

水力侵蚀对砒砂岩区土壤有机碳空间变异性的影响

张若曦¹, 秦富仓^{1,2}, 李龙^{1,3}, 杨振奇¹, 钱秋颖¹, 任小同¹

(1.内蒙古农业大学沙漠治理学院,呼和浩特 010018;2.内蒙古农业大学林学院,呼和浩特 010018;3.国家林业局荒漠生态系统保护与修复重点实验室,呼和浩特 010000)

摘要:以侵蚀剧烈的砒砂岩区为研究对象,应用地统计学 Kriging 插值法准确描述水力侵蚀下土壤有机碳空间动态迁移过程来探究侵蚀与碳平衡的关系并为有效治理砒砂岩区坡面水土流失提供科学的参考。结果表明:(1)降雨前后各土层有机碳均随着土层增加而减少,表现为中等变异、空间自相关均为正相关且0—10 cm 土层自相关性最大。降雨后0—20 cm 土层有机碳含量减少而20—40 cm 土层增加,且各土层变异程度均较雨前减弱。(2)降雨前后土壤有机碳分别与高斯模型、球状模型较为拟合,且变程值均随土层增加而增大。降雨前后0—10 cm 土层表现均为强烈空间相关性且雨后结构比增大,而10—40 cm 均为中等相关性雨后结构比减小。(3)降雨后空间异质性减弱斑块面积变大,总体表现为同一土层坡上侵蚀坡下沉积,而不同土层下0—20 cm 土层表现为侵蚀,20—40 cm 土层表现为沉积。(4)降雨前后土壤有机碳均与黏粒呈现较显著正相关,其中降雨前0—10 cm 土层有机碳与黏粒为极显著正相关,降雨后各土层相关性增强均为极显著正相关。但降雨前后土壤有机碳与粉粒相关性均较小且不显著,与砂粒则基本表现为负相关。

关键词:水力侵蚀;土壤有机碳;砒砂岩区;空间变异性

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)06-0117-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.06.018

Effect of Rainfall Erosion on Spatial Variability of Soil Organic Carbon in Arsenic Sandstone Area

ZHANG Ruoxi¹, QIN Fucang^{1,2}, LI Long^{1,3}, YANG Zhenqi¹, QIAN Qiuying¹, REN Xiaotong¹

(1.College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural

University, Hohhot 010018; 2.Forestry College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018;

3.Key Laboratory of State Forest Administration for Desert Ecosystem Protection and Restoration, Hohhot 010000)

Abstract: In this paper, the spatial dynamic transfer process of soil organic carbon under hydraulic erosion was accurately described using geostatistics Kriging interpolation method to explore the relationship between erosion and carbon balance, and to provide scientific reference for effective control of soil erosion on the slope surface of Pisha sandstone area. The results indicated that: (1) Before and after the rainfall, the organic carbon of each soil layer decreased with the increase of soil layers, showing medium variation and positive spatial autocorrelation. The maximum autocorrelation occurred in the 0—10 cm soil layer. After rainfall, the organic carbon content of 0—20 cm soil layer decreased while that of 20—40 cm soil layer increased, and the variation degree of each soil layer was weaker than that before rainfall. (2) Before and after rainfall, soil organic carbon was fitted with Gaussian model and spherical model respectively, and the range increased with the increase of soil layers. Before and after rainfall, 0—10 cm soil layer showed strong spatial correlation and the nugget/sill increases after rain, while 10—40 cm soil layer showed moderate correlation and the nugget/sill decreased after rain. (3) After rainfall, the spatial heterogeneity weakened and the patch area became larger, which was generally manifested by the erosion in the same soil layer. Erosion occurred in the 0—20 cm soil layer, while sedimentation in the 20—40 cm soil layer. (4) Before and after the rainfall, soil organic carbon and clay contents showed a significant positive correlation. A very significant positive correlation was found in 0—10 cm layer before the rainfall, and the correlations increased after the rainfall, showing a very significant positive correlation in all soil layers. However, the correlation between soil organic carbon and silt

收稿日期:2020-05-17

资助项目:国家自然科学基金青年基金项目(41807079)

第一作者:张若曦(1997—),女,在读硕士研究生,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:15624746723@163.com

通信作者:李龙(1989—),男,讲师,博士,主要从事土壤侵蚀及水土保持相关研究。E-mail:lilongdhr@126.com

contents before and after rainfall was weak and not significant, while the correlation between soil organic carbon and sand contents was basically negative.

Keywords: rainfall erosion; soil organic carbon; pisha sandstone area; spatial variability

土壤有机碳是陆地生态系统中储量最大最活跃的碳库之一,是评价土地质量的重要指标,1938 年土壤有机碳就被视为国家重要资源的一种^[1],有机碳的迁移变化可导致土地退化并造成水土流失,严重威胁生态环境问题^[2-3]。而土壤侵蚀作为制约我国可持续发展的全球热点问题之一,对全球碳循环和土壤有机碳的迁移有重要的影响^[4]。全球由土壤侵蚀影响的土壤碳迁移量约为 0.64~1.04 Pg/a,退化的有机碳有 3/5 是通过土壤侵蚀产生的^[5-6]。在土壤侵蚀过程中,坡面是最基本的单元,降雨作为侵蚀动力因子,对土壤坡面侵蚀起着关键性的作用^[7],在一定程度上直接驱动土壤有机碳发生富集与迁移,并改变土壤有机碳的空间分布格局,从而形成侵蚀区和沉积区,使其具有较强的空间异质性^[8-9]。其中 Burrough^[10]利用地统计学分析法和克里格插值来描述及量化土壤空间变异的随机性和结构性;Van Oost 等^[11]指出,由于侵蚀作用使得侵蚀区土壤有机碳减少,而沉积区由于堆积使得碳的分解被抑制从而增加;Lal^[12]的研究表明,土壤有机碳流失主要由侵蚀导致,而沉积区内有机碳可能通过其他方式被释放。由此可见,水力侵蚀是造成有机碳坡面尺度再分配的重要因素^[13]。但近几年关于有机碳空间动态变化的研究多停留在流域尺度方向,侵蚀中有机碳迁移的研究也多依附于泥沙和径流,忽略了由于土壤本身的异质性所呈现出的空间变异特征^[14]。有关坡面尺度下水力侵蚀是如何影响土壤有机碳空间动态运移以及坡面上不同空间部位是如何遭受侵蚀和堆积的?这些被业内所关心的问题还没有一定的答案^[15]。因此,合理认识水蚀作用下土壤有机碳空间运移对土壤碳平衡以及对有效治理坡面水土流失和生态修复有着重要的意义。

