

# 基于 Cokriging 的耕层土壤全氮空间特征及采样数量优化研究\*

赵业婷 常庆瑞<sup>†</sup> 李志鹏 齐雁冰

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

## STUDY ON SPATIAL DISTRIBUTION OF TOTAL NITROGEN IN ARABLE SOIL LAYER AND OPTIMIZATION OF NUMBER OF SOIL SAMPLES FOR THE STUDY BASED ON COKRIGING

Zhao Yeting Chang Qingrui<sup>†</sup> Li Zhipeng Qi Yanbing

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

关键词 耕地; 全氮; 协同克里格; 空间变异性; 采样数量

中图分类号 S153.6<sup>+</sup>21; S158 文献标识码 A

全氮是土壤质量的重要指标,是陆地氮库的重要组成部分,其不仅反映土壤肥力水平,也印证区域生态系统演变规律<sup>[1]</sup>。土壤氮素含量的空间变异性是引起区域氮素迁移转化过程模拟不确定性的重要原因之一<sup>[2]</sup>。掌握土壤全氮的空间特征,可为合理制定农业种植规划及耕地管理措施提供依据,是实现耕地土壤可持续利用和土壤有机氮库调控与管理的前提<sup>[2-6]</sup>。克里格法广泛应用于土壤理化性质的空间分布研究,以仅考虑目标变量的普通克里格(Ordinary Kriging)法应用最为普遍,其精度主要受制于采样数量和采样间距,若采样数量太少会使得取样结果缺乏代表性而失去可信的价值,若太多则又需耗费过多的人力、物力与财力<sup>[7]</sup>;协同克里格法(Cokriging)则可利用与目标变量相关性较好、稳定的、易获取的辅助变量来提高目标变量的估值精度,并被证明可以在保证目标变量空间结构性与预测精度的条件下优化采样数量<sup>[7-11]</sup>。近年来,相继有许多学者采用协同克里格法对土壤中铜<sup>[7-8]</sup>、盐分<sup>[9]</sup>、剖面电导率<sup>[10]</sup>、速效养分<sup>[11]</sup>等特性及其合理采样数量进行研究,但目前此类研究多

集中在田块等小尺度区,且构建半方差函数时多假设各向同性,甚少考虑实际存在的各向异性特征,而且有关关中平原农业区土壤氮素的研究也鲜见报道。

土壤全氮测定手续繁琐,样品前期处理复杂,易产生较大误差,给快速准确分析带来一定困难,而土壤有机质测定方法较多,测定手续相对简单,二者间通常存在极显著相关关系。鉴于此,本文选取中国西部的国际化大都市—西安市的近郊长安区,在陕西省耕地地力调查与质量评价项目支持下,基于 ArcGIS 的自动化拟合优势<sup>[12]</sup>,以土壤有机质为辅助变量,采用协同克里格法,在考虑各向异性特征下,分析协同克里格法在土壤全氮估值中的适用性,研究长安区耕层土壤全氮的空间特征,同时结合随机抽样法对采样数量的优化进行定量研究与探讨,旨在为长安区精准农业发展、耕地保养及测土配方施肥项目的推进提供科学依据和实践指导。

\* 国家“863”计划(2013AA102401)、国家科技支撑计划(2012BAH29B04)和陕西省耕地地力评价项目资助

<sup>†</sup> 通讯作者,常庆瑞(1959—),陕西西洲人,教授,主要从事土地资源与空间信息技术研究。E-mail: changqr@nwsuaf.edu.cn

作者简介:赵业婷(1985—),女,山东荣成人,博士研究生,主要从事土地资源与空间信息技术研究。E-mail: sofiacoffee@163.com

收稿日期:2013-05-13;收到修改稿日期:2013-11-18

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

长安区位于西安市近郊,典型的城乡交错带,地理坐标为  $108^{\circ}63' \sim 109^{\circ}20'E$ 、 $33^{\circ}98' \sim 34^{\circ}30'N$ ,土地面积  $824.90 \text{ km}^2$ ,土地垦殖率达  $70.25\%$ ,其从西、南两个方向围拱西安市区,是西安市直接的粮食供应与保障基地。本区属暖温带半湿润大陆性

