

基于 ArcGIS 空间插值的河套灌区土壤水盐运移规律与地下水动态研究

马贵仁¹, 屈忠义^{1,2}, 王丽萍¹, 贾咏霖¹, 刘祖汀¹

(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.内蒙古农业大学寒旱区灌溉排水研究所,呼和浩特 010018)

摘要:为探明河套灌区盐渍化半封闭小型灌域作物生育期土壤盐分和地下水变异规律,选取巴彦淖尔市五原县盐渍化土壤典型区域作为研究区。采用区域土壤—地下水信息定点监测法,选取149个采样点,30口地下水观测井,获得各项指标数据,并结合经典统计学、空间插值、相关性回归分析等方法,研究了土壤盐分及地下水动态空间变异性、不同深度土壤空间变化特征及其与地下水埋深相关性。结果表明:4—10月各土层土壤含盐量平均降幅为5.53%,研究区1 m深土壤处于脱盐状态,耕作层土壤盐分向深层土壤运移。地下水埋深主要影响因子为引黄灌溉水量、蒸发作用和研究区地势;在春灌期(4—6月)地下水矿化度平均值由2.81 g/L降至2.38 g/L,6—10月地下水矿化度平均值逐渐增加至2.66 g/L,地下水矿化度一般在春灌前期4—5月较大,春灌期较小,秋收后在二者之间。在春灌和作物生长双重抑盐作用影响下,0—20 cm土壤盐分平均值秋收后较春播前下降32.08%,生育期内土壤盐分向深层土壤(40—100 cm)运移,土壤盐分含量与土层深度成反比,且随土层深度增加对土壤盐分分布变化的影响逐渐减弱。0—20,20—40 cm土壤盐分在同时期大于4.0 g/kg的盐分分布面积在4月分别为85.63%,9.71%,在10月分别为42.37%,15.86%,40—100 cm随土层深度增加土壤盐分减小的趋势趋于平缓。随浅层地下水埋深的增大土壤盐分逐渐减小,采取有效措施将地下水埋深降低0.2 m,控制在1.8~2.2 m更佳。

关键词:河套灌区;土壤水盐运移;地下水动态;反距离权重法

中图分类号:S274; X523

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)04-0208-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.04.029

Research on Soil Water and Salt Movement and Groundwater Dynamics in Hetao Irrigation District Based on ArcGIS Spatial Interpolation

MA Guiren¹, QU Zhongyi^{1,2}, WANG Liping¹, JIA Yonglin¹, LIU Zuting¹

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018;

2. Institute of District and Irrigation in Cold Arid Region, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018)

Abstract: In order to explore the variation of soil salinity and groundwater during crop growth period in semi closed irrigation area of Hetao irrigation district, the typical saline soil area in Wuyuan County, Bayannaor, was selected as the study area. Based on fixed monitor of the regional soil-groundwater information, 149 sampling points and 30 groundwater observation wells were selected to collect data. Combined with classical statistics, spatial interpolation, and correlation regression analysis methods, the relationship between soil salinity and groundwater spatial dynamics, soil salinity, and groundwater depth was studied. The results showed that from April to October, the soil salt content of each soil layer decreased by 5.53% on average. The 1 m deep soil in the study area was desalinated, and the surface salt migrated to the deep soil. The main influencing factors of groundwater depth were irrigation water volume from the Yellow River, evaporation, and topography distribution in the study area. During the spring irrigation period (April to June), the average groundwater salinity decreased from 2.81 to 2.38 g/L, and the average groundwater salinity increased to 2.66 g/L from June to October. The groundwater mineralization was low during the spring irrigation period, increased after autumn harvest, and was high in the early spring irrigation from April to May. Due to the

收稿日期:2020-11-28

资助项目:国家自然科学基金项目(51869019);内蒙古自治区科技成果转化项目(CGZH2018138)

第一作者:马贵仁(1996—),男,在读硕士研究生,主要从事盐碱地综合治理及水盐运移研究。E-mail:315205168@qq.com

通信作者:屈忠义(1969—),男,博士生导师,主要从事区域土壤水盐环境及节水灌溉理论技术应用研究。E-mail:quzhongyi@imau.edu.cn

influence of irrigation and crop growth, the average soil salinity of 0—20 cm after autumn harvest decreased by 32.08%. During the growth period of crops, soil salinity migrated to deep soil (40—100 cm), and soil salinity was inversely proportional to depth. As the depth increases, the change in soil salt distribution gradually weakened. The area of 0—20 cm and 20—40 cm soil that had salinity greater than 4.0 g/kg in the same period was 85.63% and 9.71% in April, 42.37% and 15.86% in October. With the increase of soil depth from 40 cm to 100 cm, the decreasing trend of soil salinity tended to be gentle. With the increase of shallow groundwater depth, soil salinity gradually decreased, and effective measures should be taken to reduce the groundwater depth by 0.2 m, which is better to control within from 1.8 to 2.2 m.

Keywords: Hetao irrigation district; soil water and salt movement; groundwater dynamics; inverse distance weighting method

内蒙古河套灌区是中国“三大一首”自流引水灌区之一,灌区地形平坦,引黄灌溉控制面积 116.2 万 hm^2 ^[1],地处内陆干旱区,蒸降比在 10 以上^[2]。随节水改造工程的实施,河套灌区面临指令性的节水形势,引水量骤降 20% 以上,年均引水量减至 40 亿 m^3 ^[1],并进一步减少到 36.4 亿 m^3 ,加之灌区受气候、灌溉等条件限制,随灌溉引水而来的盐分无法有效排出灌区,整个灌区处于积盐状态,导致土壤盐渍化和次生盐渍化问题比较突出^[3],愈来愈成为困扰灌区农业生产高质量发展的主要问题。灌区土壤水分和盐分是制约作物生长与灌区长足发展的重要因素,而土壤的盐分与地下水的埋深和矿化度密切相关^[4]。因此,地下水动态变化的研究也是灌区水盐大环境研究中必不可少的组成部分。

