

## 辽河口芦苇湿地地区潜水蒸发试验

张颖<sup>1,2</sup>, 郑西来<sup>1,2</sup>, 伍成成<sup>2</sup>, 张玉荣<sup>3</sup>

(1. 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 3. 山东省齐河县水务局, 山东 齐河 251100)

**摘要:** 为探寻辽河口湿地地区芦苇 *Phragmites communis* 生长条件下潜水蒸发的变化规律, 提高研究区地下水水分利用效率, 用带有地下水补给的芦苇培养箱测量潜水蒸发量, 并与同一实验条件下的水面蒸发和裸地蒸发进行对照。研究结果得出: ①在不同地下水埋深条件下, 栽植芦苇的样地的潜水蒸发量比裸地的大, 并且随天气变化潜水蒸发量日变化也非常大, 栽植芦苇的样地日潜水蒸发量差值可达 9.0 mm。②潜水累积蒸发量随地下水埋深的增大而减小, 栽植芦苇的样地的潜水蒸发递减速度大于裸地。在试验设定的地下水埋深-5~-60 cm 范围内, 种植芦苇的样地的潜水累积蒸发量是裸地的 3.0~3.5 倍。③栽植芦苇的样地的潜水蒸发过程与水面蒸发过程一致性较好。大气蒸发能力增大到一定程度, 栽植芦苇的样地和裸地的潜水蒸发强度增加的幅度均呈减小的趋势。最后通过参数拟合, 得到潜水蒸发系数的幂函数型公式和指数型公式以及公式中的相关参数, 拟合效果较好, 适合应用于研究区潜水蒸发的研究。图 6 表 3 参 14

**关键词:** 土壤学; 潜水蒸发; 湿地; 芦苇; 辽河口

**中图分类号:** S154.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2011)04-0569-07

## Phreatic evaporation in *Phragmites communis* wetlands of the Liao-he Estuary

ZHANG Ying<sup>1,2</sup>, ZHENG Xi-lai<sup>1,2</sup>, WU Cheng-cheng<sup>2</sup>, ZHANG Yu-rong<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China; 3. Water Affairs Bureau of Qihe County, Qihe 251100, Shandong, China)

**Abstract:** To enhance groundwater use efficiency and to discover variation in phreatic evaporation from *Phragmites communis* plots, field experiments were carried out in incubators with a water supply in the test field of Liao-he estuary from 9 August to 1 October, 2009. 11 incubators were installed with different water depth. That is 10 cm above soil surface and 5, 20, 40 and 60 cm underground water respectively. The design that incubators No.6 to No.11 were set with no *Phragmites communis* while No.1 to No.5 with *Phragmites communis* was to get the transpiration, evaporation and evapotranspiration law of *Phragmites communis* compared with water surface and bare land. Results showed that: phreatic evaporation from *Phragmites Communis* plots in incubators with different groundwater depths was changed greatly with the weather. Daily phreatic evaporation could vary as much as 9.0 mm. Accumulative phreatic evaporation from *Phragmites communis* plots with different groundwater depths was larger than bare land. Accumulative phreatic evaporation from *P. communis* plots was 3.0 - 3.5 times bare land. Phreatic evaporation from *Phragmites communis* plots was similar to the water surface treatments. However, when atmospheric evaporation capacity increased to a certain extent, the

收稿日期: 2010-10-22; 修回日期: 2010-12-16

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07208-009)

作者简介: 张颖, 博士, 从事水土保持和生态需水研究。E-mail: zhangyingqd@yahoo.cn。通信作者: 郑西来, 教授, 博士生导师, 从事地下水污染控制研究。E-mail: zhxilai@ouc.edu.cn

increasing rate of phreatic evaporation intensity on land with and without *Phragmites communis* growing showed a decreasing trend. Finally, through parameter fitting, a good fit for the power function formula and exponential formula of phreatic evaporation were obtained. Therefore, these formulas were suitable for application in research on phreatic evaporation in the study area. [Ch, 6 fig. 3 tab. 14 ref.]

