

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.03.029

杨振奇, 秦富仓, 李龙, 等. 砒砂岩区小流域土壤有机质的空间分布及其环境影响因素研究. 土壤, 2020, 52(3): 626–633.

砒砂岩区小流域土壤有机质的空间分布及其环境影响因素研究^①

杨振奇¹, 秦富仓^{1*}, 李龙¹, 任小同¹, 钱秋颖¹, 韩君²

(1 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 010018; 2 内蒙古大兴安岭重点国有林管理局, 内蒙古牙克石 022150)

摘要: 通砒砂岩区是黄河中游粗泥沙集中来源区之一。研究砒砂岩区小流域土壤有机质空间分布特征及其与环境因子的关系, 对于科学指导植被建设, 减少入黄泥沙有重要意义。本文以砒砂岩区典型小流域为研究对象, 于流域内布设 150 个样点, 按照 0~20、20~40、40~60 cm 划分土层深度采集土壤样品, 运用通径分析和冗余分析方法进行分析, 研究表明: 砒砂岩区小流域不同土地利用方式土壤有机质呈乔木林>灌木林>天然草地>耕地>裸地趋势, 不同地形土壤有机质呈沟底>坡面>山脊的规律; 冗余分析的结果显示, 复合地形指数、土地利用方式、坡位以及土层厚度对砒砂岩区土壤有机质空间变异规律的释变量最大; 通径分析的结果显示, 环境因子与土壤有机质的关系可以用多元线性方程 $Y = 1.054 + 0.099X_1 + 2.722X_2 + 0.766X_3 - 0.001X_4$ 来表示, 其中坡位和土地利用方式是影响砒砂岩区小流域土壤有机质空间变异的主导因素, 土层厚度与土壤有机质垂向变异密切相关。

关键词: 砒砂岩区; 土壤有机质; 环境解释; 冗余分析; 通径分析

中图分类号: S157 文献标志码: A

Study on Spatial Distribution of SOM and Environmental Impact Factors in Small Watershed of Feldspathic Sandstone Region

YANG Zhenqi¹, QIN Fucang^{1*}, LI Long¹, REN Xiaotong¹, QIAN Qiuying¹, HAN Jun²

(1 College of Desert Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2 Inner Mongolia Daxinganling Key State Forestry Administration, Yakeshi, Inner Mongolia 022150, China)

Abstract: Feldspathic sandstone region is one of the main concentrated sources of coarse sediment in the middle reach of Yellow River. Studying the relationship between environmental factors and soil organic matter (SOM) has great significance to guide vegetation construction and reduce coarse sediment in Yellow River. We collected soil samples at 0–20, 20–40 and 40–60 cm depths in 150 sampling sites in Baojiagou Watershed of Feldspathic sandstone region in Jungar Qi of Inner Mongolia, measured SOM of the samples and analyzed its relationship with environmental factors through path analysis and redundancy analysis. The results showed that SOM content followed the order of arbor > shrub > grassland > farmland > bare land in different land use types, and the order of valley floor > slope > ridge in different topography. Redundancy analysis (RDA) demonstrated that TWI (topographic wetness index, X_1), land use type (X_3), slope position (X_2) and soil thickness (X_4) could strongly explained the spatial variation of SOM. Path analysis showed that the relation between SOM and environmental factors could be presented by $Y = 1.054 + 0.099X_1 + 2.722X_2 + 0.766X_3 - 0.001X_4$. In conclusion, slope position and land use type were the dominant factors affecting the spatial variation of SOM, soil thickness was closely related to the vertical spatial variation of SOM in feldspathic sandstone region.

Key words: Feldspathic sandstone region; Soil organic matter; Environmental interpretation; Redundancy analysis; Path analysis

土壤有机质是土壤系统中结构最复杂, 功能也最为多样的物质之一。土壤有机质既是驱动土壤养分持续供给的重要动力, 也是改善土壤结构的关键因素^[1], 常将其作为表征土壤质量的指标之一。土壤有

①基金项目: 内蒙古科技计划项目(201802106)和国家自然科学基金青年基金项目(41807079)资助。

* 通讯作者(qinfc@126.com)

作者简介: 杨振奇(1993—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士研究生, 主要从事水土保持方面研究。E-mail: 843296578@qq.com

