

基于遥感与电磁感应仪数据的土壤盐分空间变异性

吴亚坤^{1,2}, 杨劲松^{1*}, 刘广明¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 安徽工业大学建筑工程学院, 马鞍山 243002)

摘要: 针对目前黄淮海平原存在的土壤盐渍化问题, 以河南省封丘县为研究区, 利用遥感影像与磁感应电导率仪 (EM38) 在田间定位、定点测量, 对研究区土壤盐分的空间变异性进行研究。利用 Kriging、指数回归和回归-Kriging 3 种不同的方法对土壤盐分空间变异性进行分析。结果表明: 土壤电导率在一定的区域范围内具有空间结构特征, 符合指数模型分布, 具有极强的空间自相关性。通过 3 种不同的方法对土壤盐分的空间变异性进行分析, 结果表明 Kriging 法、指数回归法及回归-Kriging 法在描述土壤盐分空间分布的总体趋势上相似, 但指数回归法与回归-Kriging 法对于盐分的分布表达更具体, 更细致。综合运用多种数据源的方法, 即遥感影像数据与 EM38 测量数据相结合, 经典统计学与地统计学方法相结合的方法, 能够提高土壤盐分空间预测的精度, 结果表明研究区土壤盐分由北向南、自西向东有逐渐升高的趋势, 具有明显的趋势效应。

关键词: 遥感, 土壤盐分测定, Kriging 插值, 指数回归, 回归-Kriging, EM38

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.07.027

中图分类号: S156.4⁺¹

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-7-0148-05

吴亚坤, 杨劲松, 刘广明. 基于遥感与电磁感应仪数据的土壤盐分空间变异性[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 148-152.
Wu Yakun, Yang Jingsong, Liu Guangming. Spatial variability of soil salinity using data from remote sensing and electromagnetic induction instruments[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(7): 148-152.(in Chinese with English abstract)

0 引言

盐渍化是一个世界性的低产土壤障碍因子, 及时掌握有关盐渍土的性质、范围、地理分布、盐渍程度等方面的信息, 对于盐渍土的治理与进一步退化的防治具有重要意义。目前, 遥感与电磁感应是评价、监测及预报土壤盐渍化的先进方法。

遥感技术能大面积重复获取同一地区的信息, 具有宏观、综合、动态、快速的特点, 并在速度、精度和成本花费方面凸显出众多优势^[1]。作为地球资源调查、环境监测的一种新的探测手段, 遥感已被广泛应用于土地退化的研究, 特别是盐渍土的监测与制图^[2-3]。但由于传感器只扫描土壤的表面, 未涉及土壤剖面, 使得遥感系统在对中、轻度盐渍土的监测地面采样等技术的综合运用将成为盐渍土评价、监测与预报的新的趋势^[4-11]。本文以黄淮海平原典型地块为研究对象, 采用遥感与磁感应电导率仪 (EM38) 相结合, 运用了 Kriging 法、指数回归法与回归-Kriging 法 3 种不同分析方法, 对研究区土壤盐分空间变异性进行了分析与评价, 揭示了研究区土壤盐分的空间变异规律。该研究除了为黄淮海平原土壤盐渍化评价、改良和利用提供一定的理论参考和科学依据, 也对

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

研究区位于河南省封丘县, 地理位置位于东经 114°14'~114°45', 北纬 34°53'~35°14', 该地区具有大陆季风气候特点, 降水区量时空分布不均, 主要集中在 6~8 月份^[12]。该区位于黄淮海大平原的中部。潮土是该县分布最广、面积最大的耕作土壤, 可分为黄潮土、褐土化潮土和盐化潮土 3 个亚类。

1.2 研究方法

1.2.1 EM38 测量方法

EM38 测量点采用机械布点方法, 在全县范围内测量点间隔距离 3 km, 共选取 142 测量单元 (如图 1)。在机械布点的每个点上选 5 个点, 进行 EM38 测量, 并在每一个测点上都将 EM38 设置为 Q/P 模式, 进行水平状态和垂直状态的土壤表观电导率 (EC_a) 测量。

