

气候变化背景下青海湖流域水文水资源演变分析

赵 虎^{1,2}, 安志甲¹, 唐孝杰²

¹华北水利水电大学环境与市政工程学院, 河南 郑州

²中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京

收稿日期: 2025年3月24日; 录用日期: 2025年4月30日; 发布日期: 2025年5月31日

摘 要

青海湖流域作为青藏高原最重要的生态系统之一, 不仅控制和调节着湖区流域的生态环境, 而且是西部干旱区、东部季风区、青藏高原区三大区域的交汇地带, 研究青海湖流域水文水资源演变分析对区域生态安全与经济发展有重要意义。利用气象观测数据结合实测水文数据对青海湖流域水资源量演变规律分析, 得到的主要结论如下: (1) 流域受气候变化影响非常显著, 流域整体呈显著升温趋势, 增温率 $0.38^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 60年来升温约 2.28°C 。(2) 流域降雨主要集中在6~9月占全年降水量的77.4%, 最大月降水为7月, 年占比23.1%, 形成干湿季分明的单峰式特点。(3) 流域径流年内分配不均匀, 连续最大四个月径流量出现在6~9月, 其径流量占全年径流量的76.3~81.0%。2010年以后水资源量显著增加, 流域在整个时间序列呈现丰-枯-丰的变化。1956~2020年期间, 青海湖水位总体呈先降后升的趋势。(4) 1956~2004年水位总体呈下降趋势, 2005~2020年水位持续上升, 变化趋势和流域气温、降水量、入湖水量的变化趋势相符合。

关键词

青海湖流域, 水文水资源, M-K检验, 不均匀系数, 集中度集中期

Analysis on the Evolution of Hydrology and Water Resources in Qinghai Lake Basin under the Background of Climate Change

Hu Zhao^{1,2}, Zhijia An¹, Xiaojie Tang²

¹North China University of Water Resources and Electric Power School of Environmental and Municipal Engineering, Zhengzhou Henan

²China Institute of Water Resources and Hydropower Research Department of Water Resources, Beijing

Received: Mar. 24th, 2025; accepted: Apr. 30th, 2025; published: May 31st, 2025

文章引用: 赵虎, 安志甲, 唐孝杰. 气候变化背景下青海湖流域水文水资源演变分析[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(5): 879-891. DOI: 10.12677/aep.2025.155099

Abstract

As one of the most important ecosystems in the Qinghai-Tibet Plateau, the Qinghai Lake Basin not only controls and regulates the ecological environment of the lake basin, but also is the intersection of the three major regions of the western arid region, the eastern monsoon region, and the Qinghai-Tibet Plateau. Study on the evolution of hydrology and water resources in the Qinghai Lake Basin is of great significance to regional ecological security and economic development. Using meteorological observation data combined with measured hydrological data to analyze the evolution law of water resources in Qinghai Lake Basin, the main conclusions are as follows: (1) The basin is significantly affected by climate change. The basin as a whole shows a significant warming trend, with a warming rate of $0.38^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, and a warming of about 2.28°C in the past 60 years. (2) The precipitation in the basin is mainly concentrated in June-September, accounting for 77.4% of the annual precipitation. The maximum monthly precipitation is in July, accounting for 23.1% of the year, forming a single-peak feature with distinct dry and wet seasons. (3) The annual distribution of runoff in the basin is uneven. The maximum runoff for four consecutive months appears from June to September, and its runoff accounts for 76.3%~81.0% of the annual runoff. After 2010, the amount of water resources increased significantly, and the basin showed a change of wet-dry-wet in the whole time series. During the period from 1956 to 2020, the water level of Qinghai Lake generally showed a trend of decreasing first and then increasing. (4) From 1956 to 2004, the water level generally showed a downward trend, and the water level continued to rise from 2005 to 2020. The change trend was consistent with the change trend of temperature, precipitation and water inflow into the lake.

Keywords

Qinghai Lake Basin, Hydrological Water Resources, Mann-Kendall Test, Non-Uniformity Coefficient, Concentration Ratio Precipitation Concentration

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

青海湖作为我国最大的内陆湖泊，其存在不仅是地质作用和气候变化的共同结果，而且湖泊水位的波动及周边环境的演变更是青藏高原气候变化的指示器和调解器[1]。湖泊作为地表水体的重要组成部分，其收缩与扩张不仅会影响岸边的生态环境，也会影响区域水资源的变化，甚至威胁野生生物和人类的生存[2]。现如今，气候变化对流域水文水资源的研究也一直是科学家、政府部门及其他相关组织机构关注的重点。

20 世纪 80 年代以来，全球学者围绕气候变化与流域水资源的关联性开展了系统性研究。早期研究聚焦于水文模型的改进，例如 SWAT 模型与 VIC 模型被广泛应用于模拟不同气候情景下的径流响应，发现升温 1°C 可使干旱区径流减少 10%~20% [3]。Piao 等人通过多模型对比发现，亚洲季风区降水强度增加 20% 将导致洪峰流量增加 35%，凸显极端气候事件的非线性影响[4]。近年来，研究逐步向区域精细化方向发展。北美科罗拉多河流域的长期观测证实，积雪消融期提前导致夏季可用水量减少 12%，迫使水电站调度策略重构[5]。丁相毅等通过 WEP-L 模型分析了海河流域未来 30 年来气候变化对黄河流域水资源的影响，发现流域有丰水年洪水规模更大、平水或枯水年干旱情况更严重的趋势[6]。

中国学者针对气候变化与水资源系统的关联性开展了多尺度研究。在水文循环响应方面,郝帅等基于 SWAT-LSTM 耦合模型模拟发现,秦岭北麓水资源涵养区未来均呈现为变暖、变湿趋势[7]。李小雨等通过多模式集合预测指出,黄河流域 2022~2100 年极端暴雨频率将呈现波动性上升趋势,加剧洪涝风险[8]。农业水资源脆弱性成为研究热点,李娜等基于水分盈亏指数分析了水稻旱涝易损特征,揭示了四湖流域早稻发生旱涝灾害的规律[9]。区域对比研究显示,西北内陆河流域冰川融水补给量呈显著上升趋势[10],而东南沿海城市面临咸潮入侵加剧问题[11]。适应性管理策略方面,王浩院士提出“自然-社会”二元水循环调控理论,为海绵城市建设提供科学依据[12]。

