

# 新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征

杨乐<sup>1</sup>, 李贺鹏<sup>1</sup>, 孙滨峰<sup>2</sup>, 岳春雷<sup>1</sup>

(1. 浙江省林业科学研究院, 杭州 310023; 2. 江西省农业科学院农业工程研究所, 南昌 330200)

**摘要:** 新安江水库是我国华东地区最大的水库, 面积 580 km<sup>2</sup>, 平均深度 30 m, 水库水体处于中贫营养状态。为了研究新安江水库中 CO<sub>2</sub> 排放的时空变化特征, 2014 年 12 月至 2015 年 12 月采用静态浮箱法收集水库表面以分子扩散方式排放的 CO<sub>2</sub>, 使用气相色谱仪分析 CO<sub>2</sub> 浓度。结果表明, 新安江水库 CO<sub>2</sub> 排放通量从上游入库河流 [(120.39 ± 135.41) mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>] 至库区主体 [(36.65 ~ 61.94) mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>] 呈下降趋势, 而大坝下游河流中 CO<sub>2</sub> 排放通量 [(1535.00 ± 1447.46) mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>] 显著增加, 约分别是上游入库河流和库区主体的 13 倍和 25 ~ 42 倍。但随着与大坝距离增加, 大坝下游河流中 CO<sub>2</sub> 排放通量显著下降, 如 7 km 处的 CO<sub>2</sub> 排放通量仅为出库水体处的 20%。在库区主体中, CO<sub>2</sub> 排放通量具有明显的季节变化: CO<sub>2</sub> 排放通量在秋、冬季时为正值, 最大值出现在冬季(12 月或 1 月), 说明此时库区表层水体是 CO<sub>2</sub> 排放源; 而 CO<sub>2</sub> 排放通量在春、夏季为负值, 最小值出现在春季(3、4 或 5 月), 说明此时库区表层水体是 CO<sub>2</sub> 吸收汇, 这可能与春、夏季时水体中藻类繁殖有关。所以, 在调查水库表面 CO<sub>2</sub> 排放时, 应对水库的上游入库河流、库区主体和坝下河流进行全面长期的观测, 才能避免低估水库中 CO<sub>2</sub> 排放总量。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 排放源; CO<sub>2</sub> 吸收汇; CO<sub>2</sub> 排放通量; 新安江水库; 大坝下游河流

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5012-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201704190

## Spatial and Temporal Variability of CO<sub>2</sub> Emissions from the Xin'anjiang Reservoir

YANG Le<sup>1</sup>, LI He-peng<sup>1</sup>, SUN Bin-feng<sup>2</sup>, YUE Chun-lei<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, China; 2. Agricultural Engineering Research Institute of Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China)

**Abstract:** Xin'anjiang Reservoir is the largest reservoir in eastern China, with a surface area of 580 km<sup>2</sup> and a mean depth of 30 m. It is in an oligotrophic or mesotrophic state at present. This study measured carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions from the upstream river, the reservoir's main body, and the river downstream of the Xin'anjiang Reservoir to investigate the spatial and seasonal variability of CO<sub>2</sub> emissions from the water surface using static floating chambers and gas chromatography. Results showed that the downstream river had, significantly, the highest CO<sub>2</sub> emission flux [(1535.00 ± 1447.46) mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>], followed by the upstream river [(120.39 ± 135.41) mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>]. The reservoir's main body had the lowest flux [(36.65~61.94) mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>]. The high CO<sub>2</sub> emission flux in the downstream river was probably influenced by turbulence during the discharge periods, which would allow the dissolved CO<sub>2</sub> in the hypolimnion before the dam to be released to the atmosphere in the watercourse of the downstream river. However, the CO<sub>2</sub> emission flux decreased with distance to the dam, likely because of the drop in strength of the turbulence. Moreover, there was an obvious alternation between CO<sub>2</sub> source and CO<sub>2</sub> sink in the main body of the reservoir, with CO<sub>2</sub> sources in autumn and winter and CO<sub>2</sub> sinks in spring and summer. The maximum and minimum CO<sub>2</sub> emission values occurred in winter and spring, respectively. Such variability in the CO<sub>2</sub> emissions was probably influenced by the bloom of alga in spring and summer, because dissolved CO<sub>2</sub> in the water was absorbed by the respiration of alga. However, hydrologic conditions were unstable in the upstream river due to a fast water flow, so alga was difficult to bloom there, and a CO<sub>2</sub> source was observed throughout the year, except during April and August. The measurement of the flux from the upstream river, main body, and downstream river required a long period for the investigation of greenhouse gas emissions to avoid underestimating the total CO<sub>2</sub> emission from a hydroelectric reservoir system.

**Key words:** CO<sub>2</sub> source; CO<sub>2</sub> sink; CO<sub>2</sub> emission flux; Xin'anjiang Reservoir; downstream river

二氧化碳(CO<sub>2</sub>)是大气中最重要的温室气体, 全球气候变暖与大气中 CO<sub>2</sub> 浓度的升高关系密切<sup>[1]</sup>。湿地是 CO<sub>2</sub> 重要的排放源(2.1 Pg·a<sup>-1</sup>), 即每年从河流、溪流中排放 1.8 Pg C 的 CO<sub>2</sub>, 从水库、湖泊排放 0.32 Pg C 的 CO<sub>2</sub><sup>[2]</sup>, 湿地中碳排放与陆地上或海洋中的 CO<sub>2</sub> 碳汇量相接近<sup>[3]</sup>。水库是一种重要的湿地类型, 而水库中有大量 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub>

排放, 这一事实否定了水电是清洁能源的观点, 据最新估算, 全球水库表面每年约排放 134.9 Tg CO<sub>2</sub><sup>[4]</sup>, 而中国水库表面每年约排放 17.0 Tg

