中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

基于不同插值方法的三江平原白浆土磷素空间分布预测及其适用性分析

张迪，姜柏志，刘国辉，张慧，聂凡，孙琦，纪明元

引用本文:
张迪, 姜柏志, 刘国辉, 等. 基于不同插值方法的三江平原白浆土磷素空间分布预测及其适用性分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(8): 1405−1416.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200955

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

机器学习用于耕地土壤有机碳空间预测对比研究——以亚热带复杂地貌区为例

Comparison of machine learning for predicting and mapping soil organic carbon in cultivated land in a subtropical complex geomorphic region

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(6): 1042−1050 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200939

短距离样点对土壤呼吸空间变异预测精度的影响

Effects of short distance sampling on the prediction accuracy of the spatial variability of soil respiration

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(3): 421−428 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190703

基于改进OK模型的土壤有机质空间分布预测——以宜都市红花套镇为例

Prediction of spatial distribution of soil organic matter based on improved OK models: A case study of Honghuatao Town in Yidu City

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(1): 131−141 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180348

基于地形因子和随机森林的丘陵区农田土壤有效铁空间分布预测

Prediction of spatial distribution of soil available iron in a typical hilly farmland using terrain attributes and random forest model

中国生态农业学报. 2018, 26(3): 422−431 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170461

典型喀斯特高基岩出露坡地表层土壤有机碳空间异质性及其储量估算方法

Spatial heterogeneity and storage assessment method of surface soil organic carbon in high bulk−rock ratio slopes of Karst Regions

中国生态农业学报. 2015(6): 676−685 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.141369

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200955

张迪, 姜柏志, 刘国辉, 张慧, 聂凡, 孙琦, 纪明元. 基于不同插值方法的三江平原白浆土磷素空间分布预测及其适用性分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(8): 1405−1416

ZHANG D, JIANG B Z, LIU G H, ZHANG H, NIE F, SUN Q, JI M Y. Applicability of spatial interpolation methods to predict total phosphorus in the typical irrigated areas of the Sanjiang Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(8): 1405−1416

基于不同插值方法的三江平原白浆土磷素空间分布预测及其适用性分析*

张 迪[1], 姜柏志[1], 刘国辉[2], 张 慧[3], 聂 凡[1], 孙 琦[1], 纪明元[1]

(1. 东北农业大学资源与环境学院 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省农业环境与耕地保护站 哈尔滨 150000; 3. 东北农业大学公共管理与法学院 哈尔滨 150030)

摘 要: 土壤磷素含量是反映农业生态系统土壤肥力的重要指标。准确预测磷素空间异质性是评价土壤生产力和质量的关键。本研究采用反距离加权法(IDW)、径向基函数法(RBF)、普通克里金法(OK)、全局多项式法(GPI)、局部多项式法(LPI)、地理加权回归(GWR)和地理加权回归克里金法(GWRK)等插值方法, 分别预测了三江平原白浆土典型灌区八五三、七里沁以及大兴灌区土壤磷素分布, 并运用交叉验证法, 通过平均误差(ME)、均方根误差(RMSE)和改进效果(RI)对各种方法精度进行比较, 以期确定同一土壤类型不同采样密度土壤中磷素空间异质性最佳插值方法。对比 7 种插值方法, 在空间插值平滑性方面, LPI、GPI、GWR、GWRK 表现较好, 在插值速度方面, IDW、RBF、LPI、GPI、OK 较快, GWR 和 GWRK 方法运算复杂、速度较慢。IDW、RBF 等 6 种方法与 OK 相比, 根据 RI 判定, GWRK 方法提高了磷素空间分布模拟精度, IDW、GPI 和 LPI 方法降低了磷素空间分布模拟精度, RBF 方法在提高磷素空间分布模拟精度上表现不一致。采样密度会影响预测结果, 对于本文而言, 不论采样密度如何, GWRK 方法均方根误差(RMSE)均最低, 为最佳插值方法, 而 RBF 方法是在采样密度较低时一种可选方法。GWRK 法在本文是最佳的插值方法, 但其结果会受到辅助变量多少和各变量之间是否存在共线性的影响。

关键词: 白浆土; 磷素; 插值方法; 交叉验证; 空间自相关性; 适用性

中图分类号: S159.2 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Applicability of spatial interpolation methods to predict total phosphorus in the typical irrigated areas of the Sanjiang Plain*

ZHANG Di[1], JIANG Baizhi[1], LIU Guohui[2], ZHANG Hui[3], NIE Fan[1], SUN Qi[1], JI Mingyuan[1]

(1. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Heilongjiang Agricultural Environment and Cultivated Land Protection Station, Harbin 150000, China; 3. College of Public Administration and Law, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In the late 1990s, the “Dryland to Paddy” project was implemented in the Sanjiang Plain. After planting rice in the Albic soil, the barrier soil layer turns into a favorable soil layer, the low-yield soil becomes high-yield soil, and the Albic soil phosphorus pool increases. After flooding, the availability of phosphorus (closed storage phosphorus [O-P] and iron-bound

* 国家重点研发计划项目(2017YFD0300500)资助

** 张迪, 主要从事土壤地球化学调查与评价研究。E-mail: zhangdi6283@neau.edu.cn

收稿日期: 2020-12-02 接受日期: 2021-03-05

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2017YFD0300500).

** Corresponding author, ZHANG Di, E-mail: zhangdi6283@neau.edu.cn

Received Dec. 2, 2020; accepted Mar. 5, 2021

phosphorus [Fe-P]) increases with the decrease in soil redox potential (Eh) and the increase in pH, which substantially affects soil phosphorus heterogeneity. Therefore, we urgently need an optimal interpolation method to improve the prediction accuracy of total phosphorus in the Albic soil of typical irrigation areas of the Sanjiang Plain. This will help evaluate the impact of climate change and land use on the soil phosphorus pools and provide a reference for estimating future soil phosphorus pools. This study used the inverse distance weighting (IDW) method, radial basis function (RBF), ordinary Kriging (OK), global polynomial method (GPI), local polynomial method (LPI), geographic weighted regression (GWR), and geographic weighting regression to Kriging (GWRK) to predict the distribution of soil phosphorus in the Bawusan, Qiliqin, and Daxing irrigation areas of the Sanjiang Plain. The cross-validation method was used to obtain the mean error (ME), root mean square error (RMSE), and relative improvement (RI) to compare the accuracies of the various methods to determine the best interpolation method for assessing the spatial heterogeneity of phosphorus in the same soil type with different sampling densities. Based on the assumptions of regression analysis, this study incorporated 24 environmental variables for exploratory regression analysis, including elevation, pH, organic matter, exchangeable sodium, total nitrogen, available phosphorus, available copper, cultivated layer bulk density, and rice yield. According to the regression results, the auxiliary variables that were significantly correlated with phosphorus were selected for least square analysis. Finally, exchangeable sodium, cation exchange capacity, and available phosphorus were selected as auxiliary variables for the Bawusan irrigation area; organic matter, available zinc, and available boron were selected as auxiliary variables for the Qiliqin irrigation area; and cation exchange capacity, available zinc and copper were selected as auxiliary variables for the Daxing irrigation area. Compared to OK, RI indicated that the GWRK method with environmental auxiliary variables significantly improved the simulation accuracy of the spatial distribution of phosphorus. The IDW, GPI, and LPI methods reduced the accuracy of phosphorus spatial distribution simulation, whereas the RBF method was inconsistent. When comparing the mapping effect and interpolation speed of the seven interpolation methods, LPI, GPI, GWR, and GWRK had better mapping effects, whereas IDW, RBF, LPI, GPI, and OK were faster. The GWRK method had a better mapping effect, but it should be combined with environmental auxiliary variables, and the operation was complicated and slow. Sampling evenness also affected the prediction results. Nonetheless, GWRK had the lowest ME and RMSE, indicating that it is the best interpolation method. RBF is an optional method when the sampling evenness is lower. GWRK is the best interpolation method, but the results are affected by the number of auxiliary variables and collinearity between the variables.

