

# 蒸发条件下夹砂层土壤盐离子的迁移特性\*

史文娟, 汪志荣, 沈冰, 王文焰

(西安理工大学 水资源与环境陕西省重点实验室, 陕西 西安 710048)

[摘要] 针对新疆地区大面积盐碱地垦区土壤剖面多呈层状且砂质夹层较多的特点, 通过室内土柱模拟试验, 研究了蒸发条件下不同层位夹砂层土壤剖面盐离子的动态变化情况。结果表明, 砂质夹层对离子运动有较大影响。与均质土相比, 层位较低的砂层可以促进盐离子向土表迁移; 层位较高的砂层能有效延缓盐离子向土表迁移的速度, 并可降低土表盐离子的含量, 使得更多的盐离子滞留于砂层以下土壤及土、砂界面处, 尤其  $\text{Na}^+$  更是如此; 砂层层位越高, 其对离子向上迁移的抑制作用越强。最后用回归分析法求得了砂层对  $\text{Cl}^-$  和  $\text{Na}^+$  起抑制作用的相对临界层位。

[关键词] 新疆; 盐碱地垦区; 夹砂层土壤; 盐离子迁移动态; 相对临界层位

[中图分类号] S153.3

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)01-0133-05

## Characteristics of saline ions movement in sand-layered soil profiles under evaporation

SHI Wen-juan, WANG Zhi-rong, SHEN Bing, WANG Wen-yan

(Key Lab of Water Resources and Environment, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** Considering the fact that most soil profiles assume the sand-layered soil in field in Xinjiang region in China, the experiment on the changes of ionic concentration in soil profiles during water evaporation from sand-layered soil with the different sand position was carried out with soil column. The results show that the sand layer in soil profile has an important effect on the  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Na}^+$  movement. When the distances between the sand layer and water table are more than 8 cm and 2 cm respectively, their upward moving velocities and concentrations in soil surface are smaller in layered soil than in the uniform soil, their concentrations in soil body under sand layer and at the interface between the soil and sand are greater than that in the uniform soil, especially for  $\text{Na}^+$ . The relative limited distance (i.e. the ratio of the distance to the buried depth of ground water) where the sand layer will start to restrain the  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Na}^+$  upward movement was calculated by regression analysis.

**Key words:** Xinjiang region; saline-alkali field; sand-layered soil; characteristics of saline ions movement; relative limited distance

自然界中, 由于气象、水文、地质和生物过程的作用, 土壤并非简单的均一物质, 大都呈现出交错分布的层状结构, 如在冲积平原和黄土地区, 由于水力和风力的作用, 形成了砂粘交错沉积的土壤剖面结构; 而由于降雨、灌溉和耕作等因素, 在田间形成了致密层、沉积层以及犁底层等。有研究表明, 土壤垂

向剖面中不同土质的排列组合对土壤水、肥、气、热诸因素和水盐运行有着重要的制约作用<sup>[1-2]</sup>, 同时对土壤的次生盐渍化发展和生产性能均会造成明显的影响<sup>[3]</sup>。王金平等<sup>[4]</sup>认为, 粘土层对盐分的抑制作用随其层位的升高而加强; 但也有人认为, 粘土夹层离地下水位愈近, 地表越不易返盐<sup>[5-6]</sup>。罗焕炎等<sup>[7]</sup>的

\* [收稿日期] 2005-12-31

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50579063, 40271022); 陕西省教育厅基金项目(04JK229-1); 西安理工大学高学历人员科研启动基金项目

