

引用格式: 黄鑫, 郑江坤, 任雨之, 陈鑫, 王文武. 川中丘陵区紫色土坡耕地植物篱措施对土壤抗蚀性的影响[J]. 山地学报, 2024, 42(1): 27-36.

HUANG Xin, ZHENG Jiangkun, REN Yuzhi, CHEN Xin, WANG Wenwu. Effect of hedgerow on anti-erodibility of sloping farmlands consisted of purple soil in the hilly area of central Sichuan basin [J]. Mountain Research, 2024, 42(1): 27-36.

川中丘陵区紫色土坡耕地植物篱措施 对土壤抗蚀性的影响

黄鑫^{1a, 1b}, 郑江坤^{1a, 1b*}, 任雨之^{1a, 1b}, 陈鑫², 王文武^{1a, 1b}

(1. 四川农业大学 a. 林学院; b. 水土保持与荒漠化防治四川省高校重点实验室, 成都 611130;

2. 遂宁水土保持试验站, 四川 遂宁 629006)

摘要: 川中丘陵区紫色土坡耕地水土流失严重, 影响农作物增产增收。水土保持植物篱措施是提高土壤的抗侵蚀能力的有效生态手段。以往土壤抗蚀性的研究多集中于黄土高原, 较少涉及植物篱作用下紫色土坡耕地抗蚀机理方面的研究。本文以新银合欢 (*Leucaena leucocephala*) 和香根草 (*Vetiveria zizanioides*) 为研究对象, 基于试验站坡耕地小区定位观测的基础数据, 结合土壤采样和实验分析, 利用主成分分析法对种植不同植物篱的坡耕地土壤抗蚀性进行了综合评价。结果表明: (1) 在分析 11 项指标后, 2 项主成分指标对解释土壤抗蚀性贡献率达到 82.7%, 其中水稳性团聚体被认定为关键指标。(2) 植物篱显著提高了表层土的抗蚀性。与无植物篱的样区为对照, 10°坡耕地上香根草和新银合欢植物篱小区的土壤抗蚀性综合指数 (SERI) 分别比对照区高 2.048 和 0.853, 15°坡耕地上香根草植物篱的 SERI 比对照区高 1.321; 且植物篱下侧的土壤抗蚀性高于植物篱上侧, 在 10°和 15°香根草植物篱小区, 植物篱下侧抗蚀性指数分别达到上侧的 2.0 倍、1.5 倍, 而 10°新银合欢植物篱小区的下侧抗蚀性综合指数达到上侧的 1.1 倍。(3) 相较于新银合欢植物篱小区, 香根草植物篱小区土壤表现出了更高的抗蚀性, 且两种植物篱小区下侧土壤抗蚀性均优于上侧, 选择密植草本植物篱并重点防治植物篱上侧土壤可有效减少坡耕地水土流失。研究成果可为川中丘陵区水土流失治理及农业增产提供科学依据。

关键词: 植物篱; 坡耕地; 抗蚀性指数; 水稳性团聚体; 紫色土

中图分类号: S725.1

文献标志码: A

川中丘陵区紫色土广为分布^[1], 具有磷和钾水平较高、有机物含量较低、抵抗水力侵蚀能力差等特性^[2]。丘陵区年降雨量较高, 加之不合理开垦利用, 导致紫色土坡耕地水力侵蚀严重, 需要采取经济适用的生态措施治理川中丘陵区坡耕地水土流失, 提高农作物产量^[2]。

水土保持植物篱措施是提高土壤的抗侵蚀能力

的显著手段^[3]。植物篱主要通过改变土壤物理特性影响土壤抗蚀性, 其物理屏障可截留水流、增加入渗、延长侵蚀时间, 还能使坡度变缓, 推动坡度耕地向梯田化发展^[4]。研究发现, 植物树篱作为一种生态措施, 能显著提升篱带区域中的土壤粘粒和水稳性团聚体比例, 同时减少大于 0.25 mm 的土壤团聚体的破坏率^[5], 这一过程有助于提高土壤的抗蚀能

收稿日期 (Received date): 2023-01-21; **改回日期** (Accepted date): 2023-07-02

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (41601028, 41671277); 四川省重大科技专项课题 (2018SZDZX0034); 中国博士后科学基金面上项目 (2012M511938)。[National Natural Science Foundation of China (41601028, 41671277); Major Science and Technology Special Project of Sichuan Province (2018SZDZX0034); General Program of China Postdoctoral Science Foundation (2012M511938)]

作者简介 (Biography): 黄鑫 (1991-), 男, 四川达州人, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 水土保持。[HUANG Xin (1991-), male, born in Dazhou, Sichuan province, M. Sc., research on soil and water conservation] E-mail: 631087414@qq.com

*** 通讯作者** (Corresponding author): 郑江坤 (1982-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 生态水文。[ZHENG Jiangkun (1982-), male, Ph. D., associate professor, research on eco-hydrology] E-mail: jiangkunzheng@126.com

力。此外,定植植物篱可以增加耕作层的细微颗粒物质,降低土壤的密度,进而优化土壤的分形维数,提高其透气性和含水量^[5]。

土壤抗蚀性是土壤抵抗地表径流冲刷和破坏的能力^[6],影响土壤可蚀性变化的主要因素包括土壤质地、结构、有机质含量、团聚体含量、渗透性和稳定性、凋落物密度、植被根系质量密度等^[7]。以往土壤抗蚀性的研究多集中于黄土高原^[8],较少涉及植物篱作用下紫色土坡耕地抗蚀机理方面的研究。本文以西南地区常见的水土保持植物香根草和新银合欢为研究对象,采用主成分分析法从多项理化指标筛选出贡献度最大的指标,并对不同坡度和不同类型植物篱条件下紫色土的抗蚀性进行综合评价,深入分析不同植物篱和不同坡度的抗蚀性大小,以期选择合理的植物篱配置措施,为当地的水土流失治理及农业生产提供理论依据。

