

香根草植物篱对三峡库区坡耕地侵蚀分布的影响

肖海^{1,2,3}, 叶朝欢¹, 张伦^{1,2}, 郭萍^{1,4}, 向瑞¹, 刘子睿¹, 王光辉¹, 夏振尧^{1,2,3}

(1.三峡库区地质灾害教育部重点实验室,湖北 宜昌 443002;2.三峡大学土木与建筑学院,湖北 宜昌 443002;
3.三峡库区生态环境教育部工程研究中心,湖北 宜昌 443002;4.惠州学院建筑与土木工程学院,广东 惠州 516007)

摘要:为探究植物篱对坡耕地侵蚀分布的影响,设置 1 个坡度(15°)、3 个降雨强度(60,90,120 mm/h)和 3 种坡面条件(裸坡对照 CK、植物篱 P 和仅有植物篱根系 R),采用稀土元素氧化物将坡面分成 5 段(自上而下),开展室内人工模拟降雨试验。结果表明:随着降雨强度的增加,各坡面条件示踪坡段的侵蚀速率和侵蚀量均有所增加,整体上均表现为 CK>R>P 的趋势,植物篱可以显著降低坡面各部位的侵蚀速率及其侵蚀量,且使得侵蚀产沙主要集中在坡中部的 Ce、La 和 Yb 3 个示踪区。与 CK 坡面条件相比,R 与 P 坡面条件下 Sm 和 Ce 示踪坡段对总侵蚀量的平均贡献率分别减少 77.15%,90.38%和 30.01%,28.35%,而 Yb、La 和 Eu 示踪坡段对总侵蚀量的平均贡献率分别增加 54.34%,35.39%和 12.39%,40.58%以及 101.45%,91.31%。研究结果表明,植物篱造成坡面下部侵蚀贡献减小而中上部侵蚀贡献增加,坡面侵蚀部位整体上移,对坡地侵蚀的空间分布有显著影响。

关键词:植物篱;三峡库区;紫色土;坡耕地;侵蚀分布

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)04-0110-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.04.015

Effects of *Vetiveria Zizanioides* Hedgerow on the Erosion Distribution of Slope Land in the Three Gorges Reservoir Area

XIAO Hai^{1,2,3}, YE Chaohuan¹, ZHANG Lun^{1,2}, GUO Ping^{1,4},

XIANG Rui¹, LIU Zirui¹, WANG Guanghui¹, XIA Zhenyao^{1,2,3}

(1.Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002; 2.College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002; 3.Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002;
4.School of Architecture and Civil Engineering, Huizhou University, Huizhou, Guangdong 516007)

Abstract: In order to reveal the influence of hedgerow on the erosion distribution of sloping land, the slope was divided into five sections (from top to bottom) by using rare earth element oxides, and the simulated rainfall experiments were conducted at one slope gradient (15°), three rainfall intensities (60, 90 and 120 mm/h) and three slope conditions (CK-control slope, P-hedgerow and R-only hedgerow root). The results showed that with the increase of rainfall intensity, the erosion rate and erosion amount of the tracer slope sections in each slope condition increased, and the overall trend was CK>R>P. The hedgerow could significantly reduce the erosion rate and its erosion amount in all parts of the slope, and the erosion sand production was mainly concentrated in the three tracer areas of Ce, La and Yb in the middle of the slope. Compared with CK slope condition, the average contribution rate of Sm and Ce tracer slope sections to total erosion decreased by 77.15%, 90.38% and 30.01%, 28.35% under R and P slope conditions, respectively, while the average contribution rate of Yb, La and Eu tracer slope sections to total erosion increased by 54.34%, 35.39% and 12.39%, 40.58% and 101.45%, 91.31%, respectively. The results indicated that hedgerow caused a decrease in erosion contribution from the lower part of the slope and an increase in erosion contribution from the middle and upper parts of the slope, which had a significant effect on the spatial distribution of slope erosion by shifting the overall erosion site upward.

收稿日期:2022-11-28

资助项目:国家自然科学基金项目(41807068,42277323,U2040207);土木工程防灾减灾湖北省引智创新示范基地项目(2021EJD026)

第一作者:肖海(1988—),男,博士,副教授,博导,主要从事土壤侵蚀与生态防护研究。E-mail:oceanshawctgu@163.com

通信作者:夏振尧(1981—),男,博士,教授,博导,主要从事边坡生态防护研究。E-mail:xzy_yc@126.com

Keywords: hedgerow; the Three Gorges Reservoir Area; purple soil; sloping land; erosion distribution

三峡库区由于其特殊的地理位置以及复杂的气候特征,水土流失严重^[1],其中70.60%的水土流失发生在人为活动强烈的坡耕地和低盖度的旱坡园地上。水土流失携带大量泥沙以及污染物进入水体,造成严重的泥沙淤积现象并影响库区水质,严重威胁三峡工程使用寿命以及灌溉、防洪和发电效益^[2]。植物篱是库区常用的水土保持措施之一,可以有效控制水土流失,改善土壤理化性质^[3],是坡耕地土壤资源保护性利用的重要手段,对库区紫色土坡耕地水土保持具有重要意义。

研究坡面侵蚀的分布规律是确定侵蚀泥沙来源、理解土壤侵蚀机制和合理布设水土保持措施的关键^[4]。目前国内外常用的土壤侵蚀分布测定方法主要包括天然放射性核素示踪法^[5]、磁性示踪法^[6]以及稀土元素示踪法^[7]等。其中,稀土元素具有难溶于水、不易淋溶、与土壤吸附性强并对土壤理化性质影响较小等优势,被认为是理想的示踪剂。因此稀土元素示踪技术在研究侵蚀方式演变、泥沙来源和泥沙沉积等方面应用广泛^[4]。近年来,稀土元素示踪技术被成功应用于研究坡面、坡沟系统和小流域中侵蚀泥沙来源与动态变化过程以及上述尺度下的侵蚀分布规律^[8]。

