

# 复杂地貌类型区耕地土壤有机质空间插值方法研究\*

龙 军<sup>1,2</sup> 张黎明<sup>1,2</sup> 沈金泉<sup>3</sup> 周碧青<sup>1,2</sup> 毛艳玲<sup>1,2</sup> 邱龙霞<sup>1,2</sup> 邢世和<sup>1,2†</sup>

(1 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002)

(2 土壤生态系统健康与调控福建省高校重点实验室, 福州, 350002)

(3 福建省农田建设与土壤肥料技术总站, 福州 350003)

**摘 要** 选择适宜区域特征的高效点面拓展模型对揭示土壤属性空间分布规律具有重要意义。根据不同地貌类型特征在福建省各地级市选取了 9 个典型县(市、区), 利用 2008 年采集的 29 320 个样点数据系统评价不同空间插值方法对耕地土壤有机质含量推算精度的影响。结果表明, 福建省各典型县耕地土壤有机质平均含量为 27. 83 g kg<sup>-1</sup>, 变异系数为 37. 87%, 半方差函数以指数模型拟合效果最佳; 全省平原或盆地、丘陵和山地分布面积相当的地区(如闽侯县、建瓯市、永定县、涵江区、福鼎市)采用泛克里格法插值的精度较高, 山地为主的地区(如大田县)采用简单克里格法插值的精度较高, 而以平原、台地为主的地区(如南安市、同安区、漳浦县)采用普通克里格或张力样条函数法插值的精度较高。

**关键词** 地貌类型; 耕地; 土壤有机质; 空间插值; 福建省

**中图分类号** S15 **文献标识码** A

土壤是成土因素相互作用下形成的一种十分复杂的自然综合体, 其在空间分布上具有一定的不均一性<sup>[1]</sup>。准确掌握土壤理化性状的空间变异规律是实现精确农业养分管理和解决全球变化等环境问题的关键<sup>[2-3]</sup>。目前, 通过野外采样和室内测定是揭示土壤属性空间分布特征的主要手段。但无论采样密度多大, 均无法得到空间上所有区域的土壤属性值, 而空间插值技术可以将离散的数据点转化为连续的数据曲面从而实现研究区土壤属性的全覆盖。因此, 准确应用插值技术获取土壤信息空间分布特征及其变异规律具有十分重要的意义。

插值方法按其实现的数学原理可以分为两类: 确定性插值(反距离权重法、全局多项式法、局部多项式法、规则样条函数法、张力样条函数法、高次曲面函数法、反高次曲面函数法、平面样条函数法)和地统计插值(普通克里格法、简单克里格法、泛克里格法、指示克里格法、概率克里格法、析取克里格法、协同克里格法)<sup>[4]</sup>。很多研究表明, 由于不同区域影响土壤理化性质的因子有差异, 也会导致适宜插值方法的不同。张文龙等<sup>[5]</sup>利用 ArcGIS 软件对文登市耕层土壤有机

质的空间变异性进行了研究, 认为普通克里格插值法中的 Tetraspherical 模型最适合模拟研究区内土壤有机质含量的空间分布特征。赵巧丽等<sup>[6]</sup>利用河南省安阳县 385 个土壤全氮样点比较了不同插值方法的误差大小, 发现径向基函数法插值效果优于反距离权重法和克里格法。孙义祥等<sup>[7]</sup>以安徽省芜湖县为例, 分析了不同插值方法对县域土壤有效磷空间变异特征的影响, 结果表明, 析取克里格、普通克里格、局部多项式以及简单克里格插值精度大于泛克里格、全局多项式、反距离加权法和径向基函数插值法, 且以析取克里格法插值效果最好。马静等<sup>[8]</sup>以会宁县为研究区, 对比分析了普通克里格、反距离权重和径向基函数三种插值方法在模拟土壤速效钾含量空间分布上的差异, 结果表明, 普通克里格插值精度高于其他两种插值方法。

从以上研究可以看出, 目前不同插值方法对土壤属性空间插值精度影响的研究主要集中在县域尺度, 关于省级尺度或大区域的研究却相对较少, 这也导致在省级尺度或大区域范围内对土壤属性的空间分异研究存在很大的不确定性。有研究表

\* 教育部博士点基金(20103515120014)、福建省自然科学基金项目(2010J05090)和国家自然科学基金项目(41001126)共同资助

† 通讯作者, E-mail: fafuxsh@126. com

作者简介: 龙 军(1987—), 男, 江西芦溪人, 硕士研究生, 主要从事土壤碳循环与 GIS 应用研究。E-mail: longjun608@163. com

收稿日期: 2013-12-11; 收到修改稿日期: 2014-06-03

明,影响土壤有机质空间分布的因子可能因研究区域不同而异,导致其适宜的点面拓展模型也各不相同。福建省在地质构造运动和长期外营力的综合作用下形成了复杂多样的地形地貌特征;此外,该地区耕地利用强度大,导致土壤属性空间变异也比较强烈。因此,确定适用于福建省不同地貌特征区域的耕地土壤有机质点面拓展模型对于合理制定亚热带耕地土壤固碳减排政策和有机质提升计划具有十分重要的意义<sup>[9]</sup>。为此,本研究从福建省不同地级市选取地貌特征不同的闽侯、建瓯、永定、大田、涵江、福鼎、南安、同安和漳浦等 9 个典型县(市、区),并利用这 9 个典型县(市、区)2008 年农业部测土施肥项目采集的 29 320 个样点数据,探讨各确定性插值和地统计学插值方法对不同地貌特征耕地土壤有机质空间插值精度的影响,筛选出适用于全省不同地貌特征区域耕地土壤有机质空间插值方法,结果可为我国亚热带地区合理选择耕地土壤有机质空间插值方法提供参考依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

福建省位于我国东南沿海,境内山岭蜿蜒,丘

陵起伏,地貌类型较为复杂且以丘陵山地为主,全省平原、台地(海拔 ≤ 200 m)面积占 21.32%, 丘陵区(200 m < 海拔 ≤ 500 m)面积占 35.81%, 山地区(海拔 > 500 m)面积占 42.87%<sup>[9]</sup>。据福建省第二次土壤普查统计结果,全省耕地土壤以水稻土最多,面积达  $1.07 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 占耕地总面积的 82.63%;其次是赤红壤和红壤,分别为  $1.08 \times 10^5 \text{ hm}^2$  和  $9.00 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 占耕地总面积的 8.31% 和 6.95%;其他土壤(潮土、黄壤、滨海盐土和紫色土)面积较小,所占比例均低于耕地总面积的 1%<sup>[10]</sup>。本研究在福建省不同地级市选取了地貌特征各异的 9 个典型县作为案例区,其中闽侯县隶属福州市,建瓯市隶属南平市,永定县隶属龙岩市,涵江区隶属莆田市,福鼎市隶属宁德市,这五个典型县平原(或盆地)、丘陵和山地分布面积比例相当;大田县隶属三明市,地貌类型以山地为主,面积比例达 79.99%;南安市隶属泉州市,同安区隶属厦门市,漳浦县隶属漳州市,这 3 个典型县地貌类型以平原、台地为主,面积比例分别为 62.55%、59.39% 和 81.10% (图 1 和图 2)<sup>[10]</sup>。

