

# 明沟排水洗盐条件下土壤水盐动态模拟研究<sup>\*</sup>

陈丽娟<sup>1</sup>, 冯 起<sup>1</sup>, 张新民<sup>2</sup>, 刘 蔚<sup>3</sup>, 苏永红<sup>1</sup>, 郭 瑞<sup>1</sup>, 席海洋<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; 2. 甘肃省水利科学研究院, 兰州 730000; 3. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:**运用数值模拟的方法,对明沟排水洗盐过程中土壤水盐运移动态进行了研究。在沟距一半处土壤水盐运移可近似视为一维运动,冲洗脱盐率与脱盐深度最小,并沿这一位置形成对称分布;整个冲洗过程中,含盐量的变化总是稍滞后于含水率的变化;分析冲洗后不同含盐量剖面的返盐率发现,返盐率与含盐量符合幂函数关系,含盐量较低时,返盐率较高,反之亦然;运用数值模拟方法,建立了区域不同含盐量情况下明沟排水洗盐沟距一半处的洗盐制度。

**关键词:**洗盐;数值模拟;水盐动态

中图分类号:S156.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2010)01-0235-04

## Simulation Study on Dynamic of Soil Water and Salt of Salt Leaching with Drainage Ditch

CHEN Li-juan<sup>1</sup>, FENG Qi<sup>1</sup>, ZHANG Xin-min<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>3</sup>, SU Yong-hong<sup>1</sup>, GUO Rui<sup>1</sup>, XI Hai-yang<sup>1</sup>

(1. Cold and Arid Regions Environmental Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Gansu Research Institute of Water Resources and Hydropower, Lanzhou 730000, China; 3. State Key Laboratory of Hydrosiences and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Dynamic of soil water and salt of salt leaching with drainage ditch was studied by making use of numerical methods in this paper. Soil water-salt transport could be considered approximately as one-dimensional movement at half distance of two ditches, in which ratio and depth of desalinization reached the minimum value and formed symmetric distribution. During the entire washing process, changes of salinity were always slightly lagged behind changes of moisture content. Through analyzing the resalinization ratio of different salinity profile after leaching, it is found that the relationship between resalinization ratio and the salt content followed the principle of power function. The salt leaching system of different salt content was established.

**Key words:** salt leaching; numerical simulation; dynamics of soil water and salt

我国有盐渍土面积约 9 913 万  $\text{hm}^2$ , 涉及范围多达 23 个省、市、自治区, 具有分布范围广、含盐成分复杂、含盐量高、危害严重等特点<sup>[1]</sup>。研究土壤水盐运移对盐渍土的改良有很大的经济价值。要想使农作物生长的土层中含盐量保持在一定的限度内, 就需要研究土壤水盐在入渗、蒸发条件下的运移过程及分布规律。目前对于盐分在非饱和土层中运动规律的研究, 还少有涉及盐分在明沟排水冲洗改良过程中的运移规律及水盐动态的预测、预报方法, 无

法用来指导盐渍土改良过程中遇到的问题<sup>[2-5]</sup>, 因此, 必须在已有研究成果和试验经验的基础上, 紧密结合土壤盐渍化的防治, 对洗盐过程中盐分运移理论作进一步的探讨和研究, 为合理地确定土壤盐碱化防治措施和田间水分管理提供科学依据。本文运用数值模拟的方法, 对明沟排水洗盐条件下沟距一半处的土壤水盐运移动态进行了研究, 并建立了区域洗盐制度, 其结论可以为盐渍土的改良治理提供理论依据和技术支持。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2009-07-08

基金项目: 博士后面上基金(20080440393); 国家基金委基金专项(4094007)

作者简介: 陈丽娟(1982-), 女, 甘肃天水人, 在读博士生, 主要从事水文与水资源方面的研究。E-mail: chenlj2001@126.com

## 1 土壤水盐运移数学模型

明沟排水洗盐多选择农田休闲期进行,如忽略土壤温度及溶质对水输运过程的影响,不考虑作物根系吸水因素,以  $h$  为变量的混合型土壤水分运动数学模型为

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

$$h(z, t) = h_0(z) \quad t = t_0 \quad 0 \leq z \leq l \quad (2)$$

$$-K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) = Q_p \quad t > 0 \quad z = 0 \quad (3)$$

$$-K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) = q_l(t) \quad t > 0 \quad z = l \quad (4)$$

