

天然降雨条件下裸露砒砂岩区人工植被的 减流减沙效应

杨振奇¹, 郭建英¹, 秦富仓², 田秀民¹, 刘艳萍¹

(1.水利部 牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020; 2.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010019)

摘要: 裸露砒砂岩区是黄土高原上侵蚀最为剧烈的地区之一, 研究裸露砒砂岩区天然降雨下人工植被的减流减沙效应, 对于提升砒砂岩区水土流失治理成效与质量有重要意义。以裸露砒砂岩区鲍家沟小流域的典型人工植被为研究对象, 运用系统聚类和线性回归相结合的方法, 划分裸露砒砂岩区降雨类型, 研究不同降雨类型下坡面产流产沙的特征, 分析不同人工植被的减流减沙效应。结果表明: (1) 裸露砒砂岩的自然降雨可以分为长历时暴雨、长历时的中到大雨、短历时暴雨以及短历时的小到中雨 4 种类型。(2) 天然降雨的降雨量(P)、最大 30 min 雨强(I_{30})和最大 10 min 雨强(I_{10})与各植被类型坡面的产流量、产沙量间呈 $y = ax_1 + bx_2 + cx_3 + d$ 的多元线性关系。(3) 各植被类型的减流能力依次为沙棘林 > 油松林 > 山杏林 > 柠条林 > 草地; 减沙能力依次为沙棘林 > 山杏林 > 油松林 > 柠条林 > 草地。营造人工植被可以有效防治裸露砒砂岩区坡面的水土流失问题, 现有的人工植被类型中以沙棘林的抗蚀能力最强。

关键词: 裸露砒砂岩区; 降雨特征; 人工植被; 减流减沙效应

中图分类号: S718

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)01-0100-05

Effects of Artificial Vegetation on Runoff and Sediment Reduction by in Exposed Feldspathic Sandstone Region Under Natural Rainfall

YANG Zhenqi¹, GUO Jianying¹, QIN Fucang², TIAN Xiumin¹, LIU Yanping¹

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, China; 2. Desert Science and Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: The exposed feldspathic sandstone region is one of the areas susceptible to most severe soil and water losses in the Loess Plateau. Studying the effects of artificial vegetation on runoff and sediment reduction in exposed feldspathic sandstone region under natural rainfall has great significance to improve the effectiveness and quality of soil erosion control. In this research, through hierarchical clustering method and linear regression method, we divided the types of rainfall and studied their effects on soil erosion, and also analyzed the erodibility under different types of artificial vegetation in Baojiagou watershed of Feldspathic sandstone region. The results showed that: (1) the natural rainfall types in exposed feldspathic sandstone region could be conceptually divided into four categories: long-duration heavy rain, long-duration moderate to heavy rain, short-duration heavy rain, short-duration light to moderate rain; (2) multiple linear function relation could describe the relation between P , I_{30} , I_{10} of rainfall and runoff yield, sediment yield under different artificial vegetation types ($y = ax_1 + bx_2 + cx_3 + d$); (3) the runoff reduction ability of different vegetation types followed the order: *Hippophae rhamnoides* > *Pinus tabulaeformis* > *Prunus armeniaca* > *Caragana korshinskii* > grass land; (3) it was also found that sediment reduction capacity decreased in the order: *Hippophae rhamnoides* > *Prunus armeniaca* > *Pinus tabulaeformis* > *Caragana korshinskii* > grass land. Construction of

收稿日期: 2020-12-14

修回日期: 2021-01-11

资助项目: 内蒙古自治区科技兴蒙行动重点专项“十大孔兑综合治理与水资源集约高效利用集成示范”(KJXM-EEDS-2020005); 内蒙古自治区科技计划项目“黄河十大孔兑流域生态修复空间精准识别与智慧水土保持技术”(2021GG0052)

第一作者: 杨振奇(1993—), 男, 内蒙古赤峰市人, 博士, 工程师, 主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究。E-mail: 843296578@qq.com

通信作者: 郭建英(1979—), 男, 内蒙古呼和浩特市人, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事水土保持、矿区生态修复等方面的科研工作。

E-mail: guojianying1980@126.com

artificial vegetation can effectively prevent and control soil and water loss on the slope of exposed feldspathic sandstone area. Among the existing artificial vegetation types, *Hippophae rhamnoides* forest has the strongest ability to control erosion.

