

西南交通大学

硕士学位论文

岩溶隧道涌水对生态环境的影响

姓名：曾晓燕

申请学位级别：硕士

专业：环境工程

指导教师：牟瑞芳

20060601

摘要

岩溶地下水既是一种宝贵的自然资源, 又是环境的基本要素。但铁路隧道施工过程中不可避免地会遇到岩溶地下水问题, 即是资源问题, 同时也产生环境问题, 如导致周围地表水、地下水的疏干, 进而造成地表植被退化, 甚至引起地表塌陷等多方面的负面影响。岩溶山区生态环境脆弱, 生态环境对地下水的依赖作用十分显著: 由于对地下水引起的生态环境问题重视不够, 地下水的生态价值在地下水资源评价与开发利用中没有得到应有的体现, 产生了一系列生态环境负效应, 严重制约着社会经济发展和人类的生存空间。为减少或避免因隧道在修建过程的涌水引发的生态破坏, 研究并提出岩溶隧道涌水对生态环境影响综合评价技术十分必要。

隧道开挖过程中, 由于大量的岩溶涌水, 使得地下水位不断的下降, 破坏了生态环境。本文在参考国内外地下水引起的生态环境效应评价的研究资料基础上, 针对岩溶隧道涌水对生态环境影响的特点, 找出可能对生态环境造成的负面影响和产生的原因。探讨了影响地下水水位生态环境的因素, 建立了地下水引起的生态效应递阶层次评价指标体系、评价标准和评价方法。同时研究岩溶隧道涌水对生态环境影响综合评价指标体系的制定原则, 确立合理的评价指标。

对常用的生态环境影响评价方法进行比较分析, 提出运用模糊层次分析法进行岩溶隧道涌水对生态环境影响综合评价。构造岩溶隧道涌水对生态环境影响综合评价系统的层次模型, 确立各个层次的评价指标。建立同一层次评价指标的权重判断矩阵, 计算各评价指标的组合权重。对最底层评价指标建立隶属函数, 确定相应的隶属阈值, 进行无量纲化处理得出隶属度, 最后得出的综合评价值。

本文以渝怀铁路歌乐山隧道为例, 采取收集资料、野外踏勘、现场监测、数据分析相结合的技术路线进行施工过程涌水对生态环境影响的研究, 分析得出综合影响度和各项评价指标得分值。

关键词: 岩溶; 歌乐山隧道; 生态环境影响评价; 层次分析法; 模糊综合评价法

Abstract

Karst is not only invaluable resource but also essential factor of environment, it is difficult to avoid Karst water during the railway-tunnel construction. It is a problem of resource as well as an environmental problem which brings about surrounding ground water or underground water drying, and more leads vegetation to regress, or brings about ground's collapse, etc. Ecological environment is vulnerable in Karst. Ecological environment are dramatically depending on groundwater. However little emphasis has been placed on supergene ecological environment excited by groundwater and thus, the eco-value of groundwater has not embodied during conventional evaluation, development and exploitation of groundwater resources, which not only bring about a series of negative effects to ecological environment but also severely confine society and economy development and human living space in the area.

During tunnel construction, the ground water of ecological environment might be changed. Based on the ecological effect excited by groundwater of home and abroad, according to the characteristics of the impact on the ecological effect by tunnel karst, searches the reasons of the negative impact which the tunnel karst may do to the ecological environment, and presents the research on the principles of the comprehensive evaluation establishment about the impact on the ecological effect by tunnel karst. At the same time, the factors that affect the supergene eco-environment are discussed, and the hierarchical evaluation index system, the evaluation standard and the evaluation method on ecological effect excited by groundwater are formed. Finally to present the very appropriate evaluation indexes.

FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process) is presented to evaluate the impact on the ecological effect by tunnel karst. To establish the hierarchy model of the comprehensive evaluation system, and to present the evaluation indexes of every class. Under constructing the judging matrix and calculating every index's weight, the functions have been built for the degree of subordination of the bottom indexes, and the evaluation thresholds. Having the indexes none-dimensionally, reducing the degree of subordination of every index, getting the result of the comprehensive evaluation.

The thesis takes Geleshan tunnel of Yuhuai Railway as an example, to analyze the impact on the ecological effect by tunnel karst. The impact is studied by the route of collecting materials, making an on-the-spot surveying and monitoring, analyzing data together, and every evaluation index is analyzed.

Key words: Karst; Geleshan tunnel; the evaluation of ecological effect; analytic Hierarchy Process; fuzzy synthetical evaluation

第 1 章 绪 论

1.1 问题的提出

随着经济与科技高速发展，人们越来越重视生活质量，但大量的地下工程实施使得周围的地下水资源乃至地下水环境遭到不同程度的破坏，进而影响了生态环境，引起许多与其相关的生态环境问题，并给人们的生活环境带来破坏。

渝怀铁路歌乐山隧道位于重庆市郊区。歌乐山上有大容量的水库，山中有强富水构造，位于地下水最活跃的部分，穿越其中的歌乐山隧道必须确保珍贵的水资源不流失，确保歌乐山森林公园生态环境不受损害，要求施工单位进行技术创新，环保施工。全长 4050 米的歌乐山隧道，集滑坡、岩溶、煤层、瓦斯、采空区、高压富水于一体，被称为“地质博物馆”列为渝怀铁路十大重点控制工程之一。经调查确定该地区高压富水主要为岩溶水，其主要分布在歌乐山观音峡背斜灰岩地层中，以岩溶管道和岩溶上升泉形式出露，水量大，具承压性，且水位埋藏浅。

隧道地表植被发育，广布水田及早地，民舍密集，生活居住有 6 万余人，企事业单位 200 多家。地表有水库 5 座，距隧道中心线最近为 479m，最远为 7000m，暗河出露口 4 处，泉井 30 处。

随着隧道的施工，岩溶隧道涌水量的增加，使区域地下水水位下降，致使山区或盆地湿地萎缩或消失、地表植被破坏，导致生态环境退化。生态环境是人类生存发展的最基本自然条件，是经济、社会发展的基础。它既受到自然发展规律的制约，也为人类的社会经济活动所约束。“保护和改善生态环境”已成为 21 世纪国际社会“环境与发展”与“和平与发展”两个同等重要主题的内容之一，是实现可持续发展的重要途径，是功在当代、惠及子孙的伟大事业和宏伟工程；而水是生命之源，万物之本，对维持人类赖以生存的生态环境起着决定性的作用。作为自然的重要组成部分，水资源紧密联系着世界经济发展和人类生活的前景。因而水资源与生态环境的内在联系是我们开展任何工作所必须认识的前提。长期以来，我们在工程建设和水资源的开发利用中，普遍缺乏生态观念只重视治理水患，解决生产生活用，严重忽

视生态用水,导致河道干涸、湿地消失、土地沙化、生物多样性降低等许多生态环境问题,不少地方甚至不惜大量挤占耗用生态水来发展生产、增加城市容量、建设耗水景观、提高市民生活质量。还有一些地方在兴修水利中,不适当地采取人工防渗漏措施,使许多自然河渠硬质化,地下水的补充来源减少,水位下降。

由于生态用水的配置失当和大量被占耗用,给整个生态环境特别是岩溶地区本来就脆弱的生态环境,带来了一系列严重后果。令世人震惊的新疆塔里木河、甘肃、内蒙古黑河下游地区出现的河水断流、湖泊干涸,地下水位大幅度下降,林草植被大面积枯死,土地荒漠化急剧扩展等生态灾难,都是由于两河生态水量减少、断流所致。江河生态水量的减少,还导致江河湖泊的稀释、自净能力下降,水体污染物聚积难消,污染加重^[1]。保障生态用水,不仅关系生态环境和水土流失,还涉及到发展生产用水,人民生活用水,江河上、中、下游用水,以及眼前和长远用水等方方面面的极为复杂的利益。由于环境的变化和人类对资源的不合理开发,引起许多与水有关的生态环境问题,如河流断流,湖泊萎缩干枯,湿地面积缩小,水土流失,河床淤积,土地盐碱化,沙漠化加剧,植被衰退,生物多样性锐减等。这些问题的解决,不仅要对有限的水资源进行合理的分配,还必须采取必要的措施,改善水循环使生态环境向良性循环方向发展。而对生态用水的全面正确认识,则是解决生态用水问题的前提。

生态环境问题常常与水(尤其是地下水)、土壤、植被密切相关,其发生、发展或由于地下水的活动引起,或由于原有自然植被、土壤被改变的影响效应。而隧道是山区铁路建设中常见的大型附属工程,隧道具有技术复杂、施工难度大等工程特点,它涉及到地形、地貌、气象、水文、生态、地层、岩性、地质构造、水文地质等自然环境和工程地质等多种自然因素。因此隧道的建设不可避免地要对周围环境造成一定的影响,隧道工程对生态环境的影响主要发生在隧道的施工期,会不同程度地干扰和破坏工程所在地的地下水平衡,其重点影响因素主要为隧道废渣和地下水。隧道开挖都要产生大量废碴,通常为各种岩石碎块,或风化岩类与泥土的混合物,无法当作种植土来直接利用。

岩溶生态环境作为一种特殊物质、能量、结构和功能体系构成的多相多层次复杂界面体系,显示出生态敏感度高、环境容量低、抗干扰能力弱、空间转移能力强等一系列生态脆弱性的特征。岩溶植被的旱生性、岩生性和喜钙性使植被生长困难,森林覆盖率低,生态系统抗干扰能力低;岩溶区内降

水不少,但其广泛发育的地表和地下的双重空间结构,地下洞隙纵横交织,地表水漏失严重,岩溶水上涌成涝,非旱即涝。这些特性决定了岩溶区域的生态非常的脆弱^[2]。由于岩溶裂隙水与地表水连通,导致隧道山体外的地表水大量渗漏。而土壤水分往往是决定植物分布和生长的限制性因子,当山体地表水含量低于植物生长最低量时,植物就会萎蔫、停止生长,最终导致植物消失。因此生态用水量是岩溶隧道涌水必须考虑的一个因素。水在生态系统的形成、发展和演替过程中起着决定性作用。同时,水又是生态系统中最为敏感的因素,在自然条件或人类活动干扰下,其变化会影起其它环境要素的变化,从而将影响到整个生态系统的稳定性,改变生态群落的原有的结构,最终将导致生态系统的改变而丧失其功能。

岩溶隧道涌水对生态影响综合评价是在了解和掌握评价区生态环境质量现状的基础上,通过工程影响因素识别,把可能涉及的重要生态因子从总体上综合起来,对生态环境影响进行定性或定量分析,来预测涌水对生态环境的影响程度,来合理的控制岩溶涌水量,从而防止因工程建设导致生态环境恶化,达到隧道建设和环境保护两者协调发展的目的。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 生态环境影响综合评价研究进展

我国的环境评价始于 20 世纪 70 年代的城市环境污染现状调查和评价,20 世纪 80 年代转向工程建设项目的影响评价^[3]。对于生态环境影响的综合评价,由于它是一个多层次、多目标、多任务的系统工程,要遵循生态学、生态经济学、系统工程学的原理,增加了工作的困难。2003 年赵勇等人选取土壤、水土流失状况、工程占地量、对农作物影响、对林地的影响、对动物的影响、对景观生态影响以及对生物影响等 8 个生态指标,采用综合评价指数法进行高速公路的生态环境影响综合评价^[4]。2001 年陈利顶等人在建立生态环境综合评价指标体系的基础上,利用模糊聚类方法对三峡库区不同县市区进行聚类分析,对三峡库区生态环境综合评价^[5]。1998 年高平利等人通过绿洲草场的铁路建设项目,提出一种用矩阵半定量表示西北铁路建设项目对生态环境影响的预测方法,以确定作用因子的相对重要性和生态因子受影响的等级,运用模糊综合评价方法,对西北铁路建设项目生态环境影响的预测及评价方法探讨^[6]。虽有一些学者在生态环境影响综合评价方面作过一些工

作,但由于生态环境的时间和空间差异十分明显而缺少统一的定量的标准,故其综合评价仍处于初始阶段。

系统评价是由评价对象、评价主体、评价目的、评价时期等要素组成的一个综合性问题^[7]。生态环境影响综合评价涉及到生态学、经济学、系统工程等方面的原理,内容十分广泛。确定评价指标体系后,确定建设项目对现有的自然、社会、经济等各因素的影响水平。近代人类的许多大型基础设施建设项目已超过可持续环境承载力的阈值,引发了全球或区域性的环境问题。运用综合评价的方法确定大型基础设施建设项目对某区域生态环境的影响程度,给予一个定量的标准,从而为提出减少影响或改善生态环境的策略和措施提供可靠依据。同时,由于系统评价与决策是密切相关的,所以生态环境影响的综合评价可以为有关决策部门提供定量的资料,为制定各种政策提供科学的依据和指导。

1.2.2 地下水引起的生态环境影响评价指标及评价模型研究

地下水影响生态环境评价指标的确定。以往从不同研究目的出发,提出了相应的评价指标。王根绪、程国栋等建立西北内陆盆地与土壤次生盐渍化和天然植被退化问题有关的地下水生态环境指标包括潜水埋深、潜水矿化度、包气带含水量和包气带含盐量等^[8]。张长春、邵景力等(2003)建立的西北干旱区人工绿洲生态环境指标包括土壤含盐量和地下水临界埋深;天然绿洲生态环境指标为生态地下水位、土壤含盐量、土壤含水量和地下水矿化度^[9]。此外,秦仁昌(1959),罗江呼(1992)等,范锡朋(1991),汤梦玲(2001),徐恒力、周爱国等(2001),Sandra J. Zencich, Ray H. Froend etc(2002)^[10-16]等为了不同的研究目的,从不同角度分析了生态环境的影响因素。总的来讲都强调地下水位埋深、地下水矿化度、包气带含水量和包气带含盐量的重要作用,但其评价指标体系尚未形成、评价标准和评价方法尚未建立。因而为了深刻认识地下水所引起的生态效应,抑制地下水所引起的生态环境负效应,建立地下水所引起的生态效应的评价指标体系是十分必要的。

国内外关于地下水引起的生态效应的模型研究,主要可分成二类模型:

1) 统计模型、模糊综合评判模型等

统计方法广泛应用。张远明^[16]等(2003),徐海量、陈亚宁等^[17](2003)对新疆塔里木河中游地区植被进行了多元统计分析,揭示了决定塔里木河中游地区植物群落分布的环境因子主要是地下水位和土壤含水量,并建立了植

被盖度与地下水位和土壤含水量的回归模型。Stromberg^[18](1993)等建立了美国干旱的 Arizona 地区三类植物的植被特征与植物水势、植物水势与地下水位的回归方程,用以预测地下水位变化时植被特征的相应变化。

乔晓英、王文科^[19](2001)基 GIS,采用模糊综合评判法对冯家山灌区的地质环境进行评价,针对不同地质环境质量分区探讨了水资源合理开发利用模式。杨晓婷^[20](2002)采用指数叠加法、模糊综合评判法和神经网络法对关中盆地地下水脆弱性进行了评价,评价结果表明,渭河两岸、西安市、咸阳市、卤泊滩、大荔沙丘地等是需要重点保护的地区,最后利用 MAPGIS 编绘了地下水脆弱性分区图。

这些模型的优点是简单易行;缺点是没有耦合机理模型,其预警功能不强,地下水状态考虑不够。

2) 包气带水盐运移模型

任理、李保国^[21](1999)通过对滴灌条件下砂质壤土的盐水入渗试验,以传递函数模型为工具,获得了盐分在 45cm 土层的传递函数解,并模拟了盐分出流过程,减少了野外观测和试验工作量,对很多预测问题具有重要的实际意义。

姚德良、李新^[22](1999)利用预报校正法求解土壤水分运动的 h 型 Richards 方程,利用具有二阶高精度的差分法求解土壤盐分运移的对流扩散方程,用上述数学模型对干旱区绿洲棉田,在蒸发条件下土壤水分运动和土壤盐分向上运动积累过程进行了数值模拟,计算结果与测量值吻合较好,可为预报土壤盐碱化提供科学依据。王亚东、胡毓骏^[23](1992)利用农田灌溉研究所洪门试验场地中渗透仪,对不同地下水位埋深条件下裸地蒸发过程粉砂壤土的盐分运移进行了实验及数值模拟研究。结果表明,对于三种地下水位埋深,即 150cm, 200cm 和 250cm,在无降雨裸地蒸发情况下,表层积盐均不明显;但在有小水量降雨和裸地蒸发情况下,地下水埋深为 150cm 的表层积盐强烈。地下水埋深为 200cm 及 250cm 的表层土壤虽有积盐,但积盐量较小,这种积盐主要是上层土壤中盐分的重新分布。

这些模型的特点是主要考虑包气带,或是将地下水与包气带水分或盐分进行藕合研究,没有将地下水与包气带水盐运移模型同时考虑。

1.3 选题的意义

(1) 生态意义

隧道区域的植被属于亚热带暖性常绿针叶林，分为马尾松林、杉木林和马尾松杉木混交林三种群系类型。主要分布于海拔 500—650 米之间的三叠系须家河组黄色砂岩地区，土壤类型为山地黄壤冷沙黄泥（森林）土。针叶林多以幼龄林形式存在，尤其是在裸岩较多的地方，乔木稀疏，林下缺乏马尾松和杉木幼苗，群落结构较为简单。隧道上部地表植被乔木层群落物种多样性很低。这主要是由于隧道上部地表植被均为人工次生林，树种结构单一，以马尾松为主，某些地方栽植有杉木。由于水循环是最基本的生物地化循环，在它强烈的影响着其他所有各类物质的生物地化循环。水是这一区域的主要影响因素，首先它是区域营养物质的载体，是山的血脉，因此隧道施工的涌水和排水可能直接影响着歌乐山养育的一切生命。针对受影响的水体，即使采取工程措施，保护水体乃至整个生态环境的安全。

（2）社会意义

歌乐山隧道山顶居住着数千户农民，居民生产生活用水完全取自山体地下水，若隧道影响到当地百姓的生产生活，工程的问题将直接变为社会问题。因此隧道施工过程将利用我们的研究结果，审时度势的采取工程措施，将工程的负面影响减到最小，以避免引起民心不安，社会不稳。另外，歌乐山隧道近邻国家级历史文物保护单位、国家级生态保护区歌乐山烈士陵园、松林坡刑场等环境敏感点。隧道的修建必须不能破坏国家森林公园的生态平衡。

（3）工程意义

研究结果可以供以后类似地质条件的选线设计、施工堵排借鉴。所谓“动态”是指隧道施工过程中的地质条件是不断变化的；其力学状态也是不断变化的，因此隧道施工就不可能是一成不变的。在施工过程中所采取的各种方法和技术都是为了适应这种“动态”变化的。隧道施工的各种决策都要在施工阶段的地质技术、量测技术和质量控制技术的基础上进行管理，这就是动态施工的基本含义。针对歌乐山隧道的特殊条件，提出用包括环境监测的多种手段全程指导动态施工，实现把渝怀铁路建设成一条生态环保路的目标。

为了防止因隧道施工过程中由于涌水而破坏地表生态环境，因此在隧道开挖过程中必须采取一定的措施来控制岩溶涌水。针对歌乐山隧道的特点，通过系列科技攻关，采取“堵水防漏，保护环境”和“先探水、预注浆、后开挖、补注浆、再衬砌”的设计、施工理念，达到堵水防漏的目的。

1.4 本文主要的研究内容

本论文以岩溶隧道涌水引起的生态环境效应为主线，以水资源可持续利用与生态环境协调发展为目标，从应用层面上研究岩溶隧道涌水对生态环境产生的影响，从而为区内水资源开发利用和生态环境保护提供科学依据。其主要的研究内容如下：

1. 详细分析岩溶隧道涌水可能对生态环境造成的负面影响，以及引起生态环境影响因素。

2. 按生态环境的影响综合评价指标体系制定的原则，研究岩溶隧道涌水对生态环境影响综合评价指标体系。研究应用模糊层次分析法岩溶隧道涌水对生态环境影响综合评价，给出评价指标的组合权重，建立评价指标的隶属函数并求得隶属阈值。

