

网络出版时间:2012-07-18 11:18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20120718.1118.031.html>

县域耕地土壤速效钾空间预测方法的比较

周 磊, 齐雁冰, 常庆瑞, 杨凤群

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘 要] **【目的】**筛选出测土配方施肥项目中最适宜的土壤速效钾空间预测方法, 为准确预测土壤养分的空间分布提供依据。**【方法】**以陕西汉中汉台区耕地土壤速效钾含量为研究对象, 分别采用反距离加权插值法、径向基函数插值法和普通克里格插值法 3 种方法, 在选取 3 种方法最优模型参数的基础上, 对试验区域内 2 022 个土壤速效钾样点进行空间插值, 并对结果进行验证及评价。**【结果】**通过对 3 种空间插值方法进行交叉验证, 径向基函数插值法均方根误差为 267.349, 小于其他 2 种插值方法; 其相关系数为 0.687, 大于其他 2 种插值方法。利用分区符合度法和插值结果图进一步验证, 结果表明, 相对于反距离加权插值法和普通克里格插值法, 径向基函数插值法更能反映试验区域土壤速效钾的分布格局。**【结论】**径向基函数插值法较反距离加权插值法和普通克里格插值法更适宜于试验区耕地土壤速效钾的空间预测; 在测土配方施肥项目实施过程中, 利用分区符合度验证法对土壤养分空间预测方法进行选择是切实可行的。

[关键词] 测土配方施肥; 空间预测; 分区符合度; 土壤速效钾; 陕西汉中

[中图分类号] S159-3

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2012)08-0193-07

Comparison of spatial interpolation methods of available potassium in Hantai County

ZHOU Lei, QI Yan-bing, CHANG Qing-rui, YANG Feng-qun

(College of Science Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** The study was to accurately predict spatial distribution, and to select suitable spatial interpolation methods of available potassium in Hantai county. **【Method】** Taking soil available potassium of 2 022 sample sites as an example, based on optimum parameters selection of 3 methods and interpolation results validation and analysis, three interpolation methods were compared including OK (Ordinary Kriging), RBF(Radial Basis Functions) and IDW(Inverse Distance Weighted). **【Results】** Through the cross validation of three spatial interpolation methods, the RMS of Radial Basis Functions was 267.349, smaller than the other two interpolation methods, and the correlation coefficient of the Radial Basis Functions was 0.687, bigger than the other two interpolation methods. Validation with the zonal similarity validation and interpolation graph indicated that RBF can reflect soil available potassium distribution pattern much better than OK and IDW in experimental zone. **【Conclusion】** RBF, compared with OK and IDW, is more suitable in spatial interpolation of available potassium in Hantai County, and it also indicates that the method of zonal similarity validation is feasible in predicting spatial distribution of soil nutrients during the implementation of the program of soil testing and fertilizer recommendation.

* [收稿日期] 2012-01-13

[基金项目] 国家科技基础性专项重点项目(2007FY110800); 国家自然科学基金项目(31100516)

[作者简介] 周 磊(1986—), 男, 河南平顶山人, 在读硕士, 主要从事土地资源与空间信息技术研究。E-mail: srzerg@hotmail.com

[通信作者] 齐雁冰(1976—), 男, 河南周口人, 副教授, 主要从事资源环境评价与信息技术研究。E-mail: ybqi@nwsuaf.edu.cn

Key words: formula fertilization; spatial interpolation; zonal similarity validation; available potassium; Hanzhong City, Shaanxi Province

从 2005 年开始,我国大范围推广测土配方施肥项目^[1]。土壤养分通常存在较强的空间变异性,因此,准确预测土壤养分的空间分布状况,是土壤养分精确管理及进行配方施肥的关键。空间预测是根据已知的空间数据估计未知空间值的数学方法^[2]。随着地统计学及 GIS 技术的发展,对土壤养分的空间预测研究得以迅速发展。欧美国家在 20 世纪 80 年代就对耕地土壤性质空间变异评价方法进行了系统研究,针对空间预测及评价已建立了一系列的方法体系^[3]。到 20 世纪 90 年代,随着精准农业、精确施肥技术的提出和开展,土壤特性的空间变异和空间插值技术研究日趋成熟。在我国,由于受到土地分散经营及地形条件复杂等因素的影响,土壤养分的空间预测也逐渐受到重视,出现了关于不同地区不同尺度下土壤养分空间变异特征、不同空间预测方法的应用与比较等方面的研究。

