新疆博斯腾湖湖周水体碳和盐离子的空间分布①

房传苓[1,2]， 王秀君[1,3]， 王家平[1,2]
(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，新疆 乌鲁木齐 830011;
2. 中国科学院大学，北京 100049; 3. 美国马里兰大学地球科学交叉学科研究中心，美国 马里兰州 20740)

摘 要: 以博斯腾湖为研究对象，在大湖区周边及开都河取水样和表层土样，分析湖周水体中颗粒有机碳(POC)和溶解有机碳(DOC)在秋季的空间分布特征及其与周围土壤碳及水体盐离子的关系。结果表明: 湖周水体中POC浓度的空间变化较大($0.1 \sim 1.2\ mg \cdot L^{-1}$)，而DOC浓度的变化较小($8.5 \sim 12.3\ mg \cdot L^{-1}$)。两者在出湖口和入湖口处的浓度均较低，与开都河的浓度相近。与早期相比，博斯腾湖水中无机碳存在由CO_3^{2-}向HCO_3^-转化的现象。回归分析显示，水体中各形态碳与土壤碳之间没有显著的线性关系，表明水体中碳的含量受周围土壤的影响不大。

关键词: 颗粒有机碳; 溶解有机碳; 土壤碳; 盐离子; 空间分布; 博斯腾湖; 新疆

湖泊作为内陆水体的重要组成部分，与陆地生态系统的物质、能量交换强烈[1]，具有较高的生产力，其碳源/汇作用功能显著，是全球碳循环的重要组成部分[2]。早期研究[3]显示，全球湖泊的总碳汇为$0.077\ Gt \cdot a^{-1}$，对大气CO_2的汇达到$0.053\ Gt \cdot a^{-1}$。

作为湖泊营养元素的碳在湖泊水体中以无机碳和有机碳的形式存在。其中，有机碳是水体中营养元素的储存库，其输送和利用的方式在水生生态系统的物理、化学和生物过程中具有重要作用[4]。有机碳的形态主要包括溶解有机碳(dissolved organic carbon，简称DOC)和颗粒有机碳(particulate organic carbon，简称POC)。

DOC的来源与组成比较复杂，在已能分辨的组分中包括氨基酸、肽类、核苷酸、碳水化合物、酯类、芳香类烃和非芳香烃以及高分子腐殖质等[5]。POC分为生命部分与非生命部分，其中生命部分包括细菌、噬菌体、微型浮游植物/动物、大型藻类、浮游动物和小鱼小虾等; 非生命部分主要为有机碎屑，来源于浮游生物生命活动过程中产生的非溶性分泌物、粪便以及浮游生物的残骸等[6]。不同区域POC组成各异，且随着水体深度、季节和生物种群的变化，其组成也发生变化。

我国干旱区有大小湖泊近400个，在我国3大自然地理区域中居第2位[7]，是中国内陆水体的重要组成部分。它们以其独有的特征成为全球碳循环研究中不可缺少的部分。研究干旱区湖泊水体的碳循环不仅对深刻认识湖泊碳循环的机理具有重要作用，而且对于进一步研究干旱区的碳循环也具有重要意义。国内外学者对湖泊水体碳的含量、分布及其季节变化等进行了大量的研究[8-14]，但对干旱区湖泊水体有机碳的研究很少。本文通过对大湖区的表层水体有机碳、湖周土壤碳的分析，结合湖泊水体盐离子的分布特征，初步探讨了博斯腾湖水体有机碳的空间分布及其与土壤碳和水化学的关系。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

博斯腾湖(41°46′ ~ 42°08′N，86°19′ ~ 87°28′E，海拔高程为1 048 m)位于新疆天山南麓焉耆盆地最低处，是我国最大的内陆淡水湖。博斯腾湖85%的水量为发源于天山的开都河供给。开都河在宝浪苏木分水枢纽处分为两支，分别注入博斯腾湖大小两个湖区。除开都河外，注入博斯腾湖的河流还有黄水沟、清水河等。

