

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2023.01.012

基于回归克里格方法和 sentinel 2B 遥感数据的 澧河流域土壤总磷空间分布信息提取

杨年浩, 周 新*, 唐 志, 潘 洁, 赵明哲, 肖 洁

YANG Nian-Hao, ZHOU Xin*, TANG Zhi, PAN Jie, ZHAO Ming-Zhe, XIAO Jie

湖北省地质局第六地质大队, 湖北孝感 432000

No.6 Geological Brigade, Hubei Geological Bureau, Xiaogan 432000, Hubei, China

摘要: 土壤总磷空间分布是准确掌握流域农业面源污染状况的关键, 而遥感技术因其便利性在土壤面源污染调查中的潜力亟待探索。本文以澧河流域土壤总磷分布为例, 分析了土壤总磷的光谱特性, 发现总磷含量与土壤光谱反射率呈负相关, 其中红外光谱(700~1800nm)表现更加明显; 并以土壤总磷光谱计算数据作为环境辅助因子, 取样点数据作为主要因素, 运用回归克里格地统计方法成功提取了澧河流域土壤总磷空间分布信息, 将结果与实测数据对比, 其ME值为0.08, MAE值为0.48, RMSE值为0.69, 预测精度较协同克里格和反距离权重法有明显提高。本方法既保留了地统计分析方法的精度, 又具备处理高密度样本的能力, 为土壤属性的空间插值提供了一种可行的获取方法。

关键词: 土壤总磷; 空间分布; 回归克里格; 澧河流域

中图分类号: P66; X824

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2023)01-0138-09

Yang N H. Zhou X, Tang Z, Pan J, Zhao M Z and Xiao J. 2023. Spatial Distribution Information Extraction of Soil Total Phosphorus in Huan River Basin Based on Regression Kriging Method and Sentinel 2B Remote Sensing Data. *South China Geology*, 39(1): 138–146.

Abstract: Understanding the spatial distribution of soil total phosphorus in the Huan River basin is the key to accurately grasp the agricultural non-point source pollution in the basin, while remote sensing is expected to work in the pollution as its efficiency. In this paper, the spectral characteristics of soil total phosphorus were analyzed to find out that the total phosphorus content was negatively correlated with soil reflectance spectrum, in which the infrared spectrum (700-1800nm) was more obvious. Taking the spectral calculation data of soil total phosphorus as the environmental auxiliary factor and the data of sampling points as the main elements, the regression Kriging statistical method was used to successfully extract the spatial distribution information of soil total phosphorus in the river basin. Compared the results with the measured data, the ME value is 0.08, MAE value is 0.48 and RMSE value is 0.69. The prediction accuracy of this method is significantly higher than that of the co-Kriging and inverse distance weighting method. This method not only matches the accuracy of the statistical analysis, but also be appropriate to deal with high-density samples, which is a feasible method for getting spatial interpolation of soil properties.

Key words: total soil phosphorus; spatial distribution; regression Kriging; Huan River Basin

收稿日期: 2022-9-30; 修回日期: 2023-2-21

基金项目: 湖北省地质局2020年度科技项目(编号: 2020-622-001-513)

第一作者: 杨年浩(1991—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事地质调查工作, E-mail: 240222470@qq.com

通讯作者: 周新(1969—), 男, 高级工程师, 主要从事地质调查工作, E-mail: 327918444@qq.com

磷是植物生长和富营养化的重要土壤养分指标,也是湖泊河流发生农业面源污染的关键因子(Chien et al.,2012; Lin C et al.,2018;王磊等,2019;鲍波等,2022;段碧辉等,2022;冷智超等,2022)。国内外对高光谱技术提取土壤养分含量的空间分布信息进行了大量的研究,但对土壤总磷含量空间分布信息提取的研究相对较少。

目前土壤总磷含量空间分布信息提取主要采用两种方法,一种是运用地面高光谱数据构建的土壤总磷反演遥感模型(张海威等,2017),然后运用高光谱遥感数据提取空间分布信息,如王磊等(2015)运用HJ-1A超光谱遥感影像数据,结合野外实测样本,通过光谱反射率多种数学变换,利用相关性分析法提取土壤总磷含量的敏感波段及特征波段组合(何文熹等,2019),然后基于多元回归分析方法,建立各种敏感波段组合的土壤总磷光谱诊断模型,筛选最优诊断模型,并基于野外样本开展精度验证,实现耕地土壤总磷含量的空间制图;陈鹏飞等(2008)采用光谱变换技术和偏最小二乘法,对多种土壤类型进行估测,并构建土壤总磷的近红外光谱诊断模型。此方法的优点是不需要海量的样本,只要有限样本建立反演模型便可,缺点是受到土壤上方植被覆盖、土壤属性(土壤类型、颜色、含水量)等因素的影响,其模型计算值与真实值有较大的误差(肖凯琦等,2021)。另一种是基于地统计分析,如王雪珊等(2012)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)对黑土区小流域土壤速效磷空间模拟精度的影响,认为地理加权回归克里格方法精度最高(夏子书等,2020);王燕等(2019)也认为江苏省金坛区土壤有效磷的空间预测采用地理加权回归克里格方法效果最好。这种基于地统计的空间插值法优点是充分考虑了空间要素的关系和环境变量的影响,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、人类活动等进而影响土壤养分空间分布特征(Zhang S et al.,2012; Kumar et al.,2012;周蓓蓓等,2021)。因此,环境变量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(李启权等,2012;陈思明等,2020),其预测结果也接近于观测值,但缺点是需要大量的观测样本,如进行土壤质量地球化学评价时要求样本密度是10点/km²(邹辉等,2020;姜华等,2020;朱鑫等,2021),成本偏高。

