

刘鹏, 蒋忠诚, 蓝芙宁, 等. 土地利用对溶丘洼地土壤容重、水分和有机质空间异质性的影响: 以南洞流域驻马哨洼地为例[J]. 中国岩溶, 2019, 38(1): 100-108.

DOI: 10. 11932/karst20190111

土地利用对溶丘洼地土壤容重、水分和有机质空间异质性的影响

——以南洞流域驻马哨洼地为例

刘鹏^{1,2}, 蒋忠诚², 蓝芙宁², 李衍青^{2,3}, 于洋⁴

(1. 广西大学林学院, 南宁 530001;

2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室, 广西 桂林 541004;

3. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074; 4. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要:为了探究溶丘洼地土壤空间异质性及其影响因素, 本文以驻马哨溶丘洼地为研究对象, 利用经典统计学和地统计学的方法, 从不同土地利用、坡度、坡向、土壤深度分析土壤容重、水分及有机质的空间异质性。结果表明: (1) 土壤有机质为强变异, 变异系数为 0.71, 容重和水分变异系数分别为 0.15、0.11, 属中等变异, 土壤容重和水分呈极显著负相关, 和有机质呈显著负相关, 相关系数分别为 -0.609、-0.581; (2) 块基比介于 0.78~0.97, 随机部分引起的空间变异程度较大, 空间自相关较小, 且模型拟合较好。 (3) 耕地土壤有机质、水分含量最低, 容重最大, 而灌木土壤反之; (4) 北坡土壤容重高于南坡, 变异系数小于南坡; 而土壤水分、有机质低于南坡, 变异系数高于南坡。从不同坡位、坡向的比较中, 皆体现了土地利用对土壤空间异质性的影响。在土地利用作为主要因素的影响下, 驻马哨洼地土壤水分、容重、有机质由随机部分引起的空间变异增加, 空间自相关减小。

关键词: 空间异质性; 土地利用; 溶丘洼地

中图分类号: S153 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2019)01-0100-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

土壤的空间异质性是指土壤发生过程和格局在空间分布上的不均匀性和复杂性^[1]。土壤形成过程中, 由于不同地区母质、气候、地形、植被、微生物等方面的不同或同一地区时间和空间上的不同而存在差异。在气-水-岩-生的相互作用下, 喀斯特生态系统具有土层浅薄、土壤覆盖不连续、脆弱性强、小生境具有高度空间异质性。很多学者对喀斯特地区土壤的空间异质性展开了深入的研究并取得了系列成果^[2-9], 这些研究多集中于喀斯特峰丛洼地和高原地

貌区。如张伟^[10]探讨了喀斯特峰丛洼地土地利用和地形因素对土壤养分的影响; 张忠华^[11]研究了峰丛坡面上土壤养分的空间异质性特征; 张珍明^[12]对喀斯特高原土壤有机碳密度空间异质性及影响因素进行了分析。而喀斯特断陷盆地作为西南重要生态屏障区, 水土方面的研究和治理, 起步晚, 投入少, 相关资料十分缺乏^[13]。南洞地下河流经滇东南工业中心蒙自一开远断陷盆地, 存在水土漏失强烈、资源利用不合理等问题。溶丘洼地区作为断陷盆地区重要地貌单元, 人口密度大, 植被覆盖度低, 土地利用方式不

基金项目: 国家重点研发专项计划课题(编号: 2016YFC0502503); 国家自然科学基金青年基金(41502342); 广西自然科学基金(2015GXNSFBA139188); 国家自然科学基金面上项目(41471447)

第一作者简介: 刘鹏(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事水土流失研究。E-mail: guaiguai@126.com。

通信作者: 李衍青(1982-), 男, 高级工程师, 长期从事岩溶环境学研究。E-mail: lyq@karst.ac.cn。

收稿日期: 2018-03-03

合理,水土流失强度大,地质灾害频发,严重威胁珠江中下游经济区的生态安全^[14]。目前对该区域的研究较少,尤其是对土壤空间异质性的研究。

土壤容重、水分、有机质是揭示土壤环境最敏感的指标,可反映自然因素和人类活动对土壤的影响。人类活动引起的土地利用变化,可改变土壤性质并导致这些指标发生变化^[15]。本研究以断陷盆地内一典型溶丘洼地为对象,分析坡向、坡位、土地利用方式对土壤空间异质性的影响,阐明土壤水分、容重、有机质含量变化特征及其内在关系,找到影响断陷盆地溶丘洼地土壤(容重、水分、有机质)空间异质性的主要因素;运用地统计学方法,通过半方差函数,找出最优拟合模型,分析土壤空间相关性强弱及影响因素,为后续深入研究断陷盆地水土保持以及土地的合理开发利用提供参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

南洞地下河流域面积 1 684.8 km²,年总径流量达 3 亿 m³,属于珠江水系南盘江二级支流,是我国南方四个超大型地下河系统之一。位于 103°11'~103°