Keywords: exposed feldspathic sandstone region; rainfall characteristics; artificial vegetation; effects of runoff and sediment reduction

晋陕蒙三省交界地带的砒砂岩区,该区基岩成岩程度低,裸露基岩极易风化溃散,引发严重水土流失作用^[1],是黄河流域上中游地带的粗泥沙集中来源区,该区剧烈的水土流失作用严重影响着黄河健康与安澜。研究砒砂岩区降雨条件下的土壤侵蚀和植被抗蚀作用,对于减少泥沙入黄,推动黄河流域生态保护和高质量发展有重要现实意义。降雨引发的土壤侵蚀过程及其调控机制,一直是国内外土壤侵蚀领域专家研究的重点,研究成果丰富,包括降雨侵蚀力的概念,侵蚀性降雨的划定标准,不同气候区的水力侵蚀规律等^[2-5],但研究成果多集中在黄土区、黑土区以及红壤土区等地带^[6-9],而砒砂岩由于其独特的岩石结构和性质,在世界范围内中已公开出版的文献资料中尚无相同性质基岩的报道,相关调查和研究数据可参考性质较为接近的砂岩基岩^[10-12],国内针对砒砂岩区降雨特征及其与土壤侵蚀关系的研究相对较为单薄。

砒砂岩区按照基岩出露程度和覆土类型被分为盖土区、盖沙区和裸露区,以裸露砒砂岩区的基岩出露面积最大,土壤侵蚀作用也最为剧烈^[13]。而裸露砒砂岩区天然降雨呈何种特征?天然降雨对坡面产流产沙有何种影响?现有的人工植被措施的减流减沙效应如何等问题尚不明确。为此,本研究选择内蒙古准格尔旗的裸露砒砂岩区为研究区,选取裸露砒砂岩区的自然坡面,通过天然降雨观测、径流小区监测的方法,研究裸露砒砂岩区坡面的产流产沙特征,分析现有的人工植被措施的抗蚀作用,以期为深入研究砒砂岩区水土流失治理工作以及区域生态修复的研究提供理论基础。

1 研究区概况

研究区鲍家沟流域位于鄂尔多斯市准格尔旗,地理坐标为 110°31′—110°35′E,39°46′—39°48′N,海拔在 1 110~1 300 m;流域地形北高南低;气候属典型大陆性季风气候,冬季漫长干燥,夏季短暂温热,年均气温 7.2℃;土壤类型以黄绵土、风沙土为主;植被以人工植被为主,常见青杨(*Populus cathayana*)、旱柳(*Salix matsudana*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、柠条(*Caragana Korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、山杏(*Prunus armeniaca*)等;草本植物主要有羊草(*Leymus chinensis*)、猪毛菜(*Salsola nitraria*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等。

2 研究方法

2.1 试验设计

砒砂岩岩性特殊,重塑土的物理及力学性质与原状基岩相差较大,原状基岩样本不利于长距离运输,因此本研究中关于裸露砒砂岩坡面降雨侵蚀观测都采取野外原位试验的方法。根据研究区内主要人工植被类型在研究区内选取天然坡面布设裸露基岩小区、草地小区、油松小区、山杏小区、沙棘小区、柠条小区各 1 个,小区修建初期进行地面整平,后期自然恢复,不清理地表草本受基岩坡面地形和施工难度限制,小区围墙材料均采用厚铁皮,径流小区主要监测单次降雨的径流及产沙量,降雨指标采用 HOBO(U30)自记雨量计及风速、风向等配套气象设备。径流小区基本情况见表 1。

