

河套灌区根系层-深层土壤盐分动态及适宜控盐埋深

孙贯芳¹, 翟明飞¹, 王春语¹, 朱 焱², 屈忠义³, 李永红¹, 高照良^{1*}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072;
3. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘 要: 浅地下水埋深诱发的土壤次生盐碱化是干旱灌区面临的重要生态环境问题。为探讨河套灌区根系层-深层土壤盐分动态及适宜控盐埋深, 该研究基于内蒙古河套灌区隆胜研究区 68 块灌溉农田连续 2 a 生育期初和生育期末 0~1.80 m 的土壤盐分、地下水埋深、地下水盐分的监测和作物种植类型的调查, 分析了根系层-深层土壤盐分时空动态、季节性平衡机制、多个因素(如气象条件、地下水埋深、地下水矿化度、作物类型和生育期初土壤盐分等)间相互作用对生育期土壤盐分变化的影响, 探明了土壤盐分对地下水年际和季节性埋深的响应。结果表明, 根系层土壤盐分均在生育期积盐, 休耕期脱盐; 深层土壤盐分均在生育期脱盐, 休耕期积盐。作物类型、生育期初地下水埋深、生育期地下水埋深、地下水盐分及生育期初根系层土壤盐分均对生育期根系层土壤盐分变化有显著影响($P<0.05$)。地下水状况与其他各因素的相互作用对生育期根系层土壤盐分变化的影响与水文年型有密切的关系。生育期初根系层土壤盐分随着地下水埋深的增大而指数减小, 土壤盐分小于均值的取样点地下水埋深不小于 1.60 m。当年均地下水埋深小于 2.50 m, 不同土层的盐分值和盐分的降低速率随地下水埋深的增加而降低。在地下水埋深小于 2.50 m 的条件下, 以概率分布法得出根系层土壤盐分中位数对应的年均适宜临界控盐地下水埋深为 1.77 m, 土壤盐分远大于中位数或均值的取样点地下水埋深均小于该埋深。因此, 从控盐角度考虑, 建议该研究区地下水埋深生育期初应不小于 1.60 m, 年均地下水埋深应不小于 1.77 m。研究结果可为河套灌区通过灌溉制度的设计和排水措施的合理布局控制地下水埋深提供理论依据。

关键词: 土壤; 盐分; 作物; 河套灌区; 地下水; 埋深

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404071

中图分类号: S278

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-21-0091-10

孙贯芳, 翟明飞, 王春语, 等. 河套灌区根系层-深层土壤盐分动态及适宜控盐埋深[J]. 农业工程学报, 2024, 40(21): 91-100. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404071 <http://www.tcsae.org>

SUN Guanfang, ZHAI Mingfei, WANG Chunyu, et al. Root zone and deep soil salinity dynamics and suitable groundwater depth for salt control in the Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(21): 91-100. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404071 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

干旱半干旱地区过高的地下水位及地下水盐分是诱发土壤次生盐碱化的重要原因^[1]。因此, 地下水的管理对该地区灌溉农业的可持续发展有重要意义。土壤盐分在时间和空间上变异性强^[2-3], 土壤本身的变异性、作物类型的多样性和灌溉制度的不一致等会加剧灌区土壤盐分的时空变异性。干旱地下水浅埋深农业区土壤盐分问题更加严重和复杂^[4-5]。研究土壤盐分时空动态及影响因素, 有利于帮助理解土壤盐分长期演化过程的关键驱动因素, 更好地利用和管理受土壤盐分影响的农业生态系统, 实现干旱地区农业生产力的提高。

干旱灌溉农业区土壤盐分空间变异的驱动因素有土地利用类型、土壤特性、地下水埋深及矿化度、地表高程、土地种植年限、距离排水系统的距离等^[6-10]。由于试验设计上的困难, 多个因素(如气象条件、地下水埋深、作物类型和土壤盐分状况等)间相互作用对土壤盐分动态的影响往往被忽视。在区域尺度上大量土壤盐分及相关因素的调查为理解多个因素对土壤盐分的影响提供了可能。目前, 干旱农业区土壤盐分的研究主要集中在根系层作物生育期^[11-16]或休耕期^[17-18]。土壤盐分在时间和空间上的变化是连续的, 某一季节的土壤盐分往往受前一时期的土壤盐分的影响, 探求整个农业年内区域根系层-深层土壤盐分季节性动态、平衡机制和关键控制因素将有助于准确理解干旱农业区土壤盐分过程。

此外, 很多研究者讨论了防止土壤盐碱化的适宜地下水埋深。土壤学家指出, 河套平原浅层土壤在年内蒸发最强烈的季节不发生土壤盐碱化的临界地下水埋深是 2~3 m^[19]。WANG 等^[20]和 ABLIZ 等^[6]报道中国新疆地下水埋深小于 2.5 m 的地区表层土壤盐碱化是严重的。YU 等^[18, 21-23]发现, 河套灌区土壤盐分受地下水埋深影响显著, 土壤盐分与地下水埋深呈下降的指数关系, 但未明

收稿日期: 2024-04-11 修订日期: 2024-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(42307449); 国家重点研发计划项目(2023YFD2001400); 陕西省自然科学基金项目(2023-JC-QN-0411); 内蒙古自治区科技成果转化专项资金(2021CG0022)

作者简介: 孙贯芳, 助理研究员, 研究方向为农业水土资源与环境。

Email: gfsun1990@126.com

*通信作者: 高照良, 博士, 研究员, 研究方向为水土资源高效利用与水土保持。Email: gzl@ms.iswc.ac.cn

确给出地下水埋深的推荐阈值。此外,有研究发现地下水季节波动也对土壤盐碱化有较大影响^[6,8,24]。PETHERAM 等^[25]发现,澳大利亚北部的 Burdekin 灌区下游根系层土壤干旱季节不积盐的地下水埋深应在 2.0 m 以上。BENYAMINI 等^[26]的研究表明,春季地下水埋深大于 1.0 m 有利于防止以色列 Jezre 'el 峡谷土壤盐碱化。可见,地下水埋深的季节性控制对土壤盐碱化的防治有非常重要的作用。特别是在内蒙古河套灌区灌区,农田春季盐分状况对春季播前灌溉用水决策、作物种植类型的选择和出苗情况有重要影响。探明春季地下水埋深与农田盐分的关系,进而通过控制春季地下水埋深来减缓土壤盐碱化,对减少春季洗盐灌溉用水和保障作物出苗有重要意义。然而,尽管诸多研究一直在关注河套灌区的水盐调控问题,但尚未明确该地区春季-全年适宜的控盐地下水埋深。

本研究基于内蒙古河套灌区隆胜研究区 68 块灌溉农田连续 2 a 0~1.80 m 的土壤盐分、地下水埋深、地下水盐分的监测和作物种植类型的调查,分析了深层-浅层土壤盐分时空动态、影响因素,评估了土壤盐分对春季生育期初和年均地下水埋深的响应,在此基础上用频率分布等方法确定了生育期初和年均适宜地下水埋深阈值,有助于丰富农田深层-浅层土壤盐分研究,为河套灌区通过灌溉制度的设计和排水措施的合理布局控制地下水埋深提供理论依据,进而为干旱地下水浅埋灌区土壤盐分的控制提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

