

# 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异性研究

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

(1. 中国科学院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, 陕西 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)

**摘要:** 以神木生态观测站为例, 利用经典统计学方法对黄土高原退耕坡地土壤水分在空间三维不同方向和不同位置的空间变异性进行了研究, 并对空间变异的尺度和时间依赖性等问题进行了探讨, 以便为坡地水分管理和植被恢复提供参考。研究表明土壤水分在垂直方向和水平方向(垂直于坡长方向)的平均变异程度为弱变异; 而在东西方向(坡长方向)、二维平面和三维空间上为中等变异性; 土壤水分沿坡长方向从坡顶到坡脚表现出先减小后增大的趋势, 且在各坡位变异程度不一, 呈现出变异程度为坡上 > 坡中 > 坡下的趋势; 土壤水分沿南北方向表现为阴坡 > 山脊 > 阳坡的明显趋势, 其变异程度为阳坡 > 阴坡; 在 40 ~ 200 cm 土层深度内, 土壤水分在垂直方向表现出先减小后增大的趋势, 且在各土层的变异程度与各层平均土壤水分成正明显的正相关。

**关键词:** 黄土坡面; 土壤水分; 空间变异; 黄土高原

**中图分类号:** S152.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2006)01-0074-08

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>。土壤水分具有异质性(Ladson & Moore, 1992; Whitaker, 1993; Famiglietti 等, 1998), 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重要。

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。相关研究表明<sup>[2~16]</sup>, 土壤水分在大多数田间尺度上都为中等或弱变异, 但相关距离依研究区域和尺度的不同而差异较大(从几米到几百米)。近来, 土壤水分空间变异性的研究开始注重田间水分的空间变异与环境因子的相互关系的研究, 而使其成为国际上的研究热点之一<sup>[1,17~19]</sup>。

土壤水分是黄土高原植物生长和植被恢复的主要限制因子。提高黄土坡面土壤水分利用效率, 确定合理植被恢复方案是黄土地区生态环境建设的重要内容。黄土坡面土壤水分变异特征是植被合理配置和提高土壤水库功效的基础。本文以黄土高原神木生态观测站为例, 通过对神木生态观测站北圪坎退耕地的坡面土壤水分在不同方向和位置的变异进行了测定和较系统的分析, 并对空间变异的尺度性和时间依赖性等问题进行探讨, 为坡地水分管理提供参考。

## 1 研究区域概况和研究方法

### 1.1 研究区域概况

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,

收稿日期: 2004-08-16; 修订日期: 2004-10-30

基金项目: 中国科学院“百人计划”资助项目; 国家自然科学基金资助项目(40025106; 90102012; 50479065); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金(10501-114); 中国科学院/水利部水土保持研究所择优资助项目(C24014200)

作者简介: 胡 伟(1981-), 男, 湖南衡东人, 硕士研究生, 主要从事土壤物理学研究。E-mail: weihu205@163.com

通讯作者: 邵明安, 中国科学院地理科学与资源研究所研究员。

北依长城, 地处毛乌素沙漠的边缘, 属于黄土高原水蚀风蚀交错带的强烈侵蚀中心, 流域面积为  $6.69 \text{ km}^2$ 。该区属中温带半干旱气候, 年平均气温  $8.4^\circ\text{C}$ , 年平均降水量  $437.4 \text{ mm}$ , 其中 6~9 月的降水占全年降水的 77.4%, 植被类型为干旱草原, 天然植被大部分已遭破坏, 残存的天然草场也已严重退化、沙化。地貌类型为片沙覆盖的梁峁状黄土丘陵, 地面组成物质以第四纪黄土沉积物为主<sup>[20]</sup>。本研究选取的坡面北圪坝, 山体走向为东西方向, 坡长 280 m, 峁顶海拔 1256 m, 整个坡面除了距坡顶 80 m 左右较缓和外, 其它坡度为  $20^\circ$  左右, 坡面上端 100 m 内为已退化的柠条林, 下端为已有 30 年左右历史的苜蓿地, 现已被以长茅草为建群种, 达乌里胡枝子、草木犀状黄芪、茵陈蒿等为伴生种的生态群落演替。

