

常用潜水蒸发经验公式在新疆地区适用性研究

付秋萍^{1,2,3}, 张江辉^{2,4}, 王全九^{1,2*}

(1. 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 杨凌 712100;

2. 西安理工大学, 陕西 西安 710048; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

4. 新疆水利水电科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830049)

摘 要: 在新疆等蒸发强烈干旱地区, 潜水蒸发不仅关系到土壤水分损失, 还直接涉及土壤的盐碱化问题, 精确计算潜水蒸发量对排水计算和防治土壤盐碱化均有重要意义。目前常利用经验公式计算潜水蒸发量, 包括阿维里扬诺夫公式、清华雷氏公式、叶水庭公式以及幂函数公式。本文利用新疆昌吉站和渭干河站潜水蒸发实测资料对上述四种经验公式进行分析, 寻求阿氏公式中潜水停止蒸发深度与清华公式中潜水极限蒸发强度 $E_{\max}$ 和参数 η 的简单计算方法, 探讨各公式在计算新疆典型区潜水蒸发量的准确性。结果表明, 用清华公式拟合实测潜水蒸发与水面蒸发精度较高, $E_{\max}$ 和参数 η 与潜水平埋深呈较好的指数关系。在新疆地区清华公式有广泛的通用性, 在潜水平埋深较浅时, 阿氏公式、叶氏公式和幂函数公式拟合精度相对较高, 但当潜水平埋深较大时拟合较差。幂函数公式拟合值与实测值相差最大。阿氏公式、叶氏公式和幂函数公式对于壤土类拟合精度较粗质土高。

关键词: 潜水蒸发; 经验公式; 潜水停止蒸发深度; 潜水极限蒸发强度; 新疆地区

中图分类号: P332.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2008)03-0182-07

土壤退化已成为人类所面临的重大威胁, 盐碱地和土壤次生盐碱化是人类面临的一个世界性生态环境问题^[1]。在新疆等干旱地区, 降雨稀少, 蒸发强烈, 土壤盐碱化严重, 目前, 新疆盐碱类型的低产田达 113.3 万 hm^2 , 约占总耕地面积的三分之一。因此, 防治土壤盐碱化是关系到农业生产发展的重要因素, 而减少潜水蒸发是防止盐渍化的重要措施之一。在灌区常采用农田排水方法防治和改良次生盐碱化土壤, 在排水系统设计中需要确定适宜的地下水临界深度, 以及考虑有蒸发条件下合理地确定排水沟深和间距等参数, 这些参数的确定与潜水蒸发特征密切相关。此外, 在水文地质及水资源开发利用方面, 依靠潜水蒸发来分析计算给水度以及进行水量平衡计算。因此, 对新疆等干旱地区的潜水蒸发问题进行研究显得尤为重要。

国内外对潜水蒸发问题的研究主要有两种途径, 一种是根据土壤水动力学原理, 将潜水蒸发能力看作是在大气蒸发作用下的一个非饱和土壤水运动问题, 来进行理论分析求解; 另一种是根据室内或现场试验, 通过对实测资料的整理分析, 找出潜水蒸发的规律, 并建立相应的经验公式。以上两种方法目前均已取得不少成果, 但在生产实践中, 目前应用较多的仍以经验公式为主, 原因主要在于公式简单, 计

算方便, 在合理选定系数情况下能够正确反映某一特定条件下的潜水蒸发客观规律, 因而具有一定的实际意义。潜水蒸发经验公式很多, 但目前应用较为广泛的主要是阿维里扬诺夫公式^[2]和清华大学雷志栋公式^[3]。此外, 叶水庭指数型经验公式^[4]以及根据不同地区拟合的幂函数经验公式^[5,6]也在一定范围内使用。阿维里扬诺夫经验公式中关于潜水停止蒸发深度的确定, 一般都采用趋势延长法, 通过经验确定^[5,6], 这种求解方法有一定的人为因素, 必然对计算结果产生影响, 需寻求更加合理的确定方法。同时, 清华公式虽然精度高、结构较完整, 但一直由于其公式结构复杂, 参数多不易准确得到而在使用中受到限制。需探求一种确定其参数的简单方法。各种经验公式虽能拟合已有的实测资料, 但大多带有地域性, 外延和移用都存在不少问题。因此, 需要根据某一地区实测资料, 对潜水蒸发经验公式在该地区的应用进行分析研究。

