

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0902

YANG Xuewen, WANG Ninglian, CHEN An'an, et al. The relationship between area variation of the Aral Sea in the arid Central Asia and human activities and climate change[J]. 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[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2):681-692.]

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

杨雪雯^{1,2}, 王宁练^{1,2,3}, 陈安安^{1,2}, 张伟⁴

(1. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127; 2. 西北大学 城市与环境学院 地表系统与灾害研究院, 陕西 西安 710127; 3. 中国科学院 青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; 4. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 咸海是亚洲仅次于里海的第二大内陆咸水湖, 20世纪60年代以来湖泊面积急剧萎缩。基于1960-2018年咸海的面积数据、CRU气温和降水数据以及咸海流域灌溉面积、水库容量等资料, 定量分析了1960年以来咸海湖泊面积的变化情况, 并从气候变化与人类活动两方面探究了咸海面积变化的主要影响因素。结果表明: 1960-2018年咸海的面积由 $6.85 \times 10^4 \text{ km}^2$ 持续萎缩至 $(8.32 \pm 0.19) \times 10^3 \text{ km}^2$, 共减少了 $(6.02 \pm 0.02) \times 10^4 \text{ km}^2$ (约87.85%), 其中1960-2009年面积萎缩了 $(5.94 \pm 0.02) \times 10^4 \text{ km}^2$ (约86.77%), 而在2009-2018年其面积萎缩速率明显放缓, 减少了 740.04 km^2 (约8.17%)。统计结果显示, 1960年以来强烈的人类活动(主要表现为灌溉用水和水库储水量的持续增加)是导致咸海面积急剧萎缩的主要因素, 其对咸海面积变化的影响远大于气候变化。在中亚地区气候继续向暖湿变化的背景下, 咸海流域应尽快调整以农业灌溉为主的用水结构, 否则在上游冰川融水达到峰值后, 咸海可能面临干涸的危险。

关键词: 咸海; 面积变化; 气候变化; 冰川变化; 人类活动

中图分类号: P343.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)02-0681-12

0 引言

位于欧亚大陆腹地的中亚干旱区是亚洲中部的重要组成部分^[1], 其面积占全球干旱区总面积的三分之一^[2], 该区域既是气候变化敏感区, 又是生态环境脆弱区^[3]。湖泊不仅具有调节气候、维系绿洲、维持区域生态平衡等重要功能^[4-5], 更是研究气候变化的重要指标^[6-7], 因而一直是中亚地区气候变化研究与人类活动研究的热点方向^[8-9]。此外, 中亚干旱区是“丝绸之路经济带”的必经之地, 目前水资源短缺是制约当地发展的主要因素^[10-11]。因此, 系统开展中亚干旱区的湖泊变化及其与人类活

动的关系研究不仅具有重要的科学意义, 同时也对中亚地区的社会经济发展具有重大的现实意义。

鉴于中亚干旱区湖泊变化研究的重要意义, 国内外的专家学者已经基于多种方法对中亚地区的湖泊变化进行了深入的研究。已有的研究结果表明: 1975-2007年中亚干旱区有超过一半的内陆湖面积呈急剧萎缩趋势, 湖泊总面积从1975年的 $9.14 \times 10^4 \text{ km}^2$ 萎缩到了2007年的 $4.60 \times 10^4 \text{ km}^2$, 面积减小了49.62%^[12]; 不同海拔的湖泊变化研究结果表明, 中亚湖泊近几十年来的面积变化存在明显的垂直差异, 即平原区尾间湖泊面积普遍呈萎缩趋势, 高山湖泊水域面积基本保持不变乃至有扩张的

收稿日期: 2019-10-20; 修订日期: 2019-11-17

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA20060201); 中国科学院“一带一路”科技合作专项(131C11KYSB20160061); 国家自然科学基金项目(41971083); 第二次青藏高原综合科学考察研究专项(2019QZKK020102)资助

作者简介: 杨雪雯(1996-), 女, 陕西延安人, 2017年在西北大学获学士学位, 现为西北大学在读硕士研究生, 从事气候变化与冰川水资源研究. E-mail: yxw_0117@163.com

通信作者: 王宁练, 教授, 从事冰冻圈与全球变化研究. E-mail: nlwang@nwnu.edu.cn.

趋势。中亚地区的高山湖泊位于亚洲高山区西部边缘,气候变暖引起的冰冻圈波动是该区域高山湖泊面积普遍扩张的主控因素^[13-17]。然而,对于受气候变化和人类活动共同影响的平原尾间湖泊而言,定量分析其变化原因的研究目前还相对较少。

平原尾间湖泊对维持干旱区的生态平衡具有重要意义。新疆罗布泊的消亡引起了当地一系列生态环境灾难,造成该地区干旱化和沙漠化程度加重,植被退化,土地盐碱化加剧^[18]。因此开展中亚干旱区平原尾间湖泊变化特征研究,不仅可以明确中亚干旱区的气候环境变化和人类活动在湖泊演化过程中所起到的作用,还能为合理开发利用和保护水资源,促进区域可持续发展提供科学依据。咸海作为中亚两条最大内陆河(阿姆河和锡尔河)的尾间湖,是亚洲仅次于里海的第二大内陆咸水湖。20世纪60年代开始,阿姆河和锡尔河的河水被大量用于农业灌溉和生活用水,加之上述两个流域70年代以来气候持续干旱,造成了咸海入湖径流持续下降,进而导致湖泊水位下降,面积急剧萎缩^[19-22];到1986年咸海分裂为南北两部分,过去50年咸海的面积萎缩了 $5.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[20,23]。咸海面积的急剧萎缩引起了国际社会的强烈关注^[24-26],为保护咸海,中亚各国不断制定和完善跨界河流水合作条约,详细分配和协调流域上下游国家的水量分配,不断推进流域水资源管理的进程^[20]。在“保护

北咸海计划”的推动下,同时伴随着近年来中亚气候正在由暖干向暖湿转变^[27],北咸海的面积呈现出略微扩张的趋势^[28]。然而,不同时期咸海面积的变化,到底是气候变化作用的结果,还是人类活动作用的结果,目前仍是学界争论的焦点。

为能够从定量角度分析自然和人为要素对咸海面积变化的影响,本文基于1960–2018年咸海的面积数据、CRU气象资料以及咸海流域灌溉面积、水库容量等资料,首先明确咸海不同时期的变化状况,进而结合气象资料、灌溉资料和水库容量等资料进行综合分析,以期从定量角度探究气候变化与人类活动对咸海面积变化的影响。

1 研究区概况

咸海(图1)位于中亚哈萨克斯坦和乌兹别克斯坦两国交界处。20世纪60年代初,它是世界第四大内陆湖,水位约为53 m,湖泊面积约 $6.85 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均水深16 m,南北长435 km,东西宽290 km^[21,29]。1986年分裂成为南咸海和北咸海两片水域,2003年湖中的复活岛与陆地相连,将南咸海又进一步分成了东、西两部分。2014年,咸海水域面积约为 $6.96 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。咸海地处温带沙漠性气候,夏季高温少雨,蒸发量大,冬季寒冷干燥,年平均气温为 9.4°C ,年降水量在100~140 mm之间^[29]。

