

# 不同灌排模式下土壤盐分动态模拟与评价

孙建书<sup>1</sup>, 余美<sup>2</sup>

(1.宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司,宁夏银川750004; 2.中国科学院南京土壤研究所,江苏南京210008)

**摘要:**利用 HYDRUS-1D 模型对不同灌排模式下土壤水盐运移进行一维数值模拟,分析比较了节水灌溉和常规灌溉、暗管排水和无排水对盐碱地的改良效果。结果表明,节水灌溉模式下耕作层含盐量的年内变化规律与常规灌溉相似,在节水 14.36% 的情况下不会明显降低耕作层的洗盐效率;在连续常规灌溉和节水灌溉条件下耕作层的土壤盐分呈逐年减少的趋势,且两者间的差异不大;没有排水设施或仅有暗管排水的情况下,经灌溉淋洗进入地下水的土壤盐分不能及时排出,最终聚集在根系层底部;暗管排水条件下,土壤剖面盐分聚集带范围较无排水缩小,位置下移,且浓度峰值降低。该研究成果从盐分调控的角度,论证了在宁夏银北灌区实行节水灌溉的可行性,以及加强水平和竖直排水的必要性,可为节水排水工程的规划和盐碱土的治理提供参考依据。

**关键词:**节水灌溉;土壤盐碱化;水盐动态模拟;暗管排水

**中图分类号:** S156.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)04-0157-07

农业灌溉是宁夏的用水大户。目前,引黄灌区基本上仍实行大水漫灌,在土地开垦和中低产田改造过程中,为了冲洗盐碱又采用大定额冬灌和春季播前灌溉,造成了水资源的严重浪费。研究表明,宁夏引黄灌区自 20 世纪 60 年代以来一直处于脱盐状态,改变“大引大排”传统灌溉方式的条件已基本成熟<sup>[1]</sup>。1998 年以来,国家投入专项资金在全国大型灌区实施以节水为中心的续建配套和更新改造,大力发展节水灌溉,实现传统农业向现代农业的转变已成为宁夏发展节水型社会的一项重要任务。长久以来,明沟排水在引黄灌区占据主导地位,在“大引大排”的情况下排水干沟普遍负荷过重,不仅起不到排地下水的作用,还入渗补给地下水,导致地势平坦低洼地区的潜水位上升,加剧了局部土壤的次生盐渍化。为了加强排水能力,引黄灌区于 90 年代初开展了暗管排水技术示范,此后暗管排水面积逐步发展,成为继明沟、机井外又一主要的排水方式。在新兴灌排技术得到应用推广的形势下,研究适用于盐碱地的灌排模式,对于水资源的高效利用以及中低产田的改造具有重要的应用价值及理论意义。

近年来,随着人们对农田生态环境的重视,探求既满足作物需水要求,又能将盐分控制在作物耐盐范围内的灌溉制度,成为盐碱化地区发展节水灌溉需要解决的核心问题之一。目前该领域的研究主要分三类:一是以田间试验为手段,通过设计不同的灌溉处理,分析比较某种节水灌溉技术下土壤的水盐

状况和作物产量<sup>[2~4]</sup>;二是根据作物水盐动态响应函数,建立节水、控盐、高产灌溉制度的优化设计模型<sup>[5,6]</sup>;三是借助水盐运移模型,对节水技术实施后土壤中的水盐动态进行模拟与预测,寻求最优的农田水盐管理模式<sup>[7~10]</sup>。20 世纪 70 年代以来,国内外就暗管的排水、降渍进行了系统深入的试验研究,但有关暗管排水对土壤脱盐的研究报导不多<sup>[11~13]</sup>。现有关于灌排新技术的研究成果多侧重于田间试验,在优化模型和模拟模型的建立和应用方面还略显薄弱。在应用模拟模型研究节水灌溉下的水盐状况时,往往将灌溉需水量随意设定为不同水平,而没有充分依据灌区的种植模式和不同作物的非充分灌溉定额试验成果。为了弥补上述不足,同时配合全国大型灌区的节水改造,为新兴灌排模式的推广提供科学依据,本文以宁夏银北灌区为实例,采用 HYDRUS-1D 模型,对常规灌溉和节水灌溉、无水平排水和暗管排水条件下土壤中的水盐动态进行模拟,评价不同的灌排措施对盐碱土的改良效果,为银北灌区节水排水工程的规划、水资源的高效利用以及盐碱土的治理提供理论依据。

