

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.

ZENG Jie-feng, LIU Xia, LI Jiu-hao, 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.

基于SWAP模型的耕地-盐荒地-沙丘-海子水盐动态分析

曾揭峰^{1,2}, 刘霞^{*}, 李就好², 夏玉红³, 王丽萍¹

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 华南农业大学水利与土木工程学院, 广州 510642; 3. 巴彦淖尔市水利科学研究所, 内蒙古 巴彦淖尔 015000)

摘要:为探讨盐荒地、沙丘和海子对耕地排盐的作用和机理,于2013—2016年在内蒙古河套灌区张连生研究区展开试验,利用土壤水分、盐分以及地下水盐分、埋深变化的观测数据,经SWAP模型率定和验证,对试验区水盐动态变化进行模拟和分析。结果表明,SWAP模型能够较好地反映试验区各地土壤水盐的垂直动态变化规律。模型验证结果显示,土壤水分的均方根误差均小于 $0.03\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$,土壤盐分均方根误差均小于 $0.12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,且二者平均相对误差均小于16%。地下水动态分析表明试验区地下水走向基本为从西北流向东南。研究表明,耕地含水量受灌水影响较大,水分逐渐向深层渗漏并侧向补给盐荒地和沙丘。沙丘表层含水量低,而深层水分可侧向补给耕地、盐荒地。耕地盐分在灌溉期向盐荒地和沙丘运移,最终汇集到海子,盐荒地在作物的生育期积累盐分,而盐分在秋浇期流失。耕地和盐荒地的地下水在灌溉期侧向补给沙丘和海子,非灌溉期由沙丘的地下水侧向补给耕地、盐荒地及海子。

关键词:耕地-盐荒地-沙丘-海子;SWAP模型;水盐动态;地下水动态

中图分类号:F323.21

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)06-0540-10

doi: 10.13254/j.jare.2018.0226

Dynamic analysis of water and salt in cropland - saline alkali land - sand dunes - lake area based on SWAP model

ZENG Jie-feng^{1,2}, LIU Xia^{1*}, LI Jiu-hao², XIA Yu-hong³, WANG Li-ping¹

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. Bayannur Water Research Institute, Bayannur 015000, China)

Abstract: In order to explore the action and mechanism of saline-alkali land, sand dunes and lake on salinity discharge of cropland, an experiment was conducted from 2013 to 2016 at Zhangliansheng research area, which located in the Hetao irrigation district of Inner Mongolia. This experiment utilized variable observed data of soil moisture and salinity as well as groundwater salinity and burial depth to simulate and analyze dynamic change of soil moisture and salinity via calibration and validation of SWAP model. The results showed that SWAP model could better reflect the vertical dynamic change law of soil moisture and salinity in the test area. Model validation results showed that the root mean square error (RMSE) of soil moisture was less than $0.03\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$, the RMSE of soil salinity was less than $0.12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, and the mean relative error (MRE) of both were less than 16%. The groundwater dynamic analysis showed that the groundwater trend in the test area was basically from northwest to southeast. The research showed that the water content of cropland was greatly affected by irrigation water, and the moisture gradually seeped into the deep layer and then laterally replenished saline-alkali land and sand dunes. The surface water content of sand dunes was low, while the deep water could laterally replenish cropland and saline-alkali land. Salinity of cropland migrated to saline-alkali land and sand dunes during the irrigation period, and finally gathered in lake. Salinity was accumulated in saline-alkali land during the growth period of crops, while it was lost during the autumn irrigation period. The groundwater of cropland and saline-alkali land was laterally replenished sand dunes and lake during the irrigation period, while it was lost during the autumn irrigation period.

收稿日期:2018-09-07 录用日期:2018-09-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51169013, 51869019)

作者简介:曾揭峰(1995—),男,江西抚州人,硕士研究生,从事农田水利水盐灌排循环和作物图像处理研究。E-mail: zjff388@163.com

*通信作者:刘霞 E-mail: liukasumi@126.com

kali land laterally replenished sand dunes and lake in irrigation period, while the groundwater of sand dunes could laterally replenish cropland, saline-alkali land and lake in non-irrigation period.

Keywords: cropland-saline alkali soil-sand dunes-lake; SWAP model; water and salt dynamics; groundwater regime

据联合国教科文组织(UNESCO)和粮农组织(FAO)不完全统计,全球盐碱土面积约 $9.54 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ^[1]。河套灌区地处我国内蒙古自治区西部、黄河流域中游,是我国重要的粮食生产区^[2]。引黄灌溉以来,黄河水的引入使灌区地下水位升高,每年均有大量盐分伴随黄河水进入灌区^[3]。河套灌区的土壤盐碱化现象较国内其他灌区严重,灌区耕地附近遍布盐荒地^[4]。而本文针对河套灌区耕地-盐荒地-沙丘-海子组合试验区的水盐流向研究,对调节河套灌区水盐平衡、改善盐荒地具有重要意义。

SWAP(Soil Water Atmosphere Plant)模型前身是著名的 SWATRE 模型,最早(1978年)由荷兰 Wageningen 大学和 Alterra、SLM、WSG 研究小组提出^[5]。模型旨在模拟土壤-水分-大气-作物系统中饱和、非饱和土壤的水、溶质和热量的运移过程和作物生长进程的农业水文模型^[6]。Sarwar 等^[7]使用 SWAP 模型分析了长时间微咸水灌溉对印度西北部地区生产的影响;Smets 等^[8]在巴基斯坦通过 SWAP 模型成功模拟出棉花-小麦-棉花轮作种植条件下的土壤水盐运移情况。刘路广等^[9]运用 SWAP 模型建立了土壤水分运动模型,模拟不同灌溉条件下的灌溉制度,提出了适宜的灌水控制标准。缴锡云^[10]等针对稻田的水分运移,研究了 SWAP 模型的应用条件并进行模型验证,发现 SWAP 模型可用于模拟稻田的水分运移和相对产量。袁成福等^[11]用 SWAP 模型模拟石羊河流域土壤水盐的动态变化规律以及制种玉米的产量情况。