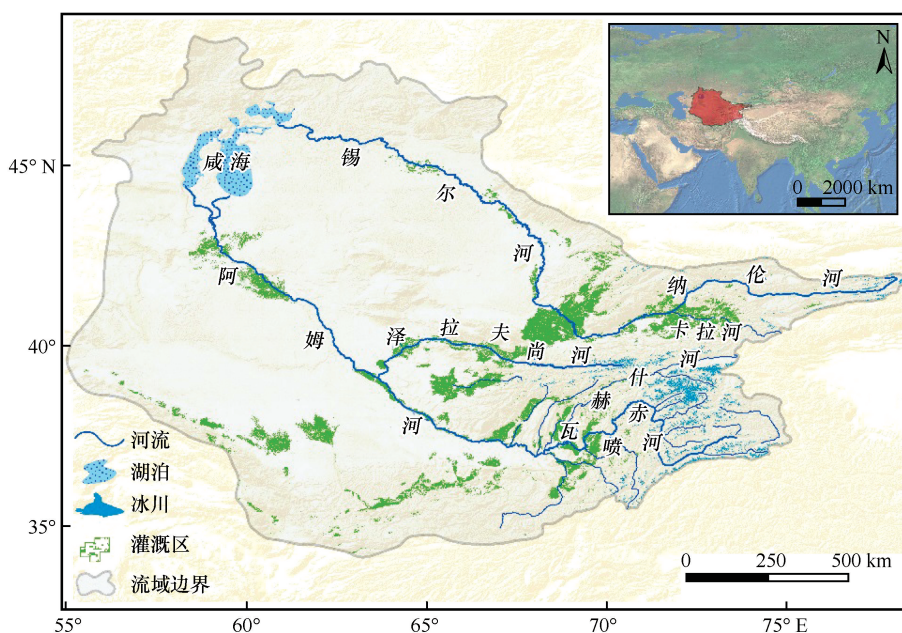


图1 咸海流域示意图

Fig. 1 Map showing the Aral Sea basin

咸海的入湖径流主要来源于阿姆河和锡尔河。锡尔河发源于中天山的阿克什拉克山冰川, 全长 3 018 km, 是中亚地区最长的河流。河流流向自东向西, 途经吉尔吉斯斯坦、乌兹别克斯坦、塔吉克斯坦、哈萨克斯坦四个国家, 最终注入咸海^[30]。阿姆河源于西天山和帕米尔高原西部山区, 全长 2 540 km, 是中亚地区流量最大的河流。河流自东向西流经塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦三个中亚国家, 最终注入咸海^[30]。

2 数据与方法

2.1 数据

(1) 湖泊面积数据

1960 – 1999 年的咸海面积数据来源于中亚水资源信息网 (CAWATER-info) (<http://www.cawater-info.net>)。2000 – 2018 年逐年的遥感影像为 MODIS MOD02QKM 产品 (来源于 <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>), 该产品为 MODIS 的一级数据产品, 时间分辨率较高, 空间分辨率达到 250 m, 能够实现咸海逐年相同时段的面积信息的提取。考虑到内陆湖泊的面积在年内波动较为剧烈, 本文选取了 2000 – 2018 年咸海面积年内变化相对稳定时期 (9 – 10 月) 的 MOD02QKM 数据。尽管归一化水体指数 (Normalized Difference Water Index, NDWI) 常被用于水域边界的提取, 但是由于 MOD02QKM 数据仅有红外和近红外两个波段, 不能用于 NDWI 的计算。因此本文选用了归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 的方法^[31], 并将 NDVI 提取所得的咸海面积与目视解译的结果进行了对比, 最终设定阈值为 -0.05 提取湖泊边界并计算面积, 提取的误差为湖泊边界所经过的像元面积的一半。

(2) 气象资料

本文的气象资料选用了英国 East Anglia 大学 Climatic Research Unit (CRU) 发布的 CRU TS v4.03 (CRU time series version 4.03, 获取地址为 http://data.ceda.ac.uk/badc/cru/data/cru_ts/)。该数据集通过整合已有的若干个知名数据库, 重建了一套覆盖全球陆地、且无缺测的月平均地表气候要素数据集。数据的空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ^[32]。已有研究表明该数据可以很好地揭示中亚地区 20 世纪的气候变化状况^[1,33]。由于中亚地区气象台站公布的资料匮乏, 因此本文选择了该数据集 1960 – 2018 年

的气温和降水量数据作为主要气象因子来分析咸海面积对气候变化的响应。

(3) 其他数据

咸海流域 2000 年左右的冰川面积数据来源于 Randolph 6.0 冰川编目数据 (Randolph Glacier Inventory, RGI)^[34], 该数据集由全球陆地冰川监测计划机构发布 (Global Land Ice Measurements from Space, GLIMS) (<http://www.glims.org/RGI/>), 2016 年的冰川面积数据是基于 Landsat ETM+、OLI 影像提取所得。冰川物质平衡观测数据来源于世界冰川监测服务处 (World Glacier Monitoring Service, WGMS) (https://wgms.ch/products_gmbb/)。咸海流域灌溉面积和水库数据来源于联合国粮食及农业组织 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) (<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/basins/aral-sea>) 和相关研究资料^[20,29]。

2.2 研究方法

(1) 显著性检验

Mann-Kendall (M-K) 检验方法是广泛应用于气候水文等要素长期变化趋势的非参数检验方法^[35]。在 M-K 趋势检验中, 检验统计量 $Z > 0$ 时表示上升趋势, $Z < 0$ 时为下降趋势。 Z 的绝对值在大于 1.28、1.64、2.32 时, 分别表示在 0.1、0.05、0.01 的水平上显著, 即通过置信度 90%、95% 和 99% 的显著性检验。在 M-K 突变检验中, 统计量 $UF > 0$ 表示呈上升趋势, $UF < 0$ 呈下降趋势, 当 UF 的绝对值大于 1.64、1.96、2.56 时, 分别表示上升或下降趋势在 0.1、0.05、0.01 的水平上显著, 即通过置信度 90%、95% 和 99% 的显著性检验。将 UF 逆序排列得到 UB , 若 UF 和 UB 曲线出现交点且交点在临界线之间, 那么相对应的时刻即为突变开始的时刻。在本文中主要用于检测中亚地区气温和降水的变化趋势及其发生突变的时间。

(2) 缓冲区分析

缓冲区分析是围绕点、线、面实体, 自动建立其周围一定距离的带状区, 用来识别这些实体对邻近对象的影响范围。本文为探究咸海面积变化对其周边不同范围内气候变化的响应, 采用缓冲区分析的方法, 以咸海的湖泊中心点位置为圆心, 以 200 km 为间隔建立若干缓冲区, 至 1 600 km 处可到达咸海流域边缘, 进而分析咸海面积变化与气象要素的空间相关性。

(3) 相关性分析

为探究湖泊面积变化与气候及人类活动之间的相关性,采用 Pearson 相关系数表示各变量之间的相关关系。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

式中: r 为相关系数; X_i 、 Y_i 为变量, \bar{X} 、 \bar{Y} 为其平均值; i 为变量的次序; n 为样本数。 $r > 0$ 时表示变量之间为正相关, 反之为负相关; r 的绝对值越接近于 1, 表明变量间相关关系越强。

Pearson 相关系数的检验统计量为

$$T = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (2)$$

式中: r 为相关系数; n 为样本数。本文中分别分析气温、降水、流域灌溉面积及水库容量等要素与湖泊面积数据之间的相关性。

(4) 回归分析

回归分析是定量分析变量之间相互依赖关系的一种重要的统计方法。标准的线性回归模型中, 假设方差在待研究总体中是恒定的, 即因变量的变异不随自身预测值以及其他自变量值的变化而发生改变。然而方差不恒定时, 线性回归不再提供最优模型估计, 而加权最小二乘回归分析可以解决这一问题。其基本原理是对不同的数据赋予不同的权重以平衡不同变异数据的影响, 使用加权最小平方(WLS)计算线性回归模型的系数, 在确定回归系数时, 对变异性小的数据赋予更高的权重。本文中采用加权最小二乘法进行回归分析, 用来确定气候要素、人为要素与湖泊面积变化之间的关系, 分析其对湖泊面积变化的影响程度。

