

红壤丘陵区不同植被覆盖阈值小流域时空分布规律

陈佳¹, 李忠武^{2,3}, 方怒放⁴, 刘成⁵, 宁珂³, 王凌霞³

(1. 贵州大学 农学院, 贵阳 550025; 2. 湖南师范大学 资源与环境科学学院, 长沙 410081;

3. 湖南大学 环境科学与工程学院, 长沙 410082; 4. 西北农林科技大学

黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 5. 国际泥沙研究培训中心, 北京 100048)

摘要: 植被覆盖度是反映土壤侵蚀状况的关键指标, 实施植被恢复是防治小流域土壤侵蚀的重要措施, 但小流域植被覆盖度到底恢复到多少才能有效控制土壤侵蚀尚不清楚。基于土壤侵蚀治理的小流域植被覆盖度阈值效应, 对红壤丘陵区 33 157 个小流域 2000—2015 年植被覆盖度的时空变化进行了分析, 评估不同植被覆盖阈值小流域时空分布规律与格局, 以期精准制定小流域土壤侵蚀治理方式与对策。结果表明: (1) 2000—2015 年, 84% 的小流域植被覆盖呈不断增加趋势, 植被覆盖下降的小流域占 15%, 植被覆盖度基本不变的小流域仅有 1%; (2) 植被覆盖小于 40% (低阈值带) 的小流域占比小且相对稳定 (3%~7%), 说明大规模人工治理小流域土壤侵蚀的局面已扭转, 但耕地依然是重点关注的对象; (3) 植被覆盖位于 40%~80% (过渡带) 的小流域占比一直最高 (超过 83%), 应采取以“自然恢复为主, 人工修复为辅”的治理方式, 重点关注土地利用结构和植被结构的优化配置; (4) 植被覆盖大于 80% (高阈值带) 的小流域占比从 2010 年前的 1%~2% 上升到 2015 年的 14%, 可见具有自我修复植被覆盖条件的小流域显著增加, 实施自然恢复 (如封禁) 是高阈值带小流域的优先选择。

关键词: 植被覆盖度; 阈值效应; 土壤侵蚀; 小流域; 红壤丘陵区

中图分类号: S157.1; S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)02-0186-07

Spatiotemporal Patterns of Small Watersheds with Different Vegetation Coverage Thresholds in Red Soil Hilly Region

CHEN Jia¹, LI Zhongwu^{2,3}, FANG Nufang⁴, LIU Cheng⁵, NING Ke³, WANG Lingxia³

(1. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. College of Resources and

Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China; 3. College of Environmental

Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 4. State Key Laboratory of Soil

Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 5. International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation, Beijing 100048, China)

Abstract: Vegetation coverage is a key indicator reflecting soil erosion status. Implementing vegetation restoration is an important measure to control soil erosion in small watersheds. However, it is not clear how much vegetation coverage can be restored in small watersheds to effectively control soil erosion. Based on the threshold effect of vegetation coverage in small watersheds in soil erosion control, we analyzed the spatiotemporal changes of vegetation coverage in 33 157 small watersheds in the red soil hilly area from 2000 to 2015, and evaluated the spatiotemporal distribution patterns of small watersheds with different vegetation coverage thresholds in order to precisely formulate erosion control methods and countermeasures in small watersheds. The results show that: (1) from 2000 to 2015, the vegetation coverage of 84% of the small watersheds showed an increasing trend, vegetation coverage in 15% of the small watersheds had decreased, and vegeta-

tion coverage in only 1% of the small watersheds did not change; (2) small watersheds with vegetation coverage less than 40% (low threshold zone) accounted for small portion of the total watersheds and relatively stable (3%~7%), indicating that the situation of artificial control of soil erosion in small watersheds had been reversed, but cultivated land was still the focus of erosion control; (3) the proportion of small watersheds with vegetation cover at 40%~80% (transition zone) had been the highest (more than 83%), and the control method of ‘natural restoration as the main, artificial management as the supplement’ should be adopted, focusing on the optimal allocation of land use structure; (4) the proportion of small watersheds with vegetation cover greater than 80% (high threshold zone) increased from 1%~2% before 2010 to 14% in 2015. It showed that the small watersheds with natural restoration vegetation coverage conditions had increased significantly. The implementation of natural restoration (such as enclosure) is a preferred selection for small watersheds with high thresholds.

