

高原咸水湖水面蒸发估算 ——以兹格塘错为例^{*}

李万春 李世杰 濮培民

(中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

提 要 根据兹格塘错流域附近气象站(安多、那曲和班戈)的器测资料和那曲站的实测辐射资料,对兹格塘错水面蒸发进行了估算。结果表明,兹格塘错多年平均(1958-1998年)蒸发量为925.1mm,在估算的41年中,最高的为1111.5mm(1975年),最低的仅791.9mm(1983年)。5年滑动平均结果揭示,近40年来兹格塘错蒸发存在波动变化,基本上由2个峰值期(1970-1980年和1993-1998年)、1个下降期(1975-1980年)和2个相对平稳期组成,且总体上呈上升趋势。

关键词 兹格塘错 青藏高原 蒸发
分类号 P343.3

近一个世纪以来,内陆封闭湖泊在全球气候变化的影响下,湖泊水位普遍下降,进而导致水体咸化、水资源短缺等一系列生态环境问题,已经引起了广泛重视^[1-3]。青藏高原腹地,由于受人类活动干扰较少,湖泊变化过程直接反映了自然条件下的区域气候变化。青藏高原也是我国两大湖泊群分布区之一^[4],湖泊类型多样,因地处干旱、半干旱地区,对局地性乃至全球气候变化的敏感性要远大于湿润区^[2]。流域水量平衡方法作为认识湖泊水文变化过程的主要手段,目前已经广泛用于内陆湖泊研究^[3,5,6]。

水面蒸发是水量平衡研究中最重要因子之一。湖面蒸发量的确定,仪器直接观测记录是比较理想的方法。目前,常用的是E₆₀₁型蒸发器或E₂₀型蒸发池,在太湖、鄱阳湖等大型湖泊中,即是利用蒸发试验站记录来进行蒸发量估算^[7,8]。在缺乏湖面直接蒸发记录的情况下,往往采用流域内或附近气象站蒸发观测记录来估计湖泊水面蒸发,即用气象站观测的蒸发量乘以折算系数而得。在青海湖、羊卓雍错,都曾采用过此方法估算过湖泊水面蒸发。相应的折算系数在青海湖为0.579,在羊卓雍错为0.64^[6,9]。除利用仪器直接观测记录外,主要根据蒸发数学模型进行湖面蒸发量计算。自从1802年Dolton提出蒸发量与水汽压差成比例以来,Fitz Gerald, Schmidt, Angstrom, Thornthwaite, Horton, Penman等先后提出了各种蒸发理论和模型^[10]。概言之,这些理论和模型主要有4种:水量平衡、热量平衡、质量转移和气候指数模型^[11]。其中,应用最广的是热平衡与湍流扩散相结合的方法——彭曼(Penman)公式^[12,13]。

兹格塘错(32°00′-32°09′N,90°44′-90°57′E,海拔4560m)位于青藏高原中部、唐古拉山南坡东巧盆地内,属西藏自治区安多县。兹格塘错是高原内流湖泊,面积187.0km²,湖面海拔

• 国家自然科学基金(40071001)、国家重点基础研究发展规划项目(G1998040800)和中国科学院青藏高原研究项目(KZ951-A1-202-02)联合资助。

收稿日期:2001-04-12;收到修改稿日期:2001-06-06。

李万春,男,1969年生,博士研究生。E-mail:wanchun@niglas.ac.cn

4560m,最大深度 38.9m,湖泊矿化度 41.1g/L(1999 年实测). 尽管兹格塘错流域附近安多站(32°21'N,91°06'E,海拔 4800m)、那曲站(31°29'N,92°04'E,海拔 4507m)和班戈站(31°22'N,90°01'E,海拔 4700m)有一些蒸发观测记录,但由于折算系数未知,但蒸发观测记录缺乏连续性,加上兹格塘错本身是咸水湖,咸水湖的蒸发量一般比淡水湖要低^[14]. 故对于兹格塘错而言,附近气象站的蒸发观测记录只能用于参比. 基于以上考虑,作者选择利用蒸发数学模型对兹格塘错水面蒸发进行估算,作为高原缺乏蒸发及水文资料地区的率先尝试,希望能在此基础上进一步加深对高原湖泊现代过程及规律的认识.

