中国科学: 地球科学 2025 年 第 55 卷 第 2 期: 485 ~ 499
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

人类活动对西北地区艾比湖长期及季节变化的影响

邓浩鑫[1,2], 汤秋鸿[1,2*], 张志栋[1,2], 刘星才[1,2], 赵罡[1,2], 崔世博[3], 张志平[4], 邵帅[2,5], 刘建宝[2,5], 陈发虎[2,5]

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程院重点实验室, 北京 100101
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 清华大学水利水电工程系, 水圈科学与水利工程全国重点实验室, 北京 100084
4. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023
5. 中国科学院青藏高原研究所, 青藏高原地球系统与资源环境重点实验室古生态与人类适应团队(ALPHA), 北京 100101
* 通讯作者, E-mail: tangqh@igsnrr.ac.cn

收稿日期: 2024-02-06; 收修改稿日期: 2024-11-06; 接受日期: 2024-12-03; 网络版发表日期: 2024-12-18
第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0805)、国家自然科学基金项目(41790424)和中德科学中心项目(M-0468)资助

摘要 中亚干旱地区的内陆湖泊对气候变化和人类活动高度敏感. 艾比湖, 作为新疆最大的咸水湖, 近年来经历了显著的快速萎缩. 现有研究表明, 人类活动是导致这一变化的主要驱动因素. 然而, 气候变化背景下不同部门的人类用水(如灌溉、畜牧业和工业)对湖泊面积长期趋势和季节性波动的相对贡献尚不清楚. 本研究构建了一个水文-社会经济-湖泊综合模型来模拟1950~2020年艾比湖面积的变化, 并通过比较不同情景下模拟的湖泊面积变化来定量区分气候变化和各部门用水的影响. 结果表明, 气候变化、灌溉、畜牧业和工业用水对湖泊面积长期变化的贡献分别为+5%、−79%、−25%和−1%. 尽管气候变化有利于艾比湖扩张, 但人类用水增长导致湖泊持续缩减. 值得注意的是, 畜牧业用水也是湖泊萎缩的重要影响因素, 其贡献约占灌溉影响的三分之一. 此外, 灌溉用水还加剧了湖泊的季节性波动, 导致年内最大和最小的月平均湖泊面积之差扩大. 模拟结果显示, 艾比湖年内月湖泊面积变化幅度从20世纪50年代的120km^{2}增加到了21世纪10年代的183km^2.

关键词 艾比湖, 气候变化, 灌溉, 季节性波动, 水文-社会经济-湖泊模型

1 引言

内陆湖泊是全球水循环的重要组成部分, 能够有效反映区域气候变化和人类活动的影响(Biskop等, 2016; 汤秋鸿, 2020; Wine和Laronne, 2020), 它还是干旱和半干旱地区重要的地表水资源, 为约7.937亿人提供主要的淡水来源(Feng等, 2022). 然而过去二十年内, 中亚地区的内陆湖泊经历了显著的快速萎缩(Che等, 2021), 如咸海(Kayiranga等, 2024)、田吉兹湖(Klein等, 2014)、博斯腾湖(Zhang等, 2023)和艾比湖(Zheng等, 2021). 湖泊的加速萎缩对中亚的生态系统健康和水安全构成了重大风险(AghaKouchak等, 2021; Zucca等, 2021). 因此, 评估内陆湖泊面积的长期变化并识别其背后的驱动因素对缓解湖泊萎缩对中亚生态系统健康

中文引用格式: 邓浩鑫, 汤秋鸿, 张志栋, 刘星才, 赵罡, 崔世博, 张志平, 邵帅, 刘建宝, 陈发虎. 2025. 人类活动对西北地区艾比湖长期及季节变化的影响. 中国科学: 地球科学, 55(2): 485–499, doi: 10.1360/N072024-0044
英文引用格式: Deng H, Tang Q, Zhang Z, Liu X, Zhao G, Cui S, Zhang Z, Shao S, Liu J, Chen F. 2025. Impact of human activities on the long-term change and seasonal variability of Ebinur Lake, Northwest China. Science China Earth Sciences, 68(2): 473–486, https://doi.org/10.1007/s11430-024-1476-7

© 2024 《中国科学》杂志社

和水资源安全的威胁至关重要.

内陆湖泊对气候变化和人类活动的敏感程度存在差异, 在人类活动相对较弱的高山地区, 气候变化是湖泊面积变化的决定因素. 例如, 青藏高原湖泊的扩张主要由于降水量的显著增加(Lei等, 2014; Biskop等, 2016); 阿尔泰山湖泊的扩张则是由于气温上升引发的冰川融化加快(Luo等, 2021); 蒙古高原的达里湖, 气温升高导致湖水位下降(Bai等, 2021). 在澳大利亚南部, 1840年以来降水与蒸发比值的长期下降成为内陆湖泊衰退的主要原因(Jones等, 2001), 降水减少导致乍得湖在1950~2018年间持续萎缩, 并在1972年分裂为两部分(Gao等, 2011; Pham-Duc等, 2020). 人类活动同样会显著改变自然水文过程, 其影响往往超过气候变化对全球各地内陆湖泊变化的影响(Nilsson等, 2005; Wang Q等, 2021). 农业灌溉一般是导致内陆湖泊面积变化的重要因素, 例如, 灌溉面积扩大、农业用水的增加导致伊朗乌鲁米耶湖(Hosseini-Moghari等, 2022)和阿富汗哈蒙湖(Rad等, 2022)萎缩. 大坝建设(Bai等, 2021)、畜牧业发展(Luo等, 2021)以及矿产资源开采(Tao等, 2015)也与湖泊面积的动态变化密切相关. 在中亚地区, 湖泊面积变化受到气候变化与日益加剧的人类活动的双重影响(Fang等, 2018). 降水增加导致湖泊扩张, 这一现象在中国新疆的高山湖泊表现尤为明显(Zheng等, 2021). 然而, 降水增加和冰川融水很多时候不足以抵消灌溉用水增加的影响, 如灌溉用水导致咸海分裂成两个湖泊并持续萎缩(Yang等, 2020). 同样, 1960~2020年间艾比湖在气候变化与人类活动的共同作用下不断萎缩(Zhang等, 2023).

艾比湖是新疆最大的咸水湖, 该湖泊面积较大, 但其平均深度仅为1.4m, 使其对入湖水量的变化高度敏感(Wang等, 2019). 艾比湖面积从1955年的1107km^{2}迅速缩减至2011年的428km^2, 同时出现了支流断流的情况(Ma等, 2014). 湖泊的快速萎缩导致自然植被严重退化、沙漠化加剧, 以及沙尘暴频发(周长海和雷加强, 2005; Maihemuti等, 2020). 在过去的七十年里, 艾比湖流域的气候状况和人类活动强度都发生了显著变化. 一方面, 伴随着气压梯度增加和西风带来的大规模水汽输送, 该地区降水量显著增加(Peng和Zhou, 2017; Chen等, 2019); 另一方面, 流域内土地资源被集约化开发, 草地大规模开垦为耕地(Wang等, 2018), 加之为满足经济发展和人口增长需求而大力发展的畜牧业(Yu等, 2017)和工业(Wei等, 2022), 致使各个部门的用水量都显著增加.

已有研究普遍认为气候变化和人类活动共同导致了艾比湖的萎缩. Zhang等(2020)利用Landsat卫星监测到湖泊面积在2003~2010年持续下降, 并将其归因于长期气候干旱. 气候敏感性分析的结果同样表明, 气候变化对1961~2015年间的湖泊萎缩的贡献约为50%(Wang Y等, 2021). 然而, 耕地开垦与湖泊萎缩时间上的高度重合(Zhang等, 2015)以及夜间灯光指数与湖泊面积之间的强负相关性(Zhang等, 2023), 表明人类活动也是湖泊面积变化的重要驱动因素. 在对湖泊面积变化过程进行分析时发现, 艾比湖面积的变化主要受到气候变化和人类活动对入湖流量的影响, 而非湖面降水或蒸发的直接作用(Cao等, 2023). 进一步的研究使用水文模型在艾比湖流域进行水文建模, 结果表明1964~2017年土地利用变化导致的径流减少不足以抵消气候变化带来的径流增加(Bao等, 2022). 综上所述, 现有研究分析了气候和农业灌溉对艾比湖萎缩的影响, 但忽略了畜牧业和工业用水的作用. 此外, 这些研究未考虑不同行业的实际用水量, 关于不同行业用水对湖泊面积季节性变化影响也未见报道, 这阻碍了人们对艾比湖持续萎缩机制的全面理解.

本研究在分布式生物圈水文(DBH)模型中耦合社会经济用水模型与湖泊模型, 以模拟1950~2020年艾比湖面积的长期变化. 本研究的目标是量化艾比湖湖泊面积对气候变化和不同部门人类用水的长期和季节性响应, 期望能为更全面理解内陆湖泊面积变化的潜在机制提供研究框架, 并可为艾比湖流域的水资源管理策略提供参考.