澧河流域位于鄂东北,跨淮河、长江两大流域,弄清澧河流域土壤总磷空间分布对区域水生态保护具有研究意义(叶舟,2021;刘太胜等,2021),同时也是准确掌握流域农业面源污染状况的关键(余红兵和戴桂金,2018)。本文以澧河流域为研究对象,探索在分析澧河流域总磷光谱特征的基础上,通过稀疏样本,研究光谱与土壤总磷的关系,以高光谱遥感数据作为环境变量,结合回归克里格模型方法,对澧河流域土壤总磷空间分布信息进行高精度提取。

1 研究区概况

澧河流域位于鄂东北部,跨淮河、长江两大流域,流域面积3601 km²(图1),流域总体地势为北高南低,以丘陵为主。区域气候属于亚热带季风气候,多年平均降雨量1150 mm左右,年平均气温16.2℃,雨量充沛且温度适宜。孝感市环保局近两年发布的地表水逐月环境质量报告显示,澧河流域氮磷元素超地表水Ⅲ类水质标准,存在富营养化风险,澧河流域孝感段上游穿过黄麦岭磷矿区,而中下游主要为人类活动聚集区,受区域地质背景中磷含量较高、上游磷矿开发中非点源扩散以及人类工农业活动等因素的综合影响,该流域污染程度较严重,污染面积大,外源输入大。

2 材料及方法

2.1 土壤样品

本次研究的土壤样品分两次取样,第一次取样集中在澧河中下游及其支流,时间为2020年12月20-28日,共998个取样点,取样位置见图1土壤取样点(地统计),主要用于地统计分析;第二次取样主要集中在整个澧河主河流附近,时间为2021年1月5-9日,共72个取样点,取样位置见图1土壤取样

点(验证),主要用于地统计结果的验证。两次取样和总磷测定按照《耕地质量等级》(GB/T33469-2016)(国家质量监督检验检疫总局和国家标准化委员会,2016)规范执行。

每个样点在取样前,使用FieldSpec 4 Wide-Res Field Spectrum radiometer便携式地物光谱仪进行光谱观测,波谱观测范围为350~2500 nm,波谱间隔为3m@700 nm,30 nm@1400/2100 nm,每个样点选取3个点进行观测(点距1m呈三角形分布),每个观测点重复3次光谱观测;光谱数据预处理运用 ViewSpecPro 软件一次载入一个取样观测数据,将得到的9条光谱曲线,剔除差异较大的2条光谱曲线,运用Statistic功能对剩余光谱曲线进行均值处理,代表该样点的光谱数据,并导出为ASCII格式以供分析。

每个样品磨样后,用FieldSpec 4 Wide-Res Field Spectrum radiometer便携式地物光谱仪进行光谱观测,方法和预处理同野外观测一致。

