DOI: 10.5846/stxb201503150498

邓凯,丁建丽,杨爱霞,王瑾杰.基于电磁感应技术的土壤剖面盐分空间分布建模研究.生态学报,2016,36(20): - . Deng K, Ding J L, Yang A X, Wang J J.Modeling of the spatial distribution of soil profile salinity based on the electromagnetic induction technique.Acta Ecologica Sinica,2016,36(20): - .

基于电磁感应技术的土壤剖面盐分空间分布建模研究

邓 凯,丁建丽*,杨爱霞,王瑾杰

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:土壤盐渍化问题是干旱半干旱地区农业发展的主要障碍,也是制约荒漠植物生长状况的关键因素之一,严重影响到绿洲 生态环境的稳定与安全。研究土壤剖面盐分的分布情况,能及时探究盐渍化对生态的影响。以渭干河-库车河三角洲绿洲为研 究靶区,利用电磁感应仪技术与传统采样方法获取该地区典型地块的土壤电导率,剖析其剖面分布特征,在建立磁感式表观电 导率和土壤样本实测电导率之间的线性混合模型的基础上,采用自然邻近插值方法解析和评估研究区土壤剖面盐分的空间分 布特征。结果表明:研究区土壤电导率具有较强的表聚性与空间变异强度,土壤主体属于中度盐渍化类型;基于各深度层土壤 电导率与磁感表观电导率所构建的3种线性混合模型均能达到0.01的显著性水平,其中磁感表观电导率两种模式相结合解译 模型预测精度最高;自然邻近法插值结果直观反映研究区土壤剖面盐分的空间分布状况,与水平模式和垂直模式相结合的土壤 盐分解译模型相结合则能够更有效的提高土壤盐分空间分布的预测精度。研究结果表明,借助构建的土壤盐分解译模型可对 研究区土壤盐渍化空间分布情况进行快速监测与评估,为该区土壤盐渍化的防治提供了一定的技术支撑。 关键词:电磁感应技术;土壤剖面盐分;空间分布;渭干河-库车河三角洲绿洲

Modeling of the spatial distribution of soil profile salinity based on the electromagnetic induction technique

DENG Kai, DING Jianli*, YANG Aixia, WANG Jinjie

College of Resources and Environment Sciences, Key Laboratory of Oasis Ecology of Ministry Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

Abstract: Soil salinization is the main obstacle to agricultural development in arid and semi-arid regions. It is also one of the key limitations on the growth of eremophytes, which seriously affect the stability and safety of the ecological environment in oases. Oases are unique among desert ecosystems because of the availability of generally sufficient water resources that can sustain a wider range of human activities. Over time, oases often become highly developed locales in arid and semi-arid regions, with concentrated human populations and activities. With the development of oasis irrigation agriculture, soil salinization and soil secondary salinization caused by irrigation has gradually become the largest obstacle for sustainable oasis agricultural development. Study of the distribution of soil salt content in soil profiles can determine the influence of salinization on oasis ecology and environment. In this study, using the Weigan-Kuqa Delta Oasis as the research area, the soil electrical conductivities of typical plots in the region were obtained using an electromagnetic induction technique and a traditional soil sampling method. A linear mixed model between magnetic inductive apparent conductivity and the observed conductivities of the soil samples indicates that the apparent electricity conductivity is a good surrogate for soil salinity. We therefore used the apparent soil electricity conductivity to examine the spatial distribution of soil salt content at different

基金项目:新疆维吾尔自治区青年科技创新人才培养工程(2013711014);国家自然科学基金项目(U1303381,41261090,41130531,41161063); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-1075);霍英东青年教师基金项目(121018);教育部长江学者计划创新团队计划(IRT1180);新疆 维吾尔自治区研究生科研创新项目(XJCRI2013023)

收稿日期:2015-03-15; 网络出版日期:2015-00-00

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

depths in the soil profile because obtaining such data is often much more cost-effective. We employed a natural neighbor interpolation approach at various depths to analyze and evaluate the spatial distribution features of the soil profile salinity. The results showed that the soil in the research area has strong surface aggregation and spatial variation, and that the soil body is moderately salinized. Soil salinization is clearly higher in the desert areas and interlaced border areas than within the oasis. Soil salt content showed a decreasing trend from the desert areas and interlaced border areas to the internal oasis. The three linear mixed models, built based on soil electrical conductivities and magnetic inductive apparent conductivities of the soils at each depth, all reached the 0.01 significance level. Both the vertical and horizontal apparent electrical conductivities were significantly related to the spatial distribution of soil salt content in soil profiles. Further exploration indicates that the horizontal apparent electrical conductivity best measures the surface soil salinization, while the vertical apparent electricity conductivity best measures the deep soil salt content. Additionally, combining both the horizontal and vertical apparent electricity conductivities produces more efficient interpretation of soil salinization and better spatial interpolation results than either method alone. The result of the natural neighbor interpolation visually reflects the spatial distribution status of the soil profile salinity in the research area. The interpretation models of soil salinity obtained by combining horizontal and vertical modes can effectively increase the prediction accuracy of the spatial distribution of soil profile salinity. Through intensive field work and soil sampling practices, coupled with a local spatial interpolation approach (the natural neighbors), this study investigates the feasibility of applying electromagnetic induction devices to evaluating, monitoring, and predicting soil salinization at various soil depths in the Werigan-Kuqa Delta Oasis. Our results show that the spatial distribution of soil salinization significantly contributes to efficient local soil salinization management and possible treatment, and thus can provide technical support for preventing and controlling soil salinization in this region.

