

# 潜水埋深为零时塔里木盆地不同土质潜水蒸发与水面蒸发关系分析

胡顺军<sup>1,2</sup>, 宋郁东<sup>2</sup>, 田长彦<sup>2</sup>, 王举林<sup>3</sup>

(1 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100; 2 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 3 陕西省户县水利局, 户县 710016)

**摘要:** 根据渭干河灌区潜水蒸发试验站和阿克苏水平衡试验站的实际监测资料, 分析了  $E_{601}$  型蒸发器与  $E_{20}$  蒸发皿观测的水面蒸发的关系、不同土质潜水埋深为零时潜水蒸发与水面蒸发的关系, 提出了潜水蒸发能力系数的概念, 并分析了其与土壤机械组成的关系。结果表明: 塔里木盆地非冻结期  $E_{601}$  型蒸发器与  $E_{20}$  蒸发皿观测的水面蒸发的折算系数变化在 0.65~0.78 之间; 除细砂土外,  $E_{601}$  蒸发器观测的水面蒸发强度不能代替潜水埋深为零时的潜水蒸发强度; 不同质地土壤的粉粘粒( $d < 0.02 \text{ mm}$ )含量百分数与潜水蒸发能力系数呈指数相关关系。

**关键词:** 潜水蒸发; 水面蒸发; 折算系数; 潜水蒸发能力系数; 塔里木盆地

中图分类号: S152.7<sup>+3</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2005)ZK-0080-04

## 0 引言

虽然反映潜水蒸发系数与潜水埋深关系的C-H型公式从结构上存在缺陷, 但由于其形式简单、参数少, 在实际生产中仍然被广泛应用。其中,

$$\text{阿维里扬诺夫公式} \quad E = E_0 \left(1 - \frac{H}{H_{\max}}\right)^n \quad (1)$$

$$\text{叶水庭公式} \quad E = E_0 e^{-\alpha H} \quad (2)$$

被《中国水资源调查和评价工作技术细则》推荐为计算潜水蒸发的经验公式<sup>[1]</sup>。式中  $E$ —潜水蒸发强度,  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $E_0$ —潜水埋深为零时的潜水蒸发强度,  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 一般认为可用  $E_{601}$  蒸发器观测的水面蒸发强度来近似代替<sup>[1-4]</sup>;  $H$ —潜水埋深,  $\text{m}$ ;  $H_{\max}$ —潜水极限埋深,  $\text{m}$ ;  $n$ —潜水蒸发指数;  $\alpha$ —常数。

公式(1)和(2)的涵义是: 潜水蒸发与水面蒸发成正比; 潜水位接近于地表时的潜水蒸发等于水面蒸发。

金光炎(1982)认为当地下水埋深达到地表面时, 潜水蒸发等于地表土壤饱和时的蒸发值<sup>[2]</sup>。金光炎、张朝新(1988)认为在无作物条件下, 当蒸发能力大于土壤最大输水能力时, 埋深为零时的潜水蒸发和水面蒸发近似相等, 当蒸发能力小于土壤输水能力时, 埋深为零时的潜水蒸发与水面蒸发不再近似相等<sup>[5]</sup>。

霍崇仁、王禹良(1988)认为对于无作物覆盖的裸地, 潜水位接近于地表时的蒸发强度可近似采用相同气候条件下的水面蒸发强度, 当植物生长旺盛, 土质松散且地下水埋深较浅时, 毛细管输水能力一般大于自由水面的蒸发强度, 此时可通过实际观测资料确定<sup>[6]</sup>。

南京水文研究所曾用砂土和混合细砂土进行了潜

水埋深为零时的潜水蒸发试验, 其结果表明: 潜水位接近地面时, 潜水蒸发与水面蒸发接近相等, 这一现象应作为一切稳定潜水蒸发计算公式外延的控制条件<sup>[7]</sup>。

张朝新(1996)综合南京水文研究所的研究成果及五道沟试验站的试验资料分析认为: 在无作物条件下不同土质埋深为零的潜水蒸发量与水面蒸发量近似相等, 在今后的潜水蒸发计算和水资源评价计算中, 对于无作物条件下不同土质埋深为零的潜水蒸发系数均可采用<sup>[8]</sup>。

