

基于旱排控盐模型的沿黄灌区不同地类间水盐运移与平衡分析

闫妍¹ 史海滨¹ 苗庆丰¹ 王国帅² 苏永德¹ 杨舒雅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. 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020)

摘要: 在地下水埋深较浅的干旱半干旱地区, 耕荒地分布较为分散破碎, 旱排控盐是减轻土壤盐渍化的重要管理手段。旱排控盐使不灌溉的盐荒地成为蒸发盐汇区域, 接收邻近灌溉农田的水分和盐分。本研究以河套灌区一个典型的旱排单元(盐荒地和相邻的不同作物农田)为例, 利用 Darcy 定律计算并揭示了盐荒地 with 相邻农田之间的水盐分布及迁移规律。结果表明: 不同农田类型腾发量(ET)存在较大差异, 玉米农田平均 ET 比葵花农田和盐荒地分别高 23.47% 和 88.97%, 葵花农田 ET 较盐荒地高 53.06%; 不同作物根区土壤(0~100 cm)盐分存在明显差异, 葵花农田含盐量为玉米农田的 2.10~2.47 倍, 盐荒地平均土壤含盐量为耕地的 2.81~6.95 倍。此外, 在春灌和作物生长阶段, 灌溉和降水使农田地下水埋深最大上升 157 cm, 从而促使水盐从农田向未灌溉的盐荒地迁移, 减轻了耕地作物根系的盐分, 维持了作物生长; 在春灌时期, 葵花地灌溉水渗漏并快速排泄到未灌溉地类, 导致水盐通量达到最大值, 水分迁移量平均为 0.045 cm/d, 盐分迁移量为 0.013 mg/(d·cm²)。盐荒地作为耕地的排泄区域, 具有维持水盐平衡的功能, 该研究量化分析了耕荒地间水盐的迁移规律, 可为干旱区水盐平衡规律提供理论依据。

关键词: 水盐运移; 耕地; 盐荒地; 地下水; 侧向流动; 旱排控盐模型

中图分类号: S274 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)10-0346-14

OSID:



Water and Salt Transport Pattern and Balance Analysis among Different Land Classes in Yellow River Irrigation Area Based on Dry Drainage Salt Control Model

YAN Yan¹ SHI Haibin¹ MIAO Qingfeng¹ WANG Guoshuai² SU Yongde¹ YANG Shuya¹

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

2. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, China)

Abstract: In arid and semi-arid areas with shallow groundwater depths, where the distribution of cultivated and wasteland is more dispersed and broken, dry drainage and salt control are important management tool for reducing soil salinization. Dry drainage salt control makes the non-irrigated wasteland an evaporative salt sink area, receiving water and salt from neighboring irrigated farmland. A typical dry drainage unit (wasteland and adjacent cultivated land of different crops) in Hetao Irrigation District was used as an example, and Darcy's law was utilized to calculate and reveal the water and salt distribution and migration law between the wasteland and adjacent cultivated land. The results showed that there were significant differences in ET among different farmland types, and the average ET of corn farmland was 23.47% and 88.97% higher than that of sunflower farmland and wasteland, respectively, and the ET of sunflower farmland was 53.06% higher than that of wasteland; there were obvious differences in the salinity of soil in the root zone (0~100 cm) of different crops. The salinity in sunflower farmland was 2.10~2.47 times higher than that of corn farmland, and the average soil salinity of wasteland was 2.81~6.95 times that of cultivated land. In addition, during the spring irrigation and crop growth stages, irrigation and precipitation caused the groundwater depth of farmland to rise maximum of 157 cm, which promoted the migration of water and salts from the farmland to unirrigated wasteland,

收稿日期: 2023-12-21 修回日期: 2024-01-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(5226090042)和内蒙古自治区科技重大专项(2023JBGS003)

作者简介: 闫妍(1997—), 女, 博士生, 主要从事节水灌溉技术研究, E-mail: yyyanyan2023@163.com

通信作者: 史海滨(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉原理及应用研究, E-mail: shi_haibin@sohu.com

alleviating the salinity in the root system of the cultivated land, and sustaining the growth of the crop. During the spring irrigation period, the irrigation water of the sunflower field leaked and quickly drained to the unirrigated land, resulting in the maximum water and salt fluxes, with the average water transport amount of 0.045 cm/d and salt transport of 0.013 mg/(d·cm²). Wasteland, as the drainage area of cultivated land, had the function of maintaining water-salt balance, and the water-salt transport law among cultivated and wasteland was quantitatively analyzed, which can provide a theoretical basis for the water-salt balance law in arid areas.

Key words: water and salt transport; cultivated land; wasteland; groundwater; lateral flow; dry drainage salt control model

0 引言

土壤盐渍化是西北干旱地区农业发展的一大制约因素,严重影响农作物的生长和产量^[1],甚至导致土壤贫瘠^[2]。当前,普遍采用的控制策略包括大量引水淋洗盐分,受限于水资源条件制约,该方法也无法采用^[3]。此外,其他多元化的土壤管理措施也在实践中得到应用,例如通过早排盐降低地下水位、改进灌排系统、农业管理优化(如推进高标准农田和作物种植模式),以及生物和化学改良手段(包括种植耐盐植物和使用石膏、磷石膏等)^[4]。然而,这些生物和化学改良通常成本过高,使得通过早排盐模式控制地下水位成为更为现实可行的措施。该方法利用干旱区的休耕地或低湿洼地作为临时储水和储盐“水库”来降低耕地地下水位^[5],尤其适合于地下水位高、蒸发量大和灌溉强度高的地区^[6]。

当前关于早排控盐的研究大多集中于其有效性和可持续性^[5-7],同时也对气候条件、耕荒地布置及耕荒面积比等影响因素进行了初步探索^[8-10]。例如岳卫峰等^[11]通过在区域尺度上建立非农区-农区-水域的水平衡模型,对水分在耕荒地间的转化与消耗、水盐迁移进行了定量分析。于兵等^[12]利用遥感蒸发模型建立河套灌区水盐平衡模型,对早排机制进行分析研究,认为早排对于预防土壤盐渍化具有重要作用。WU 等^[13]在斗渠尺度上采用归一化植被指数(NDVI)和最大似然监督分类来确定耕地和盐荒地,并使用水盐平衡模型来估算农田含盐量。结果显示,早排盐系统在控制土壤盐分方面极为有效,排放的水量和盐量分别是人工排水的 9.6 倍和 16 倍。与 WU 等^[13]野外监测和水盐平衡计算相似,WANG 等^[14]于 2007—2011 年在永联实验站进行了 5 年的野外监测,计算了研究区域 29 km²的水盐平衡。结果表明在从农田向休耕地迁移的水分和盐分中,人工排水仅占总排水量和总排盐量的 18.9% 和 11.5%,其余都是通过早排盐系统迁移的。任东阳等^[15]通过在农渠尺度计算水盐平衡,研究了盐分在灌排单元的分配规律,认为盐荒

地容纳了总引入盐分的 40%。REN 等^[16]利用 HYDRUS-dualKc 模型探索黄河上游河套灌区自然斑块的生态水文过程发现,其能够有效地容纳 3 倍耕地灌水后多余的地下水和盐分,再次证明了早排控盐的有效性。王国帅等^[17-19]探讨了河套灌区典型不同地类间水盐时空运移特征和不同类型水分的转化,发现生育期地下水运移方向为耕地流向荒地再向海子,并估算了不同时期土壤盐分的迁移量,认为农田地下水埋深应控制在 1.7 ~ 2.3 m 范围内,以形成有效的早排控盐系统。LIU 等^[20]通过在河套灌区一个典型的早排单元(盐荒地 with 农田系统)进行田间水盐迁移研究发现,在盐荒地种植盐生植物可以更有效地管理农田和盐荒地间的水盐流动。但是以上研究均没有将耕地细分来计算不同作物农田与荒地间土体水盐分布规律及地下水迁移的水量。

盐荒地作为土壤盐分的存储区域,也存在无效蒸发导致的水分损失。因此,如何协调提高排盐效率和提高水分利用效率仍有待研究。另外随着高标准农田和土地开发的推进,盐荒地面积也逐渐减少,灌区原有水盐环境发生了变化。因此对于河套灌区由破碎排列及种植不同作物的农田和邻近盐荒地组成的典型早排控盐系统,在田间尺度上是否真正有效地控制盐分还需要进一步探讨。针对以上问题,本文以河套灌区解放闸灌域沙壕渠—斗渠典型田间封闭试验区为对象,在原位监测及室内试验的基础上,利用土壤水动力学理论构建耕地—荒地水盐平衡模型,以探讨河套灌区耕荒地在生育期水盐通量,以期为河套灌区早排控盐技术、改善土壤盐渍化环境提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于内蒙古自治区巴彦淖尔市杭锦后旗沙壕渠试验站,地处河套灌区解放闸灌域,具体地理坐标为北纬 40°55′46″、东经 107°10′14″(图 1)。研究区气候干旱,平均蒸发量约为降水量的 10 倍,降水主要集中在 6—8 月(图 2a)。根据近 40 年降雨