## 1.2 研究方法

以山脊(东西方向)为主线采用勾股定理按  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  布设等高线网格(布点方式见图 1), 共 5 列 29 行(在本研究中规定, 从阴坡至阳坡, 5 列采样带依次用 A 列、B 列、C 列、D 列和 E 列表示; 坡上、坡中和坡下包括的采样行分别为 1~10 行, 11~18 行和 19~29 行, 分布在面积为  $40 \text{ m} \times 280 \text{ m}$  的区域内, 除了落在侵蚀沟中的 12 个点未测定外, 共有 133 个测点, 每测点取样深度为 200 cm, 采用烘干法( $105 \sim 108^\circ\text{C}$ , 10 h)测定土壤水分含量, 垂直方向每隔 10 cm 测定土壤水分含量值。采样工作在 2003 年 7 月 29 日~8 月 8 日进行, 由于采样期间有降雨, 为消除降雨对土壤水分空间变异性研究的影响, 剔除表层 0~40 cm 的土壤水分值, 而只对 40~200 cm 的土壤水分分布状况进行分析。利用 Excel 和 SPSS 10.0 软件进行数据处理。

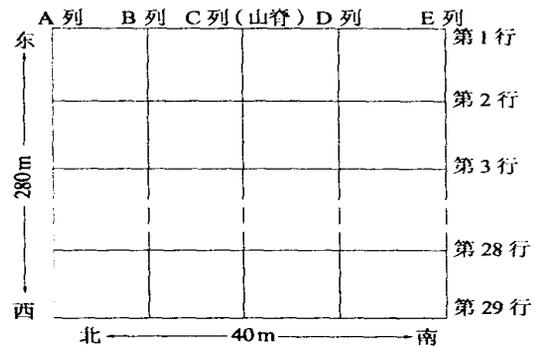


图 1 土壤水分布点网格图

Fig. 1 Sampling grid of soil moisture

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水分不同方向的平均变异与二维平面各向变异比较

由表 1 可见, 垂直方向与南北方向(垂直于坡长方向)的变异系数分别为 3.6%、7.3%, 属弱变异性, 在东西方向(沿坡长方向)、二维平面和三维空间上, 其变异系数分别为 23.8%、29.6%、35.5%, 表现为中等变异性。

表 1 在各方向土壤水分统计特征值

Table 1 Statistical results of soil moisture in different directions

	样本数	平均值/ %	标准差	标准误	变异系数/ %	95% 的置信区间/ %
南北方向	5	6.83	0.497	0.222	7.3	6.22~7.46
东西方向	29	6.83	1.603	0.298	23.8	6.12~7.34
垂直方向	16	6.83	0.243	0.061	3.6	6.70~6.95
二维平面	133	6.83	2.023	0.175	29.6	6.49~7.18
三维空间	2128	6.83	2.423	0.053	35.5	6.72~6.93

注: 南北方向的每个样本为沿坡长方向每一条采样带的土壤水分平均值; 东西方向的每个样本为同一等高线上的 5 个测点的土壤水分平均值; 垂直方向的样本为所有测点同一土层的土壤水分平均值; 二维平面的样本为每个测点的土壤水分平均值; 三维空间的样本为各测点、各土层(40~200 cm)的土壤水分值。

在多数研究中, 更多的关注坡面二维平面上各方向上的变异程度及其差别。由于本研究中东西方向的采样长度大于南北方向, 为了更客观地比较南北和东西两方向的变异程度, 采用  $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$  的“滑动窗”从坡上向坡下滑动(由于第 4、5、6、28、29 采样行采样不全, 因此“滑动窗”只在第 7 行和第 26 行之间, 即离坡顶 60~260 m 之间滑动), 并计算每个“滑动窗”内土壤水分在两个方向上的变异系数, 其结果见表 2。由表 2 可知, 除 1、2、3 和 15 号“滑动窗”外, 变异系数都表现为东西方向大于南北方向, 所以总体上可认为, 在离坡顶

60~120 m处, 南北方向的变异程度比东西方向强, 在离坡顶120 m以下, 东西方向的变异程度强于南北方向。从总体上来看, 无论是在东西方向还是在南北方向上, 随着海拔的下降, 变异程度逐渐减小。

表2 不同坡位下土壤水分在二维平面东西方向和南北方向变异系数的比较

Table 2 Comparison of  $C_v$  % between E W direction and N S direction in different slope positions