2 数据与方法

2.1 研究区

艾比湖流域(图1a)位于中国新疆天山北坡的西部, 靠近哈萨克斯坦, 地理范围为北纬43.6°~45.8°N、79.8°~85.2°E, 集水面积约为50000km^2. 该地区属典型的大陆性干旱气候(Amantai和Ding, 2021), 降水主要集中在夏季的山区(Hao等, 2019), 年均降水量约为200mm, 而年均潜在蒸散发超过1500mm(Zhang等, 2015). 艾比湖入湖水量主要来自三条河流: 博尔塔拉河、精河和奎屯河. 奎屯河曾为艾比湖提供约50%的

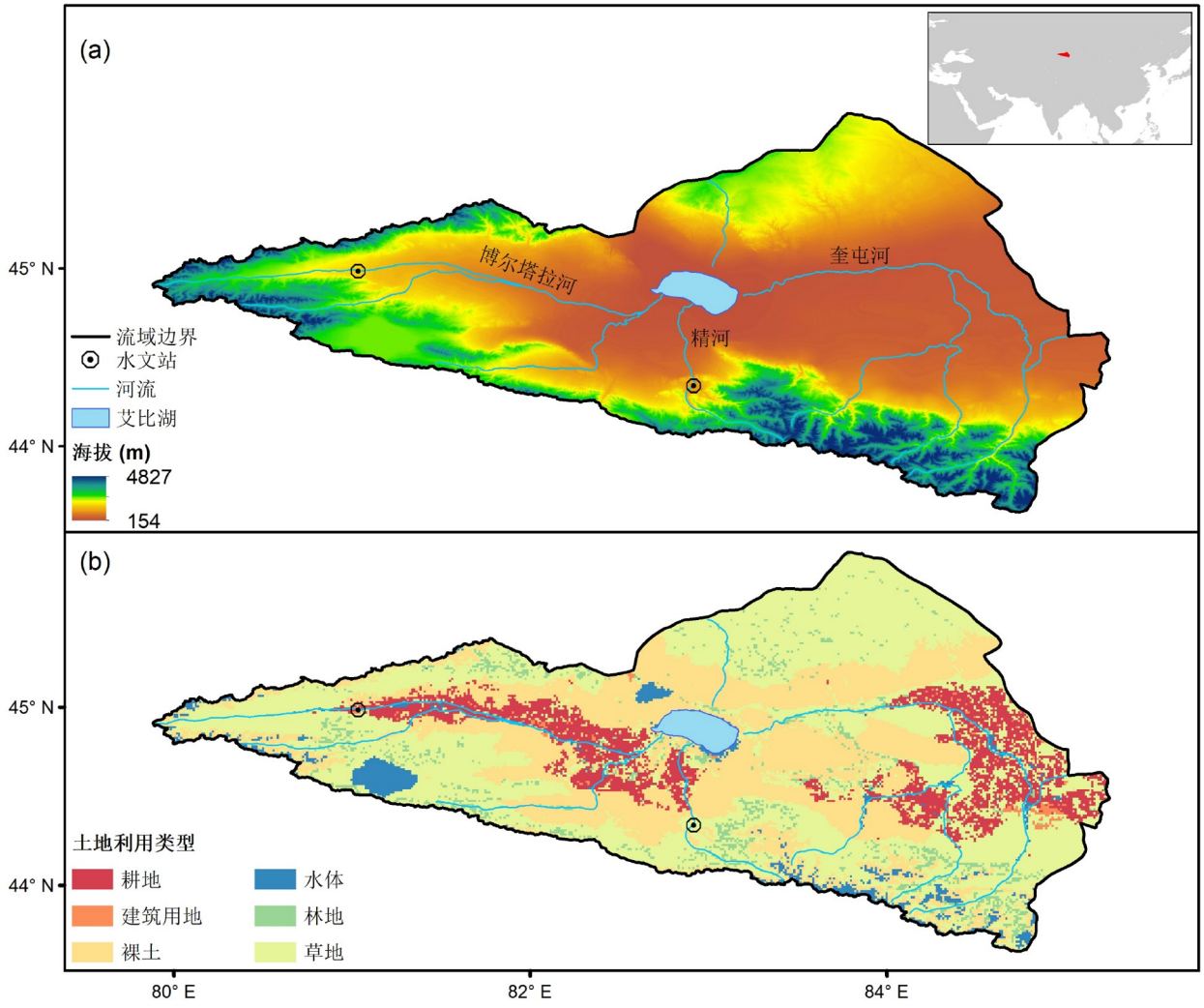

图 1　**艾比湖流域位置(a)和2015年土地利用类型(b)**

水量(Zeng等, 2019), 但由于大规模的农田开垦, 奎屯河的水量大量被用于灌溉, 从1977年起奎屯河就已断流, 不再为艾比湖提供水量(苏宏超等, 2006). 目前, 博尔塔拉河和精河是艾比湖的主要水量来源, 但它们也有大量水被用于灌溉.

艾比湖流域土地利用和覆盖情况(Xu等, 2020)如图1b所示, 该流域为脆弱的山地-绿洲-沙漠生态系统, 对全球变暖十分敏感(Yao等, 2022). 大约50%的流域面积为草地, 30%为裸土. 经过快速的农田开垦后, 约有12%的土地用于小麦、玉米和棉花的种植(Zeng等, 2019). 灌溉用水需求通常从4月的播种期开始, 6月和7月达到最高, 9月底收获期结束时结束(Geng等, 2023; Zhu等, 2024).

2.2　模型框架与数据

本研究在水文模型DBH中耦合社会经济用水模型与湖泊模型. 水文模型DBH用于模拟入湖流量, 其中的灌溉模块用于估算灌溉用水需求, 环境库兹涅茨曲线(EKC)用水回归模型被用于估算畜牧业和工业用水, 水量平衡湖泊模型来模拟湖泊面积的变化. 水文-社会经济-湖泊模型的框架如图2所示, 模型的设置和驱动数据描述如下.

2.2.1　DBH模型

DBH模型将简单生物圈模型(SiB2)(Sellers等, 1996)与分布式水文模型耦合(Tang等, 2006), 集成了水

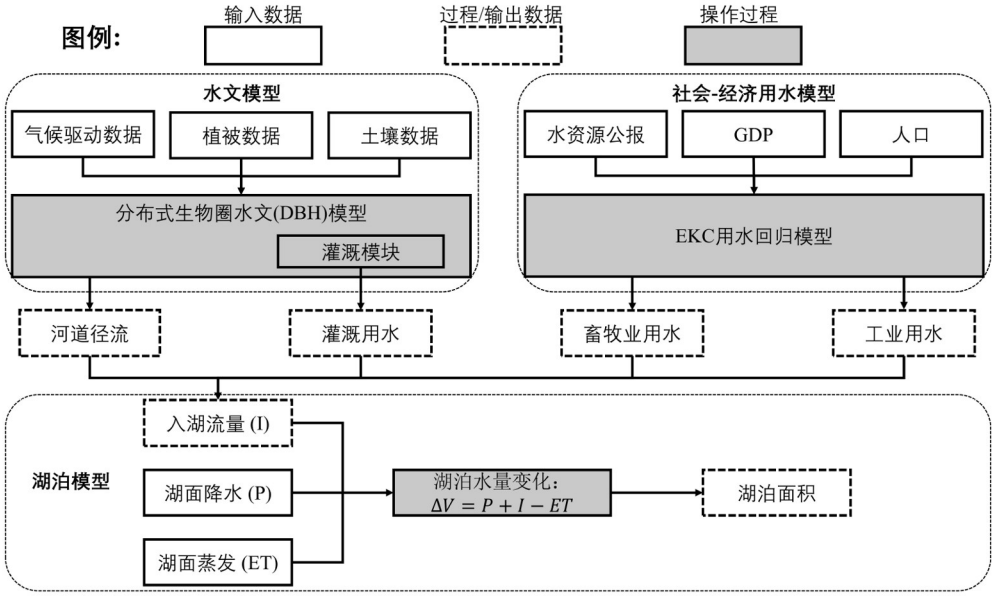

图 2　艾比湖流域水文-社会经济-湖泊模型框架示意图

文过程和土壤-植被-大气传输过程，并在流域和全球尺度上得到应用(Tang等, 2007, 2008; Hattermann等, 2017; Huang等, 2019; Liu等, 2019; Chen等, 2021).

为了估算灌溉取水量，DBH模型中耦合了一个灌溉模块，该灌溉模块基于DBH模拟的土壤水分，其目的是保持土壤水分高于萎蔫点. 当土壤水分低于萎蔫点时开始灌溉，并持续至土壤水分达到田间持水量(Tang等, 2007; Zhang等, 2017). 由于灌溉模块中未考虑灌溉水损失，灌溉取水量通过净灌溉水需求除以灌溉系数来估算(周和平等, 2013).

由于温泉和精河水文站的直接人类活动干扰较小，这两个站点的观测数据适合用于水文模型的验证(Bao等, 2022). 因此，本研究从水文年鉴中收集了1972~1989年温泉和精河水文站的径流观测数据，用于校准水文模型. 水文模型的性能通过Nash-Sutcliffe效率系数(*NSE*)、模型偏差(*bias*)和相关系数(*r*)进行评估:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T}\left(Q_0^t - Q_m^t\right)^2}{\sum_{t=1}^{T}\left(Q_0^t - \overline{Q}_0\right)^2}, \tag{1}$$

$$bias = \frac{\overline{Q}_m - \overline{Q}_0}{\overline{Q}_0}, \tag{2}$$

$$r = \frac{cov(Q_0, Q_m)}{s(Q_0)s(Q_m)}, \tag{3}$$

式中, Q_m为模拟径流, Q_0为观测径流, 函数*cov*和*s*分别表示协方差和标准差. $NSE > 0.50$、$|bias| < 0.25$且$r > 0.7$的水文模型被认为是令人满意的(Moriasi等, 2007; Merz等, 2009).

