

1990—2019 年咸海水量平衡及其影响因素分析*

昝婵娟^{1,2,3}, 黄 粤^{1,2,3**}, 李均力^{1,2,3}, 刘 铁^{1,2,3}, 包安明^{1,2,3}, 邢 伟^{1,2}, 刘志斌^{1,2,3}

(1: 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

(2: 新疆维吾尔自治区遥感与地理信息系统应用重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

(3: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 咸海地处中亚, 气候和人类的双重影响下湖面急剧萎缩引发区域生态危机, 定量解析其水量平衡互动关系及影响因素对咸海地区水资源管理和生态保护有重要意义. 基于 1990—2019 年密集时序 Landsat 影像、T/P 卫星、Jason1/2 测高卫星及咸海数字测深模型 (DBM), 提取近 30 年咸海面积、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; 建立水量平衡模型, 定量分析研究区水量平衡要素变化及时空差异, 探讨其互动关系与影响机制. 结果表明: (1) 1990—2019 年间, 咸海水量减少了 $2271.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ (约 75.15%), 年平均变化率达 $-78.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; 南咸海水量变化趋势与咸海整体基本一致, 北咸海除 1999 年出现了极小值外, 其余年份水量变化趋势均呈波动上升状态, 至 2019 年水位已恢复至 1984 年水平. (2) 1990s 以来, 南、北咸海水量平衡结构变化时空差异显著, 阿姆河入湖径流量呈波动减少趋势, 随着咸海持续退缩水体蒸发不断减小, 区域水量支出收入比由 1990 年的 2.46 降低到 2015 年的 0.87; 近年来丰水年份南咸海地下水可由亏损转化为盈余状态, 水域变化进入相对平缓的状态. 北咸海入湖径流量波动增加, 蒸散发随水域面积增加而增加, 1990s 初以来水量收入超过水量支出, 区域地下水盈余, 湖泊水位不断抬升. (3) 湖区尺度上, 入湖径流量和水域蒸发量是咸海水量变化的主导因素. 流域尺度上, 气候变化与人类活动共同影响咸海入湖水量, 南咸海入湖水量与阿姆河上游来水、流域耕地面积显著相关, 而北咸海入湖水量主要与锡尔河上游来水相关.

关键词: 咸海; 水量; 水量平衡分析; 蒸散发; 内陆河流域

Analysis of water balance in Aral Sea and the influencing factors from 1990 to 2019*

Zan Chanjuan^{1,2,3}, Huang Yue^{1,2,3**}, Li Junli^{1,2,3}, Liu Tie^{1,2,3}, Bao Anming^{1,2,3}, Xing Wei^{1,2} & Liu Zhibin^{1,2,3}

(1: *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, P.R. China*)

(2: *State Key Laboratory of Remote Sensing and Geographic Information System Application, Urumqi 830011, P.R. China*)

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

Abstract: The Aral Sea is located in Central Asia. Under the impact of climate change and human activity, the lake surface has shrunk sharply and triggered a regional ecological crisis. It is of great significance to study the changes of water balance and their driving factors for water resources management and ecological protection in the Aral Sea region. Based on the dense time-series Landsat imagery from 1990 to 2019, T/P satellite, Jason1/2 altimetry satellite, and digital bathymetry model (DBM) of the Aral Sea, time serieses of the Aral Sea area and water level in the past 30 years were extracted, to reconstruct the Aral Sea water level-area-volume capacity curve and explore the characteristics of the Aral Sea volume changes. A water balance equation was also established to quantitatively analyze the spatiotemporal changes of the water balance elements in the study area and their impacts on the Aral Sea volume. The results show that the water volume decreased by $2271.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ (about 75.15%) with an average decreasing rate of $78.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ from 1990 to 2019 in the Aral Sea, a similar variation trend was detected in the South Aral Sea. Except for

* 2020-08-30 收稿; 2020-12-17 收修改稿.

中国科学院“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”专项 (XDA2006030102)、国家重点研发计划 (2017YFC0404501)、中国科学院创新交叉团队项目 (JCTD-2019-20) 和中国科学院国际合作项目 (131551KYSB20160002) 联合资助.

** 通信作者; E-mail: huangy@ms.xjb.ac.cn.

the minimum value in 1999, the water volume in other years showed a fluctuating and rising state in the North Aral Sea. By 2019, the water level had returned to the level of 1984. Since the 1990s, the inflow from the Amu Darya River to the Aral Sea showed a decreasing trend, and the spatiotemporal differences in the water balance structure of the South and the North Aral Sea are significant. As the Aral Sea continues to shrink, and water evaporation continues to decrease, the regional water expenditure and income ratio decreases from 2.46 in 1990 to 0.87 in 2015. In recent years, the groundwater in the South Aral Sea changed from deficit to surplus, and the water area changed into a relatively stable state. The evapotranspiration of the North Aral Sea increased with the increase of the water area. Since the early 1990s, the water income has exceeded its expenditure, regional groundwater has become surplus, and the lake water level has been constantly rising. On the regional scale of the Aral Sea, the inflow and evaporation are the main factors affecting the change of the water volume in the Aral Sea. On the catchment scale, climate change and human activities jointly affect the inflow of the Aral Sea. The inflow of the South Aral Sea is significantly correlated with the runoff from the upper Amu Darya River and the cultivated land area of the basin, while the inflow of the North Aral Sea is mainly correlated with the runoff from the upper Syr River.

Keywords: Aral Sea; water volume; water balance analysis; evapotranspiration; inland river basin

1960年以来,由于乌兹别克斯坦、哈萨克斯坦、土库曼斯坦和吉尔吉斯斯坦四国水土资源开发,流域水资源配置改变导致阿姆河和锡尔河注入咸海的水量显著减少,咸海湖泊面积急剧萎缩、水位持续降低^[1-2]. 1987年咸海分裂为南咸海和北咸海,至2006年,南咸海再次分裂为西咸海和东咸海2个部分^[3]. 水面面积的急剧萎缩使得咸海湖泊系统平衡失调,生态危机愈演愈烈^[4-5]. 咸海水量平衡结构的变化及其驱动机制是提出咸海生态恢复综合治理科学方案的理论基础^[6-7].