**Key words:** soil science; phreatic evaporation; wetlands; *Phragmites communis*; Liao-he Estuary

潜水蒸发是浅层地下水在毛管力的作用下,向土壤包气带中输送水分,并经过土壤和作物进入大气的过程。作物蒸腾和地表蒸发是其消耗水分的主要方式。潜水蒸发规律探索对研究地下水浅埋区植被耗水机制、灌溉制度、地下水位调控及土壤次生盐碱化等方面均有重要的作用,对提高水资源利用效率具有重要的应用价值。国内外学者对潜水蒸发的有关问题作了大量研究,潜水蒸发机制及规律的研究成为土壤物理、水文地质、农田水利、地表水文及水资源等学科研究的热点。目前,考虑埋深与土质因素对潜水蒸发运动影响的研究已相对较多,而对有植被覆盖条件下的潜水蒸发量的研究还较薄弱,针对辽河口湿地地区芦苇 *Phragmites communis* 群落的潜水蒸发规律的研究则更少<sup>[1]</sup>。在潜水蒸发计算方法的研究方面,主要是从试验和理论上发展了多种潜水蒸发量计算模型,可以归纳为2类,第1类公式是考虑潜水蒸发的影响因素进行拟合的经验公式,主要有阿氏抛物线型公式<sup>[2]</sup>、叶水庭指数型公式<sup>[3]</sup>、沈立昌<sup>[4]</sup>、张朝新等<sup>[5]</sup>、胡顺军等<sup>[6]</sup>的双曲线公式,雷志栋等<sup>[7]</sup>提出的既考虑土壤输水特性又考虑表土蒸发的清华大学公式等;第2类公式是从土壤水动力学角度出发建立的数值模拟公式,通过土壤水动力学的知识建立方程,这类公式是从机制上研究潜水蒸发的。对有植被覆盖条件下的潜水蒸发量研究方面,史海滨<sup>[8]</sup>、王全九等<sup>[9]</sup>、徐建新等<sup>[9]</sup>对潜水蒸发与盐分运动的密切关系做了分析,认为栽植作物是抑制土壤盐渍化的重要因素。Sepaskhah等<sup>[11]</sup>等研究了地下水位1~2 m时玉米 *Zea mays* 和高粱 *Sorghum bicolor* 利用地下水的异同。此外,郭占荣等<sup>[12]</sup>、孔凡哲等<sup>[13]</sup>和刘铁刚等<sup>[14]</sup>等都作物生长条件下的潜水蒸发做了有益的研究工作。本研究主要分析辽河口湿地地区芦苇栽植条件下影响潜水蒸发的主要因素及其作用原理,并与裸地对照,依据试验实测数据拟合经验公式,以其揭示研究区芦苇湿地潜水蒸发规律,为准确计算芦苇对地下水的利用量提供参考。

## 1 材料与方方法

### 1.1 试验装置

根据测量地下水补给和蒸发的非称重式地中渗透仪的工作原理,用聚丙烯不透水材料自行设计长×宽×高=60 cm×50 cm×80 cm的培养箱9个,在沿培养箱长度方向用一垂直隔板分成50 cm和10 cm 2个部分,分别称为主箱和副箱(图1),主箱内装土,用于培育芦苇,而副箱用于控制水位。另外,隔板上打有很多个小孔,并粘一层细筛网,可以让副箱中的水自由通过隔板进入主箱中,而主箱的土不能通过小孔进入副箱。为了防止阳光直射培养箱体,影响大田试验中的水分蒸散,将培养箱全部埋入地面以下。同时,搭建可拆卸式防雨篷,防止天然降雨进入培养箱中;无降雨时,可移走雨篷,保持培养箱中的植被和土壤接受正常光照。

### 1.2 试验材料

**1.2.1 土样** 培养箱中的土样取自当地苇场,取样深度为0~80 cm。在培养箱装箱以前,使土样过10 mm筛,以筛除大的石块及植物根系等。然后,在主箱中装土,将土样以5 cm为1层,分层装入培养箱,控制培养箱中的土壤干容重为1.24 g·cm<sup>-3</sup>。土样颗粒组成中0.5~1.0 cm的占0.4%,0.25~0.5 cm的占0.4%,0.075~0.250 cm的占0.4%,0.010~0.075 cm的占0.4%,0.001~0.010 cm的占0.4%,<0.001 cm的占0.4%,土壤质地为粉黏土。

