

水力侵蚀下砒砂岩坡面植被格局对土壤颗粒空间分布的影响

张尚轩¹, 李龙^{1,2}, 朱志卓¹, 张鹏¹, 郭洋洋³, 姚立强⁴

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2.国家林业与草原局 荒漠生态系统保护与修复重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010000; 3.克什克腾旗水利局, 内蒙古 赤峰 025350; 4.内蒙古自治区水利事业发展中心, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: [目的] 研究内蒙古鄂尔多斯市典型砒砂岩地区不同植被格局下表层土壤颗粒组成空间分布特征, 探明水力侵蚀下土壤颗粒分选搬运机制, 为该区域生态环境恢复提供理论基础。[方法] 基于野外径流小区的原位监测试验, 采用三维激光扫描与地统计学相结合的方法分析自然降雨条件下, 砒砂岩坡面不同植被格局对表层土壤颗粒空间分布的影响。[结果] ①均匀分布的植被格局可有效抑制坡面的产流产沙。与裸露坡面相比其侵蚀区面积、平均径流量、平均泥沙量分别降低了5.35%, 63.16%, 76.47%。②均匀分布的植被格局下土壤黏粒、粉粒的含量分别较雨前增加了1.3%, 2.2%, 砂粒含量减少了3.2%; 随机分布、聚集分布的植被格局下砂粒的含量分别增加了5.8%, 15.3%, 使土壤质地粗化。③不同的植被格局是引起土壤颗粒空间变异的主要因素。与降雨前相比, 均匀分布、随机分布的植被格局使粉粒、砂粒的块金系数变高, 空间自相关性降低; 聚集分布的植被格局使黏粒、粉粒的块金系数由95.06%, 83.89%降为0.07%, 0.06%, 表现出强烈的空间自相关性。[结论] 均匀分布的植被格局对砒砂岩坡面有着良好的水土保持作用, 可显著减少坡面产流产沙过程并抑制土壤粗化。

关键词: 水力侵蚀; 植被格局; 砒砂岩; 土壤颗粒; 内蒙古自治区鄂尔多斯市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0083-12

中图分类号: S152

文献参数: 张尚轩, 李龙, 朱志卓, 等. 水力侵蚀下砒砂岩坡面植被格局对土壤颗粒空间分布的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 83-94, 102. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.011; Zhang Shangxuan, Li Long, Zhu Zhizhuo, et al. Effects of vegetation pattern on spatial distribution of soil particles due to water erosion on an Pisha sandstone slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 83-94, 102.

Effects of Vegetation Pattern on Spatial Distribution of Soil Particles Due to Water Erosion on an Pisha Sandstone Slope

Zhang Shangxuan¹, Li Long^{1,2}, Zhu Zhizhuo¹, Zhang Peng¹, Guo Yangyang³, Yao Liqiang⁴

(1.College of Desert Management, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;

2.Key Laboratory of Desert Ecosystem Protection and Restoration, State Forestry and Grassland Administration,

Hohhot, Inner Mongolia 010000, China; 3.Keshiketengqi Water Conservancy Bureau, Chifeng, Inner Mongolia 025350,

China; 4.Inner Mongolia Autonomous Region Water Conservancy Development Center, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China)

Abstract: [Objective] The spatial distribution characteristics of surface soil particles under different vegetation patterns at Pisha sandstone area in typical area in Ordos City, Inner Mongolia Autonomous Region, and the sorting and transportation mechanisms of water erosion for soil particles were studied in order to provide a theoretical basis for the restoration of the ecological environment in this area. [Methods] The study was conducted with in-situ monitoring of field runoff plots. The effects of different vegetation patterns on the spatial distribution of surface soil particles on Pisha sandstone slopes under natural rainfall conditions were determined by combining three-dimensional laser scanning and geostatistics. [Results] ① The uniformly

收稿日期: 2022-08-21

修回日期: 2022-12-29

资助项目: 中央引导地方科技发展资金项目“砒砂岩坡面水力侵蚀过程与植被斑块格局演变互馈机制研究”(2021ZY0023); 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: 张尚轩(1999—), 男(汉族), 内蒙古自治区巴彦淖尔市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: 2683854478@qq.com.

通讯作者: 李龙(1989—), 男(汉族), 吉林省桦甸市人, 副教授, 博士, 主要从事土壤侵蚀及水土保持相关研究。Email: lilongdhr@126.com.

distributed vegetation pattern effectively inhibited runoff and sediment production on the slope. The erosion area, average runoff, and average sediment volume were 5.35%, 63.16%, and 76.47%, respectively, lower than observed for the bare slope. ② Under the uniformly distributed vegetation pattern, the contents of soil clay and silt particles were 1.3% and 2.2%, respectively, greater after rain than before rain, and sand content was 3.2% lower. The content of sand particles increased after rain by 5.8% and 15.3% in the randomly distributed and aggregated vegetation patterns respectively, resulting in a coarsening of soil texture. ③ Different vegetation patterns were the main factors causing the spatial variation of soil particles. The uniformly distributed and randomly distributed vegetation patterns increased the nugget coefficients of silt and sand particles after rainfall, and decreased the spatial autocorrelation. The aggregated vegetation pattern decreased the nugget coefficients of clay and silt particles from 95.06% and 83.89% to 0.07% and 0.06%, showing a strong spatial autocorrelation. [Conclusion] A uniformly distributed vegetation pattern produced suitable soil and water conservation benefits on an arsenic sandstone slope, significantly reducing runoff and sediment production and inhibiting soil coarsening.

Keywords: water erosion; vegetation pattern; Pisha sandstone; soil particles; Ordos City, Inner Mongolia Autonomous Region

水力侵蚀是由于短期内的集中降雨,造成地面组成物质被破坏、剥蚀、搬运,从而引起表层土壤养分流失最终导致土壤退化^[1]。降雨作为水力侵蚀的动力因子,通过雨滴对土体表面的击溅,破坏了表层土壤结构,使土壤颗粒向各个方向发生位移,在坡度和重力的共同作用下顺坡下移,最终导致降雨前后土壤颗粒的组成发生改变^[2],并在空间分布上呈现出特定的规律性和结构性^[3]。土壤的颗粒组成可以直接影响土壤结构、土壤水力特性、土壤肥力状况和土壤侵蚀程度^[4]。罗丹竹等^[5]的研究表明,土壤颗粒组成中细颗粒含量越多,其黏结能力越强,内聚力增大,在一定程度上能够促使土壤形成团粒结构,从而增大土壤的抗打击能力。近年来植被格局与水土流失的关系一直被人们所关注,研究表明植被可减少 50% 的可侵蚀的降雨能量,75% 的径流能量,阻止土壤团聚体的破坏与颗粒的迁移^[6],不同植被分布格局则能影响坡沟系统水力学参数,改变沟坡的来水来沙量和坡沟系统侵蚀形态以及产流产沙^[7],并且随着景观最大斑块指数、斑块结合度以及聚集度指数的提高,降雨入渗量明显增加,土壤侵蚀量明显减少^[8],但探究植被格局与水力侵蚀的关系归根到底在于研究植被对土壤颗粒侵蚀、搬运和沉积过程的影响^[9]。现阶段关于土壤颗粒空间分布的研究多从大中尺度进行,其无法满足精细的土壤侵蚀防治的要求,对于小尺度水蚀坡面土壤机械组成空间分布的研究值得深入探索^[10]。因此研究水力侵蚀下坡面不同植被格局表层土壤颗粒组成空间分布特征是探明水力侵蚀土壤颗粒分选搬运机制的关键基础,对于进一步研究不同植被格局下水力侵蚀机理具有重要意义。

砒砂岩结构松散、遇水成泥、遇风成沙的性质使

得该地区水土侵蚀严重被称为“世界水土流失之最”^[11]。近年来,砒砂岩区通过人工种植使得区域生态环境逐步向好并形成了不同的植被格局,对其研究发现坡面上植被的分布格局会对黏、粉粒的富集产生不同效应,黏、粉粒富集程度随植被与坡顶距离的增加逐渐降低^[12],当植被位于坡面下部时的植被格局可以使减流、减沙效益最大化^[13],而坡度和地表切割深度则是导致植被景观破碎并决定景观空间分布格局的主导因素^[14]。但在土壤质地、水土流失如此严重的砒砂岩地区,作为水文、生态、和环境评价等模型中的重要参数土壤颗粒组成,其空间变化与水力侵蚀之间的关系却还尚未深入研究,因此本研究通过实地调查与无人机航拍选取砒砂岩区鲍家沟内的植物聚集分布、均匀分布、随机分布的 3 个自然坡面以及对照组裸露砒砂岩坡面进行研究,使用三维激光扫描仪观察坡面侵蚀空间变化,运用经典统计学和地统计学方法对不同植被格局下水力侵蚀后土壤颗粒组成空间分布变化特征进行分析,旨在揭示砒砂岩区植被斑块格局与土壤颗粒空间分布的关系,为该区域生态环境恢复提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗暖水乡的鲍家沟流域(110°31′—110°35′E, 39°46′—39°48′N),是典型的砒砂岩地区,海拔高度 1 145~1 330 m,地形特点北高南低;属于中温带半干旱大陆性季风气候,年均气温 6.5 °C,2014—2020 年年均降水量 400 mm^[15];降雨多集中于 7—8 月,降雨类型多为暴雨,降雨量可占全年的 3/4。无霜期 100~148 d,

