

## 摘要

本论文以陕北黄土高原区为研究区,在总结和分析前人研究成果的基础上,首先全面搜集和统计 1960-2008 年有准确发生时间记录的地质灾害事件,然后针对每一个有发生时间记录的地质灾害事件查阅其对应的降雨量系列,建立地质灾害及其对应降雨量数据库,在分析陕北黄土高原区降雨量和地质灾害时空分布特征的基础上,探索了陕北黄土高原区地质灾害与降雨之间的关系。研究主要包括:

(1) 地质灾害与降雨的分布特征的相关性研究。通过对 1990-2008 年陕北黄土高原区地质灾害空间分布的研究,多年平均降雨量空间分布和累计暴雨次数的空间分布进行对比分析和研究,得出陕北黄土高原区地质灾害的空间分布与多年平均降雨量的空间分布有很好的相关性,与累计暴雨次数空间分布的相关性更高。并从地质灾害和降雨的时间分布特征包括年分布特征,月分布特征和日分布特征的相关性进行分析,得出地质灾害的月际分布和月降雨量分布有明显的正相关性,而与局地暴雨月频数的相关性相对较差。

(2) 地质灾害与前期降雨的相关性研究。通过 x-y 散点图,直方图和百分比曲线图对地质灾害和前期累计降雨量进行统计分析,发现 10.1-20.0mm 和 20.1-30.0mm 这个量级发生的崩塌次数最多;滑坡在 70.0-80.0 这个量级发生的次数最多;用日降雨量对数据进行分组统计,分析地质灾害和前期降雨强度的相关性,得出暴雨(日降雨量 $\geq 50\text{mm}$ )诱发的地质灾害主要出现在当日,大雨(日降雨量 $\geq 25\text{mm}$ )诱发的地质灾害主要出现在当日和次日,而小雨和中雨诱发的地质灾害在各日均有可能发生;通过对前期降雨日数的统计,分析地质灾害与前期降雨持续时间相关性,得陕北黄土高原区的地质灾害属于多日降雨诱发型。

(3) 不同地貌类型下地质灾害与降雨的相关性研究。统计地质灾害点所处的地貌类型,得出研究区的地质灾害主要发生在黄土梁峁和残塬区。进一步运用百分比曲线,二项 Logistic 回归模型和 x-y 散点图得出三种不同地貌类型下,地质灾害发生的概率公式和临界降雨量公式。

**关键字:** 陕北黄土高原 地质灾害 降雨 地貌类型 临界值

## Abstract

In this thesis, as the study area in loess plateau of Northern Shanxi Province, in the summary and analysis based on the results of previous studies, first comprehensive collection and statistics 1960-2008, there were an accurate record of the occurrence time of geological disasters, then for each recorded a time of occurrence of geological disasters access to their corresponding rainfall series, to establish a database of geological hazards and the corresponding rainfall, Loess Plateau area in the analysis of rainfall and temporal and spatial distribution of geological disasters, based on the exploration of the Loess Plateau area between geological disasters and rainfall. Study include:

(1) The distribution characteristics correlation of geological hazards and rainfall correlation. By 1990-2008 the Loess Plateau area in the spatial distribution of geological disasters. the average annual rainfall and accumulated rainfall spatial distribution of the spatial distribution of the number of comparative analysis and research, obtained the Loess Plateau area and the spatial distribution of geological disasters the spatial distribution of the average annual rainfall has a good correlation with the total number of spatial distribution of rainfall more relevant. From geological disasters and the time distribution of rainfall distribution, including in the monthly distribution and distribution of the correlation on the analysis, obtained monthly distribution of geological disasters, and the monthly rainfall distribution was positively correlated with of storm frequency on the relatively poor correlation.

(2) Correlation of geological disasters and pre-rainfall correlation. Through the x-y scatter plot, histogram and percentage of curve on the early geological disasters and the cumulative rainfall for statistical analysis, found that 10.1-20.0mm and 20.1-30.0mm collapse of this magnitude occurred most frequently; decline in the amount of 70.0-80.0 level occurred most frequently; with daily rainfall data to group statistics, analysis of geological disasters and the relevance of early rainfall intensity, come rain (daily rainfall  $\geq 50\text{mm}$ ) induced geological disasters occurred mainly in the day, heavy rain (rain date volume  $\geq 25\text{mm}$ ) induced geological disasters occurred mainly in the day and the next day, while light rain and moderate rain-induced geological disasters may occur in the day; through the early days of rainfall statistics, analysis of geological hazards associated with the early duration of rainfall nature, may Loess Plateau, the geological disasters are many days of rainfall-induced type.

(3) Under different landforms of geological disasters in correlation with rainfall. Statistical point of

geological disasters in which the landscape types of geological disasters in the study area come mainly in the loess plateau area and the disabled. Further use of the percentage curve, 2 Logistic regression model and xy scatter obtained under three different landforms, geological disasters and the critical rainfall probability formula formula.

**Key words:** loess plateau of Northern Shanxi Province; Geological Hazards; rainfall; Landforms; Threshold

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景和意义

### 1.1.1 研究背景

陕北黄土高原区主要包括陕西的榆林、延安、铜川三市，地处青藏高原的东北部，属干旱、半干旱区，是在第三纪末起伏和缓的准平原基础上，历经第四纪以来多次黄土堆积和侵蚀作用形成的，地形非常破碎，川塬相间，沟壑纵横，地形起伏大，该地区多暴雨，降雨和特有的地形地貌使陕北黄土高原成为我国地质灾害的多发区和高发区域。年平均降雨量从东南到西北逐渐递减，定边年降雨量小于 350mm，长城沿线年平均降雨量为 360~390mm，延安以北年降雨量在 400~500mm，延安南部年平均降雨量在 500~600mm。许多研究表明降雨是导致地质灾害的一个重要的诱发因子，而在黄土高原区二者是否存在关系，关系是否密切，二者关系是否有规律。

西安地质调查中心张茂省等人在对 1980 年到 2005 年 25 年间，陕北黄土高原地区的 27 个气象站的日、时降雨量对比宝塔区的降雨特征和地质灾害发生的关系，确定了地质灾害气象预警的临界降雨量。预警的临界降雨量特征值分别是：

- (一) 日降雨量  $\geq 50\text{mm}$  ( $R_{24h} \geq 50\text{mm}$ );
- (二) 6 小时降雨量  $\geq 25\text{mm}$  ( $R_{6h} \geq 25\text{mm}$ );
- (三) 1 小时降雨量  $\geq 20\text{mm}$  或 3 小时降雨量  $\geq 25\text{mm}$  并且日降雨量  $\geq 30\text{mm}$  ( $R_{1h} \geq 20\text{mm}$  或  $R_{3h} \geq 25\text{mm}$  且  $R_{24h} \geq 30\text{mm}$ );
- (四) 连续多日降雨，且日降雨量  $\geq 10\text{mm}$ 。

符合以上条件之一就进行地质灾害预警，作为地质灾害气象诱发日对外发布。

在此背景下，本人的硕士学位论文将主要围绕所参加西安地质调查中心承担的“陕西省延安市地质灾害详细调查”“西北黄土高原区地质灾害综合研究”“延安宝塔区地质灾害监测预警示范”项目，开展陕北黄土高原区降雨与地质灾害关系的研究工作。

### 1.1.2 研究意义

由于陕北黄土高原处于青藏高原东北部，青藏高原对西风气流的动力和热力作用使黄土高原易形成气旋性涡旋，造成该地区多暴雨，降雨和特有的地质地貌使黄土高原成为我国地质灾害的多发区域，特别是近些年来，随着能源资源勘查程度的提高和国家能源开发西移战略的实施，陕北煤炭、石油、天然气开采、加工业得到了迅猛发展，同时

也带动了陕北地区其他行业的发展,成为陕西省经济社会发展最快的区域。近些年来地质灾害也有增多趋势,一旦发生地质灾害,造人民生命财产和社会经济成严重损失,因此对该区域的地质灾害预报研究非常重要。而多年来专家、学者对陕北黄土高原区地质灾害的研究,主要是集中于水土流失、地质灾害状况普查以及从地形地貌、地质构造方面分析该区域的地质灾害成因,而对该区域的地质灾害与降雨之间的关系详细分析研究甚少,无法利用气象部门提供的降雨预报信息开展地质灾害预报工作。本课题则充分利用气象部门的降雨资料分析其与地质灾害的关系,进一步清晰认识陕北黄土高原区的地质灾害,特别是崩塌、滑坡与降雨关系的基本规律,为当地经济发展、构建和谐社会提供科学的技术支持。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 国外研究现状

国外早期是主要是针对诱发滑坡降雨过程进行研究。建立滑坡发生和降雨临界值之间的一个经验公式。许多国家的专家曾进行过努力,尝试寻找在不同地质和气候条件下,降雨量和滑坡发生之间的关系(表 1.1)。

表 1.1 一些国家或地区触发滑坡的暴雨强度临界值

国家或地区	过程降雨量		降雨强度		备注
	总量(mm)	占多年年平均的百分数	日降雨量(mm)	时降雨量(mm)	
巴西	250-300	8-17%			>20%出现灾害性滑动
美国 SanBenito	250			>6	临界值
美国 Alameda	180				临界值
日本	>150-200			>20-30	临界值
加拿大	250				临界值
中国香港	350		>100	>40	临界值

各国学者用来确定降雨诱发滑坡的临界值的方法很多,归纳起来主要有以下两种型式,其不同点在于所考虑的因素不同。

#### (1) 降雨强度临界值

Brand 等人 1984 年对香港近 20 年的滑坡灾害与降雨资料进行了对比分析统计,结果表明香港绝大多数的滑坡是由短时强降雨诱发的,且这些滑坡的发生时间与最大小时

降雨量的时间同步。提出以小时降雨量作为发生灾害性滑坡的临界值，为了便于预警，又提出了日降雨临界值。

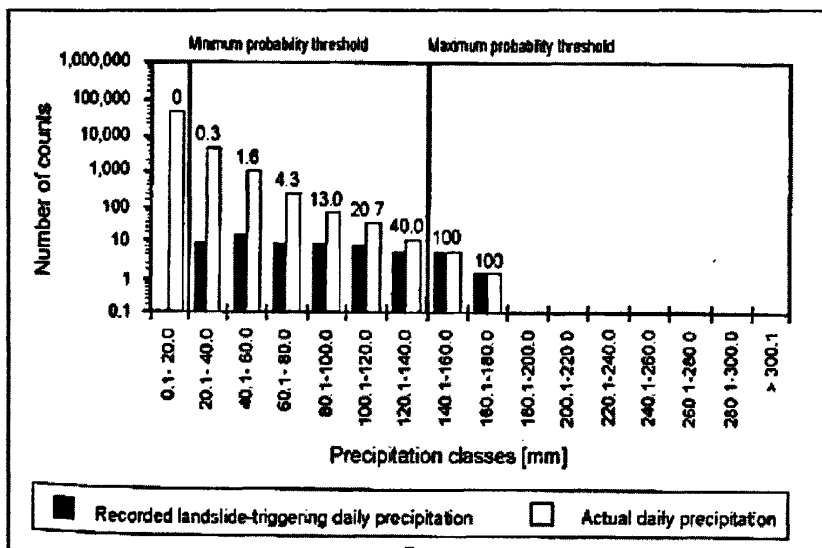


图 1.1 通过日降雨模型确定降雨诱发滑坡的临界值 (新西兰 Wellington 地区)

Glade (1997) 建立了日降雨模型 (Daily Rainfall model)，只使用日降雨量作为参数，简单的分析了诱发滑坡和不诱发滑坡的日降雨量 (Glade, 1998)，得出最小临界值与最大临界值，即在最小临界值以下，没有可能发生滑坡；在最大临界值以上，滑坡一定发生。降雨量等级划分为 20mm 为一个等级。(图 1.1)

### (2) 降雨过程雨量临界值

在世界许多地区，前期降雨量对滑坡的影响很大。许多学者认为，只考虑降雨强度，不能准确的反应滑坡与降雨之间的关系，建议用累计降雨量、降雨强度与降雨的持续时间来表达发生大量滑坡的临界值。一些学者也建立了累计降雨量和降雨强度之间的关系式。

Caine(1980)全面总结了全球的可利用数据，给出了不同地区诱发滑坡暴雨事件的降雨强度以及累计降雨量与滑坡的关系式：

$$I_r = 14.82D^{-0.39}$$

其中， $I_r$ —每小时降雨量 (mm)；

$D$ —累计降雨量 (mm)。

Guidicini G.(1997)通过对巴西九个地区滑坡记录的统计研究得出降雨与滑坡事件之间的统计关系。

$$C_c = \frac{\text{至暴雨时, 以前的降雨量的累加 (当年中)}}{\text{年平均降雨量}}$$

$$C_e = \frac{\text{降雨期间的雨量}}{\text{年平均降雨量}}$$

$C_f = C_c + C_e$  称“最终系数”

L. Ayalew (1999) 通过对埃塞俄比亚 64 个滑坡的统计分析, 得出滑坡发生的可能性与降雨的关系式:

$L_f$ —滑坡发生的可能性;

$$L_f = K \frac{X}{Y} \times 100\%$$

$K$ — $>5\text{mm}$  的降雨天数 (统计之日前) 与年平均降雨天数的比值 (考虑蒸发的影响,  $<5\text{mm}$  的降雨认为是没有入渗);

$X$ —累计降雨量 (统计之日前);

$Y$ —年平均降雨量。

Glade 的前期日降雨量模型 (Antecedent Daily Rainfall model), 考虑了前期降雨的影响。他认为决定前期情况包含两个主要因素: 前期降雨的历时时间和土体含水量的减少速率。

$$Pa_0 = P_1 + 2^{kd} P_2 + 3^{kd} P_3 + \dots + n^{kd} P_n$$

其中,  $Pa_0$ —第 0 天前期雨量 (mm);

$Kd$ —一个常数, 指表层土水的流出量;

$P_n$ —第  $n$  天的降雨量 (mm)。

总的来看, 方法 1 最大优点是简便, 在世界范围内可以普遍应用。它的缺点是, 忽略了前期降雨情况和土体含水情况。

方法 2 考虑了前期情况, 相对得出的临界值也比较准确, 但需要的资料和数据较多, 且没有考虑环境因素, 如: 地形地貌情况等。

另外, 这 2 个方法最大的问题是, 不能区分判定滑坡类型、滑坡活动特征 (新滑坡还是老滑坡复活) 以及滑坡规模等。

### 1.2.2 国内研究现状

香港是世界上最早研究降雨与滑坡关系、实施降雨滑坡气象预报的地区之一。香港地区的降雨与滑坡关系研究始于 1972 年 6 月 18 日发生的 SauMauPing 和 PoShan 滑坡。

Brand 等人 (1984) 在详细分析了 1963—1983 年的滑坡数目与 1 天至 30 天的累计降雨关系之后, 认为香港地区的日均滑坡数量和滑坡伤亡人数与前期降雨量之间基本上无关系可循, 但与小时降雨量关系密切。通过对香港 1982 年降雨资料的分析, 当最大小时降雨量超过 40mm 时, 将发生较大滑坡。但通过短历时强降雨很难提前预测滑坡, 而累计降雨量在到达临界值前几个小时就可以估算到, 因此利用 24 小时累计降雨量预测滑坡具有很重要的意义。经分析, 香港地区 24 小时降雨量超过 100mm, 将发生滑坡。香港地区采用雷达图像解译小范围的地质构造, 从而确定滑坡发生的潜在区域。香港政府于 1984 年启动了滑坡预警系统, 由 86 个自动雨量计构成, 确定小时降雨量 75mm 和 24 小时日降雨量 175mm 为滑坡预报的两个临界降雨量值。预警系统启动以来, 平均每年能发布三次滑坡预警。

中国国土资源部和中国气象局于 2003 年 4 月 7 月签订了联合开展地质灾害气象预报的协议。根据该协议, 中国地质环境监测院负责研制的中国内地国家级滑坡预报系统于 2003 年 6 月开始运行。该系统是基于这样一个认识: 在与降雨有关的滑坡、泥石流发生时, 过程降雨量和降雨强度存在一个临界值, 当一次降雨的过程雨量或降雨强度达到或超过此临界值时。滑坡和泥石流将成群发生; 中国不同地区滑坡、泥石流的临界降雨量值具有显著的差异。他们将中国的内地划分为 74 个预警区域, 中国国家气象中心根据中国地质环境监测院提供的滑坡、泥石流等数据。提供了全国 731 个雨量观测站在 15d 内的降雨量数据, 以 1—15d 的累计降雨量作为可能发生滑坡和泥石流的临界降雨判据。中国地质环境监测院根据国家气象中心每天 16:00 提供由当日 20:00 至次日 20:00 的降雨预报数据和预报雨量等值线图, 与预警地区的临界降雨判据进行逐个对比, 判定滑坡(泥石流)发生的可能性(预报等级); 判定结果经专家会商以后, 所在预警图上划定预报或警报区, 作为预报或警报信息, 通过中央电视台的天气预报节目和中国地质环境信息网进行发布。

三峡库区、四川雅安及江西省重点地质灾害易发区也建立了专业的监测预警示范区, 实现了灾害的实时监测预报和预警、信息远程传输和网上及时发布的目标。三峡库区建成了包括 GPS 监测网、综合立体监测网和遥感监测系统在内的专业监测系统, 建立各类监测网点 1446 个。通过遥感图像对三峡库区地质灾害进行宏观监控, 已对 136 个重大滑坡和重要库岸实施了专业监测, 对 1226 处地质灾害点实施了群测群防监测。在地灾最为突出的巫山、奉节两县, 地质灾害监测预警系统对已治理的高边坡和已建起的高挡墙及部分移民住宅区进行了实时监控。特别是在巫山县建立了具有国际水平的实时



监测示范站,利用国际上最先进的光导技术,对地质体的深部变形、地下水及孔隙水压力、地面变形等进行实时监测,实现了在互联网上实时查询地灾变形破坏程度并进行预警的功能。四川雅安地质灾害预警示范区降雨监测网络,完善了预警预报模型和分析软件平台,并结合降雨监测和预报数据,开展了示范区汛期地质灾害的预警预报。在江西地质灾害的易发区,科技人员结合岩土体结构、地形地貌条件、植被及人类工程活动等多种因素,利用多普勒卫星开展地质灾害气象预报预警。各专业监测预警示范区运行几年来成效显著,迄今,三峡库区已成功监测预警滑坡100多处,保护了两万多人的生命和财产安全;雅安成功避让了3起地质灾害;江西庐山地区在2005年13号台风诱发严重群发性滑坡泥石流灾害,由于预报准确,164户407人得以成功避让。

国内地质灾害与降雨的关系研究主要是通过建立降雨诱发滑坡临界值模型,如日降雨量(或降雨强度)和前期降雨量模型,采用小时雨强、当日降雨量、前几日的累计降雨量(或前期有效降雨量)、前期降雨量占年平均雨量的比值(%)等表达式对临界降雨量进行刻画,其基本方法都是采用统计技术对滑坡和降雨资料进行分析,取其统计意义上的临界点作为降雨诱发滑坡的临界值。基本上国内的研究不区分滑坡的类型和规模,不考虑降雨入渗的过程和机理,也不考虑滑坡所处的区域和地形地貌的特征。因此所得到的只是基于某种经验水平结果,即在某一地区在某个临界值条件下会有滑坡发生,至于是何种类型的滑坡以及滑坡所处何种地貌类型则无从知晓。

陕西省最主要的灾害是旱灾、洪涝灾、沙尘暴、水土流失以及滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害。陕西省率先在全国建立了年度自然灾害会商体制进行灾害预测,已坚持了10余年。陕、甘、宁水利和地质部门也进行了水旱灾害、水土流失等方面的研究;气象部门进行了重大气象灾害的预报研究;地质部门广泛开展了全区的环境地质调查,特别是地质灾害多发区的调查与区划工作,上述工作为防旱抗洪和抵御地质灾害提供了必要的资料,为减灾防灾提供了决策的依据。2005年陕西省气象局与西安地质矿产研究所联合建立了“黄土高原气象—地质灾害实验室”,建立了气象与地质部门的信息共享平台。

### 1.3 研究思路和研究内容

在对研究区的地质灾害资料和降雨资料的综合分析的基础上,从地质灾害所处的地貌类型入手,找寻不同的地貌类型下降雨与地质灾害的关系,并运用统计学的方法尝试建立在不同的地貌类型下降雨诱发地质灾害的临界值。

依据以上确定的研究思路，本研究在具体实施过程中的技术路线如图 1.2 所示。

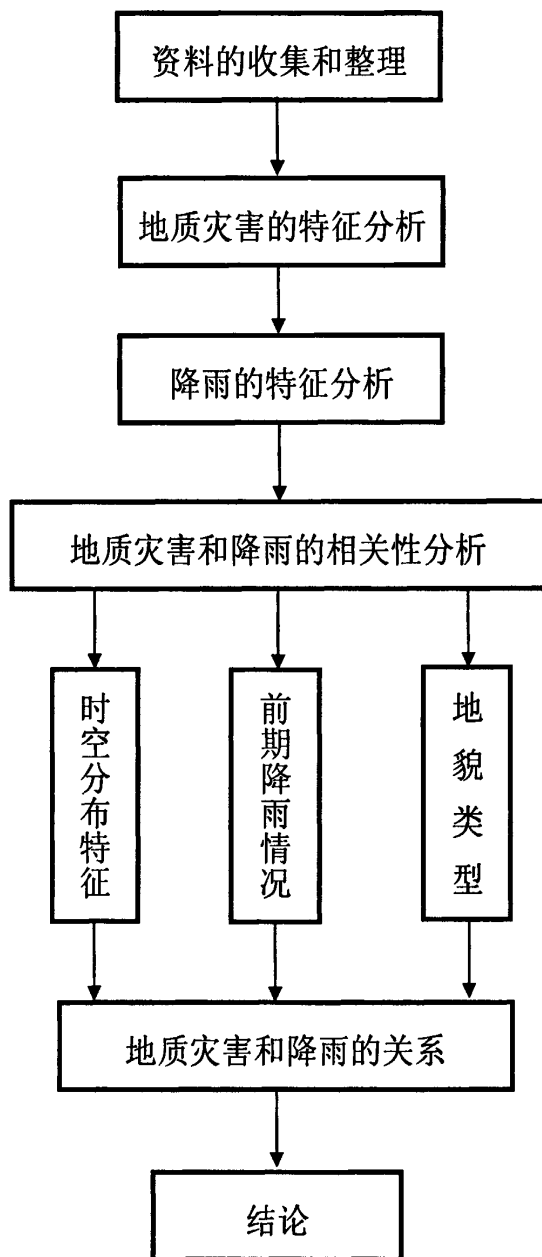


图 1.2 技术路线图

## 第二章 自然地理与地质环境概况

### 2.1 地理位置

陕北黄土高原地处青藏高原的东北部，黄土高原的中部，主要包括陕西的榆林、延安、铜川三市，包括 25 个县 4 个市辖区，9689 个行政村，介于东经  $107^{\circ} 20' \sim 111^{\circ} 25'$  和北纬  $34.8^{\circ} \sim 35.59^{\circ}$  之间。北邻内蒙古自治区、西接甘肃省、东与山西省毗邻，南与渭南市、咸阳市相连接。（见图 2.1）

