

DOI: 10.5846/stxb201405100939

徐慧芳, 宋同清, 黄国勤, 彭晚霞, 曾馥平, 杜虎, 李莎莎. 喀斯特峰丛洼地地区坡地不同土地利用方式下土壤水分的时空变异特征. 生态学报, 2014, 34(18): 5311-5319.

Xu H F, Song T Q, Huang G Q, Peng W X, Zeng F P, Du H, Li S S. Spatiotemporal variation of soil moisture under different land use types in a typical karst hill region. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(18): 5311-5319.

喀斯特峰丛洼地地区坡地不同土地利用方式下 土壤水分的时空变异特征

徐慧芳^{1,2,3}, 宋同清^{2,3}, 黄国勤^{1,*}, 彭晚霞^{2,3}, 曾馥平^{2,3}, 杜虎^{2,3}, 李莎莎^{2,3}

(1. 江西农业大学生态科学研究中心, 南昌 330045; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125;
3. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100)

摘要: 基于典型喀斯特峰丛洼地坡面土地利用方式试验火烧、刈割、刈割除根、封育、种植桂牧 1 号、种植玉米 (面积分别为 20m×70m) 控制性试验建设, 通过网格法 (5 m×5 m) 采样, 用经典统计学和地统计学方法, 分析了 6 种土地利用方式下 (火烧、刈割、刈割除根、封育、种植桂牧 1 号、种植玉米) 表层土壤水分在不同季节的空间变异特征。结果表明: 喀斯特峰丛洼地土壤含水量均很高, 雨季显著大于旱季, 雨季为火烧>封育、刈割除根>玉米、桂牧 1 号>刈割, 旱季为刈割、火烧、刈割除根>桂牧 1 号、封育>玉米, 均呈中等至强度变异, 且含水量越低变异越大; 不同土地利用方式土壤水分的自相关函数均呈由正向负方向发展的相同趋势, 但拐点不同, 且旱季大于雨季, 不同土地利用方式旱季、雨季土壤水分的最佳拟合模型不同, 但均呈中等或强烈的空间相关性, 变程为 6.8—213 m, 且旱季大于雨季; 同一土地利用方式旱季、雨季表层土壤水空间格局相似, 不同土地利用方式空间格局则不同, 因此在该区域进行植被恢复和生态重建时应采取不同的水资源利用策略。

关键词: 表层土壤水分; 空间异质性; 土地利用方式; 坡面; 喀斯特峰丛洼地

Spatiotemporal variation of soil moisture under different land use types in a typical karst hill region

XU Huifang^{1,2,3}, SONG Tongqing^{2,3}, HUANG Guoqin^{1,*}, PENG Wanxia^{2,3}, ZENG Fuping^{2,3}, DU Hu^{2,3}, LI Shasha^{2,3}

1 Research Center On Ecological Science, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

2 Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

3 Huanjiang Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Huanjiang 547100, China

Abstract: In this study, spatiotemporal variation of soil moisture was investigated on six manipulated land use types, i.e., burning, cutting, cutting plus root removal, enclosure, maize field, and sward of Guimu No. 1. Each land use type covered an area of 20 m×70 m on a typical slope in depression between karst hills. Soil moisture was measured with 5 m×5 m sampling grid and was analyzed through classical statistics and geostatistical methods. Soil moisture was high in depression between karst hills, and was significantly higher in rainy season than in dry season. In rainy season, soil moisture changed in the order of burning > enclosure and cutting plus root removal > maize field and sward of Guimu No. 1 > cutting, while in dry season, soil moisture changed in the order of cutting, burning, cutting plus root removal > sward of Guimu No.

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2XB310); 国家自然科学基金项目 (31370623, U1033004)

收稿日期: 2014-05-09; **修订日期:** 2014-08-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hgqjxc@sina.com

land enclosure > maize field. Soil moisture varied moderately or strongly, and the variation was larger when the soil moisture was lower. All autocorrelation coefficients of soil moisture under different land use types tended to change from positive to negative direction but with different inflection points and the values were larger in dry season than in rainy season. The best fitted models of soil moisture differed under different land use types, but all showed moderate or strong spatial correlation. The spatial variation ranged from 6.8 to 213 m and was larger in dry season than in rainy season. The spatial pattern of surface soil moisture under the same land use type in rainy season was similar to that in dry season, while spatial pattern of surface soil moisture varied among different land use types. Therefore, diverse strategies in the utilization of water resources should be adopted during ecological restoration and vegetation reconstruction in depressions between karst hills.