隆胜研究区 (40°51'50"N, 107°28'20.28"E) 位于内蒙古河套灌区永济灌域内,总土地面积 8 219.75 hm²,现状灌溉面积 5 560 hm² (见图 1)。研究区属于中温带干旱半干旱大陆性气候,冬季严寒少雪,夏季高温干旱,昼夜温差大,日照时间长,多年日照时间平均值为 3 229.9 h,是中国日照时数较长的地区之一,光、热、水同期,无霜期为 130 d 左右,适宜于农作物生长。邻近的临河气象站年均降雨 148.8 mm (1981—2010 年),蒸发量 (20 cm 蒸发皿) 年均 2 327 mm (1981—2010 年),作物生育期 5—9 月降雨占全年的 85% 以上。2017、2018 年降雨量分别是 100.5、176.2 mm,生育期降雨量分别是 53.1、156.6 mm。利用皮尔逊 III 型频率曲线对 1990—2018 年降雨量进行了分析,2017、2018 年全年降雨量频率分别为 83.56%、26.39%,分别属于偏枯水年和偏丰水年,生育期降雨频率为 93.32%、25.40%,在生育期降雨中属于特枯水年和偏丰水年。研究区内主要种植玉米、小麦、葵花、加工番茄、葫芦等,近年来如辣椒、洋葱、西红柿、豆角等经济作物也有少量种植。作物种植均覆塑料地膜,灌溉方式主要是地面灌溉,灌溉水量约 589.3 mm (西济支渠单位面积农田年均引水量 785.7 mm,渠道灌溉水利用系数 0.75)。

研究区地质构造为河湖相交替沉积形成的湖相和河

相沉积层,0~1.80 m 土壤质地以粉砂质壤土、粉土及砂质壤土为主,容重一般在 1.34~1.44 g/cm³,孔隙度为 46.43%~49.73%,水平方向土壤质地分布极不均匀,空间变异强烈。0~1.80 m 垂直方向上土体构型较为复杂,黏土、细砂夹层、砂黏土和粉砂土互层的土体结构较为常见。该地区浅层含水层上部是以黏砂与粉砂土、黏土为主的弱透水层,下伏以粉细砂、中细砂为典型的上细下粗二元结构。

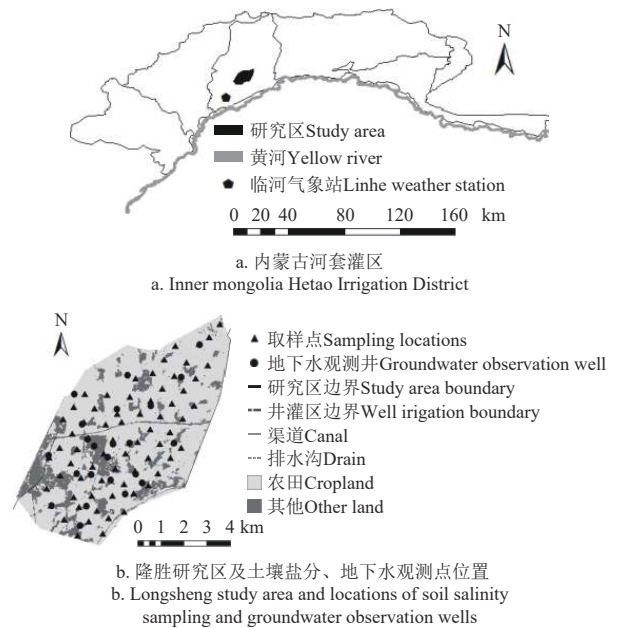


图 1 研究区及土壤盐分、地下水观测点位置

Fig.1 Schematic of study area and locations of soil salinity sampling and groundwater observation wells

1.2 土壤和地下水样本采集

在研究区内近乎均匀地布置了 68 个农田土壤水盐观测点 (见图 1), 分别于 2017 年 5 月初、2017 年 9 月末、2018 年 5 月初、2018 年 9 月末对 0~1.80 m 深度范围内每 0.20 m 一层的土壤水盐进行了 4 次详细观测。考虑到区域水盐的强烈变异性,每次取样尽可能取到农田的中央位置,一个观测点取 2 个重复。秋季在膜内和膜外裸地分别取一个孔,4 次共获取 4 582 个有效样本。研究区共有地下水观测井 23 眼,利用 HOBO 水位计每 4 h 记录一次数据,人工观测每 10 d 一次。于 2018 年 5 月自浅层地下水观测井取样,装入聚乙烯塑料瓶,带回实验室测定盐分含量。

春季部分观测点地下水埋深很浅,取到地下水面处停止取样,并同时记录该点春季取样时的地下水埋深。秋季取样时,记录各取样点的种植作物,并调查各种作物的灌水情况 (灌水次数) 和作物产量状况等。

1.3 盐分测定及地下水埋深均值

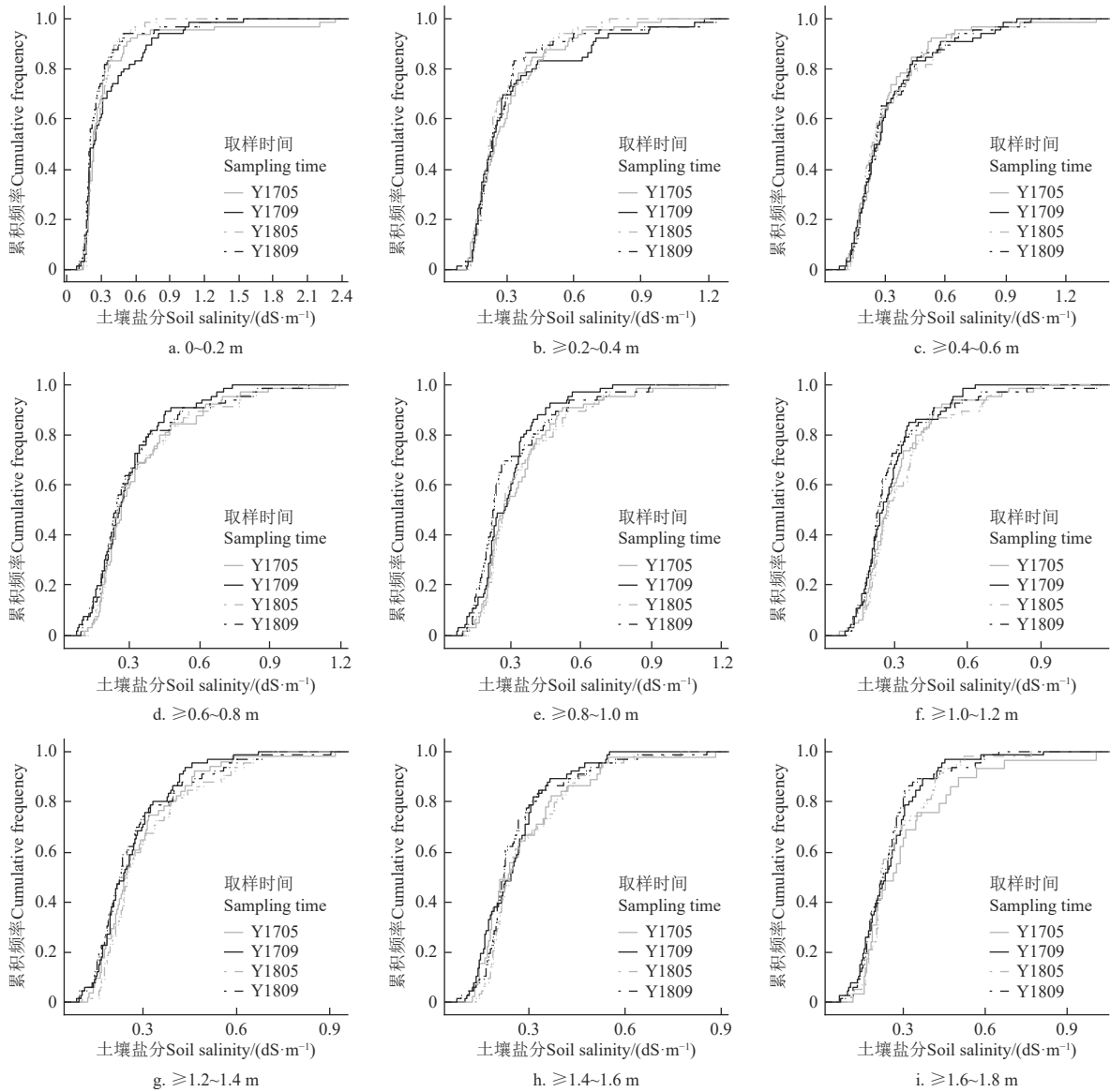
土壤盐分用电导率仪 (DDSJ-308F, 上海雷磁) 测试水土比为 5:1 的土壤浸提液的电导率;地下水盐分含量采用称量法测定。生育期及年均地下水埋深为生育期及年内历次观测的均值。

