doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.028

河套灌区不同地类盐分迁移估算及与地下水埋深的关系

王国帅[1,2]　史海滨[1,2]　李仙岳[1,2]　郭珈玮[1,2]　王维刚[1,2]　吴　迪[1,2]

(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. 高效节水技术装备与水土环境效应内蒙古自治区工程研究中心, 呼和浩特 010018)

摘要: 针对河套灌区引水量逐年减少、输入灌区的盐分无法有效排出、仅能在灌区内部重新分配的现状,以河套灌区耕地-荒地-海子为研究对象,通过野外实测和室内试验分析相结合,基于地质统计学、溶质动力学理论,研究了耕地-荒地-海子系统土壤剖面、不同土层盐分和地下水盐分的时空变化特征,定量估算了不同时期的盐分变化,揭示了系统盐分的表观平衡,分析了地下水埋深对土壤盐分的影响。结果表明:在耕地-荒地-海子系统中,灌溉期,耕地大量盐分随地下水迁移到荒地,秋浇前荒地含盐量是耕地的 2 倍,秋浇后荒地脱盐量是耕地的 3 倍。整个生育期耕地 1 m 土体盐分通过灌溉期淋洗,积盐率仍为 56%,秋浇后盐分没有完全排出,脱盐率为 44%,土壤深层有轻微积盐现象;荒地 1 m 土体积盐率为 63%,秋浇后脱盐率为 62%,荒地盐分全年基本保持平衡。地下水和海子盐分时空分布呈条带状,存在较强的空间相似性,海子是系统的储盐区。应采取有效措施将灌区目前地下水埋深降低 0.2 m,研究区地下水埋深控制在 1.7 ~ 2.3 m 之间更佳。在生育期(5 月 15 日—9 月 15 日),荒地 1 m 土体积盐量为 377 705 kg/hm^2。地下水补给荒地 20 ~ 100 cm 土壤盐量为 17 985 kg/hm^2,占积盐量的 5%;0 ~ 20 cm 土壤盐量增加 202 395 kg/hm^2,占积盐量的 54%;耕地地下水迁移给荒地深层土壤盐量为 114 015 kg/hm^2,占积盐量的 30%;耕地水平渗透给荒地的盐量为 43 305 kg/hm^2,占积盐量 11%。本研究可为灌区水盐运移提供理论依据。

关键词: 河套灌区; 耕地-荒地-海子典型区; 水盐迁移特征; 地下水埋深; 盐分迁移估算

中图分类号: S271; S274.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)08-0255-15　　**OSID**:

Estimation of Salt Transport and Relationship with Groundwater Depth in Different Land Types in Hetao Irrigation Area

WANG Guoshuai[1,2]　SHI Haibin[1,2]　LI Xianyue[1,2]　GUO Jiawei[1,2]　WANG Weigang[1,2]　WU Di[1,2]

(1. *College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot* 010018, *China*
2. *High Efficiency Water-saving Technology and Equipment and Soil Water Environment Engineering Research Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Huhhot* 010018, *China*)

Abstract: With the decrease of irrigation water in Hetao Irrigation District year by year, the salt input into the irrigation district can not be effectively drained. As a result, the salt can only be redistributed in the irrigation district. Based on field measurement and laboratory experiment, the temporal and spatial variation characteristics of the soil profile, different soil layer and groundwater solute were analyzed by using geostatistics and solute dynamics methods in the cultivated land - wasteland - lake system. The soil salinity was estimated in different periods and the effect of groundwater depth on soil salinity were revealed. The results showed that a large amount of salt in the cultivated land was transported into wasteland with the groundwater during the irrigation period. Before autumn irrigation, the accumulated salinity of the wasteland was two times of that of cultivated land. After autumn irrigation, the desalination amount of wasteland was three times of that of cultivated land. In the whole growth period, the salt in soil of 1 m cultivated land still accumulated 56%. The salt was not completely discharged after autumn irrigation, and the desalination rate was 44%. There was slight salt accumulation in deep soil layer. The accumulated salt was 63% in 1 m wasteland soil and the desalination rate was 62% after autumn

收稿日期: 2020-04-03　修回日期: 2020-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51539005、51769024)

作者简介: 王国帅(1992—),男,博士生,主要从事节水灌溉技术研究,E-mail: imau_wgs@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

irrigation. The accumulated salt in soil of 1 m wasteland was 377 705 kg/hm^2. The salt content of 20 ~ 100 cm wasteland recharged by groundwater was 17 985 kg/hm^2, accounting for 5% of all the accumulated salt. The salt content of 0 ~ 20 cm soil was increased by 202 395 kg/hm^2, accounting for 54% of all the accumulated salt. The salt content of the deep soil layer transferred by groundwater from cultivated land to wasteland was 114 015 kg/hm^2, accounting for 30% of the accumulated salt. the salt content from horizontal infiltration of cultivated land to wasteland was 43 305 kg/hm^2, accounting for 11% of the accumulated salt. The spatial-temporal distribution of groundwater and lake salt was strip and patch, which had greatly spatial similarity. Lake became a salt storage area. Measures should be taken to decrease the depth of groundwater by 0.2 m. The groundwater depth in the study area should be controlled between 1.7 m and 2.3 m. The results can provide theoretical basis for water and salt transport in irrigation area.

Key words: Hetao Irrigation District; cultivated land - wasteland - lake system; characteristics of water and salt transport; groundwater depth; estimation of salt transport

0 引言

内蒙古河套灌区是我国 3 个特大型灌区之一,地处干旱半干旱区,为无灌溉则无农业的地区[1]。节水改造前,河套灌区年用水量为 52 亿 m^3。从 1998 年开始,国家启动了大型灌区节水改造工程,根据黄河水利委员会分配指标,用水量将减少到 40 亿 m^3,引水量减少 20% 以上[2]。随着节水改造工程的实施,灌区引水量大幅度降低,多年来形成的区域水盐平衡体系被打破,造成区域和垂直剖面土壤水盐的重新分布[3-6]。因此,摸清灌区内部的盐分迁移规律,对灌区水盐调控具有重要意义。

河套灌区耕地面积 5.74×10^5 hm^2,盐荒地面积 2.09×10^5 hm^2,水域面积为 1.3×10^4 hm^2[7]。灌区存在许多小型湖泊(海子)[8-9],耕荒地交错,且荒地分布于耕地间隙和沙丘、湖泊周围[3,10]。耕地-荒地-海子是河套灌区典型的地类,其水盐变化是目前灌区主要的水盐运移形式,但机理尚不清晰,研究耕地-荒地-海子间水盐迁移机制很有必要。在耕地-荒地-海子系统中,同时精确监测 3 种地类水分和盐分变化较为困难,需要在 3 种地类中建立水盐理论模型,其理论性较强,研究较为复杂。

围绕水盐运移国内外学者开展了大量的科学研究。WU 等[11]通过研究河套灌区干排水揭示了盐分的迁移过程,发现耕地中过多的灌溉水和盐分通过地下水迁移到荒地中,干排水有助于排出耕地多余的盐分。WANG 等[12]以永联灌域为研究对象,研究了干排盐的作用,发现荒地地下水对耕地地下水横向补给响应较大,水盐平衡表明,转移到荒地的水量是人工排水的 4 倍,转移到荒地的盐量是人工排盐的 7.7 倍。韦芳良等[13]通过模型分析了干排水控盐的效果,发现气候越干旱,干排水控盐效果越好;插花式的荒地布置形式有助于增强排水效果;耕荒比对控盐效果存在临界值,当耕荒比达到临界值,耕地开始脱盐。王学全等[7]通过水盐均衡计算,发现河套灌区处于积盐过程中,荒地和低洼湿地具有排水积盐作用,从而减轻了耕地盐渍化,通过蒸发可积聚进入灌区盐分的 65%。REN 等[14]指出,较浅的地下水位可以为河套灌区的生态系统提供较为稳定的水分来源,但在蒸发蒸腾的作用下地下水中的盐分会逐渐在土壤表层积累,进而导致土壤盐渍化的形成,地下水位越浅,地下水含盐量越高,根区土壤盐渍化越严重。曾揭峰等[15]探讨了盐荒地、沙丘和海子微地形对耕地排盐的作用机理,发现在灌溉期耕地盐分向盐荒地和沙丘运移,最终汇集到海子,耕地和盐荒地地下水在灌溉期侧向补给沙丘和海子。王国帅等[16]利用氢氧同位素二端元混合模型和土壤水动力学理论研究了耕地-荒地-海子系统不同类型水分的运移转化,发现渠系灌溉水通过地下侧向径流贡献给耕地地下水的水量基本迁移给荒地地下水,地下水迁移转化是由渠系水地下侧向径流触发的。李亮等[17]利用饱和-非饱和水平运移方程,分析了河套灌区耕地与荒地间水盐补排关系,通过 Hydrus 模型发现,耕地盐分被灌溉水侧向浸入荒地 85.7 g/m^2,5 cm 土层电导率上升了 66.10%,20 cm 土层电导率上升了 63.89%[3]。任东阳等[10]通过建立水盐平衡方程研究了盐分在灌排单元的分配比例,发现荒地滞留了总引入盐量的 40%,农田滞留了总引入盐量的 39%。岳卫峰等[6]通过建立非农区-农区-水域的水盐均衡模型,对水盐的迁移进行了定量分析,发现农区脱盐量的 75% 随地下水迁移到非农区。

综上,目前尚未见关于连续的耕地-荒地-海子系统间干排盐的研究,未能揭示土壤和地下水的盐分时空变化特征,没有定量给出不同时期土壤盐分变化,未确定地下水埋深对土层盐分的影响。对于面临指令性节水 20% 的河套灌区,研究水盐分布规律和制定节水控盐策略至关重要。针对以上问题,

本文基于田间系统观测数据，采用地质统计学方法探讨河套灌区耕地-荒地-海子间水盐时空运移特征和地下水埋深对土壤盐分的影响，基于溶质动力学理论，构建耕地-荒地-海子间水盐理论模型，估算不同时期土壤盐分迁移量，以期为灌区水盐控制和可持续发展提供理论依据。

