

基于 SaltMod 模型的河套灌区解放闸灌域 土壤盐分综合调控措施

翟中民, 史文娟, 郭建忠, 刘璐

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘要: 为了探究河套灌区解放闸灌域土壤盐分的综合调控措施,以河套灌区解放闸灌域为例,基于 Salt-Mod 模型研究了灌溉水矿化度、咸淡水混合比例、排水沟深度以及渠道衬砌水平对作物根层土壤盐分的影响。结果表明:根层土壤盐分随着灌溉水矿化度的增大而增加,1.0 g/L 的地表微咸水较适合本研究区灌溉;淡水(黄河水)和地下微咸水(矿化度为 2.2 g/L)混合灌溉比为 1:1 时,既增加了地下微咸水的利用且地下水埋深下降到 2 m 左右的相对稳定平衡状态;当排水深度在 1.5~2.0 m,渠系利用系数达到 0.7 时,根层盐分显著降低,适当提高排水深度和渠系水利用系数可以有效减少高矿化度灌溉水对土壤盐分累积的影响。研究结果为河套灌区解放闸灌域制定合理的土壤盐分综合调控措施提供了科学的理论依据。

关键词: 灌溉水矿化度; 微咸水灌溉; 渠道衬砌; 根层土壤盐分; SaltMod 模型

中图分类号: S273.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)01-0314-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.01.045

Study on Comprehensive Control Measures of Soil Salinity in Jiefangzha Irrigation Area of the Hetao Irrigation District Based on SaltMod Model

ZHAI Zhongmin, SHI Wenjuan, GUO Jianzhong, LIU Lu

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: In order to explore the comprehensive control measures of soil salinity in the Hetao irrigation area, taking the Jiefangzha irrigation area as an example, the effects of irrigation water salinity, the mixing ratio of saline and fresh water, the depth of drainage ditch and the level of channel lining on soil salinity in root zone were studied using the SaltMod model. The results showed that the soil salinity in the root layer increased with the increase of the irrigation water salinity, and the surface brackish water of 1.0 g/L was more suitable for irrigation in this study area; when the mixed irrigation ratio of fresh water (Yellow River water) and underground brackish water (salinity is 2.2 g/L) was 1:1, the utilization of underground brackish water was increased and the groundwater depth dropped to a relatively stable balance of about 2 m. status; when the drainage depth was between 1.5 and 2.0 m and the canal utilization coefficient reached 0.7, the root layer salinity was significantly reduced. Appropriately increasing the drainage depth and canal water utilization coefficient could effectively reduce the accumulation of soil salt induced by high-salinity irrigation water. The results of this study could provide a scientific theoretical basis for formulating reasonable comprehensive control measures for soil salinity in the Jiefangzha irrigation area of the Hetao Irrigation District.

Keywords: irrigation water salinity; brackish water irrigation; canal lining; root soil salinity; SaltMod model

根据联合国粮农组织(FAO)的多年统计显示,全世界约有 9.54×10^8 hm^2 的盐渍土地,而且面积仍然在不断扩大^[1-3]。我国耕地也深受盐渍土危害,其主要分布于西北半干旱、干旱地区^[4],内蒙古河套灌区就因降雨量少而蒸发量大,土壤盐渍化问题较为突出,灌区的盐渍化耕地面积约为 39.4 万 hm^2 ,占总耕

地面积的 68.65%,严重影响作物的正常生长^[5-7],研究河套灌区的区域土壤水盐变化具有重要的理论和现实意义。

合理的灌溉和节水措施能够适时适量地对植物提供水分,有效改善土壤的水、肥和地下水位环境^[8-10],土壤的水盐状况影响作物的生长和产量。运

收稿日期:2020-08-05

资助项目:国家自然科学基金项目(51379173);陕西省自然科学基金项目(2018JM5051)

第一作者:翟中民(1993-),男,在读硕士研究生,主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: minzhongzhai@163.com

通信作者:史文娟(1972-),女,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: shiwj@xaut.edu.cn

