

分类 \_\_\_\_\_

密级 \_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

编号 10736

# 西北師範大學

## 碩士學位論文

### 石羊河流域生態健康研究

研究生姓名: 唐嘉琪

導師姓名、職稱: 石培基 教授

專業名稱: 人文地理學

研究方 向: 城市與區域發展研究

二〇一三年五月

硕士学位论文

**M.D. Thesis**

# 石羊河流域生态健康研究

The Study on ecological health in the  
Shi Yang River Basin

唐嘉琪

**Tang Jiaqi**

西北师范大学

**Northwest Normal University**

# 目 录

摘 要.....	II
Abstract.....	IV
1 前言.....	1
1.1 选题背景.....	1
1.2 选题目的及意义.....	2
1.2.1 选题目的.....	2
1.2.2 研究意义.....	2
2 研究综述.....	4
2.1 生态系统健康研究进展.....	4
2.2 流域生态健康研究进展.....	6
2.3 流域生态健康研究存在的问题.....	9
3 研究内容及思路.....	10
3.1 问题的提出.....	10
3.2 研究内容.....	11
3.3 研究方法.....	12
3.3.1 资料收集.....	12
3.3.2 指标确定.....	13
3.3.3 数据处理.....	14
3.3.4 空间关联性.....	14
3.3.5 健康因子的分布图系.....	15
3.3.6 健康因子协调性分析.....	16
3.4 技术路线.....	16
4 研究区概况.....	18
4.1 石羊河地理位置.....	18
4.2 自然地理概况.....	18
4.2.1 地质地貌.....	18
4.2.2 气候特点.....	19
4.2.3 水文与水资源.....	20
4.3 社会经济概况.....	21

5 石羊河流域生态健康分析.....	22
5.1 确定因子的权重.....	22
5.2 构建模型.....	22
5.2.1 状态因子.....	23
5.2.2 压力因子.....	24
5.2.3 响应因子.....	24
5.3 健康因子空间集聚趋势分析.....	25
5.3.1 状态、压力、响应因子全局空间自相关性分析.....	25
5.3.2 状态、响应、压力因子局部空间自相关性分析.....	26
5.3.3 生态因子分布图系.....	25
5.3.4 生态因子空间协调性分析.....	26
6 结论与不足.....	35
6.1 本研究的主要结论.....	35
6.2 文章不足.....	36
附 录.....	41
一、发表论文.....	41
二、参与课题.....	41
致 谢.....	42

# 摘 要

作为人类生存、社会发展的物质基础，河流是重要的自然生态系统，也是重要的生态廊道之一，是陆地生态系统和水生生态系统间物质循环、能量流动、信息交流的重要通道，发挥着重要的生态功能<sup>[1]</sup>。自古至今，文明和经济发达的地区都分布在大河大江流域，流域生态环境状况直接影响着人类的发展。如何维持和发挥现有河流生态系统的服务功能，修复受损系统，促进区域经济、社会和环境可持续发展已经成为一个全球性的问题<sup>[2]</sup>，恢复和建立一个健康的流域生态系统已经成为近年来环境管理的重要目标<sup>[3-4]</sup>。石羊河流域是我国西部地区开发程度较大的区域之一，深居亚欧大陆腹地、气候干燥、降水稀少，流域的水资源补给以冰川融水为主，是典型的水资源脆弱区，生态状况容易改变。近 50a 以来，水资源短缺导致生态环境恶化，产生系列生态问题，以该地区为中心的阿拉善高原成为我国沙尘暴爆发的三大源区之一，生态问题成为当地亟待解决的实际问题，受到了国内外专家学者的关注。认识当前石羊河流域生态系统健康现状，探索流域中不同小区域之间的生态健康效应，能够为流域生态规划和管理提供科学依据。

流域生态系统的结构和功能受到人类土地利用方式和程度的直接影响，流域生态系统的变化也直接体现在人类土地利用的方式和强度上，两者相互影响、相互制约。从生态系统健康性角度出发对流域土地利用的空间分布特征和协调性做出评价，具有明显的现实指导意义。土地利用不仅是人类改造和利用自然资源的直接方式，多种多样的土地利用类型是地球表层系统最突出的景观标志，而且还成为了重新建立生态——土地利用——生产系统均衡的基础。

本文以石羊河流域 90 个乡级行政单位为例，从土地利用的角度出发，深入分析石羊河流域土地利用的健康状况，探讨区域生态健康因子空间分布特性和协调程度，主要内容和结果包括以下几个方面：

(1) 三大健康因子存在明显的空间集聚特征，压力因子的集聚态势高，状态因子和响应因子的集聚态势低。

(2) 三大健康因子空间上存在明显的冷点、热点。其中：状态因子的热点在上游的祁连山区，冷点在中游的武威盆地东北部及下游民勤盆地西部荒漠区；压力因子的热点在中游的武威盆地和民勤东南部，冷点在祁连山山区西南部；响应因子的热点在祁连山区，冷点在民勤盆地。

(3) 从生态因子的分布图系来看，不同级别健康因子在空间分布上表现出

差异性。总体来看，状态因子和响应因子分布图系相似，随着因子值的增大，空间分布逐渐由北向南（从下游到上游）发展。压力因子在空间上分布较为均匀，整个流域呈现压力均较小的态势，其中压力较大的地区集中分布在中游的武威盆地。

（4）生态健康因子的空间协调性，反映该地区生态系统的稳定性。研究表明，整个流域中有 19 个行政单位处在协调性较低的水平，占行政单位总数的 20.22%；53 个行政单位协调性一般，占 58.51%；22 个行政单位协调性高，占 23.4%。由上游到下游生态健康因子协调性降低。

**关键词：**生态健康因子； 关联性； 分布图系； 协调性

## **Abstract**

The river is the material basis of human survival, social development, it is the material basis for terrestrial ecosystems and aquatic ecosystems, and it is exchange channels for energy flow, information. River is play an important ecological function. With the rapid growth of the population, as well as the intensification of human industrial and agricultural activity, the river ecosystem is constantly subject to human disturbance and damage, mainly in the: unreasonable exploitation of water resources caused many rivers drying up or depletion; the destruction of forests and riparian vegetation cause soil erosion and blockage of river channels; a large number of pollutants discharged into a serious impact on the water quality river; traditional water conservancy project emphasizes economic effect and safety, cause natural river channels and non-continuous, hind the exchange of rivers and riparian systems, cause biodiversity loss, many ecological function and thus weaken or lose.

By the area of the river basin as the ecological function of the river ecosystem change, river ecosystem change has a direct impact on the health of the watershed ecosystem. River is the origin and foundation of the development of human activities. Since ancient times, civilized, and economically developed areas are located in the river basin. The watershed ecological and environmental conditions directly affect human development. Therefore, how to maintain the service function of river, repair damaged systems, promote regional economic, social and environmental sustainable development has become a global problem. Environmental management in recent years has become an important goal to restore and build a healthy watershed ecosystems.

River ecosystems always affected by natural and human factors. Watershed land use status is not only reflected the local farming culture, but also expressed the ecological function of river. Land use is a kind of human activities based on land resources, and it is overall performance of the material flow and energy interactions between the human and natural environments, it is the result of human activities. The manner and extent of human land use directly the function of the river ecosystem, changes in the river ecosystem is directly reflected in the way of watershed land use,

both affect each other ,mutual restraint. From the point of view of the ecosystem health , evaluates the characteristics of spatial distribution and coordination has obvious practical significance. The landuse structure not only reflect the state of the earth's surface landscape, become the most prominent of the landscape of the earth surface system flag, but also became a re-establishment of the land-use-ecological to produce balanced.

In this paper, 90 township-level administrative units of ShiYang-River Basin are the study objects. From the point of landuse , analysed the health status of the ShiYang River Basin, investigated the spatial distribution characteristics and the coordination of ecosystem health factors. Main content and results, including the following aspects:

(1) Three health factors has significant spatial concentration. Stress factor has the highest number in spatial concentration, state factor and response factor is lower.

(2) Three health factors has obvious cold spots and hot spots. Among the factors: the hot spot of state factor is in the upstream of the Qilian Mountains, cold spot is in the northeast of WuWei basin in middlestream and the west of MinQin basin in downstream; the hot spot of state factor is in WuWei Basin in middlestream and south of MinQin Basin in downstream, the cold spot is in the south of Qilian Mountains; the hot spot of response factor is in the southwest of Qilian Mountains, and the cold spot is in MinQin Basin.

(3) From the maps department of ecological factors, the differences are much more large in different levels for each factor. Overall, the maps department of state factor and response factor is similar. With the increase of factor values, the spatial distribution gradually from north to south. The stress factor is more evenly distributed in space. The mean value of stress factor is low in the entire watershed. The highest stress factor is in WuWei Basin in middlestream.

(4) The coordination of health factors reflects the stability of ecosystem. Study has shown that 19 units of the all administrative units in ShiYang River have the low coordination value, accounting for 20.22% of the total number ; 53 units of the all administrative units in ShiYang River have the general coordination value, accounting for 58.51% of the total number ; 22 units of the all administrative units in ShiYang

River have the higher coordination value, accounting for 23.4% of the total number.

Coordination of ecological health factor decreased from upstream to downstream.

**Key words:** health factor ; relevance ; the thematic mapseries ; coordination

# 1 前言

## 1.1 选题背景

### 1.1.1 生态环境恶化，生计问题亟待关注

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部，祁连山北麓，介于  $101^{\circ} 22' \sim 104^{\circ} 16' E$ 、 $36^{\circ} 29' \sim 39^{\circ} 27' N$  之间，流域面积 4.16 万平方公里。从行政区域角度看，武威、金昌、张掖三市的七个县区均隶属于石羊河流域，到 2010 年全流域乡级行政单位共计 94 个。文献资料表明：2009 年，全流域总人口 260 万人，其中农牧业人口 165 万人，城镇人口 95 万人，国民生产总值 290.8 亿元，农业总产值 80.01 亿元。

水资源短缺成为石羊河流域的主要生态问题，全流域水资源总量 16.59 亿立方米，年均总用水量 28.77 亿立方米，全流域水资源消耗远大于水资源总量。超采地下水 4.32 亿立方米，持续超采地下水、水资源和土地资源不合理匹配导致的地下水位下降、土地沙漠化、土壤盐渍化等生态问题突出，民勤湖区北部部分群众已失去基本生活条件，生计问题亟待关注。

生态系统为人类生存和发展提供丰厚的物质和能源，同时生态系统健康也是人类社会健康的生态基础<sup>[10]</sup>，是人类可持续发展的重要前提。流域是一种拥有丰富水资源、能够灌溉农田、净化环境、以干支流为依托提供沟通运输功能的重要生态系统，其拥有丰富的水域资源养育了千千万万种水生生物，并且以蕴藏着巨大水能为流域经济振兴提供强大的动力。因此，孕育了举世瞩目的灿烂人类文明，成为人类社会发展的源地，并且成为人类可持续发展的重要生物保障和物质前提。生态系统健康性概念的产生为流域生态系统健康研究提供理论依据，更为区域可持续发展提供理论支持。

### 1.1.2 生态健康概念发展，为流域生态系统研究提供新视角

自然生态系统是人类赖以生存和发展的物质基础与基本保障，维持健康的生态系统可以实现人类社会经济可持续发展，为持续发展提供基本保障<sup>[5]</sup>。生态系统健康是环境管理的目的与基础，为生态环境管理提供了新的发展方向和研究方法，刻画了可持续的人类未来。由于全球社会经济高速发展严重影响了自然生态系统的健康状况，在自然生态系统健康状况日益恶化的情况下，生态系统健康评价已成为当前生态系统管理面临的重要问题，是基于生态系统综合评估的核

心内容，也是宏观生态学的研究热点领域之一。针对生态系统健康性的评价研究不仅具有重要的实用价值，而且在理论研究上丰富了现代生态学的研究内容。流域作为重要的生态单元，其生态价值不容忽视<sup>[6]</sup>。长期以来由于人们对流域自然生态环境的严重破坏和对流域自然资源的过度开发和持续利用，使得流域水体受到越来越严重的污染，植被的破坏、水土流失的加剧、洪水频度的加大及程度的加剧，这些因素已经成为影响到流域生态系统健康性的重要因素，由于影响因子的改变，生态系统的原始结构和功能也因此发生了重大改变。针对流域生态系统健康性的研究已日益受到学者们的重视<sup>[7-9]</sup>，基于生态系统健康概念的发展，流域生态系统健康性研究也出现了新的转机。

## 1.2 选题目的及意义

### 1.2.1 选题目的

本文选择石羊河流域作为研究区域。石羊河位于甘肃省河西走廊地区，是河西走廊的第三大河流，河流起源于南部祁连山，消失于巴丹吉林和腾格里沙漠之间的民勤盆地。东南与甘肃省白银、兰州两市相连，西北与甘肃省张掖市毗邻，西南紧靠青海省，东北与内蒙古自治区接壤。辖区降水稀少，属典型的资源型缺水地区，水资源利用效率偏低。石羊河流域水资源及生态环境问题是长期积累并日益加重的渐变过程，而流域生态环境恶化最为严重的表现在下游民勤绿洲地区。民勤绿洲及整个流域的生态环境恶化形势已十分严峻，倘若持续发展下去民勤将有可能变成第二个“罗布泊”，生态问题已经严重威胁到当地居民的生存生活质量，也将对整个区域的长远发展产生严重的不利影响。

生态环境的可持续发展是该区域社会经济可持续发展的重要前提和保障，目前针对石羊河流域民勤地区的生态学研究较多，但以乡级行政单位为研究对象深入探讨生态健康的论述较少。本研究在改进生态健康评价法的基础上，以石羊河流域这个生态健康问题突出的地区为研究对象，深入分析该地区生态健康状况对生态环境的治理和相关环境保护政策的制定具有现实的参考价值。

### 1.2.2 研究意义

生态意义：石羊河是一个集草地、森林、河流和荒漠为一体的复杂的内陆型生态系统。在以水资源开发利用为核心的高强度人类经济和社会活动的作用下，流域生态系统出现了一系列诸如河流断流、生物多样性散失、水质污染及沙尘天气频繁等问题，严重破坏了流域应有的服务功能和生态系统健康。本研究在收集

与整理流域生态、经济和社会资料的基础上，分析石羊河流域生态系统健康影响因素，并对流域生态系统健康现状进行了初步评价，其结论将有效促进流域生态、经济和社会的协调发展，为流域生态环境的综合治理提供科学的参考依据。

学术意义：在相当长的时期内，我国对生态系统健康性的研究较少<sup>[11~13]</sup>，生态系统健康评价处于摸索阶段，尚未形成成熟的方法。在长时间的摸索探究过程中，生态系统健康性评价的模型基本稳定<sup>[14]</sup>，国内外众多研究者几乎对所有的生态系统类型都进行过健康性评价。流域生态系统健康性评价也有了一定的发展，特别是联合国经济合作开发署（OECD）提出的压力-状态-响应（P-S-R）概念模型从外界胁迫、生态系统自身状态及影响效力三方面构建流域生态健康评价指标体系，为流域健康性研究提供有力的理论依据。

