

DOI: 10.11766/trxb201901080603

王伦江, 张兴昌. 苜蓿影响砒砂岩陡坡侵蚀的水动力学机理研究[J]. 土壤学报, 2020, 57 (2): 284–295.

WANG Lunjiang, ZHANG Xingchang. Hydraulic Mechanism of Alfalfa Controlling Soil Erosion on Steep Slopes of Pisha-sandstone[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (2): 284–295.

苜蓿影响砒砂岩陡坡侵蚀的水动力学机理研究*

王伦江^{1, 3}, 张兴昌^{1, 2†}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; 3. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

摘 要: 砒砂岩陡坡是黄河中游泥沙和粗沙的重要来源地, 草本植物恢复是防治土壤侵蚀的重要措施, 然而对草本植物防治砒砂岩陡坡侵蚀机理的研究却较少。为明确草本植物防治砒砂岩陡坡土壤侵蚀的水动力学机理, 通过小区径流冲刷实验, 分析不同苜蓿密度 (株间距为 2 cm、4 cm、5.6 cm、8 cm) 下砒砂岩陡坡产流产沙和径流水动力学特性变化。结果表明, 苜蓿覆盖下砒砂岩陡坡产沙主要发生在径流冲刷前期, 产沙过程呈单峰形式。产沙速率与径流流速和水流功率均呈幂函数形式关系, 决定系数 (R^2) 分别为 0.94 和 0.68。苜蓿能减小砒砂岩陡坡径流量, 影响径流水动力性质。株间距增大的过程中坡面径流阻力呈幂函数形式减小, 导致径流流速和水流功率呈幂函数形式增大, 苜蓿通过茎秆和根系影响径流水动力过程。细沟形成前, 苜蓿主要通过茎秆的作用增大径流阻力; 细沟形成后苜蓿还可能通过其出露于细沟中的根系影响股流的阻力状况。由于径流水动力性质和土壤抗冲性质的变化, 砒砂岩陡坡侵蚀量大大减小, 产沙量随苜蓿盖度增大呈幂函数形式减小 ($R^2=0.55$)。相比于盖度, 苜蓿株间距与产沙的关系更为密切 ($R^2=0.93$), 原因可能是株间距更能综合地反映苜蓿整体 (地上和地下部分) 防治砒砂岩陡坡侵蚀的作用。研究可以为砒砂岩陡坡侵蚀防治中草本植物的配置提供一定的科学依据。

关键词: 砒砂岩; 陡边坡; 草本植物; 盖度; 株间距; 水动力学特性

中图分类号: S157.1 文献标志码: A

Hydraulic Mechanism of Alfalfa Controlling Soil Erosion on Steep Slopes of Pisha-sandstone

WANG Lunjiang^{1, 3}, ZHANG Xingchang^{1, 2†}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Steep slopes of Pisha-sandstone are the major sources of silt and coarse sand in the mid-reaches of the Yellow River of China. Revegetation of herbaceous plants on the slopes is one of the most effective measures to control soil erosion thereupon. However, so far little has been reported in the literature about how herbaceous plants influence soil erosion on steep slopes of

* 中国科学院科技服务网络计划 (KFJ-STZ-ZDTP-12) 和国家重点研发计划项目 (2017YFC0504504) 资助 Supported by the Science and Technology Service Network Initiative (No.KFJ-STZ-ZDTP-012) and the National Key R & D Program of China (No.2017YFC0504504)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhangxc@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 王伦江 (1989—), 男, 贵州省兴义市人, 博士研究生, 主要从事坡面水文与土壤侵蚀研究。E-mail: wang_lunjiang@163.com

收稿日期: 2019-01-08; 收到修改稿日期: 2019-05-13; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-06-10

Pisha-sandstone. 【Objective】 This study aimed to quantitatively study effects of herbs on soil erosion on steep slope of Pisha-sandstone and hydraulic mechanism of the erosion. 【Method】 A total of ten artificial slopes (37°) were set up and planted with alfalfa plants different in spacing (2 cm、4 cm、5.6 cm、8 cm) in Erdos, Inner Mongolia. Plot runoff scouring experiments were carried out with a constant inflow ($2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$). Runoff and sediment yields on the slopes and variation in hydraulic features of the runoff were monitored and analyzed to explore the mechanism of alfalfa controlling soil erosion. 【Result】 Results show sediment yield on the slopes planted with alfalfa occurred in the initial period of runoff and scouring period, forming a single peak. Sediment yielding rate increased with flow velocity and stream power in a power function, with determination coefficients being 0.94 and 0.68, respectively. The presence of alfalfa decreased runoff volume and changed the flow hydraulics. Flows on the alfalfa covered slopes were in a laminar and subcritical state. Increase in plant spacing resulted in greater flow velocity ($R^2=0.90$) and stream power ($R^2=0.62$), but a decrease in flow resistance ($R^2=0.87$). Stems and roots of alfalfa played an important role in altering flow hydraulics. Before rill formation, stems of the plants hindered the flow of runoff. However, after rill formation, apart from the stems, roots of the plants standing out in the rills increased resistance to the flows therein. Due to the changes in flow hydraulics and soil erodibility, soil loss on the slopes decreased exponentially with alfalfa coverage ($R^2=0.55$). However, compared to the alfalfa coverage, plant spacing was more closely related to soil loss ($R^2=0.93$). 【Conclusion】 Plant spacing may reflect more comprehensively the effect of alfalfa as a whole (shoots and roots) on controlling soil erosion of steep slopes of Pisha-sandstone. The study may provide a certain scientific basis for planting herbs on steep slopes of Pisha-sandstone for erosion control.

Key words: Pisha-sandstone; Steep slope; Herbaceous plant; Coverage; Plant spacing; Hydraulics

砒砂岩一般特指位于干旱半干旱的黄河中游、晋陕蒙交界地区的二叠纪到白垩纪期间形成的厚层砂岩、砂页岩和泥质砂页岩组成的岩石互层,它具有干燥时坚硬如石、湿润时柔软如泥的性质。砒砂岩极易被风化,在干湿和冷热交替等作用的影响下,砒砂岩表面会风化累积形成一定厚度的松散层。砒砂岩的特性和这一地区的气候条件,使松散层极易受风力、水力和重力等多种作用而发生侵蚀。剧烈的侵蚀使该地区成为中国土壤侵蚀最严重的地区之一,一些地方侵蚀模数高达 $3 \text{ 万} \sim 4 \text{ 万 } \text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ [1-3],侵蚀产生的泥沙是黄河中游泥沙特别是粗沙的主要来源地 [2-4]。由于侵蚀剧烈、治理难度大,砒砂岩地区被中外专家称为“环境癌症”,其中,砒砂岩沟谷陡坡(坡度 $>25^\circ$)是侵蚀最强烈的地貌部位 [2],是侵蚀防治的难点和重点。

