

# 地下水蒸发规律及其与土壤盐分的关系\*

刘广明 杨劲松 李冬顺

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘要** 用粉砂壤土土柱进行了为期一年的室内模拟试验, 对不同地下水作用条件下地下水蒸发规律进行了深入研究, 并且研究了土壤盐分与地下水蒸发量之间的关系。研究表明, 各地下水作用条件下地下水蒸发量与试验时间呈显著线性相关。地下水矿化度越低, 地下水累积蒸发量对地下水矿化度的变动越为敏感; 地下水埋深越大, 累积蒸发量对地下水埋深变动的敏感性越强。建立了地下水累积蒸发量与地下水埋深、地下水矿化度的关系。分析了土壤盐分与地下水蒸发量之间的关系并得到了其模型。

**关键词** 水盐动态, 地下水, 地下水蒸发量, 土壤盐分

**中图分类号** S156.4<sup>+</sup> 1

盐随水来, 盐随水走。在地下水动态变化比较活跃地区, 使得土壤盐渍化的盐分来自于地下水。这些盐分的多少及其分布决定了土壤盐渍化的程度。地下水中的盐分不可能以固体形式进入土壤, 而是必须以地下水为载体随地下水一起进入土壤。因此在地下水矿化度一定条件下, 地下水蒸发量的大小, 决定了土壤累积盐分的多少。可见对地下水蒸发规律及其对土壤盐分的作用进行深入研究是非常必要的。

要研究某地区的土壤盐分动态规律, 首先要对造成该区盐分动态发生变化水体的运移规律进行研究。本项研究是在蒸发条件下开展的, 造成本研究中土体盐分动态变化的盐分, 主要来自矿化地下水, 故土壤盐分动态与地下水蒸发量关系密切<sup>[1]</sup>。目前, 对蒸发条件下土壤水盐动态规律已有不少研究<sup>[2-5]</sup>。但是对地下水蒸发规律以及土壤盐分与地下水蒸发量关系的研究较少。本项研究对地下水蒸发规律进行深入探讨, 并对土壤盐分与地下水蒸发量的关系进行仔细分析。本试验所设处理较多, 试验条件控制较以往试验更为严格。目前, 对长江河口地区土壤水盐运移规律的研究尚较少<sup>[6,7]</sup>。本试验所用土壤采自长江河口地区典型地带, 故本研究结果可表征该地区土壤水盐运移规律; 地下水条件是根据三峡工程对长江河口地区可能的影响情况设计的。可见, 本项研究不仅可以丰富区域土壤水盐运移规律方面的研究, 并且可以为消除或减轻三峡工程对河口地区生态及环境的影响、建立工程对环境影响的防范对策体系提供一定的理论依据。

\* 中国三峡工程开发公司项目 SX(97)-1F4 和国家重点基础研究发展规划项目 G1999011803 的部分内容  
收稿日期: 2001-01-25; 收到修改稿日期: 2001-12-27

# 1 材料与方 法

试验所用土壤采自长江河口地区典型地带,质地为粉砂壤,原始含盐量为 $0.364\text{g kg}^{-1}$ ,系脱盐土。供试土壤经自然风干后磨细、去杂、过20目筛并搅拌混合均匀,根据田间土壤实际容重( $1.33\text{g cm}^{-3}$ )填装土柱。试验所用地下水系根据十余个面上地下水样平均的离子组成由人工配制而成。

本试验设地下水埋深85cm、105cm、155cm三种深度,地下水矿化度 $2\text{g L}^{-1}$ 、 $4\text{g L}^{-1}$ 、 $8\text{g L}^{-1}$ 三个水平,共九个土柱,对应土柱编号如表1所示。

每个土柱顶部用一红外灯(250W)模拟日光蒸发,土壤表层温度由自动温控装置控制。分别于土柱的不同深度土层,安装盐分传感器监测土壤盐分的动态变化,并于同一深度位置布设水分张力计以监测土壤水分动态变化。本研究中0~40cm深度土壤电导率就是根据不同深度土壤电导率经过加权平均获得的。在每一土柱底部布设一马利奥特装置,用以把地下水水位控制在设定高度,并且测定地下水蒸发量。试验装置如图1所示。

# 2 结果与分析

## 2.1 地下水蒸发规律

地下水累积蒸发量动态可以清楚地揭示地下水蒸发的一般规律。通过对各土柱地下水累积蒸发量实测数据分析,可以得知各土柱累积地下水蒸发量与试验进行时间,呈显著线性正相关(见表2)。可见,尽管在本试验后期,各土柱地下水蒸发速率都有所减小,但是并没有明显改变地下水蒸发量与试验时间的线性相关性。为便于预测不同地下水埋深、地下水矿化度组合作用一年时间后地下水的蒸发量,建立了各土柱地下水累积蒸发量动态模型(见表2)。此模型可为全面研究区域土壤盐渍化提供一定的借鉴。

