

# 蒸发条件下土壤水盐热运移的实验研究

邹平<sup>1</sup>, 杨劲松<sup>1\*</sup>, 福原辉幸<sup>2</sup>, 寺崎宽章<sup>2</sup>, 何超<sup>3</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 日本国福井大学地区环境与健康研究中心, 福井 910-8507;

3 武汉科技大学城建学院, 武汉 430070)

**摘要:** 土壤水盐热的耦合运移研究是土壤水盐运移理论研究的重要组成部分。在模拟蒸发条件下, 通过室内土柱实验, 对土壤水盐热的迁移做了初步研究。结果表明: 地下水位的高低直接影响土壤剖面盐分和水分分布; 本实验一直处于稳定蒸发状态, 今后需进一步研究不同蒸发条件下土壤水盐热的运移规律。

**关键词:** 蒸发; 土壤水盐; 热量; 运移

**中图分类号:** S152

土壤水盐运移理论是盐渍土改良利用的理论基础。等温条件下饱和、非饱和土壤中水盐运动的研究在理论和实践中已取得丰硕成果<sup>[1]</sup>。非等温条件下, 土壤中温度的分布和变化通过影响水的理化性质而影响到基质势、溶质势以及土壤水动力学参数, 从而引起土壤水的运动。盐随水来、盐随水去, 土壤盐分的运移当然也受到温度的影响。因此水、盐和热在土壤中的运动是相互影响、相互制约的。

国内外学者对温度势梯度作用下的水盐运动已进行了一些相关研究, 但研究主要侧重温度势梯度条件下水分运动和一维水平水盐运移<sup>[2]</sup>。本文通过在初始饱和含水率和强烈蒸发条件下室内垂直一维土柱实验, 分析了不同蒸发历时土壤温度分布及温度势梯度水盐运移特征, 探讨了强烈蒸发条件下土壤温度势形成及其对水、气和盐分运移的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土样

供试土样采自山东省东营市垦利县永安镇棉花地耕层土壤, 其土壤含盐量为 0.34 g/kg, 系已脱盐砂质壤土。

### 1.2 实验方法

本实验用被切割的 PVC 塑料环通过粘合剂连接构成实验用土柱, 土柱高 40 cm, 直径为 10 cm, 实验分两批, 编号 SN1 和 SN2, 控制的地下水位分别为 0.2 m 和 0.35 m, 地下水为 5 g/L 的 NaCl 溶液。每次填装土柱 7 个, 编号从 No.1 到 No.7, 在每个土柱正上方 30 cm

处悬置一 125W 的红外灯 (Toshiba (IR100V125WRH)) 模拟光照条件。在整个实验过程中, 假定所用土壤样品均质各向同性, 编号 No.1 的土柱用于埋设温湿度计实时监测土壤温度和相对湿度的变化; 编号从 No.2 到 No.7 的土柱在经过不同蒸发历时切割土柱破坏性采样, 测定土壤含水量和土壤含盐量; 另外编号为 No.7 的土柱被放置在电子天平 (METTLER 生产, 感量为 1g) 上, 通过电脑控制实时监测土柱重量 (每 10 min 获取土柱重量), 测定表土蒸发强度和累积蒸发量。在编号 SN1 的第一批实验中, 编号为 No.1 的土柱分别在离土表 1、3、5、8、18 和 28 cm 处埋设温湿度计 (VAISALA), 数据采集器 (ETO DENKI) 每 10 min 采集土壤温度和相对湿度数据; 而在编号 SN2 的第二批实验中, 编号为 No.1 的土柱则分别在离土表以下 1、2、4、6、8、11、21 和 31 cm 处埋设温湿度计, 传感器其他设置及数据采集同第一批实验。

供试土壤样品在室内自然风干后, 磨细, 去掉根系、碎石等杂物, 过 2 mm 筛, 搅拌混合均匀后, 控制体积质量 (容重) 1.3 g/cm<sup>3</sup> 计算土壤重量, 分次等量填装土柱, 为使土柱各处的体积质量一致, 每次填装的土层厚度控制为 5 cm, 并且在土层之间进行刨毛, 使得土层均匀, 土柱的最下部装有石英砂作为反滤层<sup>[3]</sup>。实验开始时先按上述方案填充土柱, 然后把配制好的 5 g/L 的 NaCl 溶液倒入储水箱中, 打开阀门, 浸润土柱, 经 24 h 按下开关, 开始计时, 进行蒸发实验。室内土柱蒸发实验装置见图 1。

