

李小曼,徐梦洁,刘 勤,等. 小尺度区域重金属含量空间插值方法比较——以 Hg 元素为例[J]. 江苏农业科学,2015,43(12):426-430.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.12.131

# 小尺度区域重金属含量空间插值方法比较 ——以 Hg 元素为例

李小曼<sup>1,2</sup>, 徐梦洁<sup>1</sup>, 刘 勤<sup>2</sup>, 庄舜尧<sup>2</sup>

(1. 南京农业大学公共管理学院, 江苏南京 210095; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏南京 210008)

**摘要:**以江苏省常熟市杨园集镇为例,在小尺度下探讨了普通克里金法(OK)、反距离权重法(IDW)、局部多项式法(LP)、径向基函数法(RBF)、克里金法 6 种模型的插值精度、效果以及对土壤 Hg 含量污染空间分布模拟结果的影响。结果表明:各种插值方法的精度、效果各异。其中,RBF 的 MQ 方法充分地反映了整体趋势、局部趋势,平滑性好,生成图像逼真,插值误差较低,因此为最优模型。克里金插值方法精度较高,并能反映变化的方向、主导因素。其中,OK 方法中去除二次趋势的 JB 模型效果也较好,能较强地反映随机性因素,但反映各向异性的能力较弱。

**关键词:**小尺度;土壤重金属;Hg 元素;空间插值;精度评价

**中图分类号:** X144 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)12-0426-05

我国受重金属污染的土壤范围广、面积大,准确描述土壤重金属空间分布可以有效防治土壤重金属污染。目前,受采样技术、成本的限制,难以测得连续曲面的重金属污染土壤含量,因此很多学者运用离散点模拟连续曲面的空间插值方法对土壤重金属污染进行评价。土壤污染评价合理性及环境制图的真实性和在一定程度上都依赖于空间插值的精确性。空间插值方法的选择、模型精度及其验证是土壤重金属空间插值必须考虑的因素<sup>[1]</sup>。目前,克里金方法(kriging)是研究土壤重金属空间变异性的主要方法<sup>[2-4]</sup>。除此之外,部分学者采用确定性插值方法研究土壤重金属空间变异性<sup>[5-6]</sup>,但大多

数研究者采用单一插值方法。对于比较空间插值方法来说,数据一般是不同类型的地理要素,有着不同的规律、特点,学者们对数据处理方法不一致,对污染模拟要求不一致,数据验证方法也不一致,因而对于插值方法精度孰高孰低结论不一。以前人研究较多的反距离权重、克里金以及样条函数插值为例,部分学者研究发现,克里金的效果优于反距离权重<sup>[7-8]</sup>和样条函数<sup>[9]</sup>,而另一部分学者得出的结论却截然相反<sup>[10-13]</sup>。因此,对于特定的研究区域比较不同的插值模型,选取精度较高,最合适的方法进行插值分析是很有必要的。江苏省苏南地区是我国经济最为发达、城镇化程度最高的地区之一,但其土壤问题十分严峻。由于土壤重金属不易迁移,影响范围扩大的可能性较小,且为了方便实地验证插值效果,本研究以小尺度区域——苏南地区常熟市杨园集镇为研究对象,选择服从正态分布且具有不同趋势效应的重金属 Hg 为例,分别应用多种空间插值方法进行拟合,并对各种方法的精度、效果进行比较,选出最适插值方法,旨在为准确反映村镇土壤 Hg 含量空间分布特征提供依据。

收稿日期:2015-02-03

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2012BAJ24B06)。

作者简介:李小曼(1990—),硕士研究生,从事土壤信息系统、土地信息系统研究。E-mail: xiaoman421@foxmail.com。

通信作者:徐梦洁,副教授,硕士生导师,从事区域经济与可持续发展、地理信息系统研究。Tel: (025) 84395700。E-mail: xmj@njau.edu.cn。