表 1 径流小区基本情况

小区类型	植被类型	株行距	冠幅	草本盖度/%	林龄/a	坡度/(°)	小区规格
裸露基岩	无	—	—	—	—	20	2 m×5 m
草地小区	本氏针茅	—	—	73	—	20	2 m×5 m
油松小区	油松	2 m×3 m	1.78 m×2.33 m	45	15	20	2 m×5 m
山杏小区	山杏	2 m×3 m	1.65 m×2.06 m	48	15	20	2 m×5 m
沙棘小区	沙棘	1 m×1 m	1.29 m×1.4 m	20	15	20	2 m×5 m
柠条小区	柠条	1 m×2 m	1.72 m×1.8 m	55	15	20	2 m×5 m

2.2 数据分析

本文基于研究区已有 84 次降雨数据及 21 次径

流泥沙数据(2014—2019 年),在参考黄土高原区降雨强度的划分标准(24 h)的基础上^[14-16],结合本研究

区的降雨特点,运用系统聚类方法对研究区内的降雨类型进行划分,运用线性回归方法分析降雨特征与产流产沙的关系。

3 结果与分析

3.1 降雨特征

研究区 2014—2019 年共观测降雨 84 场,根据气象学中关于降雨类型的划分(24 h 以内),研究区 6 a 间共有小雨 8 场、中雨 55 场、大雨 17 场、暴雨 5 场、

大暴雨 1 场。均降雨量为 375.97 mm,年际间降雨差异较大,降雨量和降雨次数大,其中 2016 年与 2015 年,降雨次数相差 12 次,降雨量相差达 463.8 mm。此外,研究区内降雨分配不均匀,次降雨间的最大 30 min 雨强也具有较大差异,变异系数均在 40% 以上,特别是 2018 年降雨的 I_{30} 高达 99.58%。经计算研究区 2014—2019 年降雨侵蚀力 R 值分别为 1 156.38, 249.77, 1 464.05, 795.56, 1 504.14, 1 085.81 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,平均值为 1 042.62 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$,详见表 2。

表 2 2014—2019 年降雨特征

年份	降雨量/mm	降雨次数/次	年均 $E/$ ($\text{MJ} \cdot \text{hm}^{-2}$)	年均 $I_{30}/$ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	$R/$ ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)
2014	384.6	18	3.44±1.62	15.91±10.70	1156.38
2015	142.2	8	2.45±0.76	11.1±10.26	249.77
2016	606	20	5.65±7.21	20.27±16.29	1464.05
2017	285.6	11	4.86±3.37	19.07±18.99	795.56
2018	438	12	7.43±6.76	22.63±21.86	1504.14
2019	399.4	15	3.17±2.72	19.12±7.96	1085.81

应用聚类分析法可以将研究区内观测的降雨划分为 4 类,分类后的降雨类型统计特征见表 3。第一类降雨样本数量较小,仅有 2 次,其单次降雨历时超 1 100 min,降雨量在 97.4 mm 左右, I_{30} 平均值为 57.4 mm/h,可以将其归类为长历时暴雨;第 2 类降雨共 29 次,其平均降雨历时为 1 005.59 min,平均降雨量为 22.14 mm, I_{30} 比第一类小,均值为 11.03 mm/h,将其归类为长历时的中到大雨;第 3 类降雨有 28 次,其平均降雨历时为 491.75 min,平均降雨量为 39.09 mm,此类降雨的 I_{30} 较大,平均值为 20.65 mm/h,可以将其归类为短历时暴雨;第 4 类降雨有 25 次,其平均降雨历时为 141.4 min,平均降雨量为 18.23 mm, I_{30} 平均值为 15.13 mm/h,可以将其归类为短历时的小到大雨。

表 3 不同降雨类型的统计特征

降雨类型	降雨量		降雨历时		I_{30}		频数
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	
第一类降雨	97.4	1.20	1152.50	12.5	57.4	17.4	2
第 2 类降雨	22.14	8.79	1005.59	282.65	11.03	8.51	29
第 3 类降雨	39.09	23.10	491.75	107.23	20.65	12.91	28
第 4 类降雨	18.23	12.8	141.40	86.00	15.13	16.79	25

