

喀斯特山区洼地表层土壤水分的时空变异

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, 环江 547100; 4. 宜春学院生命科学与资源环境学院, 宜春 336000)

摘要: 研究用地统计学方法在桂西北典型喀斯特洼地研究了表层土壤水分(0~15cm)的时空变异特征及其分布格局。结果表明在取样时段内洼地表层土壤水分总体不高(15.0%~27.5%), 呈现弱至中等变异特征, 并且中等变异一般与含水量较低相对应。洼地表层土壤水分的半变异函数参数及其影响因素产生一定的季节变化; 块金值、基台值和变程的变化范围分别是 0.01~2.74, 2.04~7.52 和 6.0~36.8。块金值和基台值的变化大致与平均含水量呈相反变化趋势; 变程在采样初期和中期与土壤水分的变化趋势相反, 在后期变化趋势相同, 结果说明平均含水量对表层土壤水分的时空变异具有持续主导作用, 结合研究目标可以有效指导后续的土壤采样。在剔除趋势效应后, 表层土壤水分呈明显的斑块或条带状分布, 样块土壤水分不仅具有空间分布的差异而且具有明显季节变化, 其中旱、雨季的土壤水分分布特征明显不同。在喀斯特山区特殊地貌中, 土壤平均含水量、地形、微地貌(石丛)和人为管理等因素是造成洼地表层土壤水分时空变异及其分布差异的主要影响因素。

关键词: 喀斯特; 土壤水分; 时空变异; 空间分布; 地统计学

文章编号: 1000-0933(2008)12-6334-10 中图分类号: S152.7 文献标识码: A

Spatial and temporal variability of surface soil moisture in the depression area of Karst hilly region

ZHANG Ji-Guang^{1,2,3}, CHEN Hong-Song^{1,3,*}, SU Yi-Rong^{1,3}, ZHANG Wei^{1,3}, KONG Xiang-Li⁴

1 Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hu'nan 410125, China

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

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

4 College of Life Science, Resources and Environment, Yichun University, Yichun 336000, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6334~6343.

Abstract: Spatial and temporal variability of surface soil moisture (0–15cm) and its distribution patterns were analyzed using geostatistics in a typical depression area of karst region in Northwestern Guangxi Province. The results showed that surface soil moisture was generally low, ranging from 15.0% to 27.5% during sampling periods and had weak to middle variability. The middle variability often accompanied with low soil moisture. The parameters of the semi-variance functions of surface soil moisture and its influencing factors had seasonal variations. The values of nugget, sill and range ranged from

基金项目: 中国科学院西部行动计划资助项目(KZCX2-XB2-08); 国家自然科学基金资助项目(40501034); 中国科学院“西部之光”人才培养计划项目

收稿日期: 2007-08-10; **修订日期:** 2008-09-03

作者简介: 张继光(1980~), 男, 山东潍坊人, 博士生, 主要从事土壤环境生态研究. E-mail: jgzhang@issas.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hbchsh@isa.ac.cn

致谢: 感谢张斌研究员对本文写作的帮助。

Foundation item: The project was financially supported by the Action Plan for the Development of Western China of Chinese Academy of Sciences (CAS) (No. KZCX2-XB2-08), the National Natural Science Foundation of China (No. 40501034) and the “Western Light” Program of Talent Cultivation of the CAS

Received date: 2007-08-10; **Accepted date:** 2008-09-03

Biography: ZHANG Ji-Guang, Ph. D. candidate, mainly engaged in soil environmental science and ecology. E-mail: jgzhang@issas.ac.cn

0.01 to 2.74, from 2.04 to 7.52, and from 6.0 to 36.8, respectively during the sampling periods. The variations of nugget and sill values were generally contrary to that of mean soil moisture. The range values were also contrary to the mean soil moisture at the initial and middle time of sampling, but had the same trend at the latter stages of sampling. These results suggested that mean soil moisture had substantial influence on the spatial and temporal variability of surface soil moisture in this area and could be used for establishing proper soil sampling strategy combined with the research objective. After eliminating the trend of soil moisture variability, the patterns of surface soil moisture's distributing pattern were stripe and patch like. The surface soil moisture in the plot area had different distributions at both spatial and temporal scales. Further, the distribution patterns were profoundly varied in the dry and rainy seasons. These results indicated that, mean soil moisture, topography, micro-morphology (rock cluster) and human management were the main influencing factors on the spatial and temporal variability and distribution patterns of surface soil moisture in the special physiognomy of the karst depression area.

Key Words: Karst; soil moisture; spatial and temporal variability; spatial distribution; geostatistics

地表土壤在大的时间和空间尺度上对地球系统的相互作用具有广泛影响,其水分含量对于净辐射变成潜热和感热、降雨变成径流和入渗过程起着主要控制作用。土壤水分通过蒸发散过程成为气候系统中云和降雨的一个重要水分来源,在经陆地库储存并随后释放的地表热量减缓了地表温度的日变化和季节变化^[1,2],并且表层土壤水分可能通过这种陆地-地表大气的反馈机制来调控地表水分分布过程^[3]。

