

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.001

周杰,田培,吴宜进,等.大别山区不同水土保持措施配置模式的效益评价[J].水土保持学报,2024,38(6):61-69,78.

ZHOU Jie, TIAN Pei, WU Yijin, et al. Benefit evaluation of different allocation modes of soil and water conservation measures in Ta-pieh Mountains area[J].Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(6):61-69,78.

大别山区不同水土保持措施配置模式的效益评价

周杰^{1,2}, 田培^{1,2}, 吴宜进^{1,2}, 贾婷惠^{1,2}, 沈晨竹^{1,2}

(1.华中师范大学地理过程分析与模拟湖北省重点实验室,武汉 430079;2.华中师范大学城市与环境科学学院,武汉 430079)

摘要: [目的] 为揭示大别山区不同水土保持措施的减流减沙效益,优化大别山区水土保持措施的配置模式。[方法] 基于黄冈市石桥铺、红安县、英山县和团风县 4 个站点径流小区的侵蚀观测数据,对比分析不同水土保持措施配置模式下的水土保持效益。[结果] (1) 正常农耕种植无明显水保效益,梯田+耕作配置模式下水保效益得到提高,均取得正向的水保效益,其中石坎梯田+花生油菜综合效益最好,土壤侵蚀削减率达到 55%;(2) 生物措施结合工程措施的配置模式有着良好的水保效益,但其减流减沙效益存在差异,如石坎梯田+板栗的减沙效益要优于减流效益;(3) 香根草、香根草等高绿篱是研究中水保效益最优的措施,香根草等高绿篱的综合效益达到 70%。[结论] 香根草、香根草等高绿篱适宜在黄冈市和大别山区进行推广,同时多种措施结合的配置模式相较单一措施更具有优势。研究结果可为湖北省大别山区水土保持措施的优化配置提供参考。

关键词: 径流小区;水土保持措施;水保效益;减流减沙

中图分类号:S157.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242-(2024)06-0061-09

Benefit Evaluation of Different Allocation Modes of Soil and Water Conservation Measures in Ta-pieh Mountains Area

ZHOU Jie^{1,2}, TIAN Pei^{1,2}, WU Yijin^{1,2}, JIA Tinghui^{1,2}, SHEN Chenzhu^{1,2}

(1.Key Laboratory for Geographical Process Analysis & Simulation Hubei Province, Central China Normal University, Wuhan 430079, China; 2.College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract: [Objective] In order to reveal the effect of different soil and water conservation measures on reducing runoff and sediment in Ta-pieh Mountains, optimize the allocation mode of soil and water conservation measures in Ta-pieh Mountains. [Methods] Based on the erosion observation data of four runoff plots in Shiqiaopu, Hongan, Yingshan and Tuanfeng, the water and soil conservation benefits under different water and soil conservation measures were compared and analyzed. [Results] (1) There was no obvious benefit of soil and water conservation in normal farming, but the benefit of soil and water conservation was improved under terraced field + tillage mode, and the comprehensive benefit of stone ridge terraced field + peanut-rape was the best, and the reduction rate of soil erosion reached 55%; (2) The allocation mode of biological measures combined with engineering measures has good water and soil conservation benefits, but there are differences in the benefits of runoff and sediment reduction. For example, the benefits of sediment reduction in stone ridge terrace + chestnut were better than those of runoff reduction; (3) Vetiver and vetiver contour hedgerow were the best measures for soil and water conservation in this study, and the comprehensive benefit of vetiver contour hedgerow reached 70%. [Conclusion] Vetiver and vetiver contour hedge are suitable to be popularized in Huanggang and Ta-pieh mountainous areas, and the combination of multiple measures has more advantages than a single measure. The research results can provide reference for regional soil and water conservation measures allocation.

收稿日期:2024-04-29

修回日期:2024-05-21

录用日期:2024-06-11

网络首发日期(www.cnki.net):2024-07-15

资助项目:国家自然科学基金面上项目“RUSLE模型P因子修正及其在湖北省典型山丘区的适用性研究”(42377354);湖北省自然科学基金面上项目“水土保持措施因子算法优化及其对区域土壤侵蚀模拟精度的影响”(2024AFB951)

第一作者:周杰(2001—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:2034796237@qq.com

通信作者:田培(1988—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事水文水资源、土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:tianpei@cnu.edu.cn

Keywords: runoff plot; soil and water conservation measures; benefit of soil and water conservation; flow and sediment reduction

Received: 2024-04-29

Revised: 2024-05-21

Accepted: 2024-06-11

Online(www.cnki.net): 2024-07-15

土壤侵蚀作为自然环境对人类活动的直接反映,其造成的环境灾害包括环境、经济、农业等多个领域,例如,土壤养分流失、面源污染、洪涝灾害等,严重威胁生态和经济的可持续发展^[1-2]。我国土壤侵蚀类型主要为水力侵蚀,2022年,全国土壤侵蚀面积 265.34 万 km²,其中黄冈市有水土流失面积 3 607.05 km²,占黄冈国土面积的 20.66%。因此,开展对土壤侵蚀的防治措施研究具有显著的必要性,识别不同地区环境和气候条件下适宜的水土保持措施及不同水保措施的侵蚀防治效果,有助于区域土壤侵蚀防控和经济生态的持续发展。

自然降雨条件下野外径流小区观测法是定量评价土壤侵蚀和水保措施效益的重要方法^[3]。近年来,不断有学者利用径流小区观测数据研究不同水土保持措施的效益,如朱燕琴等^[4]基于径流小区的实测数据,定量分析了黄土高原丘陵区不同植被恢复模式的次降雨入渗、产流产沙特征;尹婧等^[5]对川东丘陵地区的柏木林为研究对象,对比分析水平阶、垒穴/培土和综合措施 3 种模式下的径流调控效果,并分析不同雨量、雨强下的拦蓄径流效果,结果表明,中雨时,垒穴/培土和综合措施优于水平阶;暴雨时,水平阶则优于垒穴/培土和综合措施;YU 等^[6]在东北坡耕地上研究了深松耕作、垄耕坑田、垄耕坑田+深松等不同耕作措施的水土保持效益,并得出等高耕作+深松耕作的水保效益较好,保持了土壤的生产能力;也有研究分析南方红壤区的耕作方式和不同水保措施的效益^[7-8],以及通过构建土壤观测数据库和汇总不同区域的数据进行分析^[9-10],或是利用径流小区数据与其他模型相结合^[11-12],但这些研究要依托单个措施种类、单一径流场或是短期观测数据。部分学者^[11-12]研究了大别山区的土壤侵蚀时空变化、典型植被的水土流失特征等,但对径流小区的长期观测数据和水土保持措施效益的研究相对较少。杨伟等^[13]以湖北省罗田县为典型区域,基于 5 年的径流小区观测数据,分析了大别山区内板栗林的水土流失特性,但其未涉及到大别山区其他的水土保持措施。因此,基于径流小区长期观测数据对大别山区不同水土保持措施的效益研究亟须深入。