3 结果与讨论

3.1 咸海面积变化

图 2 显示了过去 60 年咸海的面积变化情况。咸海面积由 1960 年的 $6.85 \times 10^4 \text{ km}^2$ 萎缩至 2018 年的 $(8.32 \pm 0.19) \times 10^3 \text{ km}^2$, 面积共萎缩了 $(6.02 \pm 0.02) \times 10^4 \text{ km}^2$ (约 87.85%), 年平均变化率达到 $-1.52\% \cdot \text{a}^{-1}$ 。其中, 1960–2009 年咸海经历了面积的急剧萎缩, 由 1960 年的 $6.85 \times 10^4 \text{ km}^2$ 减少到 2009 年的 $(9.06 \pm 0.17) \times 10^3 \text{ km}^2$, 萎缩了 $(5.94 \pm 0.02) \times 10^4 \text{ km}^2$ (约 86.77%), 年平均变化率达到 $-1.77\% \cdot \text{a}^{-1}$; 2009–2018 年咸海的面积萎缩速率明显减缓, 其面积由 $(9.06 \pm 0.17) \times 10^3 \text{ km}^2$ 变化为 $(8.32 \pm 0.19) \times 10^3 \text{ km}^2$, 共减少了 740.04 km^2 (约 8.17%), 年平均变化率为 $-0.91\% \cdot \text{a}^{-1}$, 并且在 2010 年、2015 年和 2017 年湖泊面积出现了小幅度的扩张。

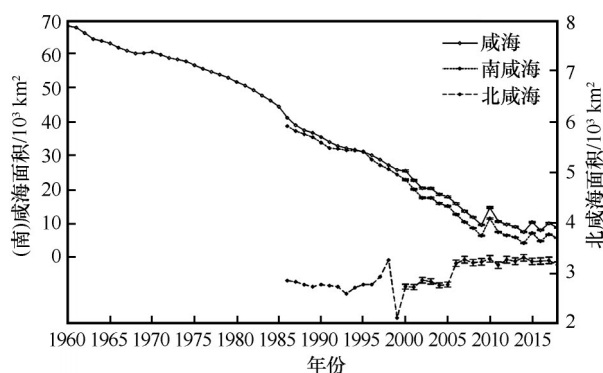


图 2 1960–2018 年咸海面积变化和 1986–2018 年南、北咸海面积变化

Fig. 2 Area variations of the Aral Sea, 1960–2018 and the South and North Aral Seas, 1986–2018

咸海在 1986 年分裂成了南、北两部分, 即主体部分的南咸海和面积相对较小的北咸海 [图 3(a)、(b)]。南咸海面积变化趋势与咸海整体的面积变

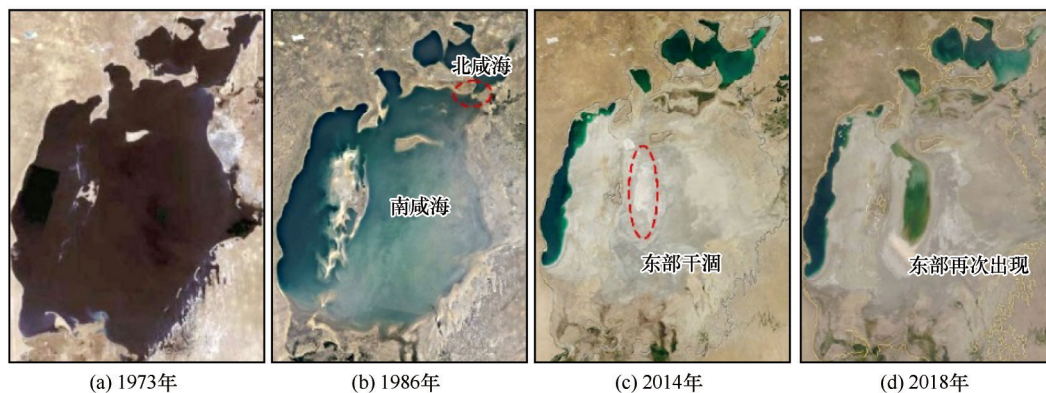


图 3 Google Earth 影像上不同时期咸海的空间特征

Fig. 3 Google Earth images showing the spatial pattern of the Aral Sea in 1973, 1986, 2014 and 2018

化趋势基本一致,即经历了急剧萎缩(1986–2009年)和波动缩小(2009–2018年)两个阶段,其面积从1986年的 $3.86 \times 10^4 \text{ km}^2$ 减少到了2018年的 $(5.18 \pm 0.12) \times 10^3 \text{ km}^2$,萎缩了 $(3.34 \pm 0.01) \times 10^4 \text{ km}^2$ (约86.57%),年平均变化率高达 $-2.71\% \cdot \text{a}^{-1}$ (图2)。2000年之后,南咸海又进一步分裂成了东、西两部分,其东部在2014年曾首次出现干涸[图3(c)],随后几年其面积有一定程度的恢复[图3(d)]。相比于南咸海的整体萎缩趋势,北咸海除1999年出现了极小值外,其余年份的面积变化趋势均呈波动的上升状态(图2)。面积从分裂之初的 $2.83 \times 10^3 \text{ km}^2$ 波动扩张至2018年的 $(3.14 \pm 0.06) \times 10^3 \text{ km}^2$,增加了 $(312.34 \pm 62.21) \text{ km}^2$ (约11.04%),年平均变化率为 $0.35\% \cdot \text{a}^{-1}$ 。

3.2 气候变化和人类活动对咸海的影响

咸海属于平原尾间湖泊,其入湖径流主要来源于降水和上游山区的冰冻圈释水,这两者都与气候变化密切相关;阿姆河和锡尔河均流经中亚地区的绿洲地区,沿途平原区大规模的农业灌溉、居民生活用水和水库蓄水也会影响咸海的入湖径流。因此,对咸海而言,气候变化和人类活动共同影响其入湖径流,有必要结合气候变化及人类活动来分析咸海面积变化的主要影响因素。

3.2.1 咸海湖区气候变化

(1) 气温

基于CRU数据获取了咸海湖区1960–2018年的气温变化状况(图4)。1960–2018年咸海湖区多年平均气温约为 $10.36 \text{ }^\circ\text{C}$,其中年均温的最大值($12.09 \text{ }^\circ\text{C}$)出现在2004年和2013年,最小值($8.16 \text{ }^\circ\text{C}$)出现在1969年。湖区气温在研究时段内整体呈波动上升的趋势[图4(a)],年均温、夏季气温和冬季气温的变化率分别为 $0.32 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 、 $0.37 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $0.29 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。年均温和夏季气温升温趋势均在0.01的水平上显著。M-K检验的结果表明:咸海湖区的年均温在1994年发生突变,开始出现增温趋势,2000年以后湖区的年均温上升趋势在0.05的水平上显著[图4(b)];湖区的夏季气温在研究时段内持续上升,并在1982年之后呈现出显著的升温趋势,达到0.05的显著性水平[图4(d)];湖区冬季气温在1960–1982年波动下降,而在1982年之后出现小幅度的上升,但其升温趋势不显著[图4(f)]。

(2) 降水

研究时段内咸海湖区多年平均降水量为 128.9 mm ,其整体呈先减少后增加的趋势[图5(a)],变化速率约为 $4.87 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。然而,湖区内夏季和冬季降水量呈现出不同的变化趋势[图5(c)、(e)]:夏季降水量整体较少,多年平均夏季降水量仅为 17.55 mm ,其变化率为 $0.34 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$,增加趋势不显著;而冬季降水量呈显著增加的趋势,变化率达到 $2.21 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$,其增加趋势在0.01的水平上显著。M-K检验结果表明:咸海湖区的年降水量在1979年发生突变,开始呈现上升趋势,且在1992年之后上升趋势在0.1的水平上显著;湖区夏季降水量在研究时段出现多个突变点,表明夏季降水量波动幅度较大,并无明显的变化趋势;冬季降水量在1960–1982年相对稳定,变化幅度较小,而在1982年之后明显增多,1989年之后增加趋势在0.1的水平上显著[图5(b)、(d)、(f)]。