季风气候,冷暖干湿、四季分明,年均降水量  $640 \text{ mm}$ ,年均气温  $13.3^{\circ}\text{C}$ ,无霜期  $219 \text{ d}$ 。地势东南高西北低,海拔  $385 \sim 882 \text{ m}$ ,平均  $487.20 \text{ m}$ ,由北向南分布着冲积平原、黄土台塬和洪积平原(图 1)。由于长期耕作、施肥的影响,在原来的自然褐土上覆盖了数  $10 \text{ cm}$  厚的人工堆积熟化层,形成了主要的农业土壤—壤土,此外有部分淤土、潮土和黄绵土等,土壤质地以粉砂质壤土为主。植被主要为大田农作物(小麦—玉米)和城市绿化等栽培植物类型。

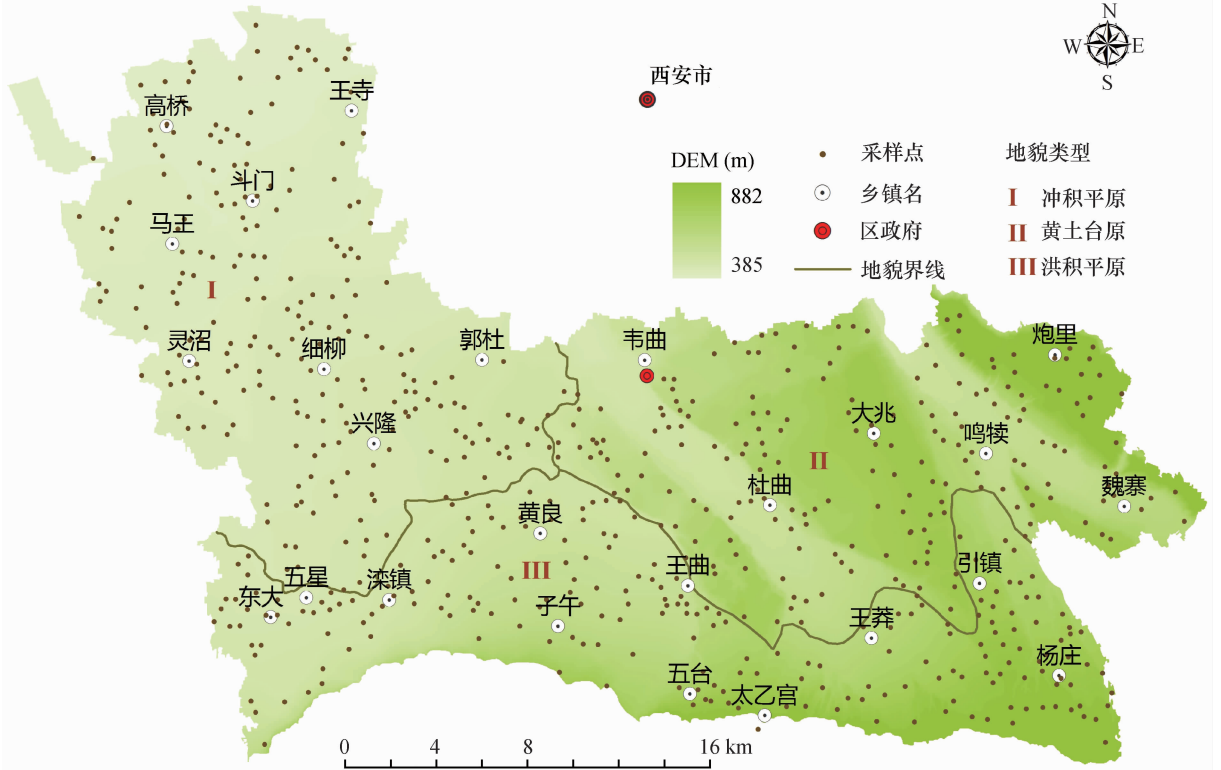


图 1 长安区地形信息与土壤采样点分布图

## 1.2 资料收集、样品采集与测定

收集整理长安区 2010 年 1:5 万土地利用现状图、行政区划图、地形图;20 世纪 80 年代全国第二次土壤普查时期的 1:5 万土壤图、质地图等相关资料。数字化纸质图件,建立空间数据库,服务于本研究。

遵照《中国耕地地力调查与质量评价技术规程》(NY/T1634-2008),在 2010 年秋,作物收获后、施肥前,根据长安区地形地貌、土壤性质、管理水平等因素特点,遵循全面性、均衡性、客观性、可比性等原则,确定采样单元。根据采样单元形状和大小确定布点方法即长方形地块采用“S”法,近似正方形地块采用“X”法或棋盘形布点法。在每一采样单元的  $0 \sim 20 \text{ cm}$  土层上选取 8 个点,混匀后用四