在蒸发 0、6、24、48、96 和 144h 后分别切割编

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-406-3), 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 重点项目 (2006AA100207) 和国家科技支撑计划重点项目 (2006BAD05B02)

\* 通讯作者 (jsyang@issas.ac.cn)

作者简介: 邹平 (1979—), 男, 博士研究生, 主要从事土壤水盐数值模拟和土壤盐渍化预测预报研究。E-mail: pzou@issas.ac.cn

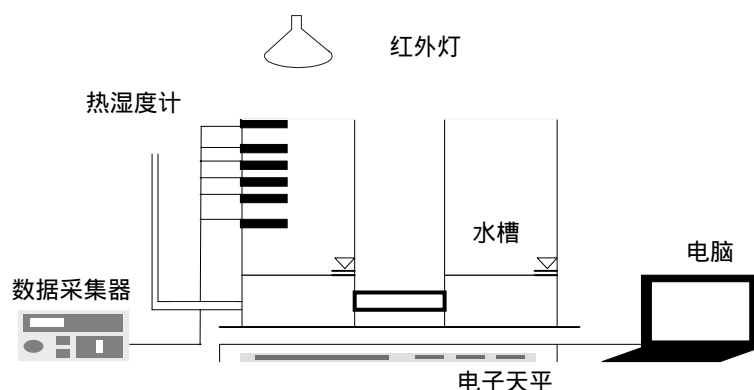


图1 蒸发实验装置示意图

Fig. 1 A schematic diagram of the evaporation apparatus

号为 No.2 ~ No.7 的土柱, 切割原则是表层 5 cm 按每 1 cm 取样, 离土表 5 ~ 29 cm 按每 2 cm 取样。切取的土壤样品用烘干法测土壤含水量, 烘干土样经准确称重后置于离心管中, 按 1:1.5 的土水比加入去 $\text{CO}_2$ 蒸馏水, 随后将离心管置于振荡器上以 250 r/min 振荡频率振荡 10 min 后, 在 4500 ~ 5000 r/min 转速下离心至浸提液清澈为止, 然后将上清液倒入烧杯中, 并立即用盐分浓度计 (SALMATE100) 测量土壤含盐量<sup>[4-5]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 蒸发条件下土壤水盐运移规律

**2.1.1 蒸发条件下土壤水分运移规律** 土柱被浸润后, 土壤中水分处于过饱和状态, 在经过 24 h 排出重力水, 打开红外灯开始蒸发实验。由于地下水埋深较浅, 补给强烈, 所以整个土壤剖面中水分含量一直很高, 从图 2 中可以看出, 在整个实验中土壤体积含水量一直保持在 40% ~ 55% 之间, 接近饱和状态。另外从 SN1 图中可以看出蒸发历时越长, 整个土壤剖面的体积含水量有减少的趋势, 而 SN2 中不同蒸发历时土壤剖面的体积含水量差异不明显。