本研究借鉴 P-S-R 模型的指标分类概念，将原有的综合模型视为独立的生态因子系统，深入探讨不同健康因子在地理空间上的分布特点及协调程度，是对前人研究方法的创新，具有一定的学术意义。

实践意义：河流是地理环境中重要的自然景观，具有重要的生态意义。人类在创造辉煌历史的同时不可避免的影响和改变着河流的生态功能，一系列的流域生态问题突出，严重的影响着人类的生存环境。石羊河是我西部国重要的内陆河流资源，对流域资源多年的不合理开发最终导致流域生态问题日益凸显。作者希望本研究能够为石羊河流域的生态系统管理略尽绵力。

## 2 研究综述

### 2.1 生态系统健康研究进展

著名的科学家 Leopold 早在 1941 年就提出了土地健康(Land health)的概念,而且“Land sickness”在当时就被用来描述土地生态系统功能的紊乱,但是以土地为基础的生态系统健康的概念并没有因此而得到推广<sup>[15]</sup>。目前,很多学者认为生态系统健康评价研究的首要目的和关键所在是确立生态系统的健康标准<sup>[16]</sup>。如果健康的或者正常的生态系统标准没有被建立, Rapport 认为则所有评价生态系统健康性的研究都是不可能并且没有希望的,他认为健康生态系统标准的建立不仅对系统健康研究本身非常重要,并且对于推进生态系统健康研究途径和方法的发展均有很大帮助作用。

研究生态系统健康的途径多种多样,不同的学者有不同的看法,归纳前人的成果主要有以下几点:

(1) 从环境因素对自然生态系统健康性胁迫角度出发。著名学者 Haris 等在对水体生态系统及 Bird 等在对陆地生态系统的研究中发现<sup>[17~18]</sup>:生态系统只有在受到相关环境因素的不可逆转的强烈胁迫时才会表现出生态系统健康性改变的症状。在研究生态系统健康状况时常产生一定的错觉,那是因为生态系统功能健康性的变化经常不是连续的即时反应,从健康到不健康的变化有一定时间滞后。在 Chihuahuan 研究美国西南部沙漠区域时 Whitford 取得一定发现,研究表明:沙漠生态系统在受到初期或早期胁迫时生产力和系统物种数不会明显降低反而会有一定增加。只有在经过较长时间的胁迫累积以后,系统物种的多样性和生产力才会明显下降<sup>[19]</sup>。所以, Rapport 认为仅从环境因素胁迫角度去研究生态系统的健康程度说服力是远远不够<sup>[20]</sup>。

(2) 从系统恢复力对生态系统健康性影响的角度出发。生态系统受到干扰后的恢复能力指标是生态系统健康研究框架中的一个关键性指示指标,越健康的生态系统,从因素干扰中恢复生态系统功能的能力也就越大<sup>[21]</sup>。随着人为因素对生态系统影响越来越大,绝大部分生态系统与外界干扰和胁迫相联系,当今几乎没有一个不受到外界干扰因素胁迫的生态系统,不管这些干扰因素来自哪里,由于这些有周期的干扰和破坏因素,生态系统有了新的发展契机<sup>[22]</sup>。由于生态系统的发展是一种动态过程,并且该过程中存在很多平衡点,所以一定程度上的干扰是过程中非常正常的生态属性<sup>[23]</sup>。在一定长时间尺度内寻找类似波动中显著不同的波动,并且给处于显著不同状况下的生态系统以时间序列上的分类是生态系统

健康性评价研究的根本问题。如干旱、降雨、病害、虫害、化学污染、火灾等一定时间尺度上的外界胁迫和干扰状况,其等级等系统属性数据的时间空间累积是研究生态系统健康性评价指标选取及其生态系统健康性特征的关键所在。

(3) 从模型角度对生态系统健康性影响出发。即时响应历史和长期胁迫历史是一个生态系统健康状态动态变化的直观表现。建立生态系统健康评价模型的关键所在是系统所受的胁迫历史,研究表明,生态系统所受胁迫历史的类型众多,包括系统受到的胁迫类型、胁迫强度、胁迫存在时间、系统响应胁迫压力时间等都是<sup>[24]</sup>。目前,专门研究多因素胁迫模型的成果还比较少,典型的研究主要集中在水生生态系统而且以单因素胁迫(如:从营养物质循环角度及酸沉降和累积角度等)研究为主,例如:著名科学家 Minns 等模拟研究酸雨沉降对加拿大某湖泊水体鱼类品种及多度性的影响就是建立了比较典型的单因素胁迫模型。科学家研究陆地生态系统单因素及多因素胁迫模型的成果很少见报道。而生态系统健康性的研究归结于生态系统所受压力的大小,一方面,受到胁迫压力较明显的生态系统人们更容易找到一些很显著的胁迫压力症状;另一方面,对不受胁迫压力、受到较轻度胁迫压力或者受到的胁迫压力在生态系统内部自我调节的范围之内的生态系统,很难用精确描述和定量表达的方法描述其具体的“健康症状”<sup>[25]</sup>。Forman 和 Godron 等科学家利用“LT-SRO 曲线波动”和“LT-LRO 曲线波动”描述生态系统所受到的轻度的但又有一定规则的稳定范围内波动的胁迫压力,并利用直观图例的方式定性表达转化为定量“生态系统健康”指标仍然存在较大的不确定性<sup>[26]</sup>。

尚处于单一方法与理论初期探阶段的生态系统健康性研究<sup>[27~28]</sup>,其在方法和理论上还有待于进一步发展提高。理论方面上,由于生态系统健康研究必然涉及到一定尺度上的生态演替,现阶段科学界对群落演替等一些生态学过程的研究尚不够深入,而生态系统健康性研究的科学试验的可操作性要求有较长时间段生物演替的试验数据的累积,因此这在一定程度上制约了生态系统健康评价的研究<sup>[29]</sup>;方法层次上,生态系统演变是一种存在很多平衡点的波动的动态变化过程,因此较长时间尺度上的数据累积是研究生态系统健康所必需的,研究目的在于要通过这些类似波动中找到显著不同的波动;数据获得上,科学家利用数学方法,采用相应的科学试验方法都需有完善的数理统计方法,而生态系统健康性研究的对象涉及到一个复杂的其结构又相对疏松的系统,表现在即便在同一研究区内很小的地理单元级别上也存在极大的自然地帶性差异,而对于生态系统健康性分析

研究又不能停留在有限的时间空间尺度上<sup>[30]</sup>,这样会造成设置重复和对照难以实现。但科学家 Schindler 等经过长期的探索研究,在上述方面还是做了一些很有创新性的贡献,例如他在研究长时间序列上有可能重复性发生的概率事件及在较长时间尺度上和较大空间尺度上的生态系统健康问题中提出应用 Baysean 模型、时间序列分析、效果分析等数理统计分析方法<sup>[31]</sup>。

20 世纪 80 年代,生态学研究中兴起了一个新的研究领域——生态健康<sup>[32]</sup>。涌现出了大批科学家,其中加拿大著名学者 Schaeffer 和 Rapport 是主要代表, Schaeffer 的观点认为,生态系统的组织没有受到损害或减弱等疾病的生态系统就是健康的生态系统。像人类生病一样,生态系统中的疾病有主要的和次要的及短期和长期的区别。一旦某生态系统不具备自动平衡修复的机制,或者这种机制不完善以至于任由“病态”发展严重至“疾病”,那么这种疾病就应该受到重点关注。经过科学家 Rapport 进一步的研究,这种观点得到了更进一步的发展,最终他将这种“疾病”描述成为生态系统水平上的危难和综合病症<sup>[33~34]</sup>。

一般认为,健康的生态系统是指生态系统处于良好生态状态。结构和功能良好的生态系统不但能保持其自身化学、物理及生物完整性,还能维持其向人类社会提供的各种物质和能量服务的功能。考虑到评价不同的自然和社会科学范畴,并同时考虑了时空尺度,生态系统健康的标准有 8 各方面,包括:活力、组织、恢复力、管理选择、生态系统服务功能的维持、对邻近系统的影响、外部输入减少及人类健康影响。其中前 3 项是科学研究中最重要的考虑方向<sup>[35]</sup>。在生态健康研究的理论中:活力状态,用来描述生态系统输入能量和营养循环容量的强弱,可用新陈代谢或初级生产力等具体指标来定量描述;组织能力,用来描述生态系统组分及组成途径的多样性,系统组分之间相互作用的数量及多样性比率来定量评价生态系统组织能力里的强弱,科学研究表明,生态系统的组织能力越强,组成成分越复杂就生态系统就越健康;恢复力也叫作抵抗能力,即如果外界因素的胁迫作用消失时,生态系统克服环境压力并且反弹回复的能力,可根据自然系统在干扰消失时的恢复速率和生态系统抵抗自然干扰的能力来评价。一个健康的生态系统同时应该是稳定的和可持续的,即:随着时间的变化生态系统能够保持自身活力并且能维持其自身组织性及自主性,受到在外界胁迫时,当胁迫减弱时系统容易恢复其功能的能力<sup>[36]</sup>。

## 2.2 流域生态健康研究进展

国外对河流生态健康的评价研究工作开展得较早。早在 19 世纪末期,污染

较为严重的少数欧洲国家已经开始了这方面的研究<sup>[37]</sup>, 针对水质的评价当时已经成为河流健康评价的主要内容和重点方向。直到 20 世纪 80 年代初, 河流生态系统的恢复替代水质保护成为河流管理的重点内容, 越来越多的科学家意识到单从水质方面出发评价河流的健康性已远远不能满足河流管理的需要, 不能全面揭示众多因素对河流的损害。正因为如此, 在实践的基础上各国科学家评价河流健康的内容也发生了实质性的改变, 逐渐开始将重点研究转向对河流整体生态质量的把握。

近年以来, 河流健康性评价的方法研究得到了很大的发展, 各种特色方法应运而生, 总体来讲评价内容可以概括为四类, 包括: 物理化学评估、水文评估、生物评估和生物栖息地质量评估<sup>[38~39]</sup>。尤其是 20 世纪 80 年代, 随着河流生态健康评价的发展, 涌现除了多种研究方法, 这一时期最主要的研究方法有两种, 即以生态完整性指数 (IBI) 为代表的河流健康评价法和以河流无脊椎动物预测和分类计划 (RIVPACS) 监测为代表的生物学方法<sup>[40]</sup>。最初用于鱼类的 IBI 法产生于美国西部, 随后其他物种也用到这种评价方法。1977 年, 英国淡水生态所的河流实验室提出 RIVPACS, 最早期此方法的目标是选择保护物种的位置, 分析物种组成类型。随着发展, 许多国家各个领域的科学家都开始使用这两种评价方法。例如: 澳大利亚科学家参考了 RIVPACS 模型进行了第一次全国水资源健康评价, 并且结合本国国情在原始模型的基础上开发了适合本国的新方法 AUSRIVAS<sup>[41]</sup>。此外, 河流健康评价指数还有藻类丰富度指数 (AAI)、硅藻的污染敏感性指数 (IPS)、底栖生物完整性指数 (B-IBI) 等。与此同时, 其他国家的科学家也作出了努力, 探索出河流系统的综合评价方法, 较具代表性的有美国、英国、南非、瑞典、澳大利亚等国家, 他们提出了快速生物评价协议 (RBP)、河流保护评价系统 (SERCON)、栖息地完整性指数 (I-HI)、岸边与河道环境细则 (RCE)、河流状况指数 (ISC) 等研究方法。

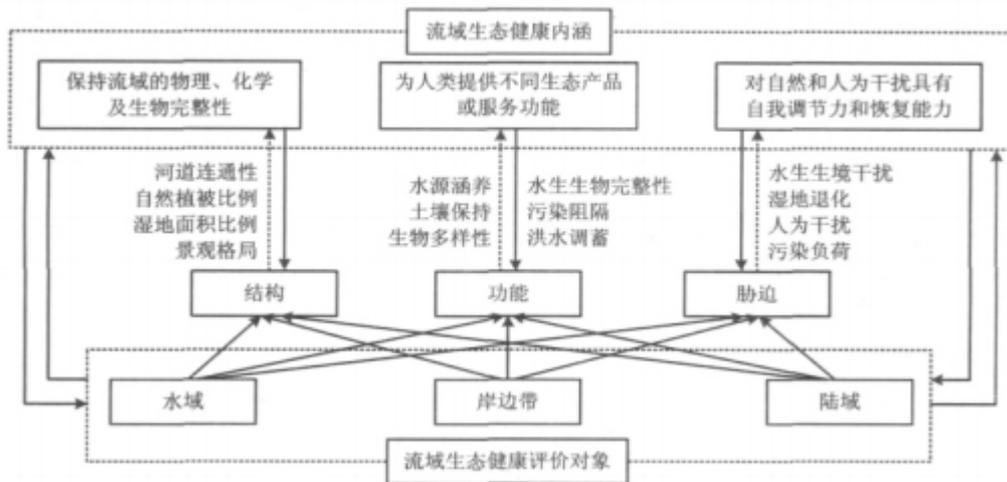


图 2-1 流域生态健康评价基本框架的构建过程

与河流生态健康评价相比，在流域这一尺度上进行生态系统健康性评价的研究和实践尚不多见。最早在这一领域尝试的是美国，早在 2005 年，美国科学家就分别对国内大河流域（Muskoka 流域、Mississippi 流域、新泽西州流域、波特兰市流域）开展了生态健康评价工作，做了相应的研究。通过经验的积累和科学的论证，综合专家和公众的意见，确定了流域健康系统的评价指标体系，并据这些评价指标对流域生态系统健康性做出了评价。经过科学家努力的钻研研究，流域生态健康评价形成了基本的框架<sup>[42]</sup>（如图 2-1 所示）。

我国著名学者崔保山和杨志锋在总结研究的基础上指出：生态系统健康是指系统内的物质循环和能量流动未受到损害，关键生态组分和有机组织被保存完整，且缺乏疾病，对长期或突发的自然或人为扰动能保持着弹性和稳定性，整体功能表现出多样性、复杂性、活力和相应的生产率，其发展终极是生态整合性<sup>[43]</sup>。通过对国内外相关概念的学习和论证，我国部分学者也认为：健康的流域生态系统是远离初级生产力的下降（对流域内陆地生态系统而言）或增加（对流域内水生生态系统而言）、营养的流失、生物多样性的丧失、关键种群的波动增强、生物结构的退化和疾病的广泛发生及严重性等流域生态系统危机综合症的系统。与生态系统健康评价相似，以上提出的流域生态系统健康性评价的定义更倾向于强调流域生态系统健康的生态学意义，流域是综合的生态系统，因此在研究中更应该将流域作为一个“社会-经济-自然”复合的生态系统<sup>[44]</sup>，人类是这个生态系统中不能或缺的一部分，理解流域生态系统的全面性和整体性应该考虑把人类行作为生态系统的重要组成部分而不被分离，应该把人类健康和社会经济因素纳入考虑范围，从可持续发展的角度讲，流域能够满足人类发展需求和愿望的程度应该被

