

基于磁感式土壤表观电导率空间变异性的插值方法比较

杨劲松, 姚荣江

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘 要: 针对目前黄河三角洲地区存在的土壤盐渍障碍问题, 以该地区典型地块为研究对象, 运用磁感大地电导率仪 (EM 38), 结合 GIS 与地统计学研究了不同样点密度下土壤表观电导率的空间变异特征, 确定了最佳的空间插值模式, 并采用偏差指数对各分布图层的空间相似性进行了评价。结果表明: 不同样点密度下的土壤表观电导率均呈中等变异强度, 并服从对数正态分布; 各样点密度下的土壤表观电导率均表现为强空间相关性, 其空间变异主要表现在小于 10 m 的田间尺度上, 且对于预测精度, 泛克立格 > 普通克立格 > 反距离权重 > 局部多项式。偏差指数法分析表明, 各插值方法分布图的空间相似性均随样点密度的降低而下降; 对于相同的样点密度减小比例下的空间信息保留度, 泛克立格 > 普通克立格 > 反距离权重 > 局部多项式, 采用泛克立格法可以在保证预测精度的基础上合理降低样点密度。该研究为黄河三角洲地区盐渍土地磁感式田间数据采集的合理密度确定以及优化空间插值模式选取提供了理论依据与技术参考。

关键词: 表观电导率; 磁感大地电导率仪; 空间插值; 黄河三角洲

中图分类号: S156.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007) 9-0050-08

杨劲松, 姚荣江. 基于磁感式土壤表观电导率空间变异性的插值方法比较[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 50-57.

Yang Jingsong, Yao Rongjiang. Comparison of interpolation approaches based on spatial variability of apparent soil electrical conductivity with an electromagnetic induction[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 50-57. (in Chinese with English abstract)

0 引言

盐渍化是制约黄河三角洲地区农业生产的主要障碍因素之一, 掌握大面积农田盐渍化的程度及动态观测盐渍化发展过程的第一手资料, 是科学管理、合理改良利用盐渍化土地的必要前提。传统的田间采样方法比较费时、费力、费钱, 且土壤特性的田间变异程度大, 受人力、物力等因素限制, 常无法采集足够数量的样品。因此, 传统方法获得的土壤特性信息比较粗略, 不能反映所希望掌握的完整信息, 应用传统方法获得的信息制作成的相关图件存在精度和准确性方面的问题。

磁感大地电导率仪 (EM 38) 能在地表直接测量土壤表观电导率 EC_a , 为非接触直读式, 其测定原理基于电磁技术, 适用于大面积土壤盐渍化的测量, EM 38 用联接 DL600 数据采集器电缆的方式, 较常规方法的调查速度快 100 倍以上^[1-3]。自 20 世纪 90 年代以来, 国外已在 EM 38 对土壤盐分、含水率、养分以及土壤组成等性质的响应特征方面进行了大量的研究^[4-7], 同时还

和空间技术相结合将其扩展到区域尺度, 成为研究土壤重要性质的有利工具。如 Triantafilis 等^[8]运用磁感大地电导率仪研究了田间尺度土壤盐分的优化地统计学模型。Barbiéro 等^[9]利用磁感大地电导率仪对田间尺度下塞内加尔峡谷中部的土壤盐渍化进行了研究, 发现结合航片能更有效地制定当地的灌溉措施。Triantafilis 等^[10]研究了利用磁感式电导率仪测定田间尺度黏粒含量的方法, 建立了使用辅助变量来估计田间尺度黏粒含量的优化统计预测方法。Corwin 等^[11]结合磁感大地电导率的田间调查进行了合理采样策略以及土壤质量评价的研究, 分析了不同深度土壤理化性质的空间变异性。至今, 国内已有的少量研究集中在点尺度上^[12, 13]。本文以黄河三角洲地区典型地块为研究对象, 结合磁感大地电导率仪 EM 38 及其移动测定系统对研究区土壤表观电导率进行测量, 运用局部多项式、反距离权重、普通克立格和泛克立格法研究了土壤表观电导率的空间变异性, 通过精度比较确定了不同样点密度下的优化空间插值模式, 并采用偏差指数对不同样点密度下的分布图层的空间相似性进行了评价。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省垦利县永安镇“东七村”与“东义和村”为主体的区域, 地理位置 $118^{\circ}48' \sim 118^{\circ}50'E$, $37^{\circ}33' \sim 37^{\circ}34'N$, 该区东临渤海, 属典型黄河下游三角洲

收稿日期: 2006-07-19 修订日期: 2006-12-25

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (KZCX2-YW-406-3); 国家科技支撑计划重点课题 (2006BAD05B02); 国家高科技研究发展技术 (863 计划) 重点项目课题 (2006AA100207); 中国科学院南京土壤研究所创新方向资助项目

作者简介: 杨劲松 (1959-), 男, 江苏靖江人, 研究员, 博士生导师, 主要研究领域为土壤盐渍化防控和盐渍土资源利用。南京 中国科学院南京土壤研究所, 210008。Email: jsyang@issas.ac.cn

地区。由于土壤直接发育于海相沉积物,且成陆过程中受海水的浸渍侧渗影响,研究区内地下水矿化度较高,平均矿化度为 32.4 g/L,最高达 70.5 g/L;地下水埋深一般在 1.8~2.4 m 之间,使研究区土壤和地下水含有较多的可溶性盐类,滨海潮盐土是该区最主要的盐土类型。该区地处北温带大陆性季风型气候带,降水量时空分布不均,全年 70% 的降水量集中在 7~8 月;且当地缺乏蓄水工程,雨季水量丰富但不能调蓄,淡水资源紧缺,导致了该地区土壤水盐运动极其活跃。

