

## 亚热带河口区水库 DOC 和 DIC 浓度时空变化特征\*

杨平<sup>1,2,3</sup>, 唐晨<sup>1,2</sup>, 陆苗慧<sup>2</sup>, 张林海<sup>1,2,3</sup>, Yang Hong<sup>4</sup>, 全川<sup>1,2,3\*\*</sup>, 吕敏<sup>1,2,5</sup>

(1: 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007)

(2: 湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福州 350007)

(3: 福建师范大学亚热带湿地研究中心, 福州 350007)

(4: Department of Geography and Environmental Science, University of Reading, Reading, RG6 6AB, UK)

(5: 邵阳学院城乡建设学院, 邵阳 422000)

**摘要:** 沿海水库汇聚并埋藏着大量的碳, 是全球碳循环的重要区域. 水体溶解有机碳 (DOC) 和溶解无机碳 (DIC) 的生物地球化学行为是水库碳循环研究的重要组成部分, 对其系统生物过程和生态环境变化具有重要的影响. 为了解亚热带河口区文武砂水库表层水体 DOC 和 DIC 的时空分布特征, 本研究于 2018 年 11 月、2019 年 3 月和 6 月分别对库区表层水进行多空间点位采样分析. 结果表明, 研究期间, 文武砂水库表层水体 DOC 和 DIC 浓度变化范围分别介于 0.10~21.13 和 0.38~34.94 mg/L, 其均值分别为 (4.09±0.18) 和 (15.83±0.24) mg/L, 最大值分别出现在夏季和秋季; 空间分布趋势, 整体表现为北库区>南库区, 且由库区周边的浅水区向库区中心的深水区域呈现出递减的趋势; 浮游植物光合作用强度是影响库区 DOC 和 DIC 浓度的季节变化的重要因素, 而外源污染输入强度是引起库区 DOC 和 DIC 浓度空间变化的重要因素. 本文结果扩展对水库碳循环的认知, 对提高水库水质也提供了有益参考.

**关键词:** 文武砂水库; 溶解有机碳; 溶解无机碳; 时空变化; 废水排放; 亚热带河口

## Spatiotemporal variations in water dissolved organic carbon and dissolved inorganic carbon concentrations in Wenwusha Reservoir in subtropical estuary, Southeast China\*

Yang Ping<sup>1,2,3</sup>, Tang Chen<sup>1,2</sup>, Lu Miaohui<sup>1,2</sup>, Zhang Linhai<sup>1,2,3</sup>, Yang Hong<sup>4</sup>, Tong Chuan<sup>1,2,3\*\*</sup> & Lv Min<sup>1,2,5</sup>

(1: School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, P.R.China)

(2: Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fuzhou 350007, P.R.China)

(3: Research Centre of Wetlands in Subtropical Region, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, P.R.China)

(4: Department of Geography and Environmental Science, University of Reading, Reading, RG6 6AB, UK)

(5: School of Urban and Rural Construction, Shaoyang University, Shaoyang 422000, P.R.China)

**Abstract:** Coastal reservoirs receive and accumulate a large amount of carbon; therefore, they are important areas for global carbon cycling. The biogeochemical cycles of dissolved organic carbon (DOC) and dissolved inorganic carbon (DIC) are important components of coastal reservoir carbon cycle, with significant effects on biological process and environmental change. This study was conducted to analyze the spatiotemporal variation in DOC and DIC concentrations at Wenwusha Reservoir, a subtropical coastal reservoir in Southeast China, based on the high spatial resolution filed sampling in November 2018 (autumn), March 2019 (spring), and June 2019 (summer). The results showed that the DOC and DIC concentrations of the surface water in Wenwusha Reservoir during the research period changed in the ranges of 0.10–21.13 mg/L, 0.38–34.94 mg/L, with mean values of 4.09±0.18 mg/L and 15.83±0.24 mg/L, respectively. Temporally, concentrations of DOC and DIC in the reservoir showed the highest

\* 2020-07-24 收稿; 2020-10-26 收修改稿.

国家自然科学基金项目 (41801070, 41671088)、福建省教育厅中青年骨干教师教育科研项目 (JT180065) 和湖南省自然科学基金项目 (2018JJ3476) 联合资助.

\*\* 通信作者; E-mail: tongch@fjnu.edu.cn.

values in summer and autumn, respectively. Spatially, DOC and DIC concentrations in the northern part of the reservoir were higher than those in the southern part. Furthermore, the DOC and DIC concentrations decreased along a gradient from shallow water (< 1 m) to deeper water (>3 m) in the reservoir. The seasonal variations in DOC and DIC concentrations were mainly influenced by phytoplankton photosynthesis, while the spatial changes of DOC and DIC concentrations were primarily affected by exogenous input (e.g., sewage discharge and river flow). The results improve the understanding of carbon cycling in aquatic ecosystem and also be helpful for improving water quality in reservoirs.

**Keywords:** Wenwusha Reservoir; dissolved organic carbon; dissolved inorganic carbon; spatio-temporal variation; sewage discharge; subtropical estuary

碳作为一种基本生源要素,是整个生物圈物质循环和能量流动的主体,参与了地表生态系统大部分的生物地球化学循环过程<sup>[1-2]</sup>,与全球气候变化密切相关<sup>[3-4]</sup>.因此,碳循环研究一直是全球气候变化研究所关注的焦点与热点<sup>[5-7]</sup>.陆域水生生态系统作为地表生态系统的重要组成部分,汇聚并埋藏着大量的碳<sup>[8-9]</sup>,是全球碳循环中的重要源与汇,对于全球气候变化具有重要意义.

根据组成形态,参与水体环境生物地球化学过程的碳可划分为溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、溶解无机碳(dissolved inorganic carbon, DIC)、颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)和颗粒无机碳(particulate inorganic carbon, PIC)4种形式<sup>[4]</sup>.DOC和DIC是陆域水生生态系统中碳的2种主要存在形式<sup>[10-12]</sup>,对其系统结构和功能的稳定具有重要的影响.就水体DOC而言,其组成十分复杂,主要包括各类可溶性腐殖酸、富里酸以及碳水化合物<sup>[11,13]</sup>.通常,水体DOC主要源自于流域内土壤有机质的侵蚀、污水排放、浮游植物光合作用产物的释放及内源性碎屑物质的分解等<sup>[2,14-17]</sup>.DOC为水体微生物生长、代谢等生命活动提供基质,是水体环境异养微生物循环的基础<sup>[18-19]</sup>;更为重要的是,DOC会影响水体环境光场和酸碱度,高浓度或过量的DOC不仅会造成水体透光性降低,阻碍水体特别是深层水体对太阳辐射的吸收,某些情况下还会造成水体酸化<sup>[20-21]</sup>,进而影响到水生生态系统的功能<sup>[21-22]</sup>.此外,DOC作为异养微生物的主要营养源,不但与氮、磷、硅等养分之间存在耦合关系,还会通过与DIC之间的转化影响着环境污染物质的迁移和降解<sup>[2]</sup>.对于水体DIC来说,主要来自陆地基岩的化学风化、土壤层中植物根系呼吸及有机质分解和大气CO<sub>2</sub>的溶解<sup>[16,23]</sup>,其主要包括无机碳酸盐、碳酸氢盐、碳酸及二氧化碳气体等组分,可通过一系列热力学平衡构成的CO<sub>2</sub>体系,在缓冲水体酸碱度、指示发生在水体环境中的光合作用和呼吸作用方面扮演着重要角色<sup>[1,24-25]</sup>.由此可见,DOC和DIC在陆域水生系统生物地球化学循环中起到十分重要的作用,是影响水环境变化和水生态过程的重要环境因子.

水库、湖泊等水生系统作为流域内物质的主要汇集场所,其系统中的DOC和DIC生物地球化学过程活跃,是区域碳循环不可忽视的一部分<sup>[26-28]</sup>.在全球变暖背景下,不同地区湖、库系统DOC和DIC生物地球化学过程已引起研究人员的广泛关注.当前,湖库系统DOC和DIC浓度时空变化规律及其机制研究是国内外水体环境碳循环过程研究的重要内容,并取得诸多进展<sup>[13,21,27-35]</sup>.但已有研究主要聚焦于内陆湖泊系统,对于水库,特别是受人类活动影响较强烈且水体含有一定盐度的沿海地区的水库研究十分薄弱.为了更好地了解滨海地区水库系统DOC和DIC的时空分布特征,本文对位于福建省福州市长乐区滨海新城南部的文武砂水库水体DOC和DIC进行了研究,以期为今后深入开展沿海水库水体碳生物地球化学循环的主要过程研究提供基础数据和科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

文武砂水库(25°49'36"~25°54'0"N, 119°35'12"~119°38'11"E)位于福建省福州市长乐区滨海新城南部,是一座利用天然河道和人工围垦而形成的具有排洪除涝、防潮、灌溉和生活用水等综合功用的小型水库.该水库所在区域属于中亚热带和南亚热带海洋性季风气候的过渡区,暖热湿润,年平均气温和降水量分别为19.3℃.流域内降雨量充沛,多年平均降水量为1390 mm,但年内分配不均,春夏季多雨,4-9月降雨量约占全年的70%~77%.文武砂水库由旧文武砂水库(本文称为北库区)和被人类围垦的外文武河(本文称为南库区)组成.文武砂水库于1956年3月动工兴建,1958年7月建成,总长度1.6 km,该水库水域南北长而

东西窄. 北库区上接长乐市南洋水网, 集雨区总面积 259 km<sup>2</sup>, 库区面积为 1.9 km<sup>2</sup>, 库容为 1.40×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>. 2002 年, 为减少台风的影响, 长乐市政府开始建设外文武围垦工程, 2004 年秋季外文武海堤建成. 外文武围垦工程围垦面积达 12.66 km<sup>2</sup>, 海堤由南、北两段组成, 全长 4.04 km, 故此, 在十八孔闸至外文武海堤间形成了南库区, 其水域面积为 3.3 km<sup>2</sup>, 汇流面积为 277 km<sup>2</sup>, 库容为 1.69×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 泄七镇及一乡的洪水, 是福建省重点水利项目.

