doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.08.031

基于指示 Kriging 的土壤盐渍化风险与地下水环境分析

李仙岳[1]　崔佳琪[1]　史海滨[1]　孙亚楠[1]　马红雨[1]　贾　飚[2]

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;
2. 内蒙古自治区水利科学研究院, 呼和浩特 010020)

摘要: 土壤盐渍化是制约干旱区农业发展的主要障碍,而浅埋地下水区域的地下水环境是影响土壤盐渍化的直接因素。为调控合理的地下水埋深和矿化度,以防控区域盐渍化,以河套灌区永济灌域为研究区,运用指示 Kriging 法比较了春灌前和生育期不同阈值条件下土壤表层含盐量、地下水埋深和矿化度的概率分布,从概率空间分布的角度研究了不同时期防治土壤盐渍化的地下水临界埋深和矿化度。结果表明:地下水埋深属于中等变异性,土壤表层含盐量和地下水矿化度属于强变异性。春灌前较生育期土壤表层盐渍化高风险区扩大、浅埋地下水高概率区缩小、地下水矿化高风险区缩小。春灌前永济灌域土壤表层发生轻度、中度盐渍化时的地下水埋深临界值分别为 2.6、2.2 m,地下水矿化度临界值分别为 2.0、2.5 g/L;生育期土壤表层发生轻度、中度盐渍化时的地下水埋深临界值分别为 2.2、1.8 m,地下水矿化度临界值分别为 2.5、3.0 g/L,春灌前更易发生土壤盐渍化。春灌前较生育期土壤盐分受外界因素(气象因素和人为因素)影响小,且土壤表层含盐量、地下水埋深和矿化度变异性也相对较小,地下水环境对土壤盐渍化的影响更强烈。研究区北部、东南部和中部小部分区域为地下水埋深小于临界值且大于矿化度临界值的高概率区,是土壤返盐的高风险区,建议进一步完善该地区的排水系统。

关键词: 河套灌区; 土壤盐渍化; 地下水埋深; 地下水矿化度; 空间分布; 指示 Kriging 法

中图分类号: S156.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)08-0297-10　　**OSID**:

Analysis of Soil Salinization Risk and Groundwater Environment Based on Indicator Kriging

LI Xianyue[1]　CUI Jiaqi[1]　SHI Haibin[1]　SUN Ya'nan[1]　MA Hongyu[1]　JIA Biao[2]

(1. *College of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Huhhot* 010018, *China*
2. *Inner Mongolia Water Conservancy Research Institute*, *Huhhot* 010020, *China*)

Abstract: Soil salinization is the main obstacle to agricultural development in arid areas, and groundwater environment is the direct factor affecting soil salinization in shallow groundwater areas. In order to control reasonable groundwater depth and salinity to prevent and control regional salinization, the Yongji Irrigation Area in Hetao Irrigation District was used as the research area, the probability distribution diagram of soil surface salinity and groundwater depth and groundwater salinity under different threshold conditions before spring irrigation period and during growth period was analyzed and compared by using indicator Kriging method. The critical groundwater depth and salinity when soil salinization occurred in different periods were analyzed from the perspective of probability spatial distribution. The results showed as following: the groundwater depth was medium variability, while the surface salinity and groundwater salinity were strong variability. Before spring irrigation, compared with the growth period, the high risk areas of soil surface salinization were increased, the high probability areas of shallow groundwater were decreased, and the high risk areas of groundwater mineralization were decreased. Before spring irrigation, the critical buried depth of groundwater in the soil surface layer of Yongji Irrigation Area when mild and moderate salinization occurred was 2.6 m and 2.2 m, and the critical salinity of groundwater when mild and moderate salinization occurred was 2.0 g/L and 2.5 g/L,

收稿日期: 2020-09-06　修回日期: 2020-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51539005、51969024、51669020)、内蒙古自治区水利厅重大项目(NSK2017-M1)和内蒙古自治区科技厅重大专项(zdzx2018059)

作者简介: 李仙岳(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事干旱区节水灌溉原理及农业水环境研究,E-mail: lixianyue80@126.com

respectively. During the growth period, the critical depth of groundwater under mild and moderate salinization was 2.2 m and 1.8 m, and the critical salinity of groundwater under mild and moderate salinization was 2.5 g/L and 3.0 g/L, respectively. Soil salinization was more likely to occur before spring irrigation. Soil salinity before spring irrigation was less affected by external factors (meteorological factors and human factors) than that during the growth period. Moreover, soil surface salinity, groundwater depth and salinity variability before spring irrigation were relatively small, groundwater environment had strong impact on soil salinization. The northern, southeastern and central parts of the study area were areas with high probability that the groundwater was less than the critical burial depth and greater than the critical salinity, which were areas with high risk of soil salt return. It was suggested to further improve the drainage system and reduce the groundwater depth and salinity in local salinization risk areas.

Key words: Hetao Irrigation Area; soil salinization; groundwater depth; groundwater salinity; spatial distribution; indicator Kriging method

0 引言

土壤盐渍化是全球化的生态环境问题,是制约农业可持续发展的主要障碍[1-3]。据统计,全球盐渍化土壤面积达 9.5 亿 hm^2,占陆地面积的 7.26%。我国盐渍化土壤分布广泛,面积约为 0.37 亿 hm^2,占全国可利用土地面积的 4.88%,其中耕地盐渍化面积达到 0.09 亿 hm^2,占全国耕地面积的 6.62%,主要集中在西北、华北、东北及沿海地区,其中陕、甘、宁、青、蒙、新的盐渍土面积占全国盐渍化土壤面积的 69.03%[4]。内蒙古河套灌区是西北地区典型的盐渍化灌区,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%[5],因此,土壤盐渍化防治已成为该区农业和生态可持续发展的主要工作。地下水是盐分传输、累积和排泄的主要载体,地下水矿化度和地下水埋深是影响土壤盐渍化程度的最主要因素[6-9],直接影响土壤盐分的变化,即盐随水移是土壤中盐分迁移的主要方式,水分的运移带动了盐分在土壤中的移动和累积,当地下水埋深小于临界深度或地下水矿化度超出一定值时,地下水中的盐分随上升毛管水不断迁移到作物根层和地表,此时土壤发生盐渍化的风险增大[10-12]。因此,研究土壤盐渍化与地下水环境的关系、控制合理的地下水埋深是防治土壤盐渍化的重要途径[13]。

