

喀斯特典型洼地土壤水分的垂直变异研究

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

(1. 中国科学院 亚热带农业生态研究所, 湖南 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 南京土壤研究所, 江苏 南京 210008; 4. 宜春学院 生命科学与资源环境学院, 江西 宜春 336000)

摘要: 利用 2005 年 5 月在桂西北喀斯特洼地 10 m × 10 m 地块范围内的网格 (2 m × 2 m) 采样数据, 用地统计学方法分析了两种土地利用类型 (耕地和牧草地) 0—80 cm 土壤水分的垂直变异结构及其分布格局。结果表明, 耕地和牧草地土壤水分呈现弱变异特征, 两者的垂直变异趋势大致随土层加深先减小后增大, 其中牧草地土壤水分的变异程度相对较大; 耕地和牧草地土壤水分在垂直层面均具有良好的半方差结构和较强的空间相关性, 均可用球状模型拟合, 变程分别是 66.0 cm 和 49.1 cm。垂直变异还具有明显的各向异性, 均用指数模型拟合; 土壤水分的空间相关性及其变程与土壤容重具有一定关系。研究显示, 洼地退耕还草后土壤总体上朝着有利于水分保蓄和植被恢复的方向转变。

关键词: 土壤水分; 喀斯特; 耕地; 牧草地; 垂直变异; 半方差

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2008)03—0005—07

中图分类号: 152.7

Vertical Variability of Soil Moisture in the Representative Depression Areas of Karst Region

ZHANG Ji-guang^{1,2,3}, SU Yi-rong^{1,2}, CHEN Hong-song^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, KONG Xiang-li⁴

(1. Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hun'an 410125, China;
2. Huanjiang Experimental Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China; 3. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China;
4. College of Life Science and Resource and Environment, Yichun University, Yichun, Jiangxi 336000, China)

Abstract: In the karst depression areas of Northwest Guangxi Zhuang Autonomous Region, grid sampling method (2 m × 2 m) was adopted in the square area (10 m × 10 m) and soil moisture content in 0—80 cm soil profiles at a 10 cm interval with two landuse types was measured in May, 2005. The vertical variability construction and distribution pattern were analyzed by the geo-statistics method. Results showed that cropland and grassland had weak variability. Their vertical variability decreased and then increased along with increased soil depth but grassland had greater spatial variability. Both cropland and grassland had good semi-variance structure and strong spatial correlation and could be well expressed by spherical model. The ranges of the two landuse types were 66 and 49.1 cm, respectively. They both had obvious anisotropy in vertical soil layers and could be fit with exponential model. It was also found that the spatial variability of soil moisture in vertical depth had a close relationship with soil physical properties under both landuse types. Conclusions from the research help to maintain soil moisture and promote vegetation restoration in the depression areas after the grain-for-green project.

Keywords: soil moisture; karst; cropland; grassland; vertical variability; semi-variance.

西南喀斯特地区与黄土高原同为我国贫困与环境退化问题最为突出的地区^[1], 喀斯特地区由于长期强烈岩溶化作用产生了地表地下双层空间结构, 地下

孔隙 (漏斗、裂隙、落水洞等) 特别发育, 地表水易流失、地下水位较深, 加上土层浅薄, 土壤持水性能差等因素, 致使该地区水土流失和石漠化十分严重, 生态

收稿日期: 2007-04-04

修回日期: 2007-10-03

资助项目: 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); 国家基金面上项目 (40671104); 国家科技支撑计划项目课题 (2006BAD05B06)

作者简介: 张继光 (1980—), 男 (汉族), 山东省潍坊市人, 博士研究生, 主要从事土壤环境生态和水土保持方面研究。E-mail: jiguang8002@163.com。