1 研究区概况

坡耕地小区位于 105°28′49″E ~ 105°28′50″E, 30°21′42″N ~ 30°21′43″N,属亚热带湿润季风气候,海拔为 288 ~ 331 m^[9]。多年平均气温为 17.4 ℃,极端高温达到 40.3 ℃,极端低温则为 -3.8 ℃。雨季通常出现在 5—9 月,该地区的多年平均降水量为 993.3 mm,最大降雨量为 1371.4 mm,最小降雨量为 736.7 mm,多年平均蒸发量为 860.5 mm,多年平均相对湿度为 79%,多年平均霜日为 12.1 d。土壤是由侏

罗系遂宁组的砂层岩和泥岩经风化形成的紫色土,土壤质地受母质岩组合的支配和制约,土壤母质性强,碳酸盐反应剧烈,土性偏沙,有机质含量低,土壤肥力中等偏下,具有较弱的抵御水土流失能力。主要乔木树种为柏木(*Cupressus funebris*)、马尾松(*Pinus massoniana*)以及桤木(*Alnus cremastogyne*),种植农作物以小麦(*Triticum aestivum* L.)、大豆(*Glycine max* (L.) Merr.)以及花生(*Arachis hypogaea* L.)为主。

2 材料与方法

2.1 试验地设计和样品采集

径流小区(长 20 m × 宽 5 m)四周修建了混凝土挡板,挡板地上和地下分别为 20 cm 和 30 cm。所有小区均单季顺坡常规种植玉米,2010 年 4 月移植了高度为 30 cm 的新银合欢、香根草植物篱,栽种行距为 20 cm^[2]。成熟后,新银合欢高度约为 120 cm,香根草高度约为 60 cm,每年冬季剪掉地上部分以促使其重新生长。为了消除施肥对试验结果的影响,所有小区的施肥时间和施肥量均保持一致^[2]。小区上坡、中坡和下坡各布置一道植物篱带。2015 年 7 月在径流小区进行了植物篱和对照小区土样采集^[2],采样点见图 1。采样使用了自制原状土取样器和环刀,为了保证取样均匀性,每个采样点采集土样约 0.5 kg^[4]。图 1 中,Ⅰ区为 15°香根草植物篱样区;Ⅱ区为 15°对对照样区;Ⅲ区为 10°新银合欢植物篱样区;Ⅳ区为 10°对对照样区;Ⅴ区为 10°香根草

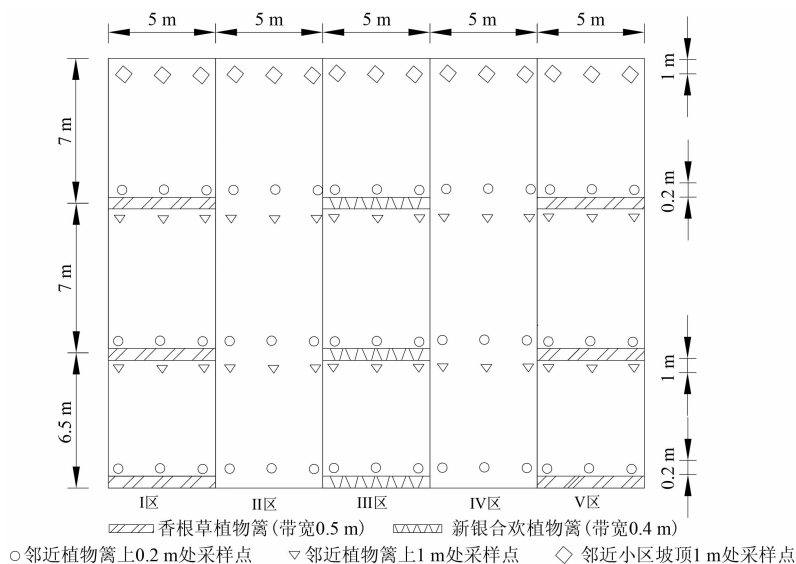


图 1 小区及采样点布置

Fig. 1 Design of plot and sampling

植物篱样区。下文分析中坡耕地小区均使用上述罗马数字代替。

2.2 测试方法

按照美国农业部的颗粒组成标准分为黏粒(小于 0.002 mm)、粉粒(0.002 ~ 0.05 mm)、砂粒(0.05 ~ 2.0 mm),采用比重计法测定;有机质(SOM)采用重铬酸钾容量法测定,参考土壤农化分析手册^[10],风干性团聚体采用干筛法测定^[11],水稳性团聚体采用湿筛法^[12]测定。

2.3 土壤抗蚀性分析方法

2.3.1 指标体系构建

通过实验分析结果计算出各坡耕地小区的各项指标,MWD (Mean Weight Diameter of Water-stable Aggregates) 为水稳性团聚体平均重量直径、GMD (Geometric Mean Diameter) 为几何平均直径、PAD (Percentage of Aggregate Destruction) 为团聚体破坏率、 K_{epic} (Erodibility Index) 为可蚀性指数等,具体计算公式如下^[13-16]:

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln R_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (1)$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n (\bar{R}_i w_i) / \sum_{i=1}^n w_i \quad (2)$$

$$PAD = (DR_i - WR_i) / DR_i \times 100\% \quad (3)$$

$$K_{epic} = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 SAN \left(1.0 - \frac{SIL}{100} \right) \right] \right\} \times \left[\frac{SIL}{CLA + SIL} \right]^{\frac{1}{3}} \times \left\{ 1.0 - \frac{0.25C}{[C + \exp(3.72 - 2.95C)]} \right\} \times \left\{ 1.0 - \frac{0.7SN1}{[SN1 + \exp(-5.51 + 22.9SN1)]} \right\} \quad (4)$$

式中, \bar{R}_i 为 i 级团聚体平均直径; R_i 为某级团聚体的直径; w_i 为某范围粒级团聚体重量比例; DR_i 为大于 0.25 mm 或大于 0.5 mm 机械稳定性团聚体质量分数; WR_i 为大于 0.25 mm 或大于 0.5 mm 水稳性团聚体质量分数; SAN 为砂粒含量; SIL 为粉粒含量; CLA 为黏粒含量; C 为有机碳含量; $SN1 = 1 - SAN/100$ 。

文中数据利用 SPSS 21.0 进行统计分析,所展示的数据均为各组的平均数。为了评估不同耕作模式下土壤性质的差异性,采用单因素方差分析(ANOVA)以及最小显著差异法(SSR)进行显著性检验。

2.3.2 数据标准化处理

在对土壤各抗蚀性指标进行主成分分析前,需

要对数据进行标准化处理,使不同特征变量具有相同尺度。

令随机变量 X 均值为 0,方差为 1。令 X^* 和 Y^* 分别表示标准化后的 X 和 Y ,则计算公式^[17]为:

$$X^* = \frac{X - E(X)}{\sqrt{D(X)}}, Y^* = \frac{Y - E(Y)}{\sqrt{D(Y)}} \quad (5)$$

式中, $E(X)$ 为 X 的期望值; $D(X)$ 为方差。标准化后的 X^* 和 Y^* 的协方差是相关系数,用 ρ_{XY} 表示。

2.3.3 主成分分析

目前学术界对评估土壤抗蚀性的指标众多,其中许多指标存在信息重叠^[2],主成分分析是一种重要的降维方法,能够保留数据最重要的特征。本文选用了 4 大类 11 个指标对土壤抗蚀性进行分析^[2],指标分别为: T_1 为 0.002 ~ 0.05 mm 粉粒含量, T_2 为小于 0.002 mm 黏粒含量, T_3 为结构性指数(T_2/T_1), T_4 为 K_{epic} 指数, T_5 为大于 0.25 mm 团聚体破坏率, T_6 为大于 0.5 mm 团聚体破坏率, T_7 为大于 0.25 mm 水稳性团聚体含量, T_8 为大于 0.5 mm 水稳性团聚体含量, T_9 为平均重量直径 MWD , T_{10} 为几何平均直径 GMD , T_{11} 为有机质。

本研究通过对不同植物篱和坡度条件下土壤抗蚀性能指标进行主成分分析(PCA),旨在精简和优化土壤抗蚀性的评估指标。通过 PCA,提取能够解释超过 80% 总变异信息的关键指标,最终将土壤抗蚀性能指标简化为两个主要成分。若初步提取的成分因子载荷差异不显著,本研究采用最大方差旋转方法进一步优化指标表征。综合指标的构建基于特征值和向量,计算土壤抗蚀性的综合表达式。在综合指数的计算中,采用方差贡献率作为权重,得出各研究的土壤抗蚀性指数 SERI (Soil Erodibility Resistance Index) 综合得分^[18]。

3 结果与分析

3.1 植物篱对紫色土坡耕地土壤颗粒组成的影响

植物篱根系能够改良土壤结构,提升土壤抗蚀能力,土壤理化性质对抗蚀性的影响至关重要。有机质和粘土含量是反映土壤抗蚀性的有效指标^[19]。在 10°坡耕地,V 小区粉粒含量及黏粒含量显著高于 IV 小区($P < 0.05$);15°坡耕地中 I 小区粉粒含量显著高于 II 小区($P < 0.05$)。植物篱能显著提升土壤粉、黏粒含量(表 1)。

表 1 不同措施处理下坡耕地样区抗蚀性指标

Tab. 1 Erosion resistance index of sloping farmland sample areas treated by different measures

抗蚀性指标分类	抗蚀性指标	I 号	II 号	III 号	IV 号	V 号
无机黏粒类 (I)	T_1	0.69abc	0.65ab	0.72bc	0.61a	0.76c
	T_2	0.15b	0.12a	0.14ab	0.12a	0.15b
	T_3	0.224a	0.19a	0.197a	0.19a	0.20a
可蚀性指标类 (II)	T_4	0.05ab	0.05ab	0.05ab	0.05a	0.05b
	T_5	0.65a	0.78bc	0.74b	0.79c	0.64a
	T_6	0.85a	0.89b	0.90c	0.92c	0.83a
水稳性团聚体类 (III)	T_7	32.57c	17.83a	24.66b	17.53a	35.08c
	T_8	13.68c	9.05b	9.10b	6.89a	15.29d
	T_9	0.34bc	0.28a	0.31ab	0.28a	0.36c
	T_{10}	0.21c	0.17a	0.19b	0.17a	0.22c
有机物类 (IV)	T_{11}	11.10b	8.01a	12.41bc	8.47a	13.66c

