

对常用潜水蒸发经验模型中 E_0 值的探讨

邢旭光¹, 史文娟¹, 王全九^{1,2}

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 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)

摘要: 为提高潜水蒸发计算精度, 利用潜水蒸发强度、埋深为零时的土面蒸发强度和水面蒸发强度的实测资料对阿维里扬诺夫公式、叶水庭公式和雷志栋公式中 E_0 值的选取进行了探讨, 同时对比分析了 E_0 分别为水面蒸发强度和埋深为零时土面蒸发强度两种情况下的潜水蒸发强度。结果表明, 针对新疆地区粘壤土类型, 对于上述三种公式, 若用埋深为零的土面蒸发强度代替水面蒸发强度, 计算结果会产生误差, 精度偏低, 应选用 E_0 为水面蒸发强度进行计算, 获得了 η 与地下水埋深的指数函数关系。该研究为潜水蒸发经验模型中 E_0 值的选取提供参考, 同时为求解雷志栋公式中参数 η 提供一种新方法。

关键词: 潜水蒸发; 经验模型; 水面蒸发; 土面蒸发

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)04-0057-04

Discussion on E_0 value in common groundwater evaporation empirical models

XING Xu-guang¹, SHI Wen-juan¹, WANG Quan-jiu^{1,2}

(1. Key Laboratory for Northwest Water Resources and Ecological Environment of Ministry of Education,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The evaporation rate of water surface (expressed with E_0) is contained in the common empirical models of groundwater evaporation, which can be replaced by the evaporation rate of soil surface at groundwater depth of zero. Measured data of groundwater evaporation rate, evaporation rate of soil surface at groundwater depth of zero and evaporation rate of water surface were used to made a discussion on the selection of E_0 value in Averiyonov equation, Ye equation and Lei equation, so as to improve the accuracy of calculation. Meanwhile, the groundwater evaporation rate was compared under the two conditions in which E_0 was the evaporation rate of water surface and the evaporation rate of soil surface at groundwater depth of zero, respectively. The results turned to be that, in the light of clay loam in Xinjiang, some calculation error would be caused if the evaporation rate of soil surface at groundwater depth of zero were used instead of the evaporation rate of water surface as for the above three equations. So it was suggested that the evaporation rate of water surface be used as E_0 , and an exponential function relationship between η and groundwater table was obtained. The study results may provide references for the selection of E_0 in the empirical models of phreatic evaporation, and offer a new method for calculating the parameter η in Lei equation.

Keywords: groundwater evaporation; empirical model; evaporation of water surface; evaporation of soil surface

潜水蒸发是指潜在土壤吸力的作用下向包气带输送水分, 并通过土壤蒸发和作物蒸腾进入大气的过程^[1]。同时它也是田间水循环的一部分, 是浅层地下水向土壤水和大气水转化的重要途径^[2], 因而, 在 GSPAC 连续系统中具有重要意义^[3]。在蒸发过程中, 潜水向土壤进行补给, 因此, 在以垂向运动

的浅层地下水均衡分析计算中, 潜水蒸发是主要消耗项, 同时, 在干旱半干旱地区, 潜水蒸发还直接涉及到土壤盐碱化问题。由此可见, 对潜水蒸发的研究在制定地下水浅埋区灌溉制度、地下水位调控及土壤次生盐碱化、天然植被生态耗水量计算等方面均具有重要作用^[4-5]。

收稿日期: 2013-02-27

基金项目: 国家重点基础研究计划(973 计划)(2011CB411903); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301102); 新疆维吾尔自治区科技计划项目(201130103-3); 陕西省自然科学基金计划项目(S2012JC7610); 陕西省教育厅基金(11JS076)

