

重庆大学

---

硕士学位论文

---

龙河流域生态安全评价研究

---

姓名：王辉

---

申请学位级别：硕士

---

专业：环境工程

---

指导教师：杨幸

---

20070428

## 摘 要

全球环境问题与危机的加剧，使生态安全作为与军事安全、国防安全等传统安全不同的一种非传统安全越来越受到世界各国的广泛关注。当前人们最关注的生态安全问题，如洪涝灾害、沙尘暴等大多数都属于区域尺度，我国局部地区的生态安全态势已经破坏、甚至损害了当地社会经济持续发展的基础。因此，区域生态安全问题已经上升到决定地区发展和国家安全的高度。

本文以位于重庆市三峡库区核心地域的龙河流域为研究对象。龙河为长江右岸一级支流，流域位于重庆市主城区东南部，东靠湖北省利川市，南与彭水县和武隆县交界，西与涪陵区毗邻，北接万州区和忠县。全流域包括石柱县、丰都县的28个乡镇。流域位于三峡库区水污染防治和水土流失防治重点治理区，流域内生态环境破坏较为严重，已经产生的危害和潜在的危害不容忽视。突出表现为水土流失严重，河道淤积，河道多处断流、局部河段水体污染严重，河岸天然植被被破坏等环境问题。

本文考虑研究区域具有流域生态系统及山地生态系统的多重特点，以P-R-S模型为基本框架，构建一套适用于龙河流域具体情况的生态安全评价指标体系，运用层次分析法进行龙河流域生态安全评价。根据评价结果，龙河流域的生态安全状态虽然处于一般状态的级别，但是已经濒于不安全状态的边缘，其生态环境状况不容乐观。造成龙河流域生态系统不安全的重点因素在于其水土资源的不合理开发利用，另外，由于经济水平的有限，用于生态环境保护方面的投资也有限，导致没有足够的能力对已经破坏的生态环境问题予以积极的修缮，人与自然的矛盾使得龙河流域存在着生态隐患。

为了改善维护龙河流域的生态安全状态，本文根据综合评价的结果，提出了具体对策，建议加强对公众环境保护知识的宣传普及教育，以提高民众的环保意识，同时严格执行相关法律法规，在资金投入上对保护生态环境的项目予以大力支持，建立龙河流域生态安全监测、评估与预警系统。

**关键词：**生态安全，层次分析法，P-R-S模型，生态安全评价，龙河流域

## ABSTRACT

The aggravation of the global environmental problems and crisis causes ecological security to be concerned by the countries all around the world as a non-traditional security as military affairs security and national defense security which are different from traditional securities. Currently, the most concerned ecological security problems, such as flood-water logging disaster, and sands storm etc. belong to regional scale, and the ecological security situation in some regions of China has been destroyed and even damaged the basis for social economy continuous development. Therefore, regional ecological security problem has been raised to the height of deciding regional development and nation security.

Longhe river watershed located in the core zone of Three Gorges reservoir region Chongqing is taken as the study object in this paper. Longhe river is the first level branch at the right bank of Yangtze River, and the drainage area covers the southeast part of main city zone of Chongqing, which is close to Lichuan city of Hubei province in east, marching with Pengshui county and Wulong county in south, adjoining Fuling district in west, and connecting Wanzhou district and Zhong county in north. The total drainage area covers 28 villages and towns including Shizhu county and Fengdu county. Longhe river watershed belongs to the key administration area in Three Gorges reservoir region to prevent and control water pollution and soil erosion, and the ecological environment in this area has been destroyed seriously, so as to the existing hazards and potential hazards shall not be ignored. The outstanding aspects are serious soil erosion, river course fill up, serious water body pollution in parts of reach, natural vegetations along the river bank been destroyed etc.

This studied region consists multiple characteristic on both of the watershed ecosystem and the mountainous ecosystem, which take the P-R-S model as the bare bone to construct a set of ecology security evaluating system suitable for Longhe river, to conduct ecology security evaluation work in Longhe river watershed using analytic hierarchy process. According to the evaluating result, the Longhe river watershed is already not in a secure state for its bad ecological environment condition, although is still at a general condition rank. The key factor forming the exist ecosystem unsafety of Longhe river watershed lies in unreasonable development on its water and oil resources, moreover, as a result of economical level limited, the investment on ecological

environment protection is also limited, leading to no enough capability could be given to restoring on destroyed ecological environment .The contradictions between the person and the nature cause the hidden danger on ecosystem in Longhe river watershed. In order to improve the ecological security state in dragon river valley, this article based on the evaluating result ,provides detailed countermeasures ,suggests to raise public's environmental protection consciousness by strengthened environmental protection knowledge popularization education ,simultaneously strictly carry out the related legal laws and regulations ,give vigorous fund support on ecological environment protection project as well as establish the ecological security monitor , evaluating and early warning system in Longhe river watershed.

**Keywords:** Ecological Security, Analytic Hierarchy Process, P-R-S Model, Ecological Security Assessment, Longhe River Watershed

# 独创性声明

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

学位论文作者签名：王辉 签字日期：2007年4月28日

# 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解重庆大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权重庆大学可以将学位论文的全部或部分内内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

保密（），在    年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密（）。

（请只在上述一个括号内打“√”）

学位论文作者签名：王辉 导师签名：杨萃

签字日期：2007年4月28日

签字日期：2007年4月28日

# 1 绪 论

## 1.1 研究背景、目的及意义

随着全球经济的快速发展,人与大自然之间的矛盾日趋尖锐,生态环境总体上出现恶化趋势,主要表现在全球变暖,臭氧层空洞出现与扩大,水土流失严重,热带雨林锐减等等,各类灾害性的生态问题一次又一次地向人类敲响警钟,使人类认识到生态环境的重要性,人们迫切地感受到生态对经济发展所带来的重大影响及其存在的安全问题;当多数国家和地区把主要精力转向发展经济的时候,人们才发现严重制约经济发展的因素不再是军事威胁或政治威胁,而是因长时期的积累效应所形成的生态危机的广泛存在所造成的影响。因此,生态环境的安全状况问题逐渐引起了决策者的高度重视,这使得生态环境问题上上升到一个前所未有的高度——生态安全作为一个独立的概念,已经构成国家或地区安全的重要内容<sup>[1,2,3]</sup>。区域生态安全的研究也愈来愈受到研究人员的关注。

本文的研究区域为重庆市龙河流域。该流域位于重庆市三峡库区核心地域,为长江右岸一级支流,发源于石柱县冷水乡李家湾,处丰都县江池乡入丰都县境,贯穿石柱和丰都县境内,在丰都县双路镇葫芦溪口注入长江。龙河流域位于重庆市主城区东南部,东靠湖北省利川市,南与彭水县和武隆县交界,西与涪陵区毗邻,北接万州区和忠县。全流域包括石柱县、丰都县的 28 个乡镇。

龙河流域所处的渝东—鄂西地区是中国 17 个生物多样性关键区域之一,备受全世界关注。龙河流域在地质历史变迁中,自第三纪以来直接受第四纪冰川的影响相对较小,因此成为著名的第三纪动植物的“避难所”,聚集了不少形态上原始、分类上孤立的古老孑遗和我国特产的珍稀动植物种类。加上龙河流域处于中国—日本和中国—喜马拉雅植物区系交汇处,生物区系成分极为丰富多样,具有交汇与过渡性。此外,龙河流域支流众多,为典型的山地冷水急流型河流,鱼类等水生生物资源丰富,具有极大的保护和科研价值。因此作为拥有众多珍稀动植物栖息地的龙河流域,其生态系统是地球上重要而独特的自然生态系统。同时,由于地处三峡库区腹地和长江上游,对龙河流域的保护开发和研究具有更特殊的意义,龙河流域生态安全状况、针对安全状况建立相应的预警机制,进行合理的开发规划,对日后整个三峡库区的生态环境均具有重大意义。

## 1.2 国内外研究概况

早在 1977 年,美国世界观察研究所所长莱斯特·R·布朗在他的著作《建立

一个持续发展的社会》中，阐述了环境安全的概念，并以此为基础提出了国家安全的新内涵——“目前对安全的威胁，来自国与国间关系的较少，而来自人与自然间关系的可能较多。”<sup>[4]</sup>“土壤侵蚀，地球基本生物系统的退化和石油储量的枯竭，目前正在威胁着每个国家的安全”。<sup>[4]</sup>由此将生态环境的对人类生存的影响明确引入安全概念。

1987年世界环境与发展委员会(WCED)发表的正式报告《我们共同的未来》中指出：“发展中国家面临着沙漠化、森林砍伐和污染等明显的威胁生命的挑战，忍受着大多伴随着环境恶化的贫困”<sup>[5]</sup>。“工业化的国家面临着有毒化学品、有毒废弃物和酸污染的威胁生命的挑战。所有各国都可能遭受到由工业化国家排放的二氧化碳和各种气体，以及臭氧层反映造成的危害”<sup>[5]</sup>。警告人们各种各样的生态环境问题已经对人类生存构成了巨大威胁，国家和区域的稳定不再仅仅基于传统的概念，“安全的定义必须扩展，超出对国家主权的政治和军事威胁，而要包括环境恶化和发展条件遭到的破坏”<sup>[5]</sup>。从而第一次正式的提出了“生态安全”这一名词。

1992年在巴西里约热内卢召开的联合国人类环境会议作为生态安全问题的里程碑，首次将环境与发展紧密的联系起来。以这次大会为标志，可持续与环境安全或生态安全成为国际社会中国际政治的一部分。<sup>[6]</sup>

### 1.2.1 “生态安全”的定义

国际上对生态安全的研究是从对“安全”定义的扩展开始，最早提出的即莱斯特斯的“环境安全”概念。1987年，Westing提出“全面安全”的概念，指出其包括“政治安全”和“环境安全”，“全面安全”意味着免受或远离各种威胁，包括核战争、贫穷和全球环境问题。<sup>[7]</sup>此后，人们对生态环境安全的关注程度不断加深，并逐渐引入了“生态安全”一词，围绕其进行了大量的研究。

“生态安全”这一名词提出以来，许多学者对其概念都进行了阐述，目前尚未成公认的定义，一般有广义和狭义两种理解：前者包括自然生态安全、经济生态安全和社会生态安全，后者指自然和半自然生态系统的安全，即生态系统完整性和健康的整体水平反映。王根绪<sup>[2]</sup>等人认为生态安全与生态风险互为反函数，与生态健康互为正比关系，安全的生态系统是健康的并具有对这种风险维持其健康的可持续能力，生态系统安全应由系统健康和系统风险两方面来表征。因此，生态安全概念可以用生态风险和生态健康两方面定义。

程漱兰<sup>[8]</sup>从自然经济的角度，认为“生态安全，即实现一国生存和发展所处生态环境，保持土地、水源、天然林、地下矿产、动植物种质资源、大气等“自然资源”的保值增值、永续利用，使之适应国民教育水平、健康状况体现的“人力资本”和机器、工厂、建筑、水利系统、公路、铁路等体现的“创造资本”持续

增长的配比要求,避免因自然衰竭、资源生产率下降、环境污染和退化对社会生活和生产造成的短期灾害和长期不利影响,甚至危及国家军事、政治和经济安全”。

曲格平<sup>[3]</sup>先生从 2 个方面解释生态安全:一是防止生态环境的退化对经济基础构成威胁,主要指环境质量状况和自然资源的减少、退化,削弱了经济可持续发展的支撑能力;二是防止环境问题引发公众的不满,特别是导致环境难民的大量产生,影响社会稳定。

郭中伟<sup>[9]</sup>认为“生态安全”的显性特征是生态系统所提供的服务的质量和数量的状态,当一个生态系统所提供的服务的质量和数量出现异常时,则表明该系统的生态安全受到了威胁,即处于“生态不安全”的状态。因此,“生态安全”包含 2 重含义:一是生态系统自身是否安全,即自身结构是否受到破坏;二是生态系统对于人类是否安全,即生态系统所提供的服务是否满足人类的生存需要。

陈国阶<sup>[1]</sup>通过对生态安全及其对立面的分析,得出生态安全具有丰富的内涵:

- (1) 生态安全是人与环境关系过程中,生态系统满足人类生存与发展的必备条件。
- (2) 生态安全是一个相对的概念,可以通过建立起反映生态因子及其综合体系质量的评价指标,来定量地评价某一区域或国家的安全状况。
- (3) 生态安全是一个动态概念。生态因子变化,反馈给人类生活、生存和发展条件,导致安全程度的变化,甚至由安全变为不安全。
- (4) 生态安全强调以人为本,影响生态安全的因素很多,但只要其中一个或几个因子不能满足人类正常生存与发展的需求,生态安全就是不及格的。也就是说,生态安全检查具有生态因子一票否决的性质。
- (5) 生态安全具有一定的空间地域性质。
- (6) 生态安全可以调控,即可通过整治,减轻、解除环境灾难,变不安全因素为安全因素。
- (7) 维护生态安全需要成本。

目前国内的许多学者广为使用的概念强调“安全”的含义<sup>[1,2,3,7,8]</sup>,认为生态安全是维护一个地区或国家乃至全球的生态环境不受威胁的状态,能为整个生态经济系统的安全和持续发展提供生态保障,其具体含义可以扩展为保持生态子系统各种自然资源 and 生态系统服务的合理使用和积极补偿,避免因自然资源衰竭、资源生产能力下降、生态环境污染和退化给社会生活和生产造成的短期和长期不利影响,甚至危及区域或国家的政治、经济和军事安全。

### 1.2.2 生态安全的分析评价

既然生态安全对一个国家乃至区域的经济发展和未来的资源合理利用有着如此举足轻重的影响,那么如何了解判断生态安全的状况和其动态变化呢?