Key Words: electromagnetic induction technique; soil profile salinization; spatial distribution; Werigan-Kuqa Delta Oasis

绿洲是干旱气候特有的产物,作为干旱和半干旱区独有的一种生态单元,维系着干旱地区人类的生存、活动与发展,其能流、物流高度集中,承载了干旱区的精华^[1]。绿洲灌溉农业是干旱区最主要的生产活动和经济主体,而土地是绿洲灌溉农业发展的重要载体。随着绿洲灌溉农业的发展,绿洲土壤的盐渍化和灌溉引起的土壤次生盐渍化已成为影响干旱区农业可持续发展的主要障碍^[2]。此外,土壤盐分也是引起干旱区植物群落多样性变化的关键因子之一,对干旱区绿洲生态环境的稳定与安全产生重要影响^[3-4]。因此,测定绿洲土壤盐分含量,掌握农田和自然植被区盐渍化程度,并对其盐渍化发展过程进行动态追踪,是治理盐渍土土壤和防止土壤进一步退化的必要前提和关键环节^[5],对于促进绿洲农业生产、保障绿洲生态安全、实现区域可持续发展具有重要的现实意义。

用传统采样分析法确定土壤盐分含量及盐分的剖面分布状况时,取样方法和取样数量常受到人力、物力 等因素的限制,一般无法实现大面积实时动态监测,所采样品的体积、采样个数均很难达到足以反映区域空间 变异所需要的样本数量,不能有效反映区域土壤盐渍化完整信息,严重制约了盐渍土的改良与高效利用^[6]。 电磁感应表观土壤电导率快速测定技术是当今国际最为先进的土壤性质评估技术之一,在土壤理化性质测定 方面已经被广泛应用^[7],主要集中在土壤水分确定^[8]、土壤有机质含量评估^[9]、基于土壤质量分析的农作物 生产潜力评价^[10]、土壤质地评定^[11-12]、浅地下水位分布区地下水矿化度快速测评^[13]、土壤电导率测定及其影 响因素^[14-19]和土壤盐分空间变异^[20-23]等方面。电磁感应表观土壤电导率快速测定方法由于无需电极插入、 测量速度快,克服了目前传统采样方法费时费力费用高的缺点,是当前最为精确高效的剖面土壤信息采集方 法之一^[7,22]。同时,电磁感应仪能在地表测量土壤表观电导率,适用于大面积土壤盐渍化的测量,可为盐渍化 的精准监测评定提供足量的数据。因此,可将电磁感应技术和传统采样技术相结合,实现对土壤盐渍化的有 效监测和预测,为盐渍土的治理和科学规划提供必要的辅助信息。

本文以渭干河-库车河三角洲绿洲为研究靶区,应用磁感式表观土壤电导率快速测评技术进行探测,获得

与土壤剖面盐分密切相关的表观土壤电导率,构建适于研究区应用的分层土壤盐分解译模型,并利用插值技术解析和评价该区土壤盐分的空间分布状况。该研究不仅能为渭干河-库车河三角洲绿洲盐渍化土壤的精准 估算以及合理的改良与有效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 要的现实意义。

1 研究区概况

渭干河-库车河流域位于新疆维吾尔自治区塔里木盆地北缘,地处天山中段南麓,范围包括库车、沙雅和 新和3个县,土地总面积为523.76×10⁴ hm²,其中大部分是沙漠和戈壁,绿洲面积仅有56.096×10⁴ hm²,占总面 积的10.7%,绿洲内部土地利用方式以农田和防护林为主。本研究区北高南低、西高东低,为山前冲洪积倾斜 平原,受大陆性干旱气候影响,气温日差较大,年平均气温为10.5—14.4℃,极端最高气温为40.1—41.5℃, 研究区年蒸发量约为1992—2863.4 mm,而年降水量则为46.4—64.5 mm,年内蒸发量远高于降水量,土壤类 型以潮土、草甸土、沼泽土、盐土和棕钙土为主。流域内自然植被多为稀盐、泌盐和据盐植物,如柽柳(*Tamarix ramosissima*)、盐穗木(*Halostachys caspica*)、盐节木(*Halocnemum strobliaceum*)、花花柴(*Karelinia caspia*)、骆驼 刺(*Alhgi sparsifolia*)和白刺(*Nitraria sibirica*)等,主要分布在绿洲外围轻、中度盐渍化区域。农作物以小麦、 棉花、玉米等喜温作物为主。研究区灌溉水来源主要是渭干河和库车河,此外还有少量的水来自塔里木河、泉 水。由于地下水位较高,在绿洲灌区埋深一般小于3m,加之土地下层构成物颗粒细,透水性差,造成该区土 壤盐渍化现象比较普遍,在古河道、河漫滩、泉水溢出带等地下水浅埋区,分布着大面积的盐渍化土和盐土。 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,已威胁到当地的农业生产和 绿洲生态安全,绿洲可持续发展面临困境。根据实地土壤采样区域,确定的研究区边界大体位于 82°10′—83° 50′E和41°06′—41°40′N之间,这一区域主要为砂质土壤类型,土壤构成物颗粒细,透水性较差,土壤盐渍化 现象较为普遍,土地退化现象严重,具有典型性。

2 实验材料与数据采集

2.1 EM38-MK2 数据的采集

在综合考虑研究区土壤质地、盐分分布状况和植被 类型以及土地利用方式等因素的基础上,从研究区范围 所布置的采样点中选取具有代表性的测量单元40个 (图1),随机分布于绿洲内部的农田区(共计18个测量 单元)和绿洲外围的荒漠地带(共计22个测量单元), 各测量单元土壤类型均为砂质土,土壤质地较为一致。 采样时间为2014年7月,此时段0—100 cm 深度的土 壤实测平均含水量约为6.8%—32.5%,区间变异较大。 本研究应用电磁感应式大地电导率仪 EM38 进行表观 土壤电导率测定。该仪器基于电磁感应原理,通过测量 原生磁场和次生磁场之间的相对大小关系来测定表观 土壤电导率^[8],EM38-MK2 大地电导率仪包含一个发射 线圈和两个接收线圈,两个接收线圈与发射线圈分别相 距 0.5 m 和 1.0 m,根据研究需要采用 1.0 m 线圈模式,







