

城市水土流失的景观生态学研究^{*}

曾祥坤, 王仰麟, 李贵才

(1. 北京大学 深圳研究生院循环经济重点实验室, 广东 深圳 518055; 2. 北京大学 城市与环境学院, 北京 100871)

摘 要:生态化成为近年来城市水土流失研究发展的重要趋势。通过分析当前城市水土流失的研究概况, 探讨应用景观生态学原理是如何在城市水土流失研究的现有框架上进行更为综合的、深入的拓展。在景观生态学看来, 与传统地区的水土流失相比, 城市水土流失具有城乡二元景观异质性、城市化造成的过程化影响、城市水土保持的地域综合性这三个重要特点。在此基础之上当前城市水土流失已经建立了主要包括城市水土流失的效应特征、形成机制、评价体系和水土保持在内的研究框架。景观生态学的引入在研究内容、研究方法、研究途径上为今后的城市水土流失提供了崭新的视角和可操作性的思路。城市水土保持规划也是今后景观生态学原理应用的重要领域。

关键词:城市水土流失; 景观生态学; 研究框架

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)05-0025-06

A Framework for the Study of Urban Soil Erosion Based on Landscape Ecology

ZEN G Xiang-kun, WANG Yang-lin, LI Gui-cai

(1. The Key Laboratory for Recycling Economy, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen, Guangdong 518055; China; 2. College of Urban and Environment Science of Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: This article firstly summarized the researches on urban soil erosion in China, and pointed out that ecologicalization had been the mainstream of the study and practices of urban water and soil conservation. In the past two decades, the scholars had done many works in the field of urban soil erosion, but the research theories and methods that they used almost came from the study of natural soil erosion. So today, the study of urban soil erosion must pay more attention on quantity and ecology research in the larger scale. Under this background, landscape ecology should be broadened in the researches on urban soil erosion. From the vision of landscape ecology, urban soil erosion had three characteristics, namely the heterogeneous landscape between urban and rural area, the procedure influence from urbanization to urban soil erosion, and the regional synthesis of urban water and soil conservation. In recent years, the study urban soil erosion gradually formed a framework that composed of four fields: the characteristics of water and soil loss in urbanizing, the driving force of urban soil erosion, the assessment of urban soil erosion and the study on urban water and soil conservation. As a new theory and method tool, leading landscape ecology into the study of urban soil erosion was of great benefit to widen and deepen its framework: (1) On the research contents, landscape ecology had an advantage of describing the ecological characteristic of soil erosion and evaluating the land ecological security pattern based on urban water and soil conservation; (2) On the research methods, landscape pattern indices improved the quantity research method; (3) On the research approach, the theory of pattern-effect help the researchers to simplify the study of urban soil erosion's driving force by avoiding complex mathematical and physical models.

Key words: urban soil erosion; landscape ecology; research framework

^{*} 收稿日期: 2009-03-31

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (40635028, 40830747)

作者简介: 曾祥坤 (1982 -), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 主要从事景观生态和土地利用方面的学习和研究。E-mail: cosbeta@gmail.com

伴随着我国城市化进程的显著加快,城市水土流失成为社会经济快速发展中出现的新问题^[1]。自 20 世纪 90 年代初以来,城市水土流失就因其问题的广泛性、特殊性和严重性而备受关注^[2]。在过去二十多年中,研究者们以水土保持学为基础,以城市水土流失与自然水土流失的区别为出发点,以对比研究的方式展开了城市水土流失研究,总结了城市水土流失的特点、成因、危害^[3-5],介绍了国外城市水土保持的经验成果^[6-8],提出了城市水土流失强度等级划分标准^[9-10],归纳了城市水土保持措施^[11-13],完善了城市水土流失的量化研究和 GIS 应用^[14]。但是,尽管研究强调城市水土流失的特殊性,但研究范式却主要延续了传统地区水土流失研究的套路;目前对城市水土流失的总结多以一般性论述为主,缺乏系统全面的理论分析和定量研究^[1];小范围水土保持措施已见成效,但区域范围内的措施优化配置尚需进一步研究^[15]。针对这些问题,近年来不少研究者开始引入景观生态学的相关理论方法,力图将城市水土流失研究置于更广阔的视角当中^[16]。