农田土壤中的速效钾是提供作物生长的重要养分资源,其反映了当前一定时期内可供植物吸收利用的钾的数量,是衡量土壤钾元素供给能力的主要指标^[4]。在现实中由于地形条件所限,采样点并不能完全均匀分布,土地利用方式、土壤条件和成土母质的差异会导致土壤速效钾含量存在较大的空间差异性^[5]。对土壤速效钾含量的空间特征进行研究,不但能够掌握区域内速效钾的空间分布特征,同时能够及时发现区域内农业生产管理和土壤合理施肥中可能存在的问题,从而为指导农业生产提供合理建议。

目前针对土壤养分空间预测的方法很多^[6-8],克里格(Kriging)插值法是应用最广泛的土壤养分空间预测方法^[9],其中的普通克里格插值法(OK)对田块尺度及管理措施一致的均匀区域的土壤养分具有较好的预测效果^[10];此外,反距离加权插值法^[11](IDW)、径向基函数插值方法(RBF)^[12]等也被很多学者采用。空间预测结果的准确性验证是评价各种预测方法适宜性的重要依据,目前普遍采用的是交叉验证的方法^[13],也有学者运用相关系数、验证点及分区符合度^[14]等方法。目前,针对测土配方施肥项目中土壤养分空间预测及验证方法比较的研究相对较少。

本试验以陕西省汉中市汉台区测土配方施肥项目中土壤速效钾为研究对象,对普通克里格插值法、

反距离加权插值法、径向基函数插值法 3 种空间插值方法进行比较,以期从中筛选出最适合汉中平原地区土壤养分空间预测及验证的方法,为测土配方施肥项目的准确实施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西省汉中市汉台区位于陕西省南部汉中盆地中心,地处 $106^{\circ}51'50'' \sim 107^{\circ}10'45''\text{E}$, $33^{\circ}02'54'' \sim 33^{\circ}22'16''\text{N}$,北临秦岭,南接巴山,汉江自西向东流经其内,总面积 538.6 km^2 。该区属北亚热带季风气候区,冬无严寒,夏无酷暑。海拔 600 m 以下地区年均气温为 $14.2 \sim 14.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,多年平均年降水量 $700 \sim 1\,700\text{ mm}$ 。南部为平坝区,中部为沟壑纵横的丘陵地带,北部属秦岭南坡山地,整个地形从南向北呈阶梯升高,海拔在 $487 \sim 2\,038\text{ m}$ 。成土母质包括红棕色粘土母质、坡积母质、片麻岩母质、千枚岩母质及石灰岩母质等,土壤类型包括水稻土、潮土、淤土、黄褐土、黄棕壤、棕壤及石渣土,其中水稻土面积最大,占 50.09% ,其次为黄褐土,占 26.2% 。在土地利用结构上,耕地占土地总面积的 47.64% ,耕作制度为一年两熟,春季以小麦、油菜为主,秋季以水稻为主。

1.2 样品的采集与分析

汉台区从 2008 年开始实施测土配方施肥项目,于 2008 和 2009 年 5 月上旬作物收获后采集耕地土壤样品,采样时用不锈钢土钻等工具。根据研究区地形、耕地分布状况及样点均匀性等原则,针对每一土样选取有代表性的田块,在耕地表层($0 \sim 20\text{ cm}$)采用“S”法均匀随机采取 15 个点,混匀后用“四分法”留取 1 kg 土样,带回实验室风干,过孔径 2 mm 筛后装袋备用。采集耕地表层土壤样品共 2 022 个,由于研究区北部为秦岭山地,因此样点主要分布在研究区南部的平坝区(图 1)。土壤速效钾含量采用乙酸铵浸提-火焰光度计法^[15]进行测定。

