摘　要

泥石流作为一种自然灾害现象已在世界范围内引起广泛关注。由于其具有突发性强，发生速度快，破坏力大等特点，常对活动区内生态环境、生产生活及人类生命财产安全造成巨大损失。矿山是泥石流易发、频发地区，在资源开采过程中，常由于弃渣堆置不当及开采方式的不合理导致泥石流灾害的发生。

灵宝市小秦岭金矿区矿山环境地质问题十分突出，集中表现在资源毁损、地质灾害和环境污染等。在诸多环境地质问题中，尤其以矿渣型泥石流最为突出，采矿废渣堆放混乱，挤占、堵塞沟道严重，加重了泥石流的形成及危害。本文以枣香峪、大湖峪、文峪及其 22 条主要支沟为研究对象，力求通过研究区矿渣型泥石流危险性评价研究，为当地政府的宏观决策提供依据，达到保障下游居民生命财产安全及矿山生产正常运行的目的。

首先，论文以野外调查资料为基础，系统分析了研究区内存在的主要环境地质问题及其潜在危害。

其次，结合前人对矿渣型泥石流的研究，根据研究区实际情况，在假定 22 条支沟降雨量一样的条件下，选取了有效渣量、纵坡降比、渣堆补给长度与沟长比、河流弯曲度、河道堵塞系数和汇水面积六个评价因子，采用层次分析法确定了各评价因子的权重。

最后，运用模糊综合评判法对 22 条支沟泥石流危险度进行了一级模糊评判；采用目标分析法，构建了矿渣型泥石流危险性评价二级层次模型，并进行了二级模糊综合评判。从两级模糊评判结果得出如下结论：22 条沟谷的一级模糊评判与二级模糊评判结果趋于一致，且与野外实地调查分析结果相吻合。其中，5 条沟谷的泥石流危险度为Ⅳ级，即高度危险，依危险度大小排序分别为东槽桐沟、西槽桐沟、寺范沟、大湖峪西峪主峪道和槽桐沟；危险度为Ⅲ级的有 9 条沟谷；危险度为Ⅱ级的有 1 条沟谷；其余 7 条沟谷的危险度为Ⅰ级。

本文构建的评判模型及评价标准，不仅对研究区泥石流危险性进行了较为准确的评判，同时也为其它相似类型泥石流进行该方面的研究提供了参考，具有一定的借鉴意义。

关键词：矿渣型泥石流；危险性评价；层次分析；模糊综合评判；小秦岭金矿区

Abstract

Debris flow has been paid close attention as one kind of hazards around the world because it often causes strong damage to ecological environment, and human's production, property and life, for its fast velocity, sudden breakout, huge damage. Debris flow also occurs in mining areas due to unreasonable emission in the process of mining.

The mining environmental geological problems are very prominent in Xiao Qinling gold mining areas of Lingbao County, including resources destroying, geological hazards, environmental pollution and so on. Among those mining environmental geological problems, the slag mudslide is the most typical one. The mining residues randomly piles up, seriously occupies and jams trench, and often have aggravated the formation subsequent of debris flow. Taking Zao Xiangyu, Da Huyu, Wenyu and their 22 main ditches as the research objects, this thesis intends to study the hazard assessment, provides the basis for local government's macroscopic decision-making, so as to protect the safety of residents and the normal operating of mine production.

Firstly, based on the field survey data, the thesis systematic analyzed the major environmental problems and potential geological hazards of the research area.

Then, in view of debris flow's particularity in the research area, and by assuming the rainfall conditions that are same in the research area, six assessment factors are selected, including the effective volume of mining dregs, longitudinal gradient ratio, ratio of supply length of dregs pile to the ditch length, curvature degree of river, jammed coefficient of river course and watershed area. The factor weights are calculated by the analytical hierarchy process.

Lastly, the hazard degree of debris flow in the research area is judged by the fuzzy integrated evaluation. The results of one-step and two-steps fuzzy integrated evaluation are coincident and accord well with the result of on-the-spot investigation. It is shows that the hazard degrees of 5 ditches are grade Ⅳ, that is highly dangerous, the hazard degrees of 9 ditches are grade Ⅲ, the hazard degree of 1 ditch is grade Ⅱ, and the hazard degrees of 7 ditches are grade Ⅰ .Hazard assessment model and standard of debris flow used in Xiao Qinling gold mine area are successful and significant for further study and other similar hazard assessment of mine debris flow.

Key words: slag mudslide; hazard assessment; analytic hierarchy process; fuzzy integrated evaluation; Xiao Qinling gold mining area

论文独创性声明

本人声明：本人所呈交的学位论文是在导师的指导下,独立进行研究工作所取得的成果。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：刘向丹　　2008 年 6 月 5 日

论文知识产权权属声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属学校。学校享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为长安大学。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

论文作者签名：刘向丹　　2008 年 6 月 5 日

导 师 签 名：[illegible]　　2008年 6 月 5 日

论文资助项目声明

本人郑重声明：本论文研究经费及所获数据均来自于中国地质调查局西安地质调查中心承担的《小秦岭金矿带环境地质问题调查与评价》和《陕西潼关金矿区环境地质问题专题调查》项目。由于本文的矿渣型泥石流危险性评价结果会造成一定的社会影响，因而，作者要求在此后的两年时间内保密，未经项目资助单位许可，任何人不得以任何形式引用和公开有关数据和结论，否则由此引起的一切后果自负，同时保留追究其法律责任的权利。

论文作者签名：刘海涛　　2008 年 6 月 5 日

第一章 绪 论

1.1 选题背景和研究意义

1.1.1 选题背景

泥石流是山区特有的一种自然地质现象。它是由于降水（暴雨、冰川、积雪融化水）产生在沟谷或山坡上的一种挟带大量泥砂、石块和巨砾等固体物质的特殊洪流。其往往表现为突发性强，发生速度快，破坏力大等特点，给人类生命财产安全造成很大威胁[1]。

根据泥石流学科的分类体系，矿渣型泥石流属于人为泥石流的研究内容，是人为泥石流的典型代表。矿渣型泥石流地质灾害及其隐患的特殊性在于它的松散固体物质来源于矿业活动形成的弃土、石渣，区别于残坡积或崩塌、滑坡等自然因素或其它人类工程活动形成的泥石流物源[2,3]。

灵宝市是我国第二大产金县（市），金矿床主要分布在小秦岭一带，以石英脉型金矿类型为主，大量开采始于80年代。目前，区内有黄金企业数十家，矿山坑道数千个。由于开采初期采矿政策及采矿管理薄弱，遗留大量采矿历史问题，矿山环境地质问题十分突出，集中表现在资源毁损、地质灾害及其隐患、环境污染等，在诸多环境地质问题中，尤其是采矿废渣堆放混乱，挤占、堵塞沟道严重，加重了泥石流的形成及危害。据有关资料，灵宝市小秦岭金矿区共有泥石流隐患沟22条，成为泥石流的高发区，其危害严重。

据调查，1996年8月、1998年7月，1998年9月大西峪、枣香峪、灵宝鑫鑫金矿老虎沟，因暴雨引发大型泥石流灾害，直接经济损失达30余万元。目前金矿区内大西峪、枣香峪、大湖峪、杨砦峪等9条沟谷存在泥石流隐患。流域内集中分布30家矿山企业，沟内坑口密布，废渣、尾矿堆积量巨大，固体废弃物排放量最大的枣香峪、大湖峪达240多万m^3，最小的苍竹峪的排放量也有13万m^3。绝大多数采矿废渣、尾矿库依沟谷筑坝而建，或沿沟谷河道边、黄土冲沟砌坝而成，部分已超期服役；除少数矿山企业采取挡护措施外，其它均无任何防护措施。这些采矿废渣、尾矿渣长期大量堆积于山坡、河道边、沟谷底中，堵塞河道，尤其是沟谷切割深、地形纵降比大的地带，遇暴雨、洪水极易形成泥石流。由于受地质条件限制，山区城镇和村寨多建在沟谷内或沟口，城镇人口居住集中，一旦受到泥石流冲击将造成人员伤亡和巨大财产损失，此类灾害已成为制约本市社会稳定和经济持续发展的主要因素。

1.1.2 研究意义

矿渣型泥石流是矿山开发建设过程中所产生的一个突出的环境问题，经常由于泥石流的发生及其危害而影响矿山的建设和资源的开采，因此，矿渣型泥石流的系统研究对矿山的建设、资源的可持续开采、矿山的环境保护等都具有重要的理论意义和实用价值[4]。

（1）拓宽了泥石流的研究领域

从学科体系来看，矿渣型泥石流属于泥石流研究领域，但由于其形成的特殊性，赋予了许多新的研究内容，除继承传统泥石流的研究内容外，更为重要的是增加了人为活动的行为科学内容和生态环境保护的内容，横向学科交叉广泛，工程技术涉及较多，与生产建设结合紧密，深刻体现了应用泥石流研究的独特性。目前，我国关于矿渣型泥石流的系统研究还处于初始阶段，研究成果较少，尤其是矿渣型泥石流发生机理的研究几乎是空白，在泥石流研究领域尚属薄弱环节，因此，矿渣型泥石流的系统研究，拓宽了泥石流的研究领域，加强了学科的横向联系，体现了泥石流研究的应用性，使泥石流研究进入一个新的研究领域。

（2）有利于矿山建设和资源的可持续开采

矿产资源是国民经济建设的的重要支柱，矿山是经济发展的原材料基地。在资源开采和矿山建设过程中所产生的环境问题往往会造成深重的灾难。矿渣型泥石流就是一个典型的实例。

在小秦岭金矿区，由于采矿弃土、石渣堆放造成的渣山滑塌、矿渣型泥石流等灾害，严重阻挠了资源的可持续开采，有许多废弃坑道残留有未开采完的矿产资源，造成了资源的严重浪费；采矿活动造成废渣、尾矿等的大量堆积，使矿区环境严重恶化，不仅使矿产资源的开采受到制约，更为严重的是导致其他资源（如土地资源）的占用。所以矿渣型泥石流的研究对矿产资源的持续开发利用是有现实意义的。

（3）有利于矿区生态环境建设

泥石流本身就是严重的环境问题。矿产资源多分布在山高坡陡、生态环境脆弱的山区，由于资源开发所诱发的矿渣型泥石流对环境的破坏作用十分严重，更加重了生态环境的脆弱性。所以说矿渣型泥石流的研究，在矿山生态环境保护中所起的作用非常之大。矿渣型泥石流一方面对人们的生产、生活、交通造成了直接的危害；另一方面，破坏了原有地形、植被，使土壤侵蚀面扩大，水土流失加重。环境一旦破坏，在短期内很难恢复。

由于采矿活动与环境治理的不同步进行所导致的矿渣型泥石流灾害，给灵宝市小秦岭金矿区建设和当地人民的生活造成了严重的损失，阻碍了矿区的进一步扩大及当地生态环境的改善，已到了非解决不可的地步。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 国内外泥石流研究现状

（1）国内泥石流研究现状

我国泥石流研究工作，始于新中国成立初，从无到有，经历了4个发展阶段。

20世纪50年代，我国泥石流的起步时期。主要以线路或区域考察为主，在川滇山区、青藏高原以及西北和中南等地，建立了一些泥石流定位观测站及防治基地，初步查明了我国泥石流多发区的地理位置。

20世纪60年代，是我国泥石流研究部门迅速扩大时期。这一时期的泥石流研究成果，主要是综合性的科学考察与专题性的实验研究相结合，研究范围由小流域至省（区）泥石流研究，在定性研究方面成果显著，定性研究初具规模。

20世纪70年代，我国泥石流研究工作转入以探索泥石流内部规律为主的定点观测试验与各类泥石流防治工程相结合的阶段。根据泥石流形成原因，进行了泥石流分类、分区研究工作，并结合大规模的矿山建设，开展了以矿山弃渣为主所引起的矿山泥石流研究。70年代后期，泥石流研究正式纳入了我国科学技术发展规划，并确定成都地理研究所以泥石流研究为其主攻方向，加快了我国泥石流研究工作进展。

20世纪80年代以来，我国泥石流研究工作进入全新阶段。以泥石流形成机理、动态过程为研究重点，预测预报为研究目的，开展了多学科、多方位、多手段的观测及模型实验研究。目前，我国泥石流研究成果主要有如下几个方面：

1）区域泥石流研究：我国泥石流研究在大量区域调查工作基础上，基本掌握了我国泥石流的分布规律，对一些重点地区和典型泥石流沟做过较为深入的研究。

2）泥石流分类研究：我国许多泥石流工作者对分类做了大量工作，提出了各种分类指标[5]，其中以成因分类、沟谷形态分类、物质组成分、类流体性质分类等分类指标较为常用，此外，还有用上述某几种分类指标相组合，把泥石流分成类，亚类和型的。

3）泥石流形成的研究：这方面的研究工作以点面相结合为基础，通过对泥石流三个基本形成条件（即土体，水体和地形）的分析，提出了天气形势、暴雨强度、前期降雨、滑坡活动、土体含水等因素与泥石流暴发时间、规模大小、流体性质之间的关系，

建立了部分相关公式[6]。此外，还研究了人类活动与泥石流发生、发展的关系[7,8]，分析了地震与泥石流形成的关系[9]，提出地震区泥石流主要特点和预测、预防地震泥石流的定性指标及具体措施。对泥石流的形成过程，在某些点做了较为细致的观测，将泥石流形成过程分为两类，即土力类和水力类（重力类和侵蚀类），前者又可分为滑坡型和崩塌型；后者可分为沟床型、沟谷型、溃决型。

4）泥石流体性质研究：近几年来，利用胶体化学、土壤电化学、土力学、浆体管路输送和钻井泥浆方面的理论，对泥石流体性质进行了探索性的研究，取得的主要进展有[10,11]：根据泥石流颗粒的组成形式，提出了自由孔隙比的概念，并以此为指标，划出了各类性质不同的泥石流；分析了泥石流体中盐基离子的种类和含量对泥石流性质的影响，揭示了泥石流体部分物化性质；探讨了泥石流浆体各类结构的形成机理、主要类型以及各类结构与泥石流体性质的关系，提出了鉴别各类各类结构的定量指标和判别式，探索了泥石流体的内在规律；把泥石流体视为介于土体与水体之间的特殊流体，并根据实测数据，确定泥石流浆体（固体颗粒粒径小于 0.2 毫米）为具有屈服值的幂律体，其中大多数为宾汉体；根据流体的的流变性，提出了泥石流的上、下界限值，引进了各种流变方程。对于泥石流流态的认识尚未统一，有的根据泥石流不同阶段的运动特征来分析流态特征，并将其分为稀性连续泥石流和阵性粘性泥石流两类，也有根据不同条件下的泥石流运动状态把泥石流流态分为滑动、蠕动流、扰动流和紊动流四类。

5）泥石流动力学的研究：这方面主要展开有泥石流阻力规律的研究和流速的研究[12,13]。根据观测资料，对泥石流阻力和流速作了分析、计算，并编制了我国粘性泥石流糙率表，提出了稀性泥石流在不同底床条件下的 N 值计算公式。目前，泥石流计算公式已有 20 个之多，其中大部分系经验公式。此外，在泥石流冲击力方面，进行了一定的实验和观测研究[14-17]，并建立了计算公式。

6）泥石流综合治理的研究：某些地区的泥石流综合治理经受住了长期的实践检验。如四川的黑沙河、喜德东沟和汉源狮子沟，云南东川大桥河和梁河垒杏山等泥石流沟，采取工程措施与生物措施两者相结合的方式，上中下游全面规划，山水林田综合治理，基本上控制了泥石流活动。铁路、公路和厂矿等生产部门也为泥石流治理积累了丰富的经验。

7）模型试验的应用研究：1966 年结合成昆铁路方案比较，先后进行了羲农河和黑沙河两个泥石流病害工点排导工程的模型试验；1976 年进行了三滩沟沟道整治模型试验。近年来，许多泥石流工作者还进行各种模型试验[18-22]和野外人工泥石流试验，这既

积累了分析数据，为开展大型模型试验和人工泥石流试验探索了经验。

我国泥石流的研究从深度和广度来讲算是比较先进的，但是在理论上还没有重大的突破。还没有建立适用于泥石流地区工程设计的精确计算公式和统一的规范。在生物治理方面也只有数个点的经验，尚未系统化。在矿渣型泥石流研究方面还处于起步阶段，研究成果较少，尤其是矿渣型泥石流发生机理的研究几乎是空白。

（2）国外泥石流研究现状

前苏联、日本、奥地利、美国、英国、法国、德国、前南斯拉夫、罗马尼亚、印度尼西亚、加拿大、挪威、澳大利亚和新西兰等对泥石流都进行了不同程度的研究。其中，前苏联在20世纪80年代处于领先地位，前苏联领土15%属于泥石流区，约有7条泥石流沟[23,24]。前苏联对泥石流的研究时间较长，内容广泛，方法较多，程度较深，系统较完整，情报传递较快。

日本占全国总面积三分之二的山区几乎都有泥石流现象，泥石流沟谷数为62272条，有102万户人家居住在泥石流危险区[25]。1966年日本开始进行泥石流观测和定量研究。他们对泥石流遥感装置的研制和泥石流动力学研究有独到之处。近来，泥石流模型试验研究以及泥石流防治工程建筑物新型结构的进展很快。日本今后的泥石流研究方向是：积累泥石流暴发实例，研究泥石流特性，进一步弄清泥石流形成、运动、堆积机理，实测泥石流危险地区土体的外力变化及土体的动态变化，继续开展泥石流模型试验研究，进一步拟定和完善泥石流防治方法。深入开展泥石流灾害防报和泥石流暴发危险度的研究[26]。

在阿尔卑斯山区，泥石流研究最活跃的是奥地利，奥地利三分之二的国土为山地，差不多均有泥石流分布，全国约有4200条泥石流沟[27]。蒂罗尔省是奥地利最著名的泥石流地区，该省在面积12650km^{2}内发育有627条泥石流沟。当地自1884年以来，采取了系统的泥石流防治措施，至今已整治有605条泥石流沟，但在19世纪70年代，奥地利就颁发了森林法，并建立了泥石流防治部门，一直延续至今。奥地利拥有37个泥石流防治部门，当今奥地利学者研究了泥石流泥沙运动理论，泥石流预报和泥石流防治方法，特别是工程建筑物结构和森林土壤改良措施等。

美国泥石流研究的内容有：泥石流形成和运动过程，侵蚀和输沙能力、流态、海底（水下）泥石流，古泥石流堆积物、泥石流预报和泥石流整治等[28]。

1.2.2 国内外泥石流危险性评价研究现状

（1）国内泥石流危险性评价研究现状[36]

我国开展滑坡泥石流危险度评价研究起步较晚但已取得了显著的成果。其中最早的相关研究见于 1986 年谭炳炎的泥石流严重程度的综合评判，其研究主要是从定性角度对泥石流的危险性做出判别，之后其完成的泥石流沟的判别方法和数量化综合评判的科研成果在铁路部门得到推广和应用，从而为国内今后的泥石流危险性研究指明了方向。

1987 年罗云介绍了国外安全科学中对人类劳动环境的危险性评价方法，该方法对泥石流危险度的研究有很大的借鉴意义，对泥石流危险度研究产生了较大影响。

1988 年刘希林所著的“泥石流危险度判定的研究”一文被视为泥石流危险度研究的开始，他将定性分析与定量分析有效的结合起来，首次提出了多因子综合评判的模型，并在以后的研究中不断深入和完善，越来越符合中国山区泥石流的特点，大大推进了我国泥石流危险性研究。

