

# 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

史文娟, 沈冰, 汪志荣, 张建丰

(西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

**摘要:** 针对西北地区土壤剖面多呈层状和春季强烈返盐土壤多处于裸露状态的特点, 通过室内土柱实验, 研究了浅层地下水埋深条件下夹砂层土壤中砂层的层位、厚度以及级配等因素对水盐迁移特性的影响。结果表明, 砂层位于底层即层位为0时可加速水盐运动; 层位为10 cm 时可抑制其运动; 层位为35 cm 时砂层对潜水蒸发量和土壤表层返盐的抑制率可达70%~80%左右。砂层对水分和盐分的抑制率随蒸发历时的延长而减小, 但层位为35 cm 的砂层对盐分的抑制率随蒸发历时的延长而增加; 同一历时砂层对水分的抑制率小于对盐分的抑制率。相同层位时, 水盐的抑制率随砂层厚度的增加以及级配的变差而增大。该研究为层状土区盐碱地的改良以及灌溉和排水等措施的制定提供了参考。

**关键词:** 夹砂层土壤; 水盐运移; 特性; 机理

**中图分类号:** S152.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2005)09-0023-04

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 with English abstract)

## 0 引言

由于气象、水文、地质和生物过程的作用, 田间土壤大都呈现为层状结构。研究表明<sup>[1,2]</sup>, 层状土壤的水分运动特性不同于均质土。层状土壤质地的不均匀使得土水势在界面处发生了突变, 因而水分在界面处的运动方式也发生相应的变化。从土壤剖面的孔隙分布状况来看, 当质地剖面下重上轻时, 土层交界处的孔隙上大下小, 反之, 则上小下大。孔隙的这种分布会影响到土层含水率、水力梯度和传导度, 从而影响水盐的运行以及盐碱地的冲洗和改良<sup>[3,4]</sup>, 同时也对作物的产量造成影响<sup>[5]</sup>。因此, 研究层状土壤水盐运移特性, 在以灌溉为主的西北地区有着更为重要的意义。对于蒸发条件下层状土壤潜水蒸发及水盐运移特性的研究, 国内外学者已做了不少工作<sup>[6,7]</sup>, 但主要以黏土夹层的土壤为主<sup>[5,7]</sup>, 对于砂土夹层土壤中水盐运移研究甚少。本文通过室内一维土柱蒸发实验, 研究了夹砂层土壤中砂层的层位、厚度以及级配等因素对水盐运移的影响及机理, 旨在为层状土区盐碱地的改良以及灌溉和排水等措施的制定提供参考。

## 1 实验设计与方法

### 1.1 实验设计

实验装置系统由土柱、供水装置、红外灯组成。所用有机玻璃土柱高60 cm、直径14 cm。土柱沿垂直方向的

4个面每隔5 cm 处开有口径为1 cm 的小孔, 且在水平方向上互相错开, 用于水盐动态测定; 土柱底部设石英砂反滤层以及排气孔; 地下水埋深50 cm, 蓄水层厚度10 cm。“马氏瓶”用于供水并控制水位; 3 g/L 的NaCl水溶液作为蒸发水源, 250W 的红外灯昼夜照射用于模拟不同强度的稳定蒸发, 用与土柱横截面积相同的蒸发皿率定水面蒸发量。

供试细质土壤采自新疆石河子兵团垦区盐碱地, 土质为粉质壤土(其粒级组成为<0.01 mm 占47.5%, <0.001 mm 占12.5%), 土样经混合、风干、碾压、过筛, 按设定容重1.45 g/cm<sup>3</sup> 分层均匀装入土柱。供试砂土为自然砂和筛分砂两种, 粒径范围分别为0.1~3.0 mm 和0.25~0.5 mm, 其容重分别为1.70和1.60 g/cm<sup>3</sup>。实验共6个处理(见图1), 包括0、10、35 cm 3种砂层层位(即砂层下界面距潜水面的距离), 5 cm 和10 cm 两种砂层厚度, 自然砂(0.1~3.0 mm)和筛分砂(0.25~0.5 mm)两种砂层级配。同时以均质壤土作为对照, 每种处理2个重复。

