

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.029

柴达木盆地湖泊天然生态水文特性辨识

陈一迪^{1,2}, 诸葛亦斯², 石岳峰³, 杜强², 张馨予³, 聂睿²

(1. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 中国水利水电科学研究院水生态环境研究所, 北京 100038; 3. 黄河生态环境科学研究所, 河南 郑州 450000)

摘要:针对柴达木盆地内盐湖资源开发布局与生态空间矛盾日渐突出的问题,以柴达木盆地那棱格勒河尾间湖泊东、西台吉乃尔湖为例,基于长序列遥感影像及气候观测数据,结合水量平衡等方法进行湖泊天然生态水文特性辨识。结果表明:东台吉乃尔湖以 $2.19\text{ km}^2/\text{a}$ 的速率呈扩张趋势,湖面积为 $180\sim 220\text{ km}^2$,西台吉乃尔湖以 $3.50\text{ km}^2/\text{a}$ 的速率缩小,湖面积为 $130\sim 140\text{ km}^2$;水量减小时,东台吉乃尔湖以原有形态向内缩小,西台吉乃尔湖从近似三角形形态萎缩至椭圆形,由于地形和上游来水路径的原因,两湖的湖岸线主要在湖西南侧和西北侧发生变化;对长序列湖泊面积变化做累积频率曲线,确定湖泊面积保证率,选取25%、50%、75%和90%的保证率,可识别天然状态的湖泊面积、湖容及空间形态。

关键词:高原湖泊;天然状态辨识;水量平衡;缺资料地区;柴达木盆地

中图分类号:X143;P343.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)01-225-09

Identification of natural eco-hydrological characteristics of lakes in the Qaidam Basin // CHEN Yidi^{1,2}, ZHUGE Yisi², SHI Yuefeng³, DU Qiang², ZHANG Xinyu³, NIE Rui² (1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Department of Water Ecology and Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Yellow River Institute of Ecological Environment Science, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In view of the increasingly prominent problem of the contradiction between the development layout of salt lake resources and the ecological space in the Qaidam Basin, taking the East-Taijiner Lake and West-Taijiner Lake at the end of the Nalingele River in the Qaidam Basin as examples, the natural state of the lakes was identified based on long sequence remote sensing images and climate observation data, combined with water balance and other methods. The results show that the East-Taijiner Lake expands at a rate of $2.19\text{ km}^2/\text{a}$ and the lake area is $180\sim 220\text{ km}^2$, while the West-Taijiner Lake shrinks at a rate of $3.50\text{ km}^2/\text{a}$ and the lake area is $130\sim 140\text{ km}^2$. When the water quantity decreases, the East-Taijiner Lake shrinks inward in its original shape, while the West-Taijiner Lake shrinks from a nearly triangular shape to an oval shape. Due to the topography and upstream water inflow path, the shorelines of the two lakes change mainly in the southwest and northwest of the lakes. The cumulative frequency curve of the long series of lake area change is made to determine the lake area guarantee rate, and the guarantee rates of 25%, 50%, 75% and 90% are selected to identify the lake area, lake volume and spatial form in natural state.

Key words: plateau lakes; identification of natural state; water balance; ungauged region; Qaidam Basin

位于我国西北部的柴达木盆地是青藏高原的重要组成部分,是我国湖泊分布最密集的地区之一,也是全球盐湖最集中的地区^[1-2],属于全球气候变化敏感、生态环境脆弱的地区,区域内的气象水文变化

直接影响青藏高原的水文循环系统。近年来由于受气候变化和人类活动等诸多因素的影响,盆地内的湖泊濒临绝境、甚至消亡^[3]。位于柴达木盆地中部的东、西台吉乃尔湖为那棱格勒河的尾间湖泊,湖区

基金项目:清华四川能源互联网研究院创新计划(310042021004)

作者简介:陈一迪(1997—),女,硕士研究生,主要从事河流生态保护与修复研究。E-mail: 1753980963@qq.com

通信作者:诸葛亦斯(1981—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事水生态保护与修复研究。E-mail: zhugeys@iwhr.com

内富含硼、钾、锂、镁等资源^[4]。盐矿企业自2003年陆续入驻湖区进行开发,为保护企业生产安全,分别在东、西台吉乃尔湖的西侧和东侧筑起拦水坝,使上游来水在两湖之间蓄积形成鸭湖滞洪区,出现了“水上雅丹”的景观。生物多样性随着鸭湖面积的增加而增加,趋于成为一个稳定的生态系统。由于鸭湖水位上升过快会造成洪水,因此多余的湖水沿西台吉乃尔湖东侧的苦水沟流向西台吉乃尔湖西北侧的一里坪,致使常年处于干涸状态的干盐湖开始出现湖表卤水。同时,上游来水减少导致东、西台吉乃尔湖持续萎缩,逐渐向干盐湖转化^[5-7]。盐湖资源的开发逐渐改变了天然生态系统,而资源开发与生态保护之间的平衡关系也是目前研究的热点。在人为活动逐渐强烈的情况下,东、西台吉乃尔湖区形成了人为次生湖泊生态系统,人为生态系统能否替代天然生态系统是目前亟待研究的问题,为更好地解决该问题,需要准确识别湖泊的天然状态。

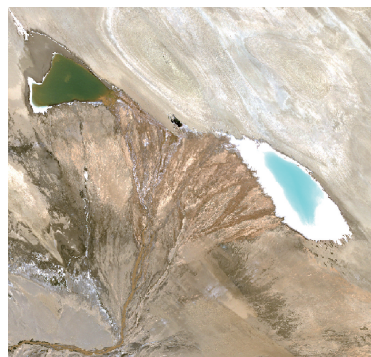
目前对于湖泊天然状态的研究集中在基于长序列观测数据下对湖泊面积、水位等动态变化特征及影响因素的分析。柴达木盆地气候恶劣、地形复杂、基础设施相对落后,观测站点稀疏,缺少长序列的实测数据,是典型的缺资料地区^[8]。补充缺测数据常用的手段是构建流域模型^[9-11]。目前,也有学者针对缺资料地区高原尾间湖泊进行了一些研究,如Wang等^[12]对缺资料地区尾间湖泊流域基于遥感流量估算方法模拟湖泊水量;Zhang等^[13]以尕斯库勒湖为研究对象,基于遥感影像及卫星测高数据构建了湖泊面积—水位曲线;Wang等^[14]以艾比湖流域为研究对象,分析河流演变对湖泊水位变化的响应。这些研究对了解缺资料地区湖泊动态变化研究方法具有重要的参考价值,但是缺资料地区湖泊天然状态的辨识研究成果较少。

