文章编号:1000-7601(2022)01-0076-10

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2022.01.09

内蒙古河套灌区典型耕、荒地 水盐动态分析

袁成福^{1,2},冯绍元¹,庄旭东¹,钱 争¹

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 江西农业大学国土资源与环境学院, 江西 南昌 330045)

摘 要:为了探究河套灌区在实施节水灌溉下的水盐平衡机制,在河套灌区永济灌域选择1个典型研究区,通 过观测耕地和盐荒地土壤含水率及含盐量、地下水位埋深及矿化度,分析耕、荒地水盐动态规律及其主要影响因素, 探讨盐荒地对耕地的"旱排"作用。结果表明:在灌溉和降雨的影响下,耕地土壤含水率比盐荒地土壤含水率变化更 剧烈,耕地土壤含水率的主要影响因素是灌溉及降雨、作物生长、地下水位埋深和土壤质地,盐荒地土壤含水率的主 要影响因素是耕地灌溉和地下水位埋深;耕地土壤含盐量在3.5g·kg⁻¹以下,为轻度盐碱化土壤,盐荒地土壤含盐量 较高,其中心区域的土壤含盐量在4.0~10.0g·kg⁻¹,为重度盐碱化土壤,耕地土壤含盐量的主要影响因素是灌溉和 作物生长,盐荒地土壤含盐量的主要影响因素是地形地貌和地下水位埋深;盐荒地地下水位埋深低于耕地地下水位 埋深,耕地地下水矿化度在3.0g·L⁻¹以下,为微咸水,盐荒地中心区域地下水矿化度平均在8.5g·L⁻¹左右,为重度 咸水。在无地表排水措施条件下,分布于耕地之间的盐荒地是耕地水盐的排泄区域,为河套灌区"旱排盐"聚集的主 要场地。

关键词:耕地;盐荒地;土壤含水率;土壤含盐量;地下水位;土壤水盐动态;河套灌区 中图分类号:S274 文献标志码:A

Analyzing water-salt dynamics in typical cultivated and wasteland in Hetao irrigation district of Inner Mongolia

YUAN Chengfu^{1,2}, FENG Shaoyuan¹, ZHUANG Xudong¹, QIAN Zheng¹

College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;
 College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045, China)

Abstract: This study was conducted at a typical study area with cultivated land and saline wasteland in Yongji irrigation area of Hetao irrigation district to explore the water-salt balance mechanism. The soil water content, soil salinity, groundwater depth and groundwater salinity were observed in field experiments. The water-salt dynamic and main influencing factors in cultivated wasteland were analyzed and discussed on the "dry drainage" effect of saline wasteland on cultivated land. The results showed that soil water content of cultivated land changed more obviously compared with soil water content of saline wasteland. The main influencing factors of soil water content for cultivated land were irrigation and rainfall, crop growth, groundwater depth and soil texture. The main influencing factors of soil water content for saline wasteland were irrigation of cultivated land and groundwater depth. The soil salinity of cultivated land was less than 3.5 g \cdot kg⁻¹, which was slightly salinized soil. The saline wasteland had high soil salinity and the soil salinity was 4.0~10.0 g \cdot kg⁻¹ in the central area of saline wasteland, which was severely salinized soil. The main influencing factors of soil salinity were topographic geomorphology and groundwater depth for saline wasteland. The main influencing factors of soil salinity was less than 3.0 g \cdot L⁻¹ in cultivated land, which was brackish water. The groundwater salinity was about 8.5 g \cdot L⁻¹ in the

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0403301);江苏省扬州大学研究生科研与实践创新计划项目(XKYCX18_065) 作者简介:袁成福(1989-),男,江西赣州人,博士,讲师,主要从事节水灌溉与农业水土环境的研究。E-mail: cfyuan1989@163.com 通信作者:冯绍元(1963-),男,江西都昌人,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉与水资源及水环境的研究。E-mail: syfeng@ yzu.edu.cn

收稿日期:2021-04-15 修回日期:2021-05-12

central area of saline wasteland, which was severely saline water. The saline wasteland, distributing in the cultivated land gap, was the drainage area for cultivated land when the surface water drainage system was absent.

