

南疆典型灌区春播前表层土壤 含水率空间分布研究

刘一凡^{1,2}, 吕廷波^{1,2}, 宋仁友^{1,2}, 张晓宇^{1,2},
陈伏龙^{1,2}, 付鑫法^{1,2}, 李港强^{1,2}

(1.石河子大学水利建筑工程学院,新疆 石河子 832000;2.现代节水灌溉兵团重点实验室,新疆 石河子 832000)

摘要:采用7种插值方法(反距离权重法、径向基函数法、全局多项式法、局部多项式法、普通克里金法、泛克里金法、经验贝叶斯克里金法)对小海子灌区(南疆典型灌区)土壤含水率进行空间分布特征评估。结果表明:(1)研究区表层土壤含水率介于4.99%~24.99%,变异系数为27.6%,属于中等变异,且具有中等的空间自相关性,指数模型拟合变异函数的效果较好。(2)对于同时受结构性因素与随机性因素影响的小海子灌区,将确定性插值径向基函数法应用于土壤含水率插值的精度较高。(3)通过对灌区表层土壤含水率空间分布图的分析,发现小海子灌区春播前土壤含水率在空间上呈现出西南高、东北低的规律,且受地下水位及灌溉措施影响较大;表层土壤含水率大于15%的面积占总面积的64.9%,从整体上看,灌区西南部与中部的土壤含水率已达到播种要求,东北部地区达到“干播湿出”的播种要求,灌区可安排相应的春播活动。

关键词:土壤水分;空间分布;空间插值法;精度评价;南疆灌区

中图分类号:S152.7 **文献标志码:**A

Spatial distribution of surface soil moisture content before spring sowing in typical irrigation areas in southern Xinjiang

LIU Yifan^{1,2}, LV Tingbo^{1,2}, SONG Renyou^{1,2}, ZHANG Xiaoyu^{1,2},
CHEN Fulong^{1,2}, FU Xinfu^{1,2}, LI Gangqiang^{1,2}

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China; 2. Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: This study employed seven interpolation methods (inverse distance weighting, radial basis function, global polynomial, local polynomial, ordinary Kriging, universal Kriging, and empirical Bayesian Kriging) to assess the spatial distribution characteristics of soil moisture content in the Xiaohaizi irrigation area (typical irrigation area in southern Xinjiang). The results indicate that: (1) The surface soil moisture content in the study area ranged from 4.99% to 24.99%, with a coefficient of variation of 27.6%, indicating moderate variability and moderate spatial autocorrelation, and the exponential model effectively fitted the variogram function. (2) For the Xiaohaizi irrigation area, which was influenced by both structural and random factors, the deterministic interpolation radial basis function method achieved high accuracy in soil moisture content interpolation. (3) Through the analysis of the spatial distribution map of soil moisture content in the irrigation area, it was found that before spring sowing, the soil moisture content in the Xiaohaizi irrigation area exhibited a pattern of high in the southwest and low in the northeast, with significant influence from groundwater level and irrigation measures. The area with soil moisture content exceeding 15% covered 64.9% of the total area. Overall, the soil moisture content in the

southwest and central parts of the irrigation area metted the sowing requirements, while the northeast region metted the “dry sowing and moist emergence” sowing requirements. Spring sowing work can be arranged in different areas accordingly.

Keywords: soil moisture; spatial distribution; spatial interpolation methods; accuracy evaluation; southern Xinjiang irrigation district

南疆地区作为我国西部重要的农业生产基地之一,灌溉农业在其中扮演着至关重要的角色。然而,由于地处干旱半干旱地区,包括小海子灌区在内的南疆大型灌区面临着水资源利用效率低和土壤盐渍化等问题,故提高灌区水资源利用效率、保护土壤生态环境已成为当前亟需解决的问题之一。土壤含水率作为影响灌溉农业生产的重要因素之一,其空间分布特征直接关系到农田灌溉、作物生长及生态环境的稳定性。

野外采样和室内测定仍是目前揭示土壤含水率空间分布特征的主要方法之一,但采样密度对揭示所在研究区的土壤含水率具有显著影响。为解决这一问题,空间插值技术被广泛应用,该技术可将离散数据点转换为连续的数据曲面,从而实现研究区土壤属性值的全面覆盖。土壤属性空间插值方法及其精度作为土壤属性变化的时空定量监测方法,已成为数字土壤研究的重点研究方向^[1]。许多学者尝试并比较了各种常用的插值方法(即克里金插值、反距离权重、径向基函数等),但得到了不同的结果^[2-3]。魏俊奇等^[4]认为地统计方法优于确定性方法,但需要在半方差函数和协方差函数建模期间选择适当的模型和参数。然而有学者认为,克里金插值方法的较高计算成本无法提供更好的性能和精度^[5]。