## 1 水盐运移模型

### 1.1 HYDRUS-1D 模型基本方程

目前,模拟土壤中水盐运移的模型基本上可分为物理模型、水盐平衡模型<sup>[14]</sup>、确定性模型<sup>[15,16]</sup>和随机模型,其中基于 Richards 方程和对流弥散理论

收稿日期:2010-11-10

基金项目:国家自然科学基金项目(40771097);公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903001);国家科技支撑计划项目课题(2006BAD05B02,2007BAC17B04);新疆自治区科技攻关项目(200733144-1);国家“863”计划重点项目课题(2006AA100207)

作者简介:孙建书(1963—),男,宁夏银川人,高级工程师,主要从事水利工程的规划、设计和研究。

的确定性模型应用最为广泛, HYDRUS 便是其中一种。它由美国盐碱地改良实验室(U.S. Salinity Laboratory)于 1991 研制成功, 用于模拟变饱和和多孔介质中水分、能量和溶质运移。经改进与完善, 得到了普遍的认可与应用<sup>[17,18]</sup>。

水分运动的基本方程为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] - S \quad (1)$$

式中,  $h$  为土壤负压水头 (cm);  $t$  为时间 (d);  $z$  为垂向空间坐标, 原点在地表, 向下为正 (cm);  $\theta$  为土壤体积含水率 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $K(h)$  为土壤非饱和导水率 (cm/d);  $S$  为根系吸水率 [ $\text{cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{d})$ ]。

盐分运移的基本方程为:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \theta D_{sh} \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial qc}{\partial z} - \lambda_1 \theta c - \lambda_2 \rho s = \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial \rho s}{\partial t} \quad (2)$$

式中,  $D_{sh}$  为水力弥散系数 ( $\text{cm}^2/\text{d}$ );  $c$  为土壤溶液溶质浓度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $q$  为土壤水流通量 (cm/d);  $s$  为被吸附的固相浓度, 即单位质量孔隙介质所吸附的溶质的质量 ( $\text{g}/\text{g}$ );  $\rho$  为土壤体积密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为溶质的液相、固相降解系数。

## 1.2 定解条件

### 1.2.1 土壤水分运动的定解条件

(1) 初始条件: 含水率在土壤剖面上的初始分布

$$\theta(z, t) = \theta_0(z) \quad t = t_0 \quad (3)$$

式中,  $t_0$  为任意给定的初始时刻。

(2) 上边界条件: 对于模拟降雨及灌溉入渗、裸地或有植被时蒸发等自然现象, 上边界取

$$-K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) = q_{\text{up}} \quad z = 0 \quad (4)$$

式中,  $q_{\text{up}}$  为上边界垂向水分通量, 入渗时  $q_{\text{up}}$  取正的降雨或灌水率, 蒸发时  $q_{\text{up}}$  取负的蒸发率 (cm/d)。

(3) 下边界条件: 因模拟的重点是耕作层土壤盐分的分布情况, 故将下边界取至地表以下 120 cm 处

$$-K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) = q_{\text{down}} \quad z = l \quad (5)$$

式中,  $l$  为土壤剖面下边界距地表深度 (cm);  $q_{\text{down}}$  为下边界垂向水分通量 (cm/d)。

在暗管排水条件下, 土壤剖面下边界为水平排水。HYDRUS-1D 提供了两种近似计算管道排水量的解析方法, 即 Hooghoudt 方程<sup>[19]</sup> 和 Ernst 方程<sup>[20]</sup>。当排水管位于不透水层之上的均质土壤中时, Hooghoudt 方程可简化为

$$\text{万方数据} \quad q_{\text{dr}} = \frac{4K_h h_{\text{dr}}^2}{L_{\text{dr}}^2} + \frac{h_{\text{dr}}}{\gamma_{\text{entr}}} \quad (6)$$

式中,  $q_{\text{drain}}$  为单位面积的排水流量 (cm/d);  $K_h$  为水平饱和导水率 (cm/d);  $h_{\text{dr}}$  为相邻暗管间距中点以上的地下水位高 (cm);  $L_{\text{dr}}$  为排水管间距 (cm);  $\gamma_{\text{entr}}$  为排水管进口摩阻 ( $\text{d}^{-1}$ )。

