

# 贵州百花湖分层期水体有机碳及其稳定碳同位素组成分布特征与控制因素

徐丹<sup>1,2</sup>, 陈敬安<sup>1,\*</sup>, 杨海全<sup>1,2</sup>, 王敬富<sup>1,2</sup>, 计永雪<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 研究湖水溶解有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)和颗粒有机碳(Particle organic carbon, POC)的空间变化特征有助于揭示湖泊有机碳的来源、迁移转化过程与控制因素。本文通过对贵州百花湖分层期水体 DOC 和 POC 浓度及其碳稳定同位素组成的对比研究, 揭示了百花湖分层期水体有机碳浓度及稳定碳同位素的空间分布特征。研究结果表明, 百花湖夏季分层期水体 DOC 和 POC 的浓度范围分别为 1.97~3.26 mg/L(平均值 2.58 mg/L)和 0.60~2.43 mg/L(平均值 1.14 mg/L), 且呈现出“上层高、下层低”的特征。水体 DOC 和 POC 浓度主要受藻类活动控制。水体  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$  值随深度增加呈偏正趋势, 这可能是由深层水体溶解有机质发生矿化作用和分解作用所致。水体  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$  值随水体深度增加呈偏负趋势, 上下层水体藻类生产力差异和沉积物再悬浮作用可能是导致该现象的主要原因。受光降解作用影响, 百花湖水体  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$  较  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$  偏正。

**关键词:** 百花湖分层期; 有机碳稳定碳同位素

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2014)05-0597-07

湖泊有机碳(DOC 和 POC)是湖泊碳的关键组分。大多数湖泊是异养的, 沉积封存的有机碳能够为湖泊提供碳和能源, 在湖泊碳循环中扮演着重要角色。由于湖泊 DOC 和 POC 成分复杂, 采样分析难度大, 目前对湖泊 DOC 和 POC 的认识远落后于无机碳<sup>[1-3]</sup>。

对湖泊水体有机碳浓度和稳定碳同位素组成空间分布特征的研究, 有助于揭示湖泊有机碳来源及其生物地球化学循环过程。水体 DOC、POC 浓度及其稳定碳同位素组成在研究海洋和河流有机碳生物地球化学循环方面得到了广泛应用<sup>[4-7]</sup>, 并提供了大量关于海洋和河流有机碳来源和迁移转化过程的宝贵信息。研究湖泊水体 DOC 和 POC 的浓度及  $\delta^{13}\text{C}$  空间变化是揭示 DOC 和 POC 的来源及其迁移转化过程的有效途径。湖泊水体 DOC 的来源分内源和外源两种: 内源是指藻类和水生生物释放的 DOC, 约占其初级生产力的 12%~75%, 其浓度通常与浮游生物量呈正相关; 外源则主要来源于陆源植物和土壤有机质分解, 由河流携带进入湖

泊<sup>[5, 7, 8]</sup>。同时, 人类活动排放的污水对湖泊水体 DOC 的影响也不容忽视。湖泊水体 POC 则主要是由藻类和水生植物通过光合作用吸收利用无机碳而产生的, 体现出明显的内源特征<sup>[9-11]</sup>。目前有关湖泊 DOC 碳同位素的研究相对较少, 尤其缺乏对湖泊分层期水体 DOC 和 POC 碳同位素时空分布特征的系统对比研究。百花湖属高原深水型湖泊, 具有季节性分层现象, 夏季热分层使得上下水体交换不畅, 对湖泊 DOC 和 POC 的空间分布特征可产生重要影响。为此, 本研究选择百花湖为研究对象, 于 2013 年 8 月夏季热分层期对百花湖水体 DOC 和 POC 浓度及其碳稳定同位素组成进行了系统研究, 旨在探讨高原亚深水型湖泊 DOC 和 POC 的空间变化特征, 为揭示湖泊 DOC 和 POC 的来源和迁移转化过程提供关键信息。

## 1 研究区概况

百花湖(106°27'~106°34'E, 26°35'~26°42'N)位于贵阳市西北郊, 地处长江支流乌江水系猫跳河

收稿日期: 2014-01-20; 改回日期: 2014-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(41173125)。

第一作者简介: 徐丹(1987-), 女, 理学硕士, 从事环境地球化学研究。E-mail: xudan@vip.skleg.cn.

\* 通讯作者: 陈敬安(1973-), 男, 研究员, 环境地球化学专业。E-mail: chenjingan@vip.skleg.cn.