在此基础上,水平模式和垂直模式相应感应土壤深度分别 0—0.75 m 和 0—1.5 m。通过 EM38-MK2 对每个点进行 2 种测定位下表观土壤电导率的测定,测定位分别为 1.0 m 水平位和 1.0 m 垂直位,获得的表观土壤电导率相应分别表示为 EC_{ab}和 EC_{av}。本研究对每个测量单元面积设定为 30 m×30 m,为保证测量单元的电导率

2.2 土壤电导率数据的获取

由于研究区是典型的极端干旱区,蒸发与降水比率约为40:1,地下水矿化度较高,在蒸发作用和偏高的 地下水水位的影响下,地下水和深层土壤中的易溶性盐分极易通过土壤毛细管上升移动到土壤表层进行积 聚,严重区域甚至会形成较厚的盐壳。基于此,对研究区范围内的主要土地利用类型进行土壤剖面采样,所选 样点尽可能规则地遍及所有荒地类型。在每个 EM38-MK2 大地电导率仪测量单元,尽量保证采样点周围土 壤性质、成因相对一致,环境因子类似,土壤异质性较小。土壤剖面样品的采集时间为 2014 年的 7 月。采样 的具体方法和步骤为:每一个测量单元范围内布置梅花状分布的 5 个采样点,每样点用剖面法采集土样,按 0—10、0—20、0—40、0—60、0—80 和 0—100 cm 进行剖面分层采样。将采集的各层剖面土壤样本按编号分别 装袋,带回实验室自然风干。风干后的样品经过磨碎,过 0.5 mm 孔径的筛子,在 25 ℃制备标准温度下,按照 土水比 1:5 的比例提取浸提液,测定土壤电导率 EC_{1.5}和土壤水溶性含盐量(土壤可溶盐),测定方法参照《土 壤农业化学分析方法》^[24]。最后,获得有效样本数据共 213 个,其中 0—10、0—20、0—40、0—60、0—80 和 0— 100 cm 各层剖面的有效样本数据个数分别为 40、39、39、38、29 和 28。

2.3 线性混合模型和空间插值方法

目前,此研究领域国内外常用的建模方法是线性混合模型(Linear Mixed Models)^[25-26]。该模型仅保留了 传统线性模型中对因变量必须来自正态分布总体的假定条件,而对其他条件则不作要求,从而扩大了传统线 性模型的适用范围。线性混合模型的一般结构为:

$Y = X\beta + Zu + \varepsilon$

式中,*Y* 表示反应变量的测量值向量,*X* 为固定效应自变量的设计矩阵, β 是与 *X* 对应的固定效应参数向量,*Z* 为随机效应变量构造的设计矩阵,其构造方式与 *X* 相同,*u* 为随机效应参数向量,*c* 为剩余误差向量。该模型的详细介绍详见参考文献^[27]。

在利用线性混合模型对土壤盐分进行预测的基础上,选取合适的插值方法实现土壤盐分的空间可视化及 空间解析是实施对区域盐渍化监控的一种必要的辅助手段。本文利用 Surfer 软件插值工具中的自然邻近插 值方法(Natural Neighbor Interpolation Method),对区域土壤表观电导率和实测浸提液电导率及其预测值进行 空间分布估算和解析,并定量评价其在研究区土壤盐渍化空间分布监测中的适用性。本文我们主要采用交叉 验证方法,如平均误差(Mean Error, ME)、均方差(Mean Squared Error, MSE)、相对均方差(Relative Mean-Square Error, RMSE)和均方根预测误差(Root-Mean-Squared Prediction Error, PMSPE)对插值效果进行定量 评估^[28]。

3 结果与分析

3.1 EM38-MK2 数据的空间分布及盐渍剖面类型判别

图 2 是 EM38-MK2 大地电导率仪在水平和垂直模式下分别测得的 40 个土壤样点表观电导率利用自然邻 近方法插值后的空间分布状况,交叉验证结果表明,水平和垂直模式下表观电导率的平均误差分别为 1.204 mS/m 和 5.017 mS/m,相对误差均在 5%以内,而均方根预测误差分别为 0.975 和 0.978,均接近 1,说明插值效 果良好。由图 2 可以看出,随着土壤深度增加,电导率是趋于减小的;两种模式下,电导率高值区均出现在绿 洲外围,尤其是绿洲东南区域的绿洲-荒漠交错带;同时,表观电导率具有明显的条带状分布规律,这与研究区 土壤盐分分布现状是一致的^[23]。相关分析表明,EM38 两种测量模式下的表观电导率具有较高的正相关关 系,相关系数 $R^2 = 0.7425$,这也是其空间分布具有明显一致性的重要原因。围绕应用电磁感应仪 EM38 两种测量模式下的表观电导率 EC_{a+}和 EC_{a-v}来判断土壤盐渍剖面类型这一命题,Corwin and Rhoades 提出直接用 EC_{a-v}/EC_{a+}作为判别土壤盐渍剖面类型的经验标准,即 EC_{a-v}/EC_{a-h} \geq 1,为底聚型;EC_{a-v}/EC_{a+}<1,则为表聚

