

# 青藏高原典型河流与湖泊表层水体碳 时空变化特征初步分析

赵登忠<sup>1a,1b</sup> 汪朝辉<sup>1a,1b</sup> 申邵洪<sup>1a,1b</sup> 谭德宝<sup>1a,1b</sup> 徐平<sup>1c</sup> 李其江<sup>2</sup>

(1. 长江科学院 a. 空间信息技术应用研究所; b. 流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室;  
c. 野外观测中心, 武汉 430010; 2. 青海省水文水资源勘测局, 西宁 810001)

**摘要:**为了研究青藏高原典型河流与湖泊水体碳时空变化特征,采集了典型河流、湖泊、冰川等水体样品,通过实验室测试分析获取了总碳、无机碳和有机碳观测数据。结果表明青藏高原典型河流与湖泊水体碳以无机碳为主、有机碳为辅。其中,长江、黄河和澜沧江源区典型河流与湖泊水体总碳平均含量分别为62.46、32.88、17.70 mg/L,长江南源当曲源、正源沱沱河源和北源楚玛尔河源水体总碳含量分别为32.90、36.56、32.90 mg/L;青藏高原封闭性湖泊水体碳含量比河流水体较高,封闭性湖泊水体总碳、总无机碳和总有机碳平均含量分别为403.82、398.35、1.24 mg/L,而河流水体则分别为17.03、14.56、2.46 mg/L,河流水体有机碳含量比封闭性湖泊水体较高。该成果可为我国青藏高原水域碳循环研究提供基础数据,对高海拔区域气候变化研究具有参考价值。

**关键词:**水体碳含量; 时空变化; 青藏高原; 河流与湖泊; 三江源

中图分类号: P342

文献标志码: A

文章编号: 1001-5485(2018)11-0013-07

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 1 研究背景

近几十年来,全球碳循环与气候变化已经引起各国科学家的关注和研究,其中内陆河流湖泊由于具有河网水系的传输性特征,对于水域碳物质输送迁移转化具有天然优势,在陆地与海洋碳循环系统之间起到联系纽带的作用,在全球碳循环系统中具有重要的地位<sup>[1-2]</sup>。目前气候变化研究领域科学家采用原位观测<sup>[3-4]</sup>、实验室分析<sup>[3-4]</sup>、碳同位素示踪<sup>[5]</sup>、遥感反演<sup>[6-7]</sup>等多种技术手段,在长江流域<sup>[3,8-10]</sup>、黄河流域<sup>[4,11]</sup>、珠江流域<sup>[12]</sup>、密西西比河流域<sup>[5-6]</sup>、典型岩溶水库<sup>[13]</sup>与湖泊<sup>[7]</sup>等区域开展大量观测与研究,从全流域角度研究分析了碳物质以水为载体进行内陆水域传输的基本规律与时空变化特征。湿地、湖泊、河流、水库、地下水等具有不同水动力特征的内陆水体碳传输机制显示出显著差异性,在岩溶性水体与非岩溶性水体之间无机碳与有机碳的比例表现为明显的区别<sup>[13]</sup>。国内外学者利用地面观测站网、卫星遥感、航空遥感等多种研究手段,在青藏

高原湖泊河流水沙特性<sup>[14-15]</sup>、水质变化<sup>[16]</sup>、河流与湖泊浮游动植物<sup>[17]</sup>、湖泊面积变化<sup>[18-19]</sup>、降水与水资源<sup>[20-22]</sup>、黑炭物质变化<sup>[23]</sup>、冰雪覆盖变化<sup>[24]</sup>、陆地碳循环<sup>[25]</sup>等领域开展了大量的研究,但对于高原河流与湖泊水体碳物质输送迁移转化还未得到充分研究。我国青藏高原高海拔区域碳循环过程对于气候变化非常敏感<sup>[26-27]</sup>,对于全球气候变化及江源水资源变化均具有重要影响。

因此,非常有必要对青藏高原典型河流与湖泊的水体无机碳、有机碳等不同形态碳含量的观测数据进行分析,以获取典型高原湖泊与河流水体碳时空变化特征,并与低海拔区域河流与湖泊相比较,对于研究我国青藏高原等高寒区域气候变化和保障水资源安全具有重要意义。

## 2 研究区概况与观测方案

### 2.1 研究区概况

青藏高原是我国最大、世界海拔最高的高原,被称为“世界屋脊”,与地球南极北极并列称为世界“第三极”,南起喜马拉雅山脉南缘,北至昆仑山、阿

收稿日期:2017-05-21;修回日期:2017-10-07

基金项目:水利部中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2017048/KJ, CKSF2017070/YB);中国清洁发展机制基金赠款项目(2013015);科技部软科学研究计划项目(2012GXS2B008);长江科学院院级创新团队及培育期创新团队建设(CKSF2017063/KJ)。

