

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 17 期 Vol.33 No.17 **2013**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 17 期 2013 年 9 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 植物角质层蜡质的化学组成研究综述 曾 琼, 刘德春, 刘 勇 (5133)
- 中国滨海盐沼湿地碳收支与碳循环过程研究进展 曹 磊, 宋金明, 李学刚, 等 (5141)

个体与基础生态

- 秸秆隔层对盐碱土水盐运移及食葵光合特性的影响 赵永敢, 逢焕成, 李玉义, 等 (5153)
- 盐地碱蓬二型性种子及其幼苗对盐渍环境的适应性 刘 艳, 周家超, 张晓东, 等 (5162)
- 不同抗旱性花生品种的根系形态发育及其对干旱胁迫的响应 丁 红, 张智猛, 戴良香, 等 (5169)
- 夏季苹果新梢生理指标与抗苹果绵蚜的关系 王西存, 周洪旭, 于 毅, 等 (5177)
- 花期海蓬子对盐胁迫的生理响应 刘伟成, 郑春芳, 陈 琛, 等 (5184)
- 白蜡多年卧孔菌生物学特性及驯化栽培 鲁 铁, 图力古尔 (5194)
- 重度火烧迹地微地形对土壤微生物特性的影响——以坡度和坡向为例
..... 白爱芹, 傅伯杰, 曲来叶, 等 (5201)
- 秸秆还田与施肥对稻田土壤微生物生物量及固氮菌群落结构的影响 刘骁蓓, 涂仕华, 孙锡发, 等 (5210)
- 大穗型小麦叶片性状、养分含量及氮素分配特征 王丽芳, 王德轩, 上官周平 (5219)
- 复合不育剂 EP-1 对小鼠空间记忆与焦虑行为的影响 王晓佳, 秦婷婷, 胡 霞, 等 (5228)

种群、群落和生态系统

- 小兴安岭阔叶红松混交林林隙特征 刘少冲, 王敬华, 段文标, 等 (5234)
- 高寒矮嵩草群落退化演替系列氮、磷生态化学计量学特征 林 丽, 李以康, 张法伟, 等 (5245)
- 中亚热带人工针叶林生态系统碳通量拆分差异分析 黄 昆, 王绍强, 王辉民, 等 (5252)
- 高寒山区一年生混播牧草生态位对密度的响应 赵成章, 张 静, 盛亚萍 (5266)
- 乳山近海大型底栖动物功能摄食类群 彭松耀, 李新正 (5274)

景观、区域和全球生态

- 采伐干扰对大兴安岭落叶松-苔草沼泽植被碳储量的影响 牟长城, 卢慧翠, 包 旭, 等 (5286)
- 西南喀斯特地区轮作旱地土壤 CO₂ 通量 房 彬, 李心清, 程建中, 等 (5299)
- 干湿季节下基于遥感和电磁感应技术的塔里木盆地北缘绿洲土壤盐分的空间变异性
..... 姚 远, 丁建丽, 雷 磊, 等 (5308)
- 东北温带次生林和落叶松人工林土壤 CH₄ 吸收和 N₂O 排放通量 孙海龙, 张彦东, 吴世义 (5320)
- 新疆东部天山蝶类多样性及其垂直分布 张 鑫, 胡红英, 吕昭智 (5329)
- 玉米农田空气动力学参数动态及其与影响因子的关系 蔡 福, 周广胜, 明惠青, 等 (5339)

天山北坡家庭牧场复合系统对极端气候的响应过程..... 李西良,侯向阳,丁 勇,等 (5353)

大城市边缘区景观破碎化空间异质性——以北京市顺义区为例..... 李 灿,张凤荣,朱泰峰,等 (5363)

资源与产业生态

基于 GLBM 模型的中国大陆阿根廷滑柔鱼鱿钓渔业 CPUE 标准化 陆化杰,陈新军,曹 杰 (5375)

三峡库区古夫河水质时空分异特征..... 冉桂花,葛继稳,苗文杰,等 (5385)

城乡与社会生态

汉、藏、回族地区农户的环境影响——以甘肃省张掖市、甘南藏族自治州、临夏回族自治州为例.....

..... 赵雪雁,毛笑文 (5397)

研究简报

中国近海浮游动物群落结构及季节变化..... 杜明敏,刘镇盛,王春生,等 (5407)

海洋污染物对菲律宾蛤仔的免疫毒性..... 丁鉴锋,闫喜武,赵力强,等 (5419)

衰亡期沉水植物对水和沉积物磷迁移的影响..... 王立志,王国祥 (5426)

伊洛河流域外来草本植物分布格局..... 郭屹立,丁圣彦,苏 思,等 (5438)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-09



封面图说: 帽儿山次生林林相——帽儿山属于长白山山脉的张广才岭西坡,松花江南岸支流阿什河的上游,最高海拔 805m,由侏罗纪中酸性火山岩构成,是哈尔滨市附近的最高峰,因其貌似冠状而得名。东北林业大学于 1958 年在此建立了实验林场。山上生长着松树、榆树、杨树及各种灌木等,栖息着山鸡、野兔等野生动物,在茂密的草地上还生长有各种蘑菇。其地带性植被为温带针阔混交林,目前状况为天然次生林。部分地方次生林转变为落叶松人工林后,落叶松林地的凋落物层影响了林地土壤水分的格局。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201205230766

姚远, 丁建丽, 雷磊, 江红南, 张芳, 牛涛. 干湿季节下基于遥感和电磁感应技术的塔里木盆地北缘绿洲土壤盐分的空间变异性. 生态学报, 2013, 33(17): 5308-5319.

Yao Y., Ding J. L., Lei L., Jiang H. N., Zhang F., Niu T. Monitoring spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the North Tarim Basin using remote sensing and electromagnetic induction instruments. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(17): 5308-5319.

干湿季节下基于遥感和电磁感应技术的塔里木盆地 北缘绿洲土壤盐分的空间变异性

姚 远, 丁建丽*, 雷 磊, 江红南, 张 芳, 牛 涛

(新疆大学资源与环境科学学院 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 土壤盐渍化问题是制约干旱半干旱区植被生长最主要的生态环境地质问题, 也是影响绿洲农业生产的障碍性问题。而将遥感与近感技术相结合, 是当前评价、监测及预报土壤盐渍化程度的先进方法。以新疆塔里木盆地北缘的渭干河-库车河三角洲绿洲为例, 以遥感数据和解译后的电磁感应数据为基础数据源, 利用解译后的数据结合 GIS 和地统计学知识以及野外实测所得到的土壤电导率和盐分资料, 分别采用泛克里格 (Universal Kriging)、光谱指数回归 (Spectral Index Regression) 和回归残差泛克里格 (Regression-Universal Kriging) 3 种方法研究了该地区两个关键季节 (干季和湿季) 土壤盐分的空间变异特征。研究结果表明: 研究区的土壤浸提液电导率 $EC_{1:5}$ 和土壤盐分呈现显著相关, 可以用 $EC_{1:5}$ 来代替土壤的全盐量进行分析; 电磁感应仪 (EM38) 所测各季节土壤表观电导率与 $EC_{1:5}$ 的相关系数均达到 1% 显著水平, 以表观电导率垂直读数 (EM_v) 和水平读数 (EM_h) 为自变量的多元回归模型拟合效果较好; 研究区各季节的表层土壤电导率的空间分布均表现为强相关性, 说明土壤采样点间的内部结构性良好, 采用能够充分考虑到干旱区表层土壤电导率空间变异的尺度依赖性的球状套合模型, 能够更好的拟合土壤表观电导率的空间结构; 经过精度比较, 回归残差泛克里格法为最优预测方法, 这表明将遥感和电磁感应技术相结合, 能够有效的提高预测与评估土壤盐分空间分布的精度, 为精确地进行土壤盐分预测以及土壤次生盐渍化的防控提供了一定的依据。

关键词: 遥感; EM38; 土壤盐渍化; 干湿季节; 渭干河-库车河三角洲绿洲; 空间变异性

Monitoring spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the North Tarim Basin using remote sensing and electromagnetic induction instruments

YAO Yuan, DING Jianli*, LEI Lei, JIANG Hongnan, ZHANG Fang, NIU Tao

College of Resource and Environmental Science, Key Laboratory of Oasis Ecology of Education Ministry, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

