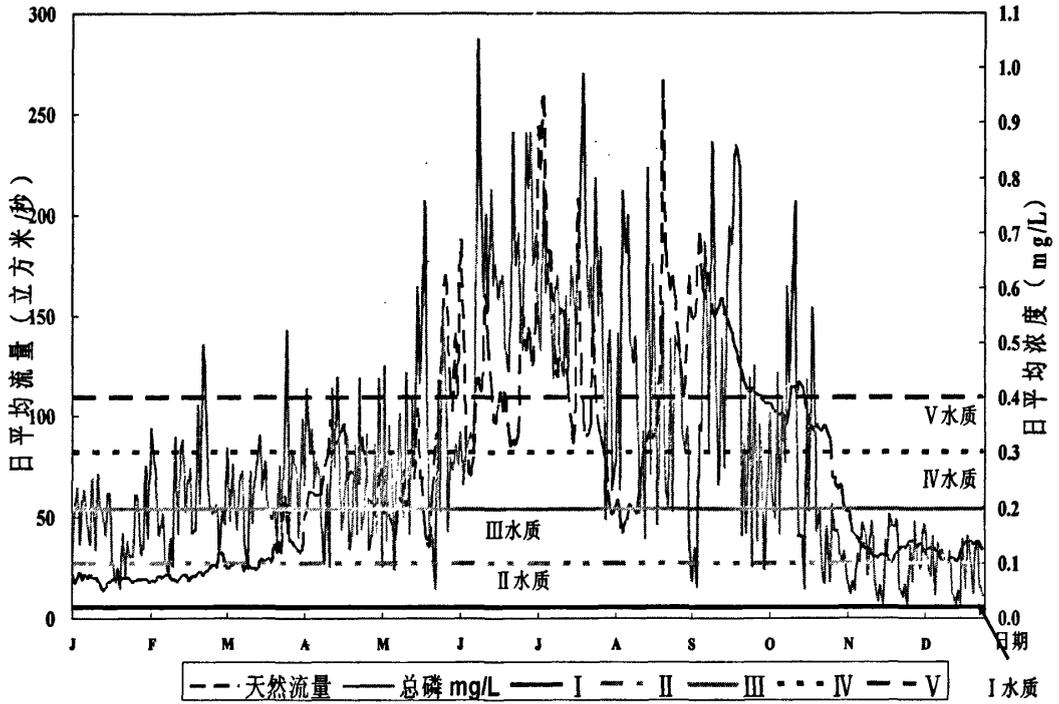


图 5-14a 湟水流域民和站日平均流量与日总磷平均浓度变化过程

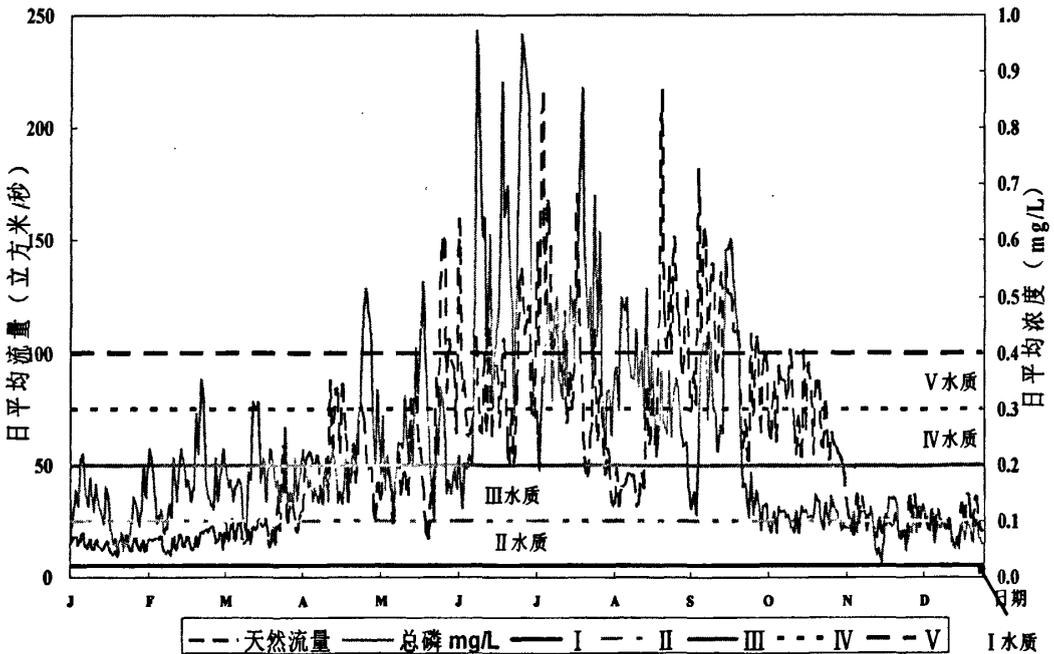


图 5-14b 湟水流域西宁站日平均流量与日总磷平均浓度变化过程

图 5-14 湟水流域逐日总磷污染指标随流量变化过程

Fig.5-14 Daily process of P polluting and flow

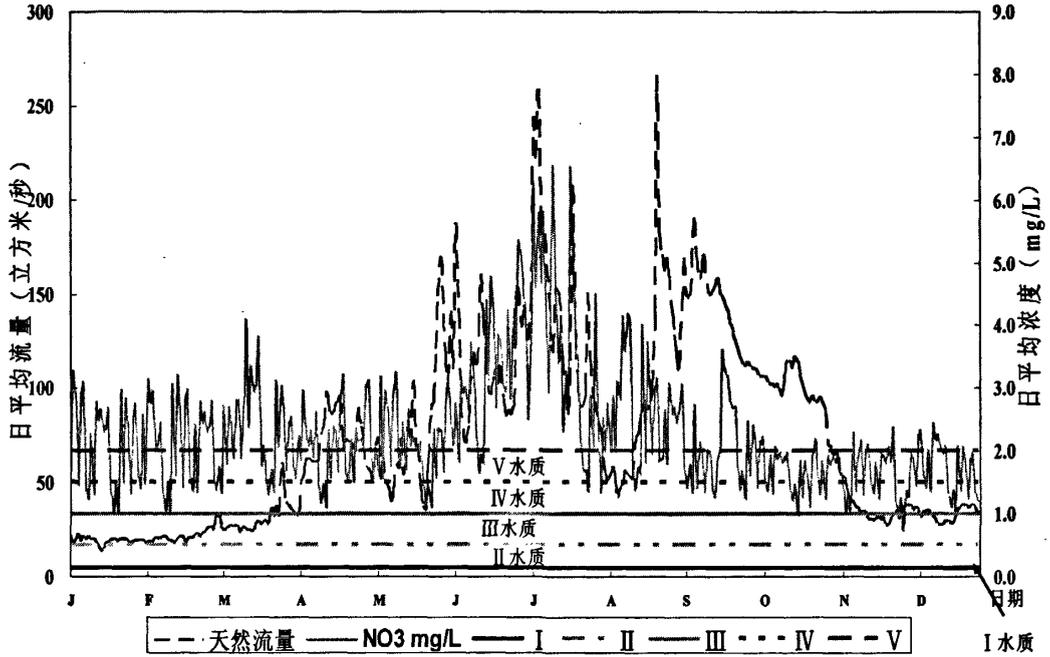


图 5-15a 湟水流域民和站日平均流量与日 NO₃-N 平均浓度变化过程

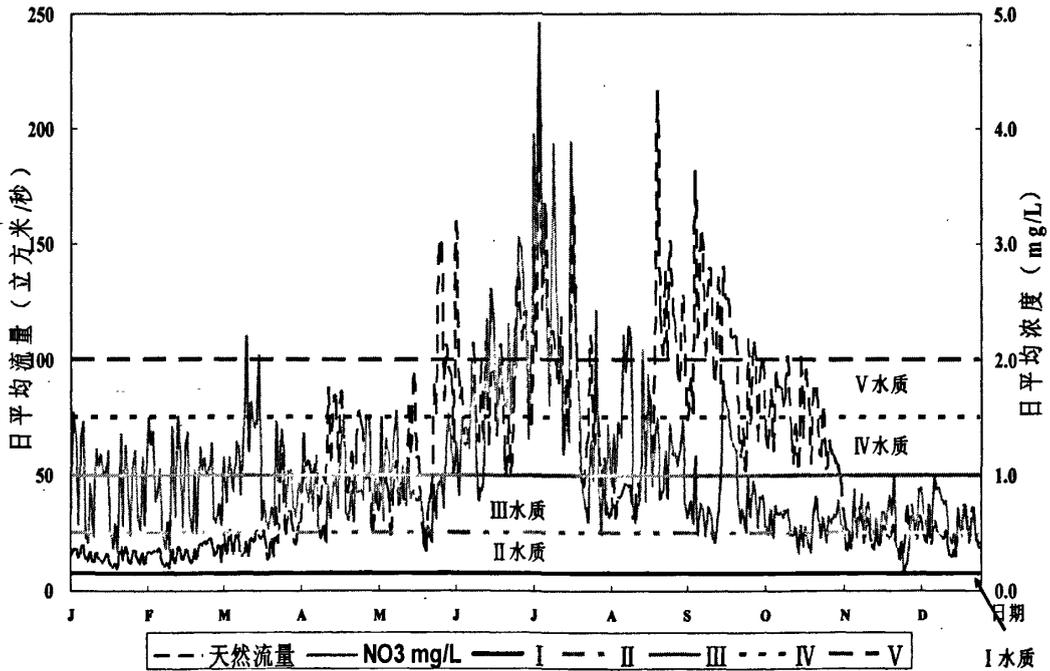


图 5-15b 湟水流域西宁站日平均流量与日 NO₃-N 平均浓度变化过程

图 5-15 湟水流域逐日硝酸盐氮污染指标随流量变化过程

Fig.5-15 Daily process of NO₃-N polluting and flow

在本文的研究过程中，由于对湟水流域某些种类的点源污染物排放数据的缺乏，造

成几种重要污染物指标的模拟结果的不完整,如挥发酚和重金属污染物指标的缺乏。鉴于本文着重于在引入分布式水文模型对流域水质水量的综合评价方面进行探讨,故在选取水环境评价指标时,主要从湟水流域主要污染物中选取了本次研究所能模拟计算的污染物指标作为流域水环境评价指标,包括氨氮(NH₄_N)、总磷和硝酸盐氮(NO₃_N)。由于SWAT模型是一个综合性模型,对点源污染物的排放和输移过程也能模拟,本文将在以后的研究中,将点源污染数据耦合到模型中,进行水质的综合评价。本文利用率定好的SWAT模型对1998年进行了日系列模拟计算,逐日平均流量及水质评价指标浓度见图5-13、5-14、5-15。

