

县域农田土壤铜含量的协同克里格插值及采样数量优化

庞 夙, 李廷轩, 王永东, 余海英

(四川农业大学资源与环境学院, 四川雅安 625014)

摘要:【目的】研究县域农田土壤铜含量的空间分布和采样数量,为农田土壤环境质量调查提供帮助。【方法】采用协同克里格方法,以初始的623个土壤铜含量数据及在此基础上随机抽取的560、498和432个数据为目标变量,并以初始的623个土壤有机质含量数据为辅助变量,对四川省双流县农田土壤铜含量进行插值分析,并对不同样点数量下协同克里格法在县域尺度农田土壤铜含量空间分布研究中的适用性进行评价。【结果】相同取样数量下,协同克里格法的均方根误差相对于普通克里格法可降低0.9%~7.77%,预测值和实测值之间的相关系数可提高1.76%至9.76%。利用协同克里格法,在土壤铜含量数据量缩减10%的情况下,其估值精度仍高于初始的623个土壤铜含量数据的普通克里格估值,且二者的分布图具有高度相似性。【结论】协同克里格作为一种更为精确和经济的方法,可为县域尺度农田土壤重金属含量的空间分布研究提供更多的信息和帮助。

关键词: 农田土壤; 县域; 铜; 协同克里格法; 采样数量

Spatial Interpolation and Sampling Numbers of the Concentration of Copper in Cropland Soil on County Scale Using Cokriging

PANG Su, LI Ting-xuan, WANG Yong-dong, YU Hai-ying

(College of Resource and Environmental of Sichuan Agriculture University, Ya'an 625014, Sichuan)

Abstract:【Objective】Studies on the spatial distribution and sampling numbers of the concentration of copper (Cu) on county scale were made to provide a help for the investigation of environmental quality of cropland soil.【Method】In this study, Cokriging was used for the interpolation of the concentration of Cu in cropland soil in Shuangliu county in Sichuan province. A total of original 623 measured data of the concentration of Cu in soil and 560, 498, 432 measured data by random were selected as target variable, original 623 measured data of soil organic matter (OM) content as auxiliary variable. The interpolation methods using Cokriging under different sampling numbers were evaluated for the suitability of estimating the spatial distribution of the concentration of Cu in soil on county scale.【Result】Compared with the ordinary Kriging under the same sampling numbers, the root-mean-square error produced by Cokriging decreased by 0.9% to 7.77%, correlation coefficient between the predicted value and the measured value increased by 1.76% to 9.76%. The prediction accuracy of original data reduced by 10% using Cokriging was still higher than original 623 data using ordinary Kriging and their interpolation maps were quite similar.【Conclusion】Cokriging was shown to be more accurate and economic method which could provide more information and help for the study on the spatial distribution of the concentration of Cu in soil on county scale.

Key words: cropland soil ; county scale; copper; Cokriging; sampling numbers

0 引言

【研究意义】土壤重金属空间分布特征研究对于土壤污染风险性评价和土壤环境质量保护具有重要意义^[1],在此类研究中,样点数量直接影响着预测精度

和研究成本。因此,在研究土壤重金属空间分布特征的同时,需要进一步考虑采样数量,以便为以后的相关研究提供帮助。此外,铜既是作物生长必须的营养元素,也是引起环境污染的重金属元素,土壤铜含量的不足和过剩都会引起农作物生长不良,致使产量降

收稿日期: 2008-11-14; 接受日期: 2009-01-13

基金项目: 四川省青年基金(06ZQ026-020)、四川省教育厅重点项目(2006A008)、四川省教育厅青年基金项目(2006B009)

作者简介: 庞 夙(1984-),男,四川江油人,硕士研究生,研究方向为土壤理化特性空间变异。E-mail: jiang_jing617@163.com。通信作者李廷轩(1966-),四川宣汉人,教授,博士,研究方向为土壤生态、植物营养。Tel: 0835-2882216; E-mail: litinx@263.net

低、品质下降^[2]。因此，了解县域内农田土壤铜含量的空间分布特征有助于采取措施保证作物的产量、安全以及污染治理。【前人研究进展】克里法可以利用原始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无偏最优估值^[3]，广泛应用于对土壤理化性质^[4-8]空间分布的研究之中。在众多的克里格方法中，只需要考虑目标变量空间信息的普通克里格法应用最为广泛，但普通克里格法作为一种仅依靠目标变量的插值方法，其精度主要受采样数量和密度的影响，增加样点密度耗费大量人力和时间^[9]。而协同克里格法可以利用与目标变量相关性较好的辅助变量来提高目标变量的估值精度，并被证实可以在保证预测精度的条件下优化采样数量^[9-11]。近年来，许多学者利用此方法对土壤电导率^[11]、水分和盐分^[10-12]等特性进行估值，并在此基础上对采样数量进行优化研究。【本研究切入点】但利用协同克里格法对土壤重金属进行研究的报道较少且所选择区域多为田块和规则的试验小区^[9,13]，更大尺度上的拓展研究仍鲜见报道。此外，土壤有机质与土壤铜含量之间具有较好的相关性^[14]，且土壤有机质含量测定耗时较少，可作为辅助变量在协同克里格法的支持下提高土壤铜含量的估值精度，有利于研究土壤铜含量空间分布特征及优化采样数量。【拟解决的关键问题】为此，本研究利用协同克里格法结合土壤有机质含量对四川省双流县农田土壤铜含量空间分布特征进行插值分析，并在保持目标变量空间结构性和预测精度的前提下探讨该区域在今后类似研究中的采样数量。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