Keywords: Albic soil; Phosphorus; Interpolation method; Cross validation; Spatial autocorrelation; Applicability

中国白浆土总面积 527.3 万 hm^2, 三江平原是白浆土集中分布区域, 总面积 258.1 万 hm^2。20 世纪 90 年代后期, 三江平原大面积实施白浆土“旱改水”工程, 白浆土种植水稻(*Oryza sativa*)后将障碍土层变为有利土层, 低产土壤成为高产土壤, 特别是白浆土磷库中闭蓄态磷(O-P)和铁结合态磷(Fe-P), 淹水后, 磷素有效化是随土壤 Eh 降低和 pH 升高而增强, 显著影响土壤磷异质性。因此, 准确预测土壤磷素分布, 将有助于评价气候变化和土地利用方式转变对土壤磷库的影响, 为今后土壤磷库的估算提供参考。

空间插值主要任务是基于采样点测量值模拟未知点或区域预测值[1], 已经广泛应用于土壤环境质量变化预测。近年来, 越来越多的空间插值方法被用于土壤地球化学元素含量预测, 包括确定性插值方法(如反距离权重法、径向基函数等)及地统计方法(如普通克里金、简单克里金法等)[2-3], 插值方法类型不断丰富。尽管很多空间插值方法具有一定程度通用性, 但仍然缺乏能够广泛适用于白浆土环境质量预测, 并能够更为精确地预测表面地球化学元素通用插值方法。问题复杂性和空间插值方法的各种局限性, 促使研究人员把研究和应用焦点放在针对特定问题的最适应插值模型选择上[4]。通常环境变量可以直接或间接改变生物地球化学过程, 影响土壤性质空间分布特征等。此外, 随着飞速发展的地理信息系统和遥感技术, 高精度环境因素(例如地形属性、植被指数等)也被用于模型拟合精确度校准方面。Chung 等[5]通过地统计学方法进行粉质壤土土壤有机质等土壤养分的空间分布研究, 发现克里格插值法能够有效表达养分的空间变异结构。Kumar 等[6]利用地理加权回归克里金法对 878 个土壤剖面进行了土壤有机质预测, 得出主要影响因素为温度、降水、高程、坡度、质地、土地利用类型和归一化植被指数。研究结果不仅表明了环境变量和土壤属性与土壤有机质之间的密切联系, 更为进一步进行土壤有机质预测及制图提供了发展方向及理论基础。马静等[7]采用反距离加权、普通克里金和径向基函数方法, 以甘肃省会宁县土壤速效钾养分为研究对象, 通过对比分析选取适合插值方法, 结果表明普通克里金是一种插值精度最高方法。普通克里金插值最大优点是充分考虑了土壤特性空间变异, 适合研究空间分布上既有随机性又有结构性, 或具有空间相关性和依赖性自然土壤预测。当取样点足够密、

均匀或对插值结果精度要求不高时, 可以考虑径向基函数和反距离加权。在采样点分布比较均匀且规则的地区, 通过反距离加权模拟局部变化会获得非常好的效果, 如果输入样点太少或不均匀, 反距离加权则不能很好地表达期望表面, 易产生“牛眼”现象和边缘效应。贾正雷[8]利用普通克里金法和径向基函数方法对广州市增城区土壤砷含量和土壤全磷含量进行空间插值, 对比插值结果径向基函数法在拟合能力和插值精度方面都优于普通克里金法。但径向基函数法仅适用于样本较少情况, 样本过多会导致结构复杂, 运算量增加。周禹莹[9]利用反距离加权、普通克里金、局部多项式、全局多项式等 4 种方法对黑龙江省大庆市大同区 4 乡镇土壤养分含量进行预测, 有效氮和速效钾选择反距离加权插值, 有机质选择全局多项式插值, 全氮则选择局部多项式插值精确度最佳。

但是当采样密度较低时, 反距离权重法可能存在问题, 全局多项式法和局部多项式法均为非精确插值方法, 全局多项式容易受到极高或极低值影响而忽略局部。对于各种空间数据插值方法, 没有绝对最优的空间插值方法, 只有在特定条件下最有效的方法。近年来, 尽管地理加权回归克里金已经被用来预测土壤养分异质性。但在三江平原典型灌区白浆土养分使用该方法仍然有限, 尤其是受“旱改水”影响最大土壤磷素异质性。在本文中采用反距离加权法、径向基函数法、普通克里金法、全局多项式法、局部多项式法、地理加权回归和地理加权回归克里金法等 7 种插值方法, 对 3 个典型的白浆土灌区磷素进行了预测, 比较其平均误差、均方根误差评价空间插值方法拟合精度。本研究的最终目的是寻找最佳插值方法来提高三江平原典型灌区白浆土磷素预测精度。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

选择三江平原 3 个典型灌区, 分别为八五三灌区、七里沁灌区和大兴灌区(图 1)。八五三灌区隶属于八五三农场, 七里沁灌区为红旗岭农场, 位于三江平原中南部。大兴灌区隶属于大兴农场, 位于黑龙江省佳木斯市富锦市, 由黑龙江省农垦总局建三江分局管理。3 个灌区在地缘关系上相近, 土壤类型一致。八五三灌区土壤中磷素丰富, 土壤亚类为典型白浆土, 土属为黄土质白浆土, 成土母质为黄土状黏质土, 海拔 45~85 m, 地形多样, 包括低阶、河漫滩、中阶等, 年降水量为 565 mm, 排涝能力可充分满足需要, 剖面土体结构为夹层型, 土壤呈混合侵蚀。七里沁灌区属潜育白浆土亚类, 土属为黄土质潜育白浆土, 成土母质主要为冲积物, 海拔 53~65 m, 地形部位大致包含低阶和河漫滩两种类型, 年降水量为 586 mm, 排涝能力基本满足所需, 剖面土体构型为上松下紧型, 土壤侵蚀类别为混合侵蚀。大兴型为上松下紧型, 土壤侵蚀类别为混合侵蚀。大兴

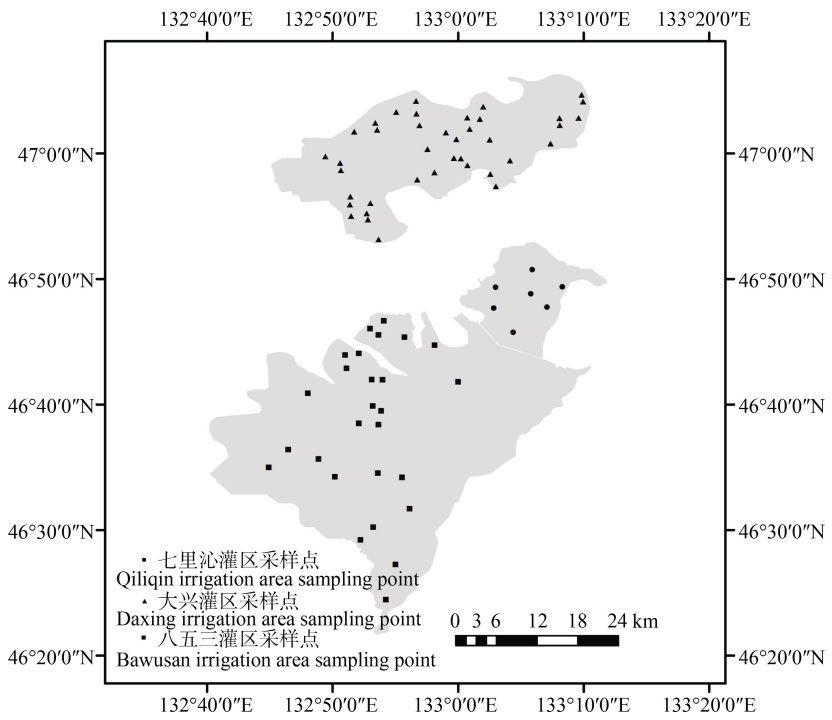

图 1　三江平原典型灌区的白浆土样点分布

Fig. 1　General situation and distribution of sample points in Albic soil area in the typical irrigation area of the Sanjiang Plain

灌区土壤类型包含草甸白浆土、潜育白浆土两类，其中草甸白浆土居多且分布广泛，土属包括泥沙质草甸白浆土及黄土质潜育白浆土，以残积物为成土母质，地势平坦，海拔 54~58 m，地形部位为低阶，年降水量为 561 mm，排涝能力基本满足所需，剖面土体构为上松下紧型与薄层性相混合(表 1)。

