

## 近47 a来青海湖流域气候变化分析

许何也, 李小雁, 孙永亮

(北京师范大学资源学院; 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

**摘 要:**选取青海湖流域内及临近7个气象站点, 对各站1959~2005年的降水和气温数据采用泰森多边形法进行了计算, 并运用Mann-Kendall方法对其变化趋势进行了分析, 同时对流域近47 a的气候变化与青海湖水位变化做了相关分析。结果表明:①青海湖流域近47 a来降水存在明显的阶段性变化, 20世纪60年代、80年代、90年代降水都呈上升的趋势, 70年代为下降趋势; 同时年、夏季降水有增加的趋势。②同时期气温存在显著的上升趋势, 尤其是冬季增温显著, 年变化倾向率达到 $0.53^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ , 1987~2000年与1961~1986年相比, 平均气温增加了 $0.79^{\circ}\text{C}$ , 显著高于全国水平。③青海湖流域近47 a来春、夏、秋、冬陆面蒸发变化倾向率均为正值, 夏季陆面蒸发增加趋势显著, 年变化倾向率为 $4.17\text{ mm}/10\text{ a}$ 。④流域降水量对湖水位的变化、布哈河径流、沙柳河径流有着显著的影响; 在9 a尺度上讲, 未来5 a流域秋季降水处于上升阶段, 湖水下降会有所减缓或者回升。

**关键词:**青海湖流域; 气温; 降水; 蒸发**中图分类号:** P461**文献标识码:** A

## 引 言

青海湖位于青藏高原的东北部, 是我国最大的内陆封闭湖, 湖水面积近 $4\,300\text{ km}^2$ , 流域面积约 $29\,660\text{ km}^2$ , 介于东经 $97^{\circ}50'$ ~ $101^{\circ}20'$ , 北纬 $36^{\circ}15'$ ~ $38^{\circ}20'$ 之间(图1)。近几十年来, 青海湖水位的持续下降及随之引发的一系列生态环境问题, 引起了人们的广泛关注<sup>[1-5]</sup>。国内一些学者先后将青海湖作为内陆湖泊对气候变化的敏感指示器进行了深入研究, 得出暖干气候是导致青海湖水位下降主要原因的结论<sup>[6-11]</sup>。然而, 已有研究主要侧重于青海湖湖区, 对于以流域为单元的整体气候变化研究相对较少。因此有必要对整个流域的气候变化作一长时间序列的系统分析, 对于认识青海湖流域气候变化对水文要素的影响具有重要意义。

## 1 资料与研究方法

## 1.1 降水和气温

青海湖流域内水文、气象站点稀少且分布不均匀, 大多设置在环湖地区, 而在占流域大部分面积的

山区测站较少, 区内只有刚察与天峻2站具有长序列的观测值, 因此选取了流域境内外的野牛沟、祁连、德令哈、刚察、天峻、茶卡、共和7个气象站数据, 以面积为权重, 应用泰森多边形法计算了青海湖流域的降水及气温(图1)。数据来源为国家标准气象

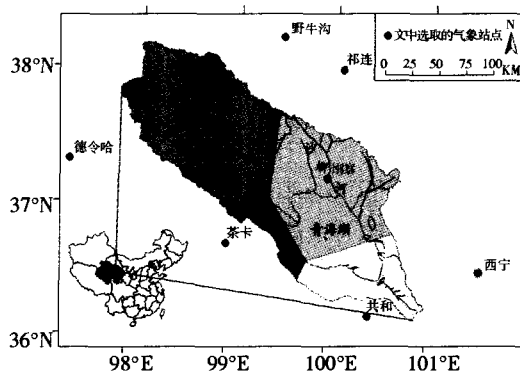


图1 青海湖流域周边气象站点分布及其相应泰森多边形分割图

Fig. 1 Location of meteorological and hydrological sites and its Thiessen area around the Lake Qinghai basin