流域,属峡谷河道型人工湖,是贵阳市主要的人工水源地,具有低纬度-高海拔的地理特征。湖泊流域面积 1 895 km<sup>2</sup>,水面面积 14.5 km<sup>2</sup>,湖泊补给系数为 182.2,最大水深为 45 m,平均水深 10.8 m<sup>[12-14]</sup>。百花湖具碳酸盐岩的地质背景,属亚热带湿润季风气候,区内自然环境特征差异明显<sup>[15]</sup>。

百花湖主要的入湖河流包括麦西河(MXH)、麦城河(MCH)和东门桥河(DMQH)(图 1),其中流量最大的是东门桥河。

## 2 研究方法

### 2.1 样品采集和预处理

2013年8月百花湖夏季热分层期,用 Niskin 采水器采集不同水深(表层 0.5 m 处、热分层下部(12 m 处)和沉积物上部 1 m 处)的样品。采样点位和采样深度见表 1 和图 1。利用 YSI 600-VZ 型水质分析仪对水深(Depth)、水温(T)、电导(Cond.)、叶绿素(Chl-a)、溶解氧(DO)等水质参数进行了测定。百花湖水体温度、溶解氧随深度的变化表明百花湖水体分层深度约为 8 m(图 2)。因此,本研究选择 12 m 为热分层下部的采样点。

采集的水样利用 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜(0.7 μm,预先 450 °C 高温燃烧 4 h)在氮气加压下用不锈钢罐进行过滤。所用玻璃瓶均预先用 10% HCl 浸泡,超纯水冲洗,然后于 450 °C 灼烧 4 h 后使用<sup>[9, 16]</sup>。样品前处理方法如下:

(1)DOC 浓度及其 δ<sup>13</sup>C 测定的前处理:取约 40 mL 过滤液用 6 mol/L 盐酸酸化至 pH=2,带回实验室冷冻保存,用于 DOC 浓度的测定;另取约 1 L 过滤液用 6 mol/L 盐酸酸化至 pH=2,带回实验室冷冻保存。样品经旋转蒸发并冷冻干燥后再高温燃烧成 CO<sub>2</sub>,收集于真空管中,并在低温下纯化用于 DOC 的 δ<sup>13</sup>C 测定。

(2)POC 浓度及其 δ<sup>13</sup>C 测定的前处理:取过滤过约 10 L 湖水的滤膜,折叠放置于铝箔中,带回

实验室冷冻保存。样品经冷冻干燥后用 12 mol/L 的盐酸熏蒸 24 h 除去碳酸盐,经 60 °C 烘干后在干燥器中保存。一部分用于 POC 浓度的测定,另一部分经高温燃烧成 CO<sub>2</sub>,收集于真空管中,并在低温下纯化备用。

### 2.2 分析测试方法

利用 TOC 分析仪(ELEMENTAR, high TOC II, Germany)高温催化氧化法测定样品 DOC 浓度,仪器检出限为 0.2 mg/L。DOC 和 POC 的 δ<sup>13</sup>C 值利用 MAT-253 质谱仪(Thermo Fisher, Germany)进行测定。利用德国 Elementar 元素分析仪(Vario macro cube)测定样品的 POC 浓度。δ<sup>13</sup>C 值测定结果以千分比为单位(‰),测量精度为 0.2‰,以 PDB 国际标准为参考标准,计算公式如下:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = \left[ \frac{{}^{13}\text{R}_{\text{sample}} - {}^{13}\text{R}_{\text{standard}}}{{}^{13}\text{R}_{\text{standard}}} \right] \times 1000 \quad (1)$$

