

喀斯特地区典型峰丛洼地旱季表层土壤水分空间 变异性初探*

张 伟^{1,2,3} 陈洪松^{1,2†} 王克林^{1,2} 张继光^{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,环江 547100)

(3 中国科学院研究生院,北京 100049)

摘 要 土壤水分空间变异性研究在喀斯特地区生态环境的恢复和重建过程中具有重要意义。通过网格(5 m × 5 m)取样,用地统计学方法研究了喀斯特洼地典型区域(150 m × 50 m)表层土壤水分(0~5 cm 和 5~10 cm)的空间变异特征。结果表明:土壤水分在采样区内呈比较简单的斑块状分布,相同性质斑块与土被连续分布区和石丛集中分布区范围相当;半变异函数在不同性质斑块内呈现出截然不同的变异特征,在整个采样区内表现出各向异性;旱季洼地表层土壤水分主要受石丛和地形两个不同尺度的环境因素影响;土壤水分具有一定的尺度效应,半变异函数的变程随着最小采样间隔增大而增大;当研究区域存在多重尺度的变异结构时,需要根据研究的目的和精度确定合理的采样尺度。

关键词 喀斯特地区;峰丛洼地;土壤水分;旱季;空间变异性;地统计学

中图分类号 S152 **文献标识码** A

表层土壤水分的空间格局由不同尺度上的自然作用和过程控制,包括降水、径流、蒸发蒸腾等,其变化尺度从几厘米到上百米^[1]。通过对以上过程的调节,地形、微地貌、植被、土壤性质、地质基础等环境因子间接控制着土壤水分的空间分布^[1],同时土壤水分的空间分布格局也反映了这些自然过程和作用的的空间差异。Grayson 等^[2]将土壤水分的空间分布格局分两种情况进行讨论:一种是降水量持续大于蒸发蒸腾总量的情况下,地形、坡位决定了水分的分布,称之为非内部因素控制;另一种是蒸发蒸腾总量持续大于降水量情况下,土壤的含水状况由土壤的物理性质和植被控制,地形因素仅仅在降雨时对地势差异显著区域的土壤水分格局起主要控制作用。然而,土壤水分的空间格局远较理论上的复杂,除了上述系统因素控制外,还受许多随机因素和地域因素影响。

在喀斯特地区,由于长期强烈的岩溶作用形成了有别于其他地区的特殊的二元水文结构^[3,4],使得水源漏失、深埋,加上降水时空分布不均、土层浅薄、土壤持水性能低、缺乏植被系统的调节,出现了

湿润气候条件下特殊的干旱现象—岩溶干旱^[5]。土壤水分作为喀斯特地区重要的水资源,在喀斯特生态系统的演化和重建过程中具有特殊意义。近年来由于人类不合理的开发利用,喀斯特植被逐年退化,水土流失、石漠化等生态灾害日趋严重^[5,6]。这就有必要对土壤水分的空间变异特征进行定量研究,充分认识土壤水分空间变异的程度、尺度以及方向性,分析影响土壤水分空间分布的环境因素和过程,进而结合生态系统恢复原理及方法为生态环境的保护和重建提供参考。

地统计学起源于 20 世纪 60 年代,是以法国统计学家 Marheron 创立的区域化变量为理论基础,以半方差函数和 Kriging 插值为主要工具的一种统计方法,20 世纪 80 年代开始广泛地应用于土壤性质空间变异性的研究。1980 年 Webster 等在分析土壤性质空间变异规律的基础上,引进了新的土壤预测和模拟技术,并加以完善和丰富,大大推动了这一研究的发展^[7]。随后一些研究者结合地统计学探讨了土壤水分的空间格局与土壤侵蚀过程的联系^[8]以及土壤水分的时空变异与环境因素的关系^[1,9]。国内

* 国家自然科学基金项目(40501034)、国家“十五”科技攻关项目(2004BA606A-08)、中国科学院知识创新工程领域前沿项目(01200220055413)资助

† 通讯作者, E-mail: hbchs@isa.ac.cn

作者简介:张 伟(1979~),男,河北邯郸人,硕士研究生,主要从事土壤特性空间变异和水土保持方面的研究

收稿日期:2005-05-25;收到修改稿日期:2006-03-06

王军等^[10]在黄土高原也进行了相关研究,发现随着土壤干湿状况的改变,土壤水分的地统计学特征出现了相应变化。苏永中等^[11]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,认为地统计学分析能够表征农田沙漠化发生发展的程度和空间尺度。雷咏雯等^[12]研究了不同尺度下土壤养分的空间变异特征。可见,地统计学是进行土壤性质空间结构分析的有效工具。近年来,学术界对喀斯特地区石漠化及生态脆弱性进行了大量研究^[4,6],而对土壤水分的空间变异性研究却鲜见报道。本文结合地统计学方法对旱季喀斯特洼地土壤水分空间变异特征进行了研究,主要讨论了三个问题:(1)在喀斯特洼地特殊的环境背景和成土条件下,地统计学是否适用于喀斯特地区土壤水分空间格局的研究;(2)探讨旱季影响喀斯特洼地土壤水分空间格局的主要因素及其影响尺度;(3)探讨喀斯特洼地典型区域土壤水分空间变异的尺度效应。

