

水布垭水库 CO₂ 排放通量时空特征及其 与环境因子的响应研究

汪朝辉^{1,2} 杜清运¹ 赵登忠^{2,3},

(1. 武汉大学 资源与环境科学学院, 武汉 430079; 2. 长江水利委员会 长江
科学院, 武汉 430010; 3. 中国长江三峡集团公司, 宜昌 443002)

摘要: 利用静态浮箱-LGR 快速温室气体分析仪法, 于 2010 年 7 月、9 月和 11 月对清江流域水布垭水库库区 9 个典型采样点 CO₂ 排放通量进行了原位观测实验, 并就 CO₂ 排放通量对环境因素的响应关系进行了分析。结果表明: 7 月份水库水体表现为 CO₂ 的“汇”, 吸收 CO₂ 最大的点分别位于两条支流及上游来水上。9 月份水库水体表现为排放 CO₂。11 月份水库水体各点均表现为较强的排放, 其中 1、2、3 号点的排放量最大, 分别达到 122.37 mmol/m²·d、123.96 mmol/m²·d、166.863 mmol/m²·d。借助于地理信息系统 Kriging 插值技术获取水库不同观测时段 CO₂ 排放通量的空间分布特征。插值结果表明: 7 月份水布垭水库 CO₂ 排放通量空间分异主要表现为水库上游入口和典型支流的吸收最显著, 坝前水体 CO₂ 吸收居中, 而水库中部范围内水体对 CO₂ 吸收较差。9 月份和 11 月份水布垭水库 CO₂ 排放通量空间分异相似, 从水库上游到坝前, 排放量依次增加, 到坝前区域排放量达到最大。水库水体 CO₂ 排放通量与环境因素的响应研究表明, 叶绿素 a 浓度、溶解氧含量、水体总有机碳含量 3 个因素是影响 CO₂ 排放通量的重要因素。其中叶绿素 a 浓度、溶解氧含量与 CO₂ 排放通量之间呈典型的负相关关系, 水体总有机碳与 CO₂ 排放通量呈显著的正相关关系。温度、pH 值和透明度对于 CO₂ 排放通量的影响较小。水库水体 CO₂ 排放通量还受到水库运行时间与水库运行方式的影响。

关键词: 环境水利; 温室气体排放; 时空特征; 环境因子; 水布垭水库

中图分类号: X143

文献标识码: A

Study on spatiotemporal characteristics of CO₂ emission and effects of environmental factors in Shuibuya reservoir

WANG Zhaohui^{1,2}, DU Qingyun¹, ZHAO Dengzhong^{2,3}

(1. School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079;
2. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010;
3. China Three Gorges Corporation, Yichang, Hubei province 443002)

Abstract: Seasonal dynamic changes of CO₂ emission were studied in situ in Shuibuya reservoir of Qingjiang basin in July, September and November of 2010, using the static chamber-LGR techniques, and the relationship between emission flux and environmental factors was analyzed. The results showed that CO₂ was absorbed in July with the sampling point of maximum absorption located in the main tributaries, while in September the reservoir water body diffused CO₂. In November, the emission flux at all the sampling points was significant and the fluxes at sampling points NO. 1 ~ 3 of greatest emission were 122.37, 123.96 and 166.863 mmol/m²·d, respectively. Spatial distributions of different seasons calculated by Kriging interpolation indicate that the emission varied quite significantly. In summer the reservoir's upstream region and main tributaries showed obvious absorption, while in autumn and winter an increasing trend of emissions appeared from the inlet to the dam. The emission from the reservoir water was dominantly controlled by environmental factors of chlorophyll a, dissolved oxygen and total organic carbon, and it has a negative

收稿日期: 2011-05-49

基金项目: 国家自然科学基金(51090111); 水利部行业科研专项(200901008); 水利部公益性科研院所基本科研业务费(CKSF2010008)

作者简介: 汪朝辉(1978-),男,博士研究生。E-mail: wangzh@mail.crsri.cn

correlation with Chlorophyll a and a positive correlation with total organic carbon. Temperature, pH and transparency have a slight influence and the operation mode and reservoir age show some effect on the emission.

Key words: environmental water conservancy; greenhouse gas emissions; spatiotemporal characteristics; environmental factors; Shuibuya reservoir

0 前言

目前气候变暖对人类和环境的影响已经成为全球共同关注的热点问题。人们普遍认为这些温室气体主要来源于陆地生态系统(森林和土壤)以及人为的排放活动。但是,近年来水库与自然水体排放到大气中的温室气体逐渐引起人们的注意,尤其是水库排放温室气体问题在学术界引起了激烈的争论^[1]。水库作为人类活动形成的重要生态系统类型,其水陆交替生态系统碳循环过程复杂,在整个碳循环过程中具有重要作用,大气中2种主要的温室气体 CO₂、CH₄ 同时参与水库生态系统地气物质交换过程^[2]。一方面,水库中的水生植物通过自身的生命活动固定 CO₂,成为 CO₂ 的“汇”,另一方面又通过水陆交替与物质循环过程排放 CH₄ 和 CO₂,从而扮演着“源”的角色。

加拿大、美国、巴西等国家在水库温室气体排放监测方面开展了大量的研究工作,基本搞清楚了北美加拿大寒带区、热带雨林区重要水库温室气体排放情况,对水电站温室气体排放形成了初步认识和结论。我国水库温室气体排放监测与研究才刚刚开始起步,仅有中国科学院、部分高校与水利专业机构等的少数研究单位开展了初步研究^[3,4],但远未形成一致的权威结论。国内研究机构和水电开发企业对水电温室气体减排效应的一些重要问题还只能给出定性回答,缺乏量化的科学数据支撑,更没有系统地开展适合中国气候条件和水库类型的温室气体源汇研究。因此研究水库的温室气体排放特征,计算其通量及其净排放量对于研究气体变化和环境可持续发展具有重要意义。