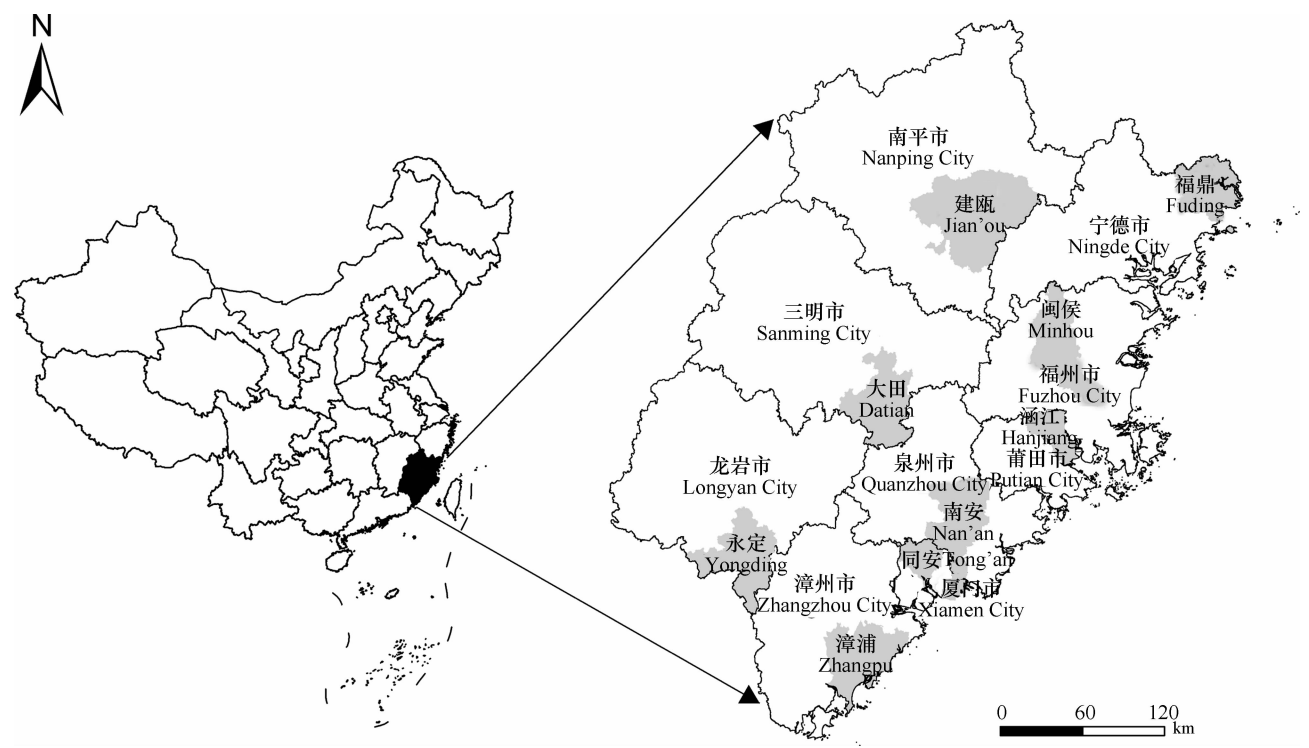


图 1 典型县地理位置图  
Fig. 1 Geographical location of the typical counties

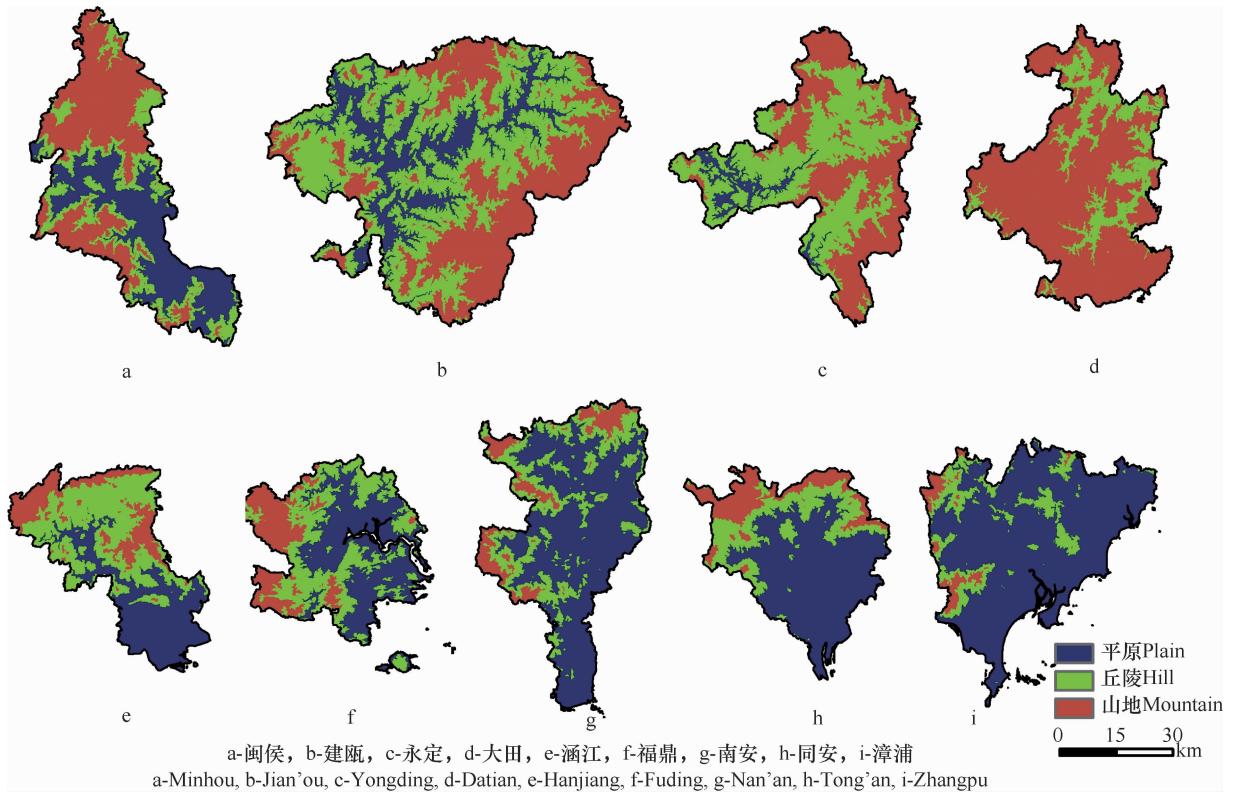


图2 典型县地貌类型分布图

Fig. 2 Landform map of the typical counties

## 1.2 土壤调查样点数据库的建立

耕地土壤调查样点数据来自农业部 2008 年测土配方施肥项目, 9 个典型县共采集样品 29 320 个; 其中闽侯县 2 829 个, 建瓯市 3 313 个、永定县 3 096 个、大田县 4 319 个、涵江区 2 038 个、福鼎市 4 002 个、南安市 3 954 个、同安区 1 572 个和漳浦县 4 197 个。土壤调查样点属性资料主要包括样点经纬度、海拔以及有机质和机械组成等理化性质, 借助 ArcGIS 软件将外业调查中 GPS 定位获取的样点经纬度坐标投影转换成北京 1954 直角坐标系坐标, 并与耕地评价底图相匹配; 然后根据空间数据指标集及其编码规则对各类调查样点图层特征进行编码、属性数据录入后保存入库, 最终建立各典型县土壤调查样点数据库 (图 3)。

## 1.3 确定性插值与地统计插值

利用 SPSS 19.0 分析土壤有机质含量的基本统计特征, 通过 GS + 9.0 建立半方差函数模型, 在 ArcGIS 9.3 地统计分析模块的支持下对典型县的样点数据进行 8 种不同确定性插值 (反距离权重法 Inverse Distance Weighting (IDW)、全局多项式法 Global Polynomial Interpolation (GPI)、局部多项式法 Local Polynomial Interpolation (LPI)、规则样条函数

法 Completely regularized spline (CRS)、张力样条函数法 Spline with tension (SWT)、高次曲面函数法 Multiquadric function (MF)、反高次曲面函数法 Inverse multiquadric function (IMS)、平面样条函数法 Thin-plate spline (TPS)) 和 4 种不同地统计插值 (普通克里格法 Ordinary Kriging (OK)、简单克里格法 Simple Kriging (SK)、泛克里格法 Universal Kriging (UK)、析取克里格法 Disjunctive Kriging (DK))。

