

# 电磁感应仪用于土壤盐分空间变异性的 指示克立格分析评价\*

杨劲松 姚荣江 刘广明

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘要** 运用磁感式大地电导率仪 EM38 及其移动测定系统, 结合非参数地质统计学的单元指示克立格方法, 对黄河三角洲地区 200 hm<sup>2</sup> 典型地块上两个比较关键季节的土壤盐分进行空间变异性的分析, 给出了同一区域不同时段土壤盐分满足一定标准的条件概率图。结果表明, 土壤表观电导率与盐分呈极显著相关性; 各时段土壤表观电导率均呈近似的对数正态分布, 且存在特异值; 各时段土壤表观电导率的指示半方差均较符合球状套合模型; 结构性因素导致秋季时段土壤盐分的空间变异性呈各向同性; 随机性因素使春季时段土壤盐分的各向异性增强, 尤其在南北、东西方向。由不同季节时段土壤盐分风险概率图看出, 研究区土壤盐渍化程度总体较高, 旱季条件下土壤盐分的表聚型是导致该现象最主要因素。电磁感应仪与指示克立格方法的结合运用为不同尺度 (从农田到区域) 上土壤调查与质量评价提供了新的途径, 并为农业水土资源的决策管理提供指导。

**关键词** 电磁感应仪; 土壤盐分; 表观电导率; 空间变异性; 指示克立格; 黄河三角洲

**中图分类号** S156.4; S159.3 **文献标识码** A

盐渍化是制约黄河三角洲地区农业生产发展的主要障碍因子之一, 监测、预测土壤盐渍化的时空分布与变异特征, 对于指导该地区的节水灌溉、盐碱地改良及农业的可持续发展具有重要意义。由于传统的田间采样方法比较费时、费力, 且土壤特性的田间变异程度大, 受人力、物力等因素的限制, 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常常比较粗略, 且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。因此, 农业及其相关领域迫切需要有较高精度、快速、适应大面积运作的实用土壤质量测评技术。

电磁感应仪 (EM38) 能在地表直接测量土壤表观电导率, 为非接触直读式, 适用于大面积土壤盐渍化的测量, EM38 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<sup>[1]</sup>。自 20 世纪 90 年代以来, 国外已在 EM38 对土壤盐分、含水量、养分以及土壤组成等性质的响应特征方面进行了大量研究, 同时还和空间技术相结合将其扩展到区域尺度, 并成为研究土壤其他重要性质的有利工具<sup>[2-4]</sup>。如 Lesch 等<sup>[5]</sup> 利用电磁感应仪对

土壤盐分进行标定、预测和制图, 发现在保证制图精度前提下, 应用电磁感应仪较传统采样方法能有效降低采样数量, 提高采样效率。Triantafilis 等<sup>[6]</sup> 运用电磁感应仪进行了田间尺度土壤盐分的优化地统计学模型的研究, 在基于估计精度和偏差分析的基础上对多种地统计学模型进行了比较。Barbi 6o 等<sup>[7]</sup> 利用电磁感应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, 同时发现结合航片能更有效地制定当地的灌溉措施。Corwin 等<sup>[8]</sup> 结合电磁感应仪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, 同时还分析了不同深度土壤理化性质的空间变异性。至今, 关于电磁感应仪在土壤属性空间变异以及土壤质量评价等方面的应用研究, 国内还没有这方面的报道。

本文以黄河三角洲地区典型地块为研究对象, 将野外采样与电磁感应仪 EM38 田间测量相结合, 综合运用 GIS 和非参数地质统计学——指示克立格方法对不同季节条件下 0~100 cm 土体盐分含量的空间变异特征进行了分析和评价, 这是该方法在田间尺度农田的土壤质量评价中应用的一个很好的例子。该

\* 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2 - YW - 406 - 3); 国家 863 计划重点项目课题 (2007AA091702、2006AA10A301); 国家科技支撑计划课题 (2006BAD05B04、2006BAD05B02) 和国家自然科学基金项目 (40771097) 资助

作者简介: 杨劲松 (1959~), 江苏人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究领域为土壤和水资源利用与管理。E-mail: jsyang@issas.ac.cn

收稿日期: 2007 - 02 - 13; 收到修改稿日期: 2007 - 07 - 09

研究不仅为黄河三角洲地区盐渍土地的科学管理与合理改良利用提供一定的理论基础和参考依据,同时对研究该地区土壤盐渍化的发生机理、预测与评估该地区土壤盐渍化的发生发展具有重要意义。

## 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,地理位置位于  $37^{\circ}33' \sim 37^{\circ}34' \text{N}$ ,  $118^{\circ}48' \sim 118^{\circ}50' \text{E}$  之间,该区东临渤海,属典型黄河下游三角洲地区。由于土壤直接发育于冲积沉积物,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  $32.4 \text{ g L}^{-1}$ ,最高达  $70.5 \text{ g L}^{-1}$ ;地下水埋深一般在  $1.6 \sim 2.4 \text{ m}$  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。由于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,全年降水量的 70% 集中在 7~8 月份;再加上当地缺乏蓄水工程,雨季水量丰富但不能调蓄,非雨季淡水资源紧缺,这些因素的综合作用导致了该地区土壤水盐运动极其活跃。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 样品采集** 在研究区范围内选择典型样点,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 EM38 的水平测定(有效感应深度  $75 \text{ cm}$ ),置于地表共测得 164 个典型样点的土壤表观电导率(记作 EM38H)数据,其中棉花/玉米地 53 个,盐蒿地 35 个,茅草地 14 个,其余样点均为光板地。对电磁感应仪测量后的典型样点进行土壤剖面挖掘,各剖面均按  $0 \sim 10 \text{ cm}$ 、 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 、 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 、 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 、 $60 \sim 80 \text{ cm}$ 、 $80 \sim 100 \text{ cm}$ 、 $100 \sim 120 \text{ cm}$ 、 $120 \sim 140 \text{ cm}$ 、 $140 \sim 160 \text{ cm}$ 、 $160 \sim 180 \text{ cm}$ 、 $180 \sim 200 \text{ cm}$  进行分层采样,实际采样时采至地下水位为止。样品采集分别于 2004 年 10 月中旬及 2005 年 9 月下旬(正值旱季)分两次进行,均处于棉铃吐絮期。

