

# 土壤盐分分布特征评价\*

吕殿青<sup>1</sup> 王全九<sup>1,2</sup> 王文焰<sup>1</sup> 邵明安<sup>1</sup>

(1 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,

陕西杨陵 712100; 2 西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

**摘要** 通过室内积水入渗土壤盐分运移模拟试验, 分析了水盐迁移特征, 并针对盐碱地干排法的特点, 提出了一些土壤盐分变化特征量。同时分析了这些土壤盐分变化特征量和水盐迁移特性间的关系, 为确定合理的盐碱地改良措施提供指导。

**关键词** 盐分运移, 干排法, 土壤盐分变化特征量

**中图分类号** S152

随着世界人口的增加, 合理开发和利用有限的土地资源成为当今世界各国关注的热点问题。近年来我国土壤发生了严重的次生盐碱化, 影响我国农业生产并带来粮食问题。因此盐碱地的改良和防治次生盐碱化就成为一个重要问题<sup>[1-3]</sup>。在水资源缺乏和环境保护日益重视的今天, 传统的盐碱地改良方法在应用上难能满足需求, 因而人们开始寻找新的盐碱地开发利用措施。干排法就是在此情况下形成的一种新型盐碱地开发利用方法, 并且在一些地区开始试验研究。该方法就是通过适当入渗水量, 将表层土壤盐分压至作物主根区以下, 调节土壤盐分浓度的分布, 使其保持在作物耐盐度以下, 以满足作物正常生长所需的水盐环境。因此对入渗条件下水盐运动规律进行系统研究, 有可能提出合理的灌水量和灌溉制度, 实现盐碱地的合理利用。但由于干排法是以满足作物对土壤盐分要求为目标, 调节土壤水盐特性的一种新型方法, 因此它的灌溉制度、灌水定额及压盐指标不同于传统的灌溉方法, 需根据土壤水盐运移特征和盐分分布特征来确定。我们通过积水入渗条件下土壤水盐运移过程试验研究, 针对干排法的特点, 提出一些盐分变化特征量, 并对其进行详细分析, 以便为盐碱地开发利用和次生盐碱化的防治提供科学依据及生产实践服务。

## 1 材料与方 法

供试土壤取自新疆盐碱区, 通过颗粒组成分析, 供试土壤为粉沙质粘壤土。土壤盐分以氯化钠为主, 属于氯化物盐土。试验土样的初始含盐量为  $14.2\text{g kg}^{-1}$ , 根据新疆荒勘局提出的土壤盐化等级标准, 属于强度盐碱土。

试验装置包括试验土筒和供水设备。试验土筒长  $\times$  宽  $\times$  高为  $9.7\text{cm} \times 4\text{cm} \times 70\text{cm}$ , 侧面  $10\text{cm}$  以下每

\* 中科院知识创新工程项目(KZCX2- 411)、国家杰出青年基金(40025106)和霍英东教育基金(71028)资助

收稿日期: 2000- 11- 21; 收到修改稿日期: 2002- 12- 25

隔 1cm 开一方形取样口,以便观测湿润锋和取土。供水设备为截面积  $20\text{cm}^2$ ,高 70cm 的马氏瓶。土样过 1mm 筛处理后,以初始含水量为  $34\text{g kg}^{-1}$  将土样分层均匀装入试验土筒。根据研究需要进行了一维积水入渗条件下不同灌水历时的土壤水盐运移试验。在试验过程中,测定入渗量和湿润锋深度,在停止供水后,立即在不同深度提取土样,用烘干法测定土样的含水量,用浸提法测定土样的含盐量和主要盐分离子含量。