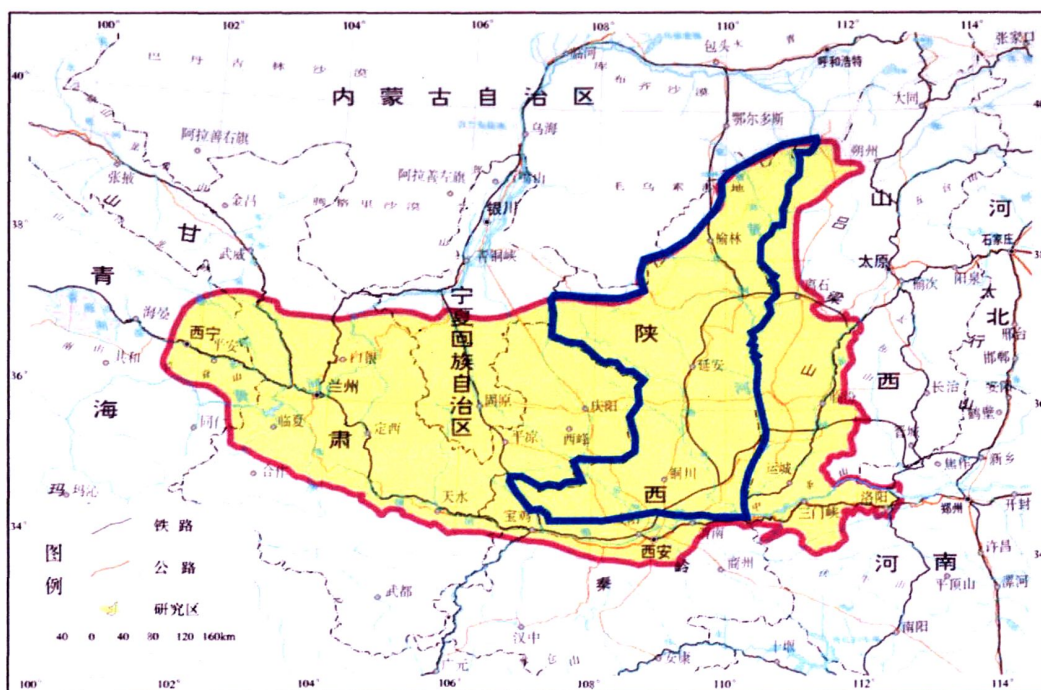


图 2.1 陕北黄土高原区交通位置图

### 2.2 地形地貌

#### 2.1.1 地形

陕北黄土高原位于黄土高原中部，地处我国的第二级阶梯，地质结构上属于鄂尔多斯地台，由中生代基岩和新生代红土层所构成的古地形上，覆盖了深厚的黄土而形成，是我国黄土高原的中心部分。由于黄土广覆于下部起伏不平的基岩古地形之上，在新构造运动的影响下，由于延河、汾川河及其支流的长期侵蚀切割，形成了现今梁峁起伏、河谷深切的地形。总的特点是西北高，东南低，地势由西向东倾斜。

### 2.2.1 地貌

陕北黄土高原大致分为两个大的地貌单元以神木—榆林—横山—定边—一线为界，以北属风沙地貌，以南属黄土地貌。（见图 2.2）

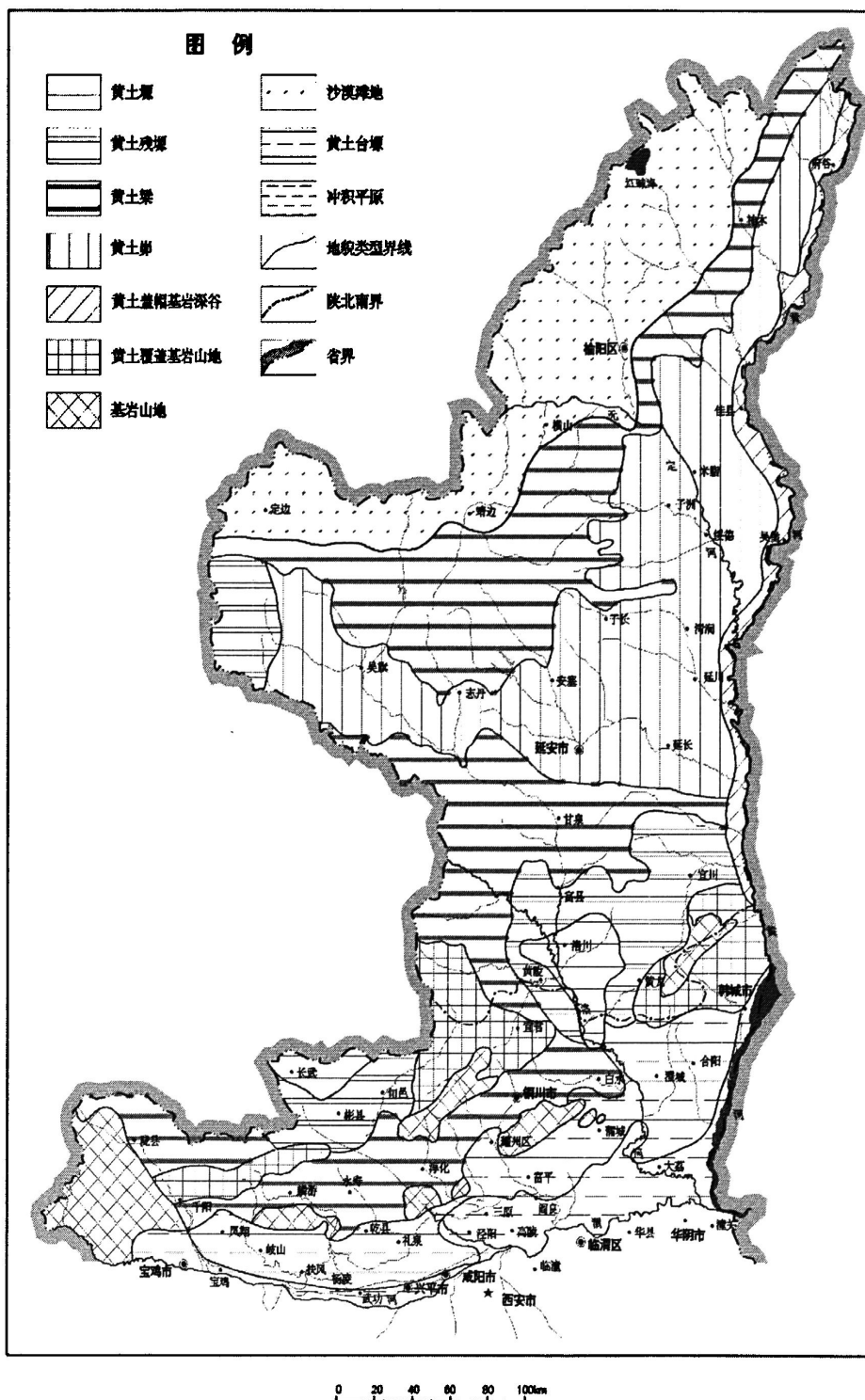


图 2.2 陕北黄土高原区地貌类型图

风沙地貌主要分布在长城沿线附近以北地区以沙漠滩地为主。突出的特征是西北高东南低，海拔约 1000—1500m，以风力作用和堆积作用为主，组成物质以第四系松散堆积物和风积物为主。本区气候干旱，地表起伏不大，组成物质松散，因此流水重力作用不显著，沟壑不发育，风蚀风积地貌分布普遍。

南部黄土高原可分为九部分：

黄土塬主要分布在洛河中游的富县、洛川河黄陵地区，统称洛川塬，是陕北保存较好的黄土塬。其底是中生代砂、页岩和厚度不超过十数米的三趾马红土所构成的一个山间盆地，从北到南，由东向西，有基岩组成的丘陵逐渐过渡为地势平缓的盆地。现代的溯源侵蚀很活跃，塬坡被蚕蚀，沟壑在增长。黄土塬坡面冲刷、沟谷侵蚀有愈演愈烈的趋势，塬面随沟壑密度和地面坡度的增大而不断缩小。

黄土残塬主要分布在宜川县云岩河两侧和仕望河流域以及富县黄陵的部分地区，塬面海拔在 1000~1400 米，由西向东微倾，因受河谷切割完整的塬面已经遭到破坏，形成小块塬地。塬面不仅破碎，由谷缘向塬的中心相对高差可达 100~120 米。

黄土梁主要分布在吴旗的周湾、安塞的王家湾和子长的李家岔等地的河沟上游以及吴旗的西北、志丹西南、甘泉县的大部分地区、陇县东北部。地面海拔在 1400~1600 米，是由厚层黄土批覆的缓梁宽谷。黄土梁的基岩谷架亦作梁装，黄土梁下伏古地形是由中生代砂、页岩和上新世红土组成的沟岭地貌岭不主要为中、上更新同黄土所覆盖。梁地貌主要是在中更新世黄土黄土堆积之后剥蚀侵蚀又为马兰黄土覆盖全新世时期未受到强烈切割，因而保存了宽谷缓梁形态。

黄土峁主要分布在吴旗、志丹、安塞、延安、子长、延长、延川、清涧、子洲、米脂、绥德、佳县等地区。海拔在 1100~1400 米之间，地势西北高东南低，是由斜梁演变成黄土峁居于主导地位的地貌类型，峁多梁窄，峁梁起伏，峁成馒头状，峁顶坡 2~5°，峁坡常呈凹形或凸形，下部坡度增致 15~30°。两峁之间凹下的鞍部，由于沟坡侵蚀和坡面冲刷变得很窄，被切穿时两峁分离。

黄土盖帽的基岩深谷主要分布在黄河沿岸地区，呈南北狭长的带状由三叠纪砂页岩组成，海拔在 1200 米左右批覆着薄层的不连续黄土，黄河深切形成峡谷，谷底高程在 450~590 米之间基岩高出谷地达 400~500 米。

黄土覆盖的基岩山地主要分布在宜君、千阳、韩城等地，海拔在 1000~1300 米之间，以斜梁为主，有孤立峁分布，古地形为中生代砂砾页岩组成的丘陵，上覆薄层黄土，梁顶面狭窄，一般宽 60~100 米，梁长约数公里。沟谷以黄土—基岩沟谷为主，其次为

黄土沟谷。

基岩山地主要分布在铜川市西部子午岭主脊及东侧支梁地带,耀州区等县也有少量分布,海拔 1300~1700,山体主要由中生代、新生代砂岩、泥岩、页岩和砾岩组成,局部地区有灰岩分布。山坡多在 40° 以上。

黄土台塬主要分布在铜川市南部和东部,海拔 700~900 米,下部为新第三纪、早更新世冲积、洪积地层。上部为中晚更新世黄土,黄土厚 50~80 米夹有 5~6 层的古土壤层。黄土台塬已被分割成 4 个小块。沟谷较为发育,切割深度为 100~150 米,较大的沟谷或河谷往往切入基岩之中,沟谷溯源侵蚀强烈,塬边不断受到蚕食。

## 2.3 气候水文

### 2.3.1 气候

陕北黄土高原区属半干旱温带大陆季风气候区,处在半干旱向干旱过渡地带。研究区沿神木、榆阳、横山、靖边和定边南界大体可分成两个气候区,北部是长城沿线温带半干旱气候区,南部是陕北高原暖温带半干旱气候区。气候大陆性强,气温、降雨变率大。春旱多风,夏短炎热,秋高气爽,冬季寒冷。研究区太阳辐射强,日照时数长,太阳辐射总量达  $5.0 \times 10^9$  焦耳/ $m^2$  以上,府谷、榆林一线以北最高  $6.0 \times 10^9$  焦耳/ $m^2$ 。本区日照时数达 2100—2926 小时,北多南少,大部分地区在 2400 小时,以西高北低的趋势分布,多年等温线近似径向分布,9℃等温线大体经过府谷、神木、安塞、富县、黄陵、宜君一线,10℃等温线则经过佳县、绥德、延长、宣川、黄龙、铜川一线。年平均气温大于 10℃积温大约在 2813—4050℃,大体呈东高西低的趋势分布,最高在黄河沿线一带,越往西越低,最高吴堡,可达 4050℃,最低在靖边、定边、宜君和黄龙一带,约在 2800—2900℃左右。气温日差较大,最大的榆林达 35℃。本区降雨稀少,多年平均降雨量约在 320—700mm,受季风及地形的影响,降雨量分布差异较大,西北小、东南及南部降雨量较大。降雨线大体沿庙沟门镇—榆林长城沿线—白于山北麓一线,以西为风沙滩地区,降雨很少,最少的定边年降雨量约 320mm 左右,而此线以东、以南的黄土高原区,降雨由北向南逐渐增加,铜川降雨量可达 550mm,最高的在宜君达 700mm。由于受季风影响较大,降雨季节变化和年际变率都很大。降雨量季节分布很不均衡,夏秋降雨量大,夏秋季降雨约占全年降雨的 70—89%,并且降雨强度大、多暴雨,黄土侵蚀比较严重,春冬季降雨稀少,而春季不足 15%,春旱多发。本区风速较大,年平均风速达 2.2—3.3m/s,春季多风、风大,持续时间长,榆林、延安一带春季平均风速可达

1.4—4m/s, 铜川一带可达 2.6—3.7m/s。本区自然灾害频繁, 多干旱、雨涝、冰雹、大风、霜冻。冰雹多发生与 6—8 月份, 年平均雹日数介于 0.1—3.3 天之间。平均无霜期约在 160—220 天之间, 长城沿线最短, 约在 165 天左右, 而南部的铜川达 220 天以上。

### 2.3.1 水文

陕北黄土高原区干旱少雨, 水资源十分匮乏, 人均和亩均地表水资源占有量分别为  $1046\text{m}^3$  和  $50\text{m}^3$ , 相当于全国平均水平的 46.4% 和 25.8%。径流分布与降雨分布一致, 南部多北部少, 自南向北径流深度逐渐减小。本区河流主要分内流河和外流河两部分。内流河主要是在长城沿线以北, 一个区是定边的八里河, 另一个区是神木的鳞盖河、齐盖素河、尔林兔河和前庙河等, 多属季节性河流, 流向由南向北注入湖泊, 或消失于沙漠之中。年径流深度仅 16mm, 水质差, 多为咸苦水。外流河属黄河流域, 占全区的 99% 以上。主要支流有窟野河、秃尾河、无定河、佳芦河、无定河、清涧河、延河、洛河等, 由西北向东南流入黄河。此外还有安川河注入马莲河, 沮河注入渭河等。全区河流基本属于树枝型水系, 总的来看, 长城以南河流众多, 河网较密, 长城以北河网比较稀疏。本区地下水主要分第四系松散层潜水和基岩裂隙水两类。第四系潜水主要包括河谷冲积、洪积层潜水, 滩间地冲积湖积层潜水, 沙层及盖沙黄土层孔隙裂隙潜水和黄土层裂隙孔洞潜水等。河谷冲积洪积潜水主要分布在区内较大的河流及其大小支流的河漫滩及阶地等地区, 含水层厚, 分布面积广, 补给条件及富水性较好。北部沙漠中的滩地以及南部黄土区的涧地、坝地则分布有滩地冲积湖积层孔隙水, 主要靠大气降雨和凝结水补给, 补给条件及富水性较好。在黄土残塬及黄土梁峁区主要以黄土裂隙孔洞潜水为主, 由于地形受流水切割, 因此分布上具有零散和不连续的特点。此外, 在本区较大的冲沟或河谷凸岸、主支流交汇的河漫滩和一级阶地展布区的裂隙发育地段, 形成中等富水和富水区, 但在河谷及梁峁地带则形成贫水区。在各种砂岩中还有一部分承压水, 由于受地质构造条件的限制, 分布上具有分散、不连续的特点, 一般在河谷地区埋深较浅而梁峁区埋藏较深, 局部低凹的河谷地段高出地面而形成自流。但水量较小, 水质差。此外本区北部天然海子较多, 但水量小, 水质矿化度高。

总体来看, 本区水资源量较小且分布不均。

## 2.4 地层岩性

陕北黄土高原区内主要发育中—新生代地层, 包括三叠系、侏罗系、新近系和第四

系，第四纪黄土分布最为广泛，几乎遍布全区，其余时代地层多沿河谷两侧零星出露。

(见图 2.3)

### (1) 中生界

#### ① 三叠系上统 (T)

##### A. 延长组 ( $T_{3y}$ )

主要分布于研究区中部甘谷驿一带。岩性为灰白色、灰绿色砂岩夹深灰色砂质泥岩、页岩及煤线，砂岩单层厚度变化较大，具交错层理，含黄铁矿结核。该层厚度约 110m。

##### B. 瓦窑堡组 ( $T_{3w}$ )

主要分布于研究区中部川口—青化砭—元龙寺一线及东南部麻洞川、固县川等地，出露于河谷两岸坡脚及部分冲沟中。岩性为灰绿、灰黑色页岩，砂质泥岩与黄绿色厚层至薄层中细砂岩互层，夹数层薄层煤线，含植物化石。本组地层勘探揭露厚度达 200 余米，未见底，与下伏地层呈假整合接触。

#### ② 侏罗系 (J)

##### A. 下统富县组 ( $J_{1f}$ )

出露于延安城东罗家坪—东十里铺一带及宝塔区北部个别沟谷之中，上部岩性为一套以紫红色为主的杂色泥岩；下部为灰白、黄绿色砂岩、砾状砂岩及砾岩，含有铁质结核，钙质胶结，胶结致密、坚硬，厚度 60 余米，与下伏瓦窑堡组呈假整合接触。

##### B. 中统延安组 ( $J_{2y}$ )

主要出露于延河、汾川河及其一级支流的岸坡坡脚和两岸沟谷之中，是构成河谷两侧基岩陡坎的主要岩层。

##### C. 中统直罗组 ( $J_{2z}$ )

主要分布于研究区的西部地区，蟠龙川流域泉岔河李家砭以北沟谷大面积出露，牡丹川流域分布于寺沟至东沟门以北地区，杜甫川和南川河流域主要分布于方庄、折家湾、前碾庄、龙寺一线的西南地区，岩性主要为绿色块状长石砂岩，夹杂色泥岩和粉砂岩。

##### D. 中统安定组 ( $J_{2a}$ )

在研究区西川河流域的西部有零星露头，岩性组合可分为上下两部分，下部为一套黑色、灰黑色油页岩、页岩及粉砂岩；上部为杂色细砂岩、粉砂岩、泥岩和泥灰岩。以富含油页岩、页岩和泥灰岩为特征，厚度一般数十米到百余米。

### (2) 新生界



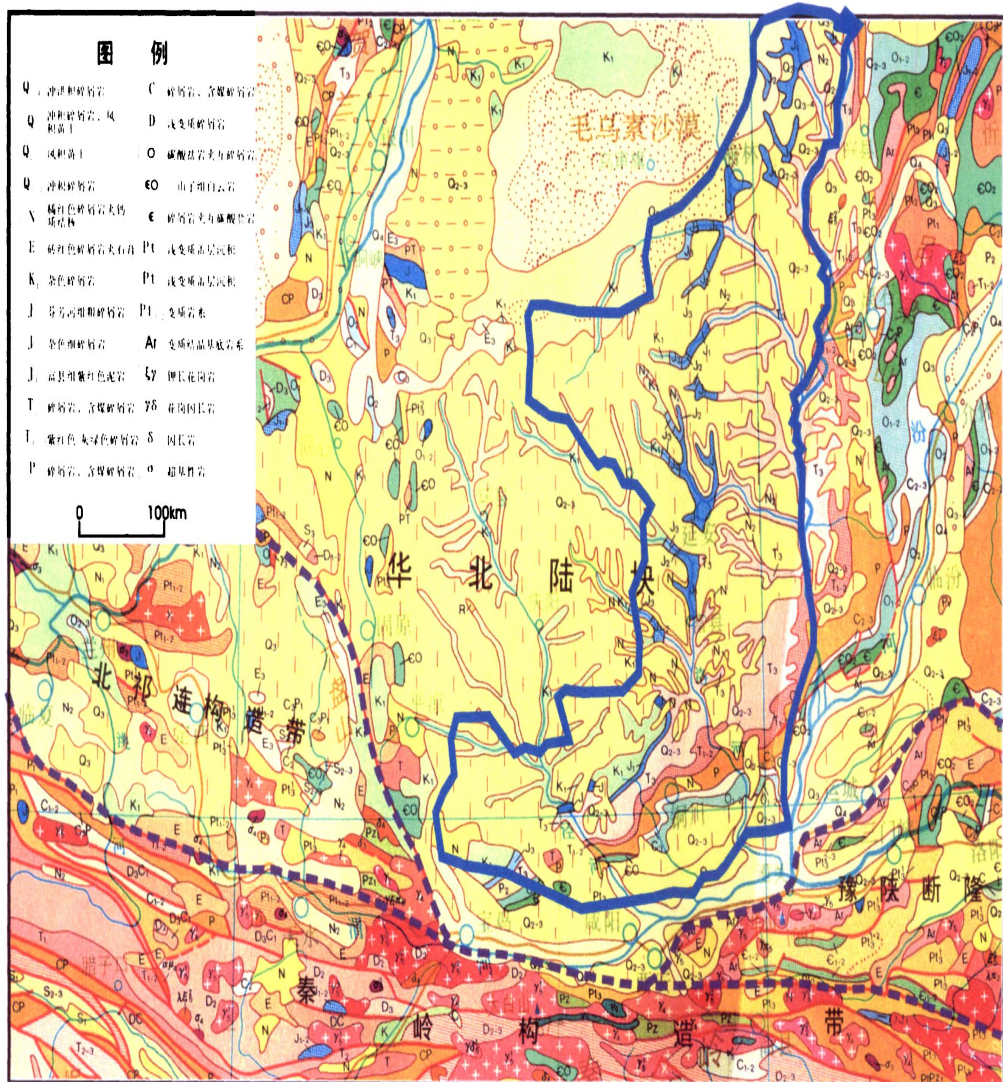


图 2.3 陕北黄土高原区区域地质略

① 近系上新统 ( $N_2$ ) 包括了保德组 ( $N_{2b}$ ) 和静乐组 ( $N_{2j}$ ), 剖面上两者不易区分, 前人习惯将两者并层。区内分布不连续, 呈不整合断续覆盖于前新近纪地层之上, 其上多被第四纪黄土覆盖, 仅在局部谷坡及较大支沟的沟脑处零星出露。

其中保德组岩性整合可分为三部分: 下部为砂砾岩或砾岩; 中部为棕黄、棕红色粘土及钙质结核层, 夹灰绿色粘土、棕黄色泥灰岩; 上部为棕红色粘土与棕黄色钙质结核层。静乐组由桔红色、深红色不含或少含钙质结核层的粘土岩、砂质粘土岩及棕灰色、黄灰色底砾岩或砂砾岩组成。

## ②第四系(Q)

区内第四系分布广泛, 以黄土为主, 几乎遍布全区, 不整合于前第四纪岩层之上。受古地理环境控制, 其沉积厚度变化较大。在黄土堆积之前, 经唐县侵蚀期以来形成的由新近纪三趾马红黏土或中生界砂、页、泥岩组成的红黏土高原是黄土高原的基座, 其上堆积了中更新世离石黄土, 上下离石黄土之间保留有一个剥蚀面。中更新世晚期, 地形起伏变缓, 又发生了一次强烈的剥蚀作用(清水期侵蚀), 之后堆积了马兰黄土。此后, 又经过了一次剥蚀期(兰州期侵蚀), 地形相对高差增大。黄土的厚度, 从总体上看有由北向南逐渐降低, 由西向东逐渐增厚的趋势, 以 100~125m 厚度为主, 最厚的地方在甘谷驿东部康家沟、石家河一带, 厚达 150m 以上。

区内黄土主要包括中更新世黄土 ( $Q_p^2$ )、晚更新世黄土 ( $Q_p^3$ ) 和全新统 ( $Q_h$ ), 而早更新世黄土在区内不发育。第四纪沉积物成因类型较为复杂, 有风积、冲积、冲洪积、坡积及坡洪积等, 与区内地质灾害关系最密切的为中一晚更新世风积黄土 ( $Q_p^{2-3eol}$ )。

### A. 下更新统

相当于午城黄土 ( $Q^{p1eol}$ ), 亦称老黄土或石质黄土, 零星分布于延河流域的西川河和蟠龙川流域的黄土梁峁区, 岩性为肉红色土状粉质粘土(石质黄土), 夹数层浅红色古土壤和 10~20 层钙质结核。

### B. 中更新统

相当于离石黄土 ( $Q^{p2eol}$ ), 亦称老黄土, 分布于黄土梁峁区, 沿梁峁边坡和河谷冲沟两侧出露, 上部多被新黄土和坡积层覆盖, 是构成黄土梁峁的主体部分, 厚 60~150m, 岩性为浅黄、浅棕黄或浅棕红色粉质粘土、粘土夹十余层棕红色古土壤, 结构较致密, 质地较坚硬, 垂直节理发育, 无层理, 古土壤下部密集, 干时质地坚硬, 颜色变深, 多为钙质结核层。

### C. 上更新统

相当于马兰黄土 ( $Q^{3eol}$ ), 亦称新黄土, 在区内广泛发育, 遍布于黄土梁峁顶部厚度一般 10~30m 不等, 局部可达 40m 以上。岩性以灰黄色或姜黄色、黄褐色粉土为主, 粉土成分含量较高, 结构疏松, 质地均一, 具大孔隙, 无层理, 垂直节理发育, 含有较多白云母片及少量蜗牛化石。沟谷边坡晚更新世马兰黄土多斜坡于中更新世离石黄土之上, 两者接触面成为软弱结构面, 是产生崩塌和滑坡的有利地段。

