

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

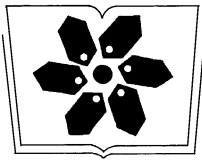
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第1期 Vol.33 No.1 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 1 期 2013 年 1 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 生态整合与文明发展..... 王如松 (1)
- 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展 高光耀,傅伯杰,吕一河,等 (12)
- 城市林木树冠覆盖研究进展 贾宝全,王 成,邱尔发,等 (23)
- 环境质量评价中的生物指示与生物监测 Bernd Markert,王美娥,Simone Wünschmann,等 (33)
- 水溶性有机物电子转移能力及其生态效应 毕 冉,周顺桂,袁 田,等 (45)

个体与基础生态

- 凋落物和增温联合作用对峨眉冷杉幼苗抗氧化特征的影响 杨 阳,杨 燕,王根绪,等 (53)
- 不同浓度 5-氨基乙酰丙酸(ALA)浸种对 NaCl 胁迫下番茄种子发芽率及芽苗生长的影响
..... 赵艳艳,胡晓辉,邹志荣,等 (62)
- 缺镁胁迫对纽荷尔脐橙叶绿素荧光特性的影响 凌丽俐,彭良志,王男麒,等 (71)
- 松嫩草地 66 种草本植物叶片性状特征..... 宋彦涛,周道玮,王 平,等 (79)
- 花蜜中酚类物质对群落中同花期植物传粉的影响..... 赵广印,李建军,高 洁 (89)
- 桉树枝瘿姬小蜂连续世代种群生命表..... 朱方丽,邱宝利,任顺祥 (97)

种群、群落和生态系统

- 蒙古栎地理分布的主导气候因子及其阈值 殷晓洁,周广胜,隋兴华,等 (103)
- 河静黑叶猴果实性食物组成、选择及其对种子的扩散作用..... 阮海河,白 冰,李 宁,等 (110)
- 2010 秋季东海今生颗石藻的空间分布 靳少非,孙 军,刘志亮 (120)
- OPRK1 基因 SNP 与梅花鹿日间行为性状的相关性 吕慎金,杨 燕,魏万红 (132)
- 鄱阳湖流域非繁殖期鸟类多样性 邵明勤,曾宾宾,徐贤柱,等 (140)
- 人工巢箱条件下两种山雀鸟类的同域共存机制 李 乐,张 雷,殷江霞,等 (150)
- 桉-栎不同混合比例凋落物分解过程中土壤动物群落动态 李艳红,杨万勤,罗承德,等 (159)
- 三峡库区生态系统服务功能重要性评价 李月臣,刘春霞,闵 婕,等 (168)

景观、区域和全球生态

- 黄土高原小流域不同地形下土壤有机碳分布特征 李林海,郜二虎,梦 梦,等 (179)
- 海岸带地理特征对沉水植被丰度的影响..... 吴明丽,李叙勇,陈年来 (188)
- 玛纳斯河流域扇缘带不同植被类型下土壤物理性质 曹国栋,陈接华,夏 军,等 (195)

资源与产业生态

- 农田开垦对三江平原湿地土壤种子库影响及湿地恢复潜力 王国栋,Beth A Middleton,吕宪国,等 (205)
- 漫溢干扰过程中微地形对幼苗定居的影响 安红燕,徐海量,叶 茂,等 (214)
- 黑龙江流域夏玉米产量提升限制因素 徐丽娜,陶洪斌,黄收兵,等 (222)
- 黑龙江省药用植物根际土壤真菌多样性 慕东艳,吕国忠,孙晓东,等 (229)

桑沟湾养殖生态系统健康综合评价 傅明珠,蒲新明,王宗灵,等 (238)

城乡与社会生态

基于“OOAO 原则”的罗源湾生态质量状况综合评价 吴海燕,吴耀建,陈克亮,等 (249)

四十里湾营养状况与浮游植物生态特征 李 斌,白艳艳,邢红艳,等 (260)

生态足迹深度和广度:构建三维模型的新指标 方 恺 (267)

中国东西部中小城市景观格局及其驱动力 齐 杨,邬建国,李建龙,等 (275)

研究简报

南海陆坡沉积物细菌丰度预测 李 涛,王 鹏 (286)

浑善达克沙地榆树疏林幼苗更新空间格局 刘 振,董 智,李红丽,等 (294)

光 and 不同打破种子休眠方法对紫茎泽兰种子萌发及幼苗状态的影响 姜 勇,李艳红,王文杰,等 (302)

学术争鸣

关于植物群丛划分的探讨 邢韶华,于梦凡,杨立娟,等 (310)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 35 * 2013-01



封面图说: 外来入侵物种紫茎泽兰——紫茎泽兰约于 20 世纪 40 年代由缅甸传入中国云南南部后迅速蔓延,现已在云南、贵州、四川、广西、重庆、湖北、西藏等省区广泛分布和危害,并仍以每年大约 30 km 的速度扩散。紫茎泽兰为多年生草本或亚灌木,号称“植物界杀手”。其对环境的适应性极强,疯长蔓延,能极大耗损土壤肥力。它的植株能释放多种化感物质,排挤其他植物生长而形成单优种群,它破坏生物多样性,威胁到农作物、畜牧草甚至林木,且花粉能引起人类过敏性疾病等,目前尚无有效治理对策。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201111051675

高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 刘宇, 王帅, 周继. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展. 生态学报, 2013, 33(1): 0012-0022.

Gao G Y, Fu B J, Lü Y H, Liu Y, Wang S, Zhou J. The effect of land cover pattern on hillslope soil and water loss in the arid and semi-arid region: a review. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(1): 0012-0022.

干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展

高光耀^{1,2}, 傅伯杰^{1,*}, 吕一河¹, 刘宇^{1,3}, 王帅¹, 周继¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

2. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

3. 中国科学院遥感应用研究所农业与生态遥感研究室, 北京 100101)

摘要: 植被恢复与建设是控制水土流失的重要措施。在干旱半干旱地区, 植被在空间上的分布呈现离散特征, 在坡面上形成的裸地-植被镶嵌和植被条带分布等覆被格局对水土流失过程具有重要影响。覆被格局与水土流失关系研究是景观生态学格局与过程研究的重要内容。从植被斑块、坡面覆被格局对水土流失的影响与耦合覆被格局与水土流失的手段和方法三个方面对国内外相关研究进行总结分析。从中发现, 植被类型、层次结构和形态特征是植被斑块尺度上影响径流泥沙的关键因素; 不同覆被类型的产流产沙特征与覆被格局的准确描述是研究覆被格局水土流失效应的重要基础; 坡面覆被格局对水土流失的影响关键在于其改变了径流泥沙运移和汇集的连续性, 应重点关注径流泥沙源汇区的连通性和空间分布在水土流失中的作用; 以坡面的精确覆被制图为基础, 建立基于水土流失过程的覆被格局指数和耦合格局信息的径流与侵蚀模型是定量研究覆被格局影响的有效手段。今后应加强以下研究: 以动态系统的观点研究覆被格局的变化对水土流失的影响, 系统理解覆被格局与水土流失之间的相互联系与反馈机制, 探讨两者间动态关系随尺度变化的规律性并发展尺度上推方法; 构建过程意义明确且简单实用的格局指数, 将覆被格局与水土流失过程有机联系起来; 发展覆被格局的动态信息与产流产沙过程相结合的水文模型, 加强对格局与径流泥沙反馈系统的耦合, 建立真正意义上的覆被格局-水土流失过程耦合模型。

关键词: 干旱半干旱区; 坡面覆被格局; 水土流失; 格局指数; 耦合模型

The effect of land cover pattern on hillslope soil and water loss in the arid and semi-arid region: a review

GAO Guangyao^{1,2}, FU Bojie^{1,*}, LÜ Yihe¹, LIU Yu^{1,3}, WANG Shuai¹, ZHOU Ji¹

