

微咸水灌溉对土壤环境效应的预测研究

杨树青^{1,2}, 史海滨¹, 杨金忠²

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要 利用识别后的 SWAP 模型, 探讨了微咸水灌溉条件下土壤水盐及其均衡要素的转化关系和土壤的积盐趋势预测。结果显示, 两种灌溉定额下土壤盐分都有所增加, 但淋洗灌溉定额下比正常灌溉定额下小麦、葵花和玉米模型土壤盐分分别降低了 6.5%、0.7%、4% ; 小麦、葵花和玉米的相对减产率分别比正常灌溉定额下降低了 1%、2%、6%。微咸水灌溉后在灌溉定额和灌溉水浓度不变的前提下, 土壤盐分的积累随着时间的推移而呈递减趋势, 大约在 10 a 后盐分达到进出平衡状态, 此时土壤的含盐量达到 $0.1852 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-3}$, 比微咸水灌溉前增加 $0.0822 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。但仍属于轻度盐渍土(土壤含盐量 0.126%), 不会对土壤水环境产生较大的影响。

关键词 微咸水灌溉; 淋洗灌溉定额; SWAP 模型; 预测

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2009)05-0961-06

Prediction and Research of Soil Environment Effect Under Light-Saline Water Irrigation.

YANG Shu-qing^{1,2}, SHI Hai-bin¹, YANG Jin-zhong²

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China; 2. Wuhan University, National Key Laboratory of Water Resources and Hydropower, Wuhan 430072, China)

Abstract There are many researches on salt water irrigation technology, salt water utilization pattern, impact on crop yield and quality using salt water irrigation, adaptability of salt water irrigation, and salt water irrigation amelioration of soils, etc. In recent years, environmental effect caused by light salt water irrigation at the regional scale is concerned. Based on the field experiment in the Inner Mongolia Hongwei testing station, this paper introduced the SWAP model and discussed the conversion relation of soil water salt balance elements and soil salt accumulation trends on the conditions of light salt water irrigation. The prediction results indicated that both in the leaching quota and in the normal irrigation could lead to the increase of soil salt. But, in the leaching quota, the soil salt in the wheat model decreased 6.5%, 0.7% in the sunflower model, and 4% in the maize model comparing with the corresponding values in the normal irrigation quota. The decreasing rate of yield in the wheat, sunflower and maize decreased 1%, 2%, and 6%, respectively. On the condition of the saline water irrigation, unchanging the irrigation quota and the irrigation water concentration, the soil salt accumulation decreased as trend goes. After about 10 years, soil salt could reach the recharging and discharging balance. At that time, the soil salt content was $0.1852 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-3}$, and increased amount was $0.0822 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-3}$. But the soil still belongs to the light salinity, and the light saline water irrigation couldn't affect the soil water environment significantly. Through analyzing the simulation results, this paper indicated that light salt water irrigation was feasible in arid or semi-arid regions.

Keywords light saline water irrigation; leaching quota; SWAP model; Prediction

利用微咸水灌溉(light saline water irrigation, LR), 增加了土壤湿度, 有利于作物吸收水分, 但同时增加了

土壤中的盐分。灌溉水的矿化度、灌溉次数及水量, 决定了土壤盐分增加的多少^[1-6]。作者在内蒙的红卫试验区进行了 4 a 的咸水灌溉试验, 据试验资料分析研究了咸水灌溉对作物、土壤的影响^[7], 得出了当地主要作物的耐盐极限值及土壤水盐运移规律。Jos van Dam^[8]开发的 SWAP 模型对一维条件下的水盐运动效果良好, 王修贵^[9]用 SWAP 模型对宁夏的咸水灌溉田间管理模式进行了模拟; 魏占民^[10]用 SWAP 模型对河套灌区的田间灌溉水有效性进行了研究; 王卫光^[11]用

收稿日期: 2008-08-09

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点项目(内蒙古河套半干旱区粮食作物综合节水技术研究与示范 2007BAD88B04); 内蒙古政府专项资金项目(内蒙古河套灌区节水改造项目区水环境监测评估与预测研究, nsn2007067)