本文针对试验区各区域土壤及地下水的水盐运移规律,将 SWAP 模型应用于组合试验区,模拟水分盐分在耕地、盐荒地和沙丘的垂直交换过程,为水盐控制提供科学依据。

1 试验概况

1.1 试验区概况

试验区设在河套灌区(北纬 $49^{\circ}19' \sim 41^{\circ}18'$, 东经 $106^{\circ}20' \sim 109^{\circ}19'$)沙壕渠东南部张连生实验区。地处半干旱荒漠的草原地带,海拔 1030~1050 m,年均降水量为 136.7 mm,降雨量小、年际变化大、分配不均,年均蒸发量在 2032~3179 mm 之间,为降雨量的

10~30 倍^[12],年平均气温 $10 \sim 12^{\circ}\text{C}$,夏秋两季降水量占全年的 80% 以上,风向以西风及西北风为主,年均风速为 $2.5 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[13]。根据试验区微气象站提供的气象资料,试验区平均气温及降雨的年内变化见图 1。

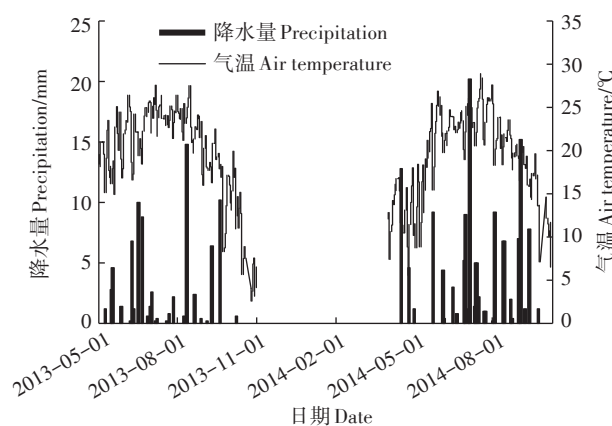


图 1 2013—2014 年降水量与气温变化

Figure 1 Changes of precipitation and air temperature from 2013 to 2014

1.2 试验设计

在试验区耕地、盐荒地和沙丘分别设置 3 套地下水位自动测定仪,并通过微气象站收集温度、湿度、太阳辐射、气压、土壤温度与含水量等数据^[14-15]。主要监测数据:2013—2016 年土壤盐分和地下水盐分、土壤含水量、土壤降雨、温度,耕地灌水量、地下水和海子水位等。

试验主要种植作物为玉米和葵花。试验区中耕地、盐荒地、沙地和海子的地面高程分别为 997.365、996.317、997.583、996.514 m。耕地井、盐荒地井和沙丘井的井口距离分别为 70、17、55 cm;2013 年测得三口实验井的初始地下水位(即井口与水面之距)分别为 246、241、264 cm。

试验采用人工取样测定土壤水分、盐分,试验区典型土壤每年分批取土,每批土共 7 份,其中沙丘、耕地、荒地土样各 2 份,用作实验对照,且海子附近土壤取有 1 份土样。

试验在作物播种前、收获后、灌水前后取土,根据观测资料和土壤质地确定耕地、盐荒地、沙丘的模拟

土层深度为120 cm,并将土层分为7层(0~10、10~20、20~30、30~40、40~60、60~80、80~120 cm)。试验期间,2013年取样8批,时间分别为5月18日、5月28日、6月30日、7月20日、7月29日、9月25日、10月17日、11月29日;2014年取样7批,时间分别为4月23日、6月13日、7月8日、7月25日、8月18日、9月23日、12月5日;2015年取样8批,时间分别为5月15日、6月11日、6月24日、7月18日、8月5日、8月25日、9月15日、9月30日;2016年取样8批,时间分别为6月2日、6月20日、7月12日、7月28日、8月12日、8月31日、9月20日、10月9日。2013年灌溉时间为5月25日、7月21日;2014年灌溉时间为5月28日、7月17日、11月5日;2015年灌溉时间为5月29日、7月19日;2016年灌溉时间为6月5日、7月15日、10月26日。

土壤水分测定是通过室内试验烘干法得到土壤含水率;土壤盐分测定是将土样碾碎过筛后,采用5:1水土比配制浸提液,再通过室内实验电导法测量,测定待测液电导率的高低即可测出土壤水溶性盐含量^[11]。

通过试验区水井抽取地下水进行水质检测,2013年6批,2014年7批,每年每批抽取4瓶地下水,分别对应盐荒地井水、沙地井水、耕地井水和海子井水;2015年、2016年各8批,每批抽取7瓶地下水,包括3口旧井:耕地井、盐荒地井和海子井,以及4口新井:1#(沙丘井)、3#(耕地井1)、5#(海子井)、6#(耕地井2)。试验区平面布置图如图2所示,各点位置坐标见表1。

表1 试验区位置

Table 1 Location of the test area

地点 Site	纬度(N) Latitude	经度(E) Longitude
耕地	40.909 61	107.280 722
沙丘	40.910 08	107.270 639
盐荒地	40.906 78	107.267 528
海子东	40.905 78	107.264 861
1#	40.910 18	107.270 802
3#	40.910 23	107.269 270
5#	40.909 99	107.266 926
6#	40.911 14	107.270 514

2 结果与讨论

2.1 土壤水分动态分析

2.1.1 模型建立

土壤水分运动根据微单元土壤体积水平衡原理和Darcy定律得出Richard方程^[16-19]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = c(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial \left[k(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right]}{\partial z} \quad (1)$$

式中: $c(h)$ 为容水度, cm^{-1} ; h 为土壤水压力水头, cm ; $k(h)$ 为土壤饱和导水率, $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$; z 为高度, cm ; t 为单位时间, s ; $\partial h / \partial t$ 为土壤水通量; $\partial h / \partial z$ 为高度为 z 处的土壤水运动通量。

模型水力函数采用VG(van Genuchten)公式^[20]:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^{\frac{n-1}{n}}} \quad (2)$$

