

DOI : 10.13872/j.1000-0275.2016.0114

赵文举, 崔珍, 马孝义, 马宏, 于平. 不同采样幅度和间距下压砂地枣树土壤水分的空间变异性研究 [J]. 农业现代化研究, 2016, 37(6): 1181-1189.

Zhao W J, Cui Z, Ma X Y, Ma H, Yu P. Effects of sampling extent and spacing on spatial variability of soil water content in a field with gravel-mulched jujube tree[J]. Research of Agricultural Modernization, 2016, 37(6): 1181-1189.



不同采样幅度和间距下压砂地枣树土壤水分的空间变异性研究

赵文举¹, 崔珍¹, 马孝义², 马宏¹, 于平¹

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了探明西北地区特有的压砂地枣树土壤水分的空间变异及其尺度效应, 本文基于野外试验, 选取 32 m×32 m 区域, 并在此基础上改变采样幅度和采样间距, 基于经典统计学和地统计学理论, 研究了不同采样幅度和间距条件下 0-50 cm 土层土壤含水量的空间分布特征及其空间变异性。结果表明, 对于所有 5 种采样幅度 (32 m×32 m、28 m×28 m、24 m×24 m、20 m×20 m 和 16 m×16 m), 随土层深度的增加, 土壤含水量呈减小的趋势, 而变异系数呈增大的趋势, 空间变异强度基本表现为弱变异至中等偏弱变异; 当采样幅度增大时, 土壤含水量的变异系数 C_v 、块金值 C_0 及变程 A 均不断增大。对于 4 m、8 m 和 12 m 这 3 种采样间距, 当采样间距增大时, 土壤含水量的块金值 C_0 不断增大, 变程 A 不断减小, 而变异系数 C_v 不受影响。在不同尺度内, 土壤含水量均存在强烈的空间自相关性。各土层土壤含水量在不同采样间距下的空间分布形态相似, 多处出现明显的“隆起”与“凹陷”, 受地形影响显著, 并随着采样间距的增大, 逐渐平坦化, 8 m 为较合理的采样间距。

关键词: 压砂地; 土壤含水量; 尺度效应; 空间分布

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0275 (2016) 06-1181-09

Effects of sampling extent and spacing on spatial variability of soil water content in a field with gravel-mulched jujube tree

ZHAO Wen-ju¹, CUI Zhen¹, MA Xiao-yi², MA Hong¹, YU Ping¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract : To explore the effects of sampling extent and spacing on spatial variability of soil moisture in a gravel-sand mulched jujube orchard, spatial analyses including classical statistics and geo-statistics were conducted with soil water content (SWC) of 0-50 cm in the 32 m×32 m field by changing the sampling extent and spacing. Irrespective of sampling extents (i.e. 32 m×32 m, 28 m×28 m, 24 m×24 m, 20 m×20 m and 16 m×16 m), the SWC decreased with the increase of soil depth while the variation coefficient increased with the increasing soil depth. The spatial variability of SWC was weak and moderate for all scales; The variation coefficient (C_v), nugget (C_0), and variation range (A) of SWC all increased with the increase of sampling extent. When three sampling spacings (i.e. 4, 8 and 12 m) were concerned, the nugget (C_0) increased with the increase of sampling spacing; The variation range (A) decreased with the increase of sampling spacing; the C_v was not affected by the sampling spacing. A strong spatial autocorrelation characteristic of SWC was found for all scales. The distribution patterns of SWC in the same soil layer at different sampling spacings were similar and tended to be "flat" with the increase of the sampling spacing. The reasonable sampling spacing was found to be 8 m in our case.

Key words : gravel-sand mulched field; soil water content; scale effect; spatial distribution

土壤水分是土壤 - 植物 - 大气连续体 (soil-plant-atmosphere continuum, SPAC 系统) 中大气降水、地表水、土壤水和地下水相互转化的一个重要环节^[1]。土壤水分的空间格局及空间变异是空间合理配置

和人工植被恢复的科学基础。随季节和研究尺度不同, 土壤水分表现出较强的空间变异性^[2-5]。土壤水分的空间异质性主要受到土壤质地、植被、地形地貌、降雨及人类活动等非线性因子的影响^[6]。有

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51269008, 51279167); 兰州理工大学红柳青年教师培养计划项目 (Q201310)。

作者简介: 赵文举 (1981-), 男, 甘肃永昌人, 博士, 副教授, 主要从事农业水土工程方面的研究, E-mail: wenjuzhao@126.com。

收稿日期: 2016-04-15, **接受日期:** 2016-09-07

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (51269008, 51279167); HongLiu Young Teachers Training Program of Lanzhou University of Technology (Q201310).

Corresponding author: ZHAO Wen-ju, E-mail: wenjuzhao@126.com.

Received 15 April, 2016; **Accepted** 7 September, 2016

研究表明,不同尺度条件下对土壤水分空间变异规律的研究可为提高土壤水分利用率、建立水分管理信息系统以及发展和验证遥感反演提供基础的地面观测数据支持,是实现田间“精准灌溉”的基础^[7-8]。Blöschl^[9]认为,采样尺度的变化将使土壤水分的表现变异与真实变异出现偏差。胡伟等^[10]通过改变采样幅度和间距的“再采样”方法,研究了尺度大小对土壤水分空间变异的影响,得出在一定范围内随采样幅度的增大,土壤水分变异的特征参数都呈不同程度地增大;随采样间距的增大,相关指数没有变化,而相关距离却减小。魏新光等^[11]研究指出土壤含水量时空变异性显著,垂直方向上随着土层深度的增加,变异系数逐渐降低。邢旭光等^[12]认为对于 40 m×40 m、8 m×8 m 和 2 m×2 m 3 种尺度,0-60 cm 深度各土层土壤含水量在水平方向上的变异强度表现为弱变异至中等(偏弱)变异,且随尺度减小和土层深度增加而减小,且所有取样点 0-60 cm 深度内土壤含水量在垂直方向上的变异强度表现为弱变异至中等(偏弱)变异。赵文举等^[13]研究得出不同种植年限压砂地的变异系数随着采样幅度的增大而增大。史文娟等^[14]研究了 3 种微尺度(0.25 m、1 m、4 m)条件下棉田土壤水分的空间变异性,指出土壤水分变异性为中等变异,半方差函数大部分可采用高斯模型模拟。同时也有研究表明^[15-17],微尺度条件下的土壤含水量半方差函数模型和空间变异特性与传统的大中尺度之间存在较大差异,因此,深入了解尺度变化对土壤水分空间变异的影响,定量分析土壤水分空间变异特征及其尺度效应,针对特定地区进行的微尺度土壤特性的空间变异性研究亟需进一步开展。