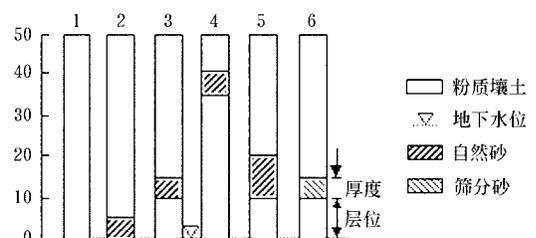


图1 实验土柱示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental columns

### 1.2 实验方法

土柱装好后, 即置于实验系统中, 当毛管水上升至土壤表层并趋于稳定状态(各处理的日耗水量小于1 mm/d)时, 即开始蒸发, 整个蒸发过程历时30 d。在蒸

收稿日期: 2004-11-25 修订日期: 2005-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59879022, 40271022); 陕西省教育厅基金资助项目(04JK229-1)

作者简介: 史文娟(1972-), 女, 陕西武功人, 讲师, 博士, 主要从事农业水资源利用方面的教学与科研工作。西安 西安理工大学水资源研究所, 710048, Email: shiwj@xaut.edu.cn

发过程中,每日8时通过“马氏瓶”观测各处理的潜水蒸发量;每隔10d取一次土样,进行水分和盐分的测定;每次取土后用相同含水率的母土回填,且每次取样的位置不重复。

测试土壤溶液为1:5的土水比浸提液。土壤全盐量通过重量法测定,其称重时所用分析天平的精度为 $10^{-4}$ g。砂土的粒级组成采用筛分法,壤土中大于0.1mm的土粒采用筛分法,小于0.1mm的土粒采用吸管法测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 砂层对蒸发强度和累积蒸发量的影响

潜水蒸发量和蒸发强度是衡量砂层能否起到“阻水隔盐”作用的重要指标<sup>[1]</sup>,对蒸发结束时各处理的潜水蒸发量和蒸发强度进行分析,其结果见表1。

表1 不同处理的潜水累积蒸发量和日蒸发强度

处理	1	2	3	4	5	6
土壤结构	均质壤土	0/5, 自然砂	10/5, 自然砂	35/5, 自然砂	10/10, 自然砂	10/5, 筛分砂
日蒸发强度/ $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	4.78	5.20	4.34	0.92	4.00	3.43
累积蒸发量/ $\text{mm}$	143.5	156.0	130.3	27.6	120.0	102.9

注:蒸发过程中的大气蒸发能力为 $40 \text{ mm/d}$ ,0/5表示砂层层位/厚度,其它数据及以下各表中的数据含义相同。

由表1可知,5cm厚的自然砂位于底层,即层位为0的2号土柱,其蒸发强度比均质土增加了8.7%;而层位为10cm和35cm的3号和4号土柱,其蒸发强度分别减小了9.2%和80.8%。可见砂层对水分运动既有促进也有抑制作用,且层位越高,阻水性越强。

与相同层位和厚度的3号自然砂土柱相比,6号筛分砂土柱的蒸发强度比均质土降低了28.3%。可见砂层的级配越差,对水分的阻滞作用越大。级配相同而厚度不同的3、5号土柱相比,后者的蒸发强度比均质土降低了16.9%,即夹砂层厚度越大,其水分运动受抑制的程度越大。以上各处理在历时30d的昼夜蒸发后,累积蒸发量的大小顺序为 $2 > 1 > 3 > 5 > 6 > 4$ 。

根据土壤水运动理论<sup>[8]</sup>,水分能否在土壤中运动及运动速率的大小取决于土壤的透水性,其代表性指标为土壤的非饱和导水率。对于夹砂层土壤,砂层层位不同时,两种土质导水率的相对大小就会发生变化,水分在其中的运动速度也就不同。当砂层为底砂层时,其剖面含水率较大,砂土的导水率明显大于壤土,因而与均质壤土相比,水分运动速度加快;如砂层层位增加且与水面保持一定距离时,含水量减小,吸力增加,砂土中绝大多数孔隙中的水被排空,成为不导水空隙,此时砂土的导水率反而比壤土小,水分运动速度降低;且砂层层位越高,两种土质导水率差异越大,水分运动速度也越慢。根据此分析,水分运动被加速到被抑制的转折点为砂层

的导水率开始小于壤土的导水率之时。

### 2.2 不同处理的蒸发抑制率比较

从以上可以看出,砂层对水分的蒸发有重要的影响,为了了解不同蒸发历时砂层对潜水蒸发量的影响程度,定义了不同夹砂层土壤的有效蒸发抑制率,其表达式为

$$R = (B_1 - B_2) / B_1 \quad (1)$$

式中  $B_1$ ——均质土(对照)的潜水蒸发量或土壤表层返盐量,mm;  $B_2$ ——各夹砂层土壤的潜水蒸发量或土壤表层返盐量,mm。用式(1)进行计算,其结果如表2所示。

