

潜水蒸发研究进展

尚松浩¹, 毛晓敏²

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室 北京 100084 ;
2. 中国农业大学水利与土木工程学院中国农业水问题研究中心 北京 100083)

摘要 :在有关研究成果的基础上 ,论述潜水蒸发的主要研究方法 ,归纳了裸地和植被生长条件下潜水蒸发的常用估算方法。指出未来应加强植被生长条件下潜水蒸发的试验观测 ,在水循环过程综合研究的基础上深入分析不同条件下的潜水蒸发规律。

关键词 :潜水蒸发 盐渍化防治 地下水资源评价 天然植被耗水 综述

中图分类号 :P641 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2010)04-0085-05

Research progress on evaporation from phreatic water//SHANG Song-hao¹, MAO Xiao-min²(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Center for Agricultural Water Research in China, College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract :Based on the available research results, the main methods for the evaporation from phreatic water were discussed. The commonly-used methods to estimate the evaporation from phreatic water in bare soil and vegetation field were summarized. In the future, the observation on the evaporation from phreatic water in the vegetation field should be strengthened, and the studies on the evaporation from phreatic water under different conditions should be incorporated in the comprehensive analysis of water cycling process.

Key words : evaporation from phreatic water; prevention of soil salinization; assessment of groundwater resources; water consumption by natural vegetation; review

潜水蒸发是指‘潜水向包气带输送水分,并通过土壤蒸发或(和)植物蒸腾进入大气的过程’^[1],英文文献中多用‘毛管上升水’^[2-3]来描述地下水对土壤水的补给量。由于土壤水、地下水处于动态变化之中,土壤水与地下水的交换是双向的,即土壤水向下补给地下水和地下水向上补给土壤水交替出现。因此潜水蒸发并不是地下水的蒸发(液态变为气态),而是土壤水与地下水之间交换量的一部分。但潜水蒸发这一术语在国内使用已比较普遍,使用时需要将其理解为地下水对土壤水的补给。引起地下水向上补给的原因可能是土壤蒸发、植物蒸腾^[4-5],也可能是土壤冻结^[6]、温度梯度^[7]等因素。

潜水蒸发是水循环的一个重要环节,潜水蒸发研究对于掌握农田及区域水循环规律具有重要作用。特别是在地下水浅埋地区,潜水蒸发是地下水的主要消耗项之一,也是区域蒸散发的主要水分来源之一^[3,8]。如果地下水矿化度比较高,其中的盐

分伴随着水流向上迁移并在土壤表层累积,便会形成土壤盐渍化。从 20 世纪 50 年代的盐渍化防治,到 20 世纪 70 年代的地下水资源评价^[9],再到 20 世纪末以来天然植被生态耗水量计算^[10],潜水蒸发研究所关注的问题和应用范围在不断扩展,潜水蒸发研究也不断取得新的进展。本文根据国内外研究成果,论述了潜水蒸发的研究方法、估算方法等方面所取得的主要进展,并分析目前存在的问题及未来发展的方向。

1 潜水蒸发研究方法

1.1 试验观测方法

器测法是潜水蒸发研究的基本试验方法,利用蒸渗仪可以测定不同土壤、不同地下水埋深、不同作物在不同时期的潜水蒸发强度。国内在不同地区先后建成了一系列地下水均衡场,对潜水蒸发进行试验观测,如位于湿润、半湿润地区的山东禹城、河北

石家庄、河南商丘、江苏汉阳等地下水均衡场^[11],位于干旱地区的新疆昌吉、三工河、乌拉泊、吐鲁番、叶尔羌河等地下水均衡场^[12]。目前的试验观测多是针对裸地条件进行的。根据试验观测结果,分析了潜水蒸发的主要影响因素及规律,进一步建立了潜水蒸发与其主要影响因素间的经验关系,并在盐渍化防治、地下水资源评价、干旱区生态需水分析中得到了广泛应用。此外,利用长期地下水动态观测资料也可以对潜水蒸发规律进行分析。

