

关中平原田间土壤含水量的空间变异性

张诗祁^{1,3} 牛文全^{1,2*} 李国春¹

(¹中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ³中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 为了明确田块尺度土壤含水量的空间变异特征, 制定合理准确的土壤采样方法, 支持田间精准灌溉, 分7个日期对陕西省杨凌区曹新庄试验区土壤样品进行采集, 利用经典统计学和地统计学方法, 分析了0~60 cm不同土层土壤含水量的空间变异特点。结果表明: 田块尺度土壤含水量空间分布呈弱变异或中等偏弱变异; 土壤含水量在11.7%~20.1%时, 其值越低, 空间变异性越强。采样间距显著影响土壤含水量空间变异性的计算精度, 采样间距设置为东西方向间距27 m和南北方向间距9 m时的土壤含水量变异系数比采样间距设置为东西方向间距9 m和南北方向间距18 m大3.3%。随着采样密度的增大, 土壤含水量分布的等值线变化增大; 表征田块尺度土壤含水量空间变异性最少的网格数量为21个点。采样间距为东西方向间距18 m和南北方向间距9 m时, 田块尺度土壤含水量具有较高的空间相关性, 田块中间位置的土壤含水量比四周高3%~5%。本研究可为关中平原田间测定土壤含水量确定合理的采样方法, 并为实现农业精准灌溉提供参考。

关键词 田块尺度; 土壤含水量; 空间变异性; 采样间距

Spatial variability of soil water content in field of Guanzhong Plain, Northwest China.
ZHANG Shi-qi^{1,3}, NIU Wen-quan^{1,2*}, LI Guo-chun¹ (¹*Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China;* ²*Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;* ³*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*).

Abstract: To clarify the spatial variability of soil water content at field scale, a reasonable sampling method was established to support precision irrigation in the field. Soil samples were collected from Caoxinzhuan experimental area in Yangling District, Shaanxi Province at seven different dates. The spatial variation of soil water content in different soil layers of 0-60 cm were analyzed with classical statistics and geostatistics methods. The results showed that spatial distribution of soil water content in field scale was weak and moderate. When soil water content was within the range of 11.7% - 20.1%, soil water content was negatively correlated with spatial variability. Sampling interval significantly affected the calculation accuracy of the spatial variability of soil water content. The coefficient of variation of soil water content between the east-west direction spacing of 27 m and the north-south direction spacing of 9 m was about 3.3% higher than the east-west direction spacing of 9 m and the north-south direction spacing of 18 m. With increasing sampling density, the contour change of soil water content distribution increased, and the number of grids with the least spatial variability of soil water content at the field scale was 21 points. When the sampling spacing was 18 m in the east-west direction, 9 m in the north-south direction, soil water content at field scale had a high spatial distribution correlation with soil water content in the middle position being 3%-5% higher than the surrounding. Our results provided reference for reasonable sampling of soil water content in the Guanzhong Plain and could guide the precision irrigation in agriculture.

Key words: field scale; soil water content; spatial variability; sampling spacing.

本文由宁夏回族自治区重点研发计划(重点)项目(2018BBF02006)资助 This work was supported by the Key Research and Development Plan (Key) in Ningxia Hui Autonomous Region (2018BBF02006).

2019-06-20 Received, 2019-12-25 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nwq@nwafu.edu.cn

土壤性质在空间上有很大的变异性^[1-2],农田耕作和管理方式、植被类型、灌水方式和地理位置等自然因素和人类活动可对土壤质地、容重和含水量等土壤性质产生影响。田间土壤含水量作为重要的土壤参数,了解其分布特征对制定合理的采样方法、高效利用水资源和实现精准灌溉均有重要意义。关中平原是我国重要的商品粮产区,研究该地区的土壤含水量分布情况对于提高农业生产尤为重要。

近年来,土壤性质空间变异性研究日益受到重视。国内外学者从不同采样尺度^[3]、不同土地利用方式^[4-5]、不同采样间距^[6-7]和不同土层深度^[8-10]等方面对土壤含水量空间变异性进行了研究,结果表明,土壤结构因子(土壤质地、地形)对土壤含水量的空间变异性起决定性作用^[11-13],如 Ersahin 等^[14]在土耳其安纳托利亚中部的研究发现,相同土质情况下,表层土与深层土的土壤含水量具有相同强度的空间变异性;还有研究表明,土壤含水量空间变异性随着尺度的增大而增强,如史文娟等^[6]和邢旭光等^[8]发现,3种尺度下的土壤含水量空间变异性与尺度大小呈正相关。这些研究虽可以从不同角度有效阐述土壤含水量的变异特征,但较多关注于水平方向上土壤性质的变异情况,忽略了垂直方向上的空间变异性。不同采样尺度下不同采样间距的土壤含水量空间变异性均存在差异,而针对田块尺度土壤性质的空间变异性研究尚需广泛开展。不同地区的土壤性质空间分布不同,本研究以曹新庄试验农田为例,通过对田间0~60 cm土层土壤含水量的测定,利用经典统计学与地统计学分析相结合的方法,分别探讨了不同土层和不同采样间距对关中地区田间土壤含水量空间变异性的影响,以期对关中地区农业生产和精准灌溉提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验于2018年9月—2019年5月在陕西省咸阳市杨凌区(34°20' N, 108°24' E, 海拔521 m)曹新庄试验农田进行。试验区多年平均气温为12.5℃,无霜期约220 d。多年平均降雨量为632 mm,降水主要集中于6—10月,多年平均蒸发量为1500 mm。试验点处于渭河平原三级阶地,地形平坦,区内种植作物为冬小麦。

