排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2015 年 5 月 May 2015 | 第 33 卷 第 5 期 Vol. 33 No. 5

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.14.0178

河套灌区解放闸灌域盐荒地积盐量分析

李亮[1]，李美艳[2]，王世锋[1]，王长生[3]，李正中[3]

（1. 中国水利水电科学研究院牧区水利科学研究所，内蒙古 呼和浩特 010020；2. 内蒙古自治区水利水电勘测设计院，内蒙古 呼和浩特 010020；3. 内蒙古河套灌区解放闸灌域沙壕渠试验站，内蒙古 杭锦后旗 015400）



李亮

摘要：以解放闸灌域为背景对盐荒地水分和盐分的变化展开研究. 在田间试验的基础上，通过遥感技术对 TM 数据解译统计盐荒地面积，利用 HYDRUS－1D 模型对盐荒地土壤盐分的积聚量与流失量进行了模拟和分析. 结果表明，盐分在表层土壤中积聚，解放闸灌域总面积为 2 156.47 km^2，盐荒地达到了总面积的 16.32%. 灌域盐荒地 1 m 深土壤层中，在作物生育期积聚盐量为 1.03×10^7 kg，在秋浇期流失盐量为 9.60×10^6 kg，占积盐量的 93.01%；年度积盐量为 7.20×10^5 kg，占积盐量的 6.99%. 经检验，HYDRUS－1D 模型对土壤水分和盐分在垂直方向运移的模拟具有较高精度，反映出盐分积聚和流失规律. 盐荒地盐分的积聚与流失对灌区盐分具有重要调节作用，可为灌区水盐运移的研究提供科学依据.

关键词：解放闸灌域；积盐量；HYDRUS－1D 模型；盐荒地；TM 数据

中图分类号：S277.9　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674－8530(2015)05－0434－08

李亮，李美艳，王世锋，等. 河套灌区解放闸灌域盐荒地积盐量分析[J]. 排灌机械工程学报，2015，33(5)：434－441.

Li Liang，Li Meiyan，Wang Shifeng，et al. Analysis of salt accumulation in wasteland of Jiefangzha irrigation field in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering(JDIME)，2015，33(5)：434－441.(in Chinese)

Analysis of salt accumulation in wasteland of Jiefangzha irrigation field in Hetao Irrigation District

Li Liang[1]，*Li Meiyan*[2]，*Wang Shifeng*[1]，*Wang Changsheng*[3]，*Li Zhengzhong*[3]

(1. Institute of Water Resources for Pastoral Area，China Institute of Water Resources and Hydropower Research，Huhhot，Inner Mongolia 010020，China；2. Inner Mongolia Autonomous Region Water Resource and Hydropower Survey Design Institute，Huhhot，Inner Mongolia 010020，China；3. Shahaoqu Experimental Station of Hetao Irrigation District，Inner Mongolia，Hangjinhouqi，Inner Mongolia 015400，China)

Abstract：Jiefangzha irrigation field in Hetao Irrigation District is taken as the background，the changes in water and salt in the salt wasteland of the field are studied. Based on field experiments，the salt wasteland area is summarized through interpreting TM data acquired by remote sensing technology，then salt accumulation and loss in the soil of the wasteland are simulated and analyzed by using HYDRUS－1D model. The results show that the salt wasteland has covered 16.32% of the 2 156.47 km^2 total area of the field and salt is mainly accumulated in the soil surface layer. The salt accumulation in the salt wasteland is 1.03×10^7 kg in the 1m deep soil layer during the whole growth period of crop. The loss of salt in autumn irrigation is 9.60×10^6 kg，which accounts for 93.01% of the total salt accumulation. The annual salt accumulation is 7.20×10^5 kg，6.99% of the total salt accumulation. Up-

收稿日期：2014－10－28；**网络出版时间**：2015－05－14

网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20150514.1602.015.html

基金项目：水利部公益性行业科研专项项目(201201008)；中国水科院科研专项项目(MK2013J05)

作者简介：李亮(1980—)，男，内蒙古巴彦淖尔人，工程师(mksliliang@163.com)，主要从事节水灌溉新技术研究.

李美艳(1979—)，女，内蒙古呼和浩特人，工程师(通信作者，limeiyan19790320@163.com)，主要从事节水灌溉应用研究.

on inspection, the HYDRUS – 1D model can simulate the vertical migration of soil water and salt with high accuracy, representing the law of salt accumulation and loss. The accumulation and loss of salt in wasteland plays an important regulating role in salt in the soil of irrigation field. The results can provide a scientific basis for study on water and salt migration in an irrigation field.