3.2.2 咸海周边气候变化

湖泊变化不仅与湖区的气候状况有关,还与所在流域甚至周边气候存在联系。基于CRU数据获取了咸海周边地区1960–2018年的年平均气温和年降水量变化率的空间分布(图6)。结果表明,咸海及其周边地区的气候呈明显的暖湿化:1960–2018年咸海及其周边地区气温均呈显著的增温趋势,增温速率约为 $0.28 \text{ }^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$,上游山区升温幅度较小;咸海及其周边地区的降水普遍呈增加趋势,尤其是咸海的上游山区,降水量的增幅显著,最大可达 $26.69 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。

为了进一步探究咸海及其周边区域的气候变化对咸海面积变化的影响,本文以湖泊为中心,按照200 km的间距建立了多个缓冲区。此外,由于咸海流域上游山区有大量冰川分布,其对气候变化极为敏感,因此将锡尔河和阿姆河的上游(图6中的I和II区域)作为探究气候变化对湖泊面积变化影响的典型区域。

将上述缓冲区及典型区域内1960–2018年的气象因子与相应时段内咸海的面积变化做相关分析(表1),结果表明:咸海面积变化与其周边区域的降水相关程度低,而与年平均气温和夏季气温呈显著的负相关关系(在0.01水平上显著相关),尤其与湖区及湖泊上游山区的年平均气温相关性最大,与距离湖泊中心点0~200 km、1 000~1 200 km、1 200

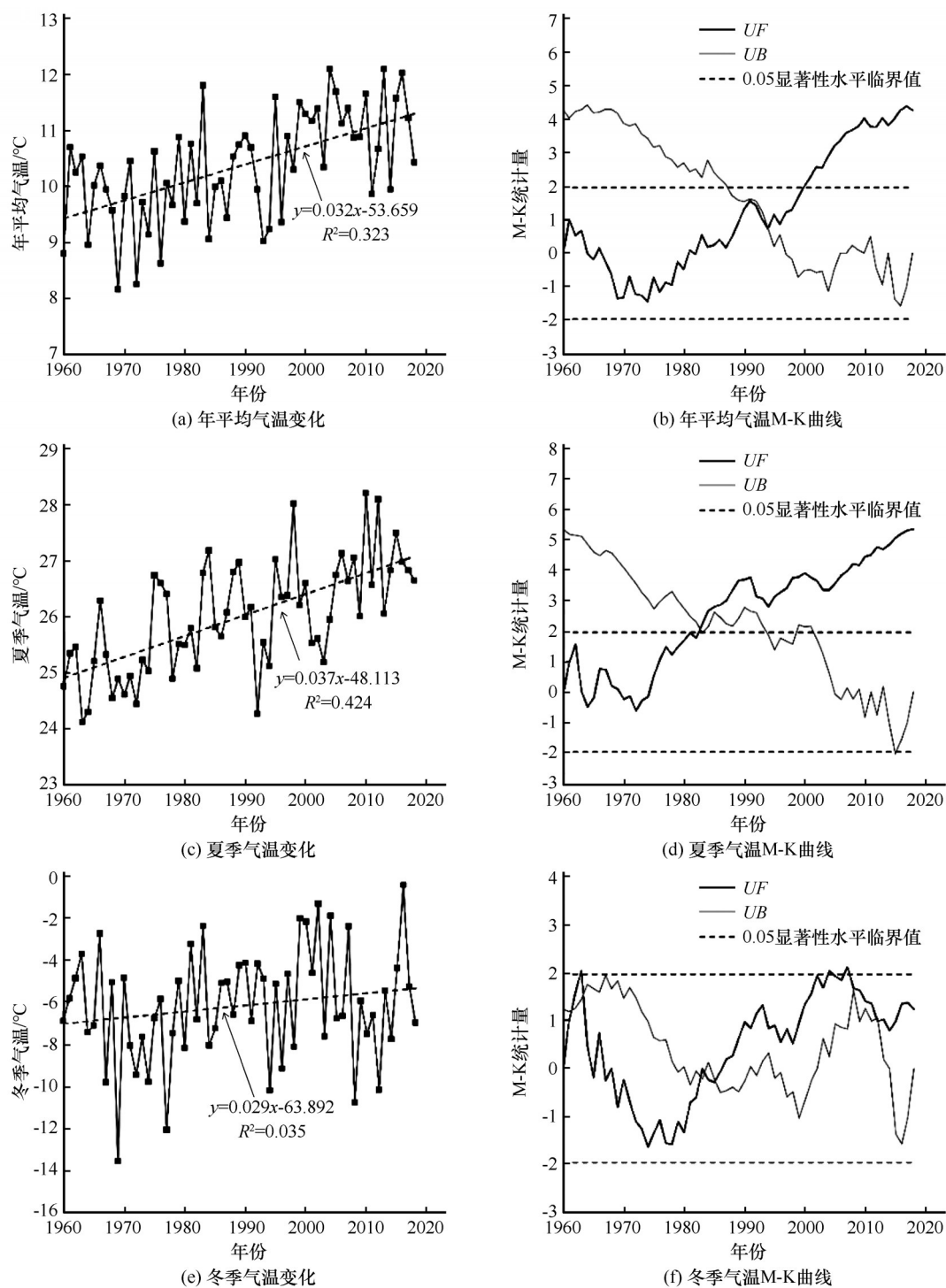


图4 1960—2018年咸海湖区气温变化及其M-K检验曲线

Fig. 4 Variations of annual mean air temperature (a), summer air temperature (c), winter air temperature (e) and M-K test curves of annual mean air temperature (b), summer air temperature (d), winter air temperature (f) in the Aral Sea from 1960 to 2018

~1 400 km、1 400 ~ 1 600 km 及阿姆河、锡尔河上游年平均气温的相关系数分别达到 -0.575、-0.635、-0.666、-0.702、-0.629 和 -0.683，而与冬季气温的相关程度低。此外，湖泊面积仅与距离湖泊中心点 400 km 以内的冬季降水量呈显著的相

关关系，与距湖泊中心点 0 ~ 200 km、200 ~ 400 km 的冬季降水相关系数分别为 -0.370 和 -0.363，均在 0.01 水平上显著相关，而与 400 km 以外的年降水量、夏季降水量和冬季降水量均无显著的相关关系。