Keywords: vegetation coverage; threshold effect; soil erosion; small watershed; red soil hilly area

小流域是侵蚀产流产沙的独立单元,也是土壤侵蚀治理的重要对象^[1-2]。实施植被恢复工程,提高植被覆盖是控制小流域土壤侵蚀的有效措施^[3-4]。我国自 20 世纪 80 年代开展水土流失治理以来,已累计治理小流域 92 万 km²,其中林草措施占比近 80%^[5-6]。大量研究表明,随着植被覆盖度的增加,在植被地上冠层、地表凋落层、地下根系的综合作用下,土壤抗蚀性和土壤入渗率均显著增强,小流域土壤保持与水源涵养功能明显提升^[7-10]。例如,杨旺鑫等^[11]研究发现丹江口 38 条小流域经过 3 a 的侵蚀治理,植被覆盖面积增加了 451.88 km²,相应的土壤侵蚀面积减少了 339.24 km²;宋月君等^[12]研究发现赣南塘背小流域经过 40 a 的侵蚀治理,植被覆盖度从最初的 23% 增加到 87%,与此同时土壤侵蚀面积与程度显著下降。可见,植被覆盖度是反映和影响小流域土壤侵蚀状况的关键指标。

就小流域水土流失治理而言,土壤侵蚀与植被覆盖度之间存在阈值效应^[13-14],当植被覆盖度低于某一阈值时,土壤侵蚀随植被覆盖度的增加急剧减小;当植被覆盖度大于某一阈值时,土壤侵蚀随植被覆盖度的增加基本不发生变化^[15-19]。最近,Chen 等^[20]以红壤丘陵区 70 个典型小流域为对象,运用 Meta 分析法,从水土流失治理角度,将小流域植被覆盖阈值分为 3 个带: <40% 的低阈值带、40%~80% 的过渡带和 >80% 的高阈值带,提出不同植被阈值带适宜采用不同的治理方式。因此,基于治理成本角度考虑,植被覆盖度并不总是越高越好,小流域植被覆盖位于不同的阈值其土壤侵蚀的治理策略也应不同,但目前相关研究仍不充分。

红壤丘陵区是仅次于黄土高原的严重土壤侵蚀区^[21],自 1983 年实施小流域水土流失综合治理、天然林保护和退耕还林等工程以来,累计治理土壤侵蚀

19.82 万 km²,一方面使得部分区域植被覆盖显著增加,另一方面该区仍存在土壤侵蚀面积约 16 万 km²^[22-25]。那么,在当前“以自然恢复为主、人工修复为辅”的生态恢复思想下,红壤丘陵区经过几十年的生态恢复,到底哪些小流域还需人工治理? 哪些小流域可以自然恢复? 哪些小流域需要两者结合? 这些问题尚不清楚,亟需研究。

基于此,本文以红壤丘陵区为研究对象,将整个研究区划分为若干个小流域,计算 2000—2015 年每个小流域的植被覆盖度,分析小流域植被覆盖变化趋势和时空变化规律,基于植被覆盖阈值将整个研究区小流域划分至不同的阈值带,分析其时空分布格局并探讨不同小流域的土壤侵蚀治理对策,以期红壤丘陵区小流域植被恢复方式的确定和土壤侵蚀治理策略的选择提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究依据《全国水土保持区划》选择红壤丘陵区中的 3 个二级区(即江南山地丘陵区、浙闽山地丘陵区 and 南岭山地丘陵区)为研究区(107°49′—123°25′E, 21°22′—31°19′N),具有典型代表性^[26-27]。该区土地总面积 79.6 万 km²,约占我国国土总面积的 8.3% (图 1),属亚热带温暖湿润季风气候区,年均降水量超过 1 400 mm,约为全国平均值的两倍,其中超过 70% 的降水集中在 4—9 月;年均气温在 15~25℃,年均日照时数为 1 489~2 900 h;丰富的水热资源使得该区森林覆盖率达 52%,主要树种包括马尾松、香樟、杉木等;以中低山丘陵地貌为主,景观异质性高、坡耕地比重大;主要土壤类型为红壤,质黏、透水性差。该区人口总量约占全国的 35%,粮食产量约占全国的 30%,还是我国重要的经果业生产基地之一。

因此,在高强度的降雨和频繁的农业活动作用下,区域土壤水蚀分布范围广。

1.2 数据来源

(1) DEM 数据:由高分辨率(30 m×30 m)ASTER GDEM 产品加工生成,从地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)下载,坐标系为 WGS84。