大别山区地处湖北、安徽、河南三省交界,是国家中部重要的生态功能区和长江中下游的生态屏障,也是水土流失较为严重的区域之一。黄冈市位于大别山

南麓,其东北部分布着大别山的低山丘陵,是大别山区生态保护的关键区域,因此,对该区域开展土壤侵蚀研究对大别山区的环境治理与保护具有重要意义。本文基于黄冈市野外径流小区自然降雨条件下的土壤侵蚀观测数据,对比分析不同水保措施的减沙减流效益,以期水土流失防治技术的研发、大别山区的综合治理及水土保持措施布设提供依据和理论参考。

1 研究区概况

研究区黄冈市位于湖北省东北部(114°24′—116°07′E, 29°45′—31°40′N),主脊呈西北—东南走向,东北部与豫皖交界为大别山脉,大别山低山丘陵遍布于黄冈东部和北部,南部为狭长的平原湖区,整体上地势起伏不平。研究区属亚热带大陆性季风气候,年平均气温 15.7~17.1℃,年平均降水量 1 223~1 493 mm,年平均无霜期 237~278 天,日照充足,利于间作农业的经营和开展。浠水、巴水、举水等河流发源自大别山,从北向南流入长江,水资源充足。区域内耕地资源丰富,土地利用以林地、坡耕地和裸地为主,农业占据主要地位。目前丘陵和山区地带存在的植被主要为人工的板栗、榉树、银杏、红豆杉及其他种类的经济林和自然林,由于其毗邻大别山区,故林木占地面积较大,树木种类繁多。研究区以水力侵蚀为主,由于不合理的土地利用方式及夏季强降雨的集中,加重了土壤侵蚀的发生,区域内土壤侵蚀状况较为严重。

根据湖北省水土保持四级区划分方案,黄冈市红安县、罗田县、英山县、麻城市、浠水县、蕲春县、黄州区、团风县属于鄂东北低山丘陵水源涵养保土区,即大别山区域。本研究中的水土保持监测站点均来自此区域(图 1)。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文依据黄冈市石桥铺 2013—2022 年,红安县、英山县 2018—2022 年和团风县 2022 年的《水土保持公报》^[14-15],汇编黄石岗桥铺站、红安观音阁站、英山鸭掌树站、团风回龙山站 4 个水土保持监测站点(图 1)的 43 个野外径流小区的土壤侵蚀观测数据。这些站点所在区域均属于亚热带季风湿润区,土壤均为黄棕壤,降雨集中于 6—8 月。纳入本文分析的观测数据,如小区类型、水土保持措施等(表 1),其中本文涉及的树种和植物有板栗(*Castanea mollissima*)、花生(*Arachis hy-*

pogaea)、油菜(*Brassica rapa var. chinensis*)、茶(*Camellia sinensis*)和黄豆(*Glycine max*)。

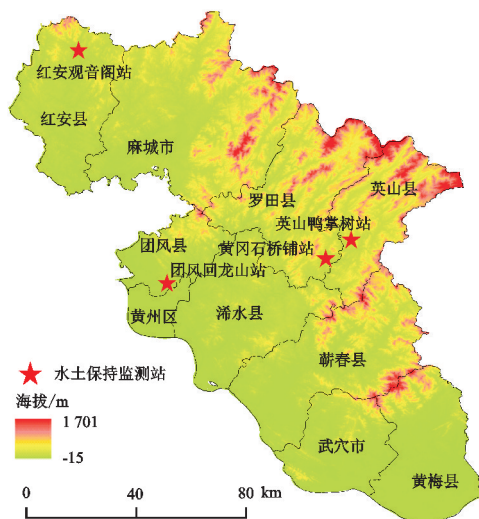


图1 黄冈市水土保持监测站的地理位置

Fig.1 Geographical location of Huanggang soil and water conservation monitoring station

通过 IBM SPSS Statistics 27.0 和 Excel 2019 软件对径流小区的土壤侵蚀量和地表径流量数据进行处理和计算,使用 Origin 2022 软件进行数据分析和制图。数字高程数据来源于地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn>),使用 ArcGIS 10.8 软件制图。

2.2 坡度标准化方法

坡度是影响土壤侵蚀的重要因素,在计算土壤侵蚀削减率时,考虑到研究区内不同径流小区的坡度有所不同,因此将各小区的坡度统一到同一坡度,以消除坡度带来的试验误差。选择 15° 作为标准坡度,并将其他坡度径流小区的观测数据转化为 15° ,进而有效地消除坡度对于土壤侵蚀的影响,确保数据的可比较性。根据坡度标准化和相关的研究资料,利用前人^[16]研究的坡度标准化公式,即:

$$\begin{cases} S = 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ S = 16.8 \sin \theta - 0.50 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ S = 21.91 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (1)$$

$$A'_i = A_i / S_i \times S_{15} \quad (2)$$

式中: θ 为坡度($^\circ$); A'_i 为第 i 小区转化到 15° 坡度上的侵蚀量(t/km^2); A_i 为第 i 小区的侵蚀量(t/km^2); S 为坡度因子; S_i 、 S_{15} 为第 i 小区和 15° 坡度的坡度因子。

筛选不同坡度的小区数据,2020 年、2021 年的年降水量分别为 1 788,1 260 mm,土坎梯田+板栗的 15° 径流小区产流量与 20° 径流小区产流量差距很小,产流率基本保持一致,分别为 30%,35%;土坎梯田+花生油菜 15° 小区和 20° 小区产流量也基本相同,产流率分别维持在 35%,40%;石坎梯田+花生油菜 15° 径流小区产流量与 20° 径流小区产流量则略有差值, 20° 径流小区产流率

比 15° 径流小区高 10%。可见,小幅度的坡度变化对于径流入渗及地表径流的产生影响也较小。这符合其他学者的相关研究,如付世琳等^[17]研究表明,在 40,80 mm/h 2 种降雨条件下, 10° 与 15° 的坡面稳定入渗速率最大相差 0.09 mm/min,而随着坡度增加,稳定入渗速率和平均入渗速率降低的百分比差距也较小; 15° 坡面与 20° 坡面的径流强度、入渗强度及初始产流时间差异较小,曲线接近^[18]。而在本研究中,径流小区坡度分别为 10° , 15° , 18.5° , 20° ,且只有自然坡地的 1 个小区和 3 个经济林小区为 10° ,因此在地表径流削减率的计算中,正常计算地表径流削减率。