纤维素、半纤维素含量相关,泥炭微波预处理可部分降解纤维素、半纤维素、木质素,同时使灰分含量上升。

## 3 结论

本研究表明,微波预处理泥炭的最佳预处理条件为微波功率 119 W、处理时间 2 min、固液比 1:4.5、原料颗粒度 40 目。该条件下,泥炭预处理后还原糖含量达到 0.193%。微波预处理能够降解泥炭 2.19% 纤维素和 1.24% 半纤维素。微波预处理为泥炭的生化转化提供了可行的预处理方法。本研究为泥炭生化转化为生物甲烷提供了参考,但泥炭预处理及组合预处理方法有待进一步研究。

## 参考文献:

[1] Glenn B S, Anupma P, Soko E V. Coal and peat fires: a global

perspective; volume 1: coal - geology and combustion [M]. Elsevier Science, 2010: 6-7.

[2] 马力通,李 珺. 内蒙古地区泥炭资源与利用[J]. 内蒙古石油化工,2014(8):33-35.

[3] 李 珺,马力通. 草本泥炭及其成炭植物[J]. 广东化工,2015,42(2):72-73.

[4] 张 英,王晓波,李 谨,等. 不同类型有机质生物产甲烷模拟实验研究[J]. 石油实验地质,2009,36(6):633-636.

[5] Van Soest P J. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. II. A rapid method for the determination of fiber and lignin[J]. Journal of the Association of Official Agricultural Chemists, 1963, 46(5): 829-835.

[6] Jackowiak D, Bassard D, Pauss A, et al. Optimisation of a microwave pretreatment of wheat straw for methane production[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(12): 6750-6756.

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

杨园镇位于常熟市西南地区,属亚热带季风气候,依托苏虞张公路、锡太公路的地理优势,发展工业、苗木种植业、水产养殖业、农业观光旅游业。根据研究区特点,以 500 m 格网布

点并在乡镇企业周边采取加密布点的方式进行土壤表层(0~20 cm)的实地采样,采用 GB/T 22105.1—2008《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 1 部分:土壤中总汞的测定》对 Hg 含量进行测定,剔除不可替代的错误数据,共有 90 个点的插值基础数据(图 1),其中 100 个作为插值数据,20 个作为检验数据。

