

# 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异的尺度性研究

胡 伟<sup>1,2</sup>, 邵明安<sup>1,3</sup>, 王全九<sup>1,4</sup>

(1. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心(西北农林科技大学水土保持研究所)黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 2 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4 西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

**摘 要:** 在面积 60 m × 60 m 的坡地上采用 2 m × 2 m 的网格进行高密度土壤水分测定, 通过改变采样幅度和采样间距的“再采样”方法, 选取变异系数、相关距离和 Moran 的  $I$  相关指数 3 个参数作为表征空间变异大小的指标, 研究了尺度大小对土壤水分空间变异的影响。研究结果表明, 随着采样幅度尺度在一定范围内的增大, 土壤水分变异的特征参数如变异系数、相关距离和 Moran 的  $I$  相关指数都呈不同程度地增大; 当采样间距增大时, 变异系数和 Moran 的  $I$  相关指数没有变化, 而相关距离却减小。

**关键词:** 土壤水分; 空间变异; 尺度

**中图分类号:** S152.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2005)08-0011-06

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[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 11- 16

Hu Wei, Shao Ming'an, Wang Quanjiu Scale-dependency of spatial variability of soil moisture on a degraded slope-land on the Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(8): 11- 16 (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

土壤水分对土壤侵蚀、溶质迁移和土壤-大气之间相互作用等水文学过程以及土壤形成过程有较大的影响<sup>[1]</sup>。土壤水分具有空间异质性, 其异质性的存在对各种水文过程和土壤形成过程均有显著的影响。因此, 了解土壤水分的异质性对理解和预测各种过程就显得尤为重要。

自 20 世纪 70 年代以来, 土壤水分的空间变异性研究得到了很大的发展, 研究范围涉及到小区、坡面、小流域和区域等不同尺度。综合相关的研究结果(见表 1)发现<sup>[2-15]</sup>, 在不同的研究区域和尺度下, 土壤水分空间变异的变异系数和相关距离不同。Western et al (1998, 1999) 针对类似问题指出, 在小尺度和大尺度的研究中, 相关长度存在差别的原因可能部分地是由于采样效应和采样的不确定性引起的<sup>[16, 17]</sup>。Bloschl (1998) 也指出, 从试验数据分析得出的表观变异(Apparent Variability)与真实变异(Natural Variability)存在差异, 且两种变异的差别大小与测量尺度有关<sup>[18]</sup>。因此, 土壤水分空间变异如何受尺度变化的影响需要进一步研究。另外, 土壤水分测量值的空间尺度常常与要求土壤水分预测的尺度不一致, 因此, 常常需要对测量尺度

和预测或模拟尺度之间进行尺度推绎(Scaling) (包括尺度上推和尺度下推), 由于测量尺度引入的偏差, 常使根据测量数据所计算的方差或空间相关长度与其真实值不一致(Western et al, 1999)<sup>[17]</sup>。由于客观上自然过程本来可能具有的多尺度特征和主观上对依赖于测量尺度的空间变异估计的偏差, 从而带来了在各种尺度上的预测和模拟的困难。因而, 对土壤水分空间变异的尺度性研究就显得尤为重要。

在研究土壤水分的空间变异时, 如何科学准确地布置样点以便最大程度地反映土壤的真实变异是当前研究面临的一个挑战。弄清楚尺度对土壤水分空间变异的影响有利于了解土壤水分的真实变异, 并可为水文学模型模拟和为获取田间真实信息而制定有效的采样方案提供依据。Bloschl 和 Sivapalan (1995)<sup>[19]</sup> 提出尺度是一个包含采样幅度(Extent)、采样间距(Spacing)、采样体积(Support) 3 个概念的名词。目前, 土壤水分空间变异的田间直接测试方法主要有土钻取土烘干法、TDR 法和中子仪法, 相对来说, 在不同的研究之间, 采样体积大小的差别较小, 而采样幅度和采样间距则存在较大差别。因此, 本文仅通过采样幅度和采用间距的变化对常用的表征空间变异的变异系数(CV%)、相关距离(Correlation Length)和自相关的 Moran 的  $I$  指数 3 个指标的影响来反映研究尺度对土壤水分空间变异的大小的影响, 以便为客观地揭示田间土壤水分空间变异状况而进行合理布点采样提供参考。