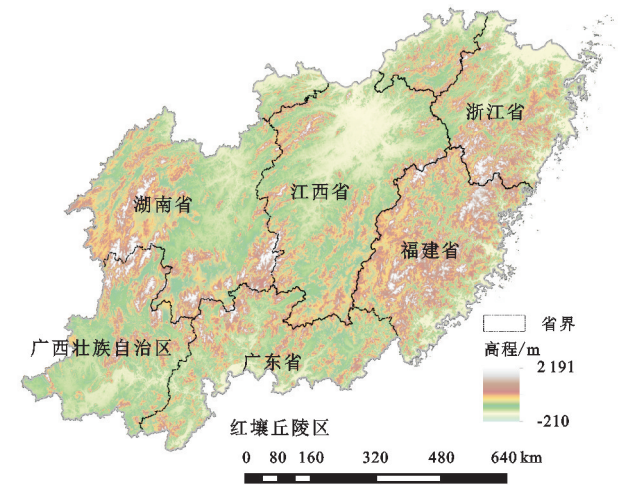


图 1 研究区位置示意图

(2) 植被覆盖:植被覆盖率通过归一化差异植被指数(NDVI)计算,2000—2015 年逐月 NDVI 数据从 MODIS 中分辨率(250 m×250 m)产品中提取,来源于美国地质调查中心(<https://modis.ornl.gov/documentation.html>)。

(3) 土地利用:2000—2015 年的土地利用数据(30 m×30 m)从资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/>)获取,分为林地、草地、耕地、水域、建设用地和裸地 6 大类。

1.3 研究方法

(1) 小流域划分:基于研究区 DEM 数据,依据《小流域划分及编码规范》(SL653-2013),运用 ArcGIS 水文分析功能,建立小流域划分模型,其面积主要控制在 0.1~50

km²,提取自动生成的小流域边界,再结合自然要素对软件生成的小流域边界进行人工筛选与修正。

(2) 小流域植被覆盖度计算:基于 NDVI 数据和像元二分模型^[28-29],采用植被覆盖度的计算公式为:
$$VFC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{vegetation} - NDVI_{soil})$$
(1)

式中:NDVI_{soil}和 NDVI_{vegetation} 分别代表裸土和纯植被像元的植被指数;NDVI 代表被求像元的植被指数;VFC 代表被求像元的植被覆盖度。利用公式(1)计算小流域内每个像元的植被覆盖度,在此基础上估算研究区每个小流域 2000—2015 年的平均植被覆盖度。

(3) 基于土壤侵蚀治理的小流域植被覆盖度阈值:根据本课题组前期已有研究成果,从小流域土壤侵蚀治理角度,将红壤丘陵区小流域植被覆盖划分为 3 个阈值带:低阈值带(<40%),平均植被土壤保持效率显著,达 423 t/(km²·a),亟需人工治理提高植被覆盖度;过渡带(40%~80%),平均植被土壤保持效率减至 113 t/(km²·a),适宜采用“自然恢复+人工治理”,重点关注土地利用结构的优化配置;高阈值带(>80%),植被土壤保持效率变化小且稳定[平均 27 t/(km²·a)],适用自然恢复方式^[30]。

2 结果与分析

2.1 红壤丘陵区小流域植被覆盖变化趋势

运用人机交互的方法,整个研究区可划分为 33 157 个小流域,根据面积大小分为 5 个等级,按占比大小依次为:10~30 km² 的小流域占比最高,达 57.78%,30~50 km² 的小流域占比 24.63%,>50 km² 的小流域占比 11.05%,3~10 km² 的小流域占比 5.67%,<3 km² 的小流域仅占 0.87%(表 1)。在 3~50 km² 的小流域占比共 88%,总体符合我国小流域综合治理的面积标准。

表 1 红壤丘陵区小流域划分结果

小流域	样本数/个	平均值	标准差	标准误	变异系数	流域总面积/km ²	比例/%
<3 km ²	3904	1.28	0.85	0.01	0.67	6925	0.87
3~10 km ²	5042	6.48	2.18	0.03	0.34	45133	5.67
10~30 km ²	19394	17.18	5.44	0.04	0.32	459929	57.78
30~50 km ²	3802	37.35	5.38	0.09	0.14	196055	24.63
>50 km ²	1015	62.76	13.66	0.43	0.22	87958	11.05
合计	33157	25.01	5.50	0.12	0.34	796000	100.00

基于 2000—2015 年的小流域植被覆盖度来分析其变化趋势(图 2),具体可分为 3 个时期:(1) 植被覆盖减少期(2000—2004 年),除 2002—2003 年有小幅增加外,植被覆盖总体呈不断减少的趋势;(2) 植被覆盖波动期(2004—2012 年),在 2006—2007 年植被