作者简介: 杨树青(1967—), 女, 博士, 副教授, 主要从事微咸水灌溉的土壤环境效应和节水灌溉新技术的研究。

E-mail: ymqndysq@126.com

通讯作者: 史海滨 E-mail: shi_haibin@sohu.com

SWAP 模型模拟了河套灌区红卫地区的灌溉制度。本文引进 SWAP 模型旨在探讨微咸水灌溉条件下土壤水盐及其均衡要素的转化关系和微咸水灌溉后的土壤积盐趋势,通过对模拟结果的分析,揭示微咸水灌溉在我国干旱、半干旱地区的可行性。

1 材料与方法

1.1 田间试验布置

试验于 2002—2004 年在内蒙河套灌区的红卫试验场进行。试验田与对比田的土壤质地为砂壤土,面积均为 7.8 hm²。在试验期间灌水前后对试验田、对比田分别取土样,进行土壤水分、盐分含量的测定。取样深度为 0~5、5~20、20~40、40~70、70~100 cm。土壤含水率采用烘干法测定,土壤含盐量采用 1:5 的土水比溶液测定,每个处理重复 3 次。试验田的灌溉水矿化度参照每种作物的耐盐度值,灌溉制度如表 1。对比田的灌溉时间、灌水定额同试验田,对比田用黄河水灌溉,矿化度为 0.608 g·L⁻¹。

1.2 采用模型的识别

运用微咸水灌溉后对环境效应影响的关键是微咸水灌溉下的土壤剖面上的水盐运移规律和盐分在剖面上的积累情况。通过试验的有限资料可以得出一些宏观上的结果,但对土壤水盐均衡要素的转化关系及盐分的积累趋势等问题难以解决。由瓦赫宁根大学集成的 SWAP(Soil-Water-Atmosphere-Plant)模型是由详尽完善的土壤水运移、溶质迁移、热量传输、土壤蒸发、植物蒸腾和作物生长子模块组成。本研究拟采用 SWAP 模型对微咸水灌溉条件下水盐运移规律进行模拟研究,揭示采用微咸水灌溉后水盐在土壤剖面上的动态分布规律。根据实测土壤含水量及含盐量与模拟的土壤含水量及含盐量之间的总误差最小的原则对 SWAP 模型中有关数据试验参数进行率定与检验。率定、检验结果如图 1(由于篇幅所

限,文中只给出种植葵花的土壤含盐量 SWAP 模型的率定、检验过程图),率定的溶质运移参数和土壤水力参数见表 2。

表 3 除水分 5 cm 深度的测点及 20~40 cm 葵花测点外,其余测点的均方误均在 5 以内,表明二者吻合较好。从图 1 也可直观看出,模拟值与实测值拟合较好。率定后的 SWAP 模型可用于对微咸水灌溉条件下土壤水-盐动态过程的模拟预测。

2 结果与分析

2.1 盐分在垂直剖面上的变化规律

通常趋势预测时,平均年法是一种简单有效的方法^[12]。通过对试验区 44 a 降雨资料的频率分析,2002 年为平水年,模拟预测所需气象、灌溉资料等采用平均年 2002 年的数据。只给出淋洗灌溉定额(LR)下小麦的盐分剖面分布图、溶质通量图(图 2)。

由第一次灌水后(5月21日)的剖面图可看出,表层盐分明显降低,盐分随着水分向下移动。LR 下 3 种模型的溶质浓度小麦大约在 90 cm 处、葵花约在 80 cm 处、玉米约在 60 cm 处达到最大值,分别为 4.45、3.75 和 5.5 g·L⁻¹,比正常灌溉定额(IR)下定额分别低 0.29、1.22 和 0.16 g·L⁻¹。3 种模型达到峰值的位置比 IR 下约低 10 cm。在灌溉间歇内,在蒸发作用下土壤水分逐渐降低,盐分在某一深度向上运移,土壤表层盐分浓度增高。这一深度以下盐分向下运移,随后生育期内各次灌水前后盐分在剖面上的运移都遵循了以往研究类似的规律。