2.2.2　社会经济用水模型

由于水文模型无法直接估算畜牧业和工业用水量，因此引入了一个基于环境库兹涅茨曲线的社会经济用水模型. 环境库兹涅茨曲线(Kuznets, 2019)描述了自然资源使用与人均收入之间的倒U型关系，即自然资源的使用在经济发展初期会上升，随后随着经济的发展而减少(Sun和Fang, 2018). 水资源利用与经济发展之间的库兹涅茨曲线关系已经在以往研究中得到验证(Duarte等, 2013)，本研究采用标准形式的EKC用水回归模型来估算畜牧业和工业的用水量(Stern, 2004; Katz, 2008):

$$\ln\left(\frac{W_{it}}{P_t}\right) = \beta_0 + \beta_1 \ln\left(\frac{\mathrm{GDP}_t}{P_t}\right) + \beta_2 \ln^2\left(\frac{\mathrm{GDP}_t}{P_t}\right) + \varepsilon_{it}, \tag{4}$$

式中, W_{it}为部门*i*在*t*年的取水量($10^4 m^3$), *P*为人口数

(10^4人), GDP为社会生产总值(10^4RMB), W/P和GDP/P分别代表人均用水量和人均GDP, β_0、β_1和β_2为模型参数, ε为误差项.

该用水回归模型的参数基于博尔塔拉蒙古自治州2006~2020年的数据进行估计. 拟合参数的数据包括《水资源公报》中提供的畜牧业和工业用水数据, 以及年鉴中的GDP和人口数据. 随后, EKC模型用于估算1950~2020年流域内畜牧业和工业的用水量. 1989年之前的人口和GDP数据仅在1950年、1952年、1955年、1965年、1970年、1978年、1980年和1985年可获取, 缺失数据通过相邻年份数据进行线性插值获得. 这些用水量随后均匀分配到每一天(Voisin等, 2013).

2.2.3　湖泊水量平衡模型

封闭内陆湖泊的每日水储量变化(ΔV, m^3)可以通过水量平衡公式估算(Zhou等, 2015; Wang等, 2022):

$$\Delta V = P - E + I + G_i - G_o, \tag{5}$$

式中, P、E、I、G_i和G_o分别表示直接进入湖泊的降水量(m^3)、湖泊蒸发量(m^3)、湖泊入流水量(m^3)、湖泊的地下水渗漏(m^3)和湖泊的地下水流出量(m^3).

地下水渗漏和流出的确定十分困难, 结合地下水模型和观测数据通常具有较大的不确定性(Mohebzadeh和Fallah, 2019). 但对于艾比湖而言, 稳定同位素证据表明由于地下含水层坡度较缓和细砾石的存在, 地下水渗漏和流出量非常小(Hao等, 2019). 因此, 在本研究中, 净地下水流量(G_i–G_o)忽略不计, 方程(5)简化为

$$\Delta V = P - E + I. \tag{6}$$

根据每日蓄水量的变化, 湖泊面积变化可通过经验方法公式(7)估算:

$$\Delta V = \frac{1}{3} \times (H_2 - H_1) \times \left(A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 A_2}\right), \tag{7}$$

式中, H_1和H_2是不同时刻的湖泊水位, A_1和A_2是对应的湖泊面积.

2.2.4　水文-社会经济-湖泊模型的驱动数据

驱动水文模型所需的数据来自欧洲中期天气预报中心的ERA5-Land数据集(https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac)(Muñoz-Sabater等, 2021), 该数据集提供了1950~2020年的每小时气象数据, 空间分辨率为9km×9km, 包括降水、温度、气压、风速、下行短波辐射和下行长波辐射, 其中降水量使用气象站数据进行了校正(Berg等, 2012; He等, 2020). 植被类型和土壤类型分别来自国家冰冻圈与荒漠数据中心(http://www.ncdc.ac.cn)(Ran等, 2012)和FAO世界土壤数据库(https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1336)(Wieder等, 2014). 冰川融水的估算方法基于度日因子法(Pritchard, 2019)和第二次中国冰川清查数据集(https://www.doi.org/10.12072/ncdc.Westdc.db0006.2020). 用于灌溉需求计算的萎蔫点和田间持水量数据来源于Han等(2019). 耕地面积变化数据来自中国科学院资源与环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)(Xu等, 2020).

用于驱动湖泊模型的数据包括直接进入湖泊的降水量、湖泊蒸发量和湖泊入流水量. 日降水量来自ERA5-Land, 日蒸发量基于Penman-Monteith方程进行估算(Allen等, 1998). 湖泊的日入流水量为水文模型的径流减去各部门的取水量. 第一次新疆科学考察与研究指出, 1957年湖泊面积为1072km^2. 2001~2016年的湖泊面积月变化数据来自Zhao等(2022)基于Landsat高分辨率卫星影响的反演结果, 这些数据用于湖泊模型的校准.

2.3　量化湖泊面积对气候变化和人类用水的响应

本研究设定了不同情景以量化湖泊面积对气候变化和不同部门用水的响应.

$S_{Realistic}$: 现实情景. 在该方案中, 考虑了气候变化和所有用水因素, 以模拟湖泊面积的实际变化.

$S_{Control}$: 控制情景. 在这种情景下, 可以得到在无气候变化和无用水情况下湖泊面积的变化情况. 无气候变化是指采用去趋势方法去除降水和温度的变化趋势(Deng等, 2022), 然后根据去趋势的降水和温度驱动水文模型, 得到湖泊的自然流入量.

$S_{Climate}$: 气候变化情景. 在这种情况下, 模拟湖泊面积的变化时考虑了气候变化, 但没有考虑任何用水量.

$S_{Irrigation}$: 灌溉用水情景. 在这种情况下, 模拟湖泊面积的变化时考虑了灌溉用水, 但没有考虑气候变化和其他用水.

$S_{Husbandry}$: 畜牧用水情景. 在这种情况下, 模拟湖泊面积的变化时考虑了畜牧用水, 但没有考虑气候变化和其他用水.

$S_{Industry}$: 工业用水情景. 在这种情况下, 模拟湖泊面积的变化时考虑了工业用水, 但没有考虑气候变化

和其他用水.

通过设置不同的情景，湖泊面积对气候变化和部门取水的响应被区分开来，控制情景与其他情景的差异即为湖泊面积对气候变化和部门取水的响应.

3 研究结果

3.1 水文模型与湖泊模型的性能

温泉站和精河站的月流量观测值与模拟值如图3所示. 1972~1989年期间，温泉站的*NSE*、偏差和相关系数分别为0.55、3.6%和0.77，精河站的*NSE*、偏差和相关系数为0.91、2.6%和0.96. 该水文模型在精河站的表现优于温泉站. 总体而言，模型满足*NSE*>0.50、|*bias*|<25%和*r*>0.7的要求，表明DBH模型的模拟结果是可信的.

湖泊模型的模拟表现通过比较观测的湖泊面积与在现实场景下模拟的湖泊面积来进行评估，如图4所示. 图4a的结果表明，艾比湖自1950年以来持续缩小，同时在2003年达到了卫星观测到的最大面积，随后迅速缩小，这与过去的研究结果一致. 图4b和4c显示了观测与模拟的月湖泊面积，月湖泊面积变化的特征同样与过去的研究一致(Che等, 2019)，月湖泊面积最大值出现在4月，最小值出现在8月. 由于艾比湖较浅，加之汛期的偶发入流和超干旱环境下的高蒸发率，湖泊表现出显著的季节性变化，该湖泊频繁经历湖泊与沼泽地之间的交替转变(Maihemuti等, 2020; Wang等, 2023). 模型的评价指标*NSE*、偏差和相关系数的范围分别为0.62~0.94、−0.1%~0.0%和0.90~0.97，较低的误差和强相关性表明，湖泊模型能够有效模拟艾比湖的年际和季节性面积变化.

3.2 气候变化与人类用水变化

降水量增加和温度升高是艾比湖流域气候变化的显著特征. 艾比湖流域降水量和温度的变化如图5所示. 1950~2020年期间流域年平均降水量为275mm，并呈现出显著的增加趋势，年均增幅为0.38mm(p<0.01)(图5a). 年平均温度为4.3℃，增速为0.022℃每年(p<0.01)(图5b). 值得注意的是，这些增速低于整个西北地区观测的增速(Deng等, 2022). 图5c和5d展示了月降水量和温度的趋势，艾比湖流域降水量的增加主要集中在4~9月期间，而温度显著增加的月份则发生在10月至次年4月.