本文选用位于新疆北疆的昌吉潜水平衡观测实验站(简称昌吉站)和位于南疆的渭干河灌区地下水均衡试验场(简称渭干河站)实测潜水蒸发数据, 探讨潜水停止蒸发深度以及清华公式中参数的确定方法, 并就上述四种经验公式在新疆地区的适用性进行分析, 为阿氏公式、清华公式的计算以及潜水蒸发

收稿日期: 2007-11-03

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目(2004109); 国家自然科学基金项目(50579062); 国家 863 计划项目(2006AA100207)

作者简介: 付秋萍(1980—), 女, 新疆奇台人, 博士研究生, 主要从事农业水土工程方面研究工作。E-mail: caufuqiuping@126.com.

通讯作者: 王全九(1964—), 男, 教授, 博导, 内蒙人, 主要从事农业水土工程方面研究工作。E-mail: wquanjiu@163.com.

经验公式在新疆地区的应用提供参考。

1 基本公式

目前通常计算潜水蒸发量的公式有以下几种:
1) 阿维里扬诺夫的抛物线型公式。

原苏联学者阿维里扬诺夫(1956 年)提出了计算潜水蒸发量的经验公式:

$$E = E_0 \left[1 - \frac{H}{H_{\max}} \right]^n \tag{1}$$

式中, E_0 为水面蒸发强度(或潜水埋深 H 为零时的蒸发强度); H 为潜水埋深; $H_{\max}$ 为潜水停止蒸发深度(也称地下水极限蒸发深度); n 为与土壤质地和植被情况有关的经验常数,一般为 $1 \sim 3$ 。公式认为潜水蒸发量是埋深的幂函数。经验公式(1) 被国内学者广泛应用于实际生产中,特别是在考虑蒸发影响下排水计算式中,基本上都引入此式来计算。该经验公式中所包含的参数通常采用经验的方法确定 $H_{\max}$,然后将公式线性化,通过线性回归方程确定指数 n ^[7,8]。

2) 清华大学雷氏公式。
雷志栋(1984 年) 等根据近代土壤水动力学的研究成果,提出了潜水蒸发的经验公式为:

$$E = E_{\max} (1 - e^{-\eta E_0 / E_{\max}}) \tag{2}$$

式中, η 为经验常数,与土质及地下水位埋深有关; $E_{\max}$ 为潜水埋深为 H 条件下的潜水极限蒸发强度, $E_{\max} = AH^{-m}$,其中 A, m 为随土壤而异的参数。该式既考虑了土壤输水特性,又考虑了表土蒸发,从非饱和土壤水稳定流理论分析了潜水蒸发与水面蒸发、潜水埋深的关系。该式结构较完整,拟合精度高,具有广泛的通用性。在考虑蒸发影响下的排水计算中也逐渐引用此式。唐海行等(1989 年) 给了 η 值的经验表达式^[9]:

$$\eta = e^{-\left(\frac{1}{E_{\max}} \right)^{\beta}} \tag{3}$$

3) 叶水庭指数型公式。
叶水庭等(1977 年) 根据实测资料提出了潜水蒸发指数型公式:

$$E = \mu \Delta h = E_0 e^{-\alpha H} \tag{4}$$

式中, α 为衰减系数; Δh 为计算时段内潜水位变幅; μ 为潜水变幅带土壤给水度。该式认为潜水蒸发系数与潜水埋深呈单一指数关系,与蒸发能力无关。衰减系数 α 通过拟合求得。