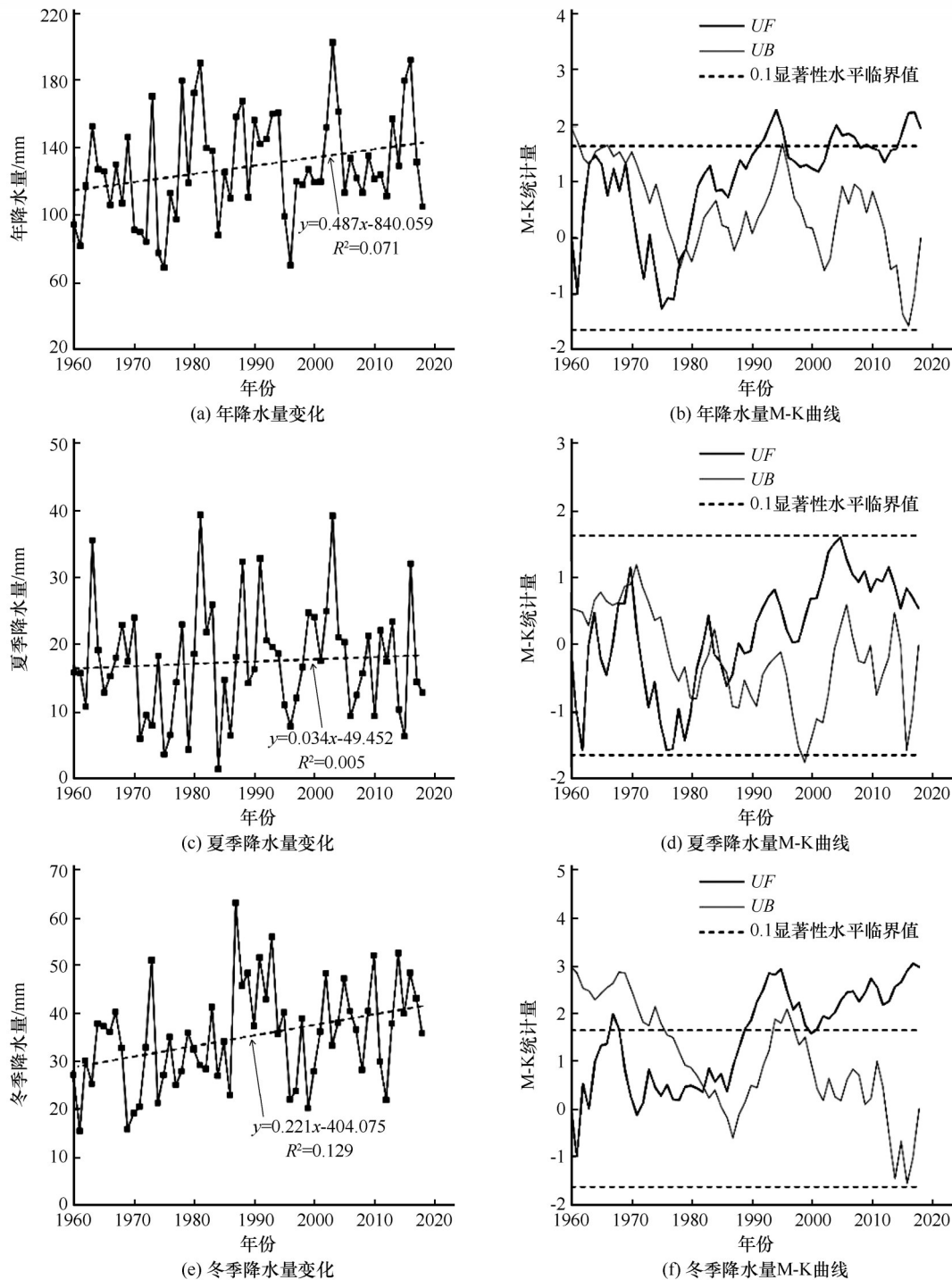


图5 1960—2018年咸海湖区降水量变化及其M-K检验曲线

Fig. 5 Variations of annual total precipitation (a), summer precipitation (c), winter precipitation (e) and M-K test curves of annual total precipitation (b), summer precipitation (d), winter precipitation (f) in the Aral Sea from 1960 to 2018

3.2.3 冰冻圈变化的影响

自1986年分裂之后,南咸海主要受阿姆河补给,北咸海主要受锡尔河补给。南、北咸海面积与阿姆河、锡尔河上游山区气候变化的相关分析结果(表2)表明:南咸海面积与阿姆河上游夏季气温呈显著的负相关(相关系数为-0.675),而北咸海面积

与锡尔河上游夏季气温呈显著的正相关(相关系数为0.543)。此外,南、北咸海的面积与阿姆河和锡尔河上游的冬季气温、年降水量、夏季降水量和冬季降水量无显著的相关关系。

一般来说,内陆湖流域气温升高(降低)在增强(减弱)流域内蒸发量的同时也会一定程度上减

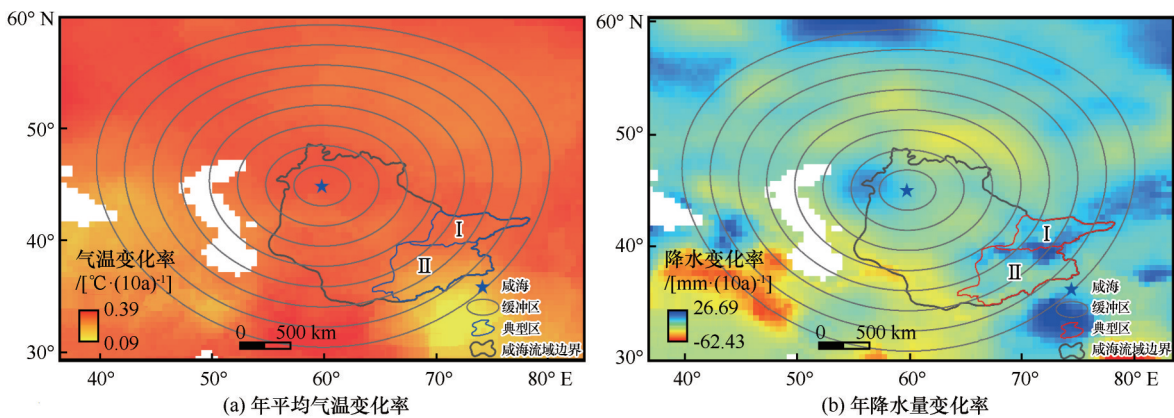


图6 1960 – 2018年咸海周边地区年平均气温(a)和年降水量(b)变化率(图中 I 代表锡尔河上游, II 代表阿姆河上游)

Fig. 6 Variation rates of annual mean air temperature (a) and annual total precipitation (b) in the Aral Sea region from 1960 to 2018 (I represents upstream of the Syr Darya, and II represents upstream of the Amu Darya)

表1 1960 – 2018年咸海面积与缓冲区及典型区内气象要素的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between area of the Aral Sea and climatic factors in buffer zones and typical zones from 1960 to 2018

区域	范围	年平均气温	夏季气温	冬季气温	年降水量	夏季降水量	冬季降水量
缓冲区	0 ~ 200 km	-0.575**	-0.632**	-0.197	-0.265*	-0.093	-0.370**
	200 ~ 400 km	-0.574**	-0.633**	-0.206	-0.208	-0.030	-0.363**
	400 ~ 600 km	-0.583	-0.631**	-0.228	-0.060	0.116	-0.221
	600 ~ 800 km	-0.591**	-0.617**	-0.249	0.068	0.227	-0.140
	800 ~ 1 000 km	-0.607**	-0.608**	-0.270	-0.043	0.178	-0.237
	1 000 ~ 1 200 km	-0.635**	-0.636**	-0.287	-0.123	0.127	0.011
	1 200 ~ 1 400 km	-0.666**	-0.653**	-0.314	-0.201	0.049	-0.175
	1 400 ~ 1 600 km	-0.702**	-0.673**	-0.349**	-0.287*	-0.096	-0.132
典型区	阿姆河上游	-0.629**	-0.548**	-0.283*	-0.171	-0.314*	-0.293*
	锡尔河上游	-0.683**	-0.580**	-0.333*	-0.178	-0.217	-0.237

注: **表示在0.01水平(双侧)上显著相关, *表示在0.05水平(双侧)上显著相关。

表2 南、北咸海面积与阿姆河、锡尔河上游气候要素的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between areas of the South and North Aral Seas and climatic factors in upstreams of the Amu Darya and the Syr Darya

区域	年平均气温	夏季气温	冬季气温	年降水量	夏季降水量	冬季降水量
阿姆河上游	-0.589**	-0.675**	0.040	-0.051	0.192	-0.121
锡尔河上游	0.353*	0.543**	-0.225	-0.010	-0.113	0.126