Abstract: Soil salinization is one of the most critical eco-environmental problems in arid and semiarid regions, which constrains vegetation growth and, therefore, exerts crop yield and agricultural production. Integrated satellite remote sensing and near sensing technology based on electromagnetic induction instruments is an advanced method for monitoring and forecasting soil salinization. In this contribution, remote sensing and electromagnetic induction EM38 and its mobile sensing system are used to evaluate soil salinity at the delta oasis between the Weigan River and the Kuqa River in the north rim of the Tarim basin. Spatio-temporal variation of soil salinity in response to dry and wet seasons is analyzed by using GIS and geo-spatial statistics. Spatial variability of soil salinity is analyzed by Universal Kriging, Spectral Index Regression and Regression-Universal Kriging. Our results show that apparent soil electrical conductivity ($EC_{1:5}$) is significantly correlated

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41261090, 41161063, 41130531, 41001198); 教育部新世纪优秀人才支持计划 (NCET-12-1075); 霍英东教育基金项目 (121018)

收稿日期: 2012-05-23; **修订日期:** 2012-10-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: watarid@xju.edu.cn

with salinity, therefore, $EC_{1:5}$ can be used as a surrogate for salt content. The correlation coefficient between apparent electrical conductivity (EM_{38}) and $EC_{1:5}$ is significance at $P < 0.01$, indicates $EC_{1:5}$ can be estimated with multiple regression equation using EM_V and EM_H as independent variables. Soil electrical conductivity in dry and wet seasons in the study region shows strong spatial autocorrelation. Considering the scale dependency of spatial variation, the nested spherical models are fitted for semi-variance of top soil (0—10cm). Regression-Universal Kriging is identified as the best method in terms of the accuracy of predicting spatial variability of soil salinity. We conclude that this study may provide a theoretical reference for rapid and accurate assessment of soil salinity and prevention of soil re-salinization.

Key Words: remote sensing; EM_{38} ; soil salinization; dry and wet seasons; the delta oasis of Weigan-Kuqa watershed; spatial variability

绿洲是干旱、半干旱区一种独特的生态单元,是以荒漠为基质,依托水分条件发育成的各种植被生态体系,是维系干旱地区人类生存、活动与发展的基本场所^[1]。而作为土地荒漠化和土地退化的主要的类型之一,土壤的盐渍化和灌溉引起的土壤次生盐渍化问题现已成为干旱区农业发展的主要障碍,同时也是影响绿洲生态环境稳定的重要因素。土壤盐分的空间变异性是盐渍土重要的自然属性之一^[2],在 1 年的时间周期内,其空间变异程度的高低受季节变化的影响较为明显,在降水稀少的干季和降水集中的湿季,土壤耕作层内的土壤盐渍化程度和状态往往有着较大的差异。因此,监测和预测土壤盐渍化的时空分布与变异特征,揭示土壤盐分的时空变化规律,对于盐渍土的治理以及促进农业生产和区域可持续发展具有重要的现实意义。

传统的取样方法和取样数量受人力及物力等因素的限制,无法实现大面积实时动态监测,获取的土壤特性信息较为粗略,一般情况下很难反映出所希望掌握的完整信息,获得的土壤信息在精度和准确度方面也存在一些问题,因而制约了盐渍土的高效利用及其科学规划。而遥感技术能够大面积、重复获取区域多波段、多时相的地物信息,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^[3],从而为大面积的实时动态监测盐渍土状况提供了可能。然而大量研究结果表明,虽然通过对遥感影像进行各种光谱分析和变换能够较好的提取土壤盐渍化信息^[4-6],但范围往往局限于土壤盐渍化程度较为严重的地区,对于中度或轻度的盐渍化土壤的识别准确度仍然较低,这就需要将遥感技术与其他技术相结合,进行综合应用来弥补其自身的缺陷。

目前,将遥感与电磁感应技术相结合是评价、监测及预报土壤盐渍化的先进方法^[7]。电磁感应仪(EM_{38})属于非接触直读式,其特殊的工作原理使得利用 EM_{38} 能实时、快速、高精度地对土壤盐渍化程度与剖面特征进行解译^[8], EM_{38} 与数据采集器、GPS 连接构建移动式电磁感应调查系统,适用于大面积土壤盐渍化的测量^[9]。将其与遥感技术和地面实际观测技术相结合,可以更为有效地监测和预测土壤盐渍化的时空变异特征。

当前,国内外关于利用 EM_{38} 进行土壤电导率的测量和预测已有大量研究成果^[10-15]。李洪义^[16]等以海涂周围垦区盐碱土为研究对象,利用 EM_{38} 在地表测量了不同高度的土壤表观电导率,进而预测了不同深度土层剖面的电导率。吴亚坤^[17]等将光谱指数与 EM_{38} 相结合对河南省封丘县的土壤盐分空间变异性进行了研究。李洪义^[18]等以 EM_{38} 和线性预测模型获取的剖面表征电导率为数据源,利用三维普通克里格方法开展了三维土体电导率的空间变异预测和模拟研究。李晓明^[19]等利用 EM_{38} 建立了土壤盐分的电磁感应解译模型。目前,利用 EM_{38} 进行土壤剖面电导率的测量和预测,以及基于 EM_{38} 对土壤盐分的空间异质性进行研究的报道很多,但将遥感技术与电磁感应仪相结合对两个关键季节(干季和湿季)土壤盐分的空间分布和变异特征进行综合分析评价,并从时空变异的角度,探讨季节变化对盐渍土生态过程的影响的研究报道较为少见。

本文以渭干河-库车河三角洲绿洲为研究对象,将遥感与电磁感应技术相结合,采用 3 种不同的方法:泛克里格法(Universal Kriging)、光谱指数回归法和(Spectral Index Regression)回归残差泛克里格法(Regression-

Universal Kriging) 对研究区干季和湿季的 0—10cm 土体含盐量的空间变异特征进行了综合分析评价。该研究不仅为渭干河-库车河三角洲绿洲的盐渍化土壤的科学管理、精准测量以及合理的改良和利用提供一定的理论依据,同时对评估与预测该地区土壤盐渍化发生发展具有重要意义。

1 研究区概况

渭干河-库车河三角洲绿洲位于新疆塔里木盆地的中北部,根据实地土壤采样区域确定研究区边界坐标为:东经 82°10'E—83°50'E;北纬 41°06'N—41°40'N。属于大陆性温带干旱气候,气温日较差大,降水较少,年平均降水量 67.5mm,土壤盐渍化现象较为普遍。随着表层土壤含盐量不断增加,植被覆盖度降低,严重时形成盐霜,形成重度盐渍化区域。天然植被以芦苇(*Phragmites australis*)、怪柳(*Tamarix ramosissima*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)、花花柴(*Karelinia caspica*)和盐爪爪(*kalidium gracile*)等为主,主要分布在绿洲外围轻、中度盐渍化区域。渭干河-库车河三角洲绿洲生态环境脆弱,近年来由于土壤盐渍化和沙质荒漠化的不断扩展,绿洲土地退化现象较为严重,这已对当地及全疆的生态环境演变和可持续发展造成严重影响。

2 研究方法与原理

2.1 EM38 数据的采集

本研究采用 GPS 定位技术,从研究区范围所布置的采样点中,选择具有代表性的土壤表层测量单元 68 个(图 1),测量单元的位置、数量在综合考虑研究区土壤质地、盐分状况和植被类型以及土地利用方式等因素的基础上进行选取。采样时间分别为 2011 年 4 月下旬和 2011 年 9 月下旬。

EM38 总长度 1m,主要由仪器信号发射和接收两个端口组成。测量时利用电磁感应的原理,由仪器后端的发射线圈产生动态原生磁场,该磁场通过地面诱导产生较弱的电涡流,进而诱导产生次生磁场。而仪器前端的信号接收线圈同时接收原生磁场和次生磁场的信息,通过测量原生磁场和次生磁场的相对关系来测量土壤的表观电导率^[20]。EM38 有两种探测模式,其中垂直偶极模式(EM_V)的探测深度为 1.5m,水平偶极模式(EM_H)的探测深度为 0.75m。采样时将 EM38 设置为 Q/P 模式,进行垂直状态和水平状态的土壤表观电导率测量。由于 Landsat-TM 遥感影像分辨率的大小为 30m×30m,因此,将 EM38 测量单元的范围也设定为 30m×30m,为保证测量单元的电导率值更具有真实性,每一个测量单元进一步选取测量点 49 个,每一个测点间隔 5m,每一个单元的测量值均为 49 个点测量值之和的平均值。采集路线按照图 2 中箭头所指示的顺序进行。

