

ABSTRACT

With the rapid development of urbanization, the proportion which the urban water-proof region occupies is getting bigger and bigger, that causes the massive surface runoff through the sewer to discharge directly the urban water body when it is rainy specially the rainstorm, the urban pollutant that runoff carries from road surface deposit, heavy metal, nourishing substance, toxic organic matter and so on becomes the primary pollution that makes the body water quality drops in the city, therefore the urban runoff pollution is the typical urban nonpoint source pollution. takes the Nanchang city as the region to research, the research includes the runoff pollution process and the prevention measur in different areas. This article studies emphasisly the runoff the pollutant change rule, and uses the model to estimate the pollutant load in the runoff, according to rule that pollutant changes in runoff, it proposes the proper prevention and control of pollution measure in Nanchang runoff.

The discover through the runoff sample's analysis is that the pollutant distribution has obvious time rule in different urban in the Nanchang district. The test result indicates that in the entire rainfall process the instantaneous density of pollutant in the runoff has a big change, the time rule of density of pollutant is different in different areas. The density of pollutant presents the index attenuation rule with the increasing of flow time in industrial area, commercial area and residential area. But in traffic area, the phenomena never happens because the continuous pollution source from the complicated human and vehicles activities.

The paper carries on the quantitative analysis to the urban rainfall runoff contamination index by computing the EMC value in the runoff pollutant event. The EMC value of pollutant is quite high in the different region and has a very big difference, the order of EMC value of TSS, COD_{Cr}, NH₃-N, TP in four function area order is: traffic area > commercial area > residential area > industrial area ; The highest EMC value of heavy metal is in the industrial area, the next is the traffic area and the commercial area, the lowest is the residential area.


It uses the urban rainfall runoff pollution load estimate model to estimate the Nanchang runoff contamination index load, the result of contamination index in different area is: the highest load of TSS, COD_{Cr}, NH₃-N, TP, Cu, Zn, Pb, Cd and so on is in traffic area; Under the different rainfall intensity, the pollutant load is different, it increases when the rainfall intensity increases.

At last, the paper bases on ecology plan principle and proposes measures such as landscape pattern and rain water converting into resources to prevent and control the rainfall runoff pollution in Nanchang city urban.

Key words: Nanchang city; Urban nonpoint source pollution; EMC value; Rain water converting into resource

学位论文独创性声明


本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 南昌大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名（手写） 签字日期：2008年6月15日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 南昌大学 有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权南昌大学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，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编本学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并通过网络向社会公众提供信息服务。

（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名

导师签名：

签字日期：2008年6月15日

签字日期：2008年6月15日

第 1 章 文献综述

1.1 引言

水资源是生命之源，是各种资源中不可替代的一种重要资源。地球表面约有 70%以上面积为水所覆盖，但这些水难以被利用，30%为陆地所覆盖，陆地上的水只有 2.53%的水是供人类利用的淡水。由于开发困难或技术经济的限制，到目前为止，海水、深层地下水、冰雪固态淡水等难被直接利用。比较容易开发利用的、与人类生活生产关系最为密切的湖泊、河流和浅层地下淡水资源，只占淡水总量的 0.34%，还不到全球总水量的万分之一^[1]。世界银行 1995 年的调查报告指出：占世界人口 40%的 80 个国家正面临着水危机，发展中国家约有 10 亿人喝不到清洁的水，17 亿人没有良好的卫生设施，每年约有 2500 万人死于饮用不清洁的水。联合国预计，到 2025 年，世界将近一半的人口生活在缺水的地区，水危机已经严重制约了人类的可持续发展。

地表水资源短缺问题是全球面临的主要问题之一，据联合国报告，世界人口从 1930 年的 2.0×10^9 ，增加到 1996 年 5 月的 5.8×10^9 ，预计到 2050 年达到 8.5×10^9 。而全世界可利用的水资源为 $4.7 \times 10^{13} \text{m}^3$ 。在 1930 年时，人均占有水资源量为 $2.35 \times 10^4 \text{m}^3$ ，到 1997 年降为 7800m^3 ，至 2050 年时将只有 5500m^3 ，仅相当于 1930 年的 1/4。随着城市化进程的加快、经济的发展和生活水平的提高，城市需水量激增，统计表明，自 20 世纪以来，全世界淡水用量增长了 8 倍，其中农业用水增加了 7 倍，城市用水增长了 12 倍，而且每年仍以 5% 的速度递增，即每 15 年增长 1 倍^[2]。水资源短缺突出表现在城市供水问题上，我国 668 座城市中约有 400 多座城市缺水，50 多座城市经常闹水荒^[3]。特别是北方城市缺水问题尤为突出，如北京、天津、西安、太原、大同、青岛、烟台、大连等城市供水长期处于紧张状态，严重影响城市居民生活，制约着城市工农业生产的发展，不利于城市经济的可持续发展。

由于受控制技术和财力的限制以及点源污染的严重性，所以点源一直普遍被作为治理水污染的主要方面，而非点源被忽视。美国在 20 世纪 70 年代投入大量资金和人力，兴建二级污水处理厂，所有污水在排入江河前必须经过处理

达标排放。但是，几年的实践证明，单纯控制点源，一些水体仍然受到污染。原因是除了点源污染外，水体还受到非点源的污染。据美国、日本等国家的报道，即使点源污染全面控制之后，江河的水质达标率仅为 65%，湖泊的水质达标率为 42%，海域水质达标率为 78%^[4]。

1.2 城市非点源污染概述

1.2.1 城市非点源污染的概念与特征

非点源污染是指溶解性或固体污染物，从非特定的地点随暴雨生成的径流进入受纳水体所造成的污染，污染的发生具有随机性、排放途径及污染物排放的不确定性、污染负荷的时空差异性以及监测、控制、管理难度大等特点^[5]，也有研究者称其为面源污染。

城市非点源污染指城市降雨径流淋洗与冲刷大气和汇水面各种污染物引起的受纳水体的污染，是城市水环境污染的重要因素^[6]。降雨是城市非点源污染形成的动力因素，而降雨形成的径流是非点源污染物迁移的载体。因此，狭义上的城市非点源污染即指城市降雨径流污染，它是城市非点源污染的最主要形式。

一般认为非点源污染有以下特点^[7]：

(1) 污染物主要发生在与气象事件密切相关的间歇时段，以扩散方式进入水体，即污染物的来源和排放点不固定，排放具有间歇性，发生具有随机性。因为非点源污染主要受水文循环过程（主要为降雨及降雨形成径流过程）的影响和支配，而降雨径流具有随机性，所以由此产生的非点源污染必然具有随机性。

(2) 非点源污染物在进入地表水或下渗到地下水之前，主要产生在广阔的土地上并在地面迁移。

(3) 非点源污染很难或者不可能在其起源处监测。与点源相比，非点源污染的监测更为困难、复杂和昂贵。

(4) 非点源污染的范围与不可控的气候事件和地质地理条件相关，污染负荷的时间变化（次降雨径流过程、年内不同季节及年际间）和空间（不同地点）变化幅度大。

(5) 非点源的治理集中在土地和径流管理措施，而不是污水处理。

(6) 点源的最严重危害发生在枯水期,而非点源的严重危害却发生在暴雨之后。

城市非点源污染与其他类型非点源污染不大相同。这是因为:①城市地面多为不透水流域的水文地面,水文活动很强烈;②流域的水文响应加快,增加了洪水发生的可能;③城市下水道及相关设施的修建,以及低于地下水位的建筑物的排水设施都会降低地下水水位,使地下水基流中以未稀释的下水道污水和废水为主;④不透水地表堆积物主要来自大气降尘、街道垃圾、落叶和枯草、动植物残体、畜禽粪便及道路交通等。经过清扫、风吹或分解后,不透水地表堆积物经过较长时间,最终都进入地表径流。土地利用、人口、交通流量、街道地面情况、大气的干湿沉降、气象件等影响城市非点源污染的特征^[8]。

1.2.2 城市非点源的污染物种类

(1) 营养盐

氮(N)、磷(P)是恶化水质的两种主要的营养物。营养物以不同氮形式如固态或液态化肥、畜禽养殖过程及粪便处理、城市或工业废水、废渣、大气沉降等进入水体。径流中的营养物有颗粒态和溶解态。在发达国家,由于基本上实现了对工业点源污染的有效治理,非点源的营养物已成为水环境的最大污染^[7]。大量的污染物直接进入水体,引起水体的富营养化,破坏水生生物的生存环境,降低河流、湖泊和河口的旅游价值和储水能力,引起排灌渠道堵塞和淤积,造成土壤生产潜力和水质的下降。

(2) 固体颗粒物

固体颗粒物包括矿物质和有机物,呈悬浮态被运移或沉降在水体底部。土壤流失降低了土壤中营养物含量,破坏了土壤结构,造成了地力下降。悬浮物磨损鱼类的腮,增大感染和患病的风险;降低水体透明度,造成鱼类减少;影响水生植物生长,降低浮游生物的过滤作用。泥沙沉积降低了河流、沟道的运移能力,造成水库、湖泊淤积,甚至造成洪水频发。

在北美,侵蚀和地表水系中泥沙运移造成的经济损失估计在160亿美元,包括处理费用及储存设施的损坏,娱乐和航运影响,侵蚀物质带来的营养物、金属和农药等对水质以及对水生栖息地的造成严重的破坏^[9]。

(3) 有毒物质

有毒物质主要是重金属和多环芳烃，并且多种有毒物质与城市径流有关，美国的城市径流污染研究表明至少10%的城市径流中含有有毒物质^[10]。重金属是城市径流中最主要的优先控制污染物，其毒性程度与土地利用有关。交通区，交通流量大，73%的径流样品中，铅浓度超过热带鱼的急性毒性标准；90%的样品中，银、铜和锌的浓度超过热带鱼的急性毒性标准。而低密度住宅区径流样品几乎未超标^[11]。

对美国Narragansett湾的研究表明，每年来自城市径流中最常见的有机物有石油类碳氢化合物（占48%）、小分子量的多环芳烃（3%）、大分子量的多环芳烃（44%）、锌（56%）、铅（65%）和铜（5%）^[12]。工业区的石油类碳氢化合物负荷最高，可达14000kg/km²，其次为高速公路7800kg/km²，商业区为580kg/km²，住宅区为180kg/km²。

由于农药的组成变化大，它对环境的毒害很大，具有急性、慢性毒性和持久性。据估计空中喷洒农药，其中25%~75%被飘浮带走。1983~1993年对北美伊利湖7条支流监测结果表明，持久性农药（DDT）在阿特拉津浓度为6.8~68.4ug/L，利谷隆浓度为1.16~69.94ug/L^[13]。

（4）病菌

城市下水道溢流和畜禽养殖区含有大量细菌和病毒，如果没有安全预防和良好的管理措施，将严重影响水质，危害人体健康。与水体有关疾病相关联的病菌可分为三类：细菌、原生动物、病毒。动物排泄物是许多细菌的主要来源，如链球菌、乳酸菌、葡萄球菌等。病毒是一类具传染性载体，寄生在宿体中。病毒主要影响人体胃肠系统。由于病菌类型、特征变化很大，很难逐一单独区分。施用在地表土壤中的粪肥，其某些成分会通过下渗水流进入地下水，最终随饮用水源或回收水又重返回到地表。

1.2.3 城市非点源污染物的来源

城市地表径流中的污染物主要来自于降雨对城市地表的冲刷，所以，城市地表沉积物是城市地表径流中污染物的主要来源。城市地表沉积物的组成决定着城市地表径流污染的性质。城市地表沉积物包含许多污染物质，有固体废物碎屑（城市垃圾、动物粪便、城市建筑施工场地堆积物）、化学药品（草坪施用的化肥农药）、空气沉降物和车辆排放物等。城市路面是城市地表的主要组

成部分，路面径流污染物来源见表1.1^[14]

表1.1 城市路面径流污染物来源

Table 1.1 The sources of pollution in urban surface runoff

污染物	污染物来源							
	制动器	轮胎	车体	燃料及 润滑油	混凝土 路面	沥青路面	除冰散盐	杂物
Cd	√	√						
Cr		√						
Cu	√	√						
Fe		√	√					√
Pb	√	√		√			√	
Ni		√						
V				√				
Zn	√	√	√					
氯化物							√	
有机固体						√		√
无机固体			√		√	√		√
PAHs				√		√		
酚						√		

具体而言，主要有以下来源：

(1) 大气沉降

城市非点源污染的强度和程度往往与大气污染及气象条件有关。降水是清洁大气最有效的途径之一，降水是大气污染物的良好载体和清除者。因此，雪和雨含有许多对水陆生态系统有害的大量污染物，如酸类、有毒金属、有机物、氮磷物质等，致使地表水体受到污染。在未扰动的流域，大气养分输入是地表水污染的主要原因。北美五大湖区，铅负荷的90%来自非点源污染^[7]，大气降尘对本地区径流水质有明显影响。在瑞典的研究发现，径流中20%的有机物、25%

的磷、70%的总氮来自大气^[15]。

据统计^[16]，我国是继欧洲、北美洲之后的第三大重酸雨区，全国酸雨覆盖面积已占国土面积的30%以上，全国1/2以上城市降雨的平均pH<5.6，其中南方城市降雨的pH<4.8，华中酸雨中心区年降雨的平均pH<4.0，酸雨频率>90%，酸雨造成的损失为130亿元。此外，1998年全国289个城市TSP(总悬浮物)平均含量达289ug/m³，超过国家二级标准(200ug/m³)，可见大气沉降对水环境非点源污染是不容忽视的。

Paerl(1993)研究表明，北卡罗来纳的河口接纳了30%~40%的大气氮，海湾接纳了50%以上的大气氮^[17]。美国全国地表水监测(the National Surface Water Survey, NSWS)结果显示，在美、加和北欧酸雨区，湖水中SO₄²⁻的浓度与大气中SO₄²⁻的沉降呈正相关^[18]。重金属铅和汞的大气沉降也是地表水中重金属的重要来源。

最新研究表明，大气沉降已成为荷兰水体中持久性有机物(POP)和农药的重要来源，降水和大气中发现50种农药，其中降水中的17种农药浓度超过地表水的最大容许值，22种农药浓度超过饮用水标准^[19]。美国最大的海湾切萨皮克湾的研究表明，在1982年随降雨进入海湾的西玛津(一种除草剂)只有110kg，而在1984年已达9.8t^[20]。在北美五大湖地区，大气沉降成为有毒污染物的主要来源，在上游地区，来自大气沉降的DDT负荷为97%~98%；在下游地区，负荷也达到22%~31%^[21]。在中国滇池，由大气干湿沉降输入湖泊的氮、磷负荷分别占总负荷的8.39%、7.58%^[22]。

(2) 住宅及商业区

这一区域的污染主要随不透水地面的比例而变化。另外，街道清扫情况及垃圾堆积、路缘长度、排水系统等，也影响污染的负荷。

大气中的绝大多数化合物可以进入地下水，如果房顶径流未经过滤层，特别容易进入透水性较好的地区^[23]。屋面污染物主要是干沉降物和屋面材料的分解物质。在北京，夏季高温使油毡屋面初期径流中高达数千毫克每升，路面初期径流中和浓度一般超过城市污水^[24]。在住宅区，秋季落叶含有90%的有机质和少量磷，成为城市暴雨径流中可降解有机物的主要来源。

(3) 交通

由于汽车行驶过程中，汽车零件如轮胎等在地面磨蚀而产生灰尘，会带来碳氢化合物如多环芳烃PAHs、铅、石棉、石油、磷酸盐及颗粒物等污染物；另

外,交通还使沉积尘土重新扬起,并迁移扩散。研究发现,交通直接贡献 $0.7\text{g}/(\text{km}\cdot\text{辆})$ 的固体颗粒物,汽车排放大约 $0.2\text{g}/(\text{km}\cdot\text{辆})$ 废物和 $0.125\text{g}/(\text{km}\cdot\text{辆})$ 的轮胎磨损。虽然与交通有关的污染物中,机动车直接排出的污染物仅占5%,但由于这些污染物的潜在毒性,使它们成为最重要的污染物。另外,交通流量、公路条件、磨蚀情况、汽车排放情况等决定了交通对污染物负荷的影响。全沥青路面的污染物负荷大约比全混凝土路面高80%^[7]。中国西安高速公路路面径流研究表明,径流排水污染强度高,有机污染以非溶解性COD为主,生物可降解性差,对河流水质有一定影响^[25]。另外,在冬季寒冷的城市,道路融雪剂的使用对融雪径流的组成有一定影响,高盐度的径流对道路和车辆有腐蚀作用,也影响土壤、植被和地下水。

(4) 休闲娱乐区

休闲娱乐用地包括城市公园、野餐场地、高尔夫球场、海滩、城市林带。这些地方的土地通常受到良好的保护,不易发生水土流失,这类土地的污染危害最小,在一般情况下,污染负荷量与森林地接近。休闲娱乐地的潜在污染源是草地过量施肥和超量使用除草剂。阿根廷马德普拉塔郊区的土地利用与地下水污染之间的关系显示,园艺活动已成为危害当地的地下水水质的原因之一^[26]。现在人们已经注意到休闲娱乐对地表水质的影响。河边的露营场地比周围地区的裸露密度大,裸露土地多,其径流量和泥沙沉积量都比土地利用低的地区产生的径流量、泥沙量高^[27]。

(5) 施工区

施工区产生的污染物数量最大。由于剥去了表土,裸露土壤未加保护,每年的沉积物可达 $5\text{万t}/\text{km}^2$ ^[7];另外,还产生其他的污染物。建筑机械将土壤压实,降低了土壤的渗透率和地表蓄水,增加了水文活动。影响建筑工地泥沙及其他污染物流失的因素是坡度、工地与河道的距离、土壤的可蚀性、植被覆盖度、气象因素等。

(6) 底泥的二次污染^[28]

大量事实表明^[29,30],在对河流进行截流、清污、疏浚等治理措施后,其水质并未达到预期的效果,其中一个主要原因是河床底泥的二次污染^[31]。这是由于河流底部的液固界面上污染物质累积和释放的平衡过程发生逆转而导致表层底泥中的污染物质向水中释放^[32],溶解于水中的污染物浓度在很大程度上受到底泥的影响。当底泥未被扬动时,底泥中的污染物主要从表层沉积物向上覆水扩

散和分解,对于水质影响相对较小;当底泥一旦受到扰动,其中的污染物将会大量向水体释放,造成河流水体的污染。对上海市区最主要的两条河流苏州河和黄浦江的底泥污染状况的研究发现,底泥大多已经遭受污染,COD_{Cr}及重金属等有机和无机污染物含量水平都较高,底泥中的重金属在一定的水动力条件下,可以通过再悬浮作用释放到水体中,从而对水环境造成污染;同时,底泥中的有机质在细菌的作用下发生好氧和厌氧分解,前者消耗了水中的大量氧气,后者则释放出甲烷、硫化氢等有臭味的气体,使水体变得黑臭^[33]。

1.2.4 城市非点源污染的危害与现状

城市地表聚集了一系列降雨径流污染物,如油类、盐分、氮、磷、有毒物质及城市垃圾,在降雨过程中形成的地表径流冲刷地面污染物,通过排水渠或直接进入江河湖泊,造成地表水污染。

美国环保局把城市地表径流列为导致全美河流和湖泊污染第三大污染源^[8]。其中,城市合流制下水道溢流(the combined sewer overflows,CSO)问题尤为突出,这些系统汇合的水流有雨水和污水,以前认为雨水可稀释污水中污染物的浓度,实际上,不透水地面产生的污染相当于未经处理的污水。在美国北卡罗来纳州的德兰姆,每年来自城市非点源的污染等于该地区未经处理污水的化学需氧量COD负荷的91%,生化需氧量BOD负荷的67%,悬浮物则比未经处理污水高数倍。融化雪水的潜在污染最大,据研究发现,积雪中污染物的含量明显高于同一地区雨水中污染物的平均浓度^[34]。目前美国环保局将合流制下水道溢流(CSO)列为全美河流和湖泊污染的第十大污染源^[7]。

1990年美国关于水体污染的调查表明^[35],约30%的水体超标是由面源污染所造成的。其原因是,在城镇地区,暴雨径流将城镇地面上的有毒污染物带入水体,这些有毒污染物种类多,数量大;据美国国家水质委员会在20世纪80年代初估算^[36],美国来自点源和面源的悬浮物总量为 $348 \times 10^3 \text{t/d}$,其中面源总量为 $319 \times 10^3 \text{t/d}$,占92%;氮负荷总量为 $78.6 \times 10^3 \text{t/d}$,其中面源总量为 $62.3 \times 10^3 \text{t/d}$,占79%;磷负荷总量为 $8.0 \times 10^3 \text{t/d}$,其中来自面源的有 $4.25 \times 10^3 \text{t/d}$,占53%;大肠杆菌的数目的98%以上来自面源。面源污染所占比例是随着对点源污染的控制而在不断增大,目前,在西方发达国家,面源污染已成为主要的水环境污染问题^[37]。

在我国,滇池湖泊流域的大青河,暴雨期悬浮物浓度比平时均值高22倍,

亚硝酸盐氮则高达163倍；宝象河暴雨期最大悬浮物浓度是非暴雨期的106倍^[38]。近年来，我国对滇池污染、太湖污染、淮河流域污染等重大河流湖泊污染问题的调查研究结果都表明面源污染在其中起着重要的作用，其中滇池富营养化问题的研究表明工业废水、城市污水及面源的污染分担率分别为9%、24%和67%。

在面源污染中，城市地表径流是仅次于农业面污染源的第二大面污染源^[39]。城市地表径流包含许多污染物质，有固体废物碎屑、化学药品、空气沉降和车辆排放物等。根据Vitale等人的研究结果，中型城市水体中BOD与COD的总含量约40%~80%来自面源，在降雨较多的年份中，90%~94%的总BOD与COD负荷来自城市下水道的溢流。城市地表径流中污染物SS、重金属及碳氢化合物的浓度与未经处理的城市污水基本相同^[40]。

