

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2020.06.15

水系连通工程下博斯腾湖矿化度时空变化及其驱动因素研究

陈世峰^{1,2}, 陈亚宁², 周洪华², 夏振华², 叶朝霞², 程勇³, 杨疆卫³, 邢延霞³,
甄炳仁³, 克帕也木·尔肯³, 高玉亮³

(1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆乌鲁木齐 830054; 2. 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, 新疆乌鲁木齐 830011; 3. 新疆维吾尔自治区塔里木河流域管理局, 新疆库尔勒 841000)

摘要: 分析了开都河-黄水沟-大湖区-小湖区连通工程实施后博斯腾湖矿化度的时空变化及其驱动因素, 以期为进一步改善博斯腾湖水环境提供科学指导。结果表明: 空间变化上, 水系连通工程促进了博斯腾湖大、小湖区水循环, 改善了博斯腾湖矿化度, 使黄水沟河道(南大闸)矿化度降低了 0.5~1.0 g/L、大湖区西北角和东南部矿化度降低了 0.3~0.5 g/L、小湖区东部矿化度降低了 0~1.5 g/L; 时间变化上, 博斯腾湖黄水沟区、西岸区、大湖区和小湖区矿化度变化具有较高的同步性; 水系连通工程的实施对改善博斯腾湖矿化度空间分布作用显著; 高矿化度水体的扩散和湖水水位, 尤其是水温等因素共同驱动了矿化度随时间的变化。在水系连通工程实施下, 科学调控年内入湖、出湖水量并严格阻止污水入河、入湖是改善博斯腾湖矿化度的关键。

关键词: 水系连通; 矿化度; 时空变化; 驱动因素; 博斯腾湖

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)06-0095-08

Spatial – temporal variation of TDS in Bosten Lake and its driving factors under water system connectivity engineering

CHEN Shifeng^{1,2}, CHEN Yaning², ZHOU Honghua², XIA Zhenhua², YE Zhaoxia², CHENG Yong³,
YANG Jiangwei³, XING Yanxia³, ZHEN Bingren³, Kepayemu · ERKEN³, GAO Yuliang³

(1. College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 3. Xinjiang Tarim River Basin Authority, Korla 841000, China)

Abstract: The spatial – temporal variation of total dissolved solids (TDS) in Bosten Lake and its driving factors after the implementation of the Kaiduhe River – the Huangshuigou River – the Great Lake – the Small Lake connectivity project were analyzed in order to provide practical guidance for the improvement of water environment in Bosten Lake. The results show that in terms of spatial variation, the connectivity project of the Bosten Lake water system promoted the water circulation in the Great Lake and the Small Lake area, alleviated the TDS in Bosten Lake with the decrease of 0.5 – 1.0 g/L TDS in the Huangshuigou River (Nanda Sluice), 0.3 – 0.5 g/L in the northwestern and southeastern part of the Great Lake, and 0 – 1.5 g/L in the eastern part of the Small Lake. In terms of time variation, the changes of TDS content in the Huangshuigou area, the west Coast area, the Great Lake and the Small Lake of Bosten Lake were highly synchronized. The implementation of the water system connectivity project had a significant effect on improving the spatial distribution of TDS in Bosten Lake. The diffusion of water with higher TDS, water level, especially water temperature all contributed to the temporal changes of TDS. With the implementation of the water system connectivity project, it is crucial to regulate the inflow and outflow of

收稿日期: 2020-07-04; 修回日期: 2020-09-09

基金项目: 中国科学院重点部署项目(ZDRWZS-2019-3)和战略性先导科技专项(XDA20100303)

作者简介: 陈世峰(1994-), 男, 甘肃静宁人, 硕士研究生, 主要从事环境变化与可持续发展研究。

通讯作者: 陈亚宁(1958-), 男, 新疆阿克苏人, 博士, 研究员, 主要从事干旱区水资源与地表过程研究。

the lake reasonably in a year, and strictly prevent sewage from entering the rivers and lakes.

Key words: water system connectivity; total dissolved solids (TDS); temporal and spatial variation; driving factors; Bosten Lake

1 研究背景

干旱区湖泊水环境问题是影响区域可持续发展的重大课题。博斯腾湖位于新疆天山南麓的焉耆盆地,曾是我国最大的内陆淡水湖,也是巴音郭楞蒙古自治州人民的“母亲湖”^[1]。近几十年来,在人类水土开发活动和气候变化的综合影响下,博斯腾湖出现了水质咸化、有机污染及富营养化等一系列水环境问题,引起了学者和政府的高度关注^[2-5]。矿化度是博斯腾湖的主要水质指标之一,反映湖水的盐度及受到的污染情况^[6-8]。研究表明,博斯腾湖矿化度年际变化显著,1970年左右由淡水湖转变为微咸水湖,1987年矿化度达到了最高值(1.87 g/L),2002年降低到1.17 g/L^[4,9-10],2003-2017年矿化度呈现先上升后下降的趋势。博斯腾湖矿化度年际变化受水盐基底、开都河来水、农田排水、湖区水位、孔雀河出流、气候变化等多种因素的影响,且人类活动改变了博斯腾湖的水盐、水量平衡关系,导致博斯腾湖矿化度年际变化加剧^[5,10-12]。

