

## 博斯腾湖水质现状(2010–2011年)及近50年来演变趋势\*

谢贵娟<sup>1,2</sup>, 张建平<sup>3</sup>, 汤祥明<sup>2</sup>, 蔡永萍<sup>1\*\*</sup>, 高 光<sup>2</sup>

(1: 安徽农业大学生命科学学院, 合肥 230036)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(3: 新疆巴音郭楞蒙古自治州环境监测站, 库尔勒 841000)

**摘 要:** 博斯腾湖(简称博湖)6个采样点周年(2010年6月–2011年6月)水质调查分析表明, 博湖水质空间差异明显, 但不同样点水质月变化无一致趋势。大湖区西北角水域水质最差; 开都河入湖处水质月变化幅度大, 水质相对较好; 中东部水域水质处于中间水平。小湖区喇嘛湖水质最好, 介于Ⅰ–Ⅲ级之间; 北闸附近的湖沼湿地, 水质差, 多为Ⅴ类和劣Ⅴ类。博湖主要污染物是盐分、总氮、硫酸盐和氯化物。水体总体营养水平为中营养, 部分时段达到了轻度富营养水平。农业面源污染、水文、湖流及水生植物等, 是造成博湖水质时空差异的主要原因。近50年来博湖水质演变过程表明, 自1970s以来, 博湖已经由新疆最大的淡水湖转变为微咸水湖。博湖水质咸化可以分为快速升高–缓慢下降–再升高三个阶段。伴随着湖水咸水, 其它污染物浓度也快速升高。总体而言, 博湖水质变化受自然和人为两种因素制约, 近十年来, 人为因素加剧了博湖的咸化和富营养化。

**关键词:** 博斯腾湖; 水质; 咸化; 富营养化; 人类活动

## Spatio-temporal heterogeneity of water quality (2010–2011) and succession patterns in Lake Bosten during the past 50 years

XIE Guijuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Jianping<sup>3</sup>, TANG Xiangming<sup>2</sup>, CAI Yongping<sup>1</sup> & GAO Guang<sup>2</sup>

(1: *School of Life Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, P. R. China*)

(2: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

(3: *Environmental Monitor Station of Environmental Protection Bureau of Bayingolin Mongolia Autonomous Prefecture, Korle 841000, P. R. China*)

**Abstract:** To investigate the spatio-temporal heterogeneity of water quality in Lake Bosten, water qualities of six stations were monitored from June 2010 to June 2011. The results showed that water qualities were distinctly different among stations, and monthly variations of water quality among stations were not uniform. In the open lake area of Lake Bosten: the water quality was the worst in northwest; whereas water quality in the river mouth of Kaidu River was the best, though changed greatly from month to month. In the less-open lake area of Lake Bosten: water quality was the best in Lake Lama (Grade I to III); water quality in lake wetlands was the worst (Grade V or even worse). The main pollutants in Lake Bosten were salinity, total nitrogen, sulfate and chloride. In general, the trophic level of Lake Bosten is mesotrophic, and sometimes it reaches light eutrophic. Agricultural non-point source pollutions, hydrology, lake currents and aquatic plants were the main factors attributed to the spatio-temporal heterogeneity of water quality in Lake Bosten. Analysis of the variation of water quality in the past 50 years shows that Lake Bosten has converted from the largest inland freshwater lake to a brackish lake since 1970s. The process of salinization could be divided three stages: rapid rise, slow decline and increase again. Accompanied with the lake salinization, concentrations of other pollutants increased rapidly as well. Overall, the variation of water quality in Lake Bosten is controlled by natural factors and human factors. In recent decades

\* 环保公益性行业科研专项项目(200909048)和国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2009ZX07106–004)联合资助。2011–07–21 收稿; 2011–08–31 收修改稿。谢贵娟, 女, 1975年生, 硕士研究生; E-mail: xieguijuan@126.com.

\*\* 通讯作者; E-mail: swkx12@ahau.edu.cn.

human activities have exacerbated the salinization and eutrophication of Lake Bosten.

**Keywords:** Lake Bosten; water quality; salinization; eutrophication; human activities

干旱地区湖泊水资源的利用与可持续发展是一个全球性的课题<sup>[1-3]</sup>. 博斯腾湖(以下简称博湖)是我国西北干旱地区湖泊的典型代表,其不仅为新疆巴音郭楞蒙古自治州工农业发展提供宝贵的水资源,而且对下游塔里木河流域生态环境保护与可持续发展具有重要意义<sup>[4-5]</sup>. 然而,自 1960s 以来,由于大规模工农业开发活动、自然环境的变迁以及焉耆盆地人口数量的剧增,加之水资源的不合理开发利用等,博湖及其湖滨湿地生态环境急剧恶化,具体表现为湿地退化、湖水矿化度升高、富营养化的趋势加剧<sup>[6-9]</sup>,严重影响了流域生态系统的稳定性和生态服务功能<sup>[10]</sup>. 博湖日益严峻的水环境问题引起了人们的高度重视,并把博湖的治理纳入了国家 21 世纪“湖泊治理规划”的议程和新疆的“1311”环保行动计划<sup>[11]</sup>. 本文通过对博湖历时一周年的全面调查分析,阐述了博湖不同水域理化因子的时空演替规律,并在此基础上分析了近 50 年来博湖水质演变过程及原因,旨在为博湖水环境治理和生态保护提供依据.

## 1 区域概况

焉耆盆地是新疆天山山脉中段南麓中的一个半封闭山间盆地,盆地中的河流源于盆地西北部及北部的山区,水量由冰川冰雪融水和降水混合补给. 博湖(41°46′–42°08′N, 86°19′–87°28′E)位于盆地中最低凹处,是地表水和地下水的汇集区,地处巴音郭楞蒙古自治州境内,是我国干旱地区最具代表性的内陆湖泊之一. 博湖地区降水稀少,年平均降水量 64.3 mm,年平均蒸发量为 1881.2 mm,为降水量的 29 倍<sup>[12]</sup>. 博湖原是蒙新高原上面积最大的淡水湖,湖泊水位由 1956 年的 1048.34 m 下降到 1988 年的 1045.21 m,湖水矿化度由 0.38 g/L 增加到 1.87 g/L,已从新疆最大的淡水湖变为微咸水湖<sup>[13-15]</sup>.