双流县位于成都平原东南部，地处东经 103°43′~104°15′，北纬 30°13′~30°40′，东西宽 46 km，南北长 49 km，面积 1 072 km²。县境内地貌组合完整，西北部为成都平原的一部分，东南部为低山区，西南至东北部为丘陵区。气候类型为亚热带湿润季风气候，年均气温 16.2℃，年均降雨量 985.1 mm。全县辖 25 个乡镇（镇）、3 个开发区，人口 90.64 万，区域内经济发达，是全国百强县之一。

1.2 样点的采集

采样点在研究区内尽量均匀分布，同时兼顾土壤类型和地形特点，在保证样品代表性的前提下，平均

$$\gamma_{ij}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{a=1}^{N(h)} [Z_i(x_a) - Z_i(x_a + h)] \times [Z_j(x_a) - Z_j(x_a + h)]$$

每 1.72 km² 左右布设一个采样点，在人为活动强烈的平原区，加密布点。每个土样以取土点为中心，在 10 m 半径内取 5~10 个耕层土样（0~20 cm）混合而成，同时用 GPS（Garmin 72）记录中心点的位置，全县共采集 623 个土样（图 1）。

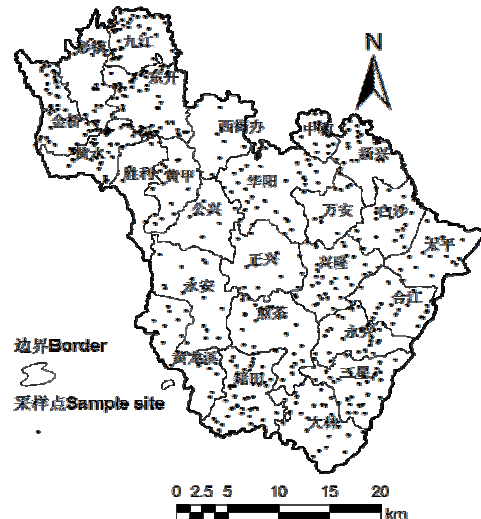


图 1 土壤样点分布图

Fig. 1 Distribution map of sampling points

1.3 测定项目及方法

土壤铜含量采用 HNO₃-HF-HClO₄ 消化，原子吸收分光光度法测定；土壤有机质含量采用 K₂Cr₂O₇-H₂SO₄ 稀释热法测定^[15]。

1.4 数据处理

1.4.1 地统计学方法 在地统计学中，半方差函数的一些重要参数如块金值、基台值和变程等可以用来表示区域化变量在一定尺度上的空间变异和相关程度，它是研究土壤特性空间变异的关键，也是精确克里格插值的基础^[16-17]。在本征平稳假设下，半方差计算公式为：

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

式中， $r(h)$ 为间隔距离 h 的半方差，也是以 h 为间距所有观测点的成对数目， $N(h)$ 是间距为 h 的计算对数， $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i+h)$ 分别是区域化变量 $Z(x)$ 和 $Z(x+h)$ 在空间位置 x_i 和 x_i+h 处的实测值。

两个随机变量的协同区域化可以用下列的交互半方差函数来表示^[11]：

式中, $r_{ij}(h)$ 是两个变量的交互半方差值, $N(h)$ 是具有相同间距 h 的变量 $Z_i(x)$ 和 $Z_j(x)$ 的离散点的数目。如果两个变量是正相关的, 那么变量 Z_i 从 x_a 到 x_{a+h} 的增加或减少会引起 Z_j 的增加或减少, 交互半方差就是正值。

如果变异函数和相关分析的结果表明某一属性的空间相关性存在, 则可以利用普通克里格进行插值。其公式为:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i)$$

式中, $z^*(x_0)$ 是待估点 x_0 处的估计值, $z(x_i)$ 是实测值, λ_i 是分配给每个实测值的权重且 $\sum \lambda_i = 1$ 。 n 是参与点估值的实测值的数目。

协同克里格法是普通克里格法的扩展形式, 它要用到两个或两个以上的变量, 其中一个为主变量, 其它的作为辅助变量, 将主变量的自相关性和主辅变量的交互相关性结合起来用于无偏最优估值中。其公式为:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_{1i} z_1(x_i) + \sum_{j=1}^p \lambda_{2j} z_2(x_j)$$

式中, $z^*(x_0)$ 是待估点 x_0 处的估计值, $z_1(x_i)$ 和 $z_2(x_j)$ 分别是主变量 z_1 和辅助变量 z_2 的实测值, λ_i 和 λ_j 分别是分配给主变量 z_1 和辅助变量 z_2 的实测值的权重, 且 $\sum \lambda_{1i} = 1$, $\sum \lambda_{2j} = 0$ 。 n 和 p 是参与 x_0 点估值的主变量 z_1 和辅助变量 z_2 的实测值数目。

1.4.2 预测精度检验 用评价方法(协同克里格法)的均方根误差相对于参考方法(普通克里格法)的均

方根误差减少的百分数(RMSSE)表示预测精度的提高程度。

$$\text{RRMSE} = (\text{RMSE}_{\text{OK}} - \text{RMSE}_{\text{CK}}) \times 100\% / \text{RMSE}_{\text{OK}}$$