1.2 样品采集与现场测定

根据文武砂水库水体的形态特征及其周边工农业生产活动实际情况, 在该水库的南库区和北库区分别布设 11 条和 10 条水样采样断面. 根据水面宽度, 每条采样断面上选取 3~10 个样品采集点, 共 103 个水样采集点(图 1), 其水面空间点位布设的密度为每平方公里的水域面积约 20 个采样点位. 野外水样采集工作分别在 2018 年 11 月、2019 年 3 月和 2019 年 6 月进行, 共采集 3 次. 每次采样过程均通过小型内燃机船来完成. 每个采样站点, 利用有机玻璃采水器采集水库表层 20 cm 深处的水样 2 份. 一份水样装入预先清洗干净的 250 mL 棕色聚乙烯塑料瓶中, 用于水体叶绿素 a(Chl.a) 浓度测定分析. 另外一份水样倒置于预先清洗干

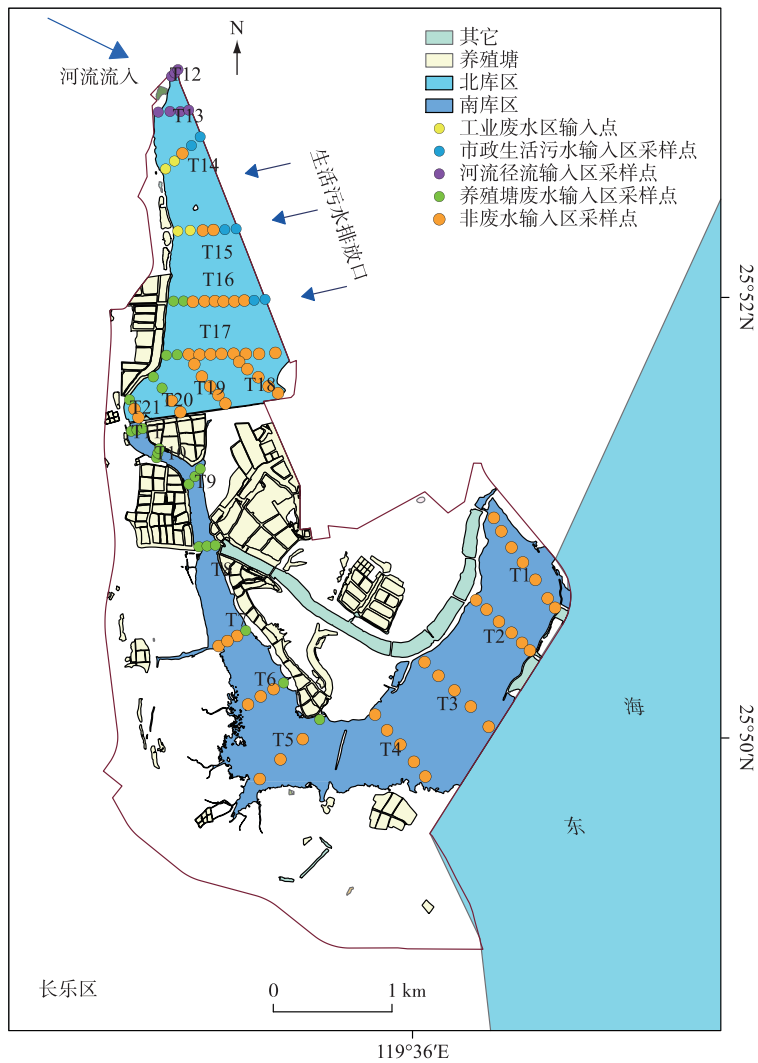


图 1 文武砂水库采样点位置

Fig.1 Study area and the sampling sites in the Wenwusha Reservoir

净的 150 mL 白色聚乙烯水样瓶中,用于水体溶解性有机碳(DOC)和溶解性无机碳(DIC)浓度测定分析. 待水样瓶装满后,立刻向瓶中加入 2 mL 的饱和  $\text{HgCl}_2$  溶液固定,抑制水样中的微生物活性<sup>[1,36-37]</sup>. 所有水样均置于保温箱中低温遮光保存,于 6 h 内运回实验室.

与水样采集同步,利用便携式仪器测定原位水温、pH、盐度、电导率(EC)和溶解氧(DO)等表层水体理化指标. 水温和 pH 值采用 IQ150 便携式 pH/氧化还原电位/温度计(IQ Scientific Instruments, 美国)测定,盐度、电导率和溶解氧分别采用便携式电导仪(2265FS EC, Spectrum Technologies, 美国)、盐度计(Eutech Instruments-Salt6, 美国)和多参数水质监测仪(HORIBA, Japan).

### 1.3 样品测试分析

返回实验室后,立即用预先 450℃ 灼烧过的 0.45  $\mu\text{m}$  玻璃纤维滤膜过滤,过滤后的水样用于测定水体 DOC 和 DIC 浓度<sup>[1,37]</sup>. 滤液采用 TOC-V<sub>CPH</sub> 总有机碳分析仪(Shimadzu, Japan)测定分析 DOC 和 DIC 浓度. 检测限为 4  $\mu\text{g/L}$ ,精密度 1.0% 以内. 用于水体 Chl.*a* 浓度分析的样品先采用未灼烧过的 0.45  $\mu\text{m}$  玻璃纤维滤膜过滤;然后,将滤膜剪碎后放入离心管中,用 10 mL 纯度 90% 的丙酮溶液低温萃取 24 h;离心 10 min 后,取上清液用紫外-可见分光光度计(岛津 UV-2450, Japan)测定分析其吸光值. Chl.*a* 浓度计算公式参考已有文献<sup>[38-39]</sup>报道,最终结果以  $\mu\text{g/L}$  表示.

### 1.4 数据统计分析

数据采用 Arcgis 10.2 软件(ESRI Inc., Redlands, CA, 美国)和 OriginPro 7.5 软件(OriginLab Corporation, Northampton, MA, 美国)进行作图分析,SPSS 17.0 统计软件(SPSS Inc., 美国)进行差异性和相关性分析. 为探讨库区周边废水输入对水库 DOC 和 DIC 浓度空间分布的影响,本研究根据废水输入来源,把水库划分为工业废水输入区、市政生活污水输入区、养殖塘废水输入区、河流输入区和非废水输入区. 同时,根据水体透明度和 DOC、DIC 浓度的变化,把水库划分为 <1 m、1~3 m 和 >3 m 水深区域,以此来探讨水库不同水深区域 DOC 和 DIC 浓度空间分布特征. 水体 DOC 和 DIC 浓度的时空变异性系数(coefficient of variation,  $C_v$ )基于其碳浓度标准差/均值获得. 对于符合正态分布的数据,当其通过方差齐性检验( $P>0.05$ )时,则采用 LSD 法(least significant difference test)检验同一采样时刻不同废水输入区(或不同水深区域)间水库 DOC 和 DIC 浓度差异性;若其不能通过方差齐性检验( $P<0.05$ )时,则采用 Tamhane's T2 进行差异显著性检验. 同一采样时刻南、北库区间的水体 DOC 和 DIC 浓度的差异显著性检验采用 SPSS 17.0 中的独立样本  $t$  检验进行统计分析. 水体 DOC、DIC 浓度与环境变量间的相关关系采用 SPSS 17.0 中的 Pearson 相关分析法进行统计分析. 以  $P<0.05$  作为显著相关, $P<0.01$  作为极显著相关. 文中的一般线性回归具体模型选择是根据回归方程拟合时的拟合优度判定系数  $R^2$  值高低来确定. 文中误差线均为标准差.

## 2 结果

### 2.1 水库表层水体主要理化性质变化特征

图 2 为采样期间文武砂水库表层水体主要理化性质的变化情况. 水温和 pH 在秋季、春季和夏季的均值分别为  $(18.35\pm 0.14)^\circ\text{C}$  和  $10.69\pm 0.03$ 、 $(22.89\pm 0.37)^\circ\text{C}$  和  $8.62\pm 0.16$ 、 $(28.20\pm 0.33)^\circ\text{C}$  和  $6.83\pm 0.18$ ,均呈现出夏季>春季>秋季的特征(图 2a 和图 2b);水体 DO 浓度在秋季、春季和夏季的均值分别为  $(5.60\pm 0.37)$ 、 $(12.29\pm 0.84)$  和  $(4.99\pm 0.25)$  mg/L,呈现出春季>秋季>夏季的特征(图 2c);水体 EC 和盐度在秋季、春季和夏季的均值分别为  $(4.44\pm 0.47)$  mS/cm 和  $2.05\text{‰}\pm 0.23\text{‰}$ 、 $(1.26\pm 0.06)$  mS/cm 和  $8.62\text{‰}\pm 0.16\text{‰}$ 、 $(0.72\pm 0.04)$  mS/cm 和  $0.45\text{‰}\pm 0.03\text{‰}$ ,亦均呈现出夏季>春季>秋季的特征(图 2d, e). 差异性分析结果显示,采样期间水体温度在南、北库区间的差异性不显著( $P>0.05$ ),除春季外,其它 2 个季节采样期间的水体 pH 值在南、北库区间的差异性亦均不显著( $P>0.05$ );但水体 DO、EC 和盐度均呈现出南库区显著高于北库区的特征( $P<0.05$ ).

