

## 青海湖流域及周边地区蒸发皿蒸发量变化(1961–2007年)及趋势分析\*

李岳坦<sup>1,2</sup>, 李小雁<sup>1,2</sup>, 崔步礼<sup>1,2</sup>, 伊万娟<sup>1,2</sup>, 张强<sup>3</sup>, 孙久虎<sup>4</sup>

(1: 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

(2: 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

(3: 中国科学院植物研究所, 北京 100093)

(4: 山东省国土测绘院, 济南 250013)

**摘要:** 采用单调趋势的非参数统计检验 Mann-Kendall (M-K) 法和灰色关联分析方法对青海湖流域及周边地区 1961–2007 年 20cm 小型蒸发皿蒸发量及其影响气候因子的变化趋势进行了分析。结果表明, 近 47a 来青海湖流域及周边地区的蒸发皿蒸发量平均每年减少 4.47mm, 各季节的蒸发皿蒸发量除秋季变化不显著外, 其它各季以 0.55–1.83mm/a 的速率减小, 其中春季减幅最大, 其次是夏季, 冬季减幅最小; 日照时数的减少导致了气温日较差变小和空气饱和差的减小, 是造成该研究区域蒸发皿蒸发量减小的主要原因。

**关键词:** 青海湖流域; 蒸发皿蒸发量; 影响因素; 变化特征

## Trend of pan evaporation and its impact factors over Lake Qinghai basin from 1961 to 2007

LI Yuetan<sup>1,2</sup>, LI Xiaoyan<sup>1,2</sup>, CUI Buli<sup>1,2</sup>, YI Wanjuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Qiang<sup>3</sup> & SUN Jiuhu<sup>4</sup>

(1: *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing 100875, P. R. China*)

(2: *College of Resource Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, P. R. China*)

(3: *Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, P. R. China*)

(4: *Shandong Provincial Land Surveying and Mapping Institute, Jinan 250013, P. R. China*)

**Abstract:** Based on the data of 20cm pan evaporation and its impact factors over Lake Qinghai basin from 1961 to 2007, the trend was analyzed through Mann-Kendall nonparametric test methods and grey incidence analysis. The main results were as follows: Significant negative trend of pan evaporation over Lake Qinghai basin was detected, with the decrease rate of 4.47mm per annum, and except for autumn, all season had the negative trends, with the decrease rate from 0.55 to 1.83mm per annum, especially in spring, then summer, while winter decrease was tiny. Decreases of the hours of sunshine that were mainly caused the decrease of pan evaporation, have resulted into decreases of the diurnal temperature range and the average vapor pressure deficit.

**Keywords:** Lake Qinghai basin; pan evaporation; impact factors; change characteristic

蒸发量既是陆地水量平衡的重要组成部分, 又是地表能量平衡的重要组成部分, 是决定天气与气候的重要因子, 在水循环中最直接的受到土地利用和气候变化的影响, 在全球水循环和气候演变中具有举足轻重的作用。因此, 蒸发研究是地理环境研究中的一项重要内容。蒸发变化的研究对深入了解气候变化的规律和探讨气候变化的原因具有十分重要的意义。蒸发皿蒸发量虽不能直接代表水面蒸发, 但与水面蒸发之间存在很好的相关关系, 是水文站和气象站的常规观测项目之一。由于实际蒸发量的测定比较困难, 而蒸发皿蒸发量观测资料累积序列长, 可比性好, 一直是水文研究、水资源评价和水利工程设计的重要参考指标。

\* 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-08-0056) 和国家科技支撑计划课题“十一五”项目 (2007BAC30B02) 联合资助。2009-08-17 收稿; 2009-09-21 收修改稿。李岳坦, 男, 1980 年生, 博士研究生; E-mail: liyuetan@sohu.com.

通常认为气温是影响蒸发的重要因子,当全球气温升高时,空气将会变得干燥<sup>[1]</sup>,水面蒸发量增大,全球水循环加速. 目前已知全球平均气温在近50a来以 $0.15^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率升高<sup>[1,2]</sup>,但目前通过对近四五十年蒸发皿蒸发量分析却发现许多地区的蒸发皿蒸发量存在持续下降的趋势<sup>[3,5]</sup>. 由此可见,全球变暖并没有使蒸发皿蒸发量增加,全球变暖可能使水循环变弱,蒸发皿蒸发量的变化与人们预期的理论结果恰恰相反,这种现象称为蒸发量佯谬<sup>[1,6]</sup>. 1995年, Peterson等<sup>[4]</sup>通过对美国和前苏联1950-1990年时段内的观测资料进行分析,发现蒸发皿蒸发量呈稳定下降的趋势,并将其归因于云量的增加;1998年, Brutsaert等<sup>[6]</sup>认为蒸发皿蒸发量减少是陆面蒸发量增加的结果,蒸发皿蒸发量与陆面蒸发量是一种互补关系,即蒸发皿蒸发量与陆面蒸发的趋势正好相反;2002年, Michael等<sup>[1]</sup>从全球日较差变小的事实出发,在理论上解释了蒸发皿蒸发量的下降主要是由于太阳辐射量减小造成的. 2004年, Liu等<sup>[7]</sup>对中国蒸发皿蒸发量空间特征分析发现,除了东北地区以外,蒸发皿蒸发量都表现出明显的下降趋势,并认为太阳总辐射是引起这种下降的主要原因;2005年, Xu等<sup>[8]</sup>认为长江流域太阳净辐射与风速显著下降是造成长江流域蒸发皿蒸发量显著下降的原因;2006年, 刘波等<sup>[9]</sup>发现近45年中国北方的蒸发皿蒸发量呈现明显的下降趋势,并认为气温和日较差都是影响蒸发的重要因子;2007年, 曾燕等<sup>[10]</sup>认为1960-2000年中国蒸发皿蒸发量呈明显的下降趋势,主要表现在春季、夏季和冬季.

