

黑土区小流域土壤速效磷空间分布模拟方法

王雪珊¹, 沈庆松^{1,2}, 高凤杰¹, 张兴义², 张少良¹, 王 力³

(1.东北农业大学 资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2.中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨 150081; 3.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为探索东北黑土小流域土壤 AP 空间分布模拟的最佳方法,综合考虑区域尺度、景观格局和采样方法等信息,选取两个典型黑土小流域(光荣和海沟河流域)作为研究对象,结合半变异分析、回归分析、主成分分析等方法,比较了不同空间插值方法(反距离权重法、径向基函数法、普通克里格、协同克里格、多元线性回归模型、地理加权回归模型、回归克里格和地理加权回归克里格)对 AP 空间模拟精度的影响。结果表明:(1)引入主成分分析后能够提高回归克里格和地理加权回归克里格方法的模拟精度(4.5%和 2.4%);(2)地理加权回归克里格方法可以作为最优空间插值方法模拟黑土区小流域 AP 的空间分布格局。地理加权回归克里格方法相较于传统插值方法能在一定程度上提高黑土小流域土壤 AP 空间模拟精度,为小流域尺度黑土养分管理提供技术支撑。

关键词:典型黑土; 磷; 空间插值方法; 克里格; 精度

中图分类号:S158.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)02-0033-08

Comparing Interpolation Methods to Predict the Spatial Distribution of Soil Available Phosphorus in the Mollisol Watershed of Northeast China

WANG Xueshan¹, SHEN Qingsong^{1,2}, GAO Fengjie¹, ZHANG Xingyi², ZHANG Shaoliang¹, WANG Li³

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2.Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China; 3.Institute of Water and Soil Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To explore the optimal method of simulating the spatial pattern of available phosphorus (AP) in Mollisol watershed of Northeast China, semi-variance analysis, regression analysis and principal component analysis were combined, and eight interpolation methods including inverse distance weighted (IDW), radial basis functions (RBF), ordinary Kriging (OK), co-Kriging (COK), multiple linear regression (MLR), geographically weighted regression (GWR), regression Kriging (RK), and geographically weighted regression Kriging (GWRK) were used to simulate the spatial patterns of soil AP in two typical Mollisol watershed (Guangrong watershed and Haigouhe watershed) with different kinds of landscapes at diverse scales. The results show that: (1) the introduction of PCA can improve the prediction accuracy of RK method (4.5% increment) and GWRK method (2.4% increment); (2) GWRK method can be used as the optimal interpolation method to simulate the spatial distribution pattern of soil AP in Mollisol watershed compared with the traditional interpolation method, GWRK can improve the simulation accuracy of soil AP in Mollisol watershed and provide technical support for nutrient management.

Keywords: typical Mollisol; phosphorus; interpolation method; Kriging; accuracy

土壤速效磷(Available phosphorus, AP)是衡量土壤供磷能力和磷素流失风险的重要指标^[1-2],该指标能够反映农田土壤肥力特征,研究其空间分布规律对于区域施肥管理和农业面源污染防控等具有重要意义^[3]。受

生物地球化学循环过程、自然环境和人类活动等因子影响^[4-5],农田土壤 AP 在空间分布上存在高度空间异质性。研究证实 AP 预测的精度直接影响农田土壤磷素的管理水平^[6],因此利用有限信息,改进模拟方法提高 AP

收稿日期:2020-06-11

修回日期:2020-06-23

资助项目:国家重点研发计划(2017YFC0504202, 2018YFC0507005);国家自然科学基金(41471228, 41771313)

第一作者:王雪珊(1995—),女,内蒙古赤峰人,硕士研究生,研究方向为农业生态环境。E-mail:wangxueshan1013@163.com

通信作者:张少良(1980—),男,黑龙江五常人,博士,教授,主要从事农业生态环境演变过程研究。E-mail:shaoliang.zhang@neau.edu.cn

空间分布预测模型的精度十分迫切。

空间插值方法是利用采样点数据通过数学模型对研究区内未知点进行模拟预测,并能够获得连续的属性值空间分布特征^[7]。回归克里格法^[8]将多元线性回归模型与克里格方法相结合,同时引入多个环境因子参与建模,并考虑土壤属性空间分布过程中的结构性因子与随机性因子,其空间插值结果更加精确^[9-10]。Li^[10]和 Zhang 等^[11]提取地形和土地利用等变量利用回归克里格法预测土壤有机质的空间分布特征,研究结果表明回归克里格方法要优于单变量空间插值方法。但是空间非平稳性的存在导致回归克里格方法不能有效地捕捉土壤属性空间变异的局部特征^[12-13]。地理加权回归模型利用局部加权最小二乘法进行逐点参数估计和空间预测,能够在引入环境变量的同时基于空间非平稳性假设揭示更多的局部信息,该模型已逐渐成为土壤属性空间预测的有效手段^[14-15]。地理加权回归克里格将地理加权回归模型与克里格方法相结合,既能够考虑空间信息的局部特征,还能利用克里格法对代表随机性的残差进行插值,插值结果能够揭示可能被空间非平稳性所掩盖的一些局部变化,反映出更加真实的土壤属性空间变异情况^[16-18]。杨顺华等^[16]引入相对高程和径流强度指数预测乡镇尺度(235 km²)土壤有机质空间分布规律;马泉来等^[17]研究表明海拔和水系距离可以作为辅助变量预测黑土区小流域(119.16 km²)土壤有机质的空间分布规律,研究证实相对于普通克里格和回归克里格法,地理加权回归克里格能够显著提高土壤有机质的模拟精度;Kumar 等^[12]引入海拔、坡度、植被指数、土壤类型、土地利用类型等变量研究宾夕法尼亚州(117 599 km²)土壤有机碳的空间分布规律;Ye 等^[19]研究表明海拔、坡度和地形湿度指数能够模拟区域尺度下(16 400 km²)不同采样点密度土壤有机碳的空间分布格局,以上研究证明考虑了空间非平稳性和残差空间自相关的地理加权回归克里格方法能够加强土壤有机碳的模拟精度。然而,应用地理加权回归克里格时,不同属性值在空间插值过程选用的辅助变量不同,即使同一属性值不同土壤类型或区域所选择的辅助变量也不完全相同,因此有必要在不同区域和不同土壤类型开展空间插值方法的研究。