机质性质活跃且时空异质性明显,对气候、地形和人类活动等多种条件极为敏感,如何准确筛选出限制土壤有机质变化的环境因子并进行科学调控,是农林牧业共同的行业科技难题^[2]。特别是在干旱和半干旱地区,土壤有机质的动态变化决定了土地生产力的高低和生态恢复的方向,制约着植被建设和土壤侵蚀治理工作的顺利开展^[3-4]。因此,研究环境因素对土壤有机质的影响机制,是当前国内外土壤科学的热点问题之一^[5-6]。目前,地统计学方法是预测土壤有机质空间分布的常用手段^[7-8],但其无法定量地描述土壤有机质在多个环境梯度上的变化规律。冗余分析等约束性排序方法源于数量生态学,是研究变量与环境梯度关系的有效手段,已有部分专家学者将排序思想引入到土壤学的研究中,为进一步探索环境因素对土壤养分的影响机制奠定了基础^[9-10]。

砒砂岩区集中分布在晋陕蒙交界的三角区域,砒砂岩成岩程度低,矿物颗粒胶结强度弱,遇水成泥、遇风成砂。砒砂岩区土壤贫瘠且气候干旱,天然植被稀疏,侵蚀剧烈,治理难度大,其分布面积仅为 $1.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,多年平均输沙量却高达 $1.61 \times 10^8 \text{ t}$,是黄河流域中游段粗泥沙的集中来源区^[11]。自20世纪80年代末期开始,该区营造了大面积的人工植被,减水减沙成效显著,水土流失趋势初步得到控制。然而,部分区域存在人工植被成活率低,长势缓慢的问题。因此,探究制约砒砂岩区土壤有机质变化的主控因素,对于科学指导植被建设,改善区域生态环境质量有重要现实意义。关于影响土壤有机质变化的环境因素的研究成果相对丰富,但砒砂岩区既具备地形破碎和气候干旱的环境背景,又独具基岩易于风化侵蚀的区域特征。以往的研究区域多集中于黄土区、黑土区和紫色土区等区域^[12-14],并未对砒砂岩区单独进行研究,影响该区土壤有机质变化的环境因素尚不明确。基于以上背景,本研究选取砒砂岩区典型小流域为研究对象,冗余分析和通径分析的理论方法,研究影响砒砂岩区小流域土壤有机质变化的环境因素,以期能为砒砂岩区土壤养分的空间预测提供数据支撑,为砒砂岩区生态修复工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区鲍家沟流域行政上隶属于内蒙古准格尔旗暖水乡($110^{\circ}31' \sim 110^{\circ}35'E$, $39^{\circ}46' \sim 39^{\circ}48'N$),海拔 $1110 \sim 1300 \text{ m}$,地形北高南低;温带大陆性气候,冬季漫长干燥,夏季短暂温热,年均气温 7.2°C ,年

降水量 400 mm ;土壤类型以栗钙土为主,土壤容重 $1.36 \sim 1.61 \text{ g/cm}^3$,土壤全氮含量 $0.10 \sim 0.82 \text{ g/kg}$,土壤粉粒含量 $47.6 \sim 179.6 \text{ g/kg}$,土壤 pH $7.5 \sim 8.3$ 。研究区自20世纪80年代末陆续开展封育禁牧并大面积营造人工植被,土地利用类型以林地、灌木林和天然草地为主,主要人工植被有:油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、柠条(*Caragana korshinskii*)以及沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等;草本植物主要有羊草(*Leymus chinensis*)、猪毛菜(*Salsola nitraria*)和阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等。

1.2 样品采集及测定

本研究基于以研究区土地利用现状图和 $1:10000$ 地形图,根据研究流域地形特征和各类用地面积,布设取样点150个,样点布设见图1,样地基本情况如表1所示。野外土壤样品采集于2018年7月进行,用手持GPS采集样点坐标,并详细记录周围地形条件、基岩裸露情况、植被盖度和土层厚度信息。研究流域基岩出露面积较大,部分地区土层厚度小于 10 cm ,下伏砒砂岩,随着取样深度的延伸,岩石结构逐渐质密坚硬,取样难度极大,因而取样深度极限设置在 60 cm 。开挖土壤剖面,用环刀和铝盒采集 $0 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 和 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土样,每层取3个重复,每一取样点随机采取3份土样,土壤样品带回室内风干、处理以供分析测定。土壤有机质的测定采用 K_2CrO_7 外加热法,土壤容重和含水量的测定采用烘干法。

