



长江科学院院报  
*Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*  
ISSN 1001-5485, CN 42-1171/TV

## 《长江科学院院报》网络首发论文

题目：气候变化对可可西里盐湖流域湖泊水量变化的影响分析  
作者：李琳，谭德宝，文雄飞，王莹，刘希胜，王岗  
收稿日期：2021-07-19  
网络首发日期：2022-02-25  
引用格式：李琳，谭德宝，文雄飞，王莹，刘希胜，王岗. 气候变化对可可西里盐湖流域湖泊水量变化的影响分析[J/OL]. 长江科学院院报.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20220223.1435.002.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 气候变化对可可西里盐湖流域湖泊水量变化的影响分析

李琳<sup>1,2</sup>, 谭德宝<sup>3</sup>, 文雄飞<sup>1,2</sup>, 王莹<sup>1,2</sup>, 刘希胜<sup>4</sup>, 王岗<sup>4</sup>

(1.长江科学院 空间信息技术应用研究所, 武汉 430010; 2.武汉市智慧流域工程技术研究中心, 武汉 430010;  
3.长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010; 4.青海省水文水资源测报中心, 西宁 810001)

**摘要:** 湖泊是气候变化的敏感指示器。为了研究气候变化对湖泊水量的影响, 以盐湖流域为研究区, 应用统计方法对 1989-2018 年降雨、气温、蒸发进行线性趋势和突变分析, 采用多源卫星遥感技术对湖泊面积等水文要素进行监测, 分析湖泊面积与气象要素、湖泊面积与湖泊水量之间的相关性。利用 VIC 模型模拟径流并结合计算的冰川水量得到盐湖径流组成, 定量探讨气象要素对湖泊水量变化的影响, 综合分析 2011 年前后气象要素影响流域湖泊水量的差异。结合统计分析与水文模型定量计算可知: 年降雨量、年平均气温显著升高, 年蒸发量呈下降趋势, 且与湖泊面积有较好的相关性。湖泊面积与湖泊水量间相关性较高, 可间接体现气象要素对湖泊水量变化的影响。2011 年前卓乃湖和盐湖水量变化主要受降雨量影响, 库赛湖和海丁诺尔水量变化主要受气温影响; 2011-2014 年四个湖泊水量变化主要受降雨量影响; 2015—2018 年四个湖泊水量变化中降雨增加量、冻土释水和地下水补给增加量、冰川融水量对湖泊扩张的贡献约为 34.48%、57.66%、7.86%, 气温变化成为影响湖泊水量变化的主要因素, 降雨量影响次之。

**关键词:** 气候变化; 湖泊面积; VIC 模型; 水量变化

**中图分类号:** P333

**文献标志码:** A

## Analysis of the Impact of Climate Change on the Change of Lake Water Volume in the Hoh Xil Salt Lake Basin

LI Lin<sup>1,2</sup>, TAN De-bao<sup>3</sup>, WEN Xiong-fei<sup>1,2</sup>, WANG Ying<sup>1,2</sup>, LIU Xi-sheng<sup>4</sup>, WANG Gang<sup>4</sup>

(1.Spatial Information Technology Application Research Institute, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2.Wuhan Smart Watershed Engineering Technology Research Center, Wuhan 430010, China; 3. Yangtze River Scientific Research Institute, Yangtze Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 4.Hydrology and Water Resources Prediction Center of Qinghai Province, Xining 810001, China)

**Abstract:** Lakes are sensitive indicators of climate change. In order to study the impact of climate change on lake water volume, taking the Salt Lake Basin as the research area, statistical methods were applied to analyze the linear trend and abrupt changes of rainfall, temperature, and evaporation from 1989 to 2018. Multi-source satellite remote sensing technology is used to monitor hydrological elements such as lake area, and analyzing the correlation between lake area and meteorological elements, lake area and lake water volume changes. Using the VIC model to simulate runoff and combining the calculated glacier water volume to obtain the composition of the salt lake runoff,

**收稿日期:** 2021-07-19; **修回日期:** 2021-12-20

**基金项目:** 青海省科技厅项目 (2020-SF-151); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目 (CKSF2021485、CKSF2021743、CKSF2019411)

**作者简介:** 李琳 (1997-), 女, 黑龙江穆稜人, 硕士研究生, 从事水利遥感研究。E-mail: 1109133700@qq.com

**通信作者:** 谭德宝 (1966-), 男, 湖北巴东人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事空间信息技术在水利行业中的应用研究。E-mail: tdebao@126.com

quantitatively explore the impact of meteorological elements on the changes in lake water volume, and comprehensively analyze the differences in the impact of meteorological elements on the lake water volume in the basin before and after 2011. Comprehensive statistical analysis and quantitative calculation of hydrological models show that annual rainfall and annual average temperature have increased significantly, and annual evaporation has shown a downward trend, and they have a good correlation with lake area. There is a high correlation between lake area and lake water volume, which can indirectly reflect the impact of meteorological elements on lake water volume changes. Before 2011, the changes in the water volume of Zhuonai Lake and Salt Lake were mainly affected by rainfall, and the water volume changes in Kusai Lake and Hading Knoll were mainly affected by temperature. The changes in water volume of the four lakes from 2011 to 2014 were mainly affected by rainfall; In the changes in water volume of the four lakes from 2015 to 2018, the increase in rainfall, the release of frozen soil and the increase in groundwater recharge, and the amount of glacial melting water contributed about 34.48%, 57.66%, and 7.86% to the expansion of the lake. Temperature changes have become the main factor affecting the changes in lake water volume, followed by rainfall.