流域内所有部门的用水量都迅速增加. 图6a~6c展示了灌溉、畜牧和工业用水的年度变化. 灌溉取水在研究期内增加了4倍，从1950年的3.3×10^8m^{3}增加至2020年的16.6×10^8m^3. 灌溉取水在1950~1970年以及2000~2020年迅速增加，这主要是由于这段时间内耕地的扩张. 灌溉用水较大的区域主要分布在奎屯河流

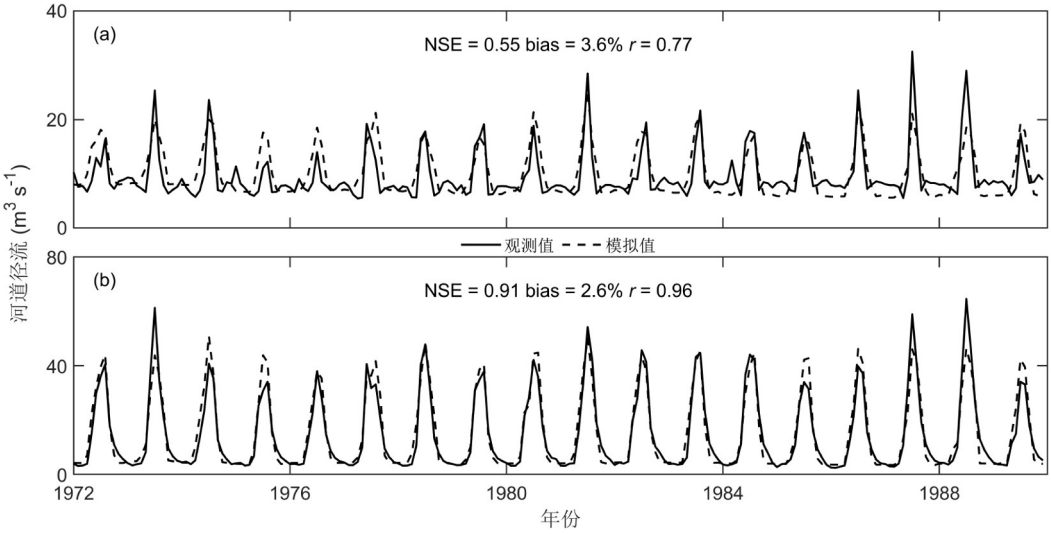

图 3 1972~1989年间观测和模拟的艾比湖流域水文站河道径流

(a) 温泉站; (b) 精河站

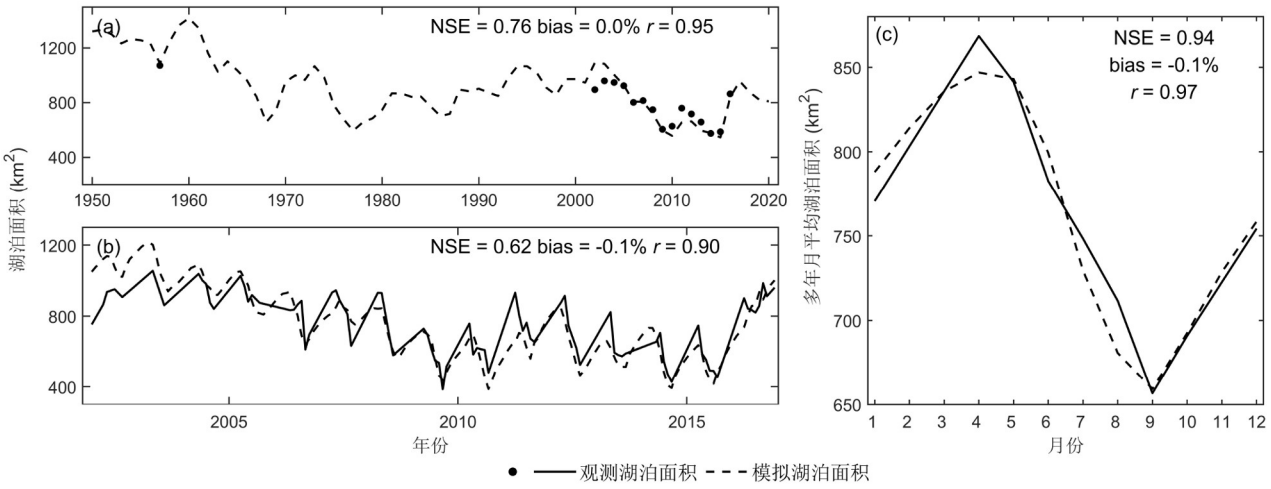

图 4　观测和模拟的湖泊面积

(a) 1950~2020年年平均湖泊面积; (b) 2001~2016年月湖泊面积; (c) 2001~2016年多年月平均湖泊面积

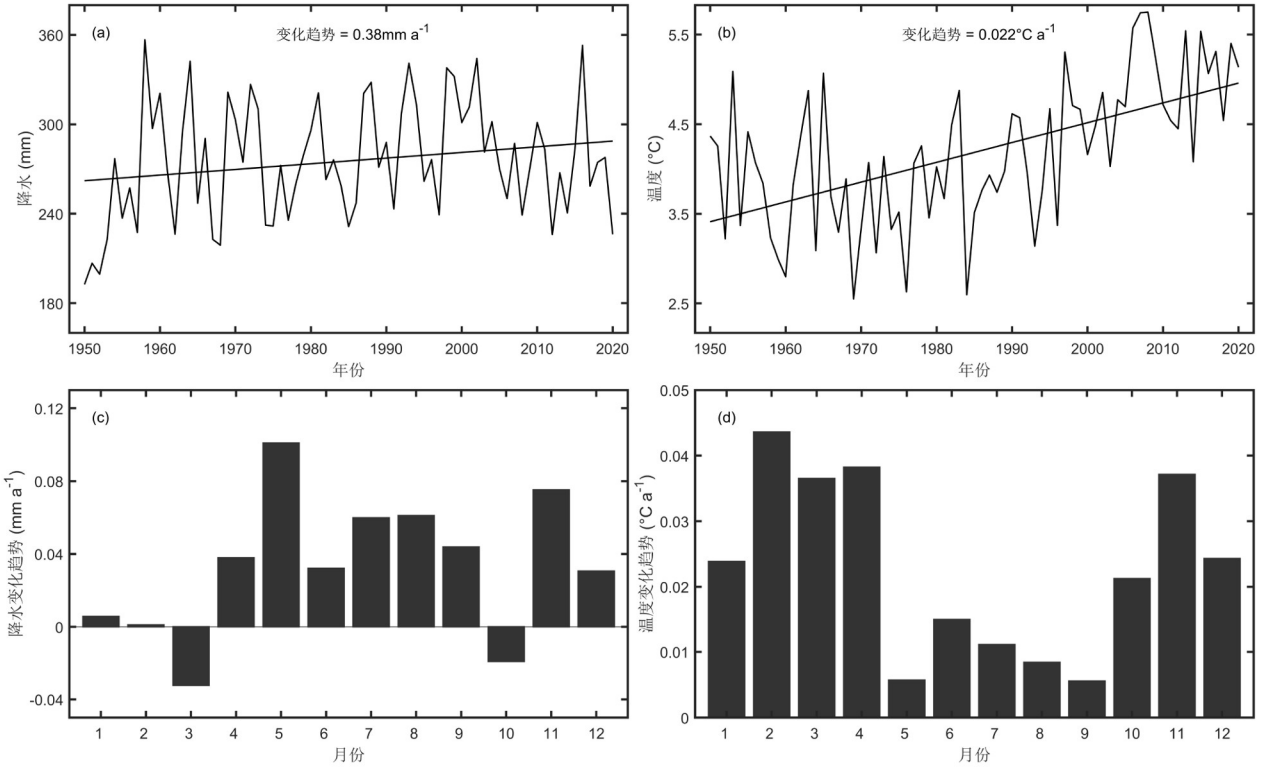

图 5　1950~2020年艾比湖流域降水和气温的年变化和季节变化

(a)和(b)分别为1950~2020年间流域年平均降水量和温度的变化, (c)和(d)分别为1950~2020年间月均降水量和温度的变化趋势

域、博尔塔拉河流域下游以及精河流域下游(图6d). 畜牧业用水在研究期内增加了2倍, 从1950年的1.0×10^8m^{3}增加至2020年的2.7×10^8m^3. 尽管畜牧业用水迅速增加, 但在最近三十年增速有所放缓. 在1990年前, 几乎没有工业用水, 但在2010年后, 工业发展消耗了约0.3×10^8m^{3}的水.

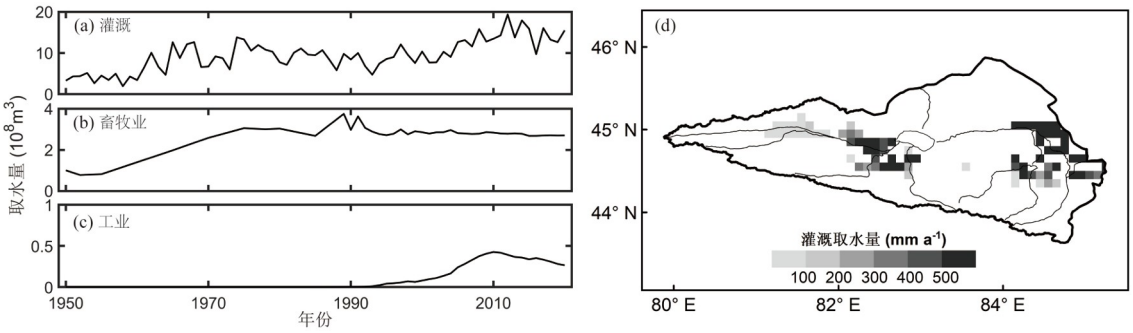

图 6　1950~2020年艾比湖流域各部门用水的年度变化和灌溉用水量的空间分布

(a)~(c)分别为灌溉用水、畜牧业用水和工业用水; (d) 灌溉用水量的空间分布

3.3　湖泊面积对气候变化和用水的长期和季节性响应

不同情景下湖泊面积变化如图7a所示. 在控制情景下, 艾比湖在1950~2020年间的平均湖泊面积为1650km^2, 这意味着如果没有气候变化和人类取水, 艾比湖的面积将更大. 通过对比控制情景和其他情景的湖泊面积变化, 可以发现尽管气候变化对湖泊有扩张效应, 但各个部门的用水都导致湖泊面积减少, 同时人类用水造成的湖泊面积萎缩效应显著大于气候变化引起的扩张效应.

