

自由对流水面蒸发系数

——兼评“水面蒸发系数公式探讨”

毛世民¹, 陈惠泉²

(1. 安徽省·淮委水利科学研究院, 安徽 蚌埠 233000; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

文献[1]从蒸发的物理机制方面答复了文献[2]对“超温水体水面蒸发与散热”^[3]的质疑;阐述了水面蒸发系数包含水气温差项是蒸发研究的重要进展,建立的水面蒸发系数公式基于蒸发率的实际观测,不存在“与对流散热无法截然分开”的问题,环境参数可控风洞的蒸发系数试验具有较高的精度和准确度。对上述针对性的回应,“水面蒸发系数公式探讨”^[4]一文并未作正面讨论,而是从冷却塔散热的概念出发提出以下论点:(1)蒸发系数公式包含水气温差项,违背了对流散热通量与水气温差的一次方成正比的原则;(2)水面蒸发系数公式应包含水温参数而不应包含水气温差;(3)湖面蒸发与冷却塔的蒸发相似;(4)水面蒸发系数的模式应为 $\alpha = f(W)(a + bT_s)^{-n}$ 。

为了澄清混淆的概念,有必要根据实验资料和蒸发机理对一些基本观点作进一步探讨。

1 水面蒸发的四种状态

水面蒸发的本质是质量传输(潜热传输),直接受风力强迫对流和热力不稳定自由对流的影响。按照两者作用的相对强弱,水面蒸发有四种状态:自由对流(极端不稳定层结)、强迫对流(极端稳定的中性层结)和介于两者之间的偏斜羽流和 unstable 强迫对流,示意如图1^[5]。

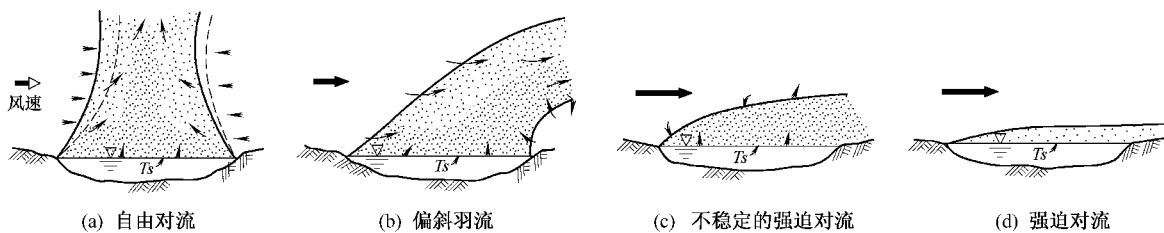


图1 水面蒸发状态

对于强迫对流蒸发,根据不同的观测资料,提出有数以百计的风速函数公式。对于自由对流蒸发,从20世纪60年代以来,也有不少理论的和实验的成果。有关强迫对流与自由对流综合作用的研究,主要针对火/核电厂废热排放利用水面冷却问题而开展的,虽然在如何描述两者综合作用方面不同研究者还存在分歧,但都认为水气温差是影响蒸发系数的重要因素。

2 自由对流的水面蒸发

水气温差形成水面空气与上层空气的密度差,是无风或弱风条件下水面蒸发的主要驱动力。下垫面温度高于气温形成的浮力自由对流现象,在日常生活和自然界中屡见不鲜:一杯热水,有水气上升;暖气片上空气跃动;吐鲁番火焰山在夏季看似冒烟。浮力对流导致气团混合,垂直输移,使水面发射的水分子得以扩散,促进水面蒸发。Shulyakorskiy在20世纪60年代即提出自由对流蒸发与水气温差的1/3次方相关^[6]。文献[7]从自由对流传质比拟加热平板传热得出自由对流的水面蒸发系数公式:

$$\alpha = 0.14 \frac{LM}{RT_s} \left[\frac{g\beta a^2 (T_{sv} - T_{av})}{\nu} \right]^{1/3} \quad (1)$$