**1.2.2 芦苇秧苗** 2009年5月,从盘锦市东郭苇场采集生长良好的芦苇苗,栽植于培养箱中。经1个月

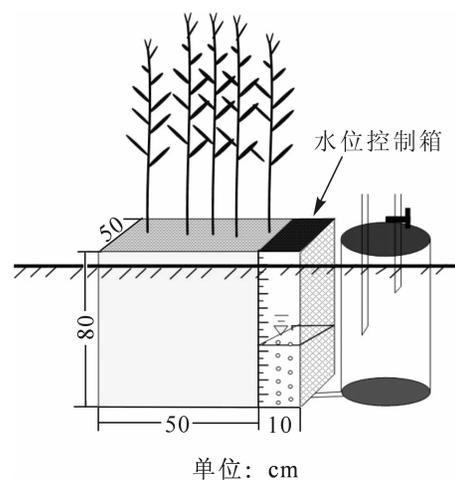


图1 芦苇培养箱示意图

Figure 1 Incubator for *Phragmites communis*

左右的缓苗期, 留取生长健壮, 高度和粗度相近的秧苗  $40 \text{ 株} \cdot \text{箱}^{-1}$ , 以供试验之用。供试芦苇的生长状况如表 1。

表 1 供试芦苇的生长状况

Table 1 Growth condition of *Phragmites communis*

水深/cm	平均高度/cm	平均基径/cm	平均叶长/cm	平均叶宽/cm	叶片数	株数
- 5	170	0.42	22.8	1.41	9	40
- 20	167	0.41	22.0	1.36	9	40
- 40	168	0.31	24.9	1.34	8	40
- 60	163	0.40	21.5	1.23	8	40

### 1.3 试验方法

1.3.1 试验条件控制 试验共采用 9 个培养箱, 在 4 个培养箱(分别记为 1 号箱、2 号箱、3 号箱和 4 号箱)栽植有芦苇, 有 4 个裸地对照培养箱(分别记为 5 号箱、6 号箱、7 号箱和 8 号箱), 另有 1 个为无植被栽植的自由水面对照培养箱(9 号箱)。潜水蒸发量监测试验时间为 2009 年 8 月 9 日-10 月 1 日, 历时 54 d。

1.3.2 培养箱的水位控制 在实验前, 用自来水使 1~8 号箱中的土样饱和, 自然蒸发 1 d 后, 控制副箱中的水位如下: 1 号箱和 5 号箱的水深为 -5 cm(水位在地表以下为负值), 2 号箱和 6 号箱的水深为 -20 cm, 3 号箱和 7 号箱的水深为 -40 cm, 4 号箱和 8 号箱的水深为 -60 cm, 并对所有副箱加盖密封, 以防止落入杂物和蒸发损失。补水取自当地的地下水。用“马氏瓶”控制水位并观测每天的潜水蒸发量。

## 2 结果与分析

### 2.1 栽植芦苇条件下日潜水蒸发变化过程与裸地比较

栽植芦苇的样地和裸地日潜水蒸发量变化见图 2。在整个观测阶段不同地下水埋深的芦苇样地的潜水蒸发量明显大于裸地的潜水蒸发量, 且随实验时间延长其变化规律不相同。栽植芦苇的样地随时间推移日潜水蒸发量不断减小, 且受气象因素等的影响非常明显, 在整个试验过程中明显分成 2 个阶段, 8 月中旬至 9 月上旬, 芦苇处于生长中期, 温度和光合有效辐射都很高, 因此, 不同地下水埋深的培养箱的潜水蒸发量都较大, 并且随天气变化潜水蒸发量日变化非常大。例如: 当潜水埋深控制在 -5 cm 时, 在晴朗高温的典型天 8 月 21 日(日均光合有效辐射为  $1\ 670 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 日平均气温为  $33.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ), 芦苇

