doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.035

盐渍化灌区节水改造后土壤盐分时空变化规律研究

史海滨　吴　迪　闫建文　李仙岳　朱　科　迟碧璇
(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 为探明沈乌灌域节水改造后因地下水水位变化造成的土壤盐分重分布规律,采用区域土壤信息定点监测,并结合经典统计学、空间插值、缓冲区分析和空间自相关分析方法,研究节水改造前后沈乌灌域土壤盐分空间变异、时空分布规律及不同改造年限区域土壤盐分变化差异。结果表明:节水改造后,秋浇前土壤整体含盐量平均降幅 7.30%,秋浇水量减少,秋浇后土壤盐分淋洗效果减弱 9.26%;空间上,土壤盐分高值区(大于 6 g/kg)多位于地下水埋深较浅的东北和南部区域,低值区(小于 2 g/kg)位于西南和东部沙区。节水改造后,秋浇前土壤盐分全局 Moran's *I* 指数平均增幅为 5%,空间相关性增强;秋浇水量减少,全局 Moran's *I* 指数变化不显著,秋浇作用对土壤盐分空间自相关影响度减弱。由 LISA 集聚分析可知,改造后、秋浇前南部高-高显著区向不显著和高-低区转变,秋浇后南部集聚特征仍十分显著,存在盐渍化风险,改造后仍是盐渍化防治重点区域。针对中度耐盐作物,沈乌灌域耕层作物生长安全区和深层非盐渍土面积比例分别为 49.66% 和 71.57%;改造后,秋浇前耕层作物生长安全区和深层非盐渍土分别增加 4.82、1.85 个百分点,秋浇后,耕层作物生长安全区面积增幅下降 5.02 个百分点,深层变化不显著。不同距离缓冲区对平均土壤含盐量的解释能力较强,长期改造区和短期改造区受渠道影响半径分别为 1.5 km 和 0.7 km,长期改造区缓冲区内平均土壤含盐量下降速率高于短期改造区,均一化程度较高。综上所述,节水改造工程实施后,土壤盐渍化程度减轻,作物生长安全区面积增加,表聚作用弱化,秋浇水量减少,土壤盐分淋洗效果减弱,土壤环境有所改善。

关键词: 土壤盐分; 空间变异; 节水改造; 地统计学; 空间自相关; 缓冲区分析
中图分类号: S154.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)02-0318-14　　**OSID**:

Spatial-temporal Variation of Soil Salinity after Water Saving Transformation in Salinized Irrigation District

SHI Haibin　WU Di　YAN Jianwen　LI Xianyue　ZHU Ke　CHI Bixuan
(*College of Water Conservation and Civil Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Huhhot* 010018, *China*)

Abstract: After the transformation of water saving, the soil salinity of Shenwu Irrigation Area was redistributed due to the change of groundwater level. Based on regional soil information fixed point monitoring, the classical statistics, spatial interpolation, buffer analysis and spatial autocorrelation analysis methods were used to study the spatial variability, temporal and spatial distribution of soil salinity and the difference of soil salinity change in regions for a fixed number of different transformation years. The results showed that after water saving transformation, the average salt content of the whole soil was decreased by 7.30% before autumn irrigation, the amount of water poured in autumn irrigation was decreased, and the leaching effect of soil salinity was decreased by 9.26% after autumn irrigation. In the space domain, the high value of soil salinity (great than 6 g/kg) was located in the northeast and southern regions with shallow groundwater depth, and the low value of soil salinity (less than 2 g/kg) was located in the southwest and eastern sand areas. After water saving transformation, the average increase amplitude of soil salt global Moran's *I* index before autumn irrigation was 5%, the spatial correlation was enhanced. The water volume of autumn irrigation water quantity was decreased, and the

收稿日期: 2019-05-11　修回日期: 2019-08-14
基金项目: 国家自然科学基金项目(51769024、51539005)、内蒙古水利厅重大项目(NSK2017-M1)和内蒙古自治区科技计划项目(201602049)
作者简介: 史海滨(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事灌溉理论与技术研究,E-mail: shi_haibin@sohu.com
通信作者: 闫建文(1985—),男,助理研究员,博士,主要从事农田水土环境变化研究,E-mail: baotouyan13579@163.com

global Moran's *I* index was changed, but it was not significant, and the influence of autumn irrigation on soil salinity spatial autocorrelation was weakened. According to the analysis of LISA cluster map, it was revealed that the high - high spatial pattern in the south before autumn irrigation was changed to non-significant and high - low cluster area, and the cluster characteristics in the south after autumn irrigation were still very significant, there was salinization risk zone, and it was still the key area of salinization prevention and control after transformation. For moderately salt-resistant crop, the proportion of crop growth safety zone and deep non-saline soil area in Shenwu Irrigation Area was 49.66% and 71.57%, respectively, after transformation, the area of crop growth safety zone and deep non-saline soil was increased by 4.82 percentage points and 1.85 percentage points, respectively, before autumn irrigation, and decreased by 5.02 percentage points after autumn irrigation, but the change in deep layer was not significant. The explanatory capability of the average soil salt content in different distance buffer was strong. The affecting radius of the long-term and short-term transformation regions was 1.5 km and 0.7 km, respectively. The falling rate of average soil salinity content in the buffer of the long-term transformation region was higher than that in the short-term transformation region, and the degree of homogenization was higher. In summary, since project of water-saving transformation, the degree of soil salinization was reduced, the area of crop growth safety zone was increased, the surface accumulation was weakened, the amount of autumn watering was reduced, the influence of autumn irrigation on soil salt spatial autocorrelation was weakened, and the soil environment was improved. It was suggested that subsurface pipe drainage and chemical improvement agent should be used in the risk area of local salinization.

Key words: soil salinity; spatial variability; water saving transformation; geostatistics; spatial autocorrelation; buffer analysis

0　引言

河套灌区是典型盐渍化灌区,轻度、中度和重度盐渍化耕地分别占总面积的 29.8%、17.2% 和 9.2%[1]。由于灌溉方式不合理及渠系水渗漏导致地下水位上升,又由于潜水蒸发强烈,下层盐分向表层聚集,增大了土壤盐渍化风险[2],威胁灌区农业可持续发展和生态环境安全[3]。因此,自 1998 年以来河套灌区实施了大规模续建配套与节水改造工程,推广节水灌溉,提高渠道防渗作用,年均净引水量由 52 亿 m^3 减少到 47 亿 m^3[4],使得灌区水循环和地下水埋深发生巨大变化,导致土壤盐分重新分布。在水权改革试点工作[5]中,沈乌灌域是黄河干流水权盟市间转让工程重要试点,根据《黄河水权转让管理实施办法》其转让水权指标为 1.2 万 m^3,工程实施后渠道衬砌长度为 1 522.2 km,渠道衬砌率达 100%,节水改造工程实施力度大,引水量减少,对该区域生态环境也产生较大影响[6-7]。土壤盐分是评价作物安全生长的重要指标,也是农田生态环境的重要指标,在区域、空间和时间尺度上对灌区节水改造后土壤盐渍化演变规律进行深入分析[8]很有必要。

针对区域土壤盐分时空变化特征的相关研究颇多,文献[9-10]应用地质统计和经典统计方法尝试探索农田尺度上盐度方差结构与空间变异的关系,文献[11-12]则提出了一个基于地统计学的土壤盐分空间动态模型方法框架,应用 GIS 技术,量化土壤性质空间变化尺度和强度。随着土壤盐分空间动态预测评估模型的逐步成熟,CEMEK 等[13]将该方法应用于灌区土壤盐分时空变异评价中,文献[14-15]分析了不同土层土壤盐分空间变异特征,使得土壤盐分时空变异研究在水平和垂直尺度上得到延伸。多位学者研究证明,使用空间插值方法进行土壤盐分预测精度较好[16-20],但量化空间自相关程度存在短板。近年来空间聚类识别方法逐渐应用于土壤属性热点分析研究中,如 Getis' *G* 指数[21]、空间扫描统计[22]和 Tango' *C* 指数[23],使用最多的是 Moran's *I* 指数[24-25]。Moran's *I* 指数能够很好地反映整体空间相关程度和检查独立位置显著情况。但是,在节水改造工程实施条件下对盐渍化区域不同土层土壤盐分时空变化特征及规律的相关研究鲜有报道。李彬等[26]在农田尺度下研究河套灌区中游节水改造前后土壤盐分剖面和空间分布规律,但并没有在宏观尺度上分析土壤盐分时空演变规律和准确地量化空间自相关程度。

本文以水权转换重要试点——河套灌区上游沈乌灌域为研究区域,研究引黄水量和秋浇水量减少及渠系防渗作用增强的节水改造条件下,土壤盐分时空变异和演变规律特征,评估土壤盐分空间分布格局,并采用 Moran's *I* 指数评估空间自相关程度,通过缓冲区分析不同节水改造年限区域土壤盐分变化差异,探明区域、空间和时间尺度上土壤盐渍化分布情况,以期为后续沈乌灌域的农业发展、秋浇制度