因此,本文以南疆典型灌区小海子灌区为研究区,结合交叉验证及独立数据集验证两种手段并采用多个精度评价指标,比较 7 种插值方法(反距离权重法、径向基函数法、全局多项式法、局部多项式法、普通克里金法、泛克里金法、经验贝叶斯克里金法)对灌区表层土壤含水率的预测效果;探讨最适宜小海子灌区土壤含水率空间插值研究的方法;进而通过评估土壤含水率指标,包括土壤含水率及分布情况,为后续预测播种时间、合理安排灌溉与施肥、预防土壤干旱与盐渍化提供科学建议。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

小海子灌区地处西南天山南麓,塔里木盆地西北边缘(78°56′~79°35′E, 39°39′~40°43′N),由 44

团、49 团、50 团、51 团、53 团和小海子水库管理处等单位组成。该地区属于暖温带大陆性干旱气候,干旱少雨,蒸发强烈,多年平均降水量仅为 52.4 mm,多年平均蒸发量高达 2 423.1 mm。小海子灌区 3 月份地下水位介于 4.7~11.35 m,地下水位由南到北、由西到东逐渐减小。与大多数南疆灌区相似,该灌区主要依靠地表水进行灌溉,灌溉水源主要来自叶尔羌河。同时该地区普遍采用膜下滴灌的灌溉模式,属于典型的南疆灌溉农业区^[6]。

1.2 数据采集

以研究区地形图、水系图、土地利用类型图为底图,综合考虑区域地形地貌、成土母质类型、土地利用类型等因素,在保证空间均匀性与采样准确性的基础上采用随机布点方式设计 5 km×5 km 采样点网格。并于 2023 年 3 月中旬(春播前)采用 GPS 定位技术进行土壤样品采集,在实际取样过程中,根据实际情况对采样点数量及位置做适当调整。最终确定实际采样点 87 个,位置如图 1(见 270 页)所示。在实际采样时,采集剖面垂直于耕作方向,每个采样点按照 60 cm 间距设置 3 个取土点,灌区进行春播的作物主要为棉花和小麦,因此我们在用土钻取土时选取棉花及小麦播种深度以上的 0~30 cm 表层土壤,取 3 次样后混合组成待测样品,共计 261 份土壤样品。

1.3 研究方法

1.3.1 空间插值方法 目前对于土壤属性空间插值方法主要分为确定性方法与地统计学方法两大类。确定性方法主要依赖于已知数据点之间的确定性数学模型,通过对这些数据点之间的关系进行数学建模,来推断未知位置的数值。而地统计学方法则利用已知样本点之间的空间关系和变异程度进行分析,从而推断未知位置的数值。本文从两类插值方法中选择了 7 种常用的插值方法,包括反距离权重法(IDW)、径向基函数法(RBF)、全局多项式法(GPI)和局部多项式法(LPI)等 4 种确定性方法,以及普通克里金(OK)、泛克里金(UK)和经验贝叶斯克里金(EBK)等 3 种地统计学方法。

1.3.2 精度评价方法 本研究采用了交叉验证和

独立数据集验证两种方法,以综合评估 7 种插值方法在土壤含水率预测中的准确性。为提高预测精度,将训练数据集的占比由常规的 70% 提高至 80%,即 70 个采样点;测试数据集占比为 20%,即 17 个采样点。

交叉验证即将原始数据集分成 K 个子集,通过重复 K 次的训练和测试,得到 K 个独立的模型性能评估结果,并汇总这些结果,以准确评估模型性能并减少随机性引入的误差^[7]。独立数据集验证则是一种直接的评估方法,将原始数据集随机分为训练集和测试集,通过比较验证数据集中的实测值和预测数据集中相应位置的预测值来评估空间预测的准确性^[8]。研究中采用的预测精度评价指标包括平均误差 (ME)、平均绝对误差 (MAE)、平均标准化误差 (MSE)、平均标准误差 (ASE)、均方根误差 (RMSE)、均方根标准化误差 (RMSSE)^[9]。评估流程如图 2 所示。

1.3.3 描述性统计 基本的统计参数,如平均值、中值、最小值、最大值、方差、偏度和峰度,被用来描述土壤含水率的分布特征。变异系数 (CV) 用于表示土壤湿度的总体变化程度, $CV < 10\%$ 为弱变异, $10\% < CV < 100\%$ 为中等变异, $CV > 100\%$ 为强变异^[10]。Kolmogorov Smirnov (K-S) 方法用于测试土壤含水率分布的正态性^[11]。采用 SPSS 22.0 软件完成描述性统计分析。

1.3.4 半方差函数 土壤水分的空间变异性及其影响因素通过基本的地质统计学工具进行分析。GS+ 9.0 地质空间分析软件用于变异函数分析,变异函数为:

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

式中, $N(h)$ 是距离等于 h 时的点对数; $Z(x_i)$ 是在 x_i 位置处的真实测量值;并且 $Z(x_i + h)$ 是在 $x_i + h$ 的位置处的真实测量值^[12]。

