

伊犁察南灌区土壤盐分时空变异特征与运移机理研究

刘迁迁^{1,2} 苏里坦¹ 刘广明³ 沙吾兰·哈斯木⁴ 张 音^{1,2}

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011;
2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008;
4. 新疆国土资源规划研究院, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 以伊犁河谷察南灌区为研究区,运用磁感式电导率快速获取技术及室内分析相结合手段,通过构建盐分解译模型,获取2015年及2016年秋季0~30 cm、30~60 cm、60~100 cm土壤盐分含量。对土壤各土层进行了盐渍化分级统计和半方差函数分析及空间插值分析。对研究区高程信息进行提取,并通过调查河流影响范围对河流进行缓冲分析。旨在构建适用于研究区及同类型灌区磁感式盐渍土地快速精量诊断评估与利用规划技术体系,了解干旱、半干旱区灌溉农田土盐时空变异特征,并对土盐时空运移机理进行研究。初步研究表明,相比于2015年秋季,2016年秋季研究区非盐化土面积显著减小,中度盐化土面积显著增加,非盐化土、轻度盐化土呈现向中度盐化土演变的趋势;研究区土壤盐分呈现向中部及东部区域运移的趋势,盐化土面积增加,且盐分含量均值增大;另外,在空间大尺度范围上,河流是影响土盐运移的主要影响因素,在局域小尺度范围内,地势是影响土盐运移的主要影响因素。

关键词: 伊犁察南灌区; 盐分运移; 时空变异; 电导率; 缓冲区

中图分类号: S151.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)12-0221-08

Spatio-temporal Variation and Migration Mechanism of Soil Salinity in Chanan Irrigation Area of Ili

LIU Qianqian^{1,2} SU Litan¹ LIU Guangming³ Shawulan·HASIMU⁴ ZHANG Yin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China
2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China
4. Xinjiang Institute of Land and Resources Planning, Urumqi 830011, China)

Abstract: Chanan Irrigation Area of Ili was selected as the study area. Through the combination of electromagnetic fast soil electrolytic conductivity acquisition technology with laboratory analysis, and using the construction of soil salinity interpretation model to get soil salinity content of 0~30 cm, 30~60 cm and 60~100 cm soil layer in the autumn of 2015 and 2016. On the one hand, simple statistical classification was conducted, and the semi-variogram analysis and spatial interpolation analysis for soil salinity characteristic factors were carried out; on the other hand, the elevation information of the study area was extracted, and the buffer area through investigating the influence of river was analyzed, which aimed at constructing suitable magnetic induction type fast precise diagnostic evaluation and utilization planning technology for the study area and the same irrigation area. Preliminary studies indicated that: firstly, from the autumn of 2015 to the autumn of 2016, non-saline soil area was significantly reduced, while moderate-saline soil area was significantly increased, there was a trend that non-saline soil and mild-saline soil were evolved to moderate-saline soil. Secondly, soil salinity in the study area had a migration trend to central and eastern regions, with an increasing trend of salinization area and the average of salt content. Moreover, both the river and the terrain were the main influence factor of soil salt movement, while the river was the main influence factors on the large scale of space, and the terrain was the main influence factor on the small scale space.

Key words: Channan Irrigation Area of Ili; salinity migration; spatio-temporal variation; electrolytic conductivity; buffer

收稿日期: 2017-03-08 修回日期: 2017-07-04
基金项目: 新疆维吾尔自治区科技厅科技计划项目(201531116)、新疆优秀青年科技人才培养项目(qn2015yx033)和国家自然科学基金项目(U1403182)
作者简介: 刘迁迁(1988—),男,博士生,主要从事干旱区生态水文学研究,E-mail: Liuqianqian215@mails.ucas.ac.cn
通信作者: 苏里坦(1972—),男,副研究员,博士,主要从事干旱区生态水文学研究,E-mail: sulitan@ms.xjb.ac.cn

引言

土壤盐渍化是世界各国普遍存在的问题,尤其在低降雨量和高蒸发量的干旱、半干旱地区,盐渍化问题更为严重^[1]。当前全球盐渍化土地 58% 发生在灌溉农业区,接近 20% 的灌溉土壤受到盐渍化的威胁^[2]。中国是世界上受盐渍化危害最为严重的国家之一,据联合国教科文组织 (UNESCO) 和联合国粮食及农业组织 (FAO)^[3] 不完全统计,中国受盐渍化危害的耕地达 $9 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 作为中国典型干旱、半干旱灌溉农业区的新疆,其绿洲农业土壤盐渍化面积已达约 $1.23 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[4]。土壤盐分含量高,次生盐渍化状况严重,是绿洲农业的可持续性发展面临的重大难题。

近年来,国内外学者对土壤盐分的相关研究逐渐增多,BARBIERO 等^[5]、刘广明等^[6] 对土壤电导率与土壤盐分响应关系方面进行了研究,完善了磁感式土壤盐分快速获取方法;WEINDORF 等^[7]、王振华等^[8] 对土壤盐分及其空间变异特征方面进行了研究,为土盐特征及空间变异等研究提供了科学参考;CHEN 等^[9]、孙三民等^[4] 对土壤盐分空间运移规律及运移机理方面进行了研究,揭示了咸水灌溉及地下滴灌情况下土盐运移状况。然而作为典型的灌溉农业区之一,针对新疆磁感式盐渍土地快速精量及诊断评估技术的研究还比较少。快速获取土壤盐分时空变异特征,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^[10]。本研究以新疆伊犁河谷察南灌区为研究区,通过构建适用于伊犁河谷磁感式土壤盐分解译模型,获取 2015 年秋季及 2016 年秋季 0~30 cm、30~60 cm、60~100 cm 分层土壤盐分含量,使用半方差函数定量描述其空间变异规律,并通过克里格空间插值及相关方法对土壤盐分因子进行时空变异研究,以构建适用于研究区及同类型灌区磁感式盐渍土地快速精量诊断评估与利用规划技术体系,了解干旱、半干旱区灌溉农田土壤盐分时空分布特征,并对土壤盐分时空运移机理进行研究。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