表 1 研究区土壤概况

Table 1 Soil profile in the typical irrigation area of the Sanjiang Plain

研究区 Research area	面积 Area (km^2)	土类 Soil	亚类 Subcategory	成土母质 Parent material	≥10 ℃积温 ≥10 ℃ accumulated temperature (℃)	年降水量 Annual precipitation (mm)	土壤侵蚀类 Soil erosion	障碍层类型 Type of barrier
八五三灌区 Bawusan Irrigation Area	829.0639	白浆土 Albic soil	典型白浆土 Typical Albic soil	黄土状黏质土 Loess-like clay soil	2487	565.0	混合侵蚀 Mixed erosion	白浆层 Albic layer
大兴灌区 Daxing Irrigation Area	387.9494	白浆土 Albic soil	潜育白浆土、草甸白浆土 Gleed Albic soil, meadow Albic soil	残积物 Residue	2761	561.0	无侵蚀 No erosion	无 Null
七里沁灌区 Qiliqin Irrigation Area	121.4848	白浆土 Albic soil	潜育白浆土 Gleed Albic soil	冲积物 Alluvial deposit	2330	586.3	混合侵蚀 Mixed erosion	无 Null

1.2 土壤采集与分析

本研究分别在 3 个灌区采用随机抽样法采集了 0~20 cm 深度表层土样，对应采样点数分别为 27、7、39(图 1)。为避免作物种植过程中直接施肥的影响，收获后的秋季在每个采样单元采用棋盘形布点法采集土壤，每个采样单元组成一个混合土样。利用全球定位系统(GPS)记录所有采样点坐标和海拔，同时随机选择采样单元内一点，挖土壤剖面，判定土壤类型，调查土壤基本利用状况，如有效土层厚、耕层厚度、障碍层深度、耕作方式等相关信息。

土壤样本经风干、研磨过 0.25 mm 筛后装玻璃瓶待相关化学分析。土壤全磷($g \cdot kg^{-1}$)利用浓盐酸-硫酸消化后钼酸盐比色法测定。辅助变量相关指标参照《土壤农业化学分析方法》[10]进行测定。

1.3 辅助变量

在前人研究基础上，提取与土壤养分相关的环境变量作为辅助变量，以反映 3 个研究区地形和自然植被特征。这些环境变量直接或间接地与水文和生态过程有关，如地表径流、淋溶、植物生长和分布，从而影响土壤性质空间分布。

无差异变量：土属、土种、地貌类型、≥10 ℃积温、年降水量、耕作制、灌溉方式、灌溉能力、排涝能力、剖面土体结构、土壤侵蚀类、障碍因素、障碍层类型、耕层质地、盐渍化程度。

待选辅助变量：成土母质、海拔、地形部位、水稻产量、有效土层厚度、耕层厚度、障碍层深度、障碍层厚度、耕层容重、土壤交换性钠、土壤 pH、土壤全氮、土壤有效磷、土壤全钾、土壤缓效钾、土壤有效硅、土壤镉、土壤 CEC、土壤铬、土壤有效锰、土壤镍、土壤铅、土壤有效铜、土壤速效钾、土壤锌、土壤有效硼、土壤铜、土壤有效锌、土壤有效铁、土壤有机质。

1.4 采样点空间分布均匀性验证

在插值预测之前，研究数据先经过 QQPlot 验证(图 2)，结果证明 3 个区域全磷数据均呈现正态分布，即数据符合地质统计学分析需要[11]。

1.5 插值方法

采用 7 种插值方法预测白浆土区磷素分布，各种方法简介如下。

1.5.1 反距离权重法(IDW)

反距离权重插值是基于相近相似原理，也就是说，离得越近的物体，其性质就越相似；相反，物体离得越远其相似性就越小[12]。反距离权重插值方法是利用预测区域里已知样本点观测值来预测区域内除了样本点以外其他值。这种方法主要优点是计算相对容易。然而，IDW 方法也存在一些局限性：1)先选择权重参数；2)与地质统计学方法相比，IDW 无法在未采样位置估计预测值方差；3)当采样点具有非均匀性时，IDW 可能存在问题。IDW 公式如下：

$$Z = \sum_{i=1}^{n} \frac{Z_i}{d_i^p} \Big/ \sum_{i=1}^{n} d_i^p \tag{1}$$

式中：Z 是预测值，n 为样本数据值总数，Z_i 为第 i 个数据值，d_i 为预测点与样本数据点的分离距离，p 为加权幂。

1.5.2 径向基函数(RBF)

空间插值以最小曲率面逼近各插值点，如同将一个软膜通过各点且同时使表面的总曲率最小，属于精确性插值方法[13]。该算法适用于样本采样量大、

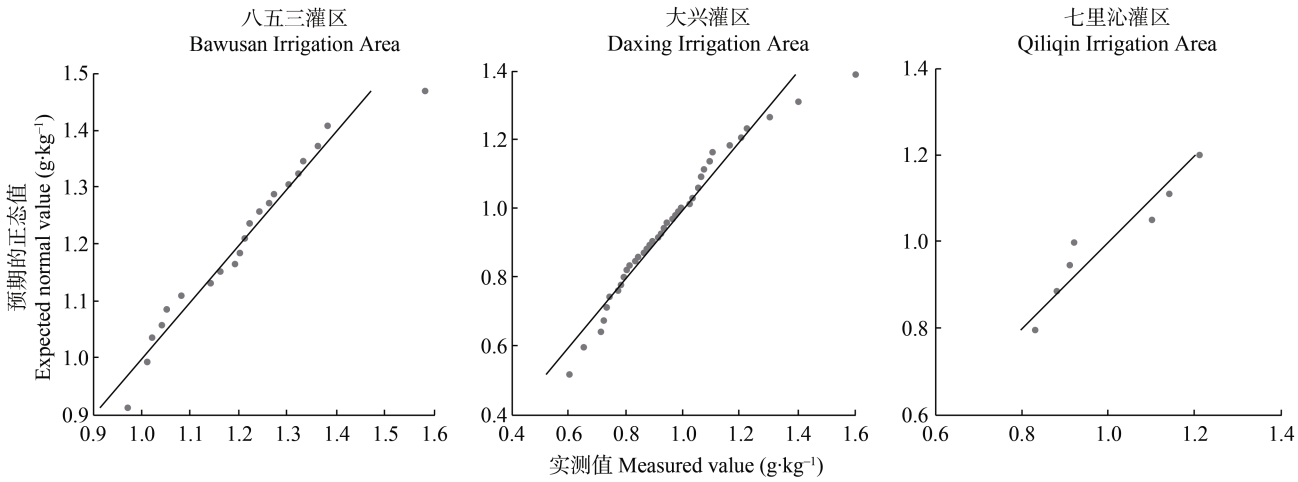

图 2　三江平原典型灌区白浆土磷素正态性分布检验

Fig. 2　Inspection of normal distribution of phosphorus in Albic soil in the typical irrigation areas of the Sanjiang Plain

表面变化平稳情况[14], 尤其适用于空间分布不规则、空间均匀度低采样点。RBF 公式如下:

$$Z=\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\phi(|x-x_i|)+p(x) \tag{2}$$

式中: Z 是预测值, $p(x)$是多项式函数, λ_i 是实值权重, $|x–x_i|$表示 x 与中心点 x_i 之间的欧氏距离, ϕ 是径向基函数。

1.5.3　普通克里金法(OK)

克里金法是地统计学创立基础, 是探究自然界中与空间相关性相关现象的有效工具[15]。而在诸多克里金法中, OK 法是以变异函数理论和结构分析为基础[16], 根据待估样点有限邻域内若干已测定样点数据, 在考虑样点形状、大小、空间位置关系、样点与待估样点相互空间位置关系和变异函数结构信息基础上, 对待估样点值进行一种线性无偏最优估计, 是目前应用最广克里金插值方法。OK 法预测准确性取决于采样点大小和分布。一般情况下, 不考虑辅助变量, OK 方法受复杂研究区域采样点均匀性和密度限制。OK 法公式如下:

$$Z=\sum_{i=1}^{n}\lambda_i Z(S_i) \tag{3}$$

式中: Z 是预测值; $Z(S_i)$是采样值, 由半变异函数模型确定的 λ_i 是要分配给每个未采样位置的权重。

1.5.4　全局多项式插值法(GPI)

