

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210495

咸海萎缩速率变化及驱动因素分析

王浩轩¹, 黄峰^{1, 2}, 郭利丹^{2, 3}, 钟瑞森⁴

(1.河海大学 水文水资源学院,江苏 南京 210098; 2.河海大学 国际河流研究中心,江苏 南京 211100;
3.河海大学 商学院,江苏 南京 211100; 4.中国科学院 新疆生态与地理研究所,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:咸海的萎缩造成了举世瞩目的生态灾难。为探究咸海萎缩及其速率变化的可能原因,采用Mann-Kendall检验法、两相线性回归检验法分析了咸海水位与水面面积、咸海流域降水与气温、耕地与建设用地面积的趋势及突变变化特征,通过构建多元线性回归模型,剖析了不同时期咸海萎缩的驱动因素。结果表明:咸海的水位显著降低了19.08 m,水面面积显著缩小了 4.90×10^4 km²;咸海水位与水面面积的变化呈现出明显的阶段性特征,均于1960年、2008年发生显著突变,在突变时间前后,咸海萎缩速率发生了显著变化;在咸海萎缩的各个阶段,人类活动均比气候变化对咸海萎缩的影响相对更为显著。

关键词:咸海;萎缩速率;趋势分析;突变检测;人类活动;气候变化

中图分类号:P337;TV15

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2023)03-0107-05

0 引言

湖泊在维持生态的稳定与人类的生存发展中发挥着重要作用,尤其是在生态环境相对脆弱的干旱区^[1]。中亚干旱区是全球最大的干旱区之一^[2],咸海流域是中亚干旱区具有代表性的流域。20世纪60年代以来,前苏联和吉尔吉斯斯坦、哈萨克斯坦、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦的大规模农垦和灌溉消耗了大量的水资源^[3],阿姆河和锡尔河注入咸海的水量显著减少,咸海水面面积急剧萎缩^[4],由此造成了一系列严重的区域生态环境问题^[5]。因此,开展咸海面积变化与气候因素、人类活动因素的关系研究具有重要的科学意义,同时也对探索咸海生态环境问题的解决办法有重要的现实意义。

目前对于咸海的研究主要集中于水资源问题及其引起的政治问题上^[6-8],也有许多研究探讨了气候变化和人类活动对咸海面积、蓄水量的影响^[9-11],各国学者普遍认为灌溉取水、水库蓄水等人类活动是影响咸海长期以来变化的主要因素。目前对于近年来咸海

萎缩速率变化及其原因的研究相对较少,因此,本文分析了咸海的变化趋势,剖析了不同时期咸海萎缩的驱动因素,研究结果可为咸海保护与水资源管理提供借鉴,决策者可针对突出问题制定相应的政策,以防止咸海生态环境问题的进一步恶化。

1 研究区概况

咸海流域包括吉尔吉斯斯坦、哈萨克斯坦、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦、阿富汗与伊朗7个国家的部分或全部领土(见图1)。咸海流域东起天山山脉与帕米尔高原,西抵图兰平原西部,南起兴都库什山脉,北达哈萨克丘陵^[12],流域面积达到170万km²。自然地理风貌上,大致南部为荒漠、绿洲与山区,北部为草原、平原与丘陵^[8],地貌单元呈现出多样化的特点。

2 数据与方法

2.1 数据与数据预处理

咸海1945—2018年的年平均水位数据与水面面

收稿日期:2021-11-26

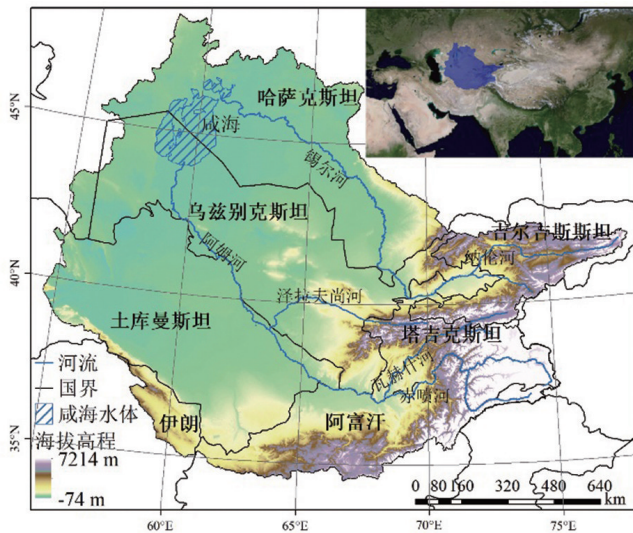
网络首发日期:2023-04-06

网络首发地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1814.p.20230404.1707.010.html>