## 1 研究材料和方法

### 1.1 样点布置及测量方法

研究区域为中国科学院水土保持研究所神木生态观测站, 该区位于神木县以西 14 km 处的六道沟小流域, 北依长城, 地处毛乌素沙漠的边缘, 属于黄土高原水

收稿日期: 2005-01-18 修订日期: 2005-07-11

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目、国家自然科学基金资助项目(50479063, 50479065); 西北农林科技大学“创新团队”计划、中国科学院水利部水土保持研究所择优资助项目资助

作者简介: 胡 伟(1981- ), 男, 湖南衡东人, 研究方向为土壤物理学。杨凌 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100。

Email: weihu205@163.com

通讯作者: 邵明安, 研究员, 主要研究方向为土壤学。北京 中国科学院地理科学与资源研究所, 100101



蚀风蚀交错带的强烈侵蚀中心,流域面积 6 68864 km<sup>2</sup>。本研究选取了已有 30 余年退耕历史的首蓆坡地,面积为 60 m × 60 m,采用 2 m × 2 m 高密度布设网格,用 TDR 测定表层 0~ 20 cm 土壤水分,共测定表层水分数据 961 个,测定时间为 2004 年 8 月 31~ 9 月 3 日。

## 1.2 “再采样”

### 1.2.1 改变采样幅度

对所有的测定数据进行分析,并分别以 50 m × 50 m、40 m × 40 m、30 m × 30 m、20 m × 20 m、10 m × 10 m

的“滑动窗”从测定区域的东北角向西南角滑动,计算每个滑动窗内的变异参数,即变异系数、相关距离和自相关的 Moran 的 *I* 指数,将同一大小“滑动窗”内的计算结果取平均值,并把该平均值作为该采样幅度尺度下的变异结果。需指出的是,为方便在同一个坐标图里比较采样幅度变化对 Moran 的 *I* 指数的影响,本文在分析采样幅度对 Moran 的 *I* 指数的影响时,只采用了 60 m × 60 m、50 m × 50 m、40 m × 40 m、30 m × 30 m 4 种幅度。