博斯腾湖水环境不但影响流域生态环境安全,也关乎区域社会经济发展。为了改善博斯腾湖水环境,有学者先后提出了黄水沟引水工程和改变出湖口等措施,以促进水循环从而改善湖泊水质^[6,13-15]。巴音郭楞蒙古自治州也相继采取一系列治理措施:2017年开展了黄水沟治污“会战”,控制入湖污染物排放;2018年疏通了黄水沟河道,通过该河道向博斯腾湖生态输水 $1.14 \times 10^8 \text{ m}^3$;2019年4月4日启动了水系连通工程,将开都河部分水资源通过解放二渠调向黄水沟,同时通过夏尔吾逊分洪闸向黄水沟下泄生态水,两支河水混合后共同汇入博斯腾湖,此外打开大、小湖隔堤上的生态闸,实现了开都河-黄水沟-大湖区-小湖区的连通。截止2019年10月1日,经黄水沟累计向博斯腾湖生态输水 $1.742 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

水系连通工程实施后,博斯腾湖矿化度在时空分布上发生了什么变化?矿化度是否得到了改善?导致矿化度时空变化的主要驱动因子是什么?针对这些问题,本文分析了2019年4-10月博斯腾湖矿化度的时空变化特征,评估了水系连通工程对矿化度的影响,并探讨了矿化度年内时空变化的驱动因素,以期为进一步改善博斯腾湖水环境提供科学指导。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

博斯腾湖位于新疆天山南麓的焉耆盆地,属中生代断陷湖,由大湖区和小湖区两部分组成。大湖区是湖体的主要部分,当水位为1049.1 m时,东西长55 km,南北平均宽20 km,水面面积1210.2 km²;湖盆呈深碟状,平均水深7.5 m,最大深度16 m。小湖区位于大湖区的西南部,由达吾松等16个小湖和大片芦苇沼泽湿地以及部分碱地、牧地等组成,总面积350 km²^[1]。大湖西北岸是育苇区,也是博斯腾湖生态系统的重要组成部分,以东风干排为界,北面为黄水沟区,南面为大湖西岸区(简称西岸区)^[5]。主要补给径流有开都河、黄水沟、清水河等,其中开都河是常年性河流,出山口多年平均径流量为 $35.05 \times 10^8 \text{ m}^3$,在宝浪苏木分水枢纽分为东、西两支,东支进入大湖,西支进入小湖;黄水沟在1964年建成夏尔吾逊分洪闸后改道进入开都河,而原河道成为该地区的主要排污渠;清水河在洪水季节有少量洪水进入博斯腾湖^[5]。湖区多年平均降水量为68.2 mm,年蒸发量为1800~2000 mm^[16]。

博斯腾湖是我国芦苇主产地和新疆两大渔业基地之一,承担着向孔雀河流域提供农业、工业、生活、生态用水以及向塔里木河下游进行生态输水等功能,其作用和意义十分重大^[17]。研究区博斯腾湖概况图如图1所示。

2.2 数据来源

于2019年4、6、8、10月,对博斯腾湖黄水沟区、西岸区、大湖区和小湖区进行了定点采样,检测指标包括矿化度(TDS)和水温(WT)。共布设样点75个,涵盖入湖口、出湖口、湖中心、旅游景区、河道、苇区、干排、扬排站等关键位置,基本能反映博斯腾湖矿化度空间分布情况,采样点分布见图1。除少数河道、干排等由于水浅或靠近岸边而采自水面下10 cm外,其余大多数样点采自水面下50 cm左右,其中TDS采用DDBJ-350型便携式电导率仪(基本误差:±1.0%(FS))进行检测,水温由PHB-4便携式酸度计(精度:±1℃)测量。入湖、出湖水量及水位数据来源于塔里木河流域巴音郭楞管理局。

2.3 研究方法

采用ArcGIS 10.6对矿化度进行空间插值,插

值方法采用反距离权重法。以“平均值±标准差”的形式表示矿化度的平均值及离散程度。相关分析在SPSS软件中进行。入湖、出湖矿化度负荷量根据公式(1)~(3)进行计算。

$$V_I = V_H \cdot T_H + V_B \cdot T_B \quad (1)$$

$$V_O = V_K \cdot T_K \quad (2)$$

$$V_L = V_I - V_O \quad (3)$$

式中: V_I 、 V_O 、 V_L 分别为入湖、出湖和滞留湖泊的矿化度负荷量, 10^4 t; V_H 、 V_B 、 V_K 分别为黄水沟生态输水、宝浪苏木分水枢纽(东、西支)和孔雀河塔什店水文站水量, 10^4 m³; T_H 、 T_B 、 T_K 分别为南大闸、宝浪苏木和火电厂运煤桥采样点的矿化度,g/L。