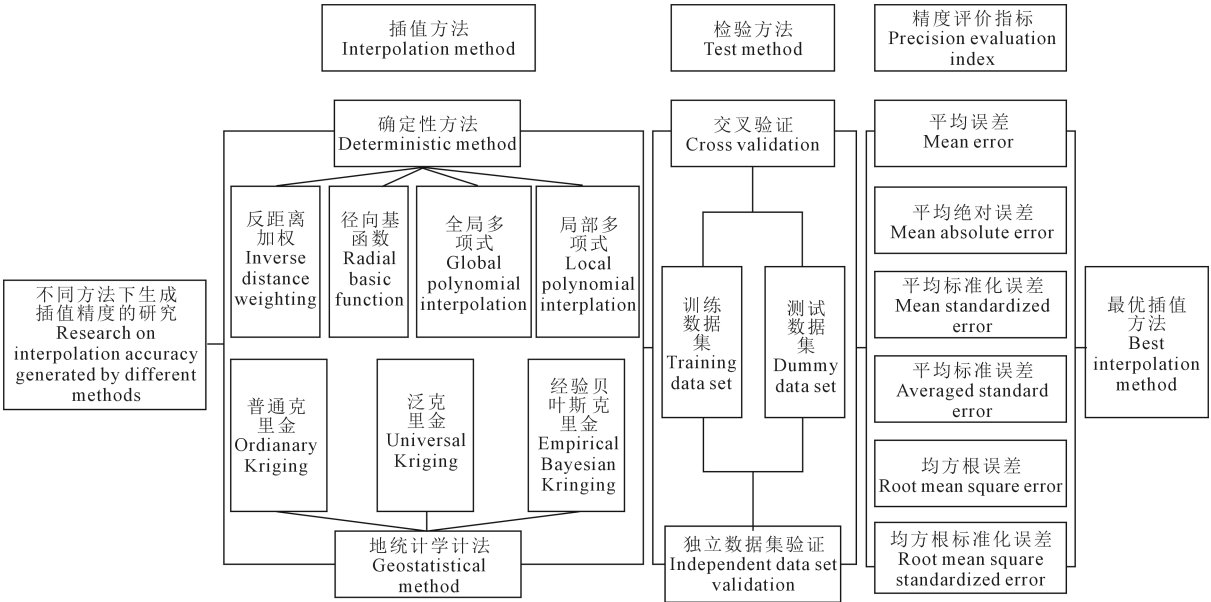


图 2 插值精度评估流程

Fig.2 Interpolation accuracy evaluation process

2 研究结果

2.1 土壤水分的描述性统计分析及空间变异的结构性特征分析

表 1 列出了小海子灌区研究区域 87 个采样点土壤含水率的基本统计信息。表层土壤含水率变化范围为 4.99%~24.99%,平均值 (15.44%) 和中位数 (15.69%) 接近。土壤水分 CV 值为 27.6%,在区域尺度上属于中等变异系数范围,表明小海子灌区

土壤含水率有良好的均匀性^[13]。K-S 检验得出的偏度为-0.169,接近于 0,峰度为 2.694,接近于 3, P 值均大于 0.05,表明采样土壤含水量服从正态分布,故在进行半方差函数计算时不需要进行数据转换。

图 3 按取样编号的顺序显示了 87 个样品的土壤含水量。土壤含水率在相邻测量值之间存在不规则波动,并表现出明显的局部变化特征。例如,土壤含水率在第 30 和 40 个采样点之间以及第 73 和 83 个采样点之间有很大的波动。由于在计算变

异系数时没有考虑空间位置的关系,这些局部变异性远远大于相关系数表示的平均变异性。因此,不依赖于空间关系的传统统计模型(如线性回归方程)在研究具有较大局部可变性采样位置的土壤性质空间异质性时,不能够对实际空间可变性做出更准确的预测^[14]。

采用 GS+9.0 软件拟合研究区土壤含水率的变化函数。根据块金效应、决定系数(R^2)、变量范围等指标在高斯模型、指数模型、球形模型、线性模型中选择最优的半方差函数拟合模型。

表 1 表层(0~30 cm)土壤含水率数据统计结果

Table 1 Statistical results of soil moisture content data in surface layer (0~30 cm)		
指标 Indicator	值 Value	
样本数 Number of samples	87	
最小值 Minimum value	4.99%	
最大值 Maximum value	24.99%	
平均值 Mean value	15.44%	
中位数 Median	15.69%	
标准差 Standard deviation	4.26	
峰度 Kurtosis	2.694	
偏度 Bias angle	-0.169	
变异函数 Variation function	27.6%	
K-S 检验 K-S test	0.2	

由表 2 可知,块金值为 9.21,基台值为 18.43,决定系数为 0.918。研究区土壤含水率变异函数的拟合效果以指数模型为最优,空间相关度为 50%,即土壤含水率具有中度的空间相关性。这表明土壤含水率的区域空间变异受结构性因素(如气候、地形、土壤类型等)和随机性因素(如灌溉措施、耕作措施等各种人为活动)共同影响^[15]。