作者简介: 邢旭光(1986—), 男, 辽宁沈阳人, 硕士, 主要从事农业水资源研究。E-mail: xg_xing@yeah.net。

通讯作者: 史文娟(1972—), 女, 陕西武功人, 副教授, 博士, 主要从事农业水资源高效利用研究。E-mail: shiwj@xaut.edu.cn

目前国内外对潜水蒸发问题的研究主要有两种方法:一种是基于土壤水动力学理论,从机理上进行研究;另一种是通过室内或田间试验,根据实测数据分析其变化规律,拟合相应的经验公式。前一种方法需要通过数值积分才能求得结果,同时要求较多参数。因此,目前潜水蒸发经验公式得以广泛应用。在常用的潜水蒸发公式中,应用最广泛的是阿维里扬诺夫抛物线型公式^[6](简称“阿氏公式”)、清华大学雷志栋公式^[7](简称“雷氏公式”)和河海大学叶水庭指数型公式^[8](简称“叶氏公式”)。在上述三种公式中,都包含 E_0 这一参数,即潜水埋深为零时的土面蒸发强度,并认为其近似等于大气蒸发强度,可用水面蒸发强度代替。但对于不同土壤质地而言,其土壤孔隙大小不相同,所以必然造成不同土壤质地埋深为零时的潜水蒸发量差异。基于此,本文通过非称重式蒸渗仪实验系统,选用 5 种不同地下水埋深实测潜水蒸发数据,并分别选用 E_0 为水面蒸发强度和埋深为零时的土面蒸发强度两种情况下的实测值,对常用潜水蒸发模型进行拟合计算,旨在分析不同潜水蒸发经验公式在新疆地区粘壤土条件下 E_0 值对计算潜水蒸发量精度的影响,从而为准确计算潜水蒸发量提供指导。

1 试验站概况及试验设计

1.1 试验站概况

潜水蒸发试验于 2012 年 4—8 月在新疆巴州水管处灌溉试验站(北纬 $41^{\circ}36'$,东经 $86^{\circ}12'$)地下水均衡场进行。试验站处于天山南麓塔里木盆地边缘孔雀河冲积平原带,属于暖温带大陆性荒漠气候。地区干旱少雨而蒸发强烈,气候干燥,昼夜温差大。多年平均降雨量 58.6 mm,潜在蒸发量 2 555.0 mm,蒸降比达 43.6,日照时数 3 036.2 h,年平均气温 11.48°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 4 121.2 $^{\circ}\text{C}$,无霜期 191 d。

1.2 试验设计

利用 5 组蒸渗仪开展不同埋深(1.0、1.5、2.0、2.5 m 和 3.0 m)潜水条件下的蒸发试验。水面蒸发量用直径为 20 cm 蒸发皿进行测定。

蒸渗仪是研究包气带水、热及溶质运移的重要工具^[1]。本研究所用蒸渗仪主要由土体(土桶)、供水系统及附带装置组成,土桶底部铺有 30 cm 砂砾反滤层,顶部与地面齐平,为裸地。供水系统主要由改进的马氏瓶组成以模拟恒定的地下水埋深。

5 组蒸渗仪内土壤土质均为粘壤土,通过比重计法对土样进行颗粒分析,测定其颗粒组成如表 1 所示。土样经风干、碾压、去杂,过 2 mm 孔径标准

筛并混合均匀,参考天然状态土体容重,按设定容重 $1.75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 均匀装填。

表 1 土壤基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of tested soil

不同粒径土壤颗粒含量/% Soil particle content of different grain diameters			土壤类型 Soil type
2~0.02mm	0.02~0.002mm	<0.002mm	粘壤土 Clay loam
46.4	38.5	15.1	

2 常用潜水蒸发经验模型

目前潜水蒸发经验公式较多,最为广泛使用的是阿氏公式、雷氏公式和叶氏公式。

原苏联学者阿维里扬诺夫提出了计算潜水蒸发强度的经验公式^[6]:

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

式中, E_0 为水面蒸发强度或潜水埋深为 0 的土面蒸发强度($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$); H 为潜水埋深(m); H_{\max} 为潜水停止蒸发深度(或极限蒸发深度)(m); n 为土壤质地和植被有关的系数。

该公式体现了潜水蒸发量与埋深之间的幂函数关系。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 n ^[9-11]。

雷志栋等根据非饱和土壤水稳定流理论,分析了潜水蒸发强度、水面蒸发强度和地下水埋深三者之间的关系,提出了“雷志栋公式”^[7]:

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

式中, E_{\max} 为潜水埋深为 H 时的极限蒸发强度($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$); η 为与土质和地下水埋深有关的经验常数,唐海行^[12]对该系数进行了分析,见式 4。

$$E_{\max} = AH^{-m} \quad (3)$$

$$\eta = e^{-\left(\frac{1}{E_{\max}}\right)^n} \quad (4)$$

式中, A 、 m 和 n 均为随土壤而异的参数。

从能量的角度考虑饱和—非饱和带的土壤水分运动情况,无论潜水埋深多大,只要非饱和带与潜水面之间,便存在水势梯度,这样就存在水分从潜水面面向上面的非饱和带转化,即潜水蒸发。所以,潜水蒸发极限埋深在理论上是不存在的。基于此,叶水庭等为了避免使用 H_{\max} 这一参数,提出了如下公式^[8]:

$$E = E_0 e^{-\alpha H} \quad (5)$$

式中, α 为衰减系数,可通过拟合得到,其余符号意义同前。

3 潜水蒸发经验模型中 E_0 的确定

在上述三种潜水蒸发经验公式中, E_0 可以采用两种方法进行确定, 其一, 将 E_0 作为水面蒸发强度; 其二, 将其作为潜水埋深为 0 的土面蒸发强度。然而由于地表不平整或存在大颗粒石子和土块, 都会造成土面蒸发量的不精确, 因此, 对于同一公式而言, E_0 作为两种不同含义的变量必将对潜水蒸发的计算精度造成影响。通过对实测潜水蒸发资料分析, 将 E_0 分别作为水面蒸发强度和埋深为 0 的土面蒸发强度, 分别用阿氏公式、雷氏公式和叶氏公式对其进行拟合计算, 从而确定不同经验模型适宜的 E_0 值。

3.1 阿氏公式中 E_0 值的确定

在阿氏公式中, 存在一重要参数 H_{\max} , 因此, 利用阿氏公式分析潜水蒸发必须先确定 H_{\max} 。图 1 显示了潜水蒸发强度和地下水埋深之间的关系。可以明显看出, 潜水蒸发强度随地下水埋深的增加而减小, 并且随着地下水埋深的增加, 减小速率逐渐变慢。

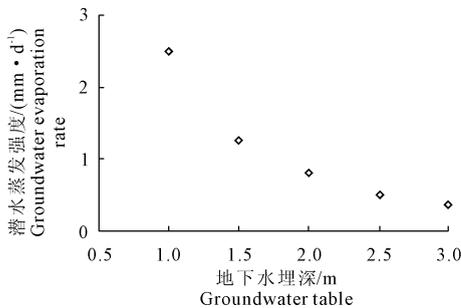


图 1 潜水蒸发强度与地下水埋深的关系

Fig. 1 Relationship between groundwater evaporation rate and groundwater table

采用 OriginPro 8.0 软件用指数函数对二者关系进行拟合, 结果如下:

$$E = 7.55145e^{-1.13132H} \quad (R^2 = 0.986) \quad (6)$$

式中, E 为潜水蒸发强度 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); H 为地下水埋深 (m)。

由上述模型可知, 只有当埋深 $H \rightarrow +\infty$ 时, 才有 $E \rightarrow 0$, 即存在潜水蒸发量等于 0 的极限埋深 H_{\max} 。相关研究表明, 过多的外延埋深因误差累积而导致荒谬的结果^[13]。根据相关研究^[14], 当 $dE/dH = -0.1$, 即潜水埋深每减小 1 m, 潜水蒸发强度变化 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 时, 可以认为潜水蒸发强度基本不随潜水埋深变化, 即潜水蒸发强度达到最小值, 此时的地下水埋深可看作潜水停止蒸发深度, 即极限埋深。应用上述方法可求得当地粘壤土的潜水停止蒸发深度

$$H_{\max} = 3.93 \text{ m}。$$

选用 E_0 分别为水面蒸发强度和埋深等于 0 的土面蒸发强度的实测值, 用阿氏公式对其拟合, 如表 2 所示。

表 2 阿氏公式中不同 E_0 值的幂函数拟合

Table 2 Power function fitting of different E_0 values in Averiyonov equation

E_0	n	R^2
水面蒸发强度 Water surface evaporation rate	4.38	0.851
土面蒸发强度 Soil surface evaporation rate	0.65	0.418