鉴于此,本文以柴达木盆地的东、西台吉乃尔湖区为研究区域,利用未开发时期的1990—2002年全年Landsat遥感影像数据(1996年、1997年影像数据缺失),分析湖泊面积的动态变化及水量平衡,辨识缺资料地区的湖泊在不同保证率下的天然状态,以期为解决柴达木盆地内盐湖资源开发布局与生态空间矛盾提供参考。

1 研究区概况

青海省海西州东、西台吉乃尔湖为柴达木盆地内最大河流——那棱格勒河的尾间湖泊(图1),位于东经 $93^{\circ}49' \sim 94^{\circ}01'$ 、北纬 $37^{\circ}24' \sim 37^{\circ}36'$,平均海拔2683 m,两湖近似三角形,呈西北-南东向分布。

湖区及周边人口极少,地质构造复杂,基础设施相对落后,是典型的缺资料地区。根据距离湖区最近的小灶火气象站统计资料,该地区年均气温 4.4°C ,平均风速 3.6 m/s ,平均降水量 29.8 mm ,蒸发量 2600 mm ,为典型的高原大陆性干旱气候。



(a) 1990年



(b) 2020年

图1 东、西台吉乃尔湖不同时期遥感影像

Fig. 1 Remotesensing images of East-Taijiner Lake and West-Taijiner Lake in different periods

盐矿企业为保证生产安全,在东、西台吉乃尔湖的西侧和东侧自建拦水坝,截断了东台吉乃尔河与两湖的直接水力联系,导致上游来水在两湖之间蓄水形成鸭湖。由于季节性洪水及采矿活动使湖泊丧失了储水调节功能,迅速向干盐湖转化。区域内水文特征发生长期不可逆转的不利转变,同时鸭湖面积逐年增加,水位逐渐升高,对企业生产设施带来防洪隐患,严重影响东、西台吉乃尔湖的周边生态环境。

2 研究数据与研究方法

2.1 数据来源

选择Landsat卫星系列影像为主要数据来源,为提高湖泊水体数据提取的准确性,优先选择云量不超过10%的遥感影像。由于1990年以前遥感数据严重不足,选取东、西台吉乃尔湖区域1990—2002年(除1996年和1997年)全年遥感影像,计算每年的湖泊平均面积。

选取距离东、西台吉乃尔湖最近的小灶火气象站实测数据进行气候要素变化分析,包括降水量、蒸发量、风速及气温的逐日数据,资料系列为1990—2002年。

那棱格勒河水文站于1958年设立,1964年撤销,此后没有监测资料,水文资料严重不足,因此选取附近的奈金河纳赤台站、格尔木河格尔木站、香日德河香日德站作为参证站在实测数据的基础上进行水文数据的插补延长。

2.2 数据处理与分析

利用ENVI 5.3软件对遥感影像依次进行假彩色合成处理、几何校正、辐射定标和大气校正^[15]。选用改进的归一化差异水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI)对水体信息进行提取,该方法被证实可以更好地应用于干旱区水体信息提取^[16-17],其表达式为

$$I_{\text{MND}} = \frac{\rho_{\text{gr}} - \rho_{\text{MIR}}}{\rho_{\text{gr}} + \rho_{\text{MIR}}} \quad (1)$$

式中: I_{MND} 为MNDWI值; ρ_{gr} 、 ρ_{MIR} 分别为绿光波段和中红外波段的反射率。

为分析气象因素对湖泊面积变化的影响,采用Pearson相关性分析法,相关系数 r 的大小可以反映两个变量之间线性相关程度的强弱。 r 的取值范围为 $|r| \leq 1$, $|r|$ 越接近于1,变量间的相关程度越高。一般情况下, $|r| \geq 0.8$ 为极强相关; $0.6 \leq |r| < 0.8$ 为强相关; $0.4 \leq |r| < 0.6$ 为中等强度相关; $0.2 \leq |r| < 0.4$ 为弱相关; $0 \leq |r| < 0.2$ 为不相关。

为分析水量平衡变化原因,引入累积距平值 S_i ^[20]检验实测数据系列平均值发生突变的情况,表达式为

$$S_i = \sum_j (x_j - \bar{x}) \quad (2)$$

式中: x_j 为实测值; \bar{x} 为系列的平均值。

当实测值大于长系列平均值时斜率为正,反之则为负,持续的正负斜率用来鉴别系列平均值的中间突变。

2.3 水量平衡计算

东、西台吉乃尔湖属于干旱区的半封闭式湖泊,湖泊补给量主要来自降水、地表水入湖和地下水补给,排泄量主要是湖面的蒸发损失和地下水渗流^[18-19]。由于研究区资料有限,将地下水的补给与渗流量合并为地下水交换量,其量值为库容差与其他水平衡项的差,正项表示补给量多于渗流量,反之则为渗流量多于补给量。水量平衡方程为

$$V = P + R + W - E \quad (3)$$

式中: V 为湖泊水量变化量; P 为湖面降水量; R 为入湖径流量; W 为地下水交换量; E 为湖面蒸发量。

由于东、西台吉乃尔湖缺乏湖面降水量的气象观测资料,选用小灶火气象站的降水量观测值和遥感影像提取的湖面面积计算湖面降水量:

$$P = P_{\text{小}} A \quad (4)$$

式中: $P_{\text{小}}$ 为小灶火气象站的降水量观测值,mm; A 为湖面面积, m^2 。

由于湖面未布设蒸发皿或蒸发池,因此利用小灶火气象站的小型蒸发皿(20 m^2)观测的蒸发量来计算湖面实际蒸发量,满足世界气象组织观测湖泊水面蒸发量的要求^[21],则东、西台吉乃尔湖的湖面蒸发量 E 计算公式为

$$E = E_{\text{小}} F \quad (5)$$

其中 $F = 1 - 0.011 (1 - r_1)^{-0.379} B_e^{1.001}$

式中: $E_{\text{小}}$ 为小灶火气象站的小型蒸发皿观测蒸发量,mm; F 为卤水蒸发折算系数,反映水体含盐量对水面蒸发的影响; r_1 为空气相对湿度; B_e 为含盐量,用波美度表示,1波美度相当于1L水含10g氯化钠。