**Key words:** climate change; lake area; vic model; variation of water quantity

## 1 研究背景

湖泊在地球水体中仅占0.4%，却在自然界的水循环中发挥着重要的作用<sup>[1]</sup>。湖泊是气候环境变化的指示器，对气候变化反应迅速，是连接地球表层系统冰冻圈、大气圈、水圈和生物圈的纽带，湖泊面积、水位及水量变化是其所在流域水量平衡综合作用的结果<sup>[2]</sup>。青藏高原分布着大量的湖泊，这些湖泊较少受到人类活动的影响，对气候暖湿化感应强烈，可以反映自然状态下的区域气候变化规律，是气候变化的前哨<sup>[3]</sup>。近20多年来，湖泊水量的变化尤为显著，其原因大多为受气候变化的影响<sup>[4]</sup>。

盐湖流域湖泊位于青藏高原腹地高寒地带，受气候变化影响较大。杜玉娥等<sup>[5]</sup>认为2011年前气候暖湿化是盐湖面积缓慢扩大的主要原因，冰川和冻土融水可能是次要原因。姚晓军等<sup>[6]</sup>认为可可西里地区湖泊动态变化主要与气候变化有关，降雨增多、蒸发减少是湖泊扩大的主要原因，而气候变暖引起的冰川融水增加、冻土水分释放是次要原因。Qiao等<sup>[7]</sup>利用1976—2019年多时相Landsat遥感影像与地形数据估算了可可西里湖泊蓄水量的变化，利用五道梁气象站数据分析多年平均、最大最小气温和多年降雨量的变化趋势，将气温和降雨的变化相比较，认为降雨增加可能主导湖泊的扩张。陈强等<sup>[8]</sup>统计分析了1961—2018年可可西里主要气候要素变化趋势，并从水量平衡角度探讨了水文情势变化后的盐湖水体补排、泄、蓄关系。

以往的研究主要是基于遥感卫星等技术手段研究不同气候条件下湖泊面积的变化，但是由于湖泊周边地形的差异，面积变化不能充分反映湖泊对气候变化的响应<sup>[9]</sup>。研究湖泊水量变化需要考虑流域

及周边相连的水系，常常借助数学模型解析湖泊水量变化的影响因素<sup>[4]</sup>。VIC (Variable Infiltration Capacity) 模型是基于SVATS (Soil Vegetation Atmospheric Transfer Schemes) 机制的大尺度分布式水文模型。VIC模型以混合产流作为产流机制，在模拟产汇流过程中考虑到了融雪和冻土因素的影响，并在径流模拟方面有很多研究与进展，适用于盐湖流域湖泊水量模拟与分析<sup>[10]</sup>。

由于实测数据难得，对于盐湖流域水文模型模拟研究并不多，且之前未将湖泊水量变化量如冰川融水、冻土和地下水补给量化。因此本文结合多源遥感数据和气象站数据，在利用统计方法计算长时间气象要素与湖泊面积关系的基础上，通过VIC模型模拟的水量和利用冰川数据集<sup>[11,12]</sup>估算的冰川融水，得到2015—2018年盐湖流域湖面降雨、陆面净补给、冻土释水和地下水、冰川融水径流组成与占比。探讨气候变化对湖泊水量变化的影响机制，辨识影响湖泊水量的主导因素，为青藏高原的水资源调查及合理利用和开发提供科学依据和理论依据<sup>[13]</sup>。

## 2 研究区域概况

盐湖流域位于青海省玉树州治多县西部、昆仑山脉南侧，属可可西里腹地，范围在35°19′~35°54′N, 91°21′~93°39′E，海拔在4400m以上。研究区属于半干旱气候区，为蒸发大于补给的水量收支负平衡区域，降雨量由东南向西北逐渐减少<sup>[10]</sup>。土温低、结冻期长，下伏深厚的多年冻土，地表寒冻冰缘地貌形态多种多样。自西向东依次分布有卓乃湖、库赛湖、海丁诺尔和盐湖。2011年以前，四个湖泊各自水量基本平衡。卓乃湖外溢后，四个湖泊自西向东