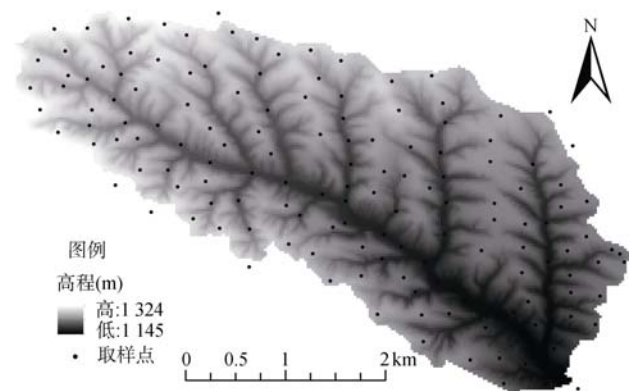


图1 样点分布图

Fig. 1 Distribution of soil sampling sites

1.3 环境因子的选取

参考前人的研究成果结合砒砂岩区小流域的区域特征^[15-16],本研究将从地形、土壤和土地利用3个属性层面选取环境因子,土壤属性选取了土壤含水量、土壤容重和土层厚度3个因子;土地利用因子1个;地形因子主要包含海拔、坡度、坡位、坡向和曲率,同时考虑到研究区地形破碎且侵蚀剧烈的特性,

加入能反映地形和径流侵蚀的地表切割深度、TWI(地形湿度指数)、SPI(汇流动力指数)和 STI(沉

积物运移指数)4 个因子; 共计 13 个因子。计算公式如下:

表 1 样点基本情况

Table 1 Information of soil samples

指标	地形			土地利用				
	沟底	坡面	山脊	乔木林	灌木林	草地	耕地	裸地
面积占比(%)	18.04	64.63	17.33	20.11	40.05	25.17	6.62	8.05
样本数	27	97	26	30	60	38	10	12
土壤类型	栗钙土	栗钙土	栗钙土	栗钙土	栗钙土	栗钙土	栗钙土	栗钙土

$$TWI = \ln \frac{Ac}{\tan a} \quad (1)$$

$$SPI = (Ac \times \tan \beta \times 100) \quad (2)$$

$$STI = \left| \frac{Ac}{22.13} \right|^{0.6} \times \left| \frac{\sin \beta}{0.0896} \right|^{1.3} \quad (3)$$

式中, Ac 为垂直与特定水流方向的汇流面积(m^2), β 为坡度($^\circ$)。

1.4 数据分析方法

本研究应用 Canoco 5.0 软件对土壤有机质因子进行 DCA 分析后(去趋势对应), 采用 RDA(冗余分析)结合偏蒙特卡罗检验方法筛选环境变量, 最终通过 PRDA(偏冗余分析)分析各环境因子的解释量。描述性统计、单因素方差分析、LSD 多重比较、相关性分析和通径分析在 SPSS 22.0 软件中完成, 数据可视化在 Origin 9.0 下完成。