作者简介:赵登忠(1978-),男,山东莘县人,教授级高级工程师,博士,主要从事内陆水域碳循环与温室气体排放研究。E-mail: njzhaodz@163.com

尔金山和祁连山北缘,西部为帕米尔高原和喀喇昆仑山脉,东及东北部与秦岭山脉西段和黄土高原相接,介于 26°00'N—39°47'N,73°19'E—104°47'E 之间。青藏高原也是世界上湖泊数量最多、湖泊总面积最大的区域,其水文循环、能量循环、碳循环、水资源与生态系统变化等自然过程极其复杂。三江源区位于青藏高原腹地,平均海拔 4 200 m,总面积达 30.25 万 km<sup>2</sup>,是长江、黄河、澜沧江等众多著名大江大河发源地,素有“中华水塔”之称。三江源区为典型高原大陆性气候,大部分地区处于永冻层区,年平均气温大多在 -4℃ 以下,全年 0℃ 以下气温长达 7~8 个月,大多数月平均气温 ≤10℃,年平均降雨量为 250~350 mm,年日照射数为 2 467.7~2 789.1 h<sup>[28]</sup>。

### 2.2 观测方案

本文作者在 2014—2016 年连续 3 a 开展了 4 次观测实验,采集水样带回实验室分析,采样时间分别为 2014 年 7 月、2015 年 7 月、2016 年 6 月和 2016 年 8 月,每个采样时期断面空间分布如图 1 所示,分别位于长江源、黄河源、澜沧江源以及青藏高原其他区域,水样包括河流、湖泊、冰川等类型。其中 2014 年 7 月共 11 个采集断面,2015 年 7 月共计 10 个采集断面,2016 年 6 月共计 9 个采集断面,2016 年 8 月共计 19 个采集断面。水样采集后装入聚乙烯瓶,经过密闭处理带回实验室分析,使用平均孔径 0.7 μm 玻璃纤维滤膜进行水样过滤,然后采用德国元素公司 vario TOC 分析仪燃烧氧化-非分散红外吸收法(依据来源于中华人民共和国国家环境保护标准(HJ501—2009))对过滤后水样进行分析,获取水样总碳、有机碳、无机碳不同形态水体碳含量数据。

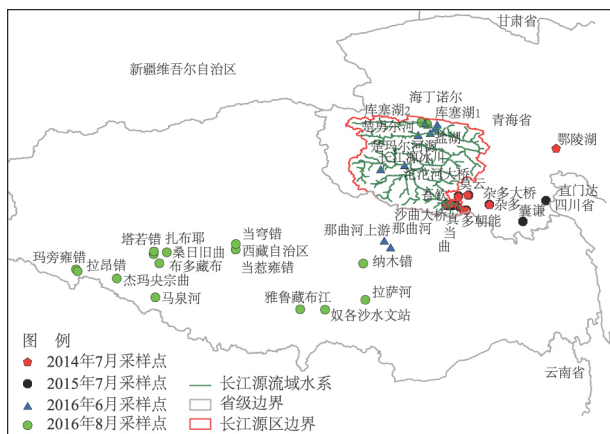


图 1 青藏高原典型河流湖泊水样采集断面位置分布  
Fig. 1 Spatial distribution of water sample sites for carbon analysis from typical rivers and lakes over the Tibetan Plateau

## 3 结果与讨论

### 3.1 三江源流域水文水环境分析

收集观测资料分析三江源典型气象与水文站降水量、流量及水质指标变化情况如图 2、图 3 和表 1 所示。从图 2 中可以看出,1956—2000 年期间,三江源中长江源代表站点直门达降水量最高,黄河源代表站点唐乃亥降水量最低,具有显著季节变化特征。从图 3 中可以看出,长江源直门达水文站流量最大,位于上游的雁石坪等其他水文站流量较低,并且具有明显的丰水年和枯水年之划分,均是在 7、8、9 月份流量达到年内最高。表 1 为长江源典型观测断面水质水环境变化情况<sup>[28]</sup>,从表 1 中可以看出,在沱沱河、直门达与雁石坪 3 个观测断面中长江水体 pH 值均在 8.0 左右波动变化,说明水体总体上呈现偏碱的状态。另外,水体溶解氧含量在直门达断面最高,大部分年份在 8.0 mg/L 以上,而位于最上游的沱沱河断面最低,可能与高海拔地区大气含氧量较低有关系。氨氮、高锰酸钾指数、总磷等其他指标相对于低海拔地区水体均处于较低水平。

