

张宇, 金鑫, 宋颖, 等. 桂北岩溶石漠化区山坡橘园不同水土保持措施效益研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(4): 248-259. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.020

ZHANG Yu, JIN Xin, SONG Ying, et al. Study on the benefits of different soil and water conservation measures in hillside citrus orchards in karst rocky desertification area of northern Guangxi Zhuang Autonomous Region[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(4): 248-259. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.020

桂北岩溶石漠化区山坡橘园不同水土保持措施效益研究

张宇^{1,2}, 金鑫^{1,2}, 宋颖¹, 郭攀³, 梁桂优^{1,2}, 翟婷^{1,2}

(1. 桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541006; 2. 桂林理工大学广西岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541006; 3. 桂林市农田灌溉试验中心站, 广西 桂林 541105)

摘要:【目的】为探索适合于岩溶石漠化区山坡橘园的最佳水土保持措施,【方法】采用修建径流观测小区的方法,对桂北岩溶区山坡橘园进行定位观测,分析植物措施、砖石围挡、PVC板围挡等3种水土保持措施在不同降雨等级(大雨、暴雨、大暴雨)下的径流、泥沙、养分流失情况,同时采用熵权-模糊综合评价法对综合效益进行定量分析。【结果】结果表明:(1)在区分与不区分降雨等级两种情况下,3种措施均表现为植物措施的减氮、减磷效益最佳,PVC板围挡的减沙效益最佳,总体上砖石围挡各指标的削减效益低于其他两种措施;大雨、暴雨等级下植物措施减流效益最好,大暴雨等级下PVC板围挡减流效益高于植物措施。(2)各水土保持措施的水、土、养分流失量以及削减效益指标并不都是随降雨等级的提升而呈单调性变化,其中产流量和养分流失量随降雨等级提升而单调递增,其他指标变化大多不呈单调性;同一措施的减流、减沙、减氮、减磷等指标随降雨等级的不同变化趋势有所差异。(3)在不区分降雨等级的情况下,在岩溶区石漠化山地橘园实施PVC板围挡措施的综合效益最佳,植物措施次之;在区分降雨等级的情况下,大雨、暴雨等级下实施植物措施综合效益最佳,大暴雨等级下实施PVC板围挡措施综合效益最佳。【结论】岩溶区石漠化山地橘园实施植物措施、PVC板围挡、砖石围挡均有一定的水土保持效益。

关键词: 降雨; 径流; 岩溶山坡; 水土保持; 侵蚀; 模糊综合评价; 橘园

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.020

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)04-0248-12



Study on the benefits of different soil and water conservation measures in hillside citrus orchards in karst rocky desertification area of northern Guangxi Zhuang Autonomous Region

ZHANG Yu^{1,2}, JIN Xin^{1,2}, SONG Ying¹, GUO Pan³, LIANG Guiyou^{1,2}, ZHAI Ting^{1,2}

(1. Guangxi Key Laboratory of Theory and Technology for Environmental Pollution Control, Guilin University of Technology,

收稿日期: 2024-02-29; 修回日期: 2024-05-15; 录用日期: 2024-05-21; 网络出版日期: 2024-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51369009); 广西自然科学基金项目(2021GXNSFAA196055); 广西重点研发计划项目(桂科 AB21075007)

作者简介: 张宇(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事水文物理规律研究。E-mail: 1158730744@qq.com

通信作者: 宋颖(1970—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事水文物理规律研究。E-mail: 402355505@qq.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Guilin 541006, Guangxi, China; 2. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin 541006, Guangxi, China; 3. Guilin City Farmland Irrigation Test Center Station, Guilin 541105, Guangxi, China)

Abstract: [Objective] In order to explore the optimal soil and water conservation measures for hillside citrus orchards in karst rocky desertification area, [Methods] a runoff observation plot method was developed to monitor the hillside citrus orchards in the karst area of northern Guangxi. The runoff, sediment, and nutrient loss under three soil and water conservation measures—vegetation planting, brick-and-stone enclosure, and PVC board enclosure—were analyzed at different rainfall levels (heavy rain, rainstorm, and heavy rainstorm). Additionally, the entropy-weight fuzzy comprehensive evaluation method was used to perform a quantitative analysis of the comprehensive benefits. [Results] The result showed that: (1) whether rainfall levels were considered or not, vegetation planting demonstrated the best nitrogen and phosphorus reduction benefits, and PVC board enclosure had the best sediment reduction benefits. In general, the reduction benefits of the brick-and-stone enclosure were lower than those of the other two measures. Vegetation planting provided the best runoff reduction benefits under heavy rain and rainstorm, while PVC board enclosure had higher runoff reduction benefits than vegetation planting under heavy rainstorm. (2) The water, soil, and nutrient loss, as well as the reduction benefit indicators of soil and water conservation measures, did not all change monotonically with the increase in rainfall level. Specifically, runoff yield and nutrient loss increased monotonically with the increase in rainfall level, while most other indicators did not show a monotonic change. The change trends in indicators such as runoff reduction, sediment reduction, nitrogen reduction, and phosphorus reduction of the same measure varied with different rainfall levels. (3) When rainfall levels were not considered, the comprehensive benefits of implementing PVC board enclosure in hillside citrus orchards in karst rocky desertification area were the best, followed by vegetation planting. When rainfall levels were considered, the comprehensive benefits of implementing vegetation planting were the best under rainfall levels of heavy rain and rainstorm, and the comprehensive benefits of implementing PVC board enclosure were the best under heavy rainstorm. [Conclusion] The implementation of vegetation planting, PVC board enclosure, and brick-and-stone enclosure in hillside citrus orchards in karst rocky desertification area all provide certain soil and water conservation benefits.

Keywords: rainfall; runoff; karst hillside; soil and water conservation; erosion; fuzzy comprehensive evaluation; citrus orchard

0 引言

柑橘是广西的主要经济果树品种之一,自2017年起,广西柑橘种植面积、产量一直位列全国第一位,成为我国柑橘最大产区^[1]。广西90%的柑橘基地分布在山区^[2],桂北等岩溶旱坡地区是广西柑橘的主要种植区域之一^[3]。桂北岩溶山区大部分坡地土层薄,土壤总量少,成土速率慢,下覆基岩类型及构造复杂^[4-5],水土一旦流失极难恢复。坡地侵蚀过程中,水力侵蚀是坡面水土流失的主因,而且坡地养分流失与水土流失的发生密切相关^[6-7],岩溶区山坡的水土流失不仅会造成水、土资源的流失,加剧岩溶区石漠化程度,还会造成土壤养分的流失,是非点源污染发生的重要形式。氮、磷是柑橘生长的必不可少元素,水土流失造成的氮、磷流失,会导致土壤肥力下降,影响柑橘的生长与产量。在南方的果园种植过程中,常又以清耕(即只种柑橘树,无其他水土保持措施)方式为主,水土流失问题也较为严重,而水土保持措施具有良好的保持水土、涵养水源、改良土壤

的作用^[8]。因此,研究桂北岩溶石漠化区山坡橘园不同水土保持措施的产流产沙、养分流失特征以及水土保持效益对于科学选择水保措施具有重要的指导意义。

目前,国内外研究者对不同耕作措施^[9-10]、土地利用方式^[11]、生物措施^[12-15]、工程措施坡改梯^[16]和秸秆覆盖措施^[17]等水土保持措施的产流产沙特征、养分流失特征以及水土保持效益均已开展了相关研究。关于柑橘园水土保持措施的研究,大多数集中在非岩溶区。张杰等^[8]在非岩溶地区研究典型水土保持措施对红壤坡地柑橘园水土保持效益的影响,发现植物措施的综合水土保持效益最优。DUAN等^[18]研究中国南方丘陵橘园不同地表覆盖的水土流失特征,发现种草覆盖的径流系数和侵蚀量最小,水土保持效益最好。江才伦等^[19]研究重庆忠县紫色土柑橘园4种耕作处理(中耕、覆盖、生草和清耕)的水土流失特征,发现生草栽培可显著减少橘园的水土流失。虽然关于柑橘园水土保持措施的研究已经取得一定的成果,但对于西南岩溶区山坡橘园,特别是岩溶石漠化