44'E,23°15'~23°44'N,地下河总长约 75 km,流经蒙自、草坝、大庄盆地,整个流域出口位于开远市境内的南洞台,出口标高 1 067 m,距离开远市 8 km^[16-17]。流域范围可分为上游高原区、中游盆地区、下游丘陵区,气候类型为低纬度亚热带季风气候,受地形地貌影响,区域具有高原立体气候的特征,年均气温变化范围在 11.5~18.6 °C,多年平均气温约 16.0 °C,年均降水量变化范围在 730~1 070 mm,多年平均值为 904 mm,降雨主要集中在 5—9 月^[18-19]。

溶丘洼地作为南洞流域内的普遍存在的地貌类型,主要位于流域中下游,因受到人类干扰大,水土流失严重,其水土资源特征及影响因素直接关系到整个流域水土资源的变化。我们在南洞地下河下游段的驻马哨一带选取一个长约 800 m、宽约 300 m 的洼地做为研究区。洼地内主要含水层为三叠系中统个旧组第一、二、三段,以白云质灰岩为主;隔水层为三叠系中统法郎组上段,以碎屑岩为主。洼地内基岩出露,呈轻—中度石漠化,洼地结构形态完整,人类活动较频繁。南洞地下河的中下游地区,有类似驻马哨的洼地上百个,坡面汇流产生的径流与泥沙经由洼地下部的消水洞与裂隙进入南洞地下河管道,最后出露于南洞口^[20-21]。

