

# 四川盆地丘陵区土壤水分空间变异 及其时间稳定性分析

王改改, 魏朝富\*, 吕家格, 张卫华  
(西南大学资源环境学院, 重庆 400751)

**摘要:** 土壤水分在空间分布上的不均匀性以及空间分布结构在时间上的稳定性, 对深入理解土壤水分空间变异具有重要的意义。在四川盆地丘陵区旱坡地选取  $150\text{ m} \times 150\text{ m}$  的地块范围, 利用传统统计学、地统计学以及时间稳定性指数对土壤水分空间变异特征及时间稳定性的进行了分析。结果发现: 在垂向变异上, 土壤水分变异含量随深度的增加而降低, 变异系数则相反; 在空间变异结构上,  $0\sim 30\text{ cm}$  土壤水分的基台值、块金效应在不同时间发生明显波动, 但仍以空间相关性为主,  $30\sim 40\text{ cm}$  的块金效应波动小, 空间自相关程度高且比较稳定; 球状、指数、高斯模型可用来模拟土壤水分的空间变异; 空间分布格局均呈基本带状分布; 土壤水分的相对值在 1 左右波动, 稳定性指数各随土壤深度的增加而降低。

**关键词:** 土壤水分; 垂向异质性; 空间变异结构; 空间分布; 时间稳定性

**中图分类号:** S151

**文献标识码:** A

土壤水分在空间分布上的不均匀性以及这种不均匀性在时间上的稳定性问题, 是土壤水分变异的重要内容, 对分析模拟土壤溶质的流体运动和物质迁移过程、进行流域水文过程模拟和优化农业生产活动具有重要的意义<sup>[1]</sup>。目前研究者研究了不同尺度下土壤水分的空间变异及其分形特征, 也发现了土壤水分在空间上的分布具有时间稳定性<sup>[2,3]</sup>。而现有的土壤水分空间变异的研究多侧重于土壤水分空间变异结构的研究, 或侧重于土壤水分时间稳定性分析, 而将空间变异结构和空间变异结构的时间稳定性的定量研究结合起来研究的并不多见<sup>[4-9]</sup>。无论是土壤水分的空间变异还是这种变异在时间上的稳定性均严重依赖所研究的时空尺度<sup>[4-7]</sup>, 深入研究不同时空尺度下土壤水分的时空变异具有重要意义。四川盆地丘陵区降水资源分布

不均匀, 土壤类型复杂多样, 山地复杂的水文过程又进一步增加了土壤水分在空间分布的复杂性。除此以外, 季节性的干旱、伏旱时有发生, 也严重影响了当地的农业生产。因此本文将地统计学与较低时间频率(每隔 5 d)的土壤水分监测数据相结合, 研究紫色土土壤水分的空间变异规律及其在时间上的稳定性, 以期理论上进一步丰富现有土壤水分时空变异的研究内容, 实践上为农业管理的因地制宜提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区基本概况

本研究在重庆合川高隆镇冠山村的旱地进行。研究区 ( $30^{\circ}08'N$ ,  $106^{\circ}22'E$ ) 海拔 230 m, 属东亚季

收稿日期 (Received date): 2008-06-09; 改回日期 (Accepted): 2008-10-15.

基金项目 (Foundation item): 教育部科技创新工程重大项目培育资金项目资助: 四川盆地紫色土丘陵区降水资源化与农业生态系统耦合机理研究 (编号: 706049) [Supported by the Cultivation Fund of the Key Scientific and Technical Innovation Project Ministry of Education of China Coupling mechanism of precipitation's availability and agroecosystem in hilly areas of purple soils Sichuan Basin (No. 706049)]

作者简介 (Biography): 王改改 (1981-), 女, 河南人, 博士研究生, 主要从事土壤物理研究。[Wang Gaigai (1981-), female, was born in Henan PhD candidate. Be engaged in mostly the research about soil physics.] E-mail wanggaiga@yahoo.cn

\* 魏朝富, 男, 研究员。[Wei Chaofu male, professor.] E-mail weic@swu.edu.cn.