区坡地橘园不同水土保持措施的径流、泥沙、养分流失特征及水土保持效益的研究仍然较少。

多数研究通过直接对比不同水土保持措施的减流、减沙、减氮、减磷效益等指标参数,确定最佳水土保持措施,没有采用综合评价方法,构建评价体系来定量分析与比较水土保持综合效益。同一水土保持措施在减流、减沙、减氮、减磷效益等各方面可能会有所差异,其削减效益不一定是最佳,因此需要采用综合评价的方法进行定量分析。模糊综合评价法就是几种常用的综合评价方法之一,可对具有模糊特性的数据和因子等单指标进行评价^[20-21]。而模糊综合评价方法中权值的确定尤为重要,常用的权值确定方法可分为主观赋权法和客观赋权法两大类^[22]。熵权法计算权重是一种客观方法,相较于层次分析法等主观方法具有一定的精确性,具有适应性较高的特点^[23]。

因此,本文通过在桂北岩溶石漠化区山坡橘园修建径流观测小区,研究不同降雨等级下不同水土保持措施的水土流失特征、养分流失特征以及水土保持效益,并采用熵权-模糊综合评价法对水土保持综合效益进行定量分析与比较,以期探寻一种适合岩溶石漠化区山坡橘园的最佳水土保持措施,同时为岩溶区山坡橘园水土流失防治、保持土壤肥力、减少非点源污染、提高柑橘产量提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验径流小区位于广西壮族自治区桂林市灵川县潮田乡福田村的一处典型岩溶石漠化区山坡上(110°29'30"E—110°29'50"E, 25°04'40"N—25°04'50"N)。试验区平均海拔 288.40 m,为岩溶峰丛地貌。该区域属于亚热带季风气候区,年平均降雨量 1 941.5 mm,5—8 月降雨占全年降雨量的 70%左右,四季分明,光热充足,雨热同季,雨量充沛,利于各种农作物及经济作物生长的特征充分体现。

试验区坡地种植柑橘,山脚种有沙田柚,柑橘共种植有 717 株,柑橘种植面积为 10 667 m²。试验区的柑橘品种为砂糖橘,砂糖橘果树的平均株行距为 4.0 m×3.0 m,于 2019 年定植,柑橘树龄为 4 a。试验区坡地的平均坡度 27.5°,土壤为黄壤。土壤呈弱酸性,pH 值在 4.92~5.75 之间,土壤粒径组成中黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.050 mm)、砂粒(0.050~2.000 mm)占比分别为 6.27%、47.96%、45.77%。根据美国农业部的土壤质地分类标准^[24],

试验区土壤质地为砂质壤土。

1.2 试验设计

本试验研究的目的是寻找一种适合岩溶石漠化山地橘园的最佳水保措施,故试验的水保措施设计除了参考前人在非岩溶区果园的水保措施设计外,还考虑了该措施在岩溶石漠化山地橘园是否便于实施、易于推广、不对自然景观进行较大改变等因素。有关研究显示,在果园中实施植物措施或者工程措施中的梯田工程搭配梯壁植草、反坡梯田均能取得较好的减流减沙效果^[8,25-27],故本试验水土保持措施设有植物措施和工程措施两类。岩溶石漠化区山坡土层薄,基岩裸露,山坡陡峭不一,坡改梯措施实施难度极大,对岩溶山坡已有的橘园破坏性大,且坡改梯措施工程量大、投入高,推广难度高。同时岩溶区地表产流产沙少,单纯从水土流失防治的角度来看,常用的坡改梯措施在土层浅薄的岩溶山地应用得不偿失^[28]。因此,本试验的工程措施改设为砖石围挡、PVC 板围挡。砖石围挡、PVC 板围挡措施较坡改梯措施具有对山坡破坏性小、易于实施、费用低、易于在岩溶石漠化区山坡推广等特点。

试验采用修建野外径流观测小区的方法,在岩溶石漠化区坡地柑橘园内选择柑橘植株长势和坡度较一致的坡面修建 4 个野外径流观测小区。考虑到岩溶区坡地基岩裸露以及尽量减小对农户柑橘园的破坏,观测的径流小区没有采用混凝土墙做围埂边壁,而是直接采用 PVC 板做围埂。围埂的 PVC 板埋深 10 cm,高出地表 15 cm,以防止地表径流进入观测区。在小区下方设有接样桶(直径 $\varphi=60$ cm、高 $H=80$ cm 的规则圆柱形)承接小区的地表径流和泥沙,并配有导流措施连接小区径流出水口和接样桶。受岩溶区山地基岩裸露、陡峭不一的影响,建设的径流小区水平投影面积约为 3.5 m²,每个小区一株柑橘树。各径流小区的水土保持措施如表 1 所列,水土保持措施如图 1 所示。1 号无措施小区为对照小区。试验小区建成于 2022 年 4 月,观测时间为 2022 年的 5—8 月。在比较不同降雨等级下各水保措施的水土、养分流失特征以及水土保持效益时,为了减小试验结果的偶然性,每个降雨等级的降雨场数尽可能多选,至少两场,取均值进行分析与比较。

有关研究发现,总氮、总磷流失在岩溶坡耕地以径流流失为主^[29],养分通过径流流失的量要高于泥沙^[30],故本试验主要通过研究径流中的总氮、总磷流失量来对比各措施的养分流失特征以及水土保持效益。

表1 各径流小区的水保措施情况

Table 1 Soil and water conservation measures of each runoff plot

小区编号	措施名称	水保措施介绍
1号	无措施	柑橘种植观测小区内无水保措施
2号	植物措施	柑橘观测小区内种植有萝卜菜、绞股蓝, 植被覆盖度 100%
3号	砖石围挡	用砖石对柑橘树进行半月形围挡, 围挡高出地面 15 cm, 砖石围挡控制面积约 2.6 m ²
4号	PVC 板围挡	用 PVC 板对柑橘树进行半月形围挡, 围挡高出地面 15 cm, 措施围挡控制面积约 2.3 m ²