4) 幂函数公式。
在对大量实测潜水蒸发资料的分析拟合中,幂函数也具有一定的适用性。其公式为:

$$C = \frac{E}{E_0} = \alpha H^{-b} \tag{5}$$

式中, E_0 为水面蒸发强度(或潜水埋深 H 为零时的蒸发强度); H 为潜水埋深; α, b 为经验常数,可通过对实测资料的拟合求得。

2 结果与分析

为了分析阿氏公式中潜水停止蒸发深度、寻求清华公式中潜水极限蒸发强度和参数 η 的简单求解方法,以及上述经验公式在新疆地区的适用性,本文选取两个具有代表性的试验站长期观测资料,即水利厅昌吉潜水均衡观测试验站(简称昌吉站)和渭干河流域地下水均衡观测试验站(简称渭干河站)。昌吉站的建立主要针对天山北麓准葛尔南缘一带的条件设置的,渭干河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,这两个站基本代表了北疆和南疆情况。具体各站情况及观测过程详见文献^[10,11]。昌吉站试验土样选用了六种,其中四种是从昌吉、石河子、精河、奇台四个县当地采集的代表性土样;另两种是粗颗粒试样,一组为粗砂,一组为砾石。昌吉、石河子、精河为层状土,本文选用粉壤土(奇台土样)、粗砂和砾石。渭干河站试验土样选用了六种南疆地区具有代表性的土壤,即砂壤土、轻壤土、中壤土、重壤土、细砂和砾石。

2.1 经验公式所包含的参数确定

2.1.1 潜水停止蒸发深度 在大多数情况下,当潜水埋深大于某一值后,各种土壤的蒸发量趋近于零,这一埋深称为潜水停止蒸发深度或极限埋深。潜水停止蒸发深度与土壤、气候等有较为密切的关系。在阿维里扬诺夫经验公式中,即包含了潜水停止蒸发深度 $H_{\max}$ 。因此,利用阿维里扬诺夫公式分析潜水蒸发须先确定 $H_{\max}$ 。图 1 为昌吉站 1986 年和渭干河站 1994 年潜水蒸发强度与地下水埋深的关系。由图可知,无论何种土质,潜水蒸发强度均随地下水埋深的增加而减少,随着地下水埋深的增加,减小速率变慢。潜水蒸发强度与地下水埋深存在明显的函数关系。用指数函数对其进行拟合,结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出,相关系数均在 0.96 以上,说明潜水蒸发强度与地下水埋深存在良好的指数关系。同时,当潜水埋深为无穷大时,才有蒸发量等于零的极限埋深。根据相关原理,过多的外延埋深数据会得出荒谬的结果^[12]。对该指数函数模型求导,当 dE/dH 为 0.1,即潜水埋深每减小 1 m,潜水蒸

发强度变化 0.1 mm/d, 可认为潜水蒸发强度基本上不随潜水埋深变化, 即潜水蒸发强度达到最小值, 此时的地下水埋深即可看作为潜水停止蒸发深度。根据上述方法求得的潜水停止蒸发深度如表 1 所示。为进一步说明上述方法求得的地下水埋深可看作潜水停止蒸发深度, 将其相应的潜水蒸发强度也

列于表 1 中。由表 1 可以看出, 除重壤土和中壤土外, 其余均小于 0.1 mm/d。该埋深下各土质的潜水蒸发强度已很小, 在实际生产中可忽略不计。因此, 可以把上述方法确定的地下水埋深看作潜水停止蒸发深度。