博斯腾湖大湖区东西长55 km，南北平均宽20 km，水面面积1 002.4 km^2，容积$88 \times 10^8\ m^3$，平均水深7.38 m，最深为16 m，湖盆呈深碟状[15]。湖区光照充足，热量丰沛，空气干燥，雨量稀少，多年平均降水量68 mm，年蒸发量1 800 ~ 2 000 mm。区域

① 收稿日期: 2012-09-18; 修订日期: 2012-11-10
基金项目: 中国科学院"百人计划"项目(0972021001)
作者简介: 房传苓(1986-)，女，硕士研究生，主要从事干旱区水体碳循环方面的研究. E-mail: fangchuanling1@163.com
通讯作者: 王秀君. E-mail: wwang@essic.umd.edu

气候为内陆干旱气候。大湖区的西南角建有扬水站,常年将湖水泵出,与小湖区流出的水汇合后流入下游的孔雀河,所以大湖区西南角水力交换作用强烈,但其他水域水体的交换能力较弱,换水周期长达 969 d[16]。

1.2　材料与方法

1.2.1　**样点分布及样品采集**　采样点分布在大湖区周围,包括开都河入湖口和湖周 11 个点位。样品采集包括表层土壤(0 ~ 20 cm)和湖水样品,大湖区的出湖口处(11#)没有取到土壤样品(图 1)。本次共采集水体样品 12 个,土壤样品 11 个,采样时间为 2011 年 11 月 18—22 日。各采样点用采水器采集表层水样(水面下 0.5 m 左右)5 L。将采集到的水样分为两部分: 一部分水样直接装到玻璃瓶中,低温(4 ℃)保存,以备总有机碳(TOC)的测定; 另一部分水样用事先灼烧(450 ℃,灼烧 4 h)过的 GF/F(0.7 μm)玻璃纤维滤膜在全玻过滤器上用较小的负压抽滤,所得滤液转移至玻璃瓶中低温(4 ℃)保存,以备 DOC 的测定。土壤样品为表层土(0 ~ 10 cm),每个采样点设置 3 个重复,取约 1 kg 土,样品经风干后混匀并过 2 mm 筛。

1.2.2　**样品的测定**　总碳(TC)、TOC 和 DOC 的测定采用高温催化氧化法,使用的仪器为岛津总有机碳分析仪 TOC-Ⅴ。从 TOC 中扣除 DOC 即为 POC 的值,即 $POC = TOC - DOC$; 从 TC 中扣除 TOC 的值即为总无机碳(TIC)的值,即 $TIC = TC - TOC$。

水样的 pH、电导用玻璃电极法测定,主要离子(HCO_3^-、CO_3^{2-}、Cl^-、SO_4^{2-}、Ca^{2+}、Mg^{2+}、$Na^+ + K^+$)用滴定法测定,矿化度用重量法测定。

土壤有机碳(SOC)和土壤无机碳(SIC)分别采用重铬酸钾法和气压法[17]测定。

2　结果与分析

2.1 博斯腾湖水体的化学特性

表 1 显示,博斯腾湖水体在秋季的 pH 为 8.2 ~ 8.5,属弱碱性; 平均矿化度为 1.5 g·L^{-1},达到微咸水湖的标准。湖水的主要阳离子以 $K^+ + Na^+$ 为主,为 111 ~ 355 mg·L^{-1},其平均含量(283 mg·L^{-1})占所测阳离子的 61%。Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的平均含量较低,分别为 99 ~ 150 mg·L^{-1}和 54 ~ 79 mg·L^{-1},两者的平均含量分别占所测阳离子的 26% 和 13%。阴离子中,SO_4^{2-} 的含量最高,为 268 ~ 678 mg·L^{-1},大约占所测阴离子的 49%,其次为 Cl^-,为 209 ~ 399 mg·L^{-1},占所测阴离子的 28%,HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 的含量分别为 220 ~ 264 mg·L^{-1}和 11 ~ 27 mg·L^{-1},分别占所测阴离子的 21% 和 2%。除 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 外,其余盐离子博斯腾湖明显高于开都河。

博斯腾湖湖周水体中阳离子总量为 264 ~ 549 mg·L^{-1},均值为 465 mg·L^{-1},最小值出现在出湖口,最大值出现在白鹭洲附近的 9# 样点(图 1)。开都河阳离子总量(180 mg·L^{-1})明显低于博斯腾湖湖周水体。

