

# 一种新的水面蒸发计算方法

洪嘉琏 傅国斌

(中国科学院 地理研究所  
国家计划委员会)

**提 要:** 本文应用相似理论, 提出一个考虑自由对流和强迫对流相结合的水面蒸发模式, 并用实测资料对蒸发模式作了检验。

**主题词:** 水面蒸发 相似理论 自由对流 强迫对流

关于水面蒸发计算, 国内外已有许多文献<sup>[1-20]</sup>报道, 这些研究有的是建立在理论基础上的模式, 但大都是根据蒸发池观测资料建立蒸发率与气象要素特征值之间关系的经验模式。

在水面蒸发的经验模式中, 多数是以道尔顿定律为基础, 通常以蒸发率表示蒸发风速的经验函数( $\beta$ )与水汽压差( $\Delta e = e_s - e_a$ )之乘积

$$E = \beta \Delta e \quad (1)$$

式中:  $e_s$ 为水面温度对应的饱和水汽压(hPa);  $e_a$ 为水面上某高度处的水汽压(hPa)。

在许多经验公式中,  $\beta$ 仅与某一高度处的风速有关, 不同研究者在各自实验条件下得出蒸发率与风速关系各不相同。其中多数为一次函数, 即

$$\beta = a + bu \quad (2)$$

式中:  $u$ 为某一高度处的风速(m/s);  $a$ 、 $b$ 为系数。

有些经验公式中取 $a = 0$ <sup>[21]</sup>, 也有幂函数的形式, 即

$$\beta = bu^n \quad (3)$$

式中:  $n$ 为指数。

在自然情况下蒸发率与风速关系的研究产生各种不同的结果, 是因为蒸发池的蒸发率与风速关系的性质主要受近地气层中温度层结的影响<sup>[22]</sup>, 而温度层结的影响在上述经验公式中没有考虑。因此有些作者在公式中引进温度层结项, 取 $\Delta T$ <sup>[23]</sup>或 $f(\Delta T)$ <sup>[24]</sup>, 即把浮力影响项与动力影响项线性叠加起来, 取其与水—气温差的幂次方成正比<sup>[25]</sup>。这个公式在 $\Delta T$ 较大时给出偏保守的结果<sup>[23]</sup>。也有取 $\Delta T/u^2$ <sup>[26]</sup>, 此式当 $\Delta T$ 较大和 $u$ 很小时,  $\Delta T/u^2 \rightarrow \infty$ , 误差很大与实际不符。

综合上述, 本文作者认为现有水面蒸发公式不完善, 其公式结构没有充分反映水蒸发到

湍流大气层中这一过程的物理本质。本文应用相似理论着重讨论了水面蒸发的计算方法。应用相似理论求解蒸发的问题,国外已有一些文献报道<sup>[27-28]</sup>,但这些研究侧重于热水池的蒸发计算,至于用于自然水体的蒸发计算的文献还不多见。

## 1 公式推导

水面上的湍流热通量和水汽通量由下式表示:

$$H_0 = C_p \rho \left( K_n \frac{\partial T}{\partial Z} \right)_{z=0} = C_p \rho D_H (T_0 - T_{1.5}) \quad (4)$$

$$E_0 = \rho \left( K_m \frac{\partial q}{\partial z} \right)_{z=0} = \rho D_w (q_0 - q_{1.5}) \quad (5)$$

式中:  $H_0$  为湍流热通量 ( $W/m^2$ );  $E_0$  为水汽通量 ( $mm/s$ );  $\rho$  为空气密度 ( $kg/m^3$ );  $C_p$  为空气定压比热 ( $J/kg \cdot ^\circ C$ );  $K_n$  和  $K_m$  是热量和水汽的湍流交换系数 ( $m^2/s$ );  $D_H$  和  $D_w$  是热量和水汽的分子扩散速度 ( $m/s$ );  $T_0$  和  $q_0$  是水面温度 ( $^\circ C$ ) 和比湿 ( $kg/kg$ );  $T_{1.5}$  和  $q_{1.5}$  是水面上 1.5m 高度处的温度 ( $^\circ C$ ) 和比湿 ( $kg/kg$ )。