建立了水力联系,盐湖来水量不仅包括原有的湖面降雨、四周河流、沟道汇水补给等,还增加了从上游卓乃湖、库赛湖、海丁诺尔向其输送的水量。研究区地理位置见图1。

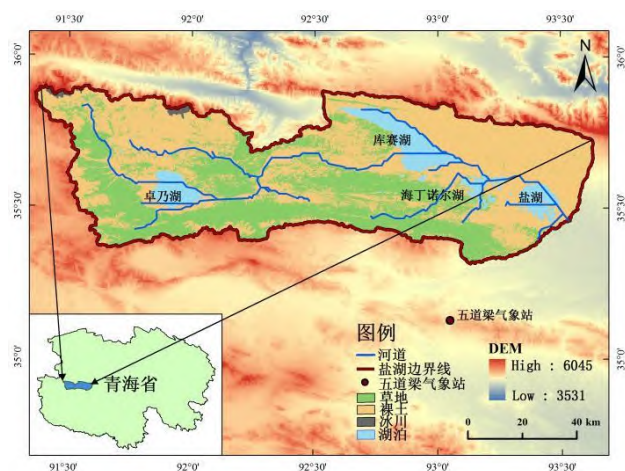


图1 盐湖流域示意图

Fig.1 Schematic diagram of Salt Lake Basin

### 3 数据与方法

#### 3.1 数据准备

##### 3.1.1 气象要素年际分析数据

五道梁气象站位于 93°03'E, 35°08'N, 距盐湖子流域中心直线距离约 30km, 区域大气热力和动力条件相似, 采用五道梁气象站数据具有一定的空间代表性<sup>[8]</sup>。因此选用五道梁气象站年降雨、年平均气温、年蒸发数据用于 1989—2018 年盐湖流域气象要素年际间变化分析。

##### 3.1.2 遥感数据

研究区 12 月—5 月湖泊受冰封影响, 选取 1989—2018 年 10 月—11 月无云遮挡的国产高分一号卫星和国外 Landsat 卫星数据。高分一号空间分辨率为 16m, 数据来源于中国资源卫星应用中心。Landsat 卫星包括 Landsat5TM、Landsat7ETM+、Landsat8OLI, 空间分辨率为 30m, 数据来源于美国地质调查局<sup>[14]</sup>。具体遥感数据时间见表 1。

##### 3.1.3 VIC 模型模拟所用数据

基于之前的研究<sup>[10]</sup>可认为 VIC 模型适用于盐湖流域水文模拟, 因此采用 30m 分辨率的 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 数字高程数据, 并将可可西里盐湖流域划分为分辨率 0.1°×0.1°的子网格 120 个、FAO 世界粮农组织的 5'分辨率的土壤质地分布图、2009 年欧空局基于 MERIS 数据发布的全球陆地覆盖数据 (ESA GlobCover) 和阳坤研发

的中国区域高时空分辨率地表气象驱动数据集<sup>[15-17]</sup> (CMFD) 用于模型模拟。

表 1 卫星影像数据

Table 1 Satellite image data

湖泊	数据类型	获取时间(年/月/日)		
卓乃湖	Landsat 5 TM	1989/10/10; 1990/11/14; 1991/11/01;		
		1992/11/03; 1993/11/22; 1994/11/09;		
		1995/10/27; 1996/11/14; 1997/11/01;		
		1998/12/06; 1999/11/23; 2000/10/08;		
		2001/10/27; 2002/12/30; 2003/10/17;		
		2004/11/04; 2005/11/07; 2006/11/10;		
		2009/11/02; 2010/11/05; 2011/11/08		
		Landsat 7 ETM+	2007/11/05; 2008/10/22; 2012/11/18	
			Landsat 8 OLI	2013/12/15; 2014/11/16; 2015/11/03;
				2016/11/21; 2017/10/07; 2018/11/11
库赛湖	Landsat 5 TM	1989/11/20; 1989/11/07; 1991/10/09;		
		1992/11/12; 1993/11/15; 1994/11/02;		
		1995/10/20; 1996/11/23; 1998/01/29;		
		1998/10/28; 1999/12/28; 2000/10/01;		
		2001/11/21; 2002/11/28; 2003/10/26;		
		2004/12/15; 2005/10/31; 2006/11/03;		
		2007/10/05; 2009/12/13; 2010/11/30		
		Landsat 7 ETM+	2008/11/16; 2011/11/09; 2012/11/11	
			Landsat 8 OLI	2013/11/06; 2014/11/09; 2015/10/27;
				2016/11/14; 2017/11/01; 2018/10/31
高分一号	2016/11/14; 2017/11/01; 2018/10/31			

海丁诺尔  
盐湖

由于研究区附近只有五道梁气象站, 将单一气象站数据插值到整个流域可能难以满足模型模拟精度, 因此选用 CMFD 数据集代替。将 1989—2018 年五道梁气象站的年降雨量、年平均气温的观测值与 CMFD 数据集五道梁气象站所在格点数据进行比较, 评估结果见图 2。

年降雨量的观测值与 CMFD 数据的相关系数  $R^2$  为 0.9526, RMSE 为 8.3139; 年平均气温的观测值与 CMFD 数据的相关系数  $R^2$  为 0.9868, 均方根误差 RMSE 为 6.2012。相关系数大于 0.95, 且 RMSE 在误差范围内, 证明 CMFD 数据集在盐湖流域具有较高的合理性和适用性, 可用于流域的气候变化与水文模拟研究。