1.3 土壤速效钾含量的空间插值预测方法

为了筛选出适宜研究区的土壤速效钾含量空间预测方法,本研究选取空间预测中较常用且具有代表性的 3 种插值方法(反距离加权插值法、径向基函数插值法、普通克里格插值法)进行分析。

1)反距离加权插值法。反距离加权插值法是基

于相近相似原理,以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均,距插值点越近的样本点赋予的权重越大^[11]。

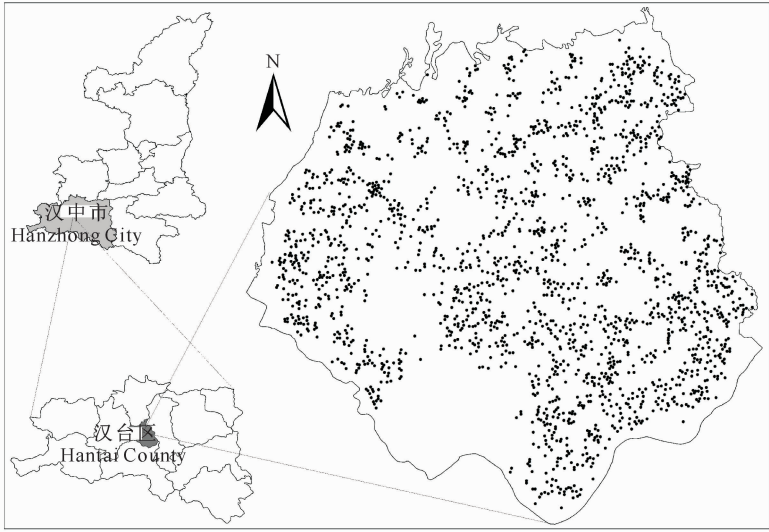


图 1 陕西汉中市汉台区土壤采样点的分布($n=2\ 022$)

Fig. 1 Distribution of soil sample sites of Hantai County, Hanzhong City, Shaanxi Province ($n=2\ 022$)

2) 径向基函数插值法。径向基函数插值法是通过将一个样条函数以最小曲率来充分逼近各观察点,即如同将一个软膜插入并经过各已知样点,其属于精确插值方法。其常用的样条函数有平面样条函数(TPS)、张力样条函数(ST)、规则样条函数(CRS)、高次曲面函数(M)和反高次曲面函数(IM)^[11,16]。

3) 普通克里格插值法。克里格插值法是以空间自相关性为基础,利用原始数据和半方差函数的结构性,对区域化变量的未知采样点进行无偏估值的插值方法,其实质是一个实行局部估计的加权平均值^[17]。

1.4 预测结果的检验

对于空间预测效果的检验,一般采用交叉验证法(Cross Validation)^[13]。通过该方法计算预测值与实测值之间的平均误差(ME)、均方根误差(RMS)及相关系数(CC)。其中平均误差和均方根误差越小,相关系数越大,则预测精度越高^[18]。

$$ME=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(Z_i-\hat{Z}), \tag{1}$$

$$RMS=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(Z_i-\hat{Z})^2, \tag{2}$$

$$CC=\frac{\sum_{i=1}^n(X_i-\bar{X})(Y_i-\bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n(X_i-\bar{X})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^n(Y_i-\bar{Y})^2}}。 \tag{3}$$

式中: Z_i 为第*i*个样点的实际观测值, $\hat{Z}$ 为估计值, n

为用于检测的样点数目, X_i 为第*i*个样点的实际观测值, $\bar{X}$ 为样点实际观测值的平均值, Y_i 为第*i*个样点的估计值, $\bar{Y}$ 为样点估计值的平均值。