3.2 降雨特征与坡面产流产沙的关系

为了进一步分析降雨条件下各植被类型坡面的产流产沙特征,由于第一类降雨的样本数量较小,也存在部分第 3 类降雨无产流产沙过程、第 4 类降雨有产流产沙过程等特殊数据,不宜分类做统计学分析,因此选取所有降雨及产流产沙数据的降雨量(P)、最大 30 min 雨强(I_{30})和最大 10 min 雨强(I_{10})与各植被类型坡面的产流量、产沙量关系进行回归分析,得到形式

为 $y = ax_1 + bx_2 + cx_3 + d$ 的多元线性方程,式中 y 为产流量或产沙量, x_1, x_2 和 x_3 分别为 P, I_{30} 和 I_{10} , a, b, c 和 d 分别为系数和常数,各回归模型的 R^2 在 0.7 以上。可以看出,各坡面的产流量与产沙量均与降雨量、最大 30 min 雨强和最大 10 min 雨强关系密切,降雨总量的增加和瞬时降雨强度的增加,都会导致坡面的产流和侵蚀量均随之增加,通过次降雨的部分特征参数可以初步估算各植被类型坡面的产流量和产沙量,各方程的相应参数和拟合的决定系数见表 4。

表 4 降雨特征与各植被类型坡面产流产沙关系

植被类型	降雨特征与各植被坡面产流关系				
	常数	a	b	c	R^2
油松林	-0.438	0.066	0.030	0.013	0.771
沙棘林	-0.062	0.065	0.011	-0.008	0.896
山杏林	-0.741	0.068	0.044	0.016	0.960
柠条林	-1.780	0.094	0.083	0.033	0.973
草地	-1.901	0.108	0.116	0.013	0.970
裸地	-2.960	0.161	0.141	0.023	0.979
植被类型	降雨特征与各植被坡面产沙关系				
油松林	-0.069	0.007	-0.004	0.009	0.918
沙棘林	-0.058	0.006	0.003	0.003	0.953
山杏林	-0.239	0.014	-0.010	0.015	0.934
柠条林	-0.127	0.018	0.000	0.006	0.943
草地	-0.462	0.050	0.031	0.009	0.913
裸地	-1.260	0.180	0.087	0.015	0.832

3.3 人工植被坡面产流产沙对雨型的响应

为了进一步分析不同人工植被的抗蚀能力,排除不同时间尺度下土壤含水量和植被长势方面的差异,选择 1 a 内植被茂盛且降雨集中的 7 月 8 月的降雨和产流产沙数据进行分析,其中引发产流产沙过程的

降雨共有 7 场(包括 2 类降雨 3 次,3 类降雨 4 次),而部分降雨(第 4 类)在有植被覆盖的坡面没有产流产沙过程。图 1 为不同植被类型坡面的产流产沙量与次降雨量的关系,单次降雨的产流产沙量以 8 月份的 0 804 号降雨最大,该次降雨为第 3 类降雨,降雨总量为 56.4 mm,裸地产流量高达 8.78 mm,产沙量为 10.45 t/hm²。从降雨类型来看,第 2 类降雨的平均降雨量为 16.87 mm,平均产流量按裸地(3.03 mm)>草地(2.03 mm)>柠条林(1.95 mm)>山杏林(1.39 mm)>油松林(1.16 mm)>沙棘林(0.83

mm)的规律排列,各植被类型平均产沙量与产流量的差异规律一致。第 3 类降雨的平均降雨量为 27.95 mm,平均产流量依次为裸地(4.85 mm)、草地(3.08 mm)、柠条林(2.74 mm)、油松林(2.37 mm)、沙棘林(2.33 mm)及山杏林(2.24 mm)的规律排列,各植被类型平均产沙量与产流量的差异规律一致。综合 7 次降雨的产流产沙量来看,以裸地最高其平均产流量为 4.07 mm,平均产沙量为 4.55 t/hm²,其余各植被类型的平均产流量为 2.09 mm,平均产沙量为 0.51 t/hm²,分别是裸地产流产沙量的 51.35%和 11.21%。