表 1 不同尺度下土壤水分空间变异研究

Table 1 Spatial variability of soil moisture under different scales

土地类型	研究区域大小	采用间隔	土层深度 /cm	测定方法	均值 /%	标准差	变异系数 /%	变异模型	相关范围	文献出处
10 坡地	80 m × 30 m	5 m × 5 m	10~ 15	烘干法	19.16	1.82	9.5	线性基台	30 m	[2]
“深海沟”		5 m	0~ 30	TDR	2.90		44.2	球状	16.38 m	
“艾碱壕”		10 m	0~ 30	TDR	2.8		38.9	指数	28.9%	[3]
半固定沙丘		5 m × 5 m	0~ 30	TDR	球状	22.54 m				
固定沙丘		5 m × 5 m	0~ 30	TDR	球状	18.86 m				
奎屯(粘土)	28 m × 32 m	4 m × 4 m	20~ 30	烘干法	33.99 <sup>1)</sup>	4.853	14.3	球状	15 m	[4]
石河子大学(砂壤土)	72 m × 72 m	9 m × 9 m	20~ 30	烘干法	25.21 <sup>1)</sup>	2.100	8.3	球状	28 m	[4]
荒地	4.0 × 10 <sup>5</sup> m <sup>2</sup>	25 m	0~ 20		15.624	11.361 <sup>2)</sup>	21.6(秋)			[5]
					22.193	10.527 <sup>2)</sup>	14.6(春)			
荒地	4.0 × 10 <sup>5</sup> m <sup>2</sup>	100 m	0~ 20		19.791	9.283 <sup>2)</sup>	15.4(秋)			[5]
					22.118	14.038 <sup>2)</sup>	16.9(春)			
麦田(粉砂质潮土)	1 hm <sup>2</sup>	10 m × 10 m	0~ 20	烘干法	17.9	1.08	6 <sup>3)4)</sup>	指数 高斯	26.07 m <sup>3)</sup> 40.07 m <sup>4)</sup>	[6]
冬小麦田(褐土)	13.3 hm <sup>2</sup>	50 m × 50 m	0~ 20	烘干法	15.482	2.339	15.11	球状	246.8 m	[7]
西北农业大学(娄土,重壤土)	24 m × 24 m	4 m × 4 m	0~ 15	烘干法	18.25	1.843	10.1		16 m	[8]
甘肃灵台县什字镇黑垆土	5 m × 5 m	1 m × 1 m	0~ 10	烘干法	113.3 <sup>5)</sup>	11.39 <sup>5)</sup>	10.05			[9]
栾城试验站(褐土)A 区	9 m × 9 m	1 m × 1 m	0~ 10	烘干法	9.48	1.224	12.91	球状	5.551 m	[10]
栾城试验站(褐土)B 区	9 m × 9 m	1 m × 1 m	0~ 10	烘干法	9.77	1.399	14.32	球状	3.599 m	[10]
栾城试验站(褐土)C 区	9 m × 9 m	1 m × 1 m	0~ 10	烘干法	8.62	0.8746	10.15	球状	1.952 m	[10]
通辽灌区(中壤土)	348.0 m × 24.0 m	12 m × 12 m 内套 4 m × 4 m	0~ 20		21.10	3.11	14.7		230.89 m	[11]
阿克苏水平衡试验区, 灌溉农田(春小麦)	25 m × 20 m	5 m × 5 m	0~ 20	烘干法	26.59	1.90	7.14(湿)	球状	1.57 m (N-S)	[12]
					16.89	2.37	14.01(干)	球状	1.68 m (E-W)	
阿克苏水平衡试验区(裸地)	20 m × 20 m	5 m × 5 m	0~ 20	烘干法	27.20	1.17	4.30(湿) <sup>6)</sup>	球状	3.30 m (N-S)	[12]
					24.86	1.33	5.35(干) <sup>6)</sup>	球状	3.68 m (E-W)	
沈阳农大旱田试验地(棕壤)	30 m × 60 m	随机布点	0~ 20	烘干法	17.77	0.612 <sup>1)</sup>			1.5 m	[13]
西北农林科技大学 农作二站(中壤土)	30 m × 35 m	5 m × 5 m	0~ 20	烘干法				线性基台	20 m	[14]
Satellite station	60 hm <sup>2</sup>	40 m × 40 m	0~ 30		33.2	6.42	19(1998-10)	球状	150 m 左右	[15]
Mahurangi river catchment, New Zealand				Dielectric-based instrument						

注: 1)田间持水量; 2)方差; 3)3月18日; 4)5月12日; 5)g · kg<sup>-1</sup>; 6)0~ 40 cm 土层。

### 1.2.2 改变采样间距

首先对所有的数据进行空间变异分析,然后依次按照间距 4、6、8、10 m 进行“再采样”(Re-sampling),在每种间距下,使所有的原测定数据都取到,并计算每个采样样本下的各变异参数,并把相同间距下的样本变异结果取平均值,并把该平均值作为该采样间距尺度下的变异结果。需要指出的是,由于在用地统计学分析时,因间距太大而造成数据太少,从而可能使结果失去可靠性,因此只用采样间距为 2、4、6 m 3 种情况分析采样间距

对相关距离的影响。

## 1.3 数据处理方法

原数据和所有“再采样”数据的空间变异结果都分别用经典统计学中的变异系数、地统计学中的相关距离和空间自相关分析中的 Moran 的 *I* 指数表示。其计算方法分别描述如下。