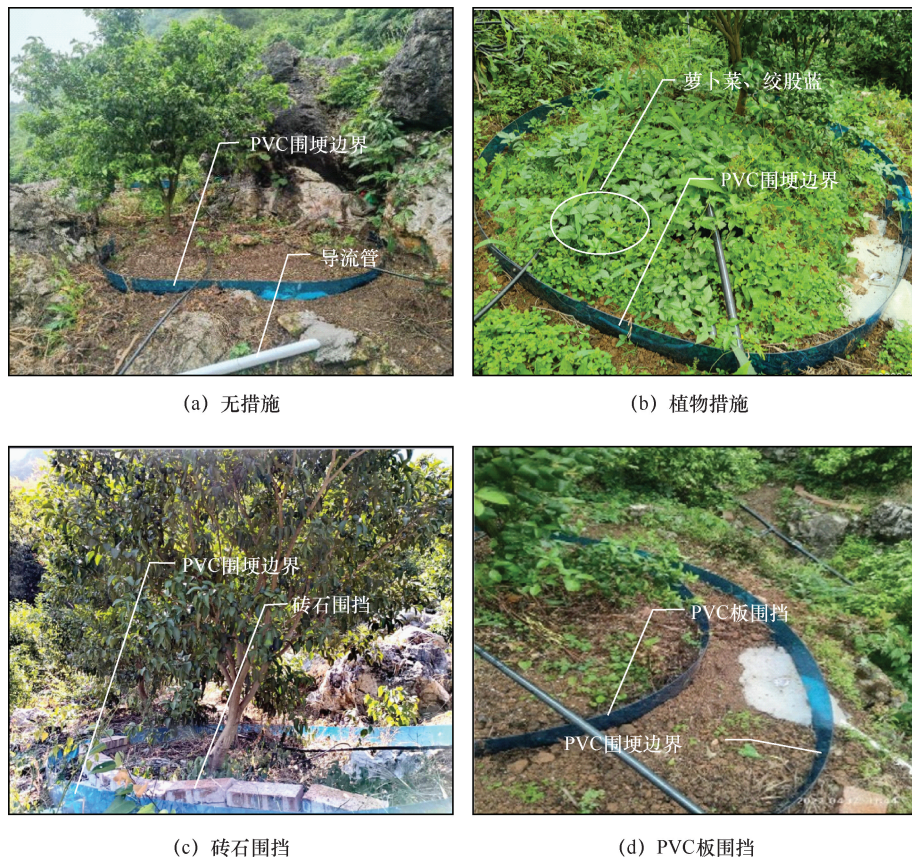


图1 试验水土保持措施

Fig. 1 Experimental soil and water conservation measures

1.3 样品采集与测定

1.3.1 采集与测定

试验区安装有两个分辨率为 0.2 mm 的翻斗式数字雨量计对自然降雨进行监测[见图 2(a)]。降雨后, 采样前先用钢直尺测量接样桶内的水深[见图 2(b)], 测量 3 次取均值, 用以计算降雨产生的径流量。测水深后, 充分搅拌均匀接样桶内的水沙, 迅速取两瓶 1 000 ml 混合均匀水沙样, 运回室内冷藏保存。水样中总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定, 总磷采用钼酸铵分光光度法测定。含沙量的测定, 把采集的水样进行沉淀至出现上清液, 倒掉上清液, 在 105 ℃ 下烘干至恒重, 烘干后称重计算含沙量。

1.3.2 降水事件筛选

试验以 12 h 为最小降雨时间间隔划分降雨场次,

降雨停歇时间间隔不足 12 h 算一场降雨, 时间间隔超过 12 h 算两场。由于试验区地处岩溶石漠化山坡, 地下漏失严重, 试验过程中大雨等级以下基本不产流, 故本研究根据 24 h 降雨量按照气象部门国家标准《降水量等级》(GB/T 28592—2012)^[31](大雨: 24 h 降雨量 25.00~49.90 mm; 暴雨: 24 h 降雨量 50.00~99.90 mm; 大暴雨: 24 h 降雨量 100.00~250.00 mm)对观测时段 2022 年 5—8 月内的降雨场次进行划分和筛选, 从中筛选出多数观测小区有产流的 7 场次降雨, 情况如表 2 所列, 其中包括大雨 2 场、暴雨 3 场、大暴雨 2 场。

1.4 数据的处理

计算径流深、土壤流失量、总磷流失量、总氮流失量、削减效益等参数, 用 Origin 绘图, 用 SPSS 软件进行分析。

径流深为每次降雨产流的径流总量与径流小区投影面积之比; 土壤流失量为每次降雨的泥沙总量与径流小区投影面

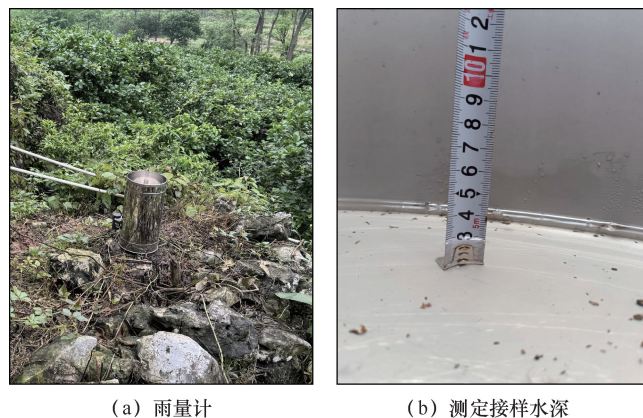


图2 雨量计与接样桶水深测定

Fig. 2 Rain gauge and sampling bucket water depth measurement

表2 降雨情况

Table 2 Rainfall conditions

降雨场次	总降雨量 /mm	I_{30} /mm·h ⁻¹	最大24h降 雨量/mm	降雨等级
1	63.8	50.8	29.9	大雨
2	83.3	65.6	42.6	大雨
3	126.7	36.4	87.4	暴雨
4	111.2	64.4	55.9	暴雨
5	121.1	40.6	65.4	暴雨
6	404.6	60.2	162.0	大暴雨
7	159.7	76.8	152.1	大暴雨

积之比值。总磷、总氮流失量为每次降雨径流中总磷、总氮流失总量与小区投影面积之比。减流效益、减沙效益、减磷效益、减氮效益为与对照小区相比的减少效益。

减流效益(CR)、减沙效益(CS)、减磷效益(CTP)、减氮效益(CTN)的计算公式为

$$CR = \frac{R_{CK} - R_L}{R_{CK}} \times 100\% \quad (1)$$

$$CS = \frac{S_{CK} - S_L}{S_{CK}} \times 100\% \quad (2)$$

$$CTP = \frac{STP_{CK} - STP_L}{STP_{CK}} \times 100\% \quad (3)$$

$$CTN = \frac{STN_{CK} - STN_L}{STN_{CK}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, R_{CK} 、 R_L 分别为对照小区和水保措施小区的径流深(mm); S_{CK} 、 S_L 分别为对照小区和水保措施小区的土壤流失量(g/m^2); STP_{CK} 、 STP_L 分别为对照小区和水保措施小区的总磷流失量(g/m^2); STN_{CK} 、 STN_L 分别为对照小区和水保措施小区的总氮流失量(g/m^2)。

采用模糊综合评价法进行综合效益分析,定量比较植物措施、砖石围挡、PVC板围挡的综合效益。采用熵权法进行权重计算,熵权法计算权重参照王德龙、范新宇等^[32-33]的计算方法。同时参考杨庭瑞^[23]模糊综合评价的构建过程,以减流效益、减沙效益、减氮效益、减磷效益构成因素集,确定综合评判集,参考杨庭瑞文中模糊综合评判隶属度的计算方法计算隶属度。最后采用 $M(\cdot, +)$ 乘加合成算子计算综合评价结果。