### 2.2 水库表层水体 DOC 和 DIC 浓度变化特征

2.2.1 季节变化特征 研究期间,文武砂水库表层水体 DOC 和 DIC 浓度变化范围分别为 0.10~21.13 和 0.38~34.94 mg/L. 随着采样季节变化,水库表层水体 DOC 浓度在秋季、春季和夏季的均值分别为  $(2.35\pm 0.17)$ 、 $(4.17\pm 0.17)$  和  $(5.74\pm 0.41)$  mg/L,呈现出夏季>春季>秋季的特征;而水体 DIC 浓度在秋季、春季和夏

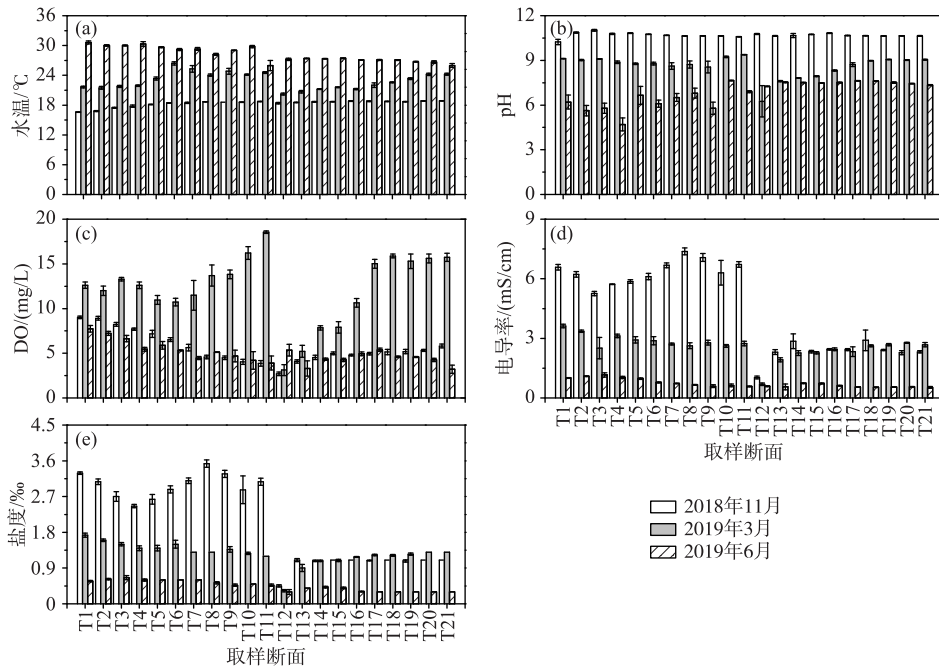


图2 文武砂水库不同取样断面表层水体温度、pH、DO、EC 和盐度变化特征

Fig.2 Variations in water temperature, pH, dissolved oxygen, EC and salinity in the surface water (20-cm depth) at the different sampling transects from the Wenwusha Reservoir during each sampling campaign

季的均值分别为  $(17.25 \pm 0.38)$ 、 $(15.85 \pm 0.37)$  和  $(14.39 \pm 0.42)$  mg/L, 呈现出秋季>春季>夏季的特征(图3)。

2.2.2 空间变化特征 图4为文武砂水库表层水体 DOC 浓度在南、北两个库区间的变化情况。北库区表层水体 DOC 浓度在秋季、春季和夏季采样期间的变化范围分别介于 2.19~6.93、1.53~11.90 和 3.84~21.13 mg/L, 均值分别为  $(3.47 \pm 0.08)$ 、 $(4.41 \pm 0.15)$  和  $(8.33 \pm 0.43)$  mg/L。南库区表层水体 DOC 浓度在秋季、春季和夏季的变化范围分别介于 0.10~7.54、2.09~8.39 和 1.06~13.00 mg/L, 均值分别为  $(1.00 \pm 0.21)$ 、 $(3.89 \pm 0.21)$  和  $(2.14 \pm 0.31)$  mg/L。差异性分析结果显示,除春季外,其它两个季节采样期间的水体 DOC 浓度均呈现出北库区显著高于南库区的特征( $P < 0.001$ , 表1)。整体上,呈现出北库区水体 DOC 浓度显著高于南库区的特征( $P < 0.001$ , 表1)。

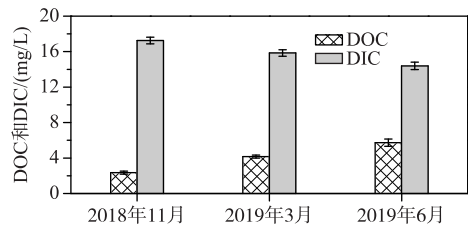


图3 文武砂水库水体表层 DOC 和 DIC 浓度的季节变化

Fig.3 Seasonal variation in DOC and DIC concentration in the surface water of the Wenwusha Reservoir

表1 文武砂水库 DOC 和 DIC 浓度在不同库区间的差异性分析(独立样本 t 检验)

Tab.1 Summary of independent samples t-test that examining the effect of sampling zones on water DOC and DIC concentrations in the Wenwusha Reservoir

指标	2018年11月		2019年3月		2019年6月		全部采样季节	
	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值
DOC	3.174	<0.001	0.593	0.119	19.174	<0.001	12.208	<0.001
DIC	4.125	<0.001	0.003	<0.001	3.286	<0.001	1.710	0.208

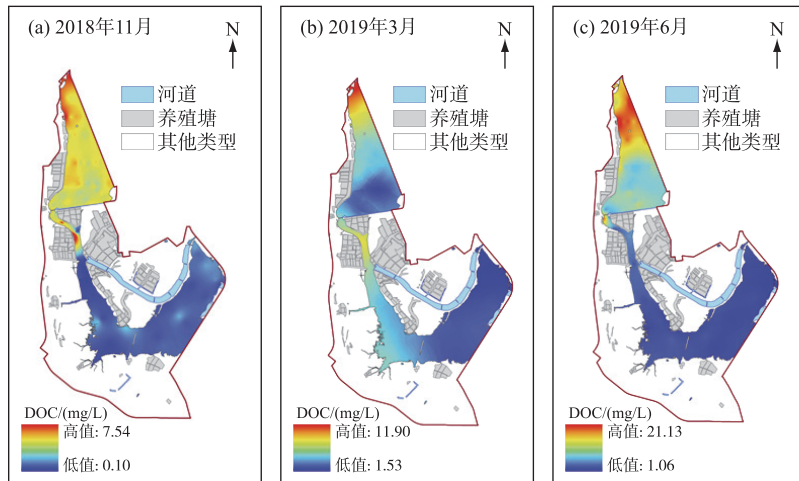


图4 文武砂水库 DOC 浓度在不同库区的比较

Fig.4 Comparison of DOC concentration among different zones in the Wenwusha Reservoir

图5为文武砂水库表层水体 DIC 浓度在南、北两个库区间的变化情况. 在秋季、春季和夏季采样期间, 北库区表层水体 DIC 浓度变化范围分别介于 13.14~30.20、12.50~34.94 和 0.38~19.96 mg/L, 均值分别为  $(18.46\pm 2.53)$ 、 $(15.16\pm 2.30)$  和  $(11.81\pm 2.86)$  mg/L. 南库区表层水体 DIC 浓度在秋季、春季和夏季的变化范围分别介于 10.34~24.11、10.89~21.47 和 11.11~30.84 mg/L 之间, 均值分别为  $(15.23\pm 0.53)$ 、 $(14.22\pm 0.45)$  和  $(17.08\pm 0.59)$  mg/L. 差异性分析结果显示, 在秋季和春季采样期间文武砂水库 DIC 浓度呈现出北库区显著高于南库区的特征 ( $P<0.001$ , 表 1).

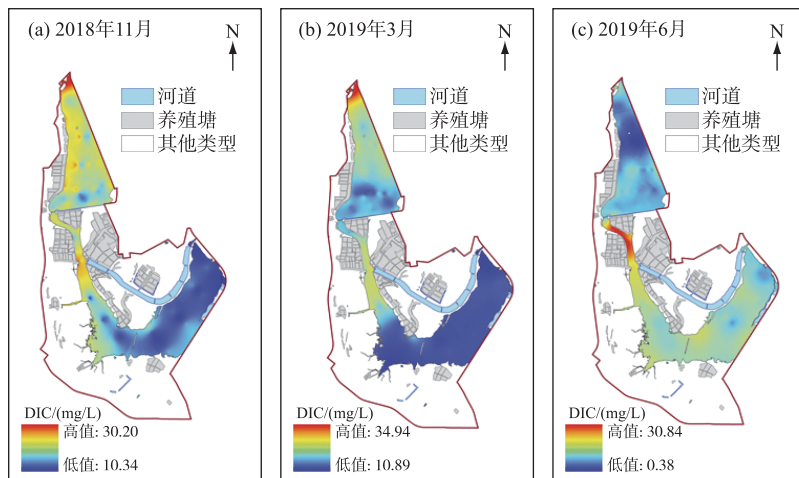


图5 文武砂水库 DIC 浓度在不同库区的比较

Fig.5 Comparison of DIC concentration among different zones in the Wenwusha Reservoir