景观生态学是一门综合学科,围绕“尺度-格局-过程”的核心概念,注重研究景观结构和功能、景观动态变化及其相互作用机理,进行景观的美化格局、优化结构、合理利用和保护^[17-18]。景观生态学跨学科及其多学科的特征特别适用于集成生态的、地理的、经济的及其人文因素的各个方面,从而能够对复杂的情况给予一定的描述^[19]。因此,借鉴景观生态学的理论方法可以为城市水土流失提供一种多尺度、多学科的综合研究平台,可以解决城市水土流失背后复杂的生态和社会问题,从而为城市水土保持的综合规划管理提供科学支持。此外,在传统地区水土流失研究中景观生态学理论方法的应用由来已久,且取得了相当丰富的成果^[20-23],可在城市地区进行相应的成果转化与验证。

1 城市水土流失内涵的景观生态学解释

目前学术界从时间、空间、诱因、内容、危害等方面对城市水土流失的内涵进行了诠释,即在城市化过程中,主要由于人类活动造成的发生在城市建设区及周边地区的水土流失,它包括水、土两类资源的损失和破坏,并给城市带来了河道淤积、雨洪灾害、非点源污染等新的生态环境问题^[2-3, 24-25]。与传统地区水土保持以保土为核心不同,城市水土保持的重点已经由“源”转到了“汇”的问题上。相对土地农业生产能力的下降,城市河道淤积、公路边坡堆积、建成区雨洪灾害等问题更应引起重视。

在景观生态学中,景观是一种地域综合体的概念,是自然与人文要素的统一有机体。景观生态学中强调人类的主导意识,侧重于人类对景观整体的作用^[26]。因此,在景观生态学看来,城市水土流失是城市化过程中因整个城市地域(建成区及周边影响地区)景观格局演变导致水、土物质迁移过程发生变化所产生的一种多驱动、多尺度的复杂生态环境效应。从景观分析的角度来看,城市水土流失具有以下三个特点:

(1) 城乡二元景观的空间异质性。景观异质性是景观生态学最核心的概念,景观格局和景观功能都是景观异质性的具体表现。城市化在空间上表现为城市景观的扩张和自然景观的破碎化,在功能上表现为区域城市功能的增强和水土涵养能力的下降,在水土流失问题上则表现为建成区和非建成区不同的水土效应,具有明显的空间二元性。而在广义的城市水土流失研究中,非建成区往往也要纳入研究范围。城乡景观异质性大大增加了城市水土流失研究的复杂性和难度,同时又是区别于传统地区水土流失研究的显著特点。

(2) 城市化对水土流失的过程化影响。城市化也是城乡景观格局演化的过程,景观格局演化将导致景观与外部环境或其内部物质能量流动过程的变化。具体到城市水土流失,城市化对它的过程化影响具有两层含义:一是除了取石采矿和建设活动直接产生的水土流失外,城市化过程中不透水面的增加、植被覆盖度的降低、城市河道的变迁、城市排水系统的强化等因素在产流、汇流、产沙、输沙等诸多环节上都对水土流失间接产生了重要影响;二是城市水土流失是城市土地利用格局变化的一种效应,它是伴随整个城市化过程发生发展的。

(3) 城市水土保持的地域综合性。尽管城市景观和自然景观中所产生的水土流失存在明显的差异,但是从城市水土保持的角度而言,关注的重点不仅是“源”,更在于“汇”,即水土流失的路径和影响范围,以及是否会对城市功能的发挥产生危害。因此,城市水土保持的规划和实施必须具有地域综合的视界,单纯强调建成区内的水土保持是片面和短视的。

2 城市水土流失的研究框架

目前城市水土流失研究主要包括 4 方面的内容:城市化过程中水土效应特征研究、城市水土流失形成机制研究、城市水土流失评价研究和城市水土保持研究(如图 1),并按照“发现问题-机理判断-问题诊断-解决问题”的逻辑联系起来。

(1) 在城市水土流失的特征研究中,发生地点、诱发原因以及类型划分是三个主要的切入点,并构成城市水土流失概念的基本内涵。而城市水土流失评价指标体系的构建^[10,12,30-31]则代表着特征研究已从定性描述逐渐向定量评价转变。通过强度的分级与分区,城市水土流失的格局特征得以显现,城市水土流失的空间差异性及其原因逐渐成为当前特征研究的重点。基于此,国内城市在水土保持实践中多采用分级预警和分区治理的策略。

