

道尔顿公式风速函数的改进

闵 騫

(江西省水利厅鄱阳湖水文分局, 江西 九江 332800)

摘 要: 总结国内外有关道尔顿公式及其应用方面的研究成果, 收集国内外众多水面蒸发实验资料进行对比试验, 指出道尔顿公式中现有各种风速函数存在的问题, 在此基础上提出了一种分段风速函数。利用国内外相关资料, 确定分段风速函数的系数。检验结果表明, 经风速函数改进后的道尔顿公式, 对水面蒸发量时空变化规律的模拟效果更佳, 尤其是大范围适应性大幅增强, 具有积极的改进意义。

关键词: 道尔顿公式; 风速函数; 分段函数; 水面蒸发

中图分类号: P426.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0852(2005)01-0037-05

1 引言

道尔顿公式是目前国内外应用最为广泛的水面蒸发量计算模型, 风速函数是道尔顿公式的核心, 风速函数的配置, 是决定道尔顿公式应用效果的关键。

100多年以来, 国际上提出了数以百计的以道尔顿公式为基础(原型)的水面蒸发经验公式, 其差异即在于采用了各种各样的风速函数。纵观现有的形形色色的风速函数, 均存在着一个共同的不可忽视的缺点: 未能全面反映不同风速段风对水面蒸发作用的本质差异, 造成所建立的水面蒸发经验公式在不同风速段出现不同的系统性误差。

本文通过采用分段函数形式的风速函数, 较好地解决了道尔顿公式中风速函数的上述缺陷, 可基本消除水面蒸发经验公式在不同风速段出现不同系统性误差的现象。

2 问题的提出

2.1 道尔顿公式及其发展概况

1802年, 英国著名物理学家、化学家道尔顿(John Dalton, 1766-1844)指出, 由于水面饱和水汽压大于空

气中的水汽压, 促使水汽从水面向空气中扩散, 使得水面附近薄层空气中水汽压下降, 为保持水面上水汽饱和, 便有新的水分子通过汽化从水体中逸出水面, 补充到水面上的空气中, 就造成了水面蒸发; 水面风速的增大, 有助于水汽的扩散输送; 而气压的升高, 则使水面上空气密度加大, 水分子难以逸出水面(逸出水面的困难加大)。因此, 水面蒸发量应与饱和水汽压成正比, 且随风速的加大而增大, 但与气压成反比。这即是著名的道尔顿蒸发定律, 是对水面蒸发形成原因与定量原则的精辟论述, 用数学公式表示为:

$$E=C(e_0-e_z)/P \quad (1)$$

式中: E 为单位时间内的水面蒸发量; C 为与风速有关的系数; e_0 为表面水温对应的饱和水汽压; e_z 为水面以上 Z 高度处的空气实际水汽压; P 为水面气压。

同时, 道尔顿提出, 在蒸发量观测精度不高的情况下, 气压对水面蒸发的影响可以忽略。后来的许多实验(主要是室内实验)也证明, 即使气压下降200~300hPa, 水面蒸发量也只加大2%~3%^[1]。略去气压的作用, 则式(1)变为:

$$E=C(e_0-e_z) \quad (2)$$

式(2)被学术界公认为著名的道尔顿公式, 它从质量输送角度概括了水面蒸发与气象条件的关系, 指明了影响水面蒸发的主要气象因素是表层水温、空气湿度和

水面风速。

道尔顿本人对风速影响系数 C 并未做过详细的研究,后人一般将系数 C 看成是风速的函数,用 $f(w)$ 代替式(2)中的 C ,将式(2)改写成:

$$E=(e_0-e_z)\cdot f(w) \quad (3)$$

式(3)即是道尔顿公式的近代和现代通用表达形式。道尔顿公式的发展历史,即是风速函数 $f(w)$ 的发展历程。起初, $f(w)$ 采用的是最简单的形式,如取 $f(w)=mw$;1882年Stelling结合前苏联境内水面蒸发实验资料,提出风速函数中一定要设立常数项,且认为采用线性函数的形式,就可以达到良好的模拟效果,即主张取 $f(w)=A+Bw$,后人们公认 $E=(e_0-e_z)\cdot(A+Bw)$ 为Stelling公式^[2]。风速函数中设置常数项 A ,是为了解决许多实验资料中出现的 $w=0$ 时 $E\neq 0$ 的问题,原因在于器测风速为0时,空气的紊动扩散依然存在,水面蒸发并未停止;或因技术性能等方面的原因,当风速很小时,测风仪难以测到接近0的真实风速,器测风速为0,而实际风速并不为0。

道尔顿公式虽然不是从严格的物理、数学理论推导中得出的,但后来众多在不同条件下进行的室内、外水面蒸发实验,均证明了它在物理上的可靠性,故一直被广泛应用,还有不少学者对其进行了深入的、理论上的补充研究。对道尔顿公式中风速函数的理论研究,于20世纪第10年代之后得到显著加强,在以下2个方面取得了重大进展:一是Thornthwaite与Holzman等学者通过模拟分子扩散过程,提出选用 $f(w)=A+Bw^\alpha$ 形式的风速函数较好,其中的 $\alpha=(2-m)/(2+m)$, m 为风剖面(风速廓线)参数,经典风洞实验中取得的 $m=1/7$;一般认为当空气近于中性平衡状态时, m 取 $1/7\sim 1/8$; m 的取值范围为 $0<m<2/3$,相应的 α 在 $0.5\sim 1.0$ 之间($0<\alpha<1$)。二是Sutton与Shih, Svedrup等学者根据整块空气动力学理论和混合理论,推导出 $f(w)=Nw$ (证明19世纪初步采用 $f(w)=mw$ 是可行的),其中的 N 为整块蒸发系数; $E=Nw(e_0-e_z)$ 又称为质量转移公式。

近100多年来,国外建立的以道尔顿公式为基础的水面蒸发经验公式,多采用 $f(w)=Nw$ 风速函数和 $\alpha=1.0, 0.85, 0.76, 0.5$ 的 $f(w)=A+Bw^\alpha$ 风速函数^[3-5]。我国水面蒸发计算方法研究,始于20世纪50年代中期,所建立的水面蒸发计算公式,绝大多数是以道尔顿公式为基础的线性风速函数的经验公式^[6-8],以施成熙先生采用的平方-平方根非线性风速函数 $f(w)=\sqrt{A+Bw^2}$ 较特殊^[1]。总

的来说,我国在水面蒸发计算方法方面所作的研究,主要为检验(验证)国外经验公式和引用国外理论推导模型建立经验公式或作部分改进2个阶段,在风速函数理论研究方面,尚未取得重要突破^[9-11]。

2.2 目前采用的风速函数存在的主要问题

在我国,目前采用的风速函数 $f(w)$ 主要有以下4种形式: $f(w)=Nw$; $f(w)=Nw^\alpha$; $f(w)=A+Bw$; $f(w)=A+Bw^\alpha$,以后两种使用较多。

根据道尔顿蒸发定律,风作为水汽输移的主要动力,风速的加大必然促使水面蒸发的加强,因此,风速函数必须满足 $df(w)/dw>0$ 的条件;但随着风速自零逐渐加大,风对蒸发的促进作用是有所不同的,且在不同风速段有着本质上的差异^[12-13]^{①②},具体表现在:当风速较小时,水面蒸发处于从以自由对流为主向以强迫对流为主的过渡时期,风速加大对于水面蒸发加强的作用非常显著,具有 $d^2f(w)/dw^2>0$ 的特点;当风速很大时,蒸发极为强盛,强烈的蒸发散热使水面严重失热,冷水膜加厚,反过来对于水面蒸发产生一定的抑制作用,风速加大对于水面蒸发加强的作用有所减弱,具有 $d^2f(w)/dw^2<0$ 的特点;两者之间(风速大小一般时期)水面蒸发处于以强迫对流为主的阶段,风速加大对于水面蒸发加强的作用较稳定,具有 $d^2f(w)/dw^2=0$ 的特点。