图7b显示了控制情景下平均湖泊面积与其他情景之间的差异, 量化了气候变化和各个部门用水对湖泊面积变化的影响. 与控制情景相比, 现实情景下的平均湖泊面积减少了740km^2, 气候变化、灌溉、畜牧业和工业对湖泊面积变化的影响分别为+32(占湖泊面积总响应的5%)、−554(79%)、−175(25%)、−5.3(1%) km^2(其中正值表示扩张效应, 负值表示萎缩效应). 结果表明, 灌溉对湖泊面积变化的影响最大, 导致湖泊萎缩, 使模拟的湖泊面积接近实际湖泊面积的演变. 畜牧业的影响仅次于灌溉, 使得湖泊缓慢萎缩, 工业对湖泊面积变化的影响相对较小. 总体而言, 用水造成的萎缩效应远大于气候变化的扩张效应, 因此自1950年以来, 艾比湖一直在持续萎缩.

图8a展示了1950~1960年和2010~2020年两个时期的月湖泊面积的季节性变化. 与1950~1960年相比, 2010~2020年期间4月的湖泊面积距平值增加, 而8月和9月的湖泊面积距平值减少, 表明在2010~2020年间的湖泊季节性增加. 为了确定季节性变化增强的原因, 图8b展示了艾比湖在这两个时期的入湖流量, 与1950~1960年相比, 2010~2020年艾比湖在所有月份的入湖流量均有所减少, 尤其是在灌溉季节(4~9月)的减少更为显著. 入湖流量的减少直接导致了灌溉月份湖泊面积持续下降, 同时这一时期整体湖泊面积的减少使得艾比湖对入湖流量更加敏感, 从而导致非灌溉期的湖泊面积相对增加.

湖泊的季节性变化通过湖泊面积年内波动幅度, 即月湖泊面积最大值与最小值之间的差值进行描述. 图9a展示了1950~2020年间湖泊面积的波动幅度, 结果表明湖泊面积的波动幅度显著增加, 年均增加幅度为0.86km^2(p<0.001), 湖泊面积的年内变化幅度从1950~1960年的120km^{2}增加到2010~2020年的183km^2. 为了区分艾比湖季节性变化增强的原因, 图9b展示了不同情景下年内湖泊变化幅度的趋势. 气候变化情景($S_{Climate}$)、灌溉用水情景($S_{Irrigation}$)、畜牧用水情景($S_{Husbandry}$)和工业用水情景($S_{Industry}$)年内波动幅度的变化趋势分别为−0.06(占湖泊面积季节总响应的5%)、1.25(109%)、−0.03(3%)和−0.01(1%)km^2 a^{-1}. 结果表明, 气候变化、畜牧用水和工业用水小幅削弱了湖泊的季节性变化, 但灌溉用水显著增加了艾比湖的季节性变化. 这些发现表明, 艾比湖的季节性正在增强, 这将导致夏季湖泊裸露面积增多, 更多的盐渍土地很可能带来更严重的沙尘暴.

4　讨论

内陆湖泊在干旱的中亚地区是重要的地表水资源, 其面积变化反映了区域气候变化和人类活动的综合影响(Bai等, 2011). 艾比湖是中亚地区的重要内陆

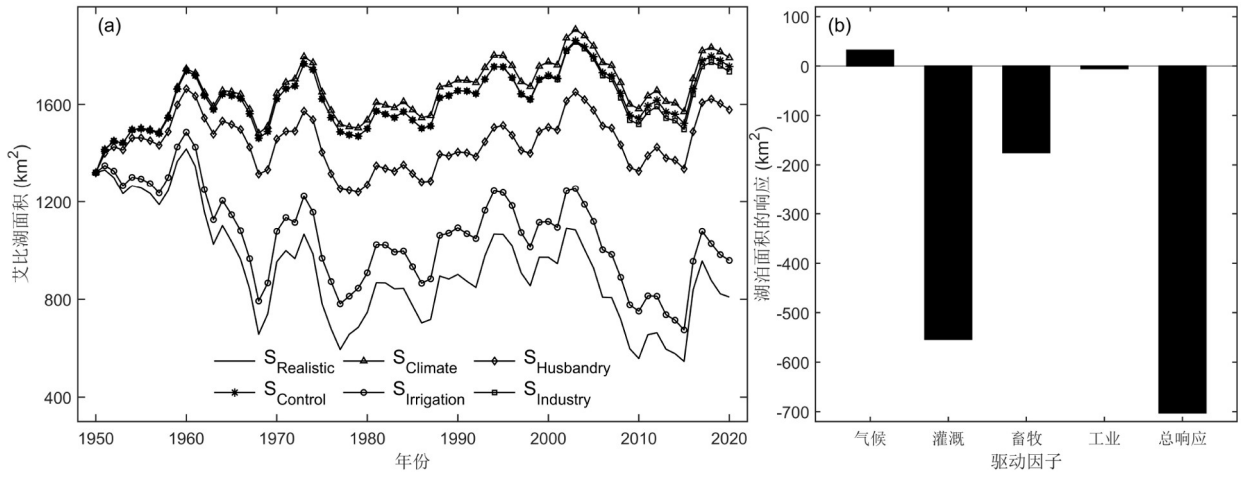

图 7　1950~2020年湖泊面积对气候变化和部门用水的响应

(a) 不同情景下艾比湖的年平均湖泊面积变化; (b) 湖泊面积对气候变化和不同部门人类用水的响应

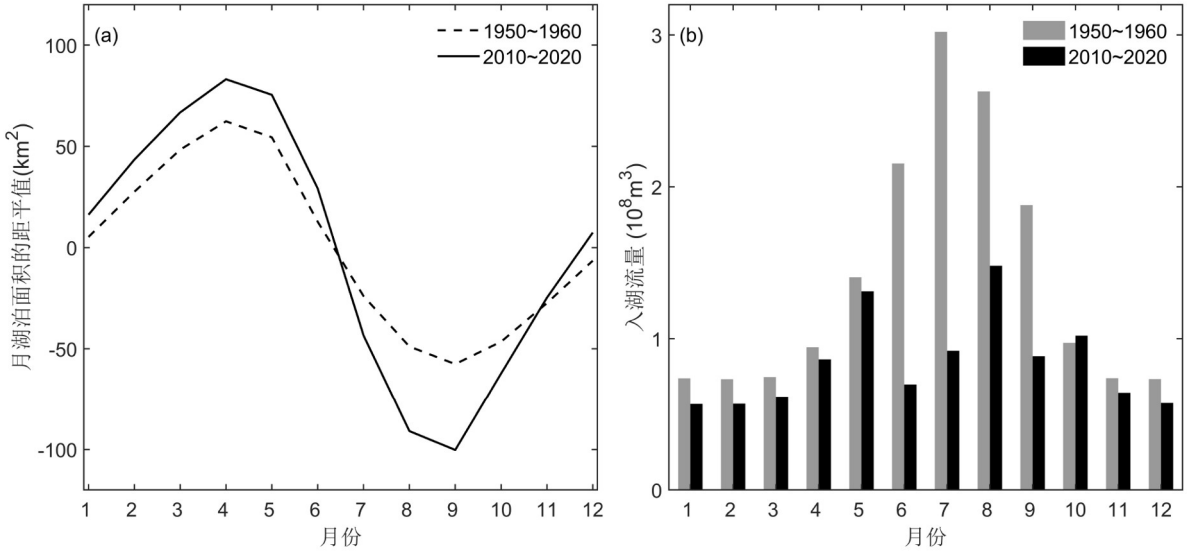

图 8　湖泊面积和入湖流量的季节性变化

1950~1960年和2010~2020年艾比湖两个时期内(a)湖泊面积在各自时期内的距平值和(b)每月入湖流量

湖泊, 近年来经历了快速萎缩, 先前的研究通过统计学方法指出, 灌溉是导致湖泊萎缩的主要原因(Zhang等, 2015; Zeng等, 2019). 然而, 湖泊面积对气候变化和不同部门取水量的响应仍然不明确. 本研究采用水文-社会经济-湖泊模型来模拟艾比湖湖泊面积的长期变化, 旨在量化湖泊面积对气候变化及各个部门人类用水的年际和季节性响应. 结果显示, 湖泊的年际响应同时受气候变化的扩张效应和灌溉、畜牧及工业取水的萎缩效应影响. 灌溉是导致艾比湖缩小的主要因素, 这与中亚地区的其他湖泊, 如咸海(Kayiranga等, 2024; Micklin, 2010)、巴尔喀什湖(Kezer和Matsuyama, 2006)、马哈尔鲁湖(Zolghadr-Asli等, 2023)、伊塞克湖(Zhang等, 2022)和哈蒙湖(Rad等, 2022)发生的现象一致. 本研究中使用的水文-社会经济-湖泊模型结合了陆面水文模型和社会经济用水模型, 能够模拟气候强迫和人类用水对湖泊的影响. 通过耦合湖泊水量平衡模型,