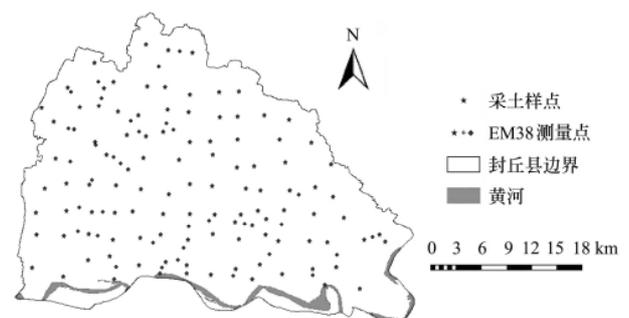


图 1 EM38 在封丘县测量单元分布

Fig.1 Measurement site distribution with EM38 in Fengqiu county
在 142 个 EM38 测量单元上, 选取 108 个单元, EM38

收稿日期: 2007-11-16 修订日期: 2009-05-29

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目课题 (kzcx2-yw-406-3/4); 国家科技支撑计划课题 (2006BAD05B02); 国家高技术研究发展计划重点课题 (2006AA100207); 国家科技支撑计划课题 (2006BAD05B04)

作者简介: 吴亚坤 (1979-), 女, 黑龙江人, 博士, 研究方向为区域土壤盐渍化遥感监测研究。南京 中国科学院南京土壤研究所, 210008。

Email: wuyakun8250@163.com

*通信作者: 杨劲松 (1959-), 博士, 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

测量结束后进行土壤样品采集，采集0~0.3 m土层的土壤样品。各采样点的相对坐标采用GPS定位技术确定，采样日期为2007年5月中下旬。采集的土样带回实验室内自然风干，磨碎、过2 mm筛后备用。从采集的土样中选取108个土壤样品，制备1：5土水比浸提液，测定其电导率 $EC_{1:5}$ ，测定方法参考《土壤农业化学分析方法》一书^[13]。

1.2.2 遥感数据处理与光谱指数计算

1) 遥感数据处理

遥感数据为覆盖研究区的2005年4月4日成像的Landsat TM影像。用1：5万地形图对数字图像各波段做地理校正，选取了15个地面控制点，在误差小于10 m的条件下，用双线性内插法对图像进行25 m重采样。从校正好的影像上裁出覆盖研究区的2642行×2422列的子域，以便减少数据量，提高处理速度。

2) 光谱指数计算

利用遥感图像中的各别波段，在ENVI中计算出如表1中的各个指数，在arcGIS中提取与EM38解译出的电导率对应的指数值，进行相关分析，相关系数见表1。

表 1 光谱指数与土壤电导率之间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between spectral indices and measured soil electrical conductivity values

光谱指数 ^[14]	各指数计算公式	相关系数
土壤指数	$SI1 = \sqrt{G \times R}$ (1)	0.226(**)
	$SI2 = \sqrt{G^2 + R^2 + NIR^2}$ (2)	-0.166(*)
	$SI3 = \sqrt{G^2 + R^2}$ (3)	0.227(**)
	$BI = \sqrt{R^2 + N^2}$ (4)	-0.213(*)
植物指数	$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$ (5)	-0.257(**)
	$DVI = NIR - R$ (6)	-0.264(**)

注：SI1、SI2、SI3、BI表示不同的土壤指数；NDVI与DVI表示两种植物指数；G、R与NIR为遥感的绿、红与近红外波段；**在P<0.01水平极显著，*在P<0.5水平显著。

1.2.3 土壤盐分的空间预测方法

1) Kriging法 空间插值是一类常用的重要算法，它有很多分类，本研究采用其中通用Kriging插值方法，此方法是很多领域都很有用的地质统计格网化方法^[16]。利用Kriging插值方法，将EM38测量结果解译得到的土壤电导率进行空间插值。