博湖可分为大湖区和小湖群两个部分. 流入博湖的河流主要有开都河、黄水沟和清水河,3 条河流的径流量占焉耆盆地地表总径流量的 93.8%<sup>[12]</sup>. 开都河发源于天山中部的依连哈比齐杂山和艾尔莫山,全长 560 km,是焉耆盆地中的最大河流,径流量占盆地地表总径流量的 84.7%. 在焉耆东南约 11 km 的宝浪苏木分水闸处,该河又分为东、西两支,东支注入博湖大湖区,西支注入博湖西南部小湖群的芦苇沼泽区(图 1). 大湖区东西长 55 km,南北平均宽 20 km. 博湖湖水西浅东深,在海拔高程为 1048.75 m 时,水面面积为 1002.4 km<sup>2</sup>,容积  $88 \times 10^8$  m<sup>3</sup>,平均水深约 7.38 m,最深处 16 m<sup>[7,16]</sup>. 小湖区总面积约 300 km<sup>2</sup>,是个芦苇密布的湿地,其中有十几个小湖,湖泊面积约 60 km<sup>2</sup>;孔雀河古河道横贯东西,小湖水深 1–4 m,总容积约  $3 \times 10^8$  m<sup>3</sup>.

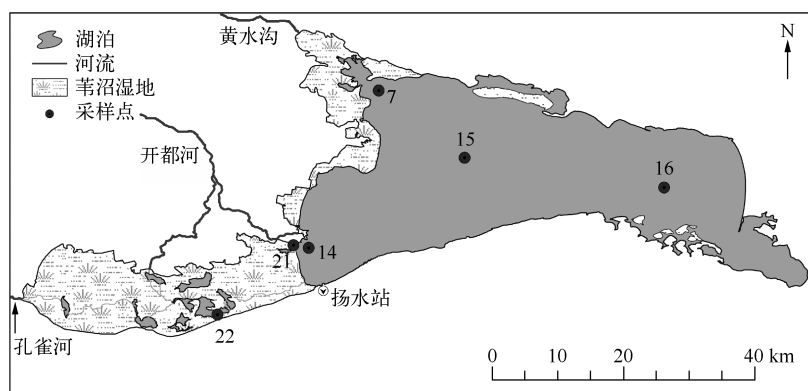


图 1 博湖及采样点位置

Fig. 1 Lake Bosten and the distribution of sampling stations

博湖既是开都河的尾间,又是孔雀河的发源地. 大湖区的西南角建有扬水站,将大湖区湖水泵出,经人工干渠,与小湖区流出的水汇合后流入下游的孔雀河(图 1),故大湖区除了西南角水力交换作用强烈外,其它水域水体的交换能力弱,换水周期长达 969 d<sup>[17]</sup>. 21 世纪初,博湖作为国家“塔里木河流域综合治理”项目

最重要的水源地,又进行了东泵站的建设,并承担向孔雀河及下游的塔里木河流域进行生态输水的任务<sup>[4,18]</sup>。2009年,随着东泵站的建成及运行,两个泵站向孔雀河总输水量达到了 $13.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。目前,扬水站修建的人工干渠是博湖大湖区出湖地表径流的唯一通道。

## 2 材料和方法

### 2.1 样点布设

在博湖大、小湖区选择了6个采样点(图1):7<sup>#</sup>点( $42^\circ 06' 00'' \text{N}$ ,  $86^\circ 50' 30'' \text{E}$ )位于大湖区西北角的黄水区;14<sup>#</sup>点( $41^\circ 53' 20'' \text{N}$ ,  $86^\circ 44' 30'' \text{E}$ )位于大湖区开都河入湖口附近;15<sup>#</sup>点( $42^\circ 00' 01'' \text{N}$ ,  $86^\circ 57' 49'' \text{E}$ )位于大湖区中心偏西;16<sup>#</sup>点( $41^\circ 57' 34'' \text{N}$ ,  $87^\circ 14' 12'' \text{E}$ )位于大湖区中心偏东;大小湖之间有一道人工堤,堤上设有两个涵闸(南闸与北闸),用于生态水双向贯通;21<sup>#</sup>点( $41^\circ 53' 01'' \text{N}$ ,  $86^\circ 43' 37'' \text{E}$ )位于小湖区北闸附近,由于大湖区水位低于小湖区,小湖区的部分水可由北闸流入大湖区;22<sup>#</sup>点( $41^\circ 47' 10'' \text{N}$ ,  $86^\circ 37' 30'' \text{E}$ )位于小湖区中的喇嘛湖,这里水草茂盛,水体与开都河的西支以及小湖区古孔雀河河道相通,水力滞留时间较短。这6个采样点属于巴州环境监测站常规监测位点,故编号沿用该站设置的监测点编号,以便于数据比较分析。

### 2.2 样品采集及理化因子测定

分别于2010年6-11月,2011年1月(由于气候条件的限制,冰封期只进行了1月份的采集)、5月及6月,用采水器采集各采样点表层水样(水下50 cm左右)5 L,置预先洗净的塑料桶中,运回巴州环境监测站进行营养盐含量分析。样品共计54份。采样点水体的透明度(SD)用透明度盘现场测定。水深用便携式测深仪(奥地利 UWITEC 公司)现场测定。水温、pH、矿化度(TDS)及溶解氧(DO)的含量用多参数水质测定仪(YSI 6600V2)现场测量。总磷(TP)、总氮(TN)、铵氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )、硝氮( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )、叶绿素a(Chl.a)、高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )、总悬浮物质(TSS)、 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{Cl}^-$ 含量的分析参照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)进行。

### 2.3 数据来源及分析

为了评价博湖水体营养状态,选取Chl.a、TP、TN、SD、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 五项指标,参照王明翠等<sup>[19]</sup>提出并由中国环境监测总站推荐的湖泊(水库)富营养化状况评价方法——综合营养状态指数法(TLI)确定各样点水体的营养状态。TLI以0-100的一系列连续数字对营养状态进行分级:TLI < 30为贫营养;30 ≤ TLI ≤ 50为中营养;TLI > 50为富营养;50 < TLI ≤ 60为轻度富营养;60 < TLI ≤ 70为中度富营养;TLI > 70为重度富营养。在同一营养状态下,指数值越高,其营养化程度也越高<sup>[19-20]</sup>。对博湖不同采样点环境因子进行正态分布检验(Shapiro-Wilk 检验)、方差齐性检验及必要的数转化后,采用SPSS 17.0 for Windows对数据进行统计分析。不同样点环境参数均值差异的显著性检验采用单因素方差分析法。SD、水深、水温、pH、DO、TDS、 $\text{Cl}^-$ 及 $\text{SO}_4^{2-}$ 因不满足方差分析要求,故未做不同样点间数据显著性检验。因博湖水较清澈,大多数水样的TSS值均在检测限以下,故本文后面不再列出这个指标。博湖水质历史数据来源于李卫红等<sup>[7,14,16,21]</sup>的研究,以及新疆巴州环境监测站与博斯腾湖科学研究所的历年监测资料。