压砂地是西北旱区劳动人民利用砂石作为覆盖材料,依赖天然降水创造出的一种以砂石覆盖和免耕为核心的保护性耕作模式,距今已有 300 多年的

发展历史^[18]。土壤表层覆盖砂石具有明显的增渗、减蒸、保温、抗蚀、减小地表径流等作用^[19-20],但会使得土壤水分的入渗、蒸发机理比均质土特殊复杂。同时鉴于土壤水分分布状况对植被生长有至关重要的影响^[21-22],对土壤水分空间变异性的研究具有重要意义。为此,基于野外试验,拟对西北地区特有的压砂地枣树土壤水分在水平方向和垂直方向上的空间变异特性及分布特征进行微尺度研究,以期压砂地田间水分管理提供理论依据。

1 研究材料与方法

1.1 试验区概况

研究区在景泰县兰州理工大学试验研究基地附近。地处河西走廊东端,北依宁夏,黄土高原与腾格里沙漠的过渡地带。土壤类型主要为洪积灰棕荒漠土和灰钙土。景泰县地处季风区与非季风区过渡地带,县境内气候呈现出明显的大陆性气候特征,年均降水量 185 mm,多集中在 7-9 三个月,占全年降水量的 61.4%,年均蒸发量 3 038 mm,是降水量的 16 倍。无霜期 141 d,年均温度 8.2 ℃。

1.2 试验方法

用 GPS 定位在样地中心的空地作土壤剖面,确定土壤样点。在东西方向与南北方向,采用规格网格布点法,以网格最小尺寸为 32 m×32 m 的矩形网格取样作为每个试验块,网格的尺度取 4 m,测点中心距为 4 m,共 64 个取样点,采样时将表层砂石小心铲除,取样深度为 0-10 cm,10-20 cm,20-30 cm 和 30-50 cm。土样的取样方法为土钻取样法,样品的采集重量为 60-70 g,采用烘干法测定土壤含水量。采样点均匀地分布在研究区域内,取样点分布如图 1 所示。现场调查和取样在 2015 年 10 月 14 日进行。

1.2.1 改变采样幅度 对所有的测定数据进行分析,

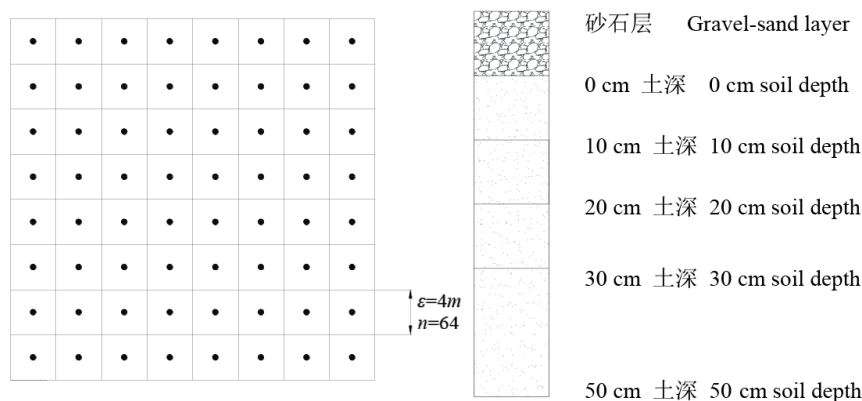


图 1 土壤含水量取样点分布图

Fig. 1 Sampling point distribution of soil water content

并分别以 28 m×28 m、24 m×24 m、20 m×20 m、16 m×16 m 的“滑动窗”从测定区域的西北角向东南角滑动，计算每个滑动窗内的变异参数。并利用 Sufer8.0 对已有土壤含水量数据通过克里格插值分别绘出其空间分布图。

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，然后在原始采样点的基础上分别在东西和南北向每隔一个和两个点对原始采样点进行隔行抽取，来实现采样密度的改变，即增大采样间距，并使在每种间距下，所有的原测数据都取到，并将相同采样点数的样本变异参数的平均值作为该采样密度内的变异结果。需要指出的是，在地统计学分析时，如果间距太大可能造成数据太少，从而使数据失去可靠性，因此只用采样间距为 4、8、12 m 这 3 种情况分析采样间距对土壤含水量空间变异的影响。

1.3 数据处理与分析

数据的空间变异研究均采用经典统计学和地统计学相结合的方法。采用 SPSS20.0 进行经典统计计算，采用 GS+9.0 对土壤含水率进行半方差分析和理论模型的拟合，采用克里格法对各尺度 0-50 cm 土层土壤含水量进行插值，最后借助 Sufer8.0 和 Origin9.0 完成图形绘制。

1.3.1 变异函数的理论模型拟合 球状模型：

$$r(h) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ C_0 + C \left(\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3} \right), & 0 < h \leq a \\ C_0, & h > a \end{cases} \quad (1)$$

式中： $r(h)$ 为半方差值； h 为样本间距； C_0 为块金常数； C_0+C 为基台值； C 为拱高； a 为变程。

指数模型：

$$r(h) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ C_0 + C \left(1 - e^{-\frac{h}{a}} \right), & h < a \end{cases} \quad (2)$$

注： $3a$ 为变程。

高斯模型：

$$r(h) = \begin{cases} 0, & h = 0 \\ C_0 + C \left(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}} \right), & h > 0 \end{cases} \quad (3)$$

注： $\sqrt{3}a$ 为变程。

半方差函数模型中块金值 (C_0) 反映随机因素引起的空间变异程度，越接近于 0 表明空间相关性越强；基台值 (C_0+C) 反映区域化变量在研究范围

内总的空间变异程度；变程 (A) 反映区域化变量空间自相关变异的尺度范围，在变程之内具有空间自相关性，反之，则是独立的；基台比 $C_0/(C_0+C)$ 为空间相关度，反映可度量的空间随机因素引起的变异所占的比例，当 $C_0/(C_0+C) < 0.25$ ，表示变量具有强烈的空间自相关性， $0.25 \leq C_0/(C_0+C) \leq 0.75$ ，表示变量具有中等的空间自相关性， $C_0/(C_0+C) > 0.75$ ，表示变量空间自相关性很弱 [24]。