青海湖流域地处高寒半干旱区,具有独特的高原、水文、气候等环境条件,流域自然条件复杂,它是国际重要湿地和优先保护湿地生态系统. 青海湖对于调节青海乃至我国西部和西北地区的气候,起着非常重要的作用,青海湖流域作为青藏高原的重要组成部分,是西部干旱区、东部季风区、青藏高原区三大区域的交汇地带,对全球气候变化的响应较为迅速. 对青海湖流域及周边地区蒸发皿蒸发量的变化趋势进行研究,对于了解青海湖流域及周边地区实际蒸发量的变化趋势以及进一步分析青海湖水位变化的成因均具有十分重要的意义.

## 1 研究区概况和资料

青海湖流域位于青海省东北部,地处北纬 $36^{\circ}15' - 38^{\circ}20'$ ,东经 $97^{\circ}50' - 101^{\circ}20'$ ,是一个四周群山环绕的封闭式内陆盆地,南傍青海南山,北依大通山,东靠日月山、西临阿木尼尼库山,海拔 $3194 - 5174\text{m}$ ,总面积 $29661\text{km}^2$ . 当前全球变暖日益显著,导致了最近几十年来青海湖流域的气候环境发生了重大变化,主要表现在气温升高、风速下降以及降水增加等<sup>[11-13]</sup>.

20cm小型蒸发皿是气象观测部门常用的仪器,利用该仪器观测的蒸发量,在湿润的小气候条件下与实际蒸发量较为接近. 在旱季或干旱气候条件下,由于蒸发皿中水体少,风吹和日晒会使观测值偏大,虽然蒸发皿蒸发量既不能代表实际水体的蒸发也不能代表土壤蒸发,但是对于了解蒸发量的变化趋势还是有价值的,对于了解区域气候变化对水资源的影响具有重要的意义<sup>[14]</sup>.

本文利用从青海省气象局收集的青海湖流域内部和周边地区(包括刚察、天峻、乌兰、都兰、海晏、湟源、共和等7个气象站,(图1))1961-2007年的20cm小型蒸发皿蒸发量、平均气温、平均最高气温、平均最低气温、平均水汽压、平均相对湿度、降水量和日照时数等资料对青海湖流域及周边地区近47a来蒸发皿蒸发量及其影响因素的变化特征进行分析. 按当年12月至翌年2月为冬季,3-5月为春季,6-8月为夏季,9-11月为秋季生成逐季序列. 多年平均值采用1961-2007年的标准气候平均值. 有关观测仪器和资料统计、处理方法见文献[15].

## 2 研究方法

### 2.1 单调趋势的非参数统计检验

本文采用单调趋势的非参数统计检验 Mann-Kendall(M-K)法来检验水文和气象过程的变化趋势,该方法变量可以不具有正态分布特征,因此适用于水文和气象变量的趋势检验. 假定 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为时间序列变量, $n$ 为时间序列的长度,M-K法定义了统计量 $S$ <sup>[16-22]</sup>:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

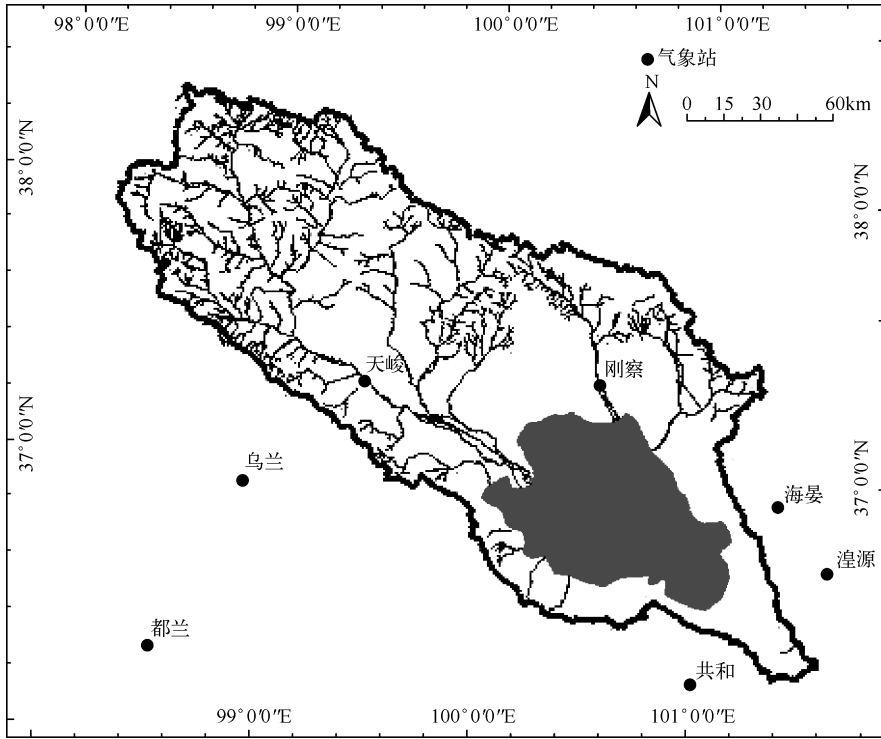


图1 青海湖流域及周边地区气象站点分布

Fig. 1 The distribution of meteorological station in and around Lake Qinghai basin