用 SaltMod 模型对土壤盐分的模拟分析已有一些研究成果,马文军等^[11]基于 SaltMod 模型探讨了河套龙胜灌区井渠灌联合灌溉对土壤水盐均衡的影响,结果表明,SaltMod 模型可以用于井渠联合灌溉对土壤盐分影响的研究且效果明显;陈艳梅等^[12]运用 SaltMod 模型研究了沙壕渠灌区灌溉水矿化度对根层盐分的影响,结果表明,适度的采用地下微咸水灌溉可以降低地下水埋深;成萧尧等^[13]基于 SaltMod 模型预测了 4 种引水量情况下河套灌区地下水动态变化过程,结果表明,未来 10 年灌区地下水埋深和排水量基本保持稳定;陈艳梅等^[14]运用 SaltMod 模型研究了灌溉制度对作物根层土壤盐分的影响,结果发现,以现在的灌排设计,沙壕渠灌域的土壤盐渍化情况较稳定。由于河套灌区面积较大,影响土壤盐分变化的因素众多,如 40 m 以内地下水矿化度变化为 3.0 g/L 左右,变化幅度较大^[15],所以选取不同的典型区域研究微咸水灌溉下土壤盐分变化显得十分必要,而合理利用丰富的地下微咸水,不仅不会导致土壤的次生盐渍化,而且可以充分利用微咸水资源,达到节约淡水资源的目的是。基于此,本文以河套灌区解放闸灌域基本资料为基础,综合分析了不同矿化度水下灌排措施对土壤盐分的影响,以期微咸水合理灌溉及土壤盐分综合调控措施提供科学的理论和依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

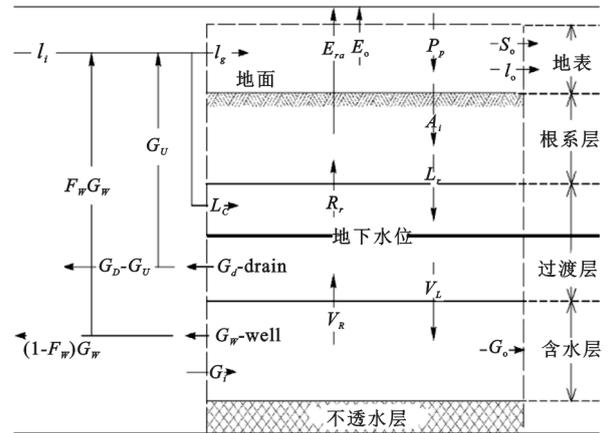
解放闸灌域位于内蒙古河套灌区上游西北部,属于河套灌区五大灌域之一。灌域地处大陆性气候特征的干旱、半干旱地带,冬季寒冷干燥,夏季高温少雨;年均降水量为 140 mm,主要集中在 6—9 月,分配极其不均匀,占全年降水量的 60%~80%;年平均蒸发量约为 1 970 mm(E601 蒸发器),蒸发量比较大,年均气温约 8.4 °C,年均日照时间 3 049 h。灌域总控制面积约为 $2.1 \times 10^5 \text{ hm}^2$,研究区总控制面积约为 $1.76 \times 10^5 \text{ hm}^2$,实际灌溉面积约为 $1.4 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。解放闸灌域引黄河水灌溉,黄河水矿化度约为 0.6 g/L;多年平均引水量约为 12 亿 m^3 ,排水量约 2 亿 m^3 ;灌溉水利用系数为 0.65 左右,排水沟深 1.5 m,多年平均地下水埋深 1.8 m,多年平均地下水矿化度 2.0 g/L。灌域主要种植的作物有小麦、玉米、葵花、瓜果、蔬菜等。

1.2 模型简介

SaltMod 模型是以水盐均衡原理为基础,用于模拟和预测不同区域的土壤盐分、地下水埋深、排水量及排水矿化度等^[16]。模型输入数据主要包括作物类型的百分比、土壤盐分、地下水矿化度、地下水埋深,降雨量、潜在的蒸散发、灌溉量、地表径流量等;输出

数据主要包括土壤盐分、地下水埋深、排水量、排水矿化度等。模型根据灌区的作物生长情况等将一年分为 1~4 个模拟季,每个季时间依据作物生育期持续的月份来确定。

模型把土壤划分为 4 层研究:地表水盐平衡、根层水盐平衡、过渡层水盐平衡和含水层水盐平衡(图 1),每层均有水量和盐分的均衡方程,假设所有因素在研究区内均匀分布,以季节性数据输入,通过每层的水盐平衡分别进行根层盐分、地下水位、地下排水量等的模拟预测。



