

大尺度采样下不同模型方法预测土壤全氮空间分布研究 ——以海南岛为例

邵娜¹, 张认连¹, 张维理¹, 曾建华², 符传良², 谢良商², 徐爱国^{1*}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;

2. 海南省农业科学院农业环境与土壤研究所, 海南 海口 571100)

摘要: 在大区域尺度、有限土壤样点情况下, 为探索准确预测土壤属性的方法, 以海南岛为研究区, 采用近似网格采样方法, 采集 130 个样点, 用多元线性回归 (MLR)、普通克里格 (OK) 和回归克里格 (RK) 3 种模型方法进行土壤全氮预测, 并以 29 个验证点比较了预测精度。结果显示: 1) 对较大区域进行土壤全氮的空间分布的预测精度为 OK > RK > MLR; 2) 3 种模型对土壤全氮含量空间预测分布趋势基本一致, 总趋势为岛内自东向西方向逐渐降低; 3) 0~5 cm 土壤全氮含量与土地利用方式呈极显著相关关系, 0~20 cm 土壤全氮含量与归一化植被指数呈显著相关, 20~40、40~60 cm 土壤全氮含量与归一化植被指数、坡度呈极显著或显著相关。

关键词: 大尺度; 全氮; 克里格; 空间分布

中图分类号: S159.9; S159.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-6257 (2015) 06-0009-09

对大区域尺度进行土壤性质模拟预测可全面了解土壤属性信息, 为区域农业生产规划决策提供数据支持^[1]。与土壤速效养分相比, 土壤全量养分受施肥等随机因素的影响较小, 空间分布模拟更有实际意义。研究大尺度土壤全氮空间变异特征, 能从宏观上发现农田土壤养分退化问题, 对区域农业生产和环境管理具有重要意义^[2]。而大区域采样点有限, 要获得更准确的土壤全氮空间分布预测, 选取最优预测模型至关重要。

在预测土壤属性空间变异特征的研究中, 普通克里格和回归克里格是两种最常用的方法, 也是地统计学和混合地统计学最有代表性的两种方法。地统计方法广泛应用于土壤属性预测制图领域, 已被证明是分析土壤属性空间分布特征及其变异规律最为有效的方法之一^[3]。普通克里格法因没有考虑对土壤养分有影响的外部环境因素 (如母质、地形、植被等), 被认为存在一定的局限性^[4-5]。而土壤养分的空间分布受诸多环境因子的影响, 其含量高低不仅受地貌、水文、土地利用方式、植物等环境

因子的独立作用^[6], 还取决于各因子的相互作用。线性回归模型被认为是研究土壤性质和景观特征之间关系的基本分析工具^[7-8], 但该模型往往需要大量数据的支持, 对大区域尺度研究并不现实^[7]。近年来, 国内外多数对中小尺度区域的研究表明, 若土壤特性与环境因子之间有显著相关性, 利用混合地统计方法, 以环境因子为辅助变量指导土壤制图和相关属性空间分布, 相对于普通克里格和线性回归可以显著提高预测精度, 并能消除平滑效应^[4,9-16]。连纲等以地形因子为辅助变量, 利用多元逐步线性回归和回归克里格预测了黄土高原县域土壤养分的空间分布, 结果表明, 回归克里格优于多元线性回归, 并减小了残差, 与实测值较为接近^[12]。Li Y 等在 10.5 hm² 的棉田通过对照发现, 借助辅助数据, 不论样本量多大, 回归克里格和协同克里格的预测精度都较普通克里格法有很大提高, 且回归克里格法的预测精度总体好于协同克里格法^[17]。但也有不同的研究结果, 如 Li Y 在山西省洪洞县中部 400 km² 区域的研究表明, 随着最小采样距离从 25 m 增加到 500 m, 利用辅助信息结合回归克里格法预测土壤有机质精度较普通克里格法未表现更高的预测精度, 精度反而降低^[18]。Zhu Q 等在美国北部的阿巴拉契亚山脉的山谷农场和森林小流域中度至陡峭的山地两种截然不同的景观土壤性质下的研究认为, 在地形起伏较大地区, 回归克里格预测效果较

收稿日期: 2015-02-12; 最后修订日期: 2015-03-07

基金项目: 科技基础性工作专项“我国 1:5 万土壤图籍编撰及高精度数字土壤构建 (二期工程)” (2012FY112100)。

作者简介: 邵娜 (1989-), 女, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要研究领域为土壤养分空间变异。E-mail: shaona147@163.com。

通讯作者: 徐爱国, E-mail: xuaiguo@caas.cn。

好,在平缓地区,普通克里格效果较好,这与研究区面积无关^[13]。现有研究多集中在一个县或一个农场的小区域范围,采样密集,地形、土地利用等环境因子相对一致。而在大尺度(省级或地区级)范围内,将多种类型的环境因子作为辅助变量,用不同地统计方法进行土壤属性空间分布预测的对比研究并不多见。赵永存等应用回归克里格法预测了河北省全省土壤有机碳密度的空间分布,认为回归克里格法预测精度高于多元线性回归和泛克里格法^[19]。但对其他地区和其他土壤属性的预测制图是否有同样结果则研究较少。

本文以地域独立的海南岛为研究区,将地形与遥感指数、土地利用等环境因子作为辅助变量,采用传统的多元线性回归及地统计学的普通克里格法和回归克里格法对比,进行土壤全氮空间变异特征分析和预测制图,并以野外验证点进行精度评价,为探索适合大尺度的土壤属性预测制图方法提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