$${}^{13}\text{R} = {}^{13}\text{C} / {}^{12}\text{C} \quad (2)$$

式中, R<sub>sample</sub> 表示样品测量值, R<sub>standard</sub> 表示国际标准值。测定结果见表 2。

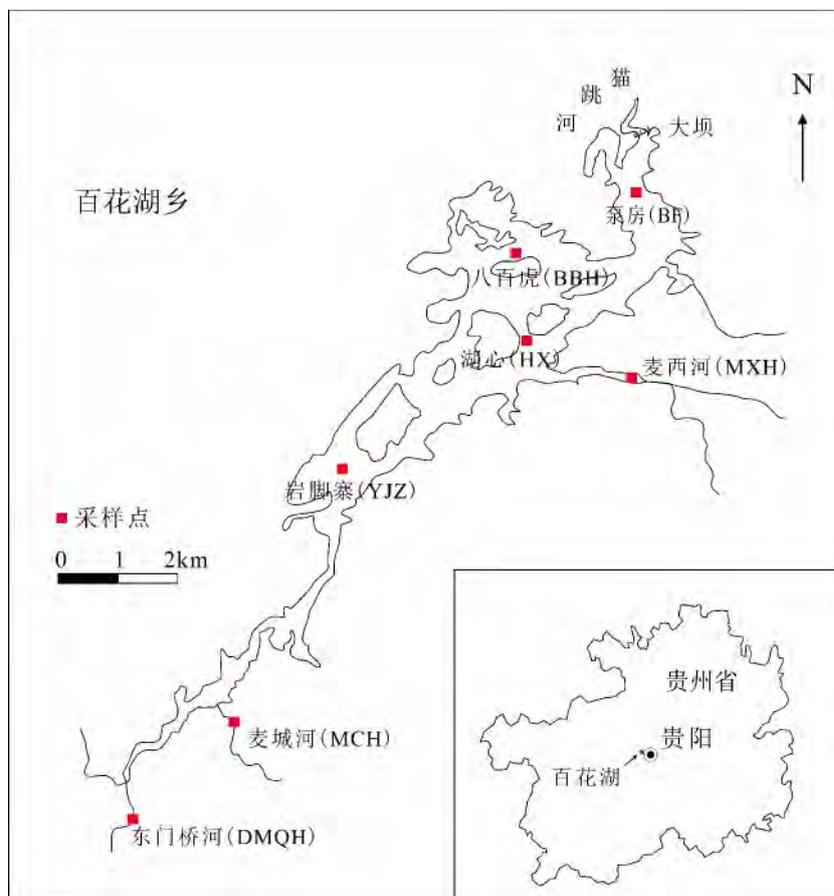


图 1 百花湖采样点分布图

Fig. 1 Map of sampling sites in Lake Baihua

表 1 百花湖采样点位和坐标

Table 1 The sampling sites and coordinates of Lake Baihua

采样点	点位描述	经度(E)	纬度(N)	采样深度(m)
BF	泵房	106°32'54"	26°40'26"	0.5, 12, 22
BBH	八百虎	106°31'11"	26°40'06"	0.5, 12, 18
HX	湖心	106°31'37"	26°39'24"	0.5, 12, 18
YJZ	岩脚寨	106°30'00"	26°38'31"	0.5, 12
MXH	麦西河	106°32'31"	26°39'18"	0.5
MCH	麦城河	106°28'48"	26°35'36"	0.5
DMQH	东门桥河	106°27'58"	26°34'01"	0.5
WS	污水厂	106°27'20"	26°34'08"	0.5

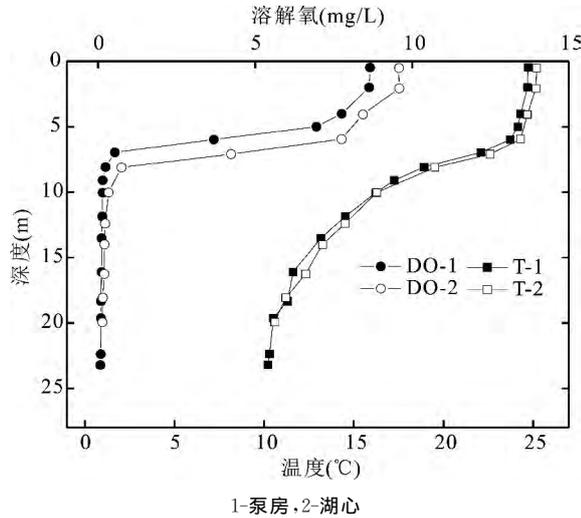


图 2 百花湖温度(T)、溶解氧(DO)随深度变化图

Fig. 2 The depth profiles of temperature (T) and dissolved oxygen (DO) in the water column of Lake Baihua

表 2 百花湖分层期 DIC, DOC 和 POC 的浓度及其  $\delta^{13}C$  值

Table 2 The concentrations and stable isotopic compositions of DIC, DOC and POC in the thermally stratified water column of Lake Baihua in August 2013

样品编号	深度(m)	DIC		DOC		POC	
		浓度(mg/L)	$\delta^{13}C$ (‰)	浓度(mg/L)	$\delta^{13}C$ (‰)	浓度(mg/L)	$\delta^{13}C$ (‰)
BF	0.5	13.41	-3.2	3.26	-27.5	1.76	-28.7
BBH	0.5	17.85	-1.9	2.73	-27.0	1.92	-28.0
HX	0.5	26.57	-2.5	2.94	-27.7	1.72	-28.5
YJZ	0.5	31.23	-2.5	2.8	-27.5	2.43	-28.3
MXH	0.5	26.38	-4.1	2.76	-26.7	3.5	-28.3
MCH	0.5	97.9	-9.4	2.35	-20.2	0.54	-30.4
DMQH	0.5	103.37	-9.1	3.46	-26.2	0.72	-27.1
WS	0.5	102.58	-11.2	3.22	-22.3	2.03	-24.2
BF	12	45.82	-10.6	2.48	-27.4	0.7	-29.2
BBH	12	47.92	-11.0	2.39	-21.2	0.6	-30.1
HX	12	3.42	-10.6	1.97	-24.1	0.61	-28.4
YJZ	12	59.95	-10.8	2.58	-23.1	0.77	-31.0
BF	22	66.9	-10.8	2.39	-23.8	0.63	-29.2
BBH	18	38.54	-11.2	2.52	-16.7	0.65	-30.1
HX	18	19.18	-11.2	2.36	-24.6	0.73	-32.2
YJZ	12	59.95	-10.8	2.58	-23.1	0.77	-31.0

