

密级:_____



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

流域非点源污染负荷遥感估算

——以岳城水库流域为例

作者姓名: 朱海涛

指导教师: 王晋年 研究员 中国科学院遥感与数字地球研究所

张 霞 研究员 中国科学院遥感与数字地球研究所

学位类别: 专业硕士

学科专业: 电子与通信工程

培养单位: 中国科学院遥感与数字地球研究所

答辩委员会主席 (签字): _____

2013 年 5 月

Estimation of Non-Point Source Pollution Load Based on
Remote Sensing in Yuecheng Reservoir Basin

By

Zhu Haitao

A Dissertation Submitted to

University of Chinese Academy of Sciences

In partial fulfillment of the requirement

For the degree of

Master of Engineering

Institute of Remote Sensing and Digital Earth

Chinese Academy of Sciences

April, 2013

原创性声明

郑重声明：本人所呈交的学位论文，是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经明确标注引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或研究成果。与本人合作并对本文研究做出过贡献的同志均已在论文中予以明确说明,并表示了致谢。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名：

日 期：2013 年 5 月

学位论文使用授权说明

本人完全了解中国科学院遥感与数字地球研究所关于收集、保存、使用学位论文的规定：

按照研究所要求提交学位论文的印刷本和电子版本；

研究所有权保存学位论文的印刷本和电子版，并提供目录检索与阅览服务；

研究所可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文；

在不以赢利为目的的前提下，研究所可以公布论文的部分或全部内容。

论文作者签名：

日期：2013年5月

导师签名：

日期：2013年5月

摘要

通过建立非点源污染模拟模型，模拟非点源污染产生、迁移和转化的过程，对非点源污染的控制、管理及水源地的保护具有理论意义和应用价值。本文立足于大尺度非点源污染负荷估算方法体系和岳城水库流域空间数据集，研究非点源污染模型与空间数据的耦合，提出基于像元的非点源污染负荷估算方法。主要完成两项工作：其一，在关键环境参数遥感反演方面，完成了流域土地利用/覆盖精细分类、植被覆盖度反演及流域土壤侵蚀空间分布数值模拟；其二，在流域非点源污染负荷估算方面，进行了非点源污染模型和空间数据的耦合，实现了基于像元的非点源污染负荷估算，并评估了岳城水库流域非点源污染负荷。论文主要研究内容和成果如下：

(1) 针对半干旱地区的下垫面特征，构建了基于面向对象的决策树分类规则，对岳城水库流域 TM 影像进行土地利用/覆盖分类，总的分类精度达 86.95%，Kappa 系数达 0.8518，分类结果精度较高，满足应用的需求；基于像元二分法进行了岳城水库流域植被覆盖度反演，表明岳城水库流域植被覆盖度以中高覆盖为主，占整个流域的 50% 以上；基于通用土壤流失方程（USLE）进行了岳城水库流域土壤侵蚀数值模拟，岳城水库流域土壤侵蚀总体情况不严重，微度侵蚀（侵蚀模数小于 $5\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ）区域面积占 73%，轻度侵蚀（侵蚀模数大于 $5\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ 小于 $25\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ）区域面积占 26%。

(2) 以溶解态二元结构模型和吸附态负荷模型为核心，结合遥感参数等多元数据，研究了多元数据与大尺度非点源污染模型的耦合过程，实现了基于像元的非点源污染负荷估算。模型验证结果显示，氮、磷、氨氮和 COD 污染负荷的相对误差分别为 10.11%、37.37%、28.89% 和 9.76%。

(3) 以基于像元的大尺度非点源污染估算模型为基础，估算了岳城水库流域的非点源污染氮、磷、氨氮和 COD 的污染负荷，结果显示，溶解态氮、磷、氨氮和 COD 的污染负荷分别为 1369.05t、134.9t、482.28t 和 1241.79t；吸附态氮和磷的污染负荷分别为 531.44t 和 210.45t。

关键词：非点源污染 土地利用覆盖/分类 岳城水库流域 参数反演 耦合模型

Abstract

The process of generation, migration and transformation of non-point source pollution is simulated by means of the model of non-point source pollution, which is of theoretical significance and practical value to control and management of non-point source pollution and the protection to water sources. Based on the methodology of estimation of non-point source pollution load in the large - scale basins and the spatial datasets of Yuecheng reservoir basin, this paper studies on the coupling of spatial data and the model of non-point source pollution and proposes a method of estimation of non-point source pollution load based on pixel. The study concentrates mainly on two aspects: For inversion of the key environmental parameters, the research finishes the land use and cover classification, the inversion of vegetation coverage and the simulation of soil erosion. For estimation of non-point source pollution load, the research couples spatial data to the model of non-point pollution, accomplishes estimation of non-point source pollution based on pixel, and estimates the non-point pollution load in Yuecheng reservoir basin. Main contents and results are summarized as follows:

1. According to the underlying surface characteristics of semi-arid areas, the decision tree classification rules based on object-oriented were established in this study. The results of land use and cover classification in Yuecheng reservoir basin showed that the overall accuracy reaches 86.95% and the coefficient of KAPPA reaches 0.8518 which meets the requirements of estimating the non-point source pollution. The vegetation coverage was inverted based on binary pixel model, and the results showed that the high vegetation coverage accounting for more than 50% of the entire basin in Yuecheng reservoir basin. Soil erosion was simulated Soil erosion was calculated based on USLE, and the results showed that the erosion modulus less than $5\text{t/hm}^2 \cdot \text{a}$ accounting for 73%, and erosion modulus between $5\text{t/hm}^2 \cdot \text{a}$ and $25\text{t/hm}^2 \cdot \text{a}$ accounting for 26% of the entire basin. In general, the situation of soil erosion is not serious in Yuecheng reservoir basin.

2. The research is focus on coupling spatial data and the model of non-point

pollution, accomplishes estimation of non-point source pollution based on pixel, and the Model validation results showed that the relative error of TN, TP, NH_4^+ and COD is respectively 10.11%、37.37%、28.89% and 9.76%.

3. The non-point source pollution load is estimated by the method of estimation of non-point source pollution load in the large-scale basins based on pixel in the Yuecheng reservoir basin, and the results showed that the load of nitrogen, phosphorus, ammonia nitrogen and COD which is in the dissolved state respectively is 1369.05t, 134.9t, 482.28t and 1241.79t, and the load of nitrogen and phosphorus which is in the adsorbed state is respectively 531.44t and 210.45t.

Key words: non-point source pollution; land use and cover classification; Yuecheng reservoir basin; parametric inversion; coupling model

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
目录.....	IV
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 非点源污染概述.....	2
1.2.1 非点源污染的内涵及特征.....	2
1.2.2 非点源污染的起源及类型.....	3
1.2.3 非点源污染的现状 & 危害.....	5
1.3 非点源污染国内外研究现状.....	6
1.3.1 非点源污染国外研究现状.....	6
1.3.2 非点源污染国内研究现状.....	10
1.4 遥感技术和 GIS 支持下的非点源污染模型研究现状.....	11
1.4.1 遥感技术和 GIS 在非点源污染研究中的意义.....	11
1.4.2 遥感技术和 GIS 在非点源污染研究的应用进展.....	11
1.5 研究内容与方法.....	12
1.5.1 研究内容及章节设置.....	12
1.5.2 研究方法.....	13
第 2 章 研究区域概况及数据收集.....	14
2.1 研究区概况.....	14
2.2 数据收集.....	15
第 3 章 非点源污染模拟模型.....	17
3.1 污染源强计算.....	18
3.2 非点源污染负荷估算模型.....	19
3.2.1 溶解态二元结构非点源污染模型.....	19
3.2.2 吸附态非点源污染模型.....	19
3.3 非点源污染模型需要的参数及获取方案.....	20
3.4 本章小结.....	22
第 4 章 关键环境参数遥感反演.....	23
4.1 岳城水库流域土地利用/覆盖分类.....	23
4.1.1 多尺度图像分割.....	23
4.1.2 典型地物光谱分析及信息提取模型.....	24
4.1.3 分类决策树建立及信息提取.....	28
4.1.4 分类结果及精度评价.....	29
4.2 岳城水库流域植被覆盖度反演.....	31
4.3 岳城水库流域土壤侵蚀量计算.....	33
4.4 本章小结.....	36
第 5 章 空间数据与非点源污染模型耦合与结果分析.....	38
5.1 空间数据与非点源污染模型耦合.....	38

5.1.1 溶解态二元结构非点源污染模型与空间数据耦合.....	38
5.1.2 吸附态非点源污染模型与空间数据耦合.....	41
5.2 模型参数率定和验证.....	43
5.2.1 模型参数率定.....	43
5.2.2 结果验证.....	44
5.3 岳城水库流域非点源污染评价结果分析.....	46
5.3.1 非点源污染空间分布特征.....	46
5.3.2 非点源污染类型比较.....	50
5.3.4 不同形态非点源污染比较.....	50
5.4 本章小结.....	51
第 6 章 总结与展望.....	52
6.1 结论.....	52
6.2 展望.....	53
参考文献.....	54
发表文章目录.....	60
参与的科研项目.....	61
致谢.....	62

第 1 章 绪论

1.1 研究背景和意义

中国是世界上水资源严重不足的国家之一，人均水资源占有量 2185m^3 ，不足世界平均水平的三分之一。改革开放以来，随着经济突飞猛进的发展，在注重水资源开发利用的同时，却忽视了水资源的节约和保护，水环境状况恶化是我国环境问题的突出表现之一。目前，随着社会经济的发展，部分地区工业污染排放总量控制的实现和城市污水处理厂建设的加快，点源污染逐步得到控制。非点源已成为影响水体环境质量的重要污染源，而其中又以农业非点源污染的广泛性和普遍性而备受关注。相关研究表明，全球有 30-50% 的地表水受到非点源污染的影响，非点源污染是造成美国河流污染的第一大污染源，在进入地表水体的污染物中，46% 的泥沙、47% 的总磷、52% 的总氮均来自非点源污染^[1]；在欧洲国家，农业非点源污染同样是造成地表水富营养化的最主要原因。近年来，随着我国农村经济的发展，农药和化肥的施用量急剧增加，加上我国化肥利用率较低，大量的农田养分随着降雨径流、农田灌溉、土壤侵蚀等途径进入水体，使得我国的农业非点源污染形势十分严峻。

定量化非点源污染负荷研究是水环境污染治理的重要基础工作，数学模拟是用来分析非点源污染时空分布问题最好的技术方法。通过建立非点源污染模型对非点源污染负荷从流失机理和定量指标两个方面进行全面、系统的研究，掌握降雨径流过程中污染物的流失特征及输出规律，搞清非点源污染物的不同来源，这对非点源污染的控制、管理及水源地的保护具有重大的理论意义和应用价值，还可以为流域水源保护规划和非点源污染控制规划提供决策依据。非点源污染具有形成过程随机性大、影响因子复杂、分布范围广、影响深远、形成过程复杂、机理模糊和潜伏周期长等特点，由此导致建立非点源污染模型难度较大。目前常采用的非点源污染负荷估算与评价算法主要有以下两大类：一类是采用统计建模的方法，即通过试验活动，先建立产污和排污系数表，再获取各种实况数据，进而

计算得到污染负荷。这类“经验”模型，缺乏对非点源污染产生过程机理的深入分析和研究，且模型的通用性较差，难以广泛应用于非点源污染的宏观控制与管理。另一类是采用物理建模的方法，即根据污染发生的机理、污染物的传播过程和各污染物的浓度变化等指标建立机理模型，对污染状况进行定量评价。这类模型能够准确地模拟流域的自然过程，其精度也较高。但是模型结构复杂，要求有详尽的资料和数据，只适用于小区域非点源污染过程的精细模拟。

伴随着科技的迅猛发展，人们对于信息的追求已经不满足于简单的传统的定性和定量分析结果，而是提出了不仅要知道“是什么(What)”以及“有多少(How much)”和“什么时候(When)”，更要知道“在哪里(Where)”精确地空间定位和分布信息，形成了现代的“4W”综合信息分析需求^[2]。经典的基于地面观测的数据精度较高，但不能代表流域所有地区，且获取成本高、实效性差，已经不能满足非点源污染模拟的要求。遥感数据具有视野广、多时相等优势，与传统的野外采集的数据和统计资料互为补充，为非点源污染研究提供准确的资料。同时，在环境监测领域，遥感技术发挥着越来越重要的作用，对污染的来源、程度、趋势预测等已从定性评价逐渐向定量评估发展，非点源污染研究与遥感技术结合有其必然性。

本文正是以遥感数据、野外观测数据和统计资料为基础数据，将空间数据与非点源污染模型进行耦合，实现基于像元的非点源污染负荷估算，并以半干旱地区岳城水库流域为例，估算和分析岳城水库流域的非点源污染状况。

1.2 非点源污染概述

1.2.1 非点源污染的内涵及特征

近年来，随着人类活动的不断加剧，水环境污染已成为中国乃至全球性问题。传统上按污染的发生类型，把水环境污染分成点源污染和非点源污染。非点源污染是相对于点源污染而言的，美国环境保护局(USEPA)将非点源污染定义为来源于降水、地表径流、土壤渗透、排水、土壤渗漏、水文变化或大气沉降，并在

降水或融雪的冲刷下，携带自然或人类活动的污染物，最终沉积在河流、湖泊、湿地、近海水体和地下水而形成的污染^[3]。与点源污染相比，非点源污染起源于分散的、多样的地区，有许多显著不同的特点。其主要具有以下特点：①随机性。非点源污染的形成与降雨过程有密切关系，除此之外，与土地利用、土壤结构、地形地貌、人类活动等因素也有关系，这些因素的随机性和不确定性（尤其是降雨因素）决定了非点源污染发生的随机性；②广泛性。与点源污染集中性相反，非点源污染发生在一个大面积区域，随着地表径流进入水体的污染物遍地可见，在地球表层广泛分布。③潜伏性和滞后性。水环境非点源污染只有在地表径流的驱动下，才能将地表的积累污染物带入水体。农药化肥等污染物很长时间内积累在地表，这一时间段是非点源污染的潜伏期，当发生降雨事件时，潜伏期积累的污染物随降雨径流进入水体发生污染，因此非点源污染在时间上具有滞后性；④模糊性。影响非点源污染的因素复杂多样，在一个区域内常常涉及到多个污染源，而且污染源可以相互交叉排放，很难确定某一区域水体中的某种污染物的具体来源，更难确定某种污染物进入水体的污染负荷。因此，非点源污染监测成本高难度大；⑤机理复杂、研究和控制难度大。非点源污染模拟涉及了多个学科的研究领域，包括气象学、水文学、地理学、土壤学、农学等，受气候条件、地理条件、土壤条件、土地利用、生产管理方式等多种因素综合影响，非常复杂，远超过点源污染。由于机理的复杂性、发生的随机性、形成的潜伏性、来源的模糊性，非点源污染的研究和控制难度非常大^{[1],[4]~[6]}。

1.2.2 非点源污染的起源及类型

非点源污染主要来源于土壤侵蚀、农业化肥和农药的不合理使用、畜禽养殖、农村居民点生活污水和垃圾、城镇地表径流、林区地表径流、厂矿和建筑工地地表径流、大气干沉降和湿沉降等。

（1）土壤侵蚀

土壤侵蚀类型主要包括风力侵蚀、水力侵蚀和冻融侵蚀。土壤侵蚀是规模最大、影响最严重的一种非点源污染。土壤侵蚀损失了土壤表层有机质，但伴随土

壤侵蚀,许多污染物质也进入了水体,形成了非点源污染。据相关调查,我国土壤侵蚀总面积已达 482.53 万平方公里,占全国面积的 50.78%^[7]。

(2) 农业化肥和农药的施用

农业化肥和农药的施用是另外一个重要的污染源。相关研究表明,化肥和农药的使用是造成水体污染和富营养化的主要原因。大量施用或不合理使用化肥,在水土流失过程中,氮、磷和氨氮等污染物质会进入水体,导致周围环境严重污染^[8]。农药在田间使用后,会进入地表水、地下水、土壤、植物和空气等不同环境区域中,其中大部分会经生物圈物质循环,最终进入水体^[8]。

(3) 畜禽养殖

改革开放以来,我国畜禽养殖规模不断扩大,畜禽养殖过程中产生大量粪便、氨气、硫化氢、粪臭素等恶臭气体和粪尿中的氮磷等元素,进入了附近水环境,严重影响了地表水和地下水的水质。畜禽粪便污染已经成为农业非点源污染的主要污染源之一^{[8],[9]}。

(4) 农村居民点生活污水和垃圾

我国大部分农村没有污水管网和垃圾处理系统,造成生活污水和垃圾随意排放和堆置,很容易随地表径流进入水体,污染水环境。生活污水中含有大量的有机和无机含氮、磷的化合物,这些化合物造成水体污染和富营养化,危害水生生物的生存和人类健康^{[5],[9]}。

(5) 城镇地表径流

主要是指雨水及其所形成的地表径流流经城镇地表,如商业区、街道、停车场等,聚集原油、盐分、氮、磷、有毒物质及杂物等污染物,进入河湖,污染地表水或地下水^[10]。

(6) 林区地表径流

主要是指降雨过程中所发生的地表侵蚀,使林区地表的植物残枝、落叶及形成的腐殖质随地表径流进入水体形成水环境污染。由于林区认为活动强度相对较低,地表植被覆盖度较高,林区地表径流形成非点源污染负荷相对较低。但是在林区砍伐时,植被破坏,土壤侵蚀增加,区域非点源污染会增加^[10]。

(7) 厂矿和建筑工地地表径流

主要是人类活动引起,一方面因不合理人为活动破坏原有土壤结构和地表植被,使土表裸露,水土流失增加;另一方面,矿区和建筑工地地表的泥沙、盐类、酸类物质和残留矿渣等,在降雨时随地表径流进入水体,形成非点源污染^[10]。

(8) 大气干沉降和湿沉降

主要是指大气中的粉尘、烟尘、有毒物质等直接降落在土壤或水体表面,或随同降雨或降雪降落在土壤和水体表面,而形成污染。酸雨形成的污染已经成为世界上公认的环境灾害之一^[11]。

1.2.3 非点源污染的现状与危害

1.2.3.1 非点源污染的现状

全球已有 30%-50%的地表受到非点源污染的影响,数百万公顷土地和数十亿公升水体受到非点源污染的影响^[12]。发达国家点源污染的控制技术比较成熟,非点源污染已经成为污染水体最主要的污染源。在美国,非点源污染已经成为环境污染的第一因素,美国江河中 73%的 BOD、92%的悬浮物和 83%的细菌来自非点源污染;墨西哥湾每年 89%总氮营养物质来自非点源污染并造成严重的水体富营养化;荷兰农业非点源污染提供的总氮、总磷分别占水体污染的 60%和 40%—50%^[13];欧洲因农业活动输入北海河口的总氮、总磷分别占 60%和 25%^{[14],[15]}。我国随着社会经济的发展,部分地区工业污染排放总量控制的实现和城市污水处理厂建设加快,点源污染逐步得到控制。非点源已成为影响水体环境质量的重要污染源,而其中又以农业非点源污染的广泛性和普遍性而备受关注。我国大部分地区夏季降水高度集中,生态破坏导致水土流失严重,再加上近年来农药、化肥等使用量不断增多,使用技术不合理等致使我国非点源污染问题日益严重^{[6],[16]}。

