

## 香根草植物篱对三峡库区坡地紫色土侵蚀的影响

郭 萍<sup>1</sup>, 夏振尧<sup>1,2</sup>, 高 峰<sup>1</sup>, 胡 欢<sup>1</sup>, 张千恒<sup>1</sup>, 杨悦舒<sup>1,2</sup>, 肖 海<sup>1,2\*</sup>

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 宜昌 443002;

2. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002)

**摘 要:** 紫色土坡地是三峡库区水土流失的主要来源, 严重影响着三峡工程的运行安全。植物篱是三峡库区坡地的重要水土保持措施之一, 具有明显的减流减沙效益, 然而植物篱地上及地下部分对坡面侵蚀的影响尚不明确。为此, 该研究通过设置 2 个坡度(15°和 25°)、2 个降雨强度(60 和 120 mm/h)和 3 个坡面条件(裸坡对照、植物篱和仅有植物篱根系), 开展人工降雨试验, 分析各试验条件下初始产流时间、径流量和侵蚀量的变化特征。结果表明: 植物篱、地下部分和地上部分的平均减沙效益分别为 75.59%、29.45%、46.13%, 是对应的平均减流效益的 4.79、4.60、4.92 倍; 地上部分和地下部分延缓初始产流时间、减流和减沙平均贡献率分别为 48.28%和 51.72%、62.25%和 37.75%、60.44%和 39.56%, 表明植物篱对减沙作用更明显, 且地上部分对产流产沙的影响大于其地下部分。以上结果加深了香根草植物篱对坡地侵蚀过程影响的理解, 可为三峡库区紫色土坡地水土流失防治提供科学依据。

**关键词:** 土壤; 侵蚀; 植物篱; 三峡库区; 地上部分; 地下部分; 减流减沙效益

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.19.012

中图分类号: S157.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-19-0105-08

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.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.19.012 http://www.tcsae.org

Guo Ping, Xia Zhenyao, Gao Feng, et al. Effects of *Vetiveria zizanioides* hedgerow on the erosion of purple soil of slope land in the Three Gorges Reservoir Area of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(19): 105-112. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.19.012 http://www.tcsae.org

## 0 引 言

三峡库区生态环境脆弱, 水土流失严重<sup>[1-3]</sup>, 水土流失面积占库区土地面积的 66.80%<sup>[4]</sup>。同时, 根据 2018 年全国水土流失动态监测成果, 三峡库区所涉及湖北、重庆 2 省(市)的水土流失面积就占 33.34%。作为三峡库区坡地主要土壤类型的紫色土水稳性差、抗侵蚀性弱<sup>[5-6]</sup>, 加上三峡库区山高坡陡、降雨集中且强度大<sup>[7]</sup>以及不合理的土地利用方式, 侵蚀模数高达 3 464~9 452 t/(km<sup>2</sup>·a)<sup>[8]</sup>, 是库区水土流失和面源污染的主要来源<sup>[9]</sup>, 严重影响三峡工程的运行安全<sup>[4]</sup>。植物篱是三峡库区坡地的重要水土保持措施之一, 可以有效地控制水土流失、防止土地退化、保护生物多样性<sup>[2]</sup>, 是治理紫色土坡地水土流失的一种良好生态措施, 对库区紫色土坡地水土保持具有重要意义。

植物篱已受到国内外学术界的广泛关注<sup>[10-13]</sup>, 在三峡库区坡地上的研究主要集中于植物篱的拦流减沙<sup>[14-15]</sup>、改善土壤物理性状<sup>[16]</sup>、改变微地形<sup>[17]</sup>等方面。大量研究表明, 植物篱具有明显的减流减沙效益, 且减沙效益大于减流

效益<sup>[10-11]</sup>。在三峡库区坡地, 马桑、黄荆、新银合欢等植物篱能使坡面径流量和土壤侵蚀量分别下降 13.4%~70.8%和 18.4%~70.0%<sup>[18]</sup>; 香根草植物篱紫色土坡地径流量和侵蚀量分别是对照小区的 61.50%和 37.71%<sup>[19]</sup>。在黄土高原堆积体坡面, 冲刷试验研究发现植物篱具有 10%~45%的减沙效益<sup>[20-21]</sup>。在川中丘陵紫色土区域, 植物篱能够减少径流和泥沙流失分别为 28.9%和 11.3%<sup>[22]</sup>。在东北黑土区, 不同坡段植物篱能够减少坡面产流产沙率分别为 5.40%~10.16%和 51.90%~75.72%<sup>[10]</sup>; 田间试验研究表明植物篱可减流 49.2~50.6%以及减沙 42.1%~44.6%<sup>[23]</sup>。在南方红壤坡地, 植物篱在天然降雨条件下能够减少平均径流量和平均土壤侵蚀量分别为 65.87%和 91.29%<sup>[11]</sup>; 通过 2012—2018 年的原位观测, 植物篱每年可减少径流 35%~36%和侵蚀泥沙 32%~87%<sup>[24]</sup>。总体来说, 不同区域不同试验条件不同物种植物篱的减流减沙效益存在差异, 但其水土保持效益却显著。同时, 国外相关研究也证明了植物篱能够有效地减少坡面径流和侵蚀产生<sup>[12-13,25-26]</sup>。

尽管如此, 上述研究均是针对完整植物篱进行的研究, 且也只是在试验现象和结果的基础上从不同角度定性解释了植物篱减流减沙的原因。而植物是通过地上和地下两部分共同作用对坡面侵蚀过程造成影响<sup>[27-28]</sup>。目前关于植物地上部分和地下部分对减流减沙的影响及贡献开展了大量研究, 为揭示植物减蚀机理提供了科学依据<sup>[29-30]</sup>。但针对三峡库区同区域从植物篱地上和地下

收稿日期: 2021-06-14 修订日期: 2021-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(41807068; U2040207), 三峡大学优秀博士论文基金(2020BSPY003)

作者简介: 郭萍, 博士生, 研究方向为土壤侵蚀过程与机理。

Email: gp\_easy@163.com

\*通信作者: 肖海, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为土壤侵蚀与生态防护。Email: oceanshawtcgu@163.com

