

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.029.

张蒙, 胡桂清, 张文太, 等. 长期植被覆盖对紫色土坡面减流减沙能力的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 164-172.

Zhang Meng, Hu Guiqing, Zhang Wentai, et al. Effect of Long-Term Vegetation Coverage on Runoff and Sediment Reducing Ability of Purple Soil Slope [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 164-172.

# 长期植被覆盖对紫色土坡面减流减沙能力的影响

张蒙<sup>1</sup>, 胡桂清<sup>1</sup>, 张文太<sup>1</sup>, 杨立荣<sup>1</sup>, 姜群力<sup>2</sup>, 王志刚<sup>3</sup>

(1.新疆农业大学 新疆土壤与植物生态过程自治区级重点实验室/资源与环境学院, 乌鲁木齐 830052;

2.赤水市水务局, 贵州 赤水 564707; 3.长江科学院赤水河生态系统野外科学观测研究站, 武汉 430010)

**摘要:** [目的] 研究长期林草植被覆盖小区减流减沙能力的变化速率, 为西南土石山区水土保持植被恢复提供科学依据。[方法] 2018—2021年在贵州省赤水市天台镇径流场观测了15°裸地、15°草地、15°林地、30°林地与30°草地5个径流小区的产流产沙、植被覆盖、土壤表层含水量数据, 用径流系数和含沙量的变化反映各小区减流减沙能力的变化。[结果] 5个小区减流减沙效益排序为30°草地>15°林地>30°林地>15°草地>裸地。其中, 30°草地小区植被覆盖度最高, 为92.8%, 其径流量和土壤侵蚀模数分别为2.43 mm和6.51 t/(km<sup>2</sup>·a)。裸地小区径流量最高, 为153.49 mm, 土壤侵蚀模数最高, 为1214.5 t/(km<sup>2</sup>·a); 15°草地小区径流系数降低速率最快, 为-0.292%/a, 其含沙量降低速率也最快, 为-14.6 g/(L·a)。植被覆盖度与径流量之间负相关关系极显著, 与含沙量负相关关系显著, 与土壤表层含水量呈极显著正相关关系。[结论] 高植被覆盖度有利于植被恢复、水源涵养和控制水土流失。对于水土流失相对严重的15°草地坡面, 其长期植被覆盖的水土保持效益更为明显。

**关键词:** 植被; 水土流失; 径流系数; 含沙量; 减流减沙效益

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0164-09

## Effect of Long-Term Vegetation Coverage on Runoff and Sediment Reducing Ability of Purple Soil Slope

Zhang Meng<sup>1</sup>, Hu Guiqing<sup>1</sup>, Zhang Wentai<sup>1</sup>, Yang Lirong<sup>1</sup>, Jiang Qunli<sup>2</sup>, Wang Zhigang<sup>3</sup>

(1. Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Processes, College of Resources and

Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Water Affairs Bureau,

Chishui, Guizhou 564707, China; 3. Hubei Key Laboratory of Water Resources and Ecological Environment

Science, Institute of Soil and Water Conservation, Yangtze River Academy of Sciences, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to investigate the changing rates of runoff and sediment reduction capacity for long-term forest and grass vegetation coverage plots, and to provide a scientific basis for vegetation restoration of soil and water conservation in southwest rocky mountain area of China. [Methods] From 2018 to 2021, the data of runoff and sediment yield, vegetation coverage as well as soil surface water content in the five runoff plots, i.e. 15° bare land, 15° grassland, 15° forest land, 30° forest land and 30° grassland, were observed in Tiantai Town, Chishui City, Guizhou Province. The changes of runoff coefficient and sediment concentration were used to reflect the changing rates of runoff and sediment reduction capacity in each plot. [Results] The order of flow and sediment reduction benefits in the five communities was 30° grassland>15° forest>30° forest>15° grassland>bare land. Among them, the

收稿日期: 2023-08-02

修回日期: 2023-10-12

资助项目: 山东省技术创新引导计划中央引导地方科技发展专项资金(YDZX2023010); 新疆土壤与植物生态过程重点实验室开放课题(XJKL202309); 国家自然科学基金项目(41761059)

第一作者: 张蒙(1999—), 女, 四川达州人, 硕士研究生, 研究方向: 水土保持与生态恢复。E-mail: 783739053@qq.com

通信作者: 张文太(1984—), 男, 山东冠县人, 教授, 博士, 主要从事雨水—土壤水综合利用研究。E-mail: zwt@xjau.edu.cn

王志刚(1981—), 男, 湖北枣阳人, 正高级工程师, 博士, 主要从事土壤侵蚀、土壤地理研究。E-mail: 371381624@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

vegetation coverage of the 30° grassland community was the highest, at 92.8%, with runoff and soil erosion modulus of 2.43 mm and 6.51 t/(km<sup>2</sup> · a), respectively. The bare land community had the highest runoff, at 153.49 mm, and the highest soil erosion modulus, at 1 214.5 t/(km<sup>2</sup> · a). The runoff coefficient of the 15° grassland community decreased the fastest at 0.292%/a, and its sediment content also decreased the fastest at -14.6 g/(L · a). There was a significant negative correlation between vegetation coverage and runoff, a significant negative correlation with sediment concentration, and a significant positive correlation with soil surface water content. [Conclusion] High vegetation coverage is beneficial for vegetation restoration, water conservation, and soil erosion control. For the 15° grassland slope with relatively severe soil erosion, the long-term vegetation coverage has a more significant effect on soil and water conservation.