3. 研究愉怀线歌乐山岩溶隧道涌水对生态环境造成负面的影响，然后进行生态环境影响综合评价。分析综合影响程度和各项评价指标的得分，探讨减小综合影响度的措施和方法。

第2章 岩溶隧道涌水与生态环境的关系

2.1 岩溶水与生态环境的关系

隧道在开挖过程中出现大量的岩溶涌水,造成地下水位持续下降,而岩溶水作为一种地下水资源,它与生态环境关系十分密切。岩溶水不仅具有资源属性和经济价值,而且具有重要的生态价值^[24]。

生态环境是关系到人类生存发展的基本自然条件,水资源是生态环境建设的基本保障因子^[25]。在岩溶隧道区具有双层水文结构使该地区的地下水文网十分发达,而缺乏系统的地表水文网,出现地表严重缺水,地下水特别丰富的局面。在雨季时,因缺乏系统的地表水文网,不能泄洪,发生涝灾;旱季时,地面降水全部转入地下,使地表缺水发生旱灾。所以,岩溶区特殊的水文二层结构决定了岩溶区生态环境的脆弱性^[26]。岩溶植被的旱生性、岩生性和喜钙性使植被生长困难,森林覆盖率低,生态系统抗干扰能力低;岩溶区内降水不少,但其广泛发育的地表和地下的双重空间结构,地下洞隙纵横交织,地表水漏失严重,岩溶水上涌成涝,非旱即涝^[27];迫于人口压力,人类毁林开垦使森林资源减少,水土流失严重,影响了经济发展,在恢复经济中又进一步破坏了生态环境,从而陷入了“环境脆弱和贫困”恶性循环中。历史上,生态环境一直就很脆弱。建国以来,随着大规模建设的展开,生态环境遭受了一定程度的破坏,加上水资源的过度开发以及不合理利用造成生态环境恶化如水质恶化、植被死亡、沙漠面积不断扩大、地面沉降、水土流失等,不仅造成了严重的环境公害和经济损失,而且进一步加剧了岩溶山区生态恶化的程度。随着社会经济不断发展,人口急剧增长,水资源供需矛盾日益突出。在自然因素和人类活动共同作用下,地下水的状态(地下水位、地下水矿化度、包气带含水量、包气带含盐量)发生根本改变,导致地下水位升降、地下水量增减,水质演化等,进而引起生态环境发生变化,如土地荒漠化、植被变化等^[28]。研究实例表明,生态系统对地下水具有很强的依赖关系,地下水的变化将引起生态环境发生改变,是由于地下水所具有的生态功能决定的^[24]。

由于岩溶隧道区缺乏系统的地表水文网,天然植被生态系统主要依靠消耗地下水资源来维持的。区内的水分来源主要是通过降水补给地下水供天然耗地下水资源来维持的。区内的水分来源主要是通过降水补给地下水供天然

植被消耗。

岩溶隧道区通过天然降水补给地下水，然后植被通过其根系毛细管的作用吸取土壤水维持生命，随着植被不断的蒸腾消耗，地下水源源不断地补充土壤水，这期间裸露土地的潜水蒸发、河道水域的蒸发也在伴随着进行。当水源对地下水的补给能力小于植被、裸地以及河道的蒸腾发消耗时，地下水因排泄大于消耗而使地下水位降低，加大了植被根系与地下水潜水面之间的距离，相应的地下水供给植被水分的能力降低，如果低于植被的生理需水，植被的生长就会受到抑制，严重则会枯萎、死亡。只有在地下水潜水面较高，土壤可以源源不断地得到上升毛细管水的补充，或植物根系可直达潜水层的情况下，植物才能够正常地生息繁衍^[28]。因此，地下水对于天然植被的生存具有重要的意义。

地下水的生态功能主要包括生命维持功能和传输功能。

1) 生命维持功能

地下水是水圈、生物圈的有机组成部分。水是生命机体不可缺少的物质组成，参与生命体内的新陈代谢和生理循环，维护生命体内的水盐平衡。

在适宜的地下水位埋深范围内，地下水能够维持生态环境的水土平衡、水盐平衡和水与生物平衡，保障生态环境的安全。当大于或小于适宜的水位埋深范围，生态环境将向荒漠化方向发展，植被向盐生或旱生方向发展^[24]。

地下水维系地表水域、生态系统的生存与发展。当地下水位下降或水量减少时，土地旱化，威胁到生物种群和生物多样性，维持生态系统稳定的根本在于保持地下水位变化为零。因此，地下水在维持生态系统平衡中发挥着重要作用^[29]。

2) 传输功能

地下水与生态系统之间的能量传输表现为水位和水量的转换。地下水位的降低，导致包气带含水量降低，使得植被生存所需的水分不能得到满足，影响到生态环境。地下水量的减少可能导致河流基流量的减少，从而影响到河流的生态功能^[30]。

地下水与生态系统之间的物质传输表现在地下水是良好的溶剂，是元素迁移、分散与富集的载体。地下水在地下径流的过程中，与周围的岩土发生溶滤、脱硫酸、阳离子交替吸附等一系列物理化学反应，使地下水中化学元素的浓度在补给区、径流区和排泄区发生明显的变化^[24]。

综上所述，地下水与生态环境关系密切，地下水的生态功能决定了地下水具有重要的生态价值。

2.2 岩溶隧道涌水与地下水的关系

隧道开挖后, 由于其集水和汇水作用, 岩溶地下水不断排入隧道中, 并以其为中心构成新的势汇。由于局部水力梯度的显著提高, 地下水的运动速度必然较天然渗流状态明显增大。隧道排水使工程所在山体地下水资源流失, 将造成隧道工程区泉水消失或流量减小, 在隧道排水、降位漏斗的逐渐扩展过程中, 不仅在丰水期地下水系统可接受大量的降水或沟水补给增量的补充, 造成天然补给量增大, 而且在平枯水期于漏斗影响范围内还将引起泉水的流量减小甚至消失等一系列天然排泄量减小的现象。随着隧道排水过程的延续, 需要不断动用储存量, 隧道工程区地下水的降位漏斗将不断扩展, 直至隧道排水量完全靠来自边界的补给保证为止。工程区地下水系统和外界进行水量交换是不断进行的, 尤其是丰水期, 与外界的水量交换是剧烈的。因此, 在施工后数年甚至更长时间范围内, 工程区降位漏斗在平、枯期将继续扩展, 但扩展速率将逐渐降低。疏干漏斗的形成和由此引起的其他水量交换, 为接受外界的补给, 尤其是降水的补给创造了条件, 打破了原有的水文动态平衡, 促进了水循环交替, 这些过程将加剧地表水土的流失, 影响植被和农作物的生长等。

由于在岩溶地段修建隧道可能引起岩溶水动力条件的改变, 破坏岩土水系统循环运移条件, 从而使得岩溶溶洞顶板的赋存条件发生改变, 这在一定程度上增加了顶板的不稳定性; 地下水的漏失可能引起地下水的动态平衡被破坏, 出现地下漏斗; 在隧道长期涌水条件下, 隧址区整个地下水系统(包括含水层和在断裂带一定范围的相对隔水层)将具有一定水力连续性。显而易见, 只要地下水系统的疏干水量满足不了隧道的排出水量, 地下水位就将持续下降。从而引起地表水源地的枯竭、水质下降、甚至地表塌陷等现象; 地下水的漏失可能使土壤含水量下降, 从而影响植物的正常生长, 破坏自然生态平衡。

因隧道排水疏干作用的控制, 影响范围内与深部地下水有水力联系的泉水溢出量将会大幅度衰减, 甚至枯竭, 沟谷基流量亦会大幅度衰减。影响范围内的人畜主要依靠泉水、沟谷基流和井水, 沟谷基流量的减少消失将对这些居民生产和生活造成严重的影响。

2.3 地下水位与生态环境的关系

对于岩溶隧道区来说,地下水是植物分布和生长最重要的限制资源,同时也是经济社会发展的限制资源;植被是生态系统最重要组成部分,是人类生活的主要依靠地不水。研究岩溶隧道涌水与植被演化的关系,合理配置并维持植被生态用水,对恢复(改善)区域生态环境,促进社会经济发展具有重要的意义。要研究岩溶隧道涌水与生态环境的关系,首先研究地下水水位与生态环境的关系,在这里提出地下水生态水位的概念,笼统地讲地下水生态水位是满足生态环境要求,不造成生态环境恶化的地下水位,是不引起天然植被衰败的地下水位,其值因植物种类不同、地理环境不同等有较大差异^[30]。影响天然植被生长的土壤水分和盐分与地下水位高低密切相关。地下水位过高,在蒸发的作用下,溶解于地下水中的盐分沿毛管上升水流积聚与表土,使土壤发生盐渍化,对植物产生盐胁迫;地下水位过低,毛管上升水流不易到达植物根系层,使上层土壤干旱,植物生长受到水分胁迫而生长不良,植物生命活动受到明显的抑制,大部分衰败、退化与死亡。只有当地下水位处于最佳生态水位时,植被生长较好,其它生态因子的变化,对植物生长产生的影响不大,即不起限制因子的作用。

一个地区的合理地下水生态水位,应在一个范围区间内,可以用上限和下限来表征。天然植被物种生存的适宜性阈值(生长的最佳阈值,能忍受的极限值)的确定也由于不同地区的气候、土壤质地等因素不同,同一种植物在不同地区其适应生长的地下水埋深范围可能存在差异。地下水位临界埋深的上界值指控制土壤表层积盐量在天然植被生长范围内的最小地下水埋深,这并不是绝对不允许土壤积盐,只是积盐不能危害植物的生长,该值是一个随季节不同、地点不同而变化的地下水动态;其下界值指不引起天然植被衰败的最大地下水埋深,其值因植物种类不同、地理环境不同等有较大差异^[31]。在自然条件下,研究地下水临界埋深与天然植被衰败,往往受到注意的是土壤含水量,地下水埋深又决定了土壤含水量的多少,因此归根到底,地下水埋深是控制天然植被生长状况的决定因素。

地下水是通过影响包气带土壤水分和盐分来间接影响天然植物的生长状态的。地下水主要以向上运移的形式补充土壤水分来满足植物的需水要求,当地下水水位浅埋时,植物的根系可直接吸收、利用地下水;地下水水深埋时,地下水通过毛管作用向地表运动来影响包气带土壤含水量,进而间接影

响了植物的生长及植物群落状况^[26]。如果地下水埋深太大,支持毛细带上缘已超过植物根系活动层下界面,地下水对根系层土壤水分的补给就显著减少,以至于不能满足植物生长对水分的最低要求,植物出现生长不良或枯萎死亡。此外,地下水不光通过影响土壤含水量来间接影响植物的生长,它还通过影响土壤含盐量来影响植物的生长。如果地下水水位埋深较浅时,因毛管水顶面接近地表,蒸发强烈,土壤表层盐分不断积累,当土壤中盐分的浓度超过植物根细胞中细胞质浓度时,植物则无法吸收水分,形成所谓的“生理干旱”,植物也会枯萎死亡^[31]。

由此可知,天然植被包气带土壤水、地下水、天然植被三者之间形成错综复杂的关系,地下水影响土壤水,土壤水又影响植被生长,但归根到底,这种岩溶区植被生存的特殊环境,地下水是决定天然植被生长状况的决定因素^[32]。沿隧道区域两侧的自然植被,它们不依赖于大气降水,而是靠地下水供给其蒸腾和蒸发。但地下水是通过毛细管作用上升补给土壤水分,使土壤沿剖面由上而下含水率逐渐增加,从而被植被吸收利用。在一定意义上说,地下水是通过改变土壤含水量来影响植被的生长,因此有必要分析不同地下水位梯度下,土壤含水率的变化特征。

研究表明:地下水位的高低直接影响植被长势的好坏和现有植物种类的多少,但是这种影响在很大程度上是通过影响土壤含水率来实现的。当地下水位在 3.5m 以上时,地下水可以通过蒸发和毛细作用影响到地表土壤含水率,从而能够被草本植被利用,地表的植被盖度和植物种类也明显要高;而当地下水位在 4m 以下时,地下水很难影响表层土壤水,因此草本植被逐渐消失。当地下水位在 5.0m 以下时,多数乔、灌木植被将因水分亏缺而死亡,此时植物种类日趋单一,植被盖度大幅减少,而耐旱性非常强的乔木开始显现长势的衰败^[33]。

2.4 生态环境影响评价的定义

生态环境影响评价的基本对象是生态系统,即评价生态系统在外力的作用下的动态变化,即通过定量揭示和预测人类活动对生态影响及其对人类健康和经济发展作用的分析确定一个地区的生态负荷或环境容量的过程^[34]。为制定环境区域规划和环境法规等提供科学依据。对各项建设工程进行生态环境影响评价是经济建设和环境保护中的重要任务。为了保护人类赖以生存和发展的生态过程和生命支持系统,使其免遭破坏,必须研究和确定一个地区

对开发建设的生态负荷，特别是容许的生态负荷。所谓容许的生态负荷是指对生活在该地区的人和生物不引起不利的后果，也不会导致自然环境质量的变坏。进行生态环境影响评价，可使环境保护工作从被动治理变为积极预防，也有利于采用对生态影响最小、资源利用率最高的开发技术，借以取得最佳的经济效果。

2.5 建设项目生态环境影响评价的基本原则

保护生态环境应当保护什么?生态环境影响评价应当评价什么或从什么角度思考评价的设计?至今仍是一个急需解决的问题。

迄今为止，存在两种明显对立的观点，即人类中心观和生态中心观^[35]。以人类为中心的观念强调保护生态或保护野生生物的理由都是以其对人类具有可利用的价值或以其有潜在的用途为基础的。根据这种观念，人们有权按照自己的意愿滥用自然资源和改造自然生态系统。但是，如果完全按照开发建设者的意图无限制地利用或改造生态系统，就会造成生态环境的严重恶化。

若完全按照生态中心论的观点^[36]，许多开发建设活动就不可能进行，因为任何开发建设活动都不可避免地会造成生态环境的改变或影响。而且实际上由于地球大部分生态系统都程度不同地受到人类的干扰或破坏，有些生态系统已经十分恶劣，因而继续保持原有的生态系统现状既不可能，也不符合改善生态环境造福人类的要求。

建设项目与生态保护之间，后者对前者有一个基本的限度要求或承受极限，超过这一限度就会产生特别的制约或反作用力，最终迫使开发活动中止。生态中心论者强调不降低或不损伤生态系统的重要性，而不是仅仅强调个别物种或生物的保护。如果从人类的利益来衡量，生态中心论者所强调的生态系统重要性主要在于生态系统的环境功能，即生态环境功能。根据这一基本认识，我们就在人类中心观与生态中心观之间找到了一个重要的衔接点或曰共同点—生态环境功能^{[26][36]}。从这点出发，开发建设活动中的生态环境保护 and 生态环境影响评价也主要应着眼于生态系统环境功能的保护和影响评价。只要开发建设活动不使生态环境功能降低或损伤、或者通过努力使受损伤的生态功能得到恢复或补偿，则开发建设项目就应该是可以接受的。这也是协调开发与保护矛盾的一条可以实际操作的途径。这就是生态环境影响评价的功能论的主要之点。是进行开发建设项目环境影响评价的基本原则。

1. 生态环境功能。生态环境功能是多方面的，十分巨大的。这些功能有

的可以直接或间接地计量,有的则无法计量。生态环境功能中最直接和显在的是能够生产生物资源,如木材、薪柴、建材、饲料、药材、肉类、毛皮、鱼贝类、果蔬及其他林产品和水产品等。这是唯一能够在国家收入帐户中直接反映出来的价值。但是,生态环境更大的或更主要的功能及其价值是间接的,其价值远高于直接的价值,而且许多直接的价值也是由其间接功能保障的。这些环境方面的功能及其价值主要是^[37]:蓄水保水、保持地球水循环、缓解旱涝等极端水情;防风固沙,抑制土地沙漠化;防风、增湿、调温,改善小气候,保障农业生产;通过绿色植物的光合作用,吸收 CO₂ 制造氧气,平衡大气成分;吸尘滞尘、净化空气和水;保护生物多样性,并由此提供多方面的服务功能;防止和减轻自然灾害;社会文化价值,如提供美好的景观、旅游环境、娱乐场所以及启迪人类智慧、缓解现代城市人群的紧张情绪等精神和文化方面的价值等。

2. 体现生态价值。生态环境影响评价应从可持续发展的观念出发看待资源利用和经济发展,如水资源的开发利用,传统经济观认为,水资源开发程度越高,创造的经济效益越大,因此水资源应“充分”利用;从生态环境保护的角度看,水资源除应供给工农业生产和民众生活利用外,还必须留有一定的份额供生态系统使用^[38]。此外,过度开采、截流或跨流域调水,会导致水位下降、井泉干涸、河流断流等问题,进而导致生态环境恶化。几千年来,以牺牲环境为代价换来的,生态环境影响就是为改变这种状况而作的努力,因而树立一种生态资源价值观并应用到实际评价工作中是必要的。

3. 量质的统一。现行的开发建设项目的环境影响评价以控制污染为主要目的,根据环境组成因子的质量标准判别影响的大小。根据可持续发展要求进行的生态环境影响评价,由于评价的对象由水和大气这些单因子扩大到生态系统,评价的目的由保护环境因子的质量发展到保护生态环境功能,判别基准亦由单因子质量标准变为生态系统的功能价值,因而影响评价的基本观念也必须从单纯的质量观发展到数量与质量统一观。一般来说,^[39]植被覆盖率可作数量指标,而植被的多样性和组分状态则可代表植被的质量。同样的植被覆盖率和面积,森林的生态功能优于草原或农田,人工纯林的生态环境功能不及生物多样性较高的自然森林。从生态环境功能保护的角度看,植被的量与质同样重要,二者是统一的,密不可分的。

4. 整体协调与主因素优先观。从保护生态环境功能出发,凡影响功能的

因素都应给予评价，对影响大的因素应给予特别的关注。由于环境的千差万别和生态系统的多样性，难以一种判别生态系统结构整体性、运行状态和环境功能大小的基准。在实际操作上，生态环境影响评价是以现实的生态环境状况为基准进行影响判别的。这一特点要求在进行生态环境影响评价时，要对现实生态环境的整体结构和运行机制进行综合研究与判别，把握总体的结构和运行特点，明确各种生态因子相互作用和相互联系，以便准确判定开发建设活动的影响方面、影响强度和影响后果，同时找出针对性的对策措施来克服或减轻这类影响^[40]。在进行生态环境影响评价时就应该贯彻主因素优先的原则，对这些重大问题给予格外的重视。

因此，在生态环境影响评价中，既要重视整体的协调。也要重视主要的影响因素。

第 3 章 岩溶隧道涌水对生态环境影响评价指标

3.1 综合评价指标体系的制定原则

3.1.1 综合评价的路线

指标是评价的基本尺度和衡量标准, 指标体系是生态环境综合评价的根本条件和理论基础。各个国家或地区所处的自然、社会经济情况不同, 研究者处的背景不同, 很难有统一的评价指标体系。因此, 指标体系的构建成功与否决定了评价效果的真实性和可行性。

进行生态环境影响综合评价首先遇到的问题是指标的选取, 要在众多的生态因子中选取普遍存在、对生态环境有重大影响和能够量化的指标参与评价。对于该问题, 有部分学者已经进行过探索, 但由于地域、地形、气候、土壤、生物等差异, 不能照搬原有的研究成果, 必须结合工程项目特点和当地的生态环境状况而定。在确定评价指标体系时应避免两种趋势: 一是指标体系信息覆盖不全, 指标间信息重叠, 没有一致认同的定量筛选方法。二是指标种类过多, 数目过大, 在实际操作中存在一定的困难^[41]。

3.1.2 评价指标体系确定的原则

岩溶隧道涌水对生态环境影响综合评价指标体系的制定必须遵循科学性与实用性、完整性与可操作性、不相容性与系统性、定量指标与定性指标结合、静态指标与动态指标相统一的原则。概括起来有以下几个方面:

1. 科学性。评价指标要能够全面反映系统结构和功能内容, 不能遗漏任何重要内容, 并注意从中抓住影响较大的主要因素。
2. 代表性原则。评价指标的确定要具有一定的代表性, 要确定反映生态环境的现状及变化特征。
3. 操作性。指标内容应简洁、项目适量, 在满足有效性的前提下, 要在实际中能够应用, 既评价指标应操作简便, 评价方法易于掌握。
4. 定性评价与定量评价相结合。在评价中, 既要把握被评对象“质”的

一面, 对其进行定性分析, 又要把握被评对象“量”的一面, 对其进行定量分析。既评价指标尽可能量化^[42]。但对某些指标量化难度较大, 此时也可采用定性指标来描述, 从质和量的角度, 对评价对象得出科学的评价结论。

3.2 岩溶隧道地下涌水生态环境影响评价指标体系

地下水位生态环境指标是指与生态环境状况密切联系的地下水和与地下水有关的各种临界指标的总称^[14], 如土壤含水量、土壤允许含盐量(作物耐盐度)、地下水位适宜矿化度、地下水位临界深度等, 这些指标是水资源管理和生态环境保护的重要依据。如果采取一定的措施使地下水位和土壤水状态控制在临界指标范围内, 便可以维系现有生态环境或者使生态环境得到改善向良性发展; 如果超过安全阈值, 就会导致生态环境恶化。显然, 这些生态环境指标阈值在不同区域是不一样的, 应根据各地的实际情况确定相应的生态环境指标阈值。由于地下水生态环境指标的项目包括很多, 而且往往是几种指标综合对生态环境产生影响, 加之不同地区生态环境指标还存在差异, 因此, 建设地下水生态环境临界指标系列是一项长期而艰巨的任务, 任重道远, 需进行大量试验和调查研究工作。

地下水引起生态环境影响综合评价指标体系的指定是一个复杂和困难的问题, 目前尚处于探索阶段。本文根据歌乐山隧道的自然地理的特点, 以及生态环境特点, 国内外有关地下水引起的生态效应评价指标, 根据野外调查资料, 在分析地下水引起的生态环境问题影响因素的基础上, 确定隧道涌水对生态环境影响的评价指标体系。生态环境影响综合评价指标是实现定性分析与定量分析相结合, 合理选择生态评价的重要基础。国外学者在设计指标体系时多采用六种方法, 即范围法、目标法、部门法、问题法、因果法和复合法^[43]。本文在设计岩溶隧道涌水对生态效应综合评价指标体系时, 主要采用范围法, 根据上述建立生态环境影响指标体系的基本原则, 我们按属性对整个系统逐层分解。第一层是整个生态系统影响, 第二层把这个系统分解为地质地貌因素、水文地质因素和气象因素系统。第三层把每个子系统分解成若干环境因子。如图 3-1。

设 O 为总目标, 代表岩溶隧道涌水对生态环境影响评价; R 为准则层, 代表其主要的影晌元素, 包括地质地貌因素(R_1)、水文地质因素(R_2)、气候水文因素(R_3); I 为指标层, 代表包气带岩性、包气带结构、地下水位埋深、地下水矿化度等共 9 个指标。

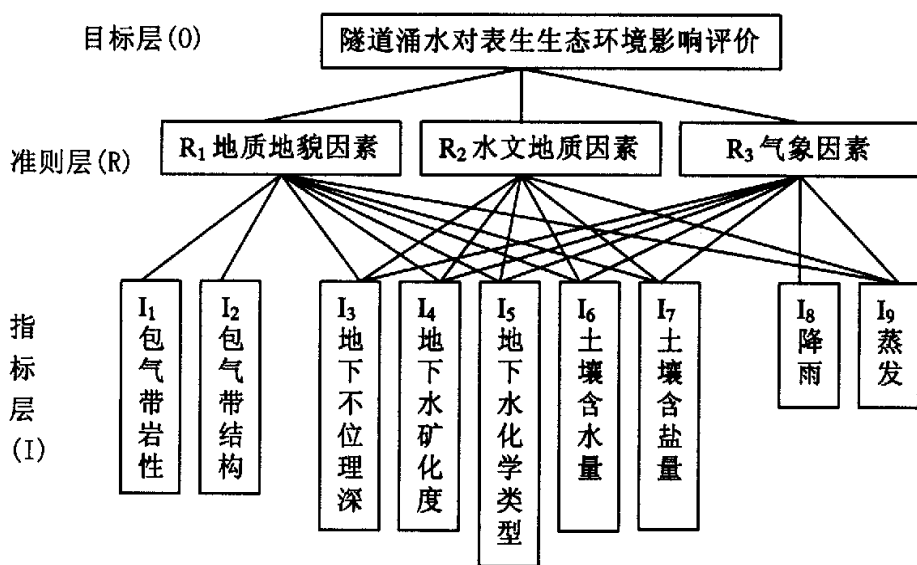


图 3-1 岩溶隧道涌水对生态环境影响递阶层次评价指标体系

各个层次的环境要素构成了一个层次结构图，这样可以进行多层次、多因素的综合评价，从而得到岩溶隧道涌水对生态环境影响的综合评价。

1、地质地貌因素

地质地貌是控制一个地区地下水量和水质宏观分布的基本因素和前提，包括包气带岩性和和包气带结构二个方面。

2、水文地质因素

水文地质因素是影响生态环境中最重要的因素，主要包括地下水位埋深、地下水矿化度、地下水化学类型、土壤含水量和土壤含盐量。

3、气象因素

气象因素主要通过降雨和蒸发影响包气带和地下水，从而影响生态环境质量。

3.2.1 包气带结构

一般而言，砂土，毛细水上升高度较小；粘土，毛细水上升高度大，因此在相同的环境条件下，砂土和粘土不易返盐，而砂质粉土则更易返盐，土壤中含盐量较高^[44]。一般来说，随着岩性从砂质-粉土-粉砂-细砂由细到粗变化，其含水量和含盐量是逐渐降低的。因而包气带岩性是决定地下水毛细上

升高度的重要条件，从而影响到土壤含水量、含盐量和植被生存。

3.2.2 包气带岩性

包气带岩性变化、致密岩性层的存在、粘性土在剖面上的分布部位及厚度对土壤水盐交替作用和植物根系发育有很大影响。根据野外调查和室内分析表明，包气带结构也影响包气带剖面土壤含水量和土壤含盐量从而影响地表植被的生长。当包气带剖面存在致密岩性层时，则其含水量和含盐量要比松散的同种岩性的明显要高，为植被生存提供了所需的水分和盐分。当包气带岩性为单一均质结构的松散沙层时，植物为了生存，根系尽量向地下水面附近延伸以吸收地下水，使植物的垂直根系比较发育。当包气带剖面存在致密岩性层或粘性土层时，植物的水平根系发育。

3.2.3 地下水位埋深

地下水位埋深是影响地表生态环境好坏的决定性因素。地下水与生态环境关系密切，地下水位的变化会引发一系列生态环境问题，地下水位过高会引发土壤盐渍化和沼泽化等，过低会引起土壤干化、沙化和天然植被衰败，这也就是说在一定的区域存在一个合理的地下水位，如地下水保持在该水位就会使生态环境往良性方向发展，否则就会向恶性方向发展^[46]。埋藏在山体中的岩石或土体里分布着大量得空隙，这些空隙是地下水的储存场所，也是地下水的转移通道。隧道开挖不可避免地会破坏某些地下水的储存点和转移通道，造成地下水重新分配，从而形成新的含水层和地下水转移通道，而原来某些含水层和转移通道中所含的地下水可能减少甚至枯竭，这些导致隧道区域局部地下水位下降、地表植被枯萎甚至死亡^[46]，进而恶化生态环境。

从水分循环的过程来看，地下水位对植被的生长有很重要的影响。国家“九五”科技攻关项目对西北水分与生态研究中，通过水分与生态演替的对比关系，建立了水分驱动下生态演替的“层圈结构”理论；也确立了地下水位与植被生长的对应关系。在对黑河流域的专项研究中，除采用生态体模型预测下游绿洲变化外，还建立了植被盖度与水盐的关系模型^[28]：

根据已知的植被盖度(CR)、地下水位埋深GH和地下水矿化度GS的样本序列资料，建立变量回归方程：

$$CR=72.393-10.48(GH)-9.814(GS) \quad (\text{式3-1})$$

式中是用32个样本系列同经线性回归的模型，相关系数0.809，经F检验其显著相关。

用同样本系列，建立盖度与地下水位的二元回归分别得到相关方程：

$$CR=49.226-28.665^{\ln(GH)} \quad (\text{式3-2})$$

利用式拟合方程，可外推计算不同水位状态下，地面植被的覆盖度，当CR值小于2时，可认为该区域土地趋于荒漠化。

不同年龄的植物及不同种类植物其正常生长情况下对地下水不位埋深的要求不一样，植物幼苗的生长环境，地下水水位埋深一般要求比较浅，因新繁殖生长的幼苗个体矮小，根系还不够发达，耐干旱的能力弱，适宜的潜水埋深范围只占整个全生长期适宜网值范围的较浅的区间部分。各种植物都有其适宜生长的地下水埋深变动范围，在此范围内植物一般枝叶繁茂，个体众多，植株密集。我们把植物生长较好的地下水埋深变动范围作为植物生长的适宜范围^[32]。在适宜范围内，存在一个植物生长良好的范围，为最适范围。在植物生长最适范围内，水位的变化对于植物的生长状态影响不显著，但当水位变动超出最适区阈值附近时，每增减不大的数量都会对植物的生长状态产生显著影响。当水位降低(或升高)到接近适宜生长范围的最低点(或最高点)时，则植物生长因水分强烈不足(或过剩)的影响，而呈现出衰败状态。通过隧道施工期对该区域植被观察发现，地下水埋深在一定的范围内变化，会对植被的生长状态产生显著的影响：当地下水埋深在1-2m范围内变化时，草甸植被、灌木及乔木等典型植被均能生长；当地下水埋深降低至2-3m时，草甸植被的生长就会受到抑制，其它植被基本上还能正常生长；当地下水埋深降低至3-4m时，草甸植被就会枯死，其它植被的生长会受到抑制；当地下水埋深降低至4-6m时，乔木层就会出现生长不良；草甸植被就会出现退化；当地下水埋深降低至6m以下时，乔木层部分植物就会出现死亡现象^[28]。

3.2.4 地下水矿化度

地下水矿化度与植被长势关系密切。不同类型植被、不同生长年龄的植被对矿化度的忍耐程度不同。幼苗的忍耐性偏低，而植株粗大的成年马尾松和杉木对矿化度的忍耐程度就较强，所以在矿化度较高的环境中很难见到植被幼苗的生长。在地下水位埋深一定的情况下，随着矿化度的增加，植被由

水生系列向盐生系列演替。

3.2.5 地下水化学

地下水化学类型影响地表荒漠化和作物的生长。如果地下水中氯化钠和硫酸钠含量太高,地表会形成盐土;由于渗透压的存在,使作物根、茎失水遭受盐害,导致作物枯萎死亡。如果地下水中碳酸钠和重碳酸钠含量太高,地表会形成碱土;由于这种盐能腐蚀农作物的根部,使作物遭受碱害,造成作物烂根死亡。如果地下水中盐、碱含量都太高,则会使土壤迅速盐碱化,作物死亡。

3.2.6 土壤含水量

土壤含水量不仅影响植被盖度,还影响植被长势和植被演替。土壤水分主要来源于潜水蒸发和毛管运移,地下水埋深的变化制约着土壤水分的多寡,从而从根本上制约着植被群落的演替。当地下水位埋深 1.0~2.5m 时,平均土壤含水量为 26.1%,因此,此埋深对植物生长十分有利;当地下水位埋深在 2.5~4.5m 时,平均土壤含水量为 19%,仍在植物适宜生长的范围内;当地下水位埋深在 4.5~6.5m 时,平均土壤含水量为 13.1%,接近部分植物的凋萎系数;当地下水位埋深在 6.5~10m 时,平均含水量为 8.2%,基本小于植物的凋萎含水量,植被衰败枯死。因此合理地下水生态水位是 2.5~4.5m^[32]。当然,不同地区由于气候、土壤质地等因素不同,同一种植物在不同地区其适宜生长的地下水埋深范围可能存在差异。因此,对具体地区来说,则以大多数植被的地下水临界埋深作为植被的地下水临界埋深指标。根据模型计算和调查分析,可以得出在大多数植物呈良好生长状态的地下水埋深下限指标是 2.025m,出现稀疏衰败状态的地下水埋深临界指标是 4.045m^[24]。以上这一切还有待于做大量的生态调查工作,也许在弄清了天然植被恢复的合理生态水位后,对西部大开发的生态保护会有极好的借鉴意义。

3.2.7 土壤含盐量

土壤含盐量与生态环境和植被生长、演替有关。据研究表明植被生长与

土壤含盐量呈对数关系。现状条件下隧道区域不同地下水位埋深包气带剖面上含盐量大多都较低,不会对植被的生长构成影响,但随着涌水量的增加,使得地下水含盐量增高,达到 0.653%,对植被生长有一定的影响。

3.2.8 降雨与蒸发

当研究区处于丰水期时,降雨量大,雨量集中,并很快下渗补给地下水,支持依赖地下水生存的天然植被;局部低洼地带,汇集成海子或湿地,使海子或湿地周围喜水的草本植物或浅根性植被生长旺盛。

当研究区处于枯水期基本无降雨或降雨量小,蒸发作用强烈,多年平均蒸发量是降水量的倍数。地下水位埋深越小,包气带岩性颗粒越细,地下水蒸发越强,土壤积盐效应越明显,使地下水浅埋区喜水耐盐植被发育。但蒸发主要发生在地表有降雨或地下水浅埋区,对于流域大部分埋藏较深的地区来说,蒸发的影响比降雨的要弱。

3.3 因子评分

到目前为止,国内外对于地下水对生态环境影响评价尚无统一的标准。以野外实际调查资料为依据,在参考国内外有关评价指标所使用的分级标准的基础上^{[47][48]},将歌乐山隧道涌水引起的生态环境状态分成五个等级,即生态环境好(I)、生态环境较好(II)、生态环境中等(III)、生态环境较差(IV)和生态环境差(V),建立了地下水引起的生态效应评价指标分级标准表(表 3-1)和评价指标分级标准评分表^[24](表 3-2)。其中地貌类型、包气带岩性和结构、地下水位埋深、地下水化学类型、土壤含水量、包气带含盐量、降雨量根据野外调查和具体情况分级;地下水矿化度采用常规的矿化度分级标准,蒸发量根据地下水位埋深和临界蒸发深度分级。

表 3-1 地下水引起的生态效应评价指标分级标准表

| 评价指标 | 生态环境好 (I) | 生态环境较好(II) | 生态环境中等 (III) | 生态环境较差(IV) | 生态环境差(V) |
|--------------|--------------|-------------|-----------------|-------------|-------------|
| 地包气带岩 质 性 | 粉土质 | 亚粘土、亚 砂土 | 粉土质亚砂土、 亚粘土 | 粉细砂、亚砂 土 | 亚砂土、 砂卵石 |

| | | | | | | |
|--------|-------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| 地貌因素 | 包气带结构 | Q ₃ +Q ₂ 黄土 | | Q ₂ 黄土 | | Q _{3s} 冲湖积物 |
| 水文地质因素 | 地下水埋深(m) | 1-3 | <1 | 3-5 | 5-8 | >8 |
| | 地下水矿化度(g/L) | <1 | 1-3 | 3-4 | 4-5 | >5 |
| | 地下水化学类型 | HCO ₃ -Ca | HCO ₃ -Ca. Mg (Mg. Ca) | HCO ₃ -Ca. Na. Mg | HCO ₃ . SO ₄ (SO ₄ . HCO ₃)-Ca. Mg | |
| | 土壤含水量(%) | >16 | 14.667-16 | 13.333-14.667 | 2-13.333 | <2 |
| | 土壤含盐量(%) | <0.2 | 0.2-1.0 | 1.0-2.0 | 2.0-3.0 | >3.0 |
| 气象 | 降雨量(mm) | >450 | 440-450 | 420-440 | 410-420 | <410 |
| 水文因素 | 蒸发(地下水埋深) | >4m | 3-4 | 2.5m-3.0m | 2.5 | 2.5m |

另外,每个因子又被细分为不同的数值范围(数值型参数,如地下水埋深、地下水含水量等)或类型(非数值型参数,如包气带岩性、包气带结构等),这些非数值型参数难以量化,因此采用分级标准评分法进行定量化处理,并用评分值来量化这些数值范围和类型对生态环境的可能影响。评分值越大,影响越大。每个因子的数值范围或类型划分及其对应的评分值如表 3-2 所示,具体使用时应根据研究区的实际水文地质条件参考该表仔细确定。本次对所有的指标按照 0.1-10 赋值的方法进行取值。取值越大,生态环境越差;反之,生态环境越好。例如:对于“地下水位埋深”这一评价因子,如果评价单元落在小于 3m 的范围内,则“地下水位埋深”指标评分值为 0.1,若取零,则反映不出权重的作用,故从 0.1 开始取值;若评价单元落在大于 8.0m 的范围内,则指标评分值取 10。

表 3-2 地下水引起的生态效应评价指标评分标准表

| 评价指标 | 评分 | 生态环境好(I) | | 生态环境较好(II) | | 生态环境中等(III) | | 生态环境较差(IV) | | 生态环境差(V) | |
|--------|---------|----------|------|------------|------|-------------|------|------------|------|----------|------|
| | | 评分区间 | 典型评分 | 评分区间 | 典型评分 | 评分区间 | 典型评分 | 评分区间 | 典型评分 | 评分区间 | 典型评分 |
| 地质地貌因素 | 包气带岩性 | 0.1 | 0.1 | 0.1-3.33 | 2 | 3.33-6.67 | 5 | 6.67-10 | 8 | 10 | 10 |
| | 包气带结构 | 0.1 | 0.1 | 0.1-3.33 | 2 | 3.33-6.67 | 6 | 6.67-10 | 9 | 10 | 10 |
| 水文地质因素 | 地下水埋深 | 0.1 | 0.1 | 0.1-3.33 | 0.5 | 3.33-6.67 | 4 | 6.67-10 | 7 | 10 | 10 |
| | 地下水矿化度 | 0.1 | 0.1 | 0.1-3.33 | 1 | 3.33-6.67 | 5 | 6.67-10 | 7.5 | 10 | 10 |
| | 地下水化学类型 | 0.1 | 0.1 | 0.1-3.33 | 1 | 3.33-6.67 | 5 | 6.67-10 | 7.5 | 10 | 10 |
| | 土壤含水量 | 0.1 | 0.1 | 0.1-3.33 | 0.5 | 3.33-6.67 | 4 | 6.67-10 | 7 | 10 | 10 |
| | 土壤含盐量 | 0.1 | 0.1 | 0.1-3.33 | 1 | 3.33-6.67 | 5 | 6.67-10 | 7.5 | 10 | 10 |
| 气象水文因素 | 降雨量 | 0.1 | 0.1 | 0.1-3.33 | 1.5 | 3.33-6.67 | 5 | 6.67-10 | 8 | 10 | 10 |
| | 蒸发 | 0.1 | 0.1 | 0.1-3.33 | 1.5 | 3.33-6.67 | 5 | 6.67-10 | 8 | 10 | 10 |

第四章 岩溶隧道涌水引起的生态环境影响评价

4.1 生态环境影响综合评价方法

综合评价指标体系的复杂性决定了其评价方法必须用复杂大系统的理论和综合集成的方法去进行,即通过分解协调原则,在定性分析下结合定量分析,将自然科学与社会科学、软科学与硬技术、现代方法与传统方法结合起来,常见的用于生态环境影响综合评价的方法有以下几类。

1. 综合评价指数法

综合评价指数法具有灵活、全面的特点,现已广泛运用于涉及面较广并较复杂的评价中,同样可拓展到应用于生态环境影响综合评价。该评价方法的基本步骤为:(1).分析建设项目的性质、规模及其对生态环境影响的特点,研究评价的生态因子的性质及变化规律。(2).建立评价指标集,并确定权重。(3).确定指标评分值。(4).确定评价标准。(5).计算综合评分值。综合评价指数法一般用于生态因子单因子质量评价,生态环境多因子综合质量评价和生态系统功能评价。应用这种方法的关键是确定指标集和指标权重。指标集应较全面地反应建设项目对生态环境的影响。在指标集和指标权重的确定过程中,一般采用的有简单易行的特尔菲法,但是这种方法受人为因素影响太大^[49]。