1 研究区概况

研究区位于广西环江毛南族自治县下南乡古周村(24°50'N,107°55'E),属典型的喀斯特峰丛洼地景

观。流域相对海拔高度 442 m,最低点海拔 376 m。分布土壤主要为碳酸盐岩发育的钙质石灰土。土地总面积 186.7 hm²,其中耕地 17.4 hm²,主要分布在洼地中。洼地作物以玉米和大豆为主,平均土层深度约为 100 cm,部分地段土深仅为十几厘米,石芽广泛出露。其余以山地为主,25°以上坡地占 80%以上,平均土层深度 20~40 cm。研究区山地植被退化严重,以灌木、藤本以及蕨类为主,森林覆盖率仅为 13%。由于长年水土流失,石漠化趋势明显,生态环境十分脆弱,属国家移民迁出区和西部“退耕还林还草区”。研究区多年平均降雨量为 1 389 mm,但季节分布不均,从 4 月下旬开始至 8 月底或 9 月初为雨季,常出现涝灾。9 月至次年 3 月为旱季,又常常受到干旱威胁。

2 研究方法

2.1 采样方法

2004 年 10 月 28 日在洼地典型区域(150 m × 50 m)范围进行网格(5 m × 5 m)取样,共设置样本点 341 个。用烘干法测定表层 0~5、5~10 cm 土壤含水量。采样区位置及采样点布设如图 1 所示。采样区相对高差为 5.5 m,样区北部地形较为平坦,有极

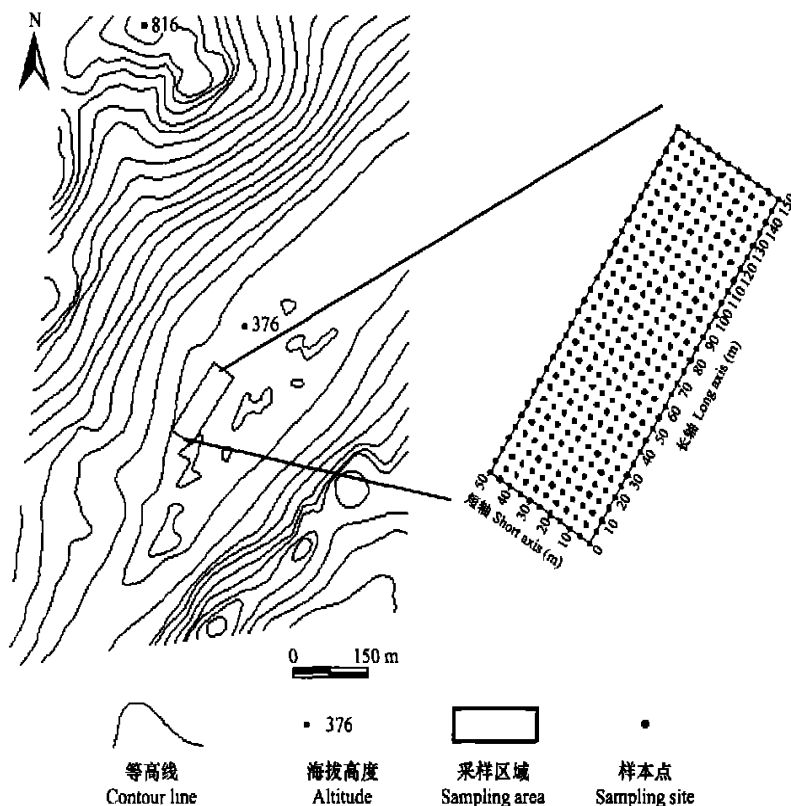


图 1 采样区位置及样点分布图

Fig. 1 The location of sampling area and distribution of soil sampling points

少量石块散布(直径约为 20~200 cm),南部则地形起伏较大且有大面积石丛出露。采样过程中,若采样点上有石块分布,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。采样区作物以大豆为主,间种红薯,采样前半月左右大豆均已收割,且红薯种植较为稀疏,因而土壤表层含水状况不考虑植被影响。除 10 月 14 日一次较小降雨外(0.7 mm),所处区域 14 d 内无降雨记录,因而土壤含水量较低。

2.2 数据处理

主要用地统计学方法对样本数据进行分析处理,所用统计计算及模型的拟合在 SPSS 和专业地统软件 GS+ 中完成。地统计学有关方法及原理^[10,13-15]简介如下:

2.2.1 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。常用的空间自相关系数有 Moran's I 系数和 Geary's c 系数,本文用 Moran's I 系数进行空间自相关分析,计算公式^[16]为:

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

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。

2.2.2 半变异函数分析 半变异函数是应用最广泛的空间格局描述工具,半变异函数公式^[10,13]为:

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

式中, $(\gamma(h))$ 为半变异函数值; $N(h)$ 是间距为向量 h

的点总数; $Z(x_i)$ 是区域化变量 Z 在 x_i 处的实测值; $Z(x_i + h)$ 是与 x_i 距离为向量 h 处样点的值。一般认为半变异函数只有在最大间隔的 1/2 内才有意义^[1,10],在本研究中没有特殊说明半变异函数的有效滞后距都设为其最大采样间隔的 1/2。对半变异函数的拟合主要采用指数模型(Exponential),公式^[13]如下:

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

式中, C_0 为块金值(Nugget); $C_0 + C$ 为基台值(Sill); a 是变程(Range); h 为滞后距离。值得注意的是指数模型的变程(Range)为 $3a$ 而不是 a ^[1,13]。

一般用决定系数(R^2)判断模型拟合的好坏。决定系数是回归平方和占总平方和的比值, F 为检验决定系数的统计量,计算公式^[10]为:

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \frac{N - k}{k - 1} \quad (4)$$

式中, k 为回归模型中自变量的个数^[10]。若计算的 F 值大于显著性水平(0.05 或 0.01)与自由度 f 的临界值 $F_{\alpha, f}$ 时, R^2 是有意义的。

3 结果与分析

3.1 经典统计描述

土壤水分的描述性统计结果如表 1 所示。由于持续干旱,0~5、5~10 cm 两层土壤平均含水量均较低;变异系数分别为 28.07% 和 20.55%,呈中等程度变异。两层数据的 Q-Q 样点图分布基本在直线上,进一步对两层样本数据进行单样本 K-S 检验,检验结果均超过 5% 显著水平,可以认为两层样本数据符合正态分布,因而不需对原始数据进行转换就可进行地统计学分析。

表 1 土壤水分的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of soil water content

土层深度 Soil depth (cm)	样本数 Number of samples	最小值 Min. (%g g ⁻¹)	最大值 Max. (%g g ⁻¹)	均值 Mean (%g g ⁻¹)	方差 Variance (g ² g ⁻²)	标准差 SD	变异系数 CV (%)
0~5	341	2.25	15.02	8.02	5.07	2.25	28.07
5~10	341	2.59	19.14	11.37	5.46	2.34	20.55

SD: Standard deviation; CV: Coefficient of variation

3.2 空间自相关分析

如图 2 所示,土壤水分在采样范围内呈现出一定的结构性,0~5、5~10 cm 两层具有相似的空间结构。土壤水分空间相关图的大致趋势为:滞后距离

较小的点对呈显著的空间自相关,随着滞后距离的增大,自相关系数逐渐向负方向增长,达到显著的负空间自相关。正空间自相关的距离大致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

相反的斑块间的平均距离^[14]。土壤水分自相关图的这种变化趋势说明水分的空间格局呈比较简单的斑块分布,具体表现为:在 0~40 m 范围内土壤水分呈正相关(0.3~0.02),40~60 m 范围内相关系数在 0 附近上下波动,超过 60 m 土壤水分呈负相关(-0.04~-0.3),这说明相似斑块的空间尺度约为 40~60 m。超过这个尺度为性质不同的斑块。这可以从采样区的具体情况得到解释。在样区北段 0~60 m 范围,地形较为平坦,石块分布较少,土壤质地较粘重且土层空间连续性好,土壤含水量相对较高,为一种性质的斑块。在样区南段 60~150 m 范围,石丛广泛出露,部分地段裸岩率达到 80%(2 m × 2 m 范围内)左右,土层较薄,土壤砂砾含量较多,含水量相对较低,为另一性质斑块。石丛对土壤水分的影响可能与三方面的作用有关,一是石丛分布区土壤的物理性质以及土壤的水文过程与土被连续分布区有所差别,Cousin 等^[17]的研究表明土壤中的石砾对水分入渗以及土壤持水能力有重要影响;二是石丛分布区岩石的出露以及土壤中的石砾会导致土壤表层温度较周围升高,土壤水分蒸发相对强烈,土壤持水能力低^[17],影响土壤的水分含量;三是石丛分布区土层深度普遍浅薄,不利于土壤持水,影响土壤水分含量。

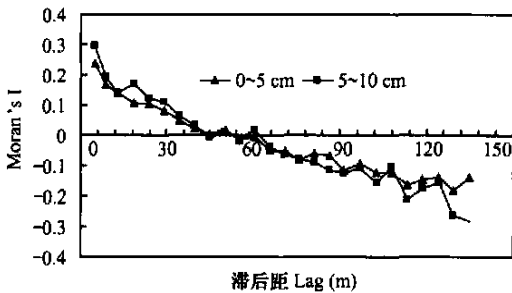


图 2 土壤水分空间相关图
Fig. 2 Spatial correlogram of soil water

3.3 半变异函数结构分析

对 0~5、5~10 cm 两层土壤水分进行了半变异函数分析,对照图 3,两层土壤水分具有相似的空间结构。用指数模型对土壤水分实验半变异函数进行拟合,理论模型的决定系数均较高,分别为 0.84 和 0.722,说明理论模型能很好的反映土壤水分的空间结构特征。