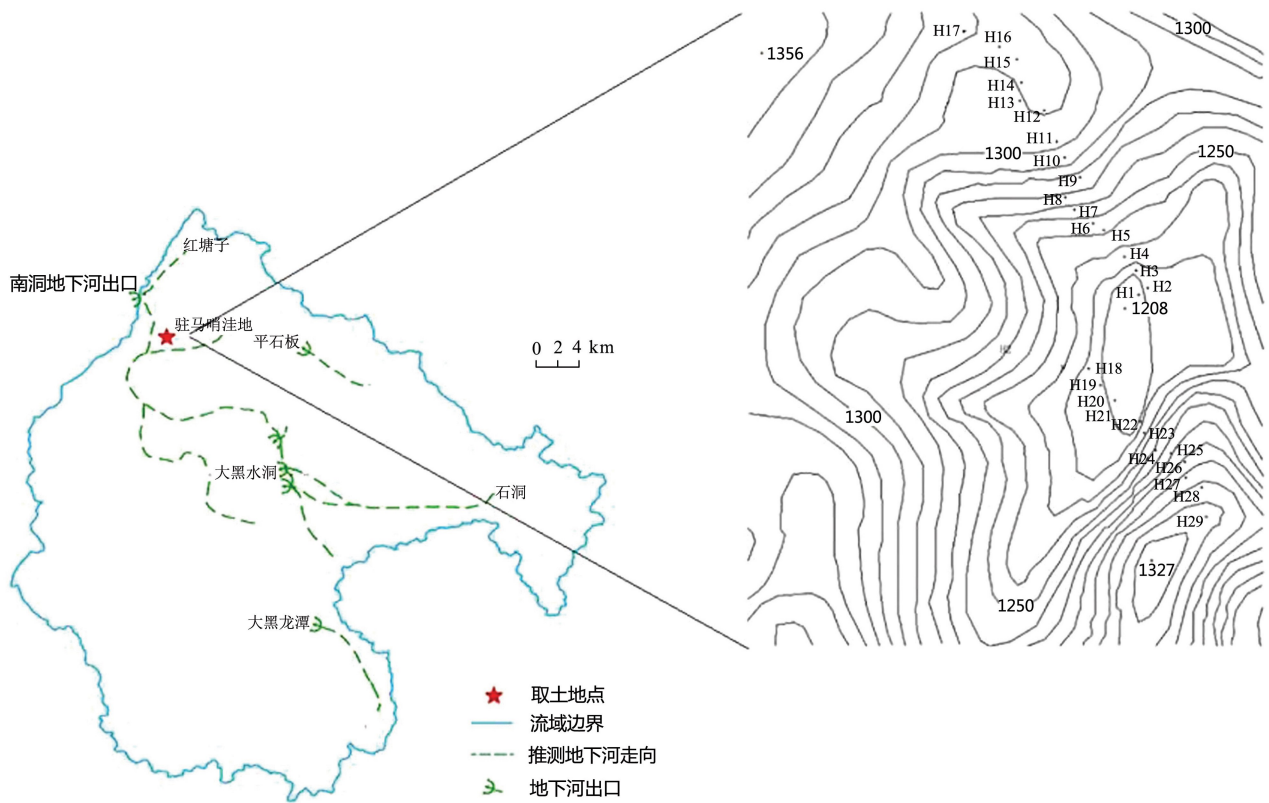


图 1 驻马哨洼地的位置及取样点分布

Fig. 1 Location and sampling point distribution of Zhumashao depression

1.2 样品采集

根据前人研究^[22],坡位、坡向、土层深度、土地利用是影响土壤容重、水分、有机质空间异质性主要因素,因此取样点分布考虑了样点能反映上述因素的影响。在驻马哨溶丘洼地中分别选取南北两个坡面,根据坡度与地形,将整个坡分为上坡(据测量,坡度在 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 之间,下同)、中坡(坡度在 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$)、下坡(坡度在 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$)、坡底(坡度 $\leq 3^{\circ}$);从坡底到坡顶,间隔10 m选择一个样点,用皮尺精确测量,北坡选取17个采样点,南坡选取12个采样点,每个样点分别取0~20 cm、20~40 m两层土壤,每层土壤取3个重复样。为了减少气候条件等因素的影响,一周无降水后才进行取样。所有样品的采集在3天内完成(2015年8月30日~9月1日)。采样时同时记录样点土地利用类型、经纬度、高程等信息。土地利用类型主要有耕地(种植玉米)、灌丛(1~3 m矮灌木丛)、草地(小于1 m),受人为干扰程度依次为耕地>草地>灌丛。

1.3 样品分析和数据处理

土壤容重用环刀法测定,土壤含水量采用烘干法测定,土壤有机质采用重铬酸钾-硫酸氧化法测定^[23-24]。

数据的非正态分布可能使得方差函数产生比例效应,降低估计的精度,使一些潜在的特征表现不明显,因而需要对数据进行正态分布检验,不符合正态分布的数据需要进行正态分布转换。本文利用SPSS18.0对数据进行K-S正态分布检验并对土壤容重、水分、有机质进行Pearson相关分析。应用GS+7.0软件分别对0~20 cm、20~40 cm土壤进行半方差函数模拟、普通克里格插值。

半方差函数是地统计学研究中特有的基本工具,用来描述属性变量在空间上的差异程度,它是距离的函数,也是应用最广泛的空间格局描述工具,其公式如下:

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

式中, $\gamma(h)$ 为半方差函数值; h 为两样本点的空间距离; $N(h)$ 为间距等于 h 的对数; $Z(x_i)$ 为区域化变量 Z 在位置 x_i 的实测值; $Z(x_i + h)$ 为与 x_i 距离为 h 处样点的值一般。认为半方差函数只有在最大间隔的1/2内才有意义。块金值(C_0)、基台值($C_0 + C$)和变程(A)为半方差分析的重要参数; C_0 是间距为0时的半方差,反映随机因素引起的变异;基台值 $C_0 + C$ 表示半方差函数随两点间距增加到一定程度以后的平稳值,是系统内总的变异; A 为变程,为半方差达到基台值时样本的间距,在变程内,样点越接近,两点的相似性、即空间上的相关性越接近。 $C_0/(C_0 + C)$ 为块金系数,是块金值与基台值得比值,其大小用于判定系统内变量的空间相关性程度,其值 < 0.25 、 $0.25 \sim 0.75$ 、 > 0.75 分别表示变量的空间相关性较强、中等、较弱。

2 结果分析

2.1 土壤容重、水分、有机质描述性经典统计

2.1.1 总体比较

从表1可以看出,研究区土壤容重和水分均值的和中值相差不大,最大值约为最小值2倍,存在一定的空间异质性。而土壤有机质的均值和中值相差较大,表明土壤有机质中心趋向分布可能被波动幅度所影响,而呈现出非标准正态分布。土壤容重为 $0.74 \sim 1.42 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,均值为 $1.17 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;土壤水分为 $16.92\% \sim 36.02\%$,均值为 26.45% ;土壤有机质含量为 $0.89 \sim 13.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,均值 $5.56 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,远低于未发生石漠化的喀斯特地区的 $16.91 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[12]。

变异系数 CV 反应了数据离散程度的大小。一般认为,变异系数 $CV < 0.1$ 为弱变异性; $0.1 \leq CV \leq 0.3$ 为强变异; $CV > 0.3$ 为强变异性^[25]。表1显示土壤容重和水分变异系数分别为0.15和0.11,均为中等变异;而土壤有机质变异系数达0.71,表现为强变异。

表1 土壤容重、水分及有机质的基本统计学特征

Table 1 Statistics of soil bulk density, moisture and organic material

	样数	均值	中数	最大值	最小值	标准差	变异系数	K-S
容重/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	171	1.17	1.20	1.42	0.74	0.178	0.15	1.090*
水分/%	171	26.45	25.99	36.02	16.92	2.985	0.11	1.083*
有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	57	5.56	3.67	13.47	0.89	3.354	0.71	1.264*

注:*表示检验水平 $\alpha=0.05$;容重、水分和有机质的样本数分别为117、117和57个。

2.1.2 不同坡位比较

分别对不同坡位的土壤容重、水分和有机质进行统计分析(表 2)。中坡和坡底土地利用方式为耕地,比例达到 70%;下坡土地利用方式以灌木丛和草地为主。中坡和坡底的水分含量分别为 25.10%、25.76%,小于下坡和上坡的 28.03%、27.75%;土壤有机质分别为 $4.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $2.44 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,小于下坡和上坡的 $5.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $7.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。一般来