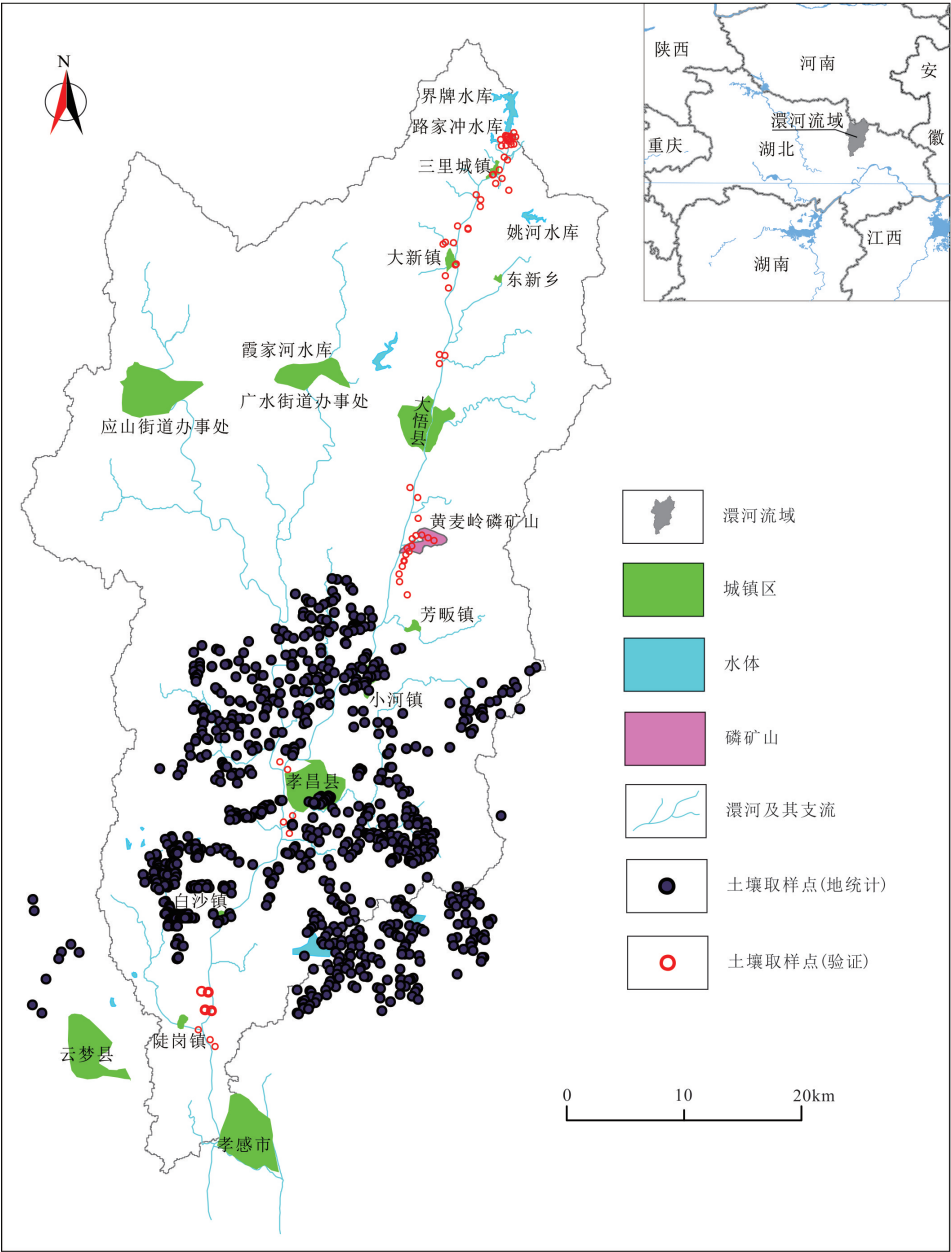


图1 潯河流域位置及土壤取样点分布图

Fig. 1 Location and distribution of soil sampling points in Huan River Basin

2.2 遥感数据预处理

Sentinel 2B 的光谱成像仪具有 12 个波段,幅宽为 290km,其波段信息和空间分辨率见表 1。

从欧空局网站 (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>) 上下载 2021 年 1 月 12 日澧河流域的 Sentinel 2B 遥感数据,同时下载欧空局针对哨兵 2 号数据预处理专门开发的 Sen2Cor 插件进行辐射定标和大气校正(代富强等,2014),最后在 Snap 软件中将遥感数据导出成空间分辨率为 20m 的 tif 格式遥感数据。

表 1 Sentinel-2B 波段信息

Table 1 Sentinel-2B band information

波段	中心波长 /nm	波段宽度 /nm	空间分辨率 /m
波段 1 海岸波段	442.3	45	60
波段 2 蓝波段	492.1	98	10
波段 3 绿波段	559.0	46	10
波段 4 红边波段	665.0	39	10
波段 5 植被红边 1 波段	703.8	20	20
波段 6 植被红边 2 波段	739.1	18	20
波段 8 近红外波段	833.0	133	10
波段 8a 近红外波段	864.0	32	20
波段 9 水汽波段	943.2	27	60
波段 10 卷云波段	1376.9	76	60
波段 11 短波红外 1	1610.4	141	20
波段 12 短波红外 2	2185.7	238	20

2.3 回归克里格法

回归克里格法是一种将多元线性回归与普通克里格相结合后用于空间预测的一种混合插值法(Hengl et al., 2007),该方法利用环境变量(如地形和 NDVI 指数等)作为辅助信息来增强土壤信息预测精度的同时,克服了普通克里格应用于地形复杂地区的局限性问题(Zhu Q and Lin H S, 2010),因而在土壤属性空间预测领域中得到了广泛应用,其计算公式为:

$$f(x) = m(x) + \varepsilon(x) \quad (1)$$

式中: $f(x)$ 为土壤总磷在点 x 处的模拟值; $m(x)$ 为用普通最小二乘法拟合的趋势项; $\varepsilon(x)$ 为用普通克里格法插值的残差项。

在 ARCMAP 中将带经纬度的样本位置数据导

入成点状要素,然后运用坐标转换功能将 WGS84 地理坐标转成 UTM 投影坐标,加载预处理后 Sentinel 2B 遥感数据,将室内实测光谱数据连同土壤总磷数据导出到 SPSS 软件中,进行逐步多元线性回归,得到回归方程,最后在 ARCMAP 中的栅格计算器中对该回归方程进行计算,得到 $m(x)$ 趋势项,运用 GS+ 软件对残差进行半方差分析,通过合理设置步长、选取拟合模型等操作得到残差的半方差模型,然后对残差部分进行普通克里格插值得到残差空间分布;最后进行栅格计算,得到回归克里格插值结果。