随着各种数学理论的成熟，许多研究学者开始注重运用数学方法来解决泥石流危险性评价的问题，研究成果大量涌现，其中代表性的有模糊数学方法的应用、灰色关联分析等，从而使泥石流危险性研究有了新的进展并逐渐趋于成熟。同时计算机技术不断发展，GIS 技术被越来越多的运用到泥石流危险性评价工作中，在泥石流专家和 GIS 专家的共同努力下，泥石流危险性评价方法得到不断的改进，与计算机技术结合得也越来越紧密。

纵观我国泥石流危险性评价的发展历史， 20 世纪 80 年代以前，研究主要局限于对灾害的定点调查和发展趋势预测，工作主要依托于铁路、公路和水利水电工程建设展开，并与水文地质、工程地质勘查和面上调查工作同时开展。研究成果主要是典型灾害的定性描述，研究处于萌芽阶段。80 年代以后，随着世界危险性评价研究的不断创新发展，我国泥石流危险性研究开始突破传统研究模式，研究理论不断提高，研究内容不断丰富，特别是 90 年代以来，危险性评价开始趋于成熟，各种研究方法日益完善，计算机技术渐渐应用于研究工作中。危险性评价方法也由传统的定性描述和不完全统计分析发展到半定量评价或定量评价，评价内容也日趋完善和合理，评价的科学性日益增强。从另一个角度来看，可以将泥石流危险性评价分为以下三类：第一类是泥石流危险性评价方法的理论研究和探讨；第二类是泥石流危险性评价方法的应用和实践；第三类是泥石流危险性评价与其它学科或新技术、新方法的交叉研究。

与国外同期研究水平相比，我国泥石流危险性评价研究尚存在很多不足之处：技术

手段落后，许多评价与分区图采用手工编制，效率低且不便于储存、查询和数据更新，虽然 RS 和 GIS 方法已用于危险性评价工作中，但还不是主流；评价精度低，评价单元多以县或更大区域为单位，影响预测效果；评价多以定性和半定量为主，评价层次不明晰，评估效果不能令人满意，在减灾决策中的作用尚未充分发挥。

（2）国外泥石流危险性评价研究现状

国际上对泥石流危险性评价非常重视，有关危险度的研究也相对较早[29]。

危险性评价是目前国内外灾害科学研究的热点之一，也是灾害预测预报和减灾防灾工作中的重要内容，现已成为国际性研究项目。滑坡泥石流灾害较严重的发达国家非常重视滑坡泥石流的基础性研究。

应联合国成员国的要求，1976 年联合国决定由国际工程地质联合会执行滑坡泥石流危险度评价的基础研究。该项目由美国联邦地质调查局 David J. Varnes 博士牵头组织实施，1984 年完成的研究报告系统总结了近年来世界各国的研究成果，完成了滑坡泥石流调查、样本数据分析、评价方法和检验分析的研究。这些成果在第三届国际地貌学大会和第 28 届国际地质学大会上都作为特邀报告交流，为世界各国开展滑坡泥石流灾害评价提供了一种规范性的技术方法[30]。

1977 年日本足立胜治等开展了泥石流发生危险度的判定研究，主要从地貌条件、泥石流形态和降雨三方面判定泥石流发生率，为以后的泥石流危险度研究开辟了一条道路。

1980 年瑞典 Eldeen 用危险区图研究了滑坡泥石流灾害的危险度，第一个将洪水危险度的研究模式引入了泥石流危险度研究中[31]。

1981 年美国 Hollingsworth 和 Kovacs 采用打分方法构建滑坡泥石流危险度评价的基本框架，采用因子叠加法实现了滑坡危险度的评估[32]，该方法为以后的滑坡泥石流危险性研究指明了方向，现在很多的研究方法都是基于因子叠加的原理而展开的。

1984 年伦敦大学皇家学院 Hansen 教授总结出了滑坡泥石流危险性评价的四点重要内容[33]，为滑坡泥石流危险性研究奠定了理论基础，对以后的危险性评价工作产生了深远的影响。

1977～1988 年，美国对加利福尼亚 Saratoga 地区、Switzerlard 地区及其北部的山林伐木规划区的滑坡泥石流开展了危险性编目工作，并对加利福尼亚地区的暴雨滑坡泥石流进行了遥感危险度评价工作，第一次在大范围内展开了滑坡泥石流危险性的评价工作，为今后的危险性评价工作提供了范例[34]。

1988 年日本高桥保等开展了扇形地上泥石流危险度的评价研究，主要探讨建筑物的损害与泥石流堆积厚度的关系；1990 年日本久保田哲也等再次开展了泥石流发生危险度的判定研究，主要从短历时降雨的有效降雨量和降雨强度来研究泥石流发生的可能性，日本学者的研究从不同角度入手，大大丰富了泥石流危险性研究的内容。

进入 90 年代以来，GIS 与 RS 技术的发展为滑坡泥石流危险性评价的空间分析提供了强有力的工具，使危险性评价的空间数据集成化更简便、分析速度更快，精度更高，从而大大促进了该领域快速发展。相关的研究大量涌现，中代表性的工作是意大利学者 Carrara 系统总结了近年来滑坡泥石流灾害制图的技术方法和存在的问题[35]。然而目前滑坡泥石流危险性评价工作的关键在于 GIS 专家、数学专家和地学工作者合作，针对不同的评估目的、不同的区域尺度，对相关空间数据进行处理和分析，开发出可靠性强的评价模型。

1.3 研究内容及技术路线

本文根据当前国内外在泥石流危险性评价领域的研究现状，以中国地质调查局西安地质调查中心“小秦岭金矿带矿山环境地质问题调查与评价”项目为依托，在对灵宝市小秦岭金矿区枣香峪、大湖峪、文峪及其 22 条主要支沟调查和分析的基础上，假定 22 条支沟降雨量一样，选取对研究区矿渣型泥石流危险性影响较大的因素作为评价因子，建立泥石流危险性评价模型；运用层次分析法确定各评价因子权重；结合层次分析法和模糊数学理论，对 22 条支沟泥石流危险性进行一级模糊评判；采用目标分析法，构建研究区矿渣型泥石流危险性评价二级层次模型，并进行二级模糊综合评判；最后，根据两级模糊评判结果，进行对比分析。

具体技术路线见图 1.1。

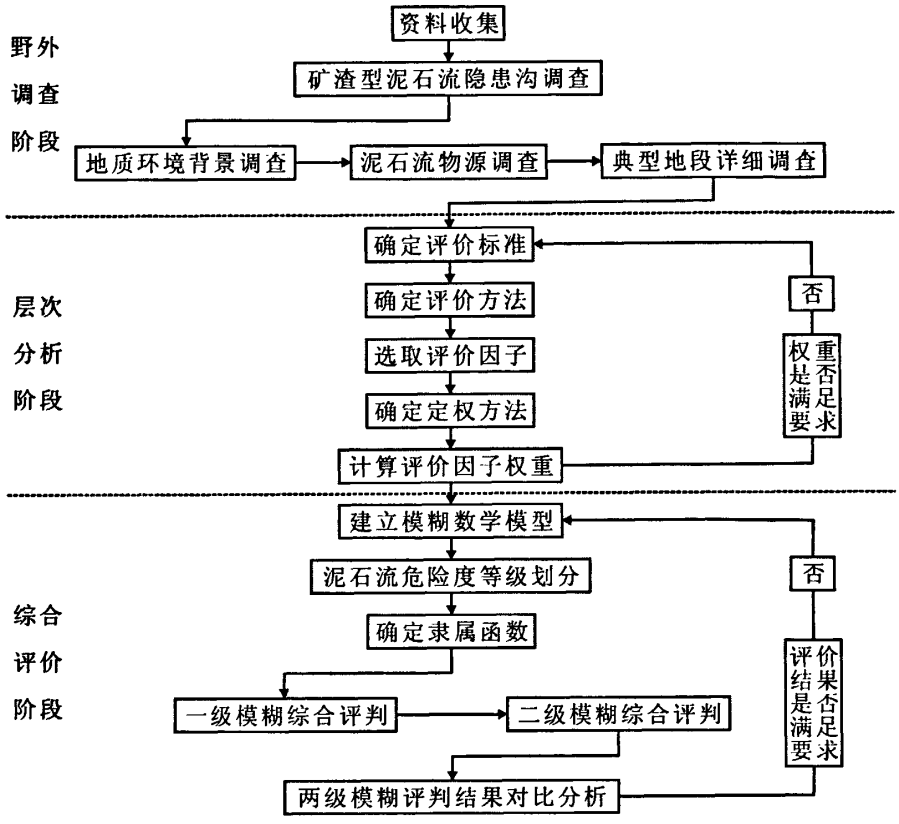


图 1.1　矿渣型泥石流危险性评价技术路线图

第二章　研究区地质环境条件

2.1 地理位置

研究区地处河南省西部灵宝市，位居豫、晋、陕三省交界的“黄河金三角地区”，北临黄河、南依小秦岭和崤山山脉，地理坐标：东经 110°47′30″～110°15′00″，北纬 34°35′00″～34°18′00″。陇海铁路、310 国道、连—霍高速公路横穿研究区北部，各峪道均有公路相通，交通便捷（图 2.1）。

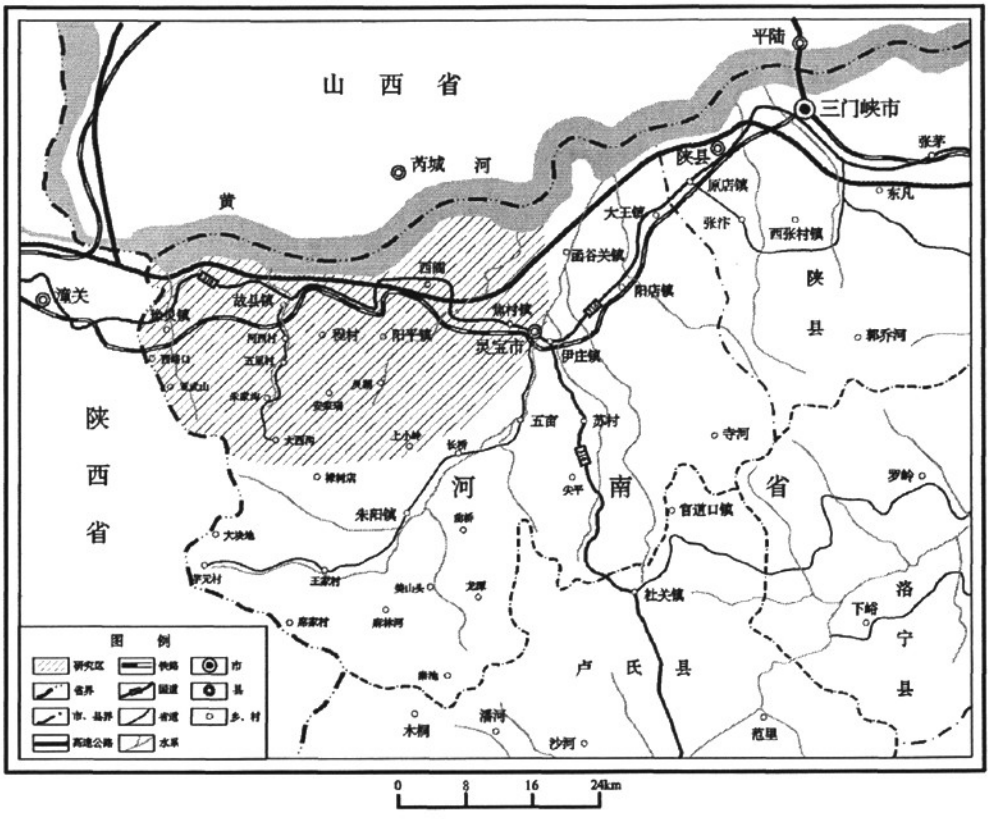


图 2.1　研究区交通位置图

2.2 气象水文

2.2.1 气象

研究区属大陆性季风型半干旱季风气候，四季多为东南风。冬季寒冷雨雪少，春季干旱多风，夏季温热多暴雨，秋季晴和日照长。年平均气温 13.8℃，极端最高气温 42.7℃，极端最低气温－16.2℃。无霜期年平均 215 天，最短无霜期 199 天。多年平均降水量 645.8mm。最大降水量 984.7mm（1958 年），年最小降水量为 318.7mm（1997 年），日最大降雨量为 193.3mm。最大 24 小时降雨量 110.2mm（1960 年 7 月 22 日），而 12 月至次年 3 月，4 个月降水量仅占 11.5%，甚至出现过几个月不下雨的现象。冬季（12、1、

2 月）干旱少雨，降雨 21.6～25.0mm；夏季（7、8、9 月）湿润多雨，降雨 225.6～390.8mm；5～10 月相对多雨，3、11 月相对少雨，4 月相对稳定（图 2.2）。多年平均蒸发量 1616.4mm，年最大蒸发量 1972.2mm，年最小蒸发量 1221.0mm，月内最大蒸发量 327mm。多年平均绝对湿度 1.7g/m^3，相对湿度 65%。

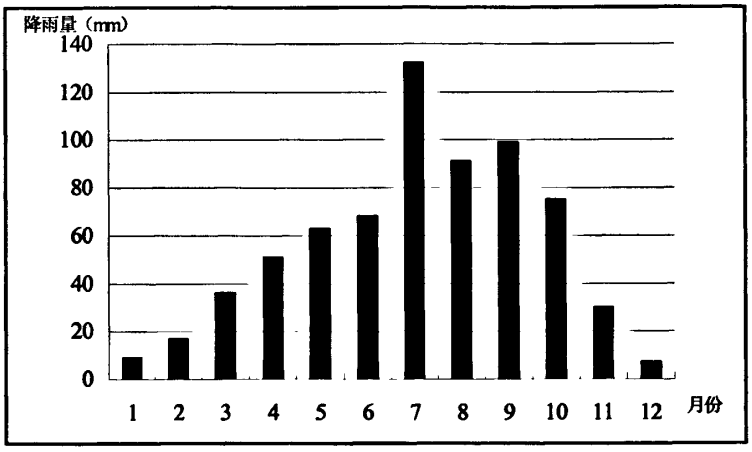


图 2.2　灵宝市多年月平均降水量柱状图

2.2.2 水文

研究区河流均属黄河水系，自西向东依次为双桥河、故县河、十二里河、阳平河、沙河和西涧河（表 2.1）。

表 2.1　研究区主要黄河支流一览表

河流名称	汇水面积（km^2）	河流长度（km）	年径流量（万 m^3）	河流宽度（m）	流量（枯、平水期 m^3/s）	主沟纵比降（‰）
双桥河	171.64	19.50	3767	90～200	0.5	1/18
故县河	195	26	2401	40	0.3	1/18
十二里河	50	18	544	35～50	0.05	1/14
阳平河	172	27	3583	30～100	0.3	1/23
沙河	264	45	4267	40～120	0.3	1/34
西涧河	1276	88	31040	120～600	3.2	1/89

区内各峪道河流均以小秦岭山脉的中线为分水岭，向北直接汇入黄河，由于均处于山区上游，多数为季节性河流，旱季流量很小，甚至干枯，雨季水量变化很大，暴雨洪水来势汹涌，去势也很快。

黄河是流经研究区的一级河流，在灵宝市流经长度 70 余 km，河谷宽平均 1.5～6.3km，河道纵坡降比为 20‰～25‰，平均流速 4.24m/s，最大流速 5.62m/s，最大流量 2890m^3/s（2001 年）。

2.3 地形地貌

灵宝市位于豫西秦岭山系的东端，南为小秦岭和崤山山脉，北为黄河及河谷平原，

中部为黄土丘陵，地势南高北低，地面高程从北边的黄河向南自 308m 逐渐升高到2413.8m，相对高差 2105.5m，平均自然比降 34.4‰，区内共有大小溪流 6300 多条，可谓山岭起伏，沟壑纵横。

研究区由南到北，按地貌形态依次分为秦岭中—低山基岩山地区、秦岭北麓冲洪积斜塬区、黄土沟壑残塬区、黄河冲积平原区和河谷冲洪积阶地区五大地貌单元（图 2.3）。

（1）秦岭中—低山基岩山地区

秦岭中—低山基岩山地区分布于潼关—灵宝山前大断裂以南至洛南陈耳—朱阳镇以北的秦岭基岩山区，山脉主体呈东西向展布，峰峦叠障，山高坡陡，沟谷纵横，主要出露太华群变质杂岩，面积约 170km^2。秦岭北坡地形较陡，东部海拔 700～2100m，西部 1000～1800m，平均 1500m，最大相对高差 900m，山坡平均坡度 25°～35°。主要山峰海拔多在 1500m 以上，其中老鸦岔脑海拔 2413.8m，系研究区最高山峰。

（2）秦岭北麓冲洪积斜塬区

秦岭北麓冲洪积斜塬区分布于小秦岭山前断裂以北的太要镇—故县镇—阳平镇—朱阳镇一带以南地区，由面积不等的古老冲洪积扇群连接组成，海拔 500～900m，东西长 80km，南北宽 2～5km，面积 160～400km^2。受山前残坡积及河流的冲蚀堆积作用，塬面向北倾斜，呈阶梯状，地形坡度 5°～8°，塬面东西起伏呈丘状，出露地层为第四系砂砾石层、细沙土、亚粘土。

（3）黄土沟壑残塬区

黄土沟壑残塬区分布于研究区北部的故县镇、乾头一带，北至西阎村、坡头一带，东西长 50km，南北宽约 6～10km，面积约 300～500km^2。灵宝地区塬面较小，由于长期受地表径流的侵蚀，沟谷切割较深，形成大小不等的沟壑和残塬，沟岸坡角陡直，往往形成黄土柱和黄土陡崖，沟谷切蚀深度一般在 30～100m。其中阳平镇、巴楼一带切蚀深度在 80m 左右，沟谷多为“V”型谷。

（4）黄河冲积平原区

黄河冲积平原区分布于黄河、弘农涧河漫滩及 1～3 级阶地区，地势平坦开阔，出露地层为第四系卵砾、砂砾石层，面积约 95km^2。河漫滩主要分布在黄河南岸，海拔 331m，常被洪水淹没。黄河南岸发育 1～3 级阶地，一级阶地分布于小泉、公庄村、闵底、东吕店一带，海拔 340～350m；二级阶地分布于四知、花园、十里铺、故县镇、沟东一带，海拔 410～415m；三级阶地分布在西敖、上寨、凹里村一带，双桥河以东零星出露，海拔 410～415m。