**1.2.2 样品处理与分析** 采集的土样带回实验室自然风干,磨碎、过  $2 \text{ mm}$  筛后备用。所有的土样均制备  $1:5$  土水质量比浸提液,采用常规分析法确定土壤各离子组成含量,并计算出相应的土壤全盐含量,具体测定方法见文献 [9]。

本文旨在利用电磁感应仪 EM38 与指示克立格方法对  $0 \sim 100 \text{ cm}$  土体含盐量的空间变异特征进行

分析。由于研究区内各采样层土壤盐分类型及离子组成特征相似,且土壤质地差异较小,因此,  $0 \sim 100 \text{ cm}$  土体的平均盐分含量可以认为是由  $1 \text{ m}$  深度田间实际采样土层按等质量混合而成,从而通过深度加权法计算得出。进一步对室内分析得到的  $0 \sim 100 \text{ cm}$  土壤平均含盐量与野外测得的土壤表观电导率 EM38H 进行相关性分析 ( $n = 164$ ),结果见图 1。可以看出,表观电导率 EM38H 与土壤盐分  $S_{0-100 \text{ cm}}$  具有良好的相关性:  $S_{0-100 \text{ cm}} = -0.5954 + 1.5779 \text{EM38H}$ ,相关系数达到 95% 以上。

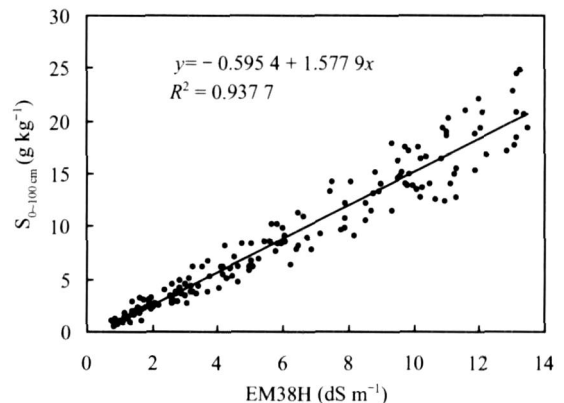


图 1 表观电导率 EM38H 与土壤含盐量相关关系  
Fig. 1 Correlation between apparent electrical conductivity EM38H and soil salinity

**1.2.3 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 2) 包括<sup>[10]</sup>: 电磁感应仪 EM38。本研究中采用水平测量位 (EM38H), 贴地进行测量。差分 GPS 可处理差分信号从而达到更高测定精度,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,存储容量为  $200 \text{ Mb}$ 。机械牵引、传动及连接装置。利用一台  $25$  马力 ( $18.4 \text{ kW}$ ) 的牵引机用作外部牵引动力;液压传动装置,用于调整电磁感应仪的位置;由于电磁感应设备对金属较为敏感,为尽量减少其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。

分别选择秋季 (2004 年 10 月中下旬) 和春季 (2005 年 3 月下旬) 这两个关键季节,运用移动式磁感测定系统对面积约  $200 \text{ hm}^2$  (东西约  $1.9 \text{ km}$ , 南北约  $1.0 \text{ km}$ ) 的研究区进行测量,两次田间测定方式均采用水平位测量模式,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

采集该测定点的地理坐标信息(由于GPS与EM38间的位置与距离固定,可以通过对GPS采集的地理坐标进行校正而获得EM38实际测定点的坐标)。2004年秋季磁感式田间测量由东向西沿条田方向进行,共有27个测量行,平均行间距40m左右,行内数据采集间距为1.0~3.0m,共采集26672个磁感表观电导率数据。2005年春季田间测量沿南北、东西两个方向进行,共有12条横行和28条纵行,行

内数据采集间距为1.0~3.0m,共采集19715个磁感表观电导率数据。因此,两次磁感式田间测量共计收集46387个土壤表观电导率测定数据以及对应测定点的地理坐标数据。测定日期选择2004年10月中下旬和2005年3月下旬,分别处于棉铃吐絮期的晚期(拔籽期)和春播期,此时田间覆盖度较低,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。