## 2 盐分变化特征量

土壤盐分离子随着土壤水分的运动而迁移。对于盐碱土而言,在一维积水入渗过程中,上层土壤发生脱盐,下层土壤积盐,土壤存在着明显的脱盐区和积盐区,积盐区深度内作物无法生长,因此脱盐区的大小对农业生产有着重要的意义<sup>[1,2,4,5]</sup>。为了对土壤的脱盐区和积盐区进行定量的对比分析,将土壤含盐量低于土壤初始含盐量的这一区域深度称之为脱盐区深度  $h_1$ ,将土壤含盐量高于土壤初始含盐量的区域深度称之为积盐区深度。在农业生产实践中,对于盐碱地而言,土壤初始含盐量一般高于作物耐盐度,因此积盐区内作物无法生长。而在脱盐区深度内,土壤含盐量低于作物耐盐度的区域深度内作物可以正常生长,如果超出这一区域深度土壤含盐量仍在作物耐盐度之上,因而该区域深度内的作物要受到盐分胁迫的一定影响。因此可将脱盐区深度对作物而言分为两个区域深度,一为作物可以正常生长的淡化区域深度,称之为达标脱盐区深度  $h_2$ ;一为超出作物耐盐度的淡化区域深度,称之为未达标脱盐区深度。这样在一次入渗后土壤盐分分布的状况可分为三个区域,即达标脱盐区深度、未达标脱盐区深度以及积盐区深度。在实际生产中人们通过灌溉水量与土壤特性,确定湿润深度,并根据土壤盐分变化特征,判定所灌水量是否可以形成作物易于生长的水盐环境范围。为使所提出的技术指标具有普遍性,并可根据湿润体的距离也来判定土壤脱盐区深度、达标脱盐区深度的范围,将脱盐区深度与湿润锋深度的比值称之为脱盐区深度系数 ( $h_1/H$ ),将达标脱盐区深度与湿润锋深度的比值称之为达标脱盐区深度系数 ( $h_2/H$ )。下面以含盐量和盐分浓度分布(图 1)为例来说明表征盐分变化的特征值。脱盐区深度  $h_1$  定义为土壤含盐量低于土壤初始含盐量的区域深度,如图 1 中的 ef 段;含盐量峰值  $S_f$  定义为含盐量分布中含盐量的最大值,即图 1 中 a 点对应的含盐量值;含盐量峰值位置  $h_3$  定义为含盐量峰值点到地表的距离,即图中的 ab 段;盐分浓度峰值定义为盐分浓度分布中盐分浓度的最大值,即图中的 g 点对应的盐分浓度值;盐分浓度峰值位置  $h_4$  定义为盐分浓度峰值点到地表的距离,即图 1 中的 hf 段; $S_f/S_0$  定义含盐量峰值与初始含盐量之比。脱盐区深度系数 ( $h_1/H$ ) 定义为脱盐区深度与湿润锋深度的比值;含盐量峰值位置系数 ( $h_3/H$ ) 定义为含盐量峰值位置与湿润锋深度的比值;盐分浓度峰值位置系数 ( $h_4/H$ ) 定义为盐分浓度峰值位置与湿润锋深度的比值。

针对于排法的特点,将表层盐分排至作物主根区之外,形成作物可正常生长的淡化区。因此要将

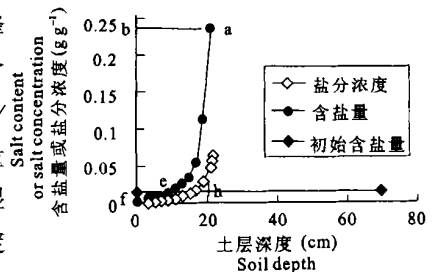


图 1 含盐量和盐分浓度分布

Fig. 1 Distribution of salt content and salt concentration

达标脱盐区深度控制在作物正常生长的主根区之内,脱盐区深度控制在作物根区之内,而含盐量锋值位置、盐分浓度锋值位置控制在压盐临界深度之外<sup>[2,5]</sup>。为能根据湿润锋的距离来判定达标脱盐区深度、脱盐区深度、含盐量锋值位置及盐分浓度锋值位置,提出了达标脱盐区深度系数、脱盐区深度系数、含盐量锋值位置系数及盐分浓度锋值位置系数一系列压盐指标。在生产实践中,可根据上述盐分变化特征量以及它们水盐运移关系来确定合理的灌溉制度和灌水定额,以达到合理开发利用盐碱地目的。

### 3 结果与分析

为了进一步分析上述技术指标的变化特征,进行了一系列积水入渗条件下水盐迁移试验研究。根据室内模拟实验结果,以新疆棉花为例(耐盐度为0.5%),分析土壤盐分特征指标变化规律与影响因素。

#### 3.1 $\text{Na}^+$ 浓度变化特征量的分析

$\text{Na}^+$  是盐碱土中主要盐分离子,也是盐分对作物生长产生直接影响的元素,因此有必要对其迁移特征进行分析<sup>[1,2]</sup>。同时由于  $\text{Na}^+$  对作物生长的影响程度主要取决于其浓度高低,因此在确定压盐水量时,需考虑将  $\text{Na}^+$  高浓度区控制在作物主根系以下。为了根据浓度来确定灌水量和灌水时间,对  $\text{Na}^+$  浓度变化特征量进行了定义与分析。将  $\text{Na}^+$  浓度锋值位置  $h_5$  定义为  $\text{Na}^+$  浓度分布中浓度的最大值; $\text{Na}^+$  浓度锋值位置系数定义为  $\text{Na}^+$  浓度锋值位置与湿润锋的比值;根据  $\text{Na}^+$  浓度实测结果可得不同历时的  $\text{Na}^+$  浓度锋值位置变化,将其点绘于图2中。