收稿日期: 2017-04-19; 修订日期: 2017-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41303065); 浙江省省院合作林业科技项目(2015SY01); 浙江省省属科研院所扶持专项(2015F50002, 2015F30001, 2017F30016)

作者简介: 杨乐(1985~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为水库碳氮循环, E-mail: yangle3012@163.com

$\text{CO}_2$  [5], 约占世界水库  $\text{CO}_2$  排放总量的八分之一。因为中国水库数量众多, 约有 98 000 座大坝, 总库容 9 323. 12 亿  $\text{m}^3$ , 居世界第一 [6]。目前国内对水库中  $\text{CO}_2$  排放的报道也较多, 主要集中在长江、黄河及其支流上的各大水库中。

新安江水库是钱塘江上游重要源头之一, 其库容达到 178. 4 亿  $\text{m}^3$ , 是我国华东地区战略水资源储存地 [7]。但新安江水库的水质因受旅游活动、网箱养殖、水土流失、上游垃圾入湖、过度开发等因素的影响, 水体中总氮 (TN)、叶绿素浓度超标, 由 2003 至 2012 年对新安江水库水质的监测结果表明, 水体由寡营养逐渐上升到中营养水平 [8], 这影响水库表面  $\text{CO}_2$  排放。因为水体中营养盐浓度上升, 会导致浮游藻类浓度升高, 而藻类的光合作用将吸收大气中的  $\text{CO}_2$ , 由  $\text{CO}_2$  排放源转变为  $\text{CO}_2$  吸收汇 [9]。所以水库中水质状况是影响“水-气”界面上  $\text{CO}_2$  排放的重要因素之一 [10]。

新安江水库水体中  $p\text{CO}_2$  ( $\text{CO}_2$  分压) 和  $\text{CO}_2$  排放通量具有明显的季节变化特征, Wang 等 [11] 使用红外平衡装置系统在 5 个不连续的月份 (1、4、6、8、11 月) 从上游 (街口) 到大坝下游河流走航观测  $p\text{CO}_2$ , 坝前库区主体 8 月  $p\text{CO}_2$  和  $\text{CO}_2$  排放通量最低 [分别为 0.51 Pa,  $-7.2 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ], 1 月  $p\text{CO}_2$  和  $\text{CO}_2$  排放通量最高 [分别为 172 Pa,  $16.8 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ]; 而大坝下游河流中 4 月  $p\text{CO}_2$  和  $\text{CO}_2$  排放通量最低 [分别为 142 Pa,  $86.0 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ], 8 月  $p\text{CO}_2$  和  $\text{CO}_2$  排放通量最高 [分别为 385 Pa,  $254.5 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ]。新安江水库面积大, 形状呈“十字”交叉型, 有西北、中心、东北、东南、西南这 5 个湖区构成, Wang 等 [11] 只走航观测了西北、中心和东南这 3 个湖区, 未涉及东北和西南两个湖区。此外, 在不连续的月份监测  $p\text{CO}_2$ , 可能会忽视出现  $p\text{CO}_2$  最大值或最小值的月份。

本研究采用静态浮箱-气相色谱法对西北、东北、东南、西南这 4 个主要湖区和坝下河流中对  $\text{CO}_2$  排放通量进行为期 1 年的连续观测, 分析新安江水库  $\text{CO}_2$  排放的时空变化特征, 以期评估新安江水电的能源清洁性提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 水库概况

新安江水库位于浙江省西部与安徽省南部交界

处淳安县境内 ( $29^\circ 22' \sim 29^\circ 50' \text{N}$ ,  $118^\circ 34' \sim 119^\circ 15' \text{E}$ ), 地处亚热带季风湿润气候带, 平均气温  $17.12^\circ \text{C}$ , 无霜期达 260 d, 平均降雨量 1 487 mm。新安江大坝于 1957 年 4 月开始建造, 1959 年 9 月新安江水库开始蓄水, 蓄水后形成的特大山谷型深水水库, 流域面积为 10 480  $\text{km}^2$ , 新安江水库面积为 580  $\text{km}^2$ , 库容量为 178. 4 亿  $\text{m}^3$ , 平均水深达 30 m, 湖中面积 2. 5  $\text{km}^2$  以上的岛屿 1078 个, 又名“千岛湖” [7]。新安江水库是一个集旅游、发电、航运、防洪、水资源供应与渔业生产于一体的特大型水库, 其巨大的蓄水量对长三角地区经济、社会的发展具有极其重要的意义。

### 1.2 样品采集与分析

西北湖区是新安江水库上游主要入库河流, 为新安江河道的一段, 每年约有 60% 的入库地表径流量从西北湖区注入新安江水库 [12]; 中心湖区、东北湖区、东南湖区、西南湖区这 4 个湖区组成了新安江水库的库区主体。根据新安江水库的水文特征和形状, 选取上游入库河流——西北湖区安徽歙县 (街口断面)、库区主体的东北湖区 (进贤溪断面)、西南湖区 (茅头尖断面)、东南湖区 (桂花岛断面, 图 1) 作为新安江大坝上游的采样地点。街口断面因江面狭窄从岸边到江中心依次设置 3 个采样点 (P1 ~ P3), 库区主体的 3 个断面由岸边至湖中心区域依次设置 5 个采样点 (P4 ~ P18, 图 1)。此外, 在新安江大坝下游河流中 0.35、1、4、7 km 设置 4 个采样点 (P19 ~ P22), 总计 22 个采样点 (图 1)。本实验从 2014 年 12 月开始至 2015 年 12 月结束, 观测这 22 个样点处“水-气”界面上以分子扩散方式排放的  $\text{CO}_2$  通量。采样活动尽量选择晴朗天气采集样品, 所有样点处气样采集的时间都为上午 09: 00 ~ 11: 00, 以避免日变化带来的影响 [13]。除 2015 年 1 月采集 2 次外, 其余月份都在各月月底采集 1 次气样, 用于反映  $\text{CO}_2$  排放通量的季节变化。