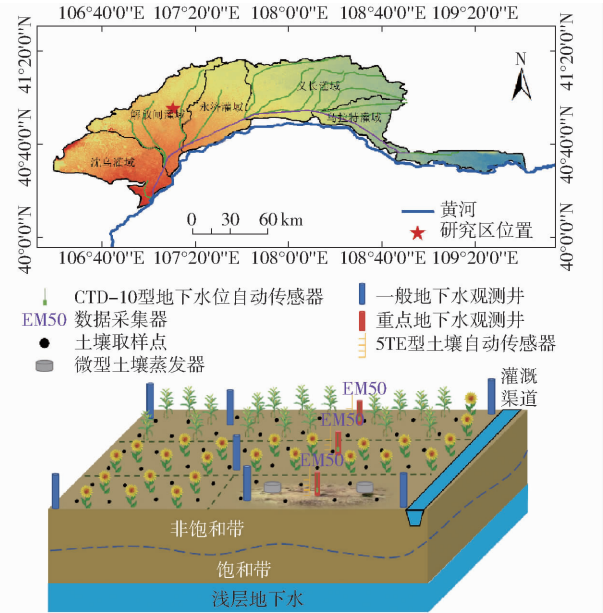


图 1 试验区布置图

Fig. 1 Schematic of study area distribution

量进行水文年分析,2021 年为枯水年,2022 年为平水年(图 2b)。耕地是研究区主要的土地利用类型,其中近 30%的耕地土壤表现出不同程度的盐碱性。其中氯化盐、硫酸盐和钠盐含量相对较高,且盐分种类多样^[21]。根据地面 RTK 测量结果,玉米种植区地表高度平均比葵花高约 10 cm,而葵花种植区与盐碱荒地的地表高度基本相同。地下水埋深在作物生育期变化范围为耕地 30~255 cm,荒地 50~265 cm,年平均地下水埋深为 162 cm(图 3)。由于该地区距离排水沟较远,加之排水设施和管理不善,没有明显的排水作用。研究区四周为毛渠和农渠,切断了外界一定的水力联系。研究区主要种植作物为玉米和葵花,玉米于 5 月初种植至 9 月末收获,生育期约为 145 d;葵花从 6 月初种植至 9 月下旬收获,生育期约 110 d。灌溉主要采用畦灌方式,一般玉米生育期灌溉 3 次,葵花生育期灌溉 1 次,而天然荒地则不进

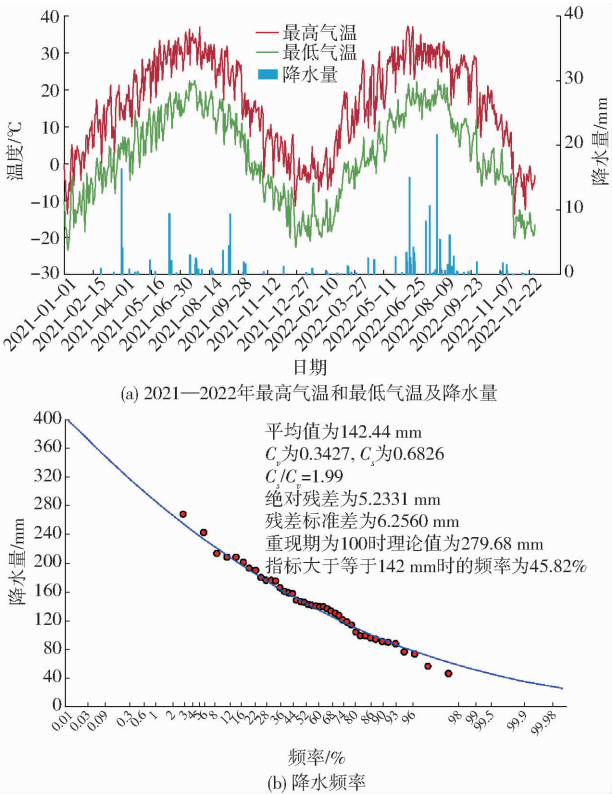


图 2 研究区气象数据和降水频率

Fig. 2 Meteorological data and precipitation frequency in study area

行灌溉,具体的灌溉数据见图 3。

1.2 试验布置及数据采集

1.2.1 地下水监测

野外试验于 2021 年 4—9 月和 2022 年 4—9 月展开,在研究区布设重点地下水观测井 3 眼,并安装地下水位自动传感器(CTD-10 型),利用 EM50 型采集器每 60 min 连续观测地下水埋深及电导率,同时布设 3 眼一般地下水观测井,每 5 d 监测地下水埋深 1 次,10 d 提取地下水测其电导率(EC),利用 EC 经验公式将电导率(mS/cm)转换为地下水矿化度(TDS,g/L)^[22],公式为 $TDS = 0.69EC$ 。

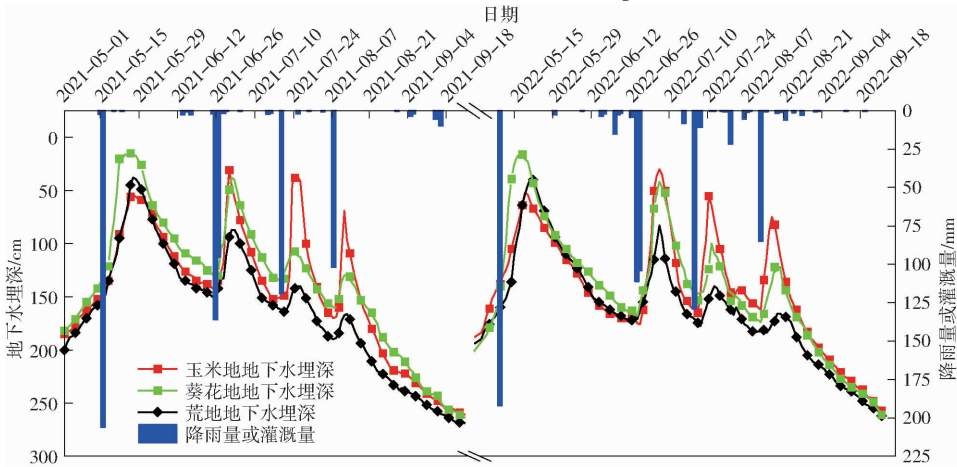


图 3 典型观测点地下水埋深动态及灌溉制度

Fig. 3 Groundwater depth dynamics and irrigation schedule of typical observation points

1.2.2 土壤监测

采用方格法布设一般土壤取样点 45 个,取样间距为 30 m,取样深度依次为 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm,每 15 d 监测其水分和盐分指标,并根据实际灌水降水情况调整取样时间。土壤含水率通过烘干法测定,并将自然风干土壤进行研磨后用电导率仪(DDS-307A 型)测定土水质量比 1:5 的土壤浸提液电导率,根据当地经验公式($SS = 3.480EC_{1:5} - 0.236$)确定土壤全盐量(g/kg)^[23]。在研究区,选择主要作物玉米、葵花农田和荒地中的重点地下水观测井,在这些观测井旁共安装 3 个土壤自动传感器(5TE 型,美国 Meter 公司),每隔 60 min 测量 1 次土壤水分、盐分和温度,用 EM50 型采集器记录数据。

1.2.3 土壤水势和水量监测

在玉米、葵花地和盐荒地 1 m 土体中安置 3 组

负压计,安装深度分别为 90、110 cm,每日进行土壤水势观测。利用梯形流量堰对不同农田作物灌水量进行测量。利用直径 20 cm 微型蒸发皿测盐荒地土壤蒸发量。每次灌水时于农渠中收集灌溉水水样,每次收集 3 个重复,用电导率仪测定其电导率,灌溉水平均矿化度为 0.65 g/L。

1.2.4 土壤理化性质和气象数据

于首次试验布置时对研究区主要作物农田和荒地安装传感器位置处挖开 2 m 土壤剖面,并对试验区进行土壤取样,带回实验室分析其土壤物理性质,包括土壤干容重、田间持水率、饱和导水率、土壤机械组成。采用干法粒度仪测定各点土壤粒径级配,测定后土壤根据美国质土壤质地分类为粉壤土,基于土壤质地和土壤持水特性,通过 HYDRUS 模型的神经网络计算子模块确定 VG 参数,见表 1。降雨量及其它气象数据(图 2a)来源于田间微型气象站。

表 1 试验区土壤物理性质
Tab.1 Soil physical characteristics in study area

地类	土层 深度/ cm	粒径组成/%			质地	$\rho_b/$ (g·cm ⁻³)	$\theta_r/$ (cm ³ ·cm ⁻³)	$\theta_s/$ (cm ³ ·cm ⁻³)	$\theta_{fc}/$ (cm ³ ·cm ⁻³)	α	n	$K_s/$ (cm·d ⁻¹)
		砂粒	粉粒	粘粒								
		(0.05 ~ 2 mm)	(0.002 ~ 0.05 mm)	(0 ~ 0.002 mm)								
耕地	0 ~ 20	34.81	58.84	6.35	粉壤土	1.58	0.061	0.341	0.308	0.007 0	1.527	2.76
	20 ~ 40	29.83	60.56	9.61	粉壤土	1.52	0.066	0.389	0.344	0.006 4	2.178	2.07
	40 ~ 60	21.83	73.39	4.78	粉壤土	1.39	0.068	0.384	0.341	0.005 5	2.025	4.47
	60 ~ 80	17.52	76.27	6.21	粉壤土	1.43	0.064	0.423	0.362	0.004 4	1.903	4.75
	80 ~ 100	10.32	79.96	9.72	粉壤土	1.46	0.064	0.429	0.370	0.004 1	1.842	4.47
	100 ~ 200	18.04	77.40	4.56	粉壤土	1.49	0.071	0.392	0.345	0.006 3	1.860	6.22
荒地	0 ~ 20	30.31	65.85	3.84	粉壤土	1.57	0.052	0.421	0.381	0.007 2	1.532	0.78
	20 ~ 40	17.33	75.96	6.71	粉壤土	1.61	0.049	0.415	0.362	0.008 5	1.682	1.81
	40 ~ 60	24.95	69.72	5.33	粉壤土	1.47	0.072	0.419	0.388	0.007 4	1.678	2.59
	60 ~ 80	11.95	80.78	7.27	粉土	1.50	0.070	0.424	0.392	0.004 3	1.741	4.32
	80 ~ 100	7.73	85.58	6.49	粉土	1.43	0.075	0.433	0.404	0.005 7	1.915	3.54
	100 ~ 200	8.32	78.94	12.74	粉壤土	1.42	0.062	0.468	0.407	0.005 9	1.966	5.44