### 3 结果

#### 3.1 有机碳浓度特征

百花湖夏季热分层水体中 DOC 和 POC 的浓度如图 3 和图 4 所示。湖泊 DOC 和 POC 浓度的总体变化范围是 1.97~3.26 mg/L(平均为 2.58 mg/L)和 0.60~2.43 mg/L(平均为 1.14 mg/L)。上层水体 DOC 的浓度高于下层水体, 水体 DOC 平均浓度由表层的 2.93 mg/L 降到底层的 2.55 mg/L。横向比较发现东门桥河水体的 DOC 浓度最大, 达 3.46 mg/L, 高于百花湖水体 DOC 浓度。百花湖水体 POC 浓度在垂向剖面上表现出与 DOC 相同的变化趋势, 但 POC 的浓度变化幅度更大。水体 POC 平均浓度由表层的 1.96 mg/L 降到底层的 0.70 mg/L。麦西河的 POC 浓度最大, 达 3.50 mg/L, 高于百花湖水体 POC 浓度, 而麦城河 POC 浓度为 0.54 mg/L, 低于百花湖水体各采样点(表 2)。

#### 3.2 有机碳 $\delta^{13}C$ 的空间分布特征

夏季热分层期, 百花湖 DOC 和 POC 的  $\delta^{13}C$  值变化范围分别为 -16.7‰~-27.7‰(平均为 -24.6‰)和 -28.0‰~-32.2‰(平均为 -29.3‰)。由图 5 和表 2 可见, DOC 的  $\delta^{13}C$  值表现出显著的垂向变化, 泵房、八百虎、湖心、岩脚寨的  $\delta^{13}C_{DOC}$  值分别从表层的 -26.5‰, -27.0‰, -27.7‰, -27.5‰ 升高到底层的 -23.8‰, -16.7‰, -24.6‰, -23.1‰, 随深度增加 DOC 的  $\delta^{13}C$  值呈现偏正的趋势, 且表层 DOC 的  $\delta^{13}C$  较入湖河流偏负。与 DOC 的  $\delta^{13}C$  值相比, POC 的  $\delta^{13}C$  值明显偏负。与  $\delta^{13}C_{DOC}$  剖面变化趋势相反, 水体  $\delta^{13}C_{POC}$  值均随深度的增加呈现偏负的趋势(图 6), 水体 DIC 也表现出上层水体较下层水体更加富集  $^{13}C$ (图 7)。泵房、八百虎、湖心和岩

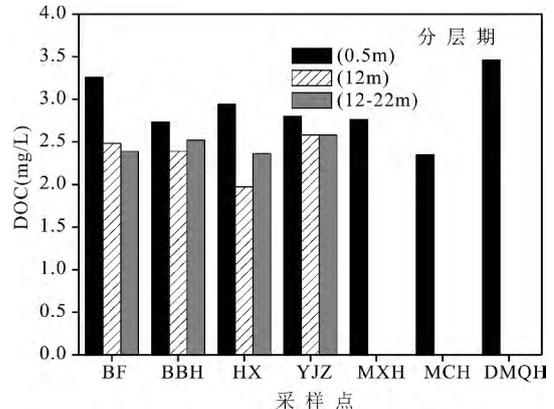


图 3 百花湖分层期各采样点 DOC 浓度的分布

Fig. 3 Site-specific distributions of the isothermal lake concentrations of DOC in Lake Baihua

脚寨,  $\delta^{13}C_{POC}$  值分别从表层的  $-28.7\text{‰}$ ,  $-28.0\text{‰}$ ,  $-28.5\text{‰}$ ,  $-28.3\text{‰}$  降至底层的  $-29.2\text{‰}$ ,  $-30.1\text{‰}$ ,  $-32.2\text{‰}$ ,  $-31.0\text{‰}$ , 表层水体  $\delta^{13}C_{POC}$  较深层偏正约  $2.7\text{‰}$ 。百花湖水体 POC 的  $\delta^{13}C$  值较 DOC 的  $\delta^{13}C$  值明显偏负。麦城河  $\delta^{13}C_{POC}$  值较湖泊表层水体偏负(见图 6 和表 2)。

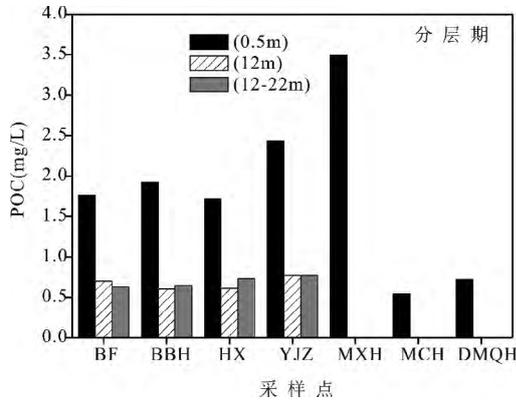


图 4 百花湖分层期各采样点 POC 浓度的分布  
Fig. 4 Site-specific distributions of the isothermal lake concentrations of POC in Lake Baihua

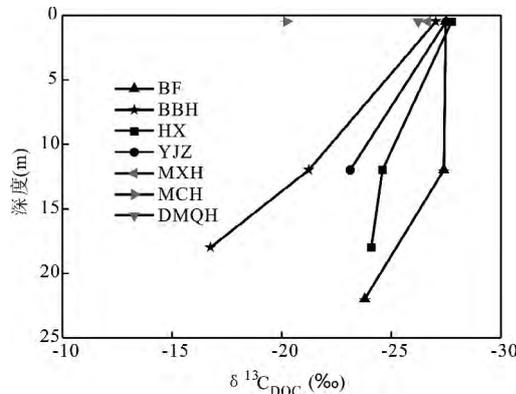


图 5 热分层期百花湖  $\delta^{13}C_{DOC}$  的垂直分布  
Fig. 5 The depth profiles of  $\delta^{13}C_{DOC}$  in the isothermal water column of Lake Baihua

