

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.02.027

王幼奇, 张兴, 赵云鹏, 等. 基于 GIS 和地理加权回归的砂田土壤阳离子交换量空间预测. 土壤, 2020, 52(2): 421–426.

基于 GIS 和地理加权回归的砂田土壤阳离子交换量空间预测^①

王幼奇^{1,2}, 张 兴^{1,2}, 赵云鹏^{1,2}, 包维斌^{1,2}, 白一茹^{1,2*}

(1 宁夏大学资源环境学院, 银川 750021; 2 旱区特色资源与环境治理教育部国际合作联合实验室, 银川 750021)

摘 要: 土壤阳离子交换量(CEC)反映土壤保水保肥能力, 研究 CEC 空间分布可为土壤改良和田间施肥提供理论依据。本文以宁夏香山地区砂田淡灰钙土为研究对象, 在土壤 CEC 和理化性质相关分析基础上以普通克里格(OK)为对照, 探索回归克里格(RK)和地理加权回归克里格(GWRK)在 CEC 空间插值上的应用, 并对三者的插值精度及制图效果进行评价。描述统计表明研究区土壤 CEC 含量均值为 10.145 cmol/kg, CEC 与有机质含量呈显著正相关, 与砂粒含量呈显著负相关; 地统计分析表明 CEC 实测值、OLS 残差和 GWR 残差块金系数分别为 8.50%、6.36% 和 7.02%, 比值均小于 25%, 具有强烈空间自相关; 对验证点进行插值精度分析, RK 和 GWRK 的相对模型改进值(RI)分别为 40.49%、41.50%, 插值精度 GWRK>RK>OK; 从成图效果看, GWRK 中辅助变量参与了局部回归, 成图效果更加精细, 揭示了更多空间变化细节。本研究结论可为土壤 CEC 空间预测研究提供可靠的方法借鉴。

关键词: 地理加权回归模型; CEC; 克里格插值; 宁夏

中图分类号: S151.9; S153.6 **文献标志码:** A

Interpolation of Soil CEC of Sandy Fields Using GIS and Geographically Weighted Regression-Kriging

WANG Youqi^{1,2}, ZHANG Xing^{1,2}, ZHAO Yunpeng^{1,2}, BAO Weibin^{1,2}, BAI Yiru^{1,2*}

(1 College of Resources and Environmental Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2 Department of Education International Cooperation Joint Laboratory of Arid Area Characteristic Resources and Environmental Governance, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Soil cation exchange capacity (CEC) reflects the preservation capacity of water and fertilizer of soil. Studying CEC spatial variability can provide a theoretical basis for soil improvement and field fertilization. In this study, field sampling and indoor analysis were conducted in light sierozem in Xiangshan area of Ningxia. Based on correlation analysis between CEC and physiochemical properties of soil, geographically weighted regression Kriging (GWRK) and regression Kriging (RK) were used for spatial interpolation of CEC compared with ordinary Kriging (OK, as CK). Descriptive statistics showed that soil CEC averaged at 10.15 cmol/kg, and it was significantly positively correlated with SOM whilst significantly negatively correlated with sand content. Geostatistics showed that both CEC and its residuals (including OLS residual and GWR residual) had strong spatial autocorrelation (nugget value was less than 25%). Interpolation accuracies by different methods were estimated based on a data set of validation samples, and the results showed that interpolation accuracies of RK and GWRK were higher than that of OK. In addition, GWRK significantly improved the accuracy of OK interpolation of CEC due to their incorporation of auxiliary variables. The map interpolated using GWRK revealed more details of CEC distribution. The results of this study can provide useful method reference for the interpolation of soil CEC.