近年来,对生态安全问题的研究愈来愈关注于如何进行评价和分析,从而为生态环境和建设提供依据。学者们针对不同地域特点,建构了各种相关的生态安全指标体系,如受到广泛承认和使用的压力状态响应<sup>[10]</sup>(Pressure-State-Response, P-S-R) 框架模型,以及在此基础上扩展后得到的驱动力-P-S-R 模型<sup>[11]</sup>;并大量借



鉴系统分析、景观生态学、遥感、地理信息系统等学科领域的分析方法,对某一特定区域的生态安全状况进行评估分级,以建立相应的预警系统,指导人们的开发活动。

### 1.2.3 生态安全评价指标体系

生态安全评价研究的关键环节是建立科学的评价标准与指标体系,它们是进行生态安全评价的基本尺度和衡量标准,指标体系构建的科学性和可操作性决定了评价结果的真实性和可行性。

现阶段国内外尚未有专门的有关生态安全的指标体系,由于环境安全标准并不能完全代表生态安全,许多学者从反映生态安全程度的生态风险与生态健康两方面,提出了大量的针对不同尺度的度量指标。<sup>[12]</sup>其中 OECD (Organization for Economic Co-operation and Development, 联合国经济合作开发署) 建立的压力状态响应<sup>[10,11,13,14,15]</sup> (Pressure-State-Response, P-S-R) 框架模型被广泛承认和使用。该框架模型具有:(1) 综合性。同时面对人类活动和自然环境。(2) 灵活性。可以适用于大范围的环境现象。(3) 因果关系。它强调了经济运作及其对环境的影响之间的联系。这一框架模型具有非常清晰的因果关系,即人类活动对环境施加了一定的压力;因为这个原因,环境状态发生了一定的变化;而人类社会应当对环境的变化做出响应,以恢复环境质量或防止环境退化。而这三个环节正是决策和制定对策措施的全过程。

左伟等在广泛分析研究了国内外生态评价指标体系方案案例基础上,对 P-S-R 框架模型进行扩展——制定区域生态安全评价指标体系概念框架,即驱动力-P-S-R 生态环境系统服务的概念框架<sup>[11]</sup>。这一扩展的作用和意义表现在:1) 扩展了原模型的压力模块的概念含义。提出了生态环境系统变化驱动力的概念模块。该模块与原模型中狭义的压力比较,含义更加广泛,并且更加中性化。既有来自人文社会方面的,如人口数量增长的压力等,也有来自自然界方面的,如自然灾害的压力等;既包括原来模型狭义的压力概念,也包括原来模型中响应的概念在内。2) 着重认识并提取满足人类需求的表征生态环境系统服务功能的指标因子来建立区域生态安全评价指标体系概念框架。

另一种具有代表性的生态安全评价指标体系是环境、生物与生态系统分类系统。该系统将生态安全评价的指标划分为环境安全指标、生物安全指标和生态系统安全指标三类,并建立各自的评价指标,如环境安全指标分为污染源、环境受体以及资源状况等方面,而生物安全则主要以生物多样性体现。该指标系统的主要缺陷在于它所揭示的更接近于一定时期的生态质量,既不能完全反映生态健康状况,更不能说明生态系统或区域环境的可持续维护能力<sup>[16,17,18]</sup>。

### 1.2.4 生态安全评价方法

在区域生态安全评价指标体系中各指标权系数的确定对整个评价具有重要意义，确定权重系数的方法有很多种，层次分析法（AHP）是美国匹兹堡大学运筹学家 T.L.Saaty 于 20 世纪 70 年代中期提出的一种多层次权重决策方法。它是一种定性和定量相结合的、系统化、层次化的分析方法，具有高度的逻辑性、系统性、简洁性和实用性。何琼<sup>[19]</sup>等人在 P-S-R 模型的基础上，选取了 36 个指标，建立 4 层层次结构模型，包括目标层（O）、准则层（A）、（B）和指标层（C），采用层次分析法确定区域生态安全评价体系指标的权系数。结果表明证明，层次分析法计算出的结果较理想、合理，从而为以后的综合评价提供了可靠依据。

生态安全的评价问题非常复杂，主要是如何确定生态安全系统中诸多要素的影响程度，也就是如何定量分析各评价指标的问题。一方面，生态安全系统中各因素间的关系复杂，目前尚无法准确把握其内在的相互联系，具有一定的灰性。另一方面，现有的生态环境基础数据资料并不完备，常用的统计量化方法存在很多局限性，如要求大量样本，样本要有典型的分布规律，计算工作量大等。因此，生态安全评价方法的选择问题是一个难点。灰关联方法是灰色系统理论中新的分析方法，它根据因素间的相似或相异程度，来衡量因素之间的关联度，克服了常见数理统计量化方法的局限性，在生态环境评价领域应用较为广泛。吴开亚<sup>[20]</sup>等基于生态安全系统的灰性特征，将灰关联方法应用于生态安全评价，并实例分析了安徽省 17 个地级市的生态安全状况，取得了理想的效果。

在资源环境承载力基础上发展起来的生态承载力概念是近年来在区域可持续发展领域备受关注的问题，其研究方法分为状态空间法和生态经济法两大类。状态空间法利用空间重的原点同系统状态点所构成的矢量模数表示区域承载力的大小，考虑到资源环境各要素何人类活动影响对区域生态承载力的作用不同，且生态系统间复杂的相互作用使得矢量模数比较复杂，近年来空间状态法与系统动力学和综合指数法相结合成为该方法的发展趋势，生态经济学方法是国内外目前分析生态承载力最为热门的方向<sup>[21,22]</sup>。其中以生态足迹法和能值分析法最具代表性。生态足迹可直接分析某地区或国家在给定时间所占用的地球生物生产率的数量，通过地区或国家的资源与能源消费同自己所拥有的资源与能源的比较，判断一个国家或地区的发展是否处于生态承载力范围内，其生态系统是否安全；基于生态经济系统的热力学特征提出的能值分析原理，把生态经济系统中不同种类、不可比较的能力转换成同一标准的能值，来衡量生态系统运行何发展的可持续性。<sup>[23]</sup>

近来，随着 GIS、RS、GPS（3S）技术的崛起和模型技术的发展，生态安全的研究有了新的契机。<sup>[24,25,26,27]</sup>“遥感”（Remote Sensing）技术在生态环境相关研究中，主要用于土地资源、环境变化和评价研究过程中，并作为各种住处建立

数据库, 以及生态环境研究的着手点。利用周期快、现势性强的遥感图像开展土地利用制图具有许多优点: ①遥感资料的综合性因素有利于土地覆盖与类型的分析和划分, ②土地覆盖因素在图像上都有明显的表征, 选用最佳时相的图像可提取更多的地物类型, 从而提高土地利用类型的制图精度, ③利用遥感资料能缩短野外土地利用调查研究和室内分析成图的周期, 并减少费用, 成本低。GIS 技术以计算机技术为基础的获取、管理、处理和显示空间数据或具有地理参照系统信息的工具, 具有空间分析、数据处理、成果表达等优势。而 GPS 技术具有易于空间定位的特点。3S 技术单独或者结合起来应用于生态安全评价, 取得了一定的研究成果。然而, 由于生态系统的可变因素很多, 影响因子复杂, 使得生态安全的量化评价工作存在许多困难, 具体操作问题仍然期待着大量研究解决。

### 1.3 研究内容

本论文以重庆市龙河流域为研究对象。针对龙河流域的区域特点, 分析目标区域的自然环境、社会环境、生态环境及经济发展的潜在动力、需求, 以及存在的生态环境安全问题, 建立相应的综合评价指标体系, 选取操作性强、可度量的评价方法对目标区域的生态安全状况进行定量评价, 分析评价结果, 针对可能存在的问题提出建议、对策。

龙河流域多支流, 具备流域生态系统的鲜明特征, 其区域内多为丘陵山地, 同时具有山地生态系统的特点, 因此在评价指标体系的建立过程中, 必须兼顾以上情况, 本研究中大量借鉴了流域生态系统及山地生态系统的理论观点。

#### 1.3.1 流域生态系统

流域 (Watershed) 是指一条河流 (或水系) 及其集水区域, 河流 (或水系) 由这个集水区域上获得水量补给, 是内陆生态系统的基本单元。由于自然事故和人类干扰, 流域经常面临着很多的问题, 如洪水、干旱、山地灾害、水资源短缺和生态退化等, 因此流域生态问题颇受关注, 并产生了专门以流域为研究对象的学科。流域生态研究主要关心下述几点问题<sup>[28,29,30,31,32]</sup>:

##### (1) 流域的水土保持

从流域生态系统的角度进行土壤、水、生物等自然资源的管理, 是目前北美水土保持学研究的主攻方向。主要研究领域包括流域生态系统的结构组成及其健康状况评价、流域生态系统的功能及其作用机理研究与建模、流域水土资源管理的社会、经济等因子对持续土地利用的影响和水土保持实践及新方法新技术的应用等。

##### (2) 水体污染和水质改良的研究

水体污染一直是环境保护的重要问题。环境质量的生物监测与评价, 水体污

染物的毒性和毒理的研究、污水净化的研究、湖泊富营养化的研究等是污染生态学研究的重要课题。而从流域角度综合考虑城市生态系统内的污水净化和处理,以及整个流域的治理同样具有重要意义。

### (3) 重大水利工程对流域生态系统影响的研究

### (4) 流域生态系统生物多样性及保护对策的研究

生物多样性(Biodiversity)是生物及其与环境形成的生态复合体以及与此相关的各种生态过程的总和。它包括数以千百万计的动物、植物、微生物和它们所拥有的基因以及它们与生存环境形成的复杂的生态系统。流域由于其特殊的生态环境,生物多样性非常高。

### (5) 水陆交错带的研究

流域通常由水生态系统和陆地生态系统构成,属于典型的水陆交错带。水陆交错带的特点是水生态系统与陆地生态系统之间的作用比较强烈,产生了复杂的景观异质性和边缘效应,是生物分布和活动频繁的地区,生物多样性比相邻地带要高的多,对生态系统间的物流、能流、信息流和生物流起到廊道(Corridor)、过滤器(Filter)和屏障(Barrier)的作用。同时,水陆交错带对于全球气候变化又是反应较敏感的地区,也是生物多样性容易丧失的地区。研究流域作为水陆交错带,其结构、功能和变化动态,以及对全球变化的响应,都是很有价值的。

### (6) 流域生态系统的可持续发展与开发利用研究

如何实现流域生态资源可持续开发原则,既能充分发挥流域生态系统的重要功能来促进社会和经济的发展,又能保护好环境,合理有效地利用流域自然资源,同时将流域发生的自然灾害(如洪涝灾害和旱灾)减到最低,并尽量杜绝人为引起的自然灾害发生,是一个关系到国民经济能否持续发展的重要课题。

本文的研究目标作为一个复杂的流域生态系统,在对其生态安全状况进行分析时,上述问题也受到关注,在指标体系的建立、评价因子的选择过程中大量借鉴流域生态学领域的相关知识。

## 1.3.2 山地生态系统特点

龙河流域多山地、丘陵,具备山地生态系统的特点,作为这样一个复杂的区域生态系统,研究其自然系统时必须考虑其特殊性。

山地,指起伏相对高度大于 200 的地段,它不包括低山、中山、高山、极高山,而且包括高原、山原、丘陵及其间的山谷与山间盆地。它是由自然、社会、经济系统组成的复合生态系统,并在自然过程和人类活动的共同作用下处于不断地演替状态。与其它复合生态系统相比,山地生态系统更具不稳定性和脆弱性。因此,在对区域生态安全状况的研究中需要充分考虑到山地系统自身的特点,目前,对山地系统的生态问题多关注于土地利用情况、土地覆被、植被覆盖和水土

流失。<sup>[33,34,35,36]</sup>

## 1.4 研究技术路线及主要方法

经过大量文献资料的参考，综合分析研究目标的区域特点，本文确定如图 1.1 所示的研究技术路线。

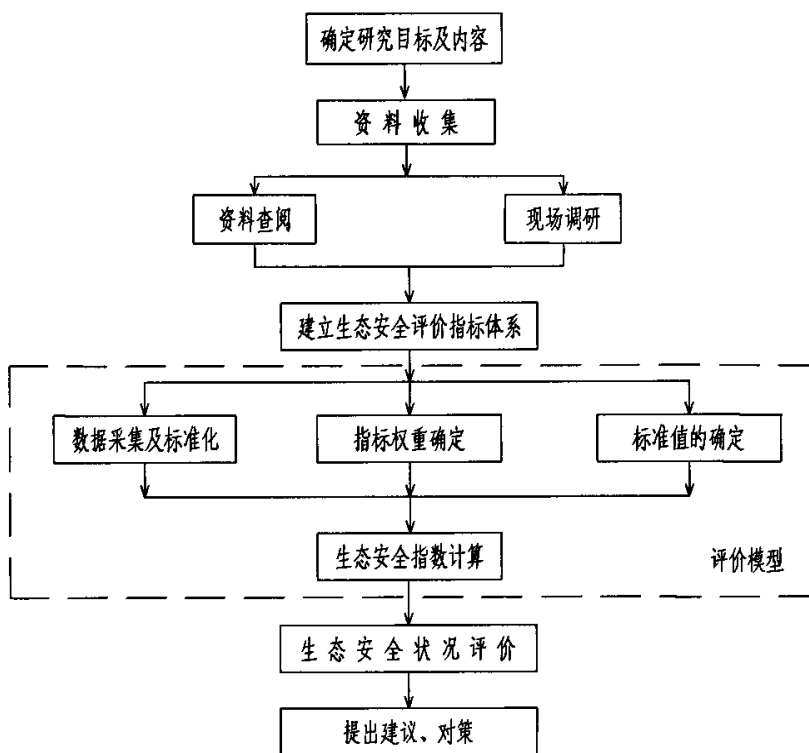


图 1.1 论文技术路线图

Fig.1.1 Technical courses of dissertation

本研究以 P-S-R 模型为基础，考虑龙河流域自身的自然、社会经济状况特点，对模型进行一定程度的修正，建立适合研究目标的生态安全评价指标体系，包括三个子系统四个分析层，通过专家咨询，并借鉴其它区域生态安全研究的方法，根据层次分析法确定各指标的权重系数。通过野外调查、实地勘查，搜集当地的社会经济状况资料，查阅文献资料、统计年鉴，大量采集相关的数据、资料，对所采集的数据、资料进行筛选，保留与本研究有关的关键资料，对这些数据资料进行标准化处理。最终通过模型的计算，得到关于该流域生态安全状况的量化结论。通过对结论的分析，寻找对结论影响重大的评价因子，从而主次分明的提出相应的对策建议。

## 2 龙河流域概况

### 2.1 自然地理状况

#### 2.1.1 地理位置

龙河为长江右岸一级支流，发源于石柱县冷水乡李家湾，自丰都县江池乡入丰都县境，贯穿石柱和丰都县境内，在丰都县双路镇葫芦溪口注入长江。龙河流域位于重庆市主城区东南部，东靠湖北省利川市，南与彭水县和武隆县交界，西与涪陵区毗邻，北接万州区和忠县，全流域包括石柱县、丰都县的 28 个乡镇。

龙河流域地理位置如图 2.1:



图 2.1 龙河流域地理位置示意图（蓝色部分）

Fig.2.1 Location of Longhe river watershed (blue part)

### 2.1.2 地质构造与地貌特征

龙河流域位于四川盆地东部中山区,属川东褶皱地带,在原四川省地貌区划中属巫山、大娄山中山区。流域范围内地势东高西低,呈起伏式下降顺北东、南西相近平行排列的七曜山、方斗山纵贯全流域,形成“两山夹一槽”的主要地貌特征。

在地形地貌上受构造的控制,地貌形态多样,七曜山以东,为鄂西山区地貌,多险峰丛谷地溶蚀洼地,岩溶洞穴发育,七曜山至方斗山之间,为中山及低山,高差大,切割深,河流发育。龙河沿方斗山和七曜山夹槽与两山呈平行状最后于丰都双路镇汇入长江。龙河的支流基本从方斗山和七曜山山地沿夹槽向内流下汇入干流。流域内石柱段地形地貌以中、低山为主,山原次之,有少部分丘陵,兼有宽谷、窄谷、岩溶、槽坝阶地等多种地形地貌,最高的黄水镇大风堡为1934m,高差近1600m。流域内丰都段地形地貌属丘陵低中山区,地势狭窄陡峻,最高海拔位于大塘坝,约2000m,相对高差接近1800m。

### 2.1.3 气候特征

龙河流域属亚热带季风湿润气候区,全流域受季风气候的影响特别明显,具有气候温和、降雨充沛、四季分明、季风明显和随海拔高程变化的立体气候规律。流域石柱段境内年平均气温 $16.5^{\circ}\text{C}$ ,年均降雨量1109.0mm,无霜期278天,年平均蒸发量为1227.5mm;流域丰都段境内年平均气温 $18.9^{\circ}\text{C}$ 至 $11.3^{\circ}\text{C}$ ,随高程的增加而降低,年平均降雨量为1211.5mm,无霜期由沿河的336天递减到中山区的220天,多年平均年日照数为1333h。

### 2.1.4 水文特征

龙河是一条集多级发电、灌溉、旅游、渔业于一体的河流,属长江上游右岸一级支流,干流全长140km,流域面积 $2910\text{km}^2$ ,多年平均流量 $28\text{m}^3/\text{s}$ 。流域石柱县境内干流长80.6km,流域面积 $1485\text{km}^2$ ;丰都县境内干流长59.4km,流域面积约 $1425\text{km}^2$ 。流域支流众多,为典型的山地冷水急流型河流,小型水库众多,因截流和雨季变化常造成部分河流部分时段断流。

### 2.1.5 土壤及生物资源

龙河流域土壤类型包括水稻土、冲积土、紫色土、黄壤土、黄棕壤、潮土等六个土类、七个亚类、23个土属、95个土种。土壤分布主要受地形、母质、气候、植被等因素的影响。流域内生物资源丰富。