## 3 结果与讨论

### 3.1 水质现状

3.1.1 月变化 TDS是表征湖泊天然水质的主要指标之一。位于小湖区的22<sup>#</sup>点TDS全年变化不大,均不超过400 mg/L;而位于小湖区北闸的21<sup>#</sup>点TDS较高,每月都超过了1100 mg/L,最大值出现在2011年1月(1792 mg/L);15<sup>#</sup>与16<sup>#</sup>样点TDS全年无明显变化;7<sup>#</sup>点的TDS较高,最高值出现在2011年1月份,为2068 mg/L;14<sup>#</sup>的TDS不同月份间变化幅度大,秋季最高,最高值为最低值的6.68倍(图2)。营养盐结果表明,博湖水体中TP含量较低,有34个样品TP含量低于检测限(记为0 μg/L),占所测样品的63%。TN最大值出现在2011年10月的21<sup>#</sup>样品(1.79 mg/L);最小值出现在2011年8月份的22<sup>#</sup>点(0.32 mg/L);15<sup>#</sup>与16<sup>#</sup>点TN的变化趋势一致。21<sup>#</sup>点 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度要远大于其它样点,且不同月份间的变化幅度也大,最高值出现在2011年6月(1.27 mg/L);最低值出现在2011年1月的14<sup>#</sup>点(0.03 mg/L),最高值是最低值的42倍。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的总体变化趋势是:2010年6-9月 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度缓慢降低,然后又逐步上升;最高值出现在2011年5月的21<sup>#</sup>点(1.00 mg/L)。 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的月变化各样点趋势不一,无明显规律。

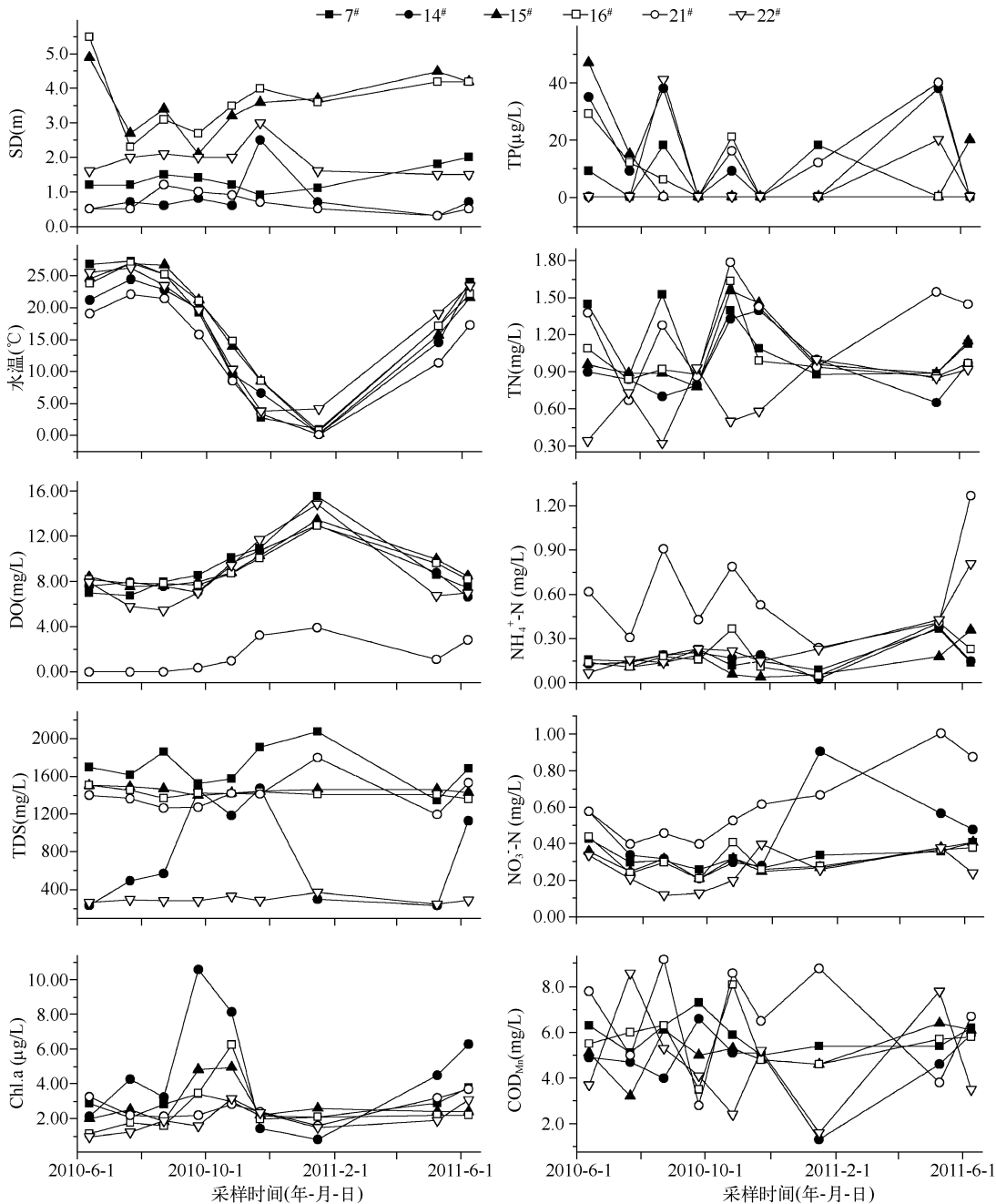


图2 博湖各样点水质参数变化

Fig.2 Variations of water quality parameters at the six selected sampling stations in Lake Bosten

3.1.2 空间变化 pH以21#点最低,均值为7.94,其它各样点水体pH值均在8.0以上,16#点pH值最高,均值为8.97(图3)。博湖各采样点水体均为碱性。7#点的DO值最高,均值为9.22 mg/L,约为21#点(1.38 mg/L)的7倍,其它各点DO值均高于8.40 mg/L。TDS以7#点最高,均值为1691 mg/L,接下来依次是15#、16#与21#点,均值均高于1300 mg/L,达到了微咸水湖的标准。小湖区的22#点TDS值最小,均值仅为281 mg/L,是7#点的