注: ρ_b 、 θ_r 、 θ_s 、 θ_{fc} 、 K_s 分别表示土壤容重、土壤残余体积含水量、饱和体积含水量、田间持水率、饱和导水率, α 、 n 为相对经验参数。

1.2.5 产量测定

在葵花成熟收获时,在各个小区内选择 1 m × 1 m 区域进行取样,称鲜质量。自然风干后进行室内烤种,测总质量、百粒质量;百粒质量为随机选 100 粒葵花称其质量,重复 3 次,取平均值。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤水分均衡模型

试验区由耕地、荒地 2 种土地利用类型组成,耕地主要种植作物为玉米、葵花,荒地主要生长植物为碱草;不同作物覆盖下土体垂直方向由地表水、土壤水和地下水组成^[24]。本研究区域内无明显排沟,由于玉米根系主要集中分布在深度 0 ~ 60 cm 土层

中^[25],葵花最大根系为 90 cm^[26],因此选择 0 ~ 100 cm 包气带来计算水分平衡(图 4)。对于农田,土壤水分平衡方程可简化为

$$\Delta W = P + I + G - ET - R - D \tag{1}$$

式中 ΔW ——生育期土壤 0 ~ 100 cm 土层水分存储量,为研究时段末减去时段初的储水量,mm

P ——降雨量,mm

I ——灌水量(只考虑引入耕地净灌水量),mm

G ——生长季总毛细管上升量,mm

ET ——耕地与荒地腾发量(蒸散量),mm

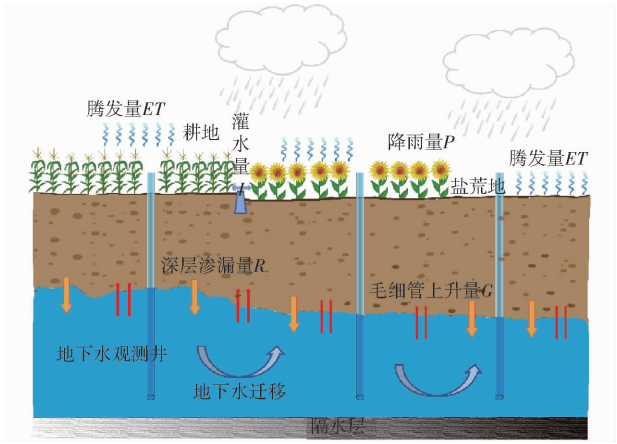


图 4 土壤水分均衡模型示意图

Fig. 4 Soil water balance model

R ——生长季总深层渗漏量,mm
 D ——排水沟排水量,研究区没有排水沟,故
 D 忽略不计

由于荒地无灌溉,所以 $I = 0$, 渠系忽略不计,因此荒地水平衡方程为

$$\Delta W = P + G - ET - R \tag{2}$$

在非饱和条件下,利用定位通量法对地下水补给渗漏量进行计算^[27]。在研究区某一位置处利用安装的负压计监测土壤水势能梯度的变化。利用监测点 Z_1 和点 Z_2 处的土壤水势差异 ΔZ , 通过 Darcy 定律计算出该点处的水通量, 计算公式为

$$q_v = -K(\theta) \left(\frac{h_2 - h_1}{\Delta Z} + 1 \right) \tag{3}$$

其中 $K(\theta) =$

$$K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{0.5} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right]^m \right\}^2 \tag{4}$$

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|)^{\frac{n-1}{n}}} \tag{5}$$

$$m = 1 - 1/n \quad (n > 1) \tag{6}$$

$$Q(T) = 10 \int_0^T q_v(t) dt \tag{7}$$

式中 $K(\theta)$ ——非饱和导水率,cm/d
 θ ——土壤体积含水率,cm³/cm³
 h ——基质势,hPa
 m ——经验参数
 q_v ——某观测时段 t 内土壤水通量,cm/d
 h_1, h_2 ——监测点 Z_1 和 Z_2 处负压计值,hPa
 $Q(T)$ ——毛细管上升量,即深度 100 cm 向上向下的水通量之和,由 cm 换算为 mm
 T ——研究时间,d

耕地和盐荒地的 ET 由 ET_0 乘以作物系数 K_c 和土壤水胁迫系数 K_w 得到,即

$$ET = ET_0 K_c K_w \tag{8}$$

其中

$$K_w = \begin{cases} \frac{1}{0.58 + 0.04ET} \frac{\theta - \theta_{wp}}{\theta_{fc} - \theta_{wp}} & (\theta \geq \theta_j) \\ 1 & (\theta < \theta_j) \end{cases} \tag{9}$$

式中 ET_0 ——参考作物腾发量,mm
 θ_{wp} ——凋萎系数,可由 $2\theta_r$ 粗略估计^[20],
cm³/cm³
 θ_j ——因水分胁迫而降低蒸腾作用的土壤含水率阈值,其计算由 FAO-56 提供,
cm³/cm³

作物系数 K_c 来源于文献[20,28];而忽略稀疏植被且无灌溉量的盐荒地的 K_c 是根据 FAO-56 建议的裸地初期 K_c 值(K_{cini})估算的,取 0.4^[29]。

1.3.2 土壤含盐量计算

土壤 1 m 土层盐储量(v ,kg/m²)由各土层土壤含盐量之和得到^[20],即

$$v = 0.01 \sum SS \rho_b l \tag{10}$$

式中 l ——土层深度,cm

土壤 1 m 土体积盐率($g, \%$)为土壤 0~100 cm 剖面在任意时期与其前一时相比土壤盐储量的增加率,当 g 为负值时,表示土壤脱盐率。计算公式为

$$g = \frac{v_i - v_{i-1}}{v_i} \times 100\% \tag{11}$$

式中 v_i ——第 i 时期土壤盐储量,kg/m²
 v_{i-1} ——第 $i-1$ 时期土壤盐储量,kg/m²

1.3.3 地下水中水盐侧向通量

相邻田间地下水侧向水通量由 Darcy 定律求得,即

$$q = \frac{-K_s \Delta H}{\Delta L} \tag{12}$$

式中 q ——地下水侧向水通量,cm/d
 ΔH ——地下水水位差,cm
 ΔL ——两口地下水观测井间水平距离,cm
盐荒地之间相关的侧向盐通量是耕荒地间的水通量与耕地地下水矿化度的乘积,即

$$q_{Cg} = q C_g \tag{13}$$

式中 q_{Cg} ——地下水侧向盐通量,mg/(d·cm²)
 C_g ——耕地地下水矿化度,g/L

1.4 数据处理与分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2019 处理分析,利用 Surfer 23.0 最优内插法绘制土壤和地下水盐分时空分布特征图,Origin 2021 软件绘制插图。

2 结果与分析

2.1 生长季土壤水分平衡计算

研究区的灌溉水大多在耕地内被转化和利用,灌溉时的深层渗漏水在灌溉间歇期通过毛细管上升补给耕地作物主要根系层,并利用蒸腾过程进行消耗^[12]。在灌溉期,耕地的地下水垂直补给远大于其渗漏量。根据式(1)~(9)计算得试验区 2021 年和 2022 年生育期(5 月 1 日—9 月 20 日)玉米、葵花和盐荒地的各项水平衡如表 2 所示。由于 2022 年生长季降雨量比 2021 年高 56 mm,且气温较高(图 2a),导致该年 ET 较大,从而引起耕地毛细管上升量增加 14.63%~17.39%(表 2)。2022 年 8 月 1 日研究区出现强降雨,降雨量为 21.6 mm,占生育期降雨量的 20.77%,因此玉米的第 3 水灌溉量减少,但由于玉米

生育期较长且作物生长需水量更多,因此 2 年间玉米地 ET 平均值比葵花和盐荒地分别高 23.47% 和 88.97%,而葵花地 ET 比盐荒地高 53.06%。玉米地的田间灌溉量、蒸散量、深层渗漏量、毛细管上升量和土壤储水量分别为(342±16)mm、(463±29)mm、(71±3)mm、(176±12)mm、(60±2)mm;葵花地的田间灌溉量、蒸散量、深层渗漏量、毛细管上升量和土壤储水量分别为(298±4)mm、(375±23)mm、(87±5)mm、(150±12)mm、(62±8)mm。耕地周围盐荒地的蒸散量、深层渗漏量、毛细管上升量、土壤储水量分别为(245±17)mm、(17±3)mm、(221±9)mm、(35±1)mm。且盐荒地的毛细管上升量和蒸散量(主要是蒸发量)变化不大。盐荒地相对稳定的毛细管上升和蒸发可能是由于两年生长季的地下水埋深范围相对稳定所致。