2 结果与分析

2.1 土壤盐分时空统计特征

图 2 为 4 次取样时间不同土层土壤盐分累积频率分布曲线。单条频率曲线显示该研究区大多数土层的土壤盐分变化范围在 $0.1 \sim 1.2 \text{ dS/m}$, 主要集中在 $0.1 \sim 0.4 \text{ dS/m}$ 。不同时间的土壤盐分累积频率曲线相互靠近, 说明土壤盐分在时间上是较为稳定的。不同时间所有

取样点土壤盐分的空间均值和其标准差如图 3 所示。不同土层土壤盐分的空间均值在 $0.20 \sim 0.35 \text{ dS/m}$ 间变化, 且有明显的季节性特征。土壤盐分标准差的变化范围为 $0.11 \sim 0.39 \text{ dS/m}$, 大多在 $0.11 \sim 0.20 \text{ dS/m}$ 。 $0 \sim 0.40 \text{ m}$ 土层 4 次取样时间的标准差间的差值明显大于其他土层 (图 3b)。经进一步分析, 土壤盐分的标准差接近空间均值的一半, 且随着土壤盐分的增大而指数增大 (R^2 为 0.59)。



注: Y1705、Y1709、Y1805、Y1809 分别表示 2017 年 5 月初、2017 年 9 月末、2018 年 5 月初、2018 年 9 月末, 下同。

Note: Y1705, Y1710, Y1805, and Y1809 represent the beginning of May 2017, the end of September 2017, the beginning of May 2018, and the end of September 2018, respectively. It's similarly hereinafter.

图 2 4 次取样时间不同深度土壤盐分累积频率分布

Fig.2 Distribution of soil salt accumulation frequency at different depths during 4 times of sampling

2.2 土壤盐分季节性平衡

由图 3a 可知, 土壤盐分的剖面分布具有明显的季节性变化特征。5 月初 (Y1705 和 Y1805), 整个剖面的土壤盐分呈倒“C”型, $>0.6 \sim 1.0 \text{ m}$ 土壤盐分值明显大于 $0 \sim 0.6 \text{ m}$ 和 $>1.0 \sim 1.8 \text{ m}$ 。生育期末, 忽略 Y1809 时期由于大的降雨导致的 $0 \sim 0.4 \text{ m}$ 较小的盐分含量, 土壤盐分自表层至 1.8 m 逐渐减小。根系层 $0 \sim 0.6 \text{ m}$ 土壤盐

分在 Y1705、Y1709、Y1805 和 Y1809 分别是 0.32 、 0.34 、 0.29 和 0.30 dS/m (见表 1)。2017 年和 2018 年生育期末与 5 月初相比, 土壤盐分提高了 0.02 和 0.01 dS/m , 生育期根系层土壤积盐。而在休耕期 (生育期末至次年 5 月初, 也即 Y1709 到 Y1805), 根系层土壤盐分降低了 14.7% , 处于脱盐状态。 $>0.6 \sim 1.2 \text{ m}$ 土壤盐分在 4 个观测期依次是 0.33 、 0.28 、 0.33 和 0.29 dS/m , $>1.2 \sim 1.8 \text{ m}$

分别是 0.29、0.26、0.29 和 0.26 dS/m。5 月初 >0.6~1.2 m 和 >1.2~1.8 m 土壤盐分明显大于 9 月末，深层土壤 (>0.6~1.8 m) 生育期脱盐，休耕期积盐。总之，对区

域平均土壤盐分而言，根系层土壤盐分和深层土壤盐分呈相反的趋势，意味着根系层土壤盐分的积累伴随着下层土壤盐分的降低，反之亦然。

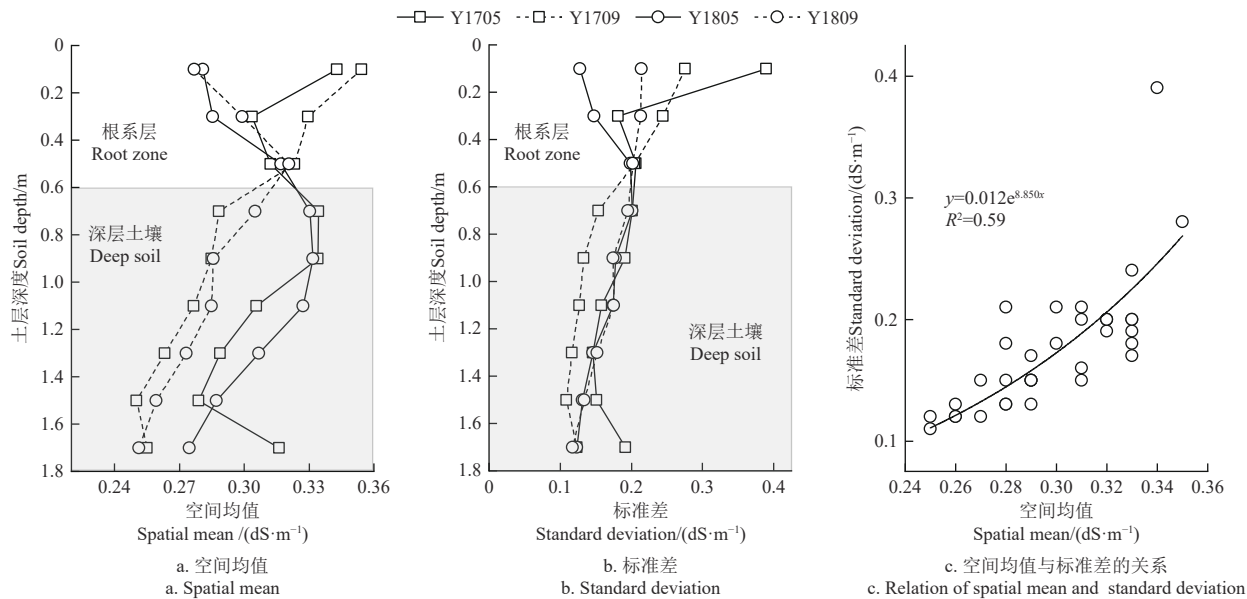


图 3 不同时间所有取样点土壤盐分的空间均值和其标准差

Fig.3 Soil salinity mean and standard deviation in space at different sampling times

表 1 土壤盐分的空间均值和季节性变化

土层 Soil depth/m	Table 1 Spatial mean and seasonal changes of soil salinity				(dS·m ⁻¹)		
	土壤盐分 Soil salinity				土壤盐分季节性变化 Soil salinity seasonal changes		
	Y1705	Y1709	Y1805	Y1809	2017S1	2017S2	2018S1
0~0.6	0.32	0.34	0.29	0.30	0.01	-0.04	<0.01
>0.6~1.2	0.33	0.28	0.33	0.29	-0.04	0.05	-0.04
>1.2~1.8	0.29	0.26	0.29	0.26	-0.03	0.04	-0.03
0~1.8	0.32	0.29	0.31	0.28	-0.03	0.02	-0.02

注：2017 年和 2018 年生育期土壤盐分的变化标记为 2017S1 和 2018S1，休耕期 Y1709 到 Y1805 土壤盐分的变化标记为 2017S2。某一季节内土壤盐分的变化是季节末土壤盐分值与季节初盐分值的差值。
Note: The changes of soil salinity in the crop growing period of 2017 and 2018 were labeled as 2017S1 and 2018S1, and the changes of soil salinity in the fallow period from Y1709 to Y1805 were labeled as 2017S2. The change of soil salinity in a certain season is the difference between the soil salinity at the end of the season and the salinity at the beginning of the season.