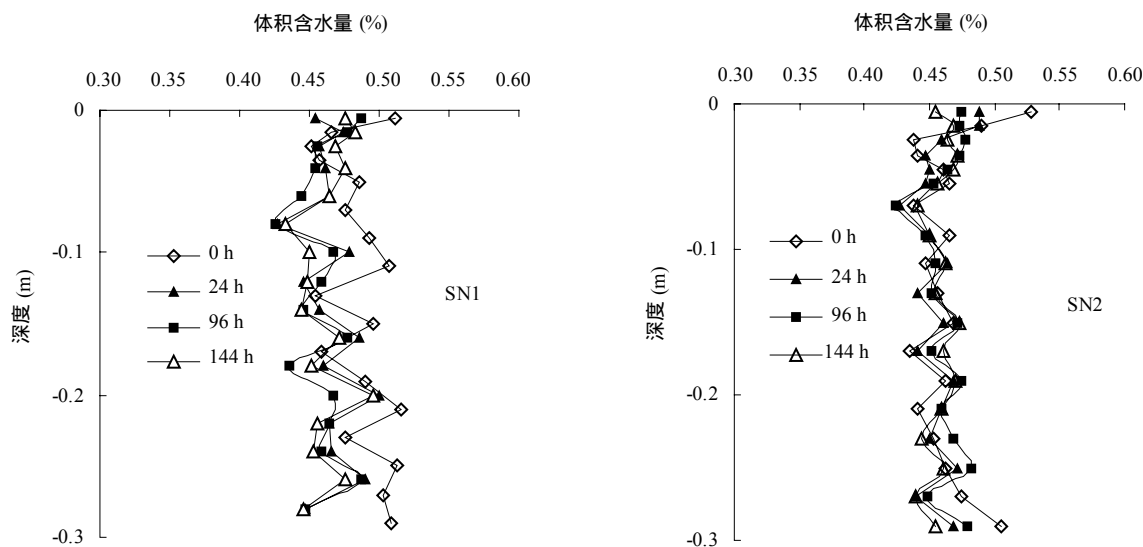


图2 不同蒸发历时土壤含水量的变化

Fig. 2 Variation of soil moisture in the profile with evaporation time

**2.1.2 蒸发条件下土壤盐分运移规律** 土壤盐分是溶于水中, 随水迁移的。土壤水分运移的变化必然引起土壤盐分运移的变化<sup>[3]</sup>。在本实验中, 土壤水在基

质势、温度势和重力势三者的共同作用下运动, 其中基质势驱使水分向基质势梯度减少的方向也就是向上运动, 而温度势和重力势却驱使水分向温度势梯度和

重力势梯度减小的方向也就是向下运动,而土表土壤基质势在温度势作用下含水量减小,使得土壤吸力增加,基质势梯度增加,最终导致土壤水分向土柱表面运移。土壤水分以两种形态在剖面中运移,气态水形式的水蒸气由于表层温度升高,导致土壤表面水汽压减小,水蒸气由土柱底部向土表运移;以液态水占优势的也和气态水一样向上运动,盐分随液态水向地表迁移,从而造成盐分最终在土表累积。因此土壤盐分的变化与水分运动是分不开的,温度势梯度下土壤盐分的迁移仍然以水分运动为基础<sup>[2,6-7]</sup>。

在本实验中不同蒸发历时土体剖面土壤含盐量的分布如图 3 所示。从整体上来看,土壤剖面离地表 5 cm 以下各层土壤含盐量几乎相等,大约是 1.5 g/kg;

而土表至 5 cm 深度各层土壤含盐量变化剧烈,这说明,土壤剖面盐分强烈表聚。从 SN1 和 SN2 两批实验不同蒸发历时土壤剖面含盐量分布图中均可以看出在 0 ~ 5 cm 深度,随着蒸发历时的延长,表层土壤含盐量有降低的趋势,这可能是因为红外灯的照射,剖面中各层土壤吸收的热量不同,形成温度场,造成表土温度较高,土柱底部温度较低,在垂直方向上产生驱使水分向下运移的温度势梯度所致。对比两批实验结果发现,编号 SN1 的实验中不同蒸发历时土壤表层的含盐量均高于同期编号 SN2 的,并且随着蒸发历时的增加,土壤含盐量增加的数值也在成倍增加。这说明在其他条件不变的情况下,地下水埋深是地表积盐量高低的主要影响因子。

