

喀斯特木论自然保护区旱季土壤水分的空间异质性*

宋同清^{1,2,*} 彭晚霞^{1,2,3} 曾馥平^{1,2} 欧阳资文^{1,2,3} 吴海勇^{1,2,4}

(¹中国科学院亚热带农业生态研究所,长沙 410125; ²中国科学院环江喀斯特农业生态系统研究观测站,广西环江 547200;

³湖南农业大学生物科学技术学院,长沙 410128; ⁴南京农业大学茶学研究所,南京 210095)

摘要 采用经典统计学和地统计学方法,分段研究了喀斯特木论自然保护区典型峰丛坡地和洼地旱季表层土壤水分(0~5 cm和5~10 cm)的空间异质性.结果表明:研究区旱季表层土壤水分仍然较高,总体上具有良好的半方差结构;坡地和洼地0~5 cm和5~10 cm土层土壤水分的空间分布均符合指数模型,同一立地条件下两土层土壤含水量具有相似的空间结构和分布格局,相同土层不同立地条件下的差异明显;坡地土壤水分含量的空间相关性中等且连续性好,具有明显的斑块分布格局,其 Moran I值的变化相对缓慢;洼地土壤水分含量具有强烈的空间自相关,但变程很短,其 Moran I值的波动较大,斑块比较破碎.地形、微地貌、降雨、人为干扰特别是植被是保护区土壤含水量空间变异的重要影响因素,保存完好的原始森林对土壤水分空间异质性具有良好的调控作用.

关键词 土壤水分 空间变异性 旱季 木论自然保护区 喀斯特

文章编号 1001-9332(2009)01-0098-07 **中图分类号** S152 **文献标识码** A

Spatial heterogeneity of surface soil moisture content in dry season in Mulun National Natural Reserve in Karst area. SONG Tong-qing^{1,2}, PENG Wan-xia^{1,2,3}, ZENG Fu-ping^{1,2}, OUYANG Zi-wen^{1,2,3}, WU Hai-yong^{1,2,4} (¹Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; ²Station of Karst Ecology in Huanjiang, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547200, Guangxi, China; ³College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; ⁴Tea Institute of Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2009, 20(1): 98-104.

Abstract: By the methods of classical statistics and geostatistics, the spatial heterogeneity of surface soil (0-5 cm and 5-10 cm layers) moisture content in dry season in the typical sloping fields and depressions in Mulun National Natural Reserve in Karst area were studied. The results indicated that in study area, the surface soil moisture content in dry season was still higher, and showed a fine semivariogram structure as a whole. The spatial distribution of moisture content in 0-5 cm and 5-10 cm soil layers, both for sloping fields and for depressions, fitted exponential model well. Under the same stand conditions, the moisture content in the two soil layers had the similar spatial structure and distribution pattern; while under different stand conditions, there existed obvious difference in the same soil layer. The spatial pattern of surface soil moisture content in sloping fields was characterized by medium spatial autocorrelation, clear patches with well continuum, relatively slow variation of Moran's I index, while that in depressions was characterized by strong spatial autocorrelation, larger variation of Moran's I index, and more fragmented patches. Therefore, topography, micro-physiognomy, precipitation, human disturbance, and especially vegetation were the most important factors affecting the spatial pattern of soil moisture content in the Mulun National Natural Reserve, and to preserve primary forest should have favorable effect on the regulation of the spatial heterogeneity of soil moisture content in the Reserve.

Key words: soil moisture; spatial heterogeneity; dry season; Mulun National Natural Reserve; Karst area

*中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-08)、国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAC01A10)和国家基础研究发展计划重点资助项目(2006CB403208).

* 通讯作者. E-mail: songtongq@163.com

2008-06-06收稿, 2008-11-01接受.