式中,  $x_j, x_k$  分别为  $j, k$  年相应的测量值, 且  $j > k$ , 而:

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1, & x_j - x_k > 0 \\ 0, & x_j - x_k = 0 \\ -1, & x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (2)$$

然后, 
$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \quad (3)$$

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $x_j$  和  $x_k$  为连续的数据值,  $n$  为数据集合的长度,  $t$  为“结”的宽度,  $q$  为“结”的个数; 正的  $Z_{MK}$  表示“上升趋势”, 负的  $Z_{MK}$  表示“下降趋势”。

如果确定有变化趋势, 可用 Sen<sup>[21-22]</sup> 坡度估计法来计算变化趋势大小, 计算公式为:

$$f(t) = \beta t + A \quad (5)$$

式中,  $\beta$  表示变化趋势的大小,  $A$  为常数。

$$\beta_i = (x_j - x_k) / (j - k) \quad \forall k < j$$

如果序列长度为  $n$ , 那么将得到  $N = n(n-1)/2$  个  $\beta_i$ , 最终的  $\beta$  由  $N$  决定:

$$\beta = \begin{cases} \beta_{[(N+1)/2]} & N \text{ 是奇数} \\ \frac{1}{2}(\beta_{[N/2]} + \beta_{[(N+2)/2]}) & N \text{ 是偶数} \end{cases} \quad (6)$$

零假设  $H_0: \beta = 0$ . 当  $|Z_{MK}| > Z_{1-p/2}$ , 拒绝零假设. 其中  $\pm Z_{1-p/2}$  为标准正态累积分布函数,  $p$  为显著性检验水平.

## 2.2 灰色关联分析

灰色关联分析方法是对系统所包含的相互联系、相互影响、相互制约的因素之间关联程度进行定量比较的一种研究方法, 其基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断其联系是否紧密, 曲线越接近, 相应序列之间的关联度就越大, 反之就越小. 所研究的序列既可以是时间序列, 又可以是空间序列<sup>[24-25]</sup>.

设行序列:

$$X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)) \quad (7)$$

记折线:  $(x_i(1) - x_i(1), x_i(2) - x_i(1), \dots, x_i(n) - x_i(1))$  为  $X_i - X_i(1)$ , 令:

$$S_i = \int_0^n [X_i - x_i(1)] dt \quad (8)$$

设序列  $X_0$  与  $X_i$  长度相同,  $S_0, S_i$  如式(8)所示, 则:

$$\varepsilon_{0i} = \frac{1 + |S_0| + |S_i|}{1 + |S_0| + |S_i| + |S_0 - S_i|} \quad (9)$$

式中,  $\varepsilon_{0i}$  为  $X_0$  与  $X_i$  的灰色绝对关联度, 简称绝对关联度. 设序列  $X_0$  与  $X_i$  长度相同, 且初值皆不等于零,  $X'_0$  与  $X'_i$  分别为  $X_0$  与  $X_i$  的初值像, 则称  $X'_0$  与  $X'_i$  的绝对关联度为  $X_0$  与  $X_i$  的灰色相对关联度, 简称相对关联度, 记为  $r_{0i}$ . 设序列  $X_0$  与  $X_i$  长度相同, 且初值皆不等于零,  $\varepsilon_{0i}$  和  $r_{0i}$  分别为  $X_0$  与  $X_i$  的灰色绝对关联度和灰色相对关联度,  $\theta \in [0, 1]$ , 则称:

$$\rho_{0i} = \theta \varepsilon_{0i} + (1 - \theta) r_{0i} \quad (10)$$

为  $X_0$  与  $X_i$  的灰色综合关联度, 简称综合关联度.

灰色关联度既体现了序列  $X_0$  与  $X_i$  的相似程度, 又可反映出  $X_0$  与  $X_i$  相对于起始点的变化速率的接近程度, 是较为全面的表征序列之间联系是否紧密的一个数量指标.

## 3 青海湖流域及周边地区蒸发皿蒸发量的变化趋势

近 47a 来青海湖流域及周边地区各季节和年平均蒸发皿蒸发量的变化速率列于表 1 (变化趋势见图 2). 就整个青海湖流域及周边地区而言, 除秋季外, 其它三个季节和年蒸发皿蒸发量均呈现不同程度的减少趋势, 年蒸发皿蒸发量平均每年减少 4.47mm, 春、夏、冬三个季节的蒸发皿蒸发量以 0.55 - 1.83mm/a 的速率减少, 其中春季减幅最大, 夏季次之, 为 1.80mm/a, 冬季最小.

就变化趋势的空间特征而言, 各站的年蒸发皿蒸发量表现为不同程度的减少趋势(图 3), 刚察和共和两站在近 47a 来没有显著变化, 其它各站平均每年减少 3.98 - 7.43mm. 春季蒸发皿蒸发量, 除刚察和共和两站没有显著变化外, 其它各站均呈现显著的减少趋势, 减幅为 1.51 - 2.76mm/a, 其中乌兰的减幅最大. 在夏季, 仅有天峻和都兰两站的蒸发皿蒸发量呈现出显著的减少趋势, 减幅分别为 1.83mm/a 和 4.68mm/a, 其余各站没有显著变化. 在秋季, 仅有乌兰和都兰两站的蒸发皿蒸发量呈现出显著的减少趋势, 减幅分别为 1.24mm/a 和 1.27mm/a. 除刚察和共和两站的冬季蒸发皿蒸发量没有显著变化外, 其余各站冬季的蒸发皿蒸发量均呈现出显著的减少趋势, 减幅为 0.58 - 1.17mm/a.