海南岛位于东经 $108^{\circ}37' \sim 111^{\circ}3'$ 、北纬 $18^{\circ}10' \sim 20^{\circ}10'$ 之间,面积 3.40万 km^2 ,具有热带海洋气候的特点。岛内年均温在 $23 \sim 25^{\circ}\text{C}$ 之间,多数地区降雨充沛,东部年均降水量约 $2\,000 \text{mm}$,西部约 $1\,000 \text{mm}$;地形呈中高周低的环状梯级结构,山地、丘陵、台地、平原层层衔接,逐渐降低,山地主要分布在中部偏南地区,丘陵主要分布在岛内陆和西北、西南,在山地丘陵周围,广泛分布着宽窄不一的台地和阶地。岛内经济以农、林为主,种植水稻、玉米、木薯等农作物和橡胶、椰子、槟榔、胡椒等经济作物。

1.2 土样采集与测试分析

2012年11月至12月,综合考虑地形地貌、土壤类型和土地利用方式等因素,采用近似网格法采集163个样点,样点间距 $1.6 \sim 17.3 \text{km}$,平均 10km 左右。每个土壤样点分 $0 \sim 5$ 、 $0 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 和 $40 \sim 60 \text{cm}$ 4个土层取样,并记录经纬度、地形、作物、田间管理方式等信息。

土壤样品经自然风干后研磨,过 0.25mm 筛,采用凯氏定氮法测试土壤全氮含量。

1.3 数据来源及模型方法

辅助因子数据来源:(1)遥感影像:采用2013年

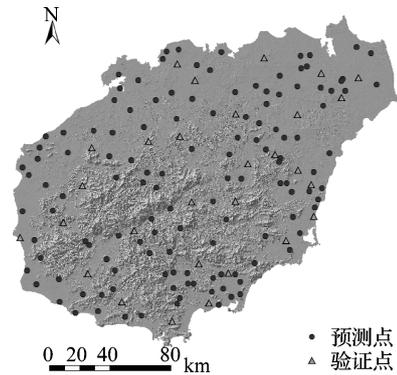


图1 土壤采样点分布图

10月26日和12月6日覆盖海南岛的Landsat 8 OLI_TIRS四景影像,数据源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn/>);(2)海南岛1:50 000等高线矢量图;(3)2000年1:100 000遥感解译土地利用图。

本研究采用普通克里格(Ordinary Kriging, OK)、多元线性回归(Multiple Linear Regression, MLR)和回归克里格(Regression Kriging, RK)进行土壤全氮预测制图。MLR和RK模型均选取8个辅助变量,其中6个地形因子:高程、坡度、坡向、平面曲率、剖面曲率、地形湿度指数(TWI),2个环境因子:归一化植被指数(NDVI)和土地利用方式。

1.4 数据处理及精度验证

1.4.1 异常值的剔除和验证数据集的选取

采用了阈值法($z \pm 3s$)识别并剔除异常值,剩余有效样点159个,在159个土壤样点中均匀选取29个点作为验证数据集,其余130个点作为预测数据集,进行研究区全氮空间分布预测,样点分布见图1。

1.4.2 数字高程模型的生成

采用1:50 000等高线矢量图在ArcGIS 9.3的3D Analyst模块生成 10m 分辨率的数字高程模型(DEM)栅格影像。

1.4.3 哑变量赋值

由于土地利用方式为分类变量,需经哑变量合理的赋值后用于相关性分析和回归分析^[20-22]。

本研究中,为避免共线性,由土地利用方式 X_8 派生出3个哑变量 X_{81} 、 X_{82} 、 X_{83} ,其中哑变量组合($X_{81}=0$ 、 $X_{82}=0$ 、 $X_{83}=0$)、($X_{81}=1$ 、 $X_{82}=0$ 、 $X_{83}=0$)、($X_{81}=0$ 、 $X_{82}=1$ 、 $X_{83}=0$)、($X_{81}=0$ 、 $X_{82}=0$ 、 $X_{83}=1$)分别表示林地、大田、果园、菜地4种土地利用类型。此时,土地利用方式在专业上仍为一个因素,却并不以单个变量的具体取值来刻画。

1.4.4 模型精度验证

采用预测集和验证集对各方法的预测精度进行评价。预测集用于获取预测的残差平方和。本文采用验证集的平均误差 (ME) 和均方根误差 (RMSE) 来评价预测准确性, 计算公式分别为:

$$ME = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L [\hat{z}(s_j) - z(s_j)],$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{j=1}^L [\hat{z}(s_j) - z(s_j)]^2}$$

式中 L 为验证数据集样点个数。

ME 是预测无偏的量度, 接近 0 表明方法是无偏的; RMSE 是预测精度的量度, 越小说明预测精度越高。

1.5 分析工具

地形因子的生成及全氮空间制图在 ArcGis 9.3 软件中完成, 遥感影像镶嵌和 NDVI 的提取由 ENVI

4.8 完成, 地统计分析采用 GS +9.0 软件, 统计分析使用 SPSS 17.0 及 Microsoft Excel 2007 工具。

2 结果与分析

2.1 不同土层土壤全氮的描述性统计分析

从研究区 130 个采样预测点土壤全氮含量的统计特征来看, 4 个土层土壤全氮含量最小值分别为 0.179、0.164、0.095、0.088 g/kg, 最大值分别为 1.961、1.650、1.196、0.973 g/kg, 平均值分别为 1.002、0.828、0.535、0.413 g/kg。4 个土层土壤全氮含量变异系数较接近, 均属中等变异强度。从偏度系数和峰度系数判定, 4 组数据均基本符合正态分布。经 SPSS 17.0 单样本 K-S 正态分布性进一步检验表明, 该区土壤 0~5 和 0~20 cm 土层全氮含量呈正态分布, 20~40 和 40~60 cm 土层全氮含量经对数转换后服从正态分布。