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解放闸灌域和永济灌域交界的张连生海子（40° 54′ 36.24″ N，107°15′59.07″E，海拔 1 035 m），试验区耕地面积大约 3.7 hm^2，荒地面积大约 4.3 hm^2，海子面积 51.2 hm^2，耕地、荒地和海子相邻（图 1）。研究区耕地最大地面高差为 15 cm，耕地平均比荒地高 45 cm（图 1）。研究区地处温带大陆性气候，多年平均气温 7.5℃，无霜期 130～150 d，降雨量为 90～144.2 mm，降雨集中在 6—8 月，占全年降雨量的 70%，年均蒸发量 2 237 mm。在作物生育期，研究区地下水埋深平均值为 138 cm，耕地地下水电导率（EC）平均值为 1.2 dS/m，荒地地下水 EC 平均值为 2.6 dS/m，海子 EC 平均值为 3.5 dS/m。研究区主要作物为葵花，200 cm 土层土壤质地主要为沙土、沙壤土。研究区共布设 17 眼地下水观测井，其中重点观测井 7 眼，一般观测井 10 眼。土壤观测点共 63 个，取样点间距 50 m，土壤重点观测点 7 个，布设 4 组负压计、4 个土壤微型蒸发器和 1 台自动气象站（HOBO U30 型，美国 Onset 公司）（图 1）。

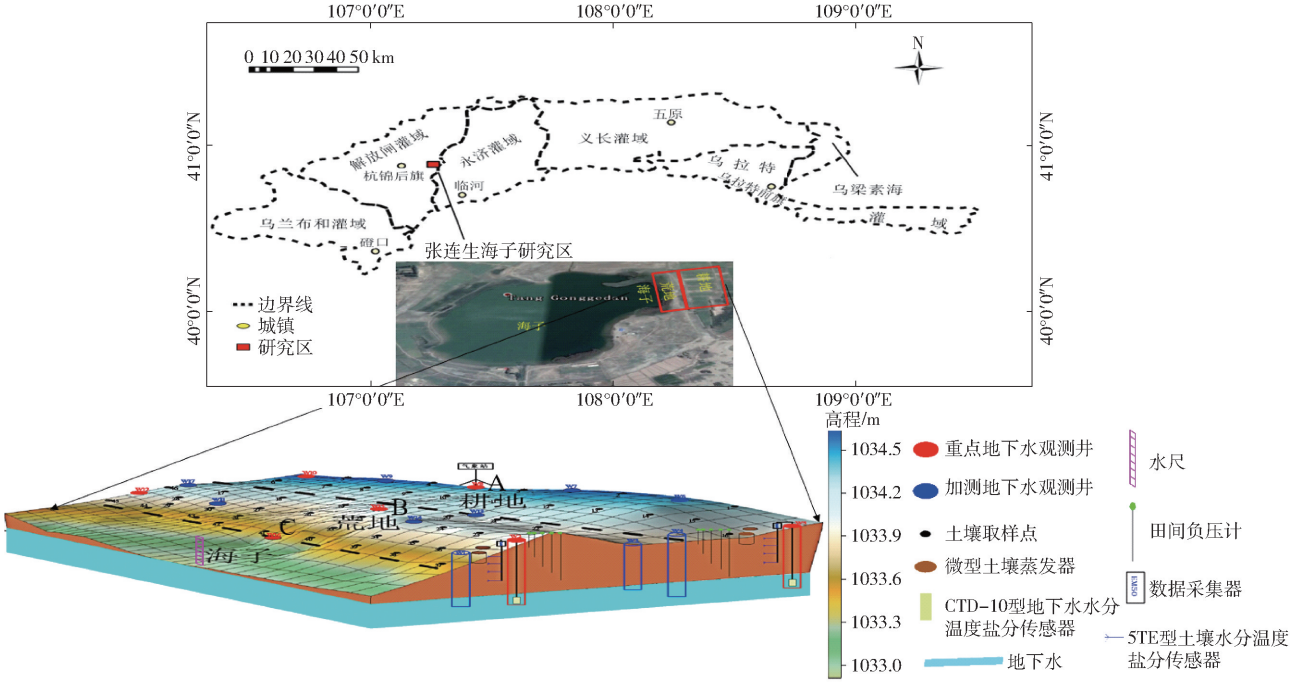

图 1　研究区与采样点

Fig. 1　Study area and layout of monitoring points

1.2　试验设计

试验时间为 2017—2020 年，由于研究区在 3 年期间气象条件没有发生较大变化，研究区每年的土壤水盐与地下水状况相类似，故以 2018 年为例进行研究。在 2018 年 4 月 4 日—11 月 15 日取样，选取整个研究区和 A－B－C 横剖面为重要研究对象（图 1），选取重点观测井 A（耕地）、B（荒地）和 C（海子边界）为地下水监测点，在观测井中间，选 6 个土壤取样点作为土壤盐分分析点（图 2）。

1.3　测试指标

1.3.1　地下水观测

重点观测井安装地下水水分温度盐分传感器（CTD－10 型，美国 Meter 公司），用 EM50 型采集器每 1 h 记录 1 次地下水水位和含盐量。一般观测井每隔 7 d 测 1 次地下水埋深，每隔 10～15 d 取水样测试地下水含盐量。在作物生育期，研究区地下水埋深变化为：耕地 90～210 cm，平均值为 150 cm；荒地 100～190 cm，平均值为 145 cm；海子边界 30～145 cm，平均值为 87.5 cm；秋浇后，耕地为 50 cm，荒地为 60 cm，海子边界为 0 cm（图 3）。

1.3.2　土水势观测

在耕地和荒地分别安装 2 组负压计，安装深度分别为 20、40、60、80、100 cm（图 2），每 2 d 观测 1 次数据。测得耕地和荒地土壤各层土水势数据，分别取平均值，作为耕地和荒地各层土水势的有效数据。

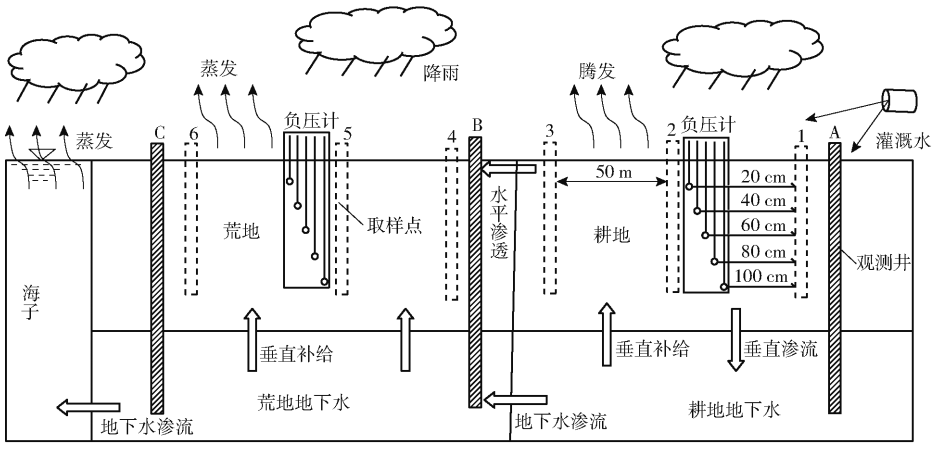

图 2 研究区 A－B－C 横剖面试验设计

Fig. 2 Design of A－B－C cross section experiment in study area

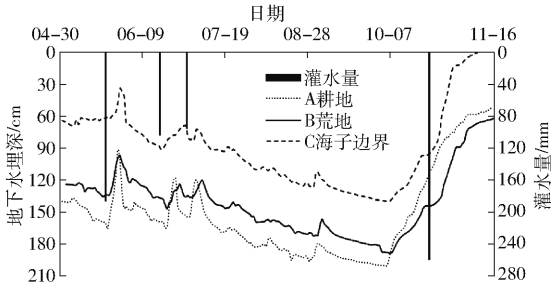

图 3 2018 年重点观测井地下水埋深变化曲线

Fig. 3 Dynamics of groundwater depth of key observation well in 2018

1.3.3 土壤监测

采用土钻法采集土壤 100 cm 深土样,共 5 层(0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm)。每隔 10 ~ 15 d 取土样,灌水前后加密取样。用干燥法测土壤含水率,用电导率仪(DDS－307A 型,上海佑科仪器公司)测定土水比 1∶5 的土壤浸提液。土壤重点观测点,土壤取样深度为 200 cm,每隔 20 cm 为 1 层。在重点观测点安装土壤水分温度盐分传感器(5TE 型,美国 Meter 公司),测土壤含水率、含盐量和温度,用 EM50 型采集器每 1 h 记录 1 次数据。

1.3.4 灌溉水量测和水样收集

用梯形量水堰量测灌水量,收集灌溉水和每隔 10 ~ 15 d 取海子水样 1 次,每次收集 3 个重复,用电导率仪(DDS－307A 型)测定其电导率。5 月 24 日、6 月 21 日和 7 月 4 日分别灌水 186、104、96 mm,作物生育期总灌水量为 386 mm。10 月 31 日,研究区进行秋浇,秋浇水量约为 260 mm。灌溉水矿化度平均值为 0.58 g/L。

1.3.5 研究区土壤物理性质

研究区重点观测点(图 1)0 ~ 200 cm 土层通过环刀法分别测定土壤容重和饱和导水率,并采用干法粒度仪(HELOS&RODOS 型,新帕泰克公司,德国)测定各点土壤粒径级配。根据测定结果(表 1),样点 A(耕地)土壤质地较为均匀,0 ~ 200 cm 土层土壤质地为沙壤土;样点 B(荒地)土壤质地可分为两层,0 ~ 80 cm 土层土壤质地为沙壤土,80 ~ 200 cm 土层土壤质地为沙土;样点 C(海子边界)土壤质地可分为两层,0 ~ 20 cm 土层土壤质地为沙壤土,20 ~ 200 cm 土层土壤质地为沙土。采用 RETC 软件的 VG 模型确定土壤参数(表 1)。