Key words: Jiefangzha irrigation field; salt accumulation; HYDRUS – 1D model; salt wasteland; TM data

解放闸灌域位于内蒙古河套灌区西部,属于干旱、半干旱地区[1],总控制面积为 2.156×10^5 ha,约占全河套灌区灌溉面积的25%;灌溉面积为 1.420×10^5 ha,非灌溉面积为 7.360×10^4 ha,盐荒地面积为 3.520×10^4 ha[2]. 盐荒地呈零星状穿插分布在灌区耕地间,储存大量盐分. 随着土地价值的增加,荒地面积不断减少,同时灌区引黄水量由2010年前的年均 5.0×10^9 m^3 下降到目前 4.0×10^9 m^3[3],盐荒地的储盐规律被打破[4],原有水盐运移动态平衡发生变化,而新的水盐动态尚不明确.

目前国内外有关于河套灌区水盐运移和盐渍化的研究工作已形成很多成果,但研究工作多基于原有平衡体系.

文中针对新平衡体系下盐荒地积盐规律展开研究,利用HYDRUS – 1D模型分析积盐量,采用遥感技术统计盐荒地面积,对解放闸灌域盐荒地进行研究,着重分析土壤积盐动态变化规律.

1　试验区概况与试验布置

解放闸灌域地处北纬 40°34′ ~ 41°14′,东经 106°43′ ~ 107°27′,海拔高度为 1 030 ~ 1 046 m. 年降水量为66.3 ~ 200 mm,集中在6—9月间,占全年降雨量的72%;年蒸发量达1 920 ~ 3 450 mm,蒸降比在10以上. 灌区年平均地下水埋深为1.1 ~ 1.6 m,最深为2.8 m(3月),最浅为0.2 m(11月). 年平均气温为5.6 ~ 7.8 ℃,气候干旱,地下水埋深浅,是土壤盐渍化发育的典型地区[5].

试验于2007,2008年每年4月末—12月末进行,气象因子及土壤蒸发为试验期2 a的月均值,试验地位于杭锦后旗陕坝镇光荣二队,土地类型为盐荒地,占地面积1 497.6 m^2,土壤质地是河套灌区典型性土壤——粉质黏壤土[6],平均干容重为1.466 t/m^3.

试验地内设土壤水分测定仪(TDR)观测孔3个,孔深1 m,自表层向下分为10,20,30,50,70,100 cm 6层读取土壤含水率数据;土壤含盐量和地下水含盐量采用实地取样,土壤盐分速测仪测定土壤电导率 EC 值及pH值. 试验期内每7 d观测土壤含水量及地下水位,同时取土壤含盐量土样及地下水水样,附近耕地灌水后连续观测10 d,降雨后连续观测5 d.

试验地设田间微气象站实测气温、降雨及水面蒸发等气象数据. 土面蒸发[7]采用微型蒸渗仪测定蒸发量. 采用的不锈钢管高25 cm,内径为12 cm;微型蒸渗仪不破坏原状土[8],测土面蒸发时纱布裹底,不隔断地下水的补给,在荒地中放置2个微型蒸渗仪,每2 d称重1次,4 d换土1次,降雨后即可称重. 气象因子及土壤蒸发月值见表1,表中 P_w 为水面蒸发量,I 为降雨量,t_a 为平均气温,P_s 为土壤蒸发量.

表1　气象因子及土壤蒸发

Tab. 1　Meteorological factors and soil evaporation

月份	P_w/mm	I/mm	t_a/℃	P_s/mm
1	37.5	0.7	-9.77	
2	61.2	3.7	-7.37	
3	134.5	0.9	2.15	116.90
4	223.1	0.5	12.28	182.35
5	327.1	13.6	17.63	234.25
6	347.8	2.3	21.83	291.25
7	296.3	75.2	23.59	219.50
8	239.1	57.9	21.27	189.30
9	189.5	19.7	15.87	160.50
10	148.7	0.3	9.67	131.80
11	46.3	7.3	-3.78	
12	30.0	1.8	-0.84	

试验地设地下水观测孔2个,孔深4 m,实测地下水动态变化如图1所示(图中 l 为地下水埋深),作物生育期地下水位保持在0.5 ~ 2.0 m,初期地下水位较高,后期逐渐回落,在降雨和附近耕地灌水后呈波浪形起伏;秋浇期地下水位陡然升高至地表附近,埋深仅0.2 m,然后逐渐回落. 最低水位出现在9月末或10月初,最高水位的多个峰值出现在灌水及降雨后,灌水后1 ~ 2 d出现灌水峰值,有效降雨(降雨量大于5 mm)12 ~ 24 h后出现降雨峰值. 总体看地下水位受到耕地灌溉水影响较大,作物生育期和秋浇期地下水位较高[9],秋浇期前和封冻期,地下水位较低.

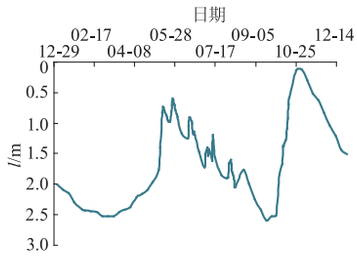


图1 地下水埋深动态变化曲线

Fig. 1 Dynamic variation curve of groundwater depth

2 模型的建立

美国盐土实验室开发的 HYDRUS－1D 模型是模拟计算水、热及多种溶质动态运移的多功能软件，适用于饱和－非饱条件下的水、热运移和多种溶质动态运动. 模型输入输出功能灵活，边界条件多样，综合考虑了水、热运动、溶质动态变化和植物根系影响，模型方程求解运用 Calerkin 线性有限元法，广泛应用于土壤中的水、热、盐、氮磷及农药的动态运移[10].