使用静态浮箱法收集“水-气”界面上  $\text{CO}_2$  分子扩散通量, 浮箱由硬质塑料制成, 底部开口, 其长、宽、高分别为 65 cm  $\times$  45 cm  $\times$  40 cm, 为了避免箱体在太阳直射下升温, 箱体外覆盖了双层气泡铝箔隔热材。在箱体较宽的相对两侧分别固定一条泡沫, 使箱体能够平衡地漂在水面上。在箱体的顶部中心和一角各钻 1 个小孔, 使用一根 3 m 长的硅胶管 (外径 6 mm, 内径 4 mm) 从中心的小孔插入箱体, 用于收集气样; 而另一根约 0.5 m 长的硅胶管从箱体顶部一角处的小孔插入箱体, 使箱体内外连通, 以

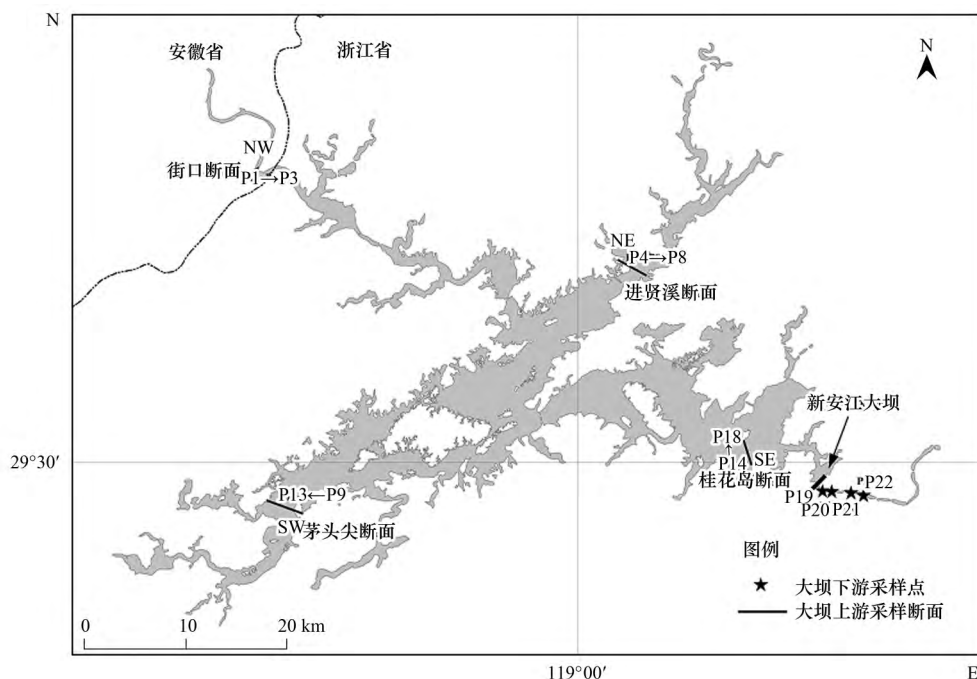


图1 新安江水库采样断面示意

Fig. 1 Distribution of sampling transects in the Xin'anjiang Reservoir

达到平衡箱内与箱外气压的效果. 每次采样时, 将3个相同的浮箱(作为重复)同时放置在水面上, 等待浮箱稳定地漂浮在水面后, 使用自制的大气采样器(其中气泵是德国的KNF气泵)分别在时间0、7、14、21 min时, 收集气样, 注入到大气采样袋(0.5 L, 大连海德科技公司)中, 以保存气样<sup>[14]</sup>.

气袋中  $\text{CO}_2$  的浓度使用气相色谱(Agilent 7890A, 美国 Agilent 公司)分析,  $\text{CO}_2$  浓度分析采用镍触媒的转化器, 转化成  $\text{CH}_4$ , 然后采用带氢焰离子检测器(FID)进行测定.  $\text{CO}_2$  标准气体的浓度分别为  $462 \times 10^{-6}$ , 由中国标准物质研究所提供.

气体通量回归的标准: ①如果通量值能够满足曲线回归(抛物线, 开口向下), 按照一元二次方程进行回归, 如果抛物线开口向上, 采用线性回归; ②回归曲线(或直线)的  $R^2 > 0.90$ ; ③抽取的第1个气样浓度值与取样附近的空气样品的差距在10%以内, 否则使用空气样品浓度值替代. 分子扩散通量的计算公式<sup>[13]</sup>:

$$F = \rho \times dc/dt \times \frac{273.15}{273.15 + T} \times H \times 60 \quad (1)$$

式中,  $F$  为气体通量 [ $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ],  $\rho$  为标准状况下  $\text{CO}_2$  的密度 ( $1.977 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $dc/dt$  是单位时间内箱体内容气体浓度的增量,  $T$  为温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ), 因箱体内温度难以直接测量, 使用酒精温度计测量箱体外的气温替代,  $H$  为箱体顶空高度 (0.35 m).

### 1.3 数据统计分析

首先使用 Kolmogorov-Smirnov 检验判断这些  $\text{CO}_2$  通量值是否服从正态分布, 如果不服从正态分布, 将  $\text{CO}_2$  通量值使用三角函数或者对数函数等初等函数进行转化使之服从正态分布. 然后采用方差分析方法(ANOVA), 使用 Student-Newman-Keuls 检验方法分析各个断面不同样点处  $\text{CO}_2$  平均通量值之间差异是否显著. 所有统计工作是使用 SPSS18.0 统计软件完成的.

## 2 结果与分析

### 2.1 上游入库河流 $\text{CO}_2$ 排放

上游入库河流(街口断面)  $\text{CO}_2$  平均排放通量为  $(120.39 \pm 135.41) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 从岸边(P1)到中心区域(P3)呈增加趋势, 但差异不显著(表1).