Key Words: surface soil moisture; spatial heterogeneity; land use type; slope; depression between karst hills

土壤水分是地表水资源的重要组成部分,具有较强的时空变异性,是土壤的一个重要状态参数^[1-2],是衔接四水转换与循环的核心,其高度的空间异质性受不同尺度的地质地貌、降水、植被覆盖、径流、蒸发蒸腾、干扰等自然、人为作用和过程控制^[3],区域尺度上由大气控制的降雨和蒸发格局起主导作用^[4-5],小流域尺度则以土壤、地形和土地利用(植被)的作用为主,但这些因子的作用因季节而异^[6]。国内外学者大量研究表明影响土壤水分时空格局的驱动因子不同,且研究的差异较大^[7-8],但一般认为,在湿润季节主要受汇水面积等非局地因子影响,在干旱季节,土壤水分格局受土壤性质、植被和微地形等局地因子控制。

喀斯特峰丛洼地地处世界三大岩溶区之一即以贵州为中心连带成片的我国西南喀斯特南部斜坡地带,属中亚热带季风气候,雨热资源丰富,年均降雨量在 1300—1500 mm 之间,但时空分布不均且蒸发量大,年蒸发量多在 1500—1900 mm,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^[9]。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^[10-11],又加之该地区土壤浅薄、土壤总量少、储水能力低、尖锐的人地矛盾产生了许多掠夺型的土地开发利用方式,大部分干扰区的森林覆盖率 $\leq 13\%$,形成了严重的干旱和石漠化状态^[12],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。目前,有关喀斯特地质背景^[13]、生态环境^[14]、植

被特性^[15-17]、土壤水分空间异质性及其主要影响因素^[18]有了初步认识,但涉及不同土地利用方式土壤水分的空间异质性很少。本文选择典型喀斯特峰丛洼地坡面,基于火烧、刈割、刈割除根、封育、种植玉米、种植桂牧 1 号 6 种主要土地利用方式的控制性试验设置,用经典统计学和地统计学方法分析旱季、雨季表层土壤水分的空间异质性及其生态学过程,旨在为提高土壤有效含水量、实现水土资源协调利用、有效指导该区农业生产和植被快速恢复提供科学依据。

1 研究方法

1.1 区域概况

研究区位于广西壮族自治区环江毛南族自治县中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站综合试验示范区,地理位置为 $N2^{\circ}43'—24^{\circ}44'$, $E108^{\circ}18'—108^{\circ}19'$,地势四周高,中间低,海拔为 288.5—337.8 m,地形破碎,坡度较陡, $\geq 20^{\circ}$ 的坡面占 57%,坡地基岩裸露面积 $<30\%$ 。土壤为白云岩母质发育而成的深色或棕色石灰土,土层较薄,一般为 10—50 cm;土壤质地为黏壤土和黏土,粉粒、黏粒质量分数分别为 25%—50% 和 30%—60%;土壤呈碱性,pH 值高达 7.83—7.98,有机质、全氮、全磷、全钾分布为 76.78—116.05 g/kg, 4.29—6.95 g/kg, 1.15—1.17 g/kg, 3.59—6.05 g/kg。研究区属中亚热带季风气候区,全年无霜期 300—330 d,年均气温 19.9 $^{\circ}\text{C}$,极端高温 38.7 $^{\circ}\text{C}$,极端低温 -5.2 $^{\circ}\text{C}$,太阳年平均辐射总量 414.1 kJ/cm^2 , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温为 5500—6530 $^{\circ}\text{C}$ 。年均降雨量 1389.1 mm,降水丰富但季节分配不均,雨季降雨量占全年降雨量的 70% 以上。

1.2 试验设置与采样

2006 年底在试验区一面东南向山坡中下部建立了 6 个 20 m×70 m 的动态监测样地,经过试验处理形成了火烧地、刈割第地、刈割除根地、封育地、玉米地和桂牧 1 号地 6 种土地利用方式。具体设计及处理见表 1。用插值法将每个动态监测样地划分为 5 m×5 m 的网格,共获得 80 个样点,分别于 2009 年 7 月 8 日即雨季(采样前最后一次降雨时间为 7 月 6 日(30 mm))和 11 月 28 日即旱季(采样前最后一次降雨时间为 11 月 5 号(4.5 mm)),用土钻进行表层土壤(0—10 cm)网格法取样,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,用烘干法测定土壤水分含量。采样同时进行立地因子、植被状况、人为干扰等调查。

1.3 数据处理

用经典统计学和地统计学方法对样本数据进行分析处理,经典统计学分析采用 SPSS16.0 软件,空间自相关分析、半变异函数分析和模型优化模拟均在专业地统计软件 GS+中完成,Kriging 等值线图绘制采用 ArcGIS9.2 软件。地统计学有关方法及原理见文献^[19-20]。

表 1 不同土地利用方式坡面样地基本情况
Table 1 Basic details of slope sample plots under different land use types

利用方式 Land use pattern	坡形 Slope shape	平均坡度/(°) Mean slope angle	处理方式 Treatment	土壤扰动情况 Soil disturbances
火烧 Burning	直形坡	33.7	每年 1 月火烧 1 次	小
刈割 Cutting	直形坡	34.5	每年 1 月砍伐、搬移,不去除植物根系	小
刈割除根 Cutting plus with root removal	直形坡	33.5	每年 1 月砍伐、搬移,去除植物根系,3—5 a 后自然恢复	大
封育 Enclosure	直形坡	33.0	保留原始植被,作为对照	无
玉米 Maize plantation	微凹形坡	26.4	坡中下部去除原始植被,挖根,顺坡种植玉米	大
桂牧 1 号 Pasture of Guimu No. 1 plantation	微凹形坡	24.4	去除原始植被,挖根,种植牧草(桂牧 1 号)	大