收稿日期:2007-04-09; 改回日期:2007-05-16

基金项目:自然科学基金委重大项目(40599423)和国家重点基础研究发展规划课题(2004CB720207)资助

作者简介:许何也(1981-), 女, 在读硕士, 从事水土保持与荒漠化研究。E-mail: xuhy001@163.com

站点 1959~2005 的逐月记录。然后按照气候学上常用的时节划分法,划分 3~5 月为春季,6~8 月为夏季,9~11 月为秋季,12 月至来年 2 月为冬季,采用趋势分析法, Mann-Kendall 检验法,对青海湖流域降水、气温以及蒸发按不同季节作了进一步分析。

## 1.2 流域陆面蒸发

近年来,在干旱区采用修正的彭曼公式取得了较好的结果,但是由于参数限制,在计算青海湖流域的蒸发系列时,采用高桥浩一郎蒸发力经验公式<sup>[12]</sup>。

$$E_0 = \frac{3.1 \exp[p(\frac{172T_m}{235 + T_m})]}{1 + AP_m \exp[p(1 - \frac{172T_m}{235 + T_m})]} \quad (1)$$

式中:  $T_m$ ——月平均温度;  $P_m$ ——月平均降水量; 指数部分为马格努斯方程指数。

Turk<sup>[12]</sup>用地球上 230 个流域的水量平衡分量的资料,拟合出陆面全年蒸发量( $E$ )与降水量( $P$ )和蒸发力( $E_0$ )的经验公式:

$$E = \frac{P}{\sqrt{0.9 + (P/E_0)^2}} \quad (2)$$

根据公式(1)、(2)计算了青海湖流域的蒸发力与蒸发量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 流域气候年代际变化

图 2 给出了青海湖流域 1959~2005 年的年平均降水、蒸发、温度距平变化,近 47 a 来流域平均降水为 339.54 mm,温度为 0.26 °C,蒸发量为 203.54 mm,

都呈一定程度的上升趋势,尤其是气温上升趋势显著,利用线性拟合得到的系数为 0.29 °C/10 a。

1959~2005 年 47 a 间青海湖流域降水在波段变化中有上升的趋势(趋势不显著),同时具有明显的阶段性变化,以降水极值为界限划分 1959~1967 年, 1968~1978 年, 1979~1989 年, 1990~2005 年 4 个时段进行分段研究(表 1)。

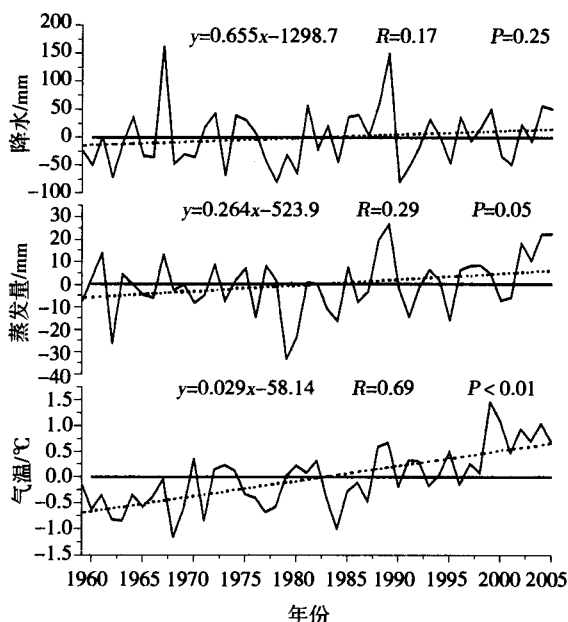


图 2 青海湖流域 1959~2000 年平均降水、蒸发、温度距平变化(实线为线性趋势)

Fig. 2 Anomalies of mean annual precipitation, temperature, and evaporation of the Qinghai Lake watershed during 1959-2000 (solid lines for linear trend)

表 1 青海湖流域不同年代平均降水、气温、蒸发

Tab. 1 Mean annual precipitation, temperature and evaporation of the Lake Qinghai basin in different decades

| 年 代     | 1959~1967 | 1968~1978 | 1979~1989 | 1990~2000 | 2001~2005 |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 流域降水/mm | 337.20    | 324.58    | 358.28    | 330.87    | 354.55    |
| 流域气温/°C | -0.31     | 0.02      | 0.21      | 0.64      | 1.12      |
| 流域蒸发/mm | 202.32    | 202.54    | 199.90    | 203.04    | 217.04    |