近年来,砒砂岩区由于成岩程度差、结构强度低,土壤侵蚀严重成为业内研究热点之一。据数据^[16]显示,该地区侵蚀模数多年平均高达 3 万 t/km²,平均每年向黄河输送 1 亿 t 以上的泥沙,为黄河粗沙来源地之一,极大地威胁黄河的安全;此外严重的水土流失也影响大量土壤有机碳的迁移再分布。在以往砒砂岩的研究^[17-18]中,主要集中在水土流失、沙棘柔性坝和复配成土的治理,关于土壤侵蚀方面也仅仅围绕着径流和泥沙^[19],在侵蚀如此严重的地区对水蚀影响下土壤有机碳空间分布格局的研究寥寥无几。因此,本文通过布设野外径流小区并在自然降雨条件下进行原位监测,研究砒砂岩区整个雨季坡面水力侵蚀

下土壤有机碳动态变化特征,为揭示土壤侵蚀与碳平衡的关系提供理论性依据,为有效治理砒砂岩区坡面水土流失并采取有效的水土保持措施及改善黄河生态环境提供参考。

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镇(110°31′—110°35′E,39°46′—39°48′N)(图 1)。海拔高度为 1 145~1 330 m,地形分布北部较高,南部偏低,主要地带性土壤为栗钙土。该区为典型大陆性气候,年平均气温为 6~9 ℃,昼夜温差大,冬季寒冷干燥且时令长,夏季炎热且时令短。年均降水量 400 mm,降雨类型多为暴雨,侵蚀强度大,多集中分布在夏季(7—8 月),占全年总降雨量的 3/4。无霜期为 100~140 d,日照充足,年均风速 2~4 m/s。土壤基岩以裸露砒砂岩为主,大部分为栗钙土,有机质含量较少。沟壑密度平均为 5~7 km/km²,侵蚀模数 2.1 万 t/(km²·a)左右,以水蚀为主,复合侵蚀严重。主要植被为松科的油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、豆科的柠条(*Caragana Korshinskii* Kom.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、羊草(*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel)、猪毛菜(*Salsola collina* Pall.)以及其他沙生类植物、沼泽草甸和退化的草地。

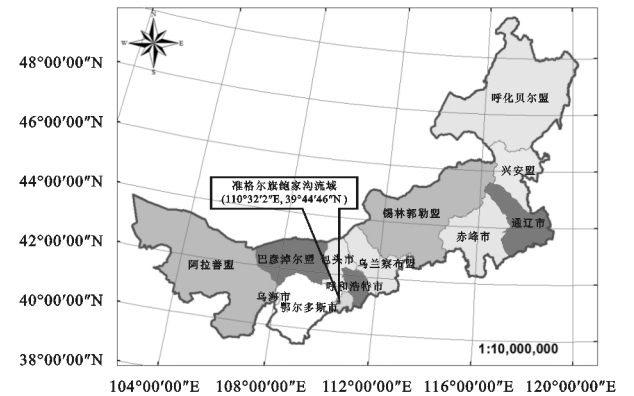


图 1 研究区位置

1.2 研究方法

空间自相关性是用来衡量空间关联和差异程度的一种分析方法,可以判断现象是否存在空间聚集状态,但不能识别具体的聚集区域。一般常用空间自相关系数 Moran *I* 来反映数据本身所具有的的空间聚集情况,其计算公式^[20]为:

$$I = \frac{n}{\sum_i (z_i - \bar{z})^2} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (z_i - \bar{z})(z_j - \bar{z})}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \quad (1)$$

式中: I 表示空间自相关系数,其取值为(0~1)表示正相关,负值(-1~0)表示负相关,近似为 0 时表示空间自相关不存在; n 为总样点数; z_i 和 z_j 表示位于 i 和 j 处的属性值; $\bar{z}$ 表示均值; w_{ij} 表示为空间权重矩阵值。

地统计学由法国统计学家 Matheron^[21] 研究得出,是基于半变异函数与结构分析来对空间相关性进行估计,基本原理为根据空间分布的已知样点来估计未知样点的数据。半变异函数公式为:

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

式中: h 为两样本间空间距离(m); $\gamma(h)$ 为 h 的半方差函数值; $N(h)$ 为间隔距离等于 h 的样本点的对数; $Z(x_i+h)$ 与 $Z(x_i)$ 分别为空间位置点 x_i+h 与 x_i 处样本的实测值(g/kg)。

Kriging 插值法以半变异函数为基础,是地统计学的主要内容之一,其数学公式^[22] 为:

$$Z(x_0)=\sum_{i=1}^n\lambda_iZ(x_i) \quad (3)$$

式中: $Z(x_0)$ 与 $Z(x_i)$ 分别为未知样点值及未知样点周围的已知样点的值(g/kg); 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。