Keywords: cultivated land; saline wasteland; soil water content; soil salinity; groundwater level; soil watersalt dynamics; Hetao irrigation district

内蒙古河套灌区是我国三个特大型灌区之一. 也是我国重要的商品粮、油生产基地[1-2]。河套灌 区总土地面积为 1.19×10⁴ km²,其中灌溉面积为 5.74×10³ km², 盐荒地面积达 2.09×10³ km², 接近灌 溉面积的40%^[3-4]。河套灌区的盐荒地在灌区内呈 零星状分布,主要分布于耕地之间及沙丘、湖泊的 周围,是一种特殊的土地类型,在灌区内储存有大 量的盐分,具有调节灌区水盐平衡的重要作用^[5-6]。 目前国内外有关灌区水盐运移规律和盐碱化问题 的研究主要集中于耕地或原有的水盐平衡体系。 郝芳华等[7] 对河套灌区不同作物种植区及不同灌 溉时期的水分动态变化规律及水平衡特征进行了 研究,结果表明,不同作物地块间土壤水分的差异 主要体现在作物生长期,灌区田间水循环过程属于 "灌溉(降雨)-下渗(优势流)-潜水蒸发型"。柯隽 迪等[8]通过河套灌区土壤水盐动态的原位监测,并 应用 HYDRUS-EPIC 耦合模型对不同灌溉条件下 葵花土壤盐分累积规律进行了研究。刘显泽等[9] 根据河套灌区义长灌域典型研究区试验观测资料, 分析了研究区土壤含盐量在垂向剖面上的分布特 征和变化规律,研究了地下水位埋深和矿化度季节 性变化规律及其对土壤盐分运移的影响。岳卫峰 等^[10]在河套灌区节水灌溉实施之前对河套灌区水 盐运移及平衡进行了研究,建立了非农区-农区-水 域的水盐运移及均衡模型,并定量分析了水盐迁移 量。韩宇平等[11]研究了宁夏青铜峡灌区的水盐运 移与转化的关系,定量计算了灌区农区-非农区的 盐分迁移量,探明了灌区水盐平衡与转化规律。在 灌区盐碱化问题方面,大量研究表明灌区地下水位 埋深小于临界深度及地下水矿化度较高,是造成土 壤盐碱化问题的主要原因,控制地下水位在合理的 深度是防止灌区土壤盐碱化发生的重要途径[12-15]。 然而,近年来,随着土地利用价值的增加,盐荒地被 不断开垦,耕地面积不断扩大,盐荒地面积逐渐减 少。同时随着灌区续建配套与节水改造工程的实 施,河套灌区引黄水量由年均52亿m³左右下降到 40亿m^{3[16-17]}。在这种强人类活动的影响下,耕、荒 地之间的水盐运移发生了变化,原有的水盐平衡体 系被打破,而新的水盐平衡体系下的耕、荒地水盐 平衡机制尚不十分明晰。针对灌区新的水盐平衡 体系下的耕、荒地水盐运移规律及其平衡的研究较 少。因此,本研究在河套灌区实施节水灌溉状态的 背景下,在永济灌域选取典型研究区,通过对耕、荒 地地下水、土壤水盐的监测,分析耕、荒地水盐动态 规律及其主要影响因素,研究地下水位埋深与矿化度 对土壤含盐量的影响,探讨盐荒地对耕地的"旱排" 作用,以期为河套灌区节水控盐及防治土壤盐碱化提 供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古河套灌区的中国农业大学 永济试验基地(图1),处于内蒙古自治区巴彦淖尔 市临河区干召镇民主村境内,地理坐标为东经 107°15′~107°18′,北纬40°43′~40°46′。研究区属 于中温带半干旱大陆性气候,干旱少雨,蒸发强烈, 多年平均降雨量为 160 mm,多年平均蒸发量为 2 240 mm^[18]。土壤冻结从每年的 11 月中下旬开 始,冻土层厚度为1.0~1.3m,在4月中旬开始融通。 研究区地下水位埋深较浅,平均地下水位埋深为1.6 ~2.2 m,其中3月最深,在2.5 m以下,11月最浅, 为0~1.0 m。研究区海拔1040~1042 m,总面积约 507 hm²,主要有耕地、盐荒地两种土地利用类型,其 中耕地面积占58%。研究区由一条分干渠(合济分 干渠)和两条支渠(新利支渠和新丈支渠)控制。研 究区盐荒地分布相对集中,主要集中在研究区中部 和西北部区域,东、南、西三面由耕地围绕,且盐荒 地比耕地地势低,为耕地水盐主要排泄区域,该研 究区是河套灌区典型的"旱排"区域。

1.2 水盐观测布设

野外观测于 2019 年 5 月—2020 年 11 月进行, 研究区内耕地与盐荒地相邻,且盐荒地地势比耕地 更低,在选取的耕地与盐荒地中布设 12 眼地下水观 测井(图 1),观测井深度均为 3 m,直径为 10 cm,其 中 1#、2#、11#观测井布置在葵花地,3#、4#、7#、9#观 测井布置在玉米地,5#、6#、8#、10#、12#观测井布置 在盐荒地。12 眼观测井所在的田块分别表示为 KH1(1#)、KH2(2#)、KH3(11#),YM1(3#)、YM2(4 #)、YM3(7#)、YM4(9#),YH1(8#)、YH2(5#)、YH3 (12#)、YH4(10#)、YH5(6#),选择 1~12#观测井所 在的田块布设土壤采样点,土壤采样点离观测井距 离 3~5 m。

