

时兴合, 李生辰, 安迪, 等. 2010. 青海湖水面蒸发量变化的研究 [J]. 气候与环境研究, 15 (6): 787-796. Shi Xinghe, Li Shengchen, An Di, et al. 2010. A study of the change of Qinghai Lake evaporation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (6): 787-796.

青海湖水面蒸发量变化的研究

时兴合^{1,2} 李生辰³ 安迪⁴ 李栋梁⁴ 苏忠诚²

1 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610072

2 青海省气候中心, 西宁 810001

3 青海省气象台, 西宁 810001

4 南京信息工程大学, 南京 210044

摘要 利用青海湖区 1958~2007 年气象、水文站的观测资料和江西沟、刚察沙柳河 2 个站 20 cm 口径蒸发皿与 E-601 型蒸发皿的对比观测资料, 计算了月、季、年蒸发量, 并应用气候诊断方法分析了蒸发量的年代际变化规律及其突变特征。结果表明: 青海湖区 4~9 月 20 cm 口径蒸发皿湖水与淡水蒸发量的折算系数在 0.91~0.97 之间, 5~9 月 E-601 型与 20 cm 口径蒸发皿蒸发量的折算系数在 0.70~0.78 之间, 同期的蒸发量与温度、湿度、风速等因素关系密切。青海湖年蒸发量呈逐步减少的趋势, 但其变化存在明显的阶段性。1958~1963 年、1977~1981 年、1998~2004 年蒸发量增加, 1964~1976 年、1982~1997 年、2005~2007 年蒸发量减少。青海湖年蒸发量每 25 年发生一次突变, 20 世纪 60、80 年代蒸发量表现出不稳定, 70、90 年代是年蒸发量的相对平稳时段。青海湖降水量增多是导致蒸发量减少的最主要的原因之一。

关键词 青海湖水面 蒸发量 气候变化

文章编号 1006-9585 (2010) 06-0787-10 **中图分类号** P426.2+2 **文献标识码** A

A Study of the Change of Qinghai Lake Evaporation

SHI Xinghe^{1,2}, LI Shengchen³, AN Di⁴, LI Dongliang⁴, and SU Zhongcheng²

1 *Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072*

2 *Climate Center of Qinghai, Xining 810001*

3 *Qinghai Provincial Meteorological Office, Xining 810001*

4 *Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

Abstract Using the Qinghai Lake data from the meteorological stations, the hydrological stations, and the observational data of 20-cm evaporation pan and E-601 type of evaporation gauged from two meteorological stations of Jiangxigou and Gangcha, the authors calculated the evaporation sequence, and analyzed its interdecadal change and catastrophe character with the climatic diagnosis method. It is showed that is the evaporation conversion coefficient between lake water and fresh water in the 20-cm evaporation pan during April to September ranges from 0.91 to 0.97 and is the avaporation conversion coefficient between 20-cm evaporation pan and E-601 type of evaporation gauged during May to September ranges from 0.70 to 0.78. The evaporation is deeply related with the temperature, moisture, wind velocity, and so on. The Qinghai Lake annual evaporation is gradually decreased. There is a catas-

收稿日期 2009-12-26 收到, 2010-10-06 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40665002, 国家自然科学基金重大项目 40599424, 中国气象局成都高原气象研究所开放基金项目 LPM2009001、LPM2008024

作者简介 时兴合, 男, 1963 年出生, 学士, 高级工程师, 主要从事高原气候预测和诊断的研究。E-mail: shixinhe@tom.com

trophe every 25 years. The 1960s and 1980s are the periods during which it changed frequently, the 1970s and the 1990s are relatively stable ones. The increase of precipitation is one of the most important reasons for the decrease of evaporation.

Key words water surface, evaporation, change, analysis, Qinghai Lake

1 引言

青海湖湖面水量平衡的分量主要包括降水、蒸发、地表和地下径流、水位高度,蒸发是湖水循环中的重要组成部分,而且蒸发变化还比较复杂(范建华和施雅风,1992;汤懋苍等,1992;李林等,2005)。在蒸发变化研究方面,左洪超等(2005,2006)、高国栋等(1967)和任国玉和郭军(2006)认为中国大多数地区蒸发量存在减少的趋势。Peterson et al. (1995)基于1950~1990年的观测资料,也证实了美国和前苏联蒸发皿蒸发量呈稳定下降的趋势,并将其成因归之于云量的增加。Roderick and Farquhar (2002)对上述观点提出质疑,通过进一步研究认为蒸发皿蒸发量的下降主要是由太阳总辐射的下降引起的(Brutsaert and Parlange, 1998)。Ohmura and Wild (2002)对目前蒸发皿蒸发量变化的研究进行了评述,认为这些研究依然存在很大的争议。

前期的一些研究都证实影响蒸发的因子较多,但一般认为气温是影响蒸发的重要因子(高国栋等,1967;周陆生和汪青春,1996;李林等,2002;王艳娇等,2003;左洪超等,2005;李进虎等,2006;任国玉和郭军,2006)。在其它条件不变的情况下,当气温升高时,青海湖湖面上空的空气饱和水汽压升高,水体的蒸发量也相应增加。在全球气候变暖的情况下,人们普遍认为高原地区的陆面和水面蒸发将明显增加,并可能引起更严重的干旱(叶笃正,1999;IPCC,2001)。然而,高原地区实际观测到的水面蒸发量(蒸发皿记录的蒸发量)近40多年来却出现了持续下降的趋势(姚檀栋等,2000;朱文琴等,2001;邱新法等,2003;杨建平等,2003),这种趋势与世界其他国家所观测到的结果比较一致。因此,分析青海湖区的蒸发观测资料不仅可以为水资源管理提供新的信息,而且也有助于加深对蒸发问题的深刻理解。

