

湿润和干旱条件下喀斯特地区洼地表层土壤水分的空间变异性*

张继光^{1,2,3} 陈洪松^{1,2,*} 苏以荣^{1,2} 吴金水^{1,2} 张伟^{1,2,3}

(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试验站, 广西环江 547100;

³ 中国科学院研究生院, 北京 100049)

【摘要】 在桂西北喀斯特洼地, 用地统计学方法研究了旱季初期湿润和干旱条件下表层(0~5和5~10 cm)土壤水分的空间结构及其分布特征。结果表明, 表层土壤水分存在明显的空间异质性和各向异性, 呈现差异显著的斑块状分布格局。湿润条件下, 土壤水分具有中等和较强的空间相关性, 变程分别为33.15 m和15.75 m, 其中0~5 cm层具有明显的趋势效应; 干旱条件下, 土壤水分则呈现出强烈的空间相关性, 而且相似斑块的空间尺度有所减小, 变程最小仅为8.22 m; 在平均含水量较低时(干旱条件)其变异程度较大, 实际应用中应根据平均含水量水平采取不同的取样设计。实验区表层土壤水分空间变异及其分布格局的显著差异, 主要是受地貌、平均含水量(降水)和地形等因素的影响。

关键词 土壤水分 喀斯特 空间变异性 克里格 空间分布

文章编号 1001-9332(2006)12-2277-06 **中图分类号** S152.7 **文献标识码** A

Spatial variability of surface soil moisture content in depression area of karst region under moist and arid conditions. ZHANG Jiguang^{1,2,3}, CHEN Hongsong^{1,2}, SU Yirong^{1,2}, WU Jinshui^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2,3} (¹ Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; ² Huanjiang Experimental Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang 547100, Guangxi, China; ³ Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2006, 17(12): 2277 ~ 2282.

By the methods of geostatistics, this paper studied the spatial structure and distribution pattern of surface soil (0~5 and 5~10 cm) moisture content in the depression area of karst region in northwest Guangxi under moist and arid conditions in the forefront of dry season. The results showed that in test area, surface soil moisture content had obvious spatial heterogeneity and anisotropy, presenting a significantly different plaque distribution pattern. Under moist condition, surface soil moisture content had a medium or stronger spatial relativity, with a range of about 33.15 and 15.75 m, respectively, and an obvious trend effect in 0~5 cm soil layer. Under arid condition, the spatial relativity was strong, and the spatial scale of resembling plaque had somewhat decrease, with the smallest range being 8.22 m. The moisture content under arid condition had a higher spatial variability, and thus, the sampling strategy should be based on the mean soil moisture content. The significant difference in the spatial variability and distribution pattern of surface soil moisture in test area was mainly due to the effects of physiognomy, soil mean moisture (precipitation), and topography.

Key words Soil moisture, Karst, Spatial variability, Kriging, Spatial distribution.

1 引 言

土壤水分对洪水、侵蚀、溶质运移、陆-气间作用以及地貌和成土过程等一系列水文过程都有重要影响^[18,19]。然而, 由于自然因素和人类活动的影响, 土壤水分在空间上具有高度异质性, 要理解和预测上述过程的发生, 就要对土壤水分空间变异过程有充分的了解^[19]。虽然国内外学者在土壤水分空间变异方面开展了大量工作^[2~4,7,8,12,13,18], 但大部分研究都集中在平原旱地和高原丘陵区^[1,5,7,10,15], 在生态脆弱的喀斯特地区则鲜有报道。

在影响土壤水分空间变异的自然因素中, 平均

含水量具有十分重要的作用^[4,19]。Jacques等^[7]发现, 微变异即使在小尺度土壤水分变异中也起重要作用, 地形、土壤、植被等诸因子的相对贡献主要依赖于前期平均含水量的状况。许多研究认为土壤水分的变异随土壤平均含水量的降低而减小^[4,5,19]。但Owe等^[12]发现土壤水分变异特性在平均含水量处于中等水平时达到最高; Fitzjohn等^[5]认为, 降雨之后, 土壤平均含水量迅速升高, 空间变异程度会随之降低; 王军等^[16]研究发现, 土壤水分基台值的季节