目前针对河套灌区水盐运移规律和地下水动态的研究,多集中于田间尺度或单一因素的研究^[5-13],利用大区域尺度的地下水动态变化与土壤水盐运移规律结合分析的研究较少。关于田间尺度土壤水盐运移的研究如陈名媛等^[5]通过外包土工布暗管排盐条件下水盐运移规律的研究为西北内陆干旱地区不同地下水埋深条件下暗管排盐技术的推广和应用提供理论支撑和科学指导;李金刚等^[6]研究发现,在利用微咸水灌溉时,将灌水下限控制在 -30 kPa,对土壤水盐环境调控效果最佳;张伟等^[7]通过准葛尔盆地南缘不同土壤质地棉田膜下滴灌盐分运移规律研究分析认为,定期大水漫灌洗盐、做好春复水工作,以及恢复排碱渠功能是土壤脱盐的必要手段。前人关于土壤水盐运移规律的研究诸多集中在小区田间尺度,且无法充分考虑地下水埋深和矿化度的动态变化对土壤水盐运移的影响作用。关于区域尺度的研究如韩丽娜^[8]通过遥感数据分析北方干旱区取水灌区水盐时空分布特征得出,地表盐分和地下水矿化度是区域水盐含量空间变化的主要因素,但是关于地下水埋深动态与区域土壤盐渍的相关性分析不足。国内针

对河套灌区地下水动态的研究主要集中在对节水灌溉工程技术和田间尺度地下水动态变化的研究^[4,9-10],并有部分关于井渠结合灌溉模式对河套灌区地下水动态的影响研究^[11-13],而利用大空间尺度的土壤水分、盐分与地下水埋深和矿化度数据分析其变化规律及相互关系的研究较少。因此,本研究基于 ArcGIS 空间插值方法探求河套灌区水盐运移规律和地下水动态变化,可为灌区盐渍化土壤的改良和水资源的优化配置提供科学依据,对推动黄河流域河套灌区生态保护和高质量发展具有一定的现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2019 年 4—10 月在内蒙古西部五原县 3 333 hm^2 试验区进行,海拔 1 019.97~1 023.96 m,试验区东西宽约 5.76 km,南北长约 9.07 km,试验区总面积 3 333 hm^2 (图 1)。北边界为 110 国道,南边界为孟王栓西中海,西边界为 S212 省道,东边界为研究区义通排干沟,界限划分明确,试验区封闭性较好,水土环境受外围影响较小,对研究整个试验区水盐运移规律和地下水动态变化提供较好的条件。研究区耕地利用面积约 2 833 hm^2 ,大面积种植向日葵、玉米,小部分种植水稻、牧草、高粱,南侧靠近湖侧为小部分盐荒地,仅有杂草生长。

试验区位处河套平原腹地,南临黄河与鄂尔多斯市相望,北依阴山山脉。气候属于中温带大陆性气候,具有日照充足、降雨量少的特点^[3]。太阳年平均辐射总量 153.44 Ka/cm^2 ,全年日照时间 3 263 h,平均气温 6.1 $^{\circ}\text{C}$,年均降水量 170 mm,大多集中在夏秋季,对农作物生长十分有利。根据当地气象资料显示,降雨最大年份为 235.4 mm,最干旱年份为 56.3 mm。降雨量在年内分配极不均衡,夏季降水量占全年降水量 63%~70%,春季降水量占 10%~20%。年平均气温为 6.3~7.7 $^{\circ}\text{C}$,全年日照时间 3 100~3 300 h。冬季严寒少雪,夏季高温干旱,平均相对湿度为 40%~

50%。多年平均无霜期 130~168 天,统计得到 2019 年作物生育期内的月基础气象数据(表 1)。

1.2 试验设计与数据采集

根据研究区高程差大小及农田不同种植结构确定实际井位布置,在项目区每个灌排水渠和田间相邻位置,每隔 1 km 左右布置 1 口地下水观测井,以矩形排列,共计 30 眼观测井(图 1)。综合考虑研究区不同土地利用类型、土壤盐渍化程度、路网沟渠分割情况,为更精准分析土壤盐分运移与地下水动态变化,以观测井为取样起始点,以 300 m×300 m 网格进行采样点位置预设,共计 149 个土壤采样点,其中 30 个土壤采样点与观测井位置重合(图 1)。利用手持 GPS 定位仪确定预设采样点位置后,结合实际地块情况在预设采样点周围确定实际采样点并记录样点的位置以方便下次在其周围取样,采用土壤取样机分 5 层(0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm 依次进行分层取样)采集 1 m 深度土壤。

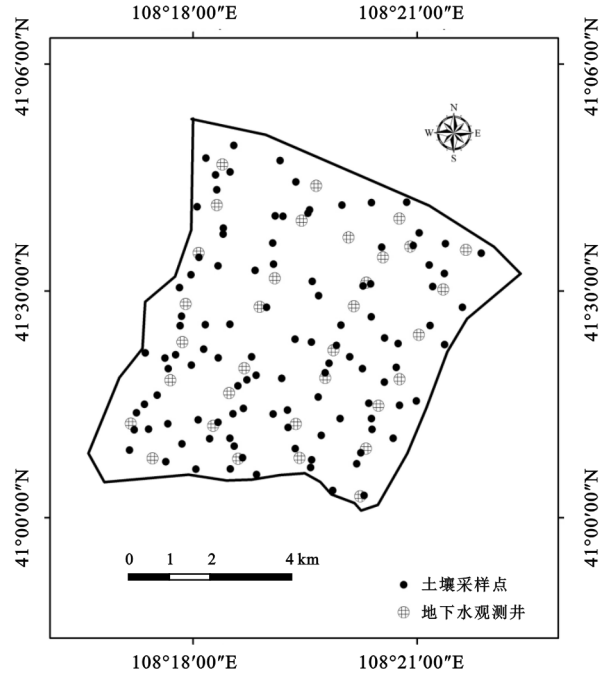


图 1 研究区地理位置和采样点分布示意

表 1 研究区 2019 年作物生育期气象数据月均值

月份	气温/℃			土壤温度/℃			土壤蒸发/mm	降雨量/mm
	最低气温	最高气温	平均气温	最低地温	最高地温	平均地温		
4	-2.70	30.20	12.19	-0.60	17.40	2.96	41.55	4.48
5	-13.30	17.80	2.25	-4.00	0.80	-1.43	115.35	16.35
6	-5.50	26.40	8.81	-0.50	9.30	3.80	186.55	21.20
7	2.30	30.70	15.02	9.80	16.30	12.59	311.95	41.80
8	8.30	34.20	21.81	0.30	21.30	17.16	264.70	37.26
9	11.70	34.70	23.13	0.50	23.80	20.90	227.50	31.80
10	9.90	37.00	22.61	0.40	24.50	22.41	38.27	3.28