1.2 机理分析方法

由于潜水蒸发涉及地下水向土壤水的补给、土壤水运动、根系吸水及土壤蒸发等诸多过程,可以通过土壤水动力学理论对潜水蒸发过程进行理论分析。但由于土壤水运动过程的复杂性,理论分析一般是针对稳定蒸发条件进行的,如 Gardner^[13]对均质土壤稳定蒸发条件下潜水蒸发规律的分析, Willis^[14]对层状土壤稳定蒸发条件下潜水蒸发规律的分析,程先军^[15]对作物生长条件下稳定潜水蒸发规律的分析。Raes 等^[16]提出了作物生长条件下稳定潜水蒸发的计算模式。由于这些理论分析多是对地下水位恒定、稳定蒸发条件进行的,而在实际气象条件下很难发生稳定蒸发,因此理论分析的结果与实际情况不一定完全相符。

1.3 数值模拟方法

由于土壤水分运动过程的复杂性,数值模拟是研究不同条件下土壤水分运动规律的主要手段^[17],目前已应用于潜水蒸发规律的模拟分析。这类方法将潜水蒸发作为地下水-土壤-植物-大气连续体(GSPAC)水分运动的一个环节,通过不同条件下的 GSPAC 水分运动模型来模拟分析相应的潜水蒸发过程及规律,如裸地潜水蒸发模拟分析^[18]、土壤冻结过程中潜水蒸发模拟分析^[6]、农田潜水蒸发模拟分析^[3,19-20]。数值模拟方法不局限于稳定蒸发状况,可以对不同条件下的潜水蒸发过程和规律进行深入分析。

以上3种方法中,试验观测方法是基本方法,根据试验观测结果可以建立估算不同土质潜水蒸发的各种经验公式,但试验结果应用于实际情况下复杂的土质结构、植物、降水入渗等条件时还存在一定的困难。机理分析方法以土壤水动力学理论为基础,主要是针对恒定地下水位下的稳定蒸发进行分析的,与实际情况存在一定差别。数值模拟方法将潜水蒸发作为 GSPAC 水分运动的一个环节来考虑,能够模拟不同外界条件下的潜水蒸发和土壤水分运动过程,但模拟一般需要较多的输入和参数,限制了该方法的普遍应用。

2 裸地潜水蒸发的估算方法

目前对于潜水蒸发的研究主要集中于裸地情况。在试验观测及机理分析的基础上,提出了不同类型的裸地潜水蒸发估算公式,这些公式反映了潜水蒸发与其主要影响因素(如大气蒸发能力、地下水埋深等)的关系,大致可以分为经验公式、半经验-半机理公式、机理公式等3类。此外,利用数值模拟方法也可以对裸地潜水蒸发规律进行模拟分析。

2.1 估算裸地潜水蒸发的经验公式

根据潜水蒸发试验结果可以分析一定时段内裸地潜水蒸发强度与其主要影响因素的关系,进而用合适的经验公式拟合试验数据,用于不同条件下潜水蒸发量的估算。经验公式中的自变量一般为大气蒸发强度(以水面蒸发强度 E_0 表示)、地下水埋深 H ,其他因素的作用则用经验参数来描述。多数经验公式采用了正比假定,即假设潜水蒸发强度 E_{gb} 与水面蒸发强度 E_0 成正比,其比值定义为潜水蒸发系数 C ,用不同的函数形式来反映潜水蒸发系数与埋深的关系,其一般形式可以表示为

$$C = \frac{E_{gb}}{E_0} = f(H) \quad (1)$$

根据埋深对潜水蒸发的影响规律,函数 $f(H)$ 为 H 的减函数,可以采用以下几种函数形式:

幂函数公式:

$$\frac{E_{gb}}{E_0} = aH^{-b} \quad (2)$$

指数公式(叶水庭公式^[21]的扩展):

$$\frac{E_{gb}}{E_0} = a \exp(-bH) \quad (3)$$

对数公式

$$\frac{E_{gb}}{E_0} = -a \ln H + b \quad (4)$$

阿维里扬诺夫公式:

$$\frac{E_{gb}}{E_0} = \left(1 - \frac{H}{H_0}\right)^b \quad (5)$$

反 Logistic 公式^[22]:

$$\frac{E_{gb}}{E_0} = \frac{a}{1 + b \exp(rH)} \quad (6)$$

式中: a , b , r 为经验常数(取决于土质等因素); H_0 为潜水极限蒸发深度。

以上公式中的正比假定一般只在埋深较浅或大气蒸发能力较小时近似成立,因此与实际情况有一定的差别。式(2)和式(4)不适用于埋深很浅的情况。式(5)中潜水埋深为零时潜水蒸发强度为水面蒸发强度,与实际情况不完全一致,可以在公式中增