2 结果与分析

2.1 不同措施的产流特征以及减流效果分析

不同措施下7场次降雨的累计径流深表现为无措施>砖石围挡>PVC板围挡>植物措施(见表3),植物

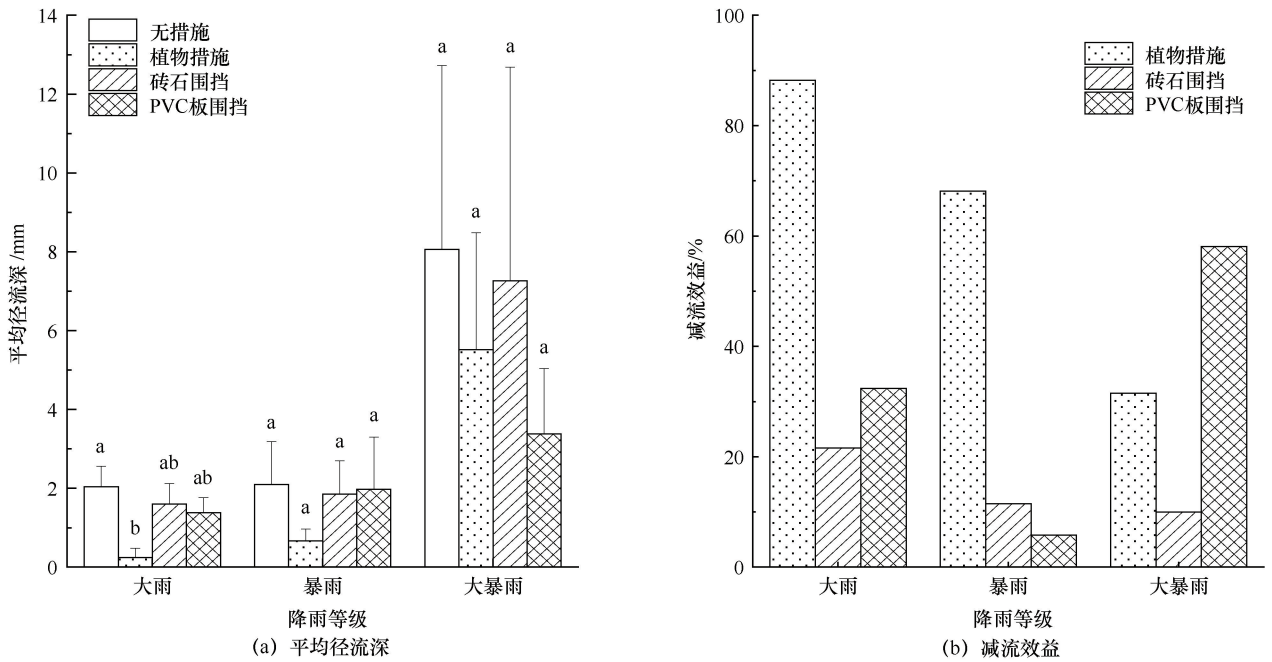
措施、砖石围挡、PVC板围挡小区的减流效益分别为48.95%、12.11%、41.71%。总体上植物措施的保水、减流效果最佳,砖石围挡最低。这是因为植物措施有截留降雨、降低雨水的落地速度、减缓径流产生、增加入渗的作用^[34-35],同时植物措施覆盖范围较大,大于PVC和砖石围挡的控制范围,使得整个集雨范围内的地表径流总体最少。PVC和砖石围挡只能拦截围挡范围内的径流,围挡范围外的集水区无减流措施,造成植物措施总体减流效果最好。砖石围挡的减流效益比PVC板围挡的低,这是由于砖石围挡措施其砖石之间存在缝隙,没有用水泥填充,部分径流会通过缝隙流出。各小区的平均径流深随降雨等级增大而增大[见图3(a)]。无措施小区的平均径流深在三个降雨等级中均为最大值;在大雨和暴雨等级下,植物措施的平均径流深最小,大雨等级下的径流深显著小于其他措施($P < 0.05$);在大暴雨等级下,PVC板围挡的平均径流深最小。

表3 不同措施小区的径流深

Table 3 Runoff depths of plots with different measures

降雨场次	降雨等级	径流深/mm			
		无措施	植物措施	砖石围挡	PVC板围挡
1	大雨	1.52	0.00	1.08	1.00
2	大雨	2.56	0.48	2.12	1.76
3	暴雨	1.64	0.40	1.56	1.44
4	暴雨	3.60	1.08	3.00	3.80
5	暴雨	1.04	0.52	1.00	0.68
6	大暴雨	12.72	8.48	12.68	5.04
7	大暴雨	3.40	2.56	1.84	1.72
总径流深/mm		26.48	13.52	23.27	15.44
减流效益/%		—	48.95	12.11	41.71

植物措施和砖石围挡的减流效益均随降雨的变大而减小[见图3(b)、表4],这表明降雨量越小,植物措施和砖石围挡的保水效果越好。PVC板围挡的减流效益随降雨等级的提升则不呈现单调性变化,在大暴雨等级下,PVC板围挡的减流效益最高,在大雨等级下其减流效益比暴雨好,这可能是受雨强、入渗面积和地下漏失的共同影响。三个降雨等级的平均雨强 I_{30} 为大雨58.20 mm/h、暴雨47.13 mm/h、大暴雨68.50 mm/h,雨强越大越易产流,但PVC板围挡在径流未达到其围挡拦截的上限时,径流不易从围挡两侧流失。在雨强大、产流量大的同时,径流因受PVC板围挡的影响水面向上坡移,径流的平铺入渗面积增大,而岩溶山坡地下漏失量大,故大雨强时因入渗面积的增大其入渗量大大增加,从而导致大雨强的减流效益反而比小雨强好。在大雨和暴雨等级下植



不同字母表示同一降雨等级下不同措施之间差异显著 ($P < 0.05$)

图3 不同降雨等级下各措施的平均径流深以及减流效益

Fig. 3 Average runoff depths and runoff reduction benefits of different measures under different rainfall levels

表4 不同降雨等级下各措施减流效益 %

Table 4 Runoff reduction benefits of different measures under different rainfall levels %

降雨等级	植物措施	砖石围挡	PVC板围挡
大雨	88.24	21.59	32.37
暴雨	68.16	11.48	5.77
大暴雨	31.52	9.96	58.08

物措施的减流效果最好,但在大暴雨等级下PVC板围挡的减流效益最好。这种情况说明同一水土保持措施在不同降雨等级下,其水土保持效果并不是一直保持最好。

2.2 不同措施的产沙特征以及减沙效果分析

不同措施的累计产沙量表现为无措施>砖石围挡>植物措施>PVC板围挡(见图4),植物措施、砖石围挡、PVC板围挡的减沙效益分别为52.38%、45.67%、79.54%。PVC板围挡的减沙效益最好,这是因为PVC板无缝隙,径流中的泥沙易在挡板前被拦截而淤积,故产沙量较小。植物措施减沙效益次之,但比砖石围挡效果好,这是由于对于较大雨强和雨量,植物截留降雨和缓冲降雨对地表的击溅有限,会有泥沙随径流从植株间流走,但植物措施防止击溅产沙的效果好于砖石围挡。不同降雨等级下各措施的平均产沙量以及减沙效益情况如图5所示。

由图5(a)可知,各措施的平均产沙量随降雨等

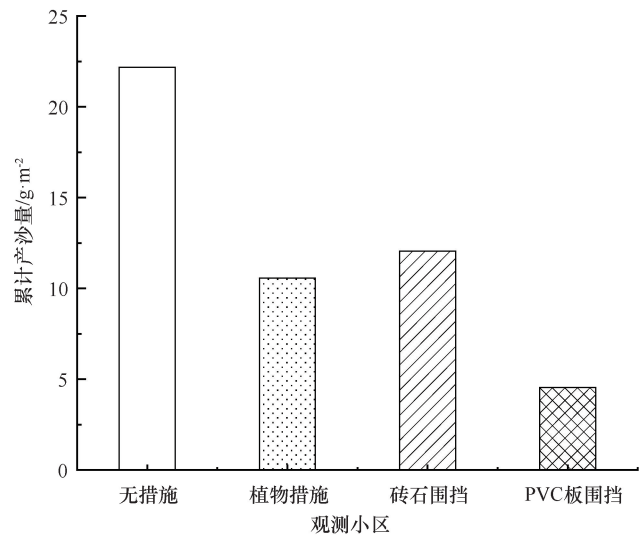


图4 不同措施的累计产沙量

Fig. 4 Cumulative sediment yields of different measures

级的增大均呈现先减小后增大的变化趋势,均表现为在暴雨等级下的平均产沙量最小。有研究表明,地表的产沙量与雨强呈正相关^[36],雨强越大,雨滴越易击溅分离土壤颗粒而产沙。各措施的平均产沙量这一变化可能是受最大30 min雨强的影响。本试验各降雨等级的平均 I_{30} 呈现大暴雨68.50 mm/h>大雨58.20 mm/h>暴雨47.13 mm/h,这与平均产沙量的变化一致。各降雨等级下,PVC板围挡措施的平均

