

强人类活动下半干旱地区湖泊水资源损失过程重建 ——以岱海为例^{*}

杨腾腾^{1,2}, 吴挺峰^{1**}, 嵇晓燕^{3**}, 秦伯强¹, 袁承梅⁴, 胡润涛^{1,2}, 何翔宇^{1,5}

(1:中国科学院南京地理与湖泊研究所,南京 210008)

(2:中国科学院大学,北京 100049)

(3:中国环境监测总站,北京 100012)

(4:江苏省水文水资源勘测局,南京 210029)

(5:河海大学水文水资源学院,南京 210098)

摘要: 湖泊水资源持续损失已经成为影响半干旱地区经济社会发展的主要问题之一。然而,由于缺少长期连续的湖泊动态监测数据,该地区湖泊水资源损失过程及其与气候变化和经济社会发展之间的关系没有得到详细的评估。针对此问题,本文以位于半干旱地区的岱海为研究对象,利用改进型归一化差异水体指数从1986—2020年258景Landsat遥感影像中提取湖泊水体边界,结合湖泊水位数据,重建了近60 a岱海水资源量动态变化过程。结果表明:1961—2019年期间,岱海急剧萎缩,湖泊水量共减少 $9.88 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。同时水量变化趋势分段函数拟合结果表明,岱海水量变化可分为3个阶段:1961—1978年,水量损失速率为 $0.726 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ 的缓慢损失阶段;1979—2004年,水量损失速率为 $2.10 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ 的快速损失阶段;2005—2019年,水量损失速率为 $3.39 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$ 的加速损失阶段。相关分析表明:岱海水量损失与流域经济社会发展密切相关。其中,改革开放后流域农业开发利用规模和强度的提高是导致岱海水量损失的主要原因;“西部大开发”战略实施后工业经济的兴起则加速了岱海水量的损失。据此,本研究建议干旱半干旱地区湖泊流域经济社会的发展应与其水资源承载力相协调。

关键词: 岱海;湖泊萎缩;遥感重建;驱动力分析;人类活动;内流湖

Reconstruction of the depletion process of lake water resources in semi-arid areas under strong human activities—Taking Lake Daihai as an example^{*}

Yang Tengteng^{1,2}, Wu Tingfeng^{1**}, Ji Xiaoyan^{3**}, Qin Boqiang¹, Luan Chengmei⁴, Hu Runtao^{1,2} & He Xian-gyu^{1,5}

(1: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

(3: China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, P.R.China)

(4: Jiangsu Hydrological and Water Resources Survey Bureau, Nanjing 210029, P.R.China)

(5: College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

Abstract: The continuous loss of lake water resources has become one of the main problems affecting the economic and social development in semi-arid areas. However, due to the lack of long-term continuous monitoring data of lake dynamics, the process of lake water resources loss and its relationship with climate change and economic and social development in this area have not been evaluated in detail. To solve this problem, this paper takes Lake Daihai, which is located in a semi-arid area, as the research object, using the improved normalized difference water body index to extract the boundary of lake water body from 258 Landsat remote

* 2021-10-28 收稿;2022-02-17 收修改稿。

国家自然科学基金项目(41790425,41971047,41621002,42071118)和中国科学院“西部之光”项目(E129030101)联合资助。

** 通信作者; E-mail: tfwu@niglas.ac.cn, jixy@cnemc.cn.

sensing images from 1986 to 2020, and reconstructs the dynamic change process of water resources in Lake Daihai for last 60 years by integrating lake water level data. The results show that from 1961 to 2019, the Lake Daihai shrank sharply, and the lake water volume decreased by $9.88 \times 10^8 \text{ m}^3$. At the same time, the fitting results of the piecewise function of the water volume change trend show that the water volume change of Lake Daihai can be divided into three stages: from 1961 to 1978, the slow loss stage with the water loss rate of $0.726 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$; from 1979 to 2004, the rapid loss stage with the water loss rate of $2.10 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$; from 2005 to 2019, the accelerated loss stage with the water loss rate of $3.39 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$. Correlation analysis shows that the loss of water volume of Lake Daihai is closely related to the economic and social development of the river basin. Among them, the increase in the scale and intensity of agricultural development and utilization in the watershed after the reform and opening-up is the main reason for the loss of water volume of the Lake Daihai; the rise of the industrial economy after the implementation of the "Western Development" strategy accelerated the loss of water volume of the Lake Daihai. Accordingly, this study suggests that the economic and social development of lake basins in arid and semi-arid regions should be coordinated with their water resource carrying capacity.

Keywords: Lake Daihai; lake shrinkage; remote sensing reconstruction; driving force analysis; human activities; inner lakes

湖泊是陆地水圈和水文循环的重要组成部分^[1],具有调节径流、改善区域生态环境、维持生物多样性等重要功能^[2].然而,近年来,由于全球变化和人类活动的加剧,我国干旱半干旱区湖泊正面临严重的萎缩问题^[3-4].例如,内蒙古湖泊总面积从1987年的 4160 km^2 减少到2010年的 2900 km^2 ,减少了30.3%,而相应的湖泊数量从427个减少到282个,有145个湖泊完全消失^[5].湖泊水资源损失也引发了湿地面积萎缩^[6-7]、水体咸化^[8-10]、水质恶化^[11-12]、生物多样性减少^[13]等一系列湖泊生态问题,严重损害了干旱半干旱地区湖泊生态系统服务价值^[14],制约了流域经济社会可持续发展^[15].

干旱半干旱区内流湖泊萎缩是水量收支失衡(收入小于支出)导致的^[16].许多研究表明气候变化和人类活动是导致这种失衡的两个原因,且多数时候是两者协同作用的结果^[17-18],如艾比湖^[19]、罗布泊^[19]、咸海^[20]、岱海^[21]等.通常来说,气候变化是一个缓慢的过程,其对湖泊萎缩的作用是长期过程;而湖泊对人类活动的响应往往是快速而显著的^[19].不过,由于缺少长期连续气象、湖泊水文、社会经济数据,在实际研究中区分这两种原因的主从关系会变得非常困难.以半干旱地区典型湖泊——岱海为例,针对近年来岱海水资源持续减少这一现象,早期有学者综合分析湖泊沉积岩芯多环境指标并初步推断出人类活动影响是岱海萎缩、环境恶化的一个重要原因^[22];部分学者通过利用测年技术重建了岱海湖泊演变过程,发现历史时期长时间过程中气候变化是影响岱海湖泊演化的主导因素,20世纪中后期人类不合理利用水资源对湖面高程变化的影响加剧^[23-24].有学者认为气候变化仍是近40年来岱海萎缩的根本原因,如陈海英等^[25]认为风速和蒸发量是影响岱海湖面面积变化的主要因子;曹建廷等^[26]认为湖泊流域的降水量是控制岱海水位波动的主要原因,同时也有学者认为湖区人类活动对岱海水文循环扰动日益增强,甚至已占据主导地位,如庞雪敏等^[27]从土地利用类型变化的角度出发探究岱海湖面萎缩的驱动因子是林地面积增大,植被增加;赵辉等^[28]和周云凯等^[29]均发现工农业用水量增加是岱海水量持续减少的主要原因;Chen等^[30]和Wang等^[31]发现人类大量开采地下水导致岱海严重退化,可见岱海水资源损失的主要原因并没有形成一致的看法.此外,缺少长期连续数据也妨碍了从时间上理解湖泊萎缩过程及其影响因素变化^[32].例如,尽管已经证明经济社会发展会加剧干旱半干旱地区湖泊萎缩^[33-34],但是鲜有研究关注该地区经济社会发展不同阶段湖泊水资源量损耗差异,而这对于科学合理地制订该地区经济社会可持续发展战略是有价值的^[35].因此,开展干旱半干旱地区湖泊水资源动态监测,获取长期连续的自然环境和社会经济数据,是充分理解该地区湖泊水资源损失过程及主要驱动机制的前提.

湖泊水资源动态监测的主要手段有传感器原位观测^[36]、湖泊沉积物测年技术^[37-38]、卫星遥感技术^[39-40]等.其中卫星遥感技术以广覆盖、低成本的优点被广泛应用于湖泊水情动态监测研究^[41].例如:基于多源遥感影像提取湖泊边界获取湖泊面积^[42],利用卫星雷达测高技术监测湖面高程变化^[43-44].但是这些研究多关注湖泊水面的动态变化^[15,32,39,41,45],利用遥感技术监测湖泊水量变化的研究相对较少^[46-47].张国庆等^[48]基于ICESat和Landsat数据进行了中国十大湖泊水量平衡估算;王志杰等^[49]利用月水量平衡模型探究了呼伦湖水量变化;昝婵娟等^[50]基于遥感影像和数字测深模型提取了近30年来咸海面积、水位变化信息,重建咸海水位—面积—库容曲线,探明咸海水量变化特征.可见由于缺乏长期连续实测水位数据的支撑,加之受限

于卫星数据的可获得性,这些研究多关注于湖泊水量近30年的变化,不能覆盖我国的几个主要经济社会发展阶段。

基于此,本研究以岱海为研究对象,从1986—2020年间的遥感影像中提取岱海湖岸线,并结合岱海实测水位和水下地形数据,推算1961—2020年间岱海的逐年水量。据此,结合同期气象水文和社会经济数据,利用趋势检验、偏相关和逐步多元回归等统计学方法,对岱海萎缩过程及其影响因素开展计算分析。本研究试图明晰:(1)近60年岱海的萎缩过程;(2)导致岱海持续萎缩的主要原因。以期为半干旱湖泊的水资源开发利用与流域经济发展提供科学依据。

1 研究区概况

岱海($40^{\circ}32' \sim 40^{\circ}37' N, 112^{\circ}37' \sim 112^{\circ}46' E$) (图1)水面东西长10 km,南北宽6.5 km,呈椭圆形^[51],湖面积历年最大为 177.5 km^2 ^[52],2019年湖泊面积为 51.32 km^2 ,实测蓄水量为 $2.16 \times 10^8 \text{ m}^3$,是内蒙古第三大内陆湖^[53],曾具有供水、发电、养殖、调节水资源和气候等多重功能^[2]。岱海流域面积为 2312.75 km^2 ,其中85%以上位于凉城县境内^[54],行政区划上隶属于内蒙古自治区乌兰察布市,气候带上属于干旱少雨、蒸发旺盛^[52]的温带大陆性半干旱季风气候带^[55]。岱海主要入湖河道22条^[56],无出湖河道;补给系数仅为17.2,是典型的内流型湖泊^[55]。岱海是内蒙古高原东南部最重要的生态单元之一,对维系流域经济社会发展和生态环境健康具有重要价值^[57]。