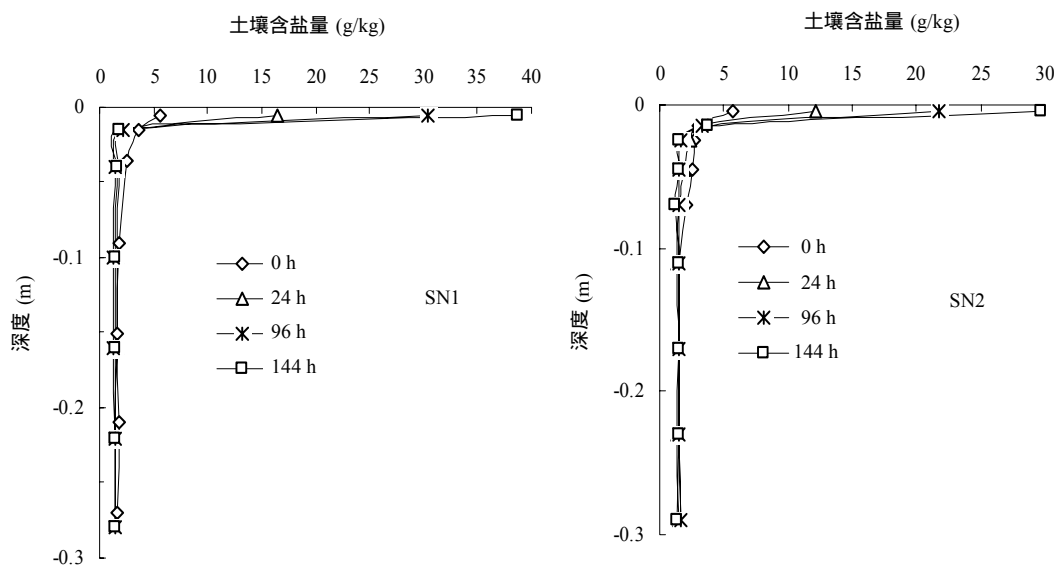


图 3 不同蒸发历时土壤剖面含盐量分布

Fig. 3 Variation of distribution of soil salt content in the profile with evaporation time

在实验过程中,随着蒸发历时的增加,土柱表层盐分迅速增加,两批实验 SN1 和 SN2 表层土壤累积含盐量变化见图 4。从中可以看出,表土累积积盐量随时间变化近似呈线性增加,而地下水埋深越浅,直线的斜率越大。由于 SN1 的地下水埋深比 SN2 的浅,地下水补给更为充分,故 SN1 中表层土壤累积含盐量比 SN2 中高一些。

## 2.2 蒸发条件下土壤剖面温度、相对湿度和蒸发量的变化

### 2.2.1 蒸发条件下土壤剖面温度分布规律

实验开始后,土壤剖面中各层次土壤由于离红外灯距离不同,吸收的热量不同,会在土壤剖面上形成温度场,其中离红外灯较近的表层土壤温度较高,而离红外灯较远的底层土壤温度较低。如图 5 中 SN1 所示,土壤

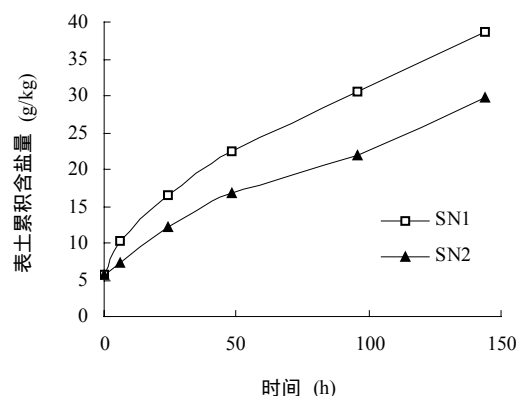


图 4 不同蒸发历时表层土壤累积含盐量变化

Fig. 4 Variation of cumulative salt content in the surface soil with evaporation time

剖面中距土表 1 cm 处, 土壤温度最高, 其他的依次由高到低为距土表 5、8 和 18 cm。图 5 SN2 所示, 土壤剖面中温度最高的是土壤表层。其他依次是距土表 1、4、8 和 21 cm。比较两次实验的结果, 发现由于灯泡的照射, 土壤中形成的温度场, 其影响深度 SN2 略大于 SN1, 这可能与两者的地下水埋深不同有关, 从整

体上看, 在土体保持接近饱和含水量的情况下, 其影响深度大约距土表 20 cm 左右。另外, 比较 SN1 和 SN2 的实验结果后认为, SN1 的结果较为可信, 土壤温度在昼夜交替中有一定的波动, 而 SN2 中各层次土壤温度波动幅度很小, 总体上随着时间的延长, 有增加的趋势, 这可能与实验条件控制不严有关。