植被恢复是防治土壤侵蚀、进行生态恢复的主要措施。20 世纪 80 年代以来,砒砂岩地区实施了一系列植被恢复工程 [5]。研究表明,由于植被恢复,该地区水土流失量大幅度减少。田鹏等 [6] 和喻锋等 [7] 结合皇甫川流域土地利用类型变化和模型计算 (USLE 和 RUSLE 模型) 结果发现砒砂岩地区植被覆盖情景下的土壤流失明显小于裸露地表。吴永红等 [8] 利用“水保法”推算了皇甫川、孤山川和窟野河

流域沙棘恢复对砒砂岩地区侵蚀的影响,结果发现,沙棘的减洪和减沙效益均随其在流域内的种植面积扩大而显著增大。苏涛等 [9] 采用野外径流冲刷的方法分析了油松、草地、柠条和沙棘的减流减沙作用,结果显示砒砂岩坡面不同种类的植物减流减沙作用存在显著差异。

目前对砒砂岩地区植被防治侵蚀的巨大作用形成了一致认识,但是对植物冠层、茎秆和根系的变化如何影响砒砂岩坡面侵蚀,特别是陡坡的侵蚀过程仍然不清楚,因此需要进一步开展相关研究。草本植物是干旱半干旱地区最重要的植物类型之一,也常常是植被恢复过程中的先锋植物 [10],相较于灌木和乔木,草本植物具有生长较快、迅速覆盖地表和抓固表层土壤的特点,能有效减弱雨滴击溅和径流冲刷的作用 [11-13]。因此,有必要重点研究草本植物对砒砂岩陡坡侵蚀防治作用及其径流水动力学机理。苜蓿是中国干旱半干旱地区治理水土流失、改善生态环境常用的草本植物。研究显示,苜蓿能够显著影响坡面径流水动力 [14]、土壤可蚀性 [15],进而改变坡面侵蚀产沙过程 [16-17]。本研究选择苜蓿为防治砒砂岩陡坡侵蚀的草本植物代表,采用径流冲刷实验研究苜蓿茎秆和根系变化对砒砂岩侵蚀和产沙的影响,揭示苜蓿影响侵蚀的径流水动力学机理,

以期为基础岩地区陡坡生态恢复的植被选择和配置提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处晋陕蒙交界的基础岩地区, 总面积 1.67 万 km^2 , 属于干旱半干旱气候, 处在中国风蚀水蚀交错地带。该地区年降雨约 300~500 mm, 降雨主要集中在 6—9 月, 占全年降雨量的 75%~80%, 该地区年均气温 5.5~8.8 $^{\circ}\text{C}$, 年蒸发量 1 800~2 500 mm, 最大风速可达 20 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。该地区土壤类型包括基础岩风化土、黑垆土、黄绵土和风沙土^[1], 由于侵蚀剧烈, 地表呈强烈丘陵沟壑切割形态^[2]。该地区原生草本植物有针茅、蒿类等, 灌木有沙棘、柠条等, 乔木主要为人工种植的油松。

1.2 实验设计与小区准备

实验地在内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗黄天绵图镇(39°69'N, 110°27'E)。实验小区尺寸为 1.5 m×0.4 m (图 1), 小区共 10 个, 以 37°坡面代表陡边坡, 该坡度约为基础岩陡边坡的平均坡度^[2]。小区填土选用的土壤为红棕色基础岩风化碎屑, 取自准格尔旗暖水镇, 其黏粒、粉粒和砂粒的体积含量分别为 8.72%、49.52%和 41.76% (激光粒度仪法)。依据美国制土壤质地分类标准为壤土。小区填土容重为 1.44 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ^[4, 18], 土壤未过筛, 将大于 3 cm 的块状颗粒挑选去除, 以保持土壤结构并使填土均匀^[19]。填土前先于小区底部铺一层厚约 3 cm 的沙, 以促进入渗水流排出, 之后在其上部按每层 10 cm 填装 30 cm 厚的基础岩土壤, 在填上一层之前先将一层土壤表面打毛, 以防止层间发生分层。填装完成后用喷壶于坡面缓慢洒水, 促进土壤自然沉降。



图 1 冲刷实验小区
Fig. 1 The experimental plots

基础岩坡面种植紫花苜蓿 (*Medicago sativa*), 由于坡面径流过程主要受苜蓿茎秆和茎秆间距大小的影响, 因此本研究以苜蓿株间距控制苜蓿密度, 苜蓿株间距分别为 8 cm、5.6 cm、4 cm、2 cm, 对应的苜蓿株密度分别为 156、319、625、2 500 株· m^{-2} (表 1)。在保证数据可重复性的原则下, 同时考虑野外实验场地和费用的限制, 本实验的苜蓿处理的重复仅为 2~3 个。2014 年 6 月种植苜蓿, 依据大于设计株数以网格为参照均匀地在小区坡面播撒种子, 之后按幼苗出苗情况拔除或剪除部分植株, 以达到设计密度, 其中, 对于 2 500 株· m^{-2} 处理的小区, 在小区上部和下部的中间各选 20 cm×20 cm 的区域, 数小区域内苜蓿株数, 以确定其达到实验设计要求。苜蓿种植完成之后让其自然生长 4 个月, 在这期间坡面经历 15 次自然降雨事件, 次降雨的降雨量在 4.0~31.3 mm 之间, 总降雨量为 198.1 mm。

1.3 径流冲刷实验

2014 年 10 月进行径流冲刷实验。实验时苜蓿的平均高度约为 15 cm, 总体而言, 株间距小的小

表 1 实验小区苜蓿处理

Table 1 Treatments of the experiment

株间距 Plants pacing/cm	苜蓿密度 Alfalfa density/(株· m^{-2})	小区数 Replicates	小区号 Plot
2	2 500	2	1、2
4	625	3	3、4、5
5.6	319	2	6、7、
8	156	3	8、9、10