风环流控制区, 为中亚热带湿润气候, 具有春早、夏长、秋短、冬迟, 及冬暖夏热、无霜期长、雨量充沛、季节地区分配不均、秋季多绵雨、冬季寒潮不易侵入、春季气温不稳定、夏季常有焚风等特点。多年平均温度 18. 10℃, 年际间平均气温变化不大。雨量在季节分配上极不均匀, 多集中在 5~ 9月, 占年降雨量的 70%, 其中 5、6、9月雨量最大, 7、8月相对减少, 常出现伏旱。土壤为侏罗系沙溪庙组紫色砂泥岩发育的灰棕紫泥土。

1. 2 数据来源与处理

在 150 m × 150 m 的网格上, 采用 5 m × 5 m 小网格设置 30个取样点, 每隔 5 d分 0~ 5 cm、5~ 10 cm、10~ 20 cm、20~ 30 cm、30~ 40 cm 层采取土壤样品, 并用烘干法获得土壤水分含量 (质量含水量 / (%))。根据本区 8月至 9月土壤水分受降水影响变异较大的特点, 选取 8月 20日到 9月 20日时间间的土壤水分研究其空间变异及在时间上的稳定性。地统计分析用 ArcGIS中的 Geostatistical Analyst 模块 (包括样本数据的统计分析、异常值的剔除), 土壤水分的空间变异结构采用半方差理论。土壤水分空间分布格局采用普通克立格 (Kriging) 方法插值。

时间稳定性的定量化评价主要采用 Pachepsky et al (2005) [10] 提出的方法。即

$$\beta_{ijk} = \frac{\theta_{ijk}}{\theta_{kj}} \tag{1}$$

式中  $\theta_{ijk}$ :  $i$  监测点  $j$  时刻  $k$  深度测得的土壤水分含量, 其中

$$\bar{\theta}_{kj} = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} \theta_{ijk} \tag{2}$$

式中  $N_k$  为  $k$  深度的监测点个数

$$T_{ik} = \beta_{ik} (p = 0. 95) - \beta_{ik} (p = 0. 10) \tag{3}$$

式中  $T_{ik}$  采样点深度的时间稳定性指数, 值越大,

时间稳定性越差。

2 结果和分析

2. 1 土壤水分的垂向异质性

对采样点的土壤水分数据进行经典统计学分析, 其结果见表 1。土壤水分受降水强度、土壤质地及土壤蒸发差异的影响, 土壤水分往往表现出显著的垂直异质性。由表 1可见 0~ 5 cm 土层土壤水分平均含水量低于其他土层的土壤含水量, 变异系数高于其他土层, 即土壤水分含量随着土壤深度的增加而增加, 而土壤水分的变异系数随着土壤深度的增加而降低。说明表层土壤水分含量较低、变异程度较大, 而深层土壤水分状况较好且变异程度较小, 和其他地区的变异基本相同 [10-11]。对此, 目前较为普遍的认识是表层土壤为降水到达地面时最先承接的部位, 其土壤含水量变化对降水最为敏感, 雨后该层土壤水消耗也快, 该层也是物根系分布的密集层, 层内土壤水分受蒸散法影响最大, 所以表层土壤水分变异系数一般最大。而土壤水分的垂向空间变异可能与采样频率有关, 增加采用频率可能导致各层土壤水分的垂向变异系数发生变化。而本研究在每间隔 5 d天进行采样分析, 发现各层土壤水分的变异系数并没有发生明显变化。土壤水分含量的峰度和偏度在 - 1~ 1之间波动, 符合正态分布, 可采用空间变异函数进行分析。

2. 2 土壤水分的空间变异结构

土壤水分的空间变异通过趋势分析发现在东西方向上具有明显的波动的趋势, 呈现出各向异性, 采用各向异性的克里格插值法对土壤水分空间变异进行分析, 结果见表 2。从表 2可以看出, 不同土层在所研究时间内表现出不同的空间结构, 空间相关性也在不断的发生变化。在 0~ 5 cm 空间相关程度发

