doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.020

猕猴桃果园不同采样密度下土壤含水率空间变异性研究*

邢旭光　赵文刚　柳　烨　马孝义
(西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100)

摘要:为揭示小区尺度乃至微尺度土壤含水率的空间变异性,在杨凌地区猕猴桃果园选取 40 m×40 m 区域,并在此基础上再以 8、2 m 为间距进行网格划分,基于经典统计学和地统计学理论,对不同采样密度条件下 0~60 cm 土层土壤含水率的空间分布特征及其空间变异性进行了研究。结果表明,对于 40 m×40 m(L)、8 m×8 m(M)和 2 m×2 m(S)3 种尺度,0~60 cm 深度各土层土壤含水率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,且所有取样点处 0~60 cm 深度内土壤含水率在垂直方向上的变异强度表现为弱变异至中等(偏弱)变异。在 3 种尺度中,土壤含水率存在强烈的空间相关性,表征土壤含水率空间分布形态的半方差函数因尺度不同存在较大差异,L 尺度可采用球状和指数模型,M 尺度可采用线性模型,S 尺度可采用高斯、指数、线性模型。L 尺度合理取样数较实际少,而 M 和 S 尺度合理取样数较实际多,对于 3 种尺度,基本表现出 0~30 cm 土层合理取样数较实际多、30~60 cm 土层合理取样数较实际少,表明取样点的合理性分布有待进一步优化。由于地形原因导致当地果园内南北侧土壤含水率空间分布存在较大差异。

关键词:土壤含水率　微尺度　空间变异　土壤水分分布
中图分类号:S156.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2015)08-0138-08

Spatial Variability of Soil Moisture in Kiwi Field under Different Sampling Density Conditions

Xing Xuguang　Zhao Wen'gang　Liu Ye　Ma Xiaoyi
(*College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: A study on spatial variability of soil moisture for micro-scales was conducted in a kiwi field in Yangling region. The mesh generation was formed based on the separation distance of 8 m, 2 m and 0.5 m in the 40 m×40 m field. The spatial distribution and variation of soil moisture in 0~60 cm soil layers under different sampling densities were analyzed based on classical statistics and geo-statistics theories. Results showed that as for three micro-scales of 40 m×40 m (L), 8 m×8 m (M) and 2 m×2 m (S), the variability of soil moisture in 0~60 cm soil layers was weak and moderate in horizontal direction, and it decreased with the decrease of scale and the increase of depth. Meanwhile, the variability of soil moisture in 0~60 cm soil layers was also weak and moderate in vertical direction. A strong and significant spatial correlation was found in soil moisture in these three scales, and the semi-variance models for soil moisture varied with scales. This meant that semi-variance models for soil moisture in L scale could be simulated by spherical and exponential models; semi-variance models for soil moisture in M scale could be simulated by linear model; and semi-variance models for soil moisture in S scale could be simulated by Gaussian, exponential and linear models. Besides, the reasonable sampling amount in L scale was less than actual amount, but the reasonable sampling amounts in both M and S

收稿日期:2015-05-15　修回日期:2015-06-17
*国家自然科学基金资助项目(51279167)、"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2012BAD08B01)和水利部公益性行业科研专项资助项目(201301016)
作者简介:邢旭光,博士生,主要从事土壤水-盐-热迁移监测与模拟研究,E-mail:xingxg86@163.com
通讯作者:马孝义,教授,博士生导师,主要从事农业水土工程研究,E-mail:xiaoyima@vip.sina.com

scales were more than actual amount. And as for L, M and S scales, the reasonable sampling amount in 0 ~ 30 cm layer was more than actual amount, but the reasonable sampling amount in 30 ~ 60 cm layer was less than actual amount. These results indicated that a reasonable layout of sampling point needs to be further optimized. In Yangling region, a significant difference of the spatial distribution of soil moisture could be found in the north and south of local kiwi field due to topography. These results could provide some guidance for irrigation and water control in precision agriculture.

Key words: Soil moisture　Micro-scale　Spatial variability　Soil water distribution

引言

采样尺度需根据研究目的进行合理选择[1]，不同尺度的作用不尽相同，大尺度研究可以改进土壤分类系统，从而提高土壤调查、制图质量；中小尺度研究则有利于对作物进行合理布局、完善田间管理进而提高土壤水分利用效率，从而为实现精准灌溉奠定基础[2-4]。土壤水分是重要的土壤物理参数，明晰土壤水分在土体内的分布及运动特性对于指导灌溉、提高水分利用效率和高效利用土壤储水量具有重要意义，同时也可为土壤其他物理特性的研究提供参考[5-8]。然而由于土壤水分在空间上存在高度变异性，增大了土壤水分运动及再分布的研究难度，因此，查明并分析土壤水分在空间上的分布特性及其变异性至关重要。