2014年12月  $\text{CO}_2$  排放通量最大 [ $(336.31 \pm 72.30) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ], 2015年4月和8月  $\text{CO}_2$  排放通量最小, 值分别为  $(-68.63 \pm 57.58) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  和  $(-66.83 \pm 9.00) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  (图2), 此时上游入库河流表层水体成为  $\text{CO}_2$  的吸收汇. 但上游入库河流在其余月份为  $\text{CO}_2$  排放源,  $\text{CO}_2$  排放通量季节变化呈波动式下降趋势(图2):  $\text{CO}_2$  排放通量在2014年12月~2015年3月保持高排放水平, 均值为  $(255.58 \pm 78.43) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ ,

在 2015 年 5 月 ~ 7 月保持中等排放水平, 均值为  $(127.94 \pm 33.75) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 而在 2015 年 9 ~ 12 月保持较低排放水平, 均值为  $(73.60 \pm 28.89) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ .

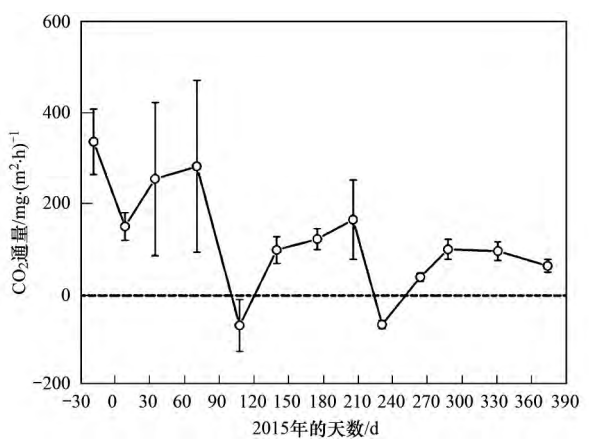
表 1 街口断面 3 个取样点  $\text{CO}_2$  扩散通量统计<sup>1)</sup> /  $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$

Table 1 Statistics for the diffusive  $\text{CO}_2$  flux at the three

sampling points of the Jiekou transect /  $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$

样点	n	平均值 $\pm$ 标准差	最大值	最小值
P1	40	$99.26 \pm 115.16^a$	301.20	-134.76
P2	38	$101.75 \pm 101.32^a$	288.27	-60.14
P3	39	$160.15 \pm 178.77^a$	487.88	-63.30
平均值	117	$120.39 \pm 135.41$	487.88	-134.76

1) 同一列中相同的字母表示在  $P = 0.01$  的水平上没有显著差异, 下同



横坐标中以 2015 年 1 月 1 日记为 1, 30 为 2015 年 1 月 30 日, 以此类推, 而 -30 为 2014 年 12 月 1 日, 下同

图 2 上游主要入库河流  $\text{CO}_2$  扩散排放平均通量动态

Fig. 2 Dynamics of the average diffusive  $\text{CO}_2$  emission flux in the main upstream river

2.2 水库主体  $\text{CO}_2$  排放

2.2.1 东北湖区

东北湖区进贤溪断面  $\text{CO}_2$  平均排放通量为  $(36.65 \pm 115.61) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 其中岸边样点 (P4)  $\text{CO}_2$  平均排放通量最大  $[(71.90 \pm 171.78) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$ , 约是其余 4 个样点处 (P5 ~ P8) 的 2 ~ 3 倍 (表 2)。

2015 年冬季 (1 ~ 2 月、12 月) 和秋季后段 (10 ~ 11 月) 为  $\text{CO}_2$  排放源, 最大值出现在 1 月  $[(363.45 \pm 231.98) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$ ; 而春季 (4 ~ 5 月)、夏季 (6 ~ 8 月) 和秋季前段 (9 月) 为  $\text{CO}_2$  吸收汇, 最小值出现在 7 月  $[( - 71.05 \pm 8.19) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$ , (图 3)。

2.2.2 西南湖区

西南湖区茅头尖断面  $\text{CO}_2$  平均排放通量为

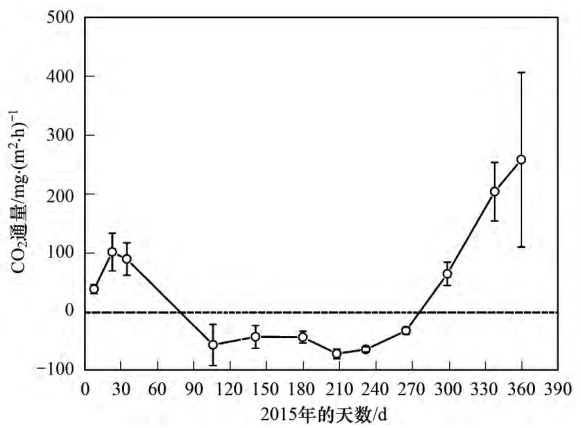


图 3 东北湖区  $\text{CO}_2$  扩散排放平均通量动态

Fig. 3 Dynamics of the average diffusive  $\text{CO}_2$  emission flux in the northeast lake

$(57.14 \pm 141.18) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 茅头尖断面  $\text{CO}_2$  排放通量变化趋势不明显: 在 5 个样点中 (P9 ~ P13), P11 的  $\text{CO}_2$  平均排放通量最大  $[(108.71 \pm 191.40) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$ , 湖中心 (P13) 的  $\text{CO}_2$  平均排放通量最小  $[(15.10 \pm 88.61) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$ , 表 2]。

冬季 (12 月 ~ 次年 2 月)、春季前段 (3 月) 和秋季 (9 ~ 11 月) 为  $\text{CO}_2$  排放源, 最大值出现在 1 月  $[(363.45 \pm 231.98) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$ ; 而春季后段 (4 ~ 5 月) 和夏季 (6 ~ 8 月) 为  $\text{CO}_2$  吸收汇, 其中 4 月  $\text{CO}_2$  排放通量值最小  $[( - 128.51 \pm 176.75) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}]$ , 图 4]。