部分角度分析植物篱对坡面侵蚀过程的影响及其地上地下部分对侵蚀影响的贡献研究较为少见。因此,本文以三峡库区坡地紫色土为研究对象,采用人工模拟降雨试验,设置 2 个坡度(15°和 25°)、2 个降雨强度(60 和 120 mm/h)和 3 个坡面条件(裸坡对照、植物篱和仅有植物篱根系),对比分析植物篱对坡面产流产沙过程的影响以及植物篱地上部分和地下部分的减流减沙效益及贡献率,以期加深植物篱对三峡库区坡地紫色土侵蚀过程影响的理解。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

试验土壤采自湖北省秭归县水田坝乡(110°38′~110°44′E, 30°21′~30°10′N),是侏罗系上统蓬莱镇组紫色砂泥岩发育的 A-C 型石灰性紫色土。采样前清除地表植被残落物及固体杂块,并将土壤运至三峡大学经风干处理过 5 mm 筛以分离出根系石子等杂物备用。经测定,野外土壤容重为 1.30 g/cm<sup>3</sup>,有机质含量为 6.75 g/kg, pH 值为 6.87,颗粒组成为黏粒(<0.002 mm)占 16.50%、粉粒(0.002~0.05 mm)占 38.44%和砂粒(>0.05~2.00 mm)占 45.06%,土壤质地为壤土(美国制)。

### 1.2 试验设计

#### 1.2.1 试验设置

李秋艳等<sup>[31]</sup>对比分析发现在坡度为 15°~25°的坡地适宜采用植物篱措施,三峡库区湖北段 1 h 最大降雨量在 55~110 mm 之间<sup>[7]</sup>。因此,本研究采用的是底板现浇钢筋混凝土(坡下设有排水口)和四壁砖块与水泥砂浆砌修建坡地实体模型(图 1a),形成 15°和 25°两个坡度坡面实体模型有效尺寸为 4.4 m 长、1.0 m 宽、0.5 m 深。设计 60 和 120 mm/h 两个降雨强度开展人工模拟降雨试验。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,降雨均匀度大于 80%<sup>[32]</sup>。

植物选用三峡库区常用植物篱物种香根草,每带植物篱 2 行,行距为 20 cm<sup>[19]</sup>。为节约成本和提高工作效率,减少植物篱植物生长时间的影响,采用植物篱生长槽养护形成植物篱带(图 1b)。植物篱生长槽尺寸为 1.0 m 长、0.4 m 宽和 0.5 m 高,其各面挡板均可以拆卸,同时形成 15°和 25°两个坡度,以便后续吊装至实体模型与坡面形成一致坡度。在生长槽底部装填 10 cm 厚粗砂以确保植物篱在生长过程中能够自由排水,然后将紫色土壤自下而上按设计容重 1.30 g/cm<sup>3</sup> 分层装填于生长槽中,并在 2019 年 4 月将香根草植物苗(两行,行距和株距分别为 20 和 10 cm)移栽至生长槽内并开始养护。试验前植物篱已经养护 1 年以上,形成了密闭的植物篱。正式试验前,将植物篱生长槽整体吊装至坡地实体模型对应位置并固定,拆卸前后挡板以避免挡板影响坡面侵蚀过程。随后分层(5 cm 一层,共 8 层)装填坡地实体模型,装填前测定所装填土壤含水率,计算各层所需装填土壤量,并形成与野外一致的容重(1.30 g/cm<sup>3</sup>),形成植物篱坡

面条件(P)。装填过程中在各层打毛并压实处理,以避免出现不同土层分层现象和保证装填土壤容重均匀。为避免所填土体与边壁四周(含与植物篱接触部分)出现不连续裂缝,在装填前对边壁四周进行洒水湿润处理并在装填过程中适当压实处理。对于仅有植物篱根系坡面条件(R),准备过程与 P 条件一致,待装填完成后用剪刀沿地表将植物篱地上部分全部剪掉。对于裸坡对照条件(CK),则使用紫色土按设计容重分层装填整个坡面。

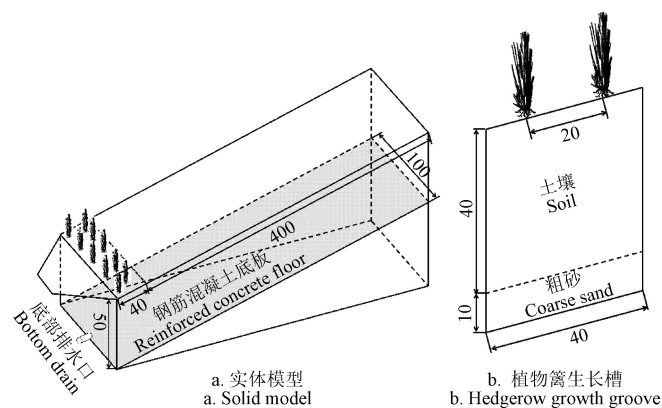


图 1 实体模型和植物篱生长槽示意图  
Fig.1 Schematic diagram of solid model and hedgerow growth groove

#### 1.2.2 降雨试验

待各坡面条件下坡地实体模型装填完成后,将模拟降雨器喷嘴直径换成最小值(5 mm),调整两个降雨器间距以及工作水压使雨强达到 30 mm/h 左右形成雾状雨对所铺设的土壤进行湿润处理。湿润过程中确保坡面土壤不被冲刷破坏,且至坡面表层土壤即将开始产生径流时停止模拟降雨,并使用塑料薄膜覆盖整个坡面静置 24 h 左右。正式降雨前在坡面覆盖塑料膜情况下将降雨强度率定至设计降雨强度后,掀开塑料膜并开始计时,待坡面开始连续产流后记录初始产流时间并再次开始计时,至产流 60 min 后结束降雨。降雨过程中每隔 3 min 换一次接样塑料桶,收集全部径流泥沙样。降雨结束后,对每个过程样的泥沙样进行称量并记录,然后将泥沙样充分搅拌,使用烧杯在泥沙上中下 3 个部位分别取样混合形成一个完整试样,静置 24 h 后倒掉上清液,采用烘干法得到泥沙含量,以计算不同降雨场次坡地的侵蚀量和径流量。