察布查尔县位于新疆伊犁河谷,地处 $43^{\circ}17' \sim 43^{\circ}57' \text{N}$, $80^{\circ}31' \sim 81^{\circ}43' \text{E}$ (图 1), 有大小河流 13 条,年均径流量 $2.73 \times 10^9 \text{ m}^3$, 地下水资源动态储量 $4.31 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。察南灌区位于该县中南部,地处 $43^{\circ}46' \sim 43^{\circ}50' \text{N}$, $81^{\circ}08' \sim 81^{\circ}13' \text{E}$, 冬春长,冬季寒冷,夏秋短,夏季炎热,降水较少,属大陆性干旱、半干旱气候,全年平均降水量 222 mm。研究区以灌溉农田为主,灌溉面积 $1.87 \times 10^3 \sim 2 \times 10^3 \text{ hm}^2$, 常年种植小麦、水稻、棉花、蔬菜等作物,其中以水稻种植为主,是伊犁地区重要的水稻产区。区域内有 2 条河流经过,通过水渠对农田进行灌溉,渠灌水呈弱碱性,离子浓度由大到小依次为: Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} , 属于 Cl^- - Na^+ 型水。

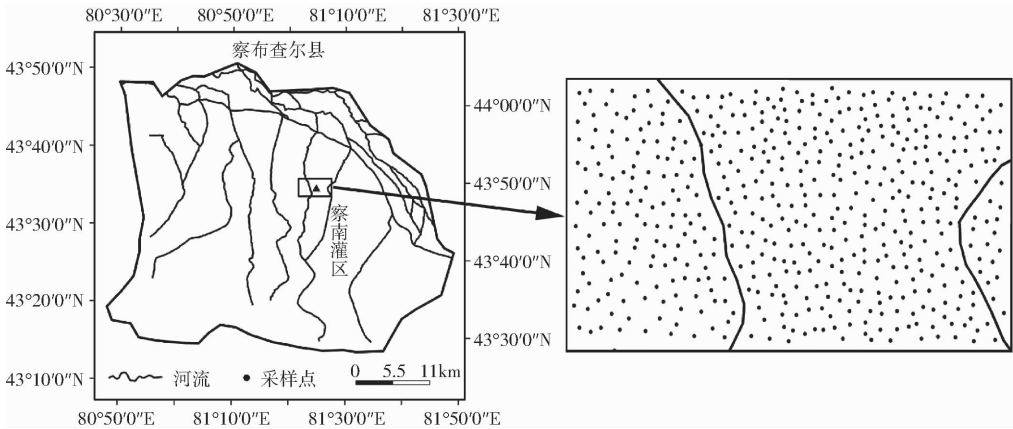


图 1 伊犁河谷察南灌区土壤样点分布图

Fig. 1 Sampling plots of soil in Chanan Irrigation Area of Ili River Valley

1.2 土壤电导率采集及盐分解译模型构建

采样时间分别为 2015 年秋季及 2016 年秋季,为水稻收获后的关键时期,地表作物覆盖率、土壤含水率均较低,有效的避免了外界因子的干扰,地点位于新疆伊犁河谷察南灌区内 (图 1)。传统取样方法受人力物力等因素制约,常无法采集到足够数量的样

品,对完整信息反映较差。本研究使用移动式磁感式盐渍土地快速精量技术,该技术快速高效、成本低、测量精度高,效率比常规调查方法有很大幅度提高。移动式磁感测定系统 (Mobile electromagnetic sensing system)^[11] 包括 EM38-MK2 型、EM31-MK2 型电导率仪、差分 GPS 及牵引装置,具体测量方法为:将各仪

器连接固定于牵引式拖拉机上,其中,EM38 电导率仪距离地面约 15 cm 高度,EM31 电导率仪距离地面约 40 cm 高度(图 2)。在保证测量精度的前提下,运用电导率仪不同模式对 EC 值进行测定。根据灌区常年粮食种植区域及灌溉分布特征,在覆盖整个灌溉区的基础上,按照点距为 1 m、行距 300 m 进行样点设置(其中,2015 年获取 36 446 个样点值,2016 年获取 33 586 个样点值,图 1 选取 500 个样点)。

