

基于光谱指数与 EM38 的土壤盐分空间变异性研究

吴亚坤^{1,2}, 杨劲松^{1*}, 李晓明¹

1. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008

2. 安徽工业大学, 安徽 马鞍山 243002

摘要 针对目前半干旱区存在的土壤盐渍化问题, 以典型半干旱区封丘县为研究区, 将遥感与磁感应电导率仪 (EM38) 技术相结合对典型半干旱区土壤盐分空间变异性进行了研究。结合田间采样对 EM38 测量数据进行解译, 并对解译后的数据进行经典数据统计特征分析, 建立了 EM38 解译后的土壤电导率与光谱指数 (土壤指数、植被指数) 之间的回归模型。利用该模型绘制了研究区土壤盐分的空间分布图。结果表明, 受内在和外在因子的共同作用, 研究区各土层含盐量均具有中等的变异强度。采用植被指数与土壤指数和 EM38 测量相结合的方法, 较好地绘制了研究区土壤盐分的空间变化图。盐渍化土壤主要集中在研究区北部与南部, 具有明显的趋势效应, 并且在整个剖面盐分表现为表层最高, 随着深度增加盐分先减小后增大的趋势。

关键词 光谱指数; 植被指数; 土壤指数; EM38; 土壤盐分; 空间变异性

中图分类号: S127, S156.4 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)04-1023-05

引言

盐渍化是一个世界性的低产土壤障碍因子, 与土壤侵蚀、土壤沙漠化、土壤退化、土壤污染构成了长期困扰人类的 5 大土壤问题。及时掌握有关盐渍土盐分的空间变异性是治理盐碱地和防止其进一步退化的必要前提。

目前已有许多学者利用遥感方法成功地对盐渍土进行监测与制图^[1-4]。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、轻度盐渍土的监测方面受到限制, 这就需要遥感系统与其他技术的联合使用来弥补其不足^[5,6]。EM38 磁感应电导仪 (又叫大地电导仪) 能在地表直接测量土壤表观电导率, 方便、快速, 为解决上述问题提供了有效手段^[7-11]。遥感、电磁感应技术及地面采样等技术的综合运用将成为盐渍土评价、监测与预报新的趋势。目前利用植被指数或土壤指数对作物或土壤性状监测的研究报道很多^[12,13], 但利用植被与土壤光谱指数结合 EM38 测量共同解译土壤盐分还未见报道。本文探讨了采用遥感与磁感应电导率仪 (EM38) 技术相结合对典型半干旱区土壤盐分空间变异性进行调查, 以期揭示其土壤盐分的空间变异规律, 为半干旱区土壤盐渍化评价、改良和利用提供一定的理论参考和

科学依据。

1 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', 地处北暖温带半干旱型季风气候区, 降水量时空分布不均, 主要集中在 6~8 月份, 年平均蒸发量是降雨量的 3.02 倍。该区位于黄淮海平原的中部。

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。在机械布点的每个点上选 5 个点, 进行 EM38 测量, 并在每一个测点上将 EM38 进行水平状态和垂直状态的土壤表观电导率 (EC_a) 测量。

在 EM38 测量单元上, 分 0~30, 30~60, 60~90, 90~120 cm 四层采样, 选取 108 个剖面, 共采集 432 个土样, 测量其 1:5 土水比的电导率 $EC_{1:5}$ ^[14]。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。

1.2.2 遥感数据处理与光谱指数计算

收稿日期: 2007-11-02, 修订日期: 2008-02-06

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目课题项目 (kzcx2-yw-406-3), 国家科技支撑计划课题项目 (2006BAD05B02, 2006BAD05B04, 国家自然科学基金项目 (40771097)) 和国家高技术研究发展计划重点课题项目 (2007AA091702) 资助

作者简介: 吴亚坤, 女, 1979 年, 安徽工业大学建筑工程学院讲师 e-mail: wuyakun8250@163.com

*通讯联系人 e-mail: jsyang@issas.ac.cn

(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。

(2) 光谱指数计算^[15]

利用遥感图像中的绿(G)、红(R)、近红外波段(NIR),在 ArcGIS 中计算研究区的土壤盐分指数($SI3 = \sqrt{G^2 + R^2}$)与植被归一化指数($NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$),并提取其与 EM38 解译出的电导率对应的指数值,进行回归分析,回归系数及方程见表 1。