2.4 湖泊天然状态识别方法

通过对湖泊水量的计算得出湖泊上游来水补给的变化和地表水地下水的交换量,结合湖水的补给路径和湖区地形,可以分析东、西台吉乃尔湖在天然状态下的湖泊面积、湖容和两湖的空间布局关系。将1990—2002年提取出的湖泊面积分为19组,计算各组出现的次数及频率,将各组频率相加,其累积频率就是湖泊面积保证率,即湖泊面积在多年期间可以得到满足的程度,可以绘制湖泊面积保证率曲线。选取不同的保证率可以确定天然状态时的湖泊面积,根据水量平衡方程和长序列的气象水文数据计算得出湖容,结合补水路径和地形进一步确定两湖的空间布局关系。东、西台吉乃尔湖的盐湖资源开发可以根据该保证率确定开发程度,从而保证天然湖泊生态系统的稳定和湖泊水量的平衡。

3 结果与分析

3.1 气候变化特征

选取小灶火气象站1990—2002年降水量、气温、蒸发和风速4个气象因子绘制逐月变化曲线,如图2所示。从图2可见,降水量集中在4—9月,最大降水量出现在7—9月。降水年际变化倾向率为每10年11mm,呈下降趋势,1997年降水量达到最大值37mm,在2000年产生突变,以2000年为分界线,1990—2000年年均降水量为27.33mm,2000—

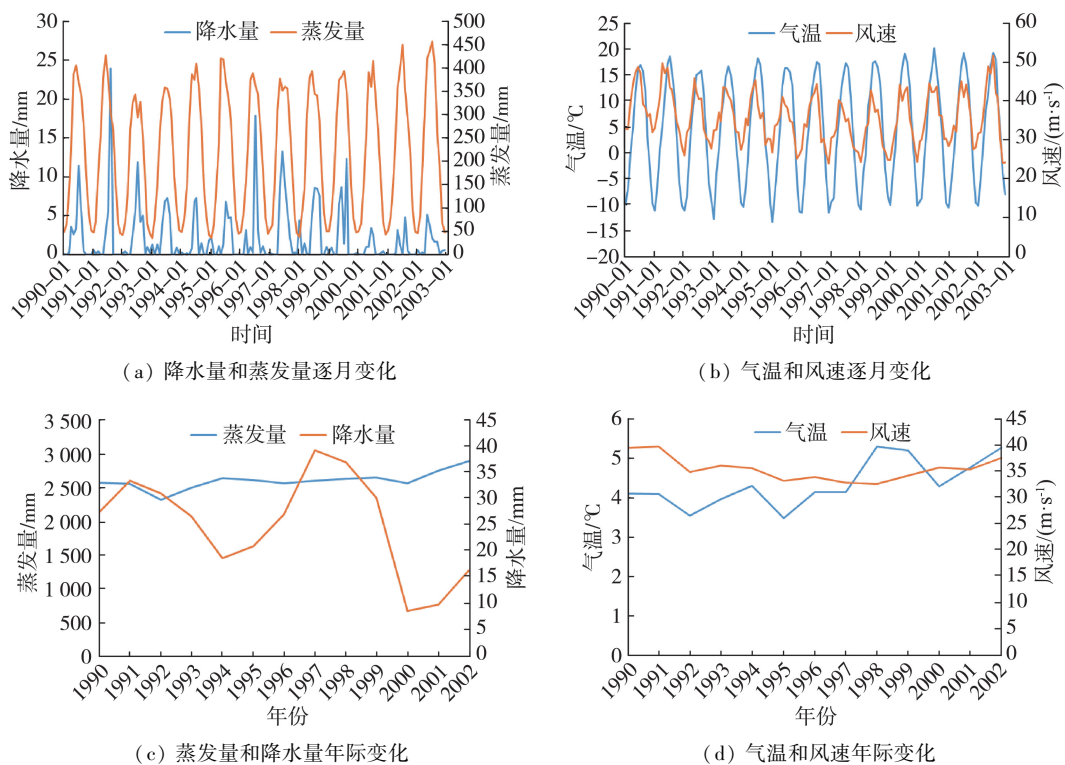


图2 小灶火气象站气象因素变化

Fig. 2 Variation of meteorological factors at Xiaozaohuo Meteorological Station

2002 年年均降水量为 11.67 mm。蒸发量为降水量的 80 倍,集中在 4—9 月,6—8 月达到峰值。以 26 mm/a 的速率呈上升趋势,1990—1997 年蒸发量大部分低于均值,1992 年蒸发量最小,为 2319.5 mm,2000 年后蒸发量逐渐增加,2002 年达到最大值 2892.1 mm。气温在每年 3、4 月左右达 0℃ 以上,11 月下降到 0℃ 以下,7—8 月气温达到峰值。2000 年 7 月气温最高,为 20.18℃,1995 年 1 月气温最低,为 -13.36℃,1990—1997 年气温变化幅度不明显,1997 年以后气温以每 10 a 0.6℃ 的速度上升。风速的峰值集中在 5—7 月,以西-西北风和西北风为主,共占研究时段内的 51.64%。1990—2002 年风速年均下降 0.16 m/s,1991 年年均风速最大,为 39.72 m/s,1998 年风速最小,为 32.65 m/s。

3.2 水量平衡计算结果

由于缺少实测湖盆数据,通过构建湖盆数字高程模型得到面积-库容曲线,根据遥感影像提取出的湖泊面积确定水量变化量 V 。具体步骤为:通过 DEM 信息插值计算遥感影像提取出水体边界线高程值,对不同时间序列的湖泊边界图层进行叠加,生成湖泊等水位图,再通过 ArcGIS 软件构建湖泊的不规则三角网 (triangulated irregular network, TIN) 模型,计算不同湖泊面积对应的库容^[23]。东、西台吉乃尔湖的水量平衡方程内各项变化情况见图 3。