2.3 生育期土壤盐分变化影响因素

作物类型、生育期初地下水埋深、生育期地下水埋深、地下水盐分及生育期初根系层土壤盐分 5 个因素及其交互作用对根系层生育期土壤盐分变化的影响如图 4 和表 2 所示。玉米地和小麦地根系层土壤盐分在生育期是降低的，而葵花地、加工番茄地、籽瓜地和其他经济作物地生育期末盐分较生育期初高（图 4a）。如图 4b，生育期初地下水埋深越小，根系层生育期土壤盐分变化的范围越大。生育期根系层土壤盐分增加量有随生育期平均地下水埋深和生育期初根系层土壤盐分含量增大而减小，随地下水盐分含量增大而增大的趋势（图 4d）。作物类型、生育期初地下水埋深、生育期地下水埋深、地下水盐分及生育期初根系层土壤盐分等均对生育期土壤盐分的变化有显著影响（ $P<0.05$ ，表 2）。单一因素中，2017 干旱年生育期初根系层土壤盐分含量对生育期根系层土壤盐分的变化影响最大，而 2018 湿润年影响最大的因素是生育期初地下水埋深。

从多个因素相互作用来看，作物类型和生育期初地

下水埋深相互作用在 2017 干旱年和 2018 湿润年均对根系层土壤盐分的变化有极显著影响（ $P<0.01$ ）。2017 干旱年，地下水状况（包括生育期初埋深、生育期平均埋深和地下水盐分）与作物类型间相互作用显著影响生育期盐分变化（ $P<0.05$ ）。其中，作物类型、生育期初地下水埋深和生育期平均地下水埋深对生育期根系层盐分变化影响最大，生育期平均地下水埋深和盐分间相互作用对生育期根系层盐分变化影响次之。2018 湿润年，生育期初根系层土壤盐分与作物类型、地下水埋深、地下水盐分间相互作用对生育期根系层盐分变化有显著影响（ $P<0.05$ ），其中作物类型与生育期初地下水埋深相互作用及作物类型、生育期平均地下水埋深和生育期初根系层土壤盐分对生育期根系层土壤盐分变化有较大的影响。可见，作物类型、生育期初地下水埋深、生育期地下水埋深、地下水盐分及生育期初根系层土壤盐分均是影响生育期根系层土壤盐分变化的关键因素，地下水状况对生育期根系层土壤盐分变化有非常重要的影响，且各因素与其的相互作用对生育期根系层土壤盐分变化的贡献与水

文年型有密切的关系。地下水盐分是各因素长期作用的结果，短期难以改变，而地下水埋深对灌溉、排水等响

应迅速，通过灌溉制度的设计和排水措施的合理布局控制地下水埋深是当前该研究区盐分控制行之有效的办法。

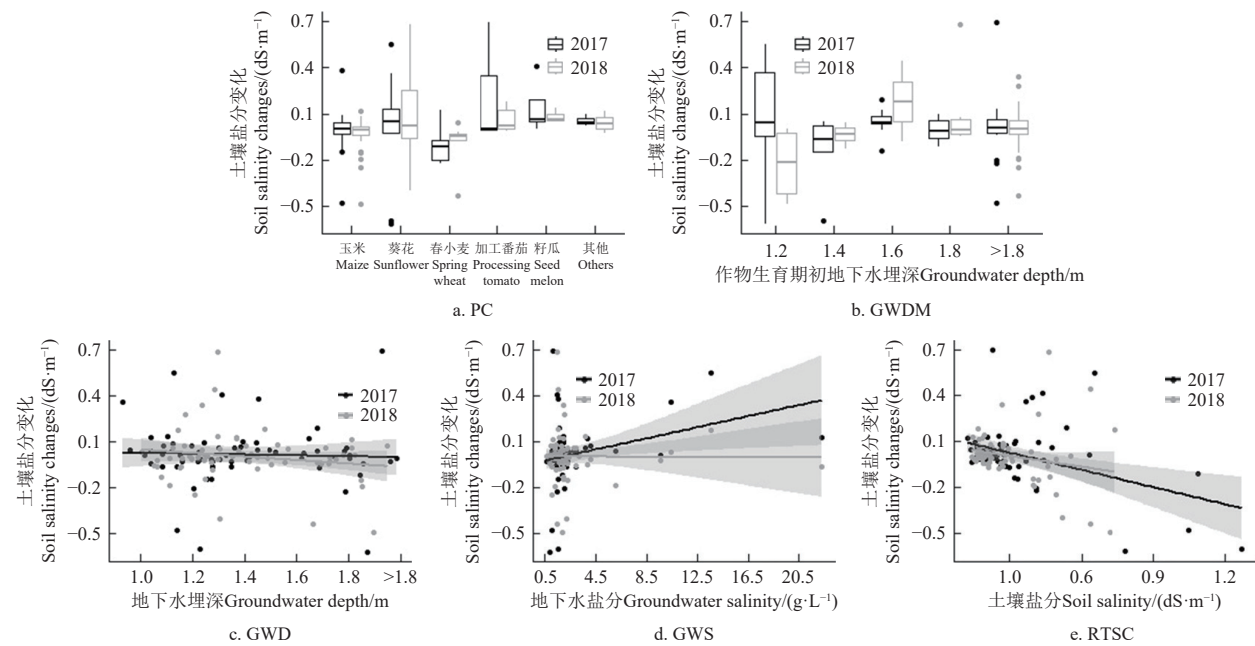


图 4 各指标对作物生育期根系层土壤盐分变化的影响

Fig.4 Effect of each factor on root zone soil salinity changes during crop growing period

表 2 生育期根系层土壤盐分变化的多因素方差分析			
Table 2 Multi-factor variance analysis for root zone soil salinity change during crop growing period			
因素 Factors	F 值 F value		
	2017 干旱年 Arid year of 2017	2018 湿润年 Wet year of 2018	
PC	20.81**	10.47**	
GWDM	16.61**	23.19**	
GWD	33.91**	14.27**	
GWS	63.26**	12.47**	
RTSC	111.86**	7.35*	
PC×GWDM	20.36**	26.00**	
PC×GWD	10.27**	—	
GWDM×GWD	7.26**	4.42*	
GWDM×GWS	12.19**	—	
GWD×GWS	21.03**	—	
GWD×RTSC	20.55**	—	
GWS×RTSC	13.25**	—	
PC×RTSC	—	3.67*	
PC×GWD×RTSC	—	10.64**	
PC×GWS×RTSC	—	9.17**	
GWDM×GWS×RTSC	—	5.47*	
PC×GWDM×GWD	52.88**	—	
PC×GWDM×GWS	20.43**	—	

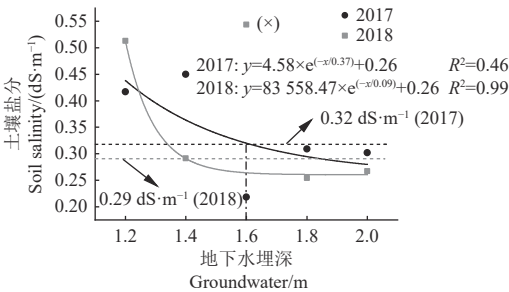
注：**表示在 0.01 水平上显著；*表示在 0.05 水平上显著。
Note: ** indicates significant at 0.01 level, and * indicates significant at the 0.05 level.