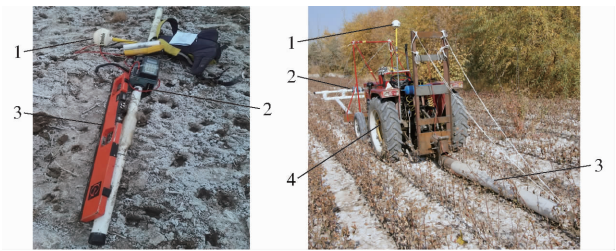


图 2 察南灌区移动式磁感测定系统

Fig.2 MESS in Chan'an Irrigation Area

1.差分 GPS 2. EM31 电导率仪 3. EM38 电导率仪 4. 牵引机械

磁感式大地电导率仪能在地表直接测量土壤表观电导率,为非接触直读式^[12],其中 EM38-MK2 型电导率仪可采集水平方向 0.75 m 和垂直方向 1.5 m 深度的数据,EM31-MK2 型电导率仪水平和垂直模式测量深度分别为 3.0 m 和 6.0 m。土壤盐分含量是根据电导率仪测值读数和跟踪取样进行室内分析手段相结合。本研究选取察南灌区内 70 个具有代表性的样点,以 0~100 cm 范围内土壤为研究范围,分 0~30 cm、30~60 cm、60~100 cm 3 个土层采样,进行室内分析,作为模型构建数据,用以确定整个研究区内各土层土壤盐分含量。

1.3 地统计分析方法

地统计学是研究土壤空间变异最常用的方法,它通过半方差函数定量描述其空间变异规律。半方差函数既能描述区域化变量的空间结构性,也能描述其随机性^[13-14]。半方差函数也称为半变异函数,它是地统计学中研究土壤变异性的关键函数。土壤特征度量值 $Z(x_i)$ 是取样点 x_i 的函数,以 h 为样点间的距离,则 h 间距处土壤特性值为 $Z(x_i + h)$,即随机变量的理论半方差函数为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i) - Z(x_i + h))^2 \quad (1)$$

式中, $\gamma(h)$ 是样点间距 h 的半方差,该值随 h 的增加而增加;而 $N(h)$ 是间距为 h 的计算对数。

然而在实际测量中,样点分布是散乱的^[15-16]。对平稳化分布变量 $Z(x)$,先算出每个观测点与其他观测点之间的距离 h_{is} ,然后把观测点间距离分成 P 个级别,取其可能点数据对数 $(x_i, x_{is}) = (x_i, x_i + h_{is})$,并算出该距离平均值 h_{is} 、点对数 $N(h_{is})$ 和观测

值平方和的平均值,则半方差函数 $\gamma(h_{is})$ 为

$$\gamma(h_{is}) = \frac{1}{2N(h_{is})} \sum_{i=1}^{N(h_{is})} (Z(x_i) - Z(x_i + h_{is}))^2 \quad (2)$$

($s = 1, 2, \dots, P$)

式中 h_{is} ——第 s 级空间不同点之间的样本距,又称步长

这样就可以根据半方差函数原理画出 $\gamma(h) - h$ 图。

2 结果与分析

2.1 土壤盐分解译模型结果分析

基于土壤盐分与不同测定模式下土壤表观土壤电导率之间的线性关系,建立复合模式下的逐步回归模型^[6]

$$y = a + bH_{38} + cV_{38} + dH_{31} + eV_{31} \quad (3)$$

式中 $a、b、c、d、e$ ——常数

y ——土壤盐分质量比, g/kg

$H_{38}、V_{38}$ ——EM38-MK2 型电导率仪水平和垂直测量模式测量数据

$H_{31}、V_{31}$ ——EM31-MK2 型电导率仪水平和垂直测量模式测量数据

根据逐步回归模型,得出表 1 所示土壤盐分解译模型拟合结果。基于 EM38-MK2 型电导率仪及 EM31-MK2 型电导率仪不同测量模式测量深度存在差异,0~30 cm 土壤盐分解译值主要由 EM38-MK2 型电导率仪水平模式 EC 值测量结果决定;30~60 cm 土壤盐分解译值主要由 EM38-MK2 型电导率仪水平模式及垂直模式 EC 值测量结果决定;60~100 cm 土壤盐分解译值主要由 EM38-MK2 型电导率仪垂直模式、EM31-MK2 型电导率仪水平模式及垂直模式 EC 值测量结果决定。

表 1 察南灌区各土层土壤盐分解译模型拟合结果
Tab.1 Fitting results of each soil salinity model in Chan'an Irrigation Area

土层深度/cm	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>R</i> ²
0~30	-0.216 0	2.499 0	0	0	0	0.920
30~60	-0.069 4	1.018 8	1.259 5	0	0	0.846
60~100	-1.310 3	0	1.060 2	1.924 1	-0.879 4	0.794

图 3 为回归方程标准化残差的 P-P 图,由图可知,在土壤 0~30 cm、30~60 cm、60~100 cm 土层回归模型中,数据在标准值周围呈现规律性分布,没有明显偏离的情况,且该模型的决定系数 R^2 分别达到 0.920、0.846、0.794,表明基于 0~100 cm 范围内土壤 EC 值进行土壤盐分分层解译模型拟合性较好,回归方程比较准确。另外,随着土层深度的增加,决

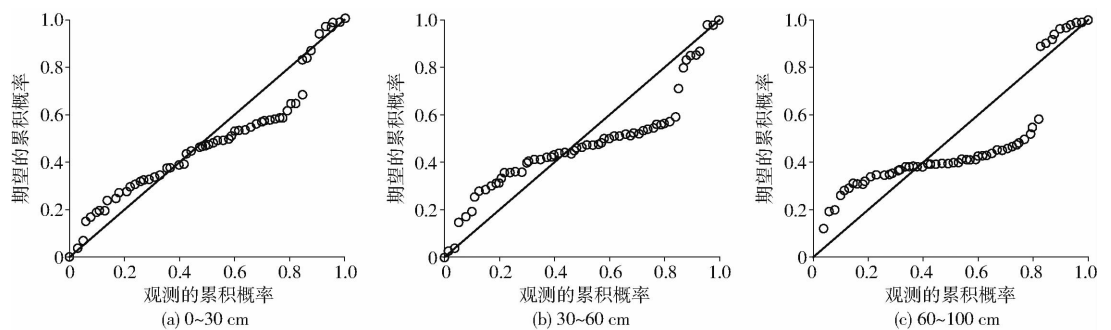


图3 察南灌区土壤各土层盐分解译模型回归方程标准化残差 P-P 图

Fig.3 Regression normalization residual P-P plots of soil salinity decomposition interpretation model in different soil layers of Chanan Irrigation Area