由表 2 可以看出, 对于阿氏公式, E_0 为水面蒸发强度比土面蒸发强度拟合精度高, n 值也比较符合经验值。因此, 对于新疆粘壤土类, 为提高潜水蒸发计算精度, 应将 E_0 值作为水面蒸发强度进行计算。

3.2 叶氏公式中 E_0 值的确定

取 E_0 为水面蒸发强度和埋深为 0 的土面蒸发强度的实测值, 用叶氏公式分别对两种情况进行指数拟合, 见表 3。

表 3 叶氏公式中不同 E_0 值的指数函数拟合

Table 3 Exponential function fitting of different E_0 values in Ye equation

E_0	α	R^2
水面蒸发强度 Water surface evaporation rate	1.34	0.973
土面蒸发强度 Soil surface evaporation rate	0.24	0.323

由表 3 可知, 对于叶氏公式, E_0 为水面蒸发强度比土面蒸发强度拟合精度高。因此, 当选用叶氏公式进行潜水蒸发强度计算时, 为提高计算结果准确度, 应选用 E_0 值作为水面蒸发强度。

另外, 来剑斌^[15]研究表明, 埋深为零时的潜水蒸发强度容易受土壤热容量和土表反射率影响, 而二者决定于土壤物理性质。这也是造成选用 E_0 为土面蒸发强度计算精度低的原因。

3.3 雷氏公式中 E_0 值的确定

在雷氏公式中, 存在参数 E_{\max} , 因此, 应用该模型时必须确定 E_{\max} 值。由 (3) 式可知, E_{\max} 与 H 之间并无明显函数关系, 为便于计算, 对其取对数, 则二者呈现线性关系:

$$\ln E_{\max} = \ln A - m \ln H \quad (7)$$

对于 (7) 式而言, 最少满足两种埋深的 E_{\max} 值即

可确定 E_{\max} 与 H 的关系。欲获得不同埋深时的 η 值,只需将 E_{\max} 与 H 的关系式与(2)式结合即可。求得各埋深条件下的 η 值如表 4 所示。值得注意的是,当选用 E_0 为水面蒸发强度和土面蒸发强度时, η 亦表现出两组值,然而 η 决定于土质和埋深,因此必有一组 η 值与实际不符。现用(4)式对其进行拟合。拟合发现,当取 E_0 为水面蒸发强度时, $n = 1.30 (R^2 = 0.946)$;当取 E_0 为土面蒸发强度时, $n < 0$,故舍去。

表 4 各地下水埋深对应的 η 值

Table 4 η value of each groundwater table

H/m	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
η	0.918	0.453	0.215	0.112	0.069

根据以上求得的 E_{\max} 及 n ,结合(2)和(4)式,分别选取 E_0 为水面蒸发强度和埋深为 0 的土面蒸发强度的实测值,计算新疆粘壤土类不同地下水埋深条件的潜水蒸发强度,同时将其分别与实测潜水蒸发强度进行对比,如表 5、表 6 所示。

表 5 雷氏公式潜水蒸发强度计算值与实测值对比

(E_0 为水面蒸发强度)

Table 5 Comparison of calculated and measured values of groundwater evaporation rate in Lei equation

(E_0 means the evaporation rate of water surface)

H/m	$E/(mm \cdot d^{-1})$		相对误差/% Relative error
	计算值 Calculated value	实测值 Measured value	
1.0	2.416	2.487	2.83
1.5	1.314	1.260	4.29
2.0	0.825	0.783	5.35
2.5	0.542	0.505	7.50
3.0	0.326	0.350	6.93

表 6 雷氏公式潜水蒸发强度计算值与实测值对比

(E_0 为埋深等于 0 的土面蒸发强度)

Table 6 Comparison of calculated and measured values of groundwater evaporation rate in Lei equation (E_0 means the evaporation rate of soil surface at groundwater depth of zero)

H/m	$E/(mm \cdot d^{-1})$		相对误差/% Relative error
	计算值 Calculated value	实测值 Measured value	
1.0	1.070	2.487	56.96
1.5	0.536	1.260	53.65
2.0	0.270	0.783	65.48
2.5	0.147	0.505	70.82
3.0	0.093	0.350	73.51