**Keywords:** vegetation; soil erosion; runoff coefficient; sediment content; benefits of runoff and sediment reduction

西南土石山区包含紫色土区和喀斯特地区,是我国水土流失最为严重的地区之一<sup>[1]</sup>。贵州紫色土主要分布在遵义、习水等地海拔 450~1 900 m 的中山和丘陵中部地段,是西南土石山区水土流失分布面积最广、程度最为严重的区域。增加植被覆盖是控制水土流失的重要举措,在贵州省开展水土保持和植被恢复工作对于该省生态文明建设至关重要。

植被覆盖可抑制坡面径流、增强入渗、削弱雨滴动能<sup>[2]</sup>、保护土壤颗粒免受雨滴击溅<sup>[3]</sup>和径流冲刷<sup>[4]</sup>,以及降低土壤可蚀性。植被覆盖格局调节着径流和输沙量对降雨特征的响应<sup>[5]</sup>。不同类型的植被覆盖对坡面土壤抗溅蚀能力有不同的影响,相同降雨等级下,其产流产沙量也存在较大差异<sup>[6]</sup>。不同类型的降雨条件下,林地措施的减流率最高,灌木措施的减流率次之<sup>[7]</sup>。地表植被直接影响降雨的再分配过程,一定盖度的植被越是接近地面,其防蚀作用越明显。杨青等在喀斯特地区的研究表明坡面产沙量与植被覆盖度关系密切,植被覆盖度的增加能有效减少地表径流<sup>[8]</sup>。有关临界植被覆盖度的研究,刘纪根等认为盖度对坡面径流特征值的影响不明显,植被覆盖度达到 60%以上时减沙作用趋于稳定<sup>[9]</sup>。闫夏娇认为 60%~70%的植被覆盖度可作为植物措施控制水土流失的临界值<sup>[10]</sup>;吴光艳等研究表明植被盖度越高,土壤侵蚀模数越小<sup>[11]</sup>。有关植被覆盖度对水土流失影响的研究大多集中在黄土高原和南方红壤区,在西南紫色土区开展的长期植被覆盖对产流产沙影响的研究相对较少。

本研究以贵州省赤水市天台镇坡面径流场为研究区,以长期植被覆盖小区为研究对象,开展自然降雨观测试验,分析各小区植被覆盖度和土壤表层含水量的动态变化趋势,以及径流系数、含沙量与植被覆盖度之间的关系,旨在为贵州紫色土区水土保持植被修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区大石河小流域坡面径流场位于贵州省赤水市天台镇,地理位置为 28°31′56″N,105°49′10″E。监测点所在流域属长江流域赤水河水系大石河支流的上游,该区域为紫色砂页岩丹霞地貌,气候类型属中亚热带湿润季风气候,四季分明,日照时数少,雨量充沛,多年平均气温 18.0℃,降水丰富,年内分布不均,6—9 月降水量接近全年降水量的 70%,多年平均降水量 1 228.7 mm,多年平均日照时数 1 145.2 h,平均相对湿度 83%。

1.2 试验设计

观测站于 2017 年 6 月建成,2017 年 8 月投入运行,2018 年为观测的第 1 年。根据观测目的和要求布设了 12 个观测小区(图 1)。本研究分析了其中 5 个小区,即对照(15°裸地),15°草地和林地、30°草地和林地的观测数据。30°林地小区于 2018 年 12 月种植斑竹幼苗。15°草地人工种植黑麦草为一年生植被,每年 10—12 月为裸地状态;30°草地杂草定期刈割,植被覆盖度常年保持在 93%。小区宽度统一为 5 m,长度根据土地条件而变化,基本信息见表 1。

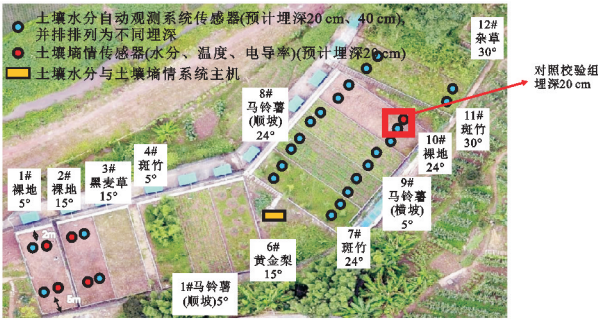


图 1 研究小区布置图

Fig. 1 Layout map of the study plots

表 1 监测小区基本信息

Table 1 Basic information of monitoring plots

小区 编号	坡度/ (°)	小区 面积/m <sup>2</sup>	生物 措施	植物 类型	植被 覆盖度/%
(2) 对照	15	13.8×5	无	裸地	5
(3) 15°草地	15	13.8×5	种草	黑麦草	63
(4) 15°林地	15	13.8×5	造林	斑竹	64
(11) 30°林地	30	18×5	造林	斑竹	69.8
(12) 30°草地	30	18×5	无	杂草	92.8

### 1.3 测定方法

本次研究采用的是监测站 5 个径流小区 2018—2021 年降雨、径流、泥沙等实测数据。

降雨量测定:试验区安装 HOBO 翻斗式小型自动气象站每月下载数据 1 次;J II 型虹吸式自记雨量计、人工雨量器每天早 8:00 观测。

产沙量测定:降雨时每产流 1 次人工取样 1 次,测量分流池、集流池径流深,搅拌均匀采集泥沙样,每个径流小区取样 2 个,取样完成后放水清洗干净分流池和集流池,将样品带回实验室进行分析测定。

土壤含水量测定:用 TDR 速测仪每月 1 日和 15 日在各小区选代表点位 0—20 cm 土层含水量,在选择点附近测量 3 个重复值。

植被覆盖度测定:植被监测采用数码相机对小区垂直拍摄,利用 Photoshop 软件的“选择”中的“色彩范围”来选取一定特征的像素,从而根据所选像素占支配总像素的比例计算照片区域内的植被覆盖度<sup>[12]</sup>,每月 1 日和 15 日观测郁闭度、植被盖度和地面盖度。

### 1.4 数据计算与处理

用 Excel 2016 对数据进行整理,在 Origin 2021 里进行基础数据绘图,选取 84 次侵蚀性降雨通过线性拟合绘出径流系数和含沙量的变化趋势线,选取每月数据绘出植被覆盖度和土壤含水量的变化趋势线,最后在 SPSS 26 中采用 Pearson 相关分析对植被覆盖度和各径流小区产流产沙的关系进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 降雨量与各径流小区植被覆盖度的变化特征