2 数据和方法

2.1 数据

研究基础数据包括遥感影像数据、水位数据、气象数据、入湖径流量数据和社会经济数据。其中遥感影像数据下载自美国地质调查局(www.usgs.gov/)及地理空间数据云(www.gscloud.cn/),包括1986—2020年Landsat系列数据258景,各景影像质量良好,云量小于5%,空间分辨率为30 m。水位数据(海拔高程)摘自于《内蒙古内陆河水文年鉴》及相关研究^[58-60],时间序列为1961—2019年。气象数据选用

了岱海湖边以西的凉城气象站^[21]气象数据,数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)的“中国地面气候资料日值数据集”,主要包括1961—2020年日均气温、日降水量、日均风速、日均日照时数等,而潜在蒸散量(ET_0)则采用联合国粮农组织(FAO)推荐的Penman-Monteith公式^[61]计算,公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (1)$$

式中, ET_0 为潜在蒸散量(mm/d); R_n 为冠层表面太阳净辐射量($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$); G 为土壤热通量($\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$); Δ 为饱和水汽压曲线斜率($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); γ 为干湿常数($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); T 为日平均气温($^{\circ}\text{C}$); u_2 为地面以上2 m处风速(m/s); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa)。同时利用干燥度指数(AI)来衡量区域气候干燥程度,一般按照如下公式^[62]计算:

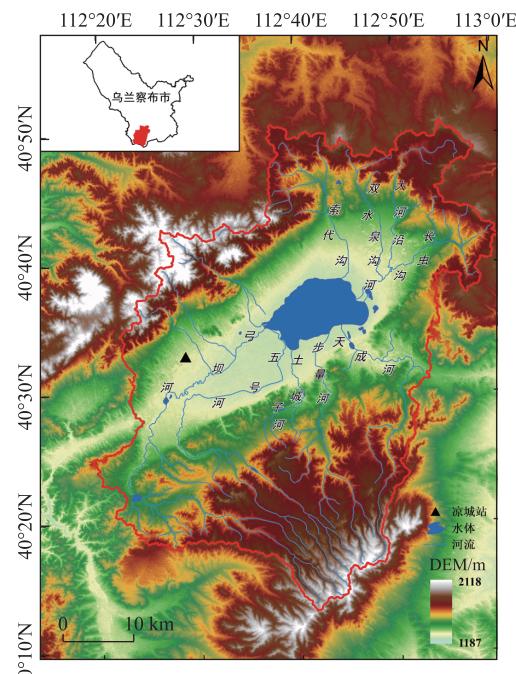


图1 岱海流域地貌水系图(湖面水系数据来源于国家基础地理信息数据库2017年数据)

Fig.1 Geomorphological water system map
of Lake Daihai Watershed

(Lake water system data comes from the
data of National Basic Geographic
Information Database in 2017)

$$AI = ET_0/P \quad (2)$$

式中, ET_0 为潜在蒸散量, P 为降水量.

入湖径流量数据参考文献^[63], 时间序列为 1961—1994 年. 而社会经济数据则选用 1986—2020 年凉城县的人口数、国内生产总值(GDP)、工业生产总值、农业生产总值, 数据来源于《内蒙古自治区统计年鉴》. 由于数据获取存在一些客观原因, 各种数据时间序列不完全一致.

2.2 方法

2.2.1 湖面面积重建 首先对选取的遥感影像进行辐射定标、大气校正、几何校正以及投影转换等预处理, 之后利用水体指数法对湖泊水体进行提取. 作为划分开阔水域特征最广泛、最有效的方法之一, 改进的归一化水体指数(*MNDWI*)利用了水体与其他地物在中红外波段反射率上的差异, 考虑抑制植被、最大区分周围建筑物与土壤等因素^[64], 被证明可以有效利用于干旱半干旱地区的水体提取^[65], 其计算公式如下:

$$MNDWI = \frac{\rho_{\text{Green}} - \rho_{\text{SWIR}}}{\rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{SWIR}}} \quad (3)$$

为了准确地提取湖泊边界, 本研究根据每景 Landsat 影像的 *MNDWI* 值分布采用不同的阈值, 而后结合人工目视解译对提取结果进行修正, 误差在 1 个像元内, 最后利用空间计算统计湖面面积. 所有的操作均在 ENVI 5.2(EVIS Inc., USA)、ArcGIS 10.7(ESRI Inc., USA) 中实现. 所有数据均采用 Albers 等面积圆锥投影坐标系.

2.2.2 湖泊萎缩强度 为了更好地描述不同时期湖泊水体面积的相对变化程度, 引入湖泊萎缩强度(*ILLI*)来定量描述某一时间段湖泊萎缩强弱的相对程度. 假定某一时期内湖泊萎缩总量为 A , 该时期可以分成 N 个不同发展阶段, 每个阶段的湖泊萎缩量为 A_i ($i=1, 2, 3, \dots, N$), 则每个阶段湖泊萎缩强度为:

$$ILLI = A_i/A \quad (4)$$

式中, $ILLI \in (-1, 1)$, 当 $ILLI > 0$ 时, 表明湖面面积缩小; 当 $ILLI < 0$ 时, 表示湖面面积增大. *ILLI* 的大小表征了湖泊萎缩的相对强度^[66].

2.2.3 湖泊水量变化 利用湖面面积和湖泊水位重建岱海湖泊水量变化过程, 湖泊水量变化 ΔV 按照如下公式^[67]计算:

$$\Delta V = \frac{1}{3}(H_2 - H_1)(S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 \cdot S_2}) \quad (5)$$

式中, H_1, H_2 为计算时段始末的湖泊水位(m); S_1, S_2 为其对应的湖面面积(m^2).

2.2.4 湖泊水位—水量曲线 根据 2019 年实测岱海水下地形, 计算 2019 年岱海水量, 并利用湖泊水位及遥感提取的湖面面积计算湖泊水量变化, 估算 1986—2019 年岱海水量, 构建岱海水位—水量曲线.

2.3 统计分析

采用 Mann-Kendall 检验(M-K 检验)^[20]、Mann-Whitney 突变检测^[68]结合累计距平曲线^[69]对岱海萎缩特征要素(水位、湖面面积和水量)和潜在的影响因素(气象、水文和社会经济要素)时间序列的趋势变化以及突变程度进行探究. 以倾斜度 z 来量化单调趋势, 当 z 为正时, 表示上升趋势, 当 z 为负时, 表示下降趋势. P 值表示显著性水平.

采用 SPSS 26.0 软件(IBM Inc., USA)计算各时间序列之间的相关及偏相关性, 以 Pearson 相关系数(r)表征(偏)相关性强弱、 P 值表示显著性水平: $|r|$ 越接近 1, (偏)相关性越强; $P < 0.05$ 表示在 0.05 水平上显著(偏)相关, $P < 0.01$ 表示在 0.01 水平上显著(偏)相关^[20]. 在此基础上, 采用多元线性回归模型, 进一步衡量各要素的相对贡献. 最后采用 Origin 2018 软件(OriginLab Inc., USA)对时间序列开展统计分析并绘制曲线图.

3 结果

3.1 岱海萎缩特征要素

3.1.1 水位 1961—2019 年间岱海年均水位时间序列的 M-K 检验结果表明: 岱海水位从 1961 年的 989.80 m 显著下降到 2019 年的 978.95 m ($z = -10.418, P < 0.01$). 59 年水位共下降了 10.85 m, 下降速率为 0.178 m/a.

岱海水位年均值分段拟合结果(图 2)表明: 岱海水位年均值变化过程可分为 3 个阶段: 第 1 阶段

(1961—1978年),湖泊水位呈缓慢下降趋势($P<0.01$),下降速率仅为0.060 m/a;第2阶段(1979—2004年),岱海水位呈快速下降趋势($P<0.01$),下降速率为0.199 m/a;第3阶段(2005—2019年),岱海水位呈加速下降趋势($P<0.01$),下降速率为0.441 m/a。总体呈现先慢后快的变化趋势。

岱海多年月均水位介于985.76 m(4月)到985.50 m(12月)之间,均值为985.69 m。回归分析结果表明,多年月均水位呈现逐年显著下降趋势($y=-0.0225x+985.8, P<0.01$)。在消除这种下降趋势的情况下,多年月均水位年变化呈双峰型,分别在4—5月和8—9月达到峰值(图3)。

第一阶段内岱海1971—1978年月均水位年变化模式(图4)为:1—3月水位逐渐增加,4月水位为全年最高值,而后湖泊水位逐渐下降,7—9月汛期,湖泊水位上升,9月水位与4月水位相差不大,汛期结束后湖泊水位下降。1971—1978年月均水位年变化幅度为-0.009 m/a。第三阶段内岱海2011—2018年月均水位变化模式(图4)为:1月水位值最大,之后则呈现显著下降,虽然汛期补给量大,湖泊水位在8月稍有上涨,但全年水位总体呈现显著下降趋势($z=-4.183, P<0.01$)。2011—2018年月均水位年变化幅度为-0.04 m/a。

3.1.2 湖面面积

遥感提取的1986—2020年岱海岸线向湖心退缩显著(图5)。其中,西南段湖岸线向湖心平均退缩6 km;东南和东北段湖岸线向湖心平均退缩了约2 km;西北段湖岸线向湖心退缩不足1 km,缩进速度相对缓慢。近35年来,岱海岸线几何中心持续向东北方向移动。

随着岸线的退缩,1986—2020年岱海年均湖面面积以 $2.16 \text{ km}^2/\text{a}$ 的速率自1986年的 125.07 km^2 缩减到2020年的 49.55 km^2 (图6)。ILLI统计结果(表1)显示在过去35年中每5年一个时间段,每个时间段内湖泊面积均呈现萎缩状态:1986—2000年岱海萎缩强度较高,其所包含的3个时间段内岱海湖面面积均减小 12 km^2 以上;2000—2005年湖泊萎缩强度较低,5年内湖泊面积仅减少 4.1 km^2 ;2005—2010年萎缩强度有所恢复;2010—2020年萎缩强度约 $10 \text{ km}^2/5 \text{ a}$ 。M-K检验结果表明:1986—2020年湖泊面积总体呈显著的下降趋势($z=-8.095, P<0.01$)。同时相关性分析结果表明,岱海水位与面积呈显著的正相关关系($r=0.68, P<0.01$)。