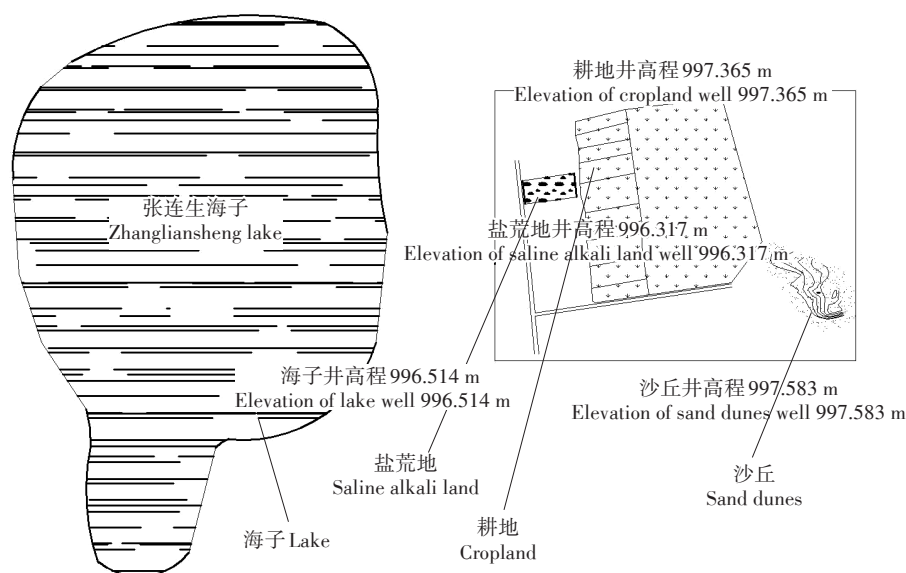


图2 试验区平面位置

Figure 2 Plane position chart of test area

式中: θ 为土壤体积含水率, $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$; h 为土壤基质势,cm; θ_s 、 θ_r 分别为土壤饱和含水率和残余含水率, $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$; α 表示进气值的倒数, cm^{-1} ,即 α 越小,进气值越大,土壤持水性能越强, n 表示孔径分布指数($n>1$)。

2.1.2 SWAP模型的率定和验证

试验根据张连生实验区2013—2014年度耕地、盐荒地和沙丘土壤水分的测定结果,对不同土壤的平均含水率和土壤水分特性参数进行率定。模型基本运动参数的初始值根据室内实验测定样土来初步确定^[21-23]。试验将耕地、盐荒地0~10 cm和10~20 cm土样以及20~30 cm和30~40 cm土样混合后进行土壤物理特性检测,详见表2。以初始地下水水位作为下边

界条件,根据土壤含水率模拟值和观测值的比对结果人工调整相应参数^[24]。经率定,耕地、盐荒地土壤水分特性参数如表3所示,沙丘土壤水分特性参数如表4所示。

本研究旨在摸清组合试验区不同土壤水分垂直运移趋势^[25-27]。因此,利用SWAP模型分别对耕地、沙丘、盐荒地土壤各层含水率的观测值进行模拟,然后将得到的2013年8批土样和2014年7批土样的模拟值平均后,与两年平均观测值进行对比,最终分析得出组合区土壤水分的垂直运移情况。

若统一采用表3所示率定来模拟组合试验区的土壤水分运移情况,能较好地模拟耕地、盐荒地各层的土壤含水率变化趋势,但模型对沙丘的模拟效果不

表2 耕地、盐荒地土壤物理特性

Table 2 Soil physical characteristics of cropland and saline-alkali land

土层深度 Soil depth/cm	容重 Bulk density/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	比重 Specific gravity	土壤颗粒分布 Particle size distribution/%			土壤类型 Soil type
			0.05~2 mm	0.002~0.05 mm	<0.002 mm	
0~20	1.45	2.66	30.95	63.91	5.14	粉壤土
20~40	1.47	2.67	8.92	85.76	5.32	粉土
40~60	1.46	2.70	19.35	77.68	2.97	粉壤土
60~80	1.49	2.71	17.90	79.87	2.23	粉壤土
80~100	1.53	2.72	21.18	75.68	3.15	粉壤土

表3 耕地、盐荒地土壤水分特性参数率定结果

Table 3 Soil water characteristic parameters calibration results of cropland and saline alkali land

土层深度 Soil depth/cm	残余含水率 θ_r Residual moisture content/ $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$	饱和含水率 θ_s Saturated moisture content/ $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$	饱和导水率 K_s Saturation conductivity/ $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$	形状参数 α Shape parameter	形状参数 n Shape parameter	形状参数 λ Shape parameter
0~10	0.06	0.30	5.0	0.03	1.65	0.65
10~20	0.08	0.33	8.0	0.03	1.75	0.80
20~30	0.08	0.33	8.0	0.03	1.80	0.80
30~40	0.08	0.33	8.0	0.03	1.80	0.80
40~60	0.08	0.33	8.0	0.03	1.80	0.80
60~80	0.09	0.36	6.0	0.03	1.45	0.65
80~120	0.09	0.36	6.0	0.02	1.50	0.65

表4 沙丘土壤水分特性参数率定结果

Table 4 Soil water characteristic parameters calibration results of sand dunes

土层深度 Soil depth/cm	残余含水率 θ_r Residual moisture content/ $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$	饱和含水率 θ_s Saturated moisture content/ $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$	饱和导水率 K_s Saturation conductivity/ $\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$	形状参数 α Shape parameter	形状参数 n Shape parameter	形状参数 λ Shape parameter
0~10	0.02	0.10	8.0	0.03	1.65	0.5
10~20	0.05	0.25	10.0	0.03	1.75	0.5
20~30	0.05	0.25	10.0	0.03	1.80	0.5
30~40	0.05	0.25	10.0	0.03	1.80	0.5
40~60	0.05	0.27	10.0	0.03	1.80	0.5
60~80	0.06	0.27	7.5	0.03	1.45	0.5
80~120	0.06	0.30	7.5	0.02	1.50	0.5

够理想,误差较大,这是因为沙丘表层扰动大,且沙土较松散、孔隙大,水分垂直入渗速率较快,同时深层土壤受地下水的补给,导致沙丘土壤含水率年际变化较大,在模型率定和验证过程中曲线产生偏移。因此,根据沙丘土壤特性采用表4所示率定结果重新对沙丘土壤含水率进行模拟,并去除模型率定验证荒地土壤时作物参数对模拟的影响,最终组合试验区各地土壤水分运移模拟结果如图3所示。

模型采用2015—2016年土壤水分观测值进行验

证,验证结果如图4所示。并利用均方根误差 σ (Root mean square error)和平均相对误差 δ (Mean relative error)对模型的模拟值和土壤含水率的实测值进行误差分析^[11]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - o_i)^2} \quad (3)$$

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{s_i - o_i}{o_i} \right| \times 100\% \quad (4)$$