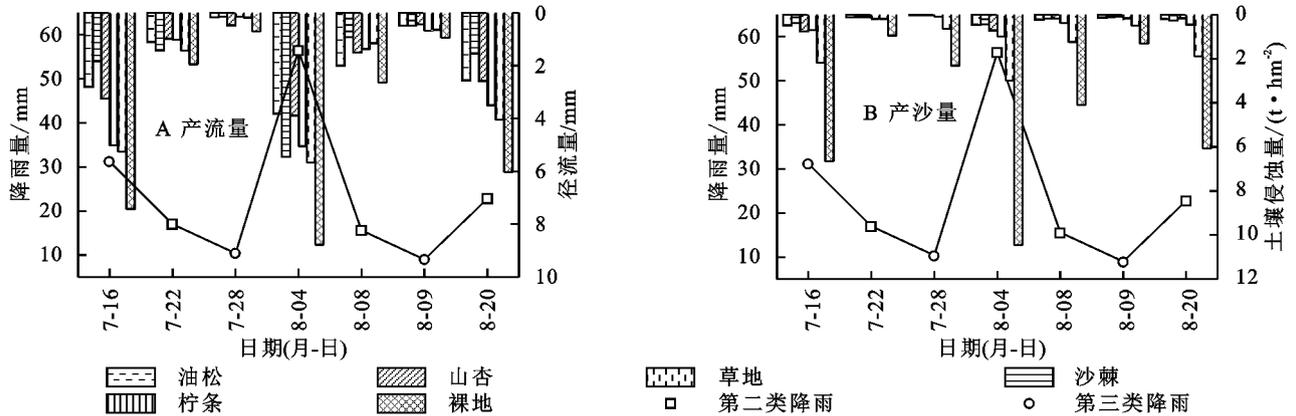


图 1 2019 年不同植被类型的产流产沙量

以裸地为基准,相较裸地径流泥沙量减少的部分与裸地径流泥沙量比值即为减流减沙率,由图 2 可知,从降雨类型来看,第 2 类降雨条件下裸地的平均产流量为 3.03 mm,各植被的平均减流率按草地(44.58%)<柠条林(46.60%)<山杏林(47.07%)<油松林(61.60%)<沙棘林(67.34%)的规律排列,各植被类型平均减沙率与平均减流率的差异规律一致。第 3 类降雨的裸地的平均

产流量为 4.85 mm,平均减流率从小到大依次为草地(37.76%)、柠条林(45.01%)、油松林(45.38%)、山杏林(51.45%)及沙棘林(56.93%)的规律排列,各植被类型平均减沙率与产流率的规律一致。综合来看,以沙棘林的减流率和减沙率最高分别为 61.39%和 94.34%,其余各植被类型的减流减沙能力由强到弱依次为山杏林、油松林、柠条林及草地。