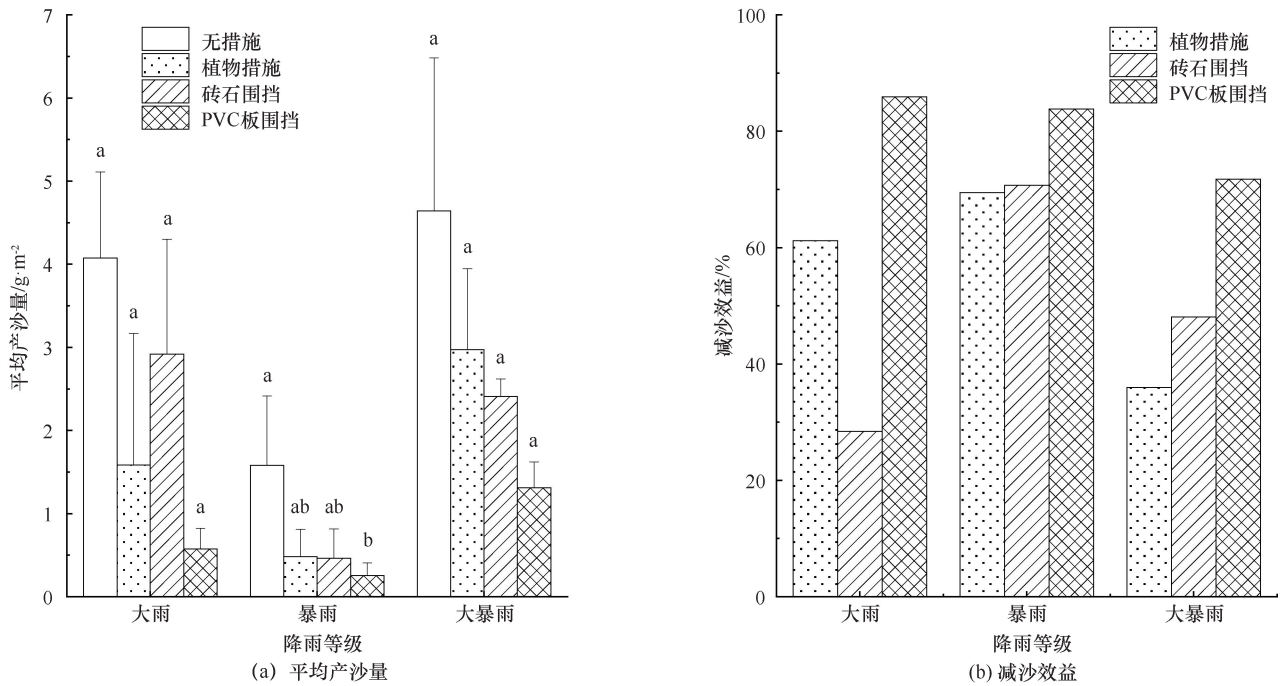


图5 不同降雨等级下各措施的平均产沙量以及减沙效益

Fig. 5 Average sediment yields and sediment reduction benefits of different measures under different rainfall levels

产沙量均为最小；暴雨和大暴雨等级下，植物措施产沙量大于砖石围挡与PVC板围挡，说明围挡措施的拦沙效果较好。但大雨等级下植物措施的产沙量小于砖石围挡，这主要是在降雨总量较小时，植物措施截留降雨、防止击溅产沙的作用更为显著所致。

由图5(b)可知，在不同降雨等级下，各水土保持措施均有一定的减沙效益，总体上暴雨等级下各措施的减沙效益最好；在不同降雨等级下，PVC板围挡的减沙、保土的效果均比其他措施好，减沙效益在71.76%~85.91%之间；植物措施在大雨等级下的减沙效益高于砖石围挡，暴雨、大暴雨时低于砖石围挡，这说明在较大降雨等级下，工程围挡措施的减沙效果要好于植物措施。

2.3 不同措施的养分流失特征以及削减效果分析

总氮、总磷的累计流失量均表现为无措施>砖石围挡>PVC板围挡>植物措施(见图6)，植物措施的减氮、减磷效益最佳，减氮、减磷效益分别为91.66%、88.58%；砖石围挡的减氮、减磷效益最低，植物措施的减氮、减磷效益分别是砖石围挡的2.1倍、3.6倍。这是由于植物措施的减流效益好，产生的径流远小于其他措施，故植物措施养分流失量最小。

总氮、总磷流失量与降雨等级密切相关，随着降雨等级的增大，平均径流深增大，各措施的总氮、总磷平均流失量也增大(见图7)；在暴雨与大暴雨等级

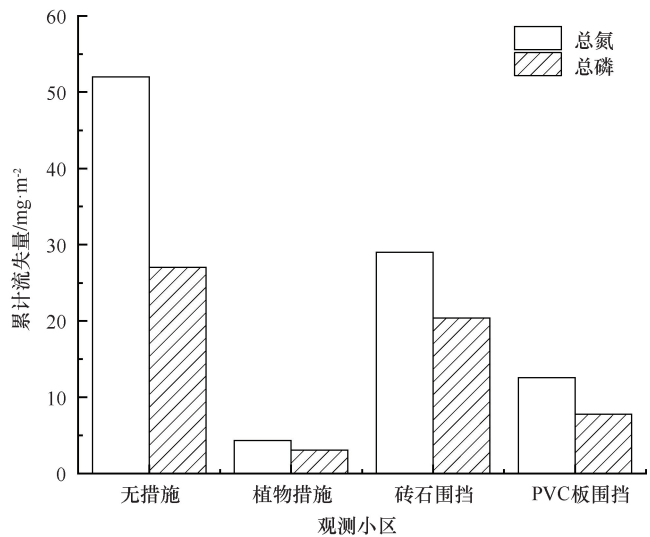


图6 不同措施的累计总氮、总磷流失量

Fig. 6 Cumulative loss of total nitrogen and total phosphorus of different measures

下，各措施的总氮、总磷平均流失量均表现为无措施>砖石围挡>PVC板围挡>植物措施；在大雨等级下，PVC板围挡平均径流深小于砖石围挡，但PVC板围挡的总氮、总磷平均流失量大于砖石围挡，这可能是因为PVC板围挡减缓径流产生的能力比砖石围挡强，径流在PVC板前受阻挡滞留的时间比砖石围挡长，土壤中更多的氮、磷向径流中迁移，使得径流中的氮、磷浓度大于砖石围挡的浓度(见表5)；暴雨

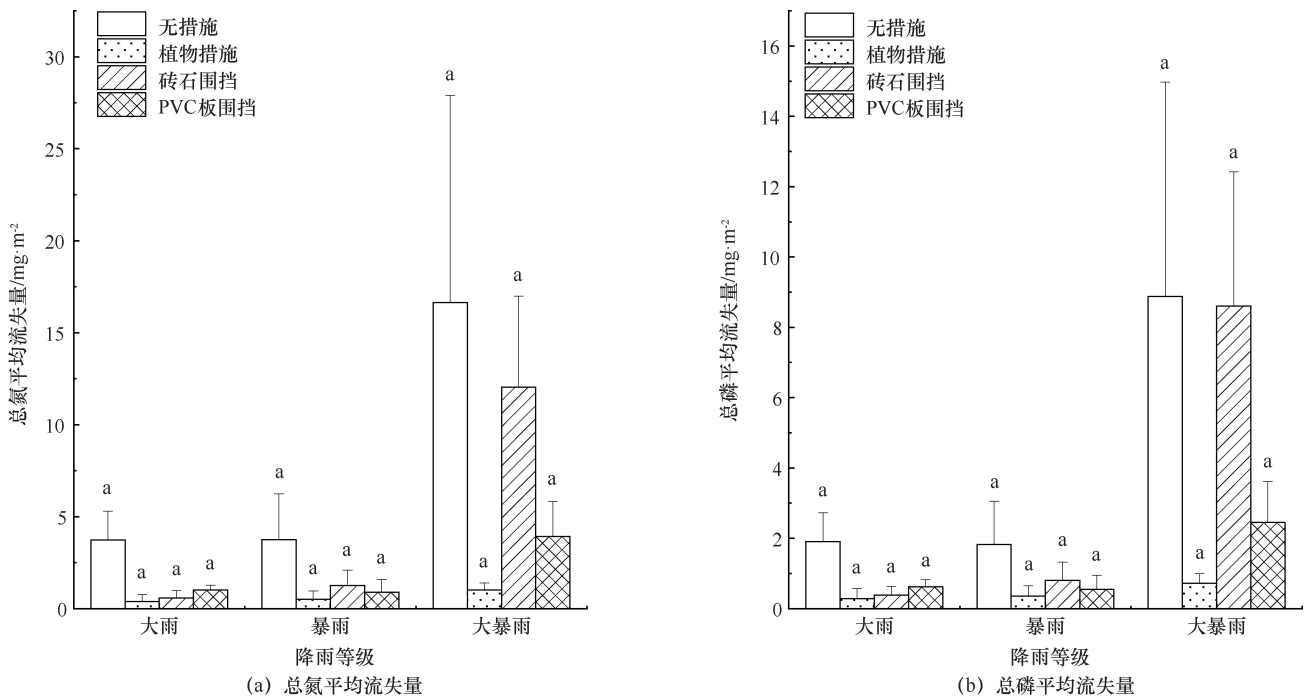


图7 不同降雨等级下各措施的总氮、总磷平均流失量

Fig. 7 Average loss of total nitrogen and total phosphorus of different measures under different rainfall levels