观测四年降雨量(图 2)得出年降雨量最大为 2018 年 1 615.3 mm,最小为 2019 年 1 245.3 mm。研究区降雨量充沛但分配不均,存在丰水期和枯水期。2018 年最大月降雨出现在 8 月,其余月份降雨量较为平均,整年降雨量偏高;2019 年全年降水主要集中在 4—10 月;2020 年春夏交接季降雨量逐步上升,在 7 月达到顶峰;2021 年降水主要集中在 8—11 月。丰水期为每年的夏秋季节,枯水期为冬春季。径流深总量 2021 年>2018 年>2020 年>2019 年,随降雨量月份变化而变化。2019 年降雨量总体偏少,径流深起伏不大。其中侵蚀性降雨主要集中在每年的丰水期 4—9 月,侵蚀性降雨量占该月总降雨量的 15%~92%,年降雨如表 2 所示,以 0.1~9.9 mm 为小雨,10.0~24.9 mm 为中雨,25.0~49.9 mm 为大雨,50.0~99.9 mm 为暴雨,100.0~249.9 mm 为大暴雨,将降雨日划分为 5 个等级,侵蚀性降雨总共 84 场,降雨量为中雨、大雨、暴雨和大暴雨,其中大雨和中雨产流场次最多,大暴雨产流场次最少。

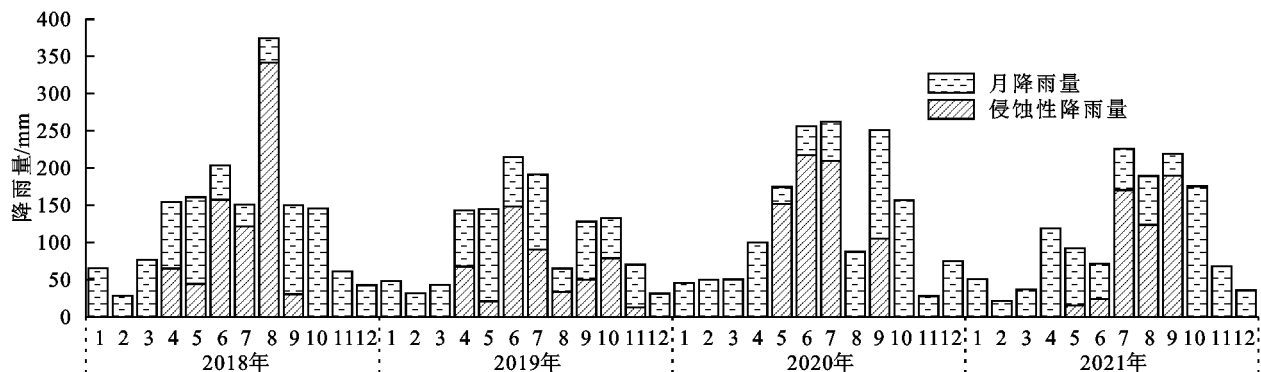


图 2 径流小区月降雨和侵蚀性降雨

Fig. 2 Monthly rainfall and erosive rainfall in runoff plots

对照小区植被覆盖度常年处于 5%,5 个小区年平均植被覆盖度顺序为:对照<15°草地<15°林地<30°林地<30°草地。由图 3 可看出 30°林地小区植被覆盖度波动较大,该小区 2018 年 4 月份整改土地到 11 月处于裸地状态,12 月种植斑竹幼苗,故植

被覆盖度波动较大;15°草地小区植被覆盖度波动也较大(图 3A),每年 6—11 月植被覆盖度呈断崖式降低,其原因为黑麦草 6 月枯萎直到 8 月人工干扰刈割,12 月重新播种,每年平均 5 个月处于裸地状态,故植被增量出现在 1—3 月生长期植被覆盖度增长变

化,4—6 月植被覆盖度稳定变化。15°林地小区植被覆盖度波动较小,2020 年 12 月竹叶枯黄凋落该月植被覆盖度下降;30°草地小区植被覆盖度波动较小生长趋势较稳定。从 4 a 覆盖度变化可看出,不同植被

生长趋势随四季变换而呈现不同的规律,30°林地覆盖度随年际变化上升,15°草地和 15°林地小区植被覆盖度呈下降趋势,30°草地自然杂草植被覆盖度平均值为 92.8%,其余 3 个小区平均值在 63%~69%。

表 2 小区年侵蚀降雨量

Table 2 Annual erosion rainfall of the runoff plots

年份	降雨 天数/d	侵蚀性 降雨场次	中雨 场次	中雨量/ mm	大雨 场次	大雨量/ mm	暴雨 场次	暴雨量/ mm	大暴雨 场次	大暴 雨量/mm
2018	205	25	7	134.3	13	456.4	4	244	—	—
2019	201	23	14	235.2	8	265.5	—	—	—	—
2020	177	23	9	176.3	11	373.0	3	214	—	—
2021	146	13	8	138.0	2	56.9	1	55	2	273.2