说,坡度加大了土壤的稳定入渗速率,土壤含水量相应降低^[12],而本研究并不完全呈此规律,土壤含水量因土地利用方式的改变而发生变化,下坡的水分最高,与下坡主要植被为人为干扰最小的灌丛有关;地上生物量和凋落物量是决定土壤有机质的重要因素,玉米收割和人为清理枯枝落叶,会减小中坡和坡底的有机质含量,进而减小土壤含水量。

表 2 不同坡位土壤容重、水分和有机质的分布情况

Table 2 Distribution of soil bulk density, moisture and organic material on different slopes

	样数	耕地	灌木	草地	坡度/ °	容重/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	水分/ %	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$
坡底	54	67%	0%	33%	2.8	1.27	25.76	2.44
下坡	42	0%	71%	29%	18.4	1.11	28.03	5.92
中坡	48	75%	25%	0%	28.2	1.08	25.10	4.81
上坡	27	44%	44%	12%	13.4	1.14	27.75	7.45

2.1.3 不同坡向比较

在不同喀斯特坡向,降雨、地质条件、坡度、土地利用等原因会对上覆土壤的空间异质性产生影响^[26]。南、北坡土壤空间异质性分布情况如表 3 所示,北坡的土壤容重平均值为 $1.24 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,稍大于南坡的 $1.08 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;而南坡土壤水分和有机质均值为 27.69%、 $6.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别高于北坡的 25.54%、 $3.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。北坡的土壤容重变异系数

为 0.12,变异小于南坡;而土壤水分、有机质变异系数分别为 0.12、0.72,变异大于南坡。

驻马哨洼地面积小,南北坡相连,小气候具有相似性,并且坡度接近,地质条件相同($T_2 g^3$),南坡与北坡土壤异质性的原因可能与不同的土地利用方式有关,在取样中,南坡除坡底、下坡分布有草地外,其余样点都为灌木,而北坡以耕地为主,耕地土壤有机质含量低,使得土壤水分降低,导致了南北坡的差别。

表 3 南北坡土壤容重、水分和有机质的基本统计学特征

Table 3 Statistics of soil bulk density, moisture and organic material on south and north slopes

坡向	容重		水分		有机质		坡度/°	坡长/m
	均值/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	变异系数	均值/%	变异系数	均值/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	变异系数		
北坡	1.24	0.12	25.54	0.12	4.6	0.72	16	170
南坡	1.08	0.17	27.69	0.08	6.6	0.60	17	120

2.1.4 不同土地利用方式比较

驻马哨洼地以耕地、草地、灌木三种土地利用方式为主(表 4)。耕地容重平均值为 $1.25 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,大于草地($1.14 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)和灌木($1.04 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$);耕地的土壤水分为 25.05%,小于草地和灌木的 26.59%、28.54%;三种土地利用方式有机质普遍处于较低水平,耕地有机质 $3.32 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,仅为灌木土壤($6.85 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)的一半。可见,3 种土地利用方式

下,耕地的土壤容重最高,水分、有机质最低。

而从不同坡位、坡向的比较中,也体现了土地利用对土壤空间异质性的影响。因此,土地利用对土壤容重、水分、有机质的空间异质性影响较大,掩盖了自然因素的影响。在驻马哨洼地,由于开垦的不合理,造成耕地土壤粘重,土壤孔隙度下降,持水性降低,容重增加,这就使得暴雨来临时,土壤随坡蠕移,剪切应力下降,易被冲蚀进入地下空间^[25]。

表4 不同土地利用下土壤容重、水分有机质基本统计学特征

Table 4 Statistics of soil bulk density, moisture and organic material for different land uses

指标	类型	样本数	平均值	最大值	最小值	极差	标准差	变异系数	K-S
水分	耕地	84	25.05	29.66	16.92	12.46	2.50	0.10	1.14
	灌木	54	28.54	36.02	23.01	13.01	2.81	0.10	0.49
	草地	33	26.59	33.30	23.29	10.10	2.34	0.09	0.81
容重	耕地	84	1.25	1.42	0.94	0.48	0.12	0.10	0.37
	灌木	54	1.04	1.32	0.74	0.58	0.15	0.14	0.52
	草地	33	1.14	1.41	0.75	0.66	0.22	0.19	1.10
有机质	耕地	28	3.32	6.49	1.00	5.29	1.62	0.49	0.61
	灌木	18	6.85	13.47	0.89	12.58	3.88	0.57	0.42
	草地	11	4.96	13.09	1.36	11.73	4.07	0.82	0.72

2.2 土壤容重、水分、有机质之间相关性分析

对土壤容重、水分、有机质的相关性分析结果(表5)表明,土壤容重与水分呈极显著负相关,与有机质呈显著负相关,相关系数分别为 -0.609 和 -0.581 。土壤容重的增加,孔隙度下降,土壤的保肥和保水能力下降,抑制土壤微生物的活动,使土壤有机质显著下降。而在本研究中,有机质与水分并没有表现出明显的相关性。