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-426)、国家自然科学基金项目(40501034)和中国科学院知识创新工程领域前沿资助项目(01200220055413)。

** 通讯联系人。E-mail: hbchs@isa.ac.cn

2005-12-02 收稿, 2006-09-24 接受。

变化格局与平均含水量相反;也有研究者认为土壤水分变异与平均含水量之间根本不存在系统联系^[2].这可能是由于不同研究区气候、地形、土壤、植被以及取样的尺度、时间和深度等不同所造成的^[4,19].在分析平均含水量对土壤水分变异的影响时,应考虑到上述条件而不能一概而论.本文通过在喀斯特洼地旱季初期湿润和干旱两种条件下,对采样区表层土壤水分进行空间异质性分析,揭示土壤水分的空间结构特征及其分布格局,探讨特殊地形地貌条件下平均含水量对土壤水分变异的影响,旨在为喀斯特退化生态系统的植被恢复和生态重建提供理论指导.

2 研究地区与研究方法

2.1 自然概况

研究区位于广西环江毛南族自治县的下南乡古周村(107°55'E,24°50'N),属典型的喀斯特峰丛洼地,区内最低点海拔为376 m,与最高点海拔相差440 m.土地总面积186.7 hm²,其中耕地17.3 hm²,主要分布在洼地中,土层浅薄且土被很不连续.其余以山地为主,其中25°以上坡地占坡地总面积的80%以上,自然植被主要以灌丛为主,森林覆盖率仅有13%,且水土流失、石漠化严重,属于国家移民迁出区和西部“退耕还林还草区”.该地区年平均气温为19.9℃,太阳总辐射量334.4~413.4 kJ·cm⁻²,年平均降雨量为1389.1 mm,降水丰富但季节分配不均,雨季平均开始于4月下旬,结束于8月底或9月初,常出现涝灾;9月底至次年3月为旱季,干旱发生频率为50%~60%.土壤主要是碳酸盐岩发育的石灰土.

2.2 研究方法

2.2.1 取样方法 试验地位于研究区洼地中部,呈东北-西南走向.该地地势总体起伏不大,其中东南部分偏高,有部分石丛存在,西北部分地势偏低但较为平坦.种植作物为大豆套种甘薯,分别于2004年旱季初期的9月10日(湿润条件,平均含水量为23.13%)和10月28日(干旱条件,平均含水量为9.89%)在90 m×40 m地块范围内以网格法(间距5 m×5 m)分两层(0~5和5~10 cm)定点采样(图1),共采集土壤样品342个,在室内用烘干法测定土壤重量含水量.

2.2.2 分析方法 文中数据采用域法识别特异值,即样本均值加减3倍标准差,在此区间外的数据均定为特异值,分别用正常的最大和最小值代替特异值^[11,20],后续计算均采用处理过的原始数据.土壤水分的空间变异研究主要采用地统计学方法^[9,17,21],对空间自相关:变异函数、最优模型和空间局部插值等作如下说明.

1)空间自相关:空间自相关分析主要用于检验某一空间变量是否存在空间依赖关系.常用的空间自相关系数有 Moran's *I* 系数和 Geary's *C* 系数,其中用 Moran's *I* 系数进行空间自相关分析的公式为:

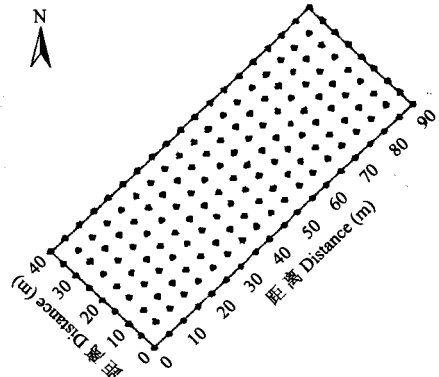


图1 研究区域内样点分布示意图
Fig.1 Sketch of sampling spots in research area.