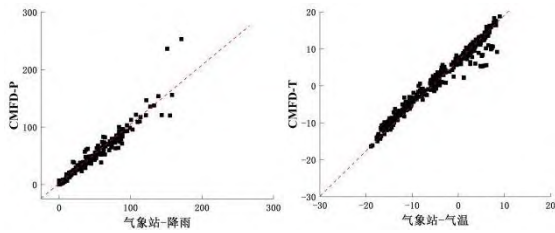


图2 1989—2018年五道梁气象站观测值与CMFD数据对比

Fig.2 Comparison of observation data and CMFD data of Wudaoliang meteorological station from 1989 to 2018

### 3.1.4 冰川水量分析数据

估算冰川融水数据源于第二次冰川编目数据集<sup>[11]</sup> (<http://westdc.westgis.ac.cn>)与2017—2018年中国西部冰川编目数据集<sup>[12]</sup> (<http://www.dx.doi.org/10.11922/sciencedb.j00001.00227>)。

## 3.2 方法介绍

本文总体研究路线见图3。

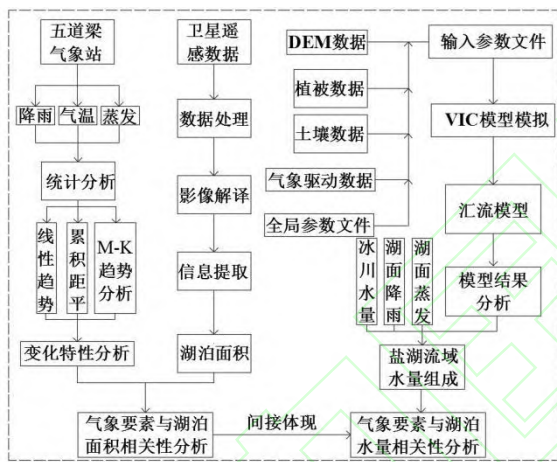


图3 总体技术路线

Fig.3 General technical route

### 3.2.1 气象要素年际变化分析方法

利用线性倾向估计法计算分析气候要素的变化速率。使用累积距平法来分析气候要素的阶段性变化特征。Mann-Kendall 检验用于气象要素突变检验。

### 3.2.2 湖泊面积计算方法

对高分一号和 Landsat 卫星数据进行辐射定标、大气校正、几何校正、影像裁剪等预处理。针对陆地水体，基于卫星影像多波段反射率数据归一化比值运算得到的水体指数，能够自动消除地形起伏的影响，并通过突出水体、抑制其他地物信息，是区分水体和非水体地表覆盖的一种常用和有效办法<sup>[18]</sup>。针对高分一号和 Landsat 卫星的光谱特征，本文选择归一化水体指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)作为特征参数用于提取湖泊面积。

具体步骤如下：

(1) 使用大尺度均值漂移算法<sup>[19]</sup> (Large-Scale MeanShift)，通过设置合适的空间和光谱参数，对 NDWI 特征参数进行图像分割；

(2) 计算分割后各个图斑的 NDWI 参数平均值，利用直方图双峰分布准则进行逐图斑判断，利用动态阈值算法自动化实现水体提取的最佳分割阈值；

(3) 对提取结果进行人工目视检验并修正，最终得到湖泊面积提取结果。

### 3.2.3 VIC 模型模拟方法

VIC 模型进行水量平衡计算后，输出研究区各网格的径流和蒸发结果，同 Dag Lohmann<sup>[20]</sup>开发的汇流模型相耦合，将网格内的产流转化为流域出口断面的流量<sup>[10]</sup>。可在湖泊出口断面设置出水口，通过设置汇流参数，可以将出口流量分为陆面净补给量与冻土融水和地下水入湖补给量。

### 3.2.4 冰川水量估算方法

将第二次冰川编目数据集与 2017—2018 年中国西部冰川编目数据集中研究区内冰川面积进行统计，利用公式 (1)<sup>[11]</sup>和公式 (2)<sup>[11]</sup>计算，取平均值，最终计算出 2011 年与 2018 年盐湖流域冰川体积值 (单位  $\text{km}^3$ )，将 2011-2018 年冰川体积变化量做线性插值为 2015-2018 年冰川体积变化量，并利用冰与水的体积比 0.9 将其换算成水量，参与湖泊水量平衡计算。

$$V = 0.0365A^{1.375} \quad (1)$$

$$V = 0.0433A^{1.29} \quad (2)$$

## 3.3 湖泊水量计算公式

盐湖来水量主要包括湖面降雨补给、陆面净补给入、冰川融水补给、冻土融水和地下水入湖补给 4 个部分，损失量主要是湖面蒸发，湖面降雨根据湖面面积与降雨量计算，湖面蒸发根据湖面面积与水面蒸发计算。建立水量平衡方程：

$$\Delta V = P + R_s + R_g + R_i - E_w \quad (3)$$

式中， $\Delta V$  为湖泊蓄变量； $P$  为湖面降雨量； $R_s$  为陆面净补给量； $R_g$  为冻土融水和地下水入湖补给量； $R_i$  为冰川融水补给量； $E_w$  为湖面蒸发量。

由于 VIC 模型不包含冰川模块，冰川融水会不断补给到河道径流中<sup>[21]</sup>，认为冰川融水汇入陆面净补给中，因此模拟结果中陆面净补给量需扣除冰川融水量。