注: P_p 为垂直达到地表的水量(降雨和喷洒的水量); I_g 为总的灌水量(天然的水流、用于灌溉的井水和排水,但是不包括渠道渗漏的水量); λ_o 为从根层渗漏到表层的水量; E_o 为水面蒸发; λ_i 为从地表进入根层的水量; I_o 为离开灌溉地的水量; S_o 为地表径流量; R_r 为进入根层的毛管水量; E_{ra} 为根层实际腾发量; L_r 为根层渗漏的水量; L_c 为渠道的渗漏量; V_r 为从含水层渗入到过渡层的水量; V_l 为从过渡层进入含水层的水量; G_d 为排水量。

图 1 SaltMod 模型水平平衡要素示意

1.3 模型基本数据

按照灌区的作物生长等情况,将全年分为 3 个季度:第 1 季度生育期为 5—9 月(共 5 个月),第 2 季秋浇期为 10—11 月(共 2 个月),第 3 季为冻融期 12 至翌年 4 月(共 5 个月)。依据地质调查资料,将 SaltMod 模型垂向方向上的厚度分为 3 层:第 1 层根系层厚度为 1 m,第 2 层过渡层厚度为 2 m,第 3 层含水层厚度为 60 m;根系层和过渡层总孔隙度为 0.48,含水层总孔隙度为 0.4;根系层和过渡层有效孔隙率为 0.07,含水层有效孔隙率为 0.1。降雨量来自气象站多年资料均值,第 1 季降雨量约为 142 mm,第 2 季降雨量约为 10 mm,第 3 季降雨量约为 13 mm;潜在蒸散量由参考作物腾发量乘以作物系数求得,参考作物腾发量采用 Penman-Monteith 公式计算。其他有关的引水灌溉资料、作物种植结构、气象资料等均来源于河套灌区灌域管理局和气象站的统计数据。

1.4 模型验证指标

本研究中选取相对误差(RE)指标来评价模型的

模拟精度,当 $RE < 10\%$ 时,认为模型拟合效果非常好,当 $10\% < RE < 20\%$ 时,认为模型拟合效果较好。公式为:

$$RE = \frac{|Y' - Y|}{Y} \times 100\% \quad (1)$$

式中: Y 为实测值; Y' 为模拟值。

2 结果与分析

2.1 模型参数率定与模型验证

本研究采用解放闸灌域 2013—2016 年已有的实测根层盐分、排水量和地下水埋深等资料^[17-18],对自然排水量(G_n)、根层淋洗率(Fl_r)和过渡层淋洗率(Fl_x)进行率定和验证。以 2013—2014 年的数据对模型进行率定,2015—2016 年数据进行验证。

2.1.1 自然排水量 自然排水量($G_n, m^3/(季 \cdot m^2)$)定义为水平流出灌区的地下水量(G_o)与进入的地下水量(G_i)的差值。由于研究区位于平缓的平原区,水力坡度相对较小,地下水流动较慢,进出水量差异很小。因此在率定时,可将进入量(G_i)设为 0,改变流出水量(G_o)值,比较排水模拟值和实测值,以确定自然排水量(G_n)值。分别取第 1, 2, 3 季自然排水量(G_{n1}, G_{n2}, G_{n3})的 4 组组合值(0, 0, 0), (0.02,

0.01, 0.02), (0.04, 0.02, 0.04), (0.06, 0.03, 0.06), 即排水量为 0, 0.05, 0.010, 0.015 $m^3/(a \cdot m^2)$ 进行比较分析,率定结果见表 1。

表 1 率定和验证期排水量模拟值和实测值

模拟期	年份	实测值/ mm	模拟值/mm			
			0	0.05	0.010	0.015
率定期	2013	92.90	127.10	98.43	90.20	78.60
	2014	92.27	139.70	107.20	93.10	80.30
验证期	2015	85.72	140.10	107.40	85.85	72.70
	2016	101.60	142.30	110.50	98.50	81.40

根据表 1 率定期和验证期自然排水量的模拟值和实测值对比,当自然排水量参数为 0.010 $m^3/(a \cdot m^2)$ 时,率定期 2013 年和 2014 年相对误差(RE)分别为 2.90%, 0.90%, 验证期 2015 年和 2016 年相对误差(RE)分别为 0.15%, 3.05%, 模拟值和实测值误差最小,且符合精度要求。