#### A. 全新统 ( $Q^h$ )

区内全新统沉积物类型复杂, 按其成因可划分为冲积层 ( $Q^{hal}$ )、冲洪积层 ( $Q^{hpal}$ )、坡积层 ( $Q^{hd1}$ )、坡洪积层 ( $Q^{hd1p1}$ ) 等, 主要分布于河谷区阶地、河漫滩、河床及较大的冲沟沟口和下游段, 坡积层多见于沟谷两侧的斜坡地带。

## 2.5 地质构造

陕北黄土高原区位于华北地台鄂尔多斯地块的中部, 岩层自东向西由老而新, 多为南北走向, 局部地区略呈东西走向, 且一致向西缓慢倾斜, 倾角约  $2^\circ$  左右。鄂尔多斯地块在中生代以前与华北地台同升共降。二叠纪后期海西运动, 山西地台、六盘山地区、秦岭一带三个脊梁升起, 形成了鄂尔多斯地台区独立的内陆盆地沉积单元。在地台内部是造陆型的振荡构造运动, 地壳比较稳定。

中生代, 这个内陆盆地经长期沉陷, 堆积了一套深厚的陆相沉积。白垩纪末, 地块抬升, 结束了内陆盆地沉陷的历史。晚第三纪, 在老第三纪古地貌的基础上, 堆积了新第三纪红土层, 上新世末发生喜马拉雅运动, 鄂尔多斯地台升起, 形成高原。早更新世时, 在和缓的古地形面上堆积了午城黄土。中更新世时地台又发生沉降, 广泛沉积离石黄土, 直到中更新世末, 地台开始抬升, 产生河流溯源侵蚀, 山前老冲积扇发育。在晚更新世时, 鄂尔多斯地台地壳稳定沉陷, 堆积了马兰黄土。

鄂尔多斯地台以升降运动为主, 振荡幅度小而频繁, 因而地质构造简单, 无大型剧烈的褶皱和断层, 长期以来是一个比较稳定的地区。区域基底构造的特点为隆起与凹陷相间带状分布。

根据物理勘测重力变化表明, 以延安地区为中心的陕北单斜翘曲构造, 是一个东高西低的大斜坡。在这个斜坡上, 由北向南自靖边以东, 经二家畔转志丹县东部, 到曹新庄南经墩梁东, 穿过石马河至直罗镇西黑水寺, 经子午岭入咸阳地区为线, 将陕北宦途高原区分为两个构造单元。在该线以东是陕北单斜翘曲构造, 以西为陕甘宁凹陷向斜构造。除吴旗、志丹两县和葫芦河、沮水河以外, 研究区大部分地区在单斜翘曲地带。

## 2.6 岩土体类型与工程地质特征

研究区地层发育较为齐全主要以第四纪冲-湖积层和风成黄土堆积为主,高原周边及高原内隆起地区自元古代至第四纪地层均有分布,其中以元古代深变质岩、古生代浅变质岩、碳酸盐岩和岩浆岩为主。按岩土颗粒间有无牢固连接将岩土介质分为岩体和土体两大类。

岩体以构造、结构及强度划分为8类,土体以成因、颗粒组成和工程性质划分为III类(见表1.1)。区内黄土在各种外营力的作用下,节理裂隙不断延伸扩展,其整体性大大降低,在重力作用下,常沿节理裂隙或软弱结构面产生滑移变形,导致滑坡、崩塌的产生。

## 2.7 水文地质

研究区属于半干旱气候区,在河川谷地,地下水较为丰富;丘陵山区,沟豁塬区较为贫乏。地貌因素决定地下水埋藏、补给、径流与排汇。沟谷下切深的地方,地下水埋藏较深,为数十米至百余米;塬区由塬心到边缘埋深增大为45-80米,最深百余米。破碎的地貌使黄土中地下水难以补给和蓄存,主要靠天然降雨补给。下伏基岩裂隙不发育,水分分布不均匀。总的分布趋势是:横山-安塞-宜君一线以西的研究区西部,以第四系黄土潜水和白垩系厚层砂页岩中裂隙水为主。黄土潜水零星分布,水量贫乏,泉水流量 $1-150\text{m}^3/\text{日}$ 。以东地区,以第四系黄土层中潜水、侏罗系厚层砂页岩及三叠系砂页岩层中潜水为主。黄土区特别是黄土塬潜水水位埋深30-150m,泉水流量梁细区和塬区分别为 $1-25\text{m}^3/\text{日}$ 和 $5-40\text{m}^3/\text{日}$ 。侏罗系是主要的含水岩组,泉水流量达 $1000\text{m}^3/\text{日}$ ,浅部基岩地下水涌水量 $1000\text{m}^3/\text{日}$ 。切割较烈的三叠系含水岩组,裂隙水多被排汇,泉水流量 $1-80\text{m}^3/\text{日}$ 。延安地区南缘的北部山区,贮存的石灰岩裂隙水埋藏较深,移动性大。砂页岩裂隙水富水地段待勘探开发。河谷砂砾层中潜水,埋深4-6米,单井最大涌水量 $10-300\text{m}^3/\text{日}$ ,与浅部基岩裂隙水构成地下水较丰富地带。

研究区地下水有四种类型:

(1)黄土塬区地下水:分布在黄土塬面较广、切割较弱的洛川、富县和黄陵塬区,主要靠降雨补给,局部地区也有基岩裂隙水补给。

(2)黄土梁峁区地下水:分布在延安以北地带,属基岩裂隙潜水。岩性为砂、泥岩互层,为良好的含水岩层。具有多层性,有较多的泉水出露。

表 1.1 岩(土)体类型及特征一览表

类型		分布	地层岩性	结构	岩土体特征	
岩	块状坚硬 岩浆岩	陕北黄土高原周边山 地	各期侵入岩, 花岗岩、闪长岩、辉长岩、 角闪岩等	块状	岩块单轴抗压强度可达 140~230MPa, 软化系数大于 0.8。风化 带岩体厚度变化大, 力学性质差, 全风化带为砂土, 强风化带岩石 破碎呈半岩半土状、裂隙发育。	
	中厚层状中 深变质岩		太古—元古界太华岩群、秦岭岩群等, 岩性为片麻岩、混合岩、大理岩、石英 岩	中厚 层状	结晶联结、坚硬, 结构面以片麻理面为主, 具有各向异性。	
	中厚层状 碳酸盐岩	分布于洛南北、陇县、 北山、白水、韩城等地 区	中元古界熊儿群、高山河群、官道口群、 寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、三 叠系, 岩性为硅质白云质灰岩	中厚 层状	岩块单轴抗压强度可达 100~200MPa, 软化系数大于 0.75。胶 结联结, 结构面间距 20—100cm, 岩溶发育, 泥岩及炭质页岩, 饱水 易软化、泥化, 泥质夹层为软弱结构面。	
	碎 屑 岩 类	砂泥岩 互层	黄河沿岸、洛河上游、 陇宝一带, 骊山外围等 地		包括下第三系、白垩系、三叠系中、下 统及二叠系上统等。岩性为砂岩、泥岩、 页岩、呈互层状	砂岩切层裂隙较发育, 暴露于斜坡地带的泥、页岩易遭风化侵 蚀, 常使其上的砂岩层处于悬空状态。
		含煤砂 泥岩	分布于陕北黄土高原 和渭北等地		主要包括侏罗系中、下统, 三叠系上统 及石炭、二叠系的砂岩及泥岩, 互层状, 夹可采煤和油页岩等软层	古侵蚀面倾向附近沟谷, 侵蚀面上常有 0.5—1 m 厚的风化粘土 层, 古侵蚀面和软夹层是其主要软弱结构面。
	砂砾岩	陕、甘、宁盆地, 如宜 君、旬邑、彬县、千阳 —志丹、榆林等地	为白垩系下统洛河组 and 侏罗系中统的 砂岩、砂砾岩, 夹薄层泥岩	块状	结构较疏松, 透水性强, 浸水易崩解, 易风化, 风化层厚度可 达 10—20m, 湿抗压强度仅为干抗压强度的 25%—50%, 软化系 数在 0.27~0.6 之间。	
	粘土岩类	陕、甘、宁黄土塬区及 洛南等地	上第三系, 岩性以棕黄—棕红色粘土 岩、泥岩、砂砾岩等组成		压密程度低, 岩体结构一般为层状, 干时坚硬—半坚硬, 风化 裂隙密集; 湿润下具有膨胀性和崩解性, 饱水状态易软化、泥化。 风化泥岩湿水后, 其力学强度极低, 常导致上覆黄土层失稳。	
构造岩类	沿断裂带呈条带状分 布广布于高原周边	各期断裂破碎带的糜棱岩、角砾岩等, 局部具炭化、硅化绿泥石化现象	碎裂 状散体	岩体因结构和连续性遭到严重破坏, 故力学强度锐减抗侵蚀能 力极差, 为区域异滑地层		
土 体	黄土及黄 土状土	陕北黄土高原广大地 区	黄土和黄土状土(冲洪积等, 粉粒为主)	松散状	干时有壁立性好, 垂直节理和大孔隙发育, 浸水后易发生湿陷 变形和崩解, 为区域易滑土。	
	胀缩土	河流二级阶地上和盆 缘陇岗地带	第四系粘土		冲洪积, 粘粒矿物为蒙脱石、伊利石, 风化裂隙密集, 风化裂 隙呈网状, 裂隙深度可达数米, 宽坡脚变化敏感。	
	砾卵石	分布于河床及漫滩, 地 形宽阔平坦	砾卵石			

(3) 河谷阶地地下水：分布在较大河流及文流的河漫滩及阶地区域。主要指河谷第四系冲积层潜水。

(4) 承压水：埋藏在中生代砂、页岩地层中。吴旗、志丹县境内，下白空系洛河组地层含有丰富的承压水。

## 2.8 植被生态

陕北黄土高原区处于我国东部季风区与内陆干旱区的过渡地带，植被性质具有明显的过渡特色，即从暖温带落叶阔叶林带向温带森林灌丛草原过渡。研究区以南以落叶阔叶林为主，其主要组成树种有辽东栎、山杨、白桦等阔叶树以及油松、侧柏等针叶树；以北地带则以森林灌丛草原为主，主要有荆条、酸枣、狼牙刺等灌木以及白羊草、黄背草等众多草本植物。全区植被覆盖率较低，且分布极不均匀，汾川河流域森林植被较好，覆盖率约为 68%；而延河左岸无天然次生林，只有部分稀疏退化草场，右岸森林覆盖率也仅为 34%，水土流失严重。

## 2.9 人类工程经济活动

千百年来自然界在缓慢的剥蚀、侵蚀、堆积过程中，形成了动态平衡，后由城镇、工业、交通、水利建设及矿山开发、土地开垦都不同程度改变了(或正在改变)地质环境的本来面目，人类社会工程活动已经成为作用于地壳表面(含浅部)不可忽视的巨大营力，程度不等的改变了地质环境的条件，有时会诱发或加剧各种地质灾害。陕北黄土高原区与地质灾害相关的工程经济活动主要有农耕、建窑、修路、采煤、砂石开采及石油开采等。

**农耕：**改革开放以前，大多数耕地属于坡地或梯田，传统的开荒及广种薄收耕作方式，加快了水土流失，也为地质灾害的产生创造了有利条件。近年来，中央推行的“退耕还林，创建黄土高原秀美山川”的政策已初见成效，大于 25° 的坡地多已退耕，梁峁山川到处有了绿色景象，但是要从根本上防止水土流失，缓解地质灾害的发生和发展，尚需时日。

**建窑：**自古以来，窑洞是黄土区人民传统的居住方式，无论是石窑、砖窑或土窑，都对黄土边坡进行削坡开挖，导致黄土斜坡稳定性变差，形成崩塌或滑坡隐患，多年来由于地质灾害引起的窑毁人亡现象屡见不鲜。

**修路：**道路建设对黄土斜坡多进行了截弯取直、削坡填平的施工活动，形成了高陡

边坡，为地质灾害的发生埋下了许多隐患。

**砂石开采：**侏罗系、白垩系之中细砂岩是当地村民传统的建筑材料，过量的开山放炮采石是对自然斜坡的直接破坏，掌握不当则会导致斜坡失稳而形成地质灾害。

**石油开采：**黄土区赋存有丰富的石油资源，据延长油矿、省三普大队及长庆油田指挥部等部门勘探资料，石油主要为中生界油层。自 80 年代以来，大规模的石油开发活动如火如荼，石油开采带动了当地经济发展，提高了人民的生活水平，但是同时也对生态环境带来了不可估量的破坏，加剧了地质灾害的发生和发展。应引起地方部门的高度警惕。

**建库蓄水：**水库蓄水，浸润和软化了周边土体，加大岩土体中的静、动水压力，易导致崩塌、滑坡的发生。此外，小型库坝及淤地坝均就地取材，用黄土筑坝，其稳定性差，易造成毁库隐患，一旦发生溃堤，极易威胁到人民群众的生命财产安全。

**煤矿开采：**黄土高原地区煤炭资源较为丰富，目前正在进行大规模的开发，形成了大片的采空区，但随着开采规模的扩大，可能会导致地面塌陷等地质灾害发生。

## 第三章 地质灾害特征

### 3.1 地质灾害发育概况

陕北黄土高原区地处黄土高原中部，黄土几乎遍布全区。特殊的地形地貌和岩土体条件，限制了斜坡变形破坏的模式，控制了滑坡崩塌灾害的发育特征，决定了陕北黄土高原区是滑坡崩塌地质灾害的高发地区。陕北黄土高原区 25 个县（区、市）从 1990 年—2008 年发生的有准确日期记录的各类地质灾害 253 个，其中滑坡 88 次，崩塌 157 次，泥石流 8 次。（见图 3.1）

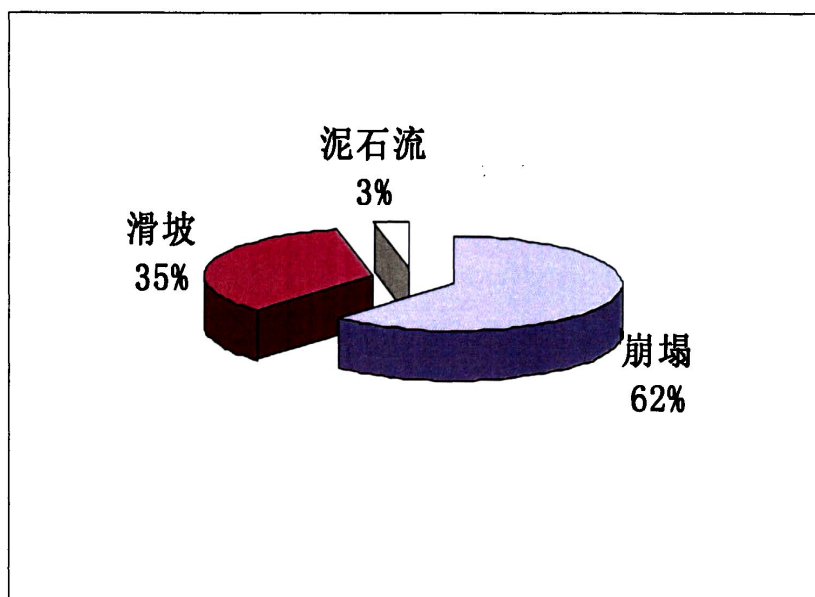


图 3.1 地质灾害发育现状饼图

### 3.2 地质灾害类型

陕北黄土高原区地质灾害主要类型有滑坡、崩塌和泥石流等，其中以滑坡和崩塌为主，区内大部分为第四纪松散沉积物所覆盖，故黄土滑坡和崩塌占绝对优势，基岩滑坡和基岩崩塌相对较少。泥石流以洪水泥流的形式出现。

#### 3.2.1 滑坡

滑坡是区内最为主要的地质灾害，根据其物质组成和滑面位置分为黄土滑坡和黄土—基岩滑坡。其主要发育特征是：滑坡形态较完整，边界轮廓清晰，具有明显的圈椅状形态，后缘滑壁保留一般较完好，滑体滑移特征明显，部分滑坡具有典型的双沟同源现



象，滑床、滑带完整或局部完整。（见图3.2）主要发生在海拔940-1110m之间。滑体坡度一般30°—50°，大者60°，小者仅15°左右。区内滑坡基本以浅层和中层滑坡为主，深层滑坡非常少。



图 3.2 延安市虎头峁滑坡全貌

### 3.2.2 崩塌

崩塌在研究区分布较为广泛，主要以黄土崩塌为主，伴有少量的基岩崩塌。崩塌发育的主要特征是：无明显滑面，以坠落、滚动、翻倒等形式破坏。一般规模不大，但破坏速度快，易产生较大的人员和财产损失。黄土崩塌一般发生在坡度大于50°的黄土斜坡上，滑坡体后壁或两侧陡坡、人工切坡以及挖窑洞所形成的陡壁处也是黄土崩塌发生的主要场所。区内基岩出露位置普遍较低，高陡基岩斜坡少，因此，基岩崩塌相对较少。（见图3.3）



图 3.3 榆林市兔界沟黄土崩塌

### 3.2.3 泥石流

研究区年平均降雨量在 500mm 以上，年内分配不均匀，7—9 月降雨量占全年降雨量的 60%—80%，且多以雷阵雨形式降落，降雨量日最大 139.9mm，时最大 62mm，持续的降雨使斜坡黄土含水率增大，强度降低，产生滑坡，崩塌，或冲毁淤地坝，进而引发泥石流地质灾害。据延河水文站多年观测资料，多年平均含泥沙量 314.2kg/m<sup>3</sup>，最大可达 1560kg/m<sup>3</sup>，二者分别达到了稀性和粘性泥石流固体物质含量的标准，故本区泥石流属洪水泥流类型，如 1977 年洪水泥流，洪峰流量高达 7200m<sup>3</sup>/s，水位 16.44m，延河两岸河谷阶地大部分被淹，众多基础设施及房屋被毁坏，4000 余人受灾，损失 2700 多万元。

## 3.3 地质灾害分布特征

陕北黄土高原区的地质灾害主要是滑坡、崩塌、泥石流。以黄土崩塌、滑坡为主，泥石流主要以泥流为主。前人资料表明，这些地质灾害的发育和分布具有十分明显的规律性和地域性。

### 3.3.1 地质灾害的空间分布特征

陕北黄土高原区的地质灾害主要分布在黄陵、宜川、宝塔区、子长、延川、洛川、王益区等黄土梁、峁和塬区，（见图 3.4）。而这些地区也是地质灾害的严重和中等发育区。（见图 3.5）

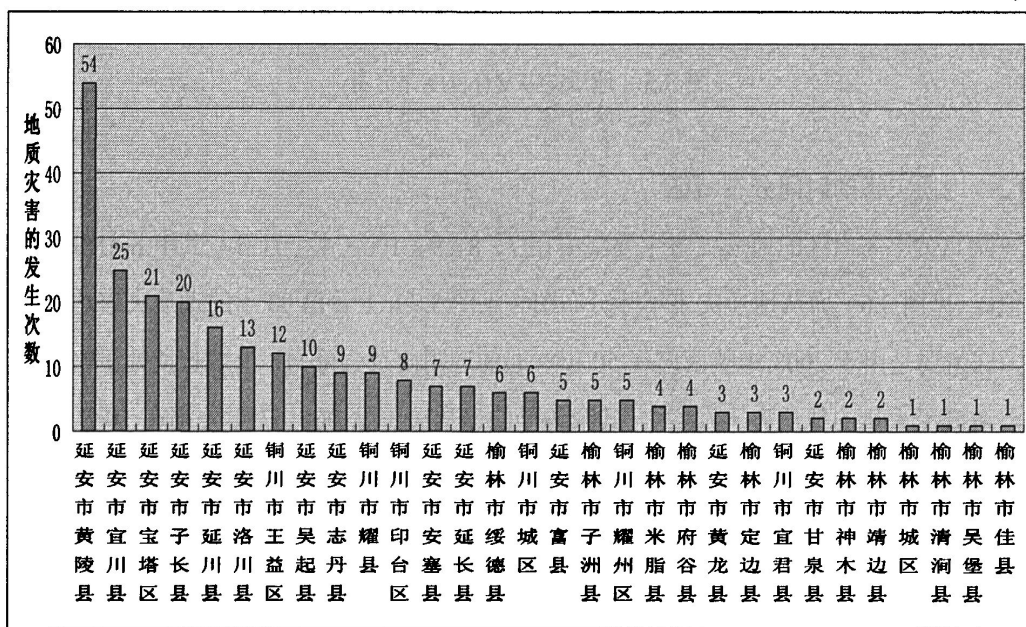


图 3.4 90-08 年陕北黄土高原区各县市地质灾害频次分布图

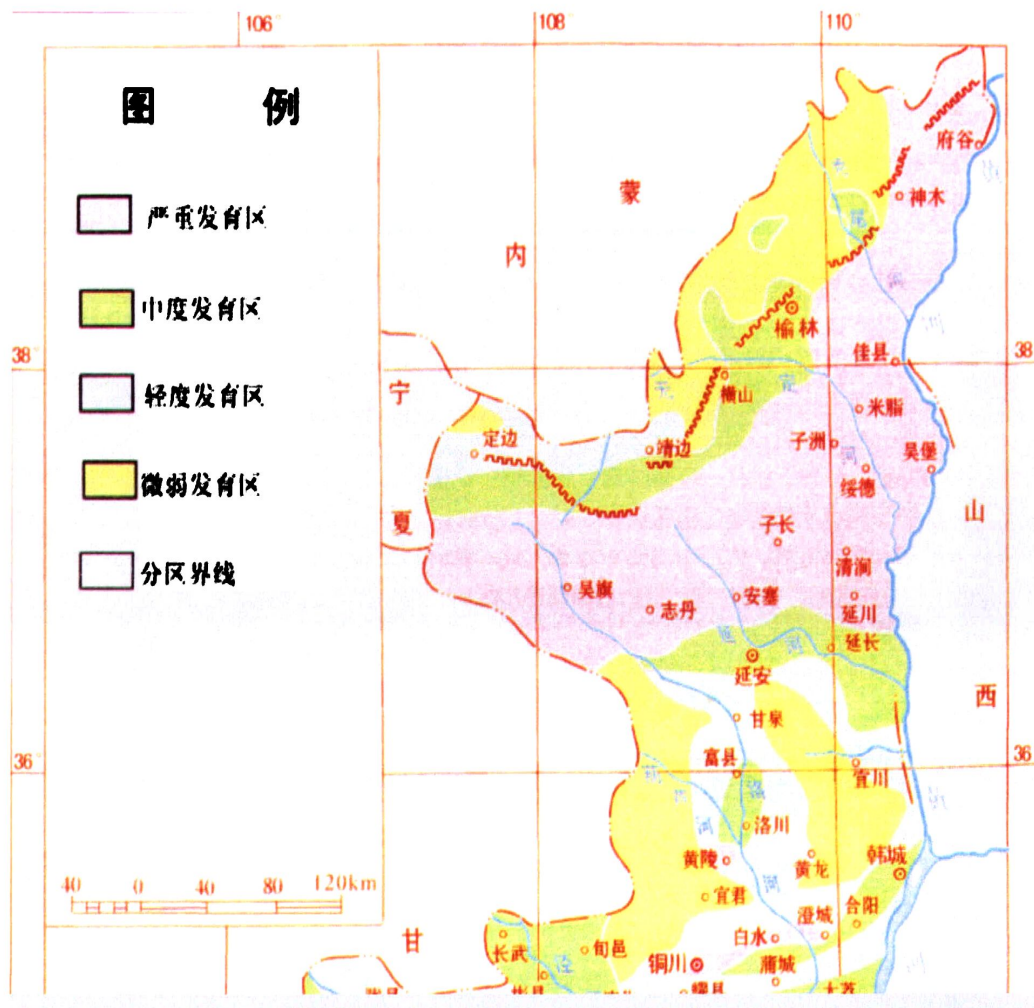


图 3.5 地质灾害发育程度评价图  
来源：陕西省气象局（2008）

### 3.3.2 地质灾害的时间分布特征

陕北黄土高原区的地质灾害主要集中在7、8、9、10这4个月份，其中8月份达到峰值。（见图 3.6）而从地质灾害年际分布图（见图 3.7）上看出 03 年的地质灾害达到峰值，这主要是由于 2003 年陕西出现 50 年一遇的连阴雨及强降雨，土壤长期处于饱和状态，造成了大量的地质灾害发生。其余各年的地质灾害除 06、07 年外都在 10 次（含 10 次）以下。看见 06 年以来地质灾害有明显增加的趋势，这主要由两个方面的原因造成：一方面是说明近年来地质灾害详细调查的成果显著，另一方面也与近年人类工程活动增加有关。