关于水面蒸发量的选用, 国内大部分学者在经验公式中大都引用  $E_{601}$  型蒸发器的观测值或折算为  $E_{601}$  型蒸发器的数值。 $E_{20}$  蒸发器所测得的水面蒸发强度  $E_{20}$  与  $E_{601}$  值有较大的差别, 两者的比值一般为 0.5~0.8, 且年内变化较大。对于塔里木盆地不同的土质, 当潜水埋深为零时的潜水蒸发量是否等于  $E_{601}$  型蒸发器观测的水面蒸发量的问题, 本文根据塔里木河上游的阿克苏水平衡站不同型号的水面蒸发器(皿)观测的水面蒸发资料和塔里木河中游的渭干河灌区潜水蒸发试验场的潜水蒸发资料, 进行初步探讨。

## 1 材料与方法

### 1.1 阿克苏水平衡试验站水面蒸发对比试验

阿克苏水平衡试验站位于塔里木河三大源流——阿克苏河、叶尔羌河、和田河交汇处附近的冲积平原新型绿洲区内。地理坐标为东经 80°30', 北纬 40°37', 海拔高程 1028 m。土壤为沙性壤土, 年平均气温 11.2°, 年平均降水量 45.7 mm, 无霜期 207 d。自 1982 年建站以来进行了  $E_{601}$  型蒸发器与  $E_{20}$  蒸发皿的水面蒸发对比试验。

### 1.2 渭干河灌区潜水蒸发试验

#### 1) 试验站基本情况

渭干河灌区潜水蒸发试验站位于新和县塔什里克乡, 地理坐标为北纬 40°30', 东经 82°33'。海拔高程 1013.7 m。土壤为灰色砂壤土, 年平均气温 10.7°, 年平均降

收稿日期: 2004-04-06 修订日期: 2004-11-21

基金项目: 863 计划(2002AA2Z4201); 国家科技攻关计划(2002BA901A36); 国家自然基金项目(40471020)和中国科学院“西部之光”项目

作者简介: 胡顺军(1968-), 男, 汉族, 陕西勉县人, 副研究员, 博士生, 主要从事干旱区生态水文、节水灌溉等方面的研究。乌鲁木齐中国科学院新疆生态与地理研究所, 830011

水量 53.2 mm, 无霜期 216 d, 年日照时数 2900 h。此试验站的气象因子可以代表天山南麓的广大区域, 而且试验站所处的地理位置和水文地质条件具有典型性和代表性。

## 2) 试验布置与观测情况

根据渭干河灌区土质情况, 选取砂壤土、轻壤土、中壤土、重壤土、细砂和砾石 6 组土样进行试验, 每组土样采用马氏瓶控制潜水埋深, 设计了 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5 m 9 个深度, 共计 54 个试筒, 试筒面积 0.3 m<sup>2</sup> (同 E<sub>601</sub> 蒸发器的面积), 按阶梯状均匀布设在观测廊道及地下室周围, 控制潜水埋深小于 1 m 的试筒布设在观测廊道两边, 控制潜水埋深大于 1 m 的试筒布设在圆形地下室周围。6 组土样的机械组成如表 1 所示<sup>[9]</sup>。试验时每天 8:00, 14:00 和 20:00 进行 3 次观测。1990 年至 1994 年连续进行了 5 年观测。现以月为单位进行整理与分析。水面蒸发采用新和县气象局资料。

表 1 土壤的机械组成 (*d* 为粒径, mm)

Table 1 Mechanical composition of soil  
(*d* is diameter of particle, mm)

土壤名称	各级颗粒含量百分数/%		
	<i>d</i> > 0.25	0.02 < <i>d</i> < 0.25	<i>d</i> < 0.02
砂壤土	0.53	67.11	32.36
轻壤土	0.83	44.22	54.95
中壤土	5.24	54.48	40.28
重壤土	3.77	54.44	41.79
细砂	56.45	37.07	6.48
砾石	100	0.0	0.0