由于在测土配方施肥项目实施过程中,施肥时主要是应用速效钾的推荐施肥范围,而不是具体数值,同时为了进一步比较内插值的效果,提出计算样点分区符合度^[14],处理方法如下:在 ArcGIS 中将土壤中速效钾指定分区图斑范围的样点全部选中,另存为一个图层,用 Excel 打开该图层的属性表,统计符合速效钾指定含量范围内样点数据的个数,如将速效钾含量为 100~120 mg/kg 的数据库打开,统计该范围内的样点个数并计算其占全部样点数的比例,在分区范围内的符合率越大,说明分区越能代表实际情况。

半方差函数和理论模型的拟合及空间插值图在 ArcGIS10.0 中完成,土壤速效钾含量数据及其残差的统计分析使用 SPSS 13.0 完成。

2 结果与分析

2.1 汉台区土壤速效钾的基本统计资料

对汉台区采样点的速效钾含量进行统计,结果(表 1)显示,汉台区耕地土壤速效钾含量最高为 216 mg/kg,最低仅为 24 mg/kg,平均值为 120.7 mg/kg。受地形、土壤母质条件的影响,研究区耕地土壤速效钾含量变异系数为 22.99%,为中等变

异^[19]。由偏态系数(C_s)可知,原始数据不符合正态分布,故对样点进行对数变换和 Box-Cox 变换,结果表明,通过对数变换,未能使数据呈正态分布;而

经过 Box-Cox 变换,采样点数据空间显著性有所提高,说明通过 Box-Cox 变换后速效钾含量可基本看作服从正态分布^[4,20]。

表 1 陕西汉中汉台区耕地土壤速效钾的统计值

Table 1 Descriptive statistic of soil available potassium in Hantai County, Hanzhong City, Shaanxi Province

项目 Items	最大值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Max	最小值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Min	平均值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Mean	中值/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Median	标准差 Std. Dev	变异 系数/% C_v	偏态系数 C_s	Shapiro- Wilk(P)
原始数据 Original data	216	24	120.7	117	26.9	22.99	0.309	0.00
对数变换 log transformation	5.375	3.178	4.762	4.767	0.238	4.99	-1.028	0.00
Box-Cox 变换 Box-Cox transformation	87.16	14.32	53.21	54.35	9.86	18.14	0.102	0.02

2.2 空间插值预测模型及参数的选择

2.2.1 普通克里格插值法 在理论模型的选择中,通常根据平均误差(ME)、均方根误差(RMS)、均方根预测误差($RMSE$)、平均标准误差(ASE)、标准均

方根误差($RMSS$)进行筛选。表 2 为采用普通克里格插值法中 4 种变异模型的模拟参数。从表 2 可以看出,4 种模型中指数模型拟合效果最佳。

表 2 普通克里格插值法不同理论模型的评估

Table 2 Estimation of ordinary kriging interpolation method with different theoretical models

理论模型 Theoretical model	平均误差 ME	均方根误差 RMS	均方根预测误差 $RMSE$	标准均方根 预测误差 $RMSS$	平均标准误差 ASE
高斯模型 Gaussian model	0.907	392.218	19.805	0.087	19.718
指数模型 Exponential model	0.855	385.699	19.639	0.084	19.555
球状模型 Pentaspherical model	0.854	389.566	19.737	0.084	19.653
环状模型 Circular model	0.875	390.059	19.749	0.085	19.665

2.2.2 径向基函数插值法 利用径向基函数插值方法,通过对函数平面样条函数、规则样条函数、张力样条函数、高次曲面函数、反高次曲面样条函数 5 种样条函数的拟合结果进行交叉验证,结果(表 3)显示,5 种函数中,张力样条函数(ST)的精确度较高。

表 3 径向基函数插值法中不同函数的评估

Table 3 Estimation of Radial basis functions interpolation method with different functions

基本函数 Basic function	平均误差 ME	均方根误差 RMS
平面样条函数 Thin Plate Spline	1.303	356.133
规则样条函数 Completely Regularized Spline	1.107	288.101
张力样条函数 Spline with Tension	1.048	267.349
高次曲面函数 Multiquadric	1.212	314.437
反高次曲面样条函数 Inverse Multiquadric	1.182	319.618