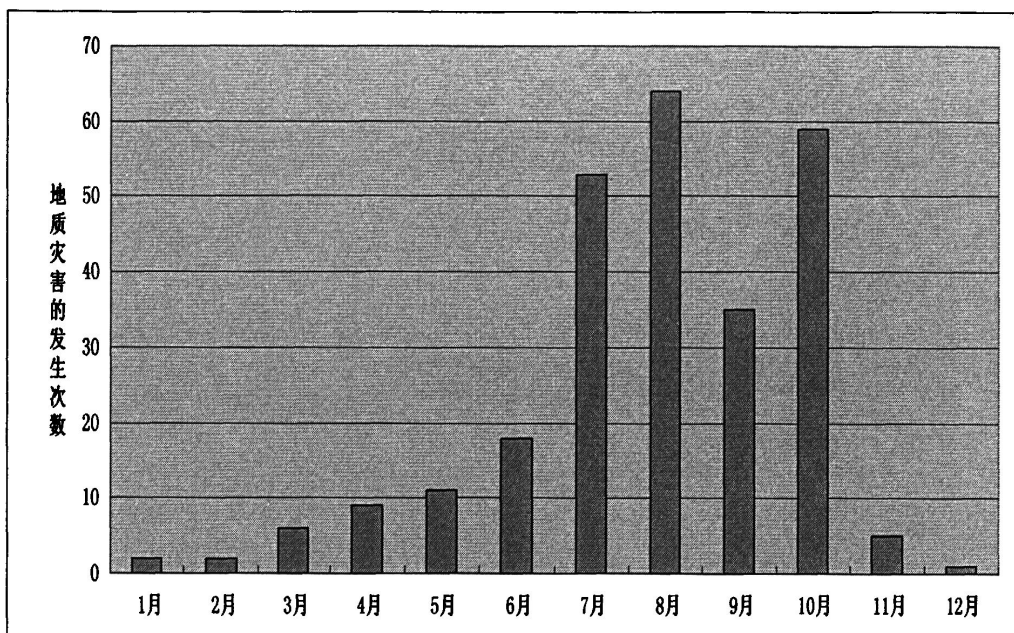


图 3.6 陕北黄土高原区地质灾害的月际分布图 (90-08)

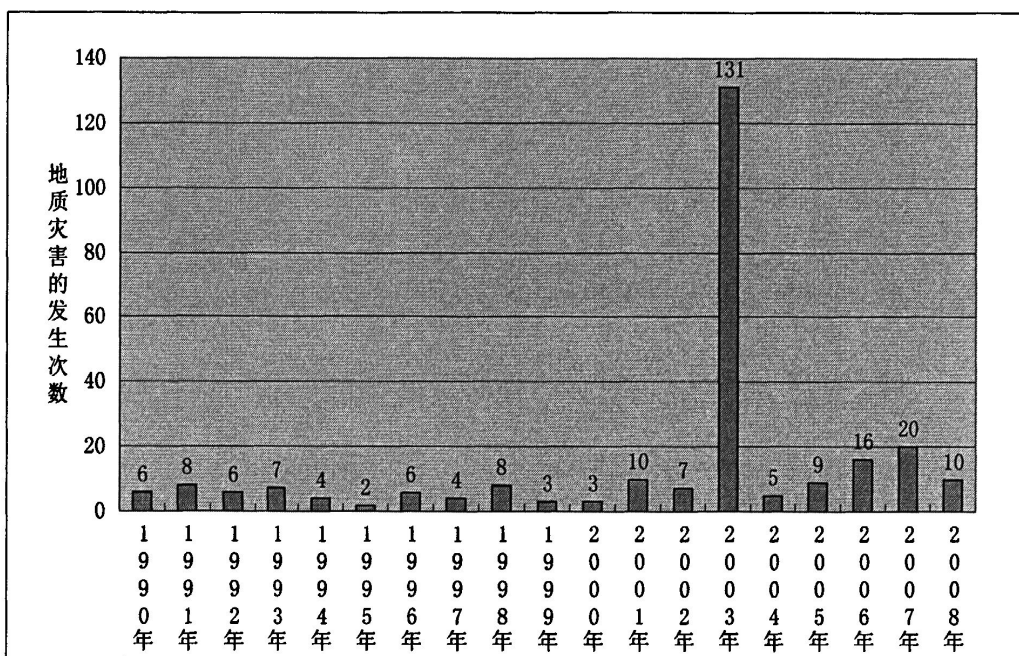


图 3.7 陕北黄土高原区地质灾害的年际分布图

### 3.4 地质灾害的诱发因素和机理

如果滑坡的地质、地貌条件具备，地质灾害的诱发因素主要为降雨、地震和人为的不当开发，其中又以降雨诱发的地质灾害最为常见。(林鸿州等)而在陕北黄土高原区 90% 的滑坡都是由降雨诱发的，所以降雨是陕北黄土高原区滑坡的最主要的诱发因素。

“降雨诱发滑坡”仅仅是直观的说法，严格的讲，是降雨转化的地下水及其与斜坡

岩土体之间的相互作用诱发滑坡。地下水作为地质营力之一，与边坡岩土体之间的作用（水—岩作用）可分为物理作用，化学作用和力学作用，水—岩作用在滑坡的孕育和发生重起着不可估量的作用。但降雨诱发的滑坡是多种因素综合约束的结果。降雨的作用主要通过雨水向边坡深处的入渗，改变地下水赋存状态来实现的。而地下水赋存状态的改变可引起岩土饱和度的改变（增加）孔隙压力的改变（增加）后者又可由于基质吸力的退化或水理水软化作用而引起土质的强度的变化（降低）。总的来说，就是降雨造成边坡的稳定系数降低，从而引起边坡的失稳和滑动。

在完整均一土体内降雨的入渗深度是极为有限的，关于这一点，前人已做过大量研究。如理论计算：当土的干密度= 15.02kN/m<sup>3</sup>、体积含水量=0.2、比重=2.7、饱和体积含水量=0.45、孔隙比=0.44、初始饱和度=0.45、渗透系数=5×10<sup>-6</sup>m/s，浸润峰面基质吸力=3kPa 时，12 小时降雨的入渗深度为 2.0m（张士宇，2004）；现场原位试验监测结果也显示：降雨入渗对孔隙水压力或吸力、含水量、土压力和变形的影响主要反应在 2 m 之内的土层中（詹良通等，2003）。

王思敬等人降雨触发滑坡过程分为三种类型：

#### （1）小型表层滑坡或滑塌（1-2m）

暴雨引起土的快速饱和，基质吸力丧失，变形及强度性能极度恶化，产生大变形及破裂，随之失稳滑动，变形中大量来水可导致土的超饱和状态，与降雨同期滑动，常转化为泥石流。

#### （2）浅层滑坡（2-5m）

是由于降雨量较大或时间较长，雨水入渗到土层的某种弱面，如坡积层底面、全风化-强风化层界面等，引起上覆土层的整体失稳和滑动土层中弱面常含有较多泥质物，而弱面下覆则时有较强渗透带，得以形成较强渗透压力。

#### （3）深层滑坡（>5m）

为较长及较大降雨过程中，雨水入渗到深部，地下水位抬升，作用及地质弱面，触发滑坡，深层滑坡可分为厚土层滑坡、基岩滑坡、老滑坡复活，常滞后于降雨过程。

然而根据西安地质调查中心唐亚明、张茂省等人的研究，黄土崩滑的规模体积从几方到上千万方不等，破坏模式从崩落、倾倒、滑动、蠕滑、泥流、碎屑流表现不一，说明了降雨的入渗深度变化范围是相当大的，而且入渗模式也是多样的，这样就导致了不同入渗模式下对斜坡破坏的不同诱发机理。根据野外观察，把降雨入渗诱发斜坡破坏概化为三种模式类型。缓慢下渗诱发模式、下渗阻滞诱发模式和下渗贯通诱发模式。

## 第四章 降雨时空分布特征

### 4.1 降雨概况

研究区地处青藏高原东北部,属干旱、半干旱区,黄土高原年平均降雨量从东南到西北逐渐递减,定边年降雨小于 350 mm,长城沿线年平均降雨量为 360 ~396.29mm,延安以北年降雨量在 400~500mm,延安南部年平均降雨量在 500~600 mm。平均年降雨量不足 500 mm (王川, 2003),统计 1960-2006 年际间研究区各地的多年平均降雨量可见,年降雨量主要集中在 320-700mm 之间,只在局部地区有差异。

### 4.2 降雨分布特征

#### 4.2.1 降雨空间分布特征

陕北黄土高原区年平均降雨量超过 500mm 的县主要集中在研究区南部的陕北高原暖温带半干旱气候区依次为铜川、耀县、子长、吴旗、志丹、安塞、延安、延川、延长等地。而北部的长城沿线温带半干旱气候区以及富县和洛川的年平均降雨量都在 500 以下。

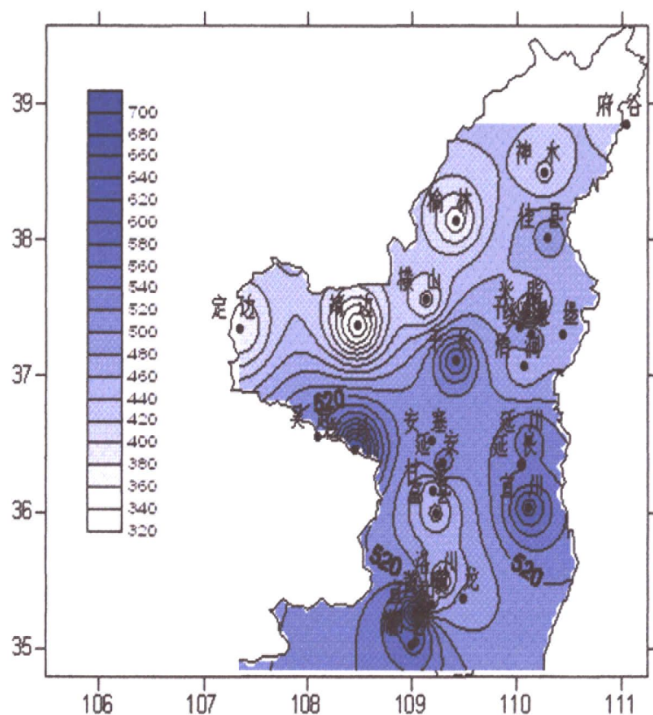


图 4.1 陕北黄土高原区多年平均降雨量 (1960—2008)

来源: 陕西省气象局杜继稳等 (2008)

#### 4.2.2 降雨时间分布特征

陕北黄土高原区年平均降雨量变化不是很明显基本在 450mm 上下波动,最高为 1964 年的 760mm,最低为为 1997 年 340mm。(见图 4.2)但研究区降雨量的月际变化确有明

显的规律性，(见图 4.3)降雨量成明显正态分布，1 月之后降雨量逐渐增加，7、8、9 月降雨量处于高峰期，9 月之后降雨量逐渐减少。

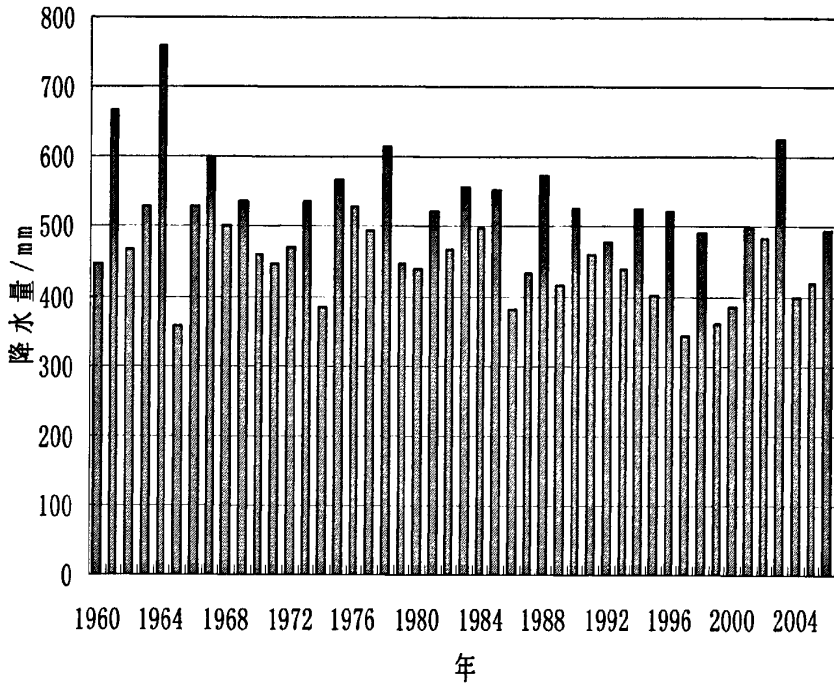


图 4.2 陕北黄土高原区 1960-2006 年的年降雨量分布图

来源：陕西省气象局（2008）

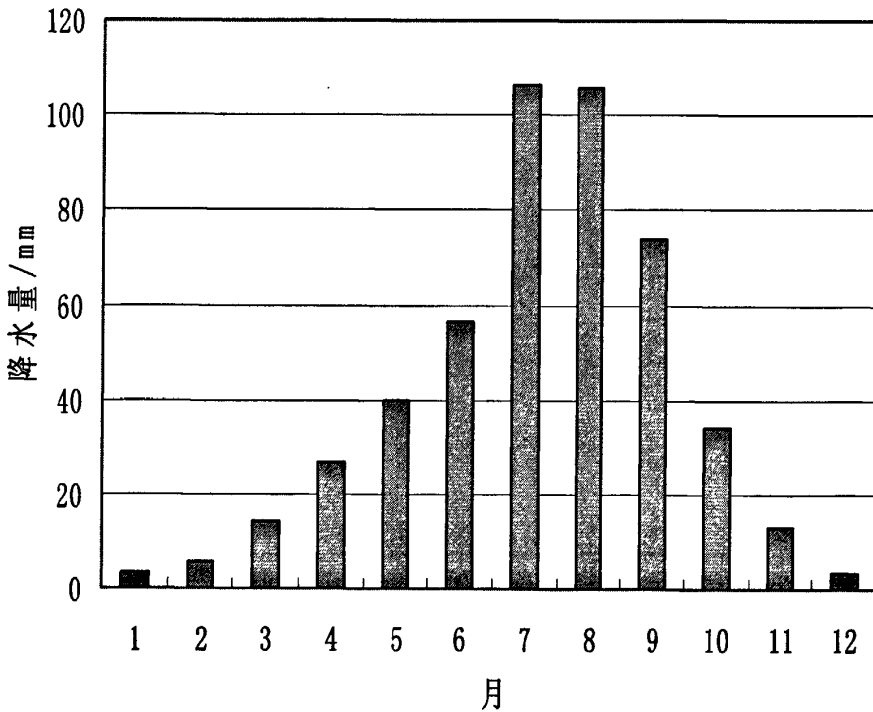


图 4.3 陕北黄土高原区 1960-2006 年各月平均降雨量分布图

来源：陕西省气象局（2008）

### 4.3 局地暴雨特征

局地暴雨指 1 小时雨量大于等于 10mm、20mm (即  $R_{1h} \geq 10\text{mm}$  和  $R_{1h} \geq 20\text{mm}$ ) 记为陕北黄土高原区的一次局地暴雨过程。

#### 4.3.1 局地暴雨空间分布特征

陕北黄土高原的暴雨多发区主要集中在研究区的陕北高原暖温带半干旱气候区如：南部黄陵、宜君、洛川、宜川、延安，中部的子长、绥德以及北部的神木。而长城沿线温带半干旱气候区的暴雨次数较少。(见图 4.4)

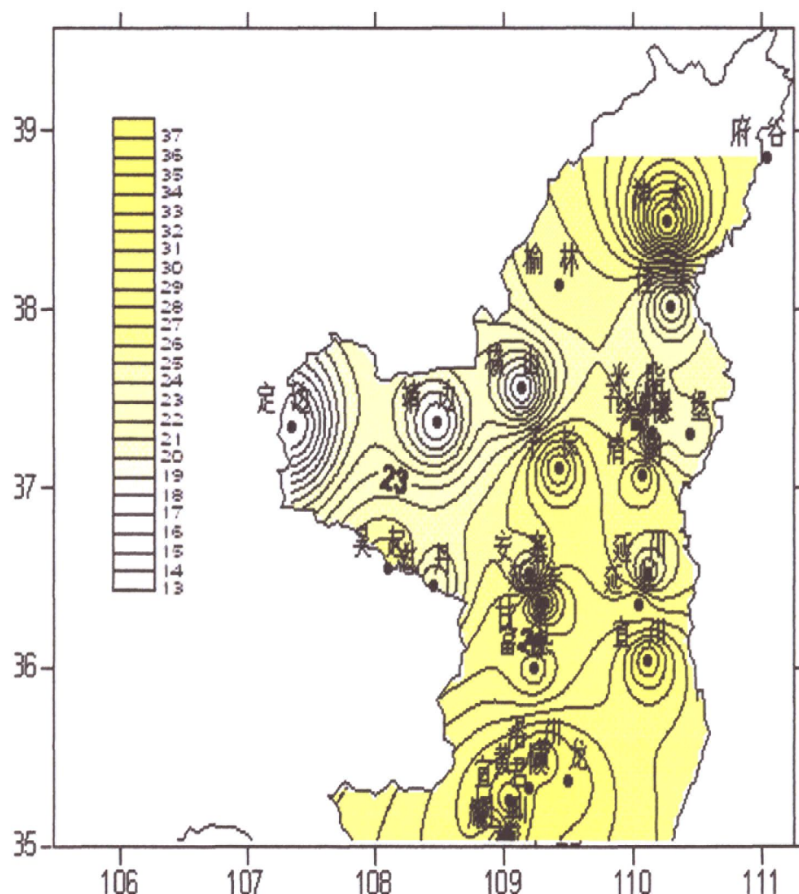


图 4.4 陕北黄土高原区累计暴雨次数分布图

来源：陕西省气象局 (2008)

陕北 7 月  $R_{1h} \geq 20\text{mm}$  分布上同  $R_{1h} \geq 10\text{mm}$  有相似的中心，但频次和大值区范围都变小，呈现四高两低型。府谷-神木-榆林为第一高发中心，且范围有所北移和扩大，神木成为第一高发中心的中心，第二高发区位于延川-宜川附近，该高发中心的中心是延川，较  $R_{1h} \geq 10\text{mm}$  的而言，范围相对缩小和中心相对东移，陕北中部的子长-安塞-志丹为第三高发区，铜川-宜君为第四高发区。两个低值区分别位于佳县-米脂一带和甘泉附近。(见图 4.5)



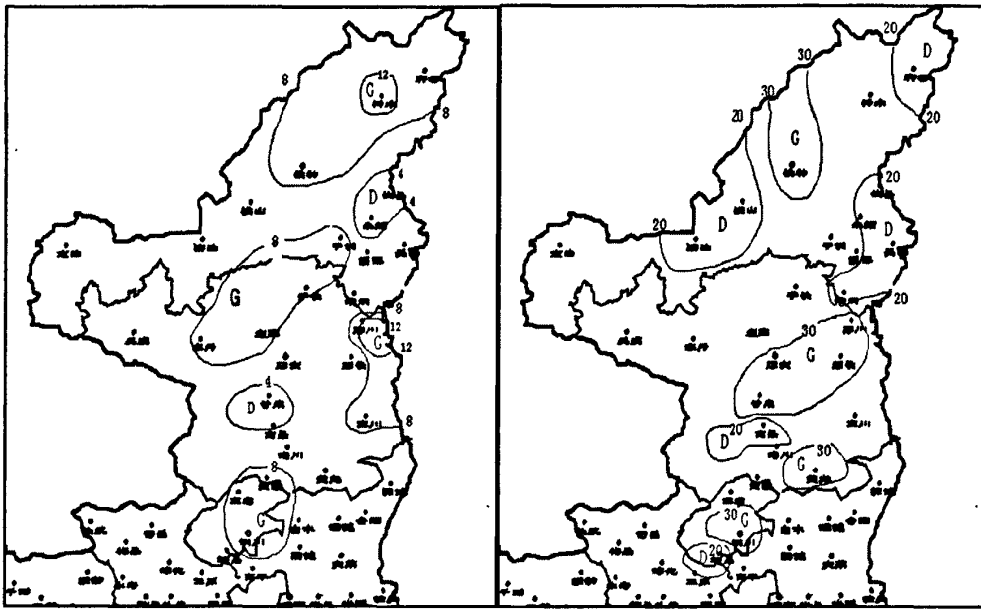


图 4.5  $R1h \geq 10\text{mm}$  和  $R1h \geq 20\text{mm}$  的 7 月份频次分布图

### 4.3.2 局地暴雨时间分布特征

#### (1) 局地暴雨年变化特征

在 80 年到 04 年的 25 年中, 陕北黄土高原共出现  $R1h \geq 10\text{mm}$  的强降雨 2638 时次,  $R1h \geq 20\text{mm}$  强降雨 574 时次, 年平均  $R1h \geq 10\text{mm}$  的强降雨有 106 时次,  $R1h \geq 20\text{mm}$  强降雨有 23 时次。  $R1h \geq 10\text{mm}$  发生时次最多的年份是 1994 年为 173 时次; 最少的是 1980 年仅有 36 时次。  $R1h \geq 20\text{mm}$  强降雨发生次数最多的年份是 1994 年, 为 56 时次; 最少的是 1982 年仅有 3 时次。可见陕北强降雨出现时次的年际差异较大, 最多年份与最少年份相差十几倍之多。(见图 4.6)

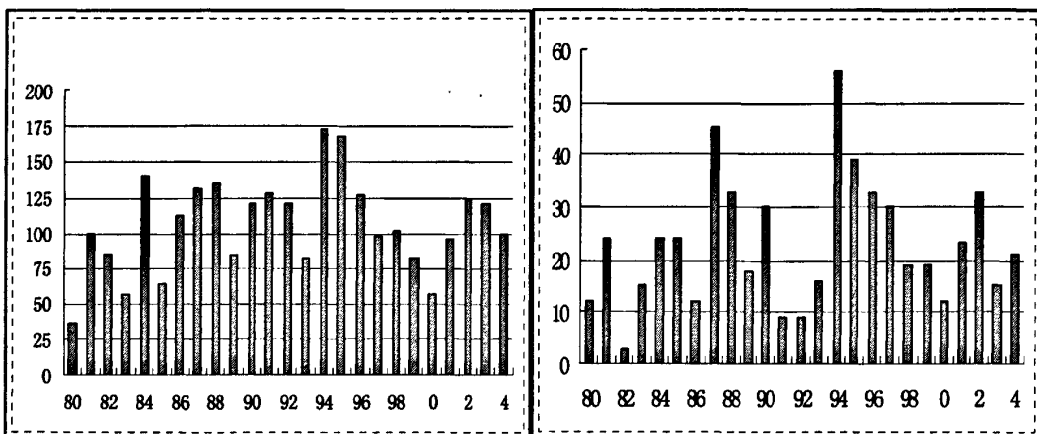


图 4.6  $R1h \geq 10\text{mm}$  和  $R1h \geq 20\text{mm}$  的年频次分布图 (80—04)

#### (2) 局地暴雨月变化特征

75% 以上的  $R1h \geq 10\text{mm}$  强降雨和 82% 以上的  $R1h \geq 20\text{mm}$  强降雨集中在 7-8 月, 集中

在7-8月，且6月强降雨频率高于9月。

表 4.1 陕北黄土高原区强降雨的月频数分布特征（时次）

强度 \ 月份	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
$R_{1h} \geq 10\text{mm}$ 月合计	3	57	229	699	616	121	5
$R_{1h} \geq 20\text{mm}$ 月合计	1	5	42	176	154	20	1
$R_{1h} \geq 10\text{mm}$ 月%	0.2%	3.3%	13.2%	40.4%	35.6%	7.0%	0.3%
$R_{1h} \geq 20\text{mm}$ 月%	0.3%	1.3%	10.6%	44.2%	38.7%	5.0%	0.3%