型^[29]。尽管该判别标准能有效的判断出表聚型和底聚型两种土壤盐渍剖面,但忽视了均匀型剖面的存在,这显然也是不合理的^[30-31]。为解决上述问题,参照 Aragüés 等的相关研究成果,对 Corwin and Rhoades 的判别标准进行了改进,定义 0.9 ≤ EC_{a-v}/EC_{a-h} ≤1.1 为均匀型,即土壤含盐量随土层深度的变化差异不大;EC_{a-v}/EC_{a-h} >1.1 为底聚型,即土壤含盐量随土层深度增加呈总体上升趋势;EC_{a-v}/EC_{a-h} <0.9 则为表聚型^[16],即土壤含盐量随土层深度增加呈总体上升趋势;EC_{a-v}/EC_{a-h} <0.9 则为表聚型^[16],即土壤含盐量随土层深度增加呈总体上升趋势;EC_{a-v}/EC_{a-h} <0.9 则为表聚型^[16],即土壤含盐量防土层深度增加呈总体降低趋势。在研究区 40 个土壤剖面采样点中,表聚型是主要的土壤盐渍剖面类型,共计 36 个,底聚型 3 个,均匀型仅 1 个,且 36 个表聚型剖面中 EC_{a-v}与 EC_{a-h}的比值相差较大,说明研究区土壤盐分在水平和垂直方向上均具有较强的分异特征,这符合图 2 中所示的表观电导率 EC_{a-v}和 EC_{a-h}的空间分布状况。





3.2 EC1.5 随土壤剖面深度的变化及其与实测盐分含量的关系

3.2.1 EC_{1.5}随土壤剖面深度的变化

表1是基于不同方法估算的6个不同深度层土壤电导率 EC1.5的统计特征值,可以看出研究区土壤剖面 不同深度层之间土壤电导率的特征参数值差异明显。由变化幅度(最大值与最小值之差)来看,0—10 cm 土 壤表层电导率的变化幅度最大,为4392.1 mS/m,0-20 cm 深度层次之,为2514.45 mS/m,其余四深度层均低 于 2000 mS/m, 总体来看, 随着深度增大, 变化幅度呈现依次减小趋势。从变异系数来看, 各层土壤电导率的 变异系数差异较为明显,分别为1.11、0.95、0.89、0.87、0.62、0.60,表现为随着深度的增加而减小的趋势,但均 具强变异性。由表1的偏度值可以看出,0-60 cm 深度土壤电导率空间分布极具偏态性,意即电导率在水平 方向上表现出显著的空间变异特征,这与变异系数揭示的结果是一致的,其中 0—10 和 0—20 cm 深度层电导 率水平空间分布变异程度最强,0-80和0-100 cm 深度层相对较弱,造成这种现象的原因较为复杂,如微地 形起伏、水文状况、土壤质地、土地利用类别、灌溉制度以及耕作方式等,这些因素中的单一因素或多因素叠加 均会对土壤电导率产生重大影响,但随着土壤深度的增加,这些因素对土壤电导率的影响也会逐渐减弱。此 外,我们也分析了各深度层土壤电导率的平均值状况,各深度层土壤电导率均值的变化范围在 523.08—831. 32 mS/m,对应的土壤平均含盐量变化范围为 2.95—4.80 g/kg,依据新疆水利厅颁发的《新疆县级盐碱地改良 利用规划工作大纲》中确定的土壤盐渍化程度分级标准,研究区土壤总体上属于中度盐渍化类型;不同深度 层电导率均值各异,如0-10 cm 土壤层电导率均值最大,明显高于其它深度层,这再次表明研究区土壤盐分 分布具有较强的表聚性,同时揭示出研究区土壤平均电导率在垂直方向上也具有较强的变异性;在 0—10 和 0-20 cm 深度层,超过 1/3 采样点的含盐量高于 5.0 g/kg,属重度盐渍化程度,这显然是研究区绿洲农业生产 发展的重要制约因素,应当引起相关部门的重视。

3.2.2 EC_{1.5}与实测盐分含量的关系

土壤水溶性含盐量和土壤浸提液电导率 EC1.5是衡量土壤盐渍化程度的重要指标,但二者反映土壤盐渍

化程度的本质却截然不同。电导率 EC_{1,5}反映了土壤中盐基离子或分子的数量,而水溶性含盐量却反映了土壤中盐基离子或分子的质量。通常在盐分组成较为复杂的区域,电导率 EC_{1,5}与含盐量并不一定具有高度的相关性,也就不能简单地根据电导率 EC_{1,5}与含盐量的关系,利用电导率数据来反演含盐量^[32]。近年来的研究表明,在干旱区绿洲土壤浸提液电导率和土壤盐分之间呈现极显著的相关性,可以用 EC_{1,5}来代替土壤的水溶性含盐量进行分析^[2]。为验证这一观点,我们对本研究区土壤水溶性含盐量(SS)和土壤浸提液电导率 EC_{1,5}进行相关分析,发现二者存在极为显著的线性正相关关系,回归方程为:*SS*=0.0062 *EC*_{1,5}-0.295(*R*²=0.9925),拟合优度 *R*²暗示电导率 EC_{1,5}对含盐量变化的解释能力可达 99%以上,这表明研究区土壤浸提液电导率 EC_{1,5}可完全替代土壤的水溶性含盐量作为土壤盐渍化的指标。因此,通过建立研究区土壤表观电导率和土壤浸提液电导率 EC_{1,5}之间的关系式,就可以达到利用电磁感应仪测量值来评估区域土壤盐渍化程度之目的。

| Table 1 Descriptive statistics of $EC_{1:5}$ for 6 depths in the soil profiles | | | | | | | | | |
|--|----------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------------|-------------------------------------|----------------|----------------|--|
| 土层 Depth/cm | 样本数 N | 最大值 Max⁄ (mS/m) | 最小值 Min⁄ (mS/m) | 平均值 Mean/ (mS/m) | 标准差 Standard deviation | 变异系数 Coefficient of variation | 偏度 Skewness | 峰度 Kurtosis | |
| 0—10 | 40 | 4410.00 | 17.90 | 831.32 | 920.56 | 1.11 | 2.03 | 5.52 | |
| 0—20 | 39 | 2533.50 | 19.05 | 669.15 | 638.60 | 0.95 | 0.99 | 0.57 | |
| 0—40 | 39 | 1692.06 | 19.30 | 591.20 | 524.24 | 0.89 | 0.62 | -0.81 | |
| 0—60 | 38 | 1451.55 | 20.88 | 523.08 | 455.84 | 0.87 | 0.64 | -0.83 | |
| 0—80 | 29 | 1280.24 | 29.10 | 612.27 | 382.62 | 0.62 | 0.26 | -1.04 | |
| 0—100 | 28 | 1204.04 | 34.44 | 603.17 | 363.45 | 0.60 | 0.17 | -1.19 | |

| 表1 | 六种不同深度剖面土壤电导率 EC _{1:5} 的统计分析 |
|----|---------------------------------------|
|----|---------------------------------------|