2.2.3 反距离加权插值法 采用反距离加权插值方法,首先要对函数权值进行选择,当函数权值(P)大于 3 的时候插值出现负数,因此可以忽略。由表 4 可知,当权值等于 2 时插值效果较好。

表 4 反距离加权插值法不同权值的评估

Table 4 Estimation of Inverse distance weighting interpolation method with different values of power

权值 Value of power	平均误差 ME	均方根误差 RMS
$P=2$	1.149	306.821
$P=3$	1.249	347.561

2.3 预测结果的对比与验证

对采用反距离加权插值法、径向基函数插值法、普通克里格插值法中的最优参数和模型所得的土壤速效钾拟合值及插值结果进行比较,通过计算其平均误差(ME)、均方误差(RMS)和相关系数(CC),对 3 种插值方法进行交叉验证。由表 5 比较结果发现,3 种插值方法的平均误差相差不大。再观察 3 种插值方法的均方根误差,可知普通克里格插值法的均方根误差最大,为 385.699;反距离加权插值法和径向基函数插值法的均方根误差均小于普通克里格差值法,分别为 306.821 和 267.349;由此可以看出,径向基函数插值法的效果较好。最后比较 3 种插值方法的相关系数,可知普通克里格插值法的相关系数最低,为 0.501;径向基函数插值法和反距离加权插值法的相关系数均明显高于普通克里格方法,分别为 0.687 和 0.682,两者相差较小。

表 5 3 种空间插值方法的交叉验证结果
Table 5 Results of Cross Validation with 3 interpolations method

插值方法 Interpolation method	平均误差 ME	均方根误差 RMS	相关系数 CC
OK	0.855	385.699	0.501
RBF	1.048	267.349	0.687
IDW	1.149	306.821	0.682

为了进一步检验预测结果的准确度,采用分区符合度的方法进行验证。土壤速效钾中值为 117 mg/kg,采样点土壤速效钾含量主要集中分布在 100~150 mg/kg (图 2),因此选取在 100~120 mg/kg和 120~150 mg/kg 2 个土壤速效钾含量区

间计算样点的分区符合度。结果显示,当土壤速效钾含量分别为 100~120 和 120~150 mg/kg 时,普通克里格插值法的样点符合度分别为 70.08%和 56.15%,径向基函数插值法的样点符合度分别为 99.8%和 97.76%,反距离加权插值法的样点符合度分别为 96.52%和 96.34%。由此可以看出,径向基函数插值法和反距离加权插值法在 100~120 mg/kg 和 120~150 mg/kg 2 个区间的分区样点符合度均在 90%以上,且径向基函数插值法优于反距离加权插值法和普通克里格插值法,其结果与交叉验证结果基本一致。

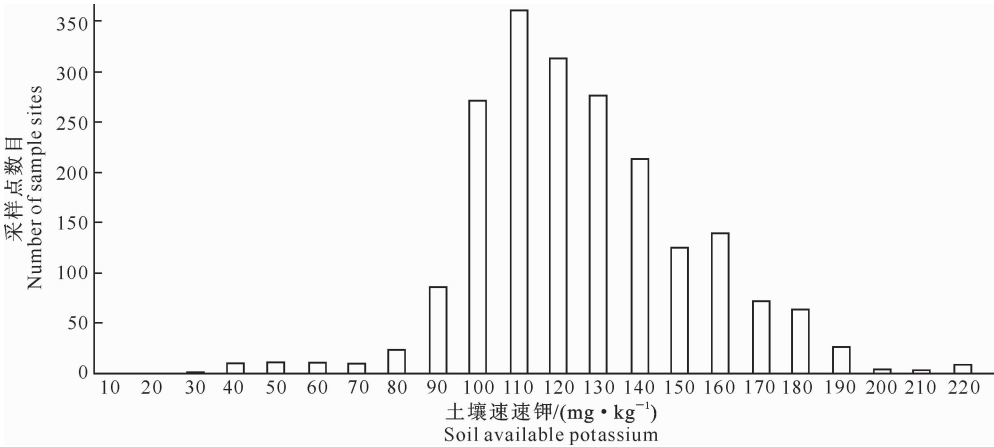


图 2 陕西汉中市汉台区土壤速效钾不同含量区间原始采样点数目的分布
Fig. 2 Distribution of original sample sites about soil available potassium in different ranges in Hantai County, Hanzhong City, Shaanxi Province