分法留取  $1 \text{ kg}$  土样装袋以备分析。本次采样,遍布区内 25 个街道办、380 多个村庄、38 个耕地土种类型,共采集土样 645 个(图 1),采样间距约为  $600 \text{ m}$ 。土壤属性指标均采用常规方法测定<sup>[13]</sup>。

## 1.3 采样数量优化方法

本研究采用随机抽样法从原始数据集中随机抽取 90%、85%、80% 和 70% 的全氮数据,分别构建各取样系列下其单变量和以初始 645 个有机质数据为辅助变量的交互变量的半方差函数,进行克里格插值。鉴于目前的研究大多采用全部样点的变量信息,利用普通克里格法分析区域化变量的空间特征,因此本研究以初始 645 个全氮的单变量空间结构特征及其普通克里格插值结果( $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ )为参考,从空间结构特征(空间相关性程度、长轴方位

角、自相关距离等)、插值精度与空间分布特征 3 个方面比较与分析协同克里格法优化取样数量的适用性及其合理的采样数量,以期优化长安区土壤全氮采样数量,节约成本,服务于精准农业。

#### 1.4 插值精度评价方法

因取样数量发生变化时,样点相对空间位置及其所承载的信息量均发生变化,且比较不同样本数量的预测精度时,其平均值、标准差等统计特征存在波动性。为使各取样系列间预测精度具有可比性,结合孙波、李艳等<sup>[8-11,14-16]</sup>的研究方法,本研究采用以下 3 个精度评价指标:

(1)采用初始 645 个样点在各取样系列下,基于普通克里格与协同克里格法预测值与实测值间的均方根误差 (RMSE) 来衡量预测的准确性<sup>[8-11,14]</sup>。

(2)采用预测值与实测值之间的相关系数( $r$ ),相关系数越大预测结果越优<sup>[15]</sup>。

(3)采用 Costantini 提出的偏差指数(DI)<sup>[9,16]</sup>量化各取样数量下的全氮空间分布图与初始全氮空间分布图的相似程度,即偏差指数 DI 越小相似程度越高,试从面上予以比较。

#### 1.5 软件平台

SPSS19:基本统计学分析,正态分布性检验,方

差分析及相关性分析等。

Minitab15:选取土壤有机质含量的最优正态分布拟合参数  $\lambda$  (Box - Cox 数据变换,  $\lambda = 0.39$ )<sup>[17]</sup>。

ArcGIS 9.3:随机抽样,地统计学分析(构建半方差函数、Ordinary Kriging 与 Cokriging 插值),空间分析(栅格计算、叠加操作、面积量化等),3D 分析(提取地形因子、绘制等值线)等。

## 2 结果

### 2.1 土壤全氮基本统计特征

长安区耕层土壤全氮含量介于 0.39 ~ 1.89 g kg<sup>-1</sup>,平均值为 1.11 g kg<sup>-1</sup>,处于陕西省土壤全氮分级标准的第 4 级即 1.00 ~ 1.25 g kg<sup>-1</sup>,属中等变异强度(表 1)。与 20 世纪 80 年代全国第二次土壤普查时期数据相比,全氮平均含量提高了 15.79%,变异系数则下降了 52.38%,含量向区域均匀化方向发展。随机抽取的 4 个样本系列(90%、85%、80% 和 70%)中全氮含量与原始样点数据具有相似的统计特征,平均值控制在 5% 误差内,表明本研究随机划分的采样数量均具有较好的代表性。

表 1 不同取样数量下的土壤全氮统计特征

样本容量 (%)	样本数量(个)	最小值	最大值	平均值	中值	标准差	偏度	峰度	变异系数 (%)	K-S 检验
		(g kg <sup>-1</sup> )								
100	645	0.39	1.89	1.11	1.09	0.25	0.45	3.83	22.99	0.15
90	580	0.39	1.89	1.11	1.09	0.25	0.43	3.85	22.88	0.16
85	548	0.39	1.89	1.10	1.09	0.25	0.43	3.88	22.67	0.17
80	516	0.39	1.89	1.11	1.09	0.26	0.48	3.71	23.40	0.20
70	451	0.39	1.89	1.11	1.09	0.26	0.41	3.61	23.17	0.31

### 2.2 土壤全氮含量的影响因素

近 30 年,随着机械化作业程度的提高,作物秸秆还田措施的普及,有机肥和化肥的大量施用等,使得长安区耕层土壤全氮含量有不同程度的提高,其中靠近城区的杜曲镇、大兆镇相对增量少增速慢,而距城区较远的灵沼镇、滦镇和子午镇增量较多增速快,呈现出明显的城乡过渡特征,可见施肥、管理等人为活动发挥着重要作用。为充分了解与掌握现今影响长安区耕层土壤全氮含量的影响因子,更好地指导农业生产,本文提取地形地貌、土壤类型和土地利用等因子进行统计分析,结果见表 2