纳入流域生态系统健康的定义中<sup>[45]</sup>。目前,这种说法被越来越多的人所接受和认同。

总结国内外学者的研究成果,认为健康的流域生态系统具有以下特征<sup>[46]</sup>:

①对流域进化过程中遇到的正常干扰(如洪水、干旱、火灾等)具有恢复力;

②远离流域生态系统危机综合症;

③能自我维持,即在无外部输入时能存在,在人类管理的生态系统中,每单位产出所需外部输入不增加;

④管理实践和生态系统过程不损害邻近生态系统;

⑤经济上可行,能够提供合乎自然和人类需求的生态服务;

⑥维持健康的人类群体。

## 2.3 流域生态健康研究展望

总体来说,目前流域生态健康研究处于初级阶段,今后的研究中将重点在以下几个方面做出努力:

(1)在我国流域生态健康概念还处在起步阶段,姜付仁<sup>[47]</sup>、李春晖<sup>[48]</sup>等学者借鉴国外先进的研究成果为国内流域生态健康概念的发展做出了很大贡献。但是,目前国内针对流域生态健康的研究成果还很有限,流域生态健康概念还有很大的发展空间。

(2)国外关于流域健康评价的方法集中在生态监测和指标体系法上<sup>[49~51]</sup>。我国在研究初期,也借鉴了国外的这种研究方法<sup>[52~55]</sup>,经过几十年的发展,国内学者开始关注人类活动对流域健康的影响<sup>[56~58]</sup>。在指标的选取和确定是越来越重视人文因子的响应机制,这也是今后流域生态健康研究的重要方面。

(3)3G技术手段在学科中的应用为流域健康的研究提供了新视角<sup>[59]</sup>,为科学研究提供科学有效的数据支持和技术支持<sup>[60~62]</sup>。在此基础上,流域生态健康的研究也越来越多的应用到这3G技术。

(4)积极开展新技术流域指标体系的建立<sup>[63~64]</sup>,建立长时间空间尺度上的健康监测体制,研究流域生态系统健康演变的过程和动态,记录生态环境应对外界刺激的应激性反应,深入研究生态健康的内在机制和响应因子。

## 3 研究内容及思路

### 3.1 问题的提出

生态系统健康是自然和社会发展的重要前提和保证，而流域生态系统的健康性直接关系到区域人类社会的发展方向和程度，从研究方法、流域特点及区域现状等方面来讲，对于石羊河流域生态系统健康性的研究势在必行。

①就研究方法而言，流域是一个集社会-经济-自然为一体的复合生态系统，对于生态系统健康研究是比较合适的研究尺度。流域生态系统健康评价作为一门综合交叉科学，不仅包括着眼于物理、化学、生物参数的检测技术建立评价指标，还应参考流域内陆地区生态系统、水陆交错带生态系统、水生态系统健康性评价的指标建设，更应该包括能反映社会经济、人类健康的指标，这些指标不仅反映了流域生态系统自身的结构和功能，更能揭示生态系统能够为人类社会提供服务的质量和可持续性。因此，流域生态系统健康评价为区域生态环境评价提供了一种新方法。但是，目前流域生态系统健康评价的方法还不够成熟，尚处于实验和摸索阶段，没有形成成熟的方法。制约流域生态系统健康的因素有很多，因素相互之间的关系也较为庞杂，需要研究的内容还很复杂，加之这一学科涉及的研究领域较宽。所以，流域生态系统健康研究还有较大的发展潜力和提升空间，有望在研究方法上取得更大的突破。

②就流域特点而言，流域是指一个由河流、湖泊或者海洋等水系以分水岭为边界所覆盖的地理区域以及由该水系汇集形成的集水区。无论地形多么复杂，流域均由分水线、水文网和斜坡构成。流域作为重要的地貌单元，是自然界生态环境中不可或缺的一部分，也是人类活动得以保障和发展的重要前提，是人类进步的坚实基础，其生态健康关乎整个生物圈的健康，更决定人类社会的发展。

③就区域现状而言，石羊河位于甘肃省西北部，是河西走廊三大水系之一。由于人为因素和自然、历史等原因，石羊河流域水资源已经出现开发过度的现象。农田灌溉面积增加、民勤地下水开采过量、经济和社会发展用水占用了大部分生态用水等不合理发展方式，造成区域生态环境急剧恶化。尤其是，下游民勤地区已经成为我国生态环境问题最为突出的地区之一，该地区人口最密集、水资源不合理开发利用程度最高、区域用水矛盾突出、生态环境问题亟待解决。与此同时，由于水资源利用方式粗放，产生众多次生生态问题：土地沙漠化、土地盐渍化进程加快，地下水位下降、用水矿化度上升，青土湖地区生态环境已经遭到严重破坏，生境已经十分脆弱。这些生态问题已经严重危及到当地居民的生存，形成大

批的生态难民。特别是，腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠环绕着民勤绿洲，如果再不采取措施两大沙漠几乎要连为一体，民勤绿洲面临消亡，而民勤绿洲的消亡将会危及流域中游绿洲甚至河西走廊大通道的生态安全，甚至影响到我国西北地区的发展与稳定。

在生态系统健康研究发展的背景下，石羊河流域作为典型的西北内陆河流域有特殊的生态系统构成和组织结构，是相对脆弱的生态系统类型。随着社会经济的发展，人类对环境的影响越来越大，各种生态问题越来越突出，已经影响到当地人类的生存质量，生态问题亟待解决。如何从生态健康的理论出发研究石羊河流域生态健康的特点是本研究的研究重点。

## 3.2 研究内容

本研究参考联合国经济合作开发署（OECD）提出的“压力-状态-响应（P-S-R）”<sup>[65]</sup>概念模型，从外界胁迫、生态系统自身状态及影响效力三方面构建流域生态系统健康评价指标体系，建立状态因子、压力因子及响应因子三大健康因子。与以往传统指标评价方法不同的是，本研究借助 Global Moran's I 和 Getis-Ord  $G_i^*$  两个指数研究因子之间的关联性，分析因子的空间集聚特性和协调性。通过研究区域生态系统健康性特点，为流域生态环境的综合治理提供科学依据，具体研究内容主要包括：

### （1）健康因子的空间相关性分析

利用 GIS 软件中的分析功能，借助 Global Moran's I 和 Getis-Ord  $G_i^*$  指数，首先分析因子的全局相关性，研究不同健康因子在整个流域上是否有集聚趋势，如果集聚特征明显，再利用局部相关指数计算健康因子在整个区域中分布的冷热点。

### （2）健康因子分布图系

健康因子图系研究的是不同健康因子不同健康尺度在流域的上的空间分布特性。本文依据健康因子的数值特点，将不同健康因子等间隔的划分为五个等级，利用 ArcGIS 的空间制图功能将不同等级健康因子表达到流域空间中，以此来研究流域不同空间位置的生态健康状况。

### （3）健康因子空间协调性分析

在研究了不同健康因子的空间分布特性以后，区域不同位置健康因子的协调性反映的是区域健康因子的综合状况。参考国际因子协调性的研究方法，利用 Matlab 分析软件研究因子协调性数据的空间分布特征，并对协调性因子进行空间

分级处理。

### 3.3 研究方法

#### 3.3.1 资料收集

(1) 本研究参考 2010 年石羊河流域县级统计资料中的乡级行政单位名称, 查阅行政区划图, 合并部分乡级行政单位, 最终确定以 90 个乡级行政单位为研究对象, 包括:

图 3-1 石羊河生态健康研究对象

县级行政单位名称	乡级行政单位名称
古浪县 (17 个)	永丰滩、土门、泗水、海子滩、民权、大靖、定宁、裴家营、城关、古丰、黄羊川、十八里铺、横梁、新堡、黑松驿、干城
天祝藏族自治县 (10 个)	旦马、大红沟、毛藏、哈溪、安远镇、西大滩、飞地 1、飞地 2、朵什、东大滩
肃南 (6 个)	马营、峡翔、北滩、东滩、蹄尖、皇城绵羊育
金川 (2 个)	宁远堡、双湾镇
凉州区 (29 个)	九墩、双城、洪祥、四坝、丰乐、下双、永丰滩、永昌、羊下坝、大柳、西营、怀安、长城、金羊、松树、柏树、清源、清水、金塔、高坝、武南、东河、新华、吴家井、古城、河东、黄羊镇、谢河、张义
民勤县 (17 个)	东湖、西渠、红沙梁、泉山镇、大滩、双次科、苏武、东坝、南湖、三雷、大坝、昌宁、夹河、薛百、重兴、蔡旗、收成
永昌县 (9 个)	河西堡、红山窑、朱王堡、水源、东寨、六坝、南坝、新城子、焦家庄

(2) 采用的主要数据有:

2010 年石羊河流域遥感解译数据 (ArcGIS 处理遥感数据获得土地利用类型数据), 在土地类型分类时, 参照中国常用土地类型分类标准和相关文献, 将土地利用类型划分为: 建设用地 (城镇建设用地、农村居民点、其他建设用地)、耕地、盐碱地、草地 (高覆盖度指数、中覆盖度指数、低覆盖度指数)、林地 (有林地、灌木林地、疏林地)、沙漠、裸地、水域、戈壁、建设用地、裸地、裸岩 12 类。

NDVI 数据 (相关网站获得): <http://free.vgt.vito.be/>. 由免费的数据网站获取, 之后用 ArcGIS 的相关功能截取研究区数据, 并通过计算获取 2010 年各个行政单

位的平均数据。

2010年石羊河流域乡级社会经济数据（石羊河流域相关市县社会经济统计年鉴）。

### 3.3.2 指标确定

文章参考了大量前人有关生态系统健康性评价的研究报告，总结了他们的研究成果，对比分析多各种评价方法的优劣。

表 3-2 石羊河流域生态健康研究因子体系

因子名称	指标
生态指标	P <sub>1</sub> : 植被指数 NDVI
	P <sub>2</sub> : 生物多样性指数 SHID
	P <sub>3</sub> : 蔓延度 (CONTAG)
	P <sub>4</sub> : 景观斑块分维数 (FRAFRAC)
	P <sub>5</sub> : 斑块密度 (PD)
	P <sub>6</sub> : 生态弹性指数 (ECROSS)
	P <sub>7</sub> : 自然景观破碎度
	P <sub>8</sub> : Shannon 均匀度指数
	P <sub>9</sub> : 植被覆盖度
	P <sub>10</sub> : 人均粮食占有量
压力指标	P <sub>11</sub> : 人口密度
	P <sub>12</sub> : 干扰指数
	P <sub>13</sub> : 人均耕地面积
	P <sub>14</sub> : 农民人均纯收入
	P <sub>15</sub> : 土壤侵蚀综合指数
响应指标	P <sub>16</sub> : 森林覆盖率
	P <sub>17</sub> : 水面率

石羊河流域生态健康性研究

根据本研究的研究目的和区域特点，选取适宜的研究方法及模型——压力-状态-响应 (P-S-R) 概念模型。从状态、压力和响应三个方面研究石羊河流域生态系统健康的特点，经过严格的筛选和对比，最终确定 17(P<sub>1</sub>~P<sub>17</sub>)个表征性指标，如表 3-2 所示。根据因子的属性，将这 17 个因子划分为三大类，其中：P<sub>1</sub>~P<sub>10</sub> 是表征状态因子的指标；P<sub>11</sub>~P<sub>14</sub> 是表征压力因子的指标，P<sub>15</sub>~P<sub>17</sub> 是表征响应因子的指标。

### 3.3.3 数据处理

本文涉及的数据多种多样，数据有不同的属性，为了消除指标的量纲，采用极差法进行数据标准化，公式如下：

(1) 归一化处理

$$r_{ij} = \frac{a_{ij} - \min(a_{ij})}{\max(a_{ij}) - \min(a_{ij})}$$

大者为优的指标：

$$r_{ij} = \frac{\max(a_{ij}) - a_{ij}}{\max(a_{ij}) - \min(a_{ij})}$$

小者为优的指标：

其中  $a_{ij}$ 、 $\max(a_{ij})$ 、 $\min(a_{ij})$ 、 $r_{ij}$  分别为  $i$  个指标的最大值和最小值和标准化后的数值。

权重是一个相对的概念，是针对某一指标而言。某一指标的权重指示的是该指标在整体系统评价中的重要程度。在整个评价过程中，表示的是被评价对象的不同侧面的重要程度，便于在随后的评价中对各评价指标在整体中的作用进行区别对待。

(2) 确定权重

目前计算权重的方法有主观方法和客观方法两种，为了消除主观权重和客观权重的误差，本文采用均值法求指标权重。首先，利用层次分析法求主观权重，用 AHP 软件计算各指标的主观权重 ( $V_i$ )。其次，在 excel 中用熵值法计算客观权重 ( $W_i$ )，计算公式如下：

$$w_i = -\frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^m H_i}, \quad \text{其中 } H_i = -\frac{1}{\ln n} \left( \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \right), \quad f_{ji} = \frac{1 + x_{ij}}{\sum_{j=1}^n (1 + x_{ij})}$$

最后，用均值法求得最终权重： $K_i = (W_i + V_i) / 2$

### 3.3.4 空间关联性

通过对健康因子空间关联性的研究，特别是因子空间集聚特点的研究，可以先判断因子在整体上的集聚特点，如果存在集聚，也以通过段局部关联指数的值准确的判断不同因子在生态系统中的冷点和热点，这种从宏观到微观的研究方法是地理学研究的普遍方法。本文利用 Global Moran  $\hat{s}$  指数来分析生态因子的整体集聚特征，Getis-Ord  $G_i^*$  反映因子区域的集聚特征，分析因子的冷热点。

Global Moran  $\hat{s}$  指数：是体现因子整体分布特点的指数，用来探索某一因

子属性数据在整个研究区域中的整体分布状态,准确判断该现象在空间上集聚与否,重点在于分析因子在整个研究区的空间关联结构模式。

$$GMI = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}}$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \quad \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad n \text{ 为研究区的行政单元数量, } X_i \text{ 与 } X_j \text{ 分}$$

别是因子属性特征值  $X$  在地理空间单元  $i$  和  $j$  上的观测值;  $W_{ij}$  为采用临近标准构建的空间权重矩阵。  $GMI$  的取值范围为-1 到 1, 在给定显著性水平时,  $GMI$  显著为正则表明指标分布具有明显的集聚态势,  $GMI$  显著为负表明指标分布具有明显的空间差异,  $GMI$  为 0 则表明指标分布呈无规律随机分布状态。

**Getis-Ord  $G_i^*$ 指数:** 分析相邻子区域中的空间信息,详细判断因子在局部区域内的空间分布的异质性,判断因子属性在某一确定区域中的观测值相对于相邻区域的特点,即分析不同区域热点和冷点区,反映了确定因子某一区域与邻近区域单元属性值的关联程度。

$$G_i^*(d)^2 = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij}(d) X_j}{\sum_{j=1}^n X_j}$$