GPI 法是一种非精确插值方法, 以整个研究区样点数据集为基础, 用一个多项式进行全区特征拟合来计算预测值[17]。这种插值方法主要揭示空间物体总体规律, 而忽略局部变异。其插值原理是利用现有每个已知点来估算未知点值, 所生成面不经过所有控制点, 而是一个平滑曲面, 不提供预测值误差检验, 只提供样本点与预测点平均预测误差和均方根误差。GPI 法生成表面容易受极高和极低样点值影响, 所以适用于属性值变化比较平缓或者是对总体趋势进行一种粗略预测情况。

1.5.5　局部多项式插值法(LPI)

LPI 法也是一种非精确插值方法, 在搜索邻域内采用多个多项式进行插值, 插值结果为平滑曲面[18]。局部多项式内插可以作为全局多项式方法和移动平均过程结合。其插值原理是用已知点的样本来估测未知点值, 所生成面不经过所有样本点, 不提供预测值误差检验, 只提供样本点与预测点平均预测误差和均方根误差。该方法一方面有趋势面法考虑全部数据点反映趋势性变化优点, 另一方面又有距离法反映局部特征优点, 适用于对曲面作局部平滑的情况[19]。

1.5.6　地理加权回归(GWR)

GWR 模型原理是借助局部回归统计思想, 遵循“地理学第一定律”(Tobler)[20], 即空间位置越近比越远数据对目标对象影响更大。在地理加权回归时, 使用了空间关系作为权重加入运算中, 目标空间单元计算时, 与之邻接的空间单元远近程度随之变换从而赋予不同权重, 最后得到每个空间单元回归系数。GWR 模型能够估计不同空间单元影响, 并计算其回归系数, 系数的大小代表了不同空间单元空间非平稳性。使得观测指标之间的关系依地理空间的变化随之变化, 得到的估计结果更加符合实际。然而, GWR 模型也存在一定局限如多重共线性问题[21-22]。多重共线性是回归分析技术中常见问题, 由于辅助变量之间存在较强的相关关系, 导致模型求解结果失真甚至非唯一解现象。GWR 公式如下:

$$Z = \sum_{i=1}^{n} a_i b_{ij} + \varepsilon_i + \beta_0 \quad (4)$$

式中: Z 是预测值; b_{ij} 是第 i 个预测点的第 j 个辅助变量; a_i 是未知的回归系数, 在空间上是变化的; n 是辅助变量的总数; ε_i 是回归残差; β_0 是截距项。

1.5.7 地理加权回归克里金(GWRK)

地理加权回归克里金(Geographically Weighted Regression Kriging, GWRK)是一种混合插值方法[23], 它将回归克里金(RK)中回归预测部分用地理加权回归(GWR)代替, 而残差部分仍然使用克里金插值, 弥补了确定性分量中潜在误差。这种方法作为一种局部空间插值模型, 它不仅考虑了目标变量的空间异质性和依赖性, 还考虑了辅助变量对目标变量的不同空间权重, 在众多研究中表现较好。GWRK 公式如下:

$$Z = \beta(x_0) + \varepsilon(x_0) \quad (5)$$

式中: Z 是预测值, $\beta(x_0)$是用 GWR 拟合的函数值, $\varepsilon(x_0)$ 是用 OK 插值的残差值。

1.6 验证方法

本文采用交叉验证法确定插值效果, 即使用所有数据对趋势和自相关模型进行估计, 它会每次移除一个数据位置, 然后使用其他位置的数据来预测与其相关联的数据, 将预测值与实测值相比较获得平均误差和均方根误差[24]。在本研究中, 利用软件 ArcGIS-10.5 交叉验证模块分析。该方法快速方便, 以平均误差(ME)和均方根误差(RMSE)作为常用验证指标, 验证预测的准确性。总的来说, 各种插值方法的 ME 和 RMSE 总体最小者, 具有较好插值效果, ME 相等时, 则 RMSE 越小越好[25]。ME 和 RMSE 计算式如下:

$$\mathrm{ME} = 1\Big/n\sum_{i=1}^{n}\left[z(x_i, y_i) - z^*(x_i, y_i)\right] \quad (6)$$

$$\mathrm{RMSE} = \left(\sum_{i=1}^{n}\left[z(x_i, y_i) - z^*(x_i, y_i)\right]^2\Big/n\right)^{1/2} \quad (7)$$

式中: n 为验证数据集中样本点数, $z(x_i, y_i)$为观测得到磷素值, $z^*(x_i, y_i)$为预测得出磷素值, x_i、y_i 为样本点横纵坐标。

当预测值接近实测值时, RMSE 较小。均方根误差(RMSE)还可以用来比较一种方法相对于另一种方法相对改进程度。RI (Relative Improvement)计算方法如下:

$$\mathrm{RI} = (\mathrm{RMSE_R} - \mathrm{RMSE_E})/\mathrm{RMSE_R} \times 100\% \quad (8)$$

式中: RI 为改进效果, $\mathrm{RMSE_R}$ 为参考方法均方根误差, $\mathrm{RMSE_E}$为评估方法均方根误差。如果 RI 为正, 则评价方法准确度高于参考方法, 反之亦然。

2 结果与分析

2.1 三江平原白浆土磷素描述性统计分析

经过对采样点数据分析, 得到 3 个典型白浆土灌区土壤磷素含量基本情况(表 2)。七里沁灌区、八五三灌区和大兴灌区磷含量分别为 0.83~1.21 g·kg^{-1}、0.97~1.58 g·kg^{-1} 和 0.65~1.22 g·kg^{-1}。不同研究区域磷素平均值存在差异, 其中八五三灌区平均值最高(1.19 g·kg^{-1}), 其次是七里沁灌区(1.00 g·kg^{-1})和大兴灌区(0.92 g·kg^{-1})。八五三灌区平均值比七里沁灌区和大兴灌区分别高 19.00%和 29.35%。磷素的变异系数在 0.117~0.151, 变异程度适中。此外, 本研究八五三、七里沁和大兴灌区采样密度分别为 0.03 样点·km^{-2}、0.06 样点·km^{-2} 和 0.10 样点·km^{-2} , 其中八五三灌区的采样密度最低。

根据回归分析基本假设, 利用探索性回归模块对数据进行筛选, 筛选后又对 3 个灌区辅助变量采用最小二乘法进行分析。运用探索性回归分析可以确定磷素和辅助变量之间的关系。根据表 3 可知, 八五三灌区, 土壤 pH、交换性钠、全氮、有效磷、海拔等辅助变量与磷素具有显著相关性。七里沁灌区, 铬、有效锰、有效锌等辅助变量与磷素具有显著相关性。大兴灌区, 有效锌、有效铜、有效硅、交换性钠等辅助变量与磷素具有显著相关性。然而, 辅助变量之间存在着共线性问题。因此, 需采用最小二乘法来减少共线性问题, 确定模型分析辅助变量。在利用 GWR 方法进行运算时, 虽然 3~5 个解释变量能够对目标地区进行更为精确插值分析, 但是

表 2 典型灌区白浆土采样点磷素含量分析

Table 2 Phosphorus contents in sampling points of Albic soil in the typical irrigation areas

灌区 Irrigation area	采样点数 Sampling points	最小值 Min (g·kg^{-1})	最大值 Max (g·kg^{-1})	平均值 Average (g·kg^{-1})	方差 Variance	标准偏差 Standard deviation (g·kg^{-1})	变异系数 Coefficient of variation	峰度 Kurtosis	偏度 Skewness	采样密度 Sampling density (points·km^{-2})
七里沁 Qiliqin	7	0.83	1.21	1.00	0.0219	0.1480	0.1482	–1.8930	0.4090	0.06
八五三 Bawusan	27	0.97	1.58	1.19	0.0194	0.1392	0.1169	0.8357	0.6007	0.03
大兴 Daxing	39	0.65	1.22	0.92	0.0194	0.1394	0.1514	–0.8081	–0.0064	0.10