非点源污染的总效应是多方面的，对区域生态环境和人类健康形成了严重的危害，不仅污染饮用水源，而且造成地表水的富营养化和地下水污染。非点源污染的严重性随着点源污染控制能力的提高而逐渐表现出来，尤其是当点源污染控制水平达到一定程度后，非点源污染成为了水环境污染的主要原因。美国环保局1986年发布的报告，表明美国被监测河流中65%受到非点源污染；由于营养物的高负荷造成水体富营养化，墨西哥湾于1993~1999年，底部水体缺氧范围由1.6万km²增至2万km²，而氮的年流入量中，89%来自非点源^[41]。丹麦的大部分河流中的94%氮负荷、52%的磷负荷由非点源污染引起；荷兰农业非点源提供的总氮、总磷分别占水环境污染总量的60%和40%~50%；奥地利北部地区进入水环境的非点源氮量远比点源大^[42,43,44]。非点源对水环境造成的污染主要有如下两方面：

(1) 以营养物型污染物污染水体环境

水体富营养化通常是指湖泊、水库和海湾等封闭性或半封闭性的水体，以及某些滞留（流速小于1m/min）河流水体内的氮、磷等营养元素的富集，导致某些特征性藻类（主要是蓝藻、绿藻等）异常增殖，致使水体透明度下降，溶解氧降低，水生生物随之大批死亡，水味变得腥臭难闻。引起水体富营养化的关键元素是氮和磷。研究表明，对于湖泊、水库等封闭性水域，当水体无机态总氮含量大于0.2mg/L、磷酸盐浓度达到0.02mg/L时，就有可能引起藻华现象的发生^[45]。

水体营养物质氮、磷的来源主要有城镇生活污水，含氮、含磷的工业废水

和农田氮肥、磷肥。其中，农田氮、磷的流失是引起水体富营养化的重要原因。在美国，农业是一个主要的非点污染源，农田径流使全国64%的河流、57%的湖泊受到污染；瑞士雨水径流中氮、磷含量相当于工业废水和城市污水中此类污染物量的总和^[46,47]。

我国湖泊达到富营养化的水体已占63.3%，其中50%以上的磷、氮污染负荷来自农业非点源污染负荷。北京密云水库、天津于桥水库、安徽巢湖、云南洱海、上海淀山湖等水域，非点源污染比例超过点源污染，非点源污染已上升为威胁地表水的主要污染源。我国五大淡水湖之一的巢湖，在20世纪60~80年代，由于湖水的富营养化，导致湖内100余种水藻大量繁殖。巢湖目前主要受到氮、磷营养盐及有机物的污染，总氮、总磷严重超标，其中70%来自非点源污染。我国第三大淡水湖—太湖，目前97%面积的水体已呈中等富营养化状态，太湖水富营养化主要由沿湖的工农业排污引起。滇池地区过量施肥、施肥结构不合理、农田排水直接进入河流等一系列因素，加剧了湖泊水体富营养化的发生^[48,49,50,51]。由水体富营养化引起的水质恶化、水源紧缺、生态环境破坏，严重制约着经济的健康持续发展。

(2) 以毒害型污染物污染水体环境

非点源污染物种类很广，几乎含有大部分自然和人工合成的各种化学、生物污染物质。它们进入地表水环境可对水生生物以及通过食物链对人体产生各种各样的影响。这主要归结于农药、除草剂及其降解产物、化肥中的重金属、有毒有机物以及大气沉降物等。其直接的毒害是引起水体生物的急性中毒，如有机磷、有机氯农药，以及有毒物在水体食物链中的富集，如磷肥中的重金属镉等。洗涤剂进入水环境可使化学物质的毒性为原来2~7倍^[50]。一些激素是内分泌系统的破坏者，会阻碍野生生物和人类正常生长，使人类和动物的生殖健康和生殖能力产生逆向改变；富营养化湖库的铜绿微囊藻的快速致死素可导致动物肝肿充血、快速死亡。

非点源毒性污染物（包括本身无毒，但可诱发其他污染物毒性的物质）进入地表水环境，造成的不仅是污染指标的超标，而且还会产生污染物的协同作用，直接对水生生物构成危害，并通过食物链对人体产生影响。上述毒害型污染物会在生物体内富集或转化，威胁水生生态系统的安全，一旦经食物链进入人体，将引起人体中毒或致癌、致畸、致突变等不良后果，造成人类健康的巨大威胁。

1.2.5 城市非点源污染控制管理措施

近年来,随着对工业废水及城市污水的处理力度的加大,城市非点源污染问题越来越突出。影响城市非点源的因素很多,且大多数为随机性的因素。具体的因素有:降雨因素(降雨的强度、降雨历时、降水量)、城市土地利用类型(居民区、工业区、商业区、城市道路等)、大气的污染状况、地表的清洁状况等。城市非点源含有的固态成分高,好氧有机污染物浓度较低,排放随机性强,如果将它与城市废水一起处理,显然不合适,因此探索一种合适的管理控制措施成为必然。目前,国外对城市非点源污染的管理措施进行了大量的研究^[52]。美国已经制定了暴雨径流污染控制措施,以提高水质,并且总结出一套城市非点源污染的最佳管理措施。实践证明,最佳管理措施行之有效,可以减缓接纳水体的水质污染。

1.2.5.1 非工程措施

(1) 加强城市环境管理

城市环境的管理包括城市建设项目施工过程的环境管理、城市垃圾的处理、城市运输车辆的管理等。加强城市环境的管理可从根本上降低地表径流中污染物的含量,尤其要加强垃圾的处理。城市是人口的集中居住地,人口密度非常高,因此,会产生大量的生活垃圾。合理处理垃圾对于减少和控制城市非点源污染物是十分重要的。

(2) 清扫地面道路

长期以来,路面清扫一直被认为是控制污染径流的有效方法。传统机械街道清扫器的效率为50%,但是随着城市的发展,现在灰尘的平均粒径在减小,所以它的效率也在急速下降。Sartor等人的研究表明,常规的路面清扫最多仅能去除的30%污染物。因为路面清扫仅仅对于颗粒较大的颗粒物有较好的去除效果,而对于较小的颗粒物则难于去除,总的效率仅能达到50%^[53]。

(3) 抑制除冰剂、杀虫剂等的使用

在冬季为了创造良好的交通条件,除冰剂大量地撒向路面,以加速冰雪的融化,常用的有NaCl等盐类和砂砾等研磨物。Field等人研究表明,盐类融化雪的能力强于研磨物,且不利于再次清扫^[54]。虽然盐类除冰剂得到了大量的运用,另一方面也产生了严重的地表水环境问题。除冰盐加剧了路面和轮胎的磨损,形成了更多的颗粒物,且其本身溶解于冰雪水中随径流排出,使径流水中Cl⁻

含量大大增加。据Eills的报导^[55]，冬季除冰盐撒布后径流水中Cl⁻的峰值浓度达到65000mg/L，SS的峰值浓度达到5500mg/L，除冰盐撒布七个月后，径流水中仍有少量残存的Cl⁻。可见除冰盐的大量使用，会对地表水环境造成严重的污染。另外，由于植被绿化大量使用杀虫剂，水流中有机物的含量也大为增加。

1.2.5.2 工程措施

(1) 植被控制

植被控制是利用地表植被对径流中污染物进行分离的措施，它能够将污染物在径流运输的过程中分离出来，以达到保护水体的目的。地表的植被不仅可以减少径流的速度，过滤沉积物，还可以提高土壤的抗侵蚀性，减少径流对土壤的侵蚀。研究表明，地表植被去除污染物的机理包括：吸附、沉淀、过滤、生物吸收等。草是植被控制最常用的植物，它的去除效率是比较高的，另外草的种类、密度、形状、结构等均影响到污染物的去除效率。

(2) 渗滤系统的建设

这是一种将污染水流暂时存储起来的措施，通常包括渗坑、渗井等，主要去除可溶解的污染物，去除机理是过滤、颗粒物吸附和离子交换等。此种系统可以单独使用，也可以与其他的方法结合使用。最近比较流行的是多孔路面，可以有效地去除径流水中溶解物和颗粒物。法国Pagotto研究发现，多孔路面最高可以去除92%的碳氢化合物和85%的悬浮物等，但是这种路面易于堵塞，需要经常的维修^[56]。Gordine等人通过研究指出，此种系统的渗坑是一种有效的城市非点源污染径流控制方法，只要设计合理，对污染物的去除效率可以达到98%。但是此种措施不仅对地形、气候等有严格的要求，而且在结冰季节去除效果不是很好。应用此种措施应该根据当地的情况，考虑各种影响因素，合理利用。

(3) 湿地滞留系统

湿地去除污染物的机理有：沉淀、截留、生物吸附等，不仅可以去除颗粒悬浮物，还可以去除可溶性污染物等。湿地系统有天然湿地和人工湿地，由于天然湿地一般不会出现在可利用的位置，所以人工湿地则显得尤为重要。湿地是一种高效的控制城市径流污染的措施。它有效地减少径流，有良好的去除污染物的能力。研究指出，城市径流在湿地中停留24h，悬浮物及其上面的污染物的去除效率可以达到90%。如果停留72h，去除率可以达到95%。在美国的佛罗里达州，已经建立了许多处理城市径流污染的湿地。一般情况下，湿地对于城市径流产生的BOD、总悬浮固体及其总氮的去除效果很好，去除效率为60%~85%。

但是，人工湿地是一项复杂的系统，不同的地理位置、气候、水流等均影响污染物的去除效率，这些因素为在建设湿地过程中应当考虑的。

(4) 合理设计和控制下水道

下水道分为合流制和分流制两种。在一般的老城市或者城市的老市区基本上是合流制，即用同一管道收集污水和雨水，然后输送到处置场地处理。在较大的排水区，为了避免大管径的水管，污水和雨水就近排放到水体中。但雨水和污水的比例超过一定的稀释比（一般是4:1~8:1）则产生溢流。在美国城市的新城区一般是采用分流制的下水道，污水和雨水都有自己的下水道。一般来说，在暴雨进入下水道之前要进行雨水的存储，可以在进入下水道之前的地方建立集水池，尤其是对于雨水中有严重污染源。集水池可以滤去径流中大量的颗粒和有机漂浮物，但是对于细小的物质，包括有机物却是效果甚微。这些滤去的物质要及时清理，否则这些物质会发生分解，一般再有暴雨便会快速进入下水道。

1.2.6 城市非点源污染研究进展及存在问题

1.2.6.1 国外研究进展

人类对非点源污染的认识和研究经历了由现象因果认识分析、机理模型开发到与计算机现代技术结合产生大型模型的3个发展阶段。在发达国家，城市非点源污染研究起始于20世纪70年代，早期的模型研究集中以土地利用对河流水质产生影响的认识为基础，对降水径流污染特征、影响因子、单场暴雨和长期平均污染负荷输出等方面进行了研究，以统计模型为主，建立污染负荷与流域土地利用或径流量之间的统计关系，著名模型有城市水管理模型(SWMM)、城市地表径流数学模型(STORM)等。到20世纪80年代，美国农业部研究所开发的化学污染物径流负荷和流失模型(CREAM)，采用了美国农业部水土保持局开发的SCS水文模型来计算暴雨径流，充分考虑了污染物在土壤中的物理、化学形态和分布状况，为城市径流污染模型的发展提供了很好的经验。20世纪90年代后，在对过去城市径流非点源污染模型多年应用经验进行总结的基础上，不断地完善已建立的模型，推出新的模型。同时，与非点源污染负荷估算相关的流域开发方向、非点源污染管理模型和风险评价成为本时期应用模型研究的最新突破点^[57]。随着计算机技术的飞速发展以及3S技术的广泛应用，一些功能强大的基

于流域尺度的具有空间数据信息处理、数据库技术、数学计算、可数字化表达等功能的超大型模型被开发出来，如由美国国家环保局开发的BASINS和美国农业部农业研究所开发的AGNPS等，这为城市非点源污染的定量化研究提供了方便。

1.2.6.2 国内研究现状

由点源、非点源污染造成的湖泊富营养化是我国20世纪70年代以来水环境研究的重点。80年代开展的我国湖泊富营养化调查标志着我国非点源污染研究的开始。而我国的城市非点源污染研究起始于对北京城市径流污染的研究，随后上海、杭州、苏州、南京、成都等城市也逐渐开展起来。我国城市非点源污染研究起步较晚，且仅局限于城区径流污染的宏观特征和污染负荷定量计算模型的研究^[58]。其中污染负荷定量计算模型研究的方向有径流量与污染负荷相关性分析^[59]、水量单位线和污染物负荷的研究以及地表物质累积规律^[60]等。同时，随着计算机技术的高速发展以及研究实践的需要，遥感技术以及人工模拟实验技术都已运用到城市非点源污染研究领域。到20世纪90年代后，分雨强计算城区径流污染负荷为城市径流污染负荷定量计算提供了新的研究方^[61]。目前，利用3S技术进行非点源污染研究的成果不断出现^[62,63,64]，为非点源污染研究提供了有力的支持，也提高了非点源污染的负荷精度。

非点源污染监测由于起源于分散的多样区域，且地理边界与发生位置难以识别与确定，尚未有更成熟快速测试方法，另外监测点位代表性的不完全也造成了污染因子转移规律研究上的困难。国外在水文观测、气象观测、水质监测等方面大多采用全自动系统，因而能够较准确地描述降雨径流污染物含量间的关系与时空变化规律，污染物流失负荷量的计算结果翔实、可靠，可利用的数据信息量大。我国目前尚无法达到这样的试验与监测条件，只能利用较少的数据通过相关模式的推演，计算污染物流失量，影响研究精度。我国目前的水污染控制重点仍主要放在点源上，对于非点源污染的认识尚处在起步阶段，缺乏相应的管理研究和实践，相关的法规条例也十分有限。缺乏针对非点源污染的治理手段，管理措施、政策有效性的量化研究更是一个空白，相关的非点源污染管理和控制措施零散，未能形成完整的体系。非点源污染的管理和控制措施的推广常因成本、利润等诸多因素而频频受阻，达不到预期效果。

1.3 城市化地表径流的水文效应

由于城市特殊的土地利用与土地覆盖，对城市水循环和水质产生的直接影响是引起洪涝、干旱、河流水量变化及地下水的变化，进而影响水质；同时，它们也间接地影响气候，并对水体产生影响。特别是近现代，由于人口和经济的发展带来的城市化水平的提高，引起了城市土地利用和土地覆盖的重大变化，城市化过程影响水文过程和特性，并携带大量污染物进入城市过境河流，影响侵蚀率^[65]。城市化带来的水文效应如图1^[66]所示。

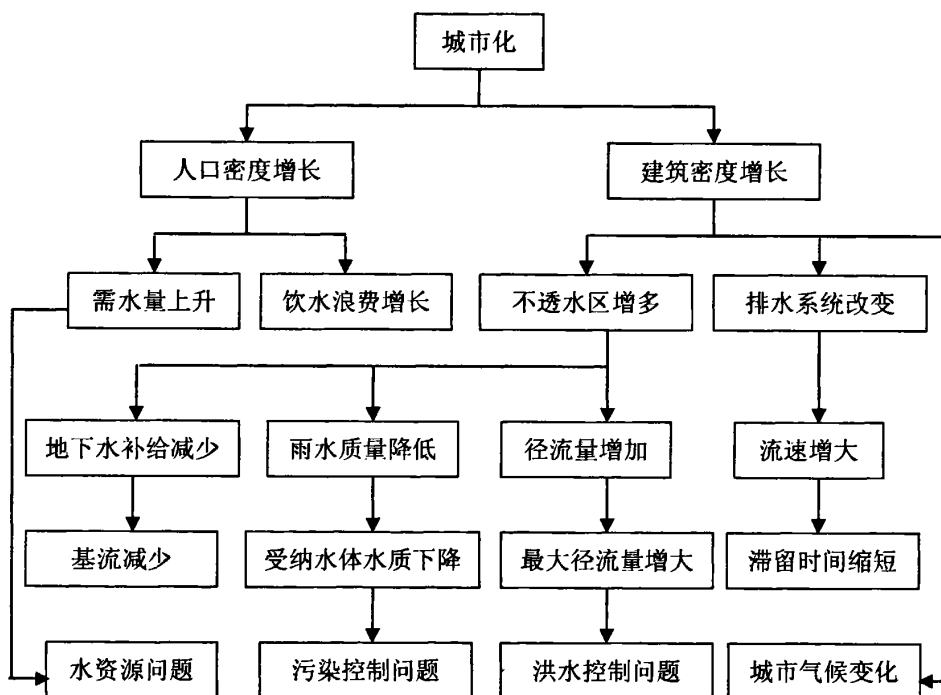


图 1.1 城市化地表径流水文效应

Fig1.1 The hydrology effect on urbanization surface runoff

降雨的淋洗和冲刷是城市非点源污染的重要一环，雨水中的各种污染物来自成云结核的污染成分，在降雨的过程中又进一步淋洗大气中的漂尘、污染物颗粒等，降雨到达地面后，首先满足植被截留、蓄渗与填洼及部分蒸发，后产生径流，从而冲刷地面累积的污染物质，一些可溶性物质或营养物质被溶解或吸附，随地表径流排入河流或渗入地下，进一步污染地表水或地下潜水。暴雨

径流的水文过程机制如图1.2所示。

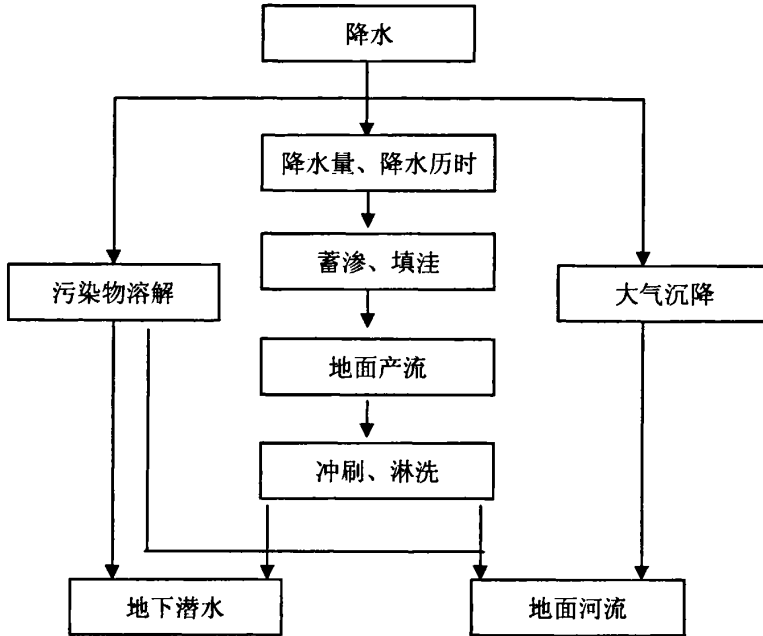


图 1.2 城市降雨径流水文过程

Fig1.2 The hydrology process on urban rainfall runoff

暴雨径流携带的污染物传输是地球元素迁移中的水迁移过程。水是地球表面分布最广的物质，水分子的偶极性与高介电常数，使水成为自然界中良好的溶剂，而对非极性化合物来说，在水分子的强极化力诱导下也会产生一定程度的溶解现象，这使水中污染物会发生一定程度的转化。另外，水是地球表层气—液—固三相中居中间的位置的成分，它起承上启下的作用，又因其具有流动性，故成为承载大气、固体地球表面中污染物的主要传输的载体。大气中的各种自然风化与人为污染物质通过干湿沉降或通过地表径流侵蚀进入水体的重金属、N、P等高分子聚合物成为水体污染的重要来源^[67]。在城市水循环过程中，大气污染物会随降雨沉降到达地表，地表积累物也会随水流运动进入接纳水体，从而造成城市及下游河段地表水污染。

1.4 研究目的和意义

城市地表径流非点源污染是仅次于农业非点源污染的第二大非点源污染源，城市地表径流中包含了大量的污染物质，有固体废物碎屑、化学物品、大气干湿沉降物以及车辆排放物和摩擦碎屑等。美国环保局向全国报道了城市径流是引起地表水水质恶化的主要来源^[68]，在八种污染源的分析中，河流水质恶化，城市径流的贡献排行第六，对湖泊的贡献排行第四，对河口污染的贡献排行第二（见表1.2）。

表1.2 人类活动产生的导致河流、湖泊、河口水质恶化的主要污染源

Table 1.2 The main pollution sources of rivers, lakes and estuaries from anthropic activities

	河流	湖泊、池塘、水库	河口
污染物	淤积(38%)	营养盐(44%)	病原体(47%)
	病原体(36%)	重金属(27%)	有机物富集(42%)
	营养盐(28%)	淤积(15%)	重金属(27%)
来源	农业(59%)	农业(31%)	城市点源(28%)
	水利工程(20%)	水利工程(15%)	城市径流(28%)
	城市径流(12%)	城市径流(12%)	大气降尘(23%)

随着人口的增加，城市化的快速发展，城市不透水地面面积迅速增大，城市径流（特别是暴雨径流）挟带大量的工业生产污染物、生活废弃物等有毒有害物质进入地表水体或地下水体，对河道及周围的工农业生产、鱼类养殖以及生活饮用水源危害越来越大。其造成的影响不仅仅是污染指标的超标，而且还会产生污染物的协同作用，直接对水生生物构成危害，并通过食物链对人体产生影响。因此，研究城市地表径流污染的特性及规律，开发可行性的污染控制技术和对策，为政府部门对非点源污染的控制管理决策提供科学依据具有重要意义。

1.5 本文的主要研究内容

本论文主要是对城市地表主要功能区进行污染物浓度进行监测，以确定地表径流的污染负荷及污染物的排放规律。为系统的分析南昌市市区降雨径流污染的时空分布特征和变化规律，重点探讨了南昌市区不同功能区（商业区、工业区、居民区和交通区）的路面径流，采用EMC模型分析比较其分布规律，并