LR 下,小麦模型大约在 100 cm 以上土层内,土壤盐分值低于 IR 的土壤盐分值。0~20 cm 土层内,土壤盐分比 IR 下土壤盐分峰值低 0.93 g·L⁻¹。20~100 cm 土层内土壤盐分峰值低 0.5 g·L⁻¹。100 cm 以下土层内的土壤盐分值高于 IR 的盐分值 0.3 g·L⁻¹。生育期灌溉后到模拟结束,100 cm 以上土层土壤盐分一

表 1 作物灌溉制度

Table 1 Irrigation norm of crop

灌溉时间 Irrigation time	作物 Crop	灌水定额/m ³ ·hm ⁻² Irrigation quota/m ³ ·hm ⁻²	灌溉水矿化度/g·L ⁻¹ Total dissolved solid of irrigation/g·L ⁻¹
5月12日—5月14日	小麦	900	0.608
5月28日	小麦	750	3
7月4日	小麦	750	8.21
7月4日	葵花	900	3.06
7月4日	玉米	900	3.06
9月2日	玉米	750	8.07
10月16日	秋浇	1 800	0.608

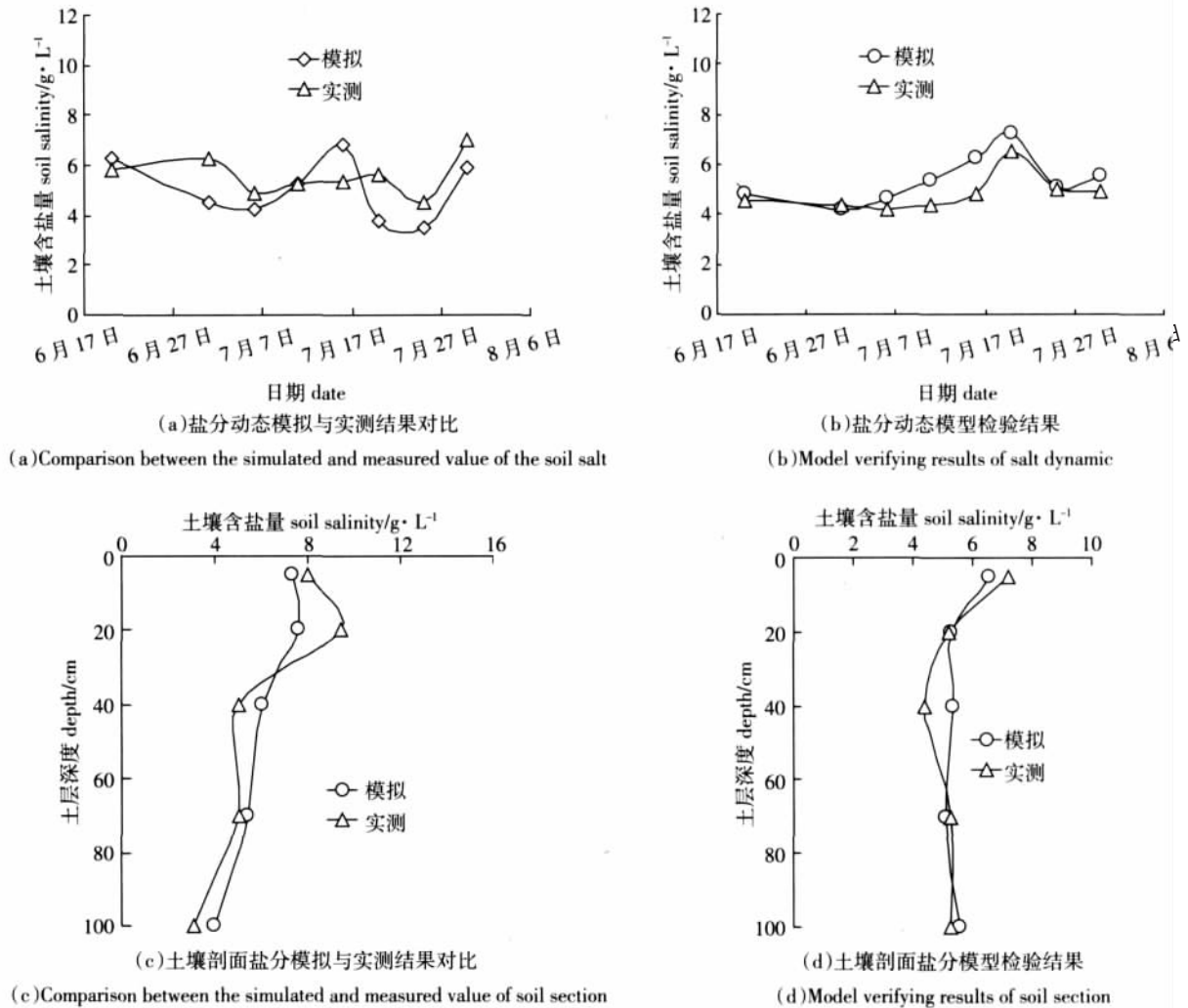


图 1 SWAP 模型识别过程图

Figure 1 Identifying procedure of SWAP model

表 2 率定后的土壤水力参数及溶质运移参数

Table 2 Identified soil hydraulic and solute movement parameter

作物 crop	土层 layer	土层深度 depth/cm	土壤质地 Soil texture	$\theta_{res}/$ $cm \cdot cm^{-1}$	$\theta_{sat}/$ $cm \cdot cm^{-1}$	$K_{sat}/$ $cm \cdot d^{-1}$	α/cm^{-1}	n	λ	扩散长度 diffusion length/cm	分子扩散率 Molecular diffusion rate
小麦	1	0~100	粉壤土	0.05	0.43	2.35	0.02	1.680	-1.51	12.2	0.01
	2	100~300	砂壤土	0.08	0.43	14.0	0.01	1.684	-1.53		