1 彭曼公式及参数确定

彭曼公式为:

$$E_L = \frac{\delta H/L + \gamma E_a}{\delta + \gamma} \quad (1)$$

式中, E_L 为水面蒸发量(mm/d); H 为辐射平衡(J/(cm²·d)); L 为蒸发潜热(J/kg); δ 为气温等于 t (°C)时饱和水汽压曲线的斜率(mb/°C); γ 为干湿球常数(mb/°C); E_a 为空气干燥力(mm/d).

为了使兹格塘错湖面蒸发估算尽可能接近实际,作者对彭曼公式中的若干参数进行了订正. 其中, γ 参照王懿贤^[15]和王菱等^[16]提出的建议,进行了海拔修正;湖面饱和水汽压参照姚宁钢^①的研究结果,进行了盐度修正. 具体各参数计算方法如下:

(1) H 的计算:

$$H = Q_0(1 - c) - Q_1 \quad (2)$$

其中, Q_0 为实测太阳总辐射(J/(cm²·d)); c 为反射率,对于青藏高原的开阔湖面,取 0.08^[17];冰面,参照库兹明(П. П. Кузьмин)在白海的测量结果,取 0.31^[18]; Q_1 为有效辐射,据萧铎等^[19]及寇有观等^[20]对青藏高原那曲地区有效辐射的经验公式:

$$Q_1 = \epsilon \sigma T^4 (0.459 - 0.0716e^{1/2})(1 - 0.56N^2) \quad (3)$$

式中, ϵ 为下垫面相对辐射能力,对于水面,取 0.95^[21]; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数,取 8.13×10^{-11} 卡/(cm²·分·K⁴),即 4.90×10^{-7} J/(cm²·d·K⁴); T 为空气的绝对温度(K); e 为空气的绝对湿度(mb); N 为总云量.

(2) L 的计算:据黄润本等^[22],有

$$L = 2.500 \times 10^6 - 2386t \text{ J/kg} \quad (4)$$

(3) δ 的计算:据克劳修司-克拉贝龙方程,有

$$\delta = \frac{de_s}{dT} = \frac{Le_s}{R_a T^2} \quad (5)$$

其中, R_a 为水汽的比气体常数,取 461 J/(kg·K); T 为绝对温度(K), $T = 273 + t$, t 为气温(°C); e_s 为水面或冰面饱和水汽压(mb). 由于兹格塘错是咸水湖,实际咸水湖水面饱和水汽压要比洁净水面要低,根据 Raoult 定律,结合 Magnus 公式,有

① 姚宁钢,1988. 喀喇昆仑山-昆仑山西北部地区湖泊考察报告(2):高原盐湖水面蒸发的计算. 1987年青藏高原综合考察报告.

$$e_{s,水} = (1 - mk)e_{s,0} \times 10^{7.45t/(235+t)} \text{ (水面)} \quad (6)$$

$$e_{s,冰} = e_{s,0} \times 10^{9.5t/(265+t)} \text{ (冰面)} \quad (7)$$

其中, $e_{s,0}$ 为三相点时的饱和水汽压(=6.1mb). k 为兹格塘错盐度(g/L); m 为系数, 根据兹格塘错的水化学组成, 取 $m = 0.000616$.

(4) γ 的计算: 据 MaCulloch^[23] 的研究, 有

$$\gamma = \frac{C_p P}{\mu L} \quad (8)$$

式中, C_p 为干空气的定压比热, 取 $1004 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; P 为实测气压值(mb); 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(J/kg), 计算参见式(4).