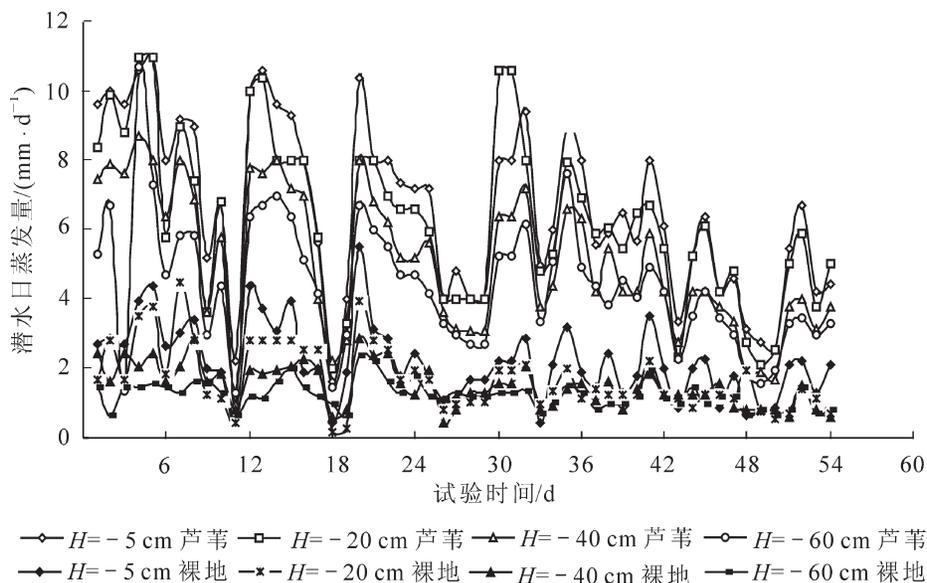


图 2 不同潜水埋深的芦苇和裸地日潜水蒸发量

Figure 2 Daily phreatic evaporation in different groundwater depth

群落的日潜水蒸发量为 10.6 mm，而在阴雨天 8 月 26 日(日均光合有效辐射为  $345 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ；日平均气温为  $26.0 \text{ }^\circ\text{C}$ )，日潜水蒸发量降至 1.6 mm，2 个典型天的日潜水蒸发量差值达 9.0 mm。到 9 月中旬以后，芦苇由生长中期过渡到生长末期，蒸腾作用减弱，气温也越来越低，土壤蒸发能力也变弱，因此日潜水蒸发量总体趋势为不断变小，日潜水蒸发量差值变小。而裸地的日潜水蒸发量随实验时间变化相对平缓，在整个实验过程中，日潜水蒸发量逐渐变小。

## 2.2 栽植芦苇条件下潜水累积蒸发量与裸地比较

土壤的粗细颗粒组成及含量，构成了土壤毛细管的分布，表现出土壤的疏水性。不同地下水埋深的芦苇和裸地潜水累积蒸发量见图 3。在实验设定的地下水浅埋深的条件下，潜水面到地表几乎全处于毛管水活动区内，因此，潜水蒸发量都很大。有芦苇和裸地的潜水蒸发过程，都明显分成 2 个阶段，8 月中旬至 9 月上旬，温度和光合有效辐射都很高，因此，不同地下水埋深的培养箱的潜水蒸发量都较大，潜水累积蒸发量随地下水埋深的增大呈线性递减，栽植芦苇的样地的潜水蒸发递减速度比裸地的快。到 9 月中旬以后，芦苇由生长中期过渡到生长末期，蒸腾作用减弱，气温也越来越低，土壤蒸发能力也变弱，因此，栽植芦苇的样地和裸地的潜水累积蒸发量都变小。在试验设定的