通信作者: 苏以荣 (1962—), 男 (汉族), 湖北省松滋市人, 研究员, 主要从事土壤生态研究。E-mail: yrsu@isa.ac.cn。

环境极为脆弱^[2-3]。土壤持水性能差是喀斯特地区生态环境脆弱的限制性因素,它决定着植被的生长、恢复和演替等过程,最终影响到喀斯特地区水土流失和石漠化的治理效果。土壤水分作为联系地表水与地下水的纽带,是 SPAC 系统中“四水转化”的重要一环^[4],也是决定生态系统结构和功能的关键因子。喀斯特地区由于土壤的非均质性和不连续性,土壤水分存在极大的空间异质性。对土壤水分空间变异特性及其分布格局进行研究,不仅有利于土壤水分的科学管理和高效利用,而且对植被演替、生物生产力和生态系统稳定性也具有重要作用^[5]。虽然国内外学者对不同地区土壤水分的空间结构、分布格局和影响因素等,从不同尺度都作了细致的分析,但土壤水分空间变异多为水平方向的变化研究^[6-15],涉及垂直方向的变异研究较少^[16-17]。而土壤水分在垂直方向常有较大变异,特别是在喀斯特地区尤为突出。因此,本文选择喀斯特峰丛洼地这一特殊地貌类型,通过研究洼地田间尺度上两种土地利用类型下土壤水分的垂直变异结构及其分布格局,旨在揭示该地区土壤水分的剖面变异特征,为喀斯特地区土壤水分的高效利用和退化生态系统的恢复重建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区环江毛南族自治县下南乡古周村(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,耕地、退耕地、自然坡地等不同土地利用类型在研究区分异明显,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 3 344~4 134 MJ/m²,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,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,质地较黏重,阳离子交换量和盐基饱和度较高,土体与基岩面过渡清晰,土壤肥力较为贫瘠。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品的采集与测定 试验地位于研究区洼地中部,呈东北—西南走向,土壤质地是粉壤黏土。

由于地块较为破碎,选择紧邻且有代表性的两种主要土地利用类型——耕地和人工牧草地,其中耕地种植作物为玉米套种大豆;两者的年平均产量分别为 4 500 kg/hm²和 1 500 kg/hm²。牧草地于 2001 年由耕地退耕后种植多年生牧草——桂牧 1 号;年平均收割产量为 7.5 × 10⁴ kg/hm²,测定时,正值玉米的大喇叭口期,在样地内选择微地形条件一致、地势平坦的区域,分别设置大小均为 10 m × 10 m 网格,内套 2 m × 2 m 的小网格 25 个。于 2005 年 5 月 10 日在每个小网格内用内径 3.5 cm 的土钻随机取 3 个样点,每个样点间隔 10 cm 分层采样,采样深度为 80 cm,共设采样点 75 个,小网格间采样点的平均间距为 2 m,最后取其平均值代表每个网格的平均含水量。在取样完成后用 105℃ 烘干法测定各层土壤含水量。并通过土壤剖面取样测定两样地土壤的基本理化性质(表 1)。其中土壤容重用环刀法,机械组成采用吸管法,pH 值采用电极电位法测定。有机质采用重铬酸钾氧化—外加加热法测定,全氮使用碳氮自动分析仪测定,全磷采用 NaOH 熔融—紫外分光光度法,全钾采用 NaOH 熔融—原子吸收法。

1.2.2 土壤水分的地统计学分析 研究区域内各土地利用类型中不同空间位置的土壤水分与样点的空间位置有关,是空间距离的函数,考虑所有间隔距离上任意两点间土壤水分的空间变异特征,可用半变异函数进行描述^[6, 21-22]:

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

式中: $N(h)$ ——间隔距离等于 h 时的样点对数; $Z(x_i)$ ——样点 Z 在位置 x_i 的实测值; $Z(x_i + h)$ ——与 x_i 距离为 h 处样点的值。

根据实测值计算耕地和牧草地在垂直方向上土壤水分的半变异函数,并建立半变异函数的理论模型。本研究中适合土壤水分实际变异函数的最优理论模型是球状模型和指数模型,其数学表达式如下:

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

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

式中: C_0 ——块金值; $C_0 + C$ ——基台值; h ——滞后距离; a ——变程。其中球状模型的变程等于自相关距离 a ,指数模型并不表现出有限变程,实际应用中变程值近似用 $3a$ 表示^[6, 8, 22]。