1.2 数据来源

试验地为139 m×36 m的田块,采用均匀网格布点法,每隔9 m间距布置一个土壤含水量采样点,

共64个采样点,计算过程中,忽略地边的19个采样点,实际采样点为45个。

土壤含水量使用TDR土壤水分测量仪测定,每次可以同时测量0~20、20~30、30~40、40~50和50~60 cm土层土壤含水量。采样时间分别选择降雨后(2018年9月20日、2018年11月19日和2019年5月12日)3次,降雨前(2018年11月2日、2019年3月14日、2019年4月2日和2019年5月31日)4次,务必在一天内将目标土壤含水量采集完毕。

1.3 研究方法

采样间距以9 m×9 m为标准,每隔一列、一行进行样点剔除,以东西方向上间距×南北方向上间距表示,得到9 m×9 m、18 m×9 m、27 m×9 m、9 m×18 m、18 m×18 m 5种采样间距。特异值是指观测数据中存在过大或过小的值,其存在会使半方差函数突发畸变^[15],对土壤参数局部估计精度产生重要影响^[16],因此,在分析前要对过大或过小的值进行判别。若数据超过样本平均值加减标准差的范围,认为该值为特异值,且分别用数据中最大或最小值代替。土壤参数空间变异性的分析要服从正态分布,将采样数据进行正态分布检验,对不符合正态分布的数据进行对数变换,使其符合正态分布。

以经典统计学和地统计学理论为基础,使用均值、标准差、变异系数及标准误差研究数据的变异性。变异系数计算公式如下:

$$CV = \sigma / a \quad (1)$$

式中:CV为变异系数; σ 为标准差; a 为均值。通常情况下,当 $CV \leq 0.1$ 时,研究变量具有弱变异性;当 $0.1 < CV < 1$ 时,研究变量具有中等变异性;当 $CV \geq 1$ 时,研究变量为强变异性。

半方差函数 $\gamma(h)$ 公式如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

式中: h 为滞后距(m); $N(h)$ 为滞后距离为 h 时的样本对数; $Z(x_i)$ 为随机变量 Z 在空间位置 x_i 上的观测值; $Z(x_i + h)$ 为随机变量 Z 在空间位置 $x_i + h$ 上的观测值。

文中半方差函数主要采用Spherical模型进行拟合。Spherical模型公式如下:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad (0 \leq h \leq a)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \quad (h > a) \quad (3)$$

地统计参数包括的块金值(C_0)、结构方差

(C_1)、基台值(C_1+C_0)和变程(R)均可以从拟合的半方差函数导出。 C_0 表示采样尺度以下变量的变异性及采样误差; C_1 表示由于采样数据中存在的空间自相关性引起的方差变化范围; C_1+C_0 表示空间变异程度的高低,反映的是空间上的最大变异; R 是指变异函数首次呈现水平状态的距离,也叫做自相关距离。半方差的拟合使用GS⁺软件(版本9.0,美国Gamma Design Software)采用Surfer软件(版本8.0,美国Golden Software)用于土壤含水量空间分布图的绘制,用SPSS 25.0和Excel进行基本统计值的统计和计算。

2 结果与分析

2.1 土壤含水量的特征统计值

运用数理统计中变异系数公式计算发现,0~60 cm 平均土壤含水量的CV存在明显差异(表1)。7次采样有5次为弱变异性,占72%,2次为中等偏弱变异性,占28%。随着土壤含水量的增大,变异系数逐渐减小,标准误差随之减小,说明在一定的土壤含水量范围内,土壤越干旱,其空间变异系数越大,空间变异性越强。

2.2 土壤含水量的空间变异特征

采用GS⁺9.0对7次采样结果进行半方差拟合,结果表明,第1次和第2次的采样结果经平方变换后符合正态分布,其他5次采样结果符合正态分布。将采样点各土层平均土壤含水量数据带入GS⁺9.0进行半方差拟合,结果见表2。第2、4、5和7次采样下土壤含水量较小,第1、3和6次采样下土壤含水量较大,而土壤在较干燥条件下(第2、4、5和7次采样)的基台值比在湿润条件下(第1、3和6次采样)的大。因此,土壤含水量越小,基台值越大,土壤含水量空间变异性越大。

基底效应即块金值与基台值的比,反映土壤属性的空间依赖性。其比值越大,说明样本间的变异更多的是由随机因素引起的,一般用小于25%、25%~75%、大于75%3个区间依次表示系统具有强烈、中等和较弱的空间相关性^[1,17]。基底效应 $C_0/(C_1+C_0)$ 在7次采样下均小于50%,表明总体上土壤含水量的空间分布受随机因素的影响不大。