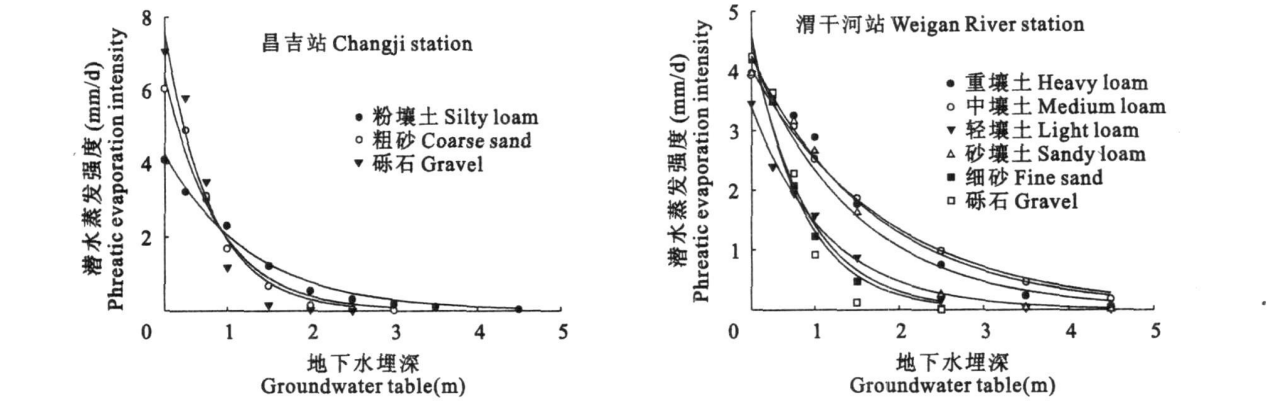


图 1 不同土质下潜水蒸发强度与地下水埋深的关系

Fig. 1 Relationship between phreatic evaporation and groundwater depth under different soils

表 1 潜水蒸发强度与地下水埋深关系模型参数及潜水停止蒸发深度

Table 1 Phreatic limit evaporation depths and the equation parameters of phreatic evaporation and groundwater table		$E = ae^{-bH}$			停止蒸发深度(m) Phreatic limit evaporation depth	潜水蒸发强度 Phreatic evaporation intensity (mm/d)
土质 Soil texture		a	b	R^2		
昌吉站 Changji station	粉壤土 Silty loam	6.51	1.20	0.993	3.63	0.08
	粗砂 Coarse sand	16.84	2.42	0.999	2.48	0.04
	砾石 Gravel	33.74	3.64	0.998	1.95	0.03
渭干河站 Weigan River station	重壤土 Heavy loam	6.76	1.00	0.993	4.21	0.10
	中壤土 Medium loam	5.19	0.72	0.999	5.03	0.14
	轻壤土 Light loam	6.40	1.54	0.998	2.98	0.07
	砂壤土 Sandy loam	10.46	1.63	0.991	3.15	0.06
	细砂 Fine sand	11.78	2.44	0.966	2.32	0.04
	砾石 Gravel	24.01	3.74	0.974	1.82	0.03

2.1.2 潜水极限蒸发强度 当地下水埋深一定时, 稳定蒸发强度将随地表处土壤水吸力的增大而增加。但地表处土壤水吸力增加又会使导水率降低, 故随着土壤水吸力的增大, 稳定蒸发强度增加的速率不断减弱。当地表处含水量比较小, 即地表处土壤水吸力梯度很大, 稳定蒸发强度将达到最大可能值, 即潜水极限蒸发强度。不同土质和地下水埋深下潜水极限蒸发强度不同。在清华公式中既包含潜水极限蒸发强度 $E_{\max}$, 要对清华公式进行求解, 需首先确定 $E_{\max}$ 。

在清华公式 $E = E_{\max}(1 - e^{-\eta E_0/E_{\max}})$ 中, 当土壤质地和潜水埋深一定时, 潜水蒸发强度 E 是大气

蒸发能力 E_0 的函数, 而 $E_{\max}$ 与 η 为两个参数。因此可以根据该函数关系对潜水蒸发强度 and 水面蒸发强度实测资料进行拟合求解, 即可得出该土质下某一埋深时的潜水停止蒸发深度 $E_{\max}$ 与 η 的值。现以渭干河站 1994 年中壤土为例进行分析。将潜水蒸发强度与水面蒸发强度实测资料以埋深为参数点绘于图 2。从图中可以看出, 在一定埋深下, 当水面蒸发强度较小时, 潜水蒸发强度随着水面蒸发强度的增加而逐渐增大, 但当水面蒸发强度增加到某一值时, 潜水蒸发强度将稳定于某一最大值。用清华公式对其进行拟合, 拟合结果如表 2 所示。