2.3 土壤侵蚀削减率和地表径流削减率计算方法

土壤侵蚀削减率(soil loss reduction rate, SLRR)是评估地表水土保持措施的减沙效益的主要指标^[19],即不同措施小区较于裸露小区的土壤侵蚀量削减比例。公式为:

$$SLRR = \frac{SL_{\text{Bare Land}} - SL_{\text{Land Use}}}{SL_{\text{Bare Land}}} \quad (3)$$

式中:SLRR 为土壤侵蚀削减率; $SL_{\text{Bare Land}}$ 、 $SL_{\text{Land Use}}$ 分别为裸地小区的土壤侵蚀量、某水保措施类型小区的土壤侵蚀量(t/km^2)。

地表径流削减率(surface runoff reduction rate, SRR)是衡量水土保持措施减流效益的重要指标,指不同措施小区相较裸地小区地表径流量的减少情况。公式为:

$$SRR = \frac{SR_{\text{Bare Land}} - SR_{\text{Land Use}}}{SR_{\text{Bare Land}}} \quad (4)$$

式中:SRR 为土壤侵蚀削减率; $SR_{\text{Bare Land}}$ 、 $SR_{\text{Land Use}}$ 分别为裸地小区的地表径流量、某水保措施类型小区的地表径流量(mm)。

3 结果与分析

3.1 不同水保措施配置模式下的减沙效益

3.1.1 工程措施与耕作措施模式下的减沙效益 在正常种植农作物而无其他水保措施的情况下,仅单独种植黄豆取得较好的减沙效益(36%~72%),花生、花生+油菜、黄豆+油菜的土壤侵蚀削减率多为负,说明正常种植农作物,不仅未起到减沙作用,反而在一定程度上加重土壤侵蚀(图 2)。

在正常种植农作物的情况下,采取工程措施,其中在土坎梯田+农作物的配置模式下,减轻泥沙量,土坎梯田+花生的土壤侵蚀削减率为 30%~35%,土坎梯田+花生油菜的削减率为 27%~43%,取得一定的减沙效益。而石坎梯田+农作物的侵蚀削减率得到进一步提高,石坎梯田+花生为 38%~43%,石坎梯田+花生油菜达到 55%,进一步减少地表的泥沙量。单独种植黄豆取得不错的减沙效益,但建立石坎并种植黄豆

的模式下,侵蚀削减率仍然有所提高,提升至 65%~81%。因此,仅种植农作物很难取得正向的减沙效益,而工程措施与耕作结合的模式下,减沙效益得到提高,

削减泥沙量,其中减沙效益最好的是石坎+黄豆,其次是石坎梯田+花生油菜,整体上采取石坎梯田与耕作的配置模式的减沙效益优于土坎梯田与耕作。

表 1 径流小区基本情况

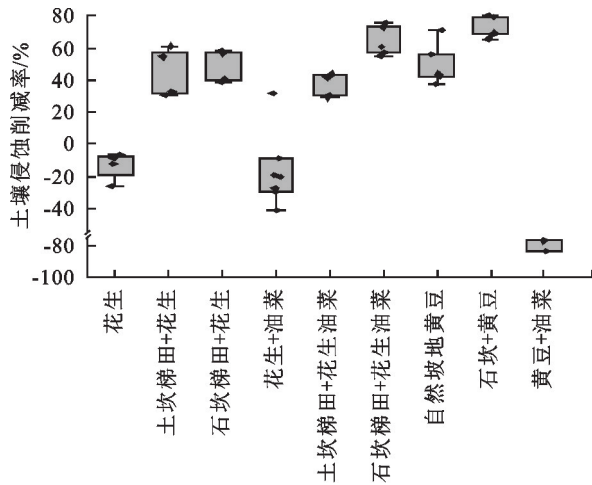
Table 1 Basic situation of runoff plots

所属县市 监测站点	小流域	小区 名称	坡度/ (°)	小区 面积/m ²	资料 年份	植被	植被 覆盖度/%
红安县观音阁	倒水河	土坎梯田	15,20		2018—2021	板栗	65,62,68
		土坎梯田	15,20		2018,2019	花生	78,75,85,82
		石坎梯田	15,20		2018—2021	板栗	75,72,93,90
		石坎梯田	15,20		2018,2019	花生	83,80,74,70
		顺坡种植	15	100	2018,2019	花生	69,65
		裸地	15		2018—2022		
		土坎梯田	15,20		2020—2022	花生+油菜	62,75,65,82
		石坎梯田	15,20		2020—2022	花生+油菜	65,70,80
		顺坡种植	15		2020—2022	花生+油菜	42
		伞房等高篱带	18.3		2013		70
罗田县石桥铺	文斗河	萱草等高篱带	18.3		2013		80
		香根草等高篱带	18.3	100	2013		85
		裸地	18.3		2013—2021		
		香根草等高篱带	20		2013		95
		伞房	18.3		2015,2016		20
		萱草	18.3		2015,2016		15
		香根草	18.3		2015,2016		15
		香根草	20		2015,2016		60
		经济林	18.3		2017—2021	茶叶	20,52
		顺坡种植	18.3		2018—2020	花生+油菜	60,90
罗田县石桥铺	文斗河	顺坡种植	18.3		2017—2020	花生	60
		香根草等高绿篱	18.3		2017—2021		70,80
		顺坡种植	20		2017,2018	玉米+油菜	40
		土坎梯田	10		2022		90
		石坎梯田	10		2022		90
		自然坡地	10,15	100	2022		90,90,90
		裸地	10		2022		
		经济林	10		2022	茶叶	80,80,80
		石坎	15	100	2018—2022	黄豆	
		土坎	15		2018—2022	茶叶	
英山县鸭掌树	东河	自然坡地	15		2018—2022	黄豆	
		裸地	15		2018—2022		
		人工林	15		2018—2022		

3.1.2 生物措施与工程措施模式下的减沙效益 在未布设工程措施条件下,对不同生物措施的产沙量进行对比和计算,可以看出本研究中采用的伞房、萱草、人工林及经济林均具有一定的减沙效益(图 3)。在采取不同植被措施的径流小区中,减沙效益最好的是人工林,土壤侵蚀削减率达到 90%以上;其次是经济林,除 2019 年外,削减率为 20%~63%;伞房和萱草的减沙效益则略次之。若采取等高绿篱种植的方式(图 3),将香根草与香根草等高绿篱对比分析,香根草等高绿篱的侵蚀削减率达到 98%以上,侵蚀削

减率更高,减沙效益更好,但伞房等高篱带和萱草等高篱带未能取得良好的减沙效益。

在同时布设植被与工程措施时,即土坎+茶叶、土坎梯田+板栗、石坎梯田+板栗,其减沙效益相对稳定,侵蚀削减率从大到小顺序为土坎+茶叶>石坎梯田+板栗>土坎梯田+板栗。与其他种类的水保措施相比,土坎+茶叶优于香根草等高绿篱和人工林之外的单独生物措施;土坎梯田+板栗、石坎梯田+板栗减沙效益分别为 35%~60%,45%~70%,弱于香根草等高绿篱和人工林,优于经济林和自然坡地。