覆盖度表现为急剧减少,而 2007—2008 年又呈现大幅增加,年际波动显著,但从拟合方程看植被覆盖总体仍然呈现增大的趋势;(3) 植被覆盖增长期(2012—2015),期间 2012—2013 年增幅最大,从拟合方程看植被覆盖度的增幅要明显大于波动期。

2.2 红壤丘陵区小流域植被覆盖时空变化

以 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年 4 个年度为断点,通过计算小流域植被覆盖度差值,分析研究区小流域的植被覆盖度时空变化,共划分为 3 种变化类型:降低型(差值<0)、增长型(差值>0)和不变型(差值≈0)(图 3)。

总体来看,从 2000—2015 年,整个研究区小流域中属于植被覆盖增长型的占比达 84%,涉及国土面积约 670,884 km²,在 8 个省(自治区)均有分布,其中以湘西北和皖南地区最为集中;植被覆盖度基本不变的小流域仅占 1%,在研究区呈零星分布状;但仍有约 120 319 km²的小流域属于植被覆盖降低型,占比约 15%,主要分布在各省(自治区)的交界处,其中以西南部的广西壮族自治区分布比例最高(图 3—4)。具体来看,前五年(2000—2005 年)属于植被覆盖降低型的小流域占主导(54%),除皖南和鄂南地区分布较少外,其余各省(自治区)分布比例都较高,且以广东和广西的分布最广;属于增长型的占 44%,主要集中分布在浙江西北部、皖南地区、鄂南地区、湘西地区和鄱阳湖周边;属

于不变型的仅占 2%。中间五年(2005—2010 年),属增长型的占比达 69%,集中分布于湘中、赣南和粤东等地区;期间属于降低型的小流域主要分布在皖南、赣东北、浙西北、闽西北及湘、粤、桂三省交界处,占比近 29%;属于不变型的不足 2%。后五年(2010—2015 年)属于增长型的小流域占比进一步提高至 82%,占绝对主导;属于降低型的小流域比例进一步下降至 17%,在研究区的分布主要表现为零星状;而植被覆盖度基本不变的小流域仅占 1%。