2. 灰色关联度分析法

灰色关联分析法是研究在许多客观事物之间、因素之间,相互关系比较复杂,人们在认识、分析、决策时,得不到全面、足够的信息,不容易形成明确的概念。因为这些都是灰色因素、灰色关联性在起作用,所以对灰色系统进行分析和研究时,要解决如何从随机性的时间序列中,找到关联性和关联性的度量值,以便进行因素分析,为系统决策提供依据。此方法确定权重,首先要选取决定研究地区生态环境变化的主导因子,再确定其它指标同主层因子决定的指标之间的关联度排序,然后以此关联度为基础,决定权重的分析^[50]。

3. 聚类分析法

聚类分析是研究“物以类聚”,解决事物分类问题的一种数学方法^[61]。分类是人们认识事物和世界的一种基本方法,在过去的较早年代,人们主要

靠经验、逻辑或专业知识进行分类，但是随着生产和科学技术的发展，分类越来越细，要求越来越高，以至有时凭经验和专业知识是不能确切分类，后来借助计算机、多元统计分析、模糊数学和图论等方法，从中逐步分离出了聚类分析这个分支。聚类分析是指在不用或不用样品所属类别信息的情况下，依据样品集数据的内在结构，在样品间相似性度量的基础上，对样品进行分析的方法。聚类分析虽然已有三十年的历史，但是理论尚不完善，方法还比较粗糙。尽管如此，它在自然科学和社会科学的许多领域的应用已经取得很大的成功。

4. 层次分析法

层次分析法是美国著名的运筹学家 T-L-Saaty 在 20 世纪 70 年代中期创立的一种多目标决策方法，其本质是指将决策问题的有关元素分解成目标、准则、方案等层次，在此基础上进行定性和定量分析的一种决策方法。该方法具有实用性、系统性、简洁性等优点，是处理某些难以完全用定量方法分析复杂问题的有力手段。层次分析法的基本思想是先按问题要求建立一个描述系统功能或特征的内部独立的递阶层次结构，通过两两比较因素(或目标、准则、方案)的相对重要性，构造上层某要素对下层相关元素的权重判断矩阵，以给出相关元素对某要素的相对重要序列。AHP 的核心问题是排序问题，包括递阶层次结构原理、标度原理和排序原理。

5. 模糊评价法

1965 年著名的美国工程控制和系统论专家、加利福尼亚大学教授 L-A-Zadeh 发表了著名的论文“模糊集合”，给出了模糊性现象的定量描述和分析运算的方法，标志着模糊数学这门新学科的诞生。模糊评判法是对受多个因素影响的事物作出全面的有效的一种综合评价方法^[62]。它突破了精确数学的逻辑和语言，强调了影响事物因素中的模糊性，较为深刻的刻划了事物的客观属性。应用模糊评判法首先要确定评价参数，不同参数在评价中所起的作用也不相同，需要分别确定各参数的权重因子大小。随后要根据不同参数的特点给出拟合隶属函数，结合评价标准，经模糊变换给出隶属度值，完成模糊综合评价。

6. 人工神经网络评价法

由于人工神经网络有类似人的大脑思维过程，可以模拟人脑解决某些模糊性和不确定性问题的能力。因此，利用人工神经网络对已知环境样本进行学习，获得先验知识，学会对新样本的识别和评价。李祚泳等开展了人工神经网络在环境科学中的应用。它将人工神经网络 B-P 模型应用于环境质量评

价^[63]。B-P 网络模型应用于环境质量评价,不需要对各评价指标权值大小做出人为规定,在学习过程中会自适应调整,评价结果具有客观性。另外,B-P 网络可以根据不同需要选取随意多个评价参数建立环境质量评价模型,此方法具有很强的适应性。

由于地质环境的复杂性、评价对象的层次性、评价标准的模糊性、定性指标难以量化等问题的存在;加之隧道涌水对生态问题的影响因素中既包括定量和定性因素,又包括确定和不确定因素;这些问题使得难以用经典的数学模型加以统一量度,本文结合层次分析法和模糊数学理论,阐述了岩溶隧道涌水对生态环境影响的层次模糊综合评价方法。该方法以层次分析法为基础,而建立在模糊集基础上的模糊综合评判法不仅考虑评价对象的层次性,使评价标准、影响因素的模糊性得以体现,而且将定性与定量因素结合起来,可扩大信息量,提高评价精度,在评价中还可以充分发挥人的经验,使评价结果符合客观实际情况,较好地解决了这些问题。因此,本次评价采用层次模糊综合评价法进行评价。

4.2 生态环境影响综合评价的模糊综合评价法

岩溶隧道涌水对生态环境影响评价涉及面广,牵涉因子多,但均具有下述特点:

1. 多指标性。评价岩溶隧道涌水对生态环境影响不能简单地用一、二个或少量几个指标来描述,因为影响生态环境的因素很多,且既有定量的又有定性的。

2. 模糊性。指被评价对象的优劣之间不存在明确的界限,而是中间过渡。根据上述特点,将多目标决策技术中的模糊评价法与层次分析法两种方法结合起来,形成一种模糊层次分析法,运用到岩溶隧道涌水对生态环境影响综合评价中,是非常适合的。

岩溶隧道涌水对生态环境影响综合评价的模糊层次综合评价分五步进行:

1. 根据对评价系统的初步分析,将评价系统按其组成层次构筑成一个层次结构模型。

2. 两两比较结构要素,建立判断矩阵群。

3. 判断每个矩阵的一致性,若不满足一致性条件,则要修改判断矩阵,直至满足为止。计算其权重向量,进而求出合成权重向量。

4. 建立最底层指标的隶属函数, 计算隶属度, 解决了指标间的可综合性问题。

5. 计算评价综合值, 对评价系统进行综合评价。

4.3 层次模糊综合评价法

4.3.1 构建层次结构指标模型

层次分析法(AHP)是把复杂的问题分解为各组因素, 将这些因素按支配关系分组以形成有序的递阶层次结构, 通过两两比较判断的方法确定每一层次中因素的相对重要性即权重^[18]。用层次分析法计算评价指标的权数分配可较大幅度地减少主观因素。如果人的主观判断偏离了客观实际, 则一致性检验就通不过, 必须对判断矩阵作出调整, 重新计算权重, 直到一致性检验通过, 权重才是合理的, 所以层次分析法较为实用。

根据对评价系统的初步分析, 将评价系统按其组成层次构筑成一树状层次结构, 在层次分析中、一般可分为 3 个层次: 目标层、准则层、指标层(如图 3-1)。

目标层: 这是最高的层次, 表示评价所要达到的目的。

准则层: 这层是对目标层的具体扩展和描述。

指标层: 指标层由直接或间接可以度量的因素组成, 是对准则层的细化。

根据所分析的岩溶隧道涌水对生态环境影响综合评价指标体系, 这个层次结构模型的目标层是岩溶隧道涌水对生态环境影响综合评价。准则层有地质地貌因素、水文地质因素、气候水文因素; 指标层主要指包气带岩性、包气带结构、地下水位埋深、地下水矿化度等共 9 个指标。

层次分析法计算权重的方法与步骤:

(1) 构造判断矩阵

$$A=(a_{ij})_{n \times n} \quad (\text{式 4-1})$$

其中 A 为判断矩阵, a_{ij} 为针对上一层某元素, 本层次指标 u_i 与 u_j 之间的相对重要性, n 为本层次指标的个数。根据专家或决策者提供的参考意见, 对各级指标两两比较, 构造出判断矩阵。采用 Saaty 的 1-9 及倒数的标度方法构造判断矩阵(表 4-1)。若有 m 名专家参加评判, 他们各自给出的 a_{ij} 值为 a_k ($k=1, 2, \dots, m$), 则最后汇总给出的判断矩阵的值 a_{ij} 为:

$$a_{ij} = \sqrt[m]{a_1 a_2 \dots a_m} \quad (\text{式 4-2})$$

表4-1 Saaty的1-9及倒数的标度方法

| 因素B、B 相比较的重要程序等级 | b_{ij}^k | b_{ji}^k |
|---------------------------|------------|------------|
| B_i 比 B_j “同等重要” | 1 | 1 |
| B_i 比 B_j “稍微重要” | 3 | 1/3 |
| B_i 比 B_j “明显重要” | 5 | 1/5 |
| B_i 比 B_j “强烈重要” | 7 | 1/7 |
| B_i 比 B_j “绝对重要” | 9 | 1/9 |
| B_i 比 B_j 重要程序介于各等级之间 | 2、4、6、8之一 | 相应倒数 |

(2) 权重向量的计算

为了从判断矩阵群中提炼出有用的信息，达到对事物的规律性认识，为决策提供科学的依据，就需要计算每个判断的权重向量，进而求出全体判断矩阵的合成权重向量。单个判断矩阵权重向量先计算特征向量 W ，然后归一化处理，使其满足 $\sum W_i = 1$ ，可按如下方法计算：

根据所建立的每一层的比较矩阵，求出最大特征根所对应的特征向量。并求出它们的权重 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ ，采用向量形式记做：

$$W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n),$$

求解判断矩阵 A 的特征根问题：

$$A\omega = \lambda_{\max} W \quad (\text{式 4-3})$$

λ_{\max} 是 A 的最大特征根，而 ω 是对应的特征向量，将 W 归一后就是权重向量。

该特征向量即为各因素重要性的顺序，也就是权重分配。求判断矩阵的特征向量的方法有两种：方根法与和积法^[18]，本文采用方根法。

(3) 一致性检验

判断矩阵的不一致性，究其产生原因，主要是两个，一是专家在进行两两比较时的价值取向和定级技巧，二是重要性等级赋值的非等比性。因此，当判断矩阵的阶数 $n > 2$ 时，通常难于构造满足一致性条件的矩阵来。只能对它们进行估计判断，实际给出的 a_{ij} 与精确值之间有偏差，不能保证判断矩阵具有完全的一致性。为此，需要进行一致性检验，其公式为：

$$CR = CI / RI \quad (\text{式 4-4})$$

式中， CI 为一一致性指标，表达式为：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (\text{式 4-5})$$

其中, λ_{max} 为判断矩阵的最大特征值, n 为判断矩阵的阶数。RI 为随机一致性指标, 对 1-9 阶判断矩阵 RI 值见表 4-2。

表 4-2 各阶判断矩阵的 RI 值

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

只有当 $CR \leq 0.1$ 时, 则认为判断矩阵具有满意的一致性, 此时认为权数分配合理, 否则需要重新调整判断矩阵, 直到满足 $CR \leq 0.1$ 。

(4) 求全体判断矩阵的合成权重向量

合成权重向量, 是指最下层各元素对上层的权重向量, 他的每一个分量表示相应指标在目标中所占的份额或比重。计算组合权重, 必须先知道某上一级的组合权重, 某一级指标的组合权重是该指标的权重和上一级指标的组合权重的乘积值。

(5) 后进行层次总排序, 根据各层的计算结果, 对最后的目标进行总的排序。

表 4-3 目标层总排序表

| 层次 C \ 层次 B | B_1 | B_2 | ... | B_m | C 层次总排序权重 |
|-------------|----------|----------|-----|----------|---------------------------|
| | b_1 | b_2 | ... | b_m | |
| C_1 | c_{11} | c_{12} | ... | c_{1n} | $\sum_{j=1}^m b_j c_{1j}$ |
| C_2 | c_{21} | c_{22} | ... | c_{2n} | $\sum_{j=1}^m b_j c_{2j}$ |
| \vdots | \vdots | \vdots | ... | \vdots | \vdots |
| C_n | c_{n1} | c_{n2} | ... | c_{nm} | $\sum_{j=1}^m b_j c_{nj}$ |

4.3.2 模糊综合评价

在实际工作中, 对一个事物的评价(或评估), 常常涉及到多个因素或多个指标, 这时就要求根据这多个因素对事物作出综合评价, 而不能只从某一因素的情况去评价事物, 这就是综合评判。在这里, 评判的意思是按照给定

的条件对事物的优劣、好坏进行评比、判别；综合的意思是指评判条件包含多个因素或多个指标。因此，综合评判就是要对多个因素影响的事物作出全面评价。

模糊综合评判法以隶属度来描述模糊界限，通过 W (权重集) 与 R (单因素评价集) 的合成运算 B (隶属度值) 来完成这一过程，其实质是对评价因子的加权的过 程，即：

$$B=W_0R \quad (\text{式 4-6})$$

根据运算结果按照隶属度最大原则即可求出评价结果。

(一) 生态环境影响模糊综合评判模型：

模糊综合评判是对受多种因素影响的事物做出全面评价的一种十分有效的多因素决策的方法。所以，模糊综合评判决策又称模糊综合决策或模糊多元决策。

设 $U=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为 n 种因素(或指标)， $V=\{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 为 m 种评判，它们的元素个数和名称均可根据实际问题需要由人们主观规定。由于各种因素所处的地位不同，作用也不一样，当然权重也不同，因而评判也不同。人们对 m 种评判并不是绝对的肯定或否定，因此综合评判应该是 V 上的一个模糊子集。

$$B=(b_1, b_2, \dots, b_m) \in \zeta(V) \quad (\text{式 4-7})$$

其中 $b_j(j=1, 2, \dots, m)$ 反映了第 j 种评判 v_j 在综合评判中所占的地位(即 v_j 对模糊集 B 的隶属度： $B(v_j)=b_j$)。综合评判 B 依赖于各个因素的权重，它应该是 U 上的模糊子集 $a=(a_1, a_2, \dots, a_n) \in \zeta(U)$ ，且 $\sum_{i=1}^n a_i=1$ ，其中 a_i 表示第 i 种因素的权重。因此，一旦给定权重 A ，相应的可得到一个综合评判 B 。

于是，需要建立一个从 U 到 V 的模糊变换 T ，如果对每一个因素 u_i ，单独作一个评判 $f(u_i)$ ，这可以看作是 U 到 V 的模糊映射 f ，

即

$$f: U \rightarrow \zeta(V) \quad (\text{式 4-8})$$

$$u_i \rightarrow f(u_i) \in \zeta(V) \quad (\text{式 4-9})$$

由 f 可诱导出一个 U 到 V 的模糊线性变换 T_f 。我们就可以把 T_f 看作为由权重 A 得到的综合评判 B 的数学模型。

(二) 模糊综合评判步骤

由以上分析可看出，模糊综合评判的数学模型由三个要素组成，其步骤分为 4 步：

(1) 因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$

(2) 评价指标的隶属函数及隶属度的计算

指标是指处于生态环境影响评价层次模型的最底层, 是没有下一层指标的指标。多指标系统的每一个评价方法, 都面临着指标之间不可公度的问题, 这一问题包含两个子问题: 一是按何种规则将每个指标无量纲化, 二是以何种方式区分各指标的相对重要性。从技术方法的角度看, 建立最底层指标的隶属函数, 计算隶属度, 解决了指标间的可综合性问题。

岩溶隧道涌水对生态环境影响评价指标量多且指标内容专业性强, 统计难度过大, 所以采用模糊分布的方法来确定隶属函数。这种方法与概率统计类似, 根据实际情况, 选定某些带参数的函数表示某种类型的模糊概念的隶属函数, 然后通过经验指定或实验数据计算出隶属函数中有关参数, 最后确定评价指标的隶属函数。常见的适合模糊概念的分布类型有降半梯形、升半梯形两种分布, 如图 4-1、4-2 所示。

① 升半梯形分布

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ 1, & b < x \end{cases} \quad (\text{式 4-10})$$

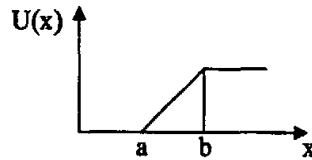


图 4-1 升半梯形分布图

② 降半梯形分布

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a}, & a < x \leq b \\ 0, & b < x \end{cases} \quad (\text{式 4-11})$$

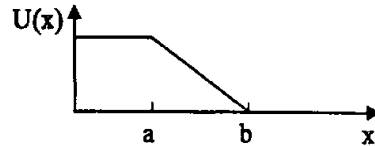


图 4-2 降半梯形分布图

(3) 评判集 (评判集或决断集) $V = \{v_1, v_2, \dots, v_s\}$

(4) 单因素评判 $f: U \rightarrow \zeta(V)$,

$$u_i \rightarrow | f(u_i) = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{is}) \in \zeta(V) \quad (\text{式 4-12})$$

由模糊映射 f 可诱导出模糊关系 $R_f \in \zeta(U \times V)$

即 $R_f(u_i, v_j) = f(u_i)(v_j) = r_{ij}$

因此 R_f 可由模糊矩阵 $R \in \mu_{s \times n}$ 表示:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{pmatrix} \quad (\text{式 4-13})$$

称 R 为单因素评判矩阵。由模糊关系 R 可诱导 U 到 V 的模糊线性变换 T_r 。称 (U, V, R) 构成一个模糊综合决策模型, U, V, R 是此模型的三个要素。

(5) 综合评判

若输入一种权重 $A \in \zeta(U)$, 则输出一个综合评判

$$B = A \circ R \in \zeta(V) \quad (\text{式 4-14})$$

B 为生态环境质量影响评价值; A 为各指标评价的权重值; “ \circ ” 为模糊矩阵的复合运算符号, 一般为取算子 $M(\wedge, \vee)$, $M(\cdot, \vee)$, $M(\wedge, \oplus)$ 、 $M(\cdot, \oplus)$ 中的一个, R 为单因素评判矩阵所组成的综合评价矩阵。

第五章 歌乐山岩溶隧道涌水对生态环境影响评价

5.1 研究区域环境条件

5.1.1 工程概况

该隧道位于渝怀线引入口团结村至井口镇之间,主洞对应里程为DK1+5.60-DK5+610,隧道全长4050m,距隧道出口左侧25m处设全长1760m的平行导坑。全隧III级围岩长3215m, N级围岩长400m, V级围岩长435m。隧道近垂直穿越中梁山脉,平均埋深为200m,最大埋深280m,单线隧道。隧道于2001年4月开工,2003年12月实现中线贯通。

5.1.2 自然地理概况

歌乐山隧道地处重庆沙坪坝区,起于井口镇,止于土主镇田坝村。该地区位于四川盆地东部,属亚热带季风性气候,年降雨量大,为1300-1700mm,降水分布不均匀,多集中在5-9月,且多大雨、暴雨等集中降雨过程。气候温和湿润,年平均气温为17-19℃。

隧道穿越地带山体主要为构造剥蚀低山地貌,山脉受构造控制明显,其走向与构造迹线一致。山坡地势陡峭,植被发育;山顶由于岩性差异风化,形成山岭与洼槽相间的地貌组合。其可溶岩地带形成之洼地平坦开阔,广布水田及早地,民舍密集,并分布有落水洞,溶蚀洼地等地貌特征。

5.1.3 水文地质概况

5.1.3.1 地质概况

隧道穿越地层主要有第四系全新统、侏罗系中统新田沟组至三叠系下统飞仙关组地层。穿越区的地貌特征、地层分布受观音峡背斜控制,该背斜为区域性构造,轴线近南北方向,与线路近垂直相交,背斜核部地区出露飞仙关组第三、四段地层,两翼岩层倾角约50-90°,且珍珠冲组、自流井组地层出现倒转,倒转倾角60°左右。须家河、新田沟地层近于直立;东翼相对较缓,且渐变明显。