滑动窗号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
东西方向	13.2	13.1	13.0	16.0	16.0	14.4	12.5	13.1	11.0	11.4	13.7	13.5	10.0	9.8	7.1	6.5	3.9
南北方向	20.5	17.6	16.2	10.9	7.0	9.7	10.1	9.6	9.5	9.3	12.6	11.6	8.7	7.0	9.3	5.6	2.3

注: 滑动窗1, 2, 3号分别代表离坡顶60~100 m, 70~110 m, 80~120 m内的正方形框, 依次类推。

## 2.2 土壤水分在各方向上的变化趋势及其在不同位置上变异的差异

### 2.2.1 东西方向(沿坡长方向)的平均变化趋势以及不同坡位上变异的差异

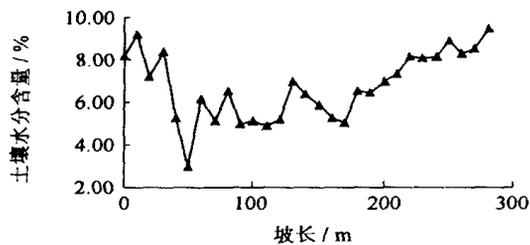


图2 沿坡长方向土壤水分(45~195 cm)分布图

Fig. 2 Distribution of soil moisture (45~195 cm) along slope

由图2可见, 沿坡长方向从上到下, 土壤水分值表现出先减小后增大的趋势, 由表3可见土壤水分在剖面的分布为坡下>坡上>坡中。方差分析表明, 土壤水分在3个坡位之间存在极显著差异( $Sig. = 0.000$ )。当不考虑坡上前100 m时, 土壤水分从坡中到坡下180 m的范围内的变化趋势同已有的研究成果<sup>[4, 21, 22]</sup>, 即土壤水分在坡面的分布呈现从坡顶到坡脚土壤湿度越来越大的规律性, 这是由于坡面降水再分配引起的。但在本研究中坡上的土壤湿度却大于坡中, 主要原因是首先坡上前80 m坡度较缓, 有利于减少土壤水分的径流损失而增加入渗量; 其次可能与柠条根系发达而主要吸收深层水有关。另外, 在离坡顶50 m左右处, 土壤水分出现一个极低值, 这是由于该处两侧各有一个大的侵蚀沟使土壤水分发生侧向迁移而损失。由此可见, 土壤水分在坡面上的分布是受微地形和植被等多种因素影响的结果。

表3 不同坡位土壤水分统计特征值

Table 3 Statistical results of soil moisture in different slope

坡位	样本数	平均值/ %	标准差	标准误	变异系数/ %	95%的置信区间/ %
坡上	40	6.74	2.418	0.382	35.9	5.97~7.51
坡中	40	5.59	1.481	0.234	26.5	5.11~6.06
坡下	53	7.84	1.454	0.200	18.5	7.44~8.25

土壤水分不仅在各坡位存在差别, 而且土壤水分在不同坡位上的变异程度也存在明显差别。由表3各坡位的变异系数可知, 土壤水分在各坡位都为中等变异, 且从坡上到坡下其变异程度越趋减弱, 这与表2的分析结果一致。沿坡长方向, 求出每一条等高线上的5个土壤水分的平均值和变异系数并进行相关分析。结果表明, 沿坡长方向从坡上到坡下, 同一等高线上的土壤水分变异程度随着土壤水分平均值的增加而减小( $R = -0.398$ ,  $Sig. = 0.033$ ), 这与土壤水分从坡上到坡下变异程度逐渐减小大体上是相吻合的。这说明随着坡地海拔的上升, 风速、温度、植被、土壤特性等因素对土壤水分在不同位置上分布的差异性影响越来越显著。

土壤水分沿坡长方向的变化在不同坡向具有一定的稳定性, 将5列采样带的土壤水分分布汇总于图3。由图3可见, 5条曲线沿坡长方向呈现出相同的变化趋势, 又由5列采样带和水分平均值相互之间的相关系数(表4)可知, 土壤水分沿坡长方向平均变化趋势与5列采样带的水分变化趋势具有极显著或显著相关性, 其相关程度按C、A、