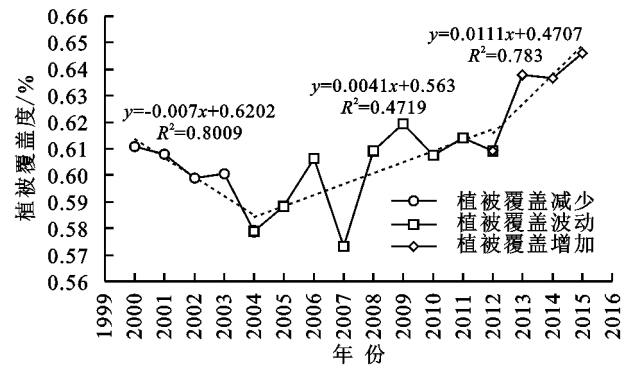


图2 红壤丘陵区 2000—2015 年小流域植被覆盖度变化趋势

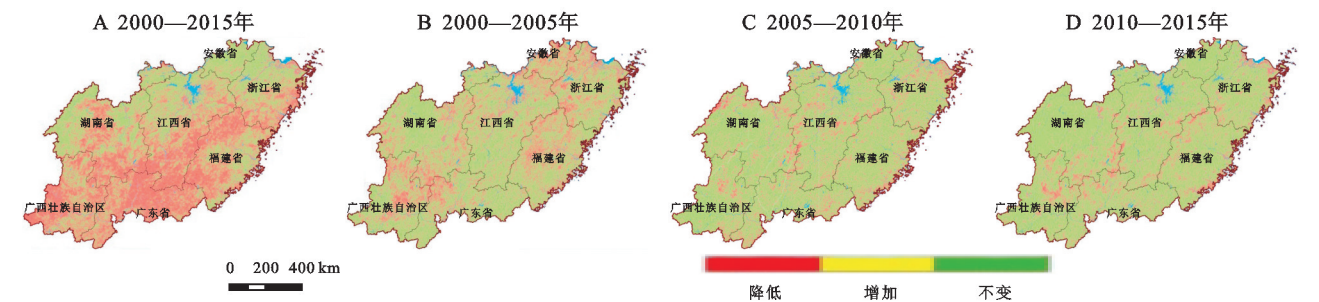


图3 红壤丘陵区 2000—2015 年小流域植被覆盖变化趋势分布图

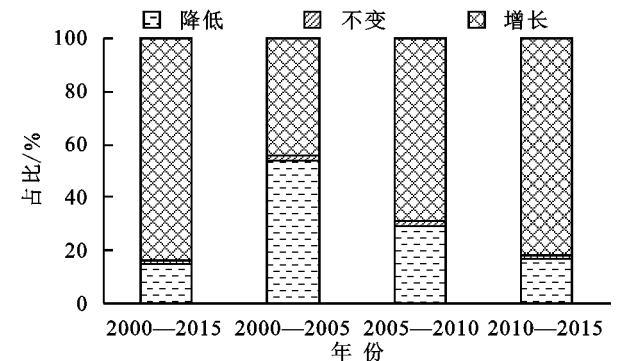


图4 红壤丘陵区 2000—2015 年不同植被覆盖变化类型小流域占比

2.3 不同植被覆盖阈值小流域时空分布特征

依据已有研究所得的植被覆盖阈值^[20],按植被覆盖度的大小将研究区的小流域划分到对应的阈值带中,具体如下:(1) 植被覆盖度<40%(低阈值带)的小流域占比较低,最高时为 7%(2010 年),最低时仅占 3%(2015 年),其所占比重总体呈波动式变化;(2) 植被覆盖位于 40%到 80%(过渡带)的小流域在

2000—2015 年期间一直占比最高,但比重总体呈逐步减少的趋势,其中最高时为 93%(2005 年),最低时占 83%(2015 年);(3) 植被覆盖>80%(高阈值带)小流域的比重在前 10 a 很低(1%~2%),但到 2015 年已增加至 14%,超过了低阈值(<40%)小流域的比重(图 5)。

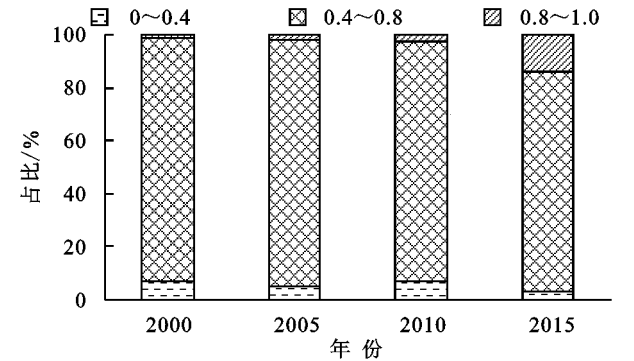


图5 红壤丘陵区 2000—2015 年不同植被覆盖阈值小流域占比变化

由图 6 可知,位于不同植被覆盖阈值带的小流域所

呈现的时空分布特征表现为:在 2000 年,低阈值小流域主要分布在浙东北、湘中南和鄱阳湖南部,而高阈值小流域总体呈零星分布,且相对集中在闽西北和粤北地区;到 2005 年,与 2000 年相比低阈值和高阈值小流域的分布区域略有向外扩展的趋势(如桂西地区),但总体分布格局变化不大;到 2010 年,与 2005 年相比江西、浙江两省的低阈值小流域空间分布变化不大,而湖南、广西两省的低阈值小流域呈现分布减少的趋势,同

时福建南部的高阈值小流域在逐步增多;至 2015 年,高阈值小流域的空间分布区域明显扩大,其中以福建省增加最为显著,而低阈值小流域相对集中在浙东北、湘江和赣江中下游等地区。总体上,2000—2015 年江西、湖南的低阈值小流域的空间分布比例明显降低,而福建、浙东南、粤中南及江西、安徽两省交界处高阈值小流域的分布比重不断增大。