用 R_R 表示评价方法相对于参考方法相关系数的提高程度。

$$R_R = (R_{\text{CK}} - R_{\text{OK}}) / R_{\text{OK}} \times 100\%$$

式中, RMSE_{OK} 和 R_{OK} 分别是参考方法的预测均方根误差及预测值与实测值间的相关系数, RMSE_{CK} 和 R_{CK} 分别表示评价方法的预测均方根误差及预测值与实测值间的相关系数。

1.4.3 软件平台

SPSS11.5: 描述性统计分析、相关性分析。

GS+5.3: 半方差函数分析, 交互半方差分析。

ArcGIS9.0: 数字化地图、Ordinary kriging 插值、Cokriging 插值、随机抽样。

2 结果与分析

2.1 土壤铜含量的协同克里格估值

2.1.1 土壤铜和有机质含量的协同区域化特征分析 由表 1 分析可知, 土壤铜含量呈对数正态分布, 而土壤有机质含量呈正态分布。土壤铜含量偏度峰度和均较大, 表明其变化范围大, 但分布较为集中, 为后期的数据缩减提供了一定的空间。土壤铜和有机质含量均属于中等变异强度, 对二者进行 person 相关性分析发现, 其相关系数为 0.146, 达到了极显著水平, 说明它们在县域内受同样的区域化现象或空间过程的影响, 属于协同区域化变量。

表 1 土壤铜和有机质含量描述性统计分析

Table 1 Description statistics of the soil Cu and OM contents

项目 Item	平均值 Mean	中值 Median	最小值 Min.	最大值 Max.	标准差 SD	变异系数 CV (%)	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	分布类型 Distribution type
铜 Cu(mg·kg ⁻¹)	36.57	36.25	13.03	88.01	9.24	25.27	1.298	4.231	对数正态 Lognormal
有机质 OM(g·kg ⁻¹)	30.23	29.86	3.70	77.15	10.75	35.56	0.611	1.555	正态 Normal

由图 2 分析可知, 土壤铜和有机质含量的变化全域均为 51 062.09 m, 且在 42 551.74 m 步长变化域内, 二者半方差函数变化相对平稳。当步长变化域大于 42 551.74 m 时, 二者半方差函数变化不稳定, 其散点图逐渐分散, 这是土壤铜和有机质含量空间变异的各向异性导致的^[18]。因为随着距离的增加, 导致土壤铜和有机质含量空间变异的各种因素在不同方向上的差异会越来越明显。

在 42 551.74 m 步长变化域内, 分别对土壤铜和有

机质含量不同步长间距下的半方差函数模型进行拟合, 得到了较好的半方差函数理论模型。由表 2 可知, 土壤铜含量以 1 000 m 步长下的球状模型为最佳模型, 土壤有机质含量以 1 600 m 步长下的高斯模型为最佳模型。从块金值与基台值的比值可以看出, 土壤铜和有机质含量均具有中等的空间相关性, 其空间变异受结构性因素和随机性因素的共同影响。土壤铜和有机质含量最佳模型所得的变程分别为 28 281 m 和 28 990 m, 一方面表明二者在县域内存在空间相关性的范围

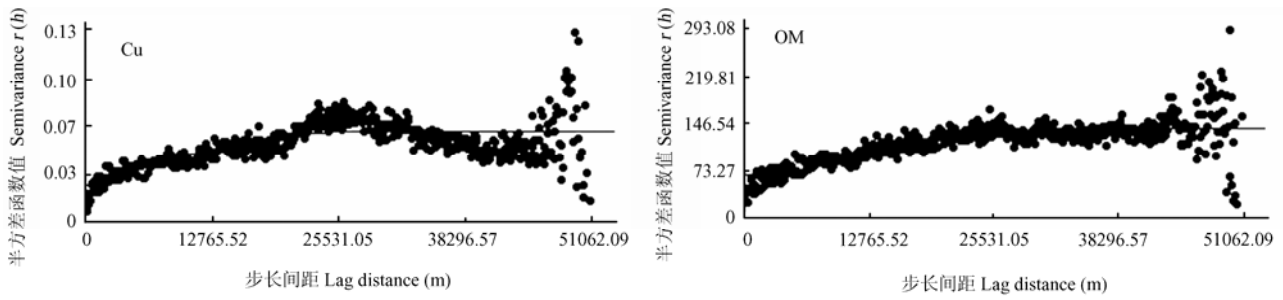


图 2 全域内土壤铜和有机质含量各向同性实验与理论半方差

Fig. 2 Global experimental and model-fitted semivariograms of soil Cu and OM contents at the full extent

表 2 土壤铜和有机质含量各向同性半方差函数理论模型及有关参数

Table 2 Theoretical isotropic semivariogram model and corresponding parameters of soil Cu and OM contents

分析项目 Analysis item	模型 Model	步长 Lag(m)	块金值 C_0	基台值 C_0+C	变程 Range (m)	$C_0/(C_0+C)$ (%)	决定系数 R^2	残差 RSS
铜 Cu	S	1000	0.03034	0.06984	28281	43.44	0.845	1.142E-06
有机质 OM	G	1600	0.07620	0.17740	28990	43.00	0.965	1.056E-03

S 表示球状模型, G 表示高斯模型。下同 S refers to Spherical model, G refers to Gaussian model. The same as below

很接近, 属于空间相关性密切的协同变量; 另一方面土壤铜含量的变程大大超出取样设计的样点距离, 表明可以在区域内根据一定的精度要求缩减样点, 这为后期缩减样点尝试协同克里格估值提供了一定的依据。