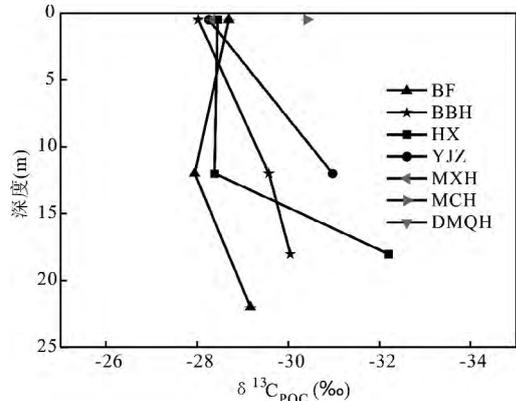


图 6 热分层期百花湖  $\delta^{13}C_{POC}$  的垂直分布  
Fig. 6 The depth profiles of  $\delta^{13}C_{POC}$  in the isothermal water column of Lake Baihua

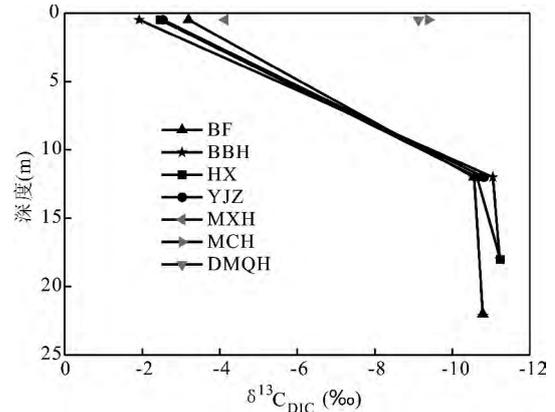


图 7 热分层期百花湖  $\delta^{13}C_{DIC}$  的垂直分布  
Fig. 7 The depth profiles of  $\delta^{13}C_{DIC}$  in the isothermal water column of Lake Baihua

### 4 讨论

#### 4.1 水体有机碳浓度变化规律与控制因素

百花湖水体分层期 DOC 浓度表现出“上层高、下层低”的趋势,这与前人对分层期湖泊(Superior 湖、红枫湖等)水体的研究结果一致<sup>[16-18]</sup>。研究表明,藻类活动和陆源输入都可能导致湖泊水体 DOC 浓度升高<sup>[19, 20]</sup>。前人研究认为 Superior 湖 DOC 浓度“上层高、下层低”的特征是由于上层水体具有较高的生产力和较多的陆源有机质输入<sup>[16]</sup>。百花湖为雨热同期的气候,湖泊的分层期正好是降雨集中的季节,同时也是藻类生长旺盛的季节<sup>[18]</sup>。Chl-a 通常可反映藻类的生物量变化<sup>[18]</sup>,百花湖水体 Chl-a 与 DOC 浓度的正相关变化( $R^2 = 0.53$ ,图 8)指示藻类活动控制了水体 DOC 浓度变化。湖泊最大 Chl-a 浓度出现在 4 m 范围内,受湖水透明度( $< 4$  m)和光照影响,藻类的生长局限在表层,表层水体藻类生长释放 DOC 是导致表层水体 DOC 浓度增加的主要原因。另一方面,陆源输入也是湖泊水体 DOC 不可忽视的一个来源。但本项研究结果表明,虽然东门桥河水体 DOC 浓度略高于百花湖水体,但与其最接近的岩脚寨 DOC 浓度并没有因为东门桥河的注入而高于湖泊其他位置。其原因可能是东门桥河 DOC 输入通量较小,对百花湖水体 DOC 浓度的影响较小。湖泊的热分层现象在一定程度上阻止了上下层物质交换,因此藻类活动导致百花湖水体 DOC 浓度呈现“上层高,底层低”的现象。

百花湖水体分层期 POC 浓度也表现出显著的“上层高、下层低”的趋势,这与北美 Superior 湖基本一致。Zigah 等(2011)<sup>[17]</sup>将这一特征归因于上层

水体富集藻类。夏季分层期, 百花湖水体 POC 浓度与 Chl-a 浓度具有显著的正相关关系 ( $R^2 = 0.97$ , 图 9), 表明藻源有机碳是百花湖 POC 的重要来源。已有研究表明, C/N 比是用来示踪 POC 来源的有效指标<sup>[21]</sup>, 浮游植物的 C/N 值通常小于 10, 陆源有机质的 C/N 比值通常大于 20<sup>[22, 23]</sup>。百花湖水体 POC 的 C/N 值范围为 1.9~6.2, 表明其主要来源于藻源有机碳。上层水体光合作用旺盛, 藻类富集, 同时湖泊水体热分层阻碍了上下层水体交换, 导致 POC 浓度呈现上高下低的趋势。因此, 藻类活动是导致百花湖 POC 浓度呈现“上层高、下层低”的最主要的因素。