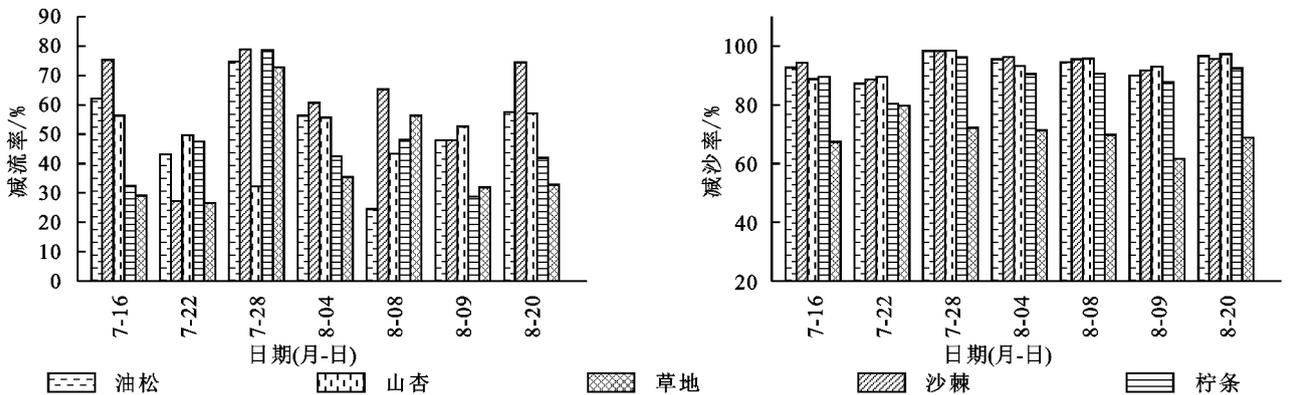


图 2 2019 年不同植被类型的减流减沙能力

4 讨论

大部分专家学者认为,黄土高原地区年内的几场侵蚀性降雨是导致该区剧烈侵蚀的主要动力。裸露砒砂岩区地处黄土高原第一副区地貌单元,区域气候基本一致,年内降雨基本集中在夏秋两季,对降雨特

征及其产流产沙量的分析也证实了,裸露砒砂岩区的土壤侵蚀作用同样也受年内的少数降雨过程决定。在降雨类型的划分上,本研究参考了张汉雄、谢云、王万忠等专家关于黄土高原区侵蚀性降雨分类指标^[14-16],划分结果与前人的研究结果基本相近。但有所不同的是,裸露砒砂岩区相比黄土高原的其他地区

下垫面条件更为复杂,实地调查中发现研究区土层厚度空间异质性较强,基岩裸露地带的土壤性质和入渗过程都与黄土有明显差异,因而其产流产沙过程也有所区别^[17-18],本研究的监测数据中,也存在部分第 4 类降雨条件下产流产沙,第 3 类降雨条件下没有产流产沙的数据,这可能与裸露砒砂岩的风化程度、土壤含水状态以及前期降雨过程等因素有关。基于本研究已有的数据初步可以看出,降雨类型对于裸露砒砂岩区不同植被类型坡面土壤侵蚀过程有一定程度的影响,但是裸露砒砂岩区坡面的水力侵蚀过程除降雨外仍受其他不确定因素影响,该区侵蚀性降雨的划分标准及其对坡面产流产沙过程的影响可以作为今后研究的重点方向之一。

自然界中降雨—产流—产沙过程中,除水流和泥沙的基本运动,还包含着微地形、植被、土壤等多种因素的参与。相关研究表明,植被茎秆、枯枝落叶及根系对于地表径流有明显阻滞作用,从而有效拦截泥沙削减土壤侵蚀强度^[19-20]。本研究证实了这一结论,裸露基岩坡面产流量是有植被覆盖坡面的 1.55 倍以上,而侵蚀产沙量则是有植被覆盖坡面的 3.11 倍以上,说明了营造人工植被可以防治裸露砒砂岩区水土流失问题。此外,本研究结果还显示,降雨类型的差异也会显著影响人工植被的减流减沙能力,人工植被对第 2 类降雨的减流作用最强,对第 3 类降雨的减流作用较差。余新晓等^[21]认为,植被从林冠到根系构成一个完整的侵蚀削减网络,陈丽华等的研究表明林冠层的截留能力与最大 30 min 雨强密切相关^[22]。瞬时强降雨的雨滴带有极大的动能,会大量穿透林冠层,造成枯落物层和土壤层短时间内无法容纳大量径流从而产流。相同降雨类型下,不同人工植被类型的抗蚀能力也存在差异,整体呈沙棘高于其他树种和草地的趋势,这是由于沙棘的生存和萌蘖能力都要远高于其他植被,野外生长的沙棘在没有人为管护的情况下能更快的实现林地的郁闭,本研究的前期研究显示,沙棘林下土壤的养分和物理性状相对其他植被类型更为良好,因此沙棘林的抗蚀能力最强,这一点与王改玲等人的研究结果一致^[23]。

5 结论

(1) 裸露砒砂岩的自然降雨可以分为 4 种类型,第一类降雨为长历时暴雨,第 2 类降雨为长历时的中到大雨,第 3 类降雨为短历时暴雨,第 4 类降雨为短历时的小到中雨。