近年来对青海湖流域的研究也是热点之一。树轮研究表明,近千年青藏高原温度波动与季风强度呈显著相关性[13]。湖芯沉积分析揭示了青海湖流域全新世以干湿交替规律[14],而冰芯记录[15]和孢粉组合[16]进一步验证了流域内气候转型事件。近年来,同位素技术($\delta^{18}\text{O}$ 、 δD)被广泛应用于降水-蒸发平衡研究[17]。青海湖水位变化也是气候-水文耦合研究的焦点,卫星遥感数据显示,2005~2015 年湖泊面积扩张与降水量增加直接相关[2]。冰川融水对流域径流的贡献率在暖期显著上升[18],而冻土退化对蒸散发的影响呈现显著的空间异质性,土壤有效含水量和植被覆盖度越低的地区,蒸散发对冻土退化的响应越敏感[19]。数值模拟表明,未来温度升高的情景下,青海湖流域的冻土层将持续退化[20]。生态工程(如退耕还草)有效地缓解了土地沙化问题[21],且近年来青海湖水位也呈现上升趋势[22]。以往的研究更多的注重于 2000 年后青海湖的变化情况,而没有对长系列时间尺度下对青海湖流域水文水资源的演变规律和发展趋势做出总结,因此本文利用气象观测数据并结合实测水文数据,对青海湖流域气象水文要素的演变规律和发展趋势进行全面分析,以期对青海湖流域水文水资源管理提供参考。

2. 研究数据及方法

2.1. 数据来源

青海湖流域水文、气象站点非常稀疏,且大部分站点系列很短。本次研究根据气象和水文站点资料完整程度以及空间分布情况,以青海湖流域内及周边的托勒、德令哈、天峻、茶卡、刚察、海晏、共和 7 处气象站气温数据进行年内、年际变化分析;以青海湖流域内及周边选取托勒、刚察、天峻、茶卡、共和站 5 个气象站和德令哈、布哈河口、下杜、海晏站 4 个水文站,分析流域内降水变化。

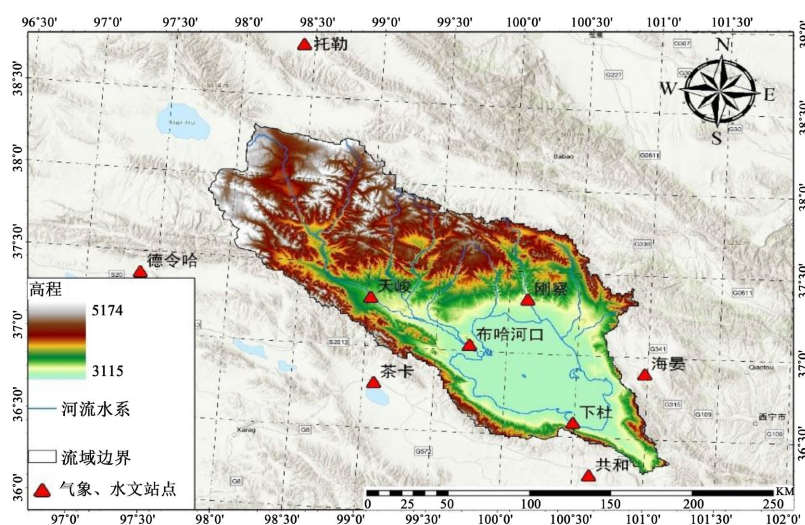


Figure 1. Distribution of precipitation representative stations in Qinghai Lake Basin and its surrounding areas
图 1. 青海湖流域及周边降水代表站分布图

2.2. 研究方法

① 线性趋势法: 用 x_i 表示样本量为 n 的某一变量, 用 t_i 表示 x_i 所对应的时间, 建立 x_i 与 t_i 之间的一元线性回归: $x_i = a + bt_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 式中回归系数 b 表示气候变量 x 的趋势倾向。

② Mann-Kendall 检验: 通过构造一秩序列: $d_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^n \alpha_{ij}$ ($k = 2, 3, 4, \dots, n$), 其中, $\alpha_{ij} = \begin{cases} 1 & X_i > X_j \\ 0 & X_i \leq X_j \end{cases}$

($k = 1, 2, \dots, n$)。定义统计变量: $UF_k = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{V_{ar}(d_k)}} (k = 1, 2, \dots, n)$, 其中 $UF_1 = 0$,

$E(d_k), V_{ar}(d_k)$ 是累积数 d_k 的均值和方差, 在 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 相互独立, 且有相同连续分布是, 它们可由下式算出: $E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4}$, $V_{ar}(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}$ 。 UF_k 为标准正态分布, 它是按时间序列 X 顺序

$X_1, X_2, \dots, X_n$ 计算出的统计量序列; 按时间序列逆序 $X_n, X_{n-1}, \dots, X_1$ 再重复上述过程, 同时使 $UB_k = -UF_k, k = n, n-1, \dots, 1, UB = 0$ 。如果 UF_k 和 UB_k 两条曲线出现交点, 且交点在临界线之间, 那么交点对应的时刻便是突变开始的时间。

③ 有序聚类分析法就是寻找突变前后系列离差平方和的总和最小的点即最优分割点。突变前后两个系列离差平方和分别表示为: $V_\tau = \sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x}_\tau)^2$, $V_{n-\tau} = \sum_{i=\tau+1}^n (x_i - \bar{x}_{n-\tau})^2$, 式中: x_τ 为突变点 τ 前的水文序列均值; $x_{n-\tau}$ 为突变点 τ 后的水文序列均值。 $S_n(\tau) = V_\tau + V_{n-\tau}$, 式中: $S_n(\tau)$ 为总离差平方和。 $S_n(\tau)$ 取最小值时对应的 τ 即为最优分割点。