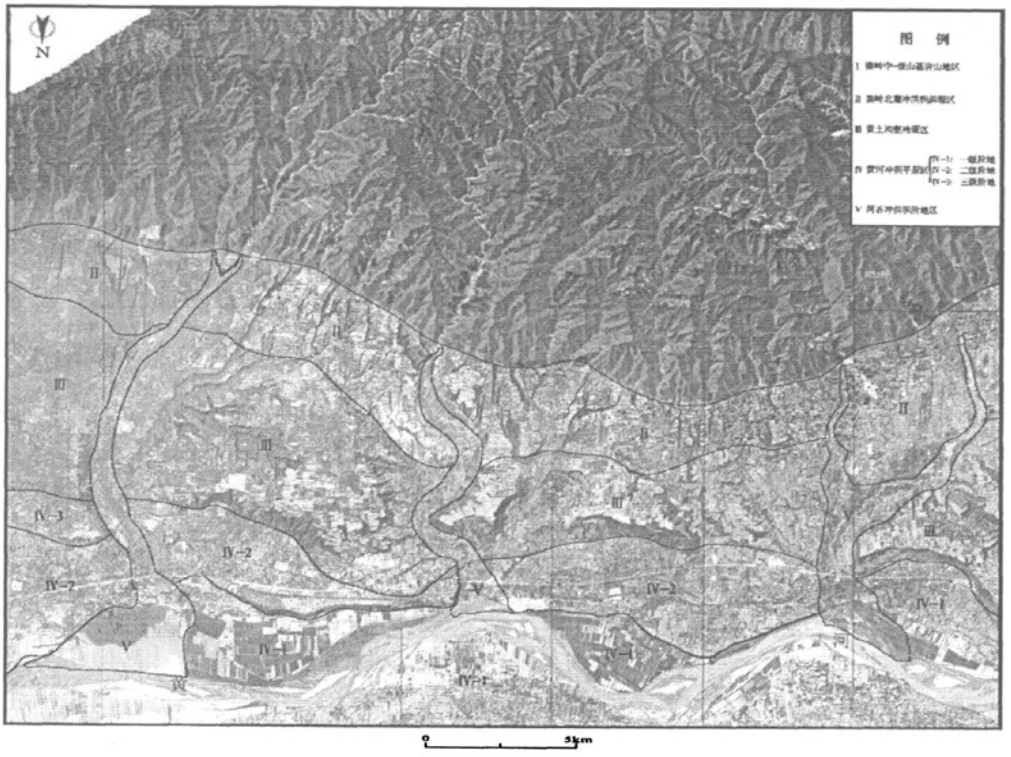


图 2.3 研究区地质环境分区图（据西安地质调查中心，2007 修编）

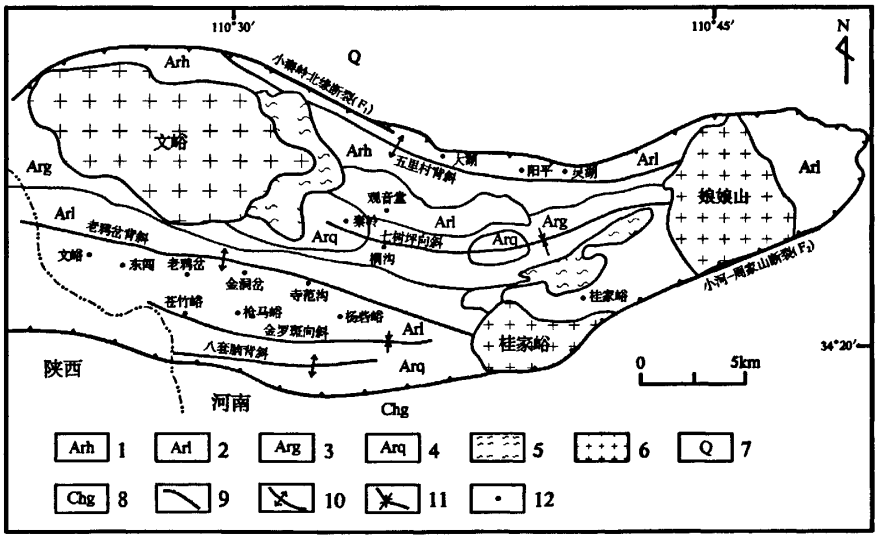
（5）河谷冲洪积阶地区

河谷冲洪积阶地区主要分布于双桥河、枣乡河、阳平河和西涧河（弘农涧河）中、下游河床两岸 1～2 级阶地及河漫滩，沿岸为黄土残塬，沟谷较开阔平坦，呈“U”型。阶地及河漫滩地层具二元结构，下部为漂砾、卵砾石、砂砾石层；上部为次生黄土、砂质粘土和亚粘土；顶部为耕作土。在双桥河寺底一带的河滩漫中，可见到巨大的“漂”砾，呈堆状出现，系山洪或泥石流堆积物。

2.4 地层岩性

研究区位于中朝准地台南缘，具有结晶基底和沉积盖层双层结构特征。结晶基底由太古界太华群及古元古界组成，以片麻岩为主，古元古界有少量大理岩。沉积盖层由中元古界、新元古界、古生界及中生界组成，其中中元古界官道口群以海相沉积白云岩、石英砂岩为主，熊耳群以海底喷发杏仁状安山玢岩为主；新元古界震旦系以冰碛岩为主；古生界仅有寒武系下统，以细晶白云岩和条带状灰岩为主；中生界仅见于白垩系，岩性为隐晶灰岩、微晶白云岩和粘土岩夹砂砾岩。

研究区地层区划属华北区豫西分区，出露地层主要为太古界太华群深变质岩系，其北为新生界第四系现代沉积物，南为中元古界长城系高山河组浅变质沉积岩（图 2.4）。



1- 太古界太华群焕池峪组; 2- 太古界太华群阎家峪组; 3- 太古界太华群观音堂组; 4- 太古界太华群枪马峪组;
5- 太古界混合岩; 6- 中生界黑云花岗岩; 7- 第四系; 8- 中元古界长城系高山河组;
9- 断裂; 10- 背斜; 11- 向斜; 12- 金矿

图 2.4　研究区地质简图（据黎世美，瞿伦全，苏振邦等，1996 修编）

（1）太古界太华群

研究区太古界太华群为变质杂岩，根据岩性组合和构造特征，自下而上大体可划分为 4 个岩组，即焕池峪组、阎家峪组、观音堂组和枪马峪组，各组之间均为整合接触。太华群片麻岩锆石的 SHRIMP U－Pb，年龄为 1846.0±5.9Ma（毛景文，2005）。

焕池峪组主要由金云母－透辉石大理岩、透闪石－透辉石大理岩和黑云斜长片麻岩组成，厚约 700m。阎家峪组是本区最重要的金矿容矿围岩，其内产出的含金石英脉多达 750 条，主要岩石类型为斜长角闪片麻岩、斜长角闪岩、黑云斜长片麻岩、条带状和均质混合岩，局部地段见有麻粒岩和大理岩夹层，厚约 1700m。观音堂组主要由磁铁石英岩、石英岩、矽线黑云斜长片麻岩、斜长角闪片麻岩和条痕状混合岩组成，厚约 600m。太华群最上部的岩层为枪马峪组，主要由斜长角闪片麻岩、黑云斜长角闪片麻岩、黑云斜长片麻岩和条带状混合岩组成，局部地段见有麻粒岩，岩层总厚度约为 680m。

区内的含金石英脉无一例外地产于太华群变质岩系中，该变质岩系主要由斜长角闪岩、石英岩、大理岩、黑云（角闪）条带混合岩和混合花岗岩等组成。

（2）中元古宙长城系高山河组

高山河组为浅变质沉积岩，以角度不整合超覆于太华群不同层位之上，主要包括石英岩、泥砂质板岩、白云岩等。

（3）中生界上白垩统

分布于灵宝市东盘龙、朱阳镇西北王家村，为一套半干旱—干旱亚热带河流相沉积。岩性为紫红色砂岩夹砾岩，厚度大于450m。

（4）新生界新近系

分布于灵宝五亩—川口一带，呈北东方向展布。下部为紫红色砂岩、砾岩、砂质泥岩夹钙质砂岩；上部为杂色砂泥岩与泥灰岩互层夹煤、油页岩，厚度800～1146m。

（5）第四系

广布于灵宝山前黄土残塬、黄河沿岸。下部以河湖相及冲积、洪积碎屑沉积为主，上部以风积黄土为主。

下更新统（Q_1）：为灰绿色粘土夹泥质粉砂岩、泥灰岩，下部为冰碛泥砾层。

中更新统（Q_2）：在潼关附近河谷中，为杂色含砾砂质粘土夹漂砾石层，厚度5～68m。黄河沿岸为一套土黄色黄土夹8～10m古土壤层及钙质结核，厚度40～240m。黄河1～3级阶地岩性为灰黄色砂土夹砂质粘土层，厚度30～50m。

上更新统（Q_3）：广布于黄河两岸的黄土残塬及支流阶地上，黄土残塬上为风积粉质黄土夹2～3层古土壤层，厚度10～30m。支流阶地上，下部为中细粒砂层夹砂砾石层，上部为砂质粘土，厚度13～28m。

全新统（Q_4）：分布于黄河两岸阶地及河漫滩和各峪道支沟。黄河阶地的下部为中细粒砂石层，上部为灰黄色砂质粘土、次生黄土和淤泥，厚度30～45m。各峪道支沟下部为粗细砂层夹卵砾石、漂石；上部为砂质粘土、亚砂土夹岩石碎块和卵砾石，厚度3～15m。表层为河流冲积淤积物和次生黄土相间的垆土。

2.5 地质构造

2.5.1 大地构造位置及构造单元划分

小秦岭地处华北地台南缘，地质构造复杂，经历了元古代以来多次构造作用和岩浆活动，区域变质作用强烈，形成了诸多的金属和非金属矿产资源。由太华台拱、汾渭断陷盆地、朱阳镇断凹盆地三个不同期次的构造单元组成。

（1）太华台拱

太华台拱位于豫西断隆北部，基地构造层由太华群组成，岩石混合岩化强烈，具多期岩浆活动和变质～变形作用。太华岩群总体为一复式背斜，主背斜向西倾伏，两翼倾角30～50°，核部被雅鸣山花岗岩占据。在蒿岔峪两岔口和太峪沟脑一带，褶皱起伏呈穹隆状出现。在多期岩浆活动的作用下，混合岩化强烈、断裂发育、岩片之间多为韧性剪切带（糜棱岩）相接处，成为含金矿脉的主要控矿构造。

太华台拱与汾渭断陷盆地间为孟塬—巴楼大断裂相隔，早期形成数百米宽的糜棱岩碎裂带，晚期由 EW 向，沿 NE 向及 NW 向剪切追踪，形成“箕状”地堑式凹陷。据区域重磁场资料及温泉、地震资料证明，该断裂为一条区域活动性大断裂。

（2）汾渭断陷盆地

汾渭断陷盆地为新月形巨型地堑式盆地，新生代沉积了巨厚的陆相堆积物，主要为新近系以来陆相堆积和风积黄土。断凹为一剧烈的下降区，在新构造运动的作用下，由南向北形成多组阶梯状活动性深大断裂，断裂切割新近纪、第四纪地层。山前大断裂仍继承新近纪活动方式，发生间歇性抬升，加速河流的切蚀和夷平，山麓型洪积扇群叠覆，地质历史上频繁发生。

（3）朱阳镇断凹盆地

朱阳镇断凹盆地西部和北部分别以石坡—上董寨断裂和石湾子—铁佛寺大断裂为界，南部和东部大致以涧河为界，总体呈北东走向，面积 60～70km^2。可分为白垩系和新生界两个构造层。其中白垩系和下新近系项城群形成一些平缓褶皱。

2.5.2 地质构造形迹

小秦岭地区经历从太古界至中新生界多期构造运动，其地质构造形迹较为复杂，但纵观其褶皱及断裂构造均以东西向展布为其主要特征（见图 2.4）。

（1）褶皱构造

研究区组成褶皱的岩石曾发生了两期区域性变质变形作用。第一期变形发生在晚太古代末阜平运动，岩石发生变质分异作用，析出长英质脉体，以形成柔流褶皱为特征。第二期变形发生于早元古代五台运动，置换改造了前期柔流褶皱，形成以小秦岭复背斜为主体的不协调褶皱系列，原生面状构造则趋于消失。

区内褶皱构造主要为小秦岭复背斜，由北向南依次为：五里村背斜、七树坪向斜、老鸦岔背斜、金罗斑向斜和八套脑背斜，总体走向近东西向，北翼缓，南翼陡。

1）五里村背斜：位于枣香峪五里村、大湖峪太阳沟一线，呈北西—南东向展布，延伸长约 7km，宽 0.5～1.5km，轴线方位 278°～328°，轴面向南西或北东摆动陡倾，倾角 81°～89°，西部被文峪花岗岩吞蚀，主要地层为焕池峪组。

2）七树坪向斜：位于枣香峪七树坪—大湖峪黑峪口一线，呈东西向展布，延展长约 37km，南北宽 2～4km。轴面倾向西段为 166°～192°，东段为 30°，倾角 72°～80°。向西超过文峪花岗岩（γ^3_5）延入陕西境内，主要地层为枪马峪组。向斜轴部为金矿密集区，桐沟金矿位于该向斜东部。

3）老鸦岔背斜：位于西峪—老鸦岔—牛圈沟一线，区内呈近东西向延展长35km，南北宽2～5km，东部为娘娘山花岗岩（γ^3_5）所截，轴面倾向南北摆动不定，倾角76°～82°，由晚太古代四范沟片麻状花岗岩及杨砦峪灰色片麻岩组成背斜主体，是小秦岭地区最主要的背斜构造。背斜轴部为主要金矿密集区，杨寨峪－文峪超大型金矿床赋存在老鸦岔背斜构造轴部附近。

4）金罗斑向斜：位于大园崖—杨砦峪金罗斑一线，测区内东西延伸长24km，宽0.5～1.2km，向西延入陕西，向东于樊岔脑一带褶皱枢纽发生向北西的弧形弯转。显示一期叠加褶皱的特征。轴面倾向353°～24°，倾角57°～78°。在木厂峪转折位轴面倾向60°，倾角84°左右。

5）八套脑背斜：位于洛南胭脂河北驹王峪—灵宝八套脑一线，东西延展长24km，宽1～3km。向东被桂家峪花岗岩所限。轴面倾向10°～30°，倾角70°～88°。

（2）断裂构造

研究区断裂构造发育，主构造线方向呈近东西向展布，南北分别以松树地—周家山断裂、小秦岭北缘断裂为界。

1）小秦岭北缘断裂（F_1）：亦称太要—武家山断裂。它是中新生界断陷盆地与小秦岭的分界断裂，在灵宝境内长约46km，向西延入陕西境内。该断裂早期为韧性剪切断裂，形成糜棱岩等构造岩，后期叠加脆性断裂，脆性断裂面北倾，倾角60°～80°，断裂带中碎粒岩构造岩发育。

据灵宝—三门峡地区重力普查测量，该断裂切割深度达8km，为区域性大断裂。

2）小河—周家山断裂（F_2）：也称寻马道断裂，分布于小秦岭南侧，西部近东西向，东部为北东东向，呈向南微凸孤形展布。该断裂先期亦为韧性剪切断裂，后期叠加脆性断裂，脆性断裂面南倾，倾角70°～80°，断裂带中断续可见糜棱岩及碎粒岩等构造岩。

2.6 岩浆岩

研究区岩浆岩比较发育，具有多旋回，多期性特点，主要形成于阜平期、五台期、加里东期、印支期和燕山期，以脉状和岩基侵入为主，岩性有花岗岩、石英闪长岩、花岗伟晶岩、石英脉、辉长岩、辉绿岩脉等。

阜平期岩浆活动表现为基性—中酸性火山喷发及TTG岩系和花岗岩侵入；五台期表现为花岗伟晶岩脉（$\gamma\rho_1^2$）侵入；早元古代表现为桂家峪花岗岩序列（$Pt_1G\eta\gamma$）侵入；中元古代表现为小河花岗岩序列（$Pt_2X\eta\gamma$）侵入；加里东期表现为辉绿岩脉（$\beta\mu_3$）、闪

长岩脉（δ_3）及杨砦峪二长花岗岩（$\eta\gamma_3$）侵入；印支期表现为正长斑岩脉（$\xi\pi_5^1$）侵入；燕山期表现为文峪花岗岩序列（JW$\eta\gamma$）和娘娘山花岗岩序列（JN$\eta\gamma$）及花岗斑岩脉（$\gamma\pi_5^3$）侵入。其中，燕山期花岗岩浆活动与研究区金矿具有密切的成生关系。

2.7 地震与新构造运动

小秦岭紧邻汾渭裂谷系，而汾渭裂谷是我国中强地震发育带，1556 年华县 8 级地震及 1815 年平陆 6.75 级地震即发生在该地震带内。

研究区自 1812 年至今共观测到 3 次 2～5 级地震。其中，1971 年 12 月 17 日及 1972 年 4 月 3 日发生的 2.1 级及 2.3 级弱震均位于小秦岭北缘断裂附近。因此，小秦岭北缘断裂很可能是一条发震断裂，据《中国地震动参数区划图》（GB18306-2001），灵宝境内地震动峰值加速度为 0.15g，地震基本烈度为 7 度区。

小秦岭地区新构造活动明显，区内沟谷深切，且多呈“V”形。新构造活动总体以上升为主，但在区域上具有差异性和间歇性，大致以小秦岭北缘断裂和小河—周家山断裂两个深断裂为界，南侧及东南侧基岩山地为强烈上升区，北侧黄土丘陵为中等上升区。

2.8 岩土工程地质条件

根据研究区出露岩（土）层性质和结构特征划分为岩体和土体两个大类及 14 个岩组：

（1）岩体类型

1）块状坚硬—较坚硬花岗岩为主侵入岩组（$\eta\gamma_2^1+\eta\gamma_5^1$）：主要分布在朱阳镇西北部及东北部的小秦岭地区，中条期角闪二长花岗岩、晋宁期黑云二长花岗岩和燕山期各类花岗岩为主，构造节理较发育，将岩体切割成规模不等块状体，风化程度各处不一，整体为弱风化，岩石呈坚硬一较坚硬状态。

2）块状坚硬花岗伟晶岩侵入岩组（$\gamma\rho_2$）：分布在朱阳镇以北小秦岭地区，总体呈北东向不规则条带状分布，形成于中条期，构造节理较发育，风化微弱，力学强度高。

3）块状坚硬石英闪长岩侵入岩组（$\delta_1^2+\delta_{O5}^2$）：零星分布朱阳镇西南蒲陈沟及上南沟等地，形成于嵩阳期限和燕山早期，构造节理较发育，质地坚硬，风化微弱。

4）块、层状坚硬—较坚硬片麻岩为主变质岩组（$A_{r2}+P_{t1}$）：主要分布于小秦岭地区，东部崤山地区也有零星分布，由新太古界四花沟片麻状花岗岩、杨砦峪灰色片麻岩、基性喷发表岩壳和古元古界观音堂组黑云斜长片麻岩、以及小面积焕池峪组大理岩组成，受构造节理、负片麻岩及大理岩层理控制，具块状结构，弱风化。

5）中厚层状坚硬—较坚硬白云岩为主碳酸盐岩夹碎屑岩岩组（$P_{t2g}+\in_1$）：主要分布在朱阳、五亩、苏村等南部崤山地区，由中元古界下官道口群白术沟组、冯家湾组、杜关组、巡检司组、龙家湾组、高山河组及寒武系下统组成，岩性以中厚层白云岩为主，次为石英砂岩、泥质板岩，构造节理较发育，总体呈弱风化状态，岩溶不发育。

6）层、块状坚硬—较坚硬安山玢岩为主喷出岩组（P_{t2x}）：主要分布于寺河、东村等东南部崤山地区，由中元古界熊耳群马家河组、鸡蛋坪组和许山组块状安山玢岩、杏仁状安山玢岩、流纹岩、泫纹斑岩组成，构造节理发育，风化程度各地不一，总体为弱风化，具层状、块状结构，呈坚硬—较坚硬状态。

7）层状坚硬—较坚硬冰碛岩为主碎屑岩组（Z）：零星分布于朱阳镇南部崤山地区，由新元古界震旦系罗圈组和东坡组冰碛砾质白云质泥岩、冰碛砂泥岩、冰碛岩及炭质石英粉砂岩、粉砂质泥岩组成，具层状结构，弱风化，坚硬—较坚硬。

8）层状坚硬—软弱白云岩、石灰岩、粘土岩夹砾岩、碳酸盐岩夹碎屑岩组（K）：零星分布于五亩、苏村及川口地区的冲沟之中，由白垩系白云岩、石灰岩、粘土岩夹砾岩组成，具层状结构，其中粘土岩易风化，强度较低。