1.2.1 土壤采集 研究区位于内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗暖水镇,该试验于 2019 年 6 月 30 日开始准备,根据当地的地形条件选取坡度为 25° 的坡地,在坡地上设置规格为 5 m(宽)×2 m(长)的径流小区。小区长边界与等高线垂直,小区内部均无植被覆盖,为裸地。根据小区的规格按照网格法取样,小区内共选取 40 个样点。由于研究区内覆土层的深度在 10 cm 以内,随着土层深度增加岩石相对坚硬取样难度较大,所以结合研究区的土壤岩性,将土壤分为 0—10,10—20,20—40 cm 3 层。在整个雨季共观测到 7 场降雨(表 1),并用三维激光扫描仪记录了坡面微地貌的变化情况(图 2),坡中与坡下出现了侵蚀细沟且平均侵蚀深度为 2~3 cm。在初始降雨前(7 月 16 日)和最后 1 次降雨(8 月 20 日)刚停止后采集 2 次土样,使用工具为直径约 1.5 cm 的自制小孔土钻,采样结束立即用取样点附近性质较为接近的土壤进行填补来减少采样对接下来试验效果的影响。土样采集后带回实验室自然风干并进行挑拣,采用重铬酸钾外加热法进行测定。

表 1 各场降雨基本特征

降雨时间 (年-月-日)	降雨 历时/min	降雨量/ mm	$I_{30}/$ (mm·h ⁻¹)	降雨强度/ (mm·min ⁻¹)	径流量/L	产沙量/kg
2019-07-16	862	31.2	26.0	0.036195	16.5	1.04
2019-07-22	517	17.0	8.0	0.032882	6.5	0.15
2019-07-28	1495	10.4	10.8	0.006957	7.0	2.32
2019-08-04	597	56.4	11.2	0.094472	135.0	6.66
2019-08-08	408	15.6	9.6	0.038235	26.5	5.70
2019-08-09	71	9.0	10.4	0.126761	9.5	1.31
2019-08-20	244	22.8	27.2	0.093443	60.3	10.07

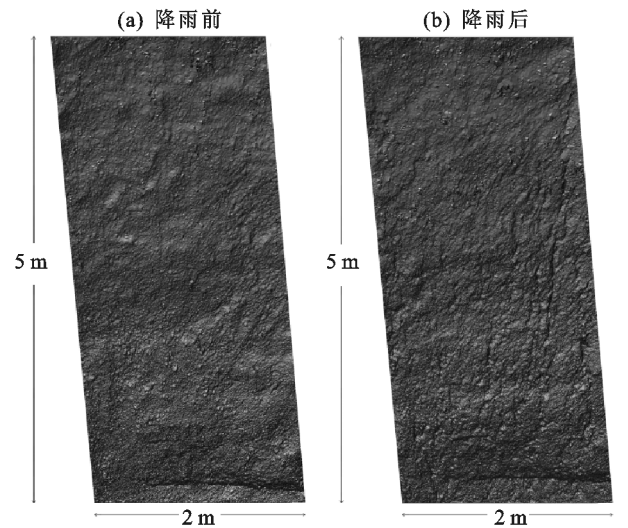


图 2 降雨前后径流小区微地貌变化

1.2.2 数据处理 运用 SAS 9.0 软件对降雨前后土壤有机碳进行描述性统计分析,并单因素 Duncan 检验(显著水平 $\alpha=0.05$)得出降雨前后土壤有机碳含

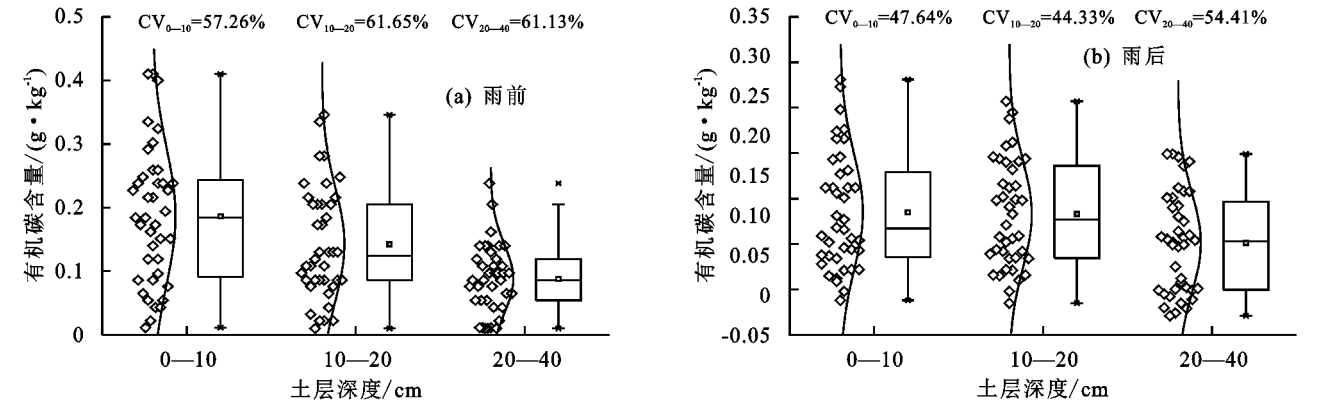
量的最大值、最小值、平均值、标准差以及变异系数等统计特征值并通过 ArcGIS 10.2 得出空间自相关 Moran I 指数。采用 Origin 9.0 软件进行制图。用 GS+9.0 进行半变异函数的拟合,其中块金值是描述在最小尺度下或由于测定误差而引起的随机性变异。基台值是描述在现阶段尺度下的总变异程度。变程是衡量空间变异程度的范围。块金值/基台值又称结构比,是描述现阶段尺度下空间变异程度,即随机因素所引起的变异占总变异的比值。比值越大,表明由随机因素引起的空间变异程度较强,比值越小,表明由随机因素引起的空间变异程度较弱,即由结构因素引起的空间变异更强。当结构比<0.25 时,空间相关性较强,结构比为 0.25~0.75 时,空间相关性表现为中等,结构比>0.75 时,空间相关性较弱^[23]。随后采用 ArcGIS 10.2 进行 Kriging 插值生成降雨前后有机碳空间分布图;最后采用 SPSS 软件对降雨前后各土层土壤有机碳与土壤粒度组分进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 降雨前后土壤有机碳统计特性分析