表 1　各个采样点理化因子值

Tab. 1　Values of environmental factors at the sampling sites

采样点	EC /(mS·cm^{-1})	TDS /(g·L^{-1})	pH	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$K^+ + Na^+$
				/(mg·L^{-1})						
开都河	1.06	0.68	8.29	5.4	214.1	108.1	179.8	59.0	59.9	60.3
1(入湖口)	2.08	1.17	8.37	16.2	236.1	243.2	607.2	63.9	116.9	256.2
2	2.71	1.73	8.15	27.0	263.5	358.0	642.6	63.9	149.8	304.0
3	2.94	1.87	8.35	21.6	258.0	391.8	654.4	54.0	146.8	342.3
4	2.71	1.64	8.40	16.2	236.1	371.6	536.5	54.0	116.9	316.7
5	2.41	1.54	8.36	16.2	241.6	310.8	524.7	59.0	110.9	279.4
6	2.72	1.69	8.34	10.8	247.1	371.6	583.7	78.6	104.9	333.7
7	2.44	1.55	8.49	16.2	230.6	304.0	678.0	59.0	140.9	287.8
8	2.63	1.62	8.26	16.2	263.5	337.8	595.5	68.8	113.9	322.2
9	2.89	1.72	8.38	16.2	230.6	398.6	654.4	68.8	125.9	354.8
10	2.10	1.26	8.23	10.8	225.1	250.0	418.6	54.0	98.9	207.1
11(出湖口)	1.77	0.98	8.46	16.2	219.6	209.4	268.2	54.0	98.9	110.8
平均值	2.49	1.52	8.34	16.7	241.1	322.4	560.4	61.6	120.4	283.2

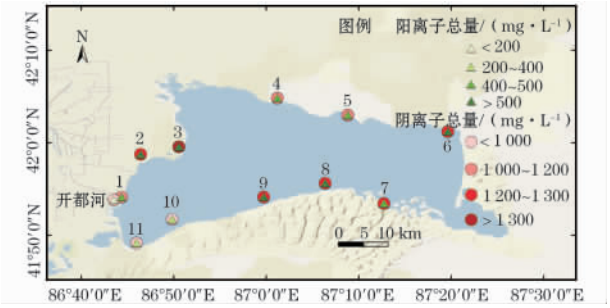


图 1 采样点位置及湖周水体阳离子和阴离子总量的空间分布

Fig. 1 Locations of the sampling sites and the spatial distribution of total concentrations of cation and anion in water around the lake

与阳离子总量类似，阴离子浓度的最低值也出现在开都河，仅为 507 mg·L^{-1}。博斯腾湖湖周水体中阴离子浓度为 713 ~ 1 326 mg·L^{-1}，均值为 1 141 mg·L^{-1}。阴离子浓度的最小值出现在西南湖区的出湖口，最大值出现在 3#样点，约为出湖口的 2 倍。

2.2 博斯腾湖表层水体有机碳浓度

开都河水和出湖口处 POC 的浓度最小，均为 0.1 mg·L^{-1}。博斯腾湖湖周其他各样点(9#样点除外) POC 的浓度明显高于出湖口，为 0.3 ~ 1.2 mg·L^{-1}，均值为 0.8 mg·L^{-1}。POC 的最大值出现在西部湖区的 2#样点和东南湖区的 7#样点(图 2)。

与 POC 浓度的分布类似，开都河水体中 DOC 的浓度最小，仅为 6.0 mg·L^{-1}，出湖口 DOC 的浓度也较低，为 8.5 mg·L^{-1}。与 POC 不同，博斯腾湖湖周 DOC 的浓度差别不大，为 9.7 ~ 12.3 mg·L^{-1}，均值为 11.5 mg·L^{-1}。入湖口和西南湖区 10#样点处 DOC 的浓度较低，分别为 10.3 mg·L^{-1} 和 9.7 mg·L^{-1}。与 POC 一致，DOC 浓度的最大值也出现在 2#样点(图 2)。