纵观目前已有研究成果，较多研究针对大尺度[4,9-10]和中小尺度[11-13]区域展开，研究表明各深度土层含水率在空间上的变异程度存在一定差异，其中多以灌溉湿润层(60 cm)土壤含水率的变异程度尤为显著。较多研究集中于水平方向，在一定程度上忽略了土壤水分在垂直方向上的变化；另一方面，若以指导地区内精细农业灌溉管理为目的，研究微尺度条件水平与垂直方向的土壤水分变化特性更具有理论和实用价值[14-15]。已有研究表明[4,16-18]，微尺度条件下的土壤含水率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，针对特定地区进行微尺度土壤特性的空间变异性研究亟需广泛开展。不难发现，较多研究已由单一尺度逐渐向多尺度以及微尺度过渡，土壤属性对区域内采样尺度具有一定的依赖性，而这种土壤学中的尺度问题正是农业水土学科中的热点之一[14]。

杨陵地区水源充足，可以满足作物生长需求；然而，区内地势整体呈现阶梯分布，故土壤含水率在空间上的分布存在差异。另一方面，鉴于猕猴桃种植是杨陵地区特色农业，因此，本文拟在该地区猕猴桃园内对小区尺度乃至微尺度(40 m×40 m、8 m×8 m和 2 m×2 m，对应取样间距分别为 8、2、0.5 m)内土壤含水率在水平和垂直方向上的空间变异特性及其空间分布特征进行研究，以期为土壤水分有效性评价提供一定技术支撑，进一步指导田间农业水管理。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

杨陵示范区位于陕西省关中平原中部(34°14′ ~ 34°19′ N，107°55′ ~ 108°08′ E)，地势呈现南低北高，依次形成三级阶地，分布着林地、滩地、一级阶地、二级阶地、三级阶地和沟坡地等多种地貌单元；区内海拔高度介于 435 ~ 563 m 之间。该地区三面环水，且有若干渠系越境而过，水资源丰富。土壤状况较好，适宜农作物生长。地区地处半干旱气候区，属于暖温带季风半湿润气候，多年平均降水量约 650 mm，主要集中于 7 ~ 10 月份，年均蒸发量约 1 000 mm，多年平均气温 13℃，无霜期约 220 d。试验区位于西北农林科技大学以东崔东沟村，处于一级阶地、地形平坦；试验区内种植玉米、小麦和猕猴桃，其中以猕猴桃为主，栽植面积约 28.7 hm^2。

1.2　研究方法

1.2.1　试验设计

试验区猕猴桃果园内果树成行种植，沿东西方向株距约 2 m，沿南北方向行距约 4 m，采用大水漫灌方式，且沿东西方向进行灌溉。灌水 3 d 后取样，测定土壤含水率。选取 40 m×40 m 田块，再依据均方距离准则进行 8、2 m 间距网格划分(对应的尺度分别为 L、M 和 S)，土样采集深度为 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm、30 ~ 40 cm、40 ~ 50 cm 和 50 ~ 60 cm；L、M 和 S 尺度取样点个数分别为 36、25(包含与 L 重复的 4 个取样点)和 25(包含与 M 重复的 4 个取样点)，样品数量分别为 216、126 和 126，共计 468 个土样。土钻取土，采用干燥法测定土壤含水率；研究区域土壤类型为粉粘壤土，土样经风干、过 2 mm 筛后，采用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测定样品颗粒组成，各样品均测定 3 次，取其均值(表 1)。网格划分方式及取样点分布见图 1。

表 1 试验样地土壤颗粒组成

Tab. 1 Particle composition of experimental soil

粒径/mm	小于 0.001	0.001 ~ 0.002	0.002 ~ 0.005	0.005 ~ 0.01	0.01 ~ 0.02	0.02 ~ 0.05	0.05 ~ 0.1	0.1 ~ 0.2	0.2 ~ 2
质量分数/%	12.11	5.19	6.21	10.78	27.31	33.22	4.93	0.25	0

注:土壤质地根据国际制土壤质地三角形确定。

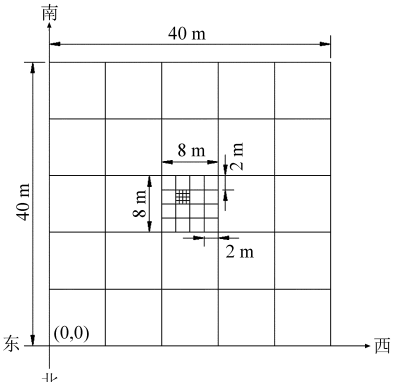


图 1 不同微尺度网格划分

Fig. 1 Mesh generations of different micro-scales

1.2.2 数据处理与分析

以经典统计学和地统计学理论为基础,采用 SPSS 20.0、GS +9.0 和 Sufer 8.0 等软件对数据进行前期处理、分析和绘制。利用 SPSS 20.0 软件对土壤含水率实测数据进行统计学分析;利用 GS +9.0 软件对 L、M 和 S 尺度 0 ~ 60 cm 土层土壤含水率进行半方差分析,拟合相关参数并构建半方差函数模型;采用克里格法对各尺度 0 ~ 60 cm 土层土壤含水率进行插值,利用 Sufer 8.0 软件绘制土壤含水率三维空间分布图;利用式(1)计算合理采样数,即

$$N = \left(\frac{tS}{xd}\right)^2 \tag{1}$$

式中 N——采样点数目

t——各显著性水平所对应的 t 氏分布值(经查 t 分布表获取)