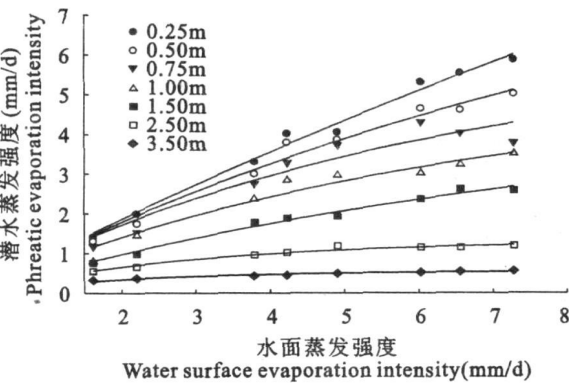


图 2 中壤土潜水蒸发强度与水面蒸发强度关系
Fig.2 Relationship between phreatic evaporation and water surface evaporation of medium loam

表 2 清华公式对中壤土潜水蒸发与水面蒸发拟合所得 $E_{\max}$ 、参数 η 及相关系数
Table 2 The correlation coefficient, $E_{\max}$ and η

of fit to relationship phreatic evaporation and water surface evaporation by Lei equation in medium loam

潜水埋深(m) Groundwater depth	$E = E_{\max}(1 - e^{-\eta E_0 / E_{\max}})$		
	$E_{\max}(\text{mm/d})$	η	R^2
0.25	20.710	0.973	0.989
0.50	9.996	0.982	0.977
0.75	6.194	1.001	0.917
1.00	5.143	0.816	0.950
1.50	4.691	0.545	0.982
2.50	1.315	0.456	0.963
3.50	0.550	0.262	0.940

由表 2 可以看出,相关系数均在 0.9 以上,说明清华公式对潜水蒸发和水面蒸发关系拟合较好。同时,通过拟合直接求出了潜水极限蒸发强度 $E_{\max}$ 与 η 的值。

表 3 潜水极限蒸发强度、参数 η 与地下水埋深关系

Table 3 Relationship between phreatic limit evaporation intensity and groundwater depth, η and groundwater depth

土质 Soil texture		$E_{\max} = ae^{-bH}$			$\eta = ae^{-bH}$		
		a	b	R^2	a	b	R^2
昌吉站 Changji station	粉壤土 Silty loam	19.91	1.32	0.939	1.08	1.16	0.928
	粗砂 Coarse sand	44.13	2.82	0.984	1.27	1.00	0.964
	砾石 Gravel	97.65	4.16	0.985	2.67	2.33	0.921
渭干河站 Weigan River station	重壤土 Heavy loam	43.34	1.48	0.991	1.19	0.53	0.937
	中壤土 Medium loam	17.89	1.02	0.961	1.19	0.42	0.959
	轻壤土 Light loam	16.91	1.81	0.926	1.06	0.64	0.962
	砂壤土 Sandy loam	26.36	1.73	0.967	1.28	0.52	0.960
	细砂 Fine sand	40.40	3.07	0.964	1.49	0.85	0.858
	砾石 Gravel	131.64	4.60	0.978	2.21	1.82	0.889

由于每种土质下各个埋深均对应一个潜水极限蒸发强度 $E_{\max}$ 和 η 的值,这对实际应用产生影响。为了寻求潜水极限蒸发强度 $E_{\max}$ 、 η 与潜水埋深的关系,把 $E_{\max}$ 、 η 与潜水埋深数据分别点绘于图 3、图 4 中。由图 3、图 4 可知, $E_{\max}$ 与 η 和潜水埋深均成良好的指数关系,相关系数在 0.95 以上。因此,可以根据 $E_{\max}$ 、 η 与潜水埋深的关系分别确定各土质下的 $E_{\max}$ 和 η 的值,其余土质 $E_{\max}$ 、 η 与潜水埋深的函数模型见表 3。

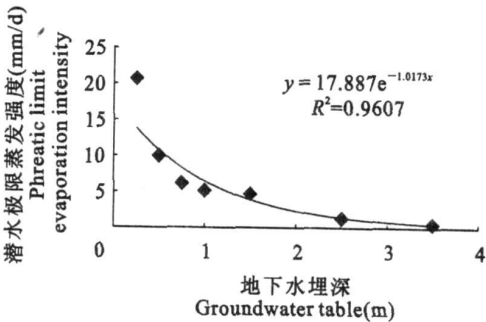


图 3 潜水极限蒸发强度与地下水埋深关系
Fig.3 Relationship between phreatic limit evaporation intensity and groundwater table