和表 3。

概念型因子(地貌类型、土壤类型、土壤质地和种植模式)内土壤全氮含量存在显著性差异( $p < 0.05$ ),其中以地貌类型间差异最显著( $F = 36.90^*$ ,  $p < 0.05$ ),洪积平原 > 平均水平 > 黄土台原 > 冲积平原;其次是种植模式,小麦 - 水稻地显著高于传统的小麦 - 玉米地;再者为土壤类型,水稻土 > 娄土 > 平均水平 > 淤土 > 黄绵土 > 潮土;土壤质地间的差异程度最小,砂壤含量显著小于其他质地( $p < 0.05$ ),全氮含量基本上随土壤颗粒的变细而增加,即黏壤土 > 壤土 > 平均水平 > 粉砂质壤土 > 砂壤

(表 2)。环境变量中以有机质与全氮相关性最高,呈极显著正相关关系( $r = 0.621^{**}$ ,  $n = 645$ );其他相关性变量依次为:土壤 pH > 距水系沟渠距离 > 降水 > 海拔 > 坡度 > 坡向(表 3)。

整体上,土壤全氮含量大致随地势升高和地貌类型变化呈纵向增加趋势。西北部冲积平原地势低,其北部土壤大部分为潮土,耕种熟化程度低,地下水位高、土壤碱性强,人为干扰程度强,不利于有机质的积累,全氮含量显著低( $p < 0.05$ );东部的黄

土台源地形梯度变化复杂,坡向多为南、西南向即阳坡,水源相对缺乏,自然基底差,氮素含量不高;南部洪积平原地势高,坡向多为西北、北向即阴坡,气温低,降水多,蒸发少,有机质分解弱积累高,全氮随之亦高。整体上,土壤全氮含量水平随热量条件的增加而降低,随湿润度的增加而增高。人为活动如施肥、灌溉等和地形地貌等是影响研究区耕层土壤全氮分布的重要因子。

表 2 不同因素下土壤全氮的方差分析

因素	指标	平均值( $\text{g kg}^{-1}$ )	F 值	因素	指标	平均值( $\text{g kg}^{-1}$ )	F 值
土壤类型	水稻土	1.19 ± 0.03a	5.42 *	质地	砂壤	0.96 ± 0.04b	2.87 *
	壤土	1.14 ± 0.01ab			壤土	1.12 ± 0.02a	
	淤土	1.10 ± 0.02bc			粉砂质壤土	1.10 ± 0.01a	
	黄绵土	1.05 ± 0.02c			黏壤土	1.18 ± 0.04a	
	潮土	1.02 ± 0.03c			冲积平原	1.02 ± 0.01c	
种植模式	小麦 - 水稻	1.35 ± 0.05b	8.42	地貌类型	黄土台塬	1.07 ± 0.02b	36.90 *
	小麦 - 玉米	1.10 ± 0.02a			洪积平原	1.21 ± 0.02a	

注:同种因素不同指标间不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

表 3 土壤全氮与环境变量的相关系数

项目	海拔	坡度	坡向	pH	有机质	降水量	距水系沟渠距离
全氮	0.144 **	0.142 **	0.082 **	-0.206 **	0.621 **	0.154 **	-0.183 **

注: \*\* 表示  $p < 0.01$  的极显著水平,  $n = 645$

### 2.3 土壤全氮空间变异特征

初始土壤全氮的单变量和以有机质为辅助变量的交互变量的最优半方差函数参数如表 4 所示,土壤全氮最优理论模型均为指数模型,且具有较明

显的各向异性特征,块金系数介于 0.55 ~ 0.65,均表现为中等强度的空间相关性,表明土壤全氮的空间变异性受结构性因素和随机因素共同作用,即受研究区水热条件和人为耕作管理的综合影响。

表 4 初始土壤全氮 ( $n = 645$ ) 半方差函数参数及其插值精度

变异函数类型	模型	长轴方位 (°)	变程 ( $\text{km}$ )		块金值 $C_0$	偏基台 $C$	块金系数 $C_0 / (C_0 + C)$	模型拟合精度		插值精度 ( $\text{g kg}^{-1}$ )		
			最大	最小				MSE	RMSSE	RMSE	$r$	DI
单变量	E	342.3	14.43	12.57	0.045	0.025	0.65	-0.0020	1.010	0.199	0.662 **	0.021
交互变量	E	311.8	14.45	12.76	0.046	0.037	0.55	0.0004	0.998	0.195	0.683 **	