### 1.2.2 土壤盐分运移的定解条件

(1) 初始条件: 盐分浓度在剖面上的初始分布

$$c(z, t) = c_0(z) \quad t = t_0 \quad (7)$$

(2) 上边界条件:

$$-\theta D_{sh} \frac{\partial c}{\partial z} + qc = J_{\text{up}} = \begin{cases} q_{\text{up}} \times c_{\text{up}} & q_{\text{up}} > 0 \\ 0 & q_{\text{up}} \leq 0 \end{cases} \quad z = 0 \quad (8)$$

式中,  $J_{\text{up}}$  为通过地表的盐分通量。蒸发时取为 0, 入渗时为  $q_{\text{up}} \times c_{\text{up}}$ ,  $c_{\text{up}}$  为地表水盐分浓度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

(3) 下边界条件:

$$\frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad q_{\text{down}} \geq 0 \quad z = l \quad (9)$$

$$c(z, t) = c(l, t) \quad q_{\text{down}} < 0$$

式中,  $c(l, t)$  为地下水矿化度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

## 2 参数确定

### 2.1 非饱和土壤水分特征参数

大量的实验研究表明, 非饱和土壤水分运动参数  $\theta(h)$ 、 $K(h)$  与负压水头  $h$  呈非线性关系。本文采用 Van Genuchten 模型<sup>[21]</sup>:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |ah|)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$K(h) = K_s \frac{[1 - (\alpha |h|)^{n-1} [1 + (\alpha |h|)^n]^{-m}]^2}{[1 + (\alpha |h|)^n]^{m/2}} \quad (11)$$

式中,  $\theta_r$  为土壤残余含水率 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\theta_s$  为土壤饱和含水率 ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $K_s$  为渗透系数 (cm/d);  $\alpha$  为进气值的倒数, 水分特征曲线的形状参数 ( $\text{cm}^{-1}$ );  $n$  为孔径分布指数, 水分特征曲线的形状参数,  $m = 1 - 1/n$ 。

因银北灌区土层为相对均一的粉砂壤土, 故未考虑土壤的分层。在灌区所辖的银川郊区、平罗县采集 0~40 cm 耕层土样, 张力计称重法测定其水分特征曲线, 采用 USSS (美国盐改中心) 开发的 RETC 软件对所测数据进行拟合, 并结合已有研究成果<sup>[22]</sup>, 确定参数取值为  $\alpha = 0.01 \text{ cm}^{-1}$ ,  $n = 1.89$ ,  $\theta_r = 0.41 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,  $\theta_s = 0.07 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,  $K_s = 4.42 \text{ cm/h}$ ,  $\rho = 1.50 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。因盐分的计算涉及的是保守物质, 所以不予考虑其吸附和降解作用, 即  $\lambda_1 = 0$ 、 $\lambda_2 = 0$ 。

2.2 潜在腾发量和根系吸水率

采用 FAO 给出的 Penman 公式,由太阳净辐射、风速、气温、水汽压、饱和水汽压、地面温度等气象条件计算潜在腾发量  $T_p$ 。

根系吸水函数  $S$  的表达形式多种多样<sup>[23]</sup>,本文采用 Feddes 模型<sup>[24]</sup>

$$S(h, z) = \alpha(h) \times b(z) \times T_p \quad (12)$$

$$\alpha(h) = \begin{cases} 0 & h_1 \leq h \leq 0 \\ (h - h_1)/(h_2 - h_1) & h_2 < h < h_1 \\ 1 & h_3 \leq h \leq h_2 \\ (h - h_4)/(h_3 - h_4) & h_4 < h < h_3 \\ 0 & h \leq h_4 \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $\alpha(h)$  为根区土壤水势对根系吸水的影响函数;  $b(z)$  为规一化的根系吸水分布函数,采用 Raats 指数形式<sup>[25]</sup>;  $h_1$  为微生物厌氧点含水率对应的土壤负压值;  $h_2$  为最大毛管持水率对应的土壤负压值;  $h_3$  为毛管水因作物吸收和地表蒸发而发生断裂时对应的土壤负压值;  $h_4$  为作物产生永久凋萎时对应的土壤负压值。