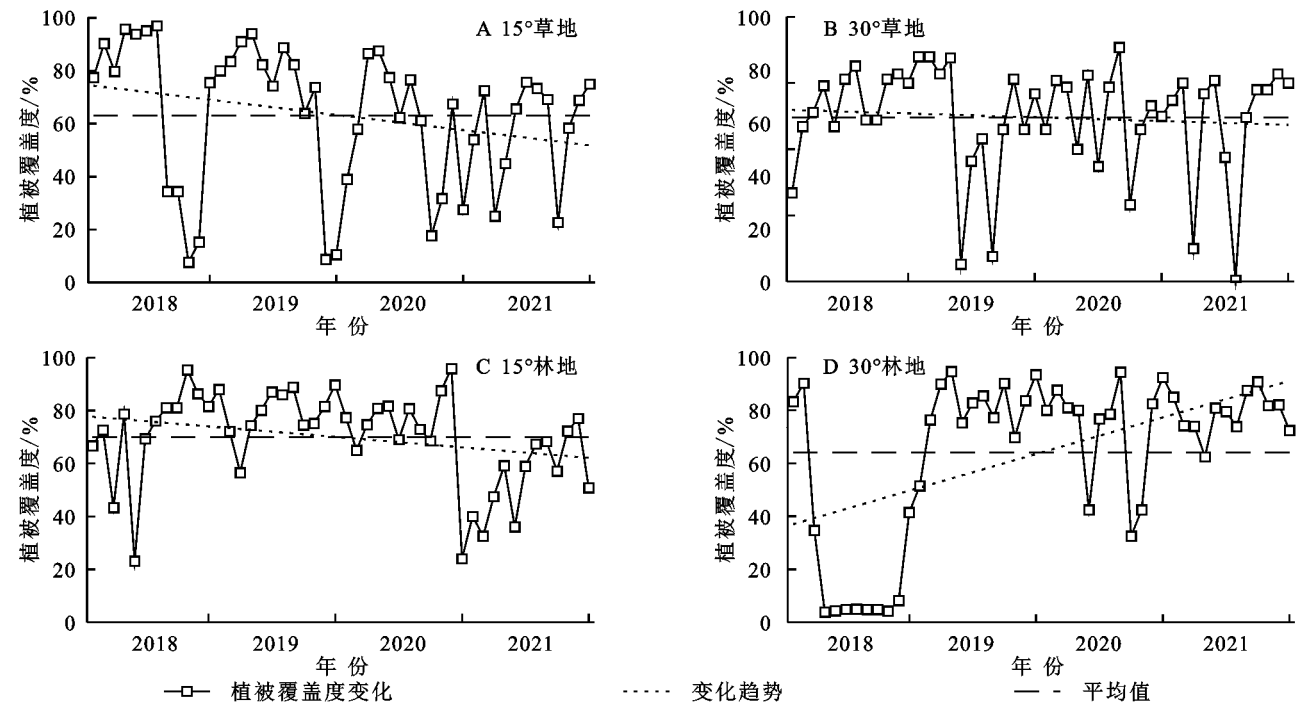


图 3 径流小区覆盖度年际变化

Fig. 3 Interannual variation of runoff plot coverage

2.2 径流小区坡面产流产沙特征

由图 4 可以看出,2018—2020 年小区径流量随着植被覆盖度的增加而降低,4 a 平均径流量大小为对照(153.49 mm)>15°草地(56.53 mm)>30°林地(25.8 mm)>15°林地(13.08 mm)>30°草地(2.43 mm),2021 年 15°草地和 30°林地径流量上升,该年降雨量较大,坡度缓的对照、15°林地小区和植被覆盖度高的 30°草地小区径流量随着坡度和植被覆盖度的变化而减少,而坡度较陡的 30°林地和 8 月割草后在丰水期呈现裸地状态的 15°草地小区径流量受坡度和植被覆盖度影响而增加。对照小区径流量始终为最大,说明植被覆盖对地表产流影响较大。结合植被覆盖度可看出,土壤侵蚀模数随着植被覆盖度的增加呈降低趋势,4 a 平均土壤侵蚀模数大小为对照

[1214.5 t/(km<sup>2</sup>·a)]>15°草地[296.91 t/(km<sup>2</sup>·a)]>30°林地[85.25 t/(km<sup>2</sup>·a)]>15°林地[13.46 t/(km<sup>2</sup>·a)]>30°草地[6.51 t/(km<sup>2</sup>·a)]。2018 年、2021 年对照小区土壤侵蚀模数分别为 2 025.25 t/(km<sup>2</sup>·a)和 2 461.59 t/(km<sup>2</sup>·a),2018 年 15°草地小区土壤侵蚀模数为 1 110.81 t/(km<sup>2</sup>·a),2020 年对照小区土壤侵蚀模数为 364.20 t/(km<sup>2</sup>·a),按照《土壤侵蚀分类分级标准 SL190-2007》均属于轻度侵蚀。

2.3 不同小区四年的径流系数和含沙量变化

选取 4 年 84 场侵蚀性降雨的累计天数,分析小区径流系数、含沙量的年际变化(图 5—6),径流系数指示有多大比例降雨量转变成了径流,能综合反映各小区地表要素对径流的影响。对照、15°草地和 15°林地小区径流系数呈下降趋势,年下降斜率分别为



$-0.036\ 5\%/a$ ,  $-0.292\%/a$  和  $-0.109\ 5\%/a$ ,  $30^\circ$  林地和  $30^\circ$  草地径流系数为上升趋势, 年上升斜率为  $0.036\ 5\%/a$  和  $0.018\ 25\%/a$ 。5 个小区径流系数在第 45 次(第 1 200 d 左右)侵蚀性降雨后呈上升趋势, 2020 年、2021 年侵蚀性降雨量大于前两年, 导致径流系数出现回弹。坡度较大的  $30^\circ$  林地和草地小区径流系数上升, 趋势线上升。 $30^\circ$  草地含沙量最大值出现在第 74 次(2021 年)侵蚀性降雨日, 2021 年  $30^\circ$  草地土壤侵蚀模数回弹, 导致含沙量回弹趋势线上升, 年上升斜率为  $1.423\ 5\ g/(L \cdot a)$ 。 $30^\circ$  草地小区

径流系数和含沙量变化趋势上升幅度较小且植被覆盖度常年较高。5 个小区含沙量年降低速率大小为:  $15^\circ$  草地  $[-14.6\ g/(L \cdot a)] > 30^\circ$  林地  $[-9.855\ g/(L \cdot a)] > 15^\circ$  林地  $[-2.153\ 5\ g/(L \cdot a)] > 30^\circ$  草地  $[1.423\ 5\ g/(L \cdot a)] > \text{对照}$   $[5.803\ 5\ g/(L \cdot a)]$ 。总体而言,  $15^\circ$  草地和  $15^\circ$  林地、 $30^\circ$  林地小区四年径流系数和含沙量变化均为下降趋势,  $30^\circ$  草地小区径流系数和含沙量均呈上升趋势但数值变化较小, 说明植被生长, 根系日渐发达, 土壤蓄水性能增加, 植被水源涵养作用得到发挥。