式中: n 表示观测值的个数(根据分层情况,土壤水分

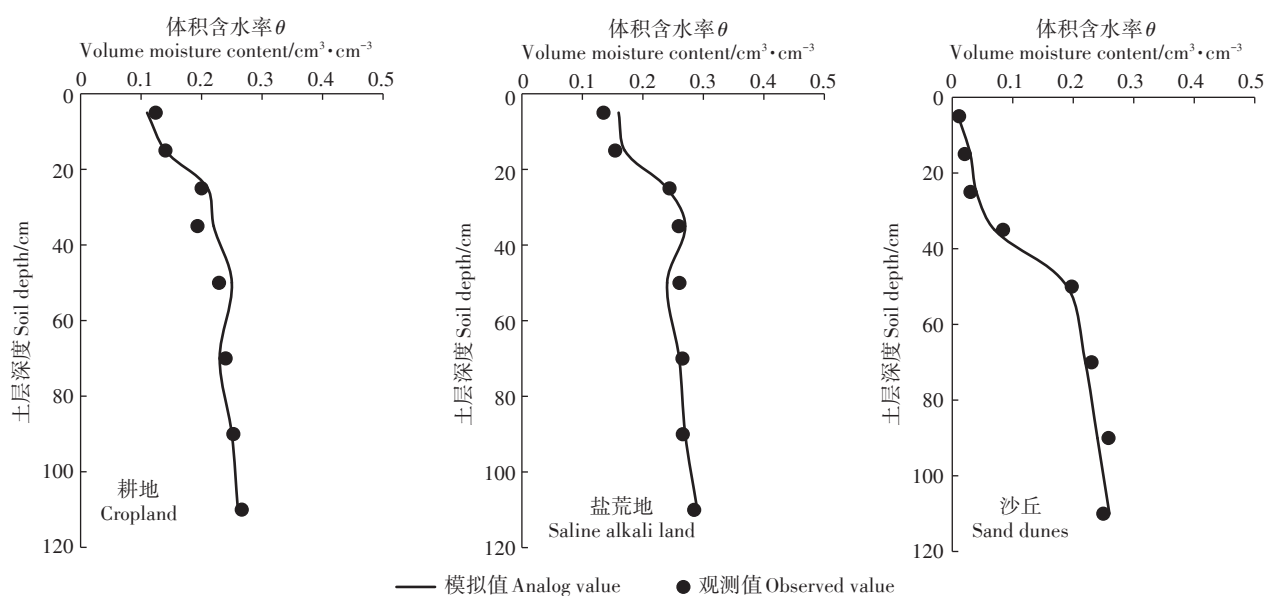


图3 率定期土壤含水率模拟值与实测值的比较

Figure 3 Comparison between simulated and measured soil moisture content in the calibration period

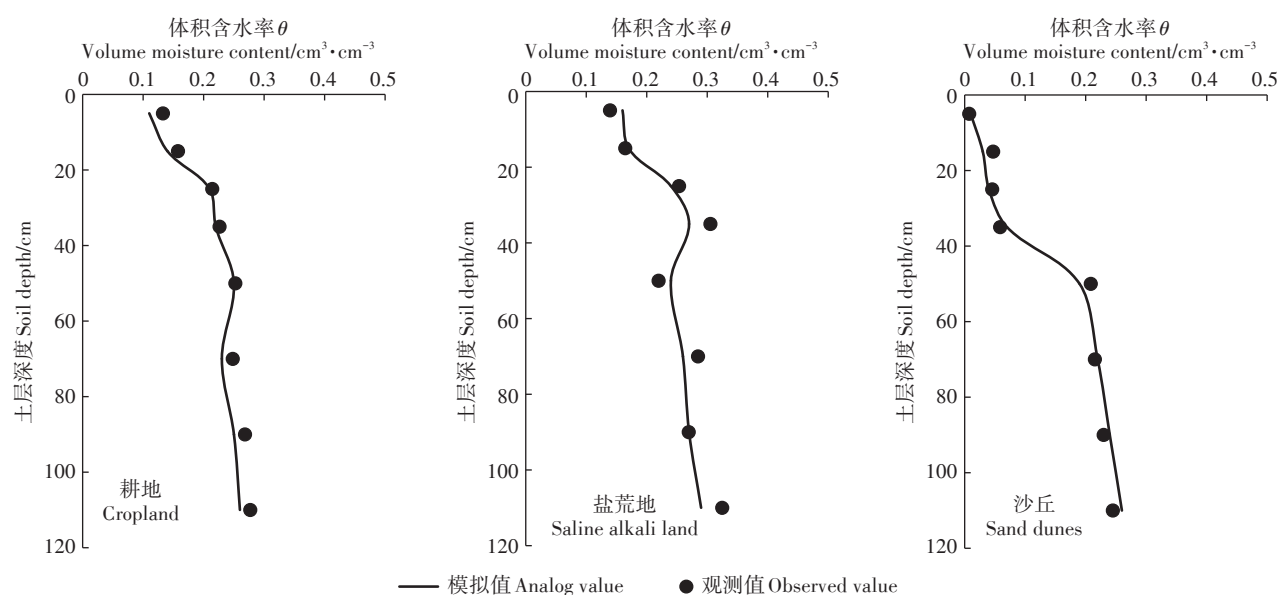


图4 验证期土壤含水率模拟值与实测值的比较

Figure 4 Comparison between simulated and measured soil moisture content in the validation period

率定验证时 n 取8,土壤盐分率定验证时 n 取7); o_i 表示第 i 个观测值; s_i 表示第 i 个模拟值。模拟值与实测值误差分析计算见表5。

从表5可看出,SWAP模型在对组合区各地土壤含水率模拟的过程中,均方根误差均小于等于 $0.03\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$,且平均相对误差均低于14%。由于深层土壤(深度大于60 cm土壤)受灌水和降雨的影响小,耕地和盐荒地土壤含水率模拟效果比表层土壤好。综上所述,SWAP模型可较好地模拟组合区土壤水分的垂直动态变化。

2.2 土壤盐分动态分析

2.2.1 模型建立

土壤水中溶质运移按对流-弥散方程进行计算,弥散通量表达式^[28]为:

$$J = qc - \theta (D_{\text{dif}} + D_{\text{dis}}) \frac{\partial c}{\partial z}$$
 (5)

模型采用1961年Millington和Quirk提出的公式来描述水流路径弯曲度,扩散系数表达式^[29]为:

$$D_{\text{dif}} = D_w \frac{\theta^{10}}{\Phi_{\text{por}}^2}$$
 (6)