### 3.4 相关性分析方法

将 1989—2010 年、2011-2018 年湖泊总面积与气象要素累积距平<sup>[14]</sup>进行 Pearson 相关性计算, 分析气象要素对湖泊面积变化的影响, 并分析湖泊面积与湖泊水量间关系。

利用 2015—2018 年 VIC 模型模拟结果得到的湖泊水量变化, 定量分析气象要素对湖泊水量变化的影响, 计算影响湖泊水量变化的主要因素。

## 4 研究结果

### 4.1 盐湖流域气候变化特征

可可西里湖泊群受季风影响, 1989—1995 年降雨量总体呈下降趋势, 1995—2018 年降雨量总体增加趋势显著, 多年平均变化速率为 36.2mm/10a。

1989—1997 年平均气温总体呈下降趋势, 1997—2018 年平均气温总体增加趋势显著, 多年平均变化速率为 0.59°C/10a。

1989—2018 年间年蒸发量总体呈下降趋势, 呈波动变化, 下降速率为 14.5mm/10a, 且自 2015 年后年蒸发量迅速下降。具体结果见图 4。

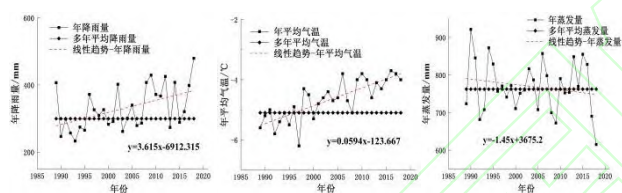


图 4 年降雨、年平均气温、年蒸发线性趋势分析图

Fig.4 Linear trend analysis chart of annual rainfall, annual average temperature and annual evaporation

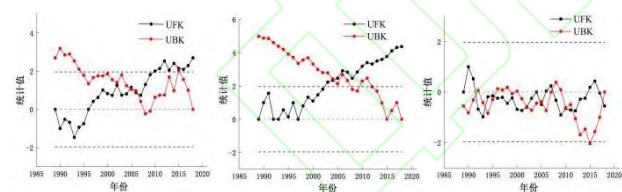


图 5 年降雨、年平均气温、年蒸发 Mann-Kendall 检验图

Fig.5 Mann-Kendall test of annual rainfall, annual average temperature and annual evaporation

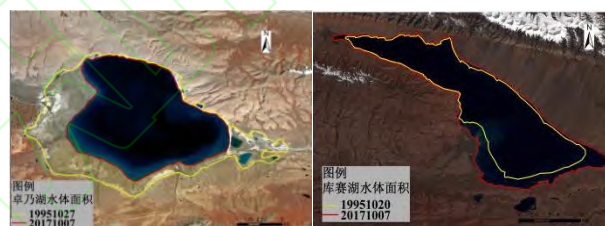
利用 Mann-Kendall 检验对年降雨、年平均气温、年蒸发进行突变检验(图 5), 结果表明降雨量在 2006 年存在突变点, 降雨量不断累积, 且在 2010 年后 UFK 超过  $U_{0.05}$ , 上升趋势显著, 为后期卓乃湖外溢提供了基础。年平均气温在 1989—2018 年间没有明显突变点, 在 2003 年以后 UFK 超过  $U_{0.05}$ , 年平均气温呈显著上升趋势。年蒸发 UFK 与 UBK 值没有超过特征值线, 下降变化趋势不显著。

### 4.2 湖泊面积变化特征

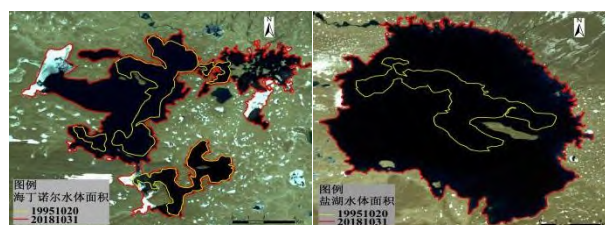
1989—2010 年四个湖泊面积先减小后增大, 且均在 1995 年发生转折。2011 年卓乃湖面积较前年骤减 105.48km<sup>2</sup>, 此后平均下降速率为 2.02km<sup>2</sup>/a。2011 年库赛湖面积较前年增加 54.58km<sup>2</sup>, 此后平均下降速率为 2.06km<sup>2</sup>/a。2011 年海丁诺尔面积较前年增加 29.13km<sup>2</sup>, 此后平均下降速率为 0.58km<sup>2</sup>/a。2011 年盐湖接收上游来水, 面积迅速扩张, 此后平均上升速率为 17.46km<sup>2</sup>/a, 变化最为剧烈。四个湖泊部分水体面积计算结果、变化图及相应折线图见表 2、图 6、图 7。

表 2 部分年份湖泊面积计算结果

湖泊面积	1989 年 /km <sup>2</sup>	1995 年 /km <sup>2</sup>	2010 年 /km <sup>2</sup>	2011 年 /km <sup>2</sup>	2018 年 /km <sup>2</sup>
卓乃湖	259.20	255.39	269.76	164.29	150.12
库赛湖	265.50	258.20	289.49	344.07	329.65
海丁诺尔	45.33	33.14	53.74	82.87	78.80
盐湖	44.83	32.48	48.45	72.86	195.06