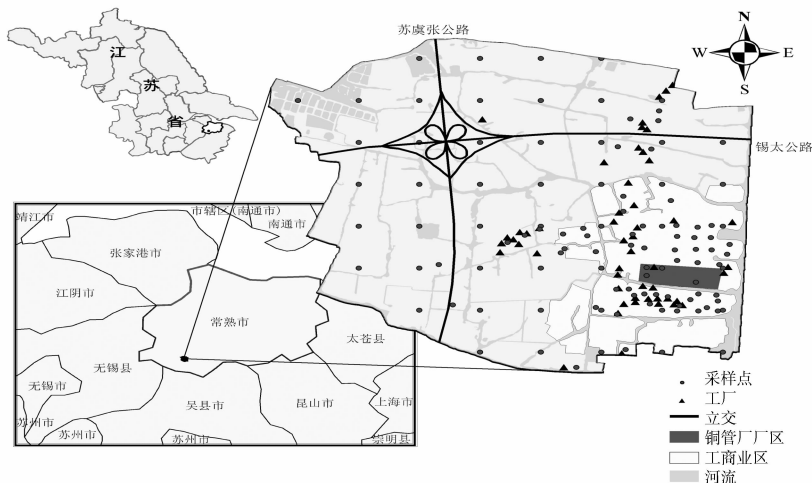


图1 土壤重金属取样点分布

### 1.2 空间插值方法

**1.2.1 克里金插值** 克里金插值是目前地质统计学中应用最广泛的插值方法,它以变异函数理论、结构分析为基础,在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计的 1 种方法。克里金法有许多种,本研究选择最为常用的普通克里金法(ordinary kriging, OK)进行插值,拟合时选取的变异函数模型为球状模型(spherical, SPH)、高斯模型(gaussian, GS)、指数模型(EXP)、孔穴效应模型(hole effect, HE)、K-贝塞尔函数模型(K-Bessel, KB)、J-贝塞尔函数模型(J-Bessel, JB)。不同变异函数模型拟合不同污染分布规律,曲线愈陡峭,预测过程中此点的预测将愈受最邻近单元的影响,因此,输出的表面较不光滑。克里金法可以通过变异函数的块金值(nugget)、变程(range)、基台值(sill)、偏基台值(partial sill)反映空间变异性程度。块金值与基台值之比称为块金效应。比值越大随机性,变异越强,结构性变异越弱,大于 75% 时,表示人为因素(工业、农业活动)较之自然因素(母质、气候、水文、地形)更具主导型<sup>[14]</sup>。各向异性比为大于 1 的实数,反映土壤重金属主要变异过程的变化,比值越大则各向异性越显著。

**1.2.2 确定性插值** 确定性插值方法是基于各个样点之间的相似性或者整个曲面的光滑性拟合形成的曲面,它与克里金法最大的不同之处在于样点处插值后的值与实际值一致,但却无法如克里金法那样描述预测值在一定概率内的合理性。反距离权重法(inverse distance weighted, IDW)是常用的方法之一,该方法认为与未采样点距离最近的若干个点对未采样点值的贡献最大,其贡献与距离成反比<sup>[15]</sup>。局部多项式法(local polynomial, 以下简称 LP)是将全局多项式方法和移动平均过程结合起来的内插方法,它是对插值对象给定搜索领域内所有点插值出适当特定阶数的多项式。径向基函数法(radial basis function, RBF)为某种沿径向对称的标量函数法,它是 1 种新型向神经网络,相对于传统的 BP 神经网络,

其具有计算格式简单、无需假设条件、计算量小、精度相对较高等特点,与克里金法类似,但没有变异函数分析功能。常见的径向基函数有完全规则样条函数(completely regularized spline)、高次曲面函数(Multiquadric)、薄板样条函数(Thin Plate Spline)、张力样条函数(Spline with tension)、逆多元二次函数(inverse multiquadric)径向基函数。

### 1.3 精度及效果评价

空间插值的精度及预测值的效果检验一般都采用交叉验证法进行。交叉验证法是采用周围样点值估计采样点值,再与采样点实测值进行比较计算误差,根据误差结果验证精度。本研究选用平均误差(ME)、均方根误差(RMSE)、平均相对误差(MRE)的和来预测精度。其中 MRE 可以克服量纲的影响,ME 越接近于 0, RMSE、MRE 越小,插值的精度越高<sup>[16]</sup>。

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P'(x_i) - P(x_i)]; \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [P'(x_i) - P(x_i)]^2}; \quad (2)$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P'(x_i) - P(x_i) / P'(x_i)|. \quad (3)$$

式中:  $P'(x_i)$  为预测值,  $P(x_i)$  为原始采样值。

插值效果的评价主要从插值图像来看,如在一定的比例尺下,局部趋势和整体趋势反映是否适中,有没有忽略极值或夸大极值的影响范围等。真实性评判主要通过验证样点值与估计值的接近程度以及实地考察附近污染源分布情况进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 克里金法

**2.1.1 不同趋势比较** 由图 2 可知,杨园镇土壤重金属 Hg 含量不具有明显的趋势效应,东西向有微弱的倒“U”型趋势,从西向东先减少后增加。南北向有微弱的线性趋势,从北向

南逐渐降低。为比较不同趋势对插值精度的影响,采用 OK 法,以 GS、EXP 模型为例,选择 0(无趋势)、1 阶(线性)、2 阶(二阶多项式)进行拟合,计算预测误差发现,ME 最接近 0。MRE 最小的是 0 趋势,其次是 1 次(GS)或 2 次趋势(EXP)。RMSE 最小的是 2 次趋势,其次是 0 趋势。总之,0 趋势、2 次趋势插值精度最高,1 次趋势其次,说明趋势较为微弱,可以忽略不计,这与前面趋势分析结果一致。