S——样本标准差

x——样本均值 d——估算精度

2 结果与分析

2.1 不同尺度土壤含水率统计特征值分析

通过对 3 种微尺度内水平方向的土壤含水率和 0 ~ 60 cm 土层垂直方向的土壤含水率统计分析(表 2、3)可知,对于 L、M 和 S 3 种尺度,随深度增加,0 ~ 60 cm 土层含水率均表现出先增大后减小的趋势,且在 20 cm 土层达到最大值;20 ~ 60 cm 土层土壤含水率的变异系数在水平方向上呈现出随土层增加而减小的趋势,这与土壤含水率的变化趋势较为一致。3 种尺度土壤含水率的空间变异强度基本表现为弱变异至中等(偏弱)变异,0 ~ 20 cm 土层土壤含水率的变异强度在灌溉后有一定程度的增强,原因在于表层水分迅速入渗。L、M 和 S 尺度 60 cm 土层土壤含水率在水平方向上的变异系数均值分别为 0.140、0.127 和 0.120,由于所选尺度均较小,故变异系数差别不大,但整体表现出变异强度随尺度的缩小而减弱的趋势。

表 2 3 种微尺度条件 0 ~ 60cm 深度各土层水平方向土壤含水率统计特征值

Tab. 2 Statistics parameters of horizontal soil water content in 0 ~ 60 cm layers of three micro-scales

尺度	土层深度/cm	最大值/%	最小值/%	均值/%	标准偏差	标准误差	变异系数
L	0 ~ 10	34.47	18.69	22.91	3.892 2	0.108 1	0.169 9
	10 ~ 20	48.43	20.40	25.56	5.104 6	0.141 8	0.199 7
	20 ~ 30	37.31	17.61	24.64	3.576 0	0.099 3	0.145 1
	30 ~ 40	34.38	19.24	23.77	3.128 8	0.086 9	0.131 6
	40 ~ 50	35.73	19.38	22.85	2.782 0	0.077 3	0.121 7
	50 ~ 60	23.66	16.61	21.33	1.480 3	0.041 1	0.069 4
M	0 ~ 10	38.05	16.22	23.74	4.707 9	0.188 3	0.198 3
	10 ~ 20	38.62	18.13	25.36	4.455 3	0.178 2	0.175 7
	20 ~ 30	32.85	19.59	24.66	3.359 1	0.134 4	0.136 2
	30 ~ 40	30.21	20.47	24.14	2.237 9	0.089 5	0.092 7
	40 ~ 50	29.67	19.93	23.85	2.644 6	0.105 8	0.110 9
	50 ~ 60	23.42	20.05	21.51	0.992 1	0.039 7	0.046 1
S	0 ~ 10	31.95	17.91	22.39	3.103 3	0.124 1	0.138 6
	10 ~ 20	38.76	20.81	25.44	4.818 1	0.192 7	0.189 4
	20 ~ 30	41.85	21.57	24.36	3.968 0	0.158 7	0.163 4
	30 ~ 40	32.75	20.87	24.29	2.489 8	0.099 6	0.102 2
	40 ~ 50	26.56	20.93	23.45	1.487 5	0.059 5	0.063 4
	50 ~ 60	26.55	19.81	21.91	1.333 8	0.053 4	0.060 9

表 3　3 种微尺度内所有取样点 0 ~ 60 cm 土层垂直方向土壤含水率统计特征值

Tab. 3　Statistics parameters of vertical soil water content in 0 ~ 60 cm layers for all samples of three micro-scales