④ 集中度和集中期是利用向量分析的原理定义时间分配特征的参数。其计算方法是把一年内各月水文要素作为向量看待, 各要素的大小为向量的长度, 所处的月份为向量的方向。将 1 月到 12 月每月所占的角度划分为 $(0^\circ, 30^\circ), (30^\circ, 60^\circ) \dots (300^\circ, 330^\circ), (330^\circ, 360^\circ)$, 即假设每个月(不管是 28 天还是 30 天或 31 天)都占据了 30° 的空间, 则每月中方位角 θ_i 可以设定为 $15^\circ, 45^\circ, 75^\circ \dots 345^\circ$; 然后把每个月的水文要素分解为 x 和 y 方向上的分量, 则 x 和 y 方向上的合成向量为: 集中度(RCD_{year})和集中期(RCP_{year})分别定义为: $RCD_{year} = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} / R_{year}$, $RCP_{year} = \arctan(R_x / R_y)$, 式中, RCD_{year} 反映了降水量占年降水量的比例, RCP_{year} 则表示一年中最大降水量出现的时间。

⑤ 不均匀系数 C_v 和完全调节系数 C_r 来表示水文要素年内分配的不均匀性。要素年内分配不均匀系数 C_v 计算公式如下: $C_v = \frac{\sigma}{\bar{R}} = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (R_i - \bar{R})^2} / \left(\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} R_i \right)$, 式中: R_i 为各月数量, $\bar{R}$ 为月平均数量。从式中可以看出, C_v 值越大, 表明各月要素数量相差悬殊, 年内分配越不均匀。

3. 结果分析

3.1. 气温变化分析

3.1.1. 年内变化分析

青海湖流域各气象站 1961~2020 年多年平均气温变化范围 $-2.4 \sim 4.3^\circ\text{C}$ 之间, 年均最高气温出现在青海湖东南共和气象站, 多年平均气温 4.3°C ; 年均最低气温出现在流域外西北的托勒气象站, 多年平均气温 -2.4°C 。气温年内季节性变化明显, 年内月最高气温都出现在 7 月, 气温范围在 $10.7 \sim 16.8^\circ\text{C}$ 之间, 月最高气温 16.8°C ; 月最低气温都出现在 1 月, 气温变化范围在 $-17.3 \sim -9.4^\circ\text{C}$ 之间, 月最低气温 -17.3°C 。

采用泰森多边形法, 由气温代表站控制面积权重, 提出了流域面的 1961~2020 年系列月年值, 流域各月气温上升明显, 上升倾向率在 $0.15^\circ\text{C}/10\text{a} \sim 0.65^\circ\text{C}/10\text{a}$ 之间, 其中冷季 1~2 月、11~12 月增温趋势最为明显, 2 月增温率高达 $0.65^\circ\text{C}/10\text{a}$, 4~5 月增温相对较弱, 增温率在 $0.15 \sim 0.25^\circ\text{C}/10\text{a}$ 之间, 夏秋季 6~10

月增温率在 $0.26\sim 0.36^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 之间(见图 2)。

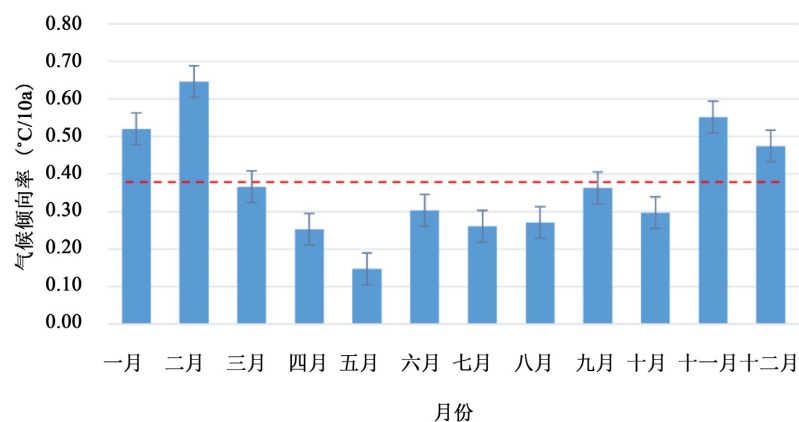


Figure 2. Monthly temperature change trend in Qinghai Lake Basin from 1961 to 2020
图 2. 青海湖流域 1961~2020 年各月气温变化趋势

3.1.2. 年际变化分析

青海湖流域各气象代表站年平均气温均呈明显上升趋势,流域整体呈显著升温,倾向率 $0.38^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,60 年来升温约 2.28°C ,经历一个完整由“高-低-高”气温变化周期;经突变检验,青海湖流域气温突变年份发生在 1997 年(见图 3)。

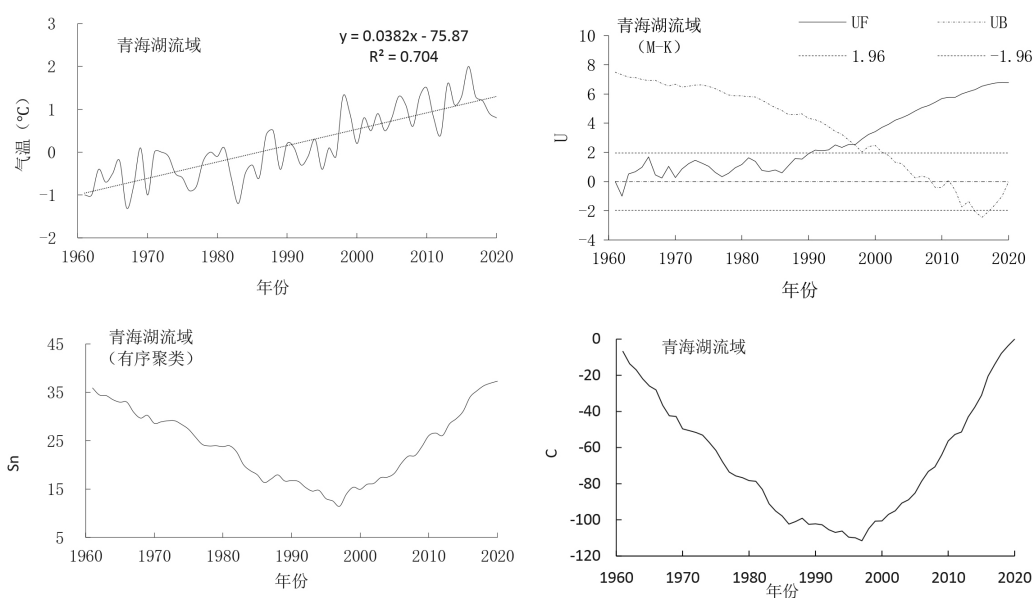


Figure 3. Temperature change trend, mutation test and difference plot curve of Qinghai Lake Basin
图 3. 青海湖流域气温变化趋势、突变检验、差积曲线图