1.3.6 气象数据采集

大气温度和降雨量由自动气象站观测,记录间隔为 1 h/次。2018 年降雨主要集中在 6—9 月,9 月降雨量最大,为 44 mm,7 月上旬平均气温最高,为

表 1 研究区典型样点土壤物理特性

Tab. 1 Soil physical characteristics of typical sample points in study area

样点	土层深度/cm	土壤物理特性					VG 参数			
		黏粒(0 ~ 0.02 mm)质量分数/%	粉粒(0.02 ~ 0.5 mm)质量分数/%	沙粒(0.5 ~ 2 mm)质量分数/%	干容重/(g·cm^{-3})	饱和导水率/(cm·d^{-1})	残余含水率/(cm^3·cm^{-3})	饱和含水率/(cm^3·cm^{-3})	土壤进气值倒数/cm^{-1}	拟合经验参数 n
耕地(A)	0 ~ 200	3.16	45.28	51.56	1.66	19.67	0.026 6	0.309	0.034 1	1.122 8
荒地(B)	0 ~ 80	2.18	42.65	55.17	1.69	22.10	0.025 8	0.359	0.040 9	1.122 8
	80 ~ 200	2.49	7.68	89.83	1.70	230.84	0.044 4	0.329	0.038 2	2.054 1
海子边界(C)	0 ~ 20	5.612	14.324	80.064	1.52	197.76	0.042 3	0.379	0.040 3	1.786 5
	20 ~ 200	0.42	5.46	94.12	1.73	315.12	0.034 7	0.31	0.036 0	3.194 7

28℃(图 4)。

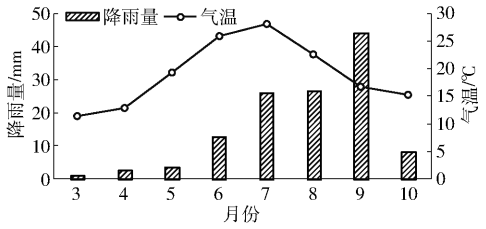

图 4　2018 年试验区降雨和气温变化

Fig. 4　Rainfall and temperature change in 2018

1.4　研究方法

1.4.1　Universal Kriging 插值法

Universal Kriging 插值法是以变异函数理论和结构分析为基础,在有限区域内对未知样点进行无偏、最优估计的一种方法。Universal Kriging 通过设定空间分布趋势和分析残差的克里金过程来研究空间场特征,其主要考虑较强的空间趋势效应[18-20]。

1.4.2　插值精度验证参数

采用均方根误差(Root mean squared error, RMSE)、平均相对误差(Mean relative error, MRE)和决定系数(Coefficient of determination, R^2)验证插值精度。MRE 和 RMSE 越接近于 0,精度越高,R^2 接近 1,说明模型可以很好地捕捉到实测值的变动趋势。一般认为 MRE 在 ±10% 以内,RMSE 与平均实测值的比值在 20% 以内,R^2 在 0.5 以上达到率定要求。

1.4.3　地下水补给量计算

地下水补给是土壤水分的重要来源,本文采用定位通量法计算研究区地下水补给。定位通量法是在某一特定位置(如地下水面以上一定位置处)z_1 和 z_2 安装负压计,监测土壤水势能梯度的变化,由达西定律可知该点处的通量为[21]

$$Q(z_{1-2}) = -K(\bar{h})\left(\frac{h_2 - h_1}{\Delta z} + 1\right) \tag{1}$$

其中

$$\bar{h} = \frac{h_1 + h_2}{2} \tag{2}$$

$$K(h) = \text{amna}\theta_s(ah)^{n-1}[1 + (ah)^n]^{-m-1} \cdot \exp(b\theta_s[1 + (ah)^n])^{-m} \tag{3}$$

式中　h_1、h_2——断面 z_1 和 z_2 处负压计值,hPa

Δz——z_2 和 z_1 的差值,cm

$Q(z_{1-2})$——$t_1 \sim t_2$ 时段内单位面积流过的土壤水流量,mm

$K(h)$——非饱和导水率,cm/min

θ_s——土壤的饱和含水率,cm^3/cm^3

a——土壤进气值的倒数,cm^{-1}

h——土壤吸力,hPa

m、b——拟合经验参数

同样可由 $Q(z_{1-2})$ 求得任一断面流量

$$Q(z) = Q(z_{1-2}) + \int_z^{z_{1-2}} Q(z,t_2)\,\mathrm{d}z - \int_z^{z_{1-2}} Q(z,t_1)\,\mathrm{d}z \tag{4}$$

1.4.4　地下水补给土壤盐量计算

地下水补给土壤盐量计算公式为

$$S_b = 10\,005\,\frac{N_d \sum_{i=1}^{4} \bar{Q}_i(z)\ \overline{TDS}}{1\,000\varphi} \tag{5}$$

式中　S_b——地下水补给土壤盐量,kg/hm^2

N_d——计算时长,d

$\bar{Q}_i(z)$——第 i 土层平均地下水补给量,mm/d

$\overline{TDS}$——地下水平均矿化度,g/L

φ——土壤孔隙度,取 0.36

地下水 EC 和地下水矿化度(TDS)转换公式为[22]

$$TDS = 0.69EC_w \tag{6}$$

式中　TDS——地下水矿化度,g/L

EC_w——地下水电导率,dS/m

1.4.5　土壤含盐量计算

土壤电导率转换为土壤全盐量计算公式为[23]

$$C = 3.765\,7EC_{1:5} - 0.240\,5 \tag{7}$$

式中　C——土壤全盐量,g/kg

$EC_{1:5}$——土水比 1:5 土壤浸提液电导率,dS/m

土壤含盐量计算公式为[24]

$$S = 10\,005\,\frac{C\rho_s l}{10} \tag{8}$$

式中　S——土壤含盐量,kg/hm^2

ρ_s——土壤容重,g/cm^3

l——土层深度,cm

1.4.6　渗透盐量计算

基于盐量平衡理论,耕地水平渗透盐量计算公式为

$$S_l = S_i - S_{i-1} - S_{ib} - S_{is} - S_d \tag{9}$$

式中　S_i——第 i 时期荒地储盐量,kg/hm^2

S_{i-1}——第 $i-1$ 时期荒地储盐量,kg/hm^2

S_{ib}——第 $i-1 \sim i$ 时期内地下水补给荒地的盐量,kg/hm^2

S_{is}——第 $i-1 \sim i$ 时期内荒地表层(0 ~ 20 cm)积累的盐量,kg/hm^2

S_d——灌溉时期荒地深层积累盐量,kg/hm^2

1.4.7　土壤积盐率计算

土壤积盐率为 0 ~ 100 cm 土壤剖面某一时期与其前一时期相比土壤含盐量的增加率,其计算公式为[25]

$$t=\frac{W_i-W_{i-1}}{W_i}\times 100\% \tag{10}$$

式中 t——土壤积盐率,%

W_i——第 i 时期土壤含盐量,kg/hm^2

W_{i-1}——第 $i-1$ 时期土壤含盐量,kg/hm^2

1.4.8 土壤脱盐率计算

土壤脱盐率为 0 ~ 100 cm 平均土壤剖面在灌溉后某一时期与灌溉前相比土壤含盐量的减少率,其计算公式为

$$\omega=\frac{S_0-S_t}{S_0}\times 100\% \tag{11}$$

式中 ω——土壤脱盐率,%

S_t——灌溉后某一时期土壤含盐量,kg/hm^2

S_0——灌溉前土壤含盐量,kg/hm^2

1.5 数据处理与分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2016 软件处理分析,利用 Surfer 12.0 最优内插法绘制土壤和地下水盐分时空分布特征图,利用 Surfer 12.0、Adobe Photoshop 和 AutoCAD 2014 软件绘制研究区地形图。

2 结果与分析

2.1 耕地-荒地间典型 A-B-C 土壤横剖面盐分时空变化特征

研究区分别在 5 月 24 日、6 月 21 日、7 月 4 日和 10 月 31 日(秋浇)进行灌水,根据 4 个时间节点前后在研究区加密取样,利用 Surfer 12.0 软件地质统计学插值模块,绘制研究区不同土层深度 $EC_{1:5}$ 时空变化特征图。由于耕地-荒地土壤盐分存在明显的逐渐增高的趋势,故采用泛克里格(Universal Kriging)进行区域估值。选取研究区典型 A-B-C 土壤横剖面,绘制 1 m 土深耕地和荒地 $EC_{1:5}$ 等值线图(图 5,图中 $EC_{1:5}$ 单位为 dS/m),研究 $EC_{1:5}$ 变化规律。

