

土壤质地对潜水蒸发的影响^{*}

来剑斌^{1,2}, 王永平³, 蒋庆华³, 王金栋³, 王全九^{2,4}

(1 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100094; 2 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048;

3 新疆渭干河流域管理处, 新疆 库车 842000; 4 中国科学院 水利部水土保持研究所

黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100)

[摘要] 利用实测资料, 对比分析了不同质地土壤埋深为 0 m 时潜水的蒸发与大气蒸发能力间的关系, 研究了地表蒸发系数的变化规律; 进而根据不同埋深的潜水蒸发情况, 提出了用土壤粘粒含量表示的潜水蒸发公式, 并计算了不同土壤在不同潜埋深时的潜水蒸发量。

[关键词] 土壤质地; 潜水蒸发; 大气蒸发

[中图分类号] S152.7

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2003)06-0153-05

潜水蒸发是田间土壤水分循环的重要组成部分, 也是进行土壤次生盐碱化控制的主要对象。国内外学者对土壤潜水蒸发特性进行了大量研究^[1~6], 提出了许多具有不同特点和用途的潜水蒸发模型, 并在农田排水、盐碱地防治、地下水补给等问题的研究中广泛应用。

土壤质地是土壤最基本的物理属性, 质地不同的土壤其粗细颗粒组成及含量不同, 从而构成了不同的土壤毛细管分布特征, 并决定着土壤持水性及导水性。因此, 土壤质地是影响潜水蒸发的主要因素之一。

目前所用的主要潜水蒸发公式^[3~6]中, 都包含了埋深为零时的潜水蒸发强度, 即 E_0 这一参数, 并认为 E_0 近似等于大气蒸发强度, 可用大气蒸发强度代替。但对于不同土壤质地而言, 由于土壤含水孔隙大小以及与大气的直接交换的空间不同, 必然造成不同土壤质地埋深为 0 时的蒸发量差异。同时, 大量研究^[7~11]表明, 质地是影响土壤导水能力和土壤水分运动参数的主要因素, 因此分析土壤质地对潜水蒸发的影响, 有助于分析不同质地潜水蒸发特征及确定合理的描述潜水蒸发过程的数学模式。本研究根据实测潜水蒸发资料及土壤颗粒组成, 对比分析了不同质地土壤的潜水蒸发特征, 并分析了利用土壤粘粒含量反映不同质地潜水蒸发特征的可能性, 以为农田排水设计、盐碱地防治及地下水补给等问题中的潜水蒸发计算提供参考。

1 理论模式

国内外学者对土壤潜水蒸发特性的研究表明, 在潜水蒸发的理论分析方面或是计算公式的结构方面, 均趋向于更加确切地反映潜水蒸发量及蒸发能力与埋深之间的关系。目前所用的主要潜水蒸发公式有:

阿维里扬诺夫^[3]的抛物线型公式:

$$E = E_0(1 - H/H_{\max})^n \quad (1)$$

沈立昌、张朝新等^[1]的双曲线型公式:

$$E = kuE_0/(H + 1)^b \quad (2)$$

雷志栋等人^[6]提出的既考虑土壤输水特性又考虑表土蒸发的经验公式:

$$E = E_{\max}(1 - e^{-\eta E_0/E_{\max}}) \quad (3)$$

式(1)~(3)中, E 为潜水蒸发强度(mm/d); E_0 为埋深为 0 时的地下水蒸发强度(mm/d); $E_{\max}$ 为潜埋深为 H 时的潜水极限蒸发强度(mm/d); H 为潜埋深(m); $H_{\max}$ 为潜水蒸发强度为 0 时的埋深(m); ku 为与土质有关的潜水蒸发经验系数; n , a , b 和 η 为经验常数, 与土质及地下水埋深有关。

这些描述潜水蒸发的经验公式, 表明了蒸发量与潜埋深之间的函数关系, 并可用于潜水蒸发特征分析与蒸发量计算。同时, 公式中均包含了潜埋深为 0 时的潜水蒸发强度 E_0 , 并认为 E_0 可用大气蒸发强度近似代替^[3~6]。

* [收稿日期] 2002-11-27

[基金项目] 国家自然科学基金重大计划项目(90102012); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室资助项目(10501-98)