目前关于植物篱的研究主要集中在产流产沙过程、减流减沙效益与原因上。植物篱可以减少35%~66%的径流量和32%~87%的侵蚀泥沙量^[9]。植物篱主要通过地上茎秆的机械阻挡与拦蓄径流作用以及地下根系的改良土壤理化性质和固持土壤作用,从而达到减流减沙的效果^[10]。郭萍等^[11]定量分析了植物篱地上部分和地下部分的减流减沙效益,认为地上部分对产流产沙的影响大于其地下部分。部分学者^[12]成功将稀土元素示踪技术应用于植物篱坡地侵蚀空间分布的研究上,采用条带法在坡面上、中、下3道植物篱带的下方部位布设不同稀土元素,认为植物篱可通过拦截阻挡侵蚀泥沙使其沉积在篱前^[13],从而影响坡面侵蚀分布。然而,目前关于植物篱对坡面侵蚀分布的研究仍不够系统。

因此,为明确植物篱对坡耕地侵蚀分布的影响,本研究采用人工模拟降雨方法结合稀土元素示踪技术,以三峡库区紫色土坡耕地为研究对象,研究不同降雨强度(60,90,120 mm/h)和不同坡面条件(裸坡对照CK、植物篱P和仅有植物篱根系R)下坡面侵蚀分布情况,弄清不同示踪坡段侵蚀速率及贡献率的动态变化过程,并对比分析不同坡面条件下坡耕地侵蚀分布情况,为坡耕地植物篱优化设计及库区水土资源可持续高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为紫色土,采自湖北省秭归县水田坝乡(31°03′32″N,110°40′32″E),土样经风干后过5 mm筛网,人工剔除土壤中石头根系等杂物备用。经测定,野外土壤容重为1.30 g/cm³,pH为6.87,黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和砂粒(0.05~2.00 mm)含量分别为16.50%,38.44%,45.06%,土壤质地为壤土(美国制)。考虑稀土元素价格和用量,本研究所用稀土元素氧化物包括氧化钐(Sm₂O₃)、氧化铈(CeO₂)、氧化镧(La₂O₃)、氧化铋(Yb₂O₃)和氧化铕(Eu₂O₃)。

1.2 试验设计

已有研究^[14]表明,植物篱措施适用于坡度为15°~25°的坡耕地,三峡库区湖北段1 h最大降雨量在55~110 mm^[15]。因此,本研究设置在15°坡度条件下开展3个降雨强度(60,90,120 mm/h)的人工模拟降雨试验。同时,为研究植物篱对坡面侵蚀分布影响,考虑植物篱状态,设置裸坡对照(CK)、植物篱(P)和仅有植物篱根系(R)共3种坡面条件。此外,所有试验重复3次,因此,本研究共有27场模拟降雨试验。人工降雨试验于2019年8—10月在三峡大学人工模拟降雨试验场开展。

植物篱的比较合适间距为2.58~5.90 m^[16],坡长设置为4.40 m,其中0.40 m用于模拟植物篱区域,4.00 m用于模拟植物篱间的坡耕地。坡耕地模型由现浇钢筋混凝土底板(设有排水口)和砌砖形成的四壁构成(图1a),实体模型有效尺寸为4.40 m长,1.00 m宽和0.50 m深。人工降雨设备采用中国科学院水利部水土保持研究所研制的BX-1型组合侧喷式降雨器,降雨高度最大可达7 m,有效降雨面积为5 m×7 m,降雨均匀度>80%^[17]。为减少植物篱植物生长时间的影响,利用植物篱生长槽养护形成植物篱带。植物篱生长槽尺寸为1.00 m长,0.40 m宽和0.50 m高(图1b),每侧采用可拆卸的挡板,安装时形成15°坡以便后续吊装至实体模型与坡面坡度一致。植物选用三峡库区常用植物篱物种香根草,于2018年4月将香根草按照行间距为20 cm株间距为10 cm种植于槽内并开始养护。

1.3 稀土元素布设与试验过程

稀土元素布设的原则是所施放的稀土元素浓度显著大于相应土壤背景值浓度^[18]。经测,本研究所用紫色土中Sm、Ce、La、Yb和Eu 5种稀土元素背景值为5.79,39.80,30.54,3.37,1.89 mg/kg,因此,本研究将相应土稀土元素的施放浓度值分别设定为169.20,824.60,723.60,93.50,45.60 mg/kg,施放稀土元素浓度为相应土壤背景值浓度20倍以上。使用Eu、Yb、La、Ce和Sm 5

种稀土元素氧化物自上而下将坡面分成 5 段进行全断面标记(图 1a),以区分坡面不同部位侵蚀情况。对于植物篱坡面条件, Eu、Yb、La 和 Ce 示踪区(1.00 m