式中: J 为弥散通量; q 为水流量; c 为溶质的质量浓度; θ 为土壤体积含水率; $\partial c/\partial z$ 为水力梯度; D_{dif} 为土壤溶质的分子扩散系数; D_{dis} 为土壤溶质的机械弥散系数; D_w 为在自由水溶液中的分子扩散系数; Φ_{por} 为土壤孔隙度。

2.2.2 SWAP模型的率定和验证

根据试验区2013—2014年耕地、沙丘、盐荒地三处各层土壤电导度(EC)的实测资料,采用拟合公式 $S = 0.0275EC + 0.1366$ ^[30]计算出土壤含盐量,用模型进行率定,通过比较土壤含盐量模拟值和实测值调整土壤溶质运移参数,经率定,耕地、盐荒地弥散度取5 cm,分子扩散系数取 $0.7\text{ cm}^2\cdot\text{d}^{-1}$;沙丘弥散度取10 cm,分子扩散系数取 $1.0\text{ cm}^2\cdot\text{d}^{-1}$ 。得到试验区耕地、盐荒地、沙丘三处土壤盐分的纵向运移情况。土壤含盐量的模拟曲线见图5。由图5可知模型能较好地模拟盐荒地、沙丘各层的土壤盐分变化趋势,而耕地的

表5 土壤水分模型率定和验证误差分析

Table 5 Model calibration and validation error analysis of soil moisture

土壤种类 Soil species	模型率定 Model calibration		模型验证 Model validation	
	均方根误差 σ	平均相对误差 δ	均方根误差 σ	平均相对误差 δ
	Root mean square error/ $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$	Mean relative error/%	Root mean square error/ $\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$	Mean relative error/%
耕地	0.02	7.22	0.02	7.76
盐荒地	0.02	5.85	0.03	8.97
沙丘	0.01	13.19	0.02	8.95

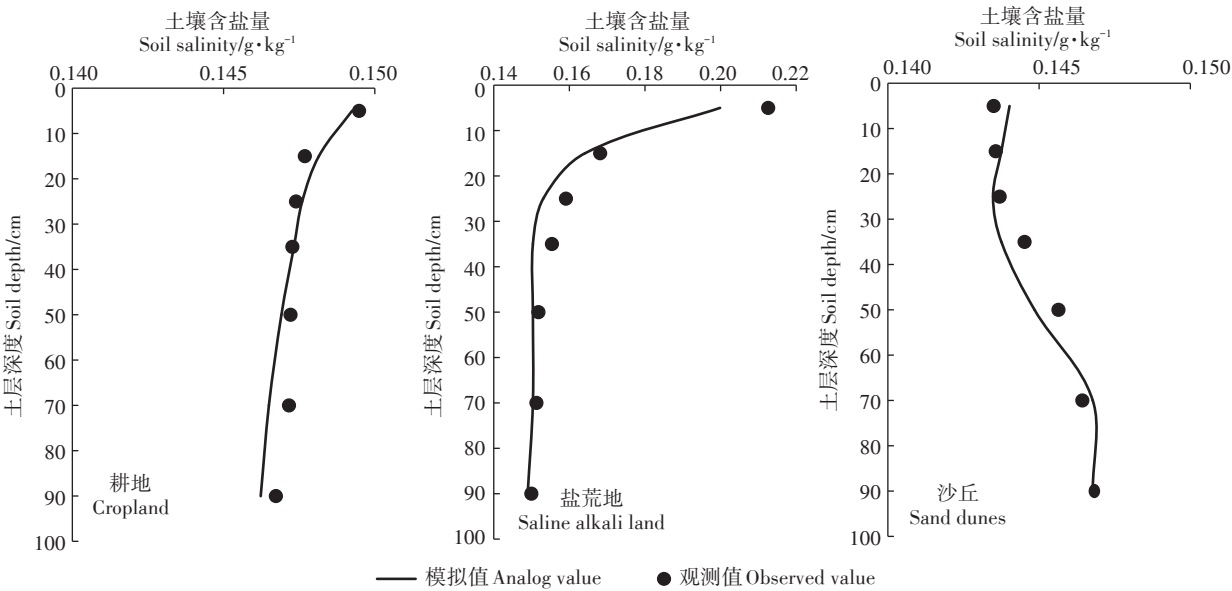


图5 率定期土壤盐分模拟值与实测值的比较

Figure 5 Comparison between simulated and measured soil salinity in the calibration period

土壤盐分模拟曲线与实测值吻合度不高,这是由于灌水和地下水侧向补给使耕地土壤盐分每年的变动较大,导致模拟偏离;而且耕地保水保肥能力强,使耕地土壤保存有残余盐分。模型对盐荒地盐分的模拟也较不稳定,这是因为盐荒地是整个试验区的“盐库”,不断积盐和清空的过程使得模拟略有偏移。

模型使用2015—2016年土壤电导率的观测值拟合计算得出土壤含盐量作为模型验证资料,其结果如图6所示。模拟值与土壤含盐量的误差分析计算结果见表6。从表6可看出,经过率定和验证,模型均方根误差均小于 $0.12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,且平均相对误差均低于16%。因此,SWAP模型可较好地模拟组合区土壤盐分的垂直动态变化。

2.3 地下水动态变化

2.3.1 地下水含盐量变化

地下水含盐量变化与土壤盐分的动态变化有着密切的联系,地下水盐分侧向补给土壤是随着水分运移进行的。由于电导率EC值可用来测量液体中可溶

性盐的浓度,试验通过监测组合试验区各地的地下水电导率的变化来测定地下水含盐量的变化。图7为2015、2016年地下水含盐量变化曲线。由图7可知,耕地井地下水盐分在灌溉期较高,侧向补给沙丘和海子,而非灌溉期盐分较低;盐荒地井地下水盐分较低,说明其盐分随水分向上运移,并在土壤表层积聚;沙丘井地下水盐分在灌溉期和非灌溉期与耕地、盐荒地补排关系密切,起到调盐的作用;海子井中盐分较高,且6—7月灌溉期盐分最高,说明试验区盐分在灌溉期汇集到海子。

