

咸海流域地表水变化长期监测及驱动因素分析

史剑聪^{1,2}, 国巧真¹, 赵爽¹, 苏怡婷¹, 石燕青¹, 杜刚², 张来鹏², 张东², 赵玉²

1. 天津城建大学 地质与测绘学院, 天津 300384

2. 煤炭工业太原设计研究院集团有限公司, 太原 030001

摘要: 咸海流域是绿色丝绸之路经济带的重要枢纽。但是地表水的逐年减少, 对咸海流域的生态环境产生了恶劣的影响, 严重阻碍了绿色丝绸之路经济带的建设。本文基于 Google Earth Engine (GEE) 平台上的 1992—2018 年 Landsat 影像, 采用水体频率的方法提取咸海流域地表水信息, 对咸海流域地表水的时空变化进行了研究, 并绘制分布图。同时采用 LandTrendr 算法生成了地表水面积变化图。通过线性回归模型分析咸海流域地表水面积变化与气候变化、人为因素之间的内在联系。结果表明: 咸海流域的地表水面积呈现递减趋势, 其中以咸海为主的全年水体面积减少最为明显。2010 年之后, 整个流域地表水的减少趋于稳定。影响咸海流域地表水变化的主要驱动因素为气候因素中的温度。本研究可为后续确定咸海流域地表水减少的成因、影响, 以及水资源保护研究提供有力的技术支持。同时也为绿色丝绸之路经济带的建设提供科学支持。

关键词: 地表水; 水体频率; LandTrendr 算法; Google Earth Engine; 咸海流域; 驱动因素分析

Long-term monitoring of surface water change of the Aral Sea Basin and the driving factors

SHI Jiancong^{1,2}, GUO Qiaozhen¹, ZHAO Shuang¹, SU Yiting¹, SHI Yanqing¹, DU Gang², ZHANG Laipeng², ZHANG Dong², ZHAO Yu²

1. School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China

2. Coal Industry Taiyuan Design and Research Institute Group CO., Ltd., Taiyuan 030001, China

Abstract: Background, aim, and scope The Aral Sea was once the fourth-largest inland lake in the world and the largest lake in the Aral Sea Basin. However, the surface water of the Aral Sea Basin has been decreasing since the 1960s because of the arid climate and rapid population growth. Afterward, the fragile ecosystem was facing more severe challenges. Consequently, the construction of the Green Silk Road Economic Belt was significantly hindered. Therefore, it is of great necessity for water protection and social development to monitor the change of surface water in the Aral Sea Basin. **Materials and methods** Based on the Landsat imagery between 1992 and 2018 from Google Earth Engine (GEE) platform, the water frequency was employed in this paper to investigate the surface water changes of the Aral Sea Basin, and the spatial and temporal distribution was mapped.

收稿日期: 2021-05-11; 录用日期: 2021-07-28; 网络出版: 2021-08-10

Received Date: 2021-05-11; Accepted Date: 2021-07-28; Online first: 2021-08-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41971310); 天津市自然科学基金项目 (18JCYBJC90900)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41971310); Natural Science Foundation of Tianjin, China (18JCYBJC90900)

通信作者: 国巧真, E-mail: gqiaozhen@tcu.edu.cn

Corresponding Author: GUO Qiaozhen, E-mail: gqiaozhen@tcu.edu.cn

引用格式: 史剑聪, 国巧真, 赵爽, 等. 2021. 咸海流域地表水变化长期监测及驱动因素分析 [J]. 地球环境学报, 12(5): 540–548.

Citation: Shi J C, Guo Q Z, Zhao S, et al. 2021. Long-term monitoring of surface water change of the Aral Sea Basin and the driving factors [J]. *Journal of Earth Environment*, 12(5): 540–548.

Meanwhile, the LandTrendr algorithm was used to observe the annual descend of the surface water. The internal relationships among surface water area changes, climate change and human factors were analyzed with the linear regression model. The analysis suggested that the surface water area presented a decreasing trend from 1992 to 2018, especially the annual water area. However, the downward trend of surface water in the whole basin is likely to stabilize after 2010. **Results** (1) Year-long water area has the most significant decline trend. The seasonal water was usually susceptible to change in temperature and precipitation while its overall trend showed downward. (2) Anthropogenic factors had significant impacts on the surface water in the Aral Sea Basin. (3) According to the multiple linear regression model, precipitation has a positive correlation with the change of surface water, and the temperature has a significant negative correlation with the surface water. **Discussion** Climate (precipitation, evapotranspiration, temperature) and anthropogenic factors (area and yield of crop) had apparent influences on the surface water changes in the Aral Sea Basin. Specifically, the temperature had the most adverse effect. The yields and planting area of crop were negatively correlated with the change of surface water, reflecting the impact of human activities on the shrinking of surface water in the Aral Sea Basin. Therefore, in relevant areas, environmental protection policies should be made, and human activities should be rationally arranged to control the decrease in surface water of the Aral Sea Basin. Moreover, it provides an ecological foundation for the construction of the Green Silk Road Economic Belt and plays a crucial role in connecting Asia and Europe and improving the living standards of the people in Central Asia. **Conclusions** Temperature is the major factor reducing surface water in the Aral Sea Basin. **Recommendations and perspectives** This research can determine the reasons and influences of surface water reduction and offer powerful support to water protection.