表 1 土壤水分的基本统计特征  
Table 1 Descriptive statistics of soilwater

土层深度 (cm)	平均水分 (%)	标准 误差	中位数 (%)	标准差	方差	峰度	偏度	最小值 (%)	最大值 (%)	置信度 (95%)	变异系数
0~ 5	12. 00	0. 44	10. 18	5. 51	30. 39	- 0. 63	0. 77	4. 39	24. 25	0. 88	0. 46
5~ 10	15. 02	0. 30	13. 94	3. 70	13. 66	- 0. 11	0. 68	7. 75	24. 03	0. 59	0. 25
10~ 20	17. 58	0. 22	17. 12	2. 68	7. 20	- 0. 37	0. 34	11. 39	24. 05	0. 43	0. 15
20~ 30	17. 19	0. 22	17. 14	2. 66	7. 08	0. 21	0. 03	8. 04	24. 13	0. 44	0. 15
30~ 40	17. 23	0. 18	17. 23	2. 02	4. 07	- 0. 32	0. 21	12. 83	22. 66	0. 36	0. 12

表 2 土壤水分空间变异理论模型及相关参数

Table 2 Semi-variogram model and corresponding parameters of soil water

时间	土层深度 (cm)	拟合模型	变程 (m)	RMSS	$C_0$	$C$	$C_0 + C$	$C_0 / C + C_0$
					块金值	偏基台值	基台值	块金效应
8月 20日	0~ 5	球状	47. 99	1. 02	0. 17	6. 17	6. 34	0. 03
	5~ 10	球状	133. 84	1. 16	1. 38	2. 34	3. 72	0. 37
	10~ 20	球状	133. 84	1. 05	2. 09	1. 33	3. 42	0. 61
	20~ 30	球状	133. 84	1. 01	4. 53	58. 29	62. 82	0. 07
	30~ 40	球状	133. 84	1. 02	7. 98	33. 54	41. 51	0. 19
8月 25日	0~ 5	球状	133. 84	1. 03	6. 67	2. 41	9. 09	0. 73
	5~ 10	球状	133. 84	1. 08	1. 81	5. 81	7. 62	0. 24
	10~ 20	球状	133. 84	1. 09	0. 61	2. 54	3. 15	0. 19
	20~ 30	球状	133. 84	1. 00	35. 22	20. 25	55. 47	0. 63
	30~ 40	球状	133. 84	1. 02	8. 13	26. 27	34. 4	0. 24
8月 30日	0~ 5	球状	133. 84	1. 07	0. 04	13. 15	13. 18	0. 00
	5~ 10	球状	133. 84	1. 06	4. 41	5. 53	9. 94	0. 44
	10~ 20	球状	133. 84	1. 03	0. 89	2. 87	3. 76	0. 24
	20~ 30	球状	124. 97	1. 01	1. 01	49. 78	50. 79	0. 02
	30~ 40	球状	124. 97	1. 01	8. 12	25. 13	33. 24	0. 24
9月 5日	0~ 5	高斯	133. 84	1. 08	2. 11	5. 54	7. 65	0. 28
	5~ 10	球状	133. 84	1. 20	1. 38	1. 77	3. 15	0. 44
	10~ 20	指数	133. 84	1. 10	1. 25	0. 56	1. 81	0. 69
	20~ 30	球状	133. 84	1. 03	50. 76	29. 38	80. 14	0. 63
	30~ 40	球状	133. 84	1. 03	16. 75	38. 98	55. 73	0. 30
9月 10日	0~ 5	指数	133. 84	1. 08	0. 00	6. 24	6. 24	0. 00
	5~ 10	球状	133. 84	1. 17	1. 84	2. 17	4. 01	0. 46
	10~ 20	高斯	133. 84	1. 00	1. 41	1. 97	3. 38	0. 42
	20~ 30	球状	133. 84	0. 96	14. 87	44. 61	59. 48	0. 25
	30~ 40	球状	133. 84	1. 03	15. 41	31. 62	47. 02	0. 33
9月 15日	0~ 5	球状	133. 84	1. 00	0. 16	2. 37	2. 53	0. 06
	5~ 10	高斯	133. 84	0. 94	0. 54	2. 22	2. 75	0. 19
	10~ 20	球状	133. 84	1. 05	0. 73	1. 31	2. 04	0. 36
	20~ 30	球状	63. 94	1. 04	36. 98	20. 71	57. 68	0. 64
	30~ 40	球状	133. 84	1. 02	11. 69	28. 75	40. 45	0. 29
9月 20日	0~ 5	球状	133. 84	0. 98	3. 79	6. 4	10. 19	0. 37
	5~ 10	球状	133. 84	1. 09	6. 35	2. 14	8. 5	0. 75
	10~ 20	球状	133. 84	1. 00	0. 55	2. 83	3. 38	0. 16
	20~ 30	球状	133. 84	1. 01	0. 55	2. 83	3. 38	0. 16
	30~ 40	球状	133. 84	1. 01	7. 34	33. 18	40. 52	0. 18