2.2 研究区实测电导率数据的获取

待 EM38 测量结束后,对每个测量单元进行表层(0—10cm)土壤样品的采集。为了降低采样的随机性,在每一个测量单元范围内布置 5 个采样点,样点成梅花状分布(图 2),取 5 点的均值作为一个测量单元电导率和盐分的真值。将采集的土壤样本按编号分别装袋,带回实验室自然风干。将风干后的样品磨碎,用 0.5mm 孔径的筛子进行过滤,制备标准温度 25℃ 时,按照土水比 1:5 的比例提取浸提液,进而测定土壤电导率 $EC_{1:5}$ 和土壤含盐量,测定方法参照《土壤农业化学常规分析方

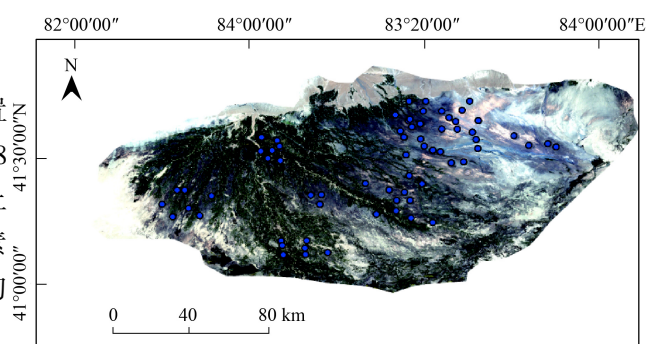
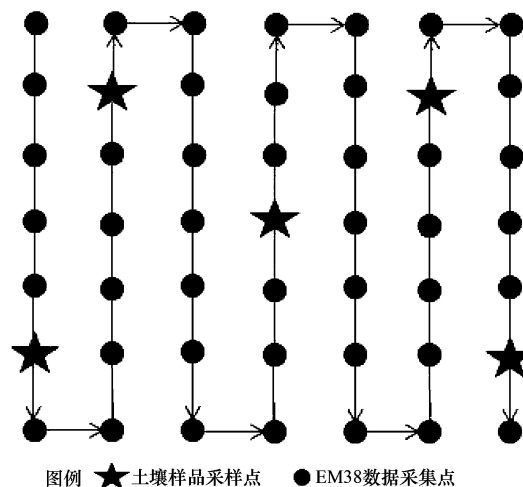


图 1 采样区位置及样点分布图

Fig. 1 Location of sampling area and distribution of soil sampling points



图例 ★ 土壤样品采样点 ● EM38 数据采集点

图 2 EM38 测量单元操作路线图

Fig. 2 The measurement points at a site

法》^[21]。

2.3 遥感数据的获取和预处理

本文采用遥感数据为 2011 年 4 月 15 日和 2011 年 9 月 22 日成像的 Landsat-TM 数据,并根据研究区 2001 年的 1:100000 地形图对研究区 2001 年 4 月的遥感图像进行几何校正,接着以 2001 年的图像为基准,校正 2011 年 4 月和 2011 年 9 月的图像。RMS 校正误差分别为 0.4271 和 0.2512,误差均在 0.5 个像元以内。经过几何校正之后,选择 COST 模型对研究区进行大气校正。

2.4 光谱指数的选取与计算

首先,利用 ENVI 4.7 软件将经过辐射校正和几何校正的 Landsat-TM 影像的蓝波段 ρ_{TM1} 、绿波段 ρ_{TM2} 、红波段 ρ_{TM3} 和近红外波段 ρ_{TM4} 的反射率数据分别用于反演能够较好地反应土壤盐渍化程度的五种光谱指数:盐分指数(SI)、归一化盐分指数(NDSI)、亮度指数(BI)以及归一化植被指数(NDVI)和差值植被指数(DVI),再利用 ARCGIS 10.0 软件提取其与 EM38 解译出的电导率对应的指数值。最后,通过 SPSS 17.0 统计软件进行相关性分析(表 1)。结果表明:从遥感影像中所提取的光谱指数值与 EM38 解译出的电导率值均在 $P<0.01$ 水平显著。

表 1 光谱指数与磁感式表现电导率的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between spectral indices and electromagnetic apparent conductivity values

光谱指数 Spectral indices	关系式 Formula	$R^2(04-15)$	$P(04-15)$	$R^2(09-22)$	$P(09-22)$
SI ^[22]	$SI = \sqrt{\rho_{TM1} \times \rho_{TM3}}$	0.349	0.000	0.315	0.000
NDSI ^[22]	$NDSI = \frac{\rho_{TM3} - \rho_{TM4}}{\rho_{TM3} + \rho_{TM4}}$	0.282	0.000	0.343	0.000
BI ^[23]	$BI = \sqrt{\rho_{TM2}^2 + \rho_{TM3}^2}$	0.338	0.000	0.389	0.000
NDVI	$NDVI = \frac{\rho_{TM4} - \rho_{TM3}}{\rho_{TM4} + \rho_{TM3}}$	0.282	0.000	0.343	0.000
DVI ^[24]	$DVI = \rho_{TM4} - \rho_{TM3}$	0.318	0.000	0.391	0.000

SI: 盐分指数 Salinity Index; NDSI: 归一化盐分指数 Normalized Differential Salinity Index; BI: 亮度指数 Brightness Index; NDVI: 归一化植被指数 Normalized Differential Vegetation Index; DVI: 差值植被指数 Difference Vegetation Index

2.5 空间预测方法的选取

2.5.1 泛克里格法

本文选择泛克里格法将 EM38 测量结果解译得到的土壤电导率进行空间插值。这是由于泛克里格法是一种对空间变量分布数据寻求最优、线性、无偏内插估计量的方法,该方法在不同样点密度条件下的预测精度较高、局部变异明显、保留空间信息的能力较好^[25]。

2.5.2 光谱指数回归法

从五种光谱指数中选出与土壤电导率显著相关的光谱指数,根据所选取的光谱指数和 EM38 电导率数据建立回归方程,根据回归方程在 ENVI 中利用波段运算进行土壤电导率的反演,以此绘制出研究区干季和湿季的土壤盐分的时空分布图。

2.5.3 回归残差泛克里格法

回归残差泛克里格法是回归模型和泛克里格相结合的统计方法,它通过目标变量与辅助变量之间的回归和回归残差的泛克里格技术来预测空间的特征。本研究将指数回归法计算出的电导率残差(预测电导率值和实测电导率值的差值),利用泛克里格法进行插值,将插值结果与指数回归法计算的土壤盐分图进行叠加,从而形成新的干季和湿季两个时段区域土壤盐分空间分布图。

2.6 验证方法

采用交叉验证法对上述 3 种研究方法的预测结果进行对比分析,通过计算采样点的实测值与预测值的误

差来评价研究方法的优劣。研究过程中,对研究区内的采样单元进行交叉验证,选用均方根误差(RMSE)、平均标准误差(ASE)和平均误差(ME)三项指标对预测值和测量值之间的符合度进行统计分析,从而分析各种方法模拟结果的准确性,以便能很好地反映不同方法模拟值的预测性。其计算公式分别为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [Z^*(S_i) - Z(S_i)]^2} \quad (1)$$

$$ASE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [Z^*(S_i) - (\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M Z(S_i)) / M]^2} \quad (2)$$

$$ME = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [Z^*(S_i) - Z(S_i)] \quad (3)$$

式中, $Z^*(S_i)$ 表示预测值; $Z(S_i)$ 表示实测值; M 表示验证点的数量。判断精度的标准为:①均方根误差 RMSE 越小越好;②平均标准误差 ASE 与均方根误差 RMSE 应尽可能的接近,如果 $ASE > RMSE$, 则预测值可能高于实测值,相反,则低于实测值;③平均误差的绝对值越接近于 0 越好。