据调查,全流域高等维管束植物有194科、919属、2191种,其中蕨类植物211种,裸子植物33种,被子植物1947种;陆生野生脊椎动物300余种,其中,两栖类20种,爬行类28种,鸟类197种,哺乳类84种。龙河流域所处的渝东—

鄂西地区是中国 17 个生物多样性关键区域之一，备受全球关注。

龙河流域在地质历史变迁中，地处低纬度和具有以石灰岩为主的复杂多样地形，自第三纪以来直接受第四纪冰川的影响相对较小，因此成为著名的第三纪动植物的“避难所”，聚集了不少形态上原始、分类上孤立的古老孑遗和我国特产的珍稀动植物种类。加上，龙河流域处于中国—日本和中国—喜马拉雅植物区系交汇处，生物区系成分极为丰富多样，具有交汇与过渡性。

## 2.2 社会经济状况

### 2.2.1 人口与城镇化水平

龙河流域共流经石柱县、丰都县的 28 个乡镇，石柱县境内是土家族聚居地。根据石柱县、丰都县统计年鉴（2004 年）、现状调查及相关部门提供的统计资料，整理统计结果表明：龙河流域内总人口为 62.5 万人，其中城镇人口 26.30 万人，流域内城镇化率为 42.08%。

### 2.2.2 经济发展水平

流域内共有工业企业 850 余家，其中产值 2000 万元的有 4 家，产值上 1000 万元的有 10 家，销售上 5000 万元的有 3 家，销售上 2000 万元的有 9 家，利税上百万元的有 13 家。

多年来，石柱县始终坚持改革、管理、挖潜、创新、扶优扶强的方针，努力调整工业结构。强化营销措施，拓展市场空间，特别是近几年实施“工业兴县”战略以来，工业经济得以呈快速、高效的恢复性发展。全县工业总产值达到 7.5 亿元，销售收入达到 9.1 亿元，实现利润 4700 万元，入库税金达到 3500 万元，新产品产值达到 2078 万元。全县三大产业的比例为：31.2：31.0：37.8，工业经济对全县 GDP 的贡献率的 28%。

流域内丰都县近年工业发展较快，现状工业总产值 6.51 亿元，占工农业总产值的 36.49%。丰都县全县共有工业企业 460 个，覆盖了化工、造纸、机械、建材、食品、加工等行业，其中：国有企业 98 个，集体企业 148 个，私营企业 154 个，产值在 100 万元以上的工业企业有 170 个。乡镇企业持续发展，全县乡镇企业总产值 42800 万元。

流域内各县以农业经济为主导，其中石柱县农业的发展以绿色生态为基本特征，全县国内生产总值达到 14.76 亿元，三次产业结构比达到 31.7：30.9：37.4，农民人均纯收入 1439 元；丰都县农业主要以种植业、畜牧业为主，全县农业总产值达到 113300 万元，占工农业总产值的 63.51%。其中农业产值 52500 万元，畜牧业产值 54600 万元，林业产值 2900 万元，渔业产值 3300 万元。



### 2.2.3 交通建设状况

流域内石柱县属典型的山区农业县，虽有水道 27km，对内外主要依靠公路运输。县境内现有公路里程 1725km。重庆直辖以来，县委、县政府大力发展交通事业，现已完成石丰路、石垫路、石西路、石郁路等干道公路 270km，路面硬化（含油化）270km，完成投资 36269 万元。“一纵两横”的县城骨架干线公路已具雏形。打通了向西沱长江深水港，忠县、利川、丰都、万州等出口，打破了制约石柱经济发展的“瓶颈”。

流域内丰都县水陆交通方便，境内长江长 47km，水上距重庆 172km，万州 155km，宜昌 483km。城乡公路纵横交错，构成联系全国各地的交通网络。本县公路主要干线有丰垫、丰忠、丰涪和丰石公路。全县 31 个乡镇政府所在地全部通车，319 村有机耕道。

### 2.2.4 丰富的旅游资源

龙河流域内旅游资源丰富，包括石柱县黄水国家森林公园、鱼池镇的千野草场，丰都县的龙河漂流、雪玉洞、南天湖风景区等。黄水镇全镇均纳入国家森林公园范围之内，同时近年通过生态农业发展，大力包装特色农业经济品种，推行生态旅游，旅游业发展非常显著。丰都县境内的龙河漂流等景区在三峡库区蓄水以后，旅游船只可以经龙河河口逆流而上，对推进旅游业的发展有明显的作

## 2.3 现存的生态环境问题

龙河流域位于三峡库区水污染防治和水土流失防治重点治理区，流域内生态环境破坏较为严重，已经产生的危害和潜在的危害不容忽视，突出表现在以下方面。

### 2.3.1 水土流失严重引起河流污染

调查表明，龙河流域存在着较为严重的水土流失问题，大量的水土流失致使流域内土壤资源遭到破坏和损失，土层变薄，质地变瘠，不利于保水保肥，地力减退；同时，水土流失冲刷产生的大量泥土淤塞河道，使河床逐年抬升，严重妨碍河道行洪能力，加剧了洪涝灾害的频繁发生，严重制约了当地经济的发展。

龙河流域坡耕地面积较大，再加上地理条件及河流特性的影响，水土流失十分严重，水土流失使生态系统各个要素之间失去平衡。由于严重的水土流失，植被和土壤对小气候调节的功能被削弱，加剧了自然灾害的危害。同时大量的水土泥沙通过龙河间接进入长江水生生态系统，对长江流域的水生生态系统平衡将起到较大的破坏作用，河流中悬浮物的增加使水体复氧困难，好氧微生物的生存和大量鱼虾类的生存环境受到损害，使水体水质恶化，直接影响主城区人民的生活和库区的经济建设。

表 2.1 龙河流域水土流失污染负荷统计

Table 2.1 Statistic of water loss and soil erosion and pollutional load of Longhe river watershed

县名		石柱县	丰都县	合计
极 强 度 流 失	土地面积(km <sup>2</sup> )	25.25	22.84	48.09
	平均侵蚀模数 (t/a · km <sup>2</sup> )	11500	11500	
	土壤侵蚀量(万 t/a)	29.037	26.272	55.309
	输移比	0.043	0.043	
	河流输沙量(万 t/a)	1.336	1.208	2.544
强 度 流 失	土地面积(km <sup>2</sup> )	130.03	83.55	213.58
	平均侵蚀模数 (t/a · km <sup>2</sup> )	6500	6500	
	土壤侵蚀量(万 t/a)	84.519	54.311	138.830
	输移比	0.043	0.043	
	河流输沙量(万 t/a)	3.888	2.998	6.886
中 度 流 失	土地面积(km <sup>2</sup> )	557.73	558.04	1115.77
	平均侵蚀模数 (t/a · km <sup>2</sup> )	3750	3750	
	土壤侵蚀量(万 t/a)	209.147	209.263	418.410
	输移比	0.043	0.043	
	河流输沙量(万 t/a)	9.621	9.626	19.247
轻 度 流 失	土地面积(km <sup>2</sup> )	264.62	221.86	486.48
	平均侵蚀模数 (t/a · km <sup>2</sup> )	1500	1500	
	土壤侵蚀量(万 t/a)	39.693	33.280	72.973
	输移比	0.043	0.043	
	河流输沙量(万 t/a)	1.826	1.531	3.357
输沙量合计(万 t/a)		16.671	14.864	31.54
污 染 负 荷	COD(t/a)	2500.65	2229.60	4730.25
	BOD <sub>5</sub> (t/a)	333.42	297.28	630.70
	TN (t/a)	16.67	14.86	31.53
	TP (t/a)	3.34	2.98	6.32

### 2.3.2 局部河段水质污染严重

龙河流域沿河建有场镇 16 个，场镇居民有十几万人；长期以来，场镇生活污

水直排水体，生活垃圾随意堆弃在沿河河岸；南宾镇、下路镇、龙河镇等沿河主要场镇的工业污水排放严重超标，对龙河水质已经造成了严重威胁，也是三峡库区水质安全的潜在隐患。对龙河流域的环境监测表明，龙河已受到沿河流场镇的生活污染、工业污染和农业污染，主要污染物为 COD、BOD<sub>5</sub>、氨氮、总磷和石油类等。

2004 年龙河流域城镇综合污水排放量为：40244m<sup>3</sup>/d，1468.90 万 m<sup>3</sup>/a；产生的污染负荷为 COD：1905.74t/a，BOD<sub>5</sub>：848.15t/a，TN：254.10t/a，TP：32.70t/a。龙河流域各城镇的工业发展落后，工业企业数量少，产生的工业废水量也较少，根据 2003 年的统计，2003 年龙河流域工业废水排放总量为 171.45 万 m<sup>3</sup>，平均 5715m<sup>3</sup>/d，造成的污染负荷为：COD：269.17t/a，BOD<sub>5</sub>：98.19t/a，TN：42.86t/a，TP：10.82t/a。

根据《龙河流域水污染综合整治规划》的评估，龙河流域水质状况如表 2.2 所示。

表 2.2 龙河水质评价结果

Table 2.2 Result of water quality evaluate for Longhe river watershed

县域	断面	COD	DO	TP	TN	NH <sub>3</sub> -N	BOD <sub>5</sub>	评价结果
石柱	磨刀溪汇入龙河前	I	I	I	II	I	I	I
	沙子镇下游	I	I	I	II	I	I	I
	蚕溪河	I	I	I	II	I	I	I
	龙沙河入龙河前	I	I	II	II	I	I	II
	沙子河入桥头镇前	I	I	I	II	I	I	I
	悦峡河入桥头镇前	I	I	I	II	I	I	I
	悦峡河	I	I	I	II	I	I	I
	四龙溪	I	I	I	II	I	I	I
	龙河入南宾镇前	I	I	II	III	I	I	II
	南宾镇龙河出口	I	I	III	IV	I	I	III
	牛石嵌河	劣V	劣V	劣V	劣V	V	劣V	劣V
	菜地河	劣V	劣V	劣V	劣V	V	劣V	劣V
	出石柱处	I	I	II	IV	I	I	III
丰都	包鸾河龙河入口	I	I	III	III	/	I	II
	黄沙溪龙河入口	I	I	II	III	/	I	II
	双鹰河龙河入口	I	I	II	III	/	I	II
	暨龙河龙河入口	III	I	V	V	/	III	V
	江池	I	I	II	III	/	II	III
	金竹滩	I	I	III	IV	/	III	III

### 2.3.3 河流淤积，危害水利工程

近年来，由于工程建设泥沙流失、沿河挖沙取石、开山采石，造成龙河流域河床淤积，水质下降。河床淤积造成河床抬高，过流断面缩小，洪水位抬高，从而增加洪水灾害的次数和加重危害的程度。大量淤积的泥沙对已建水利工程造成破坏，使工程效益降低，工程寿命缩短。龙河三建乡境内因沿河大量开山采石，造成河道严重堵塞。

龙河干支流上大小梯级电站的盲目建设，使天然河道脱水、减水，水体自净能力下降，渔业生态环境质量恶化，一些产卵场和索饵场消失，部分珍稀鱼类资源面临绝迹。

#### 2.3.4 河岸天然植被破坏，河流生态功能受到损害

龙河流域干流及主要支流河岸的天然植被大都遭到破坏，大部分河岸均被开垦，河岸湿地生态系统的生态服务功能受损。由于缺乏河岸生态屏障的有效拦截，集约化禽畜养殖粪便、以及农田径流携带大量泥沙和营养性污染物直接进入河流水体，已成为河流污染的主要来源之一。场镇范围内居民住宅较集中的许多河段，垃圾直接堆放在河岸，既影响视觉景观，又污染环境、传播疾病，严重影响人民群众的身心健康和城镇的形象。龙河干、支流不仅水体表观受损，河流水质变差，而且河流生物多样性降低，河流的正常生态功能受到了严重损害。

#### 2.3.5 地质灾害频繁，生产条件差

龙河流域由于地处相对高差极大的山谷地带，同时属于干旱、洪涝多发地带，加之地貌岩性复杂，致使地质灾害形势严峻，伴随着灾害性天气的危害，带来洪涝灾害、山体滑坡、泥石流等地质灾害。

### 3 龙河流域生态安全评价指标体系的建立

指标体系是进行评价的基本尺度和衡量标准，指标体系构建的科学性和可操作性决定评价结果的真实性和可行性。本文将对龙河流域的生态安全状况进行定量评估，首先需要确定评价单元，并建立一套符合该区域特点的评价指标体系。

#### 3.1 评价单元的选取

评价单元的确定，主要根据研究所需达到的目标来确定。从国内外区域生态研究、规划工作成果，区域生态质量评价的单元选择上看，主要有基于面状评价单元和点状评价单元两类。<sup>[37]</sup>

面状评价单元是以矢量面元作为评价的信息载体和评价单元。其优点是数据获取尤其是社会经济数据的获取较为方便，评价结论亦便于应用于环境管理之中。其最大的不足是数据及评价结论的“精确空间位置性”不能得到保证。常用的面状评价单元包括行政单元、小流域和景观单元等。行政区单元在以国家、省域为尺度进行区域生态质量评价时采用较多。流域单元主要根据区域生态系统的地貌分异以及小流域范围水文过程形成的生态空间格局。景观单元由基质、镶嵌于基质上的拼块体以及线状连接景观内生态系统的廊道构成。构成景观的下一级单位是土地单元，上一级单位是构成地理分异的生态区划基础单位。因此，它是联接生态区划和土地利用规划的中间环节，采用景观为单元的区域生态评价，对于生态功能区划分，区域生态保护具有十分重要的意义。<sup>[37]</sup>

点状评价单元是以栅格单元作为评价的住处载体和评价单元。由于栅格单元优点是具有空间“精确位置”的含义，就使得评价结果具有“真正空间性”的意义。<sup>[37]</sup>

生态安全评价涉及自然、社会、经济的复合系统，评价指标复杂多面。本研究将龙河流域整体区域作为一个大的区域尺度，以此进行该流域的生态安全综合评价。

#### 3.2 评价指标体系的概念框架

评价指标体系的概念框架是构建指标体系的逻辑基础<sup>[10]</sup>。20 世纪 80 年代末，在加拿大政府组织力量研究的基础上，经济合作和开发组织（OECD）与联合国环境规划署（UNEP）共同提出了环境指标的 P-S-R 概念模型，即压力（pressure）—状态（state）—响应（response）模型（见图 3.1）<sup>[9,10,11,12]</sup>。该框架模型具有<sup>[10]</sup>：

（1）综合性，同时面对人类活动和自然环境；（2）灵活性，可以适用于大范围的生态环境现象；（3）因果关系，它强调了经济运作及其对生态环境的影响之间的联系。P-S-R 概念模型从人类与生态环境系统的相互作用与影响出发，对环境指标进行组织分类，具有较强的系统性<sup>[10]</sup>。