土壤水分是土壤的一个重要状态参数和时空连续变异性^[1-2],高度的空间异质性由不同尺度的降水、径流、蒸发蒸腾、地质地貌、植被覆盖、干扰等自然、人为作用和过程控制^[3-4]。喀斯特峰丛洼地地处世界三大岩溶之一,即以贵州为中心连带成片的中国西南喀斯特南部斜坡地带,该区雨热资源丰富,但蒸发量明显大于降水量,导致水汽总体上处于亏损状态,易形成干旱气候^[5]。长期强烈的岩溶作用形成了有别于其他地区的地表、地下双层二元水文结构,众多的溶洞、溶沟、溶隙、漏斗、地下河和落水洞及喀斯特浅薄的土层、大量的岩石裸露致使大气降水迅速渗漏和蒸发,形成了湿润气候条件下特殊的岩溶干旱现象^[6-7],加之该区人地矛盾尖锐以及严重的干扰破坏,导致大部分干扰区的森林覆盖率13%,形成了严重的干旱和石漠化状态^[8],且漏水、农田耗水量和蒸发量过大的问题难以解决,因此,土壤水分对喀斯特退化生态系统的水热平衡及系统稳定性起着决定作用。

地统计学是在传统统计学基础上发展起来的空间分析方法,它不仅能有效地揭示属性变量在空间上的分布、变异和相关特征,而且可有效地解释空间格局对生态过程与功能的影响^[9-12]。国内外学者应用地统计学对土壤水分空间变异进行了大量研究,如 Fitzjohn等^[13]研究了半干旱地区集水沟区域土壤水分的空间变异及对水土流失与侵蚀控制的建议,李毅等^[14]探讨了土壤空间变异所必须考虑的尺度问题,苏永中等^[15]研究了科尔沁沙地旱作农田土壤理化性质在沙漠化演变过程中的空间变异特征,Westem等^[16]研究了小流域土壤水分的空间相关及其与主要空间水分过程的关系,马风云等^[17]研究了沙坡头人工固沙植被土壤水分的空间异质性。目前,在喀斯特地区的研究主要集中于采用传统方法研究地下岩溶水^[18-19],而采用地统计学方法对喀斯特峰丛洼地坡面或洼地土壤水分空间变异特征的研究则鲜见报道。本文以喀斯特木论国家级自然保护区的典型景观单元——峰丛洼地为尺度,应用半方差函数和 Kriging插值方法分析了土壤水分的空间异质性和分布格局,初步探讨了其生态学过程,以期为西南喀斯特峰丛洼地广大退化生态系统水资源的合理利用和生态重建提供理论依据和参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

木论自然保护区(25°07'01"—25°12'22"N,

107°54'01"—108°05'51"E)位于广西环江毛南族自治县西北部,东西宽19.80 km、南北长10.75 km,林区总面积89.69 km²,属于中亚热带石灰岩区常绿阔叶阔叶混交林生态系统,是世界上喀斯特地貌区幸存的连片面积最大、完好性保存最佳、原生性最强的喀斯特森林,森林覆盖率达94.8%,其典型景观单元为峰丛洼地。研究区属中亚热带季风气候,年均日照1451.1 h,占全年可照时数(4422 h)的32.8%,月平均日照以7月最多(190.7 h)、2月最少(61.5 h);年均气温19.3℃,极端最低气温-5.0℃,极端最高气温36℃,10年活动积温6260℃,无霜期310 d;年均降水量1529.2 mm(海拔420 m),4—8月降水量占全年降水量的73.7%,年均相对湿度79%,干燥度0.69,湿润度1.46($K>1.0$)。

本研究区域为一典型的峰丛洼地,面积190.2 hm²,其中洼地面积11.8 hm²,海拔最高处为637.8 m,最低处为413.6 m。山坡岩石裸露率高达90%,只有一些零星分布的土壤,平均坡度约35°;凹凸不平,人为破坏少,森林保存完好,层次结构分明,主要树种有小叶栎树(*Koelreuteria henryi*)、鸭掌木(*Liriodendron chinense*)、广西密花树(*Rapanea kwangsiensis*)、九里香(*Murraya exotica*)、波叶山黄皮(*Murraya euchrestifolia*)、铁榄(*Sinosideroxylon pedunculatum*)和东女贞(*Ligustrum liukiense*)等。洼地土层30 cm,岩石裸露率25%,零星分布,人为破坏严重,1993年之前种植玉米后封育至今,主要树种有杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、杜茎山(*Maesa japonica*)、伞花木(*Eurycorymbus cavaleriei*)、鱼藤(*Derris elliptica*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、八角枫(*Alangium chinense*)和白毛长叶紫珠(*Floccosa schauer*)等,植被盖度35%,分布不均。