式中:  $\theta$  ——体积含水率;  $h$  ——压力水头;  $h_0(z)$  ——初始压力水头分布;  $K(h)$  ——水力传导度;  $Q_p$  ——供水强度或表土蒸发强度;  $q_l(t)$  ——净排水通量,  $l$  ——计算土层厚度。

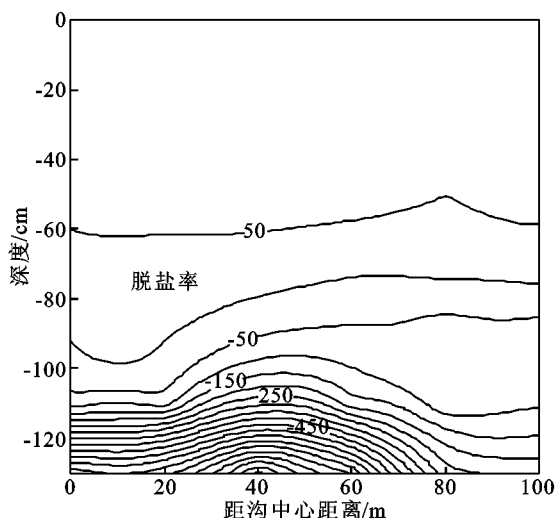
作为土壤水分输运物质的盐分,忽略其在土壤中的化合与分解、溶解与沉淀及离子交换等影响,明沟排水洗盐盐分运移的数学模型为

$$\frac{\partial(c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (qc) \quad (5)$$

$$c(z, 0) = c_a(z) \quad t = t_0 \quad 0 \leq z \leq l \quad (6)$$

$$-D \frac{\partial c}{\partial z} + qc = J_p \quad z = 0 \quad (7)$$

$$c(z, t) = c_l \quad z = l \quad (8)$$



式中:  $c$  ——土壤溶质浓度;  $D$  ——水动力弥散系数;  $q$  ——土壤水通量;  $J_p$  ——通过土壤表面的盐分通量,入渗时为  $c_r$ ,蒸发时为零;  $c_l$  ——下边界土壤盐分浓度。

## 2 模型验证

### 2.1 模拟方案的确定

2003 年 7 月有关部门在疏勒河昌马灌区进行了明沟排水洗盐试验,试验设计见参考文献[6],为监测冲洗脱盐效果,试验以 4<sup>#</sup> 排水沟中心为起点每隔 20 m 设置了一个土壤盐分监测剖面,从监测所得冲洗后土壤脱盐率及含盐量等值线图(图 1)可以看出,在同一条田中,距排水沟近的区域脱盐率高,脱盐层厚,反之,则脱盐率低,脱盐层浅。对于水平方向含盐量均匀的土壤,冲洗后脱盐率与脱盐深度均在沟距一半处最小,形成一谷值点,并沿这一位置形成对称分布。由此可见,沟距一半处的土壤水盐运移动态及分布规律对明沟排水洗盐具有较大的影响,很大程度上影响着冲洗脱盐的整体效果。

明沟排水洗盐的过程中,水流携带盐分向排水沟的运移为二维饱和-非饱和运动,但在一般情况下,两排水沟沟距一半处的非饱和带土壤水盐运移可以近似地视为一维运动<sup>[7]</sup>。鉴于此,本文确定运用数值模拟方法,仅对沟距一半处非饱和带的土壤水盐运移规律进行研究,并制定相应的洗盐制度。