注: E 表示指数模型; MSE 表示标准平均误差; RMSSE 表示标准均方根误差; RMSE 表示均方根误差;  $r$  表示样点实测值与估测值间的相关系数; DI 表示偏差指数,下同

表 4 可知,本采样尺度下,以有机质为辅助变量的全氮协同克里格法相对普通克里格法,空间结构性方面,二者的空间自相关距离接近,长轴方位趋势基本一致,维持了原有的空间结构性特征;因融合了辅助变量的空间信息,结构性因素比重增加,一定程度上扩展了变量具有空间相关性的范围,与

庞凤等<sup>[7-10]</sup>的研究结果一致。插值精度方面,协同克里格法下的初始 645 个全氮数据估测的 RMSE 减少了 2.01%,  $r$  提高了 2.86%。空间分布特征方面,两个空间分布图之间的偏差指数 DI 仅为 0.021,分布趋势和图斑形态整体相似度高(图 2);基于协同克里格法的空间分布图中全氮含量的极值范围增

加了 9.10%，等级图斑数增加了近 35%，空间镶嵌结构复杂，能够表达更多的局部变异细节，与苏晓燕等<sup>[19]</sup>的研究结果一致。综合分析，基于相同样点数量 ( $n=645$ )，协同克里格法插值效果明显优于普通克里格法，能够表达更为丰富的空间信息，且全氮的空间自相关距离远超试验的平均样点间距 (600 m)，表明可以在区域内根据一定的精度要求优化采样数量，为下文尝试协同克里格法的采样点数量优化提供理论依据。

## 2.4 土壤全氮空间丰缺格局

长安区耕层土壤全氮含量空间梯次变化显著，呈明显的南高北低、西高东低格局，其由西北的冲积平原和东部的黄土台塬向中南部的洪积平原递增的地域特征显见；南部等值线密度大，含量梯度变化紧凑，西北部等值线分布相对稀疏，空间团块

状镶嵌特征明显，表明人为影响大 (图 2b)。土壤全氮含量基本在  $0.90 \sim 1.40 \text{ g kg}^{-1}$ ，其中 68.63% 耕地处“偏低”水平即  $1.00 \sim 1.25 \text{ g kg}^{-1}$ ，遍布于除高桥镇、马王镇之外的各镇，多集中在中南部呈“几”字形即灵沼 - 兴隆 - 黄良 - 王曲 - 鸣犊 - 魏寨一线以南；其次， $>1.25 \text{ g kg}^{-1}$  的“中等”水平区共分布了 9.72% 的耕地，空间呈团块状，最大斑块位于王曲以南，其次分布于滦镇的南八元、杨庄村以南，少量分布在王曲镇的新庄、贾庄村和引镇的胡刘村； $\leq 1.00 \text{ g kg}^{-1}$  的“缺乏”区，耕地面积比例达 21.65%，空间主要呈三大片状，即西北部的高桥以南、斗门镇和马王镇，郭杜镇东部，杜曲 - 大兆周边区域，此外东大镇的庆镇村、兴隆镇的南、北雷村均有少量分布。