图6为文武砂水库 DOC 和 DIC 浓度在不同水深区域变化的空间分布特征. 研究期间, 水库 DOC 浓度在水深  $<1$  m、 $1\sim 3$  m 和  $>3$  m 区域变化范围分别介于  $(2.45\pm 0.39) \sim (6.09\pm 0.73)$ 、 $(2.31\pm 0.27) \sim (5.86\pm 0.72)$  和  $(2.24\pm 0.31) \sim (5.14\pm 0.61)$  mg/L 之间 (图 6a), 均值分别为  $(4.40\pm 1.06)$ 、 $(3.97\pm 1.03)$  和  $(3.77\pm 0.84)$  mg/L. 就具体季节而言, DOC 浓度在秋季采样期间在不同水深区域间的差异性不显著 ( $P>0.05$ , 图 6a), 但其浓度

在春季和夏季期间呈现出水深<1 m 区域显著高于水深 1~3 m 和>3 m 区域( $P<0.05$ , 图 6a). DIC 浓度在上述 3 个水深区域变化范围分别介于(15.82±0.82)~(18.60±0.59)、(13.00±0.50)~(16.71±0.68)和(13.80±0.59)~(15.95±0.65) mg/L(图 6b), 均值分别为(17.07±0.82)、(14.98±1.08)和(14.98±0.63) mg/L. 就具体季节而言, 水体 DIC 浓度在秋季、春季和夏季均呈现出水深<1m 区域显著高于水深 1~3 m 和>3 m 区域( $P<0.05$ , 图 6b), 但水深 1~3 m 和>3 m 区域间的水体 DIC 浓度差异性不显著( $P>0.05$ , 图 6b). 整体上, 文武砂水库呈现出靠库区岸边浅水区域的 DOC 和 DIC 浓度高于其他水深区域的特征(图 6).

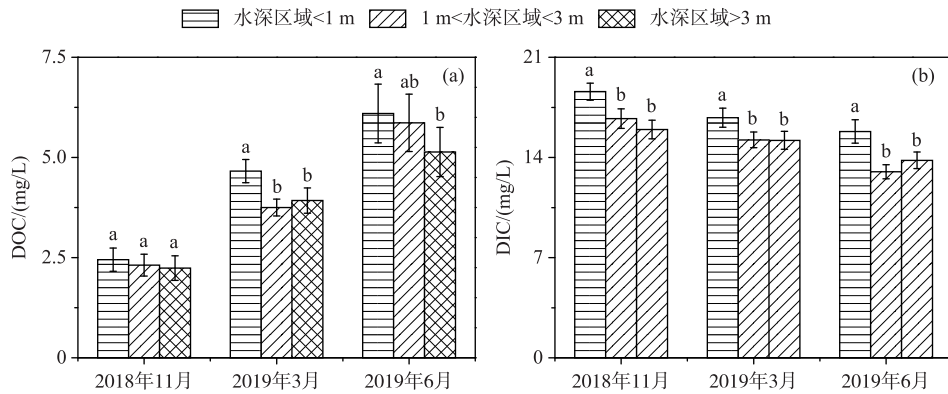


图 6 文武砂水库 DOC(a) 和 DIC(b) 浓度在不同水深区域的比较  
(不同小写字母代表同一季节不同水深区域之间具有显著差异性( $P<0.05$ ))

Fig.6 Comparison of DOC(a) and DIC(b) concentrations among different water depth zones in the Wenwusha Reservoir(The various lowercase letters represent there are significant differences among the different water depths in the same season ( $P<0.05$ ))

### 2.3 外源废水输入对水库 DOC 和 DIC 浓度变化的影响

图 7 为文武砂水库不同废水输入区 DOC 和 DIC 浓度变化特征. 研究期间, 水库表层水体 DOC 浓度在工业废水、市政废水、养殖塘废水和河流径流输入区的浓度均值变化范围分别介于(3.96±0.56)~(13.63±1.04)、(3.64±0.25)~(12.14±2.13)、(2.50±0.43)~(5.12±0.63)和(4.71±0.54)~(10.70±1.29) mg/L 之间(图 7a), 其均值分别为非废水输入区(3.19 mg/L)的 2.4、2.2、1.3 和 2.4 倍. DIC 浓度在以上 4 个废水输入区的均值分别介于(15.46±1.34)~(20.42±0.62)、(14.65±2.45)~(19.73±0.45)、(18.46±1.17)~(19.60±0.41)和(20.90±1.37)~(22.46±2.00) mg/L 之间(图 7b); 其均值分别为非废水输入区(13.35 mg/L)的 1.4、1.3、1.4 和 1.7 倍. 以上结果显示, 废水输入是文武砂水库水体碳素重要来源, 影响着 DOC 和 DIC 在水库中的空间分布特征.

### 2.4 水库表层水体 DOC 和 DIC 浓度的时空变异系数

整个采样期间, 水库表层水体 DOC 和 DIC 的季节变异系数( $C_v$ )分别为 42% 和 10%. 空间变化上, 就库区间而言, 北库区表层水体 DOC 和 DIC 浓度在秋季、春季、夏季采样期间的空间  $C_v$  值分别为 146% 和 24%、37% 和 22%、81% 和 24%; 南库区表层水体 DOC 和 DIC 浓度在秋季、春季、夏季的空间  $C_v$  值分别为 16% 和 13%、25% 和 13%、39% 和 24%. 在不同水深区域间, 表层水体 DOC 浓度在秋季、春季和夏季采样期间的空间  $C_v$  值均为 13%, DIC 浓度在秋季、春季和夏季空间  $C_v$  值分别为 10%、7% 和 9%. 在不同废水输入区间, 表层水体 DOC 浓度在秋季、春季和夏季采样期间的空间  $C_v$  值分别为 34%、31% 和 45%, DIC 浓度在秋季、春季、夏季的空间  $C_v$  值分别为 13%、19% 和 25%.

### 2.5 水库 DOC 和 DIC 浓度与水体理化性质的相关性分析

Pearson 相关分析结果显示(表 2), 研究期间水库 DOC、DIC 浓度空间变化与水体 DO、EC 和盐度均呈现显著负相关关系( $P<0.01$ ), 与水温的相关性不显著( $P>0.05$ ); 此外, 在春季 DOC、DIC 浓度空间变化与水体 pH 亦均呈现显著负相关关系( $P<0.01$ ). 在季节变化上, 水库 DOC 变化与水温呈现显著正相关关系( $P<$

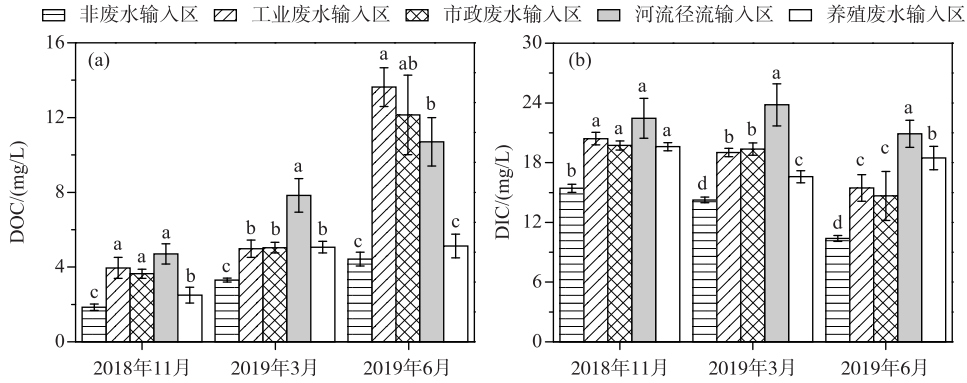


图7 文武砂水库 DOC 和 DIC 浓度在不同废水输入区的比较  
(不同小写字母代表同一季节不同外源输入区间具有显著差异性 ( $P < 0.05$ ))

Fig.7 Comparison of DOC and DIC concentration among different wastewater input zones in the Wenwusha Reservoir (The various lowercase letters represent there are significant differences among the different wastewater input zones in the same season ( $P < 0.05$ ))

0.01), 但与 pH、DO、EC 和盐度均呈现显著负相关关系 ( $P < 0.01$ ); 水库 DIC 变化分别与水温和 DO 呈现显著负相关关系 ( $P < 0.01$ ).

表2 文武砂水库 DOC、DIC 浓度与水体理化性质的 Pearson 相关系数

Tab.2 Pearson correlation coefficients between DOC, DIC concentrations and environmental variables in the Wenwusha Reservoir

环境指标	DOC 浓度				DIC 浓度			
	2018年11月	2019年3月	2019年6月	所有季节	2018年11月	2019年3月	2019年6月	所有季节
水温	NS	NS	NS	0.337**	NS	NS	NS	-0.206**
pH	NS	-0.706**	NS	-0.325**	NS	-0.778**	NS	NS
DO	-0.688**	-0.512**	-0.544**	-0.233**	-0.782**	-0.539**	-0.298**	-0.232**
EC	-0.713**	-0.535**	-0.434**	-0.536**	-0.445**	-0.590**	-0.336**	NS
盐度	-0.735**	-0.668**	-0.526**	-0.553**	-0.484**	-0.756**	-0.519**	NS

NS 表示相关性未达到显著性水平 ( $P > 0.05$ ); \*\* 表示相关性达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ).

### 3 讨论

#### 3.1 文武砂水库水体 DOC 和 DIC 浓度季节变化特征

与全球低纬度亚热带流域 DOC 平均浓度 (6.00 mg/L) 相比<sup>[40]</sup>, 本研究库区水体 DOC 浓度 (均值为  $(4.09 \pm 0.18)$  mg/L) 处于较低水平, 并且呈现出显著低于 DIC 浓度 (均值为  $(15.83 \pm 0.24)$  mg/L) 的特征 (图 3). 这一结果表明, DIC 为文武砂水库水体中溶存碳的主要存在形式. 类似结果亦存在于对湖泊、河流和浅水池塘等水生生态系统的研究中<sup>[2, 12, 37, 41-42]</sup>.