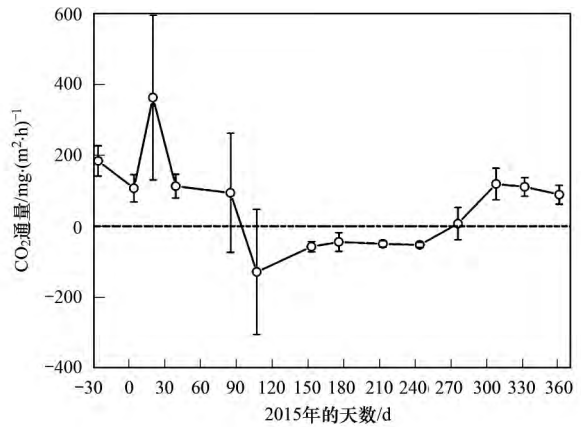


图 4 西南湖区  $\text{CO}_2$  扩散排放平均通量动态

Fig. 4 Dynamics of the average diffusive  $\text{CO}_2$  emission flux in the southwest lake

2.2.3 东南湖区

东南湖区桂花岛断面  $\text{CO}_2$  平均排放通量为  $(61.94 \pm 139.49) \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ , 桂花岛断面的 5 个样点从岸边到中心呈增加趋势, 岸边处 (P14)

CO<sub>2</sub> 平均排放通量最小 [ ( 40. 21 ± 125. 55 ) mg·( m<sup>2</sup>·h )<sup>-1</sup> ], 湖中心( P18 ) CO<sub>2</sub> 平均排放通量最大 [ ( 82. 63 ± 160. 68 ) mg·( m<sup>2</sup>·h )<sup>-1</sup> , 表 2 ] .

冬季( 12 月 ~ 次年 2 月 ) 、秋季( 9 ~ 11 月 ) 为 CO<sub>2</sub> 排放源 , 最大值出现在 1 月 [ ( 318. 81 ± 141. 47 ) mg·( m<sup>2</sup>·h )<sup>-1</sup> ]; 而春季( 3 ~ 5 月 ) 、夏季( 6 ~ 8 月 ) 为 CO<sub>2</sub> 吸收汇 , 最小值出现在 5 月 [ ( -150. 75 ± 54. 95 ) mg·( m<sup>2</sup>·h )<sup>-1</sup> , 图 5 ] .

2.3 坝下河流 CO<sub>2</sub> 排放

新安江大坝下游河流中 CO<sub>2</sub> 平均排放通量为 ( 1 535. 00 ± 1 447. 46 ) mg·( m<sup>2</sup>·h )<sup>-1</sup> , 见表 3 . 离大坝不同距离的 4 个样点比较可以发现 , 距离大坝越远 , CO<sub>2</sub> 排放通量呈下降趋势 : 距离大坝 0. 35 km 的样点处( P19 ) CO<sub>2</sub> 平均排放通量最大 [ ( 3 031. 21 ± 1 530. 23 ) mg·( m<sup>2</sup>·h )<sup>-1</sup> ], 距离大坝 7 km 处的样点处( P22 ) CO<sub>2</sub> 平均排放通量最小 [ ( 599. 85 ±

608. 46 ) mg·( m<sup>2</sup>·h )<sup>-1</sup> ], 仅为 P19 样点处的 20% , 而距离大坝 1 km( P20 ) 和 4 km( P21 ) 的 CO<sub>2</sub> 平均排放通量相接近 , 约为 P19 样点处的 40% ( 表 3 ) .

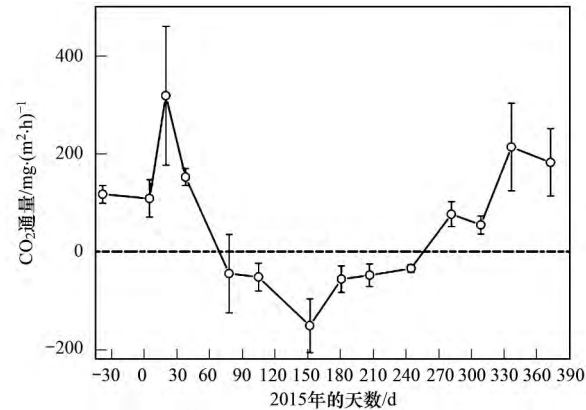


图5 东南湖区 CO<sub>2</sub> 扩散排放平均通量动态  
Fig. 5 Dynamics of the average diffusive CO<sub>2</sub> emission flux in the southeast lake

表2 新安江水库主体部分 CO<sub>2</sub> 排放通量统计 /mg·( m<sup>2</sup>·h )<sup>-1</sup>

Table 2 Statistics for diffusive CO <sub>2</sub> flux for the sampling points in Xin'anjiang Reservoir's main body/mg·( m <sup>2</sup> ·h ) <sup>-1</sup>					
位置	样点	n	平均值 ± 标准差	最大值	最小值
东北湖区	P4	32	71. 90 ± 171. 78 <sup>a</sup>	518. 70	- 70. 32
	P5	34	23. 89 ± 98. 39 <sup>a</sup>	215. 92	- 64. 03
	P6	36	37. 89 ± 109. 92 <sup>a</sup>	242. 35	- 82. 82
	P7	32	25. 41 ± 104. 67 <sup>a</sup>	201. 81	- 103. 57
	P8	31	23. 12 ± 85. 23 <sup>a</sup>	164. 83	- 82. 74
	平均值		36. 65 ± 115. 61	518. 70	- 103. 57
西南湖区	P9	27	84. 90 ± 166. 99 <sup>a</sup>	510. 83	- 72. 45
	P10	34	25. 65 ± 145. 85 <sup>a</sup>	223. 98	- 332. 59
	P11	32	108. 71 ± 191. 40 <sup>a</sup>	611. 49	- 51. 95
	P12	34	50. 98 ± 80. 89 <sup>a</sup>	169. 07	- 63. 84
	P13	30	15. 10 ± 88. 61 <sup>a</sup>	134. 77	- 117. 88
	平均值		57. 14 ± 141. 18	510. 83	- 332. 59
东南湖区	P14	37	40. 21 ± 125. 55 <sup>a</sup>	268. 11	- 228. 34
	P15	38	61. 41 ± 152. 03 <sup>a</sup>	500. 32	- 110. 09
	P16	37	59. 70 ± 140. 74 <sup>a</sup>	282. 38	- 176. 39
	P17	39	70. 04 ± 139. 01 <sup>a</sup>	326. 53	- 149. 36
	P18	37	82. 63 ± 160. 68 <sup>a</sup>	381. 59	- 99. 00
	平均值		61. 94 ± 139. 49	500. 32	- 228. 34