由图 3 可以看出,在采用反距离加权插值法时,图斑较其他 2 种方法破碎,同时分区界线不明显,图斑在各分区“牛眼”现象比较明显;采用径向基函数

插值法时,图斑较为平整,分区界线明显;采用普通克里格插值法时,插值结果连续,但分区界线破碎且不明显。

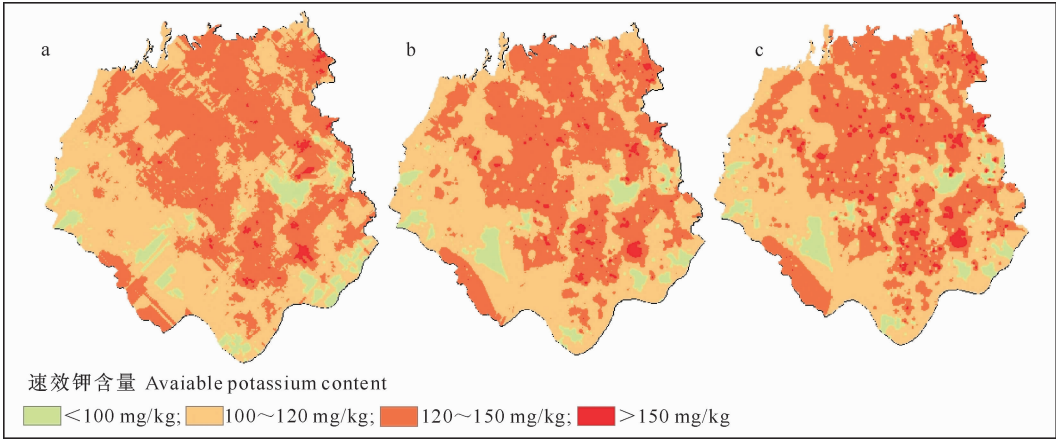


图 3 不同插值方法对陕西汉中市汉台区土壤速效钾分区效果的影响
a. 普通克里格插值法; b. 径向基函数插值法; c. 反距离加权插值法
Fig. 3 Effect of different interpolation methods on contour maps of available potassium content in Hantai County, Hanzhong City, Shaanxi Province
a. Ordinary kriging; b. Radial basis functions; c. Inverse distance weighting

综上所述可知,在 3 种插值方法中,采用径向基函数插值法对研究区耕地土壤速效钾养分进行空间拟合预测时,其拟合结果相关系数较高,区间符合度较好,插值结果显示图斑更加清晰平滑,故其效果最优。

3 讨论与结论

土壤养分空间预测方法的选择关系到预测的准确性,其中普通克里格方法是利用半方差图的模型进行测定点之间的内插,当样点数据呈正态分布时,其具有操作简单、插值结果平滑、效应好等特点,该方法已广泛应用于区域土壤养分空间变异特征评价等方面,如由孙义祥等^[14]在芜湖市的研究结果可知,局部多项式、普通克里格、简单克里格和析取克里格插值方法的评价效果优于反距离加权法、全局多项式、径向基插值和泛克里格等插值方法;张铁婵等^[17]对榆林市榆阳区的研究结果显示,普通克里格插值法对试验区域土壤养分元素空间分布趋势的预测效果明显优于反距离加权法和样条函数法。