表5 土壤容重、水分及有机质的相关性

Table 5 Correlation of soil bulk density, moisture and organic material

	容重	水分	有机质
容重	1	-0.581^{**}	-0.609^{**}
水分	-0.581^{**}	1	0.199
有机质	-0.609^{**}	0.199	1

注: **表示相关性水平 $\alpha=0.01$ 。

2.3 土壤容重、水分、有机质空间异质性

应用GS+7.0软件对研究区土壤容重、水分、有机质的空间异质性进行半方差分析,结果表明(表6):土壤容重、水分、有机质存在半方差结构,但半方差最优结构和模型表现不一。从拟合模型看,0~20 cm水分、容重、有机质与球状模型(S)拟合较好,拟合度 R^2 为0.91、0.98、0.92;20~40 cm土壤层水分、容重、有机质与高斯模型(G)拟合较好,拟合度 R^2 为0.65、0.73、0.88。

表6中,0~20 cm土壤层和20~40 cm土壤层的6个因子块金系数均大于0.75,20~40 cm土壤层的块金系数小于0~20 cm;表明驻马哨洼地水分、容重、有机质的空间相关性皆较弱,说明其受土壤的结构性因子(土壤类型、地形、气候)影响较小,而随机性因子即人类活动的干扰增加了0~20 cm土壤层容重、水分、有机质空间分布的随机性变异,这种干扰随土壤层深度的增加逐渐变小。

表6 土壤容重、水分及有机质半方差函数的拟合模型及参数

Table 6 Fitting model of semi-variance function for soil bulk density, moisture and organic material

深度	指标	模型	C_0	C_0+C	A	RSS	R^2	$C_0/(C_0+C)$
0~20 cm	水分	S	14.87	15.23	94.5	16.2	0.91	0.97
	容重	S	201.8	211.6	52.1	397	0.98	0.95
	有机质	S	16.06	18.79	112.3	11.7	0.92	0.86
20~40 cm	水分	G	23.15	25.31	729.02	74.4	0.65	0.92
	容重	G	540.9	670.9	708.06	28525	0.73	0.81
	有机质	G	8.39	10.77	387.11	3.1	0.88	0.78