综上所述,道尔顿公式中的风速函数,应用时满足以下2个条件:

条件1:无论风速大小,均有 $df(w)/dw>0$ 。

条件2:风速较小时, $d^2f(w)/dw^2>0$;风速一般时, $d^2f(w)/dw^2=0$;风速很大时, $d^2f(w)/dw^2<0$ 。

显然,前面提到的4种目前常用的风速函数均不同时具备以上2个条件(只满足条件1,不满足条件2)。

以上结论不仅得到了国外学者理论推导的验证(例如不同风速段的风速廓线特征不同,则风剖面参数也不相同,风速指数 α 也就互不相同^[2]),也得到了国内实验资料的验证。如陈惠泉通过对北京、广州两处室内风洞实验资料分析,得到“风速较小时, $d(E/\Delta e)/dw$ 随 w 加大而增大;风速较大时, $d(E/\Delta e)/dw$ 接近常数”的结论^[14];笔者根据鄱阳湖远岸陆地、岸边半岛、湖心岛屿3处水面蒸发实验资料的对比分析,得出了“ $f(w)=A+Bw^\alpha$ 中的 α 在不同风速的站应采用不同的数值,风速较小的站可取 $\alpha=1$,风速较大的站

注:①水利电力部规划设计局.水面冷却译文专辑(内部材料).1980,1-166.

②陈惠泉,等.水面蒸发与散热系数研究(内部交流材料).1990,15-48.

应取 $\alpha < 1$, 风速越大的站所采用的 α 值也应越小”的认识^[15-16]。

3 风速函数的改进与检验

要使道尔顿公式中的风速函数 $f(w)$ 同时满足 $df(w)/dw > 0$ 和 w 自零逐渐增大 $d^2f(w)/dw^2$ 经历 $> 0, = 0, < 0$ 三个过程这两个条件, 较妥当的办法, 是以3段制的分段函数作为风速函数。为此, 本文采用以下分段函数对道尔顿公式中的风速函数进行改进:

$$f(w) = \begin{cases} a+bw^{\alpha_1} & (\alpha_1 > 1, w \leq w_1) \\ c+dw & (w_1 < w < w_2) \\ e+fw^{\alpha_2} & (\alpha_2 < 1, w \geq w_2) \end{cases} \quad (4)$$

3.1 分段函数的确定

为便于叙述, 令 $w \leq w_1$ 段的风速函数为 $f_1(w)$, $w_1 < w < w_2$ 段的风速函数为 $f_2(w)$, $w \geq w_2$ 段的风速函数为 $f_3(w)$, 即 $f(w)$ 的3个分段函数分别为 $f_1(w) = a + bw^{\alpha_1}$, $f_2(w) = c + dw$, $f_3(w) = e + fw^{\alpha_2}$ 。

在小风速段($w \leq w_1$ 区间), 风速加大的作用可以看作是单方面的, 即起加强乱流扩散的作用, 故将 α_1 设置为常数。而在大风速段($w \geq w_2$ 区间), 风速加大的作用则是双方面的, 既起加强乱流扩散的作用, 又起增强冷水膜阻隔的作用, 风速加大对水面蒸发的作用较小风速段要复杂得多, 因而, α_2 宜设置成随风速而改变的变数(这与风剖面参数随风速变化而有所改变是一致的)^[17]。经试验, 本文取 $\alpha_2 = 1 - g(w - w_2)^\beta$ 。这样一来, 式(4)中便有 $a, b, \alpha_1, c, d, e, f, g, \beta$ 共9个待定系数。