表 3　典型灌区白浆土辅助变量与磷素相关显著性分析

Table 3　Significance analysis of the correlation between auxiliary variables and phosphorus of Albic soil in the typical irrigation areas　　%

辅助变量 Auxiliary variable	八五三灌区 Bawusan Irrigation Area	七里沁灌区 Qiliqin Irrigation Area	大兴灌区 Daxing Irrigation Area	辅助变量 Auxiliary variable	八五三灌区 Bawusan Irrigation Area	七里沁灌区 Qiliqin Irrigation Area	大兴灌区 Daxing Irrigation Area
土壤 pH Soil pH	50.67*	—	—	土壤有效铜 Soil available cuprum	2.26	3.15	82.61*
土壤交换性钠 Soil exchangeable sodium	44.95*	1.18	13.58*	土壤速效钾 Soil available potassium	1.88	0.79	0.14
土壤全氮 Soil total nitrogen	41.15*	3.15	1.08	土壤锌 Soil zinc	0.31	0.39	0.48
土壤有效磷 Soil available phosphorus	31.66*	0.39	0.18	水稻产量 Rice yield	0.25	—	—
海拔 Altitude	29.63*	—	—	耕层容重 Cultivated layer bulk density	0.14	—	2.04
土壤有效硅 Soil available silicon	24.23	0.39	72.41*	土壤有效硼 Soil available boron	0.14	1.18	0.05
土壤镉 Soil cadmium	22.51	—	—	土壤铜 Soil cuprum	0.14	2.76	—
土壤 CEC Soil CEC	20.20	2.36	—	土壤有效锌 Soil available zinc	0.07	10.24*	100.00*
土壤铬 Soil chromium	7.96	26.38*	0.07	土壤缓效钾 Soil slow potassium	0.02	—	4.37
土壤有效锰 Soil available manganese	3.44	12.20*	—	土壤全钾 Soil total potassium	0.01	1.57	55.24
土壤镍 Soil nickel	2.75	1.18	2.45	土壤有效铁 Soil available iron	0.01	—	1.07
土壤铅 Soil plumbum	2.30	7.87	28.74	土壤有机质 Soil organic matter	—	3.15	—

表中数据大小表示该变量作为预测因子的强度，数值越大表明其作为预测因子趋势越大，*代表该辅助变量与磷元素具有显著相关性。

Data in the table indicates the strength of the variable used as a predictor parameter, and the larger the data, the greater the trend as a predictor. "*" means that the auxiliary variable is significantly correlated with soil phosphorus content.

由于不同变量之间存在着局部共线问题，使得模型无法运行，因此舍弃了部分解释变量。根据表 4 结果，最终八五三灌区选择交换性钠、CEC、有效磷作为解释变量，七里沁灌区选择有机质、有效锌、有效硼为解释变量，大兴灌区选择交换性钠、有效锌、有效铜作为解释变量。

2.2　不同插值方法下磷素空间分布

由图 3 可知，在八五三灌区，磷素含量从西南到东北呈现出中间高并依次向两边递减趋势。在映射效果上，IDW 和 RBF 都有明显不均匀性，高值与低值之间具有明显界限，存在亮斑。相比之下，GWR 和 GWRK 方法考虑辅助变量，可以更详细地揭示磷

表 4　典型灌区白浆土辅助变量与磷素多元线性逐步回归分析

Table 4　Multiple linear stepwise regression analysis between auxiliary variables and phosphorus of Albic soil in the typical irrigation areas

灌区 Irrigation area	变量 Variable	系数 Coefficient	标准差 Standard deviation	*T* 统计量 *T* statistics	概率 Probability	VIF 值 VIF value
八五三 Bawusan	土壤交换性钠 Soil exchangeable sodium	–1.8121	0.3927	–4.6149	0.0001	1.4022
	耕层容重 Cultivated layer bulk density	–0.6753	0.2895	–2.3329	0.0297	2.0655
	土壤 CEC Soil CEC	0.0141	0.0050	2.8038	0.0106	2.1943
	土壤有效磷 Soil available phosphorus	0.0033	0.0016	2.0901	0.0490	1.4460
	土壤有效锰 Soil available manganese	0.0054	0.0015	3.5205	0.0020	2.3576
大兴 Daxing	土壤交换性钠 Soil exchangeable sodium	–0.3065	0.1185	–2.5870	0.0141	1.1004
	土壤有效锌 Soil available zinc	–0.0961	0.0346	–2.7776	0.0089	1.1790
	土壤有效铜 Soil available cuprum	0.1311	0.0476	2.7533	0.0094	1.300
	土壤镉 Soil cadmium	0.9035	0.8165	1.1065	0.2763	1.0242
七里沁 Qiliqin	土壤有机质 Soil organic matter	0.0141	0.0038	3.7262	0.0223	1.7061
	土壤有效锌 Soil available zinc	–0.6213	0.1789	–3.4733	0.0331	1.6344
	土壤有效硼 Soil available boron	1.7556	0.5317	3.3019	0.0411	2.3092

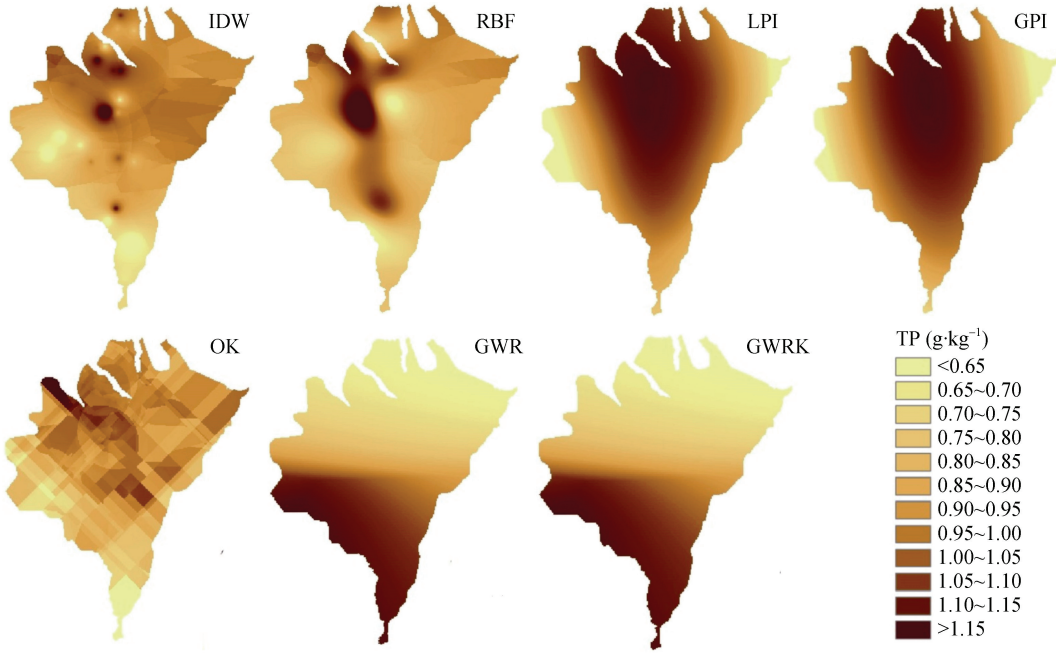

图 3　八五三灌区不同插值方法磷素(TP)空间分布预测

Fig. 3　Prediction of spatial distribution of phosphorus (TP) by different interpolation methods in Bawusan Irrigation Area

IDW: 反距离加权; RBF: 径向基函数; OK: 普通克里金; GPI: 全局多项式法; LPI: 局部多项式法; GWR: 地理加权回归; GWRK: 地理加权回归克里金法。IDW: inverse distance weighting method; RBF: radial basis function; OK: ordinary Kriging; GPI: global polynomial method; LPI: local polynomial method; GWR: geographic weighted regression; GWRK: geographic weighting regression to Kriging.

