

黔西北乡土植物篱对典型石漠化区石灰土 侵蚀动力学过程的调控

王恒松¹, 张芳美²

(1. 贵州师范大学喀斯特研究院, 国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心,

贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵阳 550001; 2. 贵州师范大学外国语学院, 贵阳 550025)

摘要: 在自然降水条件下, 定量研究黔西北喀斯特石漠化区典型乡土植物刺梨在坡耕地产流产沙的变化规律, 分析该植物篱控制侵蚀产沙的水动力学机理。结果表明, 刺梨植物篱截流、分流作用延缓径流产生及汇流时间, 增加喀斯特坡面径流入渗量, 减小坡面侵蚀动力。在不同降雨强度条件下, 喀斯特坡面入渗率与径流量和产沙量呈负线性相关。植物根系缠绕串连黏结根土, 改变土壤的入渗特性, 增强土壤抗冲性与抗蚀能力。根系密度随土层深度增加而减少, 减沙效应亦变小。土壤抗侵蚀能力与 $d < 1\text{ mm}$ 的须根密度呈极显著正相关关系, 与 $d \leq 2\text{ mm}$ 须根的根量、根长与土壤抗冲指数存在线性回归关系。当 I_{30} 雨强为 2.41 mm 时, 植物篱小区几乎无流水侵蚀, 而对照样地侵蚀产生较多泥沙; 当 I_{30} 为 $4.72, 8.35\text{ mm}$ 时, 研究小区皆已侵蚀产沙, 并在对照样地侵蚀产生细沟, 显示雨强加大, 坡面产流动力加强, 冲沙携沙能力加大。说明植物篱起到保水固土减沙和对土壤侵蚀水动力过程的调控。喀斯特坡面流侵蚀产沙水动力主要受降雨强度和雨滴动能影响, 雨滴侵蚀力的大小取决于雨量、雨强、雨滴大小。侵蚀产沙量与雨强、降雨历时呈显著的幂函数关系。揭示了植物根系固土减沙和提高土壤抗侵蚀水动力的调控机理。

关键词: 根系; 乡土植物篱; 刺梨; 侵蚀产沙; 坡面流; 动力学机理

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)04-0016-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.04.003

Regulation of Native Hedgerow on the Kinetic Process of Limestone Erosion in Typical Rocky Desertification Areas of Northwest Guizhou

WANG Hengsong¹, ZHANG Fangmei²

(1. Institute of Karst Science, Guizhou Normal University, State Engineering Technology Institute for Karst Rocky Desertification Control, Guizhou Incubation Base for State Key Laboratory of Karst Mountain

Ecology Environment, Guiyang 550001; 2. School of Foreign Language, Guizhou Normal University, Guiyang 550025)

Abstract: Under natural rainfall conditions, the variations of runoff and sediment yield of typical native plant *Rosa roxburghii* quantitative studied on karst rocky desertification area of Northwest Guizhou, and the hydrodynamic mechanism of controlling erosion and sediment yield by hedgerow analyzed. The results showed that the interception and diversion of *R. roxburghii* hedgerow delayed runoff production and confluence time, increased runoff infiltration on karst slopes and reduced erosion power. Under different rainfall intensities, the infiltration rate of karst slope was negatively linearly correlated with runoff and sediment yield. The root system of plants twisted and banded the root soil in series, which changed the infiltration characteristics of the soil and enhanced the erosion resistance and corrosion resistance of the soil. Root density decreased with the increasing of soil depth and sediment reduction effect is also reduced. The soil erosion resistance was significantly positively correlated with the density of fibrous roots less than 1 mm , and linearly correlated with the quantity and length of fibrous roots less than 2 mm and the soil erosion resistance index. When the rainfall intensity of I_{30} was 2.41 mm , there was almost no runoff erosion in hedgerow plot, but more sediment was produced in the control plot. When I_{30} was 4.72 mm and 8.35 mm , the erosion and sediment yield of the study plots were all increased, and rills were formed in the control plot, which indicated that the

收稿日期: 2019-01-10

资助项目: 国家自然科学基金项目(41561064); 国家“十三五”重点研发计划项目“喀斯特高原山地石漠化综合治理与混农林复合经营技术与示范”(2016YFC0502601); 贵州省科技厅社发攻关项目(黔科合[2016]支撑 2841); 贵州师范大学博士启动基金项目

第一作者: 王恒松(1967—), 男, 博士, 教授, 主要从事喀斯特地质地貌、生态环境、石漠化生态治理及气候变化的研究。E-mail: wangheng-song796@163.com

rainfall intensity increased, the productivity of slope surface flow was strengthened, and the sand carrying capacity increased. It showed that hedgerows played an important role in water conservation, soil consolidation and sediment reduction, as well as in regulating the hydrodynamic process of soil erosion. The hydrodynamic forces of runoff erosion and sediment yield on karst slopes were mainly affected by rainfall intensity and kinetic energy of raindrops. The size of raindrop erosion depended on rainfall, rainfall intensity and raindrop size. Erosion sediment yield had a significant power function relationship with rainfall intensity and duration. It reveals the regulation mechanisms of soil consolidation and sediment reduction by plant roots and the improvement of soil erosion resistance hydrodynamics.

Keywords: root system; native hedgerow; *Rosa roxburghii*; erosion and sediment yield; slope flow; dynamic mechanism

贵州喀斯特山区土层浅薄、结构疏松,长期的土壤侵蚀,使得坡耕地的水土流失极为严重,导致土地石漠化,亟需进行有效治理。植物篱是坡耕地上一种重要的农艺生物措施,能有效控制水土流失。采用植物篱技术防治水土流失,简单易行、成本低,具有较好的实用价值,是治理喀斯特坡耕地水土流失的一种良好的生态措施。近年来,国外在植物篱控制土壤侵蚀^[1-3]、面源污染^[4]及对微地貌的影响^[5]等领域已有不少报道。国内在植物篱侵蚀控制机理、坡形变化、控制侵蚀的效果以及影响土壤入渗性能、土壤有机质、微团聚体、土壤结构、土壤抗冲性等方面开展了大量的研究,如孙辉等^[5]讨论了等高植物篱控制侵蚀的效果;蔡强国等^[6]分析了等高植物篱控制侵蚀的原因,认为机械拦阻作用是植物篱减少土壤侵蚀的主要原因;朱远达等^[7]研究认为,植物篱减少了养分流失;许多学者^[8-14]在裸土坡面上对坡面水动力学侵蚀过程进行了较为深入的研究,潘成忠等^[15]、李勉等^[16]在草被覆盖对坡面水流流速等水力学参数影响的研究方面取得了一定进展,为从水流水力学过程方面研究植物篱侵蚀产沙过程奠定了基础。但从坡面水动力学特性分析植物篱固土作用的机理还需深入研究,尤其是乡土刺梨植物篱对喀斯特坡地土壤侵蚀水动力学调控性能的定量研究。因此,本文从乡土刺梨植物篱拦截雨水、减沙过程及根系抗蚀固土方面入手,对典型石漠化坡面土层减沙固土机理进行试验和定量研究,为在喀斯特地区开展乡土植物刺梨资源的保护与合理利用防治石漠化提供科学依据。