### 1.3 指标测定与数据分析

土壤容重采用环刀法测定;有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定<sup>[33]</sup>;pH 值采用 pH 酸度计法测定<sup>[34]</sup>;土壤颗粒采用 TopSizer 激光粒度分析仪(SCF-108,珠海欧美克仪器公司,中国)扫描法测定。

径流率( $I$ , L/min)<sup>[35]</sup>和侵蚀率( $E$ , kg/min)计算公式(1)、(2):

$$I = \frac{R_t}{t} \quad (1)$$

$$E = \frac{S_t}{t} \quad (2)$$

式中  $R_i$  为接样时间内收集的径流量,  $L$ ;  $S_i$  为接样时间内收集的径流中所含泥沙量,  $\text{kg}$ ;  $t$  为接样时间,  $\text{min}$ 。

对比分析 P 和 R 两种坡面条件与 CK 坡面条件的初始产流时间、径流量和侵蚀量等模拟降雨试验过程中获取的指标数据结果, 分别获得完整植物篱和植物篱地下部分对测定指标的影响结果, 植物篱地上部分对测定指标的影响结果通过完整植物篱对测定指标的影响结果减去植物篱地下部分对测定指标的影响结果获得。因此, 植物篱延缓初始产流时间百分比 ( $R_1$ , %)、减流效益 ( $R_2$ , %)、减沙效益 ( $R_3$ , %), 相应植物篱地下部分延缓初始产流时间百分比 ( $R_{u1}$ , %)、减流效益 ( $R_{u2}$ , %)、减沙效益 ( $R_{u3}$ , %) 以及植物篱地上部分延缓初始产流时间百分比 ( $R_{a1}$ , %)、减流效益 ( $R_{a2}$ , %)、减沙效益 ( $R_{a3}$ , %) 分别按公式 (3)、(4)、(5) 计算。

$$R_i = \frac{R_{Pi} - R_{CKi}}{R_{CKi}} \times 100\% \quad (3)$$

$$R_{ui} = \frac{R_{Ri} - R_{CKi}}{R_{CKi}} \times 100\% \quad (4)$$

$$R_{ai} = R_i - R_{ui} \quad (5)$$

式中  $R_{Pi}$ 、 $R_{Ri}$ 、 $R_{CKi}$  分别为 P、R 和 CK 坡面条件下的  $i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 指标的结果, %。

植物篱地下部分和地上部分对各指标影响的贡献率分别按照公式 (6)、(7) 计算。

$$P_{ui} = \frac{R_{ui}}{R_i} \times 100\% \quad (6)$$

$$P_{ai} = \frac{R_{ai}}{R_i} \times 100\% = 100\% - P_{ui} \quad (7)$$

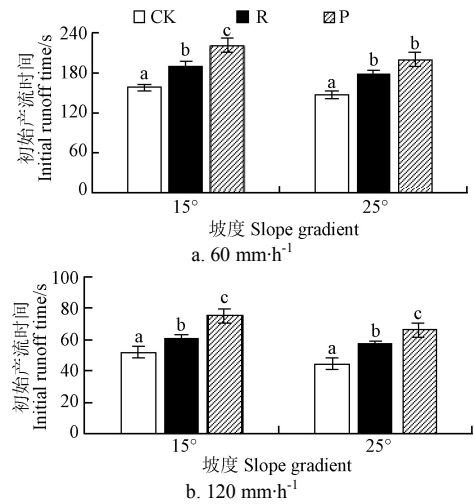
式中  $P_{ui}$  和  $P_{ai}$  分别为植物篱地下部分和地上部分对  $i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 指标影响的贡献率, %。

本研究设有 2 个坡度 (15° 和 25°)、2 个降雨强度 (60 和 120  $\text{mm/h}$ ) 和 3 个坡面条件 (裸坡对照 CK、植物篱 P 和仅有植物篱根系 R), 交叉设置 12 场模拟降雨试验, 重复 3 次, 共计 36 场模拟降雨试验, 取三次重复试验数据平均值进行处理及分析。采用 SPSS21.0 分析同一降雨强度和坡度条件下不同处理之间是否存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。

## 2 结果分析

### 2.1 初始产流时间

同一降雨强度和坡度条件下, 除 60  $\text{mm/h}$  和 25° 下的 R 和 P 坡面条件之外, 不同坡面条件的初始产流时间存在显著性差异 ( $P<0.05$ ) (图 2), 且均呈现  $CK<R<P$ , 表明植物篱的存在能够有效延缓坡面产流时间。总体来说, 与 CK 坡面条件相比, P、R 两种坡面条件的初始产流时间分别增加了 35.79%~48.06%、17.23%~28.27%, 平均分别增加了 42.06% 和 21.69%。分析表明, 植物篱地上部分和地下部分对初始产流时间增加平均贡献率分别为 48.28% 和 51.72%, 贡献差别不大。



注: CK-裸坡对照; R-仅有植物篱根系; P-植物篱; 同一降雨强度和坡度条件下不同字母表示不同处理间存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。

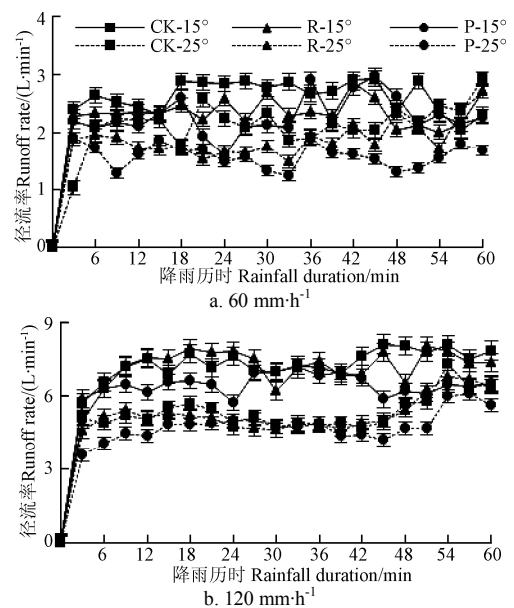
Note: CK-Control check; R-Only hedgerow roots; P-Hedgerow; Different letters under the same rainfall intensity and slope gradient indicate significant differences between different treatments ( $P<0.05$ ).