水量平衡的计算结果表明,东台吉乃尔湖的地

下地表水交换量平均值为 0.05 亿 m^3 ,补给量最大值为 0.53 亿 m^3 ,渗流量最大值为 0.78 亿 m^3 ;西台吉乃尔湖的地下地表水交换量平均值为 0.01 亿 m^3 ,补给量最大值为 0.34 亿 m^3 ,最大渗流量为 0.32 亿 m^3 ,地下水交换量呈现不确定性。两湖的库容差呈现正常的波动状态,2000 年以后变化增大,地下水交换更加剧烈,是由于 2000 年后两湖的面积都发生了突变,水平衡各项需要进行调整从而确定新的平衡点。

3.3 湖泊面积动态变化

图 4 和图 5 分别为东、西台吉乃尔湖面积年内和年际变化。由图 4 图 5 可见,两湖总面积在 140 km^2 以上,1990—2002 年两个湖泊总面积变化具有波动性特征,不同时段内的年内波动振幅与均值有显著差异。1990—2002 年,东台吉乃尔湖在 1990 年 2 月面积最小,2000 年后面积呈扩大趋势,最大值为 261.70 km^2 ;西台吉乃尔湖呈萎缩趋势,面积最大值出现在 1992 年 7 月,2001 年 1—3 月湖泊干涸,除此之外面积最小值出现在 2000 年 2 月。东台吉乃尔湖面积变化可以分为 3 个阶段:1990—1992 年湖泊面积以 33 km^2/a 的速率扩张;1993—1999 年湖泊面积逐渐萎缩,每年缩小 6 km^2 ;2000—2002 年湖泊面积变化较剧烈,湖泊面积年均扩张 2.19 km^2 。西台吉乃尔湖在 1992 年急剧扩张,此后面积由 118.41 km^2 逐渐下降到 25.55 km^2 ,即使 1994 年和 2001 年有短