2 结果与分析

2.1 采样幅度对空间变异结果的影响

2.1.1 不同采样幅度尺度条件下土壤含水量统计特征值分析 变异系数 C_v 与采样幅度的关系如图 2 所示。由图 2 可知，对于 16 m×16 m、20 m×20 m、24 m×24 m、28 m×28 m 和 32 m×32 m 5 种采样幅度 0-50 cm 土层内土壤水分在水平方向上的变异系数均值分别为 13.0%、13.3%、14.0%、14.8% 和 16.5%，呈现出随采样幅度增大而增大的趋势。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，即某些在较大尺度内对土壤水分分布起影响作用的因素在较小有限尺度内，可能具有相对一致性；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 C_v 与采样幅度的关系进行拟合，得到式 (4)：

$$y = 4 \times 10^{-6} x^2 - 0.0004x + 12.872 \quad (4)$$

$$R^2 = 0.9973$$

式中： y 为变异系数； x 为采样幅度。由拟合结果可知，在研究区域内，所选尺度均较小，故变异系数差别不大；随着采样幅度 x 的增大，变异系数 y 值也随之增大。

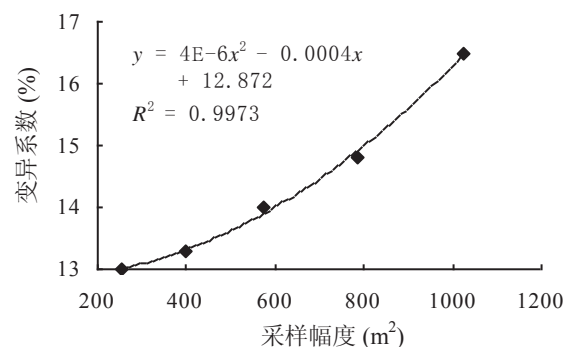


图 2 采样幅度对土壤水分变异系数的影响
Fig. 2 The effect of scale for soil moisture variation coefficient

通过对 16 m×16 m 到 32 m×32 m 采样幅度的压砂地枣树区水平方向的土壤含水量和 0-50 cm 土层垂直方向的土壤含水量统计分析 (表 1)，对于不同

采样幅度, 0-50 cm 土层含水率均表现出随深度增加而减小的趋势; 对于全部取样点, 各土层土壤含水量变异系数在水平方向上呈现随深度增加而增加的趋势, 介于 8.1%-22.5%, 除 0-10 cm 土层空间变异强度在 24 m×24 m、20 m×20 m 及 16 m×16 m 尺度时表现为弱变异外, 其余均表现为中等偏弱变异。
 2.1.2 不同采样幅度条件下土壤含水量空间变异特性分析 以地统计学方法为基础, 对不同采样幅度尺度条件下压砂地枣树区土壤水分进行半方差分

析, 绘制采样幅度为 32 m×32 m 时的土壤水分半方差函数图 (图 3)。由图 3 可以看出, 采样幅度为 32 m×32 m 时的土壤水分半方差函数曲线变化较平稳, 模型拟合的相关系数较高, 表明在整个研究区域内土壤水分的相关性较高。各采样幅度尺度的半方差函数模型及相关参数见表 2。

从表 2 可以看出, 在 32 m×32 m 尺度条件下, 各土层 (除 10-20 cm 外) 均采用指数模型模拟; 在 28 m×28 m 尺度条件下, 各土层的最佳理论模型均

表 1 不同采样幅度 0-50 cm 深度各土层水平方向上土壤水分统计特征值

Table 1 Statistics parameters of horizontal soil water content in 0-50 cm layers under different sampling extents

| 采样幅度 | 土层深度 (cm) | 采样点数 | 最大值 (%) | 最小值 (%) | 中位数 (%) | 均值 (%) | 标准偏差 | 变异系数 (%) | 偏度 | 峰度 |
|-------------|-----------|------|---------|---------|---------|--------|------|----------|--------|--------|
| 32 m × 32 m | 0-10 | 64 | 11.6 | 7.6 | 10.1 | 9.8 | 1.09 | 11.2 | -0.316 | -0.980 |
| | 10-20 | 64 | 11.2 | 6.8 | 9.5 | 9.2 | 1.27 | 13.8 | -0.278 | -1.100 |
| | 20-30 | 64 | 11.0 | 5.2 | 8.0 | 8.1 | 1.54 | 18.7 | -0.122 | -0.906 |
| | 30-50 | 64 | 10.8 | 4.1 | 7.2 | 7.2 | 1.63 | 22.5 | -0.004 | -0.399 |
| 28 m × 28 m | 0-10 | 49 | 11.4 | 7.6 | 10.2 | 9.9 | 1.00 | 10.1 | -0.483 | -0.626 |
| | 10-20 | 49 | 11.2 | 6.8 | 9.5 | 9.3 | 1.12 | 12.1 | -0.507 | -0.715 |
| | 20-30 | 49 | 10.3 | 5.2 | 8.4 | 8.2 | 1.37 | 16.1 | -0.410 | -0.506 |
| | 30-50 | 49 | 10.4 | 4.1 | 7.4 | 7.4 | 1.55 | 20.9 | -0.258 | -0.060 |
| 24 m × 24 m | 0-10 | 36 | 11.4 | 8.1 | 10.2 | 9.9 | 0.91 | 9.2 | -0.259 | -0.923 |
| | 10-20 | 36 | 11.2 | 7.4 | 9.5 | 9.4 | 1.08 | 11.5 | -0.316 | -0.845 |
| | 20-30 | 36 | 10.2 | 5.5 | 8.4 | 8.2 | 1.28 | 15.5 | -0.347 | -0.503 |
| | 30-50 | 36 | 10.4 | 4.1 | 7.4 | 7.4 | 1.47 | 19.9 | -0.319 | 0.555 |
| 20 m × 20 m | 0-10 | 25 | 11.4 | 8.1 | 10.0 | 9.9 | 0.87 | 8.8 | -0.224 | -0.499 |
| | 10-20 | 25 | 11.2 | 7.4 | 9.4 | 9.4 | 1.07 | 11.4 | -0.183 | -0.799 |
| | 20-30 | 25 | 10.2 | 5.5 | 8.0 | 8.1 | 1.20 | 14.8 | -0.279 | -0.536 |
| | 30-50 | 25 | 10.4 | 4.1 | 7.4 | 7.5 | 1.35 | 18.0 | -0.276 | 1.156 |
| 16 m × 16 m | 0-10 | 16 | 11.3 | 8.4 | 10.2 | 10.0 | 0.81 | 8.1 | -0.526 | -0.172 |
| | 10-20 | 16 | 11.2 | 7.4 | 9.5 | 9.5 | 1.16 | 12.2 | -0.239 | -0.981 |
| | 20-30 | 16 | 9.6 | 6.2 | 7.6 | 7.8 | 1.00 | 12.8 | 0.283 | -0.705 |
| | 30-50 | 16 | 10.4 | 4.1 | 7.3 | 7.4 | 1.40 | 19.0 | 0.052 | 2.095 |