加 1 个系数来改进。但由于这类公式相对比较简单,因此在实际中应用较为普遍,特别是式(5)。

为克服线性假定的局限性,可以采用幂函数来描述潜水蒸发强度与水面蒸发强度之间的非线性关系,此时潜水蒸发强度的计算公式可以表示为

$$E_{gb} = E_0^n g(H) \quad (7)$$

式中: n 为幂指数; $g(H)$ 为 H 的减函数。

沈立昌^[23]、胡顺军等^[24]提出的经验公式均属于这种形式:

$$E_{gb} = \frac{k\mu E_0^n}{(H+1)^b} \quad (8)$$

$$E_{gb} = kE_0^n H^{-b} \quad (9)$$

式中: μ 为给水度; k 为经验常数。

由于这类公式在结构上存在不足之处^[25],同时其形式比式(2)~(6)复杂,因此在实际中应用还不太普遍。

2.2 估算裸地潜水蒸发的半经验-半机理公式

雷志栋等^[26]提出了半经验-半机理的公式(后来被称为清华公式)用于估算潜水蒸发强度:

$$E_{gb} = E_{\max} \left[1 - \exp\left(-\frac{\eta E_0}{E_{\max}}\right) \right] \quad (10)$$

式中: η 为与土质和地下水埋深有关的经验常数,根据试验观测结果, η 取 0.85 时可以取得比较好的拟合效果; E_{\max} 为潜水极限蒸发强度,是根据定水位条件下土壤稳定蒸发时的土壤含水率及吸力分布得出的。如果土壤非饱和导水率 K 和吸力 s 的关系表示为 $K(s) = a/(s^m + b)$,则 E_{\max} 与 H 的关系为幂函数关系:

$$E_{\max} = aH^{-m} \quad (11)$$

式中: m 为经验常数。

唐海行等^[25]根据试验分析认为式(10)中的 η 不是常数,并假定 η 与 E_{\max} 存在以下关系:

$$\eta = \exp(-E_{\max}^{-n}) \quad (12)$$

同时将 K 和 s 的关系表示为 $K(s) = a \exp(-bs)$,此时 E_{\max} 与 H 的关系为

$$E_{\max} = \frac{a}{\exp(bH) - 1} \quad (13)$$

胡顺军等^[24,27]建立了 2 个包含 E_{\max} 的简化公式:

$$\begin{cases} E_{gb} = E_{\max} [1 - \exp(-mE_0)] \\ E_{\max} = \frac{a}{\exp(bH) - 1} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} E_{gb} = E_{\max} \frac{E_0}{E_0 + b} \\ E_{\max} = aH^{-m} \end{cases} \quad (15)$$

2.3 估算裸地潜水蒸发的机理公式

利用达西定律可以直接估算潜水蒸发,其计算公式为^[28]

$$E_{gb} = -K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \quad (16)$$

式中: $K(\theta)$ 为地下水位附近含水率为 θ 时的土壤非饱和导水率; h 为土水势; z 为纵坐标。

但式(16)需要已知潜水位附近的土水势梯度和导水率,在实际应用中是很难获得的,一般在达西定律的基础上采用一定的简化形式来估算潜水蒸发。

孔凡哲等^[29]提出了利用地表土壤水吸力 s_a 计算潜水蒸发的公式:

$$E_{gb} = \frac{a}{s_a^m + b} \left(\frac{s_a}{H} - 1 \right) \quad (17)$$

式中右端第 1 项 $\frac{a}{s_a^m + b} = K(s_a)$ 为吸力 s_a 对应的非饱和导水率。

从实质上看,式(17)是达西定律的具体应用,因此归为机理公式。由于该公式中包含的地表土壤水吸力在实际工作中一般不观测,因此公式的应用范围受到很大限制。此外,式中的导水率应该是整个非饱和区的等效导水率,采用地表土壤水吸力来计算也存在一定的问题。

在以上 3 类公式中,经验公式一般形式简单,但缺乏对潜水蒸发机理的考虑;半经验-半机理公式有一定的物理基础,但形式较为复杂;机理公式物理概念明确,但在实际中不便于应用。王振龙等^[30]利用淮北平原五道沟水文试验站的试验资料对以上常用公式进行了比较,结果表明式(3)、式(5)、式(6)、式(8)的拟合效果较好。