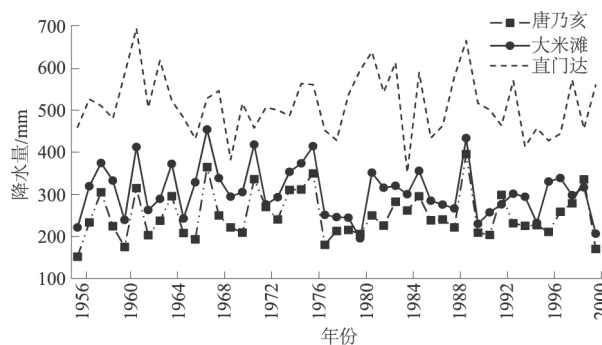


图 2 三江源区代表性观测站降水量多年变化过程  
Fig. 2 Yearly variation of precipitation at typical stations over Three-River Source area

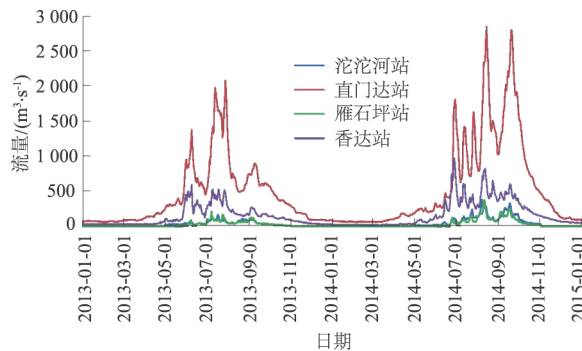


图 3 三江源区代表性水文站流量变化过程  
Fig. 3 Yearly variation of streamflow at typical hydrological stations over the Three-River Source area

表 1 三江源区典型观测断面水质变化情况

Table 1 Water equality variation at typical stations over the Three-Rivers Source area

断面名称	年份	pH	溶解氧/ (mg·L <sup>-1</sup> )	氨氮/ (mg·L <sup>-1</sup> )	高锰酸盐指数/ (mg·L <sup>-1</sup> )	5 d 生化需氧量/ (mg·L <sup>-1</sup> )	总磷/ (mg·L <sup>-1</sup> )
沱沱河	2003	8.3	6.0	0.29	1.7	NA	<0.01
	2005	8.2	7.1	0.18	1.7	1.6	0.06
	2006	8.2	7.2	0.18	1.4	1.2	0.08
	2007	8.2	6.7	<0.05	1.5	<2.0	0.02
	2008	8.6	7.4	<0.05	1.4	<2.0	0.03
	2009	8.4	7.0	0.13	2.6	1.1	0.02
雁石坪	2001	NA	8.2	0.10	1.2	NA	NA
	2003	NA	NA	0.19	1.6	NA	<0.01
	2005	7.7	6.8	0.08	0.9	1.6	0.02
	2006	7.9	7.1	0.12	0.7	0.8	0.01
	2007	8.2	7.1	0.06	0.8	0.7	0.02
	2008	8.3	7.2	<0.05	0.9	<2.0	0.02
直门达	2009	8.2	7.1	0.06	0.8	0.7	0.02
	2000	8.5	6.8	0.17	1.1	0.9	<0.01
	2001	8.5	6.5	0.10	1.0	1.1	<0.01
	2002	8.2	8.6	<0.05	0.6	0.6	<0.01
	2003	8.0	7.6	0.07	1.0	0.8	0.02
	2004	7.6	8.4	<0.05	1.0	1.1	<0.01
	2005	7.8	6.6	<0.05	1.0	1.1	0.02
	2006	8.2	8.2	0.06	1.0	1.2	0.02
	2007	8.1	9.9	<0.05	0.9	1.4	0.01
	2008	7.8	6.7	<0.05	1.1	2.1	0.01
2009	7.9	6.6	<0.05	1.5	1.6	0.01	

注: ①NA 代表数据缺失; ②数据来源于青海省环境监测中心

### 3.2 典型高原河湖水体碳含量时空变化分析

2014 年 7 月青藏高原典型河流与湖泊水体碳溶解碳含量变化如图 4 所示。

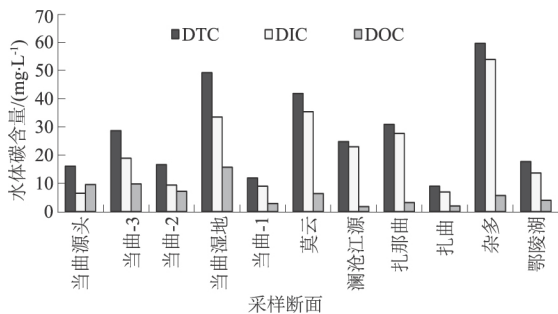


图 4 2014 年 7 月三江源典型河湖水体碳溶解碳含量变化  
Fig. 4 Change of dissolved carbon in surface water from typical rivers and lakes over the Three River Source Area in July, 2014