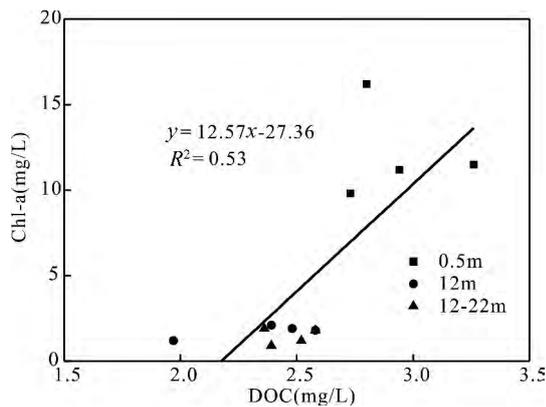


图 8 POC 浓度与 Chl-a 浓度的相关关系  
Fig. 8 POC vs. Chl-a concentration plot

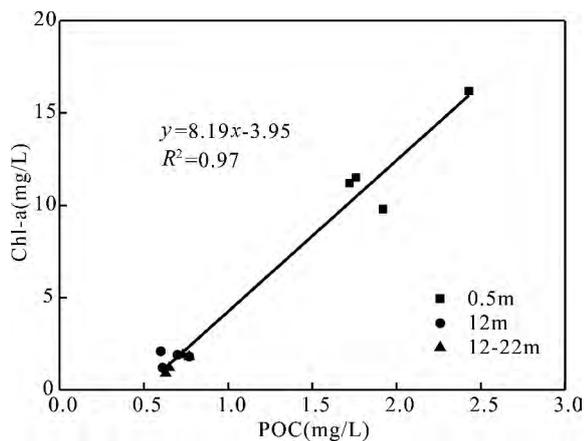


图 9 POC 浓度与 Chl-a 浓度的相关关系  
Fig. 9 POC vs. Chl-a concentration plot

#### 4.2 水体有机碳稳定同位素组成变化规律与控制因素

夏季分层期, 百花湖水体 DIC 的  $\delta^{13}\text{C}$  值随水体深度增加而偏负 (图 7)。受藻类光合作用影响, 湖泊表层水体藻类光合作用旺盛, 藻类在光合作用形成有机质过程中优先利用  $^{12}\text{C}$ <sup>[24, 25]</sup>, 使剩余水体 DIC 的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  增加; 相反, 底层水体中有机质分解优

先释放出大量  $^{12}\text{C}$  进入湖水, 使底层水体中的  $\delta^{13}\text{C}$  值偏负<sup>[26]</sup>。

百花湖水体 POC 的  $\delta^{13}\text{C}$  值表现为随水体深度增加呈偏负趋势, 这与前人在 Superior 湖和大西洋中观测到的结果一致<sup>[17, 27]</sup>。百花湖 POC 的主要来源为藻源有机碳, 其表层水体  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$  偏正最可能的原因是表层水体藻类光合作用。夏季分层期, 百花湖表层藻类多, 水体光合作用旺盛, 光合作用优先利用  $^{12}\text{C}$ , 使得剩余水体 DIC 富集  $^{13}\text{C}$ , 藻类光合作用由于二氧化碳供给不足, 对  $^{12}\text{C}$ 、 $^{13}\text{C}$  的选择性变弱, 光合作用选择利用  $^{13}\text{C}$  从而生成的 POC 的  $\delta^{13}\text{C}$  值也偏正。上层水体光合作用是导致百花湖  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$  值呈现上正下负的最重要原因。此外, 沉积物的再悬浮也可能导致下层水体  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$  值偏负<sup>[25, 28]</sup>。

Zigah 等 (2011)<sup>[17]</sup> 研究表明, Superior 湖泊水体 DOC 的  $\delta^{13}\text{C}$  值没有和湖泊的热分层机制耦合, 未表现出显著的空间变化。与此形成鲜明对照的是, 百花湖水体分层期 DOC 的  $\delta^{13}\text{C}$  值表现出明显的空间差异, 随深度增加 DOC 的  $\delta^{13}\text{C}$  值呈现偏正的趋势。通常, 湖泊水体 DOC 的来源主要为藻类释放 DOC 和河流输入 DOC<sup>[5]</sup>。虽然野外采样观察发现百花湖有污水输入, 且污水具有相对偏正的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$  值 ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}} = -22.3\text{‰}$ ), 但即使在离污水输入点较近的岩脚寨表层也没有发现明显偏正的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$  值, 这表明河流输入对百花湖水体  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$  值的影响较小。一般情况下, 夏季湖泊分层期, 溶解有机质在深体会发生矿化<sup>[16, 29]</sup>, 矿化作用会优先矿化  $^{12}\text{C}$ , 使得剩余水体 DOC 富集  $^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$  值偏正<sup>[30]</sup>。此外, 溶解有机质的分解也会释放大量的  $^{12}\text{C}$ , 使得剩余 DOC 的  $\delta^{13}\text{C}$  值偏正<sup>[28]</sup>。深层水体 DOC 的矿化作用和分解作用是导致百花湖深层水体  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$  值偏正的最可能的原因。Superior 湖泊水体 DOC 的  $\delta^{13}\text{C}$  值并没有表现出显著的空间变化, Zigah 等 (2012)<sup>[16]</sup> 认为这是由于 Superior 湖为双混合型湖泊, 湖水的混合作用导致湖水横向运动速率较湖泊生物地球化学循环更快。百花湖为单季混合性湖泊, 夏季分层更稳定, 且湖水温度比 Superior 湖高, 有利于藻类的生长, 因此分层期上下层水体 DOC 的  $\delta^{13}\text{C}$  值呈现明显差异性。