春播前(4 月 4 日),荒地土层盐分显著高于耕地,由于上年秋浇影响,耕地盐分通过地下水和水平

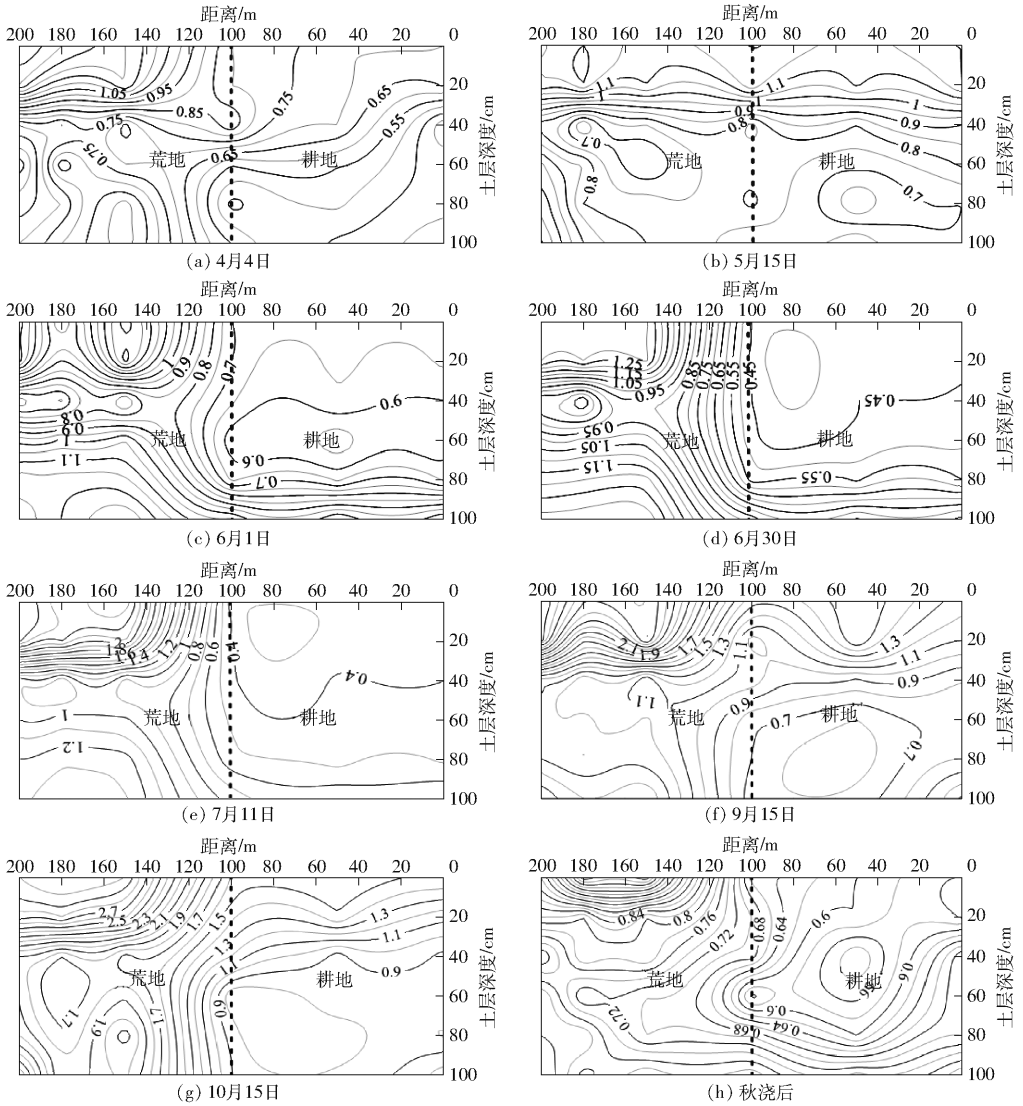

图 5 A-B-C 土壤横剖面土壤 $EC_{1:5}$ 等值线图

Fig. 5 Isoline maps of soil $EC_{1:5}$ in A-B-C soil cross section

渗漏迁移到荒地。随着温度回升(图 4),5 月 15 日冻土层融通,土壤表层返盐,耕地 0 ~ 40 cm 土层返盐量较大,增加了 4.61 g/kg(表 2)。5 月 24 日研究区第 1 次灌水后,耕地表层盐分被淋洗到深层(图 5c),大量盐分随地下水迁移到荒地,荒地深层盐分增加。6 月 1 日耕地 1 m 土体中含盐量减少 5.15 g/kg(表 2),荒地 40 ~ 100 cm 土层盐分增加 2.82 g/kg(表 3)。6 月 21 日第 2 次灌水,灌后第 9 天,耕地 1 m 土体中含盐量减少 2.81 g/kg,荒地 40 ~ 100 cm土层含盐量增加 0.64 g/kg。6 月 30 日荒地 60 ~ 100 cm 土层含盐量为 9.05 g/kg(表 3),灌溉期荒地深层土壤盐分高于表层,耕地-荒地间的盐分通过地下水迁移。7 月 4 日第 3 次灌水,与第 2 次灌水间隔较短,7 月 11 日荒地 60 ~ 100 cm 土层盐分增加不明显,但此时土壤蒸发强烈,荒地表层(0 ~ 20 cm)积盐明显,含盐量增加 3.96 g/kg(表 3)。荒地 0 ~ 80 cm 为沙壤土,毛管作用强烈,积盐速度快(表 1)。9 月 15 日耕地根系层(0 ~ 40 cm)含盐量增加 3.64 g/kg(图 5f、表 2),由于向日葵冠层增加了地表覆盖,减少土壤蒸发,抑制了表层土壤返盐;但向日葵腾发强烈,根系吸水量大,盐分在根层聚集。秋浇前(10 月 15 日),荒地含盐量为 34.44 g/kg(表 3),耕地为 17.17 g/kg(表 2),荒地含盐量是耕地的 2 倍。秋浇后(11 月 15 日),荒地和耕地含盐量分别降低 21.3、7.6 g/kg(图 5h、表 2、表 3)。由于表层盐分被淋洗到深层,耕地 100 cm 土层处盐分较高。秋浇期耕地-荒地间以土壤水平侧向渗透排盐为主,地下水补给荒地排盐为辅,使荒地表层土壤盐分也得到了淋洗。由于秋浇水量较大,造成地下水埋深变浅(图 3),易造成翌年土壤返盐(图 5a、5b),不利于作物生长。应在保证秋浇洗盐的同时,合理控制秋浇水量并及时排除地下水,控制地下水埋深。

表 2　不同时期耕地各层土壤含盐量

Tab. 2　Changes of soil salt in different layers of cultivated land in different periods　g/kg

土层深度/cm	4 月 4 日	5 月 15 日	6 月 1 日	6 月 30 日	7 月 11 日	9 月 15 日	10 月 15 日	11 月 15 日
0 ~ 20	2.49	5.03	3.75	3.05	2.40	4.37	4.83	2.09
20 ~ 40	2.21	4.28	3.41	1.57	1.57	3.24	3.42	1.74
40 ~ 60	1.68	2.96	1.64	1.83	1.42	2.33	2.92	1.68
60 ~ 80	1.48	2.41	1.04	1.42	1.00	2.33	2.75	1.58
80 ~ 100	1.46	2.55	2.24	1.42	1.27	2.78	3.25	2.48

2.2　耕地-荒地不同土层盐分时空变化及盐分表观分析

2.2.1　插值精度交叉验证

根据研究区 8 个特征时期,利用研究区 63 个取样点,分别对土层深度 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 和 40 ~ 100 cm 进行 Universal Kriging 插值,不同时期不同土层盐分时空变化如图 6 ~ 8 所示。Universal Kriging 插值的估计方差如表 4 所示,插值方差分别为:土层深度 0 ~ 20 cm 为 0.005 ~ 0.948 dS^2/m^2;土层深度 20 ~ 40 cm 为 0.004 ~ 0.117 dS^2/m^2;土层深度 40 ~ 100 cm 为 0.013 ~ 0.282 dS^2/m^2。选取 4 月 4 日和 9 月 15 日不同土层的数据来验证插值精度。验证结果如表 5 所示,土层深度 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 和 40 ~ 100 cm 均方根误差的平均值分别为 0.048 3、0.031 9、0.016 7 dS/m;平均相对误差的平均值分别为 1.54%、-0.59% 和 0.36%;决定系数的平均值分别为 0.978、0.955 和 0.982。根据不同土层和不同时期的 Universal Kriging 插值的估计方差和均方根误差、平均相对误差和决定系数进行相互比对验证,发现插值精度满足要求,数据准确性较高。

表 3　不同时期荒地各层土壤含盐量

Tab. 3　Changes of soil salt in different layers of waste land in different periods　g/kg

土层深度/cm	4 月 4 日	5 月 15 日	6 月 1 日	6 月 30 日	7 月 11 日	9 月 15 日	10 月 15 日	11 月 15 日
0 ~ 20	4.28	3.80	4.10	4.70	8.66	10.12	10.02	3.65
20 ~ 40	2.31	2.43	2.17	2.77	2.96	3.89	5.36	2.31
40 ~ 60	2.40	3.10	3.56	3.60	3.60	4.04	5.36	2.16
60 ~ 80	2.57	3.05	4.17	4.28	4.43	4.94	6.01	2.30
80 ~ 100	2.80	3.29	4.28	4.77	4.69	4.43	7.69	2.74

2.2.2　不同土层深度盐分时空变化特征

由图 6 ~ 8 可知,各层土壤盐分的空间分布较一致,研究区荒地盐分较高,耕地盐分较低,耕地和荒地交界处出现盐分过渡带,呈现出条带状格局。各土层盐分存在较强的空间相似性,其原因为灌溉水通过淋洗耕地盐分,使耕地盐分降低,耕地地下水盐分升高,耕地地下水盐分横向补给荒地,使荒地深层盐分增加,加之荒地地势较低,地下水埋深较浅,在长期的蒸发作用下,把深层土壤以及地下水中的盐分带到土壤表层,使地表盐分升高。

2.2.3　盐分表观分析

根据式(7)、(8)、(10)、(11),计算结果如表 6 所示。在 1 m 耕地土体中,春播期(4 月 4 日—5 月 15 日)土壤返盐量 262 770 kg/hm^2,返盐率为 46%,在灌溉期(6 月 1 日—7 月 11 日),耕地盐量平均值为 320 160 kg/hm^2,较 5 月 15 日,脱盐量 250 125 kg/hm^2,脱盐率为 44%,灌溉期-秋浇前(7 月 11 日—10 月 15 日),积盐量 320 160 kg/hm^2,积盐率为 56%。秋浇后,脱盐量 252 285 kg/hm^2,脱盐率 44%。