素分布空间信息，具有更好空间连续性，可以更加详细揭示磷素空间分布。

由图 4 可知，大兴灌区与八五三灌区相反，磷素含量从西南到东北呈现出中间低两边高分布趋势。在映射效果上，同样是 IDW 和 RBF 存在明显的缺陷。相比之下, LPI、GPI、GWR 和 GWRK 4 种方法呈现结果更好，没有出现颜色极深或极浅斑块。

由图 5 可知，七里沁灌区磷素含量从北到南表现出先高后低递减趋势。在映射效果上, IDW 和 RBF 依然表现出明显亮斑，高值与低值存在明显界限。

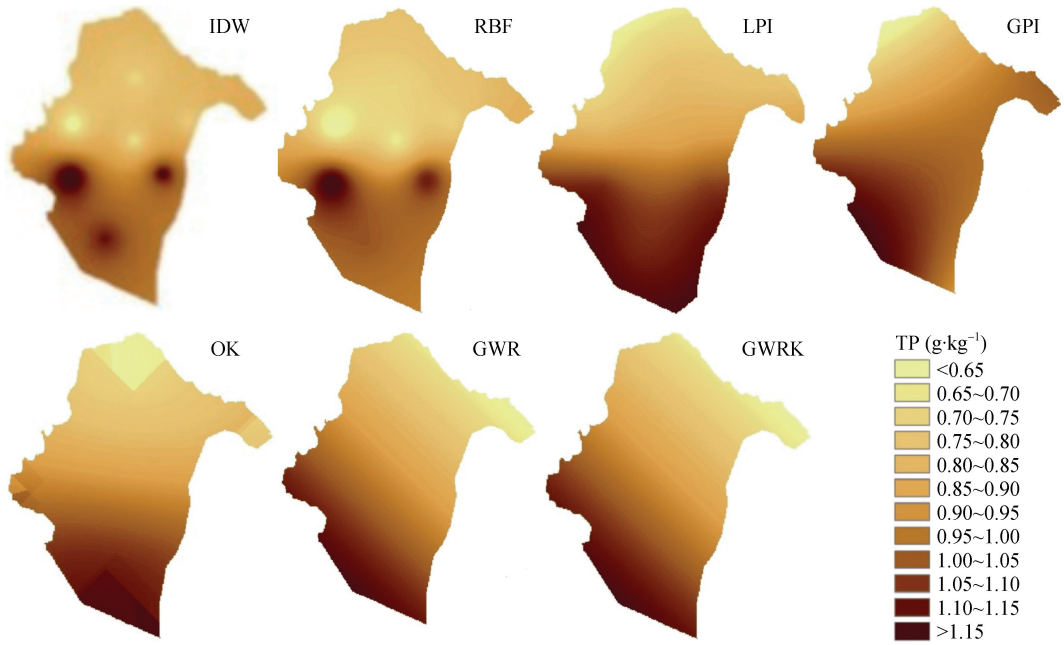

图 4　大兴灌区不同插值方法磷素(TP)空间分布预测

Fig. 4　Prediction of spatial distribution of phosphorus (TP) by different interpolation methods in Daxing Irrigation Area

IDW: 反距离加权; RBF: 径向基函数; OK: 普通克里金; GPI: 全局多项式法; LPI: 局部多项式法; GWR: 地理加权回归; GWRK: 地理加权回归克里金法。IDW: inverse distance weighting method; RBF: radial basis function; OK: ordinary Kriging; GPI: global polynomial method; LPI: local polynomial method; GWR: geographic weighted regression; GWRK: geographic weighting regression to Kriging.

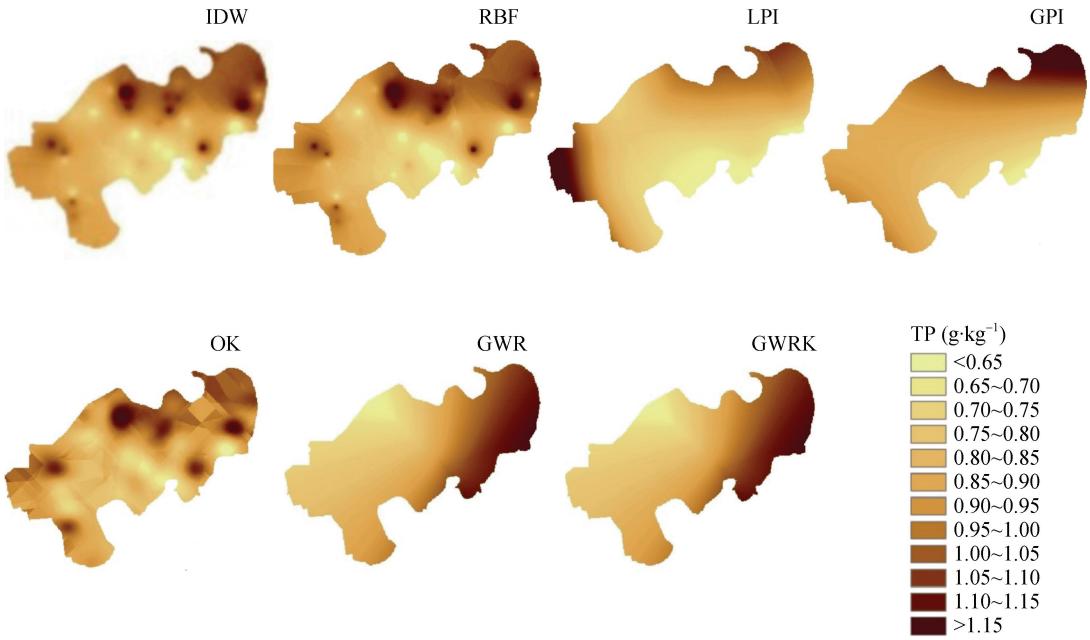

图 5　七里沁灌区不同插值方法磷素空间分布预测

Fig. 5　Prediction of spatial distribution of phosphorus by different interpolation methods in Qiliqin Irrigation Area

IDW: 反距离加权; RBF: 径向基函数; OK: 普通克里金; GPI: 全局多项式法; LPI: 局部多项式法; GWR: 地理加权回归; GWRK: 地理加权回归克里金法。IDW: inverse distance weighting method; RBF: radial basis function; OK: ordinary Kriging; GPI: global polynomial method; LPI: local polynomial method; GWR: geographic weighted regression; GWRK: geographic weighting regression to Kriging.

OK 总体表现一般, 处理结果比较光滑, 只是在灌区最北部和东部小范围出现了断层现象。对于其他 4 种方法来说, 磷素分布呈现出相同趋势, 不存在断层和亮斑现象, 符合预期效果。

一般情况下, 基于克里金(OK, GWRK)的插值方法在磷素分布方面变化更为详尽, 但在本文中 OK 表现一般, 相比之下, GWRK 方法能够准确揭示更多局部信息, 这一结果也在其他研究领域得到证实。

2.3　不同插值方法适宜性评价

由于本研究针对 3 个灌区都是白浆土类, 因此其降水量和土壤流通性等特质类似, 又位于平原地区, 海拔基本持平, 因此可以忽略坡度因素影响。表 5 列出了各个插值方法误差项, 包含 ME 和 RMSE 以及 RI 计算结果。

由表 5 可知, 七里沁灌区, OK 和 GWRK 方法预测误差最小, 与其他方法相比, RMSE (0.1494 和

表 5　三江平原白浆土磷素空间分布的 7 种插值方法评价

Table 5　Evaluation of seven interpolation methods for spatial distribution of phosphorus of Albic soil in the typical irrigation areas of the Sanjiang Plain

灌区 Irrigation area	指标 Index	OK	RBF	IDW	LPI	GPI	GWR	GWRK
七里沁 Qiliqin	ME	0.0008	0.0017	0.0049	0.0215	0.0105	—	0.0004
	RMSE	0.1494	0.1530	0.1579	0.2201	0.1733	—	0.0084
	RI (%)	—	–2.41	–5.79	–47.32	–16.00	—	94.38
八五三 Bawusan	ME	0.0088	0.0024	0.0073	0.0075	0.0048	—	0.0003
	RMSE	0.1366	0.1130	0.1374	0.1348	0.1393	—	0.1426
	RI (%)	—	17.28	–0.59	1.32	–1.98	—	–4.39
大兴 Daxing	ME	0.0088	0.0014	0.0053	0.0137	0.0004	—	0.0022
	RMSE	0.1198	0.1231	0.1235	0.1292	0.1335	—	0.0511
	RI (%)	—	–2.75	–3.09	–7.85	–11.44	—	57.35

ME: 平均误差; RMSE: 均方根误差; RI: 相对改进程度。IDW: 用反距离加权; RBF: 径向基函数; OK: 普通克里金; GPI: 全局多项式法; LPI: 局部多项式法; GWR: 地理加权回归; GWRK: 地理加权回归克里金法。ME: mean error; RMSE: root-mean-square error; RI: relative improvement. IDW: inverse distance weighting method; RBF: radial basis function; OK: ordinary Kriging; GPI: global polynomial method; LPI: local polynomial method; GWR: geographic weighted regression; GWRK: geographic weighting regression to Kriging.