与 Superior 湖相似, 百花湖水体  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$  较  $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$  偏正, 这可能是由于 DOC 更易遭受光降解作用, 实验证明光降解作用优先使溶解有机质中的  $^{12}\text{C}$  发生矿化, 从而导致残留的有机质富集  $^{13}\text{C}$ <sup>[17, 30]</sup>。

## 5 结 论

1) 夏季分层期百花湖上层水体 DOC 和 POC 的浓度均高于下层水体, 水体 DOC 和 POC 浓度变化主要由藻类活动控制。

2) 百花湖水体 DOC 的  $\delta^{13}\text{C}$  值随水体深度增加呈现明显偏正的趋势, 深层水体溶解有机质的矿化

作用和分解作用可能是导致这一现象的主要原因。

3) 百花湖水体 POC 的  $\delta^{13}\text{C}$  值表现出上层水体较下层水体更加富集  $^{13}\text{C}$ , 这可能是上下层水体生产力差异及沉积物再悬浮作用所致。

4) 百花湖水体 DOC 的  $\delta^{13}\text{C}$  值较 POC 的  $\delta^{13}\text{C}$  值偏正, 这可能是由于 DOC 更易遭受光降解作用影响。

## 参 考 文 献

- [1] Wu F, Tanoue E. Geochemical characterization of organic ligands for copper (II) in different molecular size fractions in Lake Biwa, Japan[J]. *Organic Geochemistry*, 2001, 32:1311-1388.
- [2] Urban N R, Auer M T. Carbon cycling in Lake Superior[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110:1-17.
- [3] 吴丰昌, 金相灿, 张润宇, 等. 论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性[J]. *湖泊科学*, 2010, (001):1-7.
- [4] Raymond P A, Bauer J E. DOC cycling in a temperate estuary: a mass balance approach using natural  $^{14}\text{C}$  and  $^{13}\text{C}$  isotopes[J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46(3):655-667.
- [5] Raymond P A, Bauer J E. Use of  $\delta^{14}\text{C}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  natural abundances for evaluating riverine, estuarine, and coastal DOC and POC sources and cycling: A review and synthesis[J]. *Organic Geochemistry*, 2001, 32(4):469-485.
- [6] McNichol A P, Aluwihare L I. The power of radiocarbon in biogeochemical studies of the marine carbon cycle: Insights from studies of dissolved and particulate organic carbon (DOC and POC)[J]. *ChemInform*, 2007, 38(24):443-466.
- [7] Bauer J E, Bianchi T S. Dissolved organic carbon cycling and transformation[J]. *Biogeochemistry*, 2011, 5:7-67.
- [8] Raymond P A and Bauer J E. Riverine export of aged terrestrial organic matter to the North Atlantic Ocean[J]. *Nature*, 2001, 409(6819):497-500.
- [9] Zigah P K, Minor E C, Werne J P, *et al.* An isotopic ( $\delta^{14}\text{C}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ , and  $\delta^{15}\text{N}$ ) investigation of the composition of particulate organic matter and zooplankton food sources in Lake Superior and across a size-gradient of aquatic systems[J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(9):3663-3678.
- [10] Thorp J H, Delong M D. Dominance of autochthonous autotrophic carbon in food webs of heterotrophic rivers[J]. *Oikos*, 2002, 96(96):543-550.
- [11] 王中良, 李军, 刘丛强, 等. 天津地表水中有机碳来源的同位素示踪研究[J]. *地球与环境*, 2011, 39(1):1-8.
- [12] 王春雨, 万国江, 尹澄清, 等. 红枫湖、百花湖沉积物全氮、可交换态氮和固定铵的赋存特征[J]. *湖泊科学*, 2001, 14(04):301-309.
- [13] 夏品华, 刘燕, 薛飞, 等. 贵州百花湖水库浮游植物群落结构与季节变化[J]. *地球与环境*, 2012, (02):179-187.
- [14] 王敬富, 陈敬安, 曾艳, 等. 贵州百花湖沉积物磷、氮及有机碳的空间分布特征[J]. *环境化学*, 2012, 31(05):599-603.
- [15] 万国江, 万恩源, 陈敬安, 等. 深水人工湖环境生物地球化学过程研究:以贵州红枫湖-百花湖为例[J]. *地球与环境*, 2010, 38(03):262-270.
- [16] Zigah P K, Minor E C, Werne J P. Radiocarbon and stable-isotope geochemistry of organic and inorganic carbon in Lake Superior[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26:1-20.
- [17] Zigah P K, Minor E C, Werne J P, *et al.* Radiocarbon and stable carbon isotopic insights into provenance and cycling of carbon in Lake Superior[J]. *Limnology and Oceanography*, 2011, 56(3):867-886.
- [18] Li W, Wu F, Liu C, *et al.* Temporal and spatial distributions of dissolved organic carbon and nitrogen in two small lakes on the Southwestern China Plateau[J]. *Limnology*, 2008, 9(2):163-171.
- [19] Kim B, Choi K, Kim C, *et al.* Effects of the summer monsoon on the distribution and loading of organic carbon in a deep reservoir[J]. *Water Reserch*, 2000, 34(14):3495-3504.
- [20] Mague T H, Friberg E, Huges D J. Extracellular release of carbon by marine phytoplankton: a physiological approach [J]. *Limnology and Oceanography*, 1980, 25(25):262-279.
- [21] 程君, 石晓勇, 张传松, 等. 春季黄海颗粒有机碳的时空分布特征[J]. *环境科学*, 2011, 32(9):2505-2011.

