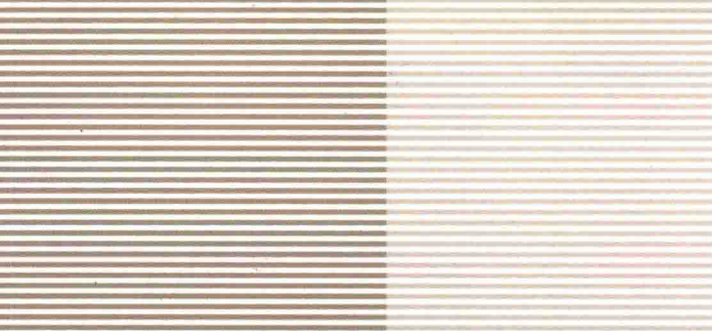




流域景观格局与 生态系统服务时空变化

——以甘肃白龙江流域为例

巩 杰 谢余初 等/著

Spatiotemporal Changes of Watershed Landscape
Pattern and Ecosystem Services

A Case Study of Bailongjiang Watershed in Gansu

非
外
借



科学出版社

流域景观格局与生态系统服务时空变化 ——以甘肃白龙江流域为例

巩 杰 谢余初 等 著

本书研究主要受到下列项目共同资助：

- (1) 国家自然科学基金面上项目：甘肃白龙江流域景观格局与生态系统服务功能时空变化研究 (41271199)
- (2) 国家自然科学基金面上项目：面向社会-生态脆弱性适应的易灾型流域生态系统服务权衡与管控研究 (41771196)



科学出版社

北 京

内 容 简 介

人类活动导致的地表景观格局变化及其生态系统服务效应研究是国际生态学和土地变化科学关注的热点和重点。本书以景观高度破碎、人类活动强烈与灾害频发的生态过渡带——甘肃白龙江流域为例，基于遥感影像、社会经济资料、野外调查、景观生态学方法、InVEST模型和地学空间分析技术等，开展了流域景观格局与生态系统服务时空变化研究，探讨了流域景观破碎化与生态系统服务的相关关系，进行了流域生态系统服务权衡与协同分析及未来情景模拟，开展了流域生态功能分区，并提出了流域人类活动、土地利用与生态系统管理的对策和建议。

本书可供从事景观生态学、综合自然地理学、生态系统服务、流域生态学、资源与环境领域的科研人员与管理者参考，也可作为高等院校与研究所相关专业的研究生阅读与参考。

审图号：甘 S(2018)011 号

图书在版编目(CIP)数据

流域景观格局与生态系统服务时空变化：以甘肃白龙江流域为例 / 巩杰等著. —北京：科学出版社，2018.9

ISBN 978-7-03-058730-5

I. ①流… II. ①巩… III. ①景观学-生态学-研究-甘肃 IV. ①Q149

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 206814 号

责任编辑：李轶冰 / 责任校对：彭 涛

责任印制：张 伟 / 封面设计：无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 9 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

2018 年 9 月第一次印刷 印张：11 1/2

字数：273 000

定价：128.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

| 前 言 |

随着人类活动强度急剧增强，影响范围迅速扩展，地球表层环境及生态系统的格局和过程等已经和正在经受着人类活动和生产行为的影响，主要表现在地表景观格局变化、土地利用/覆被变化和生态系统格局与过程变化等方面，这些变化已成为科学家和管理者关注的核心内容。

千年生态系统评估结果表明，全球 60% ~ 70% 的生态服务在过去的 50 年（相对于 2000 年）是退化或衰减的，预计相当一部分生态服务将在未来 50 年内进一步退化或衰减。过去的半个多世纪，中国的生态服务变化趋势也是总体退化或衰减的，未来 50 年内的发展也不甚乐观。为了确保人类生产生活和区域可持续发展，具有重要生态系统服务功能的区域和生态系统类型应该得到保护和管理，以便保障其在未来能进一步提供生态服务。现阶段，一方面生态系统退化对人类福祉和经济发展造成的冲击日益加剧，另一方面，为了消除贫困和实现可持续发展，人类必须尽可能合理地管理生态系统，这为人类提供了难得的机遇。因此，对于正在减退的生态系统服务功能，应该采取何种措施和途径，才能在典型中小流域尺度（更具可操作性）上进行积极有效的维系和保护，是当前人们开展生态系统服务研究和保护面临的难题和挑战，急需开展研究和实践。