在 2019 年进行 2 次(4 月中旬春种前,10 月中旬秋收后)覆盖整个研究区的土壤样本采样工作与调研工作,在观测井安装自记水位计,进行全年全时段地下水水位数据采集,并在 4—9 月每月中旬用自制取水桶进行 1 次地下水样采集。地下水样本和土壤样本测定指标及测定方法:土壤含水率(%)采用烘干法测定;土壤 pH 采用点位法测定;水溶性全盐(g/kg)采用电导法测定^[3];地下水埋深(m)采用 hobo 水位计测定;地下水 pH 采用玻璃电极法测定;地下水矿化度(g/L)采用电导法测定^[14]。

1.3 数据处理与分析

试验通过 Excel 2007 和统计分析软件 SPSS 19.0 进行绘图和整理分析,利用 ArcGIS 10.2 软件地统计模块的反距离插值法(IDW)对土壤含盐量空间分布特征图和地下水指标空间分布图进行绘制分析。

反距离插值法(IDW)是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,常应用于土壤盐分、有机质含量、地下水矿化度及埋深空间分布规律的分析研究^[1,15-16],此方法简单快速、易于计算,其定义为^[17-19]:

$$\hat{z}(S_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(S_i)$$

$$\lambda_i = \frac{[d(S_i, S_0)] - P}{\sum_{i=1}^n [d(S_i, S_0)] - P}$$

式中: $\hat{z}(S_0)$ 为评估点位 S_0 的预测值(g/kg, g/L); $Z(S_i)$ 为已知点位的实测值(g/kg, g/L); λ_i 为权重; $d(S_i, S_0)$ 为样点之间的欧氏距离(m); P 为指定幂值,一般 $1 < P < 3$ 。

采用均值误差(ME)和均方根误差(RMSE)判断反距离插值精度,其中均值误差接近 0,均方根误差越小越好。使用交叉验证法进行检验。

2 结果与分析

2.1 土壤盐分及地下水指标地统计特征

土壤全盐量 K—S 检验结果均为偏态分布(表 2),对数变换后,其偏度和峰度较小,认为符合正态分布。对地下水埋深及矿化度进行 K—S 检验均为正态分布(表 3),数据可以进行反距离插值。

变异系数(CV)反映土壤含盐量数据和地下水埋深及矿化度间的离散程度,其定义为标准差与平均值

之比, $CV < 10\%$ 为弱变异性, $10\% \leq CV \leq 100\%$ 为中等变异性, $CV > 100\%$ 为强变异性^[20]。由表 3 可知, 0—20 cm 土壤盐分属于强变异性, 20—40, 40—100

cm 土壤盐分属中等空间变异性, 4, 6, 10 月地下水矿化度均属中等空间变异性, 4, 6, 8, 10 月均属中等空间变异性。

表 2 土壤盐分特征统计

日期	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	偏度	峰度	分布类型
春播前 (4 月)	0—20	29.86	5.61	0.81	4.04	106	16.16	0.39	0.55	偏态
	20—40	14.58	2.63	0.48	1.96	75	3.82	0.32	0.47	偏态
	40—100	10.40	2.24	0.50	1.56	69	2.44	0.26	-0.28	偏态
秋收后 (10 月)	0—20	22.38	3.81	0.90	4.88	87	23.61	0.17	-0.78	偏态
	20—40	13.41	2.84	0.65	2.05	72	4.18	0.28	0.11	偏态
	40—100	11.90	2.41	0.65	1.66	69	2.79	0.27	0.35	偏态

生育期内, 试验区各土层土壤含盐量均值为 2.24~5.61 g/kg, 属轻中度盐渍化区域^[3]。春播前, 表层土壤(0—20 cm)含盐量最大, 为 5.61 g/kg, 属强空间变异性。深层土壤(20—40, 40—100 cm)属中等空间变异性, 垂直深度上变异系数逐渐减小, 说明春播前土壤盐分垂直深度上空间变异性逐渐减弱; 秋收后表层土壤(0—20 cm)含盐量降低 46.9%, 同时生育期内平均地下水埋深下降 0.58 m; 深层土壤(20—40, 40—100 cm)含盐量分别上升 7.75%, 7.52%, 秋收后深层土壤盐分含量减轻程度变化不显著, 垂直深度上变异系数逐渐减小, 说明秋收后土壤盐分垂直深度上空间变异性逐渐减弱; 深层土壤盐分与地下水变化的空间相关性不显著, 各土层土壤含盐量平均降幅为 5.53%, 表明试验区在生育期内土壤处于脱盐状态, 土壤表层脱盐明显, 分析认为受灌水淋洗和作物生育

期抑盐作用影响, 土壤表层盐分向深层运移。

按照灌水周期对地下水矿化度进行 3 阶段研究(即 4 月春灌前、6 月春灌后、10 月秋浇前), 地下水埋深 4 个阶段进行研究。计算其埋深和矿化度的统计特征值(表 3), 生育期内, 地下水埋深的平均值分别为 2.03, 1.34, 2.02, 2.61 m, 变异系数分别为 32%, 31%, 26%, 18%, 属于中等变异程度, 4—10 月变异系数逐渐减小, 说明灌区地下水埋深及其空间变异性逐渐减弱。地下水矿化度的平均值分别为 2.81, 2.38, 2.66 g/L, 变异系数分别为 84%, 97%, 88%, 属于中等变异程度, 变异系数均先增大后减小, 说明研究区地下水矿化度及其空间变异性呈现先增大后减小的趋势。地下水矿化度存在较多异常值, 异常高值可能是由于局部的土壤盐渍化程度, 地势、人为因素等造成。

表 3 地下水埋深及矿化度特征统计

月份	地下水矿化度									地下水埋深								
	最大值/ (g·L ⁻¹)	平均值/ (g·L ⁻¹)	最小值/ (g·L ⁻¹)	标准差	变异系数/%	方差	偏度	峰度	分布类型	最大值/ m	平均值/ m	最小值/ m	标准差	变异系数/%	方差	偏度	峰度	分布类型
4	11.07	2.81	0.84	2.37	84	5.43	0.22	0.46	偏态	3.19	2.03	0.70	0.65	32	0.41	-0.25	-0.48	偏态
6	10.71	2.38	0.51	2.32	97	5.23	0.30	0.73	偏态	2.14	1.34	0.68	0.41	31	0.16	0.31	-0.74	偏态
8										3.20	2.02	0.84	0.53	26	0.27	-0.25	0.11	偏态
10	11.14	2.66	0.70	2.34	88	5.31	0.28	0.63	偏态	3.44	2.61	1.37	0.47	18	0.21	-0.55	0.64	偏态