定系数逐渐减小,且回归标准化残差的偏离程度逐渐增大,表明该模型主要适用于研究区土壤表层附近进行土壤盐分解译。运用表1土壤盐分解译模型,综合使用不同模式下 EM38、EM31 型电导率仪所测土壤 EC 值进行解译,便可获得研究区 2015 年秋季及 2016 年秋季 0~30 cm、30~60 cm、60~100 cm 土壤盐分质量比。

2.2 土壤盐分特征统计分析

察南灌区为中国西北地区干旱、半干旱类型区,根据王遵亲等^[17]对我国干旱、半干旱区土盐分级标

准,得到表2统计结果。对研究区 0~30 cm、30~60 cm、60~100 cm 解译所得土壤盐分含量进行盐化水平分级统计,分别得出研究区 2015 年秋季及 2016 年秋季土壤各盐化程度统计面积比例(表2)。由表2可知,相比于 2015 年秋季,2016 年秋季非盐化土面积有显著减小趋势,中度盐化土有显著增加趋势,其他盐化水平土壤面积年际变化不明显,综合分析可知,非盐化土、轻度盐化土向中度盐化土演变,察南灌区土壤盐分含量总体上呈现加重的趋势,主要与 2016 年大面积秋灌有关。

表2 察南灌区 2015—2016 年秋季各土层土壤盐化水平面积统计百分比

Tab.2 Soil salinity level classification statistics percentage of each soil in 2015—2016 autumn of Chanan Irrigation Area						%
项目	分级标准 土层/cm	非盐化土 (0~1 g/kg)	轻度盐化土 (1~2 g/kg)	中度盐化土 (2~4 g/kg)	强度盐化土 (4~10 g/kg)	盐土 (> 10 g/kg)
2015 年秋季	0~30	74.63	16.9	3.56	4.85	0.06
	30~60	77.93	14.76	4.01	3.09	0.05
	60~100	88.24	5.61	4.35	1.72	0.08
2016 年秋季	0~30	37.15	9.59	48.84	3.24	1.18
	30~60	35.34	12.42	48.34	3.50	0.40
	60~100	31.20	17.02	48.32	3.45	0.01

2.3 土壤盐分时空变异特征分析

2.3.1 土壤盐分时空变异半方差函数拟合结果分析

半方差函数是地质统计学解释土壤特性空间变异结构的理论基础,拟合精度较高的半方差函数模型,是进行空间变异插值研究可行性的先决条件^[18]。为探究研究区 2015 年及 2016 年秋季土壤盐分时空变异特征,本研究基于高斯模型拟合得出半方差函数,根据式(1)、式(2)计算得到对应的参数值及离差平方和。如图4所示,各年份土壤各土层盐分含量半方差图总体呈现指数分布,表现出典型的空

间依赖关系。不同年份各土层盐分步长与半方差的拟合结果均为先增加,随后逐渐达到一个相对稳定的水平,根据不同的步长分别计算出对应的半方差值,得出较好的拟合结果。通过对土壤各盐分因子半方差函数拟合结果统计分析,得出块金值、基台值、决定系数、空间相关度等特征参数(表3)。空间相关度用结构比表示,一般情况下,如果结构比小于 25%,表明系统具有强烈的空间相关性;比值在 25%~75%之间,表明系统具有中等的空间相关性;比值大于 75%,表明系统空间相关性很弱,不适合采用空间插值的方法进行预测分析^[19]。2015 年秋季及 2016 年秋季察南灌区 0~30 cm、30~60 cm、60~100 cm 土层结构比均小于 25%,表明在相应年份,土壤各土层盐分在空间分布上均具有强烈的空间相关性,样本空间变异更多是由结构性因素引起,其中,2016 年秋季各土层土壤盐分结构比值较 2015 年减小,表明结构性因素对土壤盐分空间变异的影响呈现逐渐增强的趋势;另外,由表3

