

不同灌草格局对砒砂岩区土壤剥蚀特征的影响

陈 鹏¹, 张铁钢², 董 智¹, 郭建英², 李红丽¹, 仇苏倩¹

(1. 山东农业大学 林学院, 泰山森林生态系统定位研究站, 山东 泰安 271018;

2. 水利部 牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020)

摘 要: 探究水流驱动下土壤剥蚀特征对阐明土壤侵蚀机制和规避水土流失风险具有重要意义。通过野外放水冲刷试验, 以砒砂岩区灌丛分别位于坡下(SL)、坡中(SM)、坡上(SU)的灌草坡面和草地坡面(GL)为对象, 裸坡(BL)作为对照, 探讨了该区坡面土壤剥蚀和水动力参数对不同灌草格局的响应特征及其相互关系, 结果表明: (1) 不同灌草格局可以通过削弱径流过程中的水流动能来降低坡面土壤的剥蚀程度, 砒砂岩区坡面土壤剥蚀率整体介于 $0.055 \sim 0.469 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 其中 SL 格局土壤剥蚀率最低[均值 $0.098 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$], 是降低土壤剥蚀程度的最佳植被布设措施。(2) 不同格局土壤剥蚀率、水流功率及单位水流功率整体呈现出 $\text{BL} > \text{GL} > \text{SU} > \text{SM} > \text{SL}$ 的趋势, 水动力参数中水流功率与土壤剥蚀率的拟合效果最优, 可以较好地描述该区坡面土壤剥蚀特征。研究可为砒砂岩区土壤侵蚀预测模型的构建提供科学依据。

关键词: 灌草格局; 土壤剥蚀; 水动力参数; 砒砂岩区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)03-0013-06

Effect of Different Shrub and Grass Patterns on Soil Detachment Characteristics in Pisha Sandstone Area

CHEN Peng¹, ZHANG Tiegang², DONG Zhi¹, GUO Jianying², LI Hongli¹, QIU Suqian¹

(1. Taishan Forestry Ecosystem Research Station, College of Forestry, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; 2. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, China)

Abstract: Exploring the characteristics of soil detachment driven by flow is of significance to elucidate the mechanism of soil erosion and to avoid the risk of soil loss. In this study, the shrubs on the lower (SL), middle (SM) and upper (SU) slope and grass land slope (GL) were taken as research objects, and bare land slope (BL) was taken as control. The response characteristics of different vegetation patterns to soil detachment and the relationship between soil detachment rate and sediment separation characteristics were studied by field erosion test in Pisha sandstone area. The results show that: (1) different shrub—grass patterns could reduce soil detachment degree of slope by weakening the flow kinetic energy in the runoff process; under the three flow scouring degree (15, 20, 30 L/min), the soil detachment rates of the Pisha sandstone area ranged from 0.055 to $0.469 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, among which the soil detachment rate of pattern SL was the lowest [$0.098 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$], which was the best shrub—grass arrangement measure to reduce the erosion degree of soil; (2) soil detachment rate, flow stream power, flow unit stream power in different shrub—grass patterns decreased in the order: Pattern $\text{BL} > \text{Pattern GL} > \text{Pattern SU} > \text{Pattern SM} > \text{Pattern S}$; the flow stream power was the best hydrodynamic parameter to simulate soil detachment rate, and it could better simulate the slope soil detachment characteristics of slope in this area. This study can provide data support for the analysis of soil detachment characteristics and mechanisms in the future, and provide scientific basis for reasonably constructing slope soil erosion production model in the Pisha sandstone area.