(a) 卓乃湖 (b) 库赛湖



(c) 海丁诺尔 (d) 盐湖

图 6 盐湖流域部分年份面积变化遥感图

Fig.6 Remote sensing of area change of Salt Lake Basin in some years

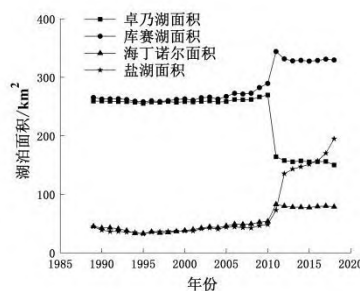


图 7 1989—2018 年盐湖流域湖泊面积变化折线图

Fig.7 Line chart of lake area change of Salt Lake Basin from 1989 to 2018

#### 4.3 气象要素对湖泊面积变化的影响

利用 SPSS 分析 1989—2010 年、2011—2018 年两个时段湖泊面积与气象要素的相关性。其中将 2011—2018 年细分为 2011—2014 年和 2015—2018 年两个时段。将 2015 年前后分开是为了与 VIC 模型定量分析做对比验证。2011 年前研究单独湖泊面积与其相关性，2011 年后研究四湖总面积与其相关性。分析中只考虑年降雨量、年平均气温和年蒸发量 3 个要素，结果见表 3、表 4。

表 3 盐湖流域湖泊面积与气象要素的 Pearson 相关系数  
Table 3 Pearson correlation coefficient between lake area and meteorological elements in Salt Lake Basin

湖泊	时段	年降雨量	年平均气温	年蒸发量
卓乃湖	1989-2010 年	0.921**	0.909**	-0.548**
库赛湖	1989-2010 年	0.938**	0.953**	-0.587**
海丁诺尔	1989-2010 年	0.889**	0.936**	-0.589**
盐湖	1989-2010 年	0.891**	0.863**	-0.685**

注：\*\* 在 0.01 级别（双尾），相关性显著。

表 4 盐湖流域四湖总面积与气象要素的 Pearson 相关系数  
Table 4 Pearson correlation coefficient between total area of four lakes and meteorological elements in Salt Lake Basin

时段	年降雨量	年平均气温	年蒸发量
2011-2018 年	0.931**	0.924**	0.926**
2011-2014 年	0.906	0.779	0.469
2015-2018 年	0.973*	0.985*	-0.864

注：\* 在 0.05 级别（双尾），相关性显著。

1989—2010 年卓乃湖与盐湖湖泊面积与年降雨量、年平均气温呈显著正相关，与年蒸发量呈显著负相关( $P < 0.01$ )，年降雨量相关性系数最大。

1989—2010 年库赛湖与海丁诺尔湖泊面积与年降雨量、年平均气温呈显著正相关，与年蒸发量呈显著负相关( $P < 0.01$ )，年平均气温相关性系数最大。

2011—2018 年四湖总面积与三个气象要素呈显著正相关，且年降雨量相关性系数最大，年蒸发量次之、年平均气温最小。细化时段分析可知 2011—2014 年四湖总面积与三个气象要素均呈正相关，年降雨量相关性系数最大。2015—2018 年四湖总面积与年降雨量、年平均气温呈显著正相关( $P < 0.05$ )，年平均气温相关性系数最大。

综上所述：

(1) 2011 年前，卓乃湖和盐湖面积变化可能受降雨量影响较大，库赛湖与海丁诺尔面积变化可能

受气温影响较大；

(2) 2011—2018 年四个湖泊面积变化可能受年降雨量影响最大；

(3) 细化时间段，2011—2014 年可能受年降雨量影响较大，年平均气温影响次之，2015—2018 年可能受年平均气温影响较大，年降雨量影响次之。

相关性计算结果不同，可能原因为 2011 年四个湖泊受卓乃湖外溢影响，面积变化存在突变，而气候变化对于湖泊水量变化是一个前期累积的过程，没有达到与面积变化一致的突变程度，二者数据统计的相关性受到影响。此外还可能与选取计算的时间序列的长度等因素有关。

#### 4.4 湖泊面积与湖泊水量间关系

湖泊水量的变化表现在面积变化，其变化是在补给流域水量平衡的结果<sup>[22]</sup>。借助水位-面积、水位-容积曲线关系得到湖泊面积-容积间关系。

利用得到的库赛湖、盐湖面积-容积关系曲线，拟合曲线推求出相应水量，最终面积水量关系见图 8。用 Pearson 相关性分析库赛湖、盐湖面积与容积变化之间关系，相关系数为 0.967、0.960，呈显著正相关( $P < 0.01$ )。湖泊面积变化与湖泊水量变化有较好的相关性，湖泊面积的变化间接体现湖泊水量变化，气象要素与湖泊面积间的变化可以间接体现出气象要素对湖泊水量变化的影响。