1 试验设计与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省乌江上游六冲河流域,毕节市西部的撒拉溪镇和野角乡境内,属喀斯特高原山区,地貌类型多样,地形破碎,耕地多分布于坡面、台地和山间谷地,常形成环山梯土和沟谷坝地;旱土耕层浅薄、肥力较低。区内有明暗交替的河流,漏斗、盲谷、落水洞、天窗、溶蚀洼地和盆地发育;属亚热带季风性

湿润气候,夏季温凉湿润多雨,冬春干旱少雨,年均温 12°C ;无霜期245 d,年平均日照时间1 360 h;降水量丰富,多年平均降水量984.4 mm。研究区内地带性植被主要为针阔叶混交林,由于长期的人类活动,旱地种植占有较大优势,自然植被分布较少,其中木本植物以马尾松、桦木、刺梨、火棘、珍珠荚迷为主;草本植物有蒿类、狗尾草、野菊、千里光等。地带性土壤为黄壤,部分地区有山地黄棕壤和石灰土。水资源以地下水为主,地下水水位一般在20~100 m,季节变化大,雨季水量丰富,可形成洪涝,旱季则较多岩溶泉干涸。

1.2 试验设计

根据《水土保持监测技术规程》^[17]的要求,遵循临时站点设置原则、典型性原则、可操作性原则和实事求是原则,在研究区选取垂直投影长10 m、宽5 m、坡度 $5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 的坡面修建了8个点16个径流小区,分别为:BJ径1(1)(2)—中度石漠化;BJ径2(1)(2)—潜在石漠化;BJ径3(1)(2)—强度石漠化;BJ径4(1)(2)—轻度石漠化;BJ径5(1)(2)(3)—无石漠化;BJ径6(1)(2)—中度石漠化;BJ径7(1)(2)—潜在石漠化;BJ径8(1)—次生林地。径流场设计长宽为10 m $\times$ 10 m,从中间分成2个10 m $\times$ 5 m的对照小区,便于对比分析以反映人类活动对水土流失及生态环境的影响。在各径流小区下端建1个沉砂池,规格为1 m $\times$ 1 m $\times$ 1 m。根据地形、土壤、植被、石漠化程度等因素选取BJ径1(1)(2)和BJ径4(1)(2)的径流小区进行试验。

研究区为典型的喀斯特高原山区,喀斯特地形地貌典型,土地类型多样,乡土植物刺梨属于优势种,生长发育快,能有效遏制水土流失的扩展,选择此处作为研究对象具有典型性和代表性,试验具有辐射推广意义。径流小区土地利用类型为退耕还林还草坡地,土壤为石灰土,这种土质在石漠化区非常典型,分布广泛,石灰土一般质地较黏重,土壤离子交换量和盐基饱和度高,土体与基岩面过渡清晰,土层较薄,一般厚度为10~60 cm,成土较差,保留大量来自母质的云母,氮和有机质含量丰富,石灰土中普遍含有碳酸钙,

并随土层深度增高,该类土壤遇雨水容易被侵蚀。选取 BJ 径 1(1)种植刺梨植物篱,双带、两行;BJ 径 4(1)种植刺梨和黑麦草间种的混合篱,双带、两行,两带之间种黑麦草。BJ 径 1(2)和 BJ 径 4(2)为对照撂荒样地。研究区安装有自动气象观测仪,以记录降雨量、气温、蒸发量等数据。

刺梨(*Rosa roxburghii* Tratt)为蔷薇科刺梨属多年生落叶小灌木,属浅根性果树,大部分根系分布在 10—60 cm 土层,根系发达,适应性强,通过大量根系的萌孽,形成冠幅很大的灌丛,具有很好的保水固土作用,是一种较好的水土保持植物。刺梨根系无自然休眠期,冬季仍缓慢生长。4—9 月根系生长最旺盛,最适合喀斯特石漠化地区生长。刺梨属于乡土植物,在当地土生土长,能很好地适应当地土壤条件、气候环境,分布普遍,自然演替,已经融入当地的自然系统中,便于栽种、易于成活。刺梨作为当地优势种,在坡面沿等高线布设密植或与草结合形成植物篱带,称为乡土植物篱。科学合理地构筑乡土植物篱能有效拦蓄喀斯特石灰土和渗透水流,植物篱形成的土坎,扩展了坡耕地利用空间。选择 2013 年 12 月中旬在研究区样地定植刺梨植物篱(图 1)。在 BJ 径 1(1)和 BJ 径 4(1)各种植 2 道植物篱,自坡下向坡上分布为 0.5,5,m。每带由 3 行刺梨植物组成,间距为 0.5,1,2 m,2 行植物错开种植,目的是使近地面形成条带状植物篱。

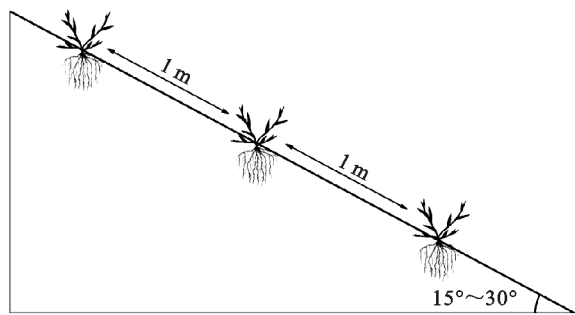


图 1 径流小区植物篱种植方式

1.3 研究方法

从 2013 年 5 月至 2015 年 12 月,在雨季期间由自记雨量计记录降雨过程,每逢大雨之后,人工测量径流池中水位,计算径流池中水量,收集径流池中的淤泥。

土壤侵蚀模数计算:每次降雨结束后,将径流池中的水和淤泥搅匀,用 1 L 容器装满水带回实验室倒入烧杯静置 24 h,用虹吸法将水放干,用烤箱烘干(100~110 ℃,8 h)烧杯中的淤泥,称重后计算出土壤侵蚀量,推算全年土壤侵蚀模数。