东北黑土区是我国重要商品粮生产基地,其粮食产量关系到国家粮食安全问题,合理和精准模拟土壤养分空间分布格局是区域土壤养分调控的关键。因此,为了提高黑土区 AP 空间分布的模拟精度,本研究尝试将回归克里格方法和地理加权回归克里格方法应用于 AP 空间模拟精度研究中,综合考虑景观格

局、区域尺度、采样方法等信息,选取东北黑土区两个典型黑土小流域作为研究对象,比较不同空间插值方法(反距离权重法、径向基函数法、普通克里格法、协克里格法、多元线性回归模型、回归克里格法、地理加权回归模型和地理加权回归克里格法)对黑土区 AP 的空间预测精度,确定黑土区 AP 的最优插值方法,旨在为研究区合理施肥和农业面源污染防控等提供理论依据和技术支撑。

1 研究区概况

光荣小流域位于黑龙江省海伦县光荣村(47.21°—47.23°N,126.50°—126.51°E),流域总面积 1.86 km²,地形为典型的漫川漫岗(高程 186—242 m),土壤类型以典型黑土为主,当前以大豆玉米轮作为主,一年一熟制,其基本理化形状见表 1。该地区以温带大陆性季风气候为主,冬季寒冷干燥,夏季温热多雨,年均降水 530 mm,主要集中在 6—8 月(65%),年均气温 1.5℃,年均有效积温 2 450℃,年均日照时数为 2 600~2 800 h,冻融期长达 130 d^[1](图 1,表 1)。

海沟河小流域位于黑龙江省哈尔滨市阿城区东部,地理坐标为 126°55′45″—127°10′05″E,45°34′8″—45°40′50″N,属于典型的“林地—旱田—水田”景观格局,总面积约 119.76 km²。流域东部为高山丘陵区,主要植被类型为原始的针阔混交林,土壤类型为森林暗棕壤;中部为典型的漫川漫岗区,主要耕作植物为玉米,土壤类型为典型黑土;西部地区位于流域下游区域,地势相对平坦,以水稻种植为主,土壤类型为黑土发育的水稻土。海沟河小流域以温带大陆性季风气候为主,年均降水 600~800 mm,主要集中在 4—10 月,占总降雨量的 90%,年均气温为 3.9℃(图 1,表 1)^[3,17]。

2 材料与方法

2.1 样点采集与测定

本研究分别于 2012 年和 2014 年秋季在光荣和海沟河小流域采用随机和网格设计法布点,兼顾不同土地利用方式,五点法采集 0—20 cm 耕层土壤样品各 120 个(图 1),同时记录采样点基本信息,包括经纬度坐标、高程、坡位、耕作方式、前茬植被等。土样经室内风干、研磨、过筛等处理,采用 0.5 mol 的 NaHCO₃ 浸提—钼蓝比色法测定 AP 含量^[20]。

2.2 环境变量提取

环境变量能够直接或间接地反映地球生物化学循环过程,如土壤发生过程、地表径流、淋溶、植被分布等进而影响土壤养分空间分布特征^[11-12]。因此,环

境变量(地形因子和遥感数据)常被用做辅助变量参与土壤养分空间异质性分析以提高模拟精度。本研究共提取 30 个环境变量通过相关性分析和回归分析揭示其与 AP 的关系,环境变量提取方法见表 2^[21]。