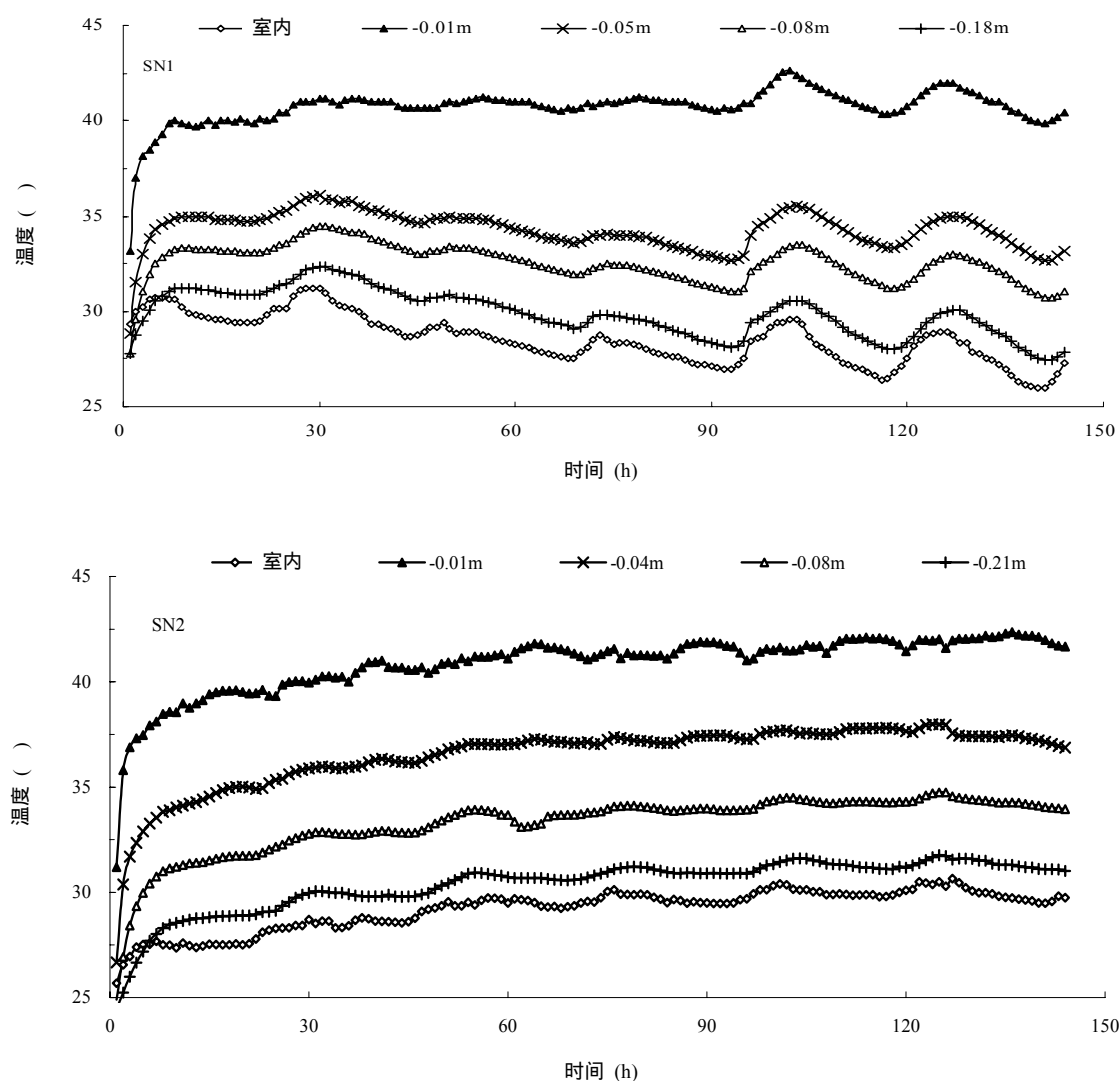


图 5 不同蒸发历时土壤剖面各层次温度分布图

Fig. 5 Distribution of soil temperature in the soil profile with evaporation time

### 2.2.2 蒸发条件下剖面各层次相对湿度的变化规律

蒸发条件下, 水分分别以液态和气态在土壤剖面中运移, 水蒸气在土壤中向着水汽压梯度减小的方向也就是向地表迁移<sup>[7-8]</sup>。

从图 6 中可以看出, 在整个实验过程中, 土壤剖面各层次的相对湿度都保持在 95% ~ 100% 之间, 土壤中的水分运动是以液态水占绝对优势的。另外, 从图 6 中两次实验的结果均可以看出, 实验室内的相对湿

