

黄土地区不同埋深条件下潜水蒸发的研究^{*}

黄梦琪¹, 蔡焕杰¹, 黄志辉²

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2 宝鸡峡引渭管理局, 陕西 咸阳 712000)

[摘 要] 为分析黄土地区潜水蒸发的规律, 建立适宜于本地区的数学模型。采用地中渗透仪对自然条件下的潜水蒸发进行了模拟试验, 根据宝鸡峡灌区扶风县段家乡试验场地连续5年的观测资料, 分析了黄土地区不同地下水埋深的蒸发蒸腾规律。结果表明, 潜水蒸发量与埋深呈负相关关系, 潜水蒸发量与埋深关系曲线以埋深1.0 m为界, 埋深小于1.0 m时曲线较陡, 即埋深小于1.0 m时的潜水蒸发量大, 且随埋深的变化较大; 地下水埋深大于1.0 m时, 潜水蒸发量小, 且随埋深变化较小; 裸地和玉米、小麦生育期潜水蒸发的极限埋深分别为4.5、5.3和6.3 m。最后还以5年实测资料为依据建立了潜水蒸发的指数型数学模型。

[关键词] 黄土地区; 地下水埋深; 潜水蒸发; 极限埋深

[中图分类号] S152.7⁺ 3

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)03-0233-05

Research on the evaporation of underground water in different burying depth conditions on the Loess area

HUANG Meng-qí¹, CAI Huan-jie¹, HUANG Zhi-hui²

(1 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Baoji Canyon Administrative Bureau for Weihe River, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract: To establish a proper mathematical model in loess region, we studied the law of underground water evaporation. We utilized Osmoscope to simulate the underground water evaporation in our region under natural conditions. According to the 5 years data of Duanjia hometown in Baoji Gorge, we analyzed the law of evapotranspiration under different underground water levels. And discovered the negative correlation between the underground water level and evaporation. The relationship curve between the amount of evaporation and underground water level was divided by the 1.0 m level; the curve was abrupt less deep than 1.0 m, namely the evaporation changes along with the underground water level, when burying depth was less than 1.0 m, the evaporation changed great, but changed little when the underground water level deep was more than 1.0 m. We also established the mathematical model for calculating the underground water evaporation. When the underground water level of infrequent vegetation land was 4.5 m, there was no evaporation when the underground water deep than 4.5 m. During the growing stages the utmost evaporation depth for maize was 5.3 m for wheat was 6.3 m.

Key words: loess region; underground water level; evaporation of underground water; experience equation

农田潜水蒸发是北方干旱地区土壤盐碱化的主要成因之一。近年来, 国内外学者对土壤潜水蒸发特

* [收稿日期] 2006-07-06

[基金项目] 国家自然科学基金项目(50479051); 教育部高校青年教师奖资助项目(农业部节水理论研究)

[作者简介] 黄梦琪(1976-), 女, 陕西咸阳人, 在读硕士, 主要从事农业节水新技术研究。

[通讯作者] 蔡焕杰(1962-), 男, 河北藁城人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事灌溉排水原理与新技术研究。E-mail: caihj@nwsuaf.edu.cn

性进行了大量研究,并取得一定成果。如郭占荣等^[1]对冬小麦进行了模拟种植试验,分析了地下水埋深对作物耗水量的影响;李艳等^[2]分析了渭干河灌区潜水蒸发随埋深、土质及气象条件的变化规律,并对潜水蒸发量进行了公式拟合;胡建锋^[3]分析了汾河地区不同地下水埋深条件下的农田潜水蒸发现律。已有研究表明,不同埋深地下水对土壤水分分布和农作物产量、水分利用效率等有着不同程度的影响^[4-5]。多年来,研究者应用不同的理论依据,通过室内、田间试验建立了多种潜水蒸发模式^[6-9],但由于研究的理论、方法和条件有限,建立的理论或经验模式还存在一定的局限性或不足之处,到目前尚不能够较准确地反映黄土地区潜水蒸发、降水入渗真实特征的模式供生产应用。