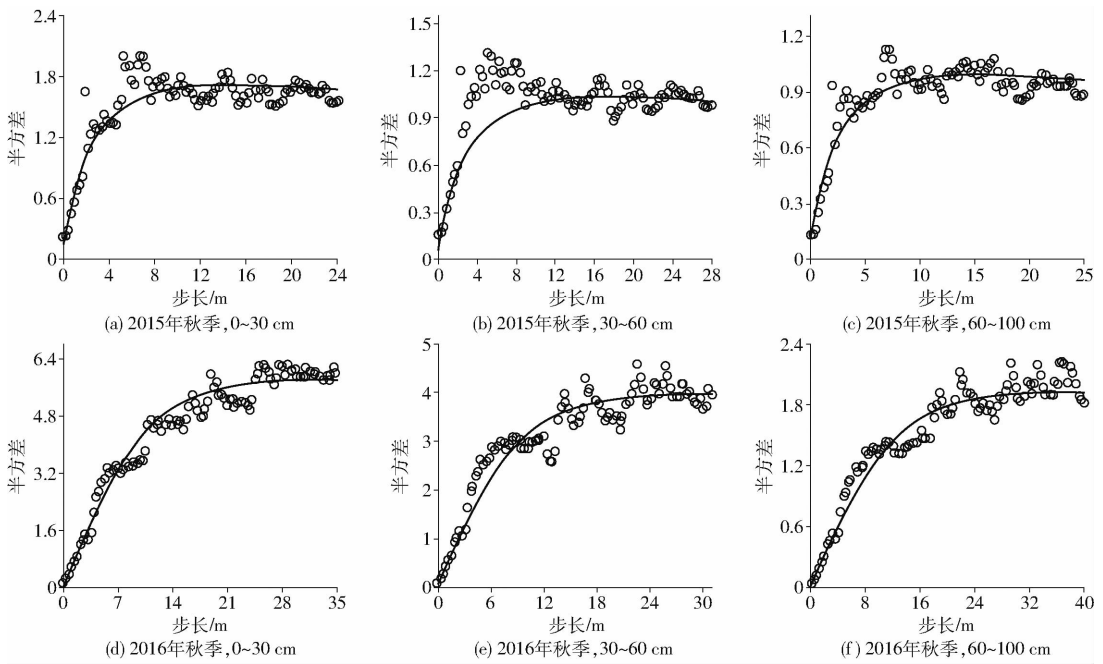


图 4 察南灌区 2015 年及 2016 年秋季土壤不同土层含盐量半方差图

Fig. 4 Semi-variogram diagrams of soil salinity of different layers in autumn of 2015 and 2016 in Chanan Irrigation Area

表 3 察南灌区 2015—2016 年秋季各土层土壤盐分含量半方差函数拟合结果

Tab.3 Semi-variogram fitting results of soil salinity contentin 2015—2016 autumn of Chanan Irrigation Area

时间	土层/cm	模型	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	结构比 $C_0 / (C_0 + C) / \%$	决定系数
2015 年秋季	0 ~ 30	高斯模型	0.22	1.63	13.50	0.91
	30 ~ 60	高斯模型	0.16	1.03	15.54	0.90
	60 ~ 100	高斯模型	0.13	1.02	12.75	0.92
2016 年秋季	0 ~ 30	高斯模型	0.14	5.91	2.37	0.92
	30 ~ 60	高斯模型	0.11	3.63	3.03	0.88
	60 ~ 100	高斯模型	0.05	2.26	2.21	0.90

可知,决定系数 R^2 达到 0.88 以上,表明基于空间变异半方差函数拟合性较好。综合可知,适合运用克里格方法对研究区土壤盐分含量进行空间插值分析。

2.3.2 土壤盐分时空变异克里格插值分析

克里格插值法能揭示属性变量在空间上的分布、变异和相关特征,将空间格局与生态过程联系起来,可有效地解释空间格局对生态过程和功能的影响^[18]。为直观反映出土壤各土层盐分含量空间变化特征,通过空间插值分析,得到 2015 年及 2016 年秋季土壤 0 ~ 30 cm、30 ~ 60 cm 及 60 ~ 100 cm 土层土壤盐分含量空间变异图(图 5)。由空间图可知,在垂直方向上,2015 年秋季及 2016 年秋季年内土壤各土层盐分空间渐变趋势基本一致,自上而下土壤盐分含量均值逐渐减小,土壤盐分在 0 ~ 30 cm 土层达到峰值,表明研究区土壤盐分具有浅层土壤集聚现象,该结果表明随着土层深度的增加,土壤盐分活跃性逐渐减弱,研究区土壤盐分自上而下总体呈现为盐分运移及积盐过程变缓,然而盐分含量增加的趋势。

在空间尺度上,2015 年秋季,土壤盐分含量高值区主要分布在西部及东北部分区域内,且自灌区西北至东南方向,盐分含量总体呈现减小的趋势;非盐化土在研究区大范围区域均有分布;轻度盐化土主要分布在研究区的南部及西南部小范围区域;中度盐化土主要分布在研究区的西部、西南部及东北部小范围区域内;重度盐化土主要分布在研究区的西南部、东北部较小范围区域内;盐土在区域内分布不集中,但是所占面积比重极小。

对于 2016 年秋季,土壤各土层盐分含量高值区主要集中在研究区中部,并以此为盐分中心向两侧辐散减小;非盐化土在研究区西北部、东南部较大范围区域内分布;轻度盐化土在北部、西北部、西部以及东南部小范围区域均有分布;中度盐化土则主要分布在研究区的西南部、东北部较大范围区域内,呈辐散状;重度盐化土及盐土主要分布在研究区中部小范围区域内。

在时间尺度上,自 2015 年秋季至 2016 年秋季,土壤盐分自研究区西部、西北部向中部及东部区域

运移,盐化土面积增加,且土壤各土层盐分含量均值增大,其中土壤 0~30 cm 土层盐分含量年际增幅最为明显,30~60 cm 土层次之,60~100 cm 土层盐分含量增幅最小;不同盐碱化土壤类型中,非盐化土的面积呈现减小的趋势;轻度盐化土面积总体变化不

大,然而自 2015 年秋季至 2016 年秋季,轻度盐化土逐渐向中度盐化土过渡,并且呈现向研究区北部、西北部运移的趋势;中度盐化土面积明显增加,且逐渐向研究区东南方向运移;重度盐化土及盐土面积整体变化不大,总体呈现向研究区中部运移。