表 1 土壤全氮含量原始数据及处理数据的描述性统计量和正态分布性检验

土层 (cm)	全氮含量	样本数 (个)	最小值 (g/kg)	最大值 (g/kg)	均值 (g/kg)	标准差 (g/kg)	变异系数 (%)	偏度	峰度	K-S
0~5	n ₁	130	0.179	1.961	1.002	0.437	43.58	0.258 7	-0.750 7	0.36 *
0~20	n ₂	130	0.164	1.650	0.828	0.368	44.43	0.380 2	-0.673 1	0.54 *
20~40	n ₃	130	0.095	1.196	0.535	0.264	49.29	0.592 7	-0.494 0	0.20 *
	n ₃₁	130	-2.355	0.179	-0.756	0.535	-70.66	-0.406 7	-0.264 4	0.65 *
40~60	n ₄	130	0.088	0.973	0.413	0.203	49.08	0.654 1	-0.346 4	0.04
	n ₄₁	130	-2.427	-0.027	-1.010	0.523	-51.75	-0.331 0	-0.372 1	0.74 *

注: n₃₁、n₄₁ 分别代表 n₃、n₄ 经对数转换后的数值, 下同; * 表示数据服从正态分布。

2.2 土壤全氮与辅助变量间的相关性分析

对辅助变量与各土层全氮含量进行相关性分析 (表 2) 可知, 除 0~5 cm 外, 其他 3 个土层全氮含量均与 NDVI 呈显著或极显著正相关关系。这表明植被对土壤全氮含量的影响显著, 植被越茂密, 返还土壤的生物量越多, 全氮含量就越高, 这一结果同张素梅等的研究相吻合^[4]。0~5 cm 土层全氮含量与坡度、NDVI 等地形因子均未达显著相关, 仅与大田土地利用方式呈极显著相关。这可能由于 0~5 cm 是表层土壤, 氮素积累量最高^[23], 施肥等随机因素对

土壤氮素的积累影响更大。此外, 20~40 和 40~60 cm 土壤全氮含量除与 NDVI 呈极显著正相关外, 还与坡度分别呈显著和极显著正相关关系。海南岛地形坡度在 0~88° 之间, 海拔在 -20~1 860 m 之间, 经 ArcGis 9.3 对土地利用图的坡度分析统计发现, 坡度大于 30° 的土地, 90% 以上为林地, 且坡度越大林地越多, 因此 20~40 和 40~60 cm 土层的根长密度就越大。已有研究证实根长密度与全氮呈极显著正相关^[24], 因此, 同层次土壤相比, 坡度越大, 全氮含量越高。

表 2 不同土层全氮含量和辅助变量之间的 Pearson 相关性

土层 (cm)	坡向 正弦值	高程	归一化 植被指数	平面 曲率	剖面 曲率	坡度	地形湿度指数	土地利用方式		
								x _{g1}	x _{g2}	x _{g3}
0~5	0.033	0.085	0.166	0.075	0.000	0.038	0.039	0.270 **	-0.139	-0.092
0~20	0.043	0.144	0.204 *	0.062	0.043	0.106	0.037	0.140	-0.042	-0.166
20~40	0.070	0.137	0.341 **	0.045	0.083	0.199 *	-0.069	-0.162	0.081	-0.114
40~60	0.065	0.149	0.331 **	0.059	0.116	0.265 **	-0.156	-0.234	0.112	-0.105

注: * 表示显著性水平为 0.05, ** 表示显著性水平为 0.01。

2.3 普通克里格法预测

本研究采样间距最大值为 17.3 km, 经半方差分析 (表 3), 不同土层全氮含量的变程均大于最大采样距离, 说明本研究区域采用此采样间距满足土壤全氮空间变异性评价的需要。

对比决定系数和残差, 选择不同土层拟合最优的半方差模型。如表 3 所示, 4 个土层全氮含量的最佳理论模型均采用球状模型拟合, 其决定系数分别为 0.856、0.932、0.848 和 0.915, 说明该理论

模型能较好反映土壤全氮的空间结构特征。从结构性因素看, $C_0/(C+C_0)$ 小于 25% 说明系统具有强烈的空间相关性; 若比值大于 75% 则说明系统空间相关性很弱。本研究 4 个土层拟合模型 $C_0/(C+C_0)$ 为 31.11% ~ 41.35%, 均为中等强度空间自相关, 表明研究区土壤全氮空间变异除了受气候、母质、地形、土壤类型等结构性因子的作用外, 还受随机性因素如施肥、耕作和种植制度等的作用, 是结构性因素和随机性因素共同作用的结果。

表 3 各土层全氮含量变异函数理论模型及相应的参数

土层 (cm)	全氮含量	理论模型	块金值 C_0	基台值 $C+C_0$	块金值/基台值 $C_0/(C+C_0)$ (%)	变程 (km)	决定系数	残差 (10^{-3})
0~5	n_1	球状模型	0.118 6	0.381 2	31.11	511	0.856	2.443
0~20	n_2	球状模型	0.089 6	0.229 2	39.09	438	0.932	0.405 3
20~40	n_{31}	球状模型	0.186 0	0.542 0	34.32	511	0.848	4.865
40~60	n_{41}	球状模型	0.184 0	0.445 0	41.35	434	0.915	1.789

根据半方差理论模型, 采用普通克里格 (OK) 法插值预测, 并依据全国第二次土壤普查土壤养分分级标准将各土层全氮含量进行划分, 结果如图 2。4 个土层全氮含量在空间分布上表现出一定的相似性, 均有从东向西递减的趋势, 高值主要分布在东北部和南部地区。0~5 cm 土层全氮含量在 1.00 ~ 1.50 g/kg 的面积最大, 主要分布在海南岛东部, 占总面积的 54.3%; 0~20 cm 土层土壤全氮含量在 0.75 ~ 1.00 g/kg 的面积最大, 分布在海南岛中部、东北部和东南部, 占总面积的 46.1%; 20~40 cm 土层土壤全氮含量在 0.50 g/kg 以下的面积分别占到总面积的 51.5%, 主要分布在海南岛西部; 40~60 cm 土层全氮含量在 0.50 g/kg 以下的面积则占到了总面积的 90.9%。OK 的预测结果高值区和低值区块状分布明显。