节理的发育随构造部位不同而有差异，翼部地层为软硬岩石相间，节理较发育。

地表岩土主要以砂黏土为主，并伴有泥岩夹砂岩、泥岩夹砂岩及灰岩、砂岩夹页岩、黑色碳质页岩夹煤、灰岩、白云岩、及岩溶角砾岩等。

5.1.3.2 水文概况

该地区处于地表水系丰富的嘉陵江流域，河流、沟渠纵横交错，隧道排水通过地表农田排水沟渠排放，最终入嘉陵江支流。

隧道穿越地段地下水丰富，且有大量泉出露，地下水主要有第四系孔隙水，基岩裂隙水和岩溶水。孔隙水主要储存于坡洪积粘性土壤中，流动性差，水量小，主要受基岩裂隙水和地表水的排泄供给。基岩裂隙水分布于侏罗系“红层”和三叠系上统须家河组地层中。“红层”为砂岩、泥岩地层。泥岩隔水，主要通过各构造面和层面连通和排泄，以降水和地表水补给为主，当地居民用水多来自砂岩层中。

隧道顶部穿越地段为可溶岩地层，且可能有隐伏大型溶洞或暗河的可能性，据北暗玻璃场打的深井(温泉)使南北向几公里范围内可溶岩区泉水、塘水枯竭，说明该地区地下水连通性较好，故岩溶水为该隧道主要关注问题。山体地表溶蚀现象发育明显，多有地表漏斗、洼地、溶洞、落水洞、溶沟、溶槽等现象。上升泉出露较多，水量大，水位高，埋藏浅。

5.1.4 生态系统类型及特征

隧道地质构造极其复杂，集瓦斯、断层、岩溶、涌水为一体，特别是岩溶裂隙水发育，在灰岩地带岩溶裂隙水最大压力达22MPa，单孔(孔径65mm)最大出水量为260m³/h。仅出口端高压富水地段长达300m以上。歌乐山隧道地表植被发育，广布水田及早地，民舍密集，生活居住有6万余人，企事业单位200多家。地表有水库5座，距隧道中心线最近为479m，最远为7000m，暗河出露口4处，泉井30处。由于岩溶裂隙水与地表水连通，隧道的修建可能造成山顶泉水和地表水的漏失，影响范围为线路中心线两侧各3km的范围，影响的区域面积有24.3Km²。而土壤水分往往是决定植物分布和生长的限制性因子，当山体地表水含量低于植物生长最低量时，植物就会萎蔫、停止生长，最终导致植物消失。

该区植物种类繁多，歌乐山范围内现有植物130科，400多属，800余种；其中木本植物占植物种数的1/4，主要农作物有小麦、玉米、棉花、花生、西

瓜等。动物区系属重庆市市属野生的动物资源较少，饲养的动物较为丰富，主要有牛、马、驴、猪、羊、兔等。

歌乐山隧道建于中梁山中部，该区域的植被大体分为两种类型，一是海拔 500 米以下的紫色土区，主要为农业群落，一是海拔 500 米以上的黄壤区，主要为暖性针叶林或灌丛植被。因历史上的乱砍滥伐、滥垦，目前森林植被破坏严重，除少部分集中分布在海拔 350-680m 背斜低山中翼部黄壤土中生长较为茂密的森林外，其它地区大多数为超强度采伐的疏残林地，森林覆盖率为 32.4%。

研究区域的植被属于亚热带暖性常绿针叶林，分为马尾松林、杉木林和马尾松杉木混交林三种群系类型，其中还夹杂有其它树种如：松树、丝栎、香樟、刺槐、合欢、柳树、枫树及楠竹、慈竹、黄竹、斑竹、凤尾竹等；林下灌丛主要为映山红、桅子、野牡丹、柃木；草本植物主要有野芒、巴茅等。主要分布于海拔 500~650 米之间的三叠系须家河组黄色砂岩地区，土壤类型为山地黄壤冷沙黄泥（森林）土。针叶林多以幼龄林形式存在，尤其是在裸岩较多的地方，乔木稀疏，林下缺乏马尾松和杉木幼苗，群落结构较为简单。局部地区尤其是黄壤上的马尾松林发育较好，混生有杉木，林下灌木和针叶树幼树较多，结构较为复杂一些。灌木以山莓、铁仔、杜鹃或映山红为主。草本植物以芒萁和芒占绝对优势。藤本植物仅有拔葵属植物分布。由于研究区域内森林资源贫乏，森林植被覆盖率低，林分质量不高，树种单一，生物多样性未能得到有效保护，森林群落结构极不稳定，森林抗逆性和水土保持功能低下，生态系统十分脆弱。

5.1.5 歌乐山隧道的区域特殊性

歌乐山隧道之所以自始至终备受关注，主要有以下几点：

(1) 人文地理环境特殊

首先，歌乐山隧道位于渝怀铁路的导入线，是渝怀铁路起点的第一座隧道，这是它受重视的第一点原因。第二，该隧道位于重庆沙坪坝区，与国家级爱国主义教育基地、国家级自然保护区——歌乐山烈士陵园、松林坡刑场、中美合作所等垂直距离只有几公里。从地域范围上来讲，这些同属于沙坪坝区歌乐山镇，又由于隧道与歌乐山烈士陵园毗邻，故命名为歌乐山隧道。从生态区域来讲，他们又同属于一个小的生态区域，应该说命运息息相关。从设计选线开始，铁道部就明确指出，保护区严禁受到破坏和影响，因此，隧道周边环境的特殊性而使其对生态环境的保护问题更加突出和重要。第三，

隧道所穿越的山体生活着六万多老百姓，并过着靠山吃山靠水吃水的生活，主要以种菜为生。该地区是重庆市的重要的蔬菜供应基地，重庆市政府非常重视；而且当地老百姓的环保意识非常强，惟恐他们的生命安全和生存条件受到破坏，并采取积极的态度关注着从他们脚下穿过的这条隧道。

(2) 水文条件特殊

隧道处于水源丰富的嘉陵江流域，不仅地表河道纵横交错，四季不断流，而且地下水系丰富，属于高地下富水区。经以往调查研究，该区地下岩溶水连通性比较好。高地下富水区的隧道施工历来是施工中的难题，在该隧道中不仅是堵排问题，而且还要保证使隧道施工过程中地下水的漏失尽可能的少，以不影响山顶居住居民的正常的生产和生活，保护当地生态环境的安全性和稳定性。此外，隧道施工涌水或自然排出的施工用水经农田灌溉排水沟汇入嘉陵江支流，而嘉陵江是重庆市的重要的水源地，因此，保护水体的安全性在这里也是非常重要。

(3) 隧道施工过程的特殊状况

隧道施工为两头向中间掘进，分别称进口方向和出口方向。出口方向掘进至约200m处，隧道出现大量涌水，日涌水量最大达到几十万方。大量的涌水，不但严重困扰了施工的正常进行，阻碍了施工进度，而且加重了当地老百姓的不安情绪，质疑洁难施工单位，干扰施工。

5.2 隧道涌水引起的动态地下水位

随着隧道的开挖，岩溶涌水量也随着增加，这样就需要不断动用储存量，出现地下漏斗，降位漏斗也随涌水量的增加而不断扩展，在隧道长期排水条件下，隧址区整个地下水系统(包括含水层和在断裂带一定范围的相对隔水层)将具有一定水力连续性。显而易见，只要地下水系统的疏干水量满足不了隧道的排出水量，地下水位就将持续下降。如下图为歌乐山隧道涌水引起的观音峡背斜东翼动态地下水位。

图5-1是观音峡背斜东翼地下水位变化规律(从2001年11月-2003年8月，每半月各有一个观测值)，从图中可以看出地下水的变化与隧道施工涌水有着密切的联系。本区地下水动态总体表现为：第一阶段(2001.10-2002.3)水位先上升后逐步下降，第二阶段(2002.4-2002.9)水位逐步上升甚至超过第一阶段的最大值，第三阶段(2002.10-2003.5)水位逐渐下降趋于稳定甚至干枯，表明地下水动态受隧道疏干排水的影响。一般来说，2001年10月份地下水位

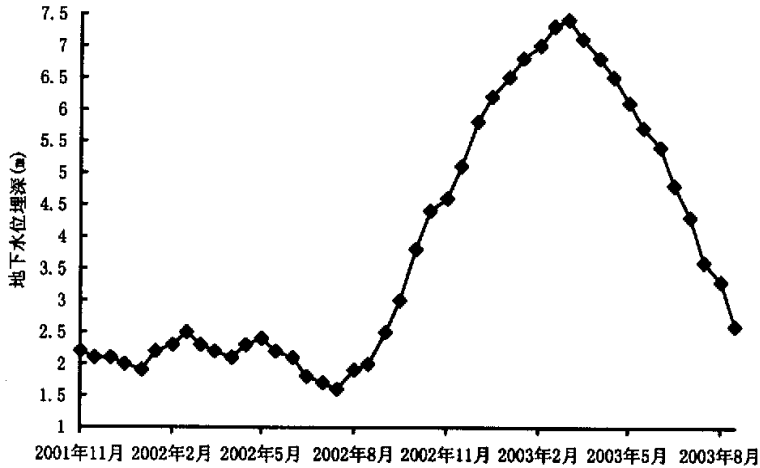


图5-1 歌乐山隧道观音峡背斜紫翼地下水位随时间变化的曲线图

逐步升高；离隧道轴线距离近的监测点从2001年11月初开始缓慢下降，随着离隧道轴线距离的增加，地下水位下降的起始时间逐渐延后，最迟的下降起始时间在2002年1月初；地下水位的恢复也与监测点离隧道轴线的距离有关，离隧道轴线距离近的监测点从2002年3月中旬开始恢复，随着离隧道轴线距离的增加，地下水位恢复的起始时间逐渐提前，最早的水位恢复起始时间在2002年1月中旬。这表明，隧道施工涌水过程中，监测点地下水位变化具有明显的滞后现象，且随着离隧道轴线距离的增加，滞后时间越长；隧道堵水成功后，监测点地下水位（流量）的恢复具有明显的“超前”现象，且随着离隧道轴线距离的增加，“超前”时间越长。

隧道堵水成功后，地下水位等值线没能恢复到2001年10月份的水平，这与地下水动态监测资料相矛盾。究其原因，可能与围岩渗透特性有关。该区经历多次间歇性抬升，且稳定间歇期较长，形成了比较发育的水平岩溶系统，导致水平向岩体渗透能力强于垂向渗透能力。天然状态下，由于垂向渗透性较差，浅层岩溶水系统与中部和深部岩溶水系统之间的水力联系较差。因此，隧道疏干排水初期，主要排泄的是深部岩溶水，浅层岩溶水动态变化主要受大气降水的影响。随着排水时间的延长，涌水量的增加，疏干降落漏斗逐渐加深并向外扩展，监测资料显示，南北长6.0km，东西宽约4.0 km，导致浅层岩溶水与深部岩溶水之间的水头差变大，最终引起地表岩溶水位（流量）逐步下降。当隧道堵水成功以后，疏干降落漏斗逐渐恢复，导致浅层岩溶水与深部岩溶水之间的水头差变小，二者之间的水力联系不断被削弱，在降雨补给影响下，浅层地下水水位迅速恢复甚至超过2001年10月份的水平，而区域地

下水位恢复较慢。

观音峡背斜西翼地下水动态变化规律东翼槽谷相似，即前期逐步上升，中期缓慢下降，后期逐渐恢复。但下降趋势的起始时间晚于东翼槽谷，主要是与西翼隧道掘进速度低于东翼槽谷有关。

无论是背斜东翼还是西翼，离隧道较近的监测点下降趋势开始时间基本都早于离隧道较远的监测点，这与隧道疏干的影响逐步向外扩展相吻合。这些都表明隧道施工涌水将导致地表岩溶水水位不同程度下降，且随径流途径的长短出现不同程度的滞后现象。这与岩溶水动态监测资料相吻合。

总之，绝大多数井泉伴随隧道涌水出现趋势性下降现象，表明岩溶隧道涌水对周边地下水系统影响较大。东翼槽谷北段已影响到隧道以北约4km左右，南段则影响到隧道以南6.1km左右；西翼槽谷北段影响到隧道以北3.5km附近，西翼槽谷南段已影响到隧道以南3.0km左右。东翼槽谷影响范围较西翼大，这显然与该翼平行导坑排水量较大有关。东翼槽谷北段影响范围小于南段，主要是因为，地下水流速较快，垂向分速度相对较小，故以浅部岩溶为主，深部岩溶不发育；南段由于地势较为平坦，地下经流缓慢，相应地流速垂向分量较大，使得岩溶发育深度增大。

5.3 岩溶隧道涌水引起的生态环境质量变化的评价

5.3.1 各影响因素重要性排序

首先，构造对比较矩阵，进行层次单排序及其一致性检验

1、构造第二层对第一层的比较矩阵 A

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 2 \\ 3 & 1 & 4 \\ 1/2 & 1/4 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{式 5-1})$$

经过计算，得到 $\lambda = 3.0183$ ，归一化的特征向量是

$$W = (0.2385, 0.6250, 0.1365)^T \quad (\text{式 5-2})$$

一致性的检验结果为：

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} = \frac{3.0183 - 3}{3 - 1} = 0.00915 \quad (\text{式 5-3})$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.00915}{0.52} = 0.0176 \quad (\text{式 5-4})$$

2、构造第三层对第二层的比较矩阵 R_1 。

$$R_1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 2 & 4 & 6 & 3 & 5 & 7 \\ 1 & 1 & 2 & 4 & 6 & 3 & 5 & 7 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 3 & 5 & 3 & 4 & 6 \\ 1/4 & 1/4 & 1/3 & 1 & 2 & 1/3 & 3 & 5 \\ 1/6 & 1/6 & 1/5 & 1/2 & 1 & 1/5 & 1/3 & 2 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 3 & 5 & 1 & 3 & 5 \\ 1/5 & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 3 & 1/3 & 1 & 3 \\ 1/7 & 1/7 & 1/6 & 1/5 & 1/2 & 1/5 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{式 5-5})$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 4 & 3 & 5 & 6 \\ 1/2 & 1 & 2 & 1/2 & 2 & 5 \\ 1/4 & 1/2 & 1 & 1/3 & 1/2 & 3 \\ 1/3 & 2 & 3 & 1 & 3 & 6 \\ 1/5 & 1/2 & 2 & 1/3 & 1 & 4 \\ 1/6 & 1/5 & 1/3 & 1/6 & 1/4 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{式 5-6})$$

$$R_3 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 3 & 2 & 3 & 1/5 & 1/4 \\ 1/3 & 1 & 1 & 1/3 & 2 & 1/7 & 1/6 \\ 1/3 & 1 & 1 & 1/3 & 2 & 1/7 & 1/6 \\ 1/2 & 3 & 3 & 1 & 2 & 1/8 & 1/7 \\ 1/3 & 1/2 & 2 & 1/2 & 1 & 1/8 & 1/5 \\ 5 & 7 & 7 & 8 & 8 & 1 & 2 \\ 4 & 6 & 6 & 7 & 5 & 1/2 & 1 \end{pmatrix} \quad (\text{式 5-7})$$

经过 Matlabe 计算矩阵，得到权和最大特征值，经过检验，第三层所有的 CI_k 都通过了一致性检验，如下表(表 5-1)：

| k | 1 | 2 | 3 |
|-------|---------|---------|---------|
| W_k | 0.25610 | | |
| | 0.25610 | | |
| | 0.18243 | 0.39107 | 0.12774 |
| | 0.07623 | 0.16195 | 0.07245 |
| | 0.03331 | 0.07872 | 0.11001 |

| | | | |
|-------------|-----------|------------|------------|
| | 0.12059 | 0.23047 | 0.10150 |
| | 0.05153 | 0.10208 | 0.06946 |
| | | | 0.32709 |
| | 0.02370 | 0.03571 | 0.19176 |
| λ_k | 0.0660714 | 0.05098 | 0.1096 |
| CI_k | 0.0468592 | 0.04046032 | 0.08179104 |
| CR | 0.0468592 | 0.04046032 | 0.08179104 |

所有的判断矩阵及指标层-目标层都通过了层次分析法一致性检验(如表 5-1), 说明所构造的判断矩阵客观而真实地反映了各指标之间的内在联系, 用这些指标的权重所评价的结果是可靠的。

3、经过计算, 得到层次总排序表如下:

表 5-2 方根法计算权重层次总排序表

| R I | O | | | I-O 权重 (W) | 排序 |
|--------|---------|---------|---------|---------------|----|
| | R1 | R2 | R3 | | |
| I | 0.23849 | 0.62501 | 0.13650 | | |
| I1 | 0.25643 | | | 0.0647 | 7 |
| I2 | 0.25577 | | | 0.0611 | 8 |
| I3 | 0.18243 | 0.39107 | 0.10525 | 0.3023 | 1 |
| I4 | 0.05153 | 0.10208 | 0.04377 | 0.0821 | 4 |
| I5 | 0.03331 | 0.07872 | 0.04464 | 0.0632 | 6 |
| I6 | 0.12059 | 0.23047 | 0.07492 | 0.1830 | 2 |
| I7 | 0.07623 | 0.16195 | 0.04464 | 0.1255 | 3 |
| I8 | | | 0.40132 | 0.0548 | 9 |
| I9 | 0.02370 | 0.03571 | 0.25846 | 0.0633 | 5 |

根据方根法计算出权重见(表 5-2), 从此表就可以看出, 地下水位埋深影响最为重要, 其次是包气带土壤含水量、第三是包气带土壤含盐量, 第四是地下水矿化度, 其它指标的影响相对较小。

通过层次分析我们可以看出生态环境主要取决于地下水埋深。当地下水埋深较高时, 植物的根可直接吸收、利用地下水。不同种属的植物对于地下水变化幅度的适应是不同的, 这是由不同植物的结构与生理功能决定的。浅根系植物只能吸收利用土壤剖面上部各层土壤中的水分, 深根系植物则可吸收利用较深层次土壤中的水分。地下水位埋深较浅时, 因毛管水顶面接近地表, 蒸发强烈, 剖面上部各层土壤盐分积累严重, 造成盐渍化。当土壤水中盐的浓度超过植物根细胞中细胞质盐浓度时, 植物则无法吸收水分, 形成所

谓的“生理干旱”。不同种属植物由于其结构与生理功能的差别，而具有不同的“生理干旱”的阈值^[31]。

同样不同年龄的植物其正常生长情况下对地下水水位埋深的要求不一样，植物幼苗的生长环境，地下水水位埋深一般要求比较浅，因新繁殖生长的幼苗个体矮小，根系还不够发达，耐干旱的能力弱，适宜的潜水埋深范围只占整个全生长期适宜网值范围的较浅的区间部分。各种植物都有其适宜生长的地下水埋深变动范围，在此范围内植物一般枝叶繁茂，个体众多，植株密集。我们把植物生长较好的地下水埋深变动范围作为植物生长的适宜范围^[28]。在适宜范围内，存在一个植物生长良好的范围，为最适范围。在植物生长最适范围内，水位的变化对于植物的生长状态影响不显著，但当水位变动超出最适区阈值附近时，每增减不大的数量都会对植物的生长状态产生显著影响。当水位降低(或升高)到接近适宜生长范围的最低点(或最高点)时，则植物生长因水分强烈不足(或过剩)的影响，而呈现出衰败状态。

通过隧道施工期对隧道沿线两侧 10km×10km 范围内植被观察发现，地下水埋深在一定的范围内变化，会对植被的生长状态产生显著的影响。根据调查：当地下水埋深在 1-2m 范围内变化时，草本植被、马尾松、杉木、山莓、映山红、芒萁等典型植被均能生长。当地下水埋深降低至 2-3m 时，草本植被芒萁的生长就会受到抑制，其它一些草甸植被如（雀稗、浆果苔、野青茅、秋分草等）开始出现死亡的现象；可以发现许多长势旺盛的灌木和乔木层植物。当地下水埋深降低至 3-4m 时，草本植物出现大面积死亡；灌木层植物的生长会受到抑制，钝叶枥、米饭花、金樱子、白栎、山胡椒、山茶这些植物开始出现枯萎的现象，只能发现一些耐旱能力较强的芒、狗脊；对于高大乔木层的马尾松、杉木基本不产生影响，但由于一些处于幼苗期的马尾松、杉木出现了枯萎的现象。当地下水埋深降低至 4-6m 时，草本植物大部分死亡；山莓、映山红、芒萁出现退化，出现大面积枯萎死亡；而乔木层的马尾松、杉木出现了生长不良的状况。当地下水埋深降低至 6m 以下时，马尾松、杉木就会开始出现死亡现象。