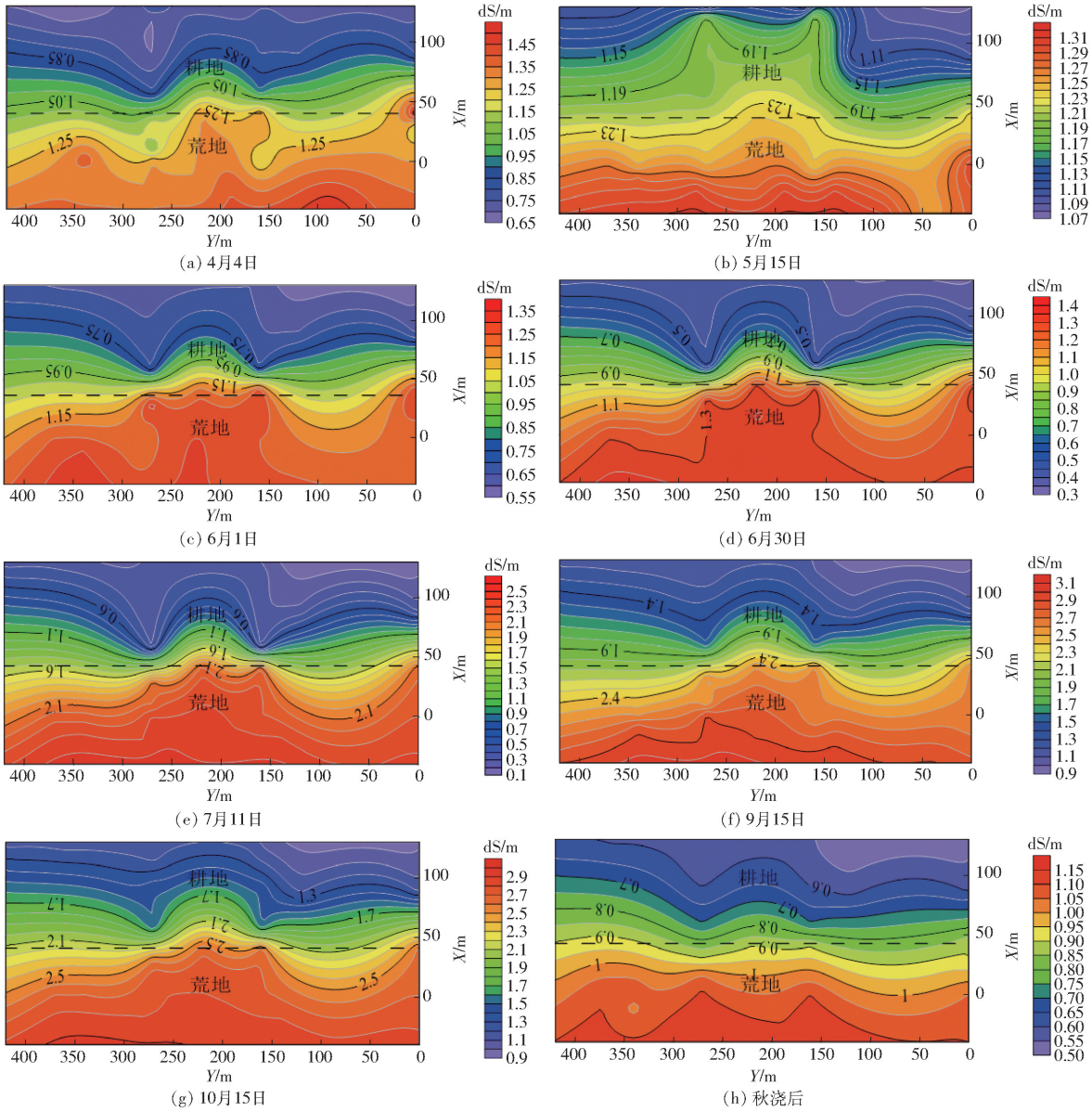

图 6 试验区 0 ~ 20 cm 土层 EC 时空变化图

Fig. 6 Temporal and spatial variation maps of EC in 0 ~ 20 cm soil layer

如表 7 所示,在 1 m 荒地土体中,春播期(4 月 4 日—5 月 15 日)土壤返盐量为 43 680 kg/hm^2,返盐率为 9%,在灌溉期(6 月 1 日—7 月 11 日),荒地盐量平均值为 679 545 kg/hm^2,较 5 月 15 日,积盐量为 169 920 kg/hm^2,积盐率为 25%,灌溉期-秋浇前(7 月 11 日—10 月 15 日),积盐量为 329 715 kg/hm^2,积盐率为 29%。秋浇后,脱盐量为 692 130 kg/hm^2,脱盐率 62%。

综上,在整个生育期,耕地 1 m 土体盐分通过灌溉期淋洗积盐率仍为 56%,秋浇后盐分没有完全排出,脱盐率为 44%,土壤深层(100 cm)有轻微积盐现象(图 5h、图 8h)。荒地 1 m 土体中,在整个生育期都处于积盐状态,积盐率为 63%,秋浇后,脱盐率为 62%,1 m 荒地的盐分在全年基本可以保持平衡。

2.3 耕地地下水、荒地地下水和海子盐分时空变化特征

2.3.1 插值精度交叉验证

利用 2018 年不同时期地下水和海子水实测盐分数据,基于 Universal Kriging 插值法,绘制地下水盐分时空变化特征图(图 9)。对插值精度进行检验,计算结果如表 8 所示。均方根误差的变化范围为 0.025 1 ~ 0.083 7 dS/m,平均相对误差为 0.845 2% ~ 3.635 1%,决定系数为 0.771 ~ 0.976。不同时期地下水盐分插值结果的精度较高。

2.3.2 盐分时空变化特征

如图 9 所示,从时间和空间变化来看,地下水和海子盐分分布特征比较一致,研究区海子电导率高,为 2.6 ~ 4.8 dS/m,耕地地下水电导率低,为 0.8 ~ 2 dS/m,荒地地下水介于二者之间,为 2 ~ 3.3 dS/m,呈

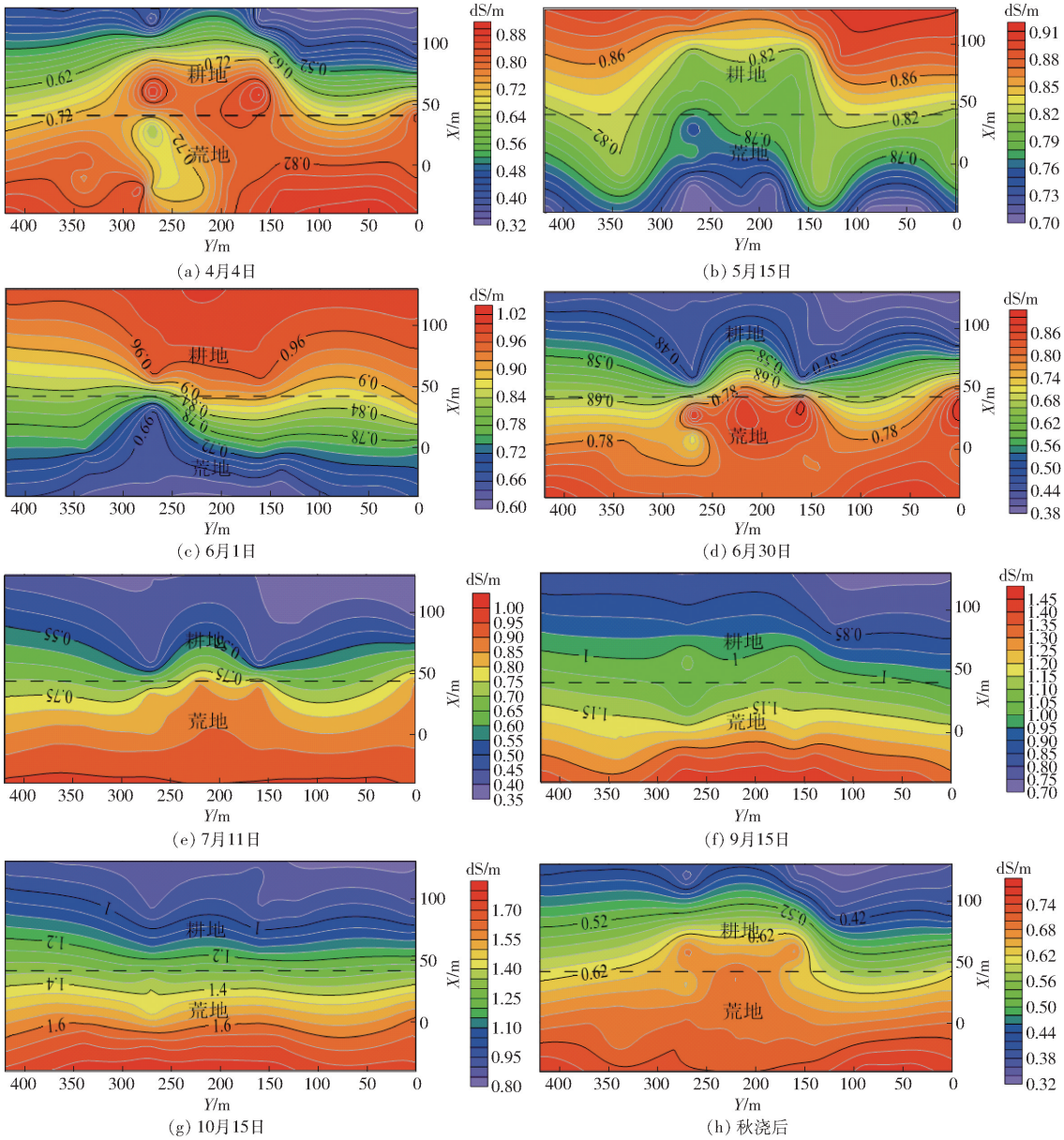

图 7　试验区 20 ~ 40 cm 土层 EC 时空变化图

Fig. 7　Temporal and spatial variation maps of EC in 20 ~ 40 cm soil layer

现出条带状分布，分布特征较为明显，存在较强的空间相似性。研究区耕地-荒地-海子地形逐渐降低，地下水埋深逐渐变浅，在灌溉期，地下水水力梯度较大，地下水由耕地向荒地再向海子方向运移[22]，被淋洗到地下水中的可溶性盐，随地下水被迁移到海子中，海子成为储盐区。

2.4　地下水埋深对土壤盐分的影响

河套灌区地下水埋深较浅、地下水中含有较多可溶性盐，由于包气带毛细水上升，把地下水中可溶性盐带到土壤表层，为了保证根系层不积盐，控制地下水埋深是一个重要因素。选取研究区 W4、W5、W6、W7、W8、W9、W10 共 7 个观测井地下水埋深与 21 个土壤根系层(0 ~ 60 cm，分 3 层)含盐量数据来分析二者之间的关系。在同一时期隔 5d 统计地下水埋深和土壤含盐量数据 1 次，地下水埋深取 7 个点的平均值，0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层含盐量分别取 21 个样点的平均值。采用 4 个时段(春播期、灌溉期、秋浇期和全生育期)地下水埋深的平均值进行相关性分析。