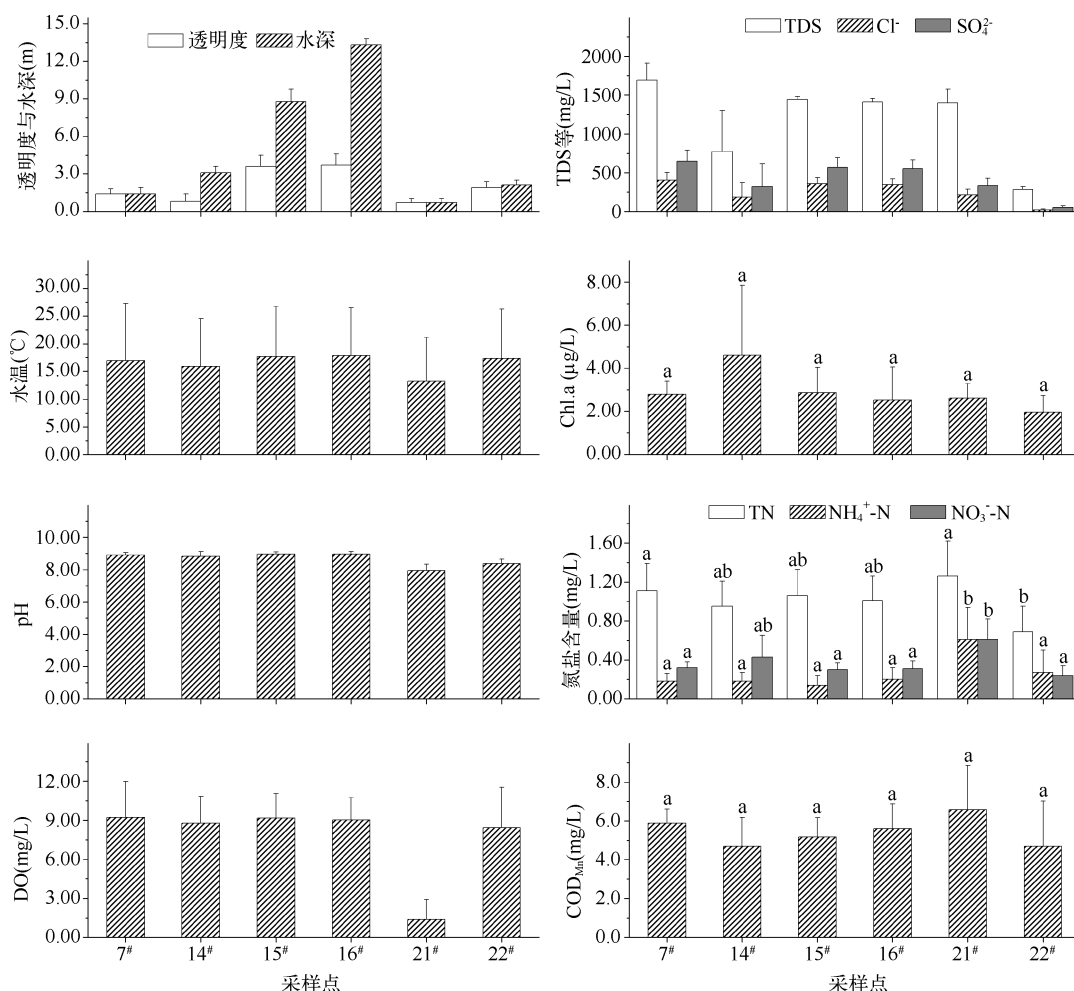


图3 2010年6月-2011年6月博湖不同采样点理化因子均值比较(数据为平均值 $\pm$ 标准差;柱状图上标有相同字母表示差异不显著( $P > 0.05$ ),相邻字母表示差异显著( $P < 0.05$ ),相隔字母表示差异极显著( $P < 0.01$ ))

Fig. 3 Comparison of environmental parameters at the six stations in Lake Bosten from June 2010 to June 2011

1/6.  $\text{Cl}^-$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  也是 7# 点最高, 22# 点最低; 大湖区与小湖区各样点在 TDS 组成方面差异明显, 大湖区  $\text{Cl}^-$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  这两种离子占 TDS 的 62% 以上, 而在小湖区 21# 与 22# 点的  $\text{Cl}^-$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  这两种离子仅分别占 TDS 的 39% 与 26%。TN、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  及  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量均是 21# 点最高, 均值分别为 1.26、0.61 和 0.61 mg/L。21# 点的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量为其它点的 2 倍多。21# 点的  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量与 7#、15#、16# 及 22# 点差异显著 ( $P < 0.05$ )。TN 含量 22# 点最低, 为 0.69 mg/L, 并且与 21# 及 7# 点差异显著 ( $P < 0.05$ )。COD<sub>m</sub> 常被作为评价地表水体受有机污染物和还原性无机物质污染程度的综合指标。COD<sub>m</sub> 的含量也以 21# 点最高, 均值达到 6.6 mg/L; 14# 点与 22# 点 COD<sub>m</sub> 的含量最低, 均为 4.7 mg/L; 但是各样品点间差异不显著。

3.1.3 水质状况评估 小湖区 22# 点水质总体较好, 21# 点水质最差, DO 为劣 V 类, COD<sub>m</sub> 及 TN 均属于 IV 类, 而  $\text{Cl}^-$  含量正常 (表 1)。大湖区 (河口区除处) 的主要污染物是 TN、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  和 COD<sub>m</sub>。此外, 由于大湖区大部分水域 TDS 含量超过了 1000 mg/L, 盐分也是主要污染物之一。博湖水体营养状态的时空变化表明 (图

4), 博湖大湖区总体处于中营养水平, 仅 14<sup>#</sup> 点冬季为贫营养水平; 小湖区 21<sup>#</sup> 点的营养水平在 2011 年 5 月甚至达到了轻度富营养水平; 而小湖区 22<sup>#</sup> 点, 水体营养水平较低, 有 3 个月为贫营养. 总体而言, 博湖大湖区西北角黄水区(7<sup>#</sup> 点)、开都河入湖区(14<sup>#</sup> 点)及西南角的小湖区(21<sup>#</sup> 点)的营养水平高于大湖区的开敞水域(15<sup>#</sup> 与 16<sup>#</sup> 点), 也高于小湖区中的喇嘛湖水域(22<sup>#</sup> 点); 春夏季节水体的营养水平要略高于秋冬季. 实际上, 由于 63% 水样的 TP 值低于检测限, 这部分样品代表 TP 的单项营养状态指数计为 0, 所以博湖实际综合营养指数要高于图 4 所示的值.