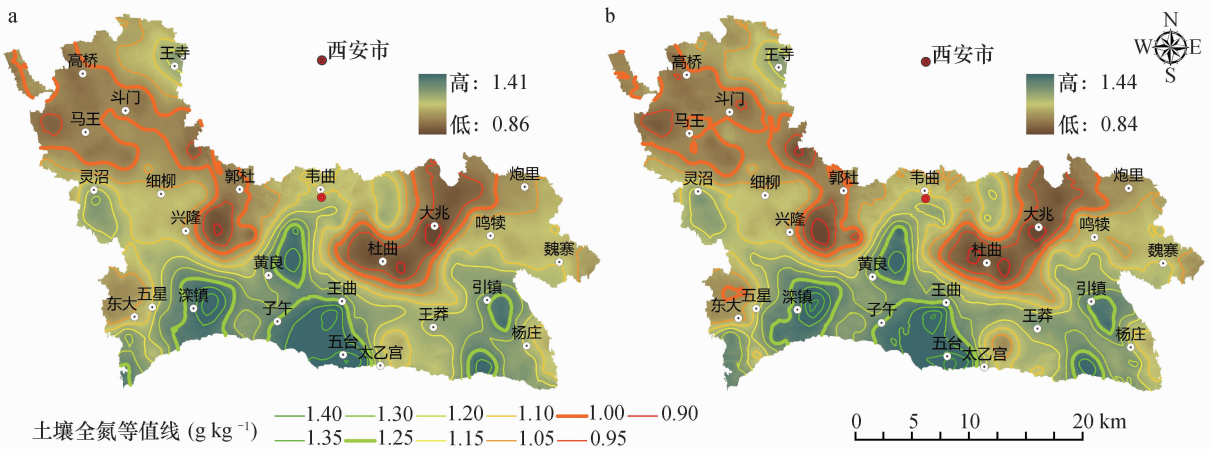


图 2 基于普通克里格法 (a) 与协同克里格法 (b) 土壤全氮空间分布图

## 2.5 土壤全氮采样数量的优化

各随机抽样系列的土壤全氮含量的最优半方差函数模型及其拟合参数如表 5 所示，各半方差模型拟合精度指标中，标准平均误差 (MSE) 在 0 附近小幅波动，标准均方根误差 (RMSSE) 在 1 左右小幅波动，模型拟合效果整体较好<sup>[18]</sup>，且基于交互变量的模型拟合效果更佳。不同取样数量系列下土壤全氮的长轴方位角基本维持在同一象限内，方向趋势一致即西北 - 东南向，块金系数介于  $0.501 \sim 0.685$ ，均表现为中等强度的空间相关性，均能维持空间变异特征的稳定性；但识别土壤全氮的空间变异结构的程度不同，在随机抽样 70% 时，能较好地表达土壤全氮的结构性特征，从中可说明在识别本区土壤全氮含量空间变异结构性特征方面，土壤样点的优化布置可能较单纯的增加采样点的数量更为

重要，与苏晓燕<sup>[19]</sup>等研究一致。各取样数量下，以土壤有机质为辅助变量的交互半方差函数较单变量变异函数更能表达更多的空间结构性特征，并在一定程度上扩大土壤全氮的空间相关性范围，尤以短轴自相关距离增加明显，增加了 0.70% ~ 12.68%，因此也在一定程度上减缓了全氮的各向异性特征。

各取样数量下土壤全氮的插值精度统计如表 6 所示，4 个取样系列下，协同克里格法预测的精度明显高于普通克里格法，3 项精度评价指标的提高程度基本随取样数量的减少即主辅变量个数差异的增大而增大，其中以相关系数  $r$  的提高趋势最明显，以偏差指数 ( $DI$ ) 的提高程度最大。从中也发现，样点数量的增加并不能总是提高空间预测精度，80% 样本容量时  $RMSE$  最大，这可能与各取样数量下土

壤全氮空间变异性有关<sup>[19]</sup>。以初始 645 个样点的全氮普通克里格插值精度为参考,即最优采样数量的精度要求: $RMSE \leq 0.199$ ,  $r \geq 0.662$  和  $DI \leq 0$ 。

021。通过表 6 中各取样数量下协同克里格法的插值精度比较分析,85% 样本容量即 548 个全氮数据为最优采样数量。

表 5 各取样数量下土壤全氮含量的半方差函数模型及其拟合参数

样本容量 (%)	变异函数类型	模型	方位(°)	步长(km)	变程(km)		块金值 $C_0$	偏基台 $C$	块金系数 $C_0/(C_0 + C)$	模型拟合精度	
					最大	最小				MSE	RMSSE
90	单变量	E	348.70	1.220	14.46	11.39	0.046	0.025	0.647	-0.0021	1.012
	交互变量	E	318.20	1.221	14.47	12.25	0.047	0.037	0.561	0.0001	0.990
85	单变量	E	346.00	1.220	14.46	12.23	0.048	0.025	0.656	-0.0010	1.019
	交互变量	E	317.80	1.221	14.47	12.67	0.048	0.036	0.575	-0.0002	0.985
80	单变量	E	347.70	1.219	14.45	11.20	0.050	0.023	0.685	-0.0028	0.957
	交互变量	E	312.70	1.220	14.46	12.62	0.051	0.037	0.583	0.0011	0.965
70	单变量	E	349.70	1.220	14.46	12.80	0.042	0.029	0.591	-0.0018	1.020
	交互变量	E	313.70	1.222	14.48	12.89	0.043	0.042	0.501	-0.0017	0.987