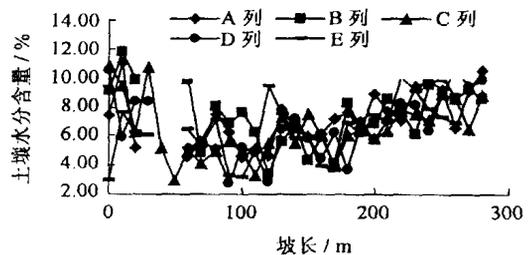


图3 各列土壤水分(45~195 cm)沿坡长分布图

Fig. 3 Distribution of soil moisture (45~195 cm) along slope for 5 sampling columns

D、B、E 的顺序依次降低。除 E 列外，其它各列之间的土壤水分都存在显著相关性，且都与 C 列采样带(山脊)的水分呈极显著相关性。由此可见，不同坡向土壤水分之间的相关性并非具有严格的随间隔距离减小而增大的规律，而是表现出各列土壤水分受 C 列(顺山脊采样带)土壤水分影响最大。由于 C 列土壤水分与坡面平均水分的相关系数最大，因此在只测得 C 列土壤水分的情况下，可用下列线性方程来表示沿坡长方向坡面平均水分含量：

$$Y = -0.056X^2 + 1.433X \quad (R^2 = 0.986, \text{ 回归方程两回归系数检验的显著性水平都小于 } 0.001)$$

式中 Y 值为沿坡长方向平均水分；X 值为 C 列采样带土壤水分值。

表 4 沿坡长方向 5 列采样带土壤水分 Pearson 相关系数

Table 4 Pearson correlation for soil moisture of 5 sampling columns along slope

	平均值	A 列	B 列	C 列	D 列	E 列
平均值	1.000	0.792 **	0.698 **	0.836 **	0.765 **	0.495 *
A 列		1.000	0.469 *	0.575 **	0.417 *	0.388
B 列			1.000	0.497 **	0.405 *	0.102
C 列				1.000	0.654 **	0.190
D 列					1.000	0.109
E 列						1.000

\* 相关系数在 0.05 的水平上显著(二尾检验)；\*\* 相关系数在 0.01 的水平上显著(二尾检验)。

2.2.2 南北方向的平均变化趋势以及不同坡向上变异的差异

坡向直接影响到光热的再分配，影响土壤形成速度，进而影响土壤水分状况。大量研究表明<sup>[4,6,23]</sup>，阴坡的土壤水分含量大于阳坡。由图 4 和表 5 可知，本研究中土壤水分呈现出阴坡 > 山脊 > 阳坡的规律，方差分析表明阴坡和阳坡之间的水分差别很显著(Sig. = 0.027)。在同一坡向，土壤水分的分布表现为靠近山脊采样列的土壤水分大于远离山脊采样列的土壤水分。

在不同坡向上，不仅土壤水分含量存在差异，土壤水分的变异性也有差别。由表 5 可见，土壤水分在各采样列的变异程度都为中等，且按照 A、B、E、C、D 的顺序依次增大；阳坡的变异程度大于阴坡。相对于阴坡来说，阳坡的植被少而不均匀，接受的太阳光热也多。出现如上变异格局的原因是太阳光热和地表性质的相互作用使土壤水分在阳坡分布的不均匀性程度要大于阴坡。对各采样列土壤水分平均值与水分变异系数回归，两者呈负相关，但水平不显著(R = -0.746, Sig. = 0.148)。

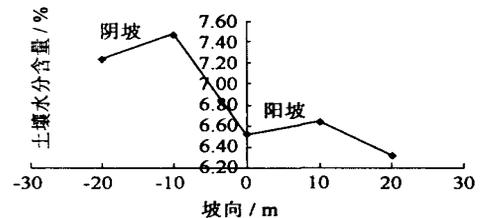


图 4 土壤水分(45~195 cm)沿各坡向分布图  
Fig.4 Distribution of soil moisture (45~195 cm) in different slope aspects