生了较大的变化,有完全的空间自相关向弱相关变化,这可能与该层受降水等随机因素的影响较大有关,5~ 10 cm、10~ 20 cm、20~ 30 cm 在不同时间段里出现了个别中等相关或弱相关,表明该层土壤水分主要受随机因素的影响明显,可能与耕作措施有关,耕作措施降低了土壤水分的空间相关性。也说

明人类活动和降水等随机因素主要影响为 0~ 30 cm。30~ 40 cm的空间相关性增强,说明该层土壤水分主要受母质和土壤类型的影响,受随机因素的影响相对较弱,和土壤水分垂向变异相同。各层土壤水分在不同的时间具有不完全相同的变程,其最大变程为 133.84 m,表明在 133.84 m 的主轴上土壤水分具有较强的空间相关性,超过这个范围土壤水分不再具有空间相关性<sup>[12]</sup>。在不同时间里土壤水分的拟合模型有所不同,球状模型、指数模型和高斯模型均较适合拟合土壤水分的空间变异,拟合精度也较高,其标准均方根预测误差比较接近于 1。与相关研究相同,相关研究者认为球状模型、指数模型和高斯模型是拟合土壤水分比较成熟的模型。

2.3 土壤水分的空间分布格局

通过土壤水分的克里格插值图上可以看出,土壤水分的空间分布图和土壤水分水分的趋势分布基本是相同的,因此可以认为普通克里格插值基本可以反映土壤水分的空间分布特征。在 8月 20日到 9月 20日期间,8月 25日、9月 10日、9月 20日分别有 3.3 mm、0.1 mm、3.3 mm 降水,在中间阶段偶尔有零星降水,因此,在土壤水分空间分布图中(图 1),土壤水分含量高值区域在不同的降水条件下呈

现出扩大或缩水的趋势,土壤水分含量的大小也发生一定的变化,在部分时间段出现零星的斑块状分布,呈现了一定的高值点,土壤水分的空间相关性也发生了一定的变化(见表 2),但是土壤水分的空间布局仍呈现基本的带状分异结构。因此降水并没有改变土壤水分空间分布的基本格局。就各层土壤水分的空间分布格局来看,0~ 30 cm 土层的空间分布格局相对于 30~ 40 cm 土层规律性较弱,但是 30~ 40 cm 土层的土壤水分在不同的时间里均表现出采样点的中间部分土壤水分含量较低,而在东西部分土壤水分含量相对较高(图 1),在 8月 20日~ 9月 20日呈现出基本完全相同的土壤水分空间分布结构。

2.4 土壤水分空间变异结构的时间稳定性

随机选取 30 个采样点中的 6 个采样点采用 Pachepsky 提出的方法定量研究土壤水分的时间稳定性。从 6 个采样点土壤水分相对值上多在 1 左右波动,所选取的 2、4、6 采样点在不同的时间中土壤相对水分含量一直较高,而 1、3、5 采样点则土壤水分相对含量则一直较低,土壤水分的空间分布也具有时间上的稳定性(图 2),而且从图 1 土壤水分的空间分布格局上也可以看出土壤水分的变化具有类