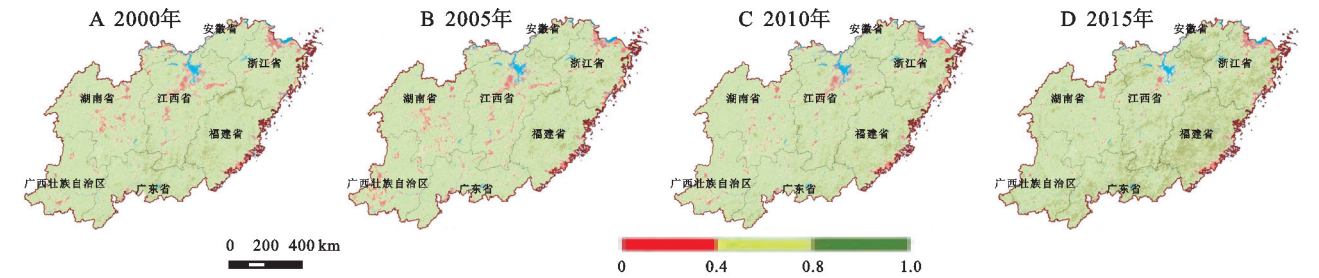


图 6 红壤丘陵区 2000—2015 年不同植被覆盖阈值小流域的空间分布格局

3 讨论

3.1 不同植被覆盖阈值小流域土地利用结构分析

为进一步了解不同植被覆盖阈值小流域的土地利用情况,运用 2000 年、2015 年的土地利用数据分析了耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 种土地利用类型的比例与结构变化情况(表 2)。总体上,无论是 2000 年还是 2015 年,低阈值带(0~40%)小流域的主导地类均为耕地,约占小流域总面积的一半;而过渡带和高阈值带小流域均以林地比重最大;2000—2015 年建设用地的比例有所增加,但草地、水域和未利用地总体变化不大。从低阈值带到高阈值带,小流域土地利用变化最为显著的是耕地和林地,其中耕地占比在逐渐减少,而林地比重在不断增大,因此低阈值带小流域中

的耕地依然是主要的水土流失源,也是未来需要重点治理的对象;在高阈值带小流域中,退耕还林工程、天然林保护工程、水土保持重点防治工程等一系列大规模生态恢复工程的实施是驱动耕地面积减少、林地面积大幅度增加的主要原因^[24]。在 2000—2015 年,红壤丘陵区退耕还林面积约为 2 053 km²,主要分布于湖南、福建、江西东部、浙江南部和广东东部等地区,累计土壤保持量增加 9.18 亿 t^[25-26]。此外,Wang 等^[27]研究认为红壤丘陵区水土保持工程投资的增加是控制土壤侵蚀最有效的方式,而农村人口向城市迁移是促使耕地面积减少和植被自然恢复的重要原因,因此土壤侵蚀防治政策不仅要注重技术,更要重视社会经济,经济增长如果能够为农村地区提供更多的正反馈,就能有效地控制土壤侵蚀。

表 2 2000 年、2015 年不同植被覆盖阈值小流域土地利用结构变化 %

时间	植被覆盖阈值	土地利用类型					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2000 年	低阈值带(0~40%)	53.00	34.50	6.25	4.71	1.29	0.25
	过渡带(40%~80%)	28.56	58.83	6.31	4.59	1.41	0.30
	高阈值带(>80%)	13.16	76.03	5.91	3.84	0.90	0.16
2015 年	低阈值带(0~40%)	49.62	36.57	6.00	3.88	3.84	0.09
	过渡带(40%~80%)	20.92	66.18	6.50	3.56	2.79	0.05
	高阈值带(>80%)	9.37	77.67	6.80	3.46	2.66	0.04

通过分析 2000 年和 2015 年低阈值带林地和草地总的比重发现,两个年度的林草覆盖比例均大于 40%,但是各个小流域的植被覆盖度却均小于 40%,这可能是由于林地和草地的质量不高且以稀疏林草地为主;再分析高阈值带的林、草地所占比重发现,两个年度的林草覆盖比重接近 80%,而各个小流域的

植被覆盖度却总体大于 80%,说明高阈值带小流域的植被质量高且各植被斑块林草覆盖率高,这应该是得益于良好的植被层次结构(如乔—灌—草),尤其是近地表植被层的保护作用^[31]。

3.2 不同植被覆盖阈值小流域土壤侵蚀治理对策探讨

“以自然恢复为主、人工修复为辅”是当前我国生

态恢复的指导思想,在植被覆盖条件总体改善的新背景下,部分小流域因植被覆盖度较高而适合采用自然恢复的方式,但也有少部分小流域土壤侵蚀严重、植被覆盖度低而必须采用人工治理的方式,此外还有大部分小流域植被覆盖度中等但植被结构或土地利用结构不佳则需要采取“人工治理+自然恢复”相结合的方式,因此在具体实践中要根据小流域实际植被覆盖情况作出合理选择。