### 1.3.1 变异系数

经典统计学里通常用变异系数(CV%)的大小确定其变异程度,当 CV% < 10% 时为弱变异性,当 10% <

CV % < 100% 时为中等变异性, 当 CV % = 100% 时为强变异性。变异系数的计算公式为

$$CV \% = \frac{S}{x} \times 100\% \quad (1)$$

式中 CV % —— 变异系数大小; S —— 标准方差; x —— 变量均值。

### 1.3.2 相关距离

基于区域化变量理论 (Regionalized Variable Theory) 和本征假设 (Intrinsic Hypothesis) 的基础上, 有半方差函数 (Semi-variogram):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} [z(x) - z(x+h)]^2 \quad (2)$$

式中  $\gamma(h)$  —— 半方差值;  $h$  —— 样本间距, 又称滞后距 Lag;  $N(h)$  —— 间距为  $h$  的样本对数;  $z(x)$ 、 $z(x+h)$  —— 分别为  $x$ 、 $x+h$  处的测定值。

将计算得到的  $\gamma(h) \sim h$  值用 DPS 数据处理软件中的球状模型拟合, 得到 3 个参数值  $C_0$  (块金值)、 $C_1$  (结构方差) 和  $a$  (相关距离)。土壤水分的空间变异存在各向异性, 而本文只研究了土壤水分沿坡长方向的空间变异情况。

### 1.3.3 空间自相关分析中的 Moran 的 I 指数

Moran 的 I 指数与统计学上的相关系数相近, 其值变化于 0 和 -1 之间。当  $I = 0$  时代表空间无关, 当  $I > 0$  时为正相关, 而  $I < 0$  时为负相关, 其计算公式为<sup>[20]</sup>:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij} (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中  $x_i$ 、 $x_j$  —— 分别代表空间要素  $x$  在空间单元  $i$  和  $j$  中的观测值;  $\bar{x}$  ——  $x$  的平均值;  $w_{ij}$  —— 相邻权重;  $N$  —— 总的空间单元数, 分析时, 将 Moran 的 I 指数与滞后距离尺度相结合, 便可得到不同尺度下空间相关关系变化, 然后利用尺度-自相关系数图表示, 从而可以直观地看出空间相关性随尺度的变化。

## 2 结果与分析

### 2.1 采样幅度尺度对空间变异结果的影响

#### 2.1.1 对变异系数的影响

在采样幅度为  $10\text{ m} \times 10\text{ m} \sim 60\text{ m} \times 60\text{ m}$  的范围内, 土壤水分的变异系数在 24.28% ~ 27.29% 之间变

化(图 1), 随着采样幅度尺度的增大, 变异系数呈逐渐增大的趋势, 在采样幅度相对较小时, 变异系数增加较快, 随着采样幅度尺度的增大, 变异系数增大的幅度逐渐趋缓。随着采样幅度尺度的增大, 土壤水分变异系数的值呈增大趋势是容易被理解的, 这主要是由于随着研究区域的增大不断引入新的变异因素的缘故, 即, 某些在较大的尺度内对土壤水分分布起影响作用的因素在较小有限的尺度内, 可能具有相对的一致性, 然而当尺度增大时, 它对水分分布的影响才得到体现, 从而使得其变异系数增大, 变异增大。对变异系数 (CV %) 与采样幅度的关系进行非线性拟合, 得到式(4):

$$y = 27.28 / [1 + \exp(-(x + 2027.9) / 987.7)] \quad (4)$$

$$R^2 = 0.9776$$

式中  $y$  —— 变异系数;  $x$  —— 采样幅度。由拟合结果可知, 在所研究的区域内, 随着采样幅度  $x$  的增大, 变异系数  $y$  值也随着增大, 但变异系数值将无限地趋向于 27.28%, 这是因为在一定研究区域内, 影响土壤水分变异的因素不会无限制地增加, 因此, 当研究区域达到一定程度后, 变异系数增大的趋势会变缓甚至不变。