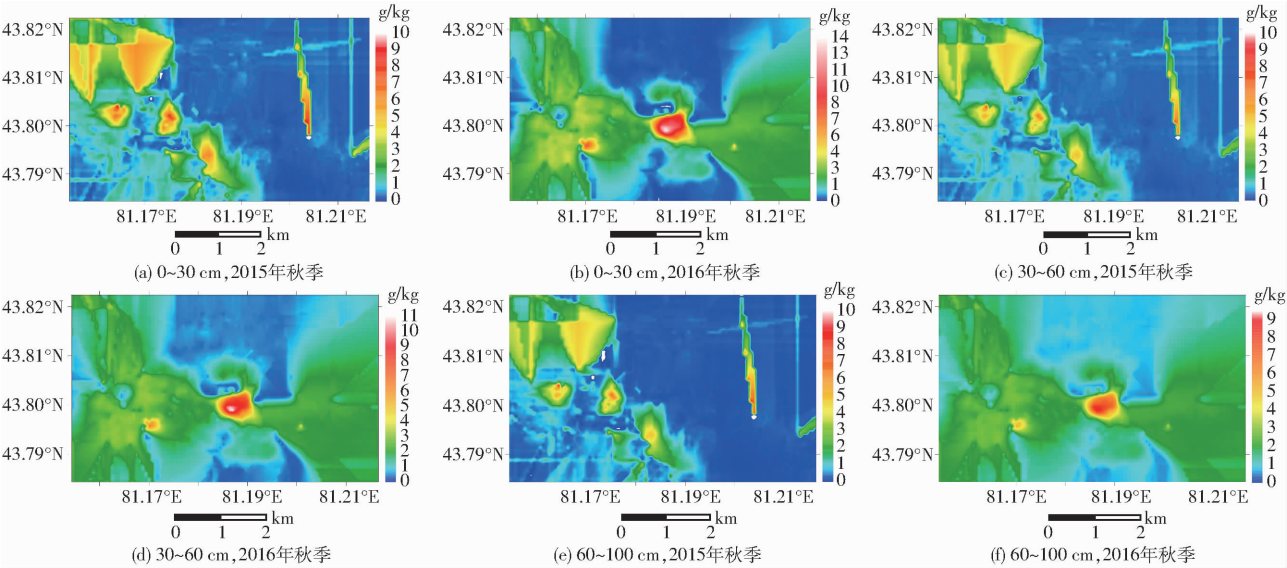


图 5 2015—2016 年秋季察南灌区不同土层土壤含盐量空间变异图

Fig. 5 Spatial fractal images of soil salinity in different layers in 2015—2016 autumn of Chanan Irrigation Area

2.4 土壤盐分运移机理研究

2.4.1 察南灌区土壤水盐特征

已有研究表明,土壤盐分时空变异一方面由结构性因素引起,另一方面由随机性因素引起^[7-8,20]。本研究中,半方差函数分析已表明,察南灌区土壤盐分空间变异主要是由结构性因素引起,因而水文过程、微地形变化和土壤质地等是影响研究区土壤盐分时空变异及运移的主要因素。水文过程主要表现为地表水与地下水运动方面,水分作为盐分的溶剂和载体,在运动过程中会对田间土壤盐分运移产生一定影响。另外,土壤水分在灌溉期间具有自由流动的特性,地势和土壤质地在一定程度上,加快和阻滞了土壤水盐渗透、排放、地表径流的形成以及地表径流速度。

研究区为伊犁河谷水土开发(1515 工程)的核心区,地表 100 cm 范围内以壤土为主,土壤渗流作用较好,质地所引起的土壤积盐过程不明显。区域内重灌轻排、地形坡度大,灌溉水为农田生态用水的主要水源,其引水灌溉方式包括引地表水与地下水,分为渠灌与井灌,其中渠灌范围较大,井灌范围较小。另外,前期研究表明,土壤 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 累积作用主要由河流影响,土壤 HCO_3^- 累积作用主要由河水以及地下水综合作用影响,综合分析可知,引河水灌溉为研究区农业用水及表层土壤盐分的主要来源。另外,察南灌区农田水

分耗散方式主要通过下渗、蒸发及植物蒸腾。通过蒸发及植物蒸腾,地表水分进行耗散,然而农田水中溶解盐分等物质比较重,无法有效排出,导致研究区土壤盐分累积;另外,通过下渗过程,盐分随水向下运移,且随着土层深度的增加,下渗量逐渐减少,形成了表层自上而下盐分含量逐渐减少的垂直变化格局。

2.4.2 察南灌区河流对土壤盐分运移的影响

河流是存在于空间尺度上的流体,除了能进行泄洪,疏导其他压力比较大的干流的水,还具有蓄水灌溉的作用。察南灌区降雨形成的洪水径流的频次相对较少,且持续时间较短,河流主要以高山融水径流为主,其主河道宽 5~7 m,支流宽 1~3 m,丰水期为春、夏季,枯水期为秋、冬季。为探究研究区河流对土盐运移的影响,通过缓冲区分析方法对河流影响范围进行研究。缓冲区分析是研究空间实体的影响范围和程度的基本方法,能比较直观的反映其影响范围的空间分布状况^[21]。根据研究可知,察南灌区河水以渠灌水的形式对农田进行灌溉,其中水渠在研究区形成网状交叉分布,通过对水渠分布范围进行测算,主河道附近水渠平均分布距离约为 1.5 km,以 1.5 km 为研究区内河流的最大影响半径,对河流影响范围做缓冲区分析,得到图 6 所示河流缓冲区图。