2.1.2 土壤铜含量的协同克里格和普通克里格插值 为了直观描述研究区农田土壤铜含量的空间分布特征, 利用协同克里格法对初始的 623 个样点数据进行

插值, 获得了农田土壤铜含量的空间分布图(图 3-a), 并与最常用的普通克里格法绘制的空间分布图(图 3-b)进行了对比。从图 3 可以看出, 两种插值方法所获得的分布图在整体趋势和具体斑块形状上极为接近, 表明协同克里格法和普通克里格法都能够较好地反映研究区农田土壤铜含量的空间分布情况。研究区农田土壤铜含量总体上呈现出西北高东南低的趋势。研究区西北部为成都平原的一部分, 地势平坦, 母质

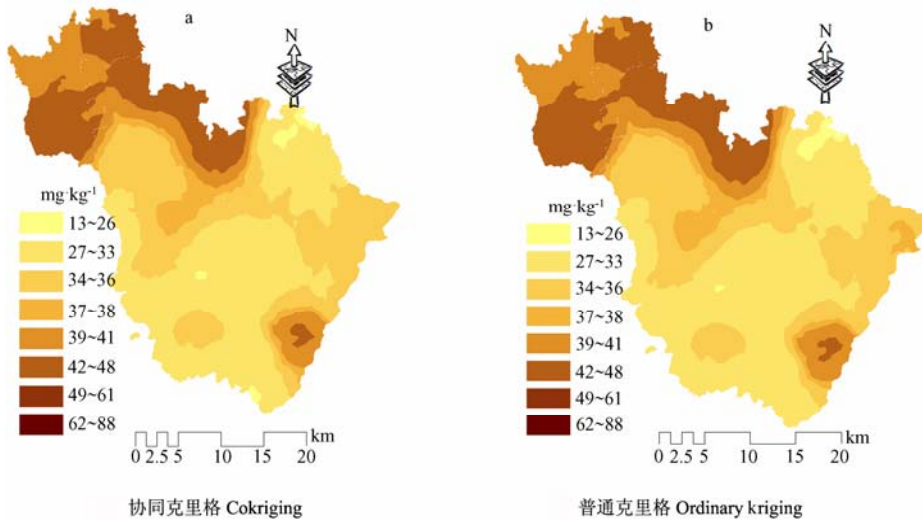


图 3 土壤铜含量协同克里格和普通克里格插值图 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Fig. 3 Interpolation maps of the concentration of Cu in soil using Cokriging and ordinary Kriging

主要为第四纪全新统灰色冲积物，多形成水稻土，有机质含量丰富。据报道，土壤铜在有机质中积累效应显著，有机质含量高的土壤具有较高的铜含量^[19]。此外，研究区西北部有机肥施用量大，而动物饲料中常添加大量的硫酸铜作为骨骼强健剂，其中大部分不能被动物吸收而随粪便排出体外^[20]，因此造成有机肥中铜含量较高进而影响土壤中的铜含量。

2.2 利用协同克里格法在空间变异基础上优化采样数量

统计分析表明，土壤铜含量和土壤有机质含量间具有极显著的相关性，属于协同区域化变量。因此，可以利用协同克里格法结合辅助变量的空间信息来提高目标变量的估值精度。本研究以土壤铜含量作为目标变量，并利用 ArcGIS 将其初始的 623 个样点随机

缩减到 90% (560 个)、80% (498 个) 及 70% (436 个)，以初始的 623 个样点有机质含量数据为辅助变量，利用协同克里格法分析在不同样点数量下土壤铜含量的预测精度，并对不同取样数量下协同克里格法的适用性进行了评价。

由表 3 分析可知，不同样点数量下土壤铜含量的半方差和交互半方差函数均以球状模型为最佳拟合模型。分析块金值和基台值之比可知，相同样点数量下，单个变量和交互变量（协同区域化变量）的空间相关程度比较接近，均具有中等空间相关性。而交互变量的变程均大于单变量，表明交互变量由于融合了辅助变量的空间信息，扩展了变量具有空间相关性的范围。因此，相同样点数量下，协同克里格法比普通克里格法具有更大的适用范围。

表 3 不同采样数量土壤铜含量的半方差函数和交互半方差函数模型及其参数

Table 3 Model and parameters of semivariogram and cross-semivariogram for the concentration of Cu in soil under different sampling numbers

样点数 Sample No.	变异函数类型 Type of semivariogram	模型 Model	块金值 C_0	基台值 C_0+C	$C_0/(C_0+C)$ (%)	变程 Range (m)	决定系数 R^2
623	单变量 Single variable	S	0.03034	0.06984	43.44	28281	0.845
	交互变量 Cross variable	S	0.02945	0.06897	42.70	30367	0.869
560	单变量 Single variable	S	0.02970	0.06939	42.80	27895	0.884
	交互变量 Cross variable	S	0.02879	0.06851	42.02	30024	0.862
498	单变量 Single variable	S	0.03431	0.07109	48.26	27130	0.817
	交互变量 Cross variable	S	0.03320	0.07017	47.31	30769	0.838
432	单变量 Single variable	S	0.02583	0.07084	36.46	28500	0.896
	交互变量 Cross variable	S	0.02554	0.07040	36.29	30753	0.847

进一步的预测精度比较表明（表 4），4 种样点数量下，协同克里格法预测的均方根误差与普通克里格法相比分别减少了 0.9%、2.78%、2.59% 及 7.77%，而预测值与实测值的相关系数分别提高了 2.52%、1.76%、1.99% 及 9.76%。表明相同的取样数量下，协