式中： L 为水的汽化潜热； M 为水汽分子质量； R 为气体常数； T_s 为以绝对温标计的平均气温； a 为空气分子传热系数； g 为重力加速度； β 为空气的热膨胀系数； ν 为空气运动黏滞系数； $(T_{sv} - T_{av})$ 为水气虚温差，是计及水汽轻于空气的浮力作用，代替水气温差 $(T_s - T_a)$ ， T_s 、 T_a 相应为水温 and 气温。

文献 [7] 并用试验室的 $1.1\text{m} \times 1.1\text{m}$ 及 $7\text{m} \times 12\text{m}$ 的蒸发池的实测资料验证上式，得出蒸发系数

$$\alpha = 2.7 (T_{sv} - T_{av})^{1/3} \quad \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \quad (2)$$

Adams 等在美国地热试验站 East Mesa 及 Savanna 河水厂（水温约 70°C ）的蒸发观测，检验了式 (2) [5]；濮培民等根据晋阳湖室内蒸发试验及北京小汤山温泉等地极端不稳定层结的蒸发资料得到 α 与 $(T_{sv} - T_{av})^{1/2}$ 相关；文献 [3] 提供的水面蒸发试验成果也得到 α 与 $(T_s - T_a)^{1/2}$ 或 $(T_{sv} - T_{av})^{1/2}$ 的关系。认为蒸发系数不包含水气温差项显然与实验成果相悖，也不能解释无风条件下的蒸发现象。

3 关于水温对蒸发系数的影响

水温对蒸发率有决定性的影响，反映在饱和水汽压 e_0 随水温增高而增大。但水温与蒸发系数只有低阶的负相关。在水利工程和水环境工程涉及的蒸发问题中，水温 T_s 变幅不大，以绝对温标计的 $T_s = 273 + T_s$ 变化幅度更小。从精度和谐和简化计算考虑，水温对蒸发系数的影响常可忽略不计。而水气温差对蒸发系数则有明显的影响，特别是在低风速情况下，这种影响不容忽视。

在环境参数可控风洞进行的单因子相关试验验证了上述结论 [3]，举例见表 1。

表 1 水面蒸发系数单因子相关试验示例

风速分级 $/(m \cdot s^{-1})$	相对湿度 $/\%$	水气温差 $/^\circ\text{C}$	表面水温 $/^\circ\text{C}$	蒸发系数 / $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1})$	蒸发系数变化 $\Delta\alpha$	相对变化 $\Delta\alpha/\bar{\alpha}$
0.5	56	0.4	25	4.8		
0.5	56	0.4	30	4.8	0.0	0%
0.5	56	5.0	30	6.2	0.9	14%
0.5	56	10.0	30	7.1		

由表 1 可知，在其他参数不变的情况下，水气温差相同，水温 T_s 增加 5°C ，对 α 并无影响，而同一表面水温，水气温差 $T_s - T_a$ 增大 5°C ， α 增大则有 14%。风洞试验得到的 $\alpha = f(w, \Delta T)$ 的曲线簇，形象地描述了自由对流与强迫对流综合作用下，水气温差 ΔT 的影响随风速增大而减小的变化（图 2）。

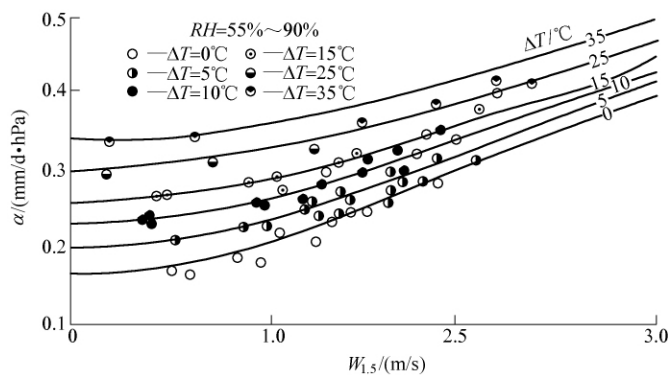


图 2 $\alpha - (\Delta T, W)$ 关系曲线

文献 [4] 虽指出“水温变化小时，其影响可不必考虑”，但仍认为是水温而非水气温差影响水面蒸发系数；不仅如此，还建议水面蒸发系数采用相同于冷却塔给出的蒸发系数经验模式。