本文利用环青海湖区(简称青海湖区,下同)1958年以来的气象观测资料和2004~2007年E-601型与20 cm口径蒸发皿蒸发量的对比观测资料,计算了湖水与淡水、E-601型与20 cm蒸发的逐月折算系数及其历史序列。应用气候诊断方法,对不同时段蒸发量的年代际变化特征、突变特点进行了分析,依据相关分析方法诠释了不同时段蒸发量变化的成因及其对区域气候变化的影响。其目的是得到一个青海湖区蒸发变化的可靠依据,并以此为环青海湖及周边生态环境的保护和修复提供服务。

2 资料与方法

2.1 资料

环青海湖及周边气象记录超过20年的观测站有7个(湟源、茶卡、天峻、共和、刚察、海晏和江西沟)。其中,湟源、茶卡、天峻、共和、刚察站的气象资料比较完善,海晏站缺1958~1975年的气象观测资料,江西沟站缺1958~1973年和1997~2007年的气象观测资料。2004~2007年共和、刚察站增加了E-601型蒸发的观测,并积累了非结冰期的逐月蒸发量资料。2007年4~9月依托本项目资助,在共和江西沟乡、刚察沙柳河乡增加了20 cm、E-601型淡水(自来水或饮用水)与湖水(咸水,青海湖湖水)蒸发的对比观测,并积累了该时段不同种类逐月的蒸发量资料。

2.2 方法

应用共和、刚察站与同期江西沟站逐月蒸发量之间的相关关系,利用一元线性回归方法插补了江西沟站1958~1973年和1997~2007年的蒸发量资料。在此基础上又选取了江西沟和刚察站的各月蒸发量资料,用加权平均方法计算了青海湖区20 cm口径的逐月蒸发量序列。依据对比观测得到的折算系数,计算了青海湖水面大型蒸发的月、季、年蒸发量序列,计算模拟序列与原序列的相关系数、气候变化倾向率以及各年代的平

均值，分析了蒸发的年代际变化规律、成因及其突变特征。

水面蒸发量的计算式为：

$$E = E_{20} \times \frac{E_{h20}}{E_{d20}} \times \frac{E_{E-601}}{E_{20}} \times \frac{E_1}{E_{E-601}} \\ = E_{20} \times K_1 \times K_2 \times K_3, \quad (1)$$

其中， E_{h20} 为 20 cm 口径湖水蒸发量， E_{d20} 为 20 cm 口径淡水蒸发量， E_1 为大型蒸发池蒸发量， E_{E-601} 为 E-601 型蒸发的蒸发量， E_{20} 为 20 cm 口径蒸发皿的蒸发量。 K_1 为 20 cm 口径湖水与淡水蒸发之间的折算系数， K_2 为 E-601 型与 20 cm 口径蒸发之间的折算系数， K_3 为大型蒸发池与 E-601 型蒸发之间的折算系数。

3 水面蒸发量的变化特征及成因

3.1 湖水和淡水蒸发的对比分析

表 1 给出了青海湖区湖水和淡水 20 cm 口径蒸发皿的月蒸发量资料，其中，湖水（咸水）采集青海湖，淡水采集自来水（饮用水或泉水）。湖水和淡水蒸发的对比观测点分别位于青海共和县江西沟乡 151 村和刚察县沙柳河乡。从表 1 看出，

2007 年 4、7、9 月 151 村和沙柳河乡湖水与淡水月平均气温的差值在 0.2~0.6℃ 之间，4 月和 7 月 2 站湖水月平均温度差值和淡水月平均温度差值均为 4~5℃，9 月均为 7~8℃。4、7、9 月 151 村湖水和淡水的月蒸发量和月平均气温值较沙柳河乡均偏大。4、7、9 月 151 村湖水与淡水月蒸发量折算系数分别为 0.93、0.97、0.96，沙柳河乡为 0.95、0.95、0.91。可以看出，青海湖区 20 cm 口径蒸发皿湖水与淡水月蒸发量的折算系数在 0.91~0.97 之间，4 月和 7 月两地折算系数相差较小，9 月两地相差较大。

3.2 水面蒸发序列的计算

对水面蒸发序列的计算，前人已做过大量研究。并通过实验对比计算了 20 cm 口径的小型蒸发与水面蒸发的折算系数。从已有的研究结果看，小型蒸发皿测得的蒸发量比实际蒸发量偏大 10%~600%，不能代表水面蒸发。而 E-601 型蒸发皿测量的蒸发量约为 WMO 推荐的标准大型蒸发池的 97%，而且两者关系比较稳定，这个百分比可以作为折算系数（谭冠日，1985；崇志，1998；刘小宁和王淑清，1998；黄秋红，2000；王永长，2005）。

表 1 2007 年青海湖区湖水和淡水月蒸发量、月平均气温统计表
Table 1 Statistics of monthly evaporation and temperature about Qinghai Lake water and fresh water in 2007

	湖水蒸发量/mm			淡水蒸发量/mm			湖水温度/℃			淡水温度/℃		
	4 月	7 月	9 月	4 月	7 月	9 月	4 月	7 月	9 月	4 月	7 月	9 月
151 村	148.5	200.8	117.1	159.0	207.5	122.6	2.0	14.3	11.0	2.3	14.9	11.5
沙柳河乡	119.6	148.1	97.6	126.3	155.6	107.6	-2.4	10.1	3.1	-2.8	10.5	3.3