2.4 基于土壤水动力学原理的裸地潜水蒸发模拟

以上 3 类计算公式主要是针对均质土建立的,无法用于层状土壤条件下的潜水蒸发量估算,也无法分析降水、灌溉、土壤盐分等因素对潜水蒸发的影响。毛晓敏等^[18]利用地表能量平衡原理、微气象学理论以及土壤水热迁移理论建立了土壤-大气系统水热传输模型,用于模拟新疆叶尔羌河绿洲潜水蒸发过程,并根据模拟结果分析了土质、潜水埋深等因素对潜水蒸发的影响。在模拟模型中,潜水蒸发过程被看做是土壤水分运动的一个组成部分,潜水蒸发量为地下水位处的水分通量。利用土壤水动力学模型可以模拟分析不同土质结构、降水、灌溉等因素影响下的潜水蒸发过程,可以作为分析潜水蒸发生态规律的一个有效工具,在研究潜水蒸发方面具有较大的优势。但模拟模型需要较多的输入和参数,难以广泛应用。

3 植被生长条件下潜水蒸发的估算方法

相对于裸地情况,植被生长情况下的潜水蒸发试验观测与分析则要少得多。张书函等^[31]对陕西杨陵西北农业大学灌溉试验站冬小麦-玉米生长情况下的潜水蒸发进行了观测分析,孔凡哲等^[32]对江苏徐州汉王水文水资源试验站小麦-大豆生长情况下的潜水蒸发进行了观测分析,胡顺军等^[27]对新疆阿克苏水平衡试验站柽柳生长条件下的潜水蒸发进行了观测分析,并对植被生长条件下的潜水蒸发现律进行了理论分析^[15]和数值模拟分析^[3,19-20]。研究表明,作物生长条件下的潜水蒸发一般要大于裸地,其主要原因是作物蒸散强度一般要大于裸地蒸发强度,根系吸水使潜水向上传输距离缩短。同时,作物生长条件下潜水蒸发的变化过程主要取决于作物耗水过程,在每种作物耗水高峰期均会出现潜水蒸发的峰值,而裸地情况下则主要取决于水面蒸发过程,1年内一般只有1个峰值。

由于植物的多样性以及植物在不同生育期根系分布、耗水特性不同,植被生长条件下的潜水蒸发现律比较复杂,已有的研究结果还不够深入,特别是天然植被生长条件下潜水蒸发的研究还十分有限。植被生长条件下潜水蒸发的估算方法也大致可分为4类。

3.1 经验公式与机理公式

第一类公式为经验公式与机理公式,其中一部分是裸地潜水蒸发公式的推广,公式形式一般相同,但经验参数会受到植被因素的影响。如利用式(5)计算植被生长条件下的潜水蒸发强度时,指数 n 与土质及植被情况有关,轻质土壤或植物根系吸水深度大、蒸腾旺盛时 n 较小^[5]。利用吸力计算潜水蒸发的式(17)在应用于植被生长情况时, s_a 取根系层以下某一点的土壤水吸力,而 H 取该点到潜水面的距离^[32]。此外,式(17)中增加一个指数 n 可以得到计算植被生长条件下潜水蒸发强度 E_{gc} 的另一公式^[32]:

$$E_{gc} = \frac{a}{s_a^m + b} \left(\frac{s_a}{H} - 1 \right)^n \quad (18)$$

Eagleson 在水量平衡模型中采用式(19)来估算稳定潜水蒸发速率^[33-34]:

$$E_{gc} = K_s \left(1 + \frac{1.5}{mc - 1} \right) \left(\frac{\psi_s}{H} \right)^{mc} \quad (19)$$

式中: K_s 为土壤饱和导水率; ψ_s 为土壤进气吸力; c, m 分别为土壤的渗透指数和孔径分布指数。式(19)具有一定的物理基础,形式上与式(2)类似。

在Maraux等^[2]建立的农田水量平衡模拟模型中,认为非饱和带储水量 W_s 小于一定程度时产生

潜水蒸发,如果 $W_s < a_{cr} W_A$,则潜水蒸发量为

$$E_{gc} = a_{cr} W_A - W_s \quad (20)$$

式中: W_A 为非饱和区有效土壤储水量(田间持水量与凋萎点之差); a_{cr} 为率定参数。

3.2 植被影响系数法

作物生长与裸地条件下潜水蒸发的比值称为潜水蒸发的植被影响系数,该系数与植被类型及其根系分布特征、潜水埋深等因素有关。根据 E_{gb} 及植被影响系数 K_g 可以计算植被生长条件下的潜水蒸发强度,即