HYDRUS－1D 模型采用 Richards 方程数值求解土壤水分，采用 Fickian 对流－弥散方程求解盐分[11].

2.1 基本方程

2.1.1 水分运动基本方程

水分运动基本方程[12]为

$$\frac{\partial\theta(h,t)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\left(\frac{\partial h}{\partial z}+1\right)\right], \tag{1}$$

$$\theta_e=\frac{\theta(h)-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}=(1+|ah|^n)^{-m}, \tag{2}$$

$$K(\theta)=K_s\theta_e^l[1-(1-\theta_e^{\frac{1}{m}})^m]^2, \tag{3}$$

式中：θ 为土壤含水率，g/g；θ_e 为有效土壤含水率，g/g；θ_r 为残余土壤含水率，g/g；θ_s 为饱和土壤含水率，g/g；h 为负压水头，cm；K 为水力传导系数，cm/d；K_s 为渗透系数，cm/d；t 为时间，min；z 为空间坐标，原点在地面，向上为正；l 为地下水埋深，cm；n，m，a 为经验参数.

2.1.2 盐分运动基本方程

盐分运动基本方程[13]为

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\theta D\frac{\partial c}{\partial z}\right)-\frac{\partial qc}{\partial z}-\lambda_1\theta c-\lambda_2\rho_0 s=\frac{\partial\theta c}{\partial t}+\frac{\partial\rho_b s}{\partial t}, \tag{4}$$

式中：D 为水动力弥散系数，cm^2/d；s 为被吸附的固相质量分数，%；q 为土体中水的流速，cm/s；c 为溶质质量浓度，g/cm^3；ρ_0 为水的密度，g/cm^3；ρ_b 为盐分溶液的密度，g/cm^3；λ_1，λ_2 为经验常数，与土壤质地和结构有关.

2.2 初始条件与边界条件

2.2.1 土壤水分运移的初始条件与边界条件

土壤水分运移的初始条件与边界条件[14]为

$$\begin{cases}h(z,0)=h_0(z), & \text{初始条件},\\ -K(h)\left(\dfrac{\partial h}{\partial z}-1\right)_{/z=0}=-\varepsilon, & \text{上边界条件},\\ h(l,0)=l, & \text{下边界条件},\end{cases} \tag{5}$$

式中：h_0 为初始土壤剖面负压水头，cm；ε 为垂向水流交换强度，cm/d.

2.2.2 土壤盐分运移的初始条件与边界条件

土壤盐分运移的初始条件与边界条件[15]为

$$\begin{cases}c(z,0)=c_0(z), & \text{初始条件},\\ \left(-D\dfrac{\partial c}{\partial z}+\varepsilon_1 c\right)_{/z=0}=0, c_{/z=0}<c_m, & \text{上边界条件},\\ c_{/z=0}\geqslant c_m,\ c(z,t)=c_d, & \text{下边界条件},\end{cases} \tag{6}$$

式中：ε_1 为蒸发强度，cm/d；c_0 为初始土壤剖面溶质质量浓度，g/cm^3；c_m 为土壤溶液溶质饱和质量浓度，g/cm^3；c_d 为地下水矿化度，g/cm^3.

2.3 单元划分及离散

模型垂直剖面深度为 0～100 cm，剖分为 100 个单元，间隔 1 cm 离散为 101 个节点；时间离散单位为 d，模拟时段为作物生育期 5 月 1 日—10 月 1 日和秋浇期 10 月 1 日—12 月 22 日：作物生育期 152 d 和秋浇期为 83 d. 时间步长：初始值、最小值、最大值分别为 0.10，0.01，1.00 d. 容许土壤含水量偏差 0.005 g/g，压力水头偏差为 0.5 cm[16].

在特定时间步长时，如果迭代自动终止，说明迭代次数超过了给定的最大值，需直接赋予 1/3 时间步长以重新进行迭代；如果迭代次数小于 3 达到收敛，则时间步长乘以大于 1 的常数；如果迭代次数大于 7 达到收敛，则时间步长乘以小于 1 的常数.

2.4 模型参数及检验

2.4.1 模型参数

HYDRUS－1D 模型参数识别利用试估－校正法，土壤含水率及含盐量在 0～100 cm 土层参数分为 0～50，50～100 cm 2 层识别[17]. 根据参数敏感性分析，a，n 以及溶质弥散参数 a_L 对模拟结果影响最明显；为了提高拟合效率，将三者作为主要参数进行识别，根据观测点含水率、电导率实测值与模拟值的差异调整参数值，经过反复调整试算，直至得

出较为理想的结果[18]. 模型参数取值见表 2. 表中 l_s 为土层深度，τ 为分子扩散参数，a_L 为溶质弥散参数.