区苜蓿高度较小, 而株间距大的小区苜蓿高度较大。实验前用削尖的直径为 2 cm 的塑料管插入坡面中部 5 cm 深取约 10 g 土, 以烘干法 (105 °C) 测量坡面土壤前期含水率; 用数码相机垂直于小区坡面对小区拍照以分析苜蓿冠层盖度, 之后用剪刀小心地剪除苜蓿冠层, 保留约 3 cm 的茎秆。径流冲刷实验所用的水为当地的生活用水, 采用定水头法供水, 以阀门控制流量大小, 设计冲刷流量为 2 L·min⁻¹, 该流量相当于砒砂岩地区暴雨雨强 (60 mm·h⁻¹) 下 5 m 坡长的坡面对应的径流量。每次实验前对流量进行率定, 以保证其准确性。实验时水流经供水水箱进入溢流槽, 再经过一块水平放置 (以水平尺测量保证平面水平) 的铺有纱布的玻璃达到坡面。铺纱布一方面可以使水流在玻璃面上均匀分布, 从而保证实验小区上方水流以薄层水流的形式均匀地向下流动, 另一方面可以增大径流阻力, 使径流初速度接近于零, 防止上方过度冲刷。当冲刷水流从玻璃表面流到砒砂岩小区坡面顶端后开始计时, 记录水流从坡面顶端到达小区出水口而发生产流所经历的时间 (产流历时)。产流之后冲刷实验继续持续 20 min, 在这段时间内每隔 1 min 用容积为 1 L 的塑料瓶取 1 次径流泥沙样, 每次取样时长约为 30 s。将小区分为上段 (0.75 m) 和下段 (0.75 m), 每隔 4 min 用 KMnO₄ 染色法分别测量其坡面径流流速。测量时用洗瓶轻轻滴入适量 KMnO₄ 溶液, 同时按下秒表开始计时, 当染色剂前锋到达终线时再次按下秒表, 记录秒表的时间。径流表面流速为上、下两段长度 (0.75 m) 分别除时间后取均值的结果。染色法测量的表面流速需要根据流态进行修正以获得径流平均流速, 由于本研究的坡面径流为层流 (下文交待), 修正系数取 0.67^[20]。用精度为 0.5 mm 的钢尺于距小区出水口 0.1 m、0.5 m、1.0 m 和 1.4 m 的 4 个断面测量径流深度, 以 4 个断面的平均值代表坡面平均径流深度。同时每隔 4 min 对坡面拍照以观察坡面径流和坡面侵蚀特征变化。冲刷过程结束后, 称取每个水沙样的质量, 沉淀、轻轻倒掉部分上清液之后放入烘箱烘 24 h (105 °C, 24 h), 之后称量烘干泥沙质量。

1.4 根长数据获取

冲刷实验结束后, 在小区坡面选取径流冲刷较弱的苜蓿株间空地和苜蓿基部两个点, 分别用土钻垂直取土, 土钻直径为 5 cm, 取土深度为 7.5 cm。

将土样装入塑封袋、编号并带回实验室。之后清洗出根, 将根摆放于透明的 A4 塑料纸上, 以 EPSONScan 扫描仪进行扫描, 扫描得到的图片用 WinRHIZO 2013e 软件进行处理获得根长数据。

1.5 水动力参数计算

(1) 雷诺数反映坡面径流的惯性力和黏滞力之比, 计算方法如下:

$$Re = \frac{uR}{\nu}$$

式中, u 为平均流速 (m·s⁻¹); R 为水力半径, 坡面薄层水流可近似地以流深 h (m) 代替; ν 为运动黏滞系数 (m²·s⁻¹), 是水温 (t , °C) 的函数, $\nu=0.01775/(1+0.0337t+0.00221t^2)$ 。

(2) 佛汝德数表示径流的惯性力和重力的比值, 计算方法如下:

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}}$$

式中, g 为重力加速度 (m·s⁻²)。

(3) 达西-维斯巴赫阻力系数能反映不同地表状况影响下径流的阻力大小, 其计算方法如下:

$$f = \frac{8gRJ}{u^2}$$

式中, J 为能坡 (m·m⁻¹)。

(4) 水流功率代表径流作用于土壤表面的径流能量大小, 是常用的分析土壤分离和泥沙搬运的简单而有效的参数, 本研究的水流功率 (ω , W·m⁻²) 的计算采用下式^[21]:

$$\omega = \tau u = \rho ghJu$$

式中, τ 为剪切力 (N·m⁻²); ρ 为水的密度 (1 000 kg·m⁻³)。

1.6 数据处理

本研究用 PCOVER-3 植被覆盖度分析软件^[22]分析拍摄的小区照片得到小区苜蓿盖度; 下文对坡面产流特征、产沙特征以及径流水动力学特性进行分析, 其中, 产流量是产流开始后 20 min 小区出水口的实测径流总量, 产流速率是坡面单位投影面积和单位时间内的产流量, 对应地, 产沙量和产沙速率也有相似的含义。用 Pearson 相关分析产流量和产沙量与可能

影响它们的因素之间的相关关系;用简单回归分析产沙量、产沙速率、径流水动力学特性与苜蓿盖度、株间距、根长密度等变量间的关系。所有相关分析和回归分析均在 SPSS19.0 软件中进行。

2 结果

2.1 不同苜蓿处理砒砂岩陡坡的产沙随时间变化规律

结合对实验过程的观察和产沙过程线分析(图2)可以发现,在径流冲刷过程中,砒砂岩陡坡坡面的产沙主要发生在冲刷早期,总体趋势为:冲刷开始后水流在坡面呈面状均匀分布,坡面出现短暂的面状侵蚀,径流相对均匀地冲刷坡面,产沙速率迅速增大。随后径流汇集成股流,径流下切坡面土壤形成细小的侵蚀沟,产沙量继续增大。产沙量大约在产流开始后 3~5 min 之间达到峰值,之后坡面产沙速率迅速减少,这一过程持续 10 min 左右,此时产沙速率达到稳定状态,细沟也趋于稳定。此后产沙速率虽然会出现一定程度的波动,但是基本维持在较低的水平,直至实验结束。冲刷结束后测量发现最大细沟深约为 3 cm。观察不同苜蓿株间距处理坡面的产沙过程曲线可以发现,在产沙速率达到稳定之前,产沙速率一致地表现为随着株间距的增大而增大。但是在产沙速率达到稳定后,其随苜蓿株间距的变化不再具有明显的规律性。

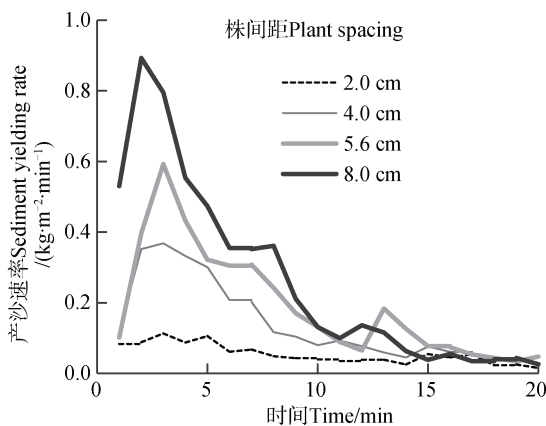


图2 不同苜蓿株间距处理砒砂岩坡面的产沙过程
Fig. 2 Sediment yielding rate as a function of time and plant spacing on steep slopes of Pisha-sandstone

数据分析显示株间距为 2、4、5.6、8 cm 时,砒砂岩陡坡平均产流速率分别为 1.575、1.684、

1.628、1.960 $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$,即随着苜蓿株间距增大,坡面产流速率呈增大的趋势;相似地,平均产沙速率和峰值产沙速率的总体趋势均随苜蓿株间距增大而增大。具体而言,苜蓿株间距从 2 cm 至 8 cm 增大的过程中,平均产沙速率分别为 0.054、0.139、0.189、0.256 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$,而对应处理的峰值产生速率分别为 0.113、0.368、0.592、0.894 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ 。同时,从产沙速率变化曲线还发现,在苜蓿株间距最小的坡面,产沙峰不明显。