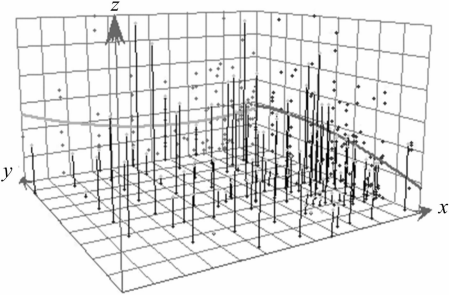


图2 土壤 Hg 含量趋势效应(单位: mg/kg)

2.1.2 不同变异函数模型的精度比较 为了比较不同变异函数模型对插值精度的影响,都选择 OK 法,以 0 趋势为例,计算 6 种模型插值精度。由表 1 可知,0 趋势中 JB 有 2 个指标预测误差值最小,EXP 虽然 ME 最接近 0,但是其他 2 个指标误差都最高,故 JB 精度较高。

表 1 不同变异函数模型 Hg 含量插值误差的比较

趋势参数	理论模型	预测误差		
		ME	RMSE	MRE
0	SPH	0.003	0.681	0.662
	GS	0.008	0.673	0.635
	EXP	-0.000	0.687	0.687
	HE	0.006	0.672	0.638
	KB	0.009	0.674	0.637
	JB	0.014	0.669	0.633

从变异函数的基本参数来看(表 2),块金效应均在 25% ~ 75% 之间,空间相关性中等,随机性变异、结构性变异强度大致相当,变化范围为 50.19% ~ 73.75%,并且随着趋势次数的增高呈现递增趋势。以精度较高的 2 次趋势为例,块金效应由高到低顺序为:JB > HE > GS > KB > SPH > EXP。其中 JB 模型中人为因素引起的变异较明显,而 EXP 较弱。

表 2 不同变异函数模型及其相关参数比较

趋势参数	理论模型	块金值	基台值	块金效应(%)	各向异性比	主导方位角
2	SPH	0.302	0.449	67.1	2.033	318.1°
	GS	0.323	0.454	71.1	2.474	319.4°
	EXP	0.269	0.446	60.3	2.228	319.1°
	HE	0.314	0.428	73.4	1.502	85.2°
	KB	0.321	0.453	70.8	2.423	319.2°
	JB	0.308	0.418	73.8	1.380	78.2°

从各向异性来看,由于各向异性比都远大于 1,说明 Hg 含量的空间分布具有显著的各向异性。各模型各向异性比由高到低顺序为:GS > KB > EXP > SPH > HE > JB,GS 反映各向异性最强,JB 最弱,并且发现部分随机变异越明显的变异函数模型各向异性反映越弱。这主要是因为各向异性是由风力、雨水、地表径流等自然因素所致,受人为因素影响较小。JB、HE 的各向异性最接近 1,即最接近各项同性,更加说明人

为因素对土壤 Hg 污染影响较为强烈。除这两模型之外,其他模型反映各向异性的变化较快。总之,各向异性和随机变异反映都较显著的模型为 GS、KB。JB 对人为因素的反映最为明显,但对各向异性反映较弱。