结果表明,青海湖流域 20 世纪 80 年代年均降水最高,70 年代年均降水最低,相差 34.3 mm,90 年代年均降水比 80 年代减少 27.41 mm,进入 2000 年以来降水有所回升。1968~1978 年间降水基本持平,平均年降水为 324.58 mm,在波动中呈稍微的下降趋势,其余时段降水在波动中都有明显的上升趋势。

同时期流域的气温则一直呈快速升温趋势,尤其是 20 世纪末年平均气温达到最高,气温年变化倾向率为 0.29 °C/10 a,与西部气温变化趋势一致<sup>[13]</sup>。1987 年被众多研究学者认为是西北地区西中部气候出现向暖湿转型的变化点<sup>[14]</sup>,以 1987 年为分界点,对比研究 1961~1987 与 1987~2003 年的气温变化,青海湖流域平均气温增加了 0.79 °C,

远远高于全国  $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$  的水平,高于西北  $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  的水平<sup>[15]</sup>。

在降水波动上升,气温持续升温的同时,流域蒸发表现为 20 世纪 80 年代减少,2000 年以来达到最高,但各时段内均为持续上升的趋势。气温的显著升高,降水的回升,表明 2000 年以来流域气候开始进入一个暖湿的时期。

## 2.2 流域气候季节变化差异

青海湖流域气候变化不仅存在年代际变化,同时有显著的季节性差异。20 世纪 60 年代以来青海湖流域春、秋季降水呈减少趋势,冬季有稍微上升的趋势,夏季上升趋势明显。计算流域春、夏、秋、冬降水变化倾向率分别为:  $-0.3\text{ mm}/10\text{ a}$ ,  $6.9\text{ mm}/10\text{ a}$ ,  $-0.3\text{ mm}/10\text{ a}$ ,  $0.3\text{ mm}/10\text{ a}$ 。20 世纪 80 年代降水的增多,主要贡献为春夏季;而 90 年代降水的减少,主要受秋季降水减少的影响,除了冬季稍有增加外,春、夏、秋 3 季都有所减少。

青海湖流域 4 季气温年变化倾向率分别为:  $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,  $0.37\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,  $0.53\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ , 秋、冬季节增温显著,春夏季节有轻微的上升趋势,4 季增温表现为全年气温的显著增加。各季节气温变化特点如下:春季气温 20 世纪 80 年代表现为降温阶段,90 年代为气温偏高的年代,较 80 年代高  $0.49\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;夏季气温在 70 年代、80 年代都呈减少趋势,在全球变暖比较明显的 90 年代气温又开始升高;秋季变化趋势与冬季相同,近 47 a 来一直表现

为增加的趋势。

青海湖流域春、夏、秋、冬陆面蒸发变化倾向率均为正值,分别为:  $0.08\text{ mm}/10\text{ a}$ ,  $2.07\text{ mm}/10\text{ a}$ ,  $0.2\text{ mm}/10\text{ a}$ ,  $0.28\text{ mm}/10\text{ a}$ , 夏季陆面蒸发呈显著的增加趋势,多数季节地表蒸发量的增加,也导致了年地表蒸发量的增加趋势。

## 2.3 流域气候变化趋势分析

对流域气候变化趋势的分析采用了世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数检验方法——Mann-Kendall 趋势检验法。在 Mann-Kendall 检验中,定义统计变量  $Z$ ,若  $|Z| \leq Z_{(1-\alpha/2)}$ ,则认为时间序列没有显著的趋势,否则,  $Z < -Z_{(1-\alpha/2)}$  时表明序列有显著下降趋势,  $Z > Z_{(1-\alpha/2)}$  时表明序列有显著上升趋势<sup>[16-18]</sup>。