(2) 城市水土流失形成机制研究的核心问题是分析人为活动与自然因素对城市水土流失的影响,具体表现为利用可监测指标实现城市水土流失的数量化与空间化表达。缺乏长期监测数据是我国城市水土流失所面临的主要问题之一。在实际研究中,通常会采用降水强度、土壤性状、地形因素、植被覆盖度等因素作为城市水土流失评价的间接指标。土地利用变化是导致城市水土流失加剧的最主要原因^[27],明确两者之间的数量关系是机制研究必须解决的主要问题。现阶段的机制研究主要有两个方面:一是单因素影响分析,如张丽萍建立坡度增加数学模型,证明随坡度临空面增加,坡度侵蚀量成倍增加^[28];二是构建以 RUSLE 和 WEPP 为代表的城市水土流失模型,对影响因素进行整合,但模型的有效性存在争议^[29],尚未进行广泛的验证。相对建设平土区、流域等小尺度研究,市域层面的城市水土流失机制尚未摸清^[15]。

(3) 城市水土流失评价是城市水土保持重要的前期工作。市域尺度的水土流失评价是近年来研究者们关注的热点。王志明在开发建设平土区的水土

流失等级划分基础上^[30],将模糊评判处理方法引入到城市化土壤侵蚀强度等级划分中,提出简单并具可操作性的综合评判模型^[31]。许有鹏等以深圳市为例,探讨并建立深圳市水土流失综合评判模型,提出城市水土流失评估模型的研制方法和途径^[12]。万方秋等进行城市水土流失强度分级指标体系的研究,提出相对完整的指标体系,包括土沙流失指标、水流失指标和相关指标^[10]。

(4) 城市水土保持研究具有鲜明的针对性,主要包括对城市水土流失提出防治对策以及对某些特定流失类型的综合治理措施。前者包括宣传教育、制订规划、加强监督等等,后者对公路铁路、采石场、开挖坡面等城市水土流失类型有较多研究。现阶段对各类城市建设活动引发的水土流失提出了明确的整治措施,但市域层面的综合水土保持规划尚处于起步阶段,特别是水保设施的有效空间配置仍然是一个亟待解决的问题。

在上述研究框架下,“机理判断”(即城市水土流失形成机制研究)是最核心的环节,是进行城市水土流失评价和水土保持策略的基础,也是城市水土流失研究最大的难点。一方面,国内大多数城市的水土流失监测工作起步较晚,使研究缺乏长时间序列数据的支撑。另一方面,在城市化地区水土流失的成因及影响因素更为复杂,传统地区的研究成果(如 RUSLE 模型)在城市地区的适用性也有待商榷。因此,在市域层面的研究中,现阶段成果仅能验证人类活动是城市水土流失的主要诱因,但其在空间上的综合作用过程仍然是一个盲区,使城市水土保持工作难以做到因地制宜。