2.4.1　不同时期平均地下水埋深与不同土层含盐量相关性分析

利用 SPSS 软件的 Pearson 系数法，分析耕地地下水埋深与土壤盐分的相关性。如表 9 所示，在不同时期，地下水埋深和 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm 土层 EC 的 Pearson 相关系数分别为 -0.916 ~ -0.908、-0.970 ~ -0.886、-0.802 ~ -0.756，在全生育期，其 Pearson 相关系数分别为 -0.949、-0.912、-0.824。在 4 个时段，Pearson 相关性呈负相关，相关系数在 -0.970 ~ -0.756 之间变化，相关性高。

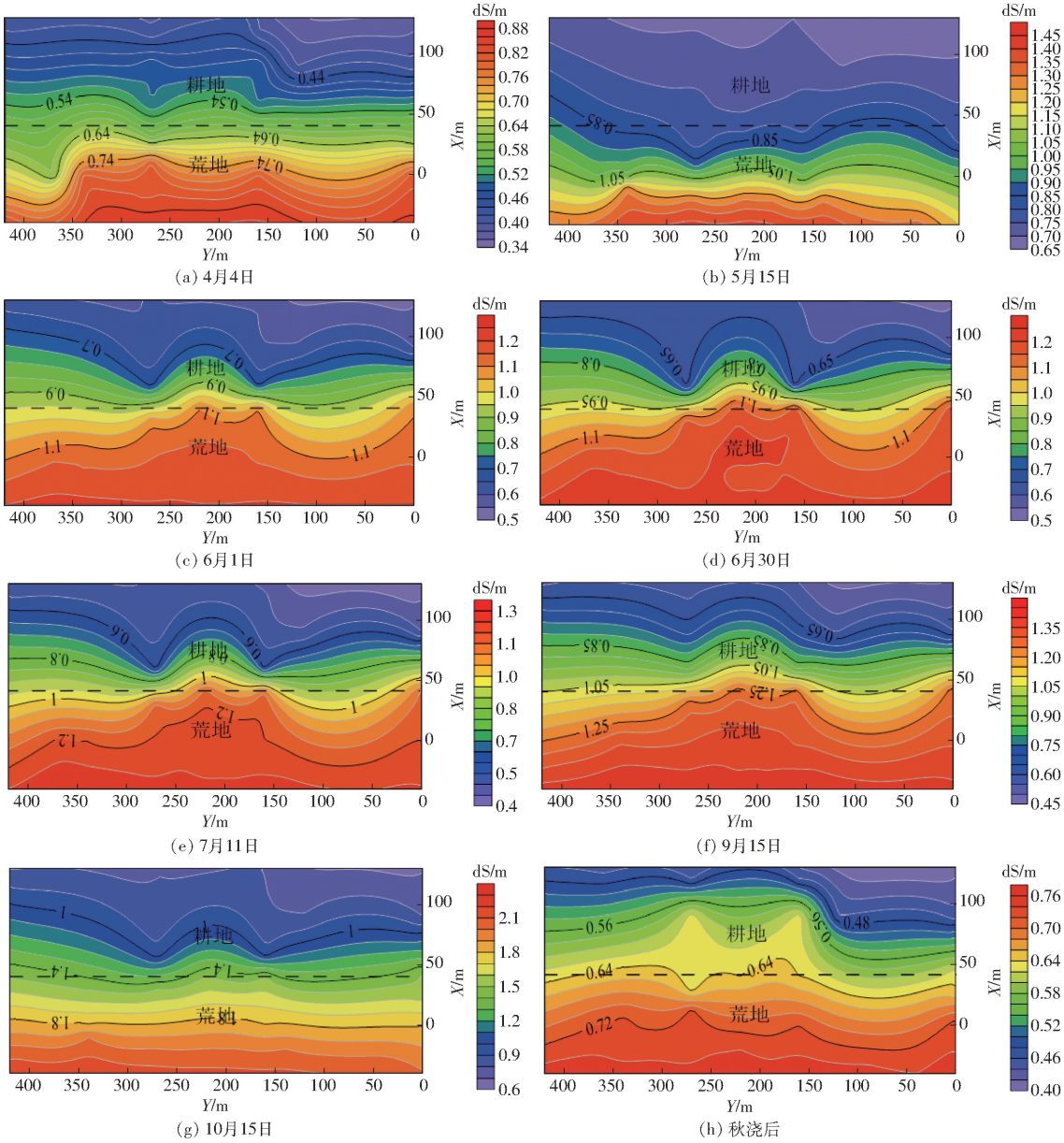

图 8 试验区 40 ~ 100 cm 土层 EC 时空变化图

Fig. 8 Temporal and spatial variation maps of EC in 40 ~ 100 cm soil layer

表 4 插值方差统计

Tab. 4 Statistics of interpolation variance

dS^2/m^2

日期	土层深度/cm		
	0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 100
4 月 4 日	0. 083	0. 034	0. 031
5 月 15 日	0. 005	0. 004	0. 065
6 月 1 日	0. 090	0. 021	0. 070
6 月 30 日	0. 182	0. 038	0. 080
7 月 15 日	0. 948	0. 058	0. 115
9 月 15 日	0. 574	0. 050	0. 125
10 月 15 日	0. 549	0. 117	0. 282
秋浇后	0. 053	0. 020	0. 013

表 5 插值精度交叉验证结果

Tab. 5 Interpolation precision cross validation parameters

监测日期	土层深度/cm	均方根误差/(dS·m^{-1})	平均相对误差/%	决定系数
4 月 4 日	0 ~ 20	0. 028 7	0. 680 7	0. 986 0
	20 ~ 40	0. 035 2	-2. 160 8	0. 972 0
	40 ~ 100	0. 016 3	-0. 709 6	0. 993 0
9 月 15 日	0 ~ 20	0. 067 9	2. 402 2	0. 969 0
	20 ~ 40	0. 028 5	0. 981 5	0. 938 0
	40 ~ 100	0. 017 0	1. 432 0	0. 970 0

2.4.2 地下水埋深与土壤盐分的关系

土壤盐分随浅层地下水埋深的增大而减小,二者之间满足指数关系,R^2不小于 0. 827 1,二者的拟合程度较高(图 10)。RHOADES 等[26]和管孝艳等[27]研究发现,当地下水埋深大于 1. 5 m,EC 小于 0. 8 dS/m 时,不会影响玉米、小麦和向日葵产量。如图 10 所示,土壤 EC 为 0. 8 dS/m 时,地下水埋

表 6　不同时期耕地各层土壤盐量

Tab. 6　Changes of soil salt in different layers of cultivated land in different periods　kg/hm²

土层深度/cm	4 月 4 日	5 月 15 日	6 月 1 日	6 月 30 日	7 月 11 日	9 月 15 日	10 月 15 日	11 月 15 日
0 ~ 20	82 781	167 129	124 600	101 210	79 570	145 072	160 541	69 563
20 ~ 40	73 441	142 112	113 343	52 052	52 052	107 505	113 634	57 639
40 ~ 60	55 929	98 333	54 553	60 807	47 048	77 235	96 998	55 929
60 ~ 80	49 008	80 029	34 540	47 048	33 289	77 485	91 286	52 594
80 ~ 100	48 341	84 657	74 567	47 048	42 045	92 287	108 047	82 489
总计	309 500	572 260	401 603	308 165	254 004	499 584	570 506	318 214

表 7　不同时期荒地各层土壤盐量

Tab. 7　Changes of soil salt in different layers of waste land in different periods　kg/hm²

土层深度/cm	4 月 4 日	5 月 15 日	6 月 1 日	6 月 30 日	7 月 11 日	9 月 15 日	10 月 15 日	11 月 15 日
0 ~ 20	136 975	121 344	131 229	150 318	277 230	323 747	320 673	116 882
20 ~ 40	73 921	77 900	69 460	88 750	94 778	124 678	171 497	73 921
40 ~ 60	76 815	100 242	114 068	115 274	115 274	129 209	171 617	69 259
60 ~ 80	82 441	97 672	133 358	136 975	141 798	158 144	192 354	73 519
80 ~ 100	95 797	112 462	146 392	163 143	160 566	151 547	263 218	93 649
总计	465 949	509 620	594 507	654 460	789 646	887 325	1 119 359	427 230