表 2　模型参数取值
Tab. 2　Values of model parameters

l_s/cm	θ_r/%	θ_s/%	K/(cm·d^{-1})	a	n	τ/cm	a_L/cm
0～50	0.118	0.44	0.682	2.973	1.734	2.6	0.004
50～100	0.212	0.51	2.166	1.691	1.366	2.6	0.008

2.4.2　模型检验

模型检验采用 2007 年数据，对模拟值与实测值进行比较，验证数值模拟的可靠性，对建立的模型合理性进行分析. 土壤含水率模拟值与实测值的对比见图 2，3；土壤 *EC* 值模拟值与实测值的对比见图 4，5.

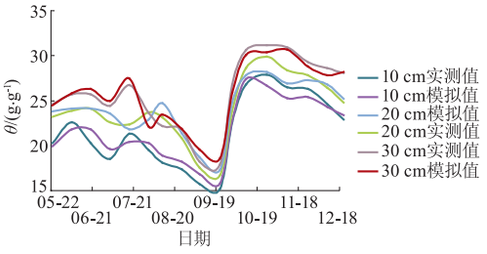


图 2　10，20，30 cm 土壤含水率模拟值与实测值对比
Fig. 2　Contrast of simulated and measured moisture contents in 10, 20 and 30 cm deep soil layers

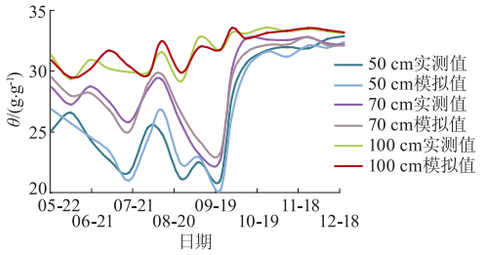


图 3　50，70，100 cm 土壤含水率模拟值与实测值对比
Fig. 3　Contrast of simulated and measured soil moisture contents in 50, 70 and 100 cm deep soil layers

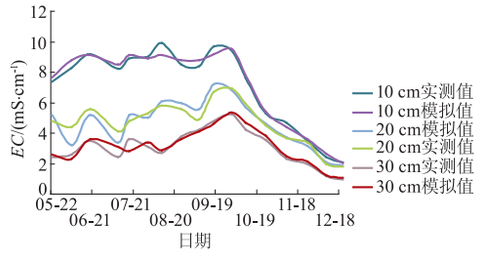


图 4　10，20，30 cm 土壤 *EC* 模拟值与实测值对比
Fig. 4　Contrast of *EC* simulated and measured values in 10, 20 and 30 cm deep soil layers

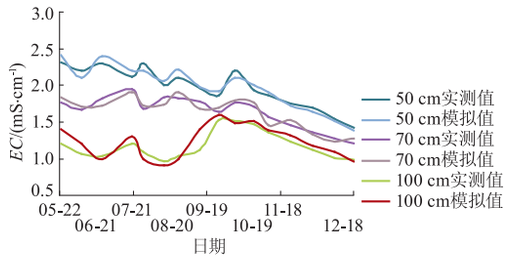


图 5　10，20，30 cm 土壤 *EC* 模拟值与实测值对比
Fig. 5　Contrast of *EC* simulated and measured values in 50, 70 and 100 cm deep soil layers

利用均方误差（*RMSE*）验证模拟值的可靠性，定量分析模拟值与实测值的精度，计算公式为

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_i - \hat{X}_i)^2}, \qquad (7)$$

式中：X_i 为观测值；$\hat{X}_i$ 为模拟值；n 为观测样本数.

2007 年模型模拟各土层土壤含水率与含盐量，其模拟值和实测值的 *RMSE* 如表 3 所示，土壤含水率 *RMSE* 值为 1.101～1.372 g/g，精度较高；土壤 *EC* 值的 *RMSE* 值为 0.971～2.364 mS/cm. 10 cm 土层土壤由于盐分积聚，并且易受到外部条件影响，精度最差；30，50，70 cm 土层精度较低；20，100 cm 处精度较高. *RMSE* 值小于 3 说明模型模拟结果合理可靠，土壤含水率与土壤含盐量在作物生育期和秋浇期实测值与模拟值拟合较好.

表 3　模拟值与实测值的 *RMSE*
Tab. 3　Simulated and measured values of *RMSE*

l_s/cm	*RMSE*	
	θ/(g·g^{-1})	*EC*/(mS·cm^{-1})
10	1.101	2.364
20	1.124	1.144
30	1.147	1.694
50	1.317	1.725
70	1.210	1.685
100	1.372	0.971

3　模型应用与分析

利用率定参数，对 2008 年作物在生育期 5 月 1 日—10 月 1 日和秋浇期 10 月 1 日—12 月 22 日的土壤水分及盐分运移进行模拟.