2.2 不同土层深度盐分生育期前后空间变化特征分析

运用 ArcGIS 软件地统计模块的反距离插值法(IDW)对试验区生育期前后土壤盐分变化进行插值见图 2a~图 2h。对 0—100 cm 土层按 0—20, 20—40, 40—60, 60—100 cm 依次进行分层绘制分布图, 土壤全盐含量的值由小到大显示为由浅色到深色, 分为 0~2.0, 2.0~4.0, 4.0~10.0, 10.0~20.0, ≥ 20.0 g/kg 5 级。

从时间尺度看, 秋收后表层(0—20 cm)土壤盐分较春播前明显下降(图 2e), 4.0~10.0 g/kg 盐分分布面积由 85.63%减小 42.37%, 其原因为灌溉水通过淋洗盐分, 加之农业耕作的影响, 使表层盐分明显降

低; 春播前到秋收后 20—40 cm 土壤盐分含量高值区多集中在研究区中部(图 2b), 且由春播前分散放射状演变为秋收后(f)条带状分布, 对于整个研究区土壤盐分含量大于 4.0 g/kg 的区域面积由春播前占比 9.71%增至 15.87%, 原因为此区域地势较低(图 4), 地下水横向补给, 加之研究区未经衬砌的排水沟贯穿此区域, 渗漏补给地下水, 致使地下水埋深较浅, 在生育期强烈蒸发作用下, 把深层土壤以及地下水中的盐分带到土壤表层(0—40 cm), 使此区域土壤表层盐分含量较高。对于 40—100 cm 土层深度的土壤, 生育期前(图 2g、图 2h)后土壤盐分值大于 4.0 g/kg 的区域分布面积变化较

小,且各层盐分分布存在较强的位置相似性,但盐分值为 2.0~4.0 g/kg 的区域分布面积由 45.52% 增大到 63.13%,变化明显,说明生育期内土壤盐分向深层土壤(40—100 cm)运移,分析认为是由于春灌和作物生育期双重压盐的影响所致。

从空间尺度看,研究区土壤盐分含量与深度成反比,1 m 深度土壤中 4 月和 10 月同时期不同深度的盐分变化均呈现随土层深度的增加,盐分含量逐层递减,其中 0—40 cm 深度土壤,随土层深度增加土壤盐分变化量较大,尤其春灌前土壤盐分多聚集在 0—20

cm 的表层(a),大于 4.0 g/kg 的盐分分布面积占研究区总面积 85.63%,20—40 cm 土层(b)深度大于 4.0 g/kg 的盐分分布面积占研究区总面积 9.71%,10 月 0—20 cm 土层(e)大于 4.0 g/kg 的盐分分布面积占研究区总面积 42.37%(f),20—40 cm 土层(f)深度大于 4.0 g/kg 的盐分分布面积占研究区总面积 15.86%,盐分表聚明显,且向深层耕作层(20—40 cm)递减趋势明显,40—100 cm 深度随土层深度增加土壤盐分减小的趋势区域平缓,空间尺度上土层深度增加对研究区土壤盐分分布变化的影响逐渐减弱。