2.1.3 不同克里金模型插值效果比较 首先,比较 OK 法不同模型的插值效果。由插值生成的图像可知,SPH 和 EXP 的效果相似,但是 SPH 低估了极值面积比例。GS 和 KB 的效果相似,但 KB 的局部细节描述却不如 GS。HE 和 JB 的效果相似,但 HE 对低值不敏感,低值在 0、1 次趋势几乎忽略,直到 2 次趋势才显现,而 JB 反映的效果更好。故选择 EXP、GS、JB 为较优模型,如图 3、图 4 所示。对其进一步比较发现,GS 突出显示了土壤 Hg 含量西南、东北高,中间低的整体趋势,但其对极值不敏感,高值部分区域在趋势较低时往往被忽略,EXP 虽对极值较为敏感,但忽略了南北之间的整体趋势。JB 既反映了东西之间趋势又反映了南北之间的趋势,并且对极值区域的反映情况适中,分布也较为合理。总的来说,JB 模型效果最好。其次,比较 OK 法不同趋势的插值效果。OK 法去 0、1 次趋势的总体分布效果反映较 2 次更好,但是却忽略了一些局部的细节,例如 GS 的 0 次、1 次趋势西南 Hg 含量值大于 2 mg/kg 的完全没有反映,并且值大于 1.8 mg/kg 面积也较小,只有 2 次趋势对极值部分反映较为明显,如图 4 所示。综合来看,2 次趋势的插值效果更好。综上所述,OK 法 2 次趋势的 JB 模型插值精度较高、效果较好。

2.2 确定性插值法

2.2.1 不同插值方法的精度比较 IDW 法随着加权参数的增加,预测误差逐渐增大。LP 法随着回归系数的增加,预测误差 RMSE 呈现先增加后减少再增加的趋势,ME 呈现先减少后增加的趋势,MRE 则是逐渐增大的趋势。RBF 则是由于不同方法和核函数参数的不同,预测误差也不同。3 种方法总体来看,ME 最小的是 RBF 的 MQ 方法,而 RMSE、MRE 最小的是回归系数为 0 的 LP 法。

2.2.2 不同插值方法的效果比较 由图 5 可知,插值精度与图像的准确性并不一致,从插值效果来看,IDW 法对局部趋势描述最高,但 IDW 法不平滑,对实测点极值大小过于敏感,“牛眼”现象较为严重。尽管增大加权参数可以增大平滑性,使得图像更加符合实际情况,但是却增大了预测误差。LP 平滑性较好,预测误差较小,但对局部趋势反映很弱,信息量较少。RBF 的平滑性较 IDW 好,对于总体趋势和局部趋势的反映适中,效果较好。其中 CRS 法和 ST 法成图效果相似,它们的平滑性较差,“牛眼”效应强,图像失真。IMQ 法与 OK 的 JB 较为相似,主体趋势较为突出,局部趋势反映不如其他方法。MQ 法和 TPS 法成图效果较为一致,都突出了整体趋势,也充分反映了局部趋势,但 TPS 法预测误差较大,且比 MQ 更加强调整极值,MQ 法变化较为平缓,过渡自然,效果更好。

2.3 最优模型的选择

总体来看,各种插值方法的误差相差不大,IDW 方法的预测误差偏高,RBF 法、LP 以及 OK 的 JB 预测误差大小相当。JB、RBF 的 CRS、ST、MQ 法和 LP 参数 0 ~ 2 方法的插值精度较高,其中精度最高的为 LP(0)、RBF(MQ)、OK(JB)。LP 与 OK(JB)比较,插值生成的样点值即为实测值,并且主体趋势与局部趋势都能较好地反映,但是对于样点值过渡的