表 2 0~100 cm 土体水平衡计算结果
Tab. 2 Water balance calculation result of 0~100 cm soil

地类	2021 年					2022 年				
	降水量	灌水量	毛细管上升量/渗漏量	储水量	蒸散量	降水量	灌水量	毛细管上升量/渗漏量	储水量	蒸散量
玉米地	48	358	164/74	62	434	104	326	188/68	58	492
葵花地	48	302	138/82	54	352	104	294	162/92	70	398
盐荒地	48	0	230/14	36	228	104	0	212/20	34	262

通过田间原位监测获得 2021、2022 年生长季(5 月 1 日—9 月 20 日)耕地和盐荒地 0~100 cm 土壤剖面水分动态分布规律(图 5)。耕地 0~40 cm 土层含水率在 0.165~0.303 cm³/cm³之间波动较大,主要受降水、农田灌溉、蒸散、深层渗漏和毛细管上升的影响。而 60~100 cm 土层湿润(含水率 0.286~0.370 cm³/cm³),生育期灌水后耕地地下水埋深通常能达到 50 cm 左右,导致深层土壤含水率

相对较高。盐荒地在生育期不同阶段都接收了来自临近农田的侧向地下水补给,导致 60~100 cm 处土壤含水率较高(0.286~0.319 cm³/cm³);而表层土壤主要是蒸发、降水及下层土壤水补给的结果(0.158~0.257 cm³/cm³)。各地块在第 1 次灌水前,均能保持较高的土壤含水率(0.301 cm³/cm³),这可能与前一年秋季灌溉后的冻结期有关^[30]。

从耕地土壤含水率生育期内变化趋势来看,5—

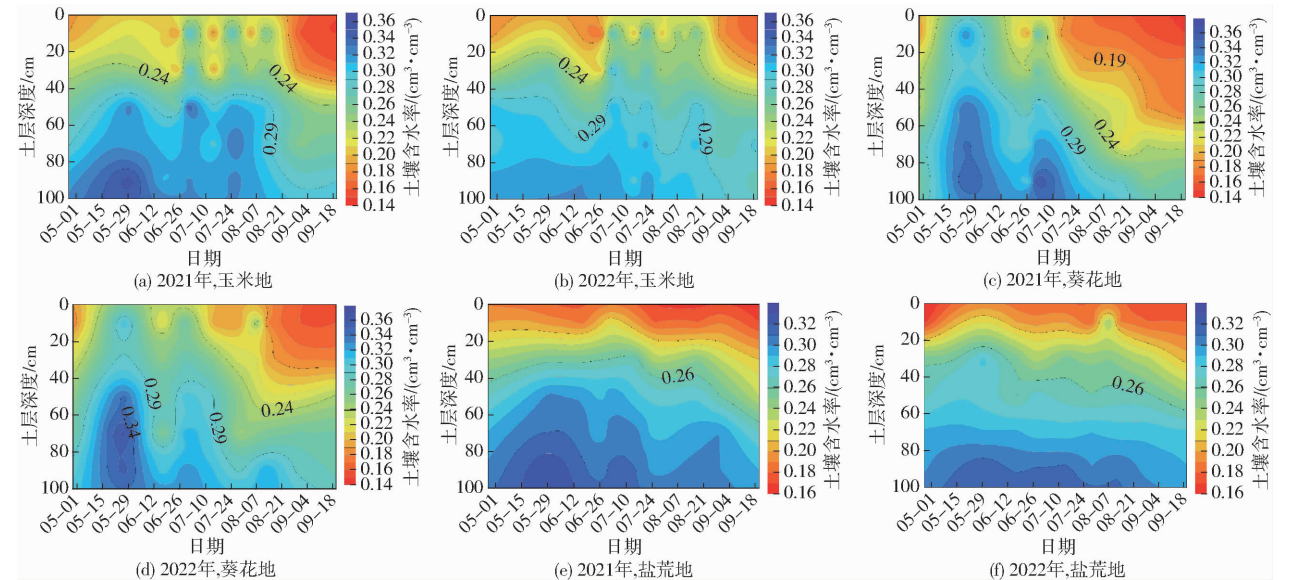


图 5 生长季土壤含水率动态变化

Fig. 5 Dynamic changes in soil moisture during growing season

7月60~100 cm处土壤含水率明显偏高,这是因为从3月中下旬开始土壤底层逐渐融化,至4月上旬在地表约80 cm处融通,但春季蒸发最为强烈、温度快速回升;此时是作物生长初期,地面植被覆盖度较低,但该时段末作物生长较为快速,玉米根系可达50 cm左右,葵花主根通常达到60 cm以上^[31],作物生长需要大量水分,因此0~40 cm处含水率相比于深层土壤相对较低。随着玉米和葵花先后进入灌浆期,该时期是籽粒形成最关键的时期^[32],需水量较大,导致0~60 cm土壤含水率较低;且地上作物蒸腾强烈,浅层地下水通过毛细管作用向上补给导致60~100 cm土壤含水率较为稳定。

研究区地下水埋深相对较浅且受到降水和灌溉的影响,玉米农田在生育期内0~100 cm平均土壤含水率为0.239 cm³/cm³,其根区土壤含水率在0.144~0.263 cm³/cm³变化,保持着较高的土壤水分状况。但2021年比较干旱,在生育期后期玉米根区土壤含水率在0.142~0.191 cm³/cm³变化,低于土壤田间持水率32.6%,玉米生长受到不同程度土壤水分胁迫的影响。由于葵花抗旱耐碱性能较好,研究区葵花生育期大多进行1次灌水^[33],因此进入灌浆期后表层土壤含水率基本持续接近于凋萎系数,比玉米提前进入干旱胁迫状态,建议葵花在灌浆期进行1次灌水以提高产量。

5月葵花地进行春灌,且春灌水量较大,葵花地地下水埋深急剧上升157 cm(图3),此时玉米地和盐荒地没有进行灌水,因此灌溉水通过渗漏进入地下水,此时玉米地未灌溉而地下水位较低,与葵花农田地下水位形成了水力梯度,因此其会向未灌溉的玉米地和盐荒地流动,在潜水蒸发作用下使60~100 cm处土壤含水率较高。6月末对玉米和葵花均进行灌溉,较多的水分留在土壤中,40~100 cm土层保持着较高的土壤含水率;较少的灌溉水进入地下水中,地下水位升高幅度小于春灌后。由于高强度蒸发,土壤表层比较干燥,潜水蒸发作用使耕地地地下水埋深平均下降102 cm。至此葵花农田不再进行灌水。而7月中下旬和8月上旬研究区对玉米进行二至三水灌溉,灌水后土壤含水率保持在较高水平。但灌水量较少,因此对地下水的渗漏作用较前两水不够明显。

2.2 生长季土壤盐分动态

根据盐渍化土壤的盐分标准^[34],将其按研究区内土壤含盐量分为非盐渍土(0~2 g/kg,作物生长安全区)、轻度盐渍土(2~3 g/kg,作物轻度抑制区)、中度盐渍土(3~6 g/kg,作物中度抑制区)、重度盐渍土(6~10 g/kg,作物重度抑制区)、盐土

(>10 g/kg,作物盐害区,无收成)。2年土壤含盐量表现为2021年土壤含盐量高于2022年,分析认为是由于降水与耕地秋季灌溉程度的差异所致。在2个生长季节的大部分时间里,不同田块的盐分分布存在明显差异(图6)。总体而言,耕地相较于盐荒地土壤含盐量较低,特别是表层土壤的差异更为明显。此外,耕地和盐荒地表层土壤含盐量均高于下层土壤,土壤盐分主要呈表聚型特征;而在耕地中,葵花农田土壤含盐量高于玉米农田,玉米根区土壤含盐量为0.68~1.73 g/kg,为非盐渍土;而葵花根区土壤含盐量2年均 在1.68~3.65 g/kg之间,是玉米农田的2.10~2.47倍,基本为轻度盐渍土和中度盐渍土。而盐荒地地表生育期内无灌水,在强烈蒸发条件下表现为持续积盐,尤其在0~40 cm处积盐更严重;土壤含盐量主要在4.73~10.45 g/kg之间,是耕地平均含盐量的2.81~6.95倍,为重度盐渍土。每次灌溉后或集中强降雨后,农田的盐分会从顶部淡化。

研究区仅在6月下旬对玉米和葵花同时进行灌溉,因此以2021年第2水灌溉前后1 m土体土壤盐储量变化为例,探讨灌溉对土壤盐分变化的影响。灌水前,玉米、葵花的0~100 cm土壤盐储量分别为2.16 kg/m²和3.76 kg/m²。然而盐荒地1 m土体土壤盐储量为12.0 kg/m²,约为农田的4倍。灌溉后农田土壤盐储量分别为1.69 kg/m²和3.12 kg/m²,脱盐率分别为21.76%和17.02%。农田土壤盐分通过灌溉被淋洗,通过地下水侧流迁移至盐荒地。在盐荒地受到强烈的土壤蒸发作用影响时,地下水也会向上运移,水分蒸发而盐分滞留在土壤中逐渐积累,3 d内0~100 cm土壤盐储量累积率为初始值的5.54%。

因9月采样时作物大多未收获,地表被作物覆盖,但叶片较多枯萎、脱落,植被蒸腾与土壤蒸发作用相对较弱^[35],盐分积聚相对盐荒地盐分较少;盐荒地地表基本无覆盖,在潜水蒸发作用下表层土壤盐分逐渐积累。盐荒地表中积累的盐分严重降低了水汽通量速率^[20],盐荒地虽长有碱草但其蒸散作用较弱;因此建议在盐荒地种植盐生植物,增强其蒸散作用,以改善盐分现状并有助于耕荒地间形成更有效的早排控盐系统。