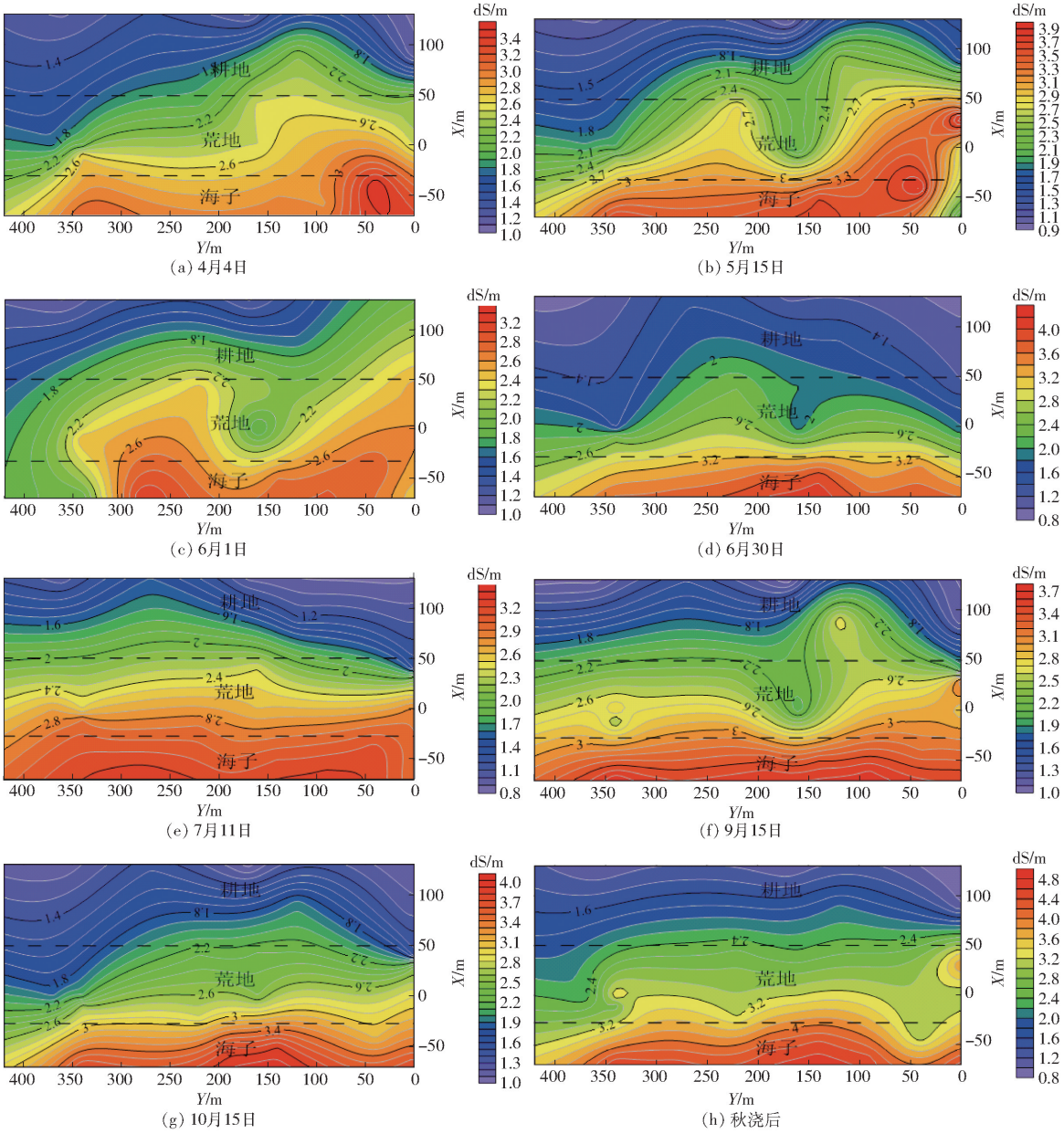

图 9　研究区地下水 EC 时空变化图

Fig. 9　Spatiotemporal variations of groundwater EC in study area

表 8 插值精度交叉验证参数

Tab. 8 Interpolation precision cross validation parameters

监测日期	均方根误差/(dS·m^{-1})	平均相对误差/%	决定系数
4 月 4 日	0.040 9	1.409 4	0.953
5 月 15 日	0.070 3	3.635 1	0.771
6 月 1 日	0.025 1	0.845 2	0.973
6 月 30 日	0.060 4	1.689 2	0.964
7 月 11 日	0.032 7	1.122 1	0.976
9 月 15 日	0.054 2	2.023 0	0.975
10 月 15 日	0.051 8	1.241 9	0.954
11 月 15 日	0.083 7	1.895 5	0.940

表 9 不同时期平均地下水埋深和不同土层含盐量相关系数

Tab. 9 Correlation coefficient between mean groundwater depth and soil salinity in different periods

时期	平均地下水埋深/m	样本数 N	土层深度/cm		
			0~20	20~40	40~60
春播期	1.40	8	-0.908**	-0.928**	-0.798**
灌溉期	0.82	12	-0.916**	-0.970**	-0.802**
秋浇前	1.90	18	-0.916**	-0.886**	-0.756**
全生育期	1.55	30	-0.949**	-0.912**	-0.824**

注：**表示在 0.01 水平上极显著相关。

深为 1.7 m，因此研究区地下水埋深大于等于 1.7 m 时对作物产量影响较小。目前耕地平均地下水埋深约为 1.5 m(图 3)，应控制地下水埋深至 1.7 m，保证作物不受盐分胁迫。当地下水埋深大于等于 2.3 m 时，土壤电导率不变，地下水埋深影响很小。现有研究成果表明[28-29]，浅层地下水埋深为 1.5 ~ 2.5 m 时，有利于作物生长，但从控制土壤盐碱化的角度看，地下水埋深宜控制在 2.0 m 左右，本文研究结果与之相符。研究区应控制灌水量或采用井灌把地下水埋深控制在 1.7 ~ 2.3 m 之间，有利于作物生长和避免发生土壤次生盐渍化。

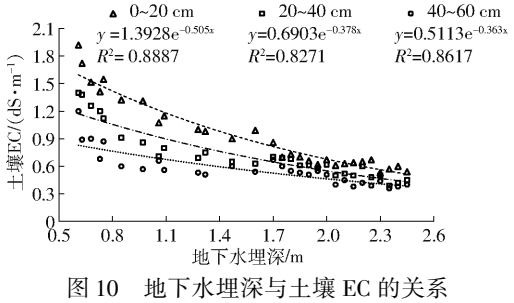

图 10 地下水埋深与土壤 EC 的关系

Fig. 10 Relationship between groundwater depth and soil EC value

2.5 荒地盐分不同来源估算

研究区灌溉时，灌溉水抬升耕地地下水水位，与邻近未灌溉的荒地和海子会产生强烈的地下水水平侧向交换。同时灌溉水会在耕地末端聚集，造成土壤水分水平渗透补给荒地。在作物生育期，荒地土壤水分补给源为荒地地下水毛细管补给和降雨。降雨矿化度可忽略不计，荒地盐分来源为耕地地下水和耕地土壤盐分水平补给，以及荒地地下水毛管补给。

荒地潜层地下水的消耗主要靠地下水的蒸散，由于研究区荒地为裸地，没有植被覆盖，所以地下水的蒸腾量为零，主要靠地下水的蒸发来消耗，而它的原动力主要依靠大气蒸发强度。由于蒸发影响，地下水通过土壤毛管作用会向上运移补给土壤水分，使地下水水位下降。

选取 5 月 15 日—9 月 15 日为计算时段(122 d)，1 m 荒地积盐总量为 377 705 kg/hm^2(表 7)。由式(1) ~ (4)可得，荒地各土层地下水补给量如图 11 所示，20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm 和 80 ~ 100 cm 土层平均地下水补给量分别为 0.52、0.49、0.52、0.51 mm/d。由图 9 和式(6)可得，荒地平均地下水矿化度为 2.6 g/L。由式(5)可得，荒地地下水补给荒地 20 ~ 100 cm 土壤盐量为 17 985 kg/hm^2，占积盐量的 5%；0 ~ 20 cm 土壤盐量增加 202 395 kg/hm^2(表 7)，占积盐量的 54%，耕地地下水迁移给荒地深层土壤盐量为 114 015 kg/hm^2，占积盐量的 30%，由式(9)可得，耕地水平渗透给荒地的盐量为 43 305 kg/hm^2，占积盐量 11%。

3 讨论

近些年，河套灌区由于节水改造工程的实施引水量逐年减少，多年形成的水盐平衡体系被打破，灌区内部盐分重新分配。在河套灌区存在很多小型湖泊，耕荒地交错且荒地分布于耕地间隙湖泊周围。耕地-荒地-海子是河套灌区典型的地类，是灌区盐分重分配的主要区域。

李亮等[3,17]指出，荒地受到毗邻灌溉耕地土壤水分水平渗透以及地下水的垂直补给，水分携带盐分逐渐向土壤表层运移，水分被蒸发而盐分最终积聚在表层土壤之中。耕荒地间的盐分运移在作物生育期总体是耕地流失盐分、荒地积聚盐分的过程，与本研究结果一致。在此基础上本研究通过构建盐分模型定量估算了耕地和荒地的盐量变化，发现在灌溉期耕地脱盐率为 44%，荒地积盐率为 25%。曾揭峰等[15]指出，耕地灌水后，盐荒地是耕地的“盐库”，在作物生育期逐渐积盐，秋浇期盐分流失，为来年继续积盐清空“盐库”，但没有指出秋浇后荒地盐分脱盐量，本文在此基础上通过定量估算荒地秋浇前后盐量变化，发现秋浇后，荒地脱盐率为 62%。王学全等[7]发现，河套灌区有较强的干排盐能力，在现状灌排工程条件下，可利用一部分弃耕荒地，用干排水措施减轻耕地盐渍化危害。本研究发现，在耕地-