土壤含水率的各向同性半方差函数如图 4 所示,可知当步长大于 26.61 km 时,半方差趋于稳定,具有小的波动,这可能是由其他方向的变化引起的。当步长小于 26.61 km 时,土壤水分含量在大尺度上相关,具有良好的空间连续性,表明结构性因素和随机性因素对土壤水分有很大影响。本研究设置的采样间隔小于土壤水分变程,满足评价土壤空间变异的要求^[16]。

2.2 插值方法精度比较

2.2.1 确定性方法预测精度比较 不同的参数设置会显著影响预测结果,为确保达到最佳的插值效果,本研究在插值过程中均采用最优参数设置,选择最优参数的唯一标准是在交叉检验中得到最小的均方根误差。确定性方法的最优参数设置如表 3 所示。

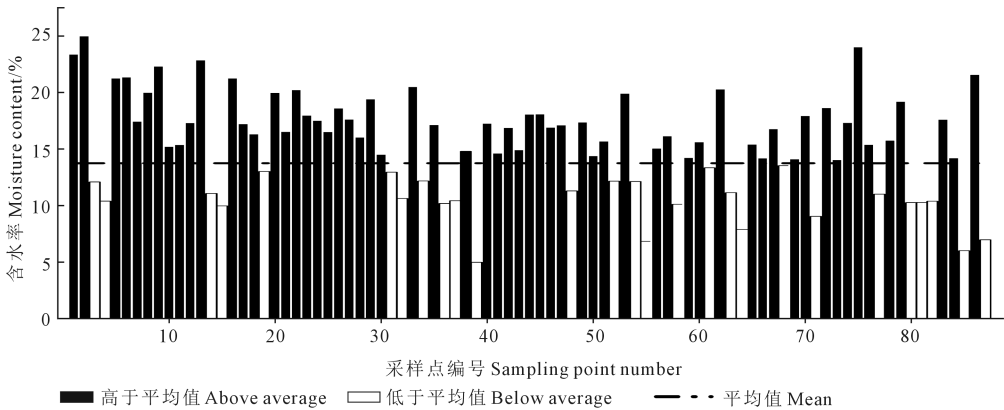


图 3 87 个采样点土壤含水率的分布

Fig.3 Distribution of soil moisture content at 87 sampling points

表 2 土壤含水率的半方差函数最优拟合模型及相关参数

Table 2 Optimal semi-variance function fitting model of soil water content and related parameters					
理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget	基台值 Sill	空间相关度 Nugget/Sill	变程 Range	决定系数 R^2
指数模型 Index model	9.21	18.43	50.00	26.61	0.918

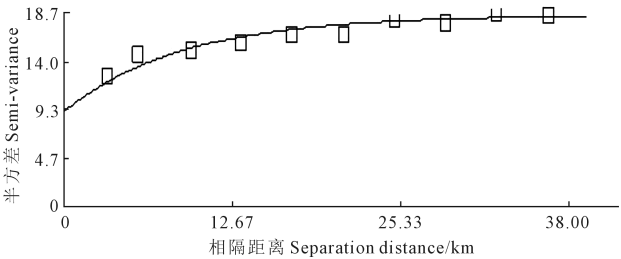


图 4 土壤含水率的各向同性半方差函数

Fig.4 Isotropic semi-variance function of soil moisture content

表 3 确定性方法估计土壤含水率的验证误差
Table 3 Validation error of the deterministic method for estimating soil moisture content

插值方法 Interpolation method	参数设置 Parameterization	交叉验证误差 Cross-validation error		独立数据集验证误差 Independent dataset validation error			
		ME	RMSE	ME	RMSE	MAE	MAPE
IDW	$\alpha = 1.26$	0.0741	4.0916	0.0185	0.2210	0.1746	0.0127
RBF	规则样条函数 Regular spline function	-0.0046	4.1704	0.0098	0.0444	0.0358	0.0023
GPI	Order=1	0.0013	4.1315	0.0425	3.2554	2.6238	0.2094
LPI	Order=2	0.0518	4.1573	0.2278	3.0158	2.5493	0.1885

通过 4 种确定性方法预测精度的交叉验证误差比较,依据 *ME* 可知,GPI 方法最接近于 0,其次是 RBF 方法,IDW 和 LPI 方法相对较大。依据 *RMSE* 可知,IDW 方法的数值最小,其次是 GPI 和 LPI 方法,而 RBF 方法略大于其他方法。

独立数据集验证结果显示,GPI 和 LPI 方法在预测精度上表现相近;具体而言,GPI 方法呈现较小的 *ME*,其整体预测结果与实际观测值的平均偏差较小;而 LPI 方法的 *RMSE* 较小,说明其整体预测结果与实际观测值的离散程度较小。

在这些插值方法中,RBF 方法的性能更为优越。RBF 方法的 *ME*、*RMSE*、*MAE* 和 *MAPE* 均优于 IDW 方法。表明采用 RBF 方法进行土壤含水率预测时,整体预测误差较小,预测结果与实际观测值的偏差较小,并且相对准确地反映了土壤含水率的空间分布情况。仅从误差评价角度而言,RBF 方法的插值精度整体上高于另外 3 种确定性方法,确定性方法预测精度从高到低为 RBF>IDW>GPI>LPI。