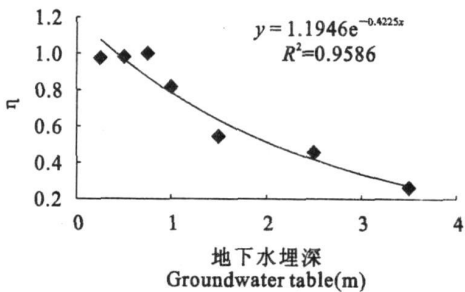


图 4 清华公式参数 η 与地下水埋深关系
Fig.4 Relationship between η and groundwater table

2.1.3 阿维里扬诺夫公式、叶氏公式与幂函数公式中参数的确定 通过对昌吉站和渭干河站的实测潜水蒸发资料分析,分别用阿维里扬诺夫公式、叶氏公式与幂函数公式对实测资料进行处理,得出不同土质下最优 $C \sim H$ 关系式。处理结果如表 4 所示。

从表中可以看出,总体而言,幂函数相关系数较小,拟合较差。阿氏公式与叶氏拟合相对较好。对于壤土类,阿氏公式和叶氏公式拟合较好,除昌吉站粉壤土外,相关系数均在 0.9 以上。幂函数公式对细砂、粗砂和砾石拟合相对较好。

表 4 阿氏公式、叶氏公式与幂函数公式对 $C \sim H$ 关系的拟合
Table 4 The regression of $C \sim H$ relationship with Averiyarov equation, ye equation and power equation

土质 Soil texture		$C = \left(1 - \frac{H}{H_{\max}}\right)^n$		$C = e^{-\alpha H}$		$C = aH^{-b}$		
		n	R^2	α	R^2	a	b	R^2
昌吉 Changji	粉壤土 Silty loam	5.04	0.842	1.55	0.912	0.21	0.75	0.846
	粗砂 Coarse sand	2.62	0.886	1.33	0.965	0.23	0.94	0.875
	砾石 Gravel	1.75	0.811	1.24	0.81	0.24	1.01	0.84
渭干河 Weigan River	重壤土 Heavy loam	1.96	0.992	0.60	0.970	0.46	0.57	0.798
	中壤土 Medium loam	2.49	0.991	0.60	0.996	0.45	0.55	0.853
	轻壤土 Light loam	2.89	0.965	1.16	0.994	0.27	0.79	0.919
	砂壤土 Sandy loam	1.55	0.993	0.68	0.955	0.42	0.63	0.793
	细砂 Fine sand	1.84	0.809	1.03	0.821	0.31	0.84	0.856
	砾石 Gravel	1.32	0.836	1.08	0.839	0.29	0.90	0.882

注: R^2 为相关系数。 Note: R^2 means correlation coefficient.

2.2 相对误差分析

为了对比分析上述四种常用潜水蒸发经验公式在新疆地区的适用性,现将昌吉站和渭干河站各土质潜埋深分别为 0.5 m 和 2.5 m 时的实测值、计算值及相对误差列于表 5。

从表中可以看出,对昌吉站和渭干河站各土质来说,不同土质土壤潜水蒸发实测值与各种经验公式拟合结果各有不同。清华公式潜水蒸发强度计算值与实测值较吻合,相对误差在 0~20% 之间,说明清华公式在新疆地区具有广泛的通用性。在潜埋深较浅时,阿氏公式拟合精度相对较高,但当潜埋深较大时拟合较差。叶氏公式和幂函数在潜埋深较小时拟合精度也相对较高,在埋深 2.5 m 时潜水蒸发强度计算值与实测值相差较大,幂函数公式拟合值与实测值相差最大。阿氏公式、叶氏公式和幂函数公式对于壤土类拟合精度较粗质土高。因此,在新疆地区计算潜水蒸发量时,应优先考虑选用清华公式,在潜埋深较浅时,也可以选用阿氏公式、叶氏公式和幂函数公式,但当埋深较大时,选用这三种公式计算则会产生较大误差。