表5 总氮、总磷平均浓度

Table 5 Average concentrations of total nitrogen and total phosphorus

降雨等级	无措施		植物措施		砖石围挡		PVC板围挡	
	总氮浓度	总磷浓度	总氮浓度	总磷浓度	总氮浓度	总磷浓度	总氮浓度	总磷浓度
大雨	1.75 ± 0.32	0.89 ± 0.18	0.80 ± 0.80	0.60 ± 0.60	0.31 ± 0.15	0.21 ± 0.09	0.73 ± 0.01	0.44 ± 0.03
暴雨	1.65 ± 0.26	0.81 ± 0.13	0.65 ± 0.33	0.46 ± 0.22	0.63 ± 0.17	0.42 ± 0.13	0.45 ± 0.08	0.27 ± 0.03
大暴雨	1.89 ± 0.30	1.00 ± 0.18	0.21 ± 0.04	0.15 ± 0.03	2.60 ± 1.26	1.79 ± 0.81	1.17 ± 0.01	0.73 ± 0.01

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

和大暴雨等级下PVC板围挡的总氮、总磷平均流失量小于砖石围挡, 主要是因为PVC板围挡保水效果好, 产生的径流远小于砖石围挡。

植物措施的减氮、减磷效益表现为大暴雨>大雨>暴雨(见图8), PVC板围挡表现为随降雨等级增大而增大, 砖石围挡表现为随降雨等级的增大而减小。植物措施和PVC板围挡的减氮、减磷随降雨等级的变化, 其削减效益变幅不大, 但砖石围挡的削减效益变幅较大, 特别是从暴雨等级转变为大暴雨时, 砖石围挡削减效益降幅巨大。这说明不同降雨等级下植物措施和PVC板围挡的减氮、减磷效益较为稳定, 砖石围挡的稳定性较差。

对比各措施的削减效益, 发现不同降雨等级下植物措施的减氮、减磷均为最好, 暴雨和大暴雨等级下PVC板围挡减氮、减磷效益大于砖石围挡, 大雨等级下砖石围挡削减效益大于PVC板围挡。植物措施的减氮、减磷效益呈现在大暴雨等级下最好, 削减效

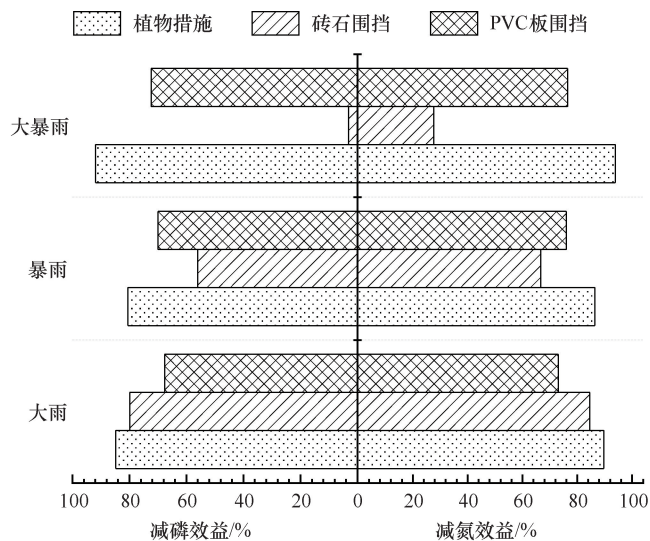


图8 减氮、减磷效益

Fig. 8 Nitrogen and phosphorus reduction benefits

益在90%以上, 这可能是在大暴雨等级下, 雨强和

降雨量大,能在较短的时间内迅速形成地表径流并流入接样桶,产生的地表径流与土壤接触的时间较短,淋溶出的养分少,从而使在大暴雨等级下径流中的氮磷含量较低(见表5)。

2.4 综合效益分析

在不同的降雨等级下同一措施各指标削减效益不一定都是最好或最差,要确定水土保持综合效益最佳的措施,就需要对各水土措施进行定量的综合评价。本文采用熵权-模糊综合评价法进行综合效益分析,定量比较植物措施、砖石围挡、PVC板围挡的综合效益。熵权法计算出的权重如表6所列。计算出综合评价结果如表7所列,综合评价值越大,综合效益越好。

表6 7场次降雨及各降雨等级权重计算值

Table 6 Seven rainfall events and the calculated weight values for different rainfall levels

降雨等级	减流效益	减沙效益	减氮效益	减磷效益
7场次降雨	0.19	0.40	0.21	0.20
大雨	0.41	0.21	0.19	0.19
暴雨	0.34	0.35	0.16	0.15
大暴雨	0.27	0.32	0.21	0.20

表7 综合评价值

Table 7 Comprehensive evaluation values

措施	7场次降雨	大雨	暴雨	大暴雨
植物措施	0.40	0.47	0.50	0.37
砖石围挡	0.20	0.23	0.24	0.16
PVC板围挡	0.41	0.31	0.26	0.47

由表7可知,总体上水土保持措施综合效益评价值呈现PVC板围挡>植物措施>砖石围挡, PVC板围挡综合效益最好(综合评价值为0.41),但PVC板围挡和植物措施的综合评价值相差很小,两者的水土保持综合效益均是砖石围挡的两倍左右。在大雨和暴雨等级下,水土保持综合效益均呈现植物措施>PVC板围挡>砖石围挡;在大暴雨等级下, PVC板围挡的综合效益最佳(综合评价值为0.47),呈现PVC板围挡>植物措施>砖石围挡。综上,砖石围挡在各降雨条件下综合效益均是最小;在大暴雨条件下,植物措施的综合效益不及PVC板围挡,但在大雨、暴雨等级下均优于PVC板围挡。

3 结果讨论

本文研究发现植物措施有较好的水土保持效益,植物措施有截留降雨、降低雨滴动能、减缓径流产生、增加入渗等作用,且植物根系能增强土壤

抗冲性,从而有效地减小产流产沙,这与前人的研究结果相似^[37]。在大雨、暴雨等级下植物措施的径流深均为最小,但在大暴雨等级下植物措施的径流深大于PVC板围挡,减流效益小于PVC板围挡,这是因为植物措施的截留和增加入渗的作用在雨强和雨量足够大的情况下,其增加的入渗和截留量并不会明显增加^[38-39]。工程措施PVC板围挡在各降雨等级下的减沙效益均优于植物措施,砖石围挡在暴雨与大暴雨等级下的减沙效益也优于植物措施。其原因可能是暴雨、大暴雨的总雨量较大,植物措施截留降雨、减缓径流、减弱雨滴冲击表土产沙的能力有限,同时泥沙又易随径流从植株间流走,而工程围挡措施因围挡的作业使径流流速减缓,径流携带的泥沙在围挡前被拦截而淤积,大大减小径流携沙能力,使得工程围挡措施的产沙量少于植物措施。总体上工程措施在拦沙保土方面比植物措施好,这与张萌等^[40]的研究结果相似。本研究发现各措施的总氮流失量均大于总磷流失量,这表明氮比磷更容易被水体溶解和携带,这与LIU^[41]、陆淑宁^[42]等的研究结果一致。