2) 指数回归法 根据表1公式计算的光谱指数与EM38测量结果解译得到的土壤电导率相关系数，选出与土壤电导率显著相关的光谱指数，再计算它们之间的回归方程，根据回归方程在ENVI中利用波段运算计算出土壤电导率的空间分布图。

3) 回归-Kriging法 将指数回归法中得到电导率的残差(预测值-实测值)进行Kriging插值，再将残差图与指数回归法计算的电导率图叠加，形成新的土壤电导率空间分布图。

1.2.4 验证方法

在土壤采样点中随机选取41个点对各种预测方法进行

验证(见图1)。采用3个指标来评价各种方法的精确度。其中 $z^*(s_i)$ 表示预测值； $z(s_i)$ 表示实测值。

平均误 (Mean error) : $ME = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [z^*(s_i) - z(s_i)]$

标准误差 (Root-mean-square error) : $RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [z^*(s_i) - z(s_i)]^2}$

平均级别^[9] : $MR = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r(s_i)$

式中： m ——为验证点的数量； $r(s_i)$ ——各方法在 s_i 位上的级别。将应用的3种方法定义为3个级别，以Kriging法为例，当其残差小于其他两种方法是， $R(s_i)=1$ ；当残差大小介于两者之间， $R(s_i)=2$ ；当其残差最大时， $R(s_i)=3$ ；其他两种方法的级别以此类推。

2 结果与分析

2.1 土壤表观电导率 (EC_a) 解译方程的确定

对于研究区内EM38所测样点的表观电导率测定值 EM_H (水平位)和 EM_V (垂直位)进行相关分析，结果见图2。可以看出，各采样点的 EM_H 和 EM_V 具有较好的相关性： $EM_V = 1.223EM_H$ ($R^2 = 0.8953$, $p < 0.01$, $n = 142$)，相关系数接近90%，这表明电磁感应仪EM38的测定数据准确，其结果均具有较高的可信度。

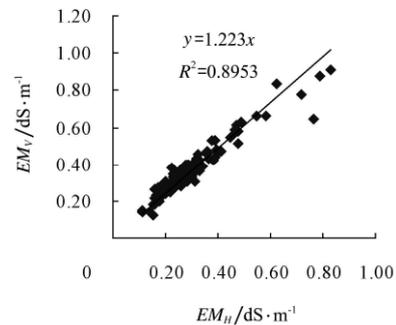


图 2 各采样点表观电导率 EM_H 和 EM_V 的相关关系
Fig.2 Relationship between apparent soil electrical conductivity EM_H and EM_V of all sample sites

本研究采用土壤电导率 $EC_{1:5}$ 来分析电磁感应仪测量值与土壤盐渍特征之间的关系，一方面是由于土壤全盐含量和土壤电导率 $EC_{1:5}$ 之间有极显著的相关性，另一方面在于电磁感应仪测量值反映的是土壤中游离态导电介质的含量，采用浸提液电导率 $EC_{1:5}$ 作为土壤盐渍化的指标与全盐含量相比更具有真实性和代表性。

以108个表层采样点为总体，分别以 EM_H 和 EM_V 为自变量，以电导率($EC_{1:5}$)为因变量进行(多元)回归分析， $EC_{1:5} = 0.041 + 1.78EM_H - 1.08EM_V$ ($R = 0.672$, $p < 0.01$, $n = 108$)，表层土壤盐分与 EM_H 、 EM_V 间均存在较好的线性关系，达到1%极显著水平 ($p < 0.01$, $n = 108$, $R_{0.01} = 0.254$)，说明 EM_H 和 EM_V 对土壤盐分状况均具有较好的响应性。故本研究采用 EM_H 和 EM_V 为变量的多元回归方程对土壤电导率进行解译。