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

3 Lab for Agriculture and Environment, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Vegetation restoration and construction play an important role in controlling soil and water loss. The spatial distribution of plant cover is scattered in arid and semi-arid region. The formed land cover patterns on hillslope such as bare soil-vegetation mosaic and banded vegetation pattern have great effect on runoff and soil erosion processes. The relationship between land cover pattern and soil loss is an important topic of pattern and process research in landscape ecology. We present a review of previous research from three aspects including the effects of vegetation patch and land cover pattern on runoff and soil erosion, and the way to account for land cover pattern and couple it with soil loss. Vegetation type,

基金项目: 国家自然科学基金(41101096, 40930528, 41171156); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金(10501-280)

收稿日期: 2011-11-05; **修订日期:** 2012-02-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bfu@rcees.ac.cn

vegetation structure and vegetation morphology are the key factors of soil and water loss at the patch scale. Accurately understanding the runoff and sediment production characteristics of different land cover type and describing land cover pattern are two important bases to study the soil and water loss rules of land cover pattern on hillslope. The land cover pattern changes the continuity of runoff and sediment transport and convergence path. Thus, one should pay much more attention to the role of connectivity and distribution of runoff and sediment source and sink areas on hillslope in affecting soil and water loss. On the base of precise hillslope land cover mapping, developing pattern metrics involved soil loss processes and integrating land cover information in runoff and soil erosion models are two efficient approaches to quantitatively account for the effect of land cover pattern. There are several issues need further investigation in future. First, land cover pattern has a temporal variation which was ignored in most of previous studies. More studies are needed to investigate the influence of land cover pattern variation on soil and water loss from a systemic and dynamic view. Second, current studies on the interaction between land cover pattern and soil loss are mainly focused on the one-way effect analysis, e. g., impact of land cover pattern on soil loss. The feedbacks of soil loss processes to land cover pattern are ignored. Much more attention should be paid to understand the interactions and feedbacks between land cover pattern and soil loss. Third, scale is a universal appearance in ecological phenomenon. Investigating scale effect of the relationship between land cover pattern and soil loss and developing up-scaling methods are front and challenging topics. Fourth, much more simple and practical pattern metrics with physical mechanism should be developed to integrate land cover pattern and soil loss, and pattern metrics should be further applied to quantitatively indicate runoff and sediment yield. Finally, the variation of land cover pattern should be coupled with runoff and sediment production processes in hydrologic model. It can strengthen the ability of the model to account for the feedbacks between pattern and runoff and sediment. This is the key to establish the land cover pattern-soil loss process integrative model, which is very useful to provide scientific basis for protecting soil erosion and designing vegetation rehabilitation pattern in arid and semi-arid region.

Key Words: arid and semi-arid region; land cover pattern of hillslope; soil and water loss; pattern metric; integrative model

土地利用/土地覆被结构与生态过程研究是对综合自然地理学的深化和发展,是地表过程研究的前沿^[1-2]。水土流失是世界性的生态环境问题,我国是世界上水土流失最严重的国家之一,而黄土高原则是我国土壤侵蚀最严重的地区。水土流失使土地退化,生产力下降,生态环境恶化。由此产生的大量泥沙淤塞江河湖泊,加剧洪水灾害,影响和制约区域经济和可持续发展。除自然因素外,不合理的土地利用是造成土壤侵蚀的重要驱动因子。土地利用与水土流失的关系一直是国内外普遍关注的重要科学问题^[3-5]。

植被恢复与建设是减缓或防治水土流失的重要措施。例如在我国黄土高原实施的小流域综合治理和退耕还林(草)工程,旨在通过黄土高原地区的植被恢复与生态环境建设达到控制水土流失的目标。要想有效控制水土流失,一方面要选择合适的植物物种及其搭配,另一方面也要合理地设计植被空间分布格局。特别是在干旱半干旱地区,水分制约加上人类活动等众多因素影响,植被恢复不可能达到理想的完全覆盖状况,而会在空间上呈现斑点(块、簇)状或条带状分布等离散特征,在坡面上会形成裸地与植被斑块的镶嵌、不同植被类型斑块的组合与裸地的镶嵌以及植被的条带分布等典型覆被格局^[5-7]。例如,在黄土高原沟坡等坡度较大、生态系统退化较严重的地段,植被以随机性斑块化格局为主;而在坡度较小、侵蚀和生态系统退化程度较低的坡面,植被格局以人为干扰和自然因素综合作用形成的带状特征为主^[4]。在地中海干旱半干旱区,人为干预和土地弃耕等交替活动的驱动使植被群落经过不同阶段的退化、更新,最终形成镶嵌式的空间结构^[7-8]。显然,具有不同覆被格局的坡面,其水土流失特征会有明显差异。坡面是各种地表过程发生发展的重要地理单元,也是流域/区域的基本构成单元。坡面尺度水土流失过程的研究对探讨大尺度上土地利用格局演变的水土流失效应具有重要作用,而且坡面的土壤侵蚀防治是流域和区域尺度水土保持工作的关键,具有重要的

理论和实践意义。因此,干旱半干旱区坡面尺度上土地覆被格局的水土流失效应研究一直是国内外的研究热点。

基于文献调研,本文从植被斑块对水土流失的影响、坡面覆被格局对水土流失的影响和耦合覆被格局与水土流失的手段与方法 3 个方面对干旱半干旱区坡面覆被格局与水土流失关系的相关研究进行综述与探讨,归纳需要进一步研究的问题,旨在从过程和机制上更加深刻认识覆被格局对水土流失过程的影响机理,为今后开展土地覆被结构与水土流失相关研究提供一定参考依据,并为坡面植被恢复格局设计、有效控制水土流失和改善干旱半干旱区的水资源状况等提供理论依据。

1 植被斑块对水土流失的影响

斑块尺度植被对水土流失有着直接和间接的影响。首先,植被以及枯枝落叶层能减轻雨滴的直接打击以及对土壤的剥离,有效的拦截地表径流,减缓其流速,很大程度上减弱或消除降雨和径流侵蚀能量,减少侵蚀发生的机会^[5,9]。植被对径流泥沙的影响关键在于改变了降雨侵蚀动能。植被生长引起植物高度增加、根系伸长、叶面积增加、覆盖度增大、植被结构发生变化,植被对降雨的阻截再分配作用因此发生变化,改变了降雨对地表的侵蚀击溅力^[10]。其次,植被及枯落物通过改善表土结构、物理化学和水文性质以及微地形,进而影响水土流失,如降低土壤可蚀性,增加入渗能力等^[5,10]。植被影响水土流失的主要因素有植被类型、植被覆盖度、植被枯枝落叶层、植被高度和植被根系等^[5,10-11]。

不同的植被类型,有不同的叶片形态和层次结构,各个层次的形态也有显著差异,进而对水土流失的影响会有不同。大叶片植被更容易将雨滴汇聚成更大的水滴,增强雨滴溅蚀。具有多层结构的植被群落比单层植被更能保护土壤,减轻侵蚀强度^[12],而林草复合的植被覆盖结构比纯林或纯草覆盖具有更强的水土保持功能^[13]。植被生长形态也具有一定的作用,而植被演替能引起群落结构发生改变,从而改变降雨对地表的侵蚀能力。国内外学者对不同植被类型、不同植被的层次及形态结构对土壤侵蚀的控制作用进行了大量研究^[5,9-11]。

植被盖度是影响水土流失的关键因素^[14]。植被覆盖度的增加会加强对降雨的拦截,降低雨滴动能,进而减弱降雨侵蚀力。实验结果表明,径流量和产沙量随着覆盖度增加而呈线性^[9,15]或指数^[9,16-17]减小。很多研究也探讨了有效植被盖度的问题,认为只有达到一定盖度之后植被才能起到有效减轻土壤侵蚀的作用^[15,18-19]。叶面积指数也是评价植被水土保持效益的重要指标。与植被覆盖度相比,植被叶面积指数反映了冠层叶片空间结构,在表征土壤侵蚀、评价植被水土保持效果上更为稳定和可靠^[13]。