半变异函数模型各结构参数如表 2 所示,两层土壤水分均具有较大的块金值。块金值表示随机变异的大小,主要有两个来源:一是来源于最小取样间

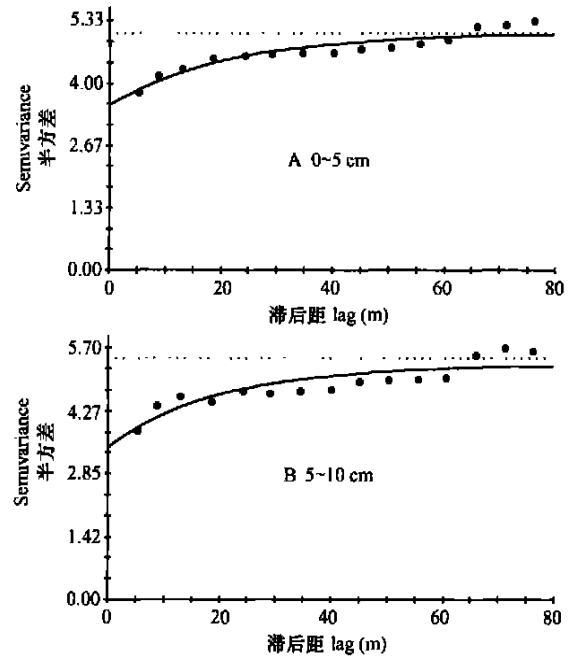


图 3 土壤水分半变异函数图
Fig. 3 Semivariograms of soil water

隔内的自然过程造成的变异,二是来源于实验误差^[1,10,13]。较大的块金值可能与石块的分布及人为干扰有关。石块分布点一般土层浅薄且蒸发强烈从而有别于周围区域土壤性质,而大豆的收割方式为根拔,会破坏表层土壤的原有结构,增加土壤的随机性变异,造成大的块金值。基台值是半变异函数达到的极限值,在这个值附近半变异函数不再单调递增,而是围绕这一值上下摆动。如果变异函数的基台值存在则说明该空间变量平稳,可以认为基台值是该变量在研究区域的总变差^[1]。两层土壤水分的基台值分别为 5.05 和 5.3,这与土壤水分的方差相似,反映了样区土壤水分总的变异程度^[1,18]。块金值/基台值分别为 0.693 和 0.641,反映随机变异占总变异的大小,一般认为块金值/基台值在 25%~75%之间时,空间相关性中等^[19]。在洼地土壤相对干燥的情况下,土壤水分具有中等的空间相关性。变程表示具有相似性质的斑块的空间连续性的范围,变程以内的空间变量具有空间自相关性或空间依赖性,变程以外则不存在空间自相关。本文土壤水分的变程分别为 62.01 m 和 56.01 m,与 Western 等^[1,9]报道的旱季土壤水分的变程(50~60 m)相似。这表明,在喀斯特地区石丛的出露尽管会改变局部地段土壤水分的空间分布,但是表层土壤水分仍具有一定的空间连续性。

表 2 土壤水分半变异函数理论模型及其结构参数

Table 2 Best-fitted semivariogram model of soil water and its structure parameters

土层深度 Soil depth (cm)	模型类型 Model type	C_0 ($g^2 g^{-2}$)	$C_0 + C$ ($g^2 g^{-2}$)	变程 Range (m)	块金值/基台值 $C_0 / (C_0 + C)$	R^2	F
0~5	Exponential	3.5	5.05	62.01	0.693	0.841	68.7
5~10	Exponential	3.4	5.3	56.01	0.641	0.722	33.7

值得注意的是, 0~5、5~10 cm 两个层次土壤水分的半变异函数均在 65 m 左右滞后距上突然增大(图 3), 这可能是因为北段相对平坦区域与南段石丛分布区域的范围均为 60 m 左右有关, 使得超过这一范围后样本间离差增大, 变异函数相应变大。这也预示土壤水分的空间格局为性质相反的两大斑块。为了更直观的反映土壤水分的这种分布特征, 利用 Kriging 方法绘制了土壤水分的等值线图。等

值线图的绘制在 Surfer 软件中完成, Kriging 各参数的设置参照表 2 的半变异函数模型参数, 插值结果如图 4 所示。在土被连续分布的北段, 土壤水分含量相对较高, 且具有较好的空间连续性; 而在石丛广泛出露的南段, 土壤水分含量总体较低, 且由于石丛的分布改变了水分的空间格局, 斑块支离破碎, 空间连续性较差, 含水量较高地段仅在地势低洼的东南角分布。

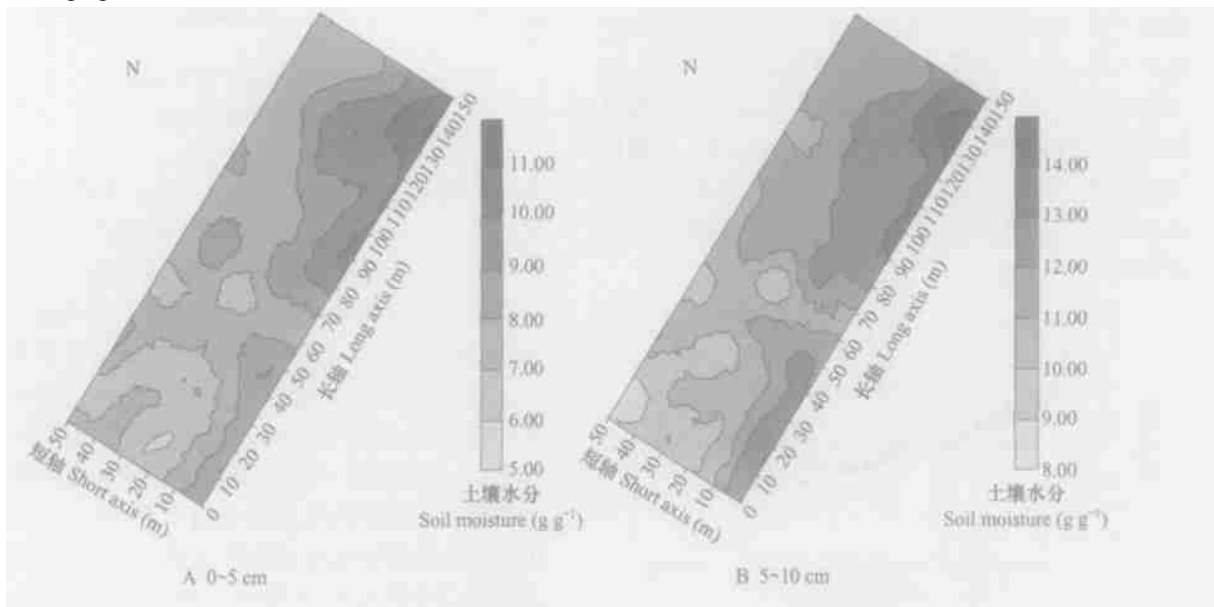


图 4 土壤水分空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution map of soil water

