

喀斯特洼地表层土壤水分的空间异质性 及其尺度效应*

张继光^{1,2,3} 陈洪松^{1,3†} 苏以荣^{1,3} 张 伟^{1,3} 孔祥丽⁴

(1 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125)

(2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(3 中国科学院环江喀斯特农业生态试验站, 广西环江 547100)

(4 宜春学院生命科学与资源环境学院, 江西宜春 336000)

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL MOISTURE IN SURFACE LAYER IN DEPRESSED KARST REGION AND ITS SCALE EFFECT

Zhang Jiguang^{1,2,3} Chen Hongsong^{1,3†} Su Yirong^{1,3} Zhang Wei^{1,3} Kong Xiangli⁴

(1 Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

(2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(3 Huanjiang Experimental Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China)

(4 College of Life Science Resource and Environment, Yichun University, Yichun, Jiangxi 336000, China)

关键词 喀斯特; 土壤水分; 尺度效应; 空间变异
中图分类号 S152.7 文献标识码 A

空间变异及其尺度问题在土壤学、地理学、水文学和生态学中均处于十分重要的地位,是当前研究热点之一^[1~5]。变异结果使得不同景观斑块间的交换过程在从田块到流域的不同空间尺度上产生^[6]。因此要实现景观生态过程中的尺度转换,关键是从实测到预测模型的复杂转变^[7,8]。在土壤学研究中,观测尺度和模型尺度均包含尺度的三因素,即采样间隔、采样幅度和支撑效应,这三个因素是界定观测或模型空间尺度的必要条件^[3]。而随采样尺度变化,土壤水分的表现变异与真实变异出现偏差,这种偏差是观测尺度的函数,可以采用地统计学中的半变异函数进行有效地尺度转化^[9]。

国内外学者对土壤水分的空间尺度问题作了大量研究。Blöschl 等^[8]综述了水文模型中存在的尺度问题。Western 等^[9]系统研究了表层土壤水分的半方差参数随采样尺度的变化规律。国内也有学者探

讨了土壤水分变异随采样尺度的变化特征^[10,11]。这些研究加深了我们对土壤水分变异尺度问题的了解和认识。

在喀斯特峰丛洼地中,生态系统多处于严重超载状态,而且土层浅薄、土被极不连续、旱涝灾害频繁等自然条件,使得土壤水分成为退化系统植被恢复过程中的关键性因子。近年来,有关学者对该地貌单元的土壤水分变异作了初步研究^[12~14],但难以反映出季节差异对土壤水分空间结构和主要水分过程的影响。本文通过旱季和雨季时期对喀斯特洼地表层的高密度网格采样,研究样地土壤水分的空间异质性及其尺度效应,这不仅有助于认识该地区土壤水分在不同时间和空间尺度上的变异特征,而且可以根据研究目的指导土壤的合理采样设计,最终为大尺度的水文模型模拟和田间真实信息获取提供实践基础。

* 中国科学院西部行动计划(KZCX2-XB2-08-01)、国家自然科学基金项目(40501034)和中国科学院“西部之光”人才培养计划项目联合资助

† 通讯作者, E-mail: hbchs@isa.ac.cn

作者简介:张继光(1980~),男,山东潍坊人,博士研究生,研究方向为土壤环境生态。E-mail: jzhang@issas.ac.cn

收稿日期:2006-12-17;收到修改稿日期:2007-05-30

1 研究区概况

研究区位于广西环江毛南族自治县的下南乡古周村(24°50'N,107°55'E),属典型的岩溶峰丛洼地,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°以上坡地占总面积的80%以上,自然植被以灌丛为主,森林覆盖率仅有13%,而且水土流失、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3344~4134 MJ m⁻²,年平均降雨量为1389 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4月初为旱季,时常受到干旱威胁。研究区分布的土壤主

要为碳酸盐岩发育的钙质湿润淋溶土。

2 研究方法

2.1 采样方法

在洼地西南部选择一块土被分布较连续的地块(100 m ×50 m),呈东北-西南走向,其中东南部分地势偏高,有石丛存在;西北部分地势偏低但较为平坦。主要种植制度为玉米间作大豆、甘薯,在该地块范围内以网格法(间距5 m ×5 m)进行高密度定点采样(图1),采样深度为0~15 cm。采样时间为2005年3月15日、3月27日、6月14日和7月19日。共采样4次,其中3月15日和3月27日对应当地旱季;6月14日和7月19日对应当地雨季(图2)。每次采集土壤样品231个,在室内用烘干法测定土壤质量含水量。