2.3 水体总无机碳和土壤无机碳浓度

开都河样点处 SIC 的浓度较高，达 33 g·kg^{-1}。博斯腾湖湖周 SIC 的浓度差别较大，为 15 ~ 41 g·kg^{-1}，均值为 26 g·kg^{-1}。总体来说湖泊南部SIC 的浓度较低，最小值出现在东南部的 7#样点。湖泊北部和西部 SIC 的浓度较高，最大值出现在东北角的 6#样点，2#样点处 SIC 也较大，为 35 g·kg^{-1}(图 3)。

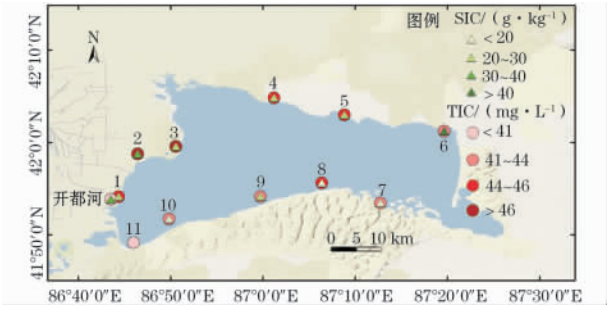


图 3 水体总无机碳和土壤无机碳的浓度

Fig. 3 Concentrations of TIC and SIC in lake water

与 SIC 不同，开都河水体 TIC 的浓度最低(38 mg·L^{-1})，出湖口 TIC 的浓度也不高(41 mg·L^{-1})。与 SIC 的分布类似，博斯腾湖湖周西部和北部 TIC 的浓度较高，最大值出现在 2#样点(53 mg·L^{-1})，最小值出现在西南部的 10#样点(41 mg·L^{-1})(图 3)。

2.4 水体总有机碳和土壤有机碳浓度

开都河处 SOC 较高，达 6 g·kg^{-1}。博斯腾湖湖周 SOC 的含量变化较大(1 ~ 10 g·kg^{-1})，最大值出现在湖区西部的 2#样点和东北角的6#样点，最小值出现在东南部的 7#样点(图 4)。总的来说，博斯腾湖南岸和北岸的 SOC 低于西岸(图 4)。

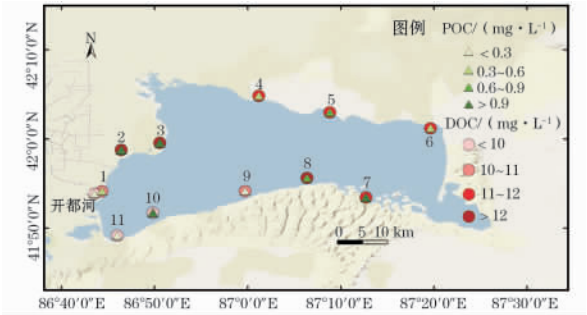


图 2 水体颗粒有机碳和溶解有机碳的浓度

Fig. 2 Concentrations of POC and DOC in lake water



图 4 水体总有机碳和土壤有机碳的浓度

Fig. 4 Concentrations of TOC and SOC in lake water

与 SOC 不同,开都河水体中 TOC 的浓度较低,仅为 10.8 mg·L^{-1}。博斯腾湖湖周西南部 TOC 的浓度较低,最小值出现在出湖口,入湖口和 10#样点的浓度也不高,均低于湖水均值(12 mg·L^{-1})。与 SOC 类似,TOC 的最大值亦出现在湖区西部的 2#样点,但 SOC 较低的 7#样点,TOC 却较高(13.2 mg·L^{-1})(图 4)。

3　讨论与结论

3.1　近 30 a 来博斯腾湖水体盐离子的变化

早期研究[18]显示,博斯腾湖水体的离子浓度在 20 世纪 80 年代后期为 1 845 mg·L^{-1},略高于本研究的离子浓度(1 669 mg·L^{-1})。其中阳离子没有大的变化,而阴离子总体有下降趋势。CO_3^{2-} 的浓度由 31 mg·L^{-1} 降至 17 mg·L^{-1},而 HCO_3^- 的含量则由 221 mg·L^{-1} 升高到 241 mg·L^{-1},表明近 30 a 来,博斯腾湖水体中无机碳由 CO_3^{2-} 向 HCO_3^- 转化。这可能与博斯腾湖水体的 pH 变化有关。早期的数据显示,80 年代后期博斯腾湖水体的 pH 为 8.54 ~ 8.90[15],而本研究发现,湖水目前的 pH 均值为8.34,不利于 CO_3^{2-} 的存在。据此可以推断,近 30 a 来博斯腾湖水体 pH 的降低导致了水体中 CO_3^{2-} 向 HCO_3^- 的转化。