2.2 影响砒砂岩陡坡产沙的因素

表2为实验小区苜蓿特征和产流产沙数据。从中可以发现,不同实验小区苜蓿盖度变化范围为 43.39%~95.79%,平均值为 79%,其中株间距为 8 cm 实验处理的三个重复(8、9、10号小区)的盖度间有一定的差异,原因可能是在剪除部分植株(以达到设计株间距)时一部分植株的基部未被彻底清理,基部萌蘖出部分小植株,使得盖度偏大。该差异可能会在一定程度上影响实验结果,但由于径流冲刷过程中苜蓿主要通过茎秆影响坡面径流过程,因此,苜蓿盖度差异的影响可能较小。不同苜蓿株间距处理小区的根长密度变化范围为 3.65~48.20 $\text{km}\cdot\text{m}^{-3}$,平均根长密度为 16.50 $\text{km}\cdot\text{m}^{-3}$;坡面前期土壤含水率范围为 11.9%~20.7%;产流历时变化范围为 16~66 s;产流量变化范围为 12.51 L~18.84 L;产沙量变化范围为 0.67~5.01 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,最大值为最小值的 7.5 倍。

对产流量与前期土壤含水率、产流历时、径流流速、苜蓿盖度、根长密度等 5 个因素进行 Pearson 相关分析发现,产流与这些因素均没有显著的相关性,但是分析显示在产流后 4 min 内产流量与株间距有显著的相关关系($r=0.66$, $P<0.05$)。对总产沙量与产流量、苜蓿盖度、株间距、根长密度、前期土壤含水率和产流历时进行相关分析,结果显示(表3),产沙量与苜蓿盖度、株间距、根长密度等代表苜蓿特征的变量均显著相关, r 分别为-0.82、0.96、-0.67。进一步利用回归分析发现,产沙量与苜蓿盖度和根长密度为指数函数关系,其 R^2 分别为 0.55 和 0.46,与株间距呈线性关系, R^2 为 0.93(图3)。

分析砒砂岩陡坡径流水动力学特性和产沙的关系,结果显示坡面产沙速率和径流水动力学特性密切相关,其中,坡面产沙速率与流速和水流功率相关系数分别为 0.87 和 0.81。回归分析发现,产沙量

表 2 实验小区苜蓿特征和产流产沙数据

Table 2 Characteristics of alfalfa, runoff yield, and sediment yield of the experimental plots

小区 Plot	盖度 Coverage/%	根长密度 Root length density / (kg·m ⁻³)	前期含水率 Soil moisture content/%	产流历时 Time to runoff initiation/s	产流量 Runoff yield/L	产沙量 Sediment yield/kg
1	94.3	48.20	16.6	55	16.67	1.07
2	95.8	20.39	14.7	59	12.51	0.67
3	79.4	17.11	20.7	57	13.89	2.25
4	92.0	18.50	13.8	66	15.17	2.36
5	87.4	18.68	13.3	60	18.25	2.03
6	73.0	3.65	17.4	44	14.81	2.69
7	67.7	8.02	11.9	16	15.97	3.36
8	86.2	14.77	16.4	26	22.86	3.89
9	73.2	8.70	12.6	58	13.69	3.81
10	43.4	6.69	13.6	30	18.84	5.07

表 3 小区产流产沙与苜蓿特性之间的相关性

Table 3 Pearson correlations of alfalfa characteristics and runoff and sediment yield

变量 Variables	盖度 Coverage	株间距 Plant spacing	根长密度 Root length density	前期含水率 Soil moisture content	产流历时 Time to runoff initiation	产流量 Runoff yield
株间距 Plant spacing	-0.70*					
根长密度 Root length density	0.64*	-0.69*				
前期含水率 Soil moisture content	0.23	-0.26	0.24			
产流历时 Time to runoff initiation	0.59	-0.57	0.41	0.19		
产流量 Runoff yield	-0.14	0.46	0.03	-0.10	-0.54	
产沙量 Sediment yield	-0.82**	0.96**	-0.67*	-0.29	-0.63	0.48

注： **表示显著水平<0.01,*表示显著水平<0.05 Note: ** significant at <0.01, * significant at <0.05

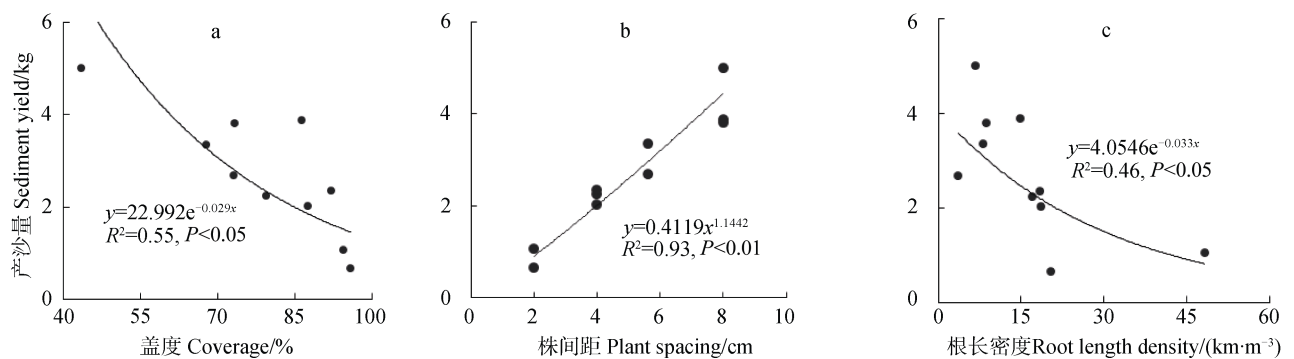


图 3 产沙量与苜蓿盖度 (a)、株间距 (b) 和根长密度 (c) 的关系

Fig. 3 Relationships of sediment yield with alfalfa coverage (a), plant spacing (b), and root length density (c)

与流速和水流功率均呈幂函数关系, R^2 分别为 0.94 和 0.68 (图 4)。同时, 分别分析前 4、8、12、16、20 min 的平均产流速率和平均产沙速率的关系, 结果显示, 在产流后 8 min 内产沙速率与产流速率存

在显著相关性, 之后产沙速率与产流速率相关性不再显著, 其中, 前 4 min 和前 8 min 产沙速率与产流速率呈幂函数关系, R^2 分别为 0.65 ($P < 0.05$) (图 5) 和 0.47 ($P < 0.05$)。