管理和节水改造措施的实施提供指导依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

沈乌灌域位于内蒙古河套灌区最西端,西南临乌兰布和沙漠,东南起三盛公水利枢纽引水口,东北处河套平原区,总面积 1 860 km^2。沈乌灌域呈由东南向西北倾斜的地势,海拔在 968 ~ 1 154 m 之间。温带大陆性干旱气候,干燥多风,日照时间长,多年平均气温 6 ~ 8℃,平均相对湿度 40% ~ 50%,年均降水量 146.4 mm,年均蒸发量 2 200 mm,多年平均蒸降比为 15.03。沈乌灌域内土壤类型有灌淤土、盐土、风砂土、灰漠土、棕钙土、草甸土 6 个类型,灌域内耕地多以砂壤土和壤砂土为主,分别占总耕地的 46.60% 和 46.83%。土地利用方式以草地为主,面积为 838.28 hm^2;其次是 597.56 hm^2 的水浇耕地,还有 123.80 hm^2 的水域,以及防风林带、道路、居民区、裸地等。2013—2018 年,沈乌灌域种植的作物以玉米和葵花为主,二者种植比例超过 56%,其他主要种植作物为小麦、蕃茄、瓜类及其他杂粮。沈乌灌域位于河套灌区上游,以夏灌(4—9 月)和秋浇(10—11 月)为主,没有春灌。沈乌灌域多年(1998—2018 年)地下水埋深和地下水矿化度分别为 1.82 m 和 1.50 g/L。截止 2017 年,内蒙古黄河干流水权盟市间转让河套灌区沈乌灌域试点水权转换工程基本实施完毕,灌域斗级以上渠道衬砌率和渠系建筑物配套率分别由 5.80% 和 3.07% 均提高到 100%。2018 年灌域总引水量 3.768 万 m^3,与试点现状年引水量 5.587 万 m^3(2009—2012 年平均)相比减少 1.819 万 m^3。

1.2 样本采集与测定

以 2015 年 4 月沈乌灌域的 Landsat 8 OLI 遥感影像(分辨率为 30 m)的多光谱和全色波段融合图像为参考资料,遵循均匀随机布点原则,将研究区网格化,依据地类分布情况调整样点,在盐碱地、沙地、湖泊、林地、耕地等附近布设相应点位,且节水改造以渠道衬砌为主要形式,因此多数点位布设在其主要骨干渠道附近,最终确定布设 40 个土壤盐分监测点,具体如图 1 所示,其中土地利用分类图来源于 FROM - GLC 网站。自 2015 年内蒙古黄河干流水权盟市间转让,河套灌区沈乌灌域试点项目实施,2015、2018 年 9 月和 10 月进行野外采样,使用取土钻分层(0 ~ 10 cm、10 ~ 30 cm、30 ~ 50 cm)采集 120 个土壤样本,并将土壤样本装于自封袋带回实验室,晾干碾碎,过 2 mm 筛,以 1∶5 的土水比配置测定溶液,测定土壤八大离子及土壤含盐量[27]。采用 GPS 定位技术确定各采样点的相对坐标,并于采样期间记录各采样点周围地形地质、灌溉条件等情况。2015、2018 年降雨量基本与平水年(145.47 mm)降水水平持平,由于沈乌灌域没有春灌,主要进行大面积的秋浇,9 月正处于河套灌区夏灌结束秋浇未开始时期,一方面夏灌结束后,受灌溉水影响的土壤盐分再分配基本稳定,节水改造工程措施对灌溉水的影响进而对土壤盐分的影响也基本结束,在这段时间采集的土样能充分反映节水改造对灌区土壤盐分的影响,并且此时也是地下水动态的相对稳定期;另一方面,通过对此时土壤盐分的分析,能够有针对性地指导秋浇。故以 2015 年 9 月(秋浇前期)和 10 月(秋浇后期)作为节水改造前基准年,探究水权转换背景下,节水改造后(2018 年 9、10 月)土壤盐分相较于基准年的时空变异及时空分布规律。

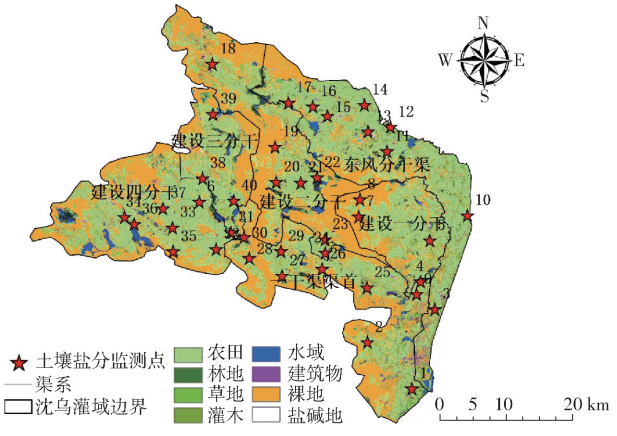


图 1 研究区采样点位布置图

Fig. 1 Location map of study area and sampling point

1.3 研究方法

1.3.1 数理统计

将采集的土壤含盐量进行数据预处理,剔除异常值,运用经典统计方法分析土壤盐分特征变化,并对其进行 K - S 检验土壤含盐量是否符合正态分布,对不符合正态分布的属性值进行对数变换,之后构建和拟合适宜的半方差函数理论模型[28-30],分析土壤盐分空间异质性。在 ArcGIS 10.4 空间分析模块进行缓冲区分析,根据不同节水改造年限条件,选取东风分干渠(节水改造时间为 2017 年 3 月 10 日—2017 年 12 月 20 日)和一干渠渠首(节水改造时间:上游,2014 年 1 月 20 日—6 月 20 日;中游,2015 年 3 月 2 日—2016 年 8 月 24 日;下游,2016 年 6 月 20 日—2017 年 11 月 30 日)两区域进行典型对比,分析不同改造年限区域沿渠道不同距离缓冲区内土壤盐分变化情况。

1.3.2 空间自相关

为进一步研究沈乌灌域土壤盐渍化水平的不平

衡性和全局空间自相关程度，采用 Moran's I 指数评估全局空间集聚特征，LISA 集聚图评价区域高低显著热点水平位置和范围。空间自相关系数(Moran's I 指数)定义为[32]

$$I = \frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中　x_i——样点 i 的空间属性观测值

x_j——样点 j 的空间属性观测值

$\bar{x}$——所有样点观测值的均值

n——观测点位个数

w_{ij}——样点 i 和 j 之间空间邻近度的权重系数

其中，Moran's I 大于 0 表示空间正相关性，其值越大，空间相关性越明显。Moran's I 小于 0 表示空间负相关性，其值越小，空间差异越大，否则，Moran's I 等于 0，空间呈随机性。计算 Z 值对其进行检验。为进行局部空间自相关分析，检查独立位置显著情况，绘制 LISA 集聚图，样点 LISA 集聚图表示该点与邻近点属性值空间集聚特性，将全局空间相关系数分解到各样点的空间自相关性[24,32-33]。

1.3.3　反距离插值法

反距离插值法(IDW)是一种简单快速、易于计算的常用的空间插值方法[16,28,34]，应用 IDW 空间插值方法绘制土壤盐分空间分布图，相比 Kriging 插值法可以更直观地反映区域和局部变化趋势[16,28,30]，是一种根据已知数据集假定评估任意点 s_0 预测值的线性插值器，其定义为[34]

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i Z(s_i) \quad (2)$$

其中

$$\lambda_i = \frac{(d(s_i, s_0))^{-p}}{\sum_{i=1}^{n}(d(s_i, s_0))^{-p}} \quad (3)$$

式中　$\hat{Z}(s_0)$——评估点位 s_0 的预测值

$Z(s_i)$——已知点位的实测值

λ_i——权重

$d(s_i, s_0)$——样点和样点之间的欧氏距离

p——指定幂值，一般 $1 < p < 3$

随着 p 值增加，s_0 距离 s_i 越远，则权重越小。采用均值误差(ME)和均方根误差(RMSE)判断反距离插值法所得的预测结果，其中均值误差接近 0，均方根误差越小越好。空间分析的精度使用交叉验证法进行检验。

1.4　数据处理方法

采用 GS + 7.0 拟合适宜不同土层土壤含盐量的半方差函数理论模型，在 ArcGIS 10.4 中计算 Moran's I 指数和 Z 值，使用 Geoda 软件空间分析模块分别绘制 Moran's I 指数散点图和 LISA 聚集图。利用 ArcGIS 10.4 软件进行反距离空间插值，获得沈乌灌域土壤盐分空间分布图。进行缓冲区分析，获得不同节水改造年限典型渠道剖面土壤盐分变化图。

2　结果与分析

2.1　土壤盐分描述性统计特征

对土壤含盐量进行 K－S 检验均为偏态分布，经过对数变换后，由表 1 可看出，其偏度和峰度(经过对数变换后计算得到)较小，符合正态分布。

表 1　土壤盐分特征统计

Tab. 1　Statistics of soil salinity characteristics

监测时间		土层深度/cm	最大值/(g·kg⁻¹)	平均值/(g·kg⁻¹)	最小值/(g·kg⁻¹)	标准差/(g·kg⁻¹)	变异系数/%	方差/(g²·kg⁻²)	偏度	峰度	分布类型
改造前(2015 年)	秋浇前(9 月)	0 ~ 10	26.91	3.43	0.23	4.300	125.5	33.699	0.50	−0.33	偏态
		10 ~ 30	22.24	2.36	0.12	2.436	103.2	16.581	0.40	−0.35	偏态
		30 ~ 50	14.75	1.75	0.08	1.230	70.3	6.304	0.14	0.35	偏态
	秋浇后(10 月)	0 ~ 10	20.81	2.44	0.04	3.334	136.8	23.908	0.68	0.75	偏态
		10 ~ 30	12.53	1.68	0.18	1.514	90.0	8.209	0.98	0.46	偏态
		30 ~ 50	9.48	1.39	0.11	0.852	61.5	3.617	0.59	0.44	偏态
改造后(2018 年)	秋浇前(9 月)	0 ~ 10	24.65	3.23	0.18	3.845	119.0	28.831	0.68	0.02	偏态
		10 ~ 30	18.66	2.10	0.16	1.927	91.7	11.506	0.45	−0.03	偏态
		30 ~ 50	14.94	1.66	0.21	1.230	74.3	6.420	0.68	0.42	偏态
	秋浇后(10 月)	0 ~ 10	19.27	2.28	0.18	2.734	120.0	17.850	0.84	0.20	偏态
		10 ~ 30	10.27	1.70	0.19	1.128	66.2	4.579	0.33	−0.65	偏态
		30 ~ 50	7.59	1.62	0.17	0.843	52.0	2.895	0.25	−0.60	偏态