3.2. 降水变化分析

3.2.1. 降水时序变化

经分析计算,青海湖流域多年平均降水深为 396.0 mm ,折合降水量 117.5 亿立方米,流域降水年内分配极为不均,主要集中在 6~9 月占全年降水量的 77.4%。其中,降水最多的月份为 7 月,年占比 23.1%;

降水最少的月份为 12 月，年占比仅有 0.2%，形成了干湿季分明的单峰式特点。(见图 4)

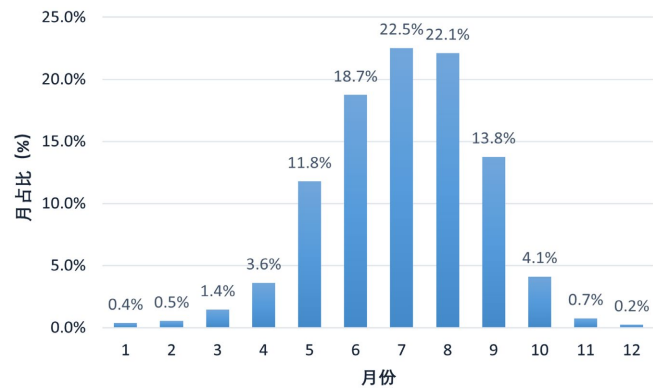


Figure 4. Characteristics of annual distribution of precipitation in Qinghai Lake Basin
图 4. 青海湖流域降水年内分配特征

3.2.2. 年内变化分析

青海湖流域降水集中度 0.60~0.77 之间，流域降水集中度基本保持不变(见图 5)。流域系列年年降水平均集中期在 170~200°之间，降水集中期介于 6~7 月，该期间也是青海湖流域多雨期；流域降水集期基本保持不变(见图 6)。流域降雨不均匀系数在 0.9~1.3 之间，流域整体降水不均匀系数略有上升(见图 7)，说明降水年内分配，随着降水的增加，趋向不均匀。

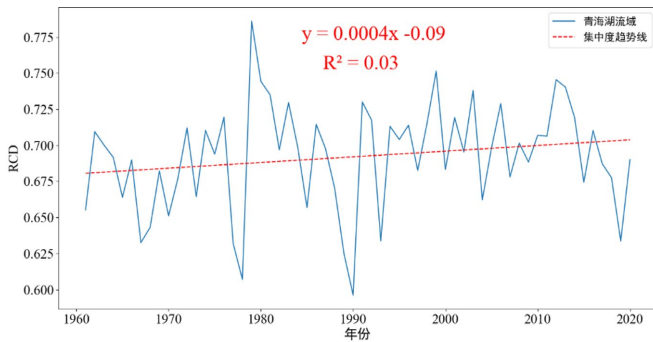


Figure 5. Precipitation concentration trend in Qinghai Lake Basin
图 5. 青海湖流域降水集中度趋势

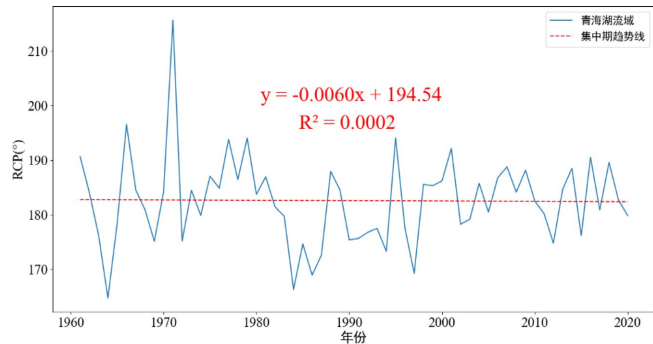


Figure 6. Precipitation concentration trend in Qinghai Lake Basin
图 6. 青海湖流域降水集中度趋势

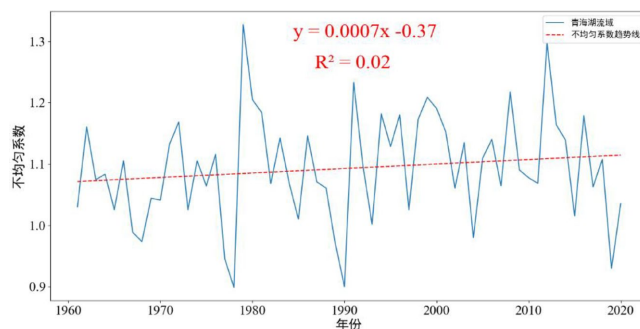


Figure 7. Trend of precipitation non-uniformity coefficient in Qinghai Lake Basin
图 7. 青海湖流域降水不均匀系数趋势

3.2.3. 年际变化分析

青海湖流域降水整体呈显著上升趋势，倾向率为 24.94 mm/10a。其中，降水量最小的年份出现在 1970 年，年降水量不到 250 mm；降水量最大的年份出现在 2016 年，年降水量在 500 mm 左右。（见图 8）。