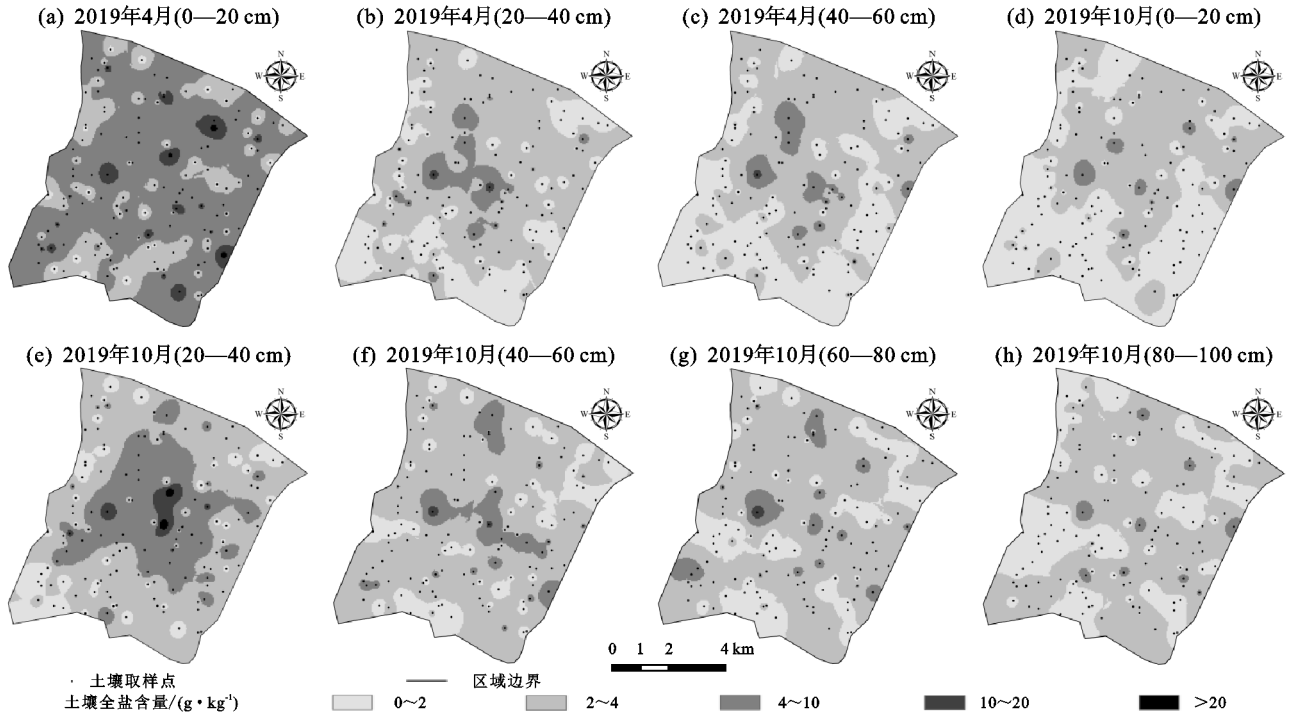


图 2 研究区 4—10 月土壤全盐含量空间分布

2.3 地下水埋深和矿化度空间分析

2.3.1 地下水埋深动态变化

对研究区 30 眼地下水观测井不同时段(作物生育期 4—10 月)地下水埋深进行插值见图 3。

从 2019 年 4 月 15 日至 10 月 15 日,整个研究区地下水埋深总体呈增加趋势。由于 5 月研究区进行大规模浸泡式洗盐引水灌溉,5—6 月地下水位较 4 月有明显抬升(图 3a~图 3c),地下水埋深最小值为 0 m,7—9 月降雨量分别为 41.80,37.26,31.80 mm,蒸发量为 311.95,264.7,227.5 mm,土壤蒸发量与降雨量比值 6.07,因此,降雨对地下水的影响力远小于蒸发作用,地下水埋深于 6 月开始总体呈现增加趋势,4—10 月埋深增幅平均值在 0.5 m 左右。水位在 10 月(f)达到低谷,地下水埋深最大值为 3.6 m。

研究区地下水埋深受气象因素和引黄灌溉水量的影响较大,6 月灌溉结束后,西北部区域和西南部区域地下水埋深整体变化较为明显,且中部区域受

到灌溉渠道进水的影响,渠道周边的地下水埋深在 6,7 月较浅,7—10 月(图 3d~图 3f)整个研究区地下水埋深均呈下降趋势。且此时地下水的运动及埋深变化与研究区的地形存在较为密切的关联,结合地形分析,研究区整体地势呈现南高北低、西高东低,中间低两侧高,区块地势呈现东北、西南、东南高,西北、中东低(图 4)。根据 8—10 月研究区埋深空间分布图变化可以看出,地下水埋深呈现中间低两侧、西高东低,东北、西南高,地下水的运动方向和埋深变化基本与地形趋势吻合,地下水由高地势处向低处运动,地形较高区域地下水埋深向深变化,地形较低处地下水埋深向浅变化。湖面处于高水头区,湖水补给周围地下水,使得研究区南侧靠近西中海高地势区域地下水埋深在 7—10 月均低于附近低地势区,综合分析得出,研究区地下水的运动方向基本与地形趋势吻合,且地下水由高水头处向低水头处运动,进而影响地下水埋深变化。