地表土壤水分不仅对地球系统过程具有重要作用,而且也是水文和地表模型模拟过程中一个关键参数。然而土壤水分具有很强的时间和空间变异特性,其时空变化的量化研究正受到国内外研究者越来越多的关注。Western 等^[4,5]在澳大利亚 Tarrawarra 流域进行了土壤水分时空变异结构及尺度效应的研究。Jacques 等^[6]研究了田块尺度上由降雨、土层深度、植被和地形等相互作用产生土壤含水量的时空变异特性,并探讨了在不同入渗和再分布过程中,垂直深度和水平位置两个因子在详尽时间尺度上的时间稳定性。王军等人^[7]在黄土高原大南沟小流域研究了土壤水分空间结构及其季节变化特征,揭示了研究尺度下土壤水分的时空变异规律。熊亚兰等^[8]在西南丘陵坡旱地研究了平均和剖面土壤水分的空间结构及其季节变化特征。这些工作进一步加强对土壤水分空间变异产生的自然过程和流域水文过程的综合理解。但在土壤水分空间变异的影响因素,特别是平均含水量的影响方面还存在较大分歧。一些研究认为土壤水分变异随平均含水量的降低而减小^[1,4];也有研究发现平均含水量与土壤水分空间变异之间存在负相关^[7,9,10];Western 等在澳大利亚 2 个研究点的结果表明土壤水分变异与平均含水量的变化相一致,而在新西兰 3 个点则呈现出与平均含水量相反的变化趋势^[11]。Owe 等^[12]则发现土壤水分变异在平均含水量呈中等水平时达到最高;甚至有研究者认为土壤水分变异与平均含水量之间不存在系统联系^[13]。土壤水分变异与土壤平均含水量的关系,不仅在一定程度上揭示出不同研究区域或位置上土壤水分分布的主导因素不同,而且能够反映出该主导因素在不同位置上影响程度的差异性^[14]。因此,要明确两者之间的相互关系,尚需要选择典型区域对主导表层土壤水分变异的具体过程进行详细分析。

当前,土壤水分时空变异方面的研究大都集中在平原旱地或高原丘陵区,在水文地质构造复杂、生态环境脆弱的喀斯特地区,虽然土壤表层水分对地表生态过程具有极端重要性^[15],但在该地区,有关土壤水分变异的量化研究还相对较少^[16~18],尚缺乏关于土壤水分时空变异及其空间分布等方面的系统研究。本文针对喀斯特山区特殊的二元水文结构及复杂的地貌、土壤特征,通过在典型洼地样块尺度上进行长期定点采样,采用地统计学方法对表层土壤水分的空间异质性进行分析,揭示土壤水分的时空变异规律及其季节分布格局。这不仅有助于准确理解喀斯特地区洼地土壤水分变异的自然过程和控制因素,为区域水资源精确模拟和有效利用奠定基础,而且对喀斯特地形破碎区的土地生产力评价及退化生态系统的植被恢复也具有重要指导意义。

1 研究区概况与研究方法

1.1 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), 属典型的喀斯特峰丛洼地景观, 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。基岩广泛出露, 特别是坡地平均裸岩率达 80% 以上, 植被退化、水土流失状况较为严重, 森林覆盖率仅有 13%。自然植被主要以撂荒草丛群落和次生灌木群落为主, 多为喜钙、耐旱、耐瘠的先锋树种和草类。草丛主要有白茅(*Imperata cylindrica*)、类芦(*Neyraudia reynaudiana*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)等; 灌丛以灰毛浆果楝(*Cipadessa cinerascens*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、刀果鞍叶羊蹄甲(*Bauhinia brachycarpa* var. *cavaleriei*)等为主; 小面积的次生乔木林主要集中在于当地的风水林区, 优势种为刀果鞍叶羊蹄甲(*Bauhinia brachycarpa* var. *cavaleriei*)、粉苹婆(*Sterculia euosma*)、密花树(*Rapanea nerifolia*)等。该地区属亚热带季风气候区, 年平均气温为 19.9℃, 太阳总辐射量 3 344 ~ 4 134 MJm⁻², 年平均降雨量为 1 389.1 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, 平均持续时间 130 ~ 140 d, 常出现涝灾; 9 月底至翌年 3 月份为旱季, 各月平均降水量在 90 mm 以下, 时常受到干旱威胁; 土壤类型主要是碳酸盐岩发育的钙质湿润淋溶土, 质地较粘重, 阳离子交换量和盐基饱和度均较高, 土体与基岩面过渡清晰, 土壤肥力较为贫瘠。

研究地区作为“中国西部重点脆弱生态区综合治理技术与示范”项目的移民迁出示范区, 从 1996 年开始实施环境移民, 同时实施“退耕还林还草”工程, 陡坡耕地实行退耕撂荒措施, 缓坡地则种植牧草护坡并建立板栗-木豆生态经济林, 以旱作耕地为主的洼地也逐渐由单一玉米为主的种植方式改变为玉米、大豆、牧草、果树等复合种植制度。通过在研究区实施一系列环境治理和扶贫开发措施后, 周围生态环境得到不断改善, 当地农民的收入状况也得到较大提高。