2.1.2 根层淋洗率 根层淋洗率(Fl_r)定义为根层渗透水的盐分质量浓度与饱和土壤水的平均盐分质量浓度的比值,取值范围为[0, 1]。取 Fl_r 为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 分别模拟根层土壤盐分值,然后将模拟值与实测值比较,确定 Fl_r , 模拟结果见表 2。

表 2 率定和验证期根层盐分模拟值和实测值

模拟期	年份	季度	实测值/ ($dS \cdot m^{-1}$)	模拟值/($dS \cdot m^{-1}$)				
				0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
率定期	2013	第 1 季	3.25	3.59	3.57	3.52	3.36	3.31
		第 2 季	3.17	3.62	3.42	3.24	3.06	2.9
	2014	第 1 季	3.20	4.02	4.03	3.68	3.31	3.19
		第 2 季	3.18	4.2	3.82	3.48	3.17	2.90
验证期	2015	第 1 季	2.94	4.72	4.39	4.09	3.12	2.58
		第 2 季	3.54	4.69	4.13	3.66	3.35	2.89
	2016	第 1 季	2.89	5.92	5.42	4.79	3.53	3.26
		第 2 季	3.32	5.95	5.18	4.25	3.43	3.13

由表 2 可知,当 Fl_r 为 0.8 时,率定期 2013 年和 2014 年相对误差(RE)在 0.31%~3.47%,验证期除 2016 年第 1 季相对误差(RE)较大外,其他季节相对误差(RE)在 5.36%~6.19%,模拟值和实测值误差最小,且符合精度要求。

2.1.3 过渡层淋洗率 过渡层淋洗率(Fl_x)定义为过渡层渗透水的盐分质量浓度与饱和土壤水的平均盐分质量浓度的比值,取值范围为[0, 1]。取 Fl_x 为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 分别模拟地下水矿化度值,然后将模拟值与实测值比较,确定 Fl_x , 模拟结果见图 2。

由图 2 可知,当 Fl_x 为 0.6 时,率定期和验证期相对误差(RE)为 0.78%~12.38%,模拟值和实测值误差最小,且符合精度要求。

2.2 模拟结果分析

2.2.1 灌溉水矿化度对根层土壤盐分的影响 在灌

溉制度相同的条件下,设置 4 种不同的灌溉水矿化度:0.6(现状条件), 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 g/L, 模拟 4 种矿化度水每季结束后根层土壤盐分的变化(图 3)。

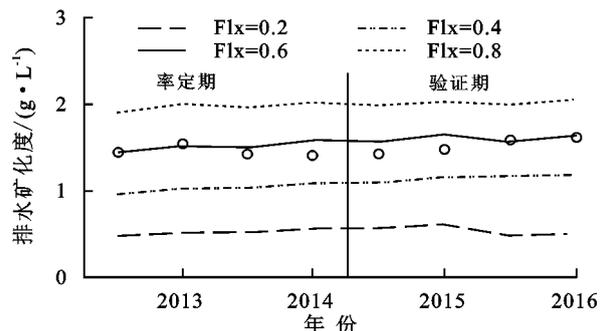


图 2 率定期和验证期排水矿化度模拟值和实测值

由图 3 可知,现状条件下,根层土壤盐分和排水矿化度均逐年缓慢增加;随着灌溉水矿化度的增加,根层土壤盐分不断增加,排水排出的盐分小于灌溉水

带入的盐分;灌溉水矿化度越大,土壤盐分累积量越大,灌溉水矿化度为 3.0 g/L 时土壤盐分增长幅度最快,增幅为 11.55 dS/m;1.0 g/L 时土壤盐分增幅较慢,增幅为 2.40 dS/m,增幅在所有处理中最小。由此表明,本研究区直接采用地表矿化度为 1.0 g/L 的微咸水灌溉较合适,根层盐分不会增加太大。