2 结果与分析

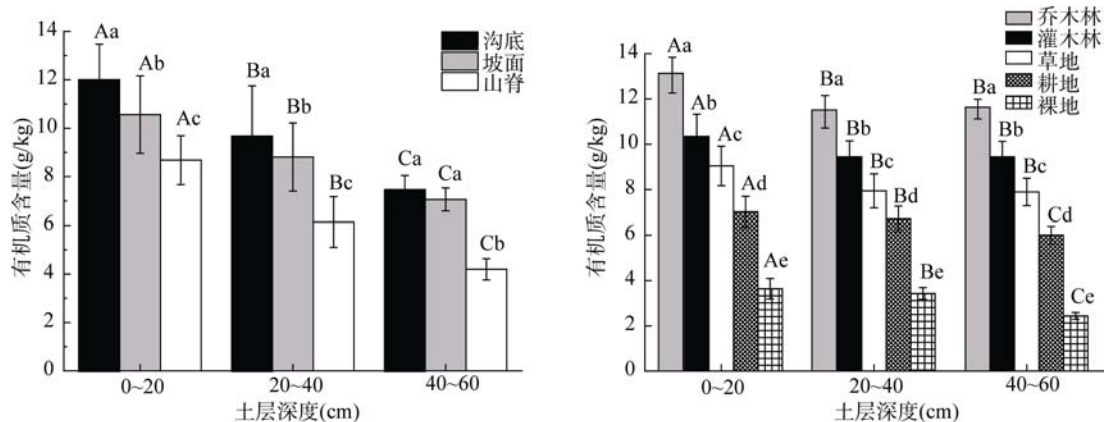
2.1 砒砂岩区小流域土壤有机质空间分布特征

研究区小流域土壤有机质含量的空间分布特征如图 2 所示, 不同地貌形态下土壤有机质含量差异显

著, 沟底土壤有机质含量最高, 其余依次为坡面和山脊, 其中山脊各层土壤的有机质含量最低分别为 8.68、6.14 和 4.21 g/kg。随土层深度的增加, 不同地貌形态土壤有机质含量整体呈下降趋势, 土层深度达到 40~60 cm 范围内, 沟底与坡面的土壤有机质含量差异不显著。不同土地利用类型下土壤有机质含量差异显著, 各层土壤有机质均呈乔木林>灌木林>草地>耕地>裸地的趋势, 其中裸地各土层土壤有机质含量最低, 分别为 3.64、3.43 和 2.44 g/kg。随着土层深度的增加, 耕地和裸地土壤有机质含量呈明显的下降趋势, 而乔木林、灌木林和草地在 20~60 cm 土层深度, 其土壤有机质含量均没有显著差异。表明了地形因素和土地利用方式均对土壤有机质含量的变化有影响作用, 但对于土壤有机质的垂向分布的影响相对较弱。

2.2 土壤有机质含量与环境因子的相关性

地形对地表的温度和水分起再分配的作用, 通过控制局部微环境影响土壤有机质的积累和分解过程。从表 2 中可以看出, 研究区土壤有机质与坡度、坡位、坡向和高程呈极显著负相关($P < 0.01$), 与地形湿度指数、河流动能指数以及沉积物运移指数均呈极显著正



(图中大写字母不同表示同一地貌或地类不同土层深度土壤有机质含量差异显著($P < 0.05$), 小写字母不同表示同一土层深度不同地貌形态或地类土壤有机质含量差异显著($P < 0.05$))

图 2 不同地形和土地利用的土壤有机质基本特征

Fig. 2 General characteristics of SOM under different topography and land use types

表 2 地形因子与土壤有机质的相关性
Table 2 Correlation between topographic factors and SOM

	土壤有机质	坡度	坡位	高程	坡向	地表切割深度	平面曲率	地形湿度指数	河流动能指数	沉积物运移指数
土壤有机质	1.000									
坡度	-0.402**	1.000								
坡位	-0.328**	0.325**	1.000							
高程	-0.264**	0.123	-0.095	1.000						
坡向	-0.347**	-0.103	-0.073	0.015	1.000					
地表切割深度	-0.153	0.450**	0.245**	0.455**	-0.105	1.000				
平面曲率	-0.106	0.112	0.364**	-0.045	-0.083	0.051	1.000			
地形湿度指数	0.559**	-0.434**	-0.448**	-0.408**	-0.031	-0.374**	-0.280**	1.000		
河流动能指数	0.415**	-0.339**	-0.321**	-0.092	0.048	-0.224**	-0.110	0.544**	1.000	
沉积物运移指数	0.424**	-0.309**	-0.471**	0.027	0.091	-0.116	-0.179*	0.517**	0.889**	1.000

注：表中 * 表示相关性达到 $P<0.05$ 显著水平，**表示相关性达到 $P<0.01$ 显著水平，下表同。

相关($P<0.01$)，与地表切割深度和平面曲率没有显著的相关关系。坡度与地表切割深度、坡位呈极显著正相关($P<0.01$)，与地形湿度指数、河流动能指数以及沉积物运移指数均呈极显著正相关($P<0.01$)。充分说明了，随着坡度的增加，地表切割深度增加，地形愈加破碎，径流冲刷剧烈，土壤有机质大幅流失。相反，坡度越低，地形越平缓，径流流速缓慢，有利于土壤细颗粒的沉积和有机质的积累。因此缓坡和沟谷地带是土壤有机质高值区的聚集区，而陡坡和山脊等地貌类型区是土壤有机质低值区的聚集区。

土地利用方式和土层厚度的不同则决定了土壤

理化性质并间接地影响地表植被覆盖度和枯落物的输入量，从而限制着土壤有机质的物质来源。表 3 列出了土壤有机质含量与土壤因素和土地利用方式的相关性，可以看出土壤有机质含量与土地利用方式和土层厚度呈极显著正相关($P<0.01$)，相关系数分别高达 0.725 和 0.687。土壤有机质与土壤含水率呈显著正相关($P<0.05$)。土层厚度与土地利用方式和土壤含水率分别呈显著正相关($P<0.05$)和极显著正相关($P<0.01$)，表明土壤有机质变化受土地利用方式的影响相对土壤因素更为强烈，也说明了砒砂岩地区土层厚度显著影响着土壤的水肥特征和土地利用方式。

表 3 土地利用和土壤因子与土壤有机质的相关性
Table 3 Correlation between land use type or soil factors and SOM