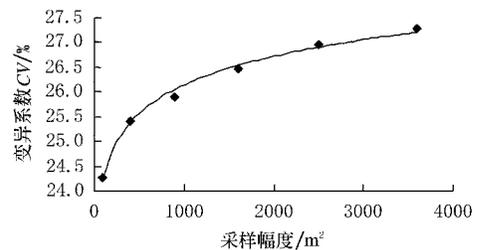


图 1 采样幅度对土壤水分变异系数的影响

Fig 1 Impacts of sampling extent on CV % of soil moisture

假定研究区域内的真实变异系数为 27.28%, 为了得到在一定的允许误差下能代表真实变异的研究尺度, 根据式(4)得到了不同尺度下的变异系数及其相对误差, 其结果见表 2。由表 2 可见, 在  $100\text{ m}^2$  以上的采样幅度内, 相对误差都较小, 然而在允许相对误差为 1% 的情况下,  $2500\text{ m}^2$  的采样幅度下的变异系数值足以表征真实变异; 在允许相对误差为 2% 的情况下,  $1800\text{ m}^2$  的采样幅度下的变异系数值可以表示为真实变异; 在允许相对误差为 3% 的情况下,  $1400\text{ m}^2$  的采样幅度下的变异系数值可表示为真实变异。

表 2 各采样幅度土壤水分变异系数拟合值及其相对误差

Table 2 Fitted values of CV % and relative errors of soil moisture under different sampling extents

采样幅度/m <sup>2</sup>	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
变异系数/%	24.44	24.69	24.92	25.13	25.32	25.50	25.66	25.81	25.94	26.06	26.18	26.28	26.37	26.46	26.53	26.60	26.67	26.73
相对误差/%	10.39	9.49	8.65	7.89	7.18	6.54	5.94	5.40	4.91	4.66	4.04	3.67	3.33	3.02	2.74	2.48	2.25	2.03
采样幅度/m <sup>2</sup>	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	3100	3200	3300	3400	3500	3600
变异系数/%	26.78	26.83	26.87	26.91	26.94	26.97	27.00	27.02	27.05	27.08	27.09	27.11	27.13	27.14	27.16	27.17	27.18	27.19
相对误差/%	1.84	1.67	1.51	1.37	1.24	1.20	1.01	0.92	0.83	0.75	0.60	0.61	0.55	0.50	0.45	0.41	0.37	0.34

### 2.1.2 对相关距离的影响

将各采样幅度尺度下的地统计学参数结果总结于表 3, 由表 3 可见, 随着采样幅度尺度的增大, 块金值不断增大, 这是因为随着采样幅度的增大, 短距离内的变异和测量误差不断增大的缘故; 结构方差值变化趋势不明显, 而土壤水分空间变异的相关距离呈现明显的增大趋势, 相关距离随采样幅度的增大而增大的现象可能与土壤水分分布格局的等级巢式结构有关, 在这种情况下, 随着研究尺度的增大, 小尺度上变异的相关性被大尺度变异的相关性所掩盖。

表 3 采样幅度尺度对土壤水分空间相关距离的影响

采样幅度	10 m	20 m	30 m	40 m	50 m	60 m
	× 10 m	× 20 m	× 30 m	× 40 m	× 50 m	× 60 m
理论模型	S	S	S	S	S	S
块金值 $C_0$	7.12	9.27	10.28	10.37	10.48	10.94
结构方差 $C_1$	5.77	3.21	1.81	2.25	3.13	4.98
相关距离 $a/m$	8.91	13.00	16.53	35.13	48.31	96.61
$R^2$	0.9863**	0.7186*	0.7289*	0.6035*	0.5992*	0.6437*

注: S 代表球状模型 (Spherical model); \* 和 \*\* 分别表示在  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  的水平下显著。