1.2 数据采集

1.2.1 MESS 基本架构及田间测量

移动式磁感测定系统 (Mobile Electromagnetic Sensing System, MESS) 的基本架构 (图 1) 包括^[2,3]: ①磁感大地电导率仪 EM 38。采用水平测量位贴地进行测量,此时其感应深度为 75 cm。②差分 GPS。用于实时收集地理位置信息进行精准定位,并可以暂时存储测得的表观电导率数据,其存储容量为 200 M。③机械牵引、传动及连接装置。利用一台 25 马力 (18.4 kW) 的牵引机用作外部牵引动力;液压传动装置,用于调整磁感大地电导率仪的位置;为尽量减少电磁感应设备感应范围内的金属物,附属部件是 PVC 支架及其余一些非金属制品,用于联接、固定和调整设备。

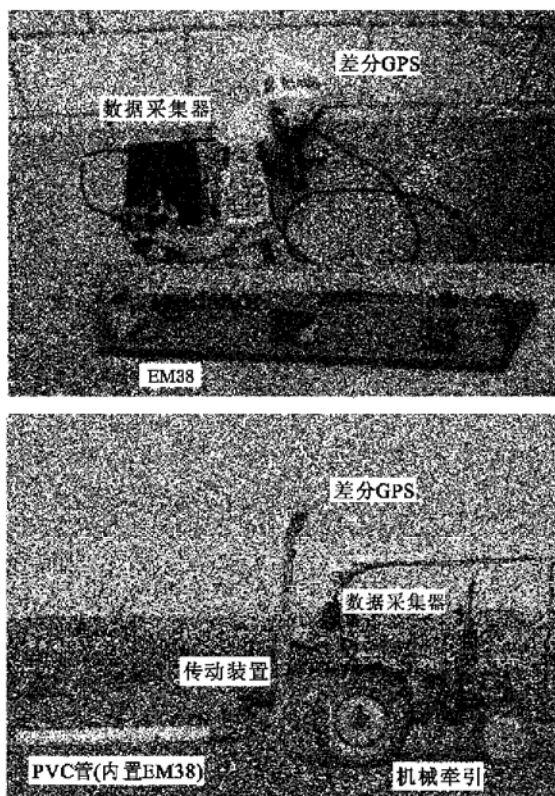


图 1 磁感大地电导率仪 EM 38 及 MESS 的架构示意图

Fig. 1 Ground conductivity with an electromagnetic EM 38 and layout of the MESS framework

运用移动式磁感测定系统对面积约 1.9 km² (东西约 1.9 km, 南北约 1.0 km) 的研究区进行测量,采用由东向西沿条田方向测量,共 27 行,平均行间距 40 m 左右,行内数据采集间距为 1.0~3.0 m,共采集 26672 个土壤表观电导率数据。在进行表观电导率数据采集的同时,固定于机械牵引装置上的差分 GPS 同步采集该测点的地理坐标信息。实际共计收集 26672 个土壤表观电导率测定数据及对应测点的地理坐标。测定日期为 2004 年 10 月中下旬,正处于棉铃吐絮期的晚期 (拔秆期),此时绝大部分棉花已采摘完毕,有利于移动式磁感测定系统进入田间进行土壤表观电导率的测定。

1.2.2 样品采集与分析

在研究区范围内布设样点,样点的位置、数量根据当地土壤质地、盐分状况、植被类型等因素确定。通过电磁感应仪 EM 38 的水平测定,置于地表共测得 164 个样点的土壤表观电导率 (记作 EM 38H) 数据,在每个电磁感应仪测定部位进行土壤剖面挖掘,并对 0~75 cm 深度的土壤样品进行采集,采样日期与移动式磁感测定系统进行田间土壤表观电导率测定日期同步。

采集土样带回实验室内自然风干,磨碎、过 2 mm 筛后备用。所有土样均制备 1:5 土水比浸提液,采用常规分析法确定土壤各离子组成含量,计算相应的土壤全盐含量,测定方法参考《土壤农业化学分析方法》^[14]。对室内分析得到 0~75 cm 土壤盐分与野外测得的 EM 38H 进行相关性分析,结果表明,磁感表观电导率 EM 38H 与土壤盐分 $S_{0-75\text{cm}}$ 具有较好的相关性: $S_{0-75\text{cm}} = -0.9288 + 1.6469\text{EM 38H}$,相关系数大于 0.95。

本文旨在利用电磁感应仪 EM 38 对土壤表观电导率的空间变异性及其优化插值方法进行研究,一方面作物生长与该深度土壤盐分密切相关,且该深度土壤水盐运动较为活跃,受外界因素影响易引起盐渍化与次生盐渍化。另一方面,该深度正处于电磁感应仪 EM 38 水平测量位的感应深度内,此时土壤表观电导率与盐分之间呈良好的相关关系,同时土壤表观电导率还能在一定程度上反映盐分信息以外的更多土壤属性信息。

1.3 研究方法

1.3.1 交叉验证及预测精度检验

1) 交叉验证

采用交叉验证法来评价插值的效果。假设某个样点的表观电导率值 EC_a 未知,用周围样点的值来估计,并计算所有样点实测值与估计值的平均误差 (ME) 和均方根误差 (RMSE) 作为评价插值效果的标准,据此获得各空间插值方法的最优化参数。计算公式如下。

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z^*(x_i) - Z(x_i)] \quad (1)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z^*(x_i) - Z(x_i)]^2 \right]^{0.5} \quad (2)$$