$$\alpha = f(W) (a + bT_s)^{-n} \quad (3)$$

4 水面散热与冷却塔散热的异同

水面散热与冷却塔散热的共性是都以蒸发散热为主,但两者的物理机制、边界条件、影响因素大不相同。包括:(1)水面散热包括蒸发、对流和幅射三种机制的作用,冷却塔散热不包括幅射的作用;(2)水面散热通过水体表面传输,冷却塔散热是通过淋洒为水滴、水膜的表面传输;(3)水面蒸发散热是超温引起的附加蒸发散热,冷却塔蒸发散热是全部蒸发散热;(4)相同的废热排放,水面散热需要的水面面积远大于冷却塔的的面积,两者不是同一个数量级;(5)水面蒸发与水体蓄热、水体中热传导、近地层大气的温度层结和紊动特性密切相关,冷却塔蒸发受环境的影响小,受塔中填料及喷溅设备的影响大;(6)水面蒸发热通量可以通过测定蒸发率直接得到,冷却塔的蒸发热通量与对流热通量不能截然分开。

综上所述,由冷却塔得到的蒸发系数模式不能拓展用于计算水面蒸发。

5 蒸发散热系数与对流散热系数的关系

根据紊流扩散理论,质量或能量的传输通量都是与紊动扩散系数和该量的梯度的乘积相关。对于水汽传输通量 $\phi_e = \alpha(e_0 - e_a)$;对于感热传输通量 $\phi_c = \alpha_c(T_s - T_a)$ 。由于蒸发通量易于量测,感热通量较小且不易量测,常采用比拟的作法,假定两者的紊动扩散系数相等将两者相关。尽管对这个假定存在争论,已有研究表明在整个中性层结和不稳定层结的范围内,这个假定还是适用的。Bowen 根据这个假定导出 Bowen 比:

$$\phi_c = R\phi_e; \quad R = b\left(\frac{T_s - T_a}{e_s - e_a}\right) \quad (4)$$

可以认为 $(e_0 - e_a)$ 和 $(T_s - T_a)$ 分别是蒸发和感热输移的内因(或潜力), α 和 α_c 反映空气流场的紊动扩散特性,是外因(或驱动力)。自由对流影响紊动扩散,必然影响 α 和 α_c 。 α_c 的公式中包含水汽温差项,从而导致 ϕ_c 不再与 $(T_s - T_a)$ 的一次方相关。承认不承认 α 公式包含水汽温差项这一客观事实,是文献[1 3]与文献[2 4]的主要分歧。

6 结语

水面蒸发受风力强迫对流与浮力自由对流的驱动。对于有热负荷的水体,自由对流作用不容忽视。蒸发系数公式自应包含水汽温差参数。水温对蒸发系数有低阶的负相关;一般水工程及水环境的蒸发问题,可以忽略不计。水面散热与冷却塔散热具有共性和各自的特性。科研工作更应重视对其个性的研究。根据冷却塔研究得到的蒸发系数经验公式,不适用于水面蒸发计算。

参 考 文 献:

- [1] 毛世民,陈惠泉.对“水面散热焓差公式及其应用”的讨论[J].水利学报,2004(9):127-128.
- [2] 赵振国.水面散热焓差公式及其应用[J].水利学报,2004(2):34-38.
- [3] 陈惠泉,毛世民,何树椿,等.超温水体水面蒸发与散热[J].水利学报,1989(10):27-36.
- [4] 赵振国.水面蒸发系数公式探讨[J].水利学报,2009,40(12):1440-1443.
- [5] Adams E E, Cosler D J, Helfrich K R. Evaporation from heated water bodies: predicting combined forced plus free convection [J]. Water Resources Research 1990, 26(3):425-435.
- [6] Shulyakovskiy L G. Formula for computing evaporation with allowance for temperature of free water surface. [M]. sov. hydrol. selec pap, 1969:566-573.
- [7] Ryan R J, Harleman D R F, Stolzenbach K D. Surface heat loss from cooling ponds [J]. Water Resources Research, 1974, 10(5):930-938.
- [8] 濮培民,等.极端不稳定温度层结下的水面蒸发[C]//中国海洋湖沼学会水文气象学学术会议(1980)论文集.北京:科学出版社,1982:49-60.