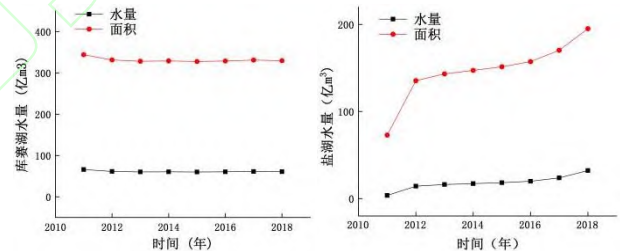


图 8 库赛湖和盐湖 2011-2018 年面积水量关系图

Fig.8 Area-volume relationship between Kusai Lake and Salt Lake

Pearson 相关性一定程度上可以体现年尺度上气象要素与湖泊面积变化之间有一定相关性，虽然可通过面积-容积曲线关系间接反映气象要素对水量的影响，但 Pearson 相关性分析是对两个变量之间线性相关程度的衡量<sup>[23]</sup>，其结果可能与实际情况不同，需引入水文模型进行定量计算进行对比验证。

#### 4.5 定量分析气象要素对湖泊水量的影响

2011 年后湖泊总面积变化与降雨量、年平均气温、年蒸发量相关性很高，可说明气象要素与流域水量变化之间存在关系。对于统计结果的差异性，需要通过 VIC 模型定量计算气象要素对湖泊水量的影响，由于用于模型验证的数据目前只有 2015—2018 年，因此选用 2015—2018 年时间段定量分析



相关性。

经 VIC 模型模拟和汇流模型汇流后得到各出水口水量变化结果。2015 年和 2018 年计算结果见图 9、图 10、表 5，结合计算的流域内冰川补给量，最终 2015—2018 年盐湖流域水量变化见表 6。

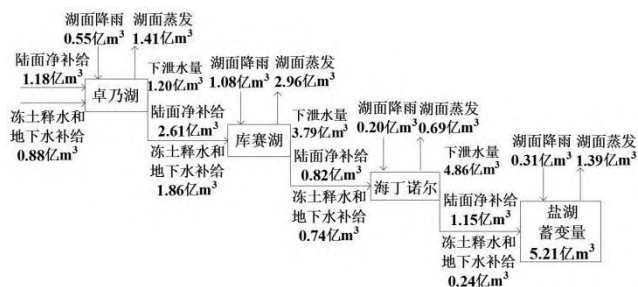


图 9 2015 年盐湖流域水量分析

Fig.9 Water analysis of the Salt Lake Basin in 2015



图 10 2018 年盐湖流域水量分析

Fig.10 Water analysis of the Salt Lake Basin in 2018

表 5 VIC 模型模拟结果

Table 5 VIC model simulation results

模型模拟结果	2015 年/亿 m <sup>3</sup>	2018 年/亿 m <sup>3</sup>
湖面降雨	2.14	3.26
陆面净补给	5.76	5.69
冻土释水和地下水补给量	3.72	5.15
总量	11.62	14.1

表 6 盐湖流域水量变化

Table 6 Changes in the amount of water in the salt lake basin

盐湖流域水量变化量	2015-2018 年 增加量/亿 m <sup>3</sup>	占比
湖面降雨	1.120	45.16%
陆面净补给(扣除冰川补给)	-0.265	-10.69%
冰川补给量	0.195	7.86%
冻土释水和地下水补给量	1.430	57.66%
总量	2.480	100%

将结果进行整理，陆面净补给变化量扣除冰川补给量后算入降雨量贡献中，可得降雨增加量、冻土释水和地下水补给增加量、冰川融水量对盐湖流域扩张的贡献约为 34.48%、57.66%、7.86%。气温

变化成为影响湖泊水量变化的主要因素，降雨量影响次之。与 2015—2018 年 Pearson 相关分析结果一致。

综合统计结果及水文模型定量分析可知：

(1) 1989—2010 年间，卓乃湖、库赛湖、海丁诺尔、盐湖面积变化与年降雨量、年平均气温呈显著正相关，与年蒸发量均呈显著负相关。卓乃湖、盐湖水量变化主要受降雨量的影响；库赛湖、海丁诺尔水量变化主要受气温的影响。

(2) 2011 年后四湖连通，研究总面积与水量变化之间的关系，2011—2014 年由统计结果得知水量变化主要受降雨量的影响，气温影响次之。2015—2018 年统计结果结合水文模型模拟计算得知气温变为主要因素，降雨量影响次之。

(3) 2011 年前四个湖泊各自水量平衡，并没有上游湖泊下溢湖水的补给，而 2011 年后卓乃湖外溢改变了原有的来水组成，上游来水占补给中较大比例，上游补给水量的变化主要受气候变化的影响。2015—2018 年气温升高的速度远高于多年平均温度，随着气温升高，加快了区域冰川、冻土和积雪的消融速度，气温变化成为影响湖泊补给变化的主要因素。

## 5 结论与展望

(1) 1989—2018 年降雨量总体增加趋势显著，增长速率为 36.2mm/10a，在 2006 年突变且在 2010 年后增加趋势显著，为后期卓乃湖外溢提供了基础。年平均气温增长速率为 0.59°C/10a，2003 年后升高趋势显著。年蒸发量下降速率为 14.5mm/10a 并波动变化，且变化趋势不显著。