2.4 土壤容重、水分、有机质空间分布

利用普通克里格插值方法对洼地南北两坡0~

20 cm、20~40 cm土层土壤容重、水分、有机质进行空间插值(图3),结果显示,土壤容重、水分、有机质

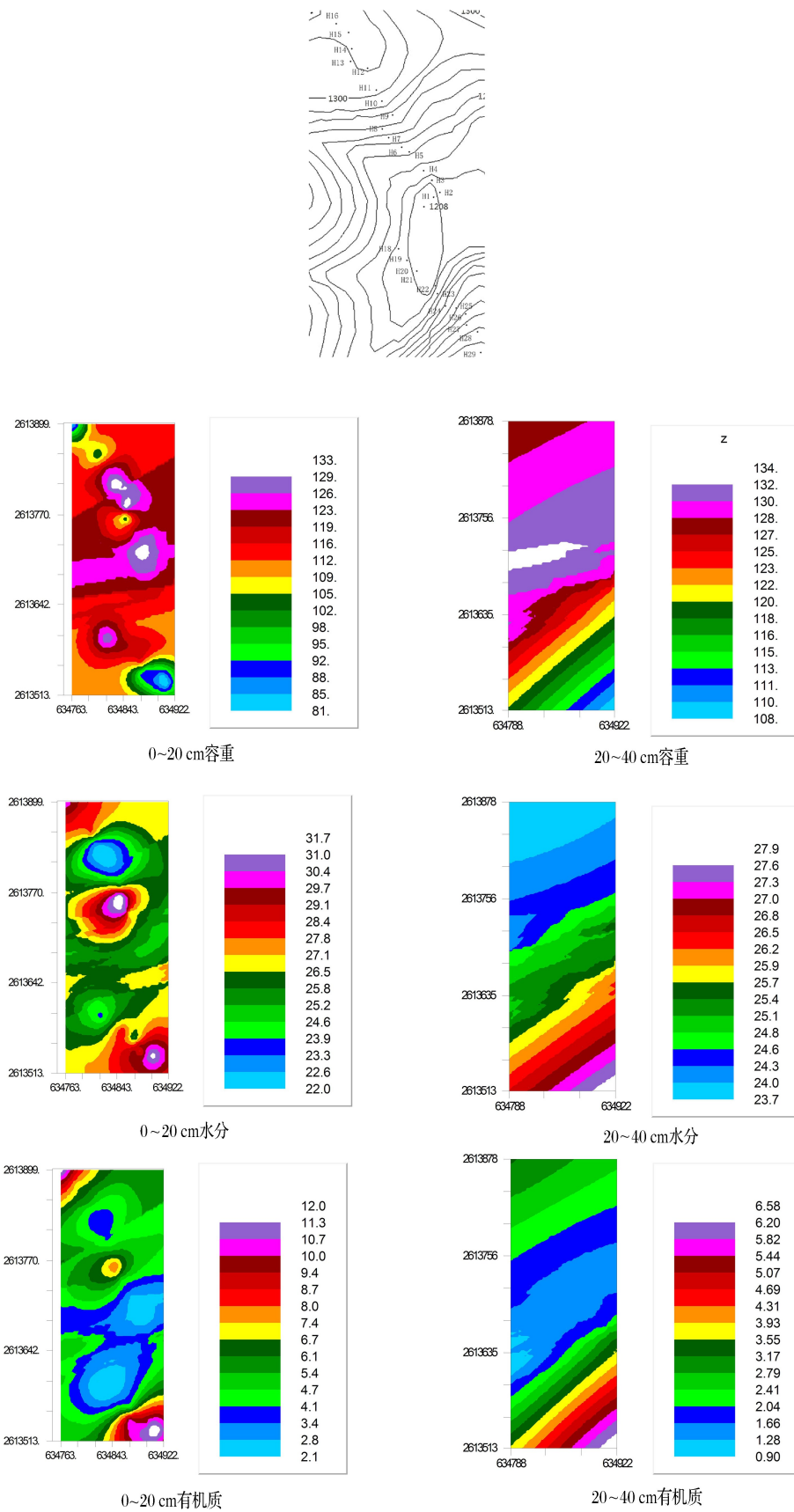


图 2 土壤容重、水分、有机质分层空间分布图

Fig. 2 Spatial layered distribution of soil bulk density, water and organic material

在不同深度、不同空间具有明显差异。

0~20 cm 土层:坡底土壤容重最大,南北两坡土壤容重随着坡位的上升而减小;土壤容重大部分区域都超过 $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。坡底和中坡水分值最低,含水率低至 22%。南北两坡有机质含量高于坡底,坡底土壤有机质含量仅为 $2.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。整体上看,土壤容重、水分、有机质含量成斑块状分布,不同坡位、坡向差异明显,异质性强。

20~40 cm 土层:不同于 0~20 cm 土层,20~40 cm 水分分布由北坡到南坡呈递减趋势,可能因南坡灌丛分布面积大,而灌丛根系深,较草地和耕地更能吸收深层土壤水;20~40 cm 土层水分含量总体小于 0~20 cm 土层,取样前一周并无降水,可能是 20~40 cm 较表层更易渗透丢失。土壤容重 20~40 cm 土层大于 0~20 cm 土层,而在空间上分布与 0~20 cm 土层相似。有机质空间分布类似于 0~20 cm 土层,而 0~20 cm 土层腐殖质较多,有机质含量要高于 20~40 cm 土层。分析认为,0~20 cm 土壤中动物、微生物量大,且植物根系多,生物活动及微生物分解等作用使土壤孔隙增多,土壤质地疏松,而 20~40 cm 土壤中动物、微生物及植物根系少而土壤紧实,导致容重大而有机质含量低。总体来看,20~40 cm 土层土壤容重自北向南梯度减小、土壤水分和有机质则自北向南梯度增加,同一立地条件下,随着土层加深,受地形、土地利用等因素的影响变小。

3 讨论

3.1 土壤空间异质性总体特征

空间变异性的研究有利于探讨土壤性质与环境因子间的关系。研究区的土壤容重、水分属于中等变异,有机质呈现出强变异。水分变异值为 0.11,要小于宋同清的 0.35~0.39^[6],而与张继光的值 0.08~0.14 较接近^[7]。有研究表明,水分平均含量往往与水分变异系数成反比^[27],本研究中水分含量为 26%,与张继光研究的 22%~27% 相近,而大于宋同清研究的木论峰丛洼地水分平均含量的 17%。与土壤水分变异不同的是,土壤有机质为强变异,达到了 0.71,地形和土地利用变化,产生不同的小环境,生物量和凋落物返还以及根区环境不同,耕地因人为对凋落物和粮食作物的收取,使返还到土壤中的有机质减少;同时,土壤侵蚀导致表层土流失,也会降低区域内有

机质含量。本研究中土壤有机质含量仅为 $5.56 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,与张珍明^[12]在后寨河的研究值 $5.23 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 相近,与未发生石漠化的喀斯特地区的 $16.91 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 相差较远^[12],也低于全国平均值 $9.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,土地退化的喀斯特地区很难形成顶级的喀斯特森林群落,植被构成往往以草地和灌丛为主,地上生物量和凋落物量是决定土壤有机质的重要因素,因此研究区土壤中有机质含量处于较低水平,而有机质的变异强是否与有机质含量低相关,今后还需进一步研究。