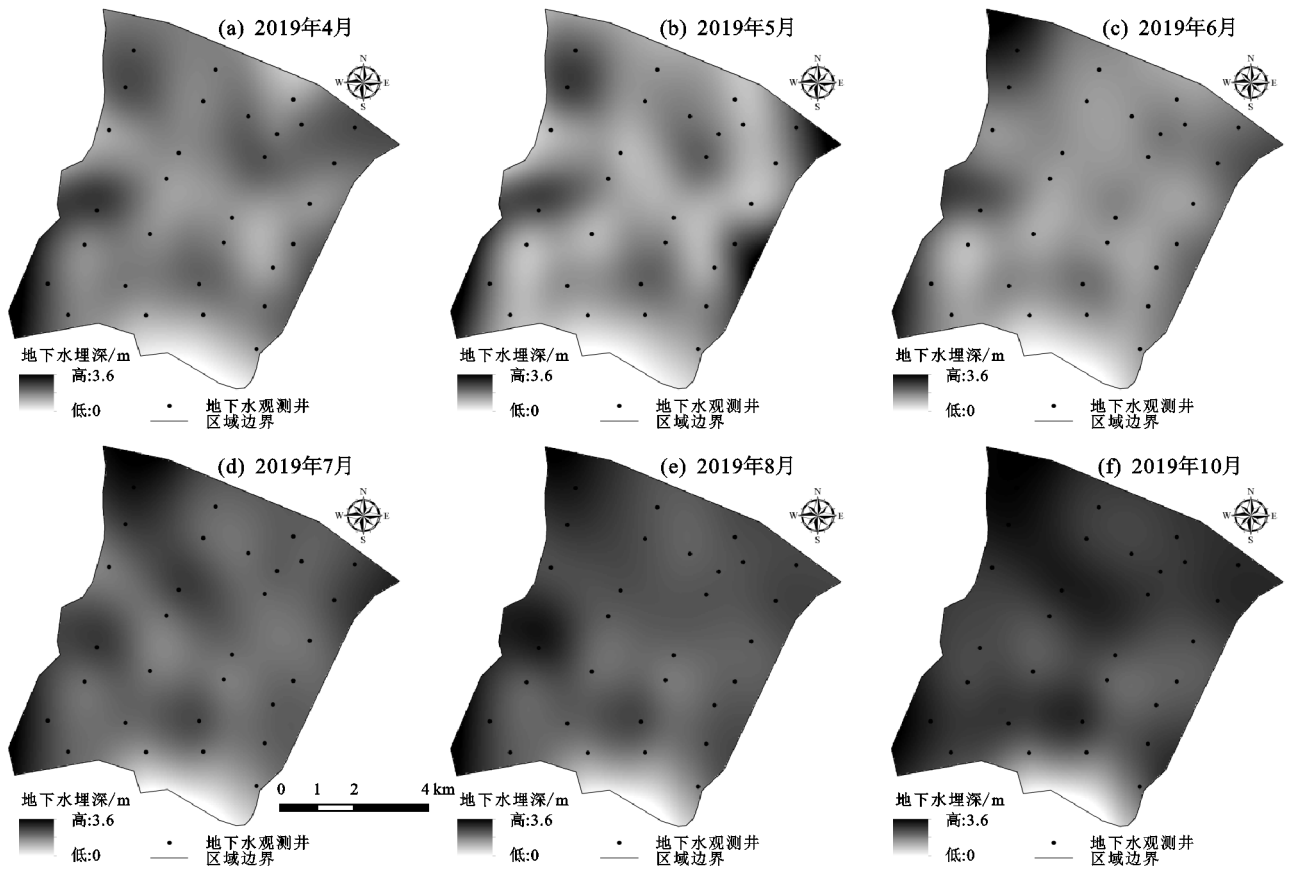


图 3 研究区 4—10 月地下水埋深空间分布

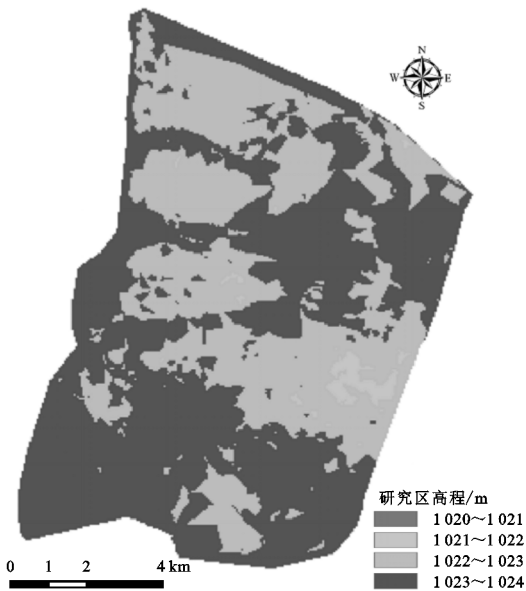


图 4 研究区高程

2.3.2 地下水矿化度动态变化 地下水矿化度变化情况见图 5。4 月研究区地下水矿化度(图 5a)由西向东逐渐增高,由中部区域向南北两侧逐渐降低,中部区域和东部区域地下水矿化度较高,地下水矿化度均在 6.0 g/L 以上,峰值在 11.2 g/L 左右。这些区域恰好位于研究区排水沟附近,加之明沟排水矿化度较大(均值 4.43 g/L),受排水沟侧渗的影响,盐分随水进入周围地下水,导致这些区域地下水矿化度高于周

围区域。与 10 月地下水矿化度分布图 5(c)相比较,整个研究区地下水矿化度呈现先降低后升高趋势,整体分布态势变化不大,位于研究区北侧中部的一块小区域在生育期内地下水矿化度一直维持在 10.0 g/L 以上,矿化度较高,由研究区高程图(图 4)可知,此区域处于研究区北侧的低洼区,致使周围地下水向此处运动,导致盐分在此处聚集。

在春季灌溉期间,研究区进行大规模引水灌溉,地下水位大幅度上升,地下水盐分得到稀释,4,6 月地下水矿化度的平均值分别为 2.81,2.38 g/L,降幅为 0.43 g/L。灌水结束后,灌水结束后受土壤盐分下移影响,地下水矿化度逐渐增加,10 月地下水矿化度平均值为 2.66 g/L。2019 年作物生育期前后研究区地下水矿化度降幅为 0.15 g/L,且地下水矿化度一般在春灌前期 4—5 月较大,灌水期较小。

2.4 反距离插值精度交叉验证

对土壤盐分含量和地下水指标进行反距离插值,获得 0—100 cm 土层土壤盐分和作物生育期内地下水矿化度及埋深空间分布图(图 2、图 3、图 5)。为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的精度。由表 4 和表 5 可知,土壤盐分均值误差绝对值(ME)处于 0.005 9~0.091 2,地下水相关指标均值误差绝对值(ME)处于 0.028 4~0.093 1,均接近于 0,且由于土壤采

样点数量大于观测井数量,土壤指标的插值精度高于地下水指标,并且各指标决定系数(R^2)均在 0.500 以

上,说明插值图的交叉验证参数达到了插值图精度要求,认为反距离插值模型具有较好的精确度。

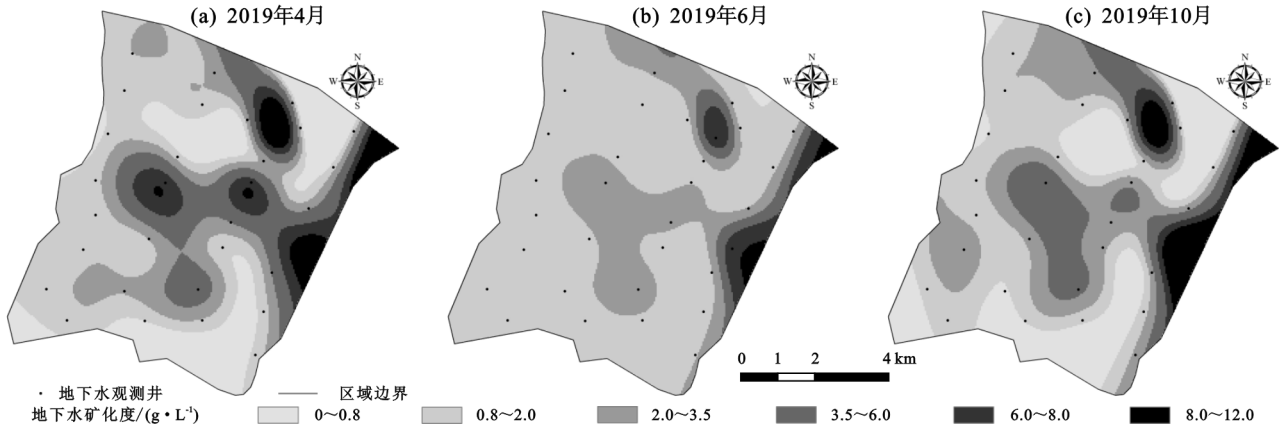


图 5 研究区 4—10 月地下水矿化度空间分布

表 4 土壤盐分插值精度交叉验证参数

日期	土层深度/cm	均值误差	均方根误差 RMS	决定系数
春播前 (4 月)	0—20	0.0059	1.0218	0.640
	20—40	0.0086	0.8670	0.576
	40—100	0.0154	0.6778	0.869
秋收后 (10 月)	0—20	-0.0213	0.5476	0.742
	20—40	0.0178	0.7568	0.714
	40—100	-0.0912	0.8679	0.661

表 5 地下水埋深及矿化度插值精度交叉验证参数

项目	日期/月	均值误差	均方根误差 RMS	决定系数
地下水矿化度/ ($g \cdot L^{-1}$)	4	0.0751	0.7645	0.784
	6	0.0319	0.5782	0.633
	10	0.0284	0.8742	0.599
地下水埋深/m	4	0.0931	0.9746	0.713
	6	0.0856	0.8769	0.545
	8	0.0815	0.7463	0.640
	10	0.0751	0.7645	0.514

2.5 地下水埋深对土壤盐分的影响

河套灌区降雨量远小于蒸发量,研究区地下水埋深较浅,加之土壤盐分本身对水分有较强的亲和力,因此为保证耕层土壤不积盐,控制地下水埋深是一个重要手段。选取研究区观测井及观测井附近土壤取样点(观测井 30 口,土壤样本 30 个),分析地下水埋深与各层土壤(0—100 cm,分 3 层)含盐量之间的关系。选取春播时期(4 月 15 日至 5 月 15 日)统计地下水埋深,取地下水埋深平均值与土壤含盐量数据(0—20,20—40,40—100 cm 土层含盐量分别取 30 个样点的平均值)进行回归分析(图 6)。