变程表示观测点之间的最大相关距离。由表2可知,7次采样中,第1次采样的土壤含水量的最大相关距离最大,第3、5次的最小,相应的土壤含水量在第3、5次采样中的空间连续性最差。对比表1中不同采样土壤平均含水量可以看出,土壤湿润程度

表1 不同采样时间和采样方式下土壤含水量的特征统计值
Table 1 Characteristic statistics of soil water content under different sampling times and sampling modes

采样日期 Sampling date	采样间距 Sampling space (m)	个数 Sampling number	平均值 Mean (%)	标准差 SD	变异系数 CV (%)	标准误差 SE
2018-09-20	9×9	45	17.2	1.28	7.5	0.21
	18×9	21	17.4	1.16	6.7	0.26
	27×9	15	17.0	1.68	9.9	0.45
	9×18	15	17.4	1.14	6.5	0.33
	18×18	7	17.8	1.13	6.4	0.46
2018-11-02	9×9	45	16.0	1.36	8.6	0.22
	18×9	21	16.0	1.20	7.5	0.27
	27×9	15	15.7	1.81	11.5	0.50
	9×18	15	16.6	0.77	4.7	0.23
	18×18	7	16.5	1.02	6.2	0.41
2018-11-19	9×9	45	17.8	0.99	5.6	0.15
	18×9	21	17.8	0.97	5.5	0.20
	27×9	15	17.9	0.62	3.4	0.16
	9×18	15	18.5	0.76	4.1	0.20
	18×18	7	18.6	0.64	3.4	0.23
2019-03-14	9×9	45	16.4	1.48	9.0	0.24
	18×9	21	16.5	1.42	8.6	0.32
	27×9	15	16.9	1.38	8.2	0.40
	9×18	15	16.9	0.83	4.9	0.26
	18×18	7	16.7	0.57	3.4	0.25
2019-04-02	9×9	45	16.3	1.70	10.4	0.28
	18×9	21	16.2	1.57	9.7	0.34
	27×9	15	16.4	2.24	13.7	0.68
	9×18	15	16.9	1.41	8.4	0.45
	18×18	7	17.0	1.05	6.2	0.47
2019-05-12	9×9	45	17.0	2.20	12.9	0.37
	18×9	21	17.0	2.15	12.6	0.48
	27×9	15	17.3	2.70	15.6	0.78
	9×18	15	17.8	1.80	10.2	0.54
	18×18	7	17.7	2.40	13.5	1.07
2019-05-31	9×9	45	13.7	2.05	15.0	0.34
	18×9	21	13.7	2.34	17.1	0.52
	27×9	15	14.1	2.47	17.4	0.71
	9×18	15	13.8	1.89	13.7	0.57
	18×18	7	14.3	2.46	17.2	1.10

会影响土壤含水量的空间变异性,即土壤含水量越低,土壤含水量的空间变异性表现越强。表征土壤含水量变异性的指标刻画了土壤含水量变异的不同方面,但在表达土壤含水量变异的效果上具有一致性。随着基台值的增大,变程逐渐减小,最大相关距离减小,说明土壤含水量越低,土壤含水量的最大相关距离越小。

2.3 不同采样间距的土壤含水量空间变异性

采用半方差函数对7次采样时间不同采样间距的各土层平均土壤含水量进行半方差分析和统计分析。在初始网格法布局的基础上,扩大取样间距,确

表 2 不同采样时间下所有采样点 0~60 cm 土层平均土壤含水量变异函数理论模型与相关参数

Table 2 Theoretical model and related parameters of soil water content in 0-60 cm layers for all samples at different sampling times

采样日期 Sampling date	块金值 C_0	基台值 C_1+C_0	变程 Range (m)	块金值/ 基台值 $C_0/(C_1+C_0)$	平均 土壤含水量 Average soil water content (%)
2018-09-20	0.63	1.78	51.6	0.36	17.2
2018-11-02	0.64	2.13	40.0	0.30	16.0
2018-11-19	0.08	1.05	10.6	0.08	17.8
2019-03-14	0.15	2.33	19.2	0.06	16.4
2019-04-02	0.33	3.17	10.6	0.10	16.3
2019-05-12	0.01	2.44	16.2	0.00	17.2
2019-05-31	0.01	3.87	17.4	0.00	13.7

模型类型均为球形 The model types were all spherical.