年平均风速 3.4 m/s。土壤类型以栗钙土为主,有机质含量低^[16],土壤结构松散,沟壑密度平均为 5~7 km/km²,水土流失严重,自然植被难以生长,主要用于防风固沙和水土保持的人工植被为主。主要人工植被有:油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等。

1.2 样地选取及植被格局的测定

确定有 3 种典型自然植被斑块格局存在的坡面,即聚集分布格局、均匀分布格局、随机分布格局,样地选取时保证 3 类样地的土壤结构一致,植被种类、盖度相近,坡度坡向相同,坡长大于 20 m 且无人干扰,与此同时,选取自然条件与研究样地完全一致的坡面,将坡面植被完全清除作为对照样地(裸地)。选

择好坡面后,在坡面上划分 1 m×1 m 的相邻网格小样方,共 60 个,依次对每个小样方进行植物群落学调查。

本研究采用方差均值比率法^[17]来测定植被分布格局,若 $S^2/m=0$,属均匀分布;若 $S^2/m=1$,属随机分布;若 S^2/m 显著地 >1 ,属聚集分布(表 1),计算公式为:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - m)^2}{N-1} \quad (1)$$

$$m = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (2)$$

式中: S^2 为方差; N 为小样方数; X_i 为第 i 个小样方内的个体数; m 为均值。

表 1 方差均值比率法测定的植被分布格局

Table 1 Vegetation distribution patterns determined by variance-mean-ratio method

样地	方差 S^2	平均值(m)	S^2/m	结果	植被盖度/%	植被种类
1	0.15	0.81	0.18 \approx 0	均匀分布	32.6	天门冬、猪毛菜、白莲蒿、白刺花、草木犀
2	0.64	0.56	1.14 \approx 1	随机分布	30.5	天门冬、猪毛菜、白莲蒿、白刺花
3	3.46	1.33	2.6	聚集分布	31.1	天门冬、猪毛菜、白莲蒿、白刺花、草木犀

1.3 小区布设及土壤采集

试验于 2021 年 7 月初开始准备。在选择样地坡面上建立规格为 2 m(宽)×10 m(长)的 4 个径流小区。① 径流小区 I 为均匀分布的植被格局;② 径流小区 II 为随机分布的植被格局;③ 径流小区 III 为聚集分布的植被格局;④ 径流小区 IV 为人工干扰清除小区内坡面上植物的裸露坡面,4 个小区坡度均为 35°。径流小区边界使用 2.5 mm 厚的钢板垂直等高线打入地下 30 cm(地表外露 20 cm),小区尾端设出水口以及集流桶(图 1)。

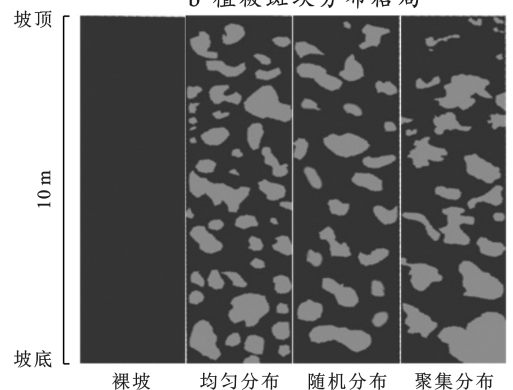
径流小区旁设置有固定 HOBO 气象站记录大气

降水过程,2021 年 7—9 月试验期间共监测侵蚀性降雨 3 场(表 2)。根据网格法确定取样点,小区内设置 3 列 9 排共 27 个采样点,该坡面为覆土砒砂岩,且根据文献阅读发现该区水力侵蚀下细沟的深度为 4—7 cm^[18-20]。因此,使用土铲及自制取样器在试验期间第一次降雨前以及最后一次降雨后,对同一采样点的 0—10 cm 表层土进行采样,土壤样本密封带回实验室处理。土壤颗粒组成使用马尔文 3000 激光粒度仪测定依据美国制标准将土壤颗粒划分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、砂粒(0.05~2 mm)3 个等级。

a 径流小区布设



b 植被斑块分布格局



注:图 1a 中植被格局由左到右依次为裸坡对照、均匀分布、随机分布、聚集分布。

图 1 径流小区布设及植被格局情况

Fig.1 Runoff plots layout and vegetation patterns

1.4 坡面侵蚀空间变化的测定

本研究采用 RIEGLVZ-400 三维激光扫描仪(扫描精度为 2 mm,测程 600 m,反射率 90%,水平扫描范围 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$,垂直扫描范围 $0^{\circ}\sim 100^{\circ}$,每秒可发射 300 000 点,接收 125 000 点),对径流小区降雨前后进行扫描,获取小区降雨前后坡面微地形点云数据。三维激光扫描仪的使用需确保每次扫描位置和高度一致,仪器放置距径流小区底端 1 m 处以及距径流小区上端 1 m 处(共 8 个固定标志点),雨后坡面的扫描要待坡面稳定表面径流完全入渗后方可进行。获取降雨前和每次降雨后的点云数据后,在 RISCAN PRO 软件中进行去植物处理以便观察植被下方坡面侵蚀的空间变化,并将点云数据转换成矢量数据后导入 ArcGIS 软件中构建精度为 1 cm 的微地形模型(M-DEM),最后通过 ArcGIS 软件中波段集统计功

能对 M-DEM 进行分析,并解析其像元大小,确定微地形模型(M-DEM)水平误差为 2 mm,垂直误差为 1.5 mm。利用降雨前的 M-DEM 中减去降雨后的 M-DEM,其差值可以定量地描述坡面微地貌的变化。在 ArcGIS 空间分析模块下,使用空间叠加分析结合栅格计算器实现栅格叠加相减,并完成计算分析。若降雨后微地貌模型(M-DEM 后)减去侵蚀前微地貌模型(M-DEM 前)得到 $\Delta M-DEM$ 为负值,则表明对应的区域为侵蚀区,若为正值,则表明对应区域为沉积区。即,侵蚀区 = $(M-DEM_{后}) - (M-DEM_{前}) < 0$; 沉积区 = $(M-DEM_{后}) - (M-DEM_{前}) > 0$ 。基于这一计算法则,根据 $\Delta M-DEM$ 的大小,确定坡面侵蚀强度分级。共分为 5 级, > 0 cm 为沉积区; $0\sim -1$ cm 为微度侵蚀; $-1\sim -2$ cm 为轻度侵蚀, $-2\sim -3$ cm 为中度侵蚀, < -3 cm 为强烈侵蚀^[21]。

表 2 研究区侵蚀性降雨事件特征统计

Table 2 Characteristic statistics of erosive rainfall events in study area

降雨时间	降雨历时/h	降雨量/mm	降雨强度/(mm·h ⁻¹)	径流小区编号	产流量/L	泥沙量/kg
20210815	4.217	22.6	5.395	I	5.40	1.05
				II	5.60	1.50
				III	9.00	2.80
				IV	13.00	2.95
20210818	4.95	23.6	4.768	I	4.68	1.36
				II	5.76	1.85
				III	10.62	3.75
				IV	13.04	6.60
20210829	3.45	16.5	4.783	I	2.03	0.59
				II	4.68	1.45
				III	5.40	1.63
				IV	6.80	3.20

注:表中 I 为均匀分布的植被格局; II 为随机分布的植被格局; III 为聚集分布的植被格局; IV 为裸坡对照。下同。

1.5 数据处理

使用 SPSS 26 软件对降雨前后各径流小区土壤黏粒、粉粒、砂粒含量进行经典统计学分析,并进行 K-S 检验,对于不是正态分布的数据使用平方根变换的方法进行处理,然后使用 GS⁺ 7.0 软件对数据进行半变异函数分析,选取最优半方差函数并获得各特征参数。利用 ArcGIS 10.7 软件对坡面进行空间分析并标注沉积区与堆积区,之后对各个植被格局的土壤颗粒进行 Kriging 插值,获得相应的空间分布图,最后,在 ArcGIS 10.7 软件中分区统计工具对空间分布图进行提取分析。相关计算公式为:

1.5.1 半变异函数^[22] 半变异函数是地质统计学中用来分析空间变异的特有工具。它既能描述区域化变量的结构性变化,又能描述其随机性变化。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (3)$$

式中: h 为分离距离; $N(h)$ 为 x 轴上相隔 h 的点的对数; $Z(x_i), Z(x_i+h)$ 为观测值 $Z(x)$ 和 $Z(x+h)$ 的 $N(h)$ 对实现。

1.5.2 Kriging 插值法^[16] 该方法以半变异函数为基础,是地统计学的主要内容之一。

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (4)$$

式中: $Z(x_0), Z(x_i)$ 分别为未知样点值及未知样点周围的已知点的值; λ_i 为第 i 个已知样本点对未知样点的权重; n 为已知样本点的个数。

2 结果与分析

2.1 降雨后不同植被格局下坡面侵蚀与沉积特征

如表 3 所示,3 场降雨后 4 个小区的 M-DEM 数据区分了明显的侵蚀和沉积区。I—IV 各小区平均侵蚀深度分别为 10, 12, 18 和 17 mm,平均沉积深度

分别为 5,6,3 和 6 mm。4 个小区的平均侵蚀深度由深至浅排序分别为:Ⅲ>Ⅳ>Ⅱ>Ⅰ,而沉积深度由高到低排序分别为:Ⅳ>Ⅱ>Ⅰ>Ⅲ,可以看出水力侵蚀对没有植物分布的裸坡侵蚀作用最大。由表 2 可知,3 次侵蚀性降雨后,径流小区Ⅳ侵蚀的泥沙量是最多的,累计产沙 12.75 kg。根据土壤侵蚀深度划分坡面土壤侵蚀强度,共分为 5 个等级(由低到高):沉积区、微度侵蚀、轻度侵蚀、中度侵蚀和强烈侵蚀。由图 2 可知,径流小区Ⅰ内沉积区分布在小区内西北侧,占坡面的 21.74%,土壤侵蚀深度集中在 0.01~0.02 m 为轻度侵蚀,面积占坡面的 34.36%。径流小

区Ⅱ内沉积区分布在小区内东南侧,面积占坡面的 15.54%,土壤侵蚀深度集中在 0.01~0.02 m 为微度侵蚀,面积占坡面的 36.5%,分布在坡面下部。径流小区Ⅲ内沉积区面积仅占坡面的 6.6%,侵蚀深度集中在 0.01~0.02 m 为微度侵蚀,占坡面的 40.11%,分布在坡面中下部位置,侵蚀深度大于 0.03 m 的强烈侵蚀分布在坡面上部,面积占坡面的 12.5%。径流小区Ⅳ内侵蚀区面积占据了整个坡面的 84.63%,沉积区面积仅占坡面的 15.36%,侵蚀深度为 0.02~0.03 m 的中度侵蚀面积比例最高为 28.45%,集中分布在坡面的下部。

表 3 侵蚀后数字高程模型变化汇总
Table 3 Summary of changes in digital elevation model after erosion

径流小区类型	侵蚀状态	深度/m				面积/m ²	像元个数
		最小值	最大值	平均值	标准差		
Ⅰ	侵蚀区	0.000 016	0.04	0.01	0.006	12.38	9 283
	沉积区	0.000 013	0.03	0.005	0.005	3.44	2 579
Ⅱ	侵蚀区	0.000 027	0.05	0.01	0.008	13.39	10 741
	沉积区	0.000 043	0.03	0.006	0.006	2.46	1 976
Ⅲ	侵蚀区	0.000 029	0.07	0.02	0.012	14.99	11 696
	沉积区	0.000 05	0.02	0.003	0.003	1.07	835
Ⅳ	侵蚀区	0.000 042	0.06	0.01	0.009	13.08	11 663
	沉积区	0.000 036	0.03	0.006	0.006	2.37	2 117

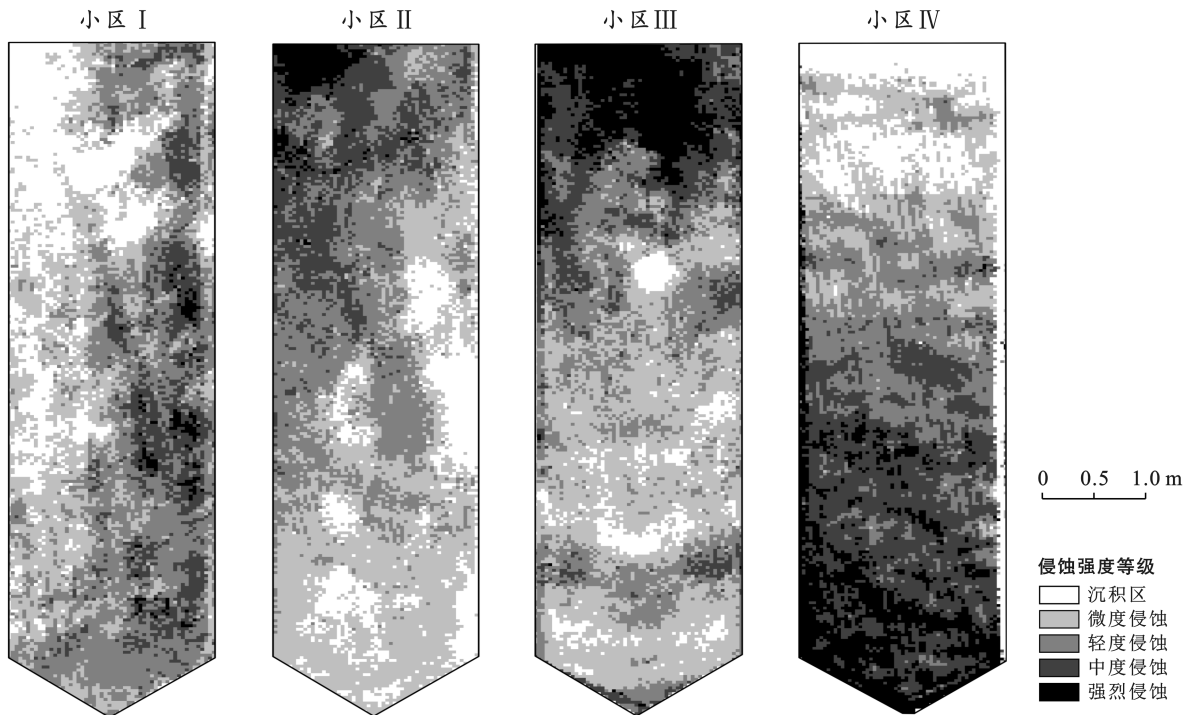


图 2 不同植被格局坡面侵蚀强度扫描结果图

Fig.2 Scan result dirgram of slope erosion intensity of different vegetation patterns

2.2 降雨前后不同植被格局下土壤颗粒组成描述性统计

利用 SPSS 26 软件,对降雨前后 4 个径流小区表

层土壤颗粒含量进行描述性统计分析,结果详见表 4。可见降雨前后土壤中黏粒、粉粒、砂粒含量的偏度绝对值范围在 0.001~1.78,峰度绝对值范围在 0.25

~4.75,各颗粒含量的概率分布近似为正态分布,唯有降雨前Ⅳ小区中的黏粒含量,降雨后Ⅰ小区中的黏粒、粉粒、砂粒含量,降雨后Ⅳ小区中的黏粒含量的概率分布为高度偏斜。降雨前各小区除Ⅳ小区内的黏粒含量的变异系数为 21.5%,属中等变异,其余均属弱等变异,降雨后Ⅱ小区内的黏粒含量与Ⅳ小区内的黏粒、砂粒含量的变异系数大于 15%,属中等变异,其余均属弱等变异。降雨前后各小区内黏粒的平均含量都较小,所占比例不到 5%,粉粒与砂粒的平均

含量相差不大。降雨前黏粒、粉粒平均含量最高的小区为Ⅳ小区,砂粒平均含量最高的小区为Ⅰ小区。降雨后黏粒、粉粒平均含量最高的小区也均为Ⅳ小区,但砂粒含量最高的小区为Ⅲ小区。与降雨前相比小区Ⅰ内的黏粒、粉粒平均含量都较雨前增加,砂粒平均含量减少 3.2%;小区Ⅱ内的黏粒与粉粒平均含量都较雨前减少,砂粒的平均含量增加 5.8%;小区Ⅲ内黏粒与粉粒平均含量分别减少了 1.2%,14.2%;小区Ⅳ内黏粒与砂粒分别增加了 0.2%和 1.2%,粉粒减少 1.5%。

表 4 降雨前后土壤颗粒含量描述性统计特征

Table 4 Descriptive statistical characteristics of soil particle content before and after rainfall