Key words: surface water; water frequency; LandTrendr algorithm; Google Earth Engine; Aral Sea Basin; analysis of drive factors

中国在提出“共建丝绸之路经济带”的同时,着重强调了环境建设的重要性,将绿色发展理念融入到丝绸之路经济带的建设当中(徐海燕,2016)。中亚是“丝绸之路经济带”的必经之地,更是构建绿色丝绸之路经济带的枢纽。但是从20世纪60年代开始,咸海流域地表水的逐年减少使得中亚地区生态环境愈加脆弱,阻碍了绿色丝绸之路经济带的建设。咸海流域由于气候干旱,再加上多年来流域各地区人口的急剧增长和粗放的农业灌溉引流方式,导致地表水逐年减少(Micklin,1988;Boomer et al,2000;Saiko and Zonn,2000;Kezer and Matsuyama,2006;田向荣等,2017)。咸海流域地表水的逐年减少严重影响了中亚地区农作物生长、水产养殖、工业生产、生态环境稳定以及人类正常生产生活,导致绿色丝绸之路经济带的建设面临严峻的挑战(徐海燕,2016;Gorelick et al,2017;阿布都米吉提·阿布力克木等,2019)。因此,监测咸海流域地表水的时空变化是建设绿色丝绸之路经济带的關鍵。

实地调查虽然是最精确的监测方法,但是很难收集到足够的數據来反映地表水的时空分布(刘延龙等,2018)。相比之下,遥感技术因其易

获取、监测范围广、成本低、节省人力物力等优点,已被广泛应用于水体监测研究(Gond et al,2004;王航和秦奋,2018)。监测方法主要是基于水体指数、神经网络、小波、混合像元分解等算法(McFeeters,1996;梁益同和胡江林,2001;Brisco et al,2009)。然而,咸海流域面积广阔,地表水类型多样且分布空间差异性较大,并且有显著的年内变化趋势。因此,利用上述算法很难对流域中不同类型、不同范围、不同时间段的地表水进行监测。同时,由于运算能力的限制,利用传统的遥感技术对大范围地区进行长期变化监测需要耗费大量的人力物力。近年来,随着地理空间数据处理云平台(Google Earth Engine,GEE)的建立,改变了传统遥感数据的处理方式,GEE平台庞大的遥感影像数据集与高性能的运算能力,为长时间、大规模的遥感监测提供了一种新途径(Xu et al,2018;Zhu et al,2019)。

本研究基于GEE平台上的Landsat数据,利用水体频率与LandTrendr(Landsat-based detection of Trends in Disturbance and Recovery)算法对咸海流域不同时间段、不同类型与不同范围的地表水进行长期监测,并结合线性回归模型,探究气候

变化、农作物变化与咸海流域地表水变化的内在联系,得到影响地表水变化的主要驱动因素,为咸海流域的水资源合理配置、中亚的生态环境保护、绿色丝绸之路经济带的建设提供有力支持。

1 研究区概况与数据源

咸海流域位于亚欧大陆中部(图1)(34°30′—49°06′N, 57°06′—78°06′E),主要由哈萨克斯坦、

乌兹别克斯坦、土库曼斯坦、吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦的部分地区组成,总面积约 $1.64 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该地区气候干燥、降水量少且分布极不均匀,年均降水量不足 300 mm。流域整体的地势由东南向西北方向降低,地貌变化多样,东南部以高山、峡谷和丘陵为主;西北部以沙漠、草原和绿洲为主,其中沙漠占据了大部分面积(胡汝骥等, 2014)。