[作者简介] 史文娟(1972-), 女, 陕西武功人, 副教授, 博士, 主要从事农业水资源利用研究。E-mail: shwj@xaut.edu.cn

试验证明,当粘土夹层从其剖面中砂性土的毛管饱和和带附近向下或向上移动时,其蒸发率都会随之增大,从而也统一了上述两种看似相反的结论。但总的来说,目前有关蒸发条件下层状土壤水盐运移的研究仍然以粘土夹层为主,针对夹砂层土壤结构的研究相对较少,如邱胜彬等<sup>[8]</sup>和 Ernest 等<sup>[9]</sup>的试验证明,与均质土(粉壤土)相比,砂质夹层或表砂层土壤结构的蒸发量均有所减小,但该研究并未对其作进一步的系统分析,也未涉及到盐分的变化。野外调查结果显示,同一区域的土壤中,由于剖面中砂粘性质及厚度的不同,一边是肥沃的良田,而另一边却可能是荒瘠的盐碱地<sup>[10]</sup>。近年来,作者也通过试验证实,砂层对水分蒸发既有促进作用也有抑制作用,其转折点为砂土和壤土导水率的相对大小发生变化之时<sup>[11]</sup>。为了进一步分析夹砂层土壤盐离子迁移的机理,本研究就砂层层位的变化对不同盐离子迁移的影响进行了研究,以期对盐碱地的改良以及灌溉和排水等措施的制定提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验装置由土柱、供水装置、红外灯 3 部分组成。土柱为高 60 cm,直径 14 cm 的有机玻璃。土柱底部设石英砂反滤层和排气孔;地下水埋深 50 cm,蓄水层厚度为 10 cm;“马氏瓶”用于供水并控制水位,同时测定潜水蒸发量;以 3 g/L 的 NaCl 水溶液作为蒸发水源,250 W 的红外灯昼夜照射用于模拟一定强度的稳定蒸发,蒸发历时为 30 d。

试验所用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。土样风干、碾压、去除根系等杂物,过 2 mm 筛,混合均匀后,按设定容重 1.45 g/cm<sup>3</sup> 分层均匀装入试验土柱。粗质砂土为自然河砂,其粒径为 0.1~3.0 mm,中值粒径  $D_{50}=0.36$

mm,容重为 1.70 g/cm<sup>3</sup>。装填砂土时分别采用了 0, 10, 35 cm 3 种不同层位(即砂层下界面距地下水的位置),其厚度均为 5 cm,即砂层分别位于土柱的 0~5, 10~15 和 35~40 cm 处(图 1)。

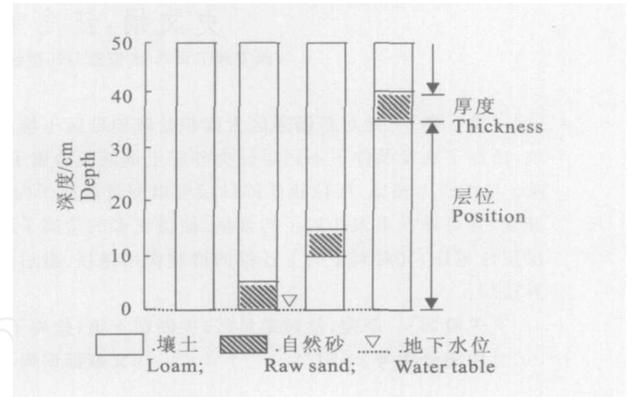


图 1 试验土柱示意图

Fig 1 Schematic of the experimental columns

土柱装好后,密封并置于试验系统。在毛管支持水的作用下,水分在土壤剖面中重新分布,使得盐分形成一个上大下小的梯度分布剖面<sup>[12]</sup>,当各处理毛管水分上升速度均小于 1 mm/d 时,认为水盐剖面相对稳定,开始进行蒸发试验,并将此时作为蒸发的起始时间(即 0 d)。蒸发为连续的昼夜蒸发,整个蒸发过程历时 30 d。

### 1.2 测定参数及方法

土壤的初始含盐量用质量法测定;阳离子采用 WFX-120 型原子吸收分光光度计测定;阴离子采用 DB-B 型数字式自动滴定仪测定。测定盐离子的土壤水溶液为 1:5 的土水(体积比)浸提液。蒸发过程中,采用取土法测定土壤盐离子动态,每次取土后用同样含水量的母土或粗砂回填,且每次取土的位置不重复。供试土样的盐分特性见表 1。

表 1 供试土样的盐分组成

Table 1 Salt content of the experiment soil

| 土壤类型<br>Soil texture | 含盐率/<br>(g·kg <sup>-1</sup> )<br>Salt content | 离子含量/(mmol·kg <sup>-1</sup> ) Ions concentration |                 |                               |                  |                               | 盐土分类<br>Saline soil type           | 盐化程度<br>Salification grade       |
|----------------------|---|--|-----------------|-------------------------------|------------------|-------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
|                      |   | Na <sup>+</sup>                                  | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Ca <sup>2+</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |                                    |                                  |
| 壤土<br>Loam           | 8.05  | 40   | 58              | 20.1                          | 9.8              | 3.65                          | 氯化物-硫酸盐土<br>Chloride-sulphate soil | 强盐化土<br>Strong salification soil |
| 自然砂<br>Raw sand      | 0.26  | 1.17   | 1.5             | 0.1                           | 1.23             | 2.75                          |                                    | -                                |