目前,关于土壤盐渍化与地下水环境关系的研究较多,如常用土壤毛管水上升高度法[14]和野外调查统计法[15]研究特定观测点或典型小区发生土壤盐渍化时的地下水临界深度。为研究大区域范围内土壤盐渍化和地下水环境的关系,WANG 等[16]应用经典统计学、地质统计学和 GIS 分析了北疆内陆河流域绿洲土壤盐渍化与地下水埋深和土地利用的关系,发现灌溉区土壤盐渍化累计面积大于非灌溉区,农业灌溉用水导致浅埋地下水上升,从而间接导致土壤盐渍化;周在明等[6]基于指示 Kriging 法对环渤海低平原区表层土壤、地下水埋深和地下水矿化度进行了空间变异分析,发现地下水矿化度大于 2 g/L、地下水埋深小于 3 m 及土壤含盐量大于 1 g/kg 时的空间概率分布呈一致性。上述研究主要针对新疆内陆河流域和环渤海低平原区,而河套灌区属于沿黄流域,地下水环境受黄河来水和配水的影响非常大。徐英等[17]基于指示 Kriging 法分析了河套灌区解放闸灌域土壤盐渍化与地下水埋深之间的关系,发现区域尺度上土壤表层发生中度和轻度盐渍化时地下水位临界埋深分别为 2.0 m 和 2.5 m,但仅考虑了地下水埋深,并未考虑地下水矿化度。以上研究均基于一个时期进行讨论,且仅定性比较二者的概率分布,而河套灌区由于受到气候和灌溉等因素的影响,春灌前和生育期发生土壤盐渍化时的地下水临界埋深和矿化度差异明显。故考虑灌水和非灌水期以及地下水埋深和矿化度等多因素过程,探索河套灌区地下水环境与土壤盐渍化的关系,对进一步揭示不同时期河套灌区土壤盐渍化与地下水环境的定量关系具有重要意义。

本文以河套灌区永济灌域为研究区,运用指示 Kriging 法分析春灌前和生育期的土壤表层盐分与地下水埋深、矿化度的空间概率分布规律,评价二者的空间分布关系并计算匹配率,确定不同时期灌域尺度上满足土壤盐渍化防治的地下水埋深和矿化度临界值,以期为盐渍化灌区土壤盐渍化的防治提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

永济灌域(40°36′~41°13′N,107°13′~107°42′E)位于内蒙古河套灌区中游,现灌溉面积约 1.122×10^5 hm^2,属温带大陆性气候,干旱少雨,日照时数长,蒸发强烈,年均气温 8.9℃,年均降雨量 135.2 mm,且多发生于生育期(4—9 月),年均蒸发

量 2 327.3 mm，属于典型的盐渍化灌域。灌域内耕地多以砂壤土和壤砂土为主，灌溉作物包括粮食作物和经济作物，粮食作物以夏玉米和春小麦为主，经济作物包括向日葵、蔬菜、瓜果等，是典型的灌溉农业区。灌域以引黄河水灌溉为主，每年约在 4 月中下旬开灌，以夏灌（4—9 月）和秋浇（10—11 月）为主，到 11 月中下旬秋浇结束，排泄方式以强烈的蒸腾蒸发为主，土壤盐渍化成为制约灌域农业发展的主要因素。随着节水改造工程的实施，灌域地下水埋深呈下降趋势，地下水呈矿化趋势，多年（1998—2017 年）年均地下水埋深和矿化度分别为 2.14 m 和 3.35 g/L，截至到 2011 年，永济干渠、永刚分干渠、隆盛示范区东济支渠和隆盛示范区西济支渠共衬砌 53.35 km，干渠和分干渠共整治 9.72 km，干沟、分干沟和支沟共整治 608.758 km，建筑物配套改造 127 座，节水效果明显，引水量由 1998—1999 年的 10.10 亿 m^3 降至 2000—2017 年的 8.65 亿 m^3，用水量减少，灌溉效率得到极大的提高。

1.2　样品采集与处理

在研究区共布置 51 眼地下水观测井，每眼井周围均布置盐分采样点，土壤盐分采样点同时考虑覆盖不同盐渍化程度的土壤，土壤盐分采样点和地下水观测井布置如图 1 所示，共有 68 个土壤盐分采样点。考虑到地下水对土壤返盐的滞后效应，于 2019 年 4 月中下旬（春灌前）和 7 月末（生育期）采集 0 ~ 30 cm 范围内土壤（每个采样点 3 个重复），在实验室内自然风干、研磨、过 2 mm 筛后，按 1∶5 土水质量比配制浸提液，测定土壤含盐量[18]；考虑到地下水对土壤返盐影响具有一定滞后效应[17]，于 2019 年 3 月末（春灌前）和 7 月初（生育期）用皮尺与测绳测定（每个观测井重复观测 3 次）地下水埋深并采集水样，应用电导率法计算地下水矿化度，用以探讨春灌前和生育期土壤表层（0 ~ 30 cm）含盐量与地下水环境（地下水埋深和地下水矿化度）之间的关系。