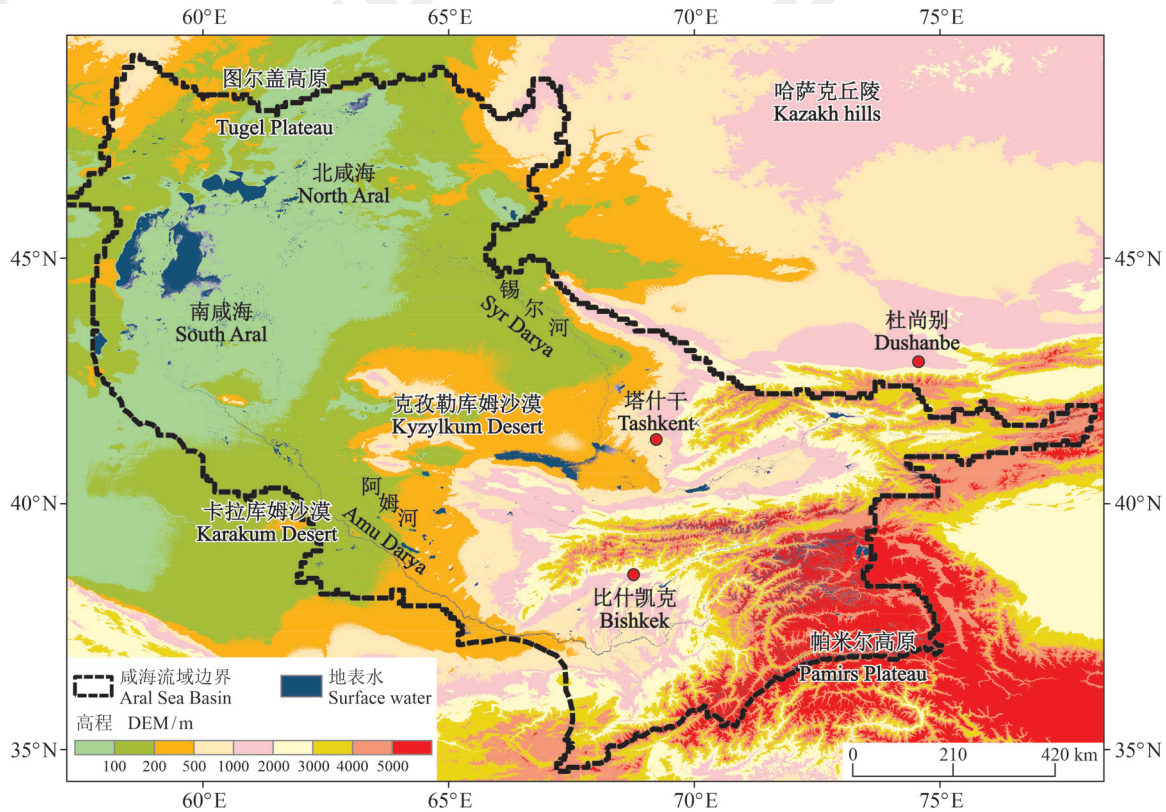


图 1 咸海流域地势分布
Fig. 1 Terrain of Aral Sea Basin

本文利用 GEE 平台上由美国地质勘探局 (United States Geological Survey, USGS) 提供的 1992—2018 年 Landsat TM/ETM/OLI (Landsat5、Landsat7、Landsat8) 地表反射率数据。由于咸海流域冬季有结冰期,所以选用了每年 4—10 月的数据。为了消除云、云阴影、冰雪等的影响,利用经过 CFMASK (C Language Function of Mask) 监测方法处理得到的质量评价波段,最终合成了跨度 27 a 的年度影像(表 1)。

2 研究方法

2.1 地表水提取算法

虽然利用改进的归一化植被指数 (MNDWI)

提取水体可以避免建筑物阴影等因素的影响(徐涵秋, 2005),但是当水体和其他土地覆盖类型混合时,依靠 MNDWI 无法进行很好地区分。尤其是遇到一些水田、湿地或者是含水量比较高的植被时,提取水体的误差会加大(Santoro et al, 2015)。本文结合归一化植被指数 (NDVI)、增强型植被指数 (EVI) 和 MNDWI 来降低植被在水体提取当中的影响(Dong et al, 2015; Xiao et al, 2006):

$$\text{MNDWI} = \frac{(\text{Green} - \text{MIR})}{(\text{Green} + \text{MIR})} \quad (1)$$

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{NIR} - \text{Red})}{(\text{NIR} + \text{Red})} \quad (2)$$

表 1 数据来源
Tab. 1 Data source

数据 Data	数据描述 Data description	数据来源 Data source
Landsat5, Landsat7, Landsat8	收集了 1992—2018 年每年 4—10 月的经过大气校正的地表反射率数据集, 用于地表水的提取和 LandTrendr 算法。 Annual atmospherically corrected surface reflectance collection from April to October, 1992—2018, for using with LandTrendr.	美国地质勘探局 United States Geological Survey (USGS)
DEM	DEM 数据范围覆盖咸海流域, 北至哈萨克丘陵、南至卡拉库姆沙漠、西至咸海、东至帕米尔高原。 DEM covers the Aral Sea Basin, from the Kazakh hills in the north, Karakum Desert in the south, the Aral Sea in the west, and the Pamirs Plateau in the east.	美国国家航空航天局 National Aeronautics and Space Administration (NASA)
气象数据 Meteorological data	年降水量、年平均温度以及年蒸散量数据。 Annual precipitation, annual mean temperature, annual evapotranspiration.	环境数据档案中心 Centre for Environmental Data Analysis (CEDA)
农作物数据 Crop data	农作物产量、农作物种植面积。 Crop yield, crop acreage.	世界银行 World Bank

$$EVI = \frac{2.5 \times (NIR - Red)}{(NIR + 6 \times Red - 7.5 \times Blue + 1)} \quad (3)$$

水体像元判定方式:

$$MNDWI > NDVI \text{ 或 } MNDWI > EVI \quad (4)$$

式中: Green 为绿色波段、MIR 为中红外波段、NIR 为近红外波段、Red 为红色波段、Blue 为蓝色波段。

$$WF = \frac{GWP}{GSP} \quad (5)$$

式中: WF 为水体频率, GWP 为一年中被确定为水体的好的像元的数量; GSP 为一年中被确定为水体的像元总数。在确定水体像元时, 选取 $MNDWI > NDVI$ 或者 $MNDWI > EVI$ 的像元作为地表水像元。

使用公式 (4) 在 GEE 平台上提取 1992—2018 年咸海流域的地表水。并且用水体频率 (WF) 的大小作为判定水体类型的依据: 为了排除遥感影像质量和预处理过程中的一些问题, 本文判定 $WF \geq 0.25$ 的像元为有效的地表水像元; $WF \geq 0.75$ 的像元为全年水体像元; WF 为 0.25—0.75 属季节性水体像元。每年都计算有效水体、全年水体和季节性水体的像元数量, 并且计算与之相对应的水体面积。最后通过线性回归和滑动滤波的方法对 1992—2018 年咸海流域的地表水进行分析。

2.2 地表水变化监测算法

LandTrendr 算法是一种针对于 Landsat 时间序列影像, 基于像元光谱的时间分割算法, 可以用于时间序列的变化监测; 其核心是通过像元级别的光谱变化轨迹提取方法获得地球表面的光谱变化, 同时将光谱指数作为时间的函数进行分割,