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

式中, x_i 和 x_j 分别是变量 x 在相邻配对空间点 i 和 j 上的取值, w_{ij} 是相邻权重, n 是空间单元总数, I 系数取值从-1到1.当 $I = 0$ 时,代表空间不相关,取正值时为正相关,取负值为负相关.

2)变异函数:作为地统计学的最基本函数,变异函数能反映出区域化变量的随机性和结构性.一般认为,它只在最大间隔的1/2内才有意义^[16,19].用于估计半方差的公式为:

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

式中, $N(h)$ 是相隔距离等于 h 时的样点对数, $Z(x_i)$ 是样点 Z 在位置 x_i 的实测值, $Z(x_i + h)$ 是与 x_i 距离为 h 处样点的值.

3)最优模型拟合:通过半方差公式计算半变异函数值,分别用不同类型的理论模型拟合,得到模型的相关参数.一般选取残差(RSS)最小、决定系数(R^2)最接近于1的模型,并采用交叉验证法修正模型参数.本研究中最优理论模型分别为指数和球状模型,其一般公式为:

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

$$\begin{cases} r(h) = C_0 + C\left(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3}\right) \\ r(h) = C_0 + C \end{cases} \quad (4)$$

式中, C_0 为块金值, $C_0 + C$ 为基台值, h 为滞后距离, a 为变程.

4)空间局部插值:地统计学中常用的插值方法是 Kriging 法,其中在土壤学中应用极为广泛的是普通 Kriging 法,即设一区域内 $Z(x_0)$ 为某一变量在位置 x_0 处的估值,其周围相关范围内的已测定值为 $Z(x_i)$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$),则 x_0 处的估值可用 $Z(x_i)$ 的线性组合来估测:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (5)$$

式中, λ_i 是与 $Z(x_i)$ 位置有关的权重系数,表示各测定值对估计值 $Z(x_0)$ 的贡献,其和为1.

表 1 土壤水分描述统计特征

Table 1 Statistical parameters of soil moisture content

采样时间 Sampling time	土层深度 Soil depth (cm)	平均值 Mean (%)	中值 Med (%)	最小值 Min (%)	最大值 Max (%)	标准差 STD (%)	变异系数 CV (%)	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
9.10	0~5	23.00	22.87	18.02	28.49	1.69	7.36	0.225	0.882
	5~10	23.26	23.34	19.98	26.98	1.36	5.83	-0.016	-0.059
10.28	0~5	8.14	8.15	2.73	13.04	1.91	23.46	0.025	0.033
	5~10	11.63	11.61	7.09	15.78	1.75	15.05	-0.141	0.350

3 结果与分析

3.1 土壤表层含水量的统计特征

从表 1 可以看出,在旱季初期湿润条件下表层(0~5 和 5~10 cm)土壤含水量的平均值为 23.13%,干旱时土壤含水量较低,0~5 cm 层仅为 8.14%,接近凋萎系数。土壤含水量的变异系数(CV)反映了随机变量的离散程度,在湿润条件下均呈现弱变异($CV < 10\%$),而干旱条件下则表现为中等变异($10\% \leq CV \leq 100\%$)。偏度系数和峰度系数显示出各层含水量数据均接近正态分布,K-S 非参数检验也表明,在 0.05 检验水平下,各层土壤含水量均服从正态分布,不必对数据进行转化。

3.2 土壤表层含水量的自相关分析

从图 2 可以看出,土壤表层含水量的空间自相关在两层具有相似的变化趋势。滞后距较小的点对呈显著的空间自相关;随着滞后距的增大,自相关系数逐渐向负方向增长,达到显著的负空间自相关,说明土壤表层水分具有一定的空间结构,且呈现较简单的斑块状分布。这与实验地的地形地貌情况相一致,在南段约 0~40 m 范围内有较大面积石丛分布,