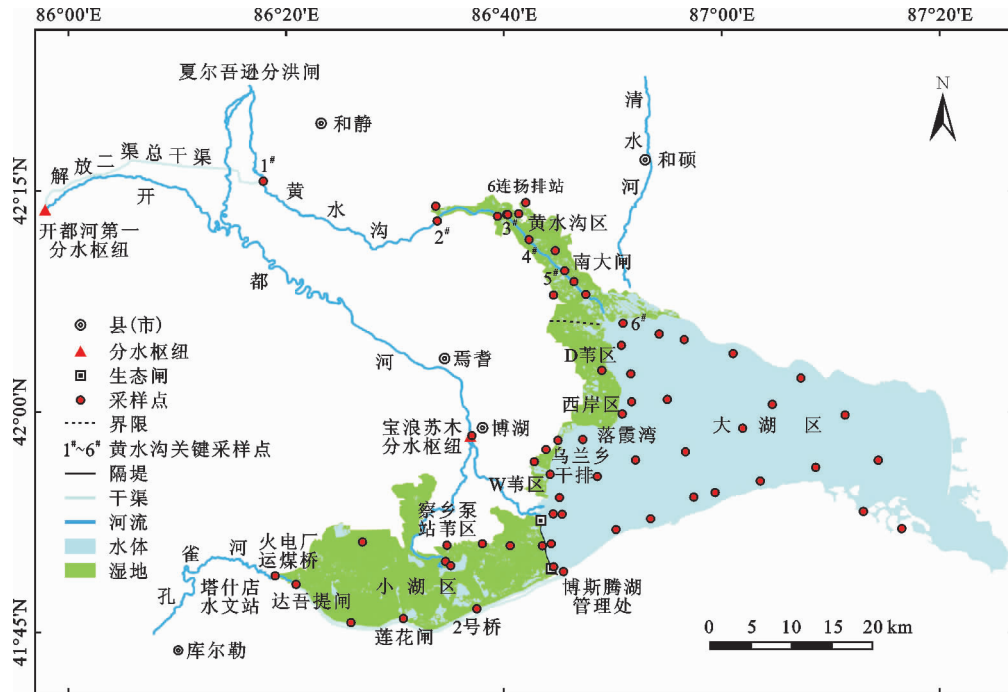


图1 研究区博斯腾湖概况图

3 博斯腾湖矿化度时空变化特征

3.1 矿化度空间变化特征

于2019年4月4日启动了博斯腾湖水系连通工程,图2为博斯腾湖2019年4-10月矿化度的空间分布情况。由图2可以看出:(1)生态输水初期(4月份),黄水沟区大部分水域矿化度为2.0~3.0 g/L,部分农田排渠、扬排站和苇区达到了3.0 g/L以上;西岸区矿化度北部高,南部低,但是部分苇区也较高,为2.0~3.0 g/L;大湖区仅西南角小部分水域矿化度低于1.0 g/L,其余水域均为1.0~1.5 g/L;小湖区西部、中部及大、小湖区隔堤附近的大部分水域矿化度低于1.0 g/L,2号桥附近水域为1.5~2.0 g/L。(2)随着黄水沟生态输水(6月份),黄水沟区主河道矿化度自西向东下降显著,但是部分扬排站和农田排渠仍然非常高;西岸区绝大部分水域矿化度在2.0 g/L以上,部分苇区达到了3.0 g/L以上;大湖区西北部、东北部及东南部矿化度高于西南角;小湖区西部、中部低,东部、东南部及察乡泵站苇区较高。(3)水系连通工程实施4个多月

后(8月份),黄水沟区的农田排渠和苇区矿化度均在3.0 g/L以上;西岸区苇区均在2.0 g/L以上,D苇区达到了10 g/L以上;大湖区西南部水域矿化度升至1.0~1.5 g/L,其余水域均为1.5~2.0 g/L;小湖区西北部、开都河西支入湖处及东北部矿化度较低,南部和察乡泵站苇区较高。(4)到了10月份,黄水沟区中部及南部部分苇区和农田排渠矿化度较高,在3.0 g/L以上,南大闸降低至1.0 g/L以下;西岸区北部、中部较低,南部较高;大湖区大部分水域矿化度为1.0~1.5 g/L,西南部小于1.0 g/L水域扩大十分明显,西北部出现了矿化度小于1.0 g/L的零星水域;小湖区绝大部分水域矿化度在1.0 g/L以下。

总体而言,2019年4-10月份,博斯腾湖大湖区矿化度为1.5~2.0 g/L的水域呈现出由西北向东北部、东南部,再向全湖扩散的趋势;小湖区矿化度为1.0~1.5 g/L的水域呈现出由东向西扩散的趋势;10月份大、小湖区矿化度均明显降低,表明开都河-黄水沟-大湖区-小湖区连通工程有效促进了大、小湖区水循环,降低了大、小湖区的矿化度。