表 1 博湖各采样点水质指标年平均值 (mg/L) 及所属类别  
Tab. 1 Water quality categories of the six sampled stations in Lake Bosten

水质指标	7 <sup>#</sup>	14 <sup>#</sup>	15 <sup>#</sup>	16 <sup>#</sup>	21 <sup>#</sup>	22 <sup>#</sup>
DO	9.22( I )	8.78( I )	9.17( I )	9.02( I )	1.38( 劣于 V )	8.44( I )
COD <sub>Mn</sub>	5.9( III )	4.7( III )	5.2( III )	5.6( III )	6.6( IV )	4.7( III )
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.18( II )	0.18( II )	0.14( I )	0.20( II )	0.61( III )	0.27( II )
TP <sup>*</sup>	0.005( I )	0.014( II )	0.009( I )	0.019( II )	0.019( II )	0.018( II )
TN	1.11( IV )	0.95( III )	1.06( IV )	1.01( IV )	1.26( IV )	0.69( III )
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> **	649( 劣于 250 )	317( 劣于 250 )	566( 劣于 250 )	549( 劣于 250 )	331( 劣于 250 )	53( I - V )
Cl <sup>-</sup> **	404( 劣于 250 )	188( I - V )	355( 劣于 250 )	343( 劣于 250 )	214( I - V )	21( I - V )

\* 湖库标准; \*\* 集中式生活饮用水地表水源地补充项目标准限值.

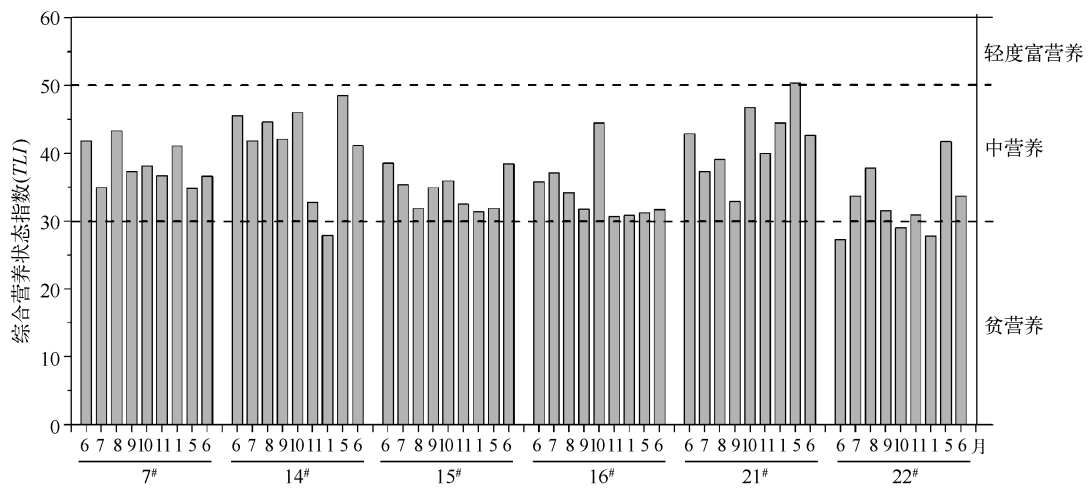


图 4 博湖各采样点综合营养状态指数月变化  
Fig. 4 Trophic status index evaluation results of the six sampling stations in Lake Bosten

3.1.4 水质时空异质性原因 博湖不同采样点水质差异明显, 但 6 个样点仅水温和 DO 月变化趋势一致, 其它水质参数逐月变化没有明显的规律(图 2 和图 3). 大湖区内 7<sup>#</sup> 点的 TDS、氮盐含量及 COD<sub>Mn</sub> 等污染物的浓度均要高于位于开敞水域的 15<sup>#</sup> 与 16<sup>#</sup> 点, 也高于开都河入湖处的 14<sup>#</sup> 点(图 3). 从 7<sup>#</sup> 点所处的黄水沟至开都河入湖处这片水域, 有许多农田排渠, 接纳了博斯腾湖北四县(和硕县、和静县、焉耆县和博湖县)大量的工农业污水及生活污水<sup>[6,8,10,22]</sup>. 虽然经过湖滨芦苇湿地的截留及净化, 但是仍有高浓度的污染物进入湖体. 巴州环境监测站的监测数据表明, 2007 年工业污水、生活污水和农田污水入湖总量分别达到了 1309 × 10<sup>4</sup>、598 × 10<sup>4</sup> 及 48000 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>, 农田污水是主要污染源, 占总入湖污水量的 96%. 入湖的 TN 达到 2700 t, TP 达 260 t, 盐量达 159 × 10<sup>4</sup> t. 因此, 从干排进入湖体的农田污水、工业污水及生活污水是造成博湖西北部水域 TDS 及

污染物浓度高于大湖区其它水域的主要原因. 位于大湖区开敞水域的 15<sup>#</sup>与 16<sup>#</sup>样点(图 1), 因离西北部高浓度的污染水域距离远, 加之西南角扬水站抽水引起的湖流影响较小, 故这两个点 TDS 及其它水质指标, 以及 *TLI* 的月变化幅度相对较小(图 2 和图 4). 开都河入湖处 14<sup>#</sup>点的 TDS、Chl.a 及营养盐的浓度随时间变化的幅度较大, 可能与开都河不同月份入湖水量及河流周边农田排水量的月变化幅度大有关.

小湖区喇嘛湖的 22<sup>#</sup>点水质最好, 主要原因有三点: 一, 22<sup>#</sup>样点汇入的水来自于污染程度较小的开都河西支, 且经过大片湿地的过滤作用后才到达这里; 二, 喇嘛湖与孔雀河古河道及其它小湖相通, 水流通畅, 水力滞留时间较短, 污染物难以积累; 三, 这个湖区周围有大量芦苇、香蒲等挺水植物, 且水底的沉水植物也较多, 水体有很好的自净能力.