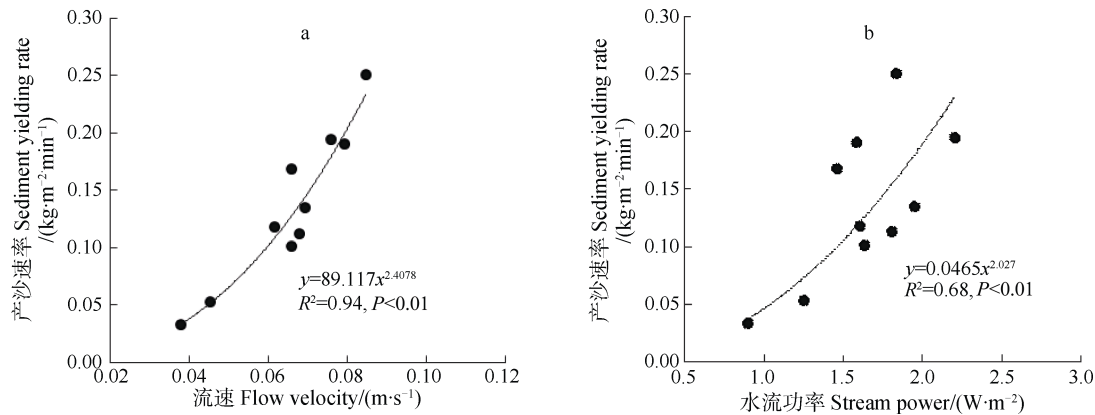


图 4 产沙速率与流速 (a) 和径流功率 (b) 的关系

Fig. 4 Relationships of sediment yielding rate with flow velocity (a) and stream power (b)

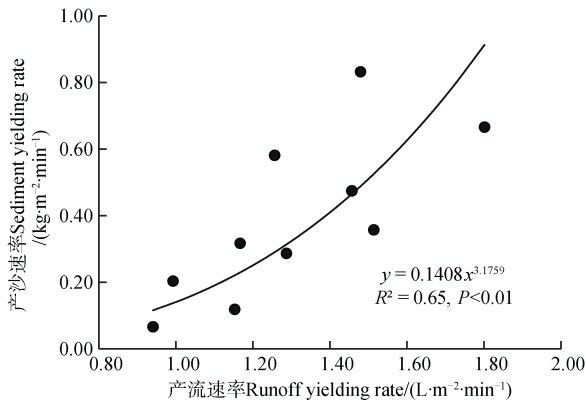


图 5 前 4 min 产沙速率与产流速率的关系

Fig. 5 Relationship between runoff yielding rate and sediment yielding rate during the first 4 min after runoff initiation

2.3 苜蓿对砒砂陡坡径流水动力的影响

对实验条件下不同苜蓿株间距坡面径流水动力学特性数据分析发现, 坡面径流雷诺数 (Re) 的变化范围为 133~322, 径流属于层流, 佛汝德数 (Fr) 的变化范围为 0.191~0.448, 属于缓流。随苜蓿株间距增大, 雷诺数和佛汝德数均呈幂函数形式增大 (图 6), 径流流速和水流功率也随苜蓿株间距增大而呈幂函数形式增大 (图 7), 而对阻力系数的数据分析发现, 其随株间距增大呈幂函数形式减小 (图 8)。同时发现, 实验前 4 min 内, 由于坡面径流为面状径流, 径流均匀地剥离坡面土壤, 坡面未形成细沟, 此时径流流速随苜蓿株间距增大呈幂函数形式显著

增大 ($R^2 = 0.93$, $P < 0.05$); 在实验开始后的 4~20 min 径流出现明显的集中现象, 并下切坡面土壤形成侵蚀细沟。细沟形成后, 虽然株间距与径流流速仍然具有显著关系, 但是决定系数变小 ($R^2 = 0.84$, $P < 0.05$), 即茎秆对径流动力的影响变小。而回归分析发现, 根长密度与 4~20 min 平均流速间存在显著的线性关系 ($R^2 = 0.47$, $P < 0.05$) (图 9), 即随着根长密度增大, 流速线性减小。观察发现, 在这一阶段由于径流下切进入土壤中, 使得原先土壤中的根系出露于细沟内。

3 讨论

3.1 苜蓿覆盖对砒砂岩陡坡侵蚀过程的影响

砒砂岩地区土壤侵蚀是黄河中游侵蚀最严重的地区, 而砒砂岩陡坡侵蚀是主要的产沙来源。相对于缓坡, 砒砂岩陡坡坡面土壤颗粒稳定性大大降低, 因此其在降雨击溅和径流剪切作用下容易发生侵蚀。本实验的砒砂岩陡坡产沙过程中, 不同苜蓿处理小区产沙峰值均出现在冲刷早期, 虽然坡面出现了细沟, 但是产沙量没有随着细沟出现继续增加, 而是达到峰值之后迅速下降达到一个较小且平稳的产沙速率, 这可归因于砒砂岩的特殊性质。研究显示砒砂岩以不稳定、易风化、亲水性强的黏土矿物

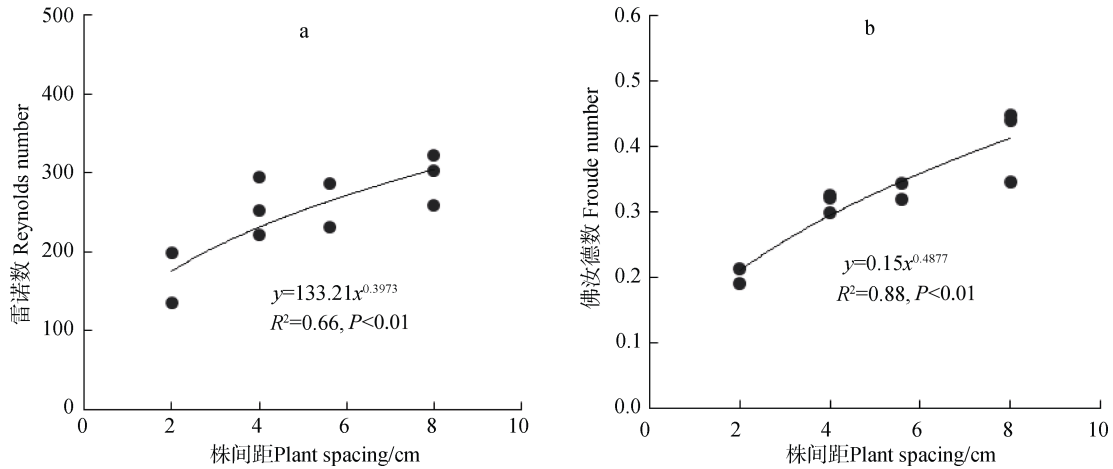


图 6 苜蓿株间距与雷诺数 (a) 和佛汝德数 (b) 的关系

Fig. 6 Relationships of plant spacing with Reynolds number (a) and Froude number (b)