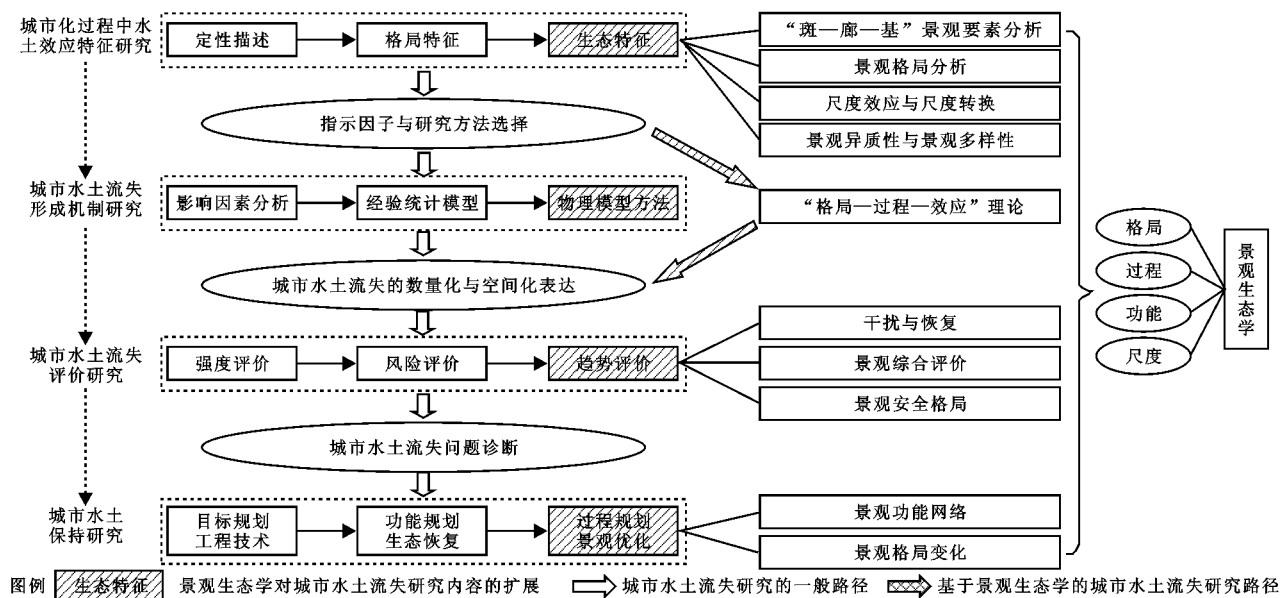


图 1 景观生态学下的城市水土流失研究框架

3 景观生态学对城市水土流失研究的影响

针对现阶段城市水土流失研究所面临的问题,景观生态学的引入为研究者提供了一条可行的途径。依据现阶段城市水土流失研究的特点,有必要按景观生态学的原理方法在研究内容、研究方法和研究路径等方面对研究框架进行完善。

3.1 对研究内容的扩展

景观生态学围绕格局、过程、功能、尺度这四个核心概念,提出一系列重要的景观分析的生态学原理方法。借助这些原理和方法,可对城市水土流失研究的各项主要研究内容进行扩展。

随着城市水土流失研究的生态化趋势日渐明显,关于水土效应生态特征的研究越来越受到重视。“斑块-廊道-基质”是构成和描述景观空间格局的一种基本模式,可用以描述水土流失区的空间形态和与周边城市环境的相互关系。对水土效应的景观格局分析可在进一步完善其空间格局特征研究的基础上,对水土效应的内在特征和生态学效应给予直观的表达。尺度效应是地理空间事物和现象的固有属性,长期以来,城市水土流失多集中于小区和小流域尺度的研究,借用景观生态学中尺度转换的概念方法有助于加强市域尺度水土效应特征的研究。土地利用/覆被变化是城市水土流失的主要诱因,也是水土保持的重要措施。景观异质性和景观多样性概念的引入可对此提供生态学的解释和指导。

由于同传统地区的显著差异,以 RUSLE 为代表的经验模型在城市水土流失研究中的适用性受到了质疑,基于过程的物理模型成为当前城市水土流失机制研究的热点。以 WEPP 流域版为例,模型输入包括气候、地形、植物与田间管理、土壤、流域结构及渠道等空间数据。根据景观结构决定景观功能的理论,对上述数据的景观结构加以分析,将有益于对水土流失机制的深入挖掘。特别是在城市水土流失研究中,用地布局的影响尤应重视。

在强度评价和风险评价已获得广泛应用的今天,趋势评价成为城市水土流失评价研究发展的主要方向,也是制定城市水土保持措施的基础。从景观生态学的观点出发,城市水土流失可以被认为是城市化过程对区域水土流失状态形成干扰的后果,各项水土保持措施实则是对这种被破坏的生态过程的恢复。基于此,城市水土流失评价的对象应包括区域景观生态系统对水土流失的容忍度和恢复力,趋势评价正是对这两种相对作用的平衡态势的判