3.2 土地利用对空间异质性的影响

土地利用变化是人类对生态环境最综合的表现,不同的土地利用方式下,土壤结构、质量产生明显差异^[28-29]。张珍明^[12]在喀斯特峰丛洼地采用高密度采样,得出不同土地利用下土壤有机质含量为灌丛>草地>旱地。本研究分别分析了坡位、坡向、土层深度、土地利用等 4 个因素对土壤水分、有机质、容重的影响,但最终都呈现的是土地利用对土壤 3 个指标的影响最大。张珍明对喀斯特峰丛洼地不同坡度土壤有机质进行分析,发现其表现为:坡地上部>坡地中部>坡地下部>坡地底部^[12],而本研究中并未呈现这种规律,有机质分布受耕地、草地、灌丛所决定,可见土地利用差异是影响驻马哨溶丘洼地土壤空间异质性最主要的因素。许月卿等^[30]认为在喀斯特地区,坡度超过 25° 的旱耕地极易造成土壤流失,并建议退耕还林还草,而驻马哨洼地中坡坡度达到了 28.2°,仍大片种植玉米,不利于水土保持。

需要指出的是,喀斯特地理环境复杂多样,土壤空间异质性强。赵志猛^[31]认为出露岩石的径流渗漏具有入土侧向流、垂直流、土石界面侧向流三个方向,都影响着土壤水分的空间异质性。在下一步的研究中,还需加密取样,来研究不同尺度下的溶丘洼地土壤空间异质性及影响因素。

4 结论

(1)土壤容重、水分、有机质存在空间异质性;土壤容重、水分变异系数分别为 0.15 和 0.11,属于中等变异;有机质变异系数达到了 0.71,为强变异。本研究中土壤有机质含量仅为 $5.56 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,与未发生石漠化的喀斯特地区的 $16.91 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 相差较远。

(2)土地利用差异是影响驻马哨溶丘洼地土壤空

间异质性最主要的因素,均掩盖了坡位、坡向、土层深度等自然因素的影响。

(3)通过半方差分析,0~20 cm 水分、容重、有机质与球状模型拟合较好,拟合度 R^2 分别为 0.911、0.977、0.922,20~40 cm 水分、容重、有机质与高斯模型拟合较好,拟合度 R^2 分别为 0.647、0.730、0.881。本研究中块金系数 >0.75 ,受土地利用因素的影响,洼地内土壤容重、水分、有机质由随机部分引起的空间变异程度增加,空间自相关小。