本研究中对土壤水分的无偏最优估计采用点状克立格法,即在某区域内, $Z(x_0)$ 为变量在位置 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, ..., n), 则 x_0 处的估值可用 $Z(x_i)$ 的线性组合来估测:

$$Z(X_0) = \sum_{i=1}^n w_i Z(x_i) \quad (4)$$

式中: w_i 是与 $Z(X_i)$ 位置有关的权重系数。通过达

到线性无偏和最小估计方差可得到该变量在 x_0 处的最优估计值。

试验数据的统计分析和绘图主要采用 SPSS 11.5, DPS 3.01 和 SURFER 6.0 等软件完成。

表1 试验地不同土层的土壤特征

土地类型	土层深度/cm	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	砂粒/ %	粗粉粒/ %	细黏粒/ %	质地	pH	有机质/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全氮/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全磷/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全钾/ ($g \cdot kg^{-1}$)
耕地	0—10	1.15	5.46	12.32	43.95	黏	7.18	26.3	1.35	0.85	9.88
	10—20	1.16	12.04	15.63	31.75	粉黏	7.36	24.12	1.17	0.97	9.09
	20—30	1.35	7.19	16.87	42.08	黏	7.58	15.93	0.89	0.65	11.14
	30—40	1.35	4.14	15.44	27.65	黏壤	7.38	4.28	0.27	0.67	12.61
	40—50	1.45	6.73	13.14	48.3	黏	7.56	2.38	0.17	0.52	12.84
	50—60	1.42	10.04	14.22	39.91	壤黏	7.69	1.23	0.12	0.46	14.81
	60—70	1.48	18.05	21.44	24.72	黏壤	7.88	0.85	0.08	0.43	13.61
	70—80	1.49	9.21	15.91	41.43	黏	7.77	0.79	0.06	0.43	14.02
牧草地	0—10	1.35	7.38	15.07	45.98	黏	6.69	23.80	1.23	0.81	8.08
	10—20	1.24	2.56	9.67	53.66	黏	6.91	16.18	0.94	0.89	8.66
	20—30	1.29	25.32	22.45	18.50	粉壤	7.02	10.57	0.70	0.53	10.48
	30—40	1.55	6.70	20.08	35.51	壤黏	7.15	6.77	0.45	0.50	11.42
	40—50	1.49	16.20	22.5	25.24	黏壤	7.37	6.17	0.40	0.49	13.47
	50—60	1.51	30.06	23.75	13.58	粉壤	7.37	1.78	0.13	0.41	13.14
	60—70	1.48	23.11	22.63	16.58	粉壤	7.41	1.24	0.10	0.35	14.47
	70—80	1.49	2.69	13.07	49.52	黏	7.51	0.97	0.09	0.41	14.13

注: 表示土壤质地采用中国制分类标准。

2 结果与讨论

2.1 土壤水分的描述统计分析

两种土地类型下土壤含水量在不同土层的统计特征见表2。耕地土壤含水量随土层加深不断增大(30—40 cm 除外), 牧草地则表现为先减小后增大, 其中耕地在 30—40 cm, 牧草地在 10—20 cm 层的含水量最低, 这主要与玉米和牧草的根系分布层次相联系。而且, 两种土地利用类型的土壤水分均呈弱变异特征($C_v < 10\%$, 但牧草地 70—80 cm 层稍大), 其中牧草地土壤水分的变异程度整体较耕地大, 但是两者的变异趋势大致相同, 均表现为变异随土层加深先减小后增大。变异程度最大的是底层土壤含水量, 这可能由于该地区存在地表地下双层空间结构, 地下水位较深且渗漏严重, 土层浅薄且石丛遍布, 因而对深层土壤含水量产生较大影响; 其次是 0—10 cm 的土壤含水量, 这主要是由于受地表微气候条件和人为活动等因素的影响较大所致; 变异最小的分别是耕地 10—20 cm 和牧草地 30—40 cm 的土壤含水量, 由于 10—20 cm 属于耕地耕层范围, 经常受耕作措施的影响

可能使该层的变异得到一定程度的平滑。牧草地的 30—40 cm 一方面受地表气候因子和上部根系的影响较小, 另一方面底部石块对该层含水量的影响也较小, 从而使得变异程度很小, 土壤水分相对较稳定。