断。其具体手段包括景观综合评价和景观安全格局,既在宏观上量化区域景观的水土保持功能,又在微观上分析此功能的空间结构基础,特别是对具有重要作用的景观要素的识别。

按研究的深入和实际效能,可将城市水土保持规划分为三个层次:目标规划、功能规划和过程规划。目标规划以工程技术为基础,以各类城市建设项目为对象,防治手段包括制度建设(如“三制”管理模式)和工程技术规范^[32]。功能规划则从城市生态学的角度为城市水土保持赋予城市生态建设的功能,侧重于通过植被恢复、河道整理等措施完善地域生态功能,保证城市功能的正常发挥^[13]。但在实际操作中,功能规划没有严密的机制分析,对绿地和河道的功能设定更类似于生态设计,对规划目标的实现缺乏保障。有鉴于此,过程规划从城市水土流失的发生机制出发,通过各种工程和生态措施对产流、产沙、汇集各环节进行全程式控制。基于景观生态学“格局-过程”的研究,在明晰城市景观格局演化与水土流失过程的关系之后,可借助生态措施更具针对性地防控城市水土流失。

3.2 对研究方法的完善

从图 1 中可以看到,在研究方法上,景观生态学既能以生态学理论为城市水土流失提供解决问题的新视角,又通过景观研究丰富城市水土流失的研究方法,主要包括景观格局分析、景观综合评价、景观格局优化等。

景观格局通常采用格局指数加以描述,量化表达景观的多样性、聚集度和异质性。近年来很多学者利用景观格局指数分析土地利用/覆被变化对水土流失的影响。如索安宁等采用 DCCA 排序法对黄土高原腹地泾河流域 12 个子流域的景观格局与流域水土流失关系进行了定量分析^[22]。陈俊华等利用遥感数据分析二滩库区土地利用景观格局和水土流失动态特征之间的关系,证实景观格局演化对水土流失的显著影响^[33]。此外,陈利顶等根据“源-汇”理论提出的景观空间负荷对比指数,在水土流失的跨尺度研究和流域风险判断方面具有很强的借鉴意义^[34]。

城市水土保持规划需以城市地形地貌和植被状况为依据,深入分析城市水土流失的成因、特点、分布和发展变化趋势并加以预测^[16]。在较大空间尺度的城市水土保持中,发挥和完善生态用地的功能是最主要的防治途径。因此,城市水土保持规划的基础之一是对城市地域生态景观水土保持功能的综合评价,包括格局特征、与水土流失动态的耦合关

系、功能区设定、关键要素识别等等。目前在实践中,面向城市水土保持的景观综合评价尚处于尝试阶段。如深圳市在裸露山体缺口整治过程中,首创“景观影响度”的概念,构建了景观影响度的计算指标体系^[13]。

景观格局优化是对城市水土流失进行生态治理的有效手段之一。任何景观其内部均存在某种潜在的空间格局,对控制景观内的水平生态过程起着关键作用的战略点及其空间联系构成了景观安全格局^[35]。在宏观上,多数城市建设过程中社会经济发展与生态保持处于矛盾状态,因此,城市水土保持需要寻找一个阈值,在不破坏土地生态经济系统的前提下,在水土资源生态环境容许限度内进行土地利用和规划。在微观上,在水土保持中发挥重要作用的景观结构要素(如集水区林地、河道防护林、森林公园等)必须在规划中得到重点保护,从而使水土保持的景观格局不至因城市建设而遭到破坏。

3.3 对研究路径的补充

如图1所示,在以往研究范式中通常是采用数学模型实现“指示因子选择”和“水土流失量化表达”两环节的衔接。这些数学模型多是经典的坡面土壤侵蚀模型,应用对象也是城市建设中“三坡一面”所导致的水土流失。但是随着空间尺度的扩大,坡面模型在描述空间格局方面存在着较大的缺陷,已无法适用于新的研究。而且城市水土流失的机制极为复杂,适用于传统地区的模型很难对其进行理想的拟合。加之长期监测数据的匮乏,目前在市域尺度的水土保持规划中很少也很难使用水土流失模型进行研究。依据景观生态学“格局-过程-效应”的理论可为这个问题提供新的解决思路。

景观生态学认为,景观格局影响着景观内部的物质交换与能量流动,景观格局的演化必然导致自然生态过程的扰动,从而影响景观功能的发挥并产生相应的生态环境效应。格局演化对自然生态过程的影响往往因其复杂性而难以进行数理分析,但格局演化及其效应则相对易于监测和数量化。因此,城市水土流失机制的研究可进行相应的简化:将土地利用变化对水土流失产流产沙过程的影响视为“黑箱”,直接考察土地利用变化与水土流失效应的耦合关系,再据此提出基于水土保持的土地利用格局优化方案。