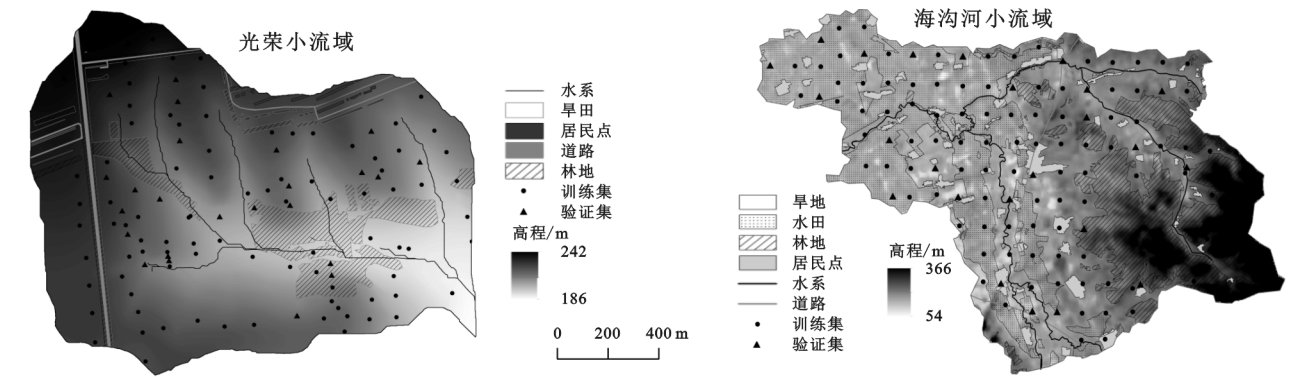


图 1 研究区地理位置及采样点分布

表 1 研究区土壤基本属性及样点参数

研究区	土壤类型	土壤质地	土壤组成 (沙/粉/黏)	容重/ (g·cm ⁻³)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	植被类型	采样距离/ m	分辨率/ (个·km ⁻²)	均匀度/ %
光荣	黑土	壤土	35/43/22	1.27	42.1	1.68	198	玉米、大豆、次生林	83.79	48.80	46.83
	黑土(73%)	壤土	38/39/23	1.30				玉米			
海沟	水稻土(21%)	粉砂壤土	29/50/21	1.41	24.0	2.68	98	水稻	809.77	0.75	56.16
	暗棕壤(6%)	壤土	47/29/24	1.40				针阔混交林			

表 2 辅助变量及其提取方法

辅助变量	提取方法
高程	源于地理空间数据云数据共享平台(http://www.gscloud.cn/)
坡度	由 DEM 数据通过 ArcGIS 10 表面分析模块直接提取
坡向	由 DEM 数据通过 ArcGIS 10 表面分析模块直接提取
坡向正弦值	ArcGIS 10 栅格计算器工具求坡向的正弦函数值
坡向余弦值	ArcGIS 10 栅格计算器工具求坡向的余弦函数值
相对高程	$Hr = E_{\max} - E$, 式中: E_{\max} 为区域内最大高程值; E 为实测高程值
地形起伏度	$RDLS = E_{\max} - E_{\min}$, 式中: E_{\max} 为区域内最大高程值; E_{\min} 为区域内最小高程值
地表切割深度	$LSCD = E_{\text{mean}} - E_{\min}$, 式中: E_{mean} 为区域内平均高程值; E_{\min} 为区域内最小高程值
地表粗糙度	$LSR = 1 / \cos(\text{slope} \times 3.14159 / 180)$
曲率	由 DEM 数据通过 ArcGIS 10 表面分析模块直接提取
平面曲率	由 DEM 数据通过 ArcGIS 10 表面分析模块直接提取
剖面曲率	由 DEM 数据通过 ArcGIS 10 表面分析模块直接提取
坡向变率	坡度的坡度, 即对坡度求坡度值
坡度变率	坡向的坡度, 即对坡向求坡度值
地形湿度指数	栅格计算器 $TWI = \ln(As / \tan\beta)$, 式中: As 为汇流面积; β 为坡度, 下同
沉积物运移指数	栅格计算器 $STI = As \times \tan\beta$
径流强度指数	栅格计算器 $SPI = (As / 22.13)^{0.6} \times (\sin\beta / 0.0896)^{1.3}$
坡度坡长因子	LS-tool
交通距离	ArcGIS 10 距离分析模块提取区域内采样点距道路距离
居民点距离	ArcGIS 10 距离分析模块提取区域内采样点距居民点距离
水系距离	ArcGIS 10 距离分析模块提取区域内采样点距水系距离
归一化植被指数	$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$, 式中: NIR 为近红外波段; Red 为红色波段, 下同
比值植被指数	$RVI = NIR / Red$
差值植被指数	$DVI = NIR - Red$
修正土壤调节指数	$MSAVI = \{2NIR + 1 - [(2NIR + 1)^2 - 8(NIR - R)]^{1/2}\} / 2$
植被覆盖度	$VC = (NDVI - NDVI_{\text{soil}}) / (NDVI_{\text{veg}} - NDVI_{\text{soil}})$
含铁矿物指数	$FMI = \text{Band}5 / \text{Band}4$
亮度指数	缨帽变换第一主成分
绿度指数	缨帽变换第二主成分
湿度指数	缨帽变换第三主成分

2.3 验证方法

为比较不同空间插值方法模拟精度,通过 ArcGIS 10 软件子集要素模块随机自动抽取训练样本集和验证样本集,样本数量比为 4 : 1。运用验证集样点的实测值与预测值进行精度评价,常用评价指标包括平均误差 (ME)、平均相对误差 (MAE)、均方根误差 (RMSE) 和相对提高度 (RI),相应的计算公式如下:

ME=1/n \sum_{i=1}^n [z(x_i,y_i)-z^* \times (x_i,y_i)] \tag{1}

MAE=1/n \sum_{i=1}^n |z(x_i,y_i)-z^* \times (x_i,y_i)| \tag{2}

RMSE=\{\sum_{i=1}^n [z(x_i,y_i)-z^* \times (x_i,y_i)]^2/n\}^{1/2} \tag{3}

RI=(RMSE_R - RMSE_E)/RMSE_R \times 100 \% \tag{4}

式中: n 为验证点数量; $z(x_i,y_i)$ 和 $z^*(x_i,y_i)$ 分别为第 i 个验证点的实测值与预测值。ME 是插值无偏性的量度,其结果越接近 0 说明结果越无偏;MAE 和 RMSE 是

插值精度的量度,其值越小说明插值方法越精确;RI 用来两两对比不同插值方法精度的提高程度。

3 结果与分析

3.1 土壤速效磷描述性分析

对随机抽取的训练集样本 AP 数据进行经典统计学分析,结果显示光荣小流域 AP 含量的范围为 2.56~50.01 mg/kg,平均值为 14.51 mg/kg,偏度和峰度分别为 1.86,3.85,结合 Kolmogorov-Smirnov test 验证法进行非参数检验可知研究区 AP 数据不符合正态分布,需进行数据转化。变异系数为 51%,表明研究区 AP 的空间变异程度为中等(表 3)。

海沟河小流域 AP 含量的范围为 6.44~162.56 mg/kg,平均值为 49.48 mg/kg,较光荣小流域 AP 含量高 71%,偏度和峰度 1.49,3.12,未通过 K-S 检验,需进行数据转化。AP 变异系数为 57%,属中等程度空间变异(表 3)。

表 3 研究区 AP 描述性统计特征值

研究区	变量	样本数量	最小值/ (mg · kg ⁻¹)	最大值/ (mg · kg ⁻¹)	平均值/ (mg · kg ⁻¹)	标准差/ (mg · kg ⁻¹)	偏度	峰度	变异系数/ %	K-S 值 <i>p</i> -value
光荣	AP	90	2.56	50.01	14.51	9.31	1.86	3.85	51	0.003
	LNAP	90	0.94	3.91	2.51	0.56	0.24	0.32	16	0.300
海沟	AP	95	6.44	162.56	49.48	27.99	1.49	3.12	57	0.030
	LNAP	95	1.86	5.09	3.75	0.58	0.48	0.87	15	0.642

3.2 土壤速效磷与辅助变量的相关性分析

光荣小流域 AP 与高程呈显著正相关关系($r=0.247$);与坡度、地形起伏度、地表粗糙度、地表切割深度呈极显著负相关关系;与交通距离和居民点距离呈极显著负相关关系。由于相关地形因子之间存在多重共线性,为减少数据冗余,提高精度,本研究对与 AP

显着相关的环境变量进行主成分分析,得到第一主成分(地形因子)和第二主成分(人类活动因子),均与 AP 呈极显著负相关,可以作为辅助变量参与建模(表 4)。海沟河流域 AP 与高程呈显著负相关关系($r=-0.257$);与含铁矿物指数呈显著负相关关系($r=0.221$);与其他环境变量并未达到显著相关(表 4)。

表 4 研究区 AP 与辅助变量相关性分析

辅助变量	光荣	海沟	辅助变量	光荣	海沟	辅助变量	光荣	海沟
高程	0.247 *	-0.257 *	相对高程	-0.202	0.001	坡度坡长	-0.124	0.118
坡度	-0.306 **	0.016	地形起伏度	-0.280 **	-0.087	植被覆盖度	-0.039	-0.200
坡向	-0.216 *	-0.028	地表粗糙度	-0.285 **	0.061	归一化植被指数	-0.035	-0.165
平面曲率	-0.037	0.028	地表切割深度	-0.275 **	-0.046	比值植被指数	-0.055	
剖面曲率	-0.004	-0.150	沉积物运移指数	0.013	-0.050	修正土壤调节植被指数	-0.059	-0.069
曲率	-0.022	0.110	地形湿度指数	0.153	0.065	差值植被指数	-0.063	0.060
坡向余弦值	-0.202 *	-0.069	径流强度指数	0.055	-0.105	亮度指数	-0.143	
坡向正弦值	0.054	-0.018	交通距离	-0.347 **	0.065	绿度指数	-0.015	
坡向变率	-0.11	0.060	居民点距离	-0.337 **	-0.039	湿度指数	0.095	
坡度变率	-0.17	-0.184	水系距离	0.078	0.010	含铁矿物指数	-0.048	-0.221 *
地形因子	-0.333 **		人为因子	-0.273 **				