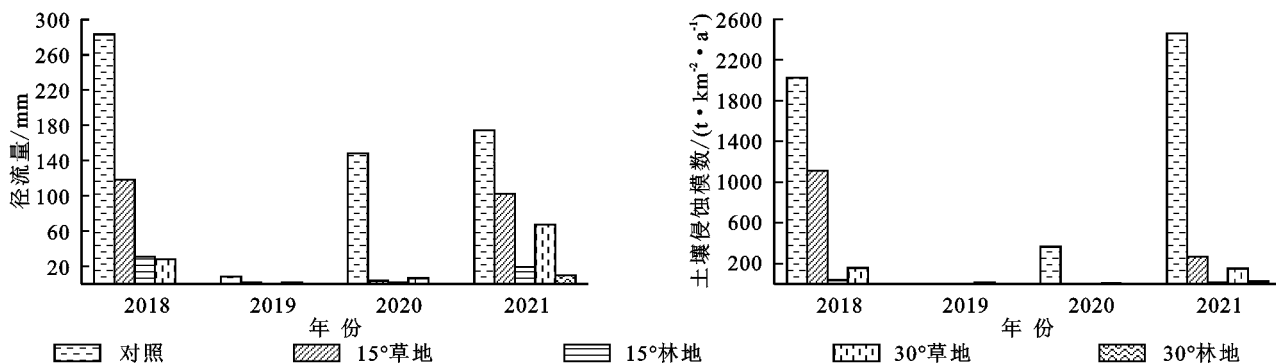


图4 径流小区径流量和土壤侵蚀模数

Fig. 4 Runoff and soil erosion modulus of runoff plots

2018—2021 年各小区月均土壤含水量变化特征如图 7 所示。5 个小区土壤含水量变化趋势相似, 主要受降雨的影响, 表现出夏季升高, 秋冬季节降低的趋势。除对照小区土壤含水量平均值低于  $40\%$ , 其余小区平均值均高于  $40\%$ 。 $15^\circ$  草地小区  $4\ a$  土壤含水量呈上升趋势且斜率最大 ( $11.315\%/a$ ), 其次是  $30^\circ$  草地小区 ( $4.015\%/a$ ), 其余小区皆呈下降趋势, 下降斜率最大的是对照小区 ( $-15.95\%/a$ ), 其次是  $15^\circ$  林地小区 ( $-5.84\%/a$ ), 下降斜率最缓慢的是  $30^\circ$  林地小区 ( $-4.745\%/a$ )。降雨是土壤水分的最主要来源, 5 个小区土壤平均含水量最小值出现在对照小区, 其余小区土壤平均含水量随着覆盖度的增加而增加,  $30^\circ$  草地土壤含水量平均值最高。

#### 2.4 降雨、植被与水土保持指标的相关性

相关性分析显示(表 3), 植被覆盖度与降雨量相关性不显著, 与土壤侵蚀模数和径流量呈极显著负相关 ( $p < 0.01$ ), 与含沙量呈显著负相关 ( $p < 0.01$ ), 与土壤含水量呈极显著正相关 ( $p < 0.01$ ); 径流量与含沙量和土壤侵蚀模数呈极显著正相关 ( $p < 0.01$ ), 与土壤含水量呈极显著负相关 ( $p < 0.01$ ); 土壤侵蚀模数与含沙量呈极显著正相关 ( $p < 0.01$ )。结果表明植被覆盖度的提高可以有效提高土壤含水量, 减少径流量和含沙量, 可通过植林种草相结合的植被措施增加地表覆盖度以减轻水土流失。

### 3 讨论

#### 3.1 不同植被类型的水土保持效益

本研究不同植被类型的水土保持效益与在黄土高原、喀斯特丘陵地区和紫色土等地区的研究结果不同<sup>[13-15]</sup>, 本研究  $30^\circ$  草地小区平均减流减沙效益优于林地小区。 $15^\circ$  坡度条件下, 林地小区减流减沙效益优于草地小区,  $30^\circ$  坡度条件下, 草地小区减流减沙效益优于林地小区, 其原因与种植或去除植被时人工扰动地表有关。 $15^\circ$  林地小区植被覆盖度高于草地小区, 且草地小区为人工黑麦草, 生长周期有限使得土地有小半年裸露, 减流减沙效果不佳;  $30^\circ$  草地小区植被覆盖度高于林地小区, 自然生长杂草根系较斑竹根系更密, 贴地面程度更高, 拦截径流和泥沙效果更强。先前有研究表明, 相同植被林地不同坡度的产流产沙量和减流减沙效益均不同<sup>[16]</sup>。本研究  $15^\circ$  林地和  $30^\circ$  林地植被均为斑竹, 与对照相比,  $15^\circ$  林地年均减流减沙分别为  $93.18\%$  和  $99.20\%$ ,  $30^\circ$  林地年均减流减沙分别为  $82.72\%$  和  $89.84\%$ , 两个小区年均减流减沙差异较大。坡面侵蚀过程中, 拦截径流和泥沙量受植被和坡度的影响, 植被相同的情况下, 坡度不同对其影响也不同<sup>[17]</sup>。在本研究区中, 植被自然生长的  $30^\circ$  草地小区, 保持常年植被覆盖度在  $93\%$ , 受人工扰动较少, 提高了表层土壤的抗蚀性<sup>[18]</sup>, 水土保持效益最好。