2 结果与分析

2.1 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^[21],后续计算均采用处理后的原始数据。由表 2 可以看出,喀斯特峰丛洼地土壤含水量均很高,旱季明显低于雨季($P<0.01$),但含水量仍在 15.26%—18.93%之间,总体趋势上含水量越低变异系数越大,旱季变异系数(24.20%—46.33%)明显高于雨季(14.11%—21.86%),这与前人研究的结果基本一致^[22]。不同土地利用方式不同季节土壤含水量和变异系数不同,雨季为火烧>封育、刈割除根>玉米、桂牧 1 号>刈割,各组间差异极显著,火烧之后新草生长茂密,其蓄水性能最好,封育次之,刈割蓄水性能最差,各利用方式的变异系数均呈中等变异($10\%<CV<30\%$)。旱季为刈割、火烧、刈割除根>桂牧 1 号、封育>玉米,各组间差异显著,刈割在旱季耗

水量最小、玉米的耗水量最大,其中刈割、玉米和封育呈强度变异($CV>30\%$),其他呈中等变异。经典统计在描述不同土地利用方式土壤水分的总体变化特征方面比较好,概括了土壤水分变化的全貌,但是却无法反映其局部的变化特征,不能定量描述随距离而产生的空间变异及分布,因此需要使用地统计学方法分析进一步研究。采用单样本 K-S 分布检验,在 5%的水平下均服从正态分布,可以直接进行地统计学分析。

2.2 土壤水分的空间自相关分析

如图 1 所示 6 种土地利用方式的土壤水分具有相似的空间结构,大致趋势为:滞后距离较小的点对呈显著的正空间自相关,随着滞后距离的增大,自相关系数逐渐向负方向发展,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。不同的土地利用方法正负变化的拐点和变化趋势不同,总趋势为旱季的拐点向坡上

表 2 土壤水分描述统计特征
Table 2 Statistical description of soil water content

	指标 Index	火烧 Burning	刈割 Cutting	刈割除根 Cutting plus with root	封育 Enclosure	玉米 Maize plantation	桂牧 1 号 Pasture of Guimu No. 1 plantation
雨季 Rainy season	最小值 Min. /%	24.54	15.33	13.55	16.18	14.33	10.11
	最大值 Max. /%	50.48	34.68	43.48	48.86	38.3	39.12
	均值 Mean/ %	38.47Aa	25.38Dd	30.52Bcbe	32.42Bb	28.63Cc	29.06Cc
	变异系数 CV/ %	14.11	17.33	18.54	21.67	19.93	21.86
	偏度 Skewness	-0.21	-0.09	-0.34	0.2	-0.5	-0.71
	峰度 Kurtosis	0.07	-0.38	0.08	-0.25	-0.2	0.53
	K-S 值 K-S value	1	0.97	0.93	0.93	0.71	0.75
旱季 Dry season	最小值 Min. /%	7.86	7.78	7.61	7.68	3.48	4.86
	最大值 Max. /%	25.83	31.47	26.37	27.86	24.71	61.14
	均值 Mean/ %	17.59ABab	18.93Aa	17.00ABabc	16.57ABbc	15.26Bc	16.75ABbc
	变异系数 CV/ %	24.2	30.23	28.73	26.11	39.76	46.33
	偏度 Skewness	-0.06	0.14	-0.19	-0.15	-0.18	2.52
	峰度 Kurtosis	-0.39	-0.66	-0.98	-0.28	-1.35	14.52
	K-S 值 K-S value	0.53	0.93	0.58	0.75	0.12	0.14

移动且变化平缓,这可以从动态监测样地的具体情况得到解释,在坡的下部地形较为平坦,石砾含量较少,土壤含水量相对较高但土层较厚,为一种性质的斑块,在坡中上部正好相反,土壤持水性差。种植桂牧 1 号的动态监测样地,因受人为干扰和坡面呈凹型的原因,在 1420 m 范围内自相关系数在 0 附近上下波动。

2.3 土壤水分的空间结构

半变异函数分析表明(图 2),不同土地利用方式不同季节的试验半变异函数拟合模型不同,主要有高斯模型(Gaussian)、指数模型(Exponential)和球状模型(Spherical),理论模型的决定系数为 0.490—0.991,均比较高,残差为 2.52—53.30,均比较低,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 3 所示,除火烧外其他土地利用方式的土壤水分块金效应明显,较大的块金值(C_0)可能是因为石砾含量高,而石砾周围土层浅薄且蒸发强烈,从而有别于周围区域土壤性质,造成较大的块金值,基台值(C_0+C)是半变异函数达到的极限值,不同土地利用方式的基台值均很高,在 16.82—75.70 之间,这说明土壤水分的空间分布主要受地形和微地貌等固定因素控制,且土壤水分变异大致与平均含水量变化相反。块金值与