3.2　博斯腾湖湖周水土理化指标的空间变化

本研究表明,博斯腾湖湖周水体的盐离子和有机碳都具有明显的空间分布特征。在测定的各个指标中,除 Ca^{2+} 外,其余各指标的含量均在开都河样点最低(表 1)。入湖口和出湖口各指标的含量也较低: 其大多数盐离子和有机碳(DOC 和 POC)的浓度均低于湖水均值。这说明开都河在一定程度上对博斯腾湖西南区域的湖水有稀释作用。同时也表明,由于入湖口和出湖口的位置距离较近,均在大湖区西南部较小的区域内,湖区中部和东部水体的交换能力较弱,从而使得开都河对博斯腾湖的影响在西南湖区比较显著,对其他湖区的影响有限。

博斯腾湖湖周表层土壤碳(SOC 和 SIC)的含量也具有明显的空间变化。湖周 SOC 和 SIC 的含量在南岸和北岸均较低,在西岸较高。这可能是因为西岸土壤以农田土和沼泽土为主,植被覆盖较多,而南岸和北岸以沙土为主,植被较少。通过对博斯腾湖水体碳(DOC、POC 和 TIC)与湖周表层土壤碳(SOC 和 SIC)的线性相关分析,发现湖泊水体各形态碳与土壤碳之间不存在显著的线性关系。这一结果表明,博斯腾湖水体中各形态的碳受周围土壤的影响不大,即陆源物质对湖泊水体碳的影响较小。

参考文献(References):

(1) 于浩,李宁. 湖泊碳循环及碳通量的估算方法(J). 环境科技,2008,21(增刊 2):1 - 5.(Yu Hao,Li Ning. Carbon cycle of lake and estimate method of air-water carbon dioxide exchange quantities(J). Environmental Science and Technology,2008,21(Suppl. 2):1 - 5.)

(2) 陈泮勤. 地球系统碳循环(M). 北京: 科学出版社,2004: 293 - 294.(Chen Panqin. The Carbon Cycle in the Earth System(M). Beijing: Science Press,2004: 293 - 294.)

(3) Downing J P,Meybcck M,Orr J,et al. Land and water interface zones(J). Water Air Soil Pollute,1993,70: 132 - 137.

(4) Houser J N,Bade D L,Cole J J,et al. The dual influences of dissolved organic carbon on hypolimnetic metabolism: Organic substrate and photosynthetic reduction(J). Biogechemistry,2003,64: 247 - 269.

(5) Duursma E K,Dawson R. Marine Organic Chemistry,Elsevier Oceanography: Series 31(M). Canada: Elsevier Scientific Publishing Company,1981: 415 - 437.

(6) 刘文臣,王荣. 海水中颗粒有机碳的研究简述(J). 海洋科学,1996(5): 21 - 23.(Liu Wenchen,Wang Rong. Review of the study on particulate organic carbon in sea waters(J). Marine Sciences,1996(5): 21 - 23.)

(7) 胡汝骥,姜逢清,王亚俊,等. 论中国干旱区湖泊研究的重要意义(J). 干旱区研究,2007,24(2): 137 - 140.(Hu Ruji,Jiang Fengqing,Wang Yajun,et al. On the importance of research on the lakes in arid land of China(J). Arid Zone Research,2007,24(2): 137 - 140.)

(8) Yoshioka T,Ueda S,Khodzher T,et al. Distribution of dissolved organic carbon in Lake Baikal and its watershed(J). Limnology,2002,3: 159 - 168.