2.4 生育期初土壤盐分对地下水埋深的响应

合理的地下水埋深控制阈值是土壤盐分控制的关键。5 月初，不同地下水埋深下根系层土壤盐分状况如表 3 所示。2017 年生育期初，地下水埋深小于等于 1.40 m 取样位置处的根系层土壤盐分显著大于地下水埋深大于 1.40 m 土壤盐分 ($P < 0.05$)。2018 年地下水埋深小于等于 1.20 m 和等于 1.60 m 的根系层土壤盐分显著大于其他埋深的土壤盐分 ($P < 0.05$)。从 2 a 的结果来看，生育期初根系层土壤盐分均随着地下水埋深的增大而指数减小 (见图 5)。

表 3 5 月初不同地下水埋深下根系层土壤盐分								
Table 3 Root zone soil salinity under different groundwater depth in early May (dS·m ⁻¹)								
地下水埋深 Groundwater depth/m	2017				2018			
	n	Mean ± SD	Q25	Q75	n	Mean ± SD	Q25	Q75
≤1.20	11	0.417±0.173a	0.293	0.458	4	0.513±0.151a	0.434	0.568
1.40	5	0.450±0.462a	0.209	0.332	4	0.291±0.131b	0.203	0.348
1.60	11	0.218±0.118b	0.159	0.200	3	0.544±0.256a	0.446	0.689
1.80	11	0.309±0.273b	0.166	0.336	6	0.254±0.109b	0.205	0.252
>1.80	27	0.302±0.181b	0.207	0.301	50	0.267±0.117b	0.186	0.292

注：n 是取样位置数；SD 是土壤盐分均值的标准差；Q25 和 Q75 是土壤盐分的下四分位数和上四分位数；相同字母表示各组间盐分无显著差异 ($P > 0.05$)。
Note: n is the number of sampling locations; SD is the standard deviation of the mean soil salinity; Q25 and Q75 are the lower quartile and upper quartile of soil salinity. The same letter indicates no significant difference in salt values between groups ($P > 0.05$).



注：(x) 表示该数据点未纳入模型，主要是由于该点样本较少 (仅有 3 个)，盐分变异大，数据代表性不足，且加上该点数据的规律与土壤盐分随地下水埋深指数下降的一般规律相违背。
Note: (x) indicates that this data point was not included in the model. It mainly because that there were only 3 samples for this point, and data representativeness is insufficient with large soil salinity variations in salinity. In addition, the fact that the pattern of data added to this point is contrary to the general rule of soil salinity exponential decreasing with groundwater depth.

图 5 生育期初根系层土壤盐分与地下水埋深的关系

Fig.5 Relationship between root zone soil salinity and groundwater depth at the beginning of crop growing period

从拟合方程来看(图5),随着地下水埋深的增大,生育期初土壤盐分趋于0.26 dS/m,并不随地下水埋深的增大而无限减小。2017、2018 年生育期初根系层土壤盐分均值(分别为0.32 和0.29 dS/m)对应的地下水埋深分别为1.60 和1.40 m。以生育期初根系层土壤盐分均值为基准确定生育期初地下水埋深阈值,建议生育期初控制地下水埋深不小于1.60 m。

2.5 土壤盐分对年均地下水埋深的响应

该研究区地下水埋深年内循环变化。用克里金插值方法获得的年内(2017 年5 月—2018 年5 月)地下水平均埋深的空间分布如图6a。研究区东部、东北部、西南部和南部地下水埋深小于1.50 m,中部井灌区(位置见图1)局部地下水埋深大于3.00 m。0~0.60、>0.60~1.20、>1.20~1.80 和0~1.80 m 土层深度范围内,4 次取样土壤盐分平均值的空间分布如图6b~图6e。较高的土壤盐分分布在研究区的东部、东北部和西南部,

较低的土壤盐分是在研究区的中部和南部。土壤盐分的空间分布与地下水埋深相反。各取样点土壤盐分时间均值与地下水埋深的关系如图7。当地下水埋深小于2.50 m,不同土层的盐分值和盐分的降低速率随地下水埋深的增加而降低,地下水埋深达到2.50 m 时土壤盐分的降低速率几乎接近于0,说明地下水埋深达到2.50 m 后对土壤盐分基本无影响。但需要注意的是,该研究区当地下水埋深大于2.50 m 后,土壤盐分随地下水埋深增大而升高趋势,考虑到地下水埋深大于2.50 m 后毛管上升水量较小,地下水埋深对土壤盐分影响微弱,土壤盐分升高主要是由于井灌区长期(地下水平均埋深3.10 m)灌溉含盐量高的地下水(含盐量为1.35 g/L)所致。因此,渠灌区土壤盐分不受地下水影响的临界年均地下水埋深为2.50 m。需要注意的是,该埋深对应的是区域土壤盐分的最小值,显然不是年均适宜临界控盐埋深。

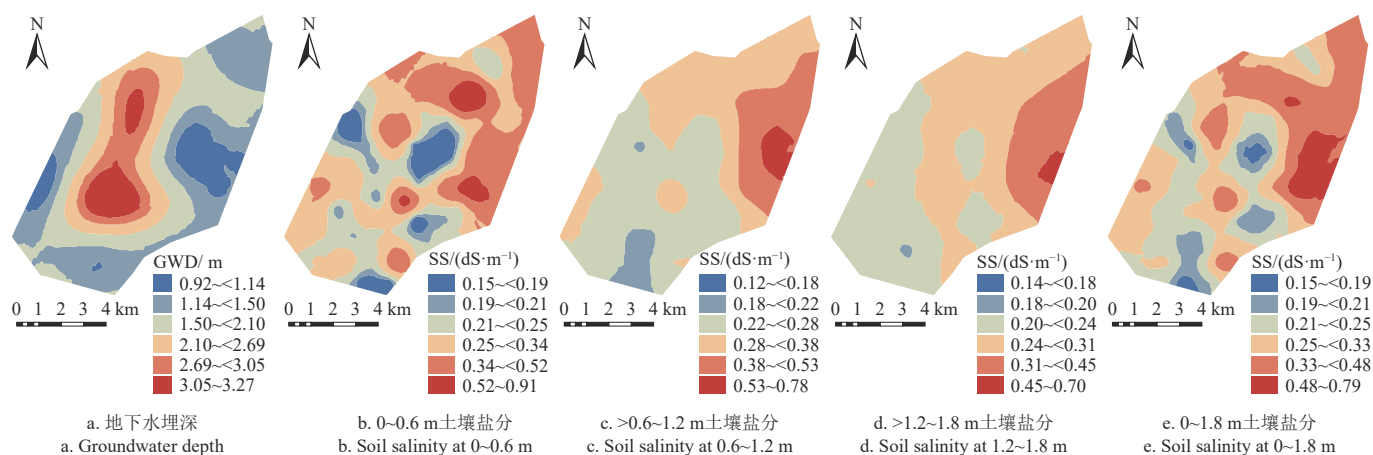


图6 2017—2018 年平均地下水埋深的空间分布图和4 次取样时间土壤盐分均值的空间分布

Fig.6 Spatial pattern of average groundwater depth and spatial pattern of average soil salinity over 4 sampling times at the depth of 0~0.60 m, >0.60~1.20 m, >1.20~1.80 m, and 0~1.80 m