2.4 地统计方法预测结果评价方法

为比较反距离权重方法、协同克里格方法、回归克里格方法的插值精度,运用验证集中 998 个样点的测量值与估计值进行精度评价,相应的评价指标及其公式如下:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z(x_i) - z^*(x_i)) \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z(x_i) - z^*(x_i)| \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z(x_i) - z^*(x_i))^2} \quad (4)$$

式中: n 为验证点个数; $z(x_i)$ 为第 i 个验证点的测量值; $z^*(x_i)$ 为第 i 个验证点的模拟值; ME 是插值无偏性的量度,其值越接近 0 说明结果越无偏差; MAE 和 RMSE 是插值精度的量度,其值越小则说明插值方法越精确。

3 结果与分析

3.1 土壤总磷光谱特征分析

分析 1070 个土壤样品在室内与野外不同条件下, 350~2500 nm 的波谱范围内以 1 nm 为波长的波段土壤反射率,分别与室内、野外条件下样品测得的总磷含量做相关分析,得到每个波长反射率与总磷含量的相关系数,绘制土壤磷含量与室内、野外土壤反射光谱的相关系数曲线(图 2)。由图可知,室内条件下土壤总磷含量与土壤反射光谱呈负相关,即土壤反射率越高,其土壤总磷含量越低,其中红外光谱(700~1800 nm)更加明显,其相关系数达到 -0.3。野外条件下土壤观测由于受其它环境要素的影响,相关性较差,但曲线形状与室内条件下曲

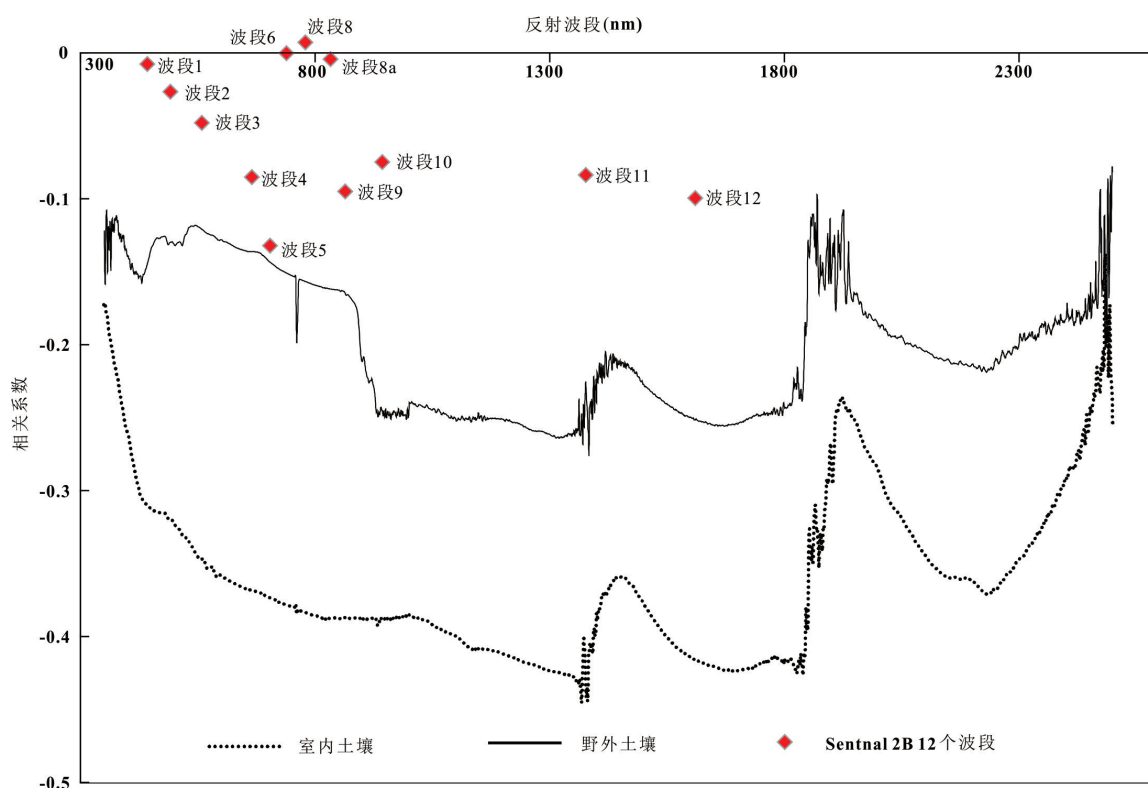


图2 土壤磷与室内、野外、Sentinal 2B 12个波段反射光谱的相关系数曲线

Fig. 2 Correlation coefficient curves of soil phosphorus and soil reflectance spectra of remote sensing data in 12 bands of indoor, field and Sentinel 2B

线基本相似。因此,700~1800 nm 光谱为提取土壤总磷含量最佳波段。

采用同样的方法将2021年01月12日澧河流域的Sentinal 2B 12个波段的遥感数据与土壤总磷做相关分析,发现其相关系数大部分为负数,与室内和野外得到的结果一样,只是其相关系数更低,因此,用Sentinal 2B 遥感数据提取土壤总磷含量是可行的。