1.2.3.2 非点源污染的危害

非点源污染来源广泛,给区域生态环境和人类健康造成了严重的危害,不仅污染饮用水源,还导致地表水体富营养化和地下水污染,从而破坏水生生物的生

存环境,对人体健康造成威胁,主要表现在以下几个方面:①污染物质淤积水体,降低水体的生态功能;②引起水体的富营养化,破坏水生生物的生存环境;③污染饮用水源(地表水和地下水),威胁人类身体健康^{[1],[6]}。

1.3 非点源污染国内外研究现状

1.3.1 非点源污染国外研究现状

人类开始全面认识和研究非点源污染的历史并不长,主要可分为四个阶段^[17]。

第一阶段,非点源污染的认识阶段(20世纪70年代以前):人们对非点源污染已逐渐有所认识并开始研究,在50年代,以美国农业局为首的研究机构就开发了一些有关农业非点源污染方面的经验统计模型,包括通用土壤流失方程和径流曲线方程,在土壤侵蚀估算和降雨径流计算方面发挥了重要作用^[1]。20世纪60年代,这个时期的研究多局限于现象的因果分析,缺乏定量评价其影响的方法,然而在此阶段也开始出现计算机模型,但是由于那时计算机费用过于昂贵,只有极少数的大学和机构进行了此类模型的开发,其中较为成功的模型是Stanford流域模型^[18]。

第二阶段,非点源污染模型发展阶段(20世纪70年代):这段时期,在污染源调查、非点源特性分析、非点源污染对水质的影响分析等方面取得了大量的成果,模型研究在此基础上得以蓬勃发展,很多模型相继问世,例如城市暴雨管理模型(SWMM),农业径流管理模型(ARM),农业输移和径流负荷模型(PTR),农业化学品运输模型(ACTMO)以及SOTRM和HSPF等模型。这些模型大都是以水文数学模型为基础的非点源污染模型。在非点源污染管理方面,这个时期逐步形成和使用最佳管理措施BMPs(Best Management Practices)。这些模型虽然经过一些实测数据的检验并得到有限的应用,但它们往往对各种资源(计算机、数据、费用、用户素质等)的要求很高,大多数模型只能适用于很小的集水面积,这些与非点源污染的广泛性格格不入,从而也限制了这些模型的推广应用。

第三阶段,非点源污染模型重视阶段(20 世纪 80 年代):从 80 年代初至 90 年代初,这一阶段研究的重点主要转向如何把已有模型应用到非点源污染的管理中去,开发新的实用模型,同时随着计算机技术的迅速发展及其在非点源污染方面的进一步推广使用,涌现了大量实用的模型。这一时期国外提出的有代表性的模型有:流域非点源污染模拟模型(ANSWER)^[19],化学污染物径流负荷和流失模型(CREAMS)^[20]、农业非点源管理和政策制定的农业非点源污染模型(AGNPS)^[21]、农田尺度的水侵蚀预测预报模型(WEPP)^[22]等。这几个模型都得到了不同程度的应用^{[23]~[26]}。此外,随着计算机技术的发展,非点源污染研究也开始使用地理信息系统(GIS)的方法^[27]。这些模型能精确的描述污染物迁移转化的过程和机理,但是模型对环境的描述和空间分析能力有限,使得其在广泛应用中受到限制^[28]。

第四阶段,非点源污染模型完善阶段(20 世纪 90 年代后):从 90 年代初至今,随着计算机技术的迅速发展和 3S 技术在流域研究中的广泛应用,把 GIS 技术和非点源模型进行耦合,进一步完善现有的非点源污染模型。其中代表性的模型有 SWAT(Soil Water Assessment Tool)、BASINS(Better Assessment Science Integrating Point and Non-point Sources)、AnnAGNPS 等大型连续分布式参数机理模型。这些模型与 GIS 的集成,成为非点源污染研究的主要手段和方向之一,能够广泛的进行非点源污染机理过程的模拟、探讨污染负荷的时空分布、标识关键源区、模拟非点源管理方案、提供最佳管理措施等,大大提高了模型的应用水平^{[29]、[30]}。

下面简单介绍国外有代表意义的非点源污染数学模型,如 RUSLE、ANSWERS、AGNPS、SWAT、AnnAGNPS 等模型。

(1) RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)

USLE 在土壤侵蚀研究领域已有 40 余年的历史,在国内外得到广泛的应用,其涉及和使用的范围之广,是其它土壤侵蚀模型所无法比拟的,但 USLE 作为一个简单的经验模型,其应用领域仍有所限制。20 世纪 80 年代中期,USDA-ARS(US Department of Agriculture, Agriculture Research Service)联合对 USLE 进行改进,并于 1992 年 12 月正式发行 RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation),之后模型历经数次改进和完善。RUSLE 是一套完整的软件,其运算能力和数据处理

能力已非 USLE 可比。首先,适用于不同的地区、不同的作物和耕作方式,以及林地和草地等,它所处理数据的规模,有了很大的提高;其次,它改进了 USLE 中不合理分析方法,弥补了原始数据的不足;最后,它具有良好的适应性,可以用作模拟多种流域管理措施下的水土流失状况,甚至可以计算出在很小的措施变动时土壤侵蚀速率所发生的变化。

(2) ANSWERS(Areal NonPoint source Watershed Environment Response Simulation)

20 世纪 60 年代晚期, Purdue 大学的农业工程系开发研制了 ANSWERS 模型,它是基于场次的分散物理模型,主要用于模拟流域管理措施或 BMPs(Best Management Practices)对径流和泥沙产生的影响,模型也包括了外挂的泥沙分散迁移模块、氮迁移模块和磷迁移模块^[31]。

ANSWERS 模型是一个基于事件的分布参数模型,并允许参数的空间变化,输出结果可以包括流域内的特定区域而不是仅仅局限于流域出水口。模型将研究流域划分为方格网,典型的单元方格大小通常设为 0.4-4 公顷,输入参数有降水量、土壤水分、土壤和作物参数等;首先计算降水产生的渗漏量,然后模拟地表对径流的储存、截留和地面漫流等过程,模型的输出包括基于事件的径流和泥沙侵蚀量。ANSWERS 模型一直都有着广泛的应用,Engel 等将模型与 GRASS GIS 联用,评价了模型的准确性^[32];Bouraoui(1997)用 ANSWERS 模型准确模拟了不同土壤类型根区下的排水和蒸发过程^[19]。

ANSWERS 模型有一个改进版 ANSWERS-2000。其主要的改进是,使用 (Green-ampt)方程更好的模拟了渗透过程;增加计算了土壤水分蒸发及渗漏过程,使模型可以进行多个降雨事件的连续模拟。国内对 ANSWERS 模型也有应用,如牛志明等采用 ANSWERS 模拟了我国三峡库区小流域土壤侵蚀过程,模拟结果与实测结果具有较高的吻合度^[33]。

(3) AGNPS(Agricultural Non-point Source Model)/AnnAGNPS

AGNPS 模型是美国农业部于 1986 年提出的农业非点源污染的著名模型之一,其采用了分散参数模拟方法,是一种基于场次的分散流域模型^[21],主要用于估算流域的侵蚀速率、土壤流失量,以及从流域流失的营养物质量,包括 N、

P、COD 等, 适用范围在 200-9300hm² 之间。AGNPS 的单事件版本自推出以来, 已经在非点源污染研究中得到了普遍应用, 美国、欧洲、台湾等地均取得了较好的模拟结果, 如 Rode(2001)应用 AGNPS5.0 对德国中部的 Lumda 流域沉淀物和颗粒态磷负荷量进行了模拟预测, 模拟值与实测值之间的相关系数分别达到 0.80 和 0.79^[34]。由于模型的模拟基于场次计算, 不适合用于流域物理过程的长期演变特性以及土壤侵蚀的时空分布规律等方面的研究。

由于它是单事件模型, 在应用中有许多局限性。因此, 20 世纪 90 年代初, 美国农业部转向开发连续模拟模型 AnnAGNPS 模型^[35]。AnnAGNPS 模型是一种连续模拟模型, 主要改进之处在于 AnnAGNPS 以日为模拟时间步长连续模拟一个时段内每天及累计的径流、泥沙、养分、农药等输出结果, 可用于评价流域内非点源污染的长期影响; 在计算单元的划分中, 它按流域水文特征将流域划分为一定的单元, 使模型更加符合实际; 模型的另一改进是采用修正的土壤流失方程 (RUSLE) 预测土壤侵蚀, 同时, 模型实现了与 GIS 较好地集成, 模型参数大多可自动提取。当前, 用连续模拟的 AnnAGNPS 模型替代 AGNPS 模型研究农业非点源污染已成为一种趋势。Grunwald 等研究了 AGNPS 模型和改进版的效率, 结果表明, Lutz 法优于 CNS 法, LS 因子依据渠中每种受侵蚀颗粒与径流速度的关系进行计算效果最好^[36]。国内对 AnnAGNPS 模型也有大量应用, 洪华生等运用 AnnAGNPS 模型在九龙江流域进行模拟, 定量估算了九龙江流域农业面源污染负荷, 并模拟了不同管理措施对面源污染物产生的影响^[30]。

(4) SWAT(Soil Water Assessment Tool)

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 是由美国农业部开发研制的分布式水文模型, 模型主要包括水文、气象、侵蚀、营养物质和农药迁移模块, SWAT 模型适合对长时间序列的农业非点源模拟, 模型对数据需求量较高, 是美国应用较为广泛的非点源模型之一。Luo 等在 2009 年应用 SWAT 模型模拟加利福尼亚州 OtestimbaCreek 农田流域毒死蜱和二嗪农两种农药的迁移转化。结果表明, SWAT 能评价农药在农田和河网中的迁移过程^[37]。Bulut 等在 2008 年使用 AVSWAT 调查了施肥率对磷的运输以及对 Uluabat 湖磷负荷的影响。结果表明, 磷负荷和化肥施用率之间具有较强的线性相关性^[38]。

1.3.2 非点源污染国内研究现状

我国的非点源污染研究起步较晚,自 20 世纪 80 年代才逐渐开始了非点源污染问题的研究。众多学者对非点源污染和径流污染的宏观特征、污染负荷定量计算模型及管理控制方法进行研究后,得出了一些初步成果。计算汇水区农业非点源污染输出量的经验统计模型在这一时期发展较快并得到广泛应用。

20 世纪 90 年代至今,随着非点源污染问题的不断加剧,在水环境领域内,我国非点源污染的研究越来越受到广泛的重视,开展了大量的研究工作,在农业、城区非点源污染、大气沉降、生物污染方面的研究都有一定的进展。农业、化肥污染的宏观特征、影响因素的研究和黑箱经验统计模式继续在农业非点源污源研究中占重要地位。李怀恩等针对当时国内外模型的不足,依据我国的实际情况,建立了一个完整的流域非点源污染模型系统,提出了流域汇流与非点源污染物迁移逆高斯分布瞬时单位线模型及流域产污过程模型^[39]。该模型既考虑了水动力学与污染物迁移机理,还用宝象河等流域验证了模型对洪水、泥沙以及多种污染物的产生与迁移的适用性。郝芳华等充分借鉴统计经验模型和机理性过程模型优势的基础上,针对我国大区域非点源污染调查工作,建立了具有非点源污染产生、迁移转化机理的大尺度非点源污染负荷估算方法体系^[40]。

从总体上来看,由于缺少长系列的水文、水质监测数据等资料,很大程度上影响了非点源污染研究工作的深入。我国目前非点源污染模型化的研究尚属应用研究,在理论上突破性的成果不多,已经建立的非点源模型大多是形式简单、功能单一的经验模型。层次上主要还是利用国外现有的成熟机理模型或将其根据课题需要,结合研究区具体特征加以修正,尽管出现了一些基于非点源污染发生机理的概念模型,但往往对模型的后续讨论较少,研究缺乏连续性^[18]。

1.4 遥感技术和 GIS 支持下的非点源污染模型研究现状

1.4.1 遥感技术和 GIS 在非点源污染研究中的意义

在环境监测领域,遥感技术发挥着越来越重要的作用,对污染的来源、程度、趋势预测等已从定性评价逐渐向定量评估方向发展。自 20 世纪 80 年代中期以来,卫星遥感技术和 GIS 的发展为水环境非点源污染研究提供了全新的手段。遥感与 GIS 技术的结合应用为水环境非点源污染研究提供了崭新的数据获取与分析方式。通过卫星图片解译,可实时、快速地记录大面积流域的空间信息及各种变化参数,提供精确的定性和定量数据,并能对各种信息进行定量分析、动态监测和自动成图。遥感技术进而给 GIS 提供实效性强、准确度高、监测范围大、具有综合性的数据源,有助于 GIS 数据库的及时更新,确保系统的现势性,在污染监测方面具有其它类型数据所无法代替的优越性。

RS、GIS 应用于非点源污染的研究体现出一定的层次性。通过遥感影像解译出模型所需的参数因子,再利用 GIS 建立农业非点源污染数据库是最基础的层次,也是实现 RS、GIS 与模型集成的基础性工作。将非点源污染模型与 GIS 实现集成是第二层次。目前主要包括如下一些工作:将空间信息和属性信息用于模型的参数估计、率定及模型的检验;以 GIS 为主要技术平台,实现模拟结果的可视化;采用 GIS 技术来定义模型研究的区域单元。在第二层次应用的基础上,以 GIS 为平台、以 RS 为重要的数据源建立综合性的集成系统是 RS、GIS 与模型结合的第三层次。这一层次为人们研究非点源污染的产生机理提供了综合性的技术手段,意味着 RS、GIS 与非点源污染模型的联系从一般结合向综合集成方向发展^[41]。

1.4.2 遥感技术和 GIS 在非点源污染研究的应用进展

在 20 世纪 80 年代,国外就将 GIS 技术融入非点源污染的研究,对非点源污染可能性的空间分布进行图形化分析,随后开展了 GIS 技术在非点源污染负

荷定量计算、管理和规划中的应用研究,并建成了许多流域管理信息系统。同时,将卫星遥感技术作为全新的获取数据的手段进行了许多尝试。这一时期研究与应用的突出成果是专业 GIS 软件开发并用于潜在非点源污染的三维图形输出。90 年代, GRASSGIS、ARC/INFO 与 WEPP、AGNPS、USLE 结合进一步用于非点源污染危险区域识别、显示多种非点源污染输出结果、绘制水源防护区范围和设计地表水监测网等众多方面。Sunil 等利用 TM 数据提取爱荷华河流域土地覆盖信息并评价爱荷华河流域非点源污染负荷^[42]。Basnyat(2000)等利用遥感和 GIS 技术分析了在流域尺度上的非点源污染问题^[43]。

国内方面,主要将 3S 技术应用于监测和评价水土流失型非点源污染的研究上,将 3S 技术用于小流域的非点源污染和湖泊富营养化的研究却少有报道。另外,实际工作中多数采用国外应用较为成熟的模型及应用软件,应用于非点源污染模型的研究甚少。因此,在国内及时将 3S 这一先进技术应用到非点源污染研究中,使我国的非点源污染管理和研究工作与国际接轨,是今后非点源研究的一个重要方面。王伟武等论述 3S 技术在流域非点源污染定量模型研究的应用及其局限性,明确了今后基于 3S 技术的流域非点源污染定量模型的发展方向和研究领域,特别关注了近年来地统计技术、高光谱遥感技术、智能 3S 技术等对流域非点源污染定量模型研究带来的应用前景^[44]。万兴等利用遥感技术,对乐安河流域土地进行分类,找出主要污染源和污染物种类,再经过现场试验与经验公式的计算,得到各类污染源的分布情况和排放量,提出相应的控制管理方案^[45]。陈强等从非点源污染研究所需数据种类的角度,对卫星遥感技术的获取能力和可行性进行了应用分析,并对卫星遥感技术在农业非点源污染评价结果的精度验证中的应用潜力进行了展望^[46]。

1.5 研究内容与方法

1.5.1 研究内容及章节设置

本文以遥感数据、野外观测数据和统计资料为基础数据,将空间数据与非点

源污染模型进行耦合,实现基于像元的非点源污染负荷估算,并以半干旱地区岳城水库流域为例,估算和分析岳城水库流域的非点源污染状况。主要完成两项工作:其一,针对岳城水库流域地处半干旱地区的特征,研究相关参数的遥感反演方法;其二,将空间数据与郝芳华等提出的二元结构非点源污染模型进行耦合,实现基于像元的非点源污染负荷估算,并以岳城水库流域为例,估算和分析该流域的非点源污染状况。

论文在绪论中介绍了非点源污染内涵和污染现状,非点源污染研究进展,以及遥感技术和 GIS 技术在非点源污染模拟中应用进展;第二章介绍研究区岳城水库流域的概况和研究数据的收集;第三章研究确定大尺度非点源污染负荷估算模型;第四章利用遥感数据反演了关键环境参数;第五章,将空间数据与大尺度非点源污染模型耦合,实现基于像元的非点源污染负荷估算,并评估岳城水库流域非点源污染负荷;第六章,对全文进行总结,并展望未来的发展趋势。

1.5.2 研究方法

在分析国内外流域非点源污染模型研究的基础上,对比国内外相关模型的优缺点,选择适合中国半干旱地区下垫面特征的最优非点源污染负荷估算模型。利用相关遥感反演技术反演研究区关键参数包括:土地利用/覆盖分类图、植被覆盖度和土壤侵蚀量。基于 GIS 技术将非点源污染模型和空间数据进行耦合,实现基于像元的非点源污染估算。以半干旱地区的岳城水库流域为典型研究区,评估该区域的非点源污染负荷。