2.3.2 地下水埋深变化

由试验区2013—2015年耕地井、沙地井、盐荒地井及海子井的地下水位观测值,分析地下水埋深变化和补排关系,可得到地下水埋深变化曲线,如图8所示。

从图8可以看出,耕地、盐荒地和沙丘地下水埋深在灌溉期缓慢、平稳下降,而在秋浇期后开始回升,且每年5—8月为地下水位的下陷期,9—11月则为地

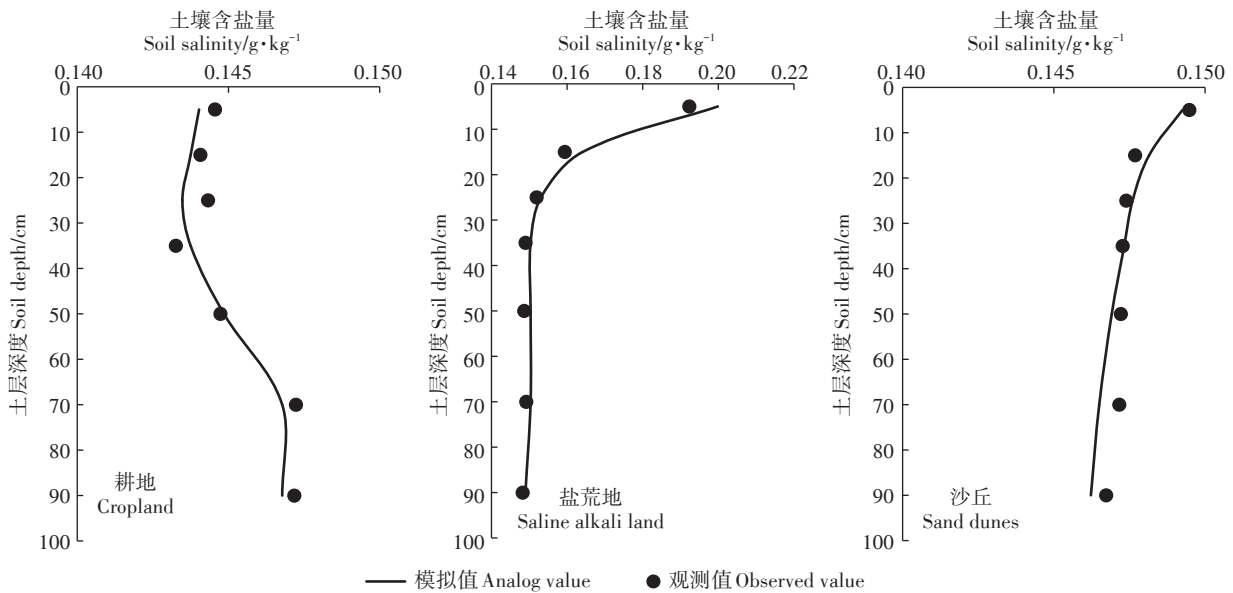


图6 验证期土壤盐分模拟值与实测值的比较

Figure 6 Comparison between simulated and measured soil salinity in the verification period

表6 土壤含盐量模型率定和验证误差分析

Table 6 Model calibration and validation error analysis of soil salinity

土壤种类 Soil species	模型率定 Model calibration		模型验证 Model validation	
	均方根误差 σ Root mean square error/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均相对误差 δ Mean relative error/%	均方根误差 σ Root mean square error/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均相对误差 δ Mean relative error/%
耕地	0.01	2.49	0.02	5.40
盐荒地	0.12	15.57	0.11	8.55
沙丘	0.02	6.82	0.02	4.77

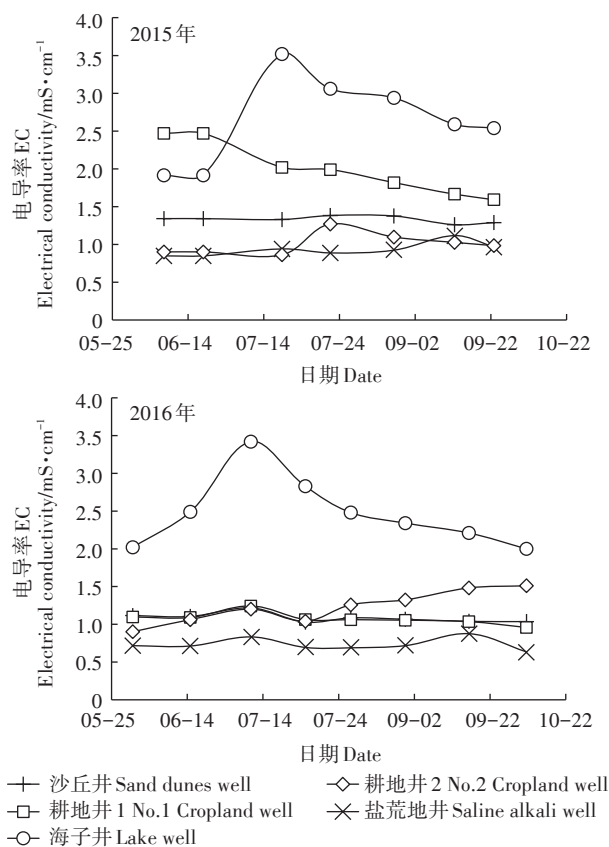


图7 地下水含盐量动态变化

Figure 7 Dynamic changes of groundwater salinity

下水位的上升期。沙丘井地下埋深较深,而海子井地下水埋深最浅,说明沙丘井地下水水位较低,而海子附近的井水水位较高,偶尔会漫出井口。

试验区东南接近沙丘区,降雨入渗、侧向补给量多,地下水位偏低;西北是农田灌溉密集区,即耕地、盐荒地区,地下水位偏高。灌溉期,试验区地下水走向基本为从西北流向东南,且耕地、盐荒地地下水侧向补给沙丘和海子;非灌溉期沙丘井埋深变浅,地下水水位升高,可侧向补给耕地、盐荒地及海子。

3 结论

(1)耕地土壤含水率受灌水的影响,变化起伏较大,且水分逐渐向深层渗漏;盐荒地和沙丘受耕地侧向补给和地下水补给的影响,土壤含水率随深度缓慢增高;沙丘表层保水性差,含水率极低,而深层水分可侧向补给耕地、盐荒地。

(2)耕地在灌水后,土壤含盐量也将随着水分的流动而增多;盐荒地是耕地的“盐库”,在作物生育期逐渐积盐,且积盐将在秋浇期流失,为来年继续积盐清空“盐库”;沙丘表层盐分含量较低,且随土层加深