IDW 是基于相近相似原理的一种局部估计加权平均插值方法, 权重与观测点和预测点之间的距离负相关, 本研究中预测一个未知点时一般使用了其周围的 50 个样点。GPI 和 LPI 属统计方法范畴, 是基于全局或局部已知值的某种特定趋势来进行内插的方法。CRS、SWT、MF、IMS 和 TPS 均属径向基函数插值法, 其主要原理是使其形成的预测表面如同一个橡胶膜经过每一个已知观测点, 且表面的总曲率最小, 选择何种函数则决定了以何种方式将这个橡胶薄膜插入到这些点之间。OK 是基于区域化变量理论, 通过空间相关的随机函数模型计算可获取变量的线性加权组合, 从而对待估点进行预测<sup>[11]</sup>。SK 用于具有二阶平稳且均值是已知的随机变量。UK 以趋势面方程分离漂移趋势、降低其不

平稳性后,再对残差进行克里格分析。本研究利用探索性数据工具进行趋势分析,发现闽侯、涵江、大田和南安在东西方向上趋势线呈倒U形,福鼎呈正U形,建瓯、漳浦、同安呈东低西高直线形,永定呈东高西低直线形,涵江在南北方向上呈倒U形,同安呈正U形,闽侯、大田、漳浦、永定、南安呈北高南低直线形,建瓯、福鼎呈北低南高直线形,并使用经纬度参数去除趋势。DK是一种获取测量的指示变量高于某一预设允许水平的条件概率方法,要求数据服从二元正态分布。

#### 1.4 预测结果的精度检验

根据“平均预测误差(Mean, ME)越接近于0越

好,均方根误差(Root-Mean-Square, RMSE)越小越好,并优先考虑RMSE”原则分别筛选出最优的确定性插值方法和地统计插值方法并进行比较,最后确定研究区耕地土壤有机质预测精度最高的空间插值方法<sup>[12-14]</sup>。

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{oi} - X_{pi}) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{oi} - X_{pi})^2} \quad (2)$$

式中, $N$ 为采样点数量, $X_{oi}$ 为采样点有机质含量实测值, $X_{pi}$ 为采样点有机质含量预测值。

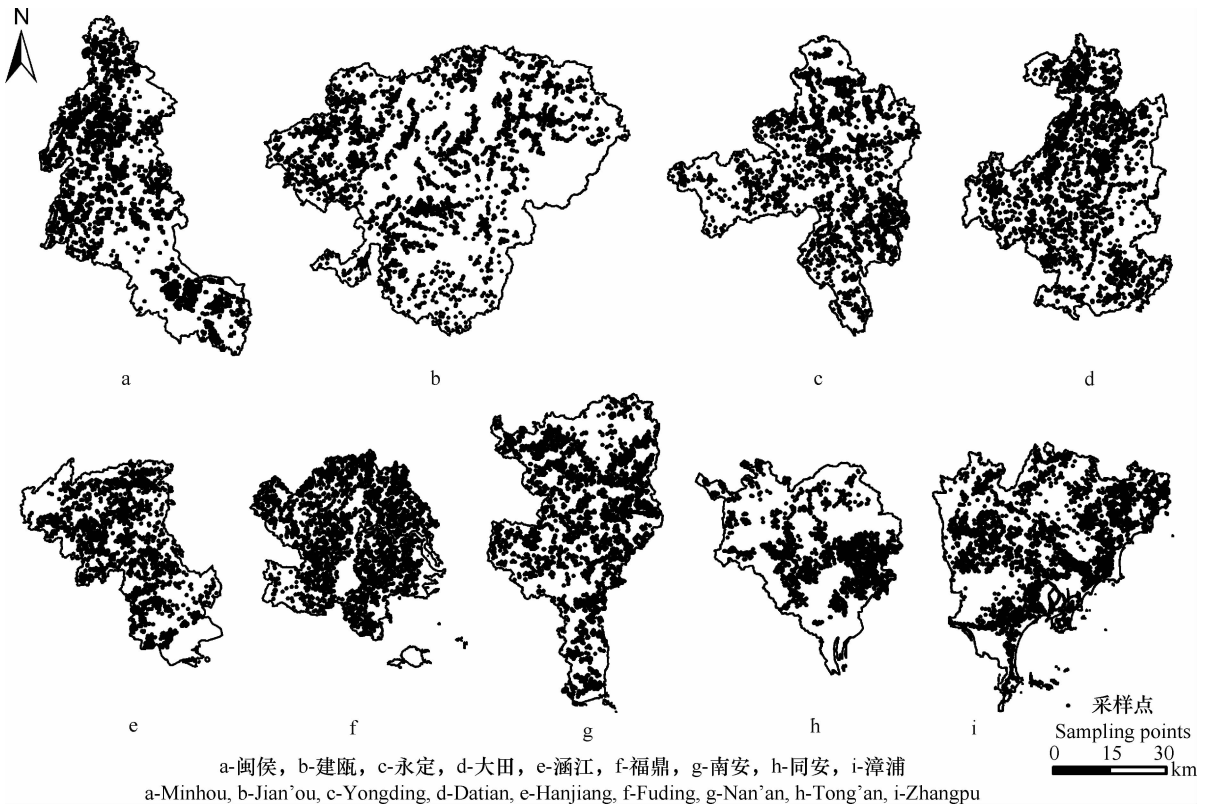


图3 基于耕地土壤的样点分布图

Fig. 3 Distribution map of sampling points based on farmland soil

## 2 结果与讨论

### 2.1 福建省典型县域耕地土壤有机质基本统计特征

福建省不同地级市典型县耕地土壤调查样点有机质含量空间分布差异较大,最低值出现在漳浦县,仅 $1.02 \text{ g kg}^{-1}$ ,最高值出现在福鼎市,达 $67.80 \text{ g kg}^{-1}$ ,二者相差60多倍(表1)。从平均含量来看,龙岩市的永定县、福州市的闽侯县、三明市的大田县、莆田市的涵江区以及宁德市的福鼎市处于丰富

水平( $>30 \text{ g kg}^{-1}$ ),这5个典型县均以丘陵山地为主,海拔相对较高,而厦门市的同安区和漳州市的漳浦县处于缺乏水平( $\leq 20 \text{ g kg}^{-1}$ ),这2个典型县以平原、台地为主,海拔相对较低,这一结果符合“土壤有机质含量与海拔高度呈正相关”的普遍观点<sup>[15]</sup>。所有典型县中以永定县有机质平均含量最高,达 $36.36 \text{ g kg}^{-1}$ ,这主要因为永定县是土壤有机质提升项目示范县,历来十分重视培肥地力,不断加大沃土工程实施力度,通过种植绿肥、推广秸秆还田和增施有机肥等多项措施有效提升了土壤有机质

含量。同安区有机质平均含量最低,仅  $15.23 \text{ g kg}^{-1}$ ,这主要由于同安区位于南亚热带,高温少雨的气候条件增加了土壤有机质的分解速率;此外,该地区经济比较发达,对农业的重视程度相对比较低,导致有机肥等投入不足<sup>[16]</sup>。总体来看,福建省不同地级市典型县耕地土壤有机质平均含量为  $27.83 \pm 10.54$

$\text{g kg}^{-1}$ ,处于中等水平 ( $20 \text{ g kg}^{-1} < \text{有机质} \leq 30 \text{ g kg}^{-1}$ ),变异系数为  $37.87\%$ ,属中等变异<sup>[17]</sup>。

数据服从正态分布是使用地统计插值方法的前提<sup>[18]</sup>。本研究利用 QQPlot 分布图进行正态分布性检验,各典型县均接近于一条直线,表明样点数据服从正态分布,可以采用地统计学方法进行插值。

表 1 福建省典型县域耕地土壤有机质基本统计特征

Table 1 Statistical characteristics of the farmland soil organic matter in the typical counties of Fujian Province