通过模型模拟其污染物的排放量，此外，本文还对城市降水径流污染控制措施进行了研究，为径流的管理和控制提供了科学的理论依据。

由于城市非点源污染的危害性及其在世界范围分布的广泛性，对城市非点源污染的研究受到各国相关专家的关注。目前我国开展城市非点源污染采样分析的城市多分布在经济发达地区，而江西省在对城市非点源污染的研究方面相对滞后，主要是对城市非点源污染的危害性认识不足，以及开展城市非点源污染研究工作的投入相对较大。因此研究城市非点源污染的污染现状并提出防治对策，是建设南昌市为生态卫生城市，实现城市经济与环境可持续发展的重要内容之一。

1.6 本文的研究路线

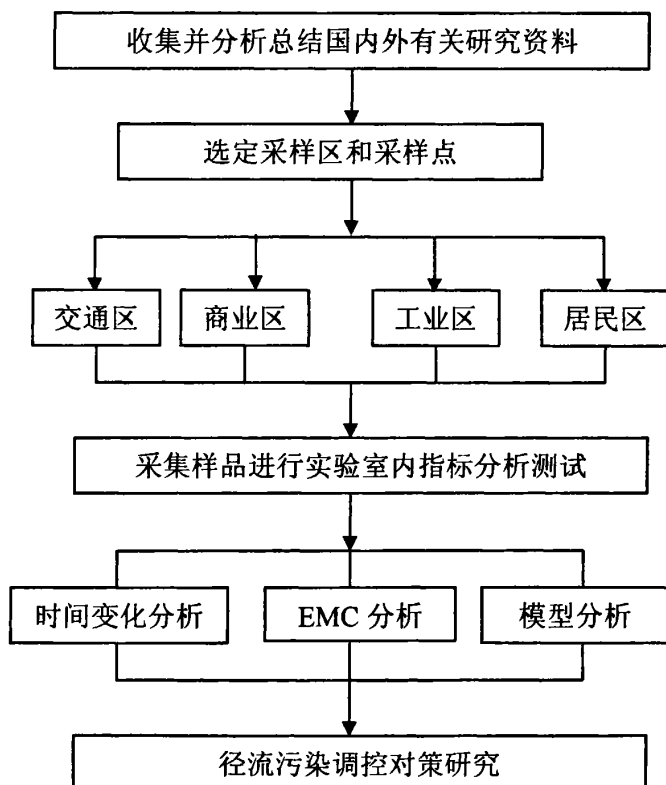


图 1.3 技术流程图

Fig1.3 The technic flow chart

第2章 研究区域环境特征与研究方法

2.1 南昌市环境概况

2.1.1 地理位置及气象条件

南昌地处江西省中偏北部，长江中下游，赣江、抚河下游，鄱阳湖西南岸，位于东经 115°27′ 至 116°35′、北纬 28°09′ 至 29°11′ 之间，东部与上饶市毗邻，南和抚州市相连，西同宜春市交界，北与九江市接壤。南昌是唯一一个与长江三角洲、珠江三角洲和闽东南经济区相毗邻的省会城市，承东启西，纵贯南北。京九、浙赣、皖赣三条铁路线交汇于此，是京九线上唯一的省会城市；105、320、316 国道纵贯南昌；昌北国际机场可达全国各大城市；水运经赣江入长江出东海。从经济学意义上看，南昌已成为国际和东部沿海发达地区产业梯度转移的理想地区。南昌全境以平原为主，东南平坦、西北丘陵起伏，南北长约 112km、东西宽约 107.6km，总面积 7402.36km²。其中：平原占 35.8%；水域占 29.8%；岗地低丘占 34.4%。昌南、昌北的地势依赣江流向，昌南西南高、东北低，以平原为主；昌北西北高、东南低，并以丘岗为主。全市平均海拔 25m；城区地势偏低洼，平均海拔 22m；西部是西山山脉，最高点梅岭主峰洗药坞，海拔 841.4m。

全市水网密布，赣江、抚河、锦江、潦河纵横境内，湖泊众多，有军山湖、金溪湖、青岚湖、瑶湖等数百个大小湖泊，市区湖泊主要有城外四湖：青山湖、艾溪湖、象湖、黄家湖(含礼步湖、蝶子湖)，城内四湖：东湖、西湖、南湖、北湖。城在湖中，湖在城中。

南昌属亚热带湿润气候，温暖湿润，四季分明，温差较大，夏季酷热，冬季寒冷，春季雨量较多，秋季气候景色十分宜人，平均气温 15.8℃，最低一月平均气温 4.9℃，最低气温 -9.9℃，最热七月平均气温 29.7℃，最高气温 43.2℃。年平均日照率为 43%，达 1888.5 小时。

南昌雨量充沛，多年平均降雨量 1645mm，且分布不均，4 至 6 月份为雨季，约占全年总降雨量 52%，春夏两季的降雨量为全年的 72.1%，秋冬季分别为 14.3%

和13.6%。全年相对湿度变化范围为72~84%，年平均相对湿度78%。

全年平均无霜期277天，降雪较少。且光照长而强，其辐射量为418.6~477.2KJ/cm²。

南昌市全年主导风为北风，出现频率为17.7%；其次为东北风，出现频率为12.7%；最小频率的风向出现在东南偏南，出现频率为0.5%；全年静风出现频率为24.7%。春、秋、冬季均以北风为主导风向，出现频率分别为16.4%、23.2%、21.5%；夏季以西南风为主导风向，出现频率为12.8%。四季静风出现频率分别为25.9%、24.8%、21.4%、26.6%。由于南昌市位于季风气候区，拥有3个风频的盛行风向，全年N、NE风频相近，方向基本一致；夏季的主导风向为SW，与次主导风向相反，也与全年主导、次主导风向大致相反。

2.1.2 南昌市污染现状^[69,70]

(1) 南昌市大气环境污染现状

“九五”期间，南昌市的大气环境污染主要来自能源消耗、工艺生产废气和机动车辆尾气等。“九五”期间废气排放总量17651244万标m³，其中工业废气占总量的94%，工业废气中二氧化硫排放197326t，烟尘排放130791t。而燃烧废气又占工业废气的首位，排放量为9318166万标m³，占废气排放总量的52.8%。全市工业废气主要污染物为二氧化硫、氮氧化物、烟尘。

(2) 地表水质污染问题

赣江是直接关系到南昌社会经济发展，每天南昌市要从中提取工业和生活用水199万m³，占市区取用地表水总量的92%，排出工业和生活污水133万m³，使赣江南支已受到严重污染，如南支青山闸—尤口段水质标准低于V类。全国300家工业废水重点污染企业，南昌就占16家。与此同时，因工业和生活污水的间接排入，湖泊水质也不断恶化，市区湖面的养殖功能因遭受污染正日益萎缩。青山湖养殖的鱼，已不能食用，象湖和艾溪湖水质不少指标达不到渔业用水要求，直接影响养殖产量，梅湖出现大批死鱼现象。如此水环境的继续恶化，必将影响市民的日常生活，危害市民身体健康，破坏一个城市的整体感观形象。究其原因，一方面是江河湖泊两岸城市进程加快，大中小型企业迅速发展，污染源增多加密，另一方面，是随着城市地发展，对城市非点源污染对其造成的影响估计过低。

2.2 实验方案设计

由于降水后形成的地表径流对地面有很大的冲刷作用，因此下垫面的性质在很大程度上影响地表径流的水质。为了能够较全面的反映市区降水造成的非点源污染,采样地点在分析其土地利用及功能区划的基础上,选择有代表性的典型功能区作为研究区域。采样地点见表2.1。图2.1是采样布点在市区的空间分布。

表2.1 不同功能区的采样点
Table2.1 Sampling sites in different function areas

功能区	采样地点	环境特征
交通区	八一大道	市重要交通干道
商业区	中山路	市商业繁华地段
工业区	高新技术产业开发区	国家级新工业区
居民区	高教小区	中等密度居民小区

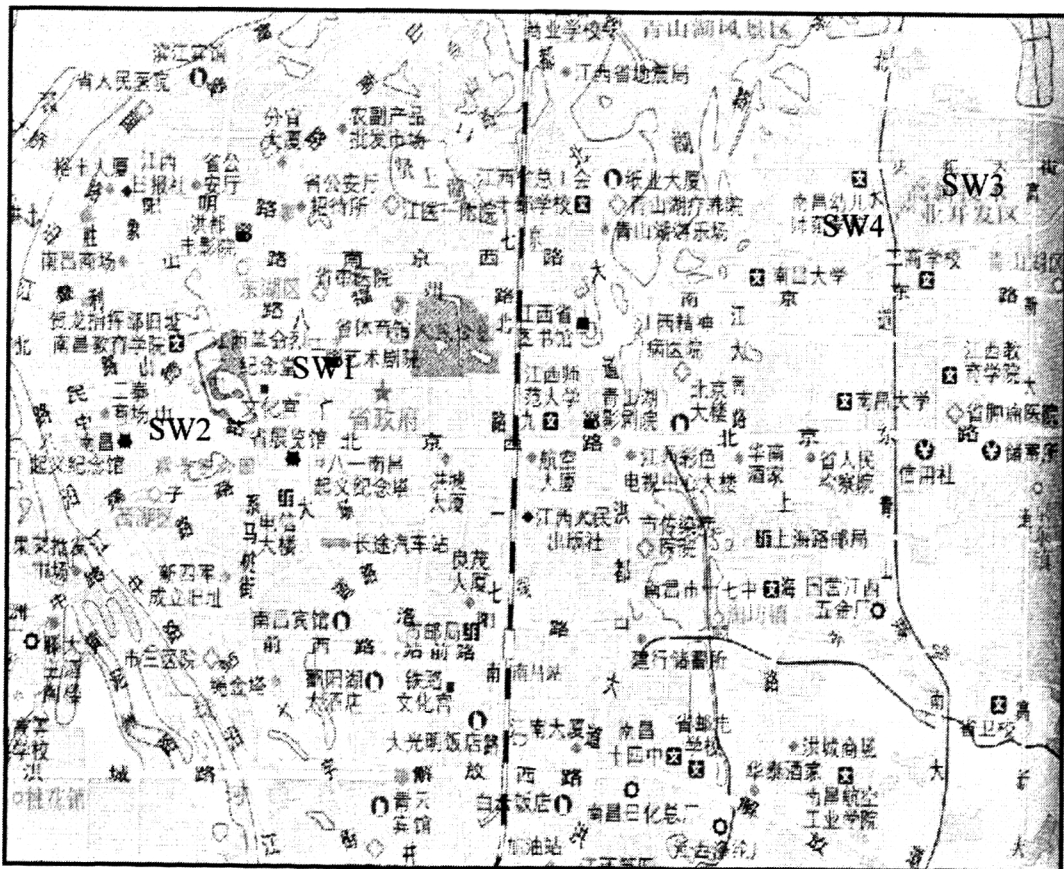


图2.1 路面径流采样图
Fig.2.1 The site of smapling

在交通区，选择八一大道，采样点为沃尔玛购物广场北约 200 米处公交车站附近的雨水集口处，路面材料为沥青；商业区为中山路与苏圃路交界处的雨水集口处，路面材料为沥青；工业区采样点位于高新区江西联通附近的雨水集口处；居民区采样点位于距小区西门口约 200 米处的雨水集口处，路面材料为水泥。

2.3 水质监测指标及分析方法

水质指标的分析方法采用国家标准，重金属采用 ICP-AES 方法，具体水质各项污染物的指标分析方法见表 2.2 ；

表2.2 水质指标分析方法
Table 2.2 Analysis method of water quality index

TSS	重量法(GB11901-89)
COD	重铬酸盐法 (GB11914-89)
NH ₃ -N	纳氏试剂比色法 (GB7479-87)
TP	钼酸铵分光光度法 (GB11893-89)
Cu、Zn、Pb、Cd	电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)法

2.4 实验主要试剂及仪器

2.4.1 主要实验仪器

79-1 磁力加热搅拌器	浙江金坛市富华仪器有限公司
TGL-16C 高速离心机	上海安亭科学仪器厂
TG-628A 分析天平	上海精密科学仪器有限公司
珠江XJ-III消解装置	广东医疗器械厂
756MC紫外可见分光光度计	上海精密科学仪器有限公司
MDS-2002A7 消解仪	上海新仪微波化学科技有限公司
2100DV ICP-AES	美国 PerkinElmer 公司

2.4.2 主要试剂

第2章 研究区域环境特征与研究方法

表2.3 实验试剂名称及试剂厂家
Table2.3 Name and manufacturer of experimental reagents

指标	试剂名称	试剂厂家
NH ₃ -N	氯化铵(AR)	天津福晨化学试剂厂
	碘化汞(AR)	上海精析化工科技有限公司
	碘化钾(AR)	上海试剂一厂
	酒石酸钾钠(AR)	武汉化学试剂厂
TP	硫酸(AR)	上海焱晨化工实业有限公司
	硝酸(AR)	上海焱晨化工实业有限公司
	氢氧化钠(AR)	天津市福晨化学试剂厂
	过硫酸钾(AR)	上海爱比西化工有限公司
	抗坏血酸(AR)	天津化学试剂有限公司
	钼酸铵(AR)	天津市福晨化学试剂厂
COD	重铬酸钾(GR)	天津市福晨化学试剂厂
	硫酸亚铁铵(AR)	上海试剂赫维化工有限公司
	硫酸银(AR)	上海试剂一厂
	硫酸汞(AR)	上海化学试剂采购供应站经销
	硫酸(AR)	广东汕头市西陇化工厂
Cu、Zn、Pb、Cd	硝酸(GR)	上海试剂赫维化工有限公司
	双氧水(AR)	上海焱晨化工实业有限公司

第3章 研究区域实验分析

3.1 采样

3.1.1 采样点的布设

城市非点源污染是造成城市环境污染的主要污染源之一，不同土地利用类型，即地表物特性不同对污染的贡献有很大差异。为了能够较全面的反映市区降水造成的非点源污染，采样地点在分析其土地利用及功能区划的基础上，选择有代表性的典型功能区作为研究区域。待降雨开始形成径流时，在雨水排水口处按照一定的时间间隔进行采样，根据南昌市城市功能分区选择典型区域，并结合人力、物力、财力等各种实际情况进行了布点监测，设计采样点为：居民区，交通区，商业区和工业区。本实验区域的选择是基于不同类型的土地利用来设计的，力求具有代表性。

3.1.2 径流的采集

在形成径流的区域，用聚乙烯瓶收集样品，从刚形成径流开始，每隔5分钟采集一次，样品采集后，贴好标签，编好号码，并且记录采样地点、日期、采样起止时间等。

3.1.3 样品的保存

采集水样所用的聚乙烯瓶事先用4mol/L的硝酸浸泡24小时，然后用蒸馏水冲洗干净，晾干备用。水样采集回来后放置冰箱保存待用。

由于受到采样条件的随机性（即降雨发生的随机性）影响，在此取三场观测较为完整的降雨进行径流水质分析。

2007年8月15日采集交通区、商业区、工业区和居民区路面径流，降雨历时65分钟，降雨量为13.5mm。从产流开始每隔5分钟采集一次样品。

2007年12月24日采样，此次降雨历时45分钟，降雨强度较小，降雨量达

到了 11.5mm。从产流开始每隔 5 分钟采集一次样品。

2008 年 3 月 13 日采样，此次降雨强度很大，降雨历时 55 分钟，降雨量达 16.2mm，从产流开始每隔 5 分钟采样一次。

3.2 实验结果与分析

3.2.1 TSS、COD、NH₃-N、TP 的实验结果与分析

各指标均采用国标法，TSS 采用重量法；COD_{Cr} 的测定先进行消解，然后用硫酸亚铁铵进行滴定，根据体积来计算 COD 的值；NH₃-N 采用纳氏试剂比色法，经离心预处理应样品进行分光光度法测定；TP 的测定是运用钼酸盐分光光度法，先进行消解，然后再测定其吸光度值。