表 6 各取样数量下土壤全氮含量的插值精度统计

样本容量 (%)	$RMSE(g\ kg^{-1})$		$r$		$DI(g\ kg^{-1})$		提高程度 (%)		
	OK <sup>1)</sup>	CK <sup>2)</sup>	OK	CK	OK	CK	$R_{RMSE}$	$R_r$	$R_{DI}$
90	0.201	0.198	0.653**	0.671**	0.024	0.020	1.487	2.757	17.27
85	0.202	0.199	0.641**	0.663**	0.024	0.021	1.772	3.432	13.01
80	0.206	0.203	0.612**	0.634**	0.031	0.021	1.515	3.595	33.14
70	0.205	0.200	0.594**	0.624**	0.032	0.024	2.473	5.051	26.41

注:1)OK:普通克里格;2)CK:协同克里格; $R_{RMSE}$ 、 $R_r$ 、 $R_{DI}$ 分别表示均方根误差  $RMSE$ 、相关系数  $r$  和偏差指数  $DI$  的精度提高程度

各取样数量下的协同克里格插值图在描述土壤全氮含量空间分布规律上基本一致,呈西北和东部低中南部高的格局。但因样本信息的不同,长轴方位、变程等的数值差异,使得各等级图斑具体形态和方向存在差异(图 3)。随样本容量的减少,等值线逐渐减少,图斑镶嵌结构下降,等级间衔接效果差。样本容量为 80% 时,与图 2 相比,图形信息在东部的杜曲 - 大兆相接处有较明显的出入,空间信息显著减少;当样本容量为 70% 时,局部变异信息被明显“屏蔽”,且西北部的斗门 - 马王以东、南部的黄良 - 王曲以南和东南角的杨庄镇南部 3 个区域等值线形态差异较大。分析认为,一方面是因为这些部位土壤全氮与有机质相关性相对较低,另一方面可能由于这些部位样点数量较少、代表性不足,致使土壤有机质与全氮的交互半方差函数难以准确判断。综合比较分析,协同克里格法支持下,初始 85% 样本容量即 548 个,为全氮最优随机取

样数。

### 3 结 论

长安农业区耕层土壤全氮含量普遍偏低,多集中于  $1.00 \sim 1.25\ g\ kg^{-1}$ ,需积极育土培肥;空间上由西北部的冲积平原和东部的黄土台塬向中南部的洪积平原递增。在 600 m 采样尺度下,土壤全氮表现出中等强度的空间相关性,其空间变异性是地形地貌等自然因素和灌溉、施肥等人为因素共同作用的结果,其中人为因素起相对更为重要的作用。以有机质为辅助变量的协同克里格法适于长安区耕层土壤全氮的空间估值研究,其不仅能提供更多的局部变异信息,也可优化采样数量,在取样数量减少至 85% (548 个) 时仍能保持初始全部样点的全氮空间结构特征及其插值精度。