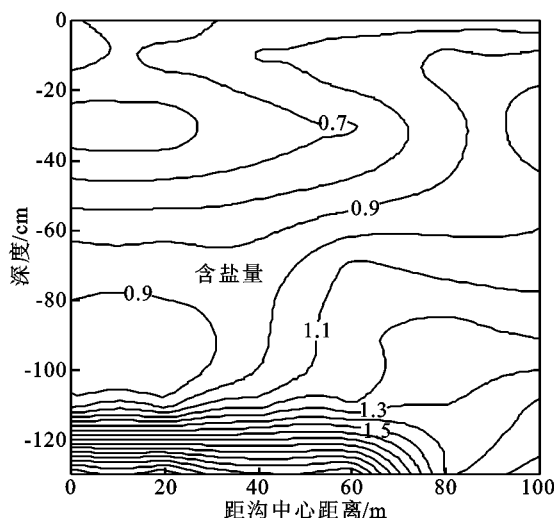


图 1 冲洗后脱盐率及含盐量等值线图

### 2.2 数值模拟结果与分析

采用美国国家盐改中心开发的 HYDRUS 软件,同时进行水分和盐分的非迟滞模拟,土壤水分运动特性参数见表 1。取昌马灌区明沟排水洗盐试验中 3<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 排水沟(间距 141.8 m)之间各监测剖面实测洗盐前后土壤含盐量值进行模型的率定,冲洗水量采用

3<sup>#</sup> 和 4<sup>#</sup> 排水沟所在六号条田实际灌水量。根据洗盐期间实测地下水位变化过程,地下水位最高时位于地面以下 0.8 m 处,因此取模拟最大土层深度距地面以下 1.2 m。模拟阶段划分压力入渗和蒸发两个过程,以累积入渗量达到各次灌溉水深所对应的时间作为划分依据,模拟结果如图 2 所示。

表 1 土壤水分运动特性参数						
土壤性质	干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$s$ / ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$r$ / ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$Ks$ / ( $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ )	$\text{m}^{-1}$	$n$
粉质壤土	1.23	0.362	0.140	63.279	6.533	2.252
砂壤土	1.56	0.344	0.058	193.536	13.230	1.239

注 :参考《甘肃省河西走廊(疏勒河)项目灌区水文地质勘查及地下水动态预测研究报告》选取。

从图中可以看出 ,距排水沟 60 ~ 80 m 处模拟得到的土壤盐分动态过程与实际观测得到的土壤盐分动态过程基本吻合 ,表明此模拟方案能反映明沟排水洗盐沟距一半处的土壤水盐动态分布。

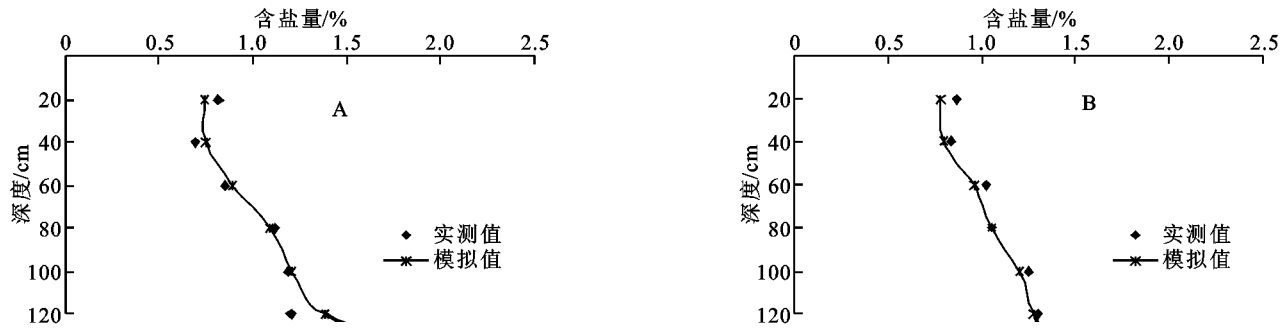


图 2 距排水沟 60 m(A)和 80 m(B)处含盐量模拟值与实测值对比

3 模型的应用

3.1 冲洗后土壤水盐动态变化

土壤含水率分布是研究土壤含盐量分布的基础和前提,第一次冲洗后,表层 0 - 30 cm 土壤平均含水率增大至  $0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  (图 3),较饱和含水率小,且无论是湿润锋向下移动的深度还是盐分含量的递减均比较缓慢,至第五次冲洗后,表层土壤平均含水率  $0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,含盐量 6.77 %,脱盐率 24.24 %,脱盐率低,脱盐效果不明显。第六次冲洗后因昌马西干渠停水修渠,试验灌水间隔了 8 d,在入渗和蒸发双重作用影响下含水率变化较大,饱和含水层延伸至 40 cm 土层,湿润锋至 100 cm 土层。入渗水溶解表土所含固态盐分和原有土壤溶液一并形成浓度