2.4 多元线性回归预测

采用多元线性回归 (MLR) 的方法, 利用土地利用方式、地形因子和植被指数等环境因子来预测土壤全氮空间分布。回归分析结果如表 4。

从表 4 可看出, 4 个土层 MLR 预测结果对总方差的解释分别为 14.9%、12.3%、14.5% 和 16.6%, 各土层的决定系数均不高。方程的 F 检验结果表明, 回归模型能较好地表达全氮含量的变异。有研究证明, 随研究区域面积增大, 土壤

特性回归方程拟合的决定系数减小^[25]。本文研究尺度较大, 环境因素复杂, 决定系数不会太高, 若结合考虑气候、母质、生物等因素, 可能会解释更多的残差。对 0~5 和 0~20 cm 土层, 土地利用方式 x_{81} 以自变量被拟合到方程中, 而在更深的 20~40 cm 和 40~60 cm 土层中 x_{81} 被剔除。这充分说明, 土地利用方式对全氮含量的影响主要表现在表层 (0~5 cm) 和耕层 (0~20 cm), 对耕层以下的土壤全氮没有显著影响。

MLR 模型的土壤全氮空间分布预测图 (图 3), 与 OK 对比发现:

(1) 总趋势仍呈自东向西递减的趋势, 高低值分布稍有变动:

0~5 cm 土层土壤全氮预测分布趋势与 OK 类似: 高值分布在东北部, 自东向西递减; 其余 3 个土层土壤全氮预测结果与 OK 预测不同: 高值在西南部山区, 并向岛缘递减, 这是由于 MLR 引入地形、植被等因子造成的, 如图 3 (b) 高值部位与坡度高值部位吻合。

(2) 占最大面积的全氮含量级别和面积有变化:

0~5 cm 土层全氮含量在 0.75 ~ 1.00 g/kg 等级的面积最大, 占总面积的 46.9%, 而 OK 法以 1.00 ~ 1.50 g/kg 等级的面积最大 (54.3%), 0.75 ~