取样时间	径流小区	粒级	最小值/%	最大值/%	均值/%	标准偏差/%	偏度	峰度	变异系数/%
降雨前 (20210711)	Ⅰ	黏粒	2.4	3.9	3.3	0.4	-0.49	-0.34	13.0
		粉粒	29.5	47.2	39.7	4.9	-0.76	-0.25	12.5
		砂粒	48.8	68.1	57.0	5.3	0.74	-0.26	9.4
	Ⅱ	黏粒	3.1	4.8	4.0	0.5	0.057	-1.07	12.8
		粉粒	35.9	56.2	46.1	5.4	-0.18	-0.77	11.8
		砂粒	39.2	61.1	49.9	5.9	0.20	-0.81	11.8
	Ⅲ	黏粒	3.0	4.8	4.0	0.4	-0.50	2.05	9.0
		粉粒	35.4	55.4	46.1	4.1	0.03	1.11	8.9
		砂粒	39.9	61.6	50.0	4.4	-0.001	1.24	8.8
	Ⅳ	黏粒	3.2	7.4	4.4	0.9	1.43	2.75	21.5
		粉粒	38.5	63.7	49.4	5.7	0.58	0.46	11.5
		砂粒	30.5	58.2	46.3	6.5	-0.64	0.32	14.1
降雨后 (20210901)	Ⅰ	黏粒	4.0	5.2	4.3	0.3	1.78	2.77	7.0
		粉粒	39.3	46.9	41.9	1.8	1.45	1.94	4.4
		砂粒	47.9	56.7	53.8	2.1	-1.52	2.09	4.0
	Ⅱ	黏粒	2.7	5.0	3.7	0.6	-0.07	-0.42	15.5
		粉粒	31.0	49.1	40.5	5.3	-0.08	-1.09	13.1
		砂粒	46.6	66.3	55.7	5.7	0.15	-0.97	10.3
	Ⅲ	黏粒	2.3	3.6	2.8	0.3	0.13	-0.34	11.8
		粉粒	23.0	39.5	31.9	4.1	-0.28	-0.77	12.9
		砂粒	56.9	74.6	65.3	4.4	0.26	-0.77	6.7
	Ⅳ	黏粒	3.0	7.7	4.6	0.9	1.30	4.75	19.0
		粉粒	38.3	66.6	47.9	6.4	0.71	1.32	13.3
		砂粒	25.7	58.2	47.5	7.1	-0.85	1.94	15.0

2.3 降雨前后不同植被格局下土壤颗粒组成地统计学分析

由表 5 可见降雨前后各土壤颗粒含量的半方差模型的最优选择,根据拟合得出的 R^2 可知结果具有较高的可靠性。块金值(C_0)表示区域化变量的随机性的影响,降雨前各小区的块金值(C_0)均很小,表明受随机因素引起的土壤颗粒变异很小,降雨后小区Ⅱ,Ⅲ内粉粒、砂粒的块金值增大,说明在小区Ⅱ,Ⅲ内粉粒、砂粒的空间变异主要受随机因素的影响。基

台值(C_0+C)代表着变量在空间上的总变异性大小,降雨前后各小区土壤颗粒在空间上的变异性均表现出随着粒级的增大而增大,且降雨后土壤颗粒的变异性小于降雨前。块金系数(C_0)/(C_0+C)则表示样本间的变异特征,降雨前各小区除Ⅲ小区内黏粒、粉粒所对应的块金系数大于 75%,表现出较弱的空间自相关性,其余小区的土壤颗粒的块金系数均小于 25%,有着强烈的空间自相关性,降雨后Ⅰ,Ⅱ小区内土壤颗粒有明显的空间自相关性,Ⅲ小区内土壤颗粒

有强烈的空间自相关性,Ⅳ小区内的土壤颗粒的空间自相关性较弱。

观察降雨前后各小区的变程 A_0 ,该参数表明空间自相关的距离范围,在变程之外不存在空间自相

关,本试验取样间隔为 0.5 m,小于表 5 中有效变程 A_0 的最小值 0.52 m,因此降雨前后各小区内黏粒、粉粒、砂粒的含量变化均有空间自相关性,且土壤颗粒空间分布的均一性弱。

表 5 降雨前后土壤颗粒含量变异函数参数

Table 5 Parameters of variation function of soil particle content before and after rainfall

取样时间	径流小区	粒级	最优模型	块金值 (C_0)	基台值 (C_0+C)	$C/(C_0+C)$	有效变程 (A_0)/m	R^2	残差 (RSS)
降雨前 (20210711)	I	黏粒	高斯模型	0.01	0.20	7.32%	0.68	0.93	0.000 3
		粉粒	球状模型	3.2	27.79	11.51%	1.69	0.91	8.38
		砂粒	球状模型	4.44	32.98	13.46%	1.42	0.97	0.444
	II	黏粒	球状模型	0.033	0.30	11.16%	1.69	0.97	0.000 05
		粉粒	球状模型	3.14	32.53	9.65%	1.58	0.91	1.11
		砂粒	球状模型	3.7	38.32	9.66%	1.61	0.92	1.51
	III	黏粒	线性模型	0.14	0.15	95.06%	1.65	0.84	0.006
		粉粒	线性模型	15.08	17.97	83.89%	3.87	0.54	1.86
		砂粒	球状模型	0.18	14.67	1.22%	0.88	0.88	32.1
	IV	黏粒	高斯模型	0.001	1.01	0.10%	0.55	0.88	0.27
		粉粒	高斯模型	0.39	38.55	1.02%	0.79	0.96	11.4
		砂粒	高斯模型	0.1	51.95	0.19%	0.82	0.92	41.2
降雨后 (20210901)	I	黏粒	指数模型	0.000 1	0.16	0.06%	0.52	0.89	0.04
		粉粒	线性模型	1.45	3.56	40.72%	2.51	0.90	1.86
		砂粒	线性模型	1.87	4.93	37.97%	2.31	0.93	6.02
	II	黏粒	球状模型	0.02	0.37	5.71%	1.62	0.78	0.006
		粉粒	线性模型	20.76	28.10	73.87%	3.81	0.42	36
		砂粒	线性模型	23.89	34.72	68.82%	3.15	0.42	70.8
	III	黏粒	高斯模型	0.000 1	0.14	0.07%	0.81	0.87	0.000 6
		粉粒	球状模型	0.01	17.02	0.06%	1.19	0.68	6.34
		砂粒	高斯模型	0.01	19.87	0.05%	0.59	0.72	7.96
	IV	黏粒	线性模型	0.79	0.86	91.73%	1.04	0.93	0.1
		粉粒	线性模型	38.71	41.48	93.31%	1.77	0.83	212
		砂粒	线性模型	50.87	51.17	99.41%	1.48	0.82	299

2.4 降雨前后不同植被格局下土壤颗粒组成空间分布特征

径流小区内的土样采集只能获得有限的样本,而利用 GS⁺7.0 软件对数据进行半方差模型拟合并选取最优的拟合模型之后,再结合 ArcGIS 10.7 软件中的 Kriging 插值功能则可对小区内未采集土样的数据进行预测,并以连续的面数据来展示黏粒、粉粒、砂粒的空间分布(图 3—5)。由图 3 可知,降雨前小区 I 内的黏粒、粉粒、砂粒的空间分布呈层状分布且土壤颗粒含量黑色的高值区与白色的低值区交错分布在坡面上,黏粒的高值区分布在坡面下部,含量为 3.7%~3.9%,粉粒的高值区含量为 41.5%~42.5%分布在坡顶与坡中部的位

置,砂粒含量的最小值也高达 54.1%。降雨前小区 II 内的黏粒、粉粒、砂粒的空间分布规律与小区 I 相似,黏粒的低值区含量为 3.6%~3.7%,粉粒的高值区位于坡面中部含量为 48.8%~49.7%,砂粒的高值区位于坡面底部含量为 46.0%~46.8%。降雨前 III,Ⅳ 小区内的土壤颗粒均呈岛状分布,斑块破碎化严重,连通性较差,无明显规律。

由图 4 可知, I—Ⅳ 小区内均出现了黏粒、粉粒的含量黑色高值区与白色低值区的分布位置一致,粉粒含量的黑色高值区与砂粒含量的白色低值区位置相反的现象。降雨后小区 I 内,土壤颗粒在坡中位置呈大面积的斑块出现,黑色高值区与白色低值区的位置较降雨前相比下移到坡下的位置。降雨后小区 II 内,各土壤颗粒分布位置与降雨前基本符合,