由于近水面大气中的湍流交换经常是自由对流和强迫对流共同作用的结果。因此,热量和水汽的分子扩散速度可表示如下:

$$D_H = D_{H自} + D_{H强} \quad (6)$$

$$D_w = D_{w自} + D_{w强} \quad (7)$$

式中:“自”表示自由对流项;“强”表示强迫对流项。

假定水汽的扩散机制与热的输运机制相同,虽然也有认为  $D_w$  与  $D_H$  具有某些不同之处,但还不能确证。

### 1.1 自由对流时扩散速度

在近水面大气中由于温度局部升高,于是因密度差而引起的气流流动,同时包含在流体要素中热和水汽也就一起流动,称为自由对流热传导和水汽迁移。

根据热传导量纲分析,得到下列关系式

$$Nu = \frac{hx}{\lambda_a} = f(G_r \cdot Pr) \quad (8)$$

式中:  $Nu$  是努塞尔特 (Nusselt) 数,表示水面上温度梯度与流体内的平均温度梯度之比,  $h$  是热传导系数 ( $J/m^2 \cdot s \cdot ^\circ C$ );  $\lambda_a$  是空气的导热率 ( $J/m \cdot s \cdot ^\circ C$ );  $x$  是水面平均宽度 (m);  $G_r$  和  $Pr$  称之为格拉绍夫 (Grashof) 数和普朗德 (Prandtl) 数的无因次数。

$$G_r = g\alpha(T_0 - T_{1.5})x^3/\nu^2 \quad (9)$$

$$Pr = C_p \mu / \lambda_a = \nu / K_a \quad (10)$$

式中:  $g$  是重力加速度 ( $m/s^2$ );  $\mu$  是粘滞系数 ( $kg/m \cdot s$ );  $\nu$  是动力粘滞系数 ( $m^2/s$ );  $K_a$  是导热率 ( $m^2/s$ );  $\alpha$  是体积温度膨胀系数,理想气体  $\alpha = 1/T_k$ , 其中  $T_k$  为绝对温度等于  $273.2 + T_{1.5}$ 。

对近地层大气来说，努赛尔特数 ( $N_u$ ) 与格拉绍夫数 ( $G_r$ ) 和普兰德数 ( $P_r$ ) 的乘积幂次方成正比，而 ( $P_r$ ) 大致为常数。在自由对流中格拉绍夫数起的作用和在强迫对流中雷诺数起的作用相似，剩下比率  $\nu/K_a$  已定义为普兰德数。这样在自由对流中热转移方程可写成：

$$\frac{hx}{\lambda_a} = C \left( \frac{gx^3 \Delta T}{\nu^2 T_k} \right)^{n_1} \cdot \left( \frac{\nu}{K_a} \right)^{n_2} \quad (11)$$

式中： $C$ 、 $n_1$ 、 $n_2$  是待定系数， $\Delta T$  是水面温度与气温之差。

由于自由对流引起的热转移率  $H_o$ ，可以用下列关系式表示：

$$H_o = h \cdot \Delta T \quad (12)$$

将 (4) 式和 (11) 式代入 (12) 式，

$$D_{H自} = C(G_r^{n_1} \cdot P_r^{n_2}) \lambda_a / x C_p \rho, \quad \because \lambda_a / C_p \rho = 2.23 \times 10^{-5} (m^2/s) \\ \therefore D_{H自} = 2.23 \times 10^{-5} C(G_r^{n_1} \cdot P_r^{n_2}) / x (m^2/s) \quad (13)$$