由上述三图可以看到,从逐日变化过程来看,各污染物指标主要在汛期达到最大负荷值。从断面水质(参考国家地表水环境质量标准,表5-9)来看,西宁以上流域水环境状况较好,在非汛期,水质基本能达到II、III级水质标准;但是在民和站,非汛期水质基本上只能达到III、IV级水质标准。

表5-9 地表水环境质量标准(单位:mg/L)
Table 5-9 Criterion of surface water environment quality

污染物名称	水质级别				
	I	II	III	IV	V
NH ₄ _N	0~0.15	0.15~0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0
总磷	0~0.02	0.02~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4
NO ₃ _N	0~0.2	0.2~0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0

利用本文所提出的流域水质水量综合评价方法,对湟水流域进行水环境状况进行评价。采用单因子评价法,以每日三项污染物指标内单项参数的最高水质类别作为定级依据,对该流域1998年的水质状况进行评价。结果见表5-10。

表5-10 1998年湟水流域主要断面水质水量联合评价结果(单位:亿立方米)
Table 5-10 Evaluate of water quality and water volume main section 1998

流域断面	过水量	I	II	III	IV	V	劣V类
西宁	11.20	0.00	2.31	2.48	3.12	1.65	1.64
	百分比	0%	20.6%	22.1%	27.9%	14.7%	14.6%
民和	17.20	0.00	1.22	2.04	4.78	5.21	4.95