土壤崩解速率测定:在样地中取 5 cm×5 cm×5 cm 原状土,带回住地在静水中测定其崩解速率。测

定方法参照水土保持试验规范(SD 239—87)^[18]。

土壤抗冲性:水稳性团粒含量(%)用约得尔(Yoder)法。把较大的土块在未破坏结构下沿土体自然结构面掰成直径 10 mm 的团块,取混合土 20 g 均匀置于套筛上(5,2,1,0.5,0.25 mm),<0.25 mm 粒级的土粒不称重,套筛悬挂于盛水的桶中静置 10 min 后开始振动(振动频率 f 为 30 次/min),记录土粒完全消失的时间(min)。每种土样做 3 次重复,取其平均值,然后计算抗蚀指数。

土壤渗透性能测定:采用渗透筒法测定环刀内土的渗透性能。持续往渗透筒内倒水,根据渗透所需时间和渗透量求得渗透速度。

$$V(\text{mm/min}) = \frac{10 \times Q_n}{t_n \times S}$$

式中: Q_n 为每次渗出的水量(mL); S 为渗透筒的横截面积(cm^2); t_n 为每次渗透所间隔时间(min)。

根系密度测定:采用挖掘剖面壁法。在径流样地内挖长 1 m、高 0.5 m、深 0.5 m 的土壤剖面,对根系密度的分布进行调查记录。

2 结果与分析

2.1 降雨与土壤侵蚀

研究区从 2013 年开始进行天然降雨观测,自动气象观测仪记录的降雨量数据显示,降雨集中在 5—9 月占全年雨量的 75.24%。通过 2 个水文年的监测,植物篱年均径流量为 1 586 m^3/hm^2 ,径流系数为 16.11%。

监测表明,暴雨对裸地直接冲击,侵蚀量较大。强降雨、暴雨和地面覆盖度低是土壤侵蚀的最直接原因,如果没有植被的遮挡,表土层很容易被冲走,土层薄的地块几场大暴雨表土被冲光,将失去生产能力。吴普特等^[19]研究认为,降雨强度和雨滴动能对坡面水流水动力的影响相当大,雨滴侵蚀力的大小取决于降雨的雨量、雨强和雨滴大小。土壤中的黏粒、有机质含量对土壤起黏结和胶结作用,土壤团粒结构的增加能降低雨滴击溅下的土粒分散破坏。

刺梨在幼苗期抗强暴雨能力比较弱,土地侵蚀量较大。刺梨长大形成等高植物篱后抗暴雨能力逐渐加强,即便较大的强暴雨,也比农民常规种植土壤损失少很多。有研究^[20]表明,不同降雨过程小区产流、产沙特征与刺梨植物篱累积径流量、累积产沙量及降雨时间呈较好的幂函数关系,表达式为: $y = ax^b$ (a 、 b 为系数; x 为产流后至试验结束时的时间)。系数 a 随降雨强度的增大而逐渐增大,表明喀斯特坡面产流产沙量增大,土壤侵蚀量增强。

2013 年 12 月定植的刺梨植物篱,存活率 90%左右,BJ 径 1(1)覆盖度 68%,BJ 径 4(1)植被覆盖度 75%。BJ 径 1(2)和 BJ 径 4(2)是对照样地,覆盖度

分别为 20%,30%。

2013 年、2014 年每个小区各有 7 次大雨或暴雨,2015 年有 6 次降雨观测值(表 1)。2013 年定植的植物篱长势尚幼,对降雨截留与拦截泥沙效果不明显,其观测值体现在各小区间土层厚度的差异。由于石漠化区土层较薄,降雨使土层蓄满后即开始产流。BJ 径 4(1)、(2)的土层较 BJ 径 1(1)、(2)的厚,产流较小。2013 年植物篱为幼苗,BJ 径 4(1)、(2)和 BJ 径 1(1)、(2)土壤侵蚀量相差不大,到 2015 年刺梨长势好,侵蚀量均值 BJ 径 1(1)、(2)远大于 BJ 径 4(1)、(2),是 BJ 径 4(1)、(2)的 1.88 倍,表明植物篱能明显减少石漠化土地的泥沙侵蚀。

表 1 天然降雨观测流量和侵蚀量

年份	径流小区	平均径流量/ m ³	平均侵蚀量/ (g·m ⁻²)
2013	BJ 径 1(1)	0.54	7.35
	BJ 径 1(2)	0.65	10.35
	BJ 径 4(1)	0.61	9.06
	BJ 径 4(2)	0.59	17.42
2014	BJ 径 1(1)	0.38	3.77
	BJ 径 1(2)	0.47	9.41
	BJ 径 4(1)	0.41	8.94
	BJ 径 4(2)	0.32	16.88
2015	BJ 径 1(1)	0.22	3.56
	BJ 径 1(2)	0.39	7.69
	BJ 径 4(1)	0.36	4.53
	BJ 径 4(2)	0.34	14.45

不同土地利用方式在不同降雨强度下土壤侵蚀产沙量差异较大,不论植物篱地还是对照裸地,其土壤侵蚀量均随降雨强度的增加而增大。不同降雨强度下产沙过程表明,当 I_{30} 为 4.72 mm 时,BJ 径 4(1)无细沟产生,而其他径流小区已经开始产生细沟,各小区土壤侵蚀量较大,BJ 径 1(2)和 BJ 径 4(2)小区侵蚀产沙量是 BJ 径 1(1)和 BJ 径 4(1)的 3 倍多;BJ 径 1(1)的产流产沙是 BJ 径 4(1)的 1.89 倍,BJ 径 1(2)是 BJ 径 4(2)的 1.45 倍。当 I_{30} 为 8.35 mm 时,坡面径流动力加强,冲沙携沙能力加大,土壤最大侵蚀量达 651.5 g/m²,出现在 BJ 径 1(2),而 BJ 径 1(1)、BJ 径 4(1)也达到平均值为 314.89 g/m²,虽不足裸地的 1/2,但这场大暴雨对土壤的侵蚀量相当于该地 1 年的侵蚀产沙量(表 2),并在第 2 天 BJ 径 1(2)和 BJ 径 4(2)样地里发现细沟 3~4 条,长 50~80 cm,宽 1~3.5 cm,最深达 1.6 cm。当 I_{30} 为 2.41 mm 时,由于径 1 和径 3 有植物篱截留和根系固土作用,流水侵蚀量不大,而径 2 和径 4 没有植被覆盖,侵蚀产沙量较大。之所以会产生这样的现象是因为:BJ 径 1(1)和 BJ 径 4(1)有刺梨植物篱根系固结样地土