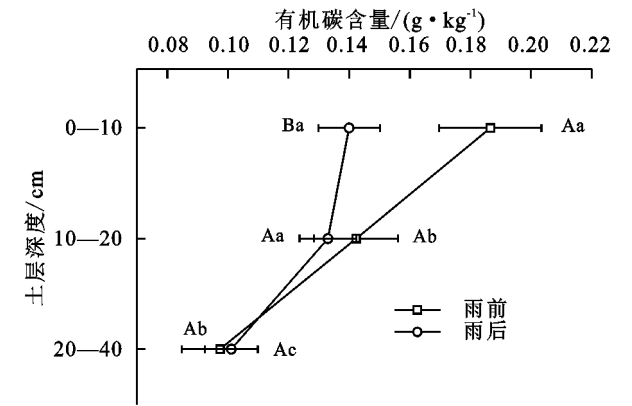
根据所取样点的实际观测数据来对砵砂岩区坡面径流小区降雨前后各土层有机碳含量进行描述性统计分析(图 3)及方差分析(图 4)。降雨前后不同土层深度的有机碳含量不尽相同,雨前各土层有机碳含量分别为 0.01~0.41,0.01~0.35,0.01~0.24 g/kg,差异显著($P<0.05$),总体属于较低水平,其均值分别为 0.19,0.14,0.09 g/kg;雨后各土层有机碳含量分别为 0.04~0.28,0.04~0.26,0.02~0.20 g/kg,均值为 0.14,0.13,0.10 g/kg,且 0—20 cm 土层有机碳含

量低于雨前,其中 0—10 cm 显著降低($P<0.05$),而 20—40 cm 土层有机碳含量有所增加。降雨前后土壤有机碳含量均表现为随着土层深度自上而下逐步降低,多富集在表层土壤。此外在地统计学中常用变异系数 CV(coefficient of variation)用来描述变量之间的离散程度,等级划为强变异、弱变异和中等变异,相应的划分标准为 $CV>100\%$, $CV<10\%$ 和 $10\%\leq CV\leq 100\%$ 。降雨前后不同土层有机碳变异系数分别为 57.26%~61.65%,44.33%~54.41%,均表现为中等程度变异,且雨后各土层土壤有机碳的变异系数均小于雨前。



注:箱线图中线为中位数,中部的“箱”为四分位间距,“箱”两端的“须”为最大值与最小值。

图 3 雨前和雨后描述性统计



注:AB 表示相同土层降雨前后的差异;ab 表示相同降雨条件下不同土层间的差异。

图 4 降雨前后有机碳含量垂直分布特征

2.2 降雨前后土壤有机碳空间自相关分析

降雨前后不同土层土壤有机碳存在不同程度的空间自相关性(图 5)。Moran I 系数的大小反映了空间自相关程度的强弱,系数越大,相关程度越大,反之越小。雨前雨后各土层有机碳空间自相关系数均大于 0,表现为正相关,在空间上呈现出一定的聚集分布。雨前有机碳空间自相关性随着土层深度的增加而减小,而雨后呈现出先减小后增加的趋势。降雨前后 0—10 cm 土层有机碳自相关性均较高,且雨后明显高于雨前。

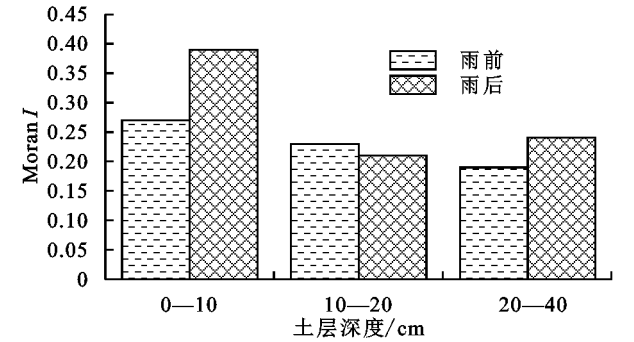


图 5 降雨前后各土层有机碳空间自相关分析

2.3 降雨前后土壤有机碳地统计学特征分析

通过 Arc GIS 地统计分析模块中的探索性分析工具对降雨前后不同土层采样数据进行正态 qq 图检验,得出分布类型基本符合正态分布。随后采用 GS⁺ 9.0 软件对其进行半变异函数拟合,得出 R^2 最大和 RSS 最小的最优半方差函数模型,从而提取特征参数(表 2)。

土壤有机碳所处的土层深度不同相应的拟合程度也存在差异,雨前各土层土壤有机碳均与高斯模型拟合效果较好,雨后则均与球状模型拟合程度较高。块金值均较小,说明采样密度可以很好地反映土壤有机碳空间变异情况。降雨前后 20—40 cm 土层的决定系数 R^2 更接近于 1,能够准确反映有机碳含量的空间变异特征。雨前各土层土壤有机碳含量空间变异

的基台值随着土层深度的增加而减小,分别为 0.012, 0.010,0.008,其变程参数 1.066,1.067,1.130 与雨后各土层有机碳的变程参数 1.065,1.068,1.235 均表现为土层越深,变程越大,且雨后 0—10 cm 土层有机碳变程值低于雨前,10—40 cm 高于雨前,其中 20—40 cm 高出最多。在 10—40 cm 土层中,雨前土壤有机碳结构比

别为 0.54,0.52,雨后均低于雨前,为 0.49,0.50,降雨前后均位于 0.25~0.75,空间相关性表现为中等程度相关,分别占总变异的 54%,52%与 49%,50%,说明其空间变异由随机因素与结构因素共同作用。而在 0—10 cm 土层中,雨后结构比 0.24 较高于雨前 0.23,二者均小于 0.25,具有较强空间相关性。