3 结 论

本文选用位于新疆北疆的昌吉潜水均衡观测实验站(简称昌吉站)和南疆的渭干河灌区地下水均衡试验场(简称渭干河站)实测潜水蒸发数据,寻求阿

氏公式中潜水停止蒸发深度与清华公式中潜水极限蒸发强度 $E_{\max}$ 和参数 η 的简单确定方法,就四种常用的潜水蒸发经验公式:阿维里扬诺夫经验公式、清华大学雷志栋公式、叶氏公式以及幂函数公式在新疆地区的适用性进行分析。结果表明:关于潜水停止蒸发深度的确定,本文方法具有可行性, dE/dH 的值可根据各地的情况及标准选取。清华公式适用性强,计算精度高,但一直由于其参数多,不易确定在使用中受到限制,本文根据实测潜水蒸发数据确定的求解模型简单易行,拟合精度高,可为清华公式的推广应用提供一定的参考。通过对各土质相对误差的分析可知,清华大学雷氏公式在新疆地区具有广泛的通用性。在潜埋深较浅时,阿氏公式拟合精度相对较高,但当潜埋深较大时拟合较差。叶氏公式和幂函数在潜埋深较小时拟合精度也相对较高,在埋深 2.5 m 时潜水蒸发强度计算值与实测值相差较大,幂函数公式拟合值与实测值相差最大。阿氏公式、叶氏公式和幂函数公式对于壤土类拟合精度较粗质土高。因此,在新疆地区计算潜水蒸发量时,应优先考虑选用清华公式,其它经验公式对不同土质也可在实际生产中使用,但都有各自的应用范围和使用限制条件。在实际生产中选用时,应根据当地的自然、气候等特点适当确定经验公式的类型和经验系数。否则,盲目地使用经验公式计算潜水蒸发可能与实际情况有较大的偏差。

表 5 潜水蒸发实测值与各经验公式计算值的对比结果

Table 5 Results comparison of phreatic evaporation measured values and calculated values by the four formulae

土质 Soil texture			清华公式 Tsinghua equation		阿氏公式 Averiyarov equation		叶氏公式 Ye equation		幂函数公式 Power function	
			0.5 m	2.5 m	0.5 m	2.5 m	0.5 m	2.5 m	0.5 m	2.5 m
昌吉 Changji	粉壤土 Silty loam	实测值 Measured values	0.40	0.04	0.40	0.04	0.40	0.04	0.40	0.04
		计算值 Calculated values	0.48	0.04	0.47	0.00	0.46	0.02	0.26	0.09
		相对误差 Relative error	−20.0	0.0	−17.5	100.0	−15.0	50.0	35.0	−129.0
	粗砂 Coarse sand	实测值 Measured values	0.61	—	0.61	—	0.61	—	0.61	—
		计算值 Calculated values	0.59	—	0.55	—	0.51	—	0.44	—
		相对误差 Relative error	3.28	—	10.98	—	16.39	—	27.87	—
	砾石 Gravel	实测值 Measured values	0.72	—	0.72	—	0.72	—	0.72	—
		计算值 Calculated values	0.64	—	0.60	—	0.74	—	0.48	—
		相对误差 Relative error	11.11	—	16.67	—	−3.85	—	33.33	—
渭干河 Weigan River	重壤土 Heavy loam	实测值 Measured values	0.78	0.16	0.78	0.16	0.78	0.16	0.78	0.16
		计算值 Calculated values	0.82	0.17	0.78	0.17	0.74	0.22	0.68	0.27
		相对误差 Relative error	−5.13	−6.25	0.00	−6.25	5.13	−37.50	12.82	−68.75
	中壤土 Medium loam	实测值 Measured values	0.76	0.21	0.76	0.21	0.76	0.21	0.76	0.21
		计算值 Calculated values	0.79	0.23	0.77	0.18	0.74	0.22	0.66	0.27
		相对误差 Relative error	−3.95	−9.52	−1.32	14.29	2.63	−4.76	13.16	−28.57
	轻壤土 Light loam	实测值 Measured values	0.52	0.04	0.52	0.04	0.52	0.04	0.52	0.04
		计算值 Calculated values	0.60	0.04	0.59	0.01	0.56	0.06	0.47	0.13
		相对误差 Relative error	−15.38	0.00	−13.46	75.00	−7.69	−50.00	9.62	−225.0
	砂壤土 Sandy loam	实测值 Measured values	0.75	0.05	0.75	0.05	0.75	0.05	0.75	0.05
		计算值 Calculated values	0.81	0.06	0.76	0.09	0.71	0.18	0.65	0.24
		相对误差 Relative error	−8.00	−20.00	−1.33	−80.00	5.33	−260.0	13.33	−380.0
	细砂 Fine sand	实测值 Measured values	0.78	—	0.78	—	0.78	—	0.78	—
		计算值 Calculated values	0.76	—	0.64	—	0.60	—	0.55	—
		相对误差 Relative error	2.56	—	17.95	—	23.08	—	29.49	—
	砾石 Gravel	实测值 Measured values	0.79	—	0.79	—	0.79	—	0.79	—
		计算值 Calculated values	0.77	—	0.65	—	0.58	—	0.54	—
		相对误差 Relative error	2.53	—	17.72	—	26.58	—	31.65	—