3 结果与分析

3.1 土壤浸提液电导率 $EC_{1:5}$ 与盐分含量的相关性

当前,针对干旱区盐渍化土壤盐分含量变化的研究,常用的指标是水溶性含盐量和土壤浸提液电导率 $EC_{1:5}$ 。近年来土壤学的研究表明:可以用 $EC_{1:5}$ 来代替土壤的全盐量进行分析,这是因为土壤浸提液电导率和土壤盐分之间呈现极显著的相关性。本文选取 $EC_{1:5}$ 来分析电磁感应仪测量值和土壤盐渍化程度之间的关系,一方面是由于通过对研究区实测样点的表观电导率和全盐量进行分析,如图 3—图 4 所示,发现在研究区的干季和湿季,各采样点的盐分含量和电导率均存在较好的线性关系;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^[26]。

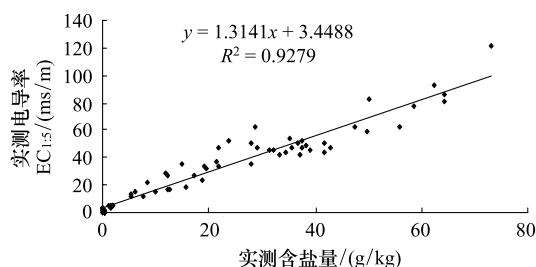


图 3 2011 年 4 月实测盐分和电导率的相关关系

Fig. 3 Relationship between soil salinity and soil electrical in April, 2011

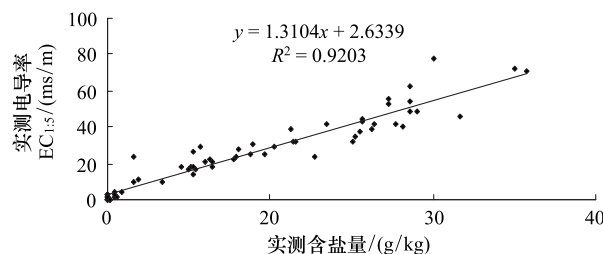


图 4 2011 年 9 月实测盐分和电导率的相关关系

Fig. 4 Relationship between soil salinity and soil electrical in September, 2011

3.2 磁感式表观电导率与土壤浸提液 $EC_{1:5}$ 的多元回归模型的建立

为了验证电磁感应仪 EM38 的测定数据准确的准确性,本文对研究区所测得的每一个样点的垂直电导率值 EM_V 和水平电导率值 EM_H 进行相关性分析,通过分析发现样点的垂直电导率值 EM_V 和水平电导率值 EM_H 的相关性较高(图 5—图 6)。这表明 EM38 测定数据准确,其结果具有较高的可信度。

本研究以 $EC_{1:5}$ 为因变量,分别以 EM_V , EM_H 和 $EM_V + EM_H$ 为自变量,以 68 个表层测量单元为研究对象进行回归分析。结果如表 2 所示, $EC_{1:5}$ 与 EM_V , EM_H 和 $EM_V + EM_H$ 之间存在这较好的线性相关。其相关系数在 0.6087–0.68 之间,均达到 1% 的极显著水平。其中对研究区干、湿两季的 $EC_{1:5}$ 拟合效果最好的均是以 $EM_V + EM_H$ 为自变量的多元回归模型。因而本文所用的土壤电导率均是由该模型计算所得。

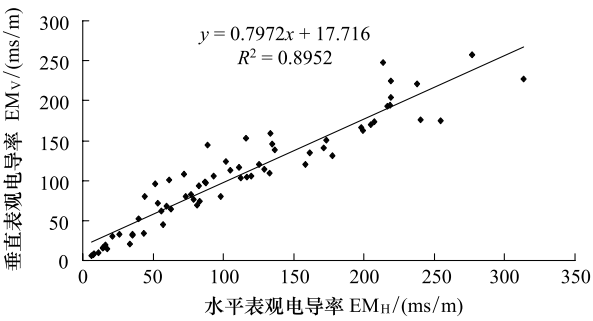


图 5 2011 年 4 月 EM_V 和 EM_H 的相关关系
Fig. 5 Relationship between electromagnetic apparent conductivity EM_V and EM_H in April, 2011

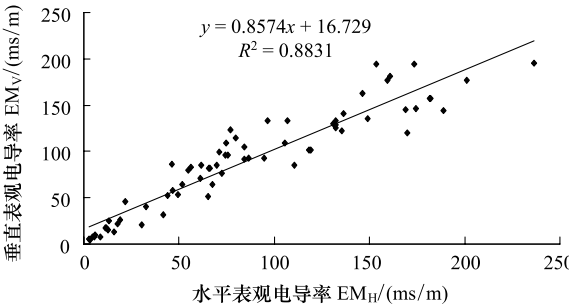


图 6 2011 年 9 月 EM_V 和 EM_H 的相关关系
Fig. 6 Relationship between electromagnetic apparent conductivity EM_V and EM_H in September, 2011

表 2 EC_{1:5} 与磁感式表观电导率 EM_V 和 EM_H 的回归季多元回归模型 (n=68)

Table 2 Regression and multiple regression model between EC_{1:5} and EM_V, EM_H (n=68)

表层土壤 (0—10cm) Top soil	EC _{1:5} = aEM _V + b			EC _{1:5} = AEM _H + B			EC _{1:5} = αEM _V + βEM _H + γ			
	a	b	R ²	A	B	R ²	α	β	γ	R ²
干季 Dry season	0.3312	-2.4076	0.6087 **	0.2898	0.6418	0.636 **	0.0547	0.2462	-0.3274	0.658 **
湿季 Wet season	0.3038	-3.6669	0.6409 **	0.284	-0.6059	0.6629 **	0.0964	0.2014	-2.2189	0.68 **

* * 为在 P<0.01 水平极显著

3.3 3 种评估研究区土壤盐分时空变异性方法的应用

3.3.1 泛克里格插值法应用分析

(1) 半方差函数分析

为研究塔里木北域绿洲干季和湿季土壤盐分的空间变异性,本研究使用 GS+7.0 软件对研究区利用 EM38 解译得出的土壤电导率的半方差函数进行计算。通过选取不同类型的模型:球状模型、指数模型、高斯模型来进行拟合,得到模型参数值。最佳拟合模型的评判标准为:平均标准差越接近均方根误差,平均误差和均方根误差越接近 0,均方根误差标准差越向 1 靠近,模型的拟合状况越好。经过比对,球状模型为拟合土壤表层电导率的最优模型,结果见表 3。最后用交叉验证的方法进一步修正模型参数,绘制半方差折线图(图 7—图 8)。

表 3 土壤表层电导率变异函数模型参数

Table 3 The theory of top soil electrical conductivity and corresponding parameters

季节 Season	理论模型 Theory model	块金值 C ₀	变程/(°) Range	基台值 C	块金值/基台值 C ₀ /(C ₀ +C)/%	决定系数 R ²
干季	Spherical	0.09	0.104	8.48	11.8	0.359
湿季	Spherical	0.31	0.104	6.842	4.33	0.398

* 变程 1°为纬度所表示的距离

如表 3 和图 7—图 8 所示,研究区干湿两季的土壤电导率的块金值分别为 0.09 和 0.31,基台值分别为 8.48 和 6.842,变程均为 0.104°。针对半方差函数进行分析时,一般认为块金值代表随机变异和最小

采样间距内的变异,而基台值代表变量空间变异的结构性方差,如表 3 所示,研究区干季和湿季的表层土壤电导率的块金值均为大于零的正数,因此可以认定,其内部存在着由采样误差、短距离变异、随机和固有变异引起的各种正基底效应^[27]。块金值和基台值之间的比值可以反映土壤性质空间的相关性程度。当比值小于 25%时,表现为强空间相关性;当比值在 25%—75%之间时则表现为中等空间相关性;当比值大于 75%时,则表现为弱空间相关性。研究区干季和湿季的块金值和基台值的比值分别为 11.8%和 4.33%,这充分表明研究区的土壤电导率的空间分布均表现出强相关性。