由表 5、表 6 明显看出,对于粘壤土类,将 E_0 作为水面蒸发强度计算潜水蒸发强度时,相对误差小,均在允许范围内;而当 E_0 作为土面蒸发强度进行计算时,相对误差大,计算结果精度偏低。因此,当选用雷氏公式计算潜水蒸发强度时,应选用 E_0 为水面蒸发强度,有利于提高计算精度。

雷氏公式结构比较完整,对田间实测资料能较好地拟合,且拟合精度较高,因此应用较为广泛。但由于其参数较多且较难确定,因此在应用时带来不便^[16]。以参数 η 为例,本文确定参数 η 的过程繁琐且计算量大。 η 与土壤质地和地下水埋深有关,所以对于某一种土壤(本研究中供试土壤为粘壤土)来说,拟合 η 与地下水埋深的关系,便可以根据地下水埋深确定 η 值,从而简化计算。从表 4 可以看出, η 值随着地下水埋深的增加而减小,对二者进行拟合,如图 2 所示。

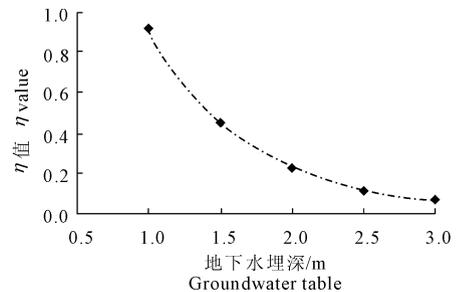


图 2 地下水埋深与参数 η 的关系

Fig. 2 Relationship between groundwater table and parameter η

图 2 明显呈现出地下水埋深与 η 具有很好的指数关系,见式(8)。因此,在应用雷氏公式计算潜水蒸发强度时,可以利用地下水埋深与 η 的关系对参数 η 进行求解。

$$\eta = 3.2413e^{-1.316H} \quad (R^2 = 0.994) \quad (8)$$

4 结论与讨论

采用 5 种地下水埋深的潜水蒸发强度、水面蒸发强度和潜水埋深为 0 时的土面蒸发强度等实测资料,对常用潜水蒸发经验公式(阿维里扬诺夫公式、叶水庭公式和雷志栋公式)中 E_0 值的确定进行了较为详细地探讨。主要得出以下结论:

1) 对于新疆地区粘壤土类型,在进行潜水蒸发强度计算时,对于各经验模型,应选用 E_0 为水面蒸发强度,计算结果相对误差小,计算精度高。

2) 鉴于雷氏公式中参数求解繁琐,提出一种求解参数 η 的方法,建立了 η 与地下水埋深指数函数模型。

(下转第 65 页)