第 2 章 研究区域概况及数据收集

2.1 研究区概况

岳城水库位于河北省邯郸市磁县与河南安阳县交界处,是海河流域漳卫河系漳河上的一个控制工程。岳城水库流域位于海河流域的西南部,地跨河北省、河南省和山西省,行政辖区包括河北的磁县和涉县,河南的林州市和安阳县,山西的长治市辖区、黎城县、潞城市、平顺县、长子县、长治县、襄垣县、屯留县、武乡县、榆社县、左权县、和顺县、沁县和壶关县等 18 个市县。岳城水库流域面积达 18100 km²,地理范围为东经 112° 26′ —114° 14′ ,北纬 35° 52′ —37° 36′ ,地处黄土高原东南部,群山环绕,地形复杂,海拔较高。岳城水库流域位置示意图见图 1。按中国气候带划分标准,属暖温带季风气候。其基本特征是:四季分明,冬长夏短,春略长于秋;气候温和,始终雨热同季,大陆性季风强盛持久,海洋性季风的作用相对较弱。年平均气温 5℃度到 11℃,年平均降雨量为 600 毫升以上,无霜期 155-184 天。岳城水库流域属于半干旱地区,十分适合北方各种农作物的生长,境内各种植被种类较多。岳城水库被河北省列为集中式饮用水水源一级保护区,是邯郸市、安阳市乃至冀南地区的重要生活饮用水水源地。岳城水库流域以农业生产为主,农田和畜禽养殖产生的非点源污染严重影响了岳城水库的水质状况。

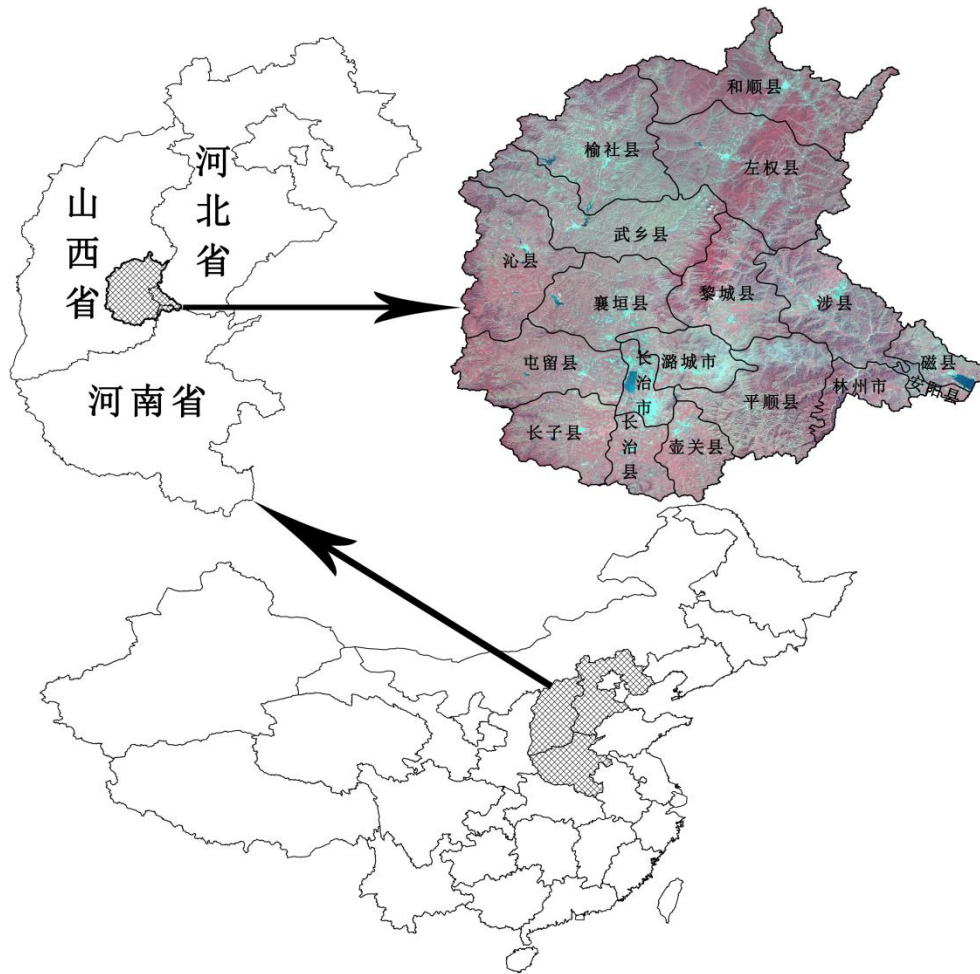


图 1 岳城水库流域位置示意图

2.2 数据收集

岳城水库流域非点源污染研究所需基础数据主要包括 DEM 数据、遥感影像数据、社会经济数据、气象数据和土壤数据等。

(1) DEM 数据

收集到研究区 30 米空间分辨率的 DEM 数据。首先将 DEM 数据进行镶嵌；其次利用 ARCGIS 软件提取岳城水库流域边界范围；最后利用研究区的 DEM 数据计算研究区坡度和坡长分布图。

(2) 遥感影像数据

收集研究区的遥感数据为 LandsatTM5 遥感影像数据，空间分辨率为 30m，采用 2010 年的四景影像，影像获取日期分别为 2010 年 8 月 15 日、9 月 5 日、9 月 23 日和 9 月 23 日；行列号分别为 124/34、124/35、125/34、125/35。本研究

主要利用 TM 数据的可见光、近红外和短波红外六个波段。采用 ENVI 软件 FLASSH 大气校正模块对 TM 遥感影像进行大气校正,并以 1:5 万地形图为底图对 TM 影像进行几何精校正。然后将精校正后的 4 景 TM 影像进行镶嵌,并利用岳城水库流域边界进行掩膜,得到研究区的遥感影像文件。

(3) 其他数据

根据《中国统计年鉴·2011》《河北统计年鉴·2011》《山西统计年鉴·2011》和《河南统计年鉴·2011》,收集研究区的农村人口、城镇人口和畜禽养殖数量(畜禽包括牛、马、猪、羊和家禽)。获取 2010 年涉县、武安、峰峰、太谷、榆社、长治、襄垣、和顺、平顺等 9 个气象站的逐月降雨量数据和大于标准雨强($12.7\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)的降雨时间。收集研究区 1:400 万土壤类型分布图和土壤质地分布图。

第3章 非点源污染模拟模型

非点源污染具有随机性强,分布范围广,机理复杂模糊,以及潜伏周期长等特点,由此致使建立非点源污染模拟模型难度较大。目前常采用的非点源污染模型主要包括物理模型和经验模型两大类。物理模型是根据污染发生的机理和污染物的迁移过程等指标建立的机理模型,物理模型能够精确地模拟流域非点源污染发生和污染物迁移的自然过程,精度较高,但是模型结构复杂,要求详尽的数据资料,适用于小流域非点源污染的精细模拟。另一类经验模型基于统计建模的方法,先通过试验,建立产污排污系数表,再获取各种实况数据计算非点源污染负荷。这类经验模型适用于大尺度非点源污染负荷模拟,但通用性较差,且由于模型对环境要素在空间上采用了简单的均一化处理,使得模拟的空间尺度越大精度越低。

非点源污染根据污染物产生和迁移转化过程可分为溶解态非点源污染和吸附态非点源污染。溶解态非点源污染具有水溶性,污染物伴随水文产汇流过程聚集;吸附态非点源污染是指污染物吸附在土壤颗粒上,污染物汇集多受土壤侵蚀过程控制^[47]。基于上述两种污染物产生机理,将非点源污染负荷分为溶解态非点源污染负荷和吸附态非点源污染负荷分别进行计算。郝芳华等针对大尺度区域特征,以径流过程为非点源污染负荷产生的基本动力过程,以农业生产、畜禽养殖、城市径流和农村居民点4种类型污染物为污染源,结合自然因子和社会因子建立了二元结构溶解态非点源污染模型^[47]。该模型综合了物理模型和统计模型的优势,比较适合我国地形地貌特征的非点源污染负荷估算。杨胜天等以USLE土壤侵蚀方程为基础,建立了吸附态氮和磷流失量的估算模型,并进行了全国境内水土流失影响下吸附态氮磷流失量估算^[48]。

本文的研究区为岳城水库流域,地形地貌复杂(在2.1节中有详细描述),如果利用经验统计模型进行非点源污染负荷估算,由于要进行简单空间均一化处理,很难适应复杂的下垫面,势必会造成很大的误差;同时,本研究区也难以获得能够满足物理模型进行非点源污染负荷估算所需要的详尽相关资料。所以,本文选择溶解态二元结构非点源污染模型和吸附态的非点源污染模型进行岳城水

库流域非点源污染负荷模拟。

3.1 污染源强计算

污染源强即为各污染类型的排放量，是溶解态污染负荷计算的一个参数。本文根据郑东海等的研究成果计算农田生产、农村居民点、城市径流和畜禽养殖 4 种污染类型的污染源强^[49]。

(1) 农业生产

$$Q = \sum_i^n \sum_j^m A_i \cdot \omega_{ij} \cdot M \quad (1)$$

式中， Q 为农业生产产生的非点源污染物排放总量； i 为农田类型， n 为类型数； j 为污染物指标类型，主要包括总氮、总磷和氨氮 3 种类型， m 为类型数； A 为农田面积， ω_{ij} 为各种作物不同污染物指标的源强系数； M 为修正系数，包括坡度、土壤、化肥和降水量修正。

(2) 畜禽养殖

$$Q = \sum_i^n \sum_j^m C_i \cdot D_i \cdot k_i \cdot \omega_{ij} \cdot \eta_{ij} \quad (2)$$

式中， Q 为畜禽养殖产生的非点源污染物排放总量； i 为畜禽养殖类型，主要包括大牲畜、猪、羊和家禽 4 种类型， n 为类型数； j 为污染物指标类型，主要包括总氮、总磷、COD 和氨氮 4 种类型， m 为类型数； C 为畜禽数量； D 为不同畜禽类型饲养周期， k 为不同畜禽类型粪便排泄指数， ω_{ij} 为不同畜禽类型不同污染物指标的源强系数； η_{ij} 为不同畜禽类型不同污染物指标的流失率。

(3) 农村居民点和城镇居民点

$$Q = \sum_j^m P \cdot \omega_j \quad (3)$$

式中， Q 为农村居民点产生的非点源污染物排放总量； j 为污染物指标类型，主要包括总氮、总磷、COD 和氨氮 4 种类型， m 为类型数； P 为乡村或城镇人口数量； ω_j 为不同污染物指标的源强系数。

3.2 非点源污染负荷估算模型

3.2.1 溶解态二元结构非点源污染模型

郝芳华等（2006）依据对二元影响因子进行线性概化的基本思想，构建了二元结构非点源污染模型^[47]：

$$C = \sum_{i=1}^4 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \cdot (1 - e^{kRt}) \cdot Q_i \cdot N_i \cdot S_i \quad (4)$$

式中， C 为污染负荷($t \cdot a^{-1}$)； i 为溶解态污染类型， n 为类型数； Q_i 为污染源强($t \cdot a^{-1}$)； k 为地面冲刷系数； R 为标准雨强($mm \cdot h^{-1}$)，模型取值 12.7； ε 为径流系数， ε_0 为标准径流系数，反映不透水硬化地面，模型取值 0.87； N_i 为自然因子修正系数，如坡度、植被覆盖等因子； S_i 为社会因子修正系数，反映社会发展程度对非点源污染源强的削弱程度。

其中自然修正因子可以表示为：

$$N = slope_{co} \cdot vegcover_{co} \quad (5)$$

$$slope_{co} = \frac{slope - slope_{min}}{slope_{max} - slope_{min}} \quad (6)$$

$$vegcover_{co} = \frac{vegcover_{max} - vegcover}{vegcover_{max} - vegcover_{min}} \quad (7)$$

式中， $slope_{co}$ 和 $vegcover_{co}$ 分别为坡度和植被覆盖度的修正系数； $slope_{max}$ 、 $slope_{min}$ 和 $slope$ 分别为最大坡度、最小坡度和计算单元坡度； $vegcover_{max}$ 、 $vegcover_{min}$ 和 $vegcover$ 分别为最大植被覆盖度、最小植被覆盖度和计算单元植被覆盖度。

社会修正因子可以表示为：

$$S = (1 - W) \cdot (1 - U) \quad (8)$$

式中， W 和 U 分别表示垃圾处理率和非点源污染进入管网比率。

3.2.2 吸附态非点源污染模型

杨胜天等（2006）基于通用土壤流失方程，建立了吸附态氮和磷流失量的估算模型^[48]：

$$C_a = X \cdot Q_a \cdot \eta \quad (9)$$

式中, C_a 为吸附态污染负荷($t \cdot a^{-1}$); X 为土壤侵蚀量($t \cdot a^{-1}$); Q_a 为流失土壤中的氮磷污染物背景含量($t \cdot t^{-1}$), 通过田间调查获取的不同土壤类型氮磷含量计算; η 为吸附态污染物富集系数。

其中 η 为吸附态污染物富集系数的计算公式为:

$$\ln \eta = 2 - 0.2 \ln X \quad (10)$$

3.3 非点源污染模型需要的参数及获取方案

3.1 节中污染源强和 3.2 节中溶解态二元结构非点源污染模型及吸附态非点源污染模型计算过程中用到数据主要包括社会经济数据(乡村人口数量、城镇人口数量和畜禽数量)、社会参数(垃圾处理率和非点源污染进入管网率)、气象数据(降雨时长)、环境参数(土地利用/覆盖分类图、坡度、植被覆盖度、土壤侵蚀量)等。

(1) 社会经济数据和参数

农村居民点、城市地表径流和畜禽养殖是主要的非点源污染源。乡村人口数量、城镇人口数量和畜禽养殖规模直接控制着非点源污染源强和规模, 获取准确的污染源强数据是进行非点源污染模拟的前提。乡村人口数量、城镇人口数量和畜禽养殖数量等主要从全国和省市统计年鉴获取。

社会参数主要是垃圾处理率和非点源污染进入管网率。由于不同污染源所处的地区基础设施建设情况的不同, 直接导致了非点源污染物流失量的百分比不同。我国城市地区基础设施建设相对完善, 部分垃圾要回收处理, 大部分污水排往污水管道; 而我国农村的基础设施建设相对薄弱, 缺乏排水管网和垃圾回收处理设施。

(2) 气象数据和坡度

非点源污染物是伴随着地表径流迁移转化的, 而降雨事件是地表径流的主要驱动因子, 降雨数据是非点源污染负荷模拟的主要参数之一。目前降雨数据的获取方式多种多样, 包括地面气象站点实时监测以及通过气象卫星反演等方式。

地形坡度直接影响着土壤侵蚀和地表径流, 是非点源污染模拟的重要自然因

子。目前主要通过 DEM 数据或地形图等提取地形坡度参数。

（3）植被覆盖度

地表植被有保水保土保肥的功效，可以拦截雨滴、改良土壤抗蚀性能，大大减少降雨或融雪径流的产流和产沙量，拦截污染物质随径流继续迁移，从而有效控制非点源污染的产生。地表植被的覆盖常常用植被覆盖度来衡量，植被覆盖度是溶解态二元结构非点源污染模型和土壤侵蚀量计算的重要参数。植被覆盖度的遥感分析方法主要有混合像元分解法和经验模型法。

（4）土地利用/覆盖分类

土地利用/覆盖数据控制着非点源污染源和污染物种类的空间分布情况，也影响污染物质、土壤和径流的输入、输出和迁移的过程。同时，土地利用/覆盖状况是人工干预最易实现的环节，也是水环境保护的重要手段，因此土地利用/覆盖是非点源污染研究的重要参数。目前基于遥感技术的土地利用/覆盖分类技术比较成熟，主要有基于传统统计分析的分类方法（监督分类和非监督分类）、神经网络分类方法、模糊分类方法、决策树分类方法和专家系统分类方法等。

（5）土壤侵蚀量

土壤侵蚀是破坏农田设施，降低土壤肥力，淤积水库、渠道，抬高河床等的主要元凶之一，同时，土壤营养物质吸附在土壤颗粒伴随土壤侵蚀流失，富集在河流、水库和湖泊等水体中，是非点源污染的主要形式之一。土壤侵蚀量是计算吸附态非点源污染的主要参数之一。目前土壤侵蚀研究方法较多，基于遥感技术的土壤侵蚀研究成为目前的热点，关于全国、重点区域和流域的土壤侵蚀遥感调查成果和数据库建设的报道屡见不鲜。

以上参数的获取方案如下：

1) 社会经济数据（乡村人口数量、城镇人口数量和畜禽养殖数量）主要通过《中国统计年鉴·2011》《河北省统计年鉴·2011》《山西省统计年鉴·2011》和《河南省统计年鉴·2011》获取；

2) 社会参数（垃圾处理率和非点源污染进入管网率）主要通过相关文献研究和统计年鉴获取；

3) 气象数据主要通过研究区各县市气象站地面监测获取；

4) 坡度数据主要是通过 DEM 数据利用 ARCGIS 软件提取；

5) 土地利用/覆盖分类、植被覆盖度、土壤侵蚀量主要利用遥感数据、DEM数据、气象数据、土壤数据等进行遥感反演和模拟。

3.4 本章小结

本文首先综述分析了常用的非点源污染负荷估算物理模型和统计模型的优缺点,根据研究区的特性,选取郝芳华等提出的具有非点源污染物产生、迁移转化机理的大尺度非点源污染负荷估算方法体系为本研究的非点源污染负荷估算模型。然后详细描述了大尺度非点源污染负荷估算方法体系中的污染源强计算模型,溶解态二元结构非点源污染模型和吸附态非点源污染模型。最后根据大尺度非点源污染负荷估算体系理论,确定非点源污染负荷估算所需的空间数据和统计数据,并设计了空间数据和统计数据的获取方案。

第4章 关键环境参数遥感反演

本章主要利用遥感数据及 DEM 等辅助数据,对关键环境参数(土地利用/覆盖分类、植被覆盖度和土壤侵蚀)进行反演和模拟,土地利用/覆盖分类主要采用基于面向对象的决策树遥感分类方法,植被覆盖度主要采用像元二分法进行反演,土壤侵蚀量主要采用通用土壤流失方程(USLE)。

4.1 岳城水库流域土地利用/覆盖分类

面向对象遥感分类方法以多个相邻像元组成的对象为处理单元,实现较高层次的遥感图像分类和目标地物提取。面向对象的决策树遥感分类方法首先通过对遥感图像进行分割,把图像分割成若干个互不相交的非空子区域,作为分类对象;然后针对每一类对象构建分类规则,建立分类决策树,达到对遥感图像分类的目的。

4.1.1 多尺度图像分割

图像分割包括两个环节:①选择波段和确定各波段权重,②确定分割尺度和分割参数,选择不同的波段、分割尺度和分割参数会影响最终的分类结果。本研究面向对象的平台采用易康软件(eCognition)。

1) 波段选择和各波段权重确定

选用不同波段会得到不同的图像分割结果,为了能够充分利用图像信息将 TM 数据六个波段都参与图像分割过程。根据各个波段的信息丰富程度确定各波段参与分割的权重。信息熵是从信息论角度反映图像信息丰富程度的一种度量方式,可以反映图像包含地物信息的详细程度。信息熵高的波段,信息比较丰富;信息熵低的波段,信息质量较差。本研究根据信息熵的值确定各波段的权重。常用的信息熵有 Shannon 熵、条件熵、平方熵和立方熵等。Shannon 熵将遥感影像视作离散无记忆信息源,其应用范围广泛^[50]。本文采用 Shannon 熵表示信息熵:

$$H(X) = - \sum_{i=0}^{L-1} P_i \log_2 P_i \quad (11)$$

式中， i 为像元可能的灰度级， L 为像元最大的灰度级， P_i 为影像 X 上像元灰度级为 i 的像元出现的概率。为方便计算并保证 Shannon 熵表达信息量的能力，将各波段划分为 256 个灰度等级来计算 Shannon 熵。