基金项目:新疆水专项(2020.E-002);国家自然科学基金(42071049)

作者简介:王浩轩(1997—),男,河南濮阳人,硕士研究生,主要研究方向为生态水文。E-mail:465412917@qq.com

通信作者:黄峰(1987—),男,江苏如皋人,博士,副教授,主要研究方向为水文水资源、生态水文。E-mail:huangfeng1987@hhu.edu.cn



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2020)4393号,对底图无修改。

图1 咸海流域
Fig.1 The Aral Sea basin

积数据从中亚水信息网(<https://www.cawater-info.net>)收集整理。咸海流域1945—2018年逐月的降水与气温栅格数据从CRU TS v4.04(https://data.ceda.ac.uk/badc/cru/data/cru_ts/cru_ts_4.04)收集和整理,数据的空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。CRU数据集能较好地描述中亚地区的气候变化特征^[13]。所用数据经过双线性内插法重采样处理,处理后空间分辨率为 $1\ 000\text{ m} \times 1\ 000\text{ m}$ 。

咸海流域1992—2019年土地利用/覆被栅格数据从欧空局气候变化项目产品(<http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php>)收集整理,数据的空间分辨率为 $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ 。所用数据参考其他学者^[14]的方法进行重分类后,按最邻近法重采样处理,处理后空间分辨率为 $1\ 000\text{ m} \times 1\ 000\text{ m}$ 。选择重分类后的耕地与建设用地用于后续分析。

2.2 研究方法

2.2.1 两相线性回归检验法

两相线性回归检验法是一种可以同时检测出时间序列均值突变和趋势变化的方法,该法中定义了由时间序列的均值和方差计算得到的位置参数和趋势参数^[15]。选择两相线性回归检验法分析咸海水位与水面面积、咸海流域降水、气温与土地利用面积的突变,计算公式详见原始文献^[16-18]。设置长度为20年的滑动窗口,基于两相线性回归检验法分析窗口内的咸海水位与水面面积、咸海流域降水、气温与土地利用面积序列的突变。

2.2.2 Mann-Kendall(M-K)检验法

采用该方法检验咸海水位与水面面积、咸海流域降水、气温与土地利用面积的趋势性。检验统计量 Z 值大于0时,表示所检验序列呈上升趋势, Z 值小于0时,表示所检验序列呈下降趋势。 Z 的绝对值大于等于1.64、1.96和2.58时,分别表示通过了0.10、0.05和0.01显著性水平的检验,即检验结果分别具有90%、95%与99%的置信度。

2.2.3 多元线性回归^[19]

利用多元线性回归模型,定量分析气候因素与人类活动因素对咸海水面面积变化的影响,选择降水与气温两个气候因素、耕地面积与建设用地面积两个人类活动因素作为自变量,选择咸海水面面积作为因变量,进行多元线性回归模型的构建,用于分析的时间序列跨度为1992—2018年。

建立多元线性回归方程如下

$$Y = a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_3 + a_4 X_4 + b \quad (1)$$

式中: Y 为min-max法^[20]标准化的咸海水面面积; X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别为min-max法标准化的降水、气温、耕地面积、建设用地面积; a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 为回归系数; b 为常数。利用膨胀系数 VIF 验证变量间的多重共线性关系, $VIF < 10$ 时即认为变量间不存在多重共线性^[21],利用相关系数 R 验证模型, R 越接近于1说明模型的拟合效果越好^[22]。

3 结果与讨论

3.1 咸海水位和水面面积变化特征

3.1.1 水位

M-K检验法显示,1945—2018年咸海水位显著降低,咸海水位1945年为52.78 m,2018年为33.70 m,降低了19.08 m。两相线性回归检验法结果显示,咸海水位的变化趋势分别于1960年和2008年发生显著突变,因此将水位的变化划分为三个阶段。第一阶段1945—1959年,咸海水位基本保持稳定,其多年平均水位为52.93 m。第二阶段1960—2007年,咸海多年平均水位为43.93 m,该阶段咸海水位显著降低,年变化率为 -0.37 m/a 。第三阶段2008—2018年,咸海多年平均水位为34.86 m,该阶段咸海水位仍呈显著降低趋势,年变化率为 -0.17 m/a ,下降速率有所放缓。