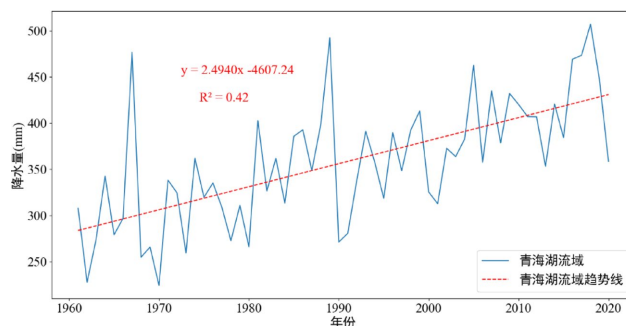
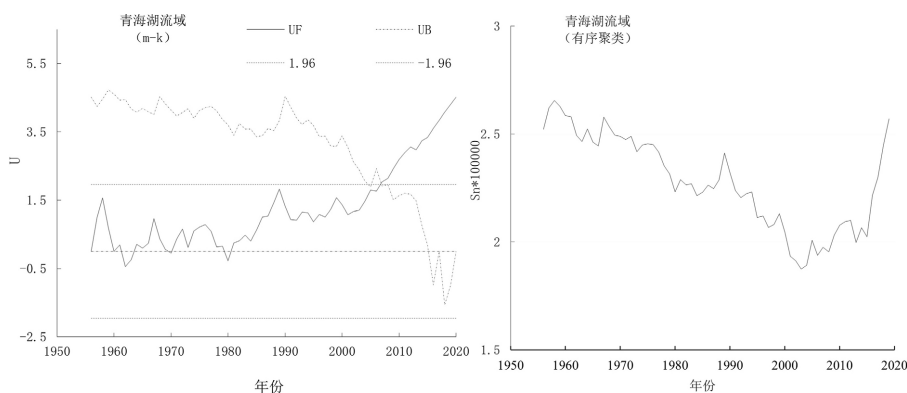


Figure 8. Trend of annual precipitation in Qinghai Lake Basin
图 8. 青海湖流域年降水量趋势图

经突变统计检测，青海湖流域降水突变时间分别为 2004 年和 2007 年，考虑流域气温的突变时间发生在 1997 年，降水突变时间因相对滞后，结合流域的降水周期的变化综合判断，青海湖流域降水突变时间分别为 2004 年和 2007 年，考虑流域气温的突变时间发生在 1997 年，降水突变时间因相对滞后，结合流域的降水周期的变化综合判断流域降水突变时间在 2004 年左右，同时也印证了上述流域降水突变时间的判断。（见图 9）



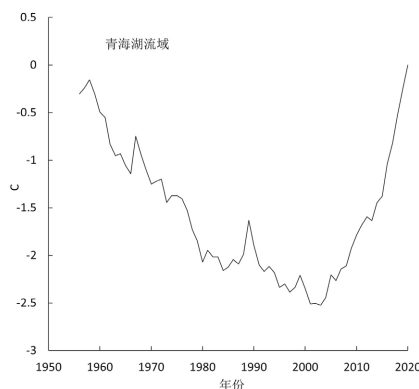


Figure 9. Abrupt change detection of precipitation in Qinghai Lake Basin and difference product curve of modulus ratio coefficient
图 9. 青海湖流域降水突变检测、模比系数差积曲线图

3.3. 水资源量演变分析

3.3.1. 年内变化分析

青海湖流域大多数河流是以降水和冰雪融水补给为主，受补给源的影响径流年内分配不均匀，连续最大四个月径流量出现在 6~9 月，其径流量占全年径流量的 76.3%~81.0%。最大月径流多出现在 7 月，其径流量可达年径流量的 26%左右，最小月径流多发生在 1~3 月份，不足全年径流量的 1%。详见图 10。

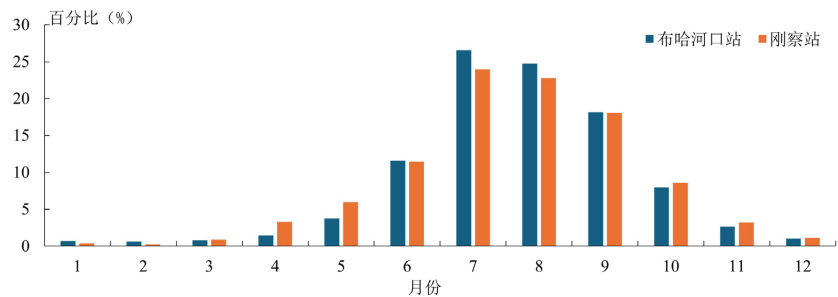


Figure 10. Annual runoff distribution map of representative stations in Qinghai Lake Basin
图 10. 青海湖流域代表站径流量年内分配图

青海湖流域不同年代最大四月径流量占比变化情况，见图 11。布哈河最大四月径流量呈现先增后降的趋势，在 20 世纪 90 年代达到 84.7%，到 2010~2020 年降为 78.6%。刚察站控制河流沙柳河最大四月径流量呈上升趋势，由 20 世纪 60 年代的 74.0%，到 2010~2020 年上升为 77.5%。

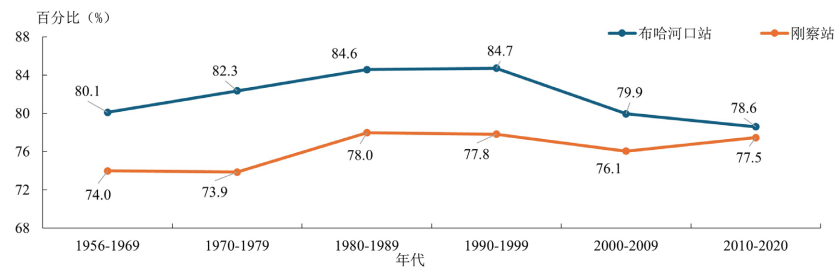


Figure 11. The change of the proportion of the maximum April runoff in different years
图 11. 最大四月径流量占比不同年代变化图

计算青海湖流域主要河流不均匀系数, 绘制不同年代青海湖流域代表站不均匀系数变化图, 见图 12。布哈河多年平均不均匀系数为 0.51, 年代际变化呈下降趋势。沙柳河多年平均不均匀系数为 0.45, 年代际变化呈上升趋势。青海湖流域布哈河径流内在 1956~2020 年间趋于均匀, 沙柳河径流内在分配在 1956~2020 年间有集中的趋势, 但沙柳河年内分配较布哈河更均匀。