从图 4 中可以看出,青藏高原典型河流湖泊水体溶解总碳以无机碳为主,溶解总碳在 10.0 ~ 60.0 mg/L 范围内变化,在杂多断面最高,达到 59.6 mg/L,在扎曲断面最低,仅为 9.0 mg/L,水体溶解碳最低值与最高值均位于澜沧江源断面,表明澜沧江源水体碳含量变化幅度较大。对于长江当曲源,水体溶解总碳在 10.0 ~ 50.0 mg/L 范围内波动,溶解无机碳在 6.5 ~ 34.0 mg/L 范围内变化,而溶解有机碳含量则在 2.9 ~ 16.0 mg/L 范围内变化,其中水体溶解总碳平

均为 24.5 mg/L,溶解无机碳平均为 15.5 mg/L,溶解有机碳平均为 9.0 mg/L。在澜沧江源,水体碳含量总体上是以无机碳为主,有机碳仅占较小的比例,其中水体溶解总体平均为 33.2 mg/L,溶解无机碳平均为 29.4 mg/L,溶解有机碳平均为 3.8 mg/L。

2015 年 7 月典型高原湖泊与河流采集水样水体碳空间变化情况见图 5(a)。从图 5(a)中可以看出,长江当曲河流水体总碳、总无机碳和总有机碳平均含量分别为 40.6, 37.8, 2.9 mg/L,水体总碳和总无机碳最高含量水平均出现在沙曲大桥断面,分别达到 47.6, 43.8 mg/L,而总有机碳在多朝能最高,达到 6.6 mg/L。当曲源河流水体总碳和总无机碳含量从上游至下游呈现逐渐下降的空间分布格局,而有机碳含量水平同样表现出逐渐下降的变化趋势。说明位于当曲最上游的多朝能断面表现出与其他断面差异显著的特征,表明多朝能断面生物活动较为频繁。在澜沧江源区,河流水体总碳含量、总无机碳和总有机碳含量平均值分别为 41.4, 39.6, 1.8 mg/L,其最高值均呈现于莫云断面,分别达到 50.0, 47.1, 2.9 mg/L,从最上游的莫云断面到下游囊谦断面,水体总碳、总无机碳和总有机碳含量呈现为显著逐渐降低的空间变化特征。

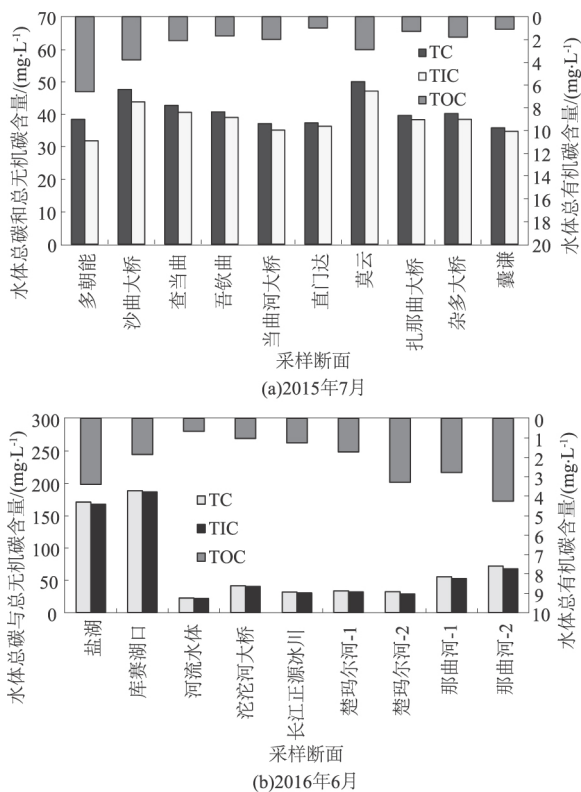


图5 三江源地区河流与湖泊水体碳含量变化  
Fig. 5 Change of carbon in surface water from typical rivers and lakes over Three-River Source Area