注:图中◆表示不同水保措施相应的数据值;箱体表示数据的集中程度。下同。

图 2 不同耕作与工程措施的土壤侵蚀削减率

Fig.2 Soil erosion reduction rates of different tillage and engineering measures

对等高篱带进一步对比分析,本研究中有香根草等高篱带、间距 4 m、5 条等高带和香根草等高篱带、间距 50 cm、40 条等高带 2 个小区,其土壤侵蚀削减率分别为 28.11%(间隔 4 m),3.95%(间隔 50 cm),说明在采取等高篱带的方式时,其间隔也影响减沙效益,合理的间隔种植才能起到更好的减沙效益。

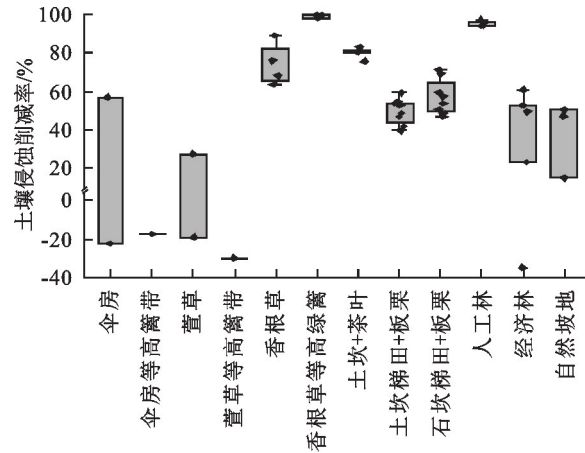


图 3 不同植被与工程措施的土壤侵蚀削减率

Fig.3 Soil erosion reduction rates of different vegetation and engineering measures

综合来看,不同水保措施配置模式下减沙效果最好的是香根草等高绿篱,其次是人工林、土坎+茶叶、石坎+黄豆,整体上是生物措施和生物与工程措施结合的 2 种配置模式下的减沙效益较好,减沙效益最差的是单独的耕作。

3.2 不同水保措施配置模式下的减流效益

对比分析单独耕作和耕作与工程措施配置下的减流率和径流系数(图 4)表明,在土坎梯田、石坎梯田和石坎上种植农作物能够发挥一定的减流效益。在径流小区水保措施布设方面,无论是工程措施的差

异还是种植农作物的不同,都导致减流率和径流系数的显著差异。自然坡地黄豆、黄豆+油菜、玉米+油菜、石坎+黄豆 4 种措施径流系数较小,均为 0.1,而花生的径流系数较大,达到 0.4,产流较大。花生+油菜的径流系数波动大,受不同年份降水量变化的影响较大,径流系数不稳定。而土坎梯田+花生油菜、石坎梯田+花生油菜径流系数较为集中,石坎梯田+花生油菜的径流系数小于土坎梯田+花生油菜。

单独种植花生、花生+油菜、黄豆、黄豆+油菜、玉米+油菜时,仅有花生和黄豆取得正向的减流效益,分别为 0~15%和 10%~35%。同时布设耕作措施与工程措施的径流小区中,土坎梯田+花生和石坎梯田+花生的减流率虽未能得到大的提高,但仍保证减流率的水平;土坎梯田+花生油菜、石坎+黄豆 2 种模式减流率均得到提高,分别为 15%~20%,15%~40%,减流效益更为显著。

在工程措施相同、种植农作物不同的情况下,在土坎梯田、石坎梯田上种植花生的减流效益弱于在土坎梯田、石坎梯田种植花生和油菜;在工程措施不同时,土坎梯田+花生和石坎梯田+花生的减流率差值较小,土坎梯田+花生油菜的减流率保持较为稳定,而石坎梯田+花生油菜减流率波动较大,2020 年没有明显的减流效益,其他年份减流率为 20%~40%。

从图 4 可以看出,单独耕作和耕作与工程措施配置下减流效益最显著的是石坎+黄豆,其次为单独种植黄豆,整体上耕作与工程配置模式的减流效益优于单独种植农作物。

从不同植被措施及植被与工程措施组合而成的水保措施配置模式(图 5)来看,除伞房、萱草及其等高篱带外,其他均有一定的减流效益。而不同措施参与的径流小区的减流率和径流系数各有不同。草地小区和人工林径流系数均<0.2,土坎梯田+板栗、石坎梯田+板栗和自然坡地的径流系数为 0.2~0.4,经济林的径流系数为 0.1~0.6,产流不稳定。

伞房、伞房等高篱带、萱草、萱草等高篱带未能取得良好减流效益,减流率均<0。在仅采取植被措施的径流小区中,减流率指标排序为香根草等高绿篱>人工林>香根草>经济林,可以看出,采取等高绿篱的方式种植香根草,能够进一步提升减流效益,而经济林减流率有着一定的浮动,与另外 3 种措施的减流效益相比,稳定性较差。在同时采取植被与工程措施的径流小区中,土坎+茶叶的减流率最高(20%~40%),减流效益最好,而土坎梯田+板栗的减流率较石坎梯田+板栗更为集中,减流效益更为稳定,石坎梯田+板栗在 2020 年、2021 年取得较高的减流率,但在大部分年份减流率并不高,有一定的减流效益。

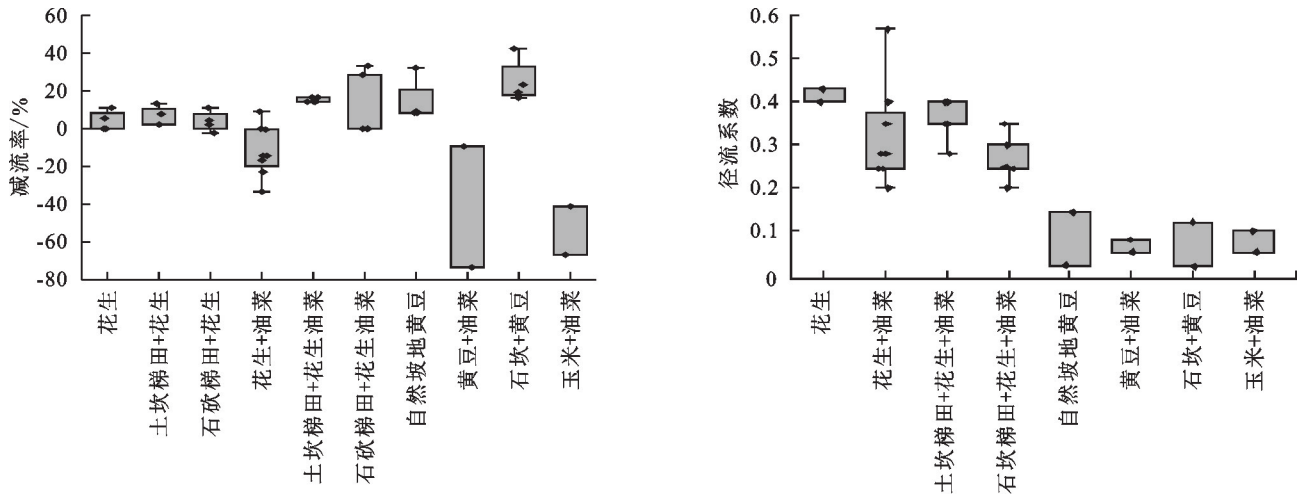


图 4 不同耕作与工程措施的减流率和径流系数

Fig.4 Flow reduction rates and runoff coefficients of different tillage and engineering measures