1.2 研究方法

1.2.1 取样方法

根据整个洼地的微地形和地貌特征, 试验地选择在研究区洼地西南部, 呈东北-西南走向, 该地块地势总

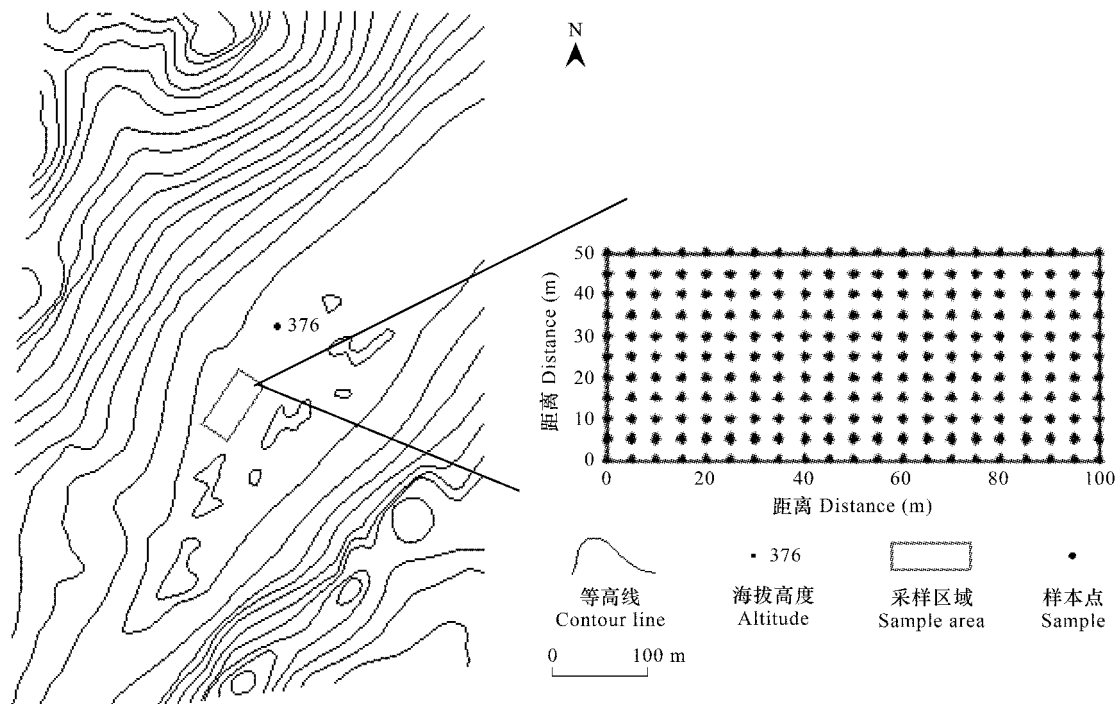


图 1 采样区位置及样点分布图

Fig. 1 Sketch of sampling sites in research area

体起伏不大,其中东南部分偏高,有石丛存在,西北部分地势偏低但相对平坦,分布有少量石块,这在所研究洼地中具有典型性和代表性。试验地种植作物为玉米套种大豆。在该地块 100 m × 50 m 范围内设置 5 m × 5 m 的采样网格(图 1),共设 231 个采样点并用 50 cm 的竹签做好标记,在每个采样点上用内径 3.5 cm 的土钻采集 0 ~ 15 cm 的表层土样均匀装入铝盒,如果样点处于出露石块则在其周围采集 3 个样混匀后代替,采样频率约为 2 周 1 次。采样时间在 2005 年 3 月 15 日至 9 月 4 日进行,正对应当地部分旱季和整个雨季时期(图 2),且采样时段涵盖了玉米的全生育期,在每次采样时都记录玉米的长势情况和地表覆盖情况。取样完成后在室内用 105℃ 烘干法测定土壤质量含水量。

1.2.2 数据处理

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,然后分别用正常的最大和最小值代替特异值^[19],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^[7, 20~22]。数据的统计分析和模型拟合过程分别在 SPSS11.5 和地统计学软件包 GS + (Version 5.3) 中实现。

2 结果与讨论

2.1 土壤水分的统计特征

从表 1 可以看出,在洼地各取样时段内,表层土壤含水量介于 15.05% ~ 27.53% 之间,具有明显的季节变化,在春季或秋初降水量较少时土壤含水量较低且波动较大,夏季降水丰富,土壤含水量较高且变化较平稳。从土壤水分的变异系数来看,除了 2005-03-15, 2005-05-8, 2005-07-19, 2005-08-2 和 2005-09-04 共 5 次数据表现为中等变异($10\% \leq CV \leq 100\%$)外,其余均表现出弱变异($CV < 10\%$)特征,这与该地区以往研究中田间土壤水分一般呈现弱或中等变异相符合^[16~18]。此外土壤含水量的不同水平对应不同的变异程度,含水量较低时一般呈中等变异,这说明变异系数表示的土壤水分变异与土壤平均含水量关系密切。偏度、峰度及 K-S 非参数检验结果均表明,在 0.05 检验水平下各次土壤水分均服从正态分布,因此不必进行数据转换,可直接进行地统计学分析。

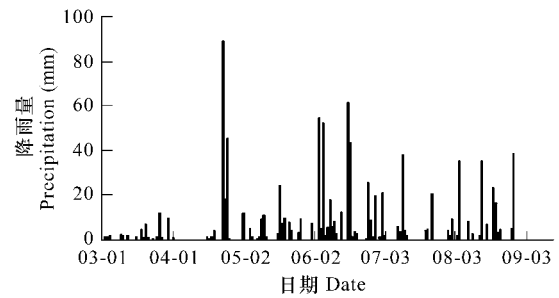


图 2 采样时段内研究区的降雨量情况

Fig. 2 The precipitation of research area in sampling time

表 1 土壤水分描述统计特征

Table 1 Statistical parameters of soil moisture

采样时间 Sampling time (year-month-day)	均值 Mean (%)	最小值 Min (%)	最大值 Max (%)	标准差 STD (%)	变异系数 CV	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	K-S 概率 (5%) K-S Probability
2005-03-15	15.05	10.34	20.53	2.17	0.14	0.289	-0.298	0.832
2005-03-27	22.96	18.70	29.28	2.13	0.09	0.346	-0.064	0.919
2005-04-10	19.19	14.92	23.63	1.68	0.09	0.134	0.116	0.916
2005-04-23	25.97	22.05	31.80	1.56	0.06	0.638	1.870	0.597
2005-05-08	18.42	11.06	25.46	2.96	0.16	-0.135	-0.265	0.618
2005-05-21	26.03	21.25	31.72	1.63	0.06	0.054	1.351	0.444
2005-06-14	27.53	19.97	33.33	2.27	0.08	0.052	0.090	0.945
2005-07-04	26.70	22.12	32.46	2.26	0.08	0.188	-0.47	0.338
2005-07-19	20.71	14.48	26.25	2.50	0.12	-0.174	-0.398	0.699
2005-08-02	20.55	15.91	26.17	2.40	0.12	0.163	-0.748	0.560
2005-08-18	24.85	19.29	29.86	2.00	0.08	-0.235	0.019	0.725
2005-09-04	18.75	12.91	24.96	2.25	0.12	-0.013	0.376	0.751