土层浅薄且砂砾含量较多,土壤持水能力较低,而岩石的出露及土壤中的砂砾又会增加土壤表层温度,导致土表蒸发加强^[4]。在 50~90 m 范围内,地势较为平坦,土被的连续性较好,土层深厚且质地粘重,土壤含水量相对较高,使南北两段表现为性质不同的斑块类型。正空间自相关的距离反映了性质相似斑块的平均半径,负空间自相关则反映了性质相反斑块间的平均距离^[20]。在湿润条件下,相似斑块的尺度约为 40 m,超过这个尺度变为性质不同的斑块。而在干旱条件下(连续 14 d 无降雨),相似斑块的尺度约为 30 m,较湿润条件下有所减小。这可能是由于 9 月 7 日的一次较强降雨过程(22 mm)使得不同斑块间土壤水分的差异得到一定程度平滑,而干旱时斑块间的差异程度则更加凸现。

3.3 各向同性下土壤水分的空间结构分析

空间结构分析(表 2、图 3 和图 4)表明,仅在湿润条件下表层土壤水分具有一定的块金效应,反映出在小于取样尺度上有影响土壤水分过程的作用存在,可能是微域中裸露石块对降雨后的水分分布存在影响。基台值在整体上表现出干旱条件比湿润条件下要大,这也可以从土壤层次变化上得到反映,在

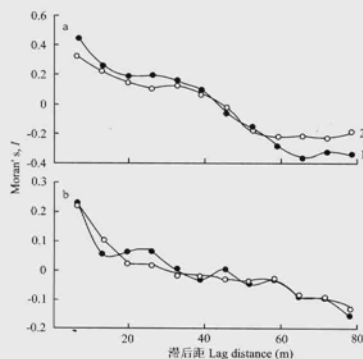


图 2 土壤水分的空间自相关
Fig. 2 Spatial correlogram of soil moisture.
a) 2004.9.10, b) 2004.10.28; 1) 0~5 cm, 2) 5~10 cm.

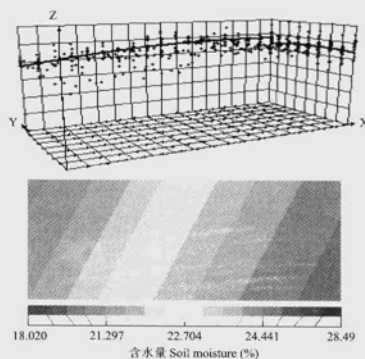


图 3 湿润条件下表层 0~5 cm 土壤水分的趋势分析
Fig. 3 Trend analysis of the soil moisture of 0~5 cm layer under moist condition.

表 2 土壤水分空间变异半方差特征参数
Table 2 Parameters of semi-variogram theoretical models for spacial variation of soil moisture

采样时间 Sampling time	土层深度 Soil depth (cm)	平均含水量 Mean moisture content (%)	块金值 C_0	基台值 $C + C_0$	$C_0 / (C + C_0)$	变程 Range (m)	模型 Model	R^2
9.10	0~5	23.00	0.97	2.35	41.27	33.15	A	0.85
	0~5*	23.00	0.18	1.92	6.25	10.83	A	0.94
	5~10	23.26	0.35	1.54	22.73	15.75	A	0.84
10.28	0~5	8.14	0.01	3.43	0.29	9.14	B	0.94
	5~10	11.61	0.001	2.75	0.04	8.22	B	0.37

A; 指数 Exponential; B; 球状 Spherical. * 趋势分离后的半方差参数项 Semi-variance parameters after trend analysis.