同克里格法由于融合了更丰富的空间信息，预测的精度要高于普通克里格法，可利用该方法优化采样数量。

由于目前绝大多数研究均采用全部样点的变量信息，利用普通克里格法分析区域内变量的空间分布特征。因此，本研究以初始的 623 个样点土壤铜含量数

表 4 土壤铜含量的协同克里格和普通克里格估测精度的比较

Table 4 Comparison of predict accuracy of the concentration of Cu in soil by co-kriging and ordinary kriging

样点数 Sample No.	普通克里格 Ordinary Kriging		协同克里格 Cokriging		RRMSSE (%)	R_R (%)
	RMSE	r	RMSE	r		
623	7.911	0.516**	7.840	0.529**	0.90	2.52
560	7.991	0.511**	7.769	0.520**	2.78	1.76
498	8.139	0.502**	7.928	0.512**	2.59	1.99
436	8.852	0.492**	8.164	0.540**	7.77	9.76

RMSE: 均方根误差; r : 实测值与预测值之间的相关系数; RRMSSE: 均方根误差的相对减少; R_R : 相关系数的相对提高

RMSE: Root-mean-square error; r : Correlation coefficient between measured values and predicted values; RRMSSE: Relative reduces of root-mean-square error; R_R : Relative improvement of correlation coefficient

据普通克里格插值的预测精度作为参考，对比了 4 种样点数量下协同克里格插值的精度，由于两种方法选用同一模型进行模拟，所以主要选取均方根误差及预测值 (*RMSE*) 与实测值间的相关系数 (*r*) 作为比较指标^[21]。由表 4 可知，当初始样点缩减到 90% 时，协同克里格法的预测精度仍高于初始 623 个样点土壤铜含量的普通克里格插值。因此，本研究可利用协同克里格法在保证预测精度的条件下，有效缩减 10% 的初始样点。而当初始样点缩减 30% 时，虽然协同克里格法获得的预测值与实测值间的相关系数较高，但其产生的均方根误差较大，不能作为样点缩减量。

为了更直观地了解减少样点数量对描述研究区农田土壤铜含量空间分布特征的影响，利用协同克里格

法绘制了不同取样数量下土壤铜含量的空间分布图 (图 4)。对比图 4 和图 3-b 可知，在初始样点缩减到 70% 时，协同克里格插值图与初始 623 个样点的普通克里格插值图仍具有较高的相似性，但仔细对比斑块的形状可以看出，图 4-a 及图 4-b 与图 3-b 最为接近，表明只有初始当样点数量缩减到 90% 时，协同克里格插法获得的土壤铜含量插值图与初始 623 个样点的普通克里格插值图最为接近，这与表 4 的结果一致。