我国南方红壤丘陵区水热资源丰富,经过近 40 a 的生态恢复,区域植被覆盖度明显提升,森林覆盖率达 52%,约为全国平均值的两倍^[27]。在 2000—2015 年期间,红壤丘陵区超过 84% 的小流域植被覆盖呈不断升高的趋势,其中植被覆盖小于 40% (低阈值带)的小流域占比最高仅为 7%,仅靠人工治理方式控制小流域土壤侵蚀的局面已总体扭转,虽然这部分小流域比重不大,但受植被覆盖度低、结构差等因素影响,这些小流域基本无法通过自我修复来恢复植被,因而人工治理势在必行,实施水土保持林草措施以尽快提高流域植被覆盖度^[32-34],同时修建梯田等工程措施以尽快控制水土流失^[35-36];植被覆盖在 40%~80% (过渡带)的小流域一直比重最高,这部分小流域适用于以自然恢复为主、人工治理为辅的治理策略,此时在景观尺度上要重视小流域土地利用结构的优化调整,构建坡面镶嵌植被斑块^[37],在植物群落上要关注植被层次结构的优化,建立多层次植被类型,增加草、灌等近地表植被覆盖^[31,38-40];植被覆盖大于 80% (高阈值带)的小流域在 2015 年时已增加至 14%,这部分小流域均可采用自然恢复方式(如封禁治理),无需投入大量人力物力,主要依靠自然修复能力恢复植被覆盖,必要时可以人工辅助管理,进而全面提高植被的水土保持服务功能^[37,41]。

4 结论

(1) 2000—2015 年期间,84% 的小流域植被覆盖度呈现不断增加趋势,植被覆盖度下降的小流域占 15%,植被覆盖度基本不变的小流域仅有 1%;

(2) 植被覆盖小于 40% (低阈值带)的小流域占比小且相对稳定(3%~7%),说明大规模人工治理小流域土壤侵蚀的局面已扭转,但低阈值带小流域中的耕地依然是主要的侵蚀源,也是未来需要重点治理的对象;

(3) 植被覆盖位于 40%~80% (过渡带)的小流域占比一直最高(超过 83%),应采取以“自然恢复为主,人工修复为辅”的治理方式,重点关注土地利用结构和植被结构的优化配置;

(4) 植被覆盖大于 80% (高阈值带)的小流域占

比从 2010 年前的 1%~2% 上升到 2015 年的 14%,可见具有自我修复植被覆盖条件的小流域显著增加,实施自然恢复(如封禁治理)是高阈值带小流域的优先选择。

参考文献:

- [1] 史志华,王玲,刘前进,等.土壤侵蚀:从综合治理到生态调控[J].中国科学院院刊,2018(2):198-205.
- [2] 黄萱.植被覆盖和降雨变化对流域水沙过程的影响机制:以堵河流域为例[D].武汉:华中农业大学,2019.
- [3] 朱显谟.黄土高原地区植被因素对于水土流失的影响[J].土壤学报,1960,8(2):110-120.
- [4] 唐克丽.中国水土保持[M].北京:科学出版社,2004.
- [5] 刘震.水土保持 60 年:成就、经验、发展对策[J].中国水土保持科学,2009,7(4):1-6.
- [6] 张洪江,张长印,赵永军,等.我国小流域综合治理面临的问题与对策[J].中国水土保持科学,2016,014(1):131-137.
- [7] 韦红波,李锐,杨勤科.我国植被水土保持功能研究进展[J].植物生态学报,2002,26(4):489-496.
- [8] 张灿,徐涵秋,张好,等.南方红壤典型水土流失区植被覆盖度变化及其生态效应评估:以福建省长汀县为例[J].自然资源学报,2015,30(6):917-928.
- [9] Deuchars S A, Townend J, Aitkenhead M J, et al. Changes in soil structure and hydraulic properties in regenerating rain forest [J]. Soil Use and Management, 1999,15(3):183-187.
- [10] Zuazo V H D, Pleguezuelo C R R. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2008,28(1):65-86.
- [11] 杨旺鑫,王莉,姜小三,等.丹江口库区及上游小流域水土流失治理成效评价[J].土壤通报,2015,46(1):210-216.
- [12] 宋月君,廖凯涛,杨洁,等.塘背河小流域植被覆盖时空动态变化及水保驱动分析[J].水资源与水工程学报,2017,028(5):24-31.
- [13] Huggett A J. The concept and utility of 'ecological thresholds' in biodiversity conservation[J]. Biological Conservation, 2005,124:301-310.
- [14] Liu J B, Gao G Y, Wang S, et al. The effects of vegetation on runoff and soil loss: Multidimensional structure analysis and scale characteristics [J]. Journal of Geographical Sciences, 2018,28(1):59-78.
- [15] 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[J]. Catena, 2009,77:39-47.
- [16] Jiang C, Liu J, Zhang H, et al. China's progress towards sustainable land degradation control: Insights from the northwest arid regions[J]. Ecological Engi-