9）层状软弱—较坚硬泥岩夹砂砾岩碎屑岩组（E）：零星分布于五亩、苏村、尹庄及川口等地的冲沟之中，由古近系粘土夹砂砾岩组成，砂砾岩为泥钙质胶结，较坚硬，泥岩易风化，较软弱。

10）层状软弱半胶结砾岩及泥岩碎屑岩组（N）：零星分布于川口等地冲沟中上部，由新近系泥质半胶结砾岩及泥岩组成，成岩程度差，呈软弱状态，上部棕红及灰绿色泥岩具膨胀性。

（2）土体类型

1）黄土、古土壤双层结构中等湿陷特殊土类（$Q_{p1}+Q_{p2}$）：大面积分布于市域南、东部黄土覆盖中低山区和中部黄土丘陵区，由第四系中、下更新统黄土—古土壤组成，古土壤多达 20 余层，黄土具有大孔隙垂直节理、直立性、易冲刷、易潜蚀、易湿陷、易塌陷等特征。

2）黄土、黄土状粉土单层结构轻—中等湿陷特殊类土（Q_{p3}）：大面积分布于黄土塬顶部及河流二、三级阶地之上，由上更新统黄土及冲积黄土状粉土组成，厚度变化大，各处不一，均具有黄土大孔隙、直立性、垂直节理和易冲刷、易潜蚀、易塌陷等特征，其中黄土具中等湿陷性，冲积黄土状土具轻微湿陷性。

3）黄土状粉土单层—双层结构新近堆积土（Q_h）：分布在河流一级阶地之上，具有

上部为冲积黄土状土，下部为冲积砂卵砾石层二元结构，松散，强度低。

4）新近堆积松散砂卵砾石层（Q_h）：分布于现代河流河床及漫滩中。

2.9 水文地质条件

研究区地处小秦岭和渭河断陷盆地的东南部，大地构造控制着不同地段的沉积环境、岩层分布和地貌类型，从而也控制了区内地下水的分布、岩性、富水性。以小秦岭山前大断裂为南北分界，研究区地下水分为金矿开采区基岩裂隙水和山外松散岩孔隙水两大类型。

（1）基岩裂隙水

主要分布于小秦岭山区，是黄土斜塬区地下水的重要补给来源。秦岭基岩山地区发育太古界、元古界变质岩系，裂隙发育，基岩裂隙水沿导水裂隙向邻近沟谷排泄，并沿山前大断裂破碎带渗透，直接渗入补给地下水。基岩山地区裂隙水明显受裂隙发育程度及大气降水控制。据矿坑排水资料，雨季地下水压力升高，矿坑排水量大；旱季地下水压力下降，矿坑排水量减小；地下水排泄以径流和疏干两种形式，前者流向沟谷变成地表水排泄，后者由矿坑抽水排向沟谷变成地表水。

（2）松散岩孔隙水

可分为黄土孔隙裂隙水、冲洪积砾石层孔隙水和砂夹砾石层孔隙水。

1）黄土孔隙裂隙水：分布于黄土沟壑残塬地区，赋存于上、中更新统（Q_2p+Q_3p）的黄土层，包括孔隙、孔洞和裂隙三种。上更新统黄土孔隙、孔洞、裂隙最为发育，并伴生有陷穴、漏斗分布，为大气降水下渗补给地下水提供了有利条件。下更新统冰湖积粘性土层为黄土含水层中的隔水层，埋深 153～194m。黄土含水层的埋深、厚度及富水性，受区域地质结构、塬面大小和切蚀程度等条件的控制。

2）漂砾卵石层孔隙水：分布于秦岭山前洪积扇群。在近山的洪积扇群顶部，含水层由 3～5 个含泥漂砾卵石层组成，单层厚度 5～20m，总厚达 54～70m，水位埋深 32～57m，单井最大涌水量为 315～470m^3/d，属中等富水。在扇群中前部，水位变浅，一般埋深 20～32m。含水层在扇群的中部为砾卵石层夹粘质砂土，到扇群前部为多层砾石、粗砂及粘质砂土互层。在近河两侧含水层粒度较粗，往往形成单一厚度较大的含水层，富水性较强。

3）砂夹砾石层孔隙水：主要分布于黄河一、二、三级阶地上，具明显的分带性。黄河滩地Ⅰ级阶地为粉细砂含水层，厚 5～25m，埋深 5～20m，单位涌水量 5～30m^3/h·m，渗透系数 10～30m/d 左右。矿化度自西向东由小于 0.5g/L 过渡到 2～5g/L，局部地段大

于 5g/L。黄河Ⅱ级阶地，岩性为中细砂夹小砾石，颗粒具西粗东细，厚度 9～97m，水位埋深 11～30m 左右，储水条件差，富水性变弱，单井最大涌水量 552.53m^3/d，属强富水。黄河三级阶地和塬区，含水层粒细、层薄、埋深大，富水程度不均匀。

2.10 人类工程经济活动对地质环境的影响

小秦岭金矿区属于深山区，原始居民较少。但从 80 年代以后，金矿开采及简易公路修建，是该区主要人类工程经济活动方式，对当地地质环境改变较大。采矿活动主要集中在文峪、枣香峪、大湖峪等上游地区。目前采矿坑口数千个，形成矿渣总量约 3000 万 m^3。采矿活动不仅使山体受到破坏，增加了不稳定隐患，而且产生的大量废渣就近堆放在坑口的沟道内或斜坡上，多数未采取任何防护措施，严重堵塞了沟道，成为泥石流灾害形成的重大隐患。交通工程经过斜坡地段需要劈坡，造成许多不稳定斜坡及危岩（土）体，成为崩塌、滑坡灾害的隐患，如 310 国道、连霍高速公路、陇海铁路等沿线的地质灾害大多是人为因素造成的；修建水库抬高了水位，使一部分岩（土）体长期或季节性受水浸泡，工程地质性质发生变化，继而产生塌岸、滑坡，如黄河塌岸就是由于三门峡水库蓄水、泄水造成的；村镇建设对地质环境的影响主要表现为对斜坡的破坏，黄土沉积区历史上曾在黄土陡壁下开挖了大量的窑洞，近年来又掏挖坡脚、平地建房，增加了黄土崩塌、滑坡的诱发因素。

2.11 本章小结

灵宝市小秦岭金矿区地形复杂，南高北低、西高东低，呈台阶状；地貌差异大，由南向北依次分为秦岭中—低山基岩山地区、秦岭北麓冲洪积斜塬区、黄土沟壑残塬区、黄河冲积平原区和河谷冲洪积阶地区五大地貌单元；地质构造复杂，由太华台拱、汾渭断陷盆地、朱阳镇断凹盆地三个不同期次的构造单元组成；地层区划属华北区豫西分区，出露地层主要为上太古宙太华群深变质岩系，其北为新生界第四系现代沉积物，南为中元古宙长城系高山河组浅变质沉积岩；岩浆岩比较发育，具有多旋回，多期性特点；地震动峰值加速度为 0.15g，地震基本烈度为 7 度区；新构造活动总体以上升为主，但在区域上具有差异性和间歇性；采矿活动主要集中在枣香峪、大湖峪、文峪等上游地区。

第三章　研究区主要环境地质问题

通过本次矿山环境地质问题调查表明，灵宝市小秦岭金矿区在矿产资源的采选活动中存在着资源毁损、地质灾害、环境污染等环境地质问题，面广量大，情况比较复杂。

3.1 资源毁损

3.1.1 土地资源压占与破坏

据调查，小秦岭金矿区各矿山开采区坑口、竖井多见，均沿各大小沟峪、沟谷分布，矿区人员众多、工棚群集。在多年的矿山生产过程中，矿渣大量堆积在沟谷和河道中，不仅占用和破坏了大量的土地，同时也严重破坏了大量的林业资源，对矿区及其周边生态环境造成较大破坏。据资料，研究区因矿山开采占用和破坏的土地面积约 4.5 万亩，各尾矿库共占用土地面积近 7500 亩，受扬尘危害影响的区域面积约 768 万亩。

3.1.2 水均衡破坏

由于灵宝市多年来诸多黄金矿山的生产开发，区内西南部的大部分山体已被采矿挖空，山体富水性本来就较差，加上开采时大量的坑道排水、水源流失，原有的水均衡被打破，致使山坡土层、植被缺水，甚者植被大面积枯死，再加上人为砍伐、破坏，植被、生态环境已遭到了不同程度的破坏。

此外，矿区内山涧溪流汛期暴涨暴落，水质混浊。各矿区坑口密布，人员、工棚群集，各种生活废水废物随处排放，加之风化作用的影响，使遍野废石中的一些金属硫化物氧化溶解，随降水带入，造成这些地表水体细菌、亚硝酸盐及金属元素含量往往超限，水体被污染。另外，由于部分矿区的混汞选矿自然排水及开矿产生的粉尘随坑道中的地下水排出，流入河中，使河水浑浊不堪，污染水体。

3.2 地质灾害

3.2.1 矿渣型泥石流灾害

泥石流是本地区重要的地质灾害之一，多集中发生于每年的 7、8、9 三个月，均由暴雨或大暴雨所激发，具暴发突然、运动速度快、能量巨大、来势凶猛、破坏力极强、致灾严重等特点。据调查，小秦岭金矿区有 22 条泥石流隐患沟，主要特点是采矿活动强度大，废矿渣堆方量大，严重挤占、堵塞沟谷，影响洪水排泄。

1994 年 7 月 11 日，大西峪发生泥石流，造成 52 人死亡，矿区全部停产；1996 年 8 月，小秦岭地区连降暴雨，大西峪、文峪发生泥石流，冲毁矿区公路 13km，通讯线路 3km，房屋、设备多有损坏，直接经济损失 690 万元，间接损失 663 万元；1998 年 7 月，

三门峡文峪金矿发生泥石流，毁坏矿区公路 16km，桥梁、涵洞十余处，变压器、空压机大型设备数台，供电、通讯中断，经济损失 473 万元；2000 年汛期，文峪、西峪、大湖峪矿区发生泥石流，造成公路冲毁，矿山停产，经济损失 30 余万元。

大湖峪、枣香峪、文峪及其 22 条主要支沟的分布见附图。2007 年对研究区内 224 处采矿废渣进行的详细调查结果见表 3.1。

表 3.1 实际调查的 224 处采矿废渣堆情况表

	枣香峪	大湖峪	文峪	合计
山区矿渣堆（处）	87	106	31	224
占据河道 1/3 以上渣堆（%）	86.2	78.3	96.7	83.9
不稳定渣堆（%）	86.2	95.3	100	92.4
压占土地面积（亩）	442.5	649.8	132.5	1224.8
矿渣堆的体积（万 m^3）	227.9	369.1	48.1	645.1

据调查，大湖峪废渣量 369.1 万 m^3，枣香峪 227.9 万 m^3，文峪 48.1 万 m^3，3 条峪道废渣总量 645.1 万 m^3。占据河道 1/3 以上渣堆占总渣量的 83.9%，山区不稳定渣堆占总渣量的 92.4%，矿业开发堆排的弃土、石渣为矿渣型泥石流发生提供了丰富的物质来源。

3.2.2 崩塌

崩塌也是研究区主要地质灾害之一，按物质组成分为岩质崩塌和土质崩塌两类。

岩质崩塌分布于南部中一低山基岩山区，部分矿区内地形陡峭，悬崖林立，断裂发育，岩体较破碎，受重力影响，时有发生崖体自然崩塌现象。如野外调查期间在枣香峪珠岔发现一巨型悬崖崩塌，直接危及下方工棚和矿山工作人员生命安全，极易造成人员伤亡和财产损失。各矿区内采矿、筑路等对自然斜坡的破坏、削坡形成的人工陡崖是产生崩塌的主要场所。如 1996 年寺范沟由于自然因素引发岩质崩塌，致使武警黄金九支队野外勘查基地被毁，造成 2 名队员死亡；又如川官公路两边由于人工修路，造成陡崖较多，仅 2000 年就发生较大的岩质崩塌 3 处，累计塌方量 $1.175\times10^4 m^3$，造成公路堵塞 63 小时，直接经济损失 12 余万元。

土质崩塌分布在黄土塬边缘和中一低山区的厚层黄土覆盖地区，在黄土塬边缘的沟壑两侧常有发生，一般发生于坡度大于 60°的黄土陡坡处，主要发育特征是以坠落、滚动、翻倒、溜滑等方式，一般规模较小，破坏速度快，易造成较大的人员伤亡和财产损失，人工切坡、修路、挖窑洞所形成的陡崖是产生土质崩塌的主要场所。

3.2.3 滑坡

研究区内滑坡按物质组成同样可以分为岩质滑坡和土质滑坡。滑坡发育特征表现为：滑坡形态较完整，后缘滑壁保留，具有明显的圈椅状形态，滑体滑移特征明显，部分滑坡具有双沟同源现象，但滑床、滑带不明显。主要分布在区内东南部中—低山区。

岩质滑坡主要分布于金矿区和公路沿线，以采矿和修路导致岩体失稳为诱发因素。据资料，研究区因采矿诱发的岩质滑坡主要有两处。其一是阳平镇大湖峪口东山滑坡体，1987 年 11 月 1 日发生，滑坡体体积 $40\times10^4m^3$，造成 3 人死亡，直接经济损失达 700 余万元，近年来由于采矿活动影响，使该滑坡体多次活动，到 2003 年滑坡范围扩大到整个山头，滑坡体积超过 $250\times10^4m^3$，目前仍在活动。其二是阳平镇大湖峪口西山滑坡体。另有一处位于川官公路上，该滑坡为一小型顺层滑坡。

土质滑坡主要分布于东南部中—低山区，数量众多，分布面积大，受威胁人数多。滑体一般由粉土、粉质粘土组成，下部为中元古界及下第三系地层，一般沿基岩面滑动，如阳平镇庙头村庙头组土质滑坡，滑坡体体积 $262\times10^4m^3$，上覆土体沿基岩面蠕动，引起 15 户房子产生裂缝，受威胁人员达 25 户 130 人。

3.2.4 采空区地面塌陷、山体开裂（地裂缝）

据调查，小秦岭金矿区因采矿活动引发的矿硐采空区地面塌陷有 2 处，其一，位于朱阳镇银家沟硫铁矿矿区，矿区面积 $0.92km^2$，矿权人为灵宝市金源晨光化工有限责任公司硫铁矿分矿。塌陷位于该硫铁矿矿区的主采区，银家沟沟谷的底部，塌陷地表由 2 个主塌陷坑组成，相距约 50m。1 号塌陷坑位于沟谷的底部，呈近圆形，面积约 $2500m^2$，最大塌陷深度达 50m、平均 20～30m，塌陷坑边缘地裂缝、崩塌多条，塌陷坑已大部分用矿渣充填，塌陷尚不稳定。2 号塌陷坑位于沟谷底部的西侧边坡处，沟谷较宽缓，塌陷坑呈不规则长方形，长 45～50m、宽 10～25m，一侧为沟谷基岩边坡，塌陷深度不一，最深有近 10m；塌陷引发沟坡基岩滑坡，滑坡体充填塌陷坑，使矿山运输道路损坏停用。其二，位于秦岭金矿东寺范沟 1730 坑口上方较陡立的山坡处，塌陷沿构造破碎带呈椭圆状，塌陷坑大小 6×7m，深达 20～30m，塌陷坑及周围植被发育；塌陷与主巷 1730 坑口相通，危及坑口安全，坑口报废停止使用。该塌陷是由于采矿坑口、巷道沿构造破碎带布设，坑口巷道上方的松散坡积物在强降雨诱发下，坑道冒顶引起的。

采矿引发的地裂缝多见于采矿区地面塌陷边缘、滑坡体后缘和渣坡失稳引发的渣堆坍塌、滑坡附近，危害附近居民房屋、工棚、道路等财产安全。

3.2.5 采矿废渣堆放不合理、渣坡失稳、尾矿库溃坝

灵宝市各矿区多年地下坑道采矿产出的矿渣均顺坡堆积于各沟峪（谷）中，矿区多地形陡峭，沟谷狭窄，日积月累，渣坡已不同程度出现堆放高度过高，渣堆过大，局部沟谷、矿区尤其严重。虽多数渣堆建有挡墙，但挡墙坚固强度多有不够；同时，仍有一些矿渣、废石堆积紊乱，每逢遇暴雨、山洪暴发多易发生渣坡崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害。暴雨过后，诸多沟谷中多见采矿的大小渣石遍布河道，局部区段冲塌下来的采矿渣石使沟谷、河道变窄、河床抬高、甚至堵塞，引发泥石流灾害，严重影响沟谷和矿区泄洪的正常通道，威胁各矿区坑口工作人员和财产的安全。

各矿山的尾矿库大多位于山谷或黄土冲沟内，选厂周围和尾矿库附近多为农田和居民区，其不仅占压大量土地，而且由于尾矿堆放造成库区土地不断减少，库区附近生态环境不断变差，尾矿渣干旱季节经常形成扬尘、风沙，影响周围民众和对库区附近土地造成危害。同时，尾矿库的存在埋下了溃坝的重大隐患，给下游居民生命财产构成威胁。

3.3 大气、水、土壤环境污染

金矿开采的矿坑水、选矿尾水、生活污水以及废石经大气降水淋溶等成为研究区的主要污染源。与研究区开发条件相同的潼关金矿区，大气、水、土壤环境的主要污染物有重金属元素（如汞、镉、铅、锌、铜等）、氰化物、石油类、悬浮物、COD、BOD 等。这些有害物质污染河流、农田、地下水，进而造成人体食物链污染，危害人体健康安全，成为生态环境病的潜在高发区。

研究区采用小氰化堆方式浸提金现象十分普遍，严重占压和破坏了基本农田用途，污染了大气、水、土壤环境。据调查，发现农田氰化 157 处 ，占地约 2400 亩。

2007 年对研究区内从山区源头到流入黄河的地表水进行的沿途污染源类型、河流物理性状、河流水质样品分析和断面监测结果显示，枣香峪、大湖峪、文峪河流污染主要集中于河流上游乃至源头，污染源多为小汞碾、小浮选污水，尤以文峪污染最为严重。河水中的 Hg、Pb、As、Cu 等元素均超过国家 V 类水标准。十二里河、藏马峪、观音峪相对污染较轻，达到地表水环境质量III类标准。

河流底泥是反映河流污染的重要信息，同时又是河水污染的重要二次污染源。在上述河流水样相同采集地点进行了河流底泥样品采集，三条峪道中矿业活动频繁，大量的选矿浆、尾矿渣和氰化渣排入河流，河水常年为灰黑色，河床淤积较厚的淤泥尾沙。据底泥样品分析结果，三条峪道的重金属污染非常严重。

2007 年对研究区 600km^2 的农田进行了土壤样品采集工作，并对采样点周围污染源

分布、污染类型（大气沉降型、污水灌溉型、尾矿渣淋溶型）污染程度及空间分布进行了系统调查分析。根据部分土壤样品分析结果，大部分样品重金属含量处于国家标准范围内，但豫灵镇王家村西、杜家村、庙上村、水车头村西、吴村一带汞、铅等元素超标严重，出现上述情况的原因多数与周围尾矿库、选矿厂污染有关，少数与大气降尘有关。虽然农田土壤重金属含量处于国家标准甚至绿色食品允许范围内，但金矿活动的影响已经遍及研究区的各个角落。