2.2 土壤水分的垂直变异性分析

在空间结构分析中, 块金值通常表示由于试验误差和小于试验取样尺度所引起的变异, 块金值较大表明较小尺度上的某种过程不容忽视^[8,10,22]。从表3可以看出, 牧草地的块金效应较小, 说明在该取样尺度下, 影响土壤水分垂直变异过程的作用较小。耕地具有较大的块金值, 表明其土壤水分随机部分的空间异质性在垂直方向上要远大于牧草地, 这主要是由农垦活动(翻耕、施肥等)、因子本身及测定误差等因素共同引起的。

牧草地在垂直方向上的基台值比耕地大, 这说明牧草地垂直方向上的变异程度要比耕地大, 这可能是由于牧草地的植被盖度大, 根系分布密集, 强烈的地面蒸散和根系吸收易造成近地面土壤水分变化剧烈; 而且牧草地又濒临石丛分布区, 石丛也会影响到土壤含水量的剖面变化^[20]。块金值与基台值之比可以用

来表明系统变量空间相关性的程度;如果比值 < 25%,说明变量具有强烈的空间相关性;在 25%~75%之间,变量具有中等程度的空间相关性;如果 > 75%时,变量的空间相关性很弱^[10]。耕地和牧草地土壤水分在垂直方向上块金值与基台值之比分别为 33.53%和 0.16%,说明耕地具有中等的空间相关性,牧草地则表现出强烈的空间相关性。牧草地剖面水分随机部分的空间变异占总空间变异的比例较小,说明在牧草地中不存在更小尺度(如牧草株间尺度)的土壤水分空间格局,即小尺度上的土壤过程可以忽略。两种土地类型土壤水分在各自变程内存在较强空间相关性,说明土壤水分的垂直分布主要是由结构性因素起作用的结果。然而耕地和牧草地剖面土壤水分的空间相关性和变程具有一定差异,结合表 1 数据可以发现,这可能与土壤容重和黏粒含量具有一定关系。

土壤平均容重越大,显示该类型的土壤水分在垂直方向的变程越小,空间相关性越强,这与李红等在北京郊区的研究结果类似^[16]。土壤容重的变化主要是由人类活动(土地利用方式改变或耕耘等)引起的。

而黏粒含量越低,土壤水分在垂直方向的变程越小,空间相关性越强,这与其研究结论不同,这可能与土地利用改变引起的土壤质地发生变化而对水分的间接作用有关。因而,土壤物理性质与空间相关性产生联系的内在原因以及是否存在确定规律还需作进一步的研究。

耕地和牧草地的最优模型均为球状模型,决定系数分别是 0.94 和 0.64,拟合效果较好,模型显示两者在垂直方向的变程分别为 66.0 cm 和 49.1 cm(表 3,图 1)。在该范围内,剖面土壤水分具有空间自相关特性,可以通过空间局部插值进行预测;超出则不存在空间自相关。变程大小不但与选取的取样尺度有关,而且还与该尺度下影响土壤水分各种过程的空间相互作用有关^[10-11],变程较大反映出喀斯特洼地虽然微地形复杂、影响因素多样,但剖面土壤水分仍显示出较好的空间连续性,这可以在土壤的剖面采样策略中得到应用。一般在块金效应较小时,采样间隔应以半变异函数变程的 1/2 为限^[8,10]。因此,本研究中所用的取样间隔(10 cm)能够满足喀斯特洼地土壤水分垂直变异分析需要。