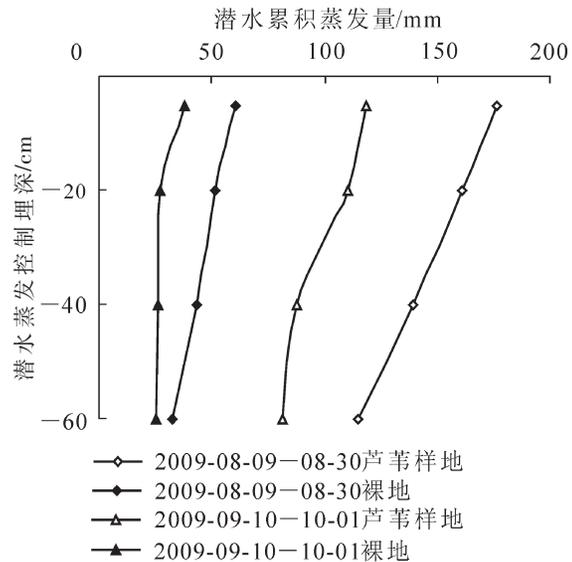


图 3 不同潜水埋深的芦苇和裸地潜水累积蒸发量

Figure 3 Daily phreatic accumulative evaporation in different groundwater

的地下水埋深范围内，不同埋深的潜水累积蒸发量之间的差值明显变小。

在试验阶段，控制地下水埋深在 -5，-20，-40 和 -60 cm 时，栽植芦苇的样地的潜水累积蒸发量分别为 354.3，331.4，272.1 和 235.6 mm，对应的裸地的潜水蒸发量分别为 127.8，102.0，84.0 和 73.0 mm。芦苇样地的潜水累积蒸发量是裸地的 3.0 ~ 3.5 倍。

## 2.3 潜水蒸发与水面蒸发的一致性

大气蒸发能力是气温、风速、地温等气象因素的综合表现，是影响潜水蒸发的主要因素之一，水面蒸发集中反映了大气蒸发能力。

裸地的潜水蒸发与水面蒸发变化过程如图 4 所示。当地下水埋深较小时，潜水蒸发较大，随着埋深的增大，潜水蒸发量逐渐减少。在本实验中，潜水埋深在 -5 cm 时，潜水蒸发量最大，与大气蒸发能力的变化规律最接近。随着埋深的增加，大气蒸发能力对潜水蒸发的影响逐渐减弱，而且从地下水向地表输送水分的路径变长，输水能力减弱。潜水蒸发和水面蒸发的一致性减弱，并显示出明显的滞后性。由此可以推断，潜水蒸发与水面蒸发的一致性随着埋深的增加而降低，也即，气象因素对裸地潜水蒸发的影响随埋深增加而减小。

图 5 显示了芦苇样地潜水蒸发与水面蒸发的变化过程。可以看出：4 个地下水埋深控制的芦苇样地的潜水蒸发过程与水面蒸发过程都表现出良好的一致性。而且，在实验设定的地下水埋深情况下，芦苇样地的潜水蒸发量都大于水面蒸发量，随地下水埋深的增大潜水蒸发量降低。与裸土面潜水蒸发曲线比较，芦苇样地的潜水蒸发曲线随天气的变化波动更明显。

## 2.4 大气蒸发力对潜水蒸发的影响

潜水蒸发强度与大气蒸发能力的实验分析结果见图 6。在地下水埋深较小的情况下，土壤蒸发和作物蒸腾消耗的水分能够直接从地下潜水中得到补给，因而潜水蒸发量的大小，主要决定于大气的蒸发能力。由图 6 可知：在实验设定的不同地下水埋深条件下，芦苇样地和裸地的潜水蒸发强度都随蒸发能力的增加不断增加。芦苇样地的潜水蒸发强度大于裸地的潜水蒸发强度。

但当大气蒸发能力增大到一定程度，潜水蒸发强度增加的幅度均呈减小的趋势，即潜水蒸发强度曲线斜率变小。例如，对于裸地，当控制水位在 -5 cm 时，大气蒸发能力由  $2.2 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$  增加到  $4.8 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ ，