1.3 观测项目及方法

在作物播种前、夏灌前后、秋灌前后和秋浇前 后在土壤采样点利用土钻田间分层获取土样,其中 耕地和YH3(12#)盐荒地土层均分为6层,分别为0 ~10、10~20、20~40、40~60、60~80 cm 和 80~100 cm;其余盐荒地由于地势较低,地下水位埋深较浅, 采样土层分为4层,分别为0~10、10~20、20~40 cm 和 40~60 cm,每个采样点取土重复3次。采用烘干 法测定土壤含水率;采用电导率仪(DDSJ-308A,上 海雷磁仪器公司)测定土壤饱和浸提液的电导率 *EC*_{1:5},并根据公式(*S*=2.882*EC*_{1:5}+0.183)将土壤 电导率换算成土壤含盐量^[19]。试验观测期间每7 d 测定1次观测井地下水位埋深和矿化度,地下水位 埋深采用钢尺水位计(JK22924,北京精凯达仪器公 司)测定;在测定地下水位埋深的同时测定地下水 的电导率(EC),并根据公式(T=0.69EC)把地下水 电导率换算成地下水矿化度^[20]。利用激光粒度分 析仪(Mastersizer 2000, Malvern,UK)测定耕地和盐 荒地土壤颗粒组成,耕地和盐荒地的土壤物理性质 见表 1、2。研究区种植的玉米品种为西单 10 号,5 月初播种,9 月底收获;种植的葵花品种为美葵 361 号,6 月初播种,9 月底收获。通过实地调查,研究区 玉米和葵花的灌溉制度如表 3 所示。气象数据通过 中国农业大学永济试验基地安装的自动气象站下 载采集获得。

1.4 水盐观测数据分析

利用 Microsoft Excel 2003 软件对耕、荒地地下 水与土壤水盐观测数据进行处理和制图,应用 SPSS 17.0 统计软件对耕、荒地地下水与土壤水盐观测数 据进行统计分析。



图 1 研究区位置示意图 Fig.1 Location sketch map of study area

表1 耕地土壤物理性质

Table 1 Soil physical properties of cultivated land

土层深度/cm Soil depth	黏粒 Clay/% /(<0.002 mm)	粉粒 Silt/% /(0.002~0.02 mm)	砂粒 Sand/% /(0.02~2 mm)	土壤容重/(g・cm ⁻³) Soil bulk density	国际制土壤质地分类 International soil texture
0~20	5.02	44.86	50.14	1.68	壤土 Loam
20~40	4.97	45.30	49.74	1.58	粉砂质壤土 Silty sandy loam
40~60	4.94	52.35	42.70	1.52	粉砂质壤土 Silty sandy loam
60~100	1.92	21.72	76.72	1.51	砂质壤土 Sandy loam
100~150	1.75	9.91	88.34	1.49	壤质砂土 Loamy sand

表 2 盐荒地土壤物理性质

Table 2 Soil physical properties of saline wasteland

土层深度/cm Soil depth	黏粒 Clay/% /(<0.002 mm)	粉粒 Silt/% /(0.002~0.02 mm)	砂粒 Sand% /(0.02~2 mm)	土壤容重/(g・cm ⁻³) Soil bulk density	国际制土壤质地分类 International soil texture
0~20	3.47	18.61	77.93	1.56	砂质壤土 Sandy loam
20~40	3.11	17.86	79.03	1.54	砂质壤土 Sandy loam
40~60	2.78	14.14	83.07	1.58	砂质壤土 Sandy loam
60~80	3.29	16.15	80.57	1.55	砂质壤土 Sandy loam
80~100	3.22	15.54	81.25	1.55	砂质壤土 Sandy loam

表 3 研究区灌溉制度/mm

Ta	abl	le	3	3	Irri	gat	tio	n s	scl	he	lu	li	ng	; iı	n t	the)	stuc	ly	are	ee
----	-----	----	---	---	------	-----	-----	-----	----------------------	----	----	----	----	------	-----	-----	---	------	----	-----	----

作物种类 Crop species	第1次灌水 First irrigation 05-02—05-10	第2次灌水 Second irrigation 06-12—06-18	第3次灌水 Third irrigation 07-01—07-08	第4次灌水 Fourth irrigation 07-26—08-04	秋浇 Autumn irrigation 10-05—11-05	
玉米 Maize		100	100	100	200	
葵花 Sunflower	180		100	100	200	