随浅层地下水埋深的增大土壤盐分逐渐减小,各层土壤与地下水埋深之间满足指数关系, R^2 值为 0.873 6~0.972 0,整体拟合程度较高,其中 0—20 cm

表层土壤与地下水埋深相关性小于 20—40,40—100 cm 土层,说明地下水埋深的变化对表层土壤的影响程度较深层土壤小。土壤含盐为 2.0 g/kg 时,地下水埋深为 2.0 m,因此研究区地下水埋深 ≥ 2.0 m 时,地下水对土壤盐分的影响较小。当地下水埋深 ≥ 2.7 m 时,土壤含盐量几乎不变,此时地下水对土壤盐分影响很小。罗金明等^[21]研究发现,当地下水埋深为 1.5~2.5 m 时,有利于作物生长,与本文研究结果相符。目前研究区平均地下水埋深约为 1.68 m(表 4),综合考虑研究区作物需水、灌溉制度、地下水水位等实际情况,研究区应控制灌水量把地下水埋深控制在 1.8~2.2 m,既有利于作物生长,又能一定程度避免加重土壤次生盐渍化。

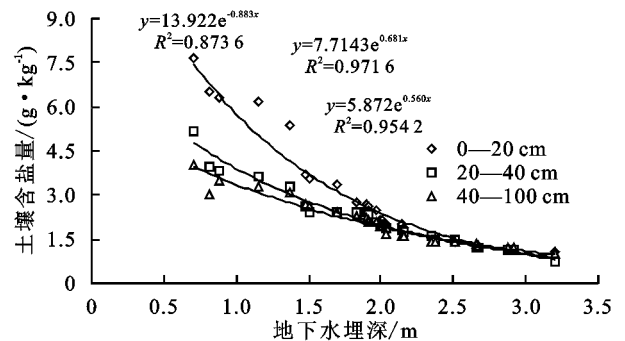


图 6 地下水埋深与土壤含盐量回归分析

3 讨论

由于河套灌区节水改造工程的实施,灌区引水量逐年减少,灌区内部的盐分平衡与分布状态必将发生新的变化。在河套灌区存在很多类似于本研究区的封闭或半封闭小型灌域,各个灌域内的土壤水盐运移情况相互影响又各有特点不尽相同,共同构成整个河套灌区,对此些小型灌域的水盐运移规律及盐分分布特征、地下水动态变化规律等之间的影响进行深入研究是探求灌区盐分重分配的重中之重。

本文应用 ArcGIS 中空间分析模块反距离插值法,研究了小型半封闭灌域土壤和地下水盐分时空分布特征,经验证插值精度较高。史海滨等^[22]通过 IDW 插值方法,研究了沈乌灌域节水改造前后土壤盐分变化规律,其中灌域秋收后土壤盐渍化程度减轻,作物生长安全区面积增加,表聚作用弱化与本研究中结果一致(研究区秋收后表层土壤(0—20 cm)含盐量降低 46.9%,较深层土壤(20—40,40—100 cm)含盐量分别上升 7.75%,7.52%,土壤表层脱盐明显,且表层盐分向深层运移)。地下水埋深与土壤盐分关联密切,通过控制地下水埋深来改善土壤盐渍化值得探究,需要综合考虑气候、土壤特性、作物、人文等因素。因此进一步探求地下水埋深与土壤盐分空间变异规律,能为土壤盐渍化改善提供重要的理论基础与科学依据。管孝艳等^[23]以河套灌区沙壕渠灌域为研究区进行土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深关系研究得出,地下水埋深与土壤盐分满足指数关系。本文研究发现,随浅层地下水埋深的增大土壤盐分减小,各层土壤深度二者之间满足指数关系,相关系数 R^2 为 0.874~0.972,拟合程度较高,地下水埋深控制在 1.8~2.2 m 为佳,既能保证作物不受盐分胁迫,又能一定程度避免加重土壤次生盐渍化。

综上,本文将 ArcGIS 与经典统计学方法结合,直观地反映了不同土层深度土壤剖面盐分和地下水盐分及埋深的时空分布特征,研究了土壤盐分与地下水空间变异性及其土壤盐分含量与地下水埋深相关性,探明了研究区土壤盐分变化及地下水动态变化的影响因子并指出地下水埋深的控制深度,为河套灌区半封闭小型灌域水盐调控提供参考依据。在今后的研究中,还需要对比研究不同空间插值法(反距离权重法(IDW)、普通克里金(OK)、普通协克里金(OCK))的精度,筛选不同指标数据集适用的空间插值分析方法,使水盐空间分布插值分析的结果更加科学精准,以提供更好的研究参考价值。

4 结论

(1)随土层深度增加,空间变异系数 CV 逐渐减小,各土层土壤含盐量均值为 2.24~5.61 g/kg。秋收后表层土壤(0—20 cm)含盐量降低 46.9%,较深层土壤(20—40,40—100 cm)含盐量分别上升 7.75%,7.52%,土壤表层脱盐明显,且表层盐分向深层运移,各土层土壤含盐量平均降幅为 5.53%,生育期内研究区 1 m 深土壤处于脱盐状态。

(2)4—10 月地下水埋深及其空间变异性逐渐减弱。地下水埋深于 6 月开始总体呈现增加趋势,4—

10 月埋深增幅平均值在 0.5 m。水位在 10 月达到低谷,地下水埋深最大值为 3.6 m。研究区埋深变化主要影响因子为引黄灌溉水量、蒸发作用和研究区地势。4—10 月研究区地下水矿化度先减小后增大。4,6 月地下水矿化度的平均值分别为 2.81,2.38 g/L,降幅为 0.43 g/L。灌水结束后受土壤盐分下移影响,10 月地下水矿化度平均值升至 2.66 g/L。地下水矿化度一般在春灌前期 4—5 月较大,灌水期较小。