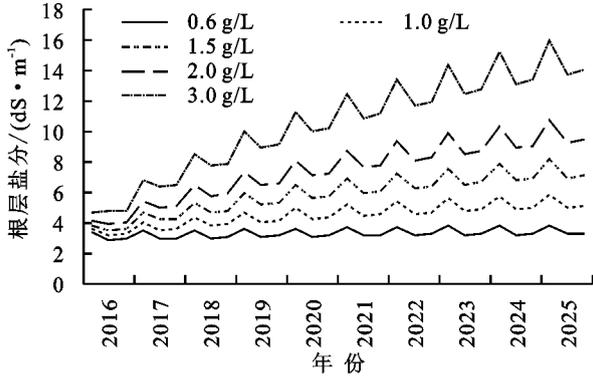


图 3 不同灌溉水矿化度对根层盐分和排水矿化度的影响

2.2.2 地下微咸水和黄河水混合灌溉比例对根层土壤盐分及地下水水位的影响 根据实测数据,研究区地下水矿化度约为 2.20 g/L,黄河水的矿化度约为 0.60

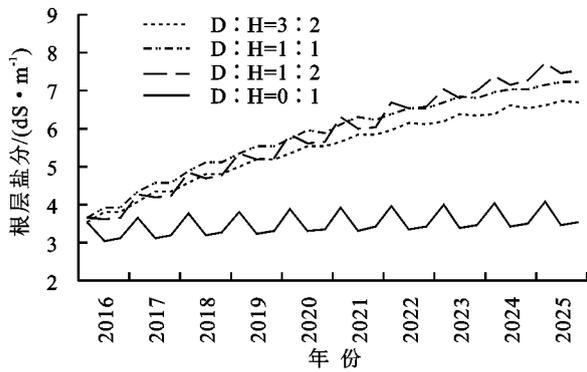


图 4 地下水微咸水和黄河水混合灌溉对根层盐分和地下水水位的影响

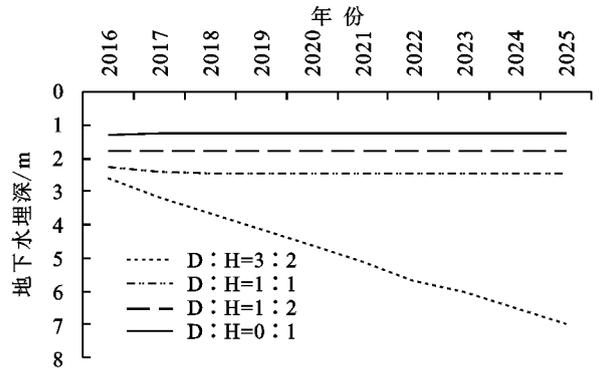
2.2.3 不同排水沟深度对土壤盐分的影响 为缓解微咸水灌溉对土壤盐分的影响,以混合灌溉比 1:1 为例,在现状灌溉制度不变的情况下,设定 4 种排水沟深度:1.3,1.5,2.0,2.5 m,预测 10 年内排水沟深度对每季结束后根层土壤盐分的影响。

由图 5 可知,随着排水沟深度的增加,根层盐分有所降低;模拟结束后,当排水深度为 1.3 m 时,根层盐分增加了 4.63 dS/m,比排水深度 1.5 m 时根层盐分高 22%,比排水深度 2.0 m 时根层盐分高 24%,比排水深度 2.5 m 时根层盐分高 33%。适当增大排水沟深度,在一定程度上增大了排水排盐的能力,能有效减少根层盐分的累积,由此本研究区微咸水灌溉条件下最合理排水深度应该在 1.5~2.0 m。

2.2.4 渠道衬砌对土壤盐分的影响 为减少微咸水灌溉中渠道渗漏以及由此引起的土壤盐分累积,以矿化度为 2.4 g/L 的混合水为例,在灌溉制度保持现状的情况下,设定 4 种渠系水利用系数 η 分别为 0.65,0.70,

g/L。采用地下微咸水(D)和黄河水(H)混合灌溉,混合比 D:H 为 3:2,1:1,1:2,0:1,混合后的灌溉水矿化度分别为 1.56,1.40,1.13,0.60 g/L。在现有的灌溉制度不变的情况下,模拟每季结束后地下微咸水和黄河水混合灌溉对根层盐分和地下水水位的影响。

由图 4 可知,采用各处理混合水灌溉,根层土壤的盐分均呈增加趋势;在试验条件范围内,随着地下微咸水和黄河水混灌比的增加,根层土壤盐分逐渐降低,混合比为 1:2 时,根层盐分增加量最大,为 4.75 dS/m,混合比为 3:2 时盐分增加最小,为 2.96 dS/m。采用地下微咸水灌溉,可以降低地下水位,在混合比大于 1:1 时,地下水埋深均降到了 2 m 以下,比只采用黄河水灌溉时的地下水埋深降低了 20 cm 左右,从而减少因潜水蒸发而上升的盐分,降低根层盐分的累积。虽然增加地下水灌溉比例,地下水位下降,减缓了土壤盐分向上迁移,但是微咸水灌溉带进土壤的盐分占主导部分,导致土壤根层盐分增加。从合理利用地下水灌溉的角度,认为最适合本研究区的灌溉混合比在 1:1 左右,地下水埋深基本保持在 2 m 左右的平衡状态。