玉米	1	0~100	粉壤土	0.08	0.43	2.55	0.03	1.58	-1.41	12.6	0.01
	2	100~300	砂壤土	0.10	0.45	16.5	0.02	1.484	-1.53		
葵花	1	0~100	粉壤土	0.08	0.43	2.25	0.07	1.580	-1.41	16.0	0.01
	2	100~300	砂壤土	0.10	0.45	14.15	0.085 7	1.484 4	-1.43		

注 研究区地下水最大埋深为 300 cm, 土柱深度取 300 cm。据土壤质地资料整个土柱分为上层 0~100 cm, 下层 100~300 cm。

直低于 IR 下的土壤盐分值, 到 10 月 20 日土壤盐分剖面的最大值比 IR 土壤盐份值低 $0.93 g \cdot L^{-1}$ 。

葵花模型与小麦模型在 100 cm 以上的情况相似, 在 100 cm 以下虽然也具有与小麦模型相同的变化趋势, 但 LR 与 IR 之间土壤盐分相差较小。

玉米模型约在 80 cm 以上土层, 土壤盐分值远远低于 IR 的土壤盐分值。最终剖面的土壤盐分峰值比 IR 的土壤盐分峰值低 $3.1 g \cdot L^{-1}$ 。80 cm 以下土层, 盐分值高于 IR 的盐分值, 最高值处高 $1.0 g \cdot L^{-1}$ 。

以上结果说明, 采用 LR 后, 在垂直方向上上层

表3 土壤水分、盐分的均方误差(RMSE%)
Table 3 RMSE of soil moisture and soil salinity(%)

	土层深度/cm Depth	小麦 wheat	玉米 maize	葵花 sunflower
水分 soil moisture	0~5	5.54	5.14	5.98
	5~20	4.21	4.26	4.79
	20~40	4.08	4.60	5.08
	40~70	2.42	4.98	3.55
	70~100	2.29	4.89	4.32
盐分 soil salinity	0~5	3.07	2.54	4.58
	5~20	0.96	1.35	2.18
	20~40	1.95	1.18	0.72
	40~70	2.58	1.56	1.46
	70~100	1.96	1.07	0.91