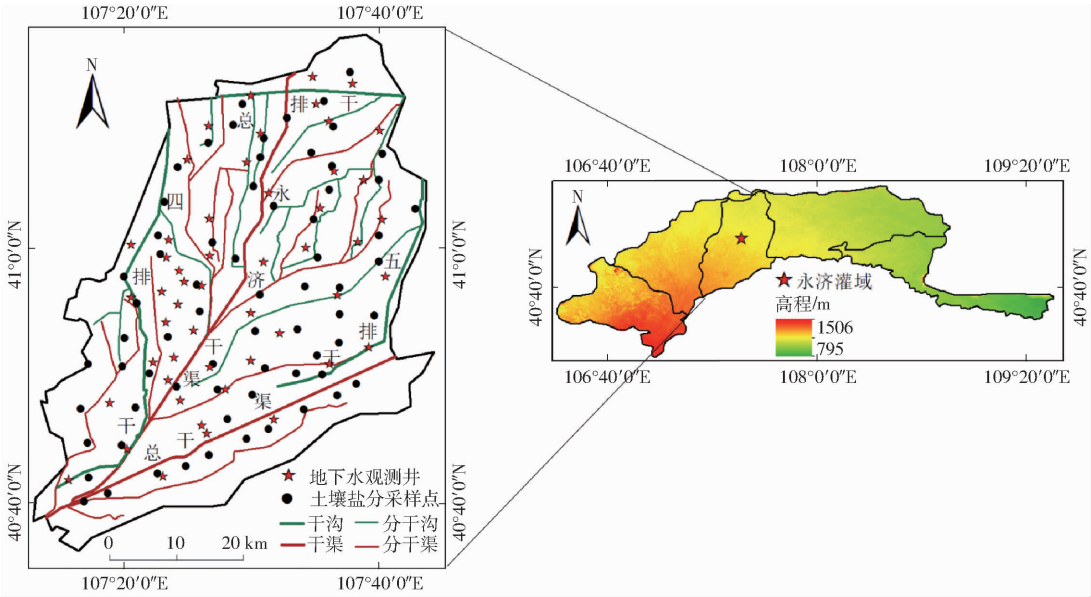

图 1　研究区采样点分布

Fig. 1　Diagram of sampling points in study area

1.3　数据处理方法

指示 Kriging 法（Indicator Kriging）是一种非参数估计方法[19-23]，不仅可以削弱有偏分布，还可以抑制特异值对变异函数稳健性的影响，可用于估计满足给定阈值的指示变量条件概率，绘制相应的概率空间分布图，或称为风险分布图。本文采用地统计学软件 GS$^+$ 7.0 确定不同阈值下土壤表层含盐量、地下水埋深和地下水矿化度的变异函数模型，并将其模型参数输入 ArcGIS 10.4 进行指示 Kriging 插值估计，绘制不同阈值条件下土壤表层盐分、地下水埋深和地下水矿化度的概率分布图，并应用 GIS 中的重叠面积提取模块计算各指标概率区面积比例构成及不同阈值条件下土壤表层含盐量与地下水埋深、矿化度概率空间分布图的匹配率。

2　结果与分析

2.1　统计特征值分析

由表 1 可知，研究区春灌前和生育期土壤表层含盐量均值分别为 3.95、3.62 g/kg，变异系数分别为 133% 和 158%，属于中度盐渍土，地下水埋深均值分别为 2.75、2.22 m，变异系数分别为 37% 和 56%，地下水矿化度均值分别为 3.43、4.00 g/L，变异系数分别为 110% 和 115%，属于微咸水。从不同指标来看，地下水埋深属于中等变异性，地下水矿化

度和土壤表层含盐量属于强变异性,可能由于研究区范围较大,地势差异、土地耕种方式差异和人为排灌等因素的共同作用,导致土壤表层含盐量和地下水矿化度变异性较大。从不同时期来看,受耕作措施、灌溉制度和降雨等人为因素和气象因素的影响,生育期各指标变异性比春灌前较大。

表 1 土壤表层含盐量、地下水埋深和地下水矿化度统计特征值

Tab. 1 Statistical characteristic values of soil surface salinity, groundwater depth and groundwater salinity

时期	指标	最小值	最大值	平均值	标准差
春灌前	土壤表层含盐量/(g·kg^{-1})	0.54	30.73	3.95	5.25
	地下水埋深/m	1.46	6.98	2.75	1.03
	地下水矿化度/(g·L^{-1})	0.35	20.37	3.43	3.79
生育期	土壤表层含盐量/(g·kg^{-1})	0.21	29.40	3.62	5.70
	地下水埋深/m	0.69	7.08	2.22	1.24
	地下水矿化度/(g·L^{-1})	0.71	22.34	4.00	4.62

2.2 指示变异函数模型构建

根据轻度(含盐量 2.0 g/kg)和中度(含盐量 3.0 g/kg)盐渍化土壤的划分标准确定土壤表层含盐量阈值。结合类似灌域相关研究[12,14]和永济灌域实际地下水埋深情况,选取 1.8、2.2、2.6、3.0 m 作为地下水埋深的阈值。根据地下水矿化度的划分标准[24-26],分别选取 2.0、2.5、3.0 g/L 作为地下水矿化度的阈值。本文中,当土壤表层含盐量大于等于阈值(2.0、3.0 g/kg)和地下水矿化度大于等于阈值(2.0、2.5、3.0 g/L)时,指示变换值为 1,否则为 0,当地下水埋深小于等于阈值(1.8、2.2、2.6、3.0 m)时,指示变换值为 1,否则为 0。

对指示变换后的土壤表层含盐量、地下水埋深和矿化度进行半变异函数分析,由表 2 可知,各变量指示变异函数均可用球状模型拟合,变程在 6.47 ~ 15.51 km 之间;不同阈值下各区域变量块金值较小,说明在本研究尺度上由采样误差等引起的变异不大[6]。块金值与基台值百分比均在 25% ~75% 之间,呈中等程度的空间自相关性,即其变异是结构性因素(气候、地形、水文地质条件等非人为因素)和随机性因素(灌溉制度、地下水利用等人为活动)共同作用的结果。将变异函数模型参数输入 GIS 10.4 进行指示 Kriging 插值,绘制各变量满足相应阈值的概率空间分布图并计算不同概率的面积占比及不同变量之间有相同概率的面积匹配率,颜色由浅色到深色表示大于等于(小于等于)阈值的概率越大(图 2、3、4),以概率 50% 为分界线,大于 50% 为高概率区,反之为低概率区。

表 2 研究区土壤表层含盐量、地下水埋深和矿化度指示变异函数理论模型

Tab. 2 Indicator semivariogram models of soil surface salinity, groundwater depth and groundwater salinity

时期	指标	阈值	理论模型	块金值	基台值	变程/km	块金值与基台值百分比/%
春灌前	土壤表层含盐量	2.0 g/kg	球状模型	0.065	0.110	7.12	58.97
		3.0 g/kg	球状模型	0.056	0.107	7.12	52.37
	地下水埋深	1.8 m	球状模型	0.051	0.103	7.46	49.76
		2.2 m	球状模型	0.049	0.094	7.46	52.01
		2.6 m	球状模型	0.053	0.120	7.12	44.36
		3.0 m	球状模型	0.056	0.141	7.12	40.04
	地下水矿化度	2.0 g/L	球状模型	0.067	0.117	15.51	57.20
		2.5 g/L	球状模型	0.060	0.110	7.12	54.74
		3.0 g/L	球状模型	0.065	0.121	7.12	53.94
生育期	土壤表层含盐量	2.0 g/kg	球状模型	0.067	0.110	6.79	61.47
		3.0 g/kg	球状模型	0.062	0.107	6.47	57.92
	地下水埋深	1.8 m	球状模型	0.061	0.111	7.12	55.37
		2.2 m	球状模型	0.057	0.121	7.12	46.88
		2.6 m	球状模型	0.061	0.125	7.12	49.10
		3.0 m	球状模型	0.073	0.163	7.46	45.07
	地下水矿化度	2.0 g/L	球状模型	0.068	0.113	6.79	60.34
		2.5 g/L	球状模型	0.066	0.116	7.12	56.81
		3.0 g/L	球状模型	0.059	0.111	7.12	52.55