3.3 线性混合预测模型的构建

线性回归是目前定量两种或两种以上变量间相互依赖关系的一种经典统计方法,在研究不同土层盐分含 量或浸提液电导率与土壤表观电导率关系时也较为常用 [2]。由于土壤表观电导率反映的是不同深度电导率 与其对电磁感应仪线圈敏感性乘积随土壤深度变化的积分值,且不同深度电导率对电磁感应仪线圈的敏感性 在土壤深度上表现为非线性[33],因而有些国内外学者认为不同深度的土壤电导率与表观电导率之间的定量 关系也应表现为非线性[8.20]。然而,传统的线性和非线性回归建模,都忽略了表观电导率两种模式下的测量 值具有高度相关的事实。目前,国内外常用的建模方法是线性混合模型,它有效克服了传统回归方法的缺陷。 因此,本文以 ECah和 ECav为自变量,以各深度土层电导率 EC1.5为因变量,利用线性混合模型分别进行单因素 和多因素回归建模,并采用限制性最大似然法(REML)对模型参数予以估计;同时,为避免实测数据的"扰动" 对建模效果产生影响,我们对变量取对数进行数据变换。整个建模过程均在统计分析软件 StataMP 中完成, 预测模型的最终形式及其显著性检验结果(Wald Z 值)见表 2。可以看出,除土壤电导率 EC_{1.5}与水平表观电 导率 EC_{ab}所建立的模型在 0—80 cm 深度上表现为 P<0.01 的显著水平外,其余各模型的 P 值均小于 0.001, 达到了极显著水平。就单因素建模效果而言,在土壤各深度剖面层中,ECah对土壤电导率的效应系数均小于 EC ",建模精度也略差于后者,这与电磁感应仪的测量模式有关,在水平和垂直测量模式下电磁感应仪对不 同深度土壤盐分的敏感度具有差异。由 EC1.5与 ECah和 ECav所建立的多因素预测模型整体精度介于两单因 素模型之间,此模型除在 0—10 cm 深度上 EC_{av}对土壤电导率的效应系数达到 0.05 的显著水平外,其余的效 应系数均不显著,而从模型的截距项所显示的显著水平可以看出样点电导率本底值在多因素预测模型中起决 定性作用,这可能与 EC " 和 EC " 的高度相关性有关。此外,我们利用这 3 种模型分别对 6 个剖面层的土壤电 导率进行预测,在预测过程中并未发现残差有明显的异常点,也无违反正态性和方差齐性假定的迹象,再次说 明所构建的模型是可信的;同时,我们还发现在各层中实测值与预测值的拟合优度整体上呈现出多因素模型 >ECav单因素模型>ECab单因素模型,但差别不大。

| | | Table 2 L | inear mixe | d models betw | ween EC _{1:5} ai | nd EC _{a-h} , E | C _{a-v} for 6 dep | pths in the | soil profiles | | |
|----------|-----|--|------------|---------------|--|--------------------------|----------------------------|--|---------------|-----------------------|------------|
| 土层 样本数 | 样本数 | $\log EC_{1:5} = \alpha_1 \log EC_{a-h} + C_1$ | | | $\log EC_{1:5} = \alpha_2 \log EC_{a-v} + C_2$ | | | $\log EC_{1:5} = \alpha_3 \log EC_{a-h} + \beta_3 \log EC_{a-v} + C_3$ | | | |
| Depth/cm | N | α1 | C_1 | Wald Z | <i>a</i> ₂ | C_2 | Wald Z | <i>a</i> ₃ | β_3 | <i>C</i> ₃ | Wald Z |
| 0—10 | 40 | 1.004 *** | 0.634 | 94.06 *** | 1.075 *** | -0655 | 108.16 *** | 0.002 | 1.073 * | 0.655 ** | 105.32 *** |
| 0—20 | 39 | 0.980 ** | 0.614 | 115.61 *** | 1.044 *** | 0.641 | 129.08 *** | 0.155 | 0.883 | 0.628 ** | 126.10 *** |
| 0—40 | 39 | 0.945 *** | 0.655 * | 121.29 *** | 0.999 *** | 0.694 | *127.89 *** | 0.323 | 0.666 | 0.666 ** | 126.80 *** |
| 0—60 | 38 | 0.898 ** | 0.729 * | 102.15 *** | 0.950 *** | 0.766 | *104.46 *** | 0.386 | 0.550 | 0.734 ** | 104.38 *** |
| 0—80 | 29 | 0.956 *** | 0.595 | 34.64 ** | 1.074 *** | 0.508 | 39.75 *** | 0.219 | 0.847 | 0.480 | 38.74 *** |
| 0—100 | 28 | 0.871 *** | 0.805 * | 34.05 *** | 0.985 *** | 0.711 | 41.52 *** | 0.119 | 0.863 | 0.699 * | 40.11 *** |