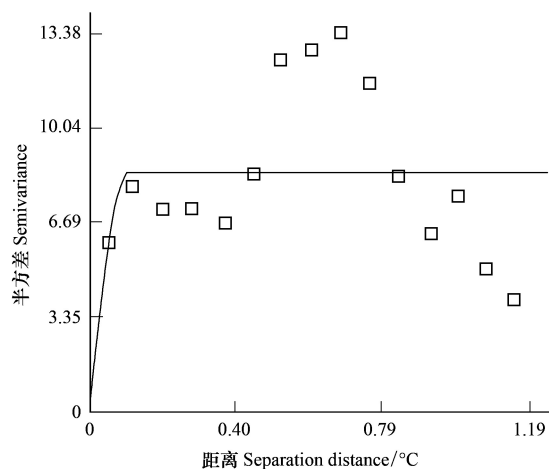


图7 2011年4月土壤电导率半方差函数图

Fig.7 The semi-variogram model of soil electrical conductivity in April, 2011

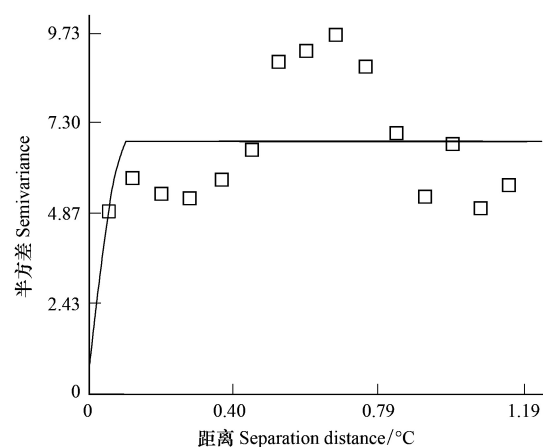


图8 2011年9月土壤电导率半方差函数图

Fig.8 The semi-variogram model of soil electrical conductivity in September, 2011

(2) 套合结构分析

由表3中的参数 R^2 以及图7—图8可以看出,对于0—10cm范围的表层土壤,可以选用球状模型来表示整个研究的空间尺度,但是,拟合的状况并不理想, R^2 值仅为0.359和0.398。该模型可能忽略了空间较小尺度的变异^[28],因而需要用更复杂的函数对其进行表达。当前研究地理属性在多个尺度的变异规律时,通常的做法是对两个或多个简单模型进行套合。因此,本研究针对表层土壤电导率的空间变异性分析采用球状套合结构模型(公式4),以单一的球状模型为基础,对不同时段土壤表观电导率的指示半方差进行分段最优拟合,发现均具有较好的拟合效果,得到的参数见表4。

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 & h = 0 \\ C_0 + C_1 \left\{ \frac{3h}{2a_1} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a_1} \right)^3 \right\} + C_2 \left\{ \frac{3h}{2a_2} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a_2} \right)^3 \right\} & 0 < h \leq a_1 \\ C_0 + C_1 + C_2 \left\{ \frac{3h}{2a_2} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a_2} \right)^3 \right\} & a_1 < h \leq a_2 \\ C_0 + C_1 + C_2 & h > a_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中, h 为滞后距, a_1 和 c_1 是短程变异的变程和基台值; a_2 和 c_2 是远程变异的变程和基台值, C_0 为块金值。

从表4可以看出,决定系数较之前有了显著提升,接近于1,残差与标准差接近于0, F 值足够大。因此可以得出结论:利用球状套合结构模型对表层土壤电导率的空间变异性模拟效果较为理想。另一方面,表层的土壤电导率的空间变异性是存在尺度上的依赖,因而不能忽略表层土壤电导率在较小空间尺度上的变异性。

表4 土壤表层电导率变异函数模型参数

Table 4 Semi-variogram parameters of top soil electrical conductivity and its validation

季节 Season	理论模型 Theory model	块金值 C_0	偏基台值 C	变程/(°) Range	基台值 C	块金值/ 基台值 $C_0/(C_0+C)/\%$	决定系数 R^2	残差 Residual error	标准差 Standard deviation	F
干季	Spherical I	0.09	3.88	0.061	8.48	11.8	0.913	0.721	0.173	384.252
	Spherical II	0.09	4.51	0.104						
湿季	Spherical I	0.31	2.611	0.058	6.842	4.33	0.901	0.757	0.231	317.972
	Spherical II	0.31	3.921	0.104						

* 变程1°为纬度所表示的距离

将采用以 EM_V 和 EM_H 为自变量的多元回归模型解译出的土壤表观电导率利用泛克里格法进行插值得到研究区的盐分时空分布图(图 9)。从图中可以看出研究区两个季节土壤盐分含量最高值均位于绿洲南部的交错带上,并且无论是在绿洲内部,还是在绿洲外围的荒漠交错带上,研究区干季的土壤盐分含量整体大于湿季。在空间尺度上的变化主要表现为:绿洲下游的土壤盐分含量大于绿洲上游地区,绿洲外围交错带上的土壤盐分含量大于绿洲内部,并且盐分梯度划分明显,土壤盐分从绿洲外围的荒漠到绿洲-荒漠交错带,再到绿洲内部呈现出由高到低的递减趋势。

从总体上看,利用泛克里格法生成盐分时空分布图,通过平滑盐分数据使得小值增高,大值降低,从而减少了土壤盐分含量的突然变化。但从局部上看,该方法对土壤盐分的空间变化的表达过于粗略,缺少更为细致和具体的描述。

3.3.2 光谱指数回归法和回归残差泛克里格法应用分析

利用从两期遥感图像中所提取的 5 种光谱指数(表 1),采用线性回归方法,分别建立单一光谱指数与 EM_{38} 解译出的电导率值的回归模型(表 5)。

表 5 光谱指数与磁感式表观电导率的多元回归模型

Table 5 Multiple regression model between spectral indices and electromagnetic apparent conductivity

光谱指数 Spectral indices	回归模型 Model	
	2011-04-15	2011-09-22
SI	$EC_{1:5} = 207.21SI - 22.44$	$EC_{1:5} = 173.56SI - 15.627$
NDSI	$EC_{1:5} = 153.25NDSI + 44.596$	$EC_{1:5} = 102.68NDSI + 48.045$
BI	$EC_{1:5} = 130.75BI - 19.136$	$EC_{1:5} = 95.004BI - 6.871$
NDVI	$EC_{1:5} = -153.25NDVI + 44.596$	$EC_{1:5} = -102.68NDVI + 48.045$
DVI	$EC_{1:5} = -175.12DVI + 52.493$	$EC_{1:5} = -127.48DVI + 69.798$

由于研究区采样点大部分处于绿洲-荒漠交错带,考虑到利用单一光谱指数所建立的电导率回归模型的模拟精度可能难以达到实际要求(表 1),因此,本研究尝试以 EM_{38} 解译出的电导率值为因变量,以多种光谱指数为自变量,通过不断的组合,以求建立最适合研究区且模拟精度最高的回归模型。经过不断的尝试发现:在干季,以 SI 和 NDVI 为自变量所建立的电导率回归模型的拟合精度高于单一光谱指数所建立的模型:

$$EC_{1:5} = 183.833SI - 84.222NDVI + 4.135 \quad (R^2 = 0.435, P < 0.01) \quad (5)$$

这是由于 4 月为渭-库绿洲的春早期,同时也是研究区的典型盐渍化干季,降水稀少,蒸发强烈,植被覆盖度较低,植被的反射光谱不够强烈,因此,SI 和 NDVI 相结合的反演精度高于其余光谱指数,故选取 SI 和 NDVI 指数所建立的电导率回归模型计算出研究区干季的土壤盐分分布图(图 9)。

在湿季,单一光谱指数 DVI 为自变量所建立的电导率模型的拟合精度高于多种光谱指数所建立的模型:

$$EC_{1:5} = -127.48DVI + 69.798 \quad (R^2 = 0.391, P < 0.01) \quad (6)$$

这是由于研究区地处南疆,纬度较低,秋季日照持续时间较长,温度高,因而该阶段研究区的植被覆盖度依然很高,植被的光谱反射与土壤相比表现的更为强烈,故选取 DVI 指数所建立的电导率回归模型计算出研究区湿季的土壤盐分分布图(图 9)。