地级市 Prefecture-level city	典型县 Typical county	样点数 Sample number	最小值 Min ( $\text{g kg}^{-1}$ )	最大值 Max ( $\text{g kg}^{-1}$ )	平均值 Mean ( $\text{g kg}^{-1}$ )	标准差 SD	变异系数 CV (%)
福州市 Fuzhou City	闽侯县 Minhou County	2 829	4.80	59.60	30.76	7.96	25.88
南平市 Nanping City	建瓯市 Jian'ou City	3 313	1.40	63.60	26.50	9.57	36.13
龙岩市 Longyan City	永定县 Yongding County	3 096	5.50	66.70	36.36	8.30	22.81
三明市 Sanming City	大田县 Datian County	4 319	3.10	66.00	30.94	10.59	34.24
莆田市 Putian City	涵江区 Hanjiang District	2 038	8.00	61.40	33.72	9.77	28.97
宁德市 Ningde City	福鼎市 Fuding City	4 002	6.20	67.80	32.36	9.40	29.04
泉州市 Quanzhou City	南安市 Nan'an City	3 954	5.00	47.00	22.57	7.14	31.63
厦门市 Xiamen City	同安区 Tong'an District	1 572	3.20	36.80	15.23	4.75	31.18
漳州市 Zhangzhou City	漳浦县 Zhangpu County	4 197	1.02	40.60	19.63	7.00	35.68
总计 Total		29 320	1.02	67.80	27.83	10.54	37.87

## 2.2 福建省典型县域耕地土壤有机质半方差函数模型

本研究利用 GS + 9.0 对土壤有机质含量进行空间变异模型的拟合。从表 2 可以看出,福建省 9

个典型县最优的拟合模型均为指数模型,这与很多学者的研究相一致<sup>[19-20]</sup>;此外,各模型拟合效果决定系数  $R^2$  均大于 0.725,残差平方和 RSS 均小于 6,块金值与基台值之比 ( $C_0/C_0 + C$ ) 均小于 25%,说

表 2 福建省典型县域耕地土壤有机质半方差函数模型及参数

Table 2 Semi-variance models and parameters of prediction of farmland soil organic matter contents in the typical counties of Fujian Province

典型县 Typical county	最优拟合模型 Optimal fitting model	块金值 $C_0$	基台值 $C_0 + C$	基台效应 $C_0/C_0 + C$ (%)	变程 Range (m)	决定系数 $R^2$	残差 RSS
闽侯县 Minhou County	指数模型 Exponential model	0.10	53.00	0.19	1 020	0.88	1.19
建瓯市 Jian'ou City	指数模型 Exponential model	2.60	88.65	2.93	2 700	0.99	1.10
永定县 Yongding County	指数模型 Exponential model	2.90	65.08	4.46	2 070	0.95	1.58
大田县 Datian County	指数模型 Exponential model	0.10	92.31	0.11	1 590	0.94	1.96
涵江区 Hanjiang District	指数模型 Exponential model	0.10	85.63	0.12	1 071	0.95	2.06
福鼎市 Fuding City	指数模型 Exponential model	0.10	76.73	0.13	3 420	0.94	5.91
南安市 Nan'an City	指数模型 Exponential model	0.10	39.32	0.25	2 250	0.73	4.46
同安区 Tong'an District	指数模型 Exponential model	0.01	19.43	0.05	765	1.00	0.00
漳浦县 Zhangpu County	指数模型 Exponential model	0.10	33.62	0.30	1 626	0.95	1.43

明半方差函数指数模型总体上能较好地反映福建省不同典型县耕地土壤有机质“具有强烈的空间自相关性且变异主要由空间自相关因素引起”的空间结构特征<sup>[21]</sup>。但从表 2 也可以看出,各县的拟合效果和空间分异规律仍存在较大差异,厦门市的同安区、南平市的建瓯市以及漳州市的漳浦县 RSS 均低于 1.50,且决定系数  $R^2$  均大于 0.95,拟合效果是所有典型县中最好的;龙岩市的永定县和南平市的建瓯市块金值明显大于其他地级市典型县,表明这两个以丘陵山地为主要地貌类型的县域耕地土壤有机质含量具有较强的非均一性<sup>[22]</sup>。变程 (Range) 是反映采样点空间相关性距离范围的重要参数,超出此范围则空间相关性消失,不可进行内插求值<sup>[23-24]</sup>。从半方差函数模型拟合结果来看(表 2),福建省不同地级市各典型县土壤有机质的变程范围介于 765 ~ 3 420 m,而本研究中各个典型县土壤有机质的变程范围均大于相应最小采样间距,达到了进行空间变异预测的条件<sup>[25]</sup>。

### 2.3 福建省典型县域耕地土壤有机质最佳空间插值方法筛选

**2.3.1 福建省典型县域耕地土壤有机质确定性插值方法精度比较** 本研究对典型县的调查样点的土壤有机质进行 8 种不同的确定性插值试验。从表 3 可以看出,闽侯县、建瓯市、永定县、涵江区以及福鼎市均方根误差 (RMSE) 分别介于 7.03 ~ 9.63、8.91 ~ 12.19、7.52 ~ 9.50、8.86 ~ 11.28 和 7.74 ~ 10.00  $\text{g kg}^{-1}$ ,且均以反距离权重法 (IDW) 的 RMSE 最小,平面样条函数法 (TPS) 的 RMSE 最大,说明 IDW 插值能较好地模拟耕地土壤有机质的空间变异特征。从地貌类型图也可以发现(图 3),闽侯县、建瓯市、永定县、涵江区以及福鼎市的平原(或盆地)、丘陵和山地的分布面积比例相当,这也与李增兵等<sup>[26]</sup>认为的“IDW 比较适宜丘陵地区或丘陵与平原兼具的县域”研究结论相一致。其原因可能是 IDW 假设已知点对预测点均有影响,当调查样点很多时能充分利用周围的采样点对预测点处进行插值,所以具有较好的拟合效果<sup>[27]</sup>。大田县的 RMSE 介于 9.04 ~ 11.96  $\text{g kg}^{-1}$ ,整体大于其他县域,说明该县耕地土壤有机质插值精度较低,这可能是由于大田县地势起伏较大造成的(该地区山地地貌面积比例达 79.99%,最高和最低高程相差达 1 350 m)。但相对来看,大田县所有确定性插值中以反高次曲

面函数法 (IMS) RMSE 最小,是该县土壤有机质最优确定性插值方法。南安市、同安区和漳浦县的 RMSE 分别介于 6.04 ~ 8.22、4.52 ~ 5.88 和 5.02 ~ 6.11  $\text{g kg}^{-1}$ ,均以张力样条函数法 (SWT) 的 RMSE 最小,TPS 的 RMSE 最大,说明 SWT 插值方法适宜这些县域耕地土壤有机质的空间插值,主要原因是由于这些地区均是以平原、台地地貌类型为主,而有些研究表明,SWT 适合于对变化平缓的表面进行插值<sup>[6,28]</sup>。

**2.3.2 福建省典型县域耕地土壤有机质地统计学插值方法精度比较** 本研究在选择半方差函数模型的基础上利用 ArcGIS 软件 Geostatistical Analyst 模块对各县的调查样点进行 4 次不同地统计学插值。从表 4 可以看出,闽侯县、建瓯市、永定县、大田县、涵江区以及福鼎市的 RMSE 分别介于 7.02 ~ 7.03、8.91 ~ 8.93、7.49 ~ 7.49、9.10 ~ 9.12、8.85 ~ 8.85 和 7.73 ~ 7.74  $\text{g kg}^{-1}$ ,整体大于南安市 (6.03 ~ 6.06  $\text{g kg}^{-1}$ )、同安区 (4.50 ~ 4.50  $\text{g kg}^{-1}$ ) 和漳浦县 (5.05 ~ 5.10  $\text{g kg}^{-1}$ ) 的 RMSE,表明地统计学插值方法中平原台地区耕地土壤有机质的空间插值精度高于丘陵山地区。从地貌类型来看(图 3),平原(或盆地)、丘陵和山地分布面积比例相当的县域(闽侯县、建瓯市、永定县、涵江区和福鼎市)均以泛克里格法 (UK) 的 RMSE 最小,插值精度最高,这主要是因为在地形复杂地区耕地土壤有机质含量存在较大的不平稳性,而 UK 是以趋势面方程来分离漂移趋势,能有效消除不平稳性<sup>[29]</sup>。大田县以简单克里格法 (SK) 的 RMSE 最小,插值精度最高,这主要是由于该地区的耕地以山地为主,而 SK 法在空间预测过程中易忽略局部极值的影响而产生较为平缓的插值效果<sup>[30]</sup>。南安市、同安区和漳浦县均以普通克里格法 (OK) 的 RMSE 最小,插值精度最高,说明 OK 能较好地预测这 3 个以平原、台地为主要地貌类型的县域。有研究表明,OK 适用于对平原县域耕地土壤有机质的预测,而对于地形复杂区域的预测效果却不理想<sup>[31]</sup>。