	百分比	0.0%	4.2%	9.0%	27.8%	30.3%	28.8%

由表5-10可以看到,利用水质水量联合评价的结果得到的I类、II类、III类水的比例较单纯使用河长评价法评价结果由不同程度的减少,尤其以II类水的差别最大,IV类、V类以及劣V类水的评价结果都明显的增加,这表明湟水流域的污染状况非常严重,仅仅以代表性河长评价结果没有考虑到水质与水量相结合的过程,在某种程度上掩盖了湟水流

域水环境恶化的严重性,不能满足对湟水流域水资源污染程度的正确评价。同时从断面评价结果来看,西宁以上水质大部分上是Ⅱ、Ⅲ类水,西宁以下、民和以上基本上全都是Ⅳ类、Ⅴ类以及劣Ⅴ类水,表明湟水流域西宁到民和段,受集中污染的影响,导致河道水质大大降低,已经严重影响到了湟水流域甚至下游黄河干流的社会经济发展,因此解决湟水流域尤其是西宁以下区域的污染问题已经到了刻不容缓的地步。

6 结论与展望

6.1 主要成果和结论

通过以上三个方面的工作和研究, 本次论文的主要成果和结论如下:

(1) 把分布式水文模型应用到湟水流域验证了模型的适用性

综合性较强的分布式水文模型, 不仅在加拿大、北美、欧洲取得了广泛的应用, 在国内的梭磨河流域、黑河流域、潮白河流域也得到了初步的应用, 并取得了良好的效果。

实践证明, 通过对模型参数的准确估算, 并进行主要参数的敏感性分析, 从而对模型参数进行有效的、正确的率定, 使得 SWAT 模型对湟水流域的水量、泥沙和水质模拟取得了不错的效果。从模型的率定结果看, 主要站点的水量误差在 10% 以内, 泥沙量误差在 20% 以内, 各主要非点源污染物的误差在 25% 以内, Nash-Sutcliffe 模型效率系数 Ens 均达到了 0.6 以上。这样的结果表明率定后的模型具有一定的精确度, 可以适于该研究区内水资源的综合评价研究。

(2) 分析得出了湟水流域水循环要素的空间分布特性与时间演变规律

► 空间分布特性:

湟水流域降雨分布不均, 从流域上游到下游, 降雨量逐步递减, 西宁以上的集水区域, 年降雨量占整个流域的 70% 以上, 而下游普遍降雨偏少。积雪与冰川融雪主要集中在大通、海晏、湟源等县的边界高海拔地段, 约占全年降水的 10% 左右。流域产流受降雨分布的影响, 在空间分布上与降雨分布基本一致, 西宁以上的集水区域, 年产流总量占整个流域的 65% 左右。湟水流域的主要蒸发带, 位于流域中上游地区, 由于受高原太阳辐射强、干旱少雨的影响, 年蒸发量很大, 约占年均降雨量的 70% 以上。

► 时间演变规律:

从 20 年的逐年计算结果分析可知, 湟水流域近 20 年来的水资源变化趋势并不明显, 没有显著的上升或下降趋势。从水平年的逐月计算结果可知, 湟水流域受冰川融雪径流的影响, 在 4 月初天然径流量会有显著的升高, 主要汛期集中在 7、8 两月; 从产流结构组成上看, 在丰水年和较丰水年, 天然河川径流主要由地表产流构成, 在平水年, 地表产流和地下产流持平, 在枯水年和较枯水年天然河川径流构成以地下径流为主。基于 SWAT 模型计算的湟水流域民和出口端面年均天然径流量为 22.04 亿立方米, 年均不重复地下水资源量为 1.56 亿立方米, 水资源总量为 23.60 亿立方米。

(3) 获得湟水流域土壤侵蚀与非点源污染负荷的时空分布特性

► 时间分布特性:

湟水流域最主要的降雨过程集中在 6、7、8 月份, 相应地这几个月份的土壤侵蚀程度也最大; 尤其是 7 月份, 泥沙量与各项非点源污染负荷量也是在 7 月份达到了峰值。但是与流量变化过程不尽相同的是, 在 7 月份过后, 各项非点源污染负荷及泥沙相对水量的比例都会明显下降, 但非点源污染负荷下降的比例更多, 这说明 经过汛期较强的暴雨径流

过程后,土壤中的养分含量大大降低了,由此可见湟水流域暴雨所产生的土壤侵蚀与营养物质流失问题十分严重。

► 空间分布特性:

湟水流域输沙模数从上游向下游逐渐增加,西宁站以上的集水区域由于植被覆盖度高,土壤抗侵蚀性强,年均输沙量仅占湟水流域的30%左右;而西宁站以下,民和站以上的集水区域,由于植被覆盖度极低,土壤又极易受到侵蚀,故输沙模数大大提高,在丰水年,部分子流域的输沙模数高达100t/ha,该集水区域的年均输沙量约占湟水流域的70%左右。有机氮、固相磷的产出和土壤中的有机质含量、土壤的可侵蚀性及雨强有关,它们主要是附着于泥沙颗粒进行输移,所以有机氮产出较大的地区,与有较高初始有机氮含量的地区和高泥沙量产出的地区大致相同。耕地的硝酸盐氮、可溶性磷等由于施肥等原因,含量较高,因此耕地比例较高的子流域产出量较大。湟水流域上游湟源、以及下游平安、乐都以及民和等县是硝酸盐氮和可溶性磷的主产区。

(4) 提出了下垫面状况对流域土壤侵蚀与非点源污染的机理

不同下垫面水循环要素产出机制是不一样的,FRST(林地)面积只占整个流域的18.05%,而总产流量占到全流域的29%左右,其中地表产流占全流域的32%之多,而占全流域面积60%的RNGB与SWRN(中低覆盖度草地)产流量只有全流域的42%。这主要是因为,FRST主要集中在湟水流域的上游,靠近流域边界的高海拔山地,包括大通、湟源、海晏的大部分地区,该区域降雨量最为丰富,每年有冰川融雪补充径流,且地形坡度较大,容易形成壤中流补充地表径流,下垫面主要以FRST(林地)和RNGE(高覆盖度草地)为主,土壤层蓄水能力好,使得地表产流偏多。

不同下垫面土壤侵蚀程度也是不一样的,RNGB和SWRN(中低覆盖度草地)主要集中在湟水流域中下游的互助、平安、乐都、民和四县,虽然该区域降雨量仅占整个流域的35%,可是由于下垫面土壤类型以淋溶性灰钙土、淋溶性灰褐土以及粗质栗钙土为主,抗侵蚀性都很低,土壤的平均侵蚀模数达到了20t/ha,是上游区域的4倍以上。有的地方甚至达到了100t/ha以上。所以即使在降雨强度较低的情况下,对地表土壤层的侵蚀作用也很明显,从而造成了湟水流域大量的泥沙问题。不同的土地利用上单位面积的非点源污染物产出率也是不同的。耕地(主要是玉米地)面积只有20%多,硝酸盐氮和可溶性磷的贡献比例分别为40%多和90%以上;RNGB和SWRN因为坡度相对较高,覆盖较低,单位面积的产沙量较高,相应有机氮和固相磷的贡献比较高。