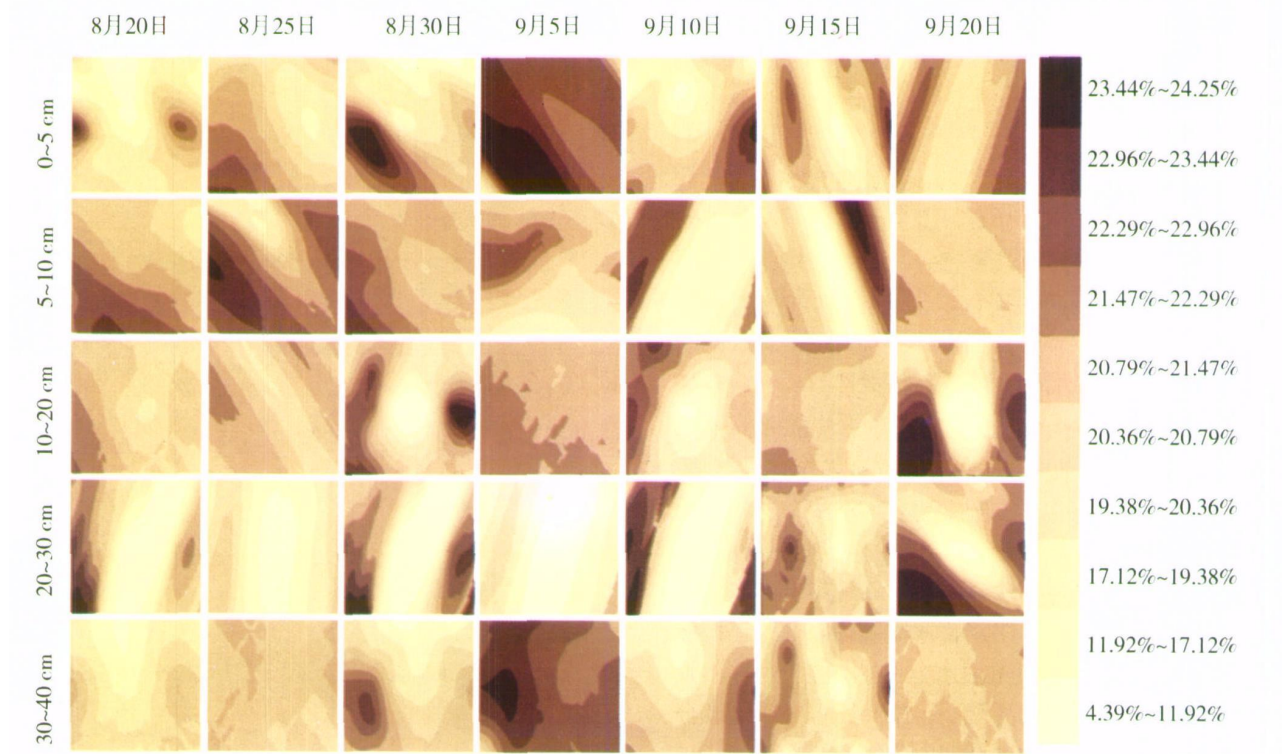


图 1 土壤水分空间分布格局

Fig. 1 Spatial distribution pattern of soil water

似的趋势,这说明在每隔 5 d 的研究频率下仍能发现土壤水分空间分布结构在时间上的稳定性,土壤水分空间变异结构在时间上的稳定性与监测频率大小的相关性较弱<sup>[6]</sup>。从图 2 中不同采样点在不同深度的时间稳定指数可以看出,土壤水分的空间分布结构在时间上的稳定性随着土壤深度的增加越来越明显。图 1 中土壤水分的空间分布格局上也呈现

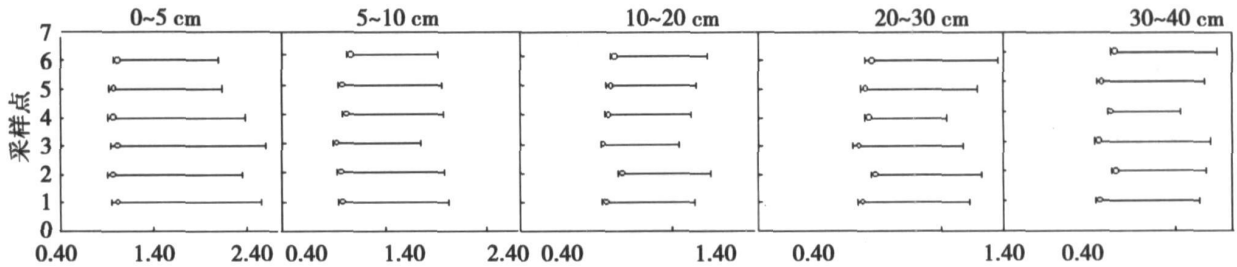


图 2 各采样点土壤水分相对含量在不同深度上的变化

Fig 2 Variations in relative soil water contents at five depths in different sample sites