### 2.1.3 对 Moran 的 I 指数的影响

由图 2 可见, 当滞后距离较小时, 采样幅度尺度对 I 指数的影响较小, 随着滞后距离的增大, 明显地表现出随着采样幅度尺度的增大, I 指数也增大的趋势, 尤其当尺度从  $40\text{ m} \times 40\text{ m}$  变化至  $50\text{ m} \times 50\text{ m}$  时趋势更明显; 在正相关的范围内呈现出的 I 指数随采样幅度的增大而增大的趋势, 与采样幅度对相关距离的影响表现较为一致。这意味着当采样幅度减小时, 就会出现削弱或消除滞后距离较大时土壤水分可能存在正相关性的可能。

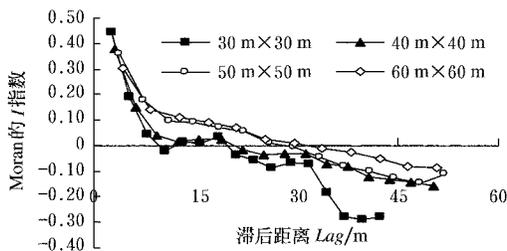


图 2 采样幅度对 Moran 的 I 指数的影响

Fig 2 Impacts of sampling extent on Moran's I index

## 2.2 采样间距尺度对空间变异结果的影响

### 2.2.1 对变异系数的影响

由表 4 可见, 当采样间距从 2 m 变化至 10 m 时, 土壤水分的变异系数无规律地变化在 26.82% ~ 28.27% 之间, 平均值为 27.48%, 相对误差分别为 0.68%、0.89%、2.39%、0.71%、2.89%, 显然采样间距对变异系数的影响可忽略, 从而可认为, 采样间距对土壤水分变异系数没有影响, 这与大多数研究结果较为一致。这主要是由于当采样幅度一定时, 增大采样间距并没有显

著减小影响土壤水分变异的因素。

由此可见, 在一定的研究区域内, 为了获得土壤水分的真实变异系数, 适当增大采样间距是一个较好的举措。如在本研究中, 当采样间距为 10 m 甚或更大时, 可以在减小采样点的情况下获得可靠的土壤水分变异。

表 4 采样间距对变异系数的影响

采样间距/m	2	4	6	8	10
变异系数/%	27.29	27.72	26.82	27.28	28.27

### 2.2.2 对相关距离的影响

采样间距为 2, 4, 6 m 的半方差图如图 3, 由图可见, 在采样间距为 2, 4, 6 m 下, 半方差图具有很大的相似性, 只不过在各个滞后距离下, 随着采样间距的增大, 半方差值减小。其拟合结果如表 5, 显而易见, 随着采样间距的增大, 其变异的相关距离呈减小的趋势。

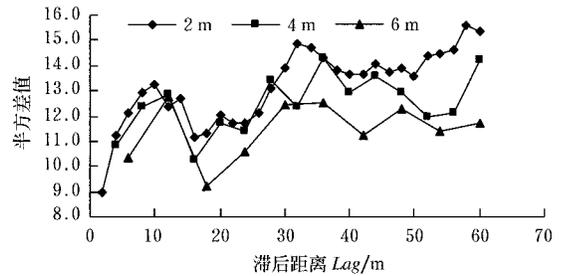


图 3 不同采样间距下的土壤水分半方差图

Fig 3 Semi variogram of soil moisture under different sampling spacings

表 5 采样间距对空间相关距离的影响

采样间距/m	2	4	6
块金值 $C_0$	10.94	11.06	10.35
结构变异 $C_1$	4.98	2.07	1.49
相关距离 $a/m$	96.61	54.32	47.17