在研究中为便于解释和比较,对  $G_i^*(d)$  进行标准化处理。  
 $Z(G_i^*)^2 = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{Var(G_i^*)}}$ , 其中  $W_{ij}$  为空间权重矩阵,空间相邻为 1,不相邻为 0。  $E(G_i^*)$  和  $Var(G_i^*)$  分别为  $G_i^*$  的数学期望和变异数;如果,  $Z(G_i^*)$  显著为正且观测值显著表明的位置  $i$  周围的值高于均值,则该地区属高值空间集聚(热点区);反之,属低值空间集聚(冷点区)。换言之,热点区的空间联动发展较好,相互作用程度较高;而冷点区的空间联动发展状态较弱,区域之间的相互作用强度较低。

### 3.3.5 健康因子的分布图系

本研究利用 ArcGIS 软件的制图功能,分别绘制状态、压力和响应指标 5 个层次的分布图系,共计 15 幅子图。通过读图客观描述不同等级指数的分布状况,进而对区域不同等级生态因子的空间分布有直观的认识和了解。

### 3.3.6 健康因子协调性分析

生态健康的3大因子，是影响生态系统健康程度的主体，重点分析各因子空间分布的特征后，因子之间的协调性也是影响生态系统健康程度的重要方面。国内外许多学者采用离差系数来判断因子之间的协调程度。

参考联合国可持续发展晴雨表概念，根据文本的数据特点建立3个维度，将生态系统状态(X)、生态系统压力(Y)和生态系统响应(Z)，将各维度划分为5个区段，则系统被分割为125个连续的内部空间，利用matlab软件将这3个维度决定的协调发展度相应的表现在三维系统中的连续空间集合内。设某乡镇各维度分别为(X、Y、Z)，则各发展集满足条件：

$$\text{协调发展度高 } S1: F(x) \geq 0.5416 \cap G(x) \geq 0.4732 \cap H(x) \geq 0.622$$

$$\text{协调发展度较高 } S2: [F(x) \geq 0.4062 \cap G(x) \geq 0.3549 \cap H(x) \geq 0.4665] - S1,$$

$$\text{协调发展度一般 } S3: [F(x) \geq 0.2708 \cap G(x) \geq 0.2366 \cap H(x) \geq 0.311] - (S1 \cup S2),$$

$$\text{协调发展度较低 } S4: [F(x) \geq 0.1354 \cap G(x) \geq 0.1183 \cap H(x) \geq 0.1555] - (S1 \cup S2 \cup S3),$$

$$\text{协调发展度低 } S5: S1 - (S1 \cup S2 \cup S3 \cup S4)$$

该模型以最低维度为参考，对协调发展的要求严谨，只要任一维度处在较低水平上，则以较低水平为准，该模型不仅能直观反映各县市各维度的发展水平，而且能够反映三者之间的制约和限制作用。

最后计算不同行政单位的综合生态系统协调性指数，并根据指数的数据特点，等距离的划分为五个级别。研究流域内不同乡镇生态系统健康因子的空间协调程度。

### 3.4 技术路线

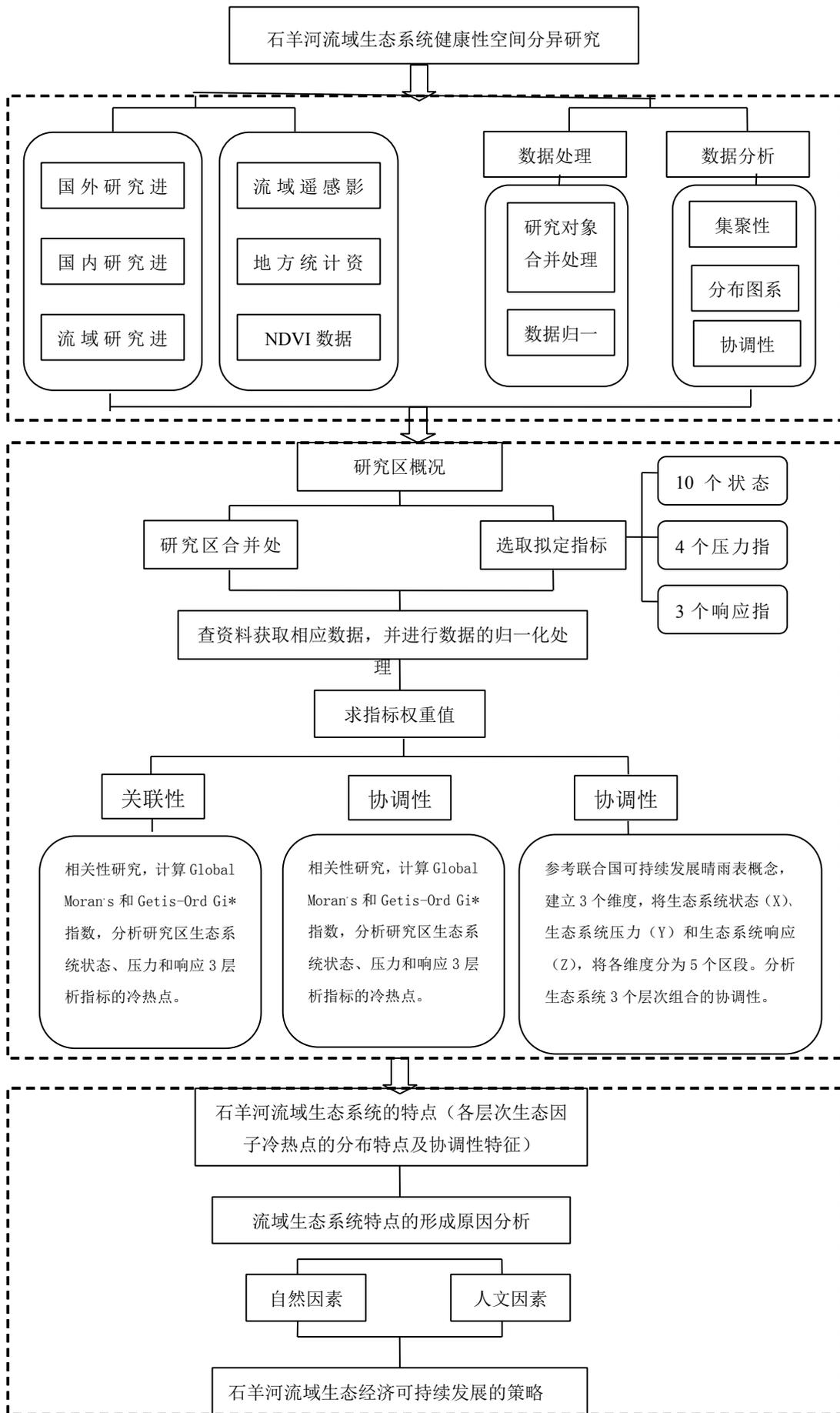


图 3-2 论文研究技术路线图

## 4 研究区概况

### 4.1 石羊河地理位置

石羊河位于甘肃省河西走廊东部，祁连山北麓，是三大内陆河河流之一。其西为乌稍岭，南衔祁连山，地理地处  $101^{\circ} 22' \sim 104^{\circ} 16' E$ ,  $36^{\circ} 29' \sim 39^{\circ} 27' N$  之间。东南与白银、兰州两市紧密相连，西接张掖市，西南紧靠肃南裕固族自治县和天祝藏族自治县，北部与内蒙古自治区接壤，西北与东北与内蒙古自治区接壤，流域总面积达 4.万多平方公里。包括武威市的凉州区、古浪县民勤县全部及天祝县部分地区，金昌市的永昌县及金川区全部及张掖市肃南裕固族自治县、山丹县部分地区，共 3 市 8 县(区)，总人口约 240.81 万人。石羊河流域地理位置见图 4-1。

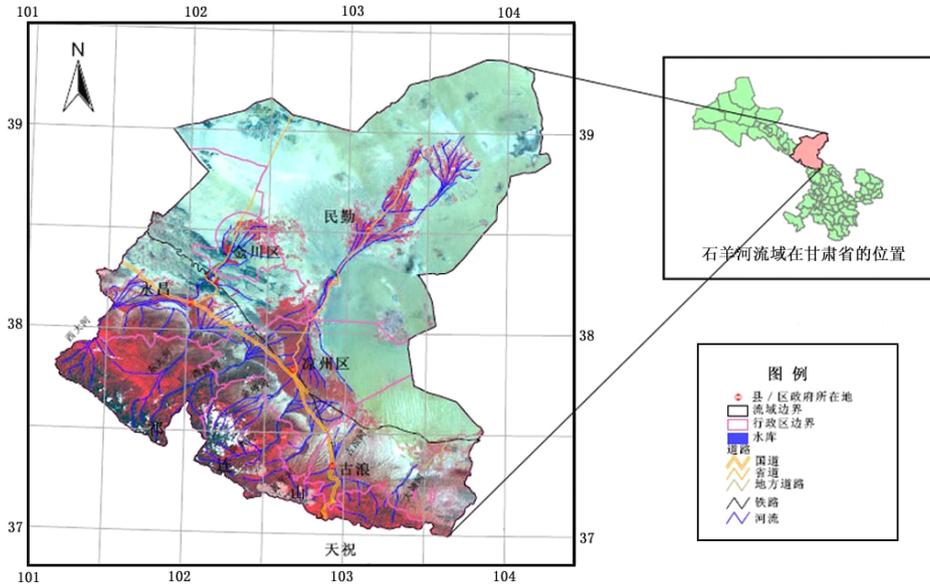


图 4-1 石羊河流域地理位置图

### 4.2 自然地理概况

#### 4.2.1 地质地貌

石羊河地质构造复杂，包括祁连山褶皱带、阿拉善台地和北山断块、走廊拗陷三大部分，地势南高北低，由西南向东北倾斜。冷龙岭是最高峰常年积雪，海拔 5254 m,; 最低为白亭海 1020 m。四大地貌单元：①祁连山地属青藏高原北缘，海拔 2000 ~ 5000 m; ②中部走廊平原是祁连山侵蚀堆积区，海拔 2000 ~ 1400 m, 形成南盆地，包括大靖、武威、永昌三个盆地；③北山剥蚀丘陵山地是构造隆升

后经剥蚀后残留的台块，海拔 2000 m 左右；④北部阿拉善高平原，海拔在 1400 ~ 1250 m。

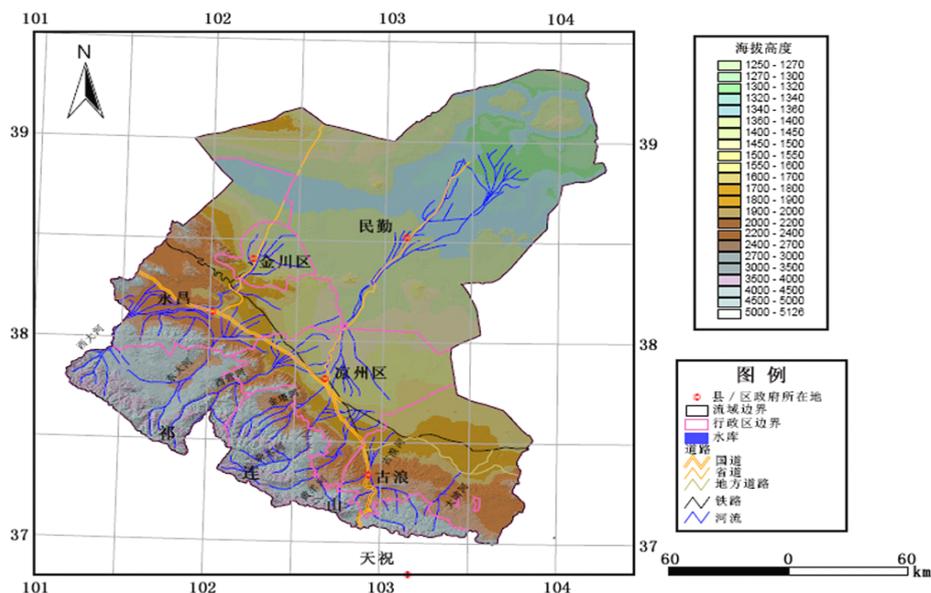


图 4-2 石羊河流域地貌图

#### 4.2.2 气候特点

石羊河流域深居大陆腹地，属大陆性温带干旱气候(图 4-3，表 4-1)，气候特点是：太阳辐射强，日照充足，夏季短而炎热，冬季长而寒冷，温差大，降水少，蒸发强烈，空气干燥。南部祁连山区地势高寒，海拔 2600 ~ 3200 m 处的年平均气温为 2.0 ~ 1.5℃，年降水量在 200 mm 以上，最高达 800mm，相对湿度约 58%，蒸发量 700 mm，无霜期约 100 日左右， $\geq 10^{\circ}\text{C}$  年积温小于 1500℃；在海拔 1600 ~ 2300 m 的地区，气候冷凉，是山农业向牧林业过渡的地带，虽然热量不足，但气候条件适于林、草生长，是河西地区重要的牧业和林业基地。中部走廊平原地区属温带干旱荒漠、半荒漠气候，气候温冷，夏季炎热，冬季酷寒，夏短冬长。本区光热资源丰富，年较差大，年平均气温为 5 ~ 10℃，日照时间长达 3000 ~ 4000 小时，年太阳总辐射收入为 502.4 KJ/cm<sup>2</sup> 至 628 KJ/cm<sup>2</sup>。北部高平原属干旱荒漠气候，气候温冷，冬季长而严寒，夏季短而炎热。这里光热资源更加丰富，但干旱程度加剧，年降水量在 100 mm 以下，年平均气温为 8 ~ 10℃，相对湿度为 45%左右，年蒸发量在 3000 mm 以上。

表 4-1 石羊河流域气象统计资料

	上游	中游	下游
年平均气温(°C)	<6	6~8	>8
相对湿度(%)	46~58	45	30~45
年平均降水量(mm)	500~700	150~250	<150
年蒸发量(mm)	800	800~1400	1200~1800
日照时数(h)	2550~2700	2700~3000	>3000