[作者简介] 来剑斌(1977-), 男, 山西五台人, 在读硕士, 主要从事土壤水、溶质运移模型及参数研究。

2 试验站基本情况

2.1 自然条件

新疆渭干河灌区地下水均衡试验场位于新疆新和县塔什力克乡, 北纬 40°30′, 东经 82°33′。多年平均气温 10.7℃, 多年平均降雨量 53.2 mm, 蒸发量为 2400 mm, 年日照时数 2900 h。上述气象资料表

明, 此站的气象因子可以代表天山南麓的广大区域, 同时, 试验场所处的地理位置和水文地质条件均具有典型性和代表性。

2.2 土壤质地

根据渭干河灌区的土质情况, 提取 6 个测区的一定土样, 在室内利用筛分法和吸管法测定了土壤的颗粒组成, 测定结果列于表 1。

表 1 6 种土壤的颗粒组成及分类

Table 1 Particle composition of 6 types of soil

土样编号 Sample No.	土类 Soil type	颗粒含量百分数/% Solid mass of each particle-size fraction		
		< 0.02 mm	0.02~ 0.25 mm	> 0.25 mm
1	砂壤土 Sandy loam	32.36	67.11	0.53
2	重壤土 Heavy loam	54.95	44.22	0.83
3	中壤土 Medium loam	40.28	54.48	5.24
4	轻壤土 Light loam	41.79	54.44	3.77
5	细砂 Fine sand	6.48	37.07	56.45
6	砾石 Gravel	0.00	0.00	100.00

2.3 试验布置

试验场每组土样控制地下水埋深分别为 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2.5, 3.5 和 4.5 m 共 9 个深度, 54 个试筒。试验时每天观测记录 3 次水面蒸发量及各土柱蒸发量数据, 分别在 8:00, 14:00, 20:00 进行。然后以旬为单位将原始观测资料数据进行整理分析。

3 结果与分析

3.1 埋深为 0 m 的潜水蒸发与大气蒸发

在 1992-03-10 (非冻结期), 对于不同的土质, 实测的大气蒸发强度与埋深为 0 m 时的潜水蒸发强度随时间的变化过程如图 1 所示。由图 1 可以看出, 对于不同质地的土壤, 埋深为 0 m 时的潜水蒸发强度与大气蒸发强度呈现出一致的变化趋势, 但并不完全相同。随着土壤质地由轻变重, 其埋深为 0 m 时的潜水蒸发强度由大变小, 与同期大气蒸发强度的差值越来越大。因此, 若用大气蒸发强度代替埋深为 0 m 时的潜水蒸发强度, 计算不同埋深的潜水蒸发量时必将产生较大的误差。

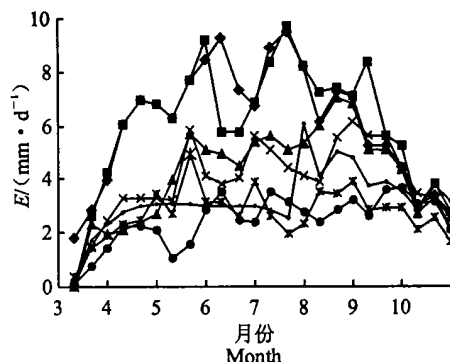


图1 大气蒸发与埋深为0m时潜水蒸发的关系

—◆— .大气; —■— .砾石; —▲— .细砂; —×— .沙壤土;
—*— .重壤土; —●— .中壤土; ——— .轻壤土

Fig.1 The relationship between phreatic evaporation of 0m water table and atmospheric evaporation

—◆— .Air; —■— .Gravel; —▲— .Fine sand; —×— .Sandy loam;
—*— .Heavy loam; —●— .Medium loam; ——— .Light loam.

将埋深为 0 m 时的潜水蒸发强度与大气蒸发强度的比值定义为地表蒸发系数 K , K 反映了不同质地土壤潜水埋深为 0 m 时, 其潜水蒸发强度与同期大气蒸发强度的相关关系。6 种供试土样的地表蒸发系数 K 的计算结果列于表 2。

表 2 不同月份 6 种土样的地表蒸发系数 K

Table 2 Surface evaporation coefficient K of 6 types of soil in different months

月份 Month	砂壤土 Sandy loam	重壤土 Heavy loam	中壤土 Medium loam	轻壤土 Light loam	细砂 Fine sand	砾石 Gravel
03~ 08	0.55	0.35	0.40	0.39	0.70	1.0
09~ 10	0.99	0.96	0.98	0.98	0.99	1.0