2 结果与分析

2.1 内蒙古河套灌区典型耕、荒地水盐观测数据统 计分析

利用 SPSS 17.0 软件对试验观测数据进行经典 统计分析,结果见表4。变异系数反映试验观测数 据的离散程度,一般认为变异系数小于0.1为弱变 异,大于1.0为强变异,在0.1~1.0之间为中等变 异^[21]。从表4可以看出,只有盐荒地地下水矿化度 的变异系数大于1.0,属于强变异,这主要是研究区 中心位置(10#附近)地下水矿化度较高,地下水矿 化度最高为 12.33 g·L⁻¹,并且方差也较大,表明盐 荒地地下水矿化度波动性较大。耕地土壤含水率、 土壤含盐量、地下水位埋深和盐荒地土壤含水率、 地下水位埋深变异系数在 0.2~0.5, 属于中等偏弱 变异,偏度和峰度也接近于0,观测数据基本满足正 态分布;耕地地下水矿化度和盐荒地土壤含盐量变 异系数在 0.5~0.8, 属于中等偏强变异, 偏度和峰度 也较大,不服从正态分布。由此可见,研究区耕地 地下水矿化度、盐荒地土壤含盐量和地下水矿化度 空间变异性较大,可能受地形地貌的影响较明显。

2.2 内蒙古河套灌区典型耕、荒地土壤水分分布 规律

图 2、3 分别为 2019、2020 年耕地与盐荒地不同

时期土壤含水率分布,以KH2(葵花地)、YM2(玉米 地)和 YH2(盐荒地)为例。由图 2、3 可以看出: (1)耕地与盐荒地土壤含水率差异性较大,总体上 耕地土壤含水率比盐荒地土壤含水率变化更剧烈。 (2)耕地土壤含水率在夏灌后、秋灌后和秋浇后土 壤含水率较大,灌溉后地下水位逐渐上升,在灌溉 入渗和潜水蒸发作用下,土壤含水率较高;耕地土 壤含水率秋浇前较小,秋浇前也是一年期间地下水 位埋深最大时期,土壤含水率受地下水位的影响较 小,在土壤蒸发作用下,土壤含水率逐渐减小;不同 耕地类型(玉米地与葵花地)土壤含水率受灌溉的 影响存在一定的差异性,由于玉米生育期灌溉3次, 而葵花生育期只灌溉2次,从作物耗水特性考虑,玉 米也比葵花生育期耗水量更大,因此整体上看玉米 地土壤含水率比葵花地土壤含水率变化更剧烈;耕 地土壤含水率的差异性还受到土壤质地的影响,研 究区耕地由于处在不同的地形地貌,土壤物理性质 存在一定的空间变异性,特别是离盐荒地较近的耕 地,土壤质地含砂粒较多,土壤含水率较低。(3)盐 荒地土壤含水率随土层深度的增加而增大,受地下 水位埋深影响较大;在耕地灌溉季节,盐荒地土壤 含水率较高且不同时期差异性较小,这主要是盐荒 地地势低于耕地,耕地灌溉后,耕地地下水会流向盐 表 4

耕、荒地地下水与土壤水盐观测指标分析

	Table 4 Classical statistical parameters of groundwater and soil water-salt in cultivated wasteland											
土地类型 Land type	项目 Item	样本数 Sample	均值 Mean	标准差 Standard deviation	最小值 Minimum	最大值 Maximum	方差 Variance	变异系数 Coefficient of variation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis		
井地 Cultivated land	土壤含水率/(cm ³ · cm ⁻³) Soil water content	160	0.346	0.072	0.103	0.457	0.005	0.208	-1.338	2.020		
	土壤含盐量/(g・kg ⁻¹) Soil salinity	160	1.103	0.397	0.426	2.425	0.158	0.360	0.902	0.993		
	地下水位埋深/m Groundwater depth	274	1.529	0.487	0.165	2.445	0.237	0.319	-0.524	-0.003		
	地下水矿化度/(g・L ⁻¹) Groundwater salinity	274	1.547	0.909	0.502	5.370	0.826	0.588	1.789	4.022		
土荒地 Saline wasteland	土壤含水率/(cm ³ · cm ⁻³) Soil water content	120	0.328	0.074	0.116	0.445	0.005	0.226	-1.149	1.837		
	土壤含盐量/(g・kg ⁻¹) Soil salinity	120	1.514	1.120	0.521	5.773	1.254	0.740	1.79	3.146		
	地下水位埋深/m Groundwater depth	190	0.980	0.471	0.000	2.080	0.222	0.481	0.213	-0.361		
	地下水矿化/(g・L ⁻¹) Groundwater salinity	190	2.317	2.650	0.550	12.330	7.024	1.143	2.092	3.211		





Note: KH2-sunflower field, YM2-maize field, YH2-saline wasteland. The same below.