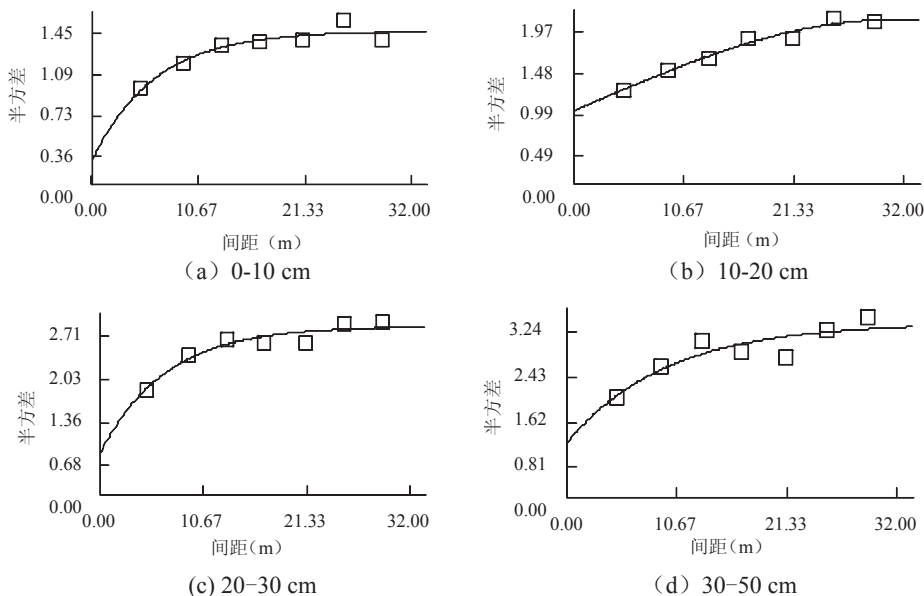


图 3 32 m×32 m 时的土壤水分半方差函数图

Fig. 3 Semi-variance function diagram of soil water content of the scale of 32 m×32 m

表2 不同采样幅度0-50 cm深度各土层土壤水分半方差函数模型及参数拟合

Table 2 Semi-variance models and fitted parameters of soil water content in 0-50 cm layers under different sampling extents

| 采样幅度 | 土层 (cm) | 理论模型 | C_0 | C_0+C | $C_0/(C_0+C)$ | $C/(C_0+C)$ | A(m) | R^2 |
|-------------|---------|------|-------|---------|---------------|-------------|-------|-------|
| 32 m × 32 m | 0-10 | 指数 | 0.218 | 1.354 | 0.161 | 0.839 | 18.72 | 0.904 |
| | 10-20 | 球状 | 0.553 | 1.953 | 0.284 | 0.716 | 25.07 | 0.951 |
| | 20-30 | 指数 | 0.380 | 2.644 | 0.144 | 0.856 | 20.13 | 0.918 |
| | 30-50 | 指数 | 0.428 | 3.129 | 0.137 | 0.863 | 24.08 | 0.810 |
| 28 m × 28 m | 0-10 | 指数 | 0.169 | 1.119 | 0.151 | 0.849 | 15.75 | 0.648 |
| | 10-20 | 指数 | 0.535 | 1.538 | 0.348 | 0.652 | 27.78 | 0.772 |
| | 20-30 | 指数 | 0.322 | 1.989 | 0.162 | 0.833 | 15.83 | 0.680 |
| | 30-50 | 指数 | 0.399 | 2.644 | 0.151 | 0.849 | 14.79 | 0.707 |
| 24 m × 24 m | 0-10 | 指数 | 0.135 | 0.913 | 0.148 | 0.852 | 13.50 | 0.809 |
| | 10-20 | 指数 | 0.171 | 1.274 | 0.134 | 0.866 | 13.17 | 0.965 |
| | 20-30 | 高斯 | 0.589 | 1.924 | 0.306 | 0.694 | 15.05 | 0.996 |
| | 30-50 | 球状 | 0.439 | 2.654 | 0.165 | 0.835 | 20.79 | 0.995 |
| 20 m × 20 m | 0-10 | 球状 | 0.237 | 0.877 | 0.270 | 0.730 | 13.14 | 0.990 |
| | 10-20 | 指数 | 0.200 | 1.304 | 0.153 | 0.847 | 12.36 | 0.918 |
| | 20-30 | 球状 | 0.001 | 1.810 | 0.001 | 0.999 | 14.89 | 0.954 |
| | 30-50 | 指数 | 0.311 | 2.465 | 0.126 | 0.874 | 18.80 | 0.950 |
| 16 m × 16 m | 0-10 | 高斯 | 0.103 | 0.769 | 0.134 | 0.866 | 8.59 | 1.000 |
| | 10-20 | 球状 | 0.089 | 1.451 | 0.061 | 0.939 | 9.19 | 0.905 |
| | 20-30 | 高斯 | 0.001 | 1.217 | 0.001 | 0.999 | 9.04 | 0.981 |
| | 30-50 | 球状 | 0.138 | 2.071 | 0.067 | 0.933 | 8.12 | 0.993 |