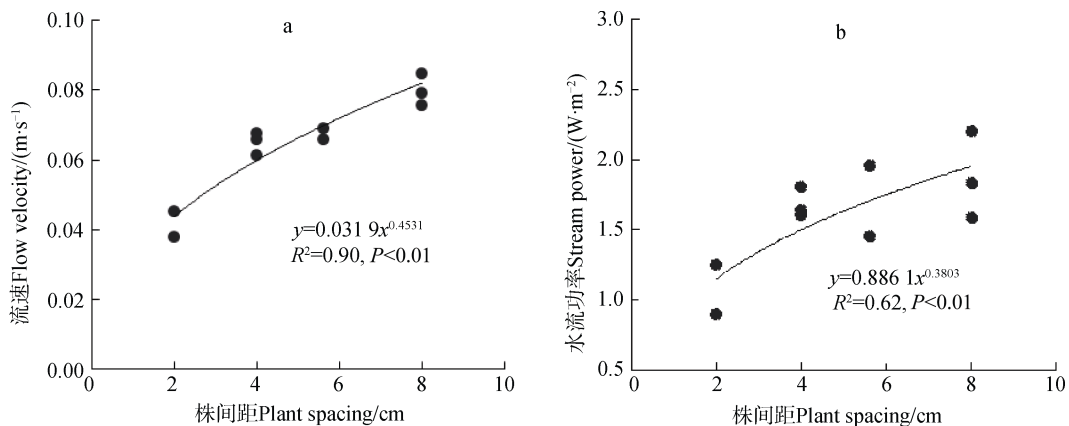


图 7 苜蓿株间距与流速 (a) 和水流功率 (b) 的关系

Fig. 7 Relationships of plant spacing with flow velocity (a) and stream power (b) of runoff

为主要矿物组成，且颗粒大小悬殊、排列无序、颗粒之间胶结性差^[23-24]，所以容易在降雨、径流及温度场变化等作用下发生从表层向下层、从大颗粒向小颗粒逐渐风化^[4, 25]。随时间推移，风化层厚度会逐渐增大，由于风化后颗粒间缺乏黏结力，坡面土壤在雨滴击溅和径流剪切力的作用下易被分离而发生下切。然而，随径流下切进行，风化较强的上层土壤被剥离殆尽，降雨和径流直接与风化程度较弱的下层颗粒发生作用，而这一层土壤的颗粒间黏聚力较大，不易被径流分离。因此，在一定的坡面径流水动力条件下，砒砂岩陡坡侵蚀产沙速率在冲刷早期迅速增大并达到峰值，之后迅速下降趋于稳定。需要注意的是，在下次侵蚀性降雨发生前，砒砂岩坡面土壤颗粒会发生风化，为侵蚀性降雨准备松散的颗粒物质。这一过程导致了砒砂岩坡面特殊的风化-侵蚀交替进行的现象^[4]。

植物对坡面侵蚀的影响是一个复杂的过程。根系密度、冠层盖度、植物株间距（密度）等是常用的反映植物对坡面产沙过程影响的重要指标。本研究分析结果显示，这三个指标与坡面产沙速率均存在显著的关系。其中，苜蓿根系密度与产沙速率为指数函数关系，该结果与 Vannoppen 等^[11]的研究结果相似。但是与株间距和冠层盖度相比，根系密度与产沙量关系的决定系数相对较小。这一方面可能与根系的作用发生在径流下切进入土壤之后才体现有关，另一方面也可能与取样不足有关。本研究在一个坡面只取了两个土样分析苜蓿根系密度，因此可能不能很好地代表根系对坡面产沙过程的影响。相对于苜蓿根系密度，苜蓿盖度与坡面产沙量的关系更密切，说明苜蓿盖度较根系密度更能有效反映其对坡面产沙的影响。本研究分析结果表明砒砂岩陡坡坡面的产沙量随着苜蓿盖度增大呈指数

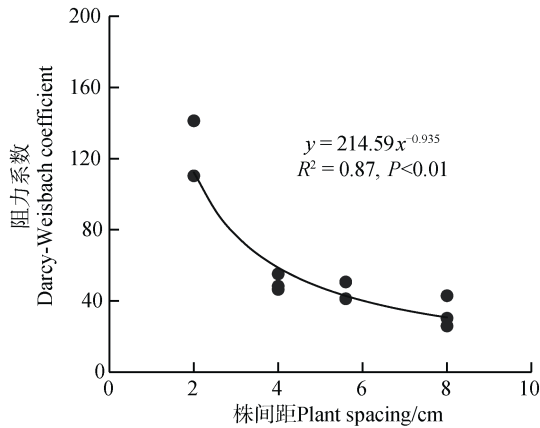
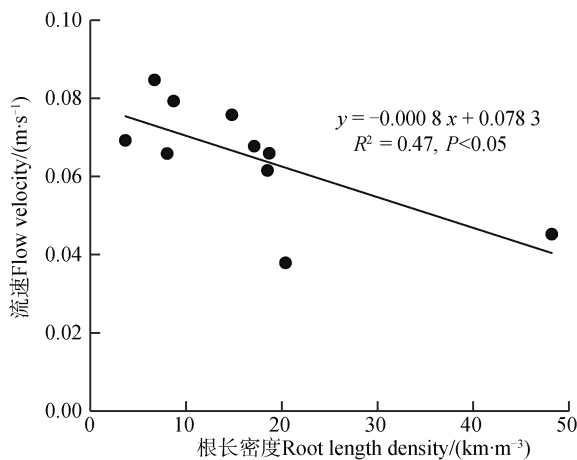


图 8 苜蓿株间距与阻力系数的关系

Fig. 8 Relationship between Darcy-Weisbach coefficient and plant spacing

图 9 细沟形成后坡面径流流速与苜蓿株根长密度的关系
Fig. 9 Relationship between flow velocity and root length density after rill formation

函数形式减小,这一结果与前人的研究相似^[12]。需要注意的是,本研究的径流冲刷实验过程中苜蓿冠层并不直接影响砒砂岩陡坡坡面侵蚀过程,盖度变化实际上间接反映了苜蓿植株茎秆密度和根系密度变化,因此间接地反映了茎秆和根系的作用。三个指标中,苜蓿株间距与产沙量的关系最密切,说明在实验的苜蓿密度处理范围内,株间距最能有效地反映苜蓿对砒砂岩陡坡产沙过程的影响。其原因可能是相较于苜蓿冠层盖度,株间距更能反映茎秆对坡面径流水动力的影响,同时株间距与苜蓿根系密度的关系也较盖度与根系密度的关系密切,因此株间距也更能反映根系对砒砂岩陡坡侵蚀的影响。

3.2 苜蓿防治砒砂岩陡坡侵蚀的水动力机理

水力侵蚀是径流能量作用于坡面土壤的过程,径流侵蚀力和土壤抗蚀能力的强弱决定侵蚀的强度

和产沙量的多少。植被的存在既能增大土壤抵抗径流冲刷的能力^[11, 16],也能减小坡面径流能量^[26-27]。前者通过植物根系的化学吸附和物理缠绕实现,而后者可能通过茎秆和根系阻挡拦截实现。分析显示,砒砂岩陡坡产沙速率随坡面径流流速增大呈幂函数形式增大,该结果与苏涛和张兴昌^[28]在砒砂岩裸坡上冲刷实验结果相似。同时本研究还发现,坡面径流功率增大,砒砂岩陡坡产沙速率约呈二次幂函数形式增大。该趋势大于肖培青等^[14]的实验结果,其实验在坡度为 20° 的黄土坡面进行,实验结果发现苜蓿覆盖坡面产沙速率与水流功率间呈显著的线性关系。出现这种差异的原因可能是本研究的砒砂岩风化土壤自身的抗蚀性较小,加之陡坡条件大大降低了坡面土壤的稳定性,坡面径流水动力条件较小的变化就能大幅度地改变产沙速率。