据 Gates 使用平板上的边界层理论得出的自由对流时努赛尔特数 ( $N_u$ ) [29] 在乱流边界层时，

$$N_u = 0.14(G_r \cdot P_r)^{1/3} \quad (14)$$

将 (14) 式代入 (13) 式，

$$D_{H自} = 3.122 \times 10^{-6} (G_r \times P_r)^{1/3} / x (m^2/s) \quad (15)$$

又因普兰德数  $P_r \approx 0.7$ ，因此，

$$D_{H自} = 2.772 \times 10^{-6} \left( \frac{gx^3 \Delta T}{\nu^2 T_k} \right)^{1/3} / x (m^2/s) \quad (16)$$

## 1.2 强迫对流时扩散速度

根据平板上边界层理论，在强迫对流时，与气流平行的表面温度均匀的平板，其局部努赛尔特数 ( $N_u$ ) [29]

在乱流边界层时，

$$\frac{hx}{\lambda_a} = 0.0273(P_r)^{1/3} \cdot (R_x)^{0.8} \quad (17)$$

式中： $R_x = \frac{u_{1.5} x}{\nu}$  是局部雷诺数， $u_{1.5}$  为 1.5m 高度处的风速 (m/s)。

将 (17) 式变换，两边除以  $C_p \rho$

$$h / C_p \rho = 0.0273(P_r)^{1/3} \cdot R_x^{0.8} \cdot \lambda_a / x C_p \rho \quad (18)$$

$$\therefore h / C_p \rho = D_{H强}, \quad \lambda_a / C_p \rho = 2.23 \cdot 10^{-5} (m^2/s)$$

$$\therefore D_{H强} = 6.09 \cdot 10^{-7} (P_r)^{1/3} \cdot (R_x)^{0.8} / x (m^2/s) \quad (19)$$

$P_r$  为常数  $\approx 0.7$  代入，则 (19) 式为

$$D_{H强} = 5.407 \cdot 10^{-7} \left( \frac{u_{1.5} x}{\nu} \right)^{0.8} / x (m^2/s) \quad (20)$$

在这里  $R_x = u_{\infty} x / \nu$  是大小  $x$  的平板上的雷诺数，把 (17) 式用于实际下垫面 (包括水面) 所求得的关系，许多学者 (Martin (1943)、Slatyer (1964)、Powell (1942))、

Raschke (1956) 通过实际观测结果和根据边界层理论计算的结果十分一致。但由于自然下垫面的复杂性,也有一些学者认为应用边界层理论的结果是有限度的,如武智等人指出,根据理论值与实验值的比较,必须在边界层理论求得热传导系数和水汽输送系数乘以订正值<sup>[29]</sup>。不过这一点笔者认为尚有待进一步探讨。

将(16)式和(20)式代入(7)式和(5)式,则

$$E_0 = \frac{\rho}{x} \left[ 2.772 \cdot 10^{-6} \left( \frac{gx^3 \Delta T}{v^2 T_k} \right)^{1/3} + 5.047 \cdot 10^{-7} \left( \frac{u_{1.5} x}{v} \right)^{0.6} \right] \cdot (q_0 - q_{1.5}) (m^2/s) \quad (21)$$

将 $q$ 转换成 $e$ , 则

$$E_0 = \frac{0.622\rho}{xp} \left[ 2.772 \cdot 10^{-6} \left( \frac{gx^3 \Delta T}{v^2 T_k} \right)^{1/3} + 5.407 \cdot 10^{-7} \left( \frac{u_{1.5} x}{v} \right)^{0.6} \right] (e_0 - e_{1.5}) (m^2/s) \quad (22)$$