表 2 雨前、雨后不同土层有机碳含量变异函数参数

采样时期	土层深度/cm	最优模型	块金值	基台值	变程	结构比	残差	决定系数 R^2
雨前	0—10	高斯模型	0.00276	0.012	1.066	0.23	0.0000232	0.638
	10—20	高斯模型	0.00540	0.010	1.067	0.54	0.0000041	0.832
	20—40	高斯模型	0.00416	0.008	1.130	0.52	0.0000130	0.918
雨后	0—10	球状模型	0.00120	0.005	1.065	0.24	0.00000078	0.818
	10—20	球状模型	0.00147	0.005	1.068	0.49	0.00237	0.690
	20—40	球状模型	0.22490	0.451	1.235	0.50	0.00187	0.886

2.4 降雨前后土壤有机碳空间分布特征分析

在地统计学基础上,从 GS+拟合的最佳半变异函数中提取拟合参数,结合 Kriging 插值法对降雨前后径流小区内 0—40 cm 各层采样点的土壤有机碳含量进行空间插值(图 6、图 7),使得采样点数据能够通过更加连续的面数据来展示。由图 6 可得,土层越深斑块面积越大。降雨前后 0—20 cm 土层有机碳含量有明显的高低值分布,其中 0—10 cm 土层均呈岛状分布,斑块破碎化严重,连续性较弱,而 20—40 cm 土层斑块较零散,无明显规律。雨前 0—10 cm 土层土壤有机碳含量高值区集中在坡上,坡上坡下差异明显,而雨后斑块面积增大变异程度降低坡上有机碳含

量明显减少,高值区多集中于坡中,坡下也有少量分布。雨前 10—20 cm 土层有机碳含量高值集中分布在坡中,而雨后上坡部也有高值区分布。雨前 20—40 cm 土层有机碳含量最少,且坡上多分布为低值区,而雨后坡上多为高值区。

雨后不同土层土壤有机碳含量减去雨前的空间分布差值图可以清晰分辨出各层土壤有机碳的侵蚀和富集情况(图 8)。0—20 cm 土层有机碳含量整体表现为侵蚀状态,即侵蚀面积大于沉积面积,其中 0—10 cm 土层土壤有机碳含量减少最多侵蚀面积最大,侵蚀严重区贯穿于整个坡面,上坡部侵蚀最为剧烈。而 20—40 cm 土层沉积范围较大,总体表现为富集状态。

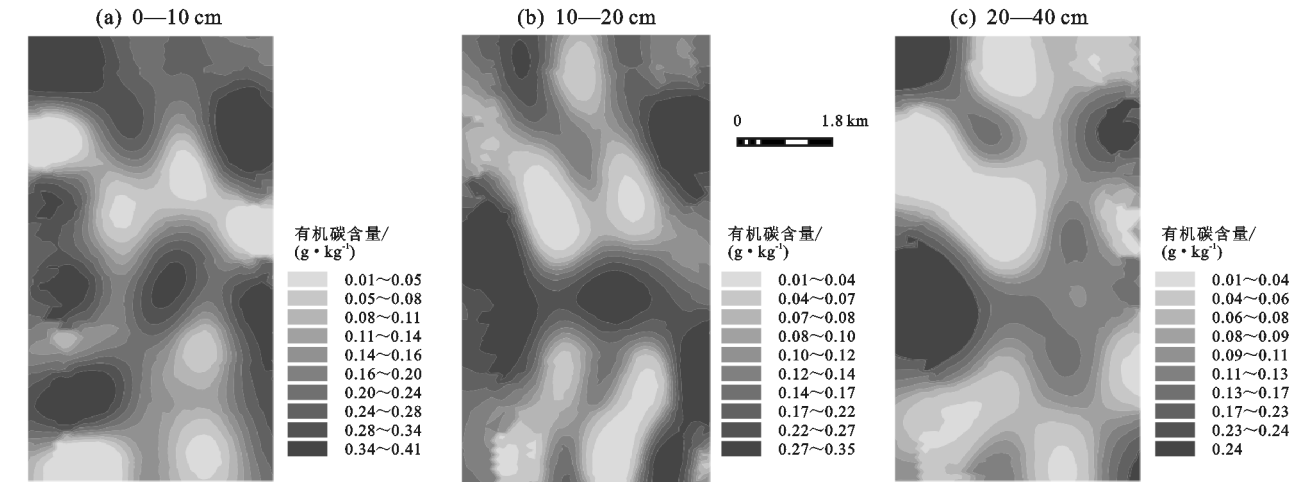


图 6 降雨前不同土层深度土壤有机碳空间分布

2.5 降雨前后土壤有机碳与土壤粒度组分的关系

土壤颗粒是土壤组成中一种不可缺少的物理性质,它对土壤有机碳有重要的影响。由图 9 可知,雨前各土层土壤粒度组分以砂粒为主,粉粒次之,黏粒最少。随着土层的增加粉粒随之增加,砂粒随之减少,黏粒则表现为先增大后减少的趋势。雨后各土层黏粒均减少,并随着土层深度的增加而降低;砂粒含量有所增加,表现为土层越深含量越高。通过分析降雨前后各土层土壤

有机碳含量与土壤粒度组分的相关关系来揭示水力侵蚀影响下土壤有机碳空间动态迁移的原因(表 3)。降雨前后土壤有机碳与粉粒均呈现出正相关关系,但相关性很小且不显著,与砂粒多表现为负相关,与黏粒则均存在较显著的正相关关系。雨前 0—10 cm 土层有机碳与黏粒表现出极显著的正相关关系,20—40 cm 土层正相关性不显著。雨后各土层有机碳与黏粒相关性较雨前更为强烈,均表现为极显著正相关。