3.1.2 水面面积

M-K检验法显示,1945—2018年,咸海水面显著

萎缩,威海水面面积1945年为6.50万 km²,2018年为0.70万 km²,缩小了89.23%。两相线性回归检验法结果显示,水面面积的变化趋势分别于1960年和2008年发生显著突变,因此将水面面积的变化划分为三个阶段。第一阶段1945—1959年威海水面面积基本保持稳定,其多年平均水面面积为6.61万 km²。第二阶段1960—2007年威海多年平均水面面积为4.39万 km²,该阶段威海水面面积显著萎缩,年变化率达到了-1 171 km²/a。第三阶段2008—2018年威海多年平均水面面积为0.91万 km²,该阶段威海水面面积仍然显著萎缩,年变化率为-304 km²/a,萎缩速率有所放缓。

3.2 气候和土地利用面积变化特征

3.2.1 气候变化

威海流域1945—2019年多年平均降水量为250.8 mm,最小年降水量175.6 mm,最大年降水量390.0 mm。威海流域年降水量在1945—2019年期间基本保持稳定,M-K算法未检测到显著变化趋势。两相线性回归检验法显示,威海流域降水序列的变化趋势在1945—2019年期间无显著突变。

威海流域1945—2019年多年平均气温为10.97℃,最低年均气温9.00℃,最高年均气温12.49℃。M-K检验法显示,威海流域年均气温在1945—2019年期间呈显著上升的趋势。两相线性回归检验法显示,威海流域气温序列变化趋势在1945—2019年期间无显著突变。

3.2.2 土地利用面积变化

M-K检验法识别出耕地、建设用地面积均在1992—2019年期间显著增加。两相线性回归检验法显示,耕地面积的变化趋势分别于1999年和2014年发生显著突变,其中1992—1998年耕地面积显著大幅增加;1999—2013年,耕地面积仍呈显著增加的趋势,但增加趋势有所放缓;2014—2019年,耕地面积有所减小。建设用地面积的变化趋势于2000年发生显著突变,2000年之前,建设用地面积基本保持稳定;2000年之后,建设用地面积显著增加。

3.3 威海萎缩驱动力分析

通过对威海水面面积变化的分析,发现水面面积萎缩的速率于2008年前后有较大差异。因此,以2008年为转折点,分析威海萎缩速率放缓前后(即1992—2007年与2008—2018年两个时段)各驱动因素对威海水面面积变化的影响。通过对威海流域降

水量变化的分析,发现其在研究时段内无显著趋势变化,即降水量对威海面积的影响可忽略,在构建多元回归方程时将其省去。将水面面积、耕地面积、建设用地面积、气温转化为无量纲变量,直观地展示各个影响因素的变化趋势与水面面积变化趋势之间的关系(见图2)。

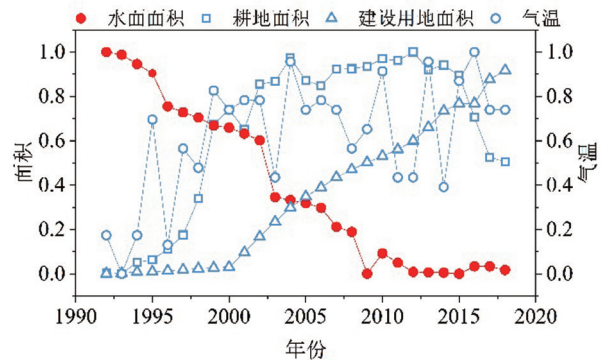


图2 标准化的威海水面面积、土地利用面积、气温变化
Fig.2 Changes in the standardized water surface area, land use area and temperature

两时段的多元线性回归方程如下:

$$Y_1 = 0.059X_1 - 0.588X_2^* - 0.493X_3^* + 3.225 \quad (2)$$

$$Y_2 = 0.294X_1 - 0.004X_2 - 0.869X_3^* + 1.446 \quad (3)$$

式中:Y₁、Y₂分别为1992—2007年、2008—2018年的min-max法标准化的水面面积;X₁、X₂、X₃分别代表min-max法标准化的气温、耕地面积、建设用地面积;上标*表示回归系数通过了95%置信水平的显著性检验。

式(2)Y₁、式(3)Y₂与实际威海水面面积之间的相关系数R分别为0.991、0.881,且各变量的膨胀系数均小于10,拟合结果较好。结果表明,耕地、建设用地面积变化对威海面积变化的影响相对较大,而降水、气温变化的影响相对较小。