1.2 试验设计与采样

通过勘查,在保护区沿东南-西北方向设置一块投影面积为200 m×40 m的样带,其坡面为120 m×40 m,洼地为80 m×40 m,(该样地已作为中国科学院环江喀斯特生态实验站动态监测样地)。用全站仪将样带划分为369个5 m×5 m的小方格,坡面样点225个,洼地样点153,其中,坡面与洼地交界面共9个样点。2007年11月28日用土钻进行网格法取样,因土层浅薄,只用烘干法测定了0~5 cm和5~10 cm土层土壤水分。采样过程中,若采样点有石块分布,则在石块周围取3个土样混合均匀后,取1/3代替该点样本。采样前最后一次降雨时间为2008年11月4日晚(3.3 mm),干旱严重,采样的同

时进行立地因子、植被状况、人为干扰等调查,并用手持 GPS(集思宝 G516-GIS)定位。

1.3 研究方法

1.3.1 空间自相关分析 空间自相关分析是生态学上常用的空间分析方法,主要用于检验某一空间变量是否存在空间依赖关系^[20]。本文采用常用的空间自相关系数——Moran I系数进行空间自相关分析,计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中: x_i 和 x_j 分别为变量 x 在相邻配对空间点 i 和 j 上的取值; w_{ij} 为相邻权重; n 为空间单元总数; I 取值在 $-1 \sim 1$, 当 $I = 0$ 时代表空间不相关, 取正值为正相关, 取负值为负相关。

1.3.2 半方差函数分析 半方差函数是应用最广泛的空间格局描述工具^[21-22], 其公式如下:

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

式中: $r(h)$ 为半方差函数值; $N(h)$ 为间距为向量 h 的点对总数; $Z(x_i)$ 为区域化变量 Z 在 x_i 处的实测值; $Z(x_i + h)$ 为与 x_i 距离为向量 h 的样点的值。一般认为半方差函数只在最大间隔的 $1/2$ 之内才有意义, 因此, 本研究中半方差函数的有效滞后距都设为最大采样间隔的 $1/2$ 。本文对半方差函数的拟合均采用指数模型 (exponential model), 其公式如下:

$$r(h) = C_0 + C(1 - e^{-\frac{h}{a}}) \quad (3)$$

式中: C_0 为块金值 (nugget); C 为结构方差; $C_0 + C$ 为基台值 (sill); h 为滞后距离; a 为变程 (range)。块金值表示随机变异的大小, 主要源于最小取样间隔内自然过程造成的变异和实验误差, 基台值通常表示系统内的总变异 (包括结构性变异和随机性变

异)。块金值和基台值受自身因素和测量单位的影响较大, 不能用于比较不同变量间的随机变异, 但块金值与基台值之比则反映了块金方差占总空间异性变异的大小, 它反映了土壤属性的空间依赖性, 一般认为, 该比值 $< 25\%$ 时, 空间变量为强烈的空间自相关, 在 $25\% \sim 75\%$ 时, 为中等空间自相关, $> 75\%$ 为弱空间自相关。变程表征属性因子空间自相关范围的大小, 它与观测尺度以及在取样尺度上影响土壤水分的各种生态过程及其相互作用有关^[23], 在变程之内, 变量具有空间自相关性, 反之则不存在。

1.4 数据处理

用地统计学方法对样本数据进行自相关、半方差函数等处理, 所有统计计算及模型拟合均在 SPSS 软件和专业地统计软件 GS+ 中完成, Kriging 等值线图在软件 ArcGIS 9.2 中完成。

2 结果与分析

2.1 喀斯特木论自然保护区旱季土壤水分的经典统计描述

本文采用样本均值加减 3 倍标准差来识别特异值, 在此区间外的数据均定为特异值, 分别用最大和最小值代替^[24], 后续计算均采用处理后的原始数据。由表 1 可以看出, 本文在取样之前虽然长达 25 d 没有降雨, 但由于森林保存较完好、覆盖度较高, 导致土壤表层的平均含水量较高, 为 $16.22\% \sim 17.24\%$, 且差异不大, 坡地 $0 \sim 5$ cm 和 $5 \sim 10$ cm 两土层的平均土壤含水量相似, 洼地 $5 \sim 10$ cm 土层较 $0 \sim 5$ cm 土层的平均土壤含水量略高, 坡地 $0 \sim 5$ cm 土层的平均含水量略高于洼地 $0 \sim 5$ cm 土层, 坡地和洼地 $5 \sim 10$ cm 平均土壤含水量间的差异很小; 研究区表层土壤含水量的标准差和变异系数较大, 分别在 $5.963 \sim 6.881$ 和 $35.59\% \sim 39.91\%$, 反映了