沈乌灌域两年各土层平均土壤含盐量在 1.39 ~ 3.43 g/kg 之间，属于轻中度盐渍化灌域。节水改造前，秋浇前表层土壤含盐量最大，为 3.43 g/kg，与深层差异明显，垂直方向上土壤盐分变异性大；秋浇后各层土壤含盐量分别降低 28.9%、28.6%、20.8%，

表明土壤盐分淋洗效果良好。

节水改造后,秋浇前表层土壤盐渍化程度减轻 5.69%,10 ~ 30 cm 和 30 ~ 50 cm 土层土壤含盐量分别下降了 10.82% 和 5.37%,各土层土壤含盐量平均降幅为 7.30%,同时 2018 年灌域平均地下水水位较 2015 年下降了 0.44 m;此外,秋浇水量减少了 8 690 m^3,秋浇后表层盐分含量减轻程度变化不显著,10 ~ 30 cm 和 30 ~ 50 cm 土层土壤含盐量分别下降 9.71% 和 18.70%。研究发现,节水改造后秋浇前土壤整体含盐量平均降幅 7.30%,此外,秋浇水量减少,秋浇后土壤盐分淋洗效果减弱 9.26%。

变异系数 C_V 反映土壤含盐量数据间的离散程度,其定义为标准差与平均值之比[35]。$C_V < 10\%$ 为弱变异性,$10\% \leqslant C_V \leqslant 100\%$ 为中等变异性,$C_V > 100\%$ 为强变异性[27]。由表 1 可知,0 ~ 10 cm 土层土壤盐分属于强变异性,10 ~ 30 cm 和 30 ~ 50 cm 土层土壤盐分属中等变异性。

2.2 土壤盐分空间结构分析

由上述经典统计分析得到适于空间预测的数据集。为研究节水改造后沈乌灌域空间范围的土壤盐分空间变异特性,利用地统计学理论进行半方差函数的计算、模拟、分析和检验,如表 2 所示。

表 2 半方差函数模型参数统计

Tab. 2 Statistics of semi-variance function model parameters

监测时间		土层深度/cm	理论模型	块金数 C_o	基台数 $C_o + C$	结构比 $C_o/(C_o + C)$/%	变程 A_o/km	决定系数	残差
改造前(2015 年)	秋浇前(9 月)	0 ~ 10	Exponential	0.548	1.355	40.4	0.07	0.722	0.307
		10 ~ 30	Exponential	0.459	1.515	30.3	0.05	0.785	0.517
		30 ~ 50	Exponential	0.167	1.056	15.8	0.07	0.681	0.213
	秋浇后(10 月)	0 ~ 10	Exponential	0.506	1.778	28.5	0.08	0.774	0.252
		10 ~ 30	Exponential	0.715	2.672	26.8	0.60	0.656	0.863
		30 ~ 50	Exponential	0.064	0.688	9.3	0.04	0.613	0.162
改造后(2018 年)	秋浇前(9 月)	0 ~ 10	Exponential	0.444	1.390	31.9	0.10	0.678	0.925
		10 ~ 30	Exponential	0.287	1.062	27.0	0.05	0.689	0.430
		30 ~ 50	Exponential	0.119	0.817	14.6	0.06	0.767	0.129
	秋浇后(10 月)	0 ~ 10	Exponential	0.327	0.985	33.2	0.06	0.543	0.499
		10 ~ 30	Exponential	0.611	2.273	26.9	0.53	0.450	0.745
		30 ~ 50	Exponential	0.191	1.016	18.8	0.06	0.537	0.475

由表 2 可知,由于决定系数 R^2 在 0.450 ~ 0.785 之间,理论模型拟合度较好,表明各土层土壤盐分的半方差函数均适用 Exponential 模型。用块金数 C_o、空间结构比 $C_o/(C_o + C)$ 和变程表示土壤盐分空间异质性程度[36-39]。其中 $C_o/(C_o + C) < 25\%$,为强空间相关性,主要受结构性因素影响;$25\% \leqslant C_o/(C_o + C) \leqslant 75\%$,为中等空间相关性,受结构性和随机性因素共同作用;$C_o/(C_o + C) > 75\%$,为弱空间相关性,受随机因素影响大。由表 2 可知,节水改造前后各层土壤含盐量的块金数 C_o 和基台数 $(C_o + C)$ 均为正值,受随机因素、固有变异及采样误差引起的变异不容忽视。节水改造后,秋浇前耕层(0 ~ 30 cm)土壤盐分结构比下降 15.92 个百分点,但结构比均在 25% 以上,始终受结构性和随机因素共同作用,深层(30 ~ 50 cm)土壤盐分结构比下降 7.97 个百分点,结构比均在 25% 以下,受结构性因素影响,说明节水改造后土壤盐渍化状况得到改善,土壤空间变异性减弱,而大量荒地复垦,随机性因素使土壤盐分空间相关性减弱,土壤属性朝均一化方向发展。秋浇后各层土壤盐分结构比均较改造前同期规律性出现差异,改造前秋浇后期各土层土壤盐分结构比平均下降 7.30 个百分点,各层空间相关性增强,而改造后 0 ~ 10 cm 和 30 ~ 50 cm 土层土壤盐分结构比分别增加了 3.94 个百分点和 29.18 个百分点,10 ~ 30 cm 土层结构比下降了 0.53 个百分点。说明秋浇水量减少,0 ~ 10 cm 和 30 ~ 50 cm 土层土壤盐分空间变异性增强。

2.3 土壤盐分空间自相关

由于小空间范围内计算的结构比均较大,空间变异性大,影响对其空间自相关性的判断,而 Moran's I 指数则是更为稳健的方法[39-41]。故为进一步研究沈乌灌域土壤盐渍化空间依赖程度和局部分布格局,用 Moran's I 指数作为衡量土壤盐分空间自相关性的指标,将沈乌灌域以 10 km × 10 km 的规模进行格网化,提高研究精度,如图 2 所示。

由表 3 可知,沈乌灌域整体土壤盐分 Z 值大于 0,$P < 0.05$,各土层均呈显著空间正相关,空间依赖性强。节水改造前,表层(0 ~ 10 cm)土壤盐分秋浇前 Moran' I 指数最小,为 0.431,Z 值为 3.885;深层(30 ~ 50 cm)土壤盐分秋浇后 Moran's I 最大,为

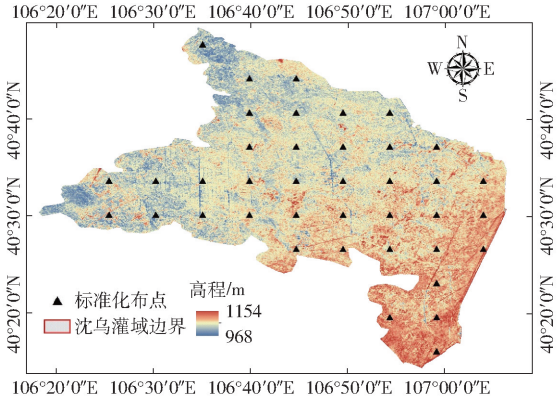


图 2　沈乌灌域土壤盐分格网化点位布置图

Fig. 2　Distribution map of soil salinity grid sites in Shenwu Irrigation Region

0.656，Z 值为 5.639，秋浇后土壤盐分空间相关性增强。节水改造后，秋浇前各土层土壤盐分 Moran's I 指数平均增幅为 5%，说明节水改造后渠道衬砌率增加，地下水水位下降，土壤盐分空间相关性增强；秋浇后较秋浇前 0 ~ 10 cm 和 30 ~ 50 cm 土层土壤含盐量 Moran's I 指数和 Z 值减少幅度在 3% 以下，10 ~ 30 cm 两指标增幅为 0.09%，各土层土壤盐分 Moran's I 指数和 Z 值降幅变化不显著。由图 3 可知，节水改造前绝大多数样点在散点图上均落于 1、3 象限，空间上呈集聚态势，节水改造后秋浇前沈乌灌域土壤盐分空间异质性减弱，秋浇后局部空间集聚逐渐向离散状态转变。

表 3　土壤盐分 Moran's I 主要空间参数

Tab. 3　Main spatial parameters of soil salinity Moran's I

参数	改造前秋浇前期(2015 年 9 月)			改造前秋浇后期(2015 年 10 月)			改造后秋浇前期(2018 年 9 月)			改造后秋浇后期(2018 年 10 月)		
	0 ~ 10 cm	10 ~ 30 cm	30 ~ 50 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 30 cm	30 ~ 50 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 30 cm	30 ~ 50 cm	0 ~ 10 cm	10 ~ 30 cm	30 ~ 50 cm
Moran's I 系数	0.431	0.462	0.474	0.488	0.557	0.656	0.431	0.542	0.463	0.426	0.543	0.449
Z	3.885	3.996	4.114	4.233	4.694	5.639	3.896	4.537	3.908	3.726	4.562	3.910
P	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

根据上述统计分析可知，表层土壤盐分空间变异性较强，其受农田管理和气象条件的影响较为明显，故选取 0 ~ 50 cm 土层的土壤含盐量进行热点分析，进一步摸清盐渍化风险区域集聚情况。由图 4 可知，节水改造前，秋浇前沈乌灌域南部处于盐渍化高值集聚区；根据统计分析可知，秋浇后整体平均土壤含盐量有所下降，建设三分干和建设四分干发生盐渍化风险可能性降低，东风分干渠和一干渠渠首的高-高显著盐渍化风险评估范围扩张，意味着尽管该区域土壤盐分得到淋洗，但仍有很大可能发生盐渍化风险。节水改造后，秋浇前 0 ~ 50 cm 土层南部高-高显著热点向不显著和高-低点位转变，北部局部出现盐渍化风险异常点；秋浇后南部土壤盐分高-高显著热点减少，但集聚特征仍十分显著。总体上，南部土壤盐分具有较高的相似性，呈现高-高集聚态势，该区域出现土壤盐分高值概率高，西部即土壤盐分呈现低-低集聚，该区域不易产生土壤盐渍化，与地处沙区的土地利用类型有关；西北和东北方向盐分分布比较随机。由此可知，沈乌灌域南部是土壤盐分含量的高-高集聚区，存在潜在的盐渍化风险，在节水改造变化环境下仍是盐渍化治理的重点区域。局部盐渍化风险地区建议采用暗管排水和化学改良剂等方式进行专项治理。