Keywords: soil detachment rate; vegetation patterns; hydrodynamic parameters; Pisha sandstone area

收稿日期: 2020-05-21

修回日期: 2020-07-21

资助项目: 国家自然科学基金(51879155, 31870708, 41701327); 内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2017BS0405); 内蒙古自治区科技重大专项课题(2019ZD003)

第一作者: 陈鹏(1995—), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事水土流失过程与机制研究。E-mail: chenpeng_sdau@163.com

通信作者: 李红丽(1972—), 女, 内蒙古赤峰人, 教授, 博士, 主要从事荒漠化防治与植物修复研究。E-mail: lhl@sdau.edu.cn

砒砂岩区土壤侵蚀严重,水土流失现象剧烈,砒砂岩成岩程度较低,且遇水时极易膨胀,土壤颗粒组分中细颗粒含量较为匮乏,砂粒间胶结程度差,细小颗粒对大颗粒孔隙的阻塞、填充作用使得土壤孔隙结构遭到破坏,渗透性能严重降低^[1]。这些特性导致砒砂岩分布区成为黄土高原治理难度最大、侵蚀强度最为剧烈的区域。合同沟小流域属于典型的砒砂岩强烈侵蚀区,生态环境较为恶劣,坡面土壤流失现象十分严重,是达拉特旗乃至鄂尔多斯多沙粗沙的代表区域^[1]。虽然以往研究表明^[2],植被措施可以显著提升土壤抗蚀性,降低土壤的侵蚀程度,但对于水分承载力较弱的干旱、半干旱地区而言,植被的控流阻沙功能受到了严重挑战^[3]。因此探究有限水资源支撑下的高效植被布设措施便显得尤为迫切。明晰不同条件下土壤侵蚀特征是研究土壤抗蚀性能、规避水土流失风险的重要前提。其中土壤剥蚀率是探究土壤侵蚀特征重要指标^[4],研究径流过程中土壤的剥蚀特征对表述水力侵蚀作用下坡面侵蚀过程以及水土流失评价具有重要意义。

流速、流量、剪切力和水流功率等水力参数是坡面土壤侵蚀的驱动力,对土壤剥离和泥沙输移过程影响显著^[5-7],其中水流功率、单位水流功率和水流剪切力作为探讨径流能量流和动力流的重要参数,在坡面土壤侵蚀过程和水蚀动力机理的研究中应用最为广泛^[6-9]。揭示土壤剥蚀率与水力参数特征之间的关系对探究土壤侵蚀机制、合理改进土壤侵蚀预报模型具有重要意义^[9]。但目前关于坡面水蚀的研究中,其侧重点较多的集中于坡度、雨强及冲刷流量等方面^[2,9-10],而利用水力参数,解析地表水文过程对不同植被格局下土壤侵蚀特征的研究则略显薄弱^[11-12]。

基于此,本文选择砒砂岩区最为常见的灌草坡面为对象,选取无灌丛草地(GL)、灌丛位于坡上部(SU)、坡

中部(SM)和坡下部(SL)4 种灌草格局,以裸坡(BL)为对照,分析不同灌草格局下土壤剥蚀率和水动力参数的特征及其相互关系,以期揭示砒砂岩区不同灌草格局下土壤侵蚀特征的差异性及其作用机理,为合理完善水蚀预测模型提供科学理论与技术依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点位于黄河一级支流罕台川的合同沟小流域,行政区划属于内蒙古达拉特旗,地理位置为 39°59′58″—40°13′18″N,109°53′36″—110°06′53″E,受温带半干旱大陆性气候的影响,该区多年平均降雨介于 200~400 mm,71.2% 的降水集中于夏季(7—9 月),降水过程表现为“短历时、大雨强”的特征。监测最大降水量达 223 mm/h,且土壤类型以栗钙土为主,质地为砂土,坡面坡度介于 5°~15°。区域内主要有柠条(*Caragana Korshinskii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、小叶杨(*Populus simonii*)等造林树种,以及本氏针茅(*Stipa bungeana*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、羊草(*Leymus chinensis*)等建群植物,其中坡面以柠条种植面积最大。

1.2 试验装置

根据达拉特旗 1960—2016 年气象资料记录的实际降雨情况,以及该区“短历时,大雨强”的降水特征,选择 1.5、2.0、3.0 mm/min 雨强,根据径流小区面积(5 m×2 m)换算后确定试验冲刷流量为 15、20、30 L/min。以该区平均坡度 8°作为本研究的试验坡度。根据柠条灌丛在坡面分布的差异性,分别设置无灌丛(即单一草地坡面, GL)、灌丛位于坡上部(SU)、坡中部(SM)、坡下部(SL)和裸坡(BL)共 5 种试验径流小区,小区建造后进行围封,经 3 个月自然沉降后进行试验。各小区基本概况见表 1。