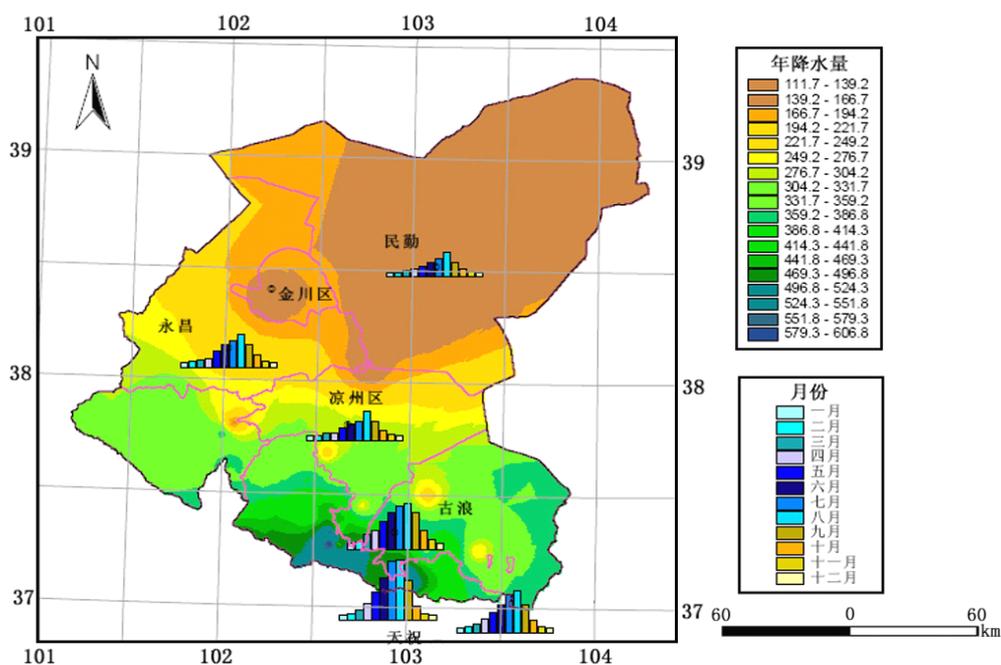


图 4-3 石羊河流域降水量图

#### 4.2.3 水文与水资源

石羊河流域水系发源于祁连山，由西大河、东大河、西营河、金塔河、杂木河、黄羊河、古浪河、大靖河八条河流组成。这些河流出山后，由武威的东、南、西三个方向流经古浪、凉州、永昌县，穿越平原，汇聚于武威城北三岔堡以下的扇形地北流，然后过红崖山峡口进入民勤盆地，至青土湖没于沙漠之中，全长 300 余 km，整个水系呈帚状，具有典型的内陆河系特征(图 4-4)。石羊河的径流由三部分组成：一为基本径流，是上游灌区灌溉水渗漏潜伏而出露的泉水；二为冬春余水，是非灌溉季节上中游灌区不宜利用和不能利用的各支流的径流和泉水下泄；三为洪水。前两项是组成石羊河径流的主要成分，约占总径流的 80%。径流在年内分配极不均匀，7~9 月主汛期径流占全年的 50%~64%，4~6 月灌溉临界期只占全年的 15%~20%，10~3 月占 20%~25%，给石羊河流域形成自产

地表水资源量 15.75 亿 m<sup>3</sup>，地下水资源 0.99 亿 m<sup>3</sup>。河流补给来源为山区大气降水和高山冰雪融水，产流面积 1.1 万 km<sup>2</sup>。

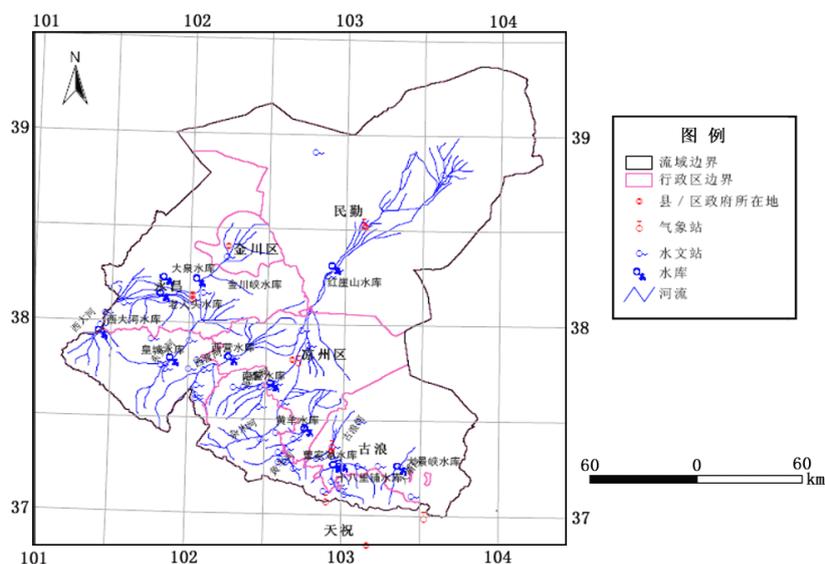


图 4-4 石羊河流域水文图

### 4.3 社会经济概况

据统计，2010 年，流域内总人口 241.31 万人。全流域国内生产总值 453.82 亿元，其中第一、第二和第三产业分别为 74.03、267.67 和 112.12 亿元，人均国内生产总值 18806.54 元，财政收入 17.76 亿元，财政支出 104.99 亿元。粮食总产量 130.16 万吨，农民人均纯收入 17512.3 元(甘肃省统计年鉴，2011)。

当前，流域内已基本形成以凉州区和金川区为中心的二元城市发展格局，城镇人口主要集中于凉州区、金川区、河西堡镇及各县城关镇等。流域人口增长速度过快，绿洲承载人口已达每平方公里 300 人以上，对于干旱内陆地区来说，人口密度已相当高。其中，从事种植业生产的人口约占总人口的 77%，第一产业负担人口所占比重大。

武威市是以农业发展为主的地区，金昌市是我国著名的有色金属生产基地，阿拉善右旗地区矿产、风能和太阳能资源比较丰富。流域内交通方便，物产丰富，有色金属工业及农产品加工业发展迅速，是河西内陆河流域经济较繁荣的流域。流域内交通方便，兰新铁路和甘新公路横穿流域东西，公路四通八达，基本形成完善的交通运输网。

## 5 石羊河流域生态健康分析

### 5.1 确定因子的权重

参考前人的研究方法，从状态、压力、响应三个方面来研究生态系统的健康程度，形成状态、压力、响应三大健康因子。考虑到不同指标对因子贡献率不同，即不同指标相对于它所属的健康因子来说重要程度不尽相同。为了体现因子的层次性，本研究采用熵值法和层次分析法计算各个因子不同指数的客观权重和主观权重，最终通过主观权重和客观权重得到指数的实际权重。这种方法降低了主观权重法和客观权重法计算权重时产生的误差，能够得到较为准确的权重值。计算结果如表 5-1 所示。

表 5-1 因子权重值表

指数	主观	客观	实际	指数	主观	客观	实际
P <sub>1</sub>	0.1909	0.02684	0.1089	P <sub>10</sub>	0.0418	0.1564	0.0991
P <sub>2</sub>	0.123	0.0676	0.0953	P <sub>11</sub>	0.4251	0.2167	0.3209
P <sub>3</sub>	0.0661	0.0233	0.0447	P <sub>12</sub>	0.191	0.2696	0.2303
P <sub>4</sub>	0.0542	0.0619	0.058	P <sub>13</sub>	0.2111	0.2814	0.2462
P <sub>5</sub>	0.0575	0.0332	0.0453	P <sub>14</sub>	0.1728	0.2323	0.2026
P <sub>6</sub>	0.1386	0.3195	0.2291	P <sub>15</sub>	0.5016	0.0307	0.2662
P <sub>7</sub>	0.0761	0.0108	0.0435	P <sub>16</sub>	0.2409	0.5286	0.3847
P <sub>8</sub>	0.0987	0.0742	0.0864	P <sub>17</sub>	0.2575	0.4407	0.3491
P <sub>9</sub>	0.1532	0.2263	0.1897				

### 5.2 构建模型

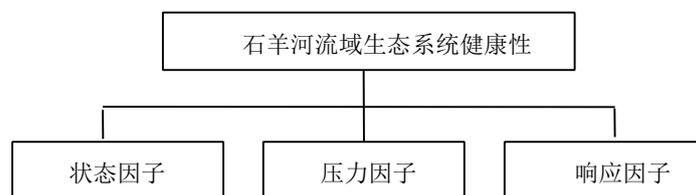


图 5-1 石羊河流域生态型健康评价

三大健康因子是本文的研究主体，将健康因子作为独立对象石羊河流域生态系统健康的空间分布特点及区域协调程度，以期对石羊河流域生态系统的健康性作整体的把握。三大健康因子从指数的选择、数据的获取到结论的分析都是贯穿全文的主线，也是文章写作的出发点和落脚点。

### 5.2.1 状态因子

状态因子，反映生态系统的完整性和功能性，包括生态系统的活力、组织结构和恢复力三个方面。本文中石羊河流域状态因子的指标中就包括反映生态系统活力、组织结构和恢复力程度的指标。包括 10 个指标，如图 5-2 所示。

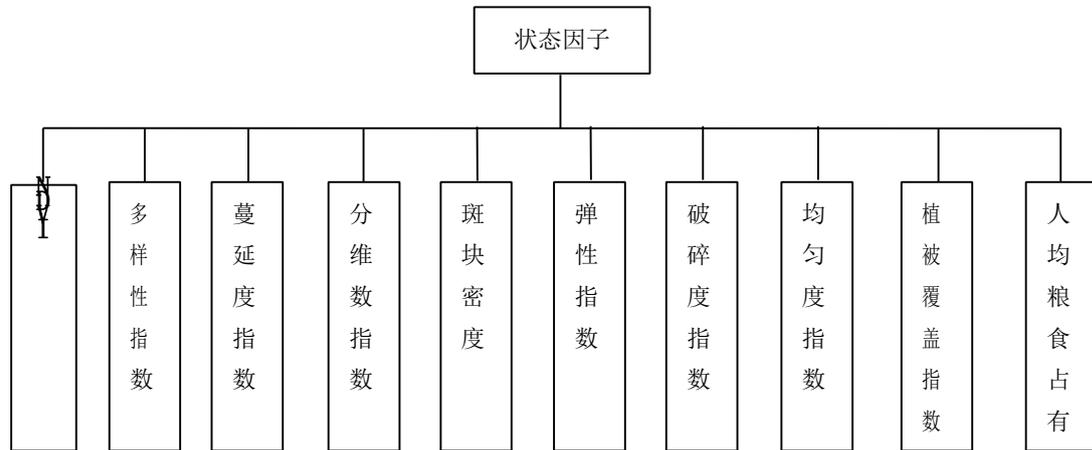


图 5-2 状态因子指标树状图

其中 NDVI 数据在相关网站直接获取，获取以后经过 ArcGIS 的处理，得到研究区 94 个乡镇的平均 NDVI 值。多样性指数、蔓延度指数、分维度指数、斑块密度、破碎度指数、均匀性指数是景观生态学涉及的指数，这些指数值的获得均通过 FRAGSTRATS 计算而得。人均粮食占有量数据可通过相关统计年鉴获得并计算。

弹性指数和植被覆盖度指数是参考其他学者的研究成果，利用相关公式计算而来。计算方法如图所示：

弹性指数：生态系统受到压力胁迫后，能够保持或恢复结构和功能的稳定性的能力称之为生态系统的恢复力。直接测量生态系统的恢复力比较困难，因此，在本评价指标体系中，根据不同土地覆盖/利用类型对生态恢复的贡献和作用，分别赋以不同级别的生态恢复力值，得出综合的指数来反映生态系统恢复力。

表 5-2 土地覆盖/利用的生态恢复力赋值

土地覆盖/利用类型	恢复力	特征
有林地、水面	0.9-1.0	指对维持生态系统恢复力有决定意义的地物类型。林地和水域是在维持区域的稳定性和保持区域的调节能方面有极其重要作用的生态类型。
滩地、沼泽	0.8-0.9	
高覆盖草地、灌木林地	0.7-0.8	
中覆盖草地、疏林地	0.6-0.7	
水田	0.5-0.6	这种生态类型对维持生态系统恢复力有重要作用，对人类社会系统提供重要的物质和活动场所，如果利用不好，则容易导致生态恢复力下降。
旱地	0.4-0.5	
建设用地	0.3-0.4	
低覆盖草地	0-0.3	这种生态类型对区域生态系统恢复力的贡献相对很小。
未利用地	0	

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n A_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

然后利用公式：计算各行政单位弹性指数。F 弹性指数； $S_i$ 为不同斑块类型各斑块面积； $A_i$ 为不同土地类型恢复力赋值（表 5-2）。

植被覆盖度指数=Aveg×(0.38×林地面积+0.34×草地面积+0.19×耕地面积+0.07×建设用地+0.02×未利用地)/区域面积，植被覆盖指数的归一化指数（如图 5-3）。

表 5-3 植被归一化指数

	林地			草地			农田		建设用地			未利用地			
权重	0.38			0.34			0.19		0.07			0.02			
结构类型	有	灌	疏	高	中	地	水	旱	城	农	其	沙	盐	裸	裸
	林	木	林	覆	覆	覆	田	田	镇	村	他	地	碱	土	岩
	地	林	地	盖	盖	盖			建	居	建		地	地	石
			地	和	草	草			设	民	设				砾
			其	地	地	地			用	点	用				
			他						地		地				
分权重	0.6	0.25	0.15	0.6	0.3	0.1	0.7	0.3	0.3	0.4	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2

## 5.2.2 压力因子

压力因子，反映人类活动和自然灾害对流域生态系统造成的压力，一般文献中包括地形地貌、人口、交通状况对环境产生的影响。本文主要研究的是人口及人类活动对流域生态系统健康性造成的压力。这些指数值均可以通过查阅当地县级统计资料并作简单数学计算得到，其指标体系如图 5-3 所示。

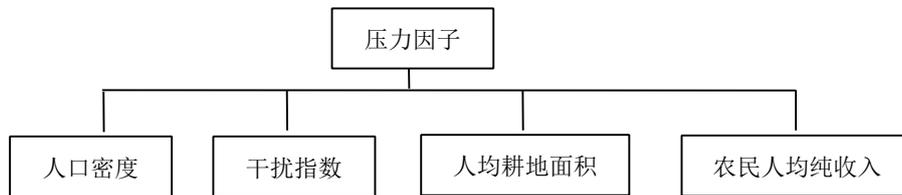


图 5-3 压力因子指标树状图

### 5.2.3 响应因子

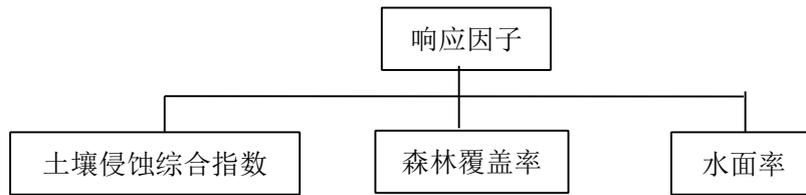


图 5-4 响应因子指标树状

响应因子，反映生态系统组分对环境的影响，例如土壤理化性质、森林面积及分布位置和水面面积对流域生态环境的响应程度。这些因子的改变往往会影响到生态系统功能的完整性和健康性。本文从土壤、森林及水域面积三个方面选取指标描述区域生态因子对生态系统的响应能力。其指标体系如图 5-4 所示。

土壤侵蚀综合指数是通过计算盐碱地、裸岩、裸地等土地类型在区域土地面积的比重获得；森林覆盖率指的是森林面积在区域土地面积中的比重；水面率用水域面积所占土地面积的比重估算。

## 5.3 健康因子空间集聚趋势分析

### 5.3.1 状态、压力、响应因子的全局空间自相关性分析

莫兰指数 (Moran's I) 反映因子在全局中的空间集聚特征。本文利用 ArcGIS 中 Spatial Autocorrelation (Moran's I) 工具分别计算三大健康因子的莫兰指数，用邻接关系方式定空间权重矩阵的权重值。分析状态、压力、响应指标的全局空间自相关性，以推断其空间集聚特征。计算结果如表 5-4 所示：

表 5-4 健康因子的全局 Moran's I 指数值

	指数值	Z Score	p	意义
状态因子	0.1923	17.26	0	空间集聚
压力因子	0.6143	55.92	0	空间集聚
响应因子	0.5109	46.51	0	空间集聚