表3 下游河流距大坝不同距离的样点 CO<sub>2</sub> 排放通量统计 /mg·( m<sup>2</sup>·h )<sup>-1</sup>

Table 3 Statistics for CO <sub>2</sub> flux at the sampling points at different distances to the dam in the downstream river/mg·( m <sup>2</sup> ·h ) <sup>-1</sup>					
位置	样点	n	平均值 ± 标准差	最大值	最小值
坝下河流	P19( 0. 35 km )	39	3 031. 21 ± 1 530. 23 <sup>a</sup>	6 680. 83	1 381. 32
	P20( 1 km )	41	1 231. 45 ± 1 073. 82 <sup>b</sup>	3 527. 20	406. 34
	P21( 4 km )	39	1 277. 49 ± 1 214. 84 <sup>b</sup>	3 612. 46	303. 89
	P22( 7 km )	41	599. 85 ± 608. 46 <sup>c</sup>	1 950. 76	108. 74
	平均值	151	1 535. 00 ± 1 447. 46	6 680. 83	108. 74

比较离大坝不同远近的 4 个样点处 CO<sub>2</sub> 排放通量动态 , 可以发现 : 距离大坝最近的样点( P19 ) 处 CO<sub>2</sub> 排放通量高于其它 3 个样点 , 其中 6 ~ 10 月

CO<sub>2</sub> 排放通量持续上升 , 10 月达到最大值 ( 6 680. 83 ± 1 885. 99 ) mg·( m<sup>2</sup>·h )<sup>-1</sup> , 此后下降( 图 6 ) ; 距离大坝 1 km( P20 ) 与 4 km( P21 ) 的 2 个样点

的 CO<sub>2</sub> 排放通量动态相似,上半年波动向下,下半年变化平缓(图 6);距离大坝 7 km 的样点(P22) CO<sub>2</sub> 排放通量在 2014 年 12 月和 2015 年 1 月通量较大,此后变化平稳,且通量值较小(图 6)。

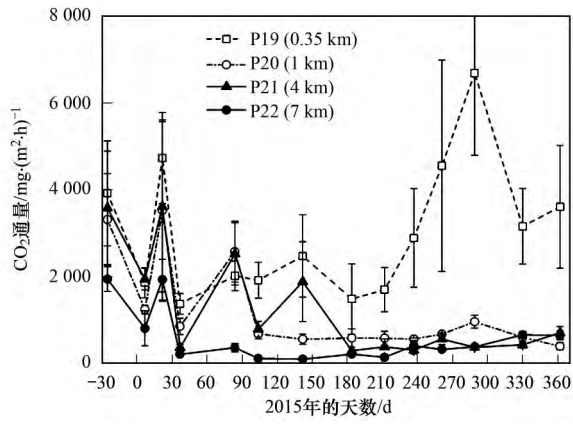


图 6 新安江大坝下游 4 个样点 CO<sub>2</sub> 扩散排放平均通量动态  
Fig. 6 Dynamics of the average diffusive CO<sub>2</sub> emission flux for the four sampling points in the river downstream of Xin'anjiang Reservoir

3 讨论

3.1 新安江水库 CO<sub>2</sub> 排放及其源、汇转化

新安江水库上游河流中 CO<sub>2</sub> 平均排放通量 120.39 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>, 约是库区主体 (36.65 ~ 61.94) mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup> 的 2 ~ 3 倍,从上游河流至库区主体 CO<sub>2</sub> 排放通量呈下降趋势,但是大坝下游河流中 CO<sub>2</sub> 平均排放通量 [1 533 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>] 显著增加,分别约是上游河流和库区主体的 13 倍和 25 ~ 42 倍. 这种变化趋势与使用喷淋-鼓泡式平衡器-非分散红外检测系统在新安江上游至大坝下游走航观测的 CO<sub>2</sub> 排放的空间动态较一致<sup>[11]</sup>. 但本项研究的 CO<sub>2</sub> 排放通量的结果高于 Wang 等<sup>[21]</sup> 的结果 (表 4),可能是由于采用的方法不同带来的差异.

新安江水库上游河流 CO<sub>2</sub> 平均排放通量略高于三峡水库上游河流,但低于丹江口水库上游入库河流(表 4). 新安江水库库区主体 CO<sub>2</sub> 平均排放通量低于三峡水库库区主体及龙溪河、香溪河、彭溪

表 4 新安江水库 CO<sub>2</sub> 排放通量与其他水库 CO<sub>2</sub> 排放通量比较 /mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>  
Table 4 Comparison of CO<sub>2</sub> emission flux in the Xin'anjiang Reservoir and other reservoirs /mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>