坡改梯是水土保持的重要措施,有研究表明坡改梯工程可以减少产流量41.9%、产沙量52%^[43],但坡改梯并不适用于所有地形。坡改梯更适合于缓坡、土层较厚的坡耕地,不适合土层薄或地形破碎的坡耕地^[44]。与坡改梯相比,本研究的砖石围挡、PVC板围挡更适合岩溶石漠化地区土层薄、坡度陡、基岩裸露、地形破碎的坡地橘园。

本文研究也存在不足,研究的水保措施较为单一,各措施均为单一的植物措施或工程措施,未对组合措施进行研究。组合措施即植物措施+工程措施相结合的措施水保效益可能更好,后续可开展组合措施在岩溶石漠化区山坡橘园的保水、保土、保肥效益研究。

4 结论

(1)各水土保持措施均有一定的水土保持效益。总体而言,植物措施的减流、减氮、减磷效益最好, PVC板围挡的减沙效益最好,砖石围挡的削减效益低于其他两种措施。在不同降雨等级下,植物措施的减氮、减磷效益均为最佳, PVC板围挡的减沙效益均为最佳;大暴雨等级下PVC板围挡减流效益最好,其他降雨等级下植物措施的减流效益均为最好。

(2)随降雨等级的增大,各水土保持措施的水土、养分流失量以及减流、减沙、减氮、减磷效益等

指标不全是呈单调性变化,同一水土保持措施的减流、减沙、减氮、减磷效益之间的变化趋势也不相同。

(3)在不区分降雨等级时,岩溶石漠化区山地橘园实施PVC板围挡的综合评价价值最大(为0.41),水土保持综合效益最佳,其评价价值是砖石围挡的两倍。对不同降雨等级而言,大雨、暴雨等级下实施植物措施的综合评价价值最大(分别为0.47、0.50),综合效益最好,PVC板围挡次之;大暴雨等级下则相反其PVC围挡的综合效益最好,综合评价价值分别是植物措施、砖石围挡的1.3倍、2.9倍左右;在各降雨条件下,砖石围挡的综合效益均低于其他措施。

参考文献(References):

- [1] 高兴. 广西柑橘产业现状、存在问题及提高质量探讨[J]. 南方园艺, 2020, 31(3): 36-39.
GAO Xing. Discussion on the current situation, existing problems and quality improvement of citrus industry in Guangxi [J]. Southern Horticulture, 2020, 31(3): 36-39.
- [2] 黄雁飞, 刘斌, 陈桂芬, 等. 广西丘陵山区果园发展现状、存在问题与策略[J]. 热带农业工程, 2020, 44(3): 18-21.
HUANG Yanfei, LIU Bin, CHEN Guifen, et al. The current situation, existing problems and strategies of orchard development in hilly and mountainous areas of Guangxi [J]. Tropical Agricultural Engineering, 2020, 44(3): 18-21.
- [3] 谭宏伟, 周柳强, 谭俊杰, 等. 广西优质高产柑橘水肥管理技术研究[J]. 南方农业学报, 2019, 50(6): 1290-1296.
TAN Hongwei, ZHOU Liuqiang, TAN Junjie, et al. Study on water and fertilizer management technology of high quality and high yield citrus in Guangxi [J]. Journal of Southern Agriculture, 2019, 50(6): 1290-1296.
- [4] 李娟, 邵明, 李法虎, 等. 峰丛洼地岩溶裂隙水土漏失过程室内模拟试验[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 29-37.
LI Juan, SHAO Ming, LI Fahu, et al. Laboratory simulation experiment of water and soil loss process in karst fissure in peak cluster depression [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 29-37.
- [5] 马芊红, 张科利. 西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2018, 33(11): 1130-1141.
MA Qianhong, ZHANG Keli. Research progress and prospect of soil erosion in southwest karst area [J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(11): 1130-1141.
- [6] YUGUO H, GARY F, YING O. Effects of soil and water conservation practices on runoff, sediment and nutrient losses[J]. Water, 2018, 10(10): 1333.
- [7] HUANG R, GAO X, WANG F, et al. Effects of biochar incorporation and fertilizations on nitrogen and phosphorus losses through surface and subsurface flows in a sloping farmland of Entisol [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 300: 106988.

- [8] 张杰, 陈晓安, 汤崇军, 等. 典型水土保持措施对红壤坡地柑橘园水土保持效益的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 165-173.
ZHANG Jie, CHEN Xiaolan, TANG Chongjun, et al. Effects of typical soil and water conservation measures on soil and water conservation benefits of citrus orchard on red soil slope land [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 165-173.
- [9] 李瑞, 李勇, 熊康宁, 等. 黔中喀斯特区典型土地利用方式及耕作措施的水土流失调控效应[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 136-140.
LI Rui, LI Yong, XIONG Kangning, et al. Soil and water loss regulation effect of typical land use patterns and tillage measures in karst area of central Guizhou [J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 2017, 37(6): 136-140.
- [10] 左强, 李素雅, 房成泰, 等. 新疆生产建设兵团水土保持遥感监管实施成效及相关建议[J]. 水利发展研究, 2024, 24(5): 53-58.
ZUO Qiang, LI Suya, FANG Chengtai, et al. Implementation effectiveness of remote sensing supervision on soil and water conservation in Xinjiang Production and Construction Corps and related suggestions [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(5): 53-58.
- [11] 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 Hongjia, WU Qixin, REN Feipeng, et al. Responses of soil erosion and phosphorus output to rainfall characteristics under different land use types on slopes in karst areas [J]. Acta Agri-environmental Sciences, 2018, 37(4): 756-765.
- [12] 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 Pingping, LI Yong, SONG Tao, et al. The characteristics of erosive rainfall in typical karst areas and the prevention and control effect of soil and water loss by biological measures on slopes [J]. Journal of Ecological Environment, 2021, 30(1): 53-62.
- [13] 罗鼎, 熊康宁, 王恒松, 等. 喀斯特山地不同类型植物篱的减流减沙作用[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(4): 430-435.
LUO Ding, XIONG Kangning, WANG Hengsong, et al. Effects of different types of hedgerows on runoff and sediment reduction in karst mountainous areas [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(4): 430-435.
- [14] 张琳卿, 覃莉, 刘忠仙, 等. 黔中喀斯特地区坡面种植措施对土壤水分及产流产沙的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 15-21.
ZHANG Linqing, QIN Li, LIU Zhongxian, et al. Effects of slope planting measures on soil moisture and runoff and sediment yield in karst area of central Guizhou [J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 2021, 41(3): 15-21.
- [15] WEI B, LI Z, DUAN L, et al. Vegetation types and rainfall regimes impact on surface runoff and soil erosion over 10 years in karst