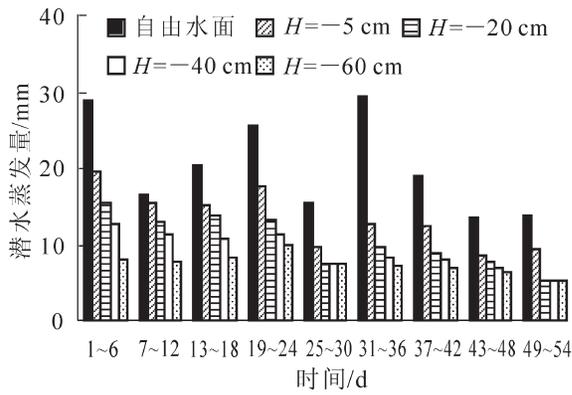


图 4 裸地潜水蒸发与自由水面蒸发过程  
Figure 4 Soil evaporation and open water evaporation

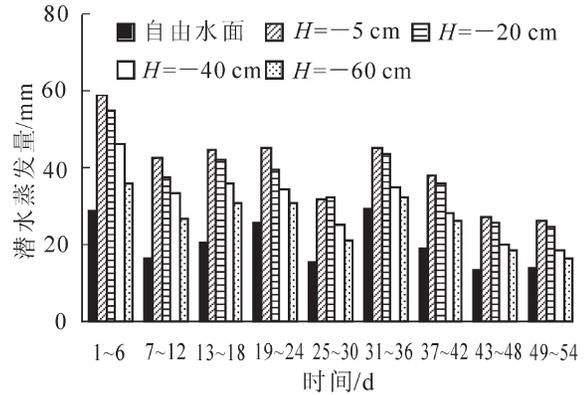


图 5 芦苇地潜水蒸发与自由水面蒸发过程  
Figure 5 Evapotranspiration of *Phragmites communis* pelt and open water evaporation

和由  $4.8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  增加到  $7.5 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  时，其蒸发强度分别增加了 80% 和 20%。

芦苇样地的潜水蒸发过程比较复杂，潜水蒸发包括芦苇的蒸腾耗水和土面蒸发 2 个部分。芦苇的蒸腾作用需要消耗大量水分。随大气蒸发力的增大，芦苇的蒸腾耗水量迅速增大，因此，同一地下水埋深条件下，芦苇样地的潜水蒸发强度高于裸地的潜水蒸发强度。但当大气蒸发能力增大到一定程度，芦苇的蒸腾作用受到抑制，增幅变小，因而导致芦苇样地的潜水蒸发强度曲线斜率变小。

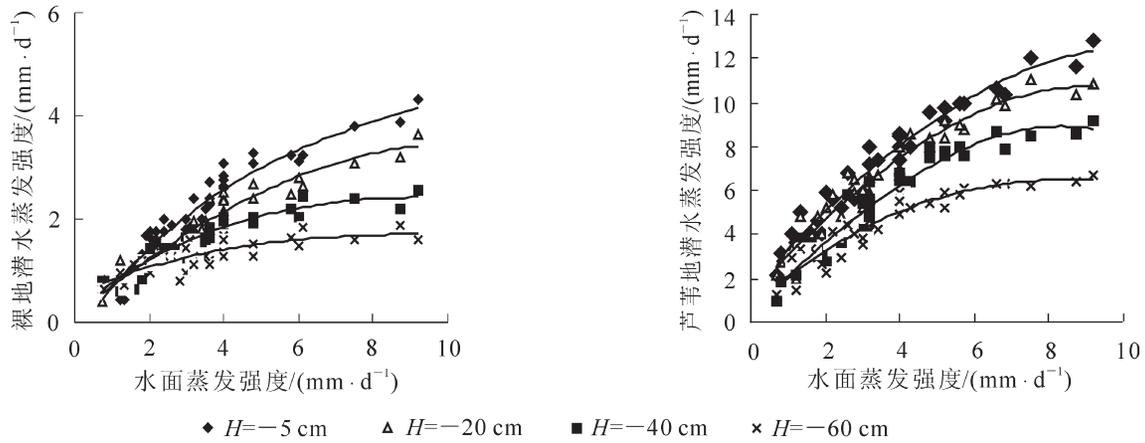


图 6 潜水蒸发与水面蒸发的关系

Figure 6 Relationship between phreatic evaporation and water surface evaporation

### 2.5 潜水蒸发系数及其计算公式

潜水蒸发系数  $C$  是在同一时间段内同一种土壤的潜水蒸发量和水面蒸发量之比，是在考虑气象因素影响后潜水消耗的一个相对量，因此具有实际应用和推广意义。计算公式为： $C = E_g/E_0$ 。其中： $E_g$  为潜水蒸发量(mm)； $E_0$  为标准 E-601 型蒸发器观测的水面蒸发量(mm)。