2.2.2 地统计方法预测精度比较 利用 Arcgis 10.8 地统计模块中的趋势分析对研究区含水率进行研究,发现各阶均无明显全局趋势效应,故本研究在进行克里金插值时均未进行趋势移除。本研究采用的地统计方法均以指数模型拟合变异函数效果最佳。

在比较地统计学插值方法的预测精度时,需要综合考量最优性和有效性^[17]。当 *ME* 和 *MSE* 接近于 0,同时 *RMSE* 和 *ASE* 尽可能小的情况下,模型表现出最优性;而当 *RMSSE* 接近于 1 且 *RMSE* 与 *ASE* 最接近时,模型才能被视作最有效。通过综合比较地统计学的交叉验证结果可知(见表 4),UK 方法的 *ME* 及 *MSE* 均接近于 0,但其 *RMSE* 与 *ASE* 之间的差距过大,这说明该模型不具备最优性,通过该模型获得的插值结果合理性难以保证,不适用于该区域表层土壤含水率的预测^[18]。

EBK 和 OK 方法的 *RMSE* 与 *ASE* 最为接近,说明模型最有效,但 OK 方法的 *RMSE*、*MSE* 均小于 EBK 方法,说明 OK 方法的精度高于 EBK 方法。

独立数据集验证结果表明(见表 4),UK 和 OK

方法的 *ME* 均小于 EBK 方法。对 UK 和 OK 方法的预测误差进行分析,发现 OK 方法的预测精度整体上高于 UK 方法,在误差评估方面,OK 方法的插值效果整体上优于另外两种地统计学方法,地统计学方法预测精度从高到低为 OK>EBK>UK。

将预测精度最高的确定性方法 RBF 与地统计学方法 OK 进行独立数据集结果比较,发现 RBF 方法的 *ME*、*RMSE*、*MAE*、*MAPE* 均小于 OK 方法,说明 RBF 方法的预测精度较 OK 方法有大幅度的提高,是最适于小海子灌区表层土壤含水率的插值方法。

2.3 土壤水分空间分布

各种方法的预测结果数据统计如表 5 所示。与原始数据集相比,GPI 和 LPI 方法表现出了极强的平滑性,导致预测范围大幅缩减;标准差分别为原始数据的 35.2%和 45.7%,变异系数分别为原始数据集的 35.14%和 45.65%。地统计学插值方法 UK 和 EBK 也呈现出显著的平滑性,其标准差均为原始数据集的 47.41%,预测数据范围大幅缩减,变异系数分别为原始数据的 47.4%和 47.1%,这导致对整体空间变异性的低估。IDW 和 RBF 作为精确性插值方法,具有良好的极值保留能力,并且在预测范围、标准差和变异系数方面与原始数据表现出较高的一致性。特别是 RBF 方法在对数据的离散程度和变异性的预测结果中最接近原始数据集,在更大程度上重现了原始数据的离散性和波动性特征。

图 5 为小海子灌区利用不同插值方法生成的土壤表层含水率空间分布图,观察发现插值方法的选择会显著影响土壤含水率的空间分布。具体而言,IDW 方法受到局部极值影响,导致插值表面出现严重的“牛眼”现象;GPI 和 LPI 方法则呈现过度平滑的特征,削弱了极值的预测范围;地统计插值方法 OK、UK、EBK 虽能更好地预测土壤含水率的空间趋势,并呈现出较高的连续性和光滑性,但在预测范围上与原始数据仍有差距。相比之下,RBF 模拟方法的预测表现出更多的变异性,预测范围更接近原始数据集,在整体上变化连续且拥有更丰富的细节。

表 4 地统计方法估计土壤含水率的验证误差

插值方法 Interpolation method	交叉验证误差 Cross-validation error					独立数据集验证 Independent dataset validation error				
	ME	RMSE	ASE	MSE	RMSSE	ME	RMSE	MAE	MAPE	RMSSE
OK	0.0079	4.1420	4.1026	0.0020	1.2090	-0.1025	0.6687	0.5803	0.0490	1.2090
UK	-0.0118	4.3684	3.5645	-0.0032	1.2082	-0.0603	2.5915	2.1672	0.1569	1.2082
EBK	0.0585	4.2350	4.1407	0.0143	1.0179	-0.2543	3.5843	2.9950	0.2532	1.0179

表 5 土壤含水率预测值的统计特征

项目 Project	极小值/% Minimum value	极大值/% Maximum value	平均值/% Mean value	标准差/% Statistics deviation	变异系数 Coefficient of variation
原始数据集 Source data set	4.99	24.99	15.44	4.26	0.276
IDW	5.04	24.83	15.45	4.10	0.265
RBF	4.99	24.94	15.44	4.24	0.274
GPI	12.82	18.76	15.44	1.50	0.097
LPI	11.94	22.79	15.37	1.95	0.126
OK	5.64	24.05	15.43	3.68	0.238
UK	11.95	20.36	15.42	2.02	0.131
EBK	11.96	20.22	15.51	2.02	0.130