已有研究表明,1960s以来咸海呈持续萎缩的态势,1960—2009年间,咸海水面面积、蒸发量和水量分别减少了约80%、90%和88%^[8],地下水对咸海水量的贡献增加,来自阿姆河下游灌区的地下水已成为南咸海最主要的补给来源^[9-10]. Micklin^[6]认为咸海的萎缩遵循负反馈机制,即抵制变化和促进稳定的机制,湖区蒸散发远超过地表径流量与降雨量的总和^[11-12]. 随着咸海面积的减少,蒸发损失显著减少,区域水循环系统将趋于平衡^[13]. 以往研究多从流域尺度探讨气候变化和人类活动对咸海湖泊面积、水量的影响^[6,9,11,14-15],各国学者普遍认同灌溉和水库蓄存为主的人类活动是影响咸海水量长期变化的主导因素^[6]. 然而,苏联解体后中亚各国水资源开发利用模式发生了显著变化,耕地扩张规模和速度减缓^[2],加之气候变化的联合影响,咸海水量平衡及其主导因素也随之发生变化,但前期研究中对此关注较少. 1987年咸海分裂为北部的小咸海和南部的大咸海两个水体,1992—2005年科卡拉尔大坝的修建,阻隔了咸海南、北两部分的地表水交换,导致南、北咸海水量变化差异显著. Benduhn和Renard^[7]基于水量平衡要素估算了1990年以前流入南咸海的地下水年变化量;Crétau等^[13]基于遥感和观测数据建立水量平衡模型,分析了1992—2005年间南咸海水量平衡要素的变化;Gaybullaev等^[8]基于观测数据分析了1960—2009年期间的水量和盐度平衡变化. Wang等^[16]指出2005年后咸海退缩或有减缓趋势,这意味着咸海已进入新的水量平衡状态中. 以上研究多集中于2009年以前,目前缺少对新状态下湖泊水量平衡要素变化、互动关系及其影响因素的定量解析.

因此,本文选择咸海湖区和阿姆河下游努库斯灌区(又称卡拉卡尔帕克斯坦灌区)为典型研究区,基于1990—2019年Landsat TM/ETM+/OLI数据,提取湖泊面积、水位变化信息,计算湖泊水量;利用高精度土地利用数据,综合多种方法计算灌区与湖区耗水;结合气象、水文观测数据,建立水量平衡模型,分析了湖泊水量、蒸散发耗水、降水、入湖径流、地下水(余项)等水量平衡要素变化,定量解析了水量收入与水量支出间的互动关系;并从咸海地区和流域2个尺度,探讨了气候变化和人类活动对南、北咸海水量的差异性影响,研究结果可为咸海地区水资源调控与生态保护提供数据支持.

1 研究区概况

咸海位于乌兹别克斯坦与哈萨克斯坦两国交界处,地处图兰低地,是阿姆河和锡尔河的尾间湖^[2]. 至1987年,阿姆河中下游灌溉面积的增加使得阿姆河间歇性断流,大部分年份无地表径流直接输入南咸海;1992—2005年期间科卡拉尔大坝的修建,将南、北咸海完全分离,切断了南北咸海间的直接水量交换^[17]. 由于南咸海近湖周边缺少入湖径流观测资料,入湖径流多选用阿姆河下游的Samambay水文站水文观测数据,

因此南咸海(大咸海)通常包含乌兹别克斯坦的努库斯灌区^[13],本研究选取努库斯灌区上游的 Samambay 水文站和锡尔河尾间的 Karateren 水文站作为研究区的入流站点(图 1)。研究区地理位置介于 58°7′~62°2′E 和 41°16′~46°52′N,面积共 9.07 万 km²,整体地势东高西低,咸海北岸地势高低不平,东岸和南岸地势较平坦,西岸比较陡峭,海拔高程为-8~255 m。研究区土地利用类型包括耕地、草地、灌丛、水体和湿地等,其中耕地面积占 9%,湿地面积占 1%;其中耕地主要分布于灌区内,草地与灌木广泛分布于咸海湖泊周边和灌区,湿地主要分布于灌区与湖泊的过渡带。区域年均最高温为-9.7~40℃,年均最低温为-19~22.3℃,年降水量不足 200 mm,年均蒸发量为 1100~1300 mm。

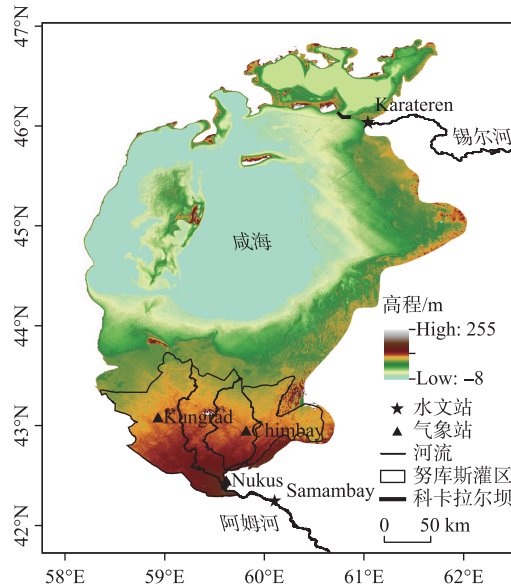


图 1 咸海研究区

Fig.1 Study area of Aral Sea region

2 材料与方法

2.1 数据收集

本文遥感数据来源于美国地质调查局(<http://glovis.usgs.gov/>),包括 1990—2019 年 Landsat TM/ETM+/OLI 数据共 96 期,时相集中于 5—10 月,用于湖泊面积信息提取;1990—2019 年湖泊水位信息由 TOPEX/Poseidon (T/P) 卫星以及 Jason1/2 测高卫星数据产品获得^[13,18]。

从中国科学院“地球系统科学数据共享平台—新疆与中亚科学数据共享平台”获取的 1990、2000、2010、2015 年四期土地利用与覆盖数据,一级分类包括农田、林地、灌木、草地、水域、建设用地、裸地 7 种土地覆被类型,空间分辨率为 30 m×30 m,用于灌区和生态耗水计算;同时,下载了欧洲太空局 CCI 全球土地覆盖数据(<https://www.esa-landcover-cci.org>),空间分辨率为 300 m×300 m,用于提取 1992—2015 年咸海流域耕地面积变化时序。