由表 2 可知, 在 03~ 08 月, 地表蒸发系数 K 为 0.35~ 1.0, 土质越轻, 系数 K 越大, 因土壤质地的不同而差别较大; 而在 09~ 10 月, 地表蒸发系数 K

均接近于 1.0, 且变化不大, 故可全部取为 1.0。

3.2 土壤质地表征参数

大量文献资料^[7-11]表明, 土壤质地与土壤水分

运动参数间相关关系密切。Arya 等^[7]和Wu 等^[8]采用土壤颗粒组成、孔隙大小预测土壤水分特征曲线,均取得了较好的结果。同时,一些研究^[9,10]表明,对于黄土类沉积物,小于 0.01 mm 粒级的物理粘粒含量 C 是土壤粒度组成中的一个重要指标。此外,0.05~0.01 mm 粒径的粗粉粒含量也是至关重要的,其含量均在 40%~60%,成为众数粒级;小于 0.001 mm 粒级的粘粒含量也是决定土壤物理性质的重要粒级,文献[9]定义粉沙粘粒比值 K_d 为粗粉粒级(0.05~0.01)和粘土粒级(<0.001 mm)的比值,其表征了不同质地土壤在粒度组成上的特点。王文焰等^[9],王全九等^[10]用物理粘粒含量 C 、粉沙粘粒比值 K_d 等作为表征量,分析土壤水分运动参数的相关性甚好。

对于新疆土壤而言,由于渭干河灌区土质普遍沙性较强,本试验用小于 0.02 mm 的粒级含量作为物理粘粒含量,则由文献[9]可知 K_d 为:

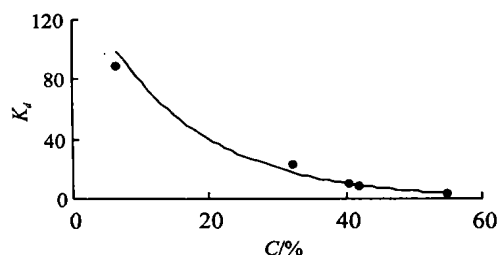


图2 粉沙粘粒比值 K_d 与物理性粘粒含量 C 的关系

●.计算值; —.拟合线
Fig.2 Relationship between ratio of silt clay fraction K_d and clay content C
●.Calculated value; —.Fitted curve

将 6 种土壤的物理粘粒($d < 0.02$ mm)含量 C 与地表蒸发系数 K (03~08 月)的关系点绘在图 3 中。由图 3 可见,不同质地土壤的物理粘粒($d < 0.02$ mm)含量 C 与地表蒸发系数 K (03~08 月)存在着明显的相关关系。地表蒸发系数 K 随土壤物理粘粒含量 C 的增加而呈减小趋势。利用指数关系对其进行拟合,结果为:

$$K = 0.897e^{-0.0183C}, R^2 = 0.936 \quad (6)$$

因此,在 03~08 月份,地表蒸发系数 K 随土壤粘粒含量的变化以指数形式呈负相关变化关系,且相关系数较高。

3.3 土壤质地对潜水蒸发的影响

对于相同土壤和大气条件而言,潜水蒸发强度随潜水埋深的增加而减小,并当埋深趋于无穷大时,

$$K_d = \text{粗粉粒级}(0.05 \sim 0.02 \text{ mm}) \text{ 含量} / \text{粘土粒级} (< 0.001 \text{ mm}) \text{ 含量} \quad (4)$$

由表 1 所列土壤颗粒组成情况,按式(4)计算灌区各土样的粉沙粘粒比值 K_d ,并与土壤小于 0.02 mm 粒级的物理粘粒含量 C 进行相关分析(图 2)。由于砾石中粉粒、粘粒含量极其微小,无法分析其 K_d 值,当作特例处理。

由图 2 可知,除砾石外,其余 5 种土样的粉沙粘粒比值 K_d 与物理粘粒含量 C 同呈明显指数负相关,其回归方程为:

$$K_d = 154.25e^{-0.067C} \quad (5)$$

K_d 与 C 间的相关性甚好,回归系数 $R^2 = 0.9817$,由此可见,不同质地土壤的主要颗粒(粗粉粒和粘粒)含量均与小于 0.02 mm 的物理性粘粒含量 C 具有良好的指数负相关性,可将土壤物理性粘粒含量 C 作为表征不同质地土壤的一个重要指标。

