

西藏盐湖卤水蒸发速率的实验与计算

齐文^{1,2,3)}, 郑绵平^{1,2,3)}

1) 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室,北京,100037; 2) 中国地质科学院矿产资源研究所,北京,100037; 3) 中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心,北京,100037

内容提要:本文对国内外水面蒸发速率的研究进行了综述,总结了西藏扎布耶盐湖 $\Phi 20$ cm 蒸发皿淡水蒸发量与气温、降水、日照的相关关系,提出了改进的扩展彭曼公式法,用于较为准确地计算盐湖卤水蒸发速率,并以西藏扎布耶盐湖为例计算了盐湖卤水蒸发。该方法可以应用于盐湖湖面蒸发与水量均衡计算,也可以应用于盐湖开发中的盐田工艺设计计算与实际生产应用。

关键词:西藏盐湖;卤水蒸发速率;扩展彭曼公式

近百年来,由于全球变暖与降水变化,盐湖水位出现加速变化趋势,影响到资源开发与生态环境。蒸发是内陆盐湖水分排泄的唯一途径,要认识盐湖水位变化规律,卤水蒸发速率的计算是关键。目前淡水蒸发研究很多,而卤水蒸发的工作很少(Maidment, 2002; 朱岗昆, 2000),本文综述了国内外卤水蒸发速率的研究,总结了西藏扎布耶盐湖卤水蒸发速率的观测数据,提出了扩展彭曼公式法计算盐湖卤水蒸发速率,可以较为准确地计算盐湖或盐田卤水蒸发速率。

1 蒸发速率的测定与折算

一般通过小型蒸发皿观测蒸发速率,并折算为湖面蒸发量(比蒸发系数法)。这种方法误差较大但简便易行。我国气象台站一般使用直径 20 cm 的金属质“小型蒸发皿”观测蒸发量,而水文观测站一般使用 E601 蒸发器。俄罗斯长期使用面积 3000 cm² 的 ггн-300 蒸发器,美国天气局使用 A 型蒸发器(直径 1.21 m、深 0.255 m 的圆盘,安放在高出地面 0.15 m 的木框架上)。也可以使用湖面飘浮式蒸发皿,或面积为 20 m² 的蒸发池(Maidment, 2002)。

蒸发速率不仅与气象因素有关,还与蒸发器的大小、深度、材质以及安置环境有关。卤水蒸发速率还与卤水盐度与成分有关。实验表明(洪嘉璉等, 1996),圆形蒸发面直径大于 4 m² 时蒸发率变化极其平缓,池深在 2 m 以上时池深变化对蒸发不再有

影响。20 m² 以上的蒸发池蒸发速率与开阔湖面的蒸发速率很接近,可以代表自然水面的蒸发值(Maidment, 2002)。我国一些湖泊蒸发实验站多采用大型蒸发池进行蒸发测定。我国各地水面蒸发折算系数有很多实验与总结(表 1)(王远明等, 1999)。

表 1 全国水面蒸发折算系数

Table 1 Pan coefficients of evaporation from water surfaces in China

仪器型式	东北区	华北区	华中区	华南区	康滇区	青藏区	蒙新区	全国
E-601	0.98	0.93	0.95	0.97	0.94	0.88	0.83	0.93
$\Phi 80$ cm	0.81	0.80	0.84	0.72	0.80	0.73	0.72	0.77
$\Phi 20$ cm	0.67	0.51	0.69	0.68	0.63	0.60	0.55	0.62

还可以进一步总结折算系数与关键气象要素的关系,如折算系数与湿度(李万义, 1997)或风速(奚玉英等, 2002)的经验关系式,获得更加可靠的折算系数。但这种关系式推广到其他湖泊时仍可能产生较大误差。

2 蒸发速率计算的经验公式

计算自由水面蒸发速率的方法很多,如水量平衡方法(Crappier et al., 1996; Nicholson et al., 2000; Tate et al., 2004)、能量平衡方法(Vallet-Coulomb et al., 2001; Maidment, 2002; Rowe et al., 2004)以及各种经验公式法。经验公式是根据实测蒸发量与气象要素的统计关系建立的,主要有