注:同一指标任意两组坡耕地小区小写字母完全不同则表示差异显著($P < 0.05$)。

3.2 植物篱对紫色土坡耕地土壤水稳性团聚体的影响

水稳性团聚体的平均质量直径 MWD 和平均几何直径 GMD 被作为衡量土壤抗蚀能力的定量指标^[18]。与 IV 小区相比,III 小区和 V 小区的大于 0.5 mm 水稳性团聚体含量分别增加了 32.16% 和 122.04%,而大于 0.25 mm 的水稳性团聚体含量分别增加了 40.72% 和 100.14%。在 15°坡耕地上,香根草植物篱小区大于 0.25 mm 和大于 0.5 mm 水稳性团聚体含量分别较对照小区增加了 51.19% 和 82.69%。土壤团聚体的破坏率与土壤结构的完整性成反比。在 10°和 15°小区上,有植物篱的小区的团聚体破坏率(PAD)显著低于对照小区,与已有研究^[21]基本一致(表 1)。

3.3 植物篱对紫色土坡耕地土壤有机质及可蚀性 K 值的影响

根据 Williams 等提出的 EPIC 模型,土壤可蚀性 K 值被作为评价土壤抗蚀性的一个重要依据^[2]。在 10°坡耕地,香根草植物篱小区的 K 值显著高于对照小区;而新银合欢植物篱小区则略高于对照小区。在 15°坡耕地上,香根草植物篱小区与对照小区间没有显著差异($P > 0.05$),说明随着坡度的增加,植物篱对土壤的抗蚀性影响减小。

与对照小区相比,III 小区和 V 小区的土壤有机质含量分别增加了 46.45% 和 61.28%,I 号区域较

II 号对照小区增加了 38.66%,且达到显著性水平。

3.4 植物篱措施对紫色土坡耕地土壤抗蚀性影响

土壤抗蚀性能的指标体现了土壤抵抗径流侵蚀,保持颗粒稳定的能力,此能力主要由土壤颗粒与水分的相互作用决定^[22]。本项研究利用主成分分析 PCA 方法,通过各处理方法将不同小区的土壤抗蚀性 SERI 进行分析评估。进一步对比坡耕地不同管理措施下的土壤抗蚀性表现,并分析这些措施对提高土壤抗蚀性的影响(表 2)。

表 2 主成分矩阵的特征根和贡献率

Tab. 2 Eigenvalues and contribution rates of the principal component matrix

主成分	特征根	贡献率/%	累计贡献率/%
1	7.08	64.4	64.4
2	2.02	18.3	82.7

表 2 展示了主成分矩阵,主成分 1 和 2 的特征值分别为 7.08 和 2.02,分别解释了 64.4% 和 18.3% 的变异,累积贡献率为 82.7%,超过了 80% 的阈值,表明这 2 个主成分能够代表土壤侵蚀抗性评估体系。主成分 1 中,变量 T_7 、 T_8 和 T_{10} 显示出较大的贡献; T_5 对侵蚀性产生负面效应,其值的增加加剧了土壤的脆弱性。主成分 2 中,变量 T_3 和 T_4 对土壤抗蚀性有显著影响,其中 T_4 值增强了抗蚀性,而 T_3 则产生负面效应(表 3)^[2],利用特征向量

表 3 抗蚀性指标主成分的矩阵变换
Tab. 3 Matrix transformation of erosion resistance
index principal components

抗蚀性指标	主成分(旋转前)		主成分(旋转后)	
	X_1	X_2	X_1	X_2
T_1	0.74	0.61	0.45	0.84
T_2	0.79	-0.29	0.84	0.04
T_3	0.36	-0.84	0.65	-0.64
T_4	0.51	0.82	0.17	0.95
T_5	-0.94	0.16	-0.93	-0.20
T_6	-0.88	0.04	-0.83	-0.30
T_7	0.94	-0.13	0.92	0.24
T_8	0.95	-0.02	0.89	0.35
T_9	0.76	-0.18	0.77	0.13
T_{10}	0.96	-0.14	0.94	0.24
T_{11}	0.76	0.32	0.58	0.59

矩阵和特征值作为系数,可以得出以下公式^[2]:

$$\begin{aligned} Z_1 = & 0.28 \times T_1 + 0.30 \times T_2 + 0.13 \times T_3 \\ & + 0.19 \times T_4 - 0.35 \times T_5 - 0.33 \times T_6 \\ & + 0.35 \times T_7 + 0.36 \times T_8 + 0.29 \times T_9 \\ & + 0.36 \times T_{10} + 0.29 \times T_{11} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Z_2 = & 0.52 \times T_1 + 0.55 \times T_2 + 0.25 \times T_3 \\ & + 0.36 \times T_4 - 0.66 \times T_5 - 0.62 \times T_6 \\ & + 0.66 \times T_7 + 0.67 \times T_8 + 0.54 \times T_9 \\ & + 0.67 \times T_{10} + 0.54 \times T_{11} \end{aligned} \quad (7)$$

使用方差贡献率 $\lambda_i (i = 1, 2)$ 为权重,计算土壤抗蚀性的综合指数。

$$X = \lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2) \times X_1 + \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2) \times X_2 \quad (8)$$

由 $\lambda_1 = 64.4$ 、 $\lambda_2 = 18.3$ 可以推算出 $X = 0.78X_1 + 0.22X_2$ 。数据比较后土壤抗蚀性的综合排名为 V 小区 > I 小区 > III 小区 > II 小区 > IV 小区。在 10° 耕作地, I 小区的抗蚀性综合指数较 II 小区提高了 1.33; 而 III 小区和 V 小区分别比 IV 小区高 0.86 和 2.06。V 小区的抗蚀性综合指数较 III 小区提升了 1.20(表 4), 表明香根草植物篱较新银合欢植物篱的土壤抗蚀性效益更高^[20]。