(2) 1989—2010 年湖泊面积先减小后增大，且均在 1995 年发生转折。2011—2018 年四湖总面积由 664.09km<sup>2</sup> 扩大至 753.63km<sup>2</sup>，盐湖面积扩大是四湖面积增加的原因。年降雨量、年平均气温、年蒸发量与湖泊面积密切相关，湖泊面积变化与湖泊水量变化相关性高，气象要素与湖泊面积间的变化可以间接体现出气象要素对湖泊水量变化的影响。

(3) 结合统计分析及 VIC 模型定量分析结果可知 2011 年前卓乃湖和盐湖水量变化主要受降雨量的影响，库赛湖和海丁诺尔水量变化主要受气温的影响。2011—2014 年四个湖泊水量主要受降雨量影响，2015—2018 年四个湖泊水量变化主要受气温影响，降雨量影响次之。

(4) 青藏高原的湖泊变化对气候变化具有非常敏感的反应，若未来气候的暖湿化更加强烈，湖泊



可能会出现更强烈的扩张。盐湖流域水量持续增加可能对于下游的青藏公路、铁路和保护区内其它设施造成危害。未来要继续细化水量研究,分析水量时空变化,完善统计分析中的不确定性,更充分评价湖泊水量变化与气候变化之间的关系。

### 参考文献(References):

- [1] Li Xinyu, Peng Shushi, Deng Xuwei, et al. Attribution of Lake Warming in Four Shallow Lakes in the Middle and Lower Yangtze River Basin[J]. *Environmental science & technology*, 2019, 53(21).
- [2] 祁苗苗. 基于多源数据的青海湖水量变化及湖冰遥感监测研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2019.
- [3] 张国庆. 青藏高原湖泊变化遥感监测及其对气候变化的响应研究进展[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(2): 214-223.
- [4] 张奇, 刘元波, 姚静, 等. 我国湖泊水文学研究进展与展望[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(5): 1360-1379.
- [5] 杜玉娥, 刘宝康, 贺卫国, 等. 1976-2017年青藏高原可可西里盐湖面积动态变化及成因分析[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(1): 47-54.
- [6] 姚晓军, 刘时银, 李龙, 等. 近40年可可西里地区湖泊时空变化特征[J]. *地理学报*, 2013, 68(7): 886-896.
- [7] Qiao B, Ju J, Zhu L, et al. Improve the accuracy of water storage estimation—a case study from two lakes in the hohxil region of north Tibetan plateau[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(2), 1-12.
- [8] 陈强, 冶富寿, 陈育红, 等. 青藏高原可可西里盐湖水量平衡初步分析[J]. *人民长江*, 2020, 51(5): 94-98.
- [9] 董斯扬, 薛娴, 尤全刚, 等. 近40年青藏高原湖泊面积变化遥感分析[J]. *湖泊科学*, 2014, 26(4): 535-544.
- [10] 李琳, 文雄飞, 谭德宝, 等. 盐湖流域空天地立体监测系统结合VIC模型径流模拟初探[J/OL]. *长江科学院院报*: 1-8 [2021-10-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20211014.1052.002.html>.
- [11] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. *地理学报*, 2015, 70(1): 3-16.
- [12] 冉伟杰, 王欣, 郭万钦, 等. 2017-2018年中国西部冰川编目数据集[J]. *中国科学数据(中英文网络版)*, 2021, 6(2): 195-204.
- [13] 张洪源. 基于遥感的青藏高原湖泊水文要素变化分析及其对气候变化的响应研究[D]. 聊城: 聊城大学, 2018.
- [14] 梅泽宇. 气候变化条件下可可西里湖泊群变化特征研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2019.
- [15] He Jie, Yang Kun, Tang Wenjun, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1).
- [16] Yang Kun, He Jie, Tang Wenjun, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: Observation and modeling in the Tibetan Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 150(1).
- [17] 阳坤, 何杰. 中国区域地面气象要素驱动数据集(1979-2018) [DB/OL]. 时空三极环境大数据平台, DOI: 10.11888/AtmosphericPhysics.tpe.249369.file.CSTR:18406.11.AtmosphericPhysics.tpe.249369.file.
- [18] 宋春桥, 詹鹏飞, 马荣华. 湖泊水情遥感研究进展[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(5): 1406-1420.
- [19] 朱士才, 翟晓彤, 王宗伟. 基于Mean Shift的大批量遥感影像分割方法[J]. *国土资源遥感*, 2020, 32(1): 13-18.
- [20] Dag Lohmann, Ralph Nolte-Holube, Ehrhard Raschke. A large-scale horizontal routing model to be coupled to land surface parametrization schemes[J]. *Tellus A*, 1996, 48(5).
- [21] 覃自成. 长江源区高寒高海拔典型小流域水循环规律研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2019.
- [22] 姚晓军, 刘时银, 孙美平, 等. 可可西里地区库赛湖变化及湖水外溢成因[J]. *地理学报*, 2012, 67(5): 689-698.
- [23] 王培玉, 巨天珍, 刘文君, 等. 甘肃省植被与对流层甲醛关系及影响因素分析[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(9): 1556-1566.

说明: 该文为经编委会审查通过的录用文章, 由于尚未确定具体刊出日期, 其内容可能与最后的发表版本稍有差异, 请以最后发表为准。