在对香根草等高篱带进行对比分析中,种植间距 50 cm,40 条等高带的减流率为 7.51%,而间距 4 m,

5 条等高带的减流率仅有 1.37%,间隔距离小、等高带较多的小区取得更好的减流效益。

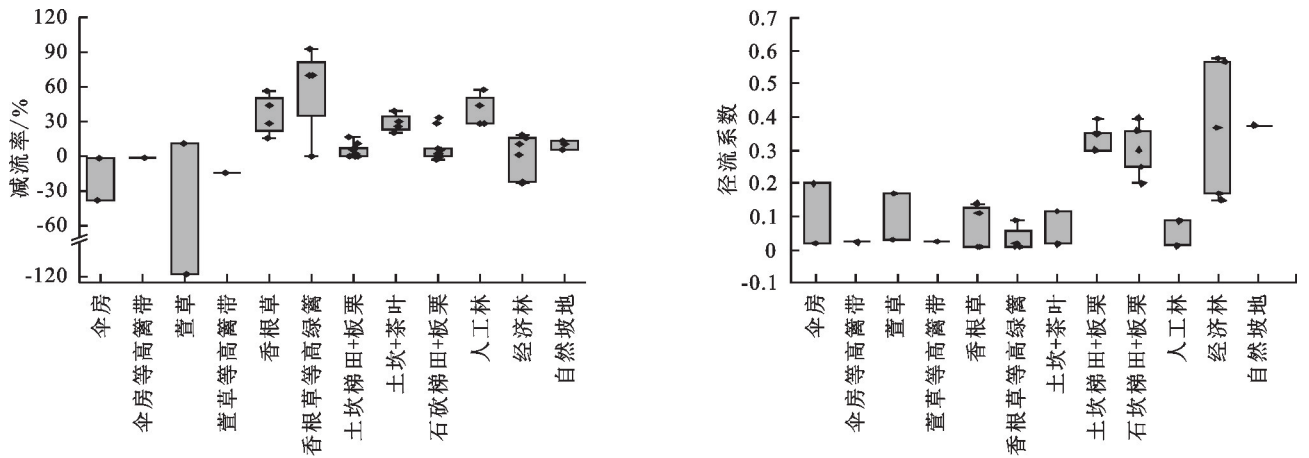


图 5 不同植被与工程措施的减流率和径流系数

Fig.5 Runoff reduction rate and runoff coefficient of different vegetation and engineering measures

总之,采取香根草等高绿篱的小区减流效益最好,香根草和人工林小区次之,伞房、萱草及其等高篱带小区减流效益较差。

花生油菜;最后几种措施减流效益相差不大,主要差距为减沙效益,综合效益大致排名为石坎梯田+板栗≈经济林>黄豆>土坎梯田+板栗>石坎梯田+花生≈土坎梯田+花生≈土坎梯田+花生油菜>自然坡地。

3.3 不同水保措施的综合效益

不同水保措施配置模式下减沙和减流效益各有不同,花生、花生+油菜、黄豆+油菜 3 种单独种植农作物的小区减沙减流均未取得正向的效益。采取植被措施的径流小区中,伞房和萱草 2 种措施减沙率浮动大,减流效益也不显著,而伞房等高篱带和萱草等高篱带的减沙率、减流率较低,未能起到明显的水保作用。除上述几种水保措施配置模式,余下的 14 种水保措施减流减沙效果虽有所差异,但都具备一定的水土保持效益(图 6)。

从减流减沙效益对比,香根草等高绿篱的综合效益最好,达到 80%;其次是香根草、人工林,香根草的减流效益较好,人工林的减沙效益更好;再次是石坎梯田+花生油菜、土坎+茶叶、石坎+黄豆,3 种措施综合效益排名为土坎+茶叶>石坎黄豆>石坎梯田+

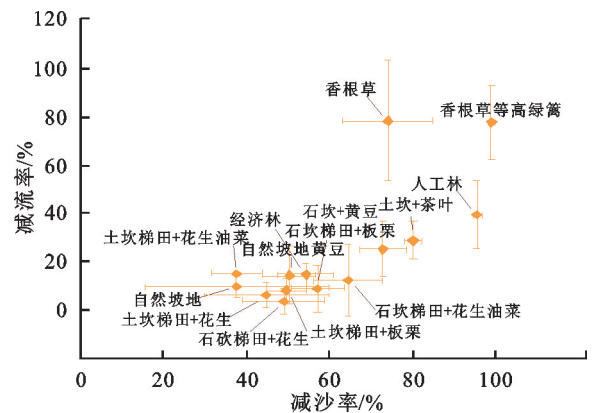


图 6 不同水保措施配置模式下的综合效益

Fig.6 Comprehensive benefits of different allocation modes of soil and water conservation measures

可见,本研究中大多水土保持措施配置模式均具有良好的水土保持效益,其中水保效益较为突出的有香根草等高绿篱、香根草、人工林等配置模式,其次是石坎梯田+花生油菜、土坎+茶叶等。特别值得注意的是,与单独种植农作物相比,土坎、石坎等工程措施下种植农作物,表现出较好的水土保持效益。

3.4 侵蚀性降水量与不同水保措施效益的关系

根据不同水土保持措施下土壤流失量与侵蚀性降水量之间的多次拟合结果(表 2),探究侵蚀性降水量对水保措施效益的影响。由表 2 可知,石坎梯田+花生油菜、石坎+黄豆、土坎梯田+花生油菜 3 种耕作措施与工程措施配置模式的最佳拟合方程分别为指数、对数和幂函数形式;生物措施与工程措施配置模式下,土坎梯田+板栗、石坎梯田+板栗、土坎+茶叶的最佳拟合方式分别为指数、指数和对数函数形式;香根草、经济林、人工林、香根草等高绿篱 4 种生物措施的最佳拟合形式则分别为指数、线性、对数和线性;花生+油菜、自然坡地黄豆的最佳拟合形式分别为对数和线性。多种水土保持措施中 R^2 在 0.6 以下的为经济林、花生+油菜 2 种措施, R^2 在 0.8 以上的水保措施有土坎梯田+板栗、石坎梯田+花生油菜、人工林、香根草等高绿篱、香根草、土坎梯田+花生油菜 6 种。