图 3.1~3.12 列出了不同功能区（工业区、商业区、居民区和交通区）在三场降雨径流中污染物随时间的变化示意图。

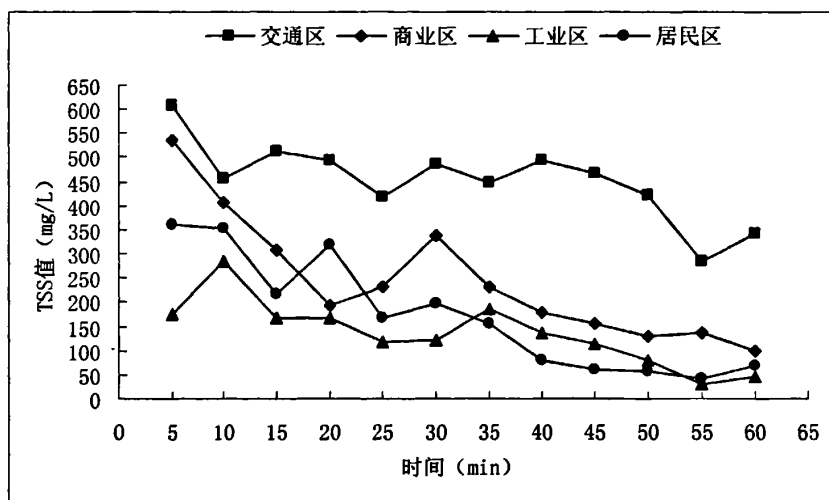


图 3.1 2007 年 8 月份 TSS 值随时间变化

Fig3.1 The change of TSS value with time variation in August in 2007

第3章 研究区域实验分析

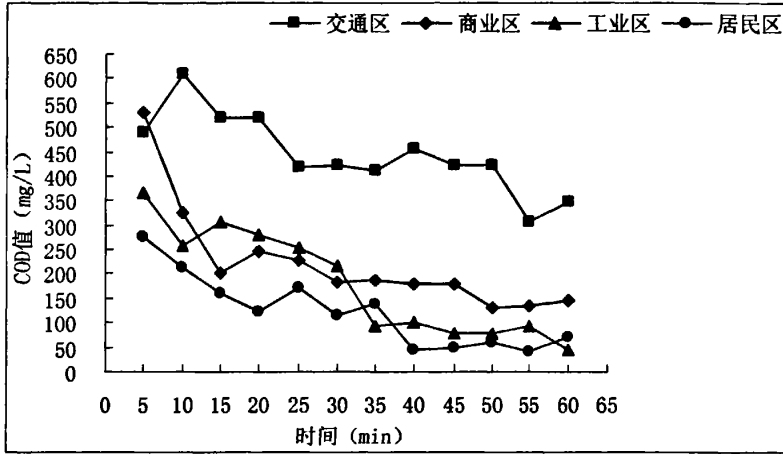


图 3.2 2007 年 8 月份 COD 值随时间变化

Fig3.2 The change of COD value with time variation in August in 2007

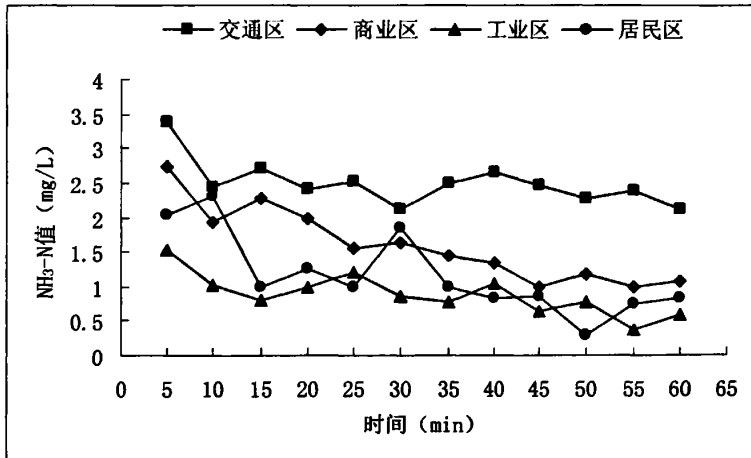


图 3.3 2007 年 8 月份 NH₃-N 值随时间变化

Fig3.3 The change of NH₃-N value with time variation in August in 2007

第3章 研究区域实验分析

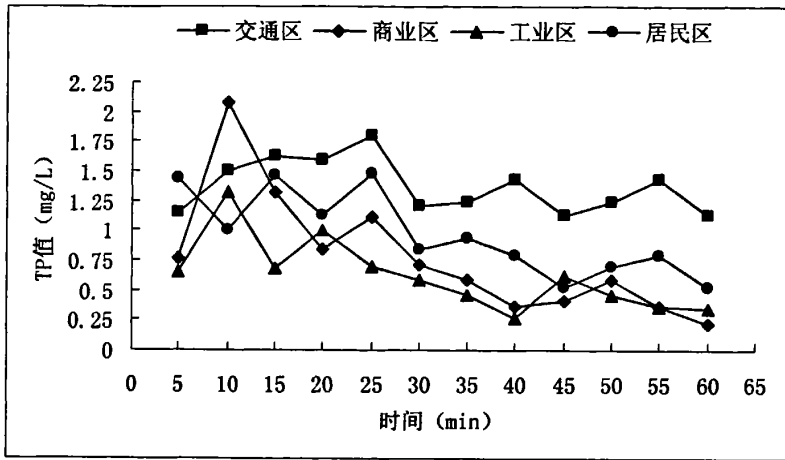


图 3.4 2007 年 8 月份 TP 值随时间变化

Fig3.4 The change of TP value with time variation in August in 2007

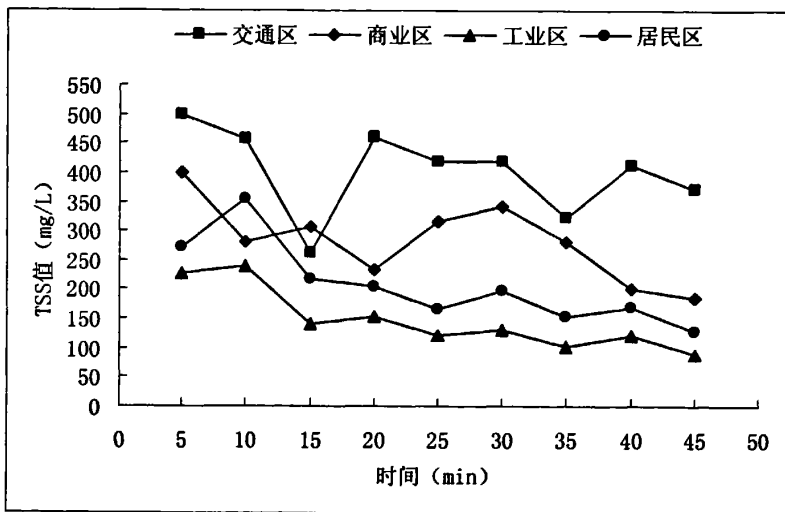


图 3.5 2007 年 12 月份 TSS 值随时间变化

Fig3.5 The change of TSS value with time variation in December in 2007

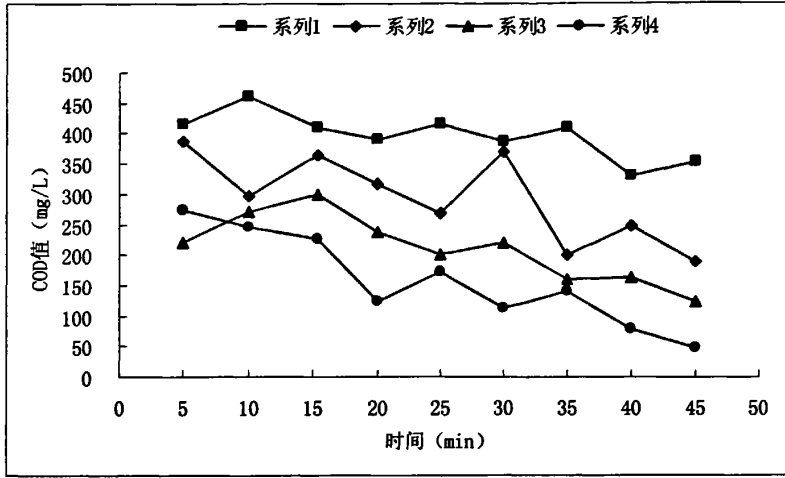


图 3.6 2007 年 12 月份 COD 值随时间变化

Fig3.6 The change of COD value with time variation in December in 2007

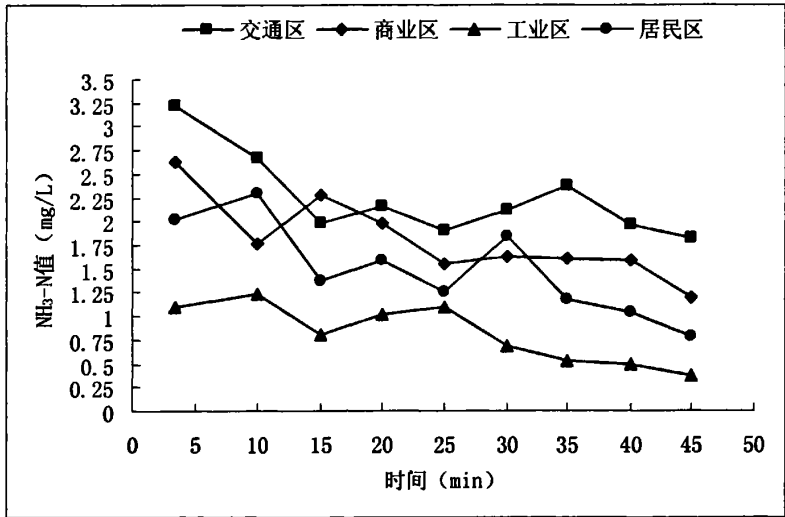


图 3.7 2007 年 12 月份 NH₃-N 值随时间变化

Fig3.7 The change of NH₃-N value with time variation in December in 2007

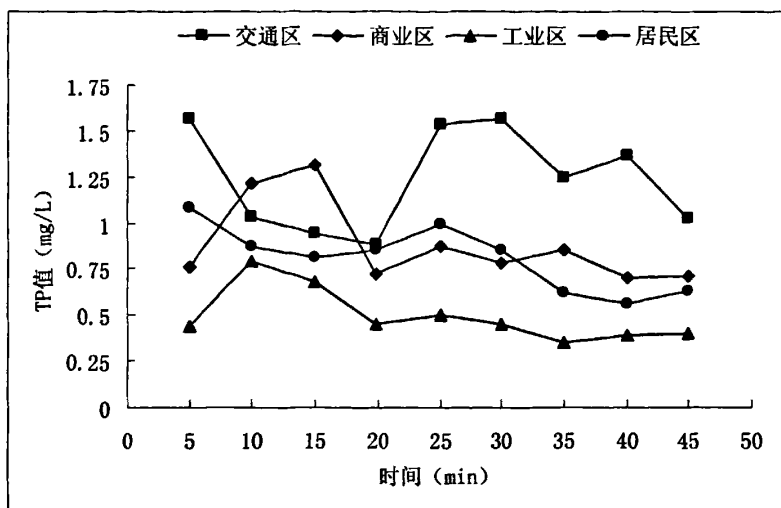


图 3.8 2007 年 12 月份 TP 值随时间变化

Fig3.8 The change of TP value with time variation in December in 2007

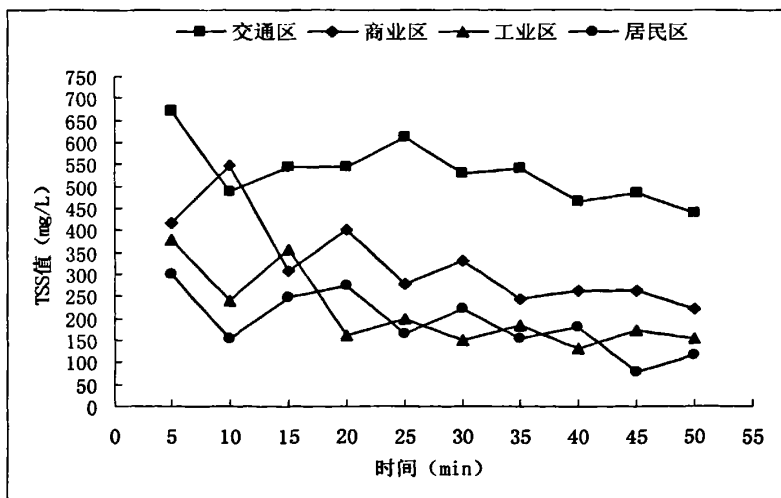


图 3.9 2008 年 3 月份 TSS 值随时间变化

Fig3.9 The change of TSS value with time variation in March in 2008

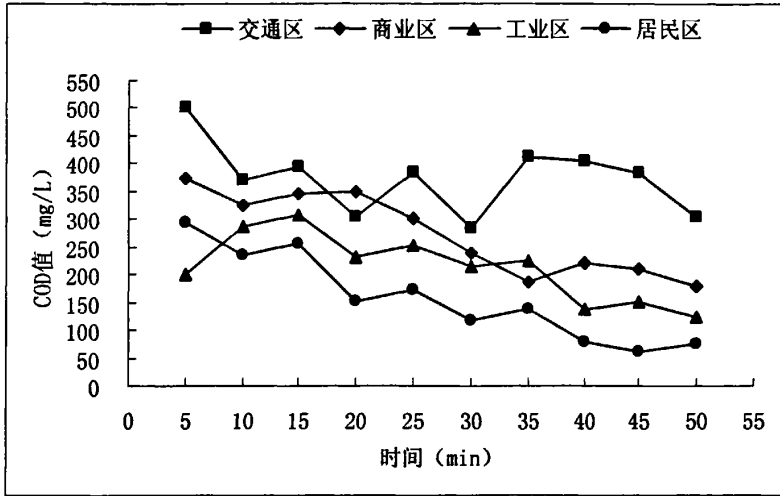


图 3.10 2008 年 3 月份 COD 值随时间变化

Fig3.10 The change of COD value with time variation in March in 2008

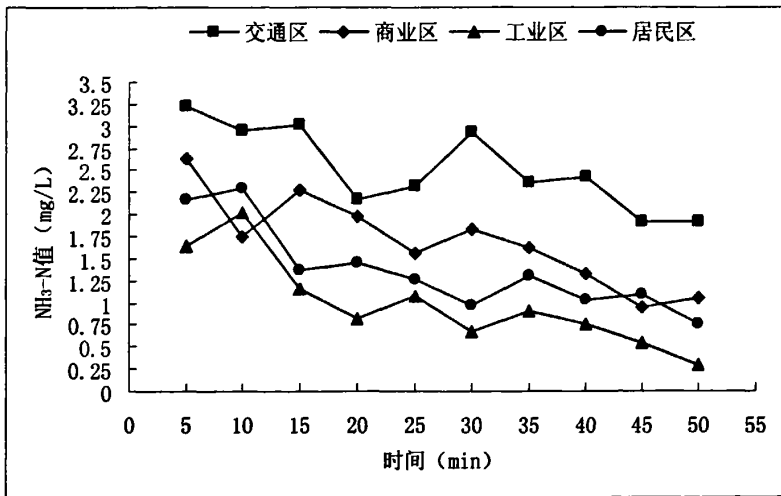


图 3.11 2008 年 3 月份 NH₃-N 值随时间变化

Fig3.11 The change of NH₃-N value with time variation in March in 2008

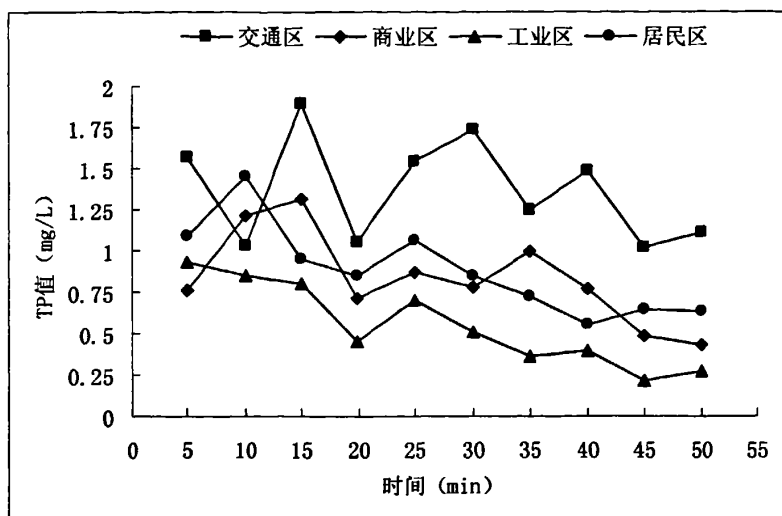


图 3.12 2008 年 3 月份 TP 值随时间变化

Fig3.12 The change of TP value with time variation in March in 2008

从实验结果得到各功能区污染物浓度随降雨时间变化趋势来看，不同土地利用类型对同一种污染物的贡献率差异较大；同一土地利用类型对不同污染的贡献率亦不同；各种污染物的浓度随降雨时间发生明显的变化。

(1) 开始产生径流起，其径流中的污染物质一直都是在变化的，由于径流中污染物质在来源、组成物质等方面存在有很大的差别，因此不同下垫面的性质等会影响到径流中污染物质含量的变化。通过对不同降雨径流的污染指标监测发现，在降雨初期，即大约在 20 分钟前产生的径流中污染物的浓度是最高的，随着降雨历时的延长，污染物浓度逐渐下降。

(2) 污染指标在整个降雨过程的变化都比较复杂，这主要是径流中污染物质来源广泛，且随机性大，从图 3.1~3.12 可以看出，TSS、COD_{Cr}、NH₃-N、TP 在工业区、商业区和居民区是存在有明显的衰减规律，但是在交通区，这种规律不明显，这主要是前三者所在地区在雨天时人类活动没有交通区那么剧烈，人为干扰要比交通区小的多，因此降雨对污染物的冲刷随着时间的推移会越来越少，但是在交通区，即使是在雨天，机动车辆和人类活动一直都很剧烈，也就是进入径流中的污染源在源源不断，再加上机动车辆在径流中不停的搅动，使得污染物的排放要比其他地区复杂的多，因此污染物随时间衰减规律不明显。

(3) 城市地表径流来自大气降水，除雨天的少量蒸发及填洼外，其产生的

地表径流量随地表下渗能力而变化。土地利用区的透水性对地表径流产生直接影响，透水率高的地区，下渗能力强，产生的地表径流量小，对地表累积物冲刷能力弱，地表径流中污染物浓度低。如在8月份的监测中，在住宅区，TSS最大值为358mg/L，COD_{Cr}为284mg/L，NH₃-N为2.41mg/L，TP为1.34mg/L；而透水率低的地区，下渗能力弱，产生的地表径流量大，对地表累积物冲刷能力强，地表径流中污染物浓度高，如交通区，污染物浓度高，TSS最大值为620mg/L，COD_{Cr}为610mg/L。NH₃-N为3.42mg/L，TP1.83为mg/L。

(4) 降雨强度与地表径流中污染物的浓度有一定的关系。从三次不同强度的降雨径流中可以看出，在12月份中污染物的浓度要低于另外两次的浓度，原因是在12月份的降雨强度较小。降雨强度与地表径流中污染物浓度大约成正相关性，因为降雨强度越大，对地面的冲刷力也就越大。

3.2.2 重金属监测的实验结果与分析

在分析水样的重金属含量中，关键是样品的消解。传统的消解技术步骤繁琐，安全性差，预处理耗时长。微波消解作为样品分析的新技术，具有消解样品能力强、速度快、消耗化学试剂少、金属元素不易挥发损失、污染小、空白值低等优点，从整体上提高了样品分析的速度和质量。电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)检出限低、精密度及准确度高、分析速度快、线性范围宽，可对水样中多种金属元素同时进行测定。因此，本实验采用微波消解和ICP-AES方法来监测样品中的重金属含量。

3.2.2.1 实验步骤

(1) 水样消解

取混合水样15mL于洁净干燥的消解罐中，依次加入硝酸和过氧化氢消解液，安装外壳保护套后于微波消解系统转盘上进行消解，消解完成后待消解罐冷却至室温，取出样品过滤，将滤液移入50ml容量瓶中，用去离子水定容待测。

根据相关资料^[71,72,73,74]，通过实验确定进行地表径流消解的最佳条件。其最佳消解条件的结果见表3.1。

表 3.1 微波消解的条件选择

Table3.1 The choice of microwave digestion conditions

试剂加入量 (ml)		消解压强与时间(min)			
HNO ₃	H ₂ O ₂	400KPa	800KPa	1200KPa	500KPa
3	2	3	7	8	4

(2) 样品空白制备

取与样品相同体积的去离子水，按照相同条件进行处理，制备样品空白溶液。

(3) 配制标准溶液系列。

3.2.2.2 实验结果与分析

重金属是路面径流污染中很重要的指标，对受纳水体产生的影响也是非常大的，路面径流中重金属的来源广泛复杂，除了大气的干湿沉降，机动车的活动是路面重金属的一个非常重要的来源，机动车的制动器、轮胎、车体、燃料及润滑油、除冰盐等是重金属中Cd、Cu、Pb、Zn等的重要来源。图3.13~3.16分别列出了不同功能区中重金属Cd、Cu、Zn、Pb在径流中分布情况。

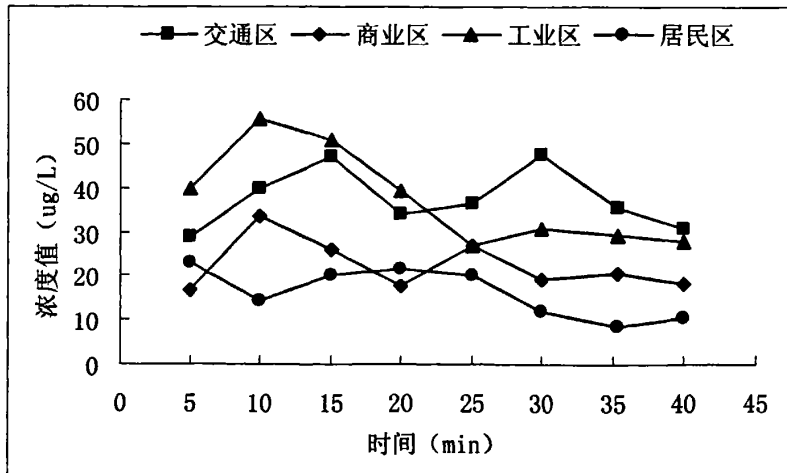


图 3.13 2008 年 3 月份 Cd 值随时间变化

Fig3.13 The change of Cd value with time variation in March in 2008

从图3.13可以看出，Cd在居民区、商业区和工业区都呈现出了很好的衰减规

律，在居民区的浓度变化范围为9.82~26.87ug/L，在商业区的变化范围是13.82~35.25ug/L，在工业区的浓度变化范围为10.22~46.78ug/L，交通区的浓度变化范围是17.89~51.36ug/L，从图中可以看出，交通区的Cd瞬时浓度存在有很大的波动性，没有出现衰减规律，除了上述的原因外，Cd主要来源于机动车辆的轮胎磨损产物，在整个降雨的过程中，机动车辆一直在运动，其轮胎磨损产生的含Cd的物质在不断的排放到径流中，因此径流中的Cd的浓度不会随着产流时间的增加而降低，因为其污染源一直存在。而其他的功能区机动车辆的活动没有交通区的剧烈，因此初期径流只会把累积在路面上的污染物质冲刷掉，降雨过程中污染源比较弱，因此呈现的衰减规律要比交通区明显。

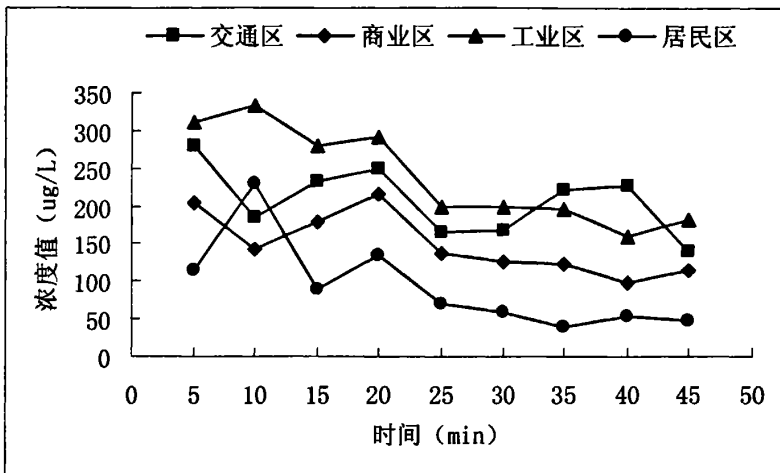


图 3.14 2008 年 3 月份 Cu 值随时间变化

Fig3.14 The change of Cu value with time variation in March in 2008

图3.14是不同功能区Cu随产流时间的变化规律，从图中可以看出，居民区、商业区和工业区的衰减规律比较明显，交通区的变化比较小，其浓度的变化范围分别为48~229ug/L、98~254ug/L、81~332ug/L、140~316ug/L。

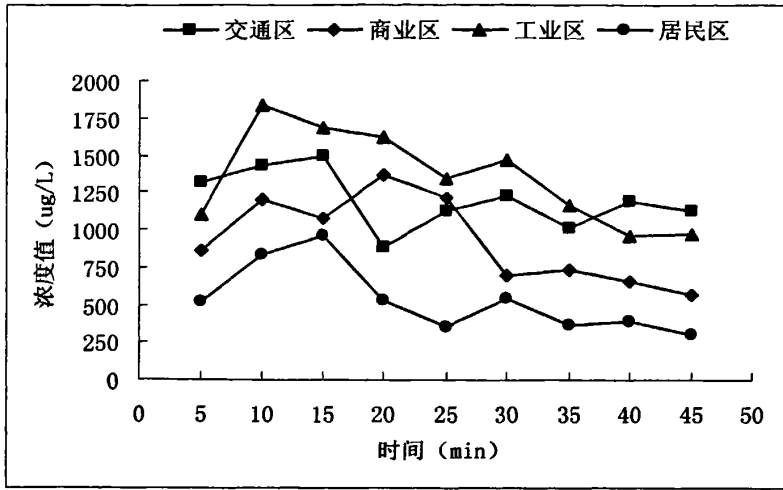


图 3.15 2008 年 3 月份 Zn 值随时间变化

Fig3.15 The change of Zn value with time variation in March in 2008

图3.15列出的是不同功能区Zn的浓度随产流时间的变化，从图中可以看出，Zn的浓度随产流时间的变化呈现逐渐降低的趋势，在交通区，其浓度的变化范围为714~1568ug/L，居民区其浓度变化范围为310~958ug/L，商业区的浓度变化范围为573~1362ug/L，工业区的浓度变化范围为704~1831ug/L。总体来说，交通区的瞬时浓度波动比其他区要大，这与交通区特有的环境特征分不开，机动车辆的扰动作用会影响径流中Zn的排放。

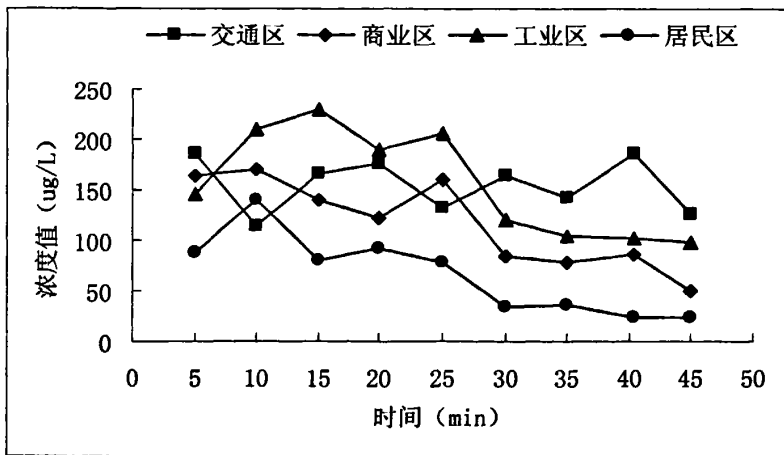


图 3.16 2008 年 3 月份 Pb 值随时间变化

Fig3.16 The change of Cd value with time variation in March in 2008

图3.16是不同功能区Pb随产流时间变化情况，图中显示四个功能区都呈现出了比较明显的衰减规律，初期浓度都非常高，工业区、交通区、商业区和居民区浓度变化范围分别为71~230ug/L、104~187ug/L、52~190ug/L、24~148ug/L，在交通区初期径流中因为有Pb的累积量，其浓度比较高，后面的浓度虽然呈现衰减规律，但其总的浓度还是比较高的。