(5) 模型对湟水流域水量水质综合评价

进行了氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、总磷和硝酸盐氮($\text{NO}_3\text{-N}$)作为流域水环境评价指标,分别选取西宁和民和两个水文断面,进行湟水流域的水质水量联合评价。

结果表明,利用水质水量联合评价的结果得到的I类、II类、III类水的比例较单纯使用河长评价法评价结果由不同程度的减少,尤其以II类水的差别最大;IV类、V类以及劣V类水的评价结果都明显的增加,这表明湟水流域的污染状况非常严重,仅仅以代表性河

长评价结果没有考虑到水质与水量相结合的过程,不能满足对湟水流域水资源污染程度的正确评价。同时从断面评价结果来看,西宁以上水质大部分上是Ⅱ、Ⅲ类水,西宁以下、民和以上基本上全都是Ⅳ类、Ⅴ类以及劣Ⅴ类水,表明湟水流域西宁到民和段,受集中污染的影响,导致河道水质大大降低,已经严重影响到了湟水流域甚至下游黄河干流的社会经济发展,因此解决湟水流域尤其是西宁以下区域的污染问题已经到了刻不容缓的地步。

综上所述,分布式水文模型在湟水流域有着良好的适用性,能够模拟包括流域水循环、土壤侵蚀以及污染物输移的全部过程,能够详细的模拟流域四水转化以及水量收支平衡过程,能够模拟流域土壤侵蚀以及非点源污染的时空分布特性,具有长期水资源演变规律分析,土壤侵蚀程度分析预测,非点源污染预测,以及模拟人类活动对于流域水资源变化影响等多种功能。

6.2 展望

在以往的流域水资源评价工作中,主要采取的水资源评价方法与实践均是基于“实测—还原”的狭义水资源评价模式。本次论文的研究工作目的,主要在于引入分布式水文模型,区别于以往的水资源评价模式,利用模型对流域产流、产沙、污染物质的产生和输移过程进行模拟,从而在利用分布式水文模型对流域水资源进行综合评价方面进行探讨。鉴于研究条件以及笔者水平的限制,在本次论文的研究过程中,还有许多工作需要进一步完善和进一步的探讨:

(1) 基于分布式水文模型的流域水资源的动态评价

研究过程中,没有考虑人类活动对水资源的影响,模拟对象均为流域天然水资源的变化过程,然而这种一元静态评价方法仅仅考虑了天然水循环过程对水资源的影响,没有考虑在人类活动下,包括“取水—输水—用水—排水—回归”所构成的人工水循环过程对水资源的影响。然而在类似湟水流域的地区,人类活动极大的干扰了流域水循环过程,在某些方面甚至超过了天然水循环过程,忽略人类活动对水循环造成的影响,都会造成模型模拟结果的失真。因此在以后的研究过程中,需要将天然水循环和人工水循环进行耦合模拟,研究在自然和人类活动共同作用下的流域水循环过程,从而对流域的水资源进行真实的评价。

(2) 基于分布式水文模型的流域综合管理研究

在研究过程中,对模型的应用,还只是限于对流域水资源模拟、计算和评价方面。然而这些研究的共同目的,就是为了更好的为流域水资源管理提供科学依据,SWAT模型提供了不同流域管理模式,对流域水量、泥沙、污染物输移以及营养物质流失过程的模拟。这为我们定性研究不同的流域管理模式对流域的综合影响,提供了非常好的工具。在很多流域的社会经济发展过程中,水资源的开发利用已经不是单独作为一类资源,而是与流域的土地资源开发利用、经济发展模式紧密联系在一起,因此如何将分布式水文模型与流域水资源综合管理结合起来,对流域的社会经济发展提供决策性依据,也是一个非常值得研究的问题。