2) 分割尺度和分割参数确定

本研究根据研究区地形复杂以及不同地物类型空间分布的特点，并对分割尺度和分割参数进行多次尝试，确定分割尺度为 20，光谱因子为 0.8，形状因子为 0.2，光滑度为 0.5，紧密度为 0.5。

4.1.2 典型地物光谱分析及信息提取模型

4.1.2.1 典型地物光谱分析

物体的光谱反射率随波长变化的曲线称为光谱反射率曲线，影响地物反射率的因素包括物质类别、组成、结构、入射角及表面特征等^[51]。分析地物的光谱特征是遥感识别地物类型的重要手段。图 1 表示研究区 9 种典型地物样本的 TM 数据 6 个波段光谱反射率曲线，其形态差异很大。在可见光谱段内，由于色素的强烈吸收，绿色植被的反射率很低，在蓝波段和红波段由于叶绿素强烈吸收辐射能而呈吸收谷；在近红外波段，由于绿色植被叶片的细胞壁和细胞空隙间折射率不同，导致多次反射，绿色植被在近红外波段内形成高反射；在短波红外波段内，植物的光谱特性受叶子含水量控制，植被入射能量基本上均被吸收和反射，光谱反射率较低。水体的光谱特征是由水本身的物质组成决定，同时又受到水的各种状态影响，在可见光波段，水体入射能量大部分透射，反射率很低，蓝绿波段反射率稍高于红波段；在近红外、短波红外部分，水体几乎吸收全部入射能量，所以在近红外和短波红外部分水体的反射率很小。居民点、未利用地和厂矿的反射率基本上是随着波长的增加而增加，此趋势在可见光和近红外波段尤为明显；部分厂矿区域受煤等物质的影响，各波段反射率整体低于居民点和未利用地的光谱反射率(见图 2-A)。

4.1.2.2 水体信息提取

利用遥感提取水体信息一般有两种方法：单波段法和多波段法。单波段法一般利用遥感影像的近红外波段设置阈值提取水体信息。这种方法主要是利用水体在近红外波段强吸收，而植被和土壤在近红外波段的强反射特性。但是，单波段法很难去除水体中杂有的阴影。研究区群山环绕、地形复杂，山体阴影在研究区广泛分布，不适合利用单波段法提取水体信息。多波段法则是利用多波段综合的优势识别水体信息。Mcfeeters 采用绿波段反射率和近红外波段反射率构建归一化差异水体指数 (NDWI)，该方法可以有效的抑制植被信息，增强水体信息^[52]。NDWI 指数只考虑到了植被因素，却忽略了土壤、建筑物和裸地等因素。在此基础上，徐涵秋在 2005 年提出了改进归一化差异水体指数 (MNDWI)。此方法可以有效的抑制土壤、建筑物和阴影的影响^{[53],[54]}。本文选择改进归一化差异水体指数 (MNDWI) 提取水体信息。

$$MNDWI = \frac{R2 - R5}{R2 + R5} \quad (12)$$

式中，R2 和 R5 分别代表 TM 数据第 2 和第 5 波段。由 9 种典型地物的 MNDWI 值（见图 2-B）可知，水体的 MNDWI 值大于 0，其他八种地物的 MNDWI 值都小于 0，利用改进归一化差异水体指数 (MNDWI) 可以很好的提取水体信息。

4.1.2.3 植被信息提取

近年来，研究人员提出的植被信息提取方法大致可以分为两类：一是通过植被的光谱特征提取植被信息；二是结合专家知识、神经网络、小波变换等外在知识提取植被信息^[55]。利用植被指数提取植被信息是主要的光谱特征提取植被信息的方法。Pearson 等于 1972 年提出了比值植被指数 (RVI)，此植被指数没有考虑土壤背景的影响，只用于植被覆盖度较高的情况，当植被分布稀疏时，RVI 效果并不理想^[56]。Rouse 等在 1974 年提出了归一化差异植被指数 (NDVI)，在植被遥感中，NDVI 的应用最为广泛，但是 NDVI 增强了低值部分，对高植被区有较低的敏感性^[57]。Huete 等于 1997 年提出了增强植被指数 (EVI)，EVI 综合考虑了大气和土壤背景的影响^[56]。张立福等于 2005 提出了一种基于通用模式分解 (UPDM) 的植被指数算法 VIUPD，该植被指数采用 UPDM 系数的线性组合，

是所有原始数据光谱信息的综合反映,比简单利用有限几个波段组合的传统植被指数更能反映植被的细微变化^{[56],[58]}。

$$VIUPD = \frac{C_v - 0.1 \times C_s - C_4}{C_w + C_v + C_s} \quad (13)$$

式中, C_w 、 C_v 、 C_s 和 C_4 分别是标准水体模式、标准植被模式、标准土壤模式和标准枯黄植被模式 UPDM 系数。

1) 植被与非植被分离

综合比较 RVI、NDVI、EVI 和 VIUPD 四种植被指数, NDVI 对中低植被覆盖度更加敏感,所以采用 NDVI 并设置阈值分离植被与非植被信息。典型地物样本的 NDVI 值见图 2-C, 植被地物的 NDVI 值都大于 0.5, 非植被地物的 NDVI 值都小于 0.5, 利用归一化差异植被指数可以很好的区分植被与非植被信息。

2) 灌草地提取

灌草地相对于坡耕地、耕地和林地植被覆盖度较低。通过分析林地、耕地、坡耕地和灌草地四种典型地物样本的 RVI、NDVI、EVI 和 VIUPD 四种植被指数, VIUPD 可以有效的提取灌草地信息。由图 2-D 知, 灌草地的 VIUPD 值小于 0.6, 其他三种地物的 VIUPD 值大于 0.6, 本文采用 VIUPD 植被指数提取灌草地信息。

3) 耕地、坡耕地和林地信息提取

坡耕地是指分布在山坡上地面平整度差跑水跑肥跑土突出作物产量低的旱地, 一般是指 6~25° 之间的地貌类型 (开垦后多称为坡耕地)。根据对研究区的调查, 林地多分布在山地, 坡度较大。因此, 本文利用坡度特征提取耕地信息。

通过对四种植被指数的分析对比, RVI 对分离坡耕地和林地比较有效 (见图 2-E), 而且 RVI 在植被覆盖度比较高的情况下较敏感, 所以本文选用 RVI 和坡度特征分离坡耕地信息和林地信息。

4.1.2.4 非植被信息提取

居民点和未利用地的反射率较高, 反射率随波段的变化趋势也极为相似。与煤有关的厂矿反射率相对较低, 但是反射率随波段的变化趋势与居民点、未利用地的也很相似, 差异表现在各个波段的整体反射率。所以, 构建反映各个波段反射率情况的指数 SSI (见图 2-F), 来提取与煤有关的厂矿^[59]。

$$SSI = R2 + R3 + R4 + R5 + R6 \quad (14)$$

式中，R2、R3、R4、R5和R6为 TM 数据的第 2、第 3、第 4、第 5 和第 7 波段。

由于单个的城镇用地面积远大于单个的农村居民点的用地面积和单块未利用地面积，所以利用面积特征提取城市用地。其它厂矿、未利用地和农村居民点的光谱特征相似，所以利用先验知识和影像的纹理等综合特征目视解译提取其他厂矿和未利用地信息。

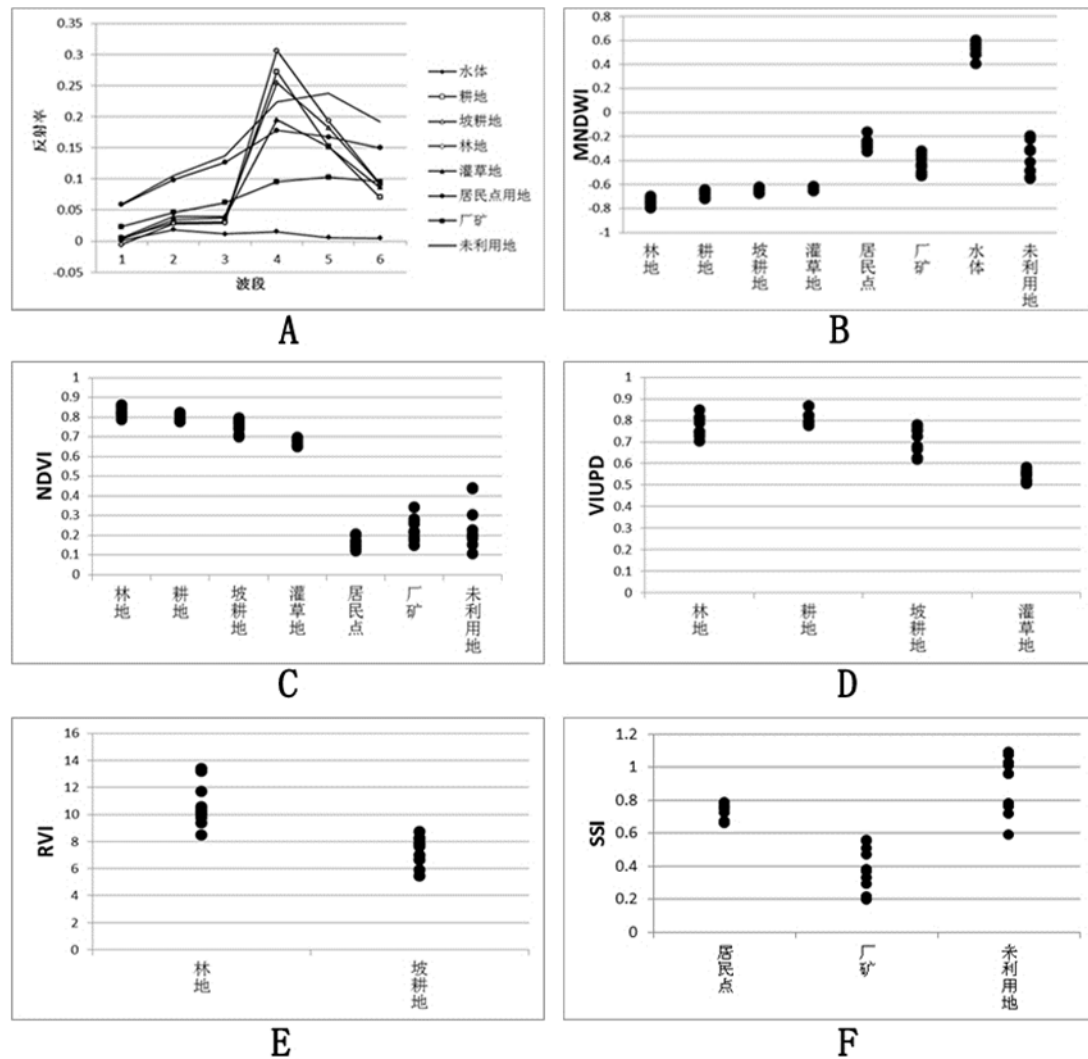


图 2 典型地物光谱特征及各遥感指数散点图

(图中，A 图物典型地物光谱特征，B 图、C 图、D 图、E 图、F 图分别为典型地物 MNDWI、NDVI、VIUPD、RVI、SSI 遥感指数散点图)

4.1.3 分类决策树建立及信息提取

本研究采用基于面向对象的决策树分类方法，按照节点将决策树分成 5 个层次。第 1 层次，应用 MNDWI 模型通过阈值设定提取水体，分离“水、陆”相关地物；第 2 层次，应用植被指数 NDVI 分离植被和非植被区；第 3 层次，对于非植被区，应用 SSI 模型提取厂矿信息；对于植被区，应用植被指数 VIUPD 提取灌草地信息；第 4 层次，对于非植被区，应用面积特征提取城镇信息；对于植被区域，利用坡度特征提取耕地信息；第 5 层次，利用比值植被指数 RVI 区分林地和坡耕地信息。分类决策数完成分类之后，利用利用先验知识和影像的纹理等综合特征目视解译提取未利用地信息。

关于决策树规则阈值的设定，由于数据获取时间、大气状况、太阳高度角等不同，阈值的设定需要视数据获取的具体条件而定。图 6 分类决策树以轨道号为 124/35 的 TM 影像为例。

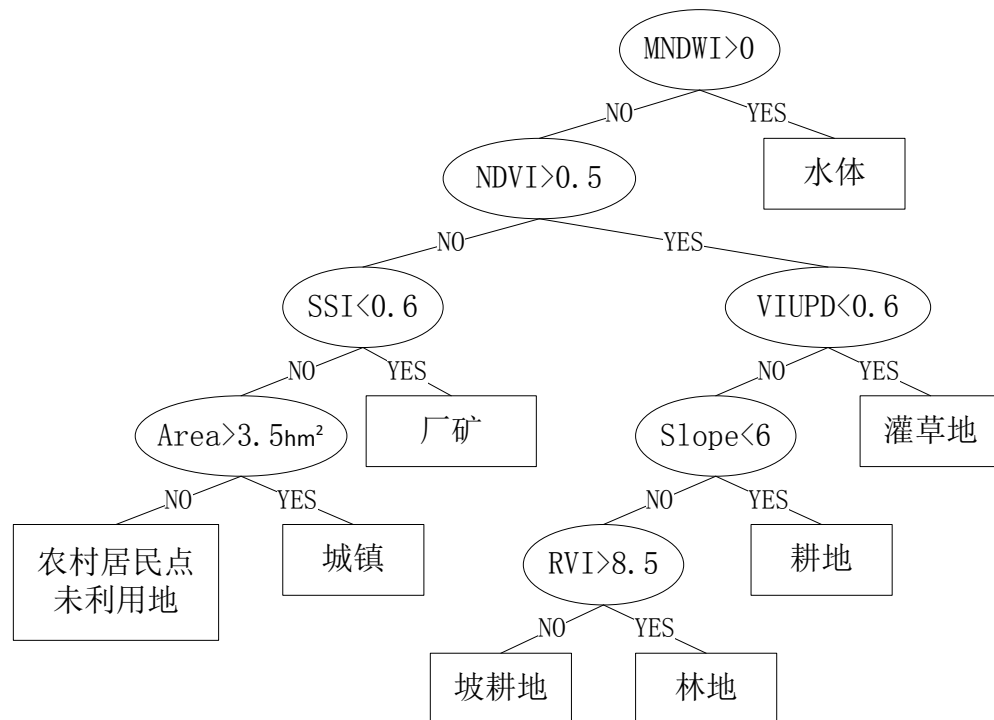


图 3 分类决策树（以 124/35 为例）

4.1.4 分类结果及精度评价

4.1.4.1 分类结果

基于面向对象决策树的分类方法,利用 TM 影像数据进行岳城水库流域土地利用/覆盖信息提取,经过分类后处理得到岳城水库流域的土地利用/覆盖分类图(见图 4)。可以看出,研究区以林地、灌草地、耕地、坡耕地和居民点为主,其中耕地主要分布长治盆地及河谷水库周围;林地和灌草地主要分布在太行山系;坡耕地主要分布在研究区的西北部的丘陵地带;居民点主要沿河流和水源地分布以及长治盆地;厂矿多分布在居民点附近。

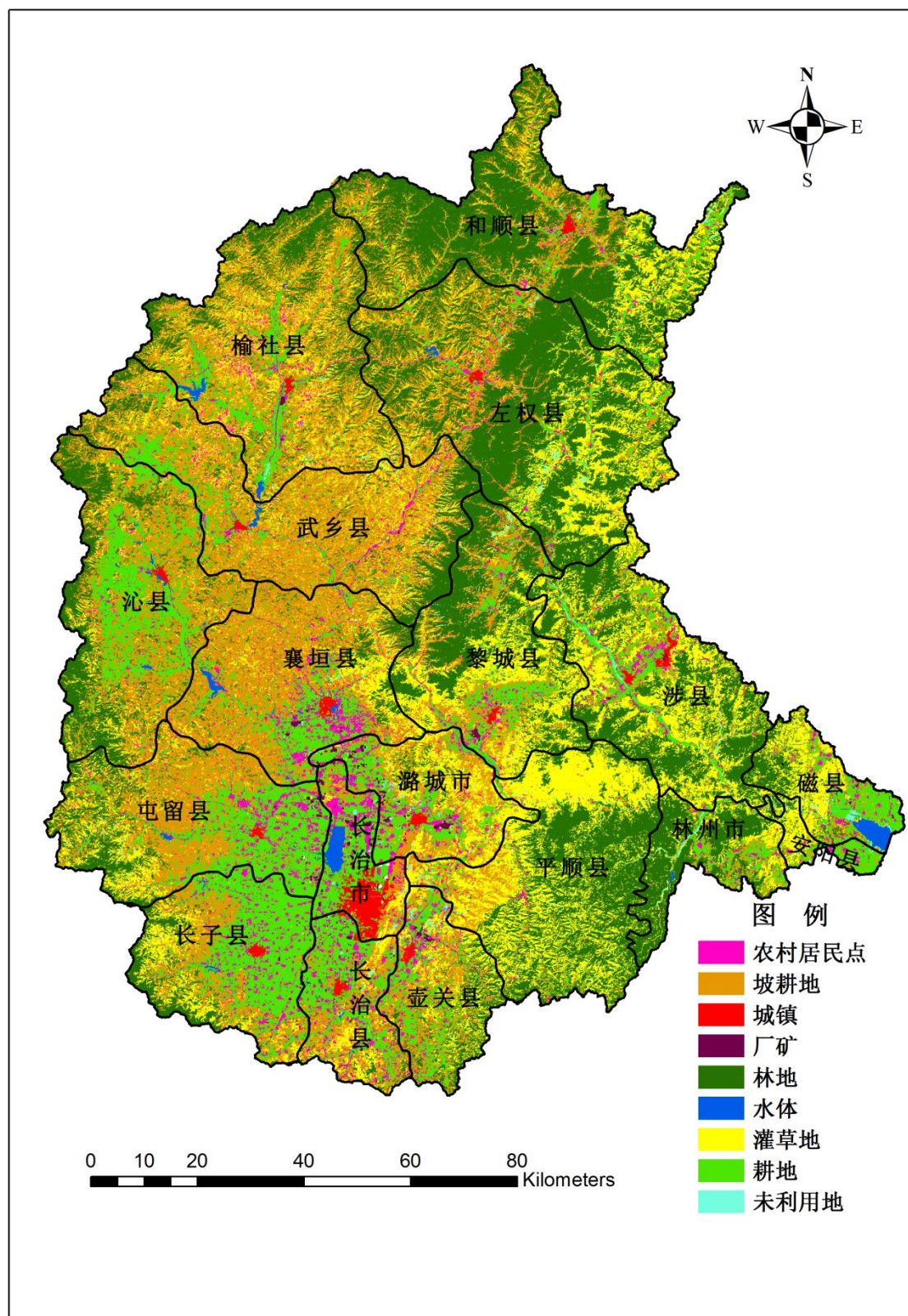


图 4 岳城水库流域土地利用/覆盖分类图

4.1.4.2 精度评价

本文中，结合地面调查和高分辨遥感影像共选取 440 块分类结果验证斑块，其中耕地 55 块、林地 55 块、坡耕地 55 块、灌草地 55 块、城镇用地 20 块、农村居民点用地 55 块、厂矿用地 55 块、水体 35 块、未利用地 55 块，各类别验证斑块均匀分布在整個研究区。为了确保验证样本的代表性和有效性，利用分层随机采样法选取 40% 的像元参与分类结果验证，各类别参与分类结果验证的像元个数见表 2。建立分类结果混淆矩阵并计算用户精度、制图精度、总精度和 Kappa 系数（见表 1）。从用户精度看，除灌草地外其他各类用地分类精度均在 80% 以上；从制图精度看，所有类别的分类精度都达到了 80% 以上，此外，总体分类精度较为理想，达 86.9498%，总的 Kappa 系数亦达 0.8518，总的来说，分类精度较高，可以达到应用的要求。