表2 不同处理的水分和盐分有效抑制率随蒸发历时的变化情况

Table 2 Changes of the relative effect of the sand layer against water and salt movement under different treatments

项目	蒸发历时/d	处 理				
		2	3	4	5	6
		0/5, 自然砂	10/5, 自然砂	35/5, 自然砂	10/10, 自然砂	10/5, 筛分砂
水分抑制率	10	-0.17	0.15	0.86	0.20	0.30
	20	-0.15	0.12	0.83	0.18	0.27
	30	-0.087	0.09	0.81	0.16	0.19
土壤表层盐分抑制率	10	-0.118	0.218	0.712	0.312	0.451
	20	-0.077	0.173	0.773	0.360	0.442
	30	-0.060	0.085	0.795	0.334	0.410

由表2可看出,累积蒸发量越小,蒸发抑制率越大。层位为0的底砂层2号土柱因对水分蒸发有促进作用,蒸发抑制率为负值,且蒸发历时越长,其抑制率越大,而其它各处理的抑制率却随历时的延长逐渐减小。说明蒸发历时较短时,砂层对水分的促进或抑制作用较大,尤其在蒸发的前10d更是如此,随蒸发历时延长,砂层的促进或抑制作用均有所降低。同时也说明,尽管地下水埋深较浅,但各处理的潜水蒸发均为非稳定蒸发。

根据实验观测现象,认为这是由于土壤表层盐壳形成后反过来又抑制了水分蒸发所致<sup>[4,9]</sup>,且蒸发强度越大,其土壤表层积盐量越多,蒸发后期的水分抑制率也越大,这也正是底砂层2号土柱水分抑制率增加,而其它各处理水分抑制率减小的原因所在。

### 2.3 砂层对土体盐的影响

#### 2.3.1 不同处理土壤表层返盐的动态特性

由于对作物的生长有较大影响的主要是接近土壤表层处的盐分累积情况,因此首先分析了蒸发过程中不同处理土壤表层0~2cm的盐分累积情况,如图2所示。

图2中显示,蒸发前不同处理土壤表层的含盐量基本相同,蒸发开始后,含盐量明显增加,但其增长率随蒸发历时的延长而减小,且以1号均质土和2号底砂层土壤最为明显。同一历时,各处理土壤表层全盐量的大小顺序为:  $2 > 1 > 3 > 5 > 6 > 4$ ,这与潜水蒸发量的变化一致,也体现了盐分“随水而动”的特点。为了与水分进行对比,又用式(1)计算了各处理不同历时土壤表层的盐分抑制率(见表2)。由表2可知,层位为35cm的4号土

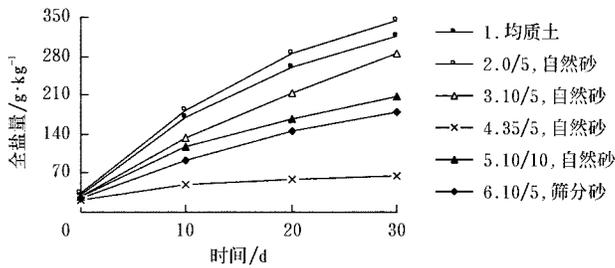


图2 不同处理土壤表层返盐量随蒸发历时的变化

Fig 2 Salt contents of soil surface for different treatments during evaporation

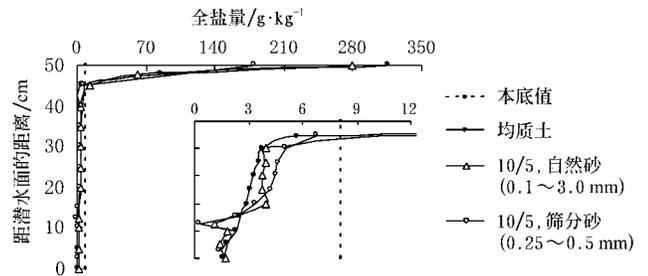


图5 蒸发结束时不同级配夹砂层土壤剖面盐分分布曲线

Fig 5 Salt content profile for the layered soil with the different sand particles distribution at the end of evaporation

柱盐分抑制率随蒸发历时的延长而增加, 这与其水分抑制率的变化情况正好相反。其它处理水分与盐分的变化基本保持一致, 但从整体情况看, 除了底砂层2号土柱外, 砂层对盐分的抑制率明显大于对水分的抑制率。这又说明层位大于10 cm的夹砂层土壤中盐分运动与水分运动不完全同步。