式中 $Z^*(x_i)$, $Z(x_i)$ —— 分别表示在插值数据点位置 i 上表观电导率的实际观测值与估计值; n —— 插值数据集的样点个数。

2) 预测精度检验

插值结果的精度可用独立于插值数据集的校验数据集进行评价。比较校验数据点位置 j 上表观电导率的估计值 $Z^*(x_j)$ 和实际观测值 $Z(x_j)$, 以校验数据集的平均预测误差 (MPE) 和均方根预测误差 ($RMSPE$) 评价预测结果精度, MPE 和 $RMSPE$ 的计算方法如下

$$MPE = \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l [Z^*(x_j) - Z(x_j)] \quad (3)$$

$$RMSPE = \left[\frac{1}{l} \sum_{j=1}^l [Z^*(x_j) - Z(x_j)]^2 \right]^{0.5} \quad (4)$$

式中 l —— 校验数据集中样点的个数。

对不同样点密度下各空间预测方法的精度进行比较, 分别均匀选取全部样点数据的 5%、10%、15%、20%、25% 和 30% (即 $l = 1334, 2668, 4001, 5335, 6668$ 和 8002) 作为独立的校验数据集, 其余数据 ($n = 25338, 24004, 22671, 21337, 20004$ 和 18670) 为插值数据集。校验数据集选取要求不同表观电导率值范围内的数量要相对均匀, 还要考虑样点的空间位置分布均匀。

表 1 不同样点密度表观电导率的统计特征值

Table 1 Statistical feature values of apparent electrical conductivity under various sample densities

变量	样点数	平均值/ $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$	中位数/ $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$	标准差	变异系数/%	偏度	峰度	K-S p	合理采样数
EC _a	25338	5.448	4.970	2.799	51.377	0.882	2.948	0.243	17514
	24004	5.447	4.970	2.796	51.331	0.886	2.940	0.257	17482
	22671	5.437	4.950	2.799	51.481	0.891	2.934	0.236*	17585
	21337	5.430	4.940	2.789	51.363	0.894	2.918	0.251	17504
	20004	5.445	4.970	2.785	51.148	0.888	2.924	0.262	17358
	18670	5.444	4.960	2.796	51.359	0.892	2.928	0.253	17501

注: * 显著性水平在 $p < 0.05$ (双尾检验); 合理采样数 $N = \lambda_{\alpha, f}^2 (CV/k)^2$, $k = 0.01$, $P_L = 99\%$, 即 99% 置信水平 1% 相对误差。

从表 1 来看, 不同样点密度表观电导率的统计参数值差异性不大, 导致该现象的原因在于校验数据集中表观电导率的选取比较均匀。各样点密度表观电导率的平均值变化范围在 5.430~5.448 dS/m 之间, 表明研究区 0~75 cm 深度土壤盐分的平均值较高, 这也说明土壤高度盐渍化是制约该区农业生产发展的重要因素。各样点密度表观电导率的变异系数在 51.148%~51.481% 之间变化, 故其在水平方向上的变异性均属于中等变异。进一步采用 Cochran 纯随机采样理论公式^[17] 计算不同样点密度表观电导率的合理采样数, 在 99% 置信水平 1% 相对误差条件下, 各样点密度表观电导率合理采样数目在 17358~17585 之间。当前各样点密度已完全满足合理采样数量的要求。

1.3.2 偏差指数法

采用 Costantini 提出的偏差指数对不同样点密度所得到的表观电导率分布图与参照分布图在空间上的相似程度进行量化^[15]。偏差指数定义为

$$DI = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{|C(i,j) - B(i,j)|}{B(i,j)} \quad (5)$$

式中 $C(i,j)$, $B(i,j)$ —— 各样点密度下的表观电导率空间分布图层及参照分布图层; M, N —— 各图层的空间分辨率, 表观电导率分布图层均转化为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 栅格图层。由式 (5) 可知, 偏差指数 DI 相当于图层间的平均相对误差, 因此 $1 - DI$ 认为是空间信息的相似程度。若 $1 - DI$ 较小, 说明图层间空间分布的相似程度较低; 若 $1 - DI$ 较大, 则较高。

2 结果与分析

2.1 表观电导率的统计特征值

由于离群值的存在会造成变量连续表面的中断, 影响变量的分布特征。本文采用域法识别离群值, 即样本平均数 μ 加、减三倍标准差 S , 在区间 $[\mu - 3S, \mu + 3S]$ 以外的数据均定义为离群值, 分别用正常的最大和最小值代替离群值^[16]。对经过离群值处理后的不同样点密度土壤表观电导率进行经典统计分析, 结果列于表 1。

2.2 正态分布性检验

检验数据的正态分布性是使用空间统计学 Kriging 方法进行土壤性质空间分析的前提。P-P 正态概率图是根据变量分布累积比和正态分布累积比生成的图形, 如果数据是正态分布, 则被检验数据基本成一直线。经过正态检验发现, 各样点密度表观电导率的 P-P 正态概率图并不是直线。由于只有当数据服从正态分布时, Kriging 方法才有效, 否则可能存在比例效应^[18, 19]; 进一步通过单样本 K-S 法对各样点密度下表观电导率的对数值进行正态检验 ($p < 0.05$, 2-tailed) 发现, 经对数转化后均呈近似的正态分布 (见表 1), 已满足地统计学分析的要求, 因此变异函数计算均采用对数转化后的数据。部分样点密度表观电导率 (经对数转化后) 的 P-P