图 2 2019 年耕、荒地土壤含水率分布





Fig.3 Soil water distribution of cultivated land and saline wasteland in 2020

荒地,使盐荒地地下水位逐渐上升,在潜水蒸发作 用下,盐荒地土壤含水率较高,盐荒地起到"干排 水"的作用;在秋浇前,由于耕地秋灌后没有再进行 灌溉,此时盐荒地地下水位埋深最大,土壤含水率 逐渐减小,秋浇后,由于耕地秋浇灌水量较大,盐荒 地基本上被淹没。

由此可见,耕地土壤含水率主要受灌溉及降雨、 作物生长、地下水位埋深和土壤质地的影响,盐荒地 土壤含水率受耕地灌溉和地下水位埋深的影响。

2.3 内蒙古河套灌区典型耕、荒地土壤盐分分布 规律

图 4、5 分别为 2019、2020 年耕地与盐荒地不同 时期土壤含盐量分布,以 KH2(葵花地)、YM2(玉米 地)和 YH4(盐荒地)为例。由图可以看出:(1)耕 地与盐荒地的土壤含盐量差异性较大,总体上耕地 土壤含盐量小于盐荒地土壤含盐量。(2)灌溉季 节,在灌溉和降雨作用下,土壤盐分被淋洗,耕地不 同时期土壤含盐量变化较小,除 2019 年 KH2 土壤 盐分略高外,其余耕地土壤含盐量均在 3.5 g·kg⁻¹ 以下。耕地土壤含盐量表层土壤高于中下层土壤, 随着土壤深度的增加,土壤含盐量表现出减小的趋 势,表层土壤含盐量变化范围为 0.3~3.5 g·kg⁻¹; 玉米地与葵花地由于灌溉水量的不同,土壤含盐量 也存在一定的差异性,总体上葵花地土壤含盐量略 高于玉米地,玉米地由于灌溉水量比葵花地大,灌 溉水淋洗盐分更多,因此,玉米地土壤含盐量较小。 (3)盐荒地土壤含盐量在不同地形地貌表现出不同 的变化规律,在离耕地比较近的盐荒地,土壤含盐量





Fig.4 Soil salt distribution of cultivated land and saline wasteland in 2019



图 5 2020 年荒、耕地土壤含盐量分布

Fig.5 Soil salt distribution of cultivated land and saline wasteland in 2020

较小,土壤含盐量在 0.5~3.5 g·kg⁻¹,这主要是因为盐荒地与耕地存在一定的高差,灌溉季节,耕地存在侧渗,侧渗的水流流向附近的盐荒地,进而淋洗盐荒地,而离耕地较远的盐荒地土壤含盐量较大,土壤含盐量在 4.0~10.0 g·kg⁻¹,为重度盐碱化土壤,如 YH4,这些区域的盐荒地受到耕地灌溉的影响,耕地的地下水流向地势更低的盐荒地地下水,盐荒地地下水在潜水蒸发作用下向土壤表层运移,从而导致土壤盐分不断地累积在土壤表层,即所谓的"旱排盐"。

由此可见,影响耕地土壤含盐量的主要因素为 灌溉水量和作物生长;影响盐荒地土壤含盐量主要 是地形地貌和地下水位埋深,离耕地近的盐荒地土 壤含盐量小于离耕地远的盐荒地。

2.4 内蒙古河套灌区典型耕、荒地地下水位埋深变 化规律

图 6、7 分别为 2019、2020 年各观测井地下水位 埋深变化。可以看出:(1)盐荒地地下水位埋深低 于耕地,这主要是盐荒地高程比耕地更低,盐荒地 地下水位埋深更浅。(2)作物生育初期,春灌后各 观测井地下水位埋深较浅,耕地地下水位迅速上 升,同时盐荒地受到耕地春灌的影响,致使盐荒地 地下水位也迅速上升。(3)作物生育期内,随着天 气温度的升高,土壤蒸发逐渐增加,耕地地下水位 埋深逐渐增加,但在灌溉时期,耕地地下水位埋深 减小,耕地地下水位埋深在灌溉前后变化明显,同 时盐荒地也受到耕地灌溉的影响,盐荒地地下水位 埋深随之变化也较明显。(4)秋浇前,地下水位埋 深均达到一年内的最大值,这主要是耕地8月份秋 灌后一直未进行灌溉,在潜水蒸发作用下,地下水 位埋深逐渐增大;由于研究区秋浇灌水量较大,灌 水持续时间较长,耕地和盐荒地地下水位均逐渐上 升,地下水位埋深逐渐减小,至秋浇期结束后,耕地 和盐荒地地下水位埋深均达到最小,部分地势低洼 的盐荒地被水淹没。在地下水观测期间耕地地下 水位埋深变化范围为0.5~2.5 m,盐荒地地下水位 埋深变化范围为0.0~2.0 m。