尺度	取样点	最大值/%	最小值/%	均值/%	标准偏差	标准误差	变异系数	取样点	最大值/%	最小值/%	均值/%	标准偏差	标准误差	变异系数
L	1	23.82	18.93	21.83	1.805 2	0.300 9	0.082 7	19	22.92	20.42	21.63	1.041 4	0.173 6	0.048 2
	2	26.23	19.58	22.84	2.548 2	0.424 7	0.111 6	20	26.87	20.81	23.01	2.051 6	0.341 9	0.089 2
	3	25.92	19.39	23.22	2.453 8	0.409 0	0.105 7	21	38.62	20.05	24.43	7.073 0	1.178 8	0.289 6
	4	27.46	21.38	24.39	2.262 9	0.377 2	0.092 8	22	31.61	21.37	24.55	3.853 2	0.642 2	0.156 9
	5	29.82	21.48	25.04	2.939 9	0.490 0	0.117 4	23	23.44	18.69	21.70	2.138 1	0.356 4	0.098 5
	6	29.12	19.40	24.75	3.285 7	0.547 6	0.132 8	24	30.03	20.65	24.70	3.619 9	0.603 3	0.146 6
	7	27.31	21.52	24.30	2.224 9	0.370 8	0.091 5	25	20.40	16.61	18.99	1.545 2	0.257 5	0.081 4
	8	27.61	21.88	25.05	2.301 6	0.383 6	0.091 9	26	23.05	21.88	22.70	0.421 7	0.070 3	0.018 6
	9	24.81	20.20	22.88	1.710 7	0.285 1	0.074 8	27	22.46	20.16	21.77	0.935 2	0.155 9	0.043 0
	10	27.89	22.34	24.37	2.203 0	0.367 2	0.090 4	28	23.64	19.38	21.46	1.560 8	0.260 1	0.072 7
	11	35.73	18.92	24.90	5.944 5	0.990 7	0.238 7	29	25.37	18.69	22.74	2.245 1	0.374 2	0.098 7
	12	34.38	20.73	25.84	5.167 7	0.861 3	0.200 0	30	25.34	19.62	23.20	2.148 4	0.358 1	0.092 6
	13	29.13	20.07	23.71	3.374 6	0.562 4	0.142 4	31	24.02	19.90	21.43	1.378 1	0.229 7	0.064 3
	14	31.43	20.64	23.85	3.887 0	0.647 8	0.163 0	32	29.96	20.60	23.13	3.463 5	0.577 3	0.149 7
	15	29.36	22.76	25.28	2.331 0	0.388 5	0.092 2	33	48.43	19.41	25.09	11.474 6	1.912 4	0.457 3
	16	31.37	20.60	26.32	3.600 3	0.600 1	0.136 8	34	23.18	20.42	21.94	0.903 2	0.150 5	0.041 2
	17	37.31	20.18	26.35	5.913 9	0.985 6	0.224 4	35	23.21	21.60	22.15	0.570 6	0.095 1	0.025 8
	18	26.13	20.33	23.71	2.197 5	0.366 2	0.092 7	36	34.47	19.10	23.21	5.753 3	0.958 9	0.247 8
M	37	26.05	20.29	22.51	2.083 0	0.347 2	0.092 5	50	23.29	20.57	22.07	1.087 2	0.181 2	0.049 3
	38	25.26	20.61	22.98	1.738 0	0.289 7	0.075 6	51	24.14	19.68	22.20	1.453 2	0.242 2	0.065 5
	39	28.90	19.47	23.00	3.175 1	0.529 2	0.138 0	52	26.04	20.62	23.55	2.095 7	0.349 3	0.089 0
	40	32.85	22.01	27.28	3.662 8	0.610 5	0.134 3	53	23.28	16.22	20.09	2.691 8	0.448 6	0.134 0
	41	24.17	21.55	22.86	1.132 9	0.188 8	0.049 6	54	30.80	23.42	28.51	2.669 8	0.445 0	0.093 7
	42	27.36	20.93	23.53	2.794 5	0.465 7	0.118 8	55	24.29	20.93	22.31	1.213 4	0.202 2	0.054 4
	43	22.90	21.15	21.86	0.622 1	0.103 7	0.028 5	56	25.96	20.57	23.62	2.232 5	0.372 1	0.094 5
	44	29.87	21.57	23.59	3.166 4	0.527 7	0.134 2	57	26.45	20.65	23.95	2.192 6	0.365 4	0.091 6
	45	34.23	20.47	24.55	4.953 5	0.825 6	0.201 7							
	46	24.97	19.88	22.37	2.038 8	0.339 8	0.091 2	15	29.36	22.76	25.28	2.331 0	0.388 5	0.092 2
	47	25.57	20.78	23.13	1.558 9	0.259 8	0.067 4	16	31.37	20.60	26.32	3.600 3	0.600 1	0.136 8
	48	24.66	20.87	23.05	1.389 9	0.231 7	0.060 3	21	38.62	20.05	24.43	7.073 0	1.178 8	0.289 6
	49	38.05	20.92	29.31	5.689 4	0.948 2	0.194 1	22	31.61	21.37	24.55	3.853 2	0.642 2	0.156 9
S	58	24.46	20.87	22.40	1.580 8	0.263 5	0.070 6	71	31.95	23.15	25.27	3.360 7	0.560 1	0.133 0
	59	24.57	17.91	22.94	2.500 4	0.416 7	0.109 0	72	22.58	20.83	21.96	0.782 2	0.130 4	0.035 6
	60	24.31	21.42	22.88	1.203 5	0.200 6	0.052 6	73	23.71	18.76	21.96	1.717 1	0.286 2	0.078 2
	61	26.53	22.24	23.84	1.765 2	0.294 2	0.074 0	74	38.76	21.78	26.70	6.307 6	1.051 3	0.236 3
	62	24.69	21.83	23.29	1.129 9	0.188 3	0.048 5	75	27.62	18.86	24.15	3.111 0	0.518 5	0.128 8
	63	23.36	20.79	22.35	0.973 2	0.162 2	0.043 5	76	41.85	20.89	27.18	7.801 8	1.300 3	0.287 1
	64	37.90	21.39	25.21	6.290 9	1.048 5	0.249 6	77	23.64	19.81	22.22	1.746 4	0.291 1	0.078 6
	65	27.86	20.17	23.09	3.019 0	0.503 2	0.130 8	78	22.96	20.45	21.65	0.918 5	0.153 1	0.042 4
	66	32.75	20.64	26.05	3.959 1	0.659 9	0.152 0							
	67	29.76	21.35	23.94	3.132 2	0.522 0	0.130 9	51	24.14	19.68	22.20	1.453 2	0.242 2	0.065 5
	68	23.06	21.07	21.99	0.782 8	0.130 5	0.035 6	52	26.04	20.62	23.55	2.095 7	0.349 3	0.089 0
	69	25.25	22.10	23.59	1.133 6	0.188 9	0.048 1	56	25.96	20.57	23.62	2.232 5	0.372 1	0.094 5
	70	34.00	21.33	25.06	4.612 7	0.768 8	0.184 1	57	26.45	20.65	23.95	2.192 6	0.365 4	0.091 6