植被高度的变化也会显著影响土壤侵蚀。当植被覆盖度不变而高度,尤其是冠层距地面高度变化时,由于冠层下雨滴直径和动能变化,溅蚀量会发生变化。研究表明只有在一定高度下,植被覆盖才能有效地降低雨滴动能,植被过高其冠层汇集的雨滴能量可能更大,对地表的溅蚀更强^[5,10]。Morgan^[20]的研究表明,当草本高度大于 0.3 m 时,植被保护土壤不被雨滴溅蚀的能力降低,当大于 1 m 时,雨滴的溅蚀会超过自然雨滴。蔡强国和陈浩^[21]的实验资料表明当植被高度为 3—4 m 时植被已无消除雨滴动能的功能。

植被枯枝落叶层是控制土壤侵蚀的重要因素。枯落物有效减弱雨滴对土壤颗粒的分散动力,具有较大的水分截持能力,影响土壤入渗和蒸发,同时会改变地表糙率等地形结构,显著降低水流挟沙能力,减少径流汇集及泥沙搬运。枯落物的组成结构、持水能力、厚度、蓄积量等因素是影响土壤侵蚀的重要指标^[22]。虽然具有相似的覆盖度,不同植被由于枯落物特性不同,土壤侵蚀程度会不同。例如,以丛生禾草为主的混合草地的枯落物厚度和粒度要大于草坪草地,使得前者的土壤侵蚀程度要低^[23]。

除了植被的地上部分,植物根系对土壤侵蚀也有重要影响。Gyssels 等^[24]与 Gyssels 和 Poesen^[25]在比利时黄土带对谷类作物和草类植被的土壤侵蚀效应研究表明,根系密度和秧苗密度的增加均能导致侵蚀速率呈指数形式降低,特别是在植物生长初期,根系对土壤侵蚀具有重要的控制作用。李勇^[26]在黄土高原的研究表明,植物根系能提高土壤抗冲性和入渗能力。总的来看,植被从地上部分的冠层到地下部分的根系,即植被的垂直结构,都对水土流失有着直接或间接的作用。

2 覆被格局对水土流失的影响

植被是土壤侵蚀的重要影响因素,而覆被格局即各种覆被类型包括植被、枯落物和裸地等的空间分布和数量结构对坡面水土流失具有直接的控制作用。覆被空间分布格局影响地表径流的汇集和携沙能力,改变了水土流失过程的连续性^[5,27]。在以超渗产流为主的干旱半干旱地区,裸地往往由于土壤结皮的存在而降低入渗率,增加地表径流,而有植被覆盖的土壤则因土壤特性的改善,入渗率增大,成为降水吸收区,从而导致径流泥沙源汇区的产生^[10-11]。植被空间分布格局改变了径流和泥沙运移路径的连通性,对水土流失作用显著^[28-31]。

Boer 和 Puigdefábregas^[32]的模拟研究发现裸露区域和植被的空间组织对暴雨径流和侵蚀的预测有显著影响。Boix-Fayos 等^[33]在西班牙东南部半干旱区的长期监测研究表明,相同规格的监测样地因覆被格局不同,总流失量可相差 9 倍之多。Bautista 等^[30]的研究表明,在半干旱环境,植被空间结构属性和植物功能多样性是比表层土壤属性更好的径流和侵蚀解释变量。尽管植被覆盖度和生物量是水文模拟中常用的植被属性,而这些变量不足以预测半干旱景观的径流和侵蚀量^[32]。鉴于覆被格局对产流产沙的重要影响,在水土流失研究中,格局对过程的作用日益得到重视。针对覆被格局与水土流失过程的关系研究逐渐增多和不断深入,景观生态学的格局分析方法逐渐应用到其中。

国际上的很多相关研究都是在定位观测基础上,分析植被斑块以及裸地-植被斑块镶嵌格局的水土流失效应^[28,33]。Reid 等^[34]在美国新墨西哥州北部研究了林下植被斑块、林间植被斑块和林间裸地斑块等 3 种覆被斑块类型的水土流失效应。结果表明,裸露斑块的产流和产沙量要大于林间植被斑块,产流产沙最小的是林下植被斑块,而且裸露斑块是水土流失的源,其他两种斑块类型起到了汇的作用^[34]。以色列荒漠化灌丛区的实验研究也表明,植被斑块越少,越易造成水土流失,增加发挥土壤和水分“汇”功能的植被或其他斑块并对它们合理布局,有助于生态系统的保护和恢复^[35]。Puigdefábregas^[28]分析了干旱区斑块和立地尺度上植被的非均匀分布特征对径流和泥沙的影响。Boer 和 Puigdefábregas^[32]的模拟研究发现坡面空间结构化的植被格局(植被斑块和裸露斑块镶嵌分布)比均一化植被格局下的产流产沙量大。Ludwig 等^[36]在澳大利亚东北部开展的微型小区和坡面尺度观测研究表明,对于具有相近草本盖度、坡度和土壤类型的两个对比坡面,植被空间格局粗粒化且有较大裸地斑块的坡面,其侵蚀速率是植被格局细粒化坡面的 40 多倍,后者可以直接由微型小区的观测结果线性尺度上推,而前者的实测值是线性递推结果的 2.5 倍。这主要是由于植被格局粗粒化坡面的覆被斑块结构未能有效降低径流速度和留滞泥沙,说明坡面植被斑块的空间离散分布使得其生态水文过程存在跨尺度的非线性特征。Bautista 等^[30]在西班牙地中海半干旱景观坡面尺度上对植被空间格局和功能多样性与坡面水文功能的关系进行监测分析,发现径流量和斑块密度呈负相关,而且产流产沙量均随植被空间格局的粗粒化而增加。Bartley 等^[17,29]在澳大利亚北部半干旱区牧场小流域内的坡面上长达 6a 的监测试验表明,当坡面上分布有大量裸地小斑块时,其径流量比具有较低植被覆盖度但裸露斑块较少的坡面产流量高 6—9 倍,而土壤流失量差别可达 60 倍,特别是当低覆盖度植被斑块靠近坡底和沟道时,坡面产流产沙量显著增加。该研究充分表明裸地斑块及其分布位置在坡面径流侵蚀中的重要作用,而在坡底位置布设中、高覆盖度植被斑块可以有效阻截泥沙,减少对河网的泥沙输入。

坡面上植被的条带分布特征也引起了国际上很多学者的注意。植被条带类型、宽度、覆盖度和位置是影响其控制水土流失的重要因素^[37]。Ludwig 等^[38]在澳大利亚东部半干旱区坡面上的模拟结果表明,去除灌丛斑块后,其径流截持率比条带状格局降低约 25%,而条纹状或线状格局的灌木地比点状镶嵌格局的截流能力提高约 8%。Valentin 等^[39]通过总结相关研究结果表明,坡面植被-裸地带状格局形成产流-聚流系统,有利于截获有限的水资源,构成限制土壤侵蚀的天然屏障,而且这种带状格局下的生物量往往高于点状或单一点状或散乱分布格局。Rey^[40]研究了坡底草本和灌丛等低矮植被对上坡径流泥沙的拦截作用,指出植被屏障盖度达到 20% 就可以有效拦截上坡的侵蚀泥沙。Martínez Raya 等^[41]在西班牙东南部坡地的山杏林间种植不同类型的植被条带,4a 的径流小区定位观测结果表明植被条带能有效减少径流和产沙,而且不同植被条带类型控