表 5 不同坡向土壤水分统计特征值

Table 5 Statistical results of soil moisture in different slope aspects

坡向	样本数	平均值/ %	标准差	标准误	变异系数/ %	95 %的置信区间/ %
A 列	26	7.24	1.822	0.357	25.1	6.51 ~ 7.98
B 列	26	7.48	2.068	0.406	27.7	6.64 ~ 8.31
C 列	29	6.51	2.010	0.373	30.9	5.75 ~ 7.28
D 列	27	6.64	2.180	0.420	32.8	5.78 ~ 7.50
E 列	25	6.32	1.916	0.383	30.3	5.53 ~ 7.11
阴坡	52	7.36	1.933	0.268	26.3	6.82 ~ 7.90
阳坡	52	6.49	2.043	0.283	31.5	5.92 ~ 7.05

2.2.3 垂直方向上的变化趋势以及各土层之间变异的差异

土壤水分含量在垂直方向的分布受降水、蒸发、土地利用类型和植被等的影响较大。由图 5 可知，在所研究的深度内，土壤水分先减小至临界深度 95 cm 左右，然后又逐渐增加，这与李洪建等<sup>[5]</sup>的分析结果一致。

在各土层之间,不仅土壤水分含量存在差别,各层之间土壤水分的变异程度也存在差异。由表6可见,各层

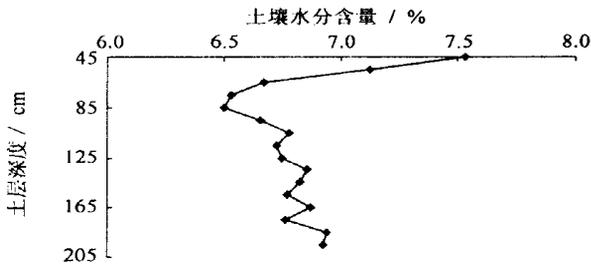


图5 土壤水分(45~195 cm)随深度变化分布图

Fig. 5 Distribution of soil moisture(45~195 cm) in depth

土壤水分之间的变异系数值在 31.0%~38.8%之间,为中等变异,但是随着深度的增加,变异系数并未表现出明显的规律。然而从各土层土壤水分平均值与标准差、变异系数之间的相关系数(表7)可看出,标准差和土壤水分的平均值呈极显著的正相关性( $Sig. < 0.01$ );而变异系数与土壤水分的平均值具有显著的正相关性( $Sig. < 0.05$ )。这说明土层之间土壤水分的变异性随土壤水分平均值的升高而增大,而表现出与土壤水分含量在垂直方向上的分布具有一致性的趋势。本研究中土壤水分平均值为 6.83%,处于萎蔫系数之下,大部分水分分布在 0.0002 mm 的当量孔径范围内,

由于土壤水分先充满较小的孔径,所以可认为,平均土壤水分越大,充水的最大当量孔径也越大,再由变异系数和平均土壤水分的正相关性可推测,垂直方向上,在萎蔫湿度下的孔径范围内,孔隙越小,其分布越均匀。

表6 不同深度土壤水分统计特征值

Table 6 Statistical results of soil moisture in different depth

深度/cm	样本数	平均值/%	标准差	标准误	变异系数/%	95%的置信区间/%
45	133	7.53	2.764	0.240	36.7	7.06~8.01
55	133	7.12	2.762	0.240	38.8	6.65~7.60
65	133	6.67	2.103	0.182	31.5	6.31~7.03
75	133	6.53	2.022	0.175	31.0	6.18~6.88
85	133	6.50	2.195	0.190	33.8	6.13~6.88
95	133	6.65	2.095	0.182	31.5	6.30~7.01
105	133	6.78	2.255	0.196	33.3	6.39~7.17
115	133	6.73	2.336	0.203	34.7	6.33~7.13
125	133	6.75	2.399	0.208	35.6	6.34~7.16
135	133	6.85	2.413	0.209	35.2	6.44~7.27
145	133	6.82	2.372	0.206	34.8	6.41~7.23
155	133	6.77	2.472	0.214	36.5	6.34~7.19
165	133	6.87	2.607	0.226	37.9	6.42~7.32
175	133	6.76	2.536	0.220	37.5	6.33~7.20
185	133	6.94	2.556	0.222	36.8	6.50~7.38
195	131	6.92	2.672	0.234	38.6	6.46~7.38

表7 沿垂直方向土壤平均水分与标准差、变异系数之间的 Pearson 相关系数

Table 7 Pearson correlation among soil moisture, Std deviation and  $C_v$  along vertical position