从而监测到渐变和突变事件 (Micklin, 1988)。可以监测到任何时间点、任何时间段的变化; 并且算法中自动消除了太阳光、云、大气等因素对影像的影响 (Zhu et al, 2019)。

利用 LandTrendr 算法对咸海流域 1992—2018 年的地表水进行变化监测, 为了排除植被、农作物等的影响, 选择 MNDWI、NDVI 以及 EVI 来提取地表水变化, 具体的参数设置如表 2 所示。顶点决定了分割的起始与结束点, 同时基于这些顶点可以得到高质量的直线轨迹, 从而通过时间分割算法得到较高质量的遥感影像数据集、顶点对应的年份以及拟合之后的年际地表水数据。整个监测过程可以识别出水体像元值的增加 (恢复)、减少 (干扰) 和保持不变。针对于咸海流域的地表水, 主要可以输出地表水的年际变化、持续变化的时间和变化量。

表 2 LandTrendr 算法运行参数
Tab. 2 Operation parameters of LandTrendr

运行参数 Operation parameters	参数值 Value
光谱指数 Spectral index	MNDWI、NDVI、EVI
轨迹分割的最大数量 Maximum number of trajectory segments	6
拟合的最大 p 值 Maximum p -value for fitting	0.05
恢复阈值 Recovery threshold	0.25
顶点参数 Despiking parameter	0.9
最优模型比例 Best model proportion	0.75

2.3 地表水变化驱动因素分析方法

多元线性回归分析是一个用于模拟若干个解释变量之间关系的模型，主要根据实验样本的观测值估计回归模型中各个变量的系数进行分析（曹西凤等，2018）。基本形式为：

$$Y_a = b_1 X_{1k} + b_2 X_{2k} + \dots + b_i X_{ik} + C_k \quad (6)$$

式中： Y_a 为第 a 个样本的被解释变量； b_1, b_2, \dots, b_i 为 i 个回归系数； $X_{1k}, X_{2k}, \dots, X_{ik}$ 为 i 个解释变量； C_k 为回归常数。对于每个样本构建回归方程，即：

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{21} & \dots & X_{i1} \\ X_{12} & X_{22} & \dots & X_{i2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ X_{1a} & X_{2a} & \dots & X_{ia} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_a \end{bmatrix} \quad (7)$$

最终使用最小二乘法得到回归方程的各个系数。

使用多元线性回归分析方法，探讨气候与人为因素对地表水面积变化的影响。回归模型的因变量为 1992—2018 年咸海流域全年水体面积，季节性水体面积与有效水体面积。气候因素包括咸海流域的年降水量、年平均气温和年蒸散量。人为因素包括咸海流域的农作物种植面积和农作物产量。建立气候因素、人为因素与因变量的多元线性回归模型。然而，咸海流域包含多个国家的多个地区（如图 1），整个流域的主要农作物都分布在乌兹别克斯坦、塔吉克斯坦等地表水较为丰富的地区。所以本文中的农作物年产量与农作物种植面积以咸海流域当中农作物分布较广的地区为例，深入研究其与咸海流域地表水减少的内在联系。

3 结果与分析

3.1 地表水时空变化

3.1.1 地表水空间变化

如图 2 所示，咸海流域在 2018 年的水体像元大约有 7100 万个，地表水面积大约为 60000 km^2 、季节性水体面积为 19602 km^2 ，全年水体面积为 45099 km^2 。全年水体像元的水体频率 ≥ 0.75 ，包括流域当中的主要湖泊、河流、水库等在一年当中都能保持水的液体形态的永久水体。咸海是咸海流域当中能够作为永久水体的最大水域，但是由于水位波动、气候等因素的影响，这种大型水体的边缘会出现干涸的情况，尤其是在咸海的南部，湖泊周围出现大量因为外界因素影像而干涸的季节性水体；而北咸海周围的季节性水体较少，

说明北咸海的水域比南咸海稳定。这一结果也符合多年来咸海流域地表水的变化趋势。

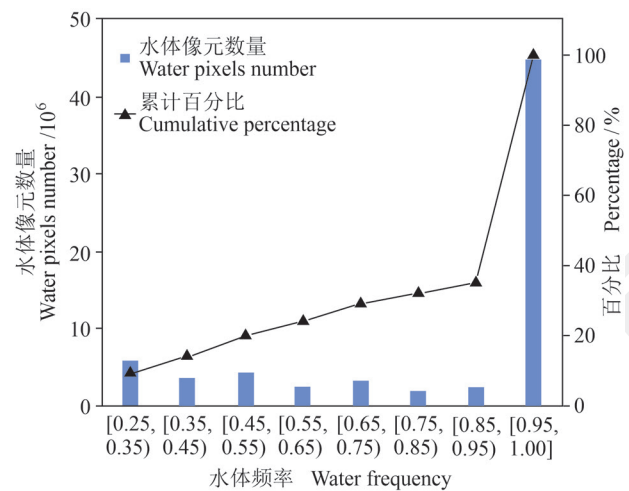


图 2 2018 年咸海流域水体像元分布
Fig. 2 Distribution of water pixels in Aral Sea Basin in 2018

阿姆河在流入南咸海之前已经分成了若干条支流（图 3a、图 3b），水体频率大幅下降，到达南咸海时水体频率已经低于 0.5，这意味着由阿姆河流入南咸海的水极易受到外界变化的影响。由锡尔河注入北咸海水源的水体频率较高（图 3c），在一定程度上解释了多年来北咸海的水体范围比南咸海稳定的现象，原因是注入北咸海的水源较为稳定，不易受外界环境的干扰。这一结果进一步反映了咸海危机与其来源河流的变化有极大关联。