(3) 局地暴雨旬变化特征

$R_{1h} \geq 10\text{mm}$  强降雨旬分布具有多峰值的特点。7月中旬、7月下旬和8月上旬为第一高峰值，在数值比较接近也是全年的最大峰值；8月下旬为全年的次峰值，6月上旬为全年的第三峰值。 $R_{1h} \geq 20\text{mm}$  单峰特征较明显，8月上旬为其高峰值，8月上旬之前，强降雨频次缓升后，强降雨的频次突然降低、减少。（见图 4.7）

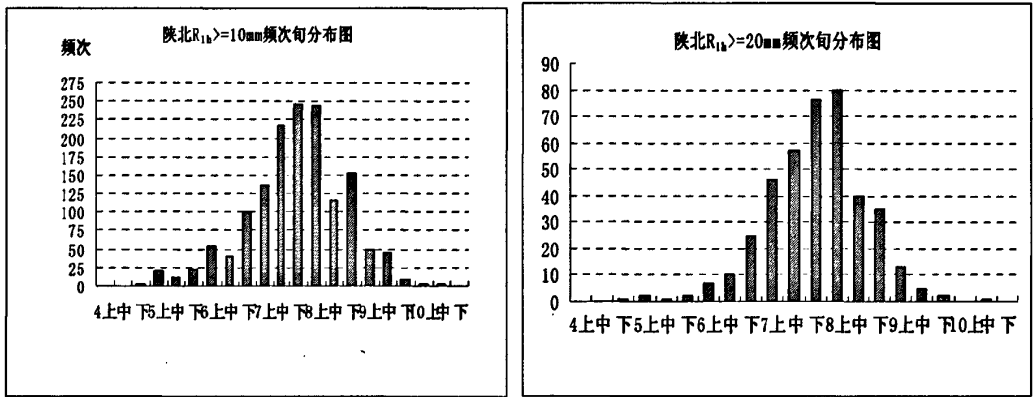


图 4.7  $R_{1h} \geq 10\text{mm}$  和  $R_{1h} \geq 20\text{mm}$  的旬频次分布图

(4) 局地暴雨日变化特征

陕北的强降雨具有明显的日变化（见图 4.8）。就统计来看， $R_{1h} \geq 10\text{mm}$  强降雨的出现频次有两个高峰，一是早晨 7 时，二是傍晚的 17 时，频次低值出现在 13 时。

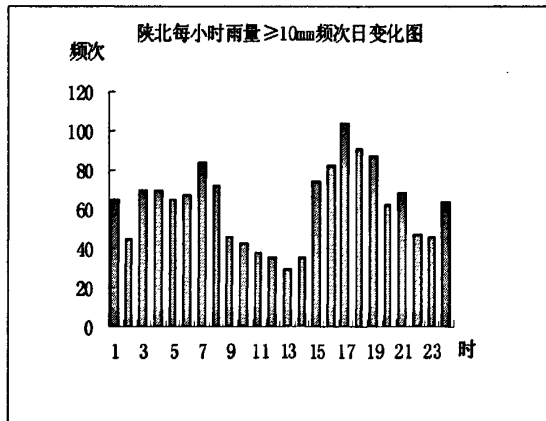


图 4.6  $R_{1h} \geq 10\text{mm}$  日频次分布图

## 第五章 地质灾害与降雨相关性

本次分析采用两个数据库的数据,一是陕北 25 个县(区、市)从 1960 年—2008 年发生的有准确日期记录的各类地质灾害 298 个,其中有小时时间记录的 89 个,包括发生地点、类型、规模、伤亡等信息,资料来源是各县政府主管部门采集上报数据。另一个是陕西省气象局历年降雨数据库,2006 年以前基本是每县 1 个气象站,2007 年及以后有加密站降雨数据。对于有准确日期记录的地质灾害查当日一前 15 日逐日降雨量,对于有准确小时记录的查前 36 小时逐时降雨量。

1960 年到 1990 年的地质灾害的统计数据较少,可能因为这期间对地质灾害的统计上报工作不够,以及经济活动少,对该地区的影响较少等原因,造成这一期间的数据较少,所以本论文主要采用 1990 年到 2008 年的数据进行研究

以上 298 个各类地质灾害中包括黄土滑坡、崩塌、路基滑塌、地面塌陷、泥石流等,政府部门的统计数据无法很好的统一口径,本次研究天然黄土斜坡的破坏,因此剔除其它灾害类型 45 个,选取 1990 年—2008 年统计口径为“滑坡”、“崩塌”和“泥石流”的地质灾害共 253 个,由于泥石流数据较少只有 8 个,所以本次研究只统计滑坡和崩塌,共 245 个。对筛选出的 245 个地质灾害中前 15 日累计降雨量,发现有一部分前期降雨量很小,这些黄土崩滑应当不是由于降雨作为主导因素诱发的,因此剔除前 15 日累计降雨量小于 4.0mm 的案例共 11 个,这样用于分析的案例共 234 个。

### 5.1 地质灾害与降雨时空特征的相关性

#### 5.1.1 空间分布特征相关性

通过 1990-2008 年陕北黄土高原区地质灾害统计,(图 3.4)黄陵发生地质灾害最多为 54 次,宜川 25 次,宝塔区 21 次,子长 20 次,延川 16 次,洛川 13 次,王益区 12 次,安塞、吴旗、志丹、子洲、绥德、府谷等在 5-10 次之间,其余地区都在 5 次以下。因此,从空间分布来看,黄陵是地质灾害第一高发区,其次是宜川、宝塔区、子长、延川洛川、王益区为地质灾害的第二高发区,吴旗、志丹、安塞、绥德、耀县、延长、富县、印台区、耀州区等是第三高发区,神木、榆林、横山、靖边、定边、佳县、吴堡、清涧、甘泉、黄龙、宜君是地质灾害少发区。这与陕北黄土高原区多年平均降雨量分布图(图 4.1)有很好的相关性。(见图 5.1)地质灾害多发区都是年降雨量超过 500mm 的县区,如黄陵、子长、吴旗、志丹、安塞、宝塔区、延川、延长等,但米脂、子洲、绥德虽然年降雨量只有 400 多毫米,但地质灾害发生仍较多,主要是由于该区域是地质灾害严重

发育区（图 3.5）。而地质灾害的多发区域与陕北黄土高原区累计暴雨次数分布图（图 4.4）的相关性更高，各地质灾害频发区域基本都是暴雨多发中心。（见图 5.2）

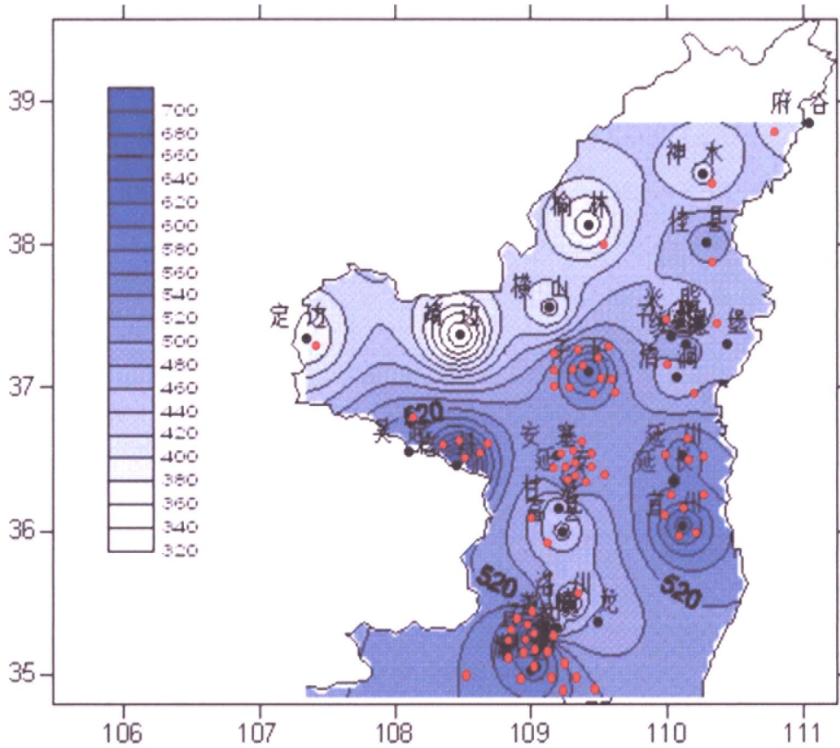


图 5.1 陕北黄土高原多年平均降雨量与地质灾害分布的叠加示意图

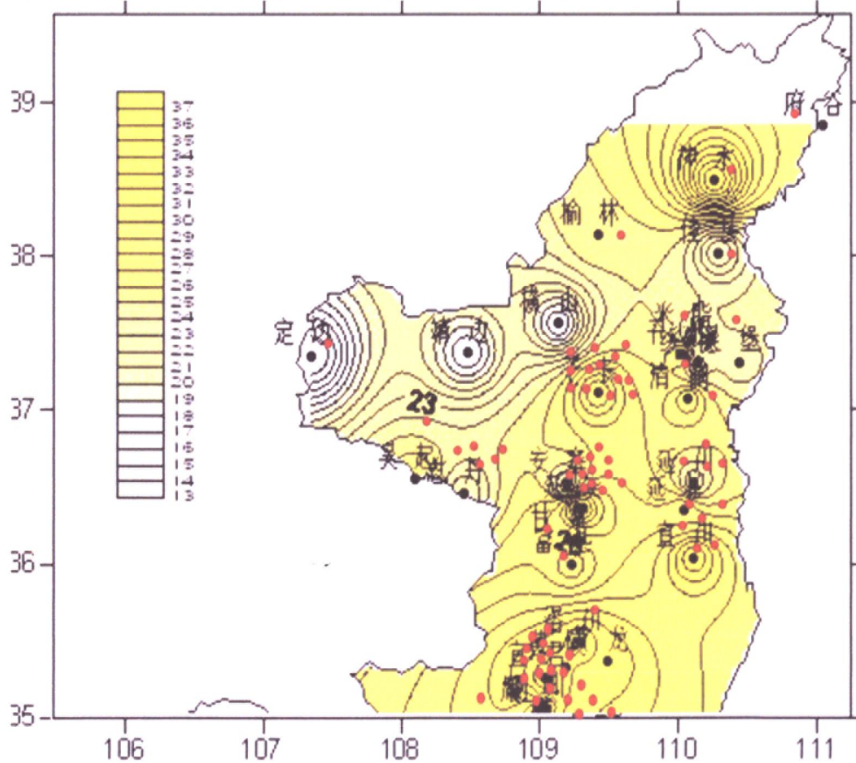


图 5.2 陕北黄土高原多年累计暴雨次数与地质灾害分布的叠加示意图

### 5.1.2 时间分布特征相关性

#### (1) 年分布特征的相关性

从 1990-2008 年陕北黄土高原区的年降雨量（图 4.2）来看，各年的降雨有明显变化，但各年发生的地质灾害次数（图 3.7）并不是随年降雨变化而成对应关系；1996 年之后的总体平均降雨比 1996 年之前有所减少，但该阶段地质灾害的发生次数却比较多。从 1990 年到 2008 年各年暴雨发生次数来看（图 4.6），并不是暴雨次数多的年份地质灾害也越多，年暴雨数和地质灾害发生次数也没有对应关系。因此，地质灾害多发年并不一定年降雨量多或暴雨次数多，年降雨量、暴雨次数和年地质灾害发生次数并不呈正相关关系。说明地质灾害发生不仅和年降雨量和年暴雨次数有关系，还要受到当地的地质地貌这一静态因子的影响，也说明地质灾害和降雨的关系是比较复杂的。

#### (2) 月分布特征的相关性

由陕北黄土高原地质灾害的月际分布图（图 3.6）可见，地质灾害主要发生在 7-10 月，7 月为高峰期，8、9、10 月为次高峰期，其他月份相对较少。从陕北黄土高原区 1990-2008 年各月的平均降雨量（图 4.3）来看，降雨量成正态分布，1 月之后降雨量逐渐增加，7、8、9 月降雨量处于高峰期，9 月之后降雨量逐渐减少，这与地质灾害各月的发生频次基本上是对应的，值得注意的是 10 月陕北出现地质灾害的高峰主要是由 2003 年陕西出现了 50 年一遇的连阴雨，黄陵正好处于这次连阴雨雨带的北缘，连阴雨及连阴雨中的强降雨造成黄陵发生大量的地质灾害，因此陕北黄土高原区地质灾害主要出现在降雨量集中的 7、8、9 三个月，地质灾害发生次数与降雨是同步的，有很高的正相关性。从陕北黄土高原局地暴雨的月频数表中看出，暴雨主要集中在 7 月和 8 月，与地质灾害的月际分布图的对应关系也较好。

从相关性分析来看，地质灾害的月际分布和月降雨量、地质灾害的月际分布与局地暴雨月频数的相关系数分别为 0.828、0.7189 ( $R1h \geq 10\text{mm}$ )、0.7178 ( $R1h \geq 20\text{mm}$ )。表明地质灾害的月际分布和月降雨量有明显的正相关性，（如果不考虑 03 年大雨的影响，相关性会更高）与局地暴雨月频数的相关性相对较差。

#### (3) 日分布特征的相关性

从地质灾害的日频次分布图和局地暴雨  $R1h \geq 10\text{mm}$  的频次分布图看出，暴雨频次多发的时间段也是地质灾害多发的时间段，主要集中在凌晨 2-7 时和下午 14-16 时。

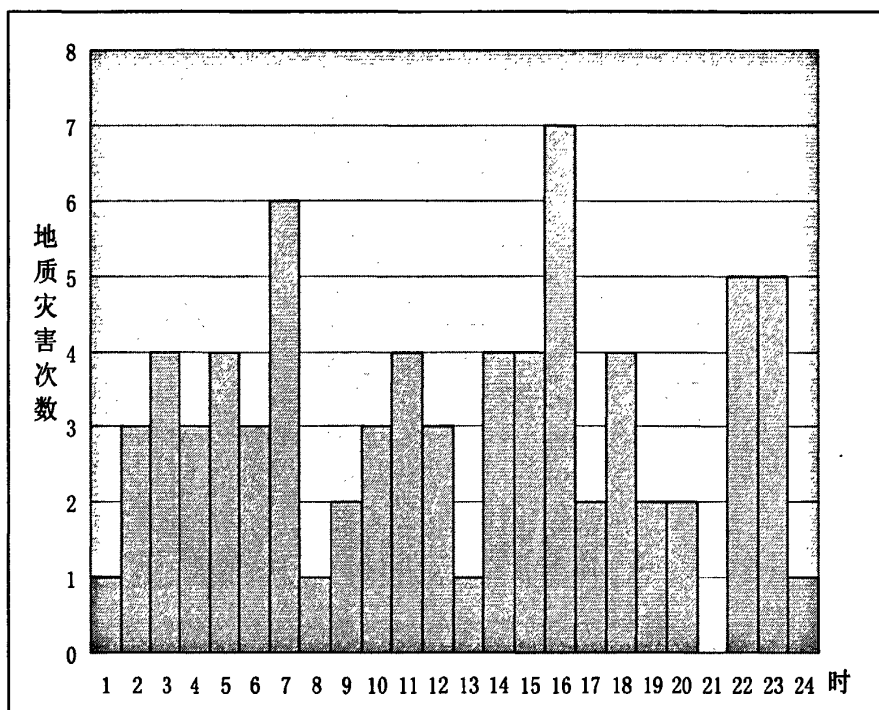


图 5.3 地质灾害日频次分布图

## 5.2 地质灾害与前期降雨相关性

### 5.2.1 地质灾害与前期累计降雨量相关性

对这 234 个数据分不同的地质灾害类型崩塌和滑坡做当日降雨量、前 3 日、前 5 日、前 10 日、前 15 日累计降雨量与地质灾害的多个散点图，发现分析的 234 个地质灾害分布都非常离散，无任何规律（见图 5.4、5.5）即在很低的降雨量和很高的降雨量的情况下均有滑坡和崩塌发生。这与实际情况也是吻合的，因为黄土高原区年降雨量较少，但每年发生的崩塌、滑坡却很多，野外观察可见，即使在很少的降雨量条件下，若有地表水沿优势通道渗入地下，也能诱发崩滑灾害。

以总累计降雨量  $R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{15} R_i$  作为分析对象，按每 10.0mm 一个量级对  $R_{\Sigma}$  进行分组，以每个量级内的地质灾害发生频次做纵轴，量级大小做横轴，做柱形图（见图 5.6、5.7），可以发现 10.1-20.0mm 和 20.1-30.0mm 这个量级发生的崩塌次数最多；滑坡在 70.0-80.0 这个量级发生的次数最多。

但图 5.6 和 5.7 的缺点是，累计降雨量越高，崩滑发生的次数越少，给人一种累计降雨量越高，崩滑发生的可能性越小的错觉，因此以崩滑发生的累积百分比做纵轴，降雨量量级大小做横轴，做曲线图。累积百分比也可理解为滑坡在某降雨量量级下发生的概率。（见图 5.8，5.9）