3.3 城市地表径流污染物浓度的分布特征

在任意一场降雨引起的地表径流过程中，由于降雨强度的随机性变化，使得径流中污染物的浓度随时间变化很大（呈数量级的变化），所以目前国外通常采用“次降雨径流平均浓度”来表示在一场降雨地表径流全过程排放的某污染物的平均浓度。按照 USGS（美国地质勘探局）对次降雨事件的定义^[75]，次降雨事件是指总降雨量至少为 0.05 英寸的降雨，且一次降雨过程不得有连续 6 小时的零降雨间隔。次降雨径流平均浓度用 EMC（event mean concentration）来表示，其定义为：任意一场降雨引起的地表径流中排放的某种污染物的质量除以总的径流体积，可用下面的式子表示：

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int C_t Q_t dt}{\int Q_t dt} \quad (3.1)$$

式中：

EMC—降雨事件的平均浓度(mg/L)；

M—整个降雨过程中总污染物含量(g)；

V—整个降雨过程中相对应的总径流量(m³)；

T—指总的径流时间(min)；

C_t—随时间变化的污染物的含量 (mg/L)；

Q_t—是指随时间变化的径流速率(m³/min)。

由 EMC 的定义可知，EMC 实质上是一场降雨径流全过程的瞬时污染浓度的流量加权平均值。因为从暴雨径流对受纳水体的影响方面来讲，水体对排入的地表径流的污染响应速度相对于径流过程中污染物浓度的变化或瞬时负荷变化而言要慢的多，所以，一般情况下，了解 EMC 或总污染负荷比了解径流过程的瞬时变化显得更为重要。

在实际情况下，在采用 EMC 公式计算的过程中，实测的径流量和污染物的浓度数据都是不连续的，尽管在国外的一些资料中，流量的测试及部分水质指标（如，PH、温度、浊度及电导率等）可以做到连续纪录测量，但大部分水质指标的监测是非连续的，即使在自动采样系统中，用于浓度分析的样品采集也是不连续的，采集的样品在降雨的时间过程中的分布也是不均匀的，所以在实际应用中采用下式来近似计算 EMC 值，即将整个降雨过程分为 n 段，在每一时段取一次水样，测其污染物的浓度，并测出该时间段的径流量 V_j ，由下式计算 EMC 值。

$$EMC = \frac{\sum_{j=1}^n C_j V_j}{\sum_{j=1}^n V_j} \quad (3.2)$$

式中：

C_j —第 j 时间段所测的污染物的浓度，mg/L；

j —第 j 时间段的径流量， m^3 ，一般按两个样品采集时间间隔之中间值划分流；

n —时间分段数。

本文在研究屋面径流和路面径流的 EMC 值的计算方法就是上述的方法，不可以计算出不同下垫面降雨径流中污染物的平均浓度，还便于对不同功能区进比较，找出其空间分布规律。

3.3.1 TSS、COD、NH₃-N、TP 的 EMC 值

通过对不同功能区路面径流的采样试验结果，运用上述 EMC 的计算方法，对不同功能区的次降雨平均浓度进行了分析。图 3.17~3.22 是不同功能区三次降雨采集的径流样品的 EMC 值。

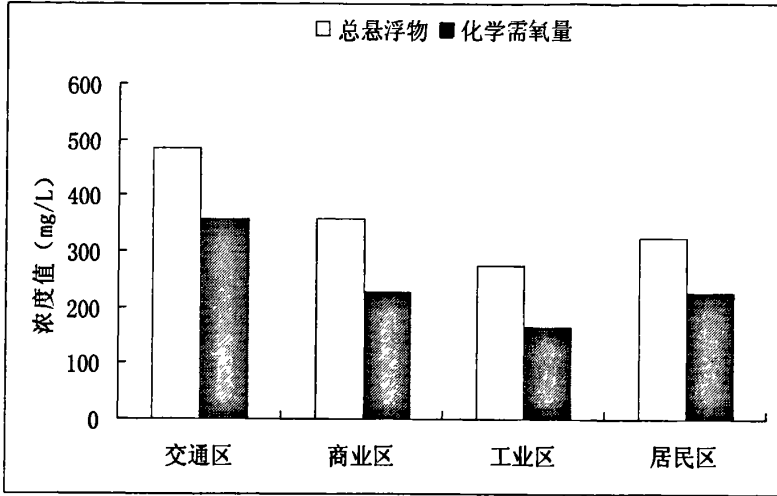


图 3.17 2007 年 8 月份不同功能区污染物的 EMC 值

Fig3.17 The EMC of contaminants in different areas in August in 2008

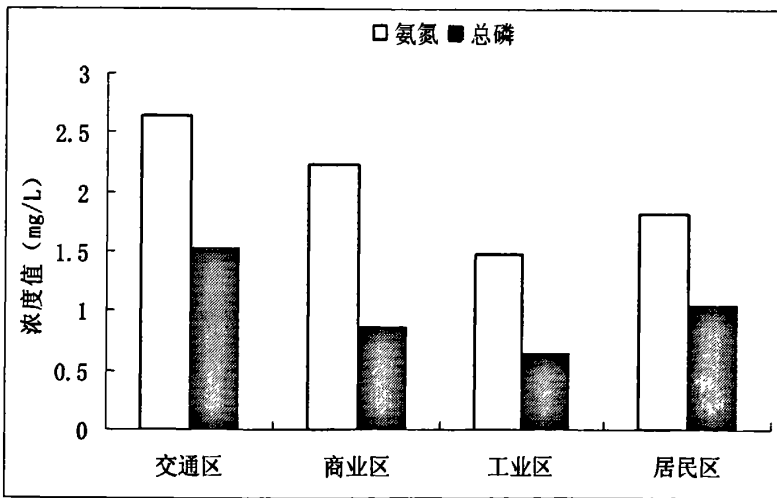


图 3.18 2007 年 8 月份不同功能区污染物的 EMC 值

Fig3.18 The EMC of contaminants in different areas in August in 2008

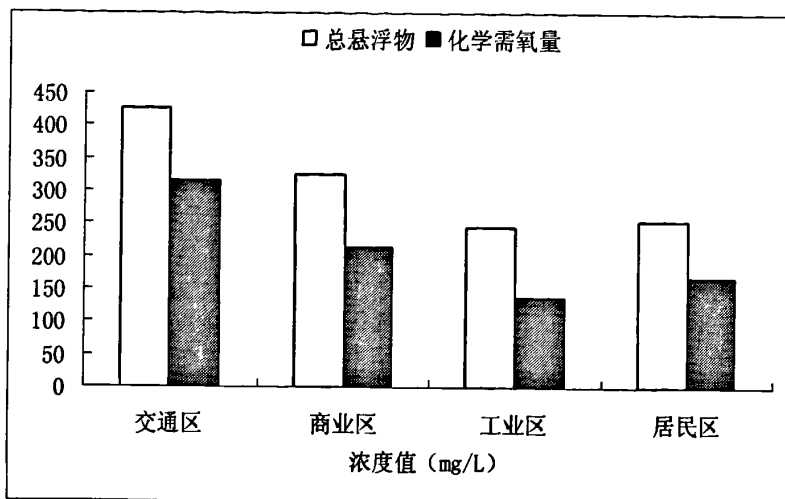


图 3.19 2007 年 12 月份不同功能区污染物的 EMC 值

Fig3.19 The EMC of contaminants in different areas in December in 2007

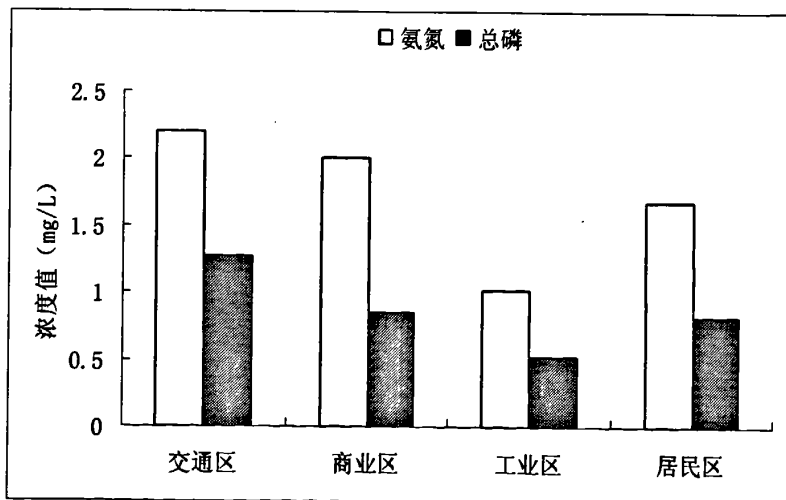


图 3.20 2007 年 12 月份不同功能区污染物的 EMC 值

Fig3.20 The EMC of contaminants in different areas in December in 2007

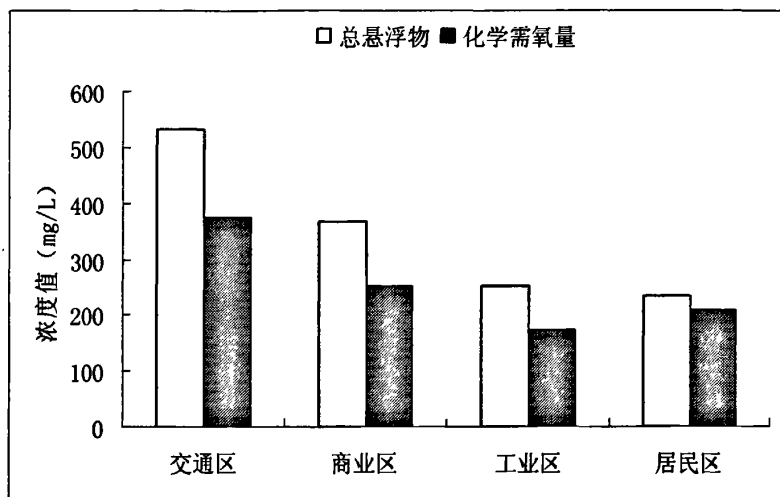


图 3.21 2008 年 3 月份不同功能区污染物的 EMC 值

Fig3.21 The EMC of contaminants in different areas in March in 2008

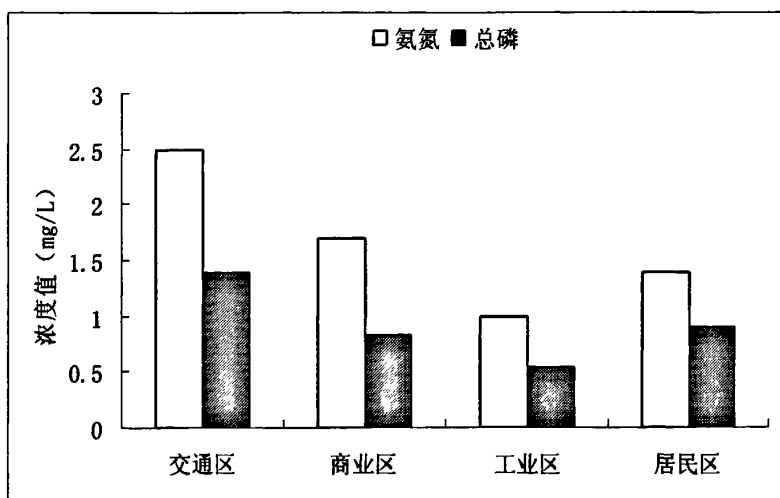


图 3.22 2008 年 3 月份不同功能区污染物的 EMC 值

Fig3.22 The EMC of contaminants in different areas in March in 2008

从图中可以看出，图中的污染指标 TSS 在不同的功能区也存在有很大的差异性，其顺序为交通区>商业区>居民区>工业区，这主要是因为交通区是城市人

类活动最剧烈的地方，路面除了人类制造大量的垃圾堆积外，车辆的运动自身产生的固体颗粒物以及车辆与路面的摩擦产物也是 TSS 的一个主要来源，因此在交通区径流中 TSS 的值是最高的，在工业区，由于是高新技术工业区，污染量大的企业少，区内路面垃圾被清扫得很干净，厂区的绿化面积增大，因此其 TSS 的浓度会大量减少。同时，由于 COD_{Cr} 大部分是吸附在固体颗粒物上，因此其分布的规律与 TSS 基本上是一致的，即最高浓度出现在交通区，最低出现在工业区。从整体上来说，COD_{Cr} 的浓度在四个功能区都超出了国家 V 类水标准。TP 的浓度在四个功能区中也有差异，其顺序为交通区>居民区>商业区>工业区，磷除了来自大气沉降外，交通区的磷部分还来自机动车辆的排放物和路面植被的施肥等，商业区的磷部分来自商业活动产物以及周围植被的施肥等。在居民区由于居民生活活动过程中使用含磷物质以及对花草的施肥等，这些物质如在路面上累积就会随雨水进入到径流中；工业区的磷部分来自于工业生产产物以及工厂周围绿化施肥等；四个功能区的 TP 的 EMC 值都超出了国家 V 类水质标准。NH₃-N 在四个功能区的表现为交通区>商业区>居民区>工业区，在降雨过程以及形成产流的过程中，氮除了大气的干湿沉降外，植被的施肥和机动车辆的排放物也是其中的重要来源；四个功能区中，NH₃-N 的 EMC 值都超出了国家 IV 类水质标准，尤其是在交通区，NH₃-N 的 EMC 值超出了国家 V 类水质标准。

在各功能区，各类污染物的 EMC 浓度都超过了国家 IV、V 类水标准，可见城市地表径流具有很高的污染强度。

国家《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)见表 3.2。

表 3.2 地表水环境质量标准 (mg/L)

Table 3.2 Environment quality standard of surface water (mg/L)

类别	COD	NH ₃ -N	TP	Cu	Zn	Pb	Cd
IV	30	1.5	0.3	1.0	2.0	0.05	0.005
V	40	2	0.4	1.0	2.0	0.1	0.01

3.3.2 重金属的 EMC 值

通过对不同功能区路面径流的采样试验结果，运用上述 EMC 的计算方法，图 3.23 是 2008 年 3 月份不同功能区径流中重金属 EMC 值，

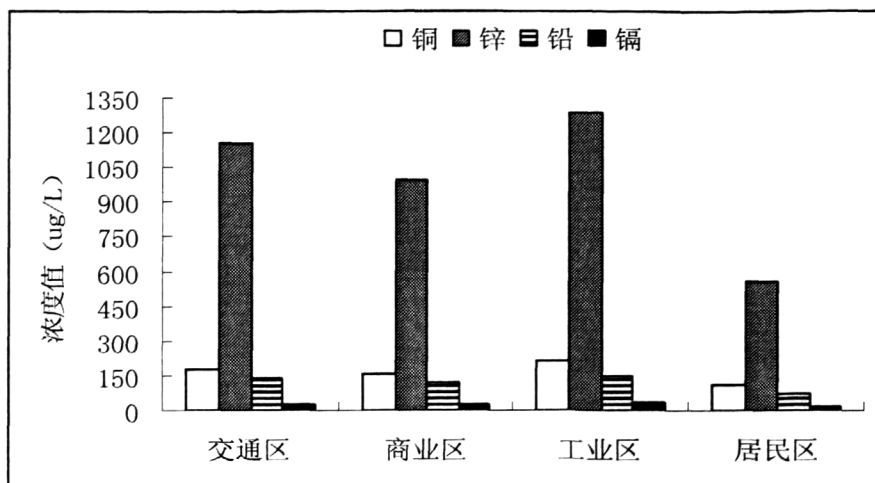


图 3.23 2008 年 3 月份不同功能区重金属的 EMC 值

Fig3.23 The EMC of heavy metals indifferent areas in March in 2008

从图3.23可以看出，Cd、Cu、Pb、Zn的浓度最高出现在工业区，其次为交通区、商业区和居民区，这可能是因为工业区虽然进行了改善环境生产，但工业生产时会产生大量的重金属元素，重金属这种物质来源很广，可以通过大气中的粉尘排放，这些吸附在小颗粒物上的重金属的量最多，重金属含量与颗粒物的关系如表3.3^[76]所示，因此在工业区内，径流中的重金属浓度含量很高，径流中的Cd、Pb浓度超过了国家V类水标准(Cd为0.01mg/L，Pb为0.1mg/L)，除了工业区外，浓度次高的是交通区，这主要是与交通区的机动车辆的运动紧密相关，机动车的制动器、车体、轮胎和燃料及润滑油是交通区径流中重金属Cd、Cu、Pb、Zn的主要来源，因此，其重金属浓度要高于商业区和居民区。从整体上来看，Cr、Pb在四个功能区都超过了国家V类水标准。

表 3.3 重金属含量在不同粒径颗粒中的分配

Table3.3 The distribution of heavy metals in dieffrent particles

金属	<100um	100~1000um
Cu	98.4%	1.6%
Zn	96%	4%
Pb	90.2%	9.8%
Cd	100%	0%
Ni	94.5%	5.5%
Cr	91.6%	8.4%

3.4 多场降雨的 EMC 平均值

地表径流的污染是一种典型的非点源污染，在整个过程中会受到很多因素的影响，这些影响因子包括大气的污染状况、降雨的强度以及污染物本身的特征等。当这些因子共同发生作用时，其带来的影响是多方面的，即降雨径流排污的随机性不仅表现在某一场降雨径流过程中污染物浓度的随机变化，而且表现在不同场次降雨的EMC值的随机变化，因此有必要计算出多场降雨测的EMC值的算术平均浓度，以求更加准确地对降雨径流进行定量分析。表3.4是采集的三场降雨的路面径流的EMC值及其平均值（TSS采用《农田灌溉水质标准》）。

表 3.4 不同功能区污染物的 EMC 值

Table 3.4 The EMC of contaminants in different areas

污染物		TSS	COD	NH ₃ -N	TP	Cu	Zn	Pb	Cd
07.8.28	交通区	486	357	2.65	1.53	-	-	-	-
	商业区	357	227	2.24	0.87	-	-	-	-
	工业区	273	167	1.48	0.65	-	-	-	-
	居民区	324	227	1.82	1.06	-	-	-	-
07.12.12	交通区	424	314	2.23	1.27	-	-	-	-
	商业区	324	214	2.11	0.86	-	-	-	-
	工业区	245	137	1.02	0.53	-	-	-	-
	居民区	253	168	1.67	0.83	-	-	-	-
08.3.16	交通区	531	374	2.52	1.42	0.181	1.152	0.136	0.029
	商业区	368	253	1.72	0.84	0.159	0.993	0.122	0.024
	工业区	252	174	0.98	0.55	0.212	1.285	0.149	0.034
	居民区	234	208	1.37	0.91	0.110	0.559	0.079	0.017
平均值	交通区	480	348	2.47	1.41	0.181	1.152	0.136	0.029
	商业区	350	231	2.02	0.86	0.159	0.993	0.122	0.024
	工业区	257	159	1.16	0.58	0.212	1.285	0.149	0.034
	居民区	270	201	1.62	0.93	0.110	0.559	0.079	0.017
V类水标准		150	40	2.0	0.4	1.0	2.0	0.1	0.01

从表3.4中可以看出路面径流中的平均EMC值非常的高, TSS、COD_{Cr}、NH₃-N的平均EMC的顺序是: 交通区>商业区>居民区>工业区, TP的平均EMC的顺序是: 交通区>居民区>商业区>工业区, 因为重金属只监测一场降雨的EMC值, 所以其值与前面所讲述的是一样的。其中, 在四个功能区中, COD_{Cr}、TP、Pb、Cd的平均EMC都超过了国家V类水的标准, 由此可知, 路面径流对城市河流、湖泊等水体的影响是非常大的。与其他国家的路面径流EMC值相比, 南昌市路面径流污染要严重很多, 表3.5是美国及加拿大一些城市地表径流污染物浓度汇总^[77], 从两个表的对比中可以发现南昌市区路面径流中污染物的浓度要比美国和加拿大的一些城市高, 这可能是南昌市正处于发展时期, 整个城市环境状况和大气质量等要比一些发达国家差, 因此径流水质污染比较严重。

表 3.5 美国及加拿大一些城市地表径流污染物浓度总汇

Table 3.5 The concentration of contaminants from urban surface in American and Canada

地点	TSS	NH ₃ -N	TP	Cd	Cu	Pb	Zn
Greenville,NC	98	0.11	0.35	0.0010	0.014	0.027	0.136
NURP居住区	101	-	0.38	-	0.033	0.144	0.135
Madison,Wis.(1971)	280	0.45	0.98	-	-	-	-
Madison,Wis.(1991)	262	-	0.66	0.004	0.016	0.032	0.203
Roseville,Minn.	240	-	1.44	-	-	0.095	-
Somerset Co,N.J.	282	-	0.36	-	-	-	-
Atlanta.Ga.	287	0.18	0.33	-	-	0.015	-
Winston-Salem,NC	37	-	0.23	-	0.015	0.013	0.162
Durham.NC	-	-	0.58	-	-	-	-
Montgomery Co,MD	42	-	0.30	-	-	-	0.075
Gien Ellyn.ill	196	0.18	0.48	-	0.041	0.224	0.171
Wasnington.D.C	26	0.26	0.26	-	-	0.018	0.037
Sault Ste,Mane,Mich	-	-	0.31	0.0060	0.070	0.097	0.274
Windsor,Canada	-	-	0.23	0.0054	0.057	0.154	0.234
Cincinnati,Ohio	210	0.60	-	-	-	-	-
Topeka,Kans	395	0.08	0.44	-	0.022	0.075	0.095