注:本文为国家自然科学基金(编号 40573026)和科技部公益性基础研究项目(编号 2005DIA3J066)资助成果。

收稿日期:2007-09-07;改回日期:2007-10-25;责任编辑:周健。

作者简介:齐文,男,1966年生,研究员。主要从事盐湖资源与环境研究。电话:010-68999549;Email:qi.wen@263.net。

两类:一是蒸发量与气温关系式,二是蒸发量与饱和差及风速的关系式(道尔顿经验公式)。经验公式简洁、简单,应用较方便,但由于影响蒸发的因素较多,各地建立的经验公式应用到其他地方时,误差会较大。彭曼公式法综合考虑了太阳辐射因素和湍流扩散条件,具有较好的理论基础,是应用最广、精度较高的水面蒸发速率计算方法。

2.1 蒸发量与温度的关系式

在欧美等地应用最广泛的是桑斯韦特公式,它根据月平均气温和该月平均昼长数据,计算月可能蒸发量(Maidment, 2002)。我们根据扎布耶地区的气象观测数据,总结了 $\Phi 20$ cm点蒸发皿月蒸发量与其他气象因素月均值的相关系数,进行了R型因子聚类分析(图1),表明蒸发量主要与温度呈强正相关,与日照、云量、降水量也有一定的相关性。因此运用最小二乘多项式拟合,得出根据月均温计算月蒸发量的公式:

$$E_m = 10.4122 \times T_m + 183.2071$$

式中: T_m 为月均温($^{\circ}\text{C}$), E_m 为 $\Phi 20$ cm蒸发皿的月蒸发量(mm)。该拟合公式相关系数 $r=0.8560$,方程的方差分析 F 值的显著水平 $p<0.0001$,说明拟合结果是合理的。

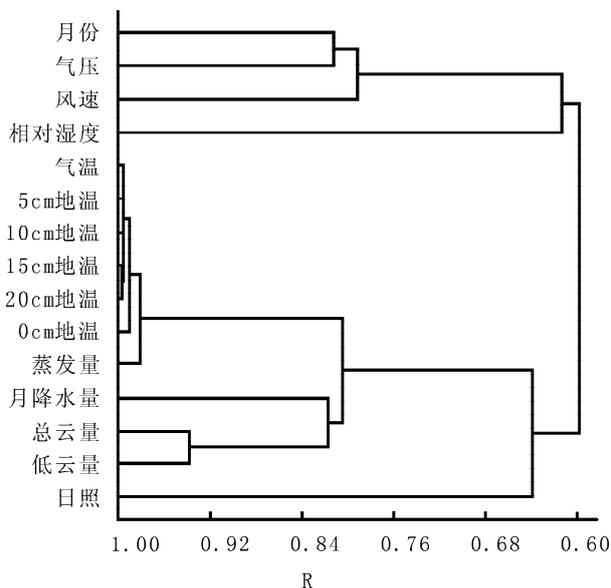


图1 气象因素R型聚类图谱

Fig. 1 R-Cluster analysis of meteorological parameters

为了提高蒸发量计算精度,可以进一步考虑蒸发量与日照、云量、降水量之间的相关性。用多项式回归分析建立了月蒸发量 E_m 与月均气温 T_m 、月降水量 P_m 、月日照时数 S_m 之间的回归方程(图2):

$$E_m = 11.0802 \times T_m - 0.8138 \times P_m + 0.2274 \times S_m + 3.2079 \times C_m + 124.3044$$

式中: T_m 为月均气温, P_m 为月降水量(mm), S_m 为月日照时数(h), C_m 为月均云量(成,满天云为10成)。该模型相关系数 $r=0.9461$,方程的方差分析 F 值的显著水平 $p<0.0001$,远远小于0.05,说明所建立的回归方程是合理的,各回归系数的偏相关系数的显著水平也小于0.05。

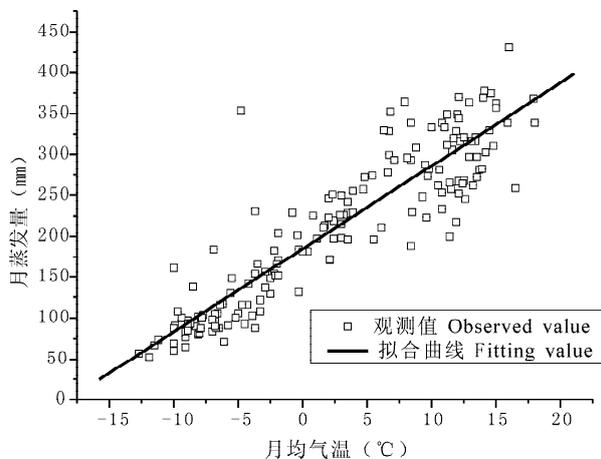


图2 月均蒸发量与月均气温的最小二乘多项式拟合

Fig. 2 Least square polynomial fitting of monthly mean evaporation and monthly mean air temperatures