表 1 径流小区基本概况

小区 类型	土壤 pH	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	株高/ m	灌幅/ m×m	草被 盖度/%	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%
BL	8.04	1.40	—	—	—	0.90	17.74	81.38
GL	7.95	1.39	0.21	—	33	1.27	23.18	75.55
SU	7.78	1.38	1.22	1.2×1.2	32	2.08	27.80	70.11
SM	7.88	1.36	1.25	1.2×1.1	31	2.12	27.95	69.93
SL	7.47	1.38	1.23	1.1×1.3	32	1.92	27.20	70.88

注:各小区草本植被组成基本一致,主要草本植被种类为本氏针茅(*Stipa bungeana* Linn.)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica* Schindl.),表中物理性质为 0—10 cm 土层特征。

本研究中径流小区的规格为 5 m×2 m(按水平投影计),试验之前使用流量计对流量进行率定,由水泵将自来水泵入供水稳流装置中,消除水流扰动,小区与溢流槽的交界处放置一个 2 m×0.2 m 的钢制平

板,以保证水流在较低的动能水平下均匀而平稳的溢入小区。预试验发现产流经过 60 min 径流基本趋于稳定,因此设定每场试验时间为 60 min,径流流出小区时开始试验计时。试验前期每分钟收集一次径流

样品,10 min 后每 5 min 收集一次径流样品,同步测定流速、水宽和水深,其中流速采用染料示踪法测定(本研究中染色剂为高锰酸钾),染料前缘速度乘以修正系数 0.8,得到平均流速^[4],水宽和水深采用精度为 1 mm 的直尺测量,将泥沙样品风干去除根系等杂质后测定重量,用以土壤剥蚀率的计算。不同处理间进行 3 次重复,试验数据取其平均值,共计 45 场。每次试验之前测定各径流小区的土壤含水量,消除土壤水分条件的差异,保证试验结果的有效性。

1.3 数据分析

1.3.1 土壤剥蚀率计算 土壤剥蚀率(D_r)采用下式计算^[13]:

$$D_r = \frac{M}{bLT} \quad (1)$$

式中: D_r 为土壤剥蚀率 $[\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$; M 为径流过程中的产沙量(g); b 为径流平均水宽(m); L 为径流长度(m),本研究中 L 为 5 m; T 为径流时间(s)。

1.3.2 水动力参数计算 水流功率(ω)、单位水流功率(P)和水流剪切力(τ)采用下式计算^[13]:

$$\omega = \tau V \quad (2)$$

$$P = VJ \quad (3)$$

$$\tau = \rho ghJ \quad (4)$$

式中: ω 为水流功率(W/m^2); P 为单位水流功率(m/s); τ 为水流剪切力(Pa); V 为径流平均流速(m/s); J 为水力坡度; ρ 为水的密度(kg/m^3); g 为重力加速度(g/m); h 为径流深度(m),本研究使用坡面坡度的正弦值近似代替 J ^[13]。

本研究使用 Excel 2016 进行试验数据的计算处理,SPSS 24.0 对进行各指标的统计分析。采用 Origin 进行图件绘制。

2 结果与分析

2.1 不同灌草格局下土壤剥蚀特征

本试验条件下径流平均宽度整体介于 0.995~0.424 m(图 1),并呈现出随冲刷流量增大而逐渐增大的趋势。灌草格局对径流宽度具有一定影响,但不同冲刷流量下,随灌草格局的改变径流宽度的大小并未呈现出一致的变化趋势。

灌草格局对土壤剥蚀特征具有显著影响($p < 0.05$)。不同格局土壤剥蚀率整体介于 0.055~0.469 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (图 2),并且随冲刷流量的提高,土壤剥蚀率均表现出增大的趋势。3 种冲刷流量下土壤剥蚀率均以 BL 格局最大,其中 BL 格局土壤剥蚀率介于 0.277~0.469 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,均值为 0.386 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。其他格局土壤剥蚀率的范围介于 0.055~0.359