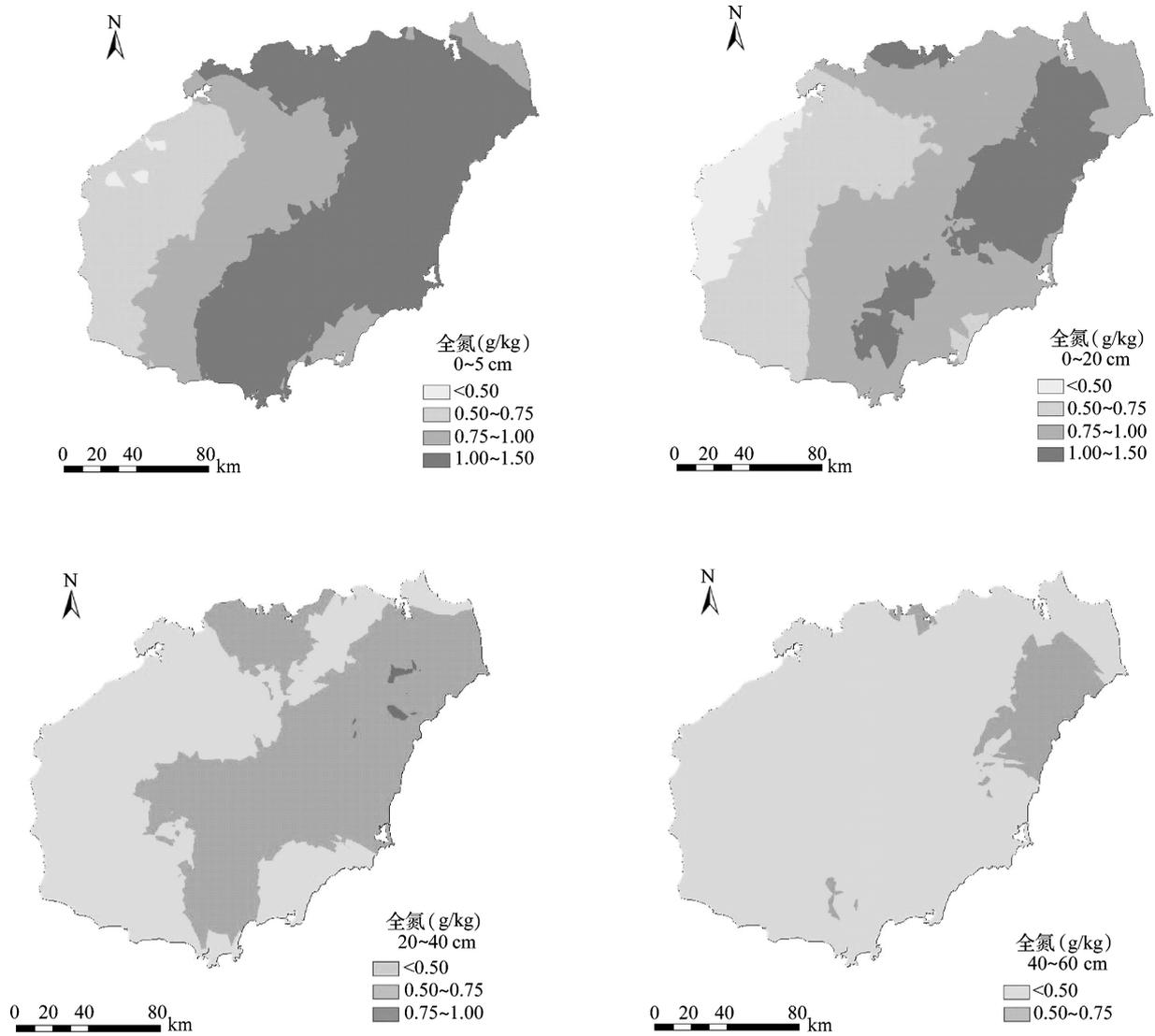


图2 普通克里格法 (OK) 预测不同土层全氮的空间分布

表4 全氮含量与环境因子线性回归方程

土层 (cm)	公式	决定系数	概率
0 ~ 5	$n_1 = 1.497x_3 + 0.355x_{81}$	0.149	0.000
0 ~ 20	$n_2 = 0.001x_2 + 1.281x_3 + 0.199x_{81} + 0.188$	0.123	0.001
20 ~ 40	$n_3 = 1.008x_3 + 0.011x_6 + 0.107$	0.145	0.000
40 ~ 60	$n_4 = 0.737x_3 + 0.012x_6 + 0.091$	0.166	0.000

注: (1) 多元线性回归变量进入的概率水平为0.05, 剔除的概率水平为0.1。(2) n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 分别代表相应土层的全氮含量, 最终进入模型的 x_3 、 x_6 、 x_8 分别代表归一化植被指数、坡向和土地利用方式。

1.00 g/kg 的面积仅为 26.6%; 0~20 cm 面积最大等级与 OK 法一致, 为 0.75~1.00 g/kg, 面积比例接近 (45% 左右); 20~40 cm 面积最大等级为 0.50~0.75 g/kg, 占总面积的 60.1%, 而 OK 法预测 0.50 g/kg 以下的面积 (51.5%) 和 0.50~0.75 g/kg 范围的面积 (48.2%) 相差不大; 40~60 cm 土层全氮

含量在 0.50 g/kg 以下的面积占总面积的 54.5%, 比 OK 法预测的 90.9% 少了 36.4%。

该预测模型虽然能一定程度上反映全氮含量与环境因子的相关关系, 但其预测数据平滑效应强烈, 残差较大, 需要进一步消除残差, 从而提高预测准确性。

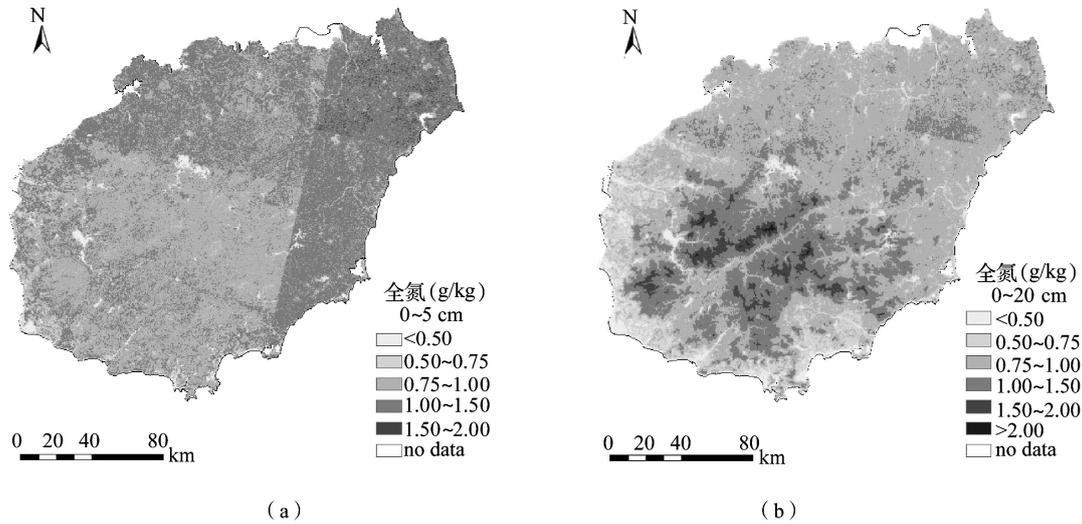


图3 多元线性回归模型 (MLR) 预测不同深度土壤全氮的空间分布

注：①由于土地利用图缺少海口市的信息，图中 no data 即为缺乏部分，下同。② 20~40 和 40~60 cm 土层限于篇幅，图略，下同。

2.5 回归克里格预测

在多元线性回归拟合的基础上，将环境变量的线性组合作为外部漂移趋势项分离残差，进行普通克里格最优估值，然后将趋势项和残差项估计值相

加，即进行回归克里格 (RK) 预测。对回归残差进行 K-S 检验结果如表 5，20~40 和 40~60 cm 的回归残差经过以自然常数 e 为底数的指数函数转换后服从正态分布。

表 5 回归残差及处理数据的描述性统计量和正态分布性检验

土层 (cm)	回归残差	样本数 (个)	极小值 (g/kg)	极大值 (g/kg)	均值 (g/kg)	标准差 (g/kg)	偏度	峰度	K-S
0~5	rs ₁	130	-1.188	1.139	0.048	0.452	-0.111	-0.261	0.782*
0~20	rs ₂	130	-0.921	0.850	0.072	0.374	-0.467	-0.076	0.658*
20~40	rs ₃	130	-0.819	0.513	0.001	0.243	-0.667	0.163	0.029
	rs ₃₁	130	0.441	1.670	1.029	0.234	-0.084	-0.320	0.239*
40~60	rs ₄	130	-0.524	0.380	0.001	0.185	-0.536	-0.295	0.057*
	rs ₄₁	130	0.592	1.462	1.018	0.180	-0.145	-0.478	0.283*

注：rs₃₁、rs₄₁ 分别代表 rs₃、rs₄ 经以 e 为底数的指数函数转换后的数值，* 表示数据服从正态分布。

RK 法预测结果如图 4 所示。与 OK 法对比：

(1) 总趋势仍呈自东向西递减的趋势，高低值分布稍有变动：0~5 cm 土层全氮高值分布在东北部，与 MLR 相似；其余土层全氮高值分布在西南部和东北部山区，向岛边缘递减。