每段)为裸露区域, Sm 示踪段为植物篱区域(0.40 m 长),裸坡对照坡面条件下稀土元素布设情况与植物篱坡面一致,以利于试验结果对比。

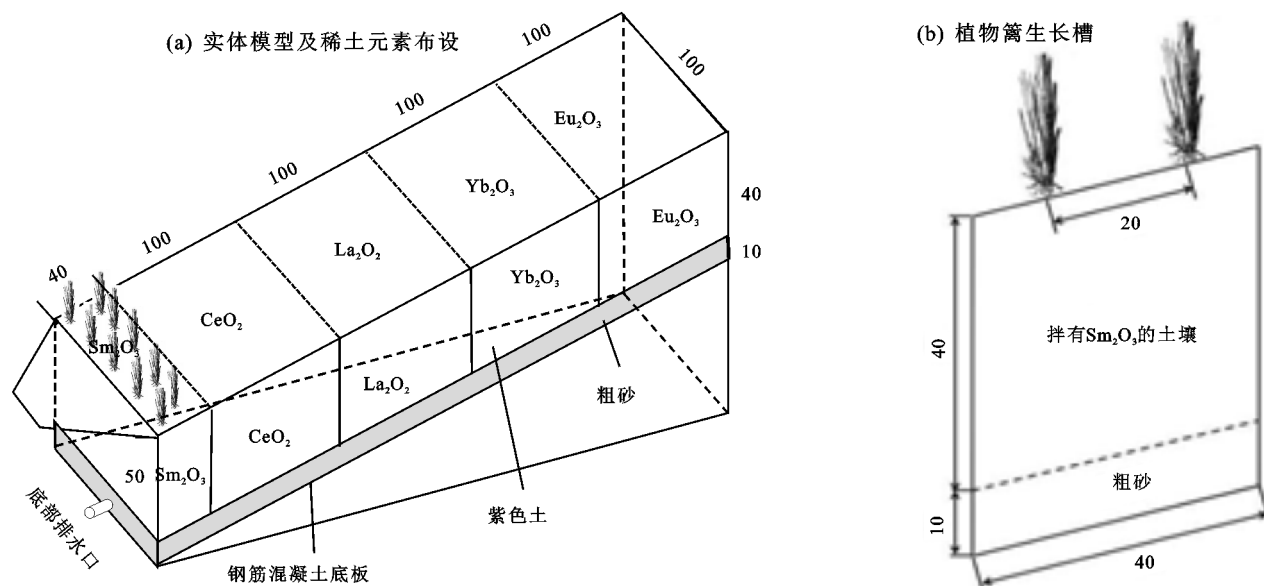


图 1 试验装置示意

对于植物篱生长槽,为确保植物篱在生长过程中能够自由排水,先在底部装填 10 cm 厚粗砂,然后按设计容重 1.30 g/cm^3 从下而上分层装填含有 Sm_2O_3 的紫色土壤于生长槽中;再将香根草按照设计要求种植于生长槽中,养护 1 年以上,形成密闭的植物篱。正式试验前,将 Sm 示踪区的植物篱生长槽整体吊装至坡地实体模型对应位置固定后拆卸前后挡板。随后在坡面其他区域也装填 10 cm 厚粗砂,再分段分层装填其他示踪区的土壤,具体装填过程中为避免含不同元素标记的土壤相互污染,使用铝片将相邻示踪区分开,铝片在铺设过程中随着装土的升高而逐渐上升,形成植物篱坡面条件(P)。对于 R 坡面条件,布设过程与 P 相同,并需要在装填完成后沿地表将植物篱地上部分全部剪掉。对于 CK 坡面条件,直接按设计容重分层分段装填含对应稀土元素的紫色土壤从而形成整个坡面。坡面形成后,使用降雨强度约为 30 mm/h 的雾化状雨对坡面进行湿润至即将产流,以保证试验下垫面地表状况均一性和促进稀土元素与土壤进一步吸附。

降雨前先用塑料膜覆盖坡面,随后将降雨强度率定至设计降雨强度,待降雨稳定后开始正式降雨,坡面开始连续产流 60 min 时结束降雨。降雨过程中使用塑料桶收集全部径流泥沙样,每 3 min 作为 1 个径流泥沙过程样,并在收集各过程样期间用一次性杯子接 $2/3$ 杯径流泥沙样用于测定侵蚀泥沙粒径分布。降雨结束后,称取每个过程样并充分搅拌径流泥沙样,随后用烧杯分别在泥沙上、中、下 3 个部位取样,形成混合样用于测定泥沙含量和后续泥沙中稀土元素含量。将混合试样称重后静置 24 h 后倒掉上清

液,采用烘干法得到泥沙含量以确定各过程样中的径流量和侵蚀泥沙量。同时,将烘干法得到的泥沙样品消解处理后使用电感耦合等离子体质谱仪 ICP-MS (X Series II, 美国赛默飞世乐科技公司)测定其中稀土元素的含量以分析坡面泥沙侵蚀来源。

1.4 数据分析

由于稀土氧化物优先吸附于土壤细颗粒的特性和侵蚀过程中存在泥沙分选的现象,造成稀土元素示踪紫色土侵蚀具有较大误差,因此,本研究采用 Zhang 修正模型公式(1)进行计算^[19]。此修正模型利用富集率修正泥沙分选作用,可以提高计算精度。各示踪区对总侵蚀的贡献按公式(2)计算,各示踪区侵蚀速率按公式(3)计算。

$$E_i = \frac{(R_i - B_i)E}{\eta C_i} \quad (1)$$

$$r_i = \frac{E_i}{E} \times 100\% \quad (2)$$

$$V_i = \frac{E_i}{A_i \times t} \quad (3)$$

式中: E_i 为 i 元素示踪区的侵蚀量(kg); R_i 为侵蚀泥沙中 i 元素的实测浓度(mg/kg); B_i 为土壤中 i 元素的背景值浓度(mg/kg); E 为实测侵蚀泥沙质量(kg); η 为侵蚀泥沙样中 $<0.05 \text{ mm}$ 富集率参数; C_i 为 i 元素施放浓度(mg/kg); r_i 为 i 元素示踪区对总侵蚀量的贡献率(%); V_i 为 i 元素示踪区的侵蚀速率 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$]; A_i 为 i 元素示踪区的面积(m^2); t 为时间(min)。

将计算出来的各示踪区侵蚀量与实际侵蚀量进行对比,可以用计算误差 σ 表示,计算公式为:

$$\sigma = \left| \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^5 E_i}{E} \right) \times 100\% \right| \quad (4)$$

采用 Excel 2016 和 Origin 2021 软件处理与分析数据以及绘制相关图表。

2 结果与分析

2.1 坡面侵蚀量及稀土元素示踪技术计算精度分析

由表 1 可知,坡面实际侵蚀量随降雨强度的增加而增加,其中 CK、R 和 P 坡面条件下实际侵蚀量范围分别为 8.23~108.14,5.54~86.97,2.34~17.70 kg,相应平均侵蚀量分别为 60.12,48.41,9.73 kg,表明单纯地下部分能够减少部分坡面侵蚀,但完整的植物篱则能够有效减少坡面侵蚀。经计算发现,计算侵蚀量与实际侵蚀量相差不大,计算误差在 0.54%~14.50%,平均为 8.72%,表明使用 Zhang 修正模型计算三峡库区紫色土坡面误差较小,具有较高的精度。