人类与生态系统之间存在着一种动态的相互作用：一方面，人类活动及变化状况直接或间接影响着生态系统的变化，另一方面，生态系统的变化又引起人类福祉的变化。同时，许多自然驱动力（如气候变化、地震、暴雨及其诱发的滑坡、泥石流）也正在影响着人类活动和生态系统格局及其变化。区域景观格局及其变化（土地利用/覆被变化）势必引起区域生态功能和生态服务发生变化。千年生态系统评估表明，在过去 50 年中，土地覆被变化是导致生态系统类型转变和格局变化的重要因素，也是导致生态系统服务变化的直接动力。土地利用/覆被变化是人类活动的载体，也是人类生存和发展的基础，基于土地利用/覆被变化的区域生态系统服务功能研究，更能有效地反映人类活动对自然生态系统所提供的服务功能的干扰力度，具有评价的客观性。同时，土地利用/覆被动态变化可用来实时跟踪生态系统的结构及服务功能，为定量分析中大尺度生态系统服务变化提供了一种有效可行的思路。因

此,基于景观格局变化开展生态系统服务研究是可行和具有综合意义的,但这一方面的研究还较少,迫切需要进行深入和系统的研究。

甘肃白龙江流域地处黄土高原、秦巴山地向青藏高原过渡的生态脆弱带,是长江上游的主要水源区和生态屏障,极具典型性和代表性。受人类活动和灾害扰动的影响,流域景观和土地覆盖已经和正在发生巨大的变化,是开展人类活动和生态系统服务功能研究的天然实验室。例如,2008年汶川大地震致使原本地质灾害频发、水土流失严重区域的生态系统更为脆弱,导致生态重灾区中1.93%的陆地表面受到破坏,也导致地表物理性基质和土壤失去原有功能,适宜生境面积减少,生境支撑能力下降。另外,地震对该区域生态系统产生极大影响,崩塌、滑坡及其产生的泥石流、河道堵塞对该区域的水资源安全产生严重影响,水源涵养能力降低,对区域生态安全屏障产生影响,并危及当地居民的生命和财物安全。2010年8月7日舟曲发生强降雨引起特大泥石流灾害,当地两万多人受灾,1400多人遇难,1800多人受伤,还引起灾区地表覆被的剧烈变化。致灾原因主要为特殊的地质地貌环境、强降雨事件、区域生态破坏和不合理生产活动等。因此,以甘肃白龙江流域为研究区,开展流域景观与生态系统服务变化研究,不仅具有重要的理论与实践应用价值,而且对类似流域管理和研究具有重要的示范作用。

基于上述认识,兰州大学土地利用与景观生态学研究团队从2010年就开始持续关注、跟踪研究甘肃白龙江流域景观变化与生态评价。在此期间得到了国家自然科学基金委员会、科学技术部、兰州大学“中央高校基本科研业务费专项资金”等项目的资助。这些项目主要有:国家自然科学基金项目“甘肃白龙江流域景观格局与生态系统服务功能时空变化研究”(41271199,2013~2016年)、“面向社会-生态脆弱性适应的易灾型流域生态系统服务权衡与管控研究”(41771196,2018~2021年),兰州大学中央高校基本科研业务费项目“陇南山区地质灾害-地表覆被变化-景观稳定性及其耦合关系”(LZUJBKY-2014-117,2009~2011年)等。上述项目的资助,极大地推进了甘肃白龙江流域景观格局与生态系统服务时空变化的相关研究进程。现今,奉献给读者的拙作——《流域景观格局与生态系统服务时空变化——以甘肃白龙江流域为例》,便是上述项目研究成果认真总结、提炼而成。

本书简要介绍了流域景观格局时空变化及其驱动因素、环境效应、生态系统服务分类、生态系统服务评估与制图、生态系统服务权衡与协同、生态系统管理等进展,及未来展望;开展了甘肃白龙江流域景观格局和生态系统服务时空变化分析,探讨了流域景观破碎化与生态系统服务的相关关系;开展了流域生态系统服务权衡与协同分析及未来情景模拟;开展流域生态功能分区,提出了流域人类活动、土地利用与生态系统管理的对策和建议。本书发展了流域生态系统服务功能评估方法,可为流域生态

系统服务功能维系和景观管理提供科学依据,具有重要的实践应用和示范价值。

各章内容及完成者如下。第一章,流域景观格局与生态系统服务研究概述:巩杰、张金茜、谢余初;第二章,甘肃白龙江流域简况:谢余初、李红瑛;第三章,数据来源与主要研究方法:谢余初、巩杰、马学成;第四章,流域景观格局时空变化研究:张金茜、巩杰;第五章,流域生态系统服务时空变化及其权衡与协同分析:张玲玲、谢余初、钱彩云、曹二佳;第六章,流域景观破碎化与生态系统服务相关关系:巩杰、张金茜;第七章,流域人类活动与生态系统服务权衡及管理:巩杰、张玲玲、柳冬青、李红瑛;第八章,结论与展望:巩杰。全书由各位作者分头编写,巩杰统稿。