此外, 分段函数的分界点 w_1 和 w_2 也是待定的参数, 需根据实测资料来确定。为提高风速函数系数和分界点率定的可靠性, 本文采用了国内外众多室内外水面蒸发实验资料, 共三大类型: 一是室内风洞实验资料, 有国内(北京和广州)2处和国外(美国与前苏联)2处; 二是湖泊水库漂浮蒸发实验资料, 国内共6站; 三是陆地 10m^2 、 20m^2 、 100m^2 蒸发池蒸发实验资料, 国内共16站, 国外4站。既有多年平均月统计资料, 也有逐月、逐旬统计资料, 还有日、短时段(6小时、12小时)统计资料; 资料有的来自实测记录, 有的从相关文献中摘抄, 还有的是从有关文献的插图中读出的, 共8267站(处)时段(绝大多数为月、旬统计的实测资料)。各站陆地蒸发池与漂浮蒸发器之间的蒸发量进行了统一折算(先作陆地池、器之间的折

算, 再作蒸发器水、陆折算, 折算系数引用文献[1]和文献[18]中的成果), 最后采用的标准蒸发量相应于湖泊水库自然水体的水面蒸发量(以漂浮蒸发器蒸发量的改正值作为湖泊水库自然水体的水面蒸发量, 改正方法见文献[18]、[19]); 各站不同高度、不同场地的风速 w_z 和饱和水汽压差 Δe ($\Delta e = e_0 - e_z$)也进行了统一换算(换算方法见文献[7]和文献[20]), 最后 w 、 Δe 统一到离水面150cm高度处。将所有资料放在一起, 依据风速大小进行分组($w = 0 \sim 1\text{m/s}$ 段每隔 0.2m/s 分一组, $w > 1\text{m/s}$ 段每隔 0.5m/s 分一组, 共分成26组), 统计各组的 $E/\Delta e$ 、 w 平均值, 作为点绘 $E/\Delta e \sim w$ 相关点群分布图(图1)和 $E/\Delta e \sim w$ 关系(其中 $E/\Delta e = f(w)$)分析的依据(E 、 Δe 、 w 的单位分别为 mm/d 、 hPa 、 m/s , 下同)。从图1中点群分布规律, 确定分段函数的分界点为 $w_1 = 1\text{m/s}$, $w_2 = 4\text{m/s}$ 。

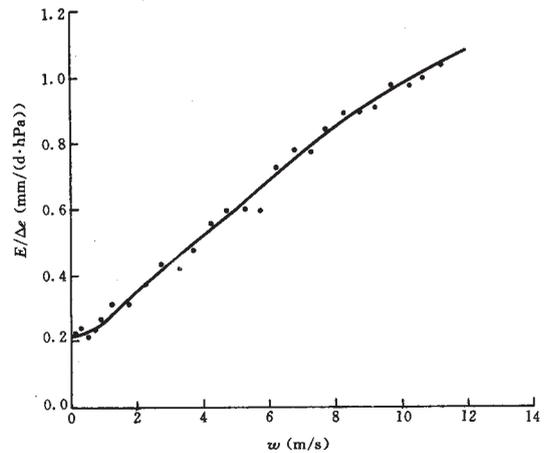


图1 $E/\Delta e \sim w$ 相关点群分布图

由式(4)可知, $f_2(w) = c + dw$ 中只有 c 和 d 这2个待定系数, 可以通过 $E/\Delta e \sim w$ ($w = 1 \sim 4\text{m/s}$)一元线性相关计算一次性得出, 故首先利用符合 $1 < w < 4\text{m/s}$ 条件的资料, 进行 $E/\Delta e \sim w$ 相关分析, 求得 $c = 0.18$, $d = 0.085$, 得出第2段风速函数为 $f_2(w) = 0.18 + 0.085w$ 。