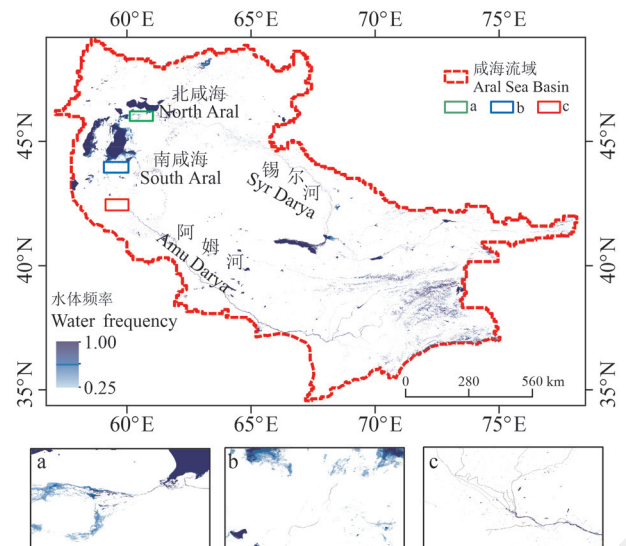


图 3 2018 年咸海流域地表水分布
Fig. 3 Distribution of surface water body in Aral Sea Basin in 2018

3.1.2 地表水时间变化

1992—2018年, 咸海流域的全年、季节性和有效水体的面积总体上呈下降趋势(图4)。首先, 咸海流域1988—2018年的全年水体面积下降的趋势最为明显, 从1992年的94133 km²下降到2018年的45099 km², 1992年比其平均值64985 km²高出30%, 2018年比其平均值低21%; 其次是有效水体面积, 从1992年的127696 km²下降到2018年的64701 km², 1992年比其平均值高出40.9%, 2018年比其平均值低28.6%; 第三, 虽然季节性水体容易受到季节、气温和降水变化等因素的影响, 但总体还是呈现出下降趋势。根据线性回归结果可知, 水体面积的变化趋势均具有统计学意义(图4), 进一步证明了咸海流域地表水体变化结果的可靠性。

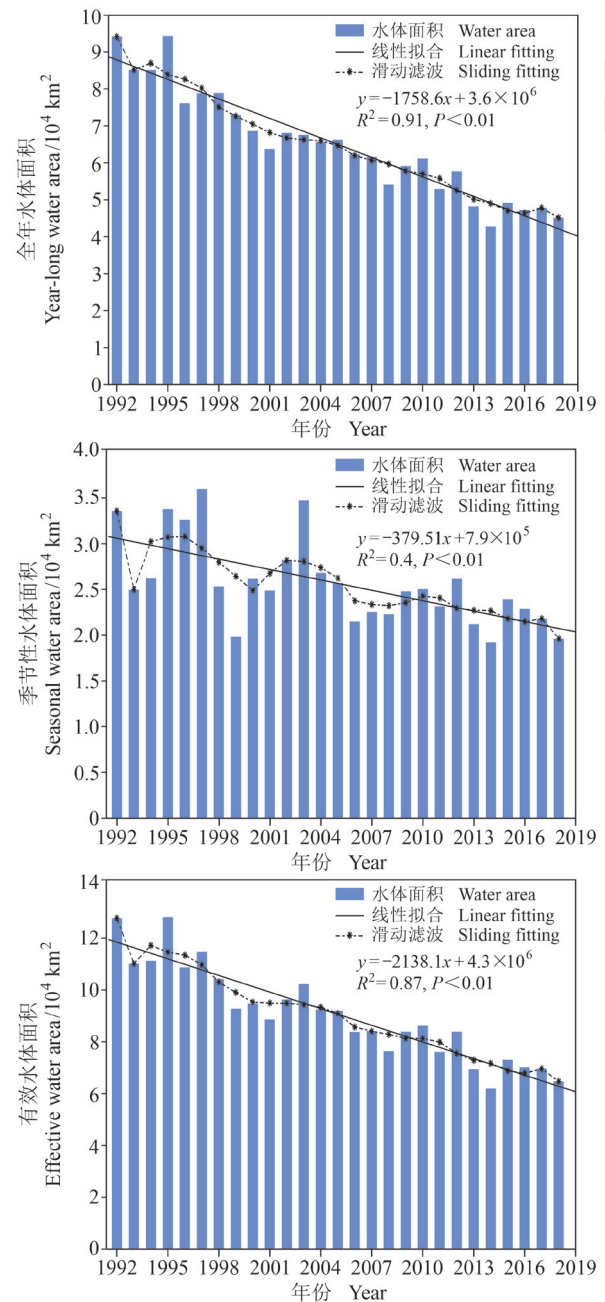
多年来, 许多专家学者针对咸海流域地表水变化进行研究, 田向荣等(2017)研究指出咸海流域的跨界水合作面临着缺乏法律保障等一系列新的挑战; 施海洋等(2020)利用水文站点数据与遥感反演的方法提取锡尔河流域的用水分析; 阿布都米吉提·阿布力克木等(2019)利用中亚水资源网站等的数据对咸海流域整个的水资源变化历史、原因与影响进行了分析。但是上述研究都是利用公开的统计数据, 对咸海流域的地表水变化进行政策、人文等的宏观分析, 对咸海流域地表水的研究主要集中于咸海等的全年水体上。而咸海流域的地表水变化有很强的季节性特征, 因此本研究利用水体频率法将咸海流域的地表水变化分为了有效水体、季节性水体与全年水体变化, 由此探讨该地区不同水体类型的年际变化特征。