表 2 不同土地利用类型下土壤水分描述统计值

土地类型	土层深度/ cm	均值/ %	最大值/ %	最小值/ %	标准差/ %	变异系数/ %	偏度	峰度
耕地	0—10	26.92	29.85	24.66	1.29	4.79	0.44	0.50
	10—20	26.97	28.24	25.44	0.80	2.95	-0.04	-1.06
	20—30	27.00	28.22	25.33	0.83	3.08	-0.57	-0.71
	30—40	26.65	28.88	24.26	1.35	5.06	0.04	-0.73
	40—50	27.63	30.29	24.75	1.41	5.10	-0.40	0.30
	50—60	28.12	33.41	26.23	1.70	6.05	1.70	3.23
	60—70	28.68	32.08	25.51	1.82	6.33	0.27	-0.68
	70—80	28.54	32.23	24.48	1.88	6.60	0.36	0.09
	0—80	27.56	29.48	26.27	0.92	3.34	0.63	-0.32
牧草地	0—10	27.36	29.77	23.49	1.68	6.15	-0.49	-0.68
	10—20	25.91	29.42	23.85	1.24	4.80	1.04	1.31
	20—30	26.96	31.47	24.91	1.35	5.00	1.63	4.04
	30—40	27.52	28.84	24.39	1.03	3.75	-1.13	2.10
	40—50	28.68	32.53	26.14	1.47	5.12	0.63	0.63
	50—60	28.63	33.85	25.87	1.84	6.42	0.80	1.51
	60—70	29.10	36.55	26.27	2.33	8.02	1.61	3.51
	70—80	29.63	38.51	25.96	3.19	10.76	1.67	2.84
	0—80	27.97	30.66	26.29	1.09	3.89	0.48	0.45

表 3 土壤水分垂直空间变异的半方差特征参数

土地利用类型	块金值	基台值	块金基台比/ %	变程/ cm	理论模型	决定系数 R^2	残差平方和
耕地	1.13	3.37	33.53	66.0	球状	0.94	4.25
牧草地	0.01	6.28	0.16	49.1	球状	0.64	7.84

耕地和牧草地土壤含水量垂直层面的空间结构具有一定差别。而且经计算,牧草地 0—80 cm 层的土壤储水量比耕地平均提高 6.7%,而且土壤各层储水量的差异也十分显著。综合上述分析可以看出,退

耕后种植人工牧草,会在一定程度上引起土壤容重变化,改变剖面土壤水分的空间结构及其分布格局,使土壤总体上朝着有利于水分保蓄和植被恢复的方向转变。

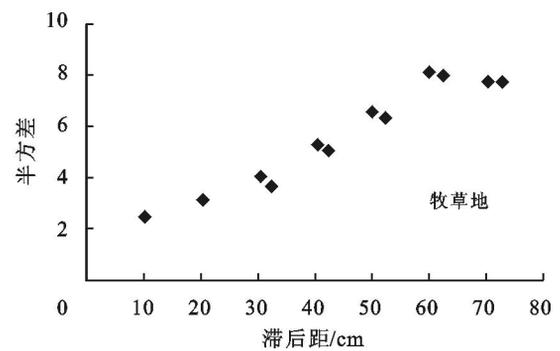
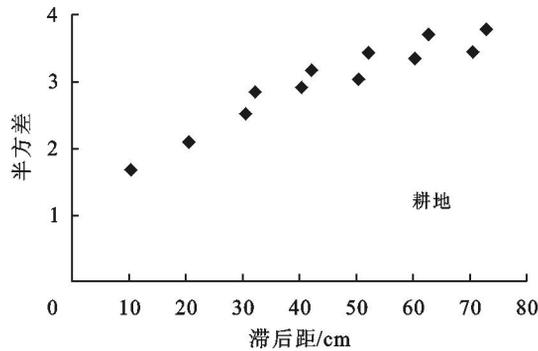


图 1 洼地土壤水分垂直变异的半方差图

2.3 土壤水分垂直变异的各向异性及其格局分析

一般土壤性质的空间变异具有方向性,土壤水分的变异也不例外。在不同方向上,由于微地形、地貌、土壤物理性质(如容重、毛管持水量等)、土地利用类型、植被盖度以及根系分布等因子的作用,会导致不同方向上土壤水分表现出不同的变异规律^[23]。如果变异函数在两个方向上的变化相似,变异函数的各向异性比值则在 1 附近波动。通过对比两种土地类型土壤水分垂直方向各向异性的半方差参数可以看出(表 4),耕地和牧草地的各向异性特征表现出一致趋势,块金效应不存在,NE 90°方向的基台值比 SE 0°方向大,而且均可以用指数模型拟合,变程在 30.3 cm 左右波动,土壤水分表现出一定的剖面连续性。