宝鸡峡灌区是关中黄土地区最大的自流灌区,灌溉面积 19.7 万 hm^2 , 1971 年通水灌溉后地下水位急剧上升, 1974 年局部低洼地区出现明水, 1983 年明水面积达 0.187 万 hm^2 。直至 1996 年,地下水位平均上升了 15.21 m, 年均 0.89 m, 最大年上升 1.29 m, 地下潜水位上升使农田生态环境恶化,引起土壤盐碱化和沼泽化现象。为了解决宝鸡峡灌区的用水供需矛盾、控制土壤盐碱化的进一步发展,宝鸡峡灌区采用地中渗透仪对自然条件下的潜水蒸发、降水入渗、人工灌水入渗进行了模拟试验,测定了不同埋深常水位下潜水蒸发和大气降水、人工灌溉入渗补给量的关系,观测了蒸发、入渗过程及其特征,获得了十分丰富的资料。本研究以宝鸡峡灌区 1996~2001 年 5 年的实测资料为依据,分析了不同地下水埋深条件下的潜水蒸发现律,建立了适宜于本地区的潜水蒸发数学模型,以期宝鸡峡灌区和黄土地区地下水资源评价、排水及地下水的开发利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区基本情况

试验场地位于宝鸡峡灌区上游扶风县段家乡小寨村。本地区年平均降水量 599.4 mm, 年水面蒸发量(200 mm 蒸发器) 1 203.25 mm, 年平均气温为 -14.0~38.7 $^{\circ}\text{C}$, 年均日照 2 136.5 h。土壤质地为中壤土, 平均容重为 1.41 g/cm^3 , 空隙率 46.9%, 田间持水率 23.2%, 毛管水上升高度为 1.75 m。

1.2 试验方法

按地下水埋深设 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 5.0 和 6.0 m 共 10 个水平, 每个水平有

作物(小麦、玉米)和无作物(裸地)2 种处理进行观测。

观测室为东西走向面积为 40 m^2 的钢筋混凝土地下室, 10 个处理分两组均按 0.5~6.0 m 深度从东向西分别将测筒埋设在地下室南北两侧, 测筒面积为 1 m^2 , 每个测筒内都设有水分探测仪导管和负压计, 室内安装有蒸渗仪, 该仪器的精度较马利奥特瓶的精度高 5 倍。主要观测项目有温度、降雨量、灌水量、土壤含水量等。各观测指标于每日 8:00 和 12:00 各观测 1 次, 降水或灌水时加测。

2 结果与分析

2.1 地下水埋深对潜水蒸发的影响

地下水埋深对潜水蒸发的影响, 主要通过地下水位深浅对水面以上土壤含水量的分布起作用来实现的。土壤含水量的分布一般可以分为两个区域, 其一为毛管水活动区, 靠近潜水面; 其二是含水量不稳定区, 靠近地表。当地下水埋深较浅时, 整个土壤层均处于毛管水活动区内, 毛管水相互联系, 能以液态水的形式向土壤表面运移, 因此潜水蒸发较大。当地下水埋深较大时, 土壤层下部处于毛管水活动区内, 上部处于含水量不稳定区, 毛管水不能连通, 水分不能以液态形式向上运移或运移的数量很少, 因而潜水蒸发量很小^[10]。从图 1, 2 可以看出, 潜水蒸发量与埋深关系曲线以 1.0 m 为界, 小于 1.0 m 时曲线较陡, 即地下水埋深小于 1.0 m 时的蒸发量大, 且随埋深变化较大; 地下水埋深大于 1.0 m 时, 蒸发量小, 且随埋深变化较小。对裸地而言, 当地下水埋深为 3.0 m 时潜水蒸发量趋近于零, 大于 3.0 m 时基本不发生潜水蒸发; 对有作物地, 地下水埋深小于 5.0 m 时潜水蒸发量变化很小, 埋深达 6.0 m 时的潜水蒸发量趋近于零。

2.2 气温变化对潜水蒸发的影响

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 3 可见, 有作物的潜水蒸发量和裸地的潜水蒸发量均随气温的升高而增大。但当地下水埋深为 1.0 m 时, 裸地潜水蒸发量随气温的变化相对不太明显; 有作物耕地的潜水蒸发量随作物生长状态的变化而变化, 如 10~12 月气温低且属于小麦生长初期, 叶面积小, 覆盖率低, 有作物耕地和裸地的潜水蒸发量基本相同; 3~6 月属于小麦生长期, 随着气温的升高, 两者潜水蒸发量相差很大; 7 月气温最