参考文献

- 【1】 郭武. 青海省湟水流域河川径流特征分析. 干旱区研究, 1996, 13(2): 25-30
- 【2】 贾绍凤等. 近 50 年青海水文要素变化特征分析. 冰川冻土, 2003, 2
- 【3】 杨芳. 青海湟水流域水资源及水环境. 干旱区资源与环境. 1994, 8 (2): 57~62
- 【4】 姚桂基. 青海湟水河主要污染物主成分分析. 青海环境, 2002, 9: 101~102
- 【5】 Arnold J.G, Williams J.R. A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resource Management. Texas A&M University Press, 1990: 1~142
- 【6】 Anderson.M.G and Buet.T.P(eds.) Hydrological Forecasting. John Wiley & Sons Ltd Press, 1985, Chichester
- 【7】 Aronld J.G, Williams J.R. and K.W.King.Soil and Water Assessment Tool. USDA. Agricultural Research Service and Grassland Soil and Water Research Laboratory. Texas A&M University. Texas Agricultural Experiment Station Blackland Research Center, 1999: 1~89
- 【8】 Baird, F.C., T.J. Dybala, M.E. Jennings, D.J. Ockerman. Characterization of Nonpoint Sources and Loadings to Corpus Christi Bay National Estuary Program Study Area. Corpus Christi, TX , 1996
- 【9】 Biftu GF., Gan T.Y.. Semi-distributed, physically based, Hydrologic modeling of the paddle River Basin, Alberta, using remotely sensed data. Journal of Hydrology, 244(2001): 137~156
- 【10】 刘昌明, 李道峰, 田英, 郝芳华, 杨桂莲. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究. 地理科学进展, 2003, 22(5): 438~448
- 【11】 Vijay P.Singh 著, 赵卫民, 戴东, 牛玉国等译. 水文系统流域模拟. 郑州, 黄河水利出版社, 2000
- 【12】 白清俊, 刘亚相. 流域坡面综合产流数学模型的研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, Vol.5(3), 1999
- 【13】 陈军峰, 李秀彬. 土地覆被变化的水文响应模拟研究. 应用生态学报, 2004, 15 (5): 833~835
- 【14】 Cassey, M.. The Effect of Watershed Subdivision on Simulated Hydrologic Response Using the NRCS TR-20 Model. Masters Thesis, University of Maryland, 1999
- 【15】 Daniel E. Storm, Michael White, Michael D, Smolen, Hailin Zhang. Modeling Phosphorous Loading for the Lake Eucha Basin. Biosystems and Agricultural Engineering Department of Oklahoma State University,2001
- 【16】 David R.Maidlnent. GIS and Hydrology Modeling. In M.F.Goodchild, B.O.Parks, and L.T .Steyaert(Eds) Environmental Modeling with GIS. Oxford University Press. Newyork, 1993: 147~167
- 【17】 Debapriya Dutta. AVSWAT — A Spatial Decision Support System for Land andwater

management and its application for watershed management in Bankura district of West Bengal. Department of Science and Technology. Technology Bhavan, New Delhi.

- 【18】 Flanagan.D.C. and Nearing.M.A.(eds.)USDA-Water Erosion Predication Project Hillslope Profile and Waterhed Model Document. NSERL Report No.10 1995, USDA—ARS National Soil Erosion Research Laboratory. West Lafayette, Indiana.
- 【19】 Green WH, Ampt GA. Studies on Soil Physics,1, The Flow of Air and Water through Soils. Journal of Agricultural Sciences 1981, 4: 11~24
- 【20】 Hession, W.C., D.E. Storm . Watershed-Level Uncertainties: Implications for Phosphorous Management. Journal of Environmental Quality 29: 1172-1179 (2000)
- 【21】 Jasso-Ibarra.. Sensitivity of Water and Sediment Yield to Parameter Values and Their Spatial Aggregation Using SWAT Watershed Simulation Model. PHD Dissertation, The University of Arizona, 1998
- 【22】 Lumagne C., Normand M., Quesney A.etc.. International of remote sensing data into hydrological models for reservoir management. Hydrological Sciences. 46(1), 2001: 89~102
- 【23】 M. Di Luzio, R. Srinivasan, J. Arnold. ArcView Interface for SWAT2000. Blackland Research Center, 2001
- 【24】 Mamillapalli, S.. Effect of Spatial Variability on River Basin Stream Flow Modeling (GIS). PHD Dissertation, Purdue University, 1998.
- 【25】 Neitsch S.L, Aronld J.G, Williams J.R. Soil and Water Assessment Tool User's Manual 99.2[M]1999. 808 East Blackland Rd, Temple, Texas-76502: USDA. Agricoltore Research Service and Grassland Soil and Water Research Laboratory
- 【26】 M.B ABBOTT, J.C. REFGAARD 编, 郝芳华, 王铃等译. 分布式水文模型. 郑州: 黄河水利出版社. 2003
- 【27】 陈军锋, 陈秀万. SWAT 模型的水量平衡及其在梭磨河流域的应用. 北京大学学报, 2004, 40 (2): 265~270
- 【28】 陈元芳. 随机模拟中模型与参数不确定性影响的分析. 河海大学学报. Vol28(1), 2000: 32~35
- 【29】 黄清华, 张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进及应用. 南京林业大学学报, 2004, 20 (2): 22~26
- 【30】 贾绍凤. 根据植被估算黄土高原的自然侵蚀和加速侵蚀-以安塞县为例. 水土保持通报, 1995, 4: 25~30
- 【31】 贾仰文, 王浩, 倪广恒, 杨大文, 王建华, 秦大庸. 分布式流域水文模型原理与实践. 北京: 中国水利水电出版社. 2005
- 【32】 贾仰文, 王浩, 王建华等. 黄河流域分布式水文模型开发与验证. 中国自然资源学会 2004 年学术年会论文集, 2004: 353~359
- 【33】 贾仰文. WEP 模型的开发与分布式流域水循环模拟. 中国水利学会 2003 年学术会论文集, 2003: 62~66
- 【34】 李道峰, 田英, 刘昌明. 黄河河源区变化环境下分布式水文模拟. 地理学报, 2004, 59 (4): 565~572