(2) 降雨类型的不同会显著影响裸露砒砂岩区坡面土壤侵蚀过程,第 3 类降雨是引起该区土壤剧烈侵蚀的主要降雨类型,其次为第 4 类降雨中带有有一定暴雨性质的降雨过程,第 2 类降雨引起的土壤侵蚀作用相对较弱。

(3) 人工植被抗蚀能力对不同降雨类型的响应不同,人工植被能够有效减弱第 2 类降雨造成的侵蚀作用,但是对第 3 类降雨的抗蚀作用较弱。营造人工植被可以有效防治裸露砒砂岩区坡面的水土流失问题,现有的人工植被类型中以沙棘林的抗蚀能力最强。

参考文献:

- [1] 张攀,姚文艺,刘国彬,等.土壤复合侵蚀研究进展与展望[J].农业工程学报,2019,35(24):154-161.
- [2] 殷水清,薛筱婵,岳天雨,等.中国降雨侵蚀力的时空分布及重现期研究[J].农业工程学报,2019,35(9):105-113.
- [3] Mark A N, Yin S Q, Pasquale B, et al. Rainfall erosivity: A historical review[J]. Catena, 2017, 157: 357-362.
- [4] Alavinia M, Saleh F N, Asadi H, et al. Effects of rainfall patterns on runoff and rainfall-induced erosion[J]. International Journal of Sediment Research, 2019, 34(3): 270-278.
- [5] Dakhllalla A O, Parajuli P B. Evaluation of the best management practices at the watershed scale to attenuate peak streamflow under climate change scenarios[J]. Water Resources Management, 2016, 30(3): 963-982.
- [6] 林庆明,丁文峰,张长伟,等.模拟降雨条件下红壤坡面侵蚀产沙水动力学特征[J].水土保持通报,2019,39(2):16-21.
- [7] 陈戎欣,吕锡芝,倪用鑫,等.人工降雨下草被对黄土丘陵沟壑区坡面径流的调控及临界阈值[J].生态环境学报,2020,29(1):122-128.
- [8] 刘晓燕,李晓宇,高云飞,等.黄土丘陵沟壑区典型流域产沙的降雨阈值变化[J].水利学报,2019,50(10):1177-1188.
- [9] 沈海鸣,刘健,王宇,等.降雨强度和坡度对黑土区土质道路路面侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):123-126.
- [10] Emeh C, Igwe O. Variations in soils derived from an erodible sandstone formation and factors controlling their susceptibility to erosion and landslide[J]. Journal of the Geological Society of India, 2017, 90(3): 362-370.
- [11] Bruthans J, Soukup J, Vaculikova J, et al. Sandstone landforms shaped by negative feedback between stress and erosion[J]. Nature Geoscience, 2014, 7(8): 597-601.
- [12] Vecchio J D, Dibiase R A, Denn A R, et al. Record of coupled hillslope and channel response to Pleistocene erosion and deposition in a sandstone headwater valley, central Pennsylvania[J]. Geological Society of America Bulletin, 2018, 130(11/12): 1903-1917.