**2.3.3 福建省典型县域耕地土壤有机质的最佳插值方法筛选** 为了明确福建省典型县域耕地土壤有机质最高效的点面拓展模型,本研究将最优的确定性插值方法与最优的地统计插值方法进行空间插值精度比较,从中筛选出适宜不同地貌特征耕地土壤有机质的最精确空间插值方法。

表 3 福建省典型县域耕地土壤有机质确定性插值方法的预测误差

Table 3 Prediction error of the use of the deterministic interpolation method in predicting farmland soil organic matter contents in the typical counties, Fujian Province

典型县 Typical county	插值 方法 Interpolation	平均预 测误差 ME (g kg <sup>-1</sup> )	均方 根误差 RMSE (g kg <sup>-1</sup> )	典型县 Typical county	插值 方法 Interpolation	平均预 测误差 ME (g kg <sup>-1</sup> )	均方 根误差 RMSE (g kg <sup>-1</sup> )	典型县 Typical county	插值 方法 Interpolation	平均预 测误差 ME (g kg <sup>-1</sup> )	均方 根误差 RMSE (g kg <sup>-1</sup> )
闽侯县 Minhou County	IDW	-0.024 6	7.03	建瓯市 Jian'ou City	IDW	0.027 5	8.91	永定县 Yongding County	IDW	0.082 0	7.52
	GPI	0.001 9	7.35		GPI	0.003 7	9.31		GPI	0.001 0	7.80
	LPI	0.006 3	7.06		LPI	0.001 6	8.97		LPI	0.007 4	7.53
	CRS	0.015 4	7.04		CRS	0.013 1	9.07		CRS	0.021 9	7.61
	SWT	0.014 7	7.03		SWT	0.012 6	9.03		SWT	0.018 1	7.56
	MF	0.052 2	7.83		MF	0.022 9	10.30		MF	0.056 0	8.31
	IMS	-0.027 8	7.06		IMS	0.022 9	9.42		IMS	0.028 9	7.63
	TPS	0.121 4	9.27		TPS	0.038 5	12.19		TPS	0.087 4	9.50
大田县 Datian County	IDW	0.004 5	9.10	涵江区 Hanjiang District	IDW	0.020 9	8.86	福鼎市 Fuding City	IDW	0.082 4	7.74
	GPI	-0.007 3	9.35		GPI	-0.003 3	9.08		GPI	0.014 7	8.19
	LPI	-0.018 7	9.14		LPI	-0.018 6	8.90		LPI	0.053 1	7.78
	CRS	0.008 1	9.22		CRS	-0.001 6	8.96		CRS	0.010 7	7.79
	SWT	0.002 1	9.18		SWT	0.002 2	8.92		SWT	0.009 7	7.77
	MF	0.008 8	10.25		MF	-0.064 1	9.86		MF	0.007 1	8.71
	IMS	-0.012 0	9.04		IMS	0.035 3	8.90		IMS	0.126 6	7.81
	TPS	-0.012 2	11.96		TPS	-0.106 6	11.28		TPS	-0.007 9	10.00
南安市 Nan'an City	IDW	0.023 5	6.21	同安区 Tong'an District	IDW	0.040 7	4.52	漳浦县 Zhangpu County	IDW	0.055 6	5.04
	GPI	-0.003 6	6.30		GPI	-0.000 5	4.56		GPI	0.016 5	5.45
	LPI	-0.065 4	6.09		LPI	-0.026 2	4.52		LPI	-0.037 6	5.07
	CRS	0.022 8	6.11		CRS	0.014 4	4.58		CRS	0.007 0	5.03
	SWT	0.000 4	6.04		SWT	0.007 4	4.52		SWT	0.006 5	5.02
	MF	0.003 7	6.82		MF	0.037 8	5.09		MF	0.008 4	5.41
	IMS	0.046 3	6.12		IMS	0.006 1	4.54		IMS	0.026 6	5.43
	TPS	0.065 6	8.22		TPS	0.047 2	5.88		TPS	0.013 9	6.11

ME: 平均预测误差 Mean, RMSE: 均方根误差 Root-Mean-Square, IDW: 反距离权重法 Inverse Distance Weighting, GPI: 全局多项式法 Global Polynomial Interpolation, LPI: 局部多项式法 Local Polynomial Interpolation, CRS: 规则样条函数法 Completely regularized spline, SWT: 张力样条函数法 Spline with tension, MF: 高次曲面函数法 Multiquadric function, IMS: 反高次曲面函数法 Inverse multiquadric function, TPS: 平面样条函数法 Thin-plate spline

从表 5 和图 4 可以看出,漳浦县耕地土壤有机质最优确定性插值法(SWT)的 RMSE 小于最优地统计插值法(OK)的 RMSE,说明漳浦县耕地土壤有机质最精确的插值方法为 SWT,这可能与漳浦县平原、台地面积比例高达 81.10% 有关。有研究表明,SWT 对变化平缓的表面具有很好的拟合效果<sup>[6, 26]</sup>。闽侯县、建瓯市、永定县、涵江区、福鼎市、南安市和同安区 8 个典型县均以最优地统计插值方法(UK、SK、OK)的 RMSE 小于最优确定性插值方法(IDW、

IMS、SWT)的 RMSE;其中,闽侯县、建瓯市、永定县、涵江区以及福鼎市均以 UK 插值效果最佳,大田县以 SK 最佳,南安市和同安区则以 OK 最佳,主要原因是由于地统计学插值是以变异函数理论和结构分析为基础,能在有限区域内最大限度地利用空间采样所提供的信息对区域化变量进行无偏最优估计,不仅考虑已知样点和未知样点的距离,还考虑已知样点的空间分布及与未知样点的空间方位关系<sup>[32-36]</sup>。

表 4 福建省典型县域耕地土壤有机质地统计学插值误差

Table 4 Error of the use of the Geo-statistical interpolation method in predicting farmland soil organic matter contents in the typical counties of Fujian Province

典型县	插值方法	平均预测误差	均方根误差	平均标准差	标准预测误差	均方根标准误差	典型县	插值方法	平均预测误差	均方根误差	平均标准差	标准预测误差	均方根标准误差
Typical county	Interpolation	ME	RMSE	ASE	MSE	RMSSE	Typical county	Interpolation	ME	RMSE	ASE	MSE	RMSSE
		(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )			(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )
闽侯县	OK	0.006 2	7.02	6.81	0.000 5	1.03	建瓯市	OK	0.001 9	8.91	8.96	0.000 1	0.99
Minhou County	SK	0.005 1	7.03	7.03	0.000 5	1.00	Jian'ou City	SK	-0.019 4	8.93	9.13	-0.002 2	0.98
	UK	0.009 3	7.02	6.81	0.001 0	1.03		UK	0.004 6	8.91	8.97	0.000 4	0.99
	DK	0.006 8	7.03	7.03	0.000 8	1.00		DK	-0.011 2	8.93	9.19	-0.001 2	0.97
永定县	OK	0.004 6	7.49	7.61	0.000 3	0.98	大田县	OK	0.002 0	9.12	9.08	0.000 3	1.01
Yongding County	SK	0.038 0	7.49	7.48	0.004 8	1.00	Datian County	SK	-0.001 7	9.10	8.56	-0.000 1	1.06
	UK	0.006 2	7.49	7.61	0.000 6	0.98		UK	-0.003 9	9.12	9.19	-0.000 3	0.99
	DK	0.033 7	7.49	7.48	0.004 2	1.00		DK	-0.001 7	9.10	8.56	0.000 1	1.06
涵江区	OK	0.007 2	8.85	8.79	0.000 9	1.01	福鼎市	OK	-0.001 3	7.74	7.84	-0.000 4	0.99
Hanjiang District	SK	0.024 3	8.85	8.78	0.002 8	1.01	Fuding City	SK	-0.010 2	7.73	7.79	-0.001 6	0.99
	UK	0.007 7	8.85	8.76	0.001 0	1.01		UK	0.000 0	7.73	7.74	-0.000 4	1.00
	DK	0.023 8	8.85	8.78	0.002 8	1.01		DK	-0.009 0	7.73	7.73	-0.001 5	1.00
南安市	OK	0.000 9	6.03	5.57	0.000 0	1.08	同安区	OK	-0.000 1	4.50	4.27	-0.000 2	1.05
Nan'an City	SK	0.011 7	6.03	5.98	0.001 9	1.01	Tong'an District	SK	-0.051 6	4.50	4.56	-0.011 3	0.99
	UK	0.003 8	6.06	5.78	0.000 6	1.05		UK	0.000 6	4.50	4.23	-0.000 1	1.06
	DK	0.011 0	6.04	6.04	0.001 8	1.00		DK	-0.051 6	4.50	4.56	-0.011 3	0.99
漳浦县	OK	-0.006 6	5.05	5.31	-0.001 5	0.95							
Zhangpu County	SK	0.014 2	5.06	5.98	0.002 1	0.85							
	UK	-0.007 4	5.06	5.47	-0.001 6	0.93							
	DK	0.014 2	5.10	6.09	0.002 1	0.84							