整个试验阶段,各土柱地下水累积蒸发量的大小次序(见表3)为:1>4>2>5>3>6>7>8>9(其中1~9分别为各土

表1 试验处理

Table 1 Experiment disposal

土柱编号 Soil column No.	地下水埋深 Groundwater depth (cm)	地下水矿化度 Groundwater salinity ( $\text{g L}^{-1}$ )
1		2
2	85	4
3		8
4		2
5	105	4
6		8
7		2
8	155	4
9		8

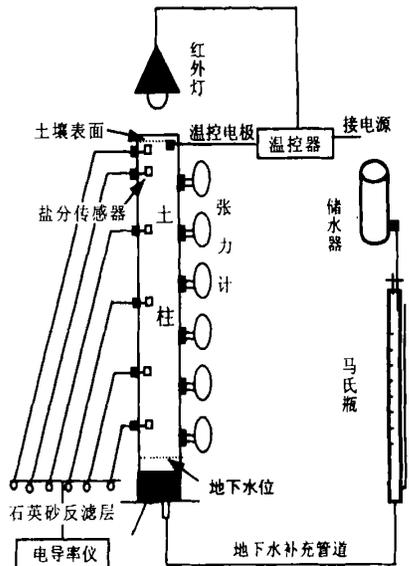


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Sketch map of devices for the simulating experiment

表 2 地下水蒸发量模型

Table 2 Model of groundwater evaporation

土柱编号 Soil column No.	模型 <sup>1)</sup> Model	R	n
1	$Y = 0.2988X + 2.8487$	0.999	102
2	$Y = 0.2526X + 0.9869$	0.998	102
3	$Y = 0.2365X + 4.6467$	0.991	102
4	$Y = 0.2894X - 1.9126$	0.998	102
5	$Y = 0.2463X + 2.4712$	0.992	102
6	$Y = 0.2386X + 0.6688$	0.990	102
7	$Y = 0.2091X + 1.7532$	0.999	102
8	$Y = 0.1726X + 0.2212$	0.999	102
9	$Y = 0.1532X - 1.5253$	0.998	102

1) Y为地下水蒸发量 (cm), X为时间 (d)

柱编号)。由此次序可以初步得出结论:各土柱地下水蒸发量受到地下水埋深、地下水矿化度的双重影响。从各土柱地下水累积蒸发量的相对大小可知:在地下水埋深相同(以地下水埋深 85cm 埋深土柱为例)条件下,地下水矿化度分别为  $2g L^{-1}$ 、 $4g L^{-1}$  土柱蒸发量的差别(相对大小相差 0.165),要远大于地下水矿化度分别为  $8g L^{-1}$  与  $4g L^{-1}$  土柱蒸发量的差别(相对大小相差 0.062);当然,地下水矿化度分别为  $8g L^{-1}$  与  $4g L^{-1}$  土柱蒸发量的差别更为显著(相对大小差别达 0.227)。可见,地下水矿化度较低时,累积蒸发量对地下水矿化度的变动更为敏感。在地下水矿化度相同(此处以地下水矿化度  $4g L^{-1}$  土柱为例)条件下,地下水埋深分别为 105cm、85cm

土柱蒸发量的差别(相对大小相差 0.042),远小于地下水埋深分别为 105cm、155cm 土柱蒸发量的差别(相对大小相差 0.200);地下水埋深分别为 85cm、155cm 土柱蒸发量的差别,则同样更为显著(相对大小差别 0.242)。由此可知,地下水埋深越大时,累积蒸发量对地下水埋深变动的敏感性较强。

综合上述地下水蒸发规律可知,各土柱地下水累积蒸发量并非单一随地下水埋深大小而变化,亦并非单一随地下水矿化度的变化而改变,而是受地下水埋深、地下水矿化度综合作用的结果。为评价这一作用,对各土柱地下水累积蒸发量进行了深入研究,建立了至试验结束为止各土柱地下水累积蒸发量与地下水埋深、地下水矿化度的关系,可表示如下:

$$Y = 144.4 - 3.426X_1 - 0.405X_2, R = 0.963^{**}, n = 9$$

其中, Y 为地下水累积蒸发量(cm),  $X_1$  为地下水矿化度( $g L^{-1}$ ),  $X_2$  为地下水埋深(cm)。

表 3 试验一年后各土柱地下水累积蒸发量

Table 3 Total groundwater evaporation during one year experiment

土柱编号 Soil column No.	地下水矿化度 Groundwater salinity ( $g L^{-1}$ )	地下水埋深 Groundwater depth (cm)	蒸发量 Total amount of evaporation (cm)	试验天数 Duration(d)	相对大小 Relative value
1	2	85	106.42	370	1
2	4	85	88.91	370	0.835
3	8	85	82.28	370	0.773
4	2	105	100.02	370	0.940
5	4	105	84.39	370	0.793
6	8	105	78.95	370	0.742
7	2	155	76.81	370	0.722
8	4	155	63.15	370	0.593
9	8	155	55.09	370	0.518