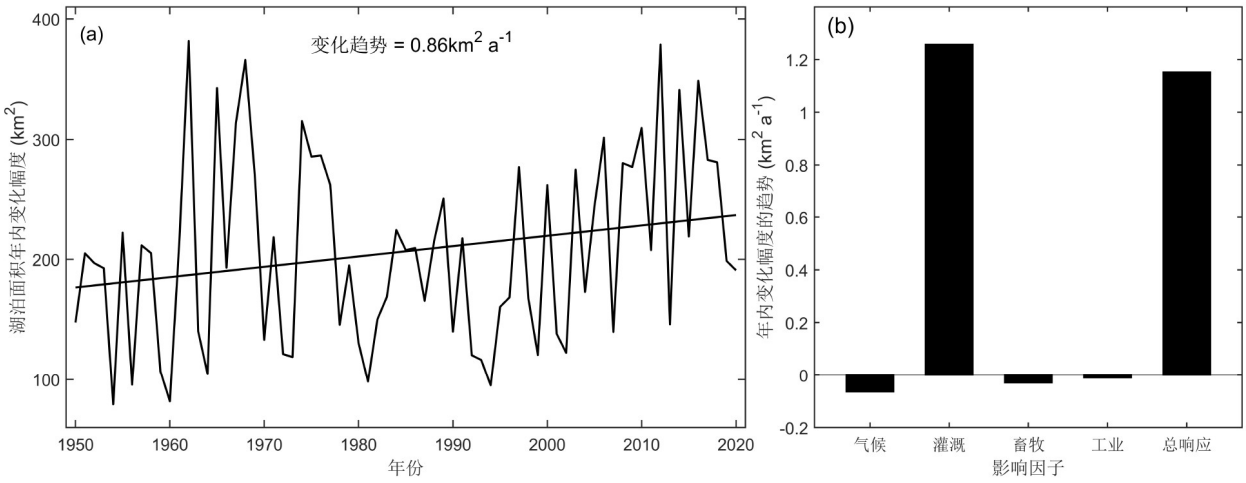

图 9　1950~2020年间湖泊面积年内变化幅度和不同因子作用下年内变化幅度的趋势

(a) 湖泊面积年内变化幅度; (b) 不同因子作用下年内变化幅度的趋势

该模型将流域的水文变化转化为内流湖面积变化. 该模型在艾比湖的成功应用显示其在解释中亚地区湖泊面积快速变化方面具有重要潜力. 中亚地区的大部分内陆湖泊流域为干旱或半干旱气候, 降水和冰川融水是湖泊的重要补给(Yapiyev等, 2017). 这些水源表现出明显的季节性特征, 夏季来水充足, 而冬季来水稀少(Pritchard, 2019). 同时, 灌溉水也呈现季节性模式, 导致作物灌溉季节湖泊流入量减少. 我们的研究表明, 灌溉用水的季节特征对湖泊面积的季节性影响显著, 这使得艾比湖流域及周边地区面临严峻挑战. 艾比湖的干涸部分风蚀率达到10cm a^{-1}, 年均输送约480万吨富含盐分的尘土(Abuduwaili等, 2008), 湖泊面积的萎缩和季节性变化的增强加剧了来自盐渍土地的严重沙尘暴, 对环境造成了威胁, 加速了生态系统的退化.

尽管气候变化通过西风带为艾比湖流域带来了额外的水汽, 并加速了冰川融化, 但人类用水活动仍主导了艾比湖的演变(Huang等, 2013; Zheng等, 2021). 在研究区域内, 人口增长和农业集约化也导致土地利用发生重大变化, 年鉴结果显示艾比湖流域的耕地面积从1950年的274km^{2}增加到2020年的5681km^2, 灌溉用地的增加直接导致了对河道取水的增加, 从而减少了入湖流量. 同时流域内地下水的过度开采导致区域地下水位下降(Wang Y等, 2021). 天山北坡作为新疆经济发展的核心区域(Tang等, 2022), 其经济发展进一步推动了畜牧业和工业用水的增加(Zhang等, 2015). 本研究显示, 气候变化的扩张效应相较于人类用水活动的萎缩效应微不足道, 因此该区域气候变湿无法抵消人类活动的影响. 总体来看, 人口增长总是伴随着取水量的显著增加, 干旱地区地表和地下水的大规模取水加速了地表水体的干涸. 由人类活动驱动的湖泊萎缩加速了沙漠化和沙尘暴的发生, 甚至危及到地方经济的发展.

本研究的局限性主要体现在对湖泊蒸发、流域动态植被及水资源使用空间模式等方面. 本研究湖泊蒸发计算所采用的Penman-Monteith方法无法准确反映结冰期的升华现象及盐度对蒸发的影响(Shi等, 2024). 艾比湖的结冰期为11月至次年2月(朱文煜等, 2020), 在此期间, 该方法可能会高估升华所造成的水损失(Lei等, 2018). 先前的研究表明, 这一方法在艾比湖流域高估了约8%的蒸发(Cao等, 2022). 因此, 使用该方法估算湖泊蒸发存在不确定性, 但随着气候变暖导致未来结冰期缩短, 这种不确定性可能会减小(Xiao等, 2018). 此外, 在相同气候条件下, 咸水湖的蒸发率往往低于淡水湖, 根据实地观测, 艾比湖的盐度约为102.4g L^{-1}(Wu等, 2014). 预计若考虑盐度, 艾比湖的蒸发可能减少约4%(Ma等, 2024). 另一个局限性在于未考虑动态植被变化, 强烈的人类活动对区域土地利用变化产生了显著影响(Habersack等, 2014). 在1990~2017年期间, 流域灌木丛面积急剧减少, 绝大部分转变为草地或建设用地(Amantai和Ding, 2021), 植

被类型的变化影响了水文模型的流量(Swain等, 2020). 同时为保护湖泊生态环境, 艾比湖流域启动了植树造林和退耕还草的项目(Ma等, 2020). 忽略了畜牧业和工业用水的空间模式是本研究的另一个局限, 不同的空间模式可能导致湖泊面积的季节性差异(Hoekstra等, 2012).

5 结论

本研究结合分布式生物圈水文模型、环境库兹涅茨曲线用水回归模型和湖泊水量平衡模型研发了水文-社会经济-湖泊模型. 该模型模拟了艾比湖1950~2020年的长期变化, 基于该模拟结果分析了艾比湖对气候变化和人类用水的长期和季节性响应特征. 主要结论如下.

(1) 1950~2020年间艾比湖流域气候变化最显著的特征是降水量增加和气温升高, 同时, 流域内各个部门的用水也显著增加.

(2) 艾比湖水面面积的变化趋势受气候变化和人类用水的影响, 影响从大到小分别为灌溉用水、畜牧业用水、气候变化和工业用水. 气候变化增加湖泊面积, 而人类用水导致湖泊萎缩, 气候变化的扩张效应被人类用水的萎缩效应完全抵消, 导致湖泊面积长期下降.

(3) 湖泊的季节性变化从1950~1960年的120km^{2}增加到2010~2020年的183km^2, 气候变化、畜牧业用水和工业用水对季节性变化的影响有限, 灌溉是造成季节性变化增加的主要因素.

因此, 自1950年以来, 人类活动, 特别是灌溉, 对艾比湖的萎缩产生了显著影响. 此外, 湖泊季节性变化的加剧可能增加盐渍土地所引发的严重沙尘暴和环境退化的风险. 为减轻这些挑战, 必须采取先进的气候变化适应措施和技术, 加强水资源研究和管理能力建设, 以应对或减缓气候变化和人类活动的影响.

致谢 本研究所用模型驱动数据获取方式已在材料与方法章节描述, 模型数据可应要求提供.

参考文献

苏宏超, 巴音查汗, 庞春花, 吉锦环. 2006. 艾比湖面积变化及对生态环境影响. 冰川冻土, 28: 941–949

汤秋鸿. 2020. 全球变化水文学: 陆地水循环与全球变化. 中国科学: 地球科学, 50: 436–438

周长海, 雷加强. 2005. 艾比湖地区风沙危害趋势及对欧亚大陆桥的影响. 干旱区地理, 2005, 28: 98–102

周和平, 张明义, 周琪, 孙志锋, 陈金龙. 2013. 新疆地区农业灌溉水利用系数分析. 农业工程学报, 29: 100–107

朱文煜, 李艳红, 李发东, 王金龙. 2020. 艾比湖湿地季节性冻融土壤温室气体排放规律研究. 北京师范大学学报(自然科学版), 56: 549–556

Abuduwaili J, Gabchenko M V, Xu J. 2008. Eolian transport of salts—A case study in the area of Lake Ebinur (Xinjiang, Northwest China). J Arid Environ, 72: 1843–1852

AghaKouchak A, Mirchi A, Madani K, Di Baldassarre G, Nazemi A, Alborzi A, Anjileli H, Azarderakhsh M, Chiang F, Hassanzadeh E, Huning L S, Mallakpour I, Martinez A, Mazdiyasni O, Moftakhari H, Norouzi H, Sadegh M, Sadeqi D, Van Loon A F, Wanders N. 2021. Anthropogenic Drought: Definition, Challenges, and Opportunities. Wiley Online Library

Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M, others. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 300, D05109

Amantai N, Ding J. 2021. Analysis on the spatio-temporal changes of LST and its influencing factors based on VIC model in the arid region from 1960 to 2017: An example of the Ebinur Lake Watershed, Xinjiang, China. Remote Sens, 13: 4867

Bai J, Chen X, Li J, Yang L, Fang H. 2011. Changes in the area of inland lakes in arid regions of central Asia during the past 30 years. Environ Monit Assess, 178: 247–256

Bai M, Mo X, Liu S, Hu S. 2021. Detection and attribution of lake water loss in the semi-arid Mongolian Plateau—A case study in the Lake Dalinor. Ecohydrology, 14: e2251

Bao Q, Ding J, Han L. 2022. Quantifying the effects of human activities and climate variability on runoff changes using variable infiltration capacity model. PLoS ONE, 17: e0272576

Berg P, Feldmann H, Panitz H J. 2012. Bias correction of high resolution regional climate model data. J Hydrol, 448-449: 80–92

Biskop S, Maussion F, Krause P, Fink M. 2016. Differences in the water-balance components of four lakes in the southern-central Tibetan Plateau. Hydrol Earth Syst Sci, 20: 209–225