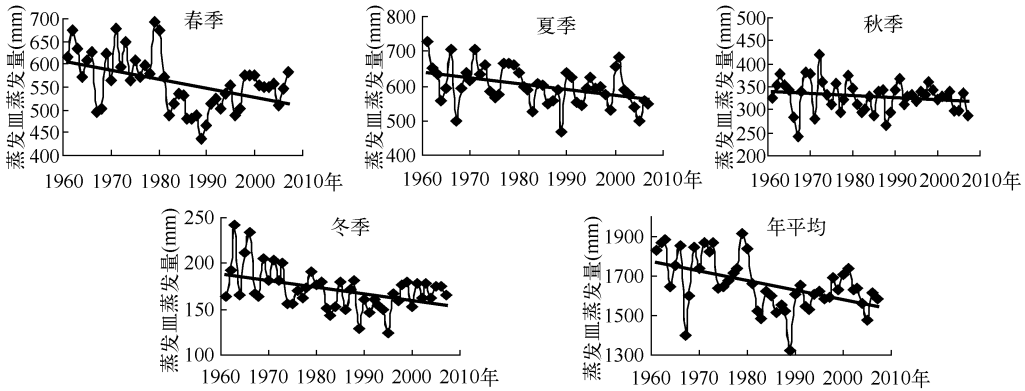


图2 近47a来青海湖流域及周边地区各季节和年平均蒸发皿蒸发量的变化趋势

Fig. 2 Changing trend of seasonal and annual pan evaporation in and around Lake Qinghai basin from 1961 to 2007

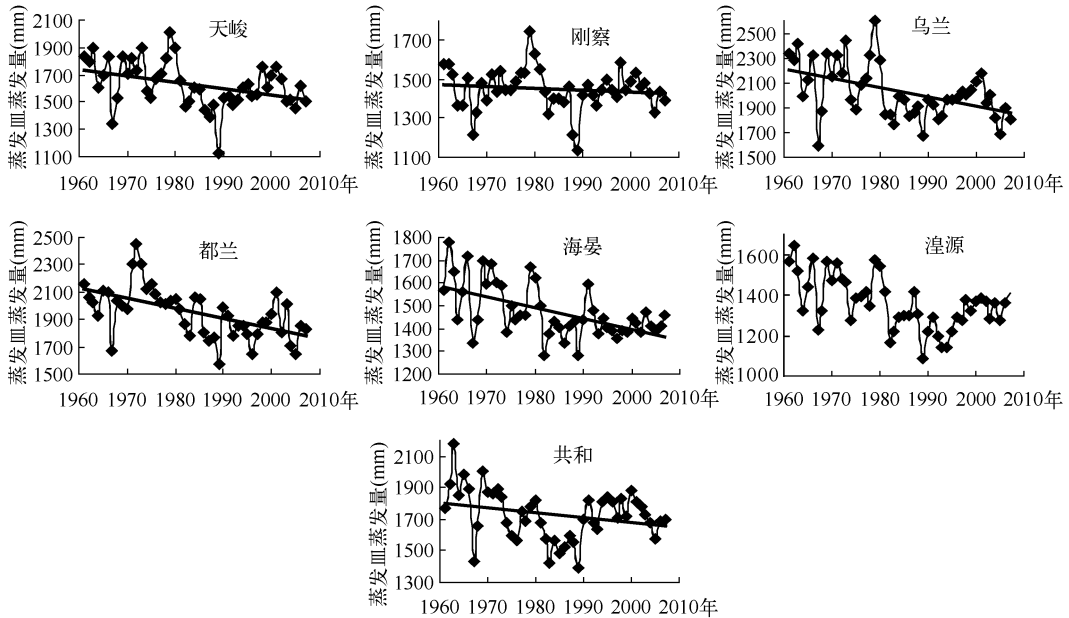


图3 青海湖流域及周边地区蒸发皿蒸发量变化趋势

Fig. 3 Changing trend of pan evaporation in and around Lake Qinghai basin from 1961 to 2007

表1 近47a青海湖流域及周边地区蒸发皿蒸发量的变化速率

Tab. 1 The changing velocity of pan evaporation in and around Lake Qinghai basin from 1961 to 2007

季节	天峻 (mm/a)	刚察 (mm/a)	乌兰 (mm/a)	都兰 (mm/a)	海晏 (mm/a)	湟源 (mm/a)	共和 (mm/a)	流域平均 (mm/a)
春季	-1.68 *	-0.46	-2.76 *	-1.51 *	-2.44 *	-2.26 *	-1.43	-1.83 *
夏季	-1.83 *	-1.14	-1.55	-4.68 *	-0.68	-0.69	-1.14	-1.80 *
秋季	-0.52	0.45	-1.24 *	-1.27 *	-0.37	-0.52	-0.19	-0.50
冬季	-0.58 *	0.28	-1.17 *	-0.63 *	-0.79 *	-0.78 *	-0.27	-0.55 *
年平均	-4.62 *	-1.01	-7.11 *	-7.43 *	-3.98 *	-4.29 *	-3.15	-4.47 *

\* 表示在  $P=0.05$  显著性水平上通过检验.

此外,通过灰色关联分析(表2)发现青海湖流域及周边地区年蒸发皿蒸发量的变化趋势与经度的关系最为密切,其次是纬度,与海拔高度的关系最不密切.蒸发皿蒸发量的季节变化趋势在春夏两季与海拔高度的关系最密切,其次是纬度,与经度的关系最不密切;在秋季和冬季蒸发皿蒸发量的变化趋势与经纬度和海拔高度的关系与年蒸发皿蒸发量的变化趋势与它们之间的关系是一致的,即经度对蒸发皿蒸发量变化趋势的影响最大,纬度次之,海拔高度对它的影响最小.