但斑块面积变小并稍向下移。降雨后小区Ⅲ内,较雨前相比,部分岛状分布的区域互相进行了连接,各土壤颗粒富集在坡下的位置。降雨后小区Ⅳ内,土壤颗粒呈明显的岛状分布且土壤颗粒在坡面上分布差异明显,黏粒、粉粒富集在坡下,砂粒则富集在坡上。

用降雨后各小区不同土壤颗粒空间分布图减去降雨前各小区不同土壤颗粒空间分布图得到空间分布差值图(图5),可以清晰分辨出各粒级土壤颗粒在坡面上的侵蚀和富集情况。在小区Ⅰ内,黏粒的含量较雨前增多,主要富集在坡上的位置增加1.03%~1.80%,位于坡下的粉粒含量减少0.22%~0.97%,但西南侧一处以岛状富集了5.52%~6.27%,砂粒较雨

前相比含量减少,坡上与西南侧最多减少6.31%~7.83%。在小区Ⅱ内,黏粒含量在坡面出东侧有少量增加,坡面整体为减少,粉粒含量整个坡面减少2.11%~10.27%,坡中西侧最多减少10.27%,砂粒含量则增加2.04%~10.63%,增加位置与粉粒含量减少位置一致。在小区Ⅲ内,黏粒含量整体减少0.31%~1.95%,粉粒含量较雨前含量减少,最多减少27.23%,砂粒含量则整体增加,坡上位置增加最多值为25.20%~29.73%。在小区Ⅳ内,黏粒的含量只在坡上位置减少1.37%~2.24%,坡下富集0.31%~3.07%,粉粒含量于坡上位置减少并在坡下位置积聚,砂粒含量坡上位置增加0.41%~17.09%,在坡下位置流失6.81%~10.36%。

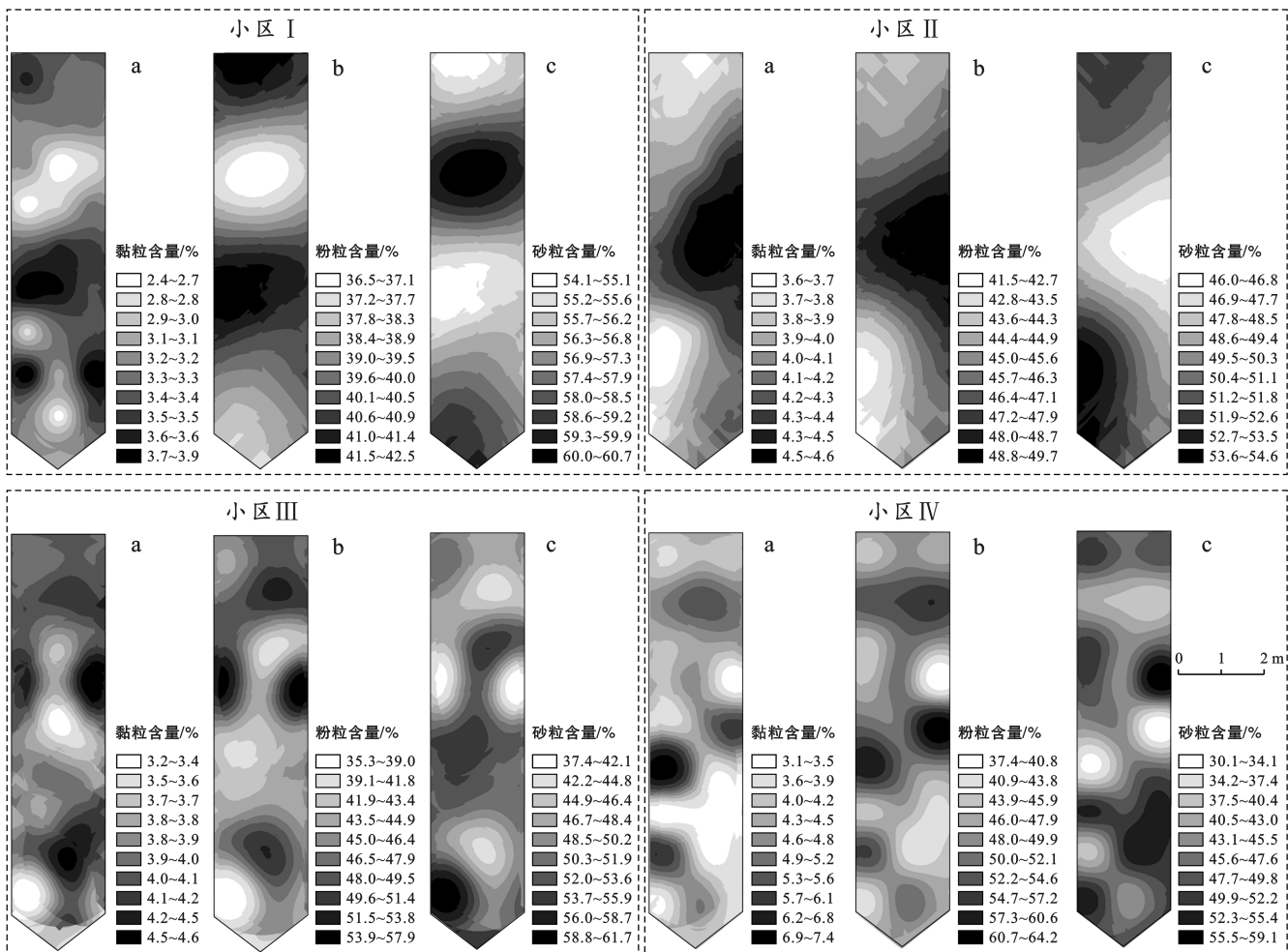


图3 降雨前土壤颗粒空间分布

Fig.3 Spatial distribution of soil particles before rainfall

2.5 降雨前后土壤颗粒在坡面侵蚀沉积区内的分布特征

对降雨前后的土壤颗粒空间插值图进行提取,可得到各个小区不同侵蚀强度等级下的土壤颗粒含量。由图6可知,在径流小区Ⅰ内,黏粒、粉粒的含量在5

个侵蚀强度等级下都有增加但黏粒含量的变化并不显著,而砂粒的含量显著减少,且随着侵蚀强度的增加各土壤颗粒的增加量(减少量)变小,表明均匀分布的植被格局可增加黏粒、粉粒的含量,增加土壤的保肥能力。在径流小区Ⅱ内,位于坡上位置的轻度侵蚀

区内粉粒的含量显著减少,其次为中度侵蚀,之后为强烈侵蚀,但在该小区内砂粒含量都增加了 5% 以上,与降雨前相比存在显著差异,可见随机分布的植被格局不能有效保持黏粒、粉粒的含量。小 II 内土壤颗粒的变化现象在小区 III 内变得愈加明显,粉粒、砂粒的含量与雨前相比存在显著差异。黏粒的含量在 5 个侵蚀强度等级内依次减小了 1.12%,1.02%,1.16%,

1.3% 和 1.17%,粉粒的含量依次减少了 13.11%,12.05%,14.62%,17.07% 和 16.52%,砂粒的含量依次增加了 14.02%,13.03%,15.76%,18.31% 和 17.87%。在径流小区 IV 内,降雨前后各土壤颗粒的含量变化不大,基本呈现黏粒占比不到 5%、粉粒和砂粒占 47% 左右,降雨后沉积区、微度侵蚀和轻度侵蚀这 3 个等级下砂粒含量较雨前都有增加,粉粒含量减少。