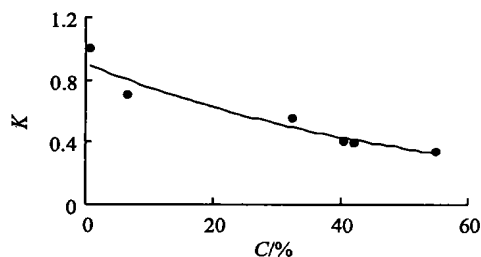


图3 系数 K 与物理粘粒含量 C 的相关关系

●.计算值; —.拟合线
Fig.3 Relationship between coefficient K and clay content C
●.Calculated value; —.Fitted curve

潜水蒸发量等于 0。为了研究土壤质地对潜水蒸发的影响,这里采用沈立昌^[11]提出的双曲线型潜水蒸发公式进行分析。由上述分析可知,埋深为 0 时的潜水蒸发量与质地有关,但并非等于大气蒸发能力。为此,在沈立昌公式^[11]的基础上,考虑质地对埋深为 0 m 时蒸发量的影响,改进后的蒸发量计算公式为:

$$E = KE_0 / (H + 1)^b \quad (7)$$

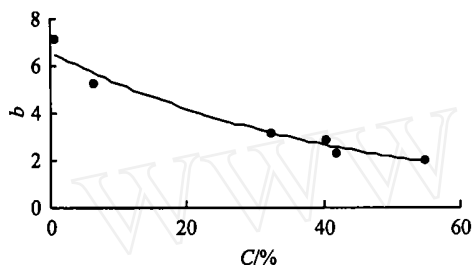
式中, E 为潜水蒸发强度(mm/d); E_0 为大气蒸发强度(mm/d); H 为潜水埋深(m); K 为地表蒸发系数; b 为蒸发指数; K, b 均与土质有关。

由于(7)式中系数 K 和 b 都与土壤质地有关,上面已经分析了质地对 K 的影响。下面主要分析 b 与质地间关系,利用式(7)拟合 03~10 月份的潜水蒸发资料,拟合结果如表 3 所示。

表 3 6 种土壤潜水蒸发公式中的 b 值Table 3 Value of b in evaporation formula of 6 types of soil

月份 Month	砂壤土 Sandy loam	重壤土 Heavy loam	中壤土 Medium loam	轻壤土 Light loam	细砂 Fine sand	砾石 Gravel
03~ 10	3.10	2.01	2.91	2.30	5.23	7.10

由表 3 可知,对于不同的土壤质地,指数 b 的取值为 2.01~ 7.10,土质越轻,指数 b 越大,且随着土壤质地的不同而差别较大。将不同质地土壤的粘粒 ($d < 0.02 \text{ mm}$) 含量百分数 C 与指数 b 关系点绘在图 4 中。

图4 粘粒含量 C 与指数 b 的关系

●.计算值; —.拟合线

Fig.3 Relationship between exponential b and clay content C

●.Calculated value; —.Fitted curve

由图 4 可知,不同质地土壤的物理粘粒 ($d < 0.02 \text{ mm}$) 含量 C 与指数 b 间存在明显的相关关系。利用指数关系对其进行拟合,结果为:

$$b = 6.5397e^{-0.0224C}, R^2 = 0.9705 \quad (8)$$

由拟合结果可知,在整个非冻结期(03~ 10月),潜水蒸发指数 b 与土壤物理粘粒含量之间具有指数型相关关系,且相关系数较高。将(6), (8)式代入(7)式,则改进后的潜水蒸发公式为

03~ 08月:

$$E = 0.897e^{-0.0183C}E_0/(H+1)^{6.5397e^{-0.0224C}} \quad (9)$$

09~ 10月:

$$E = E_0(H+1)^{6.5397e^{-0.0224C}} \quad (10)$$

(9), (10)式即为采用土壤粘粒含量表示的潜水蒸发强度与埋深的关系表达式,若已知土壤物理粘粒含量和潜水埋深,利用上式便可计算出一定大气蒸发强度下的潜水蒸发强度,进而计算出一定时期内的潜水蒸发量。

4 结 论

利用实测资料,分析了不同质地土壤的潜水蒸发特征,研究结果表明,埋深为 0 m 时的潜水蒸发量在非冻期与土壤质地有关,并与大气蒸发能力相差较大。而在寒冷季节,埋深为 0 m 的蒸发量与大气蒸发能力基本相同。因此,可以分时段采用不同的地表潜水蒸发系数。