图5(b)为2016年6月青藏高原湖泊与河流水体碳含量时空变化分布图。从图5(b)中可以看出,盐湖和库赛湖总碳和总无机碳含量显著偏高,分别高达170.71,188.22 mg/L,而总无机碳含量分别达167.31,186.36 mg/L。位于库赛湖与海丁诺尔之间的河流水体断面,总碳、总无机碳和总有机碳含量分别为22.45,21.78,0.67 mg/L,处于较低水平。长江正源冰川断面总碳和总无机碳含量分别为31.67,30.41 mg/L。分析表明长江正源沱沱河水体总碳和总无机碳平均含量分别为36.56,35.41 mg/L,楚玛尔河水体总碳和总无机碳平均含量分别为32.90,30.39 mg/L,库赛湖等湖泊水体总碳和总无机碳平均含

量分别为127.13,125.15 mg/L。库赛湖等湖泊水体碳含量水平最高,楚玛尔河水体碳含量水平最低。有机碳最高含量出现在那曲,达到4.26 mg/L,盐湖和库赛湖有机碳含量分别为3.4,1.86 mg/L。

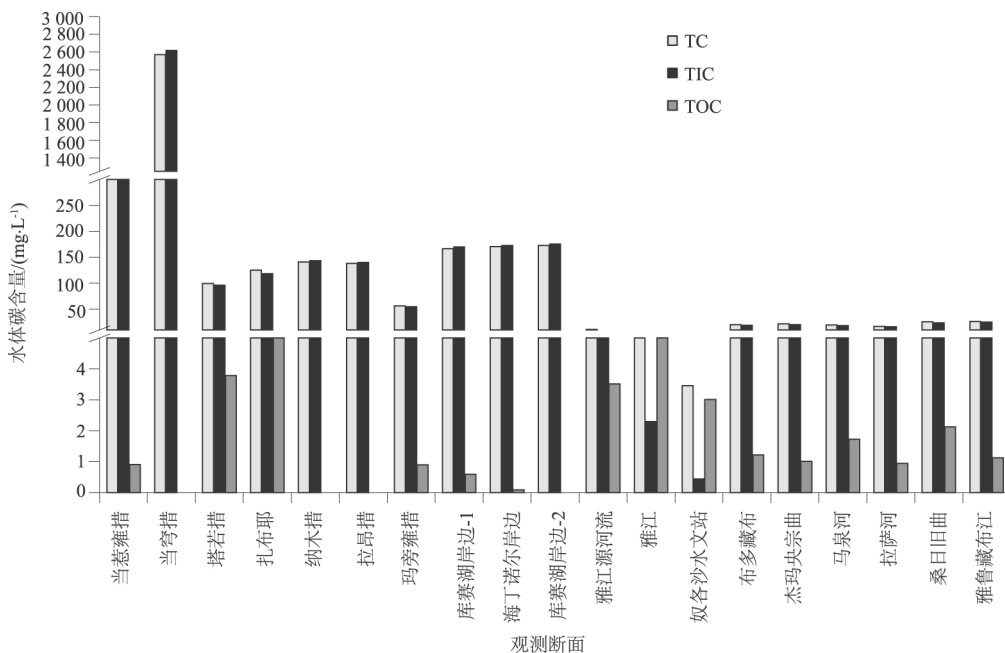


图6 2016年8月青藏高原与三江源地区河流与湖泊水体碳含量变化  
Fig. 6 Change of carbon in surface water from typical rivers and lakes over the Tibetan Plateau and Three-River Source Area in August, 2016

量分别为127.13,125.15 mg/L。库赛湖等湖泊水体碳含量水平最高,楚玛尔河水体碳含量水平最低。有机碳最高含量出现在那曲,达到4.26 mg/L,盐湖和库赛湖有机碳含量分别为3.4,1.86 mg/L。

2016年8月青藏高原典型河湖水体碳含量空间变化如图6所示。从图6中可以看出,当穹措断面总碳含量高达2570.2 mg/L,库赛湖水体碳在160.0 mg/L以上,说明青藏高原典型湖泊尤其是封闭性湖泊总无机碳含量比低海拔水体显著偏高,而有机碳含量则接近于0,说明封闭性湖泊生命活动比较微弱。水体总碳含量在奴各河水文站断面最低,仅为3.46 mg/L,且有有机碳占据较大比例,高达3.02 mg/L。水体有机碳在札布耶茶卡断面、雅江源河断面和雅鲁藏布江河流断面较高,分别高达6.12,3.52,7.47 mg/L。