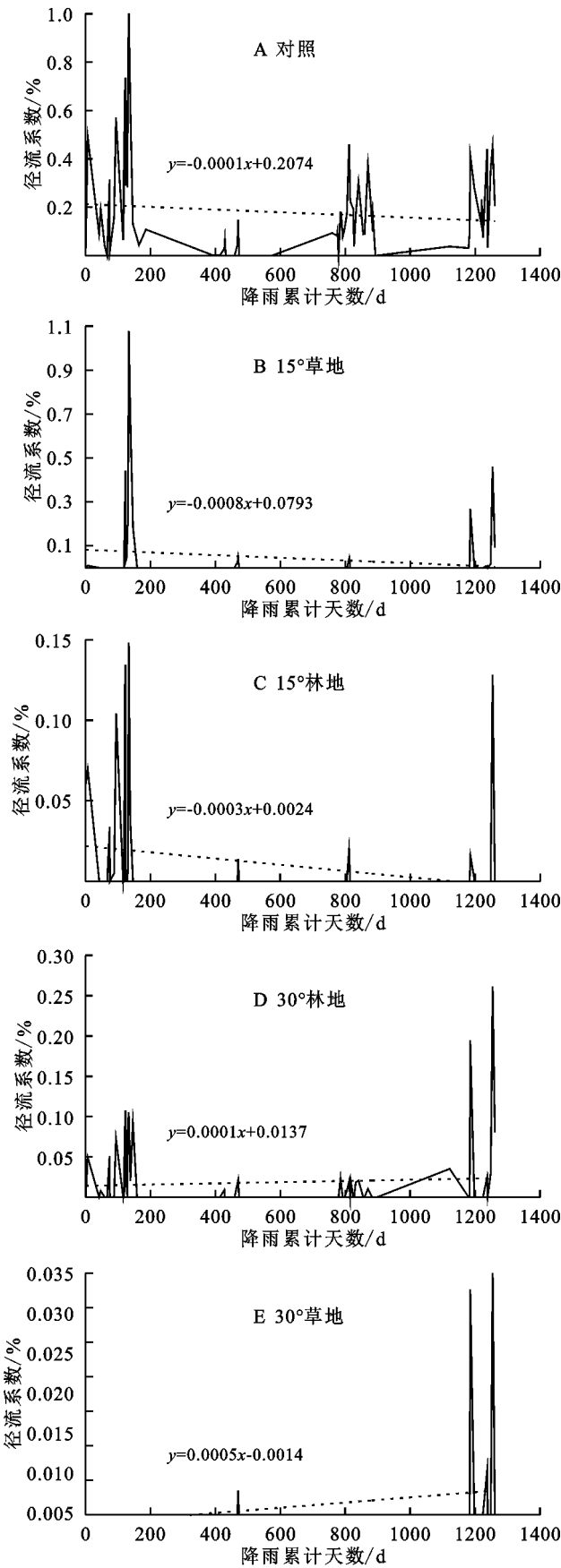


图 5 降雨累计天数径流系数变化

Fig. 5 Changes of runoff coefficient during cumulative days of rainfall

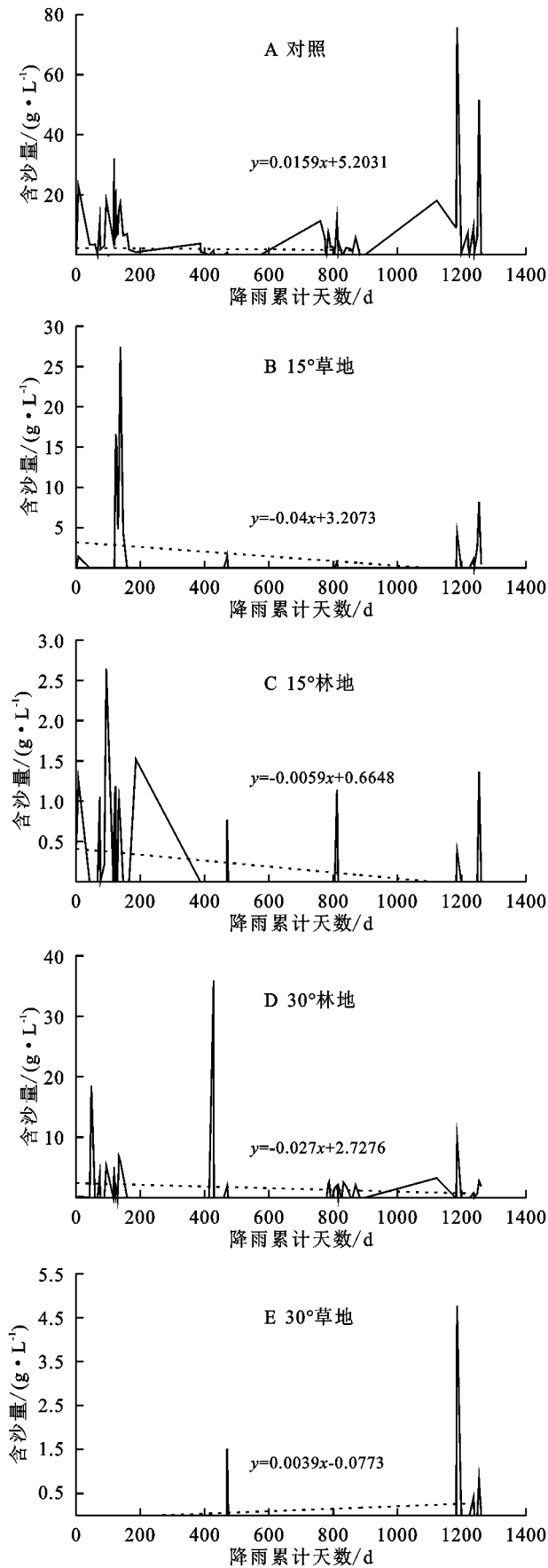


图 6 降雨累计天数含沙量变化

Fig. 6 Changes of sediment concentration during cumulative days of rainfall

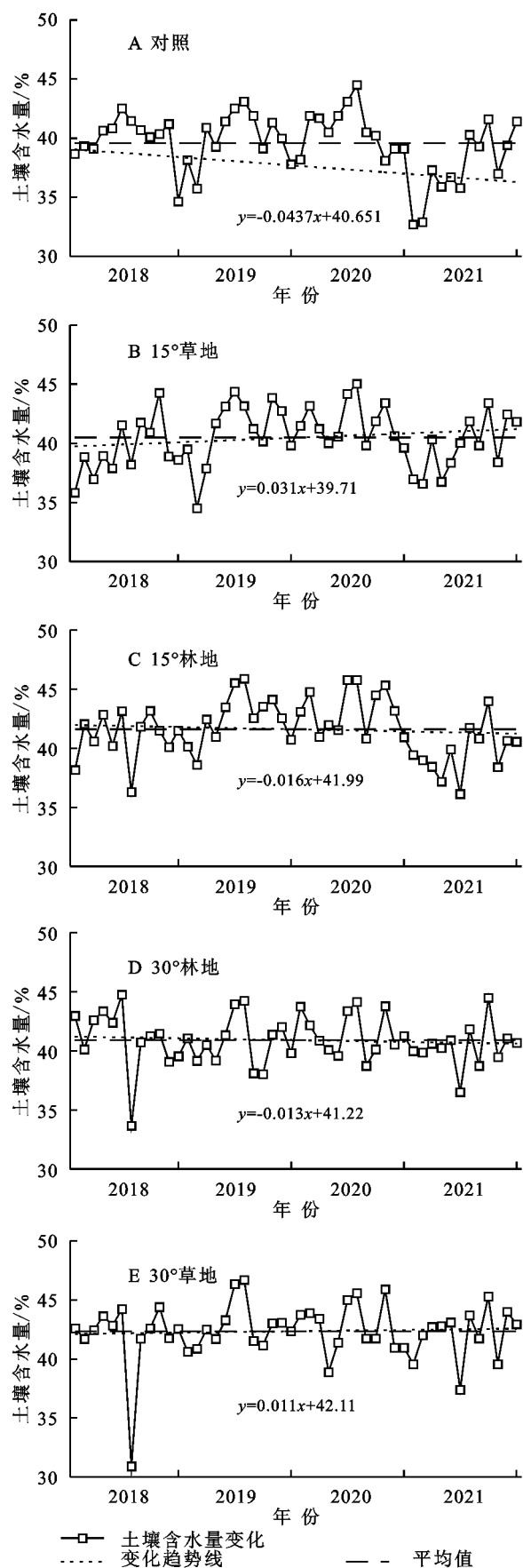


图7 径流小区土壤含水量年际变化

Fig. 7 Interannual variation of soil moisture content for runoff plots

### 3.2 长期植被覆盖的减流减沙效果

4种水土保持措施径流小区的年均径流量和年均含沙量均低于对照小区,均有较好的减流、减沙效益<sup>[19]</sup>。所有小区的径流量和含沙量与植被覆盖度呈极显著和显著负相关。在自然状态下,植被拦截地表径流和泥沙,以植被恢复为主的水土保持措施是水土流失治理的重要措施之一。在本研究区植被覆盖度的提高有利于土壤存蓄涵养水分,不同植被类型小区土壤含水量随时间的变化趋势基本一致,主要受降雨的影响,表现为夏季升高,秋冬季节降低的趋势。植被的分布及格局影响侵蚀过程,侵蚀过程反过来也会影响植被的形成和分布<sup>[20]</sup>,在长期植被覆盖度增长中可看出植被覆盖度越高坡面产流产沙越少,这与先前研究结果一致<sup>[8,21]</sup>。植被覆盖可以降低雨滴降落能量,使降雨再分配,增加土壤入渗减少地表径流。15°草地和30°草地小区植被覆盖度差异大,15°草地小区为人工种植黑麦草生长周期有限,每年表土裸露5个月左右,30°草地小区为常年生自然杂草,受人工影响较少,贴地面植被覆盖度高且根系发达,植被根系能改善土壤结构,增加土壤持水量和减少土壤流失量,增强坡面土壤抗侵蚀能力<sup>[22]</sup>。30°草地小区地上枯落物层能拦截径流和泥沙<sup>[23]</sup>,地下根系能提高土壤肥力,因此其水土流失量远远低于植被稀疏的林地小区,说明植被在改善区域生态质量上具有重要的效应<sup>[24]</sup>。本研究中,当覆盖度达到50%时减流减沙量达到50%,覆盖度达到90%时减流减沙效益均在90%以上。

本研究以侵蚀性降雨的径流系数和含沙量变化为切入点,得出长期植被覆盖对坡面减流减沙效益有显著影响。此外,还应考虑不同植被配置、坡度等对坡面小区水土流失的影响,以使水土保持工作中林草植被建设更为合理。

## 4 结论

(1) 研究区降雨丰水期集中在夏秋季节。30°草地小区植被增长最稳定,植被覆盖度最高,30°林地植被覆盖度变化呈上升趋势。

(2) 径流量与植被覆盖度之间呈极显著负相关( $p < 0.01$ ),土壤侵蚀模数与植被覆盖度之间相关性不显著;30°草地减流减沙效益最好,4 a平均减流减沙98.32%和99.62%,15°草地减流减沙效益最差,4 a平均减流减沙68.62%和82.86%。

(3) 84次侵蚀性降雨径流系数变化趋势中对照、15°草地和15°林地小区为下降趋势,30°林地和30°草地小区为上升趋势;含沙量变化中对照和30°草地呈上升趋势,其余小区皆呈下降趋势。15°

草地小区径流系数和含沙量降低速率最快,分别为  $-0.292\%/a$ 和 $-14.6\text{ g}/(\text{L}\cdot a)$ 。

表 3 降雨植被与水土保持指标的相关性