3.2 地表水面积变化

咸海是咸海流域中变化最为显著的地表水, 并且流域中注入南咸海的阿姆河的变化明显要大于注入北咸海的锡尔河的变化(图5)。间接证明了南咸海比北咸海萎缩快的现象一部分原因是由于其水体来源的减少。同时由图6可知, 咸海流域地表水的变化趋势与咸海的变化趋势大致相同, 进一步证明了咸海的萎缩与咸海流域地表水的减少, 尤其是两条主要河流的缩小有着密不可分的关系。

2005年, 哈萨克斯坦联合世界银行在北咸海地区修建了一座大坝, 使得2005年咸海减少的面积占1992—2018年减少的总面积的比例下降到2.60%, 说明人为因素对咸海流域地表水有明显影响(表3)。2010年南咸海东部重新形成了水域,

咸海甚至是咸海流域的地表水变化量也达到了近20 a的最小值。虽然咸海流域的地表水多年来一直在减少, 但在2010年以后(图6), 咸海流域以及咸海地表水减少的程度已得到缓解, 地表水减少面积仅占到27 a缩小总面积的12.91%; 而从1992年开始的5 a内, 咸海流域地表水减少面积就占减少总面积的15.81%(表3)。



实线代表线性拟合结果, 虚线代表5 a滑动滤波结果。

The solid line implies linear fitting, the dashed line implies 5 a moving average fitting.

图4 1992—2018年咸海流域地表水面积变化
Fig. 4 Changes of surface water in Aral Sea Basin from 1992 to 2018

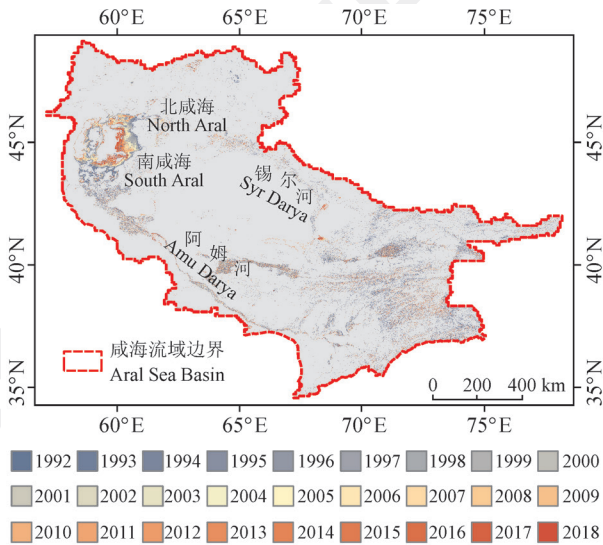


图 5 1992—2018 年咸海流域地表水面积变化
Fig. 5 Loss of surface water in Aral Sea Basin from 1992 to 2018

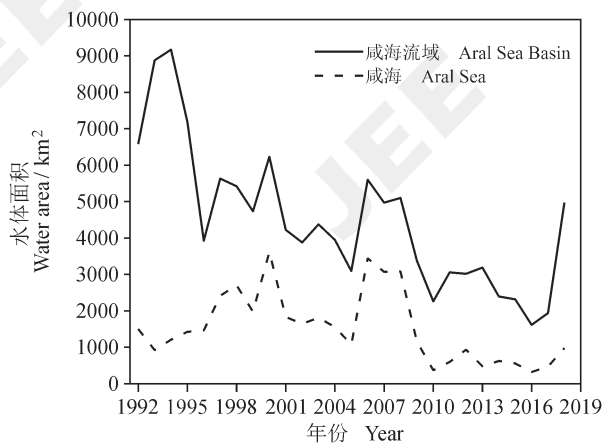


图 6 1992—2018 年咸海流域地表水面积变化
Fig. 6 Changes of surface water area in Aral Sea Basin from 1992 to 2018

3.3 地表水变化驱动因素分析

目前普遍认为是人为因素造成的咸海流域地表水减少,例如:热依莎·吉力力等(2018)通过研究哈萨克斯坦地区的径流占比、人为影响与水资源需求程度,指出人口增长导致哈萨克斯坦的用水量大幅上升,区域水资源供需矛盾日益凸显;杨雪雯等(2020)指出咸海流域的地表水减少与该地区居民的用水结构有关;施海洋等(2020)指出锡尔河流域的地表水减少与该地区下游国家不合理灌溉引流所导致。前人对于咸海流域地表水减少的影响因素分析主要集中在定性方面,本研究将咸海流域的

气候与农作物变化作为量化指标,对该地区的地表水变化影响因素进行了定量分析。

由多元线性回归分析结果可知(表 4),只有降水量与地表水体面积呈正相关,但降水量与地表水体面积的年际变化呈负相关。温度变化与咸海流域地表水的变化呈显著负相关,温度上升不仅会增加水体蒸发,还会增加农业用水需求,所以温度的升高会加快地表水面积的减少。农作物产量与农作物种植面积的变化与地表水变化呈负相关,其中农作物年产量对地表水的变化有显著的负面影响。进一步证明了人类活动对咸海流域地表水减少的影响。

表 3 1992—2018 咸海流域地表水面积变化
Tab. 3 Changes of surface water area in Aral Sea Basin from 1992 to 2018