3.1　土壤水分模拟

图 6 为作物生育期模拟土壤相对含水率 θ_{re} 随时间变化曲线. 由图 6 可知，作物生育期土壤含水率随着土壤深度增加而逐渐升高，至 70 cm 处停滞并保持较高水平；作物生育期无灌溉的盐荒地土壤含

水率基本保持不变,表明在强蒸发作用下土壤表层损失水分,水势降低,而土壤深层在不断向表层输出水分.

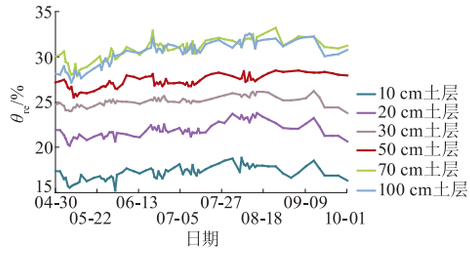


图6 作物生育期模拟土壤相对含水率随时间变化曲线

Fig. 6 Simulated soil water content curves with time in crop growth period

图7为秋浇期模拟土壤相对含水率随时间变化曲线.

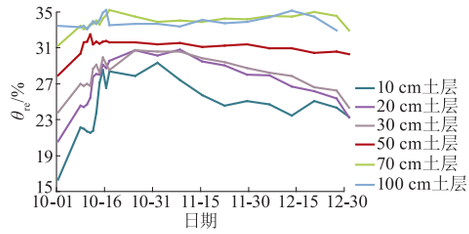


图7 秋浇期模拟土壤相对含水率随时间变化曲线

Fig. 7 Simulated soil water content curves with time in autumn irrigation period

由图7可知,秋浇期土壤含水率保持较高水平,秋浇前土壤含水率与作物生育期基本相近,秋浇后整个灌区相互渗透,0~50 cm土层含水率大幅度升高;秋浇末0~50 cm土层含水率略有降低,50~100 cm土层保持不变;秋浇期地表蒸发弱,土壤含水率随着灌区排水逐渐降低.

3.2 土壤盐分模拟

图8为作物生育期模拟土壤*EC*值随时间变化曲线.

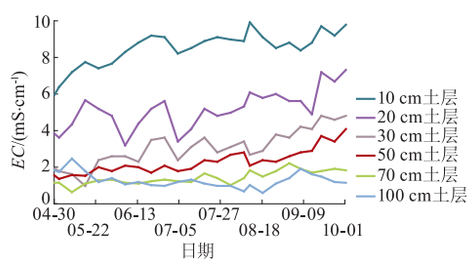


图8 作物生育期模拟土壤*EC*值随时间变化曲线

Fig. 8 Simulated soil *EC* curves with time in crop growth period

由图8可知,作物生育期在没有灌水的盐荒地中土壤含盐量随着时间推移而逐渐升高,盐分向上层土壤聚积.且聚积的盐分主要是K,Na等易受到外界因素影响的易溶性盐分.研究显示,10 cm土层*EC*值增加4.52 mS/cm,上升84.91%;20 cm土层*EC*值增加3.13 mS/cm,上升73.82%;30 cm土层*EC*值增加1.74 mS/cm,上升64.44%;50 cm土层*EC*值增加0.76 mS/cm,上升44.71%;70 cm土层*EC*值增加0.35 mS/cm,上升29.17%;100 cm土层*EC*值增加0.16 mS/cm,上升8.42%.盐荒地在作物生育期呈贮存盐分状态,灌溉水淋洗附近耕地盐分,侵入无灌溉水的盐荒地,并贮存形成"盐库",减弱了耕地的盐渍化程度,为耕地作物生产创造了有利条件.

图9为秋浇期模拟土壤*EC*值随时间变化曲线.

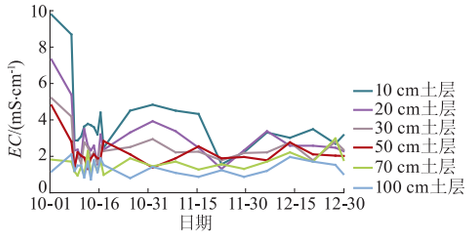


图9 秋浇期模拟土壤*EC*值随时间变化曲线

Fig. 9 Simulated soil *EC* curves with time in autumn irrigation period

由图9可知,秋浇期土壤含盐量降低,秋浇灌水对盐荒地积聚的盐分进行淋洗,0~50 cm土层含盐量大幅度降低,50~100 cm土层保持不变,盐分向地下水层流失.研究显示,10 cm土层*EC*值减少4.32 mS/cm,下降44.08%;20 cm土层*EC*值减少3.04 mS/cm,下降41.64%;30 cm土层*EC*值减少1.57 mS/cm,下降3.19%;50 cm土层*EC*值减少0.61 mS/cm,下降14.88%;70 cm土层*EC*值减少0.32 mS/cm,下降10.03%;100 cm土层*EC*值减少0.11 mS/cm,下降9.42%.秋浇期是盐荒地流失盐分的过程,在整个秋浇期盐荒地土壤含水率较高,盐分流失进入地下水,盐荒地盐渍化程度减弱,为翌年储存灌溉水所带盐分腾出"盐库".