## 2 结果与分析

### 2.1 不同层位夹砂层土壤中 Cl<sup>-</sup> 的迁移特性

#### 2.1.1 土壤剖面 Cl<sup>-</sup> 的动态变化特征 蒸发过程

中,不同层位夹砂层土壤剖面 Cl<sup>-</sup> 的动态变化情况如图 2 所示。由图 2 可以看出,蒸发开始前由于支持毛管水的作用,Cl<sup>-</sup> 剖面出现了明显的上大下小的梯度分布形式,但其梯度差异仍相对较小。蒸发开始

后, 不同层位夹砂层土壤剖面均出现了  $\text{Cl}^-$  的强烈表聚现象, 致使土表以下土壤剖面中的  $\text{Cl}^-$  随蒸发历时的动态变化而难以分辨。

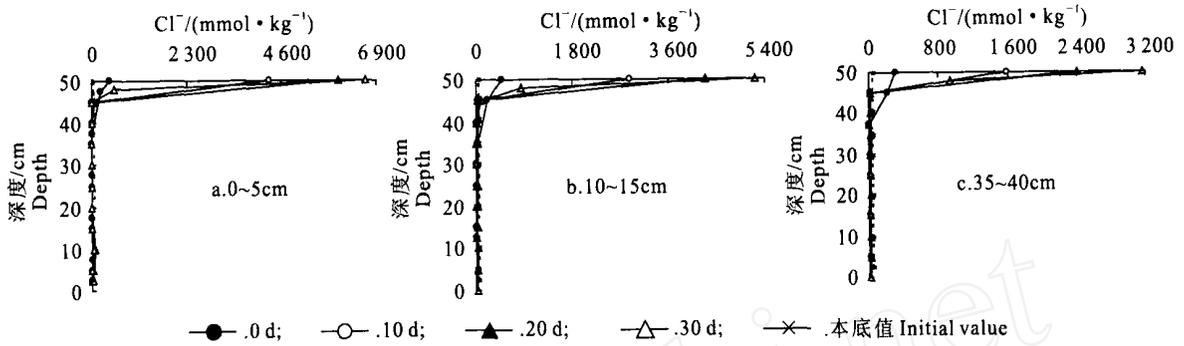


图 2 不同层位夹砂层土壤剖面  $\text{Cl}^-$  的动态分布

Fig 2  $\text{Cl}^-$  distribution in the soil profile for the layered soil with different sand positions

2.1.2 土壤表层  $\text{Cl}^-$  的动态变化特征 为了分析砂层对  $\text{Cl}^-$  迁移特性的影响, 现仅以土表  $\text{Cl}^-$  的分布情况进行分析。不同层位夹砂层土壤表层  $\text{Cl}^-$  含量随蒸发历时的动态变化如图 3 所示。

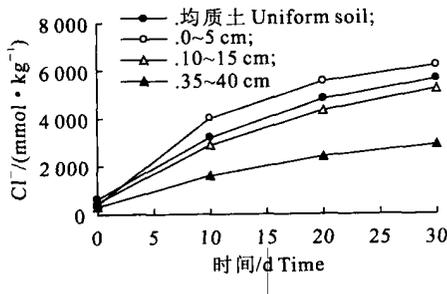


图 3 不同层位夹砂层土壤土表  $\text{Cl}^-$  含量的动态分布

Fig 3  $\text{Cl}^-$  contents of soil surface for layered soil with different sand positions

从图 3 可以看出, 砂层层位越高, 同一历时土壤表层的  $\text{Cl}^-$  含量越低。与均质土相比, 砂层对  $\text{Cl}^-$  的迁移既有促进作用, 也有抑制作用。如砂层位于 0~5 cm 的夹砂层土壤, 在蒸发历时为 10, 20, 30 d 时, 土表的  $\text{Cl}^-$  含量分别较均质土增加了 25%, 13.6% 和 10%; 而砂层位于 35~40 cm 的夹砂层土壤, 土表的  $\text{Cl}^-$  含量分别为均质土的 49.6%, 49.8% 和 50.7%。说明只有在一定的层位条件下, 砂层方可起到抑制  $\text{Cl}^-$  表聚的作用。根据砂层对水分的影响<sup>[7]</sup>, 只有当砂层所处的位置使其导水率小于同剖面中其他土壤的导水率时, 砂层才能对盐分有一定的抑制作用。由于砂层的导水率与其含水量有关, 而含水量又是由砂层的层位即砂层距地下水位的相对位置决定的, 这就要求实际生产中在控制地下水位时, 要考