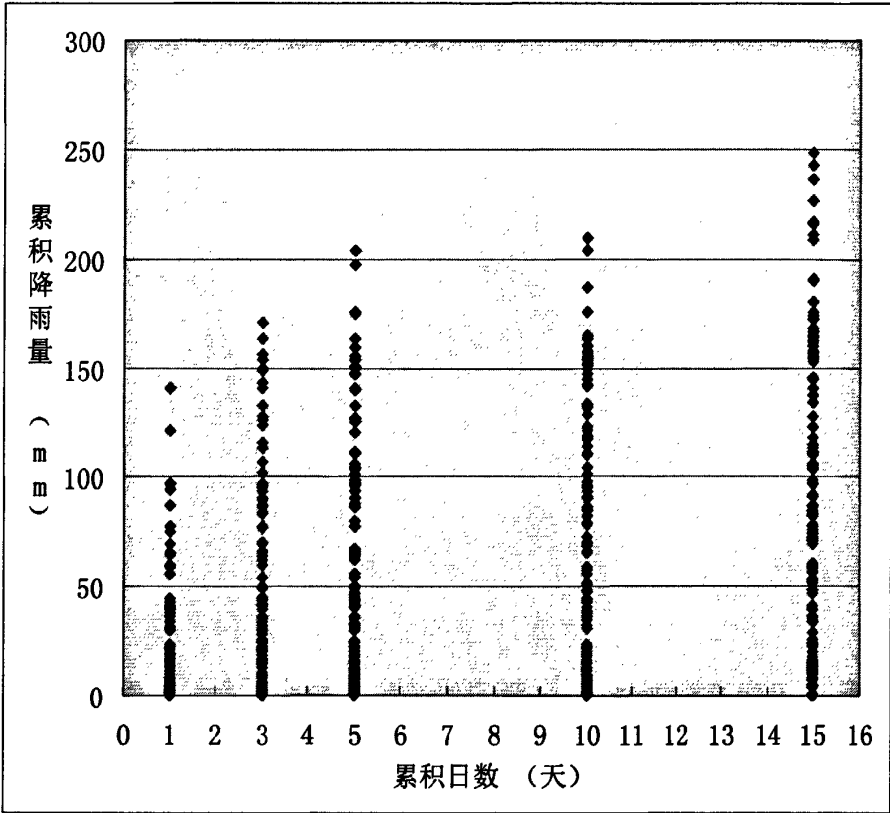


图 5.4 崩塌发生当日、前 3 日、前 5 日、前 10 日、前 15 日累计降雨量与地质灾害的 xy 散点图

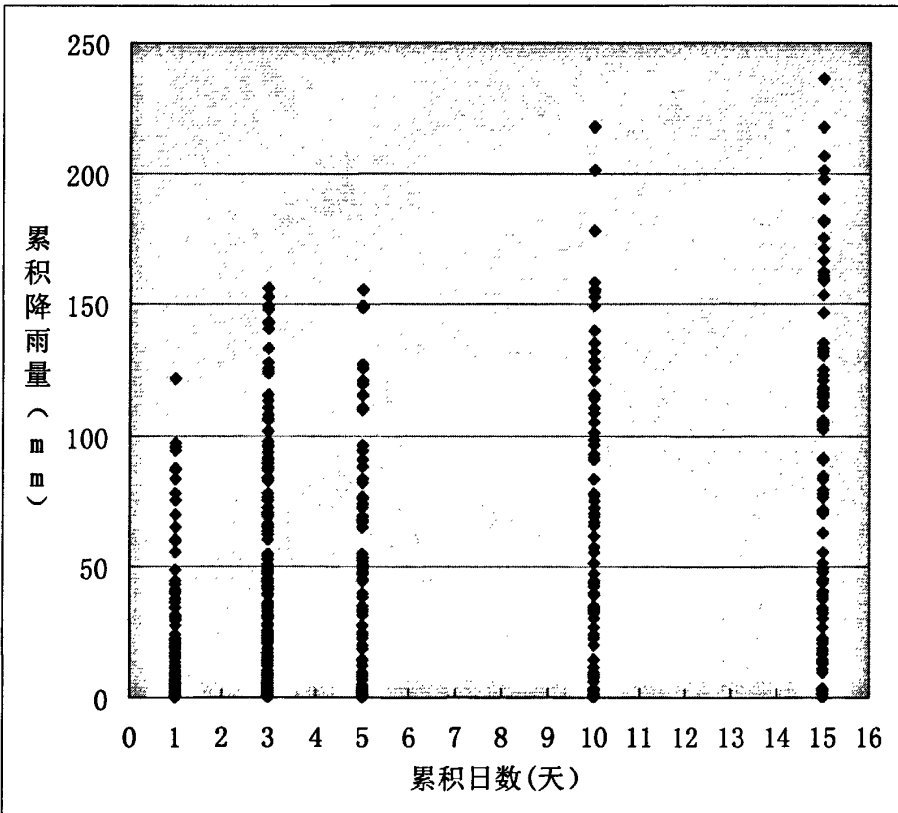


图 5.5 滑坡发生当日、前 3 日、前 5 日、前 10 日、前 15 日累计降雨量与地质灾害的 xy 散点图

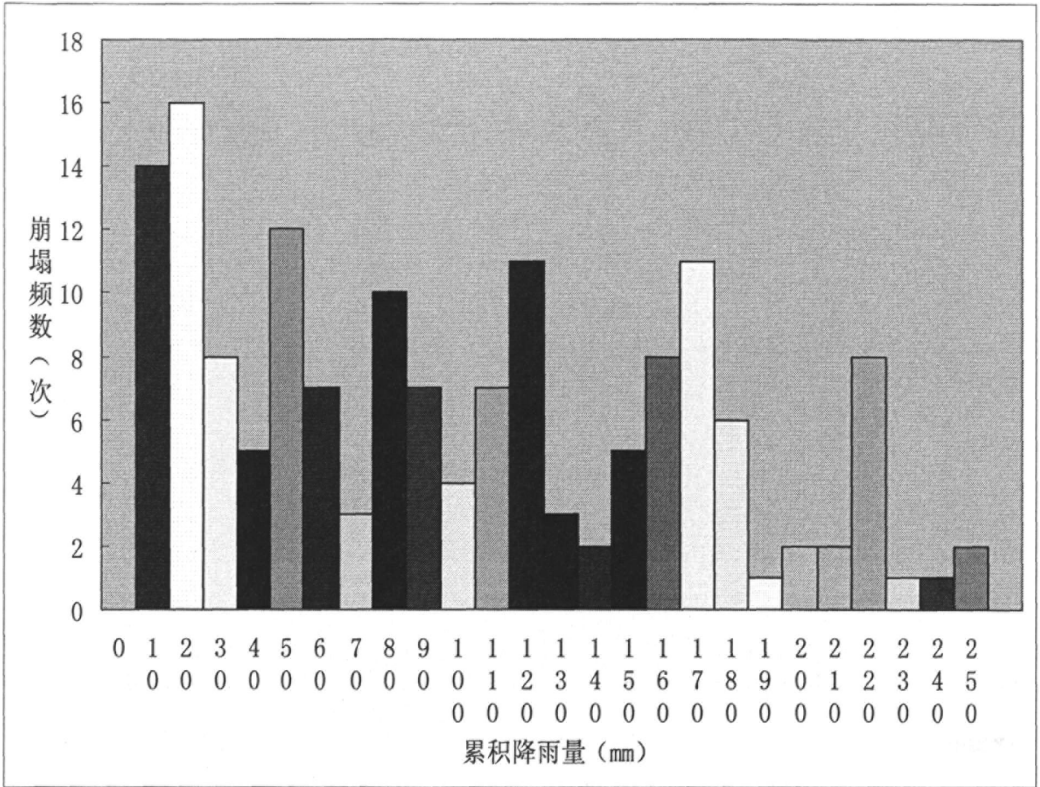


图 5.6 总累计降雨量量级与崩塌发生频数柱形图

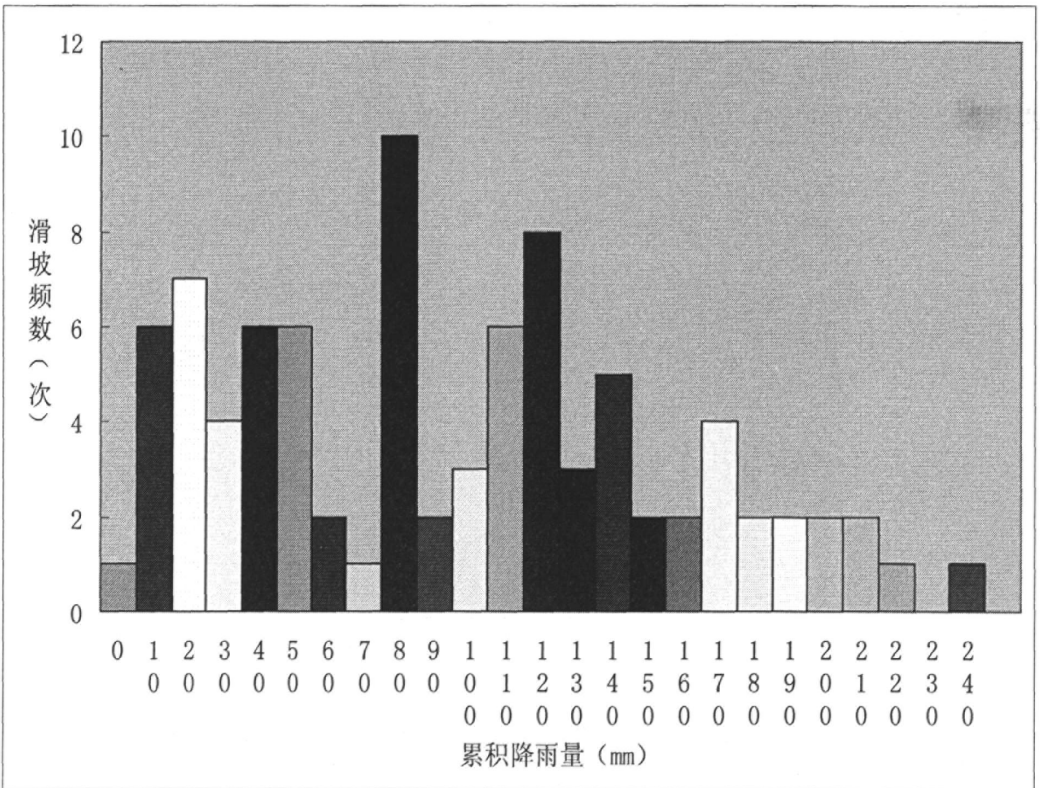


图 5.7 总累计降雨量量级与滑坡发生频数柱形图



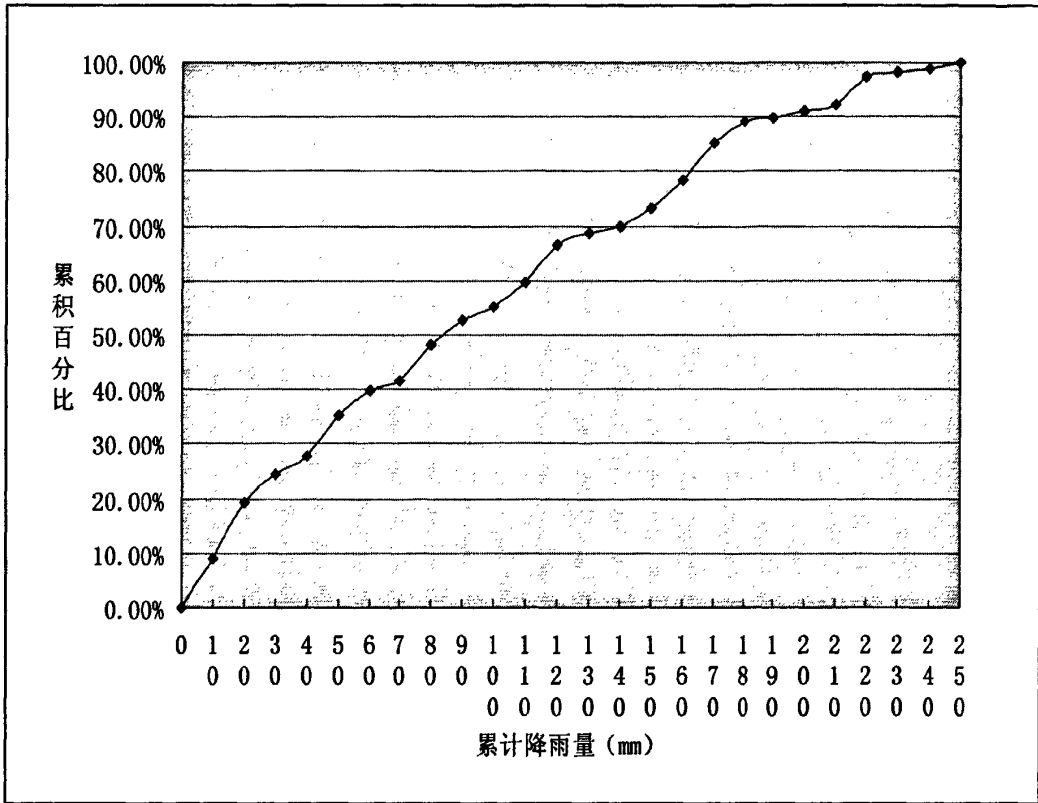


图 5.8 总累计降雨量量级与崩塌发生频数所占百分比累计曲线

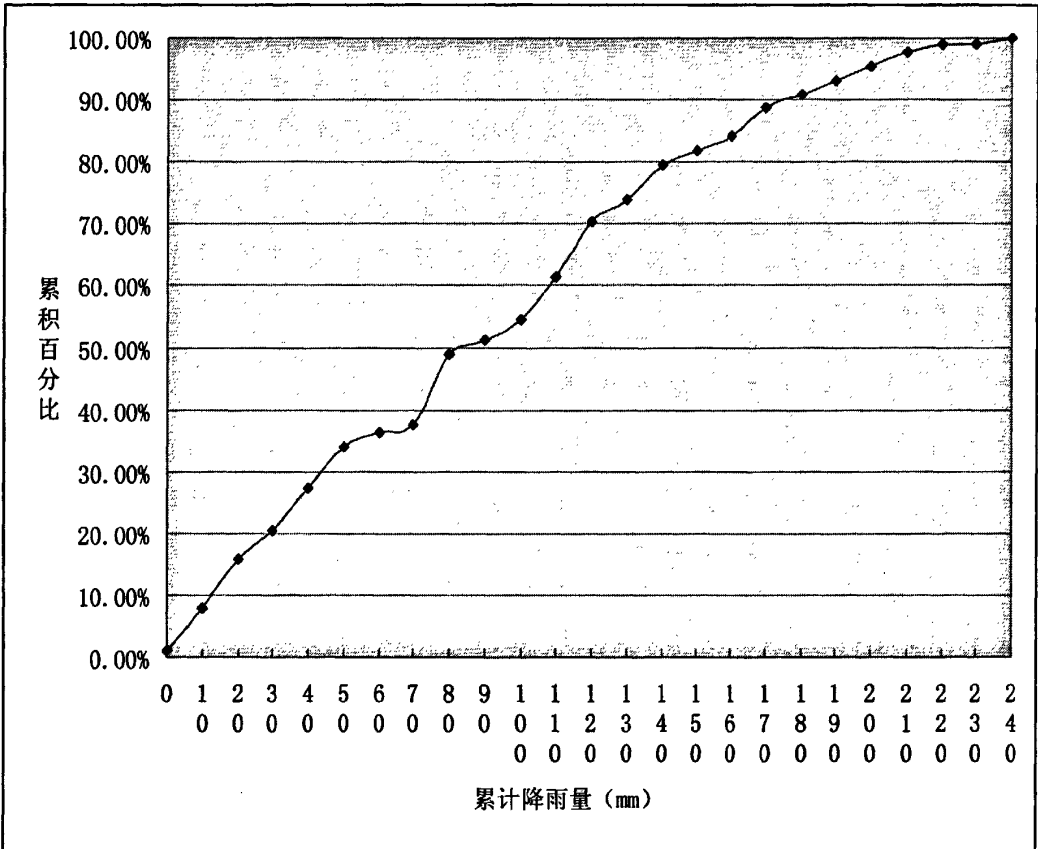


图 5.9 总累计降雨量量级与滑坡发生频数所占百分比累计曲线

图 5.8 中对应累计百分比 25%、50%、75%的量级分别为 20.1-30.0mm、80.1-90.0mm 和 150.1-160.0mm,即到达 20.1-30.0mm 量级时已有 25%的崩塌发生了;到达 80.1-90.0mm 量级时有 50%的崩塌发生;而到达 150.1-160.0mm 时将有 75%的崩塌发生。

图 5.9 中对应累计百分比 25%、50%、75%的量级分别为 30.1-40.0mm、80.1-90.0mm 和 130.1-140.0mm,即到达 30.1-40.0mm 量级时已有 25%的滑坡发生了;到达 80.1-90.0mm 量级时有 50%的滑坡发生;而到达 130.1-140.0mm 时将有 75%的滑坡发生。

## 5.2.2 地质灾害与前期降雨强度相关性

首先将数据分为三组,第一组为当日及前 15 日降雨中有 1 日或 1 日以上的日降雨量  $\geq 50\text{mm}$ ,共 65 组,第二组为除第一组外的数据中当日及前 15 日降雨中有 1 日或 1 日以上的日降雨量  $\geq 25\text{mm}$ ,共 98 组,第三组为除第一组和第二组外的数据,共 79 组。

对这三组数据的当日及前 15 日中各日地质灾害的发生次数进行分类统计,见表 5.1。

从表 5.1 中可以看出在第一组数据中当日降雨量  $\geq 50\text{mm}$  时发生地质灾害次数远远多于其它日降雨量  $\geq 50\text{mm}$  时发生地质灾害的次数;在第二组数据中当日或前一日降雨量  $\geq 25\text{mm}$  时发生的地质灾害次数也远远多于其它日降雨量  $\geq 25\text{mm}$  时发生地质灾害的次数;当日降雨量  $\leq 25\text{mm}$  时各日均有地质灾害发生。

即暴雨(日降雨量  $\geq 50\text{mm}$ )诱发的地质灾害主要出现在当日,大雨(日降雨量  $\geq 25\text{mm}$ )诱发的地质灾害主要出现在当日和次日,而小雨和中雨诱发的地质灾害在各日均有可能发生。

取第一组和第二组中的单日降雨量  $\geq 25\text{mm}$ ,其它日的降雨量均  $\leq 5\text{mm}$  的数据进行分析,即单日强降雨诱发的地质灾害,符合上述条件的数据共 23 个(见表 5.2),其中滑坡 6 个,崩塌 16 个,泥石流 1 个。单日强降雨诱发的地质灾害占有所有地质灾害的 9.5%。这说明陕北黄土高原区由单日强降雨造成的地质灾害较少,特别是滑坡由单日强降雨造成的更少。可见地质灾害不光与前期降雨强度有关,与前期降雨持续时间的关系也很密切。

## 5.2.3 地质灾害与前期降雨持续时间相关性

地质灾害的发生,不仅与前期降雨强度有关系,与前期降雨量、降雨日数的关系也非常密切。对数据进行统计分析,得出当日平均降雨量、平均降雨日数、 $\geq 10\text{mm}$  平均日数、 $\geq 25\text{mm}$  平均日数和前 15 日平均累计降雨量。(见表 5.3)

表 5.1 前期降雨与地质灾害发生次数统计表

	当日	前1日	前2日	前3日	前4日	前5日	前6日	前7日	前8日	前9日	前10日	前11日	前12日	前13日	前14日	前15日
第一组	崩塌	19	6	3	4	1	0	1	3	1	2	1	0	0	0	0
	滑坡	5	3	1	2	0	1	1	2	0	0	1	0	0	0	1
	泥石流	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
第二组	崩塌	16	13	2	4	2	2	2	2	3	1	1	0	1	1	1
	滑坡	9	9	3	1	6	2	4	1	0	1	0	1	1	0	3
	泥石流	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
第三组	崩塌	6	5	4	4	3	3	5	3	3	4	3	3	2	3	4
	滑坡	3	2	1	2	1	1	3	1	1	1	0	0	0	0	0
	泥石流	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 5.2 单日强降雨诱发的地质灾害统计表

发生时间	发生地点	灾害种类	降雨出现日	降雨量
1990.07.27	绥德	崩塌	26	37.5
1991.07.18	佳县	崩塌	17	43.6
1992.08.10	子长	崩塌	10	75.1
1993.08.20	子长	滑坡	14	36.2
1994.07.30	定边	崩塌	26	95.8
1994.08.31	吴旗	滑坡	31	87.3
1995.08.28	子长	崩塌	28	60
1997.07.18	宜川	崩塌	18	97.3
1998.07.28	延安	滑坡	27	27.1
1999.07.18	延长	崩塌	18	30.1
2000.08.15	铜川	崩塌	12	132.8
2001.07.27	黄陵	滑坡	27	75.3
2001.07.28	黄陵	泥石流	27	75.3
2001.08.16	榆林	滑坡	16	83.2
2002.07.25	吴旗	崩塌	24	69.3
2003.05.14	延川	崩塌	6	34.9
2003.07.30	府谷	崩塌	30	121.4
2003.07.30	府谷	滑坡	30	121.4
2005.05.17	铜川	崩塌	16	27.1
2005.07.05	延长	崩塌	2	77.6
2005.08.08	安塞	崩塌	7	35.8
2006.07.31	延川	崩塌	31	30.8
2008.08.01	延安	崩塌	7.17	41.9

表 5.3 地质灾害发生前期降雨情况统计表

灾害种类	平均值				
	当日降雨量	降雨日数	≥10mm 日数	≥25mm 日数	前 15 日累计降雨量
滑坡	12.89	4.3	2.1	1.1	89.3
崩塌	17.33	4.5	2.4	1.2	93.1

从地质灾害发生前15日内的降雨日数、≥10mm、≥25mm的日数等统计数据来看，陕北黄土高原区地质灾害发生当日平均降雨量相差不大，降雨日数滑坡和崩塌均在4天左右，≥10mm日数均在2天多，≥25mm的日数在1天左右。此外，崩塌发生前最多有15个连续降雨日，降雨日≤2日的有12次，占7.9%，其余均在3日以上；滑坡发生前最多有16

个降雨日，降雨日 $\leq 2$ 日的仅有3次，占3.6%，其余均在3日以上。从以上分析来看，陕北黄土高原区地质灾害发生前期，往往有多日降雨，且多数有3个以上的降雨日。

崩塌发生前期连续降雨日数平均4.5天，最长达10天，连续降雨日 $\geq 3$ 天的有14次，占80.7%，连续降雨日 $\leq 2$ 日的有38次，占19.3%。滑坡发生前连续降雨日平均4.3天，最长达16日，连续降雨日 $\geq 3$ 天的69次，占84.1%，连续降雨日 $\leq 2$ 日的有13次，占25.7%。

从以上分析看出，陕北黄土高原区的地质灾害不仅与前期降雨强度有关系，而且与前期降雨日数及持续时间有着密切关系，陕北黄土高原区的地质灾害一般都需要3天以上的降雨日，滑坡、崩塌所需的降雨日数相差不多。陕北黄土高原区的地质灾害属于多日降雨诱发型。

将连阴雨定义为当某日出现大于0.1mm降雨至某一日降雨小于0.1mm，且降雨日数超过3天，中间可以有一天为微量，累计降雨量大于10mm。对234个数据中符合连阴雨条件的数据进行分类统计。符合连阴雨条件的崩塌有114个占崩塌总数的80.7%，滑坡69个占滑坡总数的80.7%。

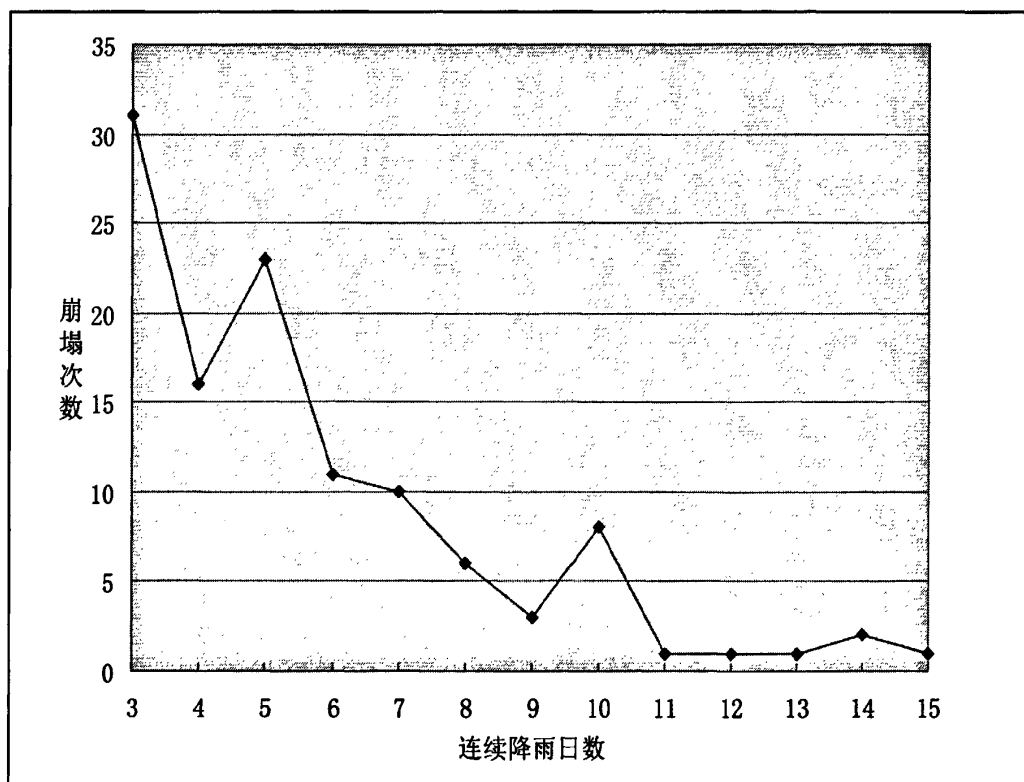


图 5.10 连阴雨降雨日数与崩塌发生次数的关系图

从图 5.10 看出连阴雨最长的持续时间为 15 天，最短 3 天，主要以 3 天连阴雨诱发崩塌为主，其次为 5 天和 4 天。由于 7 天以上的连阴雨本身发生次数的就较少所以导致

7 以上连阴雨诱发的崩塌较少。可见在陕北黄土高原区当连续降雨日数超过 3 天，崩塌将大量发生。

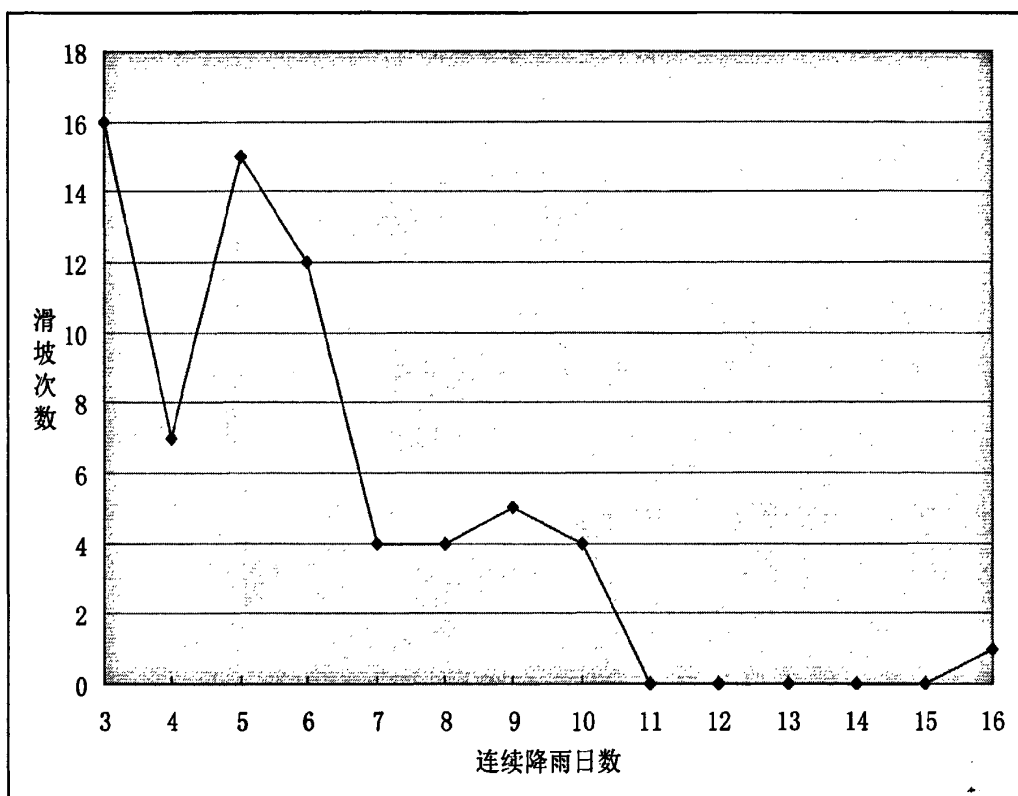


图 5.11 连阴雨降雨日数与滑坡发生次数的关系图

从图 5.11 看出连阴雨最长的持续时间为 16 天，最短 3 天，主要以 3 到 6 天的连阴雨诱发滑坡为主。由于 7 天以上的连阴雨本身发生次数的就较少所以导致 7 以上连阴雨诱发的滑坡较少。可见在陕北黄土高原区当连续降雨日数超过 3 天，滑坡将大量发生。

### 5.3 不同地貌类型下地质灾害与降雨的关系

在陕北黄土高原区按地貌类型可以将研究区分为几个不同区域, (图 2.2) 而不同区域地质灾害的发生次数的和类型有明显的不同。统计 234 个地质灾害点所处的地貌类型得表 6.1。

表 5.4 不同地貌类型区发生的地质灾害频次统计表

地貌类型 \ 地质灾害类型	黄土塬	黄土残塬	黄土梁	黄土峁	黄土盖帽 的基岩深 谷	黄土覆盖 的基岩山 地	沙漠滩地
滑坡	7	19	21	32	1	1	1
崩塌	4	47	41	52	5	3	0
总计	11	66	62	84	6	4	1

按不同的地貌类型可将研究区分为 9 个不同的区域, 而黄土台塬和基岩山地无地质灾害发生, 黄土塬、黄土盖帽的基岩深谷、黄土覆盖的基岩山地和沙漠滩地区发生的地质灾害较少占所统计地质灾害的 9.1%, 而黄土残塬、黄土梁和黄土峁区所发生的地质灾害占所统计地质灾害的 90.9%。可见研究区的地质灾害主要发生在黄土梁峁和残塬区。

#### 5.3.1 黄土台塬区

黄土台塬主要分布在铜川市南部和东部, 年平均降雨量为 460~520mm 之间, 为局地暴雨的中等发育区, 但由于黄土台塬区的塬面较宽, 最宽可达 25 公里, 塬面平坦, 坡度为一般在 3°~5°之间, 河谷一般较宽, 谷坡较缓。虽然黄土台塬为局地暴雨的中等发育区, 但由于黄土台塬特殊的地形地貌导致这一区域的地质灾害不发育, 降雨对地质灾害的影响较小。