2.3 生长季节地下水迁移方向

对于理想的早排控盐系统通常假定灌溉水从农田中向下渗漏,并通过地下水侧向流动到盐荒地,最终在盐荒地蒸发消耗^[36]。与此同时,盐分也从农田作物根部区域迁移到盐荒地,并通过强蒸发作用在表土中积累,这个过程被称为“早排盐”。由此可

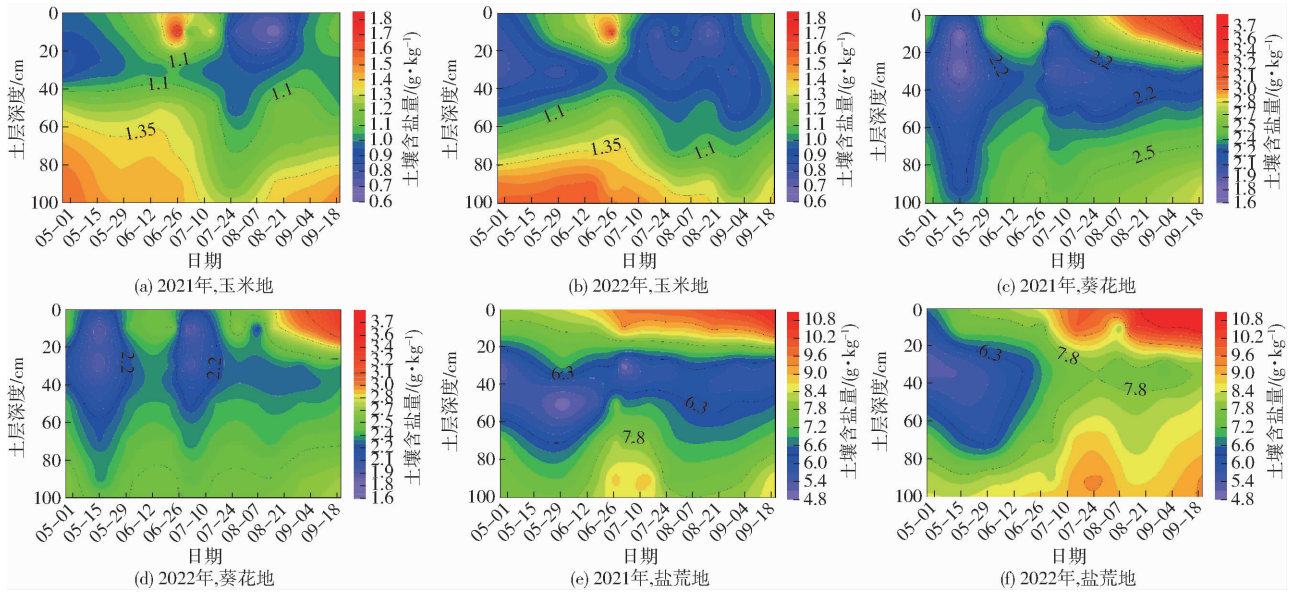


图 6 不同作物生长季土壤含盐量动态变化

Fig. 6 Dynamic changes in soil salinity during different crop growth seasons

见,耕地和盐荒地之间存在一种盐分迁移机制^[37]。为了准确地了解这一过程,利用 Surfer 软件的 Grid Vector Map 功能,在灌溉期间绘制了地下水水位等值线以确定地下水的运移方向。鉴于 2021 年和 2022 年的水盐环境相似,故选择 2021 年作为代表性示例,对研究区主要种植的玉米和葵花地下水环境动态变化进行分析。玉米生长季节进行了 3 次灌水,分别在 6 月 28 日、7 月 24 日和 8 月 10 日,而葵花在耕种前进行了春灌,并在生育期内仅进行一水灌溉,灌溉日期分别为 5 月 15 日和 6 月 28 日。通过灌水前后地下水位的动态变化,揭示耕荒地不同地类间水盐运移规律,为深入探讨早排盐作用与效益提供依据。

在灌水期,耕地地下水受到灌溉水的垂直补给,地下水位急速上升,与未灌溉的耕地与盐荒地形成水位差,地下水由于水力梯度发生迁移。以春灌前(图 7a)为例,耕地地下水位为 1 036.58 m,地下水位最小值为盐荒地,地下水位为 1 036.10 m,耕荒地最大水位差为 0.48 m,水力梯度为 0.003 2,由于上一年玉米地秋浇灌水量较大导致其地下水位较高,使得地下水迁移方向为玉米地—葵花地—盐荒地(表 3),地下水迁移速度为 0.012 cm/d 和 0.007 cm/d;随着气温升高,土壤逐渐解冻,地下水位慢慢回升,耕地地下水位最高为 1 036.78 m,盐荒地水位最小为 1 036.30 m,以 0.015 cm/d 更为快速地流向葵花地,而葵花地水分以速度 0.007 8 cm/d 向盐荒地迁移(图 7b)。

在春灌期(图 7c),耕地地下水位葵花地最高为 1 037.80 m,玉米地平均地下水位为 1 037.45 m,玉

米与葵花地之间水位差为 0.35 m,水力梯度为 0.007 0;同一时间盐荒地地下水位为 1 037.00 m,水位差为 0.80 m,水力梯度为 0.008 0。当春灌期对葵花地灌溉后,葵花地地下水位迅速上升,并向玉米地、盐荒地分别以速度 0.042 cm/d 和 0.045 cm/d 开始流动。

在夏灌和秋灌过程中,由于玉米地地面高程略高于葵花地和盐荒地,且玉米生育期灌水量较多,故地下水流动方向始终是玉米地流向葵花地,再流向盐荒地(表 3),玉米地向葵花地地下水流平均迁移速度为 0.026 cm/d,而葵花地向盐荒地迁移速度为 0.024 cm/d。直到生育期末期,地下水流动方向没有发生变化,但其地下水流迁移速度减少至 0.007 7 cm/d 和 0.011 cm/d。因耕地种植作物玉米和葵花,盐荒地生长有碱草等耐盐作物,在生育期后期未灌溉时,不同植被覆盖物蒸发量较大,不同地类地下水埋深均逐渐增大。

2.4 灌溉期地下水 EC 动态

耕地与荒地之间的侧向地下水流动会影响农田的地下水含盐量(图 8)。对 2021 年地下水电导率进行分析发现,第 1 次灌溉前,由于接收了不同盐度的融化土壤水,盐荒地地下水电导率约为 14.8 dS/m,农田地下水电导率约为 2.75 dS/m。第 1 次灌溉后,耕地地下水被土壤水和灌溉水混合物深层渗透稀释,含盐量下降。至生育期末期,盐荒地地下水电导率平均值约为 11.6 dS/m,农田地下水电导率波动比较小,平均为 2.91 dS/m。而盐荒地地下水被来自农田的侧向地下水稀释,盐度持续下降,直至生长季结束。然而,由于耕地偶