2.2 土壤水分的空间结构特征

由于研究中采用规则网格采样,因此选择 5 m 作为最小滞后距,50 m 为有效滞后距,计算了各向同性条

件下的实验半变异函数及其模型拟和参数(表2)。本研究中半变异函数的最优模型有指数模型、球状模型和线形模型3种,除2005年5月8日的数据拟合效果较差外(R^2 为0.26),其余各次的拟合效果均较好(R^2 在0.52~0.97之间),这说明所用理论模型能较好地反映土壤水分的空间结构特征。

从土壤水分的半方差参数可以看出,除2005-08-02、2005-08-18和2005-09-043次取样土壤水分的块金效应较大外(>1.2),其余各次的块金值较小。较大的块金值反映出在小于研究尺度(5 m)上存在较强人为扰动等方面的影响,这可能与该时段内玉米收获和播种大豆及红薯等农作过程对土壤的干扰有关,可以通过相应增加取样密度来增加土壤水分的空间结构信息。土壤水分在研究时段内具有明显的基台值,显示土壤水分的空间异质性较高,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。基台值的波动变化还反映出其受降雨量、植被和人为活动等随机因素的影响。由于块金值与基台值之比表示随机变异占系统总变异的比,反映了土壤属性的空间依赖性^[23]。在本研究中,除2005-04-10、2005-05-21、2005-07-19、2005-08-18和2005-09-04等5次采样的土壤水分具有中等的空间相关性外(块金值/基台值介于25%~75%之间),其余各次具有强烈的空间相关性(块金值/基台值小于25%),说明随机因素对土壤水分的影响较小,其空间变异主要是由土壤母质、地形、气候等自然因素(空间自相关部分)引起的^[24]。

变程反映了土壤水分在空间上的平均变异尺度,从土壤水分的变程来看,其值介于6.0~36.8 m之间,最大值和最小值相差6倍,显示出不同季节土壤水分的空间连续性差异较大。在研究尺度内,土壤水分变异所分析的有效采样距离不应超过最大变程的1/2(18.4 m)。但具体采样设计还应根据土壤水分的变异情况确定,如土壤水分变异较小,可以增大采样间隔,相应减少采样数目;而在土壤水分变异较大时,则相应加大采样密度,这样既可以显示不同情况下土壤水分的真实结构特征,又能保证进行有效的空间内插和制图^[25]。

在实际采样过程中,由于采样数据所反映的表观变异是土壤性质的真实变异和观测尺度的函数,采样间隔过大,会使得样本数据的变异特征与真实的变异出现偏差,只有充分小的采样间隔和足够多的样本才可以代表研究区域土壤水分的真实变异特征^[5]。选择5 m的采样间隔,空间分析结果显示可以得到稳定的半变异函数结构,能够反映出洼地研究区域内土壤水分空间变异特征,因此采样间隔的选择是适当的。研究结果可以用来指导该地区后续土壤水分的采样,而且对于指导其他土壤采样对区域化变量取得最小空间变异是十分重要的^[26]。但是5 m的采样间隔并不能反映作物的株间差异和土石面等小生境引起的土壤水分变异,这可能在一定程度上掩盖了小于采样尺度上的水分变异规律,应根据研究需要采用具有克立格方程的变异函数来确定达到既定容许误差的最优采样间隔和采样数^[5, 27]。此外,在生境复杂、空间异质性大的喀斯特地区,土壤水分的空间异质性一般较大,样点选择的代表性同样具有重要意义。除了采用常用的多点混合取均值外,采用以土壤面积权重确定的小生境土样组成代表性土样的方法也是一种比较好的选择^[28]。

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 soil moisture

采样时间 Sampling time (Year-Month-Day)	平均含水量 Mean soil moisture (%)	块金值 Nugget	基台值 Sill	块金值/基台值 Nugget/Sill (%)	变程 Range (m)	模型类型 Model Type	R^2
2005-03-15	15.05	0.11	4.32	2.5	9.6	指数模型 Exponential	0.82
2005-03-27	22.96	0.10	4.30	2.3	13.2	指数模型 Exponential	0.85
2005-04-10	19.19	0.89	2.63	33.9	27.0	指数模型 Exponential	0.96
2005-04-23	25.97	0.04	2.04	2.0	11.4	指数模型 Exponential	0.58
2005-05-08	18.42	0.65	7.52	8.6	7.2	指数模型 Exponential	0.26
2005-05-21	26.03	0.08	2.15	38.1	9.9	球状模型 Spherical	0.62
2005-06-14	27.53	0.07	4.78	1.5	6.9	指数模型 Exponential	0.58
2005-07-04	26.7	0.01	4.60	0.2	6.0	指数模型 Exponential	0.52
2005-07-19	20.71	0.52	6.22	10.5	14.1	指数模型 Exponential	0.78
2005-08-02	20.55	1.90	5.31	5.3	28.2	指数模型 Exponential	0.95
2005-08-18	24.85	1.24	4.05	30.7	36.8	线形模型 Linear	0.87
2005-09-04	18.75	2.74	4.97	55.1	25.0	线形模型 Linear	0.97

2.3 土壤水分变异半方差参数的季节变化

洼地土壤水分变异受到降雨、植被盖度、地形地貌和人为活动等诸多因素的影响而表现出明显的季节变化,这可以从半变异函数的参数变化上反映出来。

2.3.1 块金值的季节变化

从表 2 和图 3 中可以看出,块金值在 0.01 和 2.74 之间波动,季节变化较明显,块金值大致与土壤平均含水量的变化趋势相反。结合采样前的降雨信息可以看出(图 2),较小的块金值一般发生在强降雨之后土壤含水量较高时。若忽略采样误差的影响,假定块金效应表现为小于 5 m 取样尺度内自然过程造成的变异。则在降雨之后,微域内影响土壤水分变异的自然过程(主要是微地形和地貌等)得到一定程度的弱化,而干旱条件下,影响土壤水分过程的微地貌和地表蒸发散作用得以凸现,使得块金值明显增加。这与王军等在黄土高原大南沟流域的研究结果不同^[7],原因一方面可能是研究区域不同,两个地区具有差异鲜明的气候、土壤和植被特征,另一方面也与采样区的地形、微地貌及土地利用等因素有关,大南沟的采样点多分布在坡地上,地形破碎,土地类型复杂;而本研究在喀斯特洼地中进行,地表有石丛分布但总体起伏不大,利用方式单一受人为管理影响较大。