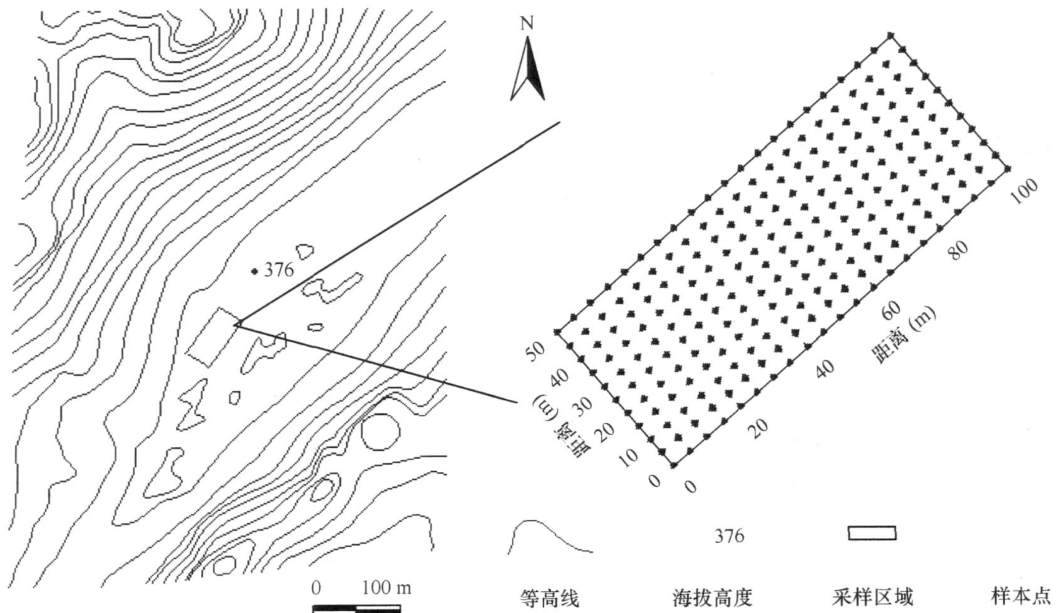


图1 采样区位置及样点分布图

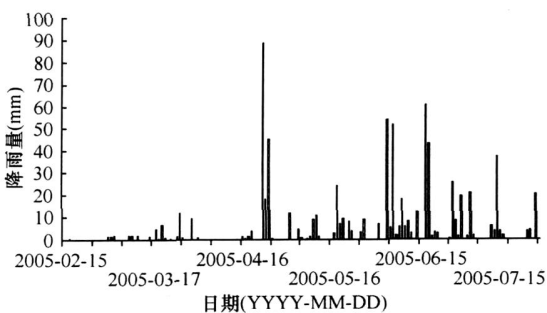


图2 采样时段内研究区的降雨量情况

2.2 尺度分析

在本研究中,一方面通过改变采样间隔,分别以5、10和15 m的间隔进行再采样分析。另一方面,通过控制采样幅度,分别以40 ×20、60 ×30、80 ×40 m²的滑动窗口从样块南侧向北侧移动,计算尺度内土壤水分的变异函数参数。假定所有数据是局部平稳的,且在半变异函数拟合过程中,滞后距较小、采样幅度较大时的表现变异近似于真实变异。此外,不考虑采样尺度中支撑效应的影响,仅分析不同采样

间隔和采样幅度下半变异函数参数变化。

2.3 数据处理

文中数据采用域法,即样本均值加减三倍标准差,识别并剔除特异值^[15]。后续计算均采用经处理的原始数据。土壤水分的空间变异研究采用地统计学方法,有关地统计学的原理和方法在许多文献上均有介绍^[16~20],在此不再赘述。文中所有的统计计算和理论模型拟合分别在 SPSS11.5 和地统计学软件 GS + 7.0 中完成。

3 结果与讨论

3.1 洼地表层土壤水分的统计特征

洼地表层土壤水分的统计特征如表 1 所示,4 次采样数据表现出弱至中等变异特征,其中 2005 年 3 月 15 日和 2005 年 7 月 19 日数据表现为中等变异 (10% CV% 100%),而中等变异一般与土壤平均含水量较低时相对应^[14]。K-S 检验结果表明,在