3.1.3 水量

岱海水位—水量曲线显示(图7),岱海水量随水位单调递增,两者呈显著正相关关系($r=0.99, P<0.01$)。该曲线拟合方程为:

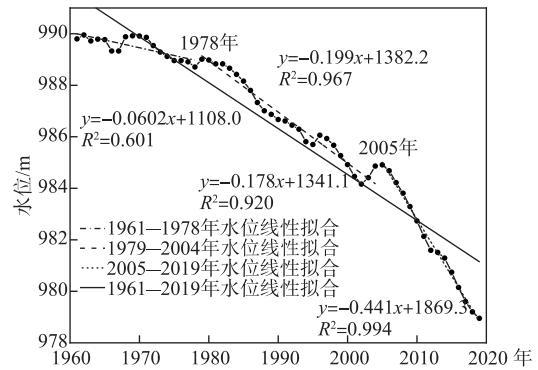


图2 1961—2019年岱海水位变化

Fig.2 Changes in the water level of Lake Daihai from 1961 to 2019

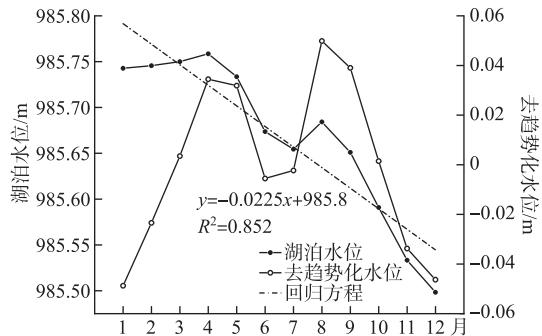


图3 岱海多年月均水位年变化

Fig.3 Annual variation of average monthly water level in Lake Daihai

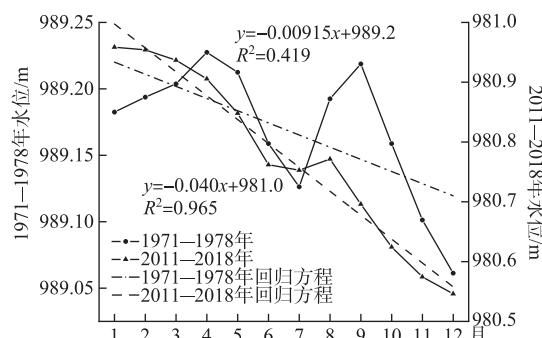


图4 不同时间段湖泊水位月变化

Fig.4 Monthly changes in lake water level over different time periods

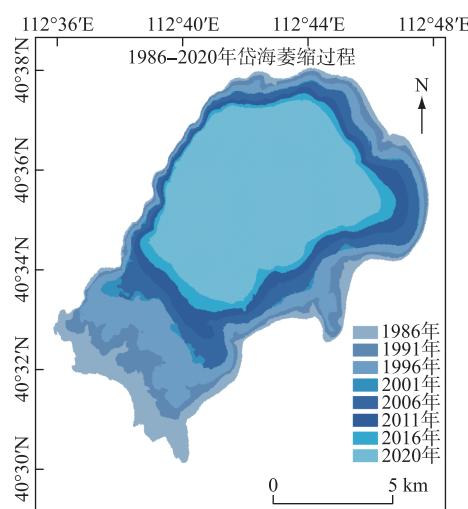


图 5 1986—2020 年岱海海岸线变化过程

Fig.5 The coastline change process of Lake Daihai from 1986 to 2020

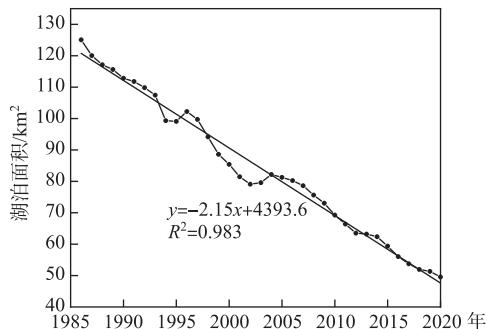


图 6 岱海 1986—2020 年年均湖面面积变化

Fig.6 Lake area changes in Lake Daihai from 1986 to 2020

表 1 年际湖泊面积变化量和 ILLI 统计

Tab.1 Interannual lake area change and ILLI statistics

时间段	面积变化量/km ²	ILLI
1986—1990 年	-12.3	0.16
1990—1995 年	-13.7	0.18
1995—2000 年	-13.7	0.18
2000—2005 年	-4.1	0.05
2005—2010 年	-12.0	0.16
2010—2015 年	-9.9	0.13
2015—2020 年	-9.8	0.13

$$y = -6.08 \times 10^9 x + 3.13 \times 10^6 x^2 + 2.95 \times 10^{12} \quad (6)$$

式中, y 、 x 分别代表水量 (m^3) 和水位 (m).

依据公式(6)计算得到的 1961—2019 年逐年平均水量显示(图 8), 近 60 年岱海水量呈显著减少趋势 ($P < 0.01$), 共减少 $9.88 \times 10^8 \text{ m}^3$, 减少速率为 $1.74 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$. 对应水位下降的 3 个阶段, 岱海水量在第一、第二和第三阶段的损失速率分别为 0.726×10^7 、 2.10×10^7 、 $3.39 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$, 分别可定义为岱海水量缓慢损失阶段、快速损失阶段和加速损失阶段. 其中加速损失阶段的损失速率为缓慢变化阶段和快速损失阶段损失率的 4.7 和 1.6 倍. 此外 Mann-Whitney 突变检测结果表明岱海年均水量变化过程线在 1978 年、2005 年分别存在 -3.73×10^8 、 $-3.35 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的减少突变 ($P < 0.01$).

3.2 岱海萎缩的影响因素

3.2.1 气象因素 岱海流域 1961—2020 年年均气温、潜在蒸散发量、降水量、干燥度、风速和日照时数分别为 $(5.69 \pm 0.78)^\circ\text{C}$ 、 $(984.3 \pm 56.9) \text{ mm}$ 、 $(414.2 \pm 100.7) \text{ mm}$ 、 (2.54 ± 0.72) 、 $(2.21 \pm 0.36) \text{ m/s}$ 、 $(2963.1 \pm 137.8) \text{ h}$ (图 9). 1961—2020 年间气象要素年均值的 MK 检验结果表明: 气温以 $0.03^\circ\text{C}/\text{a}$ 的速度显著升高 ($P < 0.01$); 风速以 -0.0133 m/(s·a) 的速度显著下降; 日照时数以 -3.39 h/a 的速度显著下降; 其他气象要素均无显著变化趋势. 同时, 分段趋势分析结果表明(表 2): 第一阶段, 各项气象要素变化趋势均不显著; 第二阶段, 年均温呈显著上升趋势 ($P < 0.01$)、年均风速和日照时数呈显著下降趋势 ($P < 0.01$), 年均潜在蒸散发量和干燥度降低、降水量增加但变化趋势不显著; 第三阶段, 年均潜在蒸散发量呈现显著增加趋势 ($P < 0.01$), 其他气象要素不具显著性变化趋势. 此外, 相关分析表明: 湖泊水量与气温呈显著负相关 ($r = -0.687, P < 0.01$), 与风速和日照时数均呈显著正相关 ($r = 0.631, r = 0.485, P < 0.01$).

从 1961—2020 年间的气象要素月均值变化(图 9)来看, 多年月平均气温、降水量最大值均出现在 7 月, 最小值均出现在 1 月. 多年月平均潜在蒸散发量最大值出现在 6 月, 最小值出现在 1 月. 多年月平均干燥度则与上述要素的月变化相反. 多年月平均日照时数为 5 月最多, 12 月最少. 多年月平均风速为 4 月最大, 8 月最小.

3.2.2 水文因素 1961—1994 年岱海入湖径流量时间序列趋势分析结果显示(图 10): 岱海入湖径流量呈波动下降趋势, 线性倾向率为 $-0.024 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 从 1961 年的 $1.109 \times 10^8 \text{ m}^3$ 下降到了 1994 年的 $0.282 \times 10^8 \text{ m}^3$, 下降了 74.6%. MK 趋势检验结果 ($z = -4.35, P < 0.01$)也表明在过去 35 年中岱海入湖径流量总体呈现显著的下降趋势.

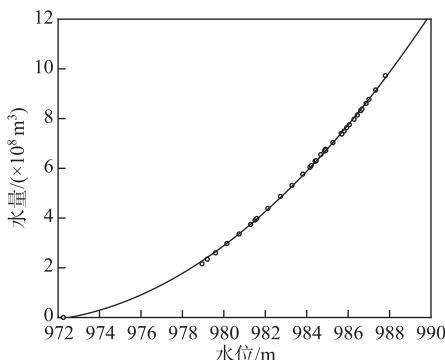


图 7 岱海水位—水量曲线

Fig.7 Fitting curves between lake level
and water volume of Lake Daihai

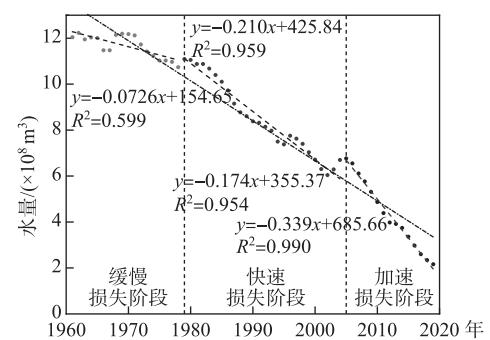


图 8 1961—2019 年岱海年均水量变化

Fig.8 Annual average water volume change in
Lake Daihai from 1961 to 2019

表 2 1961—2020 年凉城气象站总体和 3 个阶段气象要素多年平均值和年均值变化趋势 M-K 检验结果

Tab.2 M-K test results of the multi-year average and annual average change trends of the overall and
three-stage meteorological elements of Liangcheng Meteorological Station from 1961 to 2020