1959~2005 年青海湖流域夏季和全年降水通过了  $\alpha=0.1$  的显著性水平(表 2),存在上升趋势,其余各季则没有表现出明显的趋势;而流域近 47 a 来的气温检验值均通过  $\alpha=0.05$  的显著性水平,存在显著的上升趋势,尤其是冬季增温趋势明显;受降水与气温的综合影响,流域全年和冬季陆面蒸发通过了  $\alpha=0.1$  的显著性水平,夏季陆面蒸发通过  $\alpha=0.05$  显著性水平,表现为上升趋势,春、秋季节则没有明显趋势。

表 2 Mann-Kendal 检验结果

Tab. 2 Results of Mann-Kendal test for precipitation, temperature and evaporation

|      | 全年       | 夏半年      | 冬半年      | 春季       | 夏季       | 秋季       | 冬季       |
|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 流域降水 | 1.522 *  | 1.816 *  | 0.367    | 0.238    | 1.467 *  | 0.037    | 1.220    |
| 流域气温 | 5.090 ** | 4.769 ** | 5.117 ** | 2.219 ** | 2.980 ** | 4.769 ** | 5.007 ** |
| 流域蒸发 | 1.889 *  | 2.513 *  | 0.807    | 0.303    | 3.577 ** | 0.119    | 1.394 *  |

注: \*\* 通过  $\alpha=0.05$  的水平检验,  $Z_{(1-\alpha/2)}=1.96$ ; \* 通过  $\alpha=0.1$  的水平检验,  $Z_{(1-\alpha/2)}=1.28$ 。

综上所述,流域存在冬季气温、夏季降水和夏季蒸发显著增加的趋势,表现为流域全年温度、降水与蒸发都呈增加的趋势。

## 2.4 流域气候变化与青海湖水位变化分析

近 40 a 来观测资料显示,青海湖水位除个别年份略有回升外,总体呈现出明显的下降趋势,国内众多学者对影响湖水位下降的因素及其原因进行了研究分析,认为人类活动耗水量影响不大,仅占湖水亏

损量的 4%~8%<sup>[18]</sup>,暖干气候是造成青海湖水位下降的主要原因<sup>[10]</sup>,在气候因素中,主要受前期降水量、入湖流量、湖面蒸发量影响<sup>[5,7]</sup>。

本文选取 1960~2004 沙柳河、布哈河逐年径流量及青海湖水位年变化量,与流域气温、降水作相关分析。结果表明,从整个流域来看,湖水位的年变化量与流域降水、布哈河径流、沙柳河径流表现为显著的正相关(表 3),与气温的负相关不显著。同时,流域降水与 2 大河流径流之间也存在着显著的正相关,

表明流域降水一方面对湖面入水量有较大影响,另一方面流域降水对流域 2 大主要河流的径流有着较大的影响,从而影响河流的入湖流量,进而影响湖水位的变化。1960~2004 年青海湖湖水位一直呈持续下降趋势,用湖水位逐年变化量比上 1979 年的最大下降量 0.34 m,得到标准化的湖水位变化量图(图 3),表明近 40 a 来湖水位变化幅度呈减少的趋势。

表 3 流域气候变化与青海湖水位变化相关分析  
Tab. 3 Correlations between the climatic change and the lake level fluctuation of the Lake Qinghai

|          | 年均湖水位变化量 | 流域气温   | 流域降水    | 布哈河径流   | 沙柳河径流 |
|----------|----------|--------|---------|---------|-------|
| 年均湖水位变化量 | 1.000    |        |         |         |       |
| 流域气温     | -0.011   | 1.000  |         |         |       |
| 流域降水     | 0.749 *  | -0.020 | 1.000   |         |       |
| 布哈河径流    | 0.519 *  | -0.387 | 0.621 * | 1.000   |       |
| 沙柳河径流    | 0.719 *  | -0.053 | 0.802 * | 0.712 * | 1.000 |

注: \* 代表在  $\alpha=0.01$  水平上显著

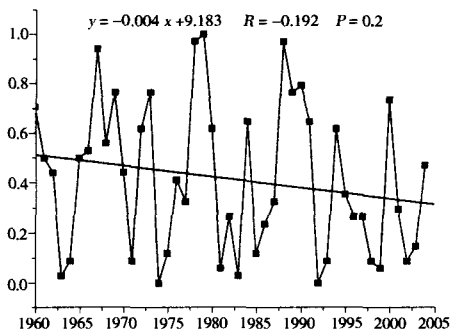


图 3 青海湖湖水位逐年变化量趋势

Fig. 3 The change in lake - level of the Qinghai Lake during 1960 - 2004 (solid line for linear trend)