本书凝结了众多人的智慧和辛劳。在本书的撰写过程中,作者指导的博士研究生谢余初、硕士研究生张玲玲、齐姗姗、赵彩霞、高彦净、张金茜、钱彩云、张影、柳冬青、曹二佳、马学成、李红瑛等做了大量工作,部分内容是在他们的学位论文基础上加工、修订而成。在此,对上述研究生所做的贡献表示衷心的感谢!此外,本书的部分阶段性成果已在国内外刊物上先行发表。

最应该感谢的是我的硕士生导师黄高宝教授和博士生导师陈利顶研究员、傅伯杰研究员,是他们将我带入生态学这片广阔而深邃的天地,使我痴迷于生态学,并教我不断探索和不懈努力,直面生态学科的复杂性和挑战。此外,特别感谢斯坦福大学Gretchen Daily教授及其Natural Capital Project研究团队,诚挚感谢Daily教授接收我为访问学者,并在生态系统服务与决策管理、InVEST模型应用等方面的研究提供诸多帮助和建议。感谢密歇根州立大学刘建国教授在人与自然耦合系统研究方面的指点和建议。感谢生态学科研路上一同前行的好友郑华、杨武、吕一河、张立伟、苏常红、刘世梁、赵文武等的热情帮助和指点。还要感谢兰州大学的同事们给予的诸多建议和无私帮助,如陈发虎教授、孟兴民教授、马金辉副教授等,篇幅有限,恕不一一致谢。

本书是从流域视角开展景观格局与生态系统服务研究的一次尝试。在编写过程中,引用了国内外学者的一些研究成果,在书中已做标注。对于这些学者的杰出工作,致以崇高的敬意。由于水平有限,加之部分研究内容具有很强的探索性,故难免有不妥和谬误,祈望读者不吝珠玉,赐教指点,以便我们不断学习和进步。

在此,我们对本书研究工作给予大力支持的国家自然科学基金委员会地球科学部、陇南市人民政府、甘州藏族自治州人民政府、甘肃省气象局、甘肃省农业节水与土壤肥料管理总站等表示衷心感谢。

巩 杰

2018年6月6日
于兰州大学观云楼

| 目 录 |

前言	
第 1 章 流域景观格局与生态系统服务研究概述	001
1.1 流域景观格局研究概述	001
1.2 流域生态系统服务概述	010
1.3 甘肃白龙江流域景观格局与生态系统服务研究的重要性	026
参考文献	031
第 2 章 甘肃白龙江流域简况	045
2.1 研究区的地理环境概要	045
2.2 流域社会经济概况	051
参考文献	053
第 3 章 数据来源与主要研究方法	055
3.1 数据获取与处理	055
3.2 主要研究方法简介	060
参考文献	066
第 4 章 流域景观格局时空变化研究	069
4.1 甘肃白龙江流域景观类型时空变化	069
4.2 甘肃白龙江流域景观破碎化与驱动因子分析——基于地理探测器	075
4.3 基于 GeoDa 的甘肃白龙江流域景观破碎化空间关联性分析	087
参考文献	093
第 5 章 流域生态系统服务时空变化及其权衡与协同分析	097
5.1 甘肃白龙江流域生态系统食物生产服务	098
5.2 流域生态系统土壤保持服务	107
5.3 流域生态系统碳储存服务	112

5.4	流域生态系统产水服务	122
5.5	流域生态系统服务变化	129
5.6	典型生态系统服务类型间的权衡与协同	133
	参考文献	136
第6章	流域景观破碎化与生态系统服务相关关系	143
6.1	数据来源与研究方法	143
6.2	景观破碎化与各项生态系统服务的全局空间自相关	144
6.3	流域景观破碎化与土壤保持服务的相关关系	146
	参考文献	152
第7章	流域人类活动与生态系统服务权衡及管理	154
7.1	生态系统服务功能分区	154
7.2	流域生态系统服务的时间权衡与模拟分析	160
	参考文献	168
第8章	结论与展望	170
8.1	基本结论	170
8.2	展望	174

| 第 1 章 | 流域景观格局与生态系统服务研究概述

1.1 流域景观格局研究概述

1.1.1 景观格局与流域的概念及内涵

在人类活动和自然过程的影响下，地球表层环境及景观系统正在发生变化，主要表现为地表景观、土地利用/土地覆被变化和生态系统格局与过程的变化等 (Turner et al., 2007; IPCC, 2007; GLP, 2005; Foley et al., 2005)，这些变化已成为科学和社会关注的核心内容。