有关采样间距对空间相关距离的影响研究也较多。研究结果也存在着不一致的现象。Wendroth et al (1999) 研究发现不同的采样间隔距离没有使半方差图产生显著的差异<sup>[21]</sup>; Gelhar et al (1983) 分别采用 5、10 和 15 cm 的采样增幅 (Increment) 进行采样分析氯化物在土壤剖面中空间变异, 结果表明, 当氯化物在剖面中规则分布时, 3 种增幅下的半方差图相同, 而当氯化物在剖面中分布不规则时, 采样增幅越大, 相同滞后距离下的半方差值越小<sup>[22]</sup>, 而在本研究中, 随着采样间距的增大, 半方差值也呈现减小的趋势 (见图 3), 这也可能与土壤表层水分的不规则分布有关; Western et al (1999) 的研究表明, 随采样间距的增大, 相关距离也增大<sup>[23]</sup>, 而在本研究中却得到与此相反的结论, 这可能部分地与模型的拟合有关, 因而, 有关采样间距对半方差结果的影响有待进一步研究。

### 2.2.3 对 Moran 的 I 指数的影响

由图 4 可见, 随着采样间距的变化, 除了滞后距离较大时各曲线之间稍有偏离外, 整体上是重合的。所以, 可认为采样间距对 Moran 的 I 指数没有影响。土壤水分的相关性也体现了影响土壤水分分布的环境因素的相关性, 当采样幅度一定时, 增大采样间距并没有改变土壤水分的相关性, 这说明了增大采样间距时并没有消除某些主要环境因子对土壤水分变异的影响。

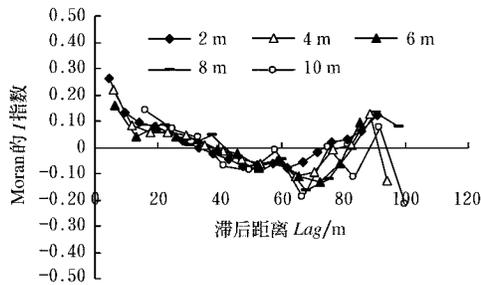


图 4 采样间距对 Moran 的 I 指数的影响

Fig. 4 Impacts of sampling spacing on Moran's I index

## 3 结论与讨论

土壤水分的空间变异是普遍存在的现象, 有关此方面的研究也很多, 然而, 在不同的研究区域和研究尺度下得到的空间变异结果也存在很大差异。本文在面积  $60\text{ m} \times 60\text{ m}$  的坡地上研究了尺度大小对土壤水分空间变异结果的影响。研究结果表明, 随着采样幅度尺度的增大, 土壤水分变异的特征参数如变异系数、相关距离和 Moran 的 I 相关指数都不同程度地增大; 当采样间距增大时, 变异系数和 Moran 的 I 相关指数没有变化, 而相关距离却减小。

Western et al (1999) 指出, 最理想的采样尺度为非常大的采样幅度、非常小的采样间距和采样体积<sup>[23]</sup>, 然而在实际操作中是很难实现的。本文中, 根据研究尺度对变异系数结果的影响, 讨论了不同的允许相对误差下合理的采样尺度。然而, 由于坡地研究尺度相对较小, 所以给合理采样尺度的确定带来一定困难。因此, 如何在更大的尺度上开展土壤水分空间变异的尺度性的研究, 以找出当表观变异 (apparent variability) 和真实变异 (natural variability) 之间的偏差可被接受时的采样尺度作为合理的采样尺度是需要进一步研究的问题。

### [参 考 文 献]

[1] Andrew W. Western, Sen-Lin Zhou, Rodger B Grayson, et al Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 286: 113- 134

[2] 张建辉, 何毓蓉, 唐时嘉. 四川丘陵区土壤湿度的空间变异分析 [J]. *土壤通报*, 1996, 27(2): 61- 62

[3] 吕怡忠, 李保国, 胡克林, 等. 鄂尔多斯夏初不同地形土壤水分的空间变异 [J]. *中国农业大学学报*, 2002, 7(5): 38- 43

[4] 李 毅, 门 旗, 罗 英. 土壤水分空间变异性对灌溉决策的影响研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2000, 18(2): 80- 85