0.0084)和 ME (0.0008 和 0.0004)值较低。其中, OK 方法的 RMSE 比 GWRK 方法高 94.38%, LPI 方法的 RMSE 最高, 比 OK 高 47.32%。七里沁灌区 RMSE 依次为: GWRK(0.0084)<OK(0.1494)<RBF(0.1530)<IDW(0.1579)<GPI(0.1733)<LPI(0.2201)。

八五三灌区, RBF 方法预测误差最小, RMSE (0.1130)和 ME (0.0024)值较低, RBF 方法的 RMSE 比 OK 方法低 17.28%, IDW 方法的 RMSE 比 OK 方法高 0.59%, GWRK 方法 ME 最小, RMSE 最大。八五三灌区 RMSE 依次为 RBF(0.1130)<LPI(0.1348)<OK(0.1366)<IDW(0.1374)<GPI(0.1393)<GWRK(0.1426)。

大兴灌区, OK 和 GWRK 方法预测误差最小, 与其他方法相比, RMSE (0.1198 和 0.0511)值较低。其中, OK 方法的 RMSE 比 GWRK 方法高 57.35%。GPI 方法的 RMSE 最大, 比 OK 方法高 11.44%。虽然 OK 方法的 RMSE 较低, 但其 ME 偏高。大兴灌区的 RMSE 依次为 GWRK(0.0511)<OK(0.1198)<RBF(0.1231)<IDW(0.1235)<LPI(0.1292)<GPI(0.1335)。

综上所述, GWRK 法, 作为地理加权回归和克里金法产物, 误差比较小, 优势比较明显。

3 讨论

磷是农业生态系统中重要的养分指标, 其基本信息(如贮存、分配和运输过程)可以指导农田的养分管理和保护。然而, 由于地形属性、作物生长和人类活动等因素严重影响磷的移动和循环, 磷的空间异质性往往较高[26]。本研究以各区域分块处理为基础, 在确认样本数据满足正态分布后, 利用 7 种插值方法进行预测。

3.1 辅助变量筛选

本研究选择了 24 个环境辅助变量, 包括海拔、土壤 pH、交换性钠等, GWRK 方法利用这些辅助变量显著提高了磷素预测精度, 这是由于磷素空间分布与辅助变量密切相关。海拔作为一个主要地形因素, 在地形较为平坦的灌区(八五三灌区)与磷素具有显著相关性, 相比之下在大兴灌区和七里沁灌区没有显著相关性, 这可能是由于地形比较复杂造成的。根据探索性回归和最小二乘法结果可知, 磷素与部分交换性阳离子具有显著的相关性, 这与前人的研究结果相似, 即土壤中磷素与交换性阳离子变化规律基本保持一致(具有明显的正相关性)[27-28], 所以在本文中部分交换性阳离子为最佳辅助变量。

根据最小二乘法(OLS)得出的报表文件来揭示目标变量与解释变量之间的关系, 可以减少辅助变量之间多重共线性的问题。前人研究表明, 当土地利用情况复杂时, 定性变量(如土地利用类型和土壤类型)明显改变了土壤养分的空间分布。因此, 在今后的研究中, 可将定性变量作为辅助变量, 尽管这些辅助变量很难获得[29]。在本研究中, 土地利用方式比较单一, 以定量变量(如交换性钠等)作为辅助变量, 也可提高土壤磷素空间异质性预测精度。

3.2 不同插值方法的预测模拟精度

在以前的研究中, OK[6,29]、RK[30]和 GWRK[31]方法通常用于较大规模的土壤有机质和土壤有机碳预测, 而少有使用这些方法进行土壤磷素的预测研究。本文在比较了不同采样密度条件下土壤磷素含量特征后, 采用 7 种插值方法对 3 个采样区磷素含量进行预测。总的来说, 3 个样区数据集统计参数略有不同, 可以用来进行提高白浆土地区磷素预测精度最佳插值方法的选择研究。

通常, ME、RMSE 和 RI 用于验证插值方法模拟精度。在本研究中, 与 ME 相比, RMSE 值在反映插值方法之间预测精度的优劣方面比较一致, 可以作为主要参数来验证预测精度。GWRK 方法在七里沁灌区具有最低的 ME 和 RMSE 值, 显著地提高了磷素的预测精度。与其他方法相比, GWRK 方法充分考虑了环境辅助变量在局部对磷素分布的影响, 使磷素预测更加准确。然而, 这种提高不是绝对的, 当辅助变量局部差异过大或数量过少时反而可能会降低 GWRK 法的预测精度。在本研究中, 与其他插值方法(IDW、GPI、LPI)相比, GWRK 法在七里沁灌区预测磷素空间分布表现较好, 而作为常用插值方法的 OK 表现一般。这与王燕等[32]在江苏金坛区土壤有效磷预测的研究结果一致, GWRK 法结合环境辅助变量较 OK 法预测精度更高。

在本研究中, 3 个灌区的自然条件相似, 采样密度不同(八五三灌区采样密度为 0.03 点·km^{-2}、七里沁灌区 0.06 点·km^{-2} 和大兴灌区 0.10 点·km^{-2})。薛正平等[33]指出最小采样距离或采样密度对预测精度没有明显影响。但在本研究中, GWRK 法显著提高了大兴和七里沁灌区预测精度, 而没有显著提高八五三灌区预测精度。因此, 在三江平原区域内, 土壤采样密度被认为是影响磷素预测的关键因素[34-35], 在今后研究中应合理设计土壤采样方式。此外, 当采样密度较低时, RBF 是一种比较精确的插值方法。一般来说, 在样点分布合理情况下, GWRK 结合辅助变量是三江平原白浆土地区磷素含量预测最好的插值方法。同时 OK 由于分析过程相对简单, 仍然是一

种可靠、方便的插值方法。

4　结论

空间插值方法种类繁多, 同一种插值方法应用于不同研究区域, 所得结果不同, 即便同一个区域, 地形、植被等因素不同, 采用同一插值方法结果也不尽相同。在本文这种空间尺度较小的研究区域, 磷素虽然为矿质元素, 但其分布与土壤坡度等地质学因素无显著相关。通过多元线性逐步回归分析, 对辅助变量进行筛选, 土壤中磷素与交换性阳离子具有显著相关性, 交换性阳离子为最佳辅助变量。在本研究中, 以 RMSE 作为评估插值效果的指标。对比分析了 IDW、RBF、LPI、GPI、OK、GWR 和 GWRK 插值方法适宜性。结果表明, 综合 3 个灌区 GWRK 方法具有较小的 RMSE 值, 插值结果的平滑性优于其他 6 种方法, 插值精度较高。总的来说, 在三江平原白浆土地区, 在采样密度适当情况下, GWRK 结合辅助变量可以作为预测土壤磷素空间分布最佳插值方法。

参考文献 References

[1] 张海平, 周星星, 代文. 空间插值方法的适用性分析初探[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(6): 14–18,105
ZHANG H P, ZHOU X X, DAI W. A preliminary on applicability analysis of spatial interpolation method[J]. Geography and Geo-Information Science, 2017, 33(6): 14–18,105

[2] 罗明, 裴韬. 空间软数据及其插值方法研究进展[J]. 地理科学进展, 2009, 28(5): 663–672
LUO M, PEI T. Review on soft spatial data and its spatial interpolation methods[J]. Progress in Geography, 2009, 28(5): 663–672

[3] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006
TANG G A, YANG X. ArcGIS Spatial Analysis Experiment Course[M]. Beijing: Science Press, 2006

[4] 张苏. 土壤重金属的空间插值方法比较分析——以阳谷县为例[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(4): 148–150,153
ZHANG S. Comparative analysis of spatial interpolation methods for soil heavy metals: a case study of Yanggu County[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2020, 43(4): 148–150,153