注: **表示在0.01水平(双侧)上显著相关, *表示在0.05水平(双侧)上显著相关。

少入湖径流,进而导致湖泊面积萎缩(扩张),流域内降水量的增加(减少)则会通过影响入湖径流而引起湖泊面积扩张(萎缩)。对上游有广泛冰冻圈(主要包括冰川、冻土和积雪)分布的咸海流域而言,冰冻圈对河川径流的“削峰填谷”作用会使阿姆河和锡尔河的径流在一定程度维持稳定。咸海流

域的冰川变化研究结果显示,过去60年整个流域冰川呈全面退缩的趋势^[36],2000 – 2016年阿姆河、锡尔河上游的冰川面积分别减少了372.24 km² (3.48%)和128.61 km² (7.31%),变化速率分别为-0.22%·a⁻¹和-0.46%·a⁻¹。距离咸海流域最近的有长期观测的冰川是图尤克苏(Ts. Tuyuksuyskiy)冰川,该冰川近60年的平衡线高度和累积物质平衡记录(图7)显示,过去60年该冰川的平衡线高度呈升高趋势,增加了140 m;物质平衡记录也表明图尤克苏冰川长期处于负平衡状态。若以图尤克苏冰川为代表来指代咸海流域及周边地区的冰冻圈变化,则可以表明咸海流域及周边地区的冰冻圈在过去60年呈全面亏损态,这一结果也在基于多源DEM资料估算过去50年该区域的冰量变化中得到了验证^[37–38]。换言之,在本文的研究时段里冰冻圈融水对咸海流域径流主要起到的是“填谷”的效

果, 然而从咸海流域的面积变化来看, 冰冻圈融水对咸海流域径流的“填谷”作用并没有对咸海面积的快速萎缩起到抑制作用效果。

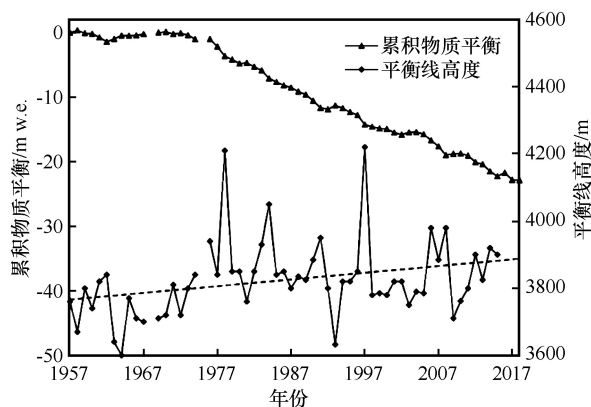


图7 1957–2018年Ts. Tuyuksuyskiy冰川累积物质平衡与平衡线高度变化

Fig. 7 Variations of cumulative mass balance and equilibrium line altitude of the Ts. Tuyuksuyskiy Glacier, 1957–2018

同时, 过去几十年咸海流域气候状况明显从暖干向暖湿转变。青藏高原地区及中亚高山区的湖泊变化研究结果表明^[14], 当气候转向暖湿时湖泊面积一般会呈现出扩张的趋势, 然而同样受冰冻圈补给的咸海却在过去60年损失了近90%的面积。二者的差异主要在于青藏高原和中亚高山地区的人类活动较弱, 而咸海流域内人类活动强烈(两条主要河流沿线分布着约 $9.74 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的绿洲)。因此, 明确人类活动对咸海面积变化的影响是探讨近60年来咸海急剧萎缩真实原因必须解决的问题。

3.2.4 人类活动的影响

灌溉用水是咸海流域水资源利用的主要方式, 流域内灌溉取水量约占用水总量的90%^[10]。咸海流域自20世纪60年代以来持续进行大规模的农业开发, 并大量修建用于农业灌溉的水利工程, 使得流域内的引水灌溉面积从60年代的 $4.51 \times 10^4 \text{ km}^2$ 增加到90年代的 $7.61 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图8), 增加了68.74%^[39]。大量水库和水利设施将阿姆河和锡尔河的径流引入平原灌区, 从而导致咸海的人湖径流从1983年的 3.5 km^3 减少到1996年的 1.0 km^3 , 减少了71.43%^[12]。相应时段咸海的面积也出现了急剧萎缩(图2~3)。20世纪90年代初苏联解体后, 中亚各国在水资源调配的问题上产生了矛盾和冲突, 咸海流域内水利设施的修建与维护受到了影响, 灌区的生产布局也发生了改变, 这使得咸海流域的灌溉面积和水库容量增加速度趋缓, 与此同

时, 咸海的萎缩速率也有所减缓。为保护咸海, 近年来中亚各国不断制定和完善跨界水资源管理的相关政策, 包括《中亚五国水协定》《咸海地区2003–2010年环境和社会经济改善行动计划》《保护北咸海计划》等, 咸海的面积在近年来趋于稳定甚至出现了小幅度的扩张。

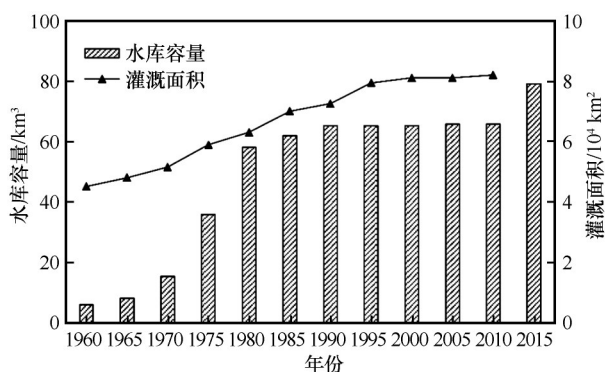


图8 1960–2015年咸海流域灌溉面积与水库容量变化
Fig. 8 Changes in irrigation area and reservoir capacity of the Aral Sea basin from 1960 to 2015

为进一步分析人类活动对咸海长期面积变化的影响, 对1960–2015年咸海流域的灌溉面积和阿姆河、锡尔河及咸海流域的水库容量与咸海面积做相关分析(表3)。结果表明: 咸海面积与咸海流域灌溉面积和水库容量呈显著的负相关关系, 均在0.01水平上显著相关, 尤其与咸海流域灌溉面积的相关性最大(相关系数达 -0.959)。由此可见, 流域内灌溉用水量是影响咸海面积变化的重要因素。

表3 1960–2015年咸海流域灌溉面积、水库容量与咸海面积的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between area of the Aral Sea and irrigation area, reservoir capacity in the Aral Sea basin during 1960–2015

对象	流域	相关系数
灌溉面积	咸海流域	-0.959^{**}
水库容量	阿姆河流域	-0.893^{**}
	锡尔河流域	-0.743^{**}
	咸海流域	-0.844^{**}

注: **表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

3.2.5 回归分析

为了进一步明确气象因素和人类活动对咸海面积变化的影响程度, 分别选取气温、降水和人类活动要素中相关性最高的变量, 即距湖泊中心 $1\,400 \sim 1\,600 \text{ km}$ 缓冲区的年均温、 $200 \sim 400 \text{ km}$ 缓

冲区的冬季降水量和咸海流域的灌溉面积,进行加权最小二乘回归分析。通过标准化处理,使各要素变为无量纲量,建立它们之间的统计关系,得到如下关系式。

$\bar{S} = -0.104\bar{T} - 0.003\bar{P} - 0.898\bar{H}$ ($R^2=0.927$, $n=59$) (3)
式中: \bar{S} 、 \bar{T} 、 \bar{P} 、 \bar{H} 分别为咸海面积、距湖泊中心 1 400 ~ 1 600 km 缓冲区年均温、距湖泊中心 200 ~ 400 km 缓冲区冬季降水量和咸海流域灌溉面积的无量纲标准化值。