$h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ 、 $h_4$  为影响根系吸水的几个土壤水势阈值。对于小麦,各参数  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ 、 $h_4$  分别为 -10、-20、-500、-16 000 cm;对于夏玉米,取值分别为 -15、-30、-325、-16 000 cm。

2.3 水动力弥散系数

水动力弥散系数为机械弥散与分子扩散之和:

$$D_{sh} = \lambda |v| + D_0 \times \tau \quad (14)$$

式中,  $\lambda$  为纵向弥散度 (cm),  $\lambda \approx 1 \sim 3$  cm, 粉砂壤土  $\lambda = 1.0$  cm;  $v$  为土壤孔隙水流速 (cm/d),  $v = q/\theta$ ;

$D_0$  为溶质在自由水中的分子扩散系数 (cm<sup>2</sup>/d), 取  $D_0 = 1.391$  cm<sup>2</sup>/d;  $\tau$  为孔隙弯曲率。

2.4 时空离散参数

取银北灌区距地表 120 cm 以内的土壤剖面作为模拟对象。土壤剖面单元的划分以上层单元密、下层单元疏,地表和耕作层加密的原则布置。模拟时段取 1 a 和 3 a,模拟时刻自当年 4 月 20 日起,至次年 4 月 19 日止。时间单位以 d 计,迭代运算的时间步长取 0.01 d。

3 模型应用

银北灌区以小麦、玉米等旱作物和水稻为主,作物种植结构见表 1。常规灌溉方式为大水漫灌,旱作物的节水灌溉方式为小畦灌;水稻的节水灌溉方式为“浅、湿、晒”灌。参考宁夏引黄灌区节水灌溉试验成果<sup>[26,27]</sup>,模拟采用的银北灌区主要作物的节水灌溉和常规灌溉制度分别见表 2 和表 3。银北的暗管排水区多采用三级排水,一级管为总输水管,选用直径 80 cm 的水泥管,埋深 3.5 m;二级管为吸水管和总输水管的连通管,选用直径 20 cm 的陶土管,埋深 2~2.5 m;三级管为吸水管,选用直径 7 cm 的波纹塑料管,埋深 1.6~1.8 m,间距 100 m<sup>[28]</sup>。

根据 2000 年逐日降雨量、灌溉量、腾发量、地下水位埋深、地下水矿化度以及土壤剖面初始水分、盐分含量<sup>[1]</sup>等观测数据,利用 HYDRUS 模型对盐分与灌溉制度、排水方式之间的关系进行模拟。无水平排水条件下,距土表 30 cm 处耕作层盐分浓度的逐年变化和年内变化趋势见图 1,土壤剖面含盐量逐年变化见图 2,暗管排水条件下土壤剖面含盐量逐年变化见图 3。

表 1 银北灌区作物种植结构

Table 1 Cropping patterns in Yinbei irrigation district

项目 Items	粮食作物 Cereal crop				经济作物 Cash crop				经果林 Fruit bearing forest	牧草 Fodder grass	合计 Total
	小麦 Wheat	水稻 Rice	玉米 Corn	其他 Others	胡麻/向日葵 Benne/helianthus	甜菜 Sugar beet	蔬菜/瓜类 Vegetable/melon	其他 Others			
灌溉面积 (10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> ) Irrigated area	5.489	3.181	0.524	0.187	1.128	0.196	1.460	0.239	0.722	0.344	13.470
比例 (%) Proportion	40.7	23.6	3.9	1.4	8.4	1.5	10.8	1.8	5.4	2.6	100

分析以上模拟结果,可得出如下结论:

(1) 从年内变化趋势来看,常规灌溉和节水灌溉模式下耕作层含盐量的变化规律相似。4~5 月由于春灌对表层土壤盐分的淋洗作用,使耕作层盐分增加,随后经不断地灌溉淋洗而明显下降;6 月至

9 月耕作层处于降水灌溉脱盐、间歇期积盐的交替阶段,但随着地表蒸发、作物蒸腾与潜水蒸发的增大,总体呈现盐分增高的趋势;10~11 月受冬灌影响,耕层土壤盐分向下层转移,含盐量降低;冬灌结束至来年 4 月,在蒸发作用下含盐量增加,说明灌溉