基台值之比反映了随机变异占总变异的大小,火烧和刈割雨季 $C_0/(C_0+C)$ 小于 25%,呈强烈的空间相关性,其余的在 0.26—0.50 之间,呈中等空间相关性。6 种土地利用模式的变程在 6.8—213 m 之间,表明在喀斯特地区较高的石砾含量尽管会改变局部地段土壤水分的空间分布,但表层土壤水分仍具有一定的空间连续性,其中火烧、刈割、刈割除根和封育在旱季随土壤水分含量降低变程增大,连续性变好,种植玉米和桂牧 1 号在旱季进行了收割,人为干扰严重而导致变程变小,破碎性增大。

2.4 土壤水分的空间格局

用 Kriging 方法制作的等值线图可以全面和直观地揭示喀斯特峰丛洼地不同土地利用方式下表层土壤水分雨季、旱季的空间分布格局(图 3)。同一土地利用方式旱季、雨季表层土壤水分的空间分布格局相似,不同土地利用方式的空间分布格局不同。火烧和刈割人为干扰导致植被格局分布不均,表层土壤水分分布的斑块破碎化程度高,规律不明显,这也是火烧和刈割土壤水分变程小的原因;封育呈凹型分布,表层土壤水分含量中间低两头高,刈割除根、种植玉米和桂牧 1 号 3 种土地利用方式表层土壤水分的空间分布均呈单峰分布,随海拔的升高而降低,且空间连续性好,变程大。

表 3 土壤水分半变异函数模型及参数

Table 3 Models and parameters of semivariogram for soil water content

	指标 Index	火烧 Burning	刈割 Cutting	刈割除根 Cutting plus with root	封育 Enclosure	玉米 Maize plantation	桂牧 1 号 Pasture of Guimu No. 1 plantation
雨季	模式 Model	Exponential	Exponential	Gaussian	Gaussian	Exponential	Spherical
Rainy season	块金值 C_0	0.01	3.62	20.83	22	21.4	14.8
	基台值 C_0+C	27.01	22.11	47.18	75.7	57.49	55.66
	$C_0/(C_0+C)$	0	0.16	0.44	0.29	0.37	0.27
	变程 A/m	6.8	17.2	42.7	45.5	213	71
	决定系数 R^2	0.064	0.918	0.991	0.974	0.708	0.844
	残差 RSS	37.2	2.85	2.52	28.5	29.7	53.3
旱季	模式 Model	Spherical	Gaussian	Exponential	Exponential	Gaussian	Gaussian
Dry season	块金值 C_0	0.01	18.37	16.59	10.83	20.9	34.8
	基台值 C_0+C	16.82	36.75	37.41	42.07	72.8	69.61
	$C_0/(C_0+C)$	0	0.5	0.44	0.26	0.29	0.5
	变程 A/m	16.8	23.8	172	213	73.8	43
	决定系数 R^2	0.49	0.935	0.694	0.879	0.953	0.954
	残差 RSS	3.01	11.5	14.8	7.17	15.2	22.5

3 讨论与结论

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。而且喀斯特区域降水时空分布不均,土层浅薄、土壤持水性能低、缺乏植被系统的调节,加上长期强烈的岩溶作用,形成了有别于其他地区特殊的二元水文结构,使得水源深埋、漏失,出现了湿润季节下特殊的干旱——岩溶干旱,目前,每年人畜饮水短缺达 3—4 个月。喀斯特峰丛洼地属亚热带季风气候,降雨量丰富又加上土壤有机质含量高,众多石块和较多的石砾上的水分源源不断的流入周围土壤之中,虽然喀斯特脆弱生态系统整体处于干旱状态,但土壤仍然存在着局部水分优势的环境,土壤含水量较高,即使是干旱季节,仍保持着 15.26%—18.93% 的水平,呈中等强度变异。6 种土地利用方式可以分成两类:一类是水源涵养型,包括火烧、封育和刈割除根,二类为水源消耗型,包括种植玉米、桂牧 1 号及刈割。

国内外许多学者应用地统计学探讨了水分的时空变异与环境因素、土壤侵蚀过程的关系^[22],我国的研究主要集中在黄土高原和沙漠化地区,而南方石漠化与北方沙漠化是制约我国西部地区可持续发展的两大生态环境问题,水资源的合理利用非常重