定了 5 种尺度: 9 m×9 m、18 m×9 m、27 m×9 m、9 m×18 m、18 m×18 m, 分析了采样间距对土壤含水量空间变异性计算精度的影响(表 1)。

随着采样间距的增大, 采样点数减小, CV 值呈减小的趋势。27 m×9 m 和 9 m×18 m 两种采样间距

采样数均为 15 个, 但 27 m×9 m 的 CV 值大于 9 m×18 m 的 CV 值, 且标准误差也是前者大于后者, 说明 27 m×9 m 采样间距获得的土壤含水量变异水平强于 9 m×18 m。这是由于 27 m×9 m 采样间距是根据地形平均取样, 而 9 m×18 m 则在南北和东西方向上采样点密度不一致。由表征东西、南北两方向上土壤含水量变异性的异质性指数确定的采样点能够均衡包含两方向上的变异性, 进而使试验区土壤含水量数据更准确, 且增大试验区面积可以提高准确性^[18]。因此, 在采样点数相同的情况下, 不同方向的采样点密度是影响结果的重要因素, 一般建议在不同方向上设置的采样点密度相同或者接近。

基于不同采样间距的土壤含水量参数的数据集, 利用 Surfer 8.0 软件绘制采样间距分别为 9 m×9 m、18 m×9 m、27 m×9 m 下土壤含水量的空间分布图(图 1)。

由图 1 可知, 采样间距为 9 m×9 m 时, 不同采样时间下土壤含水量分布形态类似, 在东向 80 m、

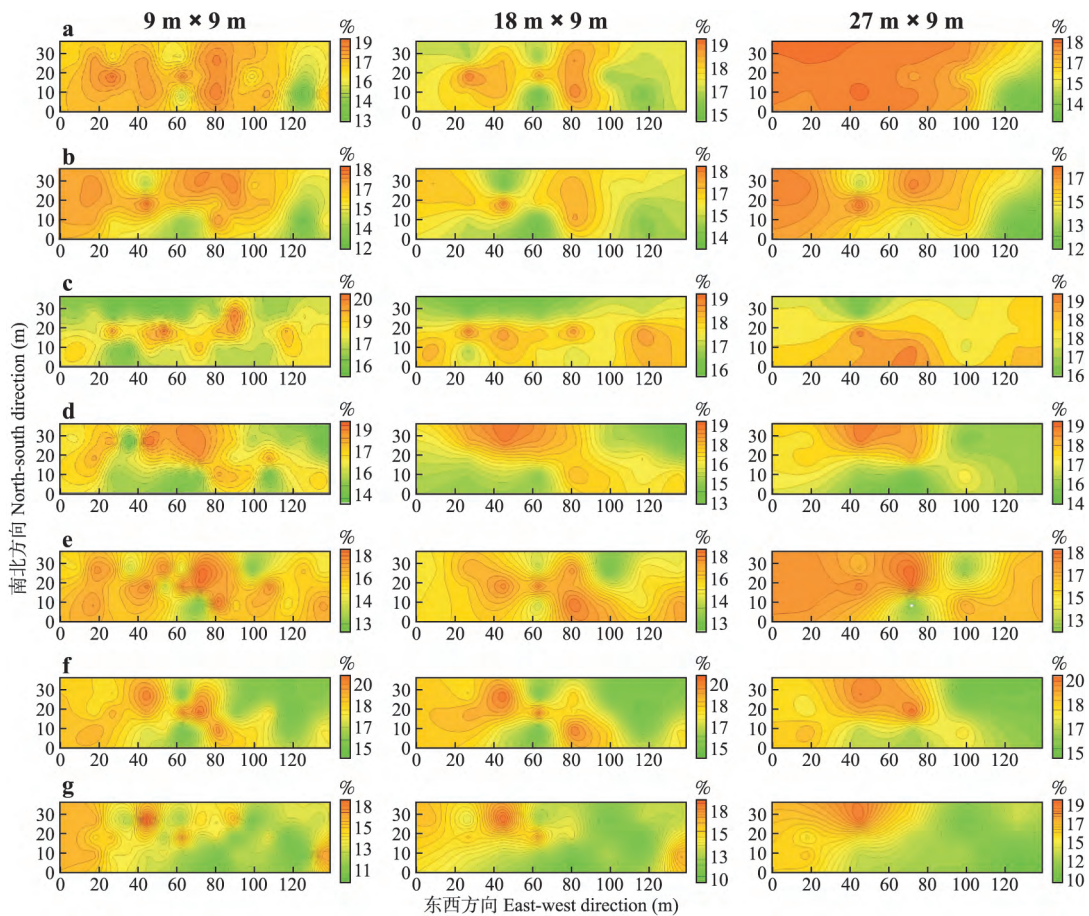


图 1 不同采样间距下 0~60 cm 土层平均土壤含水量的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of average soil water content in 0-60 cm layers at different sampling intervals.

a) 09-20; b) 11-02; c) 11-19; d) 03-14; e) 04-02; f) 05-12; g) 05-31.

北向 20 m 处附近和东向 20 m、北向 15 m 处附近土层土壤含水量差别较小,土壤含水量较大;在东向 40 m、北向 30 m 处和东向 60 m、北向 10 m 处以及东向 120 m、北向 10 m 附近土壤含水量较小。采样间距为 18 m×9 m 时,在东向 20、40、60 和 80 m,北向 20 m 处附近土壤含水量较大;东向 60 m、北向 10 m 处附近土壤含水量在 16.5%~13%,土壤含水量较小。而采样间距为 27 m×9 m 时,东向 130 m 处的土壤含水量较小,东向 40 m、北向 30 m 处土壤含水量较小,东向 40 m、北向 20 m 处土壤含水量较大。