2.4　土壤盐分空间分布格局

为了更加直观地展现沈乌灌域盐渍化分布格局和程度，利用 ArcGIS 10.4 的空间分析模块进行 IDW 插值，又由空间变异性分析可知，0 ~ 10 cm 和 10 ~ 30 cm 空间变异程度相似，且土壤耕层多以 30 cm 为界线，故将土层分为耕层(0 ~ 30 cm)和深层(30 ~ 50 cm)进行空间分析，主要研究耕层土壤盐分分布格局对中度耐盐作物的生长状况影响和深层土壤盐渍化分布情况。沈乌灌域耕层和深层土壤盐分空间分布如图 5 所示。综合考虑中度耐盐农作物的生长状况和主要土壤盐分组成类型，根据盐渍化土壤的划分标准[42-44]，将土壤分为非盐渍土(含盐量小于 2 g/kg，即作物生长安全区：作物发育良好，不缺苗，产量正常)、轻度盐渍土(含盐量 2 ~ 3 g/kg，即作物轻度抑制区：植物缺苗，产量降低 10% ~20%)、中度盐渍土(含盐量 3 ~ 6 g/kg，即作物中度抑制区：植物缺苗，产量降低 20% ~50%)、重度盐渍土(含盐量 6 ~ 10 g/kg，即作物重度抑制区：植物缺苗，产量降低 50% ~80%)、盐土(含盐量大于 10 g/kg，即作物盐害区：个别植株成活，实际无收成)。

2.4.1　插值精度交叉验证

由式(2)对土壤含盐量进行反距离插值，获得沈乌灌域耕层和深层土壤盐分空间分布图(图 5)。为了对插值精度进行检验，采用交叉验证的方法评判反距离插值精度。由表 4 可知，均值误差(ME)均接近于 0，均方根误差(RMSE)处于 0.647 6 ~ 1.028 9 g/kg 之间，并且决定系数 R^2 均在 0.500 以上，这说明插值图的交叉验证参数达到了插值图精

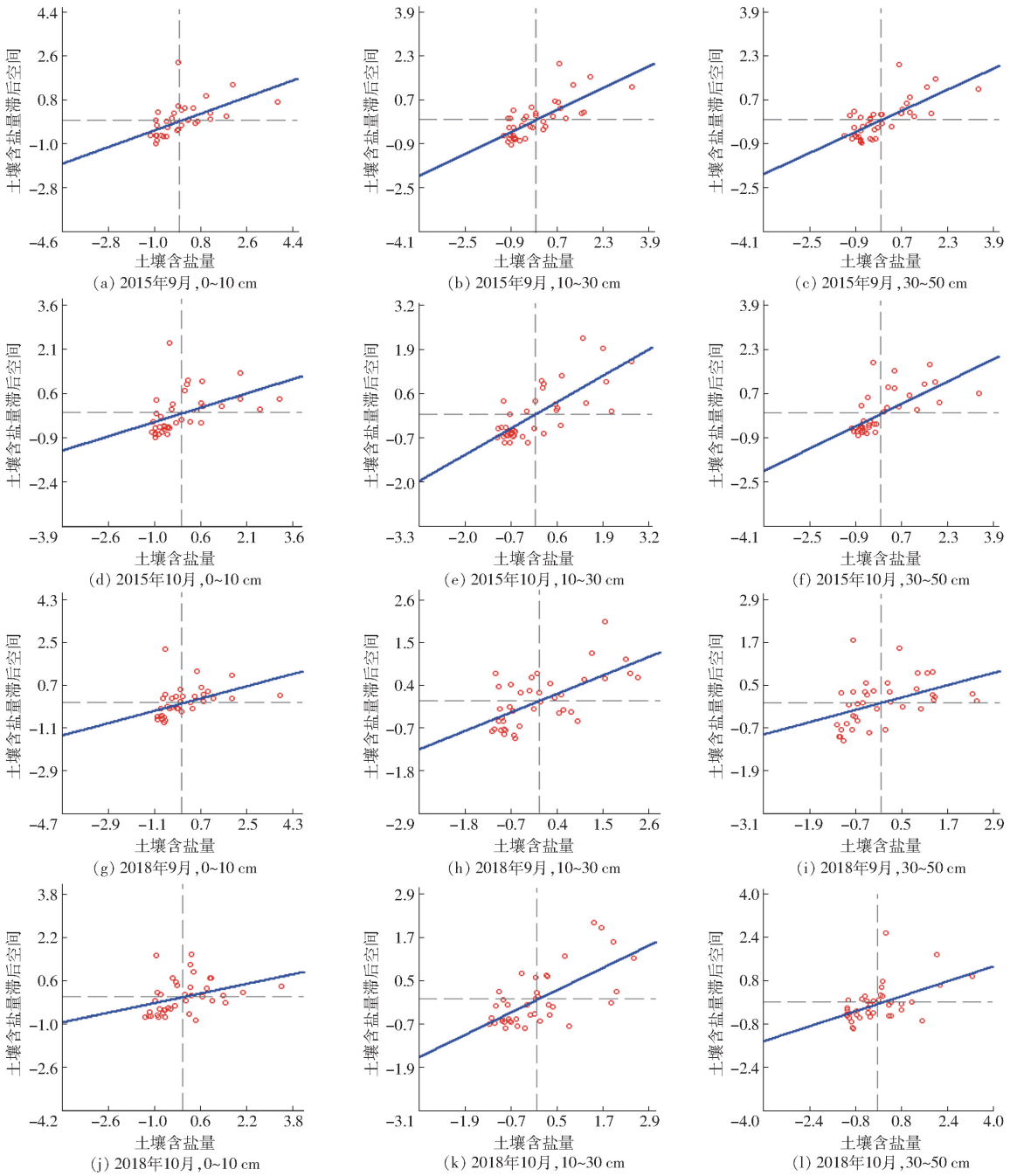


图 3 土壤盐分 Moran's *I* 散点图

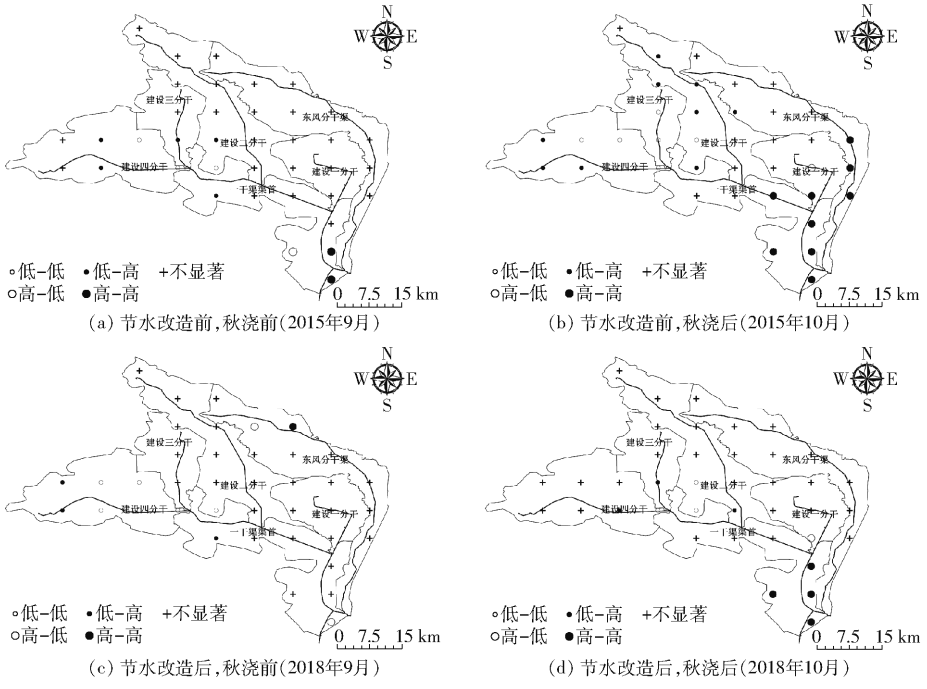
Fig. 3 Moran's *I* scatter plots of soil salinity

度要求,认为反距离插值模型描述土壤含盐量具有较好的精确度。

2.4.2 耕层(0~30 cm)土壤盐分空间分布格局

改造前,沈乌灌域主要种植作物以玉米和向日葵为主,分别是中度耐盐作物和重度耐盐作物[45]。针对中度耐盐作物,秋浇前耕层作物生长安全区、作物轻度抑制区、作物中度抑制区、作物重度抑制区和作物盐害区分别占总面积的 49.66%、18.65%、22.47%、6.61%和 2.61%(表 5),说明沈乌灌域中度耐盐作物多受轻中度土壤盐分抑制作用,而向日葵所受盐害面积较小。由图 5 可知,空间上,土壤盐分高值(大于 6 g/kg)位于东风分干渠和一干渠渠首上游区域。如图 6 所示,2015 年两区域大部分地下水埋深较浅,分别在 0.59~3.53 m 和 1.41~6.54 m 之间,加之蒸发强烈,土壤盐分借助毛细作用逐步得到累积。其余区域多为沙地,地下水埋深处于 3.90~9.20 m 之间,土壤盐分受地下水影响较小,空间差异不大;秋浇后作物生长安全区面积比例增加 14.18 个百分点,其他作物抑制区中,中度抑制区面积比例减少最多,减少 6.99 个百分点。