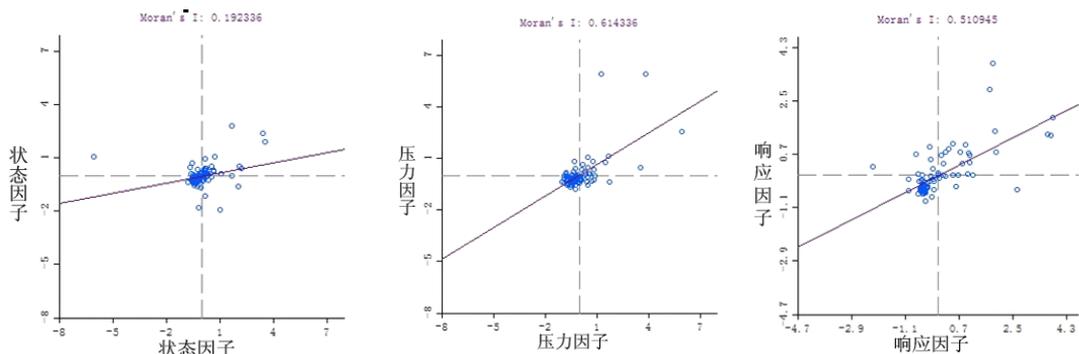


图 5-5 状态因子、压力因子、响应因子 Moran' s I 指数散点图

状态因子的莫兰指数为 0.1923, Z 得分是 17.26, p 值为 0, 通过 1% 的显著水平检验, 在全局中呈现集聚分布的特征; 压力因子的莫兰指数是 0.6143, Z 得分是 55.92, p 值为 0, 通过 1% 的显著水平检验, 呈现集聚分布的特征; 响应因子的莫兰指数是 0.5109, Z 得分是 46.51, P 值为 0, 呈现集聚分布的特征。3 大健康因子均在全局中呈现集聚特征, 其中集聚特征最强的是压力因子, 状态和响应因子呈现相对较弱的集聚特征。而散点图能够更加直观的展现健康因子空间集聚的程度, 石羊河流域健康因子莫兰指数的散点图如图 5-5 所示。

在散点图中第 1、3 象限代表正的空间相关关系, 第 2、4 象限代表负的相关关系, 其中: 第一象限代表高值区被其他高值区包围 (高-高); 第三象限代表低值区被其他低值区包围 (低-低); 第二象限代表低值区被其他高值区包围 (高-低); 第四象限代表高值区被其他低值区包围 (低-高)。

### 5.3.2 状态、响应、压力因子局部空间自相关性分析

全局空间自相关分析反映因子总体的空间聚集趋势, 通过它可以宏观的判断健康因子在空间上是否存在聚集趋势, 旨在重点揭示因子整体的空间分布态势。局部空间自相关分析通过分析子区域因子信息揭示因子属性与相邻地理单元因子属性的关系, 判断因子空间分布的冷点及热点。较全局自相关指数而言, 局部相关因子更加强调因子具体的空间分布规律, 旨在判断聚集区与孤立区在研究区域中的具体位置。

本文通过 G\* 指数研究因子的局部空间自相关特征。本研究利用 ArcGIS 中 Spatial Autocorrelation(Moran's I) 及 High-Low Clustering(Getis-Ord General G) 工具计算健康因子的 Moran's I 及 G\* 指数。根据数值特点及研究要求, 将 G\* 指数划分为七个等级, 其中 G\* 值越大说明区域间的联系越紧密, 信息的交流、物质的流动越频繁, 即是对应指标空间分布的热点区, 反之, 值越低则是空间分布的冷点区。

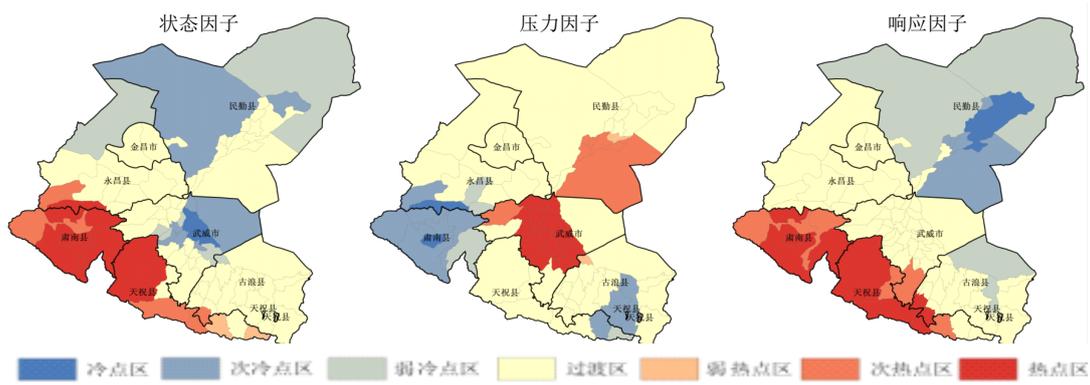


图 5-6 状态因子、压力因子、响应因子冷热点分布图

从石羊河流域生态健康因子冷热点分布图可以看出：

(1) 就状态因子看，石羊河流域生态状况良好的地区集中在南部祁连山山区，该地区植被覆盖度好、水资源丰富、生态状况稳定，该地区的整体生态状况呈现稳定有序的特点，其中生态热点区集中在肃南和天祝两个县区；中部盆地地区的生态现状呈现出差异性，在该地区有生态冷点区，集中在武威盆地，武威盆地是历史上受人类活动影响较早的地区之一，尤其是受到农业发展的影响生态环境较历史时期发生较大变化，部分地区生态环境恶化，水资源减少、土壤盐渍化现象明显、生态环境稳定性下降，但在中部盆地地区大部分区域生态环境尚处在过渡阶段，人类干预的可能性较大，生态潜力明显；下游的民勤荒漠区是受人类作用最明显的地区，该地区生态环境总体较差，其中生态现状最差的分布在西北的花儿园乡，由于水资源短缺造成土地沙漠化、盐渍化现象明显，植被以次生的沙枣林为主，生态环境极易受到气候和人类的影响，区域之间的联系不紧密。

(2) 就压力因子看，整个流域生态压力最大的地区（生态压力热点区）集中在中游的武威盆地，该地区受到人类活动的影响大，人口集中、交通较发达、自然灾害频发，对当地的生态环境造成很大的压力；生态压力最小的地区集中在南部祁连山区的西部，该地区地处山区，地形复杂、交通不发达、人口稀少，因此受到人类活动的影响较小，植被覆盖度高、水资源丰富、生态环境完善，地域自然灾害的能力强；整个研究区大多数地方生态环境的压力还处在过渡区，未来发展的方向受人类活动的影响程度大。

(3) 响应因子冷热点的分布和状态因子冷热点的分布相似。响应能力最强的在南部祁连山区，该地区的土壤理化性质稳定、森林的分布面积广泛、水域的面积稳定，生态系统响应外界环境变化的能力强；北部的民勤荒漠区响应能力弱，响应因子的冷点就分布在这一地区，这一地区受到人类开发程度大，生态系统的稳定性较差，土壤、水体、森林的面积有限，容易受到外界环境变化的影响。

### 5.3.3 生态因子分布图系

不同级别的健康因子在空间上的分布不同，通过研究不同等级的健康因子空间分布情况可以更详细的认识研究区内部不同区域的生态系统现状、生态压力和响应能力。生态健康因子的分布有一定的规律，为进一步分析三大健康因子的空间分布情况，特引入分布图系的方法。

本研究参考前人的研究思路，根据数据特点采用等间隔分级，利用 ArcGIS

强大的空间选择功能将不同级别的健康因子表示在不同的图层中，形成分布图系，图 5-7、5-8、5-9 分别是状态因子、压力因子、响应因子的分布图系，每张图都代表了该级别下的因子空间分布格局。图中数值从 I 到 V 逐渐增加，将它们组合起来观察更易获得健康因子在空间上的变化信息，了解随着指标从低值到高值的变化。

本研究中按照行政边界划分上中下游地区，其中：上游（古浪县、肃南、天祝）；中游（永昌县、武威市、金昌市）；下游（民勤县）。表 5-3、5-4、5-5 是健康因子在不同级别上的数学统计数据。结合健康因子分布图系及不同因子在流域上中下游的统计数据，分析石羊河流域生态环境状况、压力、响应规律。综合分析两者所反应的信息，从数量层级上探究三大健康因子在地理空间上的分布特点。

### (1) 状态因子的分布图系

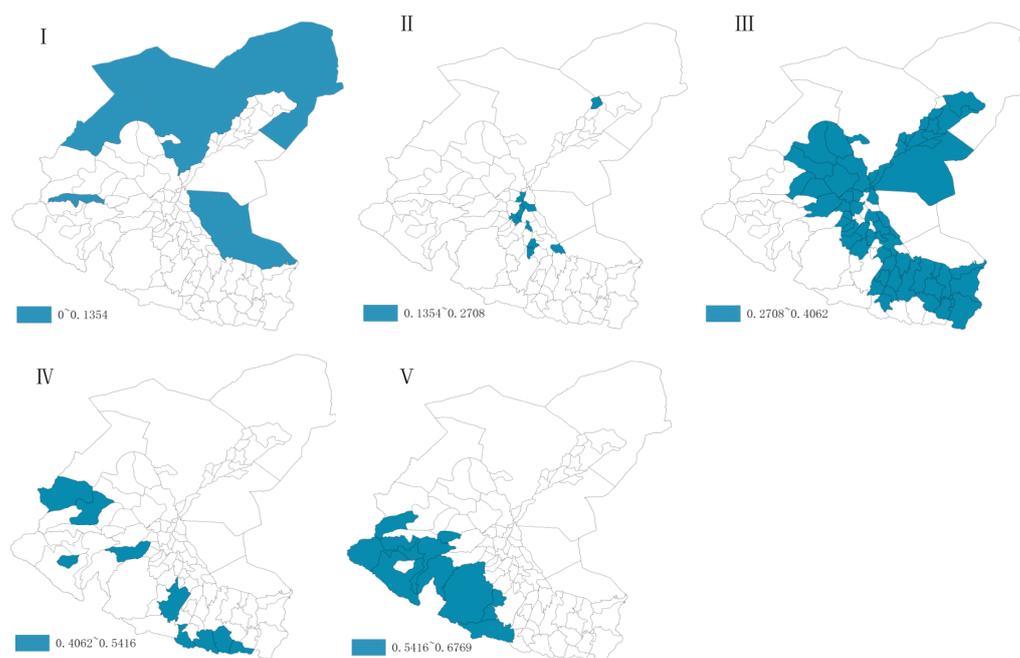


图 5-7 2010 年石羊河流域状态因子空间分布图系

图 5-7 是状态因子空间分布图系。等级越高数值越大，说明该区域生态环境的结构越完整功能越完善。分布图系反映状态因子的空间分布特征，随着因子值从低值到高值的变化，该因子值在对应的空间单元的位置也发生着转移，这种转移趋势直接反映区域生态现状状况。从图 I 到图 V，生态状况逐渐优化，空间位置逐渐的由下游的民勤荒漠区向上游的祁连山区转移，状态因子的数值由北部民勤绿洲到南部祁连山山地逐渐增加。这说明，距离河流补给区越近，生态环境

状况越好，这是因为石羊河流域是以雪山融水为主要补给，南部山区地形复杂、降水量大、植被覆盖度好，生态环境状况越好，而北部荒漠区降水少、植被稀疏、气候干燥、土地类型以荒漠戈壁为主，故生态现状差，生态环境脆弱。

表 5-4 状态因子分级的分区域单元个数及面积统计

状态因子级别	分区域单元个数			单元平均面积 (km <sup>2</sup> )
	上游	中游	下游	
1 0~0.1354	1	3	2	2859
2 0.1354~0.2708	1	7	1	51.48
3 0.2708~0.4602	18	27	15	197.38
4 0.4602~0.5416	5	4	0	293.93
5 0.5416~0.6769	8	2	0	527.8

从单位数量来看：石羊河流域生态状况不好（级别 1、2）的地区和生态状况好（级别 4、5）的地区均占少数，大多数地区处在生态状况一般的状态（级别 3），生态状况差的地区平均面积为 2859km<sup>2</sup> 远大于生态状况好的地区的平均面积 527.8km<sup>2</sup>，说明石羊河流域生态环境差的地区连片发展，生态环境较好的地区斑块破碎、整体性差。

中游地区行政单元数量大于上游和下游，说明人类活动集中在中游地区。上游 39.39%的行政单元生态环境状况好，6.06%的行政单元生态环境较差，54.55%的行政单元生态环境状况一般，表明从行政单元的数量上来看石羊河流域上游生态现状处在基本较好的过渡期；中游有 23.26%行政单元生态环境较差，62.79%的行政单元生态环境一般，13.95%的行政单元生态环境较好；下游 16.67%的行政单元生态环境差，83.3%的行政单元生态环境一般，没有生态环境较好的地区。

分布图系结合数理统计表表明，石羊河流域生态环境状态因子无论从行政单元数量上还是从分布的位置上，都呈现渐变的趋势，这种变化与气候的变迁、人类活动的影响、地形地貌等因素息息相关。

## （2）压力因子的分布图系

图 4-4 是状态因子空间分布图系，数值从 I 级到 V 级逐渐增加，数值越大说明该区内包括人口、交通状况等人类活动及地形地貌等自然条件对环境的压力越大。

从全流域来看整体压力较小。多数地区处在压力等级较低的级别，如图 5-5 中的 I 所示。随着压力指数值的增加，即从 I 级转化到 V 级，行政单元的数量也

是越来越少，所占流域的面积也逐渐的较小。说明压力因子在全流域分布均匀，流域的南北部均有分布，平均压力值较小，由于石羊河流域曾是我国西部内陆地区重要的粮食生产基地，流域自然资源在历史时期得到了较大程度的开发，环境压力在个别地区表现明显，其中高压力区集中在游武威、永昌盆地。该地区地形相对平坦、人口分布集中、农业较为发达、交通便利，生态环境压力大。

表 5-5 压力因子分级的分区域单元个数及面积统计

压力因子级别	分区域单元个数			单元平均面积 (km <sup>2</sup> )
	上游	中游	下游	
1 0~0.1183	27	19	6	595.01
2 0.1183~0.2366	5	15	10	10.50
3 0.2366~0.3549	1	6	1	391.58
4 0.3549~0.4732	0	2	1	42.40
5 0.4732~0.5915	0	1	0	41.66