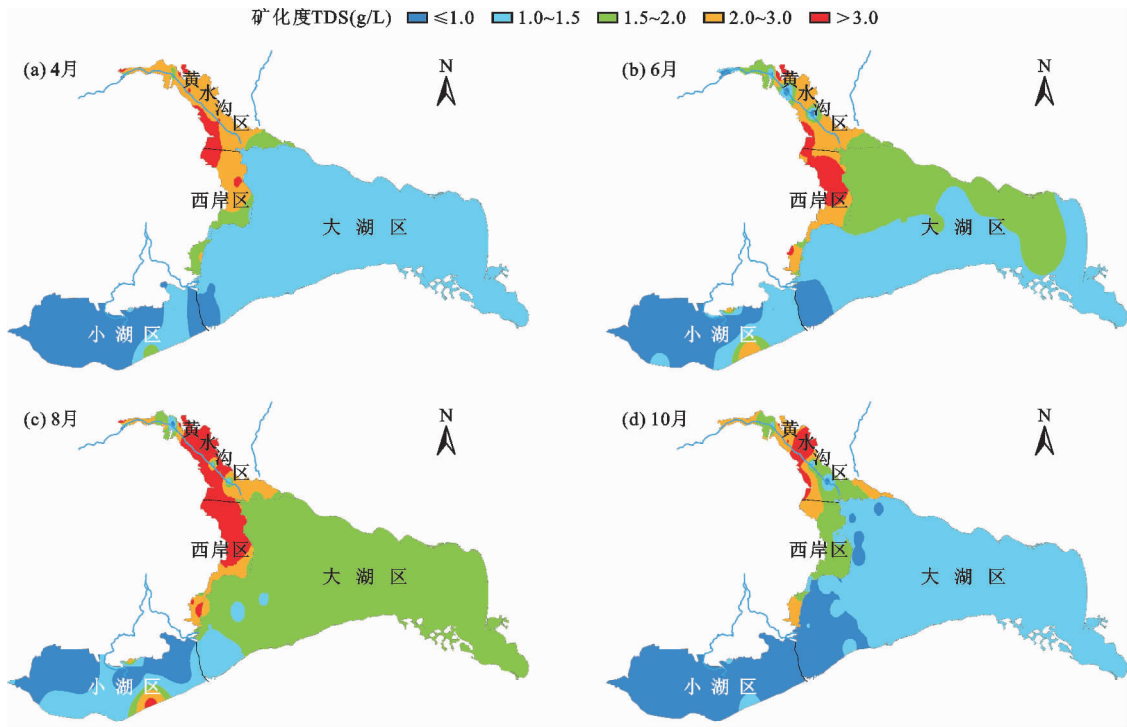


图2 2019年4-10月博斯腾湖矿化度空间分布

3.2 矿化度时间变化特征

图3为2019年4-10月博斯腾湖各分区矿化度的平均值变化。由图3可以看出:4个分区的矿化度均在8月最高,黄水沟区矿化度6月最低,西岸区、大湖区和小湖区矿化度10月最低;4-6月,黄水沟区矿化度降低,而西岸区、大湖区和小湖区矿化度升高;6-8月,4个分区的矿化度均升高;8-10月,4个分区的矿化度均明显降低。表明博斯腾湖黄水沟区、西岸区、大湖区和小湖区4个分区的矿化度年内变化具有较高的同步性。

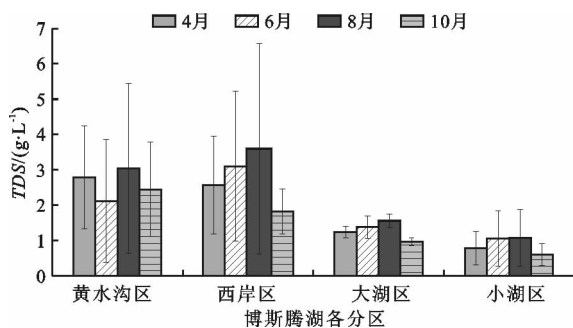


图3 2019年4-10月博斯腾湖各分区矿化度平均值变化

进一步分析2019年4-10月博斯腾湖在不同时段及整体矿化度时空变化特征,结果如图4所示。由图4可见,同一区域不同时段矿化度变化差异显著:(1)4-6月,黄水沟区77%的样点矿化度降低,主要分布于干排、苇区及黄水沟河道,而6连扬排站

及其附近农田排渠矿化度升高;6-8月矿化度升高的样点增至71%,干排及苇区矿化度升高显著,而6连扬排站及其附近农田排渠矿化度降低;8-10月黄水沟区中部河道矿化度有所上升,其余样点均为降低,尤以苇区及部分干排矿化度降低明显;整个研究时段4-10月黄水沟区矿化度降低的样点占比为80%,干排和黄水沟河道矿化度降低明显,少数苇区有所上升。(2)西岸区4-6月D苇区矿化度上升幅度最大;6-8月大部分苇区矿化度升高,D苇区和W苇区升高最为明显;8-10月除乌兰乡干排略有升高外,其余样点矿化度均为降低,尤其是D苇区;整个研究时段4-10月西岸区样点矿化度均为降低,D苇区最为明显。(3)大湖区4-6月西南部样点矿化度降低,其余样点均为升高,尤其是黄水沟和清水河入湖处及落霞湾水域;6-8月黄水沟和清水河入湖处及落霞湾水域矿化度降低,其余水域均为升高,尤其是西南部;8-10月大湖区所有样点矿化度均为降低,西北部、金沙滩、中南部及隔堤旁矿化度降低较为明显;整个研究时段4-10月大湖区仅在开都河入湖处矿化度略有升高(升高0.05 g/L),其余样点矿化度均为降低,西北部和东南部最为明显。(4)小湖区4-6月矿化度升高的样点占比为71%,察乡泵站苇区和2号桥附近水域矿化度升高最为明显,矿化度降低的样点在湖区北部,但