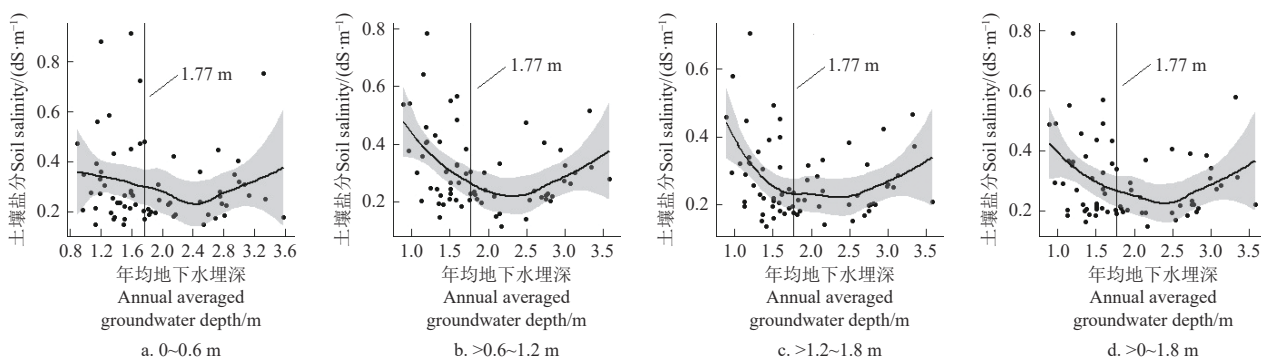


图7 4 次取样土壤盐分均值与年均地下水埋深的关系

Fig.7 Relationship between annual averaged groundwater depth and soil salinity at 4 sampling times

根系层土壤盐分对作物生长最为关键,本文以根系层土壤盐分为基础确定年均地下水埋深阈值。考虑到土壤盐分采样点与地下水采样点并非一一对应,本文采用概率分布法以中位数为界确定适宜年均地下水埋深,即认为土壤盐分的中位数对应地下水埋深的中位数,地下水埋深在该中位数以上对应的盐分小于土壤盐分中位数,

反之大于土壤盐分中位数。该研究区土壤盐分不受地下水影响的临界年均地下水埋深为2.50 m,本研究选取0~2.50 m 埋深范围内的实测土壤盐分进行分析。根系层土壤盐分、年均地下水埋深的频率分布见图8。排序50%的土壤盐分为0.26 dS/m,小于土壤盐分均值0.32 dS/m,这主要是由于土壤盐分右侧拖尾严重特异值

较多所致。年均地下水埋深距离中位数最近的分别是 1.68 和 1.86 m，对应的百分位分别是 46.9% 和 53.1%，线性插值得到的年均地下水埋深均值是 1.77 m。该研究区年均适宜临界控盐地下水埋深推荐为 1.77 m。同时，由图 7 可知，土壤盐分远大于中位数或均值的取样点也都基本出现在小于 1.77 m 的地下水埋深情况下，可见，1.77 m 作为该研究区适宜的控盐埋深是合理的。

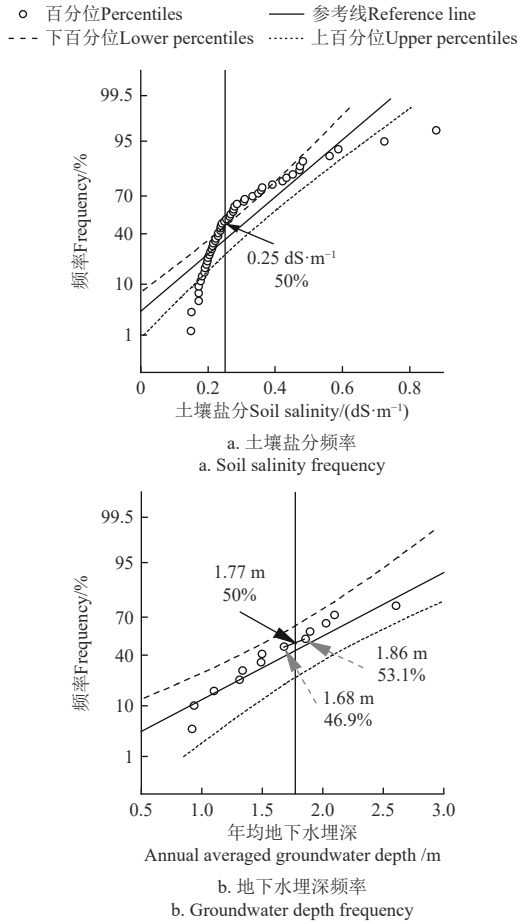


图 8 根系层盐分、年均地下水埋深频率及适宜年均地下水埋深的确定

Fig.8 Frequency of root zone soil salinity, annual groundwater depth and determination of suitable annual groundwater depth

3 讨论

根系层、深层土壤以及作物生育期、休耕期土壤盐分的变化呈相反的趋势，根系层土壤盐分的增加或者作物生育期土壤盐分的增加伴随着深层土壤及休耕期土壤盐分的降低，反之亦然。这种不同土层间土壤盐分的季节性平衡机制也被 WALTER 等^[15]在泥炭地的上层土壤和下层土壤中发现，LU 等^[27]也报道了河套灌区一个典型试验田整个农业年内的盐分平衡机制。土壤盐分的平衡是灌溉、降雨和毛管上升水带入土壤的盐分和灌溉、降雨淋滤出土壤的盐分共同作用的结果。该研究区的地下水埋深较浅，生育期大量的盐分随毛管上升水进入根系层，导致了根系层土壤盐分的积累^[14, 28]。秋浇灌溉是当地盐分淋洗的主要方式，这一传统灌溉所用的水量占据了年内农业用水的 30% 以上^[28]。根系层土壤盐分在生

育期积盐，休耕期脱盐，这种盐分的季节性变化是由该研究区特殊的灌溉实践决定的。该研究发现从 Y1709 到 Y1805，根系层土壤盐分降低了 14.7%，这与孙贯芳等^[29](2017)报道的用 180 mm 黄河水秋浇后次年田间小区土壤盐分降低 10.86%~26.14% 相一致。休耕期深层土壤 (0.6~1.8 m) 盐分是增加的，这说明秋浇灌溉不能有效淋洗深层土壤盐分。这是因为该地区地势非常平缓，坡度仅有 0.2‰^[30]，排水系统不完善，排水管理陈旧落后，淋滤水不能及时排出研究区，导致土壤盐分积累在深层土层中。此外，秋浇后的冻融也对土壤盐分有着复杂的影响，其机制目前尚不十分明确。总之，区域土壤盐分的季节性变化是灌溉排水措施、水文地质条件和气候状况共同作用的结果。

具体来看，作物类型、生育期初地下水埋深、生育期地下水埋深、地下水盐分及生育期初根系层土壤盐分等因素均对生育期盐分变化有显著影响。尽管该研究区同一作物灌溉次数差别不大，比如葵花灌水 2~3 次，玉米灌水 5~6 次，但由于农民的灌水习惯不一样，灌水定额会有差距，每个取样点灌溉定额的准确获取并非易事。但是作物类型决定总的灌溉水量，不同作物生育期灌溉水量有非常大的差别。本文用作物类型间接反映灌溉水量对生育期根系层盐分变化的影响。此外，作物类型也影响灌水时间。研究区玉米、小麦整个生育期都可以进行灌溉，生育期盐分以脱盐为主。而葵花、加工番茄、籽瓜及其他经济作物为防止倒伏或果实腐烂，灌溉主要是集中在花蕾期以前，之后主要消耗深层土壤水分和地下水，引起根系层积盐。因此，作物类型主要影响灌溉制度，进而对生育期根系层土壤盐分变化产生显著影响 ($P < 0.05$)。生育期根系层土壤盐分的变化幅度随土壤初始盐分含量的增大而增大，这主要是由于土壤盐分含量越大，淋滤水或上升水的盐分浓度越大，相同的水分通量条件下，根系层交换的盐量越大，盐分变化越多。此外，生育期根系层土壤盐分增量随生育初期根系层土壤盐分的增大而减少，这可能由于土壤盐分含量大的地块生育期灌水量多用于淋盐的结果。因此，土壤盐分的变化与它自身值的大小密切相关。