为了进一步研究土壤水分在不同性质斑块内的变异特征。分别计算了样区北段 60 m × 50 m 范围和样区南段 90 m × 50 m 范围土壤水分的半变异函数, 样本容量分别为 143 个和 209 个。这两个区域分别代表了土被连续性较好斑块和石丛广泛分布斑块在样区的分布范围。由于两个区域覆盖的面积不

一致, 为了便于比较, 半变异函数的有效滞后距均设为 40 m, 这个距离略大于北段斑块的平均半径, 而且具有较大的样本对数(均远大于 100 对)可满足统计要求。图 5 为不同斑块下土壤水分的半变异函数图, 表 3 为半变异函数模型的相应参数。

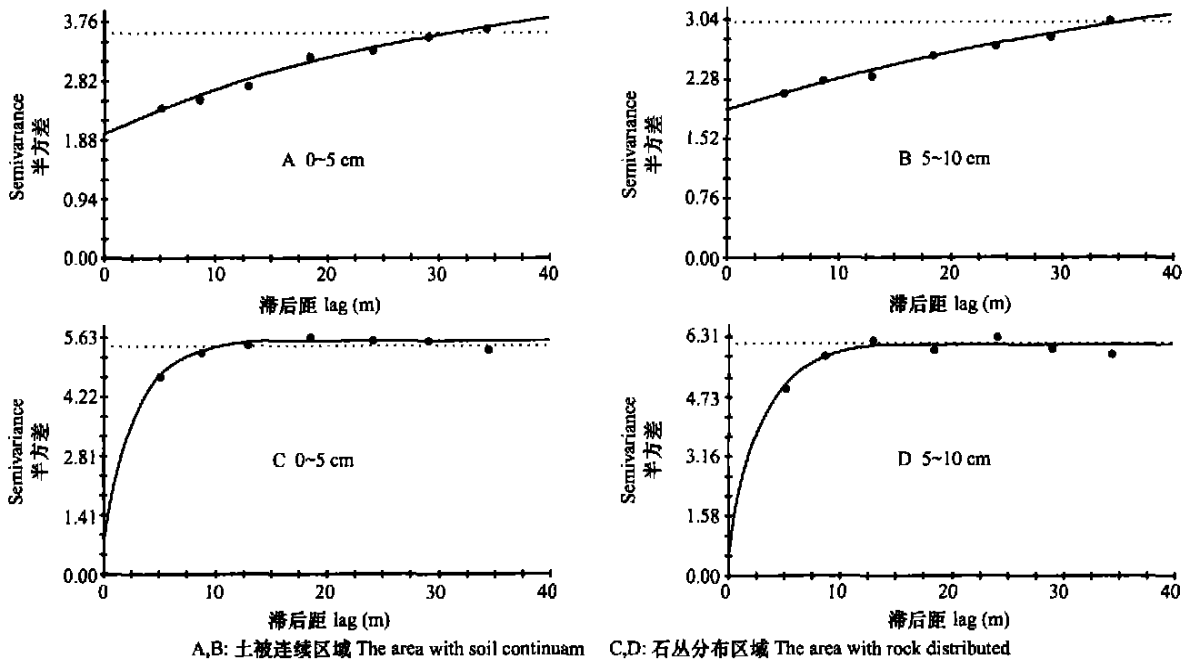


图 5 不同性质斑块土壤水分半变异函数图

Fig. 5 Semivariograms of soil water in two different patches

表 3 不同性质斑块土壤水分半变异函数理论模型及其结构参数

Table 3 The Best-fitted semivariogram models of soil water and its structure parameters in different quality patches

斑块类型 Patch type	土层深度 Soil depth (cm)	模型类型 Model type	C_0 ($g^2 g^{-2}$)	$C_0 + C$ ($g^2 g^{-2}$)	变程 Range (m)	R^2	F
连续土被 Soil continuum	0~5	Exponential	1.97	4.46	89.2	0.983	289.1
石丛分布区 Rock distribution	5~10	Exponential	1.87	3.9	130.1	0.984	307.5
连续土被 Soil continuum	0~5	Exponential	0.59	5.55	8.4	0.935	71.9
石丛分布区 Rock distribution	5~10	Exponential	0.48	6.11	8.9	0.846	27.5

Soil continuum means the area with soil continuum; Rock distribution means the area with rocks distributed

两个区域土壤水分具有截然不同的变异特征。土被连续区域具有较大的块金值和较小的基台值,较大的块金值说明人为活动对土壤干扰较大。较小的基台值则反映了土壤水分在这一区域的空间变异程度较低。石丛分布区域则相反,具有较小的块金值和较大基台值。较小的块金值可能与石丛区域的土壤性质及采样方法有关。在干旱情况下,土壤的含水量状况主要取决于土壤本身的性质^[2,20],石丛土被的流失并在临近区域的沉积,在一定程度上平和了周围地段土壤的性质,使得临近区域的土壤性质趋于相近,块金值变小。而且当样点上有石块分布时,取周围土样混合后代替也会平滑样点间的随机变异,使得块金值变小。较大的基台值说明土壤水分在石丛分布区域变异程度较高。变程在两个区域差异显著,北段土壤水分的变程较大,分别为