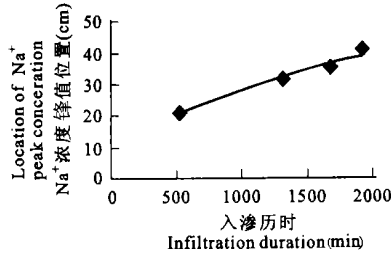


图2  $\text{Na}^+$  浓度锋值位置与入渗历时的关系(点为实测值,线为拟合值)

Fig.2 Relation between location of the  $\text{Na}^+$  peak concentration and infiltration duration

由图2可见,随着入渗量的增加, $\text{Na}^+$  浓度( $10^{-3} \text{g g}^{-1}$ )锋值位置也在增加。采用幂函数对实测点进行拟合,拟合结果为  $\text{Na}^+$  浓度( $10^{-3} \text{g g}^{-1}$ )锋值位置  $h_5 = 0.9512t^{0.4914}$ ,相关系数  $R$  为 0.9825,故两者具有很好的相关性。同时也可获得  $\text{Na}^+$  浓度锋值位置  $h_5 = 0.945134H$ ,利用此关系可根据湿润锋深度  $H$  近似估计  $\text{Na}^+$  浓度锋值位置。

#### 3.2 土壤盐分变化特征量

根据土壤水盐试验含盐量和盐分浓度分布的结果,计算了不同历时的脱盐区深度、脱盐区深度系数、含盐量锋值位置、盐分浓度锋值位置、含盐量锋值  $S_f$ 、盐分浓度锋值、含盐量锋值与初始含盐量的比值  $S_f/S_0$ 、达标脱盐区深度以及达标脱盐区深度系数,如表1所

示。

表 1 入渗历时与盐分变化特征量的关系

Table 1 Relation between salt transport properties and infiltration duration

$t$ min	$I$ cm	$H$ cm	$h_1$ cm	$\frac{h_1}{H}$	$S_f$ (%)	$\frac{S_f}{S_0}$	$h_2$ cm	$h_2/H$	$h_3$ cm	$\frac{h_3}{H}$	$h_4$ cm	$\frac{h_4}{H}$
530	9.36	23	16	0.69	4.671	3.25	10.2	0.442	21	0.91	21	0.91
1320	13.25	32	24	0.72	4.715	3.32	15.87	0.496	31.5	0.98	31.5	0.98
1680	14.85	36	26.5	0.71	4.711	3.32	17.64	0.49	33.5	0.93	35.5	0.99
1920	17.04	42	29.5	0.68	4.694	3.31	19.6	0.47	41	0.98	41	0.98
				<u>0.70</u>	<u>4.698</u>	<u>3.30</u>		<u>0.475</u>		<u>0.95</u>		<u>0.97</u>

注:带下划线的数值为均值

$t$  为入渗历时(infiltration duration),  $I$  为累积入渗量(amount of accumulated infiltration),  $H$  为湿润锋(wetting front),  $h_1$  为脱盐区深度(depth of desalination),  $h_1/H$  为脱盐区深度系数(coefficient of depth of desalination),  $S_f$  为含盐量峰值(peak of the salt content),  $S_f/S_0$  为含盐量峰值与初始含盐量的比值(ratio of peak salt content with initial salt content),  $h_2$  为达标脱盐区深度(depth of the up-to-par desalination zone),  $h_2/H$  为达标脱盐区深度系数(coefficient of depth of the up-to-par desalination zone)  $h_3$  为含盐量峰值位置(location of peak salt content),  $h_3/H$  为含盐量峰值位置系数(coefficient of the location of peak salt content),  $h_4$  为盐分浓度峰值位置(location of peak salt concentration),  $h_4/H$  为盐分浓度峰值位置系数(coefficient of the location of peak salt concentration)