3.3 土壤速效磷与辅助变量的回归分析

多元线性逐步回归分析能够保证与 AP 显着相关的环境变量进入回归模型的同时去除各环境变量之间的共线性。结果表明,坡度和交通距离是光荣小

流域 AP 空间分布规律的最佳解释变量,引入主成分分析得到的地形因子和人类活动因子参与回归分析可提高回归方程模拟精度。高程和含铁矿物指数是

海沟小流域 AP 空间分布规律的最佳解释变量,各变量之间不存在多重共线性问题(表 5)。

表 5 研究区 AP 多元线性回归方程及其相关参数

研究区	辅助变量	回归方程	膨胀系数	校正回归系数
光荣	坡度(<i>S</i>),交通距离(<i>DTR</i>)	$LNAP=2.943-0.001DTR-0.07S$	1.138	0.14
光荣(PCA)	地形因子(<i>T</i>),人类活动因子(<i>H</i>)	$LNAP=2.511-0.188T-0.154H$	1.000	0.17
海沟	高程(<i>DEM</i>),含铁矿物指数(<i>FMI</i>)	$LNAP=5.738-0.006DEM-0.895FMI$	1.023	0.12

为了便于对不同插值方法模拟精度进行比较,在进行地理加权回归模型建模过程中同样选取上述因子作为环境变量(表 6)。

表 6 研究区 AP 地理加权回归模型参数

研究区	AICc	回归系数	校正回归系数	残差平方和
光荣	137.38	0.36	0.25	18.01
光荣(PCA)	135.64	0.41	0.28	16.95
海沟	157.79	0.17	0.13	26.03

3.4 土壤速效磷的空间变异特征分析

通过 GS+9.0 软件对 AP 进行地统计分析揭示其空间变异特征,通常当 $C_0/(C_0+C)<25\%$ 时,变

量具有较强的空间自相关性,且主要受地形等结构性因子影响;当 $25\%<C_0/(C_0+C)<75\%$ 时,变量属中等空间自相关性,同时受结构性因子和随机因子的共同影响;当 $C_0/(C_0+C)>75\%$ 时,变量空间自相关性较弱,主要受施肥等随机因子的影响。本结果表明光荣小流域 AP 的变程为 274 m,可作为该区域 AP 空间分布特征研究的参考采样距离; $C_0/(C_0+C)$ 为 32.5%,表明 AP 主要受结构因子影响,同时在一定程度上受随机因子影响,处于中等程度空间自相关水平。而海沟河流域 $C_0/(C_0+C)$ 为 7.2%,表明海沟河流域土壤 AP 空间自相关性较强,主要受结构性因子影响,变程为 1 650 m(表 7)。

表 7 研究区 AP 地统计学模型和参数

研究区	数据转化方式	块金值	基台值	变程/m	块基比	拟合模型	决定系数	残差平方和
光荣	ln	0.1003	0.3086	274	0.325	Spherical	0.746	7.93E-03
海沟	ln	0.0227	0.3164	1650	0.072	Exponential	0.605	1.66E-03

3.5 土壤速效磷的空间分布特征

不同空间插值方法所预测的光荣小流域 AP 空间分布格局整体趋势基本一致(图 2)。AP 含量在流域上游居民点和道路附近含量较高,并沿水系方向从上游向流域出口处递减,与研究区高程变化情况较吻合。从制图效果来看,反距离权重法和径向基函数法存在明显的斑块效应,但其预测值范围更接近实测值变化范围。多元线性回归模型虽然能够反映相似的 AP 空间分布格局,但是其预测值范围存在明显的低估现象,插值结果并不理想,相比之下,考虑了空间非平稳性的地理加权回归模型制图效果与模拟精度均高于多元线性回归模型。普通克里格、回归克里格和地理加权回归克里格插值范围及空间预测格局相近,其中地理加权回归克里格得到的预测值范围更接近于实测值,同时考虑了环境变量的回归克里格和地理加权回归克里格的高低值界线趋于模糊化,地理加权回归克里格还能够揭示流域内 AP 的局部分布特征。

海沟河流域 AP 低值区出现在流域东部林地种植区,在中部道路两侧出现明显的条带状富集区,并沿水系方向在流域出口处达到最大值,其空间分布特征与高程变化及土地利用方式密切相关。从制图效果看(图 3),反距离权重法和径向基函数法存在明显的斑块效应,但其预测值范围更接近实测值变化范