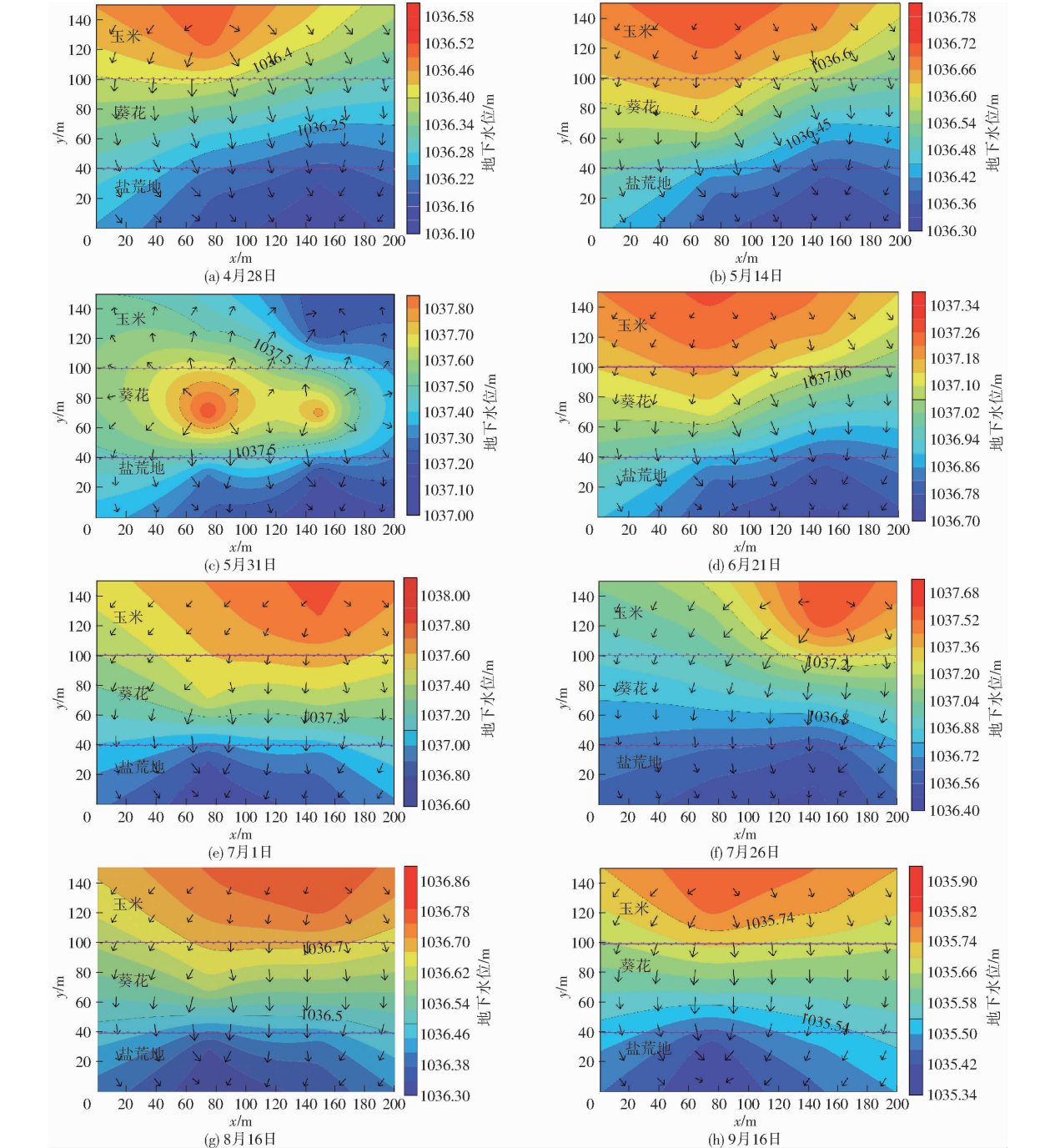


图 7 2021 年生长季地下水迁移方向

Fig. 7 Groundwater migration direction during growing season in 2021

表 3 不同时期地下水动态

Tab. 3 Groundwater transport parameters in different periods

时期	水位最大值/m	水位最小值/m	水位差/m	与荒地距离/m	水力梯度	迁移方向
春灌	1 037. 80	1 037. 00	0. 80	100	0. 008 0	葵花地—玉米地、葵花地—盐荒地
夏秋灌	1 037. 70	1 036. 60	1. 10	150	0. 006 7	玉米地—葵花地—盐荒地
非灌溉期	1 036. 58	1 036. 10	0. 48	150	0. 003 2	玉米地—葵花地—盐荒地

尔接收来自盐荒地的侧向地下水,临近耕地地下水含盐量逐渐增加。

2.5 生长季节侧向水通量和盐通量

研究区内紧邻盐荒地周围的中度盐渍化耕地均

种植葵花,且试验田地下水保持较高水位,葵花地非饱和带水平侧渗量不显著,因此在研究耕地水盐通量时不考虑非饱和带,仅针对葵花地和盐荒地之间的地下水盐通量进行探讨。根据式(12)、(13)分

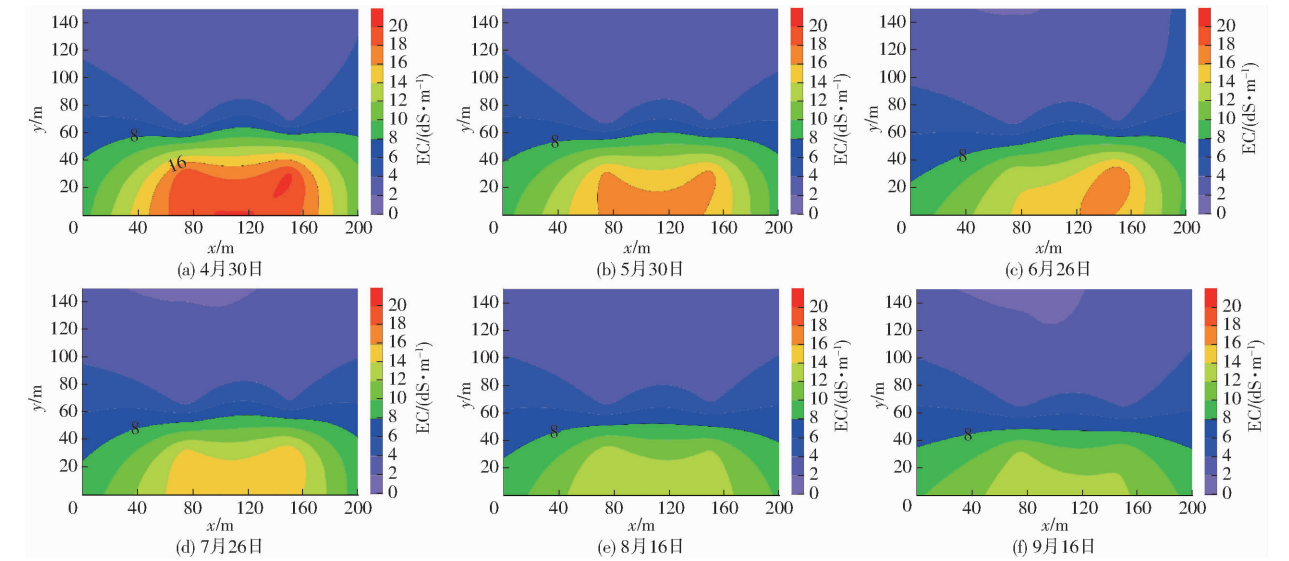


图 8 2021 年地下水 EC 变化
Fig. 8 Changes in groundwater EC in 2021

别计算 2021 年和 2022 年耕荒地间的地下水迁移量。由图 7 可直观地看出研究区两年地下水迁移变化过程基本类似。经计算,2021 年耕荒地边界处的侧向水盐通量如图 9 所示。地下水一般是由葵花地迁移至盐荒地,但由于上一年秋浇和次年春灌水量过大导致盐荒地地下水位较高,使得水盐通量从盐荒地流向农田,从而影响农田地下水含盐量。因葵花在研究阶段灌溉 2 次,因此水盐通量在春灌时期达到最大值,平均为 0.045 cm/d,盐分迁移量为 0.013 mg/(d·cm²)。研究结果表明,在作物生长阶段耕地经过灌溉,土壤中的盐分被淋洗至浅层地下水中并运移至盐荒地,在蒸发作用下导致盐荒地土壤积累盐分。因此在生育期耕地经过灌溉和降雨淋

洗,盐分通过地下水流向盐荒地。盐荒地作为耕地的排泄区域,具有维持水盐平衡的功能,其在河套灌区扮演着不可或缺的土地类型角色。

2.6 土壤盐分对作物产量的影响

研究区内紧邻盐荒地周围的中度盐渍化耕地均种植葵花。因此选择研究区内农作物种植较多的葵花农田分析土壤盐分对植物生长的影响。紧邻盐荒地的土壤在其它耕地与盐荒地之间充当一个盐分过渡带,这部分耕地的土壤盐分较高。而过高的土壤盐分会通过降低植物的水分利用率,或高盐土壤条件下根区专性离子(如氯、钠或硼)毒害作用,而对作物生长造成不利影响^[38]。土壤中高水平可溶盐的存在限制了植物对周围土壤中水分的吸收,随着灌溉后植物对水的吸收越来越困难,土壤溶液的盐分将增加,这一过程在具有高蒸散量的干旱半干旱灌区更为明显。当盐分在土壤中积累到一定程度时,植物的生理过程将受到不利影响,甚至会大幅度减少作物产量。

参考当地调研情况,将葵花高产田的参照标准定位 3 000 kg/hm²^[39]。表 4 为葵花播种前及生育期 4—9 月高产田和低产田 1 m 土体含盐量平均值。葵花高产田对应的土壤含盐量平均值低于低产田,其平均含盐量主要集中在 2.0 g/kg 以内,因此建议将种植葵花作物的农田含盐量控制在 2.0 g/kg 范围内以提高产量;而低产田中的大部分地块含盐量偏高,尤其是紧邻盐荒地的耕地尤为明显。低产田 1 m 土壤平均含盐量基本在 3.0 g/kg 以上,属于中度盐渍化,但部分高含盐量田块仍然达到了高产水平,而葵花 1 m 土体含盐量为 1.54 ~ 3.80 g/kg,遍布于非盐渍化、轻度盐渍化及部分中度盐渍化耕地。可见葵花对盐分的适宜范围相对较广,灌区内含盐

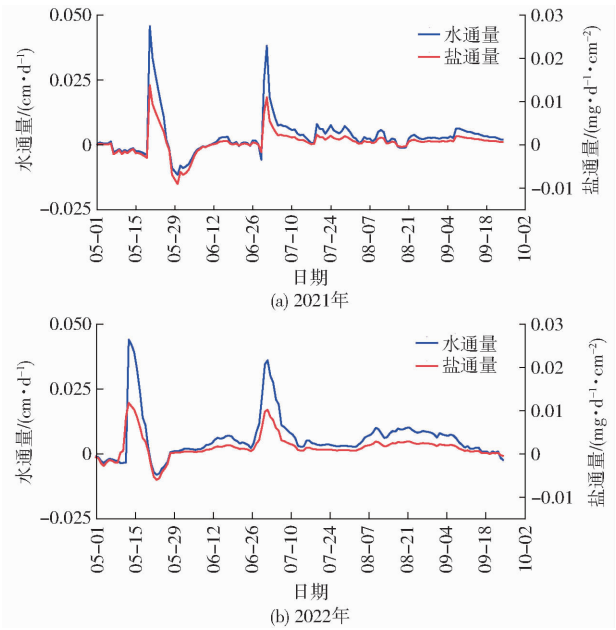


图 9 葵花地与盐荒地之间的地下水水盐侧向通量
Fig. 9 Water and salt flux between sunflower fields and wastelands