表 1 喀斯特木论保护区土壤水分的描述性统计分析 & 正态分布检验

土层 Soil layer (cm)	立地类型 Field type	样本数 No. of samples	最小值 Minimum (%)	最大值 Maximum (%)	平均值 Mean (%)	标准差 Standard variance	变异系数 Variance (%)	偏度 Skew	峰度 Kurtosis	K-S值 Value of K-S test	分布类型 Distribution type
0 ~ 5	坡地 Slope	225	5.90	37.97	17.24	6.881	39.91	0.905	0.418	0.052	N
	洼地 Depression	153	5.74	34.75	16.22	5.963	36.77	1.208	1.371	0.023	*
5 ~ 10	洼地 Depression	153	0.76	1.54	1.18	0.149	12.58	0.304	-0.403	0.766	N#
	坡地 Slope	225	5.08	36.46	17.14	6.272	36.59	0.805	0.394	0.011	*
	坡地 Slope	225	0.71	1.56	1.21	0.158	13.10	-0.106	-0.134	0.824	N#
	洼地 Depression	153	4.61	36.11	17.17	6.103	35.59	1.179	1.459	0.009	*
	洼地 Depression	153	0.66	1.56	1.21	0.148	12.23	-0.074	1.242	0.142	N#

*非正态分布 (< 0.05) Abnormal distribution at < 0.05 . #自然对数转换后的结果 The data after logarithmic transformation. N: 正态分布 Normal distribution

喀斯特地区表层土壤水分的高度异质性,且内部存在较大的变异性,总的趋势为 0~5 cm 土层比 5~10 cm 土层的变异大,坡地比洼地的变异大.对于研究区土壤水分的空间结构特征及其相互关系还需用地统计学方法进一步研究.通过对偏度、峰度的观察以及采用 K-S法进行非参数检验,在 5%的检验水平下,除坡地 0~5 cm 土层土壤含水量服从正态分布之外,其余情况均需进行对数转换.

2.2 喀斯特木论自然保护区旱季土壤含水量的空间结构

研究区土壤含水量变异函数值的最佳拟合模型均为指数模型,其决定系数在 0.753~0.957,能很好地反映土壤水分的空间结构特征.由图 1 可以看出,不论是坡地还是洼地,0~5 cm 和 5~10 cm 两土层土壤水分均具有相似的空间结构,但坡地和洼地之间的土壤水分空间结构则明显不同.由表 2 可知,研究区洼地 0~5 cm 和 5~10 cm 两土层土壤水分的块金值/基台值均非常小,具有强烈的空间相关性,其空间变异主要由土壤母质、地形、气候等自然因素(结构性变异)引起;坡地 0~5 cm 和 5~10 cm 两土层土壤水分的块金值/基台值分别为 0.402 和 0.247,空间相关性中等,其中坡地 0~5 cm 土层土壤含水量的块金值/基台值最大,原因可能是在最小取样间隔内存在着某种对水分含量起作用的自然过

程,加之坡地的裸岩出露率非常高,土壤浅薄且间断性强,取样难度很大,且试验样品由周围的 3 个点混合代替,存在一定误差.

木论自然保护区典型峰丛洼地的坡地和洼地土壤水分的变程相差很大,坡地 0~5 cm 和 5~10 cm 土层土壤水分的变程分别是洼地相同土层的 32.96 和 26.82 倍.研究区洼地在 1993 年前种植玉米,尽管封育至今,但干扰影响犹存,土壤裸岩率、厚度特别是森林盖度分布不均,破碎化程度高,从而导致其空间连续性差;坡地虽然地形复杂(高程、坡度和坡位等),但岩石裸露率均在 90% 以上,比较一致,森林保存完好,覆盖度在 95% 以上,起到了很好的调控作用,因而土壤水分的空间连续性大,坡地 0~5 cm 和 5~10 cm 土层土壤水分的变程分别达到了 380.70 m 和 460.20 m.同一立地类型随着土层的加深,系统结构更加合理,受外界干扰相应减小,导致土壤水分的变程变大、空间连续性和空间自相关范围增大.