Key words: Geographically weighted regression; CEC; Kriging interpolation; Ningxia

土壤阳离子交换量 (CEC) 直接反映土壤保蓄、供应和缓冲阳离子养分的能力, 同时也影响着土壤有机质、酸碱度和土壤结构等性质^[1-2]。因此 CEC 通常

被作为土壤质量评价指标之一, 同时也是土壤施肥和改良等的重要依据。砂田是干旱半干旱区农民在长期生产实践中探索形成的一种独有的保护性耕作方式,

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41867003, 41461104, 41761049)和宁夏高等学校科研项目(NGY2017015)资助。

* 通讯作者(yr0823@163.com)

作者简介: 王幼奇(1980—), 男, 安徽泾县人, 博士, 副教授, 主要从事水土资源与环境研究。E-mail: wyq0563@163.com

具有保温增渗、抑制土壤蒸发和防止侵蚀等作用^[3]。近年来随着宁夏硒砂瓜产业的快速发展,砂田在发挥其巨大经济和生态效益的同时,也面临着由于长期耕作导致土壤肥力下降、质量退化等一系列严重问题^[4]。因此精准预测砂田土壤 CEC 空间分布规律对于防止砂田退化和提高土地生产力具有积极作用。

目前,基于地统计学的克里格插值方法在土壤要素空间预测中最常用^[5]。普通克里格插值法(OK)对于样点数量和样点本身的数据质量具有一定的依赖性,土壤自身具有的强变异性使得在复杂环境下使用OK法对土壤属性进行空间插值已不能满足当前要素空间预测对于精度的要求^[6]。因此利用辅助信息协助变量进行空间插值的方法如回归克里格(RK)等得到了极大的应用。RK 可以综合多个变量对土壤属性进行空间插值,有效提高了预测精度,但土壤属性的强空间变异性使得最小二乘法(OLS)这一全局模型无法很好地体现土壤属性的局部特征^[7]。地理加权回归模型(GWR)作为一种有效处理回归分析中空间非平稳性和空间依赖性的局部模型,近年来被广泛应用到科学研究中^[8-9]。如江振蓝等^[10]探讨了 GWR 模型在土壤重金属高光谱预测中的适用性及局限性;王合玲等^[11]应用 GWR 模型对艾比湖土壤有机质和土壤因子响应关系的空间非平稳性进行了研究;袁玉芸等^[12]利用传统回归和 GWR 模型分析于田绿洲表层土壤盐分及其影响因素的空间非平稳性。以上研究均表明 GWR 模型对存在空间非平稳性的数据具有更强的解释能力和估计精度。地理加权回归克里格法(GWRK)是将 GWR 模型与 RK 法相结合,综合多个变量对土壤属性进行局部空间插值,提高了插值精度,能更好地反

映出土壤属性的局部变异情况^[13]。目前,关于宁夏砂田土壤属性空间插值的研究多使用普通克里格插值法^[14-15],对于将 GWR 模型应用在土壤要素空间插值上的研究较少。本文以砂田土壤为研究对象,通过分析土壤 CEC 及其影响因素之间的相关性,验证和比较 OK、RK 和 GWRK 的空间制图效果和插值精度,以期为土壤 CEC 空间变异研究和土壤肥力管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏中卫市香山乡(图 1),属于宁夏中部干旱带,地处 36°57' ~ 37°07'N, 104°56' ~ 105°15'E,区内气候为温带大陆性气候,多年平均气温 6.8℃,年均降水量 247.4 mm,降雨多集中于 7—9 月。全区地势南北高中间低,平均海拔约 1 740 m,土壤类型主要为淡灰钙土。天然植被主要以旱生灌木、半灌木、耐寒的蒿属和禾本科草类为主。土壤基本理化性质见表 1。