3.2 基于Sentinal 2B 遥感数据的澧河流域土壤总磷计算模型的构建

将998个取样点总磷观测数据作为因变量,每个样品对应的12个波段反射率数据为自变量,进行逐步回归(因子引入F值为3.83,因子剔除F值为2.71),根据各波段的显著性,最后引入了3个波段(波段5,9,10),回归方程为:

$$y = 1.0653 - 4.0427 \times 10^{-4} \times B_5 + 6.9852 \times 10^{-5} \times B_9 + 1.606 \times 10^{-4} \times B_{10} \quad (5)$$

式中: B_5 、 B_9 、 B_{10} 分别表示波段5,9,10的反射率。

计算公式 $F_{(1,1067)} = 6.7 > F_{0.01}$, 表示数据间达到极显著水平,结论可靠。

利用ARCMAP的栅格计算器,用三个波段数据便能计算出空间分辨率为20米的澧河流域土壤总磷,其空间分布见图3。

土壤有效磷含量在空间分布上往往表现出明显的异质性,不同区域其空间分布特征及其影响因素也存在差异(贾玉华等和邵明安,2014)。将研究区72个验证样点的观测值与预测值比较,其ME值为1.69,MAE为1.77, RMSE值为7.98,尽管有一定误差,但仍能反映其空间分布的差异,可以看出:在澧河流域西北部和中东部地区土壤总磷含量大,其他地区含量小。

3.3 基于回归克里格地统计方法的土壤总磷空间分布信息提取

尽管运用Sentinal 2B 遥感数据计算公式有较大误差,但土壤总磷分布差异在遥感数据上还是有所表现的,因此可将Sentinal 2B 遥感数据作为环境

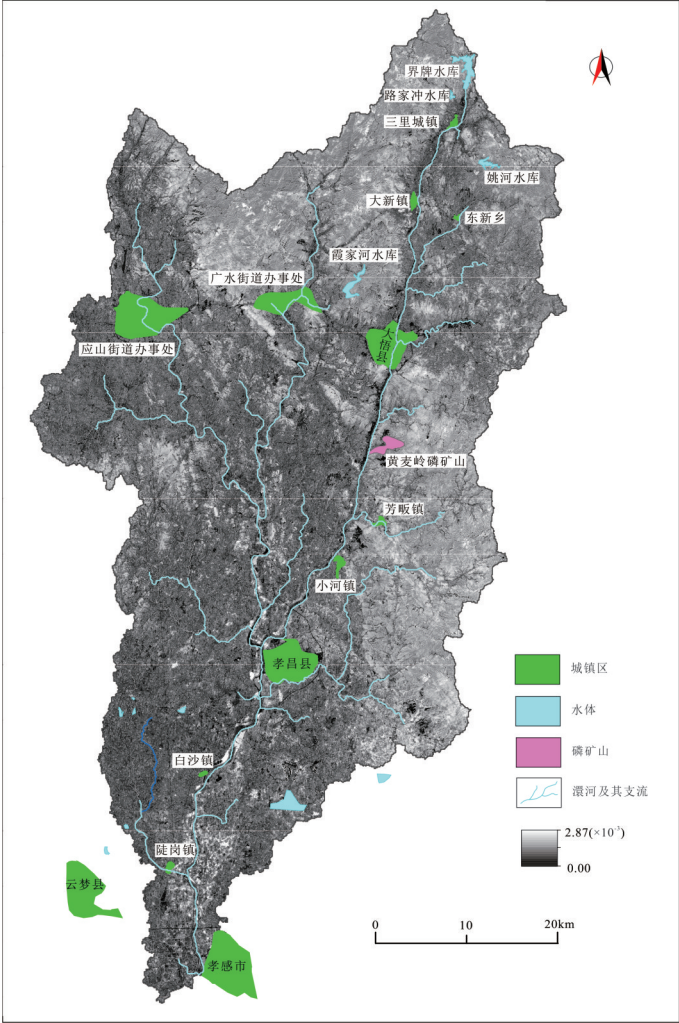


图3 基于Sentinal 2B遥感数据计算的澧河流域土壤总磷空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of soil total phosphorus in the Huan River Basin calculated based on Sentinal 2B remote sensing data

因子,也就是利用公式(5)计算的澧河流域土壤总磷空间分布数据相当于公式1中的 m 值,再用普通克里格地统计方法,在998个取样点总磷观测数据支持下,计算出公式1中的 ε 值,得到基于回归克里格地统计方法的土壤总磷空间分布信息(图4A);同时运用Sentinal 2B遥感数据作为协相关因子,将998个取样点总磷观测数据作为主要数据,运用协同克里格方法,得到土壤总磷空间分布信息(图4B);最后再用998个取样点总磷观测数据采用反距离权重法,得到土壤总磷空间分布信息(图4C)。