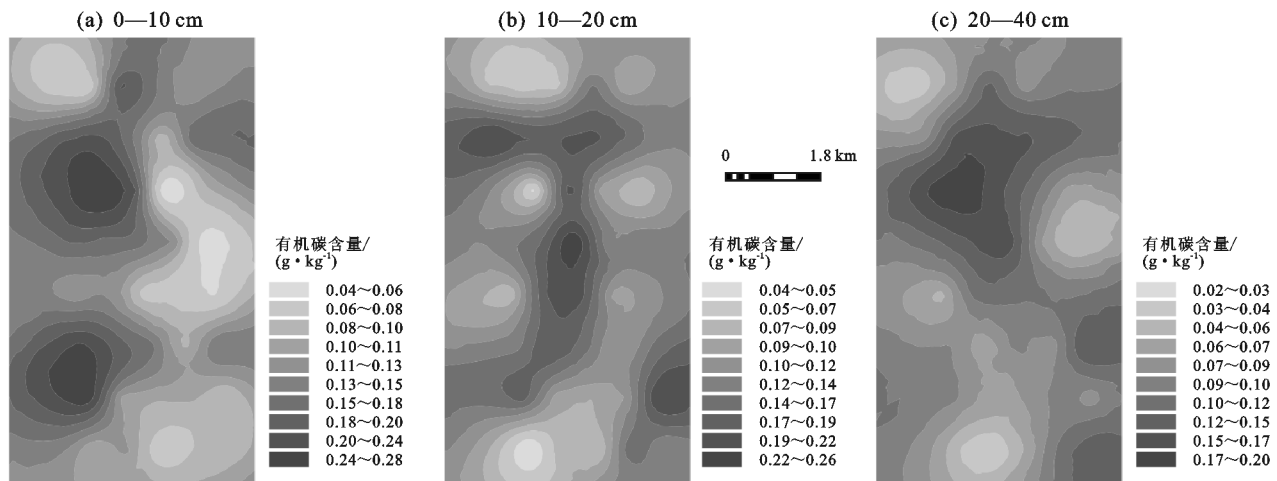


图 7 降雨后不同土层深度土壤有机碳空间分布

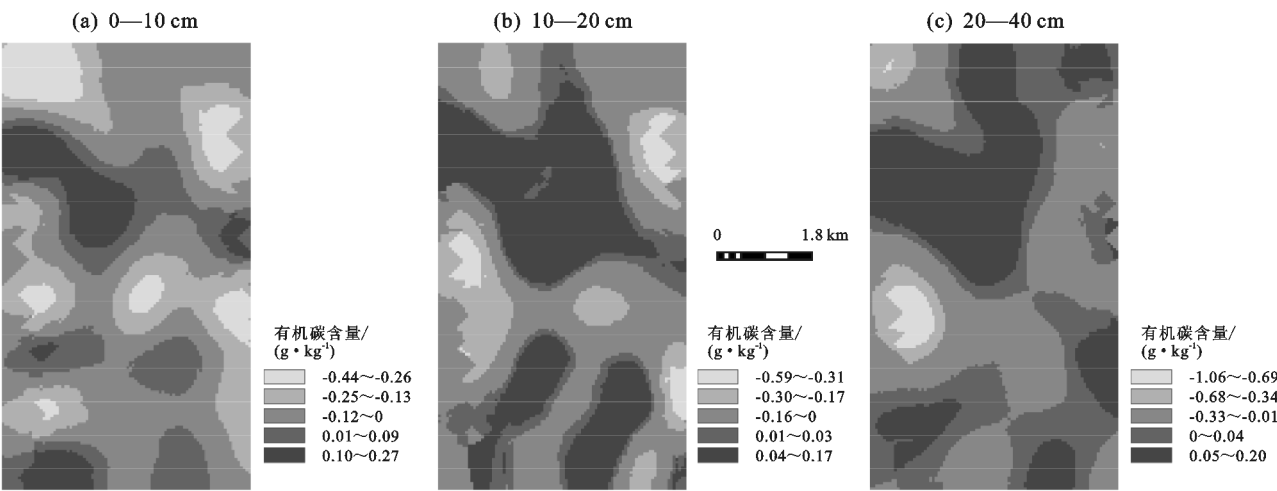


图 8 降雨前后不同土层有机碳含量空间分布差值

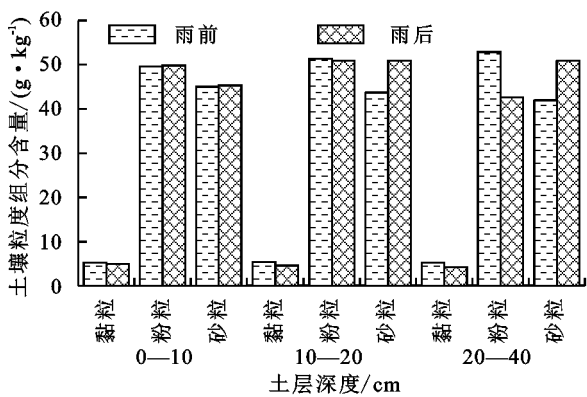


图 9 降雨前后不同土层土壤粒度组分含量变化

3 讨论

3.1 水力侵蚀影响下各土层有机碳总体特征变化

水力侵蚀是土壤碳库动态驱动因素,能够直接作用使其发生迁移与富集,并使其发生空间动态变化。本文以砭砂岩区建立的径流小区为试验采样点,结合传统的描述性统计法和地统计学方法来对降雨前后径流小区内 0—10,10—20,20—40 cm 土层中有机碳含量的空间分布情况进行研究。研究区土壤有机碳含量总体呈较低水平,并随着土层的增加而降低,这

可能由于砭砂岩区气候干旱土壤贫瘠,土壤表层微生物活性较大,地上残枝落叶分解传输养分,土层越深,动植物残体较少且岩石结构越紧实坚硬不易被植物根系所穿透从而吸收的有机质很少。这一结果与杨振奇等^[24]对砭砂岩区有机质空间分布的研究结果一致。降雨前后 0—10 cm 土层土壤有机碳差异最为显著($P<0.05$),王超华^[25]也有相同研究结果,分析其原因是表层土更易受到水蚀的扰动,从而对侵蚀的响应度更强损失量较大。而 20—40 cm 土层有机碳含量较雨前有所增加,根据张雪^[26]的研究可以认为,土壤有机碳在水力侵蚀的影响下呈现由表层土向着深层土垂直淋溶的现象。就变异系数和空间自相关系数来看,降雨前后土壤有机碳均为中等程度变异并表现为空间正相关,雨后变异程度降低且表层和深层空间自相关性增大,表明水力侵蚀一定程度上削弱了土壤有机碳的变异程度。通过简单的描述性统计特征并不能体现水力侵蚀如何使土壤有机碳在空间上进行再分配,因此需要借助地统计学进一步分析。