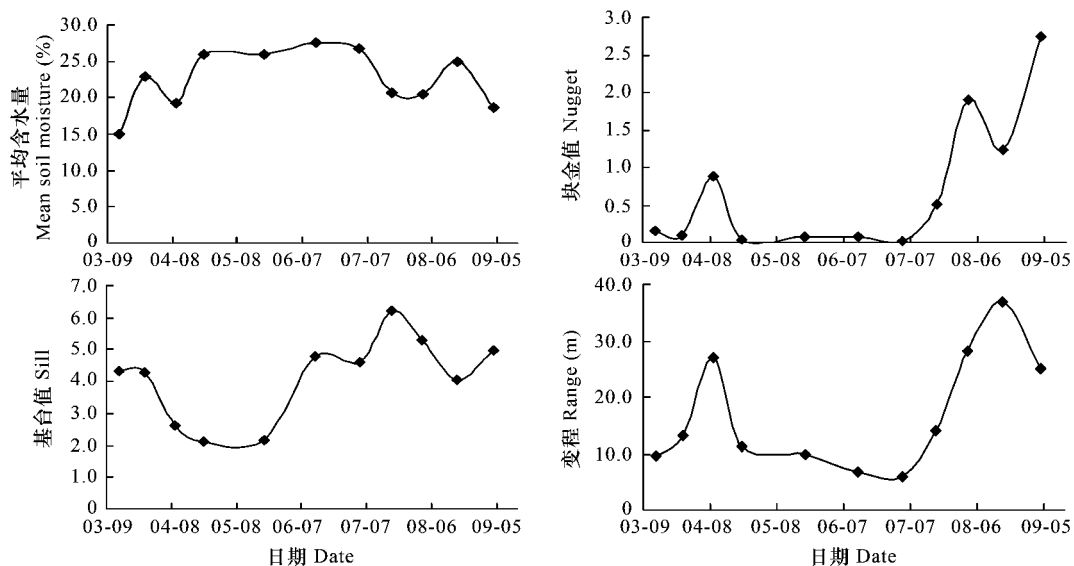


图3 样块土壤水分半变异函数参数的季节变化(2005 年)

Fig.3 Seasonal changes of semi-variograms parameters of surface soil moisture in plot area(2005)

2.3.2 基台值的季节变化

基台值也具有较明显的季节变化趋势,其波动变化也大致随土壤水分的升高而降低,这与以往许多研究结果相符合^[5, 9, 10],但也有一些研究与此不同^[1, 4]。关于基台值与土壤平均含水量的变化关系,一般认为是由研究区特殊的气候、地形、土壤、植被以及取样的尺度、时间、深度等因素不同造成的^[1]。基台值随平均含水量的这种变化只能是在喀斯特山区洼地特殊的气候、地形、土壤和采样条件下的结果,而在坡地上及其他地貌类型区是否有类似规律还需要进一步研究。典型降雨过程能对基台值产生重要影响,如 2005 年 4 月 22 日的一次强降雨过程(降雨量 89 mm)之后,次日的采样中表层土壤水分达到近饱和状态,水分均一度增加,变异程度得到一定平滑,使得基台值明显降低。之后随着土壤变干,基台值又复增加。Fitjohn 等^[9]的研究也认为降雨之后,土壤平均含水量迅速升高,空间变异会随之降低。而在干旱少雨的情况下,土壤平均含水量很低,基台值一般较大,这主要由于石丛裸露区域的地面蒸发和植被状况与邻近区域具有巨大差异,从而使得整个地块土壤水分变异增大。鉴于土壤水分变异与平均含水量间存在负相关关系,预示着后续采样应该根据田间土壤水分状况确定。即与降雨频繁、土壤含水量较高的雨季相比,在降雨稀少、土壤含水量较低的旱季,要

减小取样间隔并相应增加取样密度。

2.3.3 变程的季节变化

变程与块金值的变化趋势大致相似,但在采样后期两者差异较大。在采样前期和中期,变程与土壤水分的变化趋势相反,随着平均含水量的升高而减小。变程的减小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^[7]。在土壤水分较低时,影响水分变异的微地貌等因子的作用得到加强,如石丛分布区的出露岩石会导致土壤表层温度较周围升高,土壤水分蒸发相对强烈^[29],从而降低其土壤含水量,造成土壤水分空间分布破碎化,使变程减小。在土壤水分较高或持续降雨过后,有研究认为由于土壤饱和区域的扩张等会造成土壤水分的变程增加^[4],但在喀斯特地区变程却变小,这可能与该地区特殊的地形和微地貌有关,由于地形的起伏,必然有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从而改变了土壤水分的空间格局;此外石丛的存在也使得降雨后其周围土壤含水量明显增加,两者的叠加作用可能强化了土壤水分分布的不连续性,使变程减小。而到采样后期,变程又与土壤水分变化相一致,这种情况可能由控制土壤水分格局的自然过程和人为活动(主要是收获、播种、施肥等)的共同作用所致。

由上述分析可见,洼地样块中土壤水分的空间结构参数及其影响因素随季节变化发生一定变化,但平均含水量对土壤水分空间格局的主导作用是持续存在的。因此,加强喀斯特洼地土壤水分时空变异规律研究,一方面有助于确定适宜的采样尺度和取样策略,另一方面也可以加强对该地区土壤水文过程的进一步理解。