由于气象因素不同，潜水蒸发系数和水面蒸发也在变化，一般采用潜水蒸发系数的平均值。表 2 是不同水深的潜水蒸发系数表。

表 2 不同水深的潜水蒸发系数表

Table 2 Coefficient of phreatic evaporation

试验地	不同潜水埋深的潜水蒸发系数			
	- 5	- 20	- 40	- 60 cm
裸地	0.67	0.52	0.46	0.39
芦苇地	2.02	1.89	1.54	1.34

常用的潜水蒸发系数的模型有幂函数公式、指数函数公式、阿维里扬诺夫公式等。这些描述潜水蒸发的经验公式表明,蒸发量与地下水埋深之间的函数关系可用于潜水蒸发特征的分析与蒸发量的计算。由于实验所设地下水埋深较浅,同时结合研究区的实际情况,本研究用指数函数和幂函数公式建立拟合回归模型。利用 SPSS 统计软件的非线性回归(nonlinear regression)操作,以实测潜水蒸发量作为因变量,以其对应的埋深为自变量输入,设定参数及其初值,运用 Levenberg-Marquardt 法迭代计算来确定模型参数以及确定性系数  $R^2$ 。拟合结果如表。

叶水庭指数型公式:  $E_g = E_0 e^{-aH}$ 。幂函数公式:  $E_g = aE_0 H^{-b}$ 。其中:  $E_g$  为潜水蒸发强度( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $E_0$  为大气蒸发能力( $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $H$  为潜水埋深(m);  $a$  和  $b$  为经验常数,与土质及地下水埋深有关。

表 3 潜水蒸发经验公式系数

Table 3 Empirical formula coefficient of phreatic evaporation

试验地	$C = ae^{-bH}$			$C = aH^{-b}$		
	$a$	$b$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$
裸地	0.68	0.99	0.95	0.37	2.00	0.98
芦苇地	2.13	0.77	0.98	1.35	0.15	0.83

由表 4 可知: 2 个公式的拟合效果都较好, 确定性系数都在 0.8 以上, 适合应用于研究区潜水蒸发的研究。对于裸地, 幂函数公式的拟合效果比指数型公式好, 对于芦苇地, 指数型公式比幂函数公式拟合效果好。这和刘铁刚等<sup>[14]</sup>在研究辽宁地区栽植作物条件下的潜水蒸发规律时所得结论有一定的相似性。

### 3 结论

在整个观测阶段, 不同地下水埋深的芦苇样地的潜水蒸发量明显大于裸地的潜水蒸发量, 并且随天气变化潜水蒸发量日变化非常大, 而裸地的日潜水蒸发量随实验时间变化相对平缓; 地下水埋深对潜水蒸发量的影响明显, 芦苇样地和裸地的日潜水蒸发量都随地下水埋深的增大而减小; 不同地下水埋深控制的芦苇样地的潜水累积蒸发量是裸地的 3.0 ~ 3.5 倍。

在本实验中, 裸地潜水埋深在 -5 cm 时, 潜水蒸发量最大, 与大气蒸发能力的变化规律最接近。芦苇样地的潜水蒸发过程与水面蒸发过程表现出良好的一致性, 且在实验过程中, 芦苇样地的潜水蒸发量都大于水面蒸发量。芦苇样地和裸地的潜水蒸发强度都随蒸发能力的增加不断增加。但当大气蒸发能力增大到一定程度, 潜水蒸发强度增加的幅度均呈减小的趋势。

用指数函数和幂函数公式建立潜水蒸发系数的回归模型, 2 个公式的拟合效果都较好, 适合应用于研究区潜水蒸发的研究。对于裸地, 幂函数公式的拟合效果比指数型公式好, 对于芦苇地, 指数型公式比幂函数公式拟合效果好。