## 2 E<sub>601</sub> 型蒸发器与 E<sub>20</sub> 蒸发皿观测的水面蒸发的关系

阿克苏水平衡试验站 1982 年至 2003 年采用 E<sub>601</sub> 型蒸发器与 E<sub>20</sub> 蒸发皿观测的非冻结期(4~10 月)月平均水面蒸发强度(表 2)。定义 E<sub>601</sub> 型蒸发器与 E<sub>20</sub> 蒸发皿观测的水面蒸发量的折算系数 K 为

$$K = \frac{E_{601} \text{ 型蒸发器观测的水面蒸发量}}{E_{20} \text{ 蒸发皿蒸观测的水面蒸发量}} \quad (3)$$

将计算得到的折算系数列于表 2。

表 2 阿克苏水平衡试验站各月平均水面蒸发强度及折算系数

Table 2 Monthly mean surface water evaporation density and reduction coefficient of Aksu water balance experimental station

月份	E <sub>20</sub> /mm · d <sup>-1</sup>	E <sub>601</sub> /mm · d <sup>-1</sup>	折算系数 K
4	5.4	8.3	0.65
5	7.4	11.2	0.66
6	8.7	12.3	0.71
7	8.3	11.1	0.75
8	7.4	9.9	0.75
9	5.8	7.5	0.77
10	3.6	4.6	0.78

由表 2 可以看出, 阿克苏水平衡试验站非冻结期 E<sub>601</sub> 型蒸发器与 E<sub>20</sub> 蒸发皿观测的水面蒸发量的折算系

数变化在 0.65~0.78 之间, 并随月份的增加而增加。这是因为从 4 月开始至 7 月气温开始大幅度上升, 小型蒸发器相对于 E<sub>601</sub> 型蒸发器升温快, 易于蒸发, 在相同的时间内小型蒸发器的蒸发量大于 E<sub>601</sub> 型蒸发器的水面蒸发量, 所以折算系数均小于 1, 同时由于 E<sub>601</sub> 型蒸发器蓄存的热能大于小型蒸发器蓄存的热能, 随着气温的上升, 水面蒸发折算系数逐渐增大, 即使在 8~10 月的降温期, 由于这 3 个月温度仍大于零, 从 4 月开始的积温仍处于上升阶段, 所以水面蒸发折算系数仍然上升。有了 E<sub>601</sub> 型蒸发器与 E<sub>20</sub> 蒸发皿观测的水面蒸发量的折算系数, 就可以根据 E<sub>20</sub> 蒸发皿观测的水面蒸发量推算 E<sub>601</sub> 型蒸发器观测的水面蒸发量。

## 3 不同土质潜水埋深为零的潜水蒸发与水面蒸发的关系

将新和县气象站 1990 年至 1994 年采用 E<sub>20</sub> 蒸发皿观测的非冻结期(4~10 月)月平均水面蒸发强度, 按阿克苏水平衡站的折算系数, 换算为相同面积的 E<sub>601</sub> 蒸发器观测的水面蒸发强度, 并将 1990~1994 年 5 年平均的不同土质潜水埋深为零时的潜水蒸发强度一起列于表 3, 它们随时间的变化如图 1 所示。

表 3 潜水埋深为零时的潜水蒸发与大气蒸发力的关系

Table 3 Relationships between atmospheric evaporation

and phreatic water evaporation

(phreatic water table=0) mm · d<sup>-1</sup>

月份 /月	大气蒸发力		潜水埋深为零时的潜水蒸发强度 E					
	E <sub>20</sub>	E <sub>601</sub>	砾石	轻壤土	砂壤土	细砂土	中壤土	重壤土
4	6.55	4.26	5.12	2.76	3.19	4.07	2.52	3.81
5	8.19	5.41	7.14	3.56	4.16	5.40	3.07	4.37
6	9.61	6.82	8.78	3.52	5.85	6.09	3.43	4.42
7	9.27	6.95	8.41	3.91	4.86	5.38	3.36	3.83
8	7.17	5.38	7.29	3.53	4.58	6.27	3.29	2.67
9	5.44	4.19	5.75	2.65	4.28	4.70	2.17	2.12
10	3.24	2.53	3.08	1.79	2.70	3.33	1.48	1.79