另外,在香根草植物篱的条件下,10° 坡耕地土壤抗蚀性指数显著高于 15° 坡耕地。在无植物篱的条件下,10° 和 15° 坡耕地土壤抗蚀性并无明显差

异,表明植物篱的作用超过了坡度变化对土壤侵蚀的影响。

植物篱的根系和枝叶通过机械阻挡减缓径流冲刷,在不同小区部位产生土壤抗蚀性的差异。10° 和 15° 香根草植物篱小区,植物篱下侧土壤抗蚀性综合指数分别较上侧提高了 33.97% 和 49.38%。同时,10° 新银合欢植物篱小区下侧土壤抗蚀性综合指数较上侧提高了 7.32% (表 4)。然而对照组的对应位置无明显差异,这主要由于植物篱的机械阻拦作用降低了下侧径流流速,使得更多粉黏粒和水稳性团聚体未被携带走。

表 4 各坡耕地小区不同位置土壤抗蚀性指数综合得分
Tab. 4 Composite scores of soil erosion resistance indices at various
locations within each sloping farmland plot

坡耕地小区点位	主成分		各位置综合 得分 X_3	各小区综合 得分 X
	X_1	X_2		
I 区植物篱上侧	1.05	1.96	1.25	1.38
I 区植物篱下侧	1.58	2.97	1.89	
II 区同位置上侧	0.04	0.08	0.05	0.05
II 区同位置下侧	0.05	0.09	0.06	
III 区植物篱上侧	0.52	0.98	0.62	0.60
III 区植物篱下侧	0.56	1.05	0.67	
IV 区同位置上侧	-0.15	-0.28	-0.18	-0.26
IV 区同位置下侧	-0.16	-0.3	-0.19	
V 区植物篱上侧	1.04	1.94	1.24	1.80
V 区植物篱下侧	2.05	3.84	2.44	

4 讨论

4.1 紫色土区坡耕地土壤抗蚀性指标

有机质含量^[23]和粘土含量^[24]是评价土壤抗蚀性的关键指标,此外,水稳性团聚体含量^[21]、分形维数^[25]、平均质量直径^[26]和水稳性团聚体含量^[27]也可用于评估土壤抗蚀性。通过这些指标的分析,可以科学评估坡耕地在不同条件下的抗蚀性。紫色土易受风化和侵蚀破坏,保水保土能力较差,但具有较高的生产力^[23]。评估紫色土剥蚀、搬运和沉积时,关注土壤可蚀性是关键指标之一^[28];坡耕地通常是流域中最容易受到侵蚀的地区。在紫色土区域,

EPIC 模型更适用于估算土壤可蚀性 K 值^[29]。决定土壤抗蚀性的因素包括有机质、孔隙度、容重、团聚体等^[2]^[30]。评价土壤抗蚀性的方法有很多,例如利用模糊隶属度函数模型^[31]和土壤几何平均粒径^[32]计算土壤可蚀性指数。土壤可蚀性和土壤抗侵蚀性描述了土壤在侵蚀过程中的特点,二者区别在于评估方式、量化特点和依托模型。土壤可蚀性可以通过量化方法评估,而土壤抗蚀性则只能进行定性比较,无法用具体数值表示。

4.2 植物篱对土壤性质的影响

植被篱防止土壤侵蚀和固土作用归因于其密集地表覆盖和表层土壤中纤维状根系的协同效应^[33]。尽管对于地表部分的作用已有较多研究并形成共识,但根系在水土保持、坡面稳定及坡度固定方面的功能则是一个涉及众多因素的复杂过程。改变发生在离植物根部的范围内,一般称为植物根际,具体的范围取决于植物的根系结构、深度和密度等因素^[34-37]。植物的生长状况、生长年限以及管理措施都会令植物对土壤性质产生影响。例如,健康生长的植物通常能够更好地利用土壤中的养分和水分,从而对土壤产生积极影响^[37]。同时,不同类型的植物对土壤的改变方式也会有所不同。一些植物可以增加土壤有机质含量、改善土壤结构^[38],而其他植物可能会释放化学物质导致土壤酸化或碱化等^[39]。关于植物对土壤性质影响的不确定性,则取决于多个因素的相互作用,包括土壤类型^[40]、气候条件^[41]、植物特性等。因此,在不同的情况下,植物对土壤性质的影响可能会具有一定的不确定性^[42]。针对特定情况的具体研究和实践经验可以提供更精确和可信的信息,同时综合考虑多个因素也是理解植物对土壤性质影响的重要方面。

4.3 植物篱对土壤抗蚀性的影响

植物篱可截留雨水、减少水流对土壤的冲刷,保护土壤表面覆盖层;其枝叶和茎秆也能够遮阳和保持表层土壤湿润,有助于维持土壤湿度,降低水分蒸发速率^[43]。茂密的植被还能抵挡风力、保护土壤完整性,进而提高土壤抗蚀性^[44]。植被根系系统通过提高土壤结构稳定性和孔隙度增强土壤抗冲刷和抗侵蚀能力^[45]。此外,植物根系作用也可通过促进土壤微生物的生长和活动,改善土壤透水性、通气性及水稳性团聚体含量。植物篱作为水土保持措施,可

明显提高土壤抗蚀性。

5 结论

植物篱增加了土壤中水稳性团聚体和黏粒含量,而降低了团聚体破坏率;水稳性团聚体、粉黏粒和有机质对土壤抗蚀性具有显著促进作用。香根草和新银合欢植物篱的上部抗蚀性均显著低于下部;香根草小区的土壤抗蚀性优于新银合欢小区;且随坡度增加土壤抗蚀性增加。综上所述,香根草植物篱可作为川中丘陵区水土保持的有效措施。

版权申明:

本文是在第一作者黄鑫学位论文《定植植物篱对紫色土坡耕地表层土壤理化性质及抗蚀性的影响》基础上的后续研究,采用了原文的方法,但在关键理论与公式上进行了优化,进一步补充完善了土壤理化性质以及不同植物篱对土壤抗蚀性影响的相关分析。同时,本文中相关表格由于计算过程中出现的错误进行核查更正,保证了数据的准确性。硕士论文版权归属原培养单位——四川农业大学。特此申明!