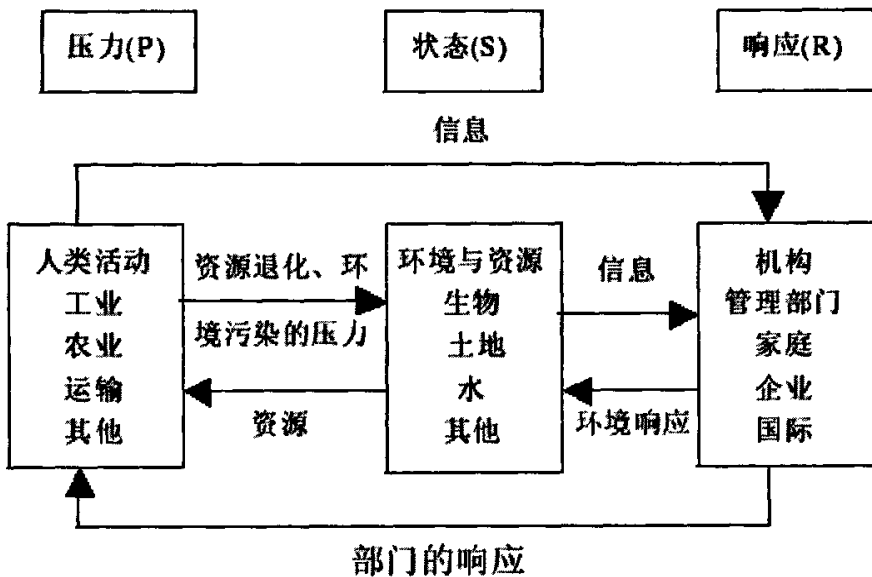


图 3.1 OECD 压力—状态—响应（P-S-R）框架模型

Fig.3.1 OECD P (pressure) – S (state) – R (response) framework model

在 P-S-R 框架内，某一类生态环境问题，可以由 3 个不同但又相互联系的指标类型来表达：

（1）“压力”指标（Pressure）：反映人类活动给环境造成的负荷，表明生态环境问题存在的原因。例如废物排放，废物处理，公路网的密度，捕鱼和矿物开采；

（2）“状态”指标（State）：表征环境质量、自然资源与生态系统的状况。例如污染物浓度，物种多样性，土地覆盖率；

(3) “响应”指标 (Response)：表征人类面临环境问题所采取的对策与措施，反映了社会在克服生态安全危机保障生态安全的能力。例如，自然资源的收税水平，与污水处理系统相关的居民数量，保护区面积。

P-S-R 框架强调了环境压力的来源，这是一个非常关键的问题，因为造成环境压力的这些人类活动应当对环境的变化负责。模型同时强调了一个非常重要的因果关系，即人类活动对生态环境施加了一定的压力，从而导致生态环境状态发生了某种程度的变化，人类社会必须对这些变化作出响应，以恢复生态环境质量或防止生态环境退化。模型表达的这些因果联系是简单直观的，而事实上这些联系未必象框架模型描述的那么直接<sup>[38]</sup>。

本文以 P-R-S 模型为基本框架，构建一套适用于研究目标具体情况的生态安全评价指标体系。

### 3.3 评价指标体系的构建

在评判某生态环境系统安全时，生态环境系统自身的状况是一切评价的基础，在此基础上，一个生态环境系统安全的最终判断标准是在人类需求与生态环境系统所提供的服务之间的交界面上进行的，也就是说，人类需求与生态环境系统服务之间的互动关系决定生态环境系统的安全程度。从这个角度理解，生态环境系统安全的核心就是通过维护与保护生态环境系统服务功能来保护人类需求，评价生态环境系统安全就是要评价生态环境系统服务功能对人类需要的满足程度，或者说是为满足人类需求生态环境系统服务功能的实现情况<sup>[39]</sup>。因此，评价指标体系的建立充分考虑评价因子的生态系统服务功能，务求精准。

#### 3.3.1 评价指标设置和选择的原则

生态安全检查的指标体系建立应该充分体现出生态安全的现状与水平，除了要考虑符合统计学的基本规范，同时也要考虑遵循以下几方面的原则：

(1) 资料收集的可行性和可操作性：这是保证评价工作顺利进行的先决条件，指标体系应该尽可能简化，计算方法简单，数据易于获得。

(2) 时空敏感性：区域生态安全评价跨越较大的时间尺度，其评价标准既要反映目前的要求，又要反映未来各个不同时期的要求。

(3) 科学性<sup>[39]</sup>：这是确保评价结果准确合理的基础。生态安全评价活动是否科学很大程度上依赖其指标、标准、程序等方法是否科学。指标体系的科学性包括以下 4 个方面：1) 特征性。指标应反映评估对象的特征；2) 准确一致性。指标的概念要正确，含义要清晰，尽可能避免或减少主观判断，对难以量化的评估因素应采用定性和定量相结合的方法来设置指标。指标体系内部各指标之间应协调统一，指标体系的层次结构应合理；3) 完备性。指标体系应围绕评估目的，全



面反映评估对象，不能遗漏重要方面或有所偏颇，否则评估结果就不能真实、全面地反映备评估对象；4) 独立性。指标体系中各指标之间不应有很强的相关性，不应出现过多的信息包含、涵盖而使指标内涵重叠。

(4) 有针对性：指标体系应是对评估对象的本质特征、结构及其构成要素的客观描述，应为评估活动目的服务，针对评估任务的要求，指标体系应能够支撑更高层次的评估准则，为评估结构的判定提供依据。有针对性原则是建立指标体系的出发点和根本，衡量指标体系是否合理有效的一个重要标准是看是否满足评估目的。

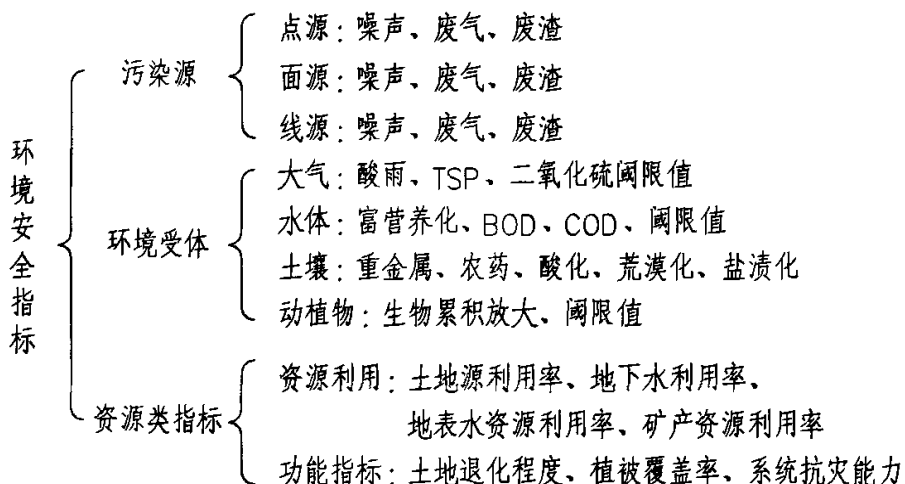
(5) 实用性：建立指标体系应考虑到现实的可能性，指标体系应符合国家政策，应适应于指标使用者对指标的理解接受能力和判断能力，适应于信息基础。生态安全评价活动是实践性很强的工作，指标体系的实用性是确保评估活动实施效果的重要基础。具体地，指标体系实用性包括以下 2 方面：1) 易于理解。在评估过程和评估结果使用中往往涉及多方面的人员，如评估者、咨询专家、管理者、决策者和公众，指标应易于理解，以保证评估判定及其结果交流的准确性和高效性；2) 适应于评估信息基础。与指标相关的信息应具有可采集性，并且可以通过各种方法进行结构化。

### 3.3.2 评价指标体系的构成

从生态安全评价指标体系内涵上看，流域生态安全评价指标体系应包括环境安全、生物安全及生态系统安全的指标内容。<sup>[6]</sup>

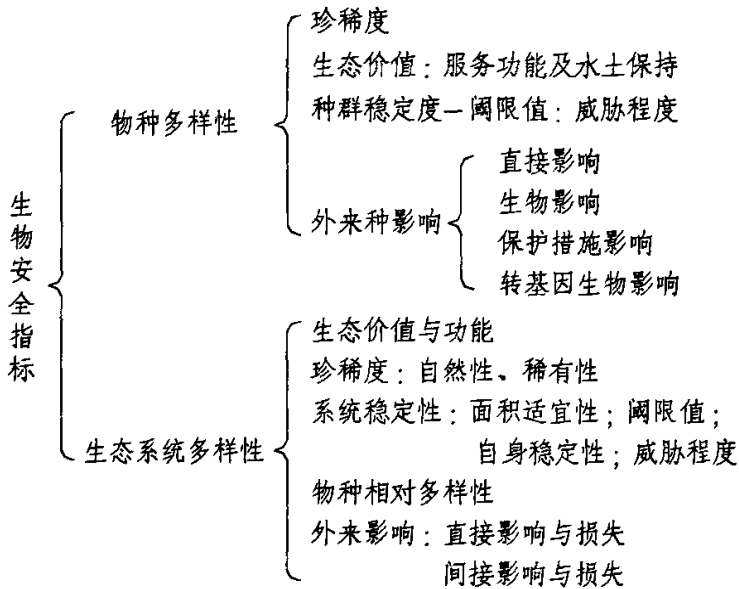
#### (1) 环境安全指标

环境安全指标至少包括污染源、环境受体、资源类指标三个部分。



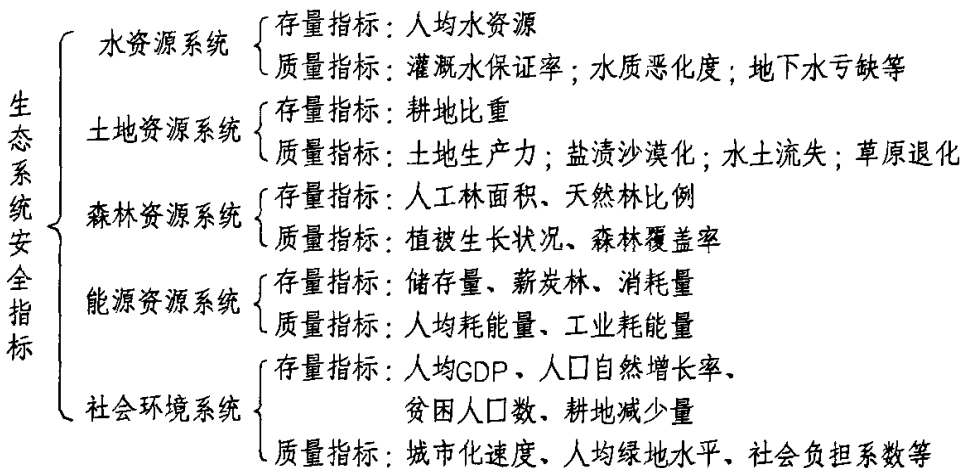
(2) 生物安全指标

生物安全的指标可以从生态系统的完整性及生物多样性上加以体现。



(3) 生态系统安全性指标

生态系统安全性指标的建立需要考虑多种因子的作用与影响特征, 因此必须建立相关的影响特征指标体系。



生态系统安全性的指标主要体现在由环境安全和食物安全所驱动下造成的人地系统变化动态, 也是一种社会行为的驱动下的效应, 从而产生许多不利影响。

### 3.3.3 龙河流域生态安全评价指标体系的建立

以P-S-R概念模型为基础框架,根据层次分析思想,将选取的评价因子进行整合分析,形成一个层次分明的结构,并以此为依据建立评价指标体系。

按照P-S-R的框架,龙河流域生态安全评价指标体系由三个子系统组成:

(1) 压力子系统: 综前所述,由于人类活动的干扰,直接或间接影响龙河流域生态环境系统,其压力主要来自土地、水资源及人口,因此这三者构成评价指标体系的压力子系统;

(2) 状态子系统: 龙河流域生态系统是一个复合生态系统,其状态应当包括自然生态系统状态和社会经济系统状态。

(3) 响应子系统: 面对各种各样的生态安全的压力,生态系统必然有所反应,主要来自部门采取的应对措施手段。

在以上三个系统的基础上,建立四个层次结构的评价指标体系,包括目标层、准则层、要素层和指标层。(见表3.1)

表3.1 龙河流域生态安全评价指标层次结构

Table 3.1 Hierarchical structure for indices system of ecological security evaluation for Longhe river watershed

目标层 (O)	准则层 (A)	要素层 (B)	指标层 (C)
龙河流域生态安全综合指数	压力子系统 (A1)	土地压力 (B1)	人均耕地 (C1)
			土地垦殖指数 (C2)
			水土流失率 (C3)
		水资源压力 (B2)	人均水资源拥有量 (C4)
			亩均农业灌溉用水量 (C5)
			水体污染指数 (C6)
			河流断流比 (C7)
		人口压力 (B3)	人口密度 (C8)
			人口自然增长率 (C9)
			人类干扰指数 (C10)
	状态子系统 (A2)	自然生态系统状态 (B4)	森林覆盖率 (C11)
			草地覆盖率 (C12)
			城镇生态系统覆盖率 (C13)
			农田生态系统覆盖率 (C14)
			水域覆盖率 (C15)
		社会经济系统状态 (B5)	人口素质指数 (C16)
			经济发展总体水平 (C17)
			城镇工矿企业比例 (C18)
	响应子系统 (A3)	部门响应 (B6)	污水处理率 (C19)
			固体废弃物处理率 (C20)
			生态保护投入占GDP百分比 (C21)

下面就部分指标及其计算方法进行说明:

人均耕地 (C1):  $(\text{耕地面积}/\text{总人口}) \times 100$

土地垦殖指数 (C2):  $(\text{耕地面积}/\text{土地总面积}) \times 100$

水土流失率 (C3):  $(\text{水土流失面积}/\text{流域总面积}) \times 100$

人均水资源拥有量 (C4):  $(\text{可利用水资源总量}/\text{总人口}) \times 100$

亩均农业灌溉用水量 (C5):  $(\text{灌溉用水总量}/\text{农业用地总量}) \times 100$

水体污染指数 (C6): (水质未达标河段长度/流域总长)  $\times 100$

人类干扰指数 (C10): [(耕地面积+建设用地面积)]  $\times 100$

城镇生态系统覆盖率 (C13): [(工矿城镇用地+交通过地)]  $\times 100$

农田生态系统覆盖率 (C14): (耕地面积/土地总面积)  $\times 100$

人口素质指数 (C16): (高中以上文化程度人口数/总人口数)  $\times 100$

经济发展总体水平 (C17): 设R1为人均GDP指数, 其值为某一区域人均GDP与上一级区域人均GDP之比。R2为密度指数, 其值为一区域GDP密度与上一级区域GDP密度之比, 则经济发展总体水平<sup>[41]</sup>:  $\delta = \sqrt{R1/R2}$

### 3.4 评价标准的确定

生态安全的评价涉及不同对象与层次, 因此评价标准的选择上也有所不同, 通常要设定一定的判别基准与理想状态作为指标值, 以是否达到标准要求作为项目与安全可行与否的基本度量。

建立评价标准, 即建立一套衡量生态环境质量的定量参照系。参照系是为了观察某一物体的运动状态, 选取相对运动的一物体或一组物体作标准。参照系不同, 人们观察事物运动状态的结果就会不同; 同时这一参照系的确立科学与否, 将直接影响到人们对事物运动状态的认识和价值趋向。

生态安全评价标准应该能够满足下述要求<sup>[40]</sup>:

- (1) 能反映生态与环境安全质量的优劣, 特别是能够衡量生态环境功能的变化;
- (2) 能反映生态安全及环境受影响的范围和程度, 尽可能量化;
- (3) 能用于生态安全建设与保护行为方式具有可操作性。

目前生态安全评价标准尚无统一标准, 由于低于差异、环境目标、生态类型的不同, 各地区选择的评价标准也不尽相同。本文在选择评价目标时考虑了以下几个方面<sup>[6]</sup>:

- (1) 国家、行业 and 地方的标准。如国家已经发布的环境质量标准, 行业发布的评价规范、规定、设计邀请等, 地方政府颁布的标准和规划区目标、河流域保护要求、特别区域的保护要求等。
- (2) 背景与底值。采用龙河流域生态环境的背景值和本底值作为评价标准。
- (3) 类比标准。以未受到人类人类干扰的生态安全度高的相似生态系统, 环境或以相似自然条件下的原先自然生态系统作为类比标准。这类标准需根据评价内容和要求科学地选择。
- (4) 制定目前的生态效应程度。通过当地或相似条件下科学研究已判定的保障生态安全的绿化率要求、污染物在生物体内的最高允许量, 敏感与濒