- 【35】 李道峰, 刘昌明. 黄河流域水循环地理信息系统平台构建初探. 地理科学进展, 2003, 22(5): 472~478
- 【36】 李纪人. 遥感和地理信息系统在分布式流域水文模型研制中的应用. 水文, 1997(3)
- 【37】 贾仰文. WEP 模型的开发与应用. 水科学进展, 2003, 14(增刊): 50~56
- 【38】 贾仰文, 王浩. 分布式流域水文模拟研究进展及未来展望. 水科学进展, 2003.14(增刊): 118~123
- 【39】 李怀恩. 流域非点源模型研究进展与发展趋势. 水资源保护, 1996, 2
- 【40】 姜文来. 21 世纪中国水资源安全战略研究. 2000, 8
- 【41】 Paterjoin, W.T., D.L.. Nutrients Dynamics on an Agricultural Watershed Observations on the Role of a Riparian Forest. Ecology, 1984
- 【42】 Penman HL. Evaporation: An Introductory survey. Netherlands Journal of Agricultural Science, 1956, 4: 7~29
- 【43】 Priestley CHB, Taylor RJ. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using large-Scale Parameters.. Mon Weather Rav.1972, 100: 81~92
- 【44】 王浩, 王建华, 秦大庸, 姚治君等. 现代水资源评价及水资源学学科体系研究. 地球科学进展, 2002, 17(1): 12~17
- 【45】 王旭东等. 分布式水文模拟模型在流域水资源管理中的应用. 南水北调水利科技, 2004, (2): 4~7
- 【46】 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79~86
- 【47】 郝芳华, 刘昌明, 陈利群, 张雪松. 降雨的空间不均性对模拟产流量和产沙量不确定的影响. 2003, 22(5): 446~452
- 【48】 刘昌明, 何希吾等. 中国水问题研究. 北京: 气象出版社, 1996
- 【49】 刘昌明, 孙睿. 水循环的生态学方面: 土壤-植被-大气系统(SPAC)水分能量平衡研究进展. 水科学进展, 1999(3)
- 【50】 万超, 张思聪. 基于 GIS 的潘家口水库面源污染负荷计算. 水力发电学报, 2003, 2: 63~68
- 【51】 万超. 潘家口水库上游流域面源污染的模拟研究. 清华大学水利水电工程系硕士学位论文, 2002
- 【52】 S.C.Rai, E.Sharma. Hydrology and Nutrient Flux in an Agrarian Watershed of the Sikkim Himalaya. Journal of Soil and Water conservation, 1998
- 【53】 S.L. Neitsch, J.G. Arnold, J.R. Kiniry, J.R. Williams. Soil and Water Assessment Tool User's Manual Version 2000. Agriculture Research Service and Blackland Research Center, 2001
- 【54】 Sloan PG, Moore ID. Modeling Subsurface Stormflow on Steeply Sloping Forested Watersheds. Water-Resources Research.1984, 20(12)
- 【55】 Sloto, R. A., Crouse, M. Y.. HYSEP-a Computer Program fro Stream flow Hydrograph Separation and Analysis. U.S. Geological Survey Soil Conservation Service. Urban Hydrology for small watershed. Technical Release. No. 55, USDA, Washington, D.C, 1975