和蒸发直接影响到土壤中盐分含量的增减。虽然节水灌溉下的耕层含盐量高于常规灌溉,但其平均差值仅有 0.014%,说明采用节水灌溉技术不仅可节

约用水量  $4.18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ,而且不会明显降低耕作层的洗盐效率。

表 2 银北灌区主要作物节水灌溉制度

Table 2 Water-saving irrigation regime of main crops in Yinbei

灌水日期(M-d) Irrigation date		灌水定额 Irrigation quota( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ )									
起 Beginning	止 End	小麦 Wheat	麦套玉米 Intercropping wheat/corn	玉米 Corn	水稻 Rice	胡麻 Benne	油葵 Helianthus	蔬菜 Vegetable	瓜类 Melon	果林 Fruit bearing forest	牧草 Fodder grass
04-20	05-10	1050	1050		1650	900		900		900	
05-15	05-25	900	900	750	4500			825	750		900
06-10	06-15	750	900		2250	900				900	
06-20	06-25	450	900	750	1650		900	900			900
07-05	07-15		750			900			600	900	
07-18	08-02			600	1500			825			900
08-05	08-20				1350				750	900	
08-22	09-15		750	600	900			900			
10-20	11-20	1350	1350	1350		1350	1350	1350	1350	1350	1350
全年合计 Annual amount of irrigation water		4500	6600	4050	13800	4050	2250	5700	3450	4950	4050
净灌溉定额 Net irrigation quota							7541				
毛灌溉用水量( $10^4 \text{ m}^3$ ) Gross amount of irrigation water use							249571.86				

表 3 银北灌区主要作物常规灌溉制度

Table 3 Conventional irrigation regime of main crops in Yinbei

灌水日期(M-d) Irrigation date		灌水定额 Irrigation quota( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ )									
起 Beginning	止 End	小麦 Wheat	麦套玉米 Intercropping wheat/corn	玉米 Corn	水稻 Rice	胡麻 Benne	油葵 Helianthus	蔬菜 Vegetable	瓜类 Melon	果林 Fruit bearing forest	牧草 Fodder grass
04-20	05-10	1200	1200		1800	900		1050		1050	
05-15	05-25	1125	1125	900	4500	900	1050	900	750		750
06-10	06-15	900	900		2250					900	
06-20	06-25	825	900	750	1650	900	975	975			750
07-05	07-15		900			600			600	975	750
07-18	08-02			750	2250		975	900			750
08-05	08-20				2250		900		750	975	
08-22	09-15		975	750	1500			975			
10-20	11-20	1500	1500	1500		1500	1500	1500	1500	1500	1500
全年合计 Annual amount of irrigation water		5550	7500	4650	16200	4800	5400	6300	3600	5400	4500
净灌溉定额 Net irrigation quota							8805				
毛灌溉用水量( $10^4 \text{ m}^3$ ) Gross amount of irrigation water use							291425.14				