但牧草地在两个方向上的变异程度均大于耕地。

从图 2 两种类型土壤水分在垂直剖面 SE 0°和 NE 90°方向上的各向异性比可以看出,耕地和牧草地土壤剖面水分均具有明显的各向异性特征,耕地在 4 m 范围内,NE 90°方向上的变异稍大于 SE 0°方向上的变异;在 4—8 m 间,各向异性比在 1 附近波动,可以认为是接近各向同性的。牧草地土壤水分在整个研究尺度上,NE 90°方向变异均大于 SE 0°方向的。由于 SE 0°方向是两侧峰丛间所夹的狭长地带,NE 90°是两侧峰丛对应坡面的自然延伸方向,这种特殊的地形地貌特征使得在喀斯特峰丛洼地剖面土壤水分中,一般存在 NE 90°方向的变异比 SE 0°方向的大。

表 4 土壤水分空间各向异性的半方差特征参数

土地类型	各向异性	块金值	基台值	变程/cm	理论模型	决定系数 R ²	残差平方和
耕地	SE 0°	0	1.67	30.2	指数	0.91	0.026
	NE 90°	0	1.82	30.3	指数	0.94	0.013
牧草地	SE 0°	0	3.33	30.3	指数	0.65	0.211
	NE 90°	0	5.11	30.3	指数	0.74	0.136

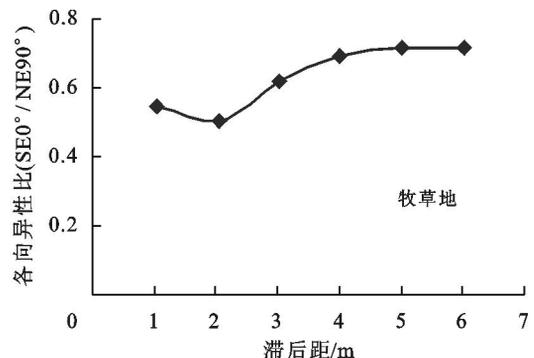
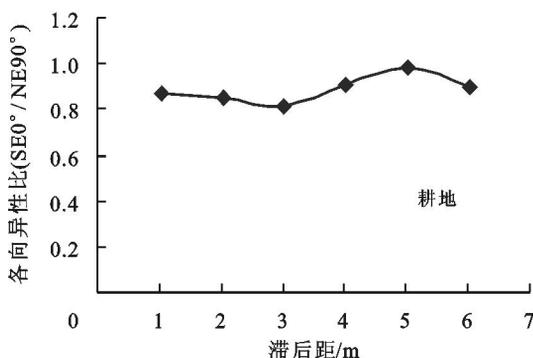


图 2 洼地土壤水分垂直变异性在 SE 0°和 NE 90°方向上的各向异性比

在土壤水分垂直变异结构及其各向异性特征分析基础上,利用克里格法对未采样区进行空间局部插值,做出了耕地和牧草地在 SE 0° 和 NE 90° 两个方向上土壤水分垂直变异的分布图(图 3),从图中可以看出,土壤水分明显地呈现带状或斑块状分布,垂直层次变化明显,而且土壤水分在剖面 SE 0° 和 NE 90° 方向的变异差异也得到直观体现。此外两种土地类型在各自垂直层面上具有不同特点,牧草地由于地

面蒸发及根系吸收等原因使得表面 0—30 cm 层的土壤含水量明显降低,底层由于受附近石丛和深层石块等的影响使含水量较高且变化明显,耕地也有类似趋势但低含水量层次下移。

总之,由于受研究地块的植被类型、地形和微地貌(石丛、漏水洞等)等因素的影响,造成了耕地和牧草地在 SE 0° 和 NE 90° 方向上土壤水分不同的垂直分布格局。