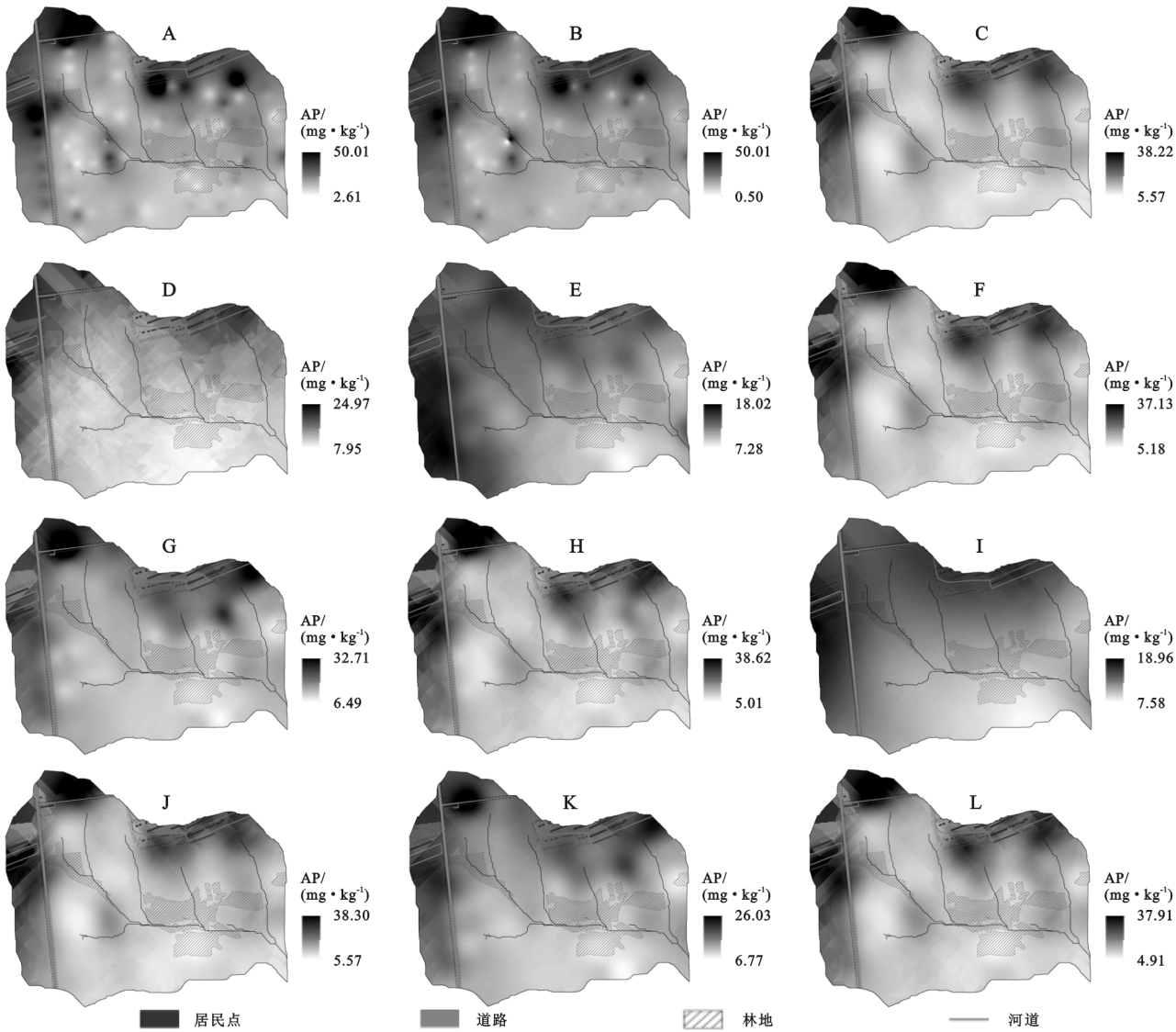
围。多元线性回归模型和地理加权回归模型出现明显的低估现象。回归克里格和地理加权回归克里格模拟的 AP 空间分布情况更加精细化,能够反映更多的空间信息。

3.6 模拟精度比较

以普通克里格法作为参照标准对比不同空间插值方法的评价参数,结果表明光荣小流域反距离权重法和径向基函数法的各项验证指标均低于普通克里格。多元线性回归模型和地理加权回归模型得到的均方根误差较普通克里格方法分别降低了 12%,2.1%,而回归克里格和地理加权回归克里格的各项验证指标均优于普通克里格,模拟精度分别提高了 4.4%,4.6%。此外,引入主成分分析结果得到的插值方法评价参数均有一定程度的提高,其中引入主成分分析的回归克里格方法模拟精度较普通克里格和回归克里格分别提高 5.7%,4.5%,引入主成分分析的地理加权回归克里格方法模拟精度较普通克里格和地理加权回归克里格分别提高了 6.9%,2.4%(表 8)。

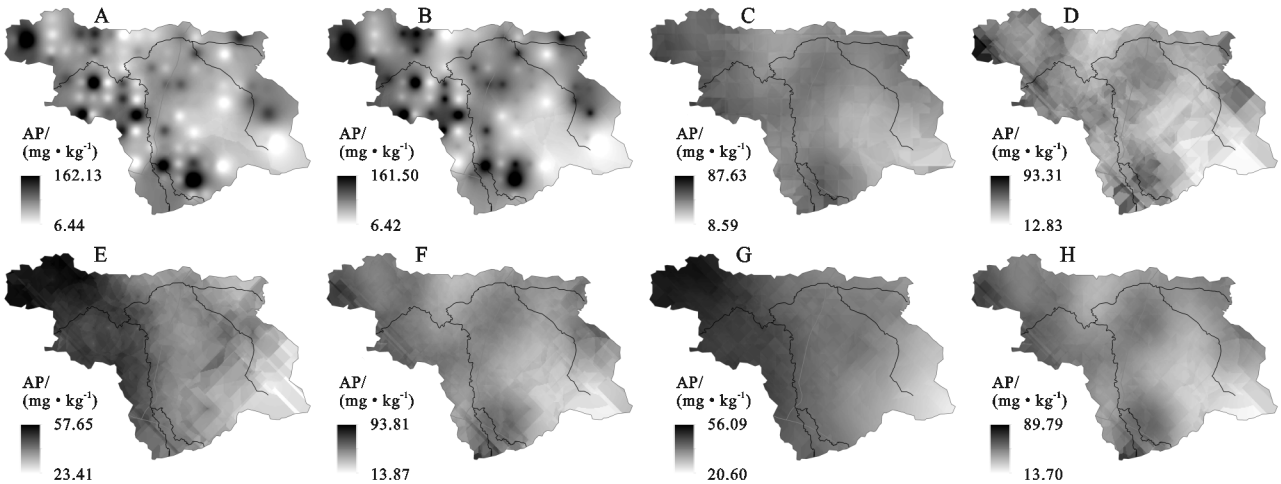
在海沟河流域反距离权重法、径向基函数法和协克里格的各项验证指标均低于普通克里格法;而回归克里格和地理加权回归克里格的各项验证指标均优于普通克里格法,模拟精度分别提高了 0.7%,1.7%;地理加权回归模型较多元线性回归模型的模拟精度