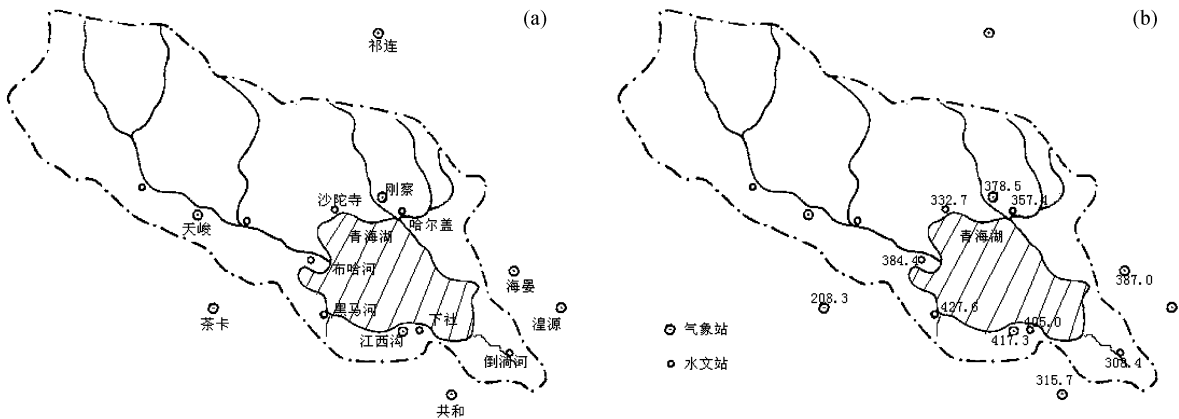


图 1 青海湖区降水量观测站地理分布图
Fig. 1 The distribution of precipitation observation stations in the Qinghai Lake area

江西沟站 1958~1973 年和 1997~2007 年没有实测的蒸发资料, 可以用相邻测站的实测资料进行恢复。从计算得出, 1974~1996 年江西沟站蒸发与沙柳河站、恰卜恰站之间的相关系数值分别在 0.61~0.90、0.45~0.82 之间, 并且都通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平。应用一元直线回归方程可以求得 1958~1973 年和 1997~2007 年江西沟站的各月蒸发量, 再对得到的两个序列求平均, 就可以得到江西沟站 1958~2007 年各月的蒸发量序列。

从表 1 对比观测点平均气温可以近似得到 6 个不同气温时段青海湖区 20 cm 口径湖水和淡水的折算系数, 其它时段的折算系数可以依据两端的内插求得。依据这个方法我们可以得到青海湖区 1~12 月不同气温时段 20 cm 口径湖水和淡水所对应的折算系数, 见表 2。

表 2 青海湖区各月 20 cm 口径湖水与淡水蒸发所对应的折算系数

Table 2 Evaporation conversion coefficient of 20-cm evaporation pan between Qinghai Lake water and fresh water in each month

月份	平均气温/℃		20 cm 口径湖水蒸发量和淡水蒸发量折算系数		E-601 型蒸发量与 20 cm 口径蒸发量折算系数	
	沙柳河	江西沟	沙柳河	江西沟	沙柳河	江西沟
1 月	-13.5	-12.5	0.95	0.95	0.59	0.59
2 月	-10.4	-9.5	0.95	0.95	0.59	0.59
3 月	-4.8	-4.3	0.95	0.95	0.59	0.59
4 月	1.0	1.6	0.95	0.93	0.63	0.63
5 月	5.3	6.1	0.95	0.94	0.70	0.70
6 月	8.4	9.4	0.95	0.95	0.74	0.74
7 月	11.0	11.5	0.95	0.97	0.70	0.70
8 月	10.3	11.2	0.93	0.96	0.70	0.70
9 月	6.1	7.1	0.91	0.96	0.78	0.78
10 月	0.3	1.8	0.93	0.93	0.65	0.65
11 月	-6.5	-4.6	0.95	0.95	0.63	0.63
12 月	-11.0	-9.1	0.95	0.95	0.59	0.59

从气候条件、海拔高度和地理环境看, 山西省北部、内蒙古高原南侧与青海湖区基本一致(年平均气温一般在 8℃以下, 全年日照时间长, 达 2800~3000 h; 干旱少雨, 多年平均降水量在 400 mm 左右; 海拔高度在 2000~3500 m 之间), 该地大同、右玉冰期的折算系数分别为 0.61、

0.56, 非冰期折算系数为 0.63、0.59。我国广东、江苏等地区实验得到的水面蒸发量的折算系数也在这个范围之内(王远明等, 1999; 牛振红和孙明, 2003; 王加虎等, 2003; 王守荣等, 2003; 荣艳淑和屠其璞, 2004; 郭军和任国玉, 2005; 胡顺军等, 2005; 姜彤等, 2005; 周连童和黄荣辉, 2006; 杨霞, 2007)。李进虎等(2006)利用 1985~1999 年青海茫崖、格尔木、门源、西宁、共和、同仁、玛沁、久治、玛多、玉树等 10 个代表站 E-601 型蒸发与 20 cm 口径蒸发资料, 也对水面蒸发折算系数进行了分析计算。其折算系数与气候条件有关, 较湿润地区折算系数低于较干旱地区。5~10 月平均折算系数在 0.51~0.74 之间。折算系数的最大值一般出现在 8 月, 平均为 0.65; 最小值出现在 4 月, 平均为 0.58。海西、海南、海北、海东、黄南地区折算系数一般在 0.60~0.70 之间, 玉树、果洛地区折算系数一般在 0.54~0.59 之间。

2006~2007 年沙柳河站 E-601 型蒸发量与 20 cm 口径蒸发量 5~9 月的折算系数分别为 0.70、0.74、0.70、0.70、0.78。其折算系数与牛振红和孙明(2003)、李进虎等(2006)计算的基本一致。折算系数略偏大可能与 2006~2007 年 5~9 月气温持续偏高有关。依据以上的分析结果, 我们可以得到青海湖区 E-601 型蒸发量与 20 cm 口径蒸发量的折算系数, 见表 2。依据公式(1)计算了青海湖区逐月蒸发量的历史序列值。

3.3 水面蒸发量的变化特征

表 3 给出了依据公式(1)计算的青海湖水面蒸发量的 10 年和 30 年平均统计值。可以看出, 青海湖多年平均蒸发量为 880.4 mm, 最大为 1038.9 mm(1979 年)(见图 2a), 最小为 699.7 mm(1989 年), 最大是最小的 1.48 倍, 变差系数 C_v 值只有 0.08。近 50 年, 青海湖水面年蒸发量 20 世纪 80 年代最小, 90 年代最大, 前者较 30 年平均偏小 7%, 后者较 30 年平均偏多 4%。