将EMC平均值与典型生活污水的相应指标值及我国适用于点源污染控制的《污水综合排放标准》(GB8978-1996)的相应指标值进行比较,可见,城市道路路面径流中平均值的EMC浓度中, COD、TSS的浓度值与典型生活污水值相近,并且高于污水综合排放标准(一、二级)的限值。

表 3.6 典型生活污水水质及污水综合排放标准

Table 3.6 Model sanitary sewage water quality and sewage synthesis emission standard

项目	pH	COD(mg/L)	SS(mg/L)	Pb(mg/L)	Zn(mg/L)
典型生活污水水质		400	220		
污水综合排放标准(一级)	6~9	100	70	1.0	2.0
污水综合排放标准(二级)	6~9	150	150	1.0	5.0
污水综合排放标准(三级)	6~9	500	400	1.0	5.0

3.5 本章小结

(1) 路面径流中,不同功能区其污染指标的时间变化存在有一定的差异,工业区、商业区和居民区的污染指标浓度会呈现比较明显的衰减规律,交通区由于有更复杂的人类活动和机动车辆等持续的污染源的排入,其衰减规律不是很明显,存在有较大的波动性。

(2) EMC是一场降雨径流全过程的瞬时污染物浓度的流量加权平均值,用来对城市降雨径流污染指标进行定量分析,从降雨径流对受纳水体的影响来讲,水体对排入的地表径流的污染响应速度相对径流过程中污染物浓度的变化或瞬时负荷变化而言要慢的多,所以,了解EMC比了解径流过程的瞬时变化显得更为重要。

(3) 路面径流中,污染物的浓度在不同功能区的浓度都比较高,并且在不同功能区其分布有很大的差异,TSS、COD_{Cr}、NH₃-N、TP的平均EMC的顺序是:交通区>商业区>居民区>工业区;重金属的平均EMC顺序是:工业区>交通区>商业区>居民区。

(4) 在整个路面径流中污染物的浓度要高于很多发达国家,并且污染物TSS、COD_{Cr}的浓度值接近典型生活污水的浓度值,如此高浓度的城市地表径流对受纳水体的影响势必是严重的。

第4章 城市地表径流污染负荷估算

通过实际取样监测,在降雨后形成的地表径流中污染物的浓度较大,进入水体后,将对水体造成较大的影响,为较全面的反应非点源污染的危害性,通过模型对南昌城区进行分析。

4.1 研究方法-SCS 模型原理

4.1.1 SCS 模型的适用范围和特点

SCS模型是美国农业部水土保持局(Soil Conservation Service,SCS,现为 Natural Resources Conservation Service,NRCS)于1954年开发研制的流域水文模型,被广泛应用于美国及其他国家。SCS模型历经半个多世纪的发展,已在小流域工程规划、流域水土保持及防洪、城市水文、土地房屋的洪水保险及无资料流域的水文问题等多个领域内得到成功的应用。SCS模型是从研究径流产生的整个自然地理背景入手揭示产流的数量关系,即从径流赖以形成和发展的基础——水文下垫面来研究暴雨和径流的数量关系。SCS模型的众多优点也是该模型得到广泛应用的基础:

(1) 模型结构简单,所需参数较少,资料易于获取,对观测数据的要求不很严格,尤其适用于资料缺乏地区。

(2) SCS模型考虑流域下垫面的特点及其时空变化对降雨-径流关系的影响,并且能对下垫面条件作定量描述,这是其他水文模型难以相比的。

(3) SCS模型考虑人类活动(如土地利用方式及管理水平、水利工程措施、水土保持状况及城市化等)对径流的影响,也可以针对未来土地利用情况的变化,预估降雨-径流关系的可能变化。

我国关于SCS模型的研究和应用始于20世纪80年代,20多年的研究重要集中在以下几个方面:①SCS模型应用于各类典型小流域并对其产流计算,多集中于小流域、干旱半干旱地区、黄土高原地区^[78,79,80,81];②将SCS模型应用于城市水文相关计算^[82,83];③利用地理信息系统和相关软件,将遥感资料应用于SCS模型

[84,85]; ④其他应用。张秀英^[86]利用定西安家沟流域小区1986~1988年的降雨径流观测数据反算CN, 在统计软件SPSS下利用逐步回归和曲线模拟函数模拟, 得出不同土地利用方式下CN值和相应的模拟曲线; 魏文秋^[87]分析了将SCS模型直接用于我国误差较大的原因并提出了改进方法, 并使用混合聚类法对土壤进行分类; 王宏^[88]利用SCS模型对葫芦河流域进行削洪减沙效益计算并对结果进行验证。

4.1.2 SCS 模型计算公式

SCS模型计算公式中, 符号说明如表4.1所示。

表 4.1 SCS 模型的符号说明

Table4.1 The explanation of SCS modle

F	mm	产流前实际渗透量
I _a	mm	初损
P	mm	次降雨量
Q	mm	直接径流深
S	mm	径流开始后的可能最大持水

最初的SCS模型的建立是基于一定的假设:认为初始损I_a为0, 流域的实际渗透量F与该场降雨前可能的最大渗透量S之比等于实际直接径流Q与次降雨量P之比:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P} \quad (4.1)$$

对这个假设, NRCS专家曾在多个自然流域对其产生的径流曲线经过实地的验证。

按照水量平衡原理有:

$$P = F + Q \quad (4.2)$$

把式(4.1)和式(4.2)结合, 消除F后得,

$$Q = \frac{P^2}{P + S} \quad (4.3)$$

当初损I_a不等于0时, 有效降雨(即产生径流的降雨)需要在次降雨量的基

础上扣除初损。因此，式（4.1）、（4.2）、（4.3）分别改写为：

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P - I_a} \quad (4.4)$$

$$p = I_a + F + Q \quad (4.5)$$

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (4.6)$$

考虑到初损未满足时不产流，得：

$$\begin{cases} Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}, p \geq I_a \\ Q = 0, P < I_a \end{cases} \quad (4.7)$$

式(4.7)就是SCS模型的计算公式。其中，S的变化幅度很大，引入一个无因次参数CN，称为Curve Number，NRCS专家使用图解法将CN与S建立关系，即：

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4.8)$$

由于 I_a 不易求得，为了使计算简化，消去一个变量，引进一个经验关系：

$$I_a = \lambda S \quad (4.9)$$

式中， λ 为常数，SCS模型中 λ 通常取0.2

将 $I_a = 0.2S$ 代入式(4.7)得：

$$\begin{cases} Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}, p \geq I_a \\ Q = 0, P < I_a \end{cases} \quad (4.10)$$

式（4.10）就是目前比较常用的SCS模型的一般形式。

4.1.3 SCS 模型重要参数的说明

（1）P的说明

SCS模型在设计时没有考虑时间因素的主要原因有：第一，考虑到土壤、土地覆盖等条件的影响，缺乏足够的、可靠的数据来确定土壤渗透能力与时间关系；第二，如果考虑时间的问题，就需要详细的降雨历时分布资料，而当时没

有具体的针对某一场降雨的可靠记录。SCS模型用于估算某一场降雨产生的径流量，多选用降雨集中、历时在24小时之内的降雨事件。

(2) Q的说明

关于模型中参数Q(direct runoff)的含义，NRCS专家趋向于在小流域和干旱地区Q为地表径流，而在湿润地区Q为直接径流。

4.2 模型参数的确定

根据SCS模型公式，只要确定CN值，就可以由降雨量求得径流深。决定CN值的主要因素包括土壤水文组、土地覆盖情况、耕作方式、水文条件和降雨前期土壤湿度条件，任何一种因素发生变化都会引起CN值的变化。CN值的大小在一定程度上体现下垫面条件对降雨—径流关系的影响：CN值高意味着渗透量小，产流量大；CN值低意味着渗透量大，产流量小。

4.2.1 研究区域的水文土壤组类型

SCS模型的土壤类型划分标准—水文土壤组(Hydrologic Soil Groups)是NRCS专家根据美国境内4000多处(后增至14000处)土壤的实测资料总结归纳而成的。土壤特性影响降雨径流的产生，即使是间接地影响产流，也必须要考虑土壤性质，可用土壤(裸露土壤)的最小渗透率来描述。具体的划分依据见表4.2^[89]。表中的四类土壤可以概括为：A类为透水性很强的土壤，B类为透水性较强的土壤，C类为中等透水性土壤，D类为弱透水性土壤。

表 4.2 水文土壤组的划分标准

Table 4.2 The division standard of hydrology and soil groups

水文土壤组类型	土壤性质	最小渗透率 (mm/h)
A	厚层沙，厚层黄土，团粒化粉沙土	7.26~11.43
B	薄层黄土，沙壤土	3.81~7.26
C	粘壤土，薄层沙壤土，有机质含量低或粘质含量高土壤	1.27~3.81
D	吸水后显著膨胀的土壤，塑性的粘土，某些盐渍土	0~1.27

任何对土壤剖面的干扰都会导致土壤渗透特性产生显著的变化。城市化的过程中，原本的土壤结构可能会因移开或混入外来土壤而发生改变。综合考虑城市区域硬化表面比例较高，能够自然下渗水分的地表面积有限，上为人工填土、下为各类粘土的土层顺序，可以认为研究区域的水文土壤组主要属于D类。

4.2.2 前期土壤湿度条件等级划分

前期土壤湿度条件AMC(Antecedent Moisture Condition)分为三级,等级的划分的依据是降雨日前5天降雨量的总和,见表4.3^[89],即前期降水指数

API(Aniecedent Precipitation Index), 其计算公式为:

$$API = \sum_{i=1}^5 P_i \quad (4.11)$$

式中 P_i :

前 i 天的降水量(mm)。

表 4.3 前期土壤湿度条件等级的划分标准

Table4.3 The division standard of preliminary soil moisture conditions

前期土壤湿度条件	前5天降雨总量(mm)	
	越冬季节	生长季节
AMC I :土壤干旱,但未到达植物萎蔫点,有良好的耕作及耕种	<12.7	<35.56
AMC II :暴雨前5天内有大雨或小雨和低温出现,土壤水分几乎饱和	12.7~27.94	35.56~53.34
AMCIII:洪泛时的平均情况,即流域洪水出现前的土壤水分平均状况	>27.94	>53.34

4.2.3 CN 值的确定

NRCS 将水文土壤组和土地利用类型结合，称为“土地-覆盖综合体”(soil-cover complex)，是确定CN值的重要依据。CN值查算表是NRCS专家收

第 4 章 城市地表径流污染负荷计算

集大量实测数据加以分析总结得到的，这些大量的实测数据来自美国各个地。CN值查算表列出的是AMC II时各种土地利用方式对应不同水文土壤组的CN值。

根据CN值查算表，结合南昌市中心城区土地利用、水文条件等实际情况，确定适用于南昌城区的CN II值。

表 4.4 NRCS 提供的 CN 值查算表（摘录）

Table4.3 The value of CN provided by NRCS(Extract)

土地利用方式	处理情况	水文条件	土壤类别			
			A	B	C	D
住宅区	不透水面积占总面积的百分比(%)	65	77	85	90	92
		38	61	75	83	87
		30	57	72	81	86
		25	54	70	80	85
		20	51	68	79	84
街道与道路	铺面并有路缘石和雨水沟		98	98	98	98
	卵石和砾石路		76	85	89	91
	泥路，天然土路		72	82	87	89
露天地区：草坪，公园，水	条件良好，草的覆盖率不小于75%		36	61	74	80
	一般条件，草的覆盖率为50%-70%		49	69	79	84
泥地等						
铺面的停车场，屋顶，车道等			98	98	98	98
商业区，不透水面积占总面积的85%			89	92	94	95
工业区，不透水面积占总面积72%			81	82	91	94

根据上表，可以得出适合南昌市的CN值，见表4.5。

表 4.5 适合南昌市区的 CN 值

Table4.5 The value of CN in Nanchang urban district

参数	交通区	商业区	工业区	居民区
CN	98	95	94	92

4.2.4 三次降雨的径流深度值

将三次的降雨量和相应的CN值代入模型公式中，结果见表4.6。

表 4.6 降雨模拟计算结果

Table4.6 The results of rainfall simulation

参数	交通区	商业区	工业区	居民区
径流曲线值CN	98	95	94	92
最大持水量S	5.18	13.36	16.21	22.08
07.8.28 径流深度Q/mm	10.65	6.28	5.28	3.70
径流系数 Ψ	0.69	0.41	0.34	0.24
07.12.12 径流深度Q/mm	5.16	2.25	1.69	0.92
径流系数 Ψ	0.55	0.24	0.18	0.10
08.3.16 径流深度Q/mm	12.24	7.56	6.46	4.69
径流系数 Ψ	0.71	0.44	0.38	0.27

由表4.6南昌城区降雨模拟计算结果表明，在不同下垫面下降雨产流有明显差异，其中道路交通用地和商业用地产流量最大，说明下垫面是影响降雨径流的重要因素。并且这些用地人流、车流量大，活动量大，致使在这些用地区积累大量的沉积物，在产生径流时，大量污染物被冲刷，随雨水流入受纳水体，对水体水质造成极大影响。

4.3 地表径流污染负荷计算方法

4.3.1 城市地表径流污染负荷的概念

地表径流污染负荷是指由一场降雨或一年中的多场降雨所引起地表径流排放的污染物的总量。就地表水体的污染评价而论，地表径流污染负荷与地表径流污染物平均浓度(EMC)都是同样重要的指标。

由一场降雨所引起地表径流径流排放的污染物的总量称为次降雨污染负荷，由一年中的多场降雨所引起地表径流排放污染物的总量称为年污染负荷。由于地表径流排污的随机性使得次降雨污染负荷的代表性差，因此采用年污染负荷是非常重要的。按照污染负荷的概念，某种污染物的径流污染负荷可用地表径流与该污染物浓度的乘积来表示。则一年中第 i 场降雨的污染负荷可表示为：

$$L_i = \int_0^{T_i} C_{t,i} Q_{t,i} dt \quad (4.12)$$

式中： L_i ——一年中第 i 场降雨的污染负荷，g；

$C_{t,i}$ ——一年中第 i 场降雨地表径流中某污染物在 t 时的瞬时浓度，mg/L；

$Q_{t,i}$ ——一年中第 i 场降雨地表径流在 t 时的径流量， m^3/s ；

T_i ——第 i 场降雨的总历时，s。

由于地表径流测试过程一般很难做到连续监测，所以上式也可以近似的表示为：

$$L_i = \sum_{j=1}^n C_{j,i} V_{j,i} \quad (4.13)$$

式中： $C_{j,i}$ ——第 i 场降雨第 j 时间段所测的污染物的浓度，mg/L；

$V_{j,i}$ ——第 i 场降雨第 j 时间段中的径流体积， m^3 ；

n ——第 i 场降雨时间分段数。

一年中的多场降雨的污染负荷之和即为年污染负荷：

$$L_y = \sum_{i=1}^m L_i \quad (4.14)$$

式中： L_y ——年污染负荷，g

m ——一年的降雨次数。

在第 3 章中已经提到过，EMC 实质上是瞬时浓度的径流加权平均值，那么一场降雨径流全过程的污染物质量负荷可由 EMC 与总降雨径流量之积表示：

$$L_i = \int_0^{T_i} C_{t,i} Q_{t,i} dt = (EMC)_i \int_0^{T_i} Q_{t,i} dt = (EMC)_i V_i \quad (4.15)$$

年污染负荷就可以用下面的公式来表示：

$$L_y = \sum_{i=1}^m L_i = \sum_{i=1}^m (EMC)_i V_i \quad (4.16)$$

式中： V_i ——第 i 场降雨的地表径流量， m^3 ；

$(EMC)_i$ ——第 i 场降雨的 EMC 浓度， mg/L 。

其余字母表示的意义与前面的相同。

4.3.2 城市地表径流污染负荷计算方法

由上面的城市地表径流污染负荷概念可知，只要知道一年中各场降雨所引起的地表径流污染物的平均浓度和各场降雨的径流体积，即可求得年污染负荷。

一年中第 i 场降雨引起的地表径流和降雨量的关系可用下式表示：

$$V_i = 0.001\Psi_i A_i \int_0^{P_i} r_t dt = 0.001\Psi_i A_i P_i \quad (4.17)$$

式中：

Ψ_i ——第 i 场降雨的地表径流系数；

A_i ——第 i 场降雨的集雨面积， m^2 ；

r_t ——第 i 场降雨 t 时刻的降雨强度， mm/s ；

P_i ——第 i 场降雨的降雨量， mm ；

0.001——单位换算因子。

从式中可知，一年中第 i 场降雨所引起地表径流污染负荷可用下式计算：

$$L_i = (EMC)_i V_i = 0.001(EMC)_i \Psi_i A_i P_i \quad (4.18)$$

那么年污染负荷则可以按下式计算：

$$L_i = 0.001 \sum_{i=1}^m (EMC)_i \Psi_i A_i P_i \quad (4.19)$$

所有符号的意义与前面讲述的相同。

在利用上式计算地表径流年污染负荷时，需要知道一年内每场降雨的径流量和 EMC 值，这是很难做到的，于是在一些计算模型中常采用年平均降雨量和多场降雨的径流平均浓度（如 EMC 或 EMC 平均值）来计算年污染负荷量，这也是多年来国外研究者不惜花费大量的人力物力进行广泛的测试研究，从而统计出适合某一区域的多场降雨的径流平均浓度的意义所在。对于估算一个地区地表径流污染物年负荷量是非常重要的。

4.3.3 城市地表径流污染负荷计算模型和应用

由于在南昌市,关于降雨径流污染的资料非常少,采集的同一地区降雨事件径流测试资料有限,因此采用美国华盛顿政府委员会的方法:1987年,美国学者 Schueler 提出了一种称为简便方法的计算模型,用于估计城市开发区地表径流污染物排放量,这种方法是基于美国 NURP(国家城市径流污染研究署)在华盛顿地区所得到的数据而开发的一种方法,模型如下:

$$L_t = 0.01 [(C_F)(\Psi)(A)(P)(C)] \quad (4.19)$$

式中:

L_t ——计算时段(t)内径流排放污染负荷, kg;

C_F ——用于对不产生地表径流的降雨进行校正的因子(产生径流的降雨事件占总降雨事件的比例),一般为.09;

Ψ ——径流区平均径流系数, m^3 径流量/ m^3 降雨量;

A ——径流集雨面积, hm^2 ;

P ——计算时段(t)内的降雨量, mm;

C ——污染物的加权平均浓度, mg/L;

0.01——单位换算因子。

式中可用于计算任意长时间段内的径流污染负荷,在求污染物年排出量时, P 表示的是年降雨量。

根据前面计算的径流系数值 Ψ ,并结合上式及前面计算的 EMC 值来计算不同功能区的污染负荷,结果见表 4.7。

表 4.7 2007 年 8 月份污染物负荷量 (kg/hm^2)

Table 4.7 pollutant load in August in 2007 (kg/hm^2)

污染物负荷	TSS	COD	NH ₃ -N	TP
交通区	51.98	38.18	0.283	0.163
商业区	22.68	14.42	0.142	0.055
工业区	14.38	8.80	0.077	0.034
居民区	12.05	8.44	0.067	0.039

第 4 章 城市地表径流污染负荷计算

表 4.8 2007 年 12 月份污染物负荷量 (kg/hm²)

Table4.8 Pollutant load in December in 2007 (kg/hm²)

污染物负荷	TSS	COD	NH ₃ -N	TP
交通区	21.92	16.23	0.115	0.065
商业区	7.30	4.82	0.047	0.019
工业区	4.14	2.31	0.017	0.008
居民区	2.37	1.57	0.015	0.007

表 4.9 2008 年 3 月份污染物负荷量 (kg/hm²)

Table4.9 pollutant load in March in 2008 (kg/hm²)

污染物负荷	TSS	COD	NH ₃ -N	TP	Cu	Zn	Pb	Cd
交通区	64.84	45.67	0.307	0.173	0.022	0.140	0.016	0.0035
商业区	27.85	19.14	0.130	0.063	0.012	0.075	0.009	0.0018
工业区	16.47	11.37	0.064	0.035	0.013	0.083	0.011	0.0022
居民区	10.86	9.65	0.063	0.042	0.005	0.025	0.003	0.0008

从上面表中可以看出，在路面径流中，TSS、COD_{Cr}、NH₃-N、TP、Cu、Zn、Pb、Cd 等指标的负荷量最高出现在交通区，其主要原因是交通区的人来活动相对来说是最为激烈，同时还存在有持续的污染源，如交通活动的频繁性，使得径流中污染负荷量特别高。商业区的人类活动仅次于交通区，其 TSS、COD_{Cr}、NH₃-N、TP 污染负荷量居于第二位，在工业区 Cu、Zn、Pb、Cd 等指标的负荷量居第二位。居民区在上述指标中相对要低一点。在重金属指标中，监测浓度工业区大于交通区，但是污染负荷量工业区小于交通区，其可能的原因是由于工业区的 C_N 值较交通区小，产生的径流量要小于交通区，所以负荷量小。交通区的重金属主要是机动车辆的排放。

4.4 不同降雨强度对地表径流的影响。

根据SCS模型，可以预测一次降雨对不同下垫面的影响程度。用南昌市暴雨公式（式4.20），设计0.25年一遇、0.55年一遇、1年一遇、2年一遇、3年一遇、5年一遇的1小时降雨强度，具体数值见表4.10。

$$q = \frac{1386(1 + 0.69L \lg p)}{(t + 1.4)^{0.64}} \quad (4.20)$$

式中：

q—设计暴雨强度(L/s'ha)；

t—降雨历时(min)；

P—设计重现期(a)。

表 4.10 不同降雨强度下 1 小时降雨量

Table4.10 An hour rainfall amount under different rainfall intensity

降雨频率(P)	小时降雨强度(L/s · ha)	1小时降雨量(mm)
0.25年一遇	58.10	20.92
0.5年一遇	78.74	28.35
1年一遇	99.39	35.78
2年一遇	120.03	43.21
3年一遇	132.11	47.56
5年一遇	147.32	53.04