(3)研究区土壤盐分含量与土层深度成反比,随土层深度增加对土壤盐分分布变化的影响逐渐减弱。0—20,20—40 cm 土壤盐分在同时期大于 4.0 g/kg 的盐分分布面积分别为 85.63%,9.71%(4 月),42.37%,15.86%(10 月)。40—100 cm 土壤随深度增加土壤盐分减小的趋势区域平缓,在春灌和作物生长双重抑盐作用影响下,生育期内土壤盐分向深层土壤(40—100 cm)运移。

(4)随浅层地下水埋深的增大土壤盐分逐渐减小,各层土壤深度二者之间满足指数关系, R^2 值在 0.874~0.972,拟合程度较高。研究区应控制灌水量把地下水埋深控制在 1.8~2.2 m,既有利于作物生长,又能一定程度避免加重土壤次生盐渍化。

参考文献:

- [1] 史海滨,杨树青,李瑞平,等.内蒙古河套灌区水盐运动与盐渍化防治研究展望[J].灌溉排水学报,2020,39(8):1-17.
- [2] 屈忠义,胡敏,王丽萍,等.不同改良措施对盐渍化土壤水热碳与葵花产量的影响[J].农业机械学报,2020,51(3):268-275.
- [3] 马贵仁,王丽萍,屈忠义,等.构建河套灌区大规模盐碱地改良效果评估指标体系[J].灌溉排水学报,2020,39(8):72-84.
- [3] 姚玲,杨洋,孙贯芳,等.基于地统计分析的河套灌区地下水埋深与矿化度时空变异规律研究[J].灌溉排水学报,2020,39(8):111-121.
- [5] 陈名媛,黄介生,曾文治,等.外包土工布暗管排盐条件下水盐运移规律[J].农业工程学报,2020,36(2):130-139.
- [6] 李金刚,屈忠义,黄永平,等.微咸水膜下滴灌不同灌水下限对盐碱地土壤水盐运移及玉米产量的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):217-223.
- [7] 张伟,李鲁华,刘建国,等.准葛尔盆地南缘不同土壤质地棉田膜下滴灌盐分运移规律研究[J].水土保持学报,2009,23(2):52-56.
- [8] 韩丽娜.北方干旱区取水灌区水盐时空分布特征的遥感数据分析研究[J].水利规划与设计,2020(3):117-124.
- [9] 成萧尧,毛威.基于 Saltmod 的河套灌区节水条件下地下水动态变化分析[J].节水灌溉,2020(2):73-79.

- [10] 毛威,杨金忠,朱焱,等.河套灌区井渠结合膜下滴灌土壤盐分演化规律[J].农业工程学报,2018,34(1):93-101.
- [11] 王璐瑶,彭培艺,郝培静,等.基于采补平衡的河套灌区井渠结合模式及节水潜力[J].中国农村水利水电,2016(8):18-24.
- [12] 于健,杨金忠,徐冰,等.内蒙古河套灌区三种水源形式滴灌发展潜力[J].中国水利,2015(19):50-53.
- [13] 陈艳梅,王少丽,高占义,等.基于 SALTMOD 模型的灌溉水矿化度对土壤盐分的影响[J].灌溉排水学报,2012,31(3):11-16.
- [14] 杨军,孙兆军,王旭.龟裂碱地下水埋深、矿化度和盐分离子年内时空变化特征研究[J].节水灌溉,2016(3):45-48,51.
- [15] 吴亚坤,刘广明,杨劲松,等.基于反距离权重插值的土壤盐分三维分布解析方法[J].农业工程学报,2013,29(3):100-106,296.
- [16] 张恒,黄莺,刘明宏,等.基于空间插值法的遵义烟区植烟土壤养分时空变化[J].中国烟草科学,2020,41(3):36-43.
- [17] Bahareh A, Ahmad J, Hossein K, et al. Sub-basin scale spatial variability of soil properties in Central Iran [J].Arabian Journal of Geosciences,2017,10(6):2-8.
- [18] 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,2017,31(4):136-141.
- [19] 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.
- [20] Xiao G X, Hu Y L, Li N, et al. Spatial autocorrelation analysis of monitoring data of heavy metals in rice in China[J].Food Control,2018,89:32-37.
- [21] 罗金明,王永洁,邓伟,等.浅地下水埋深微域尺度苏打盐渍土的积盐机理探讨[J].土壤学报,2010,47(2):238-245.
- [22] 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].农业机械学报,2020,51(2):318-331.
- [23] 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):198-206.
- (上接第 207 页)
- [13] 李佶恺,孙涛,旺扎,等.西藏地区燕麦与箭筈豌豆不同混播比例对牧草产量和质量的影响[J].草地学报,2011,19(5):830-833.
- [14] 郑凯,顾洪如,沈益新,等.牧草品质评价体系及品质育种的研究进展[J].草业科学,2006,23(5):57-61.
- [15] Li C J, Li Y Y, Yu C B, et al. Crop nitrogen use and soil mineral nitrogen accumulation under different crop combinations and patterns of strip intercropping in northwest China[J]. Plant and Soil, 2011, 342(1/2): 221-231.
- [16] 刘敏,龚吉蕊,王忆慧,等.豆禾混播建植人工草地对牧草产量和草质的影响[J].干旱区研究,2016,33(1):179-185.
- [17] 文霞,侯向阳,穆怀彬.灌水量对京南地区紫花苜蓿生产能力的影 响[J].草业科学,2010,27(4):73-77.
- [18] 王旭,曾昭海,朱波,等.箭筈豌豆与燕麦不同间作混播模式对产量和品质的影响[J].作物学报,2007,33(11):1892-1895.
- [19] 陈萍,咎林森,陈林.不同灌溉量对紫花苜蓿生长和品质的影响[J].家畜生态学报,2011,32(5):44-47.
- [20] 汪精海,齐广平,康燕霞,等.干旱半干旱地区紫花苜蓿营养品质对水分胁迫的响应[J].草业科学,2017,34(1):112-118.
- [21] 山仑,徐萌.节水农业及其生理生态基础[J].应用生态学报,1991,2(1):70-76.
- [22] Sun H Y, Liu C M, Zhang X Y, et al. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain[J].Agricultural Water Management,2006,85(1/2):211-218.
- [23] Li F M, Liu X L, Li S Q. Effects of early soil water distribution on the dry matter partition between roots and shoots of winter wheat [J]. Agricultural Water Management,2001,49(3):163-171.
- [24] 王自奎,吴普特,赵西宁,等.小麦/玉米套作田棵间土壤蒸发的数学模拟[J].农业工程学报,2013,29(21):72-81.