(5) E_a 的计算: 根据 Dalton 定律, 有

$$E_a = (e_s - e_d) f(u) \quad (9)$$

式中, e_d 为实测水汽压(mb); $(e_s - e_d)$ 为饱和差; $f(u)$ 为水平风速 u 的函数, 综合朱岗昆^[24]、王懿贤^[25]和曾建柱^[26]等研究成果, 可以得出:

$$f(u) = 0.26(1 + 0.351 u_{10})(e_s - e_d) \quad (10)$$

其中, u_{10} 为实测风速(m/s).

兹格塘错位于安多、那曲和班戈之间, 因此假定兹格塘错的所有气象要素满足:

$$x_{\text{兹格塘错}} = (x_{\text{安多}} + x_{\text{那曲}} + x_{\text{班戈}}) / 3 \quad (11)$$

其中, x 为任一气象要素, 如气温、水汽压、云量、风速等. 如果三站中有一站资料缺失, 则取下二站平均; 若有二站资料缺失, 则先建立 $x_{\text{兹格塘错}}$ 与 $x_{\text{那曲}}$ 的相关曲线, 然后再进行内插. 只有实测太阳总辐射 Q_0 为那曲站观测记录, 个别年份由于那曲站太阳辐射记录缺失, 则先建立拉萨站的太阳辐射记录与那曲站的相关关系, 然后再进行插补.

2 结果与讨论

根据气象记录, 兹格塘错地区每年 10 月至次年 4 月月平均温度都在 0°C 以下, 这里约定每年 10 月至次年 9 月为一个水文年, 并以此作为进一步统计的基础. 计算结果表明, 兹格塘错多年平均(1958-1998 年)蒸发量为 925.1mm, 在估算的 41 年中, 最高的为 1111.5mm(1975 年), 最低的仅 791.9mm(1983 年). 5 年滑动平均结果揭示, 40 年来兹格塘错蒸发存在波动变化, 基本上由 2 个峰值期(1970-1980 年和 1993-1998 年)、1 个下降期(1975-1980 年)和 2 个相对平稳期组成, 且总体上呈上升趋势(图 1). 与对应时期气温、降水的波动(图 2)相比, 同期降水的波动(2 个峰值期: 1980-1985 年, 1987-1990 年; 1 个低谷期: 1992-1997 年), 与蒸发量的波动近似呈反相关系. 同期气温几乎一直处于上升期, 反映了青藏高原 20 世纪以来的气候变化趋势, 与兹格塘错蒸发量的逐年增加趋势一致.

气象观测记录表明, 安多、那曲、班戈站多年平均蒸发量分别为 1764.1mm, 1796.6mm 和 1976.9mm. 若根据西藏水文总站在拉萨及羊卓雍错建立的蒸发折算系数经验公式^[27], 兹格塘错多年平均蒸发量应该在 1129.0~1265.2mm 之间. 本文估算的结果稍低, 原因可能有二: (1) 兹格塘错本身是咸水湖, 咸水湖的蒸发量一般比淡水湖要低^[14], 而目前所有气象站蒸发观测使用的都是淡水; (2) 经验公式中的折算系数偏高, 达 0.64. 在青海湖, 据研究仅取 0.579^[6], 相

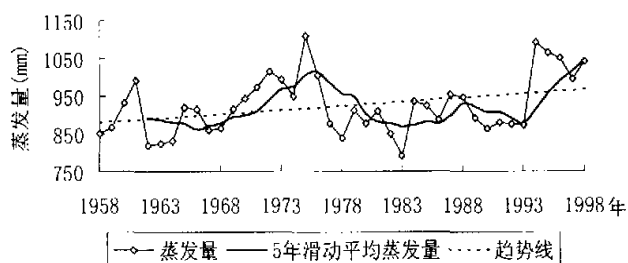


图 1 兹格塘错湖面蒸发量(1958-1998年)