水库名称	上游河道	库区主体	下游河流	文献
新安江水库	约 121 ± 135	45 ± 144	1 535 ± 1 447	本研究
新安江水库	-6.7 ~ 13.94	-7.24 ~ 16.88	86.0 ~ 254.5	[10]
三峡水库	59 ~ 117	163.3 ± 117.4 或 69 ~ 84	54 ~ 142	[13, 15]
香溪河支流		76.5		[15]
彭溪河支流		58.5 ~ 189.2		[16]
龙溪河支流		321.20 ± 83.16		[17]
梅溪河支流		-13.69(夏季)		[18]
丹江口水库	218.17	16.50		[19]
万安水库		23.31		[20]
重庆城市区小型水库		251.6 ± 148.2		[21]
重庆林地区小型水库		55.6 ± 58.9		[21]
重庆农业区小型水库		88.2 ± 31.1		[21]
红枫水库		10	约 300	[22]
百花水库		15.4	约 300	[22]
红岩水库		16	约 300	[22]
修文水库		31.5	约 300	[22]
小浪底水库		69.98		[23]
花园口水库		80.35		[23]
新丰江水库		20.50		[24]

河等支流,低于重庆城区小水库和周边农、林业区小水库表面排放出的 CO<sub>2</sub> 排放通量,也低于黄河花园口水库和小浪底水库中 CO<sub>2</sub> 排放通量,但高于乌江流域红枫等 4 个水库、丹江口水库、万安水库和新丰江水库中 CO<sub>2</sub> 排放通量(表 4). 新安江水库坝下河流中 CO<sub>2</sub> 平均排放通量显著高于三峡水库坝下河流和乌江流域红枫等 4 个水库(表 4).

新安江水库库区主体的 3 个断面呈现出相近的 CO<sub>2</sub> 源与汇更替的格局:春、夏季是 CO<sub>2</sub> 的吸收汇,而秋、冬季是 CO<sub>2</sub> 的排放源(图 3 ~ 5). 这一源汇转化可能由于春、夏季时水体中的藻类等浮游植物繁殖导致光合作用增加,从而吸收表层水体中溶解的 CO<sub>2</sub>,造成表层水体中 pCO<sub>2</sub> 低于大气中 CO<sub>2</sub> 的压强,形成 CO<sub>2</sub> 的吸收汇. 这一推测可以从水体中

叶绿素 a 浓度的变化规律得到验证,新安江水库水体中叶绿素 a 浓度在 2003 ~ 2012 年这 10 a 中呈现出春、夏季高,冬季低的变化格局,变化范围在  $1.21 \sim 18.1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  [8]. Wang 等 [11] 认为,新安江水库夏季(6 月、8 月)  $\text{CO}_2$  的吸收汇是因为藻类繁殖光合能力增强,造成水库表层水体中溶解  $\text{CO}_2$  浓度和  $p\text{CO}_2$  都降低. 因藻类繁殖促使水体表面从  $\text{CO}_2$  排放源转化成  $\text{CO}_2$  吸收汇的案例在三峡水库的很多支流也常有报道,如三峡水库的香溪河支流 [9,14]、梅溪河 [22] 等,“水华”发生时间多出现在春季和夏季,此时支流内的  $p\text{CO}_2$  低,  $\text{CO}_2$  排放通量为负值,为吸收汇.

### 3.2 大坝下游的 $\text{CO}_2$ 排放通量

大坝下游河流中全年都是  $\text{CO}_2$  的排放源,  $\text{CO}_2$  排放随着与大坝距离的增加也逐渐降低(表 3). 新安江大坝的出水口位于坝体下部,坝下河流水体从坝前深水处释放出来,在强烈的扰动下,富含  $\text{CO}_2$  的水体迅速将  $\text{CO}_2$  排放出来,所以在坝下 0.35 km (P19 样点)处观测出  $\sim 3000 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$  这样极高通量值,但随着离大坝距离的增加,在坝下 1 km (P20 样点)处  $\text{CO}_2$  排放通量值降低至 P19 样点的 40%,坝下 7 km (P22 样点)处  $\text{CO}_2$  排放通量值仅为 P19 样点的 20%,因为坝前深层水体中溶解的  $\text{CO}_2$  在坝下数公里的河道中逐渐释放出来,并且随着距离的增加,水体流速、扰动强度不断地降低.

P19 样点冬季  $\text{CO}_2$  排放通量虽然较高,但 7 ~ 10 月  $\text{CO}_2$  排放通量不断上升(图 6). 新安江水库坝前水体在 4 月 ~ 次年 1 月存在热分层现象 [7,25],热分层现象限制了上层与下层水体的溶解态物质的交换 [9]. 虽然坝前水体表面存在  $\text{CO}_2$  吸收汇和排放源之间季节转换,但下层水体中在下半年时  $p\text{CO}_2$  分压较高,  $p\text{CO}_2$  约从 7 月 405 Pa 不断上升到 10 月的 567 Pa,至 11 月减低到 527 Pa 和 12 月的 486 Pa,仍处于过饱和状态 [11]. 当深层水体通过大坝后,造成 P19 样点处 7 ~ 10 月  $\text{CO}_2$  排放通量不断升高,11 ~ 12 月下降的变化格局(图 6).

## 4 结论

(1) 新安江水库是  $\text{CO}_2$  的排放源,排放强度从安徽上游入库水体到淳安的主库区呈下降趋势,但坝下河流中  $\text{CO}_2$  排放量高于坝前的库区主体.

(2) 新安江水库的库区主体中  $\text{CO}_2$  排放通量具有明显的源、汇转换情况,春、夏季是  $\text{CO}_2$  的吸收汇,而秋、冬季是  $\text{CO}_2$  的排放源.

(3) 新安江水库坝下河流中  $\text{CO}_2$  排放高,但随着与大坝距离的增加,  $\text{CO}_2$  排放通量逐渐下降.