	土壤有机质	土层厚度	土壤容重	土地利用方式	土壤含水率
土壤有机质	1.000				
土层厚度	0.687**	1.000			
土壤容重	-0.234	0.055	1.000		
土地利用方式	0.725**	0.544*	-0.105	1.000	
土壤含水率	0.434*	0.728**	0.348	0.489	1.000

2.3 土壤有机质与环境因子的关系

约束性排序思想是将相应变量按照一定的关系排列在特定的环境梯度上，从而揭示变量对多变环境梯度的响应机制。对研究流域各样地土壤有机质含量进行去趋势对应分析，由表 4 可知典范轴梯度长度的最大值为 0.605，适宜采用冗余分析方法开展进一步分析。采用自动预选和偏蒙特卡罗检验结合方式，筛选出最优变量数为 4 个($P<0.05$)，分别为土地利用方式、地形湿度指数、坡位和土层厚度。冗余分析结果显示，第一轴和所有轴的蒙特卡罗置换检验结果 P 值均小于 0.05，说明冗余分析的结果可信($\alpha=0.05$)，

土壤有机质-环境因子与 4 个排序轴的相关度依次为 0.646、0.260、0.191、0.067，环境因子与第一轴的相关系数大小顺序为 $0.599>0.445>0.396>0.104$ ，第一轴对响应变量的解释量达到了 98.8%，前两轴对响应变量的累计解释量达到了 99%，说明前两轴能够充分反映土壤有机质含量与环境因子之间的响应关系。

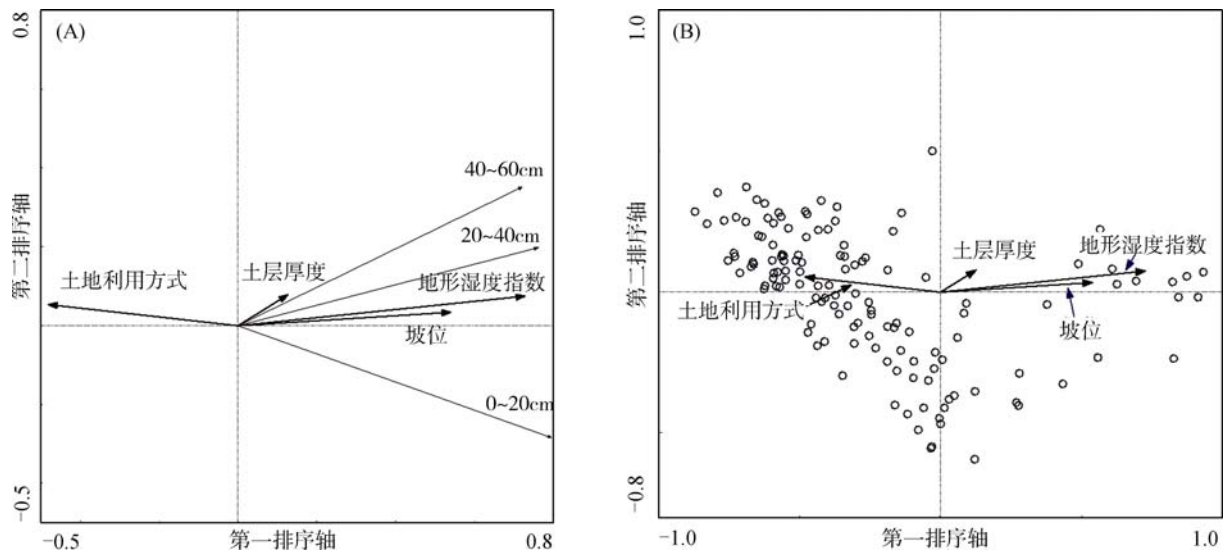
排序图 3A 直观地显示了环境因子与不同土层深度土壤有机质含量的关系，环境因子箭头的长度反映了环境因子对响应变量的解释量，环境因子解释量大小顺序依次为地形湿度指数>土地利用方式>坡位>

土层厚度;箭头的夹角可以反映出环境因子与土壤有机质含量的相关性,(夹角 $<90^\circ$ 时两变量呈正相关关系,反之呈负相关关系)可以看出土地利用因子与各深度土壤有机质含量呈负相关关系,土层厚度因子与各土层深度土壤有机质含量均呈正相关关系,地形湿

度指数和坡位因子与 0~20 cm 深度土壤有机质呈正相关关系。图 3B 反映了环境因子与所有样地土壤有机质含量的关系,样地距离反映了各样地土壤有机质含量的相近程度,可以看出部分样地的聚集现象与土地利用因子和地形湿度指数因子有关。