变化值较小;6-8月东北部矿化度有所降低,其余样点均为升高,2号桥附近水域升高较为明显;8-10月小湖区所有样点矿化度均为降低,察乡泵站苇

区和2号桥附近水域矿化度降低最为明显;整个研究时段4-10月小湖区东部矿化度降低,西部矿化度略有升高。

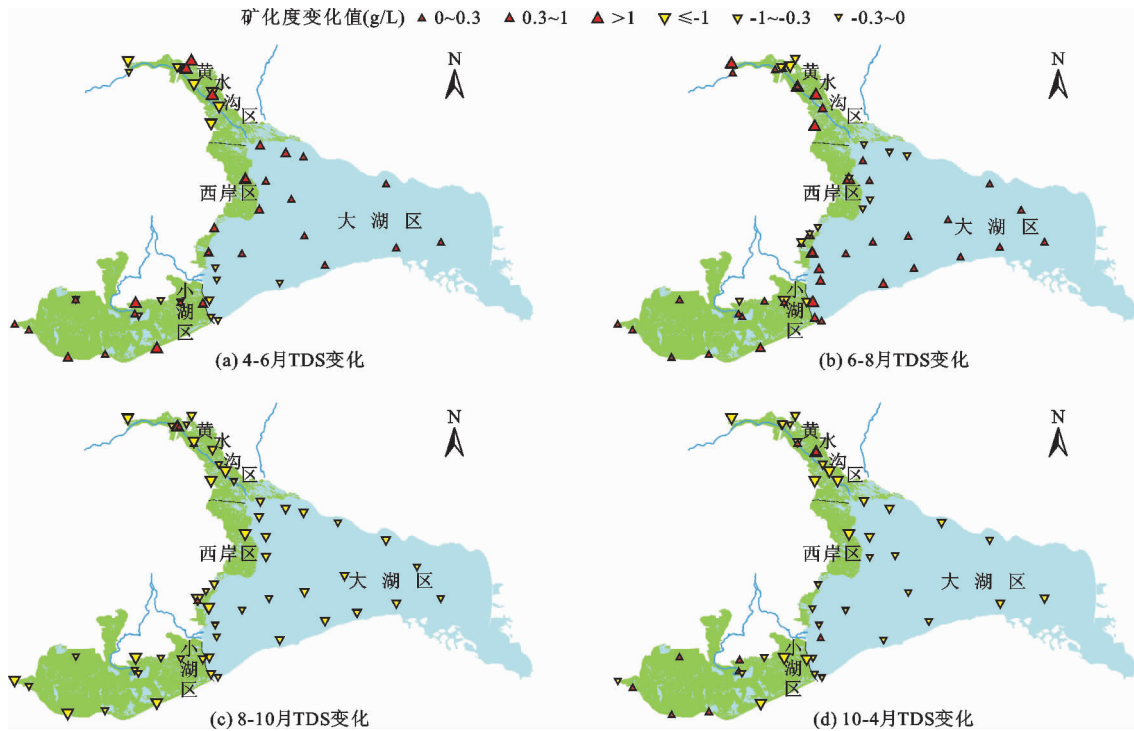


图 4 2019 年 4-10 月博斯腾湖在不同时段及整体矿化度变化特征

4 博斯腾湖矿化度驱动因素分析

4.1 水系连通工程对矿化度的影响

选取黄水沟河道 6 个关键采样点(1#~6#样点, 见图 1),对 2019 年 4-10 月该 6 个关键采样点的矿化度变化进行分析,结果见图 5。图 5 表明,向黄水沟生态输水有助于改善黄水沟河道矿化度,如南大闸(5#样点)矿化度从 4 月的 1.975 g/L 降低到了 6-10 月的平均值 0.961 g/L。但黄水沟河道矿化度受排水的影响,输入黄水沟生态水为低矿化度水,属于淡水,但在汇入了黄水总干排等排水之后,矿化度升高明显,沿途整体呈递增趋势(图 5)。表明排水入河是黄水沟矿化度升高的主要原因。在水系连通工程下,应严格控制入河排渠的水质。

大湖区西北部由于水循环较差,尤其是农田排水、工业废水和生活污水的排入导致其成为全湖污染最为严重的水域,矿化度曾高达 3.9 g/L;东南角由于水体交换缓慢,矿化度也较高^[5-6,11,13]。在水系连通工程下,大湖区水体交换能力加强。初期(4-6 月)由于黄水沟河道高矿化度水的输入,导致西北角矿化度升高;中后期(6-10 月)随着黄水沟

河道矿化度的改善,西北角矿化度也随之降低(图 4)。但是由于西北部矿化度历史基底高,在水系连通工程下,水体受到扰动,加上风场等因素的共同驱动^[5,18],造成了 1.5~2.0 g/L 矿化度水体在湖区的扩散;到了 10 月份,大湖区水体得到置换和沉淀,矿化度明显改善(图 2)。

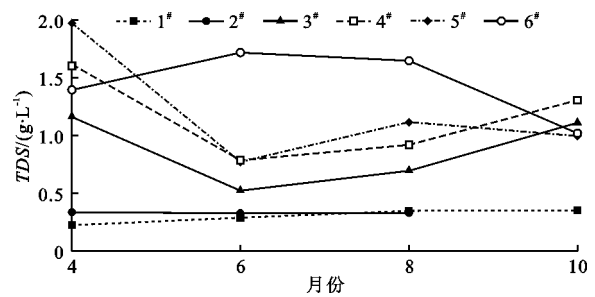


图 5 2019 年 4-10 月黄水沟河道关键样点(1#~6#样点)矿化度变化

小湖区部分水域水流缓慢、芦苇腐殖质较多^[11]、土地盐碱化严重,在大湖区-小湖区连通工程下,有效促进了水循环,同时造成了 1.0~1.5 g/L 矿化度水体的扩散和水体的置换(图 2)。4-10 月东部矿化度下降明显,但一定程度上造成了西部矿

化度略有上升(图4)。

综上所述,开都河-黄水沟-大湖区-小湖区连通工程对改善博斯腾湖矿化度空间分布作用显著,同时水体在空间的扩散也影响了矿化度年内随时间的变化。

4.2 水量与矿化度关系分析

影响博斯腾湖大、小湖区矿化度的水量因素有人湖流量、出湖流量和水位等。水系连通工程实施后,博斯腾湖大湖区的入湖径流主要是开都河东支和黄水沟,出湖口包括两个生态闸、两个泵站(在博斯腾湖管理处),以泵站为主;小湖区的入湖口是开都河西支和两个生态闸,出湖口是达吾提闸和莲花闸。本文以汇合大、小湖区出湖水的塔什店水文站径流为出湖水量。