[5] 杨贵羽, 陈亚新. 土壤水分、盐分空间序列初步研究 [J]. *灌溉排水*, 2002, 21(3): 32- 35

[6] 胡克林, 李保国, 陈德立, 等. 农田土壤水分和盐分的空间变异性及其协同克里格估值 [J]. *水科学进展*, 2001, 12(4): 460- 465

[7] 张淑娟, 何 勇, 方 慧. 基于 GPS 和 GIS 的田间土壤特性空间变异性的研究 [J]. *农业工程学报*, 2003, 19(2): 39- 43

[8] 李小昱, 雷廷武, 王 为. 农田土壤特性的空间变异性及分形特征 [J]. *干旱地区农业研究*, 2000, 18(4): 61- 64

[9] 张仁陟, 李小刚, 李焕峰. 土壤水分变异规律的研究 [J]. *西北农业学报*, 1993, 2(1): 21- 26

[10] 高 鹭, 陈素英, 胡春胜, 等. 喷灌条件下农田土壤水分的空间变异性研究 [J]. *地理科学进展*, 2002, 21(6): 609- 614

[11] 史海滨, 陈亚新. 土壤水分空间变异的套合结构模型及区域信息估值 [J]. *水利学报*, 1994, (7): 70- 76

[12] 李 彦, 黄妙芬. 绿洲地区田间土壤湿度空间变异规律 [J]. *干旱地区农业研究*, 1991, 9(3): 85- 93

[13] 张玉龙, 代国英, 刘鸣达, 等. 沈阳地区棕壤含水量空间变异规律的研究 [J]. *沈阳农业大学学报*, 1997, 28(3): 200 - 204

[14] 马孝义, 李新平, 赵延风. 土壤含水量的 Kriging 和 Cokriging 估值研究 [J]. *水土保持通报*, 2001, 21(3): 59- 62

[15] Wilson D J, Western A W, Rodger B Grayson, et al Spatial distribution of soil moisture over 6 and 30 cm depth, Mahurangi river catchment, New Zealand [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 276: 254- 274

[16] Western A W, Bloschl G, Grayson R B. Geostatistical characterization of soil moisture patterns in the Tarrarra Catchment [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 205: 20- 37.

[17] Western A W, Grayson R B, Bloschl G, et al Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices [J]. *Water Resour. Res.*, 1999, 35(3): 797 - 810

[18] Bloschl G. Scale and scaling in hydrology — a framework for thinking and analysis [M]. John Wiley, Chichester, 1998

[19] Bloschl G, Sivapalan M. Scale issues in hydrological modelling— a review [J]. *Hydrology Processes*, 1995, 9: 251- 290

[20] 邬建国. 景观生态学— 格局、过程、尺度与等级 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002

[21] Wendroth O, Pohl W, Koszinski S, et al Spatio-temporal patterns and covariance structures of soil water status in two Northeast-German field sites [J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 215: 38- 58

[22] Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability [M]. Pudoc Wageningen, 1995: 209- 234

[23] Western A W, Bloschl G. On the spatial scaling of soil moisture [J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 17: 203- 224

## Scale-dependency of spatial variability of soil moisture on a degraded slope-land on the Loess Plateau

Hu Wei<sup>1,2</sup>, Shao Ming'an<sup>1,3</sup>, Wang Quanjiu<sup>1,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Education, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to explore the impacts of scale on the spatial variability of soil moisture, a study in a 60 m × 60 m sloping land area was carried out, spatial variation of soil moisture was analyzed with all the data measured under 2 m × 2 m sampling grid with TDR, then, re-sampling technique was employed with changing sampling extents and spacings, and spatial variation of each scenario was also determined. In the process of data analysis, three indices commonly used in spatial analysis including coefficient of variation, correlation length and Moran's I index were applied to each scenario to characterize the degree of spatial variability of soil moisture, at the same time, some related issues of scale-dependency were discussed. The results showed that all the indices measured increased with various degrees with increasing extent. However, spacing did not affect coefficient of variation and Moran's I index, while correlation length decreased with the increase of spacing.

**Key words:** soil moisture; spatial variability; scale-dependency