无论采样间距多大,在田块北向 15 m 处,即田块中间处的土壤含水量均较高。采样密度越小,土壤含水量的空间分布趋势越平缓,随着采样密度的增大,土壤含水量的空间分布特征趋于明显。当采样间距从 9 m×9 m 增大到 18 m×9 m 时,土壤含水量空间分布趋势无明显变化,采样间距从 18 m×9 m 增大到 27 m×9 m 时,土壤含水量空间分布趋势更明显。为了方便说明,参照吴才聪等^[19]对碱解氮的分级,将每增加 1% 的土壤含水量划为一个等级:1 级 11%~12%;2 级 12.01%~13%;3 级 13.01%~14%;4 级 14.01%~15%;5 级 15.01%~16%;6 级 16.01%~17%;7 级 17.01%~18%;8 级 18.01%~19%;9 级 19.01%~20%。由图 2 可知,采样间距为 18 m×9 m 的各级面积与采样间距为 9 m×9 m 的对应面积最接近,7 次采样中,6 级面积变化最小,11 月 2 日的 5 级面积变化最大,增加了 796.1 m²,其变化占田块总面积的 15%。采样间距为 27 m×9 m 时只保留了 15 个数据,仅占采样间距为 9 m×9 m 的 1/3,其各级面积与采样间距为 9 m×9 m 的各级面积有较大不同。综上,土壤含水量的采样间距可以控制为 18 m×9 m,采样密度约为 45 个·hm⁻²。

2.4 垂直方向上的土壤含水量空间变异性

以第 3 次采样为例,绘制了 9 m×9 m 采样间距下 0~60 cm 不同土层土壤含水量在东西、南北方向的空间分布图(图 3),土壤含水量分布较为“突起”的部分大多出现在地形的中间部分,即南北方向 15~25 m、东西方向 20~120 m 处土壤含水量较大,而田块四周边缘处的土壤含水量相对较小,且土壤含水量分布较“平稳”。由于降雨后土壤含水量较高,各土层土壤含水量的空间分布形态大致相似,且 0~40 cm 土层土壤含水量分布起伏较大,40~60 cm 土层土壤含水量分布较平坦,这是由于浅层土壤对降雨响应较快,变化较大,随着土层深度的增加,降雨短期内对土壤含水量的影响逐渐减小,土壤含水

量的空间分布逐渐均匀。在 0~60 cm 深度范围内,

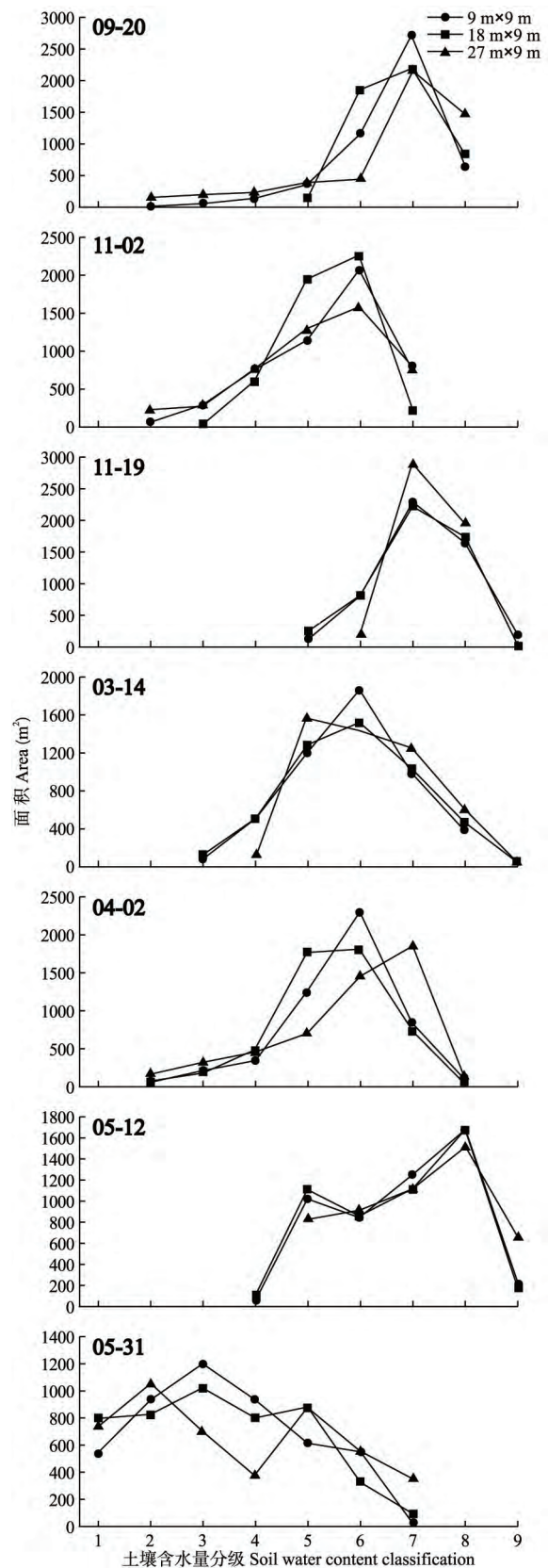


图 2 不同采样间距土壤含水量分级面积统计
Fig.2 Statistics of soil water content classification area at different sampling intervals.