表 1 土壤水分描述统计特征

采样时间 (YYYY-MM-DD)	均值 (%)	最小值 (%)	最大值 (%)	标准差 (%)	变异系数 (%)	偏度	峰度	K-S 概率
2005-03-15	15.05	10.34	20.53	2.17	14.39	0.289	-0.298	0.832
2005-03-27	22.96	18.70	29.28	2.13	9.28	0.346	-0.064	0.919
2005-06-14	27.53	19.97	33.33	2.27	8.25	0.052	0.090	0.945
2005-07-19	20.71	14.48	26.25	2.50	12.07	-0.174	-0.398	0.699

0.05 水平下各次土壤水分均服从正态分布,可以直接进行地统计学分析。

3.2 洼地表层土壤水分的空间结构及其季节变化分析

洼地表层土壤水分的空间结构分析表明(表 2),土壤水分变异均可用指数模型拟合,具有强烈的空间相关性,且以结构性变异为主。2005 年 7 月 19 日采样中块金效应明显,较大的块金值可能与当时玉米收割和间种大豆等人为干扰有关,反映出在小于 5 m 研究尺度上存在作物的株间差异和土壤扰动等影响。4 次采样中土壤水分均表现出明显的基台值,这与土壤水分的空间格局由地形和微地貌(石丛)等固定因素控制有关。而且土壤水分变异大致与平均含水量变化相反,这与以往许多研究结果相符合^[14, 19, 21, 22]。变程在平均含水量中等时较大,在干旱或降雨之后较小,这主要与样块内影响

土壤水分各种过程的空间相互作用变化有关。在较干旱时(如 2005 年 3 月 15 日),石丛区的出露岩石能通过影响水分蒸发而影响土壤含水量,岩石的高吸热性会导致周围土壤升温而使其含水量低于无岩石的土壤^[23, 24],这容易造成土壤水分分布的破碎化,使变程较小。而降雨之后(如 2005 年 6 月 14 日),地形起伏易造成地表径流和侧向流的发生,侧向流的再分配能导致排水线内形成湿润的窄带而改变水分的空间格局^[20];此外石丛的存在使降水沿石块边缘下流,增加了周围土壤的含水量,两者的叠加效应加剧了土壤水分的不连续性,使变程变小。

由上述分析可见,平均含水量、地形、微地貌及人为因素等可能显著影响洼地表层土壤水分的空间结构及其季节变化特征。

表 2 土壤水分空间变异半方差特征参数

采样时间 (YYYY-MM-DD)	平均含水量 (%)	块金值 C_0	基台值 $C + C_0$	块基比 $C_0 / (C + C_0)$ (%)	变程 (m)	模型	决定系数
2005-03-15	15.05	0.11	4.32	2.55	9.6	指数	0.82
2005-03-27	22.96	0.10	4.30	2.32	13.2	指数	0.85
2005-06-14	27.53	0.07	4.78	1.46	6.9	指数	0.58
2005-07-19	20.71	0.52	6.22	8.36	14.1	指数	0.78

3.3 采样间隔变化引起土壤水分的尺度效应

采样间隔变化引起土壤水分半方差参数的变化如表 3 所示,块金值随着采样间隔增加总体变大,这是由于采样间隔增加后,微域内石块及作物株间差异表现的结构特征被掩盖,较大尺度上影响土壤水分变异过程的随机因素相应增加所致。基台值未表现出持续增加或减少趋势,而是围绕一个固定值小幅波动,这可能是采样幅度内土壤水分的真实变异。由于保证采样幅度未变,影响土壤水分变异的主要因素未发生显著变化,因此采样间隔变化对变异程度的影响较小。变程随采样间隔的增加表现出线性增大趋势,反映出土壤水分在不同尺度上的变异特

征及其空间连续性,这与 Western 等在澳大利亚的研究结果类似^[9]。

采样间隔不同引起变异特征变化,表现了各环境因素在不同尺度内影响土壤水分变异的强弱程度。如 5 m 采样尺度内,土壤水分变异主要受微域内地貌(石丛)及其植被的影响,而在 15 m 采样尺度时,微域内变异可能被掩盖,局部地形、地貌和土壤等方面的影响更加突出。在此值得注意的是,由于基台值是较自相关距(变程)更大的稳健统计量,在再采样分析中的估值也更为准确,因此在后续尺度效应研究中,基台值的变化更值得关注。