2.2 坡面各示踪区侵蚀速率变化规律

受到降雨强度和坡面条件的影响,坡面各示踪区侵蚀速率随降雨历时的变化规律复杂(图 2)。随降雨历时

的增加,Sm 示踪坡段侵蚀速率大致呈现波动稳定的变化趋势,Ce 示踪坡段侵蚀速率大致呈现波动增加、先增加后减小或者先稳定后减小等变化趋势,La 示踪坡段侵蚀速率呈现迅速增加或先缓慢增加后迅速增加的变化趋势,Yb 示踪坡段侵蚀速率主要呈现波动稳定或波动增加的变化趋势,Eu 示踪坡段侵蚀速率主要呈现保持波动稳定的变化规律,但在 P 坡面条件下降雨强度为 120 mm/h 时呈现逐渐增加的趋势。

表 1 稀土元素示踪坡地侵蚀计算误差

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡面 条件	实际 侵蚀量/kg	计算 侵蚀量/kg	误差(σ)/ %
60	CK	8.23	8.85	7.48
	R	5.54	6.26	12.86
	P	2.34	2.23	4.81
90	CK	64.03	54.75	14.50
	R	52.72	48.44	8.13
	P	9.16	10.34	12.85
120	CK	108.14	92.66	14.31
	R	86.97	87.44	0.54
	P	17.70	17.17	3.01

注:CK 为裸坡对照;R 为仅有植物篱根系;P 为植物篱。下同。

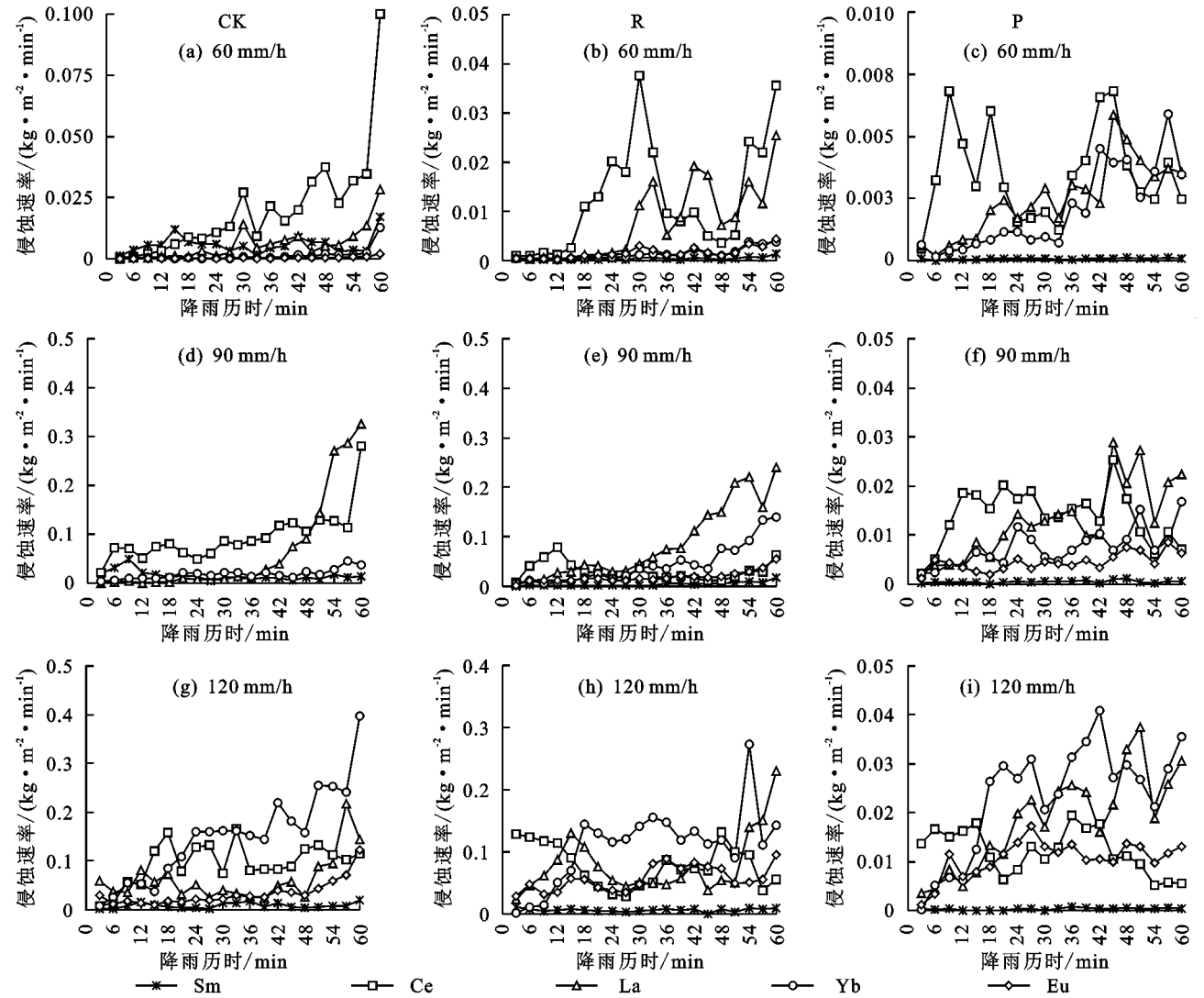


图 2 3 种坡面条件的各示踪坡段侵蚀速率

对比各时间段不同坡面条件下侵蚀速率发现,各示踪段侵蚀速率整体上呈现 $CK > R > P$ 的趋势,说明植物篱可以显著降低坡面各部位的侵蚀速率。整体而言, R 与 P 坡面条件下 Sm 、 Ce 、 La 、 Yb 和 Eu 示踪段侵蚀速率相比 CK 坡面条件下分别减少 $7.33\% \sim 71.79\%$ 与 $95.00\% \sim 99.71\%$ 。同时,随着降雨强度的增加,各坡面条件示踪坡段的侵蚀速率都有所增加,与降雨强度 60 mm/h 相比, $90, 120 \text{ mm/h}$ 降雨强度下各示踪段侵蚀速率分别增加 $2.35 \sim 16.42, 1.22 \sim 45.26$ 倍。