为指数模型;在24 m×24 m尺度条件下,各土层可采用指数、高斯和球状模型模拟;在20 m×20 m尺度条件下,各土层可采用球状和指数模型模拟;在16 m×16 m尺度条件下,各土层可采用高斯和球状模型进行模拟。采样幅度从32 m×32 m减小到16 m×16 m时, C_0 均值分别为0.394、0.356、0.333、0.187和0.083,表现为随采样幅度的减小,块金值不断减小的趋势,这是因为随着采样幅度的减小,短距离内的变异和测量误差不断减小的缘故。变程(A)均值分别为22.00 m、18.54 m、15.62 m、14.80 m和8.74 m,表明空间自相关距离随采样幅度减小而减小,且最小变程为8.12 m,大于采样间距4 m,表明采样间距合理。基台值(C_0+C)呈现出随土层深度增加而增大的趋势,表明在研究区域内,50 cm土层土壤含水量的空间变异程度也与土层深度密切相关。在各采样幅度尺度内,基台比 $C_0/(C_0+C)$ 大部分小于0.25,其余介于0.25-0.50之间,表明在各研究幅度尺度内,0-50 cm土层土壤含水量整体表现出较强的空间自相关性。

2.2 采样间距对空间变异结果的影响

2.2.1 不同采样间距条件下土壤含水量统计特征值分析 当采样间距从4 m变化至12 m时,对压砂地枣树区水平方向的土壤含水量和0-50 cm土层垂直方向的土壤含水量进行统计分析(表3)。当采样密度发生变化时,各土层土壤含水量和变异系数

均围绕一个固定值波动。其变异系数的均值分别为11.4%、14.2%、19.4%和23.2%。由此可以看出,研究区域内土壤含水量变异系数受土层深度的影响,而采样间距对变异系数基本不产生影响,这也说明采样幅度一定时,采样密度的改变并不能改变影响土壤含水量变异的因素。由此可见,在一定的研究区域内,适当增大采样间距仍可以得到土壤水分的实际变异系数。

2.2.2 不同采样间距条件下土壤含水量空间变异特性分析 在不同采样间距下,0-10 cm土层采用指数模型模拟;10-20 cm土层采用球状模拟;20-30 cm土层和30-50 cm土层采用指数模型模拟(表4)。

随采样间距从4 m增大到12 m时,块金值(C_0)基本呈现增大的趋势,这可能是由于短距离内微地貌或植被间差异虽表现出一定的结构特征,但却被较大距离上影响土壤水分变异过程的局部微地貌、土壤质地等因素所掩盖。基台值无明显变化规律,变程(A)随采样间距的增大呈明显减小的趋势,说明适当减小采样间距能使土壤含水量表现出更好的空间连续性,采样间距为4 m和8 m时,变程均大于相应的采样间距,表明所取采样间距合理,而当采样间距为12 m时,变程均小于采样间距,采样间距不再合理,说明本研究中8 m的采样间距是较为合理的,可以在取相对较少采样点的情况下仍可获得较为合理的结果。不同采样间距时,各土

表 3 不同采样间距 0-50 cm 深度各土层水平方向上土壤水分统计特征值

Table 3 Statistics parameters of horizontal soil water content in 0-50 cm layers of different sampling spacings

| 土层 (cm) | 采样间距 (m) | 采样点数 | 最大值 (%) | 最小值 (%) | 中位数 (%) | 均值 (%) | 标准偏差 | 变异系数 (%) | 偏度 | 峰度 |
|---------|----------|------|---------|---------|---------|--------|------|----------|--------|--------|
| 0-10 | 4 | 64 | 11.6 | 7.6 | 10.1 | 9.8 | 1.09 | 11.2 | -0.316 | -0.980 |
| | 8 | 32 | 11.4 | 7.6 | 9.9 | 9.7 | 1.01 | 11.3 | -0.395 | -0.706 |
| | 12 | 24 | 11.4 | 7.8 | 9.9 | 9.7 | 1.11 | 11.6 | -0.239 | -1.144 |
| 10-20 | 4 | 64 | 11.2 | 6.8 | 9.5 | 9.2 | 1.27 | 13.8 | -0.278 | -1.100 |
| | 8 | 32 | 11.2 | 6.8 | 9.5 | 9.2 | 1.13 | 13.9 | -0.303 | -0.454 |
| | 12 | 24 | 11.2 | 7.4 | 9.5 | 9.2 | 1.25 | 14.2 | -0.193 | -1.314 |
| 20-30 | 4 | 64 | 11.0 | 5.2 | 8.0 | 8.1 | 1.54 | 18.7 | -0.122 | -0.906 |
| | 8 | 32 | 11.0 | 5.5 | 8.4 | 8.3 | 1.30 | 18.7 | -0.268 | -0.117 |
| | 12 | 24 | 11.0 | 5.2 | 8.1 | 8.0 | 1.53 | 19.7 | -0.081 | -0.393 |
| 30-50 | 4 | 64 | 10.8 | 4.1 | 7.2 | 7.2 | 1.63 | 22.5 | -0.004 | -0.399 |
| | 8 | 32 | 10.8 | 4.1 | 7.5 | 7.5 | 1.66 | 22.5 | -0.132 | 0.153 |
| | 12 | 24 | 10.8 | 4.1 | 7.5 | 7.2 | 1.78 | 23.4 | -0.230 | -0.425 |

表 4 采样间距对 0-50 cm 土层土壤水分半方差参数的影响

Table 4 Effects of sampling spacing on semi-variogram parameter of soil water content in 0-50 cm layers

| 土层深度 (cm) | 采样间距 (m) | 理论模型 | C_0 | C_0+C | $C_0/(C_0+C)$ | $C/(C_0+C)$ | A | R^2 |
|-----------|----------|------|-------|---------|---------------|-------------|-------|-------|
| 0-10 | 4 | 指数 | 0.218 | 1.354 | 0.161 | 0.839 | 18.72 | 0.904 |
| | 8 | 指数 | 0.226 | 1.074 | 0.210 | 0.790 | 10.32 | 0.949 |
| | 12 | 指数 | 0.239 | 1.379 | 0.173 | 0.827 | 10.12 | 0.989 |
| 10-20 | 4 | 球状 | 0.554 | 1.953 | 0.284 | 0.716 | 25.07 | 0.951 |
| | 8 | 球状 | 0.589 | 1.317 | 0.448 | 0.552 | 13.66 | 0.993 |
| | 12 | 球状 | 0.592 | 1.655 | 0.358 | 0.642 | 10.29 | 0.967 |
| 20-30 | 4 | 指数 | 0.380 | 2.644 | 0.144 | 0.856 | 20.13 | 0.918 |
| | 8 | 指数 | 0.364 | 2.011 | 0.181 | 0.819 | 15.53 | 0.986 |
| | 12 | 指数 | 0.368 | 2.605 | 0.142 | 0.858 | 11.04 | 0.496 |
| 30-50 | 4 | 指数 | 0.428 | 3.129 | 0.137 | 0.863 | 24.08 | 0.863 |
| | 8 | 指数 | 0.437 | 3.109 | 0.141 | 0.859 | 12.36 | 0.965 |
| | 12 | 指数 | 0.497 | 3.417 | 0.146 | 0.854 | 9.66 | 0.435 |