- [22] Tao F, Liu C, Li S. Source and flux of POC in two subtropical karstic tributaries with contrasting land use practice in the Yangtze River Basin[J]. *Geochem*, 2009, 24(11):2102–2112.
- [23] Meyers P A, Horie S. An organic carbon isotopic record of glacial–postglacial change in atmospheric pCO<sub>2</sub> in the sediments of Lake Biwa, Japan [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1993, 105:171–178.
- [24] 王仕禄, 刘丛强, 万国江. 红枫湖碳同位素变化指示的湖泊碳循环过程[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2006, 25:107–108.
- [25] 喻元秀, 刘丛强, 汪福顺, 等. 乌江流域梯级水库中溶解无机碳及其同位素分异特征[J]. *科学通报*, 2007, 53(16):1935–1941.
- [26] Parker S R, Gammons C H, Poulson S P, *et al.* Diel behavior of stable isotopes (18-O & 13-C) of dissolved oxygen and dissolved inorganic carbon in Montana, USA rivers, and in a mesocosm experiment[J]. *Chemical Geology*, 2010, 269:22–32.
- [27] Bauer J E, Druffel E R M, Wolgast D M, *et al.* Temporal and regional variability in sources and cycling of DOC and POC in the northwest Atlantic continental shelf and slope[J]. *Deep-Sea Research II*, 2002, 49:4387–4419.
- [28] Breugel Y, Schouten S, Paetzel M, *et al.* The impact of recycling of organic carbon on the stable carbon isotopic composition of dissolved inorganic carbon in a stratified marine system (Kyllaren fjord, Norway)[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36:1163–1173.
- [29] 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):1979–1985.
- [30] Vahatalo A V, Wetzel R G. Long-term photochemical and microbial decomposition of wetland-derived dissolved organic matter with alteration of <sup>13</sup>C:<sup>12</sup>C mass ratio[J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53(4):1387–1392.

## Stable Isotopic Composition and Distribution Characteristics of Organic Carbon in the Stratified Column of Lake Baihua, Guizhou Province

XU Dan<sup>1, 2</sup>, CHEN Jing-an<sup>1, \*</sup>, YANG Hai-quan<sup>1, 2</sup>, WANG Jing-fu<sup>1, 2</sup>, JI Yong-xue<sup>1, 2</sup>

(1. The State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Investigations on the dissolved organic carbon (DOC) and particulate organic carbon (POC) in lake water help to reveal the sources and fate of organic carbon. The concentrations and stable carbon isotopic compositions of dissolved organic carbon (DOC) and particulate organic carbon (POC) in Lake Baihua, Southwest China, were determined to investigate the spatial distribution of organic carbon in the stratified water column of Lake Baihua. The results indicated that DOC and POC concentrations are within the ranges of 1.97~3.26 mg/L (with a mean value of 2.58 mg/L) and 0.60~2.43 mg/L (with a mean value of 1.14 mg/L), respectively. Both DOC and POC concentrations decrease with depth in the lake during stratification. Algal activity dominates the variations of DOC and POC in the water column. The considerable enrichment of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DOC}}$  with depth in Lake Baihua during the stratified season is most likely due to mineralization and decomposition processes in the deeper water. The <sup>13</sup>C values of POC were <sup>13</sup>C-depleted progressively with depth during the stratified period because of differences in productivity and sedimentary resuspension between epilimnion and respiration. The consistent  $\delta^{13}\text{C}$ -depletion of POC relative to DOC may have resulted from the fact that the DOC pool was more vulnerable to photodegradation.

**Key words:** Lake Baihua; stratification; organic carbon; stable carbon isotope