苜蓿通过改变径流水动力特征影响侵蚀过程。苜蓿的存在能增大入渗速率而减少坡面产流速率,导致径流深度减小。在相似的地表糙率状况下,径流深度减小,单位径流所受的地表阻力会增大。因此,苜蓿的存在能通过减少产流速率而增大径流阻力,阻力条件的这种变化会减小径流分离土壤颗粒和搬运泥沙的能力。这可能部分解释了在冲刷前期产沙量随径流量变化而呈幂函数形式变化的趋势(图 5)。在本实验的流量条件下,受苜蓿覆盖影响,砒砂岩陡坡坡面径流属于层流和缓流流态。在该流态下,径流分离和搬运泥沙的能量较小,泥沙以接触质的形式运动^[29],径流挟带的泥沙容易因径流阻力增大发生沉积。本研究的实验数据显示,随着苜蓿密度增大,坡面径流阻力显著增大,这可能是砒砂岩陡坡的产沙速率随苜蓿密度增大显著减小的原因之一。

在坡面径流向下坡运动的过程中,苜蓿通过其茎秆和根系的作用改变径流阻力。在面蚀阶段,坡面径流直接受苜蓿茎秆作用,因此径流水动力特征的变化主要归因于苜蓿茎秆间距,表现为阻力系数随苜蓿株间距增大而显著减小,而流速则随苜蓿株间距增大呈幂函数形式增大。在径流下切形成细沟后,坡面径流更多地汇集进入细沟中,一部分径流不再直接受苜蓿茎秆作用,而受细沟中因土壤剥离而出露的根系作用。因此,径流水动力特征的变化在一定程度上可归因于细沟中出露的根系及其密度变化。根系作用于径流改变了径流能量,具体表现

为径流流速随根长密度增大呈线性减小(图 9)。这些结果说明苜蓿的地上部分和地下部分共同影响径流水动力过程,且侵蚀阶段不同,苜蓿通过不同的组织影响径流水动力学特性。其中,根系对径流水动力学特性的影响在以往的研究中很少被注意到,也没有被直接量化研究。因此,本研究有利于更加全面地认识植物影响坡面侵蚀的径流水动力学机理。但由于本研究的根系取样较少,这一发现需要进一步的实验印证。

3.3 研究的不足

本研究利用人工小区径流冲刷实验研究了苜蓿对砒砂岩陡坡侵蚀及水动力过程的影响。限于试验条件限制,研究主要存在两点不足:(1)实验坡长较小(1.5 m),研究显示径流在向下坡运动的过程中存在一个加速区间,坡长大于该区间,径流流速等动力参数才能达到稳定状态^[30]。调查显示,砒砂岩地区不同长度陡坡坡面大量存在,坡长变化对苜蓿的作用可能有一定的影响。(2)本研究采用径流冲刷实验研究坡面侵蚀过程,实验过程中剪除了苜蓿的冠层,这种实验方法忽略了苜蓿冠层对砒砂岩陡坡溅蚀的影响,而溅蚀对产沙可能是砒砂岩陡坡产沙的重要方面。因此,有必要在今后的实验中增加模拟降雨或进行自然降雨观测,以分析苜蓿冠层对砒砂岩陡坡侵蚀的影响。这样才能获得更加全面的草本植物对砒砂岩陡坡侵蚀影响的认识。

4 结 论

砒砂岩陡坡产沙主要发生在径流冲刷前期,呈单峰形式。随着株间距增大,峰值产沙速率和平均产沙速率均呈增大趋势,前者的变化范围为 0.113~0.894 kg·m⁻²·min⁻¹,而后者的变化范围为 0.054~0.256 kg·m⁻²·min⁻¹。苜蓿盖度、株间距、根系密度三个指标中,苜蓿株间距最能反映苜蓿对坡面产沙的综合影响,与坡面产沙量的关系最密切($R^2=0.93$)。

在实验坡度和径流流量条件下,砒砂岩陡坡坡面径流属于层流和缓流,径流流速变化范围为 0.038~0.085 m·s⁻¹,水流功率变化范围为 0.901~2.201 W·m⁻²,达西维斯巴赫阻力系数的变化范围为 25.9~110.3。苜蓿的存在能影响砒砂岩陡坡的径流水动力过程,随着株间距增大,流速和水流功率呈幂函数形式显著增大,阻力系数则呈幂函数形式显

著减小。

苜蓿的存在通过直接作用和间接作用影响坡面阻力状况,从而影响坡面水动力过程。直接作用通过苜蓿茎秆和根系发挥,在细沟形成前,苜蓿通过茎秆直接作用于径流而增大径流阻力;在细沟形成后,苜蓿还通过其出露于细沟中的根系影响汇集于细沟中的径流阻力状况。间接作用是苜蓿通过增大砒砂岩陡坡入渗速率而减小径流深度,从而增大了坡面径流阻力。

参考文献 (References)

- [1] Hou Q C, Tang K L. The characteristics of the ecologic environment in the contiguous areas of Shanxi, Shaanxi and Neimenggu. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1994, 14 (2): 8—15. [侯庆春, 唐克丽. 晋陕蒙接壤区水蚀风蚀交错带生态环境特征. 水土保持通报, 1994, 14 (2): 8—15.]
- [2] Ran D C, Gao J L, Zhao A C, et al. Analysis on runoff and sediment characteristics and harnessing measure in Huangfuchuan River Watershed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 34 (2): 122—128. [冉大川, 高健翎, 赵安成, 等. 皇甫川流域水沙特性分析及其治理对策. 水利学报, 2003, 34 (2): 122—128.]
- [3] Bi C F, Wang F G. Research on soil erosion mechanism in soft rock regions. *Journal of Sediment Research*, 2008 (1): 70—73. [毕慈芬, 王富贵. 砒砂岩地区土壤侵蚀机理研究. 泥沙研究, 2008 (1): 70—73.]
- [4] Tang Z H, Cai Q G, Li Z W, et al. Study on interaction among wind erosion, hydraulic erosion and gravity erosion in sediment-rock region of Inner Mongolia. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15 (2): 25—29. [唐政洪, 蔡强国, 李忠武, 等. 内蒙古砒砂岩地区风蚀、水蚀及重力侵蚀交互作用研究. 水土保持学报, 2001, 15 (2): 25—29.]
- [5] Xiao P Q, Yao W Y, Liu H. Research progress and harnessing method of soil and water loss in pisha sandstone region. *Yellow River*, 2014, 36 (10): 92—94. [肖培青, 姚文艺, 刘慧. 砒砂岩地区水土流失研究进展与治理途径. 人民黄河, 2014, 36 (10): 92—94.]
- [6] Tian P, Zhao G J, Mu X M, et al. A modified RUSLE model to estimate sediment yield in the Huangfuchuan watershed. *Resource Science*, 2015, 37 (4): 832—840. [田鹏, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于改进 RUSLE 模型的皇甫川流域土壤侵蚀产沙模拟研究. 资源科学, 2015, 37 (4): 832—840.]
- [7] Yu F, Li X B, Wang H. Optimization of land use pattern based on eco-security: A case study in the Huangfuchuan watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (12): 3198—3210. [喻锋, 李晓兵, 王宏. 生态安全条件下土