与其他研究报道类似<sup>[13, 27]</sup>, 文武砂水库水体 DOC、DIC 浓度具有一定的季节变化特征, 分别呈现出夏季 > 春季 > 秋季、秋季 > 春季 > 夏季的特征. 已有研究表明, 水体浮游藻类及水生植物可通过光合作用吸收利用水中的 DIC<sup>[4, 43-44]</sup>, 且较低的浮游藻类含量导致水体光合作用强度减弱, 进而会减少对水体 DIC 的吸收利用量<sup>[4, 43, 45]</sup>. 还有研究指出, 浮游藻类的死细胞会释放高分子量 DOC, 而活细胞释放低分子量 DOC<sup>[46]</sup>. Chl. a 是水生生物新陈代谢过程方向和强度的重要性指标, 可反映水体藻类等水生生物光合作用的强度<sup>[34, 47]</sup>. 本研究中, 水库表层水体 Chl. a 浓度在秋季、春季和夏季采样期间的变化范围分别介于 10.92 ~ 40.13、6.83 ~



60.06 和 8.19~76.44  $\mu\text{g/L}$  之间,均值分别为  $(23.23\pm 1.86)$ 、 $(34.19\pm 3.36)$  和  $(41.50\pm 4.29)$   $\mu\text{g/L}$ . Chl. *a* 浓度变化与水体 DOC 浓度呈现显著正相关关系(图 8a),但与 DIC 浓度呈现显著负相关(图 8b). 此外,野外调查发现该水库南库区有大量互花米草和水烛沿库区浅水区域(特别是库区西岸)分布,其季节生长长势呈现出夏季>春季>秋季的特征. 以上结果表明,文武砂水库表层水 DIC 浓度随采样季节推移呈现出降低的趋势,很大程度与水体浮游藻类及南库区水生植物光合作用逐渐增强对 DIC 吸收利用量的增加有关;而水体 DOC 浓度随采样季节推移呈现出增加的趋势可能与浮游藻类的死细胞释放出大量的 DOC 有关.

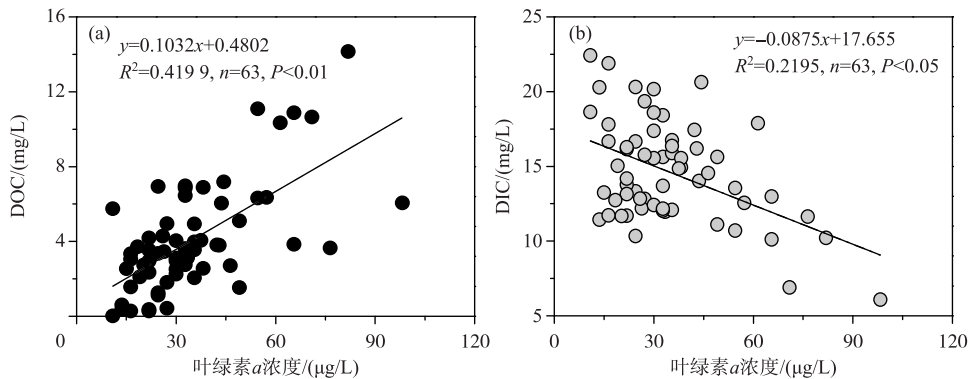


图 8 文武砂水库叶绿素 *a* 浓度与 DOC(a)、DIC(b) 浓度的关系

Fig.8 Relationships between Chl. *a* concentration and DOC(a), DIC(b) concentrations in the Wenwusha Reservoir

采样期间,本研究发现水体 DOC 浓度季节变化特征还与水温呈现出显著正相关关系( $P<0.05$ ,  $R^2 = 0.28$ ),表明温度也是影响文武砂水库表层水体 DOC 浓度在春、夏季高于秋季的一个重要环境因子. 一些研究认为,较高的水温有利于微生物活动,可促进水库中大量死亡浮游藻类的分解和生产,其排泄物和分泌物形成了水中大部分的 DOC<sup>[2,48]</sup>. 然而,高水温下微生物的活动增强也能促进 DOC 的降解. 因此,温度影响本研究水库表层水体 DOC 浓度季节变化的作用机制,是今后需值得深入的研究. 对于水体 DIC 而言,其季节变化特征与水温呈现出显著负相关关系( $P<0.01$ , 表 2). 这一结果与郭兴森等<sup>[1]</sup>对黄河口表层水中 DIC 时空分布特征的研究结果类似. 已有研究表明,水温变化可通过影响水体浮游藻类的生长和水-气界面  $\text{CO}_2$  通量来影响 DIC 浓度变化<sup>[1,49]</sup>. 一方面,较高水温环境下,水体浮游藻类生长较旺盛,其较强烈的光合作用会促使较多的无机碳向有机碳转化,进而会造成水体 DIC 浓度降低<sup>[1,49]</sup>. 另一方面,较高水温会促使水体  $\text{CO}_2$  向大气扩散,造成水体  $\text{CO}_2$  的溶解度降低,进而导致 DIC 浓度降低<sup>[1]</sup>. 这些结果表明,文武砂水库春、夏季节较高的水温环境下水体强烈的光合作用和水-气界面  $\text{CO}_2$  交换通量亦是导致其水体 DIC 浓度低于秋季的重要因素.

### 3.2 文武砂水库水体 DOC 和 DIC 浓度空间变化特征

人类活动对湖、库系统内部有机碳的空间分布特征有着十分显著的影响<sup>[13]</sup>. 本研究中,相比南库区,北库区为人类排污活动较密集的区域,受到工业废水、城镇生活污水、周边养殖塘废水等诸多污染源的影响(图 1),水体综合营养状态指数(trophic level index, *TLI*)值介于 37.10~50.40 之间,其富营养化程度较高. 受此影响,北库区水体生态系统的内部生物地球化学循环可能较南库区活跃,其水体可能具有更强大的现场产 DOC 能力,进而导致 DOC 浓度偏高. 与此同时,本研究在 3 个季度采样期间测得入库的工业废水、养殖塘废水、市政生活污水及河流水体中 DOC 浓度变化范围分别介于 7.91~20.45、7.28~17.60、9.41~16.05 和 5.37~12.66  $\text{mg/L}$ ,其均要高于相应废水输入区水体中的 DOC 浓度(图 7a). 这一结果表明,进入库区的诸多废水所含有大量 DOC,对北库区水体较高的 DOC 浓度亦具有重要贡献. 此外,有研究表明,地表径流可将流域内产生的大量营养盐和 DOC 携带至湖库,对其水体 DOC 浓度增加具有显著影响<sup>[10,27]</sup>. 本研究中,文武砂水库北库区上接长乐市南洋水网,有大量的河水注入该库区,可将流域内大量 DOC 携带入库;而南库区相

对较封闭,入库区的河流较少,故而进入库区的外源 DOC 相对较少. 另外,相比北库区,南库区受河流淡水影响较小,其相对较高的盐度可引起水体部分阳离子快速置换,促进有机质矿化,加速有机碳的损失<sup>[50-51]</sup>,进而会造成水体 DOC 浓度降低. 因此,文武砂水库南、北库区间水体 DOC 浓度的差异性除受到库区周边人类排污活动的影响,也受到河流输入的影响.

文武砂水库水体 DIC 浓度在两个库区也存在差异,且在不同季节呈现出不一样的空间变化特征. 在秋季和春季采样期间,水体 DIC 浓度呈现出北库区显著高于南库区的特征(表 1). 这种差异性除主要受到北库区较密集的人类废水排放活动和大量入库河流将流域内岩溶作用所形成的高浓度 DIC 携带入库影响外,可能还受到 2 个库区间水体盐度存在较大变化的调控. 本研究调查结果显示,南库区水体盐度呈现出显著高于北库区的特征,且与 DIC 浓度的空间变化呈现出显著负相关关系( $P < 0.01$ , 表 2). 类似的相关关系亦被其他研究所报道<sup>[52-54]</sup>. 诸多研究表明,高盐度水体环境下的离子胁迫和毒害作用会降低水体浮游藻类及微生物的呼吸作用<sup>[55]</sup>,并导致水体中的过饱和碳酸盐发生沉降<sup>[54]</sup>,进而引起 DIC 浓度的降低. 就本研究而言,盐度影响文武砂水库水体 DIC 浓度空间变化的作用机制并不清楚,今后值得进一步开展研究. 然而,在夏季采样期间,虽然水体盐度亦呈现出南库区高于北库区,但水体 DIC 浓度呈现出北库区显著低于南库区的特征(表 1). 究其原因,可能主要是由于受降水作用及其造成的水库北库区泄水的综合影响掩盖了盐度的作用. 已有研究表明,大量雨水输入会对湖、库水体 DIC 浓度产生明显的稀释效应<sup>[56-57]</sup>. 本研究在夏季采样期间,所在区域发生过强降水事件. 受其影响,不仅会对整个水库 DIC 浓度产生稀释作用,而且也会造成水库北库区水位大幅度上升. 在此情况下,北库区会向南库区进行泄水. 一方面,南库区水体受到泄水作用的强烈扰动,可将库区底层储层的 DIC 携带至表层<sup>[43]</sup>,进而引起表层 DIC 浓度增加. 另一方面,泄水可致使南库区水体悬浮颗粒物增加,导致水体浊度增加和透明度降低,引起水体光合作用减弱,进而可大大减少浮游植物对水体 DIC 浓度的吸收利用量<sup>[4,29]</sup>. 再者,泄水作用既可增加北库区向南库区的碳输入量,也可通过其强烈扰动促使库区水-气界面  $\text{CO}_2$  通量向大气库扩散<sup>[58]</sup>,引起水体  $\text{CO}_2$  的溶解度降低,进而改变水体 DIC 浓度.