从青海湖水面蒸发量的年内变化(图 2b)看出, 水面蒸发量的最大值出现在 5~6 月, 最小值均出现在 1 月。青海湖区春季随着气温较快回升和风速的增大, 4 月蒸发量增加较快, 达到了 91 mm, 月蒸发量占全年总量的 10%, 5 月份达到最大值, 月蒸发量占全年总量的 14%, 6 月和 7 月份

表 3 青海湖水面蒸发量的统计结果
Table 3 Statistics of evaporation in Qinghai Lake

	水面蒸发量/mm					变化倾向率 /mm · (10 a) ⁻¹
	1961~1970 年	1971~1980 年	1981~1990 年	1991~2000 年	1971~2000 年	
春季	283.3	288.2	255.9	272.9	272.3	-5.7
夏季	334.6	357.7	322.9	336.7	339.1	-4.0
秋季	181.6	186.9	179.0	193.8	186.6	-0.6
冬季	89.1	82.8	83.5	82.5	82.9	-0.6
年	889.7	914.0	822.9	884.3	880.4	-11.0

气温继续升高,但风速减弱,月蒸发量仍然维持较高的水平,均占全年总量的 13%,8 月气温接近 6 月的水平,但风速比 6 月偏小,月蒸发量也比 6 月偏小,占全年总量的 12%,9 月蒸发量开始减小,与 4 月的蒸发量基本持平。9 月以后气温开始迅速降低,风速继续减弱,使 10 月份的月蒸发量降低较快,仅占全年总量的 7%。由此可见,青海湖的蒸发主要集中在每年的 4~9 月份,6 个月的合计蒸发量占全年总蒸发量的 72%。

从图 2 青海湖水面蒸发量的年际变化曲线看出,20 世纪 60~90 年代年(见图 2a)和四季(图略)水面蒸发量基本呈减少趋势。春、夏、秋、冬四季蒸发量占年总量的比例分别为 30%、41%、22%、7%。1961~2007 年四季和年的水面蒸发量变化倾向率分别为 -5.7、-4.0、-0.6、-0.6、-11.0 mm · (10 a)⁻¹,其中只有春季水面蒸发量的变化倾向率通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平。年和春、夏季 1958~1988 年水面蒸发量呈明显的下降趋势,1989~2007 年又有微弱的上升趋势,1988 年为转折点。秋、冬季 1958~1967 年水面蒸发量呈明显的下降趋势,1968~2007 年又有微弱的上升趋势,1967 年为转折点。

从青海湖年水面蒸发量的距平累积曲线看出(图 2c),青海湖年水面蒸发量存在明显的阶段性变化,近 50 年基本上经历了 3 个较剧烈的升降期。1958~1963 年、1977~1981 年、1998~2004 年水面蒸发量增加,期间的平均值分别高出正常值 10.3%、9.3%、3.3%;1964~1976 年、1982~1997 年、2005~2007 年水面蒸发量减少,期间的平均值分别比正常值低 1.3%、3.7%、1.4%。1997 年以前,水面蒸发量上升期的持续时间短,下降期的持续时间长,但 1998 年以后,上升期的持续时间延长,下降期的持续时间明显缩短。

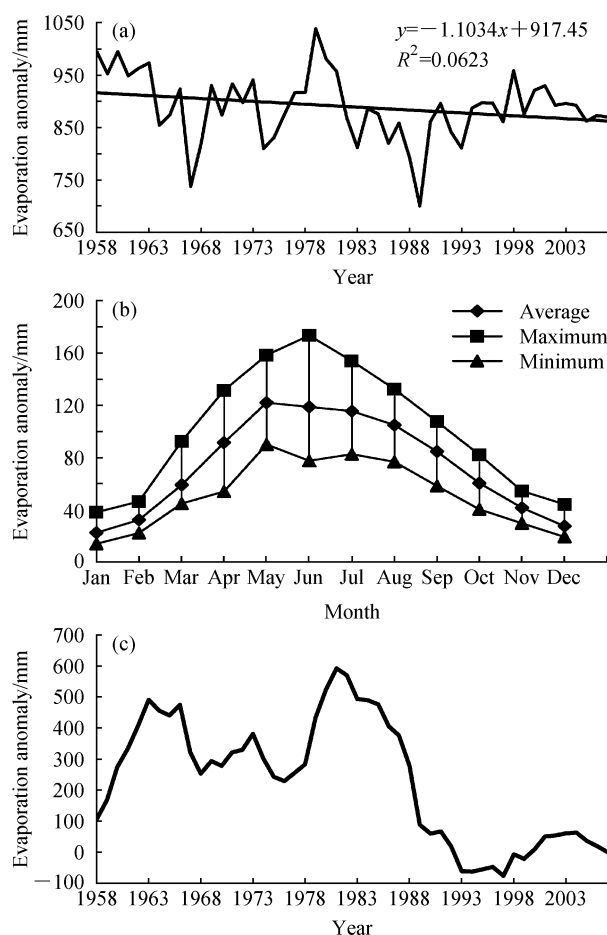


图 2 青海湖水面蒸发量的变化曲线: (a) 年; (b) 季节变化; (c) 距平累积

Fig. 2 Change curve of evaporation in Qinghai Lake: (a) Annual variation; (b) seasonal variation; (c) anomaly accumulation

3.4 水面蒸发量的突变检测

利用 Yamamoto 方法计算了青海湖水面蒸发量年、季序列的信噪比(魏凤英, 2007), 从其分析得出, 青海湖年度和春、夏、冬季水面蒸发量每 25.0 年发生一次突变(通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验)。其中, 年度 20 世纪 60、80 年代各发生 1

次突变, 春季 80 年代发生 2 次突变, 夏季 70、80 年代各发生 1 次突变, 冬季 80、90 年代各发生 1 次突变。从年水面蒸发量的突变检测看, 60、80 年代是青海湖水面蒸发量的多变时段, 70、90 年代是青海湖水面蒸发量的相对平稳时段。