(2) 占最大面积的全氮含量级别和面积有变动：

0~5 cm 土层土壤全氮含量面积最大等级与 OK 法相同，均为 1.00~1.50 g/kg，占总面积的 42.3%，比 OK 法的 54.3% 略低；0~20 cm 土层全氮含量面积最大等级比 OK 法高一级，为 1.00~

1.50 g/kg，占总面积的 33.6%；20~40 cm 土层全氮含量面积最大等级较 OK 法高一级，为 0.50~0.75 g/kg，占总面积 46.0%；40~60 cm 土层全氮含量面积最大等级也为 0.50 g/kg 以下，占总面积的 52.3%，比 OK 法的 90.9% 少，但与 MLR 法的 54.5% 接近。

本法与 OK 法预测结果相比，斑块更细化，能反映出土壤全氮随环境的变化趋势，且消除了平滑效应，增大了预测值的极差，梯度变化更加明显，但其预测精度需进一步进行验证比较。

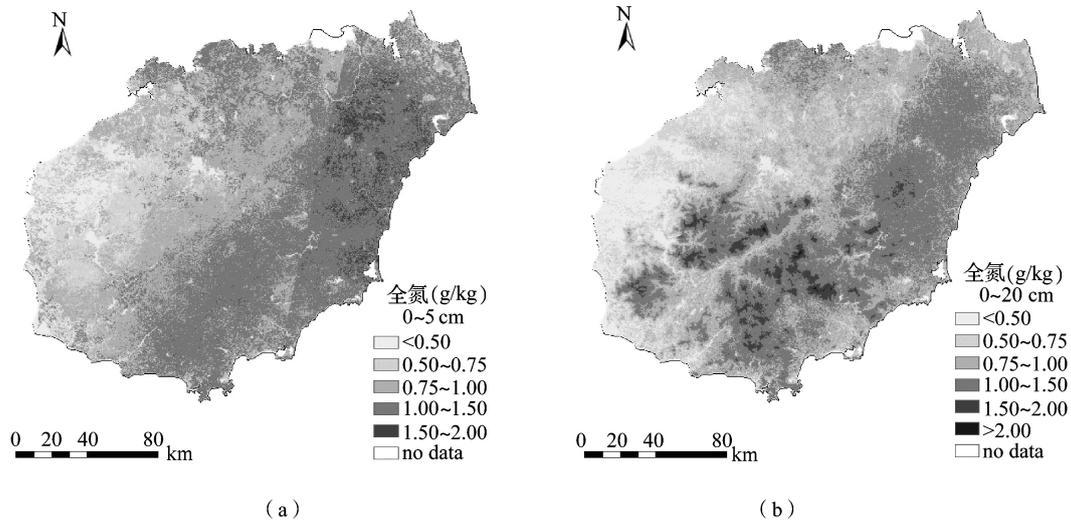


图4 回归克里格法 (RK) 预测不同土层全氮的空间分布

2.6 验证集精度验证及分析

应用 29 个验证点数据对 3 种方法土壤全氮预测准确性进行检验, 从表 6 各土层预测结果的平均误差 (ME) 和均方根误差 (RMSE) 可看出, OK 法的 ME 和 RMSE 最低, 从图 5 可以看出, OK 法预测值与实测值之间的斜率及相关系数均高于 RK 和 MLR 模型, 这都说明 OK 法预测精度最高。3 种模型预测精度为 OK > RK > MLR, OK 法精度最好, RK 法精度稍差, MLR 法精度最差。这与

Li Y^[18]粗采样的研究结果相似, 在较大尺度、较少采样点条件下, RK 法同 OK 法相比并未表现出更高的准确性。分析原因认为, 大区域尺度采样因各点土壤、地形等环境因素复杂多变, 随机误差不易控制消除; 样点稀疏, 多元线性回归方程的决定系数较低, 是导致 RK 法预测误差较大的原因。另外, 多来源数据在时间、精度难以做到完全吻合以及空间数据的不确定性^[26], 也会导致 RK 预测误差增大。

表 6 预测结果准确性分析

土层 (cm)	多元线性回归			普通克里格			回归克里格		
	平均误差	均方根误差	相关系数	平均误差	均方根误差	相关系数	平均误差	均方根误差	相关系数
0~5	-0.006	0.534	0.088	-0.005	0.463	0.434	0.004	0.513	0.323
0~20	0.064	0.389	0.081	0.055	0.309	0.557	0.055	0.338	0.457
20~40	-0.014	0.235	0.064	0.006	0.211	0.332	-0.003	0.231	0.220
40~60	-0.031	0.203	0.150	-0.017	0.193	0.280	-0.030	0.209	0.197