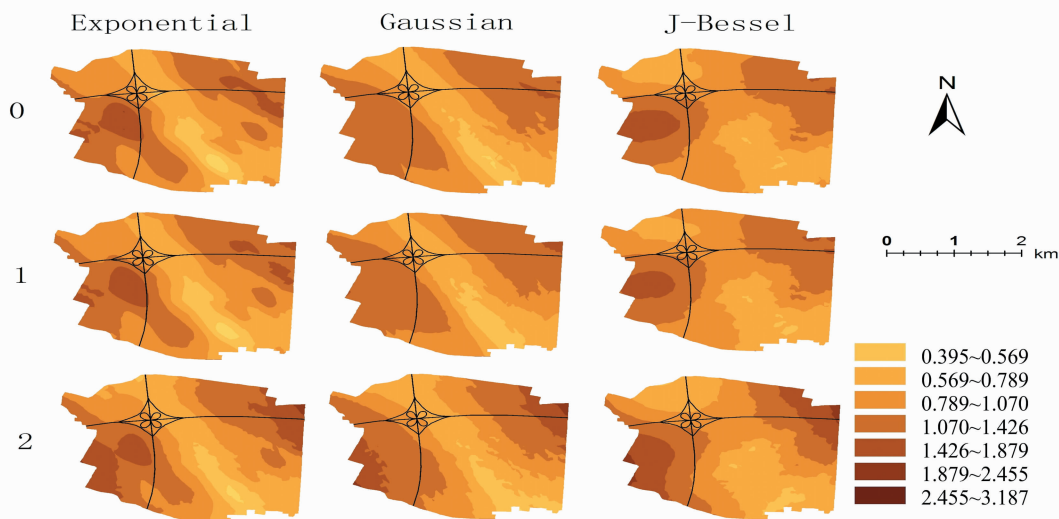


图3 杨园镇不同模型的 Hg 含量 OK 空间插值图(单位: mg/kg)

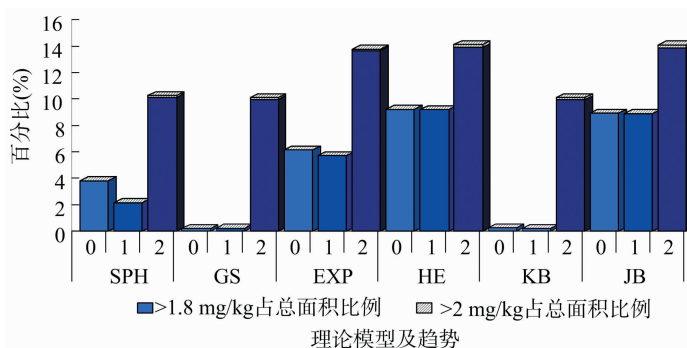


图4 不同的插值图 Hg 含量超出阈值的面积比较 (单位: mg/kg)

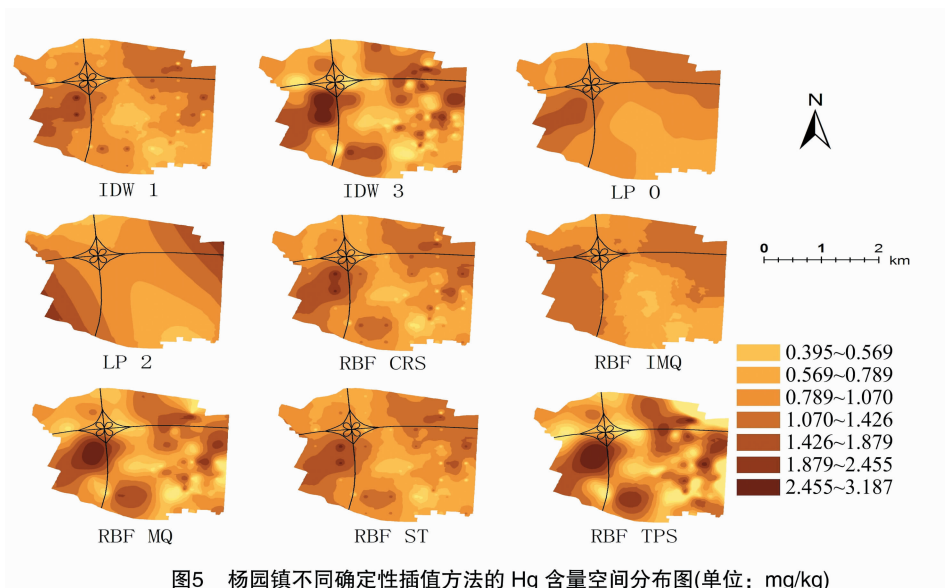


图5 杨园镇不同确定性插值方法的 Hg 含量空间分布图(单位: mg/kg)