### 3.3 江源区典型河湖水体碳含量空间变化及比较分析

青藏高原与三江源区典型湖泊与河流水体碳含量比较分析如表2和表3所示(*n*为样本数量)。从表2和表3中可以看出,长江、黄河和澜沧江源河流与湖泊水体总碳平均含量分别为34.91,32.88,17.70 mg/L,其中长江源水体总碳含量最高,库赛湖和盐湖较高总碳含量导致长江源总体上呈现较高状态。长江南源当曲源、正源沱沱河源和北源楚玛尔河源水体总碳含量分别为32.90,36.56,32.90 mg/L;南源当曲源、正源沱沱河源以及北源楚玛尔

表 2 长江源及其分源断面河流水体碳平均含量

Table 2 Mean carbon concentration in surface water from rivers over the Changjiang Source Area

源头名称	分源名称	样本数 <i>n</i>	水体碳含量/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )		
			TC	TIC	TOC
长江源	当曲源	10	32.90	26.76	6.14
	沱沱河源	2	36.56	35.41	1.15
	楚玛尔河源	2	32.90	30.39	2.51
	直门达	1	37.30	36.30	1.00
平均值		15	34.91	32.21	2.70

表 3 青藏高原江源河流与典型湖泊水体碳平均含量

Table 3 Mean carbon concentration in surface water from typical rivers and lakes over the Tibetan Plateau

江源河湖名称	样本数 <i>n</i>	水体碳含量/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )		
		TC	TIC	TOC
澜沧江源	10	32.88	29.43	3.45
黄河源	1	17.70	13.70	4.00
可可西里库塞湖盐湖	5	172.65	175.34	1.19
其他高原湖泊	10	403.82	398.35	1.24
其他高原河流	9	17.03	14.56	2.46

河源水体总无机碳含量则分别为 26.76, 35.41, 30.39  $\text{mg/L}$ , 以正源沱沱河源最高; 总有机碳在当曲源最高, 达到 6.14  $\text{mg/L}$ , 直门达水文站断面水体有机碳含量仅为 1.0  $\text{mg/L}$ 。

对比分析表明青藏高原湖泊水体碳含量相对于河流水体高得多, 湖泊水体总碳、总无机碳和总有机碳平均含量分别为 403.82, 398.35, 1.24  $\text{mg/L}$ , 而河流水体总碳、总无机碳和总有机碳平均含量分别为 17.03, 14.56, 2.46  $\text{mg/L}$ 。比较分析表明, 黄河水体溶解碳平均含量为 3.67  $\text{mg/L}$ <sup>[4]</sup>, 水布垭水库水体总碳、总无机碳、溶解有机碳和颗粒有机碳为 26.665, 24.089, 2.141, 0.438  $\text{mg/L}$ <sup>[29]</sup>。广西典型岩溶区地下水补给型水库表层无机碳含量从 122.88  $\text{mg/L}$  升高到 154.79  $\text{mg/L}$ <sup>[13]</sup>。上海长江口区域对水体溶解有机碳和颗粒有机碳平均含量分别为 1.59, 0.91  $\text{mg/L}$ <sup>[30]</sup>。研究结果表明青藏高原河流水体碳含量总体上比低海拔区域河流水体碳水平高, 尤其是属于咸水湖泊的库赛湖和盐湖水体无机碳较低海拔区域淡水湖泊高得多, 岩溶性地下水补给型水库接近。

## 4 结论与展望

本文在 2014—2016 年连续开展了青藏高原典型河湖水体碳野外观测实验, 获取了水体总碳、总无机碳、总有机碳等不同形态碳观测数据, 从长江源、黄河源以及澜沧江源等不同源区分析了水体碳空间分异特征, 发现 3 个江源区之间以及与典型高原封

闭性湖泊水体碳具有显著的差异性, 无机碳和有机碳含量占据比例差异也较大, 相对于低海拔湖泊河流水体碳时空变化表现为显著的独特特征。另外, 由于青藏高原和三江源区气候条件等生存环境恶劣, 水体样品采集与野外科学考察极为困难, 未来还需要采集数量更多空间范围更广泛的水样进行分析, 获取更加丰富的水环境、水资源与空间基础数据, 提高我国青藏高原及江源区水域碳循环研究水平。

致谢: 非常感谢长江科学院郭伟杰博士、赵伟华博士、殷大聪博士和周银军博士在科学考察和水样采集方面的大量工作, 特别感谢审稿专家的宝贵意见及编辑同志的辛勤劳动, 使本文更加严谨与完善。