$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,土壤剥蚀率均值仅为 BL 格局的 44.63%,表明不同灌草格局均能够显著降低土壤剥蚀率。不同灌草格局间土壤剥蚀特征具有一定差异,GL 格局土壤剥蚀率显著高于 SU,SM 和 SL 格局,3 种冲刷流量下,不同灌草格局表现出一致的趋势,土壤剥蚀率的大小关系均为 $\text{GL} > \text{SU} > \text{SM} > \text{SL}$,其中 GL 格局土壤剥蚀率均值为分别是 SU,SM,SL 格局的 1.55,1.77,2.73 倍。SL 土壤剥蚀率均值仅为 0.098 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,是降低土壤剥蚀率的最佳灌草布设措施。

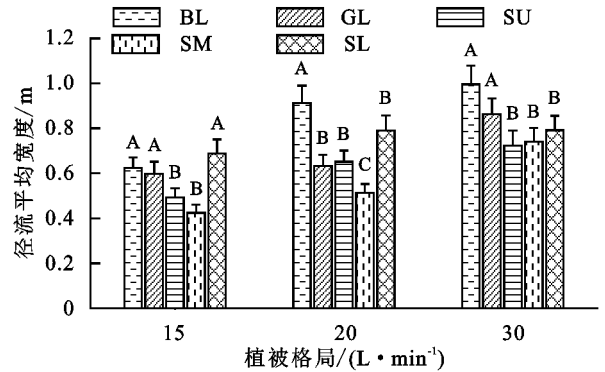


图 1 不同灌草格局下径流平均宽度特征

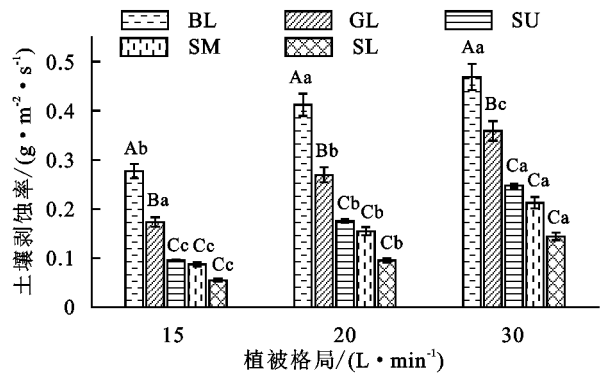


图 2 不同灌草格局下土壤剥蚀特征

2.2 不同灌草格局下水动力参数特征

不同灌草格局条件下水流剪切力介于 15.458~22.750 Pa,与 BL 格局相比(21.503 Pa),各灌草格局均能显著降低水流剪切力,其中 SL 格局水流剪切力最低,仅为 BL 格局的 78.99%,但随植被格局的改变水流剪切力的变化趋势并不明显。不同格局下水流功率介于 1.727~5.830 W/m^2 ,随冲刷流量的增大,不同格局间的水流功率显著增加。15,20,30 L/min 冲刷流量时,BL 格局水流功率分别为 3.967,4.483,5.830 W/m^2 ,是其余灌草格局的 1.80,1.56,1.71 倍,不同灌草格局可以发现水流功率呈现 $\text{BL} > \text{GL} > \text{SU} > \text{SM} > \text{SL}$ 的分布趋势。单位水流功率介于 0.014~0.055 m/s ,随冲刷流量的提高,单位水流功率呈增大趋势。BL 格局单位水流功率均值为 0.047 m/s ,是其余灌草格局的 2.29 倍,不同灌草格局单位水流功率分布特征与水流功率相同(图 3)。