表 2 六种不同剖面深度下 EC_{1:5}与 EC_{a-b}和 EC_{a-v}间的线性混合模型

*显著性 P < 0.05; * *显著性 P < 0.01; * * *显著性 P < 0.001

3.4 土壤剖面盐分空间分布解析

为研究土壤剖面盐分的空间分布情况,并考虑到样本数据的代表性,利用上述3种模型分别对研究区 0—60 cm 深度(耕作深度)的土壤盐分空间分布进行模拟,并用 Surfer 软件中的自然邻近方法进行空间插值 以实现其空间可视化。为便于论述,把基于 EC_{ah}、EC_{av}和 EC_{ah}与 EC_{av}的模型分别定义为 Model(1)、Model (2)和 Model(3)。图 3A 显示的是土壤剖面 0—60 cm 深度实测浸提液电导率的空间分布状况,图 3B、图 3C 和图 3D 分别是 Model(1)、Model(2)和 Model(3)模拟值的电导率空间分布。单就其插值效果来看,实测浸提 液电导率平均误差(ME)仅为-0.00149、均方差(MSE)为 0.15977、相对均方差(RMSE)为 0.39971、均方根预 测误差(PMSPE)为 0.97015,非常接近 1,而 Model(1)、Model(2)和 Model(3)预测值的交叉验证结果如表 3 所 示,不难看出自然邻近法的空间插值结果是可靠的,具有较强的可信性。同时,我们也给出了 3 种模型在其他 5 层土壤剖面深度预测值的空间插值交叉验证结果,详见表 3。通过对比图 3A—图 3C 可以看出,对于 0—60



图 3 土壤剖面 0—60 cm 深度的实测浸提液电导率(对数值)和预测值(对数值)的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of measured conductivity (logarithm) and predicted value (logarithm) in the soil profile (0-60 cm)

cm 深度土壤盐分空间分布,基于 Model(1)和 Model(2)的预测结果与实测值的拟合优度 *R*²均为 0.7394,可有效的反映研究区土壤电导率的整体情况,但在空间分布上略有不同。两种模型均能大体反映电导率值高于 2.3 mS/m 的区域范围,但对研究区东南部电导率值高于 2.8 mS/m 的区域范围放大效应明显,其中 Model(2)的放大效应更为显著。单一基于 EC_{ab}或 EC_{av}的模拟,可能忽略了电导率空间较小尺度的变异,因而需要综合考虑 EC_{ab}和 EC_{av}对其进行表达。由图 3D 可以看出,综合考虑 EC_{ab}和 EC_{av}的 Model(3)模拟效果明显优于单一基于 EC_{ab}或 EC_{av}的模拟结果,Model(3)的预测结果与实测值的拟合优度 *R*²均为 0.7489,比 Model(1)和 Model(2)有所提高,Model(3)对研究区电导率值高于 2.3 mS/m 的区域范围界定更加准确,但对电导率值高于 2.8 mS/m 的区域范围模拟效果仍不理想,这是模拟预测研究中普遍存在的现象,精确模拟毕竟是一个世界级难题。尽管模型还存在些许缺陷,但对预测土壤电导率高于 2.3 mS/m 的区域范围是有效的,尤其是 Model (3)。本研究区土壤电导率 2.3 mS/m 对应的土壤水溶性含盐量为 1 g/kg,根据新疆水利厅颁发的《新疆县级盐碱地改良利用规划工作大纲》中确定的土壤盐渍化程度分级标准,土壤水溶性含盐量小于 1 g/kg 的土壤属于非盐渍化土壤,因此我们所建的模型可作为相关部门监测该区土壤盐渍化的辅助手段。

| 土层 Depth/cm | 模型 Models | 平均误差 Mean Error | 均方差 Mean squared error | 相对均方差 Relative mean- square error | 均方根预测误差 Root-mean-squared prediction error |
|----------------|---------------------|--------------------|---------------------------|---|--|
| 0—10 | Model(1) | 0.00694 | 0.12199 | 0.34927 | 0.99049 |
| | Model(2) | 0.01591 | 0.13351 | 0.36539 | 0.97723 |
| | <pre>Model(3)</pre> | 0.01590 | 0.13347 | 0.36534 | 0.97722 |
| 0—20 | Model(1) | -0.00594 | 0.12793 | 0.35767 | 0.99343 |
| | Model(2) | 0.00597 | 0.13918 | 0.37307 | 0.97823 |
| | <pre>Model(3)</pre> | 0.00436 | 0.12663 | 0.35585 | 0.97947 |
| 0—40 | Model(1) | -0.00573 | 0.11891 | 0.34483 | 0.99336 |
| | Model(2) | -0.00606 | 0.13302 | 0.36472 | 0.99338 |
| | Model(3) | 0.00186 | 0.12369 | 0.35170 | 0.98213 |
| 0—60 | Model(1) | -0.00447 | 0.10660 | 0.32650 | 0.99231 |
| | Model(2) | -0.00473 | 0.11934 | 0.34546 | 0.99229 |
| | <pre>Model(3)</pre> | 0.00217 | 0.11013 | 0.33186 | 0.98238 |
| 0—80 | Model(1) | 0.00009 | 0.06376 | 0.25251 | 0.99310 |
| | Model(2) | 0.01361 | 0.06894 | 0.26256 | 0.95025 |
| | <pre>Model(3)</pre> | 0.01075 | 0.06724 | 0.25931 | 0.95643 |
| 0—100 | Model(1) | 0.01665 | 0.04823 | 0.21961 | 0.93780 |
| | Model(2) | 0.02847 | 0.05589 | 0.23641 | 0.88424 |
| | Model(3) | 0.02721 | 0.05456 | 0.23358 | 0.88655 |

表 3 不同模型的自然邻近插值预测的交叉验证

Table 3 Cross-validation of natural neighbor interpolation predictions for different models