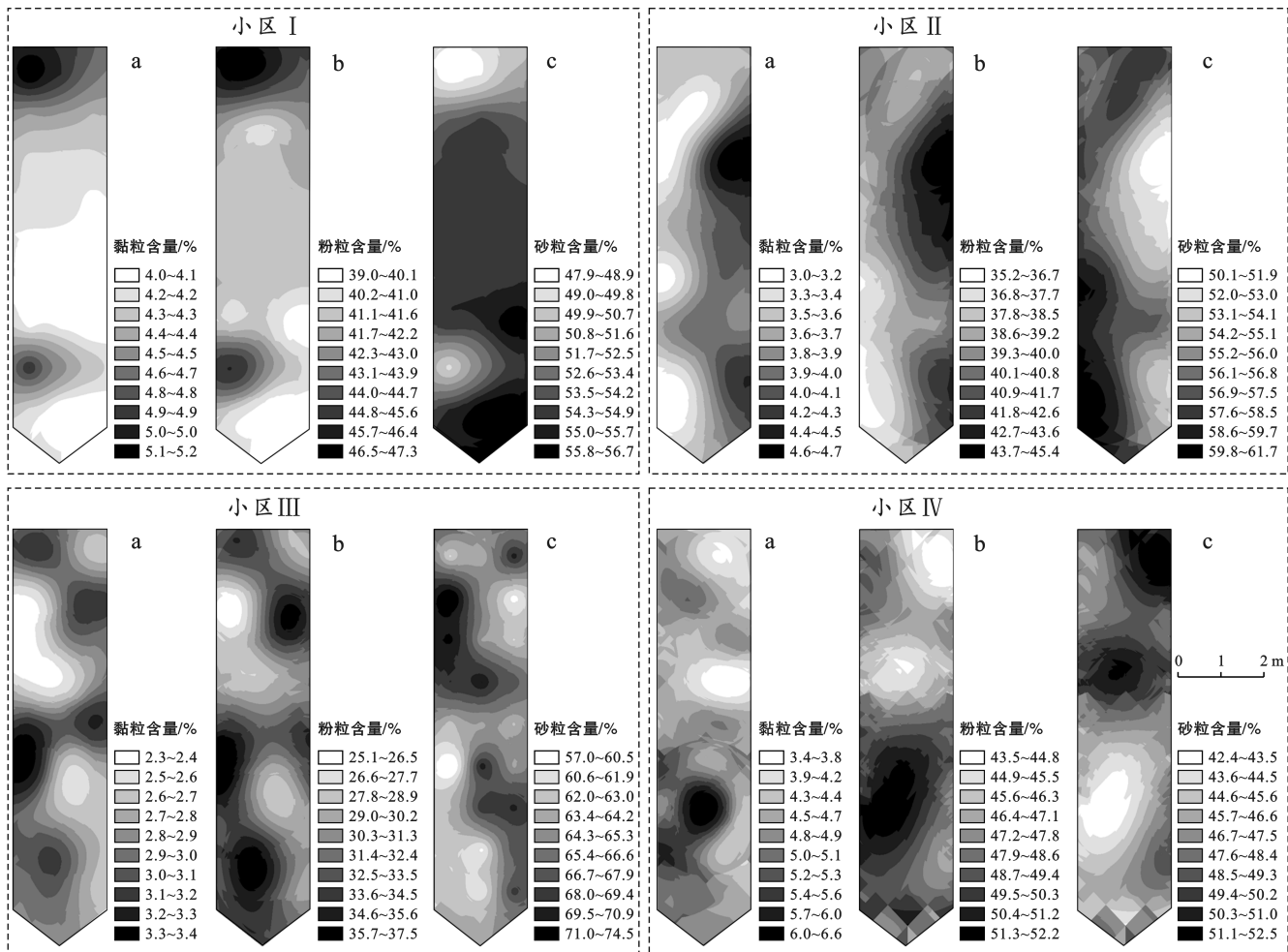


图 4 降雨后土壤颗粒空间分布

Fig.4 Spatial distribution of soil particles after rainfall

3 讨论

3.1 植被格局对坡面土壤侵蚀的影响

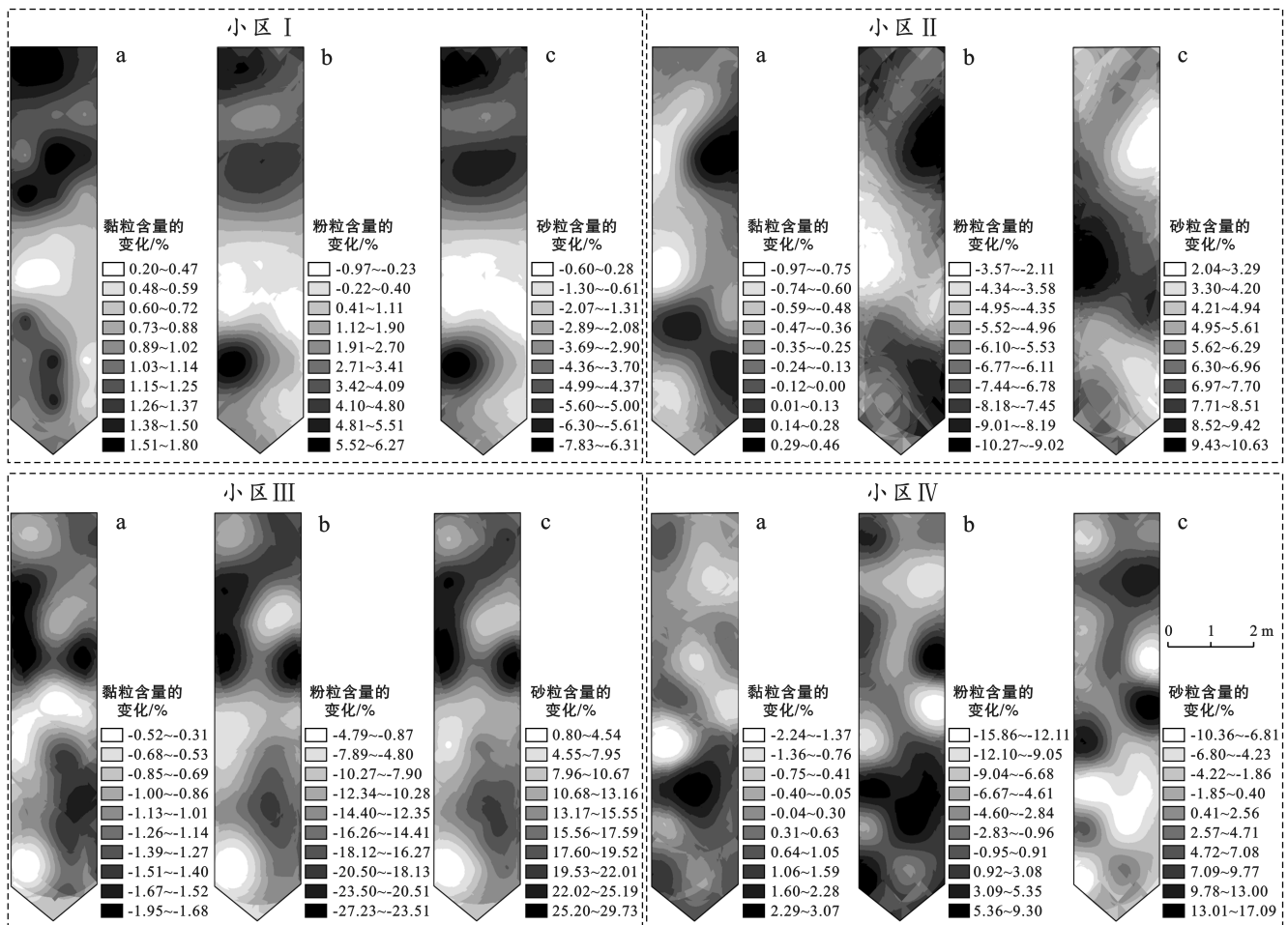
目前,减少水土流失的公认措施是增加地表植被覆盖度,但对于砒砂岩区进一步增加植被面积会加剧水资源的短缺,因此选择适宜该地区的植被格局是控制砒砂岩区土壤侵蚀的最优方式。

本文通过方差均值比率法确定了 3 种植被格局:均匀分布($S^2/m = 0.18 \approx 0$)、随机分布($S^2/m = 1.14 \approx 1$)、聚集分布($S^2/m = 2.6 > 1$)以及裸坡对照。分析其降雨前后坡面侵蚀沉积空间变化(图 2)发现,

径流小区 I(均匀分布)的侵蚀区面积明显少于径流小区 II(随机分布)和 III(聚集分布),植被截留产生的沉积区面积也明显多于随机分布与聚集分布的径流小区。并且 3 场侵蚀性降雨的监测数据也表明,植被均匀分布的径流小区 I 内的径流量和泥沙量均明显少于其他两种植被分布格局。结合闫帅旗等^[23]的研究结果植被盖度和格局可显著影响坡面的侵蚀状况,分析原因认为均匀分布的植被格局可削弱雨滴对土壤的溅蚀,并且增加地表粗糙度,进而降低水流动能减弱地表径流对坡面的侵蚀,相比之下植被聚集分布的防治效果就显得极其不佳,笔者认为聚集分布

的植被格局改变了坡面的水文连通性,地表径流在漫流过程中更容易汇集雨水,进而改变了径流侵蚀动力,使冲刷能力增强,从而加剧土壤颗粒的侵蚀、搬运和沉积过程^[24]。在径流小区Ⅳ内其降雨后坡面侵蚀区的面积占坡面的84.63%,几乎占据了整个坡面,而沉积区仅占15.36%位于坡面上端,这是由于该坡

面为典型的覆土砗砂岩坡面,其土壤入渗率高,且降雨强度较小时坡面上方没有径流只有雨滴溅蚀,在坡面中下部产生汇流所以位于坡下位置的土壤侵蚀严重^[25],导致该小区内的径流量、泥沙量显著高于其他3个小区,可见没有植被的存在坡面水力侵蚀情况严重。



注:a为降雨后黏粒含量与降雨前黏粒含量的差值(%);b为降雨后粉粒含量与降雨前粉粒含量的差值(%);c为降雨后砂粒含量与降雨前砂粒含量的差值(%).