对于全部取样点，在 60 cm 深度内土壤含水率在垂直方向上的变异强度亦表现为弱变异至中等（偏弱）变异，变异系数介于 0.018 6 ~ 0.457 3 之间；在 78 个取样点中，共有 33 个取样点处土壤含水率表现为中等（偏弱）变异且变异系数均值为 0.176 3，45 个取样点处土壤含水率表现为弱变异且变异系数均值为 0.068 7。另一方面由表 3、4 中标准偏差和标准误差可以看出，所有测点值偏离均值程度均较小，且

精度较高。

2.2 不同尺度土壤含水率空间变异特性分析

2.2.1 土壤含水率的空间变异特征

采用半方差函数对 L、M 和 S 3 种尺度下采集的土壤样本含水率进行半方差分析(表 4)。在半方差函数模型中,块金值(C_0)、基台值(C_0+C)、变程(A)常用来表示变量在某尺度上的空间变异性和相关程度[14]。

表 4 3 种微尺度条件 0~60 cm 土层土壤含水率半方差函数模型及其参数拟合

Tab. 4 Semi-variance models and fitted parameters of soil water content in 0~60 cm layers of three micro-scales

尺度	土层深度/cm	理论模型	C_0	C_0+C	A	$C_0/(C_0+C)$	$C/(C_0+C)$	R^2
L	0~10	球状	1.360	16.120	18.670	0.084	0.915 6	0.939
	10~20	球状	2.290	28.350	12.750	0.081	0.919 2	0.942
	20~30	球状	3.900	20.930	61.000	0.186	0.813 7	0.936
	30~40	指数型	3.080	14.169	10.140	0.217	0.782 6	0.836
	40~50	指数型	0.170	7.653	9.720	0.022	0.977 8	0.867
	50~60	线性	1.665	1.908	26.156	0.873	0.127 4	0.568
M	0~10	线性	1.442	25.051	6.519	0.058	0.9424	0.941
	10~20	线性	1.344	21.602	6.519	0.062	0.937 8	0.680
	20~30	线性	7.214	11.265	6.519	0.640	0.359 6	0.387
	30~40	线性	4.530	4.530	6.519	1.000	0.000 1	0.634
	40~50	线性	3.196	6.947	6.519	0.460	0.539 9	0.991
	50~60	球状	0.014	0.950	2.860	0.015	0.985 3	0.009
S	0~10	球状	0.010	8.632	0.608	0.001	0.998 8	0.001
	10~20	线性	0.126	0.126	1.630	1.000	0.000 1	0.869
	20~30	指数型	0.076	7.194	10.725	0.011	0.989 4	0.825
	30~40	高斯	0.090	6.329	0.972	0.014	0.985 8	0.996
	40~50	球状	0.042	2.201	0.743	0.019	0.980 9	0.039
	50~60	球状	0.059	1.782	0.819	0.033	0.966 9	0.130

从表 4 可以看出,对于 L、M 和 S 尺度,C_0均值分别为 2.078、2.957 和 0.067,各尺度内 C_0较稳定且变化程度较小,表明由于土壤特性、采样或测量误差等随机因素而导致的空间变异程度较小。C_0+C 和 A 均表现出随尺度减小而减小(C_0+C 均值分别为 14.855、11.724 和 4.377;A 均值分别为 23.073、5.909 和 2.583),这表明对于 40 m×40 m 研究区域,系统内总的空间变异程度与尺度范围密切相关,即随尺度的减小而减小,空间自相关距离亦随尺度的减小而减小;其中基台值基本呈现出随土层深度增加而减小的趋势,这说明在该研究范围内,60 cm 土层土壤含水率的空间变异程度也与土层深度密切相关。在这 3 种尺度中,块金系数值 $C_0/(C_0+C)$大部分小于 0.25,只有个别 $C_0/(C_0+C)$值介于 0.25~0.50 之间,表明在 40 m×40 m、8 m×8 m 和 2 m×2 m 研究尺度内,0~60 cm 土层土壤含水率整体表现出较强烈的空间相关性,且随机因子的总体变异程度较小。结构比 $C/(C_0+C)$可以反映由结构因素而导致的空间变异[19],绝大多数结构比大于 0.75,表现出了强烈的空间自相关。对于 L 尺度 0~60 cm 土层,可选取球状、指数型和线性模型进行模拟,其中球状模型精度较高;对于 M 尺度0~60 cm 土层,可选取线性模型进行模拟;对于 S 尺度 0~60 cm 土层,球状、指数型、高斯和线性模型均可采用,球状模型精度略低。

2.2.2 土壤含水率的空间分布特征

为便于直观了解研究区域内土壤含水率的空间分布特征,分别绘制了 L、M 和 S 尺度 0~60 cm 深度内各土层土壤含水率在水平方向(图 1,东西方向)和竖直方向(图 1,南北方向)的空间分布图,如图 2a~2r 所示。