表 3 采样间隔变化对土壤水分半方差参数的影响

采样时间 (YYYY-MM-DD)	采样间隔 (m)	块金值 C_0	基台值 $C + C_0$	变程 (m)	模型	决定系数
2005-03-15	5	0.11	4.32	9.6	指数	0.82
	10	0.12	4.28	16.9	指数	0.64
	15	0.31	4.90	28.2	指数	0.85
2005-03-27	5	0.10	4.30	13.2	指数	0.85
	10	0.12	4.49	18.6	高斯	0.38
	15	0.13	4.15	31.4	球状	0.84
2005-06-14	5	0.07	4.78	6.9	指数	0.58
	10	0.12	4.72	17.7	球状	0.74
	15	0.04	4.86	19.3	指数	0.65
2005-07-19	5	0.52	6.22	14.1	指数	0.78
	10	0.11	6.58	19.3	球状	0.43
	15	0.33	6.42	27.0	球状	0.83

3.4 采样幅度变化引起土壤水分的尺度效应

采样幅度变化同样引起土壤水分半方差参数的变化(表 4),块金值总体上无明显规律,但在不同的采样幅度内部表现出一定差异。较大的块金值出现在 $60 \times 30 \text{ m}^2$ 和 $40 \times 20 \text{ m}^2$ 尺度内,而较小的则在 $80 \times 40 \text{ m}^2$ 及 $100 \times 50 \text{ m}^2$ 尺度上产生,这反映出土壤水分存在不同的斑块结构,由于 $60 \times 30 \text{ m}^2$ 的尺度大致与石丛分布区的面积相当,造成在该尺度及以下主要是石丛对土壤水分过程产生影响。而在更大采样尺度内,随采样点的增加一方面减小了随机误差,另一方面非石丛区的比例上升也可能使土壤水分变异得到一定程度平滑,从而导致块金值减小。

基台值和变程的变化趋势较为一致,均随采样幅度增加小幅波动,这可能是由于采样幅度主要变化在 5 倍变程以外所致。据 Western 等^[9]研究,采样幅度在大于真实变程 5 倍时,变异程度和自相关距两者与真值的偏差较小;而采样幅度较小时,表观变异可能仅为真实变异的 1/5,自相关距仅及真值的 1/10。

总之,洼地土壤水分的半方差参数随观测尺度(采样间隔和幅度)呈现明显的尺度效应,且尺度效应不随平均含水量而变化,仅与采样设计相联系。因此,在今后土壤水分空间变异研究中,应根据研究目的和要求确定合理的采样尺度。

表 4 采样幅度变化对土壤水分半方差参数的影响

采样时间 (YYYY-MM-DD)	采样幅度 (m × m)	块金值 C_0	基台值 $C + C_0$	变程 (m)	模型	决定系数
2005-03-15	40 × 20	0.18	4.49	9.10	指数	0.66
	60 × 30	0.33	4.10	8.72	指数	0.45
	80 × 40	0.10	4.35	9.87	指数	0.71
	100 × 50	0.11	4.32	9.60	指数	0.82
2005-03-27	40 × 20	0.23	4.53	12.17	指数	0.54
	60 × 30	0.34	4.18	12.84	指数	0.66
	80 × 40	0.08	4.00	11.71	指数	0.73
	100 × 50	0.10	4.30	13.20	指数	0.85
2005-06-14	40 × 20	0.33	4.69	8.38	指数	0.87
	60 × 30	0.24	4.65	6.69	指数	0.31
	80 × 40	0.04	4.58	6.86	指数	0.50
	100 × 50	0.07	4.78	6.90	指数	0.58
2005-07-19	40 × 20	0.43	6.06	10.48	球状	0.78
	60 × 30	0.19	5.93	8.91	指数	0.58
	80 × 40	0.03	5.78	9.05	球状	0.73
	100 × 50	0.52	6.22	14.10	指数	0.78

4 结 论

1) 喀斯特洼地表层土壤水分呈弱至中等变异, 2005年7月19日采样中较大的块金值主要与当时玉米收割和间种大豆等人为干扰有关, 基台值表示的水分变异大致与土壤平均含水量相反。而变程在平均含水量中等时较大, 在极干旱或降雨之后, 变程较小, 这主要与样块内影响土壤水分各种过程的空间相互作用变化有关。