### 2.3.2 不同处理土壤剖面盐分分布情况比较

为进一步了解砂层对水盐运移的影响机理, 对蒸发结束时各处理的盐分剖面进行了对比分析, 其结果如图3、4、5所示。由于蒸发过程中, 各处理土壤表层的返盐均较为强烈, 致使土壤表层以下土壤剖面的盐分变化相对较小, 因此将各处理土壤表层以下盐分分布图放大(即取各图横坐标刻度为0~12的部分, 使剖面曲线能清楚显示)嵌套于各自的图中。

发结束时, 各处理的盐分剖面发生了较大变化, 主要表现在以下4方面:

1) 砂层的含盐量明显小于上下土层的含盐量, 且砂层层位越高, 含盐量越小。根据土壤水动力学原理<sup>[8]</sup>, 同一含水率时壤土的吸力大于砂土, 因此在水分运动过程中, 为了维持整个土壤剖面水势的连续性, 砂层的含水率则要小于壤土的含水率, 相应地砂土的含盐量也小于上下土层壤土的含盐量。

2) 砂层层位越高, 即越接近土壤表层, 土壤剖面相同位置壤土处的含盐量越大, 且当砂层的层位大于10 cm时, 土壤剖面的含盐量大于均质壤土。从图中可以看出, 这与土壤表层含盐量的变化情况是一致的, 即土壤表层的含盐量越大, 剖面中的含盐量越小。可见, 除了底砂层以外, 砂层的存在抑制了盐分向上迁移的速度, 从而使更多的盐分滞留于深层土壤中, 且砂层层位越高, 盐分迁移的速度也越小。

3) 砂层使得较多的盐分滞留于土砂界面, 且层位越高, 滞留量相对越大。根据王文焰等人在入渗条件下的研究结果<sup>[1, 10]</sup>, 水分在运动到土砂界面时会发生滞留现象, 且滞留时间随砂层埋深的增大而延长。由于毛管水上升阶段的水分运动过程与入渗过程完全相同, 只是方向相反。因此, 盐分在土砂界面处滞留是由于毛管水上升过程中水分的滞留引起的。这也正是砂层对土壤表层盐分的抑制率大于对水分的抑制率的主要原因。

4) 除了层位为35 cm的处理外, 其它处理的盐分剖面均出现了明显的脱盐现象; 这主要是由于母土中大量盐分参与了土壤表层的返盐过程, 同时也与地下水的矿化度(3 g/L)小于母土盐分的本底值, 使得母土中部分盐分溶解于地下水中有关系。

此外, 从层位为35 cm的夹砂层土壤剖面出现明显积盐及其土壤表层盐分抑制率与水分抑制率不同步的事实(见表2)可以推断, 蒸发过程中, 此处理的水分运动以汽态扩散为主。当砂层接近土壤表层时, 其导水率明显减小, 满足水分蒸发的能力进一步减弱, 并在土壤表层逐渐形成干燥层, 而盐分则滞留于液态水的部位。

图4所示的是相同条件下不同厚度夹砂层土壤剖面盐分分布情况。砂层厚度越大, 土壤表层以下砂层以上土壤剖面的含盐量越大, 说明层位大于10 cm时, 砂

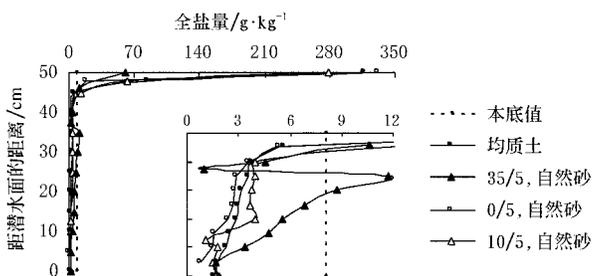


图3 蒸发结束时不同层位夹砂层土壤剖面盐分分布曲线

Fig 3 Salt content profile for the layered soil under different sand positions at the end of evaporation

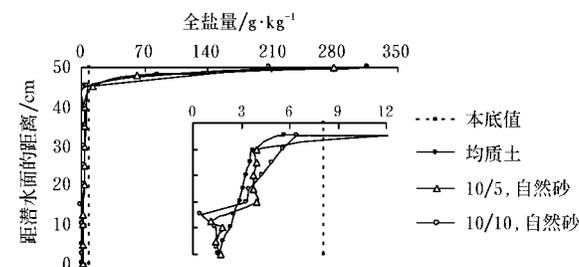


图4 蒸发结束时不同厚度夹砂层土壤剖面盐分分布曲线

Fig 4 Salt content profile for the layered soil under different sand thickness at the end of evaporation