提高了 3.6%(表 8)。综上所述,考虑了环境变量和残差空间自相关的回归克里格和地理加权回归克里格能够提高 AP 的空间预测精度,地理加权回归克里格法最优。



注: A—L 分别是反距离权重法、径向基函数法、普通克里格、协同克里格、多元线性回归模型、回归克里格、地理加权回归模型、地理加权回归克里格、多元线性回归模型(PCA)、回归克里格(PCA)、地理加权回归模型(PCA)、地理加权回归克里格(PCA)。

图 2 不同空间插值方法下光荣小流域 AP 空间分布



注: A—H 分别是反距离权重法、径向基函数法、普通克里格、协同克里格、多元线性回归模型、回归克里格、地理加权回归模型、地理加权回归克里格。

图 3 不同空间插值方法下海沟河流域 AP 空间分布

表 8 不同空间插值方法精度评价参数

研究区	验证指标	IDW	RBF	OK	COK	MLR	RK	GWR	GWRK	MLR PCA	RK PCA	GWR PCA	GWRK PCA
光荣	MAE	6.217	6.216	5.884	5.896	5.819	5.491	5.542	5.622	5.946	5.502	5.704	5.604
	ME	1.382	1.916	0.542	−0.090	−0.674	−0.530	−0.294	−0.307	0.177	0.254	0.196	0.368
	RMSE	7.526	7.745	7.493	7.785	8.395	7.163	7.651	7.151	8.330	7.062	7.533	6.976
	RI/%	−0.400	−3.400		−3.900	−12.000	4.400	−2.100	4.600	−11.200	5.700	−0.500	6.900
海沟	MAE	16.346	17.184	15.336	16.285	16.160	15.328	15.605	14.848				
	ME	1.825	−2.383	2.076	−1.052	1.708	0.937	1.312	1.140				
	RMSE	21.364	21.446	19.600	20.436	20.484	19.466	19.767	19.264				
	RI/%	−9.000	−9.400		−4.300	−4.500	0.700	−0.900	1.700				

4 讨论

通过对比 AP 空间分布图和模拟精度评价指标,我们发现反距离权重法和径向基函数法制图效果较差,存在明显的斑块效应,同时,两种方法的各项验证指标均处于最低水平,研究表明,反距离权重法仅可在样点密度大且地形起伏较小的情况下适用,最好用于较小区域的栅格化,不宜在较大范围内进行插值^[22],径向基函数多适用于样本数目较多且变化平缓的数据^[23],Shen 等^[21]比较不同空间插值方法对黑土区土壤全磷模拟精度的影响,研究表明当样点空间分布不规则或均匀度较低时径向基函数会产生精确的插值结果。因此,反距离权重法和径向基函数法需在特殊情况下才可能应用并提高黑土区小流域土壤 AP 的空间模拟精度。

普通克里格方法利用采样点数据和半方差函数的结构性,对未采样点的区域化变量进行最优无偏估值,已被广泛应用于土壤养分空间异质性分析研究^[1]。本研究中,所选择研究区样点均匀度或样点密度均较高,满足普通克里格插值方法需要,其模拟精度仅次于回归克里格和地理加权回归克里格方法。

地理加权回归模型是一种局部回归模型,可用于处理目标变量与解释变量之间的空间非平稳回归系数^[14-15]。本研究中,地理加权回归模型模拟精度低于普通克里格方法,这可能是由于经逐步线性回归剔除后可用于建模的环境变量较少,回归模型拟合精度较低。Wang 等^[13]比较了地理加权回归模型对土壤有机质和全氮模拟精度的影响,结果表明地理加权回归模型能够有效提高土壤有机质的模拟精度,但是由于环境变量数据不详且未能解释所有相关变量之间的自相关和互相关而导致该方法对全氮模拟精度较差^[24]。本研究已提取相关环境变量达 30 个,但并未进一步提高回归模型精度,这与 Shen 等^[21]在黑土区土壤全磷空间模拟精度研究结果一致。此外,比较不

同研究区回归分析结果,并未发现共同的环境变量用于 AP 建模。因此,有关如何进一步提高黑土区土壤磷素与环境变量之间的回归模型拟合精度的问题需进一步探讨。研究表明,样点密度会影响空间插值方法对土壤属性法的模拟精度^[19],但本研究发现,当样点均匀度相似且高于 45%时,样点密度和采样距离对 AP 模拟精度无显著影响。