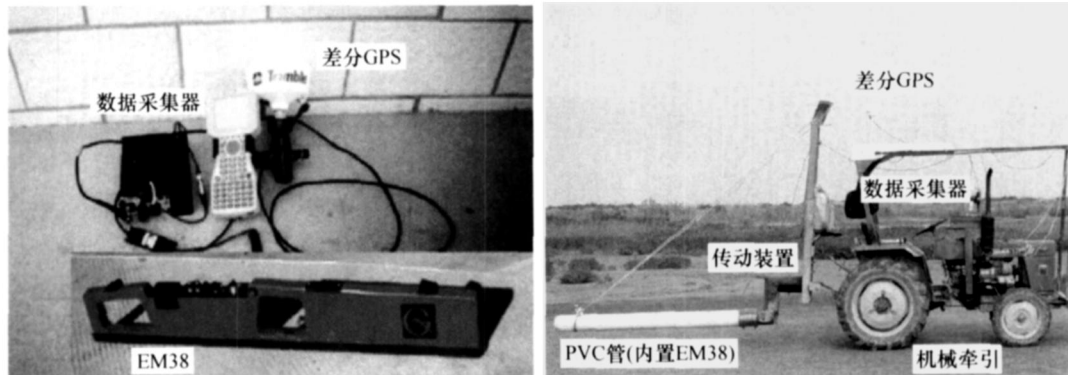


图2 电磁感应仪EM38及MESS的架构示意图

Fig. 2 Electromagnetic induction EM38 and layout of the MESS framework

## 2 结果与分析

### 2.1 描述性统计特征分析

表1列出了不同时段土壤表观电导率的统计特征值。可以看出,不同时段土壤表观电导率的统计特征值具有一定的差异性。从平均值来看,各时段土壤盐分都较高,根据图1计算可知,0~100cm土体土壤含盐量均值分别达 $7.99 \text{ g kg}^{-1}$ 和 $8.54 \text{ g kg}^{-1}$ 。这主要是由于这两个时段均正值旱季,0~100cm深度土壤积盐相对强烈。此外,2005年春季要略高于2004年秋季,其原因在于研究区春季为季

节性积盐期,此时土壤积盐与秋季相比更为强烈。按一般对变异系数 $C_v$ 的评估<sup>[11]</sup>,当 $C_v < 10\%$ 时,为弱变异性, $10\% < C_v < 100\%$ 为中等变异性,各时段土壤表观电导率的变异系数分别为51.4%和47.8%,均属于中等变异性。2004年秋季土壤表观电导率的峰度值接近3,但偏度值较大,达0.89,且右侧由于特异值的存在出现长尾现象(图3);2005年春季峰度很大程度偏离了3,但偏度值较小,仅为0.33。实际上,各时段土壤表观电导率的频率分布图均明显向左偏倚,并不符合正态分布,经对数转换后,均大致接近正态分布。进一步通过Cochran<sup>[12]</sup>纯随机采样理论公式计算得出不同时段

表1 不同时段土壤表观电导率的统计特征值

Table 1 Statistical feature values for soil apparent electrical conductivity at different periods

时段 Period	样点数 Number of samples	均值 Mean ( $\text{dS m}^{-1}$ )	中值 Median ( $\text{dS m}^{-1}$ )	标准差 S. D.	变异系数 CV (%)	峰度 Kurt.	偏度 Skew.	合理采样数 Appropriate number of samples
2004年秋季 Autumn of year 2004	26 672	5.44	4.96	2.80	51.4	3.06	0.89	17 519
2005年春季 Spring of year 2005	19 715	5.79	5.62	2.77	47.8	2.27	0.33	15 176

\*显著性水平在 $p < 0.05$ (双尾检验);合理采样数 $N = \frac{2}{f} (CV/k)^2$ ,其中 $f$ 为 $t$ 分布特征值, CV为变异系数,  $k = 0.01$ ,  $P_L = 99\%$ ,即99%置信水平1%相对误差。Note: \* means significance at 5% level (two-tailed); Appropriate number of samples  $N = \frac{2}{f} (CV/k)^2$ ,  $f$  means critical value of  $t$  distribution, CV means variation coefficient.  $k = 0.01$  and  $P_L = 99\%$ , namely confidence level of 99% and relative error level of 1%

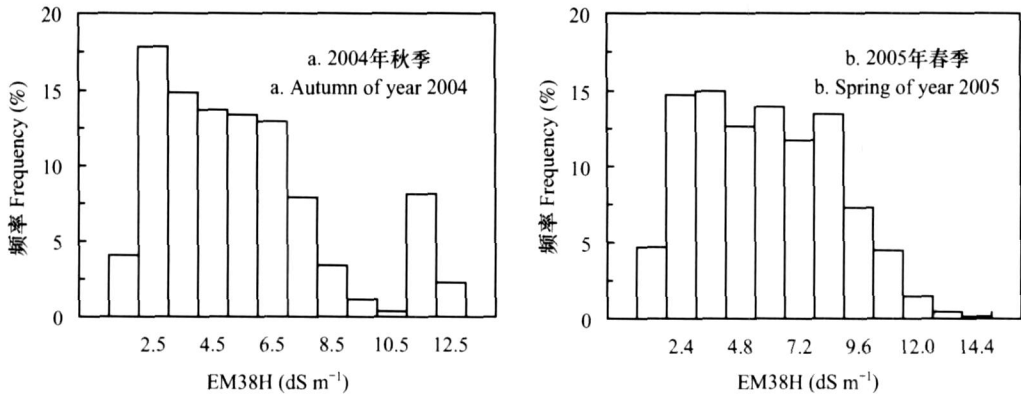


图 3 不同时段土壤表观电导率的频率分布图

Fig. 3 Frequency distribution of soil apparent electrical conductivity at different periods

土壤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,其合理采样数目分别为 17 519 和 15 176。由表 1 可以看出,当前各时段土壤表观电导率的样点密度均已满足合理采样数量的要求。

2.2 指示半变异函数结构分析

统计特征(表 1 和图 3)表明,土壤表观电导率数据不仅呈非正态分布,而且存在特异值(尤其是 2004 年秋季),两者均会影响变异函数的稳健性,进而影响克里格估值结果;此外,尽管各种克里格方法(包括指示克里格和普通克里格等)能给出单个变量,即某一时段土壤盐分的空间分布图,但有时人们更感兴趣的不是某一部位土壤盐分的具体含量,而是大于(或小于)某一阈值,或处于某一范围内的盐分含量在空间上的分布概率。指示克里格法不仅能削弱有偏分布和特异值对变异函数及估计结果的影响,而且能有效地估计区域化变量的分布概率,成为解决这类问题的有力工具。