由表 1 可知,脱盐区深度系数、含盐量峰值、达标脱盐区深度系数、含盐量比值  $S_f/S_0$  变化幅度较小,基本为一常数,可认为与时间无关。同时根据表 1 可得脱盐区深度  $h_1$ 、达标脱盐区深度  $h_2$ 、含盐量峰值位置  $h_3$ 、盐分浓度峰值位置  $h_4$  与湿润锋  $H$  间的定量关系如下:

$$h_1 = 0.70H \quad \text{相关系数 } R = 0.9786 \quad h_2 = 0.4745H \quad \text{相关系数 } R = 0.9554$$

$$h_3 = 0.95H \quad \text{相关系数 } R = 0.9685 \quad h_4 = 0.97H \quad \text{相关系数 } R = 0.9734$$

根据上述关系,可利用湿润锋的深度近似估计脱盐区深度、达标脱盐区深度、含盐量峰值位置、盐分浓度峰值位置,并可以此确定灌水定额。

图 3、4、5、6 显示了脱盐区深度  $h_1$ 、达标脱盐区深度  $h_2$ 、含盐量峰值位置  $h_3$ 、盐分浓度峰值位置  $h_4$  随入渗历时的变化过程。

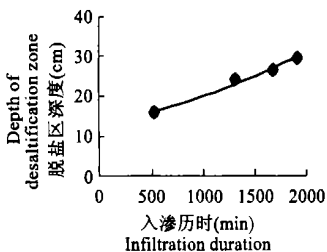


图 3 脱盐区深度与入渗历时的关系

Fig.3 Relation between depth of the desalination zone and infiltration duration

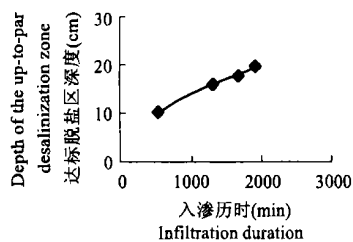


图 4 达标脱盐区深度与入渗历时的关系

Fig.4 Relation between depth of the up-to-par desalination zone and infiltration duration

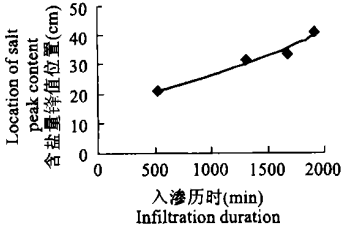


图5 含盐量锋值位置与入渗历时的关系

Fig.5 Relation between location of the peak salt content and infiltration duration

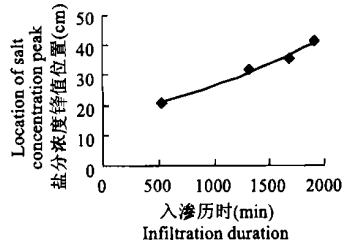


图6 盐分浓度锋值位置与入渗历时的关系

Fig.6 Relation between location of the peak salt concentration and infiltration duration

由图3、4、5、6可见,随着入渗历时(入渗量)的增加,脱盐区深度增加,达标脱盐区深度、含盐量锋值位置以及盐分浓度锋值位置也增加。采用幂函数对其进行拟合,拟合结果如表2所示。由拟合结果可知,脱盐区深度、达标脱盐区深度、含盐量锋值位置以及盐分浓度锋值位置与入渗历时存在明显的幂函数关系。

表2 脱盐区深度、达标脱盐区深度、含盐量锋值位置、盐分浓度锋值位置与入渗历时的拟合结果

Table 2 Fitting results of the depth of the desalination zone, the depth up-to-par desoluiization zone, the location of the peak salt content and the peak salt concentration, with the infiltration duration

指标关系 Relation of indexes	幂函数形式 Power function	相关系数 $R$ Correlation coefficient
脱盐区深度 $\sim t$	$h_1 = 0.8915t^{0.4595}$	0.9946
达标脱盐区深度 $\sim t$	$h_2 = 0.4581t^{0.4941}$	0.9967
含盐量锋值位置 $\sim t$	$h_3 = 1.0665t^{0.4733}$	0.9576
盐分浓度锋值位置 $\sim t$	$h_4 = 0.9512t^{0.4914}$	0.9825

### 3.3 水盐耦合迁移特征

水分的运动必定伴随着盐分的迁移,因此反映水分运动宏观特征的累积入渗量与反映盐分迁移特征的脱盐区深度、达标脱盐区深度、含盐量锋值位置以及盐分浓度锋值位置必定存在着密切的关系。随着累积入渗量的增加,脱盐区深度,达标脱盐区深度、含盐量锋值位置以及盐分浓度锋值位置加深。采用幂函数对其进行拟合,拟合结果如下。

$$\text{脱盐区深度} \sim I: \quad h_1 = 1.5919 I^{1.0385} \quad \text{相关系数 } R = 0.9914;$$

$$\text{达标脱盐区深度} \sim I: \quad h_2 = 0.8614 I^{1.1135} \quad \text{相关系数 } R = 0.9902;$$

$$\text{含盐量锋值位置} \sim I: \quad h_3 = 1.84 I^{1.0894} \quad \text{相关系数 } R = 0.9904;$$

$$\text{盐分浓度锋值位置} \sim I: \quad h_4 = 1.7177 I^{1.1217} \quad \text{相关系数 } R = 0.9902。$$