2) 土壤水分的空间结构随观测尺度改变而变化。块金值大致随着采样间隔增加而增大; 基台值围绕土壤水分的真实变异上下波动, 而变程随采样间隔增加表现出线性增大规律; 块金值随采样幅度的变化显示土壤水分存在两种斑块结构。基台值和变程的变化较一致, 均在某恒定值附近小幅波动, 这可能与采样幅度主要变化在5倍变程以外有关。土壤水分变异的尺度效应反映了研究地块受地形、微地貌、土壤和植被等复杂因素影响。

3) 研究发现土壤水分的空间异质性随平均含水量的增加而减小, 而尺度效应不随平均含水量而变化。因此, 在微地貌复杂、土被破碎的喀斯特地区土壤水分空间变异研究中, 后续采样应根据研究目

的和精度要求, 结合尺度效应和含水量状况确定适宜的采样尺度和实施方案。

参 考 文 献

- [1] Kim G, Barros A P. Downscaling of remotely sensed soil moisture with a modified fractal interpolation method using contraction mapping and ancillary data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(3): 400~413
- [2] 倪九派, 魏朝富, 谢德体. 土壤侵蚀定量评价的空间尺度效应. *生态学报*, 2005, 25(8): 2061~2067
- [3] 孟斌, 王劲峰. 地理数据尺度转换方法研究进展. *地理学报*, 2005, 60(2): 277~288
- [4] 夏军. 水文尺度问题. *水利学报*, 1993(5): 32~37
- [5] 吕一河, 傅伯杰. 生态学中的尺度及尺度转换方法. *生态学报*, 2001, 21(12): 2096~2015
- [6] Kabat P, Hutjes R W A, Feddes R A. The scaling characteristics of soil parameters: From plot scale heterogeneity to sub-grid parameterization. *Journal of Hydrology*, 1997, 190(3-4): 363~396
- [7] 郭建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级. 北京: 高等教育出版社, 2000
- [8] Bloschl G, Sivapalan M. Scale issue in hydrological modeling: A review. *Hydraulic Processes*, 1995(9): 251~290
- [9] Western A W, Bloschl G. On the spatial of soil moisture. *Journal of Hydrology*, 1999, 217(3-4): 203~224
- [10] 徐英, 陈亚新, 史海滨, 等. 土壤水盐空间变异尺度效应的研究. *农业工程学报*, 2004, 20(2): 1~5
- [11] 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变

- 异的尺度性研究. 农业工程学报, 2005, 21(8): 11~16
- [12] 张继光,陈洪松,苏以荣,等. 喀斯特地区典型峰丛洼地表层土壤水分空间变异及合理取样数研究. 水土保持学报, 2006, 20(2): 114~117
- [13] 张伟,陈洪松,王克林,等. 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. 土壤学报, 2006, 43(4): 554~562
- [14] 张继光,陈洪松,苏以荣,等. 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. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2 277~2 282
- [15] 刘付程,史学正,于东升,等. 太湖流域典型地区土壤全氮的空间变异特征. 地理研究, 2004, 23(1): 163~170
- [16] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999
- [17] 周慧珍,龚子同, Lamp L. 土壤空间变异性研究. 土壤学报, 1996, 33(3): 232~241
- [18] 区美美,王建武. 土壤空间变异研究进展. 土壤, 2003, 35(1): 30~33
- [19] 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
- [20] Western A W, Bloschl G, Grayson R B. Geostatistical characterization of soil moisture patterns in Tarrawarra catchment. Journal of Hydrology, 1998, 205(1-2): 20~37
- [21] Hupet F, Vanclooster M. Intraseasonal dynamics of soil moisture variability within a small agricultural maize cropped field. Journal of Hydrology, 2002, 261(1-4): 86~101
- [22] 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(1): 55~70
- [23] Cousin I, Nicoullaud B, Coutadeur C. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil. Catena, 2003, 53(2): 97~114
- [24] Danalatos N G, Kosmas C S, Moustakas N C, et al. Rock fragments: II. Their impact on soil physical properties and biomass production under Mediterranean conditions. Soil Use Management, 1995, 11(3): 121~126