注: 圆圈表示平均值, 误差条分别表示 5%、95% 的概率水平

### 3 结论

在垂向空间变异上, 土壤水分含量的变化随着深度的增加而逐渐增加, 变异系数随着深度的增加而降低, 这主要说明表层土壤水分由于蒸发、作物根系、降水的影响, 其含量低于底层, 变异系数则高于底层, 同时在每隔 5 d 的时间分辨率下土壤水分的垂向空间变异并没有变化。各层土壤水分在不同的时间内均服从正态分布。各层土壤水分在不同的时间具有明显的东西较高、南北较低的趋势, 且空间分布结构没有共同的基台值, 具有各向异性。各层土壤水分在研究时间内最大变程为 133.84 m, 说明在此范围内土壤水分存在空间相关性。从各层的块金效应来看, 0~30 cm 土层的块金效应随时间发生变化的较大, 空间相关性受随机因素如作物种植、降水等影响相对较大, 但仍以空间自相关为主。30~40 cm 的块金效应变化较小, 受随机因素影响小, 其空间变异主要受母质等结构性因素的影响, 和土壤水分垂向变异相同。采用普通克里格插值方法内插了不同土层不同时间土壤水分的空间分布格局, 发现在 8 月下旬到 9 月中旬, 土壤水分的高低值及分布区域发生了一定的变化, 出现了零星的斑块状分布格局, 但是仍然表现出基本稳定的条带状分布格局。土壤水分相对含量值在 1 左右上下波动, 稳定

了类似的结果。Kangar et al. (1992) 等也发现了相似的结果<sup>[13-15]</sup>, 并认为表层土壤水分空间变异结构在时间上的稳定性差主要因为作物根系吸收水分的影响, 相反, 底层由成土过程中所产生的土壤水分变异在不同的时间内仍然保持着一个相对稳定的形态; 另外一个可能的原因可能是土壤结构及其它的持水动力学在更深层更加明显。

性指数随深度的增加而减小, 土壤水分空间分布格局的时间上稳定性随着土壤深度增加而日趋明显。土壤水分空间分布时间稳定性的存在说明了土壤水分空间变异结构研究的可靠性, 也为当地农业的管理提供了科学依据, 但如何将土壤水分空间分布的时间稳定性进一步用于长时间序列土壤水分空间分布的演变规律上, 实现多时间尺度上农业的分区管理仍然是进一步研究的重要内容。

### 参考文献 (References)

- [1] Rodriguez-Iturbe J, Porporato A. Ecology of Water Controlled Ecosystems: Soil Moisture and Plant Dynamics [M]. London: Cambridge University Press, 2005.
- [2] Gomez-Plaza A, Alvarez-Rogel J, Albaladejo J. Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in a semi-arid environment [J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14: 1261 ~ 1277.
- [3] Katra I, Blumberg D G, Lavee H, et al. Spatial distribution dynamics of topsoil moisture in shrub microenvironment after rain events in arid and semi-arid areas by means of high-resolution maps [J]. *Geomorphology*, 2007, 86(3-4): 455 ~ 464.
- [4] Fernandez-Garcia J, Simmonds L P, Barahona E. Estimating detailed soil water profile records from point measurements [J]. *Eur Soil Sci*, 2006, 57: 708 ~ 718.
- [5] Kaleita Amy L, Tian Lei F, Hirschmichael C. Identification of optimal sampling locations and grid size for soil moisture mapping [A]. In: Engenberg R, et al. ASAE Annual International Meeting 2004 [C]. Oteawa, Ontario Canada: American Society of Agriculture.