指标	降雨量	植被覆盖度	径流量	含沙量	土壤侵蚀模数
植被覆盖度	-0.134				
径流量	0.247	-0.632**			
含沙量	0.248	-0.662*	0.883**		
土壤侵蚀模数	0.157	-0.579**	0.853**	0.949**	
土壤含水量	0.109	0.631**	-0.632**	-0.628**	-0.344

注:\*\* 在 0.01 级别(双尾)相关性显著,\* 在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

(4) 随着植被覆盖度的增加,径流量和含沙量减少,土壤含水量呈增加趋势,15°草地小区土壤含水量年上升速率最快,为  $11.315\%/a$ ,土壤蓄水性能增加,土壤侵蚀模数减少,长期植被覆盖能有效地保持涵养水源。

参考文献(References):

[1] 彭宏佳,吴起鑫,任斐鹏,等.喀斯特地区坡面不同土地利用方式水土流失及磷素输出对次降雨特征的响应[J].农业环境科学学报,2018,37(4):756-765.  
Peng H J, Wu Q X, Ren F P, et al. Response of soil erosion and phosphorus losses to individual rainfall under different land uses at Karst slopes[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018,37(4):756-765.

[2] 王瑞红,李明鑫,张瀚,等.不同植被盖度对三峡库区边坡减蚀的室内模拟降雨研究[J].水土保持学报,2023,37(1):59-64.  
Wang R H, Li M X, Zhang H, et al. Study on indoor simulated rainfall with different vegetation coverage on slope erosion reduction in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1):59-64.

[3] Yao J J, Cheng J H, Zhou Z D, et al. Effects of herbaceous vegetation coverage and rainfall intensity on splash characteristics in Northern China[J]. Catena,2018,167: 411-421.

[4] Dong Y F, Xiong D H, Su Z A, et al. Effects of vegetation buffer strips on concentrated flow hydraulics and gully bed erosion based on *in situ* scouring experiments [J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(6): 1672-1682.

[5] Tang C J, Liu Y, Li Z W, et al. Effectiveness of vegetation cover pattern on regulating soil erosion and runoff generation in red soil environment, Southern China[J]. Ecological Indicators, 2021,129:107956.