式中 $p$ 是气压(hPa);  $(e_0 - e_{1.5})$ 是水汽压差(hPa)。

## 2 水面温度和湿度订正

### 2.1 水面温度订正

在水域表面通常有水面冷膜存在使温度降低,据精确测定冷表面膜温度差的平均值为 $0.3^\circ\text{C}$ 。因此对水面温度( $T_0$ )需进行订正,即

$$T_n = T_0 - 0.3^\circ\text{C}$$

式中 $T_n$ 为订正后水面温度,因此 $e_n$ 为在水面温度 $T_n = T_0 - 0.3^\circ\text{C}$ 时的饱和水汽压。

### 2.2 湿度订正

水汽密度比干空气小,强烈蒸发时水汽的垂直梯度往往很大,这对热力稳定度可以产生相当大的影响。为了考虑水汽对空气密度的影响,可引入水-气虚温差。

湿空气的状态方程为:

$$p = \frac{\rho R T_k}{1 - 0.378e/p} \quad (23)$$

式中 $R$ 为干空气的气体常数( $2.876 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ )。

由于水汽的存在( $e > 0$ ),使同样 $P$ 、 $T$ 条件下的空气密度减小。如果引进虚温( $T_v$ )

$$T_v = \frac{T_k}{1 - 0.378e/p} \quad (24)$$

则湿空气的状态方程可写成与干空气的状态方程相类似的形式

$$P = \rho R T_v \quad (25)$$

由于 $0.378e/p \ll 1$ , 所以

$$T_v \approx T_k (1 + 0.378e/p) \quad (26)$$

则 $(T_{vn} - T_{v1.5})$ 为

$$\Delta T_v = (373.2 + T_n)(1 + 0.378e_n/p) - (273.2 + T_{1.5})(1 + 0.378e_{1.5}/p) \tag{27}$$

为了正确估算水面蒸发中浮力的影响，可用 $\Delta T_v$ 代替（22）式中 $\Delta T$ 。

如果 $\rho$ 为 $1.276\text{kg/m}^3$ ； $g$ 为 $9.8\text{m/s}^2$ ； $v$ 取 $1.56 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ ； $x$ 取 $20\text{m}^2$ 蒸发池直径 $5.04\text{m}$ ；时段以日计，代入（22）式，

则 $20\text{m}^2$ 蒸发池日蒸发量计算公式如下：

$$E_{20} = \frac{187.98}{P} \left[ 3.446 \left( \frac{\Delta T_v}{T_k} \right)^{1/3} + (u_{1.5})^{1/3} \right] (e_n - e_{1.5}) \text{ mm/d} \tag{28}$$

3 公式检验和误差分析

应用中国科学院禹城综合试验站1989年4—10月期间共194天气象资料对（28）式进行验算，并与该站同期 $20\text{m}^2$ 蒸发池实测蒸发量进行比较。将两者蒸发量点绘成图（图略，一编者），从图中看出绝大部分点都聚集在1：1直线上方，表明公式计算值比实测值偏低，经计算平均略低5.1%，但两者之间仍然有较高的相关性，相关系数为0.928，回归系数 $b=0.929$ 。通过 $t$ 法显著性检验， $t=34.4592$ ， $t_{0.01}=2.5758$ ，因为 $|t|>t_{0.01}$ ，故相关系数 $r=0.928$ ，在 $\alpha_1=0.01$ 的水平上显著。表明公式计算值与实测值的相关系数是高度显著的。

表 1 应用国内外常用水面蒸发公式验算的误差比较  
The comparison among the model with some famous evaporation formula

公 式 名 称	相对误差 (%)			≤各级误差的天数占总 样本天数的百分数			
	最大	最小	平均	≤5%	≤10%	≤20%	≤30%
美国公式* $E=0.251U_{1.5}(e_0-e_{1.5})$	33.9	-0.6	29.1	11.9	21.4	39.9	57.7
扎依可夫公式 $E=0.15(e_0-e_{1.5})(1+0.72u_{1.5})$	-51.5	-1.0	23.5	7.7	16.7	50.8	69.0
施成熙公式 $E=0.22(e_0-e_{1.5})\sqrt{1+0.31u_{1.5}^2}$	-53.8	-1.1	26.5	3.0	8.3	34.5	63.7
禹城站经验公式 $E=(0.334+0.051u_{1.5}-0.018\Delta T)(e_0-e_{1.5})$	62.9	0.2	17.2	19.0	36.3	65.5	89.3
本文公式	33.5	-0.1	13.4	23.2	46.9	75.3	93.3