89.2 m 和 130.1 m;而在石丛分布的南段变程仅为 8.4 m 和 8.9 m。变程在北段和南段之间的巨大差异主要与该地段石丛的出露情况有关。在土被连续性较好的北段,变程大致反映了地形控制下土壤水分空间连续性的范围。由于采样区在洼地位置的特殊性,以及采样范围的有限性,北段半变异函数并没有表现出基台值,而是在有效滞后距内持续上升,说明地形因子的控制尺度要大于北段的研究范围。南段的变程仅为 8.4 m 和 8.9 m,主要是由于石丛的广泛出露,使得土壤水分的分布格局在地形的大背景下变得支离破碎,土壤水分的空间相关范围变小,变程变短。同时石丛分布区较小的变程也说明石丛在研究区的影响尺度约为 8~9 m 左右。结合表 2 的分析,土壤水分在整个采样区的变程分别为 56.01 m 和 62.01 m,这个尺度大于石丛分布区的变程而小于

土被连续区的变程,说明当样区内存在不同尺度的影响因素时,笼统的整体分析会在一定程度上中和不同因素的影响尺度,掩盖不同影响因子的差异。较好的解决办法是使用套和模型对区域化变量进行因子克立格分析^[15],由于篇幅有限本文不再进行这方面的分析。

3.4 各向异性分析

土壤物理性质和水文过程在不同方向上的显著差异会导致土壤水分的变异特征产生方向上的差异^[21]。为了了解自然过程在各个方向上对土壤水分空间响应的影响,分别计算了长轴和短轴两个方向土壤水分的半变异函数,角度容差设为 45° 。结果显示 $0\sim 5$ 、 $5\sim 10$ cm 两个层次上土壤水分均具有明显各向异性。如图 6 所示,短轴方向(西北-东南)土壤水分的变异程度均大于长轴方向(东北-西南)的变异程度,表明在这两个方向上影响土壤水分空间格局的因素不同。由于两侧峰丛的分布,短轴方向作为峰丛洼地正负地形交接面的垂直方向,水文过程在这一方向上变化强烈^[3],从而使得土壤物理性质如粘粒含量在这一方向出现较大变化,导致土壤水分的空间变异程度出现方向上的差异,这也可以从土壤水分的空间分布图上(图 4)直观反映出来。Western 等^[1]同样在湿季发现了 Tarrawarra 流域土壤水分存在各向异性,并认为各向异性的存在主要与地形和壤中流有关。所不同的是,在本研究区域,土壤水分各向异性的存在主要与土壤物理性质的空间分布有关,而且土壤物理性质的这种分布与峰丛洼地系统的地形特征有密切关系^[22]。可见,在旱季,地形和石丛的分布都是影响洼地土壤水分空间分布的主要因素。当然,随着季节的变化,各环境因素对土壤水分空间格局的影响作用也会发生相应的变化^[1,9,10]。因而并不能简单认为地形与石丛对土壤水分空间格局的主导作用是不变的。

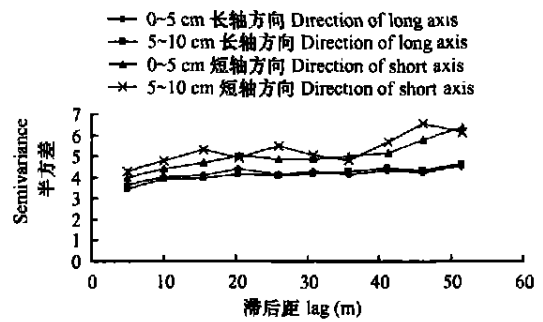


图 6 两个方向的土壤水分半变异函数图

Fig. 6 Anisotropic semivariograms of soil water

3.5 土壤水分空间变异的尺度效应

土壤水分的空间格局由不同尺度的自然作用和过程控制,同时土壤水分空间变异的尺度和特征也反映了这些自然过程变异的尺度和特征。但是土壤水分真实变异特征与样本数据所呈现出的变异特征是有区别的^[23]。一般认为充分小的采样间隔和足够多的样本可以代表土壤属性真实的变异特征;而随着采样间隔的增大,小于取样尺度的变异规律将被掩盖,使得样本数据的变异函数模型与真实结构出现偏差。在实际工作中,过小的采样间隔会增加采样和分析成本,过大的取样间隔又不能反映土壤属性真正的结构特征。因而分析土壤水分在不同采样尺度上的变化有助于认识自然过程在不同尺度的空间结构特征,并有助于指导土壤水分的采样设计。

为了认识喀斯特地区旱季土壤水分的这种尺度变化特征,在对样本数据进行重组的基础上,分析了最小滞后距分别为 5 m、10 m、15 m 和 20 m 四种尺度上半变异函数的变化。4 个尺度上的半变异函数均采用指数模型进行拟合,决定系数变化在 $0.709\sim 0.871$ 之间, F 检验均达到显著水平,结果如表 4 所示。

表 4 不同采样尺度土壤水分半变异函数理论模型及其结构参数

Table 4 Theoretical semivariogram model and its structure parameters with different sample spacings