有研究表明,在湖泊、水库的形成发展过程中,源自于周边的有机物质进入这些水生系统后,由周边向中心往往会呈现出水平分异的特征<sup>[2,34]</sup>. 在本研究中,亦发现文武砂水库 DOC 和 DIC 浓度在不同水深区域具有显著的水平变化特征,呈现出由水库周边浅水区域向库区中心深水区域递减的趋势(图 6). 相比库区中心的深水区域,水库周边浅水区具有较高的 DOC 和 DIC 浓度,主要跟该区域直接接收了库区周边大量外源废水和河流径流输入有关. 这些外源废水和径流通常含有较高浓度的 DOC、DIC 及其他有机污染物<sup>[59-62]</sup>. 当废水入库时,大部分 DOC 和 DIC 可首先停蓄在库区周边的浅水区域,可产生一个“累积效应”,进而促使这一区域具较高的 DOC 和 DIC 浓度. 此外,有研究表明,相比离湖、库岸边较远的深水区域,靠岸较近的浅水区域由于较高的溶解氧水平,其微生物活性较高,有机物质分解较快<sup>[61]</sup>,进而有利于大量微生物代谢产物(如 DOC 和 DIC)的形成. 然而,DOC 作为水体有机质的重要组分,在微生物的分解作用下,也可能被大量消耗掉. 所以,不同水深区域微生物作用下的有机物质分解活动作用对文武砂库区 DOC 浓度水平变化特征的影响情况并不明确,仍需要开展进一步研究加以明晰. 此外,废水入库时还会通过改变库区内部的水动力条件来影响沉积物再悬浮作用,进而影响到沉积物间隙水中 DOC 和 DIC 向水体的释放量. 相比深水区域,毗邻废水输入的浅水区域,废水输入会导致其水动力作用更为强烈,水体扰动剧烈且频繁,沉积物再悬浮作用明显,促使沉积物间隙水中大量的 DOC 和 DIC 会被释放至水体中<sup>[63-65]</sup>,进而导致其水体碳浓度较高. 当然,废水输入亦可能会引起浅水区域与深水区域水体营养盐浓度在水平方向上具有一定的梯度变化,进而造成其浮游藻类或生物存在差异性,最终亦会导致碳浓度的空间分布表现出差异性. 本课题组的研究表明减少废水输入,对于提高水质<sup>[66-67]</sup>,控制水库碳循环都有重要的意义<sup>[68]</sup>.

### 3.3 水体 DOC 和 DIC 多空间点位测定的科学意义

目前对湖、库系统水体碳生物地球化学循环研究中,尽管已有研究考虑到系统内部的空间异质性特征,但仍然是基于少数几个空间点位的野外样品采集策略,进而会导致研究结果存在较大不确定性. 例如,Linkhorst 等<sup>[69]</sup>对巴西东南部 Chapéu d'Uvas 水库水体的含碳气体( $\text{CH}_4$ )溶存浓度及其界面通量研究发现,相比高空间分辨率采样点位测定的结果,不同情景下的低空间分辨率采样点会显著低估和高估水库向大气库释

放的含碳气体总量,其低估率和高估率分别可达到 79% 和 174%。Paranaíba 等<sup>[70]</sup> 研究也获得类似的研究结论. 为体现多空间点位监测工作在研究沿海水库碳动态方面的重要性,参考 Linkhorst 等<sup>[69]</sup> 研究报道,本研究基于 103 个空间点位的观测数据,抽出一些常规监测点位作为“低空间分辨率”的情景,来模拟不同采样情景下水库水体 DOC 和 DIC 浓度变化情况(表 3). 结果显示,若采样点仅布设在水库的南库区(情景 I)、非废水输入区(情景 II)、库区深水区域(情景 III)或采样断面 T21(情景 IV),其水库水体 DOC 浓度要比基于所有采样点测得的浓度均值分别低约 38%、22%、5% 和 69%, DIC 浓度均值分别低约 3%、5%、5% 和 36%. 若采样点仅布设在水库的北库区、废水输入区、库区浅水区域或采样断面 T7,其水库水体 DOC 浓度要比基于所有采样点测得的值分别高出约 33%、62%、8% 和 187%, DIC 浓度分别高出约 2%、21%、8% 和 78%. 以上研究结果表明,少数几个空间点位的采样方法会导致低估或高估水库水体 DOC 和 DIC 浓度,可能是导致大尺度水库碳库估算结果不确定性的重要原因之一,而采取多空间点位或高空间分辨率观测是降低其不确定性的重要途径. 此外,多空间点位或高空间分辨率观测会更加清晰识别外源输入对库区水体 DOC 和 DIC 浓度有何影响,进而为研究水库水体其它碳生物地球化学过程(如含碳气体排放的热点区域)提供重要参考价值.

表 3 不同采样情景下文武砂水库表层水体 DOC 和 DIC 平均浓度变化  
Tab.3 Mean DOC and DIC concentrations for different upscaling scenarios  
at the surface water in the Wenwusha Reservoir

情景	数据集	DOC/(mg/L)	DIC/(mg/L)
*	整个库区所有采样点( $n = 103$ )	4.09	15.83
I	南库区 47 个采样点	2.51	15.51
	北库区 56 个采样点	5.40	16.10
II	库区非废水输入区的 64 个采样点	3.19	13.35
	库区废水输入区的 39 个采样点	6.61	19.21
III	库区岸边浅水区域 42 个采样点	4.40	17.07
	库区深水区域 61 个采样点	3.87	14.98
IV	最大值采样断面 T1( $n=7$ )	11.70	28.19
	最小值采样断面 T21( $n=3$ )	1.28	10.06

\* 表示对水库 DOC 和 DIC 浓度较理想的估算,该估算是基于高空间分辨率采样,其平均浓度是源自于所有季节所有采样点的均值.

## 4 结论

1) 采样期内,文武砂水库水体 DOC 和 DIC 浓度具有显著的季节变化特征,其最大值分别呈现在夏季和秋季调查期间;不同季节水体浮游植物数量(Chl.a 浓度表征)及其代谢活动的强烈程度是影响水库 DOC 和 DIC 浓度季节变化的重要因素.

2) 文武砂水库水体 DOC 和 DIC 浓度亦具有显著的空间变化特征. 在库区之间,整体上呈现出北库区水体 DOC 和 DIC 浓度高于南库区的特征;在不同水深区域,水体 DOC 和 DIC 浓度由库区周边的浅水区向库区中心的深水区域呈现出递减的趋势. 外源污染输入强度是引起水库 DOC 和 DIC 浓度空间变化的重要因素.

3) 文武砂水库 DOC 和 DIC 浓度变化主要受到工业废水、市政废水、养殖塘废水和河流径流输入的影响,其中库区周边的工业废水和河流径流输入对水库水体 DOC 和 DIC 浓度影响较大. 高密度空间采样调查分析在揭示人类活动对湖、库系统水体碳空间分布特征的影响方面起重要作用.

致谢: 感谢福建师范大学亚地理科学学院赵光辉、李玲和张逸飞等同学在野外样品采集中给予的帮助.

## 5 参考文献

- [ 1 ] Guo XS, Lv YC, Sun ZG *et al.* Spatial-temporal distributions of dissolved inorganic carbon and its affecting factors in the Yellow River estuary. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 457-463. [ 郭兴森, 吕迎春, 孙志高等. 黄河口溶解无机