表2 近47a来青海湖流域蒸发皿蒸发量与经纬度、海拔高度的灰色综合关联度排序

Tab.2 Grey integrated incidence among pan evaporation, longitude, latitude and altitude over Lake Qinghai basin in 1961-2007

季节	经度	纬度	海拔
春季	0.3854	0.4203	0.4516
夏季	0.4297	0.4406	0.4755
秋季	0.5470	0.5465	0.5455
冬季	0.5846	0.5623	0.5455
年平均	0.4330	0.4170	0.3765

#### 4 影响蒸发皿蒸发量的气候因子变化

##### 4.1 近47a来气候因子的变化趋势

根据影响蒸发皿蒸发量气候因子的变化趋势分析(表3),就青海湖流域及周边地区平均而言,近47a来年平均气温以 $3.38 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C/a}$ 的速率升高,在一年四季中,平均气温亦均呈现显著的升高趋势,升幅为 $2.06 \times 10^{-2} - 5.21 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C/a}$ .年平均最高气温以 $3.08 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C/a}$ 的速率升高,在一年四季中除春季变化不显著外,其它季节平均最高气温亦均呈现显著的升高趋势,升幅为 $2.24 \times 10^{-2} - 4.85 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C/a}$ .年平均最低气温以 $4.45 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C/a}$ 的速率升高,明显高于年平均最高气温的升高速率,在一年四季中,平均最低气温亦均呈现显著的升高趋势,升幅为 $2.95 \times 10^{-2} - 6.51 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C/a}$ .近47a来年平均水汽压的变化趋势不显著,春季的平均水汽压以 $2.14 \times 10^{-2} \text{ hPa/a}$ 的速率在降低,而夏季的平均水汽压却以 $1.87 \times 10^{-2} \text{ hPa/a}$ 的速率在升高,秋冬两季的水汽压变化趋势不显著.流域的年、季平均相对湿度近47a来没有发生显著的变化.降水量除年平均值和夏季平均值分别以 $81.34 \times 10^{-2} \text{ mm/a}$ 和 $81.20 \times 10^{-2} \text{ mm/a}$ 的速率在显著增加外,其余各季的平均降水量的增加趋势亦不显著.年日照时数的变化趋势不显著,除夏季的日照时数以 $92.64 \times 10^{-2} \text{ h/a}$ 的速率减少外,其它季节日照时数的变化趋势不显著.

表3 近47a来青海湖流域及周边地区蒸发皿蒸发量影响因子的平均变化速率

Tab.3 The mean changing velocity of pan evaporation impact factors of each meteorological station over Lake Qinghai basin from 1961 to 2007

影响因子	春季	夏季	秋季	冬季	年平均
平均气温( $\times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C/a}$ )	2.06*	2.54*	3.55*	5.21*	3.38*
平均最高气温( $\times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C/a}$ )	1.80	2.24*	3.93*	4.85*	3.08*
平均最低气温( $\times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C/a}$ )	2.95*	4.29*	3.83*	6.51*	4.45*
水汽压( $\times 10^{-2} \text{ hPa/a}$ )	-2.14*	1.87*	0.03	0.15	0.13
相对湿度( $\times 10^{-2} \text{ %/a}$ )	-2.40	3.57	-2.04	2.09	0.05
降水量( $\times 10^{-2} \text{ mm/a}$ )	10.05	81.20*	1.96	0.45	81.34*
日照时数( $\times 10^{-2} \text{ h/a}$ )	-11.88	-92.64*	11.26	-30.27	-141.95

\*表示在 $P=0.05$ 显著性水平上通过检验.

就流域各气象站的气候因子变化趋势的时空分布来看(表4),近47a来流域各气象站的年平均气温均呈显著的升高趋势,升幅为 $2.08 \times 10^{-2} - 5.18 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C/a}$ ,其中以共和升幅最大,天峻次之(为 $3.46 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C/a}$ ),湟源最小;在春季,除天峻和湟源两站没有显著变化外,其余各站的平均气温以 $1.81 \times 10^{-2} - 4.00 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C/a}$ 的速率升高;在夏季,乌兰的平均气温没有显著变化,其余各站均呈现出显著的升高趋势,升幅为 $2.03 \times 10^{-2} - 4.09 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C/a}$ ;各站秋季的平均气温除湟源没有显著变化外,其余各站以 $3.02 \times 10^{-2} - 5.17 \times 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C/a}$ 的速率升高;冬季的平均气温均呈现显著的升高趋势,升幅为 $3.73 \times 10^{-2} - 8.46 \times$

表4 近47a来青海湖流域及周边地区各气象站蒸发皿蒸发量影响因子的变化速率

Tab. 4 The changing velocity of pan evaporation impact factors of each meteorological station over Lake Qinghai basin from 1961 to 2007