小湖区 21<sup>#</sup>点比较特殊, 水体的 TDS 及其它污染物浓度要远高于 22<sup>#</sup>点, 并且 DO 的含量特别低, 很多月份水体中 DO 甚至为 0 mg/L, 为完全厌氧状态(图 2 和图 3). 小湖区除了总面积约 60 km<sup>2</sup>的十几个小湖泊外, 大部分地区是芦苇密布的湖沼湿地<sup>[23]</sup>, 这些地方水浅, 水流不畅, 芦苇的枯枝落叶大量堆积, 经微生物的作用进行腐烂分解, 消耗了水体中的氧. 此外, 还有 9 条农田排渠直接将污水排入小湖区, 使水体中 TDS 增高<sup>[9-10]</sup>. 微生物矿化作用产生的氮、磷以及农田排渠积存的盐分等因不能及时排出, 造成了此地水体中污染物浓度偏高. 这部分污水虽然流量较小, 但长年经过北闸排入大湖, 也加剧了大湖区的污染程度.

### 3.2 近 50 年来博湖水质变化趋势及原因

**3.2.1 矿化度变化趋势** 在 1960s 之前博湖是新疆最大的淡水湖, TDS 只有 390 mg/L(图 5). 博湖水质咸化可以大致分为升高—下降—再升高三个阶段(图 5): ① 1960—1989 年, 湖水持续咸化. 1958 年在开都河上修建的宝浪苏木分水闸, 改变了东西支自然分水比例, 使东支入大湖淡水水量由建国前的 78.4% 减少到 1982 年的 50.9%, 最少的 1967 年只占 33.9%<sup>[16]</sup>. 1960s 后由于焉耆盆地农业开发的迅猛发展, 洗盐和改土治碱使进入博湖的高盐农田水大量增加, 导致湖水矿化度呈持续升高, 至 1975 年湖水的 TDS 已达到 1440 mg/L, 博湖已从淡水湖转变为微咸水湖<sup>[7, 24]</sup>. 此外, 1975 年扩建了解放一渠, 直接将大量淡水引入孔雀河, 使湖水循环水量减少, 使得湖水咸化过程加剧<sup>[14]</sup>. 1982 年, 解放一渠停止直接向孔雀河输水, 同时扬水站的西泵站启用, 加快了大湖的水循环, 使湖水的 TDS 有所下降. 但由于西泵站位于博湖西南角, 距开都河入湖口处仅有 8 km, 泵站抽出去的湖水 TDS 也不太高, 对整个大湖的水循环作用有限, 故 TDS 只是稍有降低. 而且由于抽水量的增加, 大湖区的水位迅速下降(图 5). 1986 年由西泵站抽出去的湖水甚至比从宝浪苏木分水闸东支进入大湖区的水还要多(图 6), 加上这个阶段开都河上游来水量偏少<sup>[18, 25-26]</sup>, 导致 1987 年博湖水位下降到历史最低点(1044.96 m). 相应地, TDS 又持续上升, 至 1989 年达到最高值(1930 mg/L). ② 1990—2003 年, 湖水 TDS 总体呈下降趋势. 1980s 后期, 受全球气温上升及近年新疆气候暖湿化趋势的影响<sup>[26-28]</sup>, 开都河

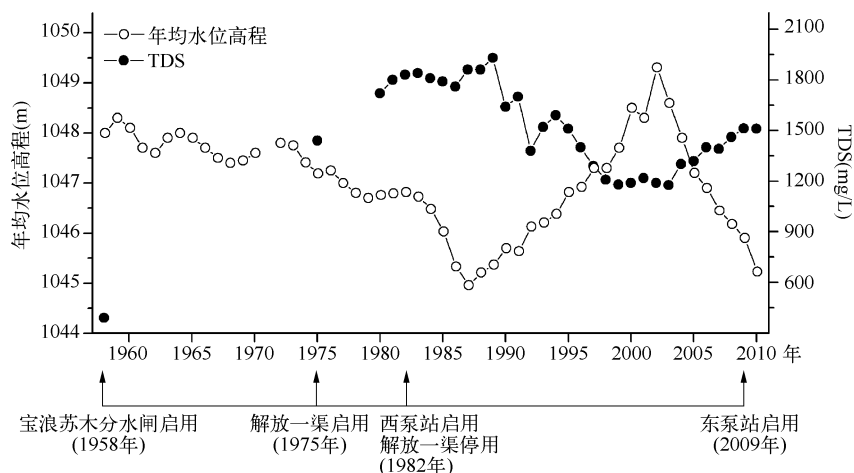


图 5 1958—2010 年博湖近 50 年来年均矿化度及水面高程变化

Fig. 5 Variations of total dissolved solids and water level of Lake Bosten from 1958 to 2010

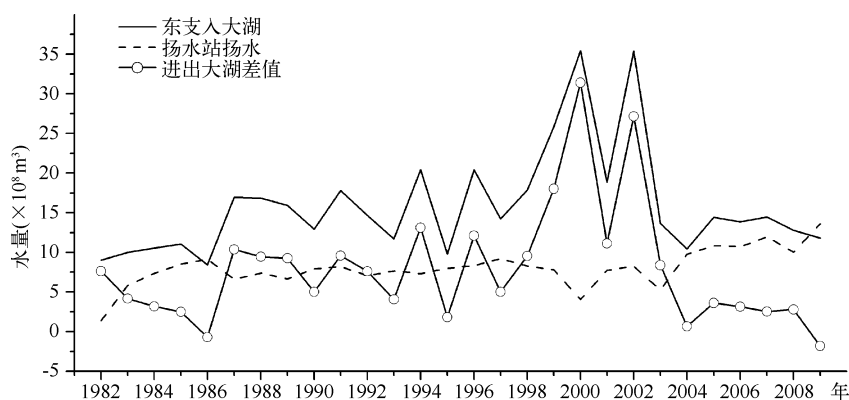
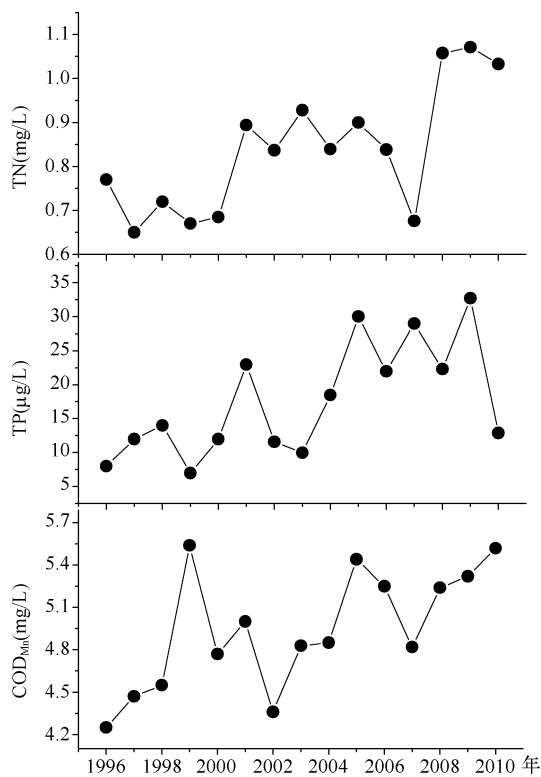