研究时段	气温/℃	潜在蒸散发量/mm	降水量/mm	干燥度	风速/(m/s)	日照时数/h
1961—2020 年	均值	5.69	984.3	414.2	2.54	2963.1
	趋势	5.372 **	0.179	-0.663	0.829	-4.912 **
1961—1978 年	均值	5.10	988.6	435.7	2.51	3013.1
	趋势	0.493	1.136	0.606	-0.379	1.706
1979—2004 年	均值	5.74	965.6	412.9	2.48	2978.4
	趋势	3.308 **	-1.807	0.661	-0.992	-3.617 **
2005—2020 年	均值	6.29	1010.0	392.1	2.67	2881.9
	趋势	0.180	2.476 *	0.585	0	1.669

** 表示变化趋势的置信度为 99%, * 表示变化趋势的置信度为 95%.

3.2.3 社会经济因素 1986—2020 年间,凉城县人口变化曲线(图 11)呈现双峰型,存在 2 个人口上升期(1986—1997、2003—2009 年)和 2 个人口下降期(1997—2003、2009—2019 年). GDP 和工业生产总值均呈现单峰变化(图 11),峰值分别为 78.10 亿和 78.85 亿元. 农业生产总值自 1986 年的 0.57 亿元增加到 2014 年的 29.45 亿元,之后变化趋缓. 1986—2020 年间社会经济要素趋势检验结果显示,凉城人口无显著性变化趋势,但是 GDP、工业和农业生产总值呈显著增长趋势($P<0.01$). 此外,M-K 突变检验以及累计距平曲线表明(图 12):人口、GDP、工业生产总值、农业生产总值在 2005 年均发生了不显著的增加突变. 相关分析表明:各萎缩特征要素均与 GDP、工农业生产总值呈显著负相关($P<0.01$). 其中,岱海水量与农业生产总值相关性达到-0.944.

3.3 萎缩特征要素与影响因素关系统计分析

使用偏相关分析^[70]剔除其他影响要素的影响,分析单一影响要素与各萎缩特征要素(水位、湖面面积和水量)的相关程度,结果显示(表 3):萎缩特征要素水位、湖面面积和水量仅与农业生产总值呈现显著负相关关系($P<0.01$),偏相关系数分别为-0.532、-0.486、-0.496. 相反地,各萎缩特征要素与其他影响要素不具有显著偏相关性.

采用逐步多元回归方法分析各影响要素对岱海水量变化的相对贡献^[71]. 结果表明(表 4):相对于气象要素,社会经济要素对岱海水量损失贡献率较高. 在 2005—2019 年间,社会经济要素可解释岱海水量加速下降原因的 98%,其中 GDP 对岱海水量损失的影响较大(标准化系数为-0.982);而气象要素的相对贡献仅

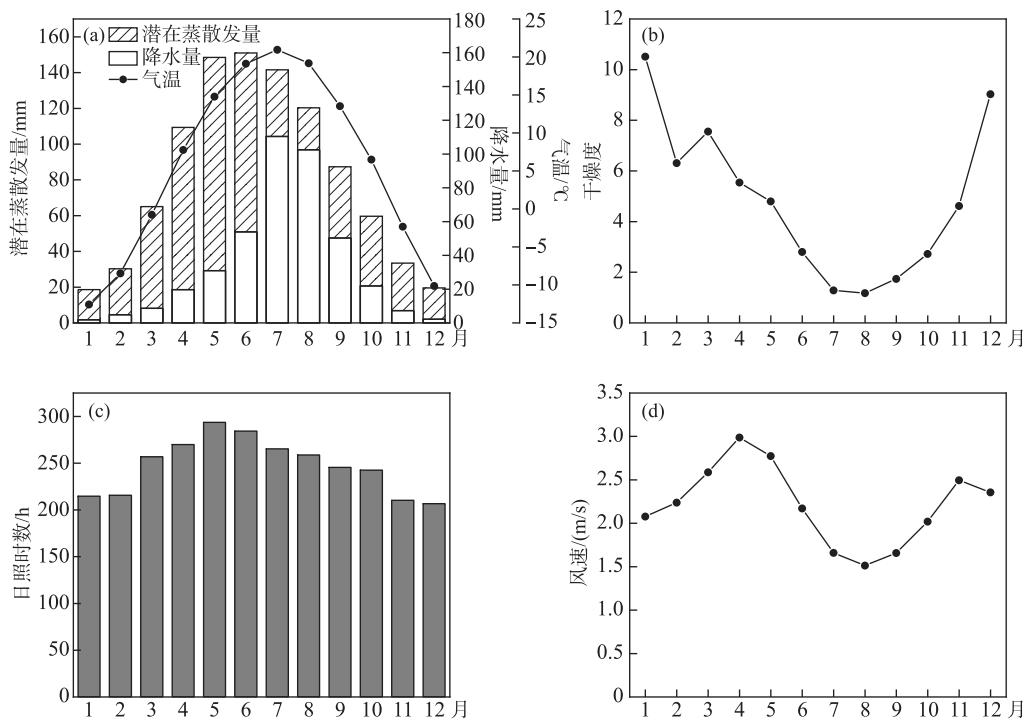


图 9 1961—2020 年凉城站气象要素的多年月均值变化

Fig.9 Multi-year monthly mean changes of meteorological elements at Liangcheng Station from 1961 to 2020

为 33.2%.

4 讨论

自 1961—2019 年,岱海水位从 989.8 m 持续下降到 978.95 m,造成了共 $9.88 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的水量损失。分段拟合和突变检验结果表明,岱海水量损失依次经历了缓慢、快速和加速损失 3 个阶段。这种先慢后快的损失过程与半干旱区大多数湖泊萎缩过程是相类似的^[72-74]。尽管导致该地区近百年内内流型湖泊萎缩的主要因素各异,但是可以概括为气候变化^[75](降水减少和蒸发增大)、植被演替^[27](自然林或人工林扩张)和经济社会发展^[42,76](居民生活和工农业生产耗水)。那么,究竟是何原因导致岱海持续萎缩?

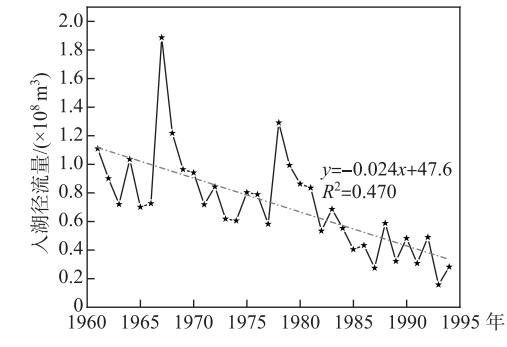


图 10 1961—1994 年岱海入湖径流量变化

Fig.10 Changes in the runoff of Lake Daihai from 1961 to 1994

温升高、风速增加、日照时数增加会使蒸发量增加^[77],入湖径流减少,进而增大水资源的损失。而降水量减少也会使得入湖径流及降水补给减少^[26],从而造成湖泊水资源损失。1961—2020 年间岱海流域气温显著上升($P<0.01$),潜在蒸散发量呈微弱的上升趋势,降水量呈下降趋势,这种气候条件可能利于湖泊的萎缩^[71]。此外,从岱海水量损失的 3 个阶段情况来看:第一阶段(1961—1978 年),所有气象要素变化均不显著,呈波动变化;第二阶段(1979—2004 年),尽管降水量和潜在蒸散发量无显著变化,但此阶段降水量均值较第一阶段均值有所下降,潜在蒸散发量与降水量的差值增大。其中 2003、2004 年^[72]湖泊水量有所回升,主要是因为这两年降水量显著增加,分别比多年平均值多 255.2、109.9 mm,属于丰水年^[78],且潜在蒸散发量也均低于多

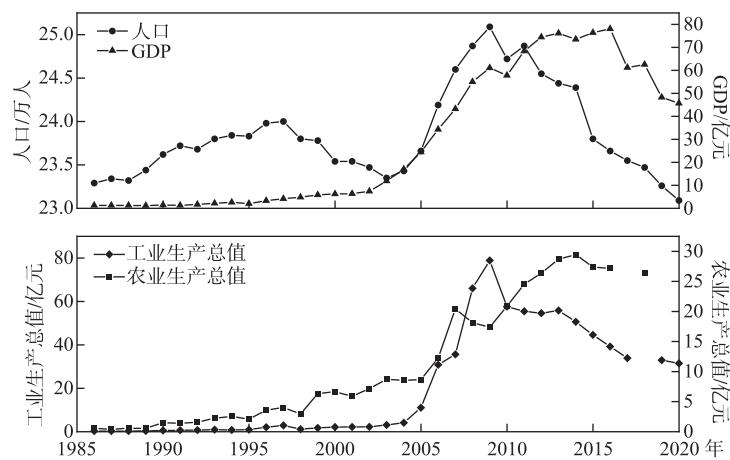


图 11 1986—2019 年凉城县社会经济要素(人口、GDP、工农业生产总值)变化

Fig.11 Changes in social and economic factors (population, GDP, gross industrial and agricultural production value) of Liangcheng County from 1986 to 2019