将72个验证样点的观测值与预测值进行对比(图5),其ME值、MAE值和RMSE值见表2。可以

看出,回归克里格法相关系数($R^2=0.9529$)最接近1,且它的ME值在三种方法中最接近0,MAE和RMSE值也最小,其插值的精确性最高。因此,回归克里格法预测的结果最优,其次是协同克里格法,最差的是反距离权重法,究其原因回归克里格法和协同克里格法虽然都用Sentinal 2B遥感数据作为协相关因子,但回归克里格法用的是面状数据,而协同克里格法用的是点状数据,信息损失量大。由此可知,使用Sentinal 2B遥感数据,加上有限取样点的观测数据,利用地学变量间的合理相关性及克里格方法的无偏性和最优性,可以给出稀疏资料变量可靠、合理的估计(鲁程鹏等,2009)。合理利用多源辅助数据有利于提升和改进回归克里格模型

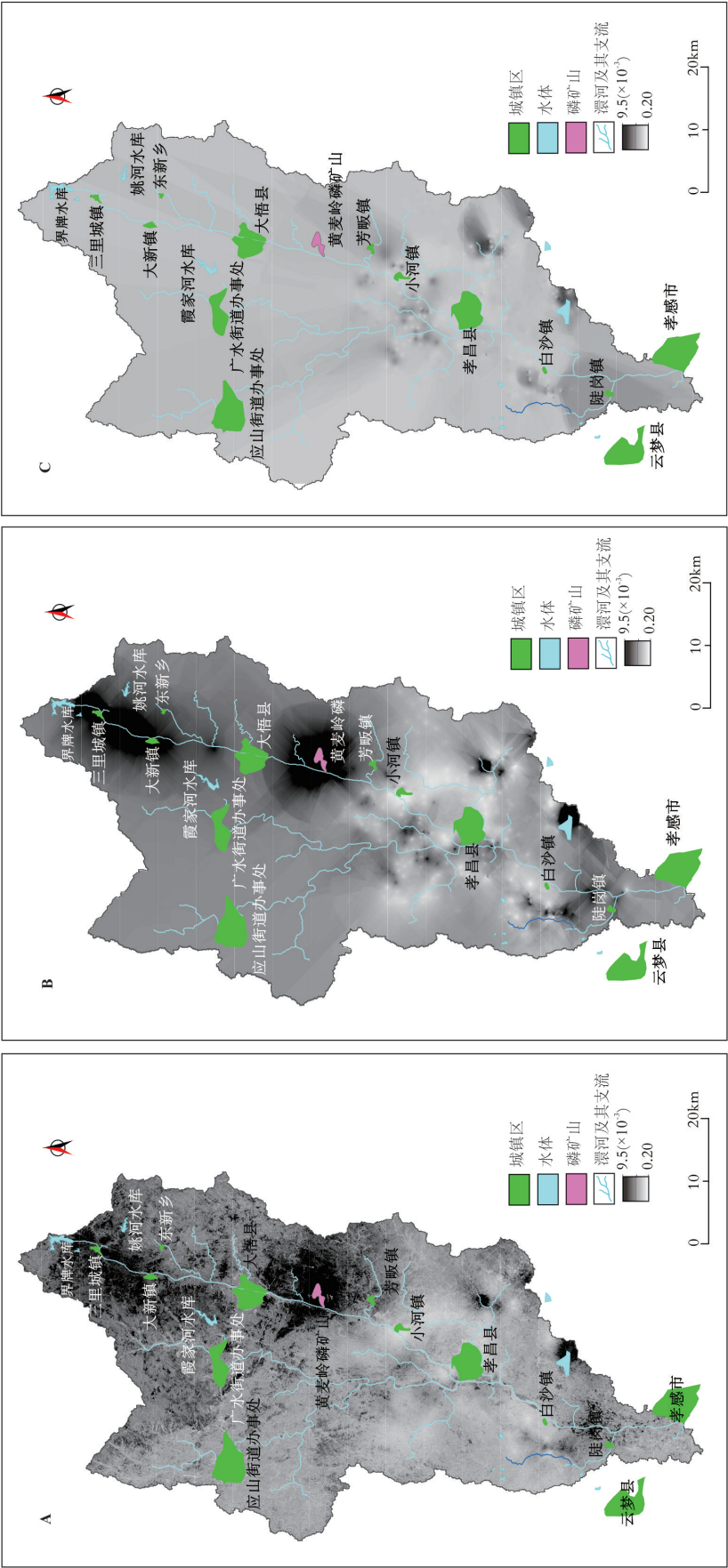


图4 基于回归克里格法(A)、协同克里格法(B)和反距离权重法(C)提取的潞河流域土壤总磷空间分布图
Fig. 4 Spatial distribution of soil total phosphorus in the Huan River basin extracted based on regression Kriging (A), cooperative Kriging (B) and inverse distance weight method (C)