图 2 不同降雨强度和坡度下三种坡面条件的初始产流时间

Fig.2 Initial runoff time of the three slope conditions under different rainfall intensity and slope gradient

### 2.2 植物篱对坡面产流产沙过程的影响

不同坡面条件下坡面产流过程在不同降雨强度和坡度下均呈现先增加后波动稳定的变化趋势 (图 3), 这说明植物篱对坡面产流过程影响不大。总体来说, 在各产流时间内, 坡面径流大致呈现  $CK>R>P$  的变化顺序。具体来说, 在相同降雨强度和坡度下, P 坡面条件下坡面径流率变化曲线总是低于其他两种坡面条件的径流率变化曲线, 而 R 和 CK 这两种坡面条件下的径流率变化曲线比较靠近。这说明植物篱可以有效减缓径流同时减少径流率的产生, 且植物篱地上部分对径流率的影响大于植物篱地下部分对径流率的影响。



注: 15°-坡度 15°; 25°-坡度 25°。

Note: 15°-Solpe gradient 15°; 25°-Solpe gradient 25°.

图 3 不同降雨强度和坡度下三种坡面条件的径流率

Fig.3 Runoff rate of the three slope conditions under different rainfall intensity and slope gradient

与坡面径流过程随着降雨历时增加各坡面条件下变化规律基本一致不同, 坡面产沙过程随降雨历时增加呈现明显差异 (图 4)。随着降雨历时的增加, P 坡面条件下的坡面侵蚀率始终保持波动稳定的变化趋势, 而 CK 和 R 坡面条件下坡面侵蚀率均呈现先缓慢增加后快速增加的变化规律。而从 3 种坡面条件 CK、R 和 P 的侵蚀率对比来看, 在产流前中期 CK 和 R 的坡面侵蚀率均明显大于 P 的坡面侵蚀率, 随着降雨历时的推移, P 与 CK、R 与 CK 的坡面侵蚀率相差值越来越大。这说明植物篱可以有效地减少侵蚀率, 并随着降雨历时的推移减蚀作用会逐渐增大, 同时植物篱地上部分对侵蚀率的影响大于植物篱地下部分对侵蚀率的影响。

### 2.3 植物篱对坡面减流减沙效益

表 1 和表 2 分析了不同坡面条件下在不同降雨强度和坡度时的总径流量、总侵蚀量和植物篱及其地上地下部分减流减沙效益。在同一降雨强度和坡度条件下, 除 120 mm/h 和 15°下的 CK 和 R 坡面条件之外, 不同坡面条件下的总径流量和总侵蚀量都存在显著性差异。在同一降雨强度和坡度条件下, 坡面总径流量和总侵蚀量呈现  $P < R < CK$  变化规律, 说明植物篱能够有效地减少坡面产流产沙。

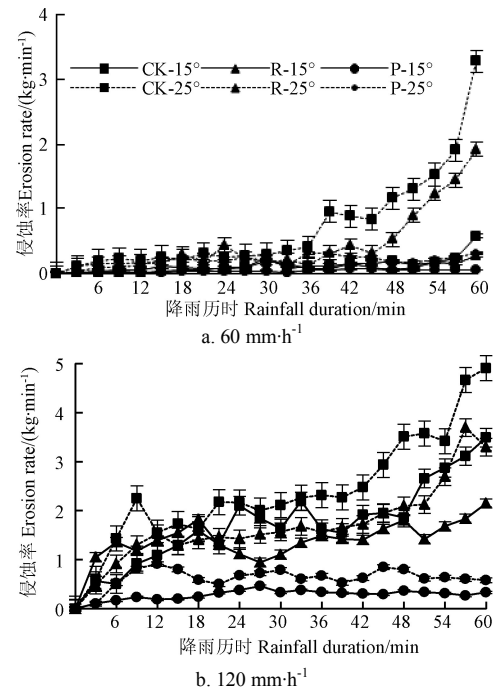


图 4 不同降雨强度和坡度下三种坡面条件的侵蚀率  
Fig.4 Erosion rate of the three slope conditions under different rainfall intensity and slope gradient

表 1 不同降雨强度和坡度下植物篱减流效益

Table 1 Runoff reduction benefit of hedgerows under different rainfall intensity and slope gradient

降雨强度 Runoff intensity/ (mm·h <sup>-1</sup> )	坡度 Slope gradient/(°)	总径流量 Total runoff/L			减流效益 Runoff reduction benefit/%			减流贡献率 Contribution rate of runoff reduction/%	
		$R_{CK2}$	$R_{R2}$	$R_{P2}$	$R_2$	$R_{u2}$	$R_{a2}$	$P_{u2}$	$P_{a2}$
60	15	158.26±1.89c	142.01±1.39b	137.35±1.90a	13.21	10.27	2.94	77.71	22.29
	25	129.78±1.22c	113.90±3.24b	95.80±1.29a	26.19	12.24	13.95	46.74	53.26
120	15	440.95±3.48b	435.05±5.74b	385.56±2.35a	12.56	1.34	11.22	10.66	89.34
	25	322.76±4.24c	317.02±2.37b	286.60±3.11a	11.20	1.78	9.43	15.88	84.12
平均 Average		262.94	251.99	226.32	15.79	6.41	9.38	37.75	62.25

注:  $R_{CK2}$ 、 $R_{R2}$ 、 $R_{P2}$  分别为 CK、R 和 P 坡面条件下的总径流量;  $R_2$ 、 $R_{u2}$  和  $R_{a2}$  分别为植物篱、地下部分和地上部分的减流效益;  $P_{u2}$  和  $P_{a2}$  分别为植物篱地下部分、地上部分的减流贡献率; 同行不同字母表示同一降雨强度和坡度条件下不同处理间存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。下同。

Note:  $R_{CK2}$ ,  $R_{R2}$  and  $R_{P2}$  are the total runoff under the condition of control check (CK), only hedgerow roots (R) and hedgerow (P), respectively;  $R_2$ ,  $R_{u2}$  and  $R_{a2}$  are the runoff reduction benefit of the hedgerow, the underground part of the hedgerow and the aboveground part of the hedgerow, respectively;  $P_{u2}$  and  $P_{a2}$  are the contribution rate of runoff reduction of the hedgerow, the underground part of the hedgerow and the aboveground part of the hedgerow, respectively; Different letters in the same row under the same rainfall intensity and slope gradient indicate significant differences between different treatments ( $P < 0.05$ ). The same below.