对于 L 尺度,0~20 cm 土层土壤含水率较 20~60 cm 土层波动幅度大,原因在于浅层土壤易受灌溉和蒸发作用影响;对比图 2a~2f 可知,在南北方向上以 24 m 为界,南、北侧 20~60 cm 土层土壤含水率分布状况类似,表现出南侧较北侧高,平均高出 7.10%~22.50%。由于表层(10 cm)土壤极易受人为因素影响,导致 10 cm 深度土壤含水率分布出现多处明显“隆起”与“凹陷”,而 10~60 cm 土层土壤含水率分布则相对“平坦”。对于 M 尺度,由图 2g~2i可知,土壤含水率分布形态类似,在西向 18 m、南向 22 m 处附近,30 cm 土层含水率差别微小且均出现“凹陷”,这可能与当地地形有关,这将是进一步研究的问题;深层土壤含水率比浅层低,但其空间分布的凹凸形态比浅层明显。对于 S 尺度,在南北方向上以 19 m 为界,60 cm 土层土壤含水率整

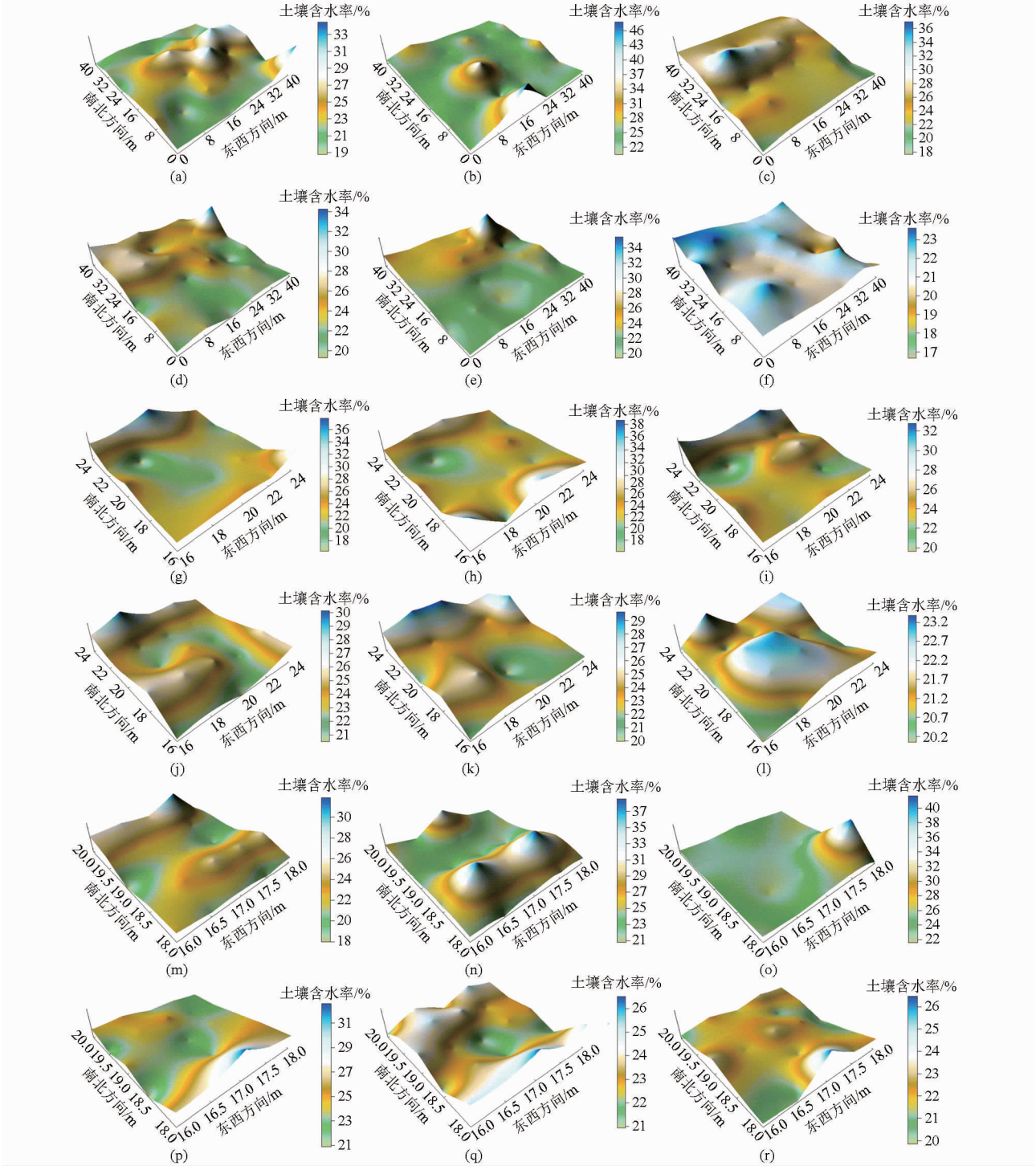


图 2　不同尺度 0 ~ 60 cm 土层土壤含水率空间分布图

Fig. 2　Spatial distribution of soil water content in 0 ~ 60 cm layers of different micro-scales