$f_1(w)$ 中的待定系数较 $f_3(w)$ 少, 所以再来考虑确定 $f_1(w) = a + bw^{\alpha_1}$ 中的系数 a, b, α_1 。在 $f_1(w)$ 与 $f_2(w)$ 的交界点($w = 1\text{m/s}$)上, $f_1(1) = f_2(1)$, 即 $c + d = a + b = 0.265$; 根据 $w \leq 1\text{m/s}$ 段 $E/\Delta e \sim w$ 相关点群分布特征, 初定一条

$f_1(w) \sim w$ 曲线,从曲线与纵坐标的交点上可以得到一个 a 值,则 $\ln(E/\Delta e - a) = \ln b + \alpha_1 \ln w$,通过 $\ln(E/\Delta e - a) \sim \ln w$ 辗转相关分析,可以得到一组与初定的 a 值对应的 b 、 α_1 值;重复上述工作,可得出多组 a 、 b 、 α_1 值,取满足 $a+b=0.265$ 的一组 a 、 b 、 α_1 值为 $f_1(w)$ 的系数,为 $a=0.21$, $b=0.055$, $\alpha_1=1.25$,得到 $f_1(w)=0.21+0.055w^{1.25}$ 。

最后确定 $f_3(w)=e+fw^{1-g(w-4)^\beta}$ 中的系数 e 、 f 、 g 、 β 。在 $f_2(w)$ 与 $f_3(w)$ 的交界点 ($w=4\text{m/s}$) 上, $f_2(4)=f_3(4)=c+4d=e+4f=0.52$; 依据 $w \geq 4\text{m/s}$ 段 $E/\Delta e \sim w$ 相关点分布趋势,初绘一条 $f_3(w) \sim w$ 曲线,在曲线左下侧延长线与纵坐标的交点上,可读出一个初定的 e 值,代入 $f=(0.52-e)/4$ 中,便可求出一个与之对应的 f 值;再将 $f_3(w)=E/\Delta e=e+fw^{1-g(w-4)^\beta}$ 作如下变形: $E/\Delta e - e = fw^{1-g(w-4)^\beta} \rightarrow (E/\Delta e - e)/f = w^{1-g(w-4)^\beta} \rightarrow \ln[(E/\Delta e - e)/f] = [1-g(w-4)^\beta] \ln w \rightarrow 1 - \ln[(E/\Delta e - e)/f] / \ln w = g(w-4)^\beta$, 令 $y = 1 - \ln[(E/\Delta e - e)/f] / \ln w$, 则变为 $\ln y = \ln g + \beta \ln(w-4)$, 由 $\ln y \sim \ln(w-4)$ 辗转相关分析,可以求出一组 g 、 β 值;重复上面的工作,得到若干组 e 、 f 、 g 、 β 数值,取其中使 $w \geq 4\text{m/s}$ 段 $E/\Delta e \sim w$ 拟合效果最好的一组 e 、 f 、 g 、 β 值,为本文 $f_3(w)$ 的系数。经过反复计算与对比,决定取 $e=-0.076$, $f=0.149$, $g=0.0612$, $\beta=0.5$, 得出第3段风速函数为 $f_3(w)=0.149w^{1-0.0612(w-4)^{0.5}} - 0.076$ 。

综合以上所有分析结果,得到本文的风速函数的具体表达式为:

$$f(w) = \begin{cases} 0.21+0.055w^{1.25} & (w \leq 1\text{m/s}) \\ 0.18+0.085w & (1 < w < 4\text{m/s}) \\ 0.149w^{1-0.0612(w-4)^{0.5}} - 0.076 & (w \geq 4\text{m/s}) \end{cases} \quad (5)$$

式中, w 为水面以上150cm高度处的平均风速(m/s)。

3.2 风速函数改进效果的检验

将式(5)代入式(3),即是水面蒸发量的计算公式。利用该式,计算前面确定风速函数系数时用到的8267个站(处)时段的水面蒸发量(日蒸发量或月、旬的日平均蒸发量),与实际值比较,统计其拟合误差,见表1。利用相同资料,求得的线性风速函数的经验公式为 $E = \Delta e(0.19+0.081w)$,其拟合误差也一并列于表1。