从相关系数  $R$  来看,脱盐区深度、达标脱盐区深度、含盐量锋值位置以及盐分浓度锋值位置与累积入渗量存在着良好的幂函数关系。因此可以根据灌溉水量来确定表征盐分特征的指标,即脱盐区深度、达标脱盐区深度、含盐量锋值位置以及盐分浓度锋值位置。

综上所述,  $\text{Na}^+$  浓度 ( $10^{-3} \text{ g g}^{-1}$ ) 锋值位置随着入渗历时的增加而增加,且两者存在着幂函数关系;随着入渗历时的增加,脱盐区深度、达标脱盐区深度、含盐量锋值位置以及盐

分浓度锋值位置增加;脱盐区深度、达标脱盐区深度、含盐量锋值位置以及盐分浓度锋值位置与入渗历时存在明显的幂函数关系;脱盐区深度、达标脱盐区深度、含盐量锋值位置以及盐分浓度锋值位置与累积入渗量存在良好的幂函数关系。

## 4 结 论

本文根据室内模拟实验,分析了一维积水入渗条件下土壤盐分变化特征量即脱盐区深度  $h_1$  及其系数、达标脱盐区深度  $h_2$ 、含盐量锋值  $S_f$  及其位置  $h_3$ 、盐分浓度锋值位置  $h_4$ 、 $\text{Na}^+$  浓度锋值位置  $h_5$ 、含盐量锋值与初始含盐量的比值  $S_f/S_0$  这些指标的变化。随着入渗历时的增加,脱盐区深度、达标脱盐区深度、含盐量锋值位置、盐分浓度锋值位置也在增加,且两者呈幂函数关系;随着入渗历时的增加,脱盐区深度系数、含盐量锋值、含盐量锋值位置系数、盐分浓度锋值位置系数、比值  $S_f/S_0$  增加甚微,基本为一常数,可认为与时间无关。同时得到脱盐区深度  $h_1$ 、达标脱盐区深度  $h_2$ 、含盐量锋值位置  $h_3$ 、盐分浓度锋值位置  $h_4$  与湿润锋  $H$  间的定量关系,以便更好地指导生产实践。 $\text{Na}^+$  浓度锋值位置随着入渗历时的增加而增加,且符合幂函数关系。同时还分析了入渗量与盐分变化特征量间的关系。这些研究结果为利用干排法开发利用盐碱地提供指导。

## 参 考 文 献

1. 李韵珠,李保国等. 土壤溶质运移. 北京:科学出版社,1999. 131 ~ 181
2. 石元春等. 盐碱地的水盐运动. 北京:北京农业大学出版社,1986
3. 尤文瑞. 盐渍土水盐动态的研究. 土壤学进展,1984,12(3):1 ~ 14
4. 尤文瑞. 土壤盐渍化预报预测的研究. 土壤学进展,1988,16(1):1 ~ 7
5. Nielsen D R *et al.* Water flow and solute transport in unsaturated zone. *Water Resources Research*, 1986, 22(9):89 ~ 108

## EVALUATION OF THE SOIL SALT DISTRIBUTION CHARACTERISTICS

L Dian-qing<sup>1</sup> Wang Quan-ju<sup>1,2</sup> Wang Wen-yan<sup>2</sup> Shao Ming-an<sup>1</sup>

(1 *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,*

*The State Key Lab of Soil Erosion and Dryland Farming in the Loess Plateau, Yangling,*

*Shaanxi 712100; 2 *Xi'an University of Technology, Xi'an 710048**)

### Summary

Soil salt transport experiments were conducted under one-dimensional water ponded infiltration in laboratory. Characteristics of soil water salt transport were investigated. Based on the characteristics of the partial drainage in the salt-affected land, some characteristic indexes for variation in soil salt were recommended. Their relations with some characteristics of the soil water-salt transport were analysed in order to provide some guidance for utilization of the salt-affected land rationally.

**Key words** Salt transport, Partial drainage, Soil salt transport characteristics