3.3 土壤积盐分析

研究以盐荒地0~100 cm土层为封闭土体,在作物生育期和秋浇期2个时间段,研究浸入和流失盐分[19],分析土壤盐量变化,反映盐荒地在降雨、蒸发等气象因素的影响下盐分的运移情况,及地下水位动态变化的形势下土壤积盐规律.盐荒地积盐量分析如表4所示,表中ρ_s为盐量,t为所占比例.

表4　盐荒地积盐量分析
Tab.4　Analysis of salt deposition in salt wasteland

l_s/cm	作物生育期积聚量		秋浇期流失量		盐分积聚量	
	ρ_s/(g·m^{-3})	t/%	ρ_s/(g·m^{-3})	t/%	ρ_s/(g·m^{-3})	t/%
[0,10)	12.684	43.26	11.904	43.65	0.780	38.09
[10,20)	8.194	27.95	7.683	28.17	0.511	24.95
[20,30)	4.238	14.45	3.939	14.44	0.299	14.60
[30,50)	3.042	10.38	2.753	10.09	0.289	14.11
[50,70)	0.666	2.27	0.528	1.94	0.138	6.74
[70,100]	0.495	1.69	0.464	1.70	0.031	1.51
合计	29.319	100.00	27.271	100.00	2.048	100.00

由表4可知,盐荒地作物生育期盐分向表层积聚,0~10 cm土层积聚量占总积聚量43.26%,接近一半,0~30 cm土层积聚85.66%,0~50 cm土层积聚96.04%,可见在强蒸发的作用下,土壤盐分主要积聚在表层,表层盐分对植被的生长具有强抑制作用,导致盐荒地的生成.盐荒地秋浇期流失盐分主要是表层土壤,0~10 cm土层流失占总流失量为43.65%,接近一半,0~30 cm土层流失86.27%,0~50 cm土层流失96.36%.盐荒地积盐主要是表层土壤,0~10 cm土层积盐量占总积盐量的38.09%,0~30 cm土层积聚77.64%,0~50 cm土层积聚91.75%.

研究结果显示,表层土壤盐分动态变化明显,作物生育期盐分积聚表层土壤,秋浇期由表层土壤流失盐分.盐荒地1 m深土壤层盐分在作物生育期积盐为29.319 g/m^3,在秋浇期流失盐分为27.271 g/m^3,年度积盐为2.048 g/m^3.说明灌区盐荒地年度输入盐量大于流失盐量,盐分在盐荒地年度内变化较小,作物生育期积聚的盐分有93.01%在秋浇期流失,但积聚了6.99%,说明盐荒地仍具有一定的积盐能力.

4　基于遥感盐荒地积盐量分析

遥感采用LandSat-5影像TM遥感器数据[20],利用ENVI 4.7软件,解译2009年7月30日的解放闸灌域影像数据.TM影像数据见图10,影像数据精度为25 m×25 m,数据已经通过大气校正、辐射校正和系统几何初校正处理[21]:利用1∶50 000解放闸灌域地形图(1980西安坐标系)为参考源[22],实地采取控制点153个进行几何精校正.影像数据校正后,准确率明显提高.

影像分类采用监督分类的最大似然法,分类结果见图11.根据地面实际数据的判别结果,最后地物合并为5类[23],其中植被包括绿色地物,例如作物、草地、灌木、林地等;沙地包括沙丘和沙性土地;水体为水面覆盖地表;盐荒地为植被无法覆盖或覆盖率极低的中度、重度盐荒地,而轻度盐荒地归为植被;居民点、道路及裸地包括城镇、乡村、道路等建筑物及地表无覆盖的裸地、宅基地等[24].



图10　灌域TM影像数据
Fig.10　TM image data in irrigation field

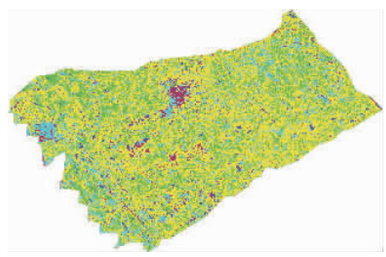


图11　灌域TM影像分类结果
Fig.11　Classification results of TM image in irrigation field

表5为遥感土地利用分布数据,表中m为像元数;Δ为像元精度;A,t_A分别为各遥感土地的面积及其所占比例.

表5　遥感土地利用分布
Tab.5　Land use distribution by remote sensing

类别	m/个	Δ/(m×m)	A/km^2	t_A/%
植被	2 272 568	25×25	1 420.36	65.86
水体	193 667	25×25	121.04	5.61
沙地	246 459	25×25	154.04	7.14
盐荒地	563 212	25×25	352.01	16.32
居民点、道路及裸地	174 443	25×25	109.03	5.06
合计	3 450 349	25×25	2 156.47	100.00

由表5可知,盐荒地面积为352.01 km^2,占解放闸灌域总面积的16.32%,仅次于植被面积.