表 4 土壤有机质与环境因子冗余分析结果
Table 4 Results of RDA of SOM and environmental factors

统计量	典范轴			
	第 1 轴	第 2 轴	第 3 轴	第 4 轴
DCA 梯度长度	0.605	0.230	0.282	0.000
相关系数				
变量-环境相关度	0.646	0.260	0.191	0.067
土地利用方式	-0.396	0.057	0.115	0.031
地形湿度指数	0.599	0.079	-0.010	0.014
坡位	0.445	0.036	0.094	-0.035
土层厚度	0.104	0.082	-0.125	-0.045
冗余分析				
特征值	0.379	0.004	0.001	0.000
解释量	37.9	38.3	38.3	38.4
累积解释量(%)	98.8	99.8	100	100
置换检验				
<i>F</i>	88.515		-	
<i>P</i>	0.002		-	
		22.554		
		0.002		



(A. 不同土层深度土壤有机质与环境因子关系, B. 各样地土壤有机质含量与环境因子关系)

图 3 土壤有机质与环境因子冗余分析排序结果

Fig. 3 Ranking results of RDA of SOM and environmental factors

2.4 影响土壤有机质含量变化的环境因子通径分析

冗余分析筛选出了影响砒砂岩区小流域土壤有机质空间异质性的 4 个关键因子,主控因子的直接效应和间接效应仍需要通过进一步的通径分析来确定。将土壤有机质与地形湿度指数等 4 个因子间建立回

归分析,得到回归方程为:

$$Y = 1.054 + 0.099X_1 + 2.722X_2 + 0.766X_3 - 0.001X_4 \quad (4)$$

回归方程的 *F* 检验值为 303.807, $P < 0.01$ 达到极显著水平, R^2 为 0.890, 方程具有统计学意义。

表 5 为 4 个环境因子在回归方程中所起到的直接

作用和间接作用。直接途径系数反映了环境因子对土壤有机质空间异质性的直接影响作用,可以看出各因子的直接影响作用程度依次为坡位(0.603)、土地利用方式(0.336)、地形湿度指数(0.114)和土层厚度(-0.016),表明坡位因子对砒砂岩区小流域土壤有机质空间异质性的直接影响作用最为强烈。间接途径系数表示某环境因子通过其余环境因子对土壤有机质空间异质性的间接影响作用,间接影响作用的大小依次为地形湿度指数>坡位>土层厚度>土地利用方式,

说明地形湿度指数对土壤有机质空间异质性的影响作用最大,主要通过影响土地利用方式等其他因素产生的间接影响作用。决定系数是通径分析中的综合性决策指标,对各环境因子的综合影响作用进行排序,决定系数大小顺序为土地利用方式>坡位>土层厚度>地形湿度指数,因此,土地利用方式和坡位因子是影响砒砂岩区小流域土壤有机质空间异质性的主控因子,而地形湿度指数和土层厚度指数是次要因素。

表 5 环境因子通径分析结果

Table 5 Results of path analysis of environmental factors

环境因子	直接通径系数	间接通径系数					R^2
		通过 X_1	通过 X_2	通过 X_3	通过 X_4	间接效果	
地形湿度指数 X_1	0.114	-	0.180	0.360	0.101	0.007	-0.088
坡位 X_2	0.603	0.104	-	0.697	0.076	0.006	0.311
土地利用方式 X_3	0.336	0.200	0.668	-	-0.068	-0.009	0.349
土层厚度 X_4	-0.016	0.135	0.177	-0.163	-	-0.004	-0.023

3 讨论

3.1 影响砒砂岩区土壤有机质空间异质性的主导因素

土壤中有机质含量的高低取决于有机物的输入和分解过程,相关研究表明,地形因素是影响县域和流域等中小尺度区域土壤有机质空间异质性的主导性因素^[17-18],特别是小流域尺度范围,海拔、坡度和坡向等因素对地表水热资源起到了再分配的作用,从而造成了局部区域的温湿度差异,为土壤有机质的积累和分解缔造了不同的分解环境。本研究选取了 5 个反映基本地表形态的指标和 4 个综合反映地形和径流侵蚀的指标,除地表切割深度和平面曲率外,其余均与土壤有机质呈极显著的相关关系,充分说明了地形因素是影响土壤有机质空间异质性的的重要因素,本研究认为坡位是制约砒砂岩区小流域土壤有机质空间异质性的主导性因子。砒砂岩区侵蚀剧烈,山脊处坡度陡峭且基岩裸露,土壤有机质含量最低,随着雨季径流的产生土壤细颗粒由坡顶搬运至沟底滩涂地带平缓处沉积,土壤有机质随之迁移,因而沟底土壤有机质显著高于坡面和山脊处,与孟国欣等人^[19]的研究成果一致。此外,部分专家学者指出,土地利用方式与土壤有机质空间异质性密切相关^[20-21],本研究得出,砒砂岩区小流域不同土地利用方式土壤有机质含量呈乔木林>灌木林>草地>耕地>裸地的规律,这充分体现了砒砂岩区的基岩特征和气候条件。研究