所有分布图都采用了相同的含水量分级比例,通过比较 7 种方法绘制的土壤含水率空间分布发现其均表现出相似的分布特点。以精度最高的 RBF 方法为例进行分析,以 15%的表层土壤含水率作为界限计算土地面积,含水率低于 15%面积占灌区总面积的 36.1%,多位于灌区东北部。而研究区西南部的土壤含水率较高,一个原因是灌区西南部土壤盐渍化程度高,在播种之前往往需要进行春灌来达到“压盐”的效果,由于采样时间为 3 月中旬,接近于播种时间,因此西南地区已进行过春灌;另一个原因是因为灌区西南部位于永安坝水库与小海子水库中间,由于靠近水库,地下水位较灌区其他区域更浅,地下水位介于 4.7~6.0 m,水分更容易通过土壤孔隙中的渗透作用向上运移,使得土壤中的含水量增加^[19]。

灌区东北部含水率低,主要因为东北部的种植技术已经由冬春灌转变为“干播湿出”,在播种前不再进行冬灌或春灌,播种后再灌水使土壤含水率达到种子出苗的要求;同时灌区东北部由于距离水库最远的原因,导致地下水位低,大部分位于 7.5 m 以下,水分较西南部向上运移效果不佳。

3 讨 论

小海子灌区位于天山南麓的西南部,靠近塔里木盆地的西北边缘。灌区干旱少雨,蒸发强烈,主要依赖地表水进行灌溉,具备南疆灌区的典型特

点。因此该研究结果对南疆地区其他类似灌区的水资源管理和灌溉农业具有一定的借鉴意义。在春播前,小海子灌区的土壤含水率介于 4.99%~24.99%,变异系数为 27.6%,这种中等变异程度表明灌区表层土壤的含水率相对均匀。使用指数模型对半方差函数进行拟合的效果最优,空间相关程度为 50%,这表明表层土壤含水率受结构性因素和随机性因素的共同影响。在南疆地区,由于盐渍化程度不同,人们采取不同的灌溉方式。在盐渍化程度较高的地区,通常会在春播前进行冬春灌以达到“压盐”的目的;而在盐渍化程度较轻的地区,人们倾向于采用“干播湿出”的种植模式,以节约水资源并适度提高出苗率^[20]。同时不同的地下水位也会影响土壤表层的含水率。小海子灌区内有小海子水库和永安坝水库两座水库,距离水库较近的区域地下水位较浅,水分更容易通过土壤孔隙的渗透作用向上运移,从而增加土壤中的含水量^[21],而距离水库较远的区域地下水位较深,水分不易向上运移。表层土壤含水率变程为 26.61 km,大于研究中设定的采样点间距 5 km,因此满足了评价土壤空间变异性的要求^[22]。

根据交叉验证和独立数据集验证的结果,小海子灌区春播前土壤含水率最优的插值方式为 RBF 方法。由于小海子灌区存在局部变异性,所以地统计学克里金法无法准确预测。而 RBF 的基本思路是通过每一个测得的采样值,并利用可能已经超出

样本数据范围的观测值来构建具有渐变趋势的平滑表面^[23]。RBF 模拟实现的预测表面显示更多的变异性,整体上变化连续,且细节更为丰富。这与马宏宏等^[24]在典型区域土壤重金属空间插值方法与污染评价中得出的结果一致。

我们通过在春播前对小海子灌区表层土壤进行取样,分析并对其插值,得到了春播前灌区的土壤含水率分布图,可对南疆相似灌区预测播种时间、防止土地干旱与盐渍化、制定灌溉措施提供一定的科学指导。

然而这项研究的缺点是使用传统的土壤含水率测量方法,基于人工单点测量,该方法存在数据实时性低的问题,不适合大规模实时监测土壤水分^[25]。因此,未来的研究可以尝试利用无人机和遥

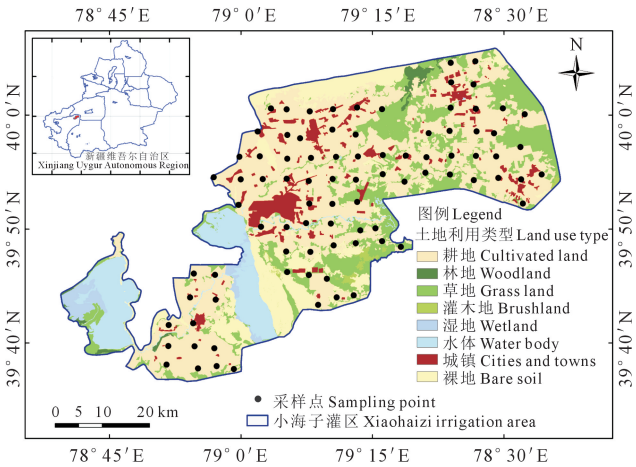


图 1 小海子灌区采样点分布图
Fig.1 Distribution map of sampling points in Xiaohaizi irrigation area