- trient status of mycorrhizal roots of Norway spruce (*Picea abies* L Karst.) [J]. *Plant and Soil*, 1998, 199 (1): 29-40.
- [20] 王见月, 刘庆花, 李俊良, 等. 胶东果园土壤酸度特征及酸化原因分析[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(16): 164-169.
- [21] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 171-178.
- [22] 崔鹏. 我国泥石流防治进展[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(5): 7-13, 31.
- [23] 余杭, 孙凡, 李松阳, 等. 不同区段金沙江下游山地失稳性坡面土壤有机碳含量特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(5): 1192-1199.
- [24] 李强. 金沙江干热河谷生态环境特征与植被恢复关键技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- [25] 张广帅, 邓浩俊, 杜锟, 等. 泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征: 以云南省小江流域为例[J]. *生态学报*, 2016, 36(3): 675-687.
- [26] 郭晓军, 崔鹏, 朱兴华. 泥石流多发区蒋家沟流域的下渗与产流特点[J]. *山地学报*, 2012, 30(5): 585-591.
- [27] 吴建召, 孙凡, 崔羽, 等. 不同气候区失稳性坡面植被生物量与土壤密度的关系: 以云南省昆明市东川区蒋家沟流域为例[J]. *北京林业大学学报*, 2020, 42(3): 24-35.
- [28] 宋永昌. 植被生态学[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2001.
- [29] McRoberts R E, Tomppo E O, Czaplewski R L. Sampling designs for national forest assessments[R]. Italy: Rome, Knowledge Reference for National Forest Assessments, 2015.
- [30] 鲍士旦. 土壤酸化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 11-13.
- [31] 张敏, 谢运球, 冯英梅, 等. 浸提用水对测定土壤 pH 值的影响[J]. *河南农业科学*, 2008, 37(6): 58-60.
- [32] 黄至颖, 刘鸿雁, 冉晓追, 等. 贵州省土壤 pH 时空变化趋势分析[J]. *山地农业生物学报*, 2020, 39(4): 21-29.
- [33] 熊佰炼, 张进忠, 彭韬, 等. 喀斯特红壤盐基离子及硅铝铁随径流流失研究[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(3): 68-74.
- [34] Kutzbach J, Bonan G, Foley J, et al. Vegetation and soil feedbacks on the response of the African monsoon to orbital forcing in the early to middle Holocene[J]. *Nature*, 1996, 384(6610): 623-626.
- [35] 赵旭, 蔡思源, 邢光熹, 等. 热带亚热带酸性土壤硝化作用与氮淋溶特征[J]. *土壤*, 2020, 52(1): 1-9.
- [36] 张驭航, 李玲, 王秀丽, 等. 河南省土壤 pH 值时空变化特征分析[J]. *土壤通报*, 2019, 50(5): 1091-1100.
- [37] 张忠华, 胡刚. 南亚热带次生林土壤 pH 值与含水量的空间异质性[J]. *生态科学*, 2014, 33(1): 148-153.
- [38] 马波, 吴发启, 李占斌, 等. 作物与坡度交互作用对坡面径流侵蚀产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3): 33-38.
- [39] 张健瑜. 龙川江流域土壤腐植酸流失影响因子特征分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- [40] Yang Y H, Li P, He H G, et al. Long - term changes in soil pH across major forest ecosystems in China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(3): 933-940.
- [41] 高海峰, 白军红, 王庆改, 等. 霍林河下游典型洪泛区湿地土壤 pH 值和土壤含水量分布特征[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(1): 268-271.
- [42] 朱小琴, 孙维侠, 黄标, 等. 长江三角洲城乡交错区农业土壤 pH 特征及影响因素探讨: 以江苏省无锡市为例[J]. *土壤学报*, 2009, 46(4): 594-602.

(上接第 104 页)

- [13] 王愿昌, 吴永红, 寇权, 等. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J]. *中国水土保持科学*, 2007, 5(1): 14-18.
- [14] 张汉雄. 黄土高原的暴雨特性及其分布规律[J]. *地理学报*, 1983, 83(4): 416-425.
- [15] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(4): 6-11.
- [16] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. *水土保持通报*, 1996, 16(5): 1-20.
- [17] 杨振奇, 秦富仓, 李旻宇, 等. 砒砂岩区不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(4): 733-739.
- [18] 杨振奇, 秦富仓, 李龙, 等. 砒砂岩区小流域土壤有机质空间分布特征及其影响因素[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(17): 154-161.
- [19] 高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 等. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(1): 12-22.
- [20] 于国强, 李占斌, 李鹏, 等. 不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J]. *水科学进展*, 2010, 21(5): 593-599.
- [21] 余新晓, 张晓明, 武思宏, 等. 黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J]. *山地学报*, 2006, 24(1): 19-26.
- [22] 陈丽华, 张艺, 余新晓, 等. 北京山区典型森林植被林冠截留特征及模拟[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2013, 21(3): 423-431.
- [23] 王改玲, 王青杵, 石生新. 晋北黄土区降雨特征及其对坡地土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 1-5.