0.75,0.80,预测每季结束后根层土壤盐分的变化。

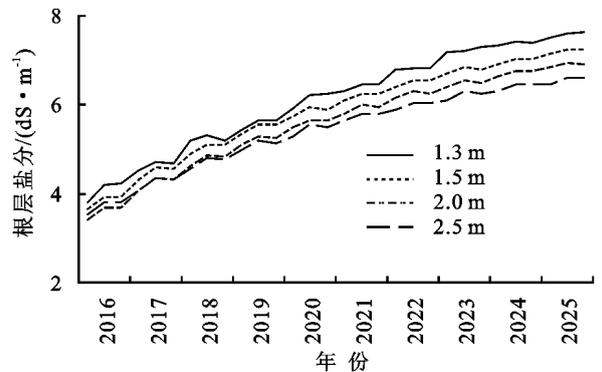


图 5 不同排水沟深度土壤盐分变化

由图 6 可知,根层土壤盐分随着渠道衬砌水平的提高而变小;渠系利用系数 0.65 时的根层盐分增加量为 4.38 dS/m,比渠系利用系数 0.70 时的根层盐分高 17%,比渠系利用系数 0.75 时的根层盐分高 19%,比渠系利用系数 0.80 时的根层盐分高 21%,说明提高渠系衬砌水平,减少了渠道渗漏,不仅节约了

灌溉水量,而且减轻了对地下水埋深的影响。由此可见,在采用微咸水灌溉时,本研究区渠系利用系数达到 0.7 左右就可以有效的起到减少土壤盐分的作用。

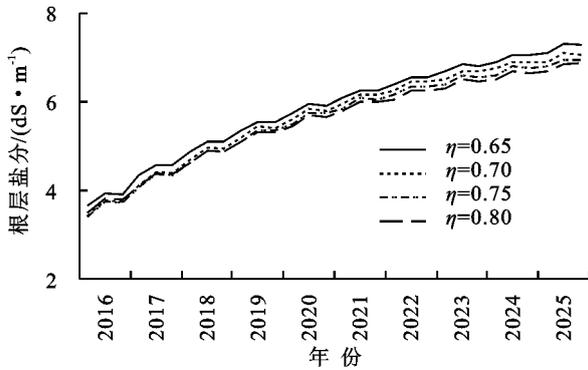


图 6 不同渠系水利用系数对根层土壤盐分的影响

3 讨论

对土壤盐分进行综合调控,降低土壤盐分含量,可以为作物提供良好的生长环境,提高作物产量,维持农业的可持续发展^[19-20]。土壤盐分的调控措施很多,例如在干旱地区利用微咸水灌溉,增大灌溉定额,加大排水沟深度,提高排水排盐能力;渠道衬砌,减少渗漏,降低地下水埋深;覆盖秸秆和枯草,抑制蒸发等措施,都有利于土壤逐渐向良性转化^[21-22]。本研究直接利用 1.0 g/L 的地表微咸水进行 10 年灌溉模拟,土壤盐分增幅为 2.40 dS/m,对土壤盐分影响较小;采用地下微咸水和黄河水大于 1:1 混合灌溉时,根层土壤盐分显著下降,这主要是由于抽取地下水降低了地下水位,地下水埋深大于 2 m,从而减少了因潜水蒸发而上升的盐分,导致根层盐分下降;虽然混灌比越大,根层盐分越小,但是不宜过大,当混灌比为 3:2 时,根层盐分显著下降,但是地下水埋深呈直线下降,这将导致地下水过度开采,引发地质问题。这与刘雪艳等^[23]研究结果相似。Chang 等^[24]研究表明,增加排水沟深度和增大渠系水利用系数可以提高排水排盐的能力。本研究结果表明,排水沟深度增大到 1.5~2.0 m,渠系利用系数增加到 0.7 左右时,可以有效地减少根层土壤盐分的累积,与以上研究结果相似。面对河套灌区大面积种植中出现的土壤盐渍化问题,为提高灌区灌溉和排水排盐能力,开展微咸水灌溉及土壤盐分综合调控措施理论研究意义重大。也有研究^[25]表明,应把微咸水和淡水混灌以及微咸水和淡水交替灌溉结合起来,效果更佳显著。近年来盐碱土壤的改良措施越来越多,但基本是长期的改良过程,不能达到土壤快速脱盐的目的,还有待进一步研究。