图6为2019年4-11月博斯腾湖入湖和出湖流量及水位变化。图6中依据时间顺序,将博斯腾

湖水量变化划分为4个阶段:启动生态输水至第1次采样前为第1阶段,第1次采样后至第2次采样前为第2阶段,依次类推。黄水沟生态输水在第2阶段日均输水量最大,达到了 $126.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,其次依次为第4阶段、第1阶段和第3阶段(图6(a))。开都河东支在第3阶段的平均流量最大,为 $134.3 \text{ m}^3/\text{s}$,其次依次为第2阶段、第4阶段和第1阶段(图6(b))。大湖区水位呈逐渐上升趋势,第4阶段平均水位最高,为 1048.23 m (图6(c))。开都河西支流量变化不同于东支,第2阶段平均流量最大,为 $55.5 \text{ m}^3/\text{s}$,其次依次为第3阶段、第1阶段和第4阶段(图6(d))。小湖区水位整体上与大湖区水位变化规律一致,4个阶段呈逐渐上升趋势(图6(e))。塔什店水文站在第3阶段平均流量最大,为 $106.97 \text{ m}^3/\text{s}$,其次依次为第2阶段、第1阶段和第4阶段(图6(f))。

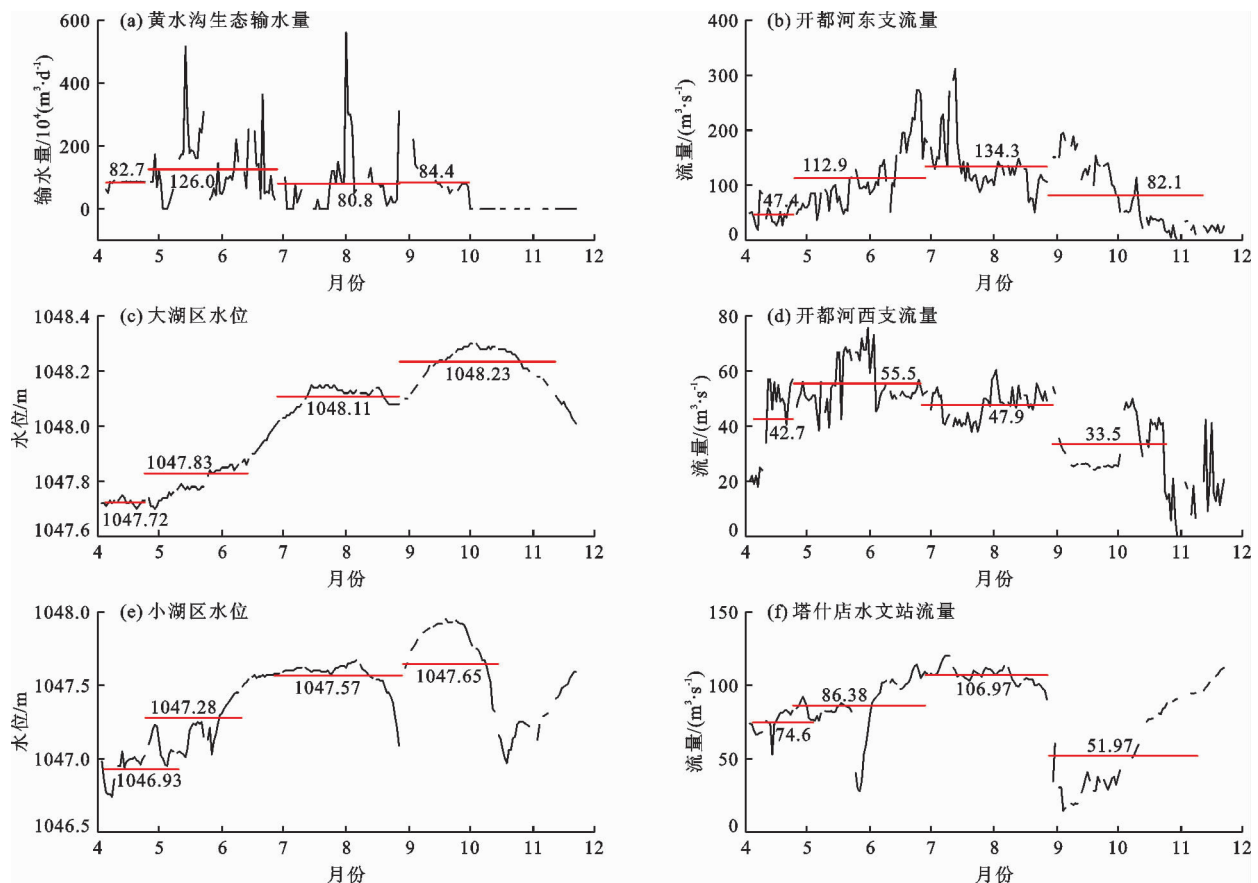


图6 2019年4-11月博斯腾湖入湖和出湖流量及水位变化

博斯腾湖大、小湖区的矿化度与水量因素 Pearson 相关系数(表1)显示:大、小湖区矿化度与入湖、出湖流量均呈正相关,其中大湖区矿化度与出湖流量的相关性达到了极显著性水平;大、小湖区矿化度与水位均呈负相关,但均未通过显著性检验。表明

入湖、出湖流量增加(减少)引起了矿化度升高(降低),水位上升对矿化度具有微弱的稀释作用。但是根据前人研究,在年际变化上,入湖流量增大会稀释矿化度,出湖流量增大会通过促进水循环而降低矿化度,水位与矿化度呈极显著负相关^[4,11]。如果