	土壤平均水分	标准差	变异系数
土壤平均水分	1.000	0.815 **	0.603 *
标准差		1.000	0.953 **
变异系数			1.000

\*相关系数在 0.05 的水平上显著(二尾检验); \*\*相关系数在 0.01 的水平上显著(二尾检验)。

### 3 讨 论

利用变异系数对土壤水分的变异进行定性分析时,其结果依赖于所研究的尺度。一般地而言,研究尺度越大,其变异性也越强,Reynolds 指出土壤水分变异程度与研究尺度成正相关( $R^2 = 0.70$ )<sup>[24]</sup>。要对土壤水分在各向的变异以及相关距离定量化,地统计学方法是有一定优势的,这正是地质统计学方法在土壤水分可见变异性研究中大量应用的原因之一。但是综合有关地统计学研究成果<sup>[9,11,12,14,25~29]</sup>发现,在一定程度上,土壤水分的

变异程度和相关距离也随研究尺度的增大而增大。然而，这正是土壤水分变异的尺度依赖性的反映，其原因为在不同的研究尺度上影响土壤水分分布的主导因素和过程不同。所以，为进一步了解不同研究区域和尺度下影响土壤水分分布的主导因素和过程，应该在研究土壤水分本身的变异的同时，还有必要定量地获取各点相关环境因素参数，并对其变异程度和相关距离进行分析，然后把土壤水分变异和环境因素变异进行对比分析，找出所研究尺度或区域下影响土壤水分分布的主导因子，以便对研究区域的土壤水分进行精确地调控。

有关沿坡长方向上土壤水分的变异的研究很多，大多数研究结果都发现土壤水分与相对海拔成反比例关系<sup>[30~33]</sup>，然而 Charpentier 等，Whieaker, Niemann & Edgell 却发现相对海拔与土壤水分没有一致性<sup>[34~36]</sup>。基于以上不同的研究结果，J. S. Famiglietti & J. W. Rudnicki & M. Rodell 通过在 200m 长的采样断面上历时 7 个月以频率为每天一次的高强度采样研究发现<sup>[37]</sup>，在降水后的早期，土壤水分与相对海拔没有相关性，但是随着土壤湿度的降低，土壤水分与相对海拔逐渐呈现出不断增强的负相关性，即表现出从坡顶到坡脚，土壤水分不断增大的趋势。与此同时，土壤水分的变异程度也不断发生变化，刚降水后，上坡的变异性最大，随着时间的推移，上坡的变异逐渐变小至下坡所呈现的状态，即下坡的土壤水分变异较小，且具有较长的时间稳定性。导致以上现象发生的原因是在不同的时间阶段，土壤水分分布和变异所受的主导影响因素不同。因此，土壤水分沿坡长方向的分布和变异具有时间依赖性，这也正是某些研究结果存在矛盾的原因之一。为了全面详细了解土壤水分沿坡长方向的动态变化过程，长时间高频率监测土壤水分是必需的。

通过在不同方向上土壤水分变异系数与土壤水分平均值的相关性分析发现，不同坡位、坡向土壤水分的变异与平均土壤水分值呈现显著或较弱的负相关，而在垂直方向上，各土层的土壤水分的变异却与土壤水分平均值呈显著的正相关。类似的研究我们也可以看到，如新西兰 Satellite Station 试验区的土壤水分变异程度随平均土壤水分值的升高而下降，而在澳大利亚的 Point Nepean、Tarrawarra 1 和 Tarrawarra 1&2 等试验区土壤水分的变异与土壤水分平均值呈正相关<sup>[1]</sup>；Roth 从二维随机流模拟中发现，土壤从湿润到干旱条件时，水流过程的异质性降低至一个临界状态，到达这个状态时，即便是在异质性土壤中，水流也是同质的，进一步干燥时，水流的异质性又增加<sup>[38]</sup>；在 Arensdorf 的砂壤中，10 cm 深度土壤水的  $pF$  值（土水势的水柱高度，厘米数的负对数）的方差随  $pF$  均值的减小，表现出先减小后增大的趋势，而在 Golzow 的重粘土中，10 cm 深度土壤水的  $pF$  值的方差随  $pF$  均值的减小而一直减小（O. Wendroth et al.）<sup>[19]</sup>，David Russo 和 Eshel Bresler 发现土壤水分  $\phi(h)$  的变异系数随土水势  $h$  的减小而增大<sup>[39]</sup>。土壤水分变异与平均土壤水分之间的各种关系，在一定程度上不仅揭示了在不同的研究区域尺度或位置上，影响土壤水分分布的主导因素的不同，还反映了该主导因素在不同位置上影响程度的差异性。在本研究中，土壤水分在阳坡的变异大于在阴坡的变异，说明了主导因子光、热等对阳坡各位置影响的差异性要强于阴坡；土壤水分的变异从坡上到坡下呈降低的趋势，说明了风速、温度、植被、土壤特性等对土壤水分分布影响的差异性从上到下依次减弱；而在垂直方向，各层土壤水分的变异性与土壤水分平均值的关系就可反映土壤中各孔径分布的变异性。因此，通过研究土壤水分变异性与平均土壤水分的关系，为我们理解影响土壤水分分布的主导因素及其在不同研究区域和位置上的影响程度提供了一个好的突破口。