- hillslopes[J]. *Catena*, 2023, 232: 107443.
- [16] 崔静, 温庆忠, 黄佳健. 喀斯特地区石漠化综合治理研究[J]. *中国水土保持*, 2024(4): 49-52.
CUI Jing, WEN Qingzhong, HUANG Jiajian. Study on comprehensive control of rocky desertification in karst area [J]. *China Soil and Water Conservation*, 2024 (4): 49-52.
- [17] 盘礼东, 李瑞, 黎庆贵, 等. 黔西喀斯特区秸秆覆盖对坡耕地产生流沙特征的响应[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 9-16.
PAN Lidong, LI Rui, LI Qinggui, et al. Response of straw mulching to runoff and sediment characteristics of slope farmland in karst area of western Guizhou [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35 (1): 9-16.
- [18] DUAN J, LIU Y, YANG J, et al. Role of groundcover management in controlling soil erosion under extreme rainfall in citrus orchards of southern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 582: 124290.
- [19] 江才伦, 彭良志, 曹立, 等. 三峡库区紫色土坡地柑橘园不同耕作方式的水土流失研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 26-31.
JIANG Cailun, PENG Liangzhi, CAO Li, et al. Study on soil and water loss of citrus orchards with different tillage in purple soil slope land of Three Gorges Reservoir Area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25 (4): 26-31.
- [20] 潘希, 罗伟, 段兴武, 等. 水土保持效益评价方法研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2020, 18(1): 140-150.
PAN Xi, LUO Wei, DUAN Xingwu, et al. Research progress on evaluation methods of soil and water conservation benefits [J]. *China Soil and Water Conservation Science*, 2020, 18 (1): 140-150.
- [21] LIU X, LI M, GUO P, et al. Optimization of water and fertilizer coupling system based on rice grain quality [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 221: 34-46.
- [22] 全毅博, 甘能俭, 伍静, 等. 基于FAHP-Entropy赋权法的矿山地质环境影响评价: 以武鸣区灰岩矿山为例[J]. *中国矿业*, 2024, 33(2): 53-62.
QUAN Yibo, GAN Nengjian, WU Jing, et al. Mine geological impact assessment based on FAHP-Entropy weighting method: A case study of limestone mines in Wuming District [J]. *China Mining*, 2024, 33 (2): 53-62.
- [23] 毛平. 水利工程建设管理模式评价研究[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(10): 83-88.
MAO Ping. Research on evaluation of water conservancy engineering management mode [J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(10): 83-88.
- [24] 范瑞宇, 金玉, 刘延锋. 基于MATLAB GUI的土壤质地类型自动识别系统[J]. *安全与环境工程*, 2021, 28(2): 142-148.
FAN Ruiyu, JIN Yu, LIU Yanfeng. Soil texture type automatic identification system based on MATLAB GUI [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2021, 28 (2): 142-148.
- [25] 杨洁, 郭晓敏, 宋月君, 等. 江西红壤坡地柑橘园生态水文特征及水土保持效益[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(2): 468-474.
YANG Jie, GUO Xiaomin, SONG Yuejun, et al. Eco-hydrological characteristics and soil and water conservation benefits of citrus orchards on red soil slopes in Jiangxi Province [J]. *Applied Ecology*, 2012, 23 (2): 468-474.
- [26] 孙永明, 叶川, 王学雄, 等. 赣南脐橙果园水土流失现状调查分析[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(2): 67-71.
SUN Yongming, YE Chuan, WANG Xuexiong, et al. Investigation and analysis of soil and water loss in navel orange orchards in Gannan [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21 (2): 67-71.
- [27] 徐乃千. 赣南红壤丘陵区果园不同开发模式下水土保持效益研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2018.
XU Naiqian. Study on Soil And Water Conservation Benefits of Orchards Under Different Development Modes in Red Soil Hilly Areas of Southern Jiangxi [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2018.
- [28] 陈洪松, 冯腾, 李成志, 等. 西南喀斯特地区土壤侵蚀特征研究现状与展望[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 10-16.
CHEN Hongsong, FENG Teng, LI Chengzhi, et al. Research status and prospect of soil erosion characteristics in karst area of Southwest China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32 (1): 10-16.
- [29] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰. 模拟降雨下喀斯特坡耕地土壤养分输出机制[J]. *生态学报*, 2018, 38(2): 624-634.
PENG Xudong, DAI Quanhou, LI Changlan. Soil nutrient output mechanism of karst slope farmland under simulated rainfall [J]. *Ecology*, 2018, 38 (2): 624-634.
- [30] 姚一文, 戴全厚, 甘艺贤, 等. 雨强和地下孔(裂)隙度对喀斯特坡耕地养分流失的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(1): 140-151.
YAO Yiwen, DAI Quanhou, GAN Yixian, et al. Effects of rainfall intensity and underground pore (fissure) gap on nutrient loss in karst slope farmland [J]. *Chinese Agricultural Sciences*, 2021, 54 (1): 140-151.
- [31] 张泽铭, 张翠翠, 侯红运, 等. 《降水量等级》(GB/T 28592—2012)应用实例[J]. *现代农业科技*, 2016, 681(19): 223-226.
ZHANG Zeming, ZHANG Cuicui, HOU Hongyun, et al. *Precipitation Grade* (GB/T 28592—2012) application example [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2016, 681 (19): 223-226.
- [32] 王德龙. 基于熵权—模糊综合评价的民办养老机构服务质量评价研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2022.
WANG Delong. Research on Service Quality Evaluation of Private Pension Institutions Based on Entropy Weight-Fuzzy Comprehensive Evaluation [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2022.
- [33] 范新宇, 贾志献, 白雪亮, 等. 熵权模糊综合评价模型在极软岩隧洞围岩分级中的应用[J]. *工程地质学报*, 2019, 27(6): 1236-1243.
FAN Xinyu, JIA Zhixian, BAI Xueliang, et al. Application of entropy weight fuzzy comprehensive evaluation model in surrounding rock classification of extremely soft rock tunnel [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27 (6): 1236-1243.
- [34] 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 Runze, FENG Tianjiao, XIAO Huijie, et al. Benefit evaluation of different configuration modes of soil and water conservation measures under heavy rainfall conditions in the suburbs of Beijing [J]. *Soil and Water Conservation Journal*, 2022, 36 (1): 8-17.
- [35] HU Y, ZHANG F, LUO Z, et al. Soil and water conservation effects of different types of vegetation cover on runoff and erosion driven by climate and underlying surface conditions[J]. *Catena*, 2023, 231: 107347.
- [36] DAI Q, PENG X, YANG Z, et al. Runoff and erosion processes on bare slopes in the Karst Rocky Desertification Area [J]. *Catena*, 2017, 152: 218-226.
- [37] 李婷婷, 何铁光, 俞月凤, 等. 桂东北坡地果园生草栽培减流减沙效应[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(2): 31-36.
LI Tingting, HE Tiegua, YU Yuefeng, et al. Effects of grass cultivation on runoff and sediment reduction in sloping orchards in northeastern Guangxi [J]. *Soil and Water Conservation Bulletin*, 2020, 40 (2): 31-36.
- [38] 郭建平. 植物对降水截留的研究进展[J]. *应用气象学报*, 2020, 31(6): 641-652.
GUO Jianping. Research progress on precipitation interception by plants [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020, 31 (6): 641-652.
- [39] 朱永杰, 毕华兴, 霍云梅, 等. 草冠截留影响因素及其测定方法对比研究综述[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(34): 117-122.
ZHU Yongjie, BI Huaxing, HUO Yunmei, et al. Review of comparative studies on influencing factors and determination methods of canopy interception [J]. *China Agricultural Bulletin*, 2014, 30 (34): 117-122.
- [40] 张萌, 关红杰, 王若水, 等. 水土保持措施对密云板栗林坡面产流产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(5): 130-136.
- ZHANG Meng, GUAN Hongjie, WANG Ruoshui, et al. Effects of soil and water conservation measures on runoff and sediment yield of chestnut forest slope in Miyun [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37 (5): 130-136.
- [41] LIU R, WANG J, SHI J, et al. Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions[J]. *Science of The Total Environment*, 2014, 468-469: 1069-1077.
- [42] 陆淑宁, 李荣融, 姚冲, 等. 横坡垄作对坡耕地产流产沙及氮磷养分流失过程影响研究[J]. *土壤学报*, 2024, 61(5): 1271-1283.
LU Shuning, LI Rongrong, YAO Chong, et al. Study on the effects of cross-slope ridge tillage on runoff and sediment yield and nitrogen and phosphorus nutrient loss process in slope farmland [J]. *Soil Science*, 2024, 61(5): 1271-1283.
- [43] DENG C, ZHANG G, LIU Y, et al. Advantages and disadvantages of terracing: A comprehensive review[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, 9(3): 344-359.
- [44] 陈磊. 薄土坡耕地水土流失防治工程措施效应研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2014.
CHEN Lei. Research on the Effect of Soil and Water Loss Prevention and Control Engineering Measures on thin Soil Slope Farmland [D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Water and Soil Conservation and Ecological Environment Research Center of the Ministry of Education), 2014.

(责任编辑 王璐)