- 地利用格局优化——以皇甫川流域为例. 生态学报, 2014, 34 (12): 3198—3210.]
- [8] Wu Y H, Hu J Z, Yan X L, et al. Reduction effects of flood and sediment yield of *Hippophae rhamnoides* Linn forest in soft sandstone area. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9 (1): 68—73. [吴永红, 胡建忠, 闫晓玲, 等. 砒砂岩区沙棘林生态工程减洪减沙作用分析. 中国水土保持科学, 2011, 9 (1): 68—73.]
- [9] Su T, Zhang X C, Wang R J, et al. Effect of vegetation coverage on slope runoff and sediment reduction in Pisha Sandstone region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29 (3): 98—101, 255. [苏涛, 张兴昌, 王仁君, 等. 植被覆盖对砒砂岩地区边坡侵蚀的减流减沙效益. 水土保持学报, 2015, 29 (3): 98—101, 255.]
- [10] Li Y G, Jiang G M. Ecological restoration of mining wasteland in both China and abroad: An over review. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (1): 95—100. [李永庚, 蒋高明. 矿山废弃地生态重建研究进展. 生态学报, 2004, 24 (1): 95—100.]
- [11] Vannoppen W, Vanmaercke M, de Baets S, et al. A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 666—678.
- [12] Durán Zuazo V H, Rodríguez Pleguezuelo C R. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2008, 28 (1): 65—86.
- [13] Zhu B B, Li Z B, Li P, et al. Effect of grass coverage on sediment yield of rain on slope. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (3): 401—407. [朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 等. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究. 土壤学报, 2010, 47 (3): 401—407.]
- [14] Xiao P Q, Yao W Y, Shen Z Z, et al. Experimental study on erosion process and hydrodynamics mechanism of alfalfa grassland. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42 (2): 232—237. [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. 水利学报, 2011, 42 (2): 232—237.]
- [15] Wang C Y, Yu Y C. Seasonal variations of soil rill erodibility under different types of grass in loess hilly region. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47 (8): 101—108. [王长燕, 郁耀闯. 黄土丘陵区不同草被类型土壤细沟可蚀性季节变化研究. 农业机械学报, 2016, 47 (8): 101—108.]
- [16] Wang S, Wang Q J, Dong W C, et al. Runoff and sediment generations and nutrient losses under different vegetation coverage in loess slope. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26 (4): 23—27. [王升, 王全九, 董文财, 等. 黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律. 水土保持学报, 2012, 26 (4): 23—27.]
- [17] Shi Q H, Li Y L, Wang W L, et al. The effect of different Re-vegetation measures on runoff and sediment yielding of dump side slopes in open pit mine. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24 (6): 1263—1271. [史清华, 李桂林, 王文龙, 等. 不同植被措施对露天煤矿排土场边坡径流产沙影响. 草地学报, 2016, 24 (6): 1263—1271.]
- [18] Lu L N, Zhao Y X, Hu L F, et al. Effects of *Hippophae rhamnoides* plantation on soil bulk density, porosity and moisture capacity in the arsenic sandstone area of Inner Mongolia. *Journal of Desert Research*, 2015, 35 (5): 1171—1176. [卢立娜, 赵雨兴, 胡莉芳, 等. 沙棘种植对鄂尔多斯砒砂岩地区土壤容重、孔隙度与贮水能力的影响. 中国沙漠, 2015, 35 (5): 1171—1176.]
- [19] Huang C H, Laften J M. Seepage and soil erosion for a clay loam soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60 (2): 408—416.
- [20] Abrahams A D, Parsons A J, Luk S H. Field measurement of the velocity of overland flow using dye tracing. *Earth Surface Processes & Landforms*, 1986, 11 (6): 653—657.
- [21] Hairsine P B, Rose C W. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles: 2. Rill flow. *Water Resources Research*, 1992, 28 (1): 245—250.
- [22] Zhang W B, Lu B J, Shi W. Determination of vegetation coverage by photograph and automatic calculation. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29 (2): 39—42. [章文波, 路炳军, 石伟. 植被覆盖度的照相测量及其自动计算. 水土保持通报, 2009, 29 (2): 39—42.]
- [23] Ye H, Shi J S, Li X Q, et al. The effect of soft rock lithology upon its anti-erodibility. *Acta Geoscientia Sinica*, 2006, 27 (2): 145—150. [叶浩, 石建省, 李向全, 等. 砒砂岩岩性特征对抗侵蚀性影响分析. 地球学报, 2006, 27 (2): 145—150.]
- [24] Wen J, Zhu Y J, Yin X Q, et al. Pb (II) adsorption property of Pisha sandstone. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34 (10): 2491—2499. [温婧, 朱元骏, 殷宪强, 等. 砒砂岩对 Pb (II) 的吸附特性研究. 环境科学学报, 2014, 34 (10): 2491—2499.]
- [25] Zhang J Y, Zhou D P. Study on ecological protection mechanism of red bed mudstone slope. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25 (2): 250—256. [张俊云, 周德培. 红层泥岩边坡生态防护机制研究. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (2): 250—256.]
- [26] Pan C Z, Shangguan Z P. Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grassplots under simulated rainfall conditions. *Journal of Hydrology*, 2006, 331 (1/2): 178—185.
- [27] Zhao C H, Gao J E, Huang Y F, et al. Effects of vegetation stems on hydraulics of overland flow under varying water discharges. *Land Degradation & Development*, 2016, 27 (3): 748—757.

- [28] Su T, Zhang X C. Hydraulic characteristics of steep slope runoff of Pisha sandstone. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26 (1): 17—21. [苏涛, 张兴昌. 砒砂岩陡坡面径流水动力学特征. *水土保持学报*, 2012, 26 (1): 17—21.]
- [29] Wu P T, Zhou P H. Research on the laminar flow type and erosion transportation manners on the slope surface. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 6 (1): 19—24, 39. [吴普特, 周佩华. 坡面薄层水流流动型态与侵蚀搬运方式的研究. *水土保持学报*, 1992, 6 (1): 19—24, 39.]
- [30] Zhuang X, Wang W, Ma Y, et al. Spatial distribution of sheet flow velocity along slope under simulated rainfall conditions. *Geoderma*, 2018, 321: 1—17.

(责任编辑：檀满枝)