盐分随着大定额的水量向下移动,将盐分带入下层,在更深层运移速度减慢,两种定额的盐分差值减小。反映在土壤溶质通量图上,溶质通量达到峰值的位置IR要比LR滞后。

2.2 模拟单元体内盐分均衡及作物相对产量

由模拟的盐分均衡结果可知,LR下小麦模型的田间土层积盐 $14.2 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$,葵花模型积盐 $9.3 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$,

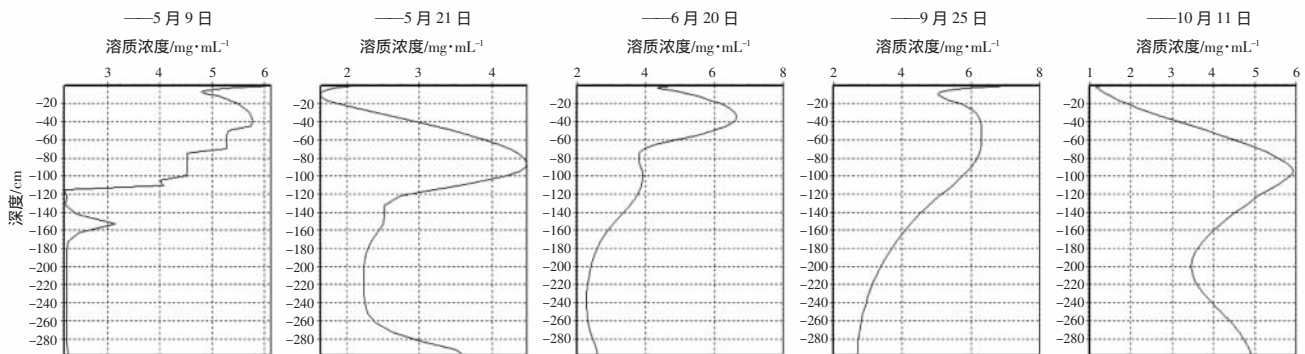
玉米模型积盐 $5.8 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-3}$,分别比IR下减少26.8、1.9和 $12.5 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。LR下小麦、葵花和玉米模型的土壤盐分分别增加了4.5%、3.6%和1.8%,但分别比IR下的积盐程度降低7.5%、0.7%、4%。