由河流缓冲区图(图 6a)可知,研究区主要有 2 条河流经过,其影响面积较大。对于 2015 年秋

季,盐分高值区主要集中在研究区西南部河流影响范围内,2016 年秋季,盐分高值区在研究区西南部及东部区域河流影响范围内均有分布。综合图 5 研究区土盐空间分布范围进行叠加测算分析,2015 年秋季及 2016 年秋季,各土层土壤盐分高值区域与河流影响范围的交叉面积均达 80% 以上(表 4);另外,由表 4 可知,随着距离河道的增加,土壤盐分均

值呈现减小的趋势,主要原因是河流不仅通过地表灌溉方式对土壤盐分产生影响,而且通过地下渗流的方式抬升河流附近区域地下水位,间接对土壤盐分产生影响。综合分析可知,土壤盐分在 2015—2016 年秋季大范围空间运移过程主要集中在河流影响范围内,该研究结果表明,河流在空间大尺度上对土盐运移具有重要影响。

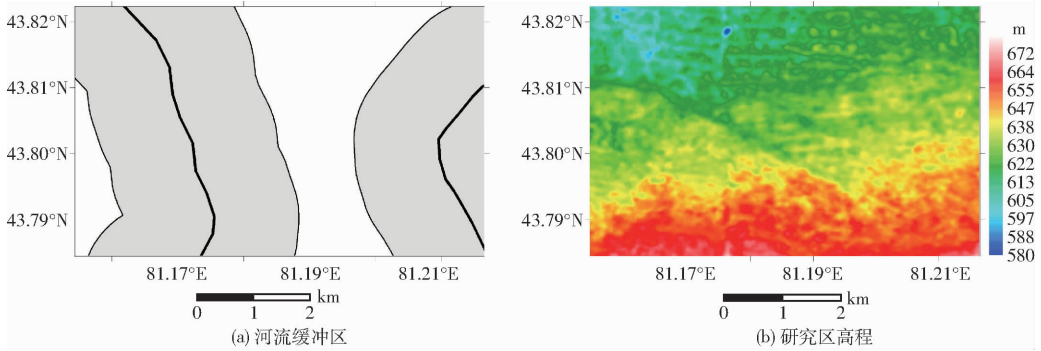


图 6 研究区河流缓冲区图及高程图

Fig. 6 River buffer map and its elevation map in study area

表 4 2015 年及 2016 年秋季不同缓冲区范围与土壤盐分关系统计结果

Tab. 4 Statistical results of relationship between buffer area and soil salinity in autumn of 2015 and 2016

年份	高值区交叉面 积比/%	0 ~ 0.5 km 盐分均 值/(g·kg ⁻¹)	0.5 ~ 1 km 盐分均 值/(g·kg ⁻¹)	1 ~ 1.5 km 盐分均 值/(g·kg ⁻¹)	> 1.5 km 盐分均 值/(g·kg ⁻¹)
2015 年秋季	85	> 2	> 1.5	> 1	< 1
2016 年秋季	89	> 2.5	> 1.5	> 1	< 1

2.4.3 察南灌区地势对土壤盐分运移的影响

区域性的高程信息可以反映不同点位之间的高程差,进而可以反映相应高程差之下流体介质的流速、流向信息。为研究地形对盐分运移的影响,通过 DEM 提取,得到研究区高程图(图 6b)。

由高程图可知,察南灌区地势为西北低,东南高,呈阶梯状上升,高程范围处于 580 ~ 672 m 之间,东、西部最大高程差约为 92 m。结合图 5 土壤盐分时空变异图分析可知,2015 年秋季各土层盐分峰值区域主要集中在研究区的西北部,2016 年秋季各土层盐分峰值区域主要集中在研究区的中部,分别为对应区域内相对高程较低的区域。另外,自 2015 年秋季至 2016 年秋季,土壤盐分总体呈现由研究区西部向中部及东部区域运移,盐分含量峰值增加,且主要集中在局部小范围区域内,并未形成区域尺度上的盐分自高地势区至低地势运移的趋势。

该趋势表明,在空间大尺度范围上,地势对土壤盐分运移为非主要决定性因素,主要原因是全域尺度上,研究区坡度约为 1.2%,地势变化较平缓,而在局域尺度上,地势变化较明显;另外,研究区以水稻种植为主,为保持水稻作物生长所需水量,在稻田边界修建有高出地面 30 ~ 50 cm 的田埂,以及部分

区域沟渠阻隔作用。二者综合作用,导致研究区土壤水盐在空间大尺度上不能自由运移,只能在局域小尺度范围内产生作用,且呈现为高地势区向低地势区运移。

3 结论

(1) 相比于 2015 年秋季,研究区在 2016 年秋季非盐化土面积显著减小,中度盐化土面积显著增加,非盐化土、轻度盐化土向中度盐化土演变,且土壤盐分含量总体上呈现逐年加重的趋势。

(2) 研究区土壤盐分空间变异半方差函数拟合性较好,2015 年秋季及 2016 年秋季土壤各土层盐分含量在各自系统内具有强烈的空间相关性。在垂直方向上,土壤盐分含量自上而下逐渐减少。在水平空间尺度上,对于 2015 年秋季,土壤盐分含量高值区主要分布在西部及东北部分区域内,且自灌区西北至东南方向,盐分含量总体呈现减小的趋势;对于 2016 年秋季,土壤各土层盐分含量高值区主要集中在研究区中部,并以此为盐分中心向两侧辐散减小。在时间尺度上,自 2015 年秋季至 2016 年秋季,研究区各土层土壤盐分向中部及东部区域运移,盐化土面积增加,且盐分含量平均值逐渐增大。