表 2 不同水土保持措施下土壤流失量与侵蚀性降水量拟合关系

Table 2 Fitting relationship between soil loss and erosive precipitation under different soil and water conservation measures

水土保持措施	方程	R^2	样本量 n
土坎梯田+板栗	$y=22.931e^{0.0026x}$	0.89	9
石坎梯田+板栗	$y=29.837e^{0.001823x}$	0.67	9
石坎梯田+花生油菜	$y=10.628e^{0.003050x}$	0.84	5
香根草	$y=0.357e^{0.00636x}$	0.85	5
经济林	$y=0.123x-39.231$	0.35	11
石坎+黄豆	$y=-2630.984+451.833\log x$	0.67	5
土坎+茶叶	$y=-1605.237+279.089\log x$	0.71	5
花生+油菜	$y=-165.289+29.254\log x$	0.44	12
人工林	$y=-638.553+108.375\log x$	0.88	5
自然坡地黄豆	$y=1.116x-237.697$	0.73	5
香根草等高绿篱	$y=0.299x-154.712$	0.92	6
土坎梯田+花生油菜	$y=0.000126x^{2.1628}$	0.96	5

4 讨论

4.1 不同水保措施的区域适宜性

本研究中实施水土保持措施小区的土壤侵蚀量均低于无水土保持措施的小区,说明水土保持措施能够减少地表泥沙流失量及径流量,进而控制土壤侵蚀的发生,符合其他学者^[20-21]对水土保持措施的研究。石坎、土坎梯田作为防治侵蚀的重要工程措施,具有良好的减流减沙作用,但其也有一定的区域局限性,

如造价高、易受洪水摧毁等^[21],并且其效益也受到土壤质量影响^[22]。因此,采用此措施时,需要考虑区域的适宜性,造价能否承受、是否经常发生灾害等。香根草、香根草等高绿篱 2 种水保措施在本研究中显示植被在坡地上显著的减流减沙效益,而等高绿篱的方式种植取得效益更优于正常种植,表明等高绿篱种植的优越性。等高绿篱优势在于地貌破坏小、保持土壤养分、成本较低及不易损毁^[23-24],但其需要一定的水分和养分,黄冈市降雨丰沛,土壤养分较为充足,而其他地区采取此措施,也需考虑地区的气候和土壤条件。本研究涉及伞房、萱草、香根草 3 种等高绿篱,显示出不同类型植物篱水土保持效益也有差异,因此也需探索当地最适宜的绿篱类型与实施模式。石坎茶叶、土坎/石坎梯田+板栗说明综合措施也比单一措施更具有效益,侵蚀严重的地区可以采取多种措施结合的方式进行侵蚀防控^[25],灵活配置不同的水土保持措施,采取适应本地区的方法。

香根草等高绿篱、人工林、石坎梯田、土坎梯田等水土保持措施其减沙效益与减流效益并不相同,如石坎梯田、土坎梯田相应的水保措施的减沙效益优于减流效益。这一过程包括微调地形及截留径流和泥沙的作用,然而其中的原因和发生机理还有待进一步深入探讨。贺军等^[26]从坡改梯工程的 2 个核心要素—坡度、植被出发,运用数学模型、结构方程模型等方法分析坡改梯工程的水保效应机理,为梯田效益机理提供参考。本研究中还将不同水保措施的土壤流失量与侵蚀性降水量进行多次拟合,得出最佳拟合关系,探索水保措施效益受侵蚀性降水量的影响,也为降水量差异的不同区域选择水保措施提供参考。

4.2 黄冈市土壤侵蚀防治建议

黄冈市土壤侵蚀发生区主要是西北部山区县(市)一大别山区,发生地主要分布在坡耕地上。而黄冈市的坡耕地面积占全省耕地面积的 9.32%, $6^{\circ}\sim 15^{\circ}$, $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$, 25° 以上的土壤侵蚀指数及平均土壤侵蚀指数,黄冈市均位于前三^[27]。本研究发现,与正常坡耕地种植耕作相比,在梯田上种植农作物有着良好的侵蚀防控效果,如石坎梯田+花生油菜的土壤侵蚀削减率达到 60%,并且梯田也能在长时段中发挥水保效益^[28],故可在西北部适宜地区实施坡改梯,这不仅符合黄冈市广大坡耕地面积的现状,而且水保措施也能帮助农民获取经济收益^[29-30]。部分学者解析影响土壤侵蚀的主要因素,明确植被对于土壤侵蚀的影响作用^[31-32],以及退耕还林还草对地表径流和产水量的作用^[33],而本研究的人工林、土坎茶叶良好的减流减沙效益也证明荒坡治理、植树造林能够有效地

遏制土壤侵蚀,值得在黄冈市及大别山地区大力推广。香根草等高绿篱的综合效益达到 70%,香根草稍次之,因此在侵蚀严重且无法采用有效的工程措施的地区,种植植被、退耕还草或可取得良好的水保效益,防止土壤侵蚀的加剧。基于此,优化土地利用结构、坡改梯、退耕还草还林、严控乱砍滥伐等措施对黄冈市的侵蚀治理有着重要的作用和意义。

5 结论

(1)正常农耕种植而不采取其他水保措施的情况下,除在自然坡地种植黄豆外,未有明显的水保效益。石坎梯田+耕作、土坎梯田+耕作配置下,较于单独的农耕种植,水保效益得到很大提升,如石坎梯田+花生油菜减沙率达到 55%。

(2)生物措施结合工程措施的配置模式发挥着良好的水土保持效益,但其不同模式下的减流减沙效益存在差异。石坎梯田+板栗、土坎梯田+板栗、土坎+茶叶的减沙效益分别达到 45%,35%,65%,土坎+茶叶的减流效益达到 20%,而石坎梯田+板栗、土坎梯田+板栗则并不稳定。

(3)单独的生物措施模式下,香根草、香根草等高绿篱水土保持效益极为优异,香根草等高绿篱的综合效益达到 70%,说明等高绿篱种植植被可以在黄冈地区大力推广,需要注意的是种植间隔的不同影响其水保效益。

(4)水土保持效益较为显著的配置模式排序为香根草等高绿篱>香根草≈人工林>土坎+茶叶>石坎黄豆>石坎梯田+花生油菜。

(5)分析并拟合不同水保措施的土壤流失量与侵蚀性降水量发现,多数水保措施的土壤流失量与侵蚀性降水量呈良好的对数或指数关系。

本文探讨依据野外径流小区的观测数据研究不同水保措施效益的方法,并以大别山区黄冈市为例开展研究,研究成果与当地实际情况较为吻合,可为黄冈市及大别山区提供水土保持措施的布置和土壤侵蚀研究提供参考和依据。随着我国各地小区观测数据的进一步积累,大范围的水保措施适宜性及效应机理值得进一步地研究。后续研究可基于区域水土流失现状,提取区域水土保持措施类型以及空间分布,分析区域内的水保措施配置模式,结合不同水保措施效益优化措施配置。本文尝试解析侵蚀性降水量与水保效益的关系,并进行拟合分析,之后可深入研究影响水保效益的降水因素,如降雨强度、不同降雨模式等,以及其他效益影响因素,探究其影响机理。

参考文献:

[1] 田培,王哲,喻海军,等.鄂西北山丘区水土流失时空格

局及影响因子定量评价[J].水土保持研究,2023,30(3):76-85.