5.3.2 生态环境影响评价

为了更准确的获得由于歌乐山隧道涌水引起的周围生态环境质量变化的信息，进行多因素模糊综合评价。通过模糊综合评价对生态环境质量数据进

行分析：一是要看随着时间变化，同一实验点的变化趋势。二是要看到随着空间位置的变化(隧道轴线不同距离，选取距离轴线位置 1km、2km、3km、4km 作为观测对象)，岩溶隧道涌水引起的生态环境质量的变化。

歌乐山岩溶隧道涌水对生态影响模糊综合评价就是：根据地下水引起的生态效应评价指标，用隶属函数描述各评价参数的分类界限，并充分考虑界限的模糊性，建立生态环境质量参数的模糊集合；形成具体评价的模糊关系矩阵；最后根据各评价参数在总体评价中的作用，决定不同的权重，构筑权重矩阵；通过模糊矩阵合成运算，推求总体生态环境质量评价的隶属函数，以隶属度最大者为评价的“分类”标准。建立生态环境因素的模糊集合就是根据地下水引起的生态效应的指标标准推求它们的隶属函数，即确定各参数的隶属度。利用层次分析法计算出的权向量 W ，用半梯形法求出隶属度矩阵 R ，根据隶属度最大原则即可得出评价结果。以表 5-3(2003 年 1 月份取距离隧道轴线位置取样分析结果表)为例说明其评判过程。

表 5-3 隧道轴线位置处各项生态质量参数在隧道施工阶段的取样分析表

| 评价 指标 | | 评分 | 2002 年 1 月 | 2002 年 8 月 | 2003 年 4 月 | 2003 年 8 月 |
|----------|---------|----|------------|------------|------------|------------|
| | | | 月 | 月 | 月 | 月 |
| 地质 | 包气带岩性 | | 7.5 | 7.5 | 7.5 | 7.5 |
| 地貌 | 包气带结构 | | 8 | 8 | 8 | 8 |
| 因素 | 地下水埋深 | | 3 | 4 | 8.3 | 4 |
| 水文 | 地下水矿化度 | | 4.5 | 4.5 | 4.5 | 4.5 |
| 地质 | 地下水化学类型 | | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 因素 | 包气带含水量 | | 3 | 4 | 8.3 | 4.5 |
| | 包气带含盐量 | | 2 | 3 | 4.5 | 4 |
| 气象 | 降雨量 | | 2 | 4 | 2 | 2 |
| 水文 | 蒸发 | | 4 | 4.5 | 2 | 4 |
| 因素 | | | | | | |

(1) 建立因素集(以各因素的隶属度集表示)

$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8, u_9\}$ ，其中 u_1 : 包气带岩性； u_2 : 包气带结构； u_3 : 地下水埋深； u_4 : 地下水矿化度； u_5 : 地下水化学类型； u_6 : 包气带含水量； u_7 : 包气带含盐量； u_8 : 降雨量； u_9 : 蒸发

(2) 建立评判集

$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$ ，其中 v_1 : I 级； v_2 : II 级； v_3 : III 级； v_4 : IV 级； v_5 :

V 级。

参考地下水引起的生态效应评价指标评分标准表，利用升降半梯形法来定义各评价因子的各级生态环境质量的隶属函数(如下表 5-4)。

表 5-4 不同生态因子对各级生态环境质量隶属函数表

| 项目 分类 | 包气带岩性 | | 包气带结构 | | 地下水埋深 | |
|----------|---------------|------------------------|---------------|------------------------|---------------|------------------------|
| | 0 | $x \geq 2$ | 0 | $x \geq 2$ | 0 | $x \geq 0.5$ |
| I | $0.53(2-x)$ | $0.1 < x < 2$ | $0.53(2-x)$ | $0.1 < x < 2$ | $2(0.5-x)$ | $0.1 < x < 0.5$ |
| | 1 | $x \leq 0.1$ | 1 | $x \leq 0.1$ | 1 | $x \leq 0.1$ |
| | $0.53(x-0.1)$ | $0.1 < x < 2$ | $0.53(x-0.1)$ | $0.1 < x < 2$ | $2(x-0.1)$ | $0.1 < x < 0.5$ |
| II | $0.33(5-x)$ | $2 < x < 5$ | $0.25(6-x)$ | $2 < x < 6$ | $0.29(4-x)$ | $0.5 < x < 4$ |
| | 0 | $x \geq 5, x \leq 0.1$ | 0 | $x \geq 6, x \leq 0.1$ | 0 | $x \geq 4, x \leq 0.1$ |
| | $0.33(x-2)$ | $2 < x < 5$ | $0.25(x-2)$ | $2 < x < 6$ | $0.29(x-0.5)$ | $2 < x < 0.5$ |
| III | $0.33(8-x)$ | $5 < x < 8$ | $0.33(9-x)$ | $6 < x < 9$ | $0.33(7-x)$ | $0.5 < x < 7$ |
| | 0 | $x \geq 8, x \leq 2$ | 0 | $x \geq 9, x \leq 2$ | 0 | $x \geq 7, x \leq 0.5$ |
| | $0.33(x-5)$ | $5 < x < 8$ | $0.33(x-6)$ | $6 < x < 9$ | $0.33(x-4)$ | $4 < x < 7$ |
| IV | $0.33(10-x)$ | $8 < x < 10$ | $10-x$ | $9 < x < 10$ | $0.33(10-x)$ | $7 < x < 10$ |
| | 0 | $x \geq 10, x \leq 5$ | 0 | $x \geq 10, x \leq 6$ | 0 | $x \geq 10, x \leq 4$ |
| | 0 | $x \leq 8$ | 0 | $x \leq 9$ | 0 | $x \leq 7$ |
| V | $0.5(x-8)$ | $8 < x < 10$ | $x-9$ | $9 < x < 10$ | $0.33(x-7)$ | $7 < x < 10$ |
| | 1 | $x \geq 10$ | 1 | $x \geq 10$ | 1 | $x \geq 10$ |
| 续上表 | 地下水矿化度 | | 地下水化学类型 | | 包气带含水量 | |
| | 0 | $x \geq 1$ | 0 | $x \geq 1$ | 0 | $x \geq 0.5$ |
| I | $1.11(1-x)$ | $0.1 < x < 1$ | $1.11(1-x)$ | $0.1 < x < 1$ | $2(0.5-x)$ | $0.1 < x < 0.5$ |
| | 1 | $x \leq 0.1$ | 1 | $x \leq 0.1$ | 1 | $x \leq 0.1$ |
| | $1.11(x-0.1)$ | $0.1 < x < 1$ | $1.11(x-0.1)$ | $0.1 < x < 1$ | $2(x-0.1)$ | $0.1 < x < 0.5$ |
| II | $0.25(5-x)$ | $1 < x < 5$ | $0.25(5-x)$ | $1 < x < 5$ | $0.29(4-x)$ | $0.5 < x < 4$ |
| | 0 | $x \geq 5, x \leq 0.1$ | 0 | $x \geq 5, x \leq 0.1$ | 0 | $x \geq 4, x \leq 0.1$ |
| | $0.25(x-1)$ | $1 < x < 5$ | $0.25(x-1)$ | $1 < x < 5$ | $0.29(x-0.5)$ | $2 < x < 0.5$ |
| III | $0.4(7.5-x)$ | $5 < x < 7.5$ | $0.4(7.5-x)$ | $5 < x < 7.5$ | $0.33(7-x)$ | $0.5 < x < 7$ |
| | 0 | $x \geq 7.5, x \leq 2$ | 0 | $x \geq 7.5, x \leq 2$ | 0 | $x \geq 7, x \leq 0.5$ |
| | $0.4(x-5)$ | $5 < x < 7.5$ | $0.4(x-5)$ | $5 < x < 7.5$ | $0.33(x-4)$ | $4 < x < 7$ |
| IV | $0.4(10-x)$ | $7.5 < x < 10$ | $0.4(10-x)$ | $7.5 < x < 10$ | $0.33(10-x)$ | $7 < x < 10$ |
| | 0 | $x \geq 10, x \leq 5$ | 0 | $x \geq 10, x \leq 5$ | 0 | $x \geq 10, x \leq 4$ |
| | 0 | $x \leq 7.5$ | 0 | $x \leq 7.5$ | 0 | $x \leq 7$ |
| V | $0.4(x-7.5)$ | $7.5 < x < 10$ | $0.4(x-7.5)$ | $7.5 < x < 10$ | $0.33(x-7)$ | $7 < x < 10$ |
| | 1 | $x \geq 10$ | 1 | $x \geq 10$ | 1 | $x \geq 10$ |
| 续上表 | 包气带含盐量 | | 降雨量 | | 蒸发 | |
| | 0 | $x \geq 1$ | 0 | $x \geq 1.5$ | 0 | $x \geq 1.5$ |
| I | $1.11(1-x)$ | $0.1 < x < 1$ | $0.74(1.5-x)$ | $0.1 < x < 1.5$ | $0.74(1.5-x)$ | $0.1 < x < 1.5$ |
| | 1 | $x \leq 0.1$ | 1 | $x \leq 0.1$ | 1 | $x \leq 0.1$ |

| | | | | | | |
|-----|---------------|------------------------|---------------|------------------------|---------------|------------------------|
| | $1.11(x-0.1)$ | $0.1 < x < 1$ | $0.74(x-0.1)$ | $0.1 < x < 1.5$ | $0.74(x-0.1)$ | $0.1 < x < 1.5$ |
| II | $0.25(5-x)$ | $1 < x < 5$ | $0.29(5-x)$ | $1.5 < x < 5$ | $0.29(5-x)$ | $1.5 < x < 5$ |
| | 0 | $x \geq 5, x \leq 0.1$ | 0 | $x \geq 5, x \leq 0.1$ | 0 | $x \geq 5, x \leq 0.1$ |
| | $0.25(x-1)$ | $1 < x < 5$ | $0.29(x-1.5)$ | $1.5 < x < 5$ | $0.29(x-1.5)$ | $1.5 < x < 5$ |
| III | $0.4(7.5-x)$ | $5 < x < 7.5$ | $0.33(8-x)$ | $5 < x < 8$ | $0.33(8-x)$ | $5 < x < 8$ |
| | 0 | $x \geq 7.5, x \leq 2$ | 0 | $x \geq 8, x \leq 2$ | 0 | $x \geq 8, x \leq 2$ |
| | $0.4(x-5)$ | $5 < x < 7.5$ | $0.33(x-5)$ | $5 < x < 8$ | $0.33(x-5)$ | $5 < x < 8$ |
| IV | $0.4(10-x)$ | $7.5 < x < 10$ | $0.25(10-x)$ | $8 < x < 10$ | $0.25(10-x)$ | $8 < x < 10$ |
| | 0 | $x \geq 10, x \leq 5$ | 0 | $x \geq 10, x \leq 5$ | 0 | $x \geq 10, x \leq 5$ |
| | 0 | $x \leq 7.5$ | 0 | $x \leq 8$ | 0 | $x \leq 8$ |
| V | $0.4(x-7.5)$ | $7.5 < x < 10$ | $0.5(2-x)$ | $8 < x < 10$ | $0.5(2-x)$ | $8 < x < 10$ |
| | 1 | $x \geq 10$ | 1 | $x \geq 10$ | 1 | $x \geq 10$ |

根据各生态环境质量参数隶属于不同评价分类的隶属度，由此建立生态环境质量模糊关系得隶属度矩阵，也就是单因素评判矩阵，这里用表格表示，具体见表 5-5。

表 5-5 模糊评判隶属度表

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.165 & 0.83 & 0 \\ 0 & 0 & 0.33 & 0.66 & 0 \\ 0 & 0.29 & 0.725 & 0 & 0 \\ 0 & 0.125 & 0.875 & 0 & 0 \\ 0 & 0.75 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0.29 & 0.725 & 0 & 0 \\ 0 & 0.75 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0.87 & 0.145 & 0 & 0 \\ 0 & 0.29 & 0.725 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

(4) 模糊评判

① 权重的确定

利用层次分析法计算出的权重，由(表 4-9)可得

$$A = (0.0647, 0.0611, 0.3023, 0.1255, 0.0632, 0.1830, 0.0821, 0.0548, 0.0633)$$

② 综合评判

$$B = A \cdot R$$

用模型中 $M(\wedge, \vee)$, $M(\cdot, \vee)$, $M(\wedge, \oplus)$, $M(\cdot, \oplus)$ 的任一个计算，可求出 2003 年 1 月份取距离隧道轴线位置生态环境质量的评判为

$$B = (0, 0.29, 0.3023, 0.0647, 0) \quad (\text{式 5-8})$$

归一化得到 $B = (0, 0.441, 0.460, 0.098, 0)$

根据最大隶属度决定原则,划分等级,结果表明 2003 年 1 月份隧道轴线位置生态环境质量为Ⅲ级,生态环境质量好。同理,得出其它几次评价所得的环境质量等级,最终不同位置不同时期的生态环境质量评价结果见表 5-6。

表 5-6 隧道施工期间生态环境质量评价结果表

| 得分 | 位置 | 隧道中心位置 | 1km | 2km | 3km | 4km |
|------------|----|--------|-----|-----|-----|-----|
| 2002 年 1 月 | Ⅲ | Ⅲ | Ⅲ | Ⅲ | Ⅲ | Ⅲ |
| 2002 年 8 月 | Ⅲ | Ⅲ | Ⅲ | Ⅲ | Ⅲ | Ⅲ |
| 2003 年 2 月 | V | V | V | V | Ⅳ | Ⅲ |
| 2003 年 8 月 | Ⅲ | Ⅲ | Ⅲ | Ⅲ | Ⅲ | Ⅲ |

由表 5-6 可知,岩溶隧道区域地下水水位监测点的变化分三个阶段,第一阶段(2001.10-2002.3)水位先上升后逐步下降,第二阶段(2002.4-2002.9)水位逐步上升甚至超过第一阶段的最高值,第三阶段(2002.10-2003.5)水位逐渐下降趋于稳定甚至干枯,表明地下水动态受隧道涌水疏干排水的影响。第一二阶段,由于隧道处于刚刚开挖阶段,还未开始涌水或涌水量非常小,地下水水位受岩溶隧道涌水的影响较小,地下水水位变化不大,对生态环境的影响很小,总体来说整个区域的生态环境质量较好,随着隧道开挖的深入,涌水量变大,地下水水位也相应发生变化,引起了一系列的生态效应。以隧道中心位置为例,从评价结果来看,隧道施工阶段的生态环境质量发生了较大的变化,质量等级由原来的Ⅲ级转变为 V 级,生态环境质量变差,隧道堵水成功后,地下水水位逐渐上升,到 2003 年 8 月基本上恢复至开挖前状态,此时生态环境质量也得到了相应的恢复,由此说明岩溶隧道涌水对生态环境造成了很大的影响。数据结果表明地下水水位生态环境效应比较严重,这与歌乐山隧道实际情况是相符合的。

由表 5-6 还可以看出,距离隧道中心轴线不同位置生态环境的对岩溶隧道涌水响应是不同的,距离隧道中心位置生态环境质量变化明显,而距隧道轴线 4km 处的生态环境质量在隧道涌水期间基本上没产生变化,这说明岩溶隧道涌水形成的疏干降落漏斗是有一定的影响范围的,而且也随着离隧道轴线距离的增加,它的影响也越来越小。

为了充分利用综合评判带来的信息,使其结果更具有直观性,可以将上述评判结果所形成的向量看成一权重,将评判集用一分制数量化,则将评判结果进行加权平均,可得到最后评判的总分。根据上面的思路,我们将评判集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$, 数量化表示为 $V = (1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2)^T$

经计算 $C=0.668$

采用同样的评价方法, 得出距离隧道中心轴线不同位置 (距隧道中心轴线 1km、2km、3km、4km 处) 的评价得分。见表 5-7。

表 5-7 各测点生态环境影响评价得分

| 位置 得分 | 中心位置 | 1km | 2km | 3km | 4km |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2002 年 1 月 | 0.668 | 0.668 | 0.662 | 0.662 | 0.679 |
| 2002 年 8 月 | 0.659 | 0.659 | 0.655 | 0.655 | 0.668 |
| 2003 年 2 月 | 0.396 | 0.464 | 0.519 | 0.528 | 0.659 |
| 2003 年 8 月 | 0.661 | 0.658 | 0.657 | 0.661 | 0.671 |

对于同一测点, 着重考虑随时间变化的情况; 而对同一时期的不同测点, 则重点关注随空间地理位置变化的情况。上面评分结果并不能给我们一个定量的信息, 只能给出定性的评价, 主要的目的是找到生态环境质量变化的规律和趋势 (如图 5-3、5-4)。

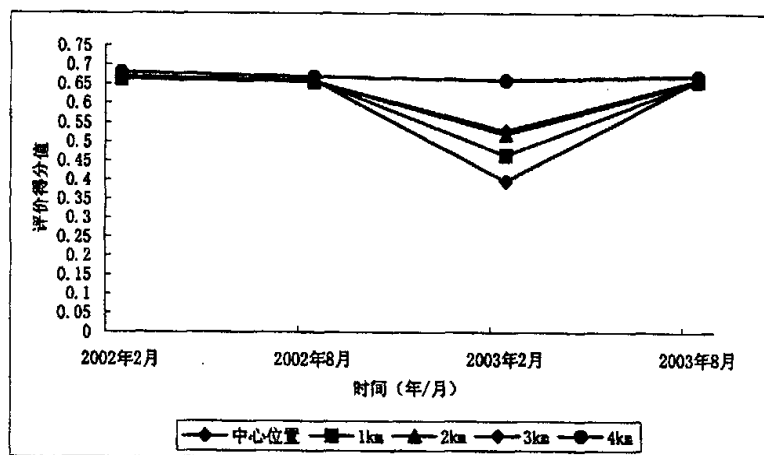


图 5-8 各测点生态环境质量随时间变化得分趋势图

由上面的曲线图, 可以看出, 总体上来说同一测点得分随着时间变化呈减小趋势, 只是各个点的增长趋势有快慢的不同, 这说明各测点生态环境质量逐渐降低。到隧道堵水成功后, 各点评价分值基本都接近背景值点的水平。以隧道中心位置处为例进行说明, 从位置上说, 该点处于隧道出口处紧邻洞口点, 所以评价结果随隧道内涌水变化最为直接, 反映在最后的评价得分上也最明显。其它各点的变化与之一致, 从原因上分析也相同, 不再重复说明。

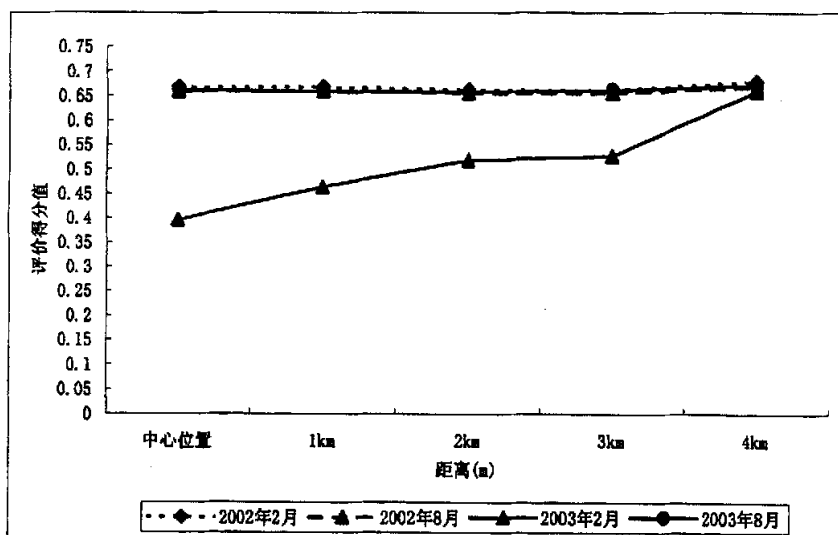


图 5-9 各测点生态环境质量随空间变化得分趋势图

从以上曲线图可以看出，从 2002 年 1 月到 2003 年 2 月各个图中，曲线均呈明显的上升趋势。分析原因是：在所测的范围内，由于岩溶隧道涌水形成的疏干降落漏斗是有一定的影响范围的，地下水位下降也随隧道的距离的变化程衰减的规律，因此对地表生态环境的影响程度也随距离的变化程衰减的趋势。因此，地表生态环境评价结果显示生态环境质量等级逐步提高。