层基台比 $C_0/(C_0+C)$ 大部分小于 0.25, 其余介于 0.25-0.50 之间, 表明当采样间距不同时, 0-50 cm 土层内土壤含水量整体表现出较强的空间自相关性。

2.2.3 不同采样间距条件下土壤含水量空间分布特征 为便于直观了解研究区域内土壤含水量的空间分布特征, 分别绘制了各采样间距尺度条件下 0-50 cm 深度内各土层土壤含水量在水平方向和垂直方向的空间分布图, 如图 4 所示。

由图 4 可知, 各尺度土壤水分均表现出“凹凸不平”的分布情况, 这可能与取样区域内的地形地貌有关, 这与邢旭光等^[12]的研究结果相似。在不同采样间距条件下, 0-20 cm 土层土壤含水量均较 20-50 cm 土层波动幅度大, 原因在于浅层土壤易受蒸发和降水作用影响, 由于表层 (0-10 cm) 土壤极易受人因素为影响, 导致 10 cm 深度土壤含水量分布出现多处明显“隆起”与“凹陷”, 而 30-50 cm 深度土壤含水量分布则相对“平坦”。由图 4 进一步可知, 各土层土壤含水量在不同采样间距下的空

间分布总体趋势相同, 但随着采样间距的增大, 其分布形态趋于“平坦”。采样间距为 8 m 时, 其图形虽趋于平坦化, 但与采样间距为 4 m 的空间分布图差别较小, 可以较好的表征土壤含水率的空间分布特征, 而当采样间距为 12 m 时, 相较于前两个采样间距, 其分布特征过于平坦化, 不再能表征土壤含水率的实际空间变异特征。所以本研究中采样间距可取为 8 m, 这可以在获得可靠的实验结果的基础上大大减小采样的工作量。

3 讨论

本文通过改变采样幅度和采样间距探讨了不同采样尺度对压砂地枣树区 0-50 cm 土层土壤水分空间变异性的影响。研究表明, 随着土层深度的增加, 土壤含水量呈减小的趋势, 而变异系数呈增大的趋势, 这与张继光等^[25]、姚雪玲等^[26]的研究结果相同; 而邢旭光等^[12]在对猕猴桃果园土壤含水量进行研究时得出, 在 0-60 cm 土层内随土层深

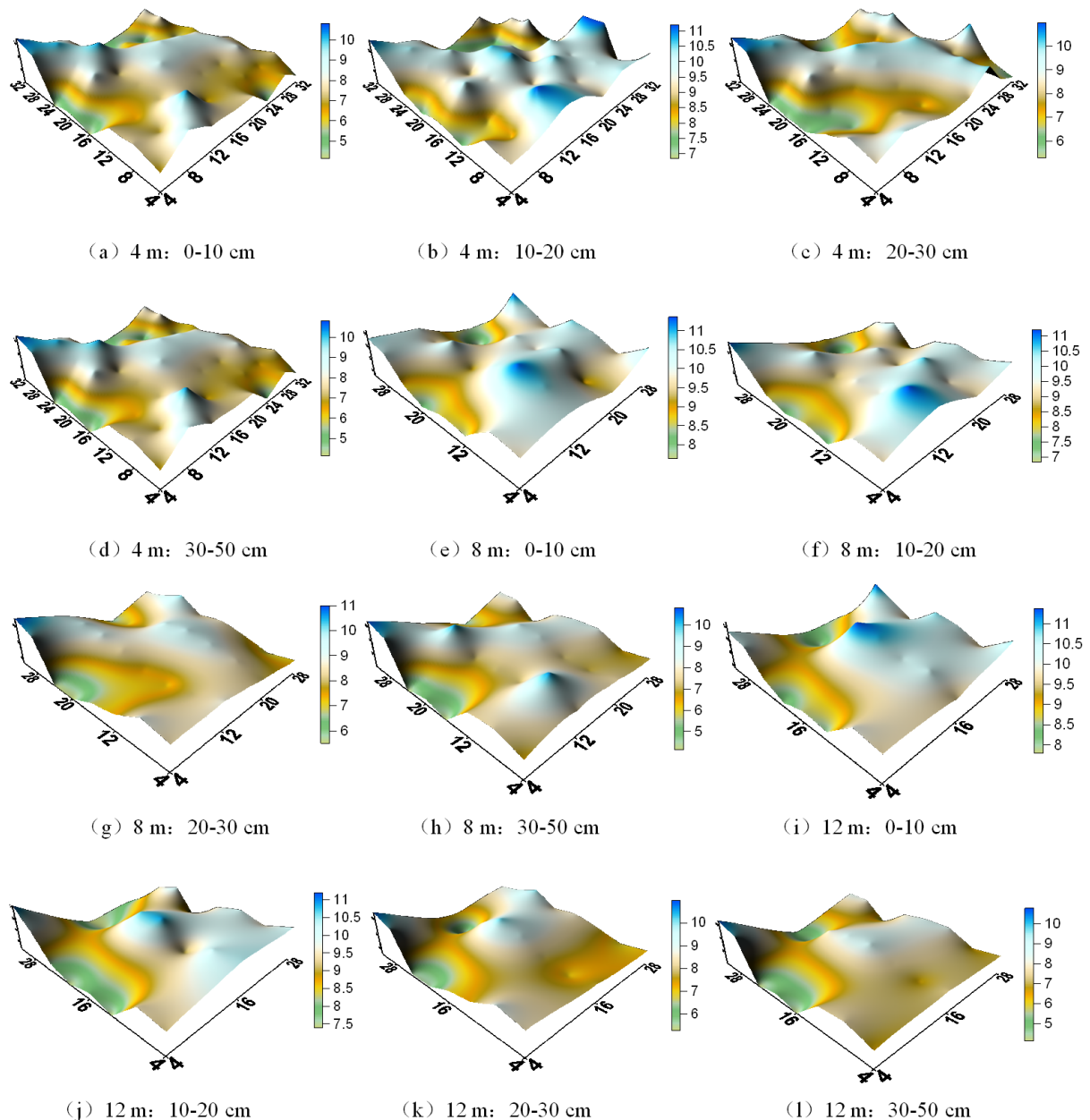


图 4 不同采样间距 0-50 cm 土层土壤含水量空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of soil water content in 0-50 cm layers under different sampling spacings