由表1可知,本文提出的改进型风速函数的拟合误差较小,尤其是对于多站点、大范围室内外实验资料放在一起进行模拟而言,其效果令人满意。与线性风速函数相比,拟合误差明显减小,模拟效果显著提高。特别值得一提的是,线性风速函数在不同风速段出现明显的系统性误差(见表2),改用分段风速函数后,不同风速段的系统性误差得到基本消除(偏大、偏小点数之差占总点数的百分比很小)。

将本文建立的风速函数与国内外十几个类似经验公式进行比较,表明不同学者利用不同途径取得的水面蒸发实验资料 and 不同形式的数学模式建立的风速函数的差异较大,尤其是小风速区间(如 $w < 1\text{m/s}$ 段)和大风速区间(如 $w > 6\text{m/s}$) 的差异突出,其原因有待研究。用本文公式计算的不同 w 下的 $E/\Delta e$ 值,处于绝大多数学者所推荐公式计算值中间,表明本文提出的风速函数是合理、可靠的,具有较强的大范围适应性特征,尤其是在大、小风速段的适应性较其他公式更强(见图2和表3)。

表1 本文风速函数拟合误差统计表

公式	绝对误差总和 (mm/d)	绝对误差均方差 (mm/d)	平均相对误差 (%)	合格率(%)	
				±10%以内	±20%以内
本文公式	41.07	0.29	9.3	70.8	81.7
线性公式	-102.61	0.41	12.3	61.4	72.6

表2 不同风速函数造成的系统性误差统计表

w (m/s)	0~0.5			0.5~2.0			2.0~9.0			>9.0		
	$\Sigma(\Delta E)$	$\Sigma(\Delta E)/\Sigma E$	δ_N	$\Sigma(\Delta E)$	$\Sigma(\Delta E)/\Sigma E$	δ_N	$\Sigma(\Delta E)$	$\Sigma(\Delta E)/\Sigma E$	δ_N	$\Sigma(\Delta E)$	$\Sigma(\Delta E)/\Sigma E$	δ_N
本文公式	78.3	6.5	9.2	380.6	3.0	4.0	-390.7	-2.9	6.7	-27.1	-2.5	8.2
线性公式	-433.2	-36.0	71.2	3587.7	28.0	80.7	-3513.4	-260	78.3	256.3	23.3	74.6

注: Δe 为每个站(处)时段蒸发量的绝对误差(mm/d); E 为每个站(处)时段蒸发量的实际值(mm/d); $\Sigma(\Delta E)/\Sigma E$ 为绝对误差总和与蒸发量总和的百分比(%); δ_N 为偏大、偏小点数之差占总点数的百分比(%)。

表3 国内外多种风速函数对比表

	表达形式	不同w对应的E/Δe值(10 ⁻³ mm/(d·hPa))									
		0.2	0.5	0.7	1	2	3	4	6	8	10
本文公式		217	233	245	265	350	435	520	690	848	979
河海大学公式		223	233	242	257	326	414	519	770	1066	1403
美国A~R公式		264	267	272	281	333	421	545	897	1389	2023
地理所公式		280	309	329	359	458	556	655	853	1050	1248
前苏联公式		227	235	245	264	355	469	593	854	1121	1391
北京(官厅)公式		150	180	200	230	330	430	530	730	930	1130
罗瓦公式		406	414	420	428	457	485	514	570	627	684
湖北(东湖)公式		214	234	248	268	336	404	472	608	744	880
彭曼公式		357	367	374	384	419	453	487	556	624	693
重庆公式		176	201	217	242	323	405	486	650	813	976
山东公式		133	176	202	240	359	472	581	790	991	1187
内蒙古公式		231	255	273	278	383	502	632	915	1224	1553
福建(古田)公式		256	275	288	307	371	435	499	626	754	882
江苏(太湖)公式		238	261	277	300	377	454	531	684	838	992