ME:平均预测误差 Mean, RMSE:均方根误差 Root-Mean-Square, ASE:平均标准差 Average Standard Error, MSE:标准预测误差 Mean Standardized, RMSSE:均方根标准误差 Root-Mean-Square Standardized, OK:普通克里格法 Ordinary Kriging, SK:简单克里格法 Simple Kriging, UK:泛克里格法 Universal Kriging, DK:析取克里格法 Disjunctive Kriging

### 3 结 论

福建省典型县域耕地土壤有机质平均含量为 27.83 g kg<sup>-1</sup>, 处于中等水平; 变异系数为 37.87%, 属中等变异, 且具有强烈的空间自相关性, 半方差函数以指数模型拟合效果最佳。闽侯县、建瓯市、永定县、涵江区以及福鼎市耕地土壤有机质最优确定性插值法是反距离权重法, 最优地统计插值法是泛克里格法, 且泛克里格法插值精度高于反距离权重法; 大田县的最优确定性插值法是反高次曲面函数法, 最优地统计插值法是简单克里格法, 且简单

克里格法插值精度高于反高次曲面函数法; 南安市、同安区以及漳浦县的最优确定性插值法为张力样条函数法, 最优地统计插值法为普通克里格法, 且普通克里格法插值精度高于张力样条函数法(漳浦县除外)。总体来看, 福建省平原(或盆地)、丘陵和山地分布面积比例相当的区域采用泛克里格法进行耕地土壤有机质空间插值精度较高, 山地为主的区域采用简单克里格法进行有机质空间插值精度较高, 而以平原、台地为主的区域则采用普通克里格或张力样条函数法进行有机质空间插值精度较高。



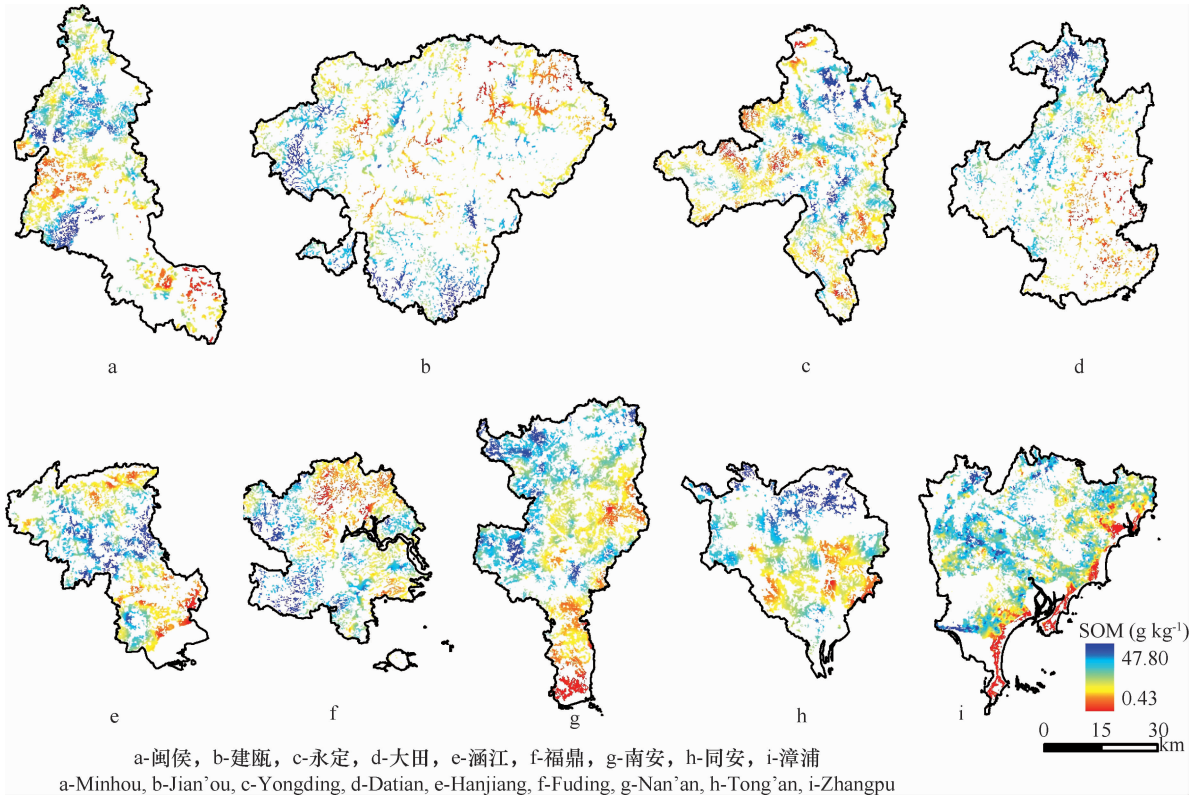


图 4 最佳空间插值方法预测的耕地土壤有机质空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of farmland soil organic matter contents predicted with the optimal spatial interpolation method

表 5 福建省典型县域耕地土壤有机质最优插值方法的误差

Table 5 Error of the use of the optimal interpolation methods in predicting farmland soil organic matter contents in the typical counties of Fujian Province

典型县 Typical county	最优确定性插值法 Optimal deterministic interpolation	平均预测误差 ME (g kg <sup>-1</sup> )	均方根误差 RMSE (g kg <sup>-1</sup> )	最优地统计插值法 Optimal geo-statistical interpolation	平均预测误差 ME (g kg <sup>-1</sup> )	均方根误差 RMSE (g kg <sup>-1</sup> )	平均标准差 ASE (g kg <sup>-1</sup> )	标准预测误差 MSE (g kg <sup>-1</sup> )	均方根标准误差 RMSSE (g kg <sup>-1</sup> )
闽侯县 Minhou County	IDW	-0.024 6	7.03	UK	0.009 3	7.02	6.81	0.001 0	1.03
建瓯市 Jian'ou City	IDW	0.027 5	8.91	UK	0.004 6	8.91	8.97	0.000 4	0.99
永定县 Yongding County	IDW	0.082 0	7.52	UK	0.006 2	7.49	7.61	0.000 6	0.98
大田县 Datian County	IMS	-0.012 0	9.04	SK	-0.001 7	9.10	8.56	-0.000 1	1.06
涵江区 Hanjiang District	IDW	0.020 9	8.86	UK	0.007 7	8.85	8.76	0.001 0	1.01
福鼎市 Fuding City	IDW	0.082 4	7.74	UK	0.000 0	7.73	7.74	-0.000 4	1.00
南安市 Nan'an City	SWT	0.000 4	6.04	OK	0.000 9	6.03	5.57	0.000 0	1.08
同安区 Tong'an District	SWT	0.007 4	4.52	OK	-0.000 1	4.50	4.27	-0.000 2	1.05
漳浦县 Zhangpu County	SWT	0.006 5	5.02	OK	-0.006 6	5.05	5.31	-0.001 5	0.95