危生物的环境质量要求,也可以作为生态安全与环境影响的评价参考标准。

### 3.5 生态安全状态分级

划分评价等级是为了确定评价工作的深度和广度,体现生态建设与环境开发项目的生态、环境安全的影响程度和保护的要求程度。<sup>[40]</sup>

#### 3.5.1 等级划分原则

评价等级的划分一般遵从以下原则<sup>[6]</sup>:

##### (1) 人类活动与建设项目

人类的活动与建设项目均会导致环境、生物及原有生态系统的破坏,有些破坏可以恢复,有些则是不可恢复的。因此可以将判别生态安全及生态环境影响性质,建立在生态安全、生态环境功能变化的基础上。凡生态环境功能可恢复者,其影响为可逆的;而生态环境及生态安全功能不可恢复者,其影响性质为不可逆的若影响性质介于可逆与不可逆之间,或者部分生态功能可以恢复,而部分生态环境与功能不可恢复,此时性质判别须作具体的分析;凡影响区域的生态功能并导致主要功能不可逆变化,应按不可逆性对待;二是看是否影响到特别重要或有特别保护要求的生态功能,凡造成这类特殊改变者均按不可逆性看待;三是看影响涉及的面,凡是因某种功能影响涉及很多其他环境、生物、系统功能的也按照不可逆性变化性质看待。

##### (2) 影响程度的判别

影响程度的判别依据主要是人类开发建设项目及其活动持续时间的影响所涉及范围等。由于同样的影响施加在不同的对象上,其响应可能是很不相同的,所以影响程度的判别还包括受影响生态系统的特征,即评价区域的生态环境状况,如生态系统是脆弱的还是稳定的,可恢复能力强还是弱,受影响因子是主要因子还是次要因子。

#### 3.5.2 龙河流域生态安全评价等级划分

生态安全指数有些值越大越安全,有些则相反,本文将各指数统一为安全指数越大,生态安全质量状况就越好。为了直观、简洁的表述生态安全状态,将各评价单元的各子系统和复合生态系统的生态安全指数按 10 分制标准进行归一化处理,然后拟分理想、良好、一般、较差、恶劣五个等级确定生态安全状态,该分级结果将作为生态安全预警的主要度量基础<sup>[41]</sup>,具体等级划分见表 3.2。

表 3.2 生态安全状况分级标准

Table 3.2 Grading standards for ecological security state

分级	一级	二级	三级	四级	五级
状态描述	理想状态	良好状态	一般状态	较差状态	恶劣状态
区间值	[10, 8)	[8, 6)	[6, 4)	[4, 2)	[2, 0)
区间代表值	9	7	5	3	1

## 4 龙河流域生态安全状态分析评价

### 4.1 评价指标权重的计算

#### 4.1.1 指标的赋权方法——层次分析法

层次分析法（简称 AHP 法）<sup>[42,43,44]</sup>是由美国运筹学家 T.L.Saaty 于 20 世纪 70 年代提出的一种定量和定性相结合的决策分析方法。它的基本思路是通过分析复杂系统的有关要素及其相互关系，将系统层次化，建立起一个有序的递阶层次系统，然后对系统中各要素进行两两比较判断，构成判断矩阵，计算判断矩阵的最大特征值和它对应的特征向量，从而得出不同要素或评价对象的优劣权重值，为决策和评价提供依据。由于生态环境受多种因素的影响，有很大的模糊性和不确定性，而层次分析法在分析流域生态安全状态这类多目标，多准则的复杂问题时具有一定的优越性。用 AHP 法确定生态安全系统各项指标权重是一种有效的方法，较常规的方法准确，可大大减少随机性。

运用层次分析法确定权重，一般按以下步骤进行：

- (1) 建立递阶层次结构模型；
- (2) 构造判断矩阵；
- (3) 层次单排序及一致性检验；
- (4) 层次总排序及一致性检验。

第一步，构造判断矩阵

层次结构反映了因素之间的关系，但准则层中的各准则在目标衡量中所占的比重并不一定相同。在确定影响某因素的诸因子在该因素中所占的比重时，遇到的主要困难是这些比重常常不易量化。此外，当影响某因素的因子较多时，直接考虑各因子对该因素有多大程度的影响时，常常会因考虑不周全、顾此失彼而使决策者提出与他实际认为的重要性程度不相一致的数据，甚至有可能提出一组隐含矛盾的数据。<sup>[43]</sup>

设现在要比较  $n$  个因子  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  对某因素  $Z$  的影响大小，怎样比较才能提供可信的数据呢？<sup>[44]</sup>Saaty 等人建议可以采取对因子进行两两比较建立成对比较矩阵的办法。两两比较，即每次取两个因子  $x_i$  和  $x_j$ ，以  $a_{ij}$  表示  $x_i$  和  $x_j$  对  $Z$  的影响大小之比，全部比较结果用矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$  表示，称  $A$  为  $Z$ - $X$  之间的成对比较判断矩阵（简称判断矩阵）。容易看出，若  $x_i$  与  $x_j$  对  $Z$  的影响之比为  $a_{ij}$ ，则  $x_j$  与  $x_i$  对

$Z$  的影响之比应为  $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$ 。



这里需要引入正互反矩阵的概念：若矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$  满足  $a_{ij} > 0$ ，且  $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ )，则  $A$  为正互反矩阵（易见  $a_{ii} = 1, i = 1, \dots, n$ ）。

关于如何确定  $a_{ij}$  的值<sup>[44]</sup>，Saaty 等建议引用数字 1~9 及其倒数作为标度。表 4.1 列出了 1~9 标度的含义：

表 4.1 1~9 标度的含义

Table 4.1 Implication of gradation one to nine

标度	含 义
1	表示两个因素相比，具有相同重要性
3	表示两个因素相比，前者比后者稍重要
5	表示两个因素相比，前者比后者明显重要
7	表示两个因素相比，前者比后者强烈重要
9	表示两个因素相比，前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若因素 $i$ 与因素 $j$ 的重要性之比为 $a_{ij}$ ，那么因素 $j$ 与因素 $i$ 重要性之比为 $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$ 。

从心理学观点来看，分级太多会超越人们的判断能力，既增加了作判断的难度，又容易因此而提供虚假数据。Saaty 等人还用实验方法比较了在各种不同标度下人们判断结果的正确性，实验结果也表明，采用 1~9 标度最为合适。<sup>[44]</sup>

最后，应该指出，一般地作  $\frac{n(n-1)}{2}$  次两两判断是必要的。有人认为把所有元素都和某个元素比较，即只作  $n-1$  个比较就可以了。这种作法的弊病在于，任何一个判断的失误均可导致不合理的排序，而个别判断的失误对于难以定量的系统往往是难以避免的。进行  $\frac{n(n-1)}{2}$  次比较可以提供更多的信息，通过各种不同角度的反复比较，从而导出一个合理的排序。<sup>[44]</sup>

构造判断矩阵是整个生态安全评价工作的数据基础。从层次结构模型的准则层 (O) 开始，对从属于上层某一个因素的  $n$  个因素，采用两两比较法确定因素之间的相对重要性，按 1~9 尺度定量化，并依据成对比较法构造出一个  $n$  阶矩阵，直到最下层<sup>[44]</sup>。

## 第二步, 层次单排序及一致性检验

判断矩阵  $A$  对应于最大特征值  $\lambda_{\max}$  的特征向量  $W$ , 经归一化后即为一层次相应因素对于上一层次某因素相对重要性的排序权值, 这一过程称为层次单排序。

上述构造成对比较判断矩阵的办法虽能减少其它因素的干扰, 较客观地反映出一对因子影响力的差别。但综合全部比较结果时, 其中难免包含一定程度的非一致性。如果比较结果是前后完全一致的, 则矩阵  $A$  的元素还应当满足:

$$a_{ij}a_{jk} = a_{ik}, \quad \forall i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (4.1)$$

满足关系式 (4.1) 的正互反矩阵称为一致矩阵。

需要检验构造出来的 (正互反) 判断矩阵  $A$  是否严重地非一致, 以便确定是否接受  $A$ 。可从以下三条定理进行判断。

定理 1 正互反矩阵  $A$  的最大特征根  $\lambda_{\max}$  必为正实数, 其对应特征向量的所有分量均为正实数。 $A$  的其余特征值的模均严格小于  $\lambda_{\max}$ 。

定理 2 若  $A$  为一致矩阵, 则

(i)  $A$  必为正互反矩阵。

(ii)  $A$  的转置矩阵  $A^T$  也是一致矩阵。

(iii)  $A$  的任意两行成比例, 比例因子大于零, 从而  $\text{rank}(A)=1$  (同样,  $A$  的任意两列也成比例)。

(iv)  $A$  的最大特征值  $\lambda_{\max} = n$ , 其中  $n$  为矩阵  $A$  的阶。 $A$  的其余特征根均为零。

(v) 若  $A$  的最大特征值  $\lambda_{\max}$  对应的特征向量为  $W = (w_1, \dots, w_n)^T$ , 则  $a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$ ,  $\forall i, j = 1, 2, \dots, n$ , 即

$$A = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

定理 3  $n$  阶正互反矩阵  $A$  为一致矩阵当且仅当其最大特征根  $\lambda_{\max} = n$ , 且当正互反矩阵  $A$  非一致时, 必有  $\lambda_{\max} > n$ 。

根据定理 3, 我们可以由  $\lambda_{\max}$  是否等于  $n$  来检验判断矩阵  $A$  是否为一致矩阵。由于特征根连续地依赖于  $a_{ij}$ , 故  $\lambda_{\max}$  比  $n$  大得越多,  $A$  的非一致性程度也就越严重,  $\lambda_{\max}$  对应的标准化特征向量也就越不能真实地反映出  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  在对因素  $Z$  的影响中所占的比重。因此, 对决策者提供的判断矩阵有必要作一次一致性检验, 以决定是否接受它。

对判断矩阵的一致性检验的步骤如下：

(i) 计算一致性指标  $CI$ ：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4.3)$$

(ii) 查找相应的平均随机一致性指标  $RI$ 。对  $n=1, \dots, 9$ ，Saaty 给出了  $RI$  的值，如下表所示：

表 4.2  $RI$  值查询表

Table 4.2 Polling list for the data of  $RI$

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$RI$	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

$RI$  的值是这样得到的，用随机方法构造 500 个样本矩阵：随机地从 1~9 及其倒数中抽取数字构造正互反矩阵，求得最大特征根的平均值  $\lambda'_{\max}$ ，并定义：

$$RI = \frac{\lambda'_{\max} - n}{n - 1} \quad (4.4)$$

(iii) 计算一致性比例  $CR$ ：

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4.5)$$

当  $CR < 0.10$  时，认为判断矩阵的一致性是可以接受的，否则应对判断矩阵作适当修正。

第三步，层次总排序及一致性检验

上面我们得到的是一组元素对其上一层中某元素的权重向量。我们最终要得到各元素，特别是最低层中各方案对于目标的排序权重，从而进行方案选择。总排序权重要自上而下地将单准则下的权重进行合成。

设上一层次 ( $A$  层) 包含  $A_1, \dots, A_m$  共  $m$  个因素，它们的层次总排序权重分别为  $a_1, \dots, a_m$ 。又设其后的下一层次 ( $B$  层) 包含  $n$  个因素  $B_1, \dots, B_n$ ，它们关于  $A_j$  的层次单排序权重分别为  $b_{1j}, \dots, b_{nj}$  (当  $B_i$  与  $A_j$  无关联时， $b_{ij} = 0$ )。现求  $B$  层中各因素关于总目标的权重，即求  $B$  层各因素的层次总排序权重  $b_1, \dots, b_n$ ，计算按下表所示方式进行，即  $b_i = \sum_{j=1}^m b_{ij} a_j$ ， $i=1, \dots, n$ 。

表 4.3 总排序权值计算表

Table 4.3 Calculation for weight coefficient of total sequencing

层 B \ 层 A	$A_1$	$A_2$	...	$A_m$	B 层总排序权值
	$a_1$	$a_2$	...	$a_m$	
$B_1$	$b_{11}$	$b_{12}$	...	$b_{1m}$	$\sum_{j=1}^m b_{1j}a_j$
$B_2$	$b_{21}$	$b_{22}$	...	$b_{2m}$	$\sum_{j=1}^m b_{2j}a_j$
$\vdots$	...	...	...	...	$\vdots$
$B_m$	$b_{m1}$	$b_{m2}$	...	$b_{mm}$	$\sum_{j=1}^m b_{mj}a_j$

对层次总排序也需作一致性检验，检验仍象层次总排序那样由高层到低层逐层进行。这是因为虽然各层次均已经过层次单排序的一致性检验，各成对比较判断矩阵都已具有较为满意的一致性。但当综合考察时，各层次的非一致性仍有可能积累起来，引起最终分析结果较严重的非一致性。

设  $B$  层中与  $A_j$  相关的因素的成对比较判断矩阵在单排序中经一致性检验，求得单排序一致性指标为  $CI(j)$ ，( $j=1, \dots, m$ )，相应的平均随机一致性指标为  $RI(j)$  ( $CI(j)$ 、 $RI(j)$  已在层次单排序时求得)，则  $B$  层总排序随机一致性比例为：

$$CR = \frac{\sum_{j=1}^m CI(j)a_j}{\sum_{j=1}^m RI(j)a_j} \tag{4.6}$$

当  $CR < 1.0$  时，认为层次总排序结果具有较满意的一致性并接受该分析结果。

#### 4.1.2 龙河流域生态安全评价指标权重的确定

本文需要建立的层次结构模型已在前一章进行了说明（见表 3.1），本章将对采集到的数据按后续的步骤进行具体的分析，即确定各评价指标的权重。

##### (1) 构造判断矩阵

本文对龙河流域生态安全评价指标体系各指标间的层次结构关系进行判断比较，分别构造  $O-A$  及  $A_1-B$ 、 $A_2-B$ 、 $A_3-B$ 、 $B_1-C$ 、 $B_2-C$ 、 $B_3-C$ 、 $B_4-C$ 、 $B_5-C$ 、 $B_6-C$  这 10 个判断矩阵。

##### (2) 计算各指标权重系数

分别计算以上 10 个矩阵的特征值和特征向量，每个特征向量即为构造矩阵中各指标的权重系数。

(3) 对判断矩阵进行一致性检验

与其它确定指标权重系数的方法相比，AHP 方法的最大优点在于通过一致性检验，保持专家思想逻辑上的一致性。所谓判断思维的一致性是指专家在判断指标重要性时，当出现 3 个以上的指标互相比时，各判断之间协调一致，不会出现内部相互矛盾的结果。根据公式 (4.3) (4.4) 和 (4.5) 进行一致性检验，均满足一致性条件。(表 4.4~表 4.13)

表 4.4 判断矩阵 O-A

Table 4.4 Judgement matrix of O-A

O	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	W <sub>i</sub>
A <sub>1</sub>	1	5	4	0.683
A <sub>2</sub>	0.20	1	0.50	0.117
A <sub>3</sub>	0.25	2	1	0.200

$\lambda_{max} = 3.025, CI = 0.012, CR = 0.021$

表 4.5 判断矩阵 A<sub>1</sub>-B

Table 4.5 Judgement matrix of A<sub>1</sub>-B

A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	W <sub>i</sub>
B <sub>1</sub>	1	0.50	0.50	0.196
B <sub>2</sub>	2	1	2	0.493
B <sub>3</sub>	2	0.50	1	0.311

$\lambda_{max} = 3.054, CI = 0.027, CR = 0.046$

表 4.6 判断矩阵 A<sub>2</sub>-B

Table 4.6 Judgement matrix of A<sub>2</sub>-B

A <sub>2</sub>	B <sub>4</sub>	B <sub>5</sub>	W <sub>i</sub>
B <sub>4</sub>	1	0.5	0.333
B <sub>5</sub>	2	1	0.667