[5] CHUNG C K, CHONG S K, VARSA E C. Sampling strategies for fertility on a stoy silt loam soil[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1995, 26(5/6): 741–763

[6] KUMAR S, LAL R, LIU D S. A geographically weighted regression kriging approach for mapping soil organic carbon stock[J]. Geoderma, 2012, 189/190: 627–634

[7] 马静, 张仁陟, 陈利. 耕地地力评价中土壤养分的空间插值方法比较研究——以会宁县土壤速效钾为例[J]. 安徽农学通报: 上半月刊, 2011, 17(17): 91–93
MA J, ZHANG R Z, CHEN L. Evaluation of farmland soil nutrient comparison of spatial interpolation methods — take Huining County cultivated soil potassium for an example[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2011, 17(17): 91–93

[8] 贾正雷. 土壤砷和氮含量的空间变异及其相互关系研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016
JIA Z L. Study on spatial variability and relationship of soil arsenic and soil nitrogen[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016

[9] 周禹莹. 大庆市大同区土壤养分空间异质性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2015
ZHOU Y Y. Soil nutrient spatial heterogeneity analysis of Datong District, Daqing[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2015

[10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
LU R K. Soil Agricultural Chemistry Analysis Method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000

[11] 姜红, 玉素甫江·如素力, 热伊莱·卡得尔, 等. 不同空间插值方法对博斯腾湖水体矿化度的适应性评价研究[J]. 新疆师范大学学报: 自然科学版, 2016, 35(4): 7–14
JIANG H, YUSUFUJIANG R, REYILAI K, et al. Study on suitability of different interpolation methods for evaluation of water salinity in Bosten Lake[J]. Journal of Xinjiang Normal University: Natural Sciences Edition, 2016, 35(4): 7–14

[12] 贾悦, 崔宁博, 魏新平, 等. 基于反距离权重法的长江流域参考作物蒸散量算法适用性评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(6): 130–138
JIA Y, CUI N B, WEI X P, et al. Applicability evaluation of different algorithms for reference crop evapotranspiration in Yangtze River Basin based on inverse distance weighted method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(6): 130–138

[13] 刘盼, 罗明良, 任春颖, 等. RBF 插值参数对黄土高原古地形 DEM 模拟的影响[J]. 工程勘察, 2017, 45(8): 38–44
LIU P, LUO M L, REN C Y, et al. Effects of RBF interpolation parameters on the creating DEM of the paleotopography in Loess Plateau[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2017, 45(8): 38–44

[14] 齐静. 径向基函数插值若干问题研究[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2016
QI J. Research for some problems of the radial basis function interpolation[D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2016

[15] 王天华. 西南地区降水量插值方法比较——以丽江市为例[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(10): 21–24
WANG T H. Comparison of interpolation methods for precipitation in southwest China: A case study of Lijiang City[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(10): 21–24

[16] 易桂花, 张廷斌, 何奕萱, 等. 四种气温空间插值方法适用性分析[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2020, 47(1): 115–128
YI G H, ZHANG T B, HE Y X, et al. Applicability analysis of

four spatial interpolation methods for air temperature[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2020, 47(1): 115–128

[17] 梁颖珊. 广州市降水量空间插值方法研究[J]. 广东水利水电, 2017, (10): 11–16
LIANG Y S. Study on spatial interpolation of precipitation in Guangzhou[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2017, (10): 11–16

[18] 宋向阳, 吴发启. 几种插值方法在微 DEM 构建中的应用[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 45–50
SONG X Y, WU F Q. Application of the spatial interpolation methods to the study on micro-DEM[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(5): 45–50

[19] 于伟宣, 赵明松, 王萌, 等. 采样数量与空间插值方法对土壤属性预测精度的影响[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(25): 186–191
YU W X, ZHAO M S, WANG M, et al. Effects of sampling sizes and spatial interpolation methods on prediction accuracy of soil properties[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(25): 186–191

[20] TOBLER W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J]. Economic Geography, 1970, 46(sup1): 234–240

[21] GRIFFITH D A. Spatial-filtering-based contributions to a critique of geographically weighted regression (GWR)[J]. Environment and Planning A: Economy and Space, 2008, 40(11): 2751–2769

[22] WHEELER D, TIEFELSDORF M. Multicollinearity and correlation among local regression coefficients in geographically weighted regression[J]. Journal of Geographical Systems, 2005, 7(2): 161–187

[23] 李运龙, 熊立华, 闫磊. 基于地理加权回归克里金的降水数据融合及其在水文预报中的应用[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(9): 1359–1368
LI Y L, XIONG L H, YAN L. A geographically weighted regression kriging approach for trmm-rain gauge data merging and its application in hydrological forecasting[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(9): 1359–1368

[24] 李艳, 朱军, 胡亚, 等. 不同插值方法模拟四川省逐月降水量的对比分析[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 151–154
LI Y, ZHU J, HU Y, et al. Comparison analysis on different spatial interpolation methods to simulate monthly precipitation in Sichuan Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1): 151–154

[25] 刘孝阳. 复垦土壤有机碳空间插值及监测样点优化布局研究——以山西平朔矿区为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015
LIU X Y. Research on spatial interpolation methods of reclaimed soil organic carbon and optimization of monitoring samples — taking Pingshuo Mining Area of Shanxi as an example[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015

[26] SHEN Q S, WANG Y, WANG X R, et al. Comparing interpolation methods to predict soil total phosphorus in the Mollisol area of Northeast China[J]. CATENA, 2019, 174: 59–72

[27] 黄武鸿, 刘艳丹, 甘晖. 福建某滨海湖泊周边土壤磷元素空间分布研究[J]. 福建轻纺, 2020, (4): 44–50
HUANG W H, LIU Y D, GAN H. Spatial distribution of soil phosphorus around a coastal lake in Fujian Province[J]. The Light & Textile Industries of Fujian, 2020, (4): 44–50

[28] 时雷雷. 海南尖峰岭热带山地雨林原始林土壤理化性质空间异质性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012
SHI L L. Study on the spatial heterogeneity of soil physical and chemical properties of primary tropical montane rainforest in Jianfengling, Hainan Island[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2012

[29] ZHANG S W, HUANG Y F, SHEN C Y, et al. Spatial prediction of soil organic matter using terrain indices and categorical variables as auxiliary information[J]. Geoderma, 2012, 171/172: 35–43

[30] LI Y. Can the spatial prediction of soil organic matter contents at various sampling scales be improved by using regression kriging with auxiliary information?[J]. Geoderma, 2010, 159(1/2): 63–75

[31] YE H C, HUANG W J, HUANG S Y, et al. Effects of different sampling densities on geographically weighted regression kriging for predicting soil organic carbon[J]. Spatial Statistics, 2017, 20: 76–91

[32] 王燕, 瞿明凯, 陈剑, 等. 基于 GWRK 的土壤有效磷空间预测及其超标风险评估[J]. 中国环境科学, 2019, 39(1): 249–256
WANG Y, QU M K, CHEN J, et al. Spatial prediction and standard-exceeding risk assessment of soil available phosphorus based on geographically weighted regression kriging[J]. China Environmental Science, 2019, 39(1): 249–256

[33] 薛正平, 杨星卫, 段项锁, 等. 土壤养分空间变异及合理取样数研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 6–9
XUE Z P, YANG X W, DUAN X S, et al. Spatial variability of soil nutrient and reasonable sampling number[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(4): 6–9

[34] 陈防, 刘冬碧, 熊桂云, 等. 东南地区土壤养分的空间变异性与取样策略 Ⅰ. 土壤属性与大量元素[J]. 湖北农业科学, 2006, 45(4): 432–435
CHEN F, LIU D B, XIONG G Y, et al. Spatial variability and sampling strategy of soil nutrient in southeast China Ⅰ. Soil property and macro-nutrient[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2006, 45(4): 432–435

[35] 陈光, 贺立源, 詹向雯. 耕地养分空间插值技术与合理采样密度的比较研究[J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1007–1011
CHEN G, HE L Y, ZHAN X W. Comparison of spatial interpolation technique of soil nutrient and reasonable sampling density[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(5): 1007–1011