参考文献 (References)

- [1] 中国科学院成都分院土壤研究所. 中国紫色土: 上篇[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 203 - 210. [Institute of Soil Sciences, Chengdu Branch of Chinese Academy of Sciences. Purple soils in China (1) [M]. Beijing: Science Press, 1991: 203 - 210]
- [2] 黄鑫. 定植植物篱对紫色土坡耕地表层土壤理化性质及抗蚀性的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2016: 11 - 26. [HUANG Xin. Influence of planting hedgerows on the surface soil physicochemical properties and erosion resistance of purple soil sloping cropland [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2016: 11 - 26]
- [3] PHAN T N, LIKITLERSUANG S, KAMCHOOM V, et al. Root biomechanical properties of chrysopogon zizanioides and chrysopogon nemoralis for soil reinforcement and slope stabilization [J]. Land Degradation and Development, 2021, 32(16): 4624 - 4636. DOI: 10.1002/ldr.4063
- [4] 黄鑫, 蒲晓君, 郑江坤, 等. 不同植物篱对紫色土区坡耕地表层土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 173 - 177. [HUANG Xin, PU Xiaojun, ZHENG Jiangkun, et al. The impact of hedgerows on soil physicochemical properties in purple soil area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30

- (4): 173–177] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2016.04.029
- [5] 李波, 李晔, 赵绍林, 等. 植物篱对石灰土坡耕地理化性质及磷素流失的影响[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(5): 14–18 + 24. [LI Bo, LI Ye, ZHAO Shaolin, et al. Effects of hedgerows on physical and chemical properties and phosphorus loss in the lime soil slope farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(5): 14–18 + 24] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2017.05.003
- [6] ZHAO Chu, NIE Yuhuan, XIN Jianpan, et al. Soil erosion effectively alleviated by *Miscanthus sacchariflorus*, a potential candidate for land deterioration improvement [J]. Rhizosphere, 2023, **26**: 100694. DOI: 10.1016/j.rhisph.2023.100694
- [7] MA Rentian, HU Feinan, XU Chenyang, et al. Vegetation restoration enhances soil erosion resistance through decreasing the net repulsive force between soil particles [J]. Catena, 2023, **226**: 107085. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107085
- [8] 李超, 周正朝, 朱冰冰, 等. 黄土丘陵区不同撂荒年限土壤入渗及抗冲性研究[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(2): 61–66. [LI Chao, ZHOU Zhengchao, ZHU Bingbing, et al. Research on soil infiltration capacity and soil anti-scourability on different abandoned land in the loess hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(2): 61–66] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2017.02.012
- [9] 任雨之, 郑江坤, 付滢, 等. 不同耕种模式下遂宁组紫色土坡耕地产流产沙特征[J]. 水土保持学报, 2019, **33**(2): 30–38. [REN Yuzhi, ZHENG Jiangkun, FU Yan, et al. Characteristics of runoff and sediment yield in purple soil sloping farmland under different tillage patterns in Suining formation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, **33**(2): 30–38] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.02.005
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25–38. [BAO Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2000: 25–38]
- [11] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 25–29. [Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil physicochemical analysis [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978: 25–29]
- [12] 张鹏, 贾志宽, 王维, 等. 秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2012, **45**(8): 1513–1520. [ZHANG Peng, JIA Zhikuan, WANG Wei, et al. Effects of straw returning on characteristics of soil aggregates in semi-arid areas in southern Ningxia of China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, **45**(8): 1513–1520] DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2012.08.007
- [13] HUANG Xiaofang, LIN Lirong, DING Shuwen, et al. Characteristics of soil erodibility K value and its influencing factors in the Changyan Watershed, southwest Hubei, China [J]. Land, 2022, **11**(1): 134. DOI: 10.3390/land11010134
- [14] WILLIAMS J R, RENARD K G, DYKE P T. A new method for assessing erosion's effects on soil productivity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1983, **38**(1): 381–383.
- [15] LIU Ya, LIU Gang, XIAO Hai, et al. Predicting the interrill erosion rate on hillslopes incorporating soil aggregate stability on the Loess Plateau of China [J]. Journal of Hydrology, 2023, **622**: 129698. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129698
- [16] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, **38**(20): 1896–1899. [YANG Peiling, LUO Yuanpei, SHI Yuanchun. Fractal characteristics of soil characterized by weight distribution of particle size [J]. Chinese Science Bulletin, 1993, **38**(20): 1896–1899]
- [17] 齐民友, 刘禄勤, 王文祥, 等. 概率论与数理统计[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2011: 35–42. [QI Minyou, LIU Luqing, WANG Wenxiang, et al. Probability and statistics [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2011: 35–42]
- [18] 李强, 刘国彬, 杨俊诚, 等. 一种量化根系抗侵蚀指标的构建及应用: 根系构架抗蚀指数[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(9): 2955–2962. [LI Qiang, LIU Guobin, YANG Juncheng, et al. Construction and application of a new index for quantifying root erosion resistance: Root framework erosion resistance index [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, **31**(9): 2955–2962. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202009.010]
- [19] TESFAYE G, DEBEBE Y, YAKOB T. Adoption and effect of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) on soil erosion in Somodo Watershed, South-Western Ethiopia [J]. Open Access Library Journal, 2018, **5**(5): e4431. DOI: 10.4236/oalib.1104431
- [20] 王针针, 刘泉宏, 湛芸, 等. 紫色土区植物篱篱前淤积带与篱下土坎土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持学报, 2020, **34**(5): 61–67. [WANG Zhenzhen, LIU Xiaohong, CHEN Yun, et al. Study on soil anti-erodibility between sedimentation zone in front of hedgerows and ridge behind hedgerows in purple soil area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, **34**(5): 61–67] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.05.009
- [21] 蒲玉琳, 林超文, 谢德体, 等. 植物篱-农作坡地土壤团聚体组成和稳定性特征[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(1): 122–128. [PU Yulin, LIN Chaowen, XIE Deti, et al. Composition and stability of soil aggregates in hedgerow-crop slope land [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, **24**(1): 122–128] DOI: 10.13287/j.1001-9332.2013.0133
- [22] WU Dan, PENG Rui, HUANG Lin, et al. Spatio-temporal analysis and driving factors of soil water erosion in the Three-River Headwaters region, China [J]. Water, 2022, **14**(24): 4127. DOI: 10.3390/w14244127
- [23] 熊泳. 川中丘陵区遂宁组紫色土抗蚀性研究[D]. 南充: 西华师范大学, 2022: 14–27. [XIONG Yong. Anti-erodibility of