度与土壤剖面中的相差较大, 这说明在大气与土壤的边界上, 水蒸气的蒸气压梯度较大, 造成水蒸气源源不断地从土体向空气中扩散。而土壤剖面中各层次的水汽压梯度却很小, 这也从一个侧面说明, 如果要进一步研究水蒸气在土壤中的迁移规律, 必须增加土柱长度, 加大地下水埋深, 降低剖面土壤含水量, 使土面蒸发能从表土蒸发强度保持稳定的第一阶段进入表土蒸发强度随含水率变化的第二阶段, 乃至水汽扩散

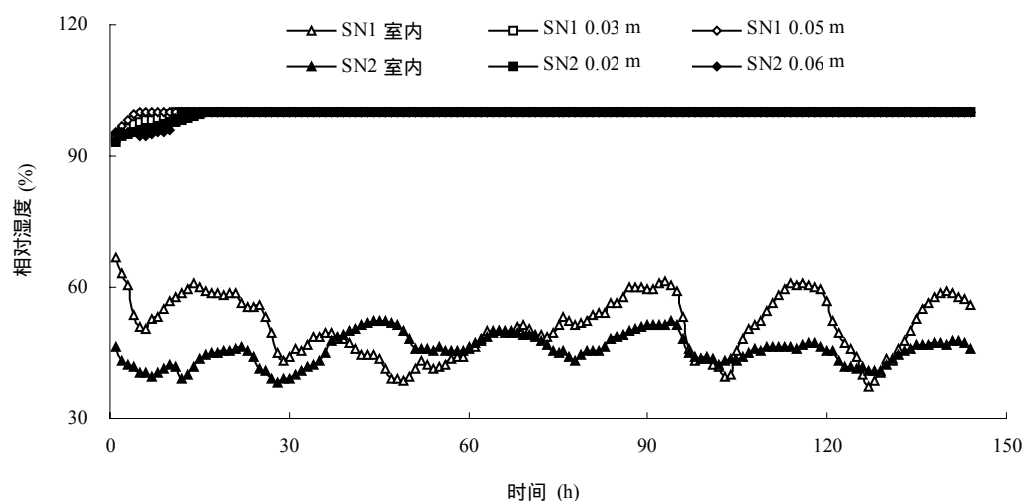


图 6 不同蒸发历时土壤剖面相对湿度的分布

Fig. 6 Distribution of soil relative humidity in the soil profile with evaporation time

的第三阶段<sup>[1]</sup>。

**2.2.3 土壤蒸发量的变化规律** 在本实验中,土壤蒸发量通过实时称量土柱的重量,可以精确地得到在蒸发过程中土壤的蒸发强度和累积蒸散量的变化。所得结果如图 7 所示。

从蒸发强度随时间变化图(图 7a)中可以看出,除了一些个别点的蒸发强度有波动外,SN1 的蒸发强度稳定在 13.6 mm/d,而 SN2 的蒸发强度平均值为 12.4 mm/d。这说明了试验的蒸发过程处于蒸发强度保持稳定的阶段。由于 SN1 的地下水埋深比 SN2 的浅,地下水补给更充分,土表因蒸发减少的水分能更迅速地得到补充,所以 SN1 能保持一个更高的蒸发强度。另外从图中可以看出,SN2 的土壤蒸发强度波动比 SN1 的小,这可能是因为实验条件控制不严所致<sup>[9]</sup>(在第二批实验时,实验室窗户紧闭)。

从累积蒸发量随时间的变化图(图 7b)看,在整个蒸发过程中,SN1 与 SN2 的累积蒸发量在蒸发的初始阶段基本一样,随着蒸发时间的延长,两者的累积蒸发量才有了一定的差异。这说明,SN2 的地下水埋深比 SN1 的深,在实验的初始阶段,SN2 土壤剖面上的水势梯度与 SN1 相差不大,因此累积土壤积盐量差异不明显,随着实验的进行,由于红外灯热源的存在,土壤剖面上形成温度场,第一批实验中土壤剖面的温