研究区农田土壤重金属污染程度与矿业活动的多少、秩序的优劣呈现明显的相关关系（图 3.1～3.4）。

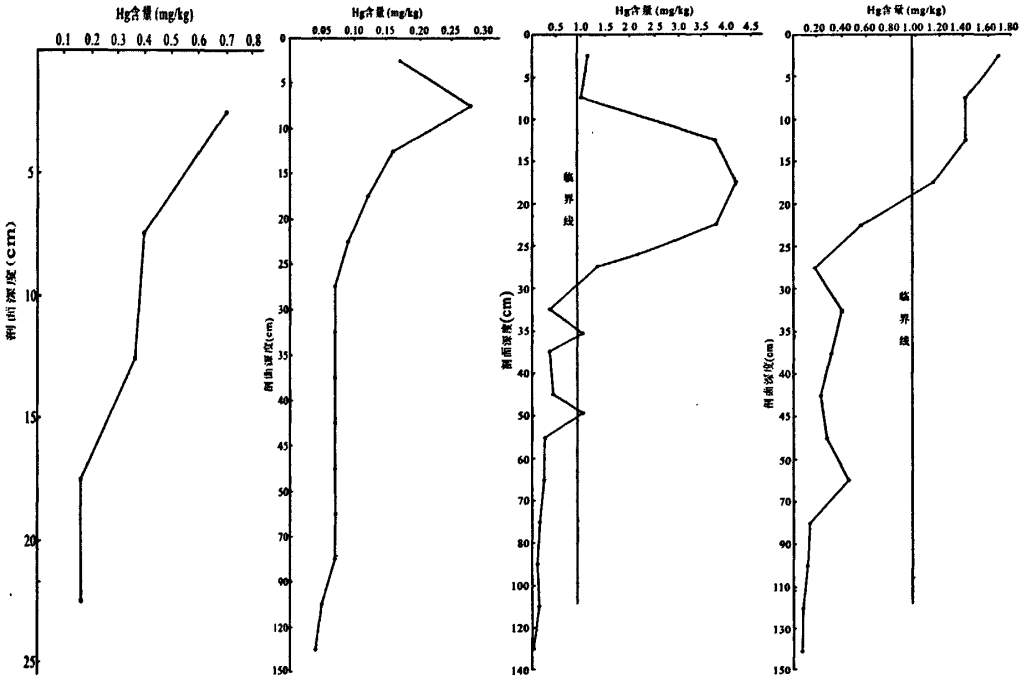


图 3.1～3.4　黄河滩地、沟壑残塬、老尾矿库和污水灌溉农田土壤垂直剖面 Hg 含量分布

3.4 本章小结

灵宝市小秦岭金矿区矿山环境地质问题十分突出，集中表现在资源毁损、地质灾害、环境污染等。在诸多环境地质问题中，尤其以矿渣型泥石流灾害最为突出，采矿废渣堆放混乱，挤占、堵塞沟道严重，加重了泥石流的形成及危害。

第四章　矿渣型泥石流危险性评价

本文研究的是单沟泥石流危险性评价。对于单沟泥石流危险性评价研究一直是我国灾害学研究的重点课题，在国内外都受到高度的重视[37-40]。目前国内对单沟泥石流危险性评价比较成熟的方法有模糊数学综合评判法[41,42]、灰色系统评价法[43]以及回归分析法[44]等。本文根据研究区实际情况，选取危险性评价因子，采用层次分析法确定评价因子权重，运用模糊综合评判法对研究区矿渣型泥石流危险性进行评价研究。

4.1 泥石流危险度的概念

危险性的定量表达是危险度，“度”即度量衡，是指有遭到损害的可能性大小。泥石流危险度是指一定范围（单沟或区域）内所存在的一切人和物有遭到泥石流损害的可能性大小[45]。可能性大小即概率，所以泥石流危险度是一个概率概念。最小概率为0%，最大概率为100%，因此危险度只能在[0,1]闭区间内取值。

泥石流危险性评价是泥石流灾前评估的重要内容，也是泥石流灾害防灾减灾系统的重要组成部分，它对于减轻泥石流灾害的直接和间接损失，制定避难和救援的紧急措施，变消极被动救灾为积极主动防灾都具有重要的现实意义。根据其研究范围，可以分为点评价和面评价，即单沟泥石流危险度评价和区域泥石流危险度评价[46]（表4.1）。

表4.1　泥石流危险性评价类型表

评价类型	点评价	面评价
评价对象	泥石流灾害体或灾害群	区域泥石流灾害
评价面积	一般不超过几十 km^2	几百到几百万 km^2
评价范围	一般不超过一个县	几个县到全国
评价意义	为抗灾救灾和实施防治工程提供依据	为区域规划和宏观决策提供依据
评价手段	专门调查统计和必要的观测、试验	区域调查统计
评价精度	定量化为主，定性为辅	半定性，半定量化

单沟泥石流危险度评价是指对一条泥石流沟或相邻近、具有统一动力活动过程和破坏对象的几条泥石流沟或沟群进行评价，它是其它评价工作的基础，其特点是评价面积小，致灾体（泥石流）和承灾体清晰明确，评价精度高，采用的指标、模型以及得出的评价结果定量化程度高。区域泥石流危险度评价是对一个流域、一个地区或更大的自然、行政区域内的泥石流灾害进行评价，其特点是面积大，致灾体的成灾条件复杂，致灾因素多样，承灾体类型多，分布广，特征复杂，许多因素具有较高程度的模糊性和不确定性，因此采用的指标多为相对指标，评价结果定量化程度较低。

由于单沟泥石流危险性评价和区域泥石流危险性评价的对象、手段和目的等方面很不相同，泥石流学者经过长期的研究，发展出了多种评价方法（图 4.1）。

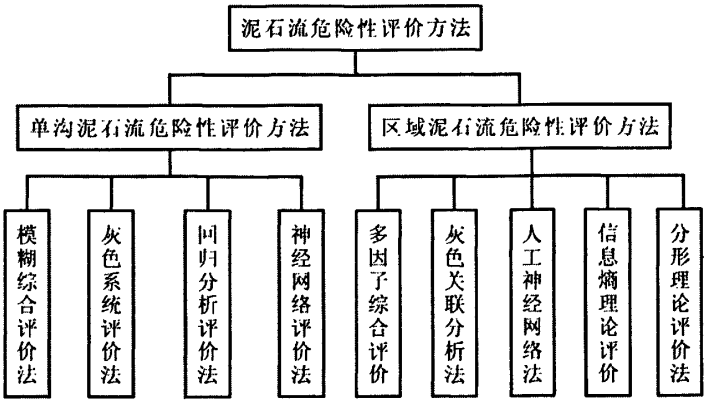


图 4.1 泥石流危险性评价方法

对于单沟泥石流危险度，最初研究者是从实践经验出发做出定性的判别。国内最早开始与泥石流危险度有关的研究是 1986 年谭炳炎所作的泥石流严重程度的综合评判[47]，其主要目的就是寻找判别泥石流沟以及泥石流沟活动强度的依据。而后随着研究的深入，泥石流研究者开始注重以数学语言表达地理过程，泥石流危险度研究逐渐从定性判别转向半定性、半定量的判别[48-51]。最新的单沟泥石流危险度评价成果以英文形式于 1996 年发表在德国召开的“国际防灾大会论文集”上[46]，受到德国学者 Becht 和 Rieger 博士的关注并加以引用[37]。

4.2 评价因子的分析与选取

泥石流的发生、发展受多种因素的控制，涉及到许多方面，怎样从众多的因子中选取对泥石流起主要作用的因子就显得至关重要。在评价因子的选取上，一方面要注重综合分析，避免单一因子的片面性。在我国早期的有关泥石流严重程度的研究论文论著中，所列出的评判因子就有 15 种[52]、18 种[53]、4 大类 15 个因子[54]，在讨论泥石流形成要素的另一些文章中列出了 19 种形成因素[55]。另一方面，由于不同类型、不同地区影响泥石流的主要因素也不尽相同，故在评价因子的选择上亦要具有代表性、针对性。

泥石流危险性评价首先要根据研究区的实际情况选取适当的评价指标，这样才能减少重复运算的累计误差，保证预测的精度。泥石流危险性评价指标的选取一般较注重泥石流的发生机理和特征。《泥石流灾害防治工程设计规范（DZT0239-2004）》中将坡面崩塌、滑坡及水土流失（自然和人为活动的）严重程度、泥砂沿程补给长度比、沟口泥石流堆积活动程度、沟口纵坡、区域构造影响程度、流域植被覆盖率、河沟近期一次变幅、

岩性影响、沿沟松散物储量、沟岸山坡坡度、产沙区沟槽横断面、产沙区沟松散物平均厚度、流域面积、流域相对高差、河沟堵塞程度作为泥石流沟的数量化综合评判的指标；张丽萍，唐克丽在《矿山泥石流》选取了固体松散物质储量及动储量、距矿区中心距离、流域沟道信息维、开发方式和规模、距交通线路的距离、降雨量、流域面积、物质岩性组成比例、泥石流沟相对距离九个评价因子。

本文结合《泥石流灾害防治工程设计规范（DZT0239-2004）》及前人对矿渣型泥石流的研究，在野外地质调查及室内分析研究的基础上，根据研究区实际情况，在假定22条支沟降雨量一样的条件下，选取了如下六个评价因子：

1．有效渣量 u_1

是指可能构成泥石流物源的渣堆方量总和。它是关系泥石流形成、发展的定量评价因子，直接影响着泥石流固体物源的多少，是泥石流潜在规模的反映，在矿渣型泥石流危险性评价中起着决定性的作用。它主要通过实地测绘计算给出，以 10^4m^3 为单位。

2．纵坡降比 u_2

是指河床上、下游两个断面的落差（即高程之差 $H_{上}$-$H_{下}$）与其水平距离之比。它是流体由位能转变为动能的底床条件，决定了泥石流形成和发生过程的快慢。河床纵坡降比越大，越有利于泥石流的形成，泥石流形成后越不易消亡；泥石流动能越大，其破坏性也越大。它是影响泥石流形成和运动的主要因素。可由现场调查或从地形图量测取得，通常取形成区与流通区的平均比降，以‰为单位。

3．渣堆补给长度与沟长比 u_3

是指渣堆沿途补给累计长度与沟长之比。它综合反映渣堆补给的范围和补给量。比值越大，表明渣堆补给的条件越好，因此它与泥石流危险度关系较为密切，对危险度判定有一定影响。

4．河道弯曲度 u_4

是指河道实际长度与其直线长度之比，其值大于或等于1。它反映了河道泄流的难易状况，可影响河道堵塞系数，从而间接影响泥石流流量和规模，因此它与泥石流危险度关系较为密切，对危险度判定有一定影响。

5．河道堵塞系数 u_5

是指堵塞河道的渣堆累计长度与河道实际长度之比。它反映了河道的堵塞情况，与泥石流危险度关系较为密切，对危险度判定有一定影响。

6．汇水面积 u_6

是指流域周围分水线与河口（或坝、闸址）断面之间所包围的面积。该指标反映了流域汇流状况。泥石流大多形成于集水区面积较小的沟谷，一般来说，较小的集水区面积易于泥石流的形成和活动，以 km^2 单位。

4.3 评判方法及原理[48,49,56-58]

4.3.1 判断矩阵法

1．判断矩阵直接给出法（层次分析法）

层次分析法（Analytical Hierarchy Process，AHP）是美国著名的运畴学家萨蒂（T.L.Soaty）于 1973 年提出的，本身是一种有效的定量与定性相结合的多目标决策分析方法，也是一种优化技术，经过多年发展已成为一种较为成熟的方法，近年来在许多领域发展迅速。

层次分析法是把复杂问题中的各因素划分成相关联的有序层次，使之条理化的多目标、多准则的决策方法，是一种定量分析与定性分析相结合的有效方法。而方案比较和多目标综合评价中，经常涉及各指标权重的确定问题，权重对综合评价和方案选优有较大影响。实际工程实践中常用层次分析法（AHP）来确定各指标的权重。

层次分析法的基本思想是首先要把问题层次化，根据问题的性质和要达到的总目标，将一个复杂的问题分解为各个组成因素，并将这些因素按支配关系分组，从而形成一个有序的递阶层次结构，并最终把系统分析归结为最低层（如决策方案）相对于最高层总目标的相对重要性权值的确定或相对优劣次序的排序问题，从而为决策方案的选择提供依据。通过两两比较的方式确定层次中诸因素的相对重要性，然后综合人的判断以确定决策因素相对重要性的总排序（表 4.2）。

表 4.2 判断矩阵重要性指标表

标度值	含义
1	表示两个因素相比，具有同样的重要性
3	表示两个因素相比，一个因素比另一个因素稍微重要
5	表示两个因素相比，一个因素比另一个因素明显重要
7	表示两个因素相比，一个因素比另一个因素非常重要
9	表示两个因素相比，一个因素比另一个因素极为重要
2、4、6、8	分别表示上述相邻判断的中值

层次分析法的出现给决策者解决那些难以定量描述的问题带来了极大方便，这种方法将分析人员的经验判断给予量化，对目标（因素）结构复杂且缺乏必要数据的情况更

为实用，是目前系统工程处理定性与定量相结合问题的比较简单易行且又行之有效的一种系统分析方法，从而使它的应用涉及广泛的科学和实际领域。

（1）单层次模型结构

如图 4.2 所示，此模型由一个目标 C 及隶属于它的 m 个评价元素 A_1、A_2、……、A_m 和决策者组成。由决策者在这个目标意义下对这 m 个元素进行评价，对他们进行优劣排序并做出相对重要性的权衡，但由于决策者能力的限制很难一下子做出这种判断，而仅仅对两个元素进行优劣程度比较则是完全可能的。

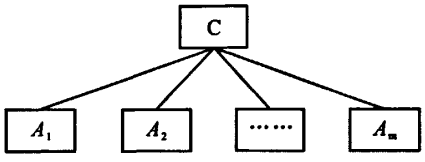


图 4.2　单层次模型结构图

（2）多层次模型结构

多层次模型结构是仿照人们的思维过程分析问题所包含的因素及其相互关系，将有关的各个因素进行分类，按照不同的属性自上而下地分解成单一因素，并按单一因素的属性分成若干组，形成不同层次。同一层次的因素对下层元素（一个或多个）有支配作用，又同时受上层因素的支配。层次之间要素的支配关系不一定是完全的，即可以存在这样的要素，它并不支配下一层的所有要素。层次结构通常可分为目标层、准则层和方案层。处于最上面的一层称为目标层，这个最高层次通常只有一个要素，是分析问题的目标；中间层次称为准则层，准则层的下一层次是子准则层；最低一层的层次称为方案层，这层是解决问题的预选方案（图 4.3）。

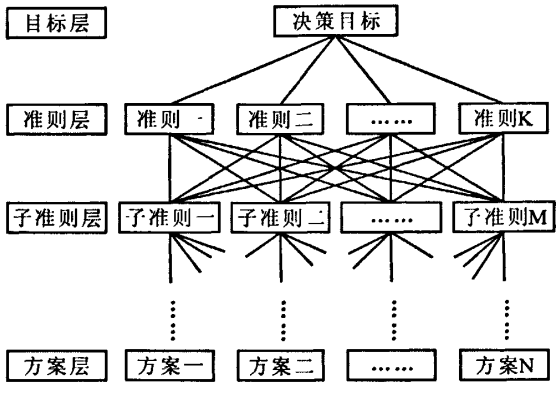


图 4.3　多层次模型结构图

2．判断矩阵间接给出法（三标度法）

用层次分析法确定权值是科学合理的，但从上述确定权值的过程看，往往易忽视以

下问题：

（1）由于各指标的多样性，决策者往往很难用1～9的标度来表示各指标的相对重要性程度。

（2）即使决策者可以给出，也往往容易凭想当然给出一个两可性的判断，这种两可性的判断会使判断矩阵带有很大程度的主观臆断性，从而使决策结果的可信度下降。

（3）当同一层次上的指标很多时，还容易使决策者作出矛盾和混乱的判断，使判断矩阵出现严重不一致的现象。

（4）在进行专家判断意见调查时，很难设计出使专家一看就懂的表格。

浙江大学左军教授1988年提出一种所谓判断矩阵间接给出法，能较好的解决上述四方面的问题。这一方法的实质是决策者用三标度（0，1，2）数值来判断同一层次上各指标的重要关系，给出一个所谓三标度的比较矩阵，然后选取其中某两个指标给出所谓基点重要程度的标度，再以此基点为依据，利用数学变换式将三标度比较矩阵转换成间接判断矩阵。

3．两两比较判断意见调查表

当决策者比较两个指标的重要性时，最直观和最容易的判断莫过于确定两者的重要关系，即确定谁重要，谁不重要，或者两者同样重要。这种比较的结果可以用0，1，2三种数值标度来表示。例如，若指标甲比指标乙重要（甲>乙），则用2表示，若指标甲和指标乙同样重要（甲＝乙），则用1表示，若指标甲没有指标乙重要（甲<乙），则用0表示。

4.3.2 评价因子权值的计算步骤

1．单层次模型的计算步骤

（1）构建间接判断矩阵

首先通过专家问卷得到三标度比较矩阵，将专家问卷表中相应位置上的元素均值四舍五入，就可得出矿渣型泥石流危险性评价指标两两判断比较表。

这种三标度比较矩阵除了表示各指标之间的重要关系外，还可以通过计算各指标的指数 r_i 对各指标进行重要性程度排序，当然这种排序还不能准确反映各指标的相对重要性程度。

各指标的重要性程度排序指数可以用下式计算：

$$r_i = \sum_{j=1}^{n} c_{ij} \qquad i = j = 1,2,\cdots,n \tag{4.1}$$

若用 r_{max} 表示最大的排序指数，r_{min} 表示最小的排序指数，u_{max} 表示排序指数最大的指标，u_{min} 表示排序指数最小的指标，则当选取这两个指标作为基点比较指标，经决策者比较，用层次分析法给出这个基点的相对重要性程度 b_m 后（见表 4.2），通过下面的交换式即可求得各指标的相对重要性程度：

$$b_{ij}=\begin{cases}\dfrac{r_i-r_j}{r_{\max}-r_{\min}}(b_m-1)+1 & r_i-r_j\geq 0\\ \left[\dfrac{r_i-r_j}{r_{\max}-r_{\min}}(b_m-1)+1\right]^{-1} & r_i-r_j<0\end{cases}\qquad (r,j=0,1,2,\cdots,n) \tag{4.2}$$

此变换式的意义在于：根据基点相对重要性程度的标度，将各指标的排序指数之差，从[0，(r_{max}-r_{min})]区间变换到能反映各指标相对重要性程度的[1～b_m]或[1/b_m～1]区间。这样就可以用 b_{ij} 来构成一个能反映各元素相对重要性程度的间接判断矩阵。

（2）将矩阵每一列指标元素正规化：

$$\overline{b_{ij}}=b_{ij}\Big/\sum_{k=1}^{n}b_{kj} \tag{4.3}$$

（3）将每一列指标正规化后的值按行相加：

$$\overline{W_i}=\sum_{i=1}^{n}\overline{b_{ij}} \tag{4.4}$$

（4）指标权值正规化：

$$W_i=\overline{W_i}\Big/\sum_{i=1}^{n}\overline{W_{ij}} \tag{4.5}$$

（5）计算间接判断矩阵最大特征根，并检验判断矩阵的一致性：

$$\lambda_{\max}=\sum_{i=1}^{n}(Aw)_i\Big/nw_i \tag{4.6}$$

$$CI=(\lambda_{\max}-n)/(n-1) \tag{4.7}$$

当判断矩阵具有完全一致性时，其一致性指标 CI=0。（λ max－n）值越大，CI 越大，矩阵的一致性越差。当检验判断矩阵是否具有满意一致性是，需要将 CI 与平均随机一致性指标 RI 进行比较，对于 1～9 阶矩阵，RI 值如表 4.3 所示。