2.4 土壤水分的空间分布格局

有研究表明,对具有区域性较大差异或多因素影响的空间变量用克立格法插值效果较好^[30],选取对应于典型旱季(2005-03-15-和 2005-03-27)和雨季时期(2005-06-14 和 2005-07-19)的 4 次数据,来研究表层土壤水分的空间分布特征及其季节差异。由于 2005-03-15 和 2005-06-14 两次取样的土壤水分分布沿 X 轴方向(西南-东北)呈线性递增趋势,沿 Y 轴方向(东南-西北)也呈平稳或缓慢增加趋势,其空间分布表现出较明显的趋势效应(图 4)。在插值过程中要剔除趋势的影响以满足克立格法的平稳性假设,而且这种趋势可以在成

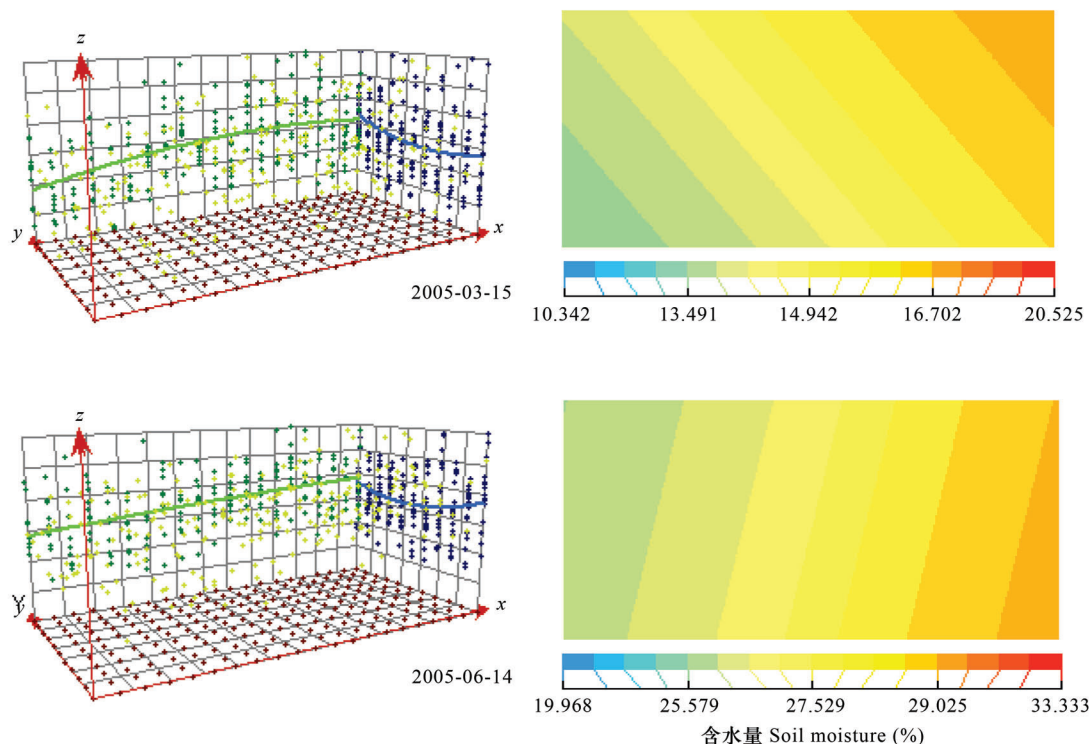


图4 样块土壤水分的趋势效应及其一阶趋势面

Fig. 4 Trend effect of soil moisture and its one-order trend surface in plot area

图时添加回来,使得分布格局更趋于合理和精确。此外插值结果还受到变异函数模拟精度、估值样点的几何性质、已知样点分布及邻近样点的选取等因素的综合影响^[4, 22]。因此,在空间结构分析基础上通过交叉验证法选取最优的普通克立格法,并考虑各向异性和趋势效应,绘制出能直观反映土壤水分季节变化的空间分布图(图 5)。