2.2 道尔顿形式经验公式

蒸发的速率与蒸发面上方空气的垂直湿度差异(饱和差 d)及空气的运动强度(风速)有关,据此道尔顿提出了水面蒸发的公式(Maidment, 2002):

$$E_0 = f(u)(e_0 - e_a)$$

式中, e_0 为相应于蒸发面温度的饱和水汽压, e_a 为实际水汽压,实际应用中可以根据水面温度或者水面上方气温建立道尔顿公式,计算水面蒸发; $f(u)$ 为风速函数,一般根据常规气象观测数据拟合得到。世界各地总结出的这类经验公式很多(Sartori, 2000; 张有芷, 1999)。例如,施成熙(1984)对我国19个蒸发试验站182站年的实验资料进行了系统的分析研究,建立了我国东部(东北、华北、华中和华南)和西部(四川、云南、青藏、蒙新地区)的两套水面蒸发量计算经验模型。陈惠泉等(1995)根据对全国范围水面蒸发-散热系数研究,在风速、水温、气温、相对湿度等参数可控的风洞中进行系统实验,建立了Dalton蒸发模式 $[E = \alpha(e_s - e_a)]$ 中的蒸发系数 α 的计算公式。濮培民(1994a, 1994b)根据1976年以来我国各典型地区大量历史资料,建立了根据水

文气象资料计算逐日蒸发的公式等。

2.3 综合法(彭曼公式)

彭曼(Penman, 1948)综合考虑了影响水面蒸发的主要因素:太阳辐射因素和湍流扩散条件。彭曼公式应用了若干经验关系式,其中的参数经改进可以适合各地情况,因而获得了广泛应用(王懿贤, 1981; 王菱等, 1988; 李万春等, 2001; Maidment, 2002)。其推导如下:

不考虑水中热通量,则水面净辐射 R 等于蒸发耗热 LE_0 (L 为蒸发潜热)加湍流热通量 Q :

$$R = LE_0 + Q$$

由于 Q 难以得到,引入鲍文比 $\beta = Q/LE_0$,并将净辐射 R 除以蒸发潜热 L 变成净辐射的蒸发当量 R_L ,得到:

$$E_0 = \frac{R_L}{1 + \beta} \quad (a)$$

另一方面根据湍流扩散方程计算 β ,有:

$$\begin{aligned} \beta &= \rho c_p k_h (\partial\theta/\partial z) / \rho L k_e (\partial q/\partial z) \\ &\approx (c_p/L)(t_0 - t_a) / (e_0 - e_a) \\ &= \gamma(t_0 - t_a) / (e_0 - e_a) \end{aligned}$$

式中, t_0 是蒸发面温度, t_a 是气温, e_0 为蒸发面温度对应的饱和水汽压, e_a 为实际水汽压, $\gamma = 0.358p/590$, p 是气压。

令 $\Delta = (e_0 - e_s) / (t_0 - t_a)$, 则:

$$\beta = \gamma \frac{t_0 - t_a}{e_0 - e_a} = \gamma \frac{t_0 - t_a e_0 - e_s}{e_0 - e_s e_0 - e_a} = \frac{\gamma e_0 - e_s}{\Delta e_0 - e_a}$$

根据道尔顿定律,由水面温度计算的水面蒸发 E_0 和由气温计算的水面蒸发 E_a 的公式为:

$$E_0 = f(u)(e_0 - e_a)$$

$$E_a = f(u)(e_s - e_a)$$

式中, e_0 为蒸发面温度对应的饱和水汽压, e_a 为实际水汽压, e_s 为相应于气温的饱和水汽压。二式相比得:

$$\frac{E_a}{E_0} = \frac{e_s - e_a}{e_0 - e_a} = 1 - \frac{e_0 - e_s}{e_0 - e_a}$$

故:

$$\beta = \frac{\gamma e_0 - e_s}{\Delta e_0 - e_a} = \frac{\gamma}{\Delta} \left(1 - \frac{E_a}{E_0}\right)$$

上式代入(a)式,化简即得:

$$E_0 = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_L + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (1)$$