但当研究区域尺度较大、地形条件复杂时,土壤性质的空间自相关性明显降低,预测结果的误差明显增大^[21-22]。如张忠启等^[23]和 Liu 等^[24]的研究结果就提出,当受到土地利用方式及地形条件的影响时,普通克里格插值法的空间预测结果准确性明显降低。本研究结果也表明,无论是交叉验证结果,还是样点分区符合度的评价结果,都显示汉台区土壤速效钾含量存在较强的空间变异性,反距离加权插值法和径向基插值法的精度均优于普通克里格插值法,且与反距离加权插值法相比,径向基函数插值法能够获得更好的空间预测结果,从而较好地反映研究区土壤速效钾的分布格局。

基于 ME、RMS 及 CC 的交叉验证是空间预测精度评定的主要方法,其验证结果可靠,是选择空间预测方法的主要手段。本研究结果同时证明,交叉验证与基于分区的符合度验证结果一致,基于分区符合度的验证方法在空间预测方法的选择上也是可行的。

[参考文献]

[1] 唐秀美,赵庚星,路庆斌. 基于 GIS 的县域耕地测土配方施肥技术研究 [J]. 农业工程学报,2008,24(7):34-38.
Tang X M,Zhao G X,Lu Q B. Research of soil testing and fertilizer recommendations at county level by GIS [J]. Agricultural Engineering,2008,24(7):34-38. (in Chinese)

[2] 李 新,程国栋,卢 玲. 空间内插方法比较 [J]. 地球科学进

展,2000,15(3):260-265.

Li X,Cheng G D,Lu L. Comparison of spatial interpolation methods [J]. Advances in Earth Science,2000,15(3):260-265. (in Chinese)

[3] 张学雷,陈 杰,龚子同. 土壤多样性理论在欧美的实践及在我国土壤景观研究中的应用前景 [J]. 生态学报,2004(5):1063-1072.
Zhang X L,Chen J,Gong Z T. What to do in China after a review of researches practices on pedodiversity in Europe and America [J]. Acta Ecologica Sinica,2004(5):1063-1072. (in Chinese)

[4] 王彬武,周卫军,马 苏,等. 耕地土壤速效钾含量的空间预测方法研究 [J]. 地理与地理信息科学,2011(5):91-94.
Wang B W,Zhou W J,Ma S,et al. Spatial prediction method of available potassium contents in arable soil [J]. Geography and Geo-Information Science,2011(5):91-94. (in Chinese)

[5] 张 健,陈 凤,濮励杰. 区域土地利用方式变化对土壤性质影响研究:以土壤钾为例 [J]. 资源开发与市场,2007(12):1057-1060.
Zhang J,Chen F,Pu L J. Study on land-use changes and its effects on soil properties: A case of Potassium [J]. Resource Development & Market,2007(12):1057-1060. (in Chinese)

[6] Ballabio C,Comolli R. Mapping heavy metal content in soils with multi-kernel SVR and LiDAR derived data [Z]. Netherlands: Springer,2010:2,205-216.

[7] 雷能忠,王心源,蒋锦刚,等. 基于 BP 神经网络插值的土壤全氮空间变异 [J]. 农业工程学报,2008,24(11):130-134.
Lei N Z,Wang X Y,Jiang J G,et al. Spatial variability of soil nitrogen by BP neural network interpolation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2008,24(11):130-134. (in Chinese)

[8] 李 楠,徐东瑞,吴杨洁. 土壤养分含量的协同克里格法插值研究 [J]. 浙江农业学报,2011,23(5):1001-1006.
Li N,Xu D R,Wu Y J. Spatial distribution with different sampling numbers of soil nutrient using Cokriging [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2011,23(5):1001-1006. (in Chinese)

[9] 王绍强,朱松丽,周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异性特征 [J]. 地理研究,2001(2):161-169.
Wang S Q,Zhu S L,Zhou C H. Characteristics of spatial variability of soil thickness in China [J]. Geographical Research,2001(2):161-169. (in Chinese)

[10] 朱会义,刘述林,贾绍凤. 自然地理要素空间插值的几个问题 [J]. 地理研究,2004(4):425-432.
Zhu H Y,Liu S L,Jia S F. Problems of the spatial interpolation of physical geographical elements [J]. Geographical Research,2004(4):425-432. (in Chinese)

[11] 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,2007.
Tang G A,Yang X. ArcGIS geographic information system spatial analysis experiment tutorial [M]. Beijing: Science Press,2007. (in Chinese)

[12] 李湘凌,张颖慧,杨善谋,等. 合肥义城地区土壤重金属污染评

价中典型插值方法的对比 [J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2011,41(1):222-227.