表 2 不同降雨强度和坡度下植物篱减沙效益

Table 2 Sediment reduction benefit of hedgerows under different rainfall intensity and slope gradient

降雨强度 Runoff intensity/ (mm·h <sup>-1</sup> )	坡度 Slope gradient/(°)	总侵蚀量 Total sediment/kg			减沙效益 Sediment reduction benefit/%			减沙贡献率 Contribution rate of sediment reduction/%	
		$R_{CK3}$	$R_{R3}$	$R_{P3}$	$R_3$	$R_{u3}$	$R_{a3}$	$P_{u3}$	$P_{a3}$
60	15	8.23±0.12c	5.54±0.12b	2.34±0.11a	71.54	32.65	38.89	45.64	54.36
	25	44.63±1.13c	28.40±0.54b	11.99±0.36a	73.13	36.37	36.77	49.73	50.27
120	15	108.14±2.40c	86.97±1.47b	17.70±0.48a	83.63	19.58	64.05	23.41	76.59
	25	149.94±5.38c	106.11±3.04b	38.92±1.03a	74.05	29.23	44.82	39.48	60.52
平均 Average		77.74	56.76	17.74	75.59	29.45	46.13	39.56	60.44

注:  $R_{CK3}$ 、 $R_{R3}$ 、 $R_{P3}$  分别为 CK、R 和 P 坡面条件下的总侵蚀量;  $R_3$ 、 $R_{u3}$  和  $R_{a3}$  分别为植物篱、地下部分和地上部分的减沙效益;  $P_{u3}$  和  $P_{a3}$  分别为植物篱地下部分、地上部分的减沙贡献率。

Note:  $R_{CK3}$ ,  $R_{R3}$  and  $R_{P3}$  are the total sediment under the condition of control check (CK), only hedgerow roots (R) and hedgerow (P), respectively;  $R_3$ ,  $R_{u3}$  and  $R_{a3}$  are the sediment reduction benefit of the hedgerow, the underground part of the hedgerow and the aboveground part of the hedgerow, respectively;  $P_{u3}$  and  $P_{a3}$  are the contribution rate of sediment reduction of the hedgerow, the underground part of the hedgerow and the aboveground part of the hedgerow, respectively.

CK 坡面条件下的总径流量是 P 和 R 坡面条件下的倍数平均值分别为 1.19 和 1.07。分析表明, 植物篱、地下部分和地上部分减流效益分别为 11.20%~26.19%、1.34%~12.24%和 2.94%~13.95%, 对应的平均减流效益

分别为 15.79%、6.41%和 9.38%。进一步分析发现植物篱地上部分减流贡献率和地下部分减流贡献率分别为 22.29%~89.34%和 10.66%~77.71%, 对应的平均减流贡献率为 62.25%和 37.75%, 这表明植物篱地

上部分对减流的贡献大于其地下部分。

CK 坡面条件下的总侵蚀量是 P 和 R 坡面条件下的倍数平均值分别为 4.30 和 1.43, 说明植物篱能减少总侵蚀量的产生。与裸坡对照 CK 相比, 植物篱、地下部分和地上部分的减沙效益在 71.54%~83.63%、19.58%~36.37% 和 36.77%~64.05%, 对应的平均减沙效益分别为 75.59%、29.45% 和 46.13%, 是对应的平均减流效益的 4.79 倍、4.60 倍、4.92 倍, 表明植物篱对减沙作用更明显。总体来说, 植物篱地上部分和地下部分减沙贡献率分别为 50.27%~76.59% 和 23.41%~49.73%, 对应的平均减沙贡献率为 60.44% 和 39.56%, 这表明植物篱地上部分对减沙的贡献大于其地下部分。

### 3 讨 论

植物篱能有效延缓紫色土坡地初始产流时间, 与裸坡对比增加了 35.79%~48.06%, 平均 42.06%, 处于刘泉宏等<sup>[36]</sup>研究植物篱延缓初始产流时间 21.78%~78.25% 范围内。这与植物篱地上部分增加了地面覆盖度而对地表径流的机械阻挡<sup>[37]</sup>、降低径流流速<sup>[36]</sup>而增加了径流在坡面的停留时间<sup>[20]</sup>, 地下部分根系固持土壤改良了土壤理化性质比如改善土壤孔隙性<sup>[38]</sup>而增加了径流入渗<sup>[39]</sup>有关。植物篱地上部分和地下部分分别滞后初始产流时间贡献率分别为 48.28% 和 51.72%, 表明植物篱地上部分起到拦截作用及地下部分改善土壤促进入渗作用对初始产流时间滞后贡献基本相当。