Table 1 Correlation coefficients between spectral indices and measured EC values

模型参数		深度/cm			
		0~30	30~60	60~90	90~120
$EC_{1:5} = a + b \cdot SI3$	a	-0.066	0.056	0.041	0.037
	b	0.004	0.002	0.002	0.002
	R	0.227 **	0.252 **	0.259 **	0.234 **
$EC_{1:5} = A + B \cdot NDVI$	A	0.281	0.195	0.215	0.211
	B	-0.320	-0.132	-0.166	-0.167
	R	0.257 **	-0.298 **	-0.312 **	-0.279 **
$EC_{1:5} = \alpha + \beta SI3 + \gamma NDVI$	α	0.479	0.327	0.405	0.394
	β	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
	γ	-0.481	-0.238	-0.321	-0.314
	R	0.261 **	0.310 **	0.328 **	0.293 **
	RMSE	0.094	0.052	0.071	0.067

1.2.3 验证方法

采用检验模型时常用的统计方法回归估计标准误差(root mean squared error, RMSE)对模拟值和测量值之间的符合度进行统计分析。RMSE 值越小模拟值与测量值的一致性越好,模拟值和测量值之间的偏差越小,即模型的模拟结果越准确可靠。因此 RMSE 能够很好地反映模型模拟值的预测性。其计算公式为

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [z^*(s_i) - z(s_i)]^2}$$

其中 $z^*(s_i)$ 表示预测值; $z(s_i)$ 表示实测值。

2 结果与分析

2.1 EM38 测量的土壤表观电导率(EC_a)解译

对于研究区内以 108 个剖面作为总体,分别以 EM38 所测样点的表观电导率测定值 EMH(水平位)和 EMV(垂直位)为自变量,以各土层电导率 $EC_{1:5}$ 为因变量进行(多元)回归分析。各层土壤 $EC_{1:5}$ 与 EMH 和 EMV 间均存在较好的线性关系,相关系数变化范围分别在 0.535~0.686 和 0.490~0.742 之间,均达到 1% 极显著水平($p < 0.01$, $n = 108$, $R_{0.01} = 0.254$),说明 EMH 和 EMV 对各层次土壤盐渍状况均具有较好的响应性。对于所有土壤层,采用 EMH +

EMV 为变量的多元回归方程对土壤电导率解译效果要优于仅以 EMH 或 EMV 为变量的回归方程,故本研究采用 EMH + EMV 为变量的多元回归方程对土壤电导率进行解译。

2.2 土壤盐分含量的统计特征值与空间变异特征分析

采用 EMH + EMV 为变量的多元回归方程,将 EM38 水平(EMH)与垂直(EMV)两种模式测量的表观电导率(EC_a)解译成 0~30, 30~60, 60~90, 90~120 cm 各层的土壤电导率($EC_{1:5}$)。对解译后的土壤盐分含量进行经典的统计分析,统计值列于表 2。

从表 2 可以看出,各土层含盐量的特征参数值表现出明显的差异性。从含盐量的变幅来看,0~30 cm 土层盐分含量的最大值是最小值的 23 倍,变化幅度为 $0.681 \text{ ds} \cdot \text{m}^{-1}$,其值最大。而 30~60, 60~90, 90~120 cm 的盐分含量最大值与最小值的比值分别为 3, 6, 8, 变化幅度分别为 0.215, 0.290, $0.331 \text{ ds} \cdot \text{m}^{-1}$ 。除了 0~30 cm 土层,随着土壤深度的增加,各土层含盐量的最大值与最小值之比以及变化幅度均呈明显上升的趋势。

从变异系数来看,各层土壤盐分含量的变异系数分别为:0.572, 0.259, 0.310 与 0.370。故土壤盐分含量在水平方向上均呈中等变异强度^[16, 17]。随着土壤深度的增加,变异系数亦不断减小,说明了水平方向上含盐量的变异随深度的增加而逐步趋弱,但各土层均值之间差异不大。

Table 2 Statistical feature values of soil salinity in different soil layer

土层深度/cm	样本数	最小值/($\text{ds} \cdot \text{m}^{-1}$)	最大值/($\text{ds} \cdot \text{m}^{-1}$)	平均值/($\text{ds} \cdot \text{m}^{-1}$)	标准差	变异系数	偏度
0~30	142	0.031	0.712	0.159	0.091	0.572	2.908
30~60	142	0.092	0.307	0.147	0.038	0.259	1.904
60~90	142	0.058	0.348	0.155	0.048	0.310	1.517
90~120	142	0.045	0.376	0.154	0.057	0.370	1.586