改造后,秋浇前作物生长安全区面积比例增加 4.82 个百分点,西南和东部区域低值(小于 2 g/kg)

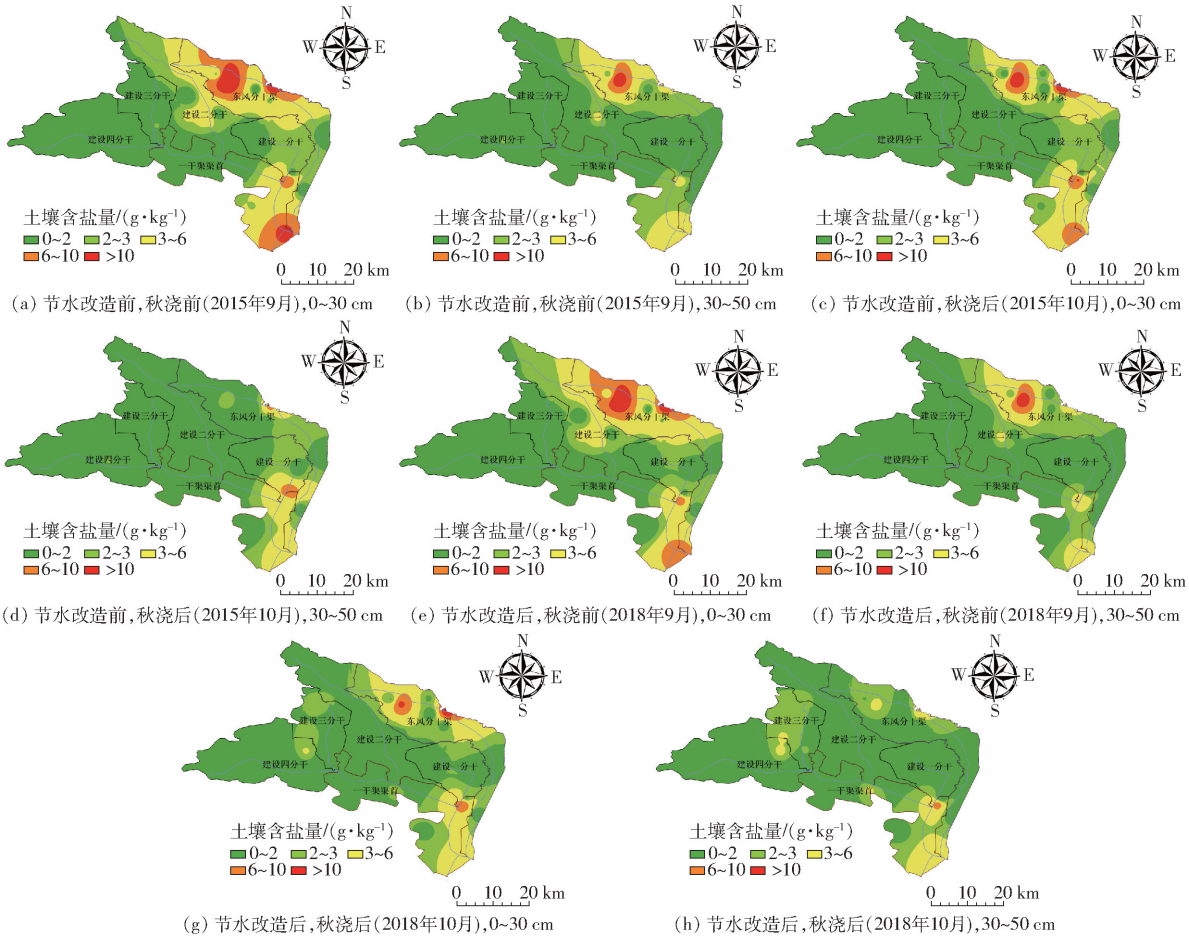


(a) 节水改造前，秋浇前(2015年9月)　(b) 节水改造前，秋浇后(2015年10月)

(c) 节水改造后，秋浇前(2018年9月)　(d) 节水改造后，秋浇后(2018年10月)

图 4　0 ~ 50 cm 土层土壤盐分 LISA 集聚图

Fig. 4　LISA cluster maps of soil salinity



(a) 节水改造前，秋浇前(2015年9月)，0~30 cm　(b) 节水改造前，秋浇前(2015年9月)，30~50 cm　(c) 节水改造前，秋浇后(2015年10月)，0~30 cm

(d) 节水改造前，秋浇后(2015年10月)，30~50 cm　(e) 节水改造后，秋浇前(2018年9月)，0~30 cm　(f) 节水改造后，秋浇前(2018年9月)，30~50 cm

(g) 节水改造后，秋浇后(2018年10月)，0~30 cm　(h) 节水改造后，秋浇后(2018年10月)，30~50 cm

图 5　土壤盐分空间分布图

Fig. 5　Spatial interpolation distribution maps of soil salinity

片状范围扩张，一干渠渠首北部盐分下降明显，这是由于局部盐荒地复垦等人为活动作用；秋浇后作物生长安全区和作物轻度抑制面积比例分别增加了 9.16、3.71 个百分点，较改造前同期安全区面积增幅下降 5.02 个百分点。改造后南部引水口地下水埋深加大了 0 ~ 40 cm，且秋浇后盐分淋洗效果明

表 4 插值精度交叉验证参数

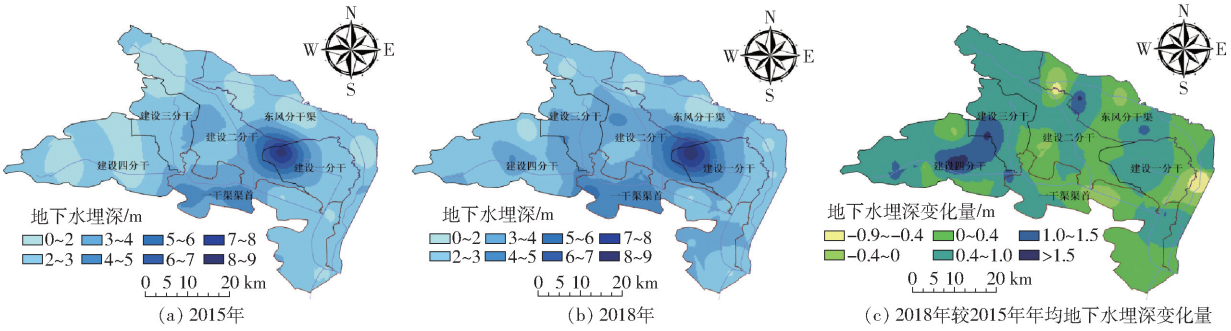
Tab. 4 Interpolation precision cross validation parameters

监测时间	土层深度/cm	均值误差/(g·kg^{-1})	均方根误差/(g·kg^{-1})	决定系数	监测时间	土层深度/cm	均值误差/(g·kg^{-1})	均方根误差/(g·kg^{-1})	决定系数
改造前秋浇前	0~30	-0.073 6	1.028 9	0.600	改造后秋浇前	0~30	-0.032 4	0.867 0	0.649
(2015 年 9 月)	30~50	-0.044 3	0.899 8	0.524	(2018 年 9 月)	30~50	0.003 0	0.677 8	0.509
改造前秋浇后	0~30	-0.043 8	0.647 6	0.525	改造后秋浇后	0~30	-0.038 1	0.923 4	0.516
(2015 年 10 月)	30~50	0.031 7	0.756 8	0.530	(2018 年 10 月)	30~50	-0.045 1	0.899 3	0.607

表 5 沈乌灌域不同盐渍化程度土壤面积及比例

Tab. 5 Soil area and proportion of different salinization degrees in Shenwu Irrigation Area

监测时间	土层深度/cm	非盐渍土		轻度盐渍土		中度盐渍土		重度盐渍土		盐土	
		面积/km^2	比例/%	面积/km^2	比例/%	面积/km^2	比例/%	面积/km^2	比例/%	面积/km^2	比例/%
改造前秋浇前(2015 年 9 月)	0~30	923.73	49.66	346.97	18.65	418.04	22.47	122.91	6.61	48.49	2.61
	30~50	1 331.36	71.57	295.23	15.87	201.60	10.84	23.55	1.27	8.40	0.45
改造前秋浇后(2015 年 10 月)	0~30	1 187.48	63.84	308.17	16.57	287.92	15.48	62.51	3.36	14.07	0.76
	30~50	1 454.52	78.19	229.06	12.31	164.08	8.82	12.47	0.67		
改造后秋浇前(2018 年 9 月)	0~30	1 013.45	54.48	323.27	17.38	378.15	20.33	115.13	6.19	30.15	1.62
	30~50	1 365.68	73.42	347.90	18.70	167.74	9.02	22.00	1.18	8.35	0.45
改造后秋浇后(2018 年 10 月)	0~30	1 183.77	63.64	392.27	21.09	250.71	13.48	28.34	1.52	5.05	0.27
	30~50	1 394.54	74.97	336.72	18.10	126.15	6.78	2.73	0.15		



(a) 2015年 (b) 2018年 (c) 2018年较2015年年均地下水埋深变化量

图 6 沈乌灌域地下水埋深空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution maps of groundwater depth in Shenwu Irrigation Area

显,而一干渠中游出现高值斑点,与秋浇水量减少有关。

2.4.3 深层(30~50 cm)土壤盐分空间分布格局

由表 5 可知,改造前,秋浇前深层非盐渍土、轻度盐渍土、中度盐渍土、重度盐渍土和盐土分别占总面积的 71.57%、15.87%、10.84%、1.27% 和 0.45%,深层较耕层盐渍化面积比例少 21.91 个百分点。由图 5 可知,空间上,土壤盐分高值区(6 g/kg)主要分布于东风分干渠中游和一干渠渠首上游区域,与耕层分布状态基本一致;秋浇后非盐渍土面积比例增加 6.62 个百分点,增幅小于深层。