度势梯度比第二批实验的大,因此实验 SN1 的累积土壤含盐量比实验 SN2 的高。

### 3 结论与展望

分析蒸发条件下土壤水、盐和热量运移的实验结果,可以看出:

(1) 地下水位的高低直接决定土壤剖面盐分和水分布。因为地下水位的高低影响土壤剖面盐分浓度梯度的高低,从而使剖面上土壤水力传导发生改变,导致剖面上土壤含水量变异<sup>[10]</sup>。

(2) 在本研究中,地下水补给充分,土柱表层土壤水吸力大,土壤温度势梯度高,盐随水上行快,导致表土层有明显的盐分聚集。

(3) 蒸发过程中,距土表 30 cm 高的红外灯热源影响土壤剖面温度变化的深度大约是 20 cm。

(4) 在整个实验过程中,土面蒸发处于稳定蒸发阶段,土壤的累积蒸发量随时间呈线性增加。

(5) 由于本实验中,土壤剖面一直维持稳定蒸发,对于土壤蒸发的后两个过程表土蒸发强度随含水率变化和水汽扩散阶段缺乏深入探讨,因此今后有必要进一步增加土柱长度,降低地下水埋深来研究土壤水盐热在蒸发条件下的运移规律。

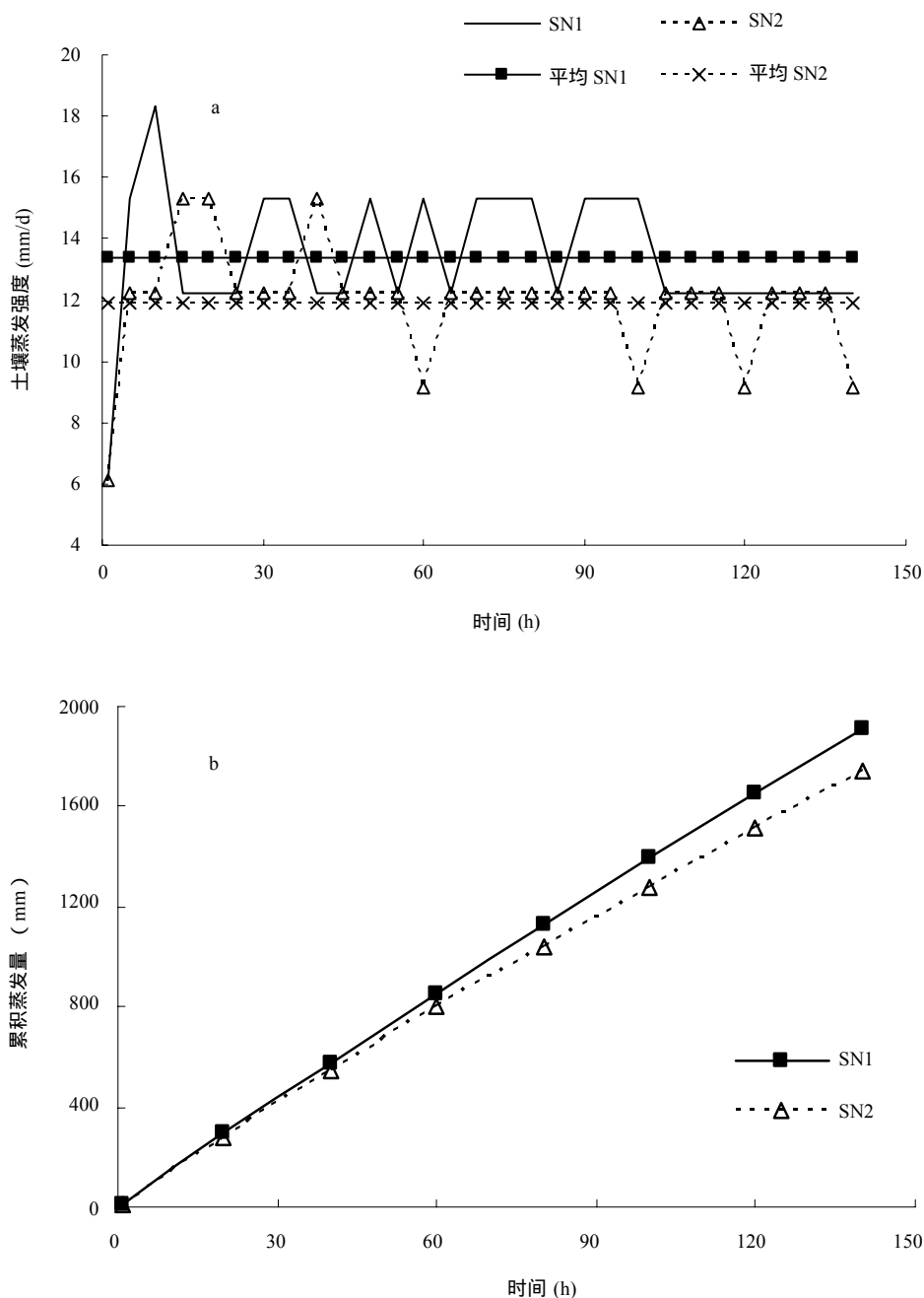


图7 随时间变化的表土蒸发强度 (a) 和不同蒸发历时的土壤累积蒸发量 (b)

Fig. 7 Variation of evaporation intensity (a) and soil cumulative evaporation (b) of the surface soil layer with evaporation time

#### 参考文献：

- [1] 雷志栋主编. 土壤水动力学. 北京: 清华大学出版社, 1989: 133-167
- [2] 李毅, 王文焰, 王全九, 邵明安, 张建丰, 来剑斌. 温度势梯度下土壤水平一维水盐运动特征的实验研究. 农业工程学报, 2002, 18 (6): 4-8
- [3] 刘广明, 杨劲松. 地下水作用条件下土壤积盐规律研究. 土壤学报, 2003, 40 (1): 65-69
- [4] Hu JC, Cao WX, Zhang JB, Jiang D, Feng J. Quantifying responses of winter wheat physiological processes to soil water stress for use in growth simulation modeling. Pedosphere, 2004, 14(4): 509-518
- [5] 信秀丽, 徐富安, 张佳宝, 徐梦熊, 朱安宁. 一种适于土壤水势定位观测的新仪器. 土壤, 2005, 37 (3): 326-329
- [6] 刘广明, 杨劲松, 姜艳. 江苏典型滩涂区地下水及土壤的盐分特征研究. 土壤, 2005, 37 (2): 163-168

- [7] 李毅, 王文焰, 门旗, 钟新才, 谢香文. 宽地膜覆盖条件下土壤温度场特征. 农业工程学报, 2001, 17 (3): 32-36