正态概率图如图2所示。

2.3 空间变异特征分析

由于半方差函数在样点间最大距离的 $1/2$ 内才有意义, 为获得空间预测模型的最优化参数, 本研究中步长选取距离组方法^[20]。对普通克立格(OK)和泛克立格(UK), 采用交叉验证分别计算不同样点密度表观电导率的平均误差(ME)和均方根误差(RMSE)随步长的变化关系, 结果如图3。在一定的步长范围内, 普通克立格与泛克立格方法的ME和RMSE均表现出相似的规律。当步长小于10 m, 普通克立格与泛克立格方法的ME和RMSE均较小, 且步长在8.0~10.0 m之间时, ME和RMSE达最小值; 当步长超过10 m呈上升趋势, 并在30 m左右时达到拐点。不同样点密度表观电导率的变异主要表现在小于10 m的空间尺度上。在该空间尺度上, ME和RMSE均随着样点密度的增大而下降; 总体上, 泛克立格法的RMSE要明显小于普通克立格法, 而普通克立格法的ME要小于泛克立格法。

各样点密度表观电导率的半方差模型及参数值如表2所示。对于普通克立格和泛克立格法, 不同样点密度下表观电导率的半变异函数形状略有差异, 块金值、基台值和自相关距也发生一定的变化。各样点密度表观电导率的块金值 C_0 均较小, 变化范围在 $0 \sim 0.0051$ (dS/m)², 这说明由采样误差、短距离的变异、随机和固有变异引起的基底效应较弱。普通克立格法的 $C_1/(C_0 + C_1)$ 变化范围在 $97.6\% \sim 100\%$ 之间, 泛克立格法的变化范围在 $97.2\% \sim 100\%$ 之间, 均表现为强空间相关性。从自相关距来看, 普通克立格法的空间自相关距范围在 $115.5 \sim 140.8$ m, 泛克立格法的自相关距在 $116.4 \sim 143.1$ m 之间, 在同一样点密度下, 泛克立格法的自相关距均略大于普通克立格法。尽管自相关距差异并不大, 但空间相关性程度的不同, 导致该现象的原因在于泛克立格法通过趋势项分离而部分消除了由方向效应引起的空间异质性, 从而使得分离趋势项后的残差进行普通克立格预测时空间相关性增强。

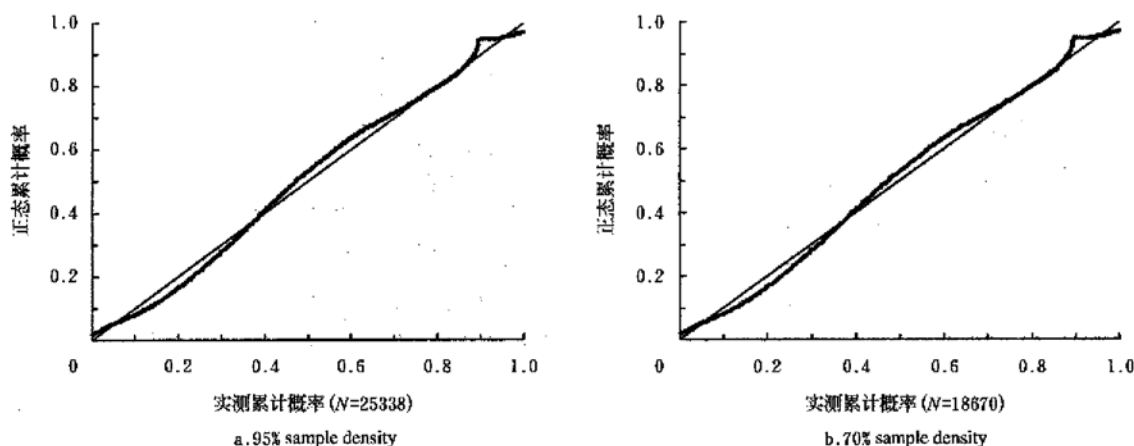


图2 部分样点密度表观电导率的P-P正态概率图

Fig. 2 P-P normal probability plots of apparent electrical conductivity under some sample densities

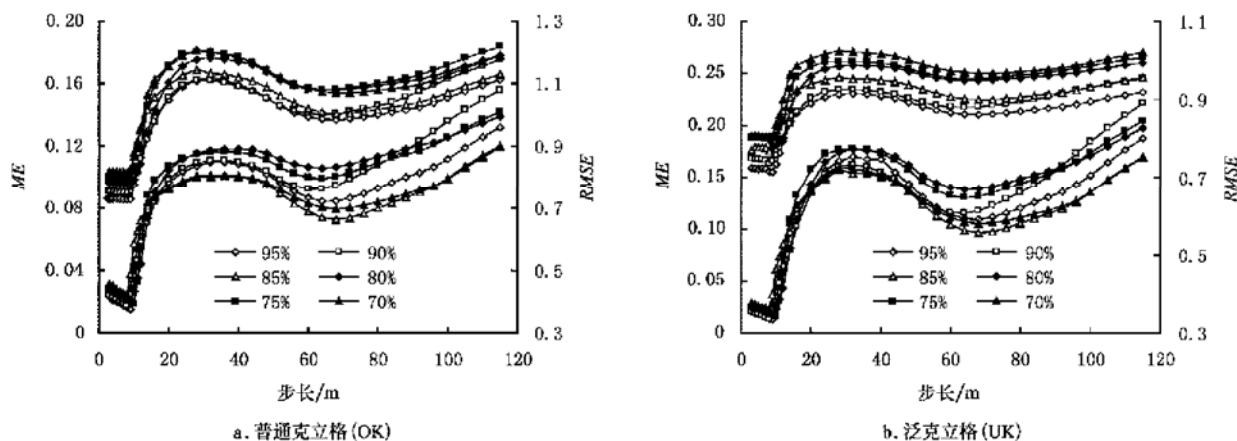


图3 不同样点密度下表观电导率的平均误差和均方根误差随步长变化关系

Fig. 3 Changes of mean error and root mean square error with lag size of ordinary kriging and universal kriging for apparent electrical conductivity under various sample densities