4 结论

(1) 经过率定和验证, SaltMod 模型适用于本研究区的根层土壤盐分、地下水埋深和地下水矿化度等

的模拟预测。

(2) 现有灌溉制度条件下,随着灌溉水矿化度的增加,根层盐分增加,采用 1.0 g/L 的地表微咸水进行灌溉,对土壤盐分影响较小。

(3) 在研究条件范围内,随着地下微咸水和黄河水混灌比的增大,根层盐分逐渐下降;但混合灌溉比大于 1:1 时,地下水位呈直线下降,不利于地下水的长期开采;混合灌溉比为 1:1,灌溉水矿化度为 1.13 g/L 时,根层土壤盐分增加不大,地下水位下降,且处于相对稳定平衡状态,不仅有利于本研究区控制地下水位,而且节约淡水资源。

(4) 在现有的灌溉制度下,采用微咸水灌溉适当加大排水沟深度和提高渠道的衬砌水平可以抑制根层土壤盐分的增加;本研究区的排水沟深度在 1.5~2.0 m,渠系利用系数达到 0.7 左右时,可以有效地减少根层土壤盐分的累积。

参考文献:

- [1] 王胡军,李纯,钟香梅,等.盐碱地改良技术研究进展[J].农业工程,2014,4(增刊1):44-47.
- [2] 毛海涛,黄庆豪,龙顺江,等.土壤盐渍化治理防护毯的研发及试验[J].农业工程学报,2015,31(17):121-127.
- [3] Singh G. Salinity-related desertification and management strategies: Indian experience [J]. Land Degradation & Development, 2009, 20(4): 367-385.
- [4] 刘阳春,何文寿,何进智,等.盐碱地改良利用研究进展[J].农业科学研究,2007,28(2):68-71.
- [5] 边荣荣,黄永飞,李惠军,等.不同改良剂对干旱区盐碱地改良效果研究进展[J].农业科学研究,2017,38(3):69-75.
- [6] 杨路华,沈荣开,曹秀玲.内蒙古河套灌区地下水合理利用的方案分析[J].农业工程学报,2003,19(5):56-59.
- [7] 周利颖,李瑞平,苗庆丰,等.河套灌区不同掺沙量对重度盐碱土壤水盐运移的影响[J].农业工程学报,2020,36(10):116-123.
- [8] 史文娟,何子建,徐飞.膜下滴灌灌水量对土壤水热影响及地下水补给耗水响应[J].水土保持学报,2017,31(2):117-121,232.
- [9] Xu X, Huang G H, Qu Z Y, 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.
- [10] Foley J A, Defries R S, Asner G P, et al. Global consequences of land use [J]. Science, 2005, 309(5734): 570-574.
- [11] 马文军,程琴娟,李良涛,等.微咸水灌溉下土壤水盐动态及对作物产量的影响[J].农业工程学报,2010,26(1):73-80.

tion of organic matter in forest[J]. The Journal of Ecology, 1968, 6(2): 355-362.

- [21] Harmon M E, Franklin J F, Swanson F J, et al. Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems[J]. Advances in Ecological Research, 2004, 15(1): 135-305.
- [22] 张林海, 曾从盛, 张文娟, 等. 闽江河口湿地枯落物分解及主要影响因子[J]. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2404-2410.
- [23] 李学斌, 马林, 陈林, 等. 草地枯落物分解研究进展及展望[J]. 生态环境学报, 2010, 19(9): 2260-2264.
- [24] Aerts R, Caluwe H D. Nutritional and plant mediated controls on leaf litter decomposition of Carex species[J]. Ecology, 1997, 78(1): 244-260.
- [25] 向云. 黄土丘陵区草地枯落物分解特征及其对土壤性质的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [26] 曾全超. 黄土高原辽东栎枯落物分解的微生物作用机制[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [27] 薛志婧. 黄土丘陵区草地生态系统典型植物枯落物分解特征研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [28] 杨继松, 刘景双, 于君宝, 等. 三江平原小叶章湿地枯落物分解及主要元素变化动态[J]. 生态学杂志, 2006, 25(6): 597-602.
- [29] 武海涛, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原典型湿地枯落物早期分解过程及影响因素[J]. 生态学报, 2007, 27(10): 4027-4035.
- [30] 温达志, 魏平, 张佑昌, 等. 鼎湖山亚热带森林细根分解干物质损失和元素动态[J]. 生态学杂志, 1998, 17