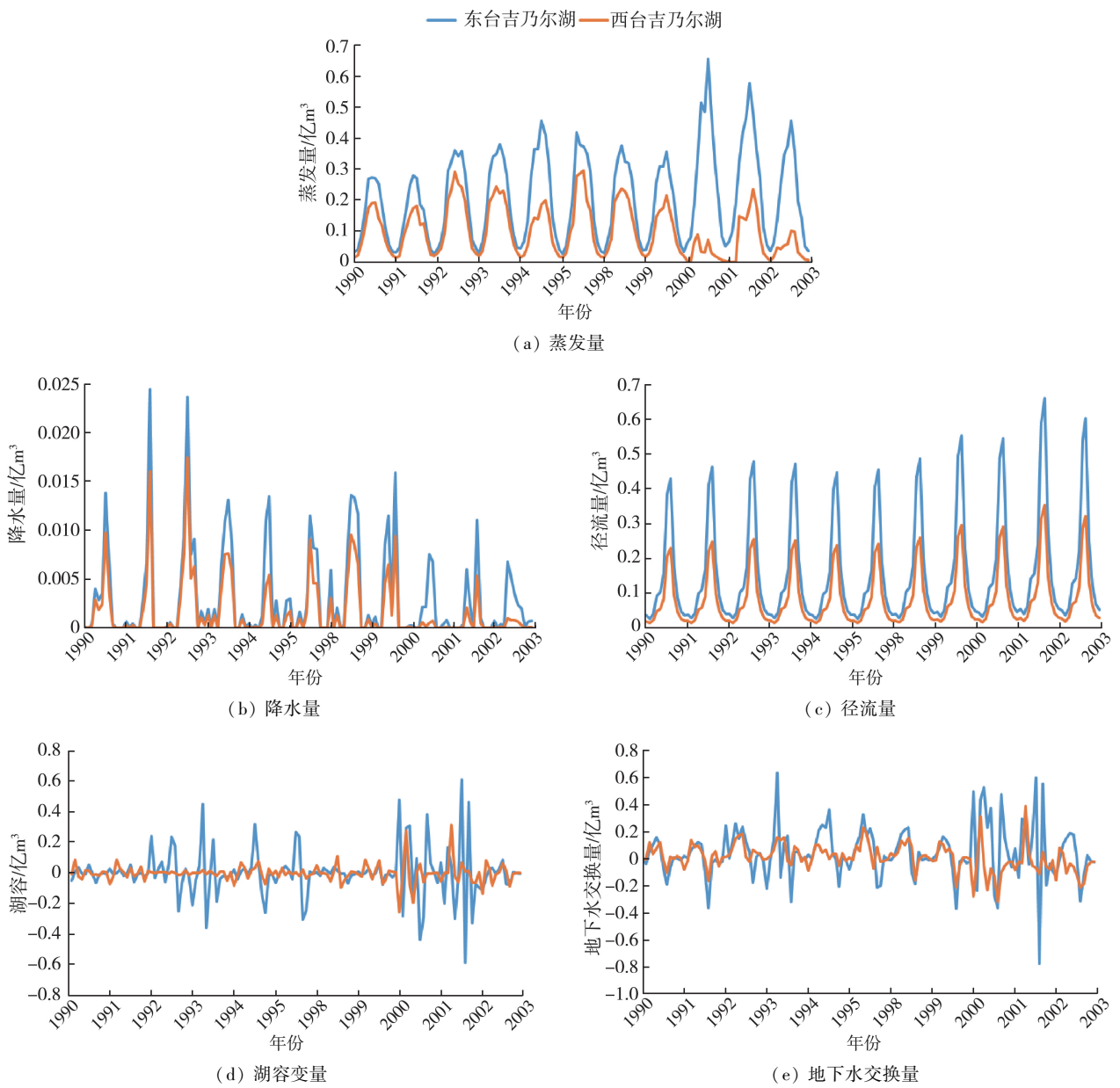


图3 水量平衡各项变化情况

Fig.3 Changes in items of water balance

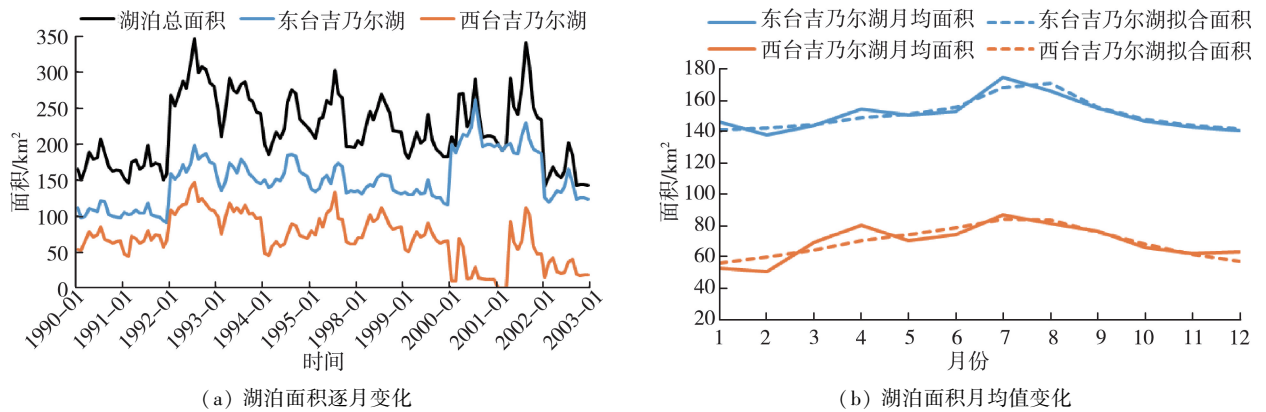
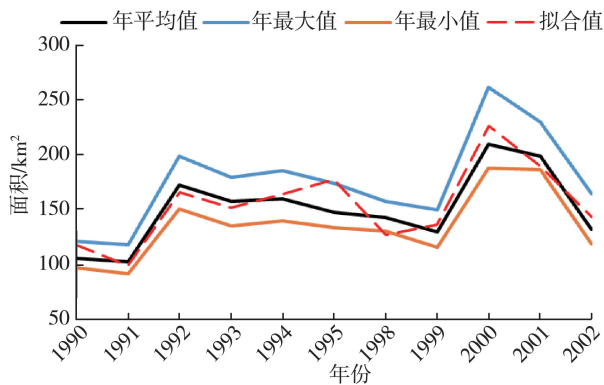
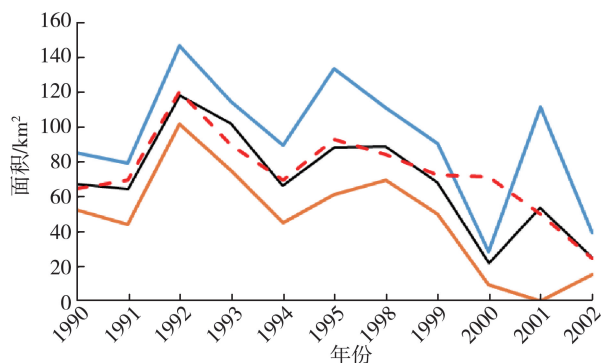


图4 东、西台吉乃尔湖面积年内变化

Fig.4 Annual changes of area of East-Taijiner Lake and West-Taijiner Lake



(a) 东台吉乃尔湖



(b) 西台吉乃尔湖

图5 东、西台吉乃尔湖面积年际变化

Fig. 5 Interannual changes of area of East-Taijiner Lake and West-Taijiner Lake

暂的扩张,也没有改变湖泊总体萎缩趋势。两湖总面积以 $1.3 \text{ km}^2/\text{a}$ 的速率萎缩。

3.4 湖泊边界动态变化

那棱格勒河发源于昆仑山北部,位于柴达木盆地西南,由西南流向东北,多年平均流量 $32.92 \text{ m}^3/\text{s}$,出口后有 $60\% \sim 80\%$ 的水量渗漏,少量河水到下游与台吉乃尔河汇流,最终在湖盆海拔最低处形成东、西台吉乃尔湖^[24]。选择1990年、1992年、1994年和2000年中面积最大月份的湖泊边界,分析东、西台吉乃尔湖的空间变化情况。东、西台吉乃尔湖是发育在柴达木盆地中部的构造断陷湖泊,湖区及周边地质构造复杂,北部为雅丹地貌群,南部为河流区,东、西侧为盐滩-荒漠区,湖盆边缘平均海拔 2700 m ,主要是砂质泥岩和砂质黏土,湖盆内部平均海拔 2680 m ,以黏土和盐类沉积为主^[25]。

图6为湖泊边界变化情况,由图6可见,东台吉乃尔湖西南侧地势平坦,湖岸线变化明显,其东部为近 50 km^2 的沙质干盐滩,厚 $15 \sim 20 \text{ m}$,坡度较陡,湖岸线变化不明显;西台吉乃尔湖西北高东南低,因此湖岸线变化主要发生在西北侧,上游来水在南侧向湖泊内补给,湖岸线变化不明显。当两湖水量充足时均呈现为三角形,当水量减少时,东

台吉乃尔湖依然以近似三角形的形状向内缩小,由于东南侧海拔较高,因此面积萎缩时湖岸线变化较明显,而西台吉乃尔湖则逐渐变为椭圆形。由此可见,湖泊水量的变化不仅影响湖泊面积,还影响湖泊的形态分布。