参 考 文 献:

[1] 杨建强,罗先香.土壤盐渍化与地下水动态特征关系研究[J].水土保持通报,1999,19(6):11—15.

[2] 阿维里扬诺夫.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,1985.56—61.

[3] 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):60—64.

[4] 叶水庭.相关分析在地下水资源评价和预报中的应用[R].华东水利学院,1977.

[5] 张江辉.干旱地区考虑蒸发影响下的排水计算[D].西安理工大学硕士论文,1996.

[6] 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):92—96.

[7] 张顺联.地下水资源计算与评价[M].北京:水利电力出版社,1992.

[8] 金光炎.平原地下水资源评价[M].北京:水利出版社,1982.

[9] 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.

[10] 刘诚明,戚 莓,邱胜彬,等.潜水均衡观测研究报告(新疆昌吉地下水均衡场)[R].新疆水利水电研究所,1992.7.

[11] 王全九,王永平.渭干河水盐资料整编(渭干河子项目)[R].新疆渭干河流域管理处,2002.7.

[12] 孙宝林,魏守忠,马 健,等.新疆三工河流域冲积平原区潜水蒸发特征与潜水调控[J].地下水,2005,27(5):352—353.

Adaptability study on empirical formulae of frequent
phreatic evaporation in Xinjiang

FU Qiu-ping^{1,2,3}, ZHANG Jiang-hui^{2,4}, WANG Quan-jiu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 3. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039; 4. Xinjiang Research Institute of Water Resources and Hydropower, Urumqi 830049, China)

Abstract: In the arid zone such as Xinjiang, the evaporation is intense. The phreatic evaporation affects not only the loss of soil moisture, but also the problem of saline-alkali soil, and the accurate calculation of phreatic evaporation intensity has significance to the calculation of drainage and prevention of saline-alkali soil. The empirical formulae of phreatic evaporation are frequently used in calculation, including Tsinghua equation, Averiyarov equation, Ye equation and power function. The four formulae have been analyzed basing on the observed data of phreatic evaporation in Changji and Weiganhe of Xinjiang. Simpler determination methods of the limit evaporation depth H_{max} in Averiyarov empirical formula and the maximum evaporation intensity E_{max} and η in the Tsinghua formula are proposed, and the accuracy of the calculated evaporation intensity are discussed. The results are as follows: The Tsinghua formula has a widespread versatility in Xinjiang; when the groundwater depth is shallow, Averiyarov equation, Ye equation and power function have a relative high precision, but the precision is low when the depth is deep. The difference between the value calculated using power function formula and the actual value is the biggest. The Averiyarov equation, Ye equation and power function fit well in loam than coarse soil.

Keywords: phreatic evaporation; empirical formula; phreatic evaporation limit depth; phreatic evaporation limit intensity; Xinjiang