壤,植物篱隔断细沟,根茎叶在近地面形成条带状,像一堵墙阻挡坡面径流,迫使流速减缓,降低携带泥沙量,而从样地上部被流水携带的泥沙也在此被植物篱拦截,显示了植物篱调控土壤侵蚀的能力。而 BJ 径 1(2)较 BJ 径 4(2)侵蚀量更大,虽都为裸地,植被覆盖较差,抗侵蚀能力弱,但前者为中度石漠化土地,植物篱为单一的刺梨,后者为轻度石漠化土地,植物篱为刺梨与黑麦草的混合,故而侵蚀产沙量较多,并被侵蚀下切形成多条细沟。尽管植物篱的拦沙作用,但暴雨作用下样地产沙量仍很大,其侵蚀总量 I_{30} 为 8.35 mm 是 I_{30} 为 4.72 mm 的 5~15 倍。说明降雨强度是喀斯特坡面流水产沙的主要动力,其次坡度对侵蚀产沙量也有密切关系。

表 2 天然大雨或暴雨 30 min 雨强与土壤侵蚀量

降雨时间 (年-月-日)	30 min 降雨量/mm	径流 小区	侵蚀量/ (g·m ⁻²)
2015-05-10	4.72	BJ 径 1(1)	36.21
		BJ 径 1(2)	146.54
		BJ 径 4(1)	19.16
		BJ 径 4(2)	100.50
2015-05-28	8.35	BJ 径 1(1)	340.26
		BJ 径 1(2)	651.50
		BJ 径 4(1)	289.52
		BJ 径 4(2)	503.68
2015-10-16	2.41	BJ 径 1(1)	11.08
		BJ 径 1(2)	55.27
		BJ 径 4(1)	3.62
		BJ 径 4(2)	39.17

2.2 喀斯特坡面流入渗机理分析

坡面径流受到降雨和土壤入渗的影响,沿程坡面有溶沟石牙出现。漫流初始时,流速缓慢,当雨强增大时,水量逐渐增加,坡面糙率减小,径流冲力增大。降水入渗到土壤,转化为土壤水,但在雨强较大时,降雨落到地面不能及时入渗到土壤中,而以地表径流形式流走。因此坡面流态并非是恒定流,而是一种非恒定不均匀流^[21]。由于坡面流水深浅不一且无固定流路,因此流速测量技术一直是研究人员困扰的问题^[22]。

美国 Horton^[23]是最早进行坡面水流研究的学者,之后 Yen 等^[24]基于降雨对于坡面流的影响推导出降雨情况下的一维坡面流运动方程,再后来采用计算机技术得出一维浅水圣维南(Saint-Venant)方程组来模拟坡面水流运动^[25],但此公式仅适用于模拟坡度<3°的缓坡^[26]。

Li 等^[27]、Liu 等^[28]在分析前人经验和问题的基础上,发展了一种能更好地反映坡面流汇流过程的二维模拟方法。即在坡面上划分二维网格,在每个网格

单元内使用准二维模型: $\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = \rho \cos - i$ 。

在实际计算中,该模型能较好地模拟坡面流的集中汇流过程。

刺梨根系集中分布在 0—50 cm 处,上层密集下层稀疏,这种根系有效地提高土壤渗透力和抗冲性,增强土壤的入渗性能。由于刺梨植物篱根系对土壤结构的改善,增大地表粗糙度,阻挡坡面流水的冲刷,继而削减了坡面径流,使坡面土壤不易形成结皮^[29]。

雨水降落到地面上击溅土壤,有部分渗入土中,当雨强超过土壤入渗能力时顺坡流动形成坡面流,在流经植物篱茎干时产生阻滞,植物根系构成一堵墙阻挡坡面径流的产沙携沙,促使土壤入渗。通过试验可知,BJ 径 1(1)的稳渗速率最高,形成的径流最少,BJ 径 4(1)次之,BJ 径 4(2)稳渗速率最低,而其产生的径流系数最大(表 3)。在不同降雨强度条件下,喀斯特坡面入渗率与单位时间的径流量和产沙量呈负线性相关,可用 $y = ax + b$ 来表示。式中: y 为单位时间的径流量(mL/min)或侵蚀产沙量(g/min); x 为入渗率(mm/min); a 和 b 为系数。研究表明,坡地径流量和侵蚀量随坡面入渗率的增大而呈线性减少,刺梨植物篱拦截雨水,明显延迟径流产生和产流后的汇流过程,增加径流在喀斯特坡面入渗的时间和径流入渗量,减小坡面侵蚀产沙量。

表 3 径流小区土壤渗透性能与径流关系

径流小区	土壤容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	水稳性结构 含量/%	稳渗速率/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	径流 系数/%
BJ 径 1(1)	0.725	95.29	19.70	7.58
BJ 径 1(2)	1.163	88.82	15.82	9.77
BJ 径 4(1)	1.013	90.21	17.83	8.88
BJ 径 4(2)	0.957	92.55	13.41	21.47

地表径流是水力侵蚀的主要外动力,其对土壤的破坏能力取决于流速与径流量。坡面产流的大小与土壤的透水性能密切相关。土壤的透水性能主要决定于土壤的颗粒组成、结构、孔隙度以及土壤湿度等因素。本研究认为,植物篱使土壤具有较大的毛管和非毛管孔隙度,增大土壤的入渗率和入渗量,距植物茎秆越近,渗透能力越大,反之则小。

2.3 植物篱对坡面土壤侵蚀水动力学过程的调控机理

2.3.1 植物篱增强土壤抗崩性

土壤抗侵蚀能力主要取决于土壤的孔隙度、机械组成、渗透性能、水稳性团聚体含量及土壤容重等物理特性,植物根系能改善土壤的上述指标,加强抗侵蚀能力。植物根系抵抗坡面水力侵蚀的作用体现在根系层盘绕稳固表土层,提高土壤入渗性能和抗剪强度,增强土壤抗冲性^[30-31]。