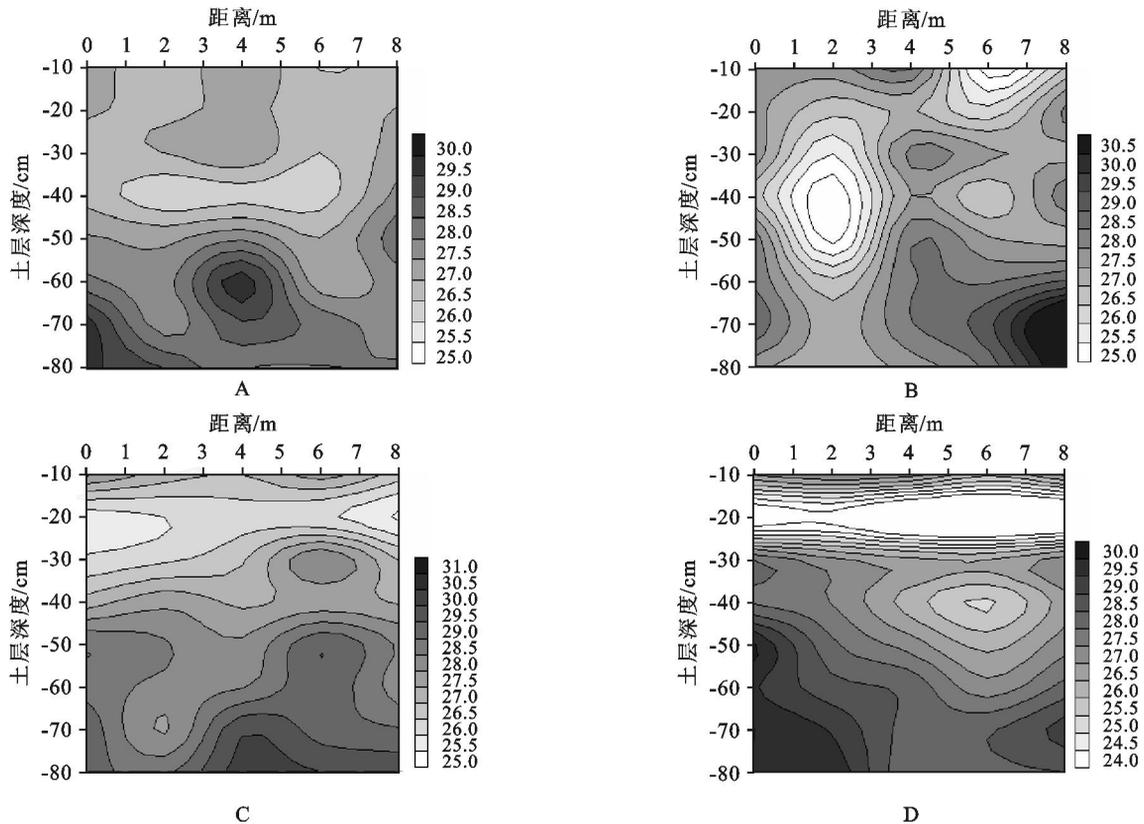


图 3 土壤水分在垂直方向上的等值线图

注:A、B 分别表示耕地 SE 0° 和 NE 90° 方向; C、D 表示牧草地 SE 0° 和 NE 90° 方向的土壤水分分布

3 结论

(1) 在典型喀斯特洼地中,耕地的土壤含水量随土层加深不断增大(30—40 cm 除外),牧草地则由于强烈的地面蒸发散和根系吸收先减小后增大。两者基本上都呈现弱变异特征,但牧草地的变异程度相对较大。半方差分析表明,在垂直方向上牧草地比耕地的块金效应小,但受植被盖度和石丛分布等因素的影响,基台值却相对较大。而且两者在垂直方向上分别表现出中等和强烈的空间相关性。变程分别为 66.0 cm 和 49.1 cm,反映出喀斯特洼地虽然微地形、地貌复杂,但剖面土壤水分仍具有较好的空间连续性。

(2) 耕地和牧草地剖面土壤水分的空间相关性和变程均具有一定差异,这可能与土壤容重有一定关

系,容重越大,空间相关性越强,变程则越小,但其中原因以及是否存在规律还需作进一步的研究。由于研究区特殊的地形、地貌和植被等特征,使得土壤水分垂直变异具有显著的各向异性,而受植被类型、地形和微地貌等因素的影响,土壤水分在垂直层面上呈现出明显的带状或斑块状分布格局。