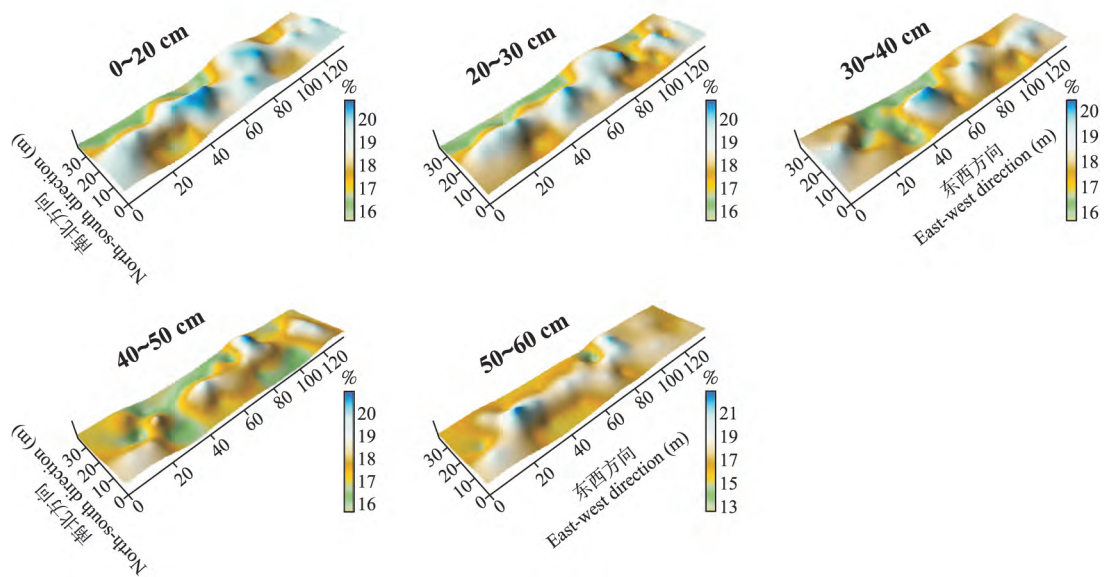


图3 0~60 cm 土层土壤含水量的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of soil water content in 0-60 cm layers.

40~50 cm 土层土壤含水量空间变异强度较其他土层弱,土壤含水量垂直方向的空间变异性呈先减小后增大的趋势。这可能是由于冬小麦根系主要集中在土壤上层,并且根系的根重密度会随着土层深度的增加而减少,所以40~50 cm 土层土壤含水量较其他土层低。这是由剖面根密度差异导致的典型的土壤含水量垂直分布格局。

3 讨 论

田块尺度下土壤性质空间变异性的研究是实现农业精准灌溉的重要基础,空间变异性的强弱是土壤性质空间关系的表象。东北黑土区^[13]、陕北黄土区^[11,20]和新疆盐碱土区^[1]的土壤含水量在垂直方向上的变异强度表现为弱变异或中等(偏弱)变异。本研究验证了这一规律,水平与垂直方向上的土壤含水量空间变异性表现为弱变异。这与许多研究得出的结果相似^[21]。

一些研究表明,不同研究区域和研究时期土壤含水量空间变异性受结构因子影响的程度主要与土壤含水量大小相关^[21-22]。本研究发现,土壤较干旱时,土壤含水量的基台值整体上比土壤湿润时大,同样说明土壤含水量空间变异性强度受土壤含水量大小的影响。土壤含水量的增加主要是由降水引起的,降水在田间分布较均匀,而由于田间的土壤质地、养分分布不同,冬小麦的生长存在差异,冬小麦的根部耗水、棵间蒸发和植株蒸腾不均匀,导致田间耗水分布不均匀,土壤含水量空间变异性发生变化。

赵文举等^[23]在研究土壤水分运动时发现,土壤含水量的变异性主要发生在土壤含水量较小的区域,土壤含水量越小,其空间变异性越大。这与本研究结果一致。土壤含水量越大,土壤越趋向于饱和,负压越小,土壤含水量的空间变异性越趋向于零。但王云强等^[18]在黄土高原0~500 cm 土层研究发现,土壤含水量的变化趋势与其空间变异性效果存在一致性,垂直方向上的结果与水平方向不同。这是由于垂直方向的土壤含水量变异性是通过各土层水平方向的土壤含水量变异强度沿深度方向的变化趋势计算得出的,因而分析垂直方向的土壤含水量的空间变异性不仅要考虑土壤含水量的大小,还要分析土壤含水量的变幅大小。

土壤性质的空间变异性差异与采样密度有关^[7,19],CV 随采样密度(测点数量/采样面积)的增加而增加,采样密度越大,采样点数越多,空间分布越趋于稳定^[24]。合理的采样密度在采样前是未知的,在控制成本最小条件下,可以根据不同产量和土壤肥力水平划定区域,确定采样密度^[25]。本研究中采样尺度较小,在不同采样时间下,采样间距18 m×9 m 的空间分布与9 m×9 m 的较为接近,为了降低成本,减少采样点数,选择采样间距为18 m×9 m。实际上,单一的采样密度不能用于所有地区,每个区域都有各自的最佳采样密度,很多情况下需要根据土壤性质和覆盖物来确定,且需要考虑实际采样情况和成本问题^[26]。