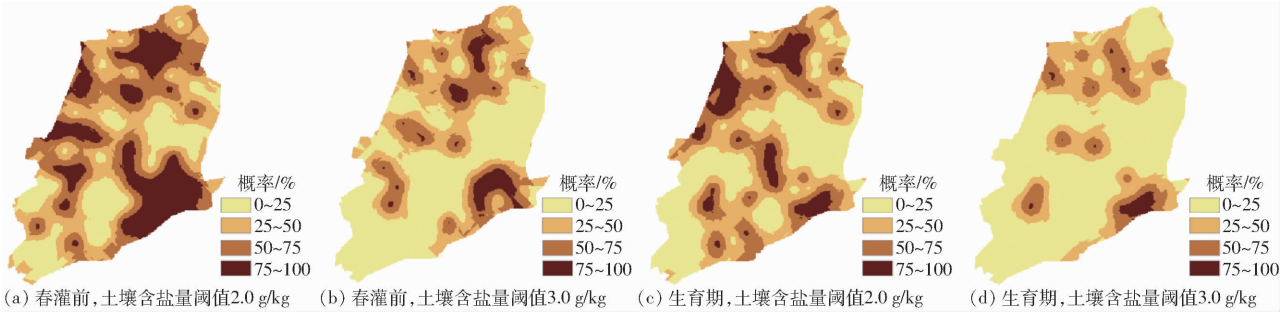

图 2　春灌前和生育期不同阈值条件下土壤表层含盐量概率空间分布

Fig. 2　Probability spatial distributions of soil surface salinity under different threshold conditions before spring irrigation and growth period

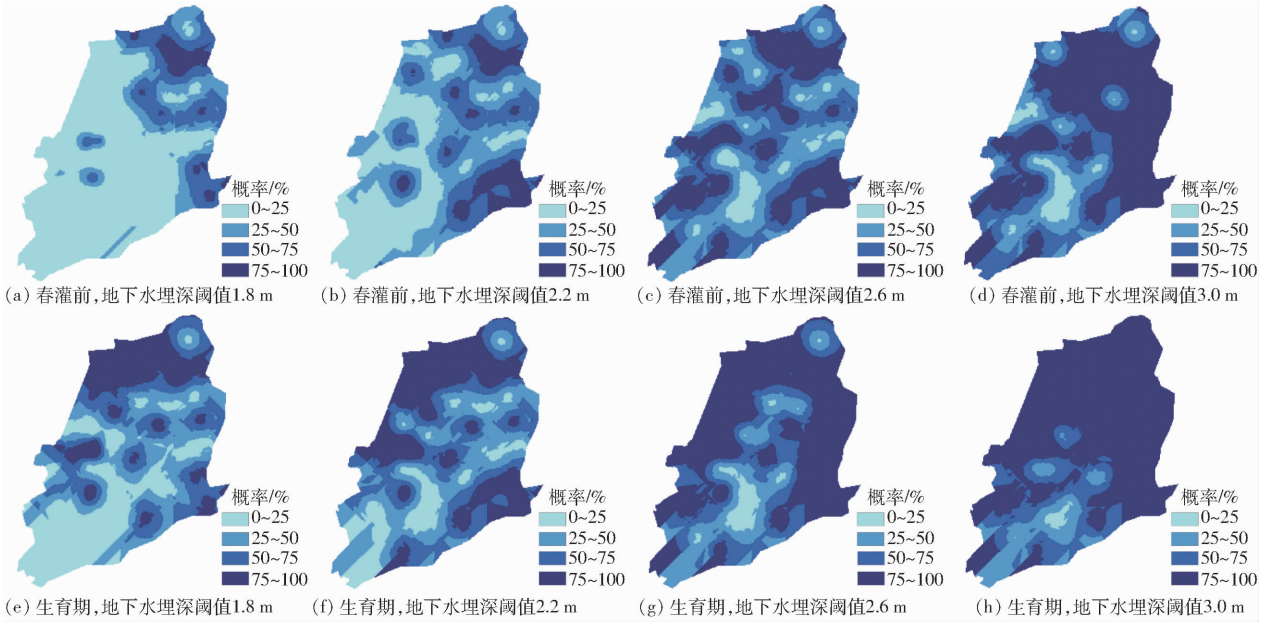

图 3　春灌前和生育期不同阈值条件下地下水埋深概率空间分布

Fig. 3　Probability spatial distribution of groundwater depth under different threshold conditions before spring irrigation and growth period

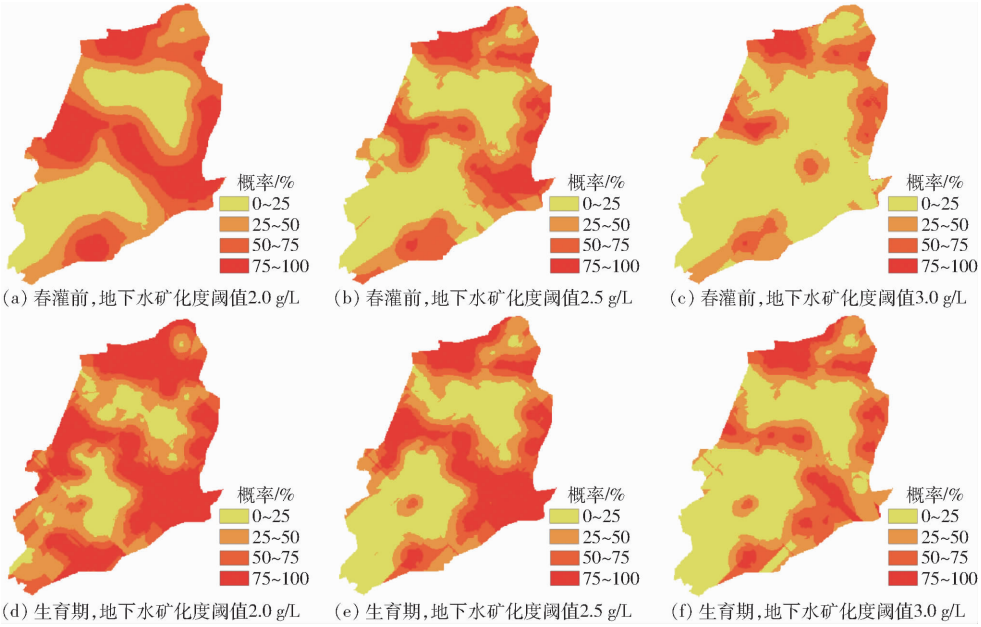

图 4　春灌前和生育期不同阈值条件下地下水矿化度概率空间分布

Fig. 4　Probability spatial distributions of groundwater salinity under different threshold conditions before spring irrigation and growth period