1992—2007年,耕地面积和建设用地面积对威海水面面积变化的影响显著,回归系数分别为-0.588与-0.493,说明随着耕地面积和建设用地面积的增加,威海水面面积有所减小,威海萎缩受耕地、建设用地面积扩张的综合影响;各因素中,耕地面积对威海面积的影响相对最为显著,说明该时段内流域耕地扩张、灌溉取水等农业生产活动是威海面积变化的主要驱动因素。据统计估算^[23],威海流域20世纪末期的灌溉面积较之20世纪60年代初期的灌溉面积增长了约1.75倍,农业作为中亚威海地区的主要用水部门,长期以来农业用水量约占全流域总用水量的90%,耕地灌

溉面积的扩张使农业取水量快速增加,大型水库和水电站的建设使流域下游的径流量进一步减少,急剧减少的入湖水量难以平衡湖泊的蒸发量,补给量与消耗量的严重失衡最终导致咸海的快速萎缩^[7]。

2008—2018年,建设用地面积仍可显著影响咸海水面面积的变化,回归系数为-0.869,说明随着建设用地面积的增加,咸海水面面积有所减小;耕地面积的减少使其对咸海水面面积的影响有所减弱,并使建设用地面积对咸海水面面积的影响程度相对增强,这种转变可能与耕地面积的减少和灌溉效率的提高有关^[1]。WEGERICH等^[24]的研究显示,苏联解体后各国进行的粮食政策改革使高耗水作物(如棉花和水稻)的种植面积不断减少,低耗水作物(如小麦)的种植面积不断增加,因此单位面积耕地的农业灌溉水量逐渐减少,近年来,随着耕地面积的逐步减少,农业种植结构的改变使咸海萎缩速率放缓成为可能;各因素中,建设用地面积对咸海面积的影响相对最为显著,说明该时段内流域工业取水、生活用水等工业生产活动与居民生活活动是咸海面积变化的主要驱动因素。

近年来咸海萎缩的速率虽已放缓,但其负面影响仍然严重。1960年咸海水体的平均含盐量仅为10 g/L,而2011年咸海水体的平均含盐量超过了100 g/L^[25],水体含盐量的快速增加使水生生物大量死亡,渔业遭受毁灭性打击。咸海萎缩后露出的河床沉积了大量盐分,盐粒与粉尘一起被大风携带到数百公里外,对咸海周边居民的身体健康造成了不利影响^[26]。因此,缓解咸海的生态危机与水资源危机是流域各国的责任与义务。建议各国不断完善水资源规划管理体系,制定相关法律法规,加强国际合作,发展先进的农业节水技术,同时注意节水型城市的建设,提高水资源利用效率,共同推动咸海治理进程。

4 结论

基于两相线性回归检验法与M-K检验法分析了咸海水位和水面面积、咸海流域气温和降水、咸海流域耕地面积和建设用地面积的变化规律,探讨了咸海萎缩速率放缓的可能原因,并基于多元线性回归模型探究了1992—2007年与2008—2018年降水、气温、耕地面积与建设用地面积变化对咸海水面面积变化的影响。主要得出以下结论:(1)咸海水位与水面面积总体呈显著下降趋势,并呈现出明显的阶段性特征。1945—1959年咸海水位与水面面积基本保持稳定,

1960—2007年咸海水位与水面面积呈显著下降的趋势,年变化率分别为-0.37 m/a与-1 171 km²/a,2008—2018年咸海水位与水面面积的下降趋势有所放缓,年变化率分别为-0.17 m/a与-304 km²/a。

(2)咸海流域年降水量在1945—2019年内基本保持稳定,咸海流域年平均气温在1945—2019年内呈显著的上升趋势。1992—2019年期间,流域内耕地、建设用地面积均显著增加,其中耕地面积的变化趋势分别于1999年和2014年发生显著突变,建设用地面积的变化趋势于2000年发生显著突变。

(3)耕地面积与建设用地面积对咸海水面面积变化的影响比降水与气温的影响更加显著。1992—2007年期间,咸海萎缩受耕地、建设用地面积扩张的综合影响;2008—2018年期间,咸海萎缩主要受建设用地面积增加的影响。

参考文献:

- [1] ZHANG J, CHEN Y, LI Z, et al. Study on the utilization efficiency of land and water resources in the Aral Sea Basin, Central Asia [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 51: 101693.
- [2] 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] DUAN W, CHEN Y, ZOU S, et al. Managing the water-climate-food nexus for sustainable development in Turkmenistan[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 220: 212-224.
- [4] BOOMER I, ALADIN N, PLOTNIKOV I, et al. The palaeolimnology of the Aral Sea: a review[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(13): 1259-1278.
- [5] 吴敬禄, 马龙, 吉力力. 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.
- [6] 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*, 2012, 33(6): 1376-1390.
- [7] 咎婵娟, 黄粤, 李均力, 等. 1990—2019年咸海水量平衡及其影响因素分析[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(4): 1265-1275.
- [8] 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.
- [9] YANG X, WANG N, HE J, et al. Changes in area and water volume of the Aral Sea in the arid Central Asia over the period of 1960 - 2018 and their causes[J]. *Catena*, 2020, 191: 104566.
- [10] 陈起川, 夏自强, 郭利丹, 等. 中亚湖泊地区降水量变化特征及趋势分析[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(06): 13-16.
- [11] ZAVIALOV P O, NI A A, KUDYSHKIN T V, et al. Five years of field hydrographic research in the Large Aral Sea (2002—2006)[J]. *Journal of Marine Systems*, 2009, 76(3): 263-271.
- [12] 徐利岗, 杜历, 姚海娇, 等. 中亚干旱区降水时空变化特征及趋势分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(11): 121-127.
- [13] 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.
- [14] LI J, CHEN H, ZHANG C, et al. Variations in ecosystem service value in response to land use/land cover changes in Central Asia from 1995-2035[J]. *Peer. J.* 2019, (7).
- [15] 曾天山, 黄峰, 秦智雅, 等. 长江干流枯水期极端流量变化特征研究[J]. *人民珠江*, 2017, 38(1): 31-34.
- [16] SOLOW A R. Testing for climate change: An application of the two-phase regression model[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1987, 26(10): 1401-1405.
- [17] ZHANG Q, XU C Y, CHEN Y D, et al. Abrupt behaviors of the streamflow of the Pearl River basin and implications for hydrological alterations across the Pearl River Delta, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 377(34): 274-283.
- [18] EASTERLING D R, PETERSON T C. A new method for detecting undocumented discontinuities in climatological time series[J]. *International journal of climatology*, 1995, 15(4): 369-377.
- [19] 高伟, 程国微, 严长安, 等. 1988-2018年滇池氮磷比的时空演变特征与原因解析[J]. *湖泊科学*, 2020, 33(1): 64-73.
- [20] 季小江, 杜三宝, 王冠东. 应用 min-max 标准化分析法测定区域经济增长差异——以陕西省榆林地区为例[J]. *经济与管理*, 2016, 30(3): 54-56.
- [21] 刘国旗. 多重共线性的产生原因及其诊断处理[J]. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2001, 24(4): 607-610.
- [22] HUANG F, OCHOA C G, CHEN X. Assessing environmental water requirement for groundwater-dependent vegetation in arid inland basins by combining the copula joint distribution function and the dual objective optimization: An application to the Turpan Basin, China[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 799.
- [23] 邓铭江, 龙爱华, 李湘权, 等. 中亚五国跨界水资源开发利用与合作及其问题分析[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(12): 1337-1346.
- [24] WEGERICH K, VAN ROOIJEN D, SOLIEV I, et al. Water security in the Syr Darya basin [J]. *Water*, 2015, 7(9): 4657-4684.
- [25] MICKLIN P. The future Aral Sea: hope and despair [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(9): 844.
- [26] MICKLIN P. The Aral sea disaster[J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2007, 35: 47-72.

Analysis of Shrinking Rate Variation and Its Driving Factors of the Aral Sea

WANG Haoxuan¹, HUANG Feng^{1,3}, GUO Lidan^{2,3}, ZHONG Ruisen⁴

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Business School of Hohai University, Nanjing 211100, China;

3. International River Research Centre, Hohai University, Nanjing 211100, China;

4. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: The shrinking of the Aral Sea has caused an ecological disaster that has attracted worldwide attention. In order to explore the possible reasons for the shrinkage of the Aral Sea and its rate change, the Mann-Kendall test and the two-phase linear regression test were used to analyze the change trend and mutation points of the surface area and average water level of the Aral Sea, the precipitation and temperature in the Aral Sea basin, and the area of cropland and built-up land. The characteristics of mutational changes were analyzed by constructing a multiple linear regression model to analyze the driving factors of the shrinkage of the Aral Sea in different periods. The results showed that the water level of the Aral Sea was significantly reduced by 19.08 m. The water surface area was significantly reduced by 4.90×10^4 km². The changes of the water level and the water surface area showed obvious phase characteristics, and both of them had significant mutational changes in 1960 and 2008. The shrinkage rate of the Aral Sea changed significantly before and after the mutation time. In all stages of the shrinkage of the Aral Sea, the impact of human activities was greater than the impact of climate change on the Aral Sea.

Keywords: the Aral Sea; rate of shrinkage; trend analysis; mutation detection; human activities; climate change