\* 美国经验公式原式为 $E=0.291A-0.005u_{1.5}(e_0-e_{1.5})$ ，式中 $A$ 为水域面积（ $\text{m}^2$ ），本文用 $20\text{m}^2$ 蒸发池的概量代入。

为了检验公式的精度还进行相对误差的计算。计算结果表明在 194 天样本中, 相对误差  $\leq 5\%$  占总样本天数的 23.2%;  $\leq 10\%$  占 46.9%;  $\leq 20\%$  占 75.3%;  $\leq 30\%$  占 93.3%。最大相对误差为 33.5%; 最小相对误差为  $-0.1\%$ ; 194 天平均相对误差为 13.4%, 其中正误差占 73 天, 平均为 11.3%; 负误差占 121 天, 平均为  $-14.6\%$ 。

为了评定 (28) 式应用精度还与国内外常用水面蒸发公式<sup>[30]</sup>进行验算的误差比较 (表 1)。由表 1 看出, 本文公式的相对误差最小, 其中以美国经验公式误差最大, 施氏和扎氏公式次之。美国经验公式中  $A^{-0.05}$  数量是根据水域面积从  $4000\text{m}^2$  到  $100\text{km}^2$  资料获得的, 这个数值如用  $20\text{m}^2$  蒸发池概量代入计算, 将高于大水体 0.653—0.767 倍。代入系数  $0.291A^{-0.05}$  计算, 对于面积为  $20\text{m}^2$  蒸发池等于 0.251, 而水面积为 3 和  $10\text{km}^2$  是 0.195 和 0.183。由此可知参数在蒸发面减小时将引起蒸发量增加。因此, 此式不适用计算小水体 (如大型蒸发池) 的蒸发量。施氏和扎氏公式属于道尔顿型经验公式, 由于式中未考虑湿度层结对蒸发的影响, 同样会产生较大的误差。禹城站经验公式, 由于式中引进温度层结项, 显然误差要小些, 略比本文公式的平均相对误差大 4%。对于缺乏大型蒸发池资料的地区, 作为一种独立的计算方法, 利用 (28) 式作日蒸发量计算, 尚能满足生产上的应用精度。

### 参 考 文 献

- [1] Millar, F.G.. Evaporation from free water surfaces, Canadian Meteorol. Memoirs, 1 (2) 1937.
- [2] Swerdrup, H.U.. On the evaporation from the oceans, Journal of Marine Res., 1937, 1 (1):
- [3] Cabot, H.W. and Doherty, B.. Measurement of evaporation from land and water surfaces U.S. Dep., Agric. Research Serv., (1970), 10.
- [4] Лайхман, Д.И. Трансформация воздушной массы под влиянием испаряющей поверхности, (Метеорология и гидрология) No. 1947.
- [5] Penman, H.L.. Natural evaporation from open water, bare soil and grass, Proc. Roy. Soc., A. 193, 1914.
- [6] Зайков, Б.Д.. Испарение с водной поверхности прудов и малых водохранилищ на территории, СССР, труды ГИ, вып. 21 (75), 1919.
- [7] Kouler, M.A., Lake and Pan evaporation water-1055 investigation, Vol. 1, Rep., 1952.
- [8] А.П.勃拉斯拉夫斯基, З.А.维库里纳. 水库表面蒸发标准. 北京: 水利电力出版社, 1958.
- [9] Kouler, M.A., Nordenson F.I. and Baker D.R.. Evaporation Maps for United States, U.S. Weather Bureau, Technical Paper No. 37, 1959.
- [10] Harbeck, G.E., A practical field technique for measuring reservoir evaporation using mass-transfer theory. U.S. Geol. survey, (Prof. Paper 112-E) Washington, U.S. Dept. of the Interior, 1962.
- [11] Stall, J.B., W.J. Roberts, New methods for determining lake evaporation 1055, J. Amer. Water Works Association, 1967, 59 (10):