表 4.3　平均随机一致性指标

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

当阶数大于 2 时，判断矩阵的一致性指标 CI 与同阶平均随机一致性指标 RI 之比，

记为 CR，即

$$CR=CI/RI \tag{4.8}$$

当 $CR=CI/RI<0.10$ 时，判断矩阵具有满意的一致性，否则就需要对判断矩阵进行调整。

2．多层次模型的计算步骤

（1）构造间接判断矩阵

与构造单层次间接判断矩阵方法一样，这里就不再赘述了。

（2）计算单一准则层下元素的相对重要性

根据判断矩阵计算对上一层某元素而言本层次与之有联系的各元素的相对重要性次序的权值。即把各判断矩阵 A 视为单层次子模型，按上述单层次模型中的方法去求解特征根问题 $AW=\lambda_{max}W$。所得特征向量 W 经正规化后作为本层次元素对于上一层次元素的排序权值。λ_{max} 和 W 的计算方法如前面所述，此处不再重复。

（3）判断矩阵的一致性检验

在得到 λ_{max} 和所对应的特征向量 $W=[W_1,\ W_2,\ \cdots\cdots,\ W_n]^T$ 后，还需要检验各判断矩阵的一致性。进行一致性检验的步骤与单层次模型完全相同。

（4）计算各层次上元素的组合权重（层次总排序）

层次总排序需要从上到下逐层进行。对于最高层，它的层次单排序即为总排序。如果上一层所有元素 A_1、A_2 、……、A_n 的组合权重已知，权值分别为 a_1、a_2、……、a_n，与 A_i 相应的本层元素 B_1、B_2、……、B_n 的单排序结果为 b_{i1}、b_{i2}、……、$b_{in}(i=1,2,\cdots\cdots,n)$。若 B_j 与 A_i 无联系时，$b_{ij}=0$，显然有 $\sum_{j=1}^{n}b_j=1$。

（5）评价层次总排序计算结果的一致性

为评价层次总排序计算结果的一致性，也需计算与层次单排序项类似的检验量。设 $C.I.$ 为层次总排序一致性指标。其计算公式为：

$$C.I.=\sum_{i=1}^{n}a_iC.I._i \tag{4.9}$$

$C.I._i$ 为 A_i 相应的 B 层次中判断矩阵的一致性指标；a_i 为 A_i 对应的权值

设 $R.I.$ 为层次总排序随机一致性指标。其计算公式为：

$$R.I.=\sum_{i=1}^{n}a_iR.I._i \tag{4.10}$$

$R.I._i$ 为 A_i 相应的 B 层次中判断矩阵的随机一致性指标，这样依照公式(4.8)：

$$C.R.=C.I./R.I. \tag{4.11}$$

当 $C.R.<0.1$ 时，层次总排序的结果具有满意的一致性。若不满足一致性条件，需对判断矩阵进行调整。AHP 的最终结果是得到相对于总的目标各决策方案的优先顺序权重，并据此做出决策。

4.3.3 模糊综合评判法

由于泥石流形成条件及地质环境的复杂性，因而对其危险性评价需要研究的变量关系较多且错综复杂，其中既有确定的可循的变化规律，又有不确定的随机变化规律；人们对地质环境的认识既有精确的一面，也有模糊的一面。用绝对的“非此即彼”有时不能准确地描述地质环境中的客观现实，经常存在着“亦此亦彼”的模糊现象，其刻划与描述也多用自然语言来表达。而自然语言最大的特点是它的模糊性。从逻辑上讲，模糊现象不能用 1 真（是）或 0 假（否）二值逻辑来刻划，而是需要一种用区间[0，1]的多值（或连续值）逻辑来描述。可见，运用模糊理论解决地质环境中泥石流危险性评价问题，是模拟人脑某些思维方式，提高认识地质体的一种有效方法。因此，对泥石流危险性评价中引入了模糊综合评判方法是客观事物的需要，也是主观认识能力的发展。

模糊数学理论为研究和处理具有双重不确定性的事物提供了新方法，其核心是用参数间的模糊关系替代数学假设基础上求出的解析关系。

1．模糊综合评判数学模型

设 $U=(u_1，u_2，\cdots\cdots，u_m)$为评价因子集，$V=(v_1，v_2，\cdots\cdots，v_n)$为危险性等级集，评价因子论域和危险性等级论域之间的模糊关系用矩阵 R 来表示：

$$R=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \tag{4.12}$$

式中，$r_{ij}=u(u_i，v_j)$表示就 u_i 因子而言，被称为 v_j 的隶属度；矩阵 R 中第 i 行 $R_i=(r_{i1}，r_{i2}，\cdots\cdots，r_{in})$为第 i 个评价因子 u_i 的单因素评判，它是 V 上的模糊子集。

实际上，不同因子在地质灾害危险性评价中所起的作用是有大小之分的，即必须考虑各因子的权重问题。假定 $a_1，a_2，\cdots\cdots，a_m$ 分别为评价因子 $u_1，u_2，\cdots\cdots，u_m$ 的权重，并满足 $a_1+a_2+\cdots\cdots+a_m=1$，令 $A=(a_1，a_2，\cdots\cdots，a_m)$，则 A 为反映了评价因子权重的模糊集（即权向量）。由权向量与模糊矩阵进行“合成”得到综合隶属度 B，即通过

模糊运算 $B=A\bullet R$，求出模糊集：

$B=(b_1，b_2，\cdots\cdots，b_n)(0\leqslant b_j\leqslant 1)$，其中 $b_j=\sum_{i=1}^{m}a_i r_{ij}(M(\bullet,+))$

根据最大隶属度准则，$b_{i_0}=\max_{1\leq i\leq n}\{b_j\}$ 所对应的分级即为危险度等级。

2．隶属度确定

隶属函数的确定虽然带有主观色彩，但还是具有一定客观规律性与科学性。确定隶属函数时应：①从实际问题的具体特征出发，总结和吸取人们长期积累的实践经验，特别要重视那些专家的经验。虽然隶属函数的确定容许有一定的人为技巧，但最终还是要以符合客观实际为标准。②在某些情况下，隶属函数可通过模糊统计试验来确定。一般来说，这种方法是较为有效的。③隶属函数还可以用概率统计的处理结果来确定。④在一定条件下，隶属函数也可以作为推理的产物，只要实验符合实际即可。⑤有些隶属函数可以经过模糊运算“并、交、余”求得。⑥在许多应用中，由于人们认识事物的局限性，因此开始只能建立一个近似的隶属函数，然后通过学习逐步修改使之完善。⑦判断隶属函数是否符合实际，主要看它是否正确地反映了元素隶属集合到不属于集合这一变化过程的整体特性，而不在于单个元素的隶属数值如何。对于应用问题，首先需要建立模糊集的隶属函数，确定隶属函数的一般方法有模糊统计法、三分法、模糊分布等。在客观事物中，最常见的是以实数 R 作论域的情形，并把实数 R 上模糊集的隶属函数称为模糊分布。根据问题的性质，选择符合实际情况的分布，则隶属函数的确定显得十分简便。常见的模糊分布有：矩形分布或半矩形分布、半梯形分布与梯形分布、三角形分布、抛物线分布、正态分布、哥西分布、岭形分布等。隶属度的确定实际上是单因素评判问题，评价因素根据它的数据特征可分为定量因素和定性因素。这里认为定量因素的数据特征为实数，定性因素的数据特征为特征状态。对于实数型定量因素，采用三角型隶属函数来确定评价因素对危险性等级的隶属度；对于特征状态型的定性因素，采用专家经验的方法确定评价因素对泥石流危险性等级的隶属度。隶属函数的分界值，以及定性因素的隶属度的给定，建议参考评价指标体系。依据具体情况，也可做特殊处理。

3．权重确定

确定权重应遵循以下三条原则：（1）客观性原则。根据分解出的各因素在整体中的客观地位和实际作用，确定各项因素的重要性程度，并依次分配给各因素不同比例的权重数。（2）导向性原则。根据评价的需要，评价者可有意识地将重要且带有方向性的因素的权重指标设定的明显地高于一般因素的权重指标。（3）可测性原则。就是指根据具

体项目的可测性大小确定权重的大小。

确定权重的方法有很多，如专家直接经验法、调查统计法、边坡敏感度方法、数理统计法、层次分析法等。由于地质环境系统的复杂性、不可逆性、模糊性，用精确的数学模型来求取评价因素的权重难度很大，有时对地质环境系统分析不够时，过分地相信定权的数学模型，反而使权重不尽合理，而根据专家的经验判断，有时其结论还较为可靠。本文主要采用层次分析法确定权重，它是多位专家的经验判断结合适当的数学模型再进一步运算确定权重，是一种较为合理可行的系统分析方法。

4. 二级模糊综合评判

在实际运用模糊综合评判的过程中，遵循灾害发生的规律，将评价总目标分划为几个子目标，每个子目标又对应数个评价因素指标，对每个子目标进行模糊综合评判，然后再以子目标为评价因素，以对评价总目标进行模糊综合评判，称之为二级模糊综合评判。

国内已有不少成功运用二级模糊综合评判的例子，二级模糊综合评判最大的优点在于分层次评价与我们人脑通常的思维方式吻合，特别是各个子目标下的因素指标相对较少、便于比较，这样便大幅度降低了确定权重和隶属度的难度。二级模糊综合评判的数学原理和方法与一级模糊综合评判完全相同，即分别对各级运用一次模糊综合评判，然后将计算结果作为已知值，再对上一级进行模糊评判运算。

4.4 大湖峪、枣香峪、文峪主要支沟泥石流危险性评价

大湖峪位于灵宝市阳平镇境内，海拔 680～2120m，相对高差 1440m。本区属黄河流域，主干水系为黄河一级支流大湖峪河，呈南北走向。大湖峪流域面积 33.26km^2，沟长 10.61km，主沟平均纵比降 135.7‰。大湖峪主要有东峪主峪道、西峪主峪道、黑峪子沟、小桐沟、庙南沟、西槽桐沟、太阳沟等 12 条支沟。

枣香峪位于灵宝市故县镇境内，其发源于小秦岭北麓老鸦岔，海拔 590～2413.8m，相对高差 1823.8m。本区主干水系为枣乡河，呈南北走向。枣香峪流域面积 52.04km^2，沟长 15.01km，主沟平均纵比降 112.6‰。枣香峪主要支沟有珠岔、寺范沟、鸥将沟、西长安岔、东长安岔、金洞岔。

文峪位于河南省灵宝市豫灵镇境内，海拔 530～2360m，从沟口往上约 4km 主峪道是军事禁区，采矿作业区位于其两条主要支沟—西峪和东峪内。其中西峪流域面积 13.30km^2，沟长 3730m，主沟平均纵比降 300‰，相对高差 1120m；东峪流域面积 13.80km^2，

沟长 6560m，主沟平均纵比降 195.1‰，相对高差 1280m。文峪主要支沟有西峪主峪道、西闯沟、西路匠沟、东峪主峪道。

本节将分别以大湖峪小桐沟、枣香峪西长安岔、文峪西闯沟为代表，详细论述研究区矿渣型泥石流危险性评价过程。

4.4.1 评价因子权值确定

权值是在多种评价因子综合时，对各个因子具有权衡轻重作用的数值，它要反映出不同评价因子间的相对重要性程度。不同类型的泥石流有不同的影响因素，同一因素对不同类型泥石流的影响程度也不同。就如矿渣型泥石流，它的影响因素与一般泥石流有所不同，最明显的区别就是松散物质来源，它的物源主要是采矿废渣。

1．构造间接判断矩阵

把前面所述六个指标作为本次泥石流危险度评价因子，建立因子集合 $U=(u_1,u_2,u_3,u_4,u_5,u_6)=$（有效渣量、纵坡降比、渣堆补给长度与沟长比、河流弯曲度、河道堵塞系数、汇水面积）。

根据三标度法，将所有专家问卷表中相应位置上的元素均值四舍五入，得出如表 4.4 所示的灵宝市小秦岭金矿区矿渣型泥石流危险度评价因子两两判断比较汇总表。

表 4.4　灵宝市小秦岭金矿区矿渣型泥石流危险度评价因子两两判断比较汇总表

指标	有效渣量 u_1	纵坡降比 u_2	渣堆补给长度与沟长比 u_3	河流弯曲度 u_4	河道堵塞系数 u_5	汇水面积 u_6	$r_i=\sum_{i=1}^{6}u_{ij}$
（0）	（1）	（2）	（3）	（4）	（5）	（6）	（7）
有效渣量 u_1	1	1	2	2	2	1	9
纵坡降比 u_2	1	1	2	2	2	2	10
渣堆补给长度与沟长比 u_3	0	0	1	2	0	0	3
河流弯曲度 u_4	0	0	0	1	1	0	2
河道堵塞系数 u_5	0	0	2	1	1	0	4
汇水面积 u_6	1	0	2	2	2	1	8

由公式(4.1)，$r_{max}=10$——u_2，$r_{min}=2$——u_4。取这两个指标作为基点，参照表 4.2，结合专家意见，给出这个基点的相对重要性程度 $b_m=5$。

由公式(4.2)～(4.5)依次计算出泥石流危险性评价因子权值间接判断矩阵表（表 4.5）。

据表4.5(7)栏括号内所得计算结果，各评价因子的权值为：有效渣量 u_1 权值为0.236、纵坡降比 u_2 权值为0.277、渣堆补给长度与沟长比 u_3 权值为0.095、河流弯曲度 u_4 权值为0.082、河道堵塞系数 u_5 权值为0.110、汇水面积 u_6 权值为0.200。

表4.5 灵宝市小秦岭金矿区矿渣型泥石流危险度评价因子权值间接判断矩阵表

指标	有效渣量 u_1	纵坡降比 u_2	渣堆补给长度与沟长比 u_3	河流弯曲度 u_4	河道堵塞系数 u_5	汇水面积 u_6	$\overline{W_i}=\sum_{j=1}^{n}\overline{b_{ij}}$ $(W_i=\overline{W_i}\Big/\sum_{i=1}^{n}\overline{W_{ij}})$ $n=1,2,\cdots,6$ $j=1,2,\cdots,6$
(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
有效渣量 u_1	1 (0.255)	0.8 (0.220)	2.5 (0.165)	2.75 (0.196)	2.25 (0.178)	1.25 (0.233)	1.246 (0.236)
纵坡降比 u_2	1.25 (0.318)	1 (0.275)	2.75 (0.181)	3 (0.214)	2.5 (0.197)	1.5 (0.279)	1.466 (0.277)
渣堆补给长度与沟长比 u_3	0.4 (0.102)	0.364 (0.100)	1 (0.066)	1.25 (0.089)	0.8 (0.063)	0.444 (0.083)	0.503 (0.095)
河流弯曲度 u_4	0.364 (0.093)	0.333 (0.092)	0.8 (0.053)	1 (0.071)	0.667 (0.053)	0.4 (0.075)	0.436 (0.082)
河道堵塞系数 u_5	0.444 (0.113)	0.4 (0.110)	1.25 (0.082)	1.5 (0.107)	1 (0.079)	0.5 (0.093)	0.585 (0.110)
汇水面积 u_6	0.8 (0.204)	0.667 (0.183)	2.25 (0.148)	2.5 (0.179)	2 (0.158)	1 (0.186)	1.058 (0.200)
$\sum_{i=1}^{n}b_{ij}$ $n=1,2,\cdots,6$ $j=1,2,\cdots,6$	4.258	3.564	10.550	12.000	9.217	5.094	5.293

2．求判断矩阵的最大特征根

计算表4.5所示间接判断矩阵最大特征根：

代入数据

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.8 & 2.5 & 2.75 & 2.25 & 1.25 \\ 1.25 & 1 & 2.75 & 3 & 2.5 & 1.5 \\ 0.4 & 0.364 & 1 & 1.25 & 0.8 & 0.444 \\ 0.364 & 0.333 & 0.8 & 1 & 0.667 & 0.4 \\ 0.444 & 0.4 & 1.25 & 1.5 & 1 & 0.5 \\ 0.8 & 0.667 & 2.25 & 2.5 & 2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.236 \\ 0.277 \\ 0.095 \\ 0.082 \\ 0.110 \\ 0.200 \end{bmatrix}$$

由公式(4.6)计算得出：

$$\lambda_{max}=\sum_{i=1}^{6}(Aw)_i\Big/6w_i=6.063$$

所对应的特征向量为：

$$w=\{0.236 \quad 0.277 \quad 0.095 \quad 0.082 \quad 0.110 \quad 0.200\}^T$$

3．一致性检验

由于客观事物的复杂性和人们对事物认识的片面性，判断矩阵很难有严格的一致性，但应该要求有大致的一致性。因此，在得到 λ_{max} 后，还需要对判断矩阵进行一致性和随机性检验。

由公式(4.7)可得，$CI=(\lambda_{max}-n)/(n-1)=\dfrac{6.063-6}{6-1}=0.0126$

此判断矩阵阶数为 6，查表 4.3 可得平均随机一致性指标 RI=1.24，由公式(4.8)可得，$CR=CI/RI=\dfrac{0.0126}{1.24}=0.0102<0.1$，说明判断矩阵具有满意的一致性，上述特征向量 w 可作为权向量。

4.4.2 泥石流危险度等级划分

参照《泥石流灾害防治工程设计规范（DZT0239－2004）》以及当地实际情况，将研究区泥石流危险度划分为一般危险、轻度危险、中度危险、高度危险四个等级。这样泥石流危险度等级集 $V=\{v_1,v_2,v_3,v_4\}$={一般危险，轻度危险，中度危险，高度危险}={Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ}。如表 4.6 所示，分别给出各个评价因子四个等级的界限值。

表 4.6 灵宝市小秦岭金矿区矿渣型泥石流危险度评价因子危险度等级及赋值表

评价因子	危险度等级划分			
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
有效渣量 u_1（万 m^3）	10	20	30	50
纵坡降比 u_2（‰）	100	200	300	600
渣堆补给长度与沟长比 u_3	0.3	0.4	0.5	0.8
河流弯曲度 u_4	1.05	1.08	1.10	1.20
河道堵塞系数 u_5	0.3	0.4	0.5	0.7
汇水面积 u_6（km^2）	0.5	1	2	5

这里需要特别指出的是，该评价标准是根据研究区泥石流隐患的实际情况，并参照该地区泥石流历史活动资料及有关规范给出的，由于矿渣型泥石流具有其特殊性，因此该评价标准仅适用于该地区或类似地区情况的泥石流危险性评价。