3.5 影响水面蒸发的气候因子

水面蒸发是一种复杂的物理过程, 一般与湿度、温度、风速等因素有密切关系(刘小宁和王淑清, 1998; 黄秋红, 2000)。20 cm 口径的小型蒸发皿由一种镀锌铁或其它合金制成。用这种仪器观测的蒸发量, 代表理想水体的蒸发, 在湿润微风气候条件下与实际的水面蒸发量比较接近。在干燥气候或干燥季节, 由于蒸发皿中水体小, 器皿外壁温度高, 会使观测到的蒸发量比真实水面蒸发量显著偏大。虽然小型蒸发皿蒸发量不能确切地代表真实水体的蒸发, 但对于了解水面蒸发量的时间变化规律和趋势还是有价值的。为了简化分析起见, 本文统一用气象台站蒸发皿观测的蒸发量资料来分析影响水面蒸发变化的气候因子。

表 4 给出了沙柳河蒸发量与本站同期气候要素的相关系数。从表 4 看出, 沙柳河的蒸发量与温度因子存在很好的正相关关系, 表明温度是影响青海湖水面蒸发的主要因子。6~8 月青海湖水面蒸发量与降水量、2~9 月水面蒸发量与相对湿

度有比较好的负相关关系。其中, 2~12 月平均气温、1~12 月平均最高气温、1~5 月和 9~12 月平均最低气温、1 月和 3~11 月日照时数、1~2 月和 4~9 月地面 0 cm 温度、3~4 月和 9~12 月水汽压、1~7 月和 11 月平均风速与同期月份的蒸发量存在较好的相关, 而且相关系数值均通过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平。依据相关系数值通过显著性水平检验的最大月数排列, 相关比较好的要素分别是平均最高气温、平均气温、日照时数、平均最低气温、相对湿度、平均风速、地面 0 cm 温度、水汽压、降水量。依据正负相关区分, 降水量、相对湿度与蒸发呈反相变化关系, 而上述所列举的其它要素呈正相变化关系。依据月份区分, 影响 3~7 月和 9 月蒸发的显著因子达到了 7~8 个, 影响 8 月、10~12 月和 1~2 月蒸发的显著因子只有 4~6 个。可以看出, 刚察县沙柳河乡的蒸发与气温、日照、湿度、风速等因素有密切的关系。

共和县江西沟乡月蒸发量与同期平均气温等要素之间的相关特征同刚察县沙柳河乡的情况基本相同。从计算分析得出, 共和县江西沟乡的蒸发与气温、湿度、降水、风速、日照等因素有密切的关系。共和县江西沟乡月降水对同期蒸发的影响要比刚察县沙柳河乡明显, 这可能与两地所处的地理环境有关, 共和县江西沟乡南靠青海南

表 4 沙柳河蒸发量与本站同期气候要素的相关系数 (1958~2004 年)

Table 4 Coefficient of correlation between evaporation and temperature etc. in Shaliuhe (1958 - 2004)

	与蒸发量相关系数							
	降水量	平均气温	平均最高气温	平均最低气温	相对湿度	日照时数	地面温度	水汽压
1 月	-0.40**		0.30*	-0.34*		0.65***	0.72	0.66***
2 月		0.81***	0.87***	0.61***	-0.71***	0.35*	0.74***	
3 月		0.89***	0.91***	0.82***	-0.62***	0.83***		0.40**
4 月		0.90***	0.93***	0.81***	-0.41**	0.52***	0.79***	0.50***
5 月		0.72***	0.83***	0.50***	-0.37**	0.63***	0.72***	0.30*
6 月	-0.38**	0.32*	0.53***		-0.66***	0.36*	0.72***	0.29*
7 月	-0.44**	0.51***	0.68***		-0.64***	0.69***	0.60***	0.29*
8 月	-0.46***	0.50***	0.68***		-0.79***	0.59***	0.33*	
9 月		0.78***	0.88***	0.64***	-0.59***	0.80***	0.51***	0.52***
10 月		0.55***	0.70***	0.41**		0.35*		0.31*
11 月		0.83***	0.87***	0.76***		0.57***		0.63***
12 月		0.83***	0.86***	0.75***				0.60***
年	-0.46***	0.42**	-0.52***	0.42**	0.32*	-0.31*		

*、**、*** 分别表示通过 0.05、0.01、0.001 的显著性检验。

山, 降水受山地系统影响, 降水量相对偏大, 多年平均降水量为 417 mm (见图 1), 青海南山南麓共和县恰卜恰镇的年降水量仅为 316 mm; 刚察县沙柳河乡四周比较开阔, 降水不受山地系统影响, 一般为天气过程的系统性降水, 降水量比较适中, 多年平均降水量为 379 mm。

3.6 水面蒸发量变化的原因分析

影响年蒸发量的因素主要有 6 个 (通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验, 见表 4), 按相关系数大小排列, 依次为相对湿度、降水量、平均最高气温、日照时数、地面温度和水气压, 其中前 4 个通过 $\alpha = 0.01$ 的显著水平检验, 这些物理量与蒸发量的

关系最密切。

统计 1958~2007 年青海湖区年相对湿度、降水量、平均最高气温和日照时数资料得出, 青海湖北部年相对湿度的气候变化倾向率为 $0.2\% (10\text{ a})^{-1}$ (见图 3e), 青海湖南部年相对湿度的气候变化倾向率为 $1.8\% (10\text{ a})^{-1}$ (见图 3d), 均没有通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验。青海湖区年降水量的气候变化倾向率为 $3.2\text{ mm} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ (见图 3c), 没有通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平。青海湖区年平均最高气温的气候变化倾向率为 $0.244\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ (见图 3b), 达到了 $\alpha = 0.001$ 的显著性水平。青海湖区年日照时数的气候变化倾向率为 -0.983