ME: 平均预测误差 Mean, RMSE: 均方根误差 Root-Mean-Square, ASE: 平均标准差 Average Standard Error, MSE: 标准预测误差 Mean Standardized, RMSSE: 均方根标准误差 Root-Mean-Square Standardized, IDW: 反距离权重法 Inverse Distance Weighting, UK: 泛克里格法 Universal Kriging, IMS: 反高次曲面函数法 Inverse multiquadric function, SK: 简单克里格法 Simple Kriging, SWT: 张力样条函数法 Spline with tension, OK: 普通克里格法 Ordinary Kriging

## 参考文献

- [1] Wang Y Q, Zhang X C, Zhang J L, et al. Spatial variability of soil organic carbon in a watershed on the Loess Plateau. *Pedosphere*, 2009, 19(4): 486—495
- [2] 江厚龙, 刘国顺, 杨孟益, 等. 精准农业中不同取样间距下 Kriging 插值精度对比研究. *土壤通报*, 2011, 42(4): 879—886. Jiang H L, Liu G S, Yang X M, et al. Comparison of kriging interpolation precision in different soil sampling interval in precision agriculture (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(4): 879—886
- [3] 赵伟, 谢德体, 刘洪斌, 等. 精准农业中土壤养分分析的适宜取样数量的确定. *中国生态农业学报*, 2008, 16(2): 318—322. Zhao W, Xie D T, Liu H B, et al. Proper soil sample numbers for soil nutrient analysis in precision agriculture (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(2): 318—322
- [4] 王玉印. 区域耕地耕层土壤氮磷储量及其价值时空变化研究. 福州: 福建农林大学, 2010. Wang Y Y. Studies on temporal and spatial variation of regional cultivated soil nitrogen and phosphorus storage and its value (In Chinese). Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2010
- [5] 张文龙, 李玉环, 姬祥. 基于地统计学的耕层土壤有机质空间变异及不同插值模型比较. *中国农学通报*, 2011, 27(6): 256—260. Zhang W L, Li Y H, Ji X. Spatial variability and comparison of different models of interpolation of tillage-layer soil organic matter based on geostatistics (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(6): 256—260
- [6] 赵巧丽, 郑国清, 冯晓, 等. 河南省安阳县三种土壤全氮含量空间插值方法的比较分析. *土壤通报*, 2012, 43(5): 1162—1166. Zhao Q L, Zheng G Q, Feng X, et al. Comparison of spatial interpolation for soil total nitrogen in Anyang Country of Henan Province (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(5): 1162—1166
- [7] 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. *应用生态学报*, 2009, 20(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 (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(3): 673—678
- [8] 马静, 张仁陟, 陈利, 等. 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. *安徽农学通报*, 2011, 17(17): 91—93. Ma J, Zhang R Z, Chen L, et al. Evaluation of farmland soil nutrient comparison of spatial interpolation methods—Take Huining County cultivated soil potassium for an example (In Chinese). *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2011, 17(17): 91—93
- [9] 邢世和. 福建耕地资源. 厦门: 厦门大学出版社, 2003. Xing S H. Cropland resources in Fujian (In Chinese). Xiamen: Xiamen University Press, 2003
- [10] 福建省土壤普查办公室. 福建土壤. 福州: 福建科学技术出版社, 1991. Soil survey office in Fujian Province. Soils of Fujian (In Chinese). Fuzhou: Fujian Science and Technology Publishing House, 1991
- [11] 张忠启, 于法展, 李保杰, 等. 江苏北部县域土壤有机质空间变异特征. *水土保持研究*, 2012, 19(5): 219—222. Zhang Z Q, Yu F Z, Li B J, et al. Spatial variation characteristic of soil organic matter in a county of North Jiangsu Province (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(5): 219—222
- [12] 胡克林, 李保国, 吕貽忠, 等. 非平稳型区域土壤汞含量的各种估值方法比较. *环境科学*, 2004, 25(3): 132—137. Hu K L, Li B G, Lü Y Z, et al. Comparison of various spatial interpolation methods for non-stationary regional soil mercury content (In Chinese). *Environmental Science*, 2004, 25(3): 132—137
- [13] ESRI. Using Geostatistical Analyst. United States of America: ESRI Inc, 2004
- [14] 封志明, 杨艳昭, 丁晓强, 等. 气象要素插值方法优化. *地理研究*, 2004, 23(3): 357—364. Feng Z M, Yang Y Z, Ding X Q, et al. Optimization of the spatial interpolation methods for climate resources (In Chinese). *Geographical Research*, 2004, 23(3): 357—364
- [15] 曾招兵, 汤建东, 刘一峰, 等. 广东耕地土壤有机质的变化趋势及其驱动力分析. *土壤*, 2013, 45(1): 84—90. Zeng Z B, Tang J D, Liu Y F, et al. Changes and driving forces of farmland organic matter in Guangdong Province, China (In Chinese). *Soils*, 2013, 45(1): 84—90
- [16] 龙军. 亚热带不同耕地土壤和利用类型对“碳源/汇”贡献的差异研究. 福州: 福建农林大学, 2012. Long J. Studies on difference of carbon source or sink contribution in subtropical cropland based on various soil types and land-uses (In Chinese). Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012
- [17] 周小青. 山地和丘陵区土壤养分空间插值精度比较研究——以永顺县和邵阳县为例. 长沙: 湖南农业大学, 2011. Zhou X Q. A comparison on soil nutrient interpolation accuracy of mountainous area and hills—A case study of Yongshun County and Shaoyang County (In Chinese). Changsha: Hunan Agricultural University, 2011
- [18] 赵彦锋, 化全县, 陈杰. Kriging 插值和序贯高斯条件模拟的原理比较及在土壤空间变异研究中的案例分析. *土壤学报*, 2011, 48(4): 856—862. Zhao Y F, Hua Q X, Chen J. Comparison of kriging interpolation with conditional sequential gaussian simulation in principles and case analysis of their application in study on soil spatial variation (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(4): 856—862
- [19] 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. Zhao Y T, Qi Y B, Chang Q R, et al. Spatio-temporal variation of soil organic matter in farmland at a county scale in Weihe Plain (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5): 1049—1054
- [20] 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. *生态学报*, 2010, 30(19): 5338—5345. Zhang Z Q, Shi X Z, Yu D S, et al. Spatial prediction of soil or-