此外研究发现，在研究区域的二维平面上，各土层的变异程度是不相同的，因此当研究二维平面土壤水分的空间变异时应该考虑所研究的土壤深度对研究结果的影响。

## 4 结 论

本文运用统计学原理以神木试区生态观测站为例分析了黄土高原退耕地坡面土壤水分的空间变异性，并对土壤水分变异的尺度性和时间依赖型以及土壤水分变异的影响因子等进行了分析和探讨。试验结果表明：

(1) 土壤水分在垂直方向和南北方向（垂直于坡长方向）的平均变异程度为弱变异；在东西方向（沿坡长方向）、二维平面和三维空间上为中等变异性；

(2) 土壤水分沿坡长方向表现出先减小后增大的趋势，且在各坡位变异程度不一，呈现出变异程度为坡上 > 坡中 > 坡下的趋势；

(3) 土壤水分沿南北方向(垂直于坡长方向)表现为阴坡 > 山脊 > 阳坡的明显趋势,其变异程度表现为阳坡 > 阴坡的趋势;

(4) 土壤水分在垂直方向表现出先减小后增大的趋势,且在各层的变异程度与各层平均土壤水分成正相关的正相关。

#### 参考文献:

- [1] Andrew W, Western, SerrLin Zhou, *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] 邱 扬,傅伯杰,王 军,等. 黄土丘陵小流域土壤物理性质的空间变异[J]. *地理学报*, 2002, 57(5):587 - 594.
- [4] 徐学选,刘文兆,高 鹏,等. 黄土丘陵区土壤水分空间分布差异性探讨[J]. *生态环境*, 2003, 12(1):52 - 55.
- [5] 李洪建,王孟本,柴宝峰. 黄土高原土壤水分变化的时空特征分析[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(4):515 - 519.
- [6] 贾志清,宋红竹,陈 涛,等. 黄家二岔小流域土壤水分空间分布特征[J]. *北京林业大学学报*, 1999, 21(5):88 - 91.
- [7] 李 红,周连第,张有山. 北京郊区平原粮田土壤水分垂直变异特征[J]. *华北农学报*, 2002, 17(2):82 - 87.
- [8] 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.
- [9] 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立格估值[J]. *水科学进展*, 2001, 12(4):460 - 465.
- [10] 周刘宗,陈志雄,周凌云,等. 土壤水分的时序分析研究[J]. *土壤*, 1998, 4:188 - 193.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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(1):46 - 48.
- [16] 王 军,傅伯杰,邱 扬,等. 用空间内查法研究黄土丘陵小流域土壤水分时空分布特征[J]. *自然科学进展*, 2002, 12(4):430 - 433.
- [17] Qiu Yang, Fu Bojie, Wang Jun, *et al.* Spatial-temporal distribution of land use in relation to topography in a gully catchment of the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(1):20 - 29.
- [18] Qiu Yang, Fu Bojie, Wang Jun, *et al.* Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 240(3,4):243 - 246.
- [19] Wendroth O, Pohl W, Koszinski S, *et al.* Spatial-temporal patterns and covariance structures of soil water status in two Northeast German field sites[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 215:38 - 58.
- [20] 唐克丽,侯庆春,王斌科,等. 黄土高原水蚀风蚀交错带和神木试区的环境背景及整治方向[J]. *中科院西北水土保持研究所集刊*, 1993, 18:2 - 15.
- [21] 杨文治,邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京:科学出版社, 2000. 128 - 130.
- [22] 李裕元,邵明安,张兴昌. 侵蚀条件下坡地土壤水分与有效磷的空间分布特征[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(2):41 - 44.
- [23] 卢金伟,李占斌,郝良勇,等. 陕北黄土区土壤水分养分空间分异规律[J]. *山地学报*, 2002, 29(1):108 - 111.
- [24] S Reynolds. A note on the relationship between size of area and soil moisture variability[J]. *Journal of Hydrology*, 1974, 22(1,2):71 - 76.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 史海滨,陈亚新. 线性非平稳型农田土壤水分信息空间变异性及预测研究[J]. *农业工程学报*, 1996, 12(3):77 - 82.
- [28] 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, 3:85 - 93.
- [29] 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.
- [30] Krumbach A W Jr. Effects of microrelief on distribution of soil moisture and bulk density[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1959(64):1587 - 1590.
- [31] Henninger D L, Peterson G W, Engman E T. Surface soil moisture within a watershed: Variations, factors influencing, and relationships to sur