这就是计算水面蒸发的彭曼公式。其物理意义很明显:水面蒸发 E_0 是净辐射蒸发 R_L 乘以权重 $\Delta/(\Delta + \gamma)$ 加上湍流蒸发 E_a 乘以权重 $\gamma/(\Delta + \gamma)$,前者是产生蒸发的热量因素,后者是产生蒸发的动力和水分因素。系数 Δ 是饱和水汽压随温度的变化率,

是温度的函数; γ 是“湿度表常数”,是气压的函数,主要决定于海拔高度。干燥力 E_a 通常由经验公式计算,净辐射 R 根据当地气象观测数据估算。

3 卤水蒸发的计算

卤水中水分子受到离子吸引力,水分子自由能减小,因而比纯水更加难以蒸发,卤水表面上方的饱和蒸汽压随盐度增加而减小,并与卤水成分有关。卤水蒸发一般都是根据相同条件下淡水蒸发量乘以折算系数(α)来计算的:

$$\alpha = E_{\text{卤}} / E_{\text{淡}}$$

Salhotra 等(1985)研究了盐度与离子成分对死海蒸发速率的影响。根据蒸发盘实验数据计算了卤水的饱和蒸汽压、溶液的活度系数以及比蒸发系数。根据蒸发速率公式:

$$\text{淡水: } E_f = f(u)[e_{\text{sat}}(T_s) - \psi e_{\text{sat}}(T_a)]$$

$$\text{卤水: } E_s = f(u)[\beta(S)e_{\text{sat}}(T_s) - \psi e_{\text{sat}}(T_a)]$$

$$\text{推导出: } \alpha = \frac{E_s}{E_f} = \frac{\beta(S)e_{\text{sat}}(T_s) - \psi e_{\text{sat}}(T_a)}{e_{\text{sat}}(T_s) - \psi e_{\text{sat}}(T_a)}$$

上式中, E_s, E_f 分别代表卤水和淡水的蒸发速率; T_s, T_a 分别是水面和大气温度; $e_{\text{sat}}(T)$ 表示水面上方饱和蒸汽压,它是温度的函数; ψ 是相对湿度(表示为小数); $f(u)$ 是风速函数的经验公式,这里假定对于淡水和卤水是相同的; β 是卤水的活度系数,代表在相同温度条件下卤水面上方与淡水面上方饱和蒸汽压的比率,即 $e'_{\text{sat}}(T, S) = \beta(S)e_{\text{sat}}(T)$,它与盐度 S 及特定离子组成有关;由上式可见, α 不仅决定于盐度与成分,也与气温、水温、相对湿度有关。

折算系数 α 可以根据实验总结出经验公式。如关丘(1979)、洪嘉琏等(1988)根据沿海盐田蒸发实验,建立了比蒸发系数 α 与海水波美度、空气湿度之间的关系式。李刚等(1992)总结了大柴旦湖滨日晒场区卤水比蒸发系数 α 与卤水密度 x 的关系式。张军等(1997);张军(2000a, 2000b)根据东台吉乃尔盐湖和察尔汉盐湖试验数据拟合出比蒸发系数 α 与镁离子浓度 w 及相对湿度 r 的线性关系式。

由于沿海地区气候与我国内陆盐湖区有很大差异,根据海水蒸发试验总结的经验公式不完全适合于内陆盐湖。青海柴达木盆地总结的卤水比蒸发系数以镁离子浓度或卤水密度作为参数,其适用性有限。

Calder 等(1984)修正了传统的 Penman 公式,得出卤水蒸发速率计算公式:

$$\lambda E = \frac{\Delta H + \rho c_p \left(\frac{e_s(T) - e/a_w}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma/a_w}$$

$$\text{或: } E = \frac{\Delta \frac{R_n - \delta s}{L_v} + \gamma \frac{e_s - e_a}{\beta(j)} f(u)}{\Delta + \gamma/\beta}$$

式中, λ 为蒸发潜热(J/kg), $\Delta = \partial e_s / \partial T$ (mbar/°C), γ 为湿度计公式常数(mbar/°C), H 为总净辐射, r_a 为水汽从表面进入大气的空气动力阻力(s/m), a_w 是水溶液活度, ρ 是空气密度(kg/m³), c_p 是常压下空气比热[J/(kg·°C)], $e_s(T)$ 是水在温度 T °C 对应的饱和蒸气压, e 是大气中水汽压(mbar)。