2.3 利用光谱指数回归法对土壤盐分空间分布的分析

根据遥感图像计算得到土壤盐分指数(SI1, SI2, SI3)与植被指数(NDVI, DVI)光谱图,统计其与EM38测量结果解译得到的土壤电导率之间的相关系数,选出与土壤电导率显著相关且相关性较好的土壤盐分指数(SI3)与归一化植被指数(NDVI),并且分别以它们为自变量,以各土层电导率 $EC_{1:5}$ 为因变量进行(多元)回归分析,结果见表2。各土层与土壤盐分指数(SI3)、归一化植被指数(NDVI)间均存在较好的线性关系,相关系数绝对值变化范围分别在0.227~0.259和0.257~0.312之间,均达到1%极显著水平($p < 0.01$, $n = 142$, $R_{0.01} = 0.0208$),说明土壤盐分指数(SI3)与归一化植被指数(NDVI)对各层次土壤盐渍状况均具有较好的响应

性。并且由相关系数可以看出各土层电导率与归一化植被指数(NDVI)的相关系数都高于土壤盐分指数(SI3),主要因为遥感图像选取的时期是4月份,此时研究区内的春小麦已经覆盖地面,植被对于光谱指数的影响大于土壤。

进一步对各层土壤电导率与EMH和EMV进行多元回归分析发现,对于所有土层,采用土壤盐分指数(SI3)与归一化植被指数(NDVI)为变量的多元回归方程对土壤电导率解译效果要优于仅以土壤盐分指数(SI3)或归一化植被指数(NDVI)为变量的回归方程,故本研究采用土壤盐分指数(SI3)与归一化植被指数(NDVI)为变量的多元回归方程对土壤电导率进行解译。解译得到的各土层土壤盐分空间分布图见图1。