2.3 喀斯特木论自然保护区旱季土壤水分的空间自相关分析

由图 2 可以看出,研究区土壤水分呈现一定的结构性,同一立地类型(坡地或洼地)0~5 cm 和 5~10 cm 两土层土壤水分之间具有相似的空间结构(本文仅以 0~5 cm 土层为例进行分析),同一土层

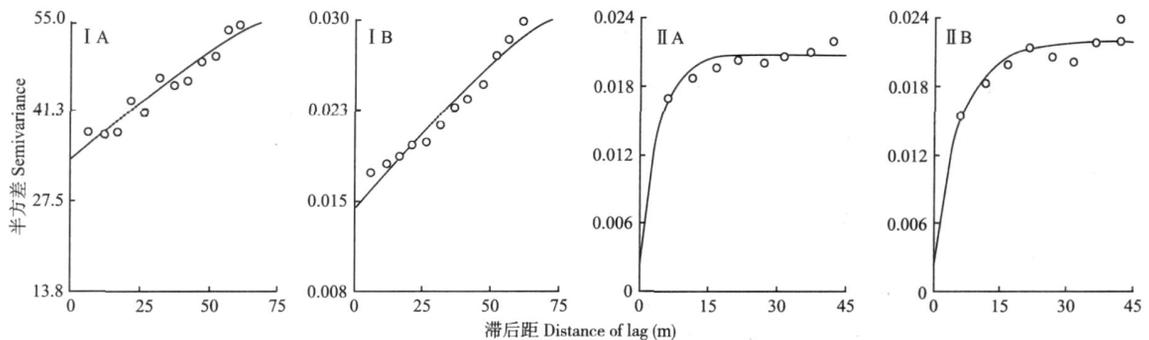


图 1 研究区坡地()和洼地()不同土层的土壤水分半方差函数图

Fig 1 Semivariograms of soil water in different soil layers in the slope () and the depression () of the study area
A: 0~5 cm 土层 0-5 cm soil layer, B: 5~10 cm 土层 5-10 cm soil layer 下同 The same below.

表 2 研究区土壤水分含量半方差函数的模型类型及参数

Tab 2 Semivariogram theoretical models and parameters for soil water in the study area

土层 Soil layer (cm)	立地类型 Field type	模型 Model	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	块金值/基台值 $C_0 / (C_0 + C)$	变程 a (m)	决定系数 R^2
0~5	坡地 Slope	指数 Exponential	33.90000	84.40000	0.402	380.70	0.927
	洼地 Depression	指数 Exponential	0.00048	0.02076	0.023	11.55	0.753
5~10	坡地 Slope	指数 Exponential	0.01430	0.05790	0.247	460.20	0.957
	洼地 Depression	指数 Exponential	0.00147	0.02184	0.067	17.16	0.807

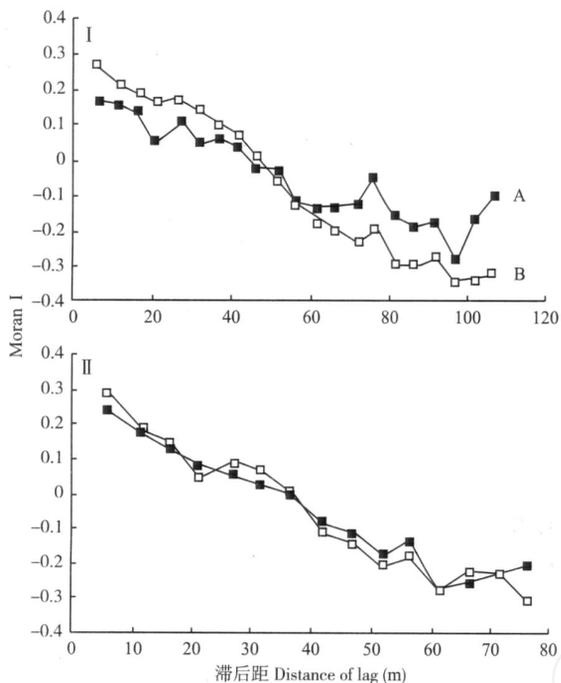


图 2 研究区坡地 ()和洼地 ()不同土层土壤水分的空间相关图

Fig 2 Spatial correlograms of soil water in different layers in the slope () and the depression () in the study area

不同立地类型之间的差别较大. 研究区坡地 0 ~ 5 cm 土层土壤水分的 Moran I 系数较洼地小, 最大时为 0.160, 随着滞后距离的增大, 自相关函数逐渐向负方向增长. 研究区洼地 0 ~ 5 cm 土层土壤水分的 Moran I 值相对较大, 最大为 0.260, 其趋势与坡地略有不同, 随着滞后距的增大呈直线下降, 滞后距在 30 m 之后呈负相关且继续直线下降至 70 m, 在将至坡脚时, 随着土壤水分的增加又有增大的趋势.