对不同时段土壤表观电导率分别进行单元指示克里格分析。其计算的第一步(也是比较关键的

一步)是选择阈值,本研究选择  $4.0 \text{ g kg}^{-1}$  作为各时段土壤盐分的域值,对应的土壤表观电导率为  $2.9 \text{ dS m}^{-1}$ ,且置大于  $2.9 \text{ dS m}^{-1}$  的表观电导率为 1,否则为 0。选取  $4.0 \text{ g kg}^{-1}$  的土壤含盐量为阈值的原因是多方面的:一方面,在 10 月下旬对研究区进行磁感式田间测量,此时田间作物已收获完毕,这时如果知道哪些是盐渍化发生的高概率区,哪些是低概率区,不仅能够定量掌握研究区土壤盐渍化状况,同时还可为盐渍化改良利用措施的制定提供科学依据;另一方面,黄河三角洲地区盐渍化土地春季时段尚未播种,此时对研究区进行磁感式田间测量可为当季种植作物种类的选择提供依据,如在盐渍化发生的低概率区种植耐盐性较差的玉米等作物,而在高概率区种植耐盐性较好的棉花、小麦、向日葵等。

2.2.1 各向同性下指示半变异函数结构分析 指示半方差函数的理论模型及参数的确定可参考有关文献<sup>[13-16]</sup>。本研究中步长选取距离组方法<sup>[17]</sup>,根据半方差函数的理论及计算模型得图 4。

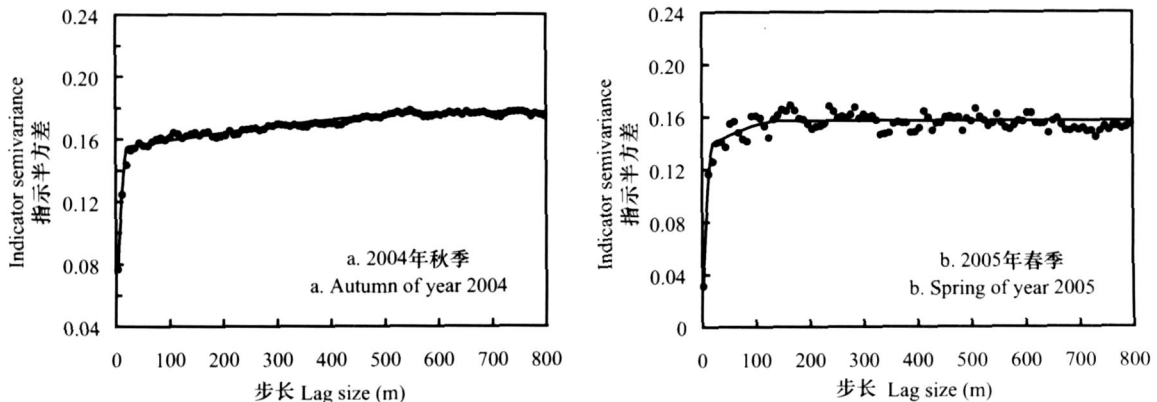


图 4 不同时段土壤表观电导率的指示半变异函数图

Fig. 4 Indicator semivariograms of apparent soil electrical conductivity at different periods

从图 4 所反映的各时段土壤表观电导率 ( $>2.9 \text{ dS m}^{-1}$ ) 的指示半方差函数图来看, 2004 年秋季与 2005 年春季均表现出较为复杂的尺度效应, 即其空间变异的结构并非是一种, 而是多种或多层次结构的叠加, 这也证明土壤属性空间变异的影响是有尺度范围的。半变异函数的稳定性是结构性因素 (如气候、地形、土壤类型等) 和随机性因素 (如耕作、施肥、灌溉措施等人为农业活动) 综合作用的结果, 从指示半方差随步长变化的稳定性来看, 2004 年秋季要明显强于 2005 年春季, 其原因是在秋季进行磁感式田间测量时, 棉花已基本采摘结束, 人为农业活动如施肥、灌溉、耕作等随机性因

素较少; 而次年春季进行磁感式田间测量时正值春播, 此时田间人为农业活动较多, 再加上春季正处于季节性积盐期, 微地形、地下水以及土壤等条件也影响着局部土壤积盐规律, 这些因素的综合作用增强了  $0 \sim 100 \text{ cm}$  土壤含盐量的空间变异性, 并进而增强了土壤表观电导率的空间变异性, 使得其指示半方差随步长表现出波动性“巢穴”结构。此外, 春季土壤含水量的局部变异性可能也是导致这种指示半方差波动性不容忽视的因素。采用球状套合模型对各时段土壤表观电导率的指示半方差进行分段最优拟合, 发现均具有较佳的拟合效果, 得到的套合结构模型分别见式 (1) 和式 (2)。