比较各土层全氮含量预测值发现, 随土层加深, 3 种模型预测精度均有所提高。这说明深层土壤全氮主要受结构性因子影响, 而受随机性因子影

响小, 因而空间变异小, 预测精度高于上层土壤。

选取验证点耕层 (0~20 cm) 土壤预测值与实测值的散点不同模型分布情况进行分析 (图 5),

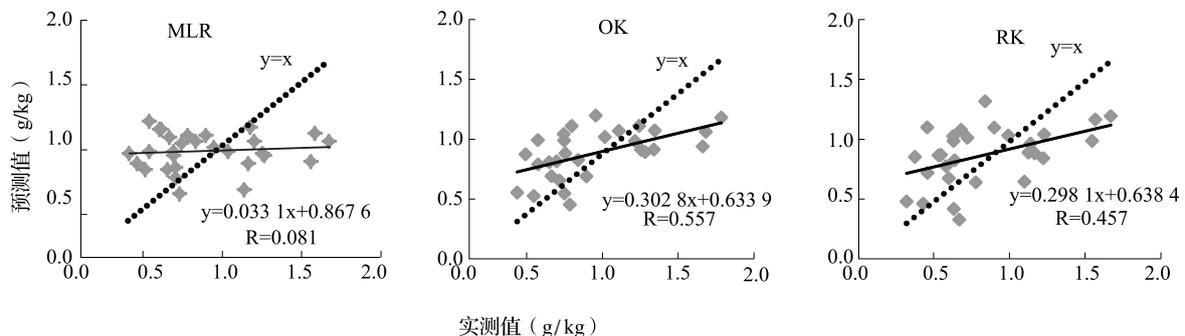


图 5 0~20 cm 土层土壤验证点不同模型预测值与实测值散点图

比较极值处发现, OK 和 RK 两种模型同 MLR 模型相比, 预测值 (散点) 更靠近实测值 (虚线所示), OK 和 RK 消除平滑效应的作用明显, RK 较 OK 稍好些, 相差不大。

3 结论

本研究在大区域尺度上, 结合地形、遥感指数和辅助因子, 对海南岛 130 个土壤样点数据, 采 OK、MLR 和 RK 3 种模型进行了土壤全氮分布的空间预测, 并以 29 个验证点数据验证, 主要结论如下:

(1) 用较少样点对较大区域进行土壤全氮的空间分布预测时, 3 种模型预测精度表现为 OK > RK > MLR, OK 和 RK 2 种模型同 MLR 模型相比, 消除平滑效应的作用明显。对于较大区域尺度土壤全氮的空间分布预测, 是否有更优的模型方法仍需进一步探索。

(2) 3 种模型对土壤全氮含量空间预测分布趋势基本一致, 全岛土壤全氮含量空间分布总趋势为从东向西逐渐降低; 表层 (0 ~ 5 cm) 和耕层 (0 ~ 20 cm) 土壤全氮含量总体为三级中上水平, 东部和南部含量较高。

(3) 不同深度土层全氮与辅助变量间的相关关系不尽相同。0 ~ 5 cm 土壤全氮含量与土地利用方式呈极显著相关关系, 0 ~ 20 cm 土壤全氮含量与 NDVI 呈显著相关, 20 ~ 40、40 ~ 60 cm 土壤全氮含量与 NDVI、坡度呈极显著或显著相关。

参考文献:

[1] 荆长伟, 支俊俊, 张操, 等. 浙江省中小比例尺土壤数据库的构建 [J]. 科技通报, 2013, 28 (11): 99 - 105.

[2] 刘付程, 史学正, 于东升, 等. 太湖流域典型地区土壤全氮的空间变异特征 [J]. 地理研究, 2004, 23 (1): 63 - 70.

[3] 李艳, 史舟. 地统计学在土壤科学中的应用及展望 [J]. 水土保持学报, 2003, 17 (1): 178 - 182.

[4] 张素梅, 王宗明, 张柏, 等. 利用地形和遥感数据预测土壤养分空间分布 [J]. 农业工程学报, 2010, 26 (5): 188 - 194.

[5] 李启权, 岳天祥, 范泽孟, 等. 中国表层土壤全氮的空间模拟分析 [J]. 地理研究, 2010, 29 (11): 1981 - 1992.

[6] 邱乐丰, 杨超, 林芬芳. 基于环境辅助变量的拔山茶园土壤肥力空间预测 [J]. 应用生态学报, 2010, 21 (12): 3099 - 3104.

[7] 张华, 张甘霖, 龚子同. 土壤 - 景观定量模型研究进展 [J]. 土壤通报, 2004, 35 (3): 339 - 346.

[8] McBratney A B, Mendonça Santos M L, Minasny B. On digital soil mapping [J]. Geoderma, 2003, 117: 43 - 52.

[9] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵沟壑区县域土壤有机质空间分布特征及预测 [J]. 地理科学进展, 2006, 25 (2): 112 - 122.

[10] 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, 25 (7): 237 - 242.

[11] 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, 30 (19): 5338 - 5345.

[12] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 黄土高原县域土壤养分空间变异特征及预测——以陕西省横山县为例 [J]. 土壤学报, 2008, 45 (4): 577 - 584.

[13] Zhu Q, Lin H. Comparing ordinary kriging and regression kriging for soil properties in contrasting landscapes [J]. Pedosphere, 2010, 20 (5): 594 - 606.

[14] Simbahan G C, Dobermann A, Goovaerts P, et al. Fine-resolution mapping of soil organic carbon based on multivariate secondary data [J]. Geoderma, 2006, 132 (3): 471 - 489.

[15] Hengl T, Heuvelink G, Stein A. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression - kriging [J]. Geoderma, 2004, 120 (1): 75 - 93.

[16] Sun W, Minasny B, McBratney A. Analysis and prediction of soil properties using local regression - kriging [J]. Geoderma, 2012, 171: 16 - 23.

[17] Li Y, Shi Z, Li F, et al. Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 56 (2): 174 - 186.

[18] Li Y. Can the spatial prediction of soil organic matter contents at various sampling scales be improved by using regression kriging with auxiliary information? [J]. Geoderma, 2010, 159 (1): 63 - 75.

[19] 赵永存, 史学正, 于东升, 等. 不同方法预测河北省土壤有机碳密度空间分布特征的研究 [J]. 土壤学报, 2005, 42 (3): 379 - 385.

[20] 罗明, 裴韬. 空间软数据及其插值方法研究进展 [J]. 地理科学进展, 2009, 28 (5): 663 - 667.

[21] 张晋昕, 李河. 回归分析中定性变量的赋值 [J]. 循证医学, 2005, 5 (3): 169 - 171.

[22] 李丽霞, 郜艳晖, 张瑛. 哑变量在统计分析中的应用 [J]. 数理医药学杂志, 2006, 19 (1): 51 - 53.