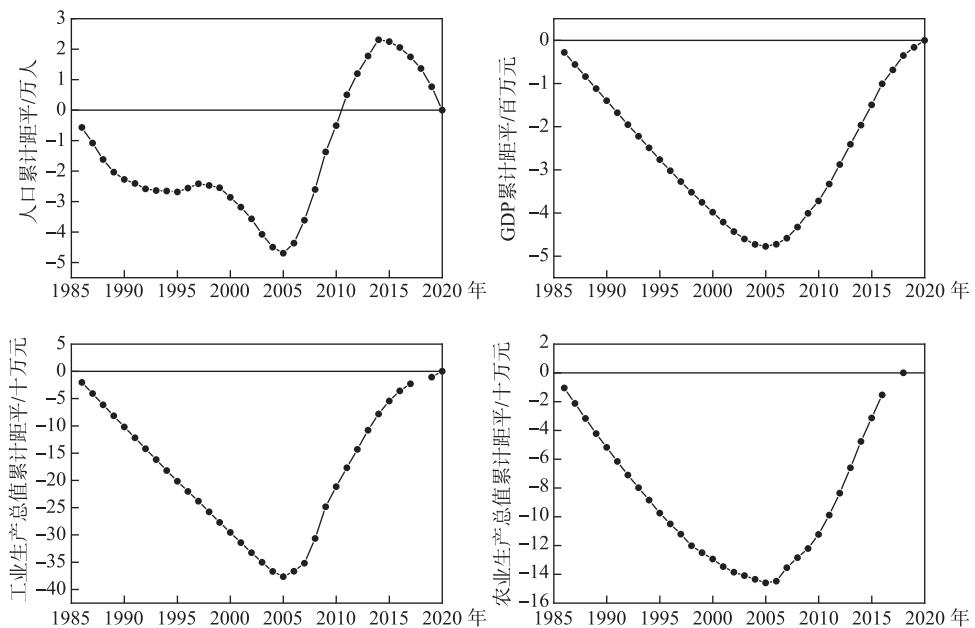


图 12 1986—2019 年凉城县社会经济要素(人口、GDP、工农业生产总值)累计距平曲线

Fig.12 Cumulative anomaly curve of social and economic factors (population, GDP, gross industrial and agricultural production value) in Liangcheng County from 1986 to 2019

年平均值,体现了湖泊水量变化对湖区有效降水(降水—蒸发)的敏感响应;第三阶段(2005—2020 年),年均潜在蒸散发量呈现显著增加趋势($P < 0.05$),其余要素无显著变化,在此阶段年均潜在蒸散发量的均值比第二阶段年均值多 24.4 mm,且年均降水量较第二阶段年均值减少 20.8 mm,潜在蒸散发量与降水量之间的差值继续增加,促使入湖径流量不断减少^[32],湖泊萎缩速度加快。但逐步多元回归模型结果显示,这种变化相对于湖泊持续萎缩而言,贡献率较小。长时间尺度不显著的气候变化对于岱海湖泊持续萎缩的作用不明显,

表3 各萎缩特征要素(水位、湖面面积和水量)与影响因素(气象和社会经济要素)间的偏相关性计算结果

Tab.3 Calculation results of partial correlations between various shrinking characteristic factors (water level, lake area, and water volume) and influencing factors (meteorological and socio-economic factors)

要素	湖泊面积	湖泊水位	湖泊水量
气温	-0.097	-0.011	-0.025
潜在蒸散发量	-0.247	-0.287	-0.282
降水量	-0.178	-0.189	-0.177
干燥度	-0.079	-0.085	-0.061
风速	0.225	0.195	0.226
日照时数	0.371	0.396	0.390
人口	-0.031	-0.029	-0.1
GDP	0.266	0.001	0.08
工业生产总值	-0.074	0.133	0.103
农业生产总值	-0.532 *	-0.486 *	-0.496 *

* 表示 0.05 水平(双侧)上显著相关.

开放”和“西部大开发”两个经济战略的时间点是一致的. 这意味着岱海水资源量损失过程对应其流域经济社会发展的 3 个阶段. 第一阶段, 随着流域农业生产的恢复和发展, 农业需水量的增大使得大量地表和地下入湖径流被各类农田水利工程(如农业灌溉机井^[26,59], 水库、塘坝等蓄水工程^[52,54])截流^[59], 削弱了对湖泊水体的补给, 岱海水量平衡被打破^[26], 岱海水资源量出现缓慢损失. 第二阶段, 我国于 1978 年实行改革开放, 进入工农业时代^[80]. 岱海流域耕地面积迅速扩张, 农业人口增加, 农业规模扩大^[29]. 耕地面积(图 13)由 1976 年的 383.20 km²增加到 1986 年的 409.80 km²^[6], 甚至侵占了岱海西南岸线退缩后裸露的部分滩地. 为适应农业的发展, 加强农业灌溉活动, 流域内农灌井和水库数量不断增多^[81], 大量抽取地下水^[30], 岱海流域平均年灌溉用水也从 1960s 的 3.457×10^7 m³增加至 1980s 的 6.251×10^7 m³, 致使入湖径流量显著下降. 岱海进入水资源快速损失阶段. 第三阶段, 我国于 2005 年在包括岱海流域之内的西北地区实行“西部大开发”战略. 这使得岱海流域农业进一步发展, 耕地面积增加至 454.92 km² (2015 年), 占整个岱海流域面积的 54.27%, 农业用水占总生产用水的 68.3%^[6]. 期间岱海地下水严重超采^[57], 对岱海的侧向补给明显减少^[13]. 同时, 这段时期流域工业的快速发展也加剧了岱海水资源的消耗. 仅 2006 年建成投产的岱海发电厂的年用水量就达到了 1.192×10^7 m³^[6], 且未考虑电厂温排水导致的岱海湖面蒸发的加速^[82]. 工业的发展, 利用了岱

表4 各影响要素对岱海萎缩贡献的逐步多元回归分析结果*

Tab.4 The results of stepwise multiple regression analysis of the contribution of each influencing factor to Lake Daihai's shrinking

时间段	x	回归方程	R ² _{adj}
1986—2019 年	气象要素	$y = 0.010x_1 - 0.015x_2$	0.447 **
	社会经济要素	$y = -1.678 \times 10^{-5}x_4 + 8.471$	0.892 **
2005—2019 年	气象要素	$y = -3.746x_3 + 11.789$	0.332 **
	社会经济要素	$y = -6.992 \times 10^{-6}x_5 + 0.696x_6 - 7.820$	0.980 **

* y 代表水量(10^8 m³), x_1 代表年均日照时数(h), x_2 代表年均潜在蒸散发量(mm), x_3 代表年均风速(m/s), x_4 代表农业生产总值(万元), x_5 代表 GDP(万元), x_6 代表人口数(万人), ** 表示 0.01 水平(双侧)上显著相关.

短时间尺度的气候波动会直接作用于湖泊水文情势变化^[26].

流域植被覆盖度增大也是加大水资源消耗的潜在原因之一. 在植物蒸腾作用下, 植被覆盖度的增大将加大浅层地下水的消耗^[79], 进而减少入湖地下径流量. 据统计, 岱海流域人工林地覆盖度从 2000 年的 9.33% 增至 2008 年的 11.57%^[9]. 可见岱海流域植被覆盖度的增大是岱海水量损失的因素之一. 不过, 第三阶段岱海流域植被覆盖度与第二阶段对比并无明显增加^[6], 而此阶段水资源量损失速率却显著高于第二阶段. 这个矛盾表明植被覆盖度增大是岱海水资源量损失的原因之一, 但并非主要原因.

岱海萎缩主要是流域经济社会发展引起的水资源消耗加剧导致的. 统计分析结果表明, 流域社会经济要素均呈现显著增加趋势($P < 0.01$), 且其与各湖泊萎缩特征要素之间均呈显著负相关($P < 0.01$), 其中萎缩特征要素与农业生产总值的相关性及偏相关性均最强. 此外, 1961—2019 年间的年均水量变化过程线的突变检测结果也显示其在 1978 年、2005 年存在减少突变, 而这两个时间点恰与我国实行的“改革

海南部地区大量的地表和地下水,也导致岱海湖面几何中心不断向北偏移^[28]。综上可知,改革开放以来岱海流域农业发展是导致湖泊水资源损失的主要因,而“西部大开发”战略实施以来的工业发展则加速了损失进程。

岱海水位年内变化也体现了流域经济社会发展对其水资源损失的贡献。第一阶段,岱海月均水位年变化曲线呈双峰型(图3和图4):1—3月融雪水通过地表径流汇入岱海,使其水位逐渐升高^[83];春季开始的农业生产损耗了大量的水资源,使得湖泊水位逐渐下降;6—9月为岱海流域的雨季^[78](图9a),集中降水使得湖泊水位再次上升;10月后进入枯水期,湖泊水位下降^[84]。然而,第三阶段流域耕地面积的增大和工业经济的发展使得更多的地表和地下径流被截留用于工农业生产。入湖径流的减少必将削弱岱海水位的季节变化,使得湖泊水位年丰枯变化不显著。可见,高强度的人类活动掩盖了湖泊水位自然丰枯变化特征^[85]。

本研究建议半干旱区经济社会发展必须建立在水资源可承受范围内。按照岱海水量损失回归方程估算(图8),岱海到2026年将趋于干涸,这必将对流域生态环境保护和经济社会发展带来巨大打击^[60]。实际上,岱海流域各项经济社会发展指标近些年已经出现了下降(图11)。可见,合理开发利用半干旱地区湖泊水资源是实现该地区经济社会可持续发展的关键之一^[35,45]。尽管当地于2016年开始人为干预治理湖泊湿地,但就目前水情来看,效果并不显著,岱海生态恢复与治理任务紧迫,未来生态补水工程应探寻更加合理的生态需水方案,保障岱海健康发展^[78]。

5 结论

本文利用1986—2020年258景Landsat遥感影像数据,提取岱海湖面面积,结合1961—2018年实测水位和水下地形数据,计算得到岱海水量,综合气候波动和社会经济两方面因素,对岱海近60 a来的萎缩过程及其驱动力进行了分析和讨论,得出以下结论:

1)近60 a以来,岱海呈现明显的湖泊面积萎缩、水位下降和水量损失趋势,其中湖泊面积1986—2020年共减少了75.52 km²,萎缩了60.38%,年均萎缩2.16 km²,湖泊萎缩空间变化以西南方向为主;而岱海水位共下降了10.85 m,下降速率为0.178 m/a,2005年之后湖泊水位下降速率加快;湖泊水量近60 a共损失 9.88×10^8 m³,岱海水量变化可分为3个阶段:1961—1978年,水量损失速率为 0.726×10^7 m³/a的缓慢损失阶段;1979—2004年,水量损失速率为 2.10×10^7 m³/a的快速损失阶段($P < 0.01$);2005—2019年,水量损失速率为 3.39×10^7 m³/a的加速损失阶段($P < 0.01$),湖泊水量变化与湖泊水位变化相一致,均呈现先慢后快的变化趋势。

2)近60 a来岱海湖泊持续性萎缩主要是由于流域经济社会发展引起的水资源消耗加剧导致的,其中,改革开放后流域农业开发利用规模和强度的提高是导致岱海水量损失的主要原因;“西部大开发”战略实施后工业经济的兴起则加速了岱海水量的损失;气候变化及植被建设也对岱海持续性萎缩进程有一定影响。干旱半干旱地区湖泊流域经济社会的发展需要与其水资源承载力相协调。