4.4.3 隶属度确定

在泥石流模糊综合评判中，隶属函数多采用线性分布，因为权函数中已考虑了各评价因子对泥石流危险度的影响大小，因此，模糊变换不宜采用突出重要因子的先取最小

值再取最大值的变换方法，本文对隶属度的确定采用建立一元线性隶属函数，就是线性分布中半梯形分布和三角形分布相结合的情况，图 4.4 为隶属函数曲线图。

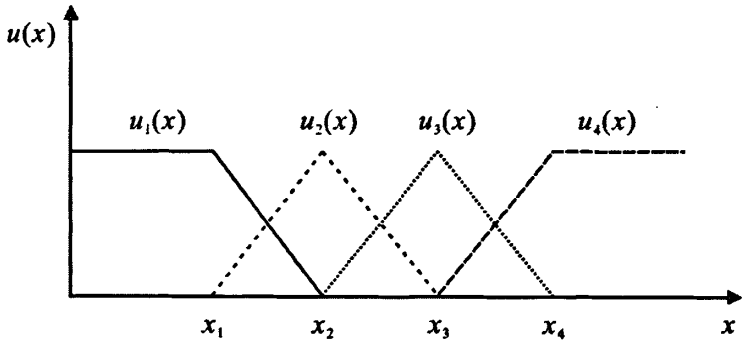


图 4.4　隶属函数曲线图

隶属函数的数学表达式为：

$$u_1(x)=\begin{cases}1 & x\le x_1\\ \dfrac{x_2-x}{x_2-x_1} & x_1<x<x_2\\ 0 & x\ge x_2\end{cases} \tag{4.13}$$

$$u_2(x)=\begin{cases}0 & x\le x_1 \text{或} x\ge x_3\\ \dfrac{x-x_1}{x_2-x_1} & x_1<x\le x_2\\ \dfrac{x_3-x}{x_3-x_2} & x_2<x<x_3\end{cases} \tag{4.14}$$

$$u_3(x)=\begin{cases}0 & x\le x_2 \text{或} x\ge x_4\\ \dfrac{x-x_2}{x_3-x_2} & x_2<x\le x_3\\ \dfrac{x_4-x}{x_4-x_3} & x_3<x<x_4\end{cases} \tag{4.15}$$

$$u_4(x)=\begin{cases}0 & x\le x_3\\ \dfrac{x-x_3}{x_4-x_3} & x_3<x<x_4\\ 1 & x\ge x_4\end{cases} \tag{4.16}$$

其中：U_m（x）代表泥石流危险度对 m 级标准的隶属度，m=1,2,3,4；

x_i代表某评价因子第 m 级评价标准，i=1,2,3,4；

x 代表某评价因子的实测数值。

研究区大湖峪、枣香峪、文峪及其 22 条主要支沟危险度评价因子实测数值如表 4.7 所示。

表 4.7　灵宝市小秦岭金矿区各峪道主要支沟泥石流危险度评价因子实测数据表

主峪道名	支沟名	有效渣量（万 m^3）	纵坡降比（‰）	渣堆补给长度与沟长比	河流弯曲度	河道堵塞系数	汇水面积（km^2）
枣香峪	珠岔	30.59	373.73	0.31	1.06	0.3114	1.96
	寺范沟	73.76	212.89	0.62	1.17	0.6063	5.93
	鸥将沟	37.11	268.98	0.36	1.08	0.3556	3.98
	西长安岔	16.23	347.92	0.48	1.09	0.4797	1.88
	东长安岔	11.10	351.25	0.59	1.09	0.5935	0.96
	金洞岔	2.95	287.77	0.29	1.10	0.1590	4.00
大湖峪	东峪主峪道	11.00	216.12	0.22	1.12	0.1211	11.68
	黑峪子沟	18.02	379.45	0.28	1.80	0.1698	3.28
	雷家坡	3.25	141.49	0.24	1.07	0.2021	3.96
	东沟	9.28	295.59	0.25	1.08	0.2412	2.59
	麻沟子	6.58	690.53	0.19	1.03	0.1879	0.51
	西峪主峪道	78.25	162.09	0.42	1.42	0.3485	16.74
	小桐沟	23.80	382.91	0.52	1.06	0.5151	1.03
	庙南沟	13.18	446.93	0.74	1.04	0.5989	1.42
	西槽桐沟	36.57	545.81	0.96	1.02	0.9617	0.54
	东槽桐沟	43.55	601.92	0.73	1.11	0.7250	0.54
	槽桐沟	50.71	168.84	0.71	1.09	0.5769	2.39
	太阳沟	5.96	345.44	0.34	1.24	0.3414	1.39
文峪	西峪主峪道	17.55	300.03	0.43	1.09	0.4318	13.30
	西闯沟	19.56	301.27	0.30	1.06	0.2967	1.67
	西路匠沟	4.32	609.91	0.39	1.10	0.3776	0.91
	东峪主峪道	6.64	195.10	0.07	1.15	0.0671	13.80

4.4.4 模糊综合评判

1．一级模糊评判

见式(4.12)，研究区泥石流危险度等级集 V 和泥石流危险度评价因子集 U 之间同样存在一种模糊关系，这种模糊关系可用 6×4 维模糊矩阵来表示：

$$R=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} & r_{54} \\ r_{61} & r_{62} & r_{63} & r_{64} \end{bmatrix}$$

其中 r_{ij} 表示(u_i, v_j)具有关系 R 的程度（隶属度）。

由式(4.13)～(4.16)，将各支沟的六种评价因子实测数值和危险度等级所赋数值代入其相应的隶属函数求得 r_{ij}，从而得到各单沟模糊评判矩阵结果。模糊变换方法采用 $M(\bullet,+)$一加权平均（一型），由此得 $B=A\cdot R$，依据最大隶属度原则，取 B 中最大值对应的等级。

（1）大湖峪小桐沟泥石流危险度一级模糊评价结果：

$$R=\begin{bmatrix} 0 & 0.62 & 0.38 & 0 \\ 0 & 0 & 0.724 & 0.276 \\ 0 & 0 & 0.933 & 0.067 \\ 0.667 & 0.333 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9 & 0.1 \\ 0 & 0.97 & 0.03 & 0 \end{bmatrix}$$

$B=A\cdot R=(0.0547,0.3670,0.4834,0.0939)$，根据最大隶属度原则，为中度危险。

（2）枣香峪西长安岔泥石流危险度一级模糊评价结果：

$$R=\begin{bmatrix} 0.377 & 0.623 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.84 & 0.16 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0 \\ 0 & 0.12 & 0.88 & 0 \end{bmatrix}$$

$B=A\cdot R=(0.0886,0.2524,0.6137,0.0442)$，根据最大隶属度原则，为中度危险。

（3）文峪西闯沟泥石流危险度一级模糊评价结果：

$$R=\begin{bmatrix} 0.044 & 0.956 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.996 & 0.004 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.667 & 0.333 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.333 & 0.667 & 0 \end{bmatrix}$$

$B = A \cdot R = (0.2700, 0.3180, 0.4098, 0.0012)$，根据最大隶属度原则，为中度危险。

其它 19 条沟谷的一级模糊评判矩阵在这里就不一一赘述了，灵宝市小秦岭金矿区矿渣型泥石流危险度一级模糊评价结果见表 4.8。

表 4.8　灵宝市小秦岭金矿区矿渣型泥石流危险度一级模糊评判结果表

主峪道名	支沟名	一级模糊评判结果				危险等级
		Ⅰ隶属度	Ⅱ隶属度	Ⅲ隶属度	Ⅳ隶属度	
枣香峪	珠岔	0.2392	0.0558	0.6330	0.0750	Ⅲ
	寺范沟	0	0.2413	0.1688	0.5909	Ⅳ
	鸥将沟	0.0820	0.2909	0.3426	0.2155	Ⅲ
	西长安岔	0.0886	0.2524	0.6137	0.0442	Ⅲ
	东长安岔	0.2252	0.2509	0.4142	0.1088	Ⅲ
	金洞岔	0.4400	0.0339	0.3917	0.1334	Ⅰ
大湖峪	东峪主峪道	0.4165	0.2558	0.1103	0.2164	Ⅰ
	黑峪子沟	0.2515	0.1885	0.3184	0.2406	Ⅲ
	雷家坡	0.6294	0.1696	0.0693	0.1307	Ⅰ
	东沟	0.4400	0.0942	0.4254	0.0394	Ⅰ
	麻沟子	0.7180	0.0040	0	0.2770	Ⅰ
	西峪主峪道	0.1600	0.3030	0.0190	0.4630	Ⅳ
	小桐沟	0.0547	0.3670	0.4834	0.0939	Ⅲ
	庙南沟	0.2423	0.1907	0.2993	0.2667	Ⅲ
	西槽桐沟	0.2660	0.0160	0.2078	0.5092	Ⅳ
	东槽桐沟	0.2162	0.0222	0.1718	0.6272	Ⅳ
	槽桐沟	0.0863	0.2317	0.3095	0.3715	Ⅳ
	太阳沟	0.3580	0.2040	0.3130	0.1240	Ⅰ
文峪	西峪主峪道	0.0576	0.3619	0.3792	0.2003	Ⅲ
	西闯沟	0.2700	0.3180	0.4098	0.0012	Ⅲ
	西路匠沟	0.3025	0.3375	0.0820	0.2770	Ⅱ
	东峪主峪道	0.3586	0.2634	0.0410	0.2410	Ⅰ

2．二级模糊综合评判

目前利用模糊综合评判方法来进行泥石流危险性评判时，对于评价因子一般采用的是一级模糊评判，而泥石流这种复杂系统，由于其影响因素很多，且各因素之间往往还有层次之分，采用一级模糊评判，难以比较系统中事物之间的优劣次序。在这种情况下，考虑将评价因子集 U 按某些属性分成几类，先对每一类做综合评判，然后再对评判结果

进行“类”之间的高层次的综合评判。

二级模糊综合评判方法是把整个系统划分为构成系统的要素和组成要素的因子两个层次，对两个层次进行综合，既先在各评价因子的基础上对各评价要素进行低层次、小系统的一级模糊评判，又此基础上对系统总目标进行高层次、大系统的二级模糊综合评判，由此得出最终评价结果，从而对泥石流危险性进行合理预测。

本文将六个评价因子按其自然属性分为松散物情况、流域地表特征、沟谷构造特征三类。其中松散物质情况包括有效渣量和渣堆补给长度与沟长比；流域地表特征包括纵坡降比和汇水面积；沟谷构造特征包括河流弯曲度和河道堵塞系数。前面已经对评级因子作了一级模糊评判，下面将进行二级模糊综合评判。

（1）确定评价因子集

$U=\{U_1,U_2,U_3\}$

其中，U_1—松散物质情况；U_2—流域地表特征；U_3—沟谷构造特征

（2）建立评价系统层次分析二级模型

建立评价系统层次分析二级模型：以泥石流危险度为总目标，松散物情况、流域地表特征、沟谷构造特征为要素层 U，各影响因素为评价因子层 C，如图 4.5 所示，建立二级评价因子层次结构模型。

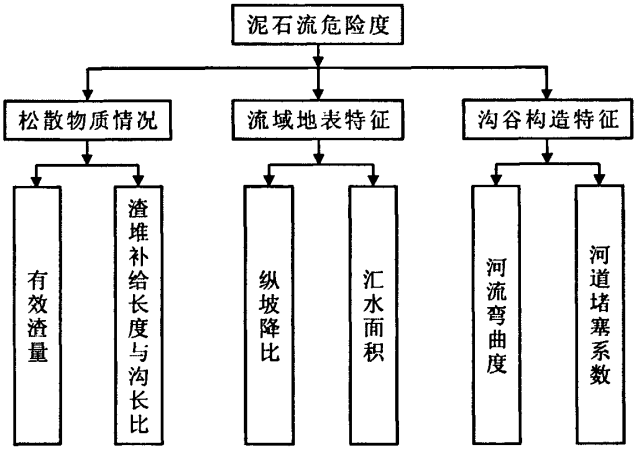


图 4.5　二级评价因子层次结构模型图

（3）构造判断矩阵

采用三标度法对各层中的因子对上一层次目标的相对重要性进行两两比较，构造判断矩阵。由公式(4.3)～(4.6)及(4.9)～(4.11)，依次计算出最大特征根、对应的特征向量、各层次的单排序以及进行判断矩阵一致性检验，其结果见表 4.9～4. 13。

表 4.9　A-U 判断矩阵表

A	U_1	U_2	U_3	W
U_1	1	0.3333	3	0.2605
U_2	3	1	5	0.6334
U_3	0.3333	0.2	1	0.1062

λ_{max}=3.0051，CI=0.0276，RI=0.58，CR=0.0476<0.1，具有满意的一致性。

表 4.10　U_1-C 判断矩阵表

U_1	u_1	u_3	W
u_1	1	3	0.75
u_3	0.3333	1	0.25

λ_{max}=2，显然满足一致性。

表 4.11　U_2-C 判断矩阵表

U_2	u_2	u_6	W
u_2	1	3	0.75
u_6	0.3333	1	0.25

λ_{max}=2，显然满足一致性。

表 4.12　U_3-C 判断矩阵表

U_3	u_4	u_5	W
u_4	1	1	0.5
u_5	1	1	0.5

λ_{max}=2，显然满足一致性。

表 4.13　二级模糊评价因子权值总排序表

层次 U / 层次 C	U_1	U_2	U_3	*W*
	0.2605	0.6334	0.1062	*权值总排序*
u_1	0.75	0	0	*0.1954*
u_3	0.25	0	0	*0.0651*
u_2	0	0.75	0	*0.4751*
u_6	0	0.25	0	*0.1583*
u_4	0	0	0.5	*0.0531*
u_5	*0*	*0*	*0.5*	*0.0531*

由公式(4.9)～(4.11)，该矩阵具有满意的一致性。

（4）二级模糊综合评判结果

将一级评价模糊集合与二级综合评价权值进行模糊运算，得到二级综合评价模糊集合，根据最大隶属度原则，判别最终评价结果。

1）大湖峪小桐沟二级模糊综合评判结果：

$$R_{u_1}=\begin{bmatrix}0 & 0.62 & 0.38 & 0\\ 0 & 0 & 0.933 & 0.067\end{bmatrix}$$

$$R_{u_2}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0.724 & 0.276\\ 0 & 0.97 & 0.03 & 0\end{bmatrix}$$

$$R_{u_3}=\begin{bmatrix}0.667 & 0.333 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0.9 & 0.1\end{bmatrix}$$

进行一级模糊评判

$$B_{u_1}=W_{u_1}\cdot R_{u_1}=(0,0.465,0.5183,0.0168)$$

$$B_{u_2}=W_{u_2}\cdot R_{u_2}=(0,0.2425,0.5505,0.207)$$

$$B_{u_3}=W_{u_3}\cdot R_{u_3}=(0.3335,0.1665,0.45,0.05)$$

由此得二级模糊评判矩阵

$$R=\begin{bmatrix}0 & 0.465 & 0.5183 & 0.0168\\ 0 & 0.2425 & 0.5505 & 0.207\\ 0.3335 & 0.1665 & 0.45 & 0.05\end{bmatrix}$$

作二级模糊评判，$B=W\cdot R=(0.0354,0.2924,0.3262,0.1408)$，由最大隶属度原则，为中度危险。

2）枣香峪西长安岔二级模糊综合评判结果：

$$R_{u_1}=\begin{bmatrix}0.377 & 0.623 & 0 & 0\\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0\end{bmatrix}$$

$$R_{u_2}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0.8403 & 0.1597\\ 0 & 0.12 & 0.88 & 0\end{bmatrix}$$

$$R_{u_3}=\begin{bmatrix}0 & 0.5 & 0.5 & 0\\ 0 & 0.2 & 0.8 & 0\end{bmatrix}$$

进行一级模糊评判

$$B_{u_1}=W_{u_1}\cdot R_{u_1}=(0.2828,0.5172,0.2,0)$$

$$B_{u_2}=W_{u_2}\cdot R_{u_2}=(0,0.03,0.8502,0.0399)$$

$$B_{u_3}=W_{u_3}\cdot R_{u_3}=(0,0.35,0.65,0)$$

由此得二级模糊评判矩阵

$$R=\begin{bmatrix}0.2828 & 0.5172 & 0.2 & 0\\ 0 & 0.03 & 0.8502 & 0.1198\\ 0 & 0.35 & 0.65 & 0\end{bmatrix}$$

作二级模糊评判，$B=W\cdot R=(0.0737,0.1909,0.6596,0.0759)$，由最大隶属度原则，

为中度危险。

3）文峪西闯沟二级模糊综合评判结果：

$$R_{u_1}=\begin{bmatrix}0.044 & 0.956 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

$$R_{u_2}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0.9958 & 0.0042\\ 0 & 0.33 & 0.67 & 0\end{bmatrix}$$

$$R_{u_3}=\begin{bmatrix}0.667 & 0.333 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

进行一级模糊评判

$$B_{u_1}=W_{u_1}\cdot R_{u_1}=(0.283,0.717,0,0)$$

$$B_{u_2}=W_{u_2}\cdot R_{u_2}=(0,0.0825,0.9144,0.0032)$$

$$B_{u_3}=W_{u_3}\cdot R_{u_3}=(0.8335,0.1665,0,0)$$

由此得二级模糊评判矩阵

$$R=\begin{bmatrix}0.283 & 0.717 & 0 & 0\\ 0 & 0.0825 & 0.9144 & 0.0032\\ 0.8335 & 0.1665 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

作二级模糊评判，$B=W\cdot R=(0.1622,0.2568,0.5792,0.0020)$，由最大隶属度原则，为中度危险。

其它 19 条沟谷的二级模糊评判矩阵在这里就不一一赘述了，灵宝市小秦岭金矿区矿渣型泥石流危险度二级模糊综合评判结果见表 4.14。

4.4.5 两级评判结果对比分析

从以上两级评判结果可以看出，22 条沟谷的一级模糊评判与二级模糊判别结果趋于一致，且与野外实地调查分析结果相吻合。其中，有 5 条沟谷的泥石流危险性为Ⅳ级，即高度危险，依危险度大小排序分别为东槽桐沟、西槽桐沟、寺范沟、大湖峪西峪主峪道和槽桐沟；危险性为III级的有 9 条沟谷；危险性为 II 级的有 1 条沟谷；剩余 7 条沟谷的危险性为 I 级。

一级模糊评判已经成为泥石流危险性评判中广泛使用的一种方法，而二级模糊评判的应用仍在探讨当中。从评判原理上看，二级模糊评判更接近于人脑思维，其将评价因子分门别类、进行层次划分，避免了关联不大的因子间的主次评判，尤其在评价因子过多的情况下，使评判的思路更加清晰，省去了大量繁琐的计算，较之一级模糊评判方法具有极大的优越性。在因子及隶属函数选择合理的情况下，二者均可较为准确的对泥石

流的危险性进行评价。

本文将二级模糊评判原理的成功引入，对今后类似地区泥石流危险性评价方法的研究具有一定的借鉴意义。

表 4.14 灵宝市小秦岭金矿区矿渣型泥石流危险度二级模糊综合评判结果表

主峪道名	支沟名	二级模糊评判结果				危险等级
		Ⅰ隶属度	Ⅱ隶属度	Ⅲ隶属度	Ⅳ隶属度	
枣香峪	珠岔	0.1418	0.0358	0.6999	0.1225	Ⅲ
	寺范沟	0	0.4138	0.1401	0.4462	Ⅳ
	鸥将沟	0.0473	0.2715	0.5075	0.1739	Ⅲ
	西长安岔	0.0737	0.1909	0.6596	0.0253	Ⅲ
	东长安岔	0.1866	0.1938	0.5032	0.1165	Ⅲ
	金洞岔	0.5228	0.0581	0.3136	0.1056	Ⅰ
大湖峪	东峪主峪道	0.4180	0.2941	0.1191	0.1690	Ⅰ
	黑峪子沟	0.1569	0.1567	0.4417	0.2448	Ⅲ
	雷家坡	0.6092	0.2325	0.0549	0.0173	Ⅰ
	东沟	0.5813	0.0740	0.3136	0.0312	Ⅰ
	麻沟子	0.5219	0.0032	0	0.4751	Ⅰ
	西峪主峪道	0.2067	0.3737	0.0130	0.4069	Ⅳ
	小桐沟	0.0354	0.2924	0.3262	0.1408	Ⅲ
	庙南沟	0.1863	0.1539	0.3485	0.3114	Ⅲ
	西槽桐沟	0.1988	0.0127	0.2168	0.5718	Ⅳ
	东槽桐沟	0.1457	0.0127	0.1499	0.6919	Ⅳ
	槽桐沟	0.1480	0.2828	0.2157	0.3536	Ⅳ
	太阳沟	0.4649	0.1439	0.2664	0.1251	Ⅰ
文峪	西峪主峪道	0.0479	0.2568	0.5364	0.1590	Ⅲ
	西闯沟	0.1622	0.2568	0.5792	0.0020	Ⅲ
	西路匠沟	0.2410	0.4751	0.0531	0.2309	Ⅱ
	东峪主峪道	0.4517	0.3369	0.0266	0.1850	Ⅰ