(2): 1-6.

- [31] 李燕, 王丽卿, 张瑞雷. 淀山湖沉水植物死亡分解过程中营养物质的释放[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(2): 45-52.
- [32] 王维奇, 曾从盛, 钟春棋, 等. 人类干扰对闽江河口湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(10): 2411-2416.
- [33] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [34] McFee W W, Stone E L. The persistence of decaying wood in humus layers of northern forests[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 30(4): 513-516.
- [35] 林波, 刘庆, 吴彦, 等. 森林凋落物研究进展[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 60-64.
- [36] 程曼. 黄土丘陵区典型植物枯落物分解对土壤有机碳、氮转化及微生物多样性的影响[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [37] 胡宁, 马志敏, 蓝家程, 等. 石漠化区植被恢复过程凋落叶分解特征及其对土壤有机碳/氮的影响: 以重庆中梁山为例[J]. 中国岩溶, 2016, 35(5): 539-549.
- [38] 彭少麟, 刘强. 森林凋落物动态及其对全球变暖的响应[J]. 生态学报, 2002, 22(9): 1534-1543.
- [39] 罗珠珠. 不同耕作措施下黄土高原旱地土壤质量综合评价[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008.

(上接第 318 页)

- [12] 陈艳梅, 王少丽, 高占义, 等. 基于 SALTMOD 模型的灌溉水矿化度对土壤盐分的影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(3): 11-16.
- [13] 成萧尧, 毛威, 朱焱, 等. 基于 SaltMod 的河套灌区节水条件下地下水动态变化分析[J]. 节水灌溉, 2020(2): 73-79.
- [12] 彭振阳, 黄介生, 伍靖伟, 等. 秋浇条件下季节性冻融土壤盐分运动规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 77-81.
- [14] 陈艳梅, 王少丽, 高占义, 等. 不同灌溉制度对根层土壤盐分影响的模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(3): 263-270.
- [15] 杨树青. 基于 Visual-MODFLOW 和 SWAP 耦合模型干旱区微咸水灌溉的水-土环境效应预测研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2005.
- [16] Oosterbaan R J. SALTMOD: Description of principles, user manual, and application, ILRI [M]. Netherlands: Wageningen, 2000.
- [17] 常晓敏. 河套灌区水盐动态模拟与可持续性策略研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [18] 童文杰, 刘倩, 陈阜, 等. 河套灌区小麦耐盐性及其生态适宜区[J]. 作物学报, 2012, 38(5): 909-913.
- [19] 王婧, 逢焕成, 任天志, 等. 地膜覆盖与秸秆深埋对河套

灌区盐渍土水盐运动的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 52-59.

- [20] Qadir M, Schubert S. Degradation processes and nutrient constraints in sodic soils [J]. Land Degradation and Development, 2002, 13(4): 275-294.
- [21] Nassar I N, Robert H. Salinity and compaction effects on soil water evaporation and water solute distributions [J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 63(4): 752-758.
- [22] 谭军利, 王西娜, 田军仓, 等. 不同微咸水灌水量条件下覆砂措施对土壤水盐运移的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 100-108.
- [23] 刘雪艳, 丁邦新, 白云岗, 等. 微咸水膜下滴灌对土壤盐分及棉花产量的影响[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 410-417.
- [24] Chang X M, Gao Z Y, Wang S L, et al. Modelling long-term soil salinity dynamics using SaltMod in Hetao Irrigation District, China [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 156: 447-458.
- [25] Mao W, Yang J Z, Zhu Y, et al. Loosely coupled SaltMod for simulating groundwater and salt dynamics under well-canal conjunctive irrigation in semi-arid areas [J]. Agricultural Water Management, 2017, 192: 209-220.