$\lambda_{max} = 2.000, CI = 0, CR = 0$

表 4.7 判断矩阵 A<sub>3</sub>-B

Table 4.7 Judgement matrix of A<sub>3</sub>-B

A <sub>3</sub>	B <sub>6</sub>	W <sub>i</sub>
B <sub>6</sub>	1	1

$\lambda_{max} = 1, CI = 0, CR = 0$

表 4.8 判断矩阵 B<sub>1</sub>-C

Table 4.8 Judgement matrix of B<sub>1</sub>-C

B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	W <sub>i</sub>
C <sub>1</sub>	1	2	0.5	0.311
C <sub>2</sub>	0.5	1	0.5	0.196
C <sub>3</sub>	2	2	1	0.493

Table 4.9 Judgement matrix of B<sub>2</sub>-C

B <sub>2</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	W <sub>i</sub>
C <sub>4</sub>	1	1	0.50	1	0.125
C <sub>5</sub>	1	1	0.50	1	0.125
C <sub>6</sub>	2	2	1	2	0.500
C <sub>7</sub>	1	1	0.5	1	0.250

$$\lambda_{\max} = 3.054, CI = 0.027, CR = 0.046$$

$$\lambda_{\max} = 4.000, CI = 0, CR = 0$$

表 4.9 判断矩阵 B<sub>2</sub>-C表 4.10 判断矩阵 B<sub>3</sub>-CTable 4.10 Judgement matrix of B<sub>3</sub>-C

B <sub>3</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>9</sub>	C <sub>10</sub>	W <sub>i</sub>
C <sub>8</sub>	1	0.50	0.50	0.20
C <sub>9</sub>	2	1	1	0.40
C <sub>10</sub>	2	1	1	0.40

$$\lambda_{\max} = 3.000, CI = 0, CR = 0$$

表 4.11 判断矩阵 B<sub>4</sub>-CTable 4.11 Judgement matrix of B<sub>4</sub>-C

B <sub>4</sub>	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>13</sub>	C <sub>14</sub>	C <sub>15</sub>	W <sub>i</sub>
C <sub>11</sub>	1	1	2	2	0.50	0.213
C <sub>12</sub>	1	1	2	2	0.50	0.213
C <sub>13</sub>	0.50	0.50	1	1	0.50	0.123
C <sub>14</sub>	0.50	0.50	1	1	0.50	0.123
C <sub>15</sub>	2	2	2	2	1	0.329

$$\lambda_{\max} = 5.078, CI = 0.019, CR = 0.017$$

表 4.12 判断矩阵 B<sub>5</sub>-C

Table 4.12 Judgement matrix of B<sub>5</sub>-C

B <sub>5</sub>	C <sub>16</sub>	C <sub>17</sub>	C <sub>18</sub>	W <sub>i</sub>
C <sub>16</sub>	1	0.25	2	0.208
C <sub>17</sub>	4	1	4	0.661
C <sub>18</sub>	0.50	0.25	1	0.131

表 4.13 判断矩阵 B<sub>6</sub>-C

Table 4.13 Judgement matrix of B<sub>6</sub>-C

B <sub>6</sub>	C <sub>19</sub>	C <sub>20</sub>	C <sub>21</sub>	W <sub>i</sub>
C <sub>19</sub>	1	1	0.25	0.167
C <sub>20</sub>	1	1	0.25	0.167
C <sub>21</sub>	4	4	1	0.667

$$\lambda_{\max} = 3.054, CI = 0.027, CR = 0.046$$

$$\lambda_{\max} = 3.000, CI = 0, CR = 0$$

#### (4) 组合权重计算

根据表 4.3 及公式 4.6, 由上述求得特征向量值自上而下逐层计算组合权重并作一致性检验, 即可得到 A、B、C 层对 O 层目标层的权重系数, 完成层次总排序。经过总排序后, 各层中单个指标相对目标层的权重系数见表 4.14 及表 4.15。

表 4.14 A—B 层总排序

Table 4.14 Total sequencing of A-B

O	A1	A2	A3	B 层总排序 权值
B1	0.196	0.000	0.000	0.134
B2	0.493	0.000	0.000	0.337
B3	0.311	0.000	0.000	0.212
B4	0.000	0.333	0.000	0.039
B5	0.000	0.667	0.000	0.078
B6	0.000	0.000	1.000	0.200

$$CR = 0.046 < 0.10$$

表 4.15 B—C 层总排序

Table 4.15 Total sequencing of B-C

O	B1	B2	B3	B4	B5	B6	C 层总排序权值
	0.134	0.337	0.212	0.039	0.078	0.200	
C1	0.311	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.042
C2	0.196	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.026
C3	0.493	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.066
C4	0.000	0.125	0.000	0.000	0.000	0.000	0.042
C5	0.000	0.125	0.000	0.000	0.000	0.000	0.042
C6	0.000	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.168
C7	0.000	0.250	0.000	0.000	0.000	0.000	0.084
C8	0.000	0.000	0.200	0.000	0.000	0.000	0.042
C9	0.000	0.000	0.400	0.000	0.000	0.000	0.085
C10	0.000	0.000	0.400	0.000	0.000	0.000	0.085
C11	0.000	0.000	0.000	0.213	0.000	0.000	0.008
C12	0.000	0.000	0.000	0.213	0.000	0.000	0.008
C13	0.000	0.000	0.000	0.123	0.000	0.000	0.005
C14	0.000	0.000	0.000	0.123	0.000	0.000	0.005
C15	0.000	0.000	0.000	0.329	0.000	0.000	0.013
C16	0.000	0.000	0.000	0.000	0.208	0.000	0.016
C17	0.000	0.000	0.000	0.000	0.661	0.000	0.052
C18	0.000	0.000	0.000	0.000	0.131	0.000	0.010
C19	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.167	0.033
C20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.167	0.033
C21	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.667	0.133

$$CR = 0.009 < 0.10$$

根据上述两表的结果可以看出，A、B、C层相对于目标层的总排序随机一致性比例CR均小于0.10，符合一致性检验要求，即该总排序结果具有较满意的一致性，以上权重分析过程可以接受。

表 4.16 列出了龙河流域生态安全评价指标权重系数。



表4.16 龙河流域生态安全评价指标权重

Table 4.16 Weight coefficient for indices system of ecological security evaluation  
for Longhe river watershed

目标层 (O)	准则层 (A)	准则层 权重	要素层 (B)	要素层 权重	指标层 (C)	指标层 权重
龙河流域生态安全综合指数	压力子系统 (A1)	0.683	土地压力 (B1)	0.134	人均耕地 (C1)	0.042
					土地垦殖指数 (C2)	0.026
					水土流失率 (C3)	0.066
			水资源压力 (B2)	0.337	人均水资源拥有量 (C4)	0.042
					亩均农业灌溉用水量 (C5)	0.042
					水体污染指数 (C6)	0.168
					河流断流比 (C7)	0.084
			人口压力 (B3)	0.212	人口总数 (C8)	0.042
					人口密度 (C9)	0.085
					人类干扰指数 (C10)	0.085
	状态子系统 (A2)	0.117	自然生态系统状态 (B4)	0.039	森林覆盖率 (C11)	0.008
					草地覆盖率 (C12)	0.008
					城镇生态系统覆盖率 (C13)	0.005
					农田生态系统覆盖率 (C14)	0.005
					水域覆盖率 (C15)	0.013
			社会经济系统状态 (B5)	0.078	人口素质指数 (C16)	0.016
					经济发展总体水平 (C17)	0.052
	响应子系统 (A3)	0.200	部门响应 (B6)	0.200	污水处理率 (C19)	0.033
					固体废弃物处理率 (C20)	0.033
					生态保护投入占GDP百分比 (C21)	0.133

## 4.2 数据的采集、处理

数据采集自龙河流域各区县统计资料、当地环境保护部门提供的数据及相关规划, 主要以 2003—2004 年度的资料为参考。所有数据根据评价指标体系的要求进行处理, 使经过处理的指标数值范围在  $[0, 1]$ 。

### 4.2.1 龙河流域水系分布

龙河是位于三峡库区的典型激流山地河流，沿方斗山和七曜山夹槽与两山呈平行状，龙河的支流基本从方斗山和七曜山山地沿夹槽向内流下汇入干流，是集多级发电、灌溉、旅游、渔业于一体的河流。根据实地调查和资料收集，龙河发源于石柱县冷水乡李家湾，流经沙子镇、中益乡（汇入一条支流）、桥头乡（悦峡河汇入）、三河乡（纳蚕溪河、龙沙河）、南宾镇（纳双庆河、石梁河、菜地坝河、牛石嵌河）、下路镇（纳四龙溪河），进入丰都县江池镇。石柱县境内支流情况：悦峡河发源于黄水镇，经悦峡镇（一支流从鱼池镇流来汇入）、三益乡、桥头乡汇入龙河，龙沙河从龙沙镇流经大歇乡于三河乡汇入龙河，石梁河从六塘乡于南宾镇汇入龙河，四龙溪河从三星乡于下路镇汇入龙河；丰都境内龙河流经江池镇（纳江池河、五龙河）、龙河镇（纳石马河）、栗子乡（纳暨龙河）、三建乡（纳双鹰河）、南天湖镇（纳董家河）、双路镇、包鸾镇、三合镇（纳包鸾河），最后经双路镇葫芦溪口注入长江。由此绘制龙河河流系统水系图，如图 4.1。



图 4.1 龙河河流系统水系图

Fig.4.1 Water system of Longhe river

#### 4.2.2 龙河河流系统特性

河流系统流域的主要特征包括流域面积的大小、流域形状、流域的长度和宽度、流域的不对称系数、流域的河流密度等。<sup>[45]</sup>

(1) 龙河流域面积  $F$  ( $\text{km}^2$ )：根据龙河流域内行政区划划分，在地形图上定出流域分水线，量出其包围的面积，统计计算得龙河全流域面积  $2910\text{km}^2$ 。

(2) 龙河流域的长度  $L$  ( $\text{km}$ )：流域的长度也就是流域的轴长，即以河口为中心作同心圆，在同心圆与流域分水线相交处绘出许多割线，各割线中点的连线即为流域长度；若流域形状不甚弯曲，通常也有采用河源到河口的直线或干流长度来代替的。龙河流域长度采用干流长度代替，为  $140\text{km}$ ；龙河流域各主要支流长度通过地形图按照比例计算如表 4.17。按照龙河干流流经方向大致呈由西向东的走向，将由北边汇入干流的支流称为左岸支流，由南边汇入干流的支流称为右岸支流。

表 4.17 龙河流域主要支流情况

Table 4.17 the main branches of Longhe river watershed

河流名称		河流长度 (km)	流域面积 (km <sup>2</sup> )	多年均流量 (m <sup>3</sup> /s)	
干流	龙河	140	1337.5	28.0	
石柱县支流	悦嵘河 (左岸)	36.8	255.9	2.9	
	蚕溪河 (右岸)	21.9	104.2	1.1	
	龙沙河 (左岸)	25.6	123.0	1.3	
	石梁河 (右岸)	18.2	52.7	0.6	
	菜地坝河 (左岸)	18.0	64.9	0.7	
	四龙溪河 (右岸)	36.8	144.2	1.8	
	双庆河 (右岸)	19.4	65.2	0.7	
	官田河 (左岸)	17.8	82.9	1.1	
丰都县支流	董家河 (右岸)	15.5	60.5	1.31	
	石马河 (右岸)	19.1	111	2.12	
	暨龙河 (右岸)	28.7	253	5.99	
	双鹰河 (右岸)	19	105	2.11	
	包鸾河 (右岸)	28.5	150	3	
合计		445.3	总计	2910	—
			左岸	526.7	—
			右岸	1045.8	—

注：左右岸流域面积统计不包括龙河干流流域

Table 0.7 龙河流域平均宽度 B (km)：流域面积与流域长度的比值，即：

$$B = \frac{F}{L} \quad (4.7)$$

式中，B 为流域平均宽度 (km)；F 为流域面积 (km<sup>2</sup>)；L 为流域长度 (km)。龙河流域平均宽度为 20.8km。

Table 0.7 龙河河流密度 u (km/km<sup>2</sup>)：单位面积内的河流总长度称为河流密度，即：

$$u = \frac{L_{\text{总}}}{F} \quad (4.8)$$

式中,  $u$  为河流密度,  $L_{\text{总}}$  为流域河流总长度 (km)。龙河流域河流密度为  $0.153 \text{ km/km}^2$ 。

Table 0.7 龙河流域形状系数  $r$ : 流域平均宽度与流域长度的比值, 即:

$$r = \frac{B}{L} = \frac{F}{L^2} \quad (4.9)$$

式中,  $r$  为流域形状系数。龙河流域形状系数为 0.15。

Table 0.7 龙河流域的不对称系数  $K_0$ : 流域的不对称系数是左右岸面积之差与左右岸面积平均值的比值, 即:

$$K_0 = \frac{|F_{\text{左}} - F_{\text{右}}|}{(F_{\text{左}} + F_{\text{右}})/2} \quad (4.10)$$

式中,  $K_0$  为流域不对称系数;  $F_{\text{左}}$ 、 $F_{\text{右}}$  分别为左、右岸的流域面积 ( $\text{km}^2$ )。龙河流域的不对称系数为 0.66。

流域面积是流域的重要特征, 因为流域面积不仅决定河流的水量, 而且影响径流的形成过程, 在其他条件相同的情况下, 流域面积越大, 河流水量也越大。龙河流域为山地激流小流域, 流域面积小, 如遇强度大的暴雨, 往往会笼罩全流域, 很容易造成特大洪水; 而在枯水季节, 由于地下水补给少, 枯水流量小, 加之流域内水电站较多, 容易发生干断流现象。龙河流域形状系数较小, 形状狭长, 流域干支流径流变化小; 流域长度较小, 流域平均宽度较大, 季节性洪水威胁较大。流域的不对称情况对径流的集流时间与径流情势有很大影响, 龙河流域不对称系数较大, 主要源于来自左岸的方斗山夹槽支流较少, 而进入中游后, 绝大部分支流来自于右岸的七曜山夹槽。另外流域内高差较大, 七曜山源头海拔达到 2000m 左右, 而进入河口段时, 流域高度仅为 200m 左右, 流域高差决定了流域内气温和降水在不同海拔有很大差距; 流域坡度较大, 坡度大于 25 度以上的坡地面积全流域为 148149 亩, 流域坡度大造成流域内水土流失面积大, 河流含沙量大, 河底底泥堆积较多。

### 4.2.3 龙河流域土地利用类型划分

龙河流域土地构成包括耕地、林地、草地、工矿城镇用地、交通用地、水域以及未利用地。其中耕地  $814.80 \text{ km}^2$ , 林地  $1128.21 \text{ km}^2$ , 草地  $289.25 \text{ km}^2$ 、工矿城镇用地  $175.47 \text{ km}^2$ , 交通用地  $20.08 \text{ km}^2$ , 水域  $10.09 \text{ km}^2$ , 未利用地  $472.00 \text{ km}^2$ , 分别占国土面积的 28.00%、38.77%、9.94%、6.03%、0.69%、0.35%、16.22%, 如图 4.2 及图 4.3。