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{aligned} & 0.049, & & h = 0 \\ & 0.049 + 0.105 \left[ \frac{3}{2} \frac{h}{22} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{22^3} \right] + 0.023 \left[ \frac{3}{2} \frac{h}{660} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{660^3} \right], & & 0 < h < 22 \\ & 0.154 + 0.023 \left[ \frac{3}{2} \frac{h}{660} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{660^3} \right], & & 22 < h < 660 \\ & 0.177, & & h < 660 \end{aligned} \right\} & \quad (1) \\
 & \left. \begin{aligned} & 0.013, & & h = 0 \\ & 0.013 + 0.122 \left[ \frac{3}{2} \frac{h}{20} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{20^3} \right] + 0.022 \left[ \frac{3}{2} \frac{h}{150} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{150^3} \right], & & 0 < h < 20 \\ & 0.135 + 0.022 \left[ \frac{3}{2} \frac{h}{150} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{150^3} \right], & & 20 < h < 150 \\ & 0.157, & & h > 150 \end{aligned} \right\} & \quad (2)
 \end{aligned}$$

各对应模型的参数如表 2 所示, 对各拟合模型进行检验, 从决定系数  $R^2$  和残差平方和  $RSS$  可知, 各拟合指示半变异模型均具有较高的精度, 经  $F$  检验为极显著。表 2 中, 块金值  $C_0$  通常表示由实验误差和小于实验取样尺度引起的变异; 基台值  $C$  通常表示系统内总的变异; 块金值/基台值表示随机部分引起的空间异质性占系统总变异的比, 它反映了土壤属性的空间依赖性, 常被用作研究变量空间相关的分类依据<sup>[18]</sup>。各时段土壤表观电导率指示半变异函数的  $C_0/C$  分别为 27.7% 和 8.3%, 这说明土壤表观电导率的条件概率 ( $>2.9 \text{ dS m}^{-1}$ ) 的空间分布是由结构性因素 (如气候、母

质、地形、土壤类型等) 和随机性因素 (如施肥、耕作措施、种植制度等各种人为活动) 共同作用的结果, 且由结构性因素引起的空间异性程度均要显著高于随机性因素。从变程来看, 2004 年秋季与 2005 年春季土壤表观电导率均表现出两种空间变异尺度 (分别用上标 1 和 2 表示), 其变程分别为 22 m、660 m 和 20 m、150 m, 其中变程为 22 m、20 m 的小尺度反映的是局部的短程变异。不同时段土壤表观电导率短程变异尺度下的偏基台值占整个研究尺度偏基台的比例分别为 82.0% 和 84.7%, 说明在各时段短程变异均是构成其空间异质性的最主要部分。

表 2 各时段土壤表观电导率的指示半方差模型参数及其检验

Table 2 Parameters of indicator semivariograms for apparent soil electrical conductivity at different periods and their validation

时段 Period	理论模型 Theory model	变程 Range (m)	块金值 $C_0$ ( $\text{dS}^2 \text{ m}^{-2}$ )	基台值 $C$ ( $\text{dS}^2 \text{ m}^{-2}$ )	块金值/基台值 $C_0/C$ (%)	$R^2$	RSS	$F$
2004年秋季 Autumn of year 2004	球状 <sup>1</sup> Spherical <sup>1</sup>	22	0.049	0.177	27.7	0.977	4.01E-4	**
2005年春季 Spring of year 2005	球状 <sup>2</sup> Spherical <sup>2</sup>	150	0.013	0.157	8.3	0.841	3.48E-3	**

\*\*显著性水平在  $p < 0.01$  (双尾检验); RSS表示残差平方和。Note: \*\* means significance at 1% level (two-tailed); RSS means residual sum of squares

2.2.2 各向异性下指示半变异函数结构分析 土壤表观电导率的空间变异是由土壤性质(主要是含盐量)、地形、气候以及种植制度、耕作措施等各种因素在不同方向、不同尺度共同作用的结果。由于研究区南北和东西方向上地形、土地利用方式存在一定差异,为详细分析这些因素对不同时段土壤表

观电导率条件概率( $>2.9 \text{ dS m}^{-1}$ )的影响,分别计算了 NE0°、NE45°、NE90° 和 NE135° 四个方向上的指示半变异函数,角度容差设为 45°,并对主轴方向分别为 NE0° 和 NE45° 时土壤盐分的各向异性进行了分析,结果如图 5 所示。图 5 显示的是不同时段土壤表观电导率在四个方向上的指示半方差函数