## 2.2 各土柱 0~40cm 深度土壤电导率与地下水蒸发量的关系

在地下水运动比较活跃的地区,导致土壤盐渍化的盐分绝大部分来自于地下水。地下水蒸发量大小决定了进入土体盐分的多少,进而决定土壤盐渍化的发生程度。因此,地下水蒸发量对土壤积盐起着极其重要的作用。研究土壤盐分与地下水蒸发量的关系,可以为预测土壤盐渍化发生强度提供可靠依据。

从各土柱 0~40cm 深度土壤电导率与地下水蒸发量关系(见图 2),及二者回归关系(见表 4)可见,0~40cm 深度土壤盐分含量与地下水蒸发量关系十分密切。在地下水蒸发量达到 20cm 以前,由于矿化地下水尚未能影响到该深度土壤,各土柱 0~40cm 深度土壤盐分含量基本没有变化。蒸发量达到 20cm 时,矿化地下水开始对地下水埋深 85cm、105cm 各土柱 0~40cm 深度土壤产生明显的影响。由于地下水埋深较大(155cm),7、8、9 号土柱 0~40cm 深度土壤的盐分变化始终非常缓慢,但是也呈现出规律性。从分析结果知,从 1999 年 2 月中旬(1~6 号土柱地下水累积蒸发量约为 20cm)开始,1~6 号土柱 0~40cm 深度土壤电导率与地下水累积蒸发量呈对数关系,7、8、9 号土柱 0~40cm 深度土壤电导率则与地下水累积蒸发量指数相关。

通过与试验初 0~40cm 深度土壤电导率的比较可知,在地下水累积蒸

发量达到 20cm 前,1~6 号土柱该深度土壤电导率的增量都近乎为零,有的甚至出现负值。出现上述情况的原因是,此阶段 1~6 号各土柱表层土壤水分蒸发量小于下层土体的水分补给量,导致 0~40cm 深度土壤水分含量有所升高,并且矿化地下水尚未到达该深度土壤。

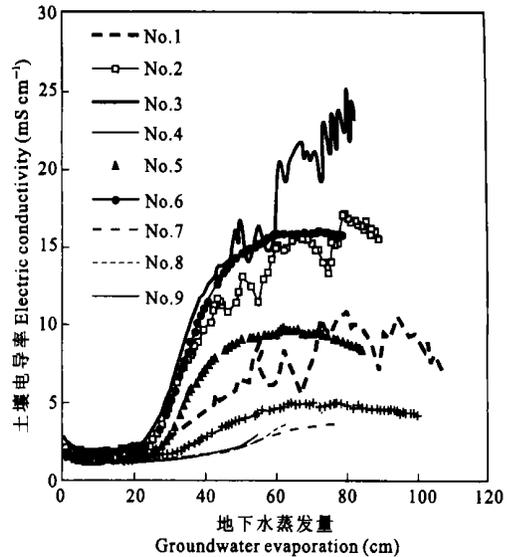


图 2 0~40cm 深度土壤电导率与地下水累积蒸发量的关系

Fig. 2 Relationship between soil electric conductivity and groundwater evaporation

表 4 各土柱 0~40cm 深度土壤电导率与地下水蒸发量的关系

Table 4 Relationship between soil electric conductivity and groundwater evaporation

土柱编号 Soil column No.	公式 <sup>1)</sup> Model	$R^2$	$n$
1	$Y = 5.4206 \ln X - 15.208$	0.844	76
2	$Y = 10.853 \ln X - 33.247$	0.961	76
3	$Y = 16.137 \ln X - 47.808$	0.973	76
4	$Y = 2.2415 \ln X - 5.2234$	0.848	76
5	$Y = 5.8962 \ln X - 15.78$	0.852	76
6	$Y = 10.797 \ln X - 29.72$	0.933	76

续表

土柱编号 Soil column No.	公式 <sup>1)</sup> Model	$R^2$	$n$
7	$Y= 0.6947 \exp(0.0228X)$	0.982	76
8	$Y= 0.8152 \exp(0.0206X)$	0.917	76
9	$Y= 1.1388 \exp(0.0144X)$	0.857	76