制水土流失的效果差异明显。

与国际上的研究相比,国内关于坡面覆被格局与水土流失过程关系的实验研究显得比较薄弱。苏敏等^[42]在黄土丘陵沟壑山坡地的小区内进行草灌带状间作试验和草粮带状轮作试验,评价了不同植被配置方式的水土保持效应,结果表明草灌带间作配置方式的水保性能要强于草粮带间作。游珍等^[43]在宁夏固原的自然荒草坡面小区内,从坡顶或坡底开始剪除一定长度的地表植被,形成不同的坡面植被分布,研究其对降雨侵蚀的影响,结果认为:在相同面积条件下,位于坡底的植被比位于坡顶的植被保水作用高 2.4 倍,保土作用高 2.8 倍。李勉等^[44]采用室内放水冲刷试验方法,研究了坡面不同草被覆盖度及空间配置下坡沟系统的侵蚀产沙变化过程及特征,结果表明坡面草被空间配置方式的产沙量大小顺序为坡上部>坡中部>坡下部。沈中原^[45]在宁夏固原的荒草坡地上,通过人工处理的方式,研究了草地聚集结构(坡顶、坡中、坡底)、带状结构、随机结构和网络结构等多种格局对水土流失效应的影响,结果表明五种植被格局坡面产沙量大小顺序为坡顶聚焦>坡底聚焦>坡中聚焦>带状格局>随机格局,产沙量大小顺序为带状格局>坡中聚焦>坡顶聚焦>随机格局>坡底聚焦。徐海燕等^[46]基于安塞试验站的坡面小区实验,研究坡耕地与草地不同配置方式的侵蚀产沙特征,所考虑的土地利用组合方式为上坡是谷子,下坡是不同类型的草本或撂荒地,结果表明谷子-撂荒地配置方式的减沙效应最好。朱冰冰等^[18]以植被覆盖完整、均一分布的自然荒草坡为原状坡面,从坡顶向下剪除植被,形成不同覆盖度的小区,通过人工模拟降雨试验,研究草本植被覆盖度对坡面降雨径流侵蚀的影响,并确定临界植被覆盖度为 60%—80%。在整个坡面上,傅伯杰等在黄土丘陵区研究了不同土地利用结构对土壤水分分布的影响^[4],并通过¹³⁷Cs 示踪量化了不同土地利用组合的土壤侵蚀强度差异,结果表明坡中部位林地和草地结构能够抑制土壤侵蚀,坡面土壤侵蚀量受土地利用类型分布和坡位共同影响^[47]。可以看出,国内关于覆被格局对水土流失作用的实测研究大都集中在不同农作物的种植方式以及不同植被的人工规则组合对土壤侵蚀的影响,且多以定性或半定量分析为主,缺少对自然坡面覆被格局-水土流失过程关系定量化的机理研究。

分析以上国内外相关进展可以看出,覆被格局影响水土流失的关键是坡面径流泥沙源汇区的连通性和空间分布^[7,28,33]。植被斑块、枯落物、碎石和地表坑洼作为地表物质流的截留、阻碍功能单元,阻滞产流产沙,是径流和泥沙的主要汇区域,而植被斑块间的裸露地表则是径流和泥沙的源区域^[31,48]。源汇区的连通性与降雨-径流-侵蚀过程密切相关,该连通性以地表土壤颗粒的剥离和沿地表的移动为目标过程,以地表水文连接性为基础,这与以生物过程为对象的景观连接性存在明显区别^[31]。高强度的降雨、陡峭的地形以及粗糙度低的裸露土壤等有利于增强水文连接性,而较强的径流、泥沙源区的连通性和坡面与沟道系统的有效连接有助于侵蚀产沙和泥沙输送^[31,48]。反之,汇单元在空间的相互连通及其控制区域与坡底沟道的连通则制约着坡面泥沙向沟道的输送,可以有效减少坡面侵蚀的发生和出口输沙量^[31,48]。

对于源汇区的空间配置对水土流失的影响,可得到如下一般性规律:1)抑制侵蚀功能强的“汇”单元越靠近坡底,越有利于阻止泥沙的输出。当以阻止泥沙输出为目的时,应尽可能使抑制侵蚀功能强的单元靠近坡底分布^[17,29,37,40];2)“源”越破碎,越不利于侵蚀产沙,“源”连通性越强,侵蚀产沙越容易。当以防止坡面侵蚀产沙为目的时,应尽量采取分散径流、泥沙“源”以降低其连通性的配置格局^[30,36];3)泥沙“源”距离出口越近,泥沙越容易输出,与出口直接连通的“源”单元越多,坡面泥沙输出量越大^[31,48];4)某单元接受上坡径流供给越多,且在下坡路径上遇到的阻碍越少,则该点泥沙越容易到达出口,对水土流失的贡献越大^[31,48]。

3 耦合覆被格局与水土流失的手段与方法

为定量表征覆被格局对水土流失的影响,建立两者的耦合关系,目前的主要研究思路是:在对覆被格局进行准确描述基础上,建立耦合水土流失过程的覆被格局指数和采用耦合格局信息的径流与侵蚀模型。

3.1 覆被制图

准确提取地表覆被信息,对覆被格局进行精确描述,获取高分辨率的覆被分布图是研究覆被格局对水土流失影响的重要前提。目前的坡面尺度覆被制图方法主要有调查法^[30]、照相法^[27,49-50]和遥感影

像法^[17]。

人工调查方法工作量大,得到的覆被信息比较粗略,难以得到准确的覆被分布图。照相法采用支架或气球悬吊的方法将高分辨率相机固定在离地面一定高度(一般小于 10 m)对坡面进行拍照,每张照片覆盖的范围可达到几十平方米,大大节省了工作量,而且分辨率一般为几厘米,要远高于传统的航拍方法。照片在 GIS 平台上进行处理后得到覆被分布图,可以精确获得坡面各栅格单元的覆被类型和覆盖度等重要信息,从而对覆被空间分布结构进行准确描述。高分辨率的遥感影像是开展大面积覆被制图工作的有效途径。Bartly 等^[17]利用 Quickbird 卫星影像资料(分辨率为 2.4 m²)对澳大利亚北部半干旱区面积为 11930,2031 m² 和 2861 m² 的 3 个坡面进行覆被制图和格局分析。

3.2 耦合水土流失过程的格局指数

景观格局指数是描述覆被空间分布格局的有效途径,是表达景观格局-生态过程关系的重要工具。随着景观生态学理论和空间信息获取与分析方法的发展,发展出众多的景观指数研究覆被格局与土壤侵蚀过程的关系,并基于景观指数与土壤侵蚀过程变量关系的统计分析,探讨土壤侵蚀对格局的响应。常用的格局指数包括空间和非空间指数,主要从图形几何或空间拓扑的角度描述覆被类型比例配置及其镶嵌的空间结构、分布以及统计特征。刘宇等^[51]阐述了 FRAGSTATS 3.3 软件计算的边界/斑块密度、形状、连接性、多样性等 4 个方面 12 个常用的景观指数在景观格局-土壤侵蚀关系研究中的意义,分析了指数应用的局限性和原因,指出景观数据属性、景观指数本身性质和土壤侵蚀过程的复杂性使得常规景观指数与土壤侵蚀表征变量间存在不确定性。景观指数变化的土壤侵蚀意义不明确,多种景观指数在解释土壤侵蚀状况时会相互矛盾。以上局限性使得难以通过常规景观指数来指示土壤侵蚀特征,而缺乏对土壤侵蚀过程机理的考虑是常规景观指数在土壤侵蚀研究中存在不足的主要原因。因此,构建面向土壤侵蚀过程的格局指数将覆被空间组织结构与水土流失过程联系起来并建立定量关系显得尤为必要。

土壤侵蚀过程包括原位土壤颗粒的剥离(产沙过程)和泥沙通过输送和沉积过程实现的再分配过程。裸地等径流、泥沙产生区在水流路径和泥沙输送通道方向上的连通性对土壤侵蚀过程发挥着重要的控制作用,而植被等覆被类型则对径流、泥沙起着重要的阻滞作用。鉴于源汇区连通性在覆被格局影响土壤侵蚀过程中的关键作用,许多学者通过对水沙从源向汇的输移通道空间连通性的描述,尝试建立面向水土流失过程的格局指数来研究覆被格局-水土流失过程关系,将覆被格局特征与水土流失过程定量联系起来,增强指数对土壤侵蚀过程的表征能力^[48,51-52]。Jaeger^[53]采用描述径流、泥沙“源”的裸露斑块分离度指数量化植被分布格局对产流、侵蚀能力的影响。植被斑块发挥着拦截上坡来水来沙的功能,为了将植被分布格局与水土流失过程有效耦合,Imeson 和 Prinsen^[52]认为植被-裸地镶嵌格局可以指示水土流失源汇区域的幅度、空间分布和连通性,确立了空隙度、裸地斑块破碎度、植被斑块上坡坡长和裸地斑块连通度 4 种格局指数量化表述植被的空间分布状况。该序列指标量化了裸地或植被斑块即径流泥沙源汇区的分布范围和连通性,用来表征水土流失格局和过程。