$$E_{gc} = K_g E_{gb} \quad (21)$$

其中 K_g 可以以图^[15]、表^[10]或经验公式^[27]的形式给出。文献^[27]给出的经验公式为

$$K_g = 1 + a \exp(-bH) \quad (22)$$

式中: a, b 为经验常数。式(22)表明 K_g 随 H 的增加而减小,但也有研究表明 K_g 随 H 的增加而增加^[15],因此这一问题还需要进一步的试验和理论分析。

3.3 蒸发面下降法

考虑到植被根系吸水使得潜水向上传输距离缩短相当于蒸发面的下降,可以利用蒸发面下降法计算植被生长条件下的潜水蒸发。毛晓敏等^[19]根据冬小麦返青至成熟期潜水蒸发的数值模拟结果,考虑根系吸水及灌溉影响,提出了根据裸地潜水蒸发量估算作物生长条件下潜水蒸发量的蒸发面下降法,即

$$E_{gc}(H) = E_{gl}(H - \Delta H) - K_l I \quad (23)$$

式中: $E_{gc}(H)$ 为潜水埋深等于 H 时作物生长情况下的潜水蒸发量; $E_{gl}(H - \Delta H)$ 为潜水埋深等于 $H - \Delta H$ 时裸地的潜水蒸发量, ΔH 为下降深度(对模拟的冬小麦田来说, ΔH 约为根系深度的1/2); I 为灌溉水量; K_l 为反映灌溉对潜水蒸发影响的经验参数。

目前在天然植被耗水估算中应用较多的是植被影响系数法。但由于植被影响系数受植被类型、生长状况、根系分布等因素的影响,而目前相关的试验观测较少,还无法给出典型植被的植被影响系数值。应用中对不同的植被通常采用同样的植被影响系数^[10,35],可能会带来较大的误差。此外,植被影响系数法没有考虑降水的影响,在降水量较大的地区也会产生一定的误差。

3.4 基于GSPAC水分迁移模型的潜水蒸发模拟

在植被生长条件下,潜水蒸发过程与土壤蒸发、植物蒸腾、根系吸水等过程密切相关。利用GSPAC水分(水热)迁移模型^[3,17]可以模拟不同植被在不同生长阶段、不同生长状况下的水分动态变化过程,可

以对其中的潜水蒸发过程和规律进行深入分析。毛晓敏等^[19]利用 GSPAC 水热耦合传输模型对冬小麦返青至成熟期的潜水蒸发进行了模拟,提出了根据裸地潜水蒸发量估算作物生长条件下潜水蒸发量的蒸发面下降法。闫华等^[20]利用土壤水动力学模型对作物生长条件下的潜水蒸发进行了模拟分析。Babajimopoulos 等^[3]利用 SWBACROS 模型分析了地下水对玉米田间耗水的作用。但与裸地潜水蒸发模型类似,模型由于需要较多的输入和参数而难以广泛应用。

4 潜水蒸发研究存在的问题及发展方向

国内外对潜水蒸发已开展了大量的研究工作,取得了一定的进展,关于不同土质、潜水埋深、大气蒸发能力等因素对潜水蒸发的影响已经有了比较深入的理解,潜水蒸发研究的成果已在盐渍化防治、地下水水资源评价、天然植被耗水估算等方面得到了应用。但关于土质结构、植被、降水(灌溉)对潜水蒸发的影响方面研究还不够深入,需要进一步加强相关的试验观测、机理分析和数值模拟分析,以掌握不同条件下的潜水蒸发规律。

在试验观测方面,重点需要加强不同植被类型及生长状况下的潜水蒸发过程观测,以掌握植被生长条件下的潜水蒸发规律,为天然植被耗水估算、生态保护提供技术支撑。

在估算公式方面,目前已提出众多的经验、半经验-半机理及机理公式,应根据实测潜水蒸发资料对各公式在不同条件下的适用性进行比较评价,以选出适合一定条件的计算公式。

在理论分析方面,需要将潜水蒸发作为水循环的一个环节,从整个水循环的角度来进行综合分析,以全面掌握不同条件下的潜水蒸发过程和规律。利用 GSPAC 水热传输模型^[17]对水循环(包括潜水消耗)规律进行综合研究,这样有助于对潜水蒸发规律的深入分析。