景观生态学是一门多学科交叉的新兴学科，它的主体是地理学与生态学之间的交叉。景观生态学以整个景观为对象，通过物种流、物质流、能量流与信息流在异质空间的传输和交换，通过非生物、生物、人类之间的相互作用与转化，运用生态系统原理、系统方法、格局—过程—尺度相互关系的原理、复杂性科学理论与方法、空间分析方法、景观模型等，研究景观的格局、过程、动态变化及其机制，实现景观可持续发展的最终目的 (肖笃宁和李秀珍, 1997; 邬建国, 2007; 傅伯杰等, 2011; 张娜, 2014; Wiens and Moss, 2005; Forman, 1995; Wu, 2013)。可见，景观生态学是研究景观及其空间格局、过程及其与人类社会的相互作用，并为结构与格局优化、合理利用和保护服务提供理论支撑的 (傅伯杰等, 2011)。

景观空间格局与生态过程是景观生态学研究的重要内容。景观是由不同生态系统组成的地表综合体 (Haber, 2004)，实质上，这些生态系统经常表现为不同的土地利用或土地覆被类型。因此，景观格局主要是指构成景观的生态系统或土地利用/覆被类型的形状、比例和空间配置 (傅伯杰等, 2003, 2011)，是各种复杂的物理、生物和社会因子相互作用的结果 (章家恩和徐琪, 1997)。景观格局深深地影响并决定着各种生态过程，也直接影响到景观内物种的丰度、分布及种群的生存能力及抗

干扰能力(肖笃宁和李秀珍, 2003)。因此, 景观格局研究是探讨景观格局和生态过程相互关系的基础(Forman and Godron, 1986), 格局既决定生态过程又影响和控制景观功能的循环与发展, 一定的景观格局有着相应的景观功能(Milne et al., 1989)。景观格局演变的综合性、复杂性以及不确定性使得景观格局研究一直是景观生态学家关注的焦点, 也是景观生态学的研究热点与难点之一。

流域是地球表层相对独立的自然地理系统单元, 以水系为纽带, 将系统内各自然地理要素连接成一个不可分割的整体。例如, 流域中的水、泥沙和其他物理化学物质都在流域内进行着物质、能量和信息的循环。流域科学则是以流域为研究对象, 在揭示流域生态水文过程的客观规律基础上, 运用现代管理科学理论和方法, 优化配置和高效利用流域资源, 在满足人类福祉对流域多种生态系统服务需求的同时, 促进流域社会生态系统的协同发展(贺缠生, 2012; 程国栋和李新, 2015)。流域科学是流域尺度上的地球系统科学, 相对整个地球而言, 流域尺度适中、相对可控, 且空间复杂性和异质性更为突出(程国栋和李新, 2015)。因此, 基于流域“水-土-气-生-人”的整体认知, 以人为本, 从人类需求-生态响应-人与自然共同体的可持续发展理念研究流域科学, 有利于实现流域的科学管理。

从地理和景观单元上讲, 流域是一个完整的地理生态单元。流域既是面临着生态、经济和社会发展难以解决的复杂问题的热点区域, 也是地球系统科学的主要研究对象。人类的经济开发活动主要是在景观层次进行的, 而流域过程是景观形成的主要驱动力。从这个意义上来讲, 所有的生态环境问题和社会问题都落入某一流域, 都与流域资源破坏或不合理管理有关。因此, 从流域的角度来解决环境问题并实现社会的可持续发展是一条更有效地应用系统综合的途径(魏晓华和孙阁, 2009)。流域景观格局演变将直接影响流域的发展与生态安全, 因此, 建立生态可持续的流域景观格局是流域综合治理的发展方向。国内开展研究较多的有泾河流域、黑河流域、海河流域、延河流域、东江流域、太湖流域等, 这些案例为流域景观格局研究提供了许多值得借鉴的经验。总的来说, 国内外有关流域景观格局的研究主要集中在流域景观格局动态变化及其驱动力研究、流域景观格局演变与生态效应的相互关系研究、流域景观格局动态预测、流域景观格局优化与管理、流域景观格局演变的尺度效应研究等方面。

1.1.2 流域景观格局的研究热点

景观格局是指景观的空间格局, 包括自然景观形成的空间特征和人类活动形成

的景观特征,是景观异质性和不同尺度生态过程共同干扰作用的结果。景观格局分析旨在无序的景观中发现潜在的有意义的秩序或规律。景观格局的定量分析是描述景观格局的基本手段(王计平等,2010)。景观格局指数是高度浓缩景观格局信息,反映其结构组成和空间配置特征的简单定量指标(邬建国,2000;张爱静等,2012),用于描述景观格局及其变化。利用景观格局指数方法,开展不同时空尺度景观格局演变特征的定量化研究,是景观格局变化研究的一个特点(王计平等,2010)。遥感与地理信息系统技术的结合,成为探讨景观格局时空变化及其驱动力模型的有力手段(张秋菊等,2003)。为了得到景观格局和空间动态变化之间的关系,国内外学者开展了大量的相关研究。例如,Turner等(1989)运用景观格局指数对景观格局进行了定量化研究,取得了较好的效果,并得到广泛应用,开启了景观格局定量化研究的新时代。