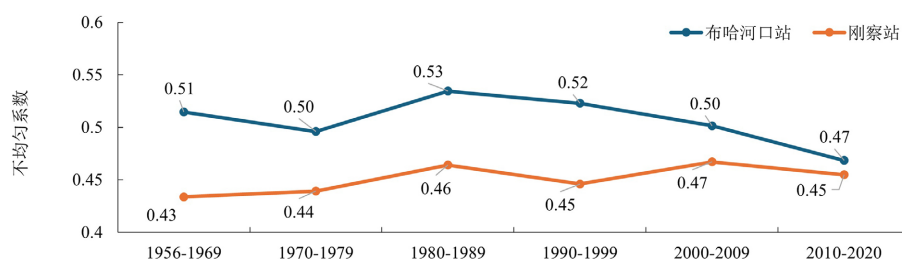


Figure 12. Variation of non-uniformity coefficient of representative stations in Qinghai Lake Basin
图 12. 青海湖流域代表站不均匀系数变化图

3.3.2. 年际变化分析

青海湖流域河流极值比在 3.0~12.6 之间, 变差系数 C_v 在 0.24~0.53 之间。其中布哈河年际变幅剧烈, 极值比为 12.6, 变差系数 C_v 为 0.53; 青海湖北部沙柳河极值比为 4.7, 变差系数 C_v 为 0.33。通过线性趋势和 m-k 检验分析流域各分区径流量趋势变化情况, 各区域径流量过程线, 见图 13。

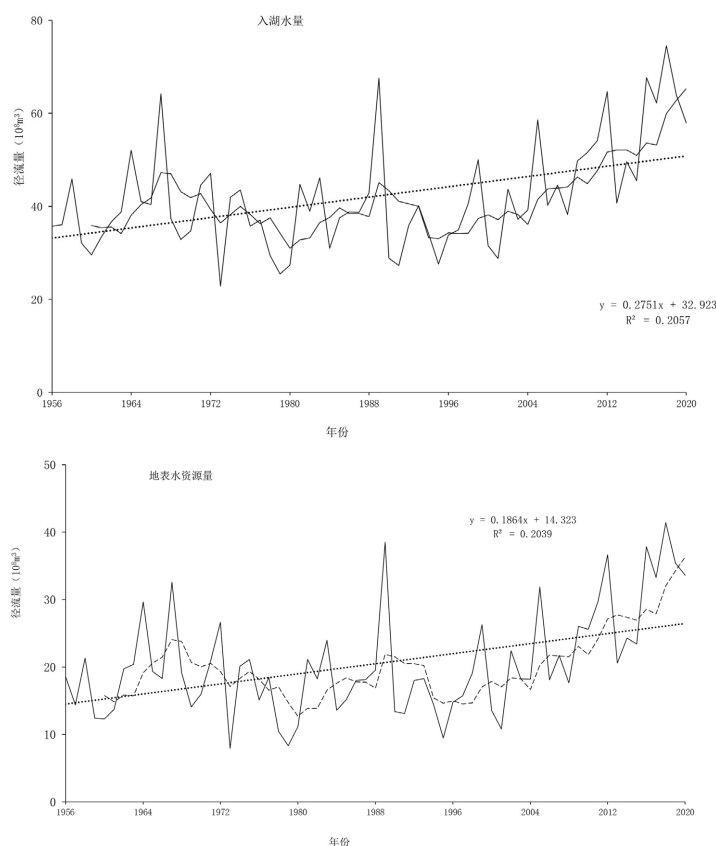


Figure 13. Process line diagram of water resources in Qinghai Lake Basin
图 13. 青海湖流域水资源量过程线图

根据 M-K 检验和有序聚类分析, 青海湖流域北部的流域突变径流量出现突变年份较早, 沙柳河在 2003 年左右发生突变; 布哈河区水资源量在 2012 年左右发生突变。青海湖水资源量在 2012 年左右发生由少转多的突变, 2012~2020 年平均水资源量较 1956~2011 年平均水资源量增加 70.7%。入湖水量受降水影响, 突变年份出现较早在 2010 年左右, 2010~2020 年平均水量较 1956-2009 年增加 48.0%。详见图 14。

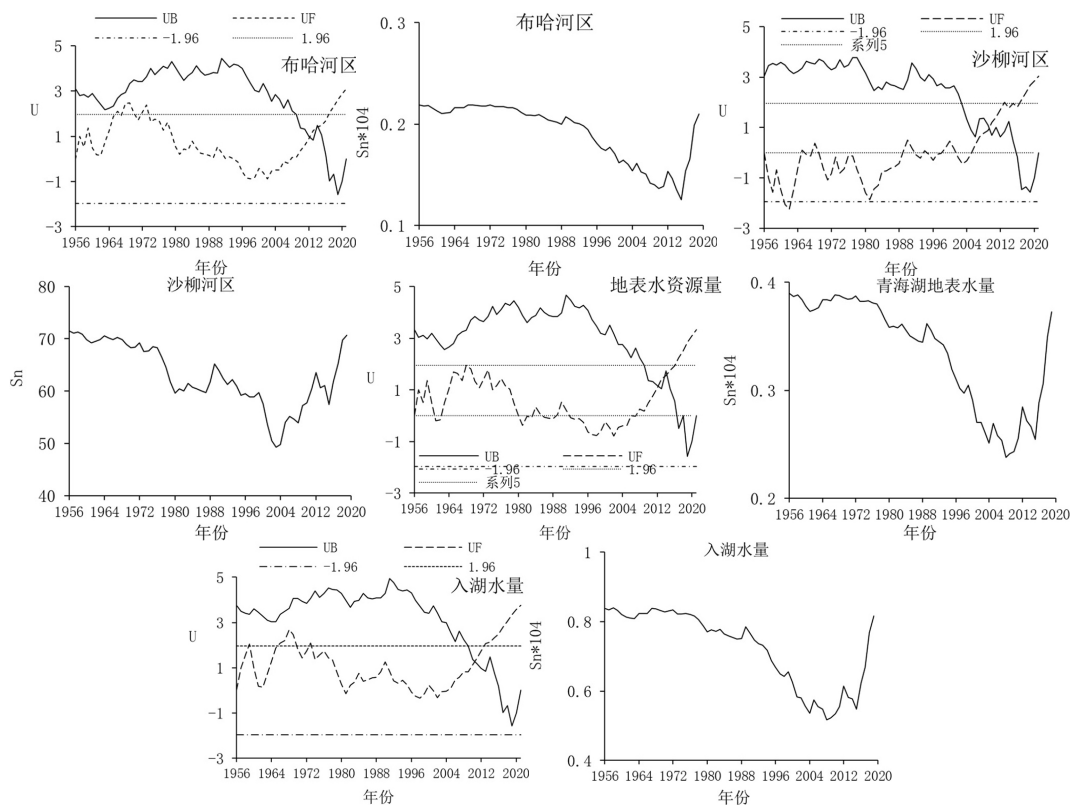
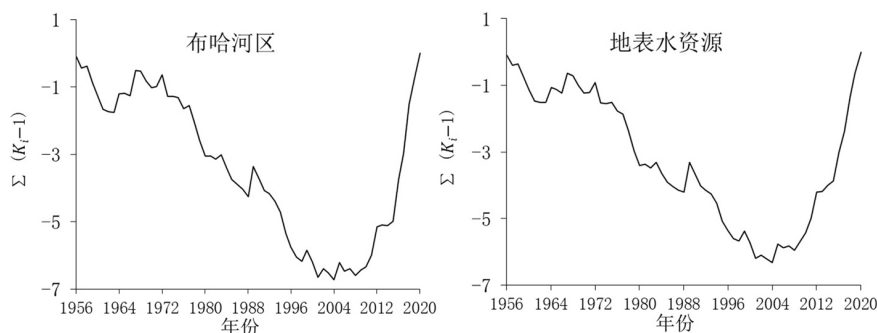