土层深度 Soil depth (cm)	最小滞后间距 Minimum lag distance (m)	C_0 ($g^2 g^{-2}$)	$C_0 + C$ ($g^2 g^{-2}$)	变程 Range (m)	块金值/基台值 $C_0 / (C_0 + C)$	R^2	F
0~5	5	3.5	5.05	62.01	0.693	0.841	68.7
	10	3.58	5.09	65.49	0.703	0.835	30.36
	15	3.6	5.1	72.99	0.706	0.836	15.29
	20	3.73	5.11	78	0.73	0.871	13.5
5~10	5	3.4	5.3	56.01	0.641	0.722	33.7
	10	3.5	5.05	60	0.693	0.709	14.61
	15	3.51	5.1	72.51	0.688	0.725	7.91
	20	3.5	5.22	81.99	0.670	0.805	8.26

两层土壤水分的半变异函数参数随着采样尺度的增大均有一定变化。其中块金值和基台值在 0~5 cm 和 5~10 cm 虽然有一定变化,但变化不明显。变程在两个层次均有随尺度增大而变大的特征,当采样尺度增大到 20 m 时,在 0~5 cm 层和 5~10 cm 层变程的变化幅度分别为原来的 25.8% 和 46.5%。可见随着采样尺度的增大,半变异函数模型的变程产生了显著变化。这种变化反映了土壤水分在不同尺度上的变异特征。产生这种变化的主要原因有两个:一是研究区域土壤水分的空间格局由两个尺度的环境因素控制,增大最小滞后间距后,小尺度的变异特征将被覆盖,从而使土壤水分的统计学特征出现偏差;另外一个滞后间距的增大导致模型拟合的偏差,这一点在满足统计要求条件下可以忽略。土壤水分在研究区的这种与尺度相关的变异特征也意味着在今后的研究中,需要根据研究的目的和精度确定合理的采样尺度。

4 结 论

1) 尽管喀斯特地区土壤具有土层薄、土被不连续等特点,但土壤水分仍具有明显的空间结构和空间连续性。在旱季,表层土壤水分的空间格局呈比较简单的斑块状分布,相似斑块的空间尺度约为 40~60 m。这个尺度相当于石丛分布区和土被连续分布区的大小。

2) 半变异函数分析表明两个层次(0~5、5~10 cm)土壤水分具有相似的空间结构。受石丛分布和人类活动影响有较大的块金值。半变异函数理论模型可采用指数模型进行拟合,变程变化在 56~62 m 之间。0~5、5~10 cm 土壤水分具有中等程度的空间相关性,块金值/基台值分别为 0.693 和 0.641。

3) 在旱季,洼地土壤水分的空间格局主要受石丛和地形两个尺度环境因素的影响和控制。在土被连续分布区域,土壤水分具有较小的总体方差和较大的变程,土壤水分空间差异程度较小、空间连续性较好,土壤水分的空间分布主要受地形影响。而在石丛分布区,土壤水分具有较大的基台值和小变程,反映在地形背景下,受石丛分布控制,土壤水分变异程度较高且空间连续性差。变程在石丛分布地段和土被连续分布地段的显著差异也意味着,要更为详尽的了解石丛分布区域的变异特征需要不同的采样设计。

4) 土壤水分的块金值和基台值随着最小滞后距

(5、10、15、20 m) 的增加无明显变化,但变程变化显著,具有随最小滞后距增大而变大的特征。当最小滞后距增大到 20 m 时,变程的变化幅度分别为原来的 25.8% 和 46.5%。说明当研究区域存在多重尺度的变异结构时,需要根据研究的目的和精度确定合理的采样尺度。

5) 地统计学是喀斯特地区土壤水分空间变异性分析的有效工具,但受采样范围和采样时间限制土壤水分在整个洼地和不同季节的变异特征以及变异的尺度效应还有待于进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Western A W, Blöschl G, Grayson R B, *et al.* Geostatistical characterization of soil moisture patterns in the tarrawarra catchment. *Journal of Hydrology*, 1998, 205: 20~37
- [2] Grayson R B, Western A W, Chiew F H S, *et al.* Preferred states in spatial soil moisture patterns: local and nonlocal controls. *Water Resources Research*, 1997, 33: 2 897~2 908
- [3] 杨明德, 梁虹. 峰丛洼地形成动力过程与水资源开发利用. 中国岩溶, 2000, 19(1): 44~51. Yang M D, Liang H. The processes of evolution dynamic of cone karst and the exploitation of the water resource (In Chinese). *Carsologica Sinica*, 2000, 19(1): 44~51
- [4] 周国富. 贵州喀斯特峰丛洼地农业自然灾害及对策初步研究. 贵州师范大学学报(自然科学版), 1997, 15(4): 25~30. Zhou G F. A preliminary study on agricultural calamities in Guizhou karst peak cluster-depression areas (In Chinese). *Journal of Guizhou Normal University(Natural Science)*, 1997, 15(4): 25~30
- [5] 陈洪松, 王克林. 岩溶干旱特征及其治理对策. 农业现代化研究, 2004, 25(专刊): 70~73. Chen H S, Wang K L. Characteristics of karst drought and its countermeasures (In Chinese). *Research of Agricultural Modernization*, 2004, 25(Monog.): 70~73
- [6] 兰安军, 张百平, 熊康宁, 等. 黔西南脆弱喀斯特生态环境空间格局分析. 地理研究, 2003, 22(6): 733~741. Lan A J, Zhang B P, Xiong K N, *et al.* Spatial pattern of the fragile karst environment in southwest Guizhou province (In Chinese). *Geographical Research*, 2003, 22(6): 733~741
- [7] 李艳, 史舟, 徐建明, 等. 地统计学在土壤科学中的应用及展望. 水土保持学报, 2003, 17(1): 178~182. Li Y, Shi Z, Xu J M, *et al.* Utilization and perspective of Geostatistics in soil sciences (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(1): 178~182
- [8] Fitzjohn C, Ternan J L, Williams A G. Soil moisture variability in a semi-arid gully catchment: implications for runoff and erosion control. *Catena*, 1998, 32: 55~70
- [9] Western A W, Zhou S L, Grayson R B, *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
- [10] 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. 地理学报, 2000, 55(4): 428~438. Wang J, Fu B J, Qiu Y, *et al.* Spatiotemporal variability of soil