2.3 坡面各示踪区贡献率变化规律

坡面各示踪区侵蚀贡献率受降雨强度和坡面条

件的影响,随降雨历时也呈现出复杂的变化规律(图 3)。随降雨历时的增加, Sm 示踪坡段侵蚀贡献率主要呈现逐渐减小或波动稳定的变化趋势, Ce 示踪坡段侵蚀贡献率大致呈现持续递减、逐渐增加或先迅速增加后逐渐减小的复杂变化趋势, La 示踪坡段侵蚀贡献率则呈现先缓慢下降后增加或波动上升的变化趋势, Yb 示踪坡段侵蚀贡献率则主要呈现持续增加或波动稳定的变化趋势, Eu 示踪坡段侵蚀贡献率在 CK 和 R 坡面条件下保持波动稳定的变化规律,但在 P 坡面条件下则呈现缓慢增加的变化规律。

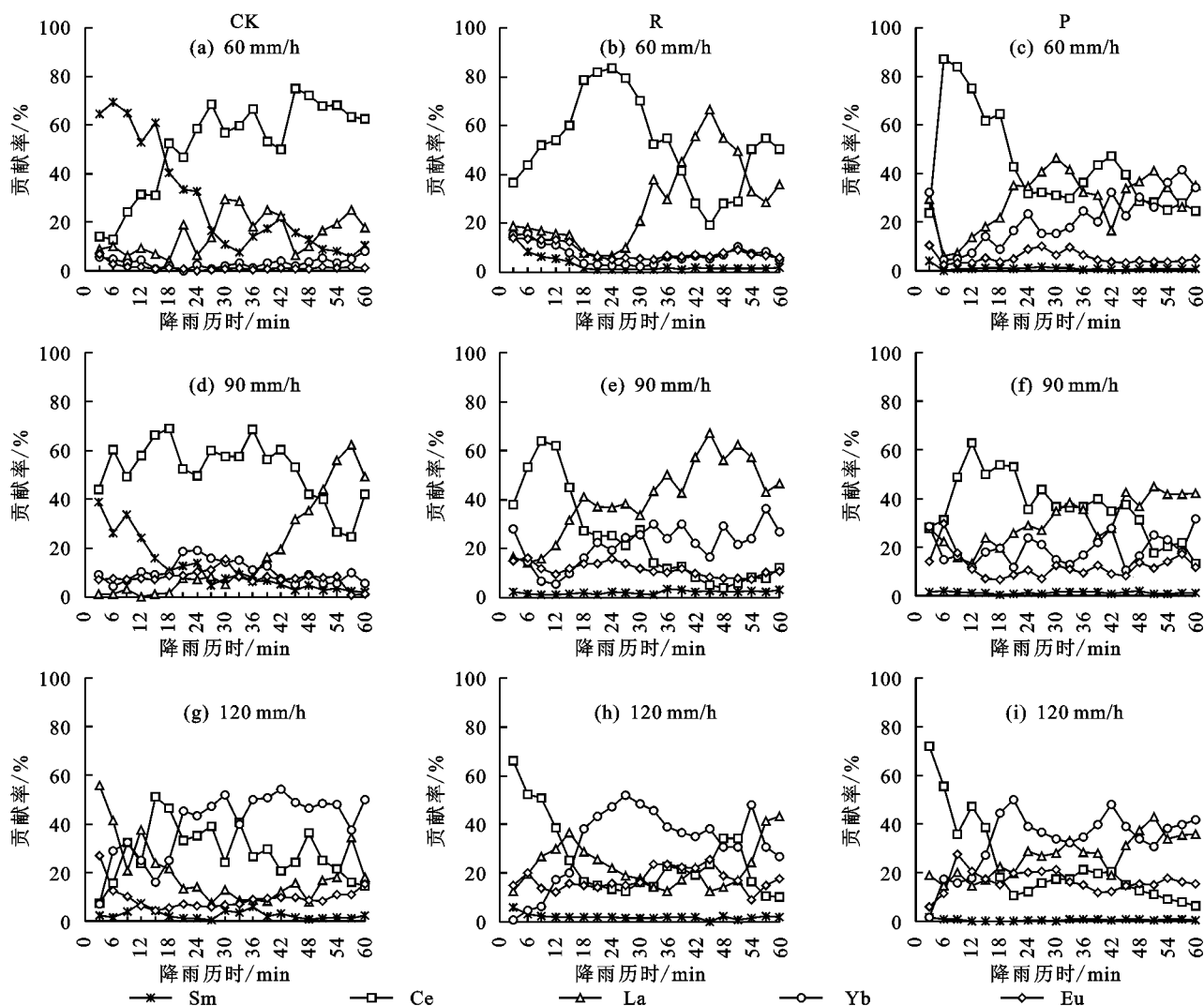


图 3 3 种坡面条件的各示踪坡段侵蚀贡献率

坡面条件对各示踪段侵蚀贡献率影响复杂,与 CK 坡面条件相比, R 和 P 坡面条件下的 Sm 和 Ce 坡段平均侵蚀贡献率分别减少 82.77% , 93.49% 和 22.44% , 21.75% 。相应条件下的 La 、 Yb 和 Eu 示踪坡段平均贡献率是增加的,分别增加 72.80% , 62.04% 和 14.32% , 38.21% 以及 98.56% , 80.84% 。这说明植物篱造成坡面下部侵蚀贡献减少而使得坡面上部侵蚀贡献增加,整体导致坡面侵蚀位置的上移。随着降雨强度的增加,各个坡面的 Sm 和 Ce 示踪坡段侵蚀贡献率在逐渐减小,