植物篱对坡面产流过程影响不大, 各坡面条件下均呈现先增加后波动稳定的变化趋势。降雨前期未形成坡面细沟之前, 土壤含水率不高, 此段时间的降雨主要被土壤吸收, 入渗量较大而径流率较小<sup>[35]</sup>。随着土壤含水量不断增加, 同时坡面结皮发育, 造成坡面径流增加随后逐渐趋于稳定。坡面细沟出现, 细沟发育过程中会出现沟壁坍塌造成细沟内径流暂时被拦截, 随着细沟径流能量增加将坍塌泥沙逐渐搬运, 造成细沟内径流恢复流动, 这一水路拦截-恢复过程造成径流呈现波动变化。植物篱对坡面产沙过程影响较大, P 坡面条件下的坡面侵蚀率变化始终保持波动稳定的变化趋势, 而 CK 和 R 坡面条件下坡面侵蚀率均呈现先缓慢增加后快速增加的变化规律。在降雨前期径流率较小, 搬运泥沙的能力有限, 使得各坡面条件下侵蚀率均较小。随着坡面细沟出现, CK 和 R 坡面条件下坡面侵蚀率快速增加。而 P 坡面条件下由于植物篱地上部分十分密集, 能够对坡面上方来沙进行有效拦截, 造成泥沙淤积于篱前和篱中, 只有少数泥沙被径流带出坡面, 因此, P 坡面条件下侵蚀率始终保持波动稳定的趋势。

本研究中植物篱的减流效益在 11.20%~26.19% 之间, 平均为 15.79%。植物篱的减沙效益在 71.54%~83.63% 之间, 平均为 75.59%, 是减流效益的 4.79 倍。植物篱的减沙效益明显大于植物篱的减流效益, 这与苏鹏等<sup>[10-11]</sup>的研究成果一致。植物篱地上部分通过物理拦截径流削减径流流速来降低其挟沙能力, 同时机械阻挡使大

部分侵蚀泥沙沉积在植物篱篱前; 地下部分通过根系在土体中交错、穿插、加筋等作用提高土壤抗剪强度, 并增强土壤抗渗性、减少径流, 从而减少土壤侵蚀。

在本研究中, 植物篱地上部分减流和减沙平均贡献率分别为 62.25% 和 60.44%, 而地下部分减流和减沙平均贡献率分别为 37.75% 和 39.56%, 植物篱地上部分减流减沙效益均大于其地下部分, 这与前人研究认为植物地下部分对坡面减流减沙贡献更大结果相反<sup>[30]</sup>。在植物完全覆盖坡面条件下获得, 植物根系能够对整个坡面土壤进行保护, 形成根土复合体, 提高整个坡面土壤抗蚀能力。而在本研究中, 植物篱仅占坡面面积的 9.09%, 地下根系难以对整个坡面土壤有效固持, 这势必会减弱植物篱地下部分贡献。同时本研究中植物篱地上部分极为致密, 能够有效拦截上方来沙, 其发挥的泥沙拦截作用比植物覆盖坡面条件时地上部分拦沙效果更强, 因此, 本研究植物篱在减流减沙效益贡献率方面其地上部分表现出绝对的优势。

### 4 结 论

1) 植物篱能很好地发挥其延缓径流产生的能力, 其地上部分和地下部分对初始产流时间增加贡献差别不大, 平均贡献率分别为 48.28% 和 51.72%。

2) 在产流过程方面, 不同坡面条件下坡面产流过程在不同降雨强度和坡度下均呈现先增加后波动稳定的变化趋势。在产沙过程方面, 植物篱坡面条件下的坡面侵蚀率变化始终保持波动稳定的变化趋势, 而对照和仅有植物篱根系坡面条件下坡面侵蚀率均呈现先缓慢增加后快速增加的规律。植物篱可以有效地减少径流率和侵蚀率, 同时植物篱地上部分对两者的影响大于其地下部分对它们的影响。

3) 植物篱减流效益在 11.20%~26.19% 之间, 平均为 15.79%; 植物篱减沙效益在 71.54%~83.63% 之间, 平均为 75.59%, 是其减流效益的 4.79 倍; 植物篱的减沙效益明显大于植物篱的减流效益。植物篱、地下部分和地上部分的平均减沙效益分别为 75.59%、29.45%、46.13%, 是对应的平均减流效益的 4.79 倍、4.60 倍、4.92 倍。植物篱具有明显的减流减沙效益, 植物篱及其地上地下部分的减沙效益均优于减流效益。

4) 植物篱不同部分对减流效益和减沙效益贡献率各不相同, 植物篱地上部分和地下部分对减流效益的平均贡献率为 62.25% 和 37.75%, 对减沙效益的平均贡献率为 60.44% 和 39.56%。植物篱减流减沙效益主要依靠的是植物篱地上部分的作用。

#### [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.
- Fu Suhua, Zhang Zhilan, Jiang Guangyi, et al. Priority watershed determination methods for comprehensive control of soil and water conservation in Three Gorges Reservoir