改造后,秋浇前非盐渍土和轻度盐渍土面积比例分别增加了 1.85、2.83 个百分点,深层土壤盐渍化变化并不显著。因改造后处于盐荒区的东风分干渠下游地下水水位升高了 0.05 m,毛细作用增强,土壤盐分略升高,而一干渠地下水水位下降 0.17 m,其上游区域土壤盐渍化程度减轻,土壤盐分表聚现象产生改变,与空间结构分布规律一致。秋浇后非盐渍土增加了 1.55 个百分点,较改造前同期非盐渍土面积比例增幅下降了 5.07 个百分点。

2.5 不同节水改造年限渠道剖面土壤盐分变化

由上述土壤盐分空间自相关性和空间分布格局分析可知,一干渠渠首和东风分干渠两区域土壤盐渍化风险较高,且两区域节水改造年限不同,故选取两典型区进一步研究不同改造年限盐渍化区域土壤盐分变化差异。将一干渠渠首视为长期(3~5 年)改造区,东风分干渠视为短期(1~2 年)改造区。典型区域布置图见图 7、8。

为了分析渠道衬砌对区域土壤盐分变化的影响,以主要渠道为中心研究对象,利用缓冲区分析,产生距离中心研究对象 0.1、0.3、0.5、0.7、1.0、1.3、1.5 km 间隔组合的环状缓冲区,分析节水改造前后随着与渠道距离的增加,平均土壤含盐量的变化过程。

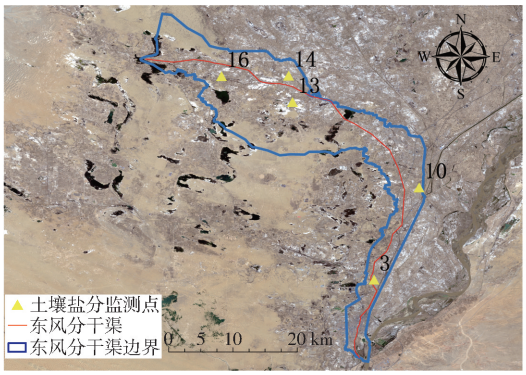


图 7　短期改造区沿渠道监测点位布置图

Fig. 7　Location map of monitoring points along channel in short-term reconstruction area

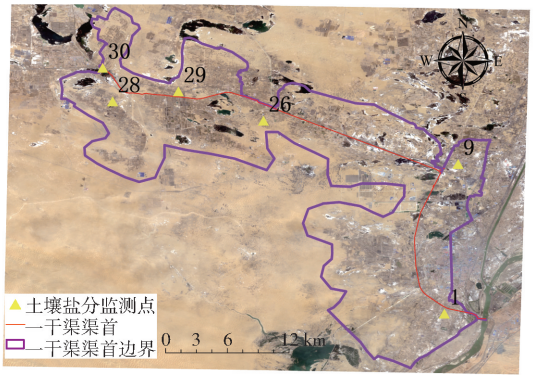


图 8　长期改造区沿渠道监测点位布置图

Fig. 8　Location map of monitoring points along channel in long-term reconstruction area

由图 9 可知，长期改造区节水改造前，秋浇前缓冲区范围内 0 ~ 30 cm 和 30 ~ 50 cm 土层土壤含盐量均值分别在 3. 65 ~ 3. 39 g/kg 和 2. 05 ~ 1. 92 g/kg 之间，不同距离缓冲区内平均土壤盐分含量线性回归分析结果表明，0 ~ 50 cm 土层秋浇前受渠道影响的半径为 1. 5 km，可划分为 1. 0 km 以内和 1. 0 km 以外两个范围，1. 0 km 以外比 1. 0 km 以内的土壤盐分下降速率更为平缓。秋浇后缓冲区范围内 0 ~ 30 cm 和 30 ~ 50 cm 土层土壤含盐量均值分别在 2. 98 ~ 2. 84 g/kg 和 2. 30 ~ 2. 19 g/kg 之间。节水改造后，秋浇前 0 ~ 30 cm 和 30 ~ 50 cm 土层在 1. 5 km 范围内的缓冲区平均土壤含盐量下降速率分别为每年 0. 050 96 g/kg 和 0. 017 45 g/kg。秋浇后，0 ~ 30 cm 土层在秋浇水量减少的条件下土壤盐分淋洗效果平均减弱 0. 32 g/kg，而 30 ~ 50 cm 土层土壤盐分含量较改造前同期出现升高的状况，可能是因为一干渠 2018 年无秋浇水量，高值区从上游逐渐向中游低值区扩散。

由图 10 可知，短期改造区节水改造前，秋浇前缓冲区范围内 0 ~ 30 cm 和 30 ~ 50 cm 土层土壤含盐量均值分别在 5. 44 ~ 5. 19 g/kg 和 2. 98 ~ 2. 82 g/kg 之间，不同土层土壤盐分差异性大，不同距离缓冲区内平均土壤盐分含量线性回归分析结果表明，0 ~ 50 cm 土层秋浇前受渠道影响的半径为 0. 7 km，可划分为 0. 3 km 以内和 0. 3 km 以外的两个范围，0. 3 km 以外比 0. 3 km 以内的土壤盐分下降速率更为平缓。秋浇后缓冲区范围内 0 ~ 30 cm 和 30 ~ 50 cm 土层土壤含盐量均值分别在 4. 23 ~ 3. 78 g/kg 和 2. 43 ~ 2. 17 g/kg 之间，0 ~ 50 cm 土层秋浇后受渠道影响的半径扩张到 1. 5 km。节水改造后，秋浇前 0 ~ 30 cm 和 30 ~ 50 cm 土层在 0. 7 km 范围内的缓冲区平均土壤含盐量下降速率分别为每年 0. 018 51 g/kg 和 0. 014 63 g/kg。秋浇后，两土层缓冲区对土壤含盐量的解释能力增强，秋浇能够有效减轻土壤盐分表聚作用。

综上所述，由不同距离缓冲区内的平均土壤盐分含量线性回归分析显示 R^2 在 0. 10 ~ 0. 94 之间，说明不同距离缓冲区对平均土壤盐分含量的解释能力较强。此外长期改造区和短期改造区受渠道影响半径分别为 1. 5 km 和 0. 7 km，30 ~ 50 cm 比 0 ~ 30 cm 土层缓冲区内平均土壤盐分含量随距离下降幅度更为平缓。随着节水改造工程的实施，长期改

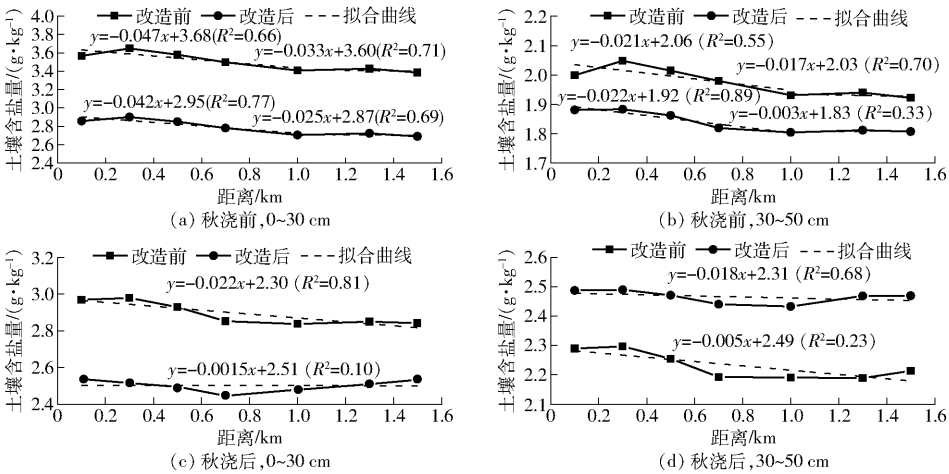
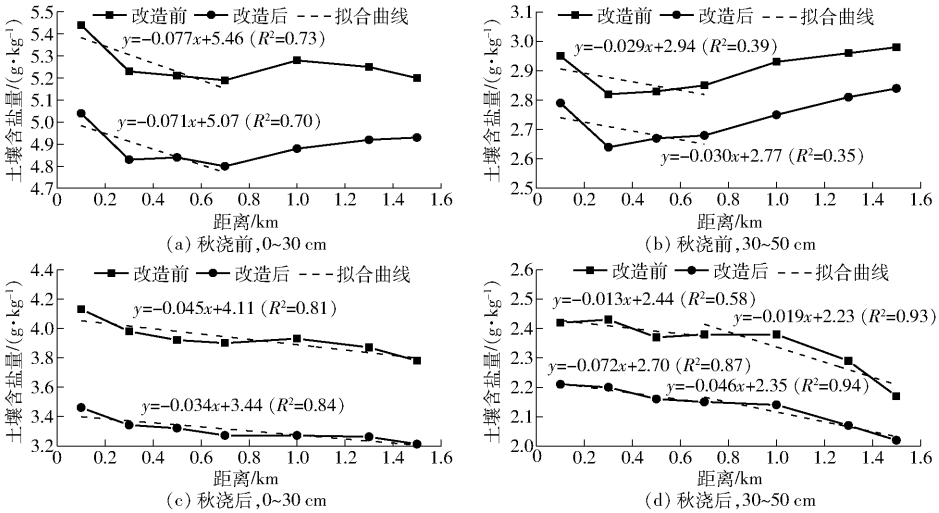


图 9　长期改造区不同距离缓冲区平均土壤盐分变化曲线

Fig. 9　Variations of average soil salt in buffer zone at different distances in long-term reconstruction area