Figure 14. M-K and ordered clustering test diagram of water resources in Qinghai Lake Basin

图 14. 青海湖流域水资源量 M-K、有序聚类检验图

3.3.3. 周期变化分析

根据模比系数差积曲线图可得, 青海湖流域布哈河区、湖南岸河区和倒淌河区水资源量在 1956~2008 年持续偏枯, 2009 年后转丰; 沙柳河区水资源量在 1956~1980 年偏枯, 在 1980~1990 年短暂转丰, 在 1990~2004 年继续偏枯, 在 2005 年后转丰; 从青海湖流域整体来看, 流域水资源量在整个时间序列上呈现“丰-枯-丰”的变化。详见图 15。



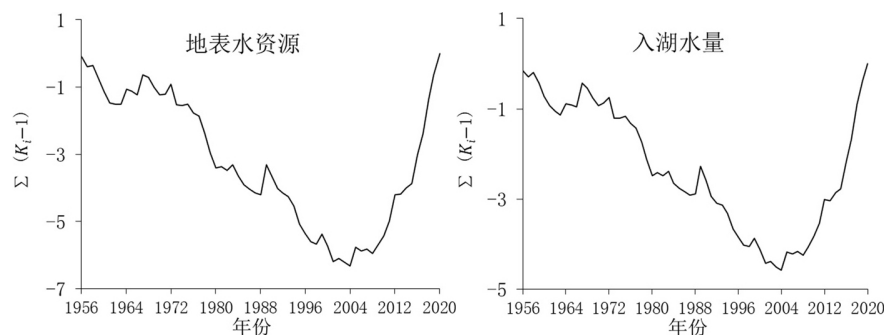


Figure 15. Difference plot curve of modulus ratio coefficient of water resources in Qinghai Lake Basin
图 15. 青海湖流域水资源量模比系数差积曲线图

3.4. 青海湖水位演变分析

青海湖湖区开展系统性水位观测工作始于 1955 年 6 月, 青海湖最高水位出现在 1956 年, 年平均水位 3196.99 m, 水面面积 4557.6 km²、蓄水量 922.5 亿 m³; 最低水位出现在 2004 年, 年平均水位 3192.86 m, 水面面积 4196.0 km²、蓄水量 741.2 亿 m³。

1956~2020 年, 水位总体呈先降后升的趋势, 2005 年以来青海湖水位上升趋势明显。1956~2004 年水位总体呈下降趋势, 2004 年年平均水位较 1956 年下降 4.13 m, 年均下降 0.086 m, 面积减小 361.6 km², 蓄水量减少 181.3 亿 m³。2005~2020 年水位持续上升, 2020 年年平均水位达到 3196.34 m, 较 2004 年上升 3.48 m, 年均上升 0.218 m, 面积增加 320.4 km², 蓄水量增加 151.7 亿 m³。青海湖水位历年水位变化过程见图 16。

2020 年, 青海湖平均水位 3196.34 m, 面积 4516.4 km², 蓄水量 892.9 亿 m³, 达到 60 年代的水平。青海湖水位上升、面积增大的主要原因与全球及青藏高原气候变暖, 青海湖地区气温升高、降水量增加、入湖水量显著增加有关。

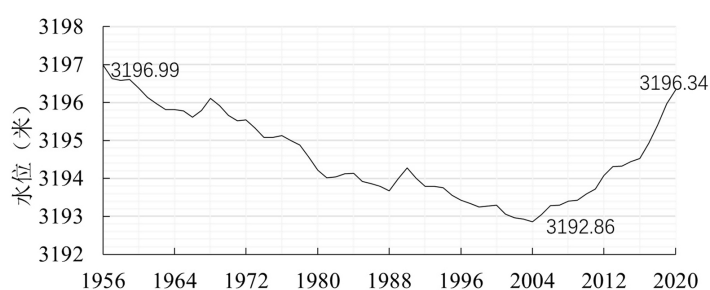


Figure 16. Water level change of Qinghai Lake
图 16. 青海湖水位变化

4. 结论

本文利用气象观测数据对青海湖流域气象水文要素的演变规律和发展趋势进行全面分析, 并结合实测水文数据对青海湖流域水资源量演变规律分析, 得到的主要结论如下:

(1) 青海湖流域受气候变化影响非常显著, 其气温、降水量近年来均有不同程度地升高。流域整体呈显著升温趋势, 增温率 0.38℃/10a, 60 年来升温约 2.28℃, 冬季气温升高最为明显, 增温率最高可达 0.65℃/10a, 流域气温突变年份为 1997 年, 1997 年之前气温缓慢下降, 1997 年以后气温上升趋势明显。