较高的土壤溶液向下移动,盐峰形成于 35 - 45 cm 处,含盐量 5.25 %。由此可见,较长的冲洗间隔时间,潜水蒸发导致的水分损失增大了土壤孔隙度,加快了水分向下入渗的速度,因此更有利于盐分向深层土壤运移。第十次冲洗后,耕作层 0 - 50 cm 土壤平均含水率达到  $0.34 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,含盐量 0.86 %,形成一个盐分淡化区域,土壤含盐量随着土壤水分下渗而减少,耕作层土壤液相盐量下降,土壤盐渍化程度明显降低。整个冲洗过程中,从整个剖面来看,含盐量的变化总是稍滞后于含水率的变化,并且从上到下盐峰的形成越来越晚,移动的速度越来越慢,由此可见,土壤脱盐实际上是一个从上到下盐分逐层传递的动态过程,具有明显的层次分异特征,土层越深,脱盐越慢,难度越大。

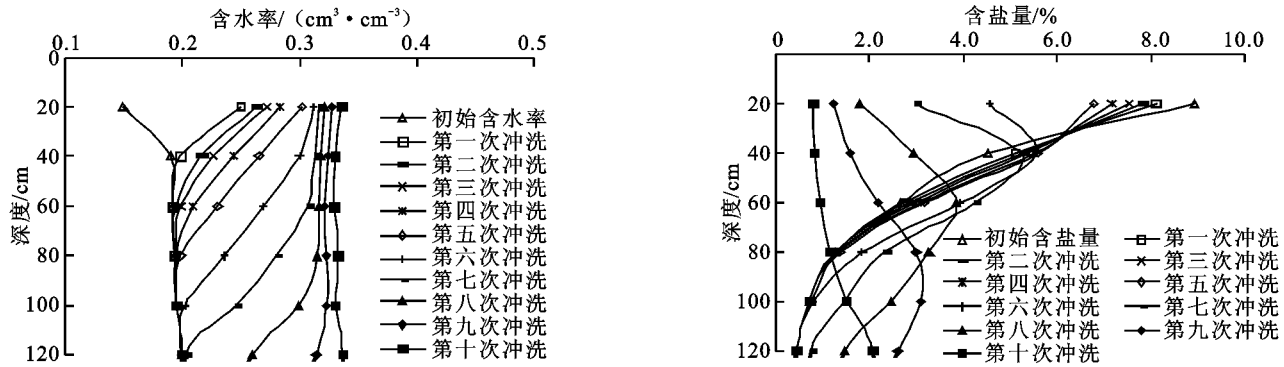


图 3 各次灌水土壤含水率与含盐量分布模拟

3.2 土壤返盐情况分析

图 4 为冲洗后 30 d 和 150 d 土壤含盐量分布情况,可以看出,冲洗后 30 d 土壤含盐量仍然保持下降趋势,但随着入渗水分的减少,盐分运移量逐渐减

小。至冲洗后 150 d,出现了不同程度的返盐,0 - 30 cm 土层含盐量由冲洗后的 0.74 %增大到 1.35 %,返盐率为 45.1 %。究其原因,连续灌水洗盐导致地下水位不断上升,强烈的潜水蒸发造成土壤严重返