Cao Y, Fu C, Wu H, Wu H, Zhang H, Yang M, Ji Z, Yu M, Dong L. 2022. Exploring methods to estimate ice sublimation and total water vapor flux of large lakes in China. J Geophys Res-Atmos, 127: e2022JD037095

Cao Y, Fu C, Yang M, Wu H, Wu H, Zhang H, Xia Y, Zhu Z. 2023. Exploring the drivers for changes in lake area in a typical arid region

during past decades. Water, 15: 3354

Che X, Feng M, Sexton J, Channan S, Sun Q, Ying Q, Liu J, Wang Y. 2019. Landsat-based estimation of seasonal water cover and change in arid and semi-arid Central Asia (2000–2015). Remote Sens, 11: 1323

Che X, Feng M, Sun Q, Sexton J O, Channan S, Liu J. 2021. The decrease in lake numbers and areas in Central Asia investigated using a landsat-derived water dataset. Remote Sens, 13: 1032

Chen F, Chen J, Huang W, Chen S, Huang X, Jin L, Jia J, Zhang X, An C, Zhang J, Zhao Y, Yu Z, Zhang R, Liu J, Zhou A, Feng S. 2019. Westerlies Asia and monsoonal Asia: Spatiotemporal differences in climate change and possible mechanisms on decadal to sub-orbital timescales. Earth-Sci Rev, 192: 337–354

Chen H, Liu J, Mao G, Wang Z, Zeng Z, Chen A, Wang K, Chen D. 2021. Intercomparison of ten ISI-MIP models in simulating discharges along the Lancang-Mekong River basin. Sci Total Environ, 765: 144494

Deng H, Tang Q, Yun X, Tang Y, Liu X, Xu X, Sun S, Zhao G, Zhang Y, Zhang Y. 2022. Wetting trend in Northwest China reversed by warmer temperature and drier air. J Hydrol, 613: 128435

Duarte R, Pinilla V, Serrano A. 2013. Is there an environmental Kuznets curve for water use? A panel smooth transition regression approach. Economic Model, 31: 518–527

Fang L, Tao S, Zhu J, Liu Y. 2018. Impacts of climate change and irrigation on lakes in arid northwest China. J Arid Environ, 154: 34–39

Feng Y, Zhang H, Tao S, Ao Z, Song C, Chave J, Le Toan T, Xue B, Zhu J, Pan J, Wang S, Tang Z, Fang J. 2022. Decadal lake volume changes (2003–2020) and driving forces at a global scale. Remote Sens, 14: 1032

Gao H, Bohn T J, Podest E, McDonald K C, Lettenmaier D P. 2011. On the causes of the shrinking of Lake Chad. Environ Res Lett, 6: 034021

Geng Q, Zhao Y, Sun S, He X, Wang D, Wu D, Tian Z. 2023. Spatio-temporal changes and its driving forces of irrigation water requirements for cotton in Xinjiang, China. Agric Water Manage, 280: 108218

Habersack H, Haspel D, Kondolf M. 2014. Large rivers in the anthropocene: insights and tools for understanding climatic, land use, and reservoir influences. Water Resour Res, 50: 3641–3646

Han E, Ines A V M, Koo J. 2019. Development of a 10-km resolution global soil profile dataset for crop modeling applications. Environ Model Software, 119: 70–83

Hao S, Li F, Li Y, Gu C, Zhang Q, Qiao Y, Jiao L, Zhu N. 2019. Stable isotope evidence for identifying the recharge mechanisms of precipitation, surface water, and groundwater in the Ebinur Lake basin. Sci Total Environ, 657: 1041–1050

Hattermann F F, Krysanova V, Gosling S N, Dankers R, Daggupati P, Donnelly C, Flörke M, Huang S, Motovilov Y, Buda S, Yang T, Müller C, Leng G, Tang Q, Portmann F T, Hagemann S, Gerten D, Wada Y, Masaki Y, Alemayehu T, Satoh Y, Samaniego L. 2017. Cross-scale intercomparison of climate change impacts simulated by regional and global hydrological models in eleven large river basins. Clim Change, 141: 561–576

He J, Yang K, Tang W, Lu H, Qin J, Chen Y, Li X. 2020. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China. Sci Data, 7: 25

Hoekstra A Y, Mekonnen M M, Chapagain A K, Mathews R E, Richter B D. 2012. Global monthly water scarcity: Blue water footprints versus blue water availability. PLoS ONE, 7: e32688

Hosseini-Moghari S M, Tang Q, Leng G, Xu X. 2022. Shrinking Lake Urmia: Causes, Future Projection and Implications. Cambridge: Cambridge University Press

Huang W, Chen F H, Feng S, Chen J H, Zhang X J. 2013. Interannual precipitation variations in the mid-latitude Asia and their association with large-scale atmospheric circulation. Chin Sci Bull, 58: 3962–3968

Huang Z, Tang Q, Lo M H, Liu X, Lu H, Zhang X, Leng G. 2019. The influence of groundwater representation on hydrological simulation and its assessment using satellite-based water storage variation. Hydrol Process, 33: 1218–1230

Jones R N, McMahon T A, Bowler J M. 2001. Modelling historical lake levels and recent climate change at three closed lakes, Western Victoria, Australia (c.1840–1990). J Hydrol, 246: 159–180

Katz D L. 2008. Water, economic growth, and conflict: Three studies. Dissertation for Doctoral Degree. Michigan: University of Michigan

Kayiranga A, Chen X, Ingabire D, Liu T, Li Y, Nzabarinda V, Ochege F U, Hirwa H, Duulatov E, Nthangeni W. 2024. Anthropogenic activities and the influence of desertification processes on the water cycle and water use in the Aral Sea basin. J Hydrol-Reg Stud, 51: 101598

Kezer K, Matsuyama H. 2006. Decrease of river runoff in the Lake Balkhash basin in Central Asia. Hydrol Process, 20: 1407–1423

Klein I, Dietz A J, Gessner U, Galayeva A, Myrzakhmetov A, Kuenzer C. 2014. Evaluation of seasonal water body extents in Central Asia over the past 27 years derived from medium-resolution remote sensing data. Int J Appl Earth Observ Geoinf, 26: 335–349

Kuznets S. 2019. Economic growth and income inequality. In: The Gap Between Rich and Poor. Routledge

Lei Y, Yang K, Wang B, Sheng Y, Bird B W, Zhang G, Tian L. 2014. Response of inland lake dynamics over the Tibetan Plateau to climate change. Clim Change, 125: 281–290

Lei Y, Yao T, Yang K, Bird B W, Tian L, Zhang X, Wang W, Xiang Y, Dai Y, Lazhu Y, Zhou J, Wang L. 2018. An integrated investigation of lake storage and water level changes in the Paiku Co basin, central Himalayas. J Hydrol, 562: 599–608

Liu X, Liu W, Yang H, Tang Q, Flörke M, Masaki Y, Müller Schmied H, Ostberg S, Pokhrel Y, Satoh Y, Wada Y. 2019. Multimodel assessments of human and climate impacts on mean annual streamflow in China. Hydrol Earth Syst Sci, 23: 1245–1261

Luo R, Yuan Q, Yue L, Shi X. 2021. Monitoring recent lake variations under climate change around the Altai mountains using multi-mission satellite data. IEEE J-STARS, 14: 1374–1388

Ma L, Wu J, Liu W, Abuduwaili J. 2014. Distinguishing between anthropogenic and climatic impacts on lake size: A modeling approach using data from Ebinur Lake in arid northwest China. J Limnol, 73: 350–357

Ma X, Zhu J, Zhang H, Yan W, Zhao C. 2020. Trade-offs and synergies in ecosystem service values of inland lake wetlands in Central Asia under land use/cover change: A case study on Ebinur Lake, China. Glob Ecol Conserv, 24: e01253

Ma X, Huang S, Huang Y, Wang X, Luo Y. 2024. Evaporation from the hypersaline Aral Sea in Central Asia. Sci Total Environ, 908: 168412

Maihemuti B, Aishan T, Simayi Z, Alifujiang Y, Yang S. 2020. Temporal scaling of water level fluctuations in shallow lakes and its impacts on the lake eco-environments. Sustainability, 12: 3541

Merz R, Parajka J, Blöschl G. 2009. Scale effects in conceptual hydrological modeling. Water Resources Res, 45: W09405

Micklin P. 2010. The past, present, and future Aral Sea. Lakes Reservoirs, 15: 193–213

Mohebzadeh H, Fallah M. 2019. Quantitative analysis of water balance components in Lake Urmia, Iran using remote sensing technology. Remote Sens Appl-Soc Environ, 13: 389–400

Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, Bingner R L, Harmel R D, Veith T L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Trans ASABE, 50: 885–900

Muñoz-Sabater J, Dutra E, Agustí-Panareda A, Albergel C, Arduini G, Balsamo G, Boussetta S, Choulga M, Harrigan S, Hersbach H, Martens B, Miralles D G, Piles M, Rodríguez-Fernández N J, Zsoter E, Buontempo C, Thépaut J N. 2021. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. Earth Syst Sci Data, 13: 4349–4383

Nilsson C, Reidy C A, Dynesius M, Revenga C. 2005. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. Science, 308: 405–408

Peng D, Zhou T. 2017. Why was the arid and semiarid northwest China getting wetter in the recent decades? J Geophys Res-Atmos, 122: 9060–9075