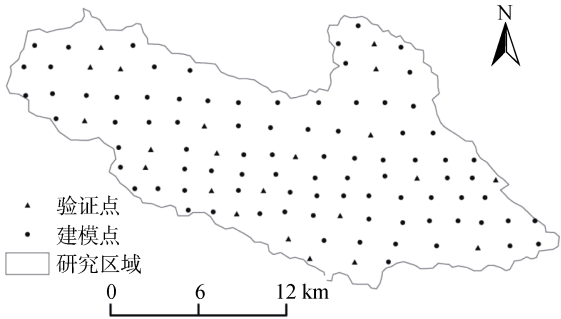


图 1 研究区样点分布
Fig. 1 Distribution of soil sampling sites in study area

表 1 研究区土壤基本理化性质
Table 1 Soil physicochemical properties in study area

有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)	黏粒(g/kg)	粉粒(g/kg)	砂粒(g/kg)
3.958	0.492	0.558	18.364	101.4	635.8	262.8

1.2 样点布设与数据采集

以香山地区行政区划图为底图,在研究区域采用 1.5 km × 1.5 km 网格布点方式进行采样。实际采样过程中有些样点落在村庄、道路等地,通常在附近 200 m 内进行调整,并用 GPS 记录调整后的坐标,共布设 108 个样点。使用土钻采集根层土壤样品(0 ~ 20 cm)。样品带回实验室后经自然风干,剔除植物残根及石砾等,碾磨分别过 10 目和 60 目筛待测。CEC 的测定采用乙酸钠-火焰光度法^[1]。土壤有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法测定^[2]。土壤机械组成采用

激光粒度仪(MS3000, Malvern instruments)测定,粒径分级标准采用美国制^[16]。

1.3 研究方法

1.3.1 回归克里格法 回归克里格法(RK)考虑到土壤属性空间变异驱动因子的复杂性,将线性回归与克里格插值相结合。当目标变量与辅助变量存在相关关系时,先通过对目标变量和辅助变量的相关性分析和线性逐步回归拟合,建立目标变量与辅助变量的多元(或一元)回归关系,得到趋势项。然后对所得残差项进行半方差分析,并使用普通克里格法对残差项进

行空间插值,最后使用栅格计算器将趋势项与残差项两项相加,即为回归克里格的插值结果。公式表达为:

$$z(s) = m(s) + \varepsilon(s)$$
 (1)

式中: $z(s)$ 为目标变量在 s 处的预测值, $m(s)$ 为使用线性逐步回归得到的趋势项, $\varepsilon(s)$ 为使用普通克里格插值得到的残差项。

1.3.2 地理加权回归克里格法 地理加权回归克里格法(GWRK)是通过对目标变量和辅助变量进行地理加权回归拟合,得到局部回归的残差项,然后使用普通克里格插值法(OK)对所得残差项进行插值。GWRK 将 RK 中的全局回归(式 2)转换成地理加权回归模型(GWR)的局部回归(式 3),能更好地体现土壤属性空间变异的局部变化。

$$y_i = \beta_0 + \sum_{k=1}^k \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i$$
 (2)

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^k \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i$$
 (3)

式中: y_i 为样点 i 的因变量; x_{ik} 为第 i 个样点上第 k 个变量的观测值; (u_i, v_i) 为样点 i 的地理空间坐标; β_0 为回归的常数项; $\beta_k(u_i, v_i)$ 为第 i 个采样点上的第 k 个回归参数; ε_i 为残差项。如果 $\beta_k(u, v)$ 在空间保持不变,则模型(式 3)就变为全局模型(式 2)。

1.3.3 模型精度检验指标 为了评价模型的预测精度,选取以下 3 个指标对模型进行精度评价。平均误差表示预测值与实测值偏差的算术平均值;均方根误差表示预测值与实测值偏差的平方和观测次数比值的平方根。均方根误差对预测中特大或特小误差反应比较敏感;相对精度改进值(RI)是表示衡量模型模拟效果是否优于仅对实测值取平均值的指标。

$$RI = \frac{R_{OK} - R_{RK/GWRK}}{R_{OK}} \times 100$$
 (4)

式中: R_{OK} 、 R_{RK} 和 R_{GWRK} 分别代表 OK、RK 和 GWRK 拟合值与实测值的相关系数, RI 值为正值即表示 RK、GWRK 较 OK 的预测精度高,值越大说明预测精度提高地越多; RI 值为负值则表示 RK、GWRK