盐,另外,在地下水位恢复灌水前的高度后,土壤含水量仍然较高,土面蒸发也会使淋滤到下层土壤中的盐分重新上移,造成返盐。

分析不同含盐量剖面的返盐率发现,含盐量与

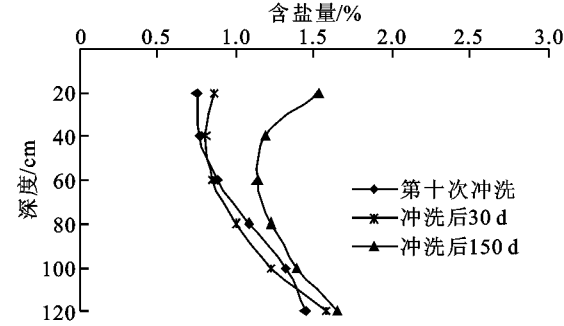


图 4 冲洗后土壤含盐量分布

3.3 洗盐制度的确定

采用明沟排水冲洗改良的盐渍土多为中、重盐土,0 - 30 cm 土层积盐严重,土壤平均含盐量为 0 - 100 cm 土层土壤平均含盐量的 2 倍以上,在冲洗过程中,沟距一半处往往是脱盐效果较差的区域,故冲洗定额的确定应首先满足该区域的计划脱盐标准。根据该试验区盐渍土冲洗改良后大麦苗期受盐害程度试验分析<sup>[4]</sup>,播种前 0 - 30 cm 土层土壤平均含盐量应控制在 1.3 % 以下,故按 0 - 30 cm 设计脱盐层,脱盐标准确定为 1.15 %,针对不同初始含盐量设计冲洗方案进行沟距一半处水盐动态模拟,制定出适合该区域不同含盐量情况下明沟排水洗盐制度见表 2。

表 2 洗盐制度设计表

0 - 30 cm 含盐量/ %	第一次冲洗/ (m <sup>3</sup> · hm <sup>-2</sup> )	冲洗定额/ (m <sup>3</sup> · hm <sup>-2</sup> )	灌水次数	灌水时间间隔/ d
1 ~ 2	1500	5400	3	< 3
2 ~ 3	1800	7200	4	< 3
3 ~ 4	1800	9000	5	< 3
4 ~ 5	1500	11250	6	< 3
5 ~ 7	1800	13500	7	< 3
7 ~ 10	1950	17700	8	< 3

4 结 论

通过明沟排水洗盐过程中沟距与脱盐率关系的分析,以沟距一半处土壤水盐动态作为模拟研究的重点,对洗盐条件下土壤水盐运移模型进行了验证,

返盐率之间存在显著的相关性(图 5),0 - 30 cm 脱盐层、0 - 100 cm 脱盐层的返盐率与含盐量均符合幂函数关系,含盐量较低时,返盐率较高,随着含盐量增高,返盐率急剧下降。

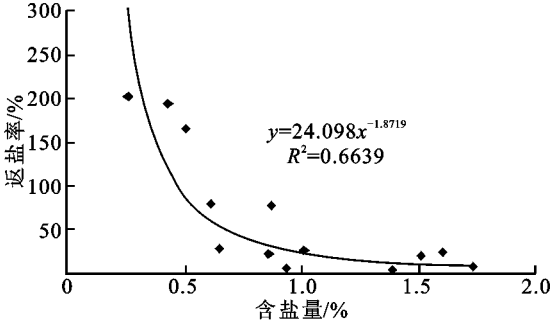


图 5 0 - 30 cm 脱盐层返盐率与含盐量关系曲线

并就冲洗后土壤水盐动态及返盐情况进行了研究。结果表明,在明沟排水洗盐的过程中,沟距一半处的冲洗脱盐率与脱盐深度最小,并沿这一位置形成对称分布,因此可将该处土壤水盐运移视为一维运动;整个冲洗过程中,含盐量的变化总是稍滞后于含水率的变化,说明土壤脱盐实际上是一个从上到下盐分逐层传递的动态过程,具有明显的层次分异特征;分析冲洗后不同含盐量剖面的返盐率发现,返盐率与含盐量符合幂函数关系,含盐量较低时,返盐率较高,反之亦然。在此基础上,本文运用数值模拟的方法制定了区域明沟排水洗盐制度,对以试验为主的盐渍土改良研究进行了有益的探索和补充。

参考文献:

[1] 桂呈森,徐蒙,王桂华.干旱半干旱地区生态环境在西部大开发中可持续发展的研究[J].内蒙古林业科技,2005(1):27-30.

[2] 许艳争.松嫩平原不同盐分补给类型盐渍土的水盐运移规律研究[D].吉林:东北师范大学,2008:2-8.

[3] 黄领梅,沈冰.水盐运动研究述评[J].西北水资源与水利工程,2000,11(1):6-12.

[4] 吕殿青,王文焰,王全九.入渗与蒸发条件下土壤水盐运移的研究[J].水土保持研究,1999,6(2):61-66.

[5] 周宏飞,马金玲.塔里木灌区棉田的水盐动态和水盐平衡问题探讨[J].灌溉排水学报,2005,24(6):10-14.

[6] 马德海.疏勒河灌区新垦盐碱地洗盐定额试验研究[J].中国农村水利水电,2007(7):22-27.

[7] 余婉贞.二维土壤洗盐模型分析[J].高校应用数学学报,1990,5(3):413-427.