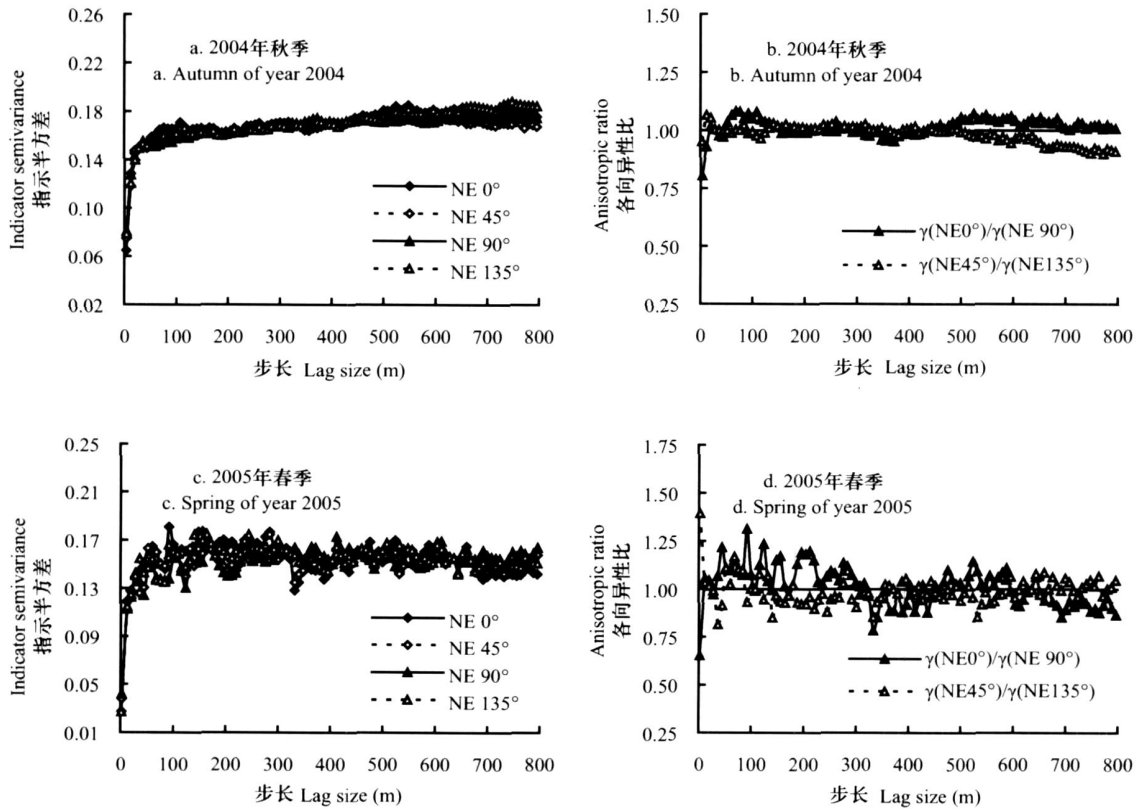


图 5 土壤表观电导率在各方向上的指示半变异函数及各向异性比

Fig. 5 Anisotropic indicator semivariograms of apparent soil electrical conductivity in all directions and their ratios

及其各向异性比  $k(h)$ 。从图 5 可以看出,当步长变化于 0~500 m 时,2004 年秋季土壤表观电导率指示半方差在不同方向上的变化大致相同(图 5a, 图 5b),超出此范围,其各向同性有所减弱,且东北、西南方向上的各向异性要强于南北、东西方向,但是在全步长变化域上,它们的各向异性比基本保持或围绕在 1 左右,说明 2004 年秋季土壤表观电导率的指示半方差在各方向上是各向同性的。相对而言,2005 年春季土壤表观电导率的指示半方差在步长 0~350 m 范围内波动较为剧烈,导致该范围内的各向异性比  $(\gamma(\text{NE}0^\circ)/\gamma(\text{NE}90^\circ))$  和  $(\gamma(\text{NE}45^\circ)/\gamma(\text{NE}135^\circ))$  的变化相对复杂(图 5c, 图 5d),可以看出的是东北、西南方向上指示半变异函数的结构性

和各向同性明显好于南北、东西方向;当超出此 350 m 范围后,各方向上指示半变异函数的变化趋势大致相同,表现为各向异性比  $(\gamma(\text{NE}0^\circ)/\gamma(\text{NE}90^\circ))$  和  $(\gamma(\text{NE}45^\circ)/\gamma(\text{NE}135^\circ))$  也基本上是随着空间尺度的增大趋于平稳;在全步长变化域上,东北、西南方向上的各向异性比  $(\gamma(\text{NE}45^\circ)/\gamma(\text{NE}135^\circ))$  基本围绕 1 上下波动,说明在该方向上土壤表观电导率的指示半方差是各向同性的;南北、东西方向上的各向异性比  $(\gamma(\text{NE}0^\circ)/\gamma(\text{NE}90^\circ))$  在 350 m 范围内差距较大,但随着距离的增加,又表现出各向同性的趋势,因此,南北、东西方向上土壤表观电导率指示半方差的各向异性主要表现在 0~350 m 步长范围内。

不同时段土壤表观电导率的指示半变异函数

在 4 个方向上的变化趋势及其各向异性比反映出了研究区地形、土地利用方式在南北、东西方向上存在着的差异。由于研究区具有西高东低、北高南低的地形特点,再加上秋季时段棉花采摘结束后土地利用以闲置为主,因此土地利用方式对该时段指示半变异函数及其各向异性比影响较小,而地形差异对其产生的影响在步长超过 500 m 后才表现出来。相比而言,春季时段正值春播,且研究区西部土壤盐分相对较低,土地利用方式以棉花种植为主,而在土壤盐分较高的东部,土地改良利用难度大,基本处于未利用状态。因此,由土地利用方式差异引起的土壤盐分非均一性是影响春季时段土壤表观电导率指示半变异函数的直接因素,并导致了南北、东西方向上指示半变异函数的各向异性比在全步长域的剧烈波动。

### 2.3 指示克立格插值分析

选择  $4.0 \text{ g kg}^{-1}$  作为土壤含盐量的域值(对应的土壤表观电导率为  $2.9 \text{ dS m}^{-1}$ ),对各时段土壤表观电导率分别进行单元指示克立格分析,图 6 详尽地反映了土壤含盐量高于  $4.0 \text{ g kg}^{-1}$  的条件概

率。整体看来,各时段研究区土壤盐分空间分布呈现出条带状和斑块状格局,均表现出东部高于西部、南部高于北部的趋势。从空间分布图来看,研究区东部和南部各时段土壤盐分不仅较高,且呈现出连片的条带状分布,事实上通过对研究区土壤盐分状况的实地调查,这些部位绝大部分为裸露的盐斑地。鉴于这些部位土壤盐渍化程度高、分布集中的特点,采用以水利工程为主、农业生物措施为辅的综合治理措施具有较显著改良效果;而在研究区西部土壤盐分相对较低,且以斑块状分布为主,因此对该部位土壤盐渍化的治理宜采用农业生物措施。由于研究区内局部部位微地形起伏较大,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层土壤,并且这种盐分的表聚性随地形起伏、地下水水质等因素的差异而不同,这是形成该盐分空间分布格局的最直接的因素。此外,在研究区西部土壤盐分相对较低,土地利用方式以棉花种植为主,因此频繁的人为农业活动可能也是加快这种盐分分布格局形成的重要因素。