Oroud(1994, 1995, 1999, 2001a, 2001b) 应用 Calder 修正彭曼公式和 Salhotra 等提出的比蒸发系数公式分别计算了死海南部浅卤水湖(池)的蒸发速率。他使用直径 3.6 m、深 0.9 m 的蒸发盘作不同浓度卤水的蒸发实验, 表明比蒸发系数差异很大(表 2)。

表 2 不同密度卤水的比蒸发系数(据 Oroud, 2001a)

密度(g/cm ³)	1.0	1.26	1.31	1.34
$K_b = E_{\text{Lake}}/E_{\text{pan}}$	0.63	0.69	0.80	1.03

本文将 Calder 公式进一步变换, 使其与彭曼公式形式更为接近:

$$E_b = \frac{\Delta R_L}{\Delta + \gamma/a_w} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma/a_w} (e_s - e_a/a_w) f(u) \quad (2)$$

上式中, E_b 为卤水湖面蒸发量, a_w 为溶液活度, $f(u)$ 为风速函数, 其他各参数与淡水蒸发彭曼公式相同。该公式引入了溶液活度参数, 常温范围内温度对活度的影响较小, 例如在温度范围 5~40°C (盐度 292‰) 时, 对应的 $a_w(T_0)$ 的变化小于 7% (Dickson et al., 1965), 但盐度变化对溶液活度影响较大, 例如扎布耶盐湖由于不同部位淡水补给条件不同, 盐度范围从 100‰~400‰ 不等, 采用 Pitzer 模型计算溶液活度, a_w 变化范围为 0.67~0.99, 主要在 0.68

~0.72 之间。

4 扎布耶盐湖卤水蒸发速率

应用扩展的彭曼公式(2)计算卤水湖面蒸发量, 其主要参数及其计算过程如下:

(1) 辐射平衡 R 的计算: 根据寇有观等(1981)对西藏地区辐射的研究, 有如下公式:

$$R = (239190 - 1302.9Lat + 9.59H) (0.403 + 0.723n^2) (1-c) - \epsilon\sigma T^4 (0.459 - 0.072e^{0.5}) (1 - 0.56N^2)$$

式中: c 为反射率(开阔湖面取 0.08), Lat 为纬度(°), H 为海拔(m), n 为日照百分率, ϵ 为下垫面相对辐射能力(取 0.95), σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, 取 8.13×10^{-11} cal/(cm²·分·K⁴), T 为空气绝对温度(K), e 为空气绝对湿度(hPa), N 为总云量。辐射平衡值 R 决定于纬度与海拔及日照、温度、湿度等气象参数(表 3)。计算辐射的其他参数及公式如下: 盐湖纬度: 31.35°; 湖面海拔: 4421.00 m; 下垫面相对辐射能力 ϵ : 0.95; Stefan-Boltzmann 常数 σ : 8.13×10^{-11} cal/(cm²·分·K⁴); 开阔湖面反射率 c : 0.08; 绝对湿度 = $0.8 \times \frac{e}{1+t/273}$ 。据此计算出扎布耶盐湖各月辐射变化如表 4。

(2) δ 是温度的函数, 计算公式为:

$$\delta = \frac{e_a}{273+t_a} \left[\frac{6463}{273+t_a} - 3.972 \right]$$

e_a 是气温 t_a 下的饱和水汽压, 可按马格努斯(Magnus)经验公式计算:

$$e_a = 6.11 \times 10^7 \cdot 63t_a / (241.9+t_a)$$

(3) γ 是高度的函数:

$$\gamma = C_p P_z / (\rho L)$$

表 3 扎布耶湖区基本气象要素

Table 3 Basic meteorological parameters in Zabuye Salt Lake

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
气温(°C)	-9.8	-7.4	-3.1	1.6	6.9	12.0	14.6	13.2	10.2	3.1	-3.8	-7.8	2.48
日照(%)	70	70	64	69	66	62	59	54	67	78	77	73	67
相对湿度(%)	47	44	43	38	43	46	51	52	48	42	42	54	46
总云量(%)	30	30	40	40	40	50	60	50	40	20	20	20	37
气压(mbar)	589	590	591	591	592	590	590	592	594	593	595	593	591
风速(m/s)	4.7	6	6.9	5.6	5.5	4.6	3.3	3.3	3.4	3.9	3.4	3.2	4.5

表 4 扎布耶湖区辐射值(W/m²)