4 结语

当前城市水土流失研究趋势表明,城市水土流失作为一种典型的城市化效应,需要通过景观生态

学原理和系统方法研究其特征、发生机理、动态变化以及调控机制;同时,随着城市水土保持的生态化,面向水土保持的景观格局优化也是未来景观生态学原理应用的重要领域之一。因此,从可持续景观规划的角度可对城市水土流失进行更为综合的研究。在市域尺度上,利用遥感影像等多种数据提取土地利用变化和水土流失动态的指示因子,通过地理信息系统平台和景观分析软件集成描述城市水土流失的时空特征、动态变化以及与城市土地利用/覆被变化的相互作用关系,真正在景观水平上构建城市水土流失的生态防治方案。在这一过程中,景观生态学在研究内容、研究方法和研究途径上进行了更为深入的扩展与补充,为城市水土流失研究提供了一个相对完善的理论框架。

参考文献:

- [1] 邓岚,宋桂琴.我国城市水土流失研究进展初探[J].水土保持学报,2001,15(5):72-75.
- [2] 祁生林,杨进怀,张洪江,等.关于我国城市水土保持的刍议[J].水土保持研究,2006,13(3):115-118.
- [3] 柴宗新.城镇侵蚀及其防治[J].中国水土保持,1997(1):29-32.
- [4] 白清俊,朱晓霞.我国城市水土流失现状分析及对策探讨[J].榆林高等专科学校学报,1999,9(2):1-4.
- [5] 张丽萍,张锐波,柳云龙.城市扩建诱发水土流失的空间地理场分析[J].水土保持通报,2002,22(6):20-22,25.
- [6] 黄荣珍,张金池,舒洪岚,等.国内外城市水土保持研究进展[J].江西林业科技,2005(4):30-33,42.
- [7] 吴长文,黄翰森,黄琼.欧洲城市水土保持考察及其思考[J].中国水土保持,2006(3):10-12.
- [8] 郭廷辅.城市水土保持工作从何入手[J].中国水土保持,1997(1):6-7.
- [9] 陈法扬.城市水土流失强度分级标准商榷[J].中国水土保持,1999(3):30.
- [10] 万方秋,丘世钧,王继增.城市水土流失强度分级指标体系初探[J].水土保持研究,2003,10(2):79-82.
- [11] 吴长文,刘伟常,盛定生.城市水土保持规划的原理与方法[J].中国水土保持,1997(1):36-39.
- [12] 许有鹏,都金康,张立锋,等.城市水土流失综合评估模型研究[J].水土保持通报,2000,20(4):16-19.
- [13] 吴长文.城市水土保持的理论与实践[J].中国水土保持科学,2004,2(3):1-5.
- [14] 王佐成,赵纯勇,郭跃,等.城市水土流失地理信息系统设计与开发[J].水土保持研究,2002,9(1):57-61,66.
- [15] 吴发启,刘秉正.我国水土保持学科研究亟待解决的问题[J].水土保持研究,2004,11(3):217-219.
- [16] 王昭艳,张旭东,周金星,等.景观生态学在城市水土