采用 Mexhat 小波对流域近 47 a 的降水进行分析研究,分析不同时间尺度上流域 4 季降水的周期变化及突变特征。结果表明流域其它季节及年降水有明显的变化趋势,秋季降水存在 4~16 a 或者更大的震荡变化,震荡中心在 9 a 左右,从 9 a 尺度上来看,秋季降水在 1964~1983 年间为丰水年,在 1984~2002 年间为枯水年,在未来的 5 a 内,秋季降水将处于丰水时段(图 4)。李林等人<sup>[7]</sup>在研究中认为,秋季湖泊水位升降对入湖流量的响应最为显著,因此可以预测湖水位变化在未来的 5 a 内下降会有所减缓或者回升。

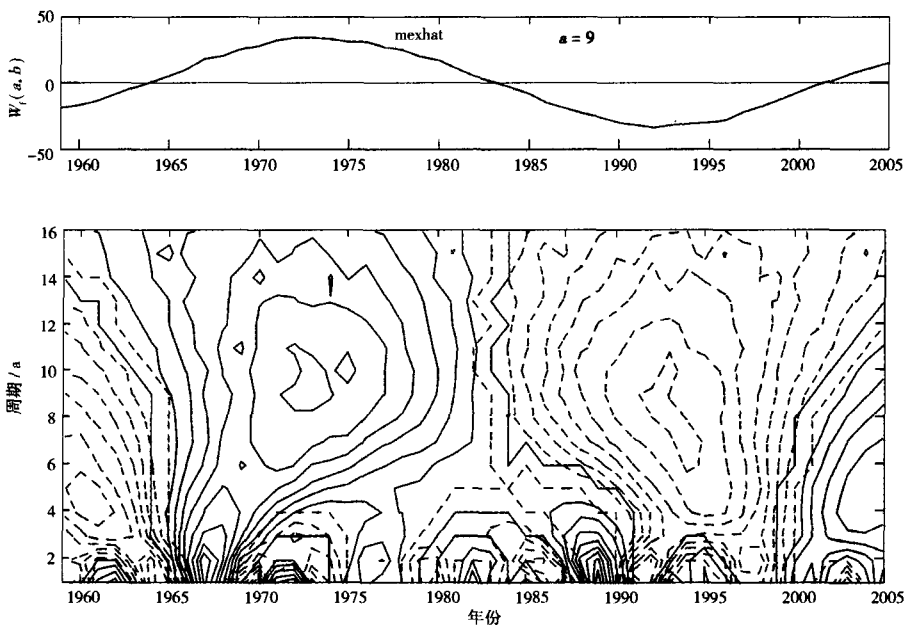


图 4 青海湖流域 1959~2005 秋季降水 Mexhat 小波分析

Fig. 4 Results of Mexhat wavelet transform for autumn precipitation of the Lake Qinghai from 1959 to 2005

### 3 结 论

(1) 青海湖流域近 47 a 来降水存在明显的阶段性变化,20 世纪 60 年代、80 年代、90 年代降水都呈上升趋势,70 年代为下降趋势。Mann-Kendal 检验年、夏季降水有增加趋势。

(2) 青海湖流域近 47 a 来气温存在显著上升趋势,1987~2000 年与 1961~1986 年相比,平均气温增加了 0.79℃,显著高于全国水平;尤其是冬季增温显著,年变化倾向率达到 0.53℃/10 a。

(3) 青海湖流域近 47 a 来春、夏、秋、冬陆面蒸发变化倾向率均为正值,分别为:0.08 mm/10 a, 2.07 mm/10 a, 0.2 mm/10 a, 0.28 mm/10 a, 夏季陆面蒸发呈显著增加趋势,年均蒸发量为 249.48 mm,年变化倾向率为 4.17 mm/10 a。