图5 降雨前后土壤颗粒空间分布差值

Fig.5 Difference in spatial distribution of soil particles before and after rainfall

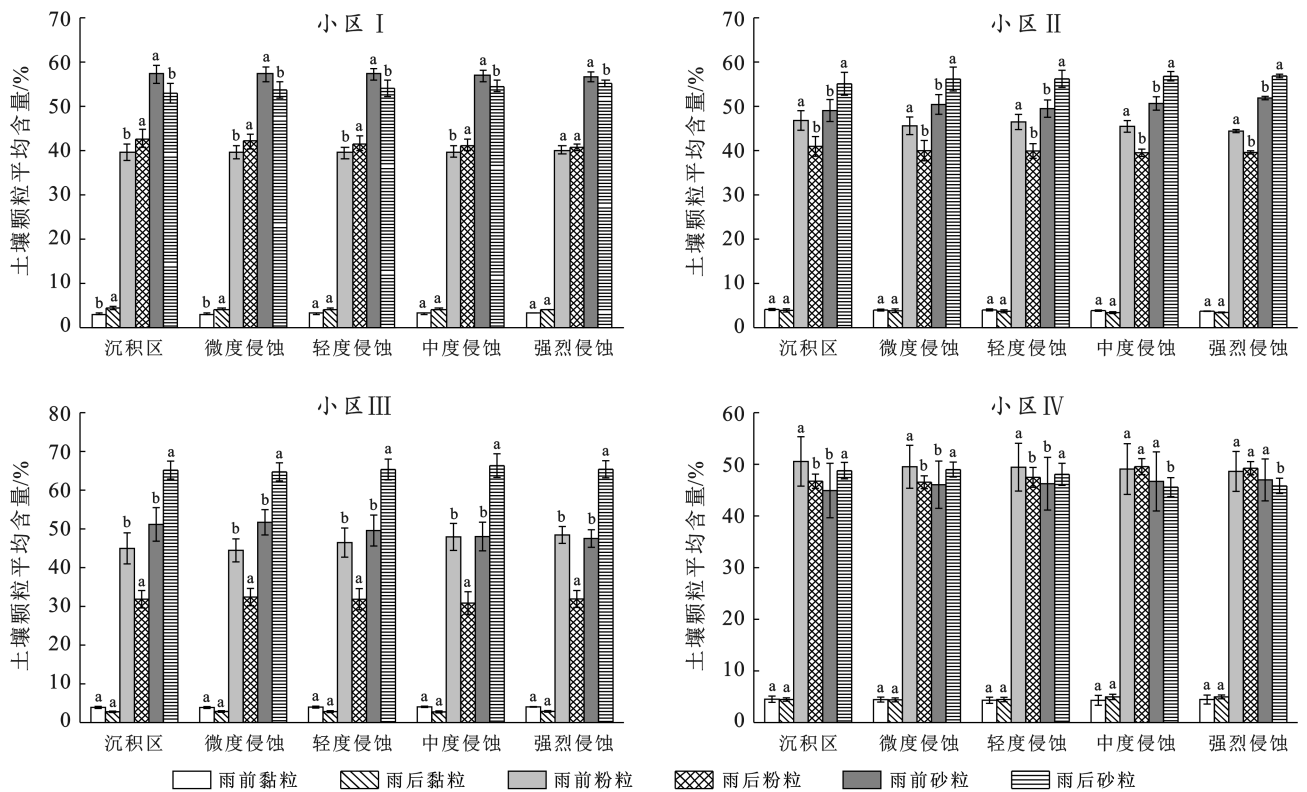
3.2 植被格局对土壤颗粒迁移的影响

作为一种景观类型,植被格局与景观格局相同,是指不同大小、形状的植被单元在空间内的排列与配置^[7]。在植被均匀分布的径流小区内,植被切断了坡面水沙的流动路径,同时均匀分布的植被格局其植被在坡面上分布均匀,裸地斑块的水沙受阻可能性增加,坡面水文连通性下降,水沙的流动路径变短^[26],但黏粒、粉粒这些细小颗粒更容易粘结在一起变为大颗粒(砂粒)^[1],在重力作用下伴随着径流冲刷开始向坡下迁移。最终,坡面的砂粒百分比含量减少,黏粒、粉粒的百分比含量增加,抑制了坡面土壤质地粗化,

这与贾晓红等^[27]研究结果相一致。在植被随机分布的径流小区内结合陈晓燕^[2]的研究结果与分析,认为小区内植物分布不均匀,植物冠层不能完整的阻挡雨滴对坡面的溅蚀,且上方来水流速慢、动能小,携带搬运能力弱,因此径流优先选择质量较小的粉粒和砂粒作为其搬载体,导致上坡位的黏粒、粉粒更容易向下坡位迁移,砂粒因自身质量较大的原因多停留在坡面中部的的位置。在植物聚集分布的径流小区内,从景观格局角度分析认为斑块—廊道—基底范式^[28]中的廊道就显得尤为明显,廊道的存在更加易于坡面径流的汇集,增加径流的流速和流量,使侵蚀愈演愈烈,这

时径流就会轻易地将质量较轻的黏粒、粉粒携带走。最后试验过后,均匀分布的植被格局抑制了坡面土壤

粗化,更容易保持肥力,植物随机分布、聚集分布的坡面则出现了土壤粗化的现象。



注:小写字母表示相同粒径不同采样时间间显著差异($p < 0.05$)。

图6 土壤颗粒在坡面空间分布特征

Fig.6 Spatial distribution characteristics of soil particles on slope

3.3 植被格局对土壤颗粒空间异质性的影响

利用地统计学中的半变异函数,不仅可以描述区域化变量的结构性变化,还能描述其随机性变化。块金系数 $C/(C_0 + C)$ 代表着空间变异的强弱,其表示随机因素引起的空间变异性占总体变异的比例^[29]。降雨后均匀分布、随机分布的植被格局使得粉粒、砂粒含量的块金系数增高,使其由空间自相关引起的空间变异占比降低,随机因素引起的空间变异开始起一定的影响^[30]。降雨后聚集分布的植被格局则表现出完全相反的结果,其土壤颗粒含量的空间变异在雨前主要受随机性因素影响,在雨后表现出了强烈的空间自相关性,对照组裸坡也有类似的现象。表5内一些土壤颗粒的变异函数模型选择了线性模型,虽然决定系数 R^2 较高,但是残差 RSS 也很高,这一现象在胡广录^[31]的研究中也有类似情况,结合其的研究说明利用变异函数理论所拟合的这些粒级的理论模型与实际变异函数计算值之间的相关程度较弱,线性模型对土壤颗粒的空间变化预测,效果欠佳,进而也说明了这些粒级的土壤颗粒含量受随机因素的影响很大。

不同粒径的土壤颗粒空间异质性是由结构性因素和随机性因素共同作用的结果^[32-33]。降雨后均匀分布、随机分布的植被格局使得粉粒、砂粒空间自相关降低,空间异质性开始受随机因素影响,这一方面可能是土壤母质类型的原因,另一方面是通过前文植被格局对土壤颗粒迁移的影响的讨论,发现植被格局对于土壤颗粒空间异质性有一定影响。降雨后,随机分布下粉粒、砂粒含量的块金系数分布为73.87%和68.82%,是3种格局中最高的,因此上述的土壤颗粒受随机因素—植被随机分布的格局影响明显。

4 结论

(1) 3种植被格局均可有效抑制坡面的产流产沙,且均匀分布的植被格局抑制效果最佳,与裸露坡面相比其侵蚀区面积、平均径流量、平均泥沙量分别降低了5.35%,63.16%,76.47%。

(2) 3种植被格局对土壤颗粒的迁移有显著影响。均匀分布的植被格局下土壤黏粒、粉粒的含量分别较雨前增加了1.3%,2.2%,砂粒含量减少了

3.2%,抑制土壤质地粗化。随机分布、聚集分布的植被格局下砂粒的含量分别增加了 5.8%和 15.3%,不能有效抑制土壤质地粗化。

(3) 植被格局是引起土壤颗粒空间变异主要因素。与降雨前相比,均匀分布、随机分布的植被格局使粉粒、砂粒的块金系数变高空间自相关性降低,聚集分布的植被格局使黏粒、粉粒的块金系数由 95.06%,83.89%分别降为 0.07%和 0.06%,表现出强烈的空间自相关。

[参 考 文 献]