#### 5.3.2 基岩山地区

基岩山地主要分布在铜川市的西部和北部, 山体主要由中生代、新生代砂岩、泥岩、页岩和砾岩组成, 局部地区有灰岩分布, 山坡多在 40° 以上。年平均降雨量为 440~500mm 之间, 为局地暴雨的中等发育区。由于基岩山地区岩性和构造的影响导致这一地区的地质灾害不发育, 降雨对地质灾害的影响较小。

#### 5.3.3 沙漠滩地区

沙漠滩地区突出的特征是西北高东南低, 海拔约 1000—1500m, 以风力作用和堆积作用为主, 组成物质以第四系松散堆积物和风积物为主。本区气候干旱, 地表起伏不大, 组成物质松散, 因此流水重力作用不显著, 沟壑不发育。年平均降雨量在 320~400mm

之间,为局地暴雨的低发育区。由于沙漠滩地区特殊的地形地貌以及较低的降雨量导致这一地区为地质灾害不发育。

#### 5.3.4 黄土塬区

黄土塬主要分布在洛河中游的富县、洛川河黄陵地区,统称洛川塬,是陕北保存较好的黄土塬。其底是中生代砂、页岩和厚度不超过十数米的三趾马红土所构成的一个山间盆地。现代的溯源侵蚀很活跃,塬坡被蚕蚀,沟壑在增长。黄土塬坡面冲刷、沟谷侵蚀有愈演愈烈的趋势,塬面随沟壑密度和地面坡度的增大而不断缩小。年平均降雨量在320~400mm之间,为局地暴雨的中等和高发育区。可见由于黄土塬区的溯源侵蚀强烈,沟谷侵蚀严重,降雨对这一地区的地质灾害的影响较大,但由于这一地区的年降雨量较少,导致黄土塬区发生的地质灾害的频次较少。

#### 5.3.5 黄土盖帽的基岩深谷区

黄土盖帽的基岩深谷主要分布在黄河沿岸地区,呈南北狭长的带状由三叠纪砂页岩组成,海拔在1200米左右批覆着薄层的不连续黄土,黄河深切形成峡谷,谷底高程在450~590米之间基岩高出谷地达400~500米。由于剥蚀作用和河流的下切,山坡平缓处的黄土厚度也不过数米至三、四十米,且属蚀余残积型黄土,料姜石和红粘土占主要成份。年平均降雨量为420~520mm,为局地暴雨的中等和低发育区。根据数据统计,黄土盖帽的基岩深谷区的地质灾害主要集中在局地暴雨的中等发育区。可见降雨对这一地区地质灾害的影响较大。

#### 5.3.6 黄土覆盖的基岩山地区

黄土覆盖的基岩山地主要分布在宜君、千阳、韩城等地,海拔在1000~1300米之间,以斜梁为主,有孤立峁分布,古地形为中生代砂砾页岩组成的丘陵,上覆薄层黄土,梁顶面狭窄,一般宽60~100米,梁长约数公里。沟谷以黄土—基岩沟谷为主,其次为黄土沟谷。年平均降雨量为420~560mm,为局地暴雨的中等和高发育区。而地质灾害多发生在局地暴雨的高发育区,即黄土覆盖的基岩山地区降雨对地质灾害的影响强烈。

#### 5.3.7 黄土梁区

黄土梁主要分布在吴旗的周湾、安塞的王家湾和子长的李家岔等地的河沟上游以及吴旗的西北、志丹西南、甘泉县的大部分地区、陇县东北部。地面海拔在1400~1600米,是由厚层黄土批覆的缓梁宽谷。黄土梁宽缓土厚,多呈凸形坡,坡面有细沟,浅沟



发育,在坡面股流转为潜流的下部坡段,常见有陷穴、小暗洞和梭形河槽,坡脚局部有加积作用。植被生长良好的地区,现在侵蚀缓慢,水土流失轻微,反之在植被破坏,又无水土保持的梁坡,面沟、切沟侵蚀均处于加速阶段,是地质灾害的多发区。研究区的年降雨量在 440~660 之间变动,区域变化较大,为局地暴雨的中等和高发育区。

以总累计降雨量  $R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{15} R_i$  作为分析对象,按每 20.0mm 一个量级对  $R_{\Sigma}$  进行分组,并以不同类型地质灾害发生频数的累计百分比做纵轴,量级大小做横轴作图。(见图 5.12)

从图 5.12 可知在黄土梁区当累计降雨量达到 50mm 时有 25%的崩塌发生,而滑坡需要 40mm 的累计降雨量。而从崩塌的累计曲线看出当累计降雨量  $\geq 30$ mm 曲线有明显变陡的趋势,即当累计降雨量  $\geq 30$ mm 黄土梁区的崩塌大量发生。滑坡的累计曲线在  $\geq 20$ mm 也有明显变陡的趋势,即当累计降雨量  $\geq 20$ mm 黄土梁区的滑坡大量发生。

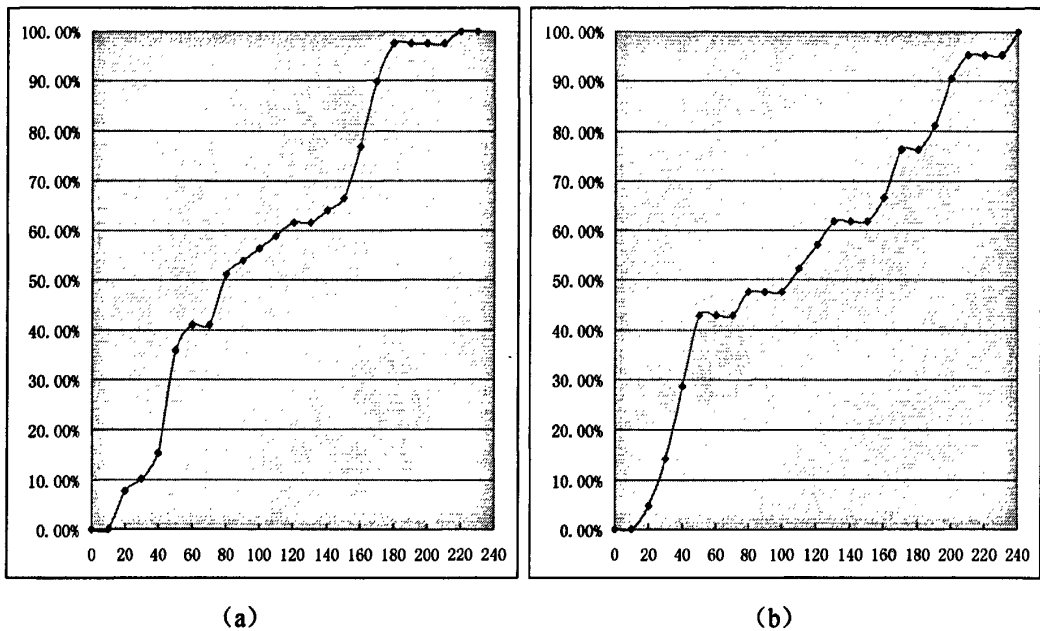


图 5.12 黄土梁区 (a) 崩塌、(b) 滑坡总累计降雨量量级与地质灾害发生频数所占百分比累计曲线

2003 年陕北各地发生的地质灾害较多,查阅气象资料可知,该年 8 月陕西省出现 50 年一遇的连阴雨及强降雨。把 2003 年 8 月黄土梁区发生的地质灾害挑选出来作为分析组,使用二项 Logistic 回归模型分析逐日降雨对地质灾害发生可能性的影响,其余的案例作为校验组,以检验模型的拟合情况。

二项 Logistic 回归模型是一种可用来预测具有两分特点的因变量的概率的统计方法,本次研究需分析在前期逐日的降雨量影响下(多自变量),地质灾害是发生(1),

还是不发生 (0)，符合该统计模型的基本原理，其多自变量模型公式为：

$$p = \frac{\exp(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_mx_m)}{1 + \exp(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_mx_m)} \quad (5.1)$$

式中：p 为因变量的发生概率；x<sub>i</sub> 为自变量；b<sub>0</sub> 为常数；b<sub>i</sub> (i = 1, 2, ..., m) 为回归系数，其含义为一个单位的自变量的变化所引起的事件发生比率的对数的改变值。模型的系数检验使用基于卡方分布的 Wald 统计量。

表 5.5 2003 年 8 月黄土梁区的部分数据表

日期	是否发生	当日雨量 (mm)	前 1 日雨量 (mm)	前 2 日雨量 (mm)	前 3 日雨量 (mm)	前 4 日雨量 (mm)	前 5 日雨量 (mm)	前 6 日雨量 (mm)	.....
2003 年 8 月 24 日	0	20.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2003 年 8 月 25 日	0	31.9	20.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2003 年 8 月 26 日	1	140.6	6.8	15.6	0.0	0.0	0.0	0.0	.....
2003 年 8 月 27 日	0	6.8	15.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2003 年 8 月 28 日	1	65.1	0.1	22.4	2.2	4.4	0.0	0.0	

将黄土梁区 2003 年 8 月的地质灾害集中发育期数据建立数据表 (表 5.5)，将当日降雨量、前一日降雨量、前二日降雨量……等逐步带入 SPSS 软件求解，当带入前四日降雨量时 wold 值为 0 已不具备统计学意义，即黄土梁区的地质灾害只与当日和前三日的降雨量的相关性较好，所以只得到如表 2 所示结果。作为自变量的当日、前 1 日、前 2 日、前 3 日降雨量的回归系数分别为 0.020、0.078、0.159 和 0.025，常数项为 -0.957。可以看出前 2 日降雨量对黄土梁区地质灾害发生可能性的影响最大，其次是前 1 日的降雨量，而当日和前 3 日的降雨量对黄土梁区地质灾害发生可能性的影响相差不大均较小，根据计算结果，反映该模型拟合优度的指标 -2LL=10.440；反映方程所能解释的回归变异的百分比的指标 Cox&Snell R<sup>2</sup> 和 NagelkerkeR<sup>2</sup> 分别为 41.1%和 55.8%；观测量分类表中判断“不发生崩滑”的正确率为 80.0%；判断“发生崩滑”的正确率为 75.0%。综上，根据各系数写出的预测模型为：

$$p = \frac{\exp(-0.951 + 0.020R_0 + 0.078R_1 + 0.159R_2 + 0.025R_3)}{1 + \exp(-0.951 + 0.020R_0 + 0.078R_1 + 0.159R_2 + 0.025R_3)} \quad (5.2)$$

将该预测方程对黄土梁区的其它案例进行检验，以概率值 0.5 作为地质灾害发生与否则的分界点，得出的预测值大于 0.5 为预测地质灾害发生，小于 0.5 为预测地质灾害不发生。(表 5.7)因数据全部是实际已发生的崩滑，所以只能检验判断“发生崩滑”的正确率，为 61.5%，如上所述，模型本身判断“发生灾害”的正确率就小于判断“不发生灾害”的正确率，因此将来在判断“不发生灾害”时，该模型的准确性可能会更高。

表 5.6 黄土梁区 Logistic 回归模型计算结果 (最终统计量)

		B	S. E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)	95% C. I. for EXP(B)	
								Lower	Upper
Step 1 <sup>a</sup>	当日降雨量	.020	.091	.049	1	.824	1.021	.853	1.221
	前一日降雨量	.078	.106	.539	1	.463	1.081	.878	1.330
	前二日降雨量	.159	.462	.119	1	.730	1.173	.474	2.903
	前三日降雨量	.025	.521	.002	1	.962	1.025	.369	2.848
	Constant	-.957	.995	.925	1	.336	.384		

表 5.7 黄土梁区地质灾害案例的部分校验结果

灾点编号	当日降雨量 (mm)	前1日降雨量 (mm)	前2日降雨量 (mm)	前3日降雨量 (mm)	预测发生 概率	检验结果
5	1.1	0.0	0.0	0.0	0.28313	失败
11	94.4	54.7	0.7	3.5	0.77778	成功
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.27868	失败
30	140.6	6.8	15.6	0.0	0.99240	成功
41	10.5	7.7	14.6	6.4	0.91222	成功
50	0.0	19.6	1.0	0.0	0.67630	成功
64	9.8	17.7	6.5	10.1	0.87120	成功

通常所说的临界值,实际上就是一个界限值,是指事件的发生在量上所需的最大或最小值。本论文研究的目的是在多少降雨量的情况下,研究区会发生地质灾害。因此,这里的临界值定义为最低的降雨量值,当雨量值等于或大于此值时,研究区将有一个或多个地质灾害发生。

在确定黄土梁区的临界值时选用研究区 62 个灾点中检测结果为成功的 40 个点的当日和前 3 日的累计降雨量这两个因子作 x-y 散点图。(图 5.13)

得黄土梁区的地质灾害发生的临界公式为:

$$D_{\text{累}} = -0.328S_{\text{累}} + 9.4 \quad (5.3)$$

式中:  $D_{\text{累}}$  为黄土梁区地质灾害发生的当日降雨量;

$S_{\text{累}}$  为黄土梁区地质灾害发生的前三日的累计降雨量。

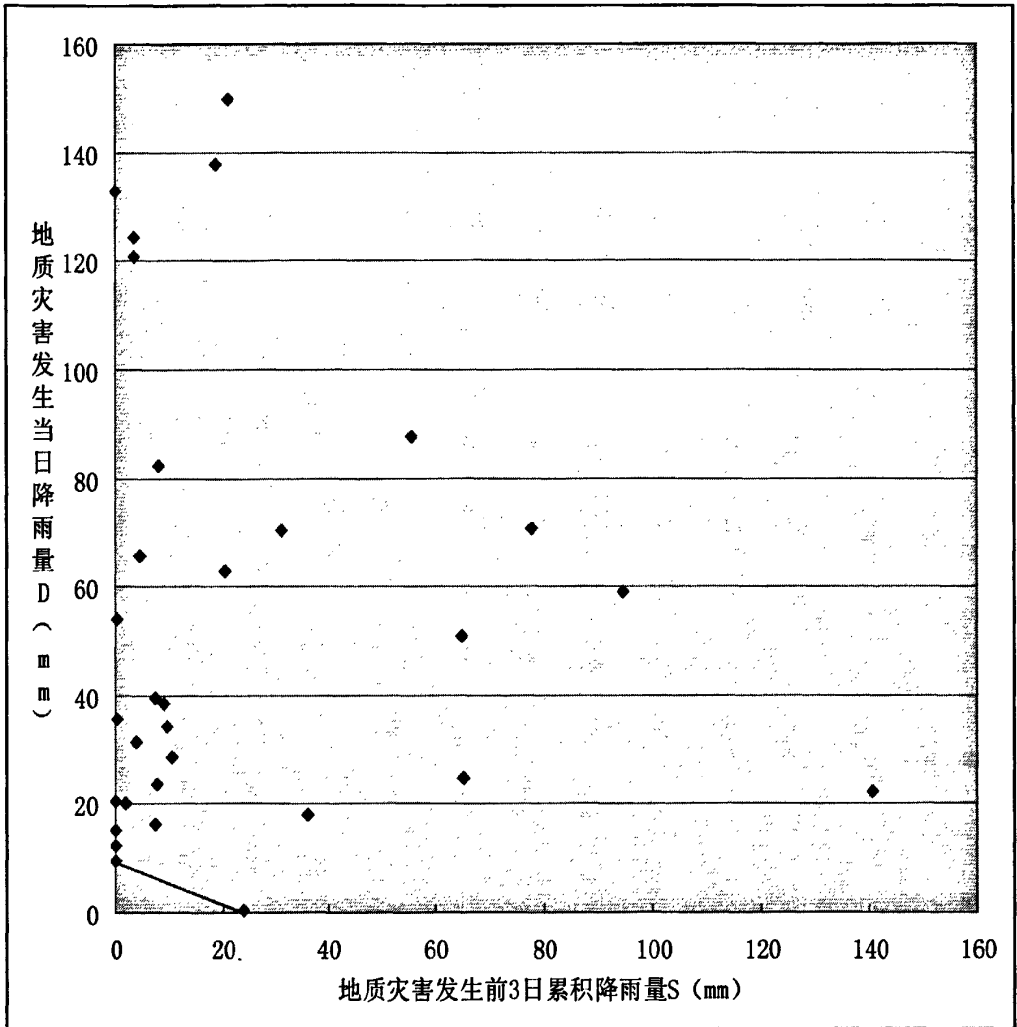


图 5.13 黄土梁去地质灾害发生当日降雨量及前 3 日累计降雨量的 x-y 散点图

### 5.3.8 黄土峁区

黄土峁主要分布在吴旗、志丹、安塞、延安、子长、延长、延川、清涧、子洲、米脂、绥德、佳县等地区。海拔在 1100~1400 米之间，地势西北高东南低，是由斜梁演变成黄土峁居于主导地位的地貌类型，峁多梁窄，峁梁起伏，峁成馒头状，峁顶坡 2~5°，峁坡常呈凹形或凸形，下部坡度增致 15~30°。两峁之间凹下的鞍部，由于沟坡侵蚀和坡面冲刷变得很窄，被切穿时两峁分离。梁峁以下的冲沟、切沟和河流下切强烈，多数切入基岩。由于峁坡大部分被耕垦，天然植被很少，由于峁顶至沟底的各种流水侵蚀活跃，所以谷坡处的崩塌、滑坡等地质灾害经常发生。该研究区的年降雨量在 500~660 之间，为局地暴雨的高和中等发育区。

以总累计降雨量  $R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{15} R_i$  作为分析对象，按每 20.0mm 一个量级对  $R_{\Sigma}$  进行分组，并

以不同类型地质灾害发生频数的累计百分比做纵轴，量级大小做横轴作图。（见图 6.4）

从图 5.14 可知在黄土峁区当累计降雨量达到 20mm 时有 25%的崩塌发生，而滑坡需要 40mm 的累计降雨量。而从崩塌的累计曲线看出当累计降雨量 $\geq 10\text{mm}$  曲线有明显变陡的趋势，即当累计降雨量 $\geq 10\text{mm}$  黄土峁区的崩塌大量发生。滑坡的累计曲线在 $\geq 10\text{mm}$  也有明显变陡的趋势，即当累计降雨量 $\geq 10\text{mm}$  黄土峁区的滑坡也大量发生。

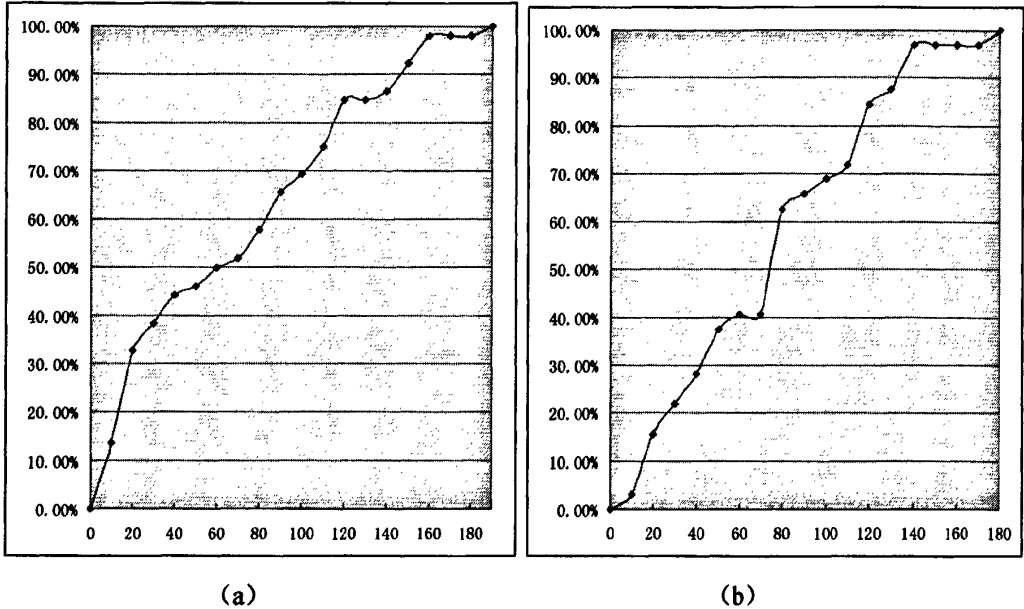


图 5.14 黄土峁区 (a) 崩塌、(b) 滑坡总累计降雨量量级与地质灾害发生频数所占百分比累计曲线

同理把 2003 年 8 月黄土峁区发生的地质灾害挑选出来作为分析组，使用二项 Logistic 回归模型分析逐日降雨对地质灾害发生可能性的影响，其余的案例作为校验组，以检验模型的拟合情况。

表 5.8 2003 年 8 月黄土峁区的部分数据表

日期	是否发生	当日雨量 (mm)	前 1 日雨量 (mm)	前 2 日雨量 (mm)	前 3 日雨量 (mm)	前 4 日雨量 (mm)	前 5 日雨量 (mm)	前 6 日雨量 (mm)	.....
2003 年 8 月 26 日	1	69.9	38.5	41.5	0.0	0.0	0.0	0.0	
2003 年 8 月 27 日	1	0.0	44.1	37.6	15.7	2.9	0.4	0.0	
2003 年 8 月 28 日	0	4.0	0.0	15.6	0.0	0.0	0.0	0.0	.....
2003 年 8 月 29 日	1	21.7	4.0	0.0	69.9	38.5	41.5	0.0	
2003 年 8 月 30 日	1	2.4	20.5	5.1	0.0	44.1	37.6	15.7	

将黄土峁区 2003 年 8 月的地质灾害集中发育期数据建立数据表（表 5.8），将当日降雨量、前一日降雨量、前二日降雨量……等逐步带入 SPSS 软件求解，当带入前三日降雨量时 wold 值为 0 已不具备统计学意义，而第二日降雨量的回归系数为负值，所以黄土梁区的地质灾害只与当日和前一日的降雨量的相关性较好，所以得到如表 5.9 所示

结果。作为自变量的当日、前 1 日降雨量的回归系数分别为 0.093、和 0.372，常数项为-0.747。可以看出前 1 日降雨量对黄土梁区地质灾害发生可能性的影响最大，其次是当日的降雨量，根据计算结果，反映该模型拟合优度的指标-2LL=6.558；反映方程所能解释的回归变异的百分比的指标 Cox&Sneil R2 和 Nagelkerke R2 分别为 43.2%和 61.3%；观测量分类表中判断“不发生灾害”的正确率为 66.7%；判断“发生灾害”的正确率为 85.7%。综上，根据各系数写出的预测模型为：

$$p = \frac{\exp(-0.747 + 0.093R_0 + 0.372R_1)}{1 + \exp(-0.747 + 0.093R_0 + 0.372R_1)} \quad (5.4)$$

表 5.9 黄土崩区 Logistic 回归模型计算结果（最终统计量）

		B	S. E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)	95% C. I. for EXP(B)	
								Lower	Upper
Step 1 <sup>a</sup>	当日降雨量	.093	.192	.233	1	.629	1.097	.753	1.599
	前一日降雨量	.372	.366	1.037	1	.309	1.451	.709	2.973
	前二日降雨量	-.300	.430	.486	1	.486	.741	.319	1.721
	Constant	-.747	1.138	.431	1	.511	.474		

将该预测方程式 (5.4) 对黄土崩区的其它案例进行检验，以概率值 0.5 作为地质灾害发生与否的分界点，得出的预测值大于 0.5 为预测地质灾害发生，小于 0.5 为预测地质灾害不发生。经检验“发生灾害”的正确率，为 53.5%。（表 6.6）

表 5.10 黄土梁区地质灾害案例的部分校验结果

灾点编号	当日降雨量 (mm)	前 1 日降雨量 (mm)	预测发生 概率	检验结果
1	0.3	5.0	0.757845	成功
3	0.0	37.5	0.999998	成功
10	0.0	0.0	0.321475	失败
20	0.0	0.0	0.321475	失败
31	0.2	0.0	0.325546	失败
45	0.0	14.9	0.991803	成功
61	0.0	0.0	0.321475	失败