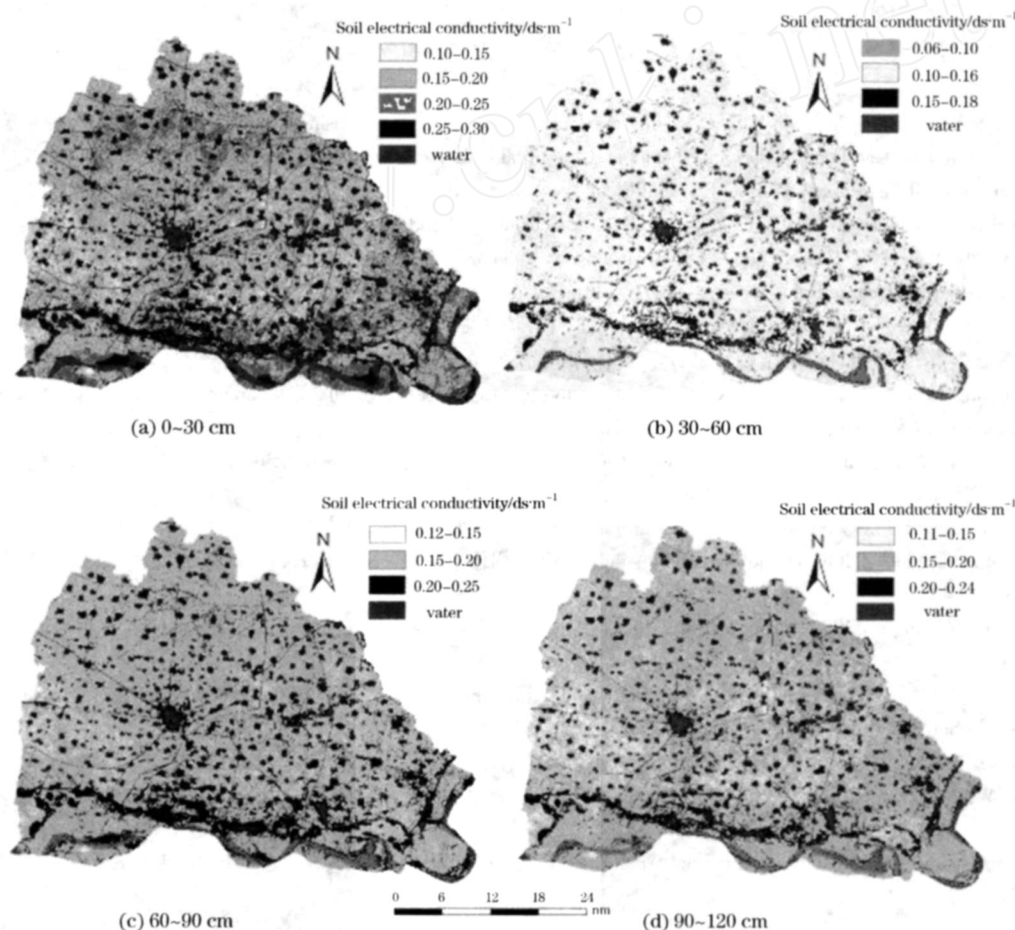


Fig 1 Spatial distribution of soil salinity for different soil layer

黑色斑块为村庄与道路分布区,对于土壤电导率大小分布表现为红色(盐渍化土壤) > 绿色 > 黄色,由各层土壤电导率分布图可以明显看出,在整个剖面中0~30 cm土壤电导率分布类型最多,土壤电导率在0.10~0.15 $ds \cdot m^{-1}$, 0.15~0.20 $ds \cdot m^{-1}$, 0.20~0.25 $ds \cdot m^{-1}$ 都有分布,并且最大;随着深度的增加,土壤电导率逐渐减小,30~60 cm土层的电导率最小主要集中在0.10~0.15 $ds \cdot m^{-1}$ 之间;到60 cm土层后土壤电导率又逐渐升高,并且土壤电导率在60~90与90~120 cm土层之间分布相近。这与传统统计结果一致。

对于各个土层,由0~30 cm土层电导率分布图可以看

出,在整个研究区内都有盐渍化土壤分布(红色区域),并主要集中在研究区的北部与南部,即天然渠两侧与黄河附近,其他地方只有零星分布。

在30~60 cm与60~90 cm土壤剖面上,土壤盐分变化的空间趋势不明显,而90~120 cm与0~30 cm一致,也表现出北面与南面高、中间低的趋势。

综上所述,利用光谱指数与EM38测量相结合的方法,对典型半干旱区土壤盐分的空间变异性研究结果表明,研究区内的盐渍化土壤主要集中北部与南部,呈现明显的趋势效应,并且在整个剖面盐分表现为表层最高,随着深度增加盐

分先减小后增大的趋势。

2.4 光谱指数回归模型的检验

在土壤采样点中随机选取 40 个点对光谱指数二元一次回归模型的预测土壤盐分进行检验。土壤盐分的模拟值与实际测量值的标准误差 RMSE 见表 1, 土壤 0~30, 30~60, 60~90, 90~120 cm 各层土壤盐分的 RMSE 分别为 0.094, 0.052, 0.071, 0.067 $\text{ds} \cdot \text{m}^{-1}$ 。各层的标准误差都很小, 表明对检验集数据的预测精度达到较高的水平。对于各层土壤盐分的预测精度表现为 0~30 cm 最低, 30~60 cm 随后升高至 60~90 cm 逐渐降低, 到 90~120 cm 又有升高的趋势。这与土壤盐分的平均含量的剖面垂直分布趋势一致, 可能土壤盐分的大小对光谱指数预测精度有一定影响, 表现为随着盐

分的升高, 预测精度逐渐有下降的趋势, 说明此回归模型对盐分比较低的地方预测精度较高。

3 结 论

(1) 经典统计分析表明: 各土层土壤盐分均值差异不大; 变异系数在 0.259~0.572 之间, 属于中等变异强度。

(2) 利用植被指数与土壤指数和 EM38 测量相结合的方法, 能够较好地绘制出研究区土壤盐分的空间变化图, 表明盐渍化土壤主要集中在研究区北部与南部, 呈现明显的趋势效应, 并且在整个剖面盐分表现为表层最高, 随着深度增加盐分先减小后增大的趋势。