虑土壤剖面中砂层的位置, 只有使其处于盐分不易迁移的层位, 才能对土壤次生盐碱化的防治起到有效作用。

由图 3 还可以看出, 在蒸发开始后的前 10 d 内, 土壤表层的  $\text{Cl}^-$  含量增加最为显著; 但蒸发 10 d 以后,  $\text{Cl}^-$  含量的增加幅度明显减缓, 且表层的  $\text{Cl}^-$  含量越大, 此现象表现得越明显。说明  $\text{Cl}^-$  向上迁移的速度随蒸发历时的延长而减小, 这应与此时土壤表层盐壳形成后又进一步阻止了水分和盐分的向上迁移有关<sup>[11]</sup>。

### 2.2 不同层位夹砂层土壤中 $\text{Na}^+$ 的迁移特性

由图 4 土壤剖面  $\text{Na}^+$  含量的动态变化情况可以看出, 蒸发开始后, 土表的  $\text{Na}^+$  也出现了明显的表聚, 在蒸发的前 10 d 表现得尤为明显。随土表积盐量的增加,  $\text{Na}^+$  增加的幅度也明显降低, 且小于同一历时  $\text{Cl}^-$  增加的幅度。不同层位的夹砂层土壤相比, 砂层层位越高, 土壤表层  $\text{Na}^+$  含量越小, 即层位越高, 砂层对  $\text{Na}^+$  迁移的抑制作用越强。

随蒸发历时的延长, 不同处理土壤剖面的  $\text{Na}^+$  含量逐渐降低, 且在蒸发初期, 其减小的幅度较大, 并以底砂层表现得最为突出; 砂层层位越高, 剖面中  $\text{Na}^+$  的变化幅度越小。这与  $\text{Na}^+$  的表聚情况(即表层  $\text{Na}^+$  含量的变化情况)保持一致。说明在蒸发过程中, 层位较高的砂层可明显降低  $\text{Na}^+$  随水分向上迁移的速度, 从而使母土和地下水中较多的  $\text{Na}^+$  不再参与盐分的表聚作用。

土壤剖面中在接近地下水位处  $\text{Na}^+$  出现的明显脱盐现象, 其一方面与土壤中  $\text{Na}^+$  的本底值较大致使部分  $\text{Na}^+$  溶解到地下水中有关系, 另一方面还与土壤中的离子也明显参与了盐分的表聚有关。

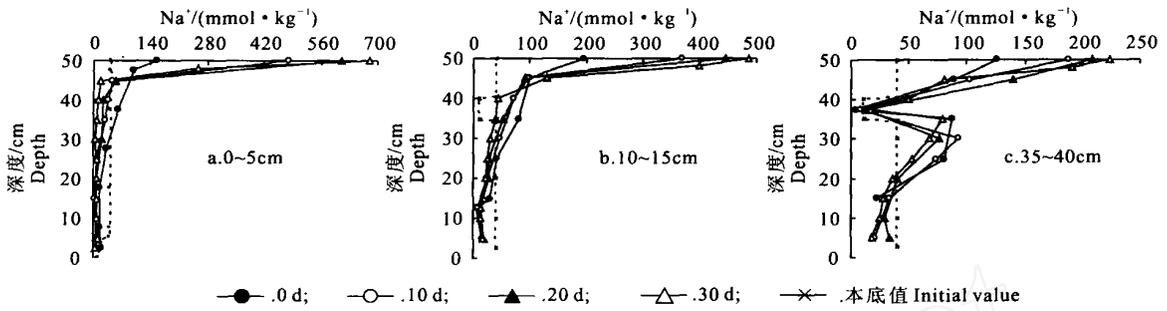


图 4 不同层位砂层土壤剖面 Na<sup>+</sup> 含量随蒸发历时的动态变化

Fig 4 Na<sup>+</sup> distribution in the soil profile for the layered soil with different sand positions