(4) 流域降水量对湖水位的变化、布哈河径流、沙柳河径流有着显著的影响,在 9 a 尺度上讲,未来 5 a 流域秋季降水处于上升阶段,湖水下降会有所减缓或者回升。

#### 参考文献:

- [1] 李林,王振宇,秦宁生,等.环青海湖地区气候变化及其对荒漠化的影响[J].高原气象,2002,21(1):59-65.
- [2] 李林,张国胜,汪青春,等.青海地表水资源的变化及影响因素[J].气象,1999,25(8):11-15.
- [3] 周笃君,马海州,高东林,等.青海湖南岸全新世黄土地球化学特征及气候环境意义[J].中国沙漠,2004,24(2):144-148.
- [4] 施雅风.山地冰川与湖泊萎缩所指示的亚洲中部气候干暖化趋势与未来展望[J].地理学报,1990,45(1):1-13.
- [5] 马珏.青海湖水位变化与湖区气候要素的相关分析[J].湖泊科学,1996,8(2):103-106.
- [6] 常国刚,李凤霞,李林.气候变化对青海生态与环境的影响及对策[J].气候变化研究进展,2005,1(4):172-175.
- [7] 李林,朱西德,王振宇,等.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,2005,25(5):690-696.
- [8] 周陆生,汪青春.青海湖水位年际变化规律的分析和预测[J].高原气象,1996,15(4):476-484.
- [9] 王艳姣,周晓兰,倪绍祥,等.近 40 a 来青海湖地区的气候变化分析[J].南京气象学报,2003,26(2):228-235.
- [10] 时兴合,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[J].气象科技,2005,33(1):58-62.
- [11] 丁永建,刘风景.近三十年来青海湖流域气候变化对水量平衡的影响及其趋势预测[J].地理科学,1995,15(2):128-135.
- [12] 中国科学院兰州分院.青海湖近代环境的演化和预测[M].北京:科学出版社,1994.50.
- [13] 李栋梁,魏丽,蔡英,等.中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望[J].冰川冻土,2003,25(2):135-142.
- [14] 施雅风,沈永平,李栋梁,等.中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J].第四纪研究,2003,23(2):152-164.
- [15] 刘德祥,董安祥,陆登荣,等.中国西北地区近 43 年气候变化及其对农业生产的影响[J].干旱区农业研究,2005,23(2):195-201.
- [16] Chen Y N, Takeuchi K, Xu Ch Ch, et al. Regional Climate Change and Its Effects on River Runoff in the Tarim Basin China [J]. Hydrological Processes, 2006(20):2207-2216.
- [17] Xu Z X, Takeuchi K, Ishidaira H. Monotonic Trend and Step Changes in Japanese Precipitation[J]. Journal of Hydrology, 2003(279):144-150.
- [18] Li X Y, Xu H Y, Sun Y L, et al. Lake-Level Change and Water Balance Analysis at Lake Qinghai, West China during Recent Decades[J]. Water Resource Manage, 2007 (in press).

## Climatic Change in the Lake Qinghai Watershed in Recent 47 Years

XU Heye, LI Xiaoyan, SUN Yongliang

(College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** The meteorological data from seven representative stations around the Lake Qinghai during 1959-2005 were used to investigate climate change of the Lake Qinghai watershed by means of Thiessen polygon method, the climatic tendencies were analyzed by Mann-Kendall test. The results are as follows: (1) In the recent 47 years, the decadal variation of precipitation is significant, there are ascending tendencies in the 1960s, 1980s and 1990s, while precipitation in the 1970s shows downward trend, and there are ascending trend of long-term change in summer and annual precipitation respectively; (2) The ascending tendency of temperature is remarkable, and the average temperature during 1987-2000 increases 0.79℃ compared with that during 1961-1986; (3) The tendencies of annual and seasonal evaporation present positive trend; (4) The precipitation has a significant correlation with the lake-level and runoff of the Buha River and the Shaliu River. Based on nine years scale, the precipitation in autumn will increase in the coming 5 years, this may decrease the magnitude of the decline of the lake-level.

**Key words:** the Lake Qinghai Watershed; temperature; precipitation; evaporation