没有其他因素影响大、小湖区矿化度,那么随着入湖、出湖流量的增加,矿化度会降低。但是在入湖、出湖径流均增加(减少)的情况下,矿化度也随之升高(降低)。这表明,在水系连通工程下,由于水体受到扰动、较高矿化度水体在湖区的扩散等因素,导致入湖、出湖流量对矿化度的影响不明显,直到第4阶段水位对矿化度的稀释作用才凸显出来。从这个意义上讲,出湖口水流矿化度能反映水系连通后水体扰动等情况。分析发现,孔雀河火电厂运煤桥处矿化度与大、小湖区矿化度均呈正相关,相关系数分别为0.997($p < 0.01$)和0.928。

表1 博斯腾湖大、小湖区矿化度与水量因素的相关系数

相关项目	黄水沟生态 输水流量	开都河 流量	水位	塔什店 流量
大湖区矿化度	0.175	0.660	-0.257	0.997**
小湖区矿化度		0.923	-0.065	0.939

注:**表示在0.01级别(双尾)相关性显著。

4.3 水温与矿化度关系分析

水温是湖泊物理、化学和生物过程的主要驱动力之一^[19-20]。博斯腾湖2019年4-10月的平均水温(表2)显示:4-8月,大、小湖区水温逐渐升高,变化幅度分别为8.4和5.8℃;8-10月,大、小湖区水温迅速降低,下降幅度分别为17.3和15.9℃;育苇区4-6月升高5.4℃,6-8月变化幅度不大,8-10月下降13.8℃。表明博斯腾湖水温变化幅度依次为大湖区>小湖区>育苇区。博斯腾湖各区域矿化度与水温的散点图及线性关系见图7。分析

图7可知:大、小湖区水温与矿化度均呈极显著正相关,相关系数分别为0.650和0.372($p < 0.01$);育苇区水温与矿化度呈显著正相关,相关系数为0.229($p < 0.05$),表明博斯腾湖矿化度与水温变化密切相关。在大、小湖区,可能是4-8月水温的逐渐升高引起了湖中可溶性盐类物质溶解加速,使得湖水矿化度逐渐升高;8-10月水温的迅速降低使得各种可溶性盐类的溶解性降低,故矿化度迅速减小^[21]。同时,博斯腾湖地处极端干旱区,年均蒸发量可达 $9.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,且主要集中在4-8月^[5]。随着湖中大量水分被蒸发,原溶解于被蒸发水中的可溶性盐仍滞留于湖中,导致湖水矿化度不断升高。两者共同作用导致了博斯腾湖矿化度随水温升高而增大,随水温降低而减小。

表2 2019年4-10月博斯腾湖不同区域月平均水温/℃

区域	4月	6月	8月	10月
大湖区	17.8	24.2	26.2	8.9
小湖区	19.4	22.6	25.2	9.3
育苇区	18.6	24.0	23.6	9.8

4.4 入湖、出湖矿化度负荷量分析

研究期各阶段博斯腾湖入湖、出湖水量及矿化度负荷量如表3。由表3可以看出,第1、第2、第3阶段入湖矿化度负荷量小于出湖矿化度负荷量,表明博斯腾湖矿化度排出量大于接收量;第4阶段在湖中滞留 $4.19 \times 10^4 \text{ t}$ 矿化度,表明入湖矿化度负荷量与大、小湖区矿化度年内变化密切相关,但出湖矿

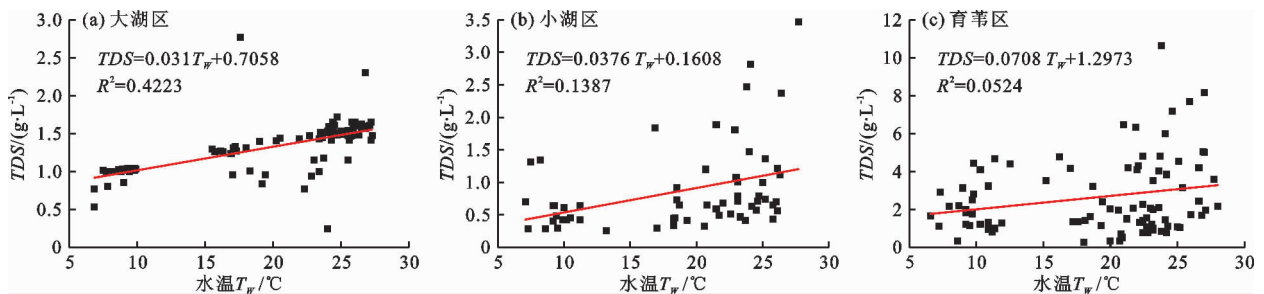


图7 博斯腾湖各区域矿化度与水温的散点图及线性关系

表3 研究期各阶段博斯腾湖入湖、出湖水量及矿化度负荷量

阶段	$V_H /$	$V_B /$	$V_K /$	$T_H /$	$T_B /$	$T_K /$	$V_i / 10^4 \text{ t}$			$V_o /$	$V_L /$
	10^4 m^3	10^4 m^3	10^4 m^3	$(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$V_H \cdot T_H$	$V_B \cdot T_B$	合计	10^4 t	10^4 t
第1阶段	1666	14789	12246	1.975	0.254	0.915	3.29	3.76	7.05	11.21	-4.16
第2阶段	8267	85187	43837	1.374	0.278	0.959	11.36	23.68	35.04	42.04	-7.00
第3阶段	4497	90099	52699	0.945	0.375	1.109	4.25	33.79	38.04	58.44	-20.41
第4阶段	2990	58397	22451	1.056	0.374	0.927	3.16	21.84	25.00	20.81	4.19