3 讨论

3.1 县域尺度下利用协同克里格法优化采样数量的特征

由于土壤有机质含量和铜含量之间具有很好的相

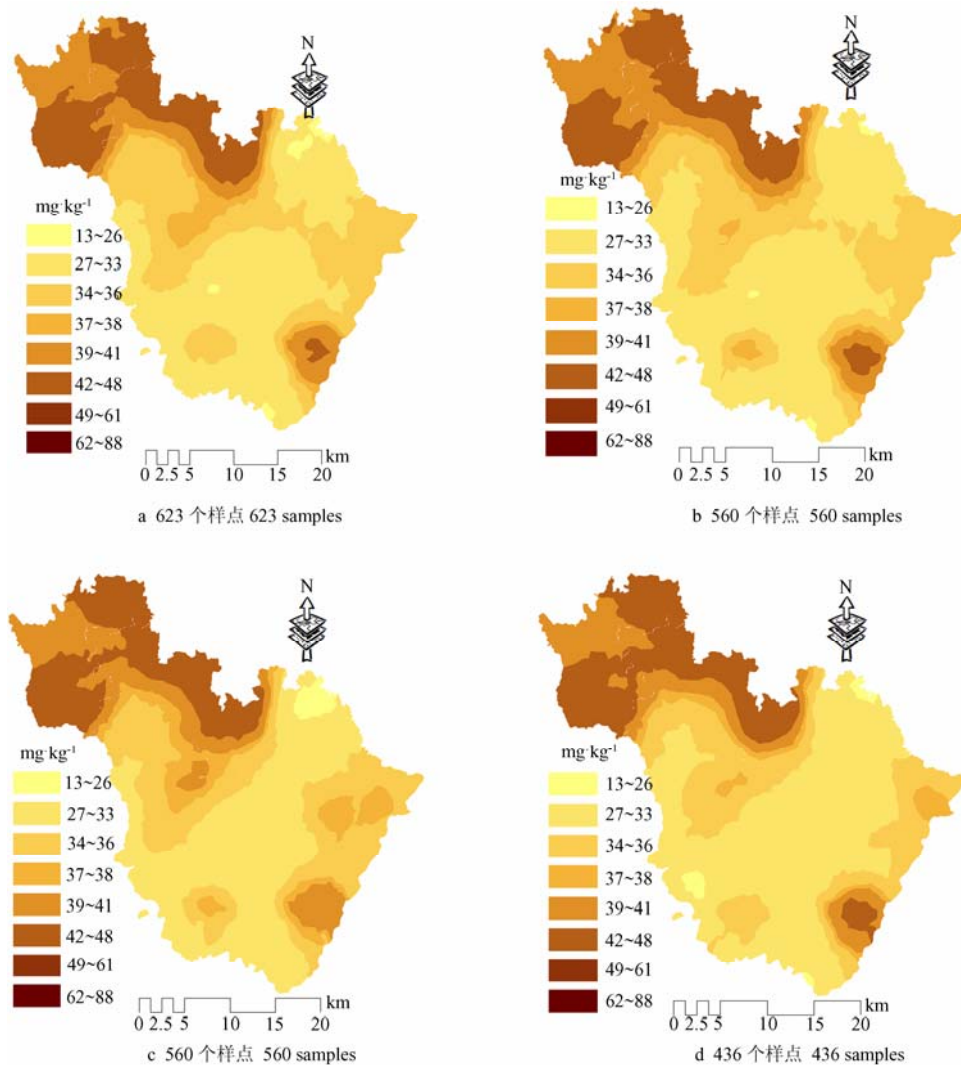


图 4 不同取样数目下土壤铜含量的协同克里格插值图 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Fig. 4 Interpolation maps of the concentration of Cu in soil using Cokriging under different sampling numbers

关性 ($r=0.146^{**}$, $P<0.01$, $n=623$) 且易于测定, 所以可作为辅助变量在协同克里格法支持下提高土壤铜含量估值的精度并在此基础上进行样点的缩减, 但与之之前对田块^[9]和试验小区^[13]的研究相比, 本研究利用协同克里格法仅能有效缩减 10% 的初始样点, 比例较低, 这可能有四方面原因造成。第一, 协同克里格法的估值精度受目标变量和辅助变量相关程度的影响, 本研究中 623 个样点土壤铜含量和有机质含量的相关性虽然达到了极显著水平, 但其相关系数较小, 影响了预测精度的提高程度; 第二, 本研究选择县域作为研究尺度, 相对于环境条件较为均一的田块和试验小区而言, 目标变量及辅助变量的值域变化范围大, 而且受到了各类因素在不同方向上的强烈影响, 使其各向同性的协同区域化范围缩短, 导致缩减样点后协同克里格法的适用性降低; 第三, 与之前对县域或县域以上尺度土壤重金属含量空间分布特征的研究相比^[22-24], 本研究采样数量达到了 623 个, 采样数量大, 密度高, 即使缩减 30%, 仍达到 436 个, 相对于之前的研究来说采样数量仍相当充足。而对于协同区域化变量, 如果全部半方差函数和交互变异函数都与一个基本模型成正比 (本研究为球状模型), 这些变量则称为本征协同区域化变量, 如果此时每个变量数据构形相同, 则某一点上的协同克里格估值与普通克里格估值一致。因此, 只有当目标变量采样数量明显不足时, 协同克里格法的适用性才更强^[25]。第四, 增加采样密度和样点数量是提高普通克里格法预测精度的关键, 本研究中样点数量较多, 全部原始数据下的普通克里格插值精度较高, 以此作为参考标准提高了协同克里格法缩减样点的要求, 从而在一定程度上限制了样点缩减的比例。

3.2 县域尺度下利用协同克里格法优化采样数量的优势

县域尺度是中国大量的调查研究如测土配方施肥、耕地地力评价、土壤环境质量调查及土壤信息系统建立的基础尺度。在这些工作中, 采样数量往往非常庞大, 而采样数量既是保证精度的关键, 也是节约成本的重要因素。因此, 对县域尺度下的采样数量进行优化研究具有重要意义。地统计学中对未采样点土壤特性克里格插值的权重和方差主要依赖于样点间的空间相关程度, 只有保证变量在缩减样点后的空间相关程度与原始数据较为接近, 才能确保缩减样点后克里格估值的精确性。常规随机抽样法以及为此所构造的 Cochran 公式也被用于优化采样数量的研究^[26], 但

该方法没有考虑变量的空间结构特征, 不能确保缩减样点后估值的精确性^[13]。协同克里格法可利用辅助变量弥补目标变量在缩减样点后实测点间以及待估值点与临近实测点间位置关系的缺失, 也可利用辅助变量的空间信息保证目标变量的空间相关程度不发生较大变化。之前利用该方法的相关研究主要集中在田块尺度和特定的试验小区, 需要向更大的尺度进行拓展, 以便更好地指导实际工作。本研究表明 (表 3、表 4), 利用协同克里格法不但很好地保证了缩减样点后土壤铜含量的空间相关程度不受较大影响, 而且能够确保估值的精确性, 说明该方法在优化采样数量的研究中具有一定的优势, 可以在今后对该区域类似的研究中加以应用。此外, 随着样点数量的减少, 协同克里格法相对于普通克里格法在预测精度上的提高程度大体上有逐渐增加的趋势。因此, 在今后的研究中, 可以尝试增大目标变量与辅助变量的数量差异, 探讨在县域尺度下, 目标变量明显不足时, 协同克里格法的适用性。

4 结论

- 4.1 协同克里格法和普通克里格法均可反映县域农田土壤铜含量的空间分布特征。在相同取样数量下, 协同克里格法的预测精度要高于普通克里格法;
- 4.2 在初始样点数量缩减 10% 的情况下, 协同克里格插值的预测精度仍高于初始 623 个样点的普通克里格插值, 且二者的空间分布图具有极高的相似性, 说明本研究利用协同克里格法可在保证精度的条件下有效缩减 10% 的初始样点;
- 4.3 协同克里格法在县域农田土壤铜含量空间分布的研究中具有一定的适用性, 可进行更深入的研究。

References

- [1] Wu C F, Wu J P, Luo Y M, Zhang H B, Teng Y. Statistical and geostatistical characterization of heavy metal concentrations in a contaminated area taking into account soil map units. *Geoderma*, 2008, 144: 171-179.
- [2] 刘 斌, 黄玉溢, 陈桂芬. 广西耕地土壤铜的含量及其影响因素. *广西农业科学*, 2006, 37(6): 707-709.
Liu B, Huang Y Y, Chen G F. Study on Cu content in cultivated soils and its influence factors in Guangxi. *Guanxi Agriculture Science*, 2006, 37(6): 707-709. (in Chinese)
- [3] 谭万能, 李志安, 邹 碧, 丁永祯. 地统计方法在土壤学中的应用. *热带地理*, 2005, 25(4): 307-311.