### 2.3 蒸发结束时不同处理土壤剖面中各离子含量的比较

以上分析主要是针对同一处理土壤剖面中各离子的动态变化进行的。为了了解不同处理之间砂层对各离子迁移特性的影响程度及其区别, 特对蒸发结束时不同处理土壤剖面 Cl<sup>-</sup> 和 Na<sup>+</sup> 的分布情况进行了对比分析。其结果如图 5 和图 6 所示。

由于蒸发过程中 Cl<sup>-</sup> 的表聚作用非常强烈, 土表的 Cl<sup>-</sup> 含量非常大, 为了能更直观显示出不同处理土壤剖面中 Cl<sup>-</sup> 含量的差异, 特将图 5 中的横坐

标设置得较小, 即图中只能显示土表以下土壤剖面中的 Cl<sup>-</sup> 分布情况。由图 5 可知, 蒸发结束时, 不同层位夹砂层土壤剖面中 Cl<sup>-</sup> 分布曲线出现了较大的差异: 首先, 砂层中的 Cl<sup>-</sup> 含量明显小于同层位壤土层中的 Cl<sup>-</sup> 含量, 且砂层层位越高, Cl<sup>-</sup> 含量越低, 与砂层含水量的大小保持一致。说明 Cl<sup>-</sup> 的迁移主要以对流为主; 其次, 砂层使得较多的 Cl<sup>-</sup> 滞留于砂层以下土壤中或土、砂界面处, 且层位越高, 其滞留的 Cl<sup>-</sup> 越多。

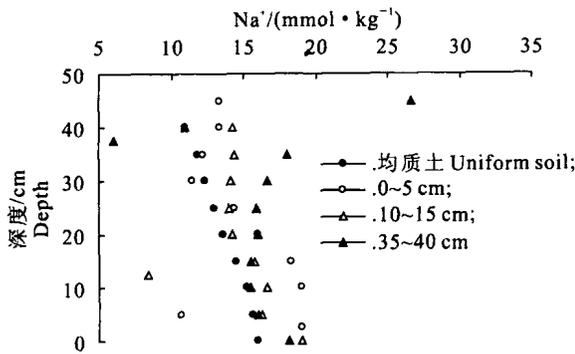


图 5 蒸发结束时不同层位夹砂层土壤剖面 Cl<sup>-</sup> 含量的分布曲线

Fig 5 Cl<sup>-</sup> content profile for the layered soil with different sand positions at the end of evaporation

图 6 显示, 与 Cl<sup>-</sup> 的变化情况相似, 砂层层位越高, 土表的 Na<sup>+</sup> 离子含量越低, 而相应土壤剖面的砂层界面以下壤土中的 Na<sup>+</sup> 含量却相对较高; 说明一定层位的砂层不仅可以抑制盐离子的迁移速度, 而且可以使较多的盐离子滞留于砂层以下土壤中或土、砂界面处, 即砂层可起到隔盐的作用。

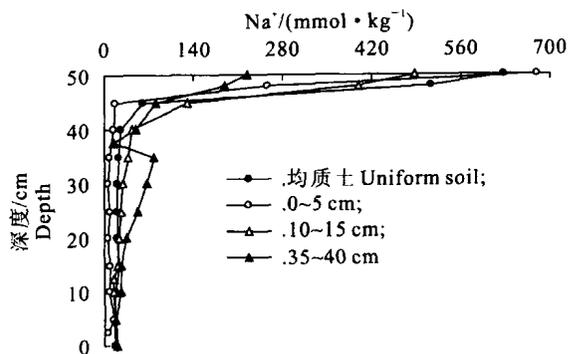


图 6 蒸发结束时不同层位夹砂层土壤剖面 Na<sup>+</sup> 含量的分布曲线

Fig 6 Na<sup>+</sup> content profile for layered soil with the different sand positions at the end of evaporation

### 2.4 促进返盐与抑制返盐的临界层位分析

为进一步确定砂层由促进返盐到抑制返盐的具体层位, 对蒸发结束时各处理土表的 Cl<sup>-</sup> 含量与砂层层位进行回归分析。同时为了使其确定的层位更具有普遍意义, 还对参数进行了无量纲化, 即取 Cl<sup>-</sup> 的相对含量  $\bar{Q}_{Cl}$  (各处理 Cl<sup>-</sup> 含量与均质土 Cl<sup>-</sup> 含量的比值) 与砂层的相对层位  $\bar{z}$  (各处理层位与地下水