解放闸灌域盐荒地盐量估算情况:积聚盐分、流失盐分、积盐量分别为29.319,27.271,2.048 g/m^3,面积为352.01 km^2,总输入量、总流失量、年总量分别为1.03×10^7,9.60×10^6,7.20×10^5 kg.

由此可知,解放闸灌域盐荒地年度积聚盐量为1.03×10^7 kg,流失盐量为9.60×10^6 kg,总积盐量为7.20×10^5 kg,盐荒地年度流失量、积盐量分别占积聚盐分的93.01%和6.99%.说明盐荒地盐分年内变化较小,侵入盐荒地的盐分少量储存,现状盐荒地仍具有一定的积盐能力.

5 结 论

盐荒地是盐渍化发育的产物,盐荒地土壤水分受到蒸发、降雨和地下水的影响,在垂向运移和渗透变化较活跃,而水分携带盐分在作物生育期积聚,在秋浇期流失,盐分年度变化较小. 1 m 深土壤层在作物生育期积盐为29.319 g/m^3,在秋浇期流失盐分为27.271 g/m^3,占积聚量的93.01%;年度积盐为2.048 g/m^3,占积盐量的6.99%.

利用HYDRUS-1D模型模拟盐荒地土壤水分和盐分在垂直方向的动态变化,反映出盐荒地土壤中水分和盐分随时间变化趋势与分布,模型较好地模拟了作物生育期和秋浇期盐荒地土壤盐分和水分的动态运移规律,模拟结果合理可靠.

遥感数据处理结果显示,解放闸灌域总面积为2 156.47 km^2,盐荒地面积为352.01 km^2,达到总面积的16.32%,仅次于植被面积. 灌域盐荒地年度积聚盐量为1.03×10^7 kg,流失盐量为9.60×10^6 kg,总积盐量为7.20×10^5 kg. 盐荒地盐分的积聚与流失对灌区盐分具有重要调节作用.

利用遥感技术和HYDRUS-1D模型对解放闸灌域盐荒地土壤盐分的分析,为灌区水盐运移的研究提供科学依据,对灌区水盐监测具有重要意义.

参考文献(References)

[1] 郝芳华,欧阳威,岳勇,等. 内蒙古河套灌区水循环特征及对土壤水运移影响的分析[J]. 环境科学学报,2008,28(5):825-831.
Hao Fanghua, Ouyang Wei, Yue Yong, et al. Analysis of water cycle characteristics and soil water movement in the agricultural irrigation area in Inner Mongolia[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008,28(5):825-831. (in Chinese)

[2] 郑佳伟,史海滨, 李正中,等. 内蒙古河套灌区解放闸灌域土壤水盐空间变异性研究[J]. 节水灌溉, 2010(2):52-55.
Zheng Jiawei, Shi Haibin, Li Zhengzhong, et al. Research on spatial variability of soil water-salt in Jiefangzha irrigation field of Hetao Irrigation District in Inner Mongolia[J]. Water Saving Irrigation, 2010(2):52-55. (in Chinese)

[3] 李亮,李美艳,张军军,等. 基于HYDRUS-2D模型模拟耕荒地水盐运移规律[J]. 干旱地区农业研究,2014,31(1):66-71.
Li Liang, Li Meiyan, Zhang Junjun, et al. The moving rule of salt and water in cultivated land and saline wasteland based on HYDRUS-2D model[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014,31(1):66-71. (in Chinese)

[4] 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)

[5] 李洪,黄国强,李鑫钢. 自然条件下土壤不饱和区中水含量分布模拟[J]. 农业环境科学学报,2004,23(6):1232-1234.
Li Hong, Huang Guoqiang, Li Xingang. HYDRUS-2D modeling of water contents in soils under climatic conditions[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2004,23(6):1232-1234. (in Chinese)

[6] 乔冬梅,史海滨,霍再林. 浅地下水埋深条件下土壤水盐动态BP网络模型研究[J]. 农业工程学报,2005,21(9):42-46.
Qiao Dongmei, Shi Haibin, Huo Zailin. BP network model for soil water-salt movement with a shallow groundwater table[J]. Transactions of the CSAE, 2005,21(9):42-46. (in Chinese)

[7] 史文娟,沈冰,汪志荣,等. 蒸发条件下浅层地下水埋深夹砂层土壤水盐运移特性研究[J]. 农业工程学报, 2005,21(9):23-26.
Shi Wenjuan, Shen Bing, Wang Zhirong, et al. Water and salt transport in sand-layered soil underevaporation with the shallow under ground water table[J]. Transactions of the CSAE, 2005,21(9):23-26. (in Chinese)

[8] 夏卫生,刘贤赵,雷廷武. 土壤蒸发的动力学分析[J]. 灌溉排水,2001,20(3):17-19,32.
Xia Weisheng, Liu Xianzhao, Lei Tingwu. Dynamical analysis on soil evaporation[J]. Irrigation and Drainage, 2001,20(3):17-19,32. (in Chinese)