表 4 葵花不同产量等级 1 m 土体平均含盐量统计

Tab.4 Statistics of average salt content in 1 m soil of different yield grades of sunflowers												g/kg
产量等级	4 月		5 月		6 月		7 月		8 月		9 月	
	2021 年	2022 年	2021 年	2022 年	2021 年	2022 年	2021 年	2022 年	2021 年	2022 年	2021 年	2022 年
高产田	1.54	1.69	1.64	1.72	1.87	1.88	1.96	1.90	2.04	1.99	2.38	2.21
低产田	3.80	3.46	3.68	2.98	3.50	3.24	3.41	3.35	3.49	3.40	3.72	3.66

量稍高的土地仍然适宜种植。除此之外,土壤盐分对作物产量的影响也取决于土壤质地、作物类型及灌溉因素。因此在今后的研究中应充分考虑以上因素对作物生长及产量的制约关系,从而为合理控制葵花轻中度盐渍化耕地土壤含盐量,保证现状灌区作物生长提供重要基础。

3 讨论

内蒙古河套灌区土壤盐渍化问题由来已久,其中一个重要原因是较浅地下水埋深,造成了严重的地区土壤盐渍化,最终影响到作物生长^[40]。由于盐渍化荒废农田插花式地分布在耕地周围,许多学者开始深入研究耕荒地间水盐运移规律,以期为改良土壤盐渍化和提高作物产量提供科学依据。李亮等^[41]研究认为,荒地受到临近灌溉耕地的土壤水分水平渗透和地下水垂直补给的影响,蒸发使水分携带盐分逐渐向土壤表层迁移,盐分最终积聚在表层土壤中。XIAO 等^[42]在研究中指出,地下水迁移在支持盐荒地和维持作物生长方面具有关键作用,侧向流动的地下水会推动盐分迁移。这些研究结果与本文类似,耕地流失盐分和荒地积累盐分是作物生育期间盐分运移的整体过程,本文基于 Darcy 定律定量计算了耕地向荒地迁移的地下水量,发现在春灌时期不同田块地下水交换较为明显,种植葵花农田灌水后,地下水分别以速度 0.042、0.045 cm/d 向种植玉米农田和盐荒地迁移。这其中的水盐运移是一个复杂且动态的过程,王国帅等^[17]的研究指出,耕地-荒地-海子是河套灌区的典型早排控盐系统,是盐分再分布的主要区域,在生育期的灌水期地下水由耕地向荒地再向海子运移,海子成为水盐的容纳区,这与本研究结果相似,在夏灌和秋灌时地下水方向为玉米地迁移至葵花地再迁移至盐荒地,盐荒地成为储盐区。孙亚楠等^[43]则基于遥感技术研究了河套灌区永济灌域不同土地类型的土壤盐分时空演变规律,指出盐荒地不同土层土壤含盐量均大于耕地,是耕地的 2.55~6.97 倍。但并未能指出不同作物土壤盐分之间的区别,而本文则分析了种植玉米农田-种植葵花农田-盐荒地间的盐分分布规律,发现不同作物根区盐分存在较大差异,其中耕地中的葵花根区土壤盐分较高,约是玉米根区土壤含盐

量的 2.10~2.47 倍,而盐荒地土壤含盐量是耕地平均值的 2.81~6.95 倍。盐荒地作为耕地的排泄区域,具有维持耕地水盐平衡的功能,是研究区不可或缺的土地类型,但盐荒地盐分积聚到一个阈值时积盐能力必然下降,因此建议在盐荒地种植盐生植物(例如怪柳),增强其蒸散作用;而邻近盐荒地周围耕地的盐分也较高,本文研究认为葵花具有强耐盐的特性,在盐分较高的土地上仍然能达到高产要求,建议相邻盐荒地的耕地种植葵花以改善盐分现状并有助于耕荒地间形成更有效的早排控盐系统,获得更高的经济效益^[39,44]。

综上,本文直观地反映了种植玉米农田-种植葵花农田-盐荒地系统间不同层次土壤剖面的水分和盐分时空分布特征,并利用 Darcy 定律估算了不同时期盐荒地及其相邻农田间地下水水盐通量,量化了耕荒地间水盐运移规律,可为干旱地区水盐平衡提供理论依据。

4 结论

(1)在作物生育期,玉米地 ET 平均值比葵花地和盐荒地分别高 23.47% 和 88.97%,葵花地 ET 为盐荒地的 53.06%。春灌以及作物生长阶段的灌溉和降水等水分输入导致农田地下水埋深最大上升 157 cm,从而促使水盐从农田向未灌溉的盐荒地迁移。

(2)不同作物根区盐分存在较大差异,耕地中的葵花根区土壤含盐量(1.68~3.65 g/kg)较高,是玉米根区土壤含盐量(0.68~1.73 g/kg)的 2.10~2.47 倍,而盐荒地土壤含盐量(4.73~10.45 g/kg)是耕地的 2.81~6.95 倍。

(3)在作物生育期,灌区地下水携带盐分由玉米地运移向葵花地,葵花地运移向盐荒地。而春灌是一个特殊时期,灌溉后的葵花地地下水渗漏并迅速补给未灌溉的地类,水盐通量在春灌时期达到最大值,水分平均迁移量为 0.045 cm/d,盐分迁移量为 0.013 mg/(d·cm²)。

(4)现状条件下葵花相比于玉米对盐分的适应性较强,即使在盐分稍高的耕地上仍能达到较高的产量,应将葵花含盐量控制在 2.0 g/kg 以内以提高其产量。

参 考 文 献

- [1] OSMAN K T. Management of soil problems[M]. Berlin:Springer International Publishing, 2018.
- [2] ZHOU D, LIN Z L, LIU L M, et al. Assessing secondary soil salinization risk based on the PSR sustainability framework[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 128: 642 – 654.
- [3] WANG Y, ZHAO Y, YAN L, et al. Groundwater regulation for coordinated mitigation of salinization and desertification in arid areas[J]. Agricultural Water Management, 2022, 271: 107758.
- [4] 王全九, 邓铭江, 宁松瑞, 等. 农田水盐调控现实与面临问题[J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 139 – 147.
WANG Quanjiu, DENG Mingjiang, NING Songrui, et al. Reality and problems of controlling soil water and salt in farmland[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(1): 139 – 147. (in Chinese)
- [5] KONUKCU F, GOWING J, ROSE D. Dry drainage: a sustainable solution to waterlogging and salinity problems in irrigation areas? [J]. Agricultural Water Management, 2005, 83(1): 1 – 12.
- [6] ANSARI S, ABEDI-KOUPAI J, MOSTAFAZADEH-FARD B, et al. Assessment of solute transport and distribution under dry drainage conditions using a physical model[J]. Irrigation and Drainage, 2019, 68(4): 797 – 807.
- [7] KHOURI N. Potential of dry drainage for controlling soil salinity[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1998, 25(2): 195 – 205.
- [8] GHASSEMI F, JAKEMAN A J, NIX H A. Salinisation of land and water resources: human causes, extent, management and case studies[M]. Wallingford: CAB International Abstracting and Database, 1995.
- [9] 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 Fangliang, SHEN Can, LIU Jieying, et al. Analysis based on numerical simulation on the influencing factors of salinity control effect of dry drainage[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(5): 85 – 90. (in Chinese)
- [10] 张文聪. 河套灌区典型斗渠灌排单元农业水文过程与干排盐系统优化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
ZHANG Wencong. Research on agricultural hydrological process and optimal allocation of dry drainage system in a typical irrigation and drainage unit of Hetao Irrigation District[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [11] 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 Weifeng, YANG Jinzhong, TONG Juxiu, 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. (in Chinese)
- [12] 于兵, 蒋磊, 尚松浩. 基于遥感蒸散发的河套灌区早排作用分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 1 – 8.
YU Bing, JIANG Lei, SHANG Songhao. Dry drainage effect of Hetao Irrigation District based on remote sensing evapotranspiration[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18): 1 – 8. (in Chinese)
- [13] WU J W, ZHAO L L, HUANG J S, et al. On the effectiveness of dry drainage in soil salinity control[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(11): 3328 – 3334.
- [14] WANG C S, WU J W, ZENG W Z, et al. Five-year experimental study on effectiveness and sustainability of a dry drainage system for controlling soil salinity[J]. Water, 2019, 11(1): 111.
- [15] 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 Dongyang, XU Xu, HUANG Guanhua. Irrigation water use in typical irrigation and drainage system of Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1): 98 – 105. (in Chinese)
- [16] REN D Y, XU X, ENGEL B, et al. Growth responses of crops and natural vegetation to irrigation and water table changes in an agro-ecosystem of Hetao, upper Yellow River basin: scenario analysis on maize, sunflower, watermelon and tamarisk[J]. Agricultural Water Management, 2018, 199: 93 – 104.
- [17] 王国帅, 史海滨, 李仙岳, 等. 河套灌区耕地-荒地-海子间水盐运移规律及平衡分析[J]. 水利学报, 2019, 50(12): 1518 – 1528.
WANG Guoshuai, SHI Haibin, LI Xian Yue, et al. Analysis of water and salt transportation and balance during cultivated land, waste land and lake system in Hetao Irrigation Area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(12): 1518 – 1528. (in Chinese)
- [18] 王国帅, 史海滨, 李仙岳, 等. 河套灌区不同地类盐分迁移估算及与地下水埋深的关系[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 255 – 269.
WANG Guoshuai, SHI Haibin, LI Xian Yue, et al. Estimation of salt transport and relationship with groundwater depth in different land types in Hetao Irrigation Area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 255 – 269. (in Chinese)
- [19] 王国帅, 史海滨, 李仙岳, 等. 河套灌区耕地-荒地-海子系统间不同类型水分运移转化[J]. 水科学进展, 2020, 31(6): 832 – 842.
WANG Guoshuai, SHI Haibin, LI Xian Yue, et al. Study on migration of different types water during farmland – wasteland – lake system in Hetao Irrigation District[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(6): 832 – 842. (in Chinese)
- [20] LIU G, WANG C Z, WANG X H, et al. Growing season water and salt migration between abandoned lands and adjacent croplands in arid and semi-arid irrigation areas in shallow water table environments[J]. Agricultural Water Management, 2022,