- 【56】 Tony Prato. A Comparison of Erosion and Water Pollution Control Strategies for an Agricultural Watershed. *Water Resources Research*, Vol.26.No.2, 1990
- 【57】 USDA Soil Conservation Service. National Engineering Handbook Section4, Chapters 4~10USDA. Urban Hydrology for small watersheds. Engineering Division, Soil Conversation Service, USDA. Technical Release 55, 1986
- 【58】 Vieux, B.E., S. Needham. Non-point Pollution Model Sensitivity to Grid_Cell Size. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 119, No. 2, pp. 141-157, March/April, 1993
- 【59】 Vieux, B.E.. Geographic Information Systems and Non-Point Source Water Quality and Quantity Modeling. *Hydrological Processes*, Vol. 5, pp. 101-113, 1991
- 【60】 Vladimir Novotny, Harvey Olem. Water Quality Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution. Van Nostrand Reinhold, New York William Kelley Saunders. A Gis Assessment of Non-Point Source Pollution in the Santonio-Nueces Coastal Basin. Center for Research in Water Resources of the University of Texas, 1996
- 【61】 Young, R.A., C.A.Onstad, D.D.Bosch and W.P.Anderson. Agricultural Nonpoint Source Pollution Model: A Watershed Analysis Tool. Agriculture Research Service, U.S. Department of Agriculture, Morris, MN. 1986
- 【62】 Zeng Zhiyuan, A.M.J.MEIJERINK. Water Yield and Sediment Yield Simulations for Teba Catchment in Spain Using SWRRB Model. Model Input and Simulation Experiment. *Pedosphere*, 2002, 12(1): 41~48
- 【63】 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 中国环境科学出版社, 1990
- 【64】 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1988
- 【65】 夏军等. 水体富营养化综合水质模型及其应用研究. 2000, 7
- 【66】 贺秀斌等. 土壤物理力学性质与土壤侵蚀关系研究进展. *水土保持研究*, Vol.6(2), 1999, 98~104
- 【67】 刘新仁. 系列化水文模型研究. *河海大学学报*, vol25(3), 1997: 7~14
- 【68】 李硕, 曾志远, 张运生. 数字地形分析技术在分布式水文建模中的应用. *地球科学进展*. 2003
- 【69】 李清河, 李昌哲, 齐实, 孙保平. 流域降雨径流路径的数字模拟技术. *地理研究*, vol.19(2), 2000: 209~216
- 【70】 任立良. 流域数字水文模型研究. *河海大学学报* vol.28, 2000: 2~7
- 【71】 李清河, 李昌哲. 土壤侵蚀与非点源污染预测控制. *水土保持通报*, 1999
- 【72】 陈家琦, 王浩. 水资源学概论. 北京: 水利水电出版社, 1996
- 【73】 于冷. 流域水资源模拟的系统动力学模型设计. *农业技术经济*, 1999: 39~42
- 【74】 水利部水文局. 中国水资源评价. 北京: 水利电力出版社, 1986
- 【75】 中华人民共和国水利部. 2003 年全国水资源公报. 北京: 中国水利水电出版社 2004
- 【76】 王浩, 秦大庸, 陈晓军. 水资源评价准则及其计算口径. *水利水电技术*, 2004 (2): 1~4
- 【77】 夏军. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战 (一). *海河水利*, 2002 (3): 3~7

致 谢

本论文是在导师黄强教授的悉心指导下完成的。导师深厚的学术造诣、渊博的理论知识、丰富的工程经验、严谨的治学态度以及一丝不苟的精神是对学生莫大的教诲，导师的谆谆教导将使我受益终生。三年的理论学习和科学研究中，导师无论在学习还是在生活上都给予了无微不至的关怀，使我不仅在基础理论方面学到了许多知识，而且在科学研究方面得到了系统的锻炼，增强了科学研究能力。值此硕士学位论文完成之际，谨向导师及师母表示诚挚的谢意和深深的敬意！

在学习生活中，我得到了解建仓教授的悉心指导，解老师知识渊博、治学严谨、富有埋头苦干的钻研精神，是我一生学习的榜样。在此特此向解老师表示诚挚的谢意！

人生得遇黄强、解建仓两位名师是我求学路上最大的幸福！

对青海省水利水电科学研究所李润杰研究员，中国科学院地理科学与资源研究所贾绍凤研究员，青海大学解宏伟教授，西安理工大学秦毅教授、王义民副教授、畅建霞副教授、马长福老师在本人论文完成过程中的大力帮助，在此一并表示感谢！

水院三年，终生难忘，朋友之谊、同窗之情足以铭记今生！感谢师兄孙凡以及同窗张永永等同学在学习和生活上的关心和帮助。

感谢我的家人对我的学业的鼓励、支持和理解！

最后感谢所有关心和帮助过我的老师、同学和家人。祝他们永远快乐、安康、幸福！

王亚军

2008年3月

于西安理工大学

附录

攻读硕士学位期间发表的论文及参加的主要科研项目

a. 硕士研究生期间发表的论文

1. 王亚军, 周陈超, 贾绍凤. 基于 SWAT 模型的湟水流域径流模拟与评价. 水土保持研究, 2007 (6) .

2. JIA Shao-feng¹ LIN Shi-jun¹ Wang ya-jun². Mapping the average annual runoff depth in Huangshui watershed using DEM. in: Reducing the Vulnerability of Societies to Water Related Risks at the Basin Scale (IAHS Publ. 317). (IAHS Publ 为 EI 收录刊物)

b. 硕士研究生期间参加的课题

1. 50 年来西宁地区环境变化与湟水流域水循环关系研究. 青海省科技厅 2005.7-2007.12;

2. 青海省湟水流域水资源综合管理. 水利部 948 项目, 2005.3-2007.12;

3. 灌区管理技术研究. 青海科技厅攻关项目 2006.3-2008.12;

4. 流域水资源合理配置与生态环境保护. 水利部项目, 2007.3-2008.12