Fig.1 Estimated lake evaporation in Zige Tangco, 1958-1998

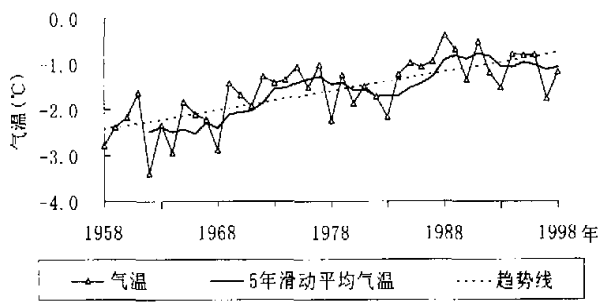
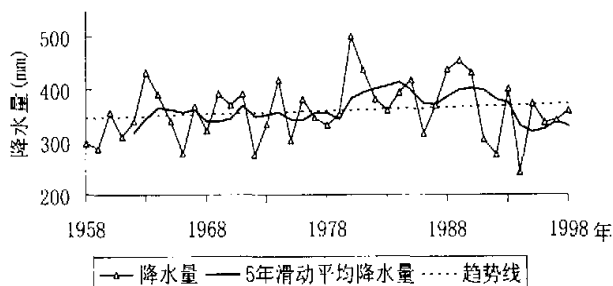


图 2 兹格塘错流域气温、降水变化(1958-1998年)

Fig.2 Variations of temperature and precipitation during 1958-1998 in Zige Tangco



应年蒸发量为 950.0mm ^[4], 青海湖是半咸水湖, 而兹格塘错是咸水湖. 年蒸发量相若, 是完全可能的.

兹格塘错蒸发的年内分配与降水、气温不同(图3)。虽然各月蒸发量存在差异,但是变化比降水、气温和缓。蒸发的这种年内分配特征与风速、降水及气温诸要素的组合条件有关。尽管7-8月气温较高,但此时正值多雨季节,湿度较大,对蒸发有所抑制。在5-6月,随着气温的明显升高,且正值雨季来临之前,湿度相对较低,加上风速较大,因而蒸发达到年内的最大值;12月或1月,蒸发最低(图3)。最大月蒸发量与最小月蒸发量之比,兹格塘错为4.37,与班戈(4.32)相当,比日喀则(3.64)、拉萨(3.10)要高,但是比噶尔(5.34)、狮泉河(5.48)要低^[27],原因可能与海拔及水汽条件有关。

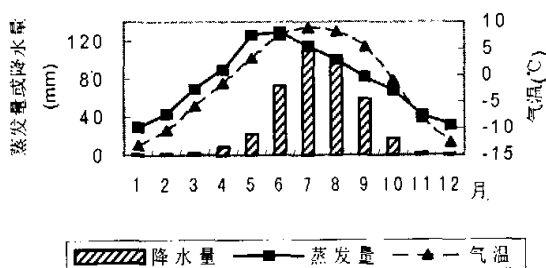


图3 兹格塘错(1958-1998年)气温、降水量、蒸发量的年内变化

Fig.3 Monthly-mean variations of temperature, precipitation and evaporation in Zige Tangco, 1958-1998

参 考 文 献

- 李世杰,李万春,夏威岚等.青藏高原现代湖泊变化的考察初步报告.湖泊科学,1998,10(4):95-96
- 秦伯强.气候变化对亚洲内陆湖泊影响研究——过去,现在与未来.中国科学院南京地理与湖泊研究所(博士论文),1993
- 杨川德,邵新媛编著.亚洲中部湖泊近期变化.北京:气象出版社,1993
- 王苏民,窦鸿身主编.中国湖泊志.北京:科学出版社,1998
- Williams W D. Lake Corangamite, Australia, a permanent saline lake; conservation and management issues. *Lake & Reservoirs: Research and Management*, 1995, 1(1):55-64
- 中国科学院兰州分院,中国科学院西部资源环境研究中心著.青海湖近代环境的演化和预测.北京:科学出版社,1994
- 毛 锐,高俊峰.太湖流域水面蒸发.北京:科学技术文献出版社,1993
- 朱海虹,张 本主编.鄱阳湖.合肥:中国科学技术大学出版社,1997
- 金相灿等著.中国湖泊环境(第三册).北京:海洋出版社,1995.114-129
- 施成熙,卞毓明,朱晓原.确定水面蒸发模型.地理科学,1984,4(1):1-10
- Coleman G, Decoursey D G. Sensitivity and model variance analysis applied to some evaporation and evapotranspiration models. *Water Res Res*, 1976, 12(5):873-879
- 卞毓明,朱英清.关于彭曼及其修正模型的研究.见:刘昌明主编.第六次全国水文学术会议论文集.北京:科学出版社,1997.171-175
- Sene K J, Gash J H C, McNeil D D. Evaporation from a tropical lake; comparison of theory with direct measurements. *Jour-*