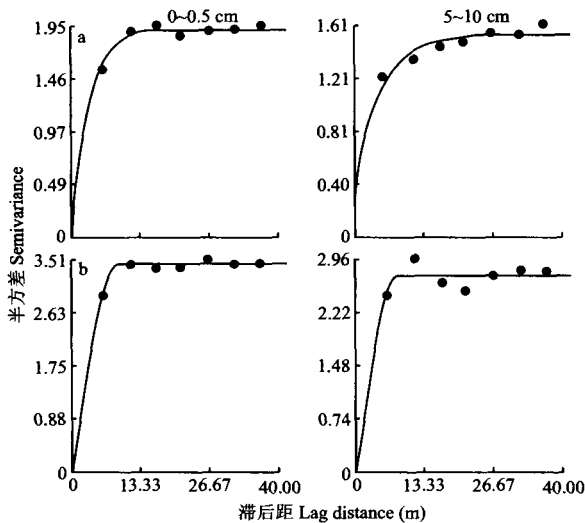


图 4 土壤含水量的半方差图
Fig. 4 Semi-variograms of soil moisture.
 a) 湿润条件 Moist condition; b) 干旱条件 Arid condition. 下同 The same below.

两种条件下, 0~5 cm 土层的平均含水量均小于 5~10 cm, 但基台值却相反. 因此可以认为, 在该地区, 旱季初期土壤水分的变异程度在平均含水量较低时较大, 这与王军等^[16]在黄土高原的研究结果类似. 已有研究表明, 在影响土壤水分的自然因素中, 除降雨外, 土壤水分的空间变异主要受地貌的控制^[16]. 在喀斯特地区, 地貌(石丛)因素通过影响降雨入渗和地面蒸发等过程影响土壤含水量, 从而控制局地土壤水分变异. 首次采样前的一次较强降雨过程显然对表层土壤水分变异起了一定的平滑作用, 使得湿润条件下土壤水分的变异程度较干旱条件有所降低.

在湿润条件下, 两土层的块金值与基台值之比分别为 41.27% 和 22.73%, 呈现出中等和较强的空间相关性, 表明由空间自相关引起的空间异质性占总空间异质性的 58.73% 和 77.27%, 主要表现在取样间隔(5 m) 到其变程的尺度上, 半方差拟合模型的变程分别为 33.15 和 15.75 m, 呈现较强的空间

连续性. 由于 0~5 cm 层土壤水分空间分布存在明显的趋势效应, 表现为沿 X 轴(西南-东北)方向呈线性增加趋势, 呈现出一阶的趋势面(图 3). 在分离趋势项后对残差进行半方差函数拟合, 其结构参数相应减小. 究其原因, 在去趋势项之前, 0~5 cm 层土壤水分的半方差参数反映的是微地貌和地形两个不同尺度上土壤水分变异的叠加结果; 在去掉趋势后, 则主要反映了小尺度上微地貌的影响, 因而半方差参数相应减小. 而在干旱条件下, 两层的块金值与基台值之比分别为 0.29% 和 0.04%, 呈现出强烈的空间相关性, 其空间异质性主要由空间自相关部分引起, 变程仅为 9.14 和 8.22 m, 主要与该取样尺度下影响土壤水分各种过程的空间相互作用加强有关. 这表明在含水量较低情况下, 影响土壤水分变异的地形地貌等因子的作用得到加强, 造成土壤水分的空间连续性较差. 由上述分析可见, 降雨等气候条件导致平均含水量的不同能显著改变表层土壤水分的空间变异程度及其分布格局, 在喀斯特洼地土壤水分的空间变异研究中, 应根据其平均含水量水平采取不同的取样设计.