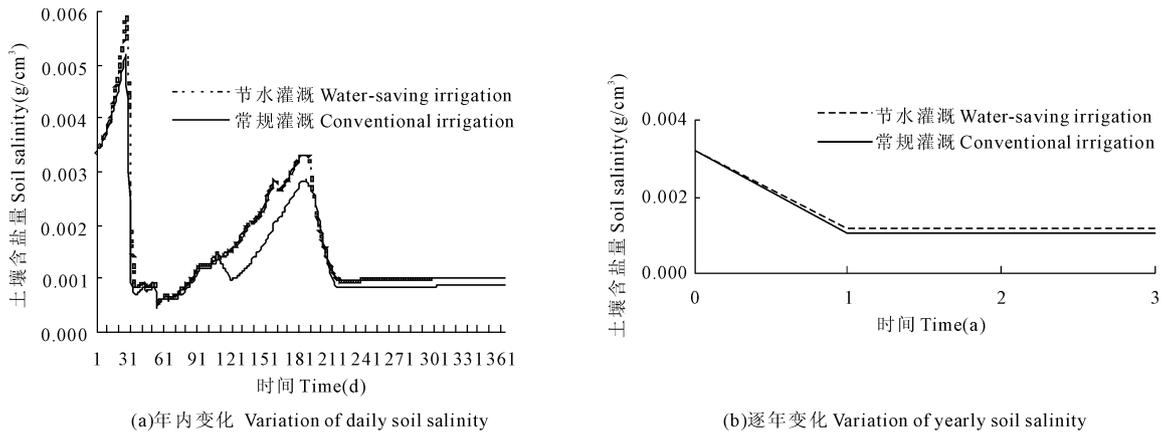


图 1 无排水耕作层土壤含盐量变化

Fig.1 Soil salinity variation in plough layer under drainless condition

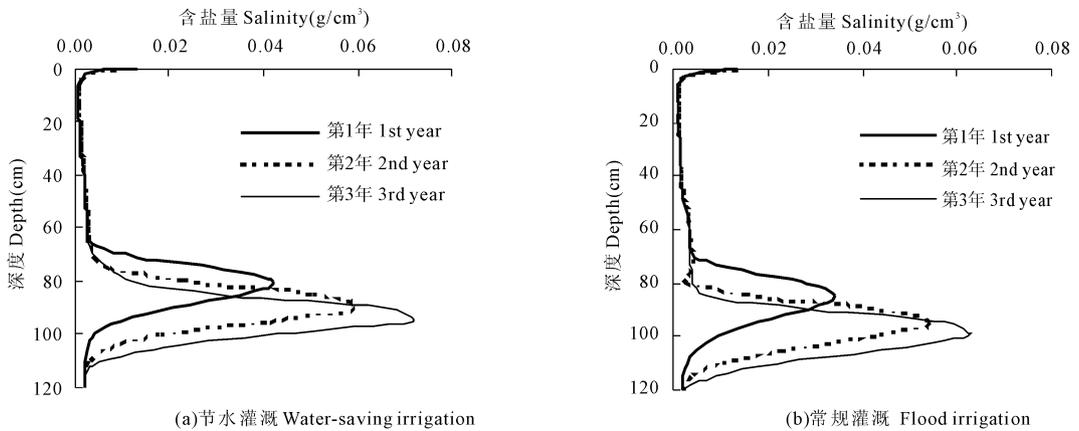


图 2 无排水土壤剖面含盐量逐年变化

Fig.2 Salinity variation at soil section under drainless condition in 3 years

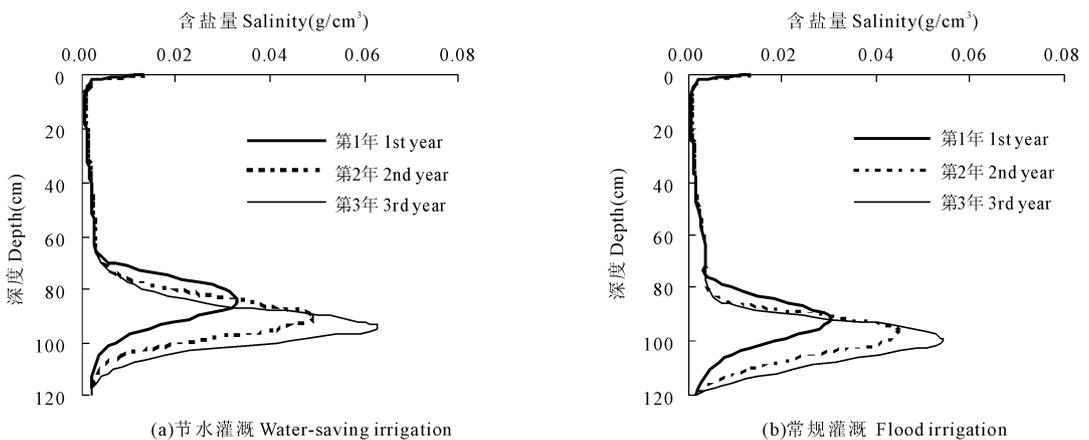


图 3 暗管排水土壤剖面含盐量逐年变化

Fig.3 Salinity variation at soil section under pipe drainage in 3 years

(2) 从多年变化趋势来看,在常规灌溉和节水灌溉条件下耕作层的土壤盐分呈逐年减少的趋势,且两者间的差异不大,说明这两种灌溉模式均能使耕层土壤脱盐。

(3) 从剖面盐分分布来看,当原土及灌溉水

中含有一定盐分,没有排水设施或仅有水平排水的情况下,由于灌溉淋洗进入地下水的土壤盐分未能及时排出,受作物蒸腾以及潜水蒸发的影响,盐分又随水上升,最终聚集在根系层底部,影响作物的生长。由连续3年土壤中盐分浓度的变化可知,在灌