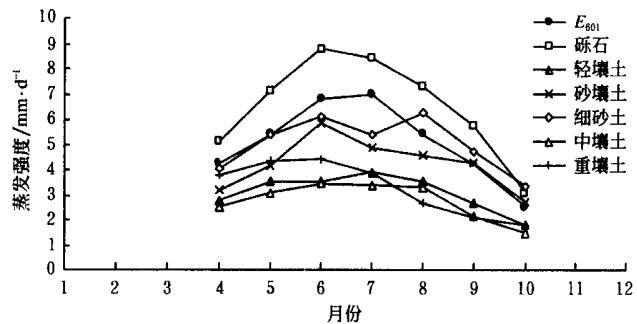


图 1 不同土质潜水埋深为零时潜水蒸发强度与 E<sub>601</sub> 水面蒸发强度随时间的变化

Table 1 Changes of E<sub>601</sub> water surface evaporation

and phreatic water evaporation for different

soil (phreatic water table=0)

从表 3 和图 1 可以看出, 相同蒸发面积的水面蒸发强度与不同土质潜水埋深为零时的潜水蒸发强度随时间的变化趋势大致相同, 但相同蒸发面积的水面蒸发强

度与不同土质潜水埋深为零时的潜水蒸发强度存在明显的差异。4~10月潜水埋深为零时砾石的潜水蒸发强度明显大于蒸发面积相同的水面蒸发强度。轻壤土、中壤土、重壤土的潜水蒸发强度明显小于蒸发面积相同的水面蒸发强度。细砂土、砂壤土的潜水蒸发强度与蒸发面积相同的水面蒸发强度差别不大。渭干河灌区6种典型土壤的潜水埋深为零时的潜水蒸发强度与 $E_{601}$ 水面蒸发强度的相关关系如图2所示。由图2可以看出,渭干河灌区6种典型土壤潜水埋深为零时的潜水蒸发强度与 $E_{601}$ 水面蒸发强度线性相关,相关系数大于0.89,达极显著水平,两者可拟合为:

$$E_0 = \beta E_{601} \quad (4)$$

式中  $E_0$ —潜水埋深为零时的潜水蒸发强度,

$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $E_{601}$ — $E_{601}$  蒸发器观测的水面蒸发强度, $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。渭干河灌区6种典型土壤的斜率如表4所示。因此,若用 $E_{601}$ 蒸发器观测的水面蒸发强度代替潜水埋深为零时的潜水蒸发强度,建立潜水蒸发经验公式,计算不同潜水埋深的潜水蒸发强度时,除细砂土外,必将产生较大的误差。

表4 渭干河灌区典型土壤的斜率

Table 4 Slope coefficient of six typical soil of Weiganhe irrigation district

土壤类型	砾石	轻壤土	砂壤土	细砂土	中壤土	重壤土
斜率 $\beta$	1.2805	0.5987	0.8157	0.9600	0.5362	0.6375
显著性	极显著	极显著	极显著	极显著	极显著	极显著