2.4 喀斯特木论自然保护区旱季土壤水分的空间格局

利用 Kriging 方法制作的等值线更深刻、全面和直观地揭示了木论自然保护区峰丛洼地旱季表层土壤水分的空间分布格局. 由图 3 可以看出, 研究区同一立地类型 0 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 土层土壤水分具有相似的空间分布特征, 不同立地类型的格局明显不同. 坡地土壤水分呈斑块状分布, 差异明显, 坡中下部土壤含水量相对较高, 中上部随着坡度的突然增大, 水分含量下降, 呈明显的两大斑块且连续性较好, 这与空间自相关分析的结果一致. 洼地土壤水分总体上呈两大斑块状, 但由于岩石裸露、地形的凹凸不平特别是植被覆盖 [25-28] 和根系的分布不均, 导致斑块支离破碎、连续性差, 这是变程较短的原因.

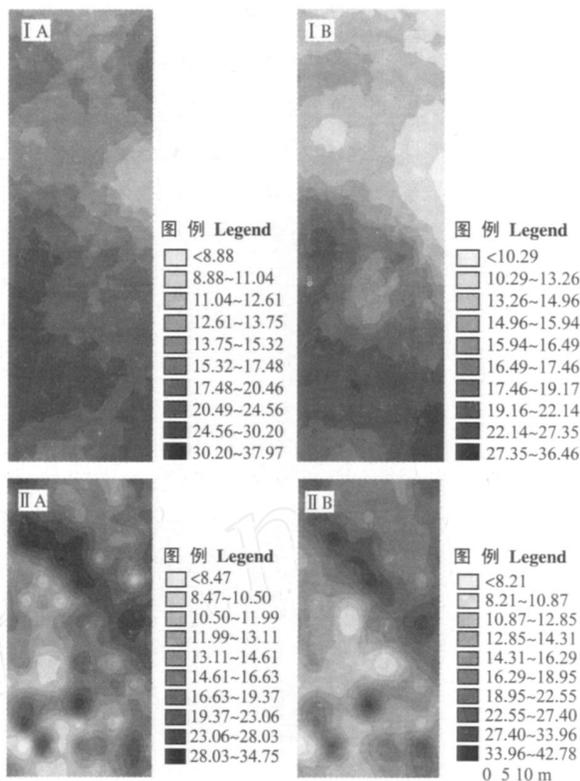


图 3 研究区坡地 ()和洼地 ()不同土层土壤水分的空间分布

Fig 3 Spatial distribution of soil water in different soil layers in slope () and depression () of the study area

3 讨 论

喀斯特峰丛洼地人地矛盾突出、人为干扰强烈、植被逐步退化、土层浅薄, 导致该区水土流失、石漠化等生态灾害日趋严重. 张继光等 [29] 研究发现, 在连续 14 d 无降雨条件下, 喀斯特农业耕作区洼地 0 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 土层的平均含水量分别为 8.14% 和 11.61%, 其变异系数分别为 23.46% 和 13.05%. 木论国家级自然保护区人为干扰相对较少、植被覆盖度较高, 在长达 25 d 持续干旱的情况下, 表层土壤平均含水量仍然较高 (在 16.22% ~ 17.24%), 其变异也很大, 变异系数在 35.59% ~ 39.91%; 同一立地条件下 (坡地或洼地) 0 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 两土层含水量的差异不大, 尽管坡地的土被不足 20%, 土层厚度一般 < 20 cm, 远低于洼地, 但因坡地植被生长茂盛、郁闭度高, 导致坡地 0 ~ 5 cm 土层含水量略高于洼地.