Pham-Duc B, Sylvestre F, Papa F, Frappart F, Bouchez C, Crétaux J F. 2020. The Lake Chad hydrology under current climate change. Sci Rep, 10: 5498

Pritchard H D. 2019. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress. Nature, 569: 649–654

Rad A M, Kreitler J, Abatzoglou J T, Fallon K, Roche K R, Sadegh M. 2022. Anthropogenic stressors compound climate impacts on inland lake dynamics: The case of Hamun Lakes. Sci Total Environ, 829: 154419

Ran Y H, Li X, Lu L, Li Z Y. 2012. Large-scale land cover mapping with the integration of multi-source information based on the Dempster-Shafer theory. Int J Geogr Inf Sci, 26: 169–191

Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, Berry J A, Field C B, Dazlich D A, Zhang C, Collelo G D, Bounoua L. 1996. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. J Clim, 9: 676–705

Shi F, Li X, Zhao S, Ma Y, Wei J, Liao Q, Chen D. 2024. Evaporation and sublimation measurement and modeling of an alpine saline lake influenced by freeze-thaw on the Qinghai-Tibet Plateau. Hydrol Earth Syst Sci, 28: 163–178

Stern D I. 2004. The rise and fall of the environmental Kuznets curve. World Dev, 32: 1419–1439

Sun S, Fang C. 2018. Water use trend analysis: A non-parametric method for the environmental Kuznets curve detection. J Cleaner Product, 172: 497–507

Swain S S, Mishra A, Sahoo B, Chatterjee C. 2020. Water scarcity-risk assessment in data-scarce river basins under decadal climate change using a hydrological modelling approach. J Hydrol, 590: 125260

Tang Q, Oki T, Kanae S. 2006. A distributed biosphere hydrological model (DBHM) for large river basin. Proc Hydraulic Eng, 50: 37–42

Tang Q, Oki T, Kanae S, Hu H. 2007. The influence of precipitation variability and partial irrigation within grid cells on a hydrological simulation. J Hydrometeorol, 8: 499–512

Tang Q, Oki T, Kanae S, Hu H. 2008. Hydrological cycles change in the Yellow River basin during the last half of the twentieth century. J Clim, 21: 1790–1806

Tang Q, Liu X, Zhou Y, Wang P, Li Z, Hao Z, Liu S, Zhao G, Zhu B, He X, Li F, Yang G, He L, Deng H, Wang Z, Ao X, Wang Z, Gaffney P P J, Luo L. 2022. Climate change and water security in the northern slope of the Tianshan Mountains. Geogr Sustainab, 3: 246–257

Tao S, Fang J, Zhao X, Zhao S, Shen H, Hu H, Tang Z, Wang Z, Guo Q. 2015. Rapid loss of lakes on the Mongolian Plateau. Proc Natl Acad Sci USA, 112: 2281–2286

Voisin N, Liu L, Hejazi M, Tesfa T, Li H, Huang M, Liu Y, Leung L R. 2013. One-way coupling of an integrated assessment model and a water resources model: Evaluation and implications of future changes over the US Midwest. Hydrol Earth Syst Sci, 17: 4555–4575

Wang J, Ding J, Li G, Liang J, Yu D, Aishan T, Zhang F, Yang J, Abulimiti A, Liu J. 2019. Dynamic detection of water surface area of Ebinur Lake using multi-source satellite data (Landsat and Sentinel-1A) and its responses to changing environment. Catena, 177: 189–201

Wang Q, Chen X, Peng W, Liu X, Dong F, Huang A, Wang W. 2021. Changes in runoff volumes of inland terminal lake: A case study of Lake Daihai. Earth Space Sci, 8: e2021EA001954

Wang R, Ding J, Ge X, Wang J, Qin S, Tan J, Han L, Zhang Z. 2023. Impacts of climate change on the wetlands in the arid region of Northwestern China over the past 2 decades. Ecol Indicat, 149: 110168

Wang S, Xu C, Zhang W, Chen H, Zhang B. 2022. Human-induced water loss from closed inland Lakes: Hydrological simulations in China's Daihai lake. J Hydrol, 607: 127552

Wang Y, Liu Z, Yao J, Bayin C, Zhu Y. 2018. Hydrological response of runoff to climate change of typical tributaries in Ebinur Lake Basin of Xinjiang. Water Resour, 45: 160–168

Wang Y, Gu X, Yang G, Yao J, Liao N. 2021. Impacts of climate change and human activities on water resources in the Ebinur Lake Basin, Northwest China. J Arid Land, 13: 581–598

Wei Q, Halike A, Yao K, Chen L, Balati M. 2022. Construction and optimization of ecological security pattern in Ebinur Lake Basin based on MSPA-MCR models. Ecol Indicat, 138: 108857

Wieder W, Boehnert J, Bonan G, Langseth M. 2014. Regridded harmonized world soil database v1.2. ORNL DAAC

Wine M L, Laronne J B. 2020. In water-limited landscapes, an Anthropocene exchange: Trading lakes for irrigated agriculture. Earths Future, 8: e2019EF001274

Wu J, Liu W, Zeng H, Ma L, Bai R. 2014. Water quantity and quality of six lakes in the arid Xinjiang region, NW China. Environ Process, 1: 115–125

Xiao K, Griffis T J, Baker J M, Bolstad P V, Erickson M D, Lee X, Wood J D, Hu C, Nieber J L. 2018. Evaporation from a temperate closed-basin lake and its impact on present, past, and future water level. J Hydrol, 561: 59–75

Xu Y, Yu L, Peng D, Zhao J, Cheng Y, Liu X, Li W, Meng R, Xu X, Gong P. 2020. Annual 30-m land use/land cover maps of China for 1980–2015 from the integration of AVHRR, MODIS and Landsat data using the BFAST algorithm. Sci China Earth Sci, 63: 1390–1407

Yang X, Wang N, Chen A, He J, Hua T, Qie Y. 2020. Changes in area and water volume of the Aral Sea in the arid Central Asia over the period of 1960–2018 and their causes. Catena, 191: 104566

Yao J, Chen Y, Guan X, Zhao Y, Chen J, Mao W. 2022. Recent climate and hydrological changes in a mountain-basin system in Xinjiang, China. Earth-Sci Rev, 226: 103957

Yapiyev V, Sagintayev Z, Inglezakis V J, Samarkhanov K, Verhoef A. 2017. Essentials of endorheic basins and lakes: A review in the context of current and future water resource management and mitigation activities in Central Asia. Water, 9: 798

Yu H, Zhang F, Kung H, Johnson V C, Bane C S, Wang J, Ren Y, Zhang Y. 2017. Analysis of land cover and landscape change patterns in Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve, China from 1972 to 2013. Wetlands Ecol Manage, 25: 619–637

Zeng H, Wu B, Zhu W, Zhang N. 2019. A trade-off method between environment restoration and human water consumption: A case study in Ebinur Lake. J Cleaner Product, 217: 732–741

Zhang F, Tiyip T, Johnson V C, Kung H, Ding J, Sun Q, Zhou M, Kelimu A, Nurmuhammat I, Chan N W. 2015. The influence of natural and human factors in the shrinking of the Ebinur Lake, Xinjiang, China, during the 1972–2013 period. Environ Monit Assess, 187: 4128

Zhang J, Ding J, Wu P, Tan J, Huang S, Teng D, Cao X, Wang J, Chen W. 2020. Assessing arid inland lake watershed area and vegetation response to multiple temporal scales of drought across the Ebinur Lake Watershed. Sci Rep, 10: 1354

Zhang X, Xiong Z, Tang Q. 2017. Modeled effects of irrigation on surface climate in the Heihe River Basin, Northwest China. J Geophys Res-Atmos, 122: 7881–7895

Zhang Y, Wang N, Yang X, Mao Z. 2022. The dynamic changes of Lake Issyk-Kul from 1958 to 2020 based on multi-source satellite data. Remote Sens, 14: 1575

Zhang Y, An C, Zheng L, Liu L, Zhang W, Lu C, Zhang Y. 2023. Assessment of lake area in response to climate change at varying elevations: A case study of Mt. Tianshan, Central Asia. Sci Total Environ, 869: 161665

Zhao G, Li Y, Zhou L, Gao H. 2022. Evaporative water loss of 1.42 million global lakes. Nat Commun, 13: 3686

Zheng L, Xia Z, Xu J, Chen Y, Yang H, Li D. 2021. Exploring annual lake dynamics in Xinjiang (China): Spatiotemporal features and driving climate factors from 2000 to 2019. Clim Change, 166: 36

Zhou J, Wang L, Zhang Y, Guo Y, Li X, Liu W. 2015. Exploring the water storage changes in the largest lake (Selin Co) over the Tibetan Plateau during 2003–2012 from a basin-wide hydrological modeling. Water Resources Res, 51: 8060–8086

Zhu H, Zheng B, Nie W, Fei L, Shan Y, Li G, Liang F. 2024.

Optimization of maize irrigation strategy in Xinjiang, China by AquaCrop based on a four-year study. Agric Water Manage, 297: 108816

Zolghadr-Asli B, Naghdyzadegan Jahromi M, Wan X, Enayati M, Naghdizadegan Jahromi M, Tahmasebi Nasab M, Tiefenbacher J P, Pourghasemi H R. 2023. Uncovering the depletion patterns of inland water bodies via remote sensing, data mining, and statistical analysis. Water, 15: 1508

Zucca C, Middleton N, Kang U, Liniger H. 2021. Shrinking water bodies as hotspots of sand and dust storms: The role of land degradation and sustainable soil and water management. Catena, 207: 105669

(责任编委: 李小雁)