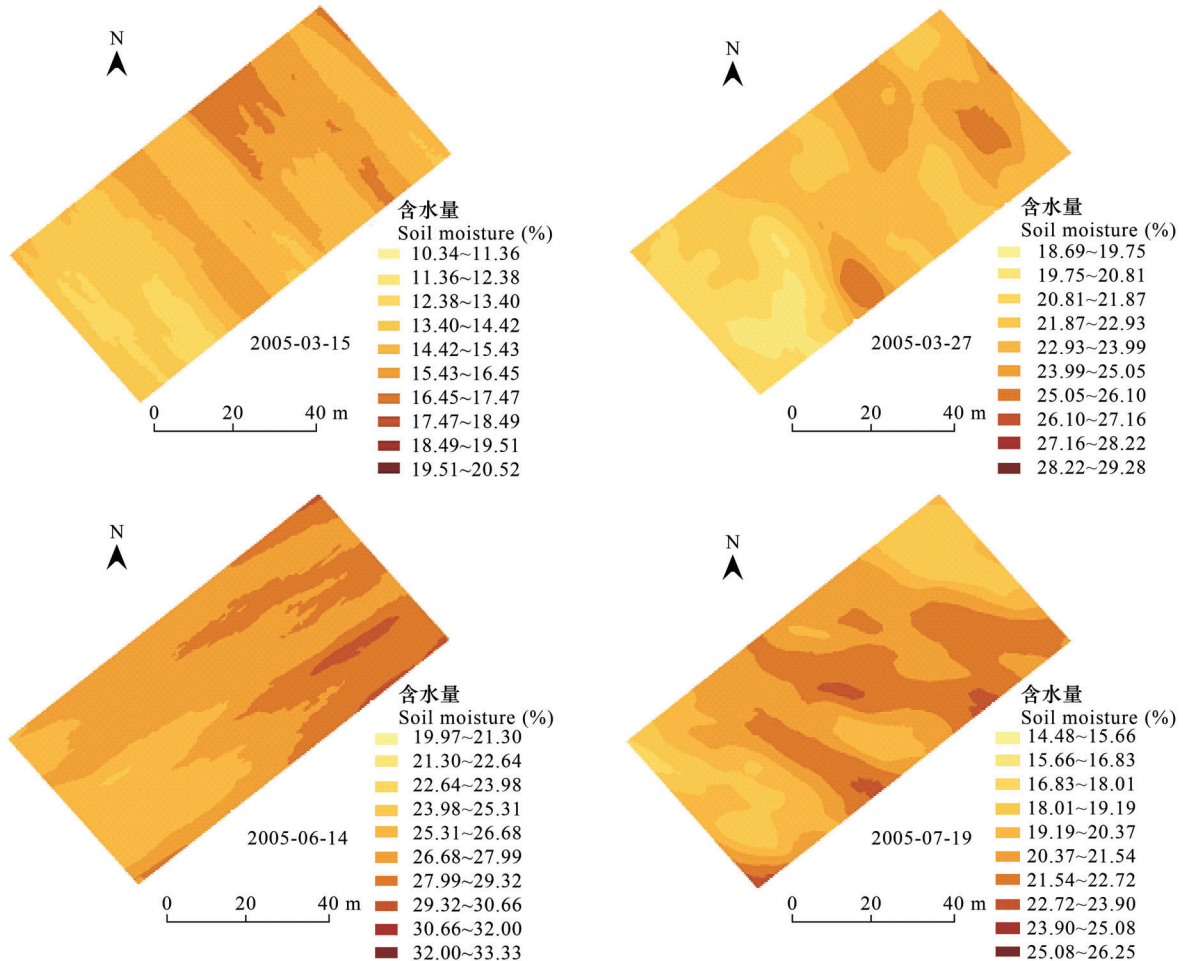


图 5 样块表层土壤水分在旱季和雨季时期的空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution maps of the surface soil moisture during dry and rainy seasons in plot area

从分布图中可以看出,土壤水分明显地呈斑块或条带状分布,含水量高值区和低值区差异明显。在样块南部有一定面积石丛存在,地表蒸发散相对强烈,造成土壤含水量在这一区域较低。西部处在一侧峰坡的延伸地带,地势相对较高,含水量较低。相对应在北部和东部地形和缓、地势低洼区域,土壤含水量较高,从而造成了样块内土壤水分的空间差异。而且值得注意的是,南部石丛分布区的土壤水分整体较低,但是石丛周围的土壤由于受裸露石块作用(主要是石丛对降水的汇集及减少侧渗等方面影响),使土壤水分出现一个相对高值的环形区域^[16],从而加大了异质斑块的空间破碎化程度。此外土壤水分的空间分布也具有较明显的季节差异,旱季土壤水分主要在西南-东北方向上差异明显,呈现两种不同的斑块格局,且在较干旱条件下(2005-03-15),其界限趋于平滑,空间分布呈条纹状特征。雨季土壤水分分布与旱季有所不同,在较湿润条件下(2005-06-14),表层土壤水分趋于饱和和成条带状分布,斑块的空间连续性增强。

有研究认为田块尺度土壤水分的空间格局主要受局部土壤蒸发散、内部水分的垂直和水平再分布(渗漏-径流过程)的影响^[31, 32],但在喀斯特地区影响土壤水分分布的因素要复杂的多^[8],显然采样分析受到喀斯特峰丛洼地微地貌及水文结构特殊性的制约,但土壤平均含水量、地形、微地貌(石丛)和人为管理等因素使得

洼地表层土壤水分仍然呈现出时间和空间上差异明显的分布格局。

3 结论

3.1 在桂西北喀斯特洼地,通过样块尺度上的长期密集采样,用地统计学方法分析了表层土壤水分的时空变异特征及其分布格局。研究结果表明,在取样时段内洼地表层土壤含水量总体不高(15.0%~27.5%),表现出弱至中等的变异特征,并且在土壤平均含水量较低时一般对应中等变异。

3.2 随着季节变化,洼地表层土壤水分的空间结构参数及其影响因素会发生一定变化,但平均含水量对土壤水分空间变异的主导作用持续存在。块金值和基台值的变化大致与土壤平均含水量的变化趋势相反,变程在采样的初期和中期与土壤水分的变化趋势相反,但在后期变化趋势相同。

3.3 在喀斯特地区后续土壤水分空间变异研究中,应根据研究目标结合田间土壤水分状况,确定合理的取样设计和取样密度。在降雨稀少的旱季与降雨频繁的雨季相比,取样时要适当注意减小取样间隔,增加取样密度,这样更能反映研究区域土壤水分变异的特征。

3.4 在综合考虑各向异性和趋势效应的基础上,分析了4次典型取样土壤水分的空间分布格局。土壤水分呈明显的斑块或条带状分布,不仅在样地上的空间分布不同而且具有季节差异,雨季和旱季时期的土壤水分分布特征明显不同。

3.5 在喀斯特山区洼地这类特殊地貌类型中,表层土壤水分具有明显的空间结构及其季节变化,其变异特征随土壤平均含水量的增加而降低。平均含水量、地形、微地貌(石丛)和人为管理是造成喀斯特洼地表层土壤水分时空变异及其分布差异的主要影响因素。

Reference:

- [1] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. *Journal of Hydrology*, 1998, 210(1-4): 259—281.
- [2] Famiglietti J S, Devereaux J A, Laymon C A, *et al.* Ground-based investigation of soil moisture variability within remote sensing footprints during the Southern Great Plains 1997 (SGP97) Hydrology Experiment. *Water Resource Research*, 1999, 35(6): 1839—1851.
- [3] Koster R D, Suarez M J, Higgins R W, *et al.* Observational evidence that soil moisture variations affect precipitation, *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(5): 451—454.
- [4] Western A W, Blöschl G, Grayson R B. Geostatistical characterization of soil moisture patterns in Tarrawarra catchment. *Journal of Hydrology*, 1998, 205(1-2): 20—37.
- [5] Western A W, Blöschl G. On the spatial scaling of soil moisture. *Journal of Hydrology*, 1999, 217(3-4): 203—224.
- [6] Jacques D, Monanty B, Timmerman A. *et al.* Study of time dependency of factors affecting the spatial distribution of soil water content in a field-plot. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 2001, 26(7-8): 629—634.
- [7] Wang J, Fu B J, Qiu Y, *et al.* Spatiotemporal variability of soil moisture in small catchments on Loess Plateau-Semivariograms. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(4): 428—438.
- [8] Xiong Y L, Wei C F. Spatio-temporal variability of soil water content in sloping field of the southwest upland. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(1): 22—25.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Western A W, Zhou S, Grayson R B, *et al.* Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrology process. *Journal of Hydrology*, 2004, 286(1-4): 113—134.
- [12] Owe M, Jones E B, Schmutge T J. Soil moisture variation patterns observed in Hand County, South Dakota. *Water Resource Bulletin*, 1982, 18: 949—954.
- [13] Charpentier M A, Groffman P M. Soil moisture variability within remote sensing pixels. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(17): 18 987—18 995.
- [14] Hu W, Shao M A, Wang Q J. Study on spatial variability of soil moisture on the recultivated slope-land on the Loess Plateau. *Advances in Water Science*, 2006, 17(1): 74—81.
- [15] Li Y B, Gao M, Wei C F. Differences of soil water characteristics under different land use patterns in Karst Mountains *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(5): 63—66.

- [16] Zhang J G, Chen H S, Su Y R, *et al.* Spatial Variability of Soil Moisture Content and Reasonable Sampling Number in Cluster-Peak Depression Areas of Karst Region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 114—117.
- [17] Zhang W, Chen H S, Wang K L, *et al.* Spatial variability of surface soil water in typical depressions between hills in karst region in dry season. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(4): 554—562.
- [18] Zhang J G, Chen H S, Su Y R, *et al.* Spatial variability of surface soil moisture content in depression area of karst region under moist and arid conditions. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(12): 2229—2460.
- [19] Liu F C, Shi X Z, Yu D S, *et al.* Mapping soil properties of the typical area of Taihu lake watershed by geostatistics and geographic information systems — A case study on total nitrogen in topsoil. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 20—27.
- [20] Zhou H Z, Gong Z T, Lamp L. Study on soil spatial variability. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(3): 232—241.
- [21] Wang Z Q. *Geo-statistics and Its Application in Ecology*. Beijing: Science Press, 1999.
- [22] Lu P. Land use and spatial variability of soil nutrients based on GIS in Subtropical Typical Region. Ph. D. Degree thesis of the CSA, 2005.
- [23] Chine Y J, Lee D Y, Guo H Y, *et al.* Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils. *Soil Science*, 1997, 162(4): 291—298.
- [24] Cambardella C A, Moorman T B, *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of American Journal*, 1994, 58(5): 1501—1511.
- [25] Gupta R K, Mostaghimi S, McClellan P W, *et al.* Spatial variability and sampling strategies for $\text{NO}_3\text{-N}$, P and K determinations for site-specific farming. *Trans of the ASME*, 1997, 40(2): 337—343.
- [26] Van Groenigen J W, Siderius W Stein. A. Constrained optimisation of soil sampling for minimisation of the kriging variance. *Geoderma*, 1999, 87(3-4): 239—259.
- [27] Li Z Z, Gong Y S. Spatial variability of soil water content and bulk soil electrical conductivity and determination of sampling number in field. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(5): 59—66.
- [28] Wang S J, Lu H M, Zhou Y C. Spatial variability of soil organic carbon and representative soil sampling method in Maolan karst virgin forest. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(3): 475—483.
- [29] 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.
- [30] Su Y Z, Zhao H L, Cui J Y. Spatial Heterogeneity of Soil Properties in the Desertification Process of Rainfed Farmland in Horqin Sandy land. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 210—217.
- [31] Herbst M, Dieckkruger 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, Parts A/B/C*, 2003, 28(6-7): 239—245.
- [32] Albertson J D, Montaldo N. Temporal dynamics of soil moisture variability: 1. Theoretical basis. *Water Resource Research*, 2003, 39(10): 1274, doi:10.1029/2002WR001616.

参考文献:

- [7] 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.
- [8] 熊亚兰, 魏朝富. 西南丘陵坡地土壤水分的时空变异. *土壤通报*, 2006, 37(1): 22~25.
- [14] 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异性研究. *水科学进展*, 2006, 17(1): 74~81.
- [15] 李阳兵, 高明, 魏朝富, 等. 岩溶山地不同土地利用土壤水分特征差异. *水土保持学报*, 2003, 17(5): 63~66.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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): 2229~2460.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 王政权. *地统计学及在生态学中的应用*. 北京: 科学出版社, 1999.
- [22] 路鹏. 亚热带典型土地利用与土壤养分变异. 中国科学院博士学位论文, 2005.
- [27] 李子忠, 龚元石. 农田土壤水分和电导率空间变异性及确定其采样数的方法. *中国农业大学学报*, 2000, 5(5): 59~66.
- [28] 王世杰, 卢红梅, 周运超, 等. 茂兰喀斯特原始森林土壤有机碳的空间变异性与代表性土样采集方法. *土壤学报*, 2007, 44(3): 475~483.
- [30] 苏永中, 赵哈林, 崔建垣. 农田沙漠化演变中土壤性状特征及其空间变异性分析. *土壤学报*, 2004, 41(2): 210~217.