- (12) Кузнецов, В.И., Т.Г. Федорова, (равнительная оценка методов расчета испарения с водоемов, труды, гги, вып.152, 1968.
- (13) 邓根云.水面蒸发量的一种计算方法,气象学报, 1979, 37 (3):
- (14) 陈宏藩.水面蒸发及其折算系数的研究.水资源研究, 1980, (1):
- (15) 毛锐.太湖、团湖水面蒸发初步研究,海洋与湖沼, 1981, 9 (1):
- (16) 孙芹芳.10平方米蒸发池水面蒸发实验研究.水文, 1981 (4):
- (17) 濮培民等.极端不稳定温度层结下的水面蒸发.见:中国海洋湖沼学会水文气象学术会议 (1980) 论文集,北京:科学出版社, 1982.
- (18) 洪嘉璉.有限水域表面蒸发的计算,地理集刊,第15号,北京:科学出版社, 1985.
- (19) 洪嘉璉、王淑清.京津唐地区水面蒸发估算及其分布特征,地理研究, 1987, 6 (1):
- (20) [苏联]A.A.索科洛夫, [澳]T.G.查普曼编著.水量平衡计算方法——研究和实践的国际指南,李驾三等译.北京:科学出版社, 1988.31-39.
- (21) Pailey, P.P., E.O. Mordeno and J.f. Kennedy, Winter-Regime. Surface heat IOSS from heated streams, IHR Report, 155, 1947.
- (22) М.И.布德科, 自然条件下的蒸发,徐淑英等译,北京:科学出版社, 1958, 22-23.
- (23) Ryan, P.J., D.R.F. Harleman and K.D. Stolgenbach, Surface heat IOSS from colling Ponds. Water Resources Research, 1974, 10 (5), 930-938.
- (24) Браславский, А.П., С.Н. Нуркалив, новая формула расчета испарения с учетом разности между водой и воздухом. проблемы гидроэнергетики и водного хозяйства. вып. 4: 195—206, 1966.
- (25) Fishenden, M. and D.A. Saunders, An introduction to heat transfer, Clarendon Press, 1950.
- (26) Константинов, А.Р., обоснование методики расчета испарения по данным метеорологических станций. труды гги. вып., 54: 5—74. 1956.
- (27) Adams E.E, Douglas J. Coseer and Karl R. Helfrich, Evaporation from heated bodies; predisting combined forced plus free convection, Water Resources Research Vol.26 No.3, 425-435, 1990.
- (28) Richard N. Weisman and A.M. ASCE, Comparison of warm water evaporation equations, Journal of the hydraulics division. HY10, October 1975.
- (29) [日]坪井八十二等编,新编农业气象手册.侯宏森等译,北京:农业出版社, 1985, 96-97.
- (30) 洪嘉璉,水面蒸发的计算,农田蒸发研究.北京:气象出版社, 1991, 164-171.

## A METHOD OF ESTIMATION OF EVAPORATION FROM WATER SURFACE

Hong Jialian Fu Guobin

(Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences and State  
Planning Commission of the People's Republic of China)

**Subject terms:** evaporation from water surface, similarity theory,  
free convection, forced convection

### Abstract

Based on the similarity theory, this paper points out a new method in which free convection and forced convection are taken into account in the estimation of water surface evaporation. To compare the estimated water surface evaporation by the model with observed water surface evaporation in Yucheng Experimental Station, CAS, we get that the average estimated evaporation value is about 5.1% less than that of the observed and the average relative error is 13.2%. The coefficient between estimated water surface evaporation value and observed value reaches 0.928, which illustrates the model has a high precision and is likely advisable for application. Finally, the authors compare the model with some famous water surface evaporation's formula at home and abroad.