气象数据采用英国 East Anglia 大学 Climatic Research Unit (CRU) 发布的 CRU TS4.04 数据(http://data.ceda.ac.uk/badc/cru/data/cru_ts/),空间分辨率为 0.5°×0.5°,时段为 1990—2019 年,下载参量包括月均最高温、月均最低温、月均温和降水量;气象站点数据由乌兹别克斯坦农业与水资源部提供,采用研究区内 Nukus、Chimbay、Kungrad 三个气象站的常规观测数据,数据时段与 CRU 数据一致,包括日平均最高气温、日平均最低气温、日均温、2 m 处风速、日降水量。

水文站点径流观测数据由乌兹别克斯坦农业与水资源部提供,咸海湖区入流水文站点分别选择位于努

库斯灌区入口的阿姆河 Samambay 站和位于锡尔河入湖口的 Karateren 站^[18]; 为开展湖泊变化的归因分析, 收集了阿姆河上游的 Kelif 站、干流 Kerki 站和 Tuyamuyun 站以及锡尔河上游的 Uchkurgan 站, 以及三角洲入流站点 Kazalinsk 站的径流观测数据; 为保持分析时间尺度一致, 水文数据时段均采用 1990—2019 年。

2.2 湖泊水量计算

基于 1990—2019 年间共 96 期 Landsat 影像, 采用“全域—局部”自适应迭代的阈值分割方法提取湖泊面积信息^[19]。利用 T/P 卫星、Jason1/2 陆地测高数据产品获取 1990—2019 年的湖泊水位信息。湖盆地形数据采用 Crétau 等^[13]建立的咸海数字湖底模型 (DBM), 依此建立咸海水位—面积—库容关系曲线, 利用遥感湖泊面积、水位变化信息估算咸海储水量。

2.3 区域耗水计算

2.3.1 潜在蒸散发计算 潜在蒸散发是农田灌溉管理、作物需水量估算、稀缺资料地区水量平衡等研究中的重要参量。本文采用联合国粮食及农业组织 (FAO) 推荐的彭曼 (Penman-Monteith) 公式 (公式 (1))^[20], 根据最高温、最低温和风速来估算研究区潜在蒸散发。该方法中主要输入项为气候参数, 在咸海缺资料地区数据相对简单易得, 且已有众多学者运用彭曼公式在干旱地区进行潜在蒸散量的计算, 准确性相对较高^[21-23]。

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

式中, ET_0 为参考作物蒸散量 (mm/d); R_n 为地表净辐射 (MJ/(m²·d)); G 为土壤热通量 (MJ/(m²·d)); T 为地表 2 m 处平均气温 (°C); u_2 为 2 m 处风速 (m/s); e_s 为饱和蒸气压 (kPa); e_a 为实际蒸气压 (kPa); $e_s - e_a$ 为饱和蒸气压差 (kPa); Δ 为蒸气压曲线斜率 (kPa/°C), γ 为干湿表常数 (kPa/°C)。

由 FAO 操作手册获得入射太阳辐射 R_n , 依据缺失辐射数据的计算方法得到地表净辐射 R_n , u_2 来自气象站数据, e_s 是月均最高温 (T_{max}) 和最低温 (T_{min}) 对应的饱和蒸气压的平均值 (式 (2)), e_a 是露点温度 T_{dew} 对应的饱和蒸气压, 在本文中采用月均最低温 T_{min} 来近似替代露点温度 T_{dew} (式 (3)), Δ 基于月均温 T 计算 (式 (4)), γ 是高程的函数 (式 (5))。

$$e_s = \frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2} \quad (2)$$

$$e_a = e^0(T_{dew}) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{dew}}{T_{dew} + 237.3} \right] \quad (3)$$

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.618 \exp \left(\frac{17.25 T}{T + 237.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2} \quad (4)$$

$$\gamma = 0.000665P = 0.000665 \left[101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \right] \quad (5)$$

式中, P 为大气压 (kPa), z 为海拔高度 (m)。

2.3.2 农作物蒸散发计算 采用作物系数法来估算研究区内作物蒸散发量 (ET_c)^[24]。作物系数法估算作物需水量是以联合国粮食及农业组织 (FAO) 提供的 K_c 系数乘以 Penman-Monteith 公式计算出的潜在蒸散发 (ET_0) 获得 (式 (6)), 即:

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (6)$$

2.3.3 荒漠植被蒸散发计算 本文荒漠植被生态需水量采用面积定额法计算^[25], 荒漠植被的生态需水定额的选取可参照阿姆河下游相关研究成果^[26-27]。面积定额法是以某一区域某一类型植被的面积乘以其生态用水定额, 计算得到的水量即为生态需水量, 其公式为:

$$W = \sum_{i=1}^n A_i \cdot P_i \quad (7)$$

式中, W 为区域植被生态需水总量 (m³); A_i 为第 i 类型植被的面积 (m²); n 为植被种类总数; P_i 为第 i 类型植被生态需水定额 (m³/m²)。

2.4 水量平衡模型

某时段湖泊库容差与增(减)水的关系,可用水量平衡方程式^[28]表示:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = A(h)(P - E) + Q_{in} + Q_{out} \quad (8)$$

式中, Δt 为计算时段(a); ΔV 为湖泊库容变化量(m^3); A 为湖泊水面面积(m^2), A 是水位(h)的函数; P 为研究区内降雨量(mm); E 为研究区内总蒸发量(mm); Q_{in} 为入湖水量(m^3); Q_{out} 为出湖水量(m^3).

由于咸海是阿姆河及锡尔河的尾间湖,属于封闭湖泊,没有出水河流,根据咸海地区实际情况,将水量平衡方程表示为:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = A(h)(P - E) + Q_{\text{河流入}} + Q_{\text{地下入}} - Q_{\text{地下出}} = A(h)(P - E) + Q_{\text{河流入}} + Q_{\text{余项}} \quad (9)$$

式中, $Q_{\text{河流入}}$ 为河流入湖水量, $Q_{\text{地下入}}$ 、 $Q_{\text{地下出}}$ 分别为地下水入、出湖水量. 余项表示为:

$$Q_{\text{余项}} = Q_{\text{地下入}} - Q_{\text{地下出}} \quad (10)$$

2.5 相关分析

为探究咸海水量平衡要素变化与环境因子之间的相关性,采用 Pearson 相关系数表示各变量之间的相关关系^[29].