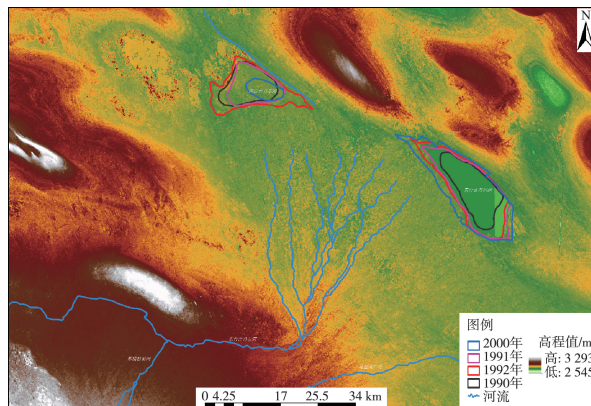


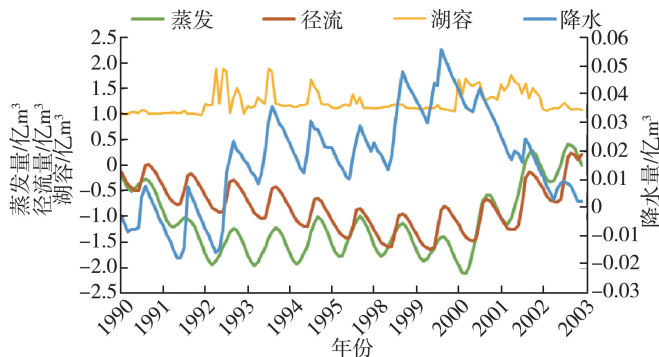
图6 湖泊边界变化情况

Fig. 6 Change of lake boundary

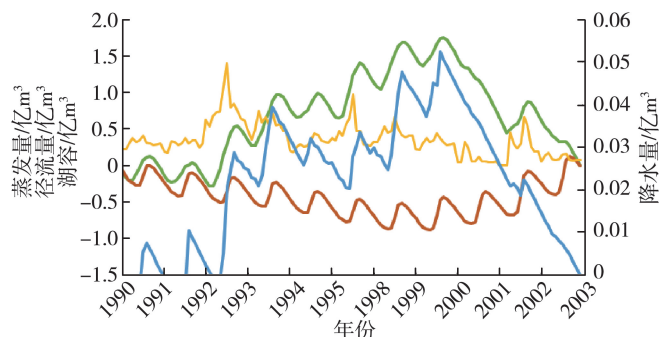
4 讨论

4.1 水量平衡

1990—2002年东、西台吉乃尔湖的月水量平衡计算结果(图7)表明,两个湖泊库容差变化不一,没有持续萎缩,处于正常波动状态。2000年后两湖的水量变化剧烈,采用累积距平法进行分析,结果表明,



(a) 东台吉乃尔湖



(b) 西台吉乃尔湖

图7 水平衡各项累积变化

Fig. 7 Cumulative changes in items of water balance

东台吉乃尔湖的湖面蒸发量、降水量、径流量和库容的平均值分别为 0.208 亿 m³、0.003 亿 m³、0.159 亿 m³ 和 1.496 亿 m³。其中,蒸发量、径流量和库容的变化趋势几乎一致,1990 年开始呈下降趋势,在 2000 年前后达到最小值,此后逐渐上升,而降水量的变化趋势完全相反,说明东台吉乃尔湖库容发生变化的主要原因是蒸发量和径流量。西台吉乃尔湖的湖面蒸发量、降水量、径流量和库容的平均值分别为 0.099 亿 m³、0.002 亿 m³、0.085 亿 m³ 和 0.360 亿 m³。库容变化与降水量和蒸发量的变化趋势相似,1992 年开始急剧上升,1999 年前后达到最大值,此后逐渐下降,而径流量较稳定,呈先下降后上升的趋势,说明西台吉乃尔湖的水量变化主要取决于降水量和蒸发量。由于 2003 年以前湖区处于天然状态,并且径流量、降水量、蒸发量的突变几乎在同一时期发生,表明引起湖泊水量的变化主要原因是气候变化。

4.2 湖泊天然状态识别

由于东、西台吉乃尔湖区域年均降水量仅为 30 mm 左右,蒸发量是降水量的 80 倍,所以降水量的影响可以忽略不计。湖泊的径流量年内变化出现两次峰值:第一次峰值在 4 月,由于气温上升使冰雪融水量增加,第二次在 7 月,与汛期降水量导致地表产流量增加有关。相关研究表明,由于冰雪融水参加径流过程会导致年内径流过程有两次峰值,这也是高寒地区水文过程的特征之一^[26-27]。同时柴达木盆地近年增温速度明显高于青藏高原整体水平^[27],那棱格勒河流域位于昆仑山脉附近,周围有冰川分布,气温的变化对流域积雪的冻融过程贡献较大,因此两湖泊面积从 3 月开始随着气温的增加逐渐扩大,至 7 月达到峰值。

相关性分析结果表明,两湖泊年内面积变化与气温和径流量均呈正相关关系,并且相关性系数均通过了置信度为 0.01 的双侧检验。选择气温和径流量作为自变量,湖泊面积作为因变量,分别对东、西台吉乃尔湖湖泊面积年内变化建立多元线性回归方程:

$$A_1 = 142.243 + 48.35R + 0.246T \quad (6)$$

$$A_2 = 64.049 + 28.695R + 0.736T \quad (7)$$

式中: A_1 、 A_2 分别为东、西台吉乃尔湖湖泊面积, km²; T 为气温, °C。

拟合面积的峰值出现在 8 月,主要是两湖径流量在 8 月份达到最大值所致。根据回归系数 t 检验结果,径流量对年内变化的贡献率较大;经方差分析,两湖的线性回归模型总体达到极显著水平($p <$

0.01); Durbin-Watson 检验值表明模型拟合效果较好,预测值的方差独立。

根据年蒸发量等气象因素与湖泊面积年际变化相关性分析结果,选择相关性较高的因子对两湖年际面积变化建立多元线性回归方程:

$$A_1 = 717.179 - 0.146E - 2.209T - 5.920w + 41.220R \quad (8)$$

$$A_2 = 542.801 - 0.108E - 9.606T - 4.561w + 6.651R \quad (9)$$

式中 w 为风速, m/s。

经分析,方程拟合结果较符合实际,西台吉乃尔湖 2000 年的拟合值大于实际值是由于模型中未考虑降水因素,而 2000 年年均降水量骤减至 8.7 mm,对湖泊面积产生了一定的影响。经方差分析,模型总体达到极显著水平($p < 0.01$); Durbin-Watson 检验值表明模型拟合效果较好,预测值的方差独立。