地下水对于干旱半干旱地下水浅埋深区的作物生长和生态环境有着非常重要的作用^[16, 31]。地下水浅埋深地区作物对地下水的利用量决定着根系层土壤盐分状况^[5, 28]，地下水埋深、地下水矿化度、灌水频率和灌溉水量、作物类型、土质等均影响地下水利用量^[31]，进而影响土壤盐分状况，特别是干旱年，作物对地下水的利用是增强的^[32-33]，更多盐分积累在了根系层，2017 干旱年大多数作物生育期根系层土壤盐分的增加量均大于 2018 湿润年。地下水埋深是决定作物对地下水利用量大小的最重要因素。因此，在根系层土壤盐分的管理中，地下水埋深包括季节性埋深的管理特别重要。一些研究表明，在地下水埋深为 0.70~1.50 m，来自地下水的毛细上升水能够满足 20%~40% 的蒸散量^[32, 34]。在河套灌区，20%~50% 的蒸散量来自浅层含水层^[14, 35]。地下水浅埋深区毛管上

升水对作物蒸散量的贡献对缓解水资源短缺有着积极作用,同时也导致了根系层土壤盐分的快速积累,这是造成土壤盐碱化的主要原因^[10]。可见,既有利于作物生长又有利于土壤盐分控制的地下水埋深是不存在的。本研究从土壤盐分控制的角度提出有利于土壤盐分控制的生育期初地下水埋深阈值为 1.60 m。CUI 等^[36]综合考虑土壤热湿条件,推荐的河套灌区合理冻前水位埋深为 1.00 m。推荐的生育期初地下水埋深 1.60 m 较冻前提高了 0.60 m,地下水给水度按 0.07 计算,该时段地下水储水减少量为 42.00 mm,加上该时段土壤储水量的减少量 28.88 mm^[37],基本与冻融期水分的耗散量 60.00 mm 相接近^[38]。为此,推荐的生育期初地下水埋深阈值 1.60 m 是与合理冻前水位埋深 1.00 m 吻合的,便于通过秋浇调控,在实践上易于操作。建议的年内平均地下水埋深临界深度是 1.77 m,该值略小于 ZHANG 等基于实测数据和遥感推荐的河套灌区杨树适宜生态地下水埋深 1.87 m^[39],说明该临界控盐地下水埋深对灌区生态是有利的,同时也在西北干旱区适宜生态地下水埋深范围(1.60~3.90 m)内^[40]。同时,由图 7 可知,土壤盐分远大于中位数或均值的取样点也都基本出现在小于 1.77 m 的地下水埋深情况下。因此,1.77 m 作为该研究区适宜的控盐埋深是合理的。

4 结 论

基于内蒙古河套灌区隆胜研究区 68 块灌溉农田连续 2 a 的土壤盐分、地下水埋深、地下水盐分的监测和作物种植类型的调查,分析了土壤盐分时空动态和季节性平衡特征、生育期土壤盐分变化的影响因素及土壤盐分对地下水埋深的响应,取得的主要结论如下:

1) 根系层土壤盐分生育期积盐,休耕期脱盐;深层土壤盐分在生育期脱盐,休耕期积盐,根系层-深层土壤盐分的变化总在生育期和休耕期表现为相反的趋势。

2) 作物类型、生育期初地下水埋深、生育期地下水埋深、地下水盐分及生育期初根系层土壤盐分均是影响生育期根系层土壤盐分变化的关键因素,通过灌溉制度的设计和排水措施的合理布局控制地下水埋深是当前该研究区盐分控制行之有效的办法。

3) 以生育期初根系层土壤盐分均值为基准确定生育期初地下水埋深阈值,建议生育期初控制地下水埋深不小于 1.60 m。

4) 从全年来看,当地下水埋深小于 2.50 m,不同土层的盐分值和盐分的降低速率随地下水埋深的增加而降低。以概率分布法得出的年均适宜临界控盐地下水埋深为 1.77 m,土壤盐分远大于中位数或均值的取样点地下水埋深都小于该埋深。

[参 考 文 献]

- [1] SCHOUPS G, HOPMANS J W, YOUNG C A, et al. Sustainability of irrigated agriculture in the San Joaquin Valley, California[J]. *PNAS*, 2005, 102: 15352-15356.
- [2] 孙贯芳, 高照良, 朱焱, 等. 时空克里金评估河套灌区土壤盐分时空格局[J]. *干旱区研究*, 2023, 40(2): 182-193.
SUN Guanfang, GAO Zhaoliang, ZHU Yan, et al. Spatio-temporal patterns of soil salinity in Hetao irrigation based on spatio-temporal Kriging[J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(2): 182-193. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(15): 105-113. (in Chinese with English abstract)
- [4] SINGH A. Soil salinization and waterlogging: A threat to environment and agricultural sustainability[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 57: 128-130.
- [5] SUN G F, ZHU Y, MAO W, et al. Development and application of a monthly water and salt balance model for seasonally frozen agricultural and non-agricultural areas with shallow groundwater table[J]. *Catena*, 2024, 235: 107701.
- [6] ABLIZ A, TIYIP T, GHULAM A, et al. Effects of shallow groundwater table and salinity on soil salt dynamics in the Keriya Oasis, Northwestern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75: 1-15.
- [7] AKRAMKHANOV A, MARTIUS C, PARK S J, et al. Environmental factors of spatial distribution of soil salinity on flat irrigated terrain[J]. *Geoderma*, 2011, 163: 55-62.
- [8] IBRAKHIMOV M, MARTIUS C, LAMERS J P A, et al. The dynamics of groundwater table and salinity over 17 years in Khorezm[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 101: 52-61.
- [9] WANG Y, DENG C, LIU Y, et al. Identifying change in spatial accumulation of soil salinity in an inland river watershed, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 177-185.
- [10] WICHELNS D, QADIR M. Achieving sustainable irrigation requires effective management of salts, soil salinity, and shallow groundwater[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 157: 31-38.
- [11] 赵玉, 赵嘉滨, 范雯婧, 等. 基于作物水分亏缺指数和盐分淋洗系数的新疆棉田节水控盐优化方法[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(12): 96-108.
ZHAO Yu, ZHAO Jiabin, FAN Wenjing, et al. Optimizing the water-saving and salt-regulating method for cotton field in Xinjiang of China based on plant water deficit index and salt leaching coefficient[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2024, 40(12): 96-108. (in Chinese with English abstract)
- [12] 田荣荣, 王淑娟, 刘嘉, 等. 根区施用生物炭和脱硫石膏提高盐碱土壤质量及向日葵产量[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(5): 148-157.
TIAN Rongrong, WANG Shujuan, LIU Jia, et al. Applying biochar and flue gas desulfurization gypsum in the root zone to improve saline-alkali soil quality and sunflower yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural*

- Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(5): 148-157. (in Chinese with English abstract)
- [13] GHAMARNIA H, JALILI Z. Shallow saline groundwater use by Black cumin (*Nigella sativa* L.) in the presence of surface water in a semi-arid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 132: 89-100.
- [14] REN D, XU X, HAO 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.
- [15] WALTER J, LÜCK E, BAURIEGEL A, et al. Seasonal dynamics of soil salinity in peatlands: A geophysical approach[J]. *Geoderma*, 2018, 310: 1-11.
- [16] XUE J, HUO Z, WANG F, et al. Untangling the effects of shallow groundwater and deficit irrigation on irrigation water productivity in arid region: New conceptual model[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619/620: 1170-1182.
- [17] WU M, HUANG J, WU J, et al. Experimental study on evaporation from seasonally frozen soils under various water, solute and groundwater conditions in Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 46-53.
- [18] YU R, LIU T, XU Y, et al. Analysis of salinization dynamics by remote sensing in Hetao Irrigation District of North China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97: 1952-1960.
- [19] 王遵亲. 中国盐渍土 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [20] WANG Y, XIAO D, 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: 291-302.
- [21] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. *生态学报*, 2012, 32(4): 1202-1210.
GUAN 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 Ecologica Sinica*, 2012, 32(4): 1202-1210. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(1): 102-109. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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 Haibing, MIAO Qingfeng, et al. Temporal and spatial variability 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 with English abstract)
- [24] IBRAHIMI M K, MIYAZAKI T, NISHIMURA T, et al. Contribution of shallow groundwater rapid fluctuation to soil salinization under arid and semiarid climate[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, 7: 3901-3911.
- [25] PETHERAM C, BRISTOW K L, NELSON P N. Understanding and managing groundwater and salinity in a tropical conjunctive water use irrigation district[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95: 1167-1179.
- [26] BENYAMINI Y, MIRLAS V, MARISH S, et al. A survey of soil salinity and groundwater level control systems in irrigated fields in the Jezre'el Valley, Israel[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 76: 181-194.
- [27] LU X, LI R, SHI H, et al. Successive simulations of soil water-heat-salt transport in one whole year of agriculture after different mulching treatments and autumn irrigation[J]. *Geoderma*, 2019, 344: 99-107.
- [28] SUN G, ZHU Y, YE M, et al. Development and application of long-term root zone salt balance model for predicting soil salinity in arid shallow water table area[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 486-498.
- [29] 孙贯芳, 屈忠义, 杜斌, 等. 不同灌溉制度下河套灌区玉米膜下滴灌水热盐运移规律[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(12): 144-152.
SUN Guanfang, QU Zhongyi, DU Bin, et al. Water-heat-salt effects of mulched drip irrigation maize with different irrigation scheduling in Hetao Irrigation District[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(12): 144-152. (in Chinese with English abstract)
- [30] 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: 301-313.
- [31] AYARS J E, CHRISTEN E W, SOPPE R W, et al. The resource potential of in-situ shallow ground water use in irrigated agriculture: a review[J]. *Irrigation Science*, 2006, 24: 147-160.
- [32] GAO X, BAI Y, HUO Z, et al. Deficit irrigation enhances contribution of shallow groundwater to crop water consumption in arid area[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 185: 116-125.
- [33] ZIPPER S C, SOYLU M E, BOOTH E G, et al. Untangling the effects of shallow groundwater and soil texture as drivers of subfield-scale yield variability[J]. *Water Resource Research*, 2015, 51: 6338-6358.
- [34] FAN Y, MIGUEZ-MACHO G. Potential groundwater contribution to Amazon evapotranspiration[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14: 2039-2056.
- [35] LIU Z, CHEN H, HUO Z, et al. Analysis of the contribution of groundwater to evapotranspiration in an arid irrigation district with shallow water table[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 171: 131-141.
- [36] CUI L, ZHU Y, ZHAO T, et al. Evaluation of upward flow of groundwater to freezing soils and rational per-freezing water table depth in agricultural areas[J]. *Journal of Hydrology*, 2020,

- 585: 124825.
- [37] 孙贯芳. 干旱区多尺度土壤盐分动态及长期均衡模型研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2020.
- SUN Guanfang. Study On Soil Salinity Dynamics at Multiple Scales and Long-term Solute Balance Models in Arid Area[D]. Wuhan: Wuhan University, 2020.
- [38] KANEKO T, KOBAYASHI T, WANG W Z, et al. Estimating evaporation in winter at a field irrigated late in autumn in Inner Mongolia, China[J]. *Journal of the Faculty of Agriculture-Kyushu University (Japan)*, 2006, 51(2): 407-411.
- [39] ZHANG R, WU J W, YANG Y, et al. A method to determine optimum ecological groundwater table depth in semi-arid areas[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 139: 108915.
- [40] 张阳阳, 陈喜, 高满, 等. 基于元数据分析的西北干旱区生态地下水位埋深及其影响因素[J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2020, 18(5): 57-65.
- ZHANG Yangyang, CHEN Xi, GAO Man, et al. Metadata analysis of ecological groundwater depth and its influencing factors in arid area of Northwest China[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(5): 57-65. (in Chinese with English abstract)

Root zone and deep soil salinity dynamics and suitable groundwater depth for salt control in the Hetao Irrigation District

SUN Guanfang¹, ZHAI Mingfei¹, WANG Chunyu¹, ZHU Yan², QU Zhongyi³, LI Yonghong¹, GAO Zhaoliang^{1*}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: Soil salinization is a main environmental and ecological problem in irrigated agro-ecosystems especially for the area with shallow groundwater table. Most previous studies mainly focused on the surface and root zone soil salinity, however, the knowledge on spatio-temporal dynamics of soil salinity for both root zone and deep soil as well as driving factors, and the recommended seasonal and annual groundwater depth for salt control was rarely addressed. In this study, 68 cropland sampling experiments and investigations related to soil salinity from the top soil to the depth of 1.80 m, groundwater depth and salinity, and crop types were carried out before and after the crop growing season of 2017-2018 in the Hetao Irrigation District. Soil salinity statistical characteristics showed that the standard deviation of soil salinity in time and space became larger with increasing of temporal mean and spatial mean. The root zone (within depth of 0~0.60 m) soil salinity in the crop growing season were accumulated and desalinated in the fallow season, which was opposite for changes of the deep (within depth of 0.60-1.80 m) soil salinity. The multi-factor variance analysis of variance showed that the driving factors including crop type, groundwater depth at the beginning of crop growing season, averaged groundwater depth in the crop growing season, groundwater salinity and root zone soil salinity at the beginning of crop growing season had significant effects on root zone soil salinity changes in the crop growing season ($P<0.05$). The influence of groundwater condition and other factors on root zone soil salinity change during crop growing season was closely related to the hydrological year type. At the beginning of crop growing season, the soil salinity in the root zone decreased exponentially with increasing groundwater depth, and the sampling locations with soil salinity below average had a minimum groundwater depth of 1.60 m. Both salt value and salt reduction rate decreased with groundwater depth increased across different soil layers when the average annual groundwater depth was less than 2.50 m. Thus, the sampling locations were selected where the groundwater table depth was less than 2.50 m, and then the median of root zone soil salinity and groundwater depth was obtained by the frequency analysis method. The annual suitable critical control groundwater depth for soil salinity median was 1.77 m. The groundwater depth of sampling locations where soil salinity was significantly higher than the median or mean value were less than 1.77 m. Therefore, in order to control soil salinity, it is recommended that the groundwater depth should be no less than 1.60 m at the beginning of crop growing period, and to maintain an average annual groundwater depth of at least 1.77 m. The research results will provide theoretical support for the design of irrigation scheduling and the rational layout of drainage projects for similar irrigation area in the arid area.

Keywords: soils; salts; crops; Hetao Irrigation District; groundwater; groundwater depth