(2) 流域降雨年内分配极为不均, 主要集中在 6~9 月占全年降水量的 77.4%, 最大月降水为 7 月, 年

占比 23.1%，形成干湿季分明的单峰式特点；流域降水突变发生在 2004 年，1956~2004 年、2005~2020 年发生由枯到丰的周期变化。

(3) 流域径流年内分配不均匀，连续最大四个月径流量出现在 6~9 月，其径流量占全年径流量的 76.3%~81.0%。2000 年以前流域水资源量较多年平均偏少，2010 年以后水资源量显著增加，较多年平均偏多 20% 以上，流域在整个时间序列呈现丰 - 枯 - 丰的变化。

(4) 1956~2020 年期间，水位总体呈先降后升的趋势。1956~2004 年水位总体呈下降趋势，2005~2020 年水位持续上升，变化趋势与流域气温升高、降水量增加、入湖水量增加相符合。

基金项目

1. 青海省科技计划项目(2022-SF-143); 2. 河南省科技攻关项目(252102320238)。

参考文献

- [1] 李林, 申红艳, 刘彩红, 等. 青海湖水位波动对气候暖湿化情景的响应及其机理研究[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(5): 600-608.
- [2] 夏兴生, 蔡建军, 王林刚, 等. 青海湖两季水体范围时空变化遥感监测[J]. 遥感技术与应用, 2024, 39(4): 1026-1038.
- [3] Arnell, N. (1999) Climate Change and Global Water Resources. *Global Environmental Change*, **9**, S31-S49. [https://doi.org/10.1016/s0959-3780\(99\)00017-5](https://doi.org/10.1016/s0959-3780(99)00017-5)
- [4] Piao, S., Ciais, P., Huang, Y., Shen, Z., Peng, S., Li, J., *et al.* (2010) The Impacts of Climate Change on Water Resources and Agriculture in China. *Nature*, **467**, 43-51. <https://doi.org/10.1038/nature09364>
- [5] Barnett, T.P., Pierce, D.W., Hidalgo, H.G., Bonfils, C., Santer, B.D., Das, T., *et al.* (2008) Human-Induced Changes in the Hydrology of the Western United States. *Science*, **319**, 1080-1083. <https://doi.org/10.1126/science.1152538>
- [6] 丁相毅, 贾仰文, 王浩, 等. 气候变化对海河流域水资源的影响及其对策[J]. 自然资源学报, 2010, 25(4): 604-613.
- [7] 郝帅, 张洪波, 杨佳雯, 等. 未来气候情景下秦岭北麓水资源涵养区径流组分的结构性演化研究[J/OL]. 水资源保护, 1-14. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=8t0HcLKTPb0ebI0TePgJR-mWSN-DADLw41ZySdWd1jtic7RWSPyo7VW7fapvTPMiPpRyD9mih3PlfqRptDeLLg98My49f0Ea5IGH5t0hBI-fOAGGqXKXVq_wxIKLJ2etqRQhRmMFrm35LKwtXLP-PHS2xYc6SaFvKPj6bkMh1l903uwM3IXUDJ0AsQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS, 2025-03-15.
- [8] 李小雨, 张国栋, 尹昌燕, 等. 未来气候模式下黄河流域极端降水指数时空分布特征[J]. 人民黄河, 2024, 46(11): 37-42.
- [9] 李娜, 罗强, 董苇, 等. 四湖流域水稻耗水与降雨匹配度及水稻旱涝易损特征分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(24): 79-91.
- [10] 李振林, 秦翔, 刘宇硕. 1966-2019 年党河流域冰川变化遥感监测[J]. 测绘科学, 2024, 49(10): 146-155.
- [11] 季永兴, 李路, 高晨晨. 咸潮影响下长江口水源地优化布局及白茆沙水库建设可行性分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 25-32, 43.
- [12] 王浩, 牛存稳, 赵勇. 流域“自然-社会”二元水循环与水资源研究[J]. 地理学报, 2023, 78(7): 1599-1607.
- [13] He, M., Yang, B. and Datsenko, N.M. (2013) A Six Hundred-Year Annual Minimum Temperature History for the Central Tibetan Plateau Derived from Tree-Ring Width Series. *Climate Dynamics*, **43**, 641-655. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1882-x>
- [14] An, Z., Colman, S.M., Zhou, W., Li, X., Brown, E.T., Jull, A.J.T., *et al.* (2012) Interplay between the Westerlies and Asian Monsoon Recorded in Lake Qinghai Sediments since 32 ka. *Scientific Reports*, **2**, Article No. 619. <https://doi.org/10.1038/srep00619>
- [15] Yao, T., Thompson, L., Chen, D. and Piao, S. (2022) Reflections and Future Strategies for Third Pole Environment. *Nature Reviews Earth & Environment*, **3**, 608-610. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00342-4>
- [16] 肖霞云, 沈吉, 谭金凤. 末次冰消期滇西地区气候突变事件: 湖泊孢粉记录[J]. 第四纪研究, 2019, 39(4): 964-974.
- [17] 陈亚荣, 李星玥, 陈克龙. 布哈河流域不同水体稳定同位素特征分析[J]. 水文, 2025, 45(1): 83-89.

-
- [18] Zhao, Q., Ding, Y., Wang, J., Gao, H., Zhang, S., Zhao, C., *et al.* (2019) Projecting Climate Change Impacts on Hydrological Processes on the Tibetan Plateau with Model Calibration against the Glacier Inventory Data and Observed Streamflow. *Journal of Hydrology*, **573**, 60-81. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.043>
- [19] 季芳, 范林峰, 匡星星, 等. 青藏高原多年冻土退化对蒸散发的影响[J]. 水科学进展, 2022, 33(3): 390-400.
- [20] Shen, T., Jiang, P., Ju, Q., Zhao, J., Chen, X., Lin, H., *et al.* (2024) Permafrost on the Tibetan Plateau Is Degrading: Historical and Projected Trends. *Journal of Hydrology*, **628**, Article ID: 130501. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130501>
- [21] 梅子钰, 张雅茹, 黄心言, 等. 基于生态系统服务的青海湖流域生态风险评估及其空间异质性影响因素分析[J]. 生态学报, 2024, 44(12): 4973-4986.
- [22] 王海彬, 刘家宏, 刘希胜, 等. 基于 ANUSPLIN 插值法的青海湖流域数字流域模型研究[J]. 水资源保护, 2024, 40(4): 82-91.