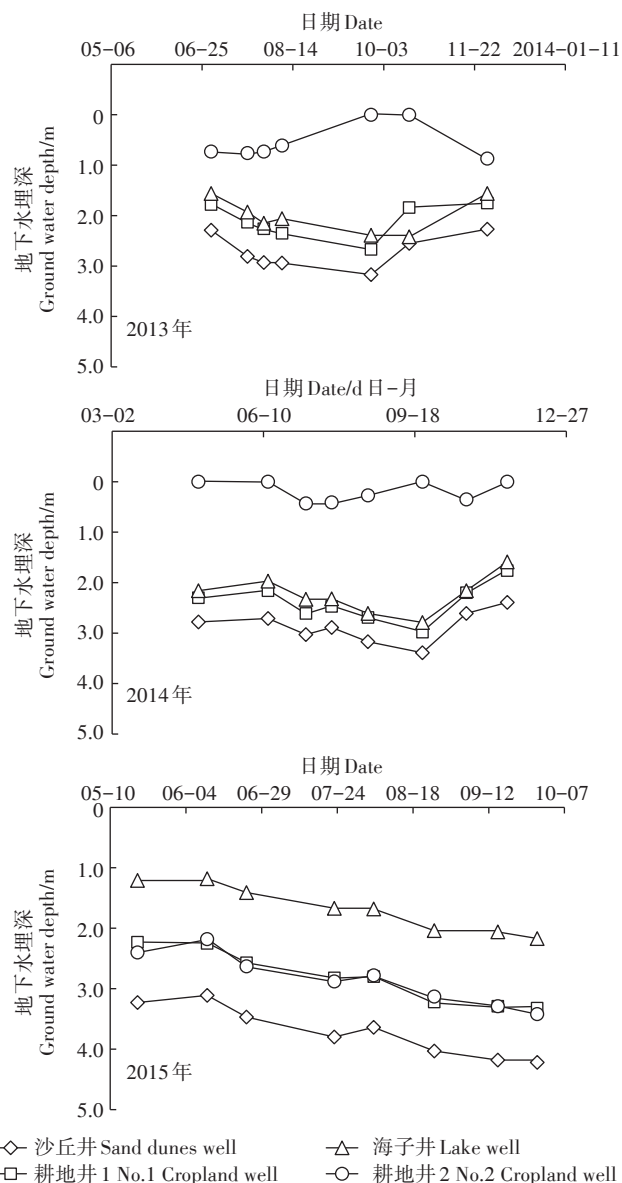


图8 地下水埋深动态变化

Figure 8 Dynamic change of groundwater depth

而逐渐增高,地下水盐分侧向补给沙丘。

(3)耕地井地下水盐分在灌溉期侧向补给沙丘和海子;盐荒地井地下水盐分随水分向上运移,并在土壤表层积聚;沙丘井地下水盐分起到调盐的作用;试验区盐分在灌溉期汇集到海子。试验区地下水走向基本为从西北流向东南。灌溉期,耕地、盐荒地地下水侧向补给沙地和海子;非灌溉期则由沙地侧向补给耕地、盐荒地及海子。

参考文献:

- [1] 杨卫东, 吴永健, 刘春光. 盐碱土改良剂的研究和应用进展[J]. 天津科技, 2014(2): 17-19.

- YANG Wei-dong, WU Yong-jian, LIU Chun-guang. Advances in research and application of saline soil amendments[J]. *Tianjin Science & Technology*, 2014(2):17-19.
- [2] 傅国斌, 李丽娟, 于静洁, 等. 内蒙古河套灌区节水潜力的估算[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1):54-58.
- FU Guo-bin, LI Li-juan, YU Jing-jie, et al. Estimation of water-saving potential in the Hetao irrigation district[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(1):54-58.
- [3] 张义强, 白巧燕. 内蒙古河套灌区水盐运移状况分析研究: 中日合作项目最新研究成果[C]. 合肥: 中国水利学会 2006 学术年会, 2006.
- ZHANG Yi-qiang, BAI Qiao-yan. Analysis and research on the status of water and salt migration in Hetao irrigation district in Inner Mongolia; The latest research results of China-Japan cooperation project[C]. Hefei: China water conservancy association 2006 academic annual meeting, 2006.
- [4] 邹超煜, 白岗栓. 河套灌区土壤盐渍化成因及防治[J]. 人民黄河, 2015, 37(9):143-148.
- ZOU Chao-yu, BAI Gang-shuan. Formation cause and control methods about soil salinization in Hetao irrigation area[J]. *Yellow River*, 2015, 37(9):143-148.
- [5] Xie X, Cui Y. Development and test of SWAT for modeling hydrological processes in irrigation districts with paddy rice[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 396(1):61-71.
- [6] Van Dam J C, Huygen 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[R]. Wageningen: Wageningen Agricultural University and DLO Winand Staring Centre, 1997: 19-114.
- [7] Sarwar A, Bastiaanssen W G M, Feddes R A. Irrigation water distribution and long-term effects on crop and environment[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 50(2):125-140.
- [8] Smets S M P, Kuper M, Van Dam J C, et al. Salinization and crop evapotranspiration of irrigated fields in Pakistan's Punjab[J]. *Agriculture Water Management*, 1997, 35:43-60.
- [9] 刘路广, 崔远来, 冯跃华, 等. 基于SWAP和MODFLOW模型的引黄灌区用水管理策略[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4):9-17.
- LIU Lu-guang, CUI Yuan-lai, FENG Yue-hua, et al. Water management strategies of Yellow River irrigation district based on SWAP and MODFLOW models[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(4):9-17.
- [10] 缴锡云, 虞晓彬, 郭思. SWAP模型在稻田水分运移模拟中的应用[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(10):369-372.
- JIAO Xi-yun, YU Xiao-bin, GUO Si. Application of SWAP model in moisture movement simulation in paddy fields[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2013, 41(10):369-372.
- [11] 袁成福, 冯绍元, 蒋静, 等. 咸水不充分灌溉条件下土壤水盐运动SWAP模型模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20):72-82.
- YUAN Cheng-fu, FENG Shao-yuan, JIANG Jing, et al. Simulation of water-salt transport by SWAP model under deficit irrigation with saline water[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(20):72-82.
- [12] 曹连海, 吴普特, 赵西宁, 等. 内蒙古河套灌区粮食生产灰水足迹评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1):63-72.
- CAO Lian-hai, WU Pu-te, ZHAO Xi-ning, et al. Evaluation of grey water footprint of grain production in Hetao irrigation district, Inner Mongolia[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(1):63-72.
- [13] 李亮, 史海滨, 贾锦凤, 等. 内蒙古河套灌区盐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 Hai-bin, JIA Jin-feng, et al. Simulation of water and salt transport of uncultivated land in Hetao irrigation district in Inner Mongolia[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(1):31-35.
- [14] 孟佩俊, 李淑荣, 和彦冬, 等. 内蒙古农牧业区土壤中有机氯农药的分布特征及健康风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3):539-546.
- MENG Pei-jun, LI Shu-rong, HE Yan-ling, et al. Distribution characteristics and health risk assessment of organochlorine pesticides in surface soil from the major farming and animal husbandry districts in Inner Mongolia[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(3):539-546.
- [15] 张银辉, 罗毅, 刘纪远, 等. 内蒙古河套灌区土地利用变化及其景观生态效应[J]. 资源科学, 2015, 27(2):141-146.
- ZHANG Yin-hui, LUO Yi, LIU Ji-yuan, et al. Land use changes and its effects on landscape ecology in Hetao irrigated areas, Inner Mongolia[J]. *Resources Science*, 2015, 27(2):141-146.
- [16] 许友生, 刘慈群, 林机. Darcy渗流定律的微观界定及其应用[J]. 应用数学和力学, 2004, 25(3):253-261.
- XU You-sheng, LIU Ci-qun, LIN Ji. Microcosmic bound theorem of Darcy's Law and its application[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2004, 25(3):253-261.
- [17] 泰勒 S A. 物理的土壤学[M]. 北京: 农业出版社, 1983.
- Taylor S A. Physical soil science[M]. Beijing: Agricultural press, 1983.
- [18] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- LEI Zhi-dong, YANG Shi-xiu, XIE Sen-chuan. Soil hydrodynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988.
- [19] 李韵珠, 李保国. 土壤溶质运移[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- LI Yun-zhu, LI Bao-guo. Soil solute transport[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [20] 陈俊英, 刘畅, 张林, 等. 斥水程度对脱水土壤水分特征曲线的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21):188-193.
- CHEN Jun-ying, LIU Chang, ZHANG Lin, et al. Impact of repellent levels on drainage soil water characteristic curve[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(21):188-193.
- [21] 李亮, 史海滨, 赤江刚夫, 等. 内蒙古河套灌区耕地与盐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 Hai-bin, TAKEO Akai, 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.