景观格局指数的发展还催生了一系列景观格局分析程序,如Fragstats、Patch Analyst、LEAP II等。Fragstats是当前景观格局指数分析的主流软件之一,它包含上百种景观格局指数,能够较为全面地定量化分析景观结构与空间格局,极大地推动了景观格局分析的发展(张爱静等,2012)。目前研究者应用比较多的景观格局指数主要有:①斑块水平,如斑块面积、周长、斑块形状指数及其平均值与标准差;②景观水平,如景观丰富度指数、景观多样性指数、景观优势度指数等(张秋菊等,2003)。一些学者开展了景观格局与生态过程关系研究,如Schumaker(1996)采用斑块数目、斑块面积、面积周长比、形状指数、斑块周长、最邻近斑块距离、斑块核心面积、蔓延度、分维数等分析了格局与生境分布变化的相互关系;焦胜等(2014)研究了流域内各种景观格局指数对河流水质的影响。总的来说,尽管景观格局指数数量繁多,但大多属于以下几类:信息论类型、面积与周长比类型、简单统计学指标类型、空间相邻或相关类型、分维型等,这些指数之间的相关性较高,部分指数之间存在信息重复(张秋菊等,2003;焦胜,2014)。因此,景观格局分析中,景观格局指数的合理筛选是关键,如何保证所选的景观格局指数的科学性与全面性,还需要进一步的研究(张婷等,2013)。

1.1.2.1 流域景观格局动态变化及其驱动力

景观格局动态变化是景观生态学研究的基本内容,研究景观格局动态变化有助于人们从无序的景观中发现潜在的有序规律,揭示景观格局与生态过程相互作用的机理,进而对景观变化的方向、过程、效应进行模拟、预测和调控(傅伯杰等,

2011; Brogaard and Zhao, 2002; Lambin, 1997)。

景观格局分析是探讨景观格局与生态过程作用关系的基础,而景观格局指数作为景观格局分析的常用工具,则是联系景观格局与生态过程关系的桥梁。在3S技术支持下,以景观格局指数为基本手段的生态系统空间格局定量分析方法,能够大大提高生态系统空间格局及其动态评估的深度、广度和精度(李秀珍等,2004;傅伯杰和吕一河,2006;傅伯杰等,2011; Narumalani et al., 2004)。常用的景观格局指数主要有景观单元特征指数(如斑块面积、周长、斑块数等)和景观整体特征指数(如多样性指数、镶嵌度指数、距离指数、景观破碎化指数、景观形状指数等),应用这些指数定量地描述景观格局,可以对不同景观进行比较,研究他们的结构、功能和过程的异同(傅伯杰等,2011;余新晓等,2010;邬建国,2007;Uuemaa et al., 2009; Turner, 2003; Li and Wu, 2004)。如严登华(2004)基于Fragstats软件分析了1986~2000年东辽河流域景观组成、格局动态变化,结果表明:东辽河流域景观的组成不合理,林地景观所占面积的比例严重偏低;1986~2000年,旱田景观显著增加,工矿、交通和居民地景观略有增加,其他景观均有所下降;从多年平均变化来看,耕地景观的变化最为剧烈。张宏锋等(2009)分析了1976~2005年新疆玛纳斯河流域的景观格局变化,结果表明:1976~2005年,玛纳斯河流域景观变化主要表现为农田、草地、居民地面积的增加,以及森林、湿地、沙漠、冰雪面积的缩减;从景观水平上看,研究区斑块个数、景观形状指数、蔓延度指数均有所增加,香农多样性指数减小;从类型水平上看,该区各景观组分的异质性指数及其变化过程均有较大差异,体现了研究区景观生态系统的复杂性。尽管景观格局指数研究取得了一定的进展,但多年来景观格局分析一直停留在景观格局特征的描述方面,由于未能深入反映研究的生态过程而受到质疑(Chen et al., 2008; Liu et al., 2011)。

流域景观格局动态变化的驱动力研究对于揭示景观格局变化的原因、动态演变过程、内部机制、未来发展方向预测及管理对策制定等具有重要意义。目前,关于景观格局演变的驱动机制研究较多,尽管驱动机制随着不同研究区域、不同研究时段而不同,但仍具有一定的时空规律。在较大的时空尺度上,地貌环境、气候状况等自然因素和社会经济及人口状况等人文因素对景观格局演变起主导作用,而在中小时空尺度上,土壤、植被、技术革新等因子起主导作用。该研究领域常用分析方法有:典型相关分析、线性回归、多元回归、逐步回归、主成分分析、Logistic回归分析等。例如,毕晓丽等(2005)运用景观格局指数分析法和梯度分析法从景观水平和类型水平上分析了泾河河岸带景观格局的梯度变化及其驱动力,结果表明,泾