图6 大湖区主要水量收支的年变化

Fig. 6 Inter-annual changes of water budgets of Lake Bosten

图7 1996-2010年博湖TN、TP及COD<sub>Mn</sub>

浓度的年变化

Fig. 7 Variations of TN, TP and COD<sub>Mn</sub> of Lake Bosten from 1996 to 2010

的发源地天山中段高山降水及冰川融水增加,开都河径流量持续增多,致使博湖水位也持续上涨(图5和图6). 至2003年,水位涨至历史最高点的1049.31 m. 由于开都河大量淡水的稀释作用,湖水的TDS整体上呈下降趋势,2003年TDS已降至1176 mg/L. ③2004年至今,湖水TDS又持续升高. 开都河经过1987年至2002年的丰水年后,径流量开始迅速减少. 其原因是开都河源处高山地区在经过前期冰川消融后,冰川向更高处消退,冰川总量减少,导致夏季冰川融水径流减少,开都河平均径流迅速回落到平均水量以下<sup>[25-26]</sup>. 并且这段时间从扬水站向孔雀河扬出去的水量也在增加,2009年东泵站投入运行后,当年扬出的水量比宝浪苏木分水闸东支入湖的水量多 $1.82 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图6). 以上几方面因素共同作用的结果是博湖大湖区水位迅速下降,而湖水的TDS又持续上升.

**3.2.2 营养盐变化趋势** 近年来,博湖不仅TDS持续升高,水体中营养盐及污染物浓度也大幅增加. 近15年来TN、TP及COD<sub>Mn</sub>等污染物的浓度明显升高,特别是自2003年后博湖水位快速下降以来,这种趋势更加明显(图7). 其原因主要有两点:一是博湖水位持续降低,由于浓缩作用,污染物的浓度也相应升高;二是博湖流域人口的快速增长及开垦的农田面积增加,农业面源污染、工业及生活污水的排放量也有增无减. 数据表明,近几年焉耆盆地灌溉面积已发展到 $12 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,年引用水量 $15.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,上游农业灌溉大量引用河水,减少了入湖淡

水量<sup>[29]</sup>. 每年由农田废水排入并滞留在博湖中的盐分约有 $21.69 \times 10^4 \text{ t}$ . 在巴州环境监测站重点监测的直接入湖的33条排污渠中,对入湖水量和入湖污染物负荷贡献最大的八条排渠分别为黄水总干排、解放一渠、团结总干排、22团南干排、胜利干排、博湖镇干排、东风干排和四十里城子干排. 这八条排渠的入湖水量和各



污染物入湖负荷占入湖总水量和入湖污染物总量的 83% 以上. 以黄水总干排为例,此排渠污水直接汇入博湖的黄水区(7#点水域). 从对黄水总干排各年水质的监测结果可以看出(表 2):绝大部分水质项目都严重超标,污水的 TDS 平均值为 4341 mg/L,最高值达到了 6700 mg/L;TN 均值为 1.46 mg/L,属于 IV 类,最高值达到了 2.40 mg/L,属于劣 V 类;TP 含量平均值也超过了湖库 V 类水质 TP 上限,最高值达到了 0.86 mg/L;此外,水体中总悬浮物(TSS)浓度也较高,五日生化需氧量( $BOD_5$ )及化学需氧量( $COD_{Cr}$ )等的含量也超标. 这些污水直接排入黄水区,最终汇入大湖. 以上两种因素的共同作用下,博湖水污染负荷增大,环境容量降低,咸化及富营养化趋势有加重的危险. 此外,由于水位的下降,博湖周边的湿地面积萎缩,水质咸化,生物多样性下降,水体自净能力和生态系统的自我修复能力减弱,生态系统受损,系统的生态服务功能下降,已成为博湖流域亟待解决的生态环境问题之一<sup>[5,9,30-31]</sup>. 更为严重的是,博斯腾湖流域未来的年降水量有明显减少趋势<sup>[32]</sup>. 为了维持博湖及其流域的生态平衡及可持续性发展,根据流域不同区段水资源承载能力和生态需水的要求<sup>[4,13]</sup>,要加强流域水资源合理配置与管理,加大节水战略,提高水资源利用效率,减少工农业污水排放,加强博湖最适生态水位研究,以发挥其水资源最大功效,增强其生态服务功能.

表 2 黄水总干排污染物含量\*  
Tab. 2 Concentrations of different pollutants in Huangshui Main Canal

采样时间 (年-月-日)	污染物含量(mg/L)								
	TDS	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	TN	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TP	TSS	BOD <sub>5</sub>	COD <sub>Cr</sub>
2005-05-25	5650	1070	1911	1.27	0.51	0.044	12	0.6	-
2005-09-08	2540	459	855	2.08	0.11	0.730	21	20.0	47.3
2007-05-24	5108	1130	1537	1.24	1.06	0.183	11	4.0	23.0
2007-09-19	3266	890	1089	0.73	0.13	0.860	42	4.6	19.0
2008-05-08	4562	1030	2118	1.03	0.82	0.175	19	30.6	27.5
2008-09-16	6700	1552	2821	2.40	0.14	0.190	11	15.5	48.0
2009-07-21	2360	438	1087	1.08	未检出	未检出	5	11.7	30.0
2009-10-12	4540	607	1829	1.82	0.73	0.059	18	2.9	23.0
平均值	4341	897	1656	1.46	0.50	0.320	17	11.2	31.1

\* 数据来源:巴州环境监测站历年监测资料.