参考文献

- [1] Li H, Reynold J F. On definition and quantification of heterogeneity[J]. *Oikos*, 1995, 73(2): 280-284.
- [2] 李海滨,王政权,王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法[J]. *应用生态学报*, 1998, 9(6): 651-657.
- [3] 宋同清,彭晚霞,曾馥平,等. 喀斯特峰丛洼地不同植被类型土壤水分的空间异质性分析:以广西环江毛南族自治县西南峰丛洼地地区为例[J]. *中国岩溶*, 2010, 29(1): 6-11.
- [4] 蒋勇军,袁道先,章程,等. 典型岩溶农业区土地利用变化对土壤性质的影响:以云南小江流域为例[J]. *地理学报*, 2005, 60(5): 751-760.
- [5] 刘玉,李林立,赵柯,等. 岩溶山地石漠化地区不同土地利用方式下的土壤物理性状分析[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(5): 142-145.
- [6] 宋同清,彭晚霞,曾馥平,等. 喀斯特木论自然保护区旱季土壤水分的空间异质性[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(1): 98-104.
- [7] 张继光,陈洪松,苏以荣,等. 喀斯特洼地表层土壤水分的空间异质性及其尺度效应[J]. *土壤学报*, 2008, 45(3): 544-549.
- [8] 闫俊华,周传艳,文安邦,等. 贵州喀斯特石漠化过程中的土壤有机碳与容重关系[J]. *热带亚热带植物学报*, 2011, 19(3): 273-278.
- [9] 吴敏,刘淑娟,叶莹莹,等. 喀斯特地区坡耕地与退耕地土壤有机碳空间异质性及其影响因素[J]. *生态学报*, 2016, 36(6): 1619-1627.
- [10] 张伟,陈洪松,王克林,等. 喀斯特峰丛洼地土壤养分空间分异特征及影响因子分析[J]. *中国农业科学*, 2006, 40(9): 1828-1835.
- [11] 张忠华,胡刚,祝介东,等. 喀斯特森林土壤养分的空间异质性及其对树种分布的影响[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(10): 1038-1049.
- [12] 张珍明,周运超,黄先飞,等. 喀斯特小流域土壤有机碳密度及碳储量空间分布异质性[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 184-190+214.
- [13] 曹建华,邓艳,杨慧,等. 喀斯特断陷盆地石漠化演变及治理技术与示范[J]. *生态学报*, 2016, 36(22): 7103-7108.
- [14] 王宇,张华,张贵,等. 喀斯特断陷盆地环境地质分区及功能[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(3): 283-295.
- [15] 廖洪凯,李娟,龙健,等. 贵州喀斯特山区花椒林小生境类型与土壤环境因子的关系[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(12): 2429-2435.
- [16] 覃星铭,蒋忠诚,蓝芙宁,等. 南洞地下河最枯径流的周期变化及趋势分析[J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 33(2): 120-126.
- [17] 张任. 云南省开远南洞地下河流域洞穴研究[J]. *中国岩溶*, 1992, 11(4): 366-382.
- [18] 覃星铭,蒋忠诚,蓝芙宁,等. 南洞地下河月径流时间序列的混沌特征及预测[J]. *中国岩溶*, 2015, 34(4): 341-347.
- [19] 覃星铭,蒋忠诚,何丙辉,等. 南洞流域东部重点区的石漠化现状及治理对策分析[J]. *中国岩溶*, 2014, 33(4): 456-463.
- [20] 康彦仁,梁彬. 云南南洞地下河系统的水文地质特征[J]. *水文地质工程地质*, 1996, (4): 28-30.
- [21] 夏日元. 西南岩溶区生态环境演变机制与治理对策:以云南省蒙自盆地为例[A]. 中国测绘学, 全面建设小康社会:中国科技工作者历史责任——中国科协 2003 年学术年会论文集(下)[C]. 中国测绘学会, 2003: 2.
- [22] 胡忠良,潘根兴,李恋卿,等. 贵州喀斯特山区不同植被下土壤 C、N、P 含量和空间异质性[J]. *生态学报*, 2009, 29(8): 4187-4195.
- [23] 刘目兴,聂艳,于婧. 不同初始含水率下粘质土壤的人渗过程[J]. *生态学报*, 2012, 32(3): 871-878.
- [24] 季天委. 重铬酸钾容量法中不同加热方式测定土壤有机质的比较研究[J]. *浙江农业学报*, 2005(5): 311-313.
- [25] 薛正平,杨星卫,段项锁,等. 土壤养分空间变异及合理取样数研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(4): 6-9.
- [26] Zhou J, Tang Y, Yang P, et al. Inference of creep mechanism in underground soil loss of karst conduits I. Conceptual model[J]. *Nat Hazards*, 2012, 62(3): 1191-215.
- [27] 王军,傅伯杰,邱扬,等. 黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征:半变异函数[J]. *地理学报*, 2000, 55(4): 428-438.
- [28] Zhou J, Tang Y Q, Zhang X H, et al. The influence of water content on soil erosion in the desertification area of Guizhou, China[J]. *Carbonate Evaporite*, 2012, 27(2): 185-92.
- [29] 岳跃民,王克林,张伟,等. 基于典范对应分析的喀斯特峰丛洼地土壤:环境关系研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(5): 1400-1405.
- [30] Xu Y Q, Shao X M, Kong X B, et al. Adapting the RUSLE and GIS to model soil erosion risk in a mountains karst watershed, Guizhou Province, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 141(3): 275-286.
- [31] Zhao Z M, Shen Y X, Shan Z J, et al. Infiltration Patterns and Ecological Function of Outcrop Runoff in Epikarst Areas of Southern China[J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1): 170-197.

Effects of land use on spatial heterogeneity of soil bulk density, moisture and organic material in karst hilly depressions: An example of the Zhumashao depression of Nandong watershed

LIU Peng^{1,2}, JIANG Zhongcheng², LAN Funing², LI Yanqing^{2,3}, Yu Yang⁴

(1. Forestry college of Guangxi University, Nanning 530001, China;

2. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences/Key Laboratory of Karst Ecosystem and Treatment of Rocky Desertification, Ministry of land and Resources, Guilin, Guangxi 541004, China;

3. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;

4. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract The purpose of this work was to explore the influencing factors of soil spatial heterogeneity in Karst hilly depressions. Taking the hill depression catchment of Zhumashao as an example, by the methods of classical statistics and geostatistics, spatial heterogeneity of soil bulk density and water content and organic matter were analyzed in view of different land uses, slopes and aspects. The results show that the soil organic matter is strongly varied with a coefficient of variation (CV) 0.71 while the soil bulk density and moisture are of moderate variation with CV 0.16 and 0.11, respectively. The soil bulk density is significantly negatively correlated with the moisture and organic matter with correlation coefficients -0.609 and -0.58 , respectively. Geostatistics shows that the block-to-base ratio is between 0.78 to 0.97. The spatial variation caused by random part is large, the spatial autocorrelation is smaller, and the model fits well. Soil structure of the cultivated land is poor, with lowest organic matter and moisture content in the soil with largest bulk density, while the shrub is better. Soil bulk density in the north slope is higher than that of the south slope, while the CV is smaller than that of the south slope. And soil moisture content and organic matter on north slopes are lower than that of the south slopes. The effects of land use on spatial heterogeneity of soil are reflected in the comparison of different slope positions and directions. Under these effects, spatial variability of soil moisture, bulk density and organic matter increase from random parts, and spatial autocorrelation decreases. These information would be useful for prediction of soil property change and study in hilly depression areas.

Key words spatial heterogeneity, land use, hill depression catchment

(编辑 吴华英)