Table 4 Net values (W/m²) of solar irradiation in Zabuye Salt Lake

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
R	41.0	55.2	93.8	123.9	134.2	119.6	114.7	78.2	80.3	80.9	47.4	25.7	86.2

式中, $C_p = 1004 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 为干空气的定压比热; P_z 为实测气压; μ 为水汽分子量与干空气分子量的比, 取 0.622; L 为蒸发潜热。 P_z 也可根据海拔 z 与温度 t 计算:

$$P_z = 1013 / 10^{z/[18400(1+t/273)]}$$

(4) E_a 的计算: 根据对中国蒸发池实测资料的拟合, 青藏高原区的计算公式为(刘江等, 2002):

$$E_a = (0.128 + 0.1238 \times v_{10}) \times (e_s - e_d)$$

式中, v_{10} 为 10 m 高处风速(m/s), $e_s - e_d$ 为 t_a 温度下的饱和差。

(5) L 的计算: L 通常取定值, 它随温度变化有微小的变化:

$$L = 2.5 \times 10^6 - 2386t \text{ (J/kg)}$$

$$= 0.07922 - 0.00007561t \text{ (W/m}^2 \cdot \text{mm} \cdot \text{year)}$$

(6) 风速函数采用 $f(u) = 0.128 + 0.1238 \times v_{10}$ (刘江等, 2002), 活度系数 a_w 根据 Pitzer 模型计算 $a_w = 0.70$ 。据此计算出扎布耶盐湖各月淡水湖面蒸发量如表 5, 卤水湖面蒸发量如表 6。

5 结果对比

彭曼公式计算出淡水自由水面蒸发量 $E_w = 1316 \text{ mm/a}$, 与 $\Phi 20 \text{ cm}$ 点蒸发皿的多年平均蒸发量

(2512 mm) 的折算系数为 0.52。在青海湖该折算系数为 0.579, 新疆昌吉为 0.52, 乌拉泊为 0.469, 可见彭曼公式计算淡水蒸发速率, 具有较好的可比性。

扎布耶盐湖进行过数次小型蒸发皿(分别为 $\Phi 100 \text{ cm}$ 蒸发皿、脸盆、保温桶)的卤水蒸发速率实验, 但缺少同期大型蒸发池卤水蒸发速率的对比数据。因此, 本文根据比蒸发系数与卤水密度的关系(李刚等, 1992), 计算出密度 1.2 g/cm^3 (和扎布耶盐湖卤水比重很接近)的卤水在小型蒸发皿中的折算系数 $\alpha = 0.616$ 。而小型蒸发皿($\Phi 3.5 \text{ m}$)与开阔湖面卤水蒸发比在卤水密度 1.26 g/cm^3 时为 $K_1 = 0.69$ (表 2)。据此可以得出常规气象站 $\Phi 20 \text{ cm}$ 蒸发皿的蒸发量数据转换为湖面卤水蒸发量的比蒸发系数 $K = \alpha \times K_1$, 据此计算扎布耶盐湖湖面卤水逐月蒸发量(表 7), 和上述彭曼公式法计算结果吻合良好。

6 结论

水面蒸发的计算以比蒸发系数法最为简单, 但适用性有限, 不同的湖泊需要总结对应的比蒸发系数; 道尔顿形式的经验公式应用较方便、适应性更广, 可以根据不同气候类型总结出相应的经验公式;

表 5 彭曼公式计算的扎布耶地区自由淡水水面蒸发量

Table 5 Evaporation from free fresh water surface in the Zabuye Lake area calculated by Penman formula

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
δ	0.2281	0.2697	0.3608	0.4897	0.6809	0.9222	1.0710	0.9885	0.8298	0.5384	0.3443	0.2623	0.5176
γ	0.3768	0.3783	0.3805	0.3822	0.3848	0.3854	0.3863	0.3871	0.3873	0.3840	0.3828	0.3800	0.3829
E_a (mm)	1.0948	1.7115	2.7232	3.4919	4.5858	5.2794	4.3666	3.9057	3.5503	2.7035	1.4696	0.8204	2.7006
E_L (mm)	42.48	63.08	102.15	137.38	168.31	175.04	167.69	134.94	128.38	104.71	58.69	33.29	1316

表 6 彭曼公式计算的扎布耶盐湖湖面蒸发计算结果(mm)与比蒸发系数

Table 6 Evaporation (mm) from the Zabuye Salt Lake surface and pan coefficients calculated by Penman formula