[23] 徐爱国, 冀宏杰, 张认连, 等. 太湖水网地区原位模拟降雨条件下不同农田类型氮素流失特征研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16 (4): 809 - 816.

[24] 黄林, 王峰, 周立江, 等. 不同森林类型根系分布与土壤性质的关系 [J]. 生态学报, 2012, 32 (19): 6110 - 6119.

[25] Ziadat F M. Analyzing digital terrain attributes to predict soil attributes for a relatively large area [J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69 (5): 1590 - 1599.

[26] 刘大杰, 刘春. GIS 空间数据不确定性与质量控制的研究现状 [J]. 测绘工程, 2001, 10 (1): 6 - 10.

Spatial prediction of soil total nitrogen by different methods in large scale

—A case study of Hainan island

SHAO Na¹, ZHANG Ren-lian¹, ZHANG Wei-li¹, ZENG Jian-hua², FU Chuan-liang², XIE Liang-shang², XU Ai-guo^{1*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 2. Institute of Soil Science and Agricultural Environment, Hainan Academy of Agricultural Sciences, Haikou Hainan 571100)

Abstract: There has been a great concern about how to accurately predict soil properties using the limited soil samples. In order to explore the prediction method with higher precision in large scale using the limited soil samples, 130 soil sampling sites were collected in Hainan island, three methods, i. e. multiple linear regression (MLR), ordinary kriging (OK) and regression kriging (RK), were used to predict spatial distribution of soil total nitrogen (TN), and 29 sampling sites were validated to compare the prediction accuracy of these three methods. The results showed that; 1) the root mean square error of each soil layer with the three methods was OK > RK > MLR; 2) the prediction distribution tendency of soil TN by the three methods was similar, i. e. the soil TN content was decreased gradually from east to west in Hainan island; 3) soil TN content of 0 ~ 5 cm layer was very significantly correlated with farmland use types, that of 0 ~ 20 cm layer was significantly correlated with normalization difference vegetation index, and those of 20 ~ 40 cm and 40 ~ 60 cm soil layers were very significantly or significantly correlated with normalization difference vegetation index and slope.

Key words: regional scale; total nitrogen; kriging; spatial distribution prediction

4R 作物养分管理

4R 作物养分管理是国际植物营养研究所 (IPNI) 养分管理策略的核心之一, 旨在保障持续的粮食生产能力, 兼顾养分管理和施肥的经济效益、环境效益和社会效益, 是被普遍采用的肥料最佳养分管理新方法。4R 养分管理即选择正确的肥料品种 (Right source)、采用正确的肥料用量 (Right rate)、在正确的施肥时间 (Right time) 施用在正确的位置 (Right place), 4 个“正确”的英文“Right”第一个字母均为“R”, 故简称为 4R。4R 养分管理涵盖了所有与养分管理相关的科学原理, 实际生产中, 具体的植物养分管理措施取决于农户的目标、拥有的资源、种植制度、土壤条件、气候条件以及影响养分管理措施的其他因素。4R 养分管理策略广泛应用于世界各地小型企业到大型商业农场及种植园的各种作物体系上, 是农户及相关技术指导人员、推广专家、研究人员、监督管理者以及作物养分管理人员的实用工具。

4R 作物养分管理涉及多个学科及科学原理, 正确的肥料品种、用量、时间和位置都有自己相应的科学理论为依据。学科上主要涉及土壤学、植物营养学、植物生理学、农业生态学、农业经济学等; 科学原理上主要涉及植物矿质营养学说、土壤养分归还学说、营养元素不可替代律、最小养分律、肥料报酬递减律、营养因子综合律等。实际应用中, 对 4 个“R”的重视程度要均衡, 避免强调一项措施而忽视其他措施, 确定一个“R”时, 要考虑其他三个“R”, 并考虑以下原则:

四个正确 (4Rs)				
	品种	用量	时间	位置
主要科学原理	◆ 养分需求 ◆ 土壤条件 ◆ 肥料运输 ◆ 环境风险 ◆ 产品价格 ◆ 经济条件 ◆ 施肥设备	◆ 评价植物需求 ◆ 评价土壤供应 ◆ 评价养分来源 ◆ 考虑土壤肥力 ◆ 考虑施肥效益	◆ 确定作物吸收养分规律 ◆ 确定土壤养分供应动态 ◆ 了解土壤养分损失动态 ◆ 考虑田间管理措施	◆ 植物根系类型 ◆ 土壤化学反应 ◆ 耕作制度 ◆ 养分空间变异 ◆ 水分管理
一些具体措施	◆ 化学肥料 ◆ 畜禽粪便 ◆ 堆肥 ◆ 作物秸秆	◆ 测定土壤养分 ◆ NE 养分专家系统 ◆ 计算经济效益 ◆ 平衡作物移走量	◆ 播前 ◆ 播种期 ◆ 开花期 ◆ 结实期	◆ 撒施 ◆ 条施 ◆ 穴施 ◆ 注射施 ◆ 变量施肥

多年来, 国际植物营养研究所 (IPNI) 及其中国项目在多种作物上开展养分最佳管理措施的研究和示范, 出版了一系列 4R 作物养分管理的书籍、科普读物和教育培训材料包括《4R 作物养分管理》手册、Nutrient Expert 养分专家系统推荐施肥软件、《高效施肥》4R 养分管理专辑、作物 4R 养分管理光盘等, 对我国养分资源的合理施用和农业可持续发展具有重要的指导作用。有需要请联系国际植物营养研究所北京办事处索取相关材料, 也可登陆 IPNI 网站浏览和下载。

国际植物营养研究所北京办事处

地址: 北京中关村南大街 12 号旧主楼 628 室 109 信箱 邮编: 100081 电话: 010-82108000

联系人: 孙桂芳 邮箱: gfsun@ipni.net 网址: http://www.ipni.net/4R; http://china-zh.ipni.net