3.4 各向异性下的空间结构分析

土壤性状的空间变异通常是有方向性的^[17]. 也就是说, 地形、微地貌、土壤物理性质等因子的作用会影响到土壤性状在不同方向上呈现不同的变化规律. 本研究设 22.5° 容差, 计算了在 0°(东北-西南) 和 90°(西北-东南) 两个方向上的变异函数值(图 5). 由于研究地块在两个方向上的尺度不同, 因此不能用各向异性比来表征变异函数的各向异性^[14]. 从研究尺度内变异函数的特征来看, 两次取样土壤

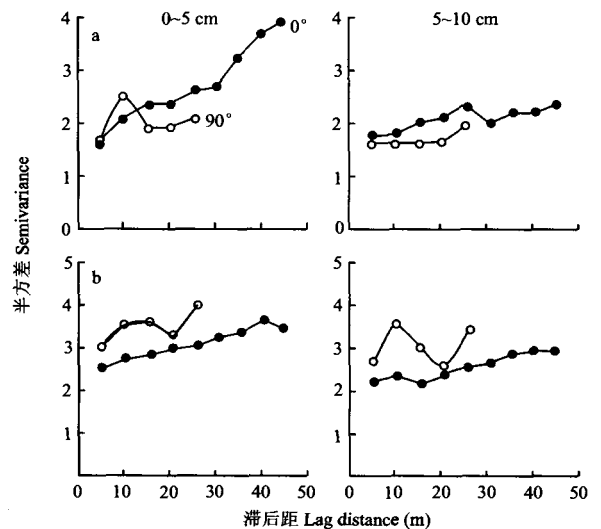


图 5 半变异函数的各向异性
Fig. 5 Semi-variograms of soil moisture for anisotropy.

含水量的空间结构均存在明显的各向异性。在湿润条件下,表层土壤水分总体上表现出 0° 方向比 90° 方向的变异程度大。 0° 方向上是性质不同的两种斑块类型,主要受地貌(石丛)因素的影响造成了变异的差异;而在干旱条件下, 90° 方向的变异程度则明显大于 0° 方向, 90° 方向是西侧峰丛的延伸方向,地形起伏较大,坡面径流等造成土壤质地及土层深度具有一定差异,久旱无雨又使得 0° 方向地貌的影响作用减弱,从而导致 90° 方向上土壤水分的异质性程度更加显著。而且土壤含水量的各向异性特征也可以在等值线图得到直观体现。总之,在不同的土壤含水量条件下, 0° 和 90° 方向上空间异质性的显著差异,能反映出控制各向异性的因素随土壤含水量的变化发生相应改变。

3.5 土壤表层含水量的空间分布格局

对具有区域性较大差异或多因素影响的空间变量用 Kriging 法插值的效果较好^[8],当然插值结果会受到变异函数模拟精度、样点分布及邻近样点的选

取等因素的影响^[6]。本文根据半变异函数理论模型,在空间结构分析的基础上,采用普通 Kriging 插值方法,并考虑各向异性和趋势项,绘制出直观反映旱季初期表层土壤水分空间分布格局的等值线图(图6)。从图6可以看出,土壤水分呈明显地斑块状或条形分布,含水量高低差异明显。在实验地块南部由于有石丛存在,造成各层土壤含水量较低;西部处在一侧峰丛的坡面延伸地带,含水量也相对较低,相对应在北部和东部地形较为一致且地势低洼的区域,土壤含水量较高,形成了表层土壤水分明显不同的分布特点,这与空间自相关分析的结果相符合。当然,这种空间分布在含水量不同时亦有显著差别。在湿润条件下,表层土壤水分在 0° 方向上差异明显,呈现两种不同的斑块格局,而在每个斑块内部变异程度则相对较小。干旱条件下,土壤水分的空间变异程度明显增大,显示为斑块结构较为破碎,并且在 90° 方向上含水量的差异较显著。尤其值得注意的是,在地块南部的石丛分布区,土壤含水量整体较