由此可见,耕地地下水位埋深主要受灌溉的影响,地下水位埋深在春灌和秋浇时期埋深最浅,在 秋浇前埋深最大,在作物生育期内,地下水位埋深 在灌溉前后变化较大;盐荒地地下水位埋深受耕地 灌溉的影响较大,耕地地下水流向盐荒地,盐荒地 为耕地的水盐排泄区域,"旱排盐"效果显著。



图 6 2019 年地下水位埋深变化





图 7 2020年地下水位埋深变化

Fig.7 Variation of ground water depth from soil surface in 2020

2.5 内蒙古河套灌区典型耕、荒地地下水矿化度变 化规律

图 8、图 9 分别为 2019、2020 年各观测井地下水 矿化度变化,图 10 为两年 10#观测井地下水矿化度 变化。可以看出:(1)耕地地下水矿化度在作物生 育期内呈逐渐减小的趋势,而盐荒地地下水矿化度 则呈现增加的趋势。(2)地下水矿化度受地形地貌 的影响较大,研究区西北部 10#观测井附近为地势 最低处,为盐碱化最严重的地区,10#观测井的地下 水矿化度最大,平均在 8.5 g·L⁻¹左右,地下水为重 度咸水。其余离耕地比较近的盐荒地的观测井地 下水矿化度与耕地地下水矿化度相当。耕地地下 水矿化度均在 3.0 g·L⁻¹以下,为微咸水,不同地形 地貌的耕地地下水矿化度略有差异,2#、3#和4#观测井地下水矿化度略高于1#、7#和11#观测井,这主要是2#、3#和4#观测井地面高程低于1#、7#和11#观测井的地面高程,地下水由高处流向低处,同时地下水盐分随着水分的运动而迁移。(3)在秋浇时期,研究区由于灌水量大,灌水时间持续长,抬高了耕地和盐荒地的地下水位,耕地与盐荒地的地下水矿化度均有所降低,耕地和盐荒地秋浇期土壤盐分均被淋洗。

由此可见,地下水矿化度主要受灌溉和地形地貌的影响,耕地地下水矿化度在 3.0 g·L⁻¹以下,盐荒地中心区域地下水矿化度平均在 8.5 g·L⁻¹左右,地下水盐分随着地下水的流动而迁移,盐荒地为耕地的排水排盐区域,具有明显的调节盐分平衡的作用。



图 8 2019 年地下水矿化度变化





图 9 2020年地下水矿化度变化

Fig.9 Variation of groundwater salinity in 2020



10# observation well (YH4)

3 讨论与结论

本研究在盐荒地不同位置布设了地下水位观测井,观测数据表明,不同观测井所在位置的盐荒 地土壤含盐量及地下水矿化度差异性较大。如离 耕地较远位置的10#、12#观测井周围的盐荒地土壤 含盐量和地下水矿化度较大,而与耕地交界附近的 5#、6#观测井的盐荒地土壤含盐量及地下水矿化度 较小,表明不同地形地貌对盐荒地的水盐分布具有 较大的影响。李亮等^[22-23]在河套灌区解放闸灌域 开展了耕、荒地水盐运移规律的研究,其研究的是 田间尺度下的耕、荒地水盐运移规律,研究范围较 小,盐荒地地形地势较平整,不同盐荒地位置上的 土壤含盐量及地下水矿化度差异性较小。刘显泽 等[9] 及陈爱萍等[24] 在河套灌区义长灌域开展了盐 荒地水盐运移规律的研究,但盐荒地上只布设了1 眼观测井,观测井数量较少,并不能完全代表盐荒 地在不同位置上土壤含盐量及地下水矿化度的大 小。河套灌区的盐荒地插花式斑状分布于灌区内, 其规模大小和地形地貌不一。本研究选择的盐荒 地与耕地相比,地势较低洼,坡度较大,盐荒地面积 也较大,是河套灌区比较典型的盐荒地类型,具有 较好的代表性。在耕地人工排水不畅的情况下,盐 荒地为耕地起到排水排盐的作用。因此,本研究所 得的耕、荒地水盐运移规律在河套灌区相对来说更 具有代表性。通过上述分析与讨论,可以得到的主 要结论:

 1)耕地土壤含水率比盐荒地土壤含水率变化 更剧烈。耕地土壤含水率的主要影响因素是灌溉 及降雨、作物生长、地下水位埋深和土壤质地;盐荒 地土壤含水率的主要影响因素是耕地灌溉和地下 水位埋深。

2)耕地土壤含盐量在 3.5 g · kg⁻¹以下,为轻度 盐碱化土壤,土壤盐分主要累积在表层土壤,表层 土壤含盐量变化范围为 0.3~3.5 g · kg⁻¹,耕地土壤 含盐量的主要影响因素是灌溉和作物生长。盐荒 地土壤含盐量较大,盐荒地中心区域的土壤含盐量 在 4.0~10.0 g · kg⁻¹,为重度盐碱化土壤,盐荒地土 壤含盐量的主要影响因素是地形地貌和地下水位 埋深。

3) 盐荒地地下水位埋深低于耕地, 盐荒地地下 水矿化度高于耕地。耕地与盐荒地地下水位埋深 及矿化度的主要影响因素是灌溉和地形地貌, 耕地 地下水矿化度在 3.0 g · L⁻¹以下, 为微咸水, 盐荒地 中心区域地下水矿化度平均在 8.5 g · L⁻¹左右, 为 重度咸水。盐荒地为耕地重要的排水排盐区域。

4)河套灌区零星状分布于耕地间隙的盐荒地 是耕地的水盐排泄区域,具有明显的调节盐分平衡 的作用,维持着灌区盐分的动态平衡,是河套灌区 不可缺少的土地类型。

参考文献:

[1] 郝远远, 徐旭, 任东阳, 等. 河套灌区土壤水盐和作物生长的 HYDRUS-EPIC 模型分布式模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11):

110-116.

HAO Y Y, XU X, REN D Y, et al. Distributed modeling of soil watersalt dynamics and crop yields based on HYDRUS-EPIC model in Hetao irrigation district [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(11): 110-116.

- [2] 任东阳,徐旭,黄冠华.河套灌区典型灌排单元农田耗水机制研究
 [J].农业工程学报,2019,35(1):98-105.
 REN D Y, XU X, HUANG G H. Irrigation water use in typical irrigation and drainage system of Hetao irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(1): 98-105.
- [3] 于兵,蒋磊,尚松浩.基于遥感蒸散发的河套灌区旱排作用分析[J]. 农业工程学报,2016,32(18):1-8.
 YU B, JIANG L, SHANG S H. Dry drainage effect of Hetao irrigation district based on remote sensing evapotranspiration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(18): 1-8.
- [4] 王学全,高前兆,卢琦,等.内蒙古河套灌区水盐平衡与干排水脱盐 分析[J].地理科学,2006,26(4):455-460.
 WANG X Q, GAO Q Z, LU Q, et al. Salt-waterbalance and dry drainage desalting in Hetao irrigating area, Inner Mongolia [J]. Scientia GeographicaSinica, 2006, 26(4): 455-460.
- [5] 赵丽蓉,黄介生,伍靖伟,等.水管理措施对区域水盐动态的影响
 [J].水利学报,2011,42(5):514-522.
 ZHAO L R, HUANG J S, WU J W, et al. Impacts of water management strategies on soil water-saltmovement [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(5): 514-522.
- [6] 韦芳良,沈灿,刘洁颖,等.基于数值模拟的干排水控盐效果影响因素分析[J].中国农村水利水电,2015,(5):85-90.
 WEI F L, SHEN C, LIU J Y, et al. Analysis based on numerical simulation on the influencing factors of salinity control effect of eryerainage
 [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015,(5): 85-90.
- [7] 郝芳华,孙铭泽,张璇,等.河套灌区土壤水和地下水动态变化及水 平衡研究[J].环境科学学报,2013,33(3):771-779.
 HAO F H, SUN M Z, ZHANG X, et al. Dynamic of soil water, groundwater and water balance in Hetao irrigation area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(3): 771-779.
- [8] 柯隽迪,黄权中,任东阳,等.河套灌区节水灌溉对土壤盐分累积规 律的模拟研究[J].节水灌溉,2016,(8):91-94.
 KE J D, HUANG Q Z, REN D Y, et al. Simulation the response of soil salinity accumulation to irrigation management practice in Hetao irrigation district[J]. Water Saving Irrigation, 2016,(8): 91-94.
- [9] 刘显泽,岳卫峰,贾书惠,等.内蒙古义长灌域土壤盐分变化特征分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2014,50(5):503-507.
 LIU X Z, YUE W F, JIA S H, et al. Variation of soil salinity in the Yichang irrigation district Inner Mongolia [J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2014, 50(5): 503-507.
- [10] 岳卫峰,杨金忠,童菊秀,等.干旱地区灌区水盐运移及平衡分析
 [J].水利学报,2008,39(5):623-626,632.
 YUE W F, YANG J Z, TONG J X, et al. Transfer and balance of water and salt in irrigation district of arid region [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5): 623-626, 632.
- [11] 韩宇平.宁夏青铜峡灌区农区非农区的水盐均衡研究[J].西北农

林科技大学学报(自然科学版),2009,37(11):224-230.