利用光谱指数回归法对研究区干湿两季的土壤盐分的空间变异性进行研究的结果表明,研究区土壤盐渍化主要集中在绿洲北部和南部的的外围交错带上,其中干季土壤盐分含量最高值位于绿洲北部交错带,而湿季则位于南部交错带。和泛克里格插值法相比,利用不同光谱指数构建的指数回归模型所得到的盐分时空分布图,其最大的优点在于其直观性,通过其所具有的遥感影像的特点可以很容易对土壤盐分的时空变化进行更准确的描述,其表达更为详尽。

由图 9 可以看出,利用回归残差泛克里格法所形成的土壤盐分分布图,其分布趋势与光谱指数回归法形成的土壤盐分空间分布图相似。从总体来看,土壤盐分从绿洲外围到绿洲内部呈现出递减趋势。该方法将不

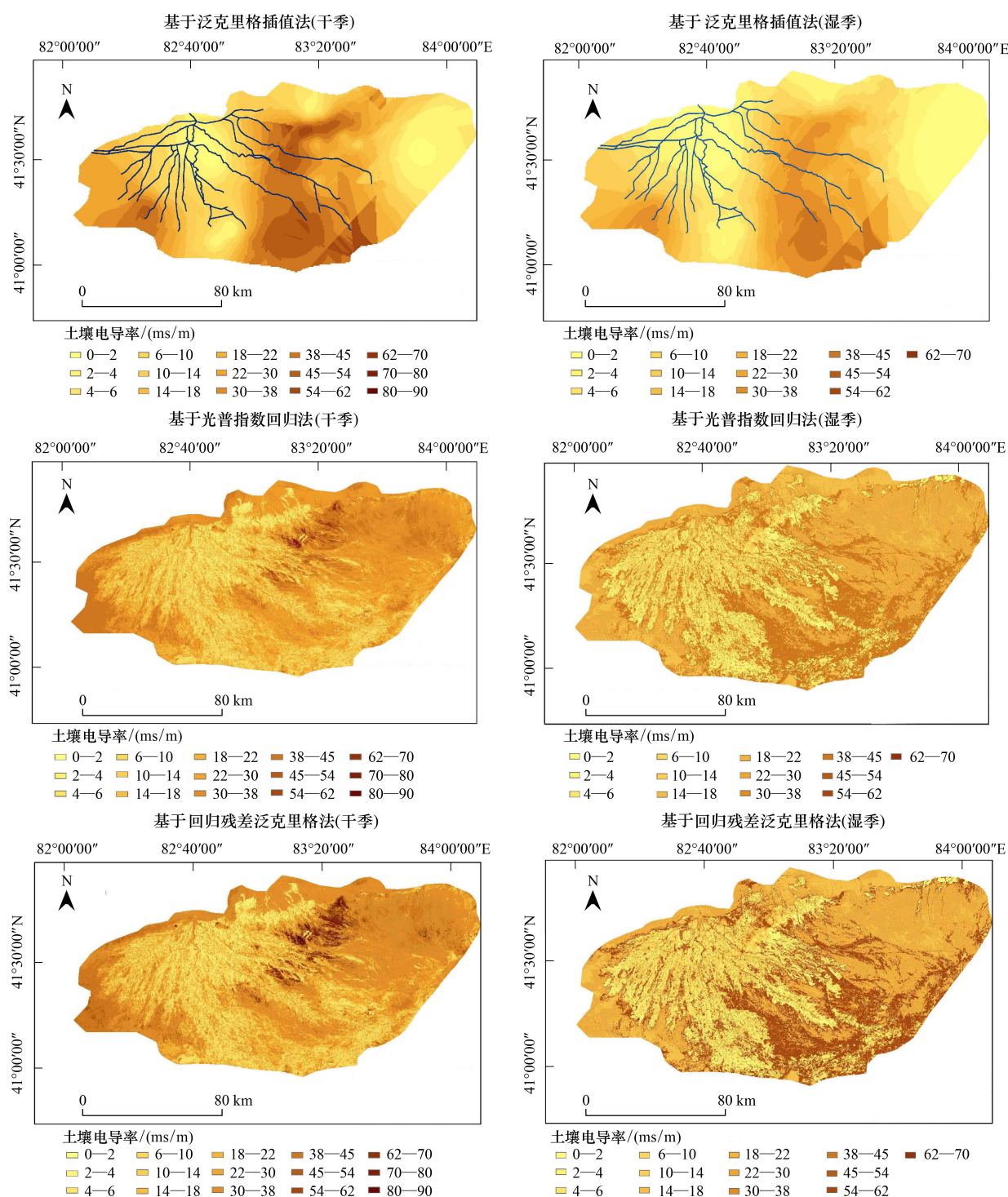


图9 各种空间预测方法下研究区干季和湿季土壤表层盐分的空间分布图

Fig.9 Spatial distribution patterns of apparent soil salinity across the study area during two critical seasons of dry and wet for Universal Kriging, Spectral Index Regression and Regression-Universal Kriging

同尺度的数据(遥感数据、EM38 采样数据、实地采样数据)进行了综合应用,除了对土壤盐分的空间变异具有更细致的描述,还兼具了泛克里格法的特点,使得土壤盐分含量在干湿两季的变化和分布趋势更为明显。

3.3.3 精度比较

采用均方根误差(RMSE)、平均标准误差(ASE)和平均误差(ME)进行检验发现(表6),与回归指数法和

泛克里格法相比,回归残差克里格法的 RMSE 在干湿两季的误差最小,ASE 与 RMSE 更为接近,且湿季的 ME 的绝对值更接近于 0。而在干季,光谱指数回归法与回归残差克里格法相比,其 ME 的绝对值更接近于 0,但考虑到二者之间的值较为接近,因而还是可以认定回归残差泛克里格法为最优方法。这也充分说明采用的光谱指数和电磁感应数据相结合,光谱指数的电导率残差和泛克里格法相结合应用于不同季节土壤盐分的空间变异性研究,其效果远高于采用传统的单一插值方法,预测精度能够得到较大提升。

表 6 RMSE、ASE 和 ME 验证结果

Table 6 The verification results for RMSE, ASE and ME

验证参数 Verification	RMSE(干季)	ASE(干季)	ME(干季)	RMSE(湿季)	ASE(湿季)	ME(湿季)
回归残差泛克里格法	0.423	0.43	-0.021	0.462	0.471	-0.014
光谱指数回归法	0.475	0.488	-0.019	0.576	0.591	-0.021
泛克里格法	0.518	0.532	-0.023	0.582	0.597	-0.017

3.3.4 研究区土壤盐分的时空变化及其生态过程

虽然泛克里格法、光谱指数回归法和回归残差泛克里格法的表达效果有一定差异,但总体趋势较为一致,均为:干季的土壤含盐量大于湿季,绿洲外围交错带上的土壤含盐量大于绿洲内部,且盐渍地主要分布在渭干河和库车河流域的下游,塔里木河以北,以及绿洲的西南、南、东和东南部地区,这与研究区实际情况相一致。

研究区土壤盐分分布格局的形成是多种因素共同作用的结果:首先,研究区的地形为北高南低,当上游地区进行灌溉时,大量盐分随河流运移至中下游地势较低处聚集,因而呈现出流域的下游地区盐分积聚量大,土壤盐分含量高,这是导致绿洲外围的土壤盐分值大于绿洲内部的最直接因素;

其次,研究区降水的时空分配不均匀,且研究区的土壤质地主要以砂土和粉砂土为主,其土壤孔隙度小,透水释水性差,蓄水能力低。在降水量少且蒸发强烈的干季,深层土壤及地下水中的可溶性盐类通过毛细管上升到地表,水分蒸发后大量盐分便在土壤表层积聚。而在降水较为集中的湿季,土壤表层的盐分又被雨水淋洗,使土壤表层脱盐,这也是研究区盐分格局形成的重要因素。最后,该绿洲地区的经济主要以农业为主,灌溉方式为大水漫灌,由于盐渍化程度比较严重,该地区每年都要耗费大量的水用于洗盐,并沿渭干河、库车河和英达里亚河沿岸修筑大量排碱渠,盐分随水进入排碱渠,由排碱渠带入下游地区,最终导致了该区域土壤盐分分布格局的形成。

4 结论

(1)对研究区的实测土壤浸提液电导率 $EC_{1:5}$ 和实测土壤表层含盐量进行相关性分析,发现二者之间呈现极显著的相关性,因而采用浸提液电导率 $EC_{1:5}$ 代替全盐含量作为干旱区流域的土壤盐渍化的指标的方法是可行的。