4 结论

通过对博湖 2010 年 6 月-2011 年 6 月大小湖 6 个采样点的水质调查分析,发现博湖水质空间差异明显,但不同样点水质月变化无一致趋势. 由于农业面源污染严重,有多条农田干渠污水直接排入大湖区西北角的黄水区,故此片水域 TDS、氮盐含量及  $COD_{Mn}$  等污染物的浓度高,水质最差,部分水质参数为 V 类或劣 V 类. 开都河入湖处受上游淡水来水量的影响,水质月变化幅度较大,水质相对较好. 受水文湖流等条件的限制,博湖中间开敞水域及东部水域水力滞留时间较长,水质处于黄水区与开都河入湖口至扬水站水域水质之间,水体营养水平为中营养. 小湖区,喇嘛湖水域由于水力滞留时间短、水草丰茂,水体自净能力强等因素的影响,水质最好,介于 I-III 级之间,水体综合营养状态指数也较低,且有三个月为贫营养. 然而,小湖区除了约 60 km<sup>2</sup> 以外的湖面,尚有以小湖区北闸附近的 21 号点为代表的湖沼湿地,面积约 240 km<sup>2</sup>. 由于这些地方水浅,水流不畅,农业干渠排入的污染物长期滞留,加上芦苇的枯枝落叶大量堆积,经微生物的作用进行腐烂分解释放污染物,消耗水体中的氧,致使水体中盐分、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 及  $COD_{Mn}$  等远高于其它水域. 水质参数类别多为 V 类和劣 V 类,水体综合营养指数有时甚至达到了轻度富营养水平,严重威胁小湖区湖沼湿地的健康发展.

近 50 年来博湖水质演变过程表明,自 1970s 以来,博湖已经由新疆最大的淡水湖转变为微咸水湖. 博湖水质咸化大致分为快速升高—缓慢下降—再升高三个阶段:① 1960-1989 年,湖水迅速咸化,这一阶段农业开发、洗盐和改土治碱、水利工程等人类活动的影响略大于自然因素对湖水咸化的影响;② 1990-2003 年,湖水矿化度缓慢下降,这一阶段主要受自然因素影响;③ 2004 年至今,湖水矿化度又持续升高. 并且湖水中

其它污染物浓度也有快速升高的趋势. 总体来说, 博湖水水质变化受自然和人为两种因素制约, 近 10 年来, 人类活动使博湖水水质的咸化和富营养化过程加剧.

致谢: 感谢迟克续、邵克强、张磊等及新疆巴州博斯腾湖科学研究所野外采样中给予的帮助.

## 5 参考文献

- [1] Bai J, Chen X, Li J *et al.* Changes in the area of inland lakes in arid regions of central Asia during the past 30 years. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **178**(1-4): 247-256.
- [2] Hambright KD, Parparov A, Berman T. Indices of water quality for sustainable management and conservation of an arid region lake, Lake Kinneret (Sea of Galilee), Israel. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2000, **10**(6): 393-406.
- [3] 施雅风, 沈永平, 李栋梁等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. 第四纪研究, 2003, **23**(2): 152-163.
- [4] 左其亨. 博斯腾湖向塔里木河生态输水效果及风险. 地理科学, 2006, **26**(5): 361-366.
- [5] 冉新军, 沈利, 李新虎. 博斯腾湖生态环境效应分析. 水资源与水工程学报, 2010, **21**(1): 105-108.
- [6] 徐海量, 陈亚宁, 李卫红. 博斯腾湖湖水污染现状分析. 干旱区资源与环境, 2003, **17**(3): 95-97.
- [7] 李卫红, 袁磊. 新疆博斯腾湖水盐变化及其影响因素探讨. 湖泊科学, 2002, **14**(3): 223-227.
- [8] 王开勇, 杨乐, 庞玮. 博斯腾湖入湖水质分析与评价. 石河子大学学报(自然科学版), 2008, **26**(4): 423-426.
- [9] 王影, 李新国, 李会志等. 博斯腾湖小湖区湿地变化及其保护对策研究. 海洋湖沼通报, 2010, (2): 123-129.
- [10] 张建平. 博斯腾湖流域生态环境现状及治理对策浅析. 环境科技, 2010, **23**(S2): 76-79.
- [11] 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. 地理研究, 2003, **22**(2): 185-191.
- [12] 郭焱, 张人铭, 蔡林刚等. 博斯腾湖鱼类资源及渔业. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2005.
- [13] 杨桂山, 马荣华, 张路等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 799-810.
- [14] 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. 水科学进展, 2007, **18**(4): 475-482.
- [15] 曾海鳌, 吴敬禄. 蒙新高原湖泊水质状况及变化特征. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 882-887.
- [16] 程其畴. 博斯腾湖水水质矿化度与水资源利用. 干旱区地理, 1993, **16**(4): 31-37.
- [17] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范(第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [18] 赵龙, 单秀琴, 达伟等. 新疆博斯腾湖水量的演变. 河南水利与南水北调, 2009, **152**(2): 15-16.
- [19] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, 2002, **18**(5): 47-49.
- [20] 刘浩, 徐志侠, 陈超等. 官厅水库库区富营养化评价. 水电能源科学, 2011, **29**(1): 13-16.
- [21] 张建平, 胡随喜. 博斯腾湖矿化度现状分析. 干旱环境监测, 2008, **22**(1): 19-23.
- [22] 李勇, 孙卫刚. 新疆博斯腾湖污染源调查分析. 地下水, 2010, **32**(4): 177-179.
- [23] 曾光, 高会军, 朱刚等. 近 32 年新疆博斯腾湖湿地动态变化及机制分析. 国土资源遥感, 2010, **86**(S1): 213-218.
- [24] 程其畴. 博斯腾湖水水质矿化度演变及展望. 大自然探索, 1994, **13**(2): 70-76.
- [25] 孙占东, 王润, 黄群. 近 20 年博斯腾湖与岱海水位变化比较分析. 干旱区资源与环境, 2006, **20**(5): 56-60.
- [26] 孙占东, Opp C, 王润等. 博斯腾湖流域山区地表径流对近期气候变化的响应. 山地学报, 2010, **28**(2): 206-211.
- [27] Shi YF, Shen YP, Kang E *et al.* Recent and future climate change in northwest China. *Climatic Change*, 2007, **80**(3-4): 379-393.
- [28] 王润, Giese E, 高前兆. 近期博斯腾湖水位变化及其原因分析. 冰川冻土, 2003, **25**(1): 60-64.
- [29] 杜新宪, 许月英. 博斯腾湖流域污染治理与生态环境保护对策浅析. 干旱环境监测, 2009, **23**(2): 113-116, 121.
- [30] 杨光华, 包安明, 陈曦等. 新疆博斯腾湖湿地生态质量的定量评价. 干旱区资源与环境, 2009, **23**(2): 119-124.
- [31] 万洪秀, 孙占东, 王润. 博斯腾湖水位变动对湿地生态环境的影响. 自然资源学报, 2006, **21**(2): 260-266.
- [32] 邱冰, 姜加虎, 孙占东等. 基于统计降尺度模型的博斯腾湖流域未来气温和降水变化趋势分析. 资源科学, 2010, (6): 1133-1140.