- 保持规划中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(6): 32-35.
- [17] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 等. 景观生态学原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 178-179.
- [18] 肖笃宁, 李秀珍. 景观生态学的学科前沿与发展战略[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1615-1621.
- [19] 岳隽, 王仰麟, 彭建. 城市河流的景观生态学研究: 概念框架[J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1422-1429.
- [20] 傅伯杰, 赵文武, 陈利顶, 等. 多尺度土壤侵蚀评价指标[J]. 科学通报, 2006, 51(16): 1936-1943.
- [21] 邱扬, 傅伯杰. 异质景观中水土流失的空间变异与尺度变异[J]. 生态学报, 2004, 24(2): 330-337.
- [22] 索安宁, 洪军, 林勇, 等. 黄土高原景观格局与水土流失关系研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1719-1723.
- [23] 邹爱平, 陈志彪, 陈志强. 水土流失景观空间自相关与自相似的尺度特征分析: 以长汀县根溪河小流域为例[J]. 国土与自然资源研究, 2007(3): 31-33.
- [24] 甘枝茂, 孙虎, 吴成基. 论城市土壤侵蚀与城市水土保持问题[J]. 水土保持通报, 1997, (10): 57-62.
- [25] 唐克丽. 城市水土流失和城市水土保持[J]. 水土保持通报, 1997, 17(2): 封二.
- [26] 王仰麟. 景观生态系统及其要素的理论分析[J]. 人文地理, 1997, 12(1): 1-5.
- [27] 孙希华. 济南城市扩展对水土流失的影响研究[J]. 水土保持研究, 2004, 11(1): 50-53.
- [28] 张丽萍, 唐克丽. 工程建设加大坡面系统潜在侵蚀能力的研究[J]. 水土保持通报, 1997, 17(2): 27-34.
- [29] 王继增, 吴志峰, 朱立安, 等. 关于城市水土流失研究若干问题的探讨[J]. 水土保持通报, 2005, 25(4): 106-110.
- [30] 吴长文, 欧阳菊根, 欧阳毅. 开发建设平土区的水土流失等级划分[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(3): 8-14.
- [31] 王志明. 关于城市化土壤侵蚀等级划分综合评判模型的探讨[J]. 水土保持研究, 1998, 5(2): 131-135.
- [32] 姜德文. 水土保持学科在实践中的应用与发展[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(2): 88-91.
- [33] 陈俊华, 何政伟, 向成华, 等. 二滩库区(盐边)土地利用景观格局及水土流失动态研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(5): 74-80.
- [34] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 等. 基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法: 景观空间负荷对比指数[J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2406-2413.
- [35] 刘世梁, 傅伯杰. 景观生态学原理在土壤学中的应用[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 102-106.

(上接第 6 页)

- [8] 李秀彬. 土地覆被变化的水文水资源效应研究: 社会需求与科学问题[C]// 中国地理学会自然地理专业委员会编: 土地覆被变化及其环境效应研究. 北京: 星球地图出版社, 2002: 1-6.
- [9] Archer D R. Scale effects on the hydrological impact of upland afforestation and drainage using indices of flow variability: The River Irthing, England[J]. Hydrology Earth System Science, 2003, 7(3): 325-338.
- [10] William B M, Turner I B L. Changes in land use and land cover: A global perspective[M]. Great Britain: the University Press, Cambridge, 1994: 238-249.
- [11] Defries R, Eshleman K N. Land-use change and hydrologic process: a major focus for the future[J]. Hydrological Process, 2004, 18: 2183-2186.
- [12] Eric F L, Helmut G. Land-use and Land-cover Change: Local Process and Global Impacts [M]. Germany: Springer-verlag Berlin Heidelberg, 2006: 104-116.
- [13] 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 202-203.
- [14] 李昌峰, 高峻峰, 曹慧. 土地利用变化对水资源影响的现状和趋势[J]. 土壤, 2002, 34(4): 191-196, 205.
- [15] 李文家, 杨含侠, 杨希刚. 渭河流域治理存在的问题和主要认识[J]. 人民黄河, 2006, 28(6): 61-62, 66.
- [16] 胡安焱, 刘燕, 郭生练, 等. 渭河流域水沙多年变化及趋势分析[J]. 人民黄河, 2007, 29(2): 39-41.
- [17] 马勇, 秦百顺, 王宏, 等. 渭河水沙变化及其影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2002, 245(8): 18-20.
- [18] 冉大川, 刘斌, 罗全华, 等. 泾河流域人为活动对水沙变化的影响分析: 兼议泾河流域治理方略[J]. 水土保持学报, 2001, 15(6): 32-35.
- [19] 李勇, 董雪娜, 张晓华, 等. 黄河水沙特性变化研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2004: 221-245.
- [20] 渭河流域水资源[EB/OL]. <http://www.chinawater.com.cn/ztgz/xwzt/2007whlt/>. 2008-10.
- [21] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 643-650.
- [22] 史培军, 宫鹏. 土地利用/覆盖变化研究的方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 105-123.
- [23] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(1): 81-87.
- [24] 王思远, 刘纪远, 张增祥, 等. 中国土地利用时空特征分析[J]. 地理学报, 2001, 56(6): 631-639.