(9) Hayakawa K,Sakamoto M,Murase J,et al. Distribution and dynamics of organic carbon in Fuxian Lake(J). Yunnan Geographic Environment Research,2002,14(2): 34 - 40.

(10) Imai A,Fukushima T,Matsushige K,et al. Fractionation and characterization of dissolved organic matter in a shallow eutrophic lake,its inflowing rivers,and other organic matter sources(J). Water Research,2001,35(17): 4 019 - 4 028.

(11) Hayakawa K. Seasonal variations and dynamics of dissolved carbohydrates in Lake Biwa(J). Organic Geochemistry,2004,35: 169 -

179.

〔12〕 刘从强. 生物地球化学过程与地表物质循环: 西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环〔M〕. 北京: 科学出版社,2007. 〔Liu Congqiang. Biogeochemical Processes and Surface Material Cycling: Southwest Karst Watershed Erosion and Biogenic Elements〔M〕. Beijing: Science Press,2007: 488 – 493.〕

〔13〕 黎文,吴丰昌,傅平青,等. 贵州红枫湖水体溶解有机质的剖面特征和季节变化〔J〕. 环境科学,2006,27(10): 1 979 – 1 985. 〔Li Wen,Wu Fengchang,Fu Pingqing,et al. Profile characteristics and seasonal variation of dissolved organic matter in Hongfeng Lake,Guizhou〔J〕. Environmental Science,2006,27(10): 1 979 – 1 985.〕

〔14〕 Ma L,Wu J L,Abuduwaili J. The climatic and hydrological changes and environmental responses recorded in lake sediments of Xinjiang,China〔J〕. Journal of Arid Land,2011,3(1): 1 – 8.

〔15〕 张建平,胡随喜. 博斯腾湖矿化度现状分析〔J〕. 干旱环境监测,2008,22(1): 19 – 23. 〔Zhang Jianping,Hu suixi. Salinity analysis of Bosten Lake〔J〕. Arid Environmental Monitoring,2008,22(1): 19 – 23.〕

〔16〕 金相灿,屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范〔M〕. 北京: 科学出版社,1990: 4 – 5. 〔Jin Xiangcan,Tu Qingying. The Standard Methods in Lake Eutrophication Investigation〔M〕. Beijing: Science Press,1990: 4 – 5.〕

〔17〕 Wang X J,Wang J P,Zhang J. Comparisons of three methods for organic and inorganic carbon in calcarous soils of northwest China〔J〕. 2012,PLoS ONE,7(8): e44334. doi: 10. 1371/journal. pone. 0044334.

〔18〕 金相灿. 中国湖泊环境〔M〕. 北京: 海洋出版社,1995: 350 – 355. 〔Jin Xiangcan. China Lake Environment〔M〕. Beijing: Ocean Press,1995: 350 – 355.〕

Spatial Distributions of Organic Carbon and Dissolved Ions in the Bosten Lake, Xinjiang

FANG Chuan-ling[1,2], WANG Xiu-jun[1,3], WANG Jia-ping[1,2]

(1. *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *Xinjiang, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; 3. *Earth System Science Interdisciplinary Center, University of Maryland, College Park, MD* 20740, *USA*)

Abstract: In order to study the spatial distribution of organic carbon, some water and topsoil samples were collected in and around the Bosten Lake in Xinjiang, China in November 2011. Particulate organic carbon (POC), dissolved organic carbon (DOC) and dissolved ions in water samples, and organic and inorganic carbon contents in soil samples were measured. The results showed that there was a wide range of POC ($0.1 – 1.2\ mg \cdot L^{-1}$) but a narrow one of DOC ($8.5 – 12.3\ mg \cdot L^{-1}$) in the Bosten Lake. Concentrations of POC and DOC near the inlet and outlet of the lake were similar to those in the Kaidu River, but much lower than the average values of the lake. Our analysis suggested that there might be a transformation of CO_3^{2-} to HCO_3^- in the Bosten Lake in recent 30 years. There was no significant correlation between soil carbon content and POC or DOC, which suggested that the effect of soil on carbon content in Bosten Lake water was not significant.

Key words: particulate organic carbon; dissolved organic carbon; soil carbon; dissolved ions; spatial distribution; Bosten Lake; Xinjiang