研究区土壤含水量半变异函数的最佳拟合模型均为指数模型, 同一立地类型 (坡地或洼地) 不同层次具有相似的空间结构, 但同一土层不同立地类型之间的土壤水分结构明显不同. 研究区洼地 0 ~

5 cm和 5~10 cm 土层土壤水分具有强烈的空间相关性,其变异主要由土壤母质、地形、气候等自然因素(即结构性变异)所引起;坡地两层土壤水分的空间相关性中等,可能存在更小尺度上的随机变异和生态学过程.研究区坡地因森林植被和岩石裸露率均高达 90%,调节能力强,空间连续性好,变程很大,0~5 cm和 5~10 cm 土层土壤水分的变程分别达 380.70 m和 460.20 m;洼地人为干扰后植被恢复较慢,植被覆盖非常不均,尽管其土被的连续性比坡地好,但土壤水分的连续性很差,其变程很短,0~5 cm和 5~10 cm 土层土壤水分的变程分别只有 11.55 m和 17.16 m,略高于张继光等^[29]的研究结果,可见,通过对植被的破坏,人为干扰不仅降低了土壤水分的整体水平,也破坏了其稳定性,且增加了其不确定性或复杂性.

木论自然保护区土壤水分呈现一定的空间结构性,Moran I系数随着滞后距离的增大,逐渐向负方向增大,其变化趋势与地形、植被的空间结构关系很大.坡地植被生长茂盛,匀质性强,其 Moran I系数较洼地小,且变化相对平缓,这与半方差分析的结果相似.

空间异质性导致空间格局的存在,Kriging等值线图能更深刻、全面和直观地反映土壤水分空间分布.研究区同一立地类型(坡地或洼地)0~5 cm和 5~10 cm 土壤水分具有相似的空间分布特征,同一土层不同立地类型的格局明显不同.坡地表层土壤水分随着坡度的上升而下降,呈明显的两大斑块分布且连续性较好,与张继光等^[30]的研究结果相反.原因可能是由于保护区坡地的森林调控能力强,土壤水分的空间分布主要受地形、岩石裸露率等因子的影响,而农业耕作区坡面土壤水分变异主要受土地利用和植被的影响.研究区洼地的斑块支离破碎,是植被覆盖和根系分布不均所致,这与空间自相关分析和半变异函数分析的结果一致.

地形、微地貌、降雨、人为干扰,特别是植被盖度和分布是影响喀斯特木论保护区土壤水分空间变异程度和分布格局的重要因素.保存完好的木论喀斯特原始森林对土壤水分具有很好的调控作用,对广大喀斯特干扰退化区水资源的改善和合理利用具有重要的指导作用.

参考文献

- [1] Huggett RJ. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: A critical review. *Catena*, 1998, **32**: 155-172
- [2] Song T-Q (宋同清), Peng W-X (彭晚霞), Yi W-M (易文明), et al. Defensive effects of three representative biological measures on seasonal drought in tea plantation in subtropical red soil hilly region. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2006, **20** (4): 191-194 (in Chinese)
- [3] Western AW, Bloschl G, Grayson RB, et al. Geostatistics characterization of soil moisture patterns in the Tarawarra catchment. *Journal of Hydrology*, 1998, **205**: 20-37
- [4] Xu L-F (许联芳), Wang K-L (王克林), Zhu H-H (朱捍华), et al. Effects of different land use types on soil nutrients in karst region of Northwest Guangxi. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(5): 1013-1018 (in Chinese)
- [5] Group of Agroclimatic Division in Weather Bureau of Guangxi Zhuang Autonomous Region (广西壮族自治区气象局农业气候区划协作组). Analysis and Application of Agroclimatic Resource in Guangxi. Beijing: China Meteorological Press, 1988 (in Chinese)
- [6] Peng W-X (彭晚霞), Wang K-L (王克林), Song T-Q (宋同清), et al. Controlling and restoration models of complex degradation of vulnerable karst ecosystem. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(2): 811-820 (in Chinese)
- [7] Yang M-D (杨明德), Liang H (梁虹). The processes of evolution dynamic of cone karst and the exploitation of the water resource. *Carsologica Sinica* (中国岩溶), 2000, **19**(1): 44-51 (in Chinese)
- [8] Yu L-F (喻理飞), Zhu S-Q (朱守谦), Ye J-Z (叶镜中). Dynamics of a degraded karst forest in the process of natural restoration. *Science Silvae Sinicae* (林业科学), 2002, **28**(1): 1-7 (in Chinese)
- [9] Guo X-D (郭旭东), Fu B-J (傅伯杰), Ma K-P (马克平), et al. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS—A case study in Zunhua City of Hebei Province. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2000, **11**(4): 557-563 (in Chinese)
- [10] Legendre P, Fortin MJ. Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetatio*, 1989, **80**: 107-138
- [11] Li H-B (李哈尔滨), Wang Z-Q (王政权), Wang Q-C (王庆成). Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1998, **9**(6): 651-657 (in Chinese)
- [12] Rossi RE, Mulla DJ, Journel AG, et al. Geostatistics tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological Monographs*, 1992, **62**: 277-314
- [13] Fitzjohn C, Teman JL, Williams AG. Soil moisture variability in a semi-arid gully catchment: Implications for runoff and erosion control. *Catena*, 1998, **32**: 55-70
- [14] Li Y (李毅), Wang W-Y (王文焰), Wang Q-J (王全九). Study on spatial variability of soil properties. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2002, **16**(1): 68-71 (in Chinese)