IR下小麦与葵花减产率仅为3%~10%。玉米有一定的减产,减产率为23%。LR下小麦的相对减产率为2%,葵花为8%,玉米为17%,产量略高于IR。

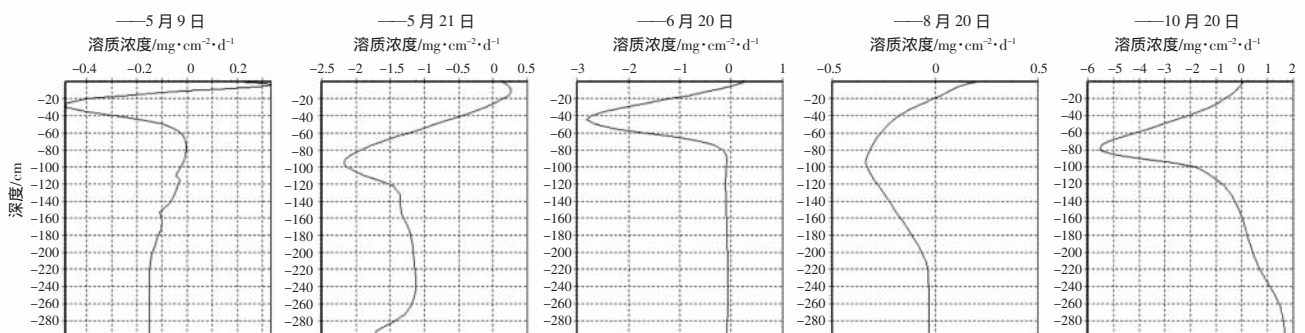
2.3 微咸水灌溉的土壤盐分累积预测

由两种灌溉制度下的模拟可知,LR下土壤盐分的积累低于IR,盐分积累的深度也较IR深,作物相对减产率比IR小。所以LR是微咸水灌溉的首选方案。但LR下的微咸水灌溉也会增加土壤盐分,而盐分的积累是否逐年递增,数年后土壤盐分累积的程度如何,是否会给水-土环境带来危害,同时为微咸水灌溉的可行性提供进一步的理论依据,因此,对LR下土壤盐分累积的趋势进行预测,解决上述问题,是保证农业生产可持续发展的关键。

经过前面的模拟可知,淋洗灌溉定额下小麦模型土壤盐分增加最多。所以土壤盐分累积预测的模型选取小麦模型,将土壤盐分的增加量平均分配在初始剖



(a)土壤盐分分布图
(a) Soil salinity distribution



(b)溶质通量图
(b) solute flux graph

图2 淋洗灌溉定额下土壤盐分动态分布图

Figure 2 Soil salt dynamic distribution in the leaching

面的 0~100 cm 土层内, 作为模型的初始盐分输入模型。逐年进行预测, 连续预测结果见图 3。

从图 3(a)可看出, 土壤盐分的积累随运行年数的增加而呈递减趋势, 到第 11 a 后土壤盐分基本保持进出平衡。图 3(b)为运行 15 a 后的最终土壤盐分剖面图。从图中可看出, 土壤盐分在 0~100 cm 土层内呈递增趋势, 在 100 cm 处达到峰值 11.1 g·L⁻¹, 比最初 10 月 20 日的剖面盐分峰值增加 5.1 g·L⁻¹。在 100 cm 以下土层盐分递减, 对应的作物相对产量为 84% 相对减产率为 16%。到土壤盐分基本维持平衡时, 土壤的含盐量达到 0.185 2 mg·cm⁻³, 比采用微咸水灌溉前的土壤含盐量 0.103 mg·cm⁻³ 增加 0.082 2 mg·cm⁻³, 相当于土壤含盐量为 0.126%, 仍属于轻度盐渍土。

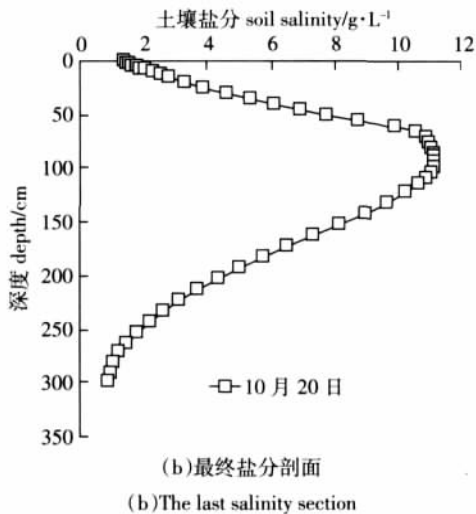
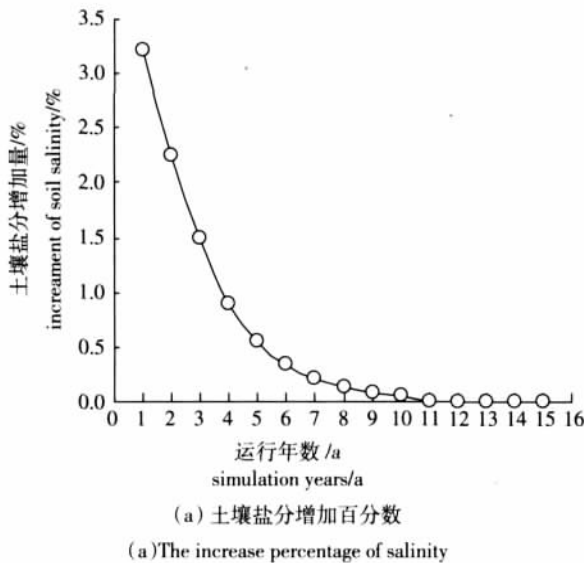