- ganic matter and total nitrogen in the hilly red soil region, China (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(19): 5338—5345
- [21] 赵明松, 张甘霖, 王德彩, 等. 徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及主控因素分析. *土壤学报*, 2013, 50(1): 1—11. Zhao M S, Zhang G L, Wang D C, et al. Spatial variability of soil organic matter and its dominating factors in Xu-Huai alluvial plain (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1): 1—11
- [22] 赵玉杰, 唐世荣, 李野, 等. 普通及指示克里格法在水稻禁产区筛选中的应用. *环境科学学报*, 2009, 29(8): 1780—1787. Zhao Y J, Tang S R, Li Y, et al. Application of ordinary and indicator kriging methods for screening non-rice cropping areas (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(8): 1780—1787
- [23] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 等. 河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征——变异函数和 Kriging 插值分析. *地理学报*, 2000, 55(5): 555—566. Guo X D, Fu B J, Ma K M, et al. The spatio-temporal variability of soil nutrients in Zunhua Plain of Hebei Province: Semivariogram and kriging analysis (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 555—566
- [24] 刘付程, 史学正, 于东升, 等. 基于地统计学和 GIS 的太湖典型地区土壤属性制图研究——以土壤全氮制图为例. *土壤学报*, 2004, 41(1): 20—27. Liu F C, Shi X Z, Yu D S, et al. Mapping soil properties of the typical area of Taihu Lake watershed by geostatistics and geographic information systems—A case study of total nitrogen in topsoil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 20—27
- [25] 张忠启, 李保杰, 于法展, 等. 基于地统计学的苏北县域土壤全氮空间变异研究. *安徽农业科学*, 2012, 40(26): 12843—12844. Zhang Z Q, Li B J, Yu F Z, et al. Spatial variability of soil total nitrogen in county region of North Jiangsu based on geostatistics (In Chinese). *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(26): 12843—12844
- [26] 李增兵, 赵庚星, 赵倩倩, 等. 县域耕地地力评价中土壤养分空间插值方法的比较研究. *中国农学通报*, 2012, 28(20): 230—236. Li Z B, Zhao G X, Zhao Q Q, et al. Comparison of spatial interpolation methods for soil nutrients in cultivated land fertility evaluation (In Chinese). *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(20): 230—236
- [27] 王秀, 苗孝可, 孟志军, 等. 插值方法对 GIS 土壤养分插值结果的影响. *土壤通报*, 2005, 36(6): 826—830. Wang X, Miao X K, Meng Z J, et al. Effect on soil nutrition interpolation result of different interpolation styles (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(6): 826—830
- [28] 汪媛媛, 杨忠芳, 余涛, 等. 土壤碳储量计算中不同插值方法对比研究——以吉林省大安市为例. *中国岩溶*, 2011, 30(4): 479—486. Wang Y Y, Yang Z F, Yu T, et al. Contrastive studies on different interpolation methods in soil carbon storage calculation in Daan City, Jilin Province (In Chinese). *Carologica Sinica*, 2011, 30(4): 479—486
- [29] 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. *土壤学报*, 2005, 42(3): 379—385. Zhao Y C, Shi X Z, Yu D S, et al. Different methods for prediction of spatial patterns of soil organic carbon density in Hebei Province, China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3): 379—385
- [30] 易湘生, 李国胜, 尹衍雨, 等. 土壤厚度的空间插值方法比较——以青海三江源地区为例. *地理研究*, 2012, 31(10): 1793—1805. Yi X S, Li G S, Yi Y Y, et al. Comparison on soil depth prediction among different spatial interpolation methods: A case study in the Three-River Headwaters Region of Qinghai Province (In Chinese). *Geographical Research*, 2012, 31(10): 1793—1805
- [31] Liu T L, Juang K W, Lee D Y. Interpolating soil properties using kriging combined with categorical information of soil maps. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(4): 1200—1209
- [32] 李立, 魏晓妹, 韩业珍. 基于地统计学的作物需水量空间变异性分析. *水土保持研究*, 2010, 17(1): 239—242. Li L, Wei X M, Han Y Z. Spatial variability on crop water requirement based on geo-statistics (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(1): 239—242
- [33] 李晓燕, 张树文. 吉林省德惠市土壤速效钾的空间分异及不同插值方法的比较. *水土保持学报*, 2004, 18(4): 97—100. Li X Y, Zhang S W. Spatial heterogeneity and comparison of different methods of interpolation of soil available K in Dehui City, Jilin Province (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(4): 97—100
- [34] 郭熙, 黄俊, 谢文, 等. 山地丘陵耕地土壤养分最优插值方法研究——以江西省渝水区水北镇为例. *河南农业科学*, 2011, 40(2): 76—80. Guo X, Huang J, Xie W, et al. The best interpolation to evaluate soil nutrient in the mountainous farmland—A case study of Shuibei Town, Yushui Country, Jiangxi Province (In Chinese). *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2011, 40(2): 76—80
- [35] 方亮, 何方, 吕莎莎, 等. 山区丘陵地带土壤有机质插值方法的研究——以安徽省东至县为例. *安徽农业科学*, 2011, 39(5): 2708—2710. Fang L, He F, Lü S S, et al. Study on the interpolation methods of soil organic matter in mountainous and foothills area—A case study of Dongzhi County, Anhui Province (In Chinese). *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(5): 2708—2710
- [36] 张摇峰, 杜摇群, 葛宏立, 等. 基于地统计学和 CFI 样地的浙江省森林碳空间分布研究. *生态学报*, 2012, 32(16): 5275—5286. Zhang Y F, Du Y Q, Ge H L, et al. Spatial distribution of forest carbon in Zhejiang Province with geostatistics based on CFI sample plots (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16): 5275—5286

## SPATIAL INTERPOLATION OF SOIL ORGANIC MATTER IN FARMLANDS IN AREAS COMPLEX IN LANDFORM

Long Jun<sup>1,2</sup> Zhang Liming<sup>1,2</sup> Shen Jinquan<sup>3</sup> Zhou Biqing<sup>1,2</sup> Mao Yanling<sup>1,2</sup> Qiu Longxia<sup>1,2</sup> Xing Shihe<sup>1,2†</sup>

(1 College of Resource and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

(2 Key Lab of Soil Ecosystem Health and Regulation, Fujian Province University, Fuzhou 350002, China)

(3 Fujian Crop Land Construction and Soil and Fertilizer Station, Fuzhou 350003, China)

**Abstract** As a core index of soil fertility, soil organic matter has played an important role in global carbon recycling and agricultural production. Field sampling, laboratory analysis and spatial interpolation are used as chief means of assessing content of soil organic matter in farmlands. Due to differences in soil forming factors and human activity, spatial distribution of soil organic matter contents and its driving force may vary from region to region under study, which in turn causes variation of applicable interpolations with the region. Fujian is a province very complicated in landform, as affected by the jointly actions of tectonic movement and long-term exogenic agencies, so the farmlands there are very high in land-use intensity and in spatial variability as well. Therefore, efficient site-specific point-plane expanding models will help expose laws of the spatial distribution of soil organic matter in farmlands of the province and realize precision agricultural nutrient management.

In this study, nine counties, namely Minhou, Jian'ou, Yongding, Datian, Hanjiang, Fuding, Nan'an, Tong'an and Zhangpu, representative of 9 different types of landforms in Fujian Province, China, were selected for case study. Based on the data collected from the 29 320 sampling sites, scattered in these nine counties, of the soil testing-based fertilizer recommendation project sponsored by the Ministry of Agriculture of China, statistical characteristics for soil organic matter contents in farmlands were analyzed using the statistical software SPSS and GS+ and a semi-variance model established. In line with the principle of "for mean errors (ME), the closer to zero, the better and for root mean square errors (RSME), the smaller the better, and RSME should be given the first priority" impacts of different interpolation methods on accuracy of the reckoning of soil organic matter contents were evaluated and eventually a point-plane expanding model with the higher accuracy in predicting soil organic matter contents in the farmlands of Fujian Province was defined.

Results show that the mean soil organic matter content of farmlands in Fujian Province was  $27.83 \text{ g kg}^{-1}$ , and its coefficient of variation was 37.87%, displaying a strong spatial autocorrelation and for semi-variance function the exponential model fitted the best. For prediction of organic matter contents in farmlands of Minhou County, Jian'ou City, Yongding County, Hanjiang District and Fuding City, the optimal geo-statistical interpolation method was the pan-kriging method, while the optimal deterministic interpolation method was the inverse distance weighting method, however, the former was higher than the latter in prediction precision. For Datian County, the optimal geo-statistical interpolation method was the simple kriging method, while the optimal deterministic interpolation method was the inverse high-order surface function method, however, the former was still higher than the latter. For Nan'an City, Tong'an District and Zhangpu County, the optimal geo-statistical interpolation method was the ordinary kriging method, while the optimal deterministic interpolation method was the tension spline function method, nevertheless, the former was higher, too, except for Zhangpu County. On the whole, in regions, like Minhou, Jian'ou, Yongding, Hanjiang and Fuding, that have similar distribution areas of plain or basin, hills and mountains, the use of the pan-kriging method in spatial interpolation of soil organic matter contents is relatively high in prediction precision, while in regions, like Datian, that are dominated with mountains the use of the simple kriging method is more advisable and in regions, like Nan'an, Tong'an and Zhangpu, that are dominated with plains or table lands, the use of the ordinary kriging method or the tension spline function method is.

**Key words** Landforms; Farmland; Soil organic matter; Spatial interpolation; Fujian Province

(责任编辑:檀满枝)