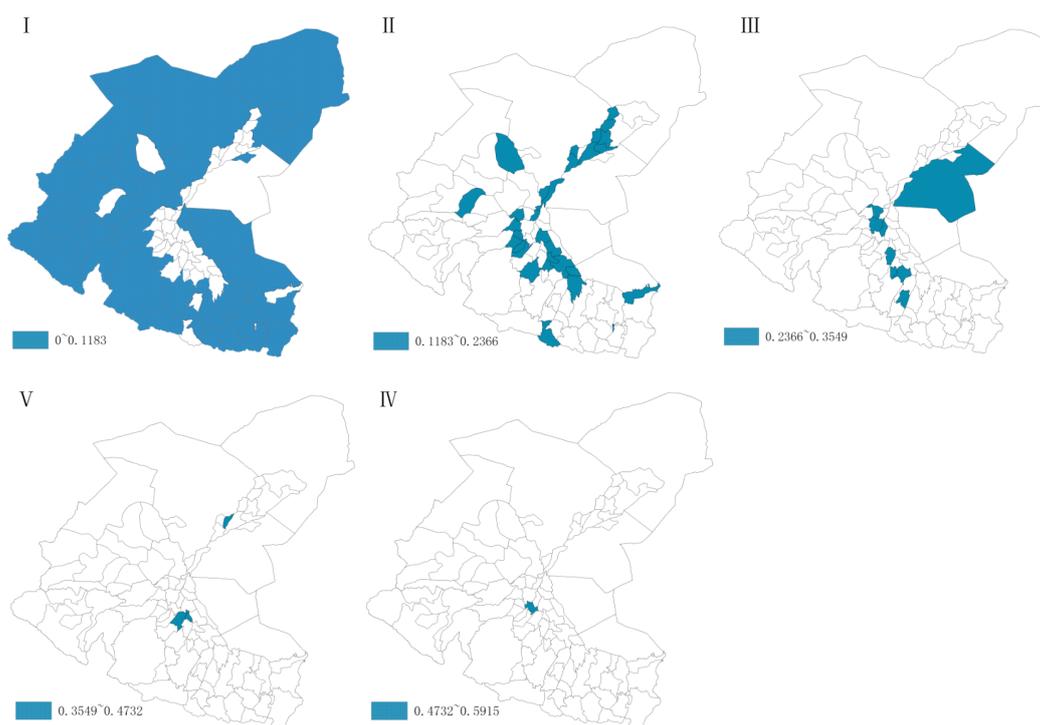


图 5-8 2010 年石羊河流域压力因子空间分布图系

表 5-4 是压力因子各等级在流域上分布的统计数据。由表可知，流域中处在压力级别 1 和级别 2 的行政单元数量最多，多达 82 个，占流域行政单元总数的 88.17%。并且在上中下游均有分布，压力等级为级别 1 和级别 2 的行政单元在上游地区占单元总数的 96.97%，中游 79.07%，下游 88.89%。压力级别较小的 1

级平均面积最大为 595.01km<sup>2</sup>，说明流域生态系统整体压力较小，压力级别最大的仅分布在中游的武威盆地。

石羊河是西北内陆地区开发最早的地区之一，人类文明对流域生态环境的改变起到很大作用，不考虑自然条件改变对环境造成的影响，就单纯人类活动对环境直接的影响而言，整个流域的均相对较小。只有在人口高度集中的极少数地区环境压力大。尽管如此，近年来人类活动对自然环境造成很大影响，极大的改变了流域的自然环境状态，给环境造成了不小的压力，比如农耕活动中不合理的水资源使用方式致使部分地区水土流失、土地沙漠化、土壤盐碱化、森林覆盖面积减少等生态现象突出，间接的改变和影响流域生态系统的功能性和整体性。

### (3) 响应因子的分布图系

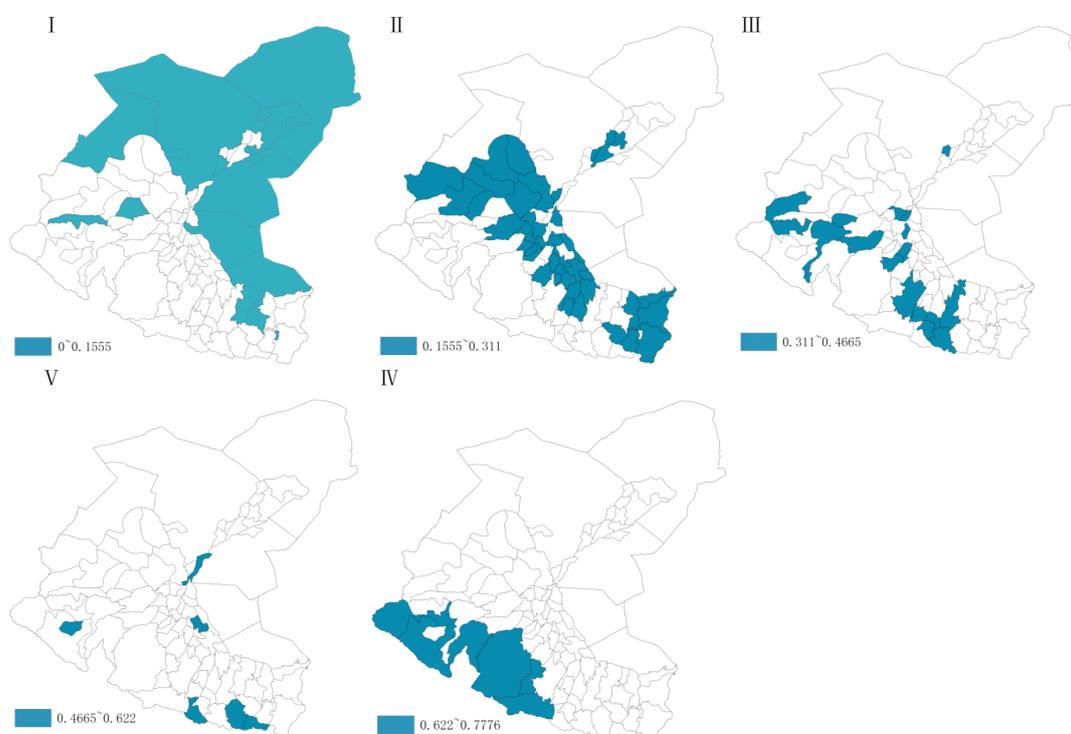


图 5-9 响应因子空间分布图系

图 5-9 是响应因子的数量分级图，从 I 级到 IV 级数值逐渐增加，数值越大说明该区域内土壤、森林及水域面积的变化对流域生态系统完整性和健康性的影响越大。分布图系反映响应因子的空间分布特征，随着因子值从低值到高值的变化，该因子值对应的空间单元的位置也发生着转移，这种转移趋势直接反映区域应对环境变化的能力。由图可知，因子响应环境变化的能力越强，空间分布逐渐向北移动，逐渐从下游的民勤荒漠区向上游的祁连山区转移。南部山区生态覆盖度好生态系统的整体性和功能性完整，应对外界环境变化的能力强，而北部荒漠区降

水少、植被种群较少、土地类型以戈壁和荒漠为主，生态系统的稳定性和完整性较差，生态环境脆弱响应外界变化的能力弱。

表 5-6 响应因子分级的分区域单元个数及面积统计

响应因子级别	分区域单元个数			单元平均面积 (km <sup>2</sup> )
	上游	中游	下游	
1 0~0.1555	4	5	11	1061.65
2 0.1555~0.311	12	28	5	186.53
3 0.311~0.4665	7	9	1	165.60
4 0.4665~0.622	4	1	1	162.02
5 0.622~0.7156	6	0	0	661.62

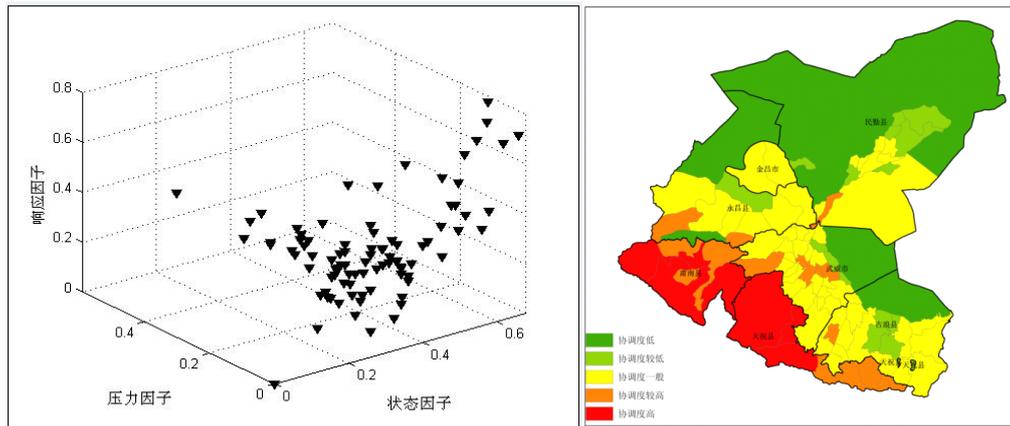
从单元数量来看：石羊河流域生态系统响应能力整体较差，级别 1、2 的地区占行政单元总数的 68.15%，处在过渡区（级别 3）的占 18.09%，级别 4、5 的地区占 12.77%，平均面积最大的是级别 1 平均为 1061.65km<sup>2</sup> 远大于响应能力强的 4 级 162.02km<sup>2</sup>，说明石羊河流域生态系统响应外界环境变化的能力整体较弱，响应能力差的地区连片发展，响应能力好的地区斑块破碎，平均面积小，整体性差。

上游 48.48%的行政单位生态系统响应能力弱，30.3%的行政单元生态系统响应能力强，21.21%的行政单元生态系统响应能力一般。表明石羊河流域上游生态系统响应能力整体较弱；中游有 76.74%行政单元生态系统响应能力弱，20.93%的行政单生态系统响应能力一般，2.33%的行政单元响应能力强，与上游相比响应能力略低；下游有 88.89%的行政单元响应能力弱，5.56%的行政单元响应能力一般，5.56%的行政单元响应能力强，下游也是生态系统响应能力较弱的地区，与上中游相比响应能力更弱。

近年来，随着人类活动对自然生态环境的影响越来越大，石羊河流域生态系统的结构和功能发生了很大的变化，其中对外界条件变化反映最敏感的是响应因子。总体而言，石羊河整个流域响应外界变化的能力均不强，空间分布上从上游到下游响应能力逐渐变弱。

### 5.3.4 生态因子空间协调性分析

图



5-10 生态健康因子协调性分布图

依据协调发展模型，对石羊河流域健康因子，状态因子、压力因子、响应因子数据归一化处理，并置于协调发展模型的空间内，对不同级别的因子作分级处理，计算因子整体的协调性指数，最终将协调指数划分为协调度低、协调度较低、协调性一般、协调度较高、协调度高五个级别。利用 ArcGis 结合 Matlab 制图工具，绘制协调度分布图（见图 5-10），从数值的大小和空间分布位置两个方面研究石羊河流域空间协调程度。

由健康因子协调度分布图可知，整个流域中有 19 个行政单位处在协调性较低的协调度，占行政单位总数的 20.22%；53 个行政单位协调性一般，占 58.51%；22 个行政单位协调性高占 23.4%，石羊河流域生态因子协调性整体一般，协调性较高的行政单元数略多于协调性较低的行政单元数。

从空间分布来看，上游有 12.5% 的行政单元生态因子协调性较低，43.75% 的行政单元生态因子协调性一般，协调性较高的占 43.75%；中游有 13.64% 的行政单元生态协调性较低，70.45% 的行政单元空间协调性一般，15.91% 的行政单元生态协调性好；下游有 50% 的行政单元生态协调性较低，44.44% 的行政单元生态协调性一般，5.56% 的行政单元协调性好。可知，由上游到下游生态因子的协调性逐渐减弱。图 4-6 中由红色到绿色，生态协调性逐渐减弱，分布位置也从上游的祁连山区转移到下游的民勤荒漠区，生态协调性最差的主要分布在民勤和武威的沙漠区，这些地区植被覆盖度低、沙漠面积广、水资源有限、生态系统的完整性低、生态系统的稳定性低。协调性好的地区分布在祁连山区，这些地区植被覆盖度好、水资源丰富、生态系统完整、系统稳定性高、协调程度好。

石羊河流域水资源补给主要以上游祁连山区的冰川融水为主，森林面积主要分布在祁连山区，由于地形地貌的限制该地区人口稀少，生态系统受到人类活动影响较小，故是区域生态系统协调性最好的地区。

表 5-7 健康因子协调发展度

	上游		中游		下游	
	乡镇数	百分比	乡镇数	百分比	乡镇数	百分比
协调度低	1	16.7%	3	50%	2	33.3%
协调度较低	3	23.08%	3	23%	7	53.85%
协调度一般	14	27.27%	31	58.18%	8	14.45%
协调度较高	8	50%	7	43.75	1	6.25%
协调度高	6	100%	0	0	0	0

## 6. 结论与不足

### 6.1 本研究的主要结论

石羊河是我国西北内陆地区开发最早的地区之一，是我国历史上重要的粮食生产基地，区域的发展和社会的不断发展和进步不可避免的给当地的生态系统带来了巨大的压力和挑战。本文根据研究区的生态环境特征，结合遥感解译、野外调查及社会统计等多元数据，构建了石羊河流域生态系统健康评价体系，探讨了生态健康状态，研究表明：

(1) 状态、压力、响应三大健康因子在空间分布上存在明显的全局自相关性，故以计算  $G^*$  为主要手段，研究三大健康因子分布的冷点、热点。结果表明：

就石羊河生态系统现状而言，区域生态状况良好的地区集中在植被覆盖度好、水资源丰富、生态状况稳定的南部祁连山山区，生态热点区集中在肃南和天祝两个县区；生态冷点区部分分布在受到农业发展影响大的武威盆地地区，部分分布在生态环境脆弱、自然条件恶劣的民勤荒漠区，这些地区水资源减少、土壤盐渍化现象明显、生态环境稳定性下降。

就石羊河生态系统压力而言，整个流域生态压力最大的地区集中分在中游受到人类活动的影响大，人口集中、交通较发达，自然灾害频发的武威盆地地区；生态压力最小的地区集中在地形复杂、交通不发达、人口稀少的南部祁连山区，该地区地处山区，因此受到人类活动的影响较小、植被覆盖度高、水资源丰富、生态环境完善，抵御自然灾害的能力强。

就石羊河生态系统响应能力而言，响应因子冷热点的分布和状态因子冷热点的分布相似。响应能力最强的分布在土壤理化性质稳定、森林的分布面积广泛、水域的面积稳定的南部祁连山区；响应因子的冷点就分布在响应能力弱的民勤荒漠区，这一地区受到人类开发程度大，生态系统的稳定性较差，土壤、水体、森林的面积有限，容易受到外界环境变化的影响。

(2) 分布图系是对健康因子空间分布的直观表示。

在状态因子空间分布图系中：从图 I 到图 V 生态状况逐渐优化，状态因子的数值由北部民勤绿洲到南部祁连山山地逐渐增加，分布空间位置逐渐的由下游的民勤荒漠区向上游的祁连山区转移，距离河流补给区越近生态环境状况越好。南部山区地形复杂、降水量大、植被覆盖度好，生态环境状况越好，而北部荒漠区降水少、植被稀疏、气候干燥、土地类型以荒漠戈壁为主，故生态现状差，生态环境脆弱。

在压力因子分布图系中：压力因子在全流域分布均匀，流域的南北部均有分布，平均压力值较小，高压区集中在游武威、永昌盆地，该地区地形相对平坦、人口分布集中、农业较为发达，生态环境压力大。