3 结果分析

3.1 咸海水量变化

基于历史湖盆数据和文献资料^[7,12-13,15],建立水位—面积—库容关系曲线,依据遥感面积、水位数据时间序列计算咸海水储量的变化如图 2. 1990—2019 年,咸海水量持续减少,由 1990 年的 $3022.8 \times 10^8 m^3$ 减少到 2008 年的 $932.6 \times 10^8 m^3$,进而缩减至 2019 年的 $751.2 \times 10^8 m^3$,共减少了 $2271.6 \times 10^8 m^3$ (约 75.15%),年平均变化率为 $-78.3 \times 10^8 m^3/a$. 其中,1990—2008 年为咸海急剧萎缩期(约 69.15%),年均变化率达到 $-116.1 \times 10^8 m^3/a$;而 2009—2019 年间,咸海水量萎缩速率明显减缓(约 18.1%),年均变化率为 $-16.6 \times 10^8 m^3/a$. 南咸海水量变化趋势与咸海整体的面积变化趋势基本一致,其水量从 1990 年的 $2804.4 \times 10^8 m^3$ 减少到了 2019 年的 $487.5 \times 10^8 m^3$,萎缩速率高达 $79.9 \times 10^8 m^3/a$;北咸海水量呈波动的上升状态,水量从 1990 年分裂之初的 $218.4 \times 10^8 m^3$ 波动增加至 2019 年的 $263.7 \times 10^8 m^3$,增加了 $45.3 \times 10^8 m^3$ (约 20.8%),年均变化率为 $1.56 \times 10^8 m^3/a$.

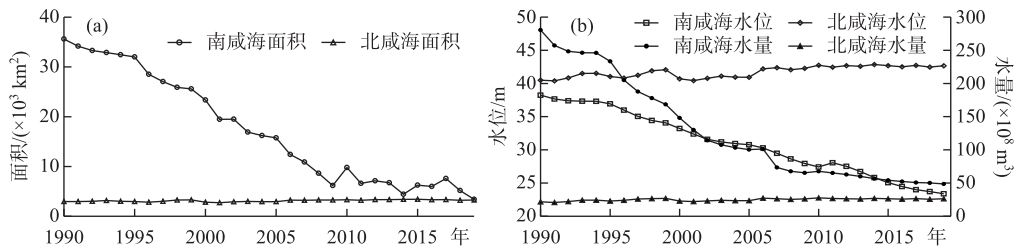


图 2 1990—2019 年南、北咸海面积(a)、水位和水量(b)变化

Fig.2 Changes in area (a), water level and volume (b) of the South and North Aral Sea from 1990 to 2019

3.2 咸海水量平衡要素变化

3.2.1 降水 1990—2019 年期间,研究区多年平均降水量为 137.17 mm,变化速率约 1.15 mm/10 a,总体小幅增加,在 2003、2016 年出现最大值,但都小于 200 mm(图 3a). 其中,1990—1999 年研究区降水呈减少趋势,南部地区降水减少明显,平均降水量为 131.57 mm;2000—2009 年,咸海地区大范围出现降水减少趋势,但减小速率较 1990—1999 年缓和,平均降水量为 138.21 mm;而 2010—2019 年期间,咸海南部地区降水小幅度增加,平均降水量为 142.23 mm.

3.2.2 入湖径流 1990—2019年期间,阿姆河入湖径流量总体大于锡尔河,阿姆河年均入湖径流量为 $83.6 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 年际变化较大, 呈现波动减少趋势, 2001年最低, 为 $4.03 \times 10^8 \text{ m}^3$; 锡尔河年均入湖径流量为 $54.74 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 呈现波动趋势但相对稳定, 入湖径流量在2001年之后有所回升, 1990—2001年期间年均入湖径流量为 $45.8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 2002—2019年锡尔河年均入湖径流量为 $60.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$. 从2条河流年内变化来看, 月径流量变化特征明显不同, 阿姆河峰值出现在夏季7、8月, 而锡尔河峰值常出现在3、4月(图3b).

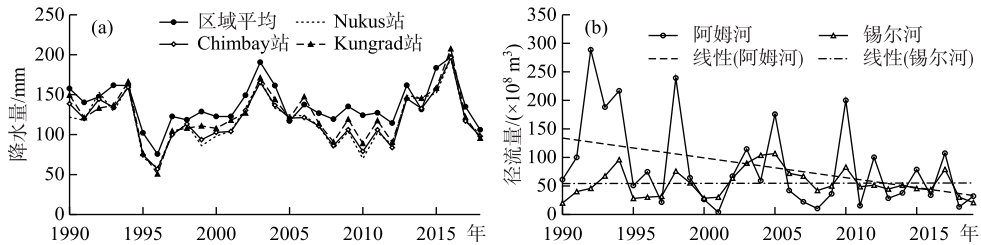


图3 1990—2019年咸海地区气象站降水量变化(a)及入湖水文站径流量变化(b)

Fig.3 Precipitation changes of meteorological stations(a) and runoff changes of hydrological stations(b) in the Aral Sea region from 1990 to 2019

3.2.3 蒸散发耗水量 如图4所示, 1990—2015年, 研究区蒸散发总量持续减少. 咸海水体蒸发量为主要减少量, 由于咸海持续萎缩, 导致水面面积锐减, 水面蒸发随之减少; 1990年咸海湖泊蒸发量占区域水体蒸发总量的97%, 后由于咸海湖泊急剧萎缩, 2015年这一比例减少至87%; 1990s蒸发量为 $1182 \text{ mm}/\text{a}$, 与 Benduhn^[7]的研究结果相近; 1990—2015年, 咸海研究区内农田的蒸散发量增加了 $9.97 \times 10^8 \text{ m}^3$, 同期耕地面积除2010年减小外均呈小幅增加, 种植结构变化较大; 天然植被的蒸散发量小幅波动, 总体变化不大; 由于湿地面积的增加, 湿地蒸散发量持续增加, 2015年湿地蒸散发量为1990年的2.7倍. 与1990年相比, 2015年咸海区域蒸散发总量减少 $251.56 \times 10^8 \text{ m}^3$; 南咸海地区蒸散发总量减少, 其中水面蒸发减少 $353.1 \times 10^8 \text{ m}^3$; 北咸海地区蒸散发总量增加, 其中水面蒸发增加 $7.52 \times 10^8 \text{ m}^3$.