表 1 分类混淆矩阵及分类精度

		分类结果 (Pixels)										
		城镇	厂矿	水体	耕地	林地	灌草地	未利用地	农村居民点	坡耕地	总和	用户精度 (%)
地面调查样本 (Pixels)	城镇	1721	0	3	0	0	0	0	0	0	1724	99.83
	厂矿	6	541	21	0	0	0	20	40	0	628	86.15
	水体	0	10	1376	0	0	0	2	0	0	1388	99.14
	耕地	10	12	89	1891	21	21	72	135	86	2337	80.92
	林地	0	0	0	0	1987	109	4	0	15	2115	93.95
	灌草地	16	10	31	63	256	1701	113	18	151	2359	72.11
	未利用地	0	0	0	0	15	72	1441	103	64	1695	85.01
	农村居民点	21	90	0	0	0	0	24	2139	17	2291	93.37
	坡耕地	0	1	0	197	41	134	52	29	1821	2275	80.04
	总和	1774	664	1520	2151	2320	2037	1728	2464	2154	16812	
生产精度 (%)	97.01	81.48	90.53	87.91	85.65	83.51	83.39	86.81	84.54			
总精度: 86.95% Kappa 系数: 0.8518												

4.2 岳城水库流域植被覆盖度反演

植被覆盖度是指统计区域植被垂直投影面积所占的百分比，是自然环境变化和人类活动综合作用的结果^[60]。利用遥感数据估算植被覆盖度是区域植被覆盖

度估算的主要手段之一。目前利用遥感技术提取区域植被覆盖度主要有经验模型法和混合像元分析法。经验模型法一般只适用于特定区域和特定植被类型，并且需要大量的实测数据建立经验回归模型，具有一定的局限性不利于推广应用^[61]。混合像元分析法有多种植被覆盖度估算模型，其中像元二分法被认为是最简单的线性组合光谱模型，并且理论基础较好，不受地域和植被类型限制，易于推广应用^[62]。本文采用像元二分法估算岳城水库流域植被覆盖度。

像元二分模型假设一个像元地表由有植被覆盖和无植被覆盖地表共同组成，传感器观测到的像元光谱信息也是由这两个组分的光谱信息线性加权合成，各因子的权重是各自面积在像元中所占的比例，植被的权重可以看作是植被覆盖度。根据像元二分模型原理，传感器获取的信息可以有以下式表示：

$$f_c = (S - S_{soil}) / (S_{veg} - S_{soil}) \quad (15)$$

式中， f_c 表示植被覆盖度， S 为传感器获取的信息， S_{soil} 为全部土壤覆盖的纯像元的遥感信息， S_{veg} 为全部植被覆盖的纯像元的遥感信息。

NDVI 能够反映植物生长状态和植被空间分布密度，可以在很大程度上消除地形和大气的的影响，且与植被分布密度线性相关。很多研究表明，利用 NDVI 进行植被覆盖度提取精度较高，将 NDVI 直接带入（5）式得：

$$f_c = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \quad (16)$$

式中， f_c 表示植被覆盖度， $NDVI$ 为某像元归一化植被指数， $NDVI_{soil}$ 为全部土壤覆盖的纯像元的归一化植被指数， $NDVI_{veg}$ 为全部植被覆盖的纯像元的归一化植被指数。本研究参考研究区土地利用/覆盖分类图，选取 NDVI 值累积频率置信度（1%~99%）的最大值与最小值作为 $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$ 参数值（见表 2）。

表 2 研究区 NDVI 频率统计结果

最小值	最大值	平均值	1%	99%
-1.00	1.00	0.76747	0.47451	0.85882

岳城水库流域 2010 年八九月份植被覆盖状况良好，以中高覆盖为主，占整个流域的 50% 以上；低植被覆盖主要是水体、城镇和河滩等；高植被覆盖主要分布在太行山脉的林地（见图 5）。

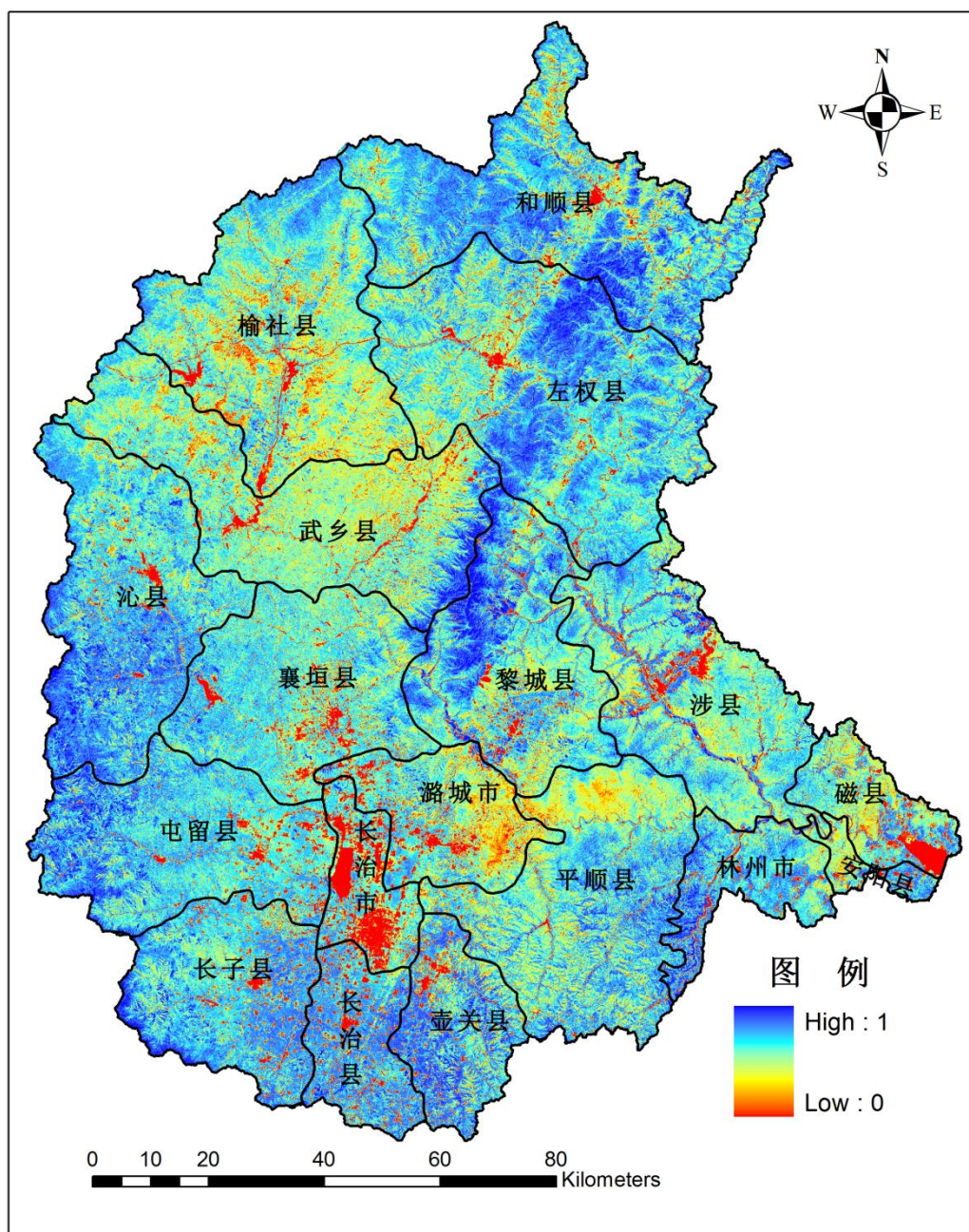


图5 岳城水库流域植被覆盖度图

4.3 岳城水库流域土壤侵蚀量计算

土壤侵蚀是不仅造成侵蚀地区的土壤贫瘠、土地生产力下降，而且被侵蚀的泥沙还会造成下游河道、水库以及河口的淤积。同时，泥沙颗粒吸附的有机和无机污染物会污染下游水体。本文采用遥感和地理信息系统技术，基于美国通用土壤流失方程 USLE (Universal Soil Loss Equation) 进行岳城水库流域 2010 年土壤

侵蚀空间分布的数值模拟^[63]，它的估算式为：

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (17)$$

式中，A为单位面积上时间和空间平均土壤流失量，t/ha·a；R为降雨-径流侵蚀力因子，MJ·mm/(ha·h·a)；K为土壤可蚀性因子，t·ha·h/(ha·MJ·mm)；LS为地形因子；C为覆盖-管理因子；P为水土保持措施因子。

本文研究用到的基础数据为气象、土壤、植被覆盖、土地利用类型和 DEM 等相关数据。土壤侵蚀估算式中的降雨-径流侵蚀力因子R、土壤可蚀性因子K、地形因子LS、覆盖-管理因子C和水土保持措施因子P五个因子的计算方法参照曾红娟（2009）、肖寒（1999）、周伏建（1995）、黄炎和（1993）和蔡崇法（2000）等的研究成果^{[64]~[68]}。

（1）降雨侵蚀力因子

$$R = \sum_{i=1}^{12} (-2.6398 + 0.3046r_i) \quad (18)$$

式中，R为年降雨侵蚀力指标(J·cm/(m²·a))；r_i为月降雨量(mm)。

（2）土壤可蚀性因子

$$K = \left[0.2 + 0.3e^{-0.0256S_d(1-\frac{S_i}{100})} \right] \cdot \left(\frac{S_i}{C_i + S_i} \right)^{0.3} \cdot \left[1 - \frac{0.25C}{C + e^{3.72-2.95C}} \right] \cdot \left[1 - \frac{0.7(1 - S_d/100)}{(1 - S_d/100) + e^{-5.51+22.9(1-S_d/100)}} \right] \quad (19)$$

式中，K为土壤可蚀性因子(100F·T·in/(acre·h))；S_d为砂粒含量(%)；S_i为粉粒含量(%)；C_i为粘粒含量(%)；C为有机碳含量(%)。

（3）地形因子

$$LS = 0.08\lambda^{0.35}\alpha^{0.66} \quad (20)$$

式中，λ为坡长(m)；α为坡度(°)。

（4）覆盖管理因子

$$C = \begin{cases} 1 & c = 0 \\ 0.6508 - 0.3436 \log c & 0 < c \leq 78.3\% \\ 0 & c > 78.3\% \end{cases} \quad (21)$$

式中，C为覆盖-管理因子，c为植物覆盖度（%）。

（5）水土保持措施因子

水土保持措施因子是采用措施后的土壤流失量与顺坡种植时的土壤流失量的比值。

岳城水库流域土壤侵蚀空间模拟的技术路线如下图（图6）

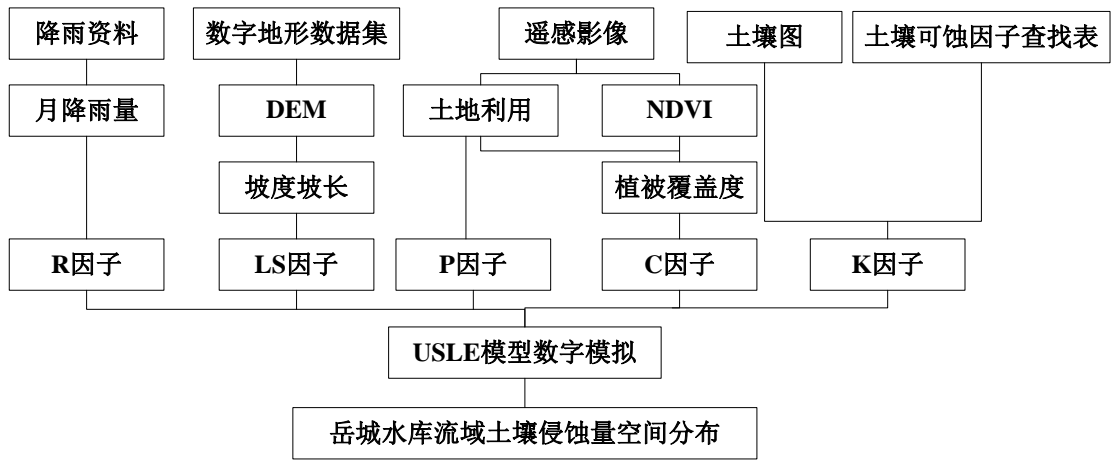


图6 岳城水库流域土壤侵蚀空间模拟技术流程图

岳城水库流域土壤侵蚀总体情况不严重（见图7），侵蚀模数小于 $5\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ 属于微度，土壤侵蚀的面积达到 73%；侵蚀模数大于 $5\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ 小于 $25\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ 属于轻度土壤侵蚀的面积达 26%；其他侵蚀等级的面积不足 1%。长治市的东部地区（平顺县、壶关县和潞城市）、北部地区（武乡县）和晋中市的南部地区（榆社县）土壤侵蚀程度相对严重，这些地区属于丘陵地貌，地形复杂，坡度较大，且植被覆盖度较低，保水保土能力相对较差，造成土壤侵蚀相对严重。

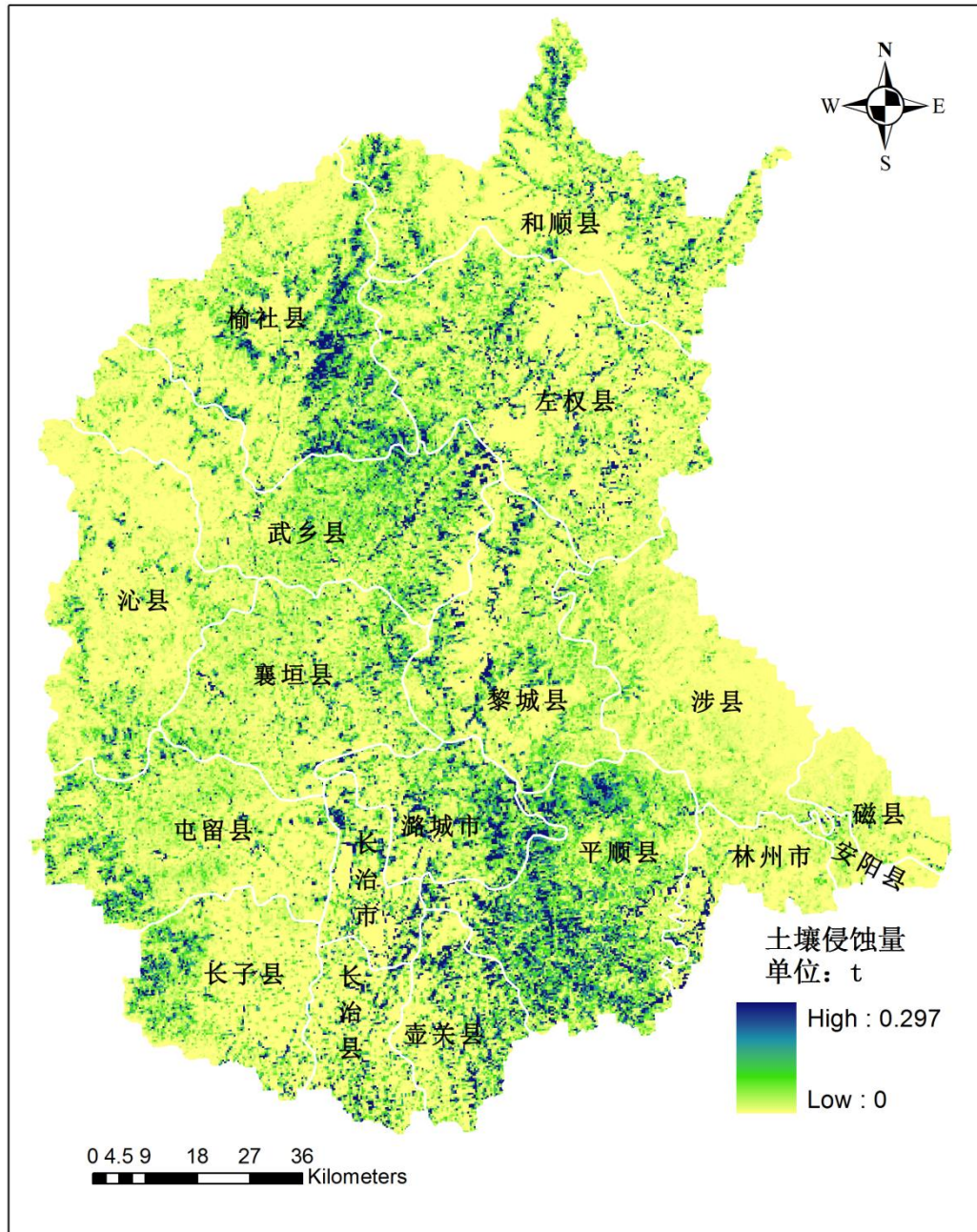


图 7 岳城水库流域 2010 年土壤侵蚀空间分布图

4.4 本章小结

本章主要利用遥感数据及 DEM 等辅助数据, 对关键环境参数(土地利用/覆盖分类、植被覆盖度和土壤侵蚀)进行反演和模拟。

1) 在分析了研究区典型地物的光谱特征和相关指数(如植被指数、水体指数等)的基础上, 构建了决策树分类规则, 对岳城水库流域 TM 影像进行基于面

向对象的土地利用/覆盖分类。本文选取 440 块验证斑块，并利用分层随机采样法选取 40% 的像元参与分类结果验证，总的分类精度达 86.95%，Kappa 系数达 0.8518，分类结果精度较高，满足应用的需求。