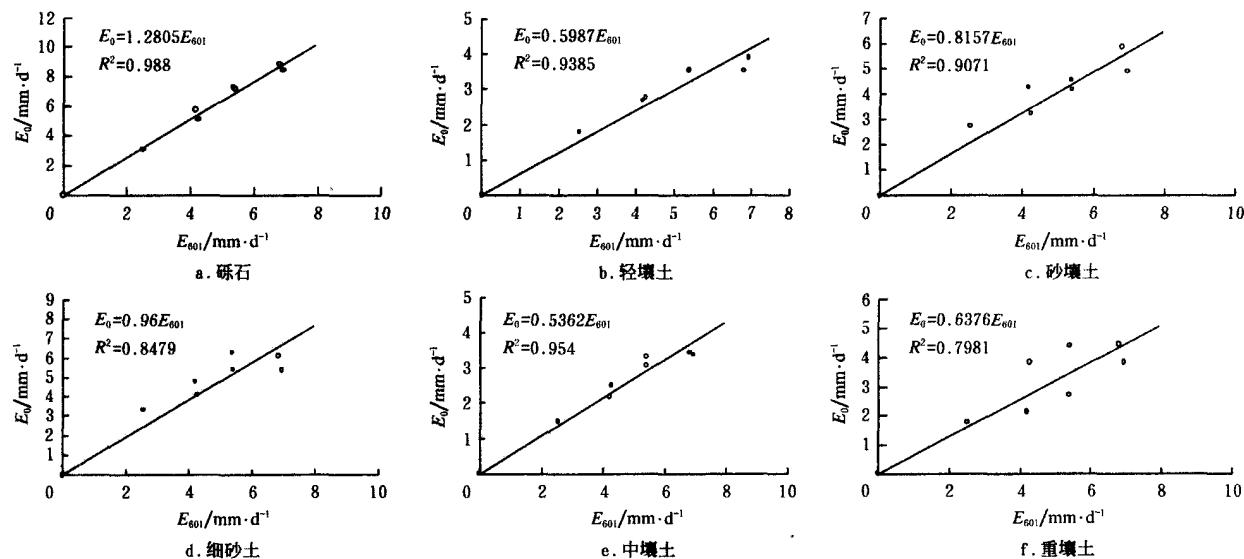


图2 不同土质下潜水埋深为零时潜水蒸发量与水面蒸发的关系

Fig. 2 Relationships between phreatic water evaporation and water surface evaporation of different soil types (phreatic water table= 0)

#### 4 潜水蒸发能力系数与土壤机械组成的关系

潜水埋深为零时的潜水蒸发受土壤的热容量与反射率的影响,而土壤的热容量与反射率又与土壤的机械组成有密切的关系。定义潜水埋深为零时的潜水蒸发量

表5 渭干河灌区典型土壤的潜水蒸发能力系数

Table 5 Phreatic water evaporation coefficient of typical soil of Weiganhe river irrigation district

月份 /月	潜水蒸发能力系数 $k_0$					
	砾石	轻壤土	砂壤土	细砂土	中壤土	重壤土
4	1.2019	0.6479	0.7488	0.9554	0.5915	0.8944
5	1.3198	0.6580	0.7689	0.9982	0.5675	0.8078
6	1.2874	0.5161	0.8578	0.8930	0.5029	0.6481
7	1.2331	0.5733	0.7126	0.7889	0.4927	0.5616
8	1.3550	0.6561	0.8513	1.1654	0.6115	0.4963
9	1.3723	0.6325	1.0215	1.1217	0.5179	0.5060
10	1.2174	0.7075	1.0672	1.3162	0.5850	0.7075
平均	1.2838	0.6274	0.8612	1.0341	0.5527	0.6602

与 $E_{601}$ 蒸发量的比值为潜水蒸发能力系数,它反映了不同质地土壤的一种蒸发特性。计算得渭干河灌区6种典型土壤的潜水蒸发能力系数如表5所示。由表5可知,每种土壤平均的潜水蒸发能力系数与方程(3)的斜率基本

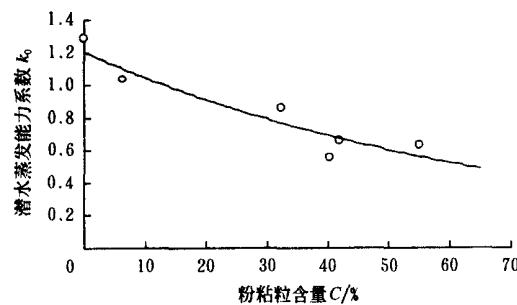


图3 粉粘粒含量 C 与潜水蒸发能力系数  $k_0$  的关系

Table 3 Relationships between content of powder-clay particle and phreatic water evaporation coefficient