表 2 不同样点密度表观电导率的半方差模型及其参数值

Table 2 Semivariance models and parameters for apparent electrical conductivity under various sample densities

变量	样点数	模型 类型	$C_0/(\text{dS} \cdot \text{m}^{-1})^2$		$C_1/(\text{dS} \cdot \text{m}^{-1})^2$		$C_1/(C_0 + C_1)/\%$		a/m	
			OK	UK	OK	UK	OK	UK	OK	UK
EC _a	25338	E	0.0003	0.0009	0.1916	0.1917	99.8	99.5	140.8	143.1
	24004	E	0.0000	0.0000	0.1898	0.1905	100.0	100.0	131.2	132.5
	22671	E	0.0043	0.0051	0.1775	0.1776	97.6	97.2	121.1	123.3
	21337	E	0.0005	0.0013	0.1938	0.1938	99.7	99.3	132.6	134.5
	20004	E	0.0002	0.0000	0.1955	0.1963	99.9	100.0	134.1	135.4
	18670	E	0.0001	0.0001	0.1830	0.1838	99.9	99.5	115.5	116.4

注: E 表示指数模型; a 表示自相关距; OK 表示普通克立格法; UK 表示泛克立格法。

2.4 空间预测方法的精度检验与比较

各空间预测方法的平均预测误差 (*MPE*) 和均方根预测误差(*RMSPE*) 关系如图 4 所示。其中 LP 表示局部多项式, IDW 表示反距离权重, OK 表示普通克立格, UK 表示泛克立格。若 *MPE* > 0, 即预测值 > 观测值(见式(3)), 表现为正偏差; 若 *MPE* < 0, 即预测值小于观测值, 表现为负偏差; 若 *MPE* = 0, 则预测值等于观测值。由图 4 可知, 除 90% 样点密度的反距离权重法 (*MPE* = - 0.003) 为负偏差外, 其余均表现出正偏差 (0 < *MPE* < 0.025), 各样点密度的 *MPE* 均较小且接近于 0 (- 0.003 < *MPE* < 0.025)。考虑到以上 4 种空间预测方法无偏估计的本质, 导致这种微弱偏差的原因可能是本研究中样点行间距(平均约 40.0 m) 远大于行内样点间距(1.0~ 3.0 m), 即样点数据空间分布的不均匀导致偏差; 田间土壤表观电导率短程的空间变异也是导致偏差的重要因素。

进一步比较各空间预测方法的偏差与精度可知, 对于所有的样点密度, 反距离权重法估计偏差最小, 其偏差范围在- 0.003~ 0.01 之间; 预测效果最好的是泛克立格法 (0.62 < *RMSPE* < 0.70), 其次是普通克立格 (0.64 < *RMSPE* < 0.72) 和反距离权重法 (0.74 < *RMSPE* < 0.81), 局部多项式预测精度最低 (0.83 < *RMSPE* < 1.03)。对于不同的空间预测方法, 各校验数据集表观电导率观测值和预测值的统计特征参数差异均不大, 说明在当前的数据密度下各空间预测方法均具有较好的精度。比较各校验数据集实际观测值与预测值间的决定系数 *R*² 可知, 泛克立格法的精度最高, 这与该方法采用了残差预测模型以及趋势效应的剔除密切相关的。由于本文中泛克立格方法采用了一阶趋势面方程以分离趋势效应, 引入线性偏移而使得某些部位预测结果不准, 导致该方法预测值的极差与其他方法相比要大, 但并不影响泛克立格法作为最佳的空间预测模型。

2.5 空间插值结果分析

为获得更为精确的土壤表观电导率空间分布, 本文

将所有土壤表观电导率数据 (*n* = 26672) 作为插值数据集进行空间内插, 各插值方法形成的土壤表观电导率空间分布见图 5。从空间分布图来看, 各插值方法的表观电导率空间分布均呈现出条带状和斑块状格局, 泛克立格、普通克立格和反距离权重法反映的局部变异明显比局部多项式法详尽。从整体上看, 土壤表观电导率南部高于北部, 且不同插值方法的表观电导率分布具有较强的空间相似性, 尤其是普通克立格法和泛克立格法。从空间尺度来看, 表观电导率最高值呈明显斑块状分布于研究区的西南部位, 而西北部位则为最低; 此外, 在研究区东部土壤表观电导率的空间变异性要强于其他部位。原因是研究区内局部微地形起伏较大, 在旱季持续的强烈地表蒸发作用下, 深层土壤以及地下水中的可溶性盐类借助毛细管作用上升并积聚于表土层, 且这种盐分的表聚性因地形起伏、地下水性质等因素而异, 由这些因素引起的土壤盐分空间变异是产生这种表观电导率空间分布格局的最直接的因素。从局部来看, 研究区西南部位土壤表观电导率明显高于其他部位, 导致这种现象的原因是多方面的。首先, 研究区西南部位地势最低, 这使得该部位土壤盐分的表聚性强于其他部位, 导致该区域土壤表观电导率明显高于其他部位 (> 10.0 dS/m); 其次, 低地势条件造成的浅地下水埋深也是较为重要的因素, 其原因在于浅地下水埋深使得电磁感应仪测量值较真实值增大, 尤其是地下水埋深小于 1 m 时, 这不仅削弱了表观电导率 EM38H 与土壤盐分的相关性, 使该部位电磁感应仪测量值要高于土壤盐分所反映的实际表观电导率值, 同时也使该部位土壤表观电导率所反映的土壤属性信息更为复杂; 再次, 电磁感应仪对土壤盐分的敏感性还易受土壤水分条件的影响。通过对研究区土壤盐分状况的实地调查发现, 该部位绝大部分为裸露的盐斑地。此外, 研究区西北部位土壤盐分相对较低, 土地利用方式以棉花/玉米种植为主, 因此频繁的人为农业活动也是加快这种土壤表观电导率分布格局形成的重要因素。