度增加，土壤含水量先增大后减小，变异系数逐渐减小的结论；魏新光等^[11]对丘陵区枣林土壤水分动态进行了研究，得出随土层深度增加，变异系数逐渐降低的结论；赵文举等^[13]在对不同种植年限压砂地 0-50 cm 土层进行研究时得出随着采样幅度尺度的增大，土壤含水量和变异系数均增大的结论。这些不同的变化规律可能与各研究区域地形地貌、管理措施、土壤质地以及植被类型和种植结构等有关，这也决定了不同研究区域土壤水分和变异系数的差异性。

3.1 采样幅度对空间变异的影响

郭德亮等^[15]在对不同采样幅度黑河中游绿洲

区不同土地利用类型表层土壤水分空间变异进行研究时，林地湿润条件下土壤水分变异的特征参数显示出与本研究相似的规律，即块金值 (C_0) 和变程 (A) 均随采样幅度的增大而增大，而农地的变程 (A) 则无固定的变化规律；胡伟等^[10]对黄土高原退耕坡地土壤水分的空间变异进行尺度性研究时得出在一定范围内随采样幅度的增大，土壤水分变异的特征参数都呈不同程度地增大的结论，与本研究变异系数的变化规律相同；而邢旭光等^[12]在对不同采样幅度下猕猴桃果园土壤含水量进行研究时得出，变程 (A) 随采样幅度的增大而增大的结论，这与本研究结果一致，而块金值 (C_0) 较稳定且变

化程度减小的结论却与本研究中块金值随采样幅度增大而增大的结论有所差异。变程 (A) 随采样幅度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^[10], 即随采样幅度的增大, 大尺度上结构因素引起的变异相关性会掩盖小尺度上结构因素和随机因素引起的变异相关性, 使土壤水分在较大尺度内变化平稳。这些相似的和不同的变化规律可能与各研究区域气候和环境条件不同有关。通过比较不同采样幅度下土壤水分的变异结果, 我们发现在采样和模拟时需要根据实际需求调整采样幅度的大小。较大的采样幅度可以改善土壤的分类系统, 提高土壤的调查和测绘质量, 中、小尺度可以为合理制定作物布局、有效管理土地资源及提高土壤利用率进而实现精确灌溉奠定基础。因此, 在今后研究中需要根据研究区实际情况和研究目的确定采样幅度, 不断总结不同区域在不同采样幅度下土壤水分的空间变异规律, 为微尺度采样幅度下土壤水分的合理监测提供理论依据。

3.2 采样间距对空间变异的影响

有关采样间距对土壤含水量空间变异特性的研究也较多, 而研究结果也有一定的差异性。Western 和 Blöschl^[27] 的研究指出变程 (A) 随采样间距的增大而增大; 胡伟等^[10] 对黄土高原退耕地土壤水分的空间变异进行尺度性研究时得出随采样间距的增大, 相关距离却减小的结论, 这与本研究中得出的结论一致, 这可能与土地类型和模型的拟合有关。因此, 有关采样间距对压砂地枣树土壤含水量空间变异特征的影响有待进一步研究。同时, Western 和 Blöschl^[27] 指出, 在空间变异研究中, 非常小的采样体积、非常大的采样幅度和采样密度是最理想的采样尺度, 只有样本数据足够多才可以代表研究区域的真实变异特征。但实际应用中受土壤水分测定时人力和物力的影响, 采样幅度和采样密度不可能无限增大。

因此, 本文中对压砂地枣树区土壤水分空间变异的尺度性研究, 在节省资源的前提下可为确定最优的采样幅度和密度提供有效的参考。但是, 本文只对特定时间里土壤水分的空间变异性规律进行了探讨, 如要全面了解景泰地区压砂地枣树土壤水分的空间变异规律, 还需要对土壤水分在不同尺度上的空间分布随时间的变化规律做更进一步的研究。

4 结论

1) 在不同采样幅度条件下, 土壤含水量随土

层深度增加而减小; 变异系数 (C_v) 随土层深度和采样幅度的增加均呈现出增大的趋势, 表现为弱变异或中等偏弱变异; 块金值 (C_0) 基本表现为随采样幅度的减小而不断减小的趋势; 变程 (A) 随采样幅度减小而减小; 基台值 (C_0+C) 呈现出随土层深度增加而增大的趋势, 且土壤含水量存在强烈的空间自相关性。

2) 在不同采样间距条件下, 变异系数变化不大, 这说明采样幅度一定时, 采样密度的改变并不能改变影响土壤含水量变异的因素。随采样间距的增大, 块金值 (C_0) 基本呈现增大的趋势; 变程 (A) 随采样间距的增大呈明显减小的趋势, 且 8 m 为较合理的采样间距, 可在减少采样点的情况下仍可获得较为合理的结果; 土壤含水量整体表现出较强的空间自相关性。

3) 在不同采样间距条件下, 各土层土壤含水量的空间分布均表现出“凹凸不平”的形态, 0-20 cm 土层土壤含水量较 20-50 cm 土层波动幅度大, 多处出现明显“隆起”与“凹陷”。各土层土壤含水量在不同采样间距下的空间分布总体趋势相同, 但随着采样间距的增大, 其分布形态趋于“平坦”。8 m 的采样间距, 仍可以较好的表征土壤含水率的空间分布特征, 是较为合理的采样间距。

参考文献:

- [1] 高晓东, 吴普特, 张宝庆, 等. 黄土丘陵区小流域土壤有效水空间变异及其季节性特征 [J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 57-67.
Gao X D, Wu P T, Zhang B Q, et al. Spatial variability of available soil moisture and its seasonality in a small watershed in the hilly region of the loess plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(1): 57-67.
- [2] 宗路平, 角媛梅, 李石华, 等. 哈尼梯田景观水源区土壤水分时空变异性 [J]. 生态学杂志, 2015, 34(6): 1650-1659.
Zong L P, Jiao Y M, Li S H, et al. Spatial and temporal variability of soil moisture in water source region of Hani terrace landscape[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(6): 1650-1659.
- [3] Brocca L, Tullio T, Melone F, et al. Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability[J]. Journal of Hydrology, 2012, 422/423: 63-75.
- [4] Gao X D, Wu P T, Zhao X N, et al. Soil moisture variability along transects over a well-developed gully in the Loess Plateau, China[J]. Fuel & Energy Abstract, 2011, 87(3): 357-367.
- [5] 王艳莉, 刘立超, 高艳红, 等. 人工固沙植被区土壤水分动态及空间分布 [J]. 中国沙漠, 2015, 35(4): 942-950.
Wang Y L, Liu L C, Gao Y H, et al. Dynamic and spatial distribution of soil moisture in an artificially re-vegetated desert area[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(4): 942-950.
- [6] 李小雁. 干旱地区土壤-植被-水文耦合、响应与适应机制 [J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(12): 1721-1730.
Li X Y. Mechanism of coupling, response and adaptation between

- soil, vegetation and hydrology in arid and semiarid regions[J]. *Science China: Earth Science*, 2011, 41(12): 1721-1730.
- [7] Navas A, Maehin J. Spatial distribution of heavy metals and arsenic in soils of Aragón (Northeast Spain): Controlling factors and environmental implications[J]. *Applied Geochemistry*, 2002, 17(8): 961-973.
- [8] Wang J K, Zhao Y C, Zhang X D, et al. Studies on the spatial variability of heavy metal contents in black soils in central areas of Hailun[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(5): 398-403.
- [9] Blöschl G. *Scale and Scaling in Hydrology: A Framework for Thinking and Analysis*[M]. Chichester: Wiley, 1999.
- [10] 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 W, Shao M A, Wang Q J. Scale-dependency of spatial variability of soil moisture on a degraded slope-land on the Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(8): 11-16.
- [11] 魏新光, 聂真义, 刘守阳, 等. 黄土丘陵区枣林土壤水分动态及其对蒸腾的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(6): 130-140.
- Wei X G, Nie Z Y, Liu S Y, et al. Soil moisture characteristics and its influence on jujube tree transpiration in Loess hilly region[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(6): 130-140.
- [12] 邢旭光, 赵文刚, 柳焯, 等. 猕猴桃果园不同采样密度下土壤含水量空间变异性研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(8): 138-145.
- Xing X G, Zhao W G, Liu Y, et al. Spatial variability of soil moisture in Kiwi field under different sampling density conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(8): 138-145.
- [13] 赵文举, 李娜, 李宗礼, 等. 不同种植年限压砂地土壤水分空间变异规律研究[J]. *农业现代化研究*, 2015, 36(6): 1067-1073.
- Zhao W J, Li N, Li Z L, et al. Study on spatial variability of soil water content in gravel-mulched fields with different planting years[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2015, 36(6): 1067-1073.
- [14] 史文娟, 马媛, 徐飞, 等. 不同微尺度膜下滴灌棉田土壤水盐空间变异特性[J]. *水科学进展*, 2014, 25(4): 585-593.
- Shi W J, Ma Y, Xu F, et al. Spatial variability of soil moisture and salt content in cotton field on microscales under mulch drip irrigation[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4): 585-593.
- [15] 郭德亮, 樊军, 米美霞. 黑河中游绿洲区不同土地利用类型表层土壤水分空间变异的尺度效应[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(5): 1199-1208.
- Guo D L, Fan J, Mi M X. Scale-dependency of spatial variability of surface soil moisture under different land use types in Heihe oasis, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(5): 1199-1208.
- [16] 郭丽俊, 李毅, 李敏, 等. 塬土土壤水力特性空间变异的多元分形分析[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(9): 50-58.
- Guo L J, Li Y, Li M, et al. Multifractal study on spatial variability of soil hydraulic properties of Lou soil[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(9): 50-58.
- [17] 杨磊, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土丘陵沟壑区深层土壤水分空间变异及其影响因子[J]. *生态与农村环境学报*, 2012, 28(4): 355-362.
- Yang L, Wei W, Chen L D, et al. Spatial variation of deep soil water in the loess hilly and gully regions and its influencing factors[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(4): 355-362.
- [18] 王占军, 蒋齐, 何建龙, 等. 宁夏环香山地区压砂地土壤水分特征曲线及入渗速率的特征分析[J]. *土壤通报*, 2013, 44(6): 1364-1368.
- Wang Z J, Jiang Q, He J L, et al. Analysis of soil water characteristic curve and infiltration rates of gravel-mulched land around Xiangshan Mountain area in Ningxia[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(6): 1364-1368.
- [19] Li X Y. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the of Northwest China[J]. *Catena*, 2003, 52(2): 105-127.
- [20] Qiu Y, Wang Y J, Xie Z K. Long-term gravel-sand mulch affects soil physicochemical properties, microbial biomass and enzyme activities in the semi-arid Loess Plateau of North-western China[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 2014, 64(4): 294-303.
- [21] Xie Z K, Wang Y J, Cheng G D, et al. Particle-size effects on soil temperature, evaporation, water use efficiency and watermelon yield in fields mulched with gravel and sand in semi-arid Loess Plateau of Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(6): 917-923.
- [22] 马波, 田军仓. 压砂地西瓜水肥耦合模型及优化组合方案[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(4): 24-29.
- Ma B, Tian J C. Model of coupling water with fertilizer in gravel-mulched watermelon field and its optimum combination scheme[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(4): 24-29, 35.
- [23] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. *土壤水动力学*[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- Lei Z D, Yang S X, Xie S Z. *Soil Water Dynamics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988.
- [24] 王云强, 邵明安, 刘志鹏. 黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性[J]. *水科学进展*, 2012, 23(3): 310-316.
- Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Spatial variability of soil moisture at a regional scale in the Loess Plateau[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(3): 310-316.
- [25] 张继光, 陈洪松, 苏以荣, 等. 喀斯特峰丛洼地坡面土壤水分空间变异研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(8): 54-58.
- Zhang J G, Chen H S, Su Y R, et al. Spatial variability of soil moisture on hillslope in cluster-peak depression areas in Karst region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(8): 54-58.
- [26] 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J]. *生态学报*, 2012, 32(16): 4961-4968.
- Yao X L, Fu B J, Lü Y H. Spatial patterns of soil moisture at transect scale in the Loess Plateau of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16): 4961-4968.
- [27] Western A W, Blöschl G. On the spatial scaling of soil moisture[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 217(3/4): 203-224.

(责任编辑:王育花)