(a) 秋浇前,0~30 cm (b) 秋浇前,30~50 cm (c) 秋浇后,0~30 cm (d) 秋浇后,30~50 cm

图 10 短期改造区不同距离缓冲区平均土壤盐分变化曲线

Fig. 10 Variations of average soil salt in buffer zone at different distances in short-term reconstruction area

造区缓冲区内平均土壤含盐量下降速率高于短期改造区,均一化程度较高,长期改造区秋浇水量减少的条件下,高值区由上游逐渐向下中游低值区扩散,土壤盐分淋洗效果减弱。

3 讨论

沈乌灌域节水改造实施力度大,渠道衬砌率高达 100%,且属于轻中度盐渍化区域,故以沈乌灌域为研究对象,分析节水改造对土壤盐分时空变化规律影响更具代表性,而此方面相关研究甚少,李彬等[26]仅从农田尺度分析河套灌区中游典型区土壤盐分时空分布变化,发现节水改造后典型区整体土壤盐分下降,与本研究结果一致。在此基础上本研究通过缓冲区分析深入研究了不同节水改造年限下区域土壤盐分变化差异,结果表明,区域受渠道影响半径和缓冲区内平均土壤含盐量下降速率呈现长期改造区大于短期改造区的规律,但由于长期改造区秋浇水量减少,高值区由上游逐渐向中游低值区扩散,土壤盐分淋洗效果减弱。步怀亮[4]将研究尺度放大,以沈乌灌域为研究对象,但由于工程实施于 2017 年年末完成,其监测时期较短,改造后土壤盐分变化状况并不明确。另外,文献[4,26]均未考虑节水改造条件下秋浇水量减少对土壤盐分淋洗效果的影响,而本研究综合考虑渠道衬砌和秋浇水量减少情况下沈乌灌域土壤盐分时空变化规律和淋洗效果影响。

文献[4,17-20]发现,将 ArcGIS 和地统计学结合方法可以有效监测区域土壤盐分空间变异及分布格局,基于区域化变量理论进行半方差函数拟合,结果显示土壤含盐量适宜于 Exponential 模型,表层和深层土壤盐分分别属强和中等空间变异性,与文献[15-16,37]研究结果一致。但有研究[39-41]表明采用结构比进行空间相关性分析稳定性不足,故本文引入 Moran's I 指数进行节水改造条件下土壤盐分空间自相关性变化量化分析,发现改造后秋浇前期各土层土壤盐分空间相关性增强 4.82 个百分点,秋浇水量减少,秋浇影响土壤盐分空间相关性程度减弱。由 LISA 集聚图分析可知南部改造后仍是盐渍化高风险区域。说明应用 Moran's I 指数和 LISA 集聚图可以更好地反映土壤盐分空间自相关程度和局部热点区域位置和范围[46-47]。在以上结构分析的基础上进行交叉验证,应用 IDW 空间插值方法绘制土壤盐分空间分布图精度较高,直观地反映区域和局部变化趋势[16,28,30],结果显示改造后,秋浇前耕层和深层土壤盐渍化程度得到改善,作物生长安全区增加,秋浇后,耕层作物生长安全区面积增幅下降。空间上,土壤盐分高值多位于地下水埋深较浅的东北部和南部区域,土壤盐分低值多位于西南沙区,土壤盐分与地下水埋深、土地利用类型和地形等影响因素有关[6,8,11,14]。经过进一步深入分析,本研究验证了节水改造条件下区域整体土壤盐分下降[4,26],作物生长安全区面积增加,表聚作用减弱[4,26]的变化规律,此外还发现秋浇水量减少的条件下,土壤盐分淋洗效果减弱。综上所述,本文运用经典统计学方法,结合空间插值和热点聚类识别方法绘制节水改造前后土壤盐分空间分布和 LISA 集聚图,可准确和直观地反映节水改造条件下各层土壤盐分的空间分布格局和土壤盐渍化显著程度,并探寻不同节水改造年限区域的土壤盐分时空变化规律,为盐渍化灌区——沈乌灌域的土壤盐渍化土地的分区、管理和合理利用提供了理论指导,同时也为后期制定节水改造举措、管理秋浇制度和发展农业

提供了参考依据。

4　结论

(1)节水改造工程建设背景下,沈乌灌域渠系防渗效果良好,秋浇前土壤整体含盐量平均降幅为7.30%,但由于引黄水量减少,秋浇水量骤减,秋浇后土壤盐分淋洗效果减弱 9.26%。空间上,土壤盐分高值区(大于 6 g/kg)多位于地下水埋深较浅的东风分干渠和一干渠渠首区域,低值区(小于 2 g/kg)位于西南和东部沙区。

(2)沈乌灌域各土层土壤盐分半方差函数采用 Exponential 模型拟合度较好,验证了各土层土壤含盐量在空间上存在一定的相关性,采用空间自相关系数进一步研究发现,沈乌灌域各土层土壤盐分 Z 值大于 0,$P<0.05$,均呈显著空间正相关。耕层土壤盐分属强空间变异性,受结构性和随机性因素共同作用,深层土壤盐分属中度变异性,主要受结构性因素影响。改造后,秋浇前各土层结构比下降,Moran's I 指数增加,空间相关性增强;秋浇后 0 ~ 10 cm 和 30 ~ 50 cm 土层土壤盐分结构比增加,Moran's I 指数降幅在 3% 以内,秋浇水量减少,秋浇作用对土壤盐分空间相关影响度减弱。另由 LISA 集聚分析可知,改造后、秋浇前南部高-高显著区向不显著和高-低区转变,秋浇后南部集聚特征仍十分显著,存在盐渍化风险,改造后仍是盐渍化防治重点区域。

(3)针对中度耐盐作物,秋浇前耕层作物生长安全区、作物轻度抑制区、作物中度抑制区、作物重度抑制区和作物盐害区分别占总面积的 49.66%、18.65%、22.47%、6.61% 和 2.61%,说明沈乌灌域中度耐盐作物作物多受轻中度土壤盐分抑制作用,而向日葵所受盐害面积较小。深层土壤较耕层盐渍化面积少 21.91 个百分点。改造后,秋浇前期耕层作物生长安全区和深层非盐渍土分别增加 4.82、1.85 个百分点,秋浇后耕层作物生长安全区面积增幅下降 5.02 个百分点,深层变化不显著。

(4)不同距离缓冲区对平均土壤盐分含量的解释能力较强,长期改造区和短期改造区受渠道影响半径分别为 1.5 km 和 0.7 km,长期改造区缓冲区内平均土壤含盐量下降速率高于短期改造区,均一化程度较高。由于长期改造区秋浇水量减少,高值区由上游逐渐向下中游低值区扩散,土壤盐分淋洗效果减弱。

(5)节水改造工程实施后,土壤盐渍化程度减轻,作物生长安全区面积增加,表聚作用弱化,秋浇水量减少,土壤盐分淋洗效果减弱,土壤环境有所改善。此外节水改造年限越长,其区域均布化程度越高。

参　考　文　献

[1] 郭姝姝. 基于遥感及 CLUE-S 模型的内蒙古河套灌区土壤盐渍化时空演变与调控研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2018.
GUO Shushu. Study on spatiotemporal evolution and regulation of soil salinization in Hetao irrigation district, Inner Mongolia, China using remote sensing and CLUE-S model [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018. (in Chinese)

[2] 刘丽娟, 李小玉. 干旱区土壤盐分积累过程研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(3):891-898.
LIU Lijuan, LI Xiaoyu. Progress in the study of soil salt accumulation in arid region[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(3):891-898. (in Chinese)

[3] 刘广明, 吕真真, 杨劲松, 等. 典型绿洲区土壤盐分的空间变异特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 100-107.
LIU Guangming, LÜ Zhenzhen, YANG Jinsong, et al. Spatial variation characteristics of soil salinity in typical oasis region[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 100-107. (in Chinese)

[4] 步怀亮. 变化环境下沈乌灌域土地利用/覆盖及土壤盐分时空变化分析[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
BU Huailiang. The spatio and temporal variation of land use/cover and soil salinity in changing environment in Shenwu Irrigation District[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[5] 水利部. 水利部关于深化水利改革的指导意见 [R]. 2013.

[6] 杜丽娟, 刘钰, 雷波. 灌区节水改造环境效应评价研究进展[J]. 水利学报, 2010, 41(5): 613-618.
DU Lijuan, LIU Yu, LEI Bo. Advancement in research of environment impact assessment for water saving orientated rehabilitation of irrigation district[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(5): 613-618. (in Chinese)

[7] 张会敏, 李占斌, 姚文艺,等. 灌区续建配套与节水改造效果多层次多目标模糊评价[J]. 水利学报, 2008, 39(2):212-217.
ZHANG Huimin, LI Zhanbin, YAO Wenyi, et al. Multi hierarchy and multi objective fuzzy method for evaluation of water saving reform and irrigation district reconstruction effect [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(2): 212-217. (in Chinese)

[8] FOSTER S, PULIDO-BOSCH A, VALLEJOS Á, et al. Impact of irrigated agriculture on groundwater-recharge salinity: a major sustainability concern in semi-arid regions[J]. Hydrogeology Journal, 2018, 26(8): 2781-2791.

[9] HAJRASULIHA S, BANIABBASSI N, METTHEY J, et al. Spatial variability of soil sampling for salinity studies in southwest Iran[J]. Irrigation Science, 1980, 1(4): 197-208.