(2)电磁感应仪(EM38)所测各季节土壤表观电导率与 $EC_{1:5}$ 的相关系数均达到 1% 显著水平,以表观电导率垂直读数(EM_V)和水平读数(EM_H)为自变量的多元回归模型拟合效果较好,这说明在研究区采用电磁感应技术是测量土壤盐分的一种快速、便捷、准确的方法。

(3)通过研究分析表明,研究区土壤电导率空间分布的相关性较强。块金值和基台值之间的比值分别为干季 11.8%,湿季 4.33%,说明研究区土壤采样点间的内部结构性良好。

(4)研究区表层 0—10cm 土壤电导率变异函数的最优模型为球状套合模型,其拟合效果较好,决定系数 R^2 分别为 0.913 和 0.901,标准差和残差均接近于 0。由此可以看出,针对土壤电导率的空间变异性进行分析时,应充分考虑它的尺度依赖性,不能忽略小尺度上的空间变异。

(5)通过运用泛克里格法、光谱指数回归法和回归残差泛克里格法对研究区干季和湿季的土壤盐分的空间变异性进行分析,结果表明,虽然 3 种方法的表达效果有一定差异,但总体趋势较为一致,均为:干季的土壤含盐量大于湿季,绿洲外围交错带上的土壤含盐量大于绿洲内部,且盐渍地主要分布在渭干河和库车河流域的下游,塔里木河以北,以及绿洲的西南、南、东和东南部地区,这与研究区实际情况相一致。

(6)通过精度比较,在本文所采用的3种研究方法中,基于遥感和电磁感应技术的回归残差泛克里格法的精度最高,将该方法与地统计学和经典统计学方法相结合,可以提高研究区土壤盐分空间变异性的预测精度。

References:

- [1] Zhang F, Tashpolat · Titip, Ding J L, Wang B C, Wang F, Mamat · Sawut. The change of land use/cover and characteristics of landscape pattern in arid areas oasis a case study of Jinghe Country, Xinjiang Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1251-1263.
- [2] Gao T T, Ding J L, Ha X P, Zhang F, Wang F. The spatial variability of salt content based on river basin scale a case study of the delta oasis in Werigan-Kuqa watershed. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10): 2695-2705.
- [3] Rao B R M, Ravisankar T, Dwivedi R S. Spectral behavior of salt-affected soils. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(12): 2125-2136.
- [4] Peng W L, An experiment of remote sensing and GIS based on quantity of soil salinity. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(3): 237-243.
- [5] Farifeth J, Farshad A, George R J, Assessing salt-affected soils using remote sensing, solute modeling and geophysics. *Geoderma*, 2006, 130(3/4): 191-206.
- [6] Jiang H N, Ding J L, Tashpolat · Titip, Zhao R, Zhang F. Extraction of salinized soil information in arid area based on ETM+ data. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(2): 222-228.
- [7] Wu Y K, Yang J S, Liu G M. Spatial variability of soil salinity using data from remote sensing and electromagnetic induction instruments. *Transactions of the CASE*, 2009, 25(7): 148-152.
- [8] Zhang T J, Yang J S, Liu G M, Yao R J. Interpretation of salinity characteristics of normal profile in estuarine region by using electromagnetic induction. *Transactions of the CASE*, 2009, 25(11): 109-113.
- [9] Liu G M, Yang J S, Ju M S, Nie J. Technology of chorometry using electromagnetic induction and its Application in agriculture. *Soils*, 2003, (3): 27-29.
- [10] Corwin D L, Lesch S M. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity: I. Survey protocols. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 46(1/3): 103-133.
- [11] Corwin D L, Lesch S M. Apparent Soil Electrical Conductivity Measurements in Agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 46(1/3): 11-43.
- [12] Triantafilis J, Lesch S M. Mapping clay content variation using electromagnetic induction techniques. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 46(1/3): 203-237.
- [13] Ye J Y, Li H Y, Cheng J L, Shi Z. Application and predominance of EM38 equipment in measuring electrical conductivity its of coastal saline soil. *Acta Agriculturae Zhengjiangensis*, 2008, 20(6): 467-470.
- [14] Yang J S, Yao R J, Liu G M. Analysis evaluation on spatial variability of soil salinity by indicator kriging with an electromagnetic induction gauge. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(4): 585-593.
- [15] Yao R J, Yang J S. Spatio-temporal variability of soil salinity in the Yellow River Delta using electromagnetic induction. *Transactions of the CASE*, 2008, 24(3): 107-113.
- [16] Li H Y, Shi Z, Cheng J L, Li Y. Inversion of soil conductivity profiles based on EM38 apparent electrical Conductivity. *Scientia Agricultura sinica*, 2008, 41(1): 295-302.
- [17] Wu Y K, Yang J S, Li X M. Study on spatial variability of soil salinity based on spectral indices and EM38 readings. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(4): 1023-1027.
- [18] Li H Y, Shi Z, Tang H L. Research on three-dimension spatial variability of soil electrical conductivity of coastal saline land using 3D ordinary kriging method. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(2): 359-363.
- [19] Li X M, Yang J S, Liu M X, Liu G M, Yao R J. Spatial heterogeneity of soil salinity in typical arid base on electromagnetic induction. *Transactions of the CASE*, 2010, 26(12): 97-101.
- [20] Ye J Y, Li H Y, Cheng J L, Shi Z. Application and predominance of EM38 equipment in measuring electrical conductivity of coastal saline soil. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2008, 20(6): 467-470.
- [21] Lu R K. Analysis Methods of Soil and Agricultural Chemistry. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999: 59-65.
- [22] Khan N M, Rastokuev V, Sato Y. Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators. *Agricultural Water Management*, 2005, 77: 96-109.
- [23] Inakwu O A, Odeh · Alex O. Spatial Analysis of Soil Salinity and Soil Structural Stability in a Semiarid Region of New South Wales, Australia.

Environmental Management, 2008, 42: 265-278.

- [24] Akkurtal A, Turudu O, Erbek F S. Analysis of changes in vegetation biomass using multisensor satellite data. Proceedings of the ISPRS Congress-Youth Forum, 2004: 181-185.
- [25] Yang J S, Yao R J. Comparison of interpolation approaches based on spatial variability of apparent soil electrical conductivity with an electromagnetic induction. Transactions of the CASE, 2007, 23(9): 50-57.
- [26] Wu Y K, Yang J S, Yang X Y, Liu G M. Surveying soil salinization in Fengqiu Country based on EM38. Agricultural Research in Arid Areas, 2008, 26(5): 129-133.
- [27] Yao R J, Yang J S, Jiang L, Chen D M. Profile characteristics and spatial distribution of soil salinity based on hierarchical cluster analysis. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45 (1): 56-65.
- [28] Yao R J, Yang J S, Zou P, Liu G M, Yu S P. Quantitative evaluation of the field soil salinity And its spatial distribution based on electromagnetic induction instruments. Scientia Agricultura sinica, 2008, 41 (2): 460-469.