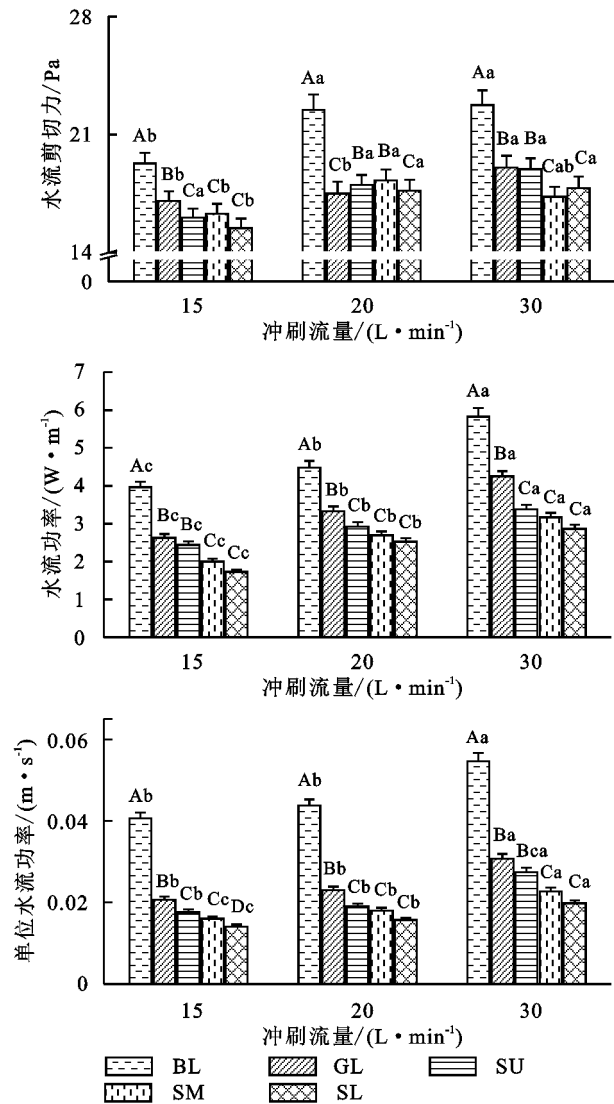


图 3 不同灌草格局下水动力参数特征

2.3 土壤剥蚀率与水动力学参数特征的关系

水流剪切力、水流功率和单位水流功率与土壤剥蚀率均呈正相关关系,其中水流功率与土壤剥蚀率的线性函数 $D_r=0.1275\omega-0.1881$ 及幂函数 $D_r=0.0167\omega^{2.176}$ 的决定系数均达到了 0.92 以上,即两者均可以对该区土壤剥蚀特征进行较好的预测,其次则是单位水流功率的线性函数以及水流剪切力的幂函数($R^2=0.912,0.661$)。由回归分析结果可知,水流功率是预测土壤剥蚀率的最