图 8 为东、西台吉乃尔湖面积累积频率分布。可见,东台吉乃尔湖面积为 180 ~ 220 km²,西台吉乃尔湖面积为 130 ~ 140 km²。由于地形的原因,天然状态下两湖的位置保持在湖区海拔最低处,当人为筑起拦水坝阻隔上游来水时,会在人为规定的空间范围内海拔最低点处蓄水形成新湖泊,即鸭湖,其平均海拔为 2685 m。因此,天然状态时的湖泊面积和形态随水量的变化而改变。表 1 为选取 25%、50%、75% 和 90% 的湖泊面积保证率情况下辨识的东、西台吉乃尔湖湖泊面积、湖容及空间形态的结果。

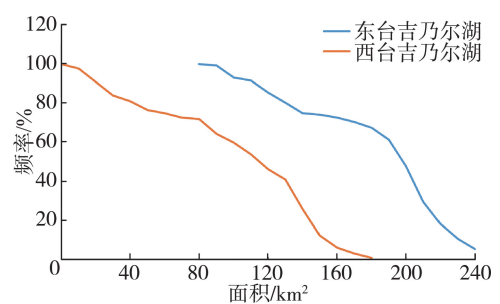


图 8 东、西台吉乃尔湖面积累积频率分布


Fig. 8 Accumulative frequency distribution of area of East-Taijiner Lake and West-Taijiner Lake

5 结 论

a. 在湖泊面积变化方面,东台吉乃尔湖面积以 2.19 km²/a 的速率呈增加趋势,面积为 180 ~ 220 km²,西台吉乃尔湖面积以 3.50 km²/a 的速率缩小,面积为 130 ~ 140 km²。两湖面积在 7 月出现峰值,4 月为次峰值;选取相关性较高的气象水文因子分别对

表 1 不同湖泊面积保证率下的湖泊天然状态

Table 1 Lake States under Different Guarantee Rates

| 保证率/% | 东台吉乃尔湖 | | 西台吉乃尔湖 | | 空间形态 |
|-------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|---|
| | 面积/ km ² | 湖容/ 亿 m ³ | 面积/ km ² | 湖容/ 亿 m ³ | |
| 25 | 221 | 1.9 | 144 | 1.3 |  |
| 50 | 204 | 1.7 | 131 | 1.0 | |
| 75 | 188 | 1.5 | 105 | 0.6 | |
| 90 | 130 | 1.1 | 50 | 0.2 | |

东、西台吉乃尔湖面积的年际和年内变化建立了线性回归方程,拟合度较高。

b. 在湖泊空间布局方面,东、西台吉乃尔湖呈西北-南东向分布,湖泊水量充足时两湖均近似为三角形,水量减少时,东台吉乃尔湖以原有的湖泊形态向内缩小,而西台吉乃尔湖逐渐萎缩成椭圆形。由于湖区周围地形和上游来水补给路径的原因,两湖边界变化较明显,主要在东台吉乃尔湖的西南侧和西台吉乃尔湖的西北侧发生变化。

c. 研究时间范围内湖泊水量维持在一个有正有负的相对平衡的状态,结合由长序列的湖泊面积变化绘制出的湖泊面积保证率曲线,以 25%、50%、75% 和 90% 的保证率为例,识别天然状态的湖泊面积、湖容及空间形态。该保证率曲线可为盐湖资源开发过程中保护天然湖泊生态系统提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 杜玉娥,刘宝康,贺卫国,等. 1976—2017 年柴达木盆地湖泊面积变化及其成因分析[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1275-1284. (DU Yu'e, LIU Baokang, HE Weiguang, et al. Analysis on the variation and cause of the lake area in Qaidam Basin from 1976 to 2017 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(1): 47-54. (in Chinese))
- [2] 谭红兵,陆是成,拓万全,等. 柴达木盆地那棱格勒河流域的水资源与矿源意义[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 392-397. (TAN Hongbing, LU Shicheng, TUO Wanquan, et al. Water resource and mineral source significances of Nalenggele River Catchment in Qaidam Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5): 392-397. (in Chinese))
- [3] 刘晓雪,温忠辉,束龙仓,等. 近 40 年可鲁克湖-托素湖

面积变化及影响因素分析[J]. 水资源保护, 2014, 30(1): 28-33. (LIU Xiaoxue, WEN Zhonghui, SHU Longcang, et al. Analysis of surface area changes of Keluke and Tuosu lakes over past 40 years and influencing factors[J]. Water Resources Protection, 2014, 30(1): 28-33. (in Chinese))

- [4] 周园,李丽娟,吴志坚,等. 青海盐湖资源开发及综合利用[J]. 化学进展, 2013, 25(10): 1613-1624. (ZHOU Yuan, LI Lijuan, WU Zhijian, et al. Development and comprehensive utilization of salt lake resources in Qinghai [J]. Progress in Chemistry, 2013, 25(10): 1613-1624. (in Chinese))
- [5] 陈奥,王建萍,陈亮,等. 台吉乃尔盐湖景观格局变化遥感分析(1990—2015 年)[J]. 盐湖研究, 2020, 28(1): 105-111. (CHEN Ao, WANG Jianping, CHEN Liang, et al. Remote sensing analysis on the landscape pattern variation influenced by resources exploitation in Taijinar Salt Lake area from 1990 to 2015 [J]. Journal of Salt Lake Research, 2020, 28(1): 105-111. (in Chinese))
- [6] 王俊昀,刘娟,潘明强. 青海省那棱格勒河尾间地区应急防洪方案探讨[J]. 人民黄河, 2018, 40(11): 53-55. (WANG Junyun, LIU Juan, PAN Mingqiang. Flood control contingency scheme for tail area of Nalenggele River [J]. Yellow River, 2018, 40(11): 53-55. (in Chinese))
- [7] 毛晓长,刘祥,董颖,等. 柴达木盆地鸭湖地区水上雅丹地貌成因研究[J]. 地质论评, 2018, 64(6): 1505-1518. (MAO Xiaochang, LIU Xiang, DONG Ying, et al. Research on the genesis of semi-submerges Yardang landform in the Duck Lake Area of Qaidam Basin [J]. Geological Review, 2018, 64(6): 1505-1518. (in Chinese))
- [8] 杜明达. 缺资料地区基于多源遥感数据的水文模型研究[D]. 北京:清华大学, 2018.
- [9] 张婷,徐彬鑫,康爱卿,等. 流域水文、水动力、水质模型联合应用研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 11-19. (ZHANG Ting, XU Binxin, KANG Aiqing, et al. Advances in joint application of hydrology, hydrodynamics and water environment models in river basins[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(3): 11-19. (in Chinese))
- [10] 林若兰,卓文珊,高延康,等. 基于 SWAT 模型的北江流域生态径流调节服务评估[J]. 水资源保护, 2020, 36(6): 131-136. (LIN Ruolan, ZHUO Wenshan, GAO Yankang, et al. Assessment of ecohydrological regulation service in the Beijiang River Basin based on SWAT model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 131-136. (in Chinese))
- [11] 孔祥意,刘志雨,周国良,等. 计算单元边长对分布式流域水文模型模拟结果的影响[J]. 河海大学学报(自