表明,砒砂岩是一种成岩程度较低的岩石互层,其原生矿物主要为长石和石英,成分相对单一,矿质营养元素来源匮乏,从而限制了风化成土过程中养分释放对土壤的补给作用^[22-23]。因而,砒砂岩区整体土壤有机质含量较低,且存在大面积基岩裸露区域,故裸露区土壤有机质含量最低。以研究区小流域为代表的砒砂岩区气候干旱,多风少雨,土地生产力低下且缺少灌溉条件,耕地质量差,人工林地是该区的主要土地利用类型。杨振奇等^[24]的研究结果显示,砒砂岩区乔木林地枯落物蓄积量显著高于灌木林地和草地,林地有着丰富的有机物输入源,因此乔木林的土壤有机质含量显著高于其他土地利用类型。

3.2 影响砒砂岩区土壤有机质空间异质性的次要因素

制约土壤有机质空间异质性的主导因素多与研究的尺度密切相关,可以反映出该尺度下土壤有机质含量的整体变化趋势,但土壤有机质在局部区域的不确定性和异质性则取决于其他辅助性因素。已有研究表明,土壤有机质的垂向分布与气象因素和土壤类型关系密切^[25],然而在气象和土壤类型一致的小尺度区域,土层厚度的差异则会显著地影响着土壤养分循环和土壤水分运动过程^[26],特别是在砒砂岩区,该区基岩大面积裸露,土层浅薄,部分地区土层厚度小于 10 cm,杨振奇等^[27]的研究结果显示,土层厚度与地表的草本植物的生物多样性和生物量密切相关,因而间接影响着枯落物的输入量。本研究 RDA 的分析

结果也证实,虽然土层厚度的整体解释量低于其他环境因子,但其与各土层的土壤有机质含量关系密切(夹角均呈锐角),说明土层厚度是影响砒砂岩区土壤有机质的垂向异质性规律的关键性因素。此外,除了地形、土地利用方式和土层厚度以外,土壤的水分特征也影响着土壤有机质的空间分布特征,流域内土壤水分的分布规律常通过坡度和汇水面积来进行模拟,地形湿度指数是同时考虑地形和土壤特性对土壤水分分布影响的综合性指标,可以量化流域内某区域的理论土壤水分含量和径流产汇能力^[28]。本研究通过对土壤有机质与环境因子进行 RDA 分析结果显示,坡位、土地利用、土层厚度和地形湿度指数对土壤有机质空间异质性的解释能力最强,进一步的通径分析结果显示,土层厚度和地形湿度的直接通径系数低于坡位和土地利用,但其通过其余环境因子的间接影响作用较大,因此可以认为土层厚度和地形湿度指数是影响砒砂岩区小流域土壤有机质空间异质性的次要因素。

4 结论

1)砒砂岩区小流域沟底土壤有机质空间分布特征是受地形和土地利用因素综合作用的结果,在该区独特的地形条件下,受土壤侵蚀的长期搬运,土壤有机质含量表现为沟底>坡面>山脊;大范围的封育禁牧和退耕还林措施有助于改善砒砂岩区土壤有机质含量,不同土地利用类型下土壤有机质含量呈现为乔木林和灌木林高于草地和耕地的趋势;部分砒砂岩出露区域,侵蚀剧烈,植被恢复困难,其土壤有机质远低于其他地类。

2)坡位、土地利用方式、地形湿度指数和土层厚度是影响砒砂岩区小流域土壤有机质空间异质性的主要因素,其中坡位和土地利用方式起主导作用,地形湿度和土层厚度起间接影响作用,土层厚度是引起土壤有机质垂向异质性的主要因素。

3)根据砒砂岩区小流域土壤有机质的空间变异规律和环境因子的影响机制,建议在砒砂岩区植被建设的实践中,对土壤养分和水分要求较高的树种应配置在沟谷或缓坡地带,坡面和沟道地带应以耐干旱贫瘠的灌木树种为主并配置径流拦蓄措施,而基岩裸露的山脊地带的植被配置应以封育措施为主。

参考文献:

[1] 杨帆,徐洋,崔勇,等.近 30 年中国农田耕层土壤有机质含量变化[J].土壤学报,2017,54(5):1047-1056.