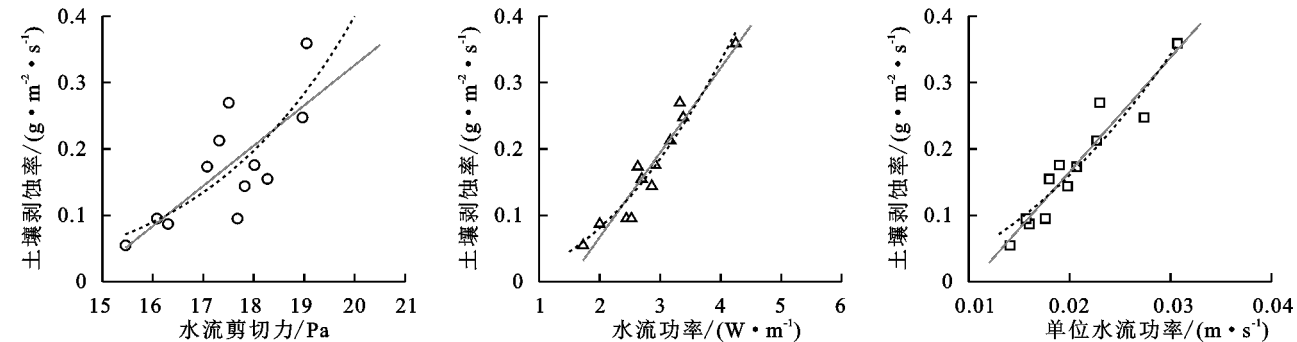


图 4 土壤剥蚀率与水动力参数的关系

佳水动力参数,水流剪切力的 R^2 值分别只有 0.572, 0.661,对土壤剥蚀率的描述效果不佳(图 4)。

通径分析是研究自变量对因变量的直接及间接重要性多元统计技术^[13],可以为统计决策提供可靠依据。通径分析结果表明,水流功率和剪切力对土壤剥蚀率的直接、间接通径系数均为正数,贡献度分别为 86.85%, 8.33%,单位水流功率对土壤剥蚀的贡献度最低(4.81%),水流剪切力的间接通径系数达到了 0.817。说明水流功率和水流剪切力均对土壤剥蚀率起增进作用,水流功率是土壤剥蚀率的主要影响因素,水流剪切力的间接作用在土壤剥蚀过程中起重要影响作用(表 2)。

3 讨论

3.1 灌草格局对土壤剥蚀特征的影响

雨滴或水流驱动下引起的土壤剥离过程是外界侵蚀营力与土壤抗蚀能力间相互作用的外在表现,当侵蚀应力大于土壤的抗蚀能力时就会产生土壤侵蚀^[14]。以往研究表明,植被影响是坡面土壤剥蚀特征的重要因素之一^[8],Zhang 等^[8]研究认为灌丛及草本植被均能有效的降低径流过程中坡面土壤的剥蚀程度,坡耕地的土壤剥蚀率是不同植被条件下的 6.9~47.8 倍。这在本研究中也得到了证实。本研究发现植被类型的差异也是影响土壤剥蚀特征的重要因素,其中 SU,SM,SL 格局土壤剥蚀率显著低于 GL 格局,这是由于较草地而言灌丛的存在增大了坡面的根系密度,根系的缠绕及其分泌物对土壤颗粒的胶结作用,可以固持土壤、提高表土及附近土壤的稳定性^[15];根系提升土壤有机质的作用,可以促进水稳性团聚体的形成^[6],提升表土粗糙度,降低径流对土壤的剥蚀;其次,在试验过程中观测发现,在研究区风水复合的特殊的侵蚀环境下,灌丛所在区域形成了凸起的丘体^[16],径流通过灌丛所在位置时均出现绕过丘体向坡下汇集的现象。丘体对地表径流的拦蓄作用可以在一定程度上降低径流的流态,削弱径流对坡面的剥蚀^[17]。从而在对土壤抗蚀性能的提升效果方面灌草坡面优于草地。

表 2 不同灌草格局下水动力参数与土壤剥蚀率的通径分析

参数	直接通径系数	间接通径系数			合计	相关系数	决定系数	贡献率/%
		ω	P	τ				
ω	0.938		−0.050	0.083	0.033	0.971 **	0.942	86.85
P	−0.052	0.893		0.082	0.975	0.923 **	−0.099	4.81
τ	0.090	0.865	−0.048		0.817	0.907 **	0.155	8.33

注:表中 * * 表示极显著相关水平($p<0.01$)。

进一步分析发现,3 种冲刷流量下土壤剥蚀率均呈现 SU 格局>SM 格局>SL 格局的趋势。对此 Zhang 等^[2]认为,径流对坡面的侵蚀主要集中于上坡下部到下坡下部的广泛区域,径流过程中坡面侵蚀主要发生在中下部位置,因此相较于灌丛位于坡上和坡中部而言,灌丛位于坡面下部时更有利于坡面重点侵蚀区域的保护;并且在干旱半干旱区,由于气候的原因有机质分解速率较慢,坡面存在一定量的凋落物组织,并在径流作用下形成一种类似“坝体”的结构^[18],此类屏障的形成对径流路径及运动状态会产生显著影响。本研究中灌丛所在位置的凋落物明显高于坡面其他部位,未分解的茎秆与小的凋落物组织及植物根茎部位结合形成足以拦截径流的“自然屏障”,极大的降低了径流速率,消耗水流能量,削弱了灌丛附近土壤剥蚀的强度^[14]。因而在多种因素的共同作用下,土壤剥蚀率表现 SU 格局>SM 格局>SL 格局的分布特征。