[6] 蒋涛,谢炎敏,陈志彪,等.福建省长汀县不同水保措施的减流减沙效应[J].水土保持通报,2018,38(6):35-41.  
Jiang T, Xie Y M, Chen Z B, et al. Reductions of water flow and sediment under different water conservation

measures in Changting County of Fujian Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(6): 35-41.

[7] 杨译,余祝媛,邓冬冬.喀斯特地区不同坡度下水土流失与石漠化相关性分析:以龙里县为例[J].贵州科学, 2023,41(2):54-59.  
Yang Y, Yu Z Y, Deng D D. Correlation analysis of soil erosion and rocky desertification at different slope gradients in Karst areas: A case study on Longli County[J]. Guizhou Science, 2023,41(2):54-59.

[8] 杨青,杨广斌,赵青松,等.喀斯特地区不同降雨和植被覆盖的坡面产流产沙特征[J].水土保持通报,2020,40(1):9-16.  
Yang Q, Yang G B, Zhao Q S, et al. Characteristics of runoff sediment yield on slopes under different rainfall and vegetation cover in Karst areas[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(1):9-16.

[9] 刘纪根,张昕川,李力,等.紫色土坡面植被覆盖度对水土流失影响研究[J].水土保持研究,2015,22(3):16-20,27.  
Liu J G, Zhang X C, Li L, et al. Research of effect of vegetation coverage on soil and water loss in purple soil slope land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015,22(3):16-20,27.

[10] 闫夏娇.植被盖度对水土保持功效的影响[J].山西水土保持科技,2019(3):9-10.  
Yan X J. Vegetation coverage impact on efficiency of soil and water conservation[J]. Soil and Water Conservation Science and Technology in Shanxi, 2019(3):9-10.

[11] 吴光艳,金平伟,钟雄,等.南方红壤区植被盖度对水土流失影响初探[J].亚热带水土保持,2016,28(4):1-4.  
Wu G Y, Jin P W, Zhong X, et al. Initial study on the impact of vegetation coverage to soil erosion in red soil areas of South China[J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2016,28(4):1-4.

[12] 普颖颖,张文太,李政,等.伊犁河谷坡面管理措施对表层土壤储水和草被恢复的影响[J].中国水土保持,2021(3):34-37,62.



- Pu Y Y, Zhang W T, Li Z, et al. Effects of slope management measures on surface soil water storage and vegetation restoration in Yili river valley[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2021(3):34-37,62.
- [13] 左静.黄土塬区不同植被措施水土保持研究[J].*黑龙江水利科技*, 2023,51(4):129-132.
- Zuo J. Study on soil and water conservation with different vegetation measures in loess Tableland Area[J]. *Heilongjiang Hydraulic Science and Technology*, 2023,51(4):129-132.
- [14] 朱锐鹏,刘殿君,张世豪,等.黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型水土流失效应[J].*水土保持研究*, 2022,29(4):10-17.
- Zhu R P, Liu D J, Zhang S H, et al. Characteristics of runoff and sediment yield in different land use types in hilly and Gully Region of the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(4):10-17.
- [15] 杨坪坪,李勇,宋涛,等.典型喀斯特区侵蚀性降雨特征及坡面生物措施水土流失防控效应[J].*生态环境学报*, 2021,30(1):53-62.
- Yang P P, Li Y, Song T, et al. Characteristics of erosive rainfall patterns and benefit of soil and water conservation for biological measures on slope in Karst Region[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021,30(1):53-62.
- [16] 纪启芳.贵州喀斯特地区坡面不同植被的减流减沙作用[D].南京:南京大学,2013.
- Ji Q F. Effects of vegetation cover on runoff and sediment reduction on slop land in Karst areas of Guizhou province[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.
- [17] 丛鑫,边振,薛春珂,等.不同坡度条件下的水土流失特征研究[J].*中国农村水利水电*, 2017(5):124-128.
- Cong X, Bian Z, Xue C K, et al. The characteristics of soil and water loss under different slope conditions[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(5):124-128.
- [18] 周桐,潘鹤,张扬,等.不同配置的多功能水土保持植被对黑土抗侵蚀特征的影响[J].*东北林业大学学报*, 2022,50(5):100-104,111.
- Zhou T, Pan H, Zhang Y, et al. Effects of multifunctional soil and water conservation vegetation with different configurations on erosion resistance characteristics of black soil[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2022,50(5):100-104,111.
- [19] 胡沁梅,谢炎敏.长汀县水土保持措施下径流小区的产流产沙及其对降水量和植被覆盖度的响应[J].*亚热带水土保持*, 2020,32(3):15-19.
- Hu Q M, Xie Y M. Runoff and sediment yield and responses to rainfall and vegetation cover in runoff plots with different soil and water conservation measures in the Changting County[J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2020,32(3):15-19.
- [20] 李杰,卞威.土壤侵蚀与植被系统相互作用规律研究[J].*水电站机电技术*, 2023,46(2):137-139.
- Li J, Bian W. Study on the interaction between soil erosion and vegetation system[J]. *Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station*, 2023,46(2):137-139.
- [21] 代勇.植被盖度对水土保持功效影响的探究[J].*山西水利科技*, 2019(2):87-89.
- Dai Y. A probe into the effect of vegetation coverage on soil and water conservation[J]. *Shanxi Hydrotechnics*, 2019(2):87-89.
- [22] 张紫薇,赵文俊,李奇,等.表层土壤结构对红壤坡耕地产流及产沙过程的影响[J].*土壤学报*, 2024,61(2):434-444.
- Zhang Z W, Zhao W J, Li Q, et al. Effects of top soil structure on runoff and sediment yield of red soil slope cropland[J]. *Journal of Soil Science*, 2024,61(2):434-444.
- [23] 蒋荣,张兴奇,张科利,等.喀斯特地区不同林草植被的减流减沙作用[J].*水土保持通报*, 2013,33(1):18-22.
- Jiang R, Zhang X Q, Zhang K L, et al. Runoff and sediment reduction effects under different forest and grass vegetation in a Karst Area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013,33(1):18-22.
- [24] 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.
- Zhang C, Xu H Q, Zhang H, et al. Fractional vegetation cover change and its ecological effect assessment in a typical reddish soil region of southeastern China: Changting County, Fujian Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015,30(6):917-928.