河自上游而下,景观水平上的景观格局指数有3种不同的变化类型(上升、下降、无明显趋势);类型水平上以农田、草地和农草交错类为主,这3种类型的景观格局指数表现突出;景观格局的梯度变化受到温度、降水、土壤和人为干扰等影响。赵锐锋等(2013)基于1975~2010年长时间序列遥感影像,开展了黑河中游湿地景观的破碎化过程及驱动因子分析,发现自然因子对湿地景观破碎化进程的影响主要体现在气温和降水上,而人类活动对湿地景观破碎化的贡献率明显高于自然因子,人类活动能力的增强以及影响范围的不断扩大是引发黑河中游湿地景观破碎化的主因。孙才志和闫晓露(2014)分析了下辽河平原景观格局演变的驱动机制,结果表明,不同时期内景观类型变化的驱动因子及其影响力存在一定的差异,但总体来讲,在中小尺度下,自然驱动因素相对于人文驱动因素的影响较弱,人口、经济发展、城市化水平、技术等因子对于下辽河平原各景观类型的变化具有较强的驱动作用。

1.1.2.2 流域景观格局及其生态效应

(1) 流域景观格局对河流水量及水质的影响

河流作为景观的重要组分,其生态环境与景观格局关系密切。随着人类活动增强而引起的土地利用/土地覆被变化显著影响着河流水量与水质(满苏尔·沙比提和努尔卡木里·玉素甫,2010;蔡运龙,2010)。景观格局是影响非点源污染负荷的主要因素之一(李明涛等,2013)。因此,土地景观格局与水质之间的关系研究,对流域水环境质量改善和管理具有重要意义。

近年来,景观格局与河流水质之间的关系成为国内外研究的热点(黄金良等,2011)。大量研究表明景观格局与区域水环境之间存在明显的相互作用(岳隽等,2006;夏歆等,2011)。相关研究主要有:一是以景观格局的组成属性为基础,即土地利用类型百分比与河流水质之间的关系(Fisher et al., 2000);二是以景观格局的空间结构为基础,即通过景观格局指数探究不同土地利用类型的空间布局与水质之间的关系(张殷俊等,2009)。在时间尺度上,主要基于多年水质监测数据和景观格局的变化数据分析二者的相关规律;在空间尺度上,主要包括流域、子流域及缓冲区等几种类型。目前,景观格局与水质关系研究常用方法有相关分析、多元回归分析、主成分分析、方差分析及模型分析等(张殷俊等,2009)。但在不同地区,不同景观格局指数和水质指标相关关系的研究仍存在不确定性,需在更广泛的区域针对相应问题开展研究,以期进一步理解二者之间的关系机制。例如,Kearns等(2005)将一个2200km²的流域划分为84个子流域,分析了景观格局指数与水质特征的相关

性,结果表明:斑块密度和斑块形状可解释 85% 的相关性。Amiri 和 Nakane (2009) 以 21 个子流域作为研究对象,选取景观类型面积比例和斑块、类型、流域 3 个尺度上的空间格局指标,通过多元线性回归分析了它们和水质指标之间的关系,结果表明类型水平上景观格局指数可有效地反映水质变化特征。焦胜等 (2014) 探讨了洮水流域土地景观格局对河流水质的影响,结果表明:斑块数量、香农多样性指数与电导率、综合污染指数的相关性指数均在 0.997 以上,呈显著正相关;平均斑块面积、蔓延度指数与电导率、综合污染指数呈显著负相关;最大斑块指数与总磷呈显著负相关;从时间上看,所选用的大部分土地景观格局指标与 pH、溶解氧在丰水期与枯水期的相关性状态相反,且枯水期景观格局对河流水质的影响较丰水期更为显著。

除此之外,一些新的研究理念和方法也被用于景观格局与水量水质分析:①“子流域”分析法,即将某一流域分解为足够数量的子流域作为分析样本,对景观指标和水质进行相关性分析。基于“子流域”的景观格局与河流水质关系研究,是近年来非点源污染研究的热点问题,但由于子流域划分的不确定性以及子流域之间景观类型比例的差异性,使得研究结果也具有一定的区域性和不确定性。总体上来说,该方法更加适合于子流域特征明显的流域上游或者受人类干扰相对较小的区域(刘丽娟等,2011)。②“源-汇”理论,即通过“源”“汇”景观之间的各种比例关系,定量表达景观-水质之间的格局-过程关系(刘丽娟等,2011)。该方法较好地结合了景观格局和面源污染过程,但是由于计算过程的复杂和相关参数获取的不确定性,在实际应用中还有待进一步完善。