预测精度低于 OK。
1.4 数据处理与分析 采用 SPSS 18.0 和 Excel 对数据进行描述统计分析、相关性分析和逐步回归分析,使用 GS+9.0 和 ArcGIS 10.2 软件对数据进行地统计分析和空间插值。为排除异常值对半方差函数稳健性的影响,依据 3σ 准则对原始取样数据进行了异常值识别,异常值用正常的最大或最小值代替,后续分析采用处理过的原始数据进行计算。为验证模型的预测精度,随机选择 86 个样点作为建模样点进行空间插值,22 个样点作为验证样点用于分析插值精度。

2 结果与分析

2.1 土壤 CEC 描述统计分析

描述统计表明(表 2),建模点和验证点 CEC 均值分别为 9.82、10.47 cmol/kg,含量变化范围分别为 5.75 ~ 14.87 cmol/kg 和 6.15 ~ 15.83 cmol/kg。研究区土壤 CEC 均值为 10.145 cmol/kg。根据土壤保肥能力分级方法^[17],供肥保肥能力弱的样本数占总样本数的 60.19%,供肥保肥能力中等的占 39.81%,说明研究区土壤供肥保肥能力多处于低水平。偏度和峰度数值均较小(<1)。从变异程度看,建模点和验证点 CEC 变异系数分别为 17.57% 和 21.02%,属中等变异。经 K-S 非参数检验,建模点和验证点的 P 值均大于 0.05,数据服从正态分布。

2.2 土壤 CEC 与土壤理化性质的相关性分析

影响土壤 CEC 含量的因素有很多,有机质及矿质胶体的数量与性质是决定土壤 CEC 的重要因子^[2]。相关学者亦研究发现 CEC 与有机质、土壤质地存在显著相关性,明显影响 CEC 在区域上的分布特征^[18-19]。因此为提高 CEC 预测精度、更好展现其空间分异特征,本文从 CEC 与有机质、矿质胶体的耦合关系为出发点,选取了研究区土壤有机质、质地与 CEC 进行相关性分析^[20]。表 3 可以看出,CEC 与有机质、砂粒、粉粒和黏粒呈显著相关关系。其中 CEC 与有机质、黏粒和粉粒呈显著正相关,与砂粒呈显著负相关。

表 2 土壤 CEC 的描述统计特征
Table 2 Descriptive statistics of soil CEC

样点	样本量	极小值 (cmol/kg)	极大值 (cmol/kg)	均值 (cmol/kg)	标准差 (cmol/kg)	变异系数 (%)	偏度	峰度	K-S 检验 P 值	分布 类型
建模点	86	5.75	14.87	9.82	1.73	17.57	0.60	1.02	0.47	正态
验证点	22	6.15	15.83	10.47	2.20	21.02	0.74	0.87	0.43	正态

2.3 土壤 CEC 的回归模型与半方差模型

2.3.1 逐步回归分析 在相关分析基础上,选择有

机质、黏粒、粉粒和砂粒作为辅助变量,采用逐步回归筛选出对各个回归模型具有显著贡献的回归参数。

表 3 土壤 CEC 与土壤理化性质的相关性
Table 3 Correlation between soil CEC and other soil physicochemical properties

	有机质	黏粒	粉粒	砂粒
CEC	0.672**	0.463**	0.545**	-0.555**

注：* 表示相关性达到 $P<0.05$ 显著水平，**表示相关性达到 $P<0.01$ 显著水平。

逐步回归结果表明(表 4)，有机质和砂粒是对 CEC 插

表 4 土壤 CEC 与土壤理化性质的逐步回归过程
Table 4 Stepwise linear regression process of soil CEC with other physicochemical properties

	非标准化系数		T 值	显著性/P 值	VIF	调整后的 R^2
	回归系数	标准差				
常量	7.478	0.665	11.253	0	1.12	0.567
有机质	0.964	0.133	7.27	0		
砂粒	-0.052	0.01	-4.968	0		