TIAN P, WANG Z, YU H J, et al. Quantitative evaluation of spatiotemporal pattern and influencing factors of soil and water loss in hilly areas of northwestern Hubei Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3):76-85.

[2] WANG F, TIAN P, GUO W, et al. Effects of rainfall patterns, vegetation cover types and antecedent soil moisture on run-off and soil loss of typical Luvisol in southern China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2024. DOI:10.1002/esp.5871

[3] BOIX-FAYOS C, MARTÍNEZ-MENA M, ARNAU-ROSALÉN E, et al. Measuring soil erosion by field plots: Understanding the sources of variation[J]. Earth-Science Reviews, 2006, 78(3/4):267-285.

[4] 朱燕琴,赵志斌,齐广平,等.陇中黄土高原丘陵沟壑区不同植被恢复模式下次降雨产流产沙特征[J].干旱区地理,2020,43(4):920-927.

ZHU Y Q, ZHAO Z B, QI G P, et al. Characteristics of slope runoff and sediment of different vegetation restoration patterns under individual rainfall events in hilly and gully loess region in middle Gansu Province[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(4):920-927.

[5] 尹婧,康必均,李菲,等.川东丘陵区柏木林水土保持措施径流调控效果对比[J].科学技术与工程,2022,22(15):6022-6032.

YIN J, KANG B J, LI F, et al. Runoff regulation effect of soil and water conservation measures in cupressus funebris plantation in the hilly region of East Sichuan [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(15):6022-6032.

[6] YU P Z, YANG T Q, ZHANG Z X, et al. Soil and water conservation effects of different tillage measures on phaeozems sloping farmland in Northeast China[J]. Land Degradation and Development, 2024, 35(5):1716-1733.

[7] 姚冲,黄少燕,查轩,等.暴雨条件下典型红壤区不同恢复方式侵蚀过程与特征分析[J].水土保持学报,2018,32(5):58-63.

YAO C, HUANG S Y, ZHA X, et al. Processes and characteristics of erosion of different vegetation restoration under simulated rainstorm condition in a typical red soil in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5):58-63.

[8] 李桂静,崔明,周金星,等.南方红壤区林下土壤侵蚀控制措施水土保持效益研究[J].水土保持学报,2014,28(5):1-5.

LI G J, CUI M, ZHOU J X, et al. Research of soil and water conservation benefits from forests soil erosion control measures in red soil region of Southern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(5):1-5.

[9] ANACHE J A A, WENDLAND E C, OLIVEIRA P T

- S, et al. Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: A meta-analysis of the Brazilian experience[J].*Catena*, 2017, 152: 29-39.
- [10] TIAN P, ZHU Z L, YUE Q M, et al. Soil erosion assessment by RUSLE with improved P factor and its validation: Case study on mountainous and hilly areas of Hubei Province, China[J].*International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 9(3): 433-444.
- [11] 田昌园, 张红丽, 汪军红, 等. 近30年皖西大别山土壤侵蚀时空变化及其对景观格局的响应[J].*水土保持学报*, 2024, 38(3): 1-9.
- TIAN CY, ZHANG H L, WANG J H, et al. Temporal and spatial changes of soil erosion and its response to landscape pattern in Dabie Mountains of Western Anhui in recent 30 years[J].*Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 1-9.
- [12] 江雯, 胡玉乾, 汪军红, 等. 安徽大别山区天然降雨对典型植被水土流失影响研究[J].*北京师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(2): 265-273.
- JIANG W, HU Y Q, WANG J H, et al. Natural rainfall affects soil erosion of typical vegetation in Dabie Mountains, Anhui Province[J].*Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2021, 57(2): 265-273.
- [13] 杨伟, 李璐, 欧阳曙光, 等. 大别山区板栗林地水土流失特性研究[J].*水土保持通报*, 2022, 42(2): 259-263.
- YANG W, LI L, OUYANG S G, et al. Characteristics of soil and water loss at *Castanea mollissima* woodlands in Dabie Mountain Area[J].*Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(2): 259-263.
- [14] 黄冈市水利和湖泊局. 水土保持公报[R]. 2013—2022. Huanggang Municipal Water Resources and Lake Authority. *Soil and Water Conservation Bulletin*[R]. 2018—2022.
- [15] 英山县水利与湖泊局. 水土保持公报[R]. 2018—2022. Hongan Water Resources and Lake Authority. *Soil and Water Conservation Bulletin*[R]. 2018—2022.
- [16] 杨润泽, 冯天骄, 肖辉杰, 等. 京郊强降雨条件下不同水土保持治理措施配置模式效益评价[J].*水土保持学报*, 2022, 36(1): 8-17.
- YANG R Z, FENG T J, XIAO H J, et al. Evaluating the benefits of different soil and water conservation measures under heavy rainfall conditions in the suburban areas of Beijing[J].*Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(1): 8-17.
- [17] 付世琳, 姚冲, 余倩, 等. 不同坡度和不同生育期的谷子坡耕地入渗特征[J].*水土保持学报*, 2023, 37(4): 23-30.
- FU S L, YAO C, YU Q, et al. Infiltration characteristics of millet slope farmland with different slope gradient and different growth period[J].*Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(4): 23-30.
- [18] 陈诚, 郝治邦. 模拟降雨下不同坡度土壤坡面产流产沙特征及磷和钾素流失研究[J].*水土保持研究*, 2017, 24(2): 70-76.
- CHEN C, HAO Z B. Research on slope runoff, sediment and P and K loss characteristics on slopes with different gradients under artificial simulation of rainfall[J].*Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(2): 70-76.
- [19] 韩旭, 田培, 黄建武, 等. 基于2009—2018年径流小区观测数据的武汉市土壤侵蚀因子定量评价[J].*生态学报*, 2021, 41(10): 3878-3890.
- HAN X, TIAN P, HUANG J W, et al. Quantitative evaluation of soil erosion factors in Wuhan based on observation data of runoff plots during 2009—2018[J].*Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(10): 3878-3890.
- [20] ZHAO J L, YANG Z Q, GOVERS G. Soil and water conservation measures reduce soil and water losses in China but not down to background levels: Evidence from erosion plot data[J].*Geoderma*, 2019, 337: 729-741.
- [21] FANG N, WANG L, SHI Z. Runoff and soil erosion of field plots in a subtropical mountainous region of China[J].*Journal of Hydrology*, 2017, 552: 387-395.
- [22] WANG G B, LIU B H, HENDERSON M, et al. Effect of terracing on soil moisture of slope farmland in Northeast China's black soil region[J].*Agriculture*, 2023, 13(10): e1876.
- [23] 王学强. 红壤地区水土流失治理模式效益评价及其治理范式的建立[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- WANG X Q. Comprehensive benefits evaluation of soil erosion control models and establishing the control paradigm in red soil region[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.
- [24] 马根录. 植物篱技术在湖北坡耕地治理中的应用和效益分析[J].*长江科学院院报*, 2009, 26(3): 9-12.
- MA G L. Application and benefit analysis of hedgerows technology in sloping farmland improvement of Hubei Province[J].*Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2009, 26(3): 9-12.
- [25] CHEN J, XIAO H B, LI Z W, et al. How effective are soil and water conservation measures (SWCMs) in reducing soil and water losses in the red soil hilly region of China? A meta-analysis of field plot data[J].*Science of the Total Environment*, 2020, 735: e139517.
- [26] 贺军, 刘卫敏, 南宏伟, 等. 基于小区观测的坡改梯工程水保效应机理研究[J].*水土保持通报*, 2023, 43(1): 32-43.
- HE J, LIU W M, NAN H W, et al. A study on effect mechanism of soil and water conservation of slope-to-terrace engineering based on runoff plots[J].*Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(1): 32-43.
- [27] 陈芳, 高宝林, 李杰, 等. 湖北省坡耕地现状分析及宜耕性评价[J].*水土保持研究*, 2023, 30(1): 418-422.
- CHEN F, GAO B L, LI J, et al. Status analysis and evaluation of cultivability for sloping farmland in Hubei Province[J].*Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(1): 418-422.