(2) 流域景观格局对水土流失的影响

水土流失作为一种生态过程,其产生和运移与土地利用/植被覆盖等地表景观格局密切相关。土壤流失限制景观结构组分的空间布局,制约生态功能的发挥,如引起可利用土地资源减少、土地退化、生产力下降、贫困面加大等一系列生态、经济和社会问题(傅伯杰等,2002)。反之,景观格局变化改变着原有地表植被类型及其覆盖度,地表径流和土壤理化性质(如土壤团聚体稳定性等)也随之变化,从而影响水土流失的发生。可见,景观格局和水土流失过程具有紧密的相互关系,其复杂的相互作用机理也是地球科学研究的热点之一(王朗等,2009)。

以土壤侵蚀产沙及泥沙输移为主要特征的水土流失过程是地表复杂系统水文生态过程中重要的一部分,它与气候、土壤、地形、植被、水文、土地利用与覆被等因素密切相关(Zhen et al., 2007; Ludwig et al., 2005; Chen et al., 2007),其中土

地利用与景观空间格局扮演着重要角色 (Wei et al., 2007; Bakker et al., 2008; Suo et al., 2008)。在人类活动主导的景观中, 土地利用/土地覆被变化是景观格局演变的直接驱动 (Wang et al., 2010), 也是水土流失时空分异的重要原因 (Qiu and Fu, 2004)。流域作为一个表征人类水土资源利用和物质迁移的自然空间综合体, 是研究土地利用景观格局与水土流失关系的最佳单元。在流域尺度上, 土地利用的空间镶嵌特征变化不仅会导致不同土地利用方式在降雨、地形、土壤等因子上的空间分布变化, 而且能够改变水文结构和侵蚀系统, 引起土地利用对土壤流失拦截能力的降低或提高, 进而影响到最终流域产沙量的增加或减少 (Slattery and Burt, 1997; Takken et al., 1999)。然而, 由于缺乏流域等大尺度上土地利用格局与水沙关系的实验数据, 目前在探讨土地利用格局与水土流失关系时, 多是利用地块或小区尺度上的实验结果来预测大尺度上侵蚀产沙过程。但随着空间尺度的增大, 水土流失机制会发生明显改变, 其主导格局因子也随之发生变化。深入理解流域及更大尺度上土地利用格局与水土流失相互关系对深化格局-过程关系认识、区域土壤侵蚀防治具有积极意义。

流域水土流失过程对景观格局变化的响应研究是生态过程与景观格局相互作用研究的重要组分。总的来讲, 常规的景观格局指数多关注景观格局几何特征的分析 and 描述, 缺乏与相关生态过程的联系 (陈利顶等, 2008; 吕一河等, 2007; Gustafson, 1998), 因此, 在流域景观格局与水土流失研究中的桥梁作用非常有限。一些新的指数如景观空间负荷对比指数 (Chen et al., 2003)、等高线方向连通度与顺坡连通度 (You and Li, 2005)、方向性渗透指数 (Ludwig et al., 2007) 等相继被提出。这些指数给静态景观格局赋予一定过程含义, 可以较好地评价景观空间格局与水土流失过程相互关系, 但受景观异质性和过程复杂性及其空间变异的影响, 这些新的指数在验证及应用推广中仍然面临诸多局限和挑战。因此, 针对当前景观格局指数研究现状, 如何利用现有景观格局指数, 通过设定尺度和分析角度来挖掘其生态学意义对景观格局与生态过程关系的进一步认识尤为重要。

当前, 景观格局演变对水土流失过程影响的研究目的是从土地利用过程和方式的角度寻求水土保持的方法, 从而降低面源污染和粮食减产等风险。目前, 土壤保持与景观格局关系研究多停留在景观格局变化与土壤形成和保护价值间的相关性分析 (邹月和周忠学, 2017; 王云等, 2014; 王航等, 2017), 且结果表明城市化和不合理的土地利用方式导致景观的斑块密度、分离度指数增加 (王云等, 2014)、聚集度降低 (王航等, 2017), 破碎化增强, 土壤保持价值相应减少。但这种静态生态系

统服务价值分析忽略了生态系统服务功能的空間异质性，且是从数理统计角度探讨价值与景观格局指数间的相关性，既未考虑生态现象的空間关联，也不能显示两者間关系的具体空間格局。因此，基于土壤保持模型评估结果，开展景观格局与土壤保持服务間空間关联性研究亟待推进。

(3) 流域景观格局变化对土壤有机碳的影响

全球气候变暖及其影响是当前人类所面临的最为严重的环境问题之一 (Lal, 2004)。景观格局变化不仅直接影响土壤有机碳的含量和分布，而且通过影响与土壤有机碳形成和转化有关的因子而间接影响土壤有机碳的含量和分布，还可通过改变土壤有机质的分解速率来影响土壤有机碳储量 (李正才, 2006)。