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	总计
卤水计算值	27.2	42.9	72.2	105.5	131.4	140.3	136.2	106.3	101.2	79.7	42.0	20.5	1005
淡水观测值	84	105	166	219	298	334	336	267	267	211	132	93	2512
K	0.32	0.41	0.44	0.48	0.44	0.42	0.41	0.40	0.38	0.38	0.32	0.22	0.40

注: $K = \Phi 20 \text{ cm}$ 点蒸发皿淡水蒸发量观测值/湖面卤水蒸发量计算值。

表 7 比蒸发系数法计算的扎布耶盐湖蒸发量及气象站 $\Phi 20 \text{ cm}$ 点蒸发皿的比蒸发系数

Table 7 Evaporation rates from the Zabuye Salt Lake surface and pan coefficient calculated with the empirical ratio

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年总
K	0.35	0.45	0.44	0.46	0.52	0.41	0.60	(0.53)	0.46	0.37	(0.31)	0.26	0.43
蒸发皿淡水蒸发量(mm)	84	105	166	219	298	334	336	267	267	211	132	93	2512
湖面卤水蒸发量(mm)	29.4	47.3	73.04	100.7	155.0	136.9	201.6	141.5	122.8	78.1	40.9	24.2	1080

注: $K = \Phi 20 \text{ cm}$ 点蒸发皿淡水蒸发量/湖面卤水蒸发量。

彭曼公式具有较好的理论依据,计算精度更高,适用性最广。卤水湖面蒸发计算难度更大,卤水与淡水蒸发量的折算系数与盐度、成分以及气温、水温、相对湿度多种因素有关,因此简单的折算系数适用性有限。扩展的彭曼公式是计算卤水湖面蒸发可靠的方法。

致谢:本文使用了扎布耶盐湖长期科学观测站的观测数据。先后有几十位工作人员,克服艰难困苦,在海拔 4420 m 的扎布耶观测站长年生活,开展长期观测工作。在此向曾经和正在为扎布耶盐湖资源开发作出贡献的人们,表示衷心感谢!

参 考 文 献

陈惠泉,毛世民. 1995. 水面蒸发系数全国通用公式的验证. 水科学进展, 6(2): 116~120.

洪嘉琰,卢瑞芝. 1988. 我国北方四大盐海区卤水蒸发计算及其分布. 地理研究, 7(2): 17~26.

洪嘉琰,傅国斌,郭早男,杜占德,朱伟. 1996. 山东南四湖水蒸发实验研究. 地理研究, 15(3): 42~49.

寇有观,曾群柱,谢维荣,萧铄. 1981. 青藏高原和邻近地区的辐射及其与高原冻土的关系. 冰川冻土, 3(4): 25~31.

李刚,薛石,姚占力,高世扬. 1992. 大柴旦湖滨日晒场区不同浓度卤水蒸发量测定. 海湖盐与化工, 21(2): 13~17.

李万春,李世杰,濮培民. 2001. 高原咸水湖水蒸发估算. 湖泊科学, 13(3): 227~232.

李万义. 1997. 巴彦高勒蒸发实验站蒸发器蒸发量与折算系数变化的分析. 人民黄河, (7): 32~34.

刘江,许秀娟. 2002. 气象学(北方本). 北京:中国农业出版社, 259.

濮培民. 1994a. 水面蒸发与散热系数公式研究一. 湖泊科学, 6(1): 1~11.

濮培民. 1994b. 水面蒸发与散热系数公式研究二. 湖泊科学, 6(3): 1~9.

关丘. 1979. 不同湿度条件下不同浓度卤水比蒸发试验式的推导. 海湖盐与化工, (1): 16~18.

施成熙. 1984. 确定水面蒸发模型. 地理科学, 4(1): 1~10.

王菱,陈沈斌,侯光良. 1988. 利用彭曼公式计算潜在蒸发的高度订正方法. 气象学报, 46(3): 381~383.

王懿贤. 1981. 高度对彭曼蒸发公式二因子 $\delta/(\delta+\gamma)$ 与 $\gamma/(\delta+\gamma)$ 的影响. 气象学报, 30(4): 503~506.

王远明,李成荣. 1999. 宜昌站水面蒸发折算系数分析. 人民长江, 30(1): 41~43.

奚玉英,陈国春. 2002. 由 20 cm 点蒸发皿资料和风速计算水库库面蒸发量. 水电站设计, 18(2): 76~78.