- Tan W N, Li Z A, Zou B, Ding Y Z. The application of geostatistics to soil science. *Tropical Geography*, 2005, 25(4): 307-311. (in Chinese)
- [4] 姚荣江, 杨劲松, 刘广明. 黄河三角洲地区典型地块地下水特征的空间变异性研究. *土壤通报*, 2006, 37(6): 1071-1075.
- Yang R J, Yang J S, Liu G M. Spatial variability of groundwater properties in some typical areas of the Yellow river delta. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(6): 1071-1075. (in Chinese)
- [5] 熊汉锋, 王运华. 梁子湖湿地土壤养分的空间异质性. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(5): 584-589.
- Xiong H F, Wang Y H. Spatial variability of soil nutrients in wetland of Liangzi Lake. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(5): 584-589. (in Chinese)
- [6] 王晋民, 王俊鹏, 胡月明, 赵之重. 栗钙土农田土壤养分空间变异特性及采样方法研究. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(5): 59-63.
- Wang J M, Wang J P, Hu Y M, Zhao Z Z. Studies on spatial variability of soil nutrients and sampling methods in a field of chestnut soil. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(5): 59-63. (in Chinese)
- [7] 王宗明, 张 柏, 宋开山, 刘殿伟, 李建平, 黄 健, 张惠琳. 东北平原典型农业县农田土壤养分空间分布影响因素分析. *水土保持学报*, 2007, 21(2): 73-77.
- Wang Z M, Zhang B, Song K S, Liu D W, Liu D W, Li J P, Huang J, Zhang H L. Analysis of related factors for soil nutrients in cropland of typical agriculture county, north plain, China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 73-77. (in Chinese)
- [8] Wu J, Norvell W A, Welch R M. Kriging on highly skewed data for DTPA-extractable soil Zn with auxiliary information for pH and organic carbon. *Geoderma*, 2006, 134: 187-199.
- [9] 姜 勇, 李 琪, 张晓珂, 梁文举. 利用辅助变量对污染土壤锌分布的克里格估值. *应用生态学报*, 2006, 17(1): 97-101.
- Jiang Y, Li Q, Zhang X K, Liang W J. Kriging prediction of soil zinc in contaminated field by using an auxiliary variable. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(1): 97-101. (in Chinese)
- [10] 李 艳, 史 舟, 程街亮, 金辉明, 王人潮. 辅助时序数据用于土壤盐分空间预测及采样研究. *农业工程学报*, 2006, 22(6): 49-55.
- Li Y, Shi Z, Chen J L, Jin H M, Wang R C. Spatial forecast and sampling of soil salinity by Kriging with temporally auxiliary data. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(6): 49-55. (in Chinese)
- [11] 李 艳, 史 舟, 王人潮, 黄明祥. 海涂土壤剖面电导率的协同克里格法估值及不同取样数目的比较研究. *土壤学报*, 2004, 41(3): 434-443.
- Li Y, Shi Z, Wang R C, Huang M X. Estimates of electrical conductivity for coastal saline soil profile using Cokriging under different sampling density. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(3): 434-443. (in Chinese)
- [12] 胡克林, 李保国, 陈德立, R. E. White. 农田土壤水分和盐分的空间变异性及其协同克里格估值. *水科学进展*, 2001, 12(4): 460-466.
- Hu K L, Li B G, Chen D L, White R E. Spatial Variability of soil water and salt in field and their estimation by the Cokriging. *Advances in Water Science*, 2001, 12(4): 460-466. (in Chinese)
- [13] 陈 涛. 杭州市城郊蔬菜地土壤重金属污染及其空间变异研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 100-110.
- Chen T. Pollution and spatial variability characteristics of heavy metal of vegetable soil in suburbs of Hangzhou city[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007: 100-110. (in Chinese)
- [14] 陈世俭. 有机物质添加量对污染土壤铜形态及活性的影响. *土壤与环境*, 1999, 8(1): 22-25.
- Chen S J. Effects of the amount of organic matter added on fractionation and availability of copper in contaminated soil. *Soil and Environmental Sciences*, 1999, 8(1): 22-25. (in Chinese)
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 1999: 30-32.
- Bao S D. *Soil and Agriculture Chemistry Analysis*. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1999, 30-32. (in Chinese)
- [16] Yang J, Huang Z C, Chen T B, Lei M, Zhang Y M, Zhang G D, Song B, Liu Y Q, Zhang C S. Predicting the probability distribution of Pb-increased lands in sewage-irrigated region: A case study in Beijing, China. *Geoderma*, 2008, 147: 192-196.
- [17] 姜 勇, 庄秋丽, 梁文举, 施春健, 欧 伟. 空间变异在土壤性质长期定位观测及取样中的应用. *土壤通报*, 2005, 36(4): 531-535.
- Jiang Y, Zhuang Q L, Liang W J, Shi C J, Ou W. Application of spatial variability in long-term site-specific observatory study of soil properties and sampling strategy. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(4): 531-535. (in Chinese)
- [18] 冯娜娜, 李廷轩, 张锡洲, 王永东, 夏建国. 不同尺度下低山茶园土壤有机质含量的空间变异. *生态学报*, 2006, 26(2): 349-356.
- Feng N N, Li T X, Zhang X Z, Wang Y D, Xia J G. The spatial variability of the content of organic matter in hilly tea plantation soils with different sampling scales. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 349-356. (in Chinese)
- [19] 张庆利, 史学正, 黄 标, 于东升, 王洪杰, Karin Blombaek, Ingrid Oboern. 南京城郊蔬菜基地土壤有效态铅、锌、铜和镉的空间分异及其驱动因子研究. *土壤*, 2005, 37(1): 41-47.
- Zhang Q L, Shi X Z, Huang B, Yu D S, Wang H J, Blombaek K, Oboern I. Characteristics of spatial variability of soil available lead, zinc, copper and cadmium in a vegetable base in the suburbs of Nanjing. *Soils*, 2005, 37(1): 41-47. (in Chinese)