(a) L: 0 ~ 10 cm　(b) L: 10 ~ 20 cm　(c) L: 20 ~ 30 cm　(d) L: 30 ~ 40 cm　(e) L: 40 ~ 50 cm　(f) L: 50 ~ 60 cm
(g) M: 0 ~ 10 cm　(h) M: 10 ~ 20 cm　(i) M: 20 ~ 30 cm　(j) M: 30 ~ 40 cm　(k) M: 40 ~ 50 cm　(l) M: 50 ~ 60 cm
(m) S: 0 ~ 10 cm　(n) S: 10 ~ 20 cm　(o) S: 20 ~ 30 cm　(p) S: 30 ~ 40 cm　(q) S: 40 ~ 50 cm　(r) S: 50 ~ 60 cm

体表现出北侧较南侧高；对比图 2m ~ 2r 可知，浅层水分入渗量较大，在 20 cm 深度达到峰值，随着土层深度增加，入渗量和入渗速率逐渐减小。

对比 3 种尺度 0 ~ 60 cm 土层土壤含水率空间分布特征，随水平方向尺度的增加，土壤含水率逐渐出现“凹凸”分布，当尺度增加时，随机因素所致的误差也同时增加，而随机因素对变异性的影响机理较为复杂；随深度增加，土壤含水率逐渐减小，且基本呈现“平坦”分布。

2.3　不同尺度土壤样本容量确定

根据土壤含水率实测资料，取置信水平 P 为 90%、95% 和 99%、估算精度为 5% 和 10%，分别计

算 L、M 和 S 尺度的样本容量(表 5)。计算结果表明,取样点数目受置信水平和估算精度影响显著:当置信水平相同时,合理取样点数目随估算精度的降低而减少;当估算精度相同时,合理取样点数目随置信水平的降低而减少。另外,合理取样点数目在垂直方向(土层深度)上的变化与其变异系数变化动态一致。

表 5 不同置信水平与估算精度条件土壤样本容量

Tab. 5 Required soil sampling amount under different specific confidence and estimated precision conditions

尺度	土层深度/cm	$P=90\%$		$P=95\%$		$P=99\%$	
		5%	10%	5%	10%	5%	10%
L	0~10	33	10	47	13	80	23
	10~20	45	13	64	18	110	30
	20~30	25	8	35	10	60	18
	30~40	21	7	29	9	50	15
	40~50	18	6	25	8	43	13
	50~60	7	3	10	4	16	7
	共计	149	45	209	63	359	106
M	0~10	44	12	63	18	108	30
	10~20	35	10	50	14	86	24
	20~30	22	7	31	9	53	16
	30~40	11	4	16	6	27	9
	40~50	15	5	21	7	36	12
	50~60	4	2	6	4	10	5
	共计	132	41	186	58	320	96
S	0~10	23	7	32	10	55	17
	10~20	41	12	58	16	99	28
	20~30	31	9	43	13	75	22
	30~40	13	5	19	7	32	10
	40~50	6	3	9	4	14	6
	50~60	6	3	8	4	14	6
	共计	119	39	168	54	288	88

增加田间土样取样数可提高土壤含水率监测精度,但同时亦会增加工作量和试验成本,因此,在长期定位连续监测中,样本容量应根据精度要求和尺度大小加以区别。本研究中,根据实际田间土壤含水率空间变异特性,可将置信水平 95%、允许误差 5% 作为标准,这也符合一般情况。以此标准为基准,经与实际取样数量对比发现,对于 L 尺度,土样合理取样数较实际取样数(216 个)有所减少,对于 M 和 S 尺度,土样合理取样数较实际取样数(各 126 个)有所增加。对于不同尺度而言,合理取样数量基本呈现出随土层深度增加而减少的趋势,与实际取样数量对比后发现,各层土壤样品的合理取样数与实际取样数也存在一定差异:① L 尺度 0~20 cm 土层的合理取样数较实际取样数(36 个)多,20~60 cm土层的合理取样数较实际少。② M 和 S 尺度 0~30 cm 土层的合理取样数较实际取样数(各 21 个)均有所增加,30~60 cm土层的合理取样数较实际取样数少,其中 30~50 cm土层的实际取样数与理想取样数接近。由以上分析可知,对于不同尺度和不同土层深度,取样数目存在较大的优化空间。

3 结论

(1) 3 种尺度内,0~60 cm 深度各层土壤含水率在水平方向上的变异强度,以及各取样点处土壤含水率在 0~60 cm 土层垂直方向上的变异强度均表现为弱变异至中等(偏弱)变异,变异系数随尺度的减小而减小,且随土层深度的增加而减小。

(2) 3 种尺度内,大部分土样 $C_0/(C_0+C)<0.25$ 且 $C/(C_0+C)>0.75$,表明土壤含水率存在强烈的空间相关性,由随机因素所致的空间变异程度微小。对于 40 m×40 m、8 m×8 m 和 2 m×2 m 尺度,土壤含水率的空间分布可分别由球状、指数模型,线性模型,高斯、指数、线性模型表征。

(3) 各土层土壤含水率在 3 种尺度内的空间分布形态存在较大差别,整体表现为在较大范围内,区域南侧土壤含水率比北侧高,但随着区域缩小,北侧土壤含水率逐渐高于南侧。在此研究中,土壤含水率的空间分布受地形影响显著。

(4) 合理的取样点数目受置信水平和估算精度影响显著,且合理取样点数目随着置信水平的提高和允许误差的降低而增多;在实际田间取样时,应根据具体要求确定取样点数目,以达到提高精度和降低成本的目的。