以 2003 年 2 月为例进行说明，此阶段地下水动态受岩溶隧道涌水疏干的影响，水位逐渐下降趋于稳定甚至干枯，而岩溶隧道涌水形成的疏干降落漏斗是有一定的影响范围的，地下水位下降也随隧道的距离的变化程衰减的规律，因而对地表生态环境的影响也随距离的增加而衰弱。

通过两组曲线图的对比结果，可以得出这样的结论：岩溶隧道涌水对地表生态环境影响随着施工时间的延长和距离的推移而逐渐减弱。同一测点的生态环境质量随着时间的推移逐渐变差。到隧道堵水成功后，生态环境质量又基本上恢复正常水平。

结 论

一、结论

在对渝怀线歌乐山隧道现场调研的基础上,本文重点研究的是岩溶隧道涌水在各个阶段与生态环境的关系,综合评价指标及生态环境影响综合评价方法的确定,并以歌乐山隧道为例进行了生态环境影响综合评价。

主要得到以下研究主要成果:

1. 从岩溶隧道地下涌水与生态环境的关系,分析岩溶隧道地下涌水产生生态环境问题的原因及引起生态环境变化的影响因素,为对其进行生态环境影响综合评价提供了依据。为合理的控制岩溶隧道涌水和生态环境保护提供了科学依据,具有重要的理论和实际意义。

2. 建立了较全面合理的岩溶隧道涌水对生态环境影响综合评价的指标体系,评价指标的选取具有科学性和可行性。

3. 将层次分析法和模糊评判法相结合应用于岩溶隧道涌水对生态环境影响综合评价中。由于评价指标中既包含定量成分又包含定性成分,涉及的因素多且具有明显的层次性,适合进行定量因素正确的描述。而模糊评判法是用精确的数学语言描述定性或不确定因素的方法。事实证明了采用模糊层次分析法分析岩溶隧道涌水对生态环境影响综合评价是合理的。

4. 运用隶属函数对评价指标进行无量纲化处理,解决了由于评价指标之间不具备可比性而不能直接进行综合评价的问题。无量纲化所选用的转化公式遵循了科学、简易原则。

5. 通过歌乐山岩溶隧道涌水对生态环境影响评价,表明:岩溶隧道涌水对地表生态环境影响随着施工时间的延长和距离的推移而逐渐减弱。同一测点的生态环境质量随着时间的推移逐渐变差。到隧道堵水成功后,生态环境质量又基本上恢复正常水平。

对于岩溶隧道涌水与生态环境的关系的全面考察是一件难度较大而且复杂的工作。由于时间与作者的能力有限,本文仍有一些问题需要作进一步深入的研究和改进:

1. 岩溶隧道涌水对生态环境影响综合评价指标的选取是一个复杂的问题,需要更深入分析,选择更加全面、合理、统一的评价指标。

2. 评价指标的隶属函数和隶属阈的选取没有统一的标准,本文中的采用模糊分布的方法确定隶属函数,由于很多生态环境指标难以定量化,所以采

用分级评分标准来取得隶属阙，具有一定的失真性，因此，有必要制定完备、合理、统一的隶属函数和隶属阙。

3. 岩溶隧道涌水对生态环境影响评价指标复杂，手工计算量比较繁琐，需要作进一步研究，开发一种简洁清晰、界面友好的综合评价系统。该评价方法对生态环境影响只能暂时反映生态质量变化情况，对于岩溶隧道涌水引起的长期生态效应及植被产生的影响还有待进一步的研究。

二、建议

1. 在隧道工程建设之前及建设过程中，充分考虑工程建设可能带来的生态环境影响，充分进行可行性研究和方案比选，尽量避开环境敏感点及地质特殊的地带，避免施工上难度加大和对环境的不良扰动。实在不能避开，应充分进行地质钻孔、超前地质预报等工作，以便采取科学、合理的工程方案和技术措施、保证工程建设和生态环境保护的协调发展。

2. 随着隧道的施工，岩溶隧道涌水量的增加，使区域地下水水位下降，致使山区或盆地湿地萎缩或消失、地表植被破坏，导致生态环境退化。在分析岩溶隧道区域主要植物的适生地下水埋深的基础上，合理控制岩溶隧道的涌水，为岩溶区的生态环境保护和建设、岩溶区走向生态效益、经济效益和社会效益良性循环的轨道有着重要的意义。

3. 为了防止因隧道施工过程中由于涌水而破坏地表生态环境，因此在隧道开挖过程中必须采取一定的措施来控制岩溶涌水。针对歌乐山隧道的特点，通过系列科技攻关，采取“堵水防漏，保护环境”和“先探水、预注浆、后开挖、补注浆、再衬砌”的设计、施工理念，达到堵水防漏的目的。

致 谢

光阴荏苒，很快研究生阶段的学习即将结束，每每回忆起课题研究过程中的各种酸甜苦辣，尤在心头。在本文初步告成之时，诚挚地感谢在课题研究过各中给予我莫大帮助的老师、同学以及亲人。

首先，我要衷心地感谢我的导师牟瑞芳教授；在我的整个研究生生活中，牟老师在学习上，给了我悉心的指导；在生活上，给了我无微不至的关怀；牟老师他以渊博的学识、严谨的治学态度和良好的师德给我们树立了榜样，使我们终生受益。特别是在做论文期间，从论文的选题开始，直到论文定稿，牟老师为我付出了许多心血。

其次，铁二院环工处曾所长、董工、吴工、代工为我的硕士论文工作提供了第一手资料和数据；

衷心感谢许顺国硕士、张文晰硕士、孟庆波硕士、周艳硕士等在论文撰写中给予的帮助。

并对我的家人和朋友的支持与鼓励表示衷心的感谢！对所有提供过帮助的亲人、朋友和同学表示感谢！

最后，对评阅本文的专家、教授及老师表示感谢！

参 考 文 献

- [1]程国栋, 仵彦卿. 黑河流域生态环境问题及其对策研究, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2002。
- [2]孙艳丽, 况明生, 张远瞩等. 中国南方岩溶地区脆弱的生态环境及石漠化过程[J], 贵州师范大学学报 2003, 21 (2):80-83。
- [3]韩传峰, 吴进林. 大型基础设施项目生态环境影响评价[J], 资源调查与环境, 2004, 25(1):8-12。
- [4]赵勇, 孙中党, 吴明作等. 高速公路建设项目对生态环境影响综合评价研究, 安全与环境工程, 2003, Vol. 10 No. 3。
- [5]陈利顶, 李俊然, 傅伯杰等. 三峡库区生态环境综合评价与聚类分析, 农村生态环境, 2001, 17(3):35-38。
- [6]高平利, 赖文宏, 赵学静等. 西北铁路建设项目对生态环境影响的预测及评价方法探讨, 环境科学, 1998(8)。
- [7]毕晓丽, 洪伟等. 生态环境综合评价方法的研究进展[J], 农业系统科学与综合研究, 2001, 17(2):123-126。
- [8]王根绪、程国栋等. 中国西北干旱区水资源利用及其生态环境问题, 自然资源学报, 1999, 14(2):109-116。
- [9]张长春, 邵景力等. 地下水位生态环境效应及生态环境指标, 水文地质工程地质, 2003, 13(3): 6-10。
- [10]秦仁昌. 关于胡杨林与灰杨林的一些问题, 新疆维吾尔自治区自然条件, 科学出版社, 1959。
- [11]罗江呼. 额尔齐斯河流域开发对河谷生态的影响及保护, 新疆环境保护, 1992, 14(2):1-7。
- [12]范锡朋. 西北内陆水资源开发引起的区域水文效应及其对环境的影响, 地理学报, 1991, 46(4):415-426。
- [13]汤梦玲、徐恒力等. 西北地区地下水对植被生存演替的作用, 地质科技情报, 2001. 20(2):79-82。
- [14]徐恒力、周爱国等. 西北地区干旱化趋势及水盐失衡的生态环境效应, 地球科学-中国地质大学学报, 2000, 25(5):499-504。
- [15]Sandra J. Zencich, Ray H. Froend etl. (2002), Influence of ground-water depth on the seasonal sources of water accessed by Banksia tree

- species on a shallow, sandy coastal aquifer, *Oecologia*, (131):8-19.
- [16]张远明、陈亚宁等.塔里木河中游植物群落与环境因子的关系,地理学报, 2003, 58(1):109-118.
- [17]徐海量、陈亚宁等.塔里木河下游环境因子与沙漠化关系多元回归分析,干旱区研究, 2003, 20(1):39-43.
- [18]Stromberg J.C., Wilkins S.D., Tress J.A., Vegetation-hydrology models:Implications for management of *Prosopis velutina*(velvet mesquite) riparian ecosystems, *Ecological Applications*, 1993, 3(2): 307-314.
- [19]乔晓英,王文科等.基于 GIS 的冯家山灌区地质环境评价研究,西安工程学院学报, 2002, 24(1):39-42.
- [20]杨晓婷.关中盆地地下水脆弱性评价[J],水文地质工程地质, 2002, 10(3): 9-12.
- [21]任理,李保国.稳定流场中饱和均质土壤盐分迁移的传递函数解[J],水科学进展, 1999, 10(2):108-112.
- [22]姚德良、李新等.干旱区绿洲棉田土壤水盐运动数值模拟,干旱区地理, 1999 22(2):26-34.
- [23]王亚东,胡毓骥等.裸地蒸发过程土壤盐分运移的实验及数值模拟研究,灌溉排水, 1992, 11(1):1-5.
- [24]杨泽元.地下水引起的表生生态效应及其评价研究, 2004.
- [25]陈英旭.环境学,中国环境科学出版社, 2001: 45-46.
- [26]曾晓燕,牟瑞芳,许顺国.岩溶生态脆弱性研究[J],环境科学与管理, 2006, 31(1): 86-88.
- [27] Hudson, J. A., *Rock Engineering Principles, Tunnels&Tunnelling International*, October 1998.
- [28]李云玲.基于水资源合理配置的黑河下游生态恢复研究, 2005.
- [29]Wang G., Qian J., Cheng G. and Lai Y. (2001), Eco-environmental degradation and causal analysis in the source region of the Yellow River, *Environmental Geology*, (40):884-890.
- [30]Boutaleb S, Bouchaou L, and Mudry J. etc. (2000), Hydrogeologic effects on the quality of water in the Oued Issen watershed, western Upper Atlas Mountains, Morocco, *Hydrogeology and Environmental Geology* (8): 230-239.
- [31]胡安焱.干旱地区内陆河的水文生态特征及其水资源的合理开发利用研

究, 2003。

[32]张长春, 邵景力, 李慈君等. 地下水位生态环境效应及生态环境指标(J), 水文地质工程地质, 2003. 3: 6-10。

[33]徐海量. 流域水文过程与生态环境演变的耦合关系, 2005。

[34]毛文永等. 《中国可持续发展战略》北京:中国科学技术出版社, 1994。

[35]<http://www.eedu.org.cn/Article/es/envir/ei/200501/3718.html>

[36]毛文永. 开发建设项目生态环境影响评价原则-生态环境功能保护论, 环境科学, 1996, 17(2):78-81。

[37](美)EUGEN P. ODUM 著, 孙儒泳等译, 生态学基础, 北京:人民教育出版社, 1981。

[38]毛文永. 生态环境影响评价概论, 中国环境科学出版社, 2003:49-58。

[39]Li Chunyang, Jarkko Koskela, Olavi Luukkanen. Protect iveforest systems in Xhina:xurrent status, problems and perspectives. AMBIO, 1999, 28(4):341-345。

[40]Yasemin EK Biro. Valuation of the environmental impacts of the Kayraklepe dam/hydroelectric project, Turkey:an exercise inconting -ent valuation. AMBIO, 1998, 27(3):223-228。

[41]Babu Rao P., Subrahmanyam K. and Dhar R. L. (2001), Geoenvironmental effects of groundwater regime in Andhra PradeSh, India, Environmental Geology, 40(4-5):632-642。

[42]史宝忠. 建设项目环境影响评价, 中国环境科学出版社, 1993。

[43]中国科学院三峡工程生态与环境科研项目领导小组, 三峡工程对生态与环境的影响及对策研究, 科学出版社, 1988。

[44]Wang G. and Cheng G. (2000), The characteristics of water resources and the changes of the hydrological process and environment in the arid zone of northwest China, Environmental Geology, 39(7):783-790。

[45]张丽, 董增川等. 干旱区典型植物生长与地下水位关系的模型研究(J), 中国沙漠, 2004, 24(1): 110-113。

[46]樊自立, 马英杰等. 塔里木河流域生态地下水位及其合理深度确定(J). 干旱区地理. 2004. 27(1): 8-13。

[47]Maria Vicenta Esteller and Carlos Diaz-Delgado(2002), Environmen -tal effects of aquifer overexploitation: a case study in the Highlands of Mexico, Environmental Management, 29(2):266-278。

-
- [48]Aller L, Bennet T, Lehr JH et al. DRASTIG A standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. USEPA Report, 1987.
- [49]高荣松. 环境影响评价原理和方法, 四川科学技术出版社。
- [50]刘年丰, 罗巍等. 生态环境质量综合评价多级灰关联识别模型应用研究, 环境科学与技术, 1999, 18(3):24-27。
- [51]陈雍森. 环境评价(第二版), 上海:同济大学出版社。
- [52]Yao Tao, Yang Xinmiao, Fuzzy Comprehensive Assessment, Fuzzy Clustering Analysis and its Application for Urban Traffic Environment Quality Evaluation. Transportation Research. 1998, 3(1):51-57.
- [53]汤丽妮, 张礼清等. 人工神经网络在生态环境质量评价中的应用, 四川环境, 2003, 22(3): 69-72。
- [54]Belousova A.P. (2000), A concept of forming a structure of ecological indicators and indexes for regional sustainable development, Environmental geology, 39(11):1227-1236.
- [55]Villarroya F., Aldwell C.R. (1998), Sustainable development and groundwater resources exploitation, Environmental Geology. 34(2/3): 111-115.
- [56]陈荷生, 西北干旱地区水资源系统开发对植被的影响, 干旱区资源与环境, 1991, 5(1):57-65。
- [57]Maria Vicenta Esteller and Carlos Diaz-Delgado, Environmental effects of aquifer overexploitation: a case study in the Highlands of Mexico, Environmental Management, 2002, 29(2):266-278.
-

攻读硕士学位期间发表的论文

- 1、曾晓燕,牟瑞芳,许顺国.岩溶生态脆弱性研究[J],环境科学与管理,2006,31(1):86-88。
 - 2、曾晓燕,牟瑞芳,许顺国.城市化对水资源的影响[J],资源环境与工程,2006,4(19):318-322。
-

作者: [曾晓燕](#)
学位授予单位: [西南交通大学](#)

参考文献(58条)

1. [参考文献](#)

- 程国栋, 仵彦卿. [黑河流域生态环境问题及其对策研究](#) 2002
- 孙艳丽, 况明生, 张远喙, 吴威, 魏秉铎. [中国南方岩溶地区脆弱的生态环境及石漠化过程](#)[期刊论文]-[贵州师范大学学报\(自然科学版\)](#) 2003(2)
- 韩传峰, 吴进林. [大型基础设施项目生态环境影响评价](#)[期刊论文]-[资源调查与环境](#) 2004(1)
- 赵勇, 孙中党, 吴明作. [高速公路建设项目对生态环境影响综合评价研究](#)[期刊论文]-[安全与环境工程](#) 2003(3)
- 陈利顶, 李俊然, 傅伯杰. [三峡库区生态环境综合评价与聚类分析](#)[期刊论文]-[农村生态环境](#) 2001(3)
- 高平利, 赖文宏, 赵学静. [西北铁路建设项目对生态环境影响的预测及评价方法探讨](#) 1998(08)
- 毕晓丽, 洪伟. [生态环境综合评价方法的研究进展](#)[期刊论文]-[农业系统科学与综合研究](#) 2001(2)
- 王根绪, 程国栋, 徐中民. [中国西北干旱区水资源利用及其生态环境问题](#)[期刊论文]-[自然资源学报](#) 1999(2)
- 张长春, 邵景力, 李慈君, 崔亚莉. [地下水位生态环境效应及生态环境指标](#)[期刊论文]-[水文地质工程地质](#) 2003(3)
- 秦仁昌. [关于胡杨林与灰杨林的一些问题](#) 1959
- 罗江呼. [额尔齐斯河流域开发对河谷生态的影响及保护](#) 1992(02)
- 范锡朋. [西北内陆平原水资源开发引起的区域水文效应及其对环境的影响](#)[期刊论文]-[地理学报](#) 1991(4)
- 汤梦玲, 徐恒力, 曹李靖. [西北地区地下水对植被生存演替的作用](#)[期刊论文]-[地质科技情报](#) 2001(2)
- 徐恒力, 周爱国, 肖国强, 支兵发, 叶含春. [西北地区干旱化趋势及水盐失衡的生态环境效应](#)[期刊论文]-[地球科学-中国地质大学学报](#) 2000(5)
- Sandra J Zencich, Ray H Froend. [Influence of ground-water depth on the seasonal sources of water accessed by Banksia tree species on a shallow, sandy coastal aquifer](#) 2002(131)
- 张元明, 陈亚宁, 张道远. [塔里木河中游植物群落与环境因子的关系](#)[期刊论文]-[地理学报](#) 2003(1)
- 徐海量, 陈亚宁, 李卫红. [塔里木河下游环境因子与沙漠化关系多元回归分析](#)[期刊论文]-[干旱区研究](#) 2003(1)
- Stromberg J C, Wilkins S D, Tress J A. [Vegetation-hydrology models: Implications for management of Prosopis velutina \(velvet mesquite\) riparian ecosystems](#) 1993(02)
- 乔晓英, 王文科. [基于GIS的冯家山灌区地质环境评价研究](#)[期刊论文]-[西安工程学院学报](#) 2002(1)
- 杨晓婷. [关中盆地地下水脆弱性评价](#) 2002(03)
- 任理. [稳定流场中饱和均质土壤盐分迁移的传递函数解](#)[期刊论文]-[水科学进展](#) 1999(2)
- 姚德良, 李新. [干旱区绿洲棉田土壤水盐运动数值模拟](#)[期刊论文]-[干旱区地理](#) 1999(2)
- 王亚东, 胡毓琪. [裸地蒸发过程土壤盐分运移的实验及数值模拟研究](#)[期刊论文]-[灌溉排水](#) 1992(1)
- 杨泽元. [地下水引起的表生生态效应及其评价研究](#) 2004
- 陈英旭. [环境学](#) 2001
- 曾晓燕, 牟瑞芳, 许顺国. [岩溶生态脆弱性研究](#)[期刊论文]-[环境科学与管理](#) 2006(1)
- Hudson J A. [Rock Engineering Principles](#) 1998
- 李云玲. [基于水资源合理配置的黑河下游生态恢复研究](#) 2005
- Wang G, Qian J, Cheng G, Lai Y. [Eco-environmental degradation and causal analysis in the source](#)

[region of the Yellow River](#) 2001(40)