参 考 文 献

- [1] Rao B R M, RaviSankar T, Dwivedi R S, et al. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16(12): 2125.
- [2] GUAN Yuan-xiu, LIU Gao-huan, LIU Qing-sheng, et al. Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2001, 5(1): 46.
- [3] GUAN Yuan-xiu, LIU Gao-huan, WANG Jing-feng(关元秀, 刘高焕, 王劲峰). Acta Geographica Sinica(地理学报), 2001, 56(2): 198.
- [4] LUO Yu-xia, CHEN Huan-wei(骆玉霞, 陈焕伟). Remote Sensing for Land & Resources(国土资源遥感), 2002, (2): 46.
- [5] Mettemieht G I, Zinck J A. Remote Sensing of Environment, 2003, 85: 1.
- [6] Farfteh J, Farshad A, George R J. Geodema, 2006, 130: 191.
- [7] YAO Rong-jiang, YANG Jing-song, JIANG Long(姚荣江, 杨劲松, 姜 龙). Journal of Zhejiang University · Agriculture and Life Science(浙江大学学报·农业与生命科学版), 2007, 33(2): 207.
- [8] YAO Rong-jiang, YANG Jing-song, LIU Guang-ming, et al(姚荣江, 杨劲松, 刘广明, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2006, 22(6): 61.
- [9] LIU Guang-ming, YANG Jing-song, JU Mao-sen, et al(刘广明, 杨劲松, 鞠茂森, 等). Soils(土壤), 2003, 35(1): 27.
- [10] Corwin D L, Lesch S M. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 46: 103.
- [11] Triantafilis J, Lesch S M. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 46: 203.
- [12] FENG Lei, FANG Hui, ZHOU Wei-jun, et al(冯 雷, 方 慧, 周伟军, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(9): 1749.
- [13] LI Zhi-wei, PAN Jian-jun, ZHANG Jia-bao(李志伟, 潘剑君, 张佳宝). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(10): 1813.
- [14] LU Ru-kun(鲁如坤). Analysis Methods of Soil and Agricultural Chemistry(土壤农业化学分析方法). Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press(北京: 中国农业科技出版社), 1999.
- [15] Abd El Kader Douaoui, Hervé Nicolas. Geoderma, 2006, 134: 217.
- [16] LI Ha-bin, WANG Zheng-quan, WANG Qing-cheng(李哈滨, 王政权, 王庆成). Chinese Journal of Applied Ecology(应用生态学报), 1998, 9(6): 651.
- [17] WANG Zheng-quan(王政权). Geostatistics and Application in Ecology(地统计学及其在生态学中的应用). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 1999. 162.

Study on Spatial Variability of Soil Salinity Based on Spectral Indices and EM38 Readings

WU Ya-kun^{1,2}, YANG Jin-song^{1*}, LI Xiao-ming¹

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

2. Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China

Abstract Taking Feng-qiu County as a case of soil salinization widely existing in the semiarid region, the spatial variability of soil salinity was investigated by using remote sensing and EM (electromagnetic induction) technologies in the present study. Descriptive statistics was applied to soil salinity data interpreted from EM38 measurements using field sampling method. Spectral indices (soil index and plant index) were derived from 25-resolution Landsat TM image taken in April 2005, and proved to be significantly correlated with soil salinity interpreted by EM38 readings. Regression models were further established between the interpreted soil electrical conductivity and spectral indices (soil index and plant index), and spatial distribution patterns across the study area were finally mapped based on the above regression models. Results indicated that soil salinity at each soil layer is from 0.259 to 0.572 and exhibits the moderate spatial variability owing to compound impact of intrinsic and extrinsic factors. Spatial distribution maps of soil salinity were obtained with the application of plant index, soil index and EM38 measurements. It was shown that soil salinization, mainly located in the north and south of the study area, exhibited obvious trend effect. Salinity at surface soil was the greatest and showed the trend of a decrease at subsoil layer and then an increase at deep layer in the whole soil profile. The accuracy of the predictions was tested using 40 soil sampled points. The root mean square error (RMSE) of calibration for soil salinity in each layer was 0.094, 0.052, 0.071 and 0.067 $\text{ds} \cdot \text{m}^{-1}$ respectively, showing that the precision is ideal. The change trends of RMSE were the same as soil salinity in soil profile. The trends indicated that soil salinity had effect on the salinity prediction by spectral indices, and showed better accuracy at low soil salinity.

Keywords Spectral indices; Plant index; Soil index; EM38; Soil salinity; Spatial variability

(Received Nov. 2, 2007; accepted Feb. 6, 2008)

* Corresponding author