影响因子	春季	夏季	秋季	冬季	年平均	影响因子	春季	夏季	秋季	冬季	年平均
平均气温 ( $\times 10^{-2}^{\circ}\text{C}/\text{a}$ )	天峻 1.39	2.03*	4.35*	6.67*	3.46*	平均最高气温 ( $\times 10^{-2}^{\circ}\text{C}/\text{a}$ )	0.51	1.67	3.21*	3.97*	3.46*
	刚察 1.81*	3.33*	3.02*	4.69*	3.04*		-0.42	2.27*	3.33*	4.85*	3.04*
	乌兰 4.00*	-0.94	4.67*	4.33*	3.37*		4.21*	0.93	5.17*	4.34*	3.37*
	都兰 2.00*	2.22*	3.61*	5.29*	3.10*		2.02	2.22*	4.52*	5.33*	3.10*
	海晏 1.88*	3.33*	3.89*	4.53*	3.45*		1.02	2.62*	3.33*	4.85*	3.45*
	湟源 1.11	2.10*	1.47	3.73*	2.08*		1.94	2.65*	3.91*	5.05*	2.08*
	共和 3.23*	4.09*	5.17*	8.46*	5.18*		3.23*	2.41*	4.07*	5.83*	5.18*
平均最低气温 ( $\times 10^{-2}^{\circ}\text{C}/\text{a}$ )	天峻 5.27*	5.45*	5.98*	9.33*	6.30*	水汽压 ( $\times 10^{-2}\text{hPa}/\text{a}$ )	-1.28	2.89*	-0.48	0.14	0.39
	刚察 2.65*	4.23*	3.91*	5.00*	3.82*		0.40	1.36*	0.63	0.77*	0.69*
	乌兰 4.33*	1.73*	4.66*	5.21*	3.92*		-0.22	2.92*	0.77	0.06	0.86*
	都兰 2.27*	2.39*	3.94*	6.47*	3.61*		-0.25	1.82*	-0.27	0.37*	0.60*
	海晏 2.17*	4.62*	1.52	6.11*	3.37*		0.39	1.90*	0.31	0.92	0.88*
	湟源 1.92	3.89*	1.43	5.21*	2.94*		0.28	1.51*	0.37	0.83*	0.75*
	共和 1.52	6.46*	6.30*	10.23*	6.97*		0.00	1.21	0.50	0.89*	0.72*
相对湿度 ( $\times 10^{-2}\%/\text{a}$ )	天峻 6.17	11.97	-0.83	3.33	3.17	降水量 ( $\times 10^{-2}\text{mm}/\text{a}$ )	-12.61	110.00	0.37	2.14	109.03
	刚察 1.63	-1.71	-0.81	8.60	-4.17		-30.00	97.90*	-4.36	1.94	62.76
	乌兰 -10.42*	18.15*	1.25	-8.17	0.00		1.58	127.94*	10.00	-15.75*	116.72*
	都兰 -5.83	8.33	-4.76	0.00	-0.48		44.74*	108.50*	5.71	6.30	170.59*
	海晏 -5.45	0.00	-0.54	7.08	0.68		4.25	68.72	8.06	-0.94	83.81
	湟源 -1.59	1.33	-1.45	8.33	0.88		37.50	7.31	0.00	5.90*	51.85
	共和 -6.06	-8.00*	-13.89*	3.13	-6.55*		20.63	43.33	-11.50	4.74	60.31
日照时数 ( $\times 10^{-2}\text{h}/\text{a}$ )	天峻 22.00	-2.33	30.67	-50.83	-12.40						
	刚察 -10.63	-96.67*	10.71	-46.11	-116.54						
	乌兰 -58.10	-66.00	21.13	-50.00	-191.42*						
	都兰 -82.22	-147.81*	-4.62	-44.38	-296.67*						
	海晏 47.00	-102.73	72.73	16.52	23.16						
	湟源 -27.00	-171.82*	-20.53	-70.00	-292.35*						
	共和 16.28	-26.09	41.62	-26.67	30.00						

\*表示在  $P=0.05$  显著性水平上通过检验。

$10^{-2}^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 。与年平均气温类似,各站的年平均最高气温亦呈现显著的升高趋势,升幅为  $2.08 \times 10^{-2} - 5.18 \times 10^{-2}^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ;在春季,平均最高气温仅有乌兰和共和两站升高的趋势显著,升幅分别为  $4.21 \times 10^{-2}^{\circ}\text{C}/\text{a}$  和  $3.23 \times 10^{-2}^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ,其余各站的变化不显著;在夏季,天峻和乌兰没有显著变化,其余各站的平均最高气温显著升高,升幅为  $2.22 \times 10^{-2} - 2.65 \times 10^{-2}^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ;各站秋季和冬季的平均最高气温均呈现显著的升高趋势,升幅分别为  $3.21 \times 10^{-2} - 5.17 \times 10^{-2}^{\circ}\text{C}/\text{a}$  和  $3.97 \times 10^{-2} - 5.83 \times 10^{-2}^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 。近47a来各站的年平均最低气温也呈现出明显的升高趋势,升幅  $2.94 \times 10^{-2} - 6.97 \times 10^{-2}^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ;在春季,湟源和共和没有显著变化,其余各站的升幅为  $2.17 \times 10^{-2} - 5.27 \times 10^{-2}^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ;在夏季和冬季,各站的平均最低气温均显著升高,升幅分别为  $1.73 \times 10^{-2} - 6.46 \times 10^{-2}^{\circ}\text{C}/\text{a}$  和  $5.00 \times 10^{-2} - 10.23 \times 10^{-2}^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ,并且冬季的升温幅度相对于其它季节明显偏大;在秋季,海晏和湟源没有显著变化,其它各站的升幅为  $3.91 \times 10^{-2} - 6.30 \times 10^{-2}^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 。各站的年平均水汽压在近47a来的变化趋势是天峻没有显著变化,其余各站以  $0.60 \times 10^{-2} - 0.88 \times 10^{-2}\text{hPa}/\text{a}$  的速率在升高,但是升幅很小,可忽略不计;在春季,各站的平均水汽压的变化趋势均不显著;在夏季,除共和的变化不显著外,其余各站的平均水汽压均呈现升高的趋势,升幅为  $1.36 \times 10^{-2} - 2.92 \times 10^{-2}\text{hPa}/\text{a}$ ;在秋季,各站的平均水汽压均没有显著的变化趋势;在冬季,天峻和乌兰没有显著变化,其余各站均表现为升高趋势,升幅为  $0.37 \times 10^{-2} - 0.92 \times 10^{-2}\text{hPa}/\text{a}$ 。近47a来各站的相对湿度除共和以每年  $6.55 \times 10^{-2}\%$  的速率降低以外,其余各站没有显著变化;在春季,乌兰的平均相对湿度平均每年降低  $10.42 \times 10^{-2}\%$ ,其余各站没有显著