### 参考文献:

- [1] Laubereau A, Iglev H. On the direct impact of the  $\text{CO}_2$  concentration rise to the global warming [J]. *EPL (Europhysics Letters)*, 2013, **104**(2): 29001.
- [2] Raymond P A, Hartmann J, Lauerwald R, *et al.* Global carbon dioxide emissions from inland waters [J]. *Nature*, 2013, **503**(7476): 355–359.
- [3] Le Quéré C, Moriarty R, Andrew R M, *et al.* Global carbon budget 2014 [J]. *Earth System Science Data*, 2015, **7**(1): 47–85.
- [4] Deemer B R, Harrison J A, Li S Y, *et al.* Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis [J]. *BioScience*, 2016, **66**(11): 949–964.
- [5] Li S Y, Zhang Q F, Bush R T, *et al.* Methane and  $\text{CO}_2$  emissions from China's hydroelectric reservoirs: a new quantitative synthesis [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(7): 5325–5339.
- [6] 中华人民共和国水利部, 中华人民共和国国家统计局. 第一次全国水利普查公报 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011. 3–4.  
Ministry of Water Resources, P. R. China, National Bureau of Statistics, P. R. China. *Bulletin of first national census for water* [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013. 3–4.
- [7] Zhang Y L, Wu Z X, Liu M L, *et al.* Thermal structure and response to long-term climatic changes in lake Qiandaohu, a deep subtropical reservoir in China [J]. *Limnology and Oceanography*, 2014, **59**(4): 1193–1202.
- [8] 盛海燕, 吴志旭, 刘明亮, 等. 新安江水库近 10 年水质演变趋势及与水文气象因子的相关分析 [J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(1): 118–127.  
Sheng H Y, Wu Z X, Liu M L, *et al.* Water quality trends in recent 10 years and correlation with hydro-meteorological factors in Xin'anjiang Reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(1): 118–127.
- [9] 袁希功, 黄文敏, 毕永红, 等. 香溪河库湾春季  $p\text{CO}_2$  与浮游植物生物量的关系 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 1754–1760.  
Yuan X G, Huang W M, Bi Y H, *et al.* Relationship between  $p\text{CO}_2$  and algal biomass in Xiangxi Bay in Spring [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(5): 1754–1760.
- [10] Yang L, Lu F, Zhou X P, *et al.* Progress in the studies on the greenhouse gas emissions from reservoirs [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(4): 204–212.
- [11] Wang F S, Cao M, Wang B L, *et al.* Seasonal variation of  $\text{CO}_2$  diffusion flux from a large subtropical reservoir in East China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **103**: 129–137.
- [12] 殷燕, 吴志旭, 刘明亮, 等. 千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2539–2546.  
Yin Y, Wu Z X, Liu M L, *et al.* Dynamic distributions of dissolved oxygen in Lake Qiandaohu and its environmental influence factors [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2539–2546.
- [13] Yang L, Lu F, Wang X K, *et al.* Spatial and seasonal variability

- of CO<sub>2</sub> flux at the air-water interface of the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25** (11): 2229–2238.
- [14] Yang L, Lu F, Wang X K, *et al.* Spatial and seasonal variability of diffusive methane emissions from the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, **118** (2): 471–481.
- [15] Zhao Y, Wu B F, Zeng Y. Spatial and temporal patterns of greenhouse gas emissions from Three Gorges Reservoir of China [J]. *Biogeosciences*, 2013, **10** (2): 1219–1230.
- [16] Huang Y, Yasarer L M W, Li Z, *et al.* Air-water CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes along a river-reservoir continuum: case study in the Pengxi River, a tributary of the Yangtze River in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, **189** (5): 223.
- [17] 李哲, 白镭, 郭劲松, 等. 三峡水库两条支流水-气界面 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 通量比较初探 [J]. *环境科学*, 2013, **34** (3): 1008–1016.
- Li Z, Bai L, Guo J S, *et al.* Comparative study on water-air CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> flux in two tributaries in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Science*, 2013, **34** (3): 1008–1016.
- [18] 李双, 王雨春, 操满, 等. 三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量 [J]. *环境科学*, 2014, **35** (3): 885–891.
- Li S, Wang Y C, Cao M, *et al.* Partial pressure and diffusion flux of dissolved carbon dioxide in the mainstream and tributary of the central Three Gorges Reservoir in summer [J]. *Environmental Science*, 2014, **35** (3): 885–891.
- [19] Li S Y, Zhang Q F. Partial pressure of CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> emission in a monsoon-driven hydroelectric reservoir (Danjiangkou Reservoir), China [J]. *Ecological Engineering*, 2014, **71**: 401–414.
- [20] 梅航远, 汪福顺, 姚臣谔, 等. 万安水库春季二氧化碳分压的分布规律研究 [J]. *环境科学*, 2011, **32** (1): 58–63.
- Mei HY, Wang F S, Yao C C, *et al.* Diffusion flux of partial pressure of dissolved carbon dioxide in Wan'an Reservoir in Spring [J]. *Environmental Science*, 2011, **32** (1): 58–63.
- [21] Wang X F, He Y X, Yuan X Z, *et al.* Greenhouse gases concentrations and fluxes from subtropical small reservoirs in relation with watershed urbanization [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **154**: 225–235.
- [22] Wang F S, Wang B L, Liu C Q, *et al.* Carbon dioxide emission from surface water in cascade reservoirs-river system on the Maotiao River, southwest of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45** (23): 3827–3834.
- [23] 张永领, 杨小林, 张东. 小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站 pCO<sub>2</sub> 特征及扩散通量 [J]. *环境科学*, 2015, **36** (1): 40–48.
- Zhang Y L, Yang X L, Zhang D. Partial pressure of CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> degassing fluxes of Huayuankou and Xiaolangdi station affected by Xiaolangdi Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2015, **36** (1): 40–48.
- [24] 叶丽菲. 新丰江水库二氧化碳分压及其通量 [D]. 广州: 中山大学, 2014.
- Ye L F. The partial pressure and flux of CO<sub>2</sub> in the Xinfengjiang Reservoir [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2014.
- [25] Zhang Y L, Wu Z X, Liu M L, *et al.* Dissolved oxygen stratification and response to thermal structure and long-term climate change in a large and deep subtropical reservoir (Lake Qiandaohu, China) [J]. *Water Research*, 2015, **75**: 249–258.