[9] 白忠,徐旭. 河套灌区解放闸灌域地下水数值模拟[J]. 节水灌溉, 2008(3):28-31,35.
Bai Zhong, Xu Xu. Numerical Simulation of the groundwater and salt dynamics in Jiefangzha irrigation scheme of Hetao Irrigation District[J]. Water Saving Irrigation, 2008(3):28-31,35. (in Chinese)

[10] 毕经纬,张佳宝,陈效民,等. 应用HYDRUS-1D模型模拟农田土壤水渗漏及硝态氮淋失特征[J]. 农村生态环境,2014,20(2):28-32.
Bi Jingwei, Zhang Jiabao, Chen Xiaomin, et al. Simu-

lation of soil water leaching and nitrate-N loss with leachate in the field using HYDRUS－1D model[J]. Rural Eco－Environment, 2014,20(2):28－32. (in Chinese)

[11] 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, 2006,26(4):455－460.
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, 2006,26(4):455－460. (in Chinese)

[12] Dahiya Rita, Ingwersen Joachim, Streck Thilo. The effect of mulching and tillage on the water and temperature regimes of a loess soil: Experimental findings and modeling[J]. Soil and Tillage Research, 2007,96(1/2): 52－63.

[13] Hansson Klas, Lundin Lars－Christer. Equifinality and sensitivity in freezing and thawing simulations of laboratory and in situ data[J]. Cold Regions Science and Technology, 2006,44(1):20－37.

[14] 夏卫生,雷廷武,杨文治,等. 蒸发条件下土壤水分再分布的动力学研究[J]. 水利学报,2002(7):37－41.
Xia Weisheng, Lei Tingwu, Yang Wenzhi, et al. Dynamics of soil water redistribution during evaporation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(7):37－41. (in Chinese)

[15] 胡克林,肖新华,李保国. 不同类型下边界条件对模拟灌溉农田水分渗漏的影响[J]. 水科学进展,2006,17(5): 665－670.
Hu Kelin, Xiao Xinhua, Li Baoguo. Numerical analysis of the effect of the different lower boundary conditions on water drainage in irrigated field[J]. Advances in Water Science, 2006,17(5):665－670. (in Chinese)

[16] Ajdary K, Singh D K, Singh A K, et al. Modelling of nitrogen leaching from experimental onion field under drip fertigation[J]. Agricultural Water Management, 2007,89(1/2):15－28.

[17] 陈丽湘, 刘伟. 土壤次生盐渍化之水盐运动规律研究[J]. 工程热物理学报, 2006,27(3):466－468.
Chen Lixiang, Liu Wei. Water－salt transfer rule research in soil secondary salinization[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006,27(3):466－468. (in Chinese)

[18] Grünberger Olivier, Macaigne Peggy, Michelot Jean－Luc, et al. Salt crust development in paddy fields owing to soil evaporation and drainage: Contribution of chloride and deuterium profile analysis[J]. Journal of Hydrology, 2008,348(1/2):110－123.

[19] 王学全,高前兆,卢琦. 内蒙古河套灌区水资源高效利用与盐渍化调控[J]. 干旱区资源与环境, 2005,19(6):118－123.
Wang Xuequan, Gao Qianzhao, Lu Qi. Effective use of water resources and salinity and waterlogging control in the Hetao Irrigation Area of Inner Mongolia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 19(6):118－123. (in Chinese)

[20] 郭娇,石建省,石迎春,等. 黄河三角洲土壤水分遥感监测研究[J]. 土壤学报, 2008,45(2):229－233.
Guo Jiao, Shi Jiansheng, Shi Yingchun, et al. Remote sensing monitoring of soil moisture in the Yellow River Delta[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008,45(2):229－233. (in Chinese)

[21] 张灿龙,倪绍祥,刘振波,等. 遥感监测土壤含水量方法综述[J]. 农机化研究, 2006(6):58－61.
Zhang Canlong, Ni Shaoxiang, Liu Zhenbo, et al. Review on methods of monitoring soil moisture based on remote sensing[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(6):58－61. (in Chinese)

[22] 何玲,汪志农,莫兴国. 基于遥感信息预测土壤水分研究[J]. 水土保持研究, 2006,13(2):168－171.
He Ling, Wang Zhinong, Mo Xingguo. Study on forecasting soil moisture based on remote sensing information [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(2):168－171. (in Chinese)

[23] 常鲁群,卞正富. 基于TM数据的土壤含水率反演研究[J]. 矿山测量, 2006(2):18－19,65.
Chang Luqun, Bian Zhengfu. The inversion soil moisture content based on the TM data[J]. Mine Surveying, 2006(2):18－19,65. (in Chinese)

[24] 徐美,黄诗峰,姚永慧. 干旱半干旱地区灌溉农业中的遥感应用[J]. 干旱区研究, 2006,23(4): 592－597.
Xu Mei, Huang Shifeng, Yao Yonghui. Application of RS in irrigated agriculture in arid and semiarid areas [J]. Arid Zone Research, 2006,23(4): 592－597. (in Chinese)

(责任编辑　张文涛)