根据SCS模型可以计算出降雨径流结果。见表4.11。

表 4.11 降雨模拟计算结果

Table4.11 The results of rainfall simulation

降雨频率 (p)	参数	交通区	商业区	工业区	居民区
	径流曲线值CN	98	95	94	92

第 4 章 城市地表径流污染负荷计算

	最大持水量S	5.18	13.36	16.21	22.08
0.25	径流深度Q/mm	15.78	10.53	9.22	7.05
	径流系数	0.7539	0.5034	0.4408	0.3373
0.5	径流深度Q/mm	22.95	16.88	15.25	12.44
	径流系数	0.8098	0.5956	0.5381	0.4390
1	径流深度Q/mm	30.23	23.58	21.71	18.40
	径流系数	0.8450	0.6591	0.6069	0.5143
2	径流深度Q/mm	37.55	30.48	28.43	24.71
	径流系数	0.8692	0.7055	0.6580	0.5721
3	径流深度Q/mm	41.85	34.58	32.44	28.53
	径流系数	0.8801	0.7272	0.6822	0.6000
5	径流深度Q/mm	47.28	39.80	37.56	33.43
	径流系数	0.8916	0.7504	0.7083	0.6304

根据 EMC 平均值，可计算出在不同降雨强度下的值。则在四个功能区污染物负荷总量见表 4.12。

表 4.12 不同降雨强度下污染物负荷总量 (kg/hm²)

Table4.12 Pollutant load total quantity under different rainfall intensity

降雨频率 (p)	TSS	COD	NH ₃ -N	TP
0.25	155.32	108.06	0.823	0.432
0.5	242.02	168.11	1.286	0.672
1	333.10	231.17	1.772	0.926
2	426.70	295.95	2.273	1.186
3	482.31	334.44	2.570	1.341
5	553.03	383.38	2.949	1.537

其变化情况如图 4.1~4.2 所示。

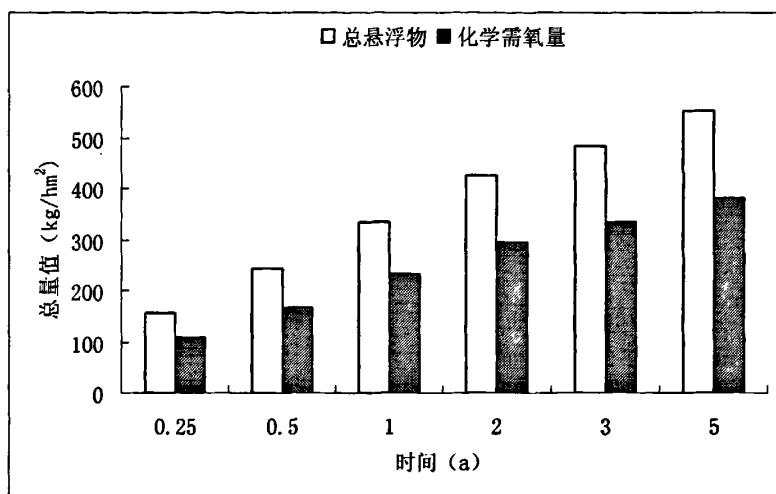


图 4.1 污染物负荷总量随降雨强度变化

Fig4.1 Pollutant load total quantity along with rainfall intensity change

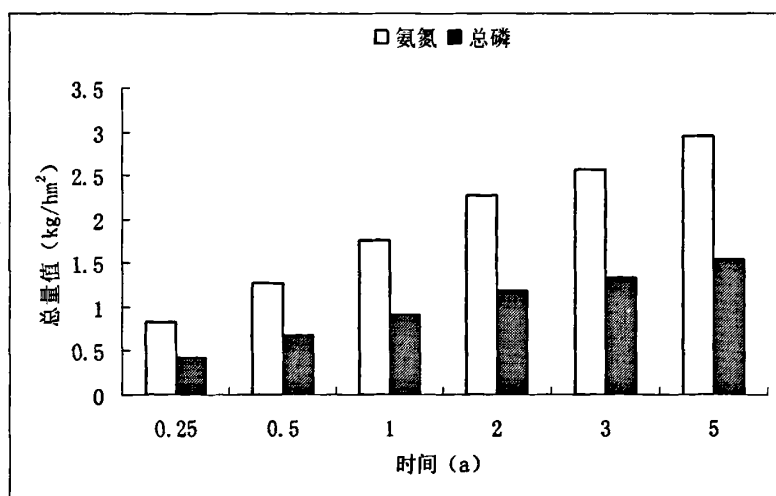


图 4.2 污染物负荷总量随降雨强度变化

Fig4.2 Pollutant load total quantity along with rainfall intensity change

由图 4.1~4.2 可知，由于降雨强度不同，对地表累积物的冲刷程度也不同，随径流产生并排放的非点源污染物总量亦不同。

4.5 本章小结

(1) 通过 SCS 模型预测，在相同的降雨条件下，不同的功能区其径流深度是不一样的，径流系数也有很大的差异。

(2) 通过采用地表径流污染负荷模型和实验实测数据，在对不同功能区的径流污染指标的估算结果表明，TSS、COD_{Cr}、NH₃-N、TP 等指标的年负荷量最高出现在交通区，商业区的人类活动仅次于交通区，其污染负荷量居于第二位。居民区和工业区在上述指标中相对要低一点。在重金属指标中，污染负荷量最大的是交通区，其次是在工业区，居民区和工业区含量较低。

(3) 通过不同的降雨强度分析可以得出，降雨强度越大，冲刷力越强，冲刷的污染物就越多。

第 5 章 南昌市降雨径流污染防治措施研究

城市地表径流带来的城市水环境非点源污染目前已成为水环境污染主要因素。特别是由于地表径流污染物输送的非连续性和暴发性，其污染所占比例在夏季降雨丰沛时期会成倍升高，造成城市受纳水体水质恶化，初步保守估算，城市雨水造成的地表径流污染占水体污染的比例，目前在北京和上海占到 10% 左右^[90]。因此，城市非点源污染控制研究对减缓暴雨给城市受纳水体造成的环境压力、改善城市水环境质量、促进城市可持续发展有重要意义。

5.1 城市非点源污染控制研究概述

由于城市非点源污染物来源的不确定性、传输过程及传输途径的复杂性，控制非点源污染还需从污染源和传输过程设计治理方案，使城市非点源污染得到根治。城市非点源污染来自降雨径流对地表沉积物的冲刷。因此污染程度一方面取决于污染物的累积量—源，另一方面取决于地表径流量—汇。

5.1.1 源的治理

城市非点源污染物主要来自大气沉降和地表累积物的冲刷，大气沉降因受大气环境质量的影响，变幅大、难以预测和控制。因此控制地表累积物的数量成为城市非点源污染控制的主要内容。改善城市环境质量，定期进行街道清扫并适当增加街道清扫次数和质量以减少城市地表累积物的数量；控制居民及工商业产生的垃圾倾倒时间与场所，减少污染物的随意排放；控制城市绿地及街道绿化廊道化肥及农药的使用，减少 N、P 等营养物质的累积；加强城市环境管理，建立健全监督监测制度，控制污染源^[91,92]

5.1.2 汇的治理

城市非点源污染是在暴雨发生后产生的大量地表径流条件下冲刷地表累积物造成的，因此减轻城市雨洪量可以有效控制城市非点源污染。径流量的大小

取决于雨强、雨频^[93]、雨期蒸发量和地表下渗率，其中对地表下渗率起决定作用的是地表下垫面的透水率。提高地表下渗率能有效地控制地表冲刷能力、抑制地表累积物进入受纳水体的数量。减少地表累积物数量和控制地表径流量成为城市非点源污染控制的关键要素。这一目标还有赖于一系列控制措施来实现。

5.2 城市雨水资源化

水资源自然分布的不均衡性，以及经济发达状况的不同，使得世界人均用水量差异极大。目前的人均年用水量：北美洲为1798m³，中美洲为916m³，南美洲为335m³，亚洲为542m³，欧洲为625m³，非洲为202m³，大洋洲为591m³^[94]，而我国人均用水量不及亚洲平均水平。由于水资源分布的差异以及我国水资源污染的日益加重，我国城市的水资源正在面临着不足和短缺等问题。造成城市水资源不足和短缺的主要原因：一是水资源总量先天不足，人口多，人均水资源少；二是水源水质日趋恶化，不能满足水体正常循环使用的功能要求，大大减少了有效水资源的利用状况。目前，全国城市水源只有30%符合卫生标准，全国七大水系有一半以上被污染，流经42个大中城市的44条河流中大约有93%被污染。因此，将雨水资源化成为城市的第二水源具有积极的意义。从技术层面上来讲，目前国际国内都有一些比较成功的做法和经验可以借鉴。

5.2.1 绿地集雨

在设计建造时调整路面高程、绿地高程、雨水口高程的关系，使路面高于绿地高程，绿地高程高于雨水口高程。这样，路面汇聚的雨水进入绿地，经绿地渗入地下，既提供绿地灌溉，又通过绿地有效过滤和净化雨水，多余的雨水再经雨水口流走。在城市生态小区中，把汇集的屋面雨水径流通过下凹式绿地或人工土层处理后渗透地下，既可涵养地下水、改善小区生态环境，又截留处置了部分雨水，减轻城区雨洪负荷和地表径流对受纳水体的污染，可带来明显的环境和社会效益^[95]。

5.2.2 路面集雨

绿地系统对雨水径流的调蓄作用主要是由于绿地的可渗透性能够实现就地

回灌，有效地补充地下水。除绿地以外，可渗透型铺装形式和铺装材料能取得同样的效果。城市中不透水路面或者基本不透水路面的径流系数很大，对这类路面的集雨利用一般有两中途径：一是在道路两旁设路边沟，沟内铺砌过滤层，使雨水流入沟内，下渗补给地下水；二是选用有一定透水能力的筑路材料以使雨水下渗，《国家生态园林城市标准》把“建成区道路广场用地中透水面积的比重”列为城市生态环境指标之一。对于城市中为数众多的其他不透水里面，如停车场、广场、商业区人行道等，同样可以采用透水性材料铺砌，保持原有功能基础上，增加透水面积和就地入渗量，减少下雨时的径流损失。

5.2.3 屋顶集雨

最近几年屋面绿化成为拓宽园林绿量增加的另一渠道，其生态功能更加丰富增加城市绿量，缓解城市热岛效应，减少太阳辐射，削减屋面雨水径流及其污染，等等。屋顶经绿化后，由于植物对雨水的截留、蒸发作用以及人工种植土对雨水的吸纳作用，屋顶绿化对暴雨峰值流量的大幅削减，有利于城市的防洪排涝，相应提高防涝标准。在有条件的幢建筑中，设置储水箱，将屋顶的雨水引入箱内，以备洗涤、冲厕和卫生之用，可以节省供水系统的优质水。屋顶雨水也可以沿雨水管流至地面设置有过滤设施的小洼地中，使水渗入地下，补给地下水。屋顶集雨系统主要由下面几个部分组成：雨水汇集区（坡屋面），输水管道系统（集水系统和供水系统），渗滤截污系统（过滤杂质、消除部分污染物），存储系统（地下蓄水池），净化系统（过滤及消毒），最终提供给家庭、公共设施或工厂等作为非饮用水^[96]。

5.2.4 雨水截污与渗透

雨水渗透主要有分散渗透和集中回灌，一方面减少地表径流量及其携带污染物的能力，控制城市非点源污染；另一方面又是解决城市景观用水和补充地下水的良好途径。分散式渗透可应用于城市生态小区、公园绿地、街道及厂区。这类城市用地多建成透水或半透水地面，利用雨水的下渗。其中生态小区和公园绿地的地表累积污染负荷小，经地表绿色植被和土壤的过滤，雨水携带的污染物得以净化，雨水入渗后进入地下贮水系统用于城市绿地灌溉或补充地下水；而街道和厂区的雨水污染物成分复杂，则可通过地下贮水系统后，通过适当的

污水处理后，用做消防或城市景观用水。集中式深井回灌可以作为地下水的重要补充水源，但回灌工程一般选在渗透率较小、渗透速度较慢，地下水位较低，有充分时间滤除雨水中污染物，且不以地下水作为主要饮用水源的地区。

5.3 加强城市景观规划与管理

5.3.1 景观生态设计

通过景观生态设计，如在城市建筑基质中建设人工绿地和廊道，可以提高人工景观的稳定性和自我调节能力，增强城市生态系统的抗逆能力。而城市景观的变化主要表现在土地利用与土地覆盖的变化上，二者直接影响城市生态系统的物质循环与能量流动变化过程^[97]。由于土地利用方式的不同，地表累积物的性质和数量有很大差异，同时地表透水率、径流系数、径流量也因土地利用方式和土地覆盖而不同，会造成非点源污染负荷的变化。因此在城市非点源污染控制中应根据生态规划原则，改善城市景观格局促进城市生态系统的物质循环和能量流动，维护城市生态系统的稳定和可持续发展。城市景观格局优化的生态学设计思路如图 5.1 所示。优化的城市景观格局，可以有效地增加降雨的地面渗入量，减缓城市雨洪形成速度，有效控制地表径流量，加之生态系统内部实现的物质循环利用，使地表累积物总量减少，有效地控制城市非点源污染。

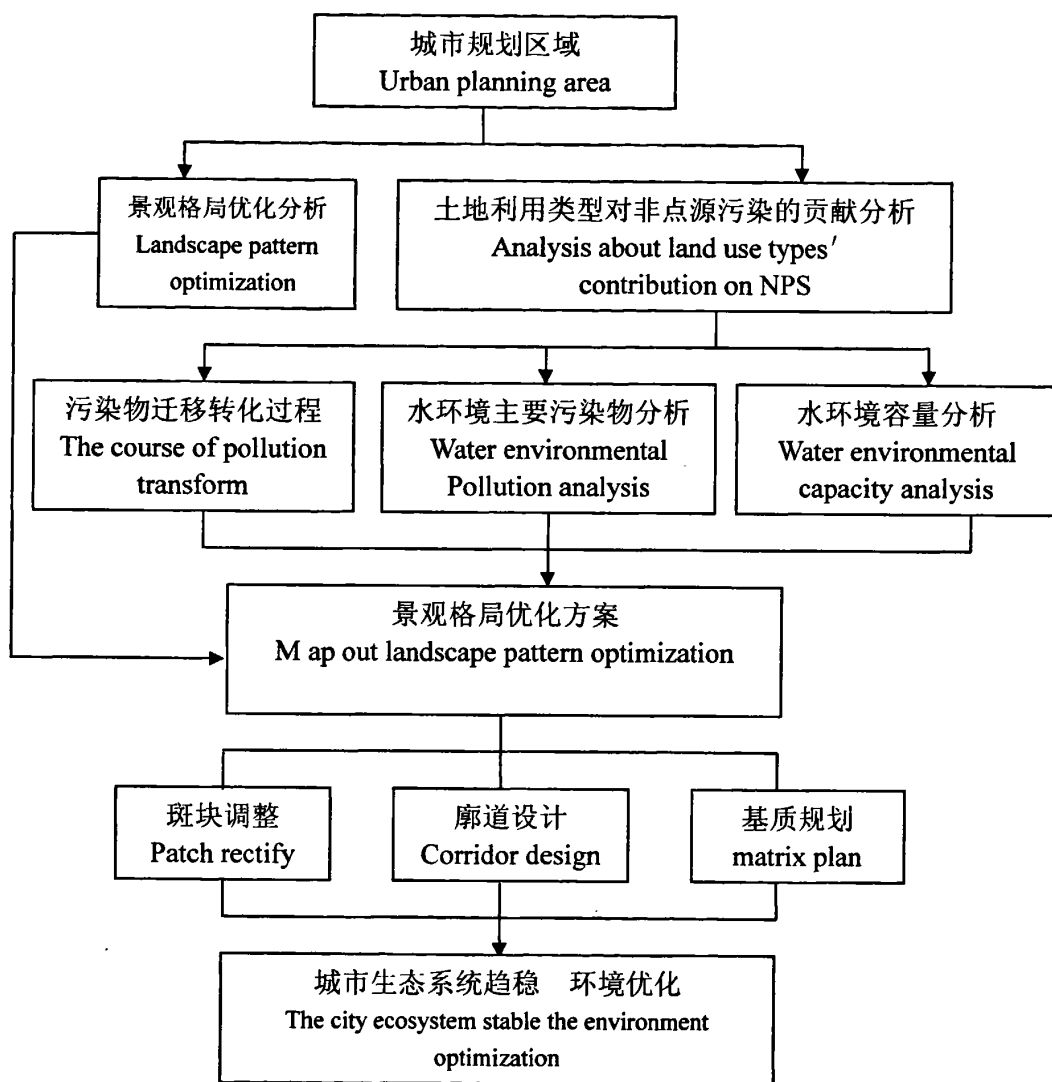


图 5.1 城市景观优化与非点源污染控制的关系

Fig5.1 Relations between urban landscape optimization and nonpoint source contamination control

5.3.2 城市非点源污染控制措施

(1) 加强城市规划与管理

在城市土地利用规划中，应加强旧城区改造，改造单户住宅为多单元住宅，

一方面改善了城市景观面貌，另一方面也从根本上改变不适当的土地利用方式带来的污染负荷。城市规划中应加强城市绿地规划与建设，特别是城市街心花园及街道两侧绿地建设应以下凹式绿地为主，以吸纳更多地表径流、增大地表渗透率；增加可渗透地面的比例，减少地面径流量，特别是街道两侧的人行道要严禁机动车进入，并采用可渗透的水泥方砖来铺设，减少破坏量、增加渗透率，减少地表径流。

加强公民环境意识教育，以更加有效的手段控制垃圾倾倒时间与地点，有效地抑制了地表污染物的累积。加强交通管理，防止机动车破坏人行街路水泥方砖地面，禁止随意停车等。加强建筑工程施工管理，对在建工程实施围栏，一方面改善城市面貌，另一方面有效控制降雨径流外泄，在建工程修建有效的净水池和排污通道，减少地表径流带来的污染。目前在建工程只注重了设置围栏，但并没有适当的净水设施和排水管道，这也应纳入城市建设管理的内容之一。

(2) 建设城市生态小区

人行道以水泥方砖、卵石、混凝土砌块等铺设，以增加降水入渗能力。大范围的庭院可以设计小区景观，充分利用庭院光照条件设计绿地斑块，采取喜阴、喜阳植物配合，乔、灌、草及藤本植物立体绿化，有利于提升生物多样性，绿地宜建设为下凹式缩短地表径流流程，减少绿地灌溉用水，降低城市洪峰。再配以雕塑小品、园艺植物乃至人工鱼塘或湿地，使得小型建筑既符合生态设计理论，又外在景观优美，形成宜人的人居环境。廊道作为联系城市景观单元——斑块的纽带，其规划设计要保证生态系统物质流的畅通、能量消耗的最小化、信息交流的快捷方便。因此，城市道路、河流乃至地下管网等基础设施不仅要成为城市物质、能量、信息、人口输送与交流的通道，而且是城市生态系统结构稳定、功能协调，景观格局优化的重要条件。对于城市街道两侧绿地廊道的规划要结合南方城市环境特点，采用速生、耐热、耐涝的树种和生长期长的多年生草本植物及长绿灌木、落叶灌丛为绿化植物，一方面达到绿化环境的目的，另一方面提升了生物多样性指数和生物生产量，提高了绿地斑块、廊道的景观效应和生态效应，又具有降低空气粉尘、减少空气污染，维持碳循环和保持供氧平衡，保持水土、维护水循环，降低环境温度、提高环境湿度，隔离噪声，安全防护等环境效应^[98]，改善了城市环境质量。因此，从小区建设来看，以生态效益为目的。环境设计与建设遵循保证系统内部稳定性；与外界物质流、

能量流、信息流、人口流和货币流畅通；人与环境和谐共生；通过有效的物质和能量、信息等的输入和完善的管理制度与规划来实现系统的有序为原则。采取绿地斑块、廊道与城市环境基质协同发展的思路，建设健康舒适、高效清洁、和谐优美的宜人居住环境，实现小区系统内物质循环和能量消耗减量。有效地控制城市地表累积物的产生，减轻地表径流中要携带的污染物总量。达到控制城市非点源污染的目的。

5.4 本章小结

一个特定地域或特定城市的自然环境条件和人口资源及经济发展状况的差异等，都使非点源污染具有不同特点。因此，在城市非点源污染控制研究中，要结合各城市所在地域的环境特点，采用适当的方式和方法来控制非点源污染。南方城市，降水量较大，春夏季降雨相对集中，极易形成雨洪，雨水资源化对充分利用丰水期降雨量，可有效补给枯水期河流水流量，降低暴雨径流量，减小城市非点源污染有重要意义。城市非点源污染得到有效控制不仅依靠科学的方法来实施，更需要政府政策与资金支持及相关法律法规的实施，还需要广大公众的参与。建设良好的宜人的城市环境是未来城市发展的必然之路，有效控制城市环境污染（大气环境、水环境及土壤环境），特别是随机性强、不定期发生、来源广泛、影响范围广的非点源污染的有效控制是现代环境科学、城市规划管理、生态学及水资源管理与监测部门共同的研究任务，更是政府政策支持与公众参与的全民性任务。

第6章 结论与展望

6.1 结论

城市化的迅速发展,使得城市不透水区域的面积占的比例越来越大,导致雨天特别是暴雨天气时产生大量的径流通过下水道直接排放到城市水体中,径流携带的来自城市路面沉积物、重金属、营养物、毒性有机物等污染物成为城市受纳水体水质下降的主要污染源,致使城市水环境问题更为严重,资源性和污染性的水资源危机已经成为影响城市可持续发展的重要因素。本文通过对南昌市城区不同功能区降雨径流污染的分析研究,初步得出以下结论:

(1) 开始产生径流起,其径流中的污染物质一直都是在变化的,由于径流中污染物质在来源、组成物质等方面存在有很大的差别,因此不同下垫面的性质等会影响到径流中污染物质含量的变化。通过对不同降雨的屋面和路面径流的污染指标监测发现,在降雨初期,大约在前20分钟之间产生的径流中污染物的浓度是最高的,随着降雨历时的延长,污染物浓度逐渐下降,并趋于稳定。

(2) 在南昌市城区不同功能区的降雨径流进行采样分析,发现在整个降雨过程中,径流中的污染物的瞬时浓度存在有很大的变动性,不同功能区其污染指标的时间变化存在有一定的差异,工业区、商业区和居民区的污染指标浓度会呈现比较明显的衰减规律,交通区由于有更复杂的人类活动和机动车辆等持续的污染源的排入,其衰减规律不是很明显,存在有较大的波动性。

(3) 采用EMC对城市降雨径流污染指标进行定量分析,在降雨径流中,污染物的浓度在不同功能区的浓度都比较高,并且在不同功能区其分布有很大的差异,TSS、COD_{Cr}、NH₃-N、TP的平均EMC的顺序是:交通区>商业区>居民区>工业区;重金属在工业区的平均EMC值是最高的,其次是交通区和商业区,居民区最低。整个路面径流中污染物的浓度要高于很多发达国家,并且污染物TSS、COD_{Cr}的浓度值接近典型生活污水的浓度值。

(4) 通过采用城市地面径流污染负荷估算模型和实验实测数据,TSS、COD_{Cr}、NH₃-N、TP、Cu、Zn、Pb、Cd等指标的负荷量最高出现在交通区,其主要原因是交通区的人来活动相对来说是最为激烈,同时还存在有持续的污染

源,如交通活动的频繁性,使得径流中污染负荷量特别高。商业区的人类活动仅次于交通区,其 TSS、COD_{Cr}、NH₃-N、TP 污染负荷量居于第二位,在工业区 Cu、Zn、Pb、Cd 等指标的负荷量居第二位。居民区在上述指标中相对要低一点。在重金属指标中,监测浓度工业区大于交通区,但是污染负荷量工业区小于交通区,其可能的原因是由于工业区产生的径流量要小于交通区,所以负荷量小。

(5) 通过不同的降雨强度分析得出,降雨强度越大,冲刷力越强,冲刷的污染物就越多。

(6) 城市非点源污染控制要结合城市自然环境特点,既要从污染的“汇”上来采取治理措施,更要从“源”上查找原因,实现污染的有效治理。要合理进行城市景观生态规划设计,改善城市景观格局促进城市生态系统的物质循环和能量流动,维护城市生态系统的稳定和可持续发展。提出了加强城市生态规划与管理,建设城市生态小区,合理设计景观绿地,加强城市雨水资源化利用,从“源”上控制非点源污染物的产生。

6.2 展望

由于降雨径流污染研究是一个很复杂的过程,存在有很大的随机性和不确定因素,为了得到更加准确的数据和径流的排污规律,找到合理有效的径流管理措施,今后还需要加强对以下方面的研究力度:

(1) 由于降雨径流污染受到很多因素的影响,如降雨强度、非雨天污染物的累积量、大气的干湿沉降、人类活动的强度等,为了对径流中的污染物来源进行定量分析,对上述的影响因素进行单一分析是非常必要的,找出它们与径流中污染物浓度的相关性,以确定污染物的来源并对其进行定量分析,实现污染源的控制。

(2) 是一种典型的面源污染,其污染物的来源存在有很大的随机性和不确定性,对其进行定量分析必须要进行长期的采样监测,其监测内容除了本文中污染指标以外,还要对径流中的有机污染物如 PAHs、PCBs 等进行监测,在国外很多发达国家的有关这方面的研究甚多,其研究的结果证明径流中的持久性有机物是城市河口滨岸潮滩污染的一个重要来源。因此以后的工作要加强这方面的研究。

(3) 降雨径流污染中污染物的浓度随降雨时间的延长而逐渐降低, 并且城市排水系统由于受到很多条件的限制, 如面积、费用等, 它只能贮存初期径流, 因此需要对降雨初期的冲刷效应进行分析, 以进行有效的治理, 提高工程效率。

(4) 要定量的研究径流中 TSS 与不同污染指标的关系, 因为 TSS 是径流污染中一个很重要的指标, 是其他污染物的载体, 分析其与其他指标的相关性可以有有效的预测其他污染物的浓度, 促进径流污染的有效治理。

(5) 本文中提到的防治措施只是理论方面的, 由于时间的有限性, 都没有对其在南昌地区径流的去污分析, 因此对所采用的径流污染防治措施进行实地检验是很重要的, 从而制定出更适合本地区的径流管理措施。

(6) 结合 RS、GSI 空间信息技术、可视化编成技术和情景分析法, 在现场监测数据的基础上, 校验和改进 SWMM 模型, 模拟城市降雨径流污染的累积、冲刷和迁移等机理过程, 获得城市降雨径流污染的负荷和特征, 建立径流污染的数据库。

致 谢

本论文是在导师董瑞斌教授的悉心指导下完成的。从论文的选题与设计、实验方案的拟定和实施到实验数据的处理、论文内容的编排、撰写和修改无不凝聚着导师的心血。恩师严谨的治学态度、渊博的专业知识、敏锐的学术思想、实事求是的科研态度以及不断进取的科研精神都给我留下了深刻的印象，这将激励我在以后的人生道路上不懈努力和开拓进取。真诚地感谢导师在我研究生期间给予的无微不至的关怀、指导和帮助！几年来，在导师睿智的引导与不倦的教诲下，领悟到许多书本上得不到的东西，使我受益终生。

感谢实验室朱衷榜老师、分析测试中心王毛兰老师在样品分析中给予的帮助；感谢在南昌大学学习期间院系各级领导和老师给予的关心和支持。

在实验研究阶段，程彬彬、桂双林、蔡晓明、彭纪鹏、高莹、陈瑶、唐志平等给予了我大力的支持和帮助，在此对他们表示衷心的感谢！

研究生两年中，我得到了各位同学的帮助和支持，在这里特别要感谢的是我的师兄查红平、肖维林、雷晓林及我的舍友程彬彬、桂双林同学，他们在生活和学习中给我提供了很多宝贵的建议和帮助，让我受益匪浅，终生难忘，也感谢曹玉静、侯延鹏、吴波、周青龄、黄建斌、谢雪峰、王敬斌、刘庆禄等同学，与他们一起度过的学习和研究岁月，令我倍感珍惜，必将成为我人生中美好的回忆。

深深感谢我的父母，感谢他们多年来对我的养育和教诲，是他们无私的关爱和默默的支持让我鼓起勇气一直前行。感谢他们多年对我的全力支持和无私关爱！也特别感谢我所有的亲人对我的支持、理解和帮助，使我的人生变得丰富起来。

最后，谨以此文献给所有关心我的亲人、老师、同学和朋友们，再次谢谢你们给予我的一切！

王业雷

2008年6月于南昌大学

参考文献

- [1] 顾夏声, 黄铭荣, 王占生等. 水处理工程. 北京[M]. 清华大学出版社, 1985, 15~17
- [2] 伊武军, 资源、环境与可持续发展[M]. 海洋出版社, 2002, 6
- [3] 朱颜明, 黎劲松, 杨爱玲. 城市饮用水地表水源非点源污染研究[J]. 城市环境与城市生态, 2000, 13(4): 1~4
- [4] 鲍全盛, 王华东. 我国水环境非点源污染研究与展望. 地理科学[J], 1996, (1): 66~71
- [5] 李怀恩, 沈晋. 非点源污染数学模型[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1996.
- [6] 林积泉, 马俊杰, 王伯铎等. 城市非点源污染及其防治研究[J]. 环境科学与技术, 2004, 27(8), 63~65.
- [7] Novotny V, Olem H. Water quality: Prevention, Identification and management of diffuse pollution. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1994
- [8] 贺缠生, 傅伯杰, 陈利顶. 非点源污染管理及控制[J]. 环境科学, 1998, 19(5): 87~91
- [9] U S Environmental Protection Agency. National management measures to control nonpoint source pollution from agriculture. 2000
- [10] U S Environmental Protection Agency. Final report of the Nationwide Urban Runoff Program, USEPA, Water Planning Division, Washington, D C, 1983
- [11] Bannerman R. Pollutants in Wisconsin Stormwater. Wisconsin Department of Natural Resources Madison, WI. 1991
- [12] Hoffman E J. Urban runoff inputs to Narragansett Bay; Comparison to point sources, in Perspectives on non-point source pollution, proceedings, National Conference. USEPA, Washington, D C, 1985, 159~164
- [13] Baker D B. the Lake Eric Agroecosystem Program: water quality assessments. Agriculture, Ecosystem and Environment, 1993, 46: 197~215
- [14] Sanalone J.J. and Buchberger S.G., Partitioning and First Flush of Metals in Urban Roadway Storm Water. J. of Envir. Engrg., ASCE, 1997, 123 (2): 134~143.
- [15] Braat A C. TNO Report R95/138, Calculation of atmospheric deposition of contaminants over the North Sea, 1995
- [16] 张百良, 马孝琴. 城市大气污染与可再生能源利用[J]. 河南农业大学学报[J], 2000, 34(1): 25~29.
- [17] Paerl H W. Emerging role of atmospheric deposition in coastal eutrophication: biogeochemical and trophic perspectives. Can J Fish Aquat Sci, 1993, 50: 2254~2269
- [18] Baker L A, Kaufmann P R, Herlihy A T, et al. Current status of surface water acid-base chemistry. in: Irving P M, ed. National Acid Precipitation Assessments program, Washington, D C, 1990, 9-1-9-367
- [19] Jan Duyzer Anne-Wim Vonk. Monitoring of POP concentrations and depositions in the

参考文献

- Netherlands, 6th international conference on diffuse Pollution Proceedings,2002,155~160
- [20] Glotfety D E, Williams G H ,et al . Regional atmosphere transport and deposition of pesticides in Maryland .In: Kurtz D A ed. Long Range Transport of Pesticides,Lewis Publ, Chelsea ,MI,1990,199~221
- [21] Strachan W M J, Eisenreich S J. Mass balance accounting of chemicals in the great lakes . In: Kurtz D A ed. Long Range Transport of Pesticides,Lewis Publ, Chelsea ,MI,1990,291~301
- [22] 金相灿, 刘鸿亮, 屠清瑛等. 中国湖泊富营养化[M] 北京: 中国环境科学出版社, 1990
- [23] Daniel E L, Gregory D J, Richard A M et al . Nonpoint Source .J A m Water Environment Research,1999,71:5
- [24] 车伍, 欧岚, 汪慧贞, 等. 北京城区雨水径流水质及其主要影响因素[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(1):33~37
- [25] 赵剑强, 刘珊, 邱立萍等. 高速公路路面径流水质特性及排污规律[J].中国环境科学,2001,21(5): 445~448
- [26] Massone H E ,Martize D E, et al. Suburban Areas in Developing Countries and Their Relationship to Groundwater Pollution: a Case Study of Mar del Plata .Argentina Environ Manage ,1998,22,245~248
- [27] Green D M. Recreational Impacts on Erosion and Runoff in a Central Arizona Riparian Area. J Soil Water Conserve,1998,53:38
- [28] 宫莹, 胡晓东.我国城市地表水环境非点源污染的研究进展[J].中国给水排水,2003,19(3):21~23
- [29] 贺宝根, 周乃晟. 苏州河污染底泥处理的合理措施[J]. 上海师范大学学报, 1997, 26(4): 54~61
- [30] 张魏, 王学军. 太湖零点行动前后水质状况对比分析[J]. 农村生态环境, 2001, 17(1): 44~47.
- [31] 陈华棒, 陈英旭. 污染底泥修复技术进展[J]. 农业环境保护, 2002, 21(2): 179~182
- [32] 贺宝根, 周乃晟. 底泥对河流的二次污染浅析[J]. 环境污染与防治, 1999, 21(3): 41~43
- [33] 史贵涛, 陈振楼.上海市水环境非点源污染及其控制对策[J].人民长江, 2007, 38 (1) : 84~86
- [34] Novotny V, Chester G. 面污染源管理与控制手册(M). 林芳荣, 李学灵, 吴亚蒂译.广州: 科学普及出版社广州分社, 1987
- [35] Wu J S.Allan C J.et al. Characterization and Pollutant Loading Estimation for Highway Runoff.J Envir Engrg. 1998,127(7):584~592
- [36] 陆雍森等. 环境评价(M). 上海: 同济大学出版社, 1990
- [37] Lee J H and Bang K W. Characterization of Urban Stormwater Runoff. Water Rearch,2000,34(6): 1773~1780
- [38] 扬具瑞, 方译. 湖泊暴雨径流水质模拟研究[J]. 环境科学学报, 1999,19(1):37~41
- [39] Deletic A B and Maksimovic C T, Evaluation of Water Quality Factors in Storm Runoff from Paved Areas Ennir ASCE,1998,124(9):869~879
- [40] Ellis K V,White G and Warm A E,Surface Water Pollution an ItsControl .England :Macmillan

- Publishers Ltd 1989:268~275
- [41] U S Environment Protection Agency. National Water Quality Inventory:1998 Report to Congress.2000
- [42] Vighi M. Eutrophication in Europe :the role of agricultural activities in Hodgson. Rev Environ,1987,3
- [43] Kronvang B et al. Diffuse Nutrient Losses in Denmark. Water Sci Technol,1996,(3):81
- [44] Boets P C M. Nutrient Emissions from Agriculture in the Netherlands: Causes and Remedies. Water Sci Technol,1996,33:183
- [46] 司友斌,王慎强,陈怀满等.农田氮、磷的流失与水体富营养化[J].土壤,2000,(4):188~124
- [46] Dago and Hessen,et al. 氮流失对淡水和海洋受体富营养化的重要意义[J].AMBIO —人类环境杂志,1997,26:306~313
- [47] 汪达. 美国非点源水污染问题及其对策综述[J]. 世界环境,1993,4:14~19
- [48] 徐谦. 我国化肥和农药的非点源污染状况综述[J]. 农村生态环境,1996,12(2):39~43
- [49] 杨苏树. 大理洱海流域农业非点源污染现状[J]. 农业环境与发展 1999,16(2):43~44
- [50] 吕耀. 苏南太湖流域农业非点源污染及农业持续发展战略[J]. 环境科学动态,1998,(2):1~4
- [51] 党啸. 巢湖流域水环境问题的观察与思考[J]. 环境保护,1998,(9):38~40
- [52] Massone H E ,Martize D E, et al. Suburban Areas in Developing Countries and Their Relationship to Groundwater Pollution: a Case Study of Mar del Plata .Argentina Environ Manage ,1998,22: 245
- [53] [英]WJ 霍尔著.城市水文学(M).詹道江等译.南京:河海大学出版社,1989
- [54] 毛战坡,单宝庆等.研究湿地有效面积对暴雨径流调控作用的多因子模型[J].水利学报,2002,(7):57~62
- [55] Magmedov V G,Vakovleva L I.Ecological features of an artificial wetlands area.In:International Symposium on the Hydrology of Wetlands in Temperate and Cold Region,Joensuu,Finland the Academy of Finland,1988
- [56] Pagotto C. Comparison of the Hydraulic behaviour and the quality of highway runoff water according to the type of pavement. Water Research,2000,34(18):4446~4454
- [57] 王和意,刘敏,刘巧梅等.城市降雨径流非点源污染分析与研究进展[J]. 城市环境与城市生态,2003,16(6):283~285
- [58] 鲍全盛,王华东. 我国水环境非点源污染研究与展望[J]. 地理科学,1996,16(1):66~72
- [59] 吴林祖. 杭州城市径流污染特征的初步分析[J]. 上海环境科学,1987,6(6):34~36
- [60] 温灼和. 苏州水网城市暴雨径流污染的研究[J]. 环境科学,1986,7(6):2~6
- [61] 施为光. 城市降雨径流长期污染负荷模型的探讨[J]. 城市环境与城市生态,1993,6(2):6~10
- [62] 代晋国,王淑莹,李利生,等. 基于GIS的非点源污染的研究及应用[J]. 安全与环境学,2003,3(6):36~39
- [63] 周慧平,葛小平,许有鹏等. GIS在非点源污染评价中的应用[J]. 水科学进展,2004,15(4):441~444

参考文献

- [64] 陈为峰, 史衍玺. “3S”技术在农业非点源污染研究中的应用[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 122~125
- [65] QiHao Weng. Modeling urban growth effects on surface runoff with the integration of remote sensing and GIS[J]. Environmental Management. 2001, 28(6): 734~748.
- [66] 黄锡荃, 李惠明, 金伯欣. 水文学[M]. 北京: 高等教育出版社. 2003: 4.
- [67] 黄秉维, 郑度, 赵名茶等. 现代自然地理学[M]. 北京: 科学实验出版社. 2000, 11.
- [68] USEPA, 2000EAP. USA. Meeting the Environment Challenge[M]. USA: EAP, 1990
- [69] 胡春燕, 李春莲, 南昌市大气环境污染特征分析[J], 江西农业大学学报, 2002, 24(1), 111~113
- [70] 黄俊, 黄文红, 浅议南昌市城区水环境保护[J], 江西水利科技, 1998, 24(3), 170~172
- [71] 陈凌云, ICP—AES法快速测定污水中的重金属[J], 中国给水排水, 2004, 20(5): 97~98
- [72] 赵清华, 李英姿, 刘莉, 赵立春, 微波消解技术与ICP-AES法测定水中金属元素[J], 给水排水, 2006, 32(6): 46~47
- [73] 陈伟珍, 杨桂珍. 微波消解与ICP-AES联用测定水中的重金属[J]. 中国卫生检验杂志, 2006, 16(1): 35~36
- [74] 邱立萍, 赵剑强, 城市路面径流雨水铅含量的测定[J], 长安大学学报, 2006, 26(5): 112~114
- [75] Akan A.O., Urban Stormwater Hydrology. USA: Technomic Publishing Company Inc., 1993.
- [76] 赵剑强. 城市地表径流污染与控制. 北京: 中国环境科学出版社, 2004
- [77] Stanley D.W., Pollutant removal by a stormwater dry detention pond. Water Environment Research, 1996, 68(6): 1076~1083
- [78] 穆宏强. SCS模型在石桥铺流域的应用研究[J]. 水利学报. 1992, 10: 79~83.
- [79] 孙三祥, 范荣生. 雨量站分布稀疏流域产流计算[J]. 甘肃水利水电技术, 1996, 1: 23~26.
- [80] 刘贤赵, 康绍忠, 刘德林等. 基于地理信息的SCS模型及其在黄土高原典型流域降雨—径流关系中的应用[J]. 水力发电学报. 2005, 24(6): 57~61.
- [81] 王兴鹏, 马轶, 张维江等. SCS模型在黄土丘陵因子径流场中的应用[J]. 宁夏工程技术. 2005, 4(2): 157~159.
- [82] 史培军, 袁艺, 陈晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1041~1049.
- [83] 卓慕宁, 王继增, 吴志峰等. 珠海城区暴雨径流污染符合估算及其评价[J]. 水土保持通报. 2003, 23(5): 35~38.
- [84] 张建云, 何惠. 应用地理信息进行无资料地区流域水文模拟研究[J]. 水科学进展. 1998, 9(12): 345~350
- [85] 谢华, 都金康, 胡裕军等. 基于汇流时间方法的空间分布式水文模型研究[J]. 武汉理工大学学报. 2005, 27(12): 75~78.
- [86] 张秀英, 孟飞, 丁宁. SCS模型在干旱半干旱区小流域径流估算中的应用[J]. 水土保持研究. 2003, 10(4): 172~174
- [87] 魏文秋, 谢淑琴. 遥感资料在SCS模型产流计算中的应用[J]. 环境遥感, 1992, 7(4): 243~250.

参考文献

- [88] 王宏张智忠, 马勇.SCS 模型在削洪减沙效益计算中的应用[J].水土保持科技情报.1995, 3: 40~42.
- [89] 袁作新,《流域水文模型》[M].北京:水利水电出版社, 1990.
- [90] 车伍、刘燕、李俊奇.国内外城市雨水水质及污染控制[J].给水排水,2003,29(10):38~42.
- [91]朱继业,窦贻俭.城市水环境非点源污染总量控制研究与应用[J].环境科学学报,1999,19(4): 415~420.
- [92] Pavoni, J.L.ed., Handbook of water quality management planning, Van nostrand reinhold company,1977,69~71.。
- [93] Y.-C.Lin and J.-J Kao.Effects of seasonal variation in precipitation on estimation of non-point source pollution[J].Water science and Technology,2003,47(7-8): 299~304.
- [94] 伊武军.资源、环境与可持续发展[M].海洋出版社,2002,6.
- [95] 欧岚,车武,汪慧贞.城市屋面雨水绿地水平流渗透净化研究[J].城市环境与城市生态,2001,14(6):24~27.
- [96] 李俊奇,车武.德国城市雨水利用技术考察分析[J].城市环境与城市生态,2002,15(1):47~49.
- [97] 高超, 朱继业, 窦贻俭等.基于非点源污染控制的景观格局优化方法与原则[J].生态学报,2004,24(1):109-116.
- [98] 姚时章,蒋中秋.城市绿化设计[M].重庆: 重庆大学出版社,2000

攻读学位期间的研究成果

已发表论文:

- [1] 王业雷, 董瑞斌, 肖维林, 查红平. 南昌市区初期雨水污染研究与防治措施. 江西科学, 2008, 26(1):151~154
- [2] 雷晓林, 董瑞斌, 王业雷. 水资源--卤水制碱. 江西科学, 2007, 25(3):274~276