在应用方面,应着重考虑如何将点尺度的潜水蒸发规律应用于区域潜水蒸发的估算,需要结合区域的气象、土壤、植被、地下水调查等现场工作,并利用 GIS 等工具来实现。

参考文献:

[1] 水利科技名词审定委员会.水利科技名词[M].北京:科学出版社,1998.
 [2] MARAUX F, LAFOLIE F, BRUCKLER L. Comparison between mechanistic and functional models for estimating soil water balance: deterministic and stochastic approaches [J].

Agricultural Water Management, 1998, 38(1): 1-20.
 [3] BABAJIMOPOULOS C, PANORAS A, GEORGOUSSIS H, et al. Contribution to irrigation from shallow water table under field conditions [J]. Agricultural Water Management, 2007, 92(3): 205-210.
 [4] 陈志凯.中国水利百科全书:水文与水资源分册[M].北京:中国水利水电出版社,2004.
 [5] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988.
 [6] 雷志栋,尚松浩,杨诗秀,等.土壤冻结过程中潜水蒸发规律的模拟研究[J].水利学报,1999(6): 6-10.
 [7] 夏自强.温度变化对土壤水运动影响研究[J].地球信息科学,2001(4):19-24.
 [8] YEH P J-F, FAMIGLIETTI J S. Regional groundwater evapotranspiration in illinois [J]. Journal of Hydrometeorology, 2009, 10(2): 464-478.
 [9] 河南省人民胜利渠管理局,国家重点科技项目黄淮海平原综合治理人民胜利渠灌区区域水盐运动监测预报课题组.灌区水盐监测预报理论与实践[M].郑州:黄河水利出版社,1996.
 [10] 贾宝全,慈龙强.新疆生态用水量的初步估算[J].生态学报,2000,20(2): 243-250.
 [11] 鲁学仁.华北暨胶东地区水资源研究[M].北京:中国科学技术出版社,1993.
 [12] 周金龙,董新光,王斌.新疆平原区潜水蒸发研究[J].新疆农业大学学报,2002,25(4): 35-38.
 [13] GARDNER W R. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table [J]. Soil Science, 1958, 85: 228-232.
 [14] WILLIS W O. Evaporation from layered soils in the presence of a water table [J]. Soil Science Society of American Journal, 1960, 24: 239-242.
 [15] 程先军.有作物生长影响和无作物时潜水蒸发关系的研究[J].水利学报,1999(6): 37-42.
 [16] RAES D, DEPROST P. Model to assess water movement from a shallow water table to the root zone [J]. Agricultural Water Management, 2003, 62(2): 79-91.
 [17] 尚松浩,毛晓敏,雷志栋,等.土壤水分动态模拟模型及其应用[M].北京:科学出版社,2009.
 [18] 毛晓敏,杨诗秀,雷志栋.叶尔羌河流域裸地潜水蒸发的数值模拟研究[J].水科学进展,1997,8(4): 313-320.
 [19] 毛晓敏,雷志栋,尚松浩,等.作物生长条件下潜水蒸发估算的蒸发面下降折算法[J].灌溉排水,1999,18(2): 26-29.
 [20] 闫华,周顺新.作物生长条件下潜水蒸发的数值模拟研究[J].中国农村水利水电,2009(9):15-18.
 [21] 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):45-48.

(下转第 94 页)

较大,SL191—2008 公式的 V_{cal}/V_{test} 平均值为 1.09, 总体上计算值略高于试验值和 GB50010—2002 公式的计算结果。

b. GB50010—2002 和 SL191—2008 规范公式简单,便于工程应用,但对于 $d > 600$ mm 和 $\rho_w \leq 1.0\%$ 的无腹筋梁,计算结果偏于不安全,对于无抗剪钢筋的厚板可能带来安全隐患。

参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院. 钢筋混凝土结构与构造 35 年设计规范背景资料汇编 [R]. 北京:中国建筑科学研究院,1985.
- [2] ASCE-ACI Committee 445 on Shear and Torsion. Recent approaches to shear design of structural concrete[J]. Journal of Structural Engineering,1998,124:1375-1417.
- [3] REINECK K H, KUCHMA D A, KIM K S, et al. Shear database for reinforced concrete members without shear reinforcement[J]. ACI Structural Journal,2003,100(2):240-249.
- [4] COLLINS M P, KUCHMA D. How safe are our large, lightly reinforced concrete beams, slabs and footings [J]. ACI

Structural Journal,1999,96(4):482-490.