埋深的比值)进行拟合,其结果为

$$\bar{Q}_{\text{cr}} = \frac{Q_{\text{cr}}}{Q_{\text{均}}} = 1.2245e^{-1.2652z},$$

$$R^2 = 0.9972, \quad (1)$$

式中:  $\bar{Q}_{\text{cr}}$  为  $\text{Cl}^-$  的相对含量(或砂层对土表  $\text{Cl}^-$  的抑制率);  $Q_{\text{cr}}$  为各处理土表的  $\text{Cl}^-$  含量;  $Q_{\text{均}}$  为均质土土表的  $\text{Cl}^-$  含量;  $z$  为砂层的相对层位。

取  $\bar{Q}_{\text{cr}} = 1.0$ , 得  $z = 0.16$ , 即可得砂层由促进  $\text{Cl}^-$  迁移到抑制  $\text{Cl}^-$  迁移的相对层位为 0.16。在本试验中, 其具体位置为距地下水位 8 cm 处, 即当砂层下界面距地下水位的距离大于 8 cm 时, 砂层即可起到抑制  $\text{Cl}^-$  向上迁移的作用。此外, 式(1)还可用来进一步定量确定砂层层位变化对  $\text{Cl}^-$  的相对抑制率。

同理, 还可求得砂层由促进  $\text{Na}^+$  迁移到抑制  $\text{Na}^+$  迁移的相对层位为 0.05, 即当地下水埋深为 50 cm 时, 砂层的具体层位为 2.5 cm。这样在实际生产中, 就可以针对不同的实际需求来控制不同的砂层层位(通过控制地下水位来实现), 从而达到控制不同盐离子迁移的目的。当然, 砂层的临界层位可能还与砂层的厚度、质地有关, 对其还需要做进一步深入的研究。

### 3 结 论

1) 土壤剖面中砂层的存在, 对离子的运动有较大的影响。与均质壤土相比, 层位较低的砂层可以促进盐离子向土表的迁移, 从而加速土壤的盐渍化进程; 层位较高的砂层可抑制盐离子的迁移, 如果加以利用, 则可有效地延缓或防止土壤的次生盐渍化。

2) 一定层位的砂层不仅可以降低盐离子向上迁移的速度, 而且还可以将更多的盐离子滞留于土砂界面以下。

3) 砂层对  $\text{Cl}^-$  和  $\text{Na}^+$  起到抑制作用的临界相对

层位分别为 0.16 和 0.05, 本试验条件下的具体临界层位分别为 8 cm 和 2.5 cm。层位越高, 砂层对离子向上迁移的抑制作用越强。

4) 对于盐渍土壤来说, 砂层对盐离子的抑制率随蒸发历时的延长而降低。

### [参考文献]

- [1] Yang M D, Ernest K Y. Water balance during evaporation and drainage in cover soils under different water table conditions [J]. *Advances in Environmental Research*, 2002, 6: 505-521.
- [2] 史文娟, 沈冰, 汪志荣. 层状土壤水盐动态研究与分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(5): 250-254.
- [3] 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.
- [4] 王金平. 蒸发条件下层状土壤水分运动的数值模拟[J]. *水利学报*, 1989(5): 49-54.
- [5] 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.
- [6] 王宏, 叶常明, 尹澄清. 人工粘土层在枯水期对小清河氧化塘底质水盐运动的抑制模拟研究[J]. *环境科学*, 1994, 15(3): 18-21.
- [7] 罗焕炎. 层状土中毛管水上升的实验研究[J]. *土壤学报*, 1965, 13(3): 312-324.
- [8] 邱胜彬, 张江辉, 刘诚明. 浅析土壤质地和结构对潜水蒸发的影响[J]. *水土保持研究*, 1996, 3(3): 30-34, 41.
- [9] Ernest K Y, Mousavi S M, Yang M D. Modeling and measurement of evaporation in moisture-retaining soil covers [J]. *Advances in Environmental Research*, 2003, 7: 783-801.
- [10] 王雄师. 疏勒河项目区土壤结构分类及对盐碱地改良的影响[J]. *甘肃水利水电技术*, 1998(3): 66-69.
- [11] 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.
- [12] 史文娟, 汪志荣, 沈冰, 等. 夹砂层土体构型毛管水上升的实验研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 167-170.