(3) 退耕后种植人工牧草导致了土地利用方式的改变,由此引起洼地中剖面土壤容重和机械组成的变化,而且土壤水分的垂直变异结构及其分布格局也发生变化。这在一定程度上增加了剖面储水量,结果显示土壤总体上朝着有利于水分保蓄和植被恢复的方向转变。本研究不仅能指导土壤水分的剖面取样设计,而且可以为峰丛洼地土壤水分的优化管理和高效利用,喀斯特退化生态系统的恢复重建提供理论依据。

[参 考 文 献]

- [1] 蔡运龙. 中国西南岩溶石山贫困地区的生态重建[J]. 地球科学进展, 1996, 11(6): 602—606.
- [2] 李阳兵, 侯建筠, 谢德体. 中国西南岩溶生态研究进展[J]. 地理科学, 2002, 22(3): 365—370.
- [3] 陈洪松, 王克林. 岩溶干旱特征及其治理对策[J]. 农业现代化研究, 2004, 25(专刊): 70—73.
- [4] 朱首军, 丁艳芳, 薛泰谦. 农林复合生态系统土壤水分空间变异性和时间稳定性研究[J]. 水土保持研究, 2000, 7(3): 56—48.
- [5] 陈伏生, 曾德慧, 陈广生, 等. 不同土地利用方式下沙地土壤水分空间变异规律[J]. 生态学杂志, 2003, 22(6): 43—48.
- [6] 李哈滨, 王政权. 空间异质性定量研究理论与方法[J]. 应用生态学报, 1998, 9(6): 651—657.
- [7] 李子忠, 龚元石. 不同尺度下田间土壤水分和混合电导率空间变异与套合结构模型[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(3): 255—261.
- [8] Western A W, Bloschl G, Grayson R B. Geostatistical characterization of soil moisture patterns in Tarrawarra catchment[J]. Journal of Hydrology, 1998, 205(1/2): 20—37.
- [9] Western A W, Bloschl G. On the spatial of soil moisture[J]. Journal of Hydrology, 1999, 217(3/4): 203—224.
- [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[J]. 地理学报, 2000, 55(4): 428—438.
- [11] Fitzjohn C, Ternan J L, Williams A G. Soil moisture variability in a semi-arid gully catchment: implications for runoff and erosion control [J]. Catena, 1998, 32(1): 55—70.
- [12] 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 [J]. Phys. Chem. Earth (B), 2001, 26: 629—634.
- [13] 王玉宽, 朱波, 高美容. 小流域土壤水分空间分异特征及时稳性分析[J]. 山地学报, 2004, 22(1): 116—120.
- [14] 潘成忠, 上官周平. 黄土半干旱丘陵区陡坡地土壤水分空间变异性研究[J]. 农业工程学报, 2003, 11(19): 5—9.
- [15] 陈蓉蓉, 周治国, 曹卫星, 等. 基于 GIS 的农田作物土壤特征空间变异性及其数量关系[J]. 应用生态学报, 2004, 15(9): 1678—168.
- [16] 李红, 周连第, 张有山. 京郊平原区粮田土壤水分垂直变异性的半方差表征[J]. 华北农学报, 2003, 18(1): 111—113.
- [17] Helmut Schume, Georg Jost, Klaus Katzensteiner. Spatio-temporal analysis of the soil water content in a mixed Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.]: European beech (*Fagus sylvatica* L.) stand [J]. Geoderma, 2003, 112: 273—287.
- [18] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 等. 喀斯特地区典型峰丛洼地地表层土壤水分空间变异及合理取样数研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 114—117.
- [19] 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[J]. 土壤学报, 2006, 43(4): 554—562.
- [20] Cousin I, Nicoullaud B, Coutadeur C. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil [J]. Catena, 2003, 53(2): 97—114.
- [21] 周慧珍, 龚子同. 土壤空间变异性研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(3): 232—241.
- [22] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 69—97.
- [23] 刘贤赵, 衣华鹏. 渭北旱塬土壤水分空间变异性[J]. 山地学报, 2004, 22(5): 521—527.