3.2 水动力参数对土壤剥蚀率影响

水流功率、单位水流功率和水流剪切力是土壤侵蚀模型中描述土壤剥离过程常用的水动力参数^[8,19-20]。运用水动力参数对不同灌草格局下土壤剥蚀率进行量化,有利于建立适用于本研究区土壤剥蚀率的预测模型。Wang 等^[7]研究发现,土壤剥蚀率与水流功率、单位水流功率和水流剪切力均呈正相关关系,这与本研究结果相符,不同灌草格局下水流功率和单位水流功率均表现为 SL 格局<SM 格局<SU 格局<GL 格局<BL 格局。对于径流小区坡度相同的本研究而言,水流深度和水流速度是计算不同灌草格局坡面径流过程的水动力特征的仅有的变量。植被对流速的径流过程中水深、流速的影响会最终反馈于径流的水动力参数中(水流剪切力、水流功率和单位水流功率)。此外,该因素也是造成不同植被格局间水动力参数特征差异的重要原因。

土壤剥蚀率与水动力参数的变化趋势基本相同,说明不同植被措施均能够通过降低水流动能来削弱坡面的剥蚀程度^[7],但在土壤剥蚀特征的预测研究中,最佳水动力参数选择仍具有一定争论,Zhang 等^[21]认为水流功率是估算土壤剥蚀率的最有效水动

力参数,而一些研究^[19-20]却发现,水流剪切力、单位水流功率是土壤剥蚀率的最佳预测参数,对此 Wang 等^[12]认为,研究条件的变化可能会导致最适宜水力参数的选取出现差异。针对本研究而言,简化式中水流剪切力是水深和坡度的函数^[13],本研究试验地点为野外自然坡面,与室内试验相比,自然坡面在多种因素干扰下平整度较差,径流填洼的现象会使水深对灌草格局及冲刷流量的反馈降低,导致不同灌草格局下水流剪切力与土壤剥蚀率拟合精度较差;此外本研究条件下,不同格局冲蚀细沟的发育也是造成差异的重要原因,Stefanovic 等^[22]研究认为侵蚀泥沙的来源并非全是由水流剪切作用对坡面土壤的剥离作用产生的,细沟发育过程中的沟岸坍塌、沟头溯源等活动作为细沟发育的重要组成部分^[22],也是泥沙的重要贡献来源^[23],而水流剪切力的剪切效应主要作用于细沟底部,这在一定程度上导致了水流剪切力对土壤剥蚀现象响应的敏感性降低;对于水流功率、单位径流功率等能量指标而言,沟岸崩塌、沟头溯源等现象可以影响水流剥离搬运的能量分配,因而对土壤剥蚀特征的响应更为灵敏。但对水动力参数和土壤剥蚀率进行通径分析后发现,水流剪切力的间接通径系数达到了 0.817,且对土壤剥蚀率贡献率仅次于水流功率,说明在研究坡面径流对土壤的侵蚀作用时,水流剪切力对土壤剥蚀率的间接作用也不应被忽视。

4 结 论

(1) 植被可以通过降低水流能量来削弱径流对坡面的剥蚀程度,3 种冲刷流量下,砒砂岩区坡面土壤剥蚀率介于 0.055~0.469 g/(m²·s),并且呈现随流量的增大逐渐上升的趋势。其中 SL 格局是降低坡面土壤剥蚀率的最佳植被布设措施。

(2) 土壤剥蚀率、水动力参数均值整体呈 BL 格局>GL 格局>SU 格局>SM 格局>SL 格局的趋势。水流功率是描述土壤剥蚀率的最佳水动力参数,水流剪切力对土壤剥蚀率的间接作用也不应被忽视。

参考文献:

[1] 仇苏倩.砒砂岩区不同林龄油松林林下生物多样性及土壤生态特征[D].山东泰安:山东农业大学,2019.