高,属于玉米生长初期且进行了灌水,有作物耕地和裸地处理的潜水蒸发量基本相同。由图4可见,当地下水埋深为0.5 m时,有作物地和裸地的潜水蒸发

量较大且变化也较大,其原因是地下水埋深很浅,潜水蒸发量受气温变化的影响较大所致。

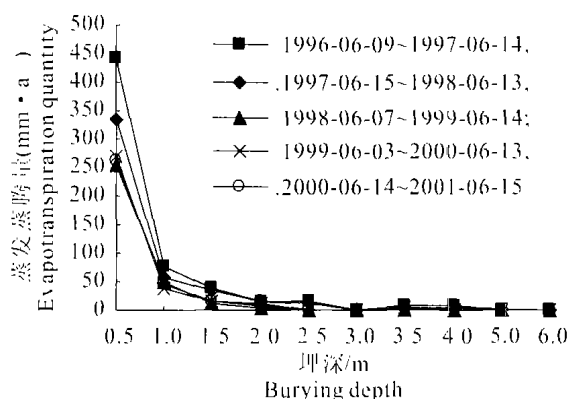


图1 不同埋深条件下裸地的潜水蒸发动态(1996~2001年)

Fig 1 Dynamic changes of evaporation of infrequent vegetation land in different underground water level (1996-2001)

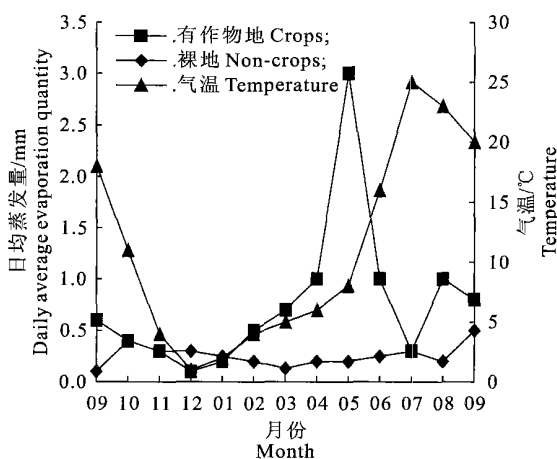


图3 地下水埋深为1.0 m时各月日均蒸发量的变化动态(1996-09~1997-09)

Fig 3 Dynamic changes of month-to-month evaporation when the underground water level was 1.0 m (1996-09-1997-09)

2.3 降、灌水对入渗补给的影响

通过5年的试验观测发现,埋深为0~6.0 m的地下水都获得了降、灌水的入渗补给量。从总体上看,年内入渗量主要发生在6月份以后。有作物耕地的降、灌水入渗量一般降年份为304~356 mm;涝年为336~568 mm;干旱年份为0.3~312.5 mm。裸地地下水埋深为0~1.0 m时,入渗量随埋深增大而减小,埋深为1.0~4.0 m时,入渗量基本

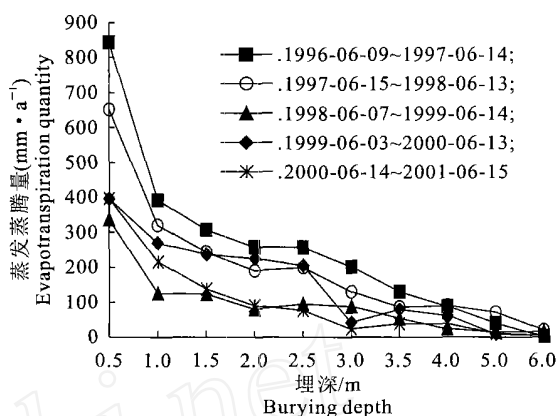


图2 不同埋深条件下有作物耕地的潜水蒸发动态(1996~2001年)

Fig 2 Dynamic changes of evaporation of vegetation land in different underground water level (1996-2001)