而 Yb 、 La 以及 Eu 示踪坡段相应侵蚀贡献率逐渐上升。与降雨强度 60 mm/h 相比, $90, 120 \text{ mm/h}$ 降雨强度下的 Sm 和 Ce 示踪坡段平均侵蚀贡献率分别减少 $0.72, 0.69$ 倍和 $1.51, 0.75$ 倍;而相应条件下的 La 、 Yb 和 Eu 示踪坡段平均侵蚀贡献率分别增加 $0.69, 4.09, 6.16$ 倍和 $0.26, 12.57, 6.61$ 倍。这说明降雨强度增加同样也可使得坡面侵蚀位置往坡上方移动。

2.4 植物篱对坡耕地侵蚀分布的影响

降雨下坡面侵蚀产沙主要集中在坡面中间的

Ce、La 和 Yb 3 个示踪区,最下面的 Sm 示踪区和最上部的 Eu 示踪区侵蚀量较小(表 2)。相同降雨强度下,Sm 和 Ce 示踪段侵蚀量均表现为 CK>R>P,La 和 Eu 示踪段侵蚀量则均表现为 R>CK>P,而坡面

条件对 Yb 示踪区总侵蚀量的影响则较为复杂。Yb 示踪区最大侵蚀量在降雨强度为 60,90,120 mm/h 时分别出现在 P、R 和 CK 坡面条件下,而最小侵蚀量则分别出现在 R、P 和 P 坡面条件下。

表 2 不同降雨强度下 3 种坡面条件的各示踪坡段总侵蚀量

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	侵蚀量/kg														
	CK					R					P				
	Sm	Ce	La	Yb	Eu	Sm	Ce	La	Yb	Eu	Sm	Ce	La	Yb	Eu
60	1.50	5.34	1.54	0.37	0.10	0.11	3.33	2.05	0.35	0.42	0.02	0.92	0.66	0.53	0.10
90	4.07	24.96	17.41	4.78	3.54	1.17	7.95	22.73	11.61	4.98	0.12	3.66	3.40	1.98	1.18
120	2.19	25.25	16.61	39.89	8.72	1.71	20.60	20.90	29.13	15.10	0.09	3.21	4.90	6.15	2.82
平均	2.59	18.51	11.85	15.01	4.12	1.00	10.63	15.22	13.70	6.83	0.08	2.60	2.99	2.89	1.37

降雨下各示踪坡段对坡面总侵蚀量的贡献率在明显差异(图 4)。坡面条件对坡地侵蚀的空间分布有显著影响,与 CK 坡面条件相比,R 与 P 坡面条件下 Sm 和 Ce 示踪坡段对总侵蚀量的平均贡献率分别减少 77.15%,30.01%和 90.38%,28.35%,而 Yb、La 和 Eu 示踪坡段总侵蚀量的平均贡献率分别增加 54.34%,12.39%,101.45%和 35.39%,40.58%,91.31%,说明植物篱造成坡面下部侵蚀贡献减小而中上部侵蚀贡献增加,坡面侵蚀部位整体上移。

3 讨论

降雨强度增加会增加雨滴打击力,也会造成坡面径流量及其侵蚀能量增强,因此随降雨强度的增加,各坡面条件示踪坡段侵蚀速率增加,这与沈海鸥等^[20]的研究结果一致。坡面总侵蚀量和各示踪坡段侵蚀速率整体上呈现 CK>R>P 的趋势,说明植物篱可以显著降低坡面各部位的侵蚀速率,这主要是因为植物篱地上部分拦截泥沙并减缓径流流速降低径流冲刷力,以及地下部分滞留土壤并通过根系加固提高土壤抗蚀性等作用,从整体上抑制细沟侵蚀的发育,改变侵蚀方式,大幅降低侵蚀程度^[11,21]。

降雨前期各坡面条件下坡中部的 Ce 和 La 示踪坡段侵蚀速率以及贡献率先缓慢增加并在降雨中后期达到峰值。这是因为降雨前期雨水在坡面存在汇流过程,坡面径流自上而下汇流,径流的冲刷力以及挟沙能力不断增加,从而导致侵蚀力增加,细沟在此区域开始发育,随后不断下切、溯源和沟壁坍塌,造成侵蚀量显著增加^[22]。而 Yb 和 Eu 示踪坡段侵蚀速率和贡献率在降雨过程中主要保持缓慢增加或稳定的趋势,这主要是因为降雨前期坡面上部承雨面积小,雨滴以及降雨径流对上部坡面的作用小^[23],此时坡上部还是以面蚀为主,侵蚀缓慢,到降雨中后期细沟从坡中部溯源侵蚀至 Yb、Eu 示踪坡段并逐渐发育,造成侵蚀速率和侵蚀贡献率也随之上升。3 种坡面条件下最下方的 Sm 示踪坡段侵蚀速率及其贡献率基本保持稳定并数值较小,主要是因为坡面下部径流量和流速降低,径流能量一部分用于搬运泥沙,侵蚀力减弱^[23],再者坡上方示踪坡段侵蚀泥沙被径流带至此示踪坡段时覆盖此坡段土壤,对该坡段土壤有一定保护作用。而更重要的是植物篱根系部分可以与土壤形成根土复合体,增强土体的抗冲刷性^[24],从而大幅度减少此区域的侵蚀。另外,该示踪区的面积只有其他示踪区面积的 40%也是引起该示踪坡段贡献率远低于其他示踪区的原因之一。