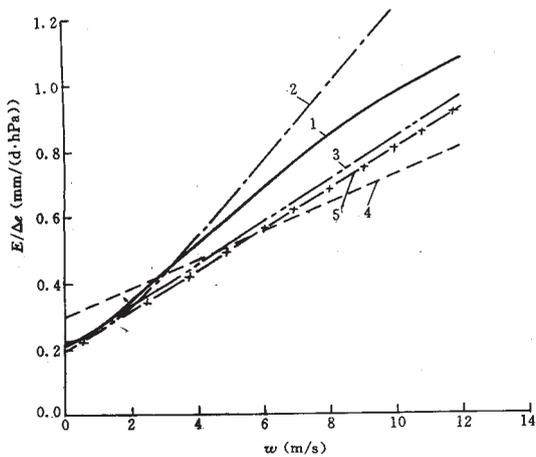


图2 几种风速函数的线型比较

注: 1.本文公式; 2.施成熙公式 $f(w)=0.22\sqrt{1+0.3w^2}$; 3.长江委公式 $f(w)=0.20+0.064w$; 4.前苏联公式 $f(w)=0.298+0.0425w$; 5.美国实验室公式 $f(w)=0.193+0.061w$ 。

4 结语

道尔顿公式是依据道尔顿蒸发定律建立起来的,它把水面蒸发量与饱和水汽压差、风速的关系用数学公式的形式刻画了出来,对于建立迅速、简便、有效地计算水面蒸发量的经验公式具有重大意义。但各地在建立以道尔顿公式为基础的水面蒸发经验公式时,一致认为水面蒸发量与风速关系的模拟十分困难,例如

点绘的 $E-w$ 相关点群分布散乱,或 $E/\Delta e-w$ 相关点群的分布规律不明显。由此可见,道尔顿公式中风速函数的确定既重要又困难,其主要原因就在于,不同风速段风对水面蒸发的作用有着本质上的差别,很难用一个单独的函数式来描述这种差异,以及难以准确地测量到蒸发面上的真实风速。

本文采用3段制的分段风速函数,是对传统单段风速函数进行改进的一个尝试,旨在较客观地反映不同风速段风对水面蒸发作用的本质上的差异。目前国内尚未报道过分段风速函数在道尔顿公式中的应用案例,故希望本文结论能得到更多学者的验证与认同。

参考文献:

- [1] 江苏省海洋湖沼学会,等. 施成熙湖泊与水文文选[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989. 1-189.
- [2] 朱岗昆. 自然蒸发的理论及应用[M]. 北京: 气象出版社, 2000. 1-79.
- [3] 马文·E·詹森. 耗水量与灌溉需水量[M]. 熊远章,等. 北京: 农业出版社, 1982. 1-189.
- [4] 施成熙,等. 陆地水文学原理[M]. 北京: 中国工业出版社, 1964. 23-36.
- [5] 谢群贤,等. 农田蒸发——测定与计算[M]. 北京: 气象出版社, 1991. 14-189.
- [6] 王积强. 中国北方地区若干蒸发实验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990. 1-53.
- [7] 裴步祥. 蒸发与蒸散的测定与计算[M]. 北京: 气象出版社, 1989. 1-63.
- [8] 毛锐,等. 太湖地区湖泊水面蒸发[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1993. 1-108.

(下转第61页)

本文得到齐汉强先生的悉心指点,在此表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] 罗先香, 邓伟, 何岩, 等. 三江平原沼泽性河流径流演变的驱动力分析[J]. 地理科学, 2002, 57(5): 603-810.
- [2] 罗先香, 邓伟, 何岩, 等. 三江平原典型沼泽性河流径流演变特征及趋势分析[J]. 资源科学, 2002, 24(5): 51-57.
- [3] 崔宝山, 刘兴土. 三江平原挠力河流域湿地生态特征变化研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(2): 117-114.
- [4] 高俊琴, 吕宪国, 刘红玉. 湿地冷湿效应初探[J]. 农村生态环境, 2003, 19(1): 18-21.