Ludwig 等^[48]提出了基于水土流失过程描述植被斑块空间分布的方向性渗透指数(DLI),该指数通过径流和泥沙的源、汇之间的欧氏距离来描述小区/坡面整体的物质滞留能力。DLI 指数反映了植被斑块间裸露区域的粒度和连接性,对植被斑块的空间排列方式和形状变化反应敏感,能较好地地区分具有不同水土流失状况的覆被格局^[48]。Bautista 等^[30]在西班牙东南部(地中海半干旱区)的坡面径流小区试验研究表明,除极端暴雨情况外,径流量与 DLI 指数具有较好的线性相关性,而产沙量与 DLI 呈指数函数关系,DLI 指数可以较好地表征小区的水土流失状况。但是,DLI 指数忽略了植被类型之间的差别,将植被斑块完全视为物质的汇,不能正确反映多种植被类型镶嵌格局下的物质流失,而且 DLI 指数对栅格单元数量敏感,没有考虑栅格到出口的距离对坡地径流和泥沙的贡献。

Mayor 等^[31]在坡面小区观测试验的基础上,发展了综合考虑植被空间分布和地形影响的汇流路径长度指数(Flowlength)。该指数通过植被斑块之间、地形洼地之间以及植被斑块与地形洼地之间水流路径长度的平

均值来定量反映径流路径之间的连通性^[31]。小区监测数据证实,Flowlength 指数能够区分具有相似覆盖度的不同植被格局的连通性差异程度,指数随裸地斑块的粒度增加而增加,与产流和产沙量间均呈较好的线性相关性^[31]。Flowlength 指数体现了径流、泥沙沿地表的运移过程和植被、地形洼地的阻滞功能,但将植被对径流、泥沙的阻滞视为完全拦截。事实上,植被斑块本身的特征(类型、盖度等)决定了其拦截效率,更多时候径流、泥沙会以一定的比例通过植被斑块。此外,Flowlength 指数仅仅反映裸露区域之间的连通程度,没有考虑裸露区域的面积大小。

针对以上 DLI 指数和 Flowlength 指数的不足,刘宇^[54]在 DLI 指数中引入反应栅格内斑块的土壤保持功能及其与出口距离的权重系数,在 Flowlength 指数中为每个栅格单元引入反映覆被类型水土保持能力、坡度和植被覆盖度的权重系数,更真实地反映了不同植被类型对径流、泥沙的阻滞作用,建立改进的 DLI 和 Flowlength 指数,利用在黄土高原羊圈沟小流域开展的小区观测试验对指数的适用性进行了验证,并模拟分析了不同坡面覆被空间配置格局的土壤侵蚀效应。

3.3 耦合格局信息的模型模拟

模型模拟是定量研究水土流失过程的重要手段。以往的坡面土壤侵蚀模型如 RUSLE/USLE^[55]和 WEPP^[56]等大部分都是基于单一的土地利用类型,缺少对不同土地覆被格局水土流失效应的模拟研究。采取适当的方法,将坡面覆被格局信息融入到土壤侵蚀模型中,充分反映由于生物及非生物因素引起的植被以及土壤属性空间分布结构对径流泥沙等水文过程的影响,加强模型对土地覆被的表征,将会有效提高模型的预测精度,捕捉格局变化导致的水土流失效应变化,揭示水土流失对覆被格局变化的内在响应机理。这是耦合覆被格局与水土流失的重要手段,也是土壤侵蚀模拟的前沿方向,国际上已经开始了此方面的相关研究。

Muller 等^[57]以运动波坡面流模型和 Smith 入渗模型为基础,根据实测结果采用统计学、地统计学和随机方法对模型中植被覆盖度、土壤入渗率和导水率等参数的非均匀分布和空间连接性特征进行定量表征,通过模型参数的空间分布反映覆被格局对水土流失的影响。模型采用的参数分布结果反映了坡面覆被格局的内在连接性特征,能对坡面径流量和坡面产流的空间分布状况进行较好的模拟,但模型结构比较复杂,需要较多点上的资料来构建模型参数的分布模型。

Arnau-Rosalén 等^[27]将西班牙地中海半干旱景观的两个南北向对比坡面的地表覆被图划分成规则的栅格单元并明确各单元的覆被类型,利用微型小区的人工模拟降雨试验得到每种覆被类型的产流规律。在此基础上,采用 Horton 模型计算每个栅格单元的入渗和产流量,并在整个坡面上进行连续的分布式模拟,得到地表径流的空间分布,结果表明:由于坡面中部存在高覆盖度的草本和裸露岩石碎片,形成径流吸收区,阻碍了径流路径在整个坡面的连续性,使得径流在上坡和下坡位汇流集中;南坡裸地、嵌入地中的岩石碎片、结皮等覆被类型具有较好的水文连通性,使得南坡产流区比例和产流量要高于北坡。该研究表明,将地表覆被制图与径流小区试验有机结合,并利用经验性模型对坡面产流进行分布式模拟,是研究坡面覆被格局对径流、侵蚀影响的简单有效手段。

Boer 和 Puigdefábregas^[32]在 100 m×100 m 的假定坡面上,设定植被的平均盖度、标准差和自相关长度等指标,根据非条件高斯模拟得到坡面上植被盖度的空间分布,并将具有相同平均盖度但均匀分布的坡面作为对照,采用基于过程的空间分布式模型 LISEM 对次降雨事件下坡面的径流和产沙过程进行模拟,结果表明坡面植被覆盖和土壤属性的空间分布结构化特征对水土流失具有重要影响。在模拟过程中,为建立植被和土壤参数的协同关系,假定一些重要参数如曼宁系数、土壤孔隙度、饱和导水率等与植被覆盖度呈简单的线性关系,而且仅仅考虑植被盖度的空间分布,没有考虑不同植被类型之间的差异性。

Frot 和 van Wesemael^[58]利用基于专家的空间分布式模型 STREAM 对西班牙半干旱区 3 个不同覆被格局草地坡面的产流空间分布和出口径流量进行模拟。该模型根据植被和裸岩两者覆盖度的不同组合划分不同等级的生态水文响应单元,对坡面进行栅格单元划分并确定其水文响应单元类型,对每个栅格单元建立径流和入渗之间的平衡方程,再根据 DEM 进行汇流计算得到出口径流量。每一类水文响应单元的稳渗率和初损值根

据研究区的相关实验结果,采用专家分析和模型率定的方法确定。STREAM 模型反映了不同水文响应单元的植被覆盖度和土壤入渗特性的空间差异,对坡面水文非均质性能较好地描述,模拟结果与实测值吻合较好。但模型没有考虑不同植被类型的水文性质差异,而且模型地域性很强,即使属于同一气候带且土壤质地相似的区域,模型也需要重新校正和检验后才能应用^[59]。

分析以上相关进展可以看出,目前耦合坡面覆被格局与水土流失的模型均采用分布式模拟的方式,对产流和产沙过程的描述既有经验模型,也有物理过程模型,而对覆被格局影响的表征主要是通过模型中描述植被以及土壤属性参数的空间分布特征和不同水文响应单元的连通性来实现,水文响应单元也主要是根据覆被特征划分。以上这种隐式表达覆被格局影响的模拟方法要得到比较准确的模拟结果,对模型参数和支撑数据的要求较高。如果能将反映覆被格局的参数直接嵌入到模型中,可以将覆被格局信息与模型更加简单地耦合起来,对于研究覆被格局与水土流失过程关系具有重要意义。

4 问题与展望

针对干旱半干旱区坡面覆被格局与水土流失关系,国内外学者以斑块尺度上植被的产流产沙特征观测为基础,重点分析了植被类型、植被的垂直结构和形态特征的影响;基于实验观测研究了坡面上不同覆被类型、裸地-植被斑块镶嵌格局和植被条带格局的水土流失规律,探讨了坡面植被空间分布格局和径流泥沙源汇区的连通性对水土流失的影响;为表征覆被格局的影响,以坡面的精确覆被制图为基础,通过基于水土流失过程的覆被格局指数和耦合覆被格局信息的径流与侵蚀模型来定量研究覆被格局的水土流失效应。本文对需要进一步研究的热点问题和未来的发展趋势总结如下:

(1) 覆被格局的动态变化

植被生长的季节动态变化和年际间变化会伴随着植被形态特征及其分布格局的改变,对水文响应有重要影响。另一方面,在干旱半干旱区,降雨和地形等因素的综合作用会使坡面植被斑块等水土流失汇功能单元的强度发生变化,甚至转化成源,具有动态性^[60]。因此,无论是从植被格局的分布特征还是从它对水土流失的功能来看,坡面覆被格局都存在一定的动态变化规律。以往的研究大多从静态的角度去分析覆被格局对水土流失过程的控制作用,较少在长期监测基础上以动态系统的观点研究格局的变化特征及其对水土流失造成的影响。

(2) 覆被格局与水土流失过程的相互作用

覆被格局影响水土流失过程,而径流泥沙产生可以改变土壤特性及微地理环境,进而反作用于植被生长、更新、演替及植被分布,引起覆被格局变化。覆被格局与水土流失过程构成一个相互作用和相互影响的反馈调节系统。以往的研究主要集中在植被对水土流失的控制上,而关于水土流失对植被及其分布格局影响的研究较少,两者之间的相互作用关系需要加强研究。

(3) 尺度问题

景观格局对水土流失的作用具有尺度依赖性。在不同尺度上,景观格局与水土流失过程相互作用的主要影响因素不同,在斑块尺度上主要是植被特性和土壤属性,在坡面尺度上主要是覆被分布格局和地形因子,在流域尺度上更为复杂,主要有植被、土壤分布和土地利用方式以及地形、气象和人类活动干扰等。本文所综述的仅是坡面尺度上的相关研究工作。从小区、坡面尺度到流域或区域尺度,水土流失有着既相互关联又有明显区别的生物物理控制过程,使得各尺度间具有连续性,但由于径流的非连续性以及地表的异质性等复杂因素影响,小区、坡面的观测结果很难直接上推至流域尺度。因此,需要系统理解植被与径流泥沙之间的联系与反馈机制及其随尺度变化的规律性,明确不同尺度上水土流失过程的关键影响因子和驱动因素,发展尺度上推方法。

(4) 覆被格局与水土流失的耦合模型

基于水土流失过程的覆被格局指数与耦合格局信息的水土流失模型是定量分析覆被格局与水土流失关系的有效手段,这两方面的研究刚刚起步,是未来的重要发展趋势。构建过程意义明确且简单实用的格局指

数,将覆被格局与地理-水文过程联系起来,这是景观格局-土壤侵蚀相互作用研究在方法上的需求。对模型而言,应以分布式水文模型为基础,将覆被格局分布及各覆被类型参数耦合到模型中,将覆被格局的动态信息与产流产沙过程相结合,加强对格局与径流泥沙反馈系统的耦合,建立真正意义上的覆被格局-水土流失过程耦合模型。

References:

- [1] Leng S Y, Song C Q. Review of land surface geographical process study and prospects in China. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(6): 600-606.
- [2] Fu B J, Zhao W W, Chen L D. Progress and perspective of geographical-ecological processes. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(11): 1123-1131.
- [3] Pimentel D, Harvey C, Resosudarmo P, Sinclair K, Kurz D, McNair M, Crist S, Shpritz L, Fitton L, Saffouri R, Blair R. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 1995, 267(5201): 1117-1123.
- [4] Fu B J, Chen L D, Qiu Y, Wang J, Meng Q H. *Land Use Structure and Ecological Process in the Hilly Area of Loess Plateau, China*. Beijing: The Commercial Press, 2002.
- [5] Xu X L, Ma K M, Fu B J, Liu X C, Huang Y, Qi J. Research review of the relationship between vegetation and soil loss. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 3137-3143.
- [6] Tongway D J, Valentin C, Seghier J. *Banded Vegetation Patterning in Arid and Semiarid Environments: Ecological Processes and Consequences for Management*. New York: Springer, 2001.
- [7] Boix-Fayos C, Martínez-Mena M, Arnau-Rosalén E, Calvo-Cases A, Castillo V, Albaladejo J. Measuring soil erosion by field plots: understanding the sources of variation. *Earth-Science Reviews*, 2006, 78(3/4): 267-285.
- [8] Gallego Fernández J B, Rosario García Mora M, Novo F G. Vegetation dynamics of Mediterranean shrublands in former cultural landscape at Grazalema Mountains, South Spain. *Plant Ecology*, 2004, 172(1): 83-94.
- [9] García-Estringana P, Alonso-Blázquez N, Marques M J, Bienes R, Alegre J. Direct and indirect effects of Mediterranean vegetation on runoff and soil loss. *European Journal of Soil Science*, 2010, 61(2): 174-185.
- [10] Zhang Z Q, Wang S P, Sun G, Xie B Y. Runoff and sediment yield response to vegetation change at multiple scales: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7): 2356-2364.
- [11] Ludwig J A, Wilcox B P, Breshears D D, Tongway D J, Imeson A C. Vegetation patches and runoff-erosion as interacting ecohydrological processes in semiarid landscapes. *Ecology*, 2005, 86(2): 288-297.
- [12] Casermeiro M A, Molina J A, de la Cruz Caravaca M T, Hernando Costa J, Hernando Massanet M I, Moreno P S. Influence of scrubs on runoff and sediment loss in soils of Mediterranean climate. *Catena*, 2004, 57(1): 91-107.
- [13] Sun J J, Yu D S, Shi X Z, Gu Z J, Zhang W T, Yang H. Comparison of between LAI and VFC in relationship with soil erosion in the red soil hilly region of south China. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(6): 1060-1066.
- [14] Zhang G H, Liang Y M. A summary of impact of vegetation coverage on soil and water conservation benefit. *Research of Soil and Water Conservation*, 1996, 3(2): 104-110.
- [15] Vásquez-Méndez R, Ventura-Ramos E, Oleschko K, Hernández-Sandoval L, Parrot J F, Nearing M A. Soil erosion and runoff in different vegetation patches from semiarid Central Mexico. *Catena*, 2010, 80(3): 162-169.
- [16] Moreno-de las Heras M, Merino-Martín L, Nicolau J M. Effect of vegetation cover on the hydrology of reclaimed mining soils under Mediterranean-Continental climate. *Catena*, 2009, 77(1): 39-47.
- [17] Bartley R, Corfield J P, Abbott B N, Hawdon A A, Wilkinson S N, Nelson B. Impacts of improved grazing land management on sediment yields, Part I: hillslope processes. *Journal of Hydrology*, 2010, 389(3/4): 237-248.
- [18] Zhu B B, Li Z B, Li P, You Z. Effect of grass coverage on sediment yield of rain on slope. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(3): 401-407.
- [19] Jiao J Y, Wang W Z, Li J. Effective cover rate of woodland and grassland for soil and water conservation. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 608-612.
- [20] Morgan R P C. Vegetative-based technologies for erosion control // Skokes A, Spanos I, Norris J E, Cammeraat E, eds. *Eco- and Ground Bio-Engineering: The use of Vegetation to Improve Slope Stability*. Springer, 2007: 265-272.
- [21] Cai Q G, Chen H. The effect of vegetation cover on reduction of rainfall erosion // Chen Y Z, ed. *The Source of the Coarse Sediment in the Middle Yellow River and the Mechanism of Soil and Sediment Production*. Beijing: Meteorology Press, 1989.
- [22] He S X, Li X Y, Mo F, Zhou B, Gao G L. The water conservation study of typical forest ecosystems in the forest transect of eastern China. *Acta*