- 碳时空分布特征及影响因素研究. 环境科学, 2015, **36**(2): 457-463.]
- [ 2 ] Wang WY, Lv CW, He J *et al.* Exchange fluxes and coupling relationship of dissolved inorganic carbon and dissolved organic carbon across the water-sediment interface in lakes. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3674-3682. [王伟颖, 吕昌伟, 何江等. 湖泊水-沉积物界面 DIC 和 DOC 交换通量及耦合关系. 环境科学, 2015, **36**(10): 3674-3682.]
- [ 3 ] Myhre G, Shindell D, Bréon FM *et al.* Anthropogenic and natural radiative forcing // Stocker TF, Qin D, Plattner GK *et al.* eds. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [ 4 ] Tang WK, Tao Z, Gao QZ *et al.* Biogeochemical processes of the major ions and dissolved inorganic carbon in the Guijiang river. *Environmental Science*, 2014, **35**(6): 2099-2107. DOI: 10.13227/j.hjxk.2014.06.009. [唐文魁, 陶贞, 高全洲等. 桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程. 环境科学, 2014, **35**(6): 2099-2107.]
- [ 5 ] Berger A, Mesinger F, Sijacki D. *Climate change.* Vienna: Springer Vienna, 2012. DOI: 10.1007/978-3-7091-0973-1.
- [ 6 ] Myrbo A. Carbon cycle in lakes//Bengtsson L, Herschy RW, Fairbridge RW eds. *Encyclopedia of lakes and reservoirs.* Netherland: Springer, 2012: 121-125.
- [ 7 ] Tranvik LJ, Cole JJ, Prairie YT. The study of carbon in inland waters—from isolated ecosystems to players in the global carbon cycle. *Limnology and Oceanography Letters*, 2018, **3**(3): 41-48. DOI: 10.1002/lo2.10068.
- [ 8 ] Cole JJ, Prairie YT, Caraco NF *et al.* Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems*, 2007, **10**(1): 172-185. DOI: 10.1007/s10021-006-9013-8.
- [ 9 ] Tranvik LJ, Downing JA, Cotner JB *et al.* Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(6part2): 2298-2314. DOI: 10.4319/lo.2009.54.6\_part\_2.2298.
- [ 10 ] Fan ZW, Hao QJ, Huang Z *et al.* Change and influencing factors of dissolved carbon and dissolved nitrogen in water of the Three Gorges Reservoir. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 129-137. DOI: 10.13227/j.hjxk.201606031. [范志伟, 郝庆菊, 黄哲等. 三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素. 环境科学, 2017, **38**(1): 129-137.]
- [ 11 ] Jiao NZ, Herndl GJ, Hansell DA *et al.* Microbial production of recalcitrant dissolved organic matter: Long-term carbon storage in the global ocean. *Nature Reviews Microbiology*, 2010, **8**(8): 593-599. DOI: 10.1038/nrmicro2386.
- [ 12 ] Vlahos P. *Dynamics of dissolved organic and inorganic carbon in the Mid-Atlantic Bight.* Boston: University of Massachusetts Boston, 2001.
- [ 13 ] Wang XJ, Fang CL, Yu ZT *et al.* Seasonal variations and sources of particulate and dissolved organic carbon in Lake Bosten, Xinjiang Province. *J Lake Sci*, 2014, **26**(4): 552-558. DOI: 10.18307/2014.0409. [王秀君, 房传苓, 于志同等. 新疆博斯腾湖水体颗粒和溶解有机碳的季节变化及其来源初探. 湖泊科学, 2014, **26**(4): 552-558.]
- [ 14 ] Bertilsson S, Jones JBJ. Supply of dissolved organic matter to aquatic ecosystems: autochthonous sources//Findlay SEG, Sinsabaugh RL eds. *Aquatic Ecosystems: Interactivity of dissolved organic matter.* New York: Academic Press, 2003.
- [ 15 ] Fujii M, Ikeda M, Yamanaka Y. Roles of biogeochemical processes in the oceanic carbon cycle described with a simple coupled physical-biogeochemical model. *Journal of Oceanography*, 2005, **61**(5): 803-815. DOI: 10.1007/s10872-006-0001-6.
- [ 16 ] Wang H, Zhang CL, Yang H *et al.* The application of stable carbon isotope to the study of carbon sources in Guijiang watershed, Guangxi. *Acta Geoscientica Sinica*, 2011, **32**(6): 691-698. DOI: 10.3975/cagsb.2011.06.06. [王华, 张春来, 杨会等. 利用稳定同位素技术研究广西桂江流域水体中碳的来源. 地球学报, 2011, **32**(6): 691-698.]
- [ 17 ] Ye LL, Kong FX, Shi XL *et al.* The bioavailability of dissolved organic carbon in the eutrophic lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(4): 779-788. DOI: 10.5846/stxb201209241349. [叶琳琳, 孔繁翔, 史小丽等. 富营养化湖泊溶解性有机碳生物可利用性研究进展. 生态学报, 2014, **34**(4): 779-788.]
- [ 18 ] Mann CJ, Wetzel RG. Dissolved organic carbon and its utilization in a riverine wetland ecosystem. *Biogeochemistry*, 1995, **31**(2): 99-120. DOI: 10.1007/BF00000941.
- [ 19 ] Wei XG. Progress in the study of biogeochemistry of riverine organic matter. *Ecology and Environment*, 2007, **16**(2): 1063-1067. [魏秀国. 河流有机质生物地球化学研究进展. 生态环境, 2007, **16**(2): 1063-1067.]
- [ 20 ] Mierle G, Ingram R. The role of humic substances in the mobilization of mercury from watersheds. *Water Air and Soil Pollution*, 1991, **56**(1): 349-357. DOI: 10.1007/BF00342282.
- [ 21 ] Song KS, Wen ZD, Shang YX *et al.* Quantification of dissolved organic carbon (DOC) storage in lakes and reservoirs of mainland China. *Journal of Environmental Management*, 2018, **217**: 391-402. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.03.121.

- [22] Yang DT, Chen WM. The temporal and spatial distribution of dissolved organic carbon in lakes at the lower reach of Changjiang River. *Environmental Pollution & Control*, 2004, **26**(4): 275-277, 323. [杨顶田, 陈伟民. 长江下游湖泊中可溶性有机碳的时空分布. 环境污染与防治, 2004, **26**(4): 275-277, 323.]
- [23] Raymond PA, Bauer JE. Riverine export of aged terrestrial organic matter to the North Atlantic Ocean. *Nature*, 2001, **409**(6819): 497-500. DOI: 10.1038/35054034.
- [24] Whitfield M, Turner DR. The carbon dioxide system in estuaries—An inorganic perspective. *Science of the Total Environment*, 1986, **49**: 235-255. DOI: 10.1016/0048-9697(86)90243-3.
- [25] Zhao M, Liu CY, Yang GP *et al.* Dissolved inorganic carbon in surface waters of the Yellow Sea and the East China Sea during springtime. *Marine Environmental Science*, 2011, **30**(5): 626-630. [赵敏, 刘春颖, 杨桂朋等. 春季黄、东海表层水中的溶解无机碳. 海洋环境科学, 2011, **30**(5): 626-630.]
- [26] Chen PQ ed. Carbon cycle in earth system. Beijing: Science Press, 2004. [陈泮勤. 地球系统碳循环. 北京: 科学出版社, 2004.]
- [27] Kai JL, Wang JB, Huang L *et al.* Seasonal variations of dissolved organic carbon and total nitrogen concentrations in Nam Co and inflowing rivers, Tibet Plateau. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4): 1099-1108. DOI: 10.18307/2019.0410. [开金磊, 王君波, 黄磊等. 西藏纳木错及其入湖河流溶解有机碳和总氮浓度的季节变化. 湖泊科学, 2019, **31**(4): 1099-1108.]
- [28] Bade DL, Carpenter SR, Cole JJ *et al.* Sources and fates of dissolved organic carbon in lakes as determined by whole-lake carbon isotope additions. *Biogeochemistry*, 2007, **84**(2): 115-129. DOI: 10.1007/s10533-006-9013-y.
- [29] Brugger A, Reitner B, Kolar I *et al.* Seasonal and spatial distribution of dissolved and particulate organic carbon and bacteria in the bank of an impounding reservoir on the Enns River, Austria. *Freshwater Biology*, 2001, **46**(8): 997-1016. DOI: 10.1046/j.1365-2427.2001.00743.x.
- [30] Dunalska J, Górniak D, Teodorowicz M *et al.* Seasonal distribution of dissolved and particulate organic carbon in the water column of a meromictic lake. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2004, **13**(4): 375-379.
- [31] Ejarque E, Khan S, Steniczka G *et al.* Climate-induced hydrological variation controls the transformation of dissolved organic matter in a subalpine lake. *Limnology and Oceanography*, 2018, **63**(3): 1355-1371. DOI: 10.1002/lno.10777.
- [32] Guillemette F, McCallister SL, del Giorgio PA. Differentiating the degradation dynamics of algal and terrestrial carbon within complex natural dissolved organic carbon in temperate lakes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, **118**(3): 963-973. DOI: 10.1002/jgrg.20077.
- [33] Kang PG, Mitchell MJ, McHale PJ *et al.* Importance of within-lake processes in affecting the dynamics of dissolved organic carbon and dissolved organic and inorganic nitrogen in an Adirondack forested lake/watershed. *Biogeosciences*, 2016, **13**(9): 2787-2801. DOI: 10.5194/bg-13-2787-2016.
- [34] Li JH, Pu JB, Yuan DX *et al.* Variations of inorganic carbon and its impact factors in surface-layer waters in a groundwater-fed reservoir in Karst area, SW China. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2833-2842. DOI: 10.13227/j.hjlx.2015.08.014. [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因素. 环境科学, 2015, **36**(8): 2833-2842.]
- [35] Vachon D, Lapierre JF, del Giorgio PA. Seasonality of photochemical dissolved organic carbon mineralization and its relative contribution to pelagic CO<sub>2</sub> production in northern lakes. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, **121**(3): 864-878. DOI: 10.1002/2015JG003244.
- [36] Taipale SJ, Sonninen E. The influence of preservation method and time on the  $\delta^{13}\text{C}$  value of dissolved inorganic carbon in water samples. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2009, **23**(16): 2507-2510. DOI: 10.1002/rcm.4072.
- [37] Yang P, Jin BS, Tan LS *et al.* Spatial-temporal variations of water column dissolved carbon concentrations and dissolved carbon flux at the sediment-water interface in the shrimp ponds from two subtropical estuaries. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(6): 1994-2006. DOI: 10.5846/stxb201702210284. [杨平, 金宝石, 谭立山等. 亚热带河口陆基养虾塘水体溶解性碳浓度及沉积物-水界面碳通量时空动态特征. 生态学报, 2018, **38**(6): 1994-2006.]
- [38] Jeffrey SW, Humphrey GF. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, 1975, **167**(2): 191-194. DOI: 10.1016/S0015-3796(17)30778-3.
- [39] Zhang Y, Wang YJ, Wang YQ *et al.* Spatial distribution and correlation of environmental factors and chlorophyll a concen-