参考文献:

- [1] 张飞, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 王伯超, 王飞, 买买提·沙吾提. 干旱区绿洲土地利用/覆被及景观格局变化特征——以新疆精河县为例. 生态学报, 2009, 29(3): 1251-1263.
- [2] 高婷婷, 丁建丽, 哈学萍, 张飞, 王飞. 基于流域尺度的土壤盐分空间变异特征——以渭干河-库车河流域三角洲为例. 生态学报, 2010, 30(10): 2695-2705.
- [4] 彭望禄. 土壤盐渍化量化的遥感与 GIS 实验. 遥感学报, 1997, 1(3): 237-243.
- [6] 江红男, 丁建丽, 塔西甫拉提·特依拜, 赵睿, 张飞. 基于 ETM+数据的干旱区盐渍化土壤信息提取研究. 土壤学报, 2008, 45(2): 222-228.
- [7] 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. 农业工程学报, 2009, 25(7): 148-152.
- [8] 张同娟, 杨劲松, 刘广明, 姚荣江. 基于电磁感应仪的河口地区底聚型盐分剖面特征的解译. 农业工程学报, 2009, 25(11): 109-113.
- [9] 刘广明, 杨劲松, 鞠茂森, 聂杰. 电磁感应土地测量技术及其在农业领域的应用. 土壤, 2003, (3): 27-29.
- [13] 叶基瑶, 李洪义, 程街亮, 史舟. EM38 大地电导率测量仪在滨海盐土电导率测量中的应用及其优势. 浙江农业学报, 2008, 20(6): 467-470.
- [14] 杨劲松, 姚荣江, 刘广明. 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. 土壤学报, 2008, 45(4): 585-593.
- [15] 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. 农业工程学报, 2008, 24(3): 107-113.
- [16] 李洪义, 史舟, 程街亮, 李艳. 基于 EM38 的土壤剖面电导率预测研究. 中国农业科学, 2008, 41(1): 295-302.
- [17] 吴亚坤, 杨劲松, 李晓明. 基于光谱指数与 EM38 的土壤盐分空间变异性研究. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(4): 1023-1027.
- [18] 李洪义, 史舟, 唐惠丽. 基于三维普通克立格方法的滨海盐土电导率三维空间变异研究. 土壤学报, 2010, 47(2): 359-363.
- [19] 李晓明, 杨劲松, 刘梅先, 刘广明, 姚荣江. 基于电磁感应的典型干旱区土壤盐分空间异质性. 农业工程学报, 2010, 26(12): 97-101.
- [20] 叶基瑶, 李洪义, 程街亮, 史周. EM38 大地电导率测量仪在滨海盐土电导率测量中的应用及其优势. 浙江农业学报, 2008, 20(6): 467-470.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 59-65.
- [25] 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. 农业工程学报, 2007, 23(9): 50-57.
- [26] 吴亚坤, 杨劲松, 杨晓英, 刘广明. 基于 EM38 的封丘县土壤盐渍化调查研究. 干旱地区农业研究, 2008, 26(5): 129-133.
- [27] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙, 陈德明. 基于聚类分析的土壤盐渍剖面特征及其空间分布研究. 土壤学报, 2008, 45(1): 56-65.
- [28] 姚荣江, 杨劲松, 邹平, 刘明, 余世鹏. 基于电磁感应仪的田间土壤盐渍度及其空间分布定量评估. 中国农业科学, 2008, 41(2): 460-469.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 17 Sep. ,2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The overview and prospect of chemical composition of plant cuticular wax ZENG Qiong, LIU Dechun, LIU Yong (5133)
- Research progresses in carbon budget and carbon cycle of the coastal salt marshes in China
..... CAO Lei, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (5141)

Autecology & Fundamentals

- Effects of straw interlayer on soil water and salt movement and sunflower photosynthetic characteristics in saline-alkali soils
..... ZHAO Yonggan, PANG Huancheng, LI Yuyi, et al (5153)
- Adaptations of dimorphic seeds and seedlings of *Suaeda salsa* to saline environments
..... LIU Yan, ZHOU Jiachao, ZHANG Xiaodong, et al (5162)
- Responses of root morphology of peanut varieties differing in drought tolerance to water-deficient stress
..... DING Hong, ZHANG Zhimeng, DAI Liangxiang, et al (5169)
- The relationship between physiological indexes of apple cultivars and resistance to *Eriosoma lanigerum* in summer
..... WANG Xicun, ZHOU Hongxu, YU Yi, et al (5177)
- Physiological responses of *Salicornia bigelovii* to salt stress during the flowering stage
..... LIU Weicheng, ZHENG Chunfang, CHEN Chen, et al (5184)
- Biological characteristics and cultivation of fruit body of wild medicinal mushroom *Perenniporia fraxinea*
..... LU Tie, BAU Tolgor (5194)
- The study of characteristics of soil microbial communities at high severity burned forest sites for the Great Xingan Mountains: an
example of slope and aspect BAI Aiqin, FU Bojie, QU Laiye, et al (5201)
- Effect of different fertilizer combinations and straw return on microbial biomass and nitrogen-fixing bacteria community in a paddy
soil LIU Xiaoqian, TU Shihua, SUN Xifa, et al (5210)
- Structural characters and nutrient contents of leaves as well as nitrogen distribution among different organs of big-headed wheat
..... WANG Lifang, WANG Dexuan, SHANGGUAN Zhouping (5219)
- Effects of EP-1 on spatial memory and anxiety in *Mus musculus* WANG Xiaojia, QIN Tingting, HU Xia, et al (5228)

Population, Community and Ecosystem

- Gap characteristics in the mixed broad-leaved Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains
..... LIU Shaochong, WANG Jinghua, DUAN Wenbiao, et al (5234)
- Soil nitrogen and phosphorus stoichiometry in a degradation series of *Kobresia humulis* meadows in the Tibetan Plateau
..... LIN Li, LI Yikang, ZHANG Fawei, DU Yangong, et al (5245)
- An analysis of carbon flux partition differences of a mid-subtropical planted coniferous forest in southeastern China
..... HUANG Kun, WANG Shaoqiang, WANG Huimin, et al (5252)
- The niche of annual mixed-seeding meadow in response to density in alpine region of the Qilian Mountain, China
..... ZHAO Chengzhang, ZHANG Jing, SHENG Yaping (5266)
- Functional feeding groups of macrozoobenthos from coastal water off Rushan PENG Songyao, LI Xinzhen (5274)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Effects of selective cutting on vegetation carbon storage of boreal *Larix gmelinii*-*Carex schmidtii* forested wetlands in Daxing'anling,
China MU Changcheng, LU Huicui, BAO Xu, et al (5286)
- CO₂ flux in the upland field with corn-rape seed rotation in the karst area of southwest China
..... FANG Bin, LI Xinqing, CHENG Jianzhong, et al (5299)
- Monitoring spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the North Tarim Basin using remote sensing and electromagn-
etic induction instruments YAO Yuan, DING Jianli, LEI Lei, et al (5308)
- Methane and nitrous oxide fluxes in temperate secondary forest and larch plantation in Northeastern China
..... SUN Hailong, ZHANG Yandong, WU Shiyi (5320)
- Butterfly diversity and vertical distribution in eastern Tianshan Mountain in Xinjiang
..... ZHANG Xin, HU Hongying, LÜ Zhaozhi (5329)

- Dynamics of aerodynamic parameters over a rainfed maize agroecosystem and their relationships with controlling factors CAI Fu, ZHOU Guangsheng, MING Huiqing, et al (5339)
- The response process to extreme climate events of the household compound system in the northern slope of Tianshan Mountain LI Xiliang, HOU Xiangyang, DING Yong, et al (5353)
- Analysis on spatial-temporal heterogeneities of landscape fragmentation in urban fringe area; a case study in Shunyi district of Beijing LI Can, ZHANG Fengrong, ZHU Taifeng, et al (5363)
- Resource and Industrial Ecology**
- CPUE Standardization of *Illex argentinus* for Chinese Mainland squid-jigging fishery based on generalized linear Bayesian models LU Huajie, CHEN Xinjun, CAO Jie (5375)
- Spatial-temporal differentiation of water quality in Gufu River of Three Gorges Reservoir RAN Guihua, GE Jiwen, MIAO Wenjie, et al (5385)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- Comparison environmental impact of the peasant household in han, zang and hui nationality region; case of zhangye, Gannan and Linxia in Gansu Province ZHAO Xueyan, MAO Xiaowen (5397)
- Research Notes**
- The seasonal variation and community structure of zooplankton in China sea DU Mingmin, LIU Zhensheng, WANG Chunsheng, et al (5407)
- Immunotoxicity of marine pollutants on the clam *Ruditapes philippinarum* DING Jianfeng, YAN Xiwu, ZHAO Liqiang, et al (5419)
- Influence of submerged macrophytes on phosphorus transference between sediment and overlying water in decomposition period WANG Lizhi, WANG Guoxiang (5426)
- Distribution patterns of alien herbs in the Yiluo River basin GUO Yili, DING Shengyan, SU Si, et al (5438)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 张利权

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

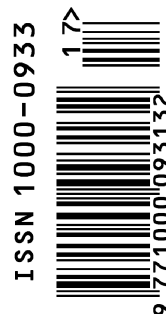
第 33 卷 第 17 期 (2013 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 17 (September, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元