植物根系缠绕及固结土壤强化抗冲性作用,是通

过根系网络串连、根土黏结以及根系生物化学作用进行^[32]。刺梨根系通过土壤黏结力加强土壤水稳性团粒及有机质含量,固结表土层,改善土壤抗侵蚀环境,构筑抗冲性强的土体结构,提高土壤抗侵蚀性^[33]。坡面径流对土壤的侵蚀力主要取决于地面径流量,而土壤渗透性是制约坡面径流和土壤侵蚀的重要因子,土壤的渗透性主要由土壤的物理特性决定,植物根系通过影响土壤物理特性来影响土壤渗透性。刺梨根系将松散的石漠化土壤颗粒黏结起来,将板结密实的土体分散,通过根系自身的腐解和转化合成腐殖质,使土壤有良好的团聚结构和孔隙状况,增强土壤渗透力^[34]。刺梨根系对土壤水力学性质的影响主要通过根系的穿插、缠绕及网络串联的固持作用来影响土壤的物理性质,进而改善土壤的抗冲性、渗透性和剪切强度。直径<1 mm 的根系在提高土壤的水力学效应方面贡献最大^[35]。

试验分析 BJ 径 1(1)(2)、BJ 径 4(1)(2)的土壤崩解速率分别为 1.28,1.59,0.94,1.73 cm^3/min 。在 10 min 内,崩解速度和崩解量分别为:径 BJ 径 4(2)>BJ 径 1(2)>BJ 径 1(1)>BJ 径 4(1),30 min 时 BJ 径 4(2)的土块崩解速度最快,完成崩解量 93.6%。而 BJ 径 1(2)在 15 min 时速度最快,崩解量达到 70.5%。影响土壤崩解性能的因素主要是 BJ 径 1(1)和 BJ 径 4(1)有刺梨及黑麦草密集的根系穿插交织在土壤中,土壤在静水中不易分散崩解,崩解速率较慢。影响深度达到 60~100 cm,说明石漠化区植被根系强化土壤抗崩性,抑制水土流失扩展。可知土壤崩解速率和抗冲性之间存在较密切的相关关系。土壤崩解速率快,土壤抗冲性小,愈易被径流冲蚀和搬运;反之,若土壤崩解速率小,则土壤抗冲性就愈大。黔西北喀斯特山区土壤崩解率与土地的利用方式、植被生长状况关系密切,相关系数分别为 0.883 和 0.785。

2.3.2 刺梨根系密度抗侵蚀动力的机理

强降雨使喀斯特坡面产流侵蚀,造成根—土分离而发生水土流失,并非毛根的断裂;刺梨根系在生长发育过程中,分泌大量高分子黏胶物质和多糖类物质,将土壤团聚体缠绕串连,形成强大的黏结力,保护土粒免遭冲蚀。根系强化土壤抗侵蚀能力,主要通过 $d < 1 \text{ mm}$ 的须根发挥作用,土壤的抗侵蚀能力与 $d < 1 \text{ mm}$ 的须根密度有极显著正相关关系,与 $d \leq 2 \text{ mm}$ 须根的根量、根长与土壤抗冲指数存在线性回归关系^[36]。

2013 年种植的刺梨,经过 2 年的培育后根系长到 0.5~0.6 m,有的长到 0.8 m,地上部分已经长高 0.8~1.0 m。冠幅面积达 0.785~2.010 m^2 ,0.5 m 间距的空间被刺梨枝叶全部覆盖,1 m 间距的空间也大部分被刺梨枝叶覆盖;而 2 m 间距的植物篱原来的

间距空间尚有 1/2 未被覆盖。2015 年监测数据分析显示,其保水固土减沙效果分别为 76.71%,69.95%,39.95%。由于刺梨植物篱不同间距中间距越小枝叶间相互交叉越多,植物篱密度越大,保水固土效果相应较高。

刺梨根系在植物篱保水固土功能中发挥着重要的作用,刺梨根系面积的大小、根系深入土壤的长度等都在影响着植物篱的水土保持效果。刺梨根系直径<1 mm 的密度主要分布在 0—30 cm,根系密度随剖面深度增加而减少(图 2),种植 2 年多的刺梨根系长度已经长到 80 cm,有的达土壤剖面底部基岩。

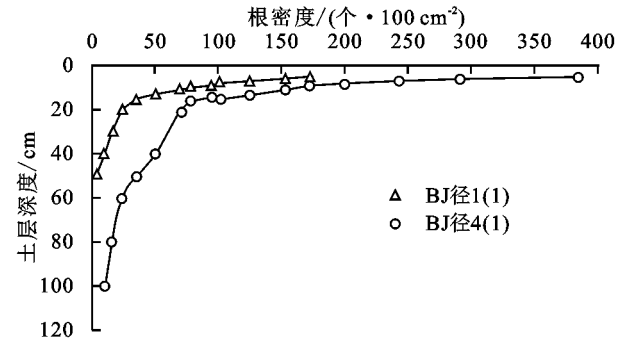


图 2 刺梨根系密度(≤1 mm)垂直分布

从图 2 可以看出,BJ 径 1(1)与 BJ 径 4(1)植物的根系分别集中在 0—20,0—40 cm,2 个样地的土层深度在 20—50 cm 与 40—80 cm 时根系逐渐减少,

表 4 表层土壤微团聚体组合状况 单位: %

样地	>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.1 mm	<0.1 mm	>0.25 mm 团粒 结构破坏率
BJ 径 1(1)	6.28	15.04	8.38	23.12	12.76	0.62	1.35	14.18
BJ 径 1(2)	39.20	14.00	12.60	9.20	7.60	2.11	0.99	8.43
BJ 径 4(1)	23.00	18.00	13.00	15.60	12.00	2.76	2.68	8.82
BJ 径 4(2)	63.00	6.40	5.20	3.60	4.60	1.86	1.09	10.77

水稳团粒含量的高低与有机质含量及根系密度的关系极为密切。有机质可以为水稳团粒的形成提供胶结剂;腐烂的根系不仅能提高土壤有机质含量,而且细小根系,尤其是根毛穿插在土体中亦可防止土体在水中分散、破碎,增强土壤的抗蚀性。植被在提高土壤抗蚀性方面,不仅根系发挥着牵拉、固定等作用,而且通过植被的枯落物来增加有机质,促进水稳性团粒的形成。

植物根系提高土壤水稳性团粒(>0.25 mm)含量,土壤孔隙度的作用实质是其有效根密度对>5 mm 和 5~2 mm 粒级的土壤水稳性团粒及非毛管孔隙度的增加效应,尤其是 5~2 mm 粒级含量,根系对该 2 个粒级水稳性团粒含量及非毛管孔隙度的提高是其稳定土层结构、强化土壤渗透力、增大土壤抗崩解性的重要机理^[27]。