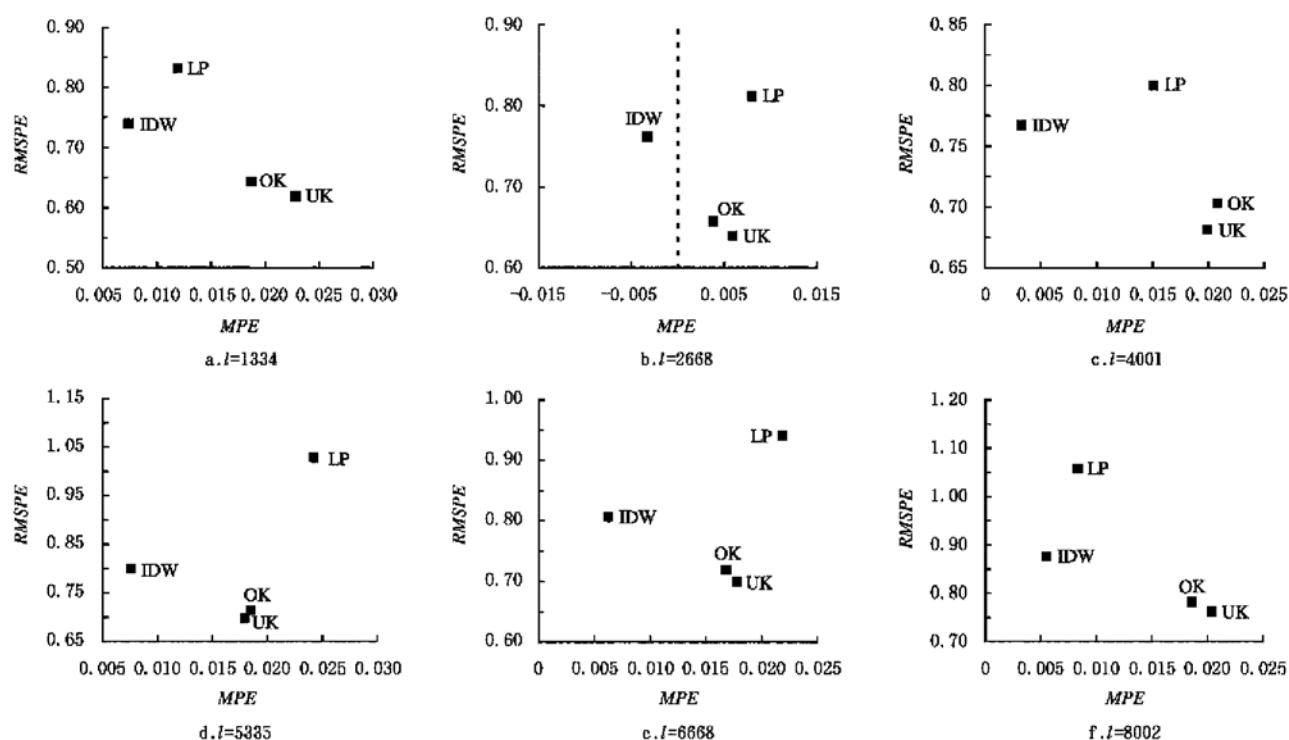
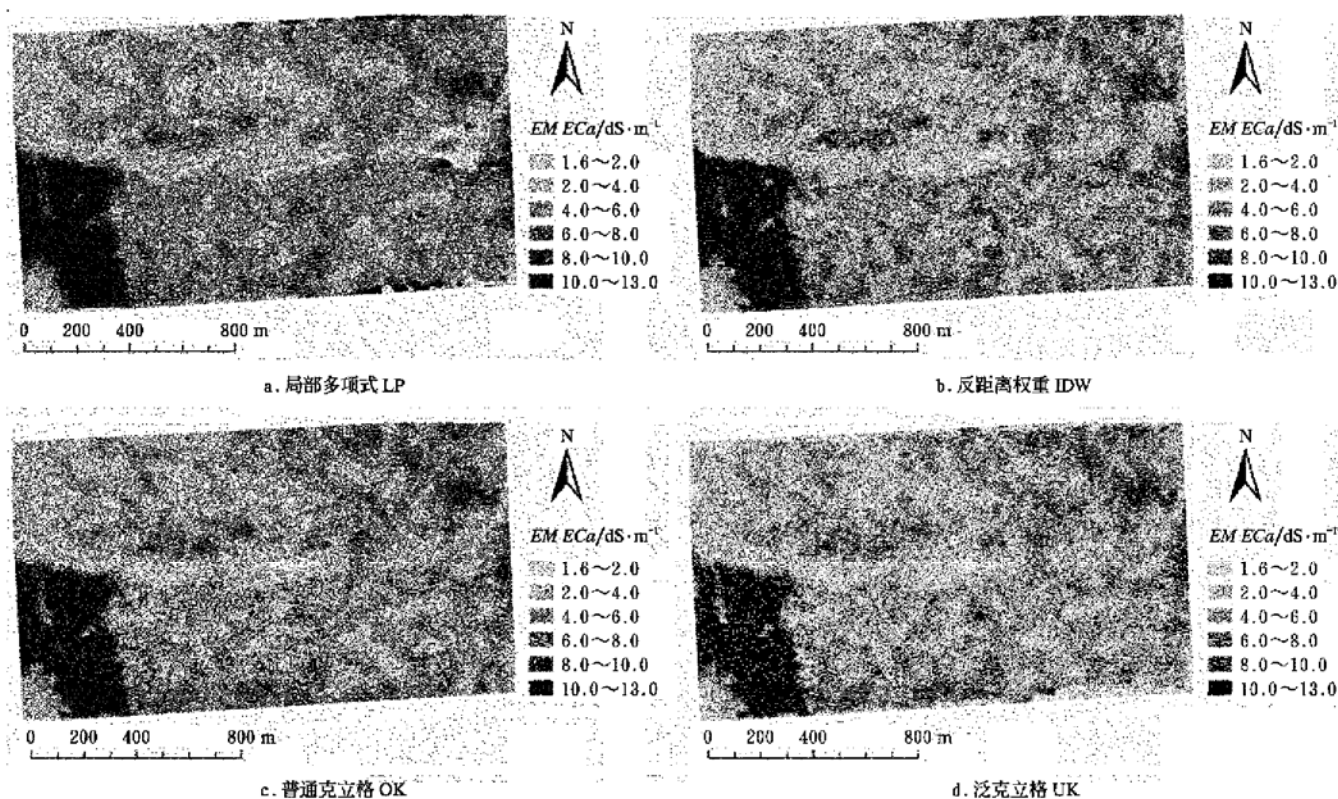