2.3 土壤表层盐分与地下水环境的概率空间分布特征

图 2a 和图 2b 为春灌前土壤易发生轻度盐渍化以上(含盐量大于等于 2.0 g/kg)和中度盐渍化以上(含盐量大于等于 3.0 g/kg)的空间概率分布图,结合表 3 可知,研究区 49% 的区域为土壤发生轻度盐渍化的高风险区(概率在 50% 以上)且主要分布在研究区的东南和西北部,对比图 1 可知,高风险区多分布在排水干沟和总排水干渠附近;23% 的区域为发生中度盐渍化的高风险区,且均包含在轻度盐渍化高风险区范围内;生育期较春灌前(图 3c、3d),土壤发生轻度盐渍化和中度盐渍化的高风险区缩至 32% 和 12%,缩小了 17、11 个百分点,研究区西北和东南部仍是高风险区集中地带。图 3a ~ 3d 为春灌前不同阈值地下水埋深的概率分布,图中颜色越深,表明该处地下水埋深小于等于该阈值的概率越大,当阈值为 1.8 m 时,仅 21% 的区域为高概率区且主要分布在北部和东南端部;当阈值为 2.2 m 时,高概率区在原有基础上扩大,35% 的区域为高概率区;当阈值为 2.6 m 时,西部地区由低概率区过渡为高概率区,高概率区面积比例增至 63%;当阈值为 3.0 m 时,仅 24% 的区域为低概率区且主要集中分布于北端部、南部及西部边缘地区。生育期不同阈值下的地下水埋深高概率区呈扩大趋势(图 3e ~ 3h),较春灌前分别扩至 44%、59%、79% 和 88%,其中阈值为 1.8 m 和 2.2 m 时,面积扩大了 23、24 个百分点,阈值为 2.6 m 和 3.0 m 时扩大了 16、12 个百分点,当阈值为 3.0 m 时,整个研究区中北部均为高概率区,小阈值的高概率区包含在大阈值的高概率区,其分布区域随阈值的增大而逐渐扩大。图 4a ~ 4c 为春灌前不同阈值下地下水矿化度的概率分布,图中颜色越深,表明该处地下水矿化度大于等于该阈值的概率越大,地下水矿化度阈值为 2.0、2.5、3.0 g/L 时高概率区面积比例分别为 47%、35% 和 17%,且中部和北部地区是高概率集中分布区,低概率区主要集中于研究区中偏北和西南腹部,大阈值的高概率区包含在小阈值的高概率区,其分布区域随阈值的增大逐渐缩小;而生育期,不同阈值下的地下水矿化度高概率区分别扩至 58%、43% 和 30%,较春灌前分别扩大了 11、8、13 个百分点,低概率区仍主要集中于中偏北和西南腹部。

表 3 研究区不同阈值条件下各指标概率区面积比例构成

Tab. 3 Area proportion of high and low probability area of each indicator constituted under different threshold conditions

时期	指标	阈值	低概率区面积/km²	低概率区面积比例/%	高概率区面积/km²	高概率区面积比例/%
春灌前	土壤表层含盐量	2.0 g/kg	997	51	974	49
		3.0 g/kg	1 516	77	455	23
	地下水埋深	1.8 m	1 553	79	417	21
		2.2 m	1 271	65	699	35
		2.6 m	730	37	1 241	63
		3.0 m	476	24	1 494	76
	地下水矿化度	2.0 g/L	1 053	53	917	47
		2.5 g/L	1 281	65	689	35
		3.0 g/L	1 627	83	343	17
生育期	土壤表层含盐量	2.0 g/kg	1 335	68	635	32
		3.0 g/kg	1 727	88	243	12
	地下水埋深	1.8 m	1 109	56	861	44
		2.2 m	812	41	1 158	59
		2.6 m	420	21	1 551	79
		3.0 m	239	12	1 732	88
	地下水矿化度	2.0 g/L	825	42	1 145	58
		2.5 g/L	1 123	57	847	43
		3.0 g/L	1 385	70	585	30

春灌前与生育期 3 个指标的空间概率分布变化主要由于春季返盐激烈,土壤表层盐分积聚量大[27],而生育期多次灌水(夏灌到秋灌间一般灌 6 次水)使得土壤中部分盐分淋洗到地下水中[28],地下水埋深变浅,同时,强烈的蒸发使地下水各离子组分浓缩,溶质浓度变大[29],所以进入 7 月(生育期内的灌溉后期)后,浅埋地下水高概率区扩大,土壤盐渍化高风险区缩小,地下水矿化高风险区扩大。

2.4 土壤表层盐分与地下水环境的概率空间分布关系

对比图 2 和图 3 可知,春灌前地下水埋深小于

等于 2.6 m 时的概率空间分布与土壤表层含盐量大于等于 2.0 g/kg 的概率空间分布有较大相似性，地下水埋深小于等于 2.6 m 的高概率区几乎覆盖轻度盐渍化的高风险区，且二者匹配率最高，为 69%（图 5a）；地下水埋深小于等于 2.2 m 时的概率空间分布与土壤表层含盐量大于等于 3.0 g/kg 的概率空间分布具有较高的相似度，地下水埋深小于等于 2.2 m 的高概率区基本覆盖中度盐渍化的高风险区，二者匹配率高达 74%。生育期，地下水埋深小于等于 2.2 m 时的概率空间分布与土壤表层含盐量大于等于 2.0 g/kg 的概率空间分布匹配率最高，为 62%；地下水埋深小于等于 1.8 m 时的概率空间分布与土壤表层含盐量大于等于 3.0 g/kg 的概率空间分布具有较高的相似度，匹配率为 63%。因此，可判定春灌前土壤表层发生轻度盐渍化的地下水埋深临界值为 2.6 m，发生中度盐渍化的地下水埋深临界值为 2.2 m；生育期，土壤表层发生轻度盐渍化的地下水埋深临界值为 2.2 m，发生中度盐渍化的地下水埋深临界值为 1.8 m。