图 3 土壤盐分累积预测图

Figure 3 Accumulative prediction of the soil salinity

3 讨论与结论

目前, 关于微咸水灌溉土壤水盐运移的研究大多集中在不同水质、灌水次数及水量的试验条件下土壤水盐在剖面上的分布情况^[1, 2, 14, 18-21]。

Ali Kerem Sayse^[22]以作物根系土壤的水盐平衡方程为基础建立了灌溉、排水、作物耗水等各项水盐平衡要素之间的动态关系, 没有对咸水灌溉条件下盐分的积累趋势进行研究。史晓楠等^[15]、吴忠东等^[17]、马东豪等^[16]对微咸水入渗特征进行了研究。

因此, 分析和预测长期微咸水灌溉过程中盐分积累和富集规律, 研究不同微咸水灌溉方式下灌溉土层水、盐运移特征显得尤为重要。

本文在前人的研究基础上, 得出以下结论:

淋洗灌溉定额下在垂直方向上上层盐分随着大定额的水量向下移动, 将盐分带入下层, 使耕作层的盐分降低, 更有利于作物生长, 所以, 采用微咸水灌溉时, 淋洗灌溉定额是首选方案。

微咸水灌溉后在灌溉定额和灌水浓度不变的前提下, 土壤盐分的积累随着时间的推移而呈递减趋势, 大约在 10 a 后盐分达到进出平衡状态。到土壤盐分基本维持平衡时, 土壤的含盐量仍在轻度盐渍土范围之内, 不会对土壤水土环境产生较大的影响。作物相对产量降幅不是很大, 可以采取调整作物种植结构, 增加耐盐或喜盐作物的种植面积等措施。

综上所述, 在干旱、半干旱地区微咸水可作为一种灌溉水源, 在灌溉淋洗(淋洗灌溉定额)和排水(排盐)作用下, 土壤剖面盐分可保持动态平衡。

参考文献:

[1] 乔玉辉, 宇振荣. 河北省曲周盐渍化地区微咸水灌溉对土壤环境效应的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 75-79.
Qiao Yu-hui, Yu Zhen-rong. Effect of brackish water on soil environment in saline area of Quzhou of Hebei Province[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(2): 75-79.

[2] 史晓楠, 王全九, 苏莹. 微咸水水质对土壤水盐运移特征的影响[J]. 干旱区地理, 2005, 28(4): 516-520.
SHI Xiao-nan, WANG Quan-jiu, SU Ying. Effects of slight saltwater quality on the characteristics of soil water and salt transference[J]. *Arid Land Geography*, 2005, 28(4): 516-520.

[3] 吕焱, 杨培岭, 管孝艳, 等. 咸淡水交替淋溶下土壤盐分运移试验[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(6): 90-93.
LV Ye, YANG Pei-ling, GUAN Xiao-yan, et al. Experimental study on salt movement in soil under saline and fresh water alternate leaching[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2007, 27(6):