1)  $Y$  为 0~40cm 深度土壤电导率( $\text{mS m}^{-1}$ ),  $X$  为地下水蒸发量(cm)

地下水累积蒸发量达到 20cm 后,随地下水累积蒸发量的不断增大,1~6 号土柱 0~40cm 深度土壤电导率迅速增大。但是在不同阶段 0~40cm 深度土壤电导率随累积蒸发量增大而增加的速率明显不同:在地下水累积蒸发量为 20cm~60cm 阶段,2、3、6 号土柱该深度土壤电导率相差不大(2 号土柱该深度土壤电导率约是 3、6 号的均值),各自电导率增加的速率大致相等;1 号土柱该深度土壤电导率约为 4、5 号两土柱的平均值。地下水累积蒸发量大于 60cm 后,1~6 号土柱 0~40cm 深度土壤电导率开始出现更明显的差别。

地下水埋深 155cm 土柱 0~40cm 深度土壤电导率,随地下水累积蒸发量变化而变化的规律与其余土柱的有所不同:7、8、9 号各土柱该深度土壤电导率大小及其增加速率,在地下水累积蒸发量达到 50cm 之前基本一致,但是在地下水累积蒸发量达到 50cm 之后,随地下水矿化度的升高二者都依次增大。

### 3 结 论

研究表明,地下水蒸发量的大小是地下水埋深、地下水矿化度综合作用的结果。地下水矿化度较低时,地下水累积蒸发量对地下水矿化度变动的敏感性更强;地下水埋深较大时,累积蒸发量对地下水埋深变动的敏感性较强。获得了累积蒸发量关于地下水埋深、地下水矿化度的关系模型。各种地下水作用条件下,累积蒸发量与地下水作用时间都呈显著线性相关。在矿化地下水明显影响到 0~40cm 深度土壤后,地下水埋深 85cm、105cm 土柱的该深度土壤电导率与地下水累积蒸发量呈对数关系,而地下水埋深 155cm 土柱相同深度土壤电导率与地下水累积蒸发量呈指数相关。

### 参 考 文 献

1. 谢承陶主编. 盐渍土改良原理与作物抗性. 北京:中国农业科技出版社, 1993. 57~73
2. 尤文瑞, 孟繁华, 肖振华. 蒸发条件下非饱和粉砂壤土水盐动态. 见:俞仁培主编. 土壤水盐动态和盐碱化防治. 北京:科学出版社, 1987. 1~14
3. 孟繁华, 尤文瑞, 王复利. 蒸发条件下非饱和黏土水盐动态的研究. 见:俞仁培、尤文瑞主编. 土壤盐化、碱化的监测与防治. 北京:科学出版社, 1993. 74~82
4. 欧阳丽, 孟繁华, 肖振华, 等. 蒸发条件下黏土夹层粉砂壤土水盐动态. 见:俞仁培, 尤文瑞主编. 土壤盐化、碱化的监测与防治. 北京:科学出版社, 1993. 61~73
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. 土壤学报, 1993, 30(2): 173~181
6. 祝寿泉, 单光宗, 胡纪常, 杨劲松. 三峡工程对长江三角洲土壤盐渍化演变的影响及其对策. 见:中国科学院三峡工程生态与环境科研项目领导小组编. 长江三峡工程对生态与环境的影响及其对策研究论文集. 北京:科学出

版社, 1987. 454~ 462

7. 杨劲松, 单光宗. 三峡工程和南水北调的叠加效应与长江河口地区土壤盐渍化及其对策. 见: 蔡述明等著. 三峡工程与沿江湿地及河口盐渍化土地. 北京: 科学出版社, 1997. 154~ 181

## EVAPORATION REGULARITY AND ITS RELATIONSHIP WITH SOIL SALT

Liu Guang-ming Yang Jing-song Li Dong-shun

(*Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

### Summary

With a one year indoor silt loam column simulation experiment, regularity of evaporation of groundwater under different groundwater conditions was studied, and so was the relationship between soil electric conductivity (of 0~ 40cm layer) and total amount of evaporation. The results showed that even under different groundwater conditions total amount of evaporation was in linear relationship with duration of the experiment, that the lower the mineralization of the groundwater was, the more sensitively related the cumulative amount of evaporation was to variation of the mineralization of the groundwater, and that the deeper the groundwater table was, the more sensitively related the cumulative amount of evaporation was to variation of the depth of groundwater table. The relationship of total amount of evaporation with groundwater table as well as groundwater salinity was thus set up. After mineralized groundwater influenced 0~ 40cm layer soil, soil electric conductivity there was logarithmic to total amount of evaporation when the groundwater table was at 85cm or 105cm, but exponential when the groundwater table was at 155cm.

**Key words** Soil salt, Groundwater, Salt-water dynamic, Evaporation