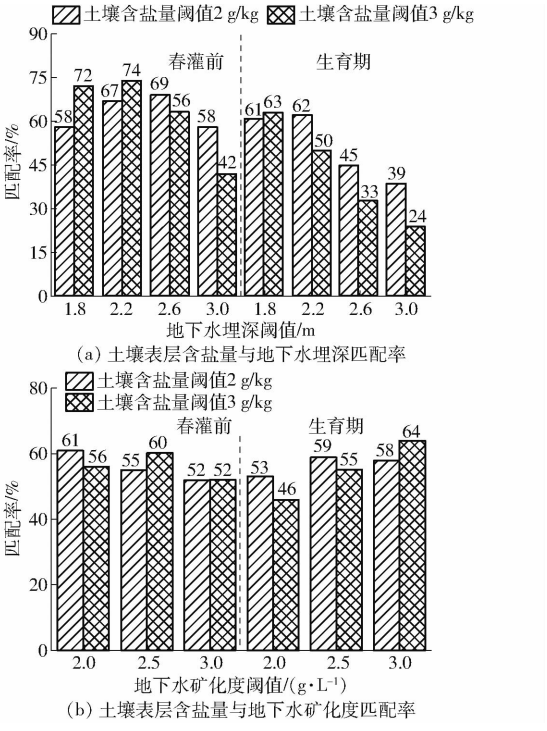

图 5　不同阈值条件下土壤表层含盐量与地下水埋深、矿化度的概率空间分布匹配率

Fig. 5　Probability spatial distribution matching rate of soil surface salinity and groundwater depth and groundwater salinity under different threshold conditions

对比图 2 和图 4 可知，春灌前地下水矿化度大于等于 2.0 g/L 时的概率空间分布，与土壤表层含盐量大于等于 2.0 g/kg（轻度盐渍化）的概率空间分布匹配率最高，为 61%（图 5b）；地下水矿化度大于等于 2.5 g/L 时的概率空间分布与土壤表层含盐量大于等于 3.0 g/kg（中度盐渍化）的概率空间分布具有较高的相似度，二者匹配率为 60%。而生育期，地下水矿化度大于等于 2.5 g/L 时的概率空间分布与土壤表层含盐量大于等于 2.0 g/kg 的概率空间分布匹配率最高，为 59%；地下水矿化度大于等于 3.0 g/L 时的概率空间分布与土壤表层含盐量大于等于 3.0 g/kg 的概率空间分布具有较高的相似度，地下水矿化度大于等于 3.0 g/L 的高概率区基本覆盖中度盐渍化的高风险区，二者匹配率高达 64%。可见，春灌前土壤发生轻度盐渍化时的临界地下水矿化度为 2.0 g/L，发生中度盐渍化时的临界地下水矿化度为 2.5 g/L；生育期土壤发生轻度盐渍化时的临界地下水矿化度为 2.5 g/L，发生中度盐渍化时的临界地下水矿化度为 3.0 g/L。

对比春灌前和生育期各指标之间的匹配率可知，春灌前各指标匹配率优于生育期，因为生育期土壤盐渍化受人为因素（种植结构、灌溉制度、耕作措施等）影响更大，导致生育期地下水环境对土壤盐渍化的影响不如春灌前明显；同时，土壤表层含盐量与地下水埋深的概率空间分布匹配率明显优于土壤表层含盐量与地下水矿化度的匹配率，地下水埋深对于土壤盐渍化的影响明显大于地下水矿化度，其原因为地下水中的盐分主要通过上升毛管水不断迁移到作物根层和地表，因此，埋深较浅时，地下水中的盐分更易导致土壤盐渍化。

3　讨论

当地下水埋深较浅时，地下水中的盐分易于随上升毛管水迁移到作物根层，蒸发后盐分表聚，易于产生次生盐渍化，特别是当地下水中的矿化度较大时，越易发生次生盐渍化。通过河套灌区地下水与土壤盐渍化关系的研究表明（表 4），河套灌区地下水埋深和土壤盐渍化密切相关，临界地下水埋深范围在 1.5 ~ 2.7 m 之间。目前更多的研究主要通过小区试验建立土壤和地下水临界埋深的关系，孔繁瑞等[30]和张义强等[31]利用测坑法和田间试验得出生育期适宜作物（葵花和玉米）生长的地下水埋深，分别为 2.0 m 左右和 2.0 ~ 2.5 m，本研究在生育期防治轻度和中度盐渍化土壤时的临界地下水埋深分别为 1.8 m 和 2.2 m，结果较相近；杨会峰等[32]通过数值模拟对全年不同时期的临界地下水埋深进行了研究，在春灌前临界地下水埋深较深，生育期较浅，总体趋势与本研究一致，且本研究的临界地下水埋深数值在该研究范围内。这些小区尺度的研究基本没有考虑不同区域土壤质地和灌溉、排水、降雨的差

异,故从区域尺度进行探索防治土壤盐渍化的临界地下水埋深更具有实际意义。徐英等[23]在区域尺度上通过指示 Kriging 法得出解放闸灌域防治轻度和中度盐渍化土壤的临界地下水埋深分别为 2.0 m 和 2.5 m,与本文研究的结果相似,但略低 0.1 ~ 0.2 m,这主要由于解放闸灌域轻度以上盐渍化土占耕地的面积小于永济灌域[5],因此,土壤更易发生盐渍化,另外该研究没有考虑地下水矿化度的影响。故总体上本研究得到的临界地下水埋深与目前相关研究结论相似,且把地下水埋深和矿化度进行综合考虑,可见应用指示 Kriging 法研究灌域或区域尺度上地下水临界埋深和矿化度是可行的。

表 4 河套灌区防治土壤盐渍化/适宜作物生长的临界地下水埋深和矿化度

Tab. 4 Critical groundwater depth and salinity for preventing soil salinization/suitable crop growth in Hetao Irrigation Area

范围	研究方法	研究目的	时期	地下水埋深临界值/m	地下水矿化度临界值/(g·L^{-1})	来源
灌域尺度	指示 Kriging 法重叠面积提取	防治土壤盐渍化	春灌前	2.6(轻度盐渍土) 2.2(中度盐渍土)	2.0(轻度盐渍土) 2.5(中度盐渍土)	本文(永济灌域)
			生育期	2.2(轻度盐渍土) 1.8(中度盐渍土)	2.5(轻度盐渍土) 3.0(中度盐渍土)	
	指示 Kriging 法	防治土壤盐渍化	4 月	2.5(轻度盐渍土) 2.0(中度盐渍土)		文献[17](解放闸灌域)
典型小区	田间试验	适宜作物生长	生育期	2.0 左右		文献[30]
	田间试验	适宜作物生长	生育期	2.0 ~ 2.5		文献[31]
	数值模拟	防治土壤盐渍化	3—6 月 7—9 月 9—11 月 11 月—次年 3 月	2.4 ~ 2.7 1.8 ~ 2.1 1.5 ~ 1.8 2.0 ~ 2.3		文献[32]