- al Engineers 2004: 1093~ 1105
- [ 6 ] Liu Chunli, Shao Mingan. Studies on dynamic changes of water contents of soil under different land uses in Liudaogou basin[ J ]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2006, 14( 4): 54~ 56[ 刘春丽, 邵明安. 六道沟流域典型坡面不同土地利用方式下土壤水分动态变化研究[ J ]. 中国生态农业学报, 2006, 14( 4): 54~ 56]
- [ 7 ] Yang Hong, Pei Tiefan, Guan Dexin, *et al.* Soil moisture dynamics under broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountains[ J ]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17( 4): 587~ 591 [杨弘, 裴铁藩, 关德新. 长白山阔叶红松林土壤水分动态研究[ J ]. 应用生态学报, 2006, 17( 4): 587~ 591]
- [ 8 ] Guber A K, Gish T J, Pachepsky Y A, *et al.* Temporal stability in soil water content patterns across agricultural fields[ J ]. *CATENA*, 2007, 09( 010): 440.
- [ 9 ] Van Pelt R S, Wierenga P J. Temporal stability of spatially measured soil matric potential probability density function[ J ]. *Soil Sci. Soc. Am.*, 2001, 65: 668~ 677
- [ 10 ] Pachepsky Y A, Guber A K, Jacques D. Temporal persistence in vertical distributions of soil moisture contents[ J ]. *Soil Sci. Soc. Am.*, 2005, 61, 1576~ 1585
- [ 11 ] Jiang Taiming, Liu Haibong, Liu Hongbin, *et al.* Analysis of vertical variation characteristic of soil moisture in yellow soil sloping field[ J ]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21( 3): 6~ 11 [蒋太明, 刘海隆, 刘洪斌, 等. 黄壤坡地土壤水分垂直变异特征分析[ J ]. 农业工程学报, 2005, 21( 3): 6~ 11]
- [ 12 ] Hangsheng Lin, Wheeler D, Jay B, *et al.* Assessment of soil spatial variability at multiple scales[ J ]. *Ecological Modelling*, 2005, 182: 271~ 290
- [ 13 ] Cassel D K, Wendroth O, Nielsen D R. Assessing spatial variability in an agricultural experiment station field: opportunities arising from spatial dependence[ J ]. *Agronomy Journal*, 2000, 92: 706~ 714
- [ 14 ] Lin H S, Kogelmann W, Walker C, *et al.* Temporal stability of soil moisture spatial pattern and subsurface preferential flow pathways in the Shale Hills catchment[ J ]. *Vadose Zone J.* 2006, 5: 7~ 340
- [ 15 ] Kangar A, Hopmans J W, Wallender W W, *et al.* On plot size and sample number for neutron probe measurements in small field trials[ J ]. *Soil Sci* 1992, 156: 213~ 224

## Spatial Variation and Its Temporal Stability of Soil Water in Hilly Area of Sichuan Basin

WANG Gaigai, WEI Chaofu, LÜ Jiakē, ZHANG Weihua

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract** Distribution characteristics of soil water and its temporal stability are important contents of soil water spatial variability and are considerably significant in further understanding spatial distribution in soil water. Soil moisture content at different layers( 0~ 5 cm, 5~ 10 cm, 10~ 20 cm, 20~ 30 cm, 30~ 40 cm ) was measured in a square area( 150 m × 150 m ). The spatial variability construction and distributing pattern were discussed by using the traditional statistics and geo-statistics. The temporal stability was analyzed by using temporal stability index. The results showed that the soil water content increased with soil depth. While the vertical variability of soil water content decreased with soil depth. The spatial distribution of soil water content at the experimental site was heterogeneous and anisotropic. Nugget effect sill of soil water and spatial correlation were changing with time and soil layer. Soil water spatial variability was well described using the Gauss, exponential, spherical model. Spatial distribution of soil water, obtained with Kriging method, was found to remain similar during different time. The relative water contents were larger or less than 1, and the temporal stability decreased with depth.

**Key words** soil water content, vertical variability, spatial variability, spatial distribution, temporal stability