#### 参考文献:

- [1] 于文颖, 周广胜, 迟道才, 等. 盘锦湿地芦苇(*Phragmites communis*)群落蒸发散主导影响因子[J]. 生态学报, 2008, 28(9): 4594 - 4601.  
YU Wenying, ZHOU Guangsheng, CHI Daocai, et al. Evapotranspiration of *Phragmites communis* community in Panjin Wetland and its control factors [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28(9): 4594 - 4601.
- [2] 阿维里扬诺夫 C Ф. 防治灌溉土地盐渍化的水平排水设施[M]. 娄溥礼, 译. 北京: 中国工业出版社, 1985: 56 - 61.
- [3] 叶水庭, 施鑫源, 苗晓芳. 用潜水蒸发经验公式计算给水度问题的分析[J]. 水文地质工程地质, 1980(4): 46 - 48.  
YE Shuiting, SHI Xinyuan, MIAO Xiaofang. The analysis to the yield of water by the phreatic evaporation empirical formula calculation [J]. *Hydrogeol & Eng Geol*, 1980(4): 46 - 48.
- [4] 沈立昌. 关于潜水蒸发量经验公式探讨[J]. 水利学报, 1985(7): 34 - 40.  
SHEN Lichang. The study on the phreatic evaporation empirical formula [J]. *J Hydraul Eng*, 1985(7): 34 - 40.
- [5] 金光炎, 张朝新. 潜水蒸发规律的分析研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1988: 169 - 181.

- [6] 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.  
HU Shunjun, KANG Shaozhong, SONG Yudong, *et al.* Variation of phreatic evaporation and its calculation method in Tarim River Basin in Xingjiang Region [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2004, **20** (2): 49 – 53.
- [7] 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.
- [8] 史海滨. 裸地蒸发条件下土壤盐分运动的预测研究[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 1993, **14** (1): 77 – 86.  
SHI Haibin. Calculation study on soil salts movement state under evaporation from a bare soil surface [J]. *J Inner Mongolia Agric Univ*, 1993, **14** (1): 77 – 86.
- [9] 王全九, 王文焰, 汪志荣, 等. 排水地段土壤盐分变化特征分析[J]. 土壤学报, 2001, **38** (2): 272 – 276.  
WANG Quanjiu, WANG Wenyan, WANG Zhirong, *et al.* Analysis of features of soil salt in a drainage area [J]. *Acta Pedol Sin*, 2001, **38** (2): 272 – 276.
- [10] 徐建新, 苏万益. 灌区节水防盐灌溉制度设计方法探讨[J]. 农业工程学报, 1999, **15** (4): 108 – 111.  
XU Jianxin, SU Wanyi. Design method of irrigation system for water saving and salt prevention in irrigation area [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 1999, **15** (4): 108 – 111.
- [11] SEPAKHAH A R, KANOONI A, GHASEMI M M. Estimating water table contribution to corn and sorghum water use [J]. *Agric Water Manage*, 2003, **58** (1): 67 – 79.
- [12] 郭占荣, 荆恩春, 聂振龙, 等. 不同潜水埋深条件下蒸发蒸腾试验研究[J]. 勘察科学技术, 2001 (5): 27 – 31.  
GUO Zhanrong, JING Enchun, NIE Zhenlong, *et al.* Study on the mechanism of infiltration and evaporation of phreatic groundwater in the planting conditions [J]. *Invest Sci Technol*, 2001(5): 27 – 31.
- [13] 孔凡哲, 王晓赞. 有作物条件下潜水蒸发计算方法的实验研究[J]. 中国农村水利水电, 2002 (3): 3 – 5.  
KONG Fanzhe, WANG Xiaozan. A study on the calculation method of evaporation from groundwater in seasons of crops [J]. *China Rural Water Hydropower*, 2002 (3): 3 – 5.
- [14] 刘铁刚, 迟道才, 于文颖, 等. 辽河地区潜水蒸发研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2005, **36** (1): 76 – 79.  
LIU Tiegang, CHI Daocai, YU Wenying, *et al.* Experiment research on phreatic evaporation rules in Liaoning Province [J]. *J Shenyang Agric Univ*, 2005, **36** (1): 76 – 79.