- soils developed from Suining formation in the hilly area of central Sichuan basin [D]. Nanchong: China West Normal University, 2022: 14–27]
- [24] 王文艳. 黄土中主要粘土矿物构成对土壤肥力与抗蚀性的影响及空间变异研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 16–21. [WANG Wenyan. The influence and spatial variability of main clay mineral composition in loess on soil fertility and corrosion resistance [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 16–21]
- [25] WANG Lei, WU Jiajun, XIE Jianzhi, et al. Effects of different hedgerow patterns on the soil physicochemical properties, erodibility, and fractal characteristics of slope farmland in the Miyun Reservoir area [J]. *Plants*, 2022, **11**(19): 2537. DOI: 10.3390/plants11192537
- [26] LI Songyang, GAO Ruoyun, HUANG Maowei, et al. Multifractal features of particle-size distribution and their relationships with soil erosion resistance under different vegetation types in debris flow basin [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, **10**: 927862. DOI: 10.3389/feart.2022.927862
- [27] 赵云鹤, 钟鹏, 高晗, 等. 土地利用类型对典型黑土团聚体稳定性和抗蚀性的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2023, **51**(9): 112–119. [ZHAO Yunhe, ZHONG Peng, GAO Han, et al. Effects of land use types on stability of anti-erodibility of typical black soil aggregates [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2023, **51**(9): 112–119] DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.2023.09.016
- [28] 李英, 林圣玉, 张龙, 等. 鄱阳湖生态经济区坡耕地表土抗蚀性评价[J]. *中国水土保持*, 2016(7): 48–51. [LI Ying, LIN Shengyu, ZHANG Long, et al. Evaluation of the erosion resistance of surface soils in sloped farmland in the Poyang Lake Ecological Economic Zone [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2016(7): 48–51] DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.2016.0185
- [29] 高敏. 三峡库区紫色土小流域土壤可蚀性 K 值研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011: 13–19. [GAO Min. Study on soil erodibility K values in small watersheds of purple soil in the Three Gorges Reservoir area [D]. Chongqing: Southwestern University, 2011: 13–19]
- [30] ZHONG Shouqin, HAN Zhen, DU Jing, et al. Relationships between the lithology of purple rocks and the pedogenesis of purple soils in the Sichuan Basin, China [J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**(1): 13272. DOI: 10.1038/s41598-019-49687-9
- [31] 李笑雨. 青藏高原南部土壤理化特性及土壤质量评价研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2023: 18–26. [LI Xiaoyu. Study on soil physicochemical characteristics and soil quality assessment in the southern Qinghai-Tibet Plateau [D]. Xianyang: Northwest Agriculture and Forest University, 2023: 18–26.] DOI: 10.27409/d.cnki.gxbnu.2023.000871
- [32] 唐夫凯. 岩溶峡谷区不同土地利用方式土壤抗蚀性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016: 27–43. [TANG Fukai. Study of soil anti-erodibility of different land use types in karst valley region [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2016: 27–43.]
- [33] 唐菡. 喀斯特坡地草篱根系固土力学性能及其主要影响因素[D]. 重庆: 西南大学, 2020: 31–36. [TANG Han. The mechanical properties and its main influencing factors of herb hedgerow roots under karst slope environment [D]. Chongqing: Southwest University, 2020: 31–36] DOI: 10.27684/d.cnki.gxndx.2020.002934
- [34] WENDEL A S, BAUKE S L, AMELUNG W, et al. Root-rhizosphere-soil interactions in biopores [J]. *Plant and Soil*, 2022, **475**(1–2): 253–277. DOI: 10.1007/s11104-022-05406-4
- [35] 李平安. 延安地区蒿属植物固土效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2022: 58–63. [LI Pingan. Study on the mechanical effect of artemisia species in Yan'an area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2022: 58–63] DOI: 10.26976/d.cnki.gehau.2022.001565
- [36] DIMKPA C O. Soil properties influence the response of terrestrial plants to metallic nanoparticles exposure [J]. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 2018, **6**: 1–8. DOI: 10.1016/j.coesh.2018.06.007
- [37] 张栋. 灌丛垫固土作用机制及其生态护岸效果研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019: 103–104. [ZHANG Dong. Soil-fixing mechanism and ecological revetment effect of living brush mattress [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019: 103–104]
- [38] 齐雪. 典型草原区露天煤矿排土场重建植物群落演替特征和土壤养分动态[D]. 内蒙古: 内蒙古农业大学, 2023: 34–51. [QI Xue. Succession characteristics of re-vegetation community and dynamics of soil nutrients in open-pit coal mine in typical steppe [D]. Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2023: 34–51] DOI: 10.27229/d.cnki.gnmnu.2023.000041
- [39] 马庆旭. 植物对氨基酸的吸收及 pH 和 Cd 胁迫对其吸收的影响机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 44–45. [MA Qingxu. The uptake of acids and the effects of pH and Cd stress on plants absorption [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019: 44–45]
- [40] QI Jiarui, GUO Mingming, ZHOU Pengchong, et al. Soil erosion resistance factors in different types of gully heads developed in four main land-uses in the Mollisols region of northeast China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, **230**: 105697. DOI: 10.1016/j.still.2023.105697
- [41] 张睿博, 汪金松, 王全成, 等. 土壤颗粒态有机碳与矿物结合态有机碳对气候变暖响应的研究进展[J]. *地理科学进展*, 2023, **42**(12): 2471–2484. [ZHANG Ruibo, WANG Jinsong, WANG Quancheng, et al. Responses of soil particulate and mineral-associated organic carbon to climate warming: A review [J]. *Progress in Geography*, 2023, **42**(12): 2471–2484] DOI:

- 10.18306/dlkxjz.2023.12.015
- [42] BATES S E, WANDRAG E M, DUNCAN R P, et al. Calculating the uncertainty associated with log response ratios in plant-soil feedback studies [J]. *Plant Ecology*, 2020(9): 1–9. DOI: 10.1007/s11258–019–00981–6
- [43] WANG Zhenhong, FANG Hong, CHEN Mouhui. Effects of root exudates of woody species on the soil anti-erodibility in the rhizosphere in a karst region, China [J]. *PeerJ*, 2017, 5: e3029. DOI: 10.7717/peerj.3029
- [44] ZHAO Bingqin, ZHANG Lun, XIA Zhenyao, et al. Effects of rainfall intensity and vegetation cover on erosion characteristics of a soil containing rock fragments slope [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019: 7043428. DOI: 10.1155/2019/7043428
- [45] LI Jing, LI Zhanbin, GUO Mengjing, et al. Effects of vegetation restoration on soil physical properties of abandoned farmland on the Loess Plateau, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(5): 205. DOI: 10.1007/s12665–018–7385–7

Effect of Hedgerow on Anti-Erodibility of Sloping Farmlands Consisted of Purple Soil in the Hilly Area of Central Sichuan Basin

HUANG Xin^{1a, 1b}, ZHENG Jiangkun^{1a, 1b*}, REN Yuzhi^{1a, 1b}, CHEN Xin², WANG Wenwu^{1a, 1b}

(1. a. College of Forestry; b. Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating, Universities and Colleges of Sichuan Province, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China;

2. Soil and Water Conservation Experimental Station in Suining, Suining 629006, Sichuan China)

Abstract: In the hilly area of central Sichuan basin, some sloping farmlands primarily consisted of purple soil have suffered serious water-soil erosion, inhibiting crop yield and income increase. Planting hedgerow is an effective ecological means of improving soil anti-erodibility. Good efforts to increase soil erosion resistance were made in the Loess Plateau of China, but less involved in revelation of corrosion-resistant mechanism of purple soil by planting hedgerows on sloping farmlands in Sichuan basin.

In this study, it took *Chrysopogon zizanioides* and *Leucaena glauca* (L.) Benth in sloping farmlands of purple soil as research object. It collected long-term positioning observation data at Suining Soil and Water Conservation Test Station, Sichuan, China and field sampling; the principal component analysis method was used to comprehensively evaluate soil anti-erodibility of sloping farmland planted with different types of hedgerows.

(1) It found that 11 indexes of soil anti-erodibility could be explained by two principal components, with a contribution rate of up to 82.7%. The water-stable aggregate could be used as the best index to measure soil corrosion resistance.

(2) Hedgerows significantly improved anti-erodibility of surface soil. Supposing sample plots without hedgerow as a control group, on a sloping farmland of 10°, soil anti-erodibility index obtained from the *Chrysopogon zizanioides* hedgerow plot and the *Leucaena glauca* (L.) Benth hedgerow plot was 7.0 and 2.3 times higher than that of the control plot, respectively; on the 15° sloping farmland, the soil anti-erodibility index for the *Chrysopogon zizanioides* hedgerow plot was 26.7 times than that of the control plot. The soil anti-erodibility on the downside of a hedgerow was higher than that on the upside. On the sloping farmland of 10° and 15°, the soil anti-erodibility on the downside was 2.0 and 1.5 times higher than that on the upside, respectively; and for *Leucaena glauca* (L.) Benth hedgerow, its value on the downside was 1.1 times higher than that on the upside on the 10° sloping farmland.

(3) Generally, the soil anti-erodibility on the *Chrysopogon zizanioides* hedgerow plot was higher than that of the

Leucaena glauca (L.) Benth hedgerow plot, and index value examined on the downside was higher than those on the upsides.

This study revealed that the selection of a suitable hedgerow type and preservation of the surface soil on the upside of hedgerow could effectively reduce soil-water loss in sloping farmland, which would provide a scientific guide to soil erosion control for agricultural yield increase in the hilly area of central Sichuan basin.

Key words: hedgerow; sloping farmland; anti-erodibility index; water-stable aggregate; purple soil

(责任编辑 朱颖彦 李嵘)