HAN Y P. Study on the water and salt balance of farming areas and non-farming areas in Ningxia Qingtongxia irrigation area[J].Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2009, 37(11): 224-230.

- WANG Y G, XIAO D N, 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.
- [13] 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, 21 (3): 219-236.
- [14] 张蔚榛,张瑜芳.对灌区水盐平衡和控制土壤盐渍化的一些认识
 [J].中国农村水利水电,2003,(8):13-18.
 ZHANG W Z, ZHANG Y F. Knowledge ofwater-and-salt balance and control of soil saline-and-water-logging in irrigation district[J]. China Rural Water and Hydropower, 2003,(8): 13-18.
- [15] 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 S Z, KONG F J, WANG X K, et al. Confirming of critical depth of undergroundwater level and discussion on it's significancetake Hetao irrigation area for example[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2008, 29(4): 164-167.

- [16] 白亮亮,蔡甲冰,刘钰,等.灌区种植结构时空变化及其与地下水相 关性分析[J].农业机械学报,2016,47(9):202-211.
 BAI L L, CAI J B, LIU Y, et al. Temporal and spatial variation of crop planting structure and its correlation analysis with groundwater in large irrigation area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agri-
- [17] 李亮,李美艳,王世锋,等.河套灌区解放闸灌域盐荒地积盐量分析[J].排灌机械工程学报,2015,33(5):434-441.

cultural Machinery, 2016, 47(9): 202-211.

LI L, LI M Y, WANG S F, et al. Analysis of salt accumulation in wasteland of Jiefangzha irrigation field in Hetao irrigation district[J].

Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33 (5): 434-441.

- [18] FENG Z Z, WANG X K, FENG Z W. Soil N and salinity leaching after the autumn irrigation and its impact on groundwater in Hetao irrigation district, China[J]. Agricultural Water Management, 2005, 71 (2): 131-143.
- [19] XU X, HUANG G H, SUN C, et al. Assessing the effects of water table depth on water use, soil salinity and wheat yield: searching for a target depth for irrigated areas in the upper Yellow River basin [J]. Agricultural Water Management, 2013, 125: 46-60.
- [20] REN D Y, XU X, HAO Y Y, et al. Modeling and assessing field irrigation water use in a canal system of Hetao, upper Yellow River basin: application to maize, sunflower and watermelon [J]. Journal of Hydrology, 2016, 532: 122-139.
- [21] 王飞,丁建丽,魏阳,等-基于 Landsat 系列数据的盐分指数和植被指数对土壤盐度变异性的响应分析———以新疆天山南北典型绿洲为例[J].生态学报,2017,37(15):5007-5022.
 WANG F, DING J L, WEI Y, et al. Sensitivity analysis of soil salinity and vegetation indices to detect soil salinity variation by using Landsat series images: applications in different oases in Xinjiang, China[J]. Acta EcologicaSinica, 2017, 37(15); 5007-5022.
- [22] 李亮,史海滨,贾锦凤,等.内蒙古河套灌区荒地水盐运移规律模拟
 [J].农业工程学报,2010,26(1);31-35.
 LI L, SHI H B, JIA J F, et al. Simulation of water and salt transport of uncultivated land in Hetao irrigation district in Inner Mongolia[J].
 Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(1): 31-35.
- [23] 李亮,李美艳,张军军,等.基于 HYDRUS-2D 模型模拟耕荒地水盐 运移规律[J].干旱地区农业研究,2014,32(1):66-71.
 LI L, LI M Y, ZHANG J J, et al. The moving rule of salt and water in cultivated land and saline wasteland based on HYDRUS-2D model
 [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(1): 66-71.
- [24] 陈爱萍,岳卫峰,侯凯旋,等.内蒙古河套灌区典型监测区不同时期 地下水变化特征[J].南水北调与水利科技,2019,17(2):98-106. CHEN A P, YUE W F, HOU K X, et al.Groundwater characteristics at different periods in a typical monitoring area of the Hetao irrigation district of Inner Mongolia [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 98-106.