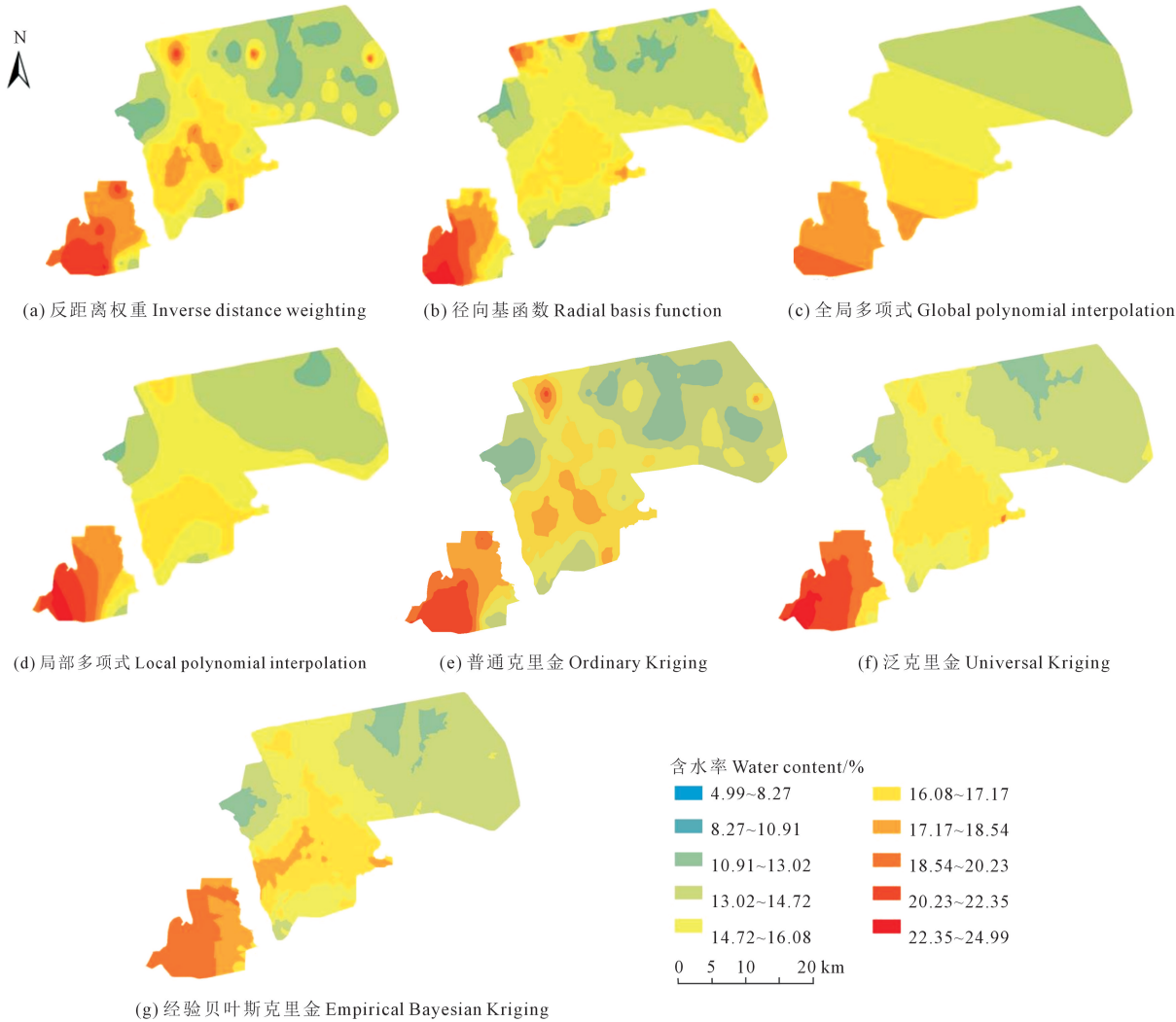


图 5 研究区土壤含水率空间分布
Fig.5 Spatial distribution of soil moisture content in the study area

感技术进行更精确、快速和大规模的土壤含水率监测^[26]。本研究为土壤含水量研究提供了一个介绍性框架,未来的工作可以在多个子尺度上进行,以进一步揭示土壤含水率的空间变异性及与其影响因素间的关系。基于这项研究,可以为南疆各灌区提供一定的科学指导。

4 结 论

1)小海子灌区表层土壤含水率为4.99%~24.99%,变异系数为27.6%,属于中等变异,表明小海子灌区的表层土壤含水率有较好的均匀性。指数函数是最佳的半方差函数拟合模型,并呈现中等程度的空间相关性,这说明土壤含水率的空间变异性受到结构性因素和随机性因素的共同影响。