- Area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 79-83, 197. (in Chinese with English abstract)
- [2] Lei P, Ni C S, Chen F X, et al. Effects of crop-hedgerow intercropping on the soil physicochemical properties and crop yield on sloping cultivated lands in a purple soil of southwestern China[J]. Forests, 2021, 12(8): 962.
- [3] Chen S Q, zhang G H, Luo Y F, et al. Soil erodibility indicators as affected by water level fluctuations in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. Catena, 2021, 207: 105692.
- [4] Cui P, Ge Y G, Lin Y M. Soil erosion and sediment control effects in the Three Gorges Reservoir Region, China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2011, 2(4): 289-297.
- [5] 何丙辉, 陈晶晶, 向明辉, 等. 不同生长年限的植物篱对坡耕地紫色土土壤侵蚀和土壤有机质的影响[J]. 三峡生态环境监测, 2016, 1(1): 36-45.
- He Binghui, Chen Jingjing, Xiang Minghui, et al. Effects of *Vetiveria zizanioides* and *Leucaena leucocephala* hedgerows in different life-phases on soil erosion and organic matter of purple soil[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2016, 1(1): 36-45. (in Chinese with English abstract)
- [6] 沈泰宇, 李贤, 汪时机, 等. 微生物固化砂质黏性紫色土的三轴抗剪强度与浸水抗压强度[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 135-143.
- Shen Taiyu, Li Xian, Wang Shiji, et al. Triaxial shear strength and immersion compressive strength of sandy clayey purple soil treated by microbial induced calcite precipitation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(21): 135-143. (in Chinese with English abstract)
- [7] 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.
- [8] 文安邦, 齐永青, 汪阳春, 等. 三峡地区侵蚀泥沙的  $^{137}\text{Cs}$  法研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 33-36.
- Wen Anbang, Qi Yongqing, Wang Yangchun, et al. Study on erosion and sedimentation in Yangtze Three Gorge Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(2): 33-36. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王谊. 三峡库区紫色坡耕地桑树系统氮磷流失负荷及养分平衡研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- Wang Yi. Research on N and P Loss Load and Nutrient Balance under Farming-Mulberry System on Purple Soil Sloping Cropland of Three Gorge Reservoir Area[J]. Chongqing: Southwest University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [10] 苏鹏, 贾燕锋, 曹馨月, 等. 东北黑土区不同坡段等间距植物篱减流减沙特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 22-26, 35.
- Su Peng, Jia Yanfeng, Cao Xinyue, et al. Characteristics of runoff and sediment reduction by equidistant hedgerows at different slope sections in northeast black soil area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3): 22-26, 35. (in Chinese with English abstract)
- [11] Chen X A, Liang Z W, Zhang Z Y, et al. Effects of soil and water conservation measures on runoff and sediment yield in red soil slope farmland under natural rainfall[J]. Sustainability, 2020, 12(8): 3417.
- [12] Oshunsanya S, Li Y, Yu H Q. Vetiver grass hedgerows significantly reduce nitrogen and phosphorus losses from fertilized sloping lands[J]. Science of the Total Environment, 2019, 661: 86-94.
- [13] Wallace E E, McShane G, Tych W, et al. The effect of hedgerow wild-margins on topsoil hydraulic properties, and overland-flow incidence, magnitude and water-quality[J]. Hydrological Processes, 2021, 35(3): e14098.
- [14] 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.
- Huang Xiaofang, Ding Shuwen, Ke Huiyan, et al. Effects of hedgerow patterns on soil physical and chemical properties and erodibility in Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 9-15, 22. (in Chinese with English abstract)
- [15] Lin C W, Tu S H, Huang J J, et al. The effect of plant hedgerows on the spatial distribution of soil erosion and soil fertility on sloping farmland in the purple-soil area of China[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 105(2): 307-312.
- [16] 曹艳, 刘峰, 包蕊, 等. 西南丘陵山区坡耕地植物篱水土保持效益研究进展[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 57-63.
- Cao Yan, Liu Feng, Bao Rui, et al. Soil and water conservation benefits of hedgerows in sloping cropland in hilly region of southwest China: A review[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(4): 57-63. (in Chinese with English abstract)
- [17] 湛芸, 何丙辉, 向明辉, 等. 紫色土坡耕地植物篱的水土保持效应研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 47-52.
- Chen Yun, He Binghui, Xiang Minghui, et al. Effects of hedgerow on soil and water conservation in sloping cropland of the purple soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(2): 47-52. (in Chinese with English abstract)
- [18] 卜崇峰, 蔡强国, 袁再健. 三峡库区等高植物篱的控蚀效益及其机制[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(4): 14-18.
- Bu Chongfeng, Cai Qiangguo, Yuan Zaijian. Mechanism and effect of different contour hedgerow types on runoff and sediment erosion in Three Gorges Reservoir Area[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(4): 14-18. (in Chinese with English abstract)
- [19] 许峰, 蔡强国, 吴淑安, 等. 香根草植物篱控制坡地侵蚀与养分流失研究[J]. 山地农业生物学报, 2000, 19(2): 75-82.
- Xu Feng, Cai Qiangguo, Wu Shuan, et al. A study on the effect of the *Vetiver zizanioides* contour hedgerow of the soil and nutrient loss control[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2000, 19(2): 75-82. (in Chinese with English abstract)