3.2 水力侵蚀影响下各土层有机碳空间动态变化

通过半变异函数拟合参数结合 Kriging 插值做

空间分布图可以清晰直观地了解降雨前后不同土层土壤有机碳的空间分布特征。在降雨作用下,随着土层的增加斑块面积增大,表明有机碳的变异性随着土层增加而降低,这一结果也可以通过基台值和变程值的变化来体现,这与贾宇平等^[27]对砖窑沟流域土壤有机碳的空间变异研究结果一致。

表 3 不同土层土壤有机碳与土壤粒度组分相关性

采样 时期	土层 深度/cm	项目	有机碳	黏粒	粉粒	砂粒
雨前	0—10	有机碳	1	0.255 **	0.233	−0.228
		黏粒	0.255 **	1		
		粉粒	0.233		1	
		砂粒	−0.228			1
	10—20	有机碳	1	0.120 *	0.003	−0.026
		黏粒	0.120 *	1		
		粉粒	0.003		1	
		砂粒	−0.026			1
	20—40	有机碳	1	0.227	−0.228	0.211
		黏粒	0.227	1		
		粉粒	−0.228		1	
		砂粒	0.211			1
雨后	0—10	有机碳	1	0.370 **	0.280	−0.305
		黏粒	0.370 **	1		
		粉粒	0.280		1	
		砂粒	−0.305			1
	10—20	有机碳	1	0.673 **	0.681 **	−0.682 **
		黏粒	0.673 **	1		
		粉粒	0.681 **		1	
		砂粒	−0.682 **			1
	20—40	有机碳	1	0.471 **	0.150	0.015
		黏粒	0.471 **	1		
		粉粒	0.150		1	
		砂粒	0.015			1

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关; * * 表示在 0.01 水平上显著相关。

土壤有机碳在坡面不同的空间部位表现出侵蚀和堆积的现象,结合李理等^[28]与陆银梅^[29]的研究,分析其原因为水力侵蚀更易作用于表层土壤而导致 0—10 cm 土层侵蚀较为严重,侵蚀区分布较多,使其雨后空间相关性范围减小,连续性减弱。部分有机碳在侵蚀中沿坡面产生了一定的位移到达坡下低洼处由于重力作用而富集,从而使得坡上表现为侵蚀状态,坡下为沉积状态,富集的有机碳之后可能会在下一段侵蚀中被带走,参与新一轮的物理迁移或者被坡上冲积下的泥沙所埋藏封存。除此之外,有机碳也会从表层土壤垂向淋滤到更深的土层,使得 20—40 cm 土层表现为沉积状态。图 2 所得坡中与坡下出现少量侵蚀沟表明,坡面微地貌的变化始终伴随着侵蚀的发生,并反映了侵蚀强度的变化过程,微地貌在一定

空间范围内能够影响坡面径流的汇集路径及水力学特征,土壤颗粒的搬运和分选随之改变,从而影响不同土层有机碳的运移。还有一部分流失的有机碳被径流和泥沙所携带到更远的地方,甚至是进入海洋。其侵蚀机理还需将微地貌的变化及侵蚀过程中产流产沙特征结合进行研究。由此可见,土壤有机碳含量空间分布格局能够通过水力侵蚀被明显改变,即土壤有机碳含量空间分布趋势在水平迁移影响的同时可能也会受到垂向淋滤的影响。

3.3 水力侵蚀影响下土壤有机碳迁移原因

土壤颗粒是组成土壤的重要因素之一,土壤有机碳容易与较细的土壤颗粒结合形成有机—无机复合体^[30]。本研究通过相关分析得出,降雨前后土壤有机碳与黏粒均存在较显著正相关关系,这与 Van Veen 等^[31]的研究一致。由于降雨前坡面各土层干扰较多存在较强的异质性,使得 20—40 cm 深层土壤相关性不甚显著,徐贵来^[32]也有相同研究。降雨初期主要表现为雨滴溅蚀,雨滴的打击使得粗颗粒物质被分散为细颗粒物质^[33],粒径表面积增大能够更好的吸附土壤有机碳,且砒砂岩的矿物组成主要为方解石和蒙脱石,在水力侵蚀作用下很容易被冲散风化,进而削弱了砒砂岩抗蚀能力。随着降雨历时以及降雨量的增加,产生大量的径流,降雨的主要侵蚀方式表现为冲刷,不断将黏粒带至坡下堆积富集,并在水的淋溶作用下使得黏粒垂直迁移到深层土层中。整个雨季中,通过整体的冲刷使得坡面变得均一化,异质性减弱,各土层中黏粒大量流失及少量富集,被吸附的有机碳也随之产生流失和富集,从而相关性增加,均表现为极显著正相关。综上,由于黏粒粒径较小、持水保肥性强,在机理上更容易吸附有机碳,且在水力侵蚀中最先受到迁移,所以土壤有机碳的空间运移主要受黏粒的牵动。

4 结 论

- (1)降雨前后均表现为土层越深有机碳含量越少,中等变异程度,且均为空间正相关,其中 0—10 cm 土层空间自相关性较大。相对于降雨前,雨后各土层有机碳变异程度减弱,0—20 cm 有机碳含量减少其中 0—10 cm 显著减少,而 20—40 cm 有所增加。
- (2)降雨前后土壤有机碳半变异函数分别与高斯模型、球状模型拟合程度较好,其变程值均随着土层深度的增加而增大。降雨前 10—40 cm 土层有机碳结构比表现为中等空间相关性,而 0—10 cm 土层有机碳表现为强空间相关性。相较于雨前,雨后 0—10 cm 土层空间自相关距离减小,结构比增大还表现为