喀斯特地区土层薄,土壤保水能力差,地表 0—5 cm

50 cm 和 90 cm 以下数量极少。其中 BJ 径 1(1)的总根系的 81%分布在 0—20 cm 土层,11%分布在 20—50 cm 的土层,50 cm 以下只占 8%。1~2 mm 的根系 1 条分布在土层的 30—40 cm 土层,2~5 mm 的根系分布在 20—30 cm 土层,5~10 mm 根系在 0—20 cm 土层。可知石漠化土地刺梨根系密度随坡面深度增加而减少,根系在表土层的盘绕密布,将土粒缠绕形成巨大的黏结力以及随土层深度增加根系对土壤渗透力的强化值降低,是提高抗侵蚀动力的机理。

2.3.3 植物篱提高土壤渗透性能 朱显谟^[32]研究认为,植物根系对土壤渗透力的作用主要是根系自身的腐解和转化合腐殖质,使土壤有良好团聚结构和孔隙状况,从而把土壤单粒黏结起来,同时也能将板结密实的土体分散。土壤的水稳性团粒含量与干稳性团粒含量变化的比较,可以判断土壤在水中的抗水分散能力,是土壤抗蚀性的重要指标^[37]。从表 4 可以看出,土壤团粒溶解于水后,大粒径土壤迅速分散,变为小粒径土壤,水稳性团粒总量较干稳性团粒平均总量减少 25%,其结构破坏率平均为 28.52%。撂荒土地 BJ 径 1(2)、BJ 径 4(2)由于植被覆盖度小,土体根系缠绕较少,土粒团聚度差,在水中易于破坏而解体,分散为大量的更细小土粒,导致它们大量悬浮于水中,或随水下渗到土壤下层,极易堵塞土壤孔隙,降低渗透速度,引起地表泥泞,为径流汇集发生侵蚀创造条件。

土层的稳渗速率与土壤的保水、入渗性能关系密切。在研究区采用双环法取上、下两层土壤研究其入渗性能,上层为 0—5 cm 土层,下层为 6—10 cm 土层。研究发现,喀斯特地区土壤上、下层稳渗速率差异显著(表 5),上层平均稳渗速率为下层平均稳渗速率的 3.13 倍。说明表层土壤大量黏粒随雨下渗到底层土壤,堵塞孔隙,致使下层土壤饱和渗透率降低。土壤上层稳渗速率随>0.25 mm 的团聚体含量增加而增大。

表 5 土壤上、下层稳渗速率对比 单位: mm/min

小区编号	上层稳渗速率	下层稳渗速率
BJ 径 1(1)	11.91	4.88
BJ 径 1(2)	13.43	2.23
BJ 径 4(1)	14.87	7.05
BJ 径 4(2)	10.32	3.66

2.3.4 植物篱减沙调控机理 不同植物根系在不同

冲刷坡度及雨强下减沙效应的特征值受平均值与变异系数影响,平均值标志根系提高土壤抗冲性能的平均水平,变异系数标志根系减沙效应受坡度及雨强的影响^[38]。平均值愈大,根系提高土壤抗冲性的能力愈大,变异系数愈小,根系提高土壤抗冲性的作用受坡度及雨强的影响程度愈小。刺梨和黑麦草由于其根系在土壤中的分布空间有异,根系有显著减沙效应的土层深度范围不同。随土层深度增加,根系的减沙效应变小,受坡度及雨强的影响程度增大。

李勇等^[8]研究表明,植物根系对提高土坡抗冲性的能力主要取决于有效根密度的大小,在宏观上表现为根系的减沙效应。自然暴雨条件下,不同植物根系减沙效应 Y 与有效根密度 R_d 的关系可用经验方程表示:

$$Y = \frac{K \cdot R_d^B}{A + R_d}$$

式中: Y 为根系减沙效应(%); R_d 为有效根密度(个/100 cm²); K 为根系减沙效应所能达到的最大值(%),其值大小随 R_d 总量及其在土壤剖面中的分布规律而异;当 Y 为最大值的 1/2 时, $A^{1/B} = R_d$, 故 $A^{1/B}$ 是根系减沙达到最大效应值 1/2 时的有效根密度,其单位与 R_d 相同。试验证明, $A^{1/B}$ 只与植物种类有关,而与冲刷坡度和雨强无关。因此,它是根系提高土壤抗冲性能有效性的特征参数,可用于定量评价根系提高土壤抗冲性的有效性强弱。 $A^{1/B}$ 值越大,表示根系提高土壤抗冲性的有效性愈弱; $A^{1/B}$ 值趋小,根系提高土壤抗冲性的有效性愈强。

植物篱之所以起到减沙拦沙固土、调控土壤侵蚀动力的作用,主要是增加地表覆盖度,减缓坡度,缩短坡长,改善土壤质地,对地表径流进行机械拦阻作用的综合结果。植物篱近地面的枯枝落叶层降低水的流速,减小其输沙量,泥土在篱笆带上部沉积下来。植物根系穿插土层,好比对土层进行加筋加固作用,使土壤抗侵蚀能力增强。

根据李勇等^[39]研究的经验公式计算刺梨植物篱根系减沙效应。取 BJ 径 1(1)坡度为 15°,雨强为 2.0 mm/min 条件下,采用土壤抗冲性数学模型: $Y = 0.7653 + 0.0153X_1 + 1.8729X_4 - 0.2059X_{11}$, 计算得到刺梨植物篱根系在 0—30 cm 的土层深度对土壤抗冲性强化值(Y)为 27.526 6 s/g,与径流小区样地实测值一致。

喀斯特区特殊的可溶性岩,地表节理裂隙发育,形成地表—地下二元结构。一旦下雨,大部分雨水沿节理裂隙、溶蚀管道进入地下河系统,不易形成坡面径流。因而喀斯特地表径流系数小于非喀斯特区,土壤侵蚀模数很低。2013—2015 年径流场产流产沙 20 次, BJ 径 1(1)、BJ 径 4(1)的径流系数均值分别为 13.74%, 15.83%。

从土壤持水量分析,石漠化地区土层薄,土壤保

水能力差,自地表到 30 cm 深的土层内, BJ 径 1(1)、BJ 径 4(1)分别为 92.2% 和 94.81%, BJ 径 1(2)、BJ 径 4(2)分别为 62.7% 与 61.34%, 二者差值分别为 30% 与 33%; 在 30 cm 以下的土层, BJ 径 1(1)、BJ 径 4(1)分别为 52.6% 和 50.11%, BJ 径 1(2)、BJ 径 4(2)分别为 39.85% 和 40.23%, 分别相差 13% 与 10%。由此可以看出,喀斯特山区土壤持水量的差异主要在地表土层 30 cm 以内,且根系对土壤持水量有重要影响。