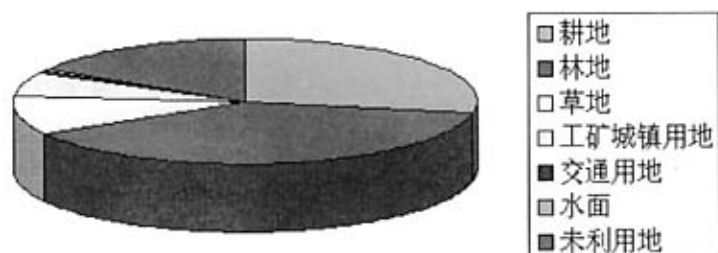


图 4.2 龙河流域土地利用构成

Fig.4.2 The soil utilization composing of Longhe river watershed

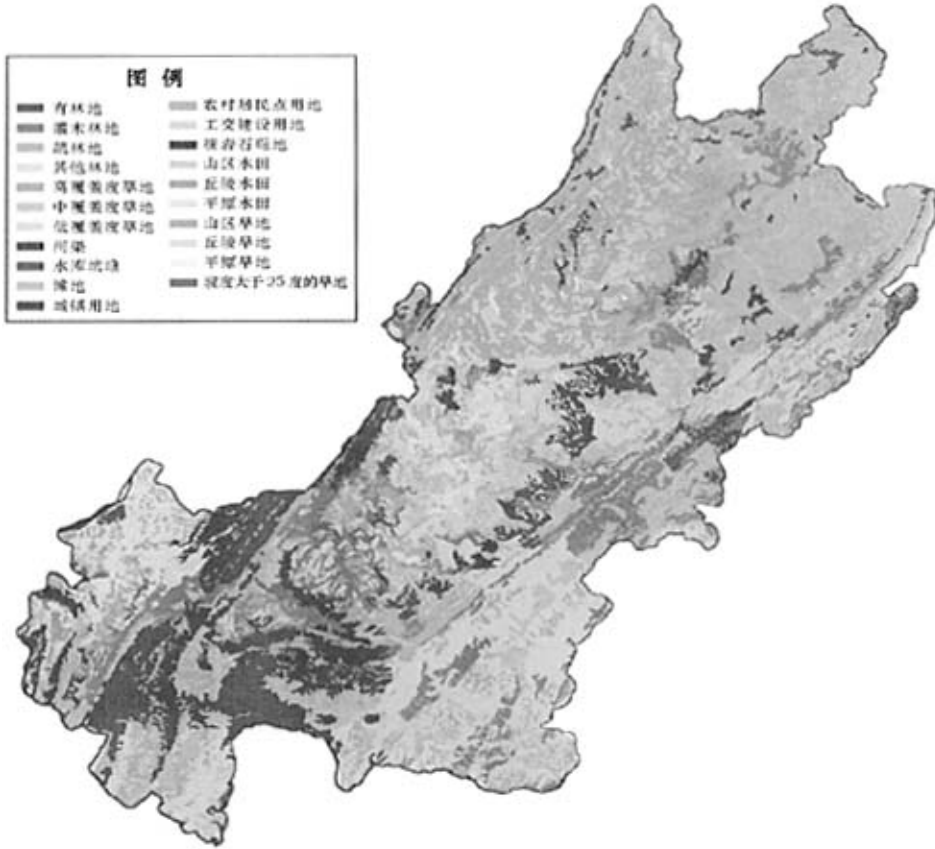


图 4.3 龙河流域土地利用现状

Fig.4.3 The soil utilization actuality of Longhe river watershed

从土地利用类型的划分可以看出，龙河流域自然生态系统包括森林、草地、城镇生态系统、农田生态系统、水域，其中城镇生态系统包括了交通用地和工矿城镇用地。综合分析图 4.2、图 4.3 及相关的资料，龙河流域的森林面积约为 1128.21km<sup>2</sup>、草地面积合计 289.25 km<sup>2</sup>、城镇生态系统面积为 195.55km<sup>2</sup>、农田生态系统的面积为 814.80km<sup>2</sup>，水域 10.09km<sup>2</sup>。

#### 4.2.4 龙河流域水土流失现状

通过对流域地形、地貌和地块的坡度、高程、土壤现状、植被、林草覆盖度等因子进行综合调查分析，龙河流域水土流失面积 1863.92km<sup>2</sup>(其中，石柱境内水

土流失面积 977.63 km<sup>2</sup>，丰都境内水土流失面积 886.29 km<sup>2</sup>)。土壤侵蚀总量按各级土壤侵蚀模数下限计算为 448.53 万 t/a，若按各级平均侵蚀模数计算为 685.517 万 t/a(表 4.18)。

表 4.18 龙河流域水土流失面积 单位: km<sup>2</sup>

Table4.18 The area of soil in Longhe river watershed Unit: km<sup>2</sup>

区域	轻度流失	中度流失	强度流失	极强度流失	小计
石柱县	264.62	557.73	130.03	25.25	977.63
丰都县	221.86	558.04	83.55	22.84	886.29
合计	486.48	1115.77	213.58	48.09	1863.92

#### 4.2.5 人口与经济

至 2004 年末，龙河流域内总人口为 62.5 万人，其中城镇人口 26.30 万人，8.60% 的人口接受高中教育。流域平均人口密度约 215 人/km<sup>2</sup>。

2004 年末，流域内石柱县 GDP 总值 22.22 亿元，其中第一产业占 31.2%，丰都县 GDP 总值为 31.40 亿元，第一产业占 31.7%。该年度重庆市 GDP 总值 2692.81 亿元。

#### 4.2.6 污染治理

为了解决流域内现存的生态环境污染及受到破坏的现状，流域内各区县政府制定了近远期规划，计划用大约 5 年左右时间，使龙河流域内的水污染得到根本治理，使流域内生态环境实现良性循环。具体目标见表 4.19。



表 4.19 龙河流域综合治理规划目标主要指标

Table 4.19 Main index of synthetical disposal target for Longhe river watershed

指标任务		2005-2007 年	2005-2010 年
总体水质标准		III	III
城镇污水处理率 (%)		70	80
城镇生活垃圾无害化处理率 (%)		90	100
城镇污水处理站 (座数, 规模)		4	3
治理水土流失面积 (km <sup>2</sup> )		1080.20	720.14
退耕还林 (万亩)		11.000	7.3331
河岸整治工程河岸整治长度 (km)	干流	12.6	8.4
	支流	21	14
场镇段防洪堤生态绿化工程 (hm <sup>2</sup> )	干流	75.6	50.4
	支流	84	56
河岸生态防护林建设工程 (hm <sup>2</sup> )	干流	2856	2904
	支流	9588	6392
河岸湿地生态系统修复工程 (hm <sup>2</sup> )	干流	168	112
	支流	600.48	400.32

### 4.3 评价结果

将上述采集到的数据、信息进行处理后, 分别得到评价单元的 3 个子系统、6 个亚系统及整个生态系统的生态安全状况。(表 4.20~表 4.22)

表4.20 龙河流域生态安全评价总表

Table 4.20 Total list of ecological security evaluation for Longhe river watershed

指 标	权重	参 值
人均耕地 (C1)	0.042	0.0055
土地垦殖指数 (C2)	0.026	0.0073
水土流失率 (C3)	0.066	0.0423
人均水资源拥有量 (C4)	0.042	0.0112
亩均农业灌溉用水量 (C5)	0.042	0.0026
水体污染指数 (C6)	0.168	0.1344
河流断流比 (C7)	0.084	0.0139
人口总数 (C8)	0.042	0.0263
人口密度 (C9)	0.085	0.0183
人类干扰指数 (C10)	0.085	0.0295
森林覆盖率 (C11)	0.008	0.0031
草地覆盖率 (C12)	0.008	0.0008
城镇生态系统覆盖率 (C13)	0.005	0.0003
农田生态系统覆盖率 (C14)	0.005	0.0014
水域覆盖率 (C15)	0.013	0.0001
人口素质指数 (C16)	0.016	0.0014
经济发展总体水平 (C17)	0.052	0.0520
城镇工矿企业比例 (C18)	0.010	0.0032
污水处理率 (C19)	0.033	0.0231
固体废弃物处理率 (C20)	0.033	0.0297
生态保护投入占GDP百分比 (C21)	0.133	0.0012
综合指数		0.4073
归一化值		4.07
安全等级		一般

表4.21 龙河流域生态安全要素评价结果

Table 4.21 Result of element factor of ecological security evaluation for Longhe river watershed

要素层	评价结果
土地压力 (B1)	0.4112
水资源压力 (B2)	0.4817
人口压力 (B3)	0.3499
自然生态系统状态 (B4)	0.1476
社会经济系统状态 (B5)	0.7207
部门响应 (B6)	0.2732

表4.22 龙河流域生态安全子系统评价结果

Table 4.22 Result of subsystem of ecological security evaluation for Longhe river watershed

准则层	评价结果
压力子系统 (A1)	0.4269
状态子系统 (A2)	0.5300
响应子系统 (A3)	0.2732

## 5 龙河流域生态安全状况评价结果分析及对策

### 5.1 评价计算结果与分析

根据层次分析法对龙河流域生态安全状况进行上述综合评价分析,从总体分析的结果看,龙河流域的生态安全状况不容乐观。根据评价结果,本文深入分析各个评价单元在评价指标体系各层次上生态安全综合指数的影响,从而找出引起不安全的重点因素,为该区域今后的发展规划提供参考。

#### 5.1.1 目标层分析——总体分析

从综合权重计算的结果可以看出,在指标体系所选取的各个因素中,水体的污染指数及环保投资的比重是最大的,也就是说,这两者的影响相对其它的指标更为重要。

可以理解,水作为万物生长不可或缺的重要生命因素,对于整个复合生态系统有着决定性的作用。一旦水体受到污染,超出了它自身的净化能力范围,生活在水中的各种生物的生存受到威胁。这些被污染了水还将进行蒸发、降雨等一系列循环过程,其中的污染因子随之进入了土壤和大气,它们和灌溉用水一起影响着人类的食物。对于一个流域生态系统,水体污染指数这一指标的重要程度的确不容忽视。

“十一五”期间,我国环境保护投入计划达同期国内生产总值(GDP)的1.5%以上;重庆市提出以2005年市政府环保专项资金5000万元为基数,逐年递增10%作为污染防治和提升环保监管能力的资金投入,体现出各级政府对环境保护工作的重视程度。一个地区工农业的发展,势必对其周边环境构成某种程度的影响,但是如何减少其污染物的排放,降低该产业存在的生态安全隐患,不仅要采取相应的技术手段来提高资源利用率,从生产过程中控制污染物的产生,也需要在废弃物排放的末端进行适当的处理措施,因此对环保的投入必不可少。事实上,我国目前对环境保护的投资在GDP所占的比例远远低于发达国家,相当一部分乡镇甚至没有实现生活污水、废弃物的集中处理。

根据龙河流域生态安全评价总表的计算结果,该区域生态安全分值为4.07,从生态安全分级划分来看,是三级安全,即一般状态,但是4.07的分值已经处于三、四级的分界边缘,说明龙河流域的生态安全状况已经受到的威胁,存在安全隐患。

#### 5.1.2 准则层分析——子系统分析

本文对压力、状态、响应三个子系统的影响进行了分析。

从评价权重的计算可以看出,压力子系统对生态安全的影响远远超出了其它两个子系统,由于人类一系列的开发活动参与了生态系统自身的物质循环,对其原有的运动过程形成干扰,引起生态系统的变化,有些人类的活动对生态环境造成破坏性的影响,对生态系统的正常运动秩序构成压力,这些压力完全有能力左右一个生态系统的生态安全状况。对子系统的评价显示龙河流域生态系统的压力指数和状态指数均不理想,说明人们的生活、生产及开发活动已经引起该流域的生态安全处于不稳定的边缘,需要给与高度重视以防止情况更加恶化。

### 5.1.3 要素层分析

与总体分析一样,要素层在权重的计算上也体现出了水资源对整个评价的重要性,该层的权重计算结果显示水资源压力的影响最为重要。而压力子系统的土地压力及人口压力两大要素的分值也偏高,说明整个压力子系统对生态系统的生态安全状况起着关键作用。其次部门响应的分值也较高,无论目下面临的生态问题多么严重,状态多么不理想,只要管理部门能够积极采取切实有效的措施,以减轻已经造成的危机,缓解压力,最终摆脱困境,那么生态安全状况即使处于较差乃至恶劣的等级,也有希望逐渐改善,进入良好状态。

## 5.2 对策及建议

根据龙河流域生态安全评价结果,龙河流域的生态安全状态评分虽然在一般状态的等级范围内,但是已经濒临较差状态的边缘,形势不容乐观。龙河流域位于三峡库区范围内,其生态安全状况对库区的生态环境有着重要的影响。该区域多山地、河流,人口居住较集中,随着人口的增长,社会经济不断发展,对土地及水资源的破坏性开发利用增加,水土流失问题严重,同时该区域对环境治理的力度不足,污水、废弃物未实现100%的处理处置,导致生态环境状况有进一步恶化的趋势。面对上述情况,必须要采取有效的措施以维护龙河流域的生态安全。

本文将根据评价分析的结果,寻找对龙河流域生态安全状态构成威胁的重点因素,结合研究区域的实际情况,主次分明的提出改善和维护该区域生态安全的对策建议。

### 5.2.1 重视水土资源

水土资源对区域生态安全的影响居于首位,从收集到的资料及生态安全评价的结果来看,龙河流域水土流失问题严重,水体污染程度较大,水土资源对该区域的生态安全造成了沉重的压力。因此,维护龙河流域生态安全必须重视水土资源的问题。

#### (1) 加强对水体污染源头的控制

根据石柱县和丰都县的城镇体系规划,考虑到龙河流域流线长、覆盖面积广,水质水量分布较复杂以及当地的经济情况等因素,建议在龙河流域范围内各乡镇修建污水处理厂(站),并且因地制宜的采用经济高效低能耗的处理工艺。争取全区域的污水处理率能够达到90%以上,以确保龙河流域的水体安全,避免对三峡库区的水安全构成威胁。

现有的垃圾处理场不重视对渗滤液的处理,导致渗滤液直接进入水体引起严重污染,建议在对原有垃圾处理场进行渗滤液处理系统改造,新建垃圾场务必考虑渗滤液的收集处理,避免污染物浓度较高的渗滤液对龙河水体环境造成严重的影响。

关闭生产规模小、能耗高、污染严重的“十五小”企业,从源头控制工业污染,建议企业采用清洁生产技术,本着“谁污染谁治理”的原则,加强对工业废水的治理、监督、管理,严禁未经处理达标的工业废水恣意排放。

#### (2) 进行河道底泥清淤工程

河流污染底泥是河流污染的潜在污染源,在河流环境发生变化时,河道污染底泥对上覆水体水质具有明显的影响,尤其是当河流流速增大,底泥起动、再悬浮时,底泥中的营养盐会重新释放出来进入水体,并污染水体环境。因此龙河流域各乡镇段污染底泥的整治势在必行。建议采用清洁有效的环境清淤技术对河道进行疏浚清淤,并妥善处理污染底泥及余水,坚决避免再次污染。此举不仅仅可以改善河流的水环境质量,而且要为河流水生植物恢复创作条件。

#### (3) 有计划有步骤的进行退耕还林还草

流域内存在土地利用不合理的现状,必须加以根治。建议对龙河流域内坡度大于25度以上的坡耕地全部退耕还林还草,预计全流域退耕还林面积148149亩。

退耕还林还草按照三个布局,采取先易后难、先重后轻的顺序稳步推进。首先龙河干、支流地区。这些地区因过渡垦殖,不仅是水土流失的重点地区,而且流失的泥沙直接注入长江,应当作为本流域退耕还林的重点地区。其次,林区坡耕地。对分布在流域东部林区以及方斗山、七曜山山区中的所有急、陡坡耕地全部退耕还林还草。第三,其它地区。凡是大于25度的坡耕地都要有计划有步骤地退耕还林还草。16—25度的坡耕地中,过度开垦的、水土流失严重或易造成水土流失的,以及处于其它生态环境脆弱带附近的也要有计划有步骤地退耕还林还草。

#### (4) 重视水土流失治理

水土流失是目下迫切需要解决的重点问题,通过坡改梯(选择土质较好,坡度小于 $25^{\circ}$ ,交通比较方便,邻近水源的坡耕地修建梯田)、建设水土保持林、封禁治理、修建小型水利水保工程等措施,根据水土流失问题的不同严重程度,对流域按照水土保持重点预防保护区、重点预防监督区、重点治理区进行划分,