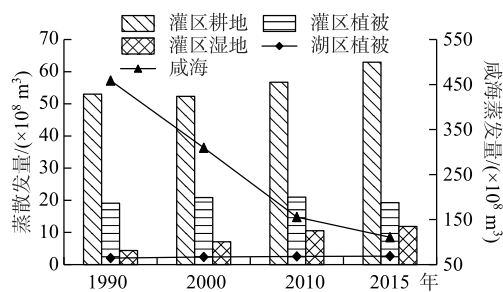


图4 咸海地区蒸散发计算结果

Fig.4 Calculation results of regional evapotranspiration in Aral Sea

3.2.4 余项 由于目前没有咸海地区地下水交换的实际观测资料, 依据建立的水量平衡公式, 余项定义为其其他水量平衡要素与库容差的差值, 近似为地下水变化量. 以咸海研究区整体为计算单元, 1990、2000、2010和2015年水量平衡要素变化量如图5. 余项在 $-327.1 \times 10^8 \sim 147.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 之间, 2010年达到最大值 $147.1 \times 10^8 \text{ m}^3$. 总的来说, 咸海地区蒸散发量减少而入湖径流量增加. 随着咸海水面的持续萎缩, 水面蒸发量逐年减小, 水量收入与水量支出间的缺口越来越小.

1990s初, 北咸海水量平衡的正向变化引起北咸海水位抬升; 为了阻挡水位升高后北咸海水量再次流入南咸海, 哈萨克斯坦于2005年在Berg海峡建成科卡拉尔大坝^[27]. Aladin等^[30]指出在Berg海峡修建大坝对北咸海的水量平衡产生了显著影响, 但并没有证据表明大坝会加速南咸海的干涸. 当大坝被毁坏时并未监

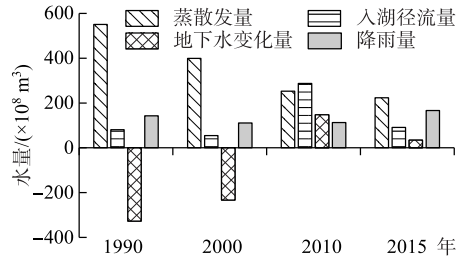


图5 咸海研究区水量平衡变化

Fig.5 Changes of water balance in the Aral Sea study area

测出水流入南咸海,而卫星影像显示有季节性水流向南流动,其中一部分消失在大坝南部的 Kokaral 半岛,一部分少量水流入南咸海的东部区域.因此,可认为由北咸海流入南咸海的水量非常小,包含在余项计算的不确定性中,在水量平衡计算中可忽略不计^[13].图6为大坝阻隔下,南、北咸海水量平衡分析结果.研究表明,1990—2015年南、北咸海水量平衡结构与变化过程差异显著.北咸海自1990s初已实现了水量平衡的正向增长,水域面积持续增加;而南咸海一侧,虽然湖区的水量收入依然处于波动减小的趋势,但蒸散发的减小速率和幅度更大,使得2010年后,阿姆河河道来水与降水基本能够满足南咸海地区农业、生态耗水和湖泊蒸发的需求,南咸海基本进入了一个变化缓慢的状态.

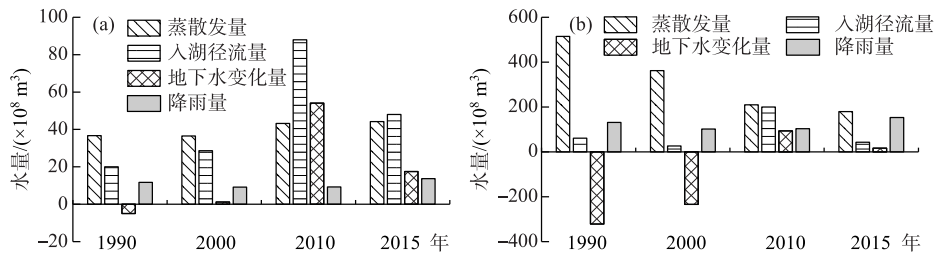


图6 北咸海(a)和南咸海(b)水量平衡变化

Fig.6 Changes of water balance in the North Aral Sea (a) and South Aral Sea (b)

3.3 水量平衡要素变化对咸海水量的影响

在咸海区域尺度,作物与植被蒸散发和水体蒸发是水量耗散的主要途径,水量收入与支出间的互动关系,决定着咸海历史演变进程与未来趋势.以往研究多关注流域尺度气候变化因子、耕地面积变化与咸海水量的关系,而对咸海地区水量平衡要素对湖泊水量的驱动机制评估较少^[31].如表1所示,咸海水量变化与湖区气温和降水的相关性低,而与阿姆河来水呈显著的正相关关系(均通过95%置信度检验),与努库斯灌区农业耗水量呈显著的负相关关系(通过了99%置信度检验).此外,湖泊水量与水体蒸发呈显著正相关关系,且相关性最大,相关系数为0.962(通过了99%置信度检验),这是由于湖泊水量与水体蒸发均通过湖泊面积计算,存在很强的自相关关系.努库斯灌区耕地面积与咸海水量之间没有明显的相关关系,但灌区农业耗水量与咸海、南咸海水量的相关系数分别为-0.621、-0.629,均通过99%置信度检验,表明努库斯灌区内种植结构和灌溉方式对咸海水量有较大影响.南咸海水量变化的相关因素与咸海一致,而北咸海水量变化仅与水体蒸发呈显著的正相关关系,与区域的温度、降水和锡尔河的来水均无显著相关关系.