3 讨论与结论

(1)坡面径流水动力主要受降雨强度和雨滴动能影响,雨滴侵蚀力的大小取决于降雨的雨量、雨强和雨滴大小。植物篱在幼苗期,抗强暴雨能力比较弱,刺梨长大形成等高植物篱后抗暴雨能力渐渐加强。土地利用方式和不同石漠化土地应对不同降雨强度下土壤侵蚀产沙量的差异较大。当 $I_{30} = 4.72$ mm 时, BJ 径 4(1)无细沟产生,其他径流小区已产生细沟, BJ 径 1(2)侵蚀产沙量最大, BJ 径 4(2)次之。当 $I_{30} = 8.35$ mm 时,坡面径流动力加强,冲沙携沙能力加大, BJ 径 1(2)侵蚀量最大达 651.5 g/m²。当 $I_{30} = 2.41$ mm 为小雨强时, BJ 径 1(1)、BJ 径 4(1)有植物篱截留和根系固土作用,流水侵蚀量不大,而对对照地 BJ 径 1(2)、BJ 径 4(2)植被覆盖较少,侵蚀产沙量仍较多。降雨强度是喀斯特坡面流水产沙的主要动力,其次坡度对侵蚀产沙量也有关系。植物篱增强土壤入渗率,削减坡面径流量,拦截泥沙侵蚀。喀斯特坡面侵蚀产沙量与降雨强度、降雨时间呈显著的幂函数关系。

(2)植物篱拦截雨水具有明显的延迟径流产生和产流后的汇流过程,增加径流在喀斯特坡面入渗的时间和径流入渗量,减小坡面侵蚀产沙量。在不同降雨强度条件下,喀斯特坡面入渗率与单位时间的径流量和产沙量呈负线性相关,表明坡面径流量和侵蚀量随坡面入渗率的增大呈线性减少趋势。土壤的透水性主要决定于土壤的颗粒组成、结构、孔隙度和土壤湿度等因素。雨水降落到地面上击溅土壤,部分渗入土中,大雨超过土壤入渗能力时形成坡面流,植物篱根系茎干构成一堵墙阻挡坡面径流产沙携沙,促使土壤入渗。 BJ 径 1(1)土层较薄,渗透性能差,蓄满产流快; BJ 径 4(1)土层较厚,坡度较小,产流慢。小雨强初期,植物篱带渗入,带下未见水流出;随着降雨时间延长,或雨强增大,可见带下有水流出。

(3)刺梨适应性强,生长快,冠幅宽,覆盖地面广,能减少土壤水分蒸发,吸收和调节地表径流,提高土壤含水量和渗透性能,改善土壤物理特性,从而有效提高土壤蓄水能力。刺梨和黑麦草植物篱改变原有土地坡度,形成绿篱梯化,降低坡度,减小坡面对土

皮的冲刷作用,喀斯特坡面被植物篱分割成几节变短,植物篱机械阻挡泥沙向下流,抑制土壤侵蚀发生。植物根系缠绕串连、根土黏结达到固结土壤、强化抗冲性,提高土壤抗侵蚀性。刺梨通过根系自身的腐解和转化合成腐殖质,使土壤有良好的团聚结构和孔隙状况,增强土壤渗透力。直径 $\leq 1\text{ mm}$ 的根系在提高土壤的水力学效应方面贡献最大。植物篱根系在土壤中的分布空间变化,随土层深度增加,根系的减沙效应变小,受坡度及雨强的影响程度增大。植物篱近地面的枯枝落叶层降低水的流速,减小输沙量。植物根系穿插加固土层,增强土壤抗侵蚀能力。

(4)刺梨根系密集,在生长发育过程中,分泌大量高分子黏胶物质和多糖类物质,将土壤团聚体缠绕串连,形成强大的黏结力,像钢筋一样把土壤牢牢网住,加强土壤抗侵蚀能力,保护土粒免遭冲蚀。刺梨根系 $d<1\text{ mm}$ 的密度主要分布在 $0\sim 30\text{ cm}$ 土层,根系密度随剖面深度增加而减少,抗侵蚀能力与 $d<1\text{ mm}$ 的须根密度呈极显著正相关关系,与 $d\leq 2\text{ mm}$ 须根的根量、根长与土壤抗冲指数存在线性回归关系。根系在表土层的盘绕密布形成巨大的黏结力,以及随土层深度增加根系对土壤渗透力的强化值降低是提高抗侵蚀动力的机理。刺梨幼苗期间保水固土效应不明显,但 3 年生刺梨地比对照样地减少土壤侵蚀量 $214.16\sim 311.24\text{ t/km}^2$,充分说明植物篱起到保水固土减沙和对土壤侵蚀水动力过程的调控。

参考文献:

[1] Salvador B S, Cornu S, Couturier A, et al. Morphological and geochemical properties of soil accumulated in hedge-induced terraces in the Massif Central, France [J]. Soil and Tillage Research, 2006, 85: 62-77.

[2] Cullum R F, Wilson G V, Mcgregor K C, et al. Runoff and soil loss from ultra-narrow row cotton plots with and without stiff-grass hedges[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 93: 56-63.

[3] Raffaella J R, Mcgregor K C, Foster G R, et al. Effect of narrow grass strips on conservation reserve land converted to cropland[J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(6): 1581-1587.

[4] Chaubey I, Edwards D R, Daniel T C, et al. Effectiveness of vegetative filter strips in controlling losses of surface applied poultry litter constituents[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(6): 1687-1692.

[5] 孙辉,唐亚,陈克明,等.固氮植物篱防治坡耕地土壤侵蚀效果研究[J].水土保持通报,1999,19(6):1-5.

[6] 蔡强国,黎四龙.植物篱减少侵蚀的原因分析[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(2):54-60.

[7] 朱远达,蔡强国,张光远,等.植物篱对土壤养分流失的

控制机理研究[J].长江流域资源与环境,2003,12(4): 345-351.

[8] 李勇,吴钦孝,朱显漠,等.黄土高原植物根系提高土壤抗冲性能的研究[J].水土保持学报,1990,4(1):1-6.

[9] 雷廷武, Nearingma M A. 侵蚀细沟水流水力学特性与形态特征的试验研究[J].水利学报,2001,32(11):49-54.

[10] 张科利.黄土坡面发育的细沟流水动力学特征的研究[J].泥沙研究,1999(1):60-68.

[11] 张光辉.坡面薄层水流水动力学特性的实验研究[J].水科学进展,2002,13(2):159-165.