- [8] 高鹏程, 张国云, 孙平阳, 张一平. 秸秆覆盖条件下土壤水分蒸发的动力学模型. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2004, 32 (10): 55-58
- [9] 李韵珠, 胡克林. 蒸发条件下粘土层对土壤水和溶质运移影响的模拟. 土壤学报, 2004, 41 (4): 493-502
- [10] 夏卫生, 雷廷武, 杨文治, 邵明安. 蒸发条件下土壤水分再分布的动力学研究. 水利学报, 2002 (7): 37-41

## Movement of Water, Salt and Heat in Soil under Evaporation Condition

ZOU Ping<sup>1</sup>, YANG Jing-song<sup>1</sup>, FUKUHARA<sup>2</sup>, TERASAKI<sup>2</sup>, HE Chao<sup>3</sup>

( 1 *Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Science, Nanjing 210008, China*; 2 *Research and Education Center for Regional Environment, Fukui University, Fukui 910-8507, Japan*; 3 *Urban Construction Institute, Wuhan Scientific and Technical University, Wuhan 430070, China* )

**Abstract:** The research on coupled movement of soil water, salt and heat makes up an important part in the study on theories of soil water and salt movement. An experiment of water, salt and heat movement in soil columns in the lab under simulated evaporation conditions was conducted. The results showed that the groundwater table had some influence on distribution of salt concentration and moisture content in the soil profile. As the experiment was carried out under stable evaporation conditions, more work should be done on effect of evaporation on movement of soil water, salt and heat.

**Key words:** Evaporation, Soil water and salt, Heat, Transportation