3.4 讨论

从长期来看,咸海的退缩是整个咸海流域气候、水资源与社会经济系统变化共同影响的结果. Savitskiy等^[32]的研究结果显示,1950—2001年咸海流域的年平均气温增加了0.6~1.2℃,年平均降水量的变化很小,且年平均径流量变化也很小. Asarin等^[27]指出,1932—2006年期间阿姆河和锡尔河流域天然径流呈波动变化,并未呈现显著的增加或减少趋势. Wang^[16]的分析表明,1960—2019年咸海流域上游山区降水以21.27

表 1 1990—2015 年咸海水量与湖区水量平衡要素的相关系数

Tab.1 Coefficient of correlation between water quantity, water balance factor and cultivated land area of irrigated area in Aral Sea from 1990 to 2015

水量	气温	降水	入湖径流	努库斯灌区耕地面积	努库斯灌区农业耗水	水体蒸发
咸海水量	-0.426 *	-0.129	0.416 *	0.299	-0.621 **	0.962 **
南咸海水量	-0.383	0.001	0.500 *	0.286	-0.629 **	0.972 **
北咸海水量	0.150	0.054	-0.007	—	—	0.586 **

* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关.

mm/10 a 的速率增加, 气温则以 0.20℃/10 a 左右的速率持续升高. 但近 30 年来(1990—2019)阿姆河与锡尔河流域上游山区降水表现出不同的变化趋势, 阿姆河上游降水小幅减少, 而锡尔河上游地区降水则为增加趋势, 增幅约 0.17 mm/10 a(图 7a).

如图 7b 所示, 从水资源总量来看, 1930s 以来, 阿姆河和锡尔河径流总体变化平稳^[27], 但其变化具有阶段性的差异. 1950s—1980s 阿姆河的上游来水量具有减少趋势, 1980s—1990s 具有增长趋势, 2000 年以后有减少趋势. 1980s 之前的减少趋势较 2000 年以后的减少趋势显著. 1990—2015 年, 阿姆河上游出山口(Termez 站)径流呈小幅减少趋势^[27], 中游入口 Kerki 站和下游入口 Tuyamuyun 站径流量则呈波动减少趋势, 与阿姆河入湖站点变化趋势一致, 2 个站点径流与南咸海入湖水量的相关系数分别为 0.86 和 0.93(图 8). 锡尔河上游来水在长期上呈增加趋势, 在 1970s—1980s 有较明显的减少趋势, 1990 年后出山口径流呈增加趋势^[27], 与锡尔河三角洲入口 Kazalinsk 站和北咸海入湖径流量变化一致.

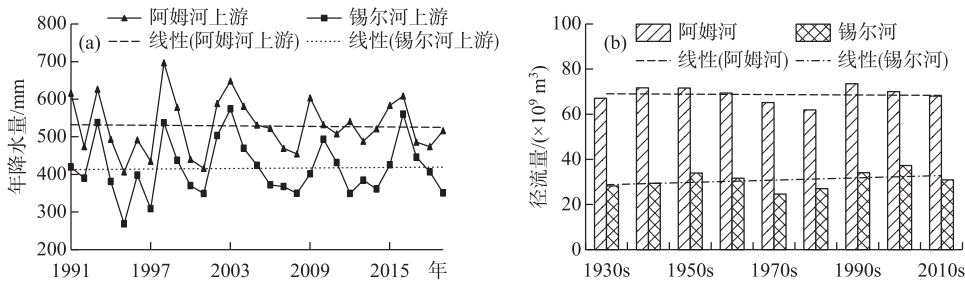


图 7 咸海流域上游山区降水量(a)与径流量(b)变化

Fig.7 Precipitation (a) and river runoff (b) changes in the mountainous area in the upstream of Aral Sea Basin

目前, 各国学者普遍认同人类活动对咸海萎缩的长期影响较气候变化更为显著^[27]. Micklin^[6]认为以灌溉取水为主的人类活动在 1911—2010 年期间咸海萎缩中起主导作用. 杨雪雯等^[29]的研究表明, 1960—2015 年期间咸海面积与咸海流域灌溉面积和水库容量均呈显著的负相关关系. Wang^[16]认为苏联解体后咸海流域取水量减少是咸海萎缩减缓的主要原因之一. 邓铭江等^[2]的研究表明, 1960—1980 年是咸海流域耕地扩张增加最为迅速的 20 年, 增幅达 54.3%; 1980—1990 年期间, 灌溉面积继续增加但增幅不足 5%. 1990—2015 年, 阿姆河流域耕地面积增加 1500 km², 其中中游和下游灌区耕地面积分别增加 850 和 650 km². 锡尔河流域耕地面积总体变化较小, 2015 年较 1992 年增加 730 km², 主要分布在流域的上游和下游地区. 可见苏联解体后, 咸海流域灌溉面积虽然仍有增加, 但增幅仅为 1%~2%; 且在锡尔河流域中游地区, 耕地面积出现了减少趋势. 如图 9 所示, 南咸海入湖径流量与阿姆河流域耕地面积呈显著相关, 而北咸海入湖水量与锡尔河流域的耕地面积呈正相关, 但相关系数仅为 0.28, 表明 1990 年以来, 阿姆河流域耕地面积小幅增加对南咸海入湖水量有显著影响, 而北咸海入湖水量变化受锡尔河耕地面积变化影响较小.

综上所述, 1990s 以来, 咸海入湖水量变化是流域气候变化与人类活动共同影响的结果, 入湖径流量和蒸发的变化直接导致了咸海水量平衡结构的改变. 研究中, 结合多种方法计算了研究区内耕地、湿地、荒