春灌前较生育期发生土壤盐渍化时的临界埋深大[32],临界矿化度小,主要由于春灌前土壤处于融冻期,返盐激烈且不能及时脱盐[33],盐分表聚加重,土壤表层含盐量大,更易发生土壤盐渍化,因此当地下水埋深小于等于 2.2 m 或地下水矿化度大于等于 2.5 g/L 时,土壤易发生中度盐渍化。而生育期,多次引黄灌溉的同时,降雨也多集中于此时期[29],盐随水走,土壤表层盐分部分被淋洗至地下水中,土壤表层盐分变少,便不易发生土壤盐渍化,即发生盐渍化时的埋深临界值减小,矿化度临界值增大。同时,本文中春灌前土壤盐渍化与地下水环境概率分布的匹配率大于生育期,主要由于研究区春灌前降雨稀少,蒸发量也较小,无引黄水量,地下水受到较少的外界因素(气象因素和人为因素)干扰,而降雨、引水和强烈的蒸腾蒸发多集中于生育期[28],这个时期种植结构及一系列耕作措施也会使土壤盐分变异性增大,因此,春灌前地下水环境对土壤盐渍化的影响更强烈。

4 结论

(1)河套灌区永济灌域春灌前和生育期地下水埋深的变异系数分别为 37% 和 56%,属中等变异性,土壤表层含盐量和地下水矿化度变异系数分别为 133%、158% 和 110%、115%,属强变异性,且生育期各指标变异系数相比春灌前较大;土壤表层含盐量、地下水埋深和地下水矿化度的指示变异函数理论模型均为球状模型,且不同阈值条件下,各变量呈中等强度的空间自相关性。

(2)春灌前,永济灌域 49% 的区域为土壤盐渍化(轻度盐渍化)的高风险区,35% 的区域为浅埋地下水(埋深小于等于 2.2 m)高概率区,17% 的区域为地下水矿化(矿化度大于等于 3.0 g/L)的高风险区;生育期,32% 的区域为土壤盐渍化(轻度盐渍化)的高风险区,59% 的区域为浅埋地下水(埋深小于等于 2.2 m)高概率区,30% 的区域为地下水矿化(矿化度大于等于 3.0 g/L)的高风险区。春灌前较生育期土壤表层盐渍化高风险区扩大,浅埋地下水高概率区缩小,地下水矿化高风险区缩小。

(3)春灌前,永济灌域土壤表层发生轻度、中度盐渍化时的地下水临界埋深分别为 2.6、2.2 m,发生轻度、中度盐渍化时的地下水临界矿化度分别为 2.0、2.5 g/L;生育期,土壤表层发生轻度、中度盐渍化时的地下水临界埋深分别为 2.2、1.8 m,发生轻度、中度盐渍化时的地下水临界矿化度分别为 2.5、3.0 g/L,春灌前更易发生土壤盐渍化,研究区北部、

东南部和中部小部分区域为地下水小于临界埋深且大于临界矿化度的高概率区，是土壤返盐的高风险区，建议进一步完善排水系统，降低局部盐渍化风险区的地下水埋深和矿化度。

(4)春灌前，土壤盐分受外界因素(气象因素和人为因素)影响小，且较生育期土壤表层含盐量、地下水埋深和矿化度变异性较小，地下水环境对土壤盐渍化的影响更强烈。

参 考 文 献

[1] SINGH R B, CHAUHAN C P S, MINHAS P S. Water production functions of wheat (*Triticum aestivum* L.) irrigated with saline and alkali waters using double-line source sprinkler system[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(5): 736 – 744.

[2] 黄亚捷, 李贞, 卓志清, 等. 用 SahysMod 模型研究不同灌排管理情景土壤水盐动态[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 129 – 140.
HUANG Yajie, LI Zhen, ZHUO Zhiqing, et al. Soil water and salt dynamics under different irrigation and drainage management scenarios based on SahysMod model[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(11): 129 – 140. (in Chinese)

[3] 李仙岳, 崔佳琪, 史海滨, 等. 不同时间尺度下冻融灌区地下水埋深 CAR 模型优选[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 247 – 254.
LI Xianyue, CUI Jiaqi, SHI Haibin, et al. CAR model optimization of groundwater depth in freezing-thawing irrigation area under different time scales [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 247 – 254. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200827&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.027. (in Chinese)

[4] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2009, 45(5): 837 – 845.
YANG Jinsong. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 45(5): 837 – 845. (in Chinese)

[5] 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)

[6] 周在明, 张光辉, 王金哲, 等. 环渤海低平原区土壤盐渍化风险的多元指示克立格评价[J]. 水利学报, 2011, 42(10): 1144 – 1151.
ZHOU Zaiming, ZHANG Guanghui, WANG Jinzhe, et al. Risk assessment of soil salinity by multiple-variable indicator Kriging in the low plain around the Bohai Sea[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(10): 1144 – 1151. (in Chinese)

[7] 吐尔逊·艾山, 塔西甫拉提·特依拜, 买买提·阿扎提, 等. 渭干河灌区地下水埋深与矿化度时空分布动态[J]. 地理科学, 2011, 31(9): 1131 – 1137.
TURSUN H, TASHPOLAT T, MAMAT G, et al. Spatial and temporal dynamic distribution of groundwater depth and mineralization in Weigan River irrigation district[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(9): 1131 – 1137. (in Chinese)

[8] BERNALDEZ F G, BENAYAS J M R. Geochemical relationships between groundwater and wetland soils and their effects on vegetation in central Spain[J]. Geoderma, 1992, 55(3 – 4): 273 – 288.

[9] SALAMA R B, OTTO C J, FITZPATRICK R W. Contributions of groundwater conditions to soil and water salinization[J]. Hydrogeology Journal, 1999, 7(1): 46 – 64.

[10] IBRAKHIMOV M, KHAMZINA A, FORKUTSA I, et al. Groundwater table and salinity: spatial and temporal distribution and influence on soil salinization in Khorezm region (Uzbekistan, Aral Sea Basin) [J]. Irrigation and Drainage Systems, 2007, 12(3): 219 – 236.

[11] RUDZIANSKAITE A, SUKYS P. Effects of groundwater level fluctuation on its chemical composition in Karst soils of Lithuania [J]. Environmental Geology, 2008, 56(2): 289 – 297.