2.2 利用不同方法进行土壤盐分空间变化的比较

2.2.1 Kriging方法空间插值分析

利用地统计学的通用 Kriging 方法研究土壤盐分的空间变异, 绘制半方差折线图及用离差平方和最小的函数进行拟合后的曲线半方差图(见图3)。拟合后的函数为

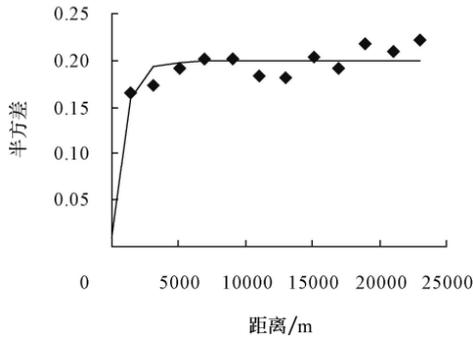


图3 土壤电导率的理论模型半方差

Fig.3 Theory model semi-variogram of soil electrical conductivity

指数模型。由图3可以直观的看出该地区土壤电导率的块金值 C_0 为0.01, 基台值为0.199及变程为2 700 m。表层土壤电导率的块金值 C_0 为正值但数值很小, 说明存在着很小的由采样误差、短距离的变异、随机和固有变异引起的各种正基底效应; 块金值与基台值(块金值+偏基台值)的比值可以表明土壤性质空间相关性的程度。如果块金值/基台值小于25%, 空间相关性强; 在25%~75%之间, 空间相关性中等; 大于75%, 空间相关性很弱; 若比值接近于1, 说明在整个尺度上具有恒定的变异^[15,16]。研究区土壤电导率的块金值/基台值为5%, 表现为强空间相关性, 说明土壤采样点间的内部结构性很好。

Kriging 插值结果平滑了土壤含盐量的数据, 使得大值降低、小值增高, 从而减少了土壤盐分含量的突然变化^[16]。从图4a可以看出研究区土壤盐分的空间分布情况: 总体上, 研究区内土壤盐分由北向南、自西向东有逐渐升高的趋势。并且盐分梯度划分明显, 且越靠近黄河, 土壤盐分越高。但在整体上盐分的空间变化缺少细节的表达。