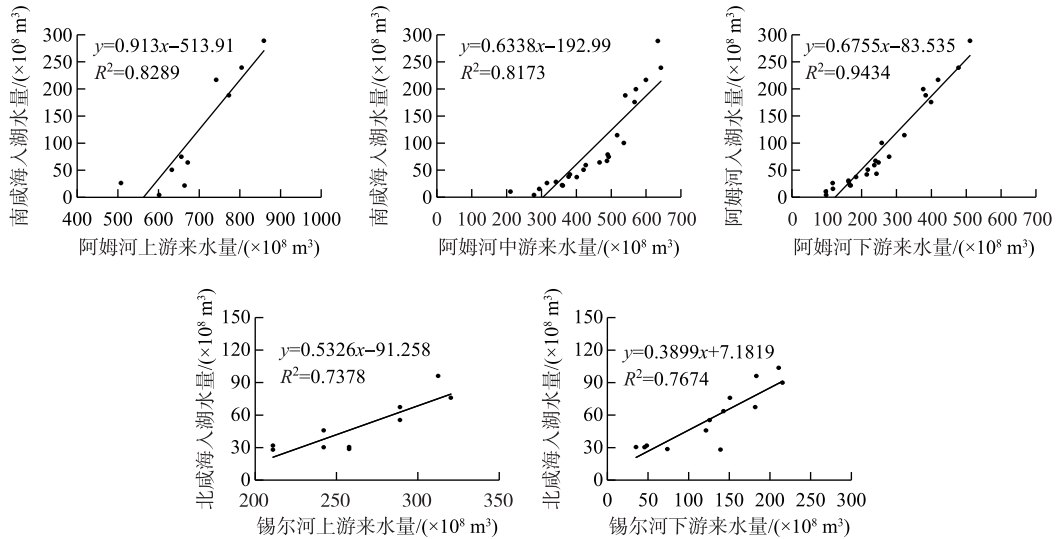


图 8 1990—2015 年阿姆河与锡尔河关键节点来水量与咸海入湖径流量的关系
Fig.8 Relationship between the water inflow into the Aral Sea and the runoff of the Amu Darya River and Syr Darya River at the key nodes during 1990—2015

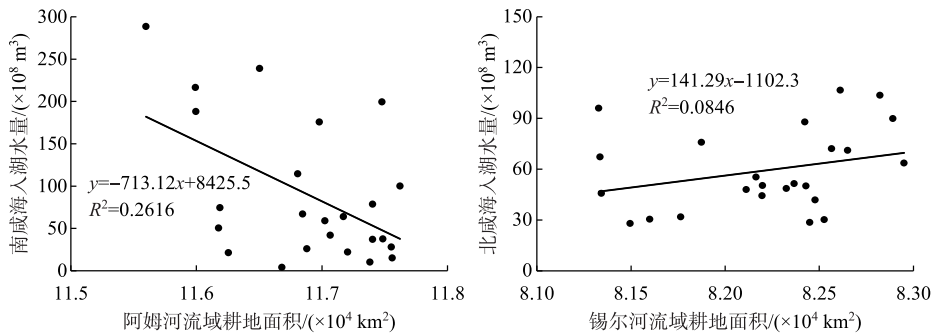


图 9 1992—2015 年阿姆河、锡尔河流域耕地面积与南、北咸海入湖水量的关系
Fig.9 Relationship between the cultivated land area and the inflows in the South and North Aral Sea during 1992—2015

漠植被和水域等不同土地覆被类型的蒸散发量,减小了水量平衡计算中的不确定性;由于缺少灌区和湖区实测地下水数据的支持,并未深入探讨地下径流对咸海的补给作用,只从计算余项的总量上进行了较粗略评估. 2019 年以来,地下水监测网络逐步在咸海地区建立和完善,后续研究将加强区域地下水数据的收集与融合分析.

4 结论

本文以包含湖泊水域和努库斯灌区的咸海地区为研究对象,不仅关注湖泊水量本身,同时也分析了降水、蒸散发、入湖水量和地下水等水量平衡要素的变化,并从咸海水量收入与支出互动关系的角度定量解析了近年来咸海水量减少放缓的主要原因. 研究表明,1990—2019 年咸海总水量持续减少,其中南咸海水量与咸海整体变化趋势一致,北咸海水量持续增加. 南、北咸海水量平衡差异显著,由于锡尔河来水量增加以及科卡拉尔大坝的拦截作用,1990s 初以来,北咸海水量平衡出现正增长,导致湖泊水位不断抬升;南咸海方

面,阿姆河上游来水减少和中下游地区耕地小幅增加导致入湖水量波动减小,而1990—2008年期间湖面急剧萎缩导致水量蒸发大幅减小,2009年以来一些年份湖区水量收入超过水量支出,地下水出现了正向补给,南咸海水量变化趋于平稳。未来咸海地区水资源调控与管理中,需针对南、北咸海水量平衡状态,并充分考虑其变化主导因素,制定适宜的措施与策略。