分析了沈立昌^[11]潜水蒸发公式中的指数 b 与质地的关系,结果表明,指数 b 与土壤粘粒含量呈负指数函数关系。结合地表潜水蒸发系数,提出了采用土壤粘粒含量表示的潜水蒸发强度与埋深的关系表达式,这一研究结果可为利用土壤质地确定潜水蒸发量提供参考。

[参考文献]

- [1] 唐海行, 苏逸深, 张和平. 潜水蒸发的实验研究及其经验公式的改进[J]. 水利学报, 1989, (10): 37- 44
- [2] Hide J C. Observation on factors influencing the evaporation of soil moisture[J]. Soil Sci Soc Amer Proc, 1954, 18: 234- 239
- [3] 阿维里扬诺夫 C Φ. 防治灌溉土地盐渍化的水平排水设施[M]. 北京: 中国工业出版社, 1985
- [4] 瞿兴业, 张友义, 苏锦星, 等. 地下水蒸发与埋深关系指数 $n=3$ 的非稳定渗流排水计算[J]. 水利学报, 1983, (9): 48- 53
- [5] 赵 华, 张友义. 地下水蒸发影响下农田排水沟(管)间距的非稳定渗流数值解[J]. 水利学报, 1986, (11): 35- 38
- [6] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 潜水稳定蒸发的分析与经验公式[J]. 水利学报, 1984, (8): 19- 23
- [7] Arya L M, Paris J F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle size distribution and bulk density data[J]. Soil Sci Soc Am J, 1981, 45: 1023- 1030
- [8] Wu L, Vomocil J A, Childs S W. Pore size, particle size, aggregate size, and water retention[J]. Soil Sci Soc Am J, 1990, 54: 952- 956
- [9] 王文焰, 张建丰. 黄土的粒度组成与运动参数的相关性[J]. 水利学报, 1991, (1): 40- 45
- [11] 王全九, 邵明安. 非饱和土壤导水特性分析[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, (6): 16- 22
- [11] 赵成义, 胡顺军, 刘国庆, 等. 潜水蒸发经验公式分段拟合研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(5): 122- 126

Study on phreatic evaporation under different soil textures

LAI Jian-bing^{1,2}, WANG Jin-dong³, WANG Yong-ping³, JIANG Qing-hua³, WANG Quan-jin^{2,4}

(1 College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 2 College of Water Conservancy and

Hydrology, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

3 Management Office of Weiganhe River Basin, Kuche, Xinjiang 842000, China;

4 State Key Lab of Soil Erosion and Dryland Farming for Loess Plateau, Institute of Soil and Water Preservation,

Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Conservancy, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Phreatic evaporation is an important part of water cycle in field. Soil texture is the main factor that influences the water retention and conduction in soil. The relationship between phreatic evaporation, especially the phreatic evaporation of 0m water table and atmospheric evaporation under different soil texture is analyzed. A simple phreatic evaporation formula is put forward, which can be used in field drainage, control and improvement of saline and alkali soil and compensation of ground water.

Key words: phreatic evaporation; atmospheric evaporation; soil texture

(上接第 148 页)

Processing technology of *Eucammia ulmoides* solid beverage

XU Huaide¹, ZHANG Kang-jian², YANG Weng-xin¹, DONG Juan-e²

(1 College of Food Science and Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 College of Forestry, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: *Eucammia ulmoides* solid beverage was made by extract juice of *Eucammia ulmoides* leaves, precipitation, concentration, drying, adding other materials. The results were as following: concentration temperature of *Eucammia ulmoides* precipitated juice was 60℃, concentration temperature of *Eucammia ulmoides* juice was 70℃, functioning composition contents of *Eucammia ulmoides* concentration juice was higher. Vacuum drought *Eucammia ulmoides* powder at 60℃ has Flavonoids content 60.84 mg/mL, Aucubin content 50.34 mg/mL, chlorogenic acid content 70.12 mg/mL. Product ingredients of *Eucammia ulmoides* solid beverage are: *Eucammia ulmoides* powder: sugar and glucose: milk powder: dextrine: group material equal 7:20:16:10:1.4. The product is instant soluble, good and delicious.

Key words: *Eucammia ulmoides* leaves; functioning composition; solid beverage; processing technology