回归克里格和地理加权回归克里格已经逐渐成为土壤属性空间预测的优秀空间统计方法,大量研究表明辅助变量的引入和残差空间自相关的结合能够有效提高土壤属性的空间预测精度^[9-10,16-19],本研究表明,在不同尺度和景观格局下,回归克里格和地理加权回归克里格各项验证指标均优于普通克里格插值方法,插值结果也能够反映更多的空间信息,其中考虑了空间非平稳性的地理加权回归克里格方法可以作为黑土区小流域土壤 AP 空间预测的最优插值方法。此外,我们发现引入主成分分析结果能够有效提高回归克里格方法和地理加权回归克里格方法的模拟精度,因此,当辅助变量充足且变量间存在多重共线性时,可以引入主成分分析以进一步提高空间插值方法的模拟精度。

5 结论

通过引入地形等环境因子建立的回归克里格、地理加权回归克里格方法较传统空间插值方法能在一定程度上提高黑土小流域土壤 AP 的空间模拟精度,将主成分分析结果与上述方法相结合能够进一步提高模拟效果。其中,地理加权回归克里格方法模拟效果最优,可作为黑土小流域土壤 AP 空间分布模拟的主要方法。本研究选取的辅助变量以地形和植被覆盖等环境因子为主,未能充分考虑与 AP 密切相关的施肥、耕作措施等农田管理因子,可作为提高黑土小流域土壤 AP 空间模拟效果的重要方向。研究结果可为黑土小流域尺度土壤养分精准管控提供技术支撑。

参考文献:

- [1] Zhang S, Huffman T, Zhang X, et al. Spatial distribution of soil nutrient at depth in black soil of Northeast China: a case study of soil available phosphorus and total phosphorus[J]. *Journal of Soil & Sediments*, 2014,14(11):1775-1789.
- [2] Chen M, Chen J, Sun F. Agricultural phosphorus flow and its environmental impacts in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 405(1/3):140-152.
- [3] 张少良,马泉来,周军,等.东北黑土区小流域“林—旱—水”格局土壤磷空间分布特征研究[J].*水利学报*,2016, 47(10):1227-1236.
- [4] Liu Z, Shao M, Wang Y. Spatial patterns of soil total nitrogen and soil total phosphorus across the entire Loess Plateau region of China [J]. *Geoderma*, 2013, 197/198:67-78.
- [5] Wang Y, Zhang X, Huang C. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China[J]. *Geoderma*, 2009,150(1/2):141-149.
- [6] 范铭丰.基于 GIS 的土壤养分空间变异特征及预测方法比较[D].重庆:西南大学,2010.
- [7] Zhang S, Yan L, Huang J, et al. Spatial heterogeneity of soil C : N ratio in a mollisol watershed of northeast China[J]. *Land Degradation & Development*, 2016,27: 295-304.
- [8] Matheron G. Principles of geostatistics[J]. *Economic Geology*, 1963,58(8):1246-1266.
- [9] 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.
- [10] 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):63-75.
- [11] Zhang S, Huang Y, Shen C, et al. Spatial prediction of soil organic matter using terrain indices and categorical variables as auxiliary information [J]. *Geoderma*, 2012,171/172:35-43.
- [12] Kumar S, Lal R, Liu D. A geographically weighted regression kriging approach for mapping soil organic carbon stock[J]. *Geoderma*, 2012, 189/190(6):627-634.
- [13] Wang K, Zhang C, Li W. Comparison of geographically weighted regression and regression kriging for estimating the spatial distribution of soil organic matter [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2012,49(6):915-932.
- [14] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity[J]. *Geographical Analysis*, 1996, 28(4):281-298.
- [15] O'Sullivan D. Geographically weighted regression: The analysis of spatially varying relationships [J]. *Geographical Analysis*, 2003, 35(3):272-275.
- [16] 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.
- [17] 马泉来,高凤杰,张志民,等.我国东北黑土丘陵区小流域土壤有机质空间分布模拟[J].*环境科学研究*,2016, 29(3):382-390.
- [18] Liu Y, Guo L, Jiang Q, et al. Comparing geospatial techniques to predict SOC stocks[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015,148:46-58.
- [19] Ye H, Huang W, Huang S, et al. Effects of different sampling densities on geographically weighted regression kriging for predicting soil organic carbon [J]. *Spatial Statistics*, 2017,20:76-91.
- [20] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [21] Shen Q, Wang Y, Wang X, et al. Comparing interpolation methods to predict soil total phosphorus in the mollisol area of Northeast China [J]. *Catena*, 2019, 174:59-72.
- [22] Lu G Y, Wong D W. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique[J]. *Computers and Geosciences*, 2008, 34(9):1044-1055.
- [23] 杨扬,杨建宇,李绍明,等.玉米生育期空间插值方法比较[J].*农业工程学报*,2009,25(9):163-167.
- [24] Wang K, Zhang C, Li W. Predictive mapping of soil total nitrogen at a regional scale: A comparison between geographically weighted regression and cokriging[J]. *Applied Geography*, 2013,42(8):73-85.