要。喀斯特峰丛洼地虽然土层浅薄、土被不连续,但土壤水分仍具有明显的空间结构和空间连续性,空间自相关系数在 0.159—0.465 之间,不同的土地利用方式具有相似的空间自相关,自相关函数随着滞后距离的增大由正向负转换,正负空间自相关的距离大致反映了性质相似斑块的平均半径,坡下部土壤含水量高,为正相关,坡中上部土壤含水量低,为负相关,在干旱季节随着土壤含水量降低,由正向负转化的拐点呈向坡上部移动的趋势。不同的土地利用方式的空间结构不同,但分别能够用高斯模型、指数模型、球状模型进行很好的拟合,所有模型均具有较大的块金效应,说明存在着不同程度的随机变异和实验取样误差,较高的基台值说明土壤水分空间结构由一些自然的固定因素控制,除火烧和刈割雨季处于强烈的空间自相关外,其他不同土地利用方式在不同季节均呈中等空间相关性,6 种土地利用模式的变程在 6.8—213 m 之间,旱季的变程有增大的趋势。不同的空间结构导致了不同土地利用方式下土壤水分空间分布格局不同,但同一土地利用方式在雨季和旱季的空间分布格局相似,火烧和刈割破碎化程度高,斑块小,封育的土壤水分呈凹型分布,中间低两头高,其他 3 种土地利用方法呈单峰分布,土壤水分随海拔和坡位的增高而降低。