景观变化中的土地利用/土地覆被变化是影响土壤有机碳的重要因素。不同的土地利用方式下的不同景观不仅可以改变土壤的物理、化学及生物学特性 (傅伯杰等, 2011)，而且还可影响到土壤的环境状况，进而影响相关的生态过程。国内学者关于土地利用变化对土壤有机碳的影响研究相对较多。例如，解宪丽等 (2004) 的研究表明，不同景观类型下的土壤有机碳密度存在显著差异。刘纪远等 (2004) 分析发现，1990 ~ 2000 年，我国耕地面积增加 404.7 万 hm^2 ，土地利用方式变化导致表层土壤 (0 ~ 30cm) 与 0 ~ 100cm 土壤有机碳库分别损失 53.7Tg 和 99.5Tg。黄星 (2017) 研究发现红树林湿地土壤中有有机碳含量随红树林面积的减小而减少，红树林面积减小和破碎化弱化了红树林湿地对重金属的吸收和净化能力。王建林等 (2009) 在研究中揭示了青藏高原高寒草原不同植被—土壤 (不同自然地带) 内土壤活性有机碳的分布特征。目前的研究多为景观格局演变下土壤有机碳、碳储量的变化，景观格局变化对景观功能参数如土壤养分流动的影响与管理正成为新的研究议题之一 (王根绪等, 2003; 武俊喜等, 2010)。

1.1.2.3 流域景观格局优化与管理

景观格局优化是利用景观生态学原理，解决土地合理利用的问题，即调节植被数量与空間分布，实现景观综合价值最大化 (边红枫, 2016)。流域景观格局优化是在景观生态规划、土地科学和计算机技术的基础上提出来的，同时也是景观生态学研究中的一个难点问题，它是通过调整、优化各种景观类型在空間上和数量上的分布格局，使其产生最大生态效益。Forman (1995) 将生态学理论融入空間格局规划，强调格局对过程的控制和影响，改变格局可以实现维持物质流和能量流、景观功能稳定的目标，该格局优化理论是目前土地利用空間格局优化中较为明确的理论依据。

概括来讲,国外景观格局优化主要是在土地适宜性分析和土地利用限制条件分析的基础上,从宏观规划着手,或为特定目标在较小尺度上进行景观格局设计。其中以 Haber 和 Wilson 的研究为主要代表 (O'Farrell et al., 2010)。Haber (1990) 提出的土地利用分异思路 (differentiated land use) 是土地利用和景观优化的代表性实践。Forman (1995) 强调景观空间格局对过程的控制和影响作用,即通过格局的改变来维持景观功能、物质流和能量流的稳定。国内的景观格局优化研究多集中于生态规划、物种保护等方面 (白军红等, 2005; 张国坤等, 2007; 黄翀等, 2012; Luo et al., 2015; 边红枫, 2016)。刘杰等 (2012) 选择滇池流域为研究区域,在遥感和地理信息系统支持下获得流域 2008 年的景观类型图,运用最小耗费距离模型对区域景观格局进行优化,在研究区域建立城市区域廊道、森林生态廊道、农业生产廊道,将源地与各景观类型有机联系起来,有效增强了景观网络连通性;同时在源地和廊道的关键区域构建生态节点,保障了源地和各景观组分生态流的畅通,优化了景观格局,进而解决了流域景观破碎化、生态功能退化等问题。

总的来说,概念模型和数学模型等传统生态过程模拟模型是当前进行景观格局优化的常用方法,景观格局优化研究工作主要是预测多因素影响下的景观格局变化结果。研究者对模拟结果进行效益评估,择优筛选最大效益“半稳定”景观格局。由于对景观组分、类型、斑块及廊道作用过程理解不足,导致目前很多的景观格局优化设计尚缺少强有力的机理性研究支持 (边红枫, 2016)。

1.1.3 流域景观格局研究的未来趋势

中国景观生态学发展已经走上影响和引领国际生态学发展的前沿舞台 (陈利顶等, 2014)。在新形势下,如何紧密结合国民经济发展中出现的新问题,开展独创性的研究,是目前亟待解决的问题 (陈利顶等, 2014)。尽管中国景观生态学发展取得了突出的成绩,但在服务国民经济发展和国土生态安全方面仍然缺乏有效与实用的手段,这正是今后需要努力的方向。

随着景观生态学的不断发展以及人们认识能力的不断提高,景观生态学家已不再满足于单纯的景观格局刻画,逐渐将研究重点转向格局与过程相互作用关系的探讨方面,并希望能够用一系列景观格局指数来表达这种相互关系。但是,目前绝大部分的景观格局指数还是在景观生态学发展初期创立的,大多来自于数理统计和几何特征与空间关系的数学表达,如斑块面积指数、边界形状指数等,指