5 参考文献

- [1] Boomer I, Aladin N, Plotnikov I *et al.* The palaeolimnology of the Aral Sea: A review. *Quaternary Science Reviews*, 2000, **19**(13): 1259-1278. DOI: 10.1016/S0277-3791(00)00002-0.
- [2] Deng MJ, Long AH. Evolution of hydrologic and water resources and ecological crisis in the Aral sea basin. *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. 冰川冻土, 2011, **33**(6): 1363-1375.]
- [3] Zavalov PO, Kostianoy AG, Emelianov SV *et al.* Hydrographic survey in the dying Aral Sea. *Geophysical Research Letters*, 2003, **30**(13): 1659. DOI: 10.1029/2003gl017427.
- [4] Wu JL, Ma L, Jilili A. Lake surface change of the Aral Sea and its environmental effects in the arid region of the Central Asia. *Arid Land Geography*, 2009, **32**(3): 418-422. [吴敬禄, 马龙, 吉力力·阿不都外力. 中亚干旱区咸海的湖面变化及其环境效应. 干旱区地理, 2009, **32**(3): 418-422.]
- [5] Yao HJ, Zhou HF. Game analysis of water resources strategy among the Central Asia Countries around the Aral Sea Basin. *Arid Land Geography*, 2013, **36**(4): 764-771. [姚海娇, 周宏飞. 中亚五国咸海流域水资源策略的博弈分析. 干旱区地理, 2013, **36**(4): 764-771.]
- [6] Micklin P. The future Aral Sea: Hope and despair. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**(9): 1-15. DOI: 10.1007/s12665-016-5614-5.
- [7] Benduhn F, Renard P. A dynamic model of the Aral Sea water and salt balance. *Journal of Marine Systems*, 2004, **47**(1/2/3/4): 35-50. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2003.12.007.
- [8] Gaybullaev B, Chen SC, Kuo YM. Large-scale desiccation of the Aral Sea due to over-exploitation after 1960. *Journal of Mountain Science*, 2012, **9**(4): 538-546. DOI: 10.1007/s11629-012-2273-1.
- [9] Jarsjö J, Destouni G. Groundwater discharge into the Aral sea after 1960. *Journal of Marine Systems*, 2004, **47**(1/2/3/4): 109-120. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2003.12.013.
- [10] Schettler G, Oberhänsli H, Stulina G *et al.* Hydrochemical water evolution in the Aral Sea Basin. Part I: Unconfined groundwater of the Amu Darya Delta-Interactions with surface waters. *Journal of Hydrology*, 2013, **495**: 267-284. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.03.044.
- [11] Yang XW, Wang NL, Chen AA *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. *CATENA*, 2020, **191**: 104566. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104566.
- [12] Small EE, Sloan LC, Hostetler S *et al.* Simulating the water balance of the Aral Sea with a coupled regional climate-lake model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, **104**(D6): 6583-6602. DOI: 10.1029/98JD02348.
- [13] Crétaux JF, Kouraev AV, Papa F *et al.* Evolution of sea level of the big Aral sea from satellite altimetry and its implications for water balance. *Journal of Great Lakes Research*, 2005, **31**(4): 520-534. DOI: 10.1016/S0380-1330(05)70281-1.
- [14] Zavalov PO, Ni A, Kudyshkin TV *et al.* Five years of field hydrographic research in the Large Aral Sea (2002–2006). *Journal of Marine Systems*, 2009, **76**(3): 263-271. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2008.03.013.
- [15] Bortnik VN. Alteration of water level and salinity of the Aral Sea//Glantz M. Creeping environmental problems and sustainable development in the Aral Sea Basin. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 47-65. DOI: 10.1017/CBO9780511535970.
- [16] Wang XX, Chen YN, Li Z *et al.* The impact of climate change and human activities on the Aral Sea Basin over the past 50 years. *Atmospheric Research*, 2020, **245**: 105125. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105125.
- [17] Abdmijit A, Ge YX, Wang YJ *et al.* The past, present and future of the Aral Sea. *Arid Zone Research*, 2019, **36**(1): 7-18. DOI: 10.13866/j.azr.2019.01.02. [阿布都米吉提·阿布力克木, 葛拥晓, 王亚俊等. 咸海的过去、现在与未来. 干旱区研究, 2019, **36**(1): 7-18.]
- [18] Li JL, Fang H, Bao AM *et al.* Spatio-temporal analysis of recent changes of lake area and lake water level at high

- mountains in Central Asia. *Resources Science*, 2011, **33**(10): 1839-1846. DOI: 10.1007/s12583-011-0162-0. [李均力, 方晖, 包安明等. 近期亚洲中部高山地区湖泊变化的时空分析. 资源科学, 2011, **33**(10): 1839-1846.]
- [19] Luo JC, Sheng YW, Shen ZF *et al.* Step by step iterative multi-spectral remote sensing water information extraction with high precision. *Journal of Remote Sensing*, 2009, **13**(4): 610-615. [骆剑承, 盛永伟, 沈占锋等. 分步迭代的多元光谱遥感水体信息高精度自动提取. 遥感学报, 2009, **13**(4): 610-615.]
- [20] Wang ZJ, Li CY, Li WP *et al.* Calculation and analysis of water balance in Lake Hulun, Inner Mongolia. *J Lake Sci*, 2012, **24**(2): 273-281. DOI: 10.18307/2012.0216. [王志杰, 李畅游, 李卫平等. 内蒙古呼伦湖水量平衡计算与分析. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 273-281.]
- [21] Allen RG, Pereira LS, Raes D *et al.* Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. United Nations Food and Agriculture Organization, 1998.
- [22] Niu JG. The climate response and change characteristics on potential evapotranspiration in the main stream basin of Tarim River[Dissertation]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2016. [牛建国. 塔里木河干流流域潜在蒸散变化特征及其气候响应[学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.]
- [23] Schieder TM. Analysis of water use and crop allocation for the Khorezm region in Uzbekistan using an integrated hydrologic-economic model[Dissertation]. Bonn: Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2011.
- [24] Dong R, Sui FX, Zhang SH. Application of pengmen formula at calculating crop water requirements. *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College*, 2006, (2): 100-101. DOI: 10.13524/j.2095-008x.2006.02.034. [董仁, 隋福祥, 张树辉. 应用彭曼公式计算作物需水量. 黑龙江水专学报, 2006, (2): 100-101.]
- [25] Peng F, He XL, Liu B *et al.* A study on estimation method for ecological water requirement of desert vegetation in arid area. *Water Saving Irrigation*, 2017, (12): 90-93. [彭飞, 何新林, 刘兵等. 干旱区荒漠植被生态需水量计算方法研究. 节水灌溉, 2017, (12): 90-93.]
- [26] Schlüter M, Savitsky AG, McKinney DC *et al.* Optimizing long-term water allocation in the Amudarya River delta: A water management model for ecological impact assessment. *Environmental Modelling & Software*, 2005, **20**(5): 529-545. DOI: 10.1016/j.envsoft.2004.03.005.
- [27] Asarin AE, Kravtsova VI, Mikhailov VN. Amudarya and Syrdarya rivers and their deltas//Kostianoy AG, Kosarev AN eds. The Aral Sea environment. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 101-121. DOI: 10.1007/698_2009_8.
- [28] 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.]
- [29] 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.]
- [30] Aladin NV, Potts WTW. Changes in the Aral Sea ecosystems during the period 1960-1990. *Hydrobiologia*, 1992, **237**(2): 67-79. DOI: 10.1007/BF00016032.
- [31] Liu ZB, Huang Y, Liu T *et al.* Water balance analysis based on a quantitative evapotranspiration inversion in the nukus irrigation area, lower amu river basin. *Remote Sensing*, 2020, **12**(14): 2317. DOI: 10.3390/rs12142317.
- [32] Savitskiy AG, Schlüter M, Taryannikova RV *et al.* Current and future impacts of climate change on river runoff in the Central Asian river basins. Adaptive and Integrated Water Management. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007: 323-339. DOI: 10.1007/978-3-540-75941-6_17.