(3)通过对察南灌区土壤盐分累积及运移机理研究发现,研究区土壤盐分垂直分布变化格局主要受灌溉水下渗作用影响,另外,在水平空间大尺度范围上,河流是影响土盐运移的主要影响因素,在局域小尺度范围内,地势、地形是影响土盐运移的主要影响因素。

(4)基于 EM38 – EM31 型电导率仪多模式测定

及土壤分层解译模型构建法对察南灌区进行多样点盐分测定研究,能较好地反映出研究区盐分因子空间变异特征,很大程度上提高了察南灌区表层土壤盐分特征因子空间变异研究的效率以及研究的精度,对于察南灌区及同类型干旱、半干旱灌溉区表层土壤盐分研究具有较高的理论意义和实践价值。

参 考 文 献

1 WICHELS D, QADIR M. Achieving sustainable irrigation requires effective management of salts, soil salinity, and shallow groundwater[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 157: 31 – 38.

2 李建国, 濮励杰, 朱明, 等. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]. *地理学报*, 2012, 67(9):1233 – 1245.
LI Jianguo, PU Lijie, ZHU Ming, et al. The present situation and hot issues in the salt-affected soil research [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9):1233 – 1245. (in Chinese)

3 赵可夫, 李法曾, 张福锁. 中国盐生植物[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2013.

4 孙三民, 安巧霞, 蔡焕杰, 等. 枣树间接地下滴灌根区土壤盐分运移规律研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(1): 160 – 169. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150124&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.024.
SUN Sanmin, AN Qiaoxia, CAI Huanjie, et al. Research on salt movement law in Jujube root zone under indirect subface drip irrigation[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2015, 46(1): 160 – 169. (in Chinese)

5 BARBIERO L, CUNNAC S, MANE L, et al. Salt distribution in the Senegal middle valley: analysis of a saline structure on planned irrigation schemes from N’Galenka creek[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 46(3): 201 – 213.

6 刘广明, 吴亚坤, 杨劲松, 等. 基于电磁感应技术的区域三维土壤盐分空间变异研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(7): 78 – 82. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130715&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.015.
LIU Guangming, WU Yakun, YANG Jinsong, et al. Regional 3-D soil salt spatial variability based on electromagnetic induction technology[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2013, 44(7): 78 – 82. (in Chinese)

7 WEINDORF D C, ZHU Y. Spatial variability of soil properties at Capulin Volcano, New Mexico, USA: implications for sampling strategy[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(2): 185 – 197.

8 王振华, 杨培岭, 郑旭荣, 等. 新疆现行灌溉制度下膜下滴灌棉田土壤盐分分布变化[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(8): 149 – 159. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140824&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.024.
WANG Zhenhua, YANG Peiling, ZHENG Xurong, et al. Soil salinity changes of root zone and arable incotton field with drip irrigation under mulch for different years[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2014, 45(8): 149 – 159. (in Chinese)

9 CHEN L J, FENG Q, LI F R, et al. A bidirectional model for simulating soil water flow and salt transport under mulched drip irrigation with saline water[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 14(6): 24 – 33.

10 姚远, 丁建丽, 雷磊, 等. 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[J]. *生态学报*, 2013, 33(17): 5308 – 5319.
YAO Yuan, DING Jianli, LEI Lei, et al. Monitoring spatial variability of soil salinity in dry and wet seasons in the North Tarim Basin using remote sensing and electromagnetic induction instruments[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2013,33(17):5308 – 5319. (in Chinese)

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 Jinsong. 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)

12 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[J]. *土壤*, 2003(1):27 – 29.
LIU Guangming, YANG Jinsong, JU Maosen, et al. Technology of chorometry using electromagnetic induction and its application in agriculture[J]. *Soils*,2003(1):27 – 29. (in Chinese)

13 JOURNEL A G. Mining geostatistics[M]. New York:Academic Press, 1978.

14 辛厚文. 混沌、分形理论及其应用[M]. 合肥:中国科技大学出版社, 1993.

15 苏里坦, 宋郁东, 张展羽. 新疆渭干河流域地下水含盐量的时空变异特征[J]. *地理学报*, 2003, 58(6): 854 – 860.
SU Litan, SONG Yudong, ZHANG Zhanyu. Study on the spatio-temporal variation of groundwater salt content in Xinjiang Weigan catchment[J]. *Acta Geographica Sinica*,2003, 58(6): 854 – 860. (in Chinese)

16 苏里坦, 古丽美拉, 宋郁东, 等. 玉龙喀什河平原区地下水矿化度的时空变异研究[J]. *干旱区研究*, 2005, 22(4):26 – 31.
SU Litan, GULI Meila, SONG Yudong, et al. Study on the temporal-spatial variation of groundwater mineralization beneath a plain in the Yurungkax River Watershed [J]. *Arid Zone Research*, 2005, 22(4):26 – 31. (in Chinese)

17 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京:科学出版社, 1993.

18 张仁铎. 空间变异理论及应用[M]. 北京:科学出版社, 2005.

19 CAMBARDELLA C A, MOORMAN T B, NOVAK J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(5):1501 – 1511.

20 WU W Y, YIN S Y, LIU H L, et al. The geostatistic-based spatial distribution variations of soil salts under long-term waste water irrigation[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(10): 6747 – 6756.

21 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.