274; 107968

- [21] 周慧,史海滨,郭珈玮,等.盐分与有机无机肥配施对土壤氮素矿化的影响[J].农业机械学报,2020,51(5):295-304.
ZHOU Hui, SHI Haibin, GUO Jiawei, et al. Effect of salt and organic-inorganic fertilizer application on soil nitrogen mineralization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5):295-304. (in Chinese)
- [22] 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, 2004, 71(2):131-143.
- [23] WANG X H, WANG C Z, WANG X W, et al. Response of soil compaction to the seasonal freezing-thawing process and the key controlling factors[J]. Catena, 2020, 184:104247.
- [24] 雷志栋,苏立宁,杨诗秀,等.青铜峡灌区水土资源平衡分析的探讨[J].水利学报,2002,33(6):9-14.
LEI Zhidong, SU Lining, YANG Shixiu, et al. Balance analysis of water resources in Qingtongxia Irrigation Area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(6):9-14. (in Chinese)
- [25] 马金平.膜下滴灌对土壤水热及春玉米生长特性的影响[D].太原:山西农业大学,2017.
MA Jinping. Research about the effects of soil water and heat transfer and maize growth characteristics under mulched drip irrigation[D]. Taiyu: Shanxi Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [26] 雷国庆.考虑水盐垂向非均匀胁迫的向日葵生长机制与水分传输模拟[D].武汉:武汉大学,2020.
LEI Guoqing, Research on sunflower growth mechanism and water transport simulation by considering vertical non-uniform water-salt stress[D]. Wuhan: Wuhan University, 2020. (in Chinese)
- [27] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [28] 戴佳信,史海滨,田德龙,等.内蒙古河套灌区主要粮油作物系数的确定[J].灌溉排水学报,2011,30(3):23-27.
DAI Jiaxin, SHI Haibin, TIAN Delong, et al. Determined of crop coefficients of main grain and oil crops in Inner Mongolia Hetao Irrigated Area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(3):23-27. (in Chinese)
- [29] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [30] 王湘浩.含盐土壤冻融条件下水热盐过程监测与模拟[D].北京:中国农业大学,2021.
WANG Xianghao. Monitoring and simulation of water, heat and salt process under freezing-thawing conditions in saline soil [D]. Beijing: China Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [31] 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 Fanghua, SUN Mingze, ZHANG Xuan, et al. Dynamic of soil water, groundwater and water balance in Hetao Irrigation Area[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(3):771-779. (in Chinese)
- [32] 周新国,韩会玲,李彩霞,等.玉米灌浆期渍水对产量及氮磷淋失量的影响[J].农业工程学报,2012,28(14):99-103.
ZHOU Xinguo, HAN Huiling, LI Caixiang, et al. Effects of waterlogging at grain filling stage on corn yield, nitrogen and phosphorus leaching loss[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(14):99-103. (in Chinese)
- [33] 赵经华,徐剑,马英杰,等.基于时序动态模型的不同灌水定额下食葵增产潜能分析[J].农业机械学报,2019,50(9):300-309.
ZHAO Jinghua, XU Jian, MA Yingjie, et al. Analysis of increasing yield potential of sunflower under different irrigation quotes based on time series dynamic [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9):300-309. (in Chinese)
- [34] 王瑞萍,万核洋,陈帅,等.河套灌区乌拉特灌域春季土壤盐碱化空间分布特征[J].农业工程学报,2021,37(15):105-113.
WANG Ruiping, WAN Heyang, CHEN Shuai, et al. Spatial distribution pattern of soil salinization in farmland of Wulate sub-irrigation areas in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia in spring[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(15):105-113. (in Chinese)
- [35] LIU M H, PAULA P, SHI H B, et al. Impacts of a shallow saline water table on maize evapotranspiration and groundwater contribution using static water table lysimeters and the dual Kc water balance model SIMDualKc[J]. Agricultural Water Management, 2022, 273:107887.
- [36] KONUKCU F. Potential of dry drainage as a sustainable solution to waterlogging and salinisation[C]// Birkhäuser Basel: Biosaline Agriculture and Salinity Tolerance in Plants, 2006:129-135.
- [37] 袁成福,冯绍元,庄旭东,等.内蒙古河套灌区典型耕、荒地水盐动态分析[J].干旱地区农业研究,2022,40(1):76-85.
YUAN Chengfu, FENG Shaoyuan, ZHUANG Xudong, et al. Analyzing water-salt dynamics in typical cultivated and wasteland in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(1):76-85. (in Chinese)
- [38] 陈水红,曹莹,陈泰祥,等.内生真菌提高禾草抗盐碱性研究进展[J].生物技术通报,2018,34(4):35-42.
CHEN Shuihong, CAO Ying, CHEN Taixiang, et al. Research process on the endophyte improving the grass's salt and Alkali resistance[J]. Biotechnology Bulletin, 2018, 34(4):35-42. (in Chinese)
- [39] 黄权中,徐旭,吕玲娇,等.基于遥感反演河套灌区土壤盐分分布及对作物生长的影响[J].农业工程学报,2018,34(1):102-109.
HUANG Quanzhong, XU Xu, LÜ Lingjiao, et al. Soil salinity distribution based on remote sensing and its effect on crop growth

in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(1): 102 – 109. (in Chinese)

[40] YANG C, LV D T, JIANG S Y, et al. Soil salinity regulation of soil microbial carbon metabolic function in the Yellow River Delta, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 790: 148258.

[41] 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 Liang, SHI Haibin, JIA Jinfeng, et al. Simulation of water and salt transport of uncultivated land in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 31 – 35. (in Chinese)

[42] XIAO X, XU X, HUANGG H. Improved analytical expressions for transient specific yield in shallow groundwater drainage[J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 126186.

[43] 孙亚楠, 李仙岳, 史海滨, 等. 基于遥感的节水改造下河套灌区土壤盐渍化演变分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 366 – 379.
SUN Ya'nan, LI Xianyue, SHI Haibin, et al. Evolution mechanism of soil salinization in Hetao Irrigation District under condition of water-saving reform based on remote sensing technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 366 – 379. (in Chinese)

[44] 李亮, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 内蒙古河套灌区耕地与荒地间水盐补排规律的研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(5): 73 – 77.
LI Liang, SHI Haibin, AKAE T, et al. Transport of soil moisture and salt between irrigated land and saline land in the Inner Mongolia Hetao Irrigation District[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(5): 73 – 77. (in Chinese)

(上接第 345 页)

[15] 廖敏, 栗超, 张宇, 等. 大棚种植川贝母分区变量灌溉系统研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 108 – 116.
LIAO Min, SU Chao, ZHANG Yu, et al. Development of the partition variable irrigation system for greenhouse planting *Fritillaria cirrhosa* [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(16): 108 – 116. (in Chinese)

[16] BUI D Q. Nozzle with flow rate and droplet size control capability US7124964[P]. 2006 – 10 – 24.

[17] 郝培业. 新型摇臂式喷头: CN2436233[P]. 2001 – 06 – 27.

[18] 韩文霆, 冯浩, 吴普特, 等. 非圆形喷洒域的摇臂式喷头 CN1175938C[P]. 2004 – 11 – 17.

[19] 陶帅, 李文涛, 黄小林, 等. 大型喷灌机喷头 PWM 变量脉冲的实现[J]. 农机化研究, 2021, 43(5): 18 – 22.
TAO Shuai, LI Wentao, HUANG Xiaolin, et al. The realization of PWM variable pulse for the sprinkler of large-scale irrigation machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(5): 18 – 22. (in Chinese)

[20] 邓巍, 丁为民, 何雄奎. PWM 间歇式变量喷雾的雾化特性[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 74 – 78.
DENG Wei, DING Weimin, HE Xiongkui. Spray characteristics of PWM-based intermittent pulse variable spray [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 74 – 78. (in Chinese)

[21] 刘大印, 王秀, 毛益进, 等. 基于单片机 PWM 变量农药喷洒控制系统研究[J]. 农机化研究, 2011, 33(5): 99 – 103.
LIU Dayin, WANG Xiu, MAO Yijin, et al. Research on PWM variable pesticide spraying control system based on single chip microcomputer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(5): 99 – 103. (in Chinese)

[22] 陆培文, 汪裕凯. 调节阀实用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.

[23] 王福军. 水泵与水泵站[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.

[24] 王金辉. 移动定点式电驱动卷盘式喷灌机研究及开发[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
WANG Jinhui. Research and development of movable fixed-point electric drive reel sprinkler [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)

[25] LIU Mengyang, ZHU Delan, NIE Xinxin, et al. Design and testing of a remote control-based integrated flow regulation and measurement device[J]. Sustainability, 2022, 14(23): 15672.