- nal of Hydrology*, 1991, 127:193-217
- 14 洪嘉珪, 卢瑞芝. 我国北方四大盐海区卤水蒸发计算及其分布. 地理研究, 1988, 7(2):17-26
 - 15 王懿贤. 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, 1981, 39(4):503-506
 - 16 王 蕊, 陈沈斌, 侯光良. 利用彭曼公式计算潜在蒸发的高度订正方法. 气象学报, 1988, 46(3):381-383
 - 17 谢贤群. 青藏高原 1979 年 5-8 月的地表反射率. 见:《青藏高原气象科学实验文集》编辑组编. 青藏高原气象科学实验文集(二). 北京: 科学出版社, 1984. 17-23
 - 18 KЯ 康德拉捷夫著. 太阳辐射能. 李怀瑾等译. 北京: 科学出版社, 1962
 - 19 萧 铄, 李存法, 李建人. 青藏高原有效辐射研究. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊. 第 3 号. 北京: 科学出版社, 1982. 18-31
 - 20 寇有观, 曾建柱, 谢维荣等. 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, 1981, 3(4):25-31
 - 21 Petzold D E. Solar and net radiation over snow. Montreal, Canada: McGill University Press, 1974
 - 22 黄润本, 黄伟峰, 陈明荣等编. 气象学与气候学. 北京: 高等教育出版社, 1986
 - 23 MacCulloch J S G. Tables for the rapid computation of the Penman estimate of evaporation. *East African Agricultural and Forestry Journal*, 1965, 30(3):286-295
 - 24 朱岗昆, 杨绉章. 气象记录在经济建设中的应用(II); 中国各地蒸发量的初步研究. 气象学报, 1955, 26(1):1-22
 - 25 王懿贤. 彭曼蒸发力快速表算法. 地理研究. 1983, 2(1):93-106
 - 26 曾建柱, 谢应钦. 青藏高原陆面可能蒸发量和干湿状况的研究. 冰川冻土, 1986, 8(2):131-140
 - 27 关志华, 陈传友, 区裕雄等. 西藏河流与湖泊. 北京: 科学出版社, 1984

Estimates of Plateau Lake Evaporation: A Case Study of Zige Tangco

LI Wanchun LI Shijie PU Peimin

(Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

Abstract

Zige Tangco (32°00' - 32°09'N, 90°44' - 90°57'E, 4560a. s. l.), located in Central Qinghai-Tibetan Plateau, is an endorheic saline lake. As no instrumental data were available in the basin, three nearby stations, i. e. Amdo, Naqu and Bangoin, were selected for lake evaporation estimates in Zige Tangco. Meteorological observations from three above-mentioned stations as well as radiation data from Naqu were used for Penman equations approach. During 1958 - 1998, a yearly-mean lake evaporation of 925.1mm was calculated, ranging from 791.9mm (in 1983) to a maximum 1111.5mm (in 1975). Further 5-year running average results revealed that 2 high-level stages and 1 low-level stage were dominant in the past 40 years, and an ascending trend was obvious, though fluctuating.

Key Words Zige Tangco, Qinghai-Tibetan Plateau, evaporation