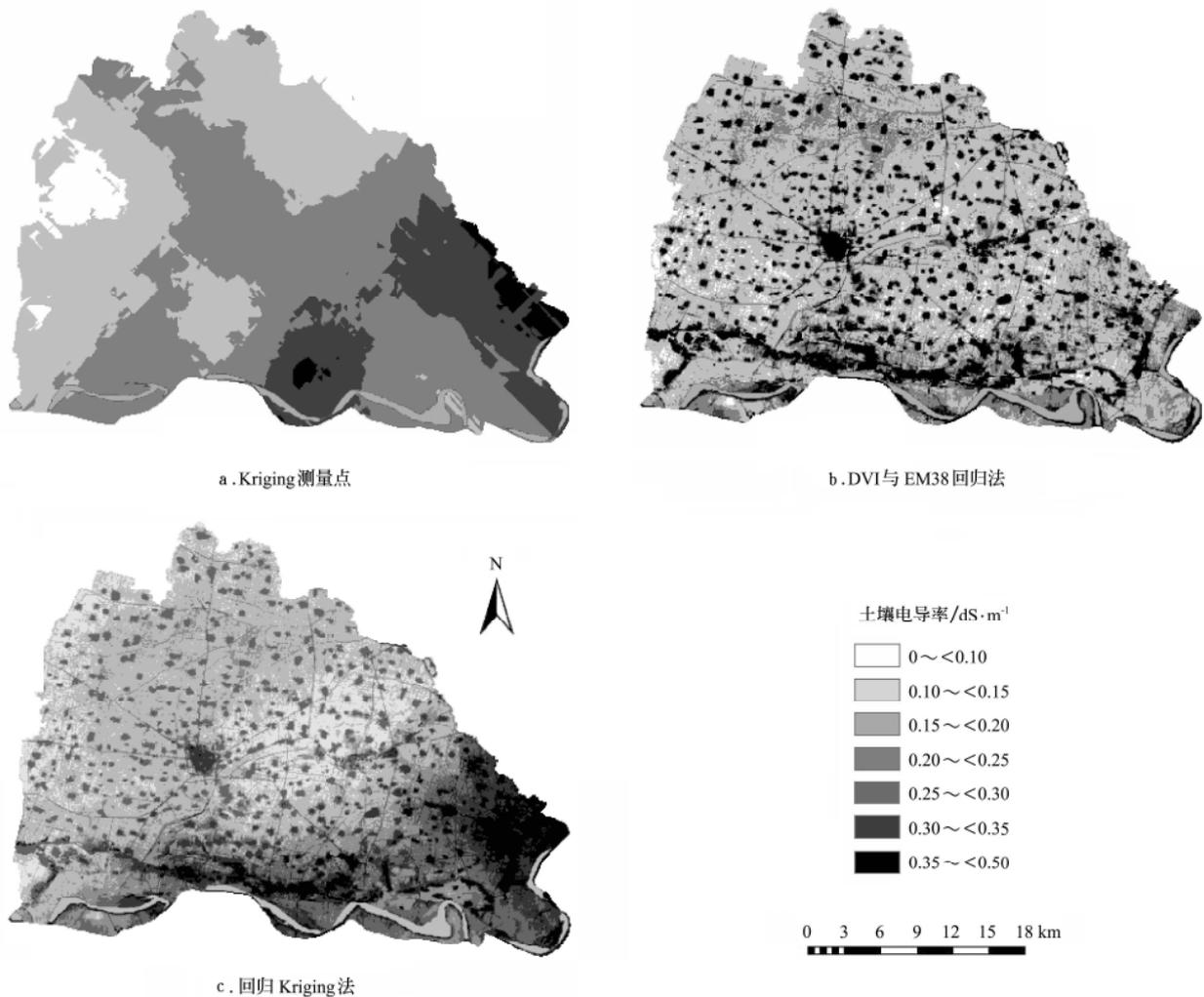


图4 3种方法土壤电导率空间分布

Fig.4 Spatial distribution of soil electrical conductivity with three methods

2.2.2 指数回归与回归-Kriging方法土壤盐分空间变化分析

根据表1, 计算的光谱指数与EM38解译的土壤电导率都显著相关, 并且表现植被指数 (NDVI、DVI) 高于

土壤指数 ($SI1$ 、 $SI2$ 、 $SI3$ 与 BI)。主要因为遥感影像的时段为4月, 而此阶段研究区的小麦已经长到一定高度, 完全覆盖地面, 植被相较于土壤光谱反射表现的更强烈一些。 DVI 与土壤电导率的相关系数最高, 故本研究选择 DVI 指数与电导率的回归方程进行土壤盐分的空间变异分析。利用回归法形成的土壤电导率空间分布图(图4b), 在研究区内的总体趋势与Kriging法相似, 但土壤电导率的表达更详尽, 主要由于回归法无平滑效应。两种方法的主要差异表现在土壤电导率的高值的分布情况, 相较于Kriging法, 回归法的高值主要集中在黄河以南及研究区北部天然渠的两侧。

回归-Kriging法(见图4c)形成的土壤电导率空间分布图, 除具有遥感影像的特点外, 土壤盐分在整个研究区分布与Kriging法形成的土壤空间分布图相似, 表现出明显的趋势效应, 总体来看土壤盐分由北向南、自西向东有逐渐升高的趋势。

2.2.3 精度比较

各种方法的验证指标见表2, 由此可见, 对于平均级别(MR): Kriging法>回归-Kriging法>指数回归法, 说明相对来说指数回归的精度最高, 但与指数回归法之间相差不大, 而标准差($RMSE$): Kriging法>指数回归法>回归-Kriging法, 以回归-Kriging法误差最小, 总体看来指数回归法与回归-Kriging法精度较高, Kriging法次之。说明遥感数据与EM38测量的表观电导率解译的土壤电导率相结合, 回归方法与Kriging法相结合在空间预测精度上较单独使用Kriging法都有较大的提高。