重点突出的进行分区治理，即要改善原有的水土流失问题，又要控制新问题的产生，使水土资源得到有效保护和合理开发与利用。建立完善的水土保持预防监督体系和监测网络，遏制人为原因造成的水土流失。

### 5.2.2 适当增加对环境保护的投资

权重计算的结果表明，生态保护投入占 GDP 的百分比对区域生态安全的影响仅次于水土资源，若要解决龙河流域现存的生态危机，必须要重视对环境保护的投资。

龙河流域的生态环境综合治理是一项庞大的系统工程，涉及到水土保持、污染治理、河道整治、河岸带湿地还原、退耕还林等各方面。流域内多支流、多山地，地质情况复杂，不但任务艰巨，而且大大增加了治理的成本。这些资金来源不仅仅从国家的中央财政中拨专款，地方政府也从财政中抽调部分资金，本着“谁投资，谁受益”的原则，鼓励企业、个人投资，积极参与流域生态建设。建立资金保证系统，加强资金管理，合理分配。

根据国内外的经验，如果用于环境保护和生态建设的总投入达到同期 GDP 的 1.5% 左右，就可以控制生态环境的破坏；如果超过 1.5%，就能够改善；低于 1.5%，说明该区域的生态环境将会恶化。而目前龙河流域的环保投入不足 1.0%，可见仍然需要增大投资力度。考虑到龙河流域地理位置的特殊性及对三峡库区生态安全的重大影响，该区域用于环境保护和生态建设的总投入在同期 GDP 所占的比例至少不能低于 1.5%。

### 5.2.3 完善法律体制，加强管理

由于人类的干扰引起了生态环境变化，从而导致潜在的生态不安定，尽管国家已经基本建立起符合国情的生态环境保护法规体系，如环境保护法、水法、森林法、土地法、野生动物保护法、草原法、城市规划法和自然保护区管理条例等一系列法律和行政规章，并制定了相应的配套政策；重庆市也针对本地生态环境特点和主要生态环境问题，制订颁布了一系列地方法规和政策。但是在实际的实施过程中，有些地方为了保全经济利益，盲目纵容破坏生态环境行为。因此，有必要加强立法，促进法律体系的完善，加强管理，真正做到有法可依、有法必依。从法律上杜绝破坏生态环境行为的发生。

建议龙河流域各乡镇加强合作，统一进行对龙河支干流的开发利用活动，共同进行龙河流域生态环境改善和保护的工作，建立一个全流域的可持续发展协调部门，加强各乡镇之间的相互协调与合作，制定统一的法规规范和制约资源开发行为，促进整个龙河流域的可持续发展。

#### 5.2.4 普及环保知识，提高全民意识

流域的可持续发展是一个自上而下和自下而上的双向过程，因而在制定了科学的、合理的可持续发展战略的同时，必须有不同层次、不同领域的单位和公众的积极参与，才能实现全流域的可持续发展。生态环境的保护工作需要全体民众的共同努力，因此有必要对公众进行环保知识的宣传普及，学校增加环保基础知识的教育，社区大力宣传节约能源、爱护环境，政府部门组织各种环保公益活动，提高民众的环保意识，使人们理解和支持环保工作，在日常生活中积极主动的担当起环保卫士的角色。

#### 5.2.5 加快建立“绿色 GDP”核算体系

传统的国民经济核算体系在很大程度上造成了各地区在社会经济发展中盲目追求经济数量的增长，而忽视经济质量的提高和生态环境的改善，导致了目前生态破坏、环境污染和资源枯竭形势严峻。应尽快将生态环境资源的损耗纳入国民经济核算体系——“绿色 GDP”核算体系，并建立相应的考核指标，这样才能有效地评价一个地区的发展，进一步避免生态破坏和环境污染，并促使流域各地区加大生态环境建设的投入，逐步树立起科学的发展观，实现整个流域的可持续发展。

#### 5.2.6 建立区域生态安全监测、评价与预警系统

龙河流域生态安全状况已经处于不安全的边缘，需要尽快建立生态安全体系维护区域生态安全，即从生态安全评价预警系统为基础，形成一个包括安全监测与预警、决策与技术支持，预警和维护一体化的，具有应变能力的生态安全体系，使生态安全维护形成定性定量目标明确，具有充分技术、人力和物力保障，以养护和保育为主，兼有处理突发事件能力的体系。

建立龙河流域生态安全监测、评估与预警系统，加强生态监测站网建设，及时注意流域生态环境状况的动态变化。充分利用现有的气候、水文等基础生态环境监测站，合理布局监测站网，提高站网在空间上和监测对象上的覆盖面。在站网稀疏、监测资料缺乏地区要适当增加布点<sup>[46,47]</sup>。在此基础上，建立生态环境变化的预警系统，未雨绸缪，提高对生态安全事件发生的预见能力，以便采取果断措施，及时加以预防和处理，防患于未然。同时对生态安全建设规划的实施要进行全过程监督，对实施结果要进行认真评估，这样在很大程度上能确保规划顺利实施和执行。



## 6 结论与建议

本论文在深入研究生态安全基本理论的基础上,针对龙河流域的地域特征及存在的主要生态问题,围绕区域生态安全研究的理论框架,建立起龙河流域生态安全评价指标体系,以生态学、流域生态学、山地生态等科学理论为知道,运用多学科交叉的集成分析方法,对龙河流域进行生态安全状况的评价,通过评价结果的综合分析,揭示了区域生态安全的内在运行机制与外界影响过程,比较分析得出影响龙河流域生态安全状态的主次原因,并据此提出维护改善龙河流域生态安全状况的对策。

### 6.1 主要结论

(1) 根据生态安全的国内外研究现状与进展,总结了生态安全的基础理论。包括生态安全的概念与涵义,属性与分类,研究发展历程,生态安全评价的理论与方法。

(2) 深入分析了控制龙河流域生态安全状态发展的内在机制与外界影响,针对存在的主要生态问题建立了龙河流域生态安全评价指标体系。体系由三个子系统四个层次 21 项具体指标构成,三个子系统为压力子系统、状态子系统和响应子系统。四个层次为目标层、准则层、要素层和指标层。

(3) 采用生态学的理论方法结合数学模型对龙河流域进行了生态安全评价研究,结果表明,龙河流域生态安全状况一般,但是已经处于较差状态的边缘,如不加以控制将有恶化的趋势,其中社会经济因素具有重要的影响。这一结论证实了压力—状态—响应的理论框架在生态安全研究领域的适用性。评价结果贴近实际,验证了评价数学模型的适用性与科学性。

(4) 针对综合分析结果,提出了改善维护龙河流域生态安全状态的具体对策。

### 6.2 讨论与建议

流域生态系统安全评价是区域生态安全研究中的一个新的领域。本文以生态安全理论为指导,结合流域生态系统的结构和功能,建立起适合龙河流域多山地特征的生态安全评价指标体系和评价模型。受时间、资料与研究方法等多方面因素的制约,本研究在许多方面需要完善:

(1) 在生态系统安全评价的指标体系的建立上, 由于受目前相关技术水平的制约以及研究资料数据、手段的限制, 本文建立的评价体系不能够全面涵盖相关的指标, 仅在现有资料的基础上进行筛选, 对评价结果会产生一定的偏差。

(2) 本研究只采用了一种评价模型, 虽然取得了较满意的计算结果, 但是未能尝试其它模型方法的运用, 无法进行比较以选取最优化的。本文所采用的评价方法应该还有改进优化的余地。

(3) 资料的获取手段比较单一。遥感 (RS) 及 GIS 技术在许多区域性研究领域被应用, 获得了良好的数据采集效果。本文受条件限制, 无法利用这些先进有效的技术手段进行资料的获取。在以后的工作中, 区域生态安全评价工作应该与上述新技术结合, 为模型的建立提供精准的数据, 将会有益于生态安全评价的发展。

(4) 流域生态系统是动态变化的。因资料有限, 本文对研究区域的评价未考虑时间跨度上的演变, 不能够良好的体现出研究目标的时空变化趋势。

## 致 谢

本学位论文是在导师杨幸副教授的精心指导和悉心关怀下完成的。在整个研究生学习生活中，恩师不仅在专业知识上给予我孜孜不倦的教导，在做人和对待科学研究的态度上，更是以身作则的作出了表率，给予我成长过程中深刻的启迪和影响。从论文的选题、准备到全文的修订，每一阶段都浸透着恩师的心血。在此，谨向恩师致以最诚挚的敬意及最衷心的感谢。

本论文的部分基础资料和数据来源于《龙河流域水污染综合整治规划》，在此向龙河流域规划的项目组的领导、老师和同学表示由衷的感谢。

在几年的学习生活中，还得到了资源及环境科学学院许多领导和老师的热情关心和帮助，在此表达我深深的谢意。

同时感谢我的同门向力、冷寒、任毅以及其他曾经帮助过我各位同学。

感谢所有关心和帮助我的师长、家人、同学和朋友！

衷心地感谢在百忙之中评阅论文和参加答辩的各位专家、教授！

王 辉

二〇〇七年四月 于重庆

## 参 考 文 献

- [1] 陈国阶.论生态安全.重庆环境科学, 2002, 24(3): 1-4.
- [2] 王根绪,程国栋,钱鞠.生态安全评价研究中的若干问题研究.应用生态学报, 2003,14(9):155
- [3] 曲格平.关注生态安全之一:生态环境问题已经成为国家安全的热门话题.环境保护, 2002(5): 3-5.
- [4] Leister R. Brown. Building a society of sustainable development. Beijing: Scientific and Technological Literature Press, 1984
- [5] World Environment and Development Commissions. Our common future. Changchun: Jilin People Press, 1997.
- [6] 杨京平主编.生态安全的系统分析.北京:化学工业出版社. 2002,5
- [7] Westing A H. The environmental component of comprehensive security. Bulletin of Peace Proposals, 1989, 20(2): 129~134
- [8] 程漱兰, 陈焱.高度重视国家生态安全战略.生态经济, 1999, 5: 9~11
- [9] 郭中伟.建设国家生态安全预警系统与维护体系——面对严重的生态危机的对策.科技导报, 2001, 1: 54~55
- [10] 左伟,王桥,王文杰等.区域生态安全评价指标与标准研究.地理学与国土研究, 2002, 18(1): 6
- [11] 左伟,周慧珍,王桥.区域生态安全评价指标体系选取的概念框架研究.土壤, 2003, 1: 2~7
- [12] Rogers, K.S. Ecological security and multinational corporation. 1997
- [13] 曹新向,郭志永,雒海潮.区域土地资源持续利用的生态安全研究.水土保持学报, 2004, 18(4): 192~195
- [14] FAO Proceedings. Land Quality Indicators and Their Use in Sustainable Agriculture and Rural Development, Proceedings of the Workshop organized by the Land and Water Development Division FAO Agriculture Department, 1997, 2: 5
- [15] 曹凤中.中国城市环境可持续发展指标体系研究手册.北京:中国环境科学出版社, 1999, 11
- [16] 贾良清,欧阳志云,赵同谦,王效科.城市生态安全评价研究.生态环境 2004, 13(4): 592-596
- [17] 陈东景,徐中民.西北内陆河流域生态安全评价研究:以黑河流域中游张掖地

- 区为例. 干旱区地理, 2002, 25(3): 219-224.
- [18] Tong C. Review on environmental indicator research. *Research On Environmental Science*. 2000, 13(4): 53
- [19] 何琼等, 区域生态安全评价的 AHP 赋权方法研究, 合肥工业大学学报(自然科学版), 2004.27 (4): 433~437
- [20] 吴开亚等, 生态安全的灰关联评价方法探讨, 安徽农业大学学报, 2004.31(3): 368~371
- [21] 许振文等, 烟台市生态功能分区及生态安全评价, 东北水利水电, 2003.21 (6): 48~51
- [22] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战. *自然资源学报*, 2002, 17(5): 262~269
- [23] Xia Jun, K Tackeuchi. Barriers to sustainable management of water quantity and quality. *Hydrological Science Journal*, 1999, 44(4): 503~505
- [24] 左伟等, 山区县域生态系统安全因子遥感和 GIS 分析——以重庆市忠县为例, 长江流域资源与环境, 2004.13 (6): 604~610
- [25] Dobson J. E. Commentary A conceptual framework for Integrating remote Sensing, GIS, and Geography. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1993, 59(10): 1491~1496
- [26] Chuansheng Liu, Tashpolat Tiyip. Study on the change of yu tian Oasis Landscape Structure based on RS & GIS, *Proceedings of SPIE*, Vol 4890, 2003
- [27] 塔西甫拉提·特依拜等. 基于 3S 技术的绿洲荒漠过渡带生态环境的安全研究. 干旱区资源与环境, 2005, 19(5): 104~109
- [28] 陈求稳, 欧阳志云. 流域生态学及模型系统. *生态学报*, 2005, 25(5): 1184~1192
- [29] 吴刚, 蔡庆华. 流域生态学研究内容的整体表述. *生态学报*. 1998, 18(11): 575~581
- [30] Harris GP. Pattern, process and prediction in aquatic ecology——A limnological view of some general ecological problems. *Freshwater Biology*, 1994, 32: 143~160
- [31] Fisher SG. Pattern, process and scale in freshwater systems: some unifying thoughts. *In Aquatic Ecology: scale pattern and process* (ed. by Giller, P.S., et al). Blackwell Science Ltd. 1994: 575~592
- [32] 蔡庆华, 吴刚, 刘建康. 流域生态学. 水生态系统多样性研究和保护的一个新途径. *科技导报*, 1997, (5): 24~26
- [33] 刘邵权, 陈国阶, 陈治谏. 三峡库区山地生态系统预警. *山地学报*, 2002, 20(6): 302~306

- [34] Yan-Zhi Zhao. Assessing the ecological security of the Tibetan plateau: Methodology and a case study for Lhaze County. *Journal of Environmental Management*, 2006, 80: 120-131
- [35] 秦建成, 高明. 三峡低山丘陵区生态系统安全评价——以重庆忠县为例. *山地学报*, 2004, 22(1): 73-78
- [36] 刘邵权, 陈国阶, 陈治谏. 三峡库区山地生态系统预警. *山地学报*, 2002, 20(3): 302-306
- [37] 陆雍森主编. 环境评价. 上海: 同济大学出版社, 1999, 9
- [38] 肖笃宁等. 论生态安全的基本概念和研究内容. *应用生态学报*, 2002, 13(3): 354-358
- [39] 谢花林, 李波. 城市生态安全评价指标体系与评价方法研究. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2004, 40(10): 705-710
- [40] 吴开业, 何琼, 孙世群. 区域生态安全的主成分投影评价模型及应用. *中国管理科学*, 2003, 12(1): 106
- [41] 邹长新. 内陆河流域生态安全研究——以黑河为例[学位论文]. 南京: 南京气象学院, 2003: 40
- [42] 樊彦芳, 刘凌, 陈星, 熊丽君. 层次分析法在水环境安全综合评价中的应用. *河海大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(9): 512-514
- [43] 张延欣. 系统工程学. 北京: 气象出版社, 1997: 125-134
- [44] 赵焕臣, 许树柏. 层次分析法. 北京: 科学出版社, 1986: 1-43
- [45] 王根绪等. 流域尺度生态水文研究评述. *生态学报*, 2005, 25(4): 892-903
- [46] 吴豪, 许刚, 虞孝感. 关于建立长江流域生态安全体系的初步探讨. *地域研究与开发*, 2001, 20(6): 34-37
- [47] 屈波, 谢世友, 邹红. 三峡库区生态安全问题与对策. *生态环境*, 2004, 13(1): 146-148

## 附 录

作者在攻读硕士学位期间发表的论文目录

- [1] 王辉. 低浓度废水厌氧生物处理的动力学模拟及工程实践. 科技情报开发与经济, 2007 (20), 待刊.