平缓性以及样点间的连接性从图上看不及 OK, 局部有可能失真。RBF(MQ) 与其他确定性插值方法不同, 插值生成图像过渡平缓, 边缘效应小, 并且局部反映适中, 比 OK(JB) 方法更能反映局部污染变化情况。通过 20 个检验样点数据验证发现, RBF 的 MQ 方法估计值有 90% 都非常接近真实值, 比例最高, 误差范围在  $\pm 0.1$  之间, 其次是接近比例为 80% 的

LP(0) 法, 克里金法只有 65%。克里金法的 5 个高值点中, Hg 含量样本点值较低, 说明克里金法高估了污染区域的面积。LP 方法只有 2 个高值点差异较大, MQ 法没有。此外, 实地考察发现, 对于局部趋势的描述, RBF(MQ) 比 OK 更能反映研究区实际情况。由于 RBF(MQ) 比其他几种方法更能充分合理地反映整体和局部趋势, 平滑性好, 插值精度较高, 生

成图像较为逼真,因而被选为最优插值方法。

### 3 结论

克里金插值方法最适用于既具有结构性又有随机性的地理要素,如本研究中的土壤 Hg 含量,其作为变量插值精度往往较高,一些研究者也得出相同的结论<sup>[17-18]</sup>。在 OK 法中,2 次趋势插值精度最高,效果最好,这与凌辉等的研究结果<sup>[19]</sup>一致。在 0~1 次趋势中 JB 模型精度最高,而凌辉等、胡志明等人由于未研究 JB 模型,都认为是 SPH 精度最高<sup>[19-20]</sup>。从变异函数的基本参数来看,OK 法各向异性和随机变异反映都较显著的模型为 GS、KB。JB 反映人为因素的影响明显,但反映各向异性的能力较弱。当取样点足够、均匀或对插值结果精度要求不高时,可以考虑采用确定性插值方法,它们更适用于光滑、连续的表面,插值效果美观、过渡平缓,能较好地反映局部趋势,但其对误差大小难以估计,采样稀疏时易造成边缘效应、“牛眼”现象。本研究中 RBF 的 MQ 方法插值误差较低,图像较为逼真,比克里金方法更能反映研究区实际情况,因此 MQ 方法是最优插值方法。谢云峰认为,RBF、IDW 比克里金、LP 方法好,与本研究结果结果基本一致,但与王珂等、谢云峰等的研究结果<sup>[21-22]</sup>相反。克里金插值方法反映总体趋势以及各向异性,空间变异性是确定性插值法不能够取代的,并且可以不受特异值的干扰,不会产生“牛眼”现象,样点间具有更强的连接性,而确定性插值方法平滑效应更强,产生图像更加美观,局部趋势可能更加突出。但是还需结合比例尺及实际情况决定局部情况是否忽略或显示。选择最优的插值方法并不是选择精度最高或效果最好的,而是插值精度、效果、计算效率、研究目的、要求以及多种因素的平衡,以期寻找到几种因素都比较高、最适合的模型,任何方法都不是绝对唯一的<sup>[23]</sup>。选用不同插值方法得到的结果不同,结果受采样密度、样点取值及变化范围、地理地貌因素、土地利用类型等多种因素的共同影响。要提高插值精度、增强插值准确性,需要在采样前对研究区做详细调查,对样点数目及分布进行详细设计,考虑到样点能更好地反映空间变异性(变异尺度、各向异性、变异因素等)与空间自相关(方向和距离相关等)<sup>[24]</sup>,本研究考虑甚少,今后可以对变异程度大的地区适当增大采用密度,提高插值精度和效率。采样时应尽量提高样点的准确性,试验时要尽量控制误差,确保数据准确。插值方法筛选时,要对数据进行描述性统计分析,了解数据的分布规律,对数据进行分析,最终选择出最优的空间插值方法<sup>[25]</sup>。