张军,刘铸唐,张宝全,王萍,李永华. 1997. 东台吉乃尔盐湖卤水比蒸发系数测定及回归方程. 盐湖研究, 5(2): 7~12.

张军. 2000a. 盐田高浓度卤水蒸发的数学模型及动力学研究. 盐湖研究, 8(4): 19~28.

张军. 2000b. 盐田卤水蒸发过程的研究进程. 盐湖研究, 8(1): 63~71.

张有芷. 1999. 我国水面蒸发实验研究概况. 人民长江, 30(3): 6~9.

朱岗昆. 2000. 自然蒸发的理论及应用. 北京:气象出版社, 143.

Calder I R, Neal C. 1984. Evaporation from saline lakes: a combination equation approach. Hydrological Sciences, 29(1): 91~96.

Crapper P F, Fleming P M, Kalma J D. 1996. Prediction of lake levels using water balance models. Environmental Software, 11(4): 251~258.

Dickson D R, Yepsen J H, Hales J V. 1965. Saturated vapor pressures over great salt lake brine. Journal of Geophysical Research, 70(2): 500~505.

Maidment D R. 2002. 水文学手册. 张建云,李纪生译. 北京:科学出版社, 1278.

Nicholson S E, Yin X G, Ba M B. 2000. On the feasibility of using a lake water balance model to infer rainfall: an example from Lake Victoria. Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques, 45(1): 75~95.

Oroud I M. 1994. Evaluation of Saturation vapor-pressure over hypersaline water bodies at the southern edge of the ead-Sea, Jordan. Solar Energy, 53(6): 497~503.

Oroud I M. 1995. Effects of salinity upon evaporation from pans and shallow lakes near the Dead Sea. Theoretical And Applied Climatology, 52(3~4): 231~240.

Oroud I M. 1999. Temperature and evaporation dynamics of saline solutions. Journal of Hydrology, 226(1~2): 1~10.

Oroud I M. 2001a. Dynamics of evaporation from saline water bodies. Journal of Geophysical Research—Atmospheres, 106(D5): 4695~4701.

Oroud I M. 2001b. A new formulation of evaporation- temperature dynamics of saline solutions. Water Resources Research, 37(10): 2513~2520.

Penman H L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. Lond, 193: 120~145.

Rowe H D, Dunbar R B. 2004. Hydrologic-energy balance constraints on the Holocene lake-level history of lake Titicaca, South America. Climate Dynamics, 23(3~4): 439~454.

Salhotra A M, Adams E E, Harleman D R F. 1985. effect of salinity and Ionic composition on evaporation—Analysis of Dead-Sea evaporation pans. Water Resources Research, 21(9): 1336~1344.

Sartori E. 2000. A critical review on equations employed for the calculation of the evaporation rate from free water surfaces. Solar Energy, 68(1): 77~89.

Tate E, Sutcliffe J, Conway D, Farquharson F. 2004. Water balance of Lake Victoria; update to 2000 and climate change modelling to 2100. Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques, 49(4): 563~574.

Vallet-Coulomb C, Legesse D, Gasse F, Travi Y, Chernet T. 2001. Lake evaporation estimates in tropical Africa (Lake Ziway, Ethiopia). Journal of Hydrology, 245(1~4): 1~18.

Rates of Evaporation from Saline Lakes on the Tibetan Plateau: an Approach to Measurements and Calculations

QI Wen^{1,2,3)}, ZHENG Mianping^{1,2,3)}

1) *Key Laboratory of Saline Lake of Land and Resources Ministry, Beijing, 100037*

2) *Institute of Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Science, Beijing, 100037*

3) *R & D Center for Saline Lake and Epithermal Deposit, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

Abstract

This paper gives a review of the methods of acquiring evaporation rates from large free water surfaces and summarizes the relations of the evaporation rate of fresh water from a $\Phi 20$ pan to air temperature, precipitation and solar irradiation. A modification is made of the conventional Penman evaporation equation to allow relative accurate calculations of the evaporation rates from saline lake brines. The evaporation rate from Zabuye Salt Lake on the Tibetan Plateau was calculated as a case study to illustrate the operation of the improved Penman equation. This method may be applied in the calculation of the saline lake surface evaporation and water balance and also in the technological design calculation of saltfields in saline lake development and practical production.

Key words: Tibetan Plateau; saline lake; evaporation rate from saline lake surface; modified Penman formula