4.5 本章小结

本章对研究区矿渣型泥石流危险性进行了评价研究，得出如下结论：

（1）泥石流危险度是指一定范围（单沟或区域）内所存在的一切人和物有遭到泥石流损害的可能性大小。本文研究的是单沟泥石流危险度评价。

（2）结合前人对矿渣型泥石流的研究，提出了适用研究区的矿渣型泥石流危险性

评价因子：有效渣量、纵坡降比、渣堆补给长度与沟长比、河流弯曲度、河道堵塞系数和汇水面积。

（3）通过一级和二级模糊综合评判结果对比分析表明：研究区 22 条泥石流隐患沟的一级模糊评判与二级模糊评判结果趋于一致，且与野外实地调查分析结果相吻合。

结论与展望

本文以灵宝市小秦岭金矿区枣香峪、大湖峪、文峪及其22条主要支沟为研究对象，通过野外实地调查、室内数据分析，运用AHP—模糊综合评判法，对研究区矿渣型泥石流危险性评价因子的选取及其权重的确定、模糊评判矩阵的构建、评判结果的分析等方面进行了深入的研究，论文的主要结论和成果如下：

（1）灵宝市小秦岭金矿区地形复杂，地貌差异大。区内峰峦叠嶂，山高坡陡，沟谷纵横，纵比降大。金矿区主要集中在文峪、枣香峪、大湖峪等上游地区，采矿活动不仅使地形地貌受损，增加了不稳定隐患，而且产生的大量废渣就近堆放在坑口的沟道内或斜坡上，多数未采取任何防护措施，严重挤占、堵塞沟道，成为矿渣型泥石流灾害隐患形成的重要物源。

（2）灵宝市小秦岭金矿区在采矿活动中存在着资源毁损、地质灾害和环境污染等环境地质问题。

（3）结合前人对矿渣型泥石流的研究，提出了适用研究区的矿渣型泥石流危险性评价因子：有效渣量、纵坡降比、渣堆补给长度与沟长比、河流弯曲度、河道堵塞系数和汇水面积。

（4）采用三标度法，并结合专家意见，得到矿渣型泥石流危险性评价因子间接判断矩阵；运用层次分析法对各评价因子权值进行了计算，所得各评价因子的权值为：有效渣量u_1权值为0.236、纵坡降比u_2权值为0.277、渣堆补给长度与沟长比u_3权值为0.095、河流弯曲度u_4权值为0.082、河道堵塞系数u_5权值为0.110、汇水面积u_6权值为0.200。

（5）运用一级模糊评判法对22条沟谷泥石流危险度进行了评价；采用目标分析法，构建了矿渣型泥石流危险性评价二级层次模型，并进行了二级模糊综合评判。从两级模糊评判结果得出，22条沟谷的一级模糊评判与二级模糊评判结果趋于一致，且与野外实地调查分析结果相吻合。其中，5条沟谷的泥石流危险度为Ⅳ级，即高度危险，依危险度大小排序分别为东槽桐沟、西槽桐沟、寺范沟、大湖峪西峪主峪道和槽桐沟；危险度为Ⅲ级的有9条沟谷；危险度为Ⅱ级的有1条沟谷；剩余7条沟谷的危险度为Ⅰ级。

虽然本文取得了以上成果，但亦不可避免地存在一些问题和不足，需要在以后的工作中给予进一步解决与完善，主要有：

（1）由于未收集到研究区详细的降雨资料，本文假定研究区降雨量是一样的。在同等降雨量条件下进行泥石流危险性评价，虽然取得了一定成果，但一定程度上影响了

泥石流危险性评判的精准性。

（2）隶属函数的确定，是本次研究中进行模糊综合评判的一个重要步骤，要用模糊集合去描述和分析某个模糊现象，建立模糊子集，首先必须确定隶属函数。确定隶属函数的方法很多，有统计试验法、对比平均法和模糊统计法等。本文采用的是一元线性隶属函数，就是线性分布中半梯形分布和三角形分布相结合的情况，在今后的工作中还需要更深入研究。

（3）泥石流风险评价包括泥石流危险度评价和泥石流易损度评价。本文研究的是泥石流危险度评价，并没有上升到易损度评价层面。而易损度评价是当今自然灾害评价中正在探索的前沿课题，泥石流易损度评价目前仍是泥石流研究中的一个新领域。因此，今后应加强泥石流易损度评价研究工作，力求建立研究区泥石流风险评价体系，为减灾、防灾和当地政府决策提供实用的理论依据。

参考文献

[1]康志成，李焯芬，马蔼乃，罗锦添．中国泥石流研究[M]．北京：科学出版社，2004

[2]徐友宁，陈社斌，张江华等．陕西潼关金矿区泥石流潜势度评价[J]．水文地质工程地质，2006，33(2)：89-92

[3]徐友宁，李育敬，何芳．潼关金矿区矿渣型泥石流地质灾害特征及防治对策[J]．山地学报，2006，(6)：667-671

[4]张丽萍，唐克丽．矿山泥石流[M]．北京：地质出版社，2001

[5]杜榕桓，康志成，章书成．试论我国泥石流分类[A]．中国科学院成都地理研究所．全国泥石流防治经验交流会议论文集[C]．重庆：科学文献出版社重庆分社，1982：126-131

[6]康志成，章书成，陈景武．云南东川蒋家沟泥石流观测实验研究概论[A]．中国科学院成都地理研究所．全国泥石流防治经验交流会议论文集[C]．重庆：科学技术文献出版社重庆分社，1982：140-153

[7]钟敦伦，谢洪．泥石流与人类经济活动[J]．长江流域资源与环境，1999，8(3)：327-333

[8]孟晖，胡东涛．我国主要人类工程活动引起的滑坡、崩塌和泥石流灾害[J]．工程地质学报，1996，4(4)：71-77

[9]钟敦伦．试论地震在泥石流形成中的作用[A]．中国科学院成都地理研究所．泥石流论文集(1)[C]．重庆：科学技术文献出版社重庆分社，1981：30-35

[10]吴积善．泥石流体结构[A]．中国科学院成都地理研究所.泥石流论文集(1)[C]．重庆：科学技术文献出版社重庆分社，1981：58-66

[11]张信宝，何淑芬．云南大盈江流域泥石流堆积物的粒度特征[A]．中国科学院成都地理研究所泥石流论文集(1)[C]．重庆：科学技术文献出版社重庆分社，1981：91-95

[12]刘江，成尊兰．云南盈江浑水沟泥石流流速计算[A]．中国科学院成都地理研究所．泥石流论文集(1)[C]．重庆：科学技术文献出版社重庆分社，1981：87-89

[13]吴积善．泥石流流态及流速计算[A]．中国科学院成都地理研究所．泥石流论文集(1)[C]．重庆：科学技术文献出版社重庆分社，1981：79-86

[14]魏鸿．泥石流龙头对坝体冲击力实验研究[J]．中国铁道科学．1996，17(3)：50-62

[15]刘雷激，魏华．泥石流冲击力研究[J]．四川联合大学学报(工程科学版)，1997，1(2)：99-102

[16]王兆印．泥石流龙头运动的实验及能量理论[J]．水力学报，2001，(3)：18-26

[17]沈寿长，李良勋，魏鸿．稀性泥石流龙头形成机制的实验研究[J]．中国铁道科学，1996，17(3)：42-49

[18]余斌，赵惠林．粘性泥石流运动模型的实验研究[J]．自然灾害学报，1999，8(2)：81-87

[19]倪晋仁，王光谦．泥石流的结构两相流模型：Ⅰ.理论[J]．地理学报，1998，53(1)：66-76

[20]倪晋仁，王光谦，康志成等．泥石流的结构两相流模型：Ⅱ.应用[J]．地理学报，1998，53(1)：77-85

[21]廖谦，倪晋仁，曲轶众等. 阵性泥石流运动与堆积的欧拉-拉格朗日模型：Ⅱ.应用[J]. 自然灾害学报，2000，9(4)：53-58

[22]王裕宜，邹仁元，严璧玉. 泥石流堆积模式的试验研究[J]. 自然灾害学报，2000，9(2)：81-86

[23]姚德基，商向朝. 七十年代的国外泥石流研究[A]. 中国科学院成都地理研究所.泥石流论文集(1)[C].重庆：科学文献出版社重庆分社，1981

[24][前苏联] C. M. 弗莱施曼（姚德基译）. 泥石流[M]. 北京：科学出版社，1986

[25]商向朝，郝勇. 日本泥石流研究现状[A]. 中国科学院成都山地研究所. 泥石流(3)[C]. 重庆：科学技术文献出版社重庆分社，1981，150-158

[26]Hiroshi Ikeya（朱桂芳，王生译）. 日本泥石流及其防治措施[J]. 世界地质，1992，11(2)：78-90

[27]刘江. 奥地利泥石流防治简介[A]. 中国科学院成都山地研究所. 泥石流(3)[C]. 重庆：科学技术文献出版社重庆分社，1981

[28]Honda N., Egashira S. Prediction of debris flow characteristics in mountain torrents[A] In: International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment[C]. USA: San Francisco，1997: 707-716

[29]Jones D.K.C. Landslide hazard assessment in the context of development[A] In: McCall G.J.H., Laming D.J.C. and Scott S.C. Geo-hazards natural and Man-made[C]. London: Chapman & Hall，1992: 117-141

[30]Varnes D.J. Landslide hazard zonation: A review of principle and practive[M]. UNESCO, 75700 Paries, France，1984

[31]Eldeen M.T. Predisaster physical planning: intergration of disasterrisk analysis into physical planning, a case study in Tunisia[J]. Disasters，1980，4(2)：211-222

[32]Hollingsworth R., Kovacs G.S. Soil slumps and debris flows: prediction and protection[J]. Bulletin of the Association of Engineering Geologists，1981，38(1)：17-28

[33]Hansen A. Landslide Hazard Analysis[A] In: Brusden D., Prior D.B. Slope instability[M], Chichester: John Wiley & Sone Led，1984: 523-543

[34]Wieczork G.F. Evaluating Danger Landslide Catalogue Maps[J]. Bulletin of the Association of Engineering Geologists，1984，1(1)：337-342

[35]Carrara A., Cardinali M., Detti R., et al. GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard[J]. Earth Surface Processes and Land forms, New York，1991，16(1)：427-445

[36]李阔，唐川. 泥石流危险性评价研究进展[J]. 灾害学，2007，22(1)：106-110

[37]刘希林，唐川. 泥石流危险性评价[M]. 北京：科学出版社，1995：1-93

[38]张梁，张业成，罗元华. 地质灾害灾情评估理论实践[M]. 北京：地质出版社，1998：1-417

[39]刘希林，莫多闻. 泥石流风险评价[M]. 成都：四川科技出版社，2002：1-8

[40]Eldeen M.T. Predisaster Physical Planning: Inteqration of Disaster Risk Anaysis into Physical Planning, A Case Study in Tunisia[J]. Disasters, 1980, 4(2)：211-222

[41]Alexander D. Natural Disaster Framewerk for Research[J]. Disasters, 1991, 15(3)：209-226

[42]刘希林. 区域泥石流危险度评价研究进展[J]. 中国地质灾害与防治学报，2002，13(4)：2-9

[43]谭炳炎. 泥石流沟严重程度的数量化综合评判[J]. 水土保持学报，1986，6(1)：51-57

[44]艾南山，张林源，咎廷全. 泥石流活动性的一种判别方法[J]. 铁道工程学报，1986(4)：56-59

[45]岳天翔，艾南山，张英保. 论流域系统稳定性的判别指标—超熵[J]. 水土保持学报，1989，3(2)：20-28

[46]蒋忠信. 泥石流流域系统的超熵[J]. 中国地质灾害与防治学报，1992，3(1)：33-40

[47]蒋忠信. 西南山区暴雨泥石流沟简易判别方案[J]. 自然灾害学报，1994，3(1)：75-83

[48]张跃，宿芬，邹寿平. 模糊数学方法及其应用[M]. 北京：煤炭工业出版社，1992

[49]冯益德. 模糊数学方法与运用[M]. 北京：地震出版社，1983

[50]刘丽，王士革. 滑坡、泥石流区域危险度二级模糊综合评判初探[J]. 自然灾害学报，1996，5(3)：51-59

[51]刘希林，张松林，唐川. 沟谷泥石流危险度评价研究[J]. 水土保持学报，1993，7(2)：20-25

[52]梁明贵. 泥石流沟严重程度的评定方法分析[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报，1999，5(5)：109-112

[53]唐邦兴，刘稀林，柳素清. 中国泥石流危险区划的探讨[A]. 中国自然灾害灾情分析与减灾对策[C]. 武汉：湖北科学技术出版社，1992：321-322

[54]王昕，唐邦兴，柳素清. 泥石流滑坡灾害的危险度模糊评价[A]. 钟敦伦、王成华、谢洪等编. 中国泥石流滑坡编目数据库与区域规律研究[C]. 成都：四川科学技术出版社，1998：102-106

[55]姚令侃. 降雨泥石流形成要素分析[J]. 水土保持通报，1987，7(2)：34-40

[56]许数柏. 层次分析法原理[M]. 天津：天津大学出版社，1998

[57]徐友宁，何芳，张江华等. 中国西北地区矿山环境地质问题调查与评价[M]. 北京：地质出版社，2006：66-87

[58]姚春梅，刘洪亮. 模糊数学综合评判法在地质灾害危险程度评价中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报，1998：48-54

[59]黎世美，瞿伦全，苏振邦. 小秦岭金矿地质和成矿预测[M]. 北京：地质出版社，1996.

[60]毛景文，李晓峰. 深部流体成矿系统[M]. 北京：中国大地出版社，2005.

攻读硕士学位期间参与的科研项目

[1]中国地质调查局西安地调中心“小秦岭金矿带矿山环境地质问题调查与评价”项目，2007.4-2008.1，本人在该项目中负责矿渣型泥石流危险性评价

[2]长安大学“浙江诸永高速公路诸暨段隧道地质超前预报及施工监测”项目，2005.12-2007.4，本人在该项目中担任现场技术人员，负责地质超前预报工作

致 谢

本论文是在导师苏生瑞教授和中国地质调查局西安地质调查中心徐友宁研究员的共同指导下完成的。从最初加强专业基础知识的学习，再到论文选题、资料收集、野外工作、室内分析和论文撰写，都得到了两位专家不遗余力的精心指导。在这里，我谨向两位专家表示衷心的感谢。同时，感谢师母李瑛老师在生活和学习中的亲切关怀和帮助。

本论文得到了西安地质调查中心承担的《小秦岭金矿带环境地质问题调查与评价》项目的资助。在论文完成过程中，西安科技大学袁汉春教授、西安地调中心何芳高级工程师、陕西区域地质矿产研究院孙嘉春高级工程师等均提供过热情的帮助和指导。在野外工作期间，陕西区域地质矿产研究院李育敬高级工程师、西安地质矿产勘查开发院乔博海高级工程师、西安地调中心张江华工程师、陈华清工程师、长安大学曹琰波硕士等给予了热情支持和帮助，才使得野外工作得以顺利完成，特向他们表示衷心感谢。

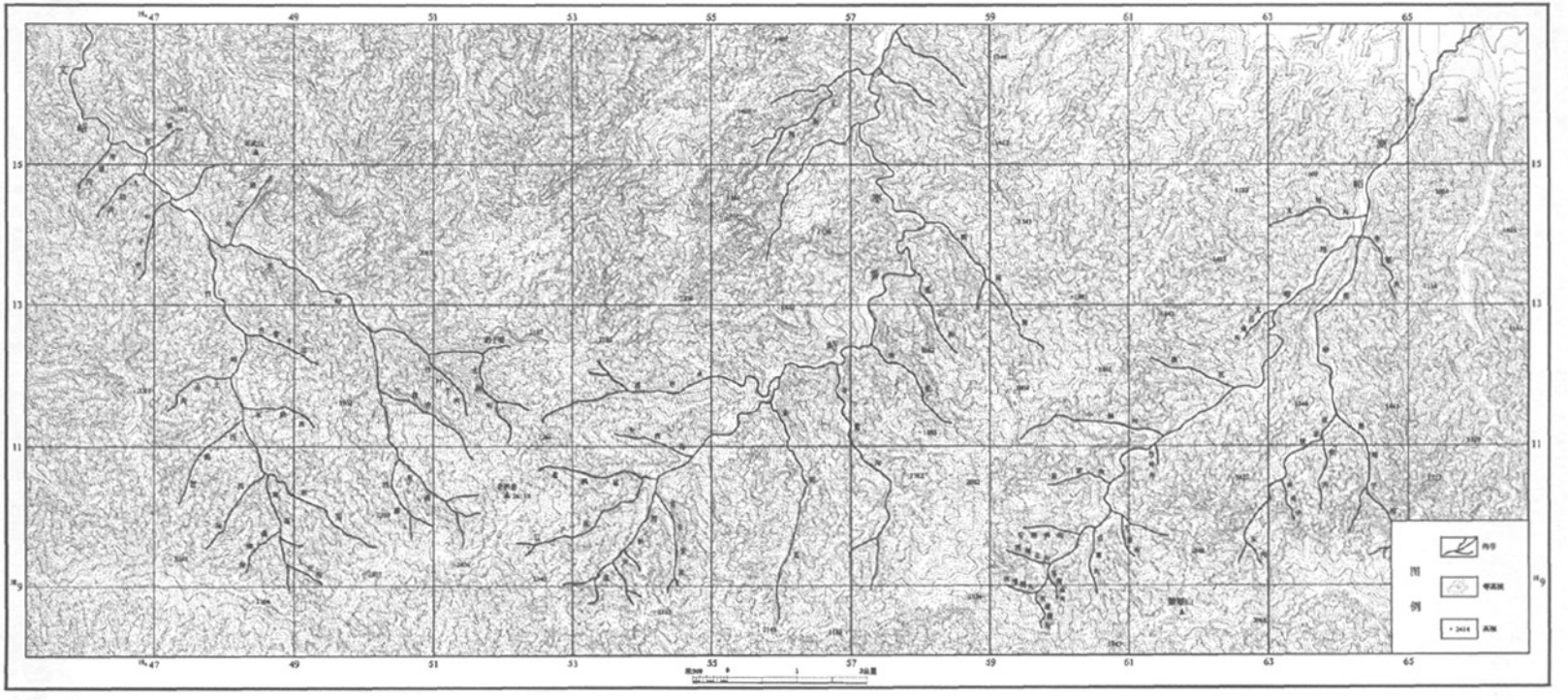
在校学习期间，得到了同门梅海博士、贺汇文博士、孙芳强博士、郭一民硕士、江海波硕士、彭琴硕士、朱仁鹏硕士、易锦俊硕士、董军硕士、韩书栋硕士、梁海硕士、王晓东硕士、成琳硕士、周虎勋硕士、张伟硕士和张其伟硕士等在学习上、生活上的大力协助与支持；感谢地测学院和研究生部所有的老师，正是在所有人的鼓励、支持和帮助下，我才得以顺利完成硕士研究生学业。

再次向所有关心、帮助和支持过我的领导、老师、同学和亲戚表示衷心的感谢!

刘向东

2008.6

附图



研究区各泥石流隐患沟分布图