表2 各方法评估质量的统计验证
Table 2 Statistical validation of estimation quality for different methods

统计参数	ME	$RMSE$	MR
Kriging法	-0.019	0.357	2.073
指数回归法	-0.016	0.342	1.951
回归-Kriging法	-0.022	0.161	1.975

2.3 研究区土壤盐分的空间变化

虽然3种方法各有差异, 但可以看出该地区土壤盐分空间变异情况, 总体来看在整个研究区内, 土壤盐分由北向南、自西向东有逐渐升高的趋势。即越靠近黄河, 土壤盐分越高, 这与研究区实际情况相一致。因为研究区地处黄河大冲积扇形平原的北半部, 南面和东面紧靠黄河, 由于滩、洼地面高度悬殊甚大, 地下水坡降在交界处有明显的转折, 其侧渗补给量约 $800 \sim 3000 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 洼地含水率具有微承压现象, 下层水与潜水位水头差几十厘米至一米, 并由此产生越顶补给, 其补给量一般随距离大堤远近而变, 距大堤越近, 承压水头越大, 地下水位也就越高, 是形成研究区东南角盐渍土的主要原因。其次, 该地区上层土壤多为粉砂壤质, 下层又往往出现不同深度的厚薄不等的黏土隔层, 这种土壤土壤孔隙小、毛管性强、透水释水性差。因此, 土壤蓄水能力低, 潜水动态受气候和灌溉影响很大, 基本上属于入渗—蒸发型, 加之粉砂壤土积盐容易, 排水脱

盐难, 就是研究区东南角盐分含量高的主要原因。

综上所述, 综合运用多种数据源的回归-Kriging法(图4c), 即遥感影像数据与EM38测量数据相结合, 经典统计学与地统计学方法相结合的方法, 能够更细致、详尽的展现土壤盐分的空间变异情况, 为区域土壤盐渍化评估提供了理论基础。由回归-Kriging法得到的土壤盐分空间变异图看(图4c), 研究区土壤盐分由北向南、自西向东有逐渐升高的趋势, 具有明显的趋势效应。

3 结论

1) 空间结构性分析表明, 土壤电导率在一定的区域范围内具有空间结构特征, 符合指数模型分布。研究区土壤电导率的块金值/基台值为5%, 表现为强空间相关性, 说明土壤采样点间的内部结构性很好。

2) 通过3种不同的方法对土壤盐分的空间变异性进行分析, 结果表明Kriging法、指数回归法及回归-Kriging法在描述土壤盐分空间分布的总体趋势上相似, 但指数回归法与回归-Kriging法对于盐分的分布表达更具体, 更细致。遥感影像数据与EM38测量数据相结合, 经典统计学与地统计学方法相结合的方法, 能够提高土壤盐分空间预测的精度。

综合应用遥感数据与EM38测量相结合的方法, 对研究区土壤盐渍化进行评价, 结果表明研究区土壤盐分由北向南、自西向东有逐渐升高的趋势, 具有明显的趋势效应。

[参 考 文 献]

- [1] Rao B R M, Ravisankar T, Dwivedi R S, et al. Spectral behavior of salt-affected soils[J]. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16(12): 2125—2136.
- [2] 吴加敏, 姚建华, 张永庭, 等. 银川平原土壤盐渍化与中低产田遥感应用研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(3): 414—419.
Wu Jiamin, Yao Jianhua, Zhang Yongting, et al. Remote sensing application study on the soil salinity and the medium & low yield croplands in Yinchuan Plain[J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(3): 414—419. (in Chinese with English abstract)
- [3] 江红南, 塔西甫拉提·特依拜, 徐佑成, 等. 于田绿洲土壤盐渍化遥感监测研究[J]. 干旱区研究, 2007, 24(2): 168—173.
Jiang Hongnan, Tahiplot Tiyip, Xu Youcheng, et al. Study on remote sensing monitoring of soil salinization in arid areas[J]. Arid Zone Research, 2007, 24(2): 168—173. (in Chinese with English abstract)
- [4] Mettemieht G I, Zinck J A. Remote sensing of soft salinity: potentials and constraints[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85: 1—20.
- [5] Farfteh J, Farshad A, George R J. Assessing salt-affected soils using remote sensing, solute modeling, and geophysics[J]. Geodema, 2006, 130: 191—206.
- [6] 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.
Yao Rongjiang, Yang Jingsong, Liu Guang-ming, et al.