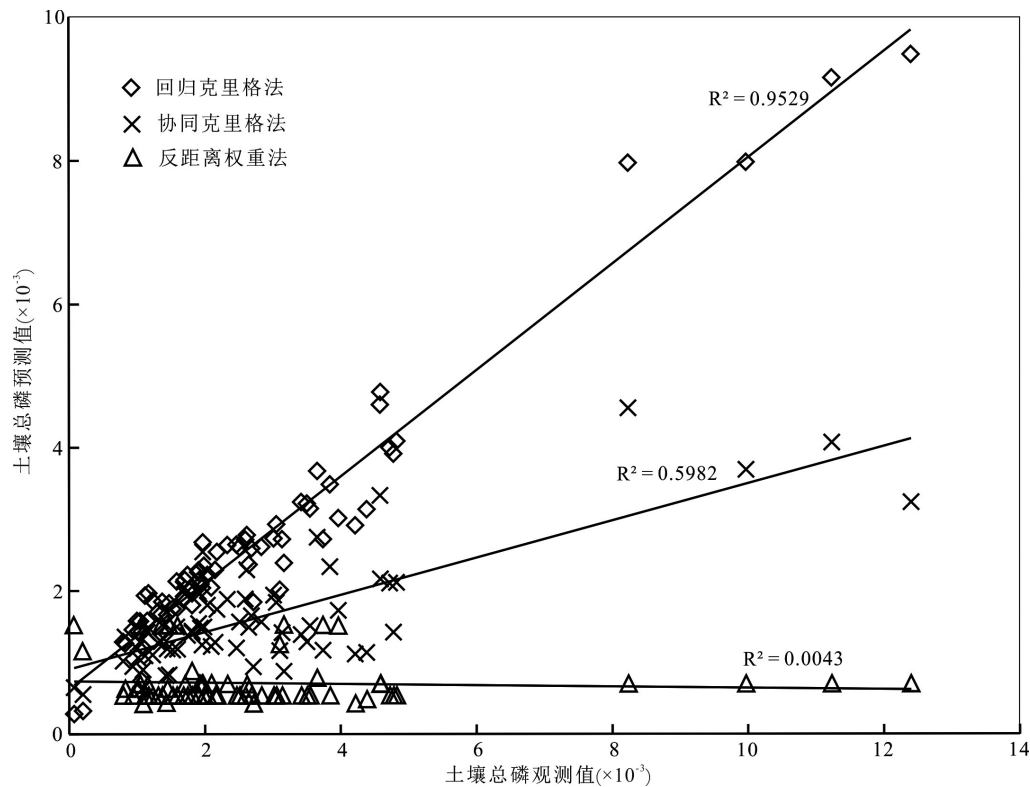


图5 三种地统计方法土壤总磷观测值与预测值对比

Fig.5 Comparison of predicted and observed values of the three geostatistical methods

预测效果(高中原等,2021),采用回归克里格地统计法能够获得比较准确的澧河流域土壤总磷空间分布信息。

表 2 地统计方法预测结果评价
Tab. 2 Evaluation of prediction results by geostatistical methods

评价参数	ME 值	MAE 值	RMSE 值
回归克里格	0.08	0.48	0.69
协同克里格	1.14	1.25	2.06
反距离权重法	2.04	2.13	3.06

4 结语

澧河流域土壤总磷的空间分布差异在光谱上有明显的反映,总磷含量与土壤光谱反射率呈负相关,即土壤光谱反射率越高,其土壤总磷含量越低,其中红外光谱(700~1800 nm)表现最为明显。Sentinal 2B 遥感数据用波段 5、9、10 反射率可以计算土壤磷的含量,但存在一定误差。若将 Sentinal 2B 遥

感数据作为环境辅助数据,加上有限取样点的观测数据,采用回归克里格地统计法能够获得在澧河流域西北部和中东部地区土壤总磷含量大,其他地区土壤总磷含量小的土壤总磷空间分布信息。

基于 Sentinal 2B 遥感数据和回归克里格地统计法提取土壤总磷空间分布信息的优点是既保留了地统计分析方法的精度,又满足了高密度样本的需求,为土壤属性的空间插值提供了一种可行的方法。需要注意的是获取 Sentinal 2B 遥感数据应尽量选择土壤表层植物稀疏的冬季时段,另外野外取样点分布要尽可能均匀。

参考文献:

鲍波,雷天赐,姜 华,徐宏林,王 磊,郝志红.2022.广西南明县海渊镇土地质量地球化学评价[J].华南地质,38(4): 669-679.
陈鹏飞,刘良云,王纪华,沈 涛,陆安祥,赵春江.2008.近红外光谱技术实时测定土壤中总氮及磷含量的初步研究[J].光谱学与光谱分析,28(2):295-298.
陈思明,王 宁,秦艳芳,张红月.2020.基于特征变量与支持向