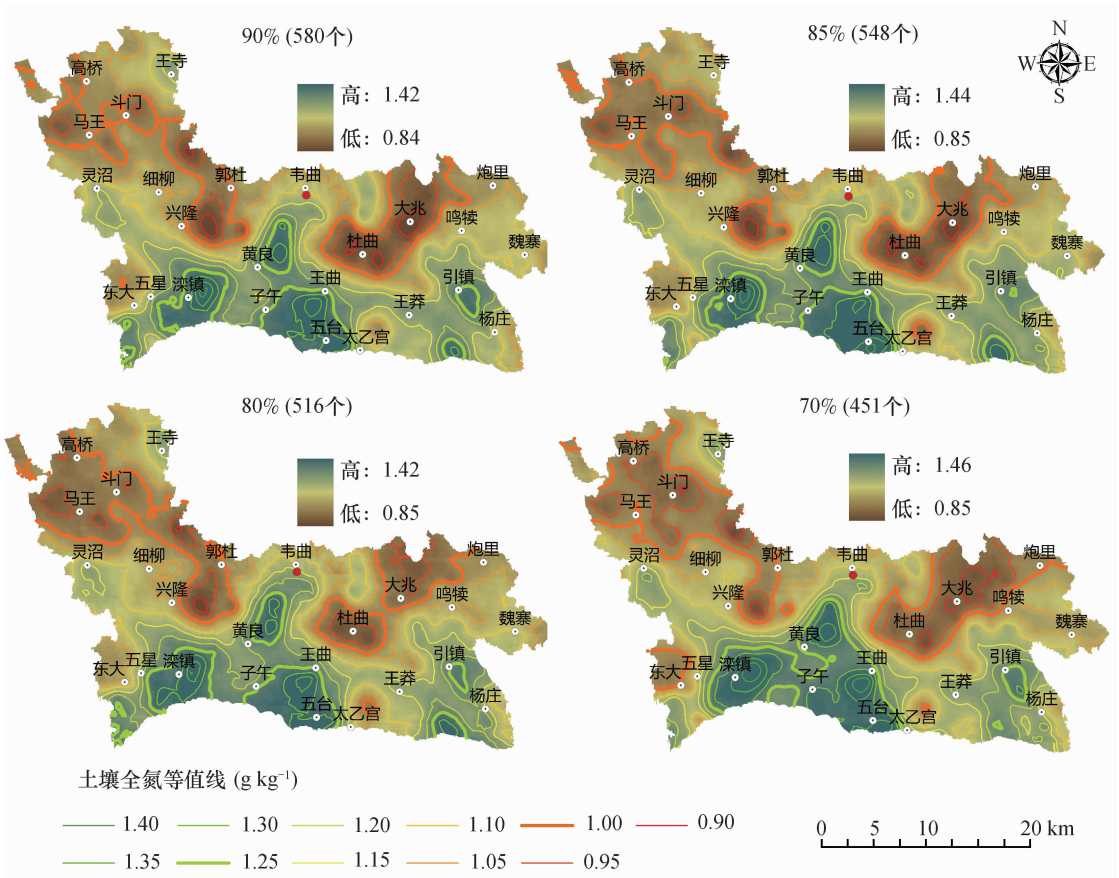


图3 基于协同克里格法的各取样数量土壤全氮空间分布图

参考文献

[ 1 ] 张春华,王宗明,居为民,等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征. 环境科学,2011,32(5): 1407—1413

[ 2 ] 张世熔,孙波,赵其国,等. 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

[ 3 ] 路鹏,黄道友,宋变兰,等. 亚热带红壤丘陵典型区土壤全氮的空间变异特征. 农业工程学报,2005,21(8): 181—183

[ 4 ] Zhang X Y,Sui Y Y,Zhang X D,et al. Spatial variability of nutrient properties in black soil of Northeast China. Pedosphere, 2007,17(1): 19—29

[ 5 ] Huang B,Sun W X,Zhao Y C,et al. Temporal and spatial variability of soil organic matter and total nitrogen in an agricultural ecosystem as affected by farming practices. Geoderma,2007,139(3/4): 336—345

[ 6 ] Wang Y Q,Zhang X C,Huang C Q. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau,China. Geoderma,2009,150(1/2): 141—149

[ 7 ] 庞凤,李廷轩,王永东,等. 县域农田土壤铜含量的协同克里格插值及采样数量优化. 中国农业科学,2009,42(8): 2828—2836

[ 8 ] 孙波,宋歌,曹尧东. 丘陵区水稻土 Cu 污染空间变异的协同克里格分析. 农业环境科学学报,2009,28(5): 865 — 870

[ 9 ] 李艳,史舟,程街亮,等. 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

[ 10 ] 李艳,史舟,王人潮,等. 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

[ 11 ] 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. 浙江农业学报,2011,23(5): 1001—1006

[ 12 ] 王葆泉. 地统计学分析在 ArcGIS 和 IDRISI 中实现特点的讨论. 计算机工程与应用,2006(15): 210—215

[ 13 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社,2000

[ 14 ] Liao K H,Xu S H,Wu J C,et al. Cokriging of soil cation exchange capacity using the first principal component derived from soil physic-chemical properties. Agricultural Sciences in China, 2011,10(8): 1246—1253

[ 15 ] 刘波,陈东湘. 基于 Cokriging 的土壤重金属空间变异研究——以昆山市为例. 环境保护科学,2013,39(2): 38—41,55

[ 16 ] 姚荣江,杨劲松,赵秀芳,等. 滩涂土壤电磁感应仪与方差四叉树法采样布局研究. 农业机械学报,2010,41(7): 174—180

[ 17 ] 赵业婷,常庆瑞,李志鹏,等. 1983—2009 年西安市郊区耕地土壤有机质空间特征与变化. 农业工程学报,2013,29(2): 132—140

- [18] 赵业婷, 齐雁冰, 常庆瑞, 等. 渭河平原县域农田土壤有机质时空变化特征. 土壤学报, 2013, 50(5): 1049—1054
- [19] 苏晓燕, 赵永存, 杨浩, 等. 不同采样点数量下土壤有机质含量空间预测方法对比. 地学前缘, 2011, 18(6): 34—40

(责任编辑: 檀满枝)