- [5] 中国科学院长春地理研究所. 三江平原沼泽[M]. 北京: 科学出版社, 1983. 199-200.
- [6] 郭大本, 等. 三江平原土地利用和环境情势变化研究[J]. 地理科学, 1997, 17(增刊): 472-478.
- [7] 陈刚起, 牛汉光, 吕宪国. 三江平原沼泽研究[M]. 北京: 科学出版社, 1996. 5-11.
- [8] 王波, 付宁, 王金河. 论三江平原龙头桥典型区建设的必要性和迫切性[J]. 黑龙江水利科技, 2002, 4(4): 71-72.

作者简介: 赵艳波(1972-), 女, 黑龙江依兰人, 工程师, 主要从事水文与水资源规划设计及研究; 刘正茂(1973-), 男, 湖南双峰人, 环境工程师, 硕士研究生, 主要从事水处理、水资源与湿地环境研究。

Study on Changes of Hydrological Characteristics of Wetland in Naolihe River Basin

ZHAO Yan-bo, LIU Zheng-mao, WU Feng-mei

(Heilongjiang Agricultural Reclamation Survey, Design and Research Institute, Jiamusi 154002, China)

Abstract: This paper presents the basic situation and the characteristics of wetland changes in the Naolihe River Basin. By analyzing the runoff features at the main gauging stations in this basin and their relations during 1955~2000, it has been found that the land evaporation appears a tendency of increasing while the runoff has a tendency of decreasing. The calculation and analysis of the mean annual runoff values from the gauging stations of Caizuizi, Baoqing, Baoan and Hongqiling indicate that the existing wetland in the Naolihe River Basin has a significant function on regulating the runoff from the upper reaches, but the whole capacity shows a tendency of decreasing. According to the runoff change rules of this wetland, the water needed based on the ecological security of the existing wetland is estimated. The research conclusions have important value and guidance for preserving the wetland and allocating water resources of Naolihe River Basin.

Key words: wetland; hydrological characteristics; Naolihe River Basin

(上接第 41 页)

- [9] 张有芷. 我国水面蒸发实验研究概况[J]. 人民长江, 1999, 30(3): 6-8.
- [10] 崔广柏. 湖泊水库水文学[M]. 南京: 河海大学出版社, 1990. 30-40.
- [11] 罗树孝. 水文学辞典[M]. 台北: 茂昌图书有限公司, 1995. 1-500.
- [12] 朱炳海, 等. 气象学词典[M]. 北京: 气象出版社, 1985. 218-246.
- [13] 左大康, 等. 国外蒸发研究的进展[J]. 地理研究, 1988, 7(1): 1-8.
- [14] 陈惠泉, 等. 超温水体水面蒸发与散热[J]. 水利学报, 1989, (10): 27-36.
- [15] 闵騫, 等. 水面蒸发计算中几个问题的研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1993, 26(2): 229-236.
- [16] 闵騫. 水面蒸发计算模型研究[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(1): 41-44.
- [17] 裴步祥. 蒸发和蒸散的测定与计算方法的现状及发展[J]. 气象科技, 1985, (2): 1-6.
- [18] 倪振行. 我国东南沿海地区水库水面蒸发的确定[J]. 水力发电, 1982, 8(7): 47-56.
- [19] 闵騫. 水库(湖泊)水面蒸发量推求方法的探讨[J]. 水文, 1991, 11(5): 39-43.
- [20] 闵騫, 等. 水库水面蒸发量计算方法的研究[J]. 水力发电, 2003, 29(5): 35-40.

作者简介: 闵騫(1958-), 江西南昌人, 工程师, 主要从事湖泊水文水资源与防洪抗旱减灾技术研究。