- [22] 李 彬, 史海滨, 闫建文, 等. 节水改造后盐渍化灌区区域地下水埋深与土壤水盐的关系[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1):117-122.
LI Bin, SHI Hai-bin, YAN Jian-wen, et al. Relation between groundwater depth and soil water and salt after water saving reform in salinization irrigation district[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1):117-122.
- [23] 李 彬, 史海滨, 张建国, 等. 节水改造前后内蒙古河套灌区地下水水化学特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1):99-110.
LI Bin, SHI Hai-bin, ZHANG Jian-guo, et al. Hydrochemical characteristics of groundwater before and after water-saving reform in Hetao irrigation district, Inner Mongolia[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(1):99-110.
- [24] 张刘东, 王庆明. 咸水非充分灌溉对土壤盐分分布的影响及SWAP模型模拟[J]. 节水灌溉, 2015(7):32-39.
ZHANG Liu-dong, WANG Qing-ming. Effect of non-sufficient irrigation with saline water on the distribution of water and salinity in soil and SWAP model simulation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2015(7):32-39.
- [25] 解雪峰, 濮励杰, 朱 明, 等. 土壤水盐运移模型研究进展及展望[J]. 地理科学, 2016, 36(10):1565-1572.
XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, et al. Evolution and prospects in modeling of water and salt transport in soils[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(10):1565-1572.
- [26] 徐 旭, 黄冠华, 黄权中. 农田水盐运移与作物生长模型耦合及验证[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4):110-117.
XU Xu, HUANG Guan-hua, HUANG Quan-zhong. Coupled simulation of soil water flow, solute transport and crop growth processes at field scale and its validation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(4):110-117.
- [27] 刘冠男, 薛 薇, 孙春美, 等. 亚硒酸盐在不同理化性质土壤中运移规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3):485-491.
LIU Guan-nan, XUE Wei, SUN Chun-mei, et al. Selenite transport in soils with various physico-chemical properties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3):485-491.
- [28] 张德生, 常安定, 沈 冰, 等. 土壤中吸附性溶质运移对流-弥散模型的准解析解及其数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2005, 20(2):226-232.
ZHANG De-sheng, CHANG An-ding, SHEN Bing, et al. Quasi-analytical solution and numerical simulation for advection-dispersion model of adsorbed solute transport through soils under steady state flow[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2005, 20(2):226-232.
- [29] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. *Water Resources Research*, 1976, 12(3):513-522.
- [30] 蒋 静. 石羊河流域咸水非充分灌溉农田土壤水盐运移试验与模拟研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2011.
JIANG Jing. Soil salt transport experiment and simulation study of unirrigated farmland in Shiyang River basin[D]. Beijing: China Agricultural University, 2011.

欢迎订阅2019年《腐植酸》杂志

《腐植酸》杂志创刊于1979年,由中国腐植酸工业协会主办,是国内外公开发行的全国唯一的腐植酸类专业科技期刊、世界唯一的腐植酸类综合性刊物。主要栏目:卷首语、专题评述、研究论文、腐植酸文摘、“土肥和谐”之声、腐植酸标准讨论、行业资讯、“乌金”采风等。

2019年,本刊将积极宣传“腐植酸,一个荣绽放的美丽因子”的思想,全方位报道腐植酸构建“土肥和谐”、推进净土洁食工程、促进产业绿色化发展等领域的新成果、新思想和行业新资讯,为推动我国腐植酸环境友好产业发展做好服务工作!

本刊为双月刊,国际标准大16开,逢双月20日出版。国际标准连续出版物号:ISSN 1671-9212;国内统一连续出版物号:CN 11-4736/TQ。每期定价20.00元,全年120.00元。

热诚欢迎各位新、老读者订阅!

订购汇款方式:

账 号:0200 0223 0901 4405 144

开户名:中国腐植酸工业协会

开户行:中国工商银行六铺炕支行

《腐植酸》编辑部联系方式:

地 址:北京市西城区德外大街36号德胜凯旋大厦B座1513

电 话:010-82784950,82035180

传 真:010-82784970

E-mail:chaia@126.com