注:表中符号含义及计算见公式(1)~(3)。

化度负荷量不是矿化度年内变化的主要原因;低矿化度入湖径流量增加有助于改善博斯腾湖的矿化度,严格控制入湖径流量尤其是黄水沟径流的矿化度,有助于减小博斯腾湖入湖矿化度的负荷量;出湖径流量增加有助于降低博斯腾湖矿化度;科学调控入湖、出湖水量并严格阻止污水入河、入湖是改善博斯腾湖矿化度的关键。

5 结论

本文分析了开都河-黄水沟-大湖区-小湖区连通工程实施后博斯腾湖水质矿化度的时空变化,并探讨了驱动矿化度时空变化的影响因素,对进一步改善博斯腾湖水环境具有一定指导意义。主要结论如下:

(1)水系连通工程的实施使黄水沟河道(南大闸)矿化度降低了 $0.5 \sim 1.0 \text{ g/L}$,促进了博斯腾湖大、小湖区水循环,同时造成 $1.5 \sim 2.0 \text{ g/L}$ 和 $1.0 \sim 1.5 \text{ g/L}$ 矿化度水体分别在大、小湖区的扩散,但大、小湖区水体得到置换及沉淀后,矿化度改善明显,尤其是大湖区西北角和东南部、小湖区东部,分别下降了 $0.3 \sim 0.5 \text{ g/L}$ 和 $0 \sim 1.5 \text{ g/L}$ 。

(2)博斯腾湖黄水沟区、西岸区、大湖区和小湖区矿化度变化具有较高的同步性,均在8月最高,黄水沟区矿化度6月最低,西岸区、大湖区和小湖区矿化度10月最低。

(3)水系连通工程的实施对促进博斯腾湖水体交换,改善博斯腾湖矿化度空间分布作用显著;较高矿化度水体的扩散和湖水水位,尤其是水温等因素共同驱动了矿化度年内随时间的变化。通过水系连通工程,科学调控入湖、出湖水量并严格阻止污水入河、入湖是改善博斯腾湖水质矿化度的关键。

参考文献:

[1] 陈亚宁,杜强,陈跃滨,等. 博斯腾湖流域水资源可持续利用研究[M]. 北京:科学出版社,2013.

[2] 赵景峰,秦大河,长岛秀树,等. 博斯腾湖的咸化机理及湖水矿化度稳定性分析[J]. 水科学进展,2007,18(4): 475-482.

[3] TAO Yuqiang, ZHANG Ya, CAO Jicheng, et al. Climate change has weakened the ability of Chinese lakes to bury polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Environmental Pollution, 2019, 255(2):113288.

[4] 周洪华,李卫红,陈亚宁,等. 博斯腾湖水盐动态变化(1951-2011年)及对气候变化的响应[J]. 湖泊科学, 2014,26(1):55-65.

[5] 汤祥明,许柯,赛·巴雅尔图,等. 博斯腾湖水环境综合治理[M]. 北京:化学工业出版社,2015.

[6] 李卫红,陈跃滨,徐海量,等. 博斯腾湖的水环境保护与可持续利用对策[J]. 地理研究,2003,22(2):185-191.

[7] 曾海鳌,吴敬禄. 蒙新高原湖泊水质状况及变化特征[J]. 湖泊科学,2010,22(6):882-887.

[8] 潘红玺,王苏民. 中国湖泊矿化度的空间分布[J]. 海洋与湖沼,2001,32(2):185-191.

[9] 谭尧,王亚俊,宁建忠. 新疆博斯腾湖水生态环境变化分析[J]. 干旱区研究,2004,21(1):7-12.

[10] 吴敬禄,马龙,曾海鳌. 新疆博斯腾湖水水质及其演化特征分析[J]. 地理科学,2013,33(2):231-237.

[11] 谢贵娟,张建平,汤祥明,等. 博斯腾湖水水质现状(2010-2011年)及近50年来演变趋势[J]. 湖泊科学, 2011,23(6):837-846.

[12] 赵婷,周孝德,郭梦京,等. 焉耆盆地农田排渠水质变化及其空间分布[J]. 灌溉排水学报,2015,34(9):66-71.

[13] 娜仁格日乐,王慧杰. 博斯腾湖水水质时空变化特征[J]. 广东农业科学,2017,44(11):98-103.

[14] 胡春明,娜仁格日乐,马金锋,等. 博斯腾湖有机物污染改善方案研究[J]. 干旱区研究,2020,37(2):428-434.

[15] LIU Ying, BAO Anming. Exploring the effects of hydraulic connectivity scenarios on the spatial-temporal salinity changes in Bosten Lake through a model[J]. Water, 2019,12(1),40.

[16] 徐培军,徐丽萍,位宏,等. 博斯腾湖流域归一化植被指数变化及其对气候变化的响应[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(1):86-92.

[17] 李卫红,吾买尔江·吾布力,马玉其,等. 基于河-湖-库水系连通的孔雀河生态输水分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2019,13(1):130-135.

[18] 王静,陈勇民,周孝德,等. 博斯腾湖矿化度影响因子的敏感度分析[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(1):111-113.

[19] GARCIA F C, BESTION E, WARFIELD R, et al. Changes in temperature alter the relationship between biodiversity and ecosystem functioning[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences,2018,115(43):10989-10994.

[20] 王苏民,窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京:科学出版社,1998.

[21] 周建军,杨倩,张曼. 长江上游水库群的热环境效应与修复对策[J]. 湖泊科学,2019,31(1):1-17.