2.3.2 地统计分析 对 CECOLS 残差和 GWR 残差进行描述性统计分析。OLS 残差变化范围为 -1.49 ~ 4.02，均值为 0.004 7；GWR 残差变化范围为 -1.57 ~ 4.44，均值为 -0.0345。经 K-S 非参数检验，两种回归方法所得残差均服从正态分布。在 GS+9.0 中对实测值、OLS 残差和 GWR 残差进行半方差函数模型拟合(表 5)。可以看出，三者均可用球状模型拟合。块金值(C_0)代表随机因素带来的变异，通常由区域变量的变异性和测定误差所造成^[21]。三者的块金值(C_0)

值的最佳自变量。方差膨胀因子(VIF)为 1.12，小于 7.5，说明自变量间不存在共线性。调整后的决定系数为 0.567，说明 OLS 模型对 CEC 的方差解释度为 56.7%。拟合模型如下： $y = 7.478 + 0.964x_1 - 0.052x_2$ ，式中， y 为 CEC； x_1 为有机质含量； x_2 为砂粒含量。为了便于对比，应用 GWR 模型时，同样选用有机质和砂粒进行建模。

均小于 0.3，表明 CEC 由测定误差或土壤性质带来的随机变异较小，空间变异主要受结构性因子影响。块金系数($C_0/(C_0+C)$)表示由随机因素引起的空间变异占系统总变异的比例。一般来说，比值 $<25\%$ 时空间变异性表现为强空间相关性，介于 $25\% \sim 75\%$ 时表现为中等强度空间相关性，比值 $>75\%$ 时表现为弱空间相关性^[17]。实测值、OLS 残差和 GWR 残差块金系数分别为 8.50%、6.36% 和 7.02%，比值均在 25% 以下，说明 CEC 及其残差具有强烈空间自相关。

表 5 土壤 CEC、OLS 残差和 GWR 残差的半方差模型参数
Table 5 Semivariance parameters of soil CEC and regression residuals of OLS and GWR

项目	模型	C_0	C_0+C	变程	$C_0/(C_0+C)$ (%)	R^2	RSS
实测值	球状	0.271	3.187	2 070	8.50	0.026	1.910
OLS 残差	球状	0.081	1.274	2 610	6.36	0.225	0.217
GWR 残差	球状	0.089	1.268	2 670	7.02	0.261	0.203

2.4 土壤 CEC 的空间分布特征

利用 OK、RK 和 GWRK 3 种方法进行空间插值得到的 CEC 空间分布图。根据图 2 可以看出，3 种方法得到的结果中 CEC 的分布格局大致相似，即研究区西部的 CEC 要大于东部，高值区分布在西北、东北和南部，CEC 存在从这些地区向中东部逐渐减小的趋势。CEC 预测值范围分别为 5.75 ~ 14.88、5.77 ~ 13.00、5.52 ~ 12.90 cmol/kg，各方法基本一致。从制图效果看，OK 法插值图较为粗略，RK 法的插值结果体现了 CEC 随着有机质和砂粒的变化情况，但是斑块的边界较为零碎，这与现实中 CEC 的空间渐变特征不相符。GWRK 法不仅保留了回归分析中 CEC 随土壤理化性质变化的丰富细节，还反映出

CEC 的空间渐变特征，斑块边界更为光滑，感官上更符合 CEC 的实际分布状况。为了更好地反映 3 种插值模型对区域土壤 CEC 的预测精度，利用平均误差、均方根误差和 RI 值对插值结果进行精度评价。

2.5 不同插值方法的空间预测精度评价

表 6 对 OK、RK 和 GWRK 方法进行了精度评价。结果表明 3 种方法的平均误差基本接近于 0，表明了所构建模型的预测具有无偏性；均方根误差 $OK>RK>GWRK$ ，范围为 1.084 ~ 1.853，趋近于 1，说明所构建模型的误差有效。从相对精度改进值来看，RK 和 GWRK 法相较于 OK 法拟合精度分别提高了 40.49%和 41.50%，表明 3 种插值方法中 GWRK 法插值精度最高，为最优插值模型。