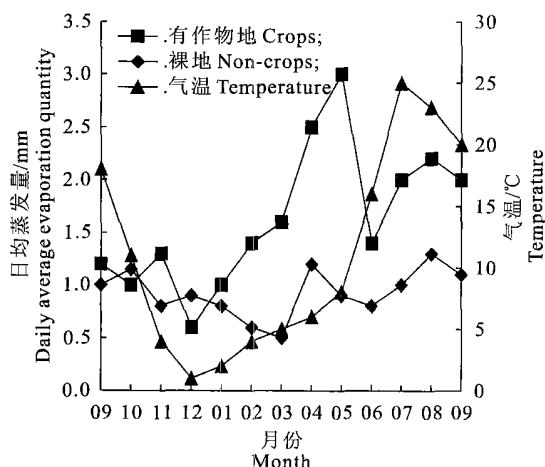


图4 地下水埋深为0.5 m时各月日均蒸发量的变化动态(1996-09~1997-09)

Fig 4 Dynamic changes of month-to-month evaporation when the underground water level was 0.5 m (1996-09-1997-09)

相同;地下水埋深大于5.0 m时入渗量虽有递减但与4.0 m埋深时的入渗量较为接近。有作物覆盖的耕地因人工灌水而使其入渗补给量较裸地大;在干旱和特别干旱的年份,地下水埋深大于6.0 m时基本无补给。

2.4 潜水蒸发的极限深度

潜水蒸发的极限深度是指有蒸发现象的潜水最大埋藏深度,即蒸发量为零时的潜水位埋深。由于土

壤具有渗透性,故土壤水分垂向上的运动主要表现为重力式和毛细管水式运动,其渗透量较小;随着地下水埋深的加大,渗透距离增加,水势梯度逐渐减小,渗透量逐渐减小到只在理论上存在而实际无法观测的程度。从实际出发,把观测不到蒸发量的地下水埋深视为无蒸发现象的潜水埋藏深度,即潜水蒸发的极限深度。通过对 5 年观测资料的分析,无蒸发现象的潜水是存在的,且在埋深上存在一定区间。由图 1,2 可以看出,裸地的潜水蒸发极限为 4.5 m;有作物耕地的潜水蒸发区间较裸地大,玉米生育期的潜水蒸发为 0~5.0 m,其极限埋深为 5.3 m;小麦生育期的潜水蒸发为 0~6.0 m,其极限埋深为 6.3 m。

2.5 黄土地区潜水蒸发数学模型的建立

2.5.1 现有潜水蒸发模型的比较 国内外学者对土壤潜水蒸发特性的研究,不论是在潜水蒸发的理论分析方面还是在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地下水埋深之间的关系^[11]。目前常用的主要潜水蒸发公式有:

(1) 阿维里扬诺夫^[5]的抛物线型公式,即:

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

式中: E 为潜水蒸发强度(mm·d), E_0 为地下水埋深为 0 时的潜水蒸发强度(mm·d), H 为地下水埋深(m), $H_{\max}$ 为潜水蒸发强度为 0 时的地下水埋深(m), n 为经验常数。

(2) 叶水庭^[12]的指数型公式:

$$E = E_0 e^{-aH} \quad (2)$$

式中: a 为经验常数。

(3) 沈立昌、张朝新等^[13]的双曲线型公式:

$$E = k_u E_0 / (H + 1)^b \quad (3)$$

式中: k_u 为与土质有关的潜水蒸发经验系数, b 为经验常数。

(4) 雷志栋等^[8]提出的既考虑土壤输水特性又考虑表土蒸发的经验公式:

$$E = E_{\max}(1 - e^{\eta E_0/E_{\max}}) \quad (4)$$

式中: $E_{\max}$ 为地下水埋深为 H 时的潜水极限蒸发强度(mm·d); η 为经验常数,其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,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。同时,公式中均包含了地下水埋深为 0 时的潜水蒸发强度 E_0 ,并认为 E_0 可近似用大气蒸发强度来代替^[14]。

公式(1)、(2)、(3)均表明,潜水蒸发系数与地下水埋深呈单一的相关关系,与蒸发能力无关,这类公式的潜水蒸发系数均随埋深的增加按照各自不同的线形递减。实际上,潜水蒸发系数与埋深关系还随蒸发力的不同而变化,一般系数随地表蒸发系数 K (埋深为 0 时的潜水蒸发强度与大气蒸发强度的比值)的增加而减小,但这些公式并未反映出这一规律,因此这类公式还有一定的局限性。