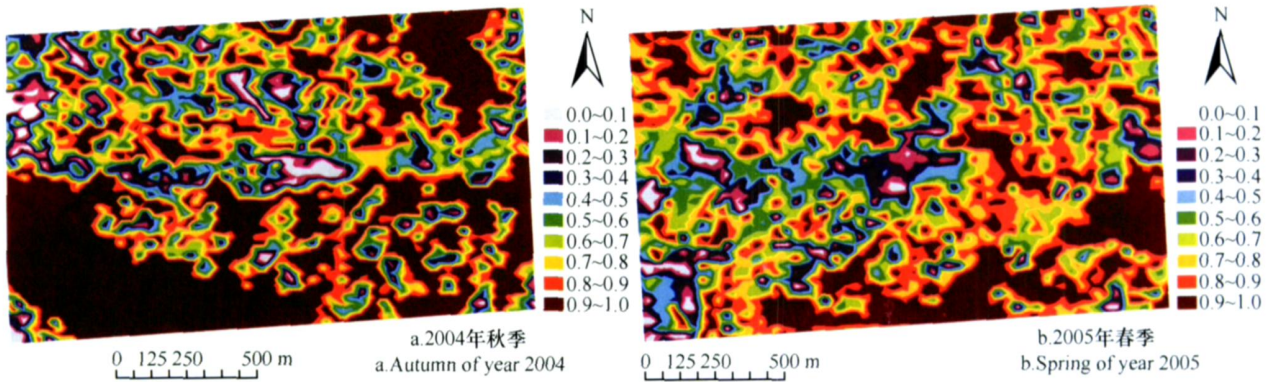


图 6 不同时段土壤盐分高于  $4.0 \text{ g kg}^{-1}$  的概率分布图

Fig. 6 Probability maps of soil salinity higher than  $4.0 \text{ g kg}^{-1}$  at different periods

从图 6a 所反映的 2004 年秋季土壤盐分的条件概率图来看,在研究区的西南部位分布着土壤含盐量高概率区,而事实上该部位主要为棉花地和盐蒿地;此外,研究区春季正处于季节性积盐期,此时土壤积盐比秋季更为强烈,但在 2005 年春季土壤盐分条件概率图(图 6b)并没有看到该含盐量高概率区。造成该现象的原因是多方面的:首先,研究区西南部位地势最低,这导致该部位土壤盐分的表聚性明显强于其他部位,使得该区域土壤表观电导率高于其他部位;其次,在秋季时段研究区地下水埋深明显浅于春季,这可能是导致该现象最为重要的因

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,尤其是当地下水埋深小于 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明显高于土壤盐分所反映的表观电导率实际值,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到土壤水分条件的影响,因此,由地下水埋深的季节性差异引起的土壤水分条件的差异也是导致该现象不容忽视的因素。另外,人为农业活动可能也是导致该现象的重要因素,这是由于春季时段正值春播,

此时该部位田间耕作、灌溉等人为农业活动较为频繁,导致土壤盐分朝均一化方向发展,这也在一定程度上降低了该部位土壤盐分的条件概率。

### 3 结 论

在土壤属性空间变异或其他农田特征变异定量化的研究中,往往由于数据源的缺乏或特异值的存在使数据偏离正态分布,而不能得到稳健的变异函数,影响克里格估计(产生有偏估计)或条件模拟结果的精度。电磁感应仪与指示克里格方法是解决这类问题的有效工具。本研究中,土壤含盐量与表观电导率呈极显著的相关性,不同时段土壤表观电导率经对数转换后均符合近似的正态分布,但仍存在特异值。对土壤盐分域值为  $4.0 \text{ g kg}^{-1}$  (对应的土壤表观电导率为  $2.9 \text{ dS m}^{-1}$ ) 的表观电导率的空间变异性进行指示克里格分析表明,各时段均表现出叠加的尺度效应,其指示半变异函数都较好地符合球状套合模型,其中 2004年秋季在各方向上总体是各向同性的,2005年春季指示半方差的各向异性较强,在南北、东西方向尤为明显。指示克里格估计的条件概率图给出了不同时段同一含盐量域值的风险概率,为该地区盐渍土地的科学管理与合理改良利用提供一定的理论基础和参考依据。

电磁感应仪能有效地解决数据源缺乏问题,指示克里格允许同时利用多个指标对农业水土资源利用的风险性进行定量评价,且各个指标可以是内在特性(如本文的盐分),也可以是外界赋予的属性(如地理位置),可以是同一时期的不同变量,也可以是不同时期的同一变量。该方法适用于从农田到区域尺度上的土壤资源调查与分析,能为土壤资源质量的评价及现代决策管理提供指导,在复杂的水土资源和区域土壤环境的分析中具有广泛的应用前景。