在响应因子分布图系中：数值从 I 级到 IV 级逐渐增加，生态系统的完整性和功能性逐渐增强，因子响应环境变化的能力越强，空间分布逐渐从下游降水少、植被种群较少、土地类型以戈壁和荒漠为主、生态系统的稳定性和完整性较差、生态环境脆弱响应外界变化能力弱的民勤荒漠区向上游生态覆盖度好的祁连山区转移。

(3) 健康因子反映了流域生态系统在三个层次上的健康程度，但健康因子之间并不是相互独立的，它们是相互联系的、完整的综合体。因此，在分别研究因子空间分布的基础上，还要综合研究因子的空间分布特点，而因子之间的协调性，恰恰是关键出发点。研究表明：石羊河流域生态因子协调性整体一般，协调性较高的行政单元数略多于协调性较低的行政单元数。随着生态协调性逐渐减弱，分布位置也从上游的祁连山区转移到下游的民勤荒漠区，生态协调性最差的主要分布在民勤和武威的沙漠区，这些地区植被覆盖度低、沙漠面积广、水资源有限、生态系统的完整性低、生态系统的稳定性低。协调性好的地区分布在祁连山区，这些地区植被覆盖度好、水资源丰富、生态系统完整、系统稳定性高、协调程度好。

## 6.2 文章不足

由于个人知识的不足以及数据限制，在研究中或多或少还会存在一些问题，今后还需要在以下几个方面进行进一步的改进和探索：第一，指标的选取，构建的指标体系能否全面反映石羊河流域生态系统健康程度有待进一步斟酌；第二，时间序列。本文只选取了 2010 年石羊河的数据，描述的是石羊河流域系统健康现状，若能从时间序列研究演变程度更有意义；第三，研究区域的选择上还有很大递补的空间，若有可能可以获取典型对比区的数据，做对比研究，更准确、更全面的反映石羊河流域生态系统健康的程度。

## 参考文献:

- [1] Palmer M A , Bernhardt E S, Allan J D , et al. Standards for ecologically successful river restoration [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42:208-217.
- [2] 庞治国, 王世岩, 胡明罡. 河流生态系统健康评价及展望[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2006,4 (2): 396-401.
- [3] Norris R H, Hawkins C P, Monitoring River Health [J]. *Hydrobiologia*, 2000, 435:5-7.
- [4] Rapport D J, Costanza R, Mc Michael A J. Assessing Ecosystem Health[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 1998, 13:397-402.
- [5] 袁兴中, 刘红, 陆健健. 生态系统健康评价——概念构架与指标选择[J]. *应用生态学报*, 2001,12(4):627-629.
- [6] 鲁邵伟, 刘凤芹, 余新晓, 等. 北京八达岭林场森林生态系统健康评价[J]. *水土保持学报*, 2006,20 (3): 79-82.
- [7] 刘永, 郭怀成, 黄凯, 等. 湖泊-流域生态系统管理的内容与方法[J]. *生态学报*, 2007,27(12): 5352-5360.
- [8] 陈高, 邓红兵, 代力民, 等. 森林生态系统健康评估, 案例实践[J]. *应用生态学报*, 2005,16 (1): 1-6.
- [9] 吴炳方, 罗治敏. 基于遥感信息的流域生态系统健康评价[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16 (1): 102-106.
- [10] 刘明华, 董贵华. RS 和 GIS 支持下的秦皇岛地区生态系统健康评价[J]. *地理研究*, 2006,25 (5): 930-938.
- [11] 麦少芝, 徐颂军, 潘颖君. PSR 模型在湿地生态系统健康评价中的应用[J]. *热带地理*, 2005,25 (4) :317-321.
- [12] 唐涛 , 蔡庆华 , 刘建康. 河流生态系统健康及其评价. *应用生态学报* , 2002 ,13 (9) : 1191~1194.
- [13] 龙笛 , 张思聪. 滦河流域生态系统健康评价研究. *中国水土保持* , 2006 ( 3) : 14~17 .
- [14] Rapport D J. The stress response environmental statistical system and its applicability to the Laurentian Lower Great Lakes [J]. *Statistical Journal of the United Nations ECE*, 1983, 1:377-405.
- [15] Rapport D J , Gaudet C L. Calow P. Evaluating and monitoring the health of large scale ecosystems[C]. *Global Environment Change Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop*, 1993,28:5-39.
- [16] Harris H J, Harris V A, Regier H A. Importance of the nearshore area for sustainable redevelopment in the Great Lakes with observations on the Baltic Sea[J]. *Ambio*, 1988,5:163-261.

- [17] Bird P M, Rapport D J. State of the Environment Report for Canada [M]. Canadian Government Publishing Center, 1986. 264-265.
- [18] Whitford W G. Desertification: implications and limitations of the ecosystem health metaphor. *Evaluating and Monitoring the Health of Large-scale Ecosystems* [J]. Springer Verlag, 1995:273-294.
- [19] Rapport D J, Regier H A, Hutchinson T C. Ecosystem behavior under stress [J]. *American Naturlist*, 1985,125:617-640.
- [20] Rapport D J, Regier H A, Hutchinson T C. Ecosystem behavior under stress [J]. *American Naturlist*, 1985,125:617-640.
- [21] Rapport D J. What is clinical ecology? *Ecosystem Health, New Goals in Environmental Management* [M]. Washington D. C. Covelo, California, Island Press, 1992. 144-156.
- [22] Harris H. J., Harris V. A., Regier H. A. Importance of the nearshore area for sustainable redevelopment in the Great Lakes with observations on the Baltic Sea[J]. *Ambio*, 1988(5):163-261.
- [23] Hilden M., Rapport D J. Four centuries of cumulative impacts on a Finnish river and its estuary: and ecosystem health approach [J]. *Aquatic Ecosystem Health*, 1993(2):261-275.
- [24] Minns C K. Use of models for disruption and human health: the next challenge to public health [J]. *Journal of Public Health*, 1992, 16:3-5.
- [25] 傅伯杰,陈利项,马克明,等.景观动态变化. 景观生态学原理及应用[M].北京:科学出版社,2002:111-115,162-163.
- [26]王治良,王国祥.洪泽湖湿地生态系统健康评价指标体系探.中国生态农业学报,2007,15(6):152~155.
- [27]林木隆,李向阳,杨明海.珠江流域河流健康评价指标体系初探.人民珠江,2006,(4):1~4.
- [28]蒋卫国,李京,李加洪,等.辽河三角洲湿地生态系统健康评价[J].生态学报,2005,25(3):408-414.
- [29]米文宝,樊新刚,刘明丽.宁夏沙湖水生生态系统健康评估[J].生态学杂志,2007,26(2):296-300.
- [30] Schindler D W. Effects of acid rain on freshwater ecosystem [J]. *Science*, 1988(239):149-159.
- [31] 李春晖,崔嵬,庞爱萍,等.流域生态健康评价理论与方法研究进展[J].地理科学进展,2008,27(1):9-17.

- [32] Rapport D J. Evolution of indicators of ecosystem health . In:Daniel,H,(eds). Ecological Indicators Barking: Elsevier Science Publishers Ltd,1992,121~134.
- [33] Robert C. Ecological economic issue and consideration in indicator development ,selection, and use: toward an operation definition of system health .In: Daniel, H.(eds). Ecological Indicators. Barking: Elsevier science Publishers Ltd,1992,1491~1502.
- [34] Rapport D J, Costanza R, McMichael A J. Assessing Ecosystem Health. Trends Ecol Evolu, 1998 , (13):397~ 402.
- [35] Meyer J L. Stream health: incorporating thee human dimension to advance stream ecology. Journal of the North American Benthological Society , 1997, (16): 439~447.
- [36] 唐涛, 蔡庆华, 刘建康. 河流生态系统健康及其评价[J]. 应用生态学报, 2002,13 (9): 1191-1194.
- [37] Barbour M T. Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable River: Periphyton, Benthic Macronvertebrates and Fish[M]. 2nd edn EPA,841-B-99. USEPA.1999.
- [38] Brinson M M, Hauer F R, Lee L C, et al. Guide book for application of hydrogeomorphic assessments to river wetlands[R]. Technical Report WRPDF211, US Army Engineer Waterways Experiment Station,Vicksbury,MS,1995.
- [39] Karr J R, Chuew. Sustaining livingrivers. Hydrobiologia, 2000, (422): 1~ 14.
- [40] Schofield N J, Davies P E . Measuring the health of our rivers. Water, 1996, 5(6): 39~43.
- [41] 王文杰, 张哲, 王维等.流域生态健康评价框架及其评价方法体系研究 (一) [J].环境工程技术学报.2012,(2),4:271-277.
- [42] 崔保山,杨志峰.湿地生态系统健康研究进展[J].生态学杂志, 2001, 20 (3): 31~ 36.
- [43] 罗初跃,周忠轩,孙轶等.流域生态系统健康评价方法[J].生态学报, 2003, 23(8) : 1606~1614.
- [44] Borman F H. Ecology: A personal history. An Review Energy and Environ, 1996, (21):1~29.
- [45] Rapport D J. Ecosystem health: Exploring the territory. Ecosystem Health, 1995, 1(1): 5~13.
- [46] 姜付仁, 刘树坤, 陆吉康.流域可持续发展的基本内涵[J].中国水利, 2002 (4): 20-21
- [47] 赵彦伟, 杨志峰.流域健康: 概念、评价方法与方向.地理科学, 2005,25 (1): 119~122.
- [48] 罗跃初, 周忠轩, 孙轶, 等.流域生态系统健康评价方法[J].生态学报, 2003,23 (8): 1606-1614.
- [49] 张凤玲, 刘静玲, 杨志峰.城市河湖生态系统健康进行评价[J].生态学报, 2005,25 (11): 3019-3027.

- [50]戴全厚, 刘国斌, 田均良等.侵蚀环境小流域生态经济系统健康定量评价[J].生态学报, 2006, 26 (7): 2219-2228.
- [51]陈铭, 张树清, 王志强, 等.基于 GIS 的蛟流河流湿地生态系统健康评价[J].农业系统科学与综合研究, 2006,22 (3): 165-168.
- [52]林木隆, 李向阳, 杨明海.珠江流域河流健康评价指标体系初探.人民珠江,2006,(4):1~4.
- [53]刘宗平, 刘进琪.内陆河流域健康评价探讨[J].水资源保护, 2007,23 (3): 24-26.
- [54]郭坤荣, 徐跃通.大汶河流域健康状况及治理对策研究[J].水土保持研究, 2007,14 (3): 336-340.
- [55]张楠, 孟伟, 张远, 等.辽河流域生态健康的多指标评价方法[J].环境科学研究, 2009.22 (2): 162-170.
- [56]赵彦伟, 杨志峰.城市河流生态系统健康评价初探[J].水科学进展, 2005,16 (3): 349-355.
- [57]吴阿娜, 车越, 杨凯.基于内容分析法的河流健康内涵及表征[J].长江流域资源与环境, 2008,17 (6): 932-938.
- [58]吴刚,韩青海,蓝盛芳.生态系统健康学与生态系统健康评价[J]. 土壤与环境, 1999, 8(1):78-80.
- [59]任海,鄔建国, 彭少麟. 生态系统健康的评估[J]. 热带地理, 2000, 20(4): 310-316.
- [60]李瑾,安树青,程小莉,等. 生态系统健康评价的研究进展[J]. 植物生态学报, 2001, 25(6): 641-647.
- [61]马克明, 孔红梅, 关文彬, 等. 生态系统健康评价: 方法与方向[J]. 生态学报, 2001, 21 (12): 2106-2116.
- [62]孔红梅, 赵景柱, 姬兰柱, 等. 生态系统健康评价方法初探[J]. 应用生态学报, 2002, 13 (4) : 486~490.
- [63]刘建军, 王文杰, 李春来. 生态系统健康研究进展[J]. 环境科学研究, 2002, 15(1): 41 - 44.
- [64]尹连庆,解莉. 生态系统健康评价的研究进展[J].环境科学与管理, 2007(11):163-167.
- [65]曾德慧,姜凤歧,范志平,等.生态系统健康与人类可持续发展[J].应用生态学报,1999,10(6):751-756.

## 附 录

### 一、发表论文

- 1.唐嘉琪, 石培基. 民勤土地利用格局时空变化研究[J]. 中国沙漠, 2013,3,
- 2.唐嘉琪, 石培基. 水资源约束下的民勤绿洲景观格局研究[J]. 中国水土保持, 2012,9,64~67.

### 二、参与课题

- 1.张掖市甘州区土地利用总体规划修编(2009-2020年): 张掖农场和工业园区规划文本的编写, 相关图件的绘制等。
- 2.兰州市“移山造地”生态修复可行性研究报告
- 3.参加国家自然科学基金“内陆河流域城镇体系与流域空间结构相互作用的生态经济效应研究——以石羊河流域为例”(40971078)

## 致 谢

又一次毕业论文初成，回想起来，转眼间已在西北师范大学学习和生活了七年，此论文的完成预示着我即将告别这段美好的时光，离开这个美丽的并留下诸多美好回忆的校园。借此，我想对尊敬的老师和同学表示感谢，感谢对我的教导和支持！

首先，要特别感谢我的导师石培基教授，将专业知识和科研经验毫无保留的传授给我，在学习和做人上对我严格要求、耐心教导，并一直严于律己、以身作则。自我踏入科学研究的神圣殿堂以来，从专业课题的选择、论文的选题、研究到最终撰写完成，他始终如一的悉心指导，帮助我学会总结提高，本论文的完成凝聚了他大量的精力和心血；他不仅认真负责指导我的论文与研究，而且还满怀希冀的培养教育我成才。

在论文的研究过程中，得到了许多老师、同学和朋友的帮助。感谢周俊菊老师、潘竟虎老师、赵锐锋老师、魏伟老师、白燕老师你们在学习上给我谆谆教诲，提供部分数据的支持，并且给予了很多中肯的意见，再次万分感谢你们的帮助，纸短意长，深埋心底。你们将是我以后工作和生活上的榜样。石羊河项目组是一个温馨的团队，在此感谢刘春芳师姐、张学兵师兄、张胜武师兄、刘海龙师兄、颜丙金师兄、高小琛师姐、吴文婕师姐、李丽娜师姐、董翰蓉师姐、刘润师兄、杨玉婷等师姐，感谢李博、王文静、金淑婷、王红、陈颖、李德发、董永康、王祖静、王培震、赵峥等同学三年来的支持和帮助，和你们一起学习和生活的过程中让我受益匪浅，是你们的陪伴让我度过了愉快而又充实的研究生生活。同时，特别感谢师小娟、赵志鹏、潘晶、汪晓霞，因为你们的陪伴我的生活多了许多愉悦，这段情谊是我一生最宝贵的财富。衷心感谢你们！

最后，我将我最深的谢意献给我的父母，感谢多年来你们对我学业给予的无私帮助和支持，是你们让我拥有强大的动力来完成学业，你们的辛勤劳动和付出我会永记在心，作为女儿的我不会让你们失望，深深的感谢你们，你们的目光和支持是我力量的源泉。

唐嘉琪

2012年5月西北师范大学