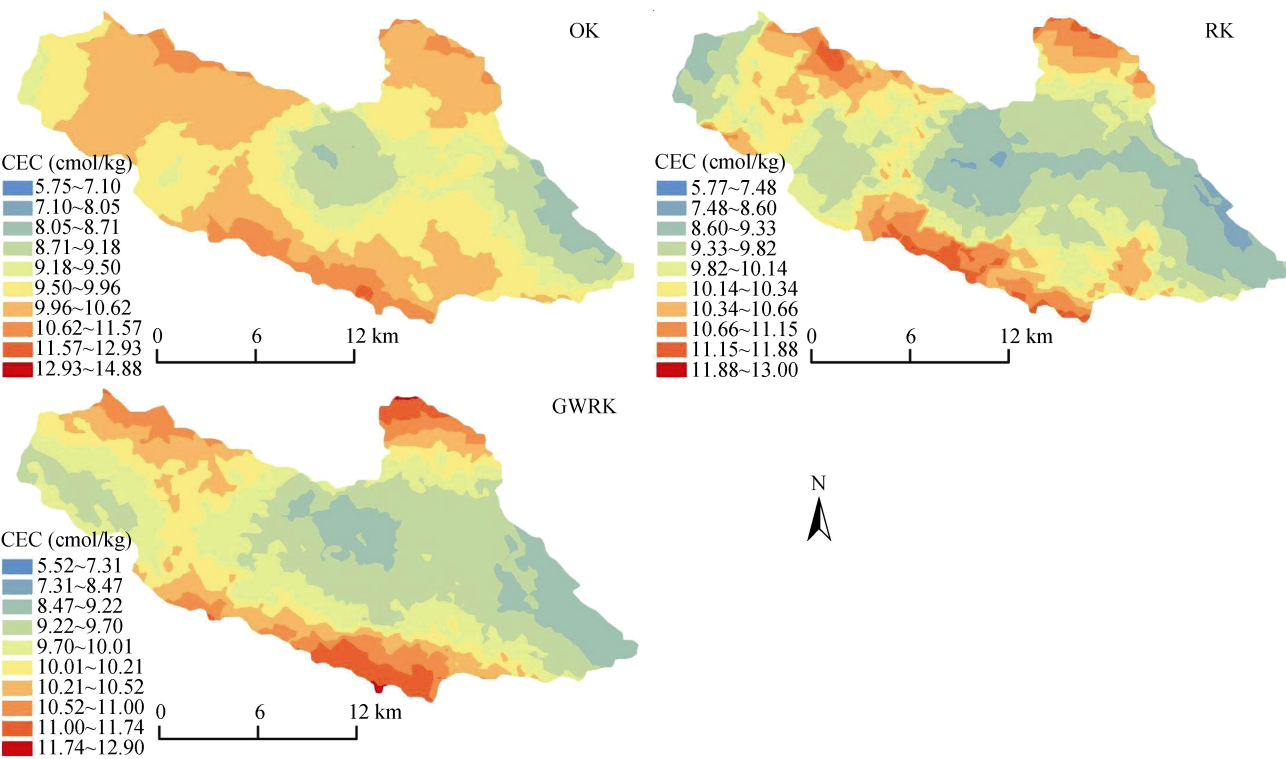


图 2 三种插值方法下土壤 CEC 的空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of soil CEC by OK, RK and GWRK interpolation

表 6 OK、RK 和 GWRK 方法的精度评价指标对比 Table 6 Precision evaluation of three interpolation methods			
方法	平均误差	均方根误差	相对精度改进值(%)
OK	-0.034	1.853	-
RK	-0.014	1.103	40.49
GWRK	-0.016	1.084	41.50