- FAO modified Penman equation[J]. Irrig Sci, 1984,5:223-233.
- [4] 陈玉民,郭国双.中国主要农作物需水量等值线图研究[M].北京:中国农业科技出版社,1993.
- [5] 龚元石. Penman-Monteith 公式与 FAO-PPP-17Penman 修正式计算参考作物蒸散量的比较[J].北京农业大学学报,1995,21(1):68-75.
- [6] Kashyap PS, Panda RK. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in sub-humid region[J]. Agric Water Manag, 2001,50:9-25.
- [7] Xu CY, Singh VP. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland[J]. Water Resour Manag, 2002,16(3):197-219.
- [8] Sumner DM, Jacobs JM. Utility of Penman-Monteith, Priestley-Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration[J]. J Hydrol, 2005,308:81-104.
- [9] Nandagiri L, Kovoor GM. Performance evaluation of reference evapotranspiration equation across a range on Indian climate[J]. J Irrig Drain Eng, 2006,132(3):238-249.
- [10] Landeras G, Ortiz-Barredo A, López JJ. Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain)[J]. Agric Water Manag, 2008,95:553-565.
- [11] George BA, Reddy BRS, Raghuvanshi NS, et al. Decision support system for estimating reference evapotranspiration[J]. J Irrig Drain Eng, 2002,128(1):1-10.
- [12] Hargreaves GH, Allen RG. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation[J]. J Irrig Drain Eng, 2003,129(1):53-63.
- [13] Hargreaves GH, Samani ZA. Reference crop evapotranspiration from temperature[J]. Appl Eng Agric, 1985,1(2):96-99.
- [14] Irmak S, Allen RG, Whitty EB. Daily grass and alfalfa-reference evapotranspiration estimates and alfalfa-to-grass evapotranspiration ratios in Florida[J]. J Irrig Drain Eng, 2003,129(5):360-370.
- [15] Qiu G Y, Miyamoto K, Sase S, et al. Comparison of the three-temperature model and conventional models for estimating transpiration[J]. JPN Agric Res Quart, 2002,36(2):73-82.
- [16] 陈玉民,郭国双.中国主要作物需水量与灌溉[M].北京:水利电力出版社,1995:45-50.
- [17] Turc L. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, evapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise a jour[J]. Annal Agron, 1961,12(1):13-49(in French).
- [18] Amatya DM, Skaggs RW, Gregory JD. Comparison of methods for estimating REF-ET[J]. J Irrig Drain Eng,1995,121(6):427-435.
- [19] Irmak S, Allen RG, Whitty EB. Daily grass and alfalfa-reference evapotranspiration estimates and alfalfa-to-grass evapotranspiration ratios in Florida[J]. J Irrig Drain Eng, 2003,129(5):360-370.
- [20] Priestley CHB, Taylor RJ. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters[J]. Mon Weather Rev, 1972,100:81-92.
- [21] Jensen ME, Burman RD, Allen RG. Evapotranspiration and irrigation water requirements[J]. ASCE Manual, 1990,70:332-333.
- [22] 谢平,陈晓宏,刘丙军.湛江地区适宜参考作物蒸发蒸腾量计算模型分析[J].农业工程学报,2008,24(5):6-9.
- [23] 史晓楠,王全九,王新,等.参考作物蒸发蒸腾量计算方法在新疆地区的适用性研究[J].农业工程学报,2006,22(6):19-23.
- [24] 刘钰.气象数据缺失条件下参照腾发量的计算方法[J].水利学报,2001,(3):11-17.
- [25] 高瑞,忠超伦巴根,于婵,等.基于随机样本的神经网络模型估算参考作物蒸发蒸腾量[J].农业工程学报,2006,22(2):42-45.

(上接第 60 页)

对于各潜水蒸发经验模型,都存在一些参数与土壤质地有关,因此对于砂壤土、细砂等其他类型土壤而言,其取值亦不相同。所以,对于不同情况,如何选取 E_0 值有助于提高计算精度需另做研究。

参考文献:

- [1] 郝振纯,陈玺,王加虎,等.淮北平原裸土潜水蒸发趋势及其影响因素分析[J].农业工程学报,2011,27(6):73-78.
- [2] 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.
- [3] 李红寿,汪万福,张国彬,等.极干旱区深埋潜水蒸发量的测定[J].生态学报,2010,30(24):6798-6803.
- [4] 张振华,史文娟,褚桂红.干旱区潜水蒸发的影响因素和计算方法分析[J].水资源与水工程学报,2008,19(6):78-80.
- [5] 孟伟超,孟翀,刘磊.不同地下水埋深、气象因子及作物影响的潜水蒸发模型研究[J].太原理工大学学报,2008,39(4):422-425.
- [6] 阿维里扬诺夫 CФ.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.
- [7] 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.
- [8] 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,1981,(4):48-50,41.
- [9] 金光炎.平原地下水资源评价[M].北京:水利出版社,1982.
- [10] 张顺联.地下水资源计算与评价[M].北京:水利电力出版社,1992.
- [11] 张永明,胡顺军,翟禄新,等.塔里木盆地裸地潜水蒸发计算模型[J].农业工程学报,2009,25(1):27-32.
- [12] 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.
- [13] 付秋萍,张江辉,王全九.常用潜水蒸发经验公式在新疆地区适用性研究[J].干旱地区农业研究,2008,26(3):182-188.
- [14] 付秋萍.旱区潜水蒸发特征与排水系统参数确定方法研究[D].西安:西安理工大学,2007:23-33.
- [15] 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.
- [16] 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.