- moisture in small catchment on Loess Plateau—semivariograms (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(4): 428~438
- [11] 苏永中, 赵哈林, 崔建垣. 农田沙漠化演变中土壤形状特征及其空间变异性分析. *土壤学报*, 2004, 41(2): 210~217. Su Y Z, Zhao H L, Cui J Y. Spatial heterogeneity of soil properties in the desertification process of rainfed farmland in Hbrqin sandy land (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 210~217
- [12] 雷咏雯, 危常州, 李俊华, 等. 不同尺度下土壤养分空间变异特征的研究. *土壤*, 2004, 36(4): 376~381. Lei Y W, Wei C Z, Li J H, *et al.* Characters of soil nutrient spatial variability in different scale (In Chinese). *Soils*, 2004, 36(4): 376~381
- [13] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999. Wang Z Q. *Geo-statistics and Its Application in Ecology* (In Chinese). Beijing: Science Press, 1999
- [14] 张朝生, 陶澍, 袁贵平, 等. 天津市平原土壤微量元素含量的空间自相关研究. *土壤学报*, 1995, 32(1): 50~57. Zhang C S, Tao S, Yuan G P, *et al.* Spatial autocorrelation analysis of trace element contents of soil in Tianjin plain area (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(1): 50~57
- [15] Goovaerts P. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. *Biol. Fertil. Soils*, 1998, 27: 315~334
- [16] 邬建国. 景观生态学—格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2002. Wu J G. *Landscape Ecology Pattern, Process, Scale and Hierarchy* (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2002
- [17] Cousin I, Nicoullaud B, Coutadeur C. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil. *Catena*, 2003, 53: 97~114
- [18] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Advance in Soil Science*, 1985 (3): 2~66
- [19] 孙波, 赵其国, 闫国年. 低丘红壤肥力的时空变异. *土壤学报*, 2002, 39(2): 190~198. Sun B, Zhao Q G, L G N. Spatio-temporal variability of red soil fertility in low hill region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(2): 190~198
- [20] Herbst M, Diekkrüger B. Modelling the spatial variability of soil moisture in a micro-scale catchment and comparison with field data using geostatistics. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, 28: 239~245
- [21] Gotway C A, Hergert G W. Incorporating spatial trends and anisotropy in geostatistical mapping of soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1997, 61: 298~309
- [22] 梁福源, 宋林华, 唐涛. 石林地区土壤性质与喀斯特洼地发育. *地理研究*, 2004, 23(3): 321~328. Liang F Y, Song L H, Tang T. Soil physical and chemical properties and their relationship with the doline development in Lunan Stone Forest National Park (In Chinese). *Geographical Research*, 2004, 23(3): 321~328
- [23] Western A W, Blöschl G. On the spatial scaling of soil moisture. *Journal of Hydrology*, 1999, 217: 203~224

SPATIAL VARIABILITY OF SURFACE SOIL WATER IN TYPICAL DEPRESSIONS BETWEEN HILLS IN KARST REGION IN DRY SEASON

Zhang Wei^{1,2,3} Chen Hongsong^{1,2†} Wang Kelin^{1,2} Zhang Jiguang^{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 547100, China)

(3 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract To quantify spatial variability of soil water is of important significance for ecological environment restoration in Karst regions. The geostatistics method is used to determine and quantify spatial variability of surface soil water (0~5 cm and 5~10 cm) for analysis of spatial patterns of soil water in a typical karst depression (150 m ×50 m) in Guzhou. Using the grid sampling method (5 m ×5 m space), 341 sampling points are fixed in total. Based on autocorrelation analysis, spatial correlation structure of these soil moisture patterns is calculated with the aid of the Moran's I index. Results indicate that the soil water contents in the two layers have a simple pattern of periodic variations, and patches with the same spatial autocorrelation character correspond to soil continuum and rock distribution in area. Sample variograms are found to have an anisotropy character in the whole research area. And in different patches, the semivariograms show different structure characters. The soil continuum patch has a low sill and a long range, whereas the rock distributed patch has a high sill and a short range. Such soil water patterns can be explained by the effect of bare rock distribution and the topography of the research area. Based on the soil water content data, spatial scaling of soil moisture is further studied. The range of the soil water is increased with the sample spacing. This implies that when the spatial pattern is controlled by plural factors of different scales, sample spacing should be decided by the aim and precision of the research. The findings of this study may help improve the sampling design in the research on soil moisture in the Karst regions.

Key words Karst region; Cluster-peak depression areas; Soil water; Dry season; Spatial pattern; Geostatistics