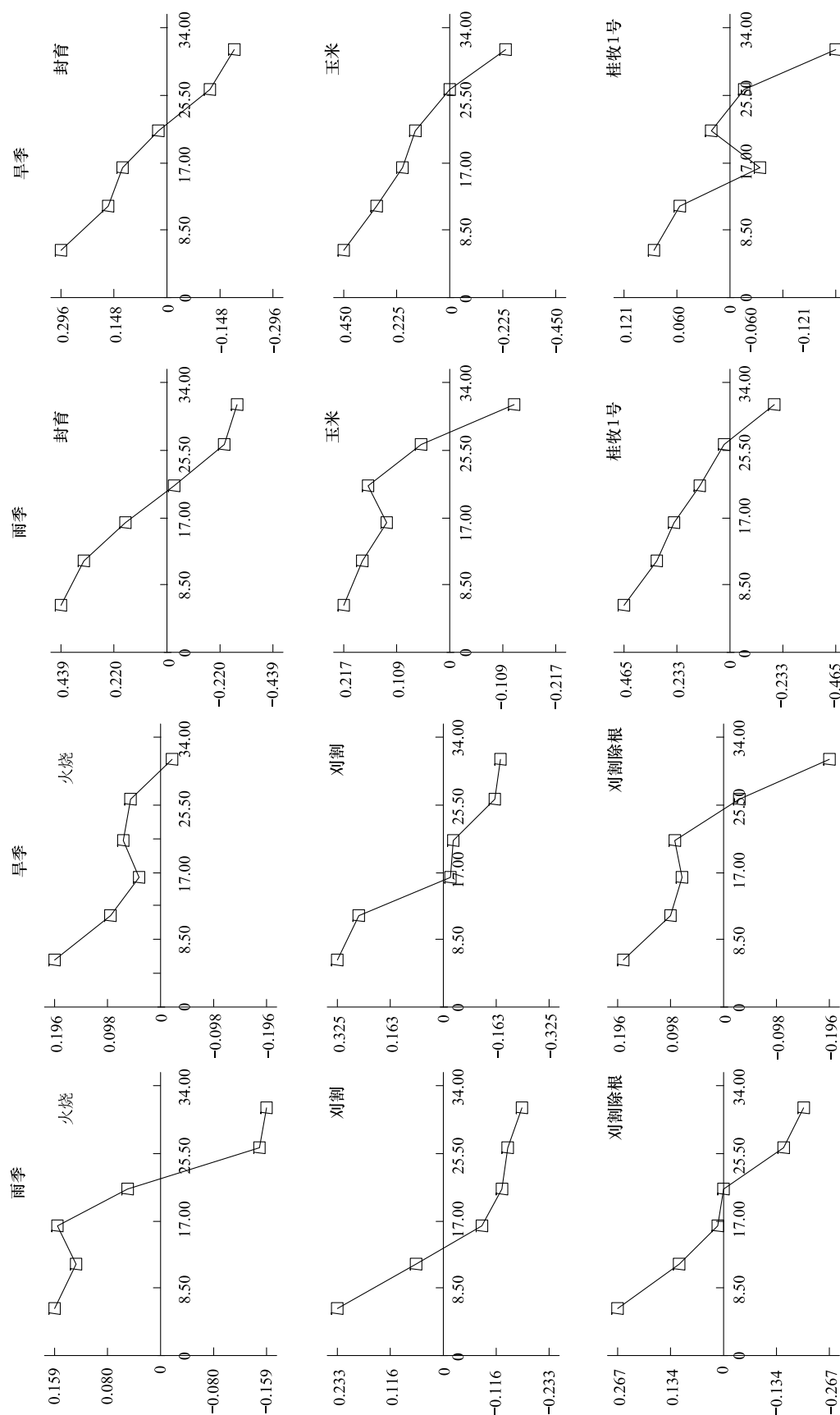


图1 土壤水分空间自相关
Fig.1 Spatial correlograms of soil water content

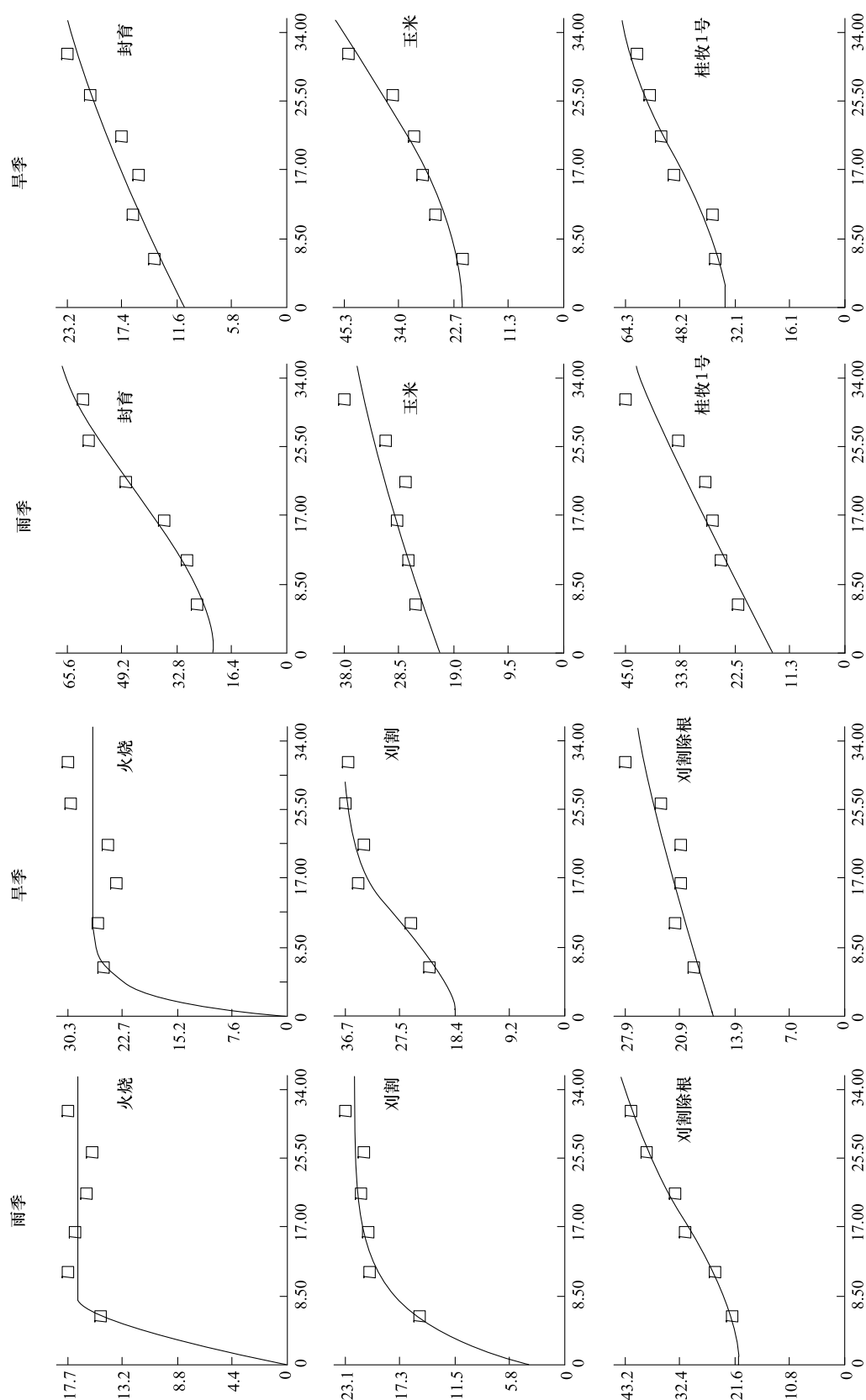


图 2 土壤水分的空间半变异函数图