- [20] 晁 雷, 周启星, 崔 爽, 陈 苏, 任丽萍. 堆肥对土壤重金属垂直分布的影响与污染评价. *应用生态学报*, 2007, 18(6): 1346-1350.
Chao L, Zhou Q X, Cui S, Chen S, Re L P. Profile distribution and pollution assessment of heavy metals in soils under livestock faces composts. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(6): 1346-1350. (in Chinese)
- [21] 赵其国, 史学正. 土壤资源概论. 北京: 科学出版社, 2007: 179-180.
Zhao Q G, Shi X Z. *Introduction of Soil Resource*. Beijing: Science Press, 2007: 179-180. (in Chinese)
- [22] 李启权, 王昌全, 李 冰, 杨 娟, 杨 艳. 成都平原土壤中砷的空间分布及污染评价. *土壤通报*, 2007, 38(2): 357-360.
Li Q Q, Wang C Q, Li B, Yang J, Yang Y. Spatial distribution and pollution assessment of soil arsenic in the Chengdu plain. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(2): 357-360. (in Chinese)
- [23] 代 英, 张世熔, 李 婷, 魏 甦, 刘英华. 成都平原土壤 Hg 和 Pb 的空间分布及影响因素研究. *农业环境科学学报*, 2006, 25(3): 745-750.
Dai Y, Zhang S R, Li T, Wei S, Liu Y H. Spatial distribution and influencing factors of soil mercury and lead in Chengdu plain. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(3): 745-750. (in Chinese)
- [24] 肖思思, 黄贤金, 彭补拙, 濮励杰, 陈 逸. 经济发达县域耕地土壤重金属污染评价及其影响因素分析——以江苏省昆山市为例. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(9): 674-679.
Xiao S S, Huang X J, Peng B Z, Pu L J, Chen Y. Analysis of heavy metal pollution and assessment of its environmental effect in developed areas——A case study in Kunshan of Suzhou city, Jiangsu Province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(9): 674-679. (in Chinese)
- [25] 孙英君, 王劲峰, 柏延臣. 地统计学方法研究进展. *地球科学进展*, 2004, 19(2): 268-274.
Sun Y J, Wang J F, Bai Y C. Study on progress of methods in geostatistics. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(2): 268-274. (in Chinese)
- [26] 张世熔, 孙 波, 赵其国, 李 婷, 陈明明, 黄丽琴. 南方丘陵区不同尺度下土壤氮素含量的分布特征. *土壤学报*, 2007, 44(5): 885-892.
Zhang S R, Sun B, Zhao Q G, Li T, Chen M M, Huang L Q. Distribution characteristics of soil nitrogen at multi-scales in hilly region in south China. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(5): 885-892. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)

欢迎订阅 2010 年《中国生态农业学报》

《中国生态农业学报》由中国科学院遗传与发育生物研究所和中国生态经济学会主办, 中国科学院主管, 科学出版社出版。中文核心期刊、中国科技核心期刊, 被美国化学文摘、国际农业生物学文摘、美国乌利希国际期刊指南以及中国科学引文数据库、中国期刊全文数据库等多家检索系统和数据库收录。荣获第三届、四届全国农业优秀期刊一等奖和首届北方优秀期刊奖, 连续三届获得河北省优秀期刊奖。

《中国生态农业学报》主要报道农业生态学、生态学、农业资源与环境保护、农业生态经济学及生态农业建设等领域创新性研究成果。适于从事农业生态学、生态学、生态经济学以及环境保护等领域科技人员、高等院校有关专业师生, 农业及环境管理工作者和基层从事生态农业建设的广大技术人员阅读与投稿。

《中国生态农业学报》国内外公开发行, 国内刊号 CN13-1315/S, 国际刊号 ISSN1671-3990。双月刊, 国际标准大 16 开本, 192 页, 每期定价 35 元, 全年 210 元。邮发代号: 82-973, 全国各地邮局均可订阅。漏订者可直接汇款至编辑部补订(需另加邮资 24.00 元)。

地址: 河北省石家庄市槐中路 286 号 中国生态农业学报编辑部 (050021)

电话: 0311-85818007; 传真: 0311-85815093; 网址: <http://www.ecoagri.ac.cn>, E-mail: editor@sjziam.ac.cn