- trations in the Bohai Sea during the summer of 2013. *Marine Science Bulletin*, 2016, **35**(5): 571-578. [张莹, 王玉珏, 王跃启等. 2013年夏季渤海环境因子与叶绿素 a 的空间分布特征及相关性分析. 海洋通报, 2016, **35**(5): 571-578.]
- [40] Thurman EM ed. Geochemical processes. Organic geochemistry of natural waters. Dordrecht: Springer Netherlands, 1985: 365-423. DOI: 10.1007/978-94-009-5095-5\_12.
- [41] Meybeck M. Riverine transport of atmospheric carbon: Sources, global typology and budget. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1993, **70**(1/2/3/4): 443-463. DOI: 10.1007/BF01105015.
- [42] Song JM, Duan LQ, Lu X. Vertical distributions and controlling factors of carbon in the Main Kuroshio region near the eastern Taiwan island. *Studia Marina Sinica*, 2016, **51**(1): 207-232. [宋金明, 段丽琴, 卢汐. 台湾东部黑潮主流径区 2014 年春季水体碳的垂直变化特征与影响因素. 海洋科学集刊, 2016, **51**(1): 207-232.]
- [43] Liu W, Pu JB, Yu S *et al.* Preliminary research on the feature of dissolved inorganic carbon in wulixia reservoir in summer, Guangxi, China. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 2959-2966. DOI: 10.13227/j.hjlx.2014.08.017. [刘文, 蒲俊兵, 于爽等. 广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究. 环境科学, 2014, **35**(8): 2959-2966.]
- [44] Zhen J. The influence of biogeochemical behavior of aquatic plants on Karst carbon sink—A case study of Xue Yu cave subterranean stream basin of Fengdu, Chongqing [Dissertation]. Chongqing: Southwest University, 2014. [郑洁. 水生植物生物地球化学行为对岩溶碳汇的影响研究——以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例 [学位论文]. 重庆: 西南大学, 2014.]
- [45] Yang C, Telmer K, Veizer J. Chemical dynamics of the “St. Lawrence” riverine system:  $\delta D_{H_2O}$ ,  $\delta O_{H_2O}$ ,  $\delta^{13}C_{DIC}$ ,  $\delta^{34}S_{sulfate}$ , and dissolved  $^{87}Sr/^{86}Sr$ . *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, **60**(5): 851-866.
- [46] Ye LL, Shi XL, Wu XD *et al.* The effect of cyanobacteria on dissolved organic carbon post the bloom in autumn in Western Lake Taihu. *China Environmental Science*, 2011, **31**(1): 131-136. [叶琳琳, 史小丽, 吴晓东等. 西太湖秋季蓝藻水华过后细胞裂解对溶解性有机碳影响. 中国环境科学, 2011, **31**(1): 131-136.]
- [47] Lin J, Su YP, Zhong HZ *et al.* Vertical distribution of phytoplankton in a eutrophic reservoir, Shanzi Reservoir (Fujian) during summer stratification. *J Lake Sci*, 2010, **22**(2): 244-250. DOI: 10.18307/2010.0214. [林佳, 苏玉萍, 钟厚璋等. 一座富营养化水库——福建山仔水库夏季热分层期间浮游植物垂向分布. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 244-250.]
- [48] Wetzel RG. Limnology: lake and river ecosystems (3rd ed.). San Diego: Academic Press, 2002.
- [49] Li N. Dissolved organic and inorganic carbon nearby Changjiang Estuary [Dissertation]. Qingdao: Ocean University of China, 2014. [李宁. 长江口邻近海域的溶解有机碳和溶解无机碳系统 [学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.]
- [50] Hou GY, Zhai SJ, Gao H *et al.* Effect of salinity on silicon, carbon, and nitrogen during decomposition of *Spartina alterniflora* litter. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(1): 184-191. DOI: 10.5846/stxb201607261527. [侯贯云, 翟水晶, 高会等. 盐度对互花米草枯落物分解释放硅、碳、氮元素的影响. 生态学报, 2017, **37**(1): 184-191.]
- [51] Weston NB, Vile MA, Neubauer SC *et al.* Accelerated microbial organic matter mineralization following salt-water intrusion into tidal freshwater marsh soils. *Biogeochemistry*, 2011, **102**(1/2/3): 135-151. DOI: 10.1007/s10533-010-9427-4.
- [52] Gui ZS, Zhang LJ, Zhang XS *et al.* Variational regulation and behavior of pCO<sub>2</sub> in Huanghe Estuary, in Sep. of 2005. *Marine Environmental Science*, 2008, **27**(6): 615-617. [桂祖胜, 张龙军, 张向上等. 2005 年 9 月黄河口淡咸水混合过程中 pCO<sub>2</sub> 变化规律及行为. 海洋环境科学, 2008, **27**(6): 615-617.]
- [53] Zhang ZB, Zhang C, Liu LS *et al.* Multilayer-distribution of dissolved inorganic carbon (DIC) in surface sea water of the Yellow Sea in spring. *Marine Sciences*, 2008, **32**(11): 36-43. [张正斌, 张闯, 刘莲生等. 黄海春季表面海水溶解无机碳的分层研究. 海洋科学, 2008, **32**(11): 36-43.]
- [54] Tang YS, Wang L, Xi XF *et al.* The spatial distribution characteristics of organic and inorganic carbon content of intertidal water in Jiuduansha wetland. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(12): 2459-2465. [唐玉姝, 王磊, 席雪飞等. 九段沙湿地潮间带水域有机碳与无机碳含量的空间分布特征. 农业环境科学学报, 2012, **31**(12): 2459-2465.]
- [55] Xu H. Effect of salinity stress on photosynthetic characteristics and carbon metabolic pathways of *Gracilaria chouae* [Dissertation]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019. [徐涵. 盐度胁迫对脆江蕨 (*Gracilaria chouae*) 光合特性及碳代谢途径的影响研究 [学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2019.]
- [56] Li SL, Liu CQ, Tao FX *et al.* Carbon biogeochemistry of ground water, Guiyang, southwest China. *Ground Water*, 2005,

- 43**(4): 494-499. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2005.0036.x.
- [57] Wu QX, Han GL, Tang Y. Temporal and spatial variation of water chemistry and dissolved inorganic carbon isotope characterization in Three Gorges Reservoir. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(3): 654-661. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2012.03.026. [吴起鑫, 韩贵琳, 唐杨. 三峡水库坝前水体水化学及溶解无机碳时空分布特征. 环境科学学报, 2012, **32**(3): 654-661.]
- [58] Sun C. Distribution and the flux of carbon in different periods of Yellow River[Dissertation]. Qingdao: Ocean University of China, 2007. [孙超. 黄河调水调沙时期的碳输运特征及花园口站碳系统各分量的年变化[学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.]
- [59] DelSontro T, Kunz MJ, Kempter T *et al.* Spatial heterogeneity of methane ebullition in a large tropical reservoir. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(23): 9866-9873. DOI: 10.1021/es2005545.
- [60] Alshboul Z, Encinas-Fernández J, Hofmann H *et al.* Export of dissolved methane and carbon dioxide with effluents from municipal wastewater treatment plants. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(11): 5555-5563. DOI: 10.1021/acs.est.5b04923.
- [61] Zhao HC, Wang SR, Jiao LX *et al.* Characteristics of composition and spatial distribution of organic matter in the sediment of Erhai lake. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(3): 243-249. DOI: 10.13198/j.res.2013.03.22.zhaohch.008. [赵海超, 王圣瑞, 焦立新等. 洱海沉积物有机质及其组分空间分布特征. 环境科学研究, 2013, **26**(3): 243-249.]
- [62] Regnier P, Friedlingstein P, Ciais P *et al.* Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. *Nature Geoscience*, 2013, **6**(8): 597-607. DOI: 10.1038/ngeo1830.
- [63] Ye J, Yao P, Xu YH *et al.* Distribution, sources and mixing behavior of different carbon species along a salinity gradient in the Chang jiang Estuary. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, **41**(4): 15-26. [叶君, 姚鹏, 徐亚宏等. 长江口盐度梯度下不同形态碳的分布、来源与混合行为. 海洋学报: 中文版, 2019, **41**(4): 15-26.]
- [64] Samanta S, Dalai TK, Pattanaik JK *et al.* Dissolved inorganic carbon (DIC) and its  $\delta^{13}\text{C}$  in the Ganga (Hooghly) River estuary, India: Evidence of DIC generation via organic carbon degradation and carbonate dissolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, **165**: 226-248. DOI: 10.1016/j.gca.2015.05.040.
- [65] Guo XH, Wong GTF. Carbonate chemistry in the northern South China sea shelf-sea in June 2010. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, **117**: 119-130. DOI: 10.1016/j.dsr2.2015.02.024.
- [66] Yang H, Flower RJ, Thompson JR. Sustaining China's water resources. *Science*, 2013, **339**(6116): 141. DOI: 10.1126/science.339.6116.141-b.
- [67] Yang H. China must continue the momentum of green law. *Nature*, 2014, **509**: 535-535.
- [68] Yang H, Xing YP, Xie P *et al.* Carbon source/sink function of a subtropical, eutrophic lake determined from an overall mass balance and a gas exchange and carbon burial balance. *Environmental Pollution*, 2008, **151**(3): 559-568. DOI: 10.1016/j.envpol.2007.04.006.
- [69] Linkhorst A, Hiller C, DelSontro T *et al.* Comparing methane ebullition variability across space and time in a Brazilian reservoir. *Limnology and Oceanography*, 2020, **65**(7): 1623-1634. DOI: 10.1002/lno.11410.
- [70] Paranaíba JR, Barros N, Mendonça R *et al.* Spatially resolved measurements of  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  concentration and gas-exchange velocity highly influence carbon-emission estimates of reservoirs. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(2): 607-615. DOI: 10.1021/acs.est.7b05138.