## 参考文献:

- [1] IPCC. IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change 2013 (AR5): The Physical Science Basis [R]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013: 1–7.
- [2] 宋金明, 徐永福, 胡维平, 等. 中国近海与湖泊碳的生物地球化学. 科学出版社, 2008, 449–463.
- [3] LI S Y, LU X X, HE M, *et al.* Daily  $\text{CO}_2$  Partial Pressure and  $\text{CO}_2$  Outgassing in the Upper Yangtze River Basin: A Case Study of the Longchuan River, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 466/467: 141–150.
- [4] RAN L S, LU X X, SUN H, *et al.* Spatial and Seasonal Variability of Organic Carbon Transport in the Yellow River, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 498: 76–88.
- [5] CAI Y, GUO L, WANG X, *et al.* Abundance, Stable Isotopic Composition, and Export Fluxes of DOC, POC, and DIC from the Lower Mississippi River during 2006–2008 [J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2015, 120(11): 2273–2288.
- [6] CASTILLO C E D, MILLER R L. On the Use of Ocean Color Remote Sensing to Measure the Transport of Dissolved Organic Carbon by the Mississippi River Plume [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 836–844.
- [7] JIANG G J, MA R H, LOISELLE S A, *et al.* Remote Sensing of Particulate Organic Carbon Dynamics in an Eutrophic Lake (Taihu Lake, China) [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 532: 245–254.
- [8] YAO P, YU Z, BIANCHI T S. A Multiproxy Analysis of Sedimentary Organic Carbon in the Changjiang Estuary and Adjacent Shelf [J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2015, 120(7): 1407–1429.
- [9] WU Y, BAO H, YU H, *et al.* Temporal Variability of Particulate Organic Carbon in the Lower Changjiang (Yangtze River) in the post-Three Gorges Dam Period: Links to Anthropogenic and Climate Impacts [J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2016, 120(11): 2194–2211.

- [10] BAO H, WU Y, ZHANG J. Spatial and Temporal Variation of Dissolved Organic Matter in the Changjiang: Fluvial Transport and Flux Estimation [J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2015, 120 (9): 1870–1886.
- [11] RAN L, LU X X, YANG H, *et al.* CO<sub>2</sub> Outgassing from the Yellow River Network and Its Implications for Riverine Carbon Cycle [J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2015, 120(7): 1334–1347.
- [12] 魏秀国, 沈承德, 孙彦敏, 等. 珠江水体悬浮物颗粒有机碳稳定同位素组成及分布特征. *地理科学*, 2003, 23(4): 471–476.
- [13] 李建鸿, 蒲俊兵, 袁道先, 等. 岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响. *环境科学*, 2015, 36(8): 2833–2842.
- [14] 周银军, 闫霞, 金中武, 等. 澜沧江源扎那曲莫云段河型班别初步分析 [J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(3): 29–34.
- [15] 李志晶, 金中武, 周银军, 等. 长江南源当曲源头水沙特性初步分析 [J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(3): 35–37.
- [16] 黄茁, 刘玥晓, 赵伟华, 等. 长江源区近年水质时空分布特征探析 [J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(7): 46–50, 67.
- [17] 殷大聪, 许继军, 金燕, 等. 长江源与澜沧江源区浮游植物组成与分布特征研究 [J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(7): 46–50, 67.
- [18] 万玮, 肖鹏峰, 冯学智, 等. 卫星遥感监测近 30 年来青藏高原湖泊变化 [J]. *科学通报*, 2014, 59(8): 701–714.
- [19] LIAO J, SHEN G, LI Y. Lake Variations in Response to Climate Change in the Tibetan Plateau in the Past 40 Years [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2013, 6(6): 1–16.
- [20] 陈进, 许珍. 以三江源为例探讨江河源头确定原则 [J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(3): 23–28.
- [21] GAO W, SUI C, FAN J, *et al.* A Study of Cloud Microphysics and Precipitation over the Tibetan Plateau by Radar Observations and Cloud Resolving Model Simulations [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2016, 121.
- [22] PIAO S H, CIAIS P, HUANG Y. The Impacts of Climate Change on Water Resources and Agriculture in China [J]. *Nature*, 2010, 467(7311): 43–51.
- [23] WANG M, XU B, WANG N, *et al.* Two Distinct Patterns of Seasonal Variation of Airborne Black Carbon over Tibetan Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 573: 1041.
- [24] ZHANG B, WU Y, LEI L, *et al.* Monitoring Changes of Snow Cover, Lake and Vegetation Phenology in Nam Co Lake Basin (Tibetan Plateau) Using Remote Sensing (2000–2009) [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2013, 39(2): 224–233.
- [25] LI C, LI Q, ZHAO L, *et al.* Land-use Effects on Organic and Inorganic Carbon Patterns in the Topsoil around Qinghai Lake Basin, Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Catena*, 2016, 147: 345–355.
- [26] SONG W, WANG H, WANG G. Methane Emissions from an Alpine Wetland on the Tibetan Plateau: Neglected but Vital Contribution of the Nongrowing Season [J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2015, 120(8): 1475–1490.
- [27] PERGA M, MABERLY S C, JENNY J, *et al.* A Century of Human-driven Changes in the Carbon Dioxide Concentration of Lakes [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2016, 30(2): 93–104.
- [28] 青海省测绘局. 三江源头科学考察报告 [R]. 西宁: 青海省测绘局, 2009.
- [29] 赵登忠, 肖潇, 汪朝辉, 等. 水布垭水库水体碳时空变化特征及其影响因素分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(2): 304–313.
- [30] 林晶, 吴莹, 张经, 等. 长江有机碳通量的季节变化及三峡工程对其影响 [J]. *中国环境科学*, 2007, 27(2): 246–249.