式中自变量系数的绝对值大小反映了该因素对因变量变化的相对影响程度。可以看出,咸海流域灌溉面积系数(-0.898)的绝对值远大于缓冲区气温系数(-0.104)和降水要素系数(-0.003)的绝对值,说明以灌溉用水为主的人类活动是咸海长期面积变化的主要影响因素,而气温和降水对其影响均较小。

虽然咸海流域乃至整个中亚地区的气候状况正朝着有利于湖泊扩张的趋势转变(从暖干向暖湿转变),但 1960 年以来增强的人类活动才是咸海面积快速萎缩的主导因素。随着“丝绸之路经济带”建设的进一步深入,咸海流域的人类活动也必将增强。2050 年之前中亚地区的气候仍将往暖湿方向发展^[40],而在这之后咸海流域的冰川融水将呈下降趋势,到 21 世纪末该流域冰川融水对径流的贡献将下降约 30%^[41]。在气候环境不发生大突变的情景下,咸海流域应尽快调整当地目前以灌溉为主的水资源利用方式,否则,如果 2050 年后冰冻圈释水减弱,咸海很有可能再次面临干涸。

4 结论

本文基于 1960 - 2018 年咸海的面积变化信息,结合气候变化与人类活动分析了咸海的长期面积变化特征及其主要影响因素。结论如下:

(1) 1960 - 2018 年,咸海的面积萎缩了 $(6.02 \pm 0.02) \times 10^4 \text{ km}^2$ (约 87.85%),年平均变化率达到 $-1.52\% \cdot \text{a}^{-1}$ 。自 1986 年分裂为南、北咸海两部分之后,南咸海面积急剧萎缩,缩减了 $(3.34 \pm 0.01) \times 10^4 \text{ km}^2$ (约 86.57%),而北咸海略有扩张,面积增加了 $(312.34 \pm 62.21) \text{ km}^2$ (约 11.04%),其变化幅度较小。

(2) 咸海面积萎缩的因素包括两个方面:①气象因素,主要由于阿姆河和锡尔河上游冰川区气温的升高,同时湖区周围的气温升高引起湖面蒸发的

增加也在一定程度上加剧了咸海的萎缩;②人类活动,主要表现为 1960 年以来咸海流域灌溉用水和水库储水量的持续增加,而人类活动是造成咸海面积萎缩的主要因素。在中亚地区气候继续向暖湿变化的背景下,咸海流域应加快调整以灌溉为主的农业用水结构,否则,如果冰川融水在 2050 年前后达到峰值后,咸海可能再次面临干涸。

参考文献(References):

- [1] Huang Qiuxia, Zhao Yong, He Qing. Climatic characteristics in Central Asia based on CRU data [J]. *Arid Zone Research*, 2013, 30(3): 396 - 403. [黄秋霞, 赵勇, 何清. 基于 CRU 资料的中亚地区气候特征 [J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 396 - 403.]
- [2] Chen Xi. Changes in land use and land cover of the arid China [M]. Beijing: Science Press, 2008. [陈曦. 中国干旱区土地利用与土地覆被变化 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.]
- [3] Becker F, Li Z L. Towards a local split window method over land surfaces [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(3): 369 - 393.
- [4] Wei Shanrong, Jin Xiaomei, Wang Kailin, et al. Response of lake area variation to climate change in Qaidam Basin based on remote sensing [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(5): 427 - 433. [魏善蓉, 金晓媚, 王凯霖, 等. 基于遥感的柴达木盆地湖泊面积变化与气候响应分析 [J]. 地学前缘, 2017, 24(5): 427 - 433.]
- [5] Ma Ronghua, Yang Guishan, Duan Hongtao, et al. China's lakes at present: number, area and spatial distribution [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2011, 54(2): 283 - 289. [马荣华, 杨桂山, 段洪涛, 等. 中国湖泊的数量、面积与空间分布 [J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(3): 394 - 401.]
- [6] Shi Yafeng. Glacier recession and lake shrinkage indicating a climatic warming and drying trend in Central Asia [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1990, 45(1): 1 - 13. [施雅风. 山地冰川与湖泊萎缩所指示的亚洲中部气候干暖化趋势与未来展望 [J]. 地理学报, 1990, 45(1): 1 - 13.]
- [7] Mason I M, Guzkowska M A J, Rapley C G, et al. The response of lake levels and areas to climate change [J]. *Climate Change*, 1994, 27(2): 161 - 197.
- [8] Li Yu, Morrill C. Multiple factors causing Holocene lake-level change in monsoonal and arid Central Asia as identified by model experiments [J]. *Climate Dynamics*, 2010, 35(6): 1115 - 1128.
- [9] Yao Junqiang, Yang Qing, Mao Weiyi, et al. Evaluation of the impacts of climate change and human activities on the hydrological environment in Central Asia [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(1): 222 - 230. [姚俊强, 杨青, 毛炜峰, 等. 气候变化和人类活动对中亚地区水文环境的影响评估 [J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 222 - 230.]
- [10] Deng Mingjiang, Long Aihua, Zhang Yi, et al. Assessment of water resources development and utilization in the five Central Asia countries [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(12): 1347 - 1356. [邓铭江, 龙爱华, 章毅, 等. 中亚五国水资源及其开发利用评价 [J]. 地球科学进展, 2010, 25(12): 1347 - 1356.]
- [11] Igor V S. Water-related problems of Central Asia: some results of the (GIWA) international water assessment program [J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2004, 33(1):