### 参考文献:

- [1] Mueller T G, Pierce F J. Soil carbon maps: enhancing spatial estimates with simple terrain attributes at multiple scales[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(1): 258-267.
- [2] 郝丽虹,张冬明,吴鹏飞,等. 海南岛农用地土壤重金属含量的空间分布[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(2): 230-234.
- [3] 姚荣江,杨劲松,杨奇勇,等. 禹城地区土壤铅含量空间分布的指示克里格估值[J]. 生态环境学报, 2011(12): 1912-1918.
- [4] 陈惠芳,李艳,吴豪翔,等. 富阳市不同类型农田土壤重金属变异特征及风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2013(2): 164-169.
- [5] 徐理超,李艳霞,苏秋红,等. 阜新市农田土壤重金属含量及其分布特征[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1510-1517.
- [6] 吕宁,吕新,马莉,等. 基于 GIS 的滴灌棉田土壤养分空间变异及预测方法比较研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(2): 403-408.
- [7] Leenaers H, Okx J P, Burrough P A. Comparison of spatial prediction methods for mapping floodplain soil pollution[J]. Catena, 1990, 17(6): 535-550.
- [8] Kravchenko A, Bullock D G. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties[J]. Agronomy Journal, 1999, 91(3): 393-400.
- [9] Panagopoulos T, Jesus J, Antunes M, et al. Analysis of spatial interpolation for optimising management of a salinized field cultivated with lettuce[J]. European Journal of Agronomy, 2006, 24(1): 1-10.
- [10] Wollenhaupt N C, Wolkowski R P, Clayton M K. Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application[J]. Journal of Production Agriculture, 1994, 7(4): 441-447.
- [11] Gotway C A, Ferguson R B, Hergert G W, et al. Comparison of kriging and inverse-distance methods for mapping soil parameters[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(4): 1237-1247.
- [12] Schloeder C A, Zimmerman N E, Jacobs M J. Comparison of methods for interpolating soil properties using limited data[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(2): 470-479.
- [13] Robinson T P, Metternicht G. Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 50(2): 97-108.
- [14] Cambardella C A, Moorman T B, Novak J M. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58: 1501-1511.
- [15] Guo X D, Fu B J, Ma K M, et al. Spatial variability of soil nutrients based on geostatistics combined with GIS—a case study in Zunhua City of Hebei Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(4): 557-563.
- [16] Liu T L, Juang K W, Lee D Y. Interpolating soil properties using Kriging combined with categorical information of soil maps[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(4): 1200-1209.
- [17] Tseg A T, Hill R L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil test, plant growth, and nutrient uptake measurements[J]. Soil Sic, 1998, 163(2): 155-165.
- [18] 林忠辉,莫兴国,李宏轩,等. 中国陆地区域气象要素的空间插值[J]. 地理学报, 2002, 57(1): 47-56.
- [19] 凌辉,武伟,王润,等. 小尺度下土壤重金属铬含量的空间插值方法比较研究[J]. 西南大学学报:自然科学版, 2007, 29(11): 93-99.
- [20] 胡志明,周冀衡,王勇,等. 湖南烤烟(*Nicotiana tabacum*)铅含量的空间变异特性研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(10): 1688-1693.
- [21] 王珂,许红卫,史舟,等. 土壤钾素空间变异性和空间插值方法的比较研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(3): 318-322, 344.
- [22] 谢云峰,陈同斌,雷梅,等. 空间插值模型对土壤 Cd 污染评价结果的影响[J]. 环境科学学报, 2010, 30(4): 847-854.
- [23] Lam N S. Spatial interpolation method: a review[J]. American Cartography, 1983, 10: 129-149.
- [24] 朱会义,刘述林,贾绍凤,等. 自然地理要素空间插值的几个问题[J]. 地理研究, 2004, 23(4): 425-432.
- [25] 李新,程国栋,卢玲,等. 青藏高原气温分布的空间插值方法比较[J]. 高原气象, 2003, 22(6): 565-573.