- neering, 2019,127:75-87.
- [17] Jiang C, Zhang H, Wang X, et al. Challenging the land degradation in China's Loess Plateau: Benefits, limitations, sustainability, and adaptive strategies of soil and water conservation[J]. *Ecological Engineering*, 2019,127:135-150.
- [18] Gu Z J, Wu X X, Zhou F, et al. Analysis of time scale influences on water and soil conservation effects for trees on experimental plots using vegetation fractional coverage [J]. *Forest Science*, 2015,61(1):67-75.
- [19] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等.草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J].*土壤学报*,2010,47(3):401-407.
- [20] Chen J, Xiao H B, Li Z W, et al. Threshold effects of vegetation coverage on soil erosion control in small watersheds of the red soil hilly region in China [J]. *Ecological Engineering*, 2019,132:109-114.
- [21] 左长青.红壤坡地水土资源保育与调控[M].北京:科学出版社,2015.
- [22] 刘震.谈谈全国水土保持情况普查及成果运用[J].*中国水土保持*,2013(10):4-7.
- [23] 曹世雄.生态修复项目对自然与社会的影响[J].*中国人口·资源与环境*,2012,11(22):103-110.
- [24] Li Z W, Ning K, Chen J, et al. Soil and water conservation effects driven by the implementation of ecological restoration projects: Evidence from the red soil hilly region of China in the last three decades[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,260:121109.
- [25] Hu X Q, Li Z W, Chen J, et al. Carbon sequestration benefits of the grain for Green Program in the hilly red soil region of southern China. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021,9(2):271-278.
- [26] 胡晓倩,李忠武,陈佳,等.南方红壤丘陵区退耕还林还草工程水土保持效应评估[J].*水土保持学报*,2020,34(6):95-100.
- [27] Wang L, Yan H, Wang X W, et al. The potential for soil erosion control associated with socio-economic development in the hilly red soil region, southern China [J]. *Catena*, 2020,194:104678.
- [28] 张家政,李崇贵,王涛.黄土高原植被覆盖时空变化及原因[J].*水土保持研究*,2022,29(1):224-230,241.
- [29] 刘洋洋,任涵玉,章钊颖,等.中国草地覆盖度时空动态格局及其影响因素[J].*水土保持研究*,2022,29(2):221-230,242.
- [30] 陈佳.红壤丘陵区水土保持措施对水土流失的作用规律[D].北京:中国科学院大学,2020.
- [31] Chen J, Li Z W, Xiao H B, et al. Effects of land use and land cover on soil erosion control in southern China: A quantitative review. *Journal of Environmental Management*, 2021,282:111924.
- [32] Ma H, Wang Y Q, Yue H, et al. The threshold between natural recovery and the need for artificial restoration in degraded lands in Fujian Province, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185:8639-8648.
- [33] Sun W Y, Song X Y, Mu X M, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2015,209:87-99.
- [34] Zhang Q Y, Shao M A, Jia X X. Understory vegetation and drought effects on soil aggregate stability and aggregate-associated carbon on the loess plateau in China [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2018, 82(1):106-114.
- [35] Gong L, Liu G H, Wang M, et al. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon in China: A meta-analysis [J]. *Chinese Geographical Science*, 2017, 27:188-200.
- [36] Chen D, Wei W, Chen L D. Effects of terracing practices on water erosion control in China: A meta-analysis [J]. *Earth-Science Review*, 2017,173:109-121.
- [37] Feng T, Wei W, Chen L D, et al. Assessment of the impact of different vegetation patterns on soil erosion processes on semiarid loess slopes [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018,43(9):1860-1870.
- [38] Calder I R. Canopy processes: Implications for transpiration, interception and splash induced erosion, ultimately for forest management and water resources[J]. *Plant Ecological*, 2001,153(1/2):203-214.
- [39] Labrière N, Locatelli B, Laumonier Y, et al. Soil erosion in the humid tropics: A systematic quantitative review[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015,203:127-139.
- [40] 张琪琳,王占礼,王栋栋,等.黄土高原草地植被对土壤侵蚀影响研究进展[J].*地球科学进展*,2017,32(10):1093-1101.
- [41] Huang Z G, Xiao Y, Yang F, et al. Analysis of the soil water balance for large-scale reforestation with *Eucommia ulmoides* in the hilly red soil region of southern China [J]. *Regional Environmental Change*, 2016,16(5):1333-1343.