- face runoff[J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, 40:773 - 776.
- [32] Robinson M, Dean T J. Measurement of near surface soil water content using a capacitance probe[J]. Hydrological Processes, 1993, 7:77 - 86.
- [33] Nyberg L. Spatial variability of water content in the covered catchment at Gårdsjön, Sweden[J]. Hydrological Processes, 1996, 10:89 - 103.
- [34] Charpentier M A, Goffman P M. Soil moisture variability within remote sensing pixels[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97:18987 - 18995.
- [35] Whitaker M P L. Small-scale spatial variability of soil moisture and hydraulic conductivity in a semi-arid rangeland soil in Arizona[M]. M S Thesis, Department of Hydrology and Water Resources, The University of Arizona, Tucson, AZ, 1993.
- [36] Niemann K O, Edgell M C R. Preliminary analysis of spatial and temporal distribution of soil moisture on a deforested slope[J]. Physical Geography, 1993, 14 (5): 449 - 464.
- [37] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas[J]. Journal of Hydrology, 1998, 210:259 - 281.
- [38] Roth K. Steady state flow in unsaturated, two-dimensional, macroscopically homogeneous, Miller similar medium[J]. Water Resour Res, 1995, 31:2127 - 2531.
- [39] David Russo, Eshel Bresler. Soil hydraulic properties as stochastic processes: I an analysis of field spatial variability[J]. Soil Sci Soc Am J, 1981, 45:682 - 687.

## Study on spatial variability of soil moisture on the recultivated slope-land on the Loess Plateau<sup>\*</sup>

HU Wei<sup>1,2</sup>, SHAO Ming-an<sup>1,3</sup>, WANG Quan-jiu<sup>1</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, CAS, Yangling 712100, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** In order to provide some recommendation for the water management and the vegetation restoration on slope-lands, the study on the spatial variability of the soil moisture in different directions and positions on the recultivated slope-land on the Loess Plateau is carried out at the Shenmu ecological station both by the field measurements and the statistical analysis. In this paper, some key issues related to the spatial variability such as scale and time-dependence are discussed. The results show that the mean variation of the soil moisture is weak along the vertical and the N-S direction (perpendicular to slope), while it is moderate when the E-W direction, 2-D and 3-D space are considered. Along the slope, the soil moisture decreases and then increases from its top to the bottom, and the sequence of the magnitude of the heterogeneity is the top-slope > the mid-slope > the bottom-slope; in the N-S direction, the soil moisture increases from the sunshine slope to the shadow slope, and the magnitude of the heterogeneity of the sunshine slope is larger than that of the shadow slope; in the vertical direction, the soil moisture decreases and then increases below the depth of 200cm from the soil surface, and the magnitude of the heterogeneity is significantly positive correlated to the mean moisture of the same soil layer.

**Key words:** loess slope-land; soil moisture; spatial variability; Loess Plateau

\* The study is financially supported by the Hundred Scientists Program Project of CAS and the National Natural Science Foundation of China (No. 40025106;90102012;50479065).