- 然科学版), 2021, 49(4): 309-315. (KONG Xiangyi, LIU Zhiyu, ZHOU Guoliang, et al. Influence of calculation unit size on simulation results of distributed watershed hydrological model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(4): 309-315. (in Chinese))
- [12] WANG Juan, YANG Shengtian, LIU Huiping, et al. Simulation of lake water volume in ungauged terminal lake basin based on multi-source remote sensing[J]. Remote Sensing, 2021, 13(4):13040697.
- [13] ZHANG Chuanhui, LYU Aifeng, ZHU Wenbin, et al. Using Multisource satellite data to investigate lake area, water level, and water storage changes of terminal lakes in ungauged regions [J]. Remote Sensing, 2021, 13(16):13163221.
- [14] WANG Juan, YANG Shengtian, LOU Hezhen, et al. Impact of lake water level decline on river evolution in Ebinur Lake Basin (an ungauged terminal lake basin) [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 104(15):102546.
- [15] 何振芳, 郭庆春, 邓焕广, 等. 南水北调调蓄湖泊水质参数遥感反演及其影响因素[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 87-95, 144. (HE Zhenfang, GUO Qingchun, DENG Huanguang, et al. Remote sensing inversion of water quality parameters and its influencing factors in a storage lake of South-to-North Water Diversion Project [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 87-95. (in Chinese))
- [16] 彭妍菲, 李忠勤, 姚晓军, 等. 基于多源遥感数据和 GEE 平台的博斯腾湖面积变化及影响因素分析[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(6): 1131-1153. (PENG Yanfei, LI Zhongqin, YAO Xiaojun, et al. Area change and cause analysis of Bosten Lake based on multi-source remote sensing data and GEE Platform [J]. Journal of Geo-Information Science, 2021, 23(6): 1131-1153. (in Chinese))
- [17] JOÃO C, SILLERO N, BRITO J C. Normalized difference water indexes have dissimilar performances in detecting seasonal and permanent water in the Sahara - sahel Transition Zone [J]. Journal of Hydrology, 2012, 7: 464-465.
- [18] 盛东, 李俊峰, 孙飞飞, 等. 干旱区内陆湖泊水盐变化及调控机理[J]. 干旱区研究, 2010, 27(4): 529-535. (SHENG Dong, LI Junfeng, SUN Feifei, et al. Study on water-salt change of some inland lakes in arid areas and the control mechanism [J]. Arid Zone Research, 2010, 27(4): 529-535. (in Chinese))
- [19] 廖杰, 王涛, 薛嫻. 黑河调水以来额济纳盆地湖泊蒸发量[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 228-232. (LIAO Jie, WANG Tao, XUE Xian. Lake's evaporation in the Ejn Basin since transferring water from the Heihe River [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(1): 228-232. (in Chinese))
- [20] CRAPPER P f, FLEMING P M, KALMA J D. Prediction of lake levels using water balance models [J]. Environmental Software, 1996, 11(4):251-258.
- [21] 曹国亮, 李天辰, 陆垂裕, 等. 干旱区季节性湖泊面积动态变化及蒸发量:以艾丁湖为例[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1095-1104. (CAO Guoliang, LI Tianchen, LU Chuanyu, et al. Dynamic variation and evaporation of seasonal lakes in arid areas; a case study of Aiding Lake [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1095-1104. (in Chinese))
- [22] 马宁, 王乃昂. 巴丹吉林沙漠腹地湖泊水面蒸发模拟的特殊性[J]. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1141-1149. (MA Ning, WANG Naiang. On the simulation of evaporation from lake surface in the Hinterland of the Badain Jaran Desert [J]. Arid Zone Research, 2016, 33(6): 1141-1149. (in Chinese))
- [23] 朱长明, 张新, 路明, 等. 湖盆数据未知的湖泊动态库容遥感监测方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(3): 309-315. (ZHU Changming, ZHANG Xin, LU Ming, et al. Lake storage change automatic detection by multi-source remote sensing without underwater terrain data [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(3): 309-315. (in Chinese))
- [24] 王涛. 柴达木盆地那棱格勒河流域水文情况研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(青海盐湖研究所), 2007.
- [25] 王懿萱, 陈天源, 吴蝉, 等. 柴达木盆地西台吉乃尔盐湖沉积的年代学研究[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 876-884. (WANG Yixuan, CHEN Tianyuan, WU Chan, et al. Formation and evolution of the Xitaijinair Salt Lake in Qaidam Basin revealed by chronology [J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 876-884. (in Chinese))
- [26] 巴桑赤烈, 刘景时, 牛竟飞, 等. 西藏中部巴木错湖泊面积变化及其原因分析[J]. 自然资源学报, 2012, 27(2): 302-310. (BASANG Chilie, LIU Jingshi, NIU Jingfei, et al. Area variation and its causes of Bamu Co Lake in the Central Tibet [J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(2): 302-310. (in Chinese))
- [27] 尹云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 等. 1981—2010 年气候变化对青藏高原实际蒸散的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1471-1481. (YIN Yunhe, WU Shaohong, ZHAO Dongsheng, et al. Impact of climate change on actual evapotranspiration on the Tibetan Plateau during 1981-2010 [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(11): 1471-1481. (in Chinese))

(收稿日期:2021-10-28 编辑:王芳)