致谢:在开展岱海水资源损失重建研究期间,中国科学院南京地理与湖泊研究所黄群副研究员等给予了大量的帮助,在此致以诚挚的谢意。

6 参考文献

- [1] Hu RJ, Jiang FQ, Wang YJ et al. On the importance of research on the lakes in arid land of China. *Arid Zone Research*,

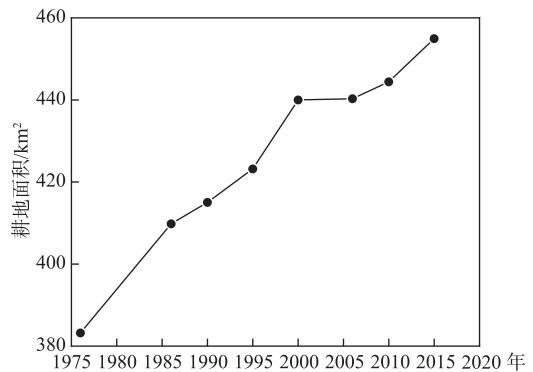


图13 岱海流域耕地面积变化
(数据来源于参考文献[5])

Fig.13 Changes in the area of arable land in the Lake Daihai Basin
(Data comes from the reference [5])

- 2007, 24(2): 137-140. DOI: 10.13866/j.aqr.2007.02.001. [胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊等. 论中国干旱区湖泊研究的重要意义. 干旱区研究, 2007, 24(2): 137-140.]
- [2] Liu JP, Jin J, Li SM et al. Dynamic changes of typical glacier-fed lakes in different climatic zones around the world from 1995 to 2015. *Advances in Water Science*, 2021, 32(1): 1-9. [刘吉平, 金晶, 李晟铭等. 1995—2015年全球不同气候带典型冰川补给型湖泊动态变化. 水科学进展, 2021, 32(1): 1-9.]
- [3] Li QT, Lu LL, Wang CZ et al. MODIS-derived spatiotemporal changes of major lake surface areas in arid Xinjiang, China, 2000–2014. *Water*, 2015, 7(10): 5731-5751. DOI: 10.3390/w7105731.
- [4] Ma RH, Duan HT, Hu CM et al. A half-century of changes in China's lakes: Global warming or human influence? *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(24): L24106. DOI: 10.1029/2010GL045514.
- [5] Tao SL, Fang JY, Zhao X et al. Rapid loss of lakes on the Mongolian Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(7): 2281-2286. DOI: 10.1073/pnas.1411748112.
- [6] Chun X, Qin FY, Zhou HJ et al. Effects of climate variability and land use/land cover change on the Daihai wetland of central Inner Mongolia over the past decades. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(12): 3070-3084. DOI: 10.1007/s11629-020-6108-1.
- [7] Bai XM, Chun X, Siqin B et al. Changes of lakes in Hunshandake sandy land in the past 45 years, Inner Mongolia. *J Lake Sci*, 2016, 28(5): 1086-1094. DOI: 10.18307/2016.0519. [白雪梅, 春喜, 斯琴毕力格等. 近45a 内蒙古浑善达克沙地湖泊群的变化. 湖泊科学, 2016, 28(5): 1086-1094.]
- [8] Guo PC, Yang SJ. Analysis on the characteristics and reasons of Daihai Lake quality change. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition*, 2021, 42(1): 40-46. DOI: 10.19760/j.newu.zk.2021006. [郭鹏程, 杨司嘉. 岱海水质变化规律及成因分析. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2021, 42(1): 40-46.]
- [9] Liang X, Liu HM, Ji MC et al. Effects of land use/cover change on lake water quality in the semi-arid region of Northern China: A case study in Lake Daihai Basin (2000–2018). *J Lake Sci*, 2021, 33(3): 727-738. DOI: 10.18307/2021.0309. [梁旭, 刘华民, 纪美辰等. 北方半干旱区土地利用/覆被变化对湖泊水质的影响: 以岱海流域为例(2000—2018年). 湖泊科学, 2021, 33(3): 727-738.]
- [10] Wu JL, Zeng HA, Ma L et al. Recent changes of selected lake water resources in arid Xinjiang, northwestern China. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(1): 142-150. [吴敬禄, 曾海鳌, 马龙等. 新疆主要湖泊水资源及近期变化分析. 第四纪研究, 2012, 32(1): 142-150.]
- [11] Bai MX, Yang F, Feng WY et al. Analysis and evaluation of eutrophication characteristics of inland lakes in a typical semi-arid area—A case study in Lake Daihai. In: "Environmental Engineering" 2019 National Academic Annual Conference Proceedings (Volume 2). Beijing: "Environmental Engineering" 2019 National Academic Annual Conference, Industrial Construction Magazine Co., Ltd, 2019; 6. [白妙馨, 杨芳, 冯伟莹等. 典型半干旱区内陆湖泊富营养化特征分析与评价——以岱海为例. 《环境工程》2019年全国学术年会论文集(下册). 北京:《环境工程》2019年全国学术年会, 工业建筑杂志社有限公司, 2019; 6.]
- [12] Yu HF, Shi XH, Sun B et al. Analysis of water quality and eutrophication changes in Hulun Lake from 2011 to 2020. *Arid Zone Research*, 2021, 38(6): 1534-1545. DOI: 10.13866/j.aqr.2021.06.05. [于海峰, 史小红, 孙标等. 2011—2020年呼伦湖水质及富营养化变化分析. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1534-1545.]
- [13] Li S. A brief discussion on the protection and restoration countermeasures of Daihai Wetland. *Inner Mongolia Forestry*, 2018, (9): 16-18. [李森. 浅议岱海湿地保护修复对策. 内蒙古林业, 2018, (9): 16-18.]
- [14] Xie QJ, Liu JH. Spatio-temporal dynamics of lake distribution and their impact on ecosystem service values in Wuhan urbanized area during 1987–2016. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(21): 7840-7850. [谢启姣, 刘进华. 1987—2016年武汉城市湖泊时空演变及其生态服务价值响应. 生态学报, 2020, 40(21): 7840-7850.]
- [15] Wang W, Alim Samat, Ma L et al. Spatio-temporal variations and trend analysis of lake area in Xinjiang in 1986–2019. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(4). DOI: 10.5846/stxb202101150156. [王伟, 阿里木·赛买提, 马龙等. 1987—2019年新疆湖泊变化时空特征及趋势分析. 生态学报, 2022, 42(4).]
- [16] Zhang Q. Hydrology of lake catchment: Research status and challenges. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(7): 1559-1573. DOI: 10.11870/cjlyzyhhj202107004. [张奇. 湖泊流域水文学研究现状与挑战. 长江流域资源与环境, 2021, 30(7): 1559-1573.]

- [17] Bai J, Chen X, Li JL et al. Changes in the area of inland lakes in arid regions of central Asia during the past 30 years. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **178**(1/2/3/4): 247-256. DOI: 10.1007/s10661-010-1686-y.
- [18] Li XH, Han F, Zhang CH et al. Influence of climate change on mosaic landscape of sand land-wetland in middle-east Inner Mongolia. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(1): 105-112. [李兴华, 韩芳, 张存厚等. 气候变化对内蒙古中东部沙地——湿地镶嵌景观的影响. 应用生态学报, 2009, **20**(1): 105-112.]
- [19] Gao X, Huang ZL. A preliminary study on the relationship between the environment deprivations and the dwindling in the Aibi Lake. *Journal of Xinjiang Normal University: Natural Sciences Edition*, 2006, **25**(1): 83-86. [高翔, 黄宗亮. 艾比湖湖面萎缩与流域生态环境恶化之间的关系. 新疆师范大学学报: 自然科学版, 2006, **25**(1): 83-86.]
- [20] Yang XW, Wang NL, Chen AA et al. The relationship between area variation of the Aral Sea in the arid Central Asia and human activities and climate change. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, **42**(2): 681-692. [杨雪雯, 王宁练, 陈安安等. 中亚干旱区咸海面积变化与人类活动及气候变化的关联研究. 冰川冻土, 2020, **42**(2): 681-692.]
- [21] Liang WJ, Chun X, Liu JY et al. Research on the area change processes in the past 40a of Daihai Lake. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, **31**(4): 93-98. [梁文军, 春喜, 刘继遥等. 近 40a 岱海湖面动态变化研究. 干旱区资源与环境, 2017, **31**(4): 93-98.]
- [22] Cao JT, Wang SM, Shen J et al. The paleoclimate changes during the past millennium inferred from the lacustrine core in Daihai Lake, Inner Mongolia. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, **20**(5): 391-396. [曹建廷, 王苏民, 沈吉等. 近千年内蒙古岱海气候环境演变的湖泊沉积记录. 地理科学, 2000, **20**(5): 391-396.]
- [23] Li HZ, Liu QS, Wang JX. Study of evolution of huangqihai and Daihai lakes in Holocene in Inner Mongolia plateau. *J Lake Sci*, 1992, **4**(1): 31-39. DOI: 10.18307/1992.0104. [李华章, 刘清泗, 汪家兴. 内蒙古高原黄旗海、岱海全新世湖泊演变研究. 湖泊科学, 1992, **4**(1): 31-39.]
- [24] Wang YF. Lacustrine carbonate chemical sedimentation and climatic-environmental evolution—a case study of Qinghai Lake and Daihai Lake. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1993, **24**(1): 31-36. [王云飞. 青海湖、岱海的湖泊碳酸盐化学沉积与气候环境变化. 海洋与湖沼, 1993, **24**(1): 31-36.]
- [25] Chen HY, An LJ, Zhang JL. Characteristics of water surface area evolution and correlation analysis with meteorological factors in Daihai Lake. *Environmental Science and Management*, 2018, **43**(12): 62-65. [陈海英, 安莉娟, 张锦龙. 岱海湖水面面积演变特征及与气象因子关联度分析研究. 环境科学与管理, 2018, **43**(12): 62-65.]
- [26] Cao JT, Wang SM, Shen J et al. The main causes of water level drawdown of Daihai Lake in Inner Mongolia since the last 40 years. *Arid Zone Research*, 2002, **19**(1): 1-6. DOI: 10.13866/j.azr.2002.01.001. [曹建廷, 王苏民, 沈吉等. 近 40 年来内蒙古岱海水位下降的主要原因. 干旱区研究, 2002, **19**(1): 1-6.]
- [27] Pang XM, Liu HM, Liu XL et al. Analysis of lake area and water level dynamic and its driving forces of Daihai Lake in recent 30 years. *Journal of Inner Mongolia University: Natural Science Edition*, 2021, **52**(3): 311-321. DOI: 10.13484/j.nmgdxbzk.20210313. [庞雪敏, 刘华民, 刘旭隆等. 近 30 年岱海湖泊面积动态变化及其驱动力分析. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 2021, **52**(3): 311-321.]
- [28] Zhao H, Guo TB. Analysis of dynamic change of Daihai Lake area based on GIS. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 2014, (23): 55-57. [赵辉, 郭田保. 基于 GIS 的岱海湖面面积动态变化分析. 内蒙古科技与经济, 2014 (23): 55-57.]
- [29] Zhou YK, Jiang JH. Changes in the ecological environment in the Daihai Lake Basin over the last 50 years. *Arid Zone Research*, 2009, **26**(2): 162-168. DOI: 10.13866/j.azr.2009.02.017. [周云凯, 姜加虎. 近 50 年岱海生态与环境变化分析. 干旱区研究, 2009, **26**(2): 162-168.]
- [30] Chen JQ, Lv JM, Li N et al. External groundwater alleviates the degradation of closed lakes in semi-arid regions of China. *Remote Sensing*, 2019, **12**(1): 45. DOI: 10.3390/rs12010045.
- [31] Wang T, Chen JS, Xu Y et al. Isotopes and hydrochemistry of Daihai Lake recharging sources, Northern China. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2017, **312**(3): 615-629. DOI: 10.1007/s10967-017-5241-y.
- [32] Wang Z, Li JL, Bao AM et al. Temporal variation in the Barkol Lake area and its driving factors in 1995–2020. *Arid Zone Research*, 2021, **38**(6): 1514-1523. DOI: 10.13866/j.azr.2021.06.03. [王振, 李均力, 包安明等. 1995—2020 年新疆巴里坤湖面积时序变化及归因. 干旱区研究, 2021, **38**(6): 1514-1523.]
- [33] Li S, Li Z, Du JK et al. Study on the dynamic relationship between water resources utilization and economic growth in Shaanxi Province based on the VAR model. *Ecological Economy*, 2020, **36**(10): 146-154. [李双, 李哲, 杜建括等. 陕