图 4 不同校验数据集下各空间预测方法的平均预测误差和均方根预测误差散点图

Fig. 4 Plots of root mean prediction error and mean square prediction error of all spatial prediction methods for different validation sites

图 5 各空间预测方法下研究区土壤表观电导率的空间分布图 ($n = 26672$)Fig. 5 Spatial distribution patterns of apparent electrical conductivity across the study area for local polynomial, inverse distance weighed, ordinary kriging and universal kriging ($n = 26672$)

2.6 空间相似性分析

以全部样本插值形成的栅格图作为参照图层, 对不同样点密度下的分布图层与参照图层间的偏差指数进行分析, 结果见表 3。对于所有空间插值方法, 其空间信息的保留度均随样点密度的降低而下降; 在相同的样本密度减少比例下, 泛克立格法保留最多的空间信息, 其次是普通克立格和反距离权重法, 局部多项式法保留空间信息的能力最差。由表 3 可知, 为使偏差指数控制在 10% 以内, 普通克立格和泛克立格法仅需 70% 的样本量 ($n = 18670$), 反距离权重法需要约 75% 的样本量 ($n = 20004$), 而局部多项式法接近 90% ($n = 24004$)。

表 4 显示了各空间插值方法的空间相似性配对样本 T 检验结果, 进行检验的配对样本数是 6。结果表明, 随样点密度的变化, 各插值方法空间信息的保留度具有良好相关性 ($0.943 < r < 0.998$), 相关性最好的是普通克立格和泛克立格 ($r = 0.998$), 其次是反距离权重与泛克立格法 ($r = 0.989$)。各配对样本间统计差异显著 ($p < 0.05$, two-tailed), 这说明从空间信息保留度来看, 泛克立格 > 普通克立格 > 反距离权重 > 局部多项式, 该结果亦表明采用泛克立格法可以在保证空间预测精度的基础上有效降低样点密度。

表 3 不同样点密度下表观电导率空间分布图间的偏差指数
Table 3 Distortion index of apparent electrical conductivity distribution maps under various sample densities

样点密度	1 - DI/%			
	局部多项式	反距离权重	普通克立格	泛克立格
$n = 25338$	93.48	96.02	97.21	97.69
$n = 24004$	90.63	95.50	96.31	96.75
$n = 22671$	87.89	94.41	95.13	95.84
$n = 21337$	85.74	93.69	94.94	95.47
$n = 20004$	82.91	92.58	94.79	95.11
$n = 18670$	77.58	88.84	90.46	91.23

表 4 不同样点密度下各插值方法空间相似性 (1 - DI(%)) 的配对样点 T 检验

Table 4 Paired-samples T test of spatial similarity (1 - DI(%)) for each interpolation method under various sample densities

配对	标准差	自由度	相关系数 r	t -值	p -值
LP- IDW	3.185	5	0.975	- 5.487	0.003*
LP- OK	3.560	5	0.943	- 5.804	0.002*
LP- UK	3.598	5	0.957	- 6.111	0.002*
IDW- OK	0.552	5	0.981	- 5.772	0.002*
IDW- UK	0.515	5	0.989	- 8.756	0.000*
OK- UK	0.170	5	0.998	- 7.821	0.001*

注: LP- 局部多项式; IDW- 反距离权重; OK- 普通克立格;

UK- 泛克立格。

3 结 论

1) 研究区 0~ 75 cm 土壤盐分普遍较高, 不同样点密度土壤表观电导率的统计特征值差异不大, 其变异系数范围在 51.148% ~ 51.481% 之间, 在水平方向上都表现为中等变异强度; 各样点密度表观电导率均符合对数正态分布, 且其样本数都达到合理采样数的要求。

2) 各样点密度表观电导率的空间结构均较好地符合指数模型, 其变异主要表现在小于 10 m 的空间尺度上; 不同样点密度表观电导率的半方差函数差异较小, 都表现为强空间自相关性。