强空间相关性。而 10—40 cm 土层空间自相关距离均增大,结构比减少为中等空间相关性。

(3)相较于雨前,雨后斑块面积增大,空间异质性减弱,且在不同空间位置呈现不同的侵蚀沉积分布。总体上坡上为侵蚀区坡下沉积区,0—20 cm 土层表现为侵蚀状态且 0—10 cm 土层有机碳侵蚀严重区分布范围大,而 20—40 cm 土层有机碳沉积面积大表现为沉积状态。

(4)降雨前后土壤有机碳与黏粒均为正相关,其中雨后相关性较强于雨前各土层均表现为极显著正相关,而与粉粒相关性极小且不显著,与砂粒则呈现出负相关。

参考文献:

[1] Albrecht W A. Loss of soil organic matter and its restoration. Soil and Men, 1938-Year Book Of Agric[M]. Washington D C: USDA,1938:347-360.

[2] 张珍明,周运超,黄先飞,等.喀斯特小流域土壤有机碳密度空间异质性及影响因素[J].自然资源学报,2018,33(2):313-324.

[3] 刘守赞,郭胜利,白岩.黄土高原沟壑区梁坡地土壤有机碳质量分数与土地利用方式的响应[J].浙江林学院学报,2005,22(5):490-494.

[4] 刘龙华,李凤全,赵庆磊,等.烧荒坡面表层土壤机械组成降雨前后的变化特征[J].安徽农业科学,2014,42(10):2881-2884.

[5] 任瑞雪,张凤宝,杨明义,等.坡面侵蚀过程中泥沙有机碳流失特征分析[J].水土保持学报,2017,31(6):15-19.

[6] 崔利论,袁文平,张海成.土壤侵蚀对陆地生态系统碳源汇的影响[J].北京师范大学学报(自然科学版),2016,52(6):816-822.

[7] 靳洋,孙希华,陈凤琴.鲁中山区坡面尺度下的土壤侵蚀特征分析[J].江苏农业科学,2019,47(21):309-312.

[8] 黄金权,程冬兵,王志刚,等.水力侵蚀作用下土壤有机碳动态研究进展[J].长江科学院院报,2016,33(12):27-32.

[9] 刘兆云,章明奎.侵蚀-沉积连续地形中土壤碳库的空间分异[J].水土保持通报,2009,23(3):61-65.

[10] Burrough P A. Soil variability: A late 20th century view[J].Soil and Fertilizers,1993,56:531-562.

[11] Van Oost K, Quine T A, Govers G, et al. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle [J].Science,2007,318(5850):626-629.

[12] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J].Science,2004,304(5677):1623-1627.

[13] 刘鹤龄,饶良懿,图尔荪,等.北方土石山区水蚀及水土保持措施对土壤有机碳的影响[J].浙江农林大学学报,2019,36(4):646-655.

[14] 李龙,姚云峰,秦富仓,等.赤峰市黄花甸子流域土壤有

机碳含量的空间变异特征研究[J].环境科学学报,2014,34(3):742-748.

[15] Quinton J N, Govers G, Van Oost K, et al. The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling[J].Nature Geoscience,2010,3(5):311-314.

[16] 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.

[17] 毕慈芬,乔旺林.沙棘柔性坝在砒砂岩地区沟道治理中的试验[J].沙棘,2000,13(1):28-34.

[18] 韩霁昌,刘彦随,罗林涛.毛乌素沙地砒砂岩与沙快速复配成土核心技术研究[J].中国土地科学,2012,26(8):87-94.

[19] 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[J].水土保持学报,2015,29(3):98-101,255.

[20] 张新胜.基于 Moran's I 和 GWR 模型的土壤重金属空间分布及其影响因素分析[D].河南 开封:河南大学,2018.

[21] 李亮亮,依艳丽,凌国鑫,等.地统计学在土壤空间变异研究中的应用[J].土壤通报,2005,36(2):265-268.

[22] 王艳妮,谢金梅,郭祥.ArcGIS 中的地统计克里格插值法及其应用[J].教育技术导刊,2008,7(12):36-38.

[23] 栗文玉,刘小芳,赵勇钢,等.黄土丘陵区人工柠条恢复为主小流域土壤有机碳空间变异性及其影响因素[J].水土保持研究,2020,27(2):15-22.

[24] 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.

[25] 王超华.黄土丘陵区水蚀对坡面土壤有机碳及土壤水热环境的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2016.

[26] 张雪.红壤丘陵区坡地侵蚀过程对土壤有机碳物理运移的影响规律研究[D].湖南 邵阳:湖南大学,2012.

[27] 贾宇平,苏志珠,段建南.黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳空间变异[J].水土保持学报,2004,18(1):31-34.

[28] 李理,朱文博,刘俊杰,等.宝天曼自然保护区土壤有机碳异质性及其影响因素[J].长江流域资源与环境,2020,29(3):687-695.

[29] 陆银梅.红壤坡地水力侵蚀下土壤有机碳迁移分布规律及流失过程模拟研究[D].湖南 邵阳:湖南大学,2015.

[30] 邢瑶丽.不同土地利用方式下热带 SOC 累积特征及相关性分析[D].海南 定安:海南师范大学,2019.

[31] Van Veen J A, Kuikman P J. Soil structural aspects of decomposition of organic matter by micro-organisms [J].Biogeochemistry,1990,11(3):213-233.

[32] 徐贵来.高庙屯小流域土壤有机碳储量及空间分布特征研究[D].北京:北京林业大学,2015.

[33] 陈晓燕,牛青霞,周继,等.人工模拟降雨条件下紫色土陡坡地土壤颗粒分布空间变异特征[J].水土保持学报,2010,24(5):163-168.