确定黄土崩区的临界值时选用研究区 84 个灾点中检测结果为成功的 45 个点的当日和前 1 日的累计降雨量这两个因子作 x-y 散点图。（图 6.5）

得黄土崩区的地质灾害发生的临界公式为：

$$D_{崩} = -3.25S_{崩} + 11.05 \quad (5.5)$$

式中：D<sub>崩</sub>为黄土崩区地质灾害发生的当日降雨量；

S<sub>崩</sub>为黄土崩区地质灾害发生的前一日降雨量。



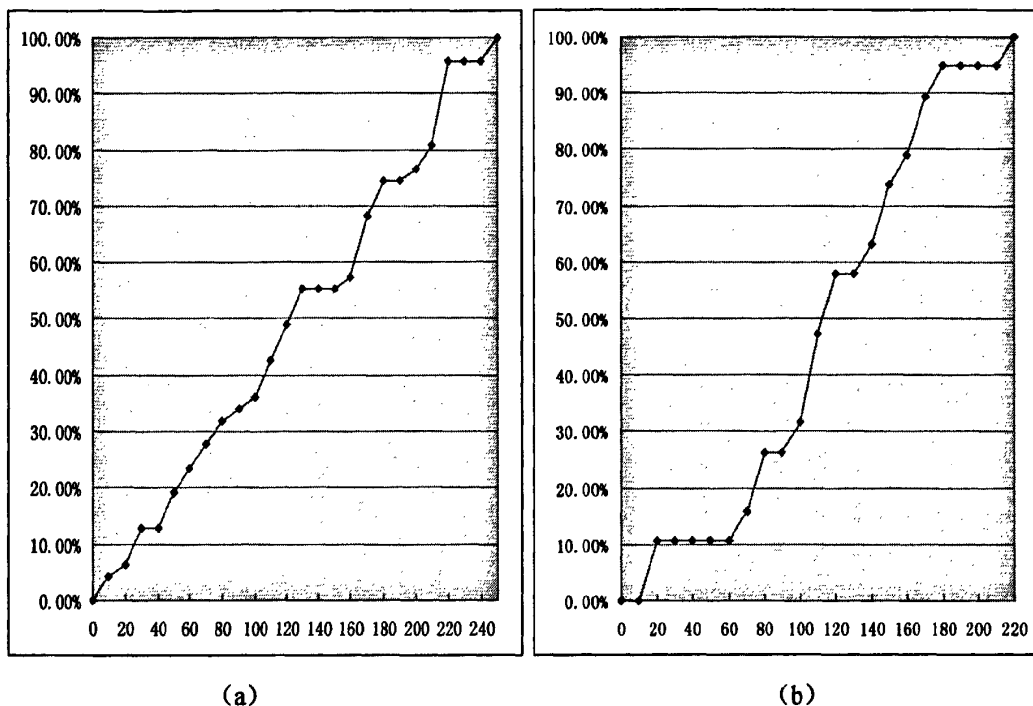


图 5.16 黄土残塬区 (a) 崩塌、(b) 滑坡总累计降雨量量级与地质灾害发生频数所占百分比累计曲线

表 5.11 2003 年 8 月黄土残塬区的部分数据表

日期	是否发生	当日雨量 (mm)	前 1 日雨量 (mm)	前 2 日雨量 (mm)	前 3 日雨量 (mm)	前 4 日雨量 (mm)	前 5 日雨量 (mm)	前 6 日雨量 (mm)	.....
2003 年 8 月 24 日	1	12.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2003 年 8 月 25 日	0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2003 年 8 月 26 日	1	41.2	42.8	12.6	0.0	0.0	0.0	0.0	.....
2003 年 8 月 27 日	1	0.1	57.2	9.8	2.2	0.0	0.0	0.0	
2003 年 8 月 28 日	1	29.4	0.0	41.2	42.8	12.6	0.0	0.0	

将黄土崩残塬区 2003 年 8 月的地质灾害集中发育期数据建立数据表 (表 5.11), 将当日降雨量、前一日降雨量、前二日降雨量.....等逐步带入 SPSS 软件求解, 当带入前二日降雨量时 wold 值为 0 已不具备统计学意义, 所以黄土梁区的地质灾害只与当日和前一日降雨量的相关性较好, 所以得到如表 5.12 所示结果。作为自变量的当日和前一日降雨量的回归系数分别为 0.179 和 0.118, 常数项为 0.795。根据计算结果, 反映该模型拟合优度的指标  $-2LL=9.248$ ; 反映方程所能解释的回归变异的百分比的指标 Cox&Snell  $R^2$  和 Nagelkerke  $R^2$  分别为 39.9%和 68.2%; 观测量分类表中判断“不发生灾害”的正确率为 100.0%; 判断“发生灾害”的正确率为 90.5%。综上, 根据各系数写出的预测模型为:



$$p = \frac{\exp(-0.795 + 0.179R_0 + 0.118R_1)}{1 + \exp(-0.795 + 0.179R_0 + 0.118R_1)} \quad (5.6)$$

表 5.12 黄土残塬区 Logistic 回归模型计算结果 (最终统计量)

		B	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp(B)	95% C.I. for EXP(B)	
								Lower	Upper
Step 1 <sup>a</sup>	当日降雨量	.179	.156	1.315	1	.252	1.196	.881	1.625
	前一日降雨量	.118	.150	.625	1	.429	1.125	.840	1.509
	Constant	-.795	.934	.725	1	.395	.452		

将该预测方程 (5.6) 对黄土残塬区的其它案例进行检验, 以概率值 0.5 作为地质灾害发生与否的分界点, 得出的预测值大于 0.5 为预测地质灾害发生, 小于 0.5 为预测地质灾害不发生。经检验“发生灾害”的正确率, 为 69.0%。(表 5.13)

表 5.13 黄土残塬区地质灾害案例的部分校验结果

灾点编号	当日降雨量 (mm)	前 1 日降雨量 (mm)	预测发生 概率	检验结果
1	0.9	0.0	0.346627	失败
4	0.0	0.0	0.311096	失败
9	5.2	1.0	0.563112	成功
14	97.3	0.1	1	成功
23	0.0	0.0	0.311096	失败
26	75.3	0.0	0.999997	成功
35	75.3	0.0	0.999997	成功

确定黄土残塬区的临界值时选用研究区 66 个灾点中检测结果为成功的 49 个点的当日和前 1 日的累计降雨量这两个因子作 x-y 散点图。(图 5.17)

得黄土残塬区的地质灾害发生的临界公式为:

$$D_{\text{天}} = -2.57S_{\text{天}} + 5.7 \quad (5.7)$$

式中:  $D_{\text{天}}$  为黄土残塬区地质灾害发生当日的降雨量;

$S_{\text{天}}$  为黄土残塬区地质灾害发生前一日降雨量。

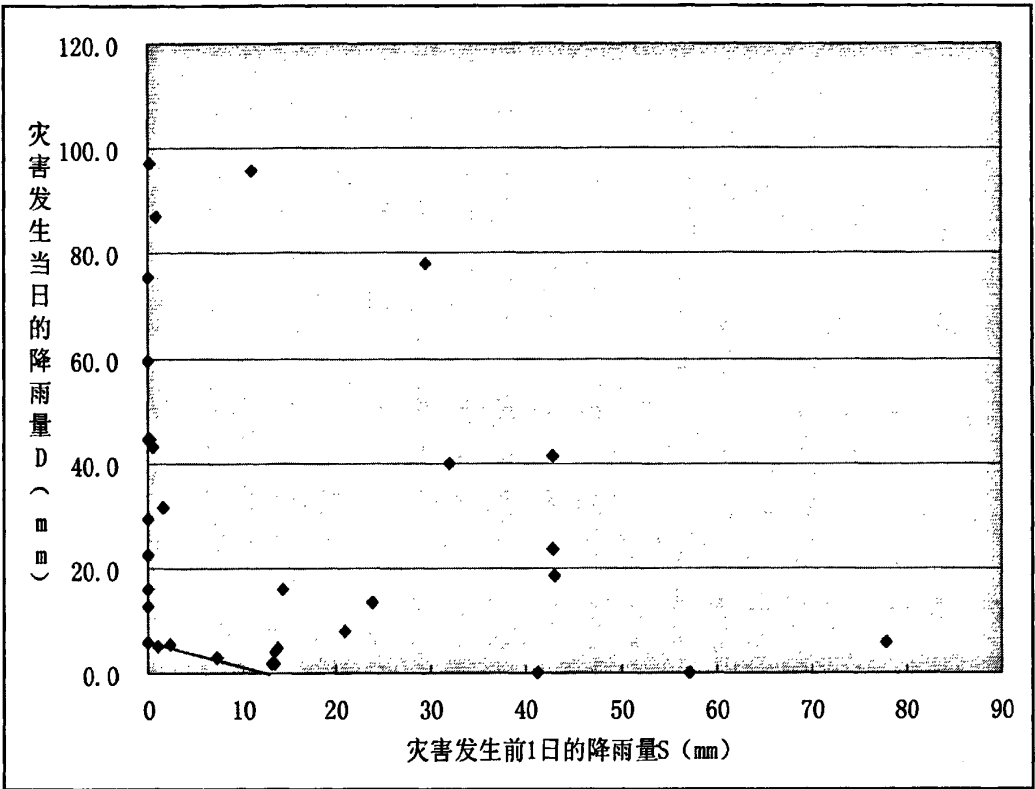


图 6.17 黄土残塬区地质灾害发生当日降雨量及前 1 日降雨量的 x-y 散点图

## 结论与展望

### 结论:

1、研究区地质灾害的空间分布与多年平均降雨量的空间分布有很好的相关性,与累计暴雨次数空间分布的相关性更高。地质灾害的月际分布和月降雨量分布有明显的正相关性,而与局地暴雨月频数的相关性相对较差。地质灾害的日频次分布和局地暴雨  $R_{1h} \geq 10\text{mm}$  的频次分布有很好的相关性,暴雨频次多发的时间段也是地质灾害多发的时间段,主要集中在凌晨 2-7 时和下午 14-16 时。

2、研究区地质灾害与前期累计降雨量有明显相关性。当前 15 日累计降雨量达到 20.1-30.0mm 时有 25%的崩塌发生,到达 30.1-40.0mm 时有 25%的滑坡发生。

3、研究区地质灾害与降雨特征有明显相关性。暴雨(日降雨量  $\geq 50\text{mm}$ )诱发的地质灾害主要出现在当日,大雨(日降雨量  $\geq 25\text{mm}$ )诱发的地质灾害主要出现在当日和次日,而小雨和中雨诱发的地质灾害在各日均有可能发生;单日强降雨诱发的地质灾害仅占地质灾害总数的 9.5%,一般都需要 3 天或多日降雨才能诱发;连阴雨诱发的崩塌 114 处,占崩塌总数的 80.7%,滑坡 69 处,占滑坡总数的 80.7%。

4、陕北黄土高原区在不同的地貌类型条件下地质灾害的发育程度不同,黄土台塬和基岩山地无地质灾害发生,黄土塬、黄土盖帽的基岩深谷、黄土覆盖的基岩山地和沙漠滩地区发生的地质灾害较少占所统计地质灾害的 9.1%,而黄土残塬、黄土梁和黄土峁区所发生的地质灾害占所统计地质灾害的 90.9%。在黄土梁、峁和残塬区,地质灾害与降雨的关系有所不同。通过建立三个不同地貌类型下地质灾害与降雨的二项 Logistic 回归模型公式,可知黄土梁区地质灾害和发生当日及前三日的累计降雨量的相关性较好,而黄土峁和残塬区地质灾害只和发生当日及前一日降雨量的相关性较好。

5、选用三种地貌类型的灾点用二项 Logistic 回归模型公式检测结果为成功的灾点的当日和前几日的累计降雨量这两个因子作 x-y 散点图。三种地貌类型下降雨临界公式分别为:

$$\text{黄土梁区} \quad D_{\text{梁}} = -0.328S_{\text{梁}} + 9.4$$

$$\text{黄土峁区} \quad D_{\text{峁}} = -3.25S_{\text{峁}} + 11.05$$

$$\text{黄土残塬区} \quad D_{\text{残}} = -2.57S_{\text{残}} + 5.7$$

### 展望:

本文从地质灾害与降雨的时空特征,与前期降雨情况以及所处的地貌类型三个方面

入手对陕北黄土高原区地质灾害和降雨的关系进行了研究,取得了一些成果,但仍存在一些问题需要进行进一步的研究和完善:

(1) 由于基础资料的缺乏,本文只研究了地质灾害与降雨的时空特征,与前期降雨情况以及所处的地貌类型之间的关系,却没有考虑降雨的入渗条件和机理,以及地质灾害的地下水类型。因此,还需要从降雨诱发滑坡的模式,降雨诱发滑坡的入渗模式以及降雨诱发滑坡的地下水结构类型等方面,对陕北黄土高原区地质灾害和降雨的关系进行进一步的研究。

(2) 在对 Logistic 回归模型采集样本数据集时,由于数据相对较少,致使回归方程与实际方程拟合精度不高。可通过扩大数据选取的时间段,或采用其他更有效的回归模型等方法弥补这一不足。

(3) 由于数据的不完整,特别是 90 年之前的数据较少,导致研究的是时间段过短。数据量不足。因该加强 90 年之前地质灾害资料的收集和整理。

## 参考文献

- [1] Varnes D.J. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice [M]. UNESCO, Paris, 1984.
- [2] 殷跃平. 中国地质灾害减灾战略初步研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(2):1-8.
- [3] 张春山, 张业成, 马寅生. 黄河上游地区崩塌、滑坡、泥石流地质灾害区域危险性评价[J]. 地质力学学报, 2003, 9(2):143-453.
- [4] Van Dijke J J, Van Westen C J. Rockfall hazard: Ageomorphological application of neighborhood analysis with ILWIS. ITC Journal, 1990. 1:40-44.
- [5] Ohlmacher G. C. , Davis J. C. .Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA.[J].Engineering Geolo, 2003, 69:3-4.
- [6] Gupta P, Anbalagan R. Slope stability of Theri Dam Reservoir Area, India, using landslide hazard zonation(LHZ)mapping. Quarterly Journal of Eng Geology, 1997. 31: 181-216.
- [7] Pachauri A K, Gupta P V, Chander R. Landslide zoning in a part of the Garhwal Himalayas. Environmental Geology, 1998. 36:3-4.
- [8] Uromeihy A, MahdaviFar M R. Reply to Discussion on “Landslide hazard zonation of the Khorshorstam area, Iran” by Uromeihy A, MahdaviFar M R. Bull Eng Geol Rnviron, 2001. 58:207-213.
- [9] Carrara A, Cardinali M, Guzzetti F. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. ITC Journal, 1992. 2:172-183.
- [10] 陈喜昌等. 长江三峡工程库岸类型与稳定性[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1993.
- [11] 刘汉超, 陈明东. 金沙江向家坝水电站库区环境地质评价研究[J]. 1993. 成都: 成都科技大学出版社.
- [12] 张业成, 张梁. 论地质灾害风险评价[J]. 地质灾害与环境保护, 1999, 7(3):1-6.
- [13] 范文等. 主成分分析法在地质灾害危险性综合评价中的应用[J]. 西安工程学院学报, 2001, 23(4):53-57.
- [14] 赵强, 倪万魁. 用信息论方法对铜川失去斜坡稳定性评价预测[J]. 西安地质学院院报, 1996, 18(2):64-66.

- [15]沈芳,黄润秋等. 区域地质环境评价与灾害预测的 GIS 技术[J].山地学报, 1999, 17(4):338-342.
- [16]阮沈勇,黄润秋.基于 GIS 的信息量法模型在地质灾害危险性区划中的应用[J].成都理工学院学报 2001, 28(1):89-92.
- [17]王轶、王慧玲. 地质灾害危险性评价与区划及 GIS 应用研究[J].勘察科学技术, 2004, (6):38-40.
- [18]李雪见,唐辉明.基于 GIS 的分组数据 Logistic 模型在斜坡稳定性评价中的应用[J].吉林大学学报, 2005, 35(3):361-365.
- [19]李军,周成虎.基于 GIS 栅格滑坡风险评价方法中格网大小选取分析[J].遥感学报, 2003, 7(2):86-92.
- [20]莫健. 地质灾害危险性评价研究综述[J]. 西部探矿工程,2005,17(10):220-223.
- [21]Zhang Maosheng, Liu Jie. Controlling factors of loess landslides in western China. *Environmental Earth Sciences*, 2009, doi:10.1007/s 12665-009-0149-7
- [22]张茂省,等. 延安宝塔区滑坡崩塌地质灾害. [M]. 北京:地质出版社, 2008: 43-54, 105- 108. Zhang Maosheng, et al. The landslide geohazards at Baota in Yan'an city. [M]. Beijing: The geological publishing house, 2008: 43- 54, 105- 108.
- [23]张茂省;唐亚明. 滑坡调查方法与实践. 地质通报, 2008, 27(8):1205-1216.Zhang Maosheng. Risk investigation method and practice of geohazards. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(8):1205-1216.
- [24]吴树仁. 突发滑坡预测评价概论. 地质通报, 2008, 27(11):1753-1763. Wu S R. Sudden geohazard prediction and evaluation: an overview. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(11):1753-1763.
- [25]Fell R., Corominas J., Bonnard Ch., Cascini L., Leroi E. & Savage W.Z. on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes. 2008a. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102: 85-98.
- [26]AGS(2007a). Landslide Risk Management Practice Note. Australian Geomechanics Society. In preparation.
- [27]匡乐红,徐林荣,刘宝琛.地质灾害危险性评价指标规范化方法研究[J].铁道科学与工程学报, 2007, 4(1):39-43.
- [28]Oldrich Hungr, Robin Fell, Ré jean Couture, et al. Landslide Risk Management. The International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver,Canada, 31

- May- 3 June, 2005.
- [29]胡永宏, 贺思辉.综合评价方法[M].北京: 科学出版社, 2000.
- [30]黄润秋, 许向宁, 唐川等.地质环境评价与地质灾害管理[M].北京: 科学出版社, 2008.
- [31]汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M].北京:科学出版社, 2006.
- [32]张茂省,薛富平,王晓勇. 陕西省山洪灾害防治区划[J]. 水土保持研究,2005,12(2): 163-165.
- [33]张茂省. 延安市宝塔区崩滑地质灾害发育特征与分布规律初探. 水文地质工程地质, 2006(6):72-79. Zhang Maosheng. A preliminary discussion of the occurrence of landslide in the Baota district of Yan'an City. Hydrogeology and engineering geology, 2006(6):72-79.
- [34]Schwab JW, Geerstema M. Terrain stability mapping on British Columbia forest lands: a historical perspective. In: Locat, J., D. Perret, D. Demers, and S. Leroueil (eds) 4th Canadian Conference on Geohazards: from cause to management. May 20–24, 2008. Presse de l'Universite Laval, Québec. pp. 477–484.
- [35]Fell, R., Ho, K.K.S., Lacasse, S. and Leroi, E.: A framework for landslide risk assessment and management [M]. In: Hungr, Fell,Couture & Eberhardt (eds.): Landslide risk management. p. 3–25. London: Taylor & Francis, 2005.
- [36]张茂省. 雷学武, 校培喜等. 遥感技术在黄土高原区滑坡详细调查中的应用. 西北地质, 2007, 40(3):92-97. Zhang Maosheng, Lei Xuewu, Xiao Peixi, et al. Application of Remote Sensing in detailed survey of geological hazards in loess plateau. Northwestern geology, 2007, 40(3):92-97.
- [37]唐亚明; 张茂省; 薛强等.陕西延安市虎头峁滑坡社会风险评价. 地质通报, 2008, 27(11):1782-1786. Tang Y M, Zhang M S, Xue Q. Social risk assessments of the Hutoumao landslide in Xi'an City, Shaanxi, China. Geological Bulletin of China, 2008, 27(11):1782-1786.
- [38]唐亚明. 基于可靠度的黄土斜坡稳定性分析. 地质通报, 2008, 27(8):1217-1222. Tang Y M. Loess slope stability analysis based on reliability. Geological Bulletin of China, 2008, 27(8):1217-1222.
- [39]王树丰. 基于滑坡风险管理的宝塔山景区景点价值核算.中国滑坡与防治学报. 2009, 20(2):28-30. Cost calculation about Baota Mountain senary spot based on

- slope risk management. The China journal of geological hazard and control, 2009, 20(2):28-30.
- [40]王哲, 易发成.我国地质灾害区划及其研究现状[J].中国矿业, 2006, 15(10): 47-50.
- [41]周启鸣, 刘学军.数字地形分析[M].北京:科学出版社, 2006.
- [42]王济川, 郭志刚.Logistic 回归模型-方法与应用[M].北京: 高等教育出版社, 2001.
- [43]杨小平.二分 Logistic 模型在分类预测中的应用分析[J].四川师范大学学报, 2009,32(3):393-395.
- [44]李红霞, 杨志, 高宇等.基于 GIS 的黄土滑坡危险性评价指标体系的建立[J].宁夏工程技术, 2007, 6(1):70-72.
- [45]G.C.Ohlmacher, J.C.Davis. Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas,USA.[J]. Engineering Geology,2003,69 (3/4).
- [46]柳源.中国地质灾害(以崩、滑、流为主)危险性分析与区划[J].中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(1):95-99.
- [47]S.Lee, K.Min. Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea[J]. Environmental Geology,2001,40:1095-1113.
- [48]姚明波, 孔志刚, 戴家胜.GIS 技术在地质灾害研究中的应用.中国水运, 2006, 4(12):30-32.
- [49]向喜琼, 黄润秋, 许强.地质灾害危险性评价系统的实现.地理学与国土研究, 2002, 18(3):76-78.
- [50]罗元华,张梁,张业成. 地质灾害风险评估方法[M]. 北京:地质出版社,1998.
- [51]张茂省,雷学武,校培喜,等. 遥感技术在黄土高原区地质灾害详细调查中的应用[J].西北地质,2007,40(3):92-97.
- [52]楚敬龙, 杜加强, 滕彦国等.基于 GIS 的重庆市万州区滑坡灾害危险性评价.地质通报, 2008, 27(11):1875-1881.
- [53]G.S.Mehrotra, S.Sarkar, R.Dharmaraju. Landslide hazard assessment in Rishikesh-Tehri area, Garhwal Himalaya[C]. Ptoc.6th.Int.Symp. Landslides, Christchurch, New Zealand, 1992,2.
- [54]刘益. 昆明市地质灾害危险性区划研究:[D].昆明:昆明理工大学,2006.
- 朱良峰,吴信才,殷坤龙等. 基于信息量模型的中国滑坡灾害风险区划研究[J]. 地球科学与环境学报,2004,26(3):52-56.



**在读硕士期间参加的科研项目：**

1. 国土资源大调查项目“延安市子长县地质灾害详细调查项目”，2007.7-2007.8；
2. 国土资源大调查项目“延安宝塔区地质灾害监测预警项目示范”，2008.6-2009.4；

**在读硕士期间参加的生产项目：**

1. “神华-陶氏榆林煤化工项目化工厂地质灾害评估”，2009.5-2009.10

## 致谢

本文是在张茂省研究员悉心指导下完成的，从论文选题，资料选取和整理，到最终成稿，始终有着张老师的引导和帮助。三年的硕士研究生期间，张老师在学业上给予了耐心指导，在工作生活中给予了诸多关怀和照顾。张茂省导师敏捷的思维模式、务实的工作作风、广博深厚的专业知识使我受益良多。在此，谨向张老师致以崇高的敬意和衷心的感谢！

2007 开始，有幸参加了西安地质调查中心水文地质环境地质处地质灾害项目诸个项目，从而有了一个学习专业知识和体验工作生活的平台。在此特别感谢项目负责人唐亚明工程师、魏兴丽工程师、黄玉华工程师在项目工作中给予的指导和关心；感谢师兄薛强对我论文上的帮助；感谢李清工程师、武文英工程师和裴赢工程师对我专业技能的指导。

感谢所在项目组成员对我的帮助和指导，你们不仅使我感受到了项目组团队的力量，也使我感受到工作的充实和愉悦！感谢张睿、陈社斌、孙巧银等同事，每当回想起和你们一起工作生活的日子，想起你们积极向上的工作态度，我心里总是充满温馨，倍感鼓舞。

感谢我的同门苗雨、韩乾隆、李夏萍，感谢你们对我的照顾和帮助，和你们一起工作学习的这段日子必将成为我人生的宝贵财富！

感谢我的学友何小锋、马宁、宋弢陪伴我走过这美好快乐的三年研究生时光，感谢舍友王明轩、于品登对我生活上的帮助！

感谢关怀过我学业的长安大学地测院系的领导和老师们！

衷心感谢在百忙之中评审论文并提出宝贵意见的各位专家和教授！

最后我要特别感谢我的父母对我多年来无私的付出和支持！