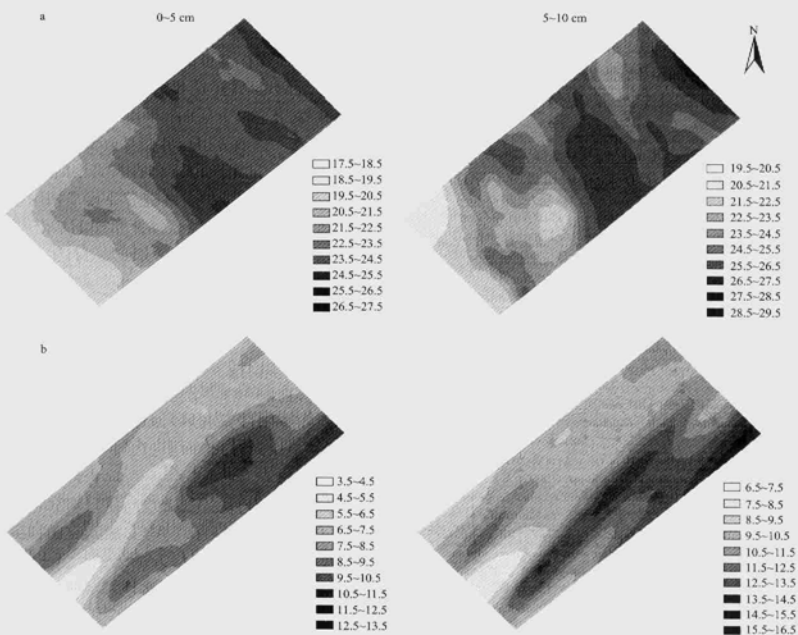


图6 土壤表层含水量的空间分布
Fig. 6 Spatial distribution of the surface soil moisture (%).

低,但石丛周围的土壤由于出露石块对雨水汇集等产生作用,使土壤水分出现数个相对高值的小区域,从而加大了斑块的空间破碎化程度.总之,在喀斯特洼地中,表层土壤水分出现这种空间差异显著的分布格局,主要是受地貌、平均含水量(降水)和地形等因素的综合影响.

4 结 论

1)喀斯特洼地土壤水分的空间自相关说明其格局分布呈斑块状,这与实验地的实际地貌情况相符合.旱季初期干旱条件下土壤水分相似斑块的空间尺度较湿润条件有所减小,主要是因为前期降雨过程使得不同斑块间土壤水分的差异得到一定程度的平滑,而到干旱时这种差异程度更加凸现所致.

2)喀斯特洼地表层土壤水分具有明显的空间结构.在湿润条件下,土壤水分呈弱变异,具有中等和较强的空间相关性,变程分别为 33.15 和 15.75 m,而且 0~5 cm 层存在明显的趋势效应;干旱条件下则表现为中等变异,具有强烈的空间相关性,变程最小仅为 8.22 m.即干旱条件下(平均含水量较低)其变异程度较大,因此在土壤水分空间变异研究中应根据其平均含水量水平采取不同的取样设计.

3)喀斯特洼地土壤表层水分具有明显的各向异性特征,在旱季初期两种含水量条件下,0°和 90°方向的变异程度明显不同,这反映出随土壤含水量的变化控制各向异性的因素也会发生相应改变.Kriging 插值结果显示,表层土壤水分呈明显的斑块状或条形分布.在喀斯特洼地中,土壤表层水分空间变异及其分布格局的显著差异,主要是受地貌、平均含水量(降水)和地形等因素的综合影响.