### 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. 土壤, 2003, 35(3): 27~29. Liu GM, Yang J S, Ju M S, *et al* Technology of chorometry using electromagnetic induction and its application in agriculture (In Chinese). Soils, 2003, 35(3): 27~29
- [ 2 ] Sheets K R, Hendrickx J M H. Non-invasive soil water content measurement using electromagnetic induction. Water Resour Res, 1995, 31: 2 401~2 409
- [ 3 ] Doolittle J A, Sudduth K A, Kitchen N, *et al* Estimating depths to claypans using electromagnetic induction methods. J. Soil Water Conserv., 1994, 49: 572~575
- [ 4 ] Kitchen N R, Sudduth K A, Drummond S T. Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils. J. Prod Agri, 1999, 12: 607~617
- [ 5 ] Lesch S M, Rhoades J D, Lund L J, *et al* Mapping soil salinity using calibrated electromagnetic measurements. Soil Sci Soc Am. J., 1992, 56: 540~548
- [ 6 ] Triantafyllis J, Odeh I O A, Mcbratney A B. Five geostatistical models to predict soil salinity from electromagnetic induction data across irrigated cotton. Soil Sci Soc Am. J., 2001, 65: 869~878
- [ 7 ] Barbi o L, Cunnac S, Man  l, *et al* Salt distribution in the Senegal middle valley: Analysis of a saline structure on planned irrigation schemes from N Galenka creek. Agricultural Water Management, 2001, 46: 201~213
- [ 8 ] Cowin D L, Lesch S M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. Comput Electron Agri, 2005, 46: 11~43
- [ 9 ] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. Lu R K ed Analytical Methods of Soil Agricultural Chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999
- [ 10 ] 姚荣江,杨劲松,姜龙. 电磁感应仪用于土壤盐分空间变异及其剖面分布特征研究. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2007, 33(2): 207~216. Yao R J, Yang J S, Jiang L. Study on spatial variability and profile distribution characteristics of soil salinity by Kriging with an electromagnetic induction (In Chinese). Journal of Zhejiang University (Agric & Life Sci Edition), 2007, 33(2): 207~216
- [ 11 ] 张淑娟,何勇,方慧. 基于 GPS和 GIS的田间土壤特性空间变异性的研究. 农业工程学报, 2003, 19(2): 39~44. Zhang S J, He Y, Fang H. Spatial variability of soil properties in the field based on GPS and GIS (In Chinese). Transactions of the CSAE 2003, 19(2): 39~44
- [ 12 ] Cochran W G. Sampling Techniques 3rd Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1977
- [ 13 ] 徐英,陈亚新,王俊生,等. 农田土壤水分和盐分空间分布的指示克里格分析评价. 水科学进展, 2006, 17(4): 477~482. Xu Y, Chen Y X, Wang J S, *et al* Using indicator Kriging to analyze and evaluate spatial distributions of soil water and salt in field (In Chinese). Advances in Water Science, 2006, 17(4): 477~482
- [ 14 ] 吴蓉,周志芳. 基于指示克里格方法的裂隙介质渗透性参数空间分布规律分析. 水利学报, 2004, (6): 104~107. Wu R, Zhou Z F. Analysis on spatial distribution property of fractured media by means of indicator Kriging method (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (6): 104~107
- [ 15 ] 李保国,胡克林,黄元仿,等. 区域浅层地下水硝酸盐含量评价的指示克里格法. 水利学报, 2001, (3): 1~5. Li B G, Hu K L, Huang Y F, *et al* Application of indicator Kriging method for assessing nitrate content of regional shallow groundwater (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 2001, (3): 1~5



- [16] 肖斌, 潘懋, 赵鹏大, 等. 时空多元指示克里格法的理论研究. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(1): 94~98. Xiao B, Pan M, Zhao P D, *et al*. Indicator Kriging study of multivariate information in temporal-spatial domain (In Chinese). Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2001, 37(1): 94~98.
- [17] 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. 地理研究, 2001, 20(4): 446~452. Li H B, Lin Z H, Liu S X. Application of Kriging technique in estimating soil moisture in China (In Chinese). Geographical Research, 2001, 20(4): 446~452.
- [18] 张伟, 陈洪松, 王克林, 等. 喀斯特地区典型峰丛洼地旱季表层土壤水分空间变异性初探. 土壤学报, 2006, 43(4): 554~562. Zhang W, Chen H S, Wang K L, *et al*. Spatial variability of surface soil water in typical depressions between hills in karst region in dry season (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(4): 554~562.

## ANALYSIS AND EVALUATION ON SPATIAL VARIABILITY OF SOIL SALINITY BY INDICATOR KRIGING WITH AN ELECTROMAGNETIC INDUCTION GAUGE

Yang Jingsong Yao Rongjiang Liu Guangning

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

**Abstract** With the aid of an electromagnetic induction gauge (EM38) and its mobile sensing system, spatial variability of soil salinity was analyzed in a field (200 hm<sup>2</sup>) typical of the Yellow River Delta for two critical seasons by using the univariate indicator Kriging procedure, and a soil salinity probability map at two different periods plotted based on the chosen criteria. Results indicate that apparent soil electrical conductivity is significantly correlated with salinity, and follows approximately the pattern of logarithmic normal distribution with some outliers in both seasons. Nested spherical models are fitted for indicator semivariance of the apparent soil electrical conductivity in both periods. Structural factors lead to isotropic spatial variability of soil salinity in autumn, while stochastic factors enhance anisotropy of soil salinity in spring, especially in the directions of north-south and east-west. Soil salinity probability maps in different seasons show that the extent of soil salinization is generally high in the study area, and surface accumulation of soil salts during the drought season is the primary reason for this phenomenon. The joint application of the electromagnetic induction gauge and the indicator Kriging method provides a new approach to survey and quality evaluation of soil resources at different scales ranging from farms to regional levels, and reference in decision making for and management of agricultural water-soil resources.

**Key words** Electromagnetic induction; Soil salinity; Apparent electrical conductivity; Spatial variability; Indicator Kriging; Yellow River Delta