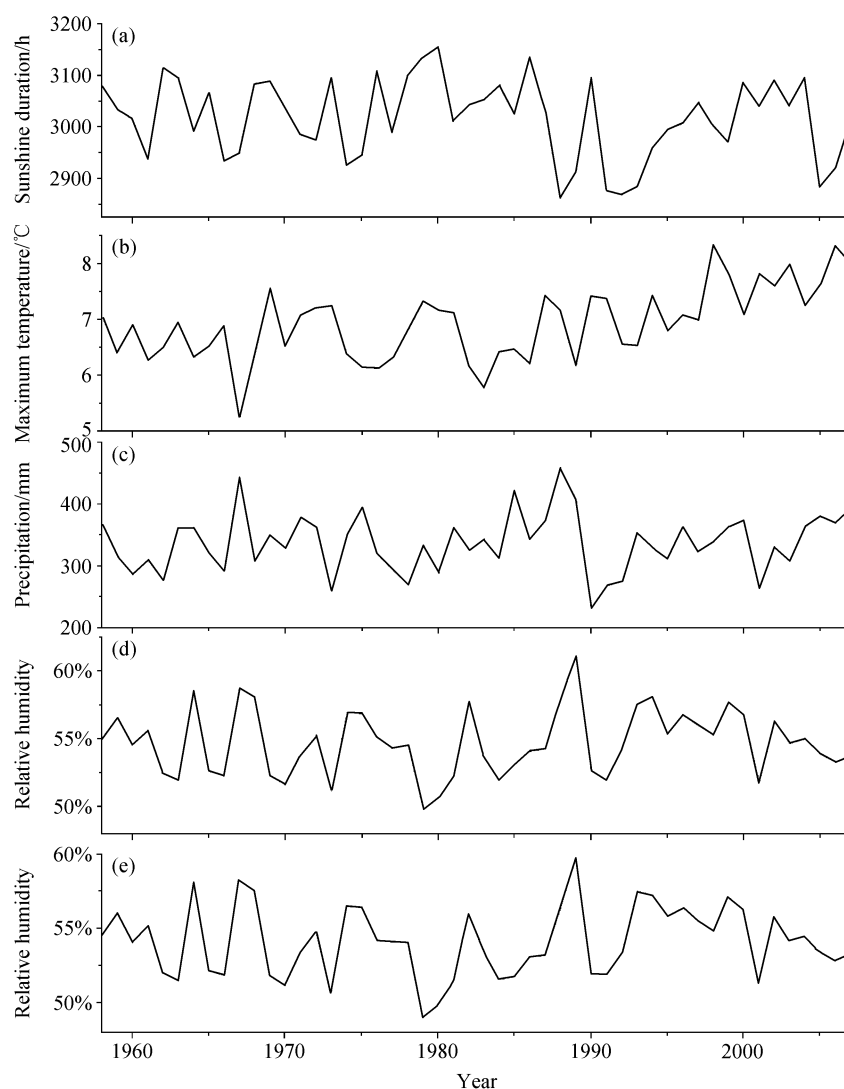


图 3 青海湖区气候要素年际变化: (a) 日照时数; (b) 平均最高气温; (c) 降水量; (d) 青海湖南相对湿度; (e) 青海湖北相对湿度

Fig. 3 Year-to-year variations of climatic elements over Qinghai Lake: (a) Sunshine duration; (b) maximum temperature; (c) precipitation; (d) relative humidity south of Qinghai Lake; (e) relative humidity north of Qinghai Lake

$h \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ (见图 3a), 没有通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平。青海湖区年日照时数减少、年降水量增加、年相对湿度增大, 这些要素都反映了 1958 年以来, 青海湖区年空气湿度在增加。依据空气湿度与蒸(散)发的关系可以得出, 空气湿度增加将会抑制蒸(散)发能力的减小。年平均最高气温与年蒸发量的关系可能比较复杂, 一方面平均最高气温升高有利于蒸(散)发能力的加强, 另一方面, 平均最高气温升高通过热力循环产生降水又间接抑制了蒸发总量的增加。这一复杂的关系也可能是我们以后研究工作的重点。

从上述分析得出, 1958 年以来青海湖区降水量增加、相对湿度增大、日照时数减少、平均最高气温升高, 该区降水量的增加和相对湿度的增大, 直接抑制了同期蒸发总量的增加, 气温升高通过热力循环产生降水又间接抑制了年蒸发总量的增加。总体看来, 年降水总量增多是导致年蒸发总量减少的最主要原因之一。

4 结论与讨论

(1) 青海湖区 20 cm 口径蒸发皿湖水与淡水 4~9 月蒸发量的折算系数在 0.91~0.97 之间, 青海湖区 5~9 月 E-601 型蒸发量与 20 cm 口径蒸发量的折算系数分别为 0.70、0.74、0.70、0.70、0.78。青海湖北部的蒸发与气温、日照、湿度、风速等因素关系密切, 其南部的蒸发与气温、湿度、降水、风速、日照等因素关系密切。

(2) 青海湖区的蒸发主要集中在每年的 4~9 月份, 6 个月的合计蒸发量占全年总蒸发量的 72%。青海湖年水面蒸发量存在明显的阶段性变化, 近 50 年基本上经历了 3 个较剧烈的升降期; 1958~1963 年、1977~1981 年、1998~2004 年水面蒸发量增加, 1964~1976 年、1982~1997 年、2005~2007 年水面蒸发量减少; 1997 年以前, 水面蒸发量上升期的持续时间短, 下降期的持续时间长, 但 1998 年以后, 上升期的持续时间延长, 下降期的持续时间明显缩短。

(3) 青海湖水面蒸发量每 25.0 年发生一次突变。1960 年代和 1980 年代是青海湖水面蒸发量的多变时段, 1970 年代和 1990 年代是青海湖水面蒸发量的相对平稳时段。