Li X L,Zhang Y H,Yang S M,et al. Comparison of typical interpolation methods for pollution evaluation of soil heavy metals in Yicheng district,Hefei [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition,2011,41(1):222-227. (in Chinese)

[13] 李海滨,林忠辉,刘苏峡. Kriging 方法在区域土壤水分估值中的应用 [J]. 地理研究,2001(4):446-452.

Li H B,Lin Z H,Liu S X. Application of kriging technique in estimating soil moisture in China [J]. Geographical Research, 2001(4):446-452. (in Chinese)

[14] 孙义祥,吴传洲,朱克保,等. 插值方法与样点数对县域土壤有效磷空间变异特征评价的影响 [J]. 应用生态学报,2009(3): 673-678.

Sun Y X,Wu C Z,Zhu K B,et al. Influence of interpolation method and sampling number on spatial prediction accuracy of soil Olsen-P [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2009 (3):673-678. (in Chinese)

[15] 雷红霞,孟昭设,贾彩霞,等. 土壤速效钾速测方法探讨 [J]. 土壤肥料,2004(5):46-47.

Lei H X,Meng Z S,Jia C X,et al. The discussion of soil available potassium speed measurement [J]. Soils and Fertilizers, 2004(5):46-47. (in Chinese)

[16] 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,2011(17):91-93.

Ma J,Zhang R S,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):91-93. (in Chinese)

[17] 张铁婵,常庆瑞,刘 京. 土壤养分元素空间分布不同插值方法研究:以榆林市榆阳区为例 [J]. 干旱地区农业研究,2010 (2):177-182.

Zhang T C,Chang Q R,Liu J. Comparison of spatial interpolation methods for soil nutrient elements: A case study of Yuyang County,Shaanxi Province [J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2010(2):177-182. (in Chinese)

[18] 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(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(5):1007-1011. (in Chinese)

[19] Nielson D R,Bouma J. Soil spatial variability [M]. Netherlands:Pudoc Wageningen,1985:2-30.

[20] 李运明,封超超,李小凯,等. Box-Cox 变换及其在 SPSS 软件中的实现 [J]. 数理医药学杂志,2009(5):569-571.

Li Y M,Feng Z C,Li X K,et al. Box-Cox transform and its realization of SPSS software [J]. Journal of Mathematical Medicine,2009(5):569-571. (in Chinese)

[21] 连 纲,郭旭东,傅伯杰,等. 基于环境相关法和地统计学的土壤属性空间分布预测 [J]. 农业工程学报,2009(7):237-242.

Lian G,Guo X D,Fu B J,et al. Prediction of the spatial distribution of soil properties based on environmental correlation and geostatistics [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2009(7):237-242. (in Chinese)

[22] Chien Y,Lee D,Guo H,et al. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils [J]. Soil Science,1997, 162(4):291-298.

[23] 张忠启,史学正,于东升,等. 红壤区土壤有机质和全氮含量的空间预测方法 [J]. 生态学报,2010(19):5338-5345.

Zhang Z Q,Shi X Z,Yu D S,et al. Spatial prediction of soil organic matter and total nitrogen in the hilly red soil region, China [J]. Acta Ecologica Sinica,2010(19):5338-5345. (in Chinese)

[24] Liu T,Juang K,Lee D. Interpolating soil properties using kriging combined with categorical information of soil maps [J]. Soil Sci Soc Am J,2006,70(4):1200-1209.