变化;在夏季,乌兰的升幅为  $18.15 \times 10^{-2}\% / a$ ,共和则呈现降低的趋势,速率为  $8.00 \times 10^{-2}\% / a$ ,其余各站没有显著变化;在秋季,共和的平均相对湿度以  $13.89 \times 10^{-2}\% / a$  的速率降低,其它各站亦没有明显的变化;冬季平均相对湿度各站均没有显著变化.各站的年平均降水量在近 47a 来仅乌兰和都兰呈现显著的升高趋势,升幅分别为  $116.72 \times 10^{-2} mm/a$  和  $170.59 \times 10^{-2} mm/a$ ,其余各站的变化趋势不显著;在春季,都兰的降水量显著增加,速率为  $44.74 \times 10^{-2} mm/a$ ,其它各站变化不显著;在夏季,刚察、乌兰和都兰的平均降水量呈现显著的升高趋势,升幅为  $97.90 \times 10^{-2} - 127.94 \times 10^{-2} mm/a$ ;在秋季,各站的降水量没有显著变化;冬季的平均降水量仅有乌兰和湟源明显发生了变化,其中乌兰以  $15.75 \times 10^{-2} mm/a$  的速率降低,湟源以  $5.90 \times 10^{-2} mm/a$  的速率增加.

近 47a 来,乌兰、都兰和湟源的年日照时数显著减小,减幅为  $191.42 \times 10^{-2} - 296.67 \times 10^{-2} h/a$ ,其余各站没有显著变化;在春季、秋季和冬季,各站的日照时数均没有显著变化;在夏季,祁连、刚察、都兰和湟源的日照时数显著减少,减幅为  $96.67 \times 10^{-2} - 171.82 \times 10^{-2} h/a$ ,而其余各站没有显著变化.

总之,流域及周边各气象站气象要素的变化趋势是平均气温、平均最高气温、平均最低气温以及降水量呈现显著的上升趋势,夏季日照时数呈下降趋势,水汽压和相对湿度在近 47a 来的变化趋势较小或者不显著.平均气温、平均最高气温和平均最低气温三者的联系较为紧密,因而在一定程度上变化趋势也是一致的;由于近几十年来青海湖流域及周边地区气温的显著升高,降水的变化趋势也势必会受到一定的影响,该地区的夏季降水呈现出显著的增加趋势,这与前人的研究成果是基本一致的<sup>[26-27]</sup>;而降水量的增加在一定程度上能够反映出云量的增加,云量的增加就会导致日照时数的减少,这会导致太阳辐射量的减少;此外,根据水汽压与相对湿度的关系可知<sup>[28-29]</sup>,水汽压与相对湿度的变化趋势应该是一致的,在该地区,水汽压和相对湿度均没有发生显著变化.这些因素的综合效果造成了青海湖流域及周边地区近 47a 来蒸发皿蒸发量所表现的时空变化特征.

#### 4.2 蒸发皿蒸发量与各气候因子的灰色关联分析

为了进一步说明环境因子和蒸发皿蒸发量的关系,对蒸发皿蒸发量和各气候因子进行了灰色关联分析,结果表明蒸发皿蒸发量与日照时数和平均最低气温的关联明显,说明日照时数和平均最低气温在蒸发皿蒸发量的减少中发挥着十分重要的作用(表 5).与水汽压、相对湿度、降水量的关联也较强,而青海湖流域及周边地区的水汽压和相对湿度在近 47a 来没有发生显著变化,而降水量显著增加,说明降水量的增加在蒸发皿蒸发量的减少中也发挥着一定的作用.

表 5 近 47a 来青海湖流域及周边地区蒸发皿蒸发量与各要素的灰色综合关联度排序  
Tab. 5 Grey integrated incidence among pan evaporation and meteorological elements over Lake Qinghai basin from 1961 to 2007

季节	平均气温	平均最高气温	平均最低气温	水汽压	相对湿度	降水量	日照时数
春季	0.3902	0.6663	0.4751	0.7413	0.6700	0.3424	0.7717
夏季	0.4788	0.3898	0.4324	0.3848	0.2796	0.3390	0.2409
秋季	0.3764	0.6553	0.5853	0.5760	0.9584	0.4214	0.6116
冬季	0.4295	0.2173	0.5068	0.2965	0.5477	0.3734	0.6540
年平均	0.2964	0.5821	0.6871	0.7835	0.6802	0.5995	0.6126

## 5 讨论

根据 Michael L Roderick 和 Graham D Farquhar 的研究结论<sup>[1]</sup>,蒸发皿蒸发量的减少主要是由于到达地球表面的太阳总辐射的减少导致了气温日较差的减小,从而引起了空气饱和差的减小而造成的.而对本研究区域而言,该区域近 47a 来的夏季日照时数呈现出显著的减少趋势,平均最低气温比平均最高气温的升温速率快,导致气温日较差的减小,同时由于最低气温的升高,导致了露点温度的升高,最终导致了空气饱和差的减小,这是造成青海湖流域及周边地区蒸发皿蒸发量减少的主要原因.此外,虽然风速在蒸发皿蒸发量的减少过程中不起主导作用<sup>[1]</sup>,但是近几十年来青海湖流域及周边地区风速的下降<sup>[11-13]</sup>在该地区蒸发皿蒸

发量的减少中也起到了一定的贡献作用.