2) 首先利用流域 TM 影像制作流域归一化植被指数 (NDVI) 分布图，基于像元二分法进行了岳城水库流域植被覆盖度反演，岳城水库流域植被覆盖度以中高覆盖为主，中高植被覆盖度面积占整个流域的 50% 以上。

3) 利用流域气象数据、土壤数据、土地利用/覆盖分类数据、植被覆盖度数据以及地形数据等，基于美国通用土壤流失方程 (USLE) 进行了岳城水库流域土壤侵蚀数值模拟，岳城水库流域土壤侵蚀总体情况不严重，侵蚀模数小于 $5\text{t/hm}^2 \cdot \text{a}$ ，属于微度侵蚀的面积达到 73%；侵蚀模数大于 $5\text{t/hm}^2 \cdot \text{a}$ 小于 $25\text{t/hm}^2 \cdot \text{a}$ ，属于轻度侵蚀的面积达 26%；其他侵蚀等级的面积不足 1%。

第5章 空间数据与非点源污染模型耦合与结果分析

本章主要是将遥感数据等空间数据集与大尺度非点源污染负荷估算模型进行耦合,实现基于像元的非点源污染负荷估算,并结合刘家庄水文站水文数据和相关文献验证模型结果。最后利用基于像元的非点源污染负荷估算模型,评估岳城水库流域非点源污染负荷。

5.1 空间数据与非点源污染模型耦合

郝芳华等(2006)在借鉴统计经验模型和机理过程模型优势的基础上,以满足水资源规划的需求为目的,结合我国在非点源污染负荷调查工作中的实际情况,建立了具有非点源污染物产生、迁移转化机理的大尺度非点源污染负荷估算方法体系^[40]。遥感数据具有效率高、经济性好、尺度大等特点,可以相应解决目前非点源污染数据获取中数据获取时间长、实效性差和跨越较广等瓶颈问题,可以与传统野外采集数据和社会统计资料互为补充。同时,以遥感数据和空间插值得到的数据为主的空间数据,能够从空间上更好的模拟非点源污染物迁移转化的过程。实现非点源污染估算模型和空间数据的耦合能够更好的描述非点源污染物迁移转化的机理,更好的实现流域非点源污染的管理与控制。

本文以郝芳华等提出的大尺度非点源污染负荷估算方法体系为基础,充分利用遥感等空间数据在大尺度区域生态环境问题研究的优势,实现空间数据集与大尺度非点源污染负荷估算模型的耦合。

5.1.1 溶解态二元结构非点源污染模型与空间数据耦合

非点源污染是区域自然环境特征和社会经济活动双重因素共同作用的结果,郝芳华等构建的二元结构非点源污染模型综合考虑了自然影响因子和社会影响因子两方面的影响^[47]。他们将二元影响因子归并为土壤结构、地形、降水、土地利用方式和开发强度等方面。其中地形、土壤结构和降水为自然影响因子,土地利用方式和开发强度属于社会影响因子。将自然影响因子和社会影响因子进行

空间化,实现二元结构模型和空间数据的有效耦合,能够更好的反映地表非点源污染的产生、运移和转化等物理过程的实际情况。

本节对相关社会经济数据和降雨数据进行空间化,结合其他自然影响因子空间数据,对溶解态二元结构非点源污染模型和空间数据集进行耦合,并估算岳城水库流域非点源污染负荷。

(1) 污染源强计算模型与空间数据耦合

污染源强属于压力指标反映了区域所面临的污染压力程度,溶解态非点源污染考虑的污染源强主要包括农业生产、畜禽养殖、农村居民点和城市地表径流。

①农业生产:本文把农业生产的土地类型主要分为坡耕地和耕地,农业生产的污染物类型主要有氨氮、氮和磷。耕地和坡耕地的三种污染物质氨氮、氮和磷的源强系数根据相关文献和模型的参数率定分别确定;模型修正系数中的坡度、土壤、化肥和降水量通过相关文献和降水量根据相关文献、地面调查和模型参数率定分别确定。最后根据 30 米空间分辨率的土地利用/覆盖分类图和农业产生污染源强计算公式(见 3.1 节(1)式)计算耕地和坡耕地每个像元的氨氮、氮和磷三种污染物的排放总量。

②畜禽养殖:研究区畜禽养殖大都以农村散养为主,是主要非点源污染源之一。本文把畜禽养殖类型划分为牛类、猪类、羊类和家禽四种养殖类型,污染物类型主要包括氨氮、氮、磷和 COD 四种。需要的参数主要包括:四种畜禽养殖类型的饲养周期、四种畜禽养殖类型的排泄指数、四种污染物源强系数、四种污染物流失率等,这些系数主要依据相关文献确定。四种畜禽养殖类型的养殖数量主要通过相关地区统计年鉴获取。综合以上相关参数,按照畜禽养殖污染源强计算公式(见 3.1 节(2)式)计算各行政单元的畜禽养殖污染源强,最后结合土地利用/覆盖分类图把畜禽养殖污染源强分配到农村居民点。

③农村和城镇居民点:农村和城镇居民点产生的污染物质主要有氮、磷、氨氮和 COD。主要利用农村和城镇居民点的人口数量和四种污染物的源强系数,通过居民点污染源强计算公式(见 3.1 节(3)式)计算各行政单元农村和城镇居民点污染源强,最后结合土地利用/覆盖分类图把污染源强分配到农村居民点和城镇居民点。

(2) 二元结构非点源污染模型与空间数据耦合

二元结构非点源污染模型的参数主要有五部分组成,即径流系数($\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$)、不透水水平硬化地面的非点源污染产污系数($1 - e^{kRt}$)、四种污染物质的排污总量(即污染源强 Q_i)、自然因子(N_i)和社会因子(S_i)。其中四种污染物质的排污总量(即污染源强 Q_i)在上文中已有介绍,径流系数和社会因子根据不同污染源类型选取不同的参数。通过空间数据处理技术,获得不透水水平硬化地面的非点源污染产污系数($1 - e^{kRt}$)和自然因子(N_i)空间分布图。

①不透水水平硬化地面的非点源污染产污系数($1 - e^{kRt}$):地面冲刷系数 K 和标准雨强 R 根据相关文献研究结果确定;大于标准雨强的降雨时长根据2010年涉县、武安、峰峰、太谷、榆社、长治、襄垣、和顺、平顺等9个气象站的年降雨量数据获取,并对9个气象站的降雨数据进行克里金空间插值得到岳城水流域30米分辨率的降雨数据。根据公式 $1 - e^{kRt}$ 计算研究区不透水水平硬化地面的非点源污染产污系数。

②自然因子(N_i):自然因子的主要参数为植被覆盖度和坡度,根据3.2.1节中(5)、(6)和(7)式计算获取岳城水库流域自然因子空间分布图。

根据各种污染源污染发生、迁移和转化过程的不同,溶解态二元结构非点源污染模型可以细分为四个模型:

城市地表径流:由于城市中大多数自然环境被人工代替,自然因子 N 为0;大部分城市地表具有不透水或难透水性, ε 和 ε_0 相等;社会因子的垃圾处理率 W 和非点源污染物进入管网率 U 根据相关文献研究和模型参数率定确定。计算公式可以表示为下式:

$$C = (1 - e^{kRt}) \times Q \times (1 - W)(1 - U) \quad (22)$$

农村居民点:农村居民点同样大多数自然环境被人工取代,自然因子 N 为0;研究区农村基本没有污水排放管网,非点源污染物进入管网率 U ;地表径流系数 ε 根据相关文献研究成果确定,垃圾处理率根据地面实际调查结果确定。计算公式可以表示为下式:

$$C = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} (1 - e^{kRt}) \times Q \times (1 - W) \quad (23)$$

畜禽养殖:研究区畜禽养殖大都以农村散养为主,自然因子 N 、非点源污染

物进入管网率 U 和垃圾处理率 W 都为 0。计算公式可以表示为下式：

$$C = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} (1 - e^{kRt}) \times Q \quad (24)$$

农业生产：农业生产产污过程与自然因子关系密切，而与社会因子没有关系。其计算公式可以表示为下式：

$$C = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} (1 - e^{kRt}) \times Q \times N \quad (25)$$

综上所述，分别计算农业生产、畜禽养殖、农村居民点和城市地表径流四种污染类型的非点源污染空间分布，再进行叠加得到岳城水库流域总氮负荷、总磷负荷、氨氮负荷、COD 负荷和总污染负荷的空间分布图。

5.1.2 吸附态非点源污染模型与空间数据耦合

吸附态非点源污染是污染物吸附在土壤颗粒上伴随着土壤侵蚀的过程迁移转化并最终在水体中富集。岳城水库流域经济以农业为主，地处半干旱山地丘陵地区，坡耕地较多，由于土地利用方式不合理和管理措施不力，水土流失所引起的吸附态氮磷污染负荷成为流域非点源污染的主要污染源之一。流域出口的污染负荷决定于流域土壤流失量、流失土壤中的氮磷污染物背景含量和吸附态污染物富集系数。其中吸附态非点源污染的实质在于土壤流失，目前国内外在吸附态非点源污染研究中，应用最广泛的是美国通用土壤流失方程（USLE）。本文吸附态非点源污染模型采用杨胜天（2006）提出的吸附态非点源污染负荷计算模型，土壤流失方程采用美国通用土壤流失方程（USLE）。

（1）USLE 方程与空间数据的耦合

USLE 方程是一个考虑了降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、地形因子、覆盖-管理因子和水土保持措施因子等 5 个因素的统计模型。

①降雨侵蚀力 R 因子：首先获取 2010 年涉县、武安、峰峰、太谷、榆社、长治、襄垣、和顺、平顺等 9 个气象站的年降雨量数据，然后通过 4.3 节中式(18)计算各气象站的降雨侵蚀力 R 因子，采用克里金空间插值得到了岳城水库流域降雨侵蚀力分布图。

②土壤可蚀性 K 因子：根据门明新等（2004）年建立的河北省部分土壤可

蚀性 K 值查找表和全国 1:400 万土壤类图^[69], 得到岳城水库流域土壤可蚀性 K 值空间分布图。

③地形 LS 因子: 首先根据研究区的 DEM 数据获取研究区的坡度和坡长, 然后根据 4.3 节中式 (20) 计算地形 LS 因子, 得到岳城水库流域地形 LS 因子空间分布图。

④覆盖-管理 C 因子: 根据研究区植被覆盖度分布图和 4.3 节中式 (21) 计算覆盖-管理 C 因子, 得到岳城水库流域覆盖-管理 C 因子空间分布图。

⑤水土保持措施 P 因子: 根据土地利用/覆盖分类图, 确定 P 因子。根据相关研究成果, 一般的林地、灌草地等自然植被 P 值取 1; 居民点等建设用地 P 值取 1; 水域 P 值取 0; 耕地和坡耕地 P 值取 0.5。最终根据土地利用/覆盖分类图得到岳城水库流域水土保持措施 P 因子空间分布图。

综上, 五个因子的空间分布图均为 30 米分辨率的栅格影像, 根据美国通用土壤流失方程 (USLE) (见 4.3 节式 (17)), 降雨侵蚀力 R 、土壤可蚀性 K 、地形 LS 、覆盖-管理 C 、水土保持措施 P 五个因子空间分布图相乘得到岳城水库流域土壤侵蚀量空间分布图。

(2) 吸附态非点源污染模型与空间数据耦合

吸附态非点源污染物以被侵蚀的土壤为载体, 流域出口的污染负荷决定于流域土壤流失量、流失土壤中的氮磷污染物背景含量和吸附态污染物富集系数。

①土壤流失量: 上文已经叙述最终得到 30 米空间分辨率的岳城水库流域土壤侵蚀量空间分布图。

②流失土壤中的氮磷污染物背景含量: 首先选取若干个地面调查点, 调查不同土壤类型不同区域土壤中的氮磷污染物的含量, 再结合土壤类型图进行克里金空间插值, 分别得到岳城水库流域污染物质氮磷土壤背景含量空间分布图。

③吸附态污染物富集系数: 吸附态污染富集系数为污染物流失过程中的富集比例, 根据土壤侵蚀量空间分布图, 通过其计算公式参照 3.2.2 节式 (10), 得到岳城水库流域污染物富集系数空间分布图。

上述土壤流失量、流失土壤中的氮磷污染物背景含量和吸附态污染物富集系数三个参数的空间分布图均为 30 米空间分辨率空间分布图。根据吸附态非点源污染模型计算公式 3.2.2 节式 (9), 三个参数图层相乘分别得到岳城水库流域吸

附态非点源污染氮和磷负荷空间分布图。

5.2 模型参数率定和验证

本文以溶解态二元结构模型和吸附态负荷模型为核心,结合遥感等多元数据,估算岳城水库流域非点源污染负荷。参照相关文献和地面调查率定模型参数,并结合刘家庄水文站水文数据和相关文献验证模型结果。

5.2.1 模型参数率定

本文主要根据文献资料和典型区域调查结果率定模型参数。参考郑东海等(2009)、郝芳华等(2006)和杨胜天等(2006)的研究成果,结合岳城水库流域实地调查成果,确定岳城水库流域非点源污染模型参数。表3和表4为污染源强计算相关系数,表5为二元结构非点源污染模型系数取值表。

表3 农业生产和居民点污染源强计算相关系数

类型		氮	磷	氨氮	COD
农田 (kg/亩·年)	耕地	6	0.6	2	—
	坡耕地	3	0.3	1	—
农村和城镇居民点 (kg/人·年)		0.002	0.0002	0.0012	0.0128

表4 畜禽养殖污染源强计算相关系数

类型		排泄指数 (kg/d)	饲养周期 (d)	氮源强 (kg/t)	磷源强 (kg/t)	氨氮源强 (kg/t)
牛、马	粪	20	365	31.9	8.61	12.48
	尿	10		29.2	1.46	12.67
猪	粪	2	199	2.34	1.36	1.23
	尿	3.3		2.17	0.34	0.84
羊		2.6	365	2.28	0.45	0.57
家禽		0.125	210	0.275	0.115	0.125

类型		COD 源强 (kg/t)	氮流失率 (%)	磷流失率 (%)	氨氮流失率 (%)	COD 流失率 (%)
牛、马	粪	226.3	5.68	5.5	2.22	6.16
	尿	21.9	50	50	50	50
猪	粪	20.7	5.34	5.25	3.04	5.58
	尿	5.91	50	50	50	50
羊		4.4	5.3	5.2	4.1	5.5
家禽		1.165	8.47	5.12	4.15	8.59

表 5 二元结构模型系数取值

类型	标准径流 系数 (ε_0)	径流系 数 (ε)	地面冲刷 系数 (K)	标准雨强 (mm/h)	垃圾处理 率 (W)	垃圾入网 率 (U)
农业生产	8.7	0.1-0.6	0.18	12.7	0	0
畜禽养殖	8.7	0.6	0.18	12.7	0	0
农村居民点	8.7	0.6	0.18	12.7	0-10%	0
城镇居民点	8.7	0.87	0.18	12.7	0-50%	0-30%

表 5 中相关参数说明：标准径流系数反映不透水硬化地面的产流状况，相关文献一般取值 0.87；城市径流系数与标准径流系数，我国农村径流系数一般取值 0.6，农田径流系数依据土壤类型而定，一般取值 0.1-0.6；地面冲刷系数反映各区域降水径流对污染物的冲刷携带能力，与降水特征和土地利用状况有关；城镇居民点的垃圾处理率和非点源污染入管网率依据城镇规模确定。

5.2.2 结果验证

对于污染总负荷本文采用采用地面调查法进行验证。为了排除点源污染的干扰，使验证数据尽量准确，本文选取了刘家庄水文站控制的流域区域，如图 8 红色边框部分。2010 年模拟结果与实地调查资料进行对比分析（表 6），可知，总氮和 COD 的相对误差较小，而总磷和氨氮的相对误差较大。由于研究区磷和氨氮的污染负荷相对较小，导致了相对误差较大。总体来说，非点源污染模拟结果较好，尤其是氮和 COD 模拟结果较好，本文非点源污染模拟结果可以反映岳城水库流域非点源污染状况。

表 6 总污染负荷模拟结果验证

	总氮	总磷	氨氮	COD
调查值 (t)	267	14.53	60.02	190.5
模拟值 (t)	240	23.2	84.4	211.11
相对差值 (t)	-27	8.67	24.38	20.61
相对误差 (%)	10.11	37.37	28.89	9.76

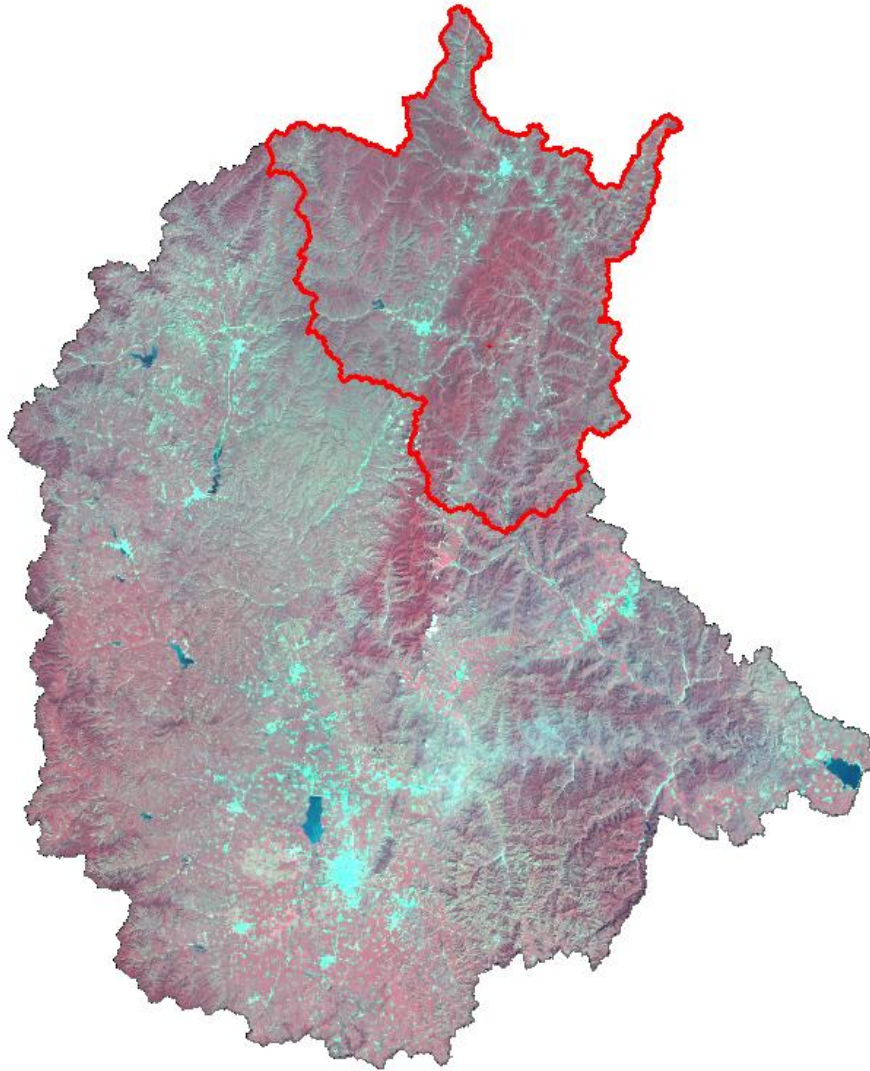


图 8 总污染负荷验证区域位置示意图（红色勾画区为验证区）

本文同时采用文献比较法，对于吸附态非点源污染负荷进行了验证。据杨胜天等（2006）研究，海河流域 2000 年吸附态氮和吸附态磷单位面积流失量分别为 $0.036\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 和 $0.015\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ；据郝芳华等（2006）研究，海河流域 2000 年吸附态氮和吸附态磷单位面积流失量分别为 $0.038\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 和 $0.016\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 。本文的研究区是海河流域的一部分，本文的研究结果为岳城水库流域 2010 年吸附态氮和吸附态磷单位面积流失量分别为 $0.03\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 和 $0.012\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ 。2000 年之后，我国大力推进退耕还林政策，水土流失状况有所改善。郝芳华等、杨胜天等和本文的吸附态氮和吸附态磷单位面积流失量的比值比较接近，分别为 2.375、2.4 和 2.5。本文的研究结果吸附态氮和吸附态磷单位面积流失量都小于 2000 年海河流域吸附态氮和吸附态磷单位面积流失量，模拟结果比较合理。