溉入渗水量的淋洗下,盐分聚集带逐年下移,到第 3 年盐分浓度曲线和地下水浓度  $2.09 \text{ g/L}$  平缓连接,且在  $60 \text{ cm}$  土层内无盐分积累。

(4) 常规灌溉条件下,土壤剖面盐分聚集带范围较节水灌溉缩小,位置下移,且浓度峰值降低,说明大水量更有利于盐分向土壤深层淋洗。暗管排水条件下,土壤剖面盐分聚集带范围较无排水缩小,位置下移,且浓度峰值降低,说明暗管排水提高了灌溉淋洗效果,对土壤返盐过程有明显的抑制作用。

可见,在盐碱危害较重的银北灌区合理减少引黄水量,发展节水灌溉,不会造成耕层盐分的逐年累积,同时还能减少渠道渗漏补给和灌溉入渗补给,降低地下水位。在低洼盐碱,沟排难度大,井排效果不明显的地区,采用暗管排水可以将盐分淋洗到根系层以下,降低盐分峰值。建议银北灌区尽快改变大水漫灌等粗放灌溉方式,大力推广农业节水灌溉技术,并在完善明沟、暗管等水平排水的基础上结合竖井灌排,充分开发利用地下水,以达到提高水资源利用效率和治理盐碱的双重功效。

## 4 讨论

由于缺乏长期详尽的土壤剖面水盐实测资料,本次研究中的部分参数只能借助于相似地区的试验成果来估计。若要利用 HYDRUS 模型对银北灌区土壤盐分的时空变化规律做出更为精确的预测预报,还需要大量的田间观测数据支持,拟合和校验水盐运动参数。

节水技术大面积实施后土壤中的盐分动态如何,减少灌溉水量是否会改变灌区的积脱盐状态,暗管排水系统如何布置更有利于控盐? 回答这些问题,不仅要借助数学模型的定量计算,还需要通过灌排实践的检验证明。

## 5 结论

在新的灌排技术逐步得到推广应用的形势下,本文运用 HYDRUS-1D 模型及计算程序对不同灌排模式下的水盐动态进行数值模拟,研究了节水灌溉和常规灌溉、暗管排水和无排水对盐碱地的改良效果,从盐分调控的角度论证了在银北灌区实行节水灌溉的可行性,以及加强水平和竖直排水的必要性。该研究进一步拓展了水盐运移模拟模型的应用领域,为灌区的节水改造提供了一种行之有效的决策手段。

## 参考文献:

- [1] 汪林,甘泓,汪珊.宁夏引黄灌区水盐循环演化与调控[M].北京:中国水利水电出版社,2003.
- [2] 肖振华,王学锋.冬小麦节水灌溉及其对土壤水盐动态的影响[J].土壤,1995,(1):28—34.
- [3] 柴付军,李光永.灌溉频率对膜下滴灌土壤水盐分布和棉花生长的影响研究[J].灌溉排水学报,2005,24(3):12—15.
- [4] 谭军利,康跃虎.滴灌条件下种植年限对大田土壤盐分及 pH 值的影响[J].农业工程学报,2009,25(9):43—50.
- [5] 刘广明,杨劲松.基于控制灌溉理论的水稻优化灌溉制度研究[J].农业工程学报,2005,21(5):29—33.
- [6] 张展羽,郭相平.节水控盐灌溉制度的优化设计[J].水利学报,2001,(4):89—94.
- [7] Ben-Asher J. Solute transfer and extraction from trickle irrigation source: the effective hemisphere model [J]. Water Resources Research, 1987, 23(11):2091—2096.
- [8] 屈忠义,陈亚新.大型灌区节水灌溉工程实施后土壤水盐动态规律预测及效果评估[J].中国农村水利水电,2007,(8):27—33.
- [9] 唐亚莉.典型试验区土壤水盐运移模型的建立及数值模拟[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2007:40—50.
- [10] 张力平,陈新明.棉田滴灌水盐模型及动态变化规律[J].灌溉排水学报,2008,27(2):47—50.
- [11] 邵孝侯,刘才良.暗管排水对滨海新垦区土壤盐分动态的影响及脱盐效果[J].河海大学学报,1995,23(2):88—93.
- [12] 姚中英,赵正玲.暗管排水在干旱地区的应用[J].塔里木大学学报,2005,17(2):76—78.
- [13] 刘子义.新疆内陆干旱重盐碱地区暗管排水技术的应用[J].农田水利与小水电,1994,(7):9—13.
- [14] 余美,芮孝芳.宁夏银北灌区水盐均衡模型及其应用[J].河海大学学报,2009,37(4):367—372.
- [15] Nielsen D R, Van Genuchten M Th. Waterflow and solute transport processes in the unsaturated zone [J]. Water Resour Res, 1986, 22(9):898—1008.
- [16] Van Genuchten M Th, Wagenet R J. Two-site/two-region models for pesticide transport and degradation: Theoretical development and analytical solutions [J]. Soil Sci Soc Am, 1989, 53(5):1303—1310.
- [17] Rassam D W, Cook F J. Numerical simulations of water flow and solute transport applied to acid sulfate soils [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2002, 128(2):107—115.
- [18] 尹大凯,胡和平,惠士博.青铜峡银北灌区井灌井排水盐运动数值模拟[J].农业工程学报,2002,18(3):1—4.
- [19] Van Horn J W. Drainage for salinity control [R]. The Netherlands: Wageningen Agricultural University, 1997:1—55.
- [20] Ernst L F. Groundwater flow in the saturated zone and its calculation when horizontal parallel open conduits are present, Thesis [D]. Utrecht, The Netherlands: University of Utrecht, 1962.
- [21] Van Genuchten, M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Sci Soc Am J, 1980, 44:892—898.