## 6 参考文献

- [ 1 ] Michael L Roderick, Graham D Farquhar. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 2002, **298**:1410-1411.
- [ 2 ] Houghton J, Ding Y. Climate change: Scientific basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [ 3 ] Ohmura A, Wild M. Is the hydrological cycle accelerating? *Science*, 2002, **298**: 1345-1346.
- [ 4 ] Peterson TC, Golubev VS, Groisman PY. Evaporation losing its strength. *Nature*, 1995, **377**: 687-688.
- [ 5 ] Thomas A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China. *International Journal of Climatology*, 2000, **20**(4): 381-396.
- [ 6 ] Brutsaert W, Parlange MB. Hydrological cycle explain the evaporation paradox. *Nature*, 1998, **396**: 30-31.
- [ 7 ] Liu BH, Xu M, Henderson M *et al.* A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955-2004. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 1091D: 15102- doi: 10029/2004JD004511.
- [ 8 ] Xu CY, Gong LB, Jiang T *et al.* Decreasing reference evapotranspiration in a warming climate: a case of Changjiang (Yangtze) River catchment during 1970-2000. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, **23**(4): 513-520.
- [ 9 ] 刘波, 马柱国, 丁裕国. 中国北方近 45a 蒸发变化的特征及与环境的关系. *高原气象*, 2006, **25**(5): 840-848.
- [ 10 ] 曾燕, 邱新法, 刘昌明等. 1960-2000 年中国蒸发皿蒸发量的气候变化特征. *水科学进展*, 2007, **18**(3): 311-318.
- [ 11 ] 许何也, 李小雁, 孙永亮. 近 47a 来青海湖流域气候变化分析. *干旱气象*, 2007, **25**(2): 50-54.
- [ 12 ] 孙永亮, 李小雁, 许何也. 近 40a 青海湖流域逐日降水和气温变化特征. *干旱气象*, 2007, **25**(1): 7-13.
- [ 13 ] 王艳姣, 周晓兰, 倪绍祥等. 近 40a 来青海湖地区的气候变化分析. *南京气象学院学报*, 2003, **26**(2): 228-235.
- [ 14 ] 杜军, 边多, 鲍建华等. 藏北高原蒸发皿蒸发量及其影响因素的变化特征. *水科学进展*, 2008, **19**(6): 786-791.
- [ 15 ] 吴艳红, 朱立平, 叶庆华等. 纳不错流域近 30 年来湖泊冰川变化对气候的响应. *地理学报*, 2007, **62**(3): 301-311.
- [ 16 ] Francesca Todisco, Lorenzo Vergni. Climatic changes in central Italy and their potential effects on corn water consumption. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, **148**: 1-11.
- [ 17 ] Donald H Burn, Mohamed A Hag Elnur. Detection of hydraulic trends and variability. *Journal of Hydrology*, 2002, **255**: 107-122.
- [ 18 ] Philip G, Oguntunde, Jan Friesen *et al.* Hydroclimatology of the Volta River Basin in West Africa: Trends and variability from 1901 to 2002. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2006, **31**: 1180-1188.
- [ 19 ] Xu ZX, Li JY, Liu CM. Long-term trend analysis for major climate variables in the Yellow River basin. *Hydrological Processes*, 2007, **21**: 1935-1948.
- [ 20 ] Khaled H Hamed. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, 2008, **349**: 350-363.
- [ 21 ] Reza Modarres, Vicente de Paulo Rodrigues da Silva. Rainfall trends in arid and semi-arid regions of Iran. *Journal of Arid Environments*, 2007, **70**: 344-355.
- [ 22 ] 蔺学东, 张镜铨, 姚治君等. 拉萨河流域近 50 年来径流变化趋势分析. *地理科学进展*, 2007, **26**(3): 58-67.
- [ 23 ] Sirois Allan. A brief and based overview of time series on how to find that evasive trend. In WMO Report No. 133: WMO/EMEP Workshop on Advanced Statistical and Application to Air Quality Database, 1998.
- [ 24 ] 邓聚龙. 灰色系统理论教程. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992: 33-78.
- [ 25 ] 刘思峰, 韩天榜, 党耀国. 灰色系统理论及其应用. 北京: 科学出版社, 1999: 40-70.
- [ 26 ] 时兴和, 李凤霞, 扎西才让等. 海西东部及环青海湖地区 40 多年的气候变化研究. *干旱地区农业研究*, 2005, **23**(2): 215-222.
- [ 27 ] 时兴和, 李林, 汪青春等. 环青海湖地区气候变化及其对湖泊水位的影响. *气象科技*, 2005, **33**(1): 58-62.
- [ 28 ] 张瑞美, 彭世彰, 徐俊增等. 不同  $e_a$  计算方法对 Penman-Monteith 公式的影响. *河海大学学报(自然科学版)*, 2006, **34**(6): 660-663.
- [ 29 ] 刘晓英, 林而达, 刘培军. Priestley-Taylor 与 Penman 计算参照作物腾发量的结果比较. *农业工程学报*, 2003, **19**(1): 32-36.