年份 Year	咸海 Aral Sea		咸海流域 Aral Sea Basin	
	减少面积 Decreased area / km ²	百分比 Percentage / %	减少面积 Decreased area / km ²	百分比 Percentage / %
1992	1501	3.64	6583	5.44
1993	922	2.24	8878	7.33
1994	1207	2.93	9174	7.58
1995	1423	3.45	7185	5.93
1996	1462	3.55	3926	3.24
1997	2413	5.86	5632	4.65
1998	2703	6.56	5422	4.48
1999	1977	4.80	4734	3.91
2000	3614	8.77	6232	5.15
2001	1832	4.45	4224	3.49
2002	1642	3.99	3877	3.20
2003	1811	4.40	4375	3.61
2004	1554	3.77	3947	3.26
2005	1073	2.60	3092	2.55
2006	3444	8.36	5600	4.63
2007	3070	7.45	4971	4.11
2008	3079	7.47	5099	4.21
2009	1156	2.81	3378	2.79
2010	370	0.90	2260	1.87
2011	596	1.45	3056	2.52
2012	933	2.26	3017	2.49
2013	476	1.16	3187	2.63
2014	623	1.51	2394	1.98
2015	556	1.35	2316	1.91
2016	320	0.78	1614	1.33
2017	470	1.14	1938	1.60
2018	973	2.35	4969	4.11
总和 Total	41200	100.00	121080	100.00

表4 多元线性回归分析
Tab. 4 Multiple linear regression analyses

有效水体面积 Effective water area		季节性水体面积 Seasonal water area		全年水体面积 Year-long water area		水体面积年际变化 Annual change of water area	
变量 Variable	回归系数 Regression coefficient	变量 Variable	回归系数 Regression coefficient	变量 Variable	回归系数 Regression coefficient	变量 Variable	回归系数 Regression coefficient
<i>T</i>	-695.03***	<i>T</i>	-297.55**	<i>T</i>	-397.47***	<i>T</i>	-6879.90**
<i>E</i>	-0.78***	<i>E</i>	-0.52**	<i>E</i>	-0.26***	<i>E</i>	-0.35**
<i>P</i>	105.43***	<i>P</i>	50.18**	<i>P</i>	55.24***	<i>P</i>	-83.58**
CA	-0.93***	CA	0.10**	CA	-1.04***	CA	-1.22**
CY	-354.54***	CY	-38.69**	CY	-315.83***	CY	-54.74**

有效水体面积 Effective water area		季节性水体面积 Seasonal water area		全年水体面积 Year-long water area		水体面积年际变化 Annual change of water area	
模型概述 Model summary		模型概述 Model summary		模型概述 Model summary		模型概述 Model summary	
R^2	0.87	R^2	0.57	R^2	0.89	R^2	0.60
F	26.03	F	4.94	F	32.51	F	5.63
F_p	0.000	F_p	0.004	F_p	0.000	F_p	0.002

*: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$, ***: $P < 0.001$

T 代表咸海流域年平均温度, *E* 代表年蒸散量, *P* 代表年平均降水量, CA 代表农作物种植面积, CY 代表农作物产量。 R^2 代表相关性系数, F 代表 F 统计量, F_p 代表 F 统计量的概率。

T represents the annual average temperature of the Aral Sea Basin, *E* represents annual evapotranspiration, *P* represents annual average precipitation, CA represents crop planting area, and CY represents crop yield. R^2 represents the correlation coefficient, F represents the F statistic, and F_p represents the probability of the F statistic.

4 结论

(1) 从1992年到2018年, 咸海流域的全年水体、季节性水体都呈现出显著的下降趋势, 并且咸海的水体面积减少速度最快; 自2010年以后, 不论是咸海还是咸海流域, 地表水缩小的趋势已经保持在了一个稳定的水平。但相对于20世纪, 咸海的面积已经减少了三分之二。

(2) 温度变化是导致咸海流域地表水减少的最主要因素, 同时, 农作物变化对地表水变化也有着重要的影响, 说明咸海流域地表水的减少与人类的不合理利用密不可分。

在探究地表水减少的驱动因素时, 农作物产量和农作物种植面积与地表水面积的相关性在一定程度上可以代表人类活动对水资源变化的影响, 但有一定局限性, 未来研究将增加更多可能的驱动因素做进一步探讨。

参考文献

阿布都米吉提·阿布力克木, 葛拥晓, 王亚俊, 等. 2019. 咸海过去、现在与未来 [J]. *干旱区研究*, 36(1): 7-18.
[Ablekim Abdimijit, Ge Y X, Wang Y J, et al. 2019. The past, present and feature of the Aral Sea [J]. *Arid Zone Research*, 36(1): 7-18.]

曹西凤, 孙林, 赵子飞, 等. 2018. MODIS 遥感产品在三江源地区草产量估测中的应用 [J]. *国土资源遥感*, 30(4): 115-124. [Cao X F, Sun L, Zhao Z F, et al. 2018. Application of MODIS remote sensing products in the estimation of grass yield in Sanjiang Source Area [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 30(4): 115-124.]
胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 等. 2014. 中亚(五国)干旱生态地理环境特征 [J]. *干旱区研究*, 31(1): 1-12. [Hu R J, Jiang F Q, Wang Y J, et al. 2014. Arid ecological and geographical conditions in five countries of Central Asia [J]. *Arid Zone Research*, 31(1): 1-12.]
梁益同, 胡江林. 2001. NOAA 卫星图像水体神经网络识别方法的探讨 [J]. *应用气象学报*, 12(1): 85-90. [Liang Y T, Hu J L. 2001. A discussion on application of neural network technique in identification of water body from NOAA satellite images [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 12(1): 85-90.]
刘延龙, 张保华, 姚昕, 等. 2018. 东平湖水体透明度的遥感反演研究 [J]. *测绘科学*, 43(7): 72-78. [Liu Y L, Zhang B H, Yao X, et al. 2018. Remote sensing inversion of water transparency in Dongping Lake [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 43(7): 72-78.]
热依莎·吉力力, Issanova Gulnura, 吉力力·阿不都外力.