图3所示的是相同级配和厚度不同层位夹砂层土壤剖面的盐分分布情况。从放大后的图中可以看出, 蒸

层厚度越大, 土壤表层返盐强度越小。

从相同层位和厚度不同级配的夹砂层土壤剖面盐分分布情况(图5)可以看出, 砂层的颗粒组成越均匀, 即级配越差, 其土壤剖面的含盐量越大, 这与前面所述原因相同。

### 3 结 论

1) 与均质土相比, 砂层对水分蒸发既有促进也有抑制作用, 其转折点为砂土和壤土导水率的相对大小发生变化之时。

2) 对于盐土来说, 尽管地下水埋深较浅, 但其潜水蒸发仍为非稳定蒸发, 且砂层对水分的有效抑制率仍随蒸发历时的延长逐渐减小, 其原因在于土壤表层盐壳形成后反过来又阻止了蒸发。蒸发过程中, 层位为 10 cm 的夹砂层土壤的土壤表层盐分抑制率与水分抑制率的变化趋势一致; 而层位为 35 cm 的夹砂层土壤二者的变化趋势相反, 这与砂层层位升高后, 土壤表层含水率降低, 汽态水分扩散的比例增加有关。

3) 砂层可使较多盐分滞留于土砂界面及深层壤土中, 致使砂层对土壤表层返盐的抑制率大于同历时的水分抑制率。这对于作物的生长非常有利, 同时也会降低作物对地下临界水位的要求。

4) 砂层的阻水隔盐作用随砂层厚度的增加, 层位的升高以及级配的变差而增强。

### [参 考 文 献]

- [1] 王文焰, 张建丰, 汪志荣, 等. 砂层在黄土中的阻水性及减渗性的研究[J]. 农业工程学报, 1995, 11(1): 104- 109
- [2] 张建丰, 王文焰, 汪志荣, 等. 具有砂质夹层的土壤入渗计算[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 27- 30
- [3] 冯永军, 陈为峰, 张蕾娜, 等. 滨海盐渍土水盐运动室内实验研究及治理对策[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 38- 42
- [4] 罗家雄. 新疆垦区盐碱地改良[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985, 80
- [5] 赵风岩. 土层排列组合与作物产量差异[J]. 土壤通报, 1997, 28(3): 105- 106
- [6] Stephen W W, James M P. Effect of soil layering on NAPL removal behavior in soil-heated vapor extraction [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1997, 27(3- 4): 285- 308
- [7] 刘福汉, 王遵亲. 潜水蒸发条件下不同质地剖面的土壤水盐运动[J]. 土壤学报, 1993, 30(2): 173- 180
- [8] 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: 220- 263
- [9] 胡顺军, 康绍忠, 宋郁东, 等. 塔里木盆地潜水蒸发规律与计算方法研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 49- 53
- [10] Kampf M, Holfelder T, Montenegro H. Identification and parameterization of flow processes in artificial capillary barriers[J]. Water Resources Research, 2003, 39(10): 1276- 1285

## Water and salt transport in sand-layered soil underevaporation with the shallow under ground water table

Shi Wenjuan, Shen Bing, Wang Zhirong, Zhang Jianfeng

(Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Considering the fact that most soil profiles assume layered structure and that most bare soils are exposed to the atmosphere when salt accumulation in the surface soil was very rapid in northwest region of China. The impacts of sand position, sand thickness and sand particle distribution of sand-layered soil with the shallow ground water table on water and salt transport were analyzed through the experimental columns. The results showed that water and salt transport was accelerated when the distance between the low boundary of sand layer and the water table was zero, and that it was depressed when the distance was more than 10 cm. The controlled amount for the sand layer against the water and salt transport was 70% ~ 80% when the distance was more than 35 cm. The effect of the sand layer against the water and salt transport decreased with the increase of the evaporation duration except for the treatment with 35 cm distance, and the effect of the sand layer against salt transport was more than the effect against water transport at the same evaporation duration. In addition, the effects against water and salt transport were intensified for the treatments with the thicker sand layer and the worse sand distribution. The study is very important for preventing soil from secondary salinization and guiding irrigation and drainage.

**Key words:** sand-layered soil; water and salt transport; characteristics; mechanism