无论从土壤电导率实测值空间分布,还是预测值空间分布来看,研究区土壤盐分分布存在显著的空间差异,主要表现为:绿洲外围交错带上的土壤盐分含量明显高于绿洲内部,土壤盐分从绿洲外围荒漠带到绿洲-荒漠交错带,再到绿洲内部呈现出由高到低的递减趋势,盐分梯度整体东西向划分明显;同时,还隐含一个不 明显的由西北至东南土壤盐分逐渐增大的带状分布。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,研究区的地形为西北高东南低,平均海拔由 1100 m 下降到 980 m,坡降 1%~4%^[34],河流流向 自西北至东南,坡降 1.75%~23.7%,多年平均径流量为 22.1×10⁸ m³,变差系数为 0.12,同时地下水随地形由 高向低渗流,水力坡度 3.5%~5.5%^[35],这就使上游土壤经过雨水淋溶作用,大量盐分随河流和地下水迁移 至中下游地势较低处汇集,因而下游地区土壤盐分含量高,成为绿洲东南部区域土壤盐分含量明显过高的最 直接因素;其次,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,在绿洲内部由 于经常灌溉,致使土壤表层盐分随灌溉水下渗到土壤更深层,表现为土壤表层脱盐,而绿洲外围因降水量少且 蒸发强烈,深层土壤及地下水中的可溶性盐通过毛细管上升到地表,土壤表层"聚盐"现象明显,这也是研究 区盐分格局形成的重要因素;此外,研究区的经济主要以绿洲农业为主,由于技术原因及居民对农业生产成本 的考量,灌溉方式仍以大水漫灌为主,导致土壤盐渍化程度加剧,为解决其带来的农业生产风险,该地区每年 都要耗费大量的水用于洗盐,造成盐分随水进入排碱渠,再由排碱渠带入下游,最终形成下游地区土壤盐分过 高的分布格局。

4 结论与讨论

本文通过对渭干河-库车河三角洲绿洲土壤磁感表观电导率和土壤浸提液电导率的分析,揭示了研究区 土壤剖面盐分的分布特征,利用构建的电磁感应表观电导率与土壤电导率间的线性混合模型,并借助插值方 法解析和评估了研究区土壤盐分的空间分布特征。主要结论可归纳如下:

(1)磁感式表观电导率和土壤浸提液电导率均表明,研究区土壤盐渍剖面类型以表聚型为主,随着土壤 深度增加,电导率是趋于减小的,在空间分布上具有明显的水平和垂直方向的变异特征;同时,在磁感表观电 导率水平和垂直模式下,可以发现电导率高值区均出现在绿洲外围,尤其是绿洲东南区域的绿洲-荒漠交错 带,并表现出明显的梯度分布,这与研究区土壤盐分分布现状相符,说明电磁感应仪 EM38 对土壤盐渍化空间 分布特征的解析精度较高,结果可信。此外,依据新疆水利厅颁发的《新疆县级盐碱地改良利用规划工作大 纲》中确定的土壤盐渍化程度分级标准,可判定研究区土壤主体属于中度盐渍化水平,局部地带表层重度盐 渍化现象明显,需采取必要的治理措施对土壤盐渍化进行有效防控。

(2)对研究区的实测土壤浸提液电导率和实测土壤水溶性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,回归方程显示土壤浸提液电导率对含盐量变化的解释能力可达99%以上,因而采用浸提液电导率代替土壤水溶性含盐量作为研究区土壤盐渍化指标的方法是可行的。

(3)从构建的线性混合模型可以看出,除土壤电导率 EC_{1:5}与水平表观电导率 EC_{ah}所建立的模型在 0—80 cm 深度上表现为 P<0.01 的显著水平外,其余各模型的 P 值均小于 0.001,达到了极显著水平。此外,我们利用模型分别对 6 个剖面层的土壤电导率进行预测,发现在各层中实测值与预测值的拟合优度整体上呈现出多因素模型>EC_{av}单因素模型>EC_{ab}单因素模型,这与传统线性回归模型的结果是一致的^[2,36-37],说明综合考虑 EC_{ab}和 EC_{av}的模型模拟效果明显优于单一基于 EC_{ab}或 EC_{av}的模拟结果。与本研究区以前的相关研究^[2]对比,发现线性混合模型的模拟效果要明显优于传统的线性回归模型。这与线性混合模型的假设条件有关,它 仅需要反应变量具有正态性,放弃了独立性和方差齐性的假定,容许反应变量间具有相关性及方差不齐性。但线性混合模型对资料的要求比较严格,由于本文中样本量较少,特别是数据层次结构太少,从而也限制了我 们对研究对象的深入分析。

(4)自然邻近法插值结果直观反映了研究区土壤剖面盐分的空间分布状况,与本研究区借助回归残差泛 克里格法等的插值效果^[2,23]相比,精度更高。因此,对于研究区未采样地带的土壤盐渍化情况,可利用本文建 立的土壤盐分解译模型和自然邻近插值法相结合的方式进行快速预测,实现对全区土壤盐分空间分布的快速 掌控。本研究可为渭干河-库车河三角洲绿洲土壤盐渍化空间分布的监测及防控措施的制定提供必要的技 术支撑和理论依据,对该区绿洲生态环境保护和农业生产与作物布局也具有重要的指导意义。

参考文献(References):

- [1] 陈亚宁. 新疆塔里木河流域生态水文问题研究. 北京:科学出版社, 2010: 169-173.
- [2] 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.
- [3] 王水献, 董新光, 刘磊. 新疆焉耆盆地绿洲水盐双梯度下天然植被多样性分异特征. 冰川冻土, 2010, 32(5): 999-1006.
- [4] 张雪妮, 吕光辉, 杨晓东, 贡璐, 秦璐, 何学敏, 刘吴奇. 基于盐分梯度的荒漠植物多样性与群落、种间联接响应. 生态学报, 2013, 33

(18): 5714-5722.