- [15] Su Y-Z (苏永中), Zhao H-L (赵哈林), Cui J-H (崔建垣). Spatial heterogeneity of soil properties in the desertification process of rain fed farmland in Horqin Sandy land *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2004, **41**(2): 210-217 (in Chinese)
- [16] Western AW, Zhou SL, Grayson RB, *et al*. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes *Journal of Hydrology*, 2004, **286**: 113-134
- [17] Ma F-Y (马风云), Li X-R (李新荣), Zhang J-G (张景光), *et al*. Spatial heterogeneity of soil moisture in Shapotou sand-fixing artificial vegetation area *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(5): 789-795 (in Chinese)
- [18] William BW. Karst hydrology: Recent developments and open questions *Engineering Geology*, 2002, **65**: 85-105
- [19] Yuan D-X (袁道先), Dai A-D (戴爱德), Meng W-T (蒙五田), *et al*. Study on Water System and Its Mathematics Model in Exposed Karst Region in South of China Guangxi: Guangxi Normal College Press, 1996 (in Chinese)
- [20] Goovaerts P. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties *Biology and Fertility of Soils*, 1998, **27**: 315-314
- [21] Wang Z-Q (王政权). Geostatistics and Its Application in Ecology. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese)
- [22] Wu J-G (邬建国). Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy. Beijing: China Higher Education Press, 2002 (in Chinese)
- [23] Tranqnar BB, Yost RS, Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties *Advances in Agronomy*, 1985, **38**: 45-94
- [24] Liu F-C (刘付程), Shi X-Z (史学正), Yu D-S (于东升), *et al*. Characteristics of spatial variability of total soil nitrogen in the typical area of Taihu Lake basin *Geographical Research* (地理研究), 2004, **23**(1): 163-170 (in Chinese)
- [25] Zeng F-P (曾馥平), Peng W-X (彭晚霞), Song T-Q (宋同清), *et al*. Changes in vegetation after 22 years' natural restoration in the karst disturbed area in Northwest Guangxi *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(12): 5110-5119 (in Chinese)
- [26] Cousin I, Nicoullaud B, Coutadeur C. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soils *Catena*, 2003, **53**: 97-114
- [27] Famiglietti JS, Rudnicki JW, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hill slope transect Rattlesnake Hill Texas *Journal of Hydrology*, 1998, **210**: 259-281
- [28] Svetlitchnyi AA, Plotnitskiy SV. Spatial distribution of soil moisture content within catchments and its modeling on the basis of topographic data *Journal of Hydrology*, 2003, **277**: 50-60
- [29] Zhang J-G (张继光), Chen H-S (陈洪松), Su Y-R (苏以荣), *et al*. Spatial variability of soil moisture on hillslope in cluster-peak depression areas in Karst region *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2006, **22**(8): 54-58 (in Chinese)
- [30] Zhang J-G (张继光), Chen H-S (陈洪松), Su Y-R (苏以荣), *et al*. Spatial variability of surface moisture content in depression area of karst region under moist and arid conditions *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(12): 2277-2282 (in Chinese)

作者简介 宋同清,男,1962年生,副研究员,主要从事群落生态学和恢复生态学研究,发表论文 30余篇. E-mail: songtongq@163.com

责任编辑 杨弘