2018. 哈萨克斯坦水环境与水资源现状及问题分析 [J]. *干旱区地理*, 41(3): 518–527. [Jilili Reyisha, Issanova Gulnura, Abuduwaili Jilili. 2018. Water environment and water resource use issues of Kazakhstan [J]. *Arid Land Geography*, 41(3): 518–527.]
- 施海洋, 罗格平, 郑宏伟, 等. 2020. 基于“水—能源—食物—生态”纽带因果关系和贝叶斯网络的锡尔河流域用水分析 [J]. *地理学报*, 75(5): 1036–1052. [Shi H Y, Luo G P, Zheng H W, et al. 2020. Water use analysis of Syr Darya river basin: based on “water—energy—food—ecology” nexus and Bayesian network [J]. *Acta Geographica Sinica*, 75(5): 1036–1052.]
- 田向荣, 王国义, 樊彦芳. 2017. 咸海流域跨界水合作历史、形势及思考 [J]. *边界与海洋研究*, 2(6): 90–104. [Tian X R, Wang G Y, Fan Y F. 2017. Aral Sea Basin transboundary water cooperation: history, present situation and reflections [J]. *Journal of Boundary and Ocean Studies*, 2(6): 90–104.]
- 王航, 秦奋. 2018. 遥感影像水体提取研究综述 [J]. *测绘科学*, 43(5): 23–32. [Wang H, Qin F. 2018. Summary of the research on water body extraction and application from remote sensing image [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 43(5): 23–32.]
- 徐海燕. 2016. 绿色丝绸之路经济带建设在中亚的实践与政策探析 [J]. *华东师范大学学报(哲学社会科学版)*, 48(5): 119–125, 194. [Xu H Y. 2016. The construction of the Green Silk Road Economic Belt in Middle Asia: its implementation and policies [J]. *Journal of East China Normal University (Humanities and Social Sciences)*, 48(5): 119–125, 194.]
- 徐涵秋. 2005. 利用改进的归一化差异水体指数 (MNDWI) 提取水体信息的研究 [J]. *遥感学报*, 9(5): 589–595. [Xu H Q. 2005. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI) [J]. *Journal of Remote Sensing*, 9(5): 589–595.]
- 杨雪雯, 王宁练, 陈安安, 等. 2020. 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*, 42(2): 681–692. [Yang X W, Wang N L, Chen A A, et al. 2020. 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*, 42(2): 681–692.]
- Boomer I, Aladin N, Plotnikov I, et al. 2000. The palaeolimnology of the Aral Sea: a review [J]. *Quaternary Science Reviews*, 19(13): 1259–1278.
- Brisco B, Short N, van der Sanden J, et al. 2009. A semi-automated tool for surface water mapping with RADARSAT-1 [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 35(4): 336–344.
- Dong J W, Xiao X M, Kou W L, et al. 2015. Tracking the dynamics of paddy rice planting area in 1986–2010 through time series Landsat images and phenology-based algorithms [J]. *Remote Sensing of Environment*, 160: 99–113.
- Gond V, Bartholomé E, Ouattara F, et al. 2004. Monitoring and mapping of waters and wetlands in arid regions using the SPOT-4 VEGETATION imaging system [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 25(5): 987–1004.
- Gorelick N, Hancher M, Dixon M, et al. 2017. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone [J]. *Remote Sensing of Environment*, 202: 18–27.
- Kezer K, Matsuyama H. 2006. Decrease of river runoff in the Lake Balkhash basin in Central Asia [J]. *Hydrological Processes*, 20(6): 1407–1423.
- McFeeters S K. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7): 1425–1432.
- Micklin P P. 1988. Desiccation of the Aral Sea: a water management disaster in the Soviet Union [J]. *Science*, 241(4870): 1170–1176.
- Saiko T A, Zonn I S. 2000. Irrigation expansion and dynamics of desertification in the Circum-Aral region of Central Asia [J]. *Applied Geography*, 20(4): 349–367.
- Santoro M, Wegmüller U, Lamarche C, et al. 2015. Strengths and weaknesses of multi-year Envisat ASAR backscatter measurements to map permanent open water bodies at global scale [J]. *Remote Sensing of Environment*, 171: 185–201.
- Xiao X M, Boles S, Frolking S, et al. 2006. Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multi-temporal MODIS images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 100(1): 95–113.
- Xu Y D, Yu L, Zhao F R, et al. 2018. Tracking annual cropland changes from 1984 to 2016 using time-series Landsat images with a change-detection and post-classification approach: experiments from three sites in Africa [J]. *Remote Sensing of Environment*, 218: 13–31.
- Zhu L H, Liu X N, Wu L, et al. 2019. Long-term monitoring of cropland change near Dongting Lake, China, using the LandTrendr algorithm with Landsat imagery [J]. *Remote Sensing*, 11(10): 1234. DOI: 10.3390/rs11101234.