- [1] 刘强,穆兴民,高鹏,等.土壤水力侵蚀对土壤质量理化指标影响的研究综述[J].水土保持研究,2020,27(6):386-392.
- [2] Teh C B S. The stability of individual macroaggregate size fractions of Ultisol and Oxisol soils [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2012, 14 (2): 459-466.
- [3] 曹媛,孟明,王磊,等.宁夏中部干旱带天然草地土壤颗粒空间分布特征[J].中国水土保持,2021(2):56-59.
- [4] 郑晓岚,杨玲,宋娇,等.水库消落带土壤颗粒组成分形及其空间分异特征[J].水土保持研究,2022,29(1):66-71.
- [5] 罗丹竹,金鑫.坡面土壤颗粒组成对雨强和坡度变化的响应研究[J].水利规划与设计,2021(6):107-112.
- [6] Martinez-Mena M, Rogel J A, Albaladejo J, et al. Influence of vegetal cover on sediment particle size distribution in natural rainfall conditions in a semiarid environment [J]. *catena*, 2000,38(3):175-190.
- [7] Tang Chongjun, Liu Yu, Li Zhongwu, et al. Effectiveness of vegetation cover pattern on regulating soil erosion and runoff generation in red soil environment, southern China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107956.
- [8] 王金花,李占斌,张荣刚,等.水蚀风蚀交错区流域景观格局变化及水沙响应关系[J].中国水土保持科学,2016,14(3):68-75.
- [9] 秦伟,曹文洪,郭乾坤,等.植被格局对侵蚀产沙影响的研究评述[J].生态学报,2017,37(14):4905-4912.
- [10] 邹心雨,张卓栋,吴梦瑶,等.河北坝上地区坡面尺度土壤机械组成的空间变异[J].中国水土保持科学,2019,17(5):44-53.
- [11] 张赢.降雨条件下砒砂岩风化物坡面水力侵蚀特性试验研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
- [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] 陈鹏,张铁钢,董智,等.灌草格局对砒砂岩区产流产沙特征的影响[J].干旱区资源与环境,2020,34(9):116-121.
- [14] 杨振奇,郭建英,秦富仓,等.裸露砒砂岩区小流域植被景观空间格局与地形关系[J].西北林学院学报,2021,36(5):133-139.
- [15] 杨振奇.裸露砒砂岩区人工植被对水力侵蚀的调控机制研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.
- [16] 张若曦,秦富仓,李龙,等.水力侵蚀对砒砂岩区土壤有机碳空间变异性的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):117-124.
- [17] 杨宁,杨满元,刘慧娟,等.木质藤本植物黑老虎生活史特征与空间分布格局[J].安徽农业科学,2021,49(15):134-137,141.
- [18] 李龙,秦富仓,钱秋颖,等.冲刷条件下裸露砒砂岩区坡面细沟微形态变化及其侵蚀特征[J].水土保持学报,2021,35(5):37-43.
- [19] 钱秋颖.水力侵蚀对裸露砒砂岩区坡面微地形的影响研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
- [20] 杨振奇,郭建英,秦富仓,等.裸露砒砂岩区降雨条件下坡面微地形变化规律[J].水土保持学报,2021,35(3):111-118.
- [21] Li Long, Qin Fucang, Yao Xueling, et al. Relationship between the slope microtopography and the spatial redistribution pattern of soil organic carbon under water erosion [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 76(5): 435-445.
- [22] Wang Guangxing, George G, Fang Shoufan, et al. Mapping multiple variables for predicting soil loss by geostatistical methods with tm images and a slope map [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing: Journal of the American Society of Photogrammetry*, 2003,69(8):889-898.
- [23] 闫帅旗,刘俊娥,周正朝,等.坡面不同植被覆盖格局下的水文连通性变化特征[J].水土保持学报,2021,35(6):228-234,242.
- [24] López-Vicente M, Nadal-Romero E, Cammeraat E L H. Hydrological connectivity does change over 70 years of abandonment and afforestation in the Spanish Pyrenees [J]. *Land degradation & development*, 2017, 28(4): 1298-1310.
- [25] 郑粉莉,高学田.坡面汇流汇沙与侵蚀—搬运—沉积过程[J].土壤学报,2004,41(1):134-139.
- [26] Mayor Á G, Bautista S, Small E E, et al. Measurement of the connectivity of runoff source areas as determined by vegetation pattern and topography: A tool for assessing potential water and soil losses in drylands [J]. *Water Resources Research*, 2008,44(10):2183-2188.
- [27] 贾晓红,李新荣,陈应武,等.植被恢复对旱区表土颗粒中有机碳和氮分布的影响[J].中国环境科学,2006,26(005):560-564.

- 2018,24(5):1165-1170.
- [27] Hu Hongchuang, Wang Genxu, Liu Guangsheng, et al. Influences of alpine ecosystem degradation on soil temperature in the freezing-thawing process on Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Environmental Geology*, 2009,57(6): 1391-1397.
- [28] Wang Genxu, Wang Yibo, Li Yuanshou, et al. Influences of alpine ecosystem responses to climatic change on soil properties on the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Catena*, 2007,70(3):506-514.
- [29] 张元明,潘惠霞,潘伯荣.古尔班通古特沙漠不同地貌部位生物结皮的选择性分布[J].*水土保持学报*,2004,18(4):61-64.
- [30] Zhao D, Lei Q, Shi Y, et al. Role of species and planting configuration on transpiration and microclimate for urban trees [J]. *Forests*, 2020,11(8):1-18.
- [31] Li Ming Shun. Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: a review of research and practice [J]. *Science of the Total Environment*, 2006,357(1/3):38-53.
- [32] He Junyu, Ren Yanfang, Chen Xiulan, et al. Protective roles of nitric oxide on seed germination and seedling growth of rice (*Oryza sativa* L.) under cadmium stress [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014,108:114-119.
- [33] Iwai C B, Oo A N, Topark-ngarm B. Soil property and microbial activity in natural salt affected soils in an alternating wet-dry tropical climate [J]. *Geoderma*, 2012,189:144-152.
- [34] Farhangi-Abri S, Ghassemi-Golezani K. How can salicylic acid and jasmonic acid mitigate salt toxicity in soybean plants? [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018,147:1010-1016.
- [35] Zhumabekova Z, Xu Xinwen, Wang Yongdong, et al. Effects of sodium chloride and sodium sulfate on *Haloxylon ammodendron* seed germination [J]. *Sustainability*, 2020,12(12):4927-4946.
- [36] Manai J, Gouia H, Corpas F J. Redox and nitric oxide homeostasis are affected in tomato (*Solanum lycopersicum*) roots under salinity-induced oxidative stress [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2014,171(12):1028-1035.
- [37] Karimi E, Shirmardi M, Dehestani Ardakani M, et al. The effect of humic acid and biochar on growth and nutrients uptake of calendula (*Calendula officinalis* L.) [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2020,51(12):1658-1669.
- [38] Giehl R F H, Gruber B D, von Wirén N. It's time to make changes: modulation of root system architecture by nutrient signals [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014,65(3):769-778.
- [39] 董桂春,陈琛,袁秋梅,等.氮肥处理对氮素高效吸收水稻根系性状及氮肥利用率的影响[J].*生态学报*,2016,36(3):642-651.
- [40] Türkmenö, Dursun A, Turan M, et al. Calcium and humic acid affect seed germination, growth, and nutrient content of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) seedlings under saline soil conditions [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica (Section B: Soil & Plant Science)*, 2004,54(3):168-174.
- [41] Khaled H, Fawy H A. Effect of different levels of humic acids on the nutrient content, plant growth, and soil properties under conditions of salinity [J]. *Soil and Water Research*, 2011,6(1):21-29.

(上接第 94 页)

- [28] Song Shuang, Wang Shaohan, Shi Mengxi, et al. Influence of landscape pattern type on soil erosion [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(5):85-92.
- [29] Song Daping, Li Hong, Liu Shanjiang, et al. A geostatistic investigation of the comprehensive evaluation of fertility and spatial heterogeneity of forest soil nutrients in hilly and mountainous regions of Southern China [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019,12(9):1-9.
- [30] 蒙仲举,王猛,王淮亮,等.基于数字成像技术的风蚀地表颗粒空间异质性[J].*干旱区研究*,2016,33(6):1270-1277.
- [31] 胡广录,樊立娟,王德金,等.荒漠—绿洲过渡带斑块植被表层土壤颗粒的空间异质性[J].*兰州交通大学学报*,2013,32(6):159-164.
- [32] Hou Kai, Qian Hui, Zhang Yuting, et al. Relationship between fractal characteristics of grain-size and physical properties: Insights from a typical loess profile of the Loess Plateau [J]. *Catena*, 2021,207:105653.
- [33] 傅伯杰,陈利顶,邱扬,等.黄土丘陵小流域土壤物理性质的空间变异[J].*地理学报*,2002,57(5):587-594.