5.3 岳城水库流域非点源污染评价结果分析

利用郝芳华等(2006)建立了具有非点源污染物产生、迁移转化机理的大尺度非点源污染负荷估算方法体系,结合岳城水库流域遥感等空间数据,估算了岳城水库流域2010年非点源污染负荷(见表7)。

表7 岳城水库流域2010年非点源污染负荷量

污染类型	溶解态				吸附态	
	氮/t	磷/t	氨氮/t	COD/t	氮/t	磷/t
农业生产	812.36	80.23	270.79	—	—	—
农村居民点	3.32	0.33	1.99	21.27	—	—
畜禽养殖	553.37	54.19	208.63	1211.363	—	—
城镇居民点	1.46	0.004663	0.88	9.35	—	—
总负荷	1369.05	134.9	482.28	1241.79	531.44	210.45

5.3.1 非点源污染空间分布特征

岳城水库流域非点源污染负荷空间分布如图9、图10、图11、图12和图13所示。上述图9、图10、图11、图12和图13中的右图(以行政区划为基本单元)5个污染等级说明见表8。由非点源污染负荷分布图可以看出,流域非点源污染负荷分布范围广泛。由图9可以看出,流域非点源污染氮负荷分布广泛,与流域的农田和农村居民点的空间分布显著相关;流域北部地区氮污染比较严重,其中河北涉县、山西的榆社县和武乡县非点源氮污染最严重,山西的长治县和长治市辖区氮污染相对较轻。由于涉县的畜禽养殖规模较大,涉县的氮污染主要分布在农村居民点。

由图10可以看出,流域非点源污染磷负荷分布广泛,与流域的农田和农村居民点的空间分布显著相关;流域北部地区磷污染比较严重,其中河北涉县、山西的榆社县和武乡县和和顺县非点源磷污染最严重,磁县、安阳县磷污染相对较轻。

由图11可以看出,流域非点源污染氨氮负荷分布广泛,与流域的农田和农村居民点的空间分布显著相关;流域北部地区氨氮污染比较严重,其中河北涉县、山西的榆社县和武乡县和和顺县非点源氨氮污染最严重,山西的长治县、壶关县和平顺县氨氮污染相对较轻。由图12可以看出,流域非点源污染COD负荷分

布广泛，与农村居民点的空间分布显著相关；流域南部地区氨氮污染比较严重，其中河北涉县非点源 COD 污染最严重，山西的和顺县 COD 污染相对较轻，区别于流域非点源污染氮、磷和氨氮负荷空间分布。非点源污染氮、磷和氨氮的空间分布比较相似，分布与农田和农村居民点显著相关，西北部地区农田覆盖面积较大，以农业生产为主，随着化肥和农药施用量逐年增加及水土流失等原因，未被吸收的利用的氮、磷和氨氮的流失严重，造成这些区域氮、磷和氨氮高负荷分布；河北涉县由于养殖规模较大，造成涉县氮、磷、氨氮和 COD 都是高负荷空间分布。

图 13 为总污染负荷空间分布图，总污染负荷空间分布依然为北部地区相对严重，南部地区相对较轻。从整体来看，各类污染物的非点源污染负荷在整个流域范围内空间变异较小，氮、磷、氨氮和 COD 以像元为基本单元（30 米分辨率）的变化范围分别为： $0\sim0.0644987\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $0\sim0.00671024\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $0\sim0.0242627\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $0\sim0.240719\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

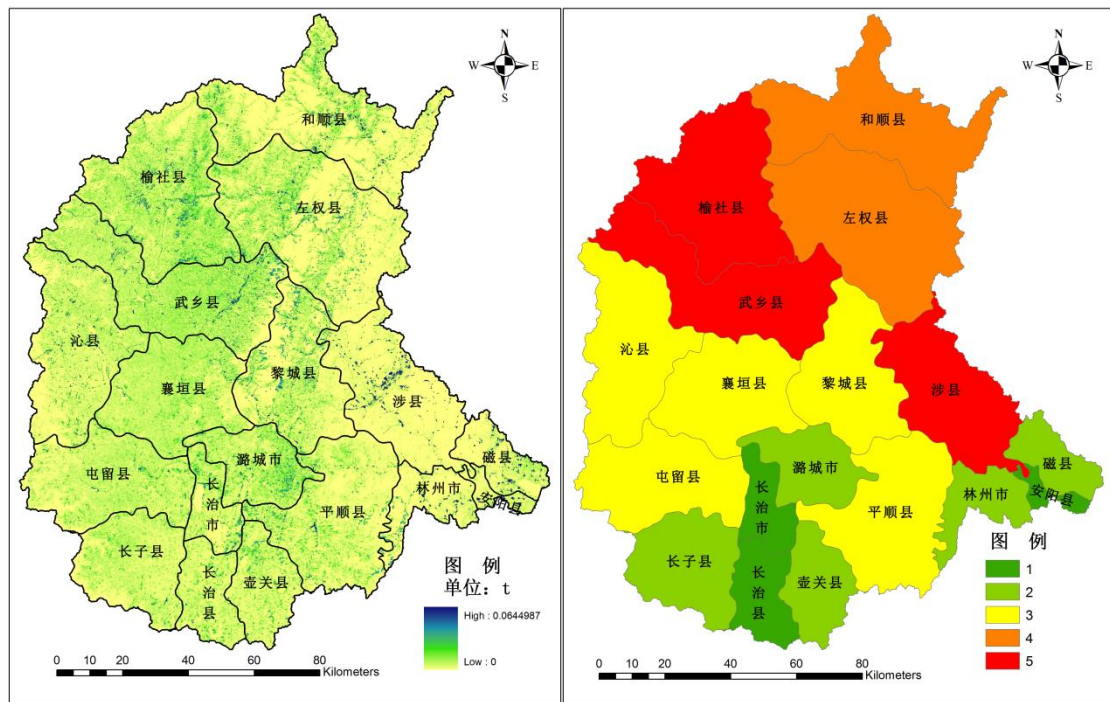
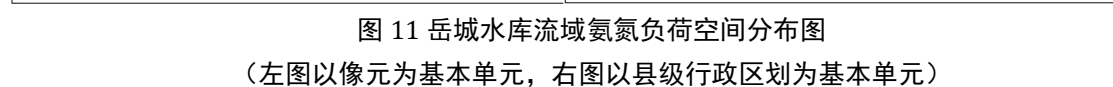
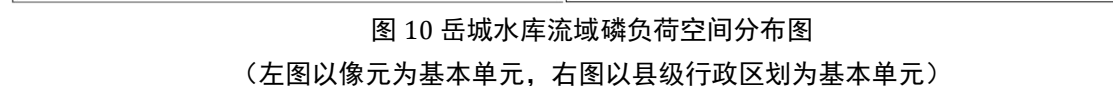


图 9 岳城水库流域氮负荷空间分布图
(左图以像元为基本单元，右图以县级行政区划为基本单元)



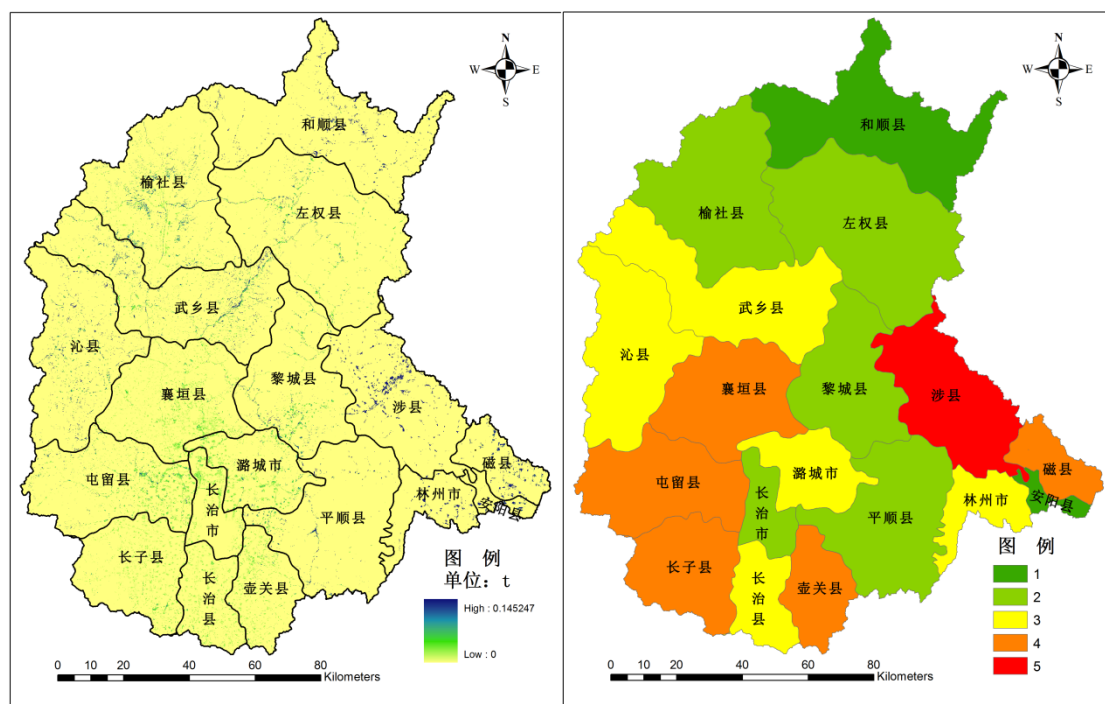


图 12 岳城水库流域 COD 负荷空间分布图
(左图以像元为基本单元, 右图以县级行政区划为基本单元)

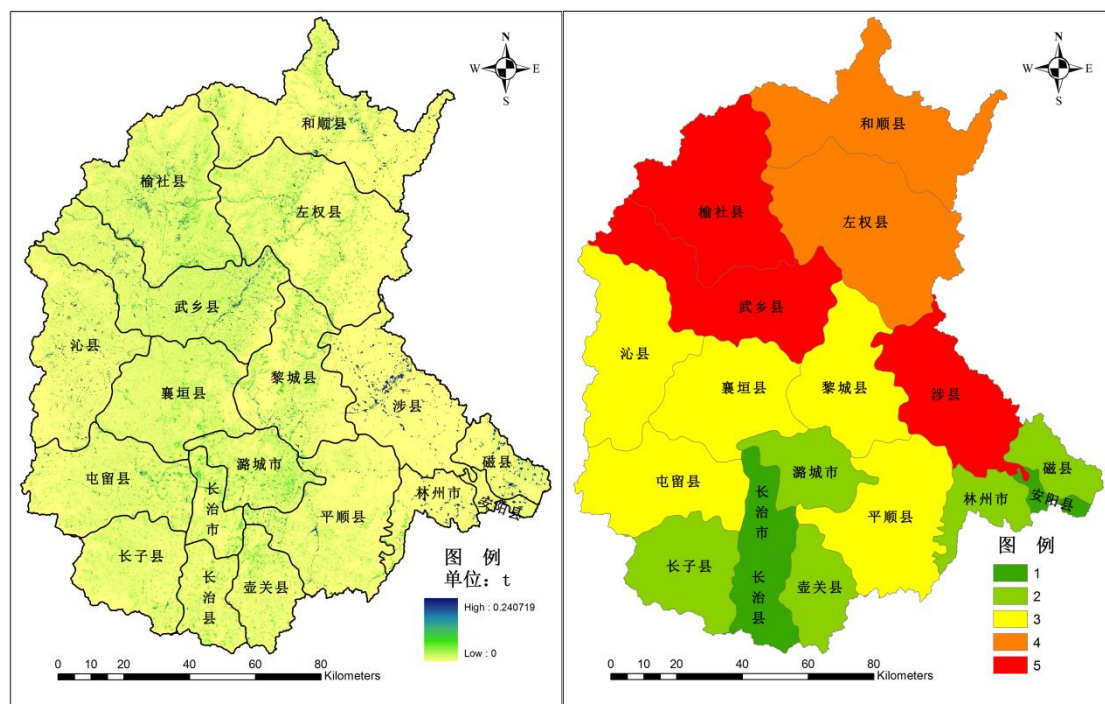


图 13 岳城水库流域总污染负荷空间分布图
(左图以像元为基本单元, 右图以县级行政区划为基本单元)

表 8 行政区划非点源污染负荷空间分布图图例等级说明

等级	氮/t	磷/t	氨氮/t	COD/t	总负荷/t
1	15.1-38.3	2.0-5.5	4.9-8.2	5.6-16.0	27.6-94.2
2	38.3-82.2	5.5-12.3	8.2-19.0	16.0-28.7	94.2-148.2
3	82.2-118.0	12.3-19.8	19.0-25.5	28.7-39.5	148.2-211.6
4	118.0-169.8	19.8-26.8	25.5-35.1	39.5-54.2	211.6-261.0
5	169.8-207.9	26.8-36.2	35.1-73.1	54.2-73.2	261.0-377.0

5.3.2 非点源污染类型比较

本文溶解态非点源污染考虑了农业生产、畜禽养殖、农村居民点和城市地表径流四种污染源类型的非点源污染。结果显示,不同类型非点源污染污染负荷差别较大(见表 7),农业生产产生的氮、磷和氨氮非点源污染负荷比较大,都占到溶解态总污染负荷的 50% 以上,大于其他三种类型非点源污染;畜禽养殖紧随其后,氮、磷和氨氮非点源污染负荷分别为 553.37t、54.19t、208.63t,且畜禽养殖的 COD 污染负荷达到 1211.363t,占整个流域 COD 总污染负荷的 97% 以上;农村居民点和城市地表径流的氮、磷、氨氮和 COD 的污染负荷都较小,农村居民点的非点源污染负荷稍大于城市地表径流非点源污染负荷。岳城水库流域非点源污染负荷主要来源于农业生产和畜禽养殖。

本文考虑了氮、磷、氨氮和 COD 四种非点源污染物质,结果显示,不同的非点源污染物负荷相差较大。整个流域溶解态非点源污染物氮、磷、氨氮和 COD 负荷分别为 1369.05t、134.9t、482.28t、1241.79t,氮污染最严重,COD 污染次之,磷污染最小;吸附态非点源污染物氮和磷的负荷分别为 531.44t 和 210.45t。总的来说,由于流域农业生产化肥和农药的施用、水土流失的原因,流域非点源污染氮负荷最为严重;由于流域畜禽养殖规模较大,造成了流域 COD 污染也较为严重。

5.3.4 不同形态非点源污染比较

岳城水库流域 2010 年土壤侵蚀总体情况不严重,侵蚀模数普遍小于 5t/hm^2 。水土流失主要发生在长治市东部地区(平顺县、壶关县和潞城市)、北部地区(武

乡县)和晋中市的南部地区(榆社县)。对不同形态的氮和磷非点源污染负荷进行比较分析(结果见表 7),可知,流域溶解态氮的负荷高于吸附态氮负荷,流域溶解态磷负荷略低于吸附态磷负荷。

5.4 本章小结

本章主要是将遥感数据等空间数据集与大尺度非点源污染负荷估算模型进行耦合,并结合刘家庄水文站水文数据和相关文献验证模型结果。最后利用基于像元的非点源污染负荷估算模型,评估岳城水库流域非点源污染负荷。

1) 研究了空间数据与大尺度非点源污染模型的耦合过程,实现了空间数据与污染源强计算模型、溶解态二元结构非点源污染模型和吸附态非点源污染模型的耦合,结合相关文献和地面调查资料率定模型参数。并结合刘家庄水文站水文数据和相关文献验证模型结果,验证结果显示,氮污染负荷和 COD 污染负荷的相对误差较小,磷污染负荷和氨氮污染负荷相对误差较大。

2) 以基于像元的大尺度非点源污染估算模型为基础,估算了岳城水库流域的非点源污染氮、磷、氨氮和 COD 的污染负荷,结果显示,溶解态氮、磷、氨氮和 COD 的污染负荷分别为 1369.05t、134.9t、482.28t 和 1241.79t;吸附态氮和磷的污染负荷分别为 531.44t 和 210.45t。

第6章 总结与展望

通过建立非点源污染模型对非点源污染负荷从流失机理和定量指标两个方面进行全面、系统的研究,掌握降雨径流过程中污染物的流失特征及输出规律,搞清非点源污染物的不同来源,这对非点源污染的控制、管理及水源地的保护具有理论意义和应用价值,还可以为流域水源保护规划和非点源污染控制规划提供决策依据。本为以将空间数据与二元结构非点源污染模型进行耦合实现基于像元的非点源污染估算为目的,主要完成了以下两方面的工作:其一是关键参数遥感反演,本文构建了基于面向对象的决策数树分类规则,对岳城水库流域的 TM 影像进行遥感分类;基于像元二分法,利用岳城水库流域的 TM 影像进行流域的植被覆盖度反演;基于美国通用土壤流失方程(USLE),进行岳城水库流域土壤侵蚀空间分布模拟。其二是将空间数据与大尺度非点源污染模型进行耦合,实现基于像元的非点源污染负荷估算,实现空间数据与污染源强计算模型、溶解态二元结构非点源污染模型和吸附态非点源污染模型的耦合,并以岳城水库流域为例,评估该流域非点源污染负荷状况。