参考文献

- 1 Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, et al. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci Soc Am J*, **58**: 1501~1511
- 2 Charpentier MA, Groffman PM. 1992. Soil moisture variability within remote sensing pixels. *J Geophys Res*, **97**: 18987~18995
- 3 Cousin I, Nicoulaud B, Coutadeur C. 2003. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil. *Catena*, **53**: 97~114
- 4 Famiglietti JS, Rudnicki JW, Rodell M. 1998. Variability in surface moisture content along a hill slope transect Rattlesnake Hill Texas. *J Hydrol*, **210**: 259~281
- 5 Fitzjohn C, Ternan JL, Williams AG. 1998. Soil moisture variability in a semi-arid gully catchment: Implications for runoff and erosion control. *Catena*, **32**: 55~70
- 6 Goovaerts P. 1999. Geostatistics in soil science: State-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, **89**(1~2): 1~45
- 7 Jacques D, Monanty B, Timmerman A, et al. 2001. Study of time dependency of factors affecting the spatial distribution of soil water content in a field-plot. *Phys Chem Earth (B)*, **26**: 629~634
- 8 Li H-B (李海滨), Lin Z-H (林忠辉), Liu S-X (刘苏峡). 2001. Application of kriging technique in estimating soil moisture in China. *Geogr Res (地理研究)*, **20**(4): 446~452 (in Chinese)
- 9 Li H-B (李海滨), Wang Z-Q (王政权), Wang Q-C (王庆成). 1998. Theory and methodology of spatial heterogeneity of quantification. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **9**(6): 651~657 (in Chinese)
- 10 Li H-J (李洪建), Wang M-B (王孟本), Chai B-F (柴宝峰). 2003. Spatial and temporal characteristics of soil moisture dynamics in Loess Plateau. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **14**(4): 515~519 (in Chinese)
- 11 Liu F-C (刘付程), Shi X-Z (史学正), Yu D-S (于东升), et al. 2004. Mapping soil properties of the typical area of Taihu Lake watershed by geostatistics and geographic information systems - A case study of total nitrogen in topsoil. *Acta Pedol Sin (土壤学报)*, **41**(1): 20~27 (in Chinese)
- 12 Owe M, Jones EB, Schmutge TJ. 1982. Soil moisture variation patterns observed in Hand County, South Dakota. *Water Resour Bull*, **18**: 949~954
- 13 Pan C-Z (潘成忠), Shangguan Z-P (上官周平). 2004. Spatial variability of soil moisture nutrients and productivity on slope land in loessial semiarid region. *Chin J Appl Ecol (应用生态学报)*, **15**(11): 2061~2066 (in Chinese)
- 14 Su Y-Z (苏永中), Zhao H-L (赵哈林), Cui J-Y (崔建垣). 2004. Spatial heterogeneity of soil properties in the desertification process of rainfed farmland in Horqin sandy land. *Acta Pedol Sin (土壤学报)*, **41**(2): 210~217 (in Chinese)
- 15 Svetlitchnyi AA, Plotnitskiy SV. 2003. Spatial distribution of soil moisture content within catchments and its modeling on the basis of topographic data. *J Hydrol*, **277**: 50~60
- 16 Wang J (王 军), Fu B-J (傅伯杰), Qiu Y (邱 扬), et al. 2000. Spatiotemporal variability of soil moisture in small catchments on Loess Plateau - Semivariograms. *Acta Geogr Sin (地理学报)*, **55**(4): 428~438 (in Chinese)
- 17 Wang Z-Q (王政权). 1999. Geo-statistics and Its Application in Ecology. Beijing: Science Press. 69~93 (in Chinese)
- 18 Western AW, Gunter B. 1999. On the spatial scaling of soil moisture. *J Hydrol*, **217**: 203~224
- 19 Western AW, Gunter B, Rodger B, et al. 1998. Geostatistical characterizations of soil moisture patterns in Tarrawarra catchment. *J Hydrol*, **205**: 20~37
- 20 Zhang C-S (张朝生), Tao S (陶 澍), Yuan G-P (袁贵平), et al. 1995. Spatial autocorrelation analysis of trace element contents of soil in Tianjin plain area. *Acta Pedol Sin (土壤学报)*, **32**(1): 50~57 (in Chinese)
- 21 Zhou H-Z (周慧珍), Gong Z-T (龚子同), Lamp L. 1996. Study on soil spatial variability. *Acta Pedol Sin (土壤学报)*, **33**(3): 232~241 (in Chinese)

作者简介 张继光,男,1980年生,硕士研究生.主要从事土壤环境生态和水土保持研究,发表文章2篇. E-mail: jiguang8002@163.com

责任编辑 肖 红