(编辑: 姜小兰)

## Temporal and Spatial Changes of Carbon in Water from Typical Rivers and Lakes over the Tibetan Plateau

ZHAO Deng-zhong<sup>1,2</sup>, WANG Zhao-hui<sup>1,2</sup>, SHEN Shao-hong<sup>1,2</sup>, TAN De-bao<sup>1,2</sup>, XU Ping<sup>3</sup>, LI Qi-jiang<sup>4</sup>  
 (1. Spatial Information Technology Application Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. Hubei Provincial Key Lab of Basin Water Resources and Eco-environment Sciences, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 3. Field Scientific Observation Centre, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 4. Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Qinghai Province, Xi'ning 810001, China)

**Abstract:** Consecutive field investigations and observations were carried out over the Tibetan Plateau from 2014 to 2016 in order to obtain the temporal and spatial distribution of carbon in water from typical high-altitude rivers and

lakes. Water from typical rivers , lakes and ice points were sampled to be analyzed using the vario TOC analyzer from German Elementar corporation in our laboratory. The total carbon concentration , total inorganic carbon concentration and total dissolved organic carbon concentration were obtained. Preliminary results show that inorganic carbon is the major form whereas organic carbon is the auxiliary form of carbon in water from typical rivers and lakes in the Tibetan Plateau and source region of three rivers , namely the Changjiang River , the Yellow River , and the Lancang River. The averaged concentration of total carbon in water from typical rivers and lakes over the source region of Changjiang River , Yellow River and Lancang River source area was 62.46 mg/L , 32.88 mg/L , and 17.70 mg/L , respectively; while the total carbon concentration in the Dangqu River source ( southern source) , the Tuotuo River source ( main source) and the Qumar River ( northern source) was 32.90 mg/L , 36.56 mg/L , and 32.90 mg/L , respectively. Over the Tibetan Plateau , the total carbon concentration and total inorganic carbon concentration in surface water from typical lakes ( 403.82 mg/L and 398.35 mg/L , respectively) were much higher than those from typical rivers ( 17.03 mg/L and 14.56 mg/L , respectively) ; however , total organic carbon concentration displayed an opposite trend , with 1.24 mg/L in lakes and 2.46 mg/L in rivers. The research results are of vital importance for the climate change and water resources and eco-environmental safety in the Tibetan Plateau and the source region of the three rivers.

**Key words:** carbon concentration in surface water; temporal and spatial changes; Tibetan Plateau; rivers and lakes; source of Three Rivers

~~~~~  
(上接第 6 页)

## Research Progress of Corrosion Damage and Diagnosis of Prestressed Anchorage Structures in High Slope

ZHU Jie-bing<sup>1</sup> , WANG Xiao-wei<sup>1 2</sup>

( 1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources , Yangtze River Scientific Research Institute , Wuhan 430010 , China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

**Abstract:** Since prestressed anchorage structures in high slope are surrounded by complicated environment , the prestressed anchor cable( rod) in slope will damage or fail after long time service caused by comprehensive factors such as electrochemical corrosion , local stress , stress corrosion and others , further resulting in slope failure. Research on corrosion damage and diagnosis of prestressed anchor structures are of great significance. In this paper , the main research findings and advances of prestressed anchorage structures in China and abroad are reviewed from four aspects: corrosion damage mechanism and influential factors of prestressed anchorage structure , non-uniform corrosion behavior , deterioration law under corrosion condition , and corrosion assessment and health diagnosis. The trend and prospect of durability research are also discussed from the above four aspects.

**Key words:** prestress; anchorage; high slope; corrosion damage; health diagnosis; durability

本刊投稿网址 : <http://ckyyb.crsri.cn>