- 量机回归克里格(SVRK)法的湿地土壤有机质空间变异特征分析[J].土壤,52(6):1298-1305.
- 代富强,周启刚,刘刚才.2014.基于回归克里格和遥感的紫色土区土壤有机质含量空间预测[J].土壤通报,45(3):562-567.
- 段碧辉,孙奥,王芳,夏伟,李春诚,邹辉,项剑桥,杨军.2022.荆门市耕地不同土壤类型养分含量特征及肥力评价[J].资源环境与工程,36(6):802-807.
- 高中原,肖荣波,王鹏,邓一荣,戴伟杰,刘楚藩.2021.融合自然-人为因子改进回归克里格对土壤镉空间分布预测[J].环境科学,42(1):343-352.
- 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.2016.中华人民共和国国家标准:耕地质量等级(GB/T 33469-2016)[S].北京:中国标准出版社.
- 何文熹,王磊,杨玉龙.2019.基于Landsat 8影像赤壁-嘉鱼地区岩性划分效果分析[J].华南地质,35(2):261-269.
- 贾玉华,邵明安.2014.黄土区撂荒地土壤全磷的小尺度空间变异研究[J].土壤通报,45(1):116-122.
- 姜华,雷天赐,鲍波,徐宏林,李梦茹.2020.广西贵港市大安镇土地质量地球化学评价[J].华南地质,(3):254-262.
- 冷智超,杜尧,陶艳秋,黄艳雯,邓娅敏.2022.长江中游沿岸地下水中铵氮与磷的共存规律及其控制因素[J].地质科技通报,41(1):300-308.
- 李启权,王昌全,岳天祥,张文江,余勇.2012.基于神经网络模型的中国表层土壤有机质空间分布模拟方法[J].地球科学进展,27(2):175-184.
- 刘太胜,姜云林,陆尧,邓瀚镏,赵蒙蒙.2021.珠江口海域沉积物中总氮总磷的空间分布特征[J].广东化工,48(16):148-149.
- 鲁程鹏,束龙仓,张颖,王勇.2009.稀疏数据插值问题的回归克里格方法[J].水电能源科学,27(1):81-84.
- 王磊,顾晓鹤,王宝山,王延仓,陈艳玲,高林.2015.基于HJ-1A超光谱影像的县域尺度耕地土壤速效磷含量遥感制图研究[J].土壤通报,46(6):1314-1320.
- 王磊,章昱,徐帅,伏永朋.2019.丹江口水库总磷浓度遥感反演及其时空特征研究[J].华南地质,35(4):449-456.
- 王燕,瞿明凯,陈剑,杨兰芳,黄标,赵永存.2019.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,39(1):249-256.
- 王雪珊,沈庆松,高凤杰,张兴义,张少良,王力.2012.黑土区小流域土壤速效磷空间分布模拟方法[J].水土保持研究,28(2):33-40.
- 夏子书,白一茹,包维斌,钟艳霞,王幼奇.2020.基于多光谱和地理加权回归模型的石嘴山城市土壤有机碳空间分布研究[J].干旱区地理,43(05):1348-1357.
- 肖凯琦,董好刚,郭军,李毅,陈彪.2021.湖南省汨罗市耕地土壤养分空间变异特征研究[J].华南地质,37(4):369-376.
- 叶舟.2021.人为扰动情形下城郊溪流沉积物磷形态及污染特征分析[J].绍兴文理学院学报(自然科学),41(2):57-62.
- 余红兵,戴桂金.2018.氮磷面源污染在沟渠中的迁移转化机理[J].南方农业,12(31):103-105.
- 张海威,张飞,李哲,阿依努尔·玉山江,陈芸.2017.艾比湖流域地表水水体悬浮物、总氮与总磷光谱诊断及空间分布特征[J].生态环境学报,26(6):1042-1050.
- 周蓓蓓,郭江,陈晓鹏,杨强,朱红艳,段曼莉,李晓晴,周德华,杨扬.2021.基于UNMIX模型的安徽大矾山废弃矿区土壤重金属源解析[J].农业工程学报,37(24):240-248.
- 朱鑫,汪实,李婷婷.2021.雷州半岛土壤地球化学背景值研究[J].华南地质,37(1):103-112.
- 邹辉,王卉,项剑桥,杨军,段碧辉,王天一,徐春燕,赵敏,潘飞.2020.不同采样密度与空间插值方法对江汉平原典型区土壤质量地球化学评价结果的影响[J].资源环境与工程,34(S1):21-27.
- Chien S H, Sikora F J, Gilkes R J, McLaughlin M J. 2012. Comparing of the difference and balance methods to calculate percent recovery of fertilizer phosphorus applied to soils: a critical discussion [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 92(1):1-8.
- Hengl T, Heuvelink G B M, Rossiter D G. 2007. About regression-kriging: From equations to case studies[J]. Computers & Geosciences, 33(10): 1301-1315.
- Kumar S, Lal R, Liu D S. 2012. A geographically weighted regression kriging approach for mapping soil organic carbon stock [J]. Geoderma, 189-190(6):627-634.
- Lin C, Ma R H, Xiong J F. 2018. Can the watershed non-point phosphorus pollution be interpreted by critical soil properties? A new insight of different soil P states [J]. Science of the Total Environment, 628-629: 870-881.
- Zhang S W, Huang Y F, Shen C Y, Ye H C, Du Y C. 2012. Spatial prediction of soil organic matter using terrain indices and categorical variables as auxiliary information[J]. Geoderma, 171-172:35-43.
- Zhu Q, Lin H S. 2010. Comparing Ordinary Kriging and Regression Kriging for Soil Properties in Contrasting Landscapes[J]. Pedosphere, 20(5):594-606.