- [5] SHERWOOD E G. One-way shear behavior of large, lightly reinforced concrete beams and slabs[D]. Toronto, Canada: University of Toronto,2008.
- [6] BENTZ E C, VECCHIO F J, COLLINS M P. Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements[J]. ACI Structural Journal,2006,103(4):614-624.
- [7] ZARAI S P D, PAPADAKIS G C. Diagonal shear failure and size effect in RC beams without web reinforcement[J]. Journal of Structural Engineering,2001,127:733-742.
- [8] 张川,张百胜,黄建锋. 钢筋混凝土无腹筋简支梁的抗剪承载力研究 [J]. 重庆建筑大学学报,2005,27(1):48-52.
- [9] VECCHIO F J, COLLINS M P. The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear[J]. ACI Structural Journal,1986,83(2):219-231.
- [10] GB50010—2002 混凝土结构设计规范 [S].
- [11] SL191—2008 水工混凝土结构设计规范 [S].
- [12] ACI318—05 Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary[S].
- [13] CSA A23.3—04 Design of Concrete Structures[S].

(收稿日期 2009-09-26 编辑:方宇彤)

(上接第 89 页)

- [22] 尚松浩,毛晓敏,雷志栋,等. 计算潜水蒸发系数的反 Logistic 公式 [J]. 灌溉排水,1999,18(2):18-21.
- [23] 沈立昌. 关于潜水蒸发经验公式的探讨 [J]. 水利学报,1985(7):34-40.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 胡顺军,田长彦,宋郁东,等. 裸地与柽柳生长条件下潜水蒸发计算模型 [J]. 科学通报,2006,50(S1):36-41.
- [28] TANJI K K, KIELEN N C. Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas[M]. Rome:FAO,2002.
- [29] 孔凡哲,王晓赞. 利用土壤水吸力计算潜水蒸发初探

[J]. 水文,1997(3):44-47.

- [30] 王振龙,刘森,李瑞. 淮北平原有无作物生长条件下潜水蒸发规律试验 [J]. 农业工程学报,2009,25(6):26-32.
- [31] 张书函,康绍忠,刘晓明,等. 农田潜水蒸发的饱和规律及其计算方法研究 [J]. 西北水资源与水工程,1995,6(1):9-15.
- [32] 孔凡哲,王晓赞. 有作物条件下潜水蒸发计算方法的实验研究 [J]. 中国农村水利水电,2000(3):3-5.
- [33] EAGLESON P S. Climate, soil and vegetation 3: a simplified model of soil moisture movement in the liquid phase[J]. Water Resources Research,1978,14(5):722-730.
- [34] EAGLESON P S. Ecohydrology: darwinian expression of vegetation form and function[M]. Cambridge: Cambridge University Press,2002.
- [35] 周金龙,刘丰,侯江涛,等. 新疆平原非灌区自然植被生态耗水量的计算 [J]. 干旱区资源与环境,2006,20(4):162-165.

(收稿日期 2009-09-03 编辑:方宇彤)

· 简讯 ·

2010 流域水安全与重大工程安全高层论坛将在南京举行

为了有效地预防或解决我国当前面临的日益突出的流域水安全和重大工程安全问题,中国工程院院士论坛——2010 流域水安全与重大工程安全高层论坛将于 2010 年 10 月 29—31 日在南京举行。本次论坛的主题是:流域水安全与重大工程安全。主要议题有:①流域旱涝灾变机理及水资源安全保障;②流域水生态环境演变与水质安全保障;③泥沙运动及河口海岸动力学;④河湖调水引流效应;⑤地震、地质灾害与重大工程安全;⑥重大工程安全检测、监测与监控;⑦重大工程安全与风险管理;⑧地下工程与基础设施安全。本次论坛由中国工程院土木、水利与建筑工程学部,国家自然科学基金委员会材料与工程科学部主办,河海大学、南京水利科学研究院、水文水资源与水利工程科学国家重点实验室、水资源高效利用与工程安全国家重点研究中心承办。

(本刊编辑部供稿)