- 西省水资源利用与经济增长动态关系的 VAR 模型分析. 生态经济, 2020, 36(10): 146-154.]
- [34] Zhang ZL, Sun H. Research on the dynamic relationship between water-intensive industrial ecosystem and economic growth in Xinjiang based on VAR model. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(16): 5273-5284. DOI: 10.5846/stxb201605190966. [张振龙, 孙慧. 新疆区域水资源对产业生态系统与经济增长的动态关联——基于 VAR 模型. 生态学报, 2017, 37(16): 5273-5284.]
- [35] Hu YL, Zheng W. Research on sustainable development in plateau lake basins. *Ecological Economy*, 2011, 27(3): 168-171, 183. [胡元林, 郑文. 高原湖泊流域可持续发展研究. 生态经济, 2011, 27(3): 168-171, 183.]
- [36] Ding MZ, Chen AL. Water level observer analysis and improvement. *Journal of Zhejiang Meteorology*, 2020, 41(4): 44-48. [丁妙增, 陈爱莲. 水位观测仪探析与改进. 浙江气象, 2020, 41(4): 44-48.]
- [37] Cao JT, Rao ZG, Shi FX et al. Lake-level records support a mid-Holocene maximum precipitation in northern China. *Science China Earth Sciences*, 2022, 64(12): 2161-2171. DOI: 10.1360/N072020-0377. [曹建涛, 饶志国, 石福习等. 湖泊水位记录支持中国北方全新世中期降水达到最高值. 中国科学: 地球科学, 2022, 64(12): 2161-2171.]
- [38] Zhang XD, Song YP, Zhang GL et al. Lake level variations in southwest China over the last millennium. *Journal of Earth Environment*, 2021, 12(2): 121-136. DOI: 10.7515/JEE202015. [张旭东, 宋云平, 张贵林等. 中国西南地区近千年湖泊水位变化. 地球环境学报, 2021, 12(2): 121-136.]
- [39] Dong SY, Xue X, You QG et al. Remote sensing monitoring of the lake area changes in the Qinghai-Tibet Plateau in recent 40 years. *J Lake Sci.*, 2014, 26(4): 535-544. DOI: 10.18307/2014.0407. [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. 湖泊科学, 2014, 26(4): 535-544.]
- [40] Ma RH, Yang GS, Duan HT et al. China's lakes at present: Number, area and spatial distribution. *Scientia Sinica: Terra*, 2011, 41(3): 394-401. [马荣华, 杨桂山, 段洪涛等. 中国湖泊的数量、面积与空间分布. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(3): 394-401.]
- [41] Song CQ, Zhan PF, Ma RH. Progress in remote sensing study on lake hydrologic regime. *J Lake Sci.*, 2020, 32(5): 1406-1420. DOI: 10.18307/2020.0514. [宋春桥, 詹鹏飞, 马荣华. 湖泊水情遥感研究进展. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1406-1420.]
- [42] Zhang HR, Qing H, Liu HM et al. Dynamics and its driving forces of Hulun Lake. *Journal of Inner Mongolia University: Natural Science Edition*, 2018, 49(1): 102-107. DOI: 10.13484/j.nmgdxxbk.20180117. [张浩然, 清华, 刘华民等. 呼伦湖湖泊动态变化及其驱动力分析. 内蒙古大学学报: 自然科学版, 2018, 49(1): 102-107.]
- [43] Phan VH, Lindenbergh R, Menenti M. ICESat derived elevation changes of Tibetan lakes between 2003 and 2009. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 17: 12-22. DOI: 10.1016/j.jag.2011.09.015.
- [44] Li L, Yao XJ, Li FX et al. Study on monitoring lake water level changes in the Hoh Xil region based on ICESat/GLAS data. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(3): 45-52, 60. DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20190307. [李龙, 姚晓军, 李风贤等. 基于 ICESat/GLAS 数据的可可西里地区湖泊水位变化研究. 中国农业资源与区划, 2019, 40(3): 45-52, 60.]
- [45] Li DS, Zhang RY, Cui BL et al. Response of lake dynamics to climate change in the Hala Lake Basin of Tibetan Plateau from 1986 to 2015. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(2): 501-512. DOI: 10.31497/zrzyxb.20210218. [李东昇, 张仁勇, 崔步礼等. 1986—2015 年青藏高原哈拉湖湖泊动态对气候变化的响应. 自然资源学报, 2021, 36(2): 501-512.]
- [46] Zhang GQ. Changes in lakes on the Tibetan Plateau observed from satellite data and their responses to climate variations. *Progress in Geography*, 2018, 37(2): 214-223. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.02.004. [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. 地理科学进展, 2018, 37(2): 214-223.]
- [47] Zhang HY, Wu YH, Liu YJ et al. Water storage variation of the Qinghai Lake in recent decades based on satellite observation. *Progress in Geography*, 2018, 37(6): 823-832. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.06.009. [张洪源, 吴艳红, 刘衍君等. 近 20 年青海湖水量变化遥感分析. 地理科学进展, 2018, 37(6): 823-832.]
- [48] Zhang GQ, Xie HJ, Yao TD et al. Water balance estimates of ten greatest lakes in China using ICESat and Landsat data. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(26): 2664-2678. DOI: 10.1007/s11434-013-5818-y. [张国庆, 谢 HJ, 姚檀栋等. 基于 ICESat 和 Landsat 的中国十大湖泊水量平衡估算. 科学通报, 2013, 58(26): 2664-2678.]
- [49] Wang ZJ, Li CY, Zhang S et al. Hydrological changes in Lake Hulun based on water balance model. *J Lake Sci.*, 2012, 24(5): 667-674. DOI: 10.18307/2012.0504. [王志杰, 李畅游, 张生等. 基于水平衡模型的呼伦湖湖泊水量变化. 湖