(4) 1958 年以来, 青海湖区降水量的增加和相对湿度的增大, 直接抑制了同期蒸发总量的增加, 气温升高通过热力循环产生降水又间接抑制了年蒸发总量的增加。年降水总量增多是导致年蒸发总量减少的最主要原因之一。

参考文献 (References)

- Brutsaert W, Parlange M B. 1998. Hydrological cycle explain the evaporation paradox [J]. *Nature*, 396: 30-31.
- 崇志. 1998. E601B 型蒸发观测业务及蒸发量的分析判断 [J]. *气象*, 24 (2): 54-55. Chong Zhi. 1998. The business of evaporate prognosticate E601B type and its record judgment analysis [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 24 (2): 54-55.
- 范建华, 施雅风. 1992. 气候变化对青海湖水情的影响——I. 近 30 年时期的分析 [J]. *中国科学 (B 辑)*, 22 (5): 537-542. Fan Jianhua, Shi Yafeng. 1992. Climate variety to the water feeling of influence in Qinghai Lake—I. Near 30 years period analysis [J]. *Science in China (Ser. B) (in Chinese)*, 22 (5): 537-542.
- 高国栋, 陆淦舜, 李怀瑾. 1967. 我国陆面蒸发量和蒸发耗热量的研究 [J]. *气象学报*, 38 (2): 165-175. Gao Guodong, Lu Yuezang, Li Huaijin. 1967. Research of our country land surface evaporate the deal with its consume the calories [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 38 (2): 165-175.
- 郭军, 任国玉. 2005. 黄、淮、海河流域蒸发量变化特征及其可能原因 [J]. *水科学进展*, 16 (5): 666-672. Guo Jun, Ren Guoyu. 2005. Recent change of pan evaporation and possible climate factors over the Huang-Huai-Hai watershed, China [J]. *Advances in Water Science (in Chinese)*, 16 (5): 666-672.
- 黄秋红. 2000. E601 型与小型蒸发器对比观测分析 [J]. *气象*, 26 (10): 46-49. Huang Qihong. 2000. Contrast analysis of E601 versus small-sized evaporation gauge [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 26 (10): 46-49.
- 胡顺军, 田长彦, 宋郁东, 等. 2005. 塔里木河流域水面蒸发折算系数分析 [J]. *中国沙漠*, 25 (5): 649-651. Hu Shunjun, Tian Changyan, Song Yudong, et al. 2005. Conversion coefficient of water surface evaporation in Tarim River Basin [J]. *Journal of Desert Research (in Chinese)*, 25 (5): 649-651.
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the International Panel on Climate Change [R]. Houghton J T, Ed. New York: Cambridge University Press, 193-227.
- 姜彤, 苏布达, 许崇育. 2005. 四十年来长江流域降水、气温与径流变化趋势 [J]. *气候变化研究进展*, 1 (2): 65-68. Jiang Tong, Su Buda, Xu Chunyu. 2005. Trends of temperature, precipitation and runoff in the Yangtze River Basin from 1961 to 2000 [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*,