不同土层土壤含水量的均值和变异系数存在较

强的相关性,且土层距离越小,相关性越强^[27]。本研究中,各土层土壤含水量空间分布相似,土壤含水量垂直方向的空间变异强度呈先减小后增大的趋势。魏新光等^[28]对黄土丘陵区枣林土壤含水量的研究认为,枣林浅层土壤由于降雨入渗,土壤含水量变异程度随土层的增加而减小,中间根系土层的土壤含水量变异系数非常小,而由于下垫面情况复杂,深层土层存在水分侧向补给的情况,其土壤含水量的变异程度增大。说明植被覆盖下的土壤含水量空间变异性需要考虑降水和植被根系对土壤含水量的影响。

另外,地形和微地貌也与土壤含水量的空间变异程度及分布格局存在一定的关系^[29]。刘宏伟等^[30]认为,土壤含水量分布受局部微地形的影响,当发生降雨时,地势较低处的土壤含水量饱和度较高,土壤含水量空间变异性强度较地势高处的弱。郭欣欣等^[13]对黑土区坡面土壤的研究认为,由于重力作用,土壤含水量入渗速率不同,土壤含水量沿坡长方向的变化趋势不同。本研究发现,田块区域中间范围的土壤含水量比四周高,可能是由于不同的地形影响植被生长,造成降雨时产生的入渗程度、植被蒸腾和裸间蒸发产生差异,从而影响土壤含水量的空间变异性^[13,31]。

参考文献

- [1] 王全九,毕磊,张继红. 新疆包头湖灌区农田土壤水盐热特性空间变异特征. 农业工程学报, 2018, **34**(18): 138-145 [Wang Q-J, Bi L, Zhang J-H. Spatial variability analysis of large-scale soil water, salt and heat characteristics in Baotou Lake irrigation area of Xinjiang. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, **34**(18): 138-145]
- [2] 刘继龙,马孝义,张振华. 土壤水盐空间异质性及尺度效应的多重分形. 农业工程学报, 2010, **26**(1): 81-86 [Liu J-L, Ma X-Y, Zhang Z-H. Multifractal study on spatial variability of soil water and salt and its scale effect. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, **26**(1): 81-86]
- [3] 孔达,王立权,刘继龙,等. 黑土区农田土壤含水量空间变异性的尺度效应研究. 水利学报, 2017, **48**(5): 608-612 [Kong D, Wang L-Q, Liu J-L, et al. Scale effect of spatial variability of cropland soil water content in black soil region. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, **48**(5): 608-612]
- [4] Sun B, Zhou SL, Zhao QG. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma*, 2003, **115**: 85-99
- [5] Hu W, Shao MA, Han FP, et al. Spatio-temporal variability behavior of land surface soil water content in shrub- and grass-land. *Geoderma*, 2011, **162**: 260-272
- [6] 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. 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. *Advances in Water Science*, 2014, **25**(4): 585-593]
- [7] 李敏,李毅,曹伟,等. 不同尺度网格膜下滴灌土壤水盐的空间变异性分析. 水利学报, 2009, **40**(10): 1210-1218 [Li M, Li Y, Cao W, et al. Spatial variability of soil moisture and salt content at different sampling grid scales under plastic mulch drip irrigation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, **40**(10): 1210-1218]
- [8] 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率空间变异性研究. 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. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, **46**(8): 138-145]
- [9] Li T, Hao XM, Kang SZ. Spatial variability of grape yield and its association with soil water depletion within a vineyard of arid northwest China. *Agricultural Water Management*, 2017, **179**: 158-166
- [10] Yemefack M, Rossiter DG, Njomgana R. Multi-scale characterization of soil variability within an agricultural landscape mosaic system in southern Cameroon. *Geoderma*, 2005, **125**: 117-143
- [11] Zhao PP, Shao MA, Wang TJ. Spatial distributions of soil surface-layer saturated hydraulic conductivity and controlling factors on dam farmlands. *Water Resources Management*, 2010, **24**: 2247-2266
- [12] 聂卫波,费良军,马孝义. 区域尺度土壤入渗参数空间变异性规律研究. 农业机械学报, 2011, **42**(7): 102-108 [Nie W-B, Fei L-J, Ma X-Y. Spatial variability of infiltration parameters at the region scales. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, **42**(7): 102-108]
- [13] 郭欣欣,付强,卢贺,等. 东北黑土区农林混合利用坡面土壤水分空间异质性及主控因素. 农业工程学报, 2018, **34**(19): 123-130 [Guo X-X, Fu Q, Lu H, et al. Spatial variability and its controlling factors of soil moisture on cropland-forestland mixed hillslope in black soil area of Northeast China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, **34**(19): 123-130]
- [14] Ersahin S, Brohi AR. Spatial variation of soil water content in topsoil and subsoil of a typic ustifluent. *Agricultural Water Management*, 2006, **83**: 79-86
- [15] 楚万林,齐雁冰,常庆瑞,等. 秦巴山地县域土壤碱解氮空间变异与合理采样数的确定. 水土保持通报, 2015, **35**(2): 141-146 [Chu W-L, Qi Y-B, Chang Q-R, et al. County-scale spatial variability of soil available nitrogen distribution and determination of reasonable sampling density in Qinba Mountains. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, **35**(2): 141-146]