公式(4)基于非饱和土壤水稳定流体理论,分析了潜水蒸发与水面蒸发及地下水埋深的关系,通过假设 $\eta = aE_0 = dE/dE_0$ 的经验关系,得出 $E = f(E_0, E_{\max})$ 的经验公式。针对公式中的 η 值,作者通过野外资料分析建议取 $\eta = 0.85$,即潜水蒸发强度随大气蒸发能力的变化速率满足指数函数关系。但实际上,对应不同的埋深, η 应该是一个变量。当 $E_0 = 0$ 时, $dE/dE_0 = \eta$ 即 η 值是 $E_0 \rightarrow 0$ 时 $E - E_0$ 曲线上的斜率;当 $H = 0$ 时, $\eta = 1$;当 $H \rightarrow \infty$ 时, $\eta = 0$,所以 η 值应是随埋深增加而减小的变量,而不应为一固定的经验常数。

2.5.2 黄土地区潜水蒸发模型的建立 在陕西关中黄土地区,一般年份种植的作物为小麦-玉米,裸地的面积很小,故按有作物耕地建立模型。通过连续 5 年实测资料的统计分析,建立的关中黄土地区潜水蒸发数学模型为:

$$E_p = a/e^{bH} \quad (5)$$

式中: E_p 为潜水蒸发量, a 、 b 为经验常数, H 为地下水埋深。

利用实测资料分析推求 a 、 b 值,可得裸地: $a = 388.4$, $b = 1.59$;有作物耕地: $a = 713.8$, $b = 0.67$ 。将作物分为小麦季和玉米季时,小麦季: $a = 405.8$, $b = 0.631$;玉米季: $a = 319.8$, $b = 0.757$ 。

3 结论与讨论

通过对宝鸡峡引渭灌区扶风县段家乡试验场地 1996~2001 年潜水蒸发及水面蒸发资料的系统分析,可以得出以下结论:

(1) 潜水蒸发量的大小随地下水埋深的变化而变化。潜水蒸发量与埋深呈负相关关系,即埋深愈小,蒸发量愈大;埋深愈大,蒸发量愈小;当地下水埋深为 1.0 m 时,潜水蒸发量为零;大于这个埋深不发生蒸发。裸地潜水蒸发量的大小与大气蒸发能力、土壤质地、地下水埋深等因素有关,经分析得到了该地的潜水极限埋深,即裸地为 4.5 m,玉米生育期为 5.3 m,小麦生育期为 6.3 m。

(2)在地下水埋深较浅时,潜水蒸发量与气候条件关系密切,其随气温的升高而增大;地下水埋深较大时,潜水蒸发量主要受土壤质地和作物根系输水能力的影响。另外降雨、灌水均能增加土壤含水量,使潜水蒸发量减小。

(3)为提高地下水利用率,获得作物高产,建议在无灌溉条件下,关中黄土地区小麦地下水调控范围宜为1.0~2.5 m,适宜埋深为2.5 m;玉米地下水调控范围宜为1.0~2.0 m,适宜埋深为2.0 m。

(4)一般年份下,宝鸡峡引渭灌区和关中黄土地区的潜水蒸发量可按公式(6)求得,但关于经验公式的精确性还有待于进一步验证。

[参考文献]

- [1] 郭占荣,荆恩春,聂振龙.不同潜埋深条件下蒸发蒸腾试验研究[J].勘察科学技术,2001(5):28-29
- [2] 李艳,胡顺军,宋郁东.渭干河灌区潜水蒸发规律实验分析[J].干旱区资源与环境,2004,18(3):37-44
- [3] 胡建锋.不同地下水埋深条件下农田潜水蒸发规律[J].山西水利科技,2005(4):24-25
- [4] Hide J C. Observation on factors influencing the evaporation of soil moisture[J]. Soil Sci Soc Amer Proc, 1954(18): 234-239
- [5] 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]. 北京:中国工业出版社,1985
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 雷志栋,扬诗秀,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
- [9] 杨建峰,李宝庆,李运生,等.浅地下水埋深区潜水对SPAC系统作用初步研究[J].水利学报,1999(7):27-31
- [10] 王晓赞.农作物有效潜水蒸发试验研究[J].徐州师范大学学报,1999,17(1):60-63
- [11] 胡顺军,宋郁东,田长彦,等.潜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[J].农业工程学报,2005,21(1):80-83
- [12] 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,1982(4):46-48
- [13] 沈立昌.利用长期观测资料分析地下水资源的几个问题[J].水文(水资源专集),1982(增刊):24-26
- [14] 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