- [22] Haverkamp R, Vauclin M. Comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration[J]. Soil Sci Soc Am J, 1977, 41: 285—294.
- [23] 邵爱军,李会昌.野外条件下作物根系吸水模型的建立[J].水利学报,1997,(2):68—72.
- [24] Feddes R A, Kowalik P J. Simulation of Field Water Use and Crop Yield[M]. The Netherlands, Wageningen: Publishing and Documentation, 1978.
- [25] Raats P A C. Steady flows of water and salt in uniform soil profiles with plant roots[J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1974, 38: 717—722.
- [26] 尹娟,田军仓.宁夏水稻节水灌溉技术试验研究[J].宁夏农学院学报,2002,23(2):12—15.
- [27] 杨建国,田军仓.银北灌区春小麦节水灌溉制度试验研究[J].灌溉排水学报,2005,24(5):29—31.
- [28] 杜历,鲍子云.银北灌区地下水调控试验示范研究[J].西北水资源与水工程,1995,6(3):77—83.

## Simulation and evaluation of soil salt movement under different irrigation and drainage conditions

SUN Jian-shu<sup>1</sup>, YU Mei<sup>2</sup>

(1. Ningxia Water Resources & Hydropower Survey Design & Research Institute Co., Ltd., Yinchuan, Ningxia 750004, China;

2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China)

**Abstract:** One-dimensional water-salt movement under different conditions of irrigation and drainage was simulated by using HYDRUS-1D model. The effects on the reclamation of saline-alkali soil of conventional irrigation, water-saving irrigation, pipe drainage, and drainless condition were compared and evaluated. The results reveal that the annual salinity variations in plough layer under water-saving irrigation are similar to those under conventional irrigation, and cutting down 14.36 percent of irrigation water may not obviously reduce the salt-leaching efficiency. The salinity in plough layer is reducing year by year under continuous water-saving irrigation or conventional irrigation, and the salinity difference between the two irrigation modes is not significant. Under the pipe drainage and drainless condition, the salt leached from aeration zone into groundwater can not be drained timely and accumulate beneath the root zone eventually. Compared with the drainless condition, the salt accumulation zone in soil profile is narrower and deeper, and the peak salt concentration is smaller under the pipe drainage condition. The research results not only demonstrate the feasibility of carrying out the water-saving irrigation and the necessity of strengthening the horizontal and vertical drainage from the perspective of soil salinity but also provide a reference for the planning of water-saving and drainage engineering and the reclamation of saline-alkali soil in the Yinbei irrigation district of Ningxia.

**Keywords:** water-saving irrigation; soil salinization; water-salt dynamic simulation; pipe drainage