- [16] 刘瑞民,王学军,郑一. 湖泊水质参数空间分析中异常值的识别与处理. 环境科学与技术, 2003, **26**(5): 17-18 [Liu R-M, Wang X-J, Zheng Y. Outlier identification and processing in spatial analysis of water quality parameters of a lake. *Environmental Science and Technology*, 2003, **26**(5): 17-18]
- [17] 蔡树英,林琳,杨金忠,等. 含水层和土壤的随机特征对水分运动的影响. 水科学进展, 2005, **16**(3): 313-320 [Cai S-Y, Lin L, Yang J-Z, et al. Effect of random characteristics of soil and aquifer on the water flow in formations. *Advances in Water Science*, 2005, **16**(3): 313-320]
- [18] 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. 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. *Advances in Water Science*, 2012, **23**(3): 310-316]
- [19] 吴才聪,马成林,张书慧,等. 基于GIS的精确农业合理采样与施肥间距研究. 农业机械学报, 2004, **35**(2): 80-83 [Wu C-C, Ma C-L, Zhang S-H, et al. Research on reasonable distances of soil sampling and fertilizing based on GIS in precision agriculture. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2004, **35**(2): 80-83]
- [20] Gao L, Shao MA. Temporal stability of shallow soil water content for three adjacent transects on a hillslope. *Agricultural Water Management*, 2012, **110**: 41-54
- [21] 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. 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. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(5): 1199-1208]
- [22] 余冬立,邵明安,俞双恩. 黄土区农草混合利用坡面土壤水分空间变异性. 农业机械学报, 2010, **41**(7): 57-63 [She D-L, Shao M-A, Yu S-E. Spatial variability of soil water content on a cropland-grassland mixed slope land in the Loess Plateau, China. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, **41**(7): 57-63]
- [23] 赵文举,李晓萍,范严伟,等. 不同降雨脉动条件下压砂地土壤水分的空间变异特征. 应用基础与工程科学学报, 2016, **24**(6): 1159-1169 [Zhao W-J, Li X-P, Fan Y-W, et al. Spatial variation characteristics of soil moisture in gravel-sand mulched field to different precipitation pulses. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2016, **24**(6): 1159-1169]
- [24] 刘姗姗,许迪,白美健,等. 考虑入渗空间分布变性的适宜土壤紧实度采样密度分析. 水利学报, 2015, **46**(3): 307-314 [Liu S-S, Xu D, Bai M-J, et al. Analysis of sampling density for suitable soil compaction considering spatial variability of soil infiltration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, **46**(3): 307-314]
- [25] Cambardella CA, Karlen DL. Spatial analysis of soil fertility parameters. *Precision Agriculture*, 1999, **1**: 5-14
- [26] Nanni MR, Povh FP, Dematté JAM, et al. Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in site-specific management. *Scientia Agricola*, 2011, **68**: 386-392
- [27] 赵文举,李晓萍,范严伟,等. 西北旱区压砂地土壤水分的时空分布特征. 农业工程学报, 2015, **31**(17): 144-151 [Zhao W-J, Li X-P, Fan Y-W, et al. Spatial-temporal stability distribution characteristics of soil moisture in gravel-sand mulched field in northwestern arid area. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(17): 144-151]
- [28] 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. 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. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, **46**(6): 130-140]
- [29] Fu BJ, Wang J, Chen LD, et al. The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China. *Catena*, 2003, **54**: 197-213
- [30] 刘宏伟,余钟波,崔广柏. 湿润地区土壤水分对降雨的响应模式研究. 水利学报, 2009, **40**(7): 822-829 [Liu H-W, Yu Z-B, Cui G-B. Pattern of soil moisture responding to precipitation in humid area. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, **40**(7): 822-829]
- [31] 张继光,陈洪松,苏以荣,等. 喀斯特地区典型峰丛洼地表层土壤水分空间变异及合理取样数研究. 水土保持学报, 2006, **20**(2): 114-117 [Zhang J-G, Chen H-S, Su Y-R, et al. Spatial variability of soil moisture content and reasonable sampling number in cluster-peak depression areas of karst region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, **20**(2): 114-117]

作者简介 张诗祁,女,1995年生,硕士研究生。主要从事水土资源高效利用研究。E-mail: a1141522507@163.com

责任编辑 张凤丽

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



张诗祁,牛文全,李国春. 关中平原田间土壤含水量的空间变异性. 应用生态学报, 2020, **31**(3): 821-828

Zhang S-Q, Niu W-Q, Li G-C, et al. Spatial variability of soil water content in field of Guanzhong Plain, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(3): 821-828