- [5] 刘广明,吴亚坤,杨劲松,余世鹏,王相平.基于电磁感应技术的区域三维土壤盐分空间变异研究.农业机械学报,2013,44(7):78-82.
- [6] 吴亚坤, 刘光明, 杨劲松, 余世鹏. 基于反距离权重插值的土壤盐分三维分布解析方法. 农业工程学报, 2013, 29(3): 100-106.
- [7] Doolittle J A, Brevik E C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. Geoderma, 2014, 223-225: 33-45.
- [8] Padhi J, Misra R K. Sensitivity of EM38 in determining soil water distribution in an irrigated wheat field. Soil and Tillage Research, 2011, 117: 93-102.
- [9] 赵军伟,蒋平安,盛建东,李荣. EM38 电磁发生仪测定结果的影响因素分析. 干旱区地理, 2005, 28(3): 362-366.
- [10] Islam M M, Cockx L, Meerschman E, De Smedt P, Meeuws F, Van Meirvenne M. A floating sensing system to evaluate soil and crop variability within flooded paddy rice fields. Precision Agriculture, 2011, 12(6): 850-859.
- [11] 刘广明,杨劲松,李冬顺.基于电磁感应原理的堤坝隐患探测技术及其应用.岩土工程学报,2003,25(2):196-200.
- [12] 刘庆生,刘高焕,赵军.土壤类型、质地和土地类型对土壤盐渍化水平的指示.中国农学通报,2008,24(1):297-300.
- [13] 刘广明,杨劲松.基于电磁感应原理的沿海滩涂地下水矿化度快速测评技术.农业工程学报,2007,23(9):76-80.
- [14] Dixit P N, Chen D L. Modification of a spatially referenced crop model to simulate the effect of spatial pattern of subsoil salinity. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 74(2): 313-320.
- [15] Li D H, Guo Q H, Rahilly P J A, Phelps G M, Harmon T C. Correlation between soil apparent electroconductivity and plant hyperspectral reflectance in a managed wetland. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(9): 2563-2579.
- [16] Aragüés R, Urdanoz V, Çetin M, Kirda C, Daghari H, Ltifi W, Lahlou M, Douaik A. Soil salinity related to physical soil characteristics and irrigation management in four Mediterranean irrigation districts. Agricultural Water Management, 2011, 98(6): 959-966.
- [17] Herrero J, Netthisinghe A, Hudnall W H, Pérez-Coveta O. Electromagnetic induction as a basis for soil salinity monitoring within a Mediterranean irrigation district. Journal of Hydrology, 2011, 405(3/4): 427-438.
- [18] Cetin M, Ibrikci H, Kirda C, Kaman H, Karnez E, Ryan J, Topcu S, Oztekin M E, Dingil M, Sesveren S. Using an electromagnetic sensor combined with geographic information systems to monitor soil salinity in an area of southern turkey irrigated with drainage water. Fresenius Environmental Bulletin, 2012, 21(5): 1133-1145.
- [19] Bouksila F, Bahri A, Berndtsson R, Persson M, Rozema J, Van der Zee S E A T M. Assessment of soil salinization risks under irrigation with brackish water in semiarid Tunisia. Environmental and Experimental Botany, 2013, 92: 176-185.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Ding J L, Yu D L. Monitoring and evaluating spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the Werigan-Kuqa Oasis, China, using remote sensing and electromagnetic induction instruments. Geoderma, 2014, 235-236: 316-322.
- [24] 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: 85-98.
- [25] Li H Y, Websterb R, Shi Z. Mapping soil salinity in the Yangtze delta: REML and universal kriging (E-BLUP) revisited. Geoderma, 2015, 237-238; 71-77.
- [26] Huang J, Wong V N L, Triantafilis J. Mapping soil salinity and pH across an estuarine and alluvial plain using electromagnetic and digital elevation model data. Soil Use and Management, 2014, 30(3): 394-402.
- [27] Jiang J M. Linear and generalized linear mixed models and their applications. New York: Springer, 2007: 1-2.
- [28] 白世彪, 王建, 常直杨. Surfer[©]10 地学计算机制图. 北京: 科学出版社, 2012: 124.
- [29] Corwin D L, Rhoades J D. Measurement of inverted electrical conductivity profiles using electromagnetic induction. Soil Science society of America Journal, 1983, 48(2): 288-291.
- [30] Rhoades J D, Chanduvi F, Lesch S. Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. FAO Irrigation and Drainage Paper 57, Rome, Italy, 1999: 45-46.
- [31] 姚荣江,杨劲松,刘广明. EM38 在黄河三角洲地区土壤盐渍化快速检测中的应用研究. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 67-73.
- [32] 彭杰,王家强,向红英,滕洪芬,刘维扬,迟春明,牛建龙,郭燕,史舟.土壤含盐量与电导率的高光谱反演精度对比研究.光谱学与光谱分析,2014,34(2);510-514.
- [33] McNeill J D. Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers. Technical Note TN-6. Geonics, ON, Canada, 1980: 5-15.
- [34] 王雪梅,柴仲平,塔西甫拉提·特依拜,龚爱瑾,胡江玲.渭干河—库车河三角洲绿洲生态系统服务功能及敏感性分析.干旱地区农业研究,2010,28(3):202-206.
- [35] 满苏尔・沙比提, 武胜利, 陆吐布拉・依明. 渭干河-库车河三角洲绿洲近 10 年地下水位及水质时空变化特征. 干旱地区农业研究, 2010, 28(1); 212-217.
- [36] 武珊珊,丁建丽,马春霞. EM38 在土壤盐渍化快速检测中的应用研究. 扬州大学学报:农业与生命科学版, 2012, 33(3): 69-73.
- [37] 姚远,丁建丽,阿尔达克·克里木,张芳,雷磊.基于实测高光谱和电磁感应数据的区域土壤盐渍化遥感监测研究.光谱学与光谱分析, 2013,33(7):1917-1921.