3 讨论

研究区土壤 CEC 均值为 10.145 cmol/kg，供肥保肥弱的样本数占总样本数的 60.19%，研究区土壤保肥供肥能力较弱。前人的相关研究也发现了类似情况^[4, 15]。其产生原因可能与当地土壤母质和耕作制度有关。研究区处于我国西北内陆腹地，土壤类型为低肥力的淡灰钙土，自然环境条件限制了当地土壤的肥力水平。再加上研究区有覆砂的传统耕作制度，农民施肥难度大，外源性的有机肥施入量不够，导致当地土壤肥力偏低。砂田土壤 CEC 在空间上展现出高度变异性，在研究区地形、气候和母质相对均一的情况下，土壤理化性质可能是导致土壤 CEC 在空间上呈现出较强变异性的主要原因。其中有机质中胶体成分在土壤固相中所占比例较大，土壤胶体是 CEC 的载体，随有机质含量增加，CEC 也随之增加。同时在土壤颗粒组成中，黏粒胶体集中了 80% 以上的负

电荷，土壤黏粒含量愈高，CEC 就越高^[18-20]。相关学者亦研究发现 CEC 与有机质、土壤质地存在显著相关性，明显影响 CEC 在区域上的分布特征。砂田 CEC 与土壤有机质、黏粒和粉粒呈正相关，与砂粒呈负相关，即在有机质和黏粒含量高的地方，CEC 相对充足。针对这一情况，建议在后续农业生产过程中增施有机肥，推广轮作制度以培肥土壤，从而提高作物产量。

空间插值技术是利用采样点数据对研究区内未知点进行预测的方法。常用的空间插值方法有普通克里格法、回归克里格法等^[22-23]。张慧智等^[24]对比了普通克里格、泛克里格和回归克里格在土壤温度空间预测中的效果，发现回归克里格法预测精度最高，能够更好地表达复杂地形地区的局部变异。Hengl 等^[25]采用回归克里格对土壤有机质含量进行空间预测，发现其预测精度较普通克里格表现更好，均方根误差数值更低。但是，土壤理化性质与土壤 CEC 之间的相关关系因地制宜，局部区域的 CEC 与土壤理化性质关系可能与做全局分析时得出的结论相反，这在回归克里格中没有考虑。GWR 模型能将数据的空间信息纳入分析过程，通过计算回归模型的局部参数来解决地理数据中存在的空间自相关性及空间非平稳性问题，从而提高模型的拟合优度及模拟效果^[26]。本文

对 3 种插值模型的精度分析结果也证明了 GWRK 法在空间制图方面表现出更丰富的局部细节和更光滑的空间渐变特征。因此,在后续土壤属性的空间制图研究中,应注重 GWRK 法在土壤属性空间插值中的应用。

4 结论

1) 相关分析表明,土壤 CEC 与有机质、黏粒和粉粒含量呈显著正相关,与砂粒含量呈显著负相关。

2) 地统计分析表明,土壤 CEC 及其插值残差均可用球状模型拟合;实测值、OLS 残差和 GWR 残差块金值均小于 0.3,说明其空间变异主要受结构性因子影响;块金系数分别为 8.50%、6.36% 和 7.02%,表现出强烈空间自相关。

3) 从插值效果和精度分析来看, GWRK 是 3 种模型中插值效果最为理想的; RK 和 GWRK 法相较于 OK 法拟合精度分别提高了 40.49% 和 41.50%, 3 种插值方法中 GWRK 法插值精度最高,为最优插值模型。

参考文献:

- [1] 李锦芬,瞿明凯,黄标,等. 区域土壤 CEC 与相关控制因子的空间非平稳关系评估[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 638-646.
- [2] 廖凯华,徐绍辉,程桂福,等. 土壤 CEC 的影响因子及 Cokriging 空间插值分析——以青岛市大沽河流域为例[J]. 土壤学报, 2010, 47(1): 26-32.
- [3] 马忠明,杜少平,薛亮. 覆砂年限对砂田砂层质量、土壤水热状况及西瓜生长的影响[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1433-1439.
- [4] 王幼奇,白一茹,赵云鹏. 宁夏砂田小尺度土壤性质空间变异特征与肥力评价[J]. 中国农业科学, 2016, 49(23): 4566-4575.
- [5] 王永东,冯娜娜,李廷轩,等. 不同尺度下低山茶园土壤阳离子交换量空间变异性研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1980-1988.
- [6] 张彬,杨联安,杨粉莉,等. 苹果主产区土壤养分空间分布特征及其影响因素——以陕西省礼泉县为例[J]. 土壤, 2016, 48(4): 777-784.
- [7] 姚雪玲,傅伯杰,吕一河,等. 基于 GIS 和统计模型的黄土丘陵沟壑区土壤水分插值方法[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 93-96.
- [8] 瞿明凯,李卫东,张传荣,等. 地理加权回归及其在土壤和环境科学上的应用前景[J]. 土壤, 2014, 46(1): 15-22.
- [9] 董磊磊,潘竞虎,王卫国,等. 基于遥感和 GWR 的兰州中心城区夏季热场格局及与土地覆盖的关系[J]. 土壤, 2018, 50(2): 404-413.
- [10] 江振蓝,杨玉盛,沙晋明. GWR 模型在土壤重金属光谱预测中的应用[J]. 地理学报, 2017, 72(3): 533-544.
- [11] 王合玲,张辉国,吕光辉. 艾比湖流域土壤有机质与土壤因子响应关系的空间非平稳性分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2): 224-228.
- [12] 袁玉芸,瓦哈甫·哈力克,关靖云,等. 基于 GWR 模型的于田绿洲土壤表层盐分空间分异及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3273-3282.
- [13] 杨顺华,张海涛,郭龙,等. 基于回归和地理加权回归 Kriging 的土壤有机质空间插值[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1649-1656.
- [14] 白一茹,王幼奇,王菲,等. 压砂地土壤导水特性空间格局及影响因子[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 55-61.
- [15] 王超,王建宇,王菲,等. 中卫市压砂地土壤有机质空间变异特点研究[J]. 土壤通报, 2016, 47(2): 287-293.
- [16] 陈冲,胡克林,贺勇. 农田土壤质地空间分布的三维随机模拟及其不确定性评价[J]. 土壤, 2013, 45(2): 319-325.
- [17] 李海鹰,姜小三,潘剑君,等. 土壤阳离子交换量分布规律的研究——以江苏省溧水县为例[J]. 土壤, 2007, 39(3): 443-447.
- [18] 魏孝荣,邵明安. 黄土高原小流域土壤 pH、阳离子交换量和有机质分布特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2710-2715.
- [19] 陈海生,王素娜. 豫中烟区植烟田土壤 pH 和阳离子交换量的空间变异性研究[J]. 西南农业学报, 2016, 29(2): 342-345.
- [20] 王文艳,张丽萍,刘俏. 黄土高原小流域土壤阳离子交换量分布特征及影响因子[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 123-127.
- [21] 苏松锦,刘金福,何中声,等. 格氏栲天然林土壤养分空间异质性[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5673-5682.
- [22] 沈浩,吉力力·阿不都外力. 玛纳斯河流域农田土壤水盐空间分布特征及影响因素[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 769-776.
- [23] 刘劲松,陈辉,杨彬云,等. 河北省年均降水量插值方法比较[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3493-3500.
- [24] 张慧智,史学正,于东升,等. 中国土壤温度的空间插值方法比较[J]. 地理研究, 2008, 27(6): 1299-1307.
- [25] Hengl T, Heuvelink G B M, Stein A. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging[J]. Geoderma, 2004, 120(1): 75-93.
- [26] 王宇航,赵鸣飞,康慕谊,等. 黄土高原地区 NDVI 与气候因子空间尺度依存性及非平稳性研究[J]. 地理研究, 2016, 35(3): 493-503.