31. [Boutaleb S. Bouchaou L. Mudry J Hydrogeologic effects on the quality of water in the Oued Issen watershed, western Upper Atlas Mountains](#) 2000(08)
32. [胡安焱 干旱地区内陆河的水文生态特征及其水资源的合理开发利用研究](#) 2003
33. [张长春. 邵景力. 李慈君. 崔亚莉 地下水位生态环境效应及生态环境指标](#)[期刊论文]-[水文地质工程地质](#) 2003(3)
34. [徐海量 流域水文过程与生态环境演变的耦合关系](#) 2005
35. [毛文永 中国可持续发展战略](#) 1994
36. [查看详情](#)
37. [毛文永 开发建设项目生态环境影响评价原则—生态环境功能保护论](#)[期刊论文]-[环境科学](#) 1996(2)
38. [EUGEN P ODUM. 孙儒泳 生态学基础](#) 1981
39. [毛文永 生态环境影响评价概论](#) 2003
40. [Li Chunyang, Jarkko Koskela, Olavi Luukkanen Protect iveforest systems in Xhina:xurrent status, problems and perspectives](#) 1999(04)
41. [Yasemin EK Biro Valuation of the environmental impacts of the Kayraklepe dam/hydroelectric project, Turkey:an exercise inconting -ent valuation](#) 1998(03)
42. [Babu Rao P. Subrahmanyam K. Dhar R L Geoenvironmental effects of groundwater regime in Andhra PradeSh](#) 2001(4-5)
43. [史宝忠 建设项目环境影响评价](#) 1993
44. [中国科学院三峡工程生态与环境科研项目领导小组 三峡工程对生态与环境影响及对策研究](#) 1988
45. [Wang G. Cheng G The characteristics of water resources and the changes of the hydrological process and environment in the arid zone of northwest China](#) 2000(07)
46. [张丽. 董增川. 黄晓玲 干旱区典型植物生长与地下水位关系的模型研究](#)[期刊论文]-[中国沙漠](#) 2004(1)
47. [樊自立. 马英杰. 张宏. 王让会. 赵元杰. 周宏飞 塔里木河流域生态地下水位及其合理深度确定](#)[期刊论文]-[干旱区地理](#) 2004(1)
48. [Maria Vicenta Esteller. Carlos Diaz-Delgado Environmen-tal effects of aquifer overexploitation:a case study in the Highlands of Mexico](#) 2002(02)
49. [Aller L. Bennet T. Lehr JH DRASTIG A standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings](#) 1987
50. [高荣松 环境影响评价原理和方法](#)
51. [刘年丰. 罗巍. 郭继孝. 刘宝珠. 雷鸣 生态环境质量综合评价多级灰关联识别模型应用研究](#)[期刊论文]-[环境科学与技术](#) 1999(3)
52. [陈雍森 环境评价](#)
53. [Yao Tao. Yang Xinmiao Fuzzy Comprehensive Assessment, Fuzzy Clustering Analysis and its Application for Urban Traffic Envirnement Quality Evaluation](#) 1998(01)
54. [汤丽妮. 张礼清. 王卓 神经网络在生态环境质量评价中的应用](#)[期刊论文]-[四川环境](#) 2003(3)
55. [Belousova A P A concept of forming a structure of ecological indicators and indexes for regional sustainable develop -ment](#) 2000(11)
56. [Villarroya F. Aldwell C R Sustainable development and groundwater resourcesexploitation](#) 1998(2-3)

57. 陈荷生 [西北干旱地区水资源系统开发对植被的影响](#) [期刊论文] - [干旱区资源与环境](#) 1991 (1)

58. [Maria Vicenta Esteller, Carlos Diaz-Delgado](#) [Environmental effects of aquifer overexploitation: a case study in the Highlands of Mexico](#) 2002 (02)

相似文献(10条)

1. 期刊论文 [杨平, 邓戎](#) [歌乐山绿色屏障工程建设重要意义的分析与评价](#) - [林业建设](#) 2004, "" (2)

“重庆市歌乐山绿色屏障工程”是重庆市“十五”重点生态环境建设项目。近年来,由于森林植被覆盖率低、树种单一、森林生态系统稳定性差等原因,已导致项目区水土流失现象加剧,环境质量下降,对重庆市中心城区及沙坪坝区生态环境改善和生态安全构成较大威胁。实施本工程将充分发挥重庆市西部歌乐山绿色屏障的重要防护功能,维护重庆市中心城区及三峡库区生态环境的安全与稳定。

2. 期刊论文 [邹振华](#) [全断面帷幕注浆堵水在歌乐山隧道施工中的应用](#) - [现代隧道技术](#) 2003, 40 (1)

渝怀线歌乐山隧道是全线十一大控制工程之一,水文地质条件复杂,地处于重庆市郊,周围水资源环境要求高。通过采用有利于保护洞顶生态环境、减少后患的帷幕注浆堵水技术,成功地解决了高压涌水、涌泥等施工难题。

3. 学位论文 [赵健](#) [歌乐山隧道岩溶富水区帷幕注浆堵水技术的研究](#) 2004

本文在总结国内外隧道对岩溶水防治经验的基础上,结合歌乐山长隧道的具体情况,对其岩溶涌水采取了合理的防治方案及岩溶处理中对区域环境的影响进行了研究。本文所做的主要工作如下:1、结合本工程地质条件复杂,岩溶发育,环境保护要求严格特点,采用隧道洞体不良地质的宏观预报、隧道洞体不良地质超前预报(即狭义隧道超前地质预报)、超前钻探和隧道洞体施工地质灾害预警等综合超前地质预报技术进行隧道地质预报。2、进行了全断面帷幕注浆技术研究。根据综合超前地质预报结果确定的岩溶水位置、赋存形式、水量和水压等初始条件,提出初步的帷幕注浆施工方案和相应的作业参数和工艺,并在实践中不断修正、优化。3、研制了帷幕注浆设备配套。针对歌乐山隧道注浆规模大,注浆压力高,施工工期紧,设备要求高,而且目前国内尚无现成的适合于歌乐山隧道所需的高效注浆成套设备的状况,施工中自主开发研制了一些设备和配套的小型机具,组成机动灵活的轨行式钻孔注浆列车,使钻孔、注浆融为一体,提高了工效。全断面深孔帷幕注浆月平均达到60隧道延米。并介绍了钻孔突发涌水施工治理技术。4、隧道岩溶富水区帷幕注浆堵水技术效果评价,即对隧道区域生态环境的影响研究。采用大范围多测点的网络进行系统的环保监测与评价。在隧道穿越区域地表 34.75km^2 范围内建立总数达40处的环境监测点,形成环境监控网络,施工前期开展了岩溶水文地质调查,确定了地表水文初始状态,施工期每日进行跟踪观测,建立长期观测档案,并根据监测数据,评价隧道施工对地下水资源、生态环境影响程度。歌乐山隧道施工中通过运用先进的注浆技术,成功地封堵了最大涌水量达 $14000\text{m}^3/\text{d}$ 、压力高达2.2MPa的岩溶涌水,说明在岩溶富水区地段采用全断面深孔帷幕注浆堵水是卓有成效的,能有效地防止地表水和地下水的流失,保护隧道区域的自然生态环境。

4. 期刊论文 [蔡金火](#) [歌乐山隧道的施工技术创新](#) - [铁道知识](#) 2004, "" (3)

渝怀铁路歌乐山隧道,全长4050米,是全线的控制工程之一,由中铁十一局集团公司承建。该隧道工程水文地质异常复杂,集滑坡、岩溶、煤层、瓦斯、采空区、涌水等于一体,尤其是富水地段,岩溶十分发育,裂隙通透性好,地下水位高,水量大,最大涌水量达53000立方米/日,最高压力2.2兆帕。该隧道位于重庆近郊,隧道通过地区山上居住有6万余居民,200多家企事业单位,是重庆市长期以来严重缺水地区。为此,也被列为重庆市的重要生态环境保护区。

5. 学位论文 [李耐霞](#) [歌乐山隧道施工过程对水环境影响研究](#) 2004

水环境影响研究是从预防性环境保护的目标出发,采用适当的评价方法和研究手段,确定建设项目排放的主要污染物对环境可能带来的影响范围和程度,提出环境保护的对策和措施,从保护环境的角度为建设项目方案的优化提供依据。在隧道施工过程中,由于工程作业,使得地下水流失过程中往往携带大量施工废水,进入地表水体。此外,由于工程扰动,引起地质环境中地下水发生变化,并且通常引起地表水体与地下水系发生水力联系。分析和评价铁路隧道对水环境的影响,从而从水环境质量变化角度提出工程控制措施,对实际工程具有一定的指导意义。该文以渝怀铁路歌乐山隧道为例,分析工程施工对水环境的影响问题。歌乐山隧道施工水环境问题主要包括地表水环境和地下水环境两个方面。针对歌乐山隧道施工特点,通过现场调查和污染源分析,确定环境监测和评价因子,并采取收集资料、野外踏勘、现场监测、室内实验、数据分析相结合的技术路线进行施工过程水环境影响研究。论文以隧道排出的地表受纳水体为研究重点,运用综合指数法和模糊综合评价法进行水环境质量分析,同时,监测隧道施工对地下水文和水质的影响。结果表明,隧道施工过程在短期内对地表受纳水体的水质有一定影响,但随着施工方法的改进,水质逐步恢复至正常水平;隧道施工没有使地下水水位发生下降,水质没有恶化趋势。研究结果对工程施工提出了积极的动态设计和施工建议,有效的减少了地下水的流失和地表水的污染,达到保护生态环境和水质安全的目的。

6. 期刊论文 [袁勇](#) [歌乐山隧道施工与环境保护](#) - [现代隧道技术](#) 2004, 41 (1)

文章根据歌乐山隧道特殊地理位置条件下的环保要求,介绍了施工中在爆破降噪、施工通风、粉尘控制、污水净化方面采取的环境保护措施,研究了隧道超前地质预报和环保注浆堵水技术的成功运用对保护隧道施工区域的生态环境所做出的贡献。

7. 学位论文 [李小红](#) [渝怀铁路歌乐山隧道岩溶富水区施工技术研究](#) 2003

渝怀铁路歌乐山隧道全长4050m,是全线的控制工程之一,该隧道水文地质异常复杂,集滑坡、岩溶、煤层、瓦斯、采空区、涌水等于一体,尤其是富水地段,岩溶十分发育,裂隙通透性好,地下水位高、水量大、最大涌水量达 $53000\text{m}^3/\text{d}$,最高水压2.2Mpa。该隧道位于重庆市近郊,地表植被丰富,是重庆市著名的避暑游览胜地和革命传统教育基地,隧道地表住有6万余居民,企事业单位200多家,歌乐山地区是重庆市水资源最缺乏的地区之一,水资源的保护是隧道施工的重中之重。该项技术研究成果,不仅有效地保护了地表的生态环境,保证了渝怀铁路这个国家重点项目建设中的关键工程—歌乐山隧道得以优质、如期建成,也对中国隧道工程技术进步作出了贡献,特别是在隧道施工中生态条件和地下水资源的保护方面所取得的经验、成果,体现了隧道工程和环境保护的新理念,对可持续发展战略在中国隧道工程施工中的实施具有重要意义。使中国在对隧道地下水实施封堵方面的设计和施工技术迈上了一个新台阶,达到国际先进水平。基于环境保护的要求,着重介绍了岩溶富水地段综合超前地质预报方法,全断面帷幕注浆技术及其设备配套技术等,施工期地下水、地表水监测过程和方法,并通过对监测结果的分析,论证隧道开挖过程中可能出现的水文地质问题,及对隧道生态区造成的影响和涉及的范围及危害程度作出客观评价,为施工提供科学依据。

8. 期刊论文 [江陵, 徐刚, JIANG Ling, XU Gang](#) [重庆歌乐山烈士陵园“7.17”山洪泥石流灾害分析](#) - [四川地质学报](#) 2008, 28 (4)

2007年7月17日10时,重庆突降特大暴雨,山洪和泥石流袭击了歌乐山烈士陵园,使该陵园遭受重大损失。本文分析了该次山洪、泥石流灾害的灾情和成因,提出了烈士陵园灾害防治对策。

9. 学位论文 [刘小云](#) [重庆市水环境中抗生素污染与微生物抗生素耐药性研究](#) 2005

随着人畜药物使用量的剧增和环境分析测试技术的快速发展,水环境中药物污染研究近年在德国、丹麦、瑞士和美国等发达国家受到了前所未有的关注。现有研究表明:多数药物在人和动物体内都不能够被完全代谢,多以原形和活性代谢产物的形式通过粪便排出体外。这些物质最终会通过医院污水、城市生活污水、牲畜粪便及医药工业废水等多种途径进入水环境造成污染。在水环境的药物污染中,抗生素污染是显得特别重要的一类。医药行业为牟取暴利而不合理使用抗生素、畜牧水产养殖业为增产而大量使用抗生素的现象使得抗生素对生态环境的负面作用正逐渐显现。德国、瑞士、丹麦和美国等国先后有人报道在医院污水、污水处理厂污水和活性污泥、水产养殖水体和底泥、地表水和地下水等水体中检出多类不同浓度的抗生素。水环境抗生素污染最有可能产生的效应是其持续低水平的暴露对水生生物的远期毒性作用和对微生物群落产生的抗生素耐药性选择压力,后者与人类健康的关系更为密切。水环境微生物耐药性卫生学意义重大:耐药微生物和耐药因子可经多种途径侵入人体,将耐药性传递给体内致病菌,加大感染性疾病病

的治疗难度；抗生素耐药谱分析(antibioticresistantanalysis, ARA)是近年发展并得到应用的水污染的微生物源追踪(microbialsource tracking, MST)技术的主要研究方法之一。

本课题第一部分以地处三峡库区的重庆市水环境为研究对象,对水环境中的抗生素污染进行初步探索,为今后的深入研究和动态监测提供基础。第二部分以耐热性大肠菌群(亦称为粪大肠菌群)为指示菌,对重庆市多种水体中微生物对十种常用抗生素的耐药性进行了初步调查研究,并在重庆市以ARA为手段进行MST研究提供了线索。第三部分对所有分离的耐热性大肠菌群的质粒谱进行分析,对菌株的多重耐药性决定因子进行初步定位。

实验方法:采集水样:采集唐家桥污水处理厂进水、一级处理污水和二级处理污水,西南医院、324医院、肿瘤医院和新桥医院污水处理站出水,沙坪坝水厂、渝中区水厂、江南水厂、和尚山水厂和西南制药厂水厂水源水,屠宰场下游地表水和畜禽养殖场下游地表水水样。确定受试抗生素为:氧四环素(Oxytetracycline)、四环素(Tetracycline)和氯四环素(Chlortetracycline)。固相萃取(SPE, solidphaseextraction):经预处理的SAX(500mg/6ml)和HLB(500mg/6ml)固相萃取小柱串联过水样,后者用柠檬酸缓冲液和冲洗后在氮气流下吹干,甲醇洗脱。洗脱液经氮气吹干后用100 μ l流动相A定容,-20 $^{\circ}$ C储存备用。用HPLC/MS对各水样中经SPE所得富集产物中的四环素进行分析测试。色谱柱为PhenomenexLunaC18(150 \times 3.0mm,3 μ m)。以流动相A(含10mM甲酸铵、0.3%甲酸和10%甲醇的水溶液)和流动相B(含10mM甲酸铵、1.0%甲酸的甲醇溶液)进行梯度洗脱,分离受试化合物。离子化采用电喷雾阳离子模式(ESI(+)),监测方法为选择性离子监测(SIM)。四环素的鉴定以保留时间、定量离子与确认离子(1或2种)的比值为依据,其定量通过分析物与内标物(Simatone)的基峰离子面积比值来计算。

以耐热性大肠菌群作为指示菌分析重庆市水环境中微生物对人畜常用十种抗生素的耐药性并小量制备质粒DNA进行质粒谱分析。采集的水样有:受医院污水污染地表水样,屠宰场下游与畜禽养殖场下游地表水样,污水处理厂进水与出水、嘉陵江地表水,歌乐山山顶泉水。富集分离并鉴定菌株:用经美国国家环保局认证的滤膜法对各水样中耐热性大肠菌群进行富集分离,并用APILabPlus微生物分析系统进行菌种鉴定。抗生素敏感性试验:采用美国临床实验室标准委员会(NCCLS1997版)推荐的Kirby-Bauer琼脂扩散法,选择人畜最常用的青霉素、氨苄青霉素、头孢他啶、庆大霉素、丁胺卡那霉素、红霉素、链霉素、环丙沙星、氧氟沙星和诺氟沙星等10种抗生素进行药物敏感性试验。分析菌株质粒谱:用碱裂解法小量制备各分离菌株的质粒DNA,经0.7%琼脂糖凝胶电泳后用Quantityone系统估算其大小,分析菌株质粒谱。

实验结果:1.从重庆市5种水体的14个水样中检出浓度为0.015~0.214 μ g/L的氯四环素、氧四环素和四环素。其中有8个水样至少检测到1种四环素,检出最多的是测到3种四环素的污水处理厂进水。

2.从7种不同水体分离得到的162株耐热大肠杆菌中156株(96.3%)为埃希氏大肠杆菌,5株为克雷伯氏菌,1株为亚利桑那沙门氏菌,埃希氏大肠杆菌为优势菌。除3株分离自山泉水的菌仅对青霉素和红霉素两种抗生素耐药外,其它菌株都对3种及3种以上抗生素耐药,多重耐药率高达98.1%,对所选十种抗生素都耐受的菌为15株(9.3%)。十种抗生素耐药率依次为:青霉素100%,红霉素99.4%,链霉素85.2%,氧氟沙星74.5%,环丙沙星56.8%,诺氟沙星56.2%,庆大霉素47.5%,头孢他啶42.0%,氨苄青霉素33.3%,丁胺卡那霉素22.2%。不同水体分离菌株对氧氟沙星、诺氟沙星、庆大霉素、丁胺卡那霉素、链霉素等5种抗生素的耐药率有显著性的差异($P < 0.005$)。不同水体的分离株耐药率两两比较发现:除嘉陵江地表水和屠宰场、畜禽养殖场下游地表水外,其它不同水体间微生物对1~5种抗生素的耐药率具有显著性差异($P < 0.01250$)。污水处理厂进水和出水分离菌株的抗生素耐药率无显著性差异($P > 0.01250$)。

3.162株分离菌株中有92株(56.8%)提取到大小为0.90~158.83Kb、数量为1~6个的质粒,有81种质粒谱型。70株(43.2%)未提取到质粒的细菌中对2种抗生素耐受的有3株,其余67株均对3种及3种以上抗生素耐药(多重耐药);具有相同质粒谱型的菌株耐药谱都不相同;未发现质粒数量的多少与抗生素耐药种类多少间有明显相关性。

结论与展望:1.SPE与HPLC/MS适于对重庆市水环境中抗生素污染进行动态监测。2.重庆市多种水体中普遍存在痕量水平的四环素类抗生素,应进行周密布点,选择出具代表性的抗生素,对重庆市水环境中抗生素污染进行长期监测。3.重庆市水环境中微生物的抗生素耐药性已普遍存在,形成原因有待深入研究。4.不同水体分离的耐热性大肠菌群对氧氟沙星、诺氟沙星、庆大霉素、丁胺卡那霉素和链霉素的耐药性有显著性差异,可以这五种抗生素为代表进一步研究重庆地区耐热大肠菌群各宿主(如人、各种家禽家畜)粪便及各种水体中耐热性大肠菌群的抗生素耐药性并建立相应数据库,为以ARA进行微生物污染源追踪的可行性研究奠定基础。5.在重庆市医院污水、污水处理厂出水及嘉陵江地表水的水质监测项目中加入微生物耐药性指标具有重要意义。6.未发现耐热性大肠菌群质粒谱与耐药谱间有明显相关性,推测菌株多重耐药性可能不是质粒DNA介导;各菌株质粒谱具有多态型,质粒谱分析不能用于区分重庆市水环境中微生物污染来源。

10. 期刊论文 [王建华, 王海军, 李为科, WANG Jian-hua, WANG Hai-jun, LI Wei-ke 重庆市歌乐山森林系统生态服务功能价值评估 - 石河子大学学报 \(自然科学版\) 2006, 24 \(2\)](#)

采用机会成本法、市场价格替代法等手段对重庆歌乐山森林系统的固碳释氧,涵养水源,水土保持,净化空气等生态服务价值进行了初步估算.最后得出歌乐山森林生态系统总生态服务价值为2.3656亿元.明确了歌乐山森林系统具有巨大的生态服务价值及对重庆市区生态环境建设具有重要作用.

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y884126.aspx

授权使用: 中南大学(zndx), 授权号: 21f9de80-78f1-4f87-97e4-9da50150bbb5, 下载时间: 2010年6月30日