- 泊科学, 2012, **24**(5): 667-674.]
- [50] Zan CJ, Huang Y, Li JL et al. Analysis of water balance in Aral Sea and the influencing factors from 1990 to 2019. *J Lake Sci*, 2021, **33**(4): 1265-1275. DOI: 10.18307/2021.0426. [昝婵娟, 黄粤, 李均力等. 1990—2019年咸海水量平衡及其影响因素分析. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 1265-1275.]
- [51] Liu PT, Wang HD, Zhu QJ. Water balance in Daihai, Liangcheng County, Inner Mongolia. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 1963, (2): 53-63. [刘培桐, 王华东, 朱启疆. 内蒙凉城岱海的水量平衡. 北京师范大学学报: 自然科学版, 1963, (2): 53-63.]
- [52] Feng XW, Wang Y, Wang Z et al. Analysis and discussion on the vicissitudes of Daihai Lake. *Inner Mongolia Water Resources*, 1994, (1): 55-56, 39. [冯学武, 王弋, 王智等. 岱海湖变迁的分析探讨. 内蒙古水利, 1994, (1): 55-56, 39.]
- [53] Chen Y, Kou Y, Wang X. Analysis of water quality in Daihai Lake area and suggestions for Daihai Development Planning. *Inner Mongolia Science Technology & Economy*, 2007, (10): 11-14. [陈贊, 寇岩, 王昕. 岱海湖区水质分析及对岱海发展规划的建议. 内蒙古科技与经济, 2007, (10): 11-14.]
- [54] Wang SH, Bai MX, Chen JY et al. Research on the ecological protection and restoration of mountain-river-forest-farmland-lake-grassland system in typical farming-pastoral ecotone: Taking Daihai Lake Basin in Inner Mongolia as an example. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, **9**(5): 515-519. [王书航, 白妙馨, 陈俊伊等. 典型农牧交错带山水林田湖草生态保护修复——以内蒙古岱海流域为例. 环境工程技术学报, 2019, **9**(5): 515-519.]
- [55] Wang SM, Dou HS eds. Chinese lake history. Beijing: Science Press, 1998. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [56] Qi QG, Ta N, Yu SZ. Research on sustainable utilization of water resources in Daihai basin. *Inner Mongolia Environmental Protection*, 2003, **15**(3): 9-11. [其其格, 塔娜, 于守智. 岱海流域水资源可持续利用研究. 内蒙古环境保护, 2003, **15**(3): 9-11.]
- [57] Guo JL. Research on the construction of government governance mechanism of Daihai Lake ecology[Dissertation]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2020. [郭佳乐. 岱海湖生态的政府治理机制建设研究[学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2020.]
- [58] Huang WY, Jiang JH, Huang Q. Water salinification and causes in Daihai Lake. *Guizhou Environmental Protection Science and Technology*, 1997, **3**(3): 32-36. [黄文钰, 姜加虎, 黄群. 岱海水质咸化及其原因分析. 贵州环保科技, 1997, **3**(3): 32-36.]
- [59] Huang Q, Jiang JH. Analysis of water level descent in Daihai Lake. *J Lake Sci*, 1999, **11**(4): 304-310. DOI: 10.18307/1999.0403. [黄群, 姜加虎. 岱海水位下降原因分析. 湖泊科学, 1999, **11**(4): 304-310.]
- [60] Hu LK, Lu WL. Analysis on the present situation of water environment and the necessity of supplementing water in Daihai Basin, Liangcheng County. *Inner Mongolia Water Resources*, 2014, (1): 109-110. [胡林奎, 鲁文林. 凉城县岱海流域水环境现状及补水必要性分析. 内蒙古水利, 2014, (1): 109-110.]
- [61] Liu Y, Cai LG. Refer to the new definition of evapotranspiration and comparison of calculation methods. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, **28**(6): 28-34. [刘钰, 蔡林根. 参照腾发量的新定义及计算方法对比. 水利学报, 1997, **28**(6): 28-34.]
- [62] Zheng JY, Yin YH, Li BY, A new scheme for climate regionalization in China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, **65**(1): 3-12. DOI: 10.3724/SP.J.1037.2010.00186. [郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 中国气候区划新方案. 地理学报, 2010, **65**(1): 3-12.]
- [63] Cao JT, Duan XJ, Wang SM et al. An 800-year reconstruction of paleosalinity in Daihai Lake water and its implications of climate change. *Earth Science Frontiers*, 2002, **9**(1): 187-192. [曹建廷, 段学军, 王苏民等. 近800年来内蒙古岱海湖水的盐度定量及其气候意义. 地学前缘, 2002, **9**(1): 187-192.]
- [64] Xu HQ. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI). *National Remote Sensing Bulletin*, 2005, **9**(5): 589-595. [徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. 遥感学报, 2005, **9**(5): 589-595.]
- [65] Peng YF, Li ZQ, Yao XJ et al. Area change and cause analysis of Bosten Lake based on multi-source remote sensing data and GEE platform. *Journal of Geo-Information Science*, 2021, **23**(6): 1131-1153. DOI: 10.12082/dqxxkx.2021.200361. [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. 地球信息科

- 学学报, 2021, 23(6): 1131-1153.]
- [66] Zeng ZP, Lu XH. Spatial-temporal evolution of urban lakes in Wuhan City based on remote sensing images. *J Lake Sci*, 2008, 20(5): 648-654. DOI:10.18307/2008.0514. [曾忠平, 卢新海. 城市湖泊时空演变的遥感分析——以武汉市为例. 湖泊科学, 2008, 20(5): 648-654.]
- [67] MTC. Instructions for winter lake mapping. In: Schneider JC ed. Manual of fisheries survey methods ii: With periodic updates. Michigan Department of Natural Resources: Fisheries Special Report 25, Ann Arbor, 2000: 1-4.
- [68] Dong Y, Chen XG, Hu JL. Spatio-temporal variability of potential evapotranspiration in Xinjiang and estimation of future trend. *China Rural Water and Hydropower*, 2015, (9): 90-94. [董煜, 陈学钢, 胡江玲. 新疆潜在蒸散量时空变化及未来变化趋势. 中国农村水利水电, 2015, (9): 90-94.]
- [69] Li HY, Xue Y, Cao EJ et al. Spatiotemporal variation characteristics of water deficit in Ulanqab during the latest 50 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(12): 145-151. [李红瑛, 薛羽, 曹二佳等. 近 50 年来乌兰察布市水分盈亏量时空变化特征. 干旱区资源与环境, 2019, 33(12): 145-151.]
- [70] Xu Y, Huang WT, Dou ZD et al. Responding mechanism of vegetation cover to climate change and human activities in southwest China from 2000 to 2020. *Environmental Science*, 2021. DOI:10.13227/j.hjkx.202108107. [徐勇, 黄雯婷, 窦世卿等. 2000—2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征. 环境科学, 2021.]
- [71] Zhang H, Tao SL, Tang ZY et al. Lake area changes in Jing-Jin-Ji region in recent 30 years. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2020, 56(2): 324-330. DOI: 10.13209/j.0479-8023.2019.123. [张恒, 陶胜利, 唐志尧等. 近 30 年京津冀地区湖泊面积的变化. 北京大学学报:自然科学版, 2020, 56(2): 324-330.]
- [72] Wang JZ, Wu JL, Zeng HA et al. Changes of water resources of the main lakes in Inner Mongolia. *Arid Zone Research*, 2015, 32(1): 7-14. DOI: 10.13866/j.azr.2015.01.02. [汪敬忠, 吴敬禄, 曾海鳌等. 内蒙古主要湖泊水资源及其变化分析. 干旱区研究, 2015, 32(1): 7-14.]
- [73] Wei X. Response of Dali Lake area to climate factors in the past 45 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(2): 110-115. [魏学. 近 45a 达里诺尔湖面积演变对气候的响应. 干旱区资源与环境, 2019, 33(2): 110-115.]
- [74] Zhao S, Ji WQ, Gao P et al. Study on dynamic change of Hulun Lake water area and the relationship with the climatic factors during 1986–2016. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(4): 53-58. DOI:10.7621/cjarrp.1005-9121.20180408. [赵澍, 冀玮强, 高鹏等. 1986—2016 年呼伦湖水域面积动态变化及与气候因素关系研究. 中国农业资源与区划, 2018, 39(4): 53-58.]
- [75] Li X, Zhang XQ, Xu XM. Climate change and its effects on the water level of Lake Baikal region since the 1980s. *J Lake Sci*, 2022, 34(1): 219-231. DOI: 10.18307/2022.0118. [李想, 张雪芹, 徐晓明. 近 40 年来贝加尔湖区气候变化及其对湖泊水位的影响. 湖泊科学, 2022, 34(1): 219-231.]
- [76] Zhou C, He LH, Yang N. Variations in the Ebinur Lake area caused by human activities and climatic changes. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(2): 121-126. DOI: 10.3724/SP.J.1140.2010.02121. [周驰, 何隆华, 杨娜. 人类活动和气候变化对艾比湖湖泊面积的影响. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(2): 121-126.]
- [77] Wang XJ, Li Z, Zhao C et al. Spatiotemporal variations of the reference crop evapotranspiration in the arid region of northwest China during 1961–2011. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(19): 5609-5616. DOI: 10.5846/stxb201306101619. [王小静, 李志, 赵姹等. 西北旱区 1961—2011 年参考作物蒸散量的时空分异. 生态学报, 2014, 34(19): 5609-5616.]
- [78] Ma JL, Liu DW, Wang J et al. Dynamic ecological water demand based on long-term ecological water consumption in Lake Daihai, 1975–2020. *J Lake Sci*, 2022, 34(1): 207-218. DOI: 10.18307/2022.0117. [马佳丽, 刘东伟, 王杰等. 基于长时间序列(1975—2020 年)生态耗水的岱海动态生态需水分析. 湖泊科学, 2022, 34(1): 207-218.]
- [79] Xu DD. Water consumption by vegetation in arid areas and its response to groundwater level decline [Dissertation]. Xi'an: Chang'an University, 2017. [徐丹丹. 旱区植被耗水及其对地下水位下降的响应 [学位论文]. 西安: 长安大学, 2017.]
- [80] Ainur Maimat, Umut Halik, Ayikamalik Kranmu et al. Remote sensing monitoring of the area change of Bosten Lake and analysis of its driving factors. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2017, 54(4): 766-774. [阿依努尔·买买提, 玉米提·哈力克, 阿依加马力·克然木等. 博斯腾湖面积变化遥感监测及其驱动因素分析. 新疆农业科学, 2017, 54(4): 766-774.]

- [81] Sun ZD, Jiang JH, Huang Q. Analysis of climate and lake hydrological change in Daihai Basin in the late 50 years. *Water Resources Protection*, 2005, **21**(5) : 16-18, 26. [孙占东, 姜加虎, 黄群. 近 50 年岱海流域气候与湖泊水文变化分析. 水资源保护, 2005, **21**(5) : 16-18, 26.]
- [82] Zhang N, Chen XT, Li HB *et al.* Effect of warm water discharge on addition evaporation of surface of Daihai Lake. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, **26**(4) : 18-21, 28. [张楠, 陈孝田, 李皓冰等. 岱海湖温排水对湖面附加蒸发量影响研究. 水资源与水工程学报, 2015, **26**(4) : 18-21, 28.]
- [83] Zhang Z. Research on the Relationship between groundwater and surface water in Daihai Basin [Dissertation]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2020. [张胄. 岱海流域地下水与地表水关系研究[学位论文]. 石家庄: 河北地质大学, 2020.]
- [84] Ge YX. Analysis of changes in the surface of Lake Aibi and natural driving factors based on machine learning in the last 30 years[Dissertation]. Urumqi: Xinjiang University, 2019. [葛翔宇. 基于机器学习近 30a 艾比湖湖面变化及自然驱动因素分析[学术论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019.]
- [85] Sun ZD, Wang R, Huang Q. Comparison of water level changes during the past 20 years between Daihai and bositen lakes. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, **20**(5) : 56-60. [孙占东, 王润, 黄群. 近 20 年博斯腾湖与岱海水位变化比较分析. 干旱区资源与环境, 2006, **20**(5) : 56-60.]