[12] Gilley J E, Kottwite E R, Simanton J R. Hydraulic characteristics of rills[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(6): 1900-1906.

[13] Abranham A D, Li G, Parson A J. Rill hydraulics on the semiarid hillslope southern Arizona[J]. Earth Surface Processes and Landformsm, 1996, 21: 35-47.

[14] Yalin M S. An expression for bedload transportation [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1963, 89(3): 221-250.

[15] 潘成忠,上官周平.牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J].水利学报,2005,36(3):371-377.

[16] 李勉,姚文艺,陈江南,等.草被覆盖下坡面沟坡系统坡面流阻力变化特征试验研究[J].水利学报,2007,38(1):112-119.

[17] 中华人民共和国水利部.SL277—2002 水土保持监测技术规程[S].北京:中国水利水电出版社,2002.

[18] 中华人民共和国水利电力部水利水土保持司.SD 239—87 水土保持试验规范[S].北京:中国水利电力出版社,1988.

[19] 吴普特,周佩华.雨滴击溅在薄层水流侵蚀中的作用[J].水土保持通报,1992,12(4):19-26.

[20] 肖培青,姚文艺,申震洲,等.苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J].水利学报,2011,42(2): 232-237.

[21] 刘青泉,李家春,陈力,等.坡面流及土壤侵蚀动力学(I):坡面流[J].力学进展,2004,34(3):360-372.

[22] 夏卫生,雷廷武,吴金水,等.电解质脉冲法测量薄层水流流速的实验研究[J].自然科学进展,2004,14(11): 1277-1281.

[23] Horton R E. Erosional development of stream s and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1945, 56(3): 275-370.

[24] Yen B C, Wenzel H G. Dynamic equations for steady spatially varied flow[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1970, 96: 801-814.

[25] Emmett W W. Overland flow[A]. In: Kirkby M J E D. Hillslope Hydrology[C]. New York: John Wiley and Sons, 1978: 145-175.

- [15] Raffel M, Kompenhans J, Wereley S T, et al. Particle image velocimetry: A practical guide[C]. Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics. American Physical Society, 2007, 331-334.
- [16] Luk S H, Merz W. Use of the salt tracing technique to determine the velocity of overland flow[J]. Soil Technology, 1992, 5(4): 289-301.
- [17] Li G, Abrahams A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 21(6): 509-515.
- [18] 邢行, 陈晓燕, 韩珍, 等. 饱和与非饱和黄绵土细沟径流水动力学特征及侵蚀阻力对比[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 92-97.
- [19] Planchon O, Silvera N, Gimenez R, et al. An automated salt-tracing gauge for flow-velocity measurement[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 30(7): 833-844.
- [20] 董月群, 庄晓晖, 雷廷武, 等. 脉冲边界模型测量冻土坡面径流流速与距离优选[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 146-152.
- [21] Huang X H, Wang W, Ma Y Y, et al. Spatial distribution of sheet flow velocity along slope under simulated rainfall conditions[J]. Geoderma, 2018, 321: 1-7.
- [22] Angermann L, Lewandowski J, Fleckenstein J H, et al. A 3 D analysis algorithm to improve interpretation of heat pulse sensor results for the determination of small-scale flow directions and velocities in the hyporheic zone[J]. Journal of Hydrology, 2012, 475: 1-11.
- [23] Berman E S F, Gupta M, Gabrielli C, et al. High-frequency field-deployable isotope analyzer for hydrological applications[J]. Water Resource Research, 2009, 45(10): 5803-5804.
- [24] Flavia T, Matteo A, Maurizio P, et al. Characterization of buoyant fluorescent particles for field observations of water flows[J]. Sensors, 2010, 10(12): 11512-11529.
- [25] Tauro F, Pagano C, Porfiri M, et al. Tracing of shallow water flows through buoyant fluorescent particles[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2012, 26(4): 93-101.
- [26] Jr E V, Nearing M A, Norton L D. Developing a magnetic tracer to study soil erosion[J]. Catena, 2001, 43(4): 277-291.
- [27] Horton R E, Leach H R, Vliet R V. Laminar sheet-flow[J]. Transactions American Geophysical Union, 1934, 15(2): 393-404.
- [28] 董月群, 雷廷武, 张晴雯, 等. 集中水流冲刷条件下浅沟径流流速特征研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 96-100.
- [29] Zhang G H, Luo R T, Cao Y, et al. Correction factor to dye-measured flow velocity under varying water and sediment discharges[J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(1): 205-213.
- [30] 陈丽燕, 雷廷武, 班云云, 等. 土壤冻结对黄土细沟水流流速的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 282-289.
- [31] Moore I D, Burch G J. Sediment transport capacity of sheet and rill flow: Application of unit stream power theory[J]. Water Resources Research, 1986, 22(8): 1350-1360.

(上接第 23 页)

- [26] 赵人俊. 流域水文模拟: 新安江模型与陕北模型[M]. 北京: 水利出版社, 1984.
- [27] Li J C, Liu Q Q, Zhou J F. Environmental mechanics research in China[J]. Advances in Applied Mechanics, 2003, 39: 217-306.
- [28] Liu Q Q, Chen L, Li J C, et al. Two-dimensional kinematic wave modeling of overland-flow[J]. Journal of hydrology, 2004, 291: 28-41.
- [29] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟, 等. 黄土高原植物根系强化土壤渗透力的有效性[J]. 科学通报, 1992, 37(4): 366-369.
- [30] Ghidry F, Alberts E E. Plant root effects on soil erodibility, splash detachment, soil strength, and aggregate stability[J]. Transaction of the ASAE, 1997, 40(1): 129-135.
- [31] Gyssels G, Poesen J. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates[J]. Earth Surface Proc Landforms, 2003, 28: 371-384.
- [32] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 93-96.
- [33] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 34-37.
- [34] 朱显谟. 黄土高原脱贫致富之道: 三论黄土高原的国土整治[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(3): 1-5.
- [35] 王库. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J]. 土壤与环境, 2001, 10(3): 250-252.
- [36] 刘国彬. 黄土高原土壤抗冲性研究及有关问题[J]. 水土保持研究, 1997, 4(5): 91-101.
- [37] 文安邦, 张信宝, 王玉宽, 等. 云贵高原区龙川江上游泥沙输移比研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 139-141.
- [38] 李勇, 朱显谟, 田积莹. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性的有效性[J]. 科学通报, 1991, 36(12): 935-938.
- [39] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性机制初步研究[J]. 中国科学(B辑), 1992(3): 254-259.