- Ecologica Sinica, 2011, 31(12): 3285-3295.
- [23] Thurow T L, Blackburn W H, Taylor C A Jr. Hydrologic characteristics of vegetation types as affected by livestock grazing systems, Edwards Plateau, Texas. *Journal of Range Management*, 1986, 39(6): 505-509.
- [24] Gyssels G, Posen J, Nachtergaele J, Govers G. The impact of sowing density of small grains on rill and ephemeral gully erosion in concentrated flow zones. *Soil and Tillage Research*, 2002, 64(3/4): 189-201.
- [25] Gyssels G, Poesen J. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(4): 371-384.
- [26] Li Y. *Vegetation Root and Soil Anti-Scourability in Loess Plateau*. Beijing: Science Press, 1995.
- [27] Arnau-Rosalén E, Calvo-Cases A, Boix-Fayos C, Lavee H, Sarah P. Analysis of soil surface component patterns affecting runoff generation: an example of methods applied to Mediterranean hillslopes in Alicante (Spain). *Geomorphology*, 2008, 101(4): 595-606.
- [28] Puigdefábregas J. The role of vegetation patterns in structuring runoff and sediment fluxes in drylands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30(2): 133-147.
- [29] Bartley R, Roth C H, Ludwig J, McJannet D, Liedloff A, Corfield J, Hawdon A, Abbott B. Runoff and erosion from Australia's tropical semi-arid rangelands: influence of ground cover for differing space and time scales. *Hydrological Processes*, 2006, 20(15): 3317-3333.
- [30] Bautista S, Mayor Á G, Bourakhouadar J, Bellot J. Plant spatial pattern predicts hillslope runoff and erosion in a semiarid Mediterranean landscape. *Ecosystems*, 2007, 10(6): 987-998.
- [31] Mayor Á G, Bautista S, Small E E, Dixon M, Bellot J. Measurement of the connectivity of runoff source areas as determined by vegetation pattern and topography: a tool for assessing potential water and soil losses in drylands. *Water Resources Research*, 2008, 44: W10423, doi:10.1029/2007WR006367.
- [32] Boer M, Puigdefábregas J. Effects of spatially structured vegetation patterns on hillslope erosion in a semiarid Mediterranean environment: a simulation study. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30(2): 149-167.
- [33] Boix-Fayos C, Martínez-Mena M, Calvo-Cases A, Arnau-Rosalén E, Albaladejo J, Castillo V. Causes and underlying processes of measurement variability in field erosion plots in Mediterranean conditions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32(1): 85-101.
- [34] Reid K D, Wilcox B P, Breshears D D, MacDonald L. Runoff and erosion in a Piñon-Juniper woodland: influence of vegetation patches. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(6): 1869-1879.
- [35] Shachak M, Sachs M, Moshe I. Ecosystem management of desertified shrublands in Israel. *Ecosystems*, 1998, 1(5): 475-483.
- [36] Ludwig J A, Bartley R, Hawdon A A, Abott B N, McJannet D. Patch configuration non-linearly affects sediment loss across scales in a grazed catchment in north-east Australia. *Ecosystems*, 2007, 10(5): 839-845.
- [37] Gumiere S J, Bissonnais Y L, Raclot D, Cheiron B. Vegetated filter effects on sedimentological connectivity of agricultural catchments in erosion modelling: a review. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(1): 3-19.
- [38] Ludwig J A, Tongway D J, Marsden S G. Stripes, strands or stipples: modelling the influence of three landscape banding patterns on resource capture and productivity in semi-arid woodlands, Australia. *Catena*, 1999, 37(1/2): 257-273.
- [39] Valentín C, d'Herbès J M, Poesen J. Soil and water components of banded vegetation patterns. *Catena*, 1999, 37(1/2): 1-24.
- [40] Rey F. Effectiveness of vegetation barriers for marly sediment trapping. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2004, 29(9): 1161-1169.
- [41] Martínez Raya A, Durán Zuazo V H, Francia Martínez J R. Soil erosion and runoff response to plant-cover strips on semiarid slopes (SE Spain). *Land Degradation and Development*, 2006, 17(1): 1-11.
- [42] Su M, Lu Z F, Zhang X C, Li G X. The appraisal and analysis on benefits of water and soil conservation under the different planting pattern in loess hilly area. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1990, 10(4): 46-52.
- [43] You Z, Li Z B, Jiang Q F. Study on the effect of vegetation patterns on the slope on the rainfall erosion. *Journal of Sediment Research*, 2005, (6): 40-43.
- [44] Li M, Yao W Y, Chen J N, Ding W F, Yang J F, Li L, Yang C X. Impact of different grass coverages on the sediment yield process in the slope-gully system. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(5): 725-732.
- [45] Shen Z Y. Study on the Effect of Vegetation Slope Pattern on Soil and Water Loss [D]. Shaanxi Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006.
- [46] Xu H Y, Zhao W W, Zhu H F, Zhu J. Characteristics of soil loss under different land use combination of sloping farmland and grassland in the hilly-gully region of Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(3): 35-41.
- [47] Fu B J, Wang Y F, Lu Y H, He C S, Chen L D, Song C J. The effects of land-use combinations on soil erosion: a case study in the Loess Plateau of China. *Progress in Physical Geography*, 2009, 33(6): 793-804.
- [48] Ludwig J A, Eager R W, Bastin G N, Chewings V H, Liedloff A C. A leakiness index for assessing landscape function using remote sensing. *Landscape Ecology*, 2002, 17(2): 157-171.

- [49] Lesschen J P, Cammeraat L H, Kooijman A M, van Wesemael B. Development of spatial heterogeneity in vegetation and soil properties after land abandonment in a semi-arid ecosystem. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(11): 2082-2092.
- [50] Ruiz Sinoga J D, Martinez Murillo J F. Hydrological response of abandoned agricultural soils along a climatological gradient on metamorphic parent material in southern Spain. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(15): 2047-2056.
- [51] Liu Y, Lü Y H, Fu B J. Implication and limitation of landscape metrics in delineating relationship between landscape pattern and soil erosion. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(1): 267-275.
- [52] Imeson A C, Prinsen H A M. Vegetation patterns as biological indicators for identifying runoff and sediment source and sink areas for semi-arid landscapes in Spain. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2004, 104(2): 333-342.
- [53] Jaeger J A G. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology*, 2000, 15(2): 115-130.
- [54] Liu Y. Effect of Landscape Pattern Dynamics on Soil Erosion [D]. Beijing: The Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [55] Renard G R, Foster G R, Weesies G A. Prediction rainfall erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). USDA Agricultural Handbook, No. 703, 1997.
- [56] Flanagan D C, Gilley J E, Franti T G. Water Erosion Prediction Project (WEPP): development history, model capabilities, and future enhancements. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2007, 50(5): 1603-1612.
- [57] Mueller E N, Wainwright J, Parsons A J. Impact of connectivity on the modeling of overland flow within semiarid shrubland environments. *Water Resources Research*, 2007, 43: W09412, doi:10.1029/2006WR005006.
- [58] Frot E, van Wesemael B. Predicting runoff from semi-arid hillslopes as source areas for water harvesting in the Sierra de Gador, southeast Spain. *Catena*, 2009, 79(1): 83-92.
- [59] Evrard O, Cerdan O, van Wesemael B, Cauvet M, Le Bissionnais Y, Raclot D, Vandaele K, Andrieux P, Bielders C. Reliability of an expert-based runoff and erosion model: application of STREAM to different environments. *Catena*, 2009, 78(2): 129-141.
- [60] Wainwright J, Parsons A J, Schlesinger W H, Abrahams A D. Hydrology-vegetation interactions in areas of discontinuous flow on a semi-arid bajada, Southern New Mexico. *Journal of Arid Environments*, 2002, 51(3): 319-338.