- [2] Zhang X, Li P, Li Z B, et al. Effects of precipitation and different distributions of grass strips on runoff and sediment in the loess convex hillslope[J]. *Catena*, 2018, 162:130-140.
- [3] Fu B J, Wang J, Chen L D, et al. The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2003, 54(1):197-213.
- [4] Mirzaee S, Ghorbani-Dashtaki S. Deriving and evaluating hydraulics and detachment models of rill erosion for some calcareous soils[J]. *Catena*, 2018, 164:107-115.
- [5] Li T Y, Li S Y, Liang C, et al. Erosion vulnerability of sandy clay loam soil in Southwest China: Modeling soil detachment capacity by flume simulation[J]. *Catena*, 2019, 178:90-99.
- [6] Wang B, Zhang G H, Yang Y F, et al. The effects of varied soil properties induced by natural grassland succession on the process of soil detachment[J]. *Catena*, 2018, 166:192-199.
- [7] Wang B, Zhang G H, Yang Y H, et al. Response of soil detachment capacity to plant root and soil properties in typical grasslands on the Loess Plateau[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 266:68-75.
- [8] Zhang B J, Zhang G H, Yang H Y, et al. Soil resistance to flowing water erosion of seven typical plant communities on steep gully slopes on the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2019, 173:375-383.
- [9] Liu L, Li Z W, Chang X F, et al. Relationships of the hydraulic flow characteristics with the transport of soil organic carbon and sediment loss in the Loess Plateau[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175:291-301.
- [10] Sun J, Huang C H, Han G, et al. Effects of cover on soil particle and associated soil nutrient redistribution on slopes under rainfall simulation[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19:729-740.
- [11] Mayorág, Bautista S, Bellot J. Scale-dependent variation in runoff and sediment yield in a semiarid mediterranean catchment[J]. *Hydrol*, 2011, 397(1/2):128-135.
- [12] 陈鹏, 张铁钢, 董智, 等. 水流驱动下不同灌草格局对泥沙分选特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2):93-100, 221.
- [13] Wang Y, Luo J, Zheng Z Ch, et al. Assessing the contribution of the sediment content and hydraulics parameters to the soil detachment rate using a flume scouring experiment[J]. *Catena*, 2019, 176:315-323.
- [14] Wang B, Zhang G H, Shi Y Y, et al. Soil detachment by overland flow under different vegetation restoration models in the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2014, 116:51-59.
- [15] Knapen A, Poesen J, De Baets S. Seasonal variations in soil erosion resistance during concentrated flow for a loess-derived soil under two contrasting tillage practices[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 94(2):425-440.
- [16] Ravi S, Breshears D D, Huxman T E, et al. Land degradation in drylands: Interactions among hydrologic-aeolian erosion and vegetation dynamics[J]. *Geomorphology*, 2010, 116(3/4):236-245.
- [17] Lu R, Liu Y F, Chao J, et al. Effects of mosaic-pattern shrub patches on runoff and sediment yield in a wind-water erosion crisscross region[J]. *Catena*, 2019, 174:199-205.
- [18] Geddes N, Dunkerley D. The influence of organic litter on the erosive effects of raindrops and of gravity drops released from desert shrubs[J]. *Catena*, 1999, 36:303-313.
- [19] McIsaac G F, Mitchell J K, Hummel J W, et al. An evaluation of unit stream power theory for estimating soil detachment and sediment discharge from tilled soils[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1992, 35(2):535-544.
- [20] Giménez R, Govers G. Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(5):1475-1483.
- [21] Zhang L T, Gao Z L, Yang S W, et al. Dynamic processes of soil erosion by runoff on engineered landforms derived from expressway construction: a case study of typical steep spoil heap[J]. *Catena*, 2015, 128:108-121.
- [22] Stefanovic J R, Bryan R B. Flow energy and channel adjustments in rills developed in loamy sand and sandy loam soils[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34:133-144.
- [23] Wirtz A, Seeger M, Ries J B. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes[J]. *Catena*, 2012, 91:21-34.