- [2] 王绍强,周成虎,李克让,等.中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J].地理学报,2000,55(5):533-544.
- [3] Schmidt M, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. Nature, 2011, 478(7367): 49-56.
- [4] 唐梦迎,丁建丽,夏楠,等.干旱区典型绿洲土壤有机质含量分布特征及其影响因素[J].土壤学报,2017,54(3):759-766.
- [5] Buurman P, van Bergen P F, Jongmans A G, et al. Spatial and temporal variation in podzol organic matter studied by pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry and micromorphology[J]. European Journal of Soil Science, 2005, 56(2): 253-270.
- [6] Roner M, D'Alpaos A, Ghinassi M, et al. Spatial variation of salt-marsh organic and inorganic deposition and organic carbon accumulation: Inferences from the Venice lagoon, Italy[J]. Advances in Water Resources, 2016, 93: 276-287.
- [7] 谢恩泽,赵永存,陆访仪,等.不同方法预测苏南农田土壤有机质空间分布对比研究[J].土壤学报,2018,55(5):1051-1061.
- [8] 黄魏,韩宗伟,罗云,等.基于地形单元的土壤有机质空间变异研究[J].农业机械学报,2015,46(4):161-167.
- [9] 龙健,廖洪凯,李娟,等.基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究[J].环境科学,2012,33(6):2131-2138.
- [10] 郭欣欣,付强,卢贺,等.东北黑土区农林混合利用坡面土壤水分空间异质性及主控因素[J].农业工程学报,2018,34(19):123-130.
- [11] 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.
- [12] 连纲,郭旭东,傅伯杰,等.黄土高原小流域土壤养分空间变异特征及预测[J].生态学报,2008,28(3):946-954.
- [13] 高凤杰,马泉来,韩文文,等.黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局[J].环境科学,2016,37(5):1915-1922.
- [14] 张国平,郭澎涛,王正银,等.紫色土丘陵地区农田土壤养分空间分布预测[J].农业工程学报,2013,29(6):113-120,294.
- [15] 魏孝荣,邵明安,高建伦.黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳与环境因素的关系[J].环境科学,2008,29(10):2879-2884.
- [16] 孙文义,郭胜利.黄土丘陵沟壑区小流域土壤有机碳空间分布及其影响因素[J].生态学报,2011,31(6):1604-1616.
- [17] 连纲,郭旭东,傅伯杰,等.黄土高原县域土壤养分空间变异特征及预测——以陕西省横山县为例[J].土壤学报,2008,45(4):577-584.
- [18] 李龙,秦富仓,姜丽娜,等.土地利用方式和地形对半干旱区土壤有机碳含量的影响[J].土壤,2019,51(2):406-412.
- [19] 孟国欣,查同刚,张晓霞,等.植被类型和地形对黄土区退耕地土壤有机碳垂直分布的影响[J].生态学杂志,2017,36(9):2447-2454.

- [20] 杨帆, 潘成忠, 鞠洪秀. 晋西黄土丘陵区不同土地利用类型对土壤碳氮储量的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 318-324.
- [21] 薛志婧, 侯晓瑞, 程曼, 等. 黄土丘陵区小流域尺度上土壤有机碳空间异质性[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 160-163, 168.
- [22] 伍艳, 杨忠芳, 刘慧, 等. 砒砂岩物质组成及其对养分含量的影响[J]. 人民黄河, 2016, 38(6): 18-21, 25.
- [23] 石建省, 叶浩, 王强恒, 等. 水岩作用对内蒙古南部砒砂岩风化侵蚀的影响分析[J]. 现代地质, 2009, 23(1): 171-177.
- [24] 杨振奇, 秦富仓, 李晓琴, 等. 砒砂岩区主要造林树种枯落物及林下土壤持水特性[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 118-122.
- [25] 杨敏, 杨飞, 杨仁敏, 等. 祁连山中段土壤有机碳剖面垂直分布特征及其影响因素[J]. 土壤, 2017, 49(2): 386-392.
- [26] 王志强, 刘宝元, 海春兴. 土壤厚度对天然草地植被盖度和生物量的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4): 164-167.
- [27] 杨振奇, 秦富仓, 张晓娜, 等. 砒砂岩区不同立地类型人工沙棘林下草本物种多样性环境解释[J]. 生态学报, 2018, 38(14): 5132-5140.
- [28] 张彩霞, 杨勤科, 李锐. 基于DEM的地形湿度指数及其应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2005, 24(6): 116-123.