3) 不同样点密度下各空间预测方法均具有较高的预测精度, 泛克立格法的预测精度最高, 反距离权重法预测偏差最小, 预测精度的排序为: 泛克立格 > 普通克立格 > 反距离权重 > 局部多项式。

4) 泛克立格、普通克立格和反距离权重法所反映的局部变异明显比局部多项式法详尽; 土壤盐分的空间变异是导致表观电导率空间格局形成的最直接因素, 微地形起伏、地下水性质以及土地利用方式差异等因素则产生间接的影响。

5) 各插值方法空间信息的保留度均随样点密度降低而下降; 保留空间信息的能力, 泛克立格 > 普通克立格 > 反距离权重 > 局部多项式, 统计差异显著, 泛克立格法可在保证预测精度基础上有效降低样点密度。

[参 考 文 献]

- [1] 刘广明, 杨劲松, 鞠茂森, 等. 电磁感应土地测量技术及其在农业领域的应用[J]. 土壤, 2003, (3): 27- 29.
- [2] 陈玉娟. EM 38 大地电导仪的应用研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(2): 146- 148.
- [3] 鞠茂森, 戴伟如, 聂杰, 等. 移动式电磁感应土地性质测定系统[J]. 水利水电技术, 2002, 33(4): 48- 50.
- [4] Cameron D R, De Jong E, Read D W L, et al. Mapping salinity using resistivity and electromagnetic inductive techniques[J]. Can J Soil Sci, 1981, 61: 67- 78.
- [5] Sheets K R, Hendrickx J M H. Non-invasive soil water content measurement using electromagnetic induction[J]. Water Resour Res, 1995, 31: 2401- 2409.
- [6] Doolittle J A, Sudduth K A, Kitchen N, et al. Estimating depths to claypans using electromagnetic induction methods[J]. J. Soil Water Conserv, 1994, 49: 572- 575.
- [7] Kitchen N R, Sudduth K A, Drummond S T. Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils[J]. J Prod Agri, 1999, 12: 607- 617.
- [8] Triantafilis J, Odeh I O A, Mcbratney A B. Five geostatistical models to predict soil salinity from electromagnetic induction data across irrigated cotton[J]. Soil Sci Soc Am

- J, 2001, 65: 869– 878.
- [9] Barbiéro L, Cunnac S, Mané L, et al. Salt distribution in the Senegal middle valley: analysis of a saline structure on planned irrigation schemes from N'Galenka creek [J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 46: 201– 213.
- [10] Triantafilis J, Huckel A I, Odeh I O A, et al. Comparison of statistical prediction methods for estimating field-scale clay content using different combinations of ancillary variables[J]. *Soil Science*, 2001, 166: 415– 427.
- [11] Corwin D L, Lesch S M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture[J]. *Comput Electron Agri*, 2005, 46: 11– 43.
- [12] 宋长春, 阎百兴, 宋新山. 电磁技术在苏打盐渍土壤研究中的运用[J]. *地理科学*, 2002, 22(1): 91– 95.
- [13] 赵军伟, 蒋平安, 盛建东, 等. EM38 电磁发生仪测定结果的影响因素分析[J]. *干旱区地理*, 2005, 28(3): 362– 366.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [15] Roggerman M C, Mills J P, Rogers S K. Multi-sensor information fusion for targeted detection and classification [J]. *SPIE*, 1988, 931: 8– 31.
- [16] 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[J]. *土壤学报*, 2004, 41(1): 20– 27.
- [17] Cochran W G. *Sampling techniques* (3rd Edition) [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1977.
- [18] Rossi R E, Mulla D J, Journel A G, et al. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence[J]. *Ecological Monographs*, 1992, 62: 277– 314.
- [19] 姚荣江, 杨劲松, 刘广明, 等. 黄河三角洲地区典型地块土壤盐分空间变异特征研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(6): 61– 66.
- [20] 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, 20(4): 446– 452.

Comparison of interpolation approaches based on spatial variability of apparent soil electrical conductivity with an electromagnetic induction

Yang Jingsong, Yao Rongjiang

(*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

Abstract: To solve the problem of soil salinization existing in the Yellow River Delta at present, electromagnetic induction EM38 was applied to study the spatial variability of apparent electrical conductivity under various sample densities with the GIS technology and geostatistics method, which was conducted in characteristic field of the Yellow River Delta. The optimized spatial interpolation approach was determined through systematic comparisons, and distortion index (DI) was introduced to evaluate the spatial similarity of apparent electrical conductivity distribution patterns. Results indicate that apparent electrical conductivity data under various sample densities all exhibit moderate spatial variation and follow logarithmic normal distribution, and apparent electrical conductivity under various sample densities all show strong spatial autocorrelation with the spatial variability at the field scale of less than 10 m. As to prediction accuracy, the sequence is universal kriging > ordinary kriging > inverse distance weighed > local polynomial. Distortion index analysis shows that the spatial similarity of apparent electrical conductivity distribution patterns all decline with the decrease of sample density. In terms of the extent of spatial information retention under the same sample density reduction, the sequence is universal kriging > ordinary kriging > inverse distance weighed > local polynomial. It means that the sample density can be rationally reduced and prediction accuracy will be maintained with the application of universal kriging. With respect to the field data collection by using electromagnetic induction EM38, the research results can serve as a theoretical and technical reference to the determination of rational sample density and optimized spatial interpolation model in saline soils of the Yellow River Delta.

Key words: apparent electrical conductivity; ground conductivity with an electromagnetic induction; spatial interpolation; the Yellow River Delta