[12] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 1202 – 1210.
GUAN Xiaoli, WANG Shaoli, GAO Zhanyi, et al. Spatiotemporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 1202 – 1210. (in Chinese)

[13] 夏江宝, 赵西梅, 赵自国, 等. 不同潜水埋深下土壤水盐运移特征及其交互效应[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 93 – 100.
XIA Jiangbao, ZHAO Ximei, ZHAO Ziguo, et al. Migration characteristics of soil water and salt and their interaction under different groundwater levels[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(15): 93 – 100. (in Chinese)

[14] 赵锁志, 孔凡吉, 王喜宽, 等. 地下水临界深度的确定及其意义探讨以河套灌区为例[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2008, 29(4): 164 – 167.
ZHAO Suozhi, KONG Fanji, WANG Xikuan, et al. Determination of the critical depth of groundwater and its significance discussion take the Hetao Irrigation Area as an example[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2008, 29(4): 164 – 167. (in Chinese)

[15] 李明, 宁立波, 卢天梅. 土壤盐渍化地区地下水临界深度确定及其水位调控[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(5): 46 – 50.
LI Ming, NING Libo, LU Tianmei. Determination and the control of critical groundwater table in salinization area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(5): 46 – 50. (in Chinese)

[16] WANG Yugang, XIAO Duning, LI Yan, 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): 291 – 302.

[17] 徐英, 葛洲, 王娟, 等. 基于指示 Kriging 法的土壤盐渍化与地下水埋深关系研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 123 - 130.
XU Ying, GE Zhou, WANG Juan, et al. Study on relationship between soil salinization and groundwater table depth based on indicator Kriging[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1): 123 - 130. (in Chinese)
[18] 史海滨, 吴迪, 闫建文, 等. 盐渍化灌区节水改造后土壤盐分时空变化规律研究[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 318 - 331.
SHI Haibin, WU Di, YAN Jianwen, et al. Spatio temporal variation of soil salt after water saving transformation in salinized irrigation district[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 318 - 331. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2002035&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.035. (in Chinese)
[19] JOURNEL A G. Non-parametric estimation of spatial distribution[J]. Journal of Mathematical Geology, 1983, 15(3): 445 - 468.
[20] 杨奇勇, 杨劲松, 余世鹏. 禹城市耕地土壤盐分与有机质的指示克里格分析[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2196 - 2202.
YANG Qiyong, YANG Jinsong, YU Shipeng. Evaluation on spatial distribution of soil salinity and soil organic matter by indicator Kriging in Yucheng City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8): 2196 - 2202. (in Chinese)
[21] 梅杨, 杨文婷, 杨勇, 等. 基于时空指示克里格的 PM2.5 不确定性分布[J]. 中国环境科学, 2018, 38(1): 35 - 43.
MEI Yang, YANG Wenting, YANG Yong, et al. Uncertainty assessment of PM2.5 probability mapping by using spatio-temporal indicator Kriging[J]. China Environmental Science, 2018, 38(1): 35 - 43. (in Chinese)
[22] 刘庚, 郭观林, 南锋, 等. 某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征[J]. 环境科学, 2012, 33(12): 4256 - 4262.
LIU Geng, GUO Guanlin, NAN Feng, et al. Heterogeneous characteristic of PAHs' spatial distribution in a large coking site of China[J]. Environmental Science, 2012, 33(12): 4256 - 4262. (in Chinese)
[23] 徐英, 陈亚新, 王俊生, 等. 农田土壤水分和盐分空间分布的指示克立格分析评价[J]. 水科学进展, 2006,17(4): 477 - 482.
XU Ying, CHEN Yaxin, WANG Junsheng, et al. Indicators of the spatial distribution of soil moisture and salinity in farmland Krieger analysis and evaluation[J]. Advances in Water Science, 2006,17(4): 477 - 482. (in Chinese)
[24] 李海学, 程旭学, 李林阳, 等. 宁夏海原盆地地下水淡水——微咸水分布规律[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(4): 182 - 188.
LI Haixue, CHENG Xuxue, LI Linyang, et al. Distribution law of ground freshwater——brackishwater in the Haiyuan basin, Ningxia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(4): 182 - 188. (in Chinese)
[25] 李伟. 河套灌区解放闸灌域土壤盐渍化影响因素及防治措施研究[D]. 扬州:扬州大学, 2018.
LI Wei. Study on influencing factors and prevention measures of soil salinization in Jiefangzha irrigation field of the Hetao Irrigation District[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018. (in Chinese)
[26] 杨树青, 叶志刚, 史海滨, 等. 内蒙河套灌区咸淡水交替灌溉模拟及预测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 8 - 17.
YANG Shuqing, YE Zhigang, SHI Haibin, et al. Simulation and prediction of rotational irrigation with salty and flesh water in the Hetao Irrigation Area of Inner Mongolia[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 8 - 17. (in Chinese)
[27] 孙亚楠, 李仙岳, 史海滨, 等. 河套灌区土壤水溶性盐基离子高光谱综合反演模型[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 344 - 354.
SUN Ya'nan, LI Xianyue, SHI Haibin, et al. Hyperspectral integrated inverse model for water-soluble salt ions content in Hetao Irrigation District[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 344 - 354. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190539&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.039. (in Chinese)
[28] 杜军, 杨培玲, 李云开, 等. 河套灌区年内地下水埋深与矿化度的时空变化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 26 - 31.
DU Jun, YANG Peiling, LI Yunkai, et al. Analysis of spatial and temporal variations of groundwater level and its salinity in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 26 - 31. (in Chinese)
[29] 崔佳琪, 李仙岳, 史海滨, 等. 河套灌区地下水化学演变特征及形成机制[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 134 - 144.
CUI Jiaqi, LI Xianyue, SHI Haibin, et al. Chemical evolution and formation mechanism of groundwater in Hetao Irrigation Area[J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 134 - 144. (in Chinese)
[30] 孔繁瑞, 屈忠义, 刘雅君, 等. 不同地下水埋深对土壤水、盐及作物生长影响的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2009(5): 44 - 48.
KONG Fanrui, QU Zhongyi, LIU Yajun, et al. Experimental study on the effects of different groundwater depth on soil water, salt and crop growth[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(5): 44 - 48. (in Chinese)
[31] 张义强, 高云, 魏占民. 河套灌区地下水埋深变化对葵花生长影响试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3): 90 - 92.
ZHANG Yiqiang, GAO Yun, WEI Zhanmin. Hetao Irrigation Area groundwater depth changes on sunflower growth experimental study[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(3): 90 - 92. (in Chinese)
[32] 杨会峰, 张发旺, 王贵玲, 等. 河套平原次生盐渍化地区地下水动态调控模拟研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(3): 63 - 67.
YANG Huifeng, ZHANG Fawang, WANG Guiling, et al. Simulation study on the dynamic regulation of groundwater in secondary salinized areas of Hetao Plain[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science and Technology, 2011, 9(3): 63 - 67. (in Chinese)
[33] WANG Yangren, KANG Shaozhong, LI Fusheng. Saline water irrigation scheduling through a crop-water-salinity production function and a soil-water-salinity dynamic model[J]. Pedosphere, 2007, 17(3): 303 - 317.