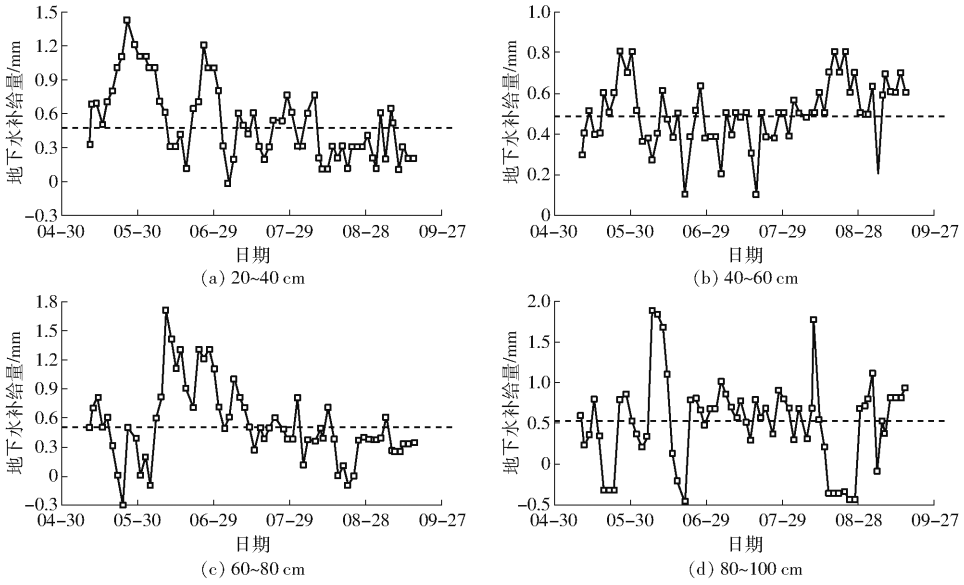

图 11　2018 年荒地地下水补给量

Fig. 11　Groundwater recharge of wasteland in 2018

荒地-海子中,荒地在全年盐分基本保持平衡,为了减轻耕地盐渍化的危害,可以利用一部分荒地来干排盐。任东阳等[10]指出,在灌溉期,灌溉田块与邻近未灌溉田块间发生剧烈的地下水横向交换,灌区内农田与荒地也具有较为密切的水力联系,土壤表层盐分被淋洗到深层,随地下水迁移到荒地。岳卫峰等[6]通过建立非农区-农区-水域的水盐运移及均衡模型,发现农区脱盐量的 75% 随地下水迁移到了非农区。王国帅等[22]通过对耕地-荒地-海子系统分别构建水量和盐量平衡模型,发现 79% 耕地地下水盐分迁移到荒地中。本文发现耕地地下水盐分迁移给荒地深层土壤盐量为 114 015 kg/hm^2,盐分迁移量较大。管孝艳等[27]以河套灌区沙壕渠灌域为研究区,运用 Kriging 插值法分析了河套灌区沙壕渠灌域土壤 EC 的空间变异特征,本文应用 Universal Kriging 插值方法,研究了土壤和地下水盐分时空分布特征,并基于交叉验证参数验证了插值精度,插值精度较高,史海滨等[4]通过反距离插值方法,研究节水改造前后沈乌灌域土壤盐分时空分布规律,并通过参数验证,插值精度较高。在今后的研究中,需对比研究 2 种插值法的精度,使水盐空间分布更加科学。地下水埋深与土壤盐分有密切关系,如何控制地下水埋深来控制土壤盐渍化是一个难题,同时还需要考虑作物、气候、土壤质地、人文因素。因此需要及时掌握地下水埋深与土壤盐分空间变异规律,能为防止与治理土壤盐渍化提供重要的理论基础与科学依据。管孝艳等[27]以河套灌区沙壕渠灌域为研究区,研究了地下水埋深和土壤盐分的关系,研究发现地下水埋深与土壤盐分满足指数关系。窦旭等[30]以河套灌区乌拉特灌域为研究区,基于统计学方法,发现荒地地下水埋深与土壤盐分满足线性关系,耕地地下水埋深与土壤盐分满足指数关系。本文研究发现地下水埋深对 0 ~ 60 cm 土层盐分满足指数关系,地下水埋深控制在 1.7 ~ 2.3 m 之间,有利于作物生长。综上,本文运用经典统计学方法,直观地反映节水改造后耕地-荒地-海子系统土壤剖面、不同土层深度盐分和地下水盐分时空分布特征,定量估算了不同时期耕地和荒地盐量变化,分析了系统盐分的表观平衡,并指出地下水埋深的控制深度,为河套灌区耕地-荒地-海子系统水盐调控提供参考依据。

4　结论

(1)在耕地-荒地-海子系统中,春播期耕地 0 ~ 40 cm 土层返盐量 4.61 g/kg,灌溉期耕地大量盐分随地下水迁移到荒地,荒地深层含盐量增加 3.46 g/kg,生育期耕地根系层(0 ~ 40 cm)含盐量增加 3.64 g/kg。秋浇前荒地含盐量是耕地的 2 倍,秋浇后荒地脱盐量是耕地的 3 倍。

(2)整个生育期耕地 1 m 土体盐分通过灌溉期淋洗,积盐率仍为 56%,秋浇后盐分没有完全排出,脱盐率为 44%,土壤深层(100 cm)有轻微积盐现象;荒地 1 m 土体积盐率为 63%,秋浇后脱盐率为 62%,荒地盐分全年基本保持平衡。

(3)在耕地-荒地-海子系统中,地下水和海子盐分空间分布特征较为一致,被淋洗到地下水中的可溶性盐随地下水迁移到海子中,海子成为系统的储盐区,盐分呈现条带状和斑块状分布,存在较强的空间相似性。

(4)地下水埋深大于等于 1.7 m 时对作物产量

影响很小,应采取措施将研究区目前地下水埋深降低 0.2 m;当地下水埋深大于等于 2.3 m 时,土壤盐分不受地下水的影响,应控制灌水量或采用井灌将地下水埋深控制在 1.7 ~ 2.3 m 之间。

(5)在生育期(5 月 15 日—9 月 15 日),荒地 1 m 土体积盐量为 377 705 kg/hm^2。地下水补给荒地 20 ~ 100 cm 土壤盐量为 17 985 kg/hm^2,占积盐量的 5%;0 ~ 20 cm 土壤盐量增加 202 395 kg/hm^2,占积盐量的 54%;耕地地下水迁移给荒地深层土壤盐量为 114 015 kg/hm^2,占积盐量的 30%;耕地水平渗透给荒地的盐量为 43 305 kg/hm^2,占积盐量 11%。

参 考 文 献

[1] 史海滨, 赤江刚夫,长崛金造,等. 盐分再分配条件下河套灌区冲洗水量的数值模拟[J]. 农业工程学报,2002,18(5):67 - 72.
SHI Haibin, AKAE T, NAGAHORI K, et al. Simulation of leaching requirement for Hetao Irrigation District considering salt redistribution after irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(5): 67 - 72. (in Chinese)

[2] XU X, HUANG G, QU Z, et al. Assessing the groundwater dynamics and impacts of water saving in the Hetao Irrigation District, Yellow River basin[J]. Agricultural Water Management, 2010, 98(2):301 - 313.

[3] 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)

[4] 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. Spatial temporal variation of soil salinity 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? file_no = 2002035&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.035. (in Chinese)

[5] 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.

[6] 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.
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. (in Chinese)

[7] 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(4): 4455 - 4460.
WANG Xuequan, GAO Qianzhao, LU Qi, et al. Salt-water balance and dry drainage desalting in Hetao Irrigating Area, Inner Mongolia[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006(4): 4455 - 4460. (in Chinese)

[8] 徐冰,邬佳宾,包玉龙, 等. 内蒙古河套灌区淖尔分布特征初步分析[J]. 内蒙古水利, 2016(10): 6 - 7.
XU Bing, WU Jiabin, BAO Yulong, et al. Analysis of lake distribution characteristics in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia[J]. Inner Mongolia Water, 2016(10): 6 - 7. (in Chinese)

[9] 赵晓瑜,杨培岭,任树梅,等. 内蒙古河套灌区湖泊湿地生态环境需水量研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(2): 126 - 129.
ZHAO Xiaoyu, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Research on eco-environmental water demand of Hetao Irrigation District in Inner Mongolia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(2): 126 - 129. (in Chinese)

[10] 任东阳,徐旭,黄冠华,等. 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, et al. 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)

[11] WU J W, ZHAO L R, 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.

[12] 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.

[13] 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)

[14] REN D, XU X, HUANG G, et al. Analyling the role of shallow groundwater systems in the water use of different land-use types in arid irrigated regions[J]. Water, 2018, 10(5): 634.

[15] 曾揭峰, 刘霞, 李就好, 等. 基于 SWAP 模型的耕地-盐荒地-沙丘-海子水盐动态分析[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(6): 540 - 549.
CENG Jiefeng, LIU Xia, LI Jiuhao, et al. Dynamic analysis of water and salt in cropland - saline alkali land - sand dunes - lake area based on SWAP model[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(6): 540 - 549. (in Chinese)

[16] 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/OL]. 水科学进展,http://

kns. cnki. net/kcms/detail/32. 1309. P. 20200521. 1839. 002. html

[17] 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）

[18] 刘廷玺，朝伦巴根. 多时段泛克立格空间估计理论及其在水文领域中的应用[J]. 水利学报，1995(2)：76－82.
LIU Tingxi，CHAO Lubagen. The theory of universal Kriging spatial estimation with multiple time period and its application in hydrology[J]. Journal of Hydraulic Engineering，1995(2)：76－82.（in Chinese）

[19] 史海滨，陈亚新. 土壤水分空间变异的套合结构模型及区域信息估值[J]. 水利学报，1994(7)：70－79.
SHI Haibin，CHEN Yaxin. Combination structure model of soil moisture spatial variability and regional information estimation[J]. Journal of Hydraulic Engineering，1994(7)：70－79.（in Chinese）

[20] 王亮，朝伦巴根，王力飞，等. 基于非列线数据的泛克立格法在地下水位空间变异性研究中的应用[J]. 水资源与水工程学报，2007，18(4)：27－31.
WANG Liang，CHAO Lunbagen，WANG Lifei，et al. Application of universal Kriging for analyzing spatial vaiation of groundwater table based on the non-equal interval date[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering，2007，18(4)：27－31.（in Chinese）

[21] 雷志栋. 土壤水动力学[M]. 北京：清华大学出版社，1998.

[22] 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 Xianyue，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）

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

[24] ZHAO Y G，LI Y Y，WANG J，et al. Buried straw layer plus plastic mulching reduces soil salinity and increases sunflower yield in saline soils[J]. Soil & Tillage Research，2016，155(1)：363－370.

[25] 史海滨，郭珈玮，周慧，等. 灌水量和地下水调控对干旱地区土壤水盐分布的影响[J/OL]. 农业机械学报，2020，51(4)：268－278.
SHI Haibin，GUO Jiawei，ZHOU Hui，et al. Effects of irrigation amounts and groundwater regulation on soil water and salt distribution in arid region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(4)：268－278. http：//www. j-csam. org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20200431&journal_id = jcsam. DOI：10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2020. 04. 031.（in Chinese）

[26] RHOADES J D，CHANDUVI F，LESCH S. Soil salinity assessment：methods and interpretation of electrical conductivity measurements[R]. Irrigation and Drainage Paper No 57，1999：11－14.

[27] 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)：199－207.
GUAN Xiaoyan，WANG Shaoli，GAO Zhanyi，et al. Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district[J]. Acta Ecological Sinica，2012，32(4)：199－207.（in Chinese）

[28] 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.
LUO Jinming，WANG Yongjie，DENG Wei，et al. Mechanism of salt-accumulation in micro-scale sodic saline soil as affected by shallow groundwater table[J]. Acta Pedologica Sinica，2010，47(2)：238－245.（in Chinese）

[29] 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.

[30] 窦旭，史海滨，苗庆丰，等. 盐渍化灌区土壤水盐时空变异特征分析及地下水埋深对盐分的影响[J]. 水土保持学报，2019，33(3)：246－253.
DOU Xu，SHI Haibin，MIAO Qingfeng，et al. Temporal and spatial analysis of soil water and salt and the influence of groundwater depth on salt in saline irrigation area[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2019，33(3)：246－253.（in Chinese）