- abstract)
- [20] 杨帅, 高照良, 李永红, 等. 工程堆积体坡面植物篱的控蚀效果及其机制研究[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 147-154.
- Yang Shuai, Gao Zhaoliang, Li Yonghong, et al. Erosion resistance effects and mechanism of hedgerows in slope of engineering accumulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(15): 147-154. (in Chinese with English abstract)
- [21] Yang S, Gao Z L, Li Y H, et al. Erosion control of hedgerows under soils affected by disturbed soil accumulation in the slopes of loess plateau, China[J]. Catena, 2019, 181: 104079.
- [22] 李铁, 谌芸, 何丙辉, 等. 天然降雨下川中丘陵区不同年限植物篱水土保持效用[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 27-35.
- Li Tie, Chen Yun, He Binghui, et al. Study on soil and water conservation effects of *Vetiveria zizanioides* and *Leucaena leucocephala* hedgerows with different planting years in central hill region of Sichuan basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3): 27-35. (in Chinese with English abstract)
- [23] 杨世琦, 邢磊, 刘宏元, 等. 植物篱埂垄向区田技术对坡耕地水土和氮磷流失控制研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 209-215.
- Yang Shiqi, Xing Lei, Liu Hongyuan, et al. Effect of reducing runoff, sediment, soil nitrogen and phosphorus losses in sloping farmland based on short ridge of clover hedgerow with ridge tillage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(22): 209-215. (in Chinese with English abstract)
- [24] Zheng H J, Li H R, Mo M H, et al. Quantified benefits of cultivating day-lily (*Hemerocallis citrina*) hedgerows over multiple years on sloped red-soil farmland, southern China[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2020, 21(1): 69-80.
- [25] Donjatee S, Tingsanchali T. Reduction of runoff and soil loss over steep slopes by using vetiver hedgerow systems[J]. Paddy & Water Environment, 2013, 11(1/2/3/4): 573-581.
- [26] Adhikary P P, Hombegowda H C, Barman D, et al. Soil erosion control and carbon sequestration in shifting cultivated degraded highlands of eastern India: Performance of two contour hedgerow systems[J]. Agroforestry Systems, 2017, 91: 757-881.
- [27] 王晶, 赵文武, 刘月, 等. 植物功能性状对土壤保持的影响研究述评[J]. 生态学报, 2019, 39(9): 3355-3364.
- Wang Jing, Zhao Wenwu, Liu Yue, et al. Effects of plant functional traits on soil conservation: A review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): 3355-3364. (in Chinese with English abstract)
- [28] Zhang B J, Zhang G H, Zhu P Z, et al. Temporal variations in soil erodibility indicators of vegetation-restored steep gully slopes on the Loess Plateau of China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2019, 286: 106661.
- [29] Zhao C H, Gao J, Huang Y, et al. The contribution of *Astragalus adsurgens* roots and canopy to water erosion control in the water-wind crisscrossed erosion region of the Loess Plateau, China[J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(1): 265-273.
- [30] Li C J, Pan C Z. The relative importance of different grass components in controlling runoff and erosion on a hillslope under simulated rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2018, 558: 90-103.
- [31] 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土保持措施的适宜性分析[J]. 资源科学, 2009, 31(12): 2157-2163.
- Li Qiuyan, Cai Qiangguo, Fang Haiyan, et al. Analyses of suitability of soil and water conservation measures on sloping cultivated lands with different slopes over the purple soil region in the upper reaches of the Yangtze River[J]. Resources Science, 2009, 31(12): 2157-2163. (in Chinese with English abstract)
- [32] 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.
- Zhao Yajun, Wu Faqi, Xu Ning, et al. Runoff and sediment yield of corn plots in different growth stages under different rainfall intensities[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 23-28, 35. (in Chinese with English abstract)
- [33] 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.
- [34] 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [35] 李建明, 牛俊, 孙蓓, 等. 两种驱动力作用下植被调控堆积体坡面减水减沙效益[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 76-84.
- Li Jianming, Niu Jun, Sun Bei, et al. Benefits of soil and water reduction on spoil heaps by vegetation under two driving forces[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(11): 76-84. (in Chinese with English abstract)
- [36] 刘泉宏, 李铁, 谌芸, 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.
- Liu Xiaohong, Li Tie, Chen Yun, et al. Effects of *Vetiveria zizanioides* L. hedgerow width of runoff and sediment yield on purple soil slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 93-101. (in Chinese with English abstract)
- [37] 刘卉芳, 鲁文, 王昭艳, 等. 植物篱在坡耕地水土保持中的作用研究综述[J]. 中国农村水利水电, 2015(10): 31-34.
- Liu Huifang, Lu Wen, Wang Zhaoyan, et al. An overview of the importance of hedgerows to soil and water conservation in slope farmland[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(10): 31-34. (in Chinese with English abstract)
- [38] 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, 215.  
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, 215. (in Chinese with English abstract)

[39] 李建兴, 何丙辉, 梅雪梅, 等. 紫色土区坡耕地不同种植模式对土壤渗透性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(3): 725-731.  
Li Jianxing, He Binghui, Mei Xuemei, et al. Effects of different planting modes on the soil permeability of sloping farmlands in purple soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(3): 725-731. (in Chinese with English abstract)

## Effects of *Vetiveria zizanioides* hedgerow on the erosion of purple soil of slope land in the Three Gorges Reservoir Area of China

Guo Ping<sup>1</sup>, Xia Zhenyao<sup>1,2</sup>, Gao Feng<sup>1</sup>, Hu Huan<sup>1</sup>, Zhang Qianheng<sup>1</sup>, Yang Yueshu<sup>1,2</sup>, Xiao Hai<sup>1,2\*</sup>

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University), Ministry of Education, Yichang 443002, China; 2. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** Purple soil erosion of slope land has posed a serious threat to the operation safety of the Three Gorges Project in recent years. Fortunately, the hedgerow has widely been one of the most important measures for soil and water conservation on slope land. Most studies have also demonstrated that the hedgerows can effectively reduce the runoff and sediment of the slope. However, the specific reduction was still lacking on the aboveground and underground part of hedgerows. Taking the purple soil of slope land in the Three Gorges Reservoir Area as the research object, this study aims to clarify the effects of *Vetiveria zizanioides* L. hedgerow on the erosion of purple soil. Simulated rainfall experiments were also conducted at 2 slope gradients (15° and 25°), 2 rainfall intensities (60 and 120 mm/h), and 3 slope conditions (CK-Control check, P-Hedgerow, and R-Only hedgerow roots). The specific characteristics were analyzed for the initial runoff time, runoff, and sediment with rainfall duration under different slope conditions. The results indicated that the average contribution rates were 48.28% and 51.72% of the aboveground and underground parts to the increase of initial runoff time, respectively. The runoff production showed a trend of first increasing and then fluctuating, finally stable under different rainfall intensity and slope conditions. In sediment yield, the erosion rate of slope always kept a fluctuating and stable trend under the condition of P slope, whereas, there was a slow increase at first and a rapid increase under the condition of CK and R slope. The runoff reduction efficiency of hedgerows ranged from 11.20% to 26.19%, while the sediment reduction efficiency of hedgerows ranged from 71.54% to 83.63%. The average benefits of sediment reduction, underground and aboveground parts were 75.59%, 29.45%, and 46.13%, respectively, which were 4.79, 4.60, and 4.92 times of the average. The average contribution rates were 62.25% and 37.75% for the aboveground and underground part of hedgerows to the runoff reduction, respectively, while the average contribution rates were 60.44% and 39.56% to the sediment reduction, respectively. Correspondingly, the hedgerows greatly contributed to delay the runoff generation, where the contribution rates were not significant for the aboveground and underground part of hedgerows to the initial time of runoff generation. Meanwhile, the hedgerows can be expected to effectively reduce the runoff rate and erosion rate, where the effect of the aboveground part was greater than that of the underground part. Consequently, there was a more obvious effect of hedgerows on sediment reduction. More importantly, the effect of the aboveground part on runoff and sediment reduction was greater than that of the underground part. Anyway, *Vetiveria zizanioides* L. hedgerow can widely be expected to prevent the erosion process of purple soil in slope land. The finding can also provide a scientific basis for the prevention and control of soil and water loss on purple soil slopes in the Three Gorges Reservoir Area.

**Keywords:** soils; erosion; hedgerow; Three Gorges Reservoir; underground part; aboveground part; runoff and sediment reduction benefit