- 90-93.
- [4] 张余良, 陆文龙, 张伟, 等. 长期微咸水灌溉对耕地土壤理化性状的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4) :969-973.
ZHANG Yu-liang, LU Wen-long, ZHANG Wei, et al. Effects of long term brackish water irrigation on characteristics of agrarian soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4) :969-973.
- [5] Beltran J M. Irrigation with saline water benefits and environmental impact[J]. *Agricultural Water Management*, 1999, 40 :183-194.
- [6] Malash H, Flowers T J, Ragab R. Effect of irrigation systems and water management practices using saline and non-saline water on tomato production[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 78(1) :25-38.
- [7] 杨树青, 史海滨, 胡文明, 等. 内蒙古河套灌区咸水灌溉的环境效应分析[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(5) :72-74.
YANG Shu-qing, SHI Hai-bin, HU Wen-ming, et al. Study on environment effects of saline water irrigation in Inner Mongolia hetao irrigation districts[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, 23(5) :72-74.
- [8] Dam, Van J C, Huyen J, Wesseling J G, et al. Theory of SWAP version 2.0, simulation of water flow, solute transport and plant growth in the soil water atmosphere-plant environment[M]//Article 71, Department water resources, Wageningen Agricultural University, Technical Document 45, Alterra, Wageningen, the Netherlands. 1997.
- [9] Wang Xiugui. Effect of groundwater table control on water management strategy and crop yield in Qingtongxia irrigation district in China[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2004, 2.
- [10] 魏占民. 干旱区作物-水分关系与田间灌溉水有效性的 SWAP 模型模拟研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2003.
WEI Zhan-min. Study on crop-water relationship and availability of field irrigation water based on SWAP model simulation in arid area[D]. Hohhot Inner Mongolia Agricultural University, 2003.
- [11] 王卫光, 王修贵, 沈荣开, 等. 河套灌区咸水灌溉试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5) :92-96.
WANG Wei-guang, WANG Xiu-gui, SHEN Rong-kai, et al. Experimental research on saline-water irrigation in Hetao irrigation district[J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(5) :92-96.
- [12] 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, 2005.7.
YANG Shu-qing. Prediction and research of water-soil environment effect under light-saline water irrigation based on Visual-MODFLOW and SWAP coupling model in arid area[D]. Hohhot Inner Mongolia Agricultural University, 2005.7.
- [13] 水利部国际合作司, 农村水利司, 译. 美国国家灌溉工程手册[M]. 中国水利水电出版社, 1998 :150-155.
Department of International Cooperation, Science and Technology, Department of Irrigation, Drainage and Rural Water Supply. National irrigation engineering manual of the United States[M]. Hydroelectricity Publishing Company of China, 1998 :150-155.
- [14] 邵玉翠, 李悦, 盛福昆, 等. 浅层咸水灌溉对冬小麦和土壤安全性的研究[J]. 生态环境, 2006, 15(6) :1241-1245.
SHAO Yu-cui, LI Yue, SHENG Fu-kun, et al. Safety of winter wheat and soil using brackish water irrigation[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(6) :1241-1245.
- [15] 史晓楠, 王全九, 巨龙. 微咸水入渗条件下 Philip 模型与 Green-Ampt 模型参数的对比分析[J]. 土壤学报, 2007, 44(2) :360-363.
SHI Xiao-nan, WANG Quan-jiu, JU Long. Parameters of Philip and Green-Ampt models for soils infiltrated with brackish water[J]. *ACTA Pedologica Sinica*, 2007, 44(2) :360-363.
- [16] 马东豪, 王全九, 苏莹, 等. 微咸水入渗水盐运移特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2006, 25(1) :62-66.
MA Dong-hao, WANG Quan-jiu, SU Ying, et al. Analysis of the characteristics of soil water and salt movement in saline water infiltration[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2006, 25(1) :62-66.
- [17] 吴忠东, 王全九. 不同微咸水组合灌溉对土壤水盐分布和冬小麦产量影响的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11) :71-76.
WU Zhong-dong, WANG Quan-jiu. Field study on impacts of soil water salt distribution and winter wheat yield by different saline water combination irrigations[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(11) :71-76.
- [18] Abu-Awwad A M. Influence of different water quantities and qualities on limon trees and soil salts distribution at the Jordan Valley[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 52 :53-71.
- [19] Patel R M, Prasher S O, Goel P K, et al. Brackish water sub-irrigation for vegetables[J]. *Irrig Drain*, 2003, 52 :121-132.
- [20] Pang H, Yang J, Yang H. Effects of irrigation with saline water on soil salinity and crop yield[J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2004, 10 :599-603.
- [21] Wenjun Ma, Zhenqiang Mao, Zhenrong Yu, et al. Effects of saline water irrigation on soil salinity and yield of winter wheat-maize in North China plain[J]. *Irrig Drainage Syst*, 2007, 22(1) :3-18.
- [22] Ali Kerem Saysel, Yaman Barlas. A dynamic model of salinization on irrigated lands[J]. *Ecological Modelling*, 2001, 139(2-3) :177-199.