- 52 – 62.
- [12] Bai Jie, Chen Xi, Li Junli, et al. Changes of inland lake area in arid Central Asia during 1975 – 2007: a remote-sensing analysis[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(1): 80 – 88. [白洁, 陈曦, 李均力, 等. 1975 – 2007 年中亚干旱区内陆湖泊面积变化遥感分析[J]. *湖泊科学*, 2011, 23(1): 80 – 88.]
- [13] Meng Kai, Shi Xuhua, Wang Erqi, et al. High-altitude salt lake elevation changes and glacial ablation in central Tibet, 2000 – 2010 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(5): 525 – 534. [孟恺, 石许华, 王二七, 等. 青藏高原中部色林错湖近 10 年来湖面急剧上涨与冰川消融[J]. *科学通报*, 2012, 57(7): 571 – 579.]
- [14] Zhang Guoqing, Yao Tandong, Shum C K, et al. Lake volume and groundwater storage variations in Tibetan Plateau's endorheic basin: water mass balance in the TP [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(11): 5550 – 5560.
- [15] Song Chunqiao, Sheng Yongwei. Contrasting evolution patterns between glacier-fed and non-glacier-fed lakes in the Tanggula Mountains and climate cause analysis [J]. *Climatic Change*, 2016, 135(3/4): 493 – 507.
- [16] Li Da, Shanguan Donghui, Huang Weidong. Study on the area change of Lake Merzbacher in the Tianshan Mountains during 1998 – 2017 [J/OL]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(1) [2019-11-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1072.P.20190305.1324.002.html>. [李达, 上官冬辉, 黄维东. 天山麦兹巴赫冰川湖 1998 – 2017 年面积变化相关研究[J/OL]. *冰川冻土*, 2019, 41(1) [2019-11-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1072.P.20190305.1324.002.html>.]
- [17] Yan Zhengxin, Guo Wanqin. Remote sensing monitoring of the lake area of Issyk-Kul Lake in Central Asia from 1991 to 2014 [J]. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2018, 41(2): 142 – 146. [闫政新, 郭万钦. 1991 – 2014 年中亚伊塞克湖湖泊面积变化遥感监测[J]. *测绘与空间地理信息*, 2018, 41(2): 142 – 146.]
- [18] Yuan Guoying, Yuan Lei. An approach to the environmental changes in Lop-Nur history [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53(Suppl 1): 83 – 89. [袁国映, 袁磊. 罗布泊历史环境变化探讨[J]. *地理学报*, 1998, 53(增刊 1): 83 – 89.]
- [19] Deng Mingjiang, Long Aihua. Evolution of hydrologic and water resources and ecological crisis in the Aral Sea basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(6): 1363 – 1375. [邓铭江, 龙爱华. 咸海流域水文水资源演变与咸海生态危机出路分析[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(6): 1363 – 1375.]
- [20] Deng Mingjiang, Long Aihua. Water resources issue among the Central Asian countries around the Aral Sea: conflict and cooperation [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(6): 1376 – 1390. [邓铭江, 龙爱华. 中亚各国在咸海流域水资源问题上的冲突与合作[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(6): 1376 – 1390.]
- [21] Wu Jinglu, Ma Long, Ji Lili, et al. Lake surface change of the Aral Sea and its environmental effects in the arid region of the Central Asia [J]. *Arid Land Geography*, 2009, 32(3): 418 – 422. [吴敬禄, 马龙, 吉力力, 等. 中亚干旱区咸海的湖面变化及其环境效应[J]. *干旱区地理*, 2009, 32(3): 418 – 422.]
- [22] Wurtsbaugh W A, Miller C, Null S E, et al. Decline of the world's saline lakes [J]. *Nature Geoscience*, 2017, 10: 816 – 821.
- [23] Singh A, Seitz F, Schwatke C. Inter-annual water storage changes in the Aral Sea from multi-mission satellite altimetry, optical remote sensing, and GRACE satellite gravimetry [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123(4): 187 – 195.
- [24] Stanev E V, Peneva E L, Mercier F. Temporal and spatial patterns of sea level in inland basins: recent events in the Aral Sea [J/OL]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(15) [2019-11-08]. <https://doi.org/10.1029/2004gl020478>.
- [25] Cretaux J F, Letolle R, Bergé-Nguyen M. History of Aral Sea level variability and current scientific debates [J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 110: 99 – 113.
- [26] Barale V, Gade M. Remote sensing of the Asian seas [M]. Berlin: Springer, 2019.
- [27] Long Aihua, Deng Mingjiang, Xie Lei, et al. Exploring analysis on the adaptive countermeasures to water resources evolution under the climate change in Xinjiang and Aral Sea basin [J]. *Arid Land Geography*, 2012, 35(3): 377 – 387. [龙爱华, 邓铭江, 谢蕾, 等. 气候变化下新疆及咸海流域河川径流演变及适应性对策分析[J]. *干旱区地理*, 2012, 35(3): 377 – 387.]
- [28] Jin Qinjian, Wei Jiangfeng, Yang Zongliang, et al. Irrigation-induced environmental changes around the Aral Sea: an integrated view from multiple satellite observations [J/OL]. *Remote Sensing*, 2017, 9 [2019-11-08]. <https://doi.org/10.3390/rs9090900>.
- [29] Micklin P, Aladin N V, Plotnikov I. The Aral Sea [M]. Berlin: Springer, 2014.
- [30] Nezlin N P, Kostianoy A G, Lebedev S A. Interannual variations of the discharge of Amu Darya and Syr Darya estimated from global atmospheric precipitation [J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 47(1/2/3/4): 67 – 75.
- [31] Defries R S, Townshend J R G. NDVI-derived land cover classifications at a global scale [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(17): 3567 – 3586.
- [32] Wen Xinyu, Wang Shaowu, Zhu Jinhong, et al. An overview of China climate change over the 20th century using UK UEA/CRU high resolution grid data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(5): 894 – 904. [闻新宇, 王绍武, 朱锦红, 等. 英国 CRU 高分辨率格点资料揭示的 20 世纪中国气候变化[J]. *大气科学*, 2006, 30(5): 894 – 904.]
- [33] Wang Jinsong, Chen Fahu, Zhang Qiang, et al. Temperature variations in arid and semi-arid areas in middle part of Asia during the last 100 years [J]. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(5): 1035 – 1045. [王劲松, 陈发虎, 张强, 等. 亚洲中部干旱半干旱区近 100 年来的气温变化研究[J]. *高原气象*, 2008, 27(5): 1035 – 1045.]
- [34] Pfeffer W T, Arendt A A, Bliss A, et al. The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers [J]. *Journal of Glaciology*, 2014, 60(221): 537 – 552.
- [35] Zhang Danwu, Cong Zhentao, Ni Guangheng. Comparison of three Mann-Kendall methods based on the China's meteorological data [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(4): 490 – 496. [章诞武, 丛振涛, 倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J]. *水科学进展*, 2013, 24(4): 490 – 496.]
- [36] Chen An'an. Glacier mass budgets in the High Mountain Asia based on multi-source DEMs over past 50 years [D]. Lanzhou: Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, 2017. [陈安安. 基于多源 DEM 的近 50 年高亚洲地区冰川物质平衡研究[D]. 兰州: 中国科学院西北生态环境资源研究院, 2017.]
- [37] Zhou Yushan, Li Zhiwei, Li Jia, et al. Geodetic glacier mass balance (1975 – 1999) in the central Pamir using the SRTM DEM and KH-9 imagery [J]. *Journal of Glaciology*, 2019,

- 65(250): 309 – 320.
- [38] Fanny B, Etienne B, Patrick W, et al. Author correction: a spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances from 2000 to 2016[J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(7): 542 – 544.
- [39] Saiko T A, Zonn I S. Irrigation expansion and dynamics of desertification in the circum-Aral region of Central Asia[J]. *Applied Geography*, 2000, 20(4): 349 – 367.
- [40] Shi Yafeng. Estimation of the water resources affected by climatic warming and glacier shrinkage before 2050 in west China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(4): 333 – 341. [施雅风. 2050年前气候变暖冰川萎缩对水资源影响情景预估[J]. *冰川冻土*, 2001, 23(4): 333 – 341.]
- [41] Huss M, Hock R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8: 135 – 140.

The relationship between area variation of the Aral Sea in the arid Central Asia and human activities and climate change

YANG Xuewen^{1,2}, WANG Ninglian^{1,2,3}, CHEN An'an^{1,2}, ZHANG Wei⁴

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China; 2. Institute of Earth Surface System and Hazards, College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China;

3. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China; 4. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Utilizing datasets of the Aral Sea area, global CRU meteorological data and the irrigation area and reservoir capacity, we quantitatively assessed the long-term area variation of the Aral Sea during the period of 1960 – 2018, and then investigated the dominant influence factors including climate change and human activities. It is revealed that area of the Aral Sea had shrunk dramatically from $6.85 \times 10^4 \text{ km}^2$ to $(8.32 \pm 0.19) \times 10^3 \text{ km}^2$ with a shrinkage of $(6.02 \pm 0.02) \times 10^4 \text{ km}^2$ (about 87.85%) from 1960 to 2018. The area of the Aral Sea had shrunk by $(5.94 \pm 0.02) \times 10^4 \text{ km}^2$ (about 86.77%) during the period of 1960 – 2009, while the shrinkage rate had slowed down obviously and the area had decreased by 740.04 km^2 (about 8.17%) during the period of 2009 – 2018. The results of this statistical analysis show that the enhanced human activities since 1960, especially the increase of irrigation water consumption and reservoir capacity, is the dominant factor rendering the rapid shrinkage of the Aral Sea. Hence, water consumption, especially for irrigation should be adjusted to adapt on-going warming in the Aral Sea basin as soon as possible.

Key words: Aral Sea; area variation; climate change; glacier change; human activity

(责任编辑: 上官冬辉; 编辑: 武俊杰)