参 考 文 献

1 王卫华,王全九. 黑河中游绿洲麦田土壤导气率空间变异尺度性研究[J]. 农业机械学报,2014,45(4):179-183.
Wang Weihua, Wang Quanjiu. Scale-dependency of spatial variability of soil air permeability on typical oasis croplands at middle reaches of Heihe river[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 179-183. (in Chinese)

2 潘成忠,上官周平. 土壤空间变异性研究评述[J]. 生态环境,2003,12(3):371-375.
Pan Chengzhong, Shangguan Zhouping. Review of the research on soil spatial variability[J]. Ecology and Environment, 2003, 12(3): 371-375. (in Chinese)

3 Letey J, Hoffman G J, Hopmans J W, et al. Evaluation of soil salinity leaching requirement guidelines[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(4): 502-506.

4 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 Deliang, Fan Jun, Mi Meixia. 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. (in Chinese)

5 García G M, Pachepsky Y A, Vereecken H. Effect of soil hydraulic properties on the relationship between the spatial mean and variability of soil moisture[J]. Journal of Hydrology, 2014, 516(4): 154 - 160.

6 Hu W, Shao M, Wan L, et al. Spatial variability of soil electrical conductivity in a small watershed on the loess plateau of China [J]. Geoderma, 2014, 230 - 231(10): 212 - 220.

7 邢旭光,赵文刚,马孝义,等. 覆膜滴灌条件下棉花根层土壤盐分时间稳定性研究[J]. 农业机械学报,2015,46(7):146 - 153.
Xing Xuguang, Zhao Wen'gang, Ma Xiaoyi, et al. Study on temporal stability of soil salinity in root zone of cotton under plastic drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(7):146 - 153. (in Chinese)

8 王卫华,王全九,李淑芹. 长武地区土壤导气率及其与导水率的关系[J]. 农业工程学报,2009,25(11):120 - 127.
Wang Weihua, Wang Quanjiu, Li Shuqin. Character of soil air permeability and its relationship with water conductivity in Changwu loess region of China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 120 - 127. (in Chinese)

9 刘全明,吴昊璋,郭晓静,等. BP 神经网络技术与稳健地质统计学在土壤水盐空间变异中的比较研究[J]. 内蒙古农业大学学报,2013,34(5):101 - 105.
Liu Quanming, Wu Haozhang, Guo Xiaojing, et al. Relative research on the spatial variation of water soil based on the geostatistics and artificial intelligent technique[J]. Journal of Inner-Mongolia Agricultural University, 2013, 34(5): 101 - 105. (in Chinese)

10 Sun B, Zhou S, Zhao Q. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China[J]. Geoderma, 2003, 115(1 - 2): 85 - 99.

11 刘继龙,马孝义,张振华. 土壤入渗特性的空间变异性及土壤转换函数[J]. 水科学进展,2010,21(2):214 - 221.
Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Zhang Zhenhua. Spatial variability of soil infiltration characteristics and its pedo-transfer function[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(2): 214 - 221. (in Chinese)

12 张川,陈洪松,张伟,等. 喀斯特坡面表层土壤含水率、容重和饱和导水率的空间变异特征[J]. 应用生态学报,2014,25(6):1585 - 1591.
Zhang Chuan, Chen Hongsong, Zhang Wei, et al. Spatial variation characteristics of surface soil water content, bulk density and saturated hydraulic conductivity on karst slopes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6): 1585 - 1591. (in Chinese)

13 Biswas A. Landscape characteristics influence the spatial pattern of soil water storage: similarity over times and at depths[J]. CATENA, 2014, 116(5): 68 - 77.

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 Wenjuan, Ma Yuan, Xu Fei, 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. (in Chinese)

15 栗现文,靳孟贵. 不同水质膜下滴灌棉田盐分空间变异特征[J]. 农业机械学报,2014,45(11):180 - 187.
Li Xianwen, Jin Menggui. Spatial variability of cotton field salinity under mulched drip irrigation with brackish and fresh water [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 180 - 187. (in Chinese)

16 申祥民,雷晓云,陈大春,等. 不同布点方式的膜下滴灌棉田土壤水分的空间变异研究[J]. 新疆农业大学学报,2010,33(4):363 - 368.
Shen Xiangmin, Lei Xiaoyun, Chen Dachun, et al. Study on spatial variability of cotton soil moisture parameter under mulch drip irrigation at different sampling point[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2010, 33(4): 363 - 368. (in Chinese)

17 郭丽俊,李毅,李敏,等. 塿土土壤水力特性空间变异的多重分形分析[J]. 农业机械学报,2011,42(9):50 - 58.
Guo Lijun, Li Yi, Li Min, 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. (in Chinese)

18 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 Lei, Wei Wei, Chen Liding, 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. (in Chinese)

19 曾宏达,杨玉盛,陈光水,等. 不同尺度下森林土壤特性空间变异与取样策略[J]. 亚热带资源与环境学报,2008,3(3):32 - 39.
Zeng Hongda, Yang Yusheng, Chen Guangshui, et al. Spatial variability and sampling strategy of forest soil in different scales [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2008, 3(3): 32 - 39. (in Chinese)