Fig. 2 Semivariograms of soil water content

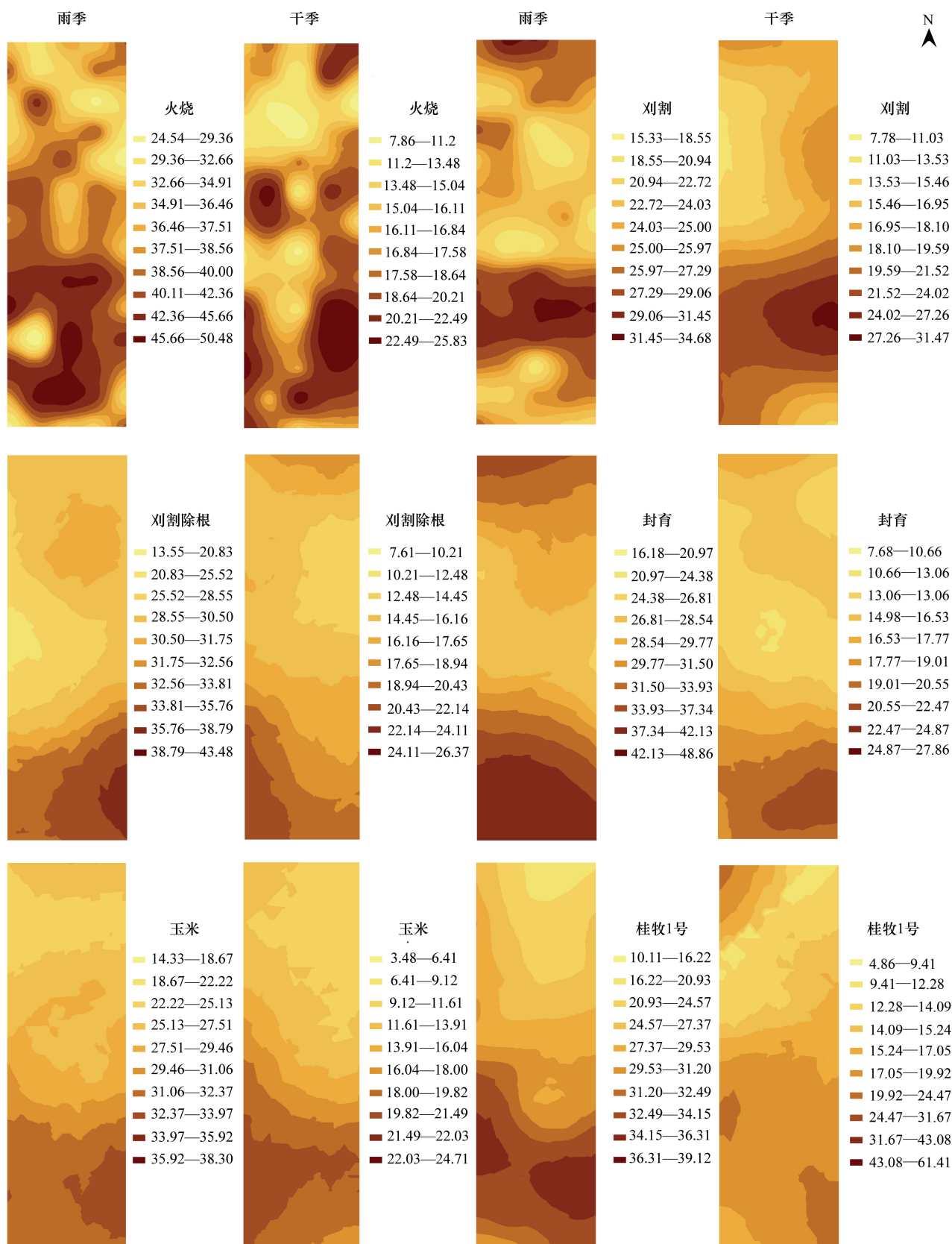


图3 土壤水分 Kriging 等值线分布图
Fig.3 Kriging contour maps of soil moisture

References:

- [1] Huggett R J. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: A critical review. *Catena*, 1998, 32(3/4): 155-172.
- [2] Song T Q, Peng W X, Yi W M, Xiao R L, Wang J R, Li S H, Luo W. 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*, 2006, 20(4): 191-194.
- [3] Western A W, Blöschl G, Grayson R B. Geostatistical characterization of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment. *Journal of Hydrology*, 1998, 205(1/2): 20-37.
- [4] Entin J K, Robock A, Vinnikov K Y, Hollinger S E, Liu S, Namkhai A. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 865-877.
- [5] Perry M A, Niemann J D. Analysis and estimation of soil moisture at the catchment scale using EOFs. *Journal of Hydrology*, 2007, 334(3/4): 388-404.
- [6] Qiu Y, F B J, Wang J, Zhang X L, Meng Q H. Spatiotemporal variation of soil moisture and its relation to environmental factors. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(1): 100-107.
- [7] Zhao Y, Peth S, Wang X Y, Lin H, Horn R. Controls of surface soil moisture spatial patterns and their temporal stability in a semi-arid steppe. *Hydrological Processes*, 2010, 24(18): 2507-2519.
- [8] Teuling A J, Troch P A. Improved understanding of soil moisture variability dynamics. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(5): 7-10.
- [9] Agro-climatic Subdivision of Guangxi Meteorological Administration. Utilization and Agro-climatic Resource in Guangxi. Beijing: China Meteorological Press, 1988.
- [10] Peng W X, Song T Q, Wang K L, Zeng F P, Wang J R. Controlling and restoration models of complex degradation of vulnerable Karst ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 811-820.
- [11] Yang M D, Liang H. The processes of evolution dynamic of cone Karst and the exploitation of the water resource. *Carsologica Sinica*, 2000, 19(1): 44-51.
- [12] Yu L F, Zhu S Q, Ye J Z, Wei L M, Chen Z R. Dynamics of a degraded Karst forest in the process of natural restoration. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 28(1): 1-7.
- [13] Li Y B, Wang S J, Li R L. Differences in natural characteristics for Karst ecosystems under different geological backgrounds as exemplified by Maolan and Huajiang ecosystems. *Earth and Environment*, 2004, 32(1): 9-16.
- [14] Wang S J, Li R L, Sun C X, Zhang D F, Li F Q, Zhou D Q, Xiong K N, Zhou Z F. How types of carbonate rock assemblages constrain the distribution of Karst rocky desertified land in Guizhou Province, P R China: Phenomena and mechanisms. *Land Degradation and Development*, 2004, 15(2): 123-131.
- [15] Du H, Peng W X, Song T Q, Wang K L, Zeng F P, Lu S Y, Shi W W, Tang C, Tan Q J. Plant community characteristics and its coupling relationships with soil in depressions between Karst hills, North Guangxi, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(3): 197-208.
- [16] Song T Q, Peng W X, Zeng F P, Wang K L, Qin W G, Tan W N, Liu L, Du H, Lu S Y. Spatial pattern of forest communities and environmental interpretation in Mulun National Nature Reserve, Karst cluster-peak depression region. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(3): 298-308.
- [17] Song T Q, Peng W X, Zeng F P, Wang K L, Cao H L, Li X K, Qin W G, Tan W N, Liu L. Community composition and biodiversity characteristics of forests in Karst cluster-peak-depression region. *Biodiversity Science*, 2010, 18(4): 355-364.
- [18] Song T Q, Peng W X, Zeng F P, Ouyang Z W, Wu H Y. Spatial heterogeneity of surface soil moisture content in dry season in Mulun National Natural Reserve in Karst area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(1): 98-104.
- [19] Wang Z Q. *Geostatistics and Its Application in Ecology*. Beijing: Science Press, 1999.
- [20] Goovaerts P. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 27(4): 315-334.
- [21] Liu F C, Shi X Z, Yu D S, Pan X Z. Characteristics of spatial variability of total soil nitrogen in the typical area of Taihu Lake basin. *Geographical Research*, 2004, 23(1): 163-170.
- [22] Zhang J G, Chen H S, Su Y R, Zhang W, Kong X L. Spatial variability of soil moisture in surface layer in depressed Karst region and its scale effect. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(3): 544-549.

参考文献:

- [2] 宋同清, 彭晚霞, 易文明, 肖润林, 王久荣, 李盛华, 罗文. 3种典型生物措施对亚热带红壤丘陵茶园季节性干旱的防御效果. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 191-194.
- [6] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 张希来, 孟庆华. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系. *生态学杂志*, 2007, 26(1): 100-107.
- [9] 广西壮族自治区气象局农业气候区划协作组. 广西农业气候资源分析与利用. 北京: 气象出版社, 1988.
- [10] 彭晚霞, 宋同清, 王克林, 曾馥平, 王久荣. 喀斯特脆弱生态系统复合退化控制与重建模式. *生态学报*, 2008, 28(2): 811-820.
- [11] 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.
- [12] 喻理飞, 朱守谦, 叶镜中, 魏鲁明, 陈正仁. 退化喀斯特森林自然恢复过程中群落动态研究. *林业科学*, 2002, 38(1): 1-7.
- [13] 李阳兵, 王世杰, 李瑞玲. 不同地质背景下岩溶生态系统的自然特征差异——以茂兰和花江为例. *地球与环境*, 2004, 32(1): 9-16.
- [15] 杜虎, 彭晚霞, 宋同清, 王克林, 曾馥平, 鹿士杨, 时伟伟, 唐成, 谭秋锦. 桂北喀斯特峰丛洼地植物群落特征及其与土壤的耦合关系. *植物生态学报*, 2013, 37(3): 197-208.
- [16] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 王克林, 覃文更, 谭卫宁, 刘璐, 杜虎, 鹿士杨. 木论喀斯特峰丛洼地森林群落空间格局及环境解释. *植物生态学报*, 2010, 34(3): 298-308.
- [17] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 王克林, 曹洪麟, 李先琨, 覃文更, 谭卫宁, 刘璐. 喀斯特峰丛洼地不同类型森林群落的组成与生物多样性特征. *生物多样性*, 2010, 18(4): 355-364.
- [18] 宋同清, 彭晚霞, 曾馥平, 欧阳资文, 吴海勇. 喀斯特木论自然保护区旱季土壤水分的空间异质性. *应用生态学报*, 2009, 20(1): 98-104.
- [19] 王政权. *地统计学及在生态学中的应用*. 北京: 科学出版社, 1999.
- [21] 刘付程, 史学正, 于东升, 潘贤章. 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.
- [22] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 张伟, 孔祥丽. 喀斯特洼地表层土壤水分的空间异质性及其尺度效应. *土壤学报*, 2008, 45(3): 544-549.