2)根据交叉验证和独立数据集验证的结果,确定性插值方法的精度从高到低依次为RBF、IDW、GPI、LPI,地统计学插值方法的精度从高到低依次为OK、EBK、UK。径向基函数法是最佳的确定性插值方法,普通克里金法是最佳的地统计学方法。此外,径向基函数法的插值精度也高于普通克里金法。综合考虑,针对受到结构性因素和随机性因素共同影响的小海子灌区,采用确定性插值的径向基函数法可以获得更高的土壤含水率插值精度。在进行土壤含水率空间插值时,与小海子灌区相似的南疆灌区可以借鉴本研究的方法选择,以提高研究的准确性和可靠性。

3)通过对灌区表层土壤含水率空间分布图的分析,发现小海子灌区春播前土壤含水率在空间上呈现出西南高、东北低的规律,这主要是因为地下水位及灌溉等措施造成的。灌区表层土壤含水率低于15%的面积占总面积的36.1%。从总体上看,灌区西南部与中部的土壤含水率达到播种要求,东北部地区达到“干播湿出”的要求,灌区可安排相应的春播工作。

参 考 文 献:

- [1] 张优,王娟,张杰,等. GIS与地统计学的土壤水分空间插值方法[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2019, 42(5): 703-710.
ZHANG Y, WANG J, ZHANG J, et al. Study on interpolation method of soil moisture based on GIS and statistical models[J]. Journal of Sichuan Normal University(Natural Science), 2019, 42(5): 703-710.
- [2] EMAMGOLIZADEH S, SHAHSAVANI S, ESLAMI M A. Comparison of artificial neural networks, geographically weighted regression and Cokriging methods for predicting the spatial distribution of soil macronutrients (N, P, and K)[J]. Chinese Geographical Science, 2017, 27(5): 747-759.
- [3] CHEN H, FAN L, WU W, et al. Comparison of spatial interpolation methods for soil moisture and its application for monitoring drought[J].

Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189(10): 525.

- [4] 魏俊奇,李小雁,蒋志云,等. 基于EMI的小泊湖退化湿地土壤盐分的空间分布[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 284-288.
WEI J Q, LI X Y, JIANG Z Y, et al. Spatial distribution of soil salinity in a degraded wetland of Xiaopo Lake based on EMI[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6): 284-288.
- [5] ANDERSON W B, ZAITCHIK B F, HAIN C R, et al. Towards an integrated soil moisture drought monitor for East Africa[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(8): 2893-2913.
- [6] 朱冬冬. 图木舒克市地下水动态监测与分析[J]. 新疆有色金属, 2021, 44(1): 14-15.
ZHU D D. Monitoring and analysis of groundwater dynamics in Tumxuk City[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2021, 44(1): 14-15.
- [7] 段梦琦,张晓光,王豹. 黄河三角洲典型区土壤盐分空间分布预测方法研究[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(8): 243-250.
DUAN M Q, ZHANG X G, WANG B. Prediction method of spatial distribution for soil salinity in typical areas of the Yellow River Delta[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(8): 243-250.
- [8] 史文娇,岳天祥,石晓丽,等. 土壤连续属性空间插值方法及其精度的研究进展[J]. 自然资源学报, 2012, 27(1): 163-175.
SHI W J, YUE T X, SHI X L, et al. Research progress in soil property interpolators and their accuracy[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(1): 163-175.
- [9] 龙军,张黎明,沈金泉,等. 复杂地貌类型区耕地土壤有机质空间插值方法研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1270-1281.
LONG J, ZHANG L M, SHEN J Q, et al. Spatial interpolation of soil organic matter in farmlands in areas complex in landform[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(6): 1270-1281.
- [10] 赵林,郭紫伊,周国华,等. 滨海地区土壤盐分空间分布预测方法比较研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(7): 720-728.
ZHAO L, GUO Z Y, ZHOU G H, et al. Comparative study of methods for spatial distribution prediction of soil salinity in coastal areas[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2018, 51(7): 720-728.
- [11] LI L, WU D D, WANG T J, et al. Effect of topography on spatiotemporal patterns of soil moisture in a mountainous region of Northwest China[J]. Geoderma Regional, 2022, 28: e00456.
- [12] 郜敏,黄安东,李德成,等. 基于GIS的江淮丘陵地区典型县域土壤质量评价[J]. 土壤通报, 2021, 52(1): 16-24.
GAO M, HUANG A D, LI D C, et al. Soil quality evaluation in a typical county of Jianghuai hilly region based on GIS[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(1): 16-24.
- [13] 马成霞,丁建丽,王璐,等. 绿洲土壤表层含盐量空间变异分析的插值方法研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(4): 317-320.
MA C X, DING J L, WANG L, et al. Research for interpolation method of spatial variation analysis on soil salinity in the oasis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(4): 317-320.
- [14] 靖亭亭,胡海棠,邱春霞,等. 东北黑土漫岗区春耕期土壤水分空间变异及地形影响[J]. 水土保持研究, 2022, 29(1): 58-65.
JING T T, HU H T, QIU C X, et al. Spatial variability and its controlling topographic factors of soil moisture during spring plowing season in black soil hilly region of Northeast China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(1): 58-65.