- 1 (2): 65-68.
- 李进虎, 邵玉红, 汪青春, 等. 2006. 青海省 E601B 型蒸发与小型蒸发观测资料的对比分析 [J]. 青海科技, 12 (3): 52-55.
- Li Jinhu, Shao Yuhong, Wang Qinchun, et al. 2006. Evaporate of E601B type in Qinghai with its contrast small scaled prognosticate data analysis [J]. Qinghai Technology (in Chinese), 12 (3): 52-55.
- 李林, 王振宇, 秦宁生, 等. 2002. 环青海湖地区气候变化及其对荒漠化的影响 [J]. 高原气象, 21 (1): 59-65. Li Ling, Wang Zhengyu, Qin Ningsheng, et al. 2002. Climate change and its impact on desertization around Qinghai Lake [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21 (1): 59-65.
- 李林, 朱西德, 王振宇, 等. 2005. 近 42 a 来青海湖水位变化的影响因子及其趋势预测 [J]. 中国沙漠, 25 (5): 689-696. Li Ling, Zhu Xide, Wang Zhengyu, et al. 2005. Impacting factors and changing tendency of water level in Qinghai Lake in recent 42 years [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 25 (5): 689-696.
- 刘小宁, 王淑清. 1998. 我国两种蒸发资料的对比分析 [J]. 应用气象学报, 9 (3): 66-73. Liu Xiaoning, Wang Shuqing. 1998. Our country contrast two kinds of evaporate data analysis [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 9 (3): 66-73.
- 牛振红, 孙明. 2003. 水面蒸发折算系数的对比观测实验与分析计算 [J]. 水文, 23 (3): 49-51. Niu Zhenhong, Sun Ming. 2003. Water surface evaporate contrast calculates of coefficient prognosticate experiment with its analysis [J]. Hydrology (in Chinese), 23 (3): 49-51.
- Ohmura A, Wild M. 2002. Is the hydrological cycle accelerating [J]. Science, 298: 1345-1346.
- Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. 1995. Evaporation losing its strength [J]. Nature, 377: 687-688.
- 邱新法, 刘昌明, 曾燕. 2003. 黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量的气候变化特征 [J]. 自然资源学报, 18 (4): 437-442. Qiu Xinfa, Liu Changming, Zeng Yan. 2003. Changes of pan evaporation in the recent 40 years over the Yellow River Basin [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 18 (4): 437-442.
- 荣艳淑, 屠其璞. 2004. 天津地区蒸发演变及对本地气候干旱化影响的研究 [J]. 气候与环境研究, 9 (4): 575-583. Rong Yanshu, Tu Qipu. 2004. The research of effects of evaporation evolution on climatological drought trend in Tianjin region [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (4): 575-583.
- 任国玉, 郭军. 2006. 中国水面蒸发量的变化 [J]. 自然资源学报, 21 (1): 31-42. Ren Guoyu, Guo Jun. 2006. Change in pan evaporation and the influential factors over China [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 49 (3): 680-688.
- Roderick M L, Farquhar G D. 2002. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years [J]. Science, 298: 1410-1411.
- 谭冠日, 严济远, 朱瑞兆. 1985. 应用气候 [M]. 上海: 上海科技出版社, 190-195. Tan Guanri, Yan Jiyuan, Zhu Ruizhou. 1985. Applied Climate [M] (in Chinese). Shanghai: Science and Technology Press, 190-195.
- 汤懋苍, 高晓清, 张健. 1992. 近 30 年来青海湖水位年际变化 [J]. 科学通报, 37 (8): 524-527. Tang Maocang, Gao Xiaoping, Zhang Jian. 1992. Variety of water level Qinghai Lake near 30 in the last years [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 37 (8): 524-527.
- 王加虎, 郝振纯, 姜彤, 等. 2003. 气温增加对长江流域参照蒸散发的影响研究 [J]. 湖泊科学, 15 (增刊): 277-288. Wang Jiahu, Hao Zhengchun, Jiang Tong, et al. 2003. Research temperature increment to Yangtze River-valley according evaporation influence [J]. Journal of Lake Science (in Chinese), 15 (Suppl.): 277-288.
- 王守荣, 郑水红, 程磊. 2003. 气候变化对西北水循环和水资源的影响的研究 [J]. 气候与环境研究, 8 (1): 43-51. Wang Shourong, Zheng Shuihong, Cheng Lei. 2003. Studies on impacts of climate change on water cycle and water resources in northwest China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (1): 43-51.
- 王艳皎, 周晓兰, 倪绍祥, 等. 2003. 近 40 a 来青海湖地区的气候变化分析 [J]. 南京气象学院学报, 26 (2): 228-235. Wang Yanjiao, Zhou Xiaolan, Ni Shaoxiang, et al. 2003. Analysis on climate change in the region of Qinghai Lake in the last 40 years [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 26 (2): 228-235.
- 王永长. 2005. E-601B 与 E-601 型蒸发器及 20 m² 蒸发池观测资料对比分析 [J]. 水文, 25 (2): 54-56. Wang Yongchang. 2005. Evaporate contrast prognosticate data analysis of E-601b and E-601 with 20 m² types [J]. Hydrology (in Chinese), 25 (2): 54-56.
- 王远明, 张明, 李成荣. 1999. 宜昌站水面蒸发折算系数分析 [J]. 人民长江, 30 (1): 41-45. Wang Yuanming, Zang Ming, Li Chengrong. 1999. Analysis fold calculates coefficient evaporate of water surface in Yichang [J]. Yangtze River (in Chinese), 30 (1): 41-45.
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 61-63. Wei Fengyin. 2007. Modern Climate Statistics Examine a Patient with Estimate Technique [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 61-63.
- 姚檀栋, 刘晓东, 王宁练. 2000. 青藏高原地区的气候变化幅度问题 [J]. 科学通报, 45 (1): 98-106. Yao Tangdong, Liu Xiaodong, Wang Ninglian. 2000. Climate change range problem of plateau region in Qinhai-Xizang [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 45 (1): 98-106.
- 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 2003. 近 40 a 中国北方降水量与蒸发量变化 [J]. 干旱区资源与环境, 17 (2): 6-11. Yang Jianping, Ding Yongjian, Chen Rensheng, et al. 2003. Variations of precipitation and evaporation in North China in recent 40

- years [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 17 (2): 6-11.
- 杨霞. 2007. 山西省 20 cm 口径蒸发器皿与 E-601 型蒸发器折算系数分析 [J]. 海河水利, 26 (6): 47-48. Yang Xia. 2007. Analysis of fold calculates coefficient evaporate the machine of 20cm with E-601 type in Shanxi [J]. Haihe Water Resources (in Chinese), 26 (6): 47-48.
- 叶笃正. 1999. 中国的全球变化与可持续发展 [J]. 地球科学进展, 14 (4): 317-318. Ye Duzheng. 1999. World variety with can keep on development of China [J]. Advance in Earth Sciences (in Chinese), 14 (4): 317-318.
- 周连童, 黄荣辉. 2006. 华北地区降水、蒸发和降水蒸发差的时空变化特征 [J]. 气候与环境研究, 11 (3): 280-295. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2006. Characteristics of temporal and spatial variation of precipitation, evaporation and difference between precipitation and evaporation in North China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (3): 280-295.
- 周陆生, 汪青春. 1996. 青海湖地区历史时期以来的气候变化 [J]. 青海环境, 6 (4): 184-191. Zhou Lusheng, Wang Qingchun. 1996. Climate change of history period the Qinghai Lake region [J]. Qinghai Environment (in Chinese), 6 (4): 184-191.
- 朱文琴, 陈隆勋, 周自江. 2001. 现代青藏高原气候变化的几个特征 [J]. 中国科学 (D 辑), 31 (增刊): 327-334. Zhu Wenqin, Chen Longxun, Zhou Zijiang. 2001. The modern climate change several characteristic in Qinhai - Xizang Plateau [J]. Science in China (Ser. D)(in Chinese), 31 (Suppl.): 327-334.
- 左洪超, 李栋梁, 胡隐樵, 等. 2005. 近 40 年中国气候变化趋势及其同蒸发器观测的蒸发量变化的关系 [J]. 科学通报, 50 (11): 1125-1130. Zuo Hongchao, Li Dongliang, Hu Yengjiao, et al. 2005. China climate change trend of evaporate the deal in recent 40 years and its relation of prognosticate variety [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 50 (11): 1125-1130.
- 左洪超, 鲍艳, 张存杰, 等. 2006. 蒸发器蒸发量的物理意义、近 40 年变化趋势的分析和数值试验研究 [J]. 地球物理学报, 49 (3): 680-688. Zuo Hongchao, Bao Yan, Zhang Cunjie, et al. 2006. An analytic and numerical study on the physical meaning of pan evaporation and its trend in recent 40 years [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 49 (3): 680-688.