一致。不同质地土壤的粉粘粒<sup>[10]</sup>( $d < 0.02 \text{ mm}$ )含量百分数 $C$ 与潜水蒸发能力系数 $k_0$ 的关系如图3所示。按指数关系拟合得

$$k_0 = 1.2004e^{-0.0139C} \quad R^2 = 0.8448 \quad (5)$$

相关关系较好。

## 5 结 论

1) 塔里木盆地非冻结期 $E_{601}$ 型蒸发器与 $E_{20}$ 蒸发皿观测的水面蒸发的折算系数变化在0.65~0.78之间。

2) 潜水埋深为零时的潜水蒸发受土壤的热容量与反射率的影响,而土壤的热容量与反射率又与土壤的机械组成有密切的关系。潜水埋深为零时的潜水蒸发强度作为建立裸地潜水蒸发公式的一个控制条件。在塔里木盆地除细砂土外, $E_{601}$ 蒸发器观测的水面蒸发强度不能代替潜水埋深为零时的潜水蒸发强度。

3) 潜水蒸发能力系数反映了不同质地土壤的一种蒸发特性,不同质地土壤的粉粘粒( $d < 0.02 \text{ mm}$ )含量百分数与潜水蒸发能力系数具有指数相关关系。

## [参 考 文 献]

- [1] 张顺联 地下水资源计算与评价[M] 北京: 水利电力出版社, 1992: 57, 69, 128- 130
- [2] 金光炎 平原地下水水资源评价[M] 北京: 水利出版社, 1982: 42- 47.
- [3] 张蔚榛 地下水非稳定流计算和地下水评价[M] 北京: 科学出版社, 1983: 373- 374
- [4] 宛莲菊, 李振栓, 武胜忠, 等 工程渗流力学及应用[M] 北京: 中国建材工业出版社, 2001: 344
- [5] 金光炎, 张朝新 潜水蒸发规律的分析研究[A] 水利部水文司 水资源评价论文集[C] 北京: 水利电力出版社, 1988: 169- 181
- [6] 霍崇仁, 王禹良 水文地质学[M] 北京: 水利电力出版社, 1988: 104- 106
- [7] 唐海行, 苏逸深, 张和平 潜水蒸发实验研究及其经验公式的改进[J] 水利学报, 1989, (10): 37- 72
- [8] 张朝新 不同地质埋深为零的潜水蒸发与水面蒸发关系分析[J] 水资源研究, 1996, 17(2): 27- 28
- [9] 来剑斌, 王永平, 蒋庆华, 等 土壤质地对潜水蒸发的影响[J] 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(6): 153- 157.
- [10] 黄昌勇 土壤学[M] 北京: 中国农业出版社, 2002: 74- 77.

## Relationship between water surface evaporation and phreatic water evaporation when phreatic water buried depth is zero for different soil in Tarim River basin

Hu Shunjun<sup>1,2</sup>, Song Yudong<sup>2</sup>, Tian Changyan<sup>2</sup>, Wang Julin<sup>3</sup>

(1 Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Yangling 712100, China; 2 Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 3 Hu County Water Conservancy Bureau in Shaanxi Province, Hu county 710016, China)

**Abstract** The relationship of water surface evaporation observed from  $E_{601}$  evaporator and the small type of 20 cm evaporation pan was derived from observed data from 1982 to 2003 at Ak su water balance experimental station. The relationships between  $E_{601}$  evaporation calculated by conversion coefficient and phreatic water evaporation when phreatic water table was zero, measured at phreatic water evaporation experimental station of W eigenhe river irrigation district was also analyzed, and the conception of phreatic water evaporation demand coefficient was presented. The correlation relationships between phreatic water evaporation coefficient and the mechanical composition of soil was established. The results showed that conversion coefficient between water surface evaporation observed from  $E_{601}$  evaporator and the small type of 20 cm evaporation pan was 0.65~0.78, water surface evaporation observed from  $E_{601}$  evaporator could not replace the phreatic water evaporation when phreatic water table was zero except for fine sand, and relationship between phreatic water evaporation coefficient and content of powder-clay particle was exponential.

**Key words:** phreatic water evaporation; water surface evaporation; conversion coefficient; phreatic water evaporation coefficient; Tarim River Basin