- of low hills[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2022, 42(12): 142-152.
- [19] GHESTEM M, VEYLON G, BERNARD A, et al. Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance[J]. *Plant and Soil*, 2014, 377(1): 43-61.
- [20] GHESTEM M, SIDLE R C, STOKES A. The influence of plant root systems on subsurface flow: Implications for slope stability[J]. *BioScience*, 2011, 61(11): 869-879.
- [21] 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.
ZHU B B, LI Z B, LI P, et al. Effect of grass coverage on sediment yield of rain on slope[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(3): 401-407.
- [22] NOVARA A, MINACAPILLI M, SANTORO A, et al. Real cover crops contribution to soil organic carbon sequestration in sloping vineyard[J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 652: 300-306.
- [23] DUCHEMIN M, HOGUE R. Reduction in agricultural non-point source pollution in the first year following establishment of an integrated grass/tree filter strip system in southern Quebec (Canada)[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 131(1/2): 85-97.
- [24] 汪雪, 刘晓静, 王静, 等. 连续间作下的紫花苜蓿/燕麦根系与碳氮代谢特性研究[J]. *草业学报*, 2024, 33(3): 85-96.
WANG X, LIU X J, WANG J, et al. Root and carbon-nitrogen metabolism characteristics of alfalfa-oat mixed stands under continuous intercropping[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(3): 85-96.
- [25] 廖义善, 唐常源, 袁再健, 等. 南方红壤区崩岗侵蚀及其防治研究进展[J]. *土壤学报*, 2018, 55(6): 1297-1312.
LIAO Y S, TANG C Y, YUAN Z J, et al. Research progress on Benggang erosion and its prevention measure in red soil region of southern China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(6): 1297-1312.
- (上接第 69 页)
- [28] JARRAY F, HERMASSI T, MECHEGUI M, et al. Long-term impact of soil and water conservation measures on soil erosion in a Tunisian semi-arid watershed [J]. *Land*, 2023, 12(8): e1537.
- [29] NIU Y H, WANG L, WAN X G, et al. A systematic review of soil erosion in citrus orchards worldwide[J]. *Catena*, 2021, 206: e105558.
- [30] DAYAKAR P, KAVI KUMAR K S. Soil and water conservation measures and rainfed agriculture in Telangana, India: Role of community and neighborhood conservation measures[J]. *Land Use Policy*, 2024, 137: e107011.
- [31] 杨严攀, 田培, 沈晨竹, 等. 基于 RUSLE 模型和地理探测器的鄂西南土壤侵蚀脆弱性评价[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(1): 91-103.
- [26] 袁再健, 马东方, 聂小东, 等. 南方红壤丘陵区林下水土流失防治研究进展[J]. *土壤学报*, 2020, 57(1): 12-21.
YUAN Z J, MA D F, NIE X D, et al. Progress in research on prevention and control of soil erosion under forest in red soil hilly region of South China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(1): 12-21.
- [27] 李前, 李忠武, 聂小东, 等. 水土流失防治措施对马尾松林土壤微生物群落分子生态网络的影响[J]. *土壤学报*, 2022, 59(3): 819-832.
LI Q, LI ZHPNG W, NIE X D, et al. Effects of soil erosion control measures on the molecular ecological network of soil microbial communities in a Masson pine forest[J]. *Journal of Soil Science*, 2022, 59(3): 819-832.
- [28] 卜晓莉, 王利民, 薛建辉. 湖滨林草复合缓冲带对泥沙和氮磷的拦截效果[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4): 32-36.
BU X L, WANG L M, XUE J H. Study on sediment and nutrient retention efficiency of integrated tree-grass riparian buffer strips[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(4): 32-36.
- [29] 汪雪, 刘晓静, 王静, 等. 紫花苜蓿-燕麦连续间作下根系及土壤养分时空变化特征[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(10): 2683-2692.
WANG X, LIU X J, WANG J, et al. Temporal-spatial variations of root and soil nutrient under continuous intercropping of alfalfa and oat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(10): 2683-2692.
- [30] 宋民欣, 吕希恒, 韩陈, 等. 三峡库区降雨特征和林草植被格局对坡面水沙产出的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(3): 82-90.
SONG M X, LU X H, HAN C, et al. Impacts of rainfall characteristics and vegetation cover patterns on slope runoff and sediment yields in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(3): 82-90.
- [32] PING Y D, TIAN P, LUO L, et al. Soil erosion sensitivity and prediction for hilly areas of Hubei Province, China, using combined RUSLE and LSTM models[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2024, 24(2): 829-846.
- [33] LI X X, MAO R C, SONG J X, et al. Response of runoff change to soil and water conservation measures in the Jing River catchment of China[J]. *Land*, 2024, 13(4): e442.