6.1 结论

1、在深入分析了研究区典型地物的光谱特征和相关指数(如植被指数、水体指数等)的基础上,针对半干旱地区的下垫面特征,构建了基于面向对象的决策树分类规则,对岳城水库流域 TM 影像进行土地利用/覆盖分类,选取 440 块斑块进行分类结果验证,总的分类精度达 86.95%, Kappa 系数达 0.8518,分类结果精度较高,满足应用的需求;利用流域 TM 影像的归一化植被指数(NDVI)分布图,基于像元二分法进行了岳城水库流域植被覆盖度反演,结果显示,岳城水库流域植被覆盖度以中高覆盖为主,占整个流域的 50%以上;利用流域气象数据、土壤数据、土地利用/覆盖分类数据、植被覆盖度数据以及地形数据等,基于美国通用土壤流失方程(USLE)进行了岳城水库流域土壤侵蚀数值模拟,岳城水库流域土壤侵蚀总体情况不严重,侵蚀模数小于 $5\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ 属于微度,土壤

侵蚀的面积达到 73%；侵蚀模数大于 $5\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ 小于 $25\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ 属于轻度土壤侵蚀的面积达 26%；其他侵蚀等级的面积不足 1%。

2、研究了空间数据与大尺度非点源污染模型的耦合过程，详细描述了空间数据与污染源强计算模型、溶解态二元结构非点源污染模型和吸附态非点源污染模型的耦合，实现了基于像元的非点源污染负荷估算。模型精度验证，氮污染负荷和 COD 污染负荷的相对误差较小，磷污染负荷和氨氮污染负荷相对误差较大。

3、以基于像元的大尺度非点源污染估算模型为基础，估算了岳城水库流域的非点源污染氮、磷、氨氮和 COD 的污染负荷，结果显示，溶解态氮、磷、氨氮和 COD 的污染负荷分别为 1369.05t、134.9t、482.28t 和 1241.79t；吸附态氮和磷的污染负荷分别为 531.44t 和 210.45t。

6.2 展望

针对研究中涉及或没涉及到的问题，以下三个方面可以作为下一步研究的重点：

1、加强遥感技术在在非点源污染主要影响因素数据获取中的应用，利用高光谱技术，建立土壤光谱与土壤的理化性质之间的关系，定量反演土壤的质量状况，如土壤含水量，土壤营养元素含量等；由于我国气象站不足且分配不均匀，影响了非点源污染估算的精度，需要综合利用气象站降水数据和测雨雷达计的遥感数据反演降水量。结合地面观测站点数据和遥感数据的优势，研究影响非点源污染主要因素的面源信息提取技术。

2、不同景观类型在非点源污染产生和迁移过程中的作用不同，如岸边林、湿地等对非点源污染的截留，将极大地降低非点源污染形成的危险。分析研究区的景观格局对非点源污染产生和迁移过程的影响，可以提高非点源污染负荷估算的精度，并且可以寻求一种非点源污染截留的景观生态系统，来控制土壤养分的流失和非点源污染。

3、在基于像元的大尺度非点源污染估算模型的基础上，开展同一地区不同时间的非点源污染状况研究，比较其变化趋势，分析原因并建议合理的控制措施。

参考文献

- [1] 李俊. 石头口门水库汇水流域农业非点源污染的模拟研究[D]. 长春: 吉林大学博士学位论文, 2009.
- [2] 刘波. 基于地面成像光谱系统的植物信息提取研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文, 2010.
- [3] 陈勇, 冯永忠, 杨改河. 农业非点源污染研究进展[J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2010, 38(8): 173-181.
- [4] 曹高明, 杜强, 宫辉力, 等. 非点源污染研究综述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 9(1): 35-40.
- [5] 朱梅. 海河流域农业非点源污染负荷估算与评价研究[D]. 北京: 中国农业科学院研究生院博士学位论文, 2011.
- [6] 朱华. 基于遥感和 GIS 的水环境非点源污染研究[D]. 长沙: 湖南大学硕士学位论文, 2005.
- [7] 赵晓丽, 张增祥, 周全斌, 等. 中国土壤侵蚀现状及综合防治对策研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 40-46.
- [8] 胡宏祥, 洪天求, 马友华. 农业非点源污染及其防治策略研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(4): 315-317.
- [9] 张中杰. 农业非点源污染来源及其防治措施[J]. 地下水, 2007, 29(5): 98-100.
- [10] 刘之杰, 路竟华, 方皓, 等. 非点源污染的类型、特征、来源及控制技术[J]. 安徽农学通报, 2009, 15(5): 98-101.
- [11] 贺缠生, 傅伯杰, 陈利顶. 非点源污染的管理及控制[J]. 环境科学, 1998, 19(5): 87-91.
- [12] Corwin D L, Vaughan P J, Loague K. Modeling non-point source pollutants in the vadose zone using GIS. Environmental Science and Technology, 1997, 31(8): 2157-2175.
- [13] 唐文魁, 康彩霞, 龙华丹. 我国农业非点源污染现状研究[J]. 水科学与工程技, 2011, 1: 33-35.

- [14] 夏军, 翟晓燕, 张永勇. 水环境非点源污染模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(7):941-952.
- [15] United States Environmental Protection Agency. National Water Quality Inventory. USA:1998 Report to Congress, 2000.
- [16] 熊丽君. 基于 GIS 的非点源污染研究[D]. 南京:河海大学硕士论文, 2004.
- [17] 张秋玲. 基于 SWAT 模型的平原区农业非点源污染模拟研究[D]. 杭州:浙江大学博士论文, 2010.
- [18] 高龙华. 遥感和 GIS 支持下流域非点源污染模型研究[D]. 南京:河海大学博士论文, 2005.
- [19] Bouraoui F, Dillaha T.A. ANSWERS-2000: Runoff and sediment transport model. Journal of Environmental Engineering, 1996,122:493-502.
- [20] Kinsel W.G. CREAMS: A field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. Conservation Research Report No. 26, USDA, Washington, 1980, D.C:36-64.
- [21] R.A. Young, C.A. Onstad, D.D. Bosch, W.P. Anderson. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluationg agricultural water sheds. Journal of Soil and Water Conservation. 1989, 44(2):168-173.
- [22] Ascough J.C. II .,Baffaut C., Nearing M.A, Liu, B.Y. The WEPP watershed model. I. Hydrology and erosion. Transaction of the ASAE. 1997,40(4):921-933.
- [23] Jamieson, C.A., Clausen, J.C. Test of the CREAMS Model on Agricultural Fields in Vermont [J]. water Resources Bulletin, 1988(6):1219-1216.
- [24] Roka, F.M., et al. Economic Effects of Soil Conditions on Farm Strategies to Reduce Agricultural Pollution[J]. Water Resources Bulletin, 1989(4):821-827.
- [25] Prato, T., Shi, H. A Comparison of Erosion and Water Pollution Control Strategies for An Agricultural Watershed[J]. Water Resources Research, 1990(2):199-205.
- [26] Prato, T., Dauten, K. Economicfeasibility of agricultural management practices for reducing sedimentation in a water supply lake[J]. Agricultural Water Management. 1991:361-370.
- [27] Gilliland, M.W., Baxter Potter, W.A. Geographic Information System to Predict

- NonPoint Source Pollution Potential[J]. Water Resources Bulletin, 1987(2):281-291.
- [28] 王晓燕. 非点源污染及其管理[M]. 北京:海洋出版社, 2003.
- [29] D.L.Corwin, R.J.Wagenet. Applications of GIS to the Modeling of NonPoint Source Pollutants in the Vadose Zone: A Conference Overview[J]. Journal of Environment Quality, 1996,25(3):403-411.
- [30] 洪华生, 黄金良, 张珞平, 等. AnnAGNPS 模型在九龙江流域农业非点源污染模拟应用[J]. 环境科学, 2005, 26(4):63-69.
- [31] 董亮. GIS 支持下西湖流域水环境非点源污染研究[D]. 杭州:浙江大学博士论文, 2001.
- [32] Engel B.A, Srinivasan R., Arnold J., et al. Nonpoint source pollution modeling using models integrated with geographic information systems [J]. Water Science Technology, 1992,28:685.
- [33] 牛志明, 解明曙, 孙阁, 等. ANSWER2000 在小流域土壤侵蚀过程模拟中的应用研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3):57-60.
- [34] Rode M, Lindenschmidt K E. Distributed Sediment and Phosphorus Transport Modeling on a Medium Sized Catchment in Central Germany, Pbys. Clwn. Earth(B), 2001,26(7-8):635-440.
- [35] 沈晔娜. 流域非点源污染过程动态模拟及其定量控制[D]. 杭州:浙江大学博士论文, 2010.
- [36] Grunwald S, Norton L.D. Calibration and validation of a non-point source pollution model. Agricultural Water Management,2000,45(1):17-39.
- [37] Luo Y, Zhang M. Management-oriented sensitivity analysis for pesticide transport in watershed-scale water quality modeling using SWAT[J]. Environmental Pollution,2009:1-9.
- [38] Bulut E, Aksoy A. Impact of fertilizer usage on phosphorus loads to Lake Uluabat[J]. Desalination, 2008,226:289-297.
- [39] 李怀恩, 沈晋, 刘玉生. 流域非点源污染模型的建立与应用实例[J]. 环境科学学报, 1997, 17(2):141-147.

- [40] 郝芳华, 杨胜天, 程红光, 等. 大尺度区域非点源污染负荷估算方法研究的意义、难点和关键技术[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3):362-365.
- [41] 高龙华, 张行南. RS 和 GIS 支持下农业非点源污染模型研究评述[J]. 中国水土保持, 2005, 11:36-38.
- [42] Sunil Narumalani, Yingchun Zhou, John R.Jensen. Application of remote sensing and geographic information systems to the delineation and analysis of riparian buffer zones[J]. Aquatic Botany, 1997, 58:393-409.
- [43] Basnyat, Prakash, L.D. Teeter, B.G. Lockaby and K.M. Flynn 2000. The use of remote sensing and GIS in watershed level analyses of non-point source pollution problems[J]. Forest Ecology and Management 128: 65-73.
- [44] 王伟武, 朱利中, 王人潮. 基于 3S 技术的流域非点源污染定量模型及其研究展望[J]. 水土保持, 2002, 16(6):39-49.
- [45] 万兴, 万金保, 赵晋. 基于遥感技术的流域非点源污染研究[J]. 水资源保护, 2006, 22(4):62-67.
- [46] 陈强, 胡勇, 巩彩兰. 卫星遥感技术在农业非点源污染评价中的应用分析[J]. 国土资源遥感, 2011, 4:1-5.
- [47] 郝芳华, 杨胜天, 程红光, 等. 大尺度区域非点源污染负荷计算方法[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3):375-383.
- [48] 杨胜天, 程红光, 步青松, 等. 全国土壤侵蚀量估算及其在吸附态氮磷流失量匡算中的应用[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3):366-374.
- [49] 郑东海, 王凌, 曾红娟, 等. 松涛水库流域非点源污染负荷模拟模型[J]. 环境科学学报, 2009, 29(6):1311-1320.
- [50] 张霞, 帅通, 赵冬. 干涉城乡光谱仪高光谱数据信息质量评估[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(2) :143-147.
- [51] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [52] Mcfeeters S K. The Use of the Normalized Difference Water Index(NDWI) in the Delineation of Open Water Features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7):1425—1432.
- [53] Hanqiu Xu (2006): Modification of normalised difference water index (NDWI)

- toenhance open water features in remotely sensed imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 27:14, 3025-3033.
- [54] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589—595.
- [55] 张海霞, 卞正富. 遥感影像植被信息提取方法研究及思考[J]. 地理空间信息, 2007, 5(6): 65-67.
- [56] 张立福. 通用光谱模式分解算法及植被指数的建立[D]. 武汉: 武汉大学博士论文, 2005.
- [57] 田庆久, 闵祥军. 植被指数研究进展[J]. 地球科学进展, 1998, 13(4): 327-333.
- [58] Lifu Zhang, S. Furumi, K. Muramatsu, N. Fujiwara, M. Daigo & Liangpei Zhang (2007): A new vegetation index based on the universal pattern decomposition method, *International Journal of Remote Sensing*, 28:1, 107-204
- [59] 王树东. 海南岛生态系统格局与服务功能演变特征研究[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心博士后出站报告, 2011.
- [60] 龚建周, 夏北成. 基于大气辐射校正的广州市植被覆盖度遥感估算[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 575-580.
- [61] 徐爽, 沈润平, 杨晓. 利用不同植被指数估算植被覆盖度的比较研究[J]. 国土资源遥感, 2012, 4: 95-100.
- [62] M. Zribi, S. Le Hegarrat-Masclé, O. Taconet, V. Ciarletti, D. Vidal-Madjar & M.R. Boussema (2003): Derivation of wild vegetation cover density in semi-arid regions: ERS2/SAR evaluation, *International journal of Remote Sensing*, 24(6): 1335-1352.
- [63] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland and east of Rocky Mountains. USDA Agricultural Handbook, No. 282, 1965.
- [64] 曾红娟, 杨胜天, 王凌, 等. 海南省松涛水库流域土壤侵蚀及控制方案[J]. 地理研究, 2009, 28(5): 1197-1207.
- [65] 肖寒, 欧阳志云, 王效科, 等. GIS 支持下的海南岛土壤侵蚀空间分布特征[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4): 75-80.
- [66] 周伏建, 黄炎和. 福建省降雨侵蚀力指标 R 值[J]. 水土保持学报, 1995,

9(1):13-18.

- [67] 黄炎和, 卢程隆, 付勤, 等. 闽东南土壤流失预报研究[J]. 水土保持学报, 1993, 7(4):13-18.
- [68] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 和地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2):19-24.
- [69] 门明新, 赵同科, 彭正萍, 等. 基于土壤粒径分布模型的河北省土壤可蚀性研究[J]. 中国农业科学, 2004, 37(11):1647-1653.

发表文章目录

- [1] **朱海涛**,张霞,王树东,王晋年,孙艳丽.基于面向对象决策树算法的半干旱地区遥感影像分类.遥感信息.(CSCD, 已接受)
- [2] 刘凯,张立福,杨杭,**朱海涛**,姜海玲,李瑶.面向对象分析的非结构化背景目标高光谱探测方法研究,光谱学与光谱分析,vol.33,2013.(SCI)

参与的科研项目

- 1、国家高技术研究发展计划(863 计划) 专题之一：热红外高光谱遥感应用技术研究
- 2、国家高技术研究发展计划(863 计划) 专题之一：基于混合光谱分解的嫦娥一号 IIM 数据月表矿物信息提取
- 3、全国资源环境承载力调查评价——基于空间信息技术的资源环境承载力综合评价方法（中国地质调查局）

致谢

三年的硕士生活一晃而过，回首走过的岁月，还忘不了面试时进入高光谱实验室的场景，但是，转眼离去的脚步声也越来越近。一路走来，师长的教诲、家人的支持、同学和朋友们的关心和帮助都萦绕在我心头。

首先衷心感谢我的导师王晋年研究员。王老师豁达干练、待人宽和、思维活跃、见解独到，对遥感应用的发展具有敏锐的洞察和感知能力。王老师严谨的治学之道、忘我投入的工作热情和不断创新的科研精神，为我树立了一辈子的学习典范。“清泉汤汤，冽冽涓涓，师者育人，润物无声”，恩不言谢，惟学生今后勤勉努力，不负您的殷切期望。

衷心感谢我的导师张霞研究员。在读期间，无论是在学习还是生活上，老师都给予了我亲切的关怀和孜孜不倦的教诲。论文得以完成，倾注了老师大量心血，频繁地与您的讨论和沟通让我收获颇丰。张老师饱满的工作热情、乐观的人生态度、严谨的治学之道给我们营造了一个宽松愉快的科研环境。您心胸宽广、乐观豁达，将永远是我学习的榜样。

衷心感谢高光谱实验室童庆禧院士、郑兰芬研究员和张立福研究员。童老师是我国成像光谱遥感事业的领头人，他知识渊博，思维敏捷、治学严谨、视野广阔，每次与您的交流，我都受益匪浅。感谢郑老师在生活和学习中给予的指导与关怀，研究生入学面试时，与您沟通交流的场景还历历在目。张立福老师带我走进了高光谱实验室，走入了遥感领域研究。张老师和蔼可亲，在学习上和生活上给了我很多帮助。我的点滴进步都得益于您的指导。

感谢方俊永老师、刘学老师在学习与生活上给予的指导、关心、帮助和支持。特别感谢王树东老师，从论文的选题，实验的开展到现在论文成稿，一直得到您的悉心指导。特别感谢赵冬师兄在生活与学业上的真诚关心，在找工作过程中的筹略帮助，让我十分感动。特别感谢杨杭师兄的无私帮助与真诚关怀，在您的带领下，一起在石家庄做实验的愉快经历是我宝贵的财富。感谢张晓红师姐、王潇师姐、吴太夏师兄和岑奕师姐在生活上和学业上给予的关心和帮助。

感谢张学文、孙韬、黄长平、胡顺石、覃环虎、兰穹穹、张明、谢一淞等师

兄的关心和帮助，特别感谢帅通师兄在学习与生活上的关心与帮助，与你多次的长谈极大地开阔了我的思路；感谢王倩师姐和姜海玲师姐在给予的关心和帮助，特别感谢陈小平师姐和尚坤师姐在学业上给予的帮助，和你们一块儿学习交流，我找到了研究方向和学习的乐趣。感谢在高光谱实验室共同求学的兄弟们，他们是孙雪剑、赵恒谦、刘凯、张旭凯、姜高珍、甄明和丰明博，忘不了和你们一块儿从玉泉路回研究所签字的场景，忘不了和你们一块儿开展课余活动的场景，忘不了和你们一块儿畅谈理想的场景，在单调的科研生活中，是你们丰富了我生活。感谢高光谱实验室师弟师妹们的关心和帮助，他们是李雪轲、庄智、余小君、王晶、张艮中，孙艳丽、王力彦、杨苏新、毕景芝、王政通。感谢研究生一块儿求学的兄弟赵涌泉、叶磊、龙鑫、王庆刚，在我失意的时候，是你们给我加油鼓劲，在我烦恼的时候，是你们帮我排忧解难。

感谢周丽萍女士、龚正女士和王畅给予的帮助，点点滴滴，我会铭记于心。感谢研究生处吴晓清、杨硕两位老师的关心与帮助，两位老师耐心且细心，让我感到特别亲切。

最后，我要衷心感谢我的亲人们，首先感谢我的父母，父亲像一座山，永远是我的依靠，您无限的宽容和无尽的支持，一直是我拼搏进取的动力；慈母手中线，游子身上衣，临行密密缝，意恐迟迟归，如今孩儿已长大，也愿您在天国一切安好；感谢我的哥哥在我多年的求学路上给予的支持、关心和鼓励！

感谢所有关心和帮助过我的人！