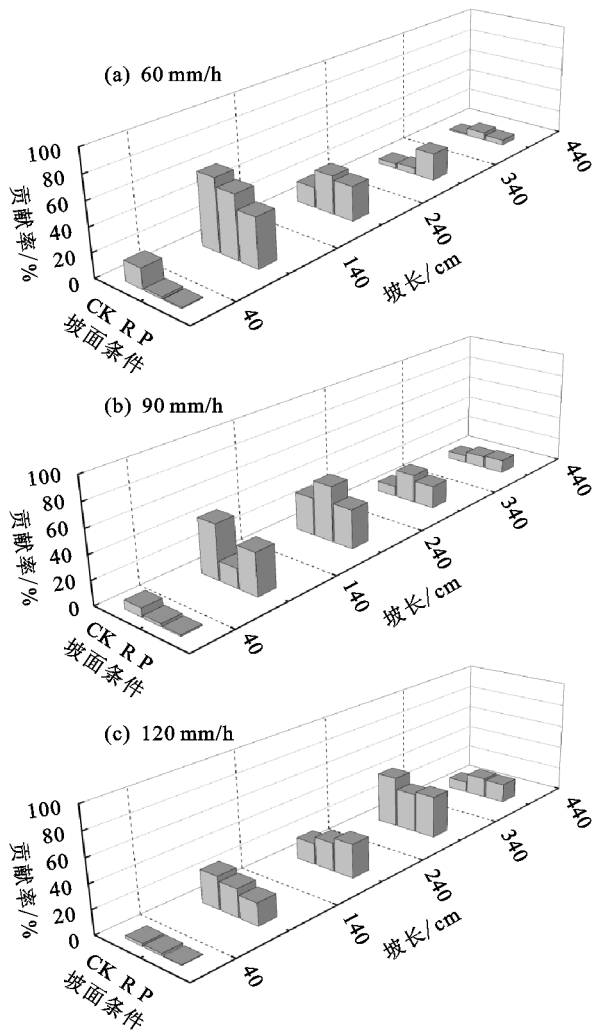


图 4 不同降雨强度下 3 种坡面条件的总侵蚀量各示踪坡段贡献率

坡面侵蚀产沙主要集中在坡面中间的 Ce、La 和 Yb 3 个示踪坡段区,最下面的 Sm 示踪区和最上部的 Eu 示踪区侵蚀量较小,说明坡中部是侵蚀最严重的位置,与前人^[25-26]研究结果一致,这主要与细沟侵蚀的发生特征有关,降雨过程中细沟主要集中在此区域。与 CK 坡面条件相比,植物篱(R 和 P 坡面条件)造成坡面下部(Sm 和 Ce 示踪坡段)侵蚀量及其贡献减小而中上部(La 和 Yb 示踪段)侵蚀量及其贡献增加,并显著增加坡顶 Eu 示踪段对坡面总侵蚀量的贡献率。植物篱地上部分减小降雨动能和坡面径流流速及其地下根系加固下部土体提高其抗蚀性,并改善土壤理化性质^[10],造成 Sm 示踪坡段侵蚀量及其贡献率减小。而 Ce 示踪坡段侵蚀量和贡献率减小一方面是因为植物篱拦截于坡面上并形成大面积的回水区,降低了此区域坡面径流流速及其侵蚀能量,从而减小了坡面侵蚀量;另一方面,则是由于植物篱拦截大量侵蚀泥沙,试验中观察发现大量泥沙淤积在此区域,所淤积的泥沙覆盖在坡面土壤上方,阻止其下方土壤进一步侵蚀。La 和 Yb 示踪坡段侵蚀量和贡献率增加的原因则与植物篱影响坡面细沟分布有关。在 CK 坡面条件下,坡面细沟从 Sm 区开始发育,随后逐渐向上溯源发育,而 R 和 P 坡面条件下,坡面细沟无法从 Sm 示踪区发育,大多是从 Ce 示踪段开始发育,随后在 La 和 Yb 这 2 个示踪坡段快速发育。而位于坡顶 Eu 示踪坡段侵蚀贡献率始终处于较低的水平,主要是由于坡上部承雨量较小,汇水面积有限,坡面径流量少,且细沟发育不明显,侵蚀方式还是以片蚀为主。值得注意的是,P 坡面条件下在大降雨强度(120 mm/h)时坡面 La 和 Yb 示踪区侵蚀量相对较大,因此,可以适当减少间距以进一步发挥植物篱水土保持作用。

4 结论

(1)各示踪段侵蚀速率随降雨强度增加而增加,但整体上呈现 CK>R>P 的趋势,植物篱可以显著降低坡面各部位的侵蚀速率。R 和 P 坡面条件下各示踪段侵蚀速率相比 CK 坡面条件下分别减少 7.33%~71.79%和 95.00%~99.71%。

(2)随着降雨强度的增加,Sm 和 Ce 坡段侵蚀贡献率减少而 La、Yb 和 Eu 示踪坡段增加。植物篱对各示踪坡段侵蚀贡献率有显著影响,R 和 P 坡面条件下的 Sm 和 Ce 坡段平均侵蚀贡献率相比 CK 坡面分别减少 82.77%,93.49%和 22.44%,21.75%。相应条件下的 La、Yb 和 Eu 示踪坡段平均侵蚀贡献率分别增加 72.80%,62.04%和 14.32%,38.21%以及 98.56%,80.84%。

(3)各示踪段侵蚀量随着降雨强度增加而增加,降雨强度能够有效增加坡面不同部位侵蚀量。坡面侵蚀产沙主要集中在坡面中间的 Ce、La 和 Yb 3 个示踪区。与 CK 坡面条件相比,R、P 坡面条件总侵蚀量的 Sm 和 Ce 示踪坡段平均贡献率分别减少 77.15%,30.01%和 90.38%,28.35%;而 Yb、La 和 Eu 示踪坡段平均贡献率分别增加 54.3%,35.4%和 12.4%,40.6%以及 101.4%,91.3%,植物篱造成坡面下部侵蚀贡献减小而中上部侵蚀贡献增加,坡面侵蚀部位整体上移,对坡地侵蚀的空间分布有显著影响。

参考文献:

- [1] 符素华,张志兰,蒋光毅,等.三峡库区水土流失综合治理优先小流域识别方法[J].水土保持学报,2020,34(3):79-83,197.
- [2] 蒋光毅,黄嵩,郭宏忠.三峡库区水土流失综合治理现状与展望[J].中国水土保持,2021,473(8):27-29.
- [3] 黄小芳,丁树文,柯慧燕,等.三峡库区植物篱模式对土壤理化性质和可蚀性的影响[J].水土保持学报,2021,35(3):9-15,22.
- [4] 吴倩云.REEs 示踪技术在土壤侵蚀研究中的应用[J].安徽农业科学,2017,45(32):124-126,155.
- [5] 张风宝,杨明义,王光谦.⁷Be 示踪土壤侵蚀研究现状及存在问题探讨[J].核技术,2009,32(8):596-600.
- [6] 于悦,崔红佳.近 30 年来磁性示踪技术应用于土壤侵蚀领域的文献计量分析[J].土壤通报,2022,53(3):747-756.
- [7] 汤振权,刘刚,许文年.稀土元素示踪技术及其在土壤侵蚀研究中的应用[J].中国稀土学报,2011,29(5):515-522.
- [8] 吴文泉,倪世民,王军光.稀土元素示踪法探究坡面侵蚀进展与热点:基于 CiteSpace 计量分析[J].亚热带水土保持,2021,33(1):1-6.
- [9] Zheng H J, Li H R, Mo M H, et al. Quantified benefits of cultivating day-lily (*Heimerocallis citrina*) hedgerows over multiple years on sloped red-soil farmland, southern China[J].Journal of Soil Science and Plant Nutrition,2021,21(1):69-80.
- [10] 刘泉宏,李铁,湛芸,等.香根草植物篱带宽对紫色土坡地产流产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):93-101.
- [11] 郭萍,夏振尧,高峰,等.香根草植物篱对三峡库区坡地紫色土侵蚀的影响[J].农业工程学报,2021,37(19):105-112.
- [12] 张沛,严力蛟,樊吉,等.不同草篱种植模式对土壤侵蚀的控制效应[J].生态与农村环境学报,2011,27(3):29-34.
- [13] 郭岳阳,严力蛟,樊吉,等.植物篱对红壤坡耕地的水土保持效应及其机制研究[J].生态与农村环境学报,2012,28(6):609-615.
- [14] 李秋艳,蔡强国,方海燕,等.长江上游紫色土地区不同

- 坡度坡耕地水保措施的适宜性分析[J].资源科学, 2009, 31(12): 2157-2163.
- [15] 罗先启, 葛修润. 滑坡模型试验理论与实践[M]. 北京: 水利电力出版社, 2008.
- [16] 许峰, 蔡强国, 吴淑安. 等高植物篱在南方湿润山区坡地的应用: 以三峡库区紫色土坡地为例[J]. 山地学报, 1999, 17(3): 193-199.
- [17] 赵娅君, 吴发启, 徐宁, 等. 不同雨强下各生育期玉米坡耕地的侵蚀产沙研究[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 23-28, 35.
- [18] Liu P L, Tian J L, Zhou P H, et al. Stable rare earth element tracers to evaluate soil erosion[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 76(2): 147-155.
- [19] Zhang X C, Liu G, Zheng F L. A simple enrichment correction factor for improving erosion estimation by rare earth oxide tracers[J]. Vadose Zone Journal, 2017, 16(12): 1-10.
- [20] 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 162-170.
- [21] 贾莲莲, 刘雅丽, 朱冰冰, 等. 不同草带空间分布对坡面细沟侵蚀调控机制[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 145-148, 153.
- [22] 龙琪, 韩剑桥, 何育聪, 等. 黄土坡面细沟侵蚀强度的空间分布及形态分异特征[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 1-7.
- [23] 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 黄土坡面细沟侵蚀形态试验[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5514-5521.
- [24] 湛芸, 何丙辉, 练彩霞, 等. 三峡库区陡坡根—土复合体抗冲性能[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5173-5181.
- [25] 杨维鸽, 郑粉莉, 王占礼, 等. 地形对黑土区典型坡面侵蚀—沉积空间分布特征的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 572-581.
- [26] 王全辉, 胡国庆, 董元杰, 等. 磁性示踪条件下坡面土壤侵蚀产流、产沙及侵蚀空间分异特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 21-23, 28.
- (上接第109页)
- [20] 朱晓锋, 陈洪松, 付智勇, 等. 喀斯特灌丛坡地土壤—表层岩溶带产流及氮素流失特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2197-2206.
- [21] 席沁. 典型栗钙土区工程造林地土壤钙积次生化及适宜造林技术探究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [22] 陈晓安, 蔡强国, 张利超, 等. 黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀的临界坡度[J]. 山地学报, 2010, 28(4): 415-421.
- [23] 王光火, 朱祖祥. pH 对土壤吸持磷酸根的影响及其原因[J]. 土壤学报, 1991, 28(1): 1-6.
- [24] 王建中, 刘凌. 坡面氮、磷流失特征分析及预测[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(4): 359-363.
- [25] Luo C Y, Gao Y, Zhu B, et al. Sprinkler-based rainfall simulation experiments to assess nitrogen and phosphorus losses from a hillslope cropland of purple soil in China[J]. Sustainability of Water Quality and Ecology, 2013, 1/2: 40-47.
- [26] Wu L, Qiao S S, Peng M L, et al. Coupling loss characteristics of runoff-sediment-adsorbed and dissolved nitrogen and phosphorus on bare loess slope[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(14): 14018-14031.
- [27] Vaezi A R, Abbasi M, Keesstra S, et al. Assessment of soil particle erodibility and sediment trapping using check dams in small semi-arid catchments[J]. Catena, 2017, 157: 227-240.
- [28] He Z G, Weng H X, Wu T, et al. Impact of moving rainfall events on hillslope pollutant transport[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(7): 5989-5999.
- [29] 左继超, 郑海金, 奚同行, 等. 自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4178-4186.
- [30] 陈晓安, 杨洁, 郑太辉, 等. 赣北第四纪红壤坡耕地水土及氮磷流失特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 162-167.
- [31] Cui Z L, Chen X P, Zhang F S. Current nitrogen management status and measures to improve the intensive wheat-maize system in China[J]. Ambio, 2010, 39: 376-384.