[10] SHI Z, LI Y, WANG R C, et al. Assessment of temporal and spatial variability of soil salinity in a coastal saline field[J]. Environmental Geology, 2005, 48(2): 171 - 178.
[11] JORDÁN M M, NAVARRO-PEDRENO J, GARCÍA-SÁNCHEZ E, et al. Spatial dynamics of soil salinity under arid and semi-arid conditions: geological and environmental implications[J]. Environmental Geology, 2004, 45(4): 448 - 456.
[12] JUAN P, MATEU J, JORDÁN M M, et al. Geostatistical methods to identify and map spatial variations of soil salinity[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2011, 108(1): 62 - 72.
[13] CEMEK B, GÜLER M, KILIÇ K, et al. Assessment of spatial variability in some soil properties as related to soil salinity and alkalinity in Bafra plain in northern Turkey[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2007, 124(1 - 3): 223 - 234.
[14] WANG Y, XIAO D, LI Y, et al. Soil salinity evolution and its relationship with dynamics of groundwater in the oasis of inland river basins: case study from the Fubei region of Xinjiang Province, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 140(1 - 3): 291 - 302.
[15] 姚荣江, 杨劲松, 刘广明, 等. 黄河三角洲地区典型地块土壤盐分空间变异特征研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6):61 - 66.
YAO Rongjiang, YANG Jinsong, LIU Guangming, et al. Spatial variability of soil salinity in characteristic field of the Yellow River Delta[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(6): 61 - 66. (in Chinese)
[16] 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.
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. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20130715&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.015. (in Chinese)
[17] SAMIEE M, GHAZAVI R, PARPARVAR M, et al. Mapping spatial variability of soil salinity in a coastal area located in an arid environment using geostatistical and correlation methods based on the satellite data[J]. Desert, 2018, 23(2): 233 - 242.
[18] AGHASI B, JALALIAN A, KHADEMI H, et al. Sub-basin scale spatial variability of soil properties in Central Iran[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(6): 136.
[19] 李会亚, 冯起, 陈丽娟, 等. 民勤绿洲灌区表层土壤盐分空间变异性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017(4): 136 - 141.
LI Huiya, FENG Qi, CHEN Lijuan, et al. Spatial distribution characteristics of topsoil salinity in the Minqin oasis, Northwest China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017(4): 136 - 141. (in Chinese)
[20] 柴晨好, 王玉刚, 周宏飞, 等. 干旱区典型绿洲水库库周土壤盐分空间分异及盐岛效应[J]. 生态学杂志, 2018, 37(8):2445 - 2452.
CHAI Chenhao, WANG Yugang, ZHOU Hongfei, et al. Spatial variability of soil salinity and "salt island" effect around oasis reservoir in arid area [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(8): 2445 - 2452. (in Chinese)
[21] XIAO G, HU Y, LI N, et al. Spatial autocorrelation analysis of monitoring data of heavy metals in rice in China[J]. Food Control, 2018, 89: 32 - 37.
[22] SCHABENBERGER O, GOTWAY C A. Statistical methods for spatial data analysis[M]. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2017.
[23] SOLGI E, OSHVANDI Z. Spatial patterns, hotspot, and risk assessment of heavy metals in different land uses of urban soils (case study: Malayercity)[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2018, 24(1): 256 - 270.
[24] YUAN Y, CAVE M, ZHANG C. Using local Moran's I to identify contamination hotspots of rare earth elements in urban soils of London[J]. Applied Geochemistry, 2018, 88: 167 - 178.
[25] WANG T, KANG F, CHENG X, et al. Spatial variability of organic carbon and total nitrogen in the soils of a subalpine forested catchment at Mt. Taiyue, China[J]. CATENA, 2017, 155: 41 - 52.
[26] 李彬, 史海滨, 妥德宝, 等. 节水改造前后土壤盐分剖面特征及其空间分布——以内蒙古河套灌区中游临河区为例[J]. 干旱区研究, 2015, 32(4): 663 - 673.
LI Bin, SHI Haibin, TUO Debao, et al. Soil salinity profile characteristics and its spatial distribution before and after water saving—taking the middle reach in Hetao irrigation district of Inner Mongolia as an example[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(4): 663 - 673. (in Chinese)
[27] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999.
[28] 徐丹, 刘昌华, 蔡太义, 等. 农田土壤有机质和全氮三维空间分布特征研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 157 - 163.
XU Dan, LIU Changhua, CAI Taiyi, et al. 3D spatial distribution characteristics of soil organic matter and total nitrogen in farmland[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 157 - 163. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20151222&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.022. (in Chinese)
[29] 卢鑫, 胡文友, 黄标, 等. 基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤重金属源解析[J]. 环境科学, 2018, 39(3): 1421 - 1429.
LU Xin, HU Wenyou, HUANG Biao, et al. Source apportionment of heavy metals in farmland soils around mining area based on UNMIX model [J]. Environmental Science, 2018, 39(3): 1421 - 1429. (in Chinese)
[30] 胡克林, 李保国, 吕贻忠, 等. 非平稳型区域土壤汞含量的各种估值方法比较[J]. 环境科学, 2004, 25(3):132 - 137.
HU Kelin, LI Baoguo, LÜ Yizhong, et al. Comparison of various spatial interpolation methods for non-stationary regional soil mercury content [J]. Environmental Science, 2004, 25(3): 132 - 137. (in Chinese)
[31] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙, 等. 基于聚类分析的土壤盐渍剖面特征及其空间分布研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(1):56 - 65.

YAO Rongjiang, YANG Jinsong, JIANG Long, et al. Profile characteristics and spatial distribution of soil salinity based on hierarchical cluster analysis [J]. Journal of Soil Science, 2008, 45(1): 56 – 65. (in Chinese)

[32] MATKAN A A, SHAHRI M, MIRZAIE M. Bivariate Moran's *I* and LISA to explore the crash risky locations in urban areas [C]//Proceedings of the Conference of Network-Association of European Researchers on Urbanisation in the South, Enschede: The Netherlands, 2013: 12 – 14.

[33] 张飞, 李怡博, 王东芳, 等. 精河绿洲盐渍土表层土壤盐分因子的空间变异及分布格局[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(1): 64 – 73.
ZHANG Fei, LI Yibo, WANG Dongfang, et al. Analysis of distribution patterns and spatial variability of soil salinity affecting factors in topsoil layer of salinized soil in Jinghe oasis[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(1): 64 – 73. (in Chinese)

[34] KRAVCHENKO A, BULLOCK D G. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties[J]. Agronomy Journal, 1999, 91(3): 393 – 400.

[35] ABDI H. Coefficient of variation[M]//SALKIND N J. Encyclopedia of research design. Thousand Oaks: SAGE Publications, Inc., 2010: 169 – 171.

[36] 朱金灸,郭世文,杨永利,等. 天津滨海开发区绿地土壤盐分时空变异特征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊2): 161 – 168.
ZHU Jindi, GUO Shiwen, YANG Yongli, et al. Temporal-spatial variability of soil salinity in greenspace of Tianjin Binhai Economic-Technological Development Area [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp.2): 161 – 168. (in Chinese)

[37] 张源沛,胡克林,李保国,等. 银川平原土壤盐分及盐渍土的空间分布格局[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 19 – 24.
ZHANG Yuanpei, HU Kelin, LI Baoguo, et al. Spatial distribution pattern of soil salinity and saline soil in Yinchuan plain of China [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 19 – 24. (in Chinese)

[38] 江叶枫,郭熙, 孙凯, 等. 江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2017, 38(9): 3840 – 3850.
JIANG Yefeng, GUO Xi, SUN Kai, et al. Spatial variability of C – to – N ratio of farmland soil in Jiangxi Province[J]. Environmental Science, 2017, 38(9): 3840 – 3850. (in Chinese)

[39] 郑睛之, 王楚栋, 王诗涵,等. 典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2875 – 2883.
ZHENG Jingzhi, WANG Chudong, WANG Shihan, et al. Spatial variation of soil heavy metals in Lin'an City and its potential risk evaluation [J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2875 – 2883. (in Chinese)

[40] 厉彦玲, 赵庚星. 黄河三角洲典型地区耕地土壤养分空间预测[J]. 自然资源学报, 2018, 33(3): 489 – 503.
LI Yanling, ZHAO Gengxing. Spatial prediction of cultivated land soil nutrients in typical region of Yellow River Delta[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(3): 489 – 503. (in Chinese)

[41] 张红桔, 赵科理, 叶正钱, 等. 典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2893 – 2903.
ZHANG Hongju, ZHAO Keli, YE Zhengqian, et al. Spatial variation of heavy metals in soils and its ecological risk evaluation in a typical *Carya cathayensis* production area[J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2893 – 2903. (in Chinese)

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

[43] 王玉刚, 肖笃宁, 李彦. 流域尺度绿洲土壤盐分的空间异质性[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5262 – 5270.
WANG Yugang, XIAO Duning, LI Yan. Spatial heterogeneity of soil salinity in oasis at catchment scale [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 27(12): 5262 – 5270. (in Chinese)

[44] 科夫达 B A, 穆娜朵娃 B C, 葉戈洛夫 B B,等. 按盐渍化程度和性质并结合植物耐盐性而拟定的土壤分类[J]. 土壤, 1962(3): 61 – 64.

[45] 童文杰. 河套灌区作物耐盐性评价及种植制度优化研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
TONG Wenjie. Study on salt tolerance of crops and cropping system optimization in Hetao irrigation district [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)

[46] 刘芳, 王楠, 杨春, 等. 准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征[J]. 环境科学, 2016, 37(12): 4815 – 4829.
LIU Fang, WANG Nan, YANG Chun, et al. Spatial distribution characteristics of heavy metal pollution and health risk in soil around the coal industrial area of east Junggar basin[J]. Environmental Science, 2016, 37(12): 4815 – 4829. (in Chinese)

[47] 左小安, 赵哈林, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地退化植被恢复过程中土壤有机碳和全氮的空间异质性[J]. 环境科学, 2009, 30(8): 2387 – 2393.
ZUO Xiaoan, ZHAO Halin, ZHAO Xueyong, et al. Spatial heterogeneity of soil organic carbon and total nitrogen of sandy grassland in the restoration of degraded vegetation in Horqin sandy land, Northern China [J]. Environmental Science, 2009, 30(8): 2387 – 2393. (in Chinese)