参考文献:

- [1] 冷疏影, 宋长青. 陆地表层系统地理过程研究回顾与展望. *地球科学进展*, 2005, 20(6): 600-606.
- [2] 傅伯杰, 赵文武, 陈利顶. 地理-生态过程研究的进展与展望. *地理学报*, 2006, 61(11): 1123-1131.
- [4] 傅伯杰, 陈利顶, 邱扬, 王军, 孟庆华. 黄土丘陵沟壑区土地利用结构与生态过程. 北京: 商务印书馆, 2002.
- [5] 徐宪立, 马克明, 傅伯杰, 刘宪春, 黄勇, 祁建. 植被与水土流失关系研究进展. *生态学报*, 2006, 26(9): 3137-3143.
- [10] 张志强, 王盛萍, 孙阁, 谢宝元. 流域径流泥沙对多尺度植被变化响应研究进展. *生态学报*, 2006, 26(7): 2356-2364.
- [13] 孙佳佳, 于东升, 史学正, 顾祝军, 张文太, 杨浩. 植被叶面积指数与覆盖度定量表征红壤区土壤侵蚀关系的对比研究. *土壤学报*, 2010, 47(6): 1060-1066.
- [14] 张光辉, 梁一民. 植被盖度对水土保持功效影响的研究综述. *水土保持研究*, 1996, 3(2): 104-110.
- [18] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 游珍. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究. *土壤学报*, 2010, 47(3): 401-407.
- [19] 焦菊英, 王万中, 李靖. 黄土高原林草水土保持有效盖度分析. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 608-612.
- [21] 蔡强国, 陈浩. 植被覆盖对降雨溅蚀的影响 // 陈永宗. 黄河粗泥沙来源及侵蚀产沙机理研究文集. 北京: 气象出版社, 1989: 41-47.
- [22] 贺淑霞, 李叙勇, 莫菲, 周彬, 高广磊. 中国东部森林样带典型森林水源涵养功能. *生态学报*, 2011, 31(12): 3285-3295.
- [26] 李勇. 黄土高原植物根系与土壤抗冲性. 北京: 科学出版社, 1995.
- [42] 苏敏, 卢宗凡, 张兴昌, 李够霞. 黄土丘陵区不同种植方式水保效益的分析评价. *水土保持通报*, 1990, 10(4): 46-52.
- [43] 游珍, 李占斌, 蒋庆丰. 坡面植被分布对降雨侵蚀的影响研究. *泥沙研究*, 2005, (6): 40-43.
- [44] 李勉, 姚文艺, 陈江南, 丁文峰, 杨剑锋, 李莉, 杨春霞. 坡面草被覆盖对坡沟侵蚀产沙过程的影响. *地理学报*, 2005, 60(5): 725-732.
- [45] 沈中原. 坡面植被格局对水土流失影响的实验研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [46] 徐海燕, 赵文武, 朱恒峰, 朱婧. 黄土丘陵沟壑区坡耕地与草地不同配置方式的侵蚀产沙特征. *中国水土保持科学*, 2009, 7(3): 35-41.
- [51] 刘宇, 吕一河, 傅伯杰. 景观格局-土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性. *生态学报*, 2011, 31(1): 267-275.
- [54] 刘宇. 景观格局变化的土壤侵蚀效应研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.1 January, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Integrating ecological civilization into social-economic development WANG Rusong (1)
- The effect of land cover pattern on hillslope soil and water loss in the arid and semi-arid region: a review
..... GAO Guangyao, FU Bojie, LÜ Yihe, et al (12)
- The status and trend on the urban tree canopy research JIA Baoquan, WANG Cheng, QIU Erfa, et al (23)
- Bioindicators and Biomonitoring in Environmental Quality Assessment
..... Bernd Markert, WANG Mei'e, Simone Wünschmann, et al (33)
- Electron transfer capacities of dissolved organic matter and its ecological effects ... BI Ran, ZHOU Shungui, YUAN Tian, et al (45)

Autecology & Fundamentals

- Antioxidative responses of *Abies fabri* seedlings to litter addition and temperature elevation
..... YANG Yang, YANG Yan, WANG Genxu, et al (53)
- Effects of seed soaking with different concentrations of 5-aminolevulinic acid on the germination of tomato (*Solanum lycopersicum*)
seeds under NaCl stress ZHAO Yanyan, HU Xiaohui, ZOU Zhirong, et al (62)
- Influence of magnesium deficiency on chlorophyll fluorescence characteristic in leaves of Newhall navel orange
..... LING Lili, PENG Liangzhi, WANG Nanqi, et al (71)
- Leaf traits of 66 herbaceous species in Songnen grassland in Northeast China
..... SONG Yantao, ZHOU Daowei, WANG Ping, et al (79)
- Effects of nectar secondary compounds on pollination of co-flowering species in a natural community
..... ZHAO Guangyin, LI Jianjun, GAO Jie (89)
- The continuous life-table of *Leptocybe invasa* ZHU Fangli, QIU Baoli, REN Shunxiang (97)

Population, Community and Ecosystem

- Dominant climatic factors of *Quercus mongolica* geographical distribution and their thresholds
..... YIN Xiaojie, ZHOU Guangsheng, SUI Xinghua, et al (103)
- Fruit diet, Selectivity and Seed dispersal of Hatinh langur (*Trachypithecus francoisi hatinhensis*)
..... Nguyen Haiha, BAI Bing, LI Ning, et al (110)
- The distribution of living coccolithophore in East China Sea in autumn, 2010 JIN Shaofei, SUN Jun, LIU Zhiliang (120)
- The association of OPRK1 gene SNP with sika deer (*Cervus nippon*) diurnal behavior traits
..... LÜ Shenjin, YANG Yan, WEI Wanhong (132)
- Preliminary study on bird composition and diversity in Poyang Lake watershed during non-breeding period
..... SHAO Mingqin, ZENG Binbin, XU Xianzhu, et al (140)
- Coexistence mechanism of two species passerines in man-made nest boxes LI Le, ZHANG Lei, YIN Jiangxia, et al (150)
- Dynamics on soil faunal community during the decomposition of mixed eucalypt and alder litters
..... LI Yanhong, YANG Wanqin, LUO Chengde, et al (159)
- RS/GIS-based integrated evaluation of the ecosystem services of the Three Gorges Reservoir area (Chongqing section)
..... LI Yuechen, LIU Chunxia, MIN Jie, et al (168)

Landscape, Regional and Global Ecology

- The distribution of soil organic carbon as affected by landforms in a small watershed of gully region of the Loess Plateau
..... LI Linhai, GAO Erhu, MENG Meng, et al (179)
- Effects of coastal geographical characteristics on the abundance of submerged aquatic vegetation
..... WU Mingli, LI Xuyong, CHEN Nianlai (188)
- Analysis of soil physical properties under different vegetation types in the alluvial fan area of Manas River watershed
..... CAO Guodong, CHEN Jiehua, XIA Jun, et al (195)

Resource and Industrial Ecology

- Effects of farming on wetland soil seed banks in the Sanjing Plain and wetland restoration potential
..... WANG Guodong, Beth A Middleton, LÜ Xianguo, et al (205)

Effects of the microhabitats on the seedling emergence during the flooding disturbance	
.....	AN Hongyan, XU Hailiang, YE Mao, et al (214)
Analysis on the limiting factors to further improve yield of summer maize in Heilonggang River Valley	
.....	XU Lina, TAO Hongbin, HUANG Shoubing, et al (222)
Fungal diversity in rhizosphere soil of medicinal plants in Heilongjiang Province	
.....	MU Dongyan, LÜ Guozhong, SUN Xiaodong, et al (229)
Integrated assessment of mariculture ecosystem health in Sanggou Bay	FU Mingzhu, PU Xinming, WANG Zongling, et al (238)
Urban, Rural and Social Ecology	
The integrative assessment on ecological quality status of Luoyuan Bay based on ‘OOAO principle’	
.....	WU Haiyan, WU Yaojian, CHEN Keliang, et al (249)
Trophic state of seawater and ecological characteristics of phytoplankton in Sishili Bay	
.....	LI Bin, BAI Yanyan, XING Hongyan, et al (260)
Ecological footprint depth and size: new indicators for a 3D model	FANG Kai (267)
Landscape dynamics of medium- and small-sized cities in eastern and western China: a comparative study of pattern and driving forces	QI Yang, WU Jianguo, LI Jianlong, et al (275)
Research Notes	
Prediction of bacterial species richness in the South China Sea slope sediments	LI Tao, WANG Peng (286)
Spatial pattern of seedling regeneration of <i>Ulmus pumila</i> woodland in the Otindag Sandland	
.....	LIU Zhen, DONG Zhi, LI Hongli, et al (294)
Impacts on seed germination features of <i>Eupatorium adenophorum</i> from variable light stimulation and traditional dormancy-broken methods	JIANG Yong, LI Yanhong, WANG Wenjie, et al (302)
Opinions	
Discus for classification of plant association	XING Shaohua, YU Mengfan, YANG Lijuan, et al (310)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 1 期 (2013 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 1 (January, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元