- Spatial variability of soil salinity in characteristic field of the Yellow River Delta[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(6): 61—66. (in Chinese with English abstract)
- [7] 李海涛, 李小梅, Philip B, 等. 电磁感应方法在土壤盐渍化评价中的应用研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(1): 95—98.
Li Haitao, Li Xiaomei, Philip B, et al. Application of electromagnetic method to soil salinization assessment[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006, 33(1): 95—98. (in Chinese with English abstract)
- [8] Corwin D L, Lesch S M. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity I. Survey protocols[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 46: 103—133.
- [9] Triantafyllis J, Lesch S M. Mapping clay content variation using electromagnetic induction techniques[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 46: 203—237.
- [10] 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)
- [11] 姚荣江, 杨劲松. 基于电磁感应仪的黄河三角洲地区土壤盐分时空变异特征[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 107—113.
Yao Rongjiang, Yang Jingsong. Spatio-temporal variability of soil salinity in the Yellow River Delta using electromagnetic induction[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 107—113. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张文冉, 杜黎君, 高殿滑. 封丘县光、温、水等气象要素的特征分析[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2007, 35(4): 18-19
- [13] 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.
Lu Rukun. Analysis Methods of Soil Agricultural Chemistry[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999. (in Chinese)
- [14] Abd El Kader Douaoui, Hervé Nicolas, Christian Walter. Detecting salinity hazards within a semiarid context by means of combining soil and remote-sensing data[J]. Geoderma, 2006, 134: 217—230.
- [15] 李哈尔滨, 王政权, 王庆成. 空间异质性定量研究理论与方法[J]. 应用生态学报, 1998, 9(6): 651—657.
Li Habin, Wang Zhengquan, Wang Qingcheng. Theory and methodology of spatial heterogeneity quantification[J]. Chinese journal of applied ecology, 1998, 9(6): 651—657. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 162—192.
Wang Zhengquan. Geostatistics and application in ecology [M]. Beijing: Technology Press, 1999: 162—192. (in Chinese)

Spatial variability of soil salinity using data from remote sensing and electromagnetic induction instruments

Wu Yakun^{1,2}, Yang Jingsong^{1*}, Liu Guangming¹

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. Anhui University of Technology, Institute of Civil Engineering and Architecture, Maanshan 243002, China)

Abstract: Taking into account the problem of soil salinization existing in Huanghuaihai plain at present, spatial variability of soil salinity was surveyed using remote sensing and the EM38 (electromagnetic induction instruments) in Fengqiu county of Henan Province. Spatial variability of soil salinity was analyzed by three methods of Kriging, exponential regression and regression-Kriging. The results indicated that soil electrical conductivity had spatial structure characteristics in a certain region, which was in line with the exponential model distribution and had strong spatial autocorrelation. The trends of spatial variability of soil salinity were similar to each other by three methods, but the spatial distributions of soil salinity by index regression and regression-Kriging were more specific and thorough than that by Kriging interpolation. The integrated methods by adopting comprehensively multi data sources, namely integration of remote sensing image data and EM38 measuring data, and integration of exponential regression and regression-Kriging, could improve the spatial prediction precision of soil salinity and were more accurate than that only by Kriging interpolation, which showed that in the study area the distribution of soil salinization appeared a tendency of increasing from north to south and from west to east, and exhibited obvious trend effect.

Key words: remote sensing, soil salinity measurement, Kriging interpolation, index regression, regression-Kriging, EM38