1 研究区域概况

水布垭水库位于清江流域,是清江梯级开发的龙头枢纽,坝址位于巴东县境内。水库2006年下半年蓄水,2007年7月首台机组发电,2009年工程全部竣工。水库两岸及库底多为石质本底,水库淹没的植被及土壤较少,在水库建设以前开展了大规模的清库工作。由于水库为典型河道型水库,两岸大部分区域为陡峭石壁,库区内人类活动较少,没有污染型的大型工矿企业。水库正常蓄水位400m,相应库容43.12亿m³,总库容45.8亿m³,装机容量1600Mw,是以发电、防洪、航运为主,并兼顾其他的水利枢纽工程。

2 材料与方法

水库生态系统水体较深、基面稳定性差,与森林、草地、农田生态系统相比,其水—气界面的监测难度较大,波浪、船只的往返、风、河道型水库的流速较大等因素严重影响了采样和分析的准确性,影响采样结果的代表性。为了研究水库对全球温室气体排放的净贡献,必须对水库的排放通量进行可靠的、量化的观测与研究。

目前国际上比较通用的方法包括:TBL法、涡度相关塔法、通量浮箱法。涡度相关法可以用来测量痕量气体通过水面的湍流扩散,通过测量塔安装在固定的平台上,但容易受到邻近的非水体产生的影响。TBL法采用半经验公示来计算通量,由于对于驱动这一过程的机制的理解还很缺乏,因此测得的通量值存在很多不确定因素。在大面积的监测上,TBL的应用可能会更加广泛,但是在方法上需要更多的实验来校验。浮箱法是一种经济的、方便的测量水域生态系统表面的直接扩散通量的方法,该方法适合于水流速较小,水面波动不大的水库。本研究采用浮箱法来测定水布垭水库 CO₂ 的排放。

2.1 实验材料

静态浮箱由箱体和箱基座2部分构成。箱体规格为直径30cm,高50cm的圆柱体,底座为40cm×40cm×20cm的泡沫材料,便于浮箱稳定浮于水体表面。箱内装有搅气小风扇及采气三通阀,箱体用不锈钢材料制成,外覆白色不透光材料,根据已有的采样箱的对比研究发现,白色不透光材料可以增大箱壁对太阳光的辐射,降低箱内温度升高的速度,减缓箱内温度的变化,同时箱体的透光性对于水体中浮游生物对 CO₂ 的交换通量也有着直接的影响。

2.2 实验设计与样品的采集

该实验方案共设计采样点9个,根据水库库区实际情况,在河道典型位置和典型支流、上游入口、坝前均设置

采样点(图1),更大限度的保证采样点的代表性,并反映空间的差异性。采样时间分别为2010年7月9日和11月,各个采样点均在上午9时至10点之间开始采样,以保证各采样点CO₂排放研究的可比性。

数据采集采用美国LGR公司DLT-400温室气体分析仪原位观测完成的。为了保证测量数据的准确性,减少偶然性误差,每个采样点采样时间持续30分钟。30分钟内采集的气体样品浓度与采样时间间隔存在线性相关的关系,所有样品的相关系数均在 $R > 0.95$ 时视为有效。同时用便携式仪器现场测定水体的pH值、水温、电导率、溶解氧、叶绿素a、透明度、大气的气温、大气压、风速等环境因子参数。并取水样带回实验室测定水体中的总碳、溶解有机碳和溶解无机碳。

气体通量(F)为负值时表示土壤从大气中吸收该气体,正值时表示土壤向大气排放该气体。通量的计算公式如式1:

$$F = \frac{K^* V^* T_{st}}{S^* (T_{st} + T)} \cdot \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中: F 为通量; K 指标准温度和压力下气体的浓度单位转化系数; V 为浮箱的体积; S 为浮箱的表面积; T_{st} 为标准状态下的温度 273.2°C ; T 为采样时箱体中的温度; $\frac{dc}{dt}$ 为CO₂浓度随时间变化的斜率。

3 结果与讨论

3.1 水布垭水库CO₂排放的季节变化

季节的变化会引起水库水体发生一系列的自然气候综合效应,水温的高低差异性明显,水体的对流改变,入库流量发生改变,水库内部物质的迁移也发生改变,这一系列差异使水库水体在化学条件和生物活性上具有明显的不同,进而影响水体CO₂的排放情况。实验结果表明:水布垭水库水体的CO₂排放季节差异性明显,见图2,其中7月份水库水体表现为CO₂的“汇”,主要以吸收CO₂为主,这与相关单位的实验结果一致,其中7、8、9号点CO₂吸收显著,7、8号点分别位于两条支流上,9号点位于水库上游的来水方向,吸收通量分别达到 $12.43\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $12.61\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $15.19\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。9月份水库水体表现为排放CO₂,其中2、3号点排放量最大,分别为 $15.89\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $9.54\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。7、8、9号点排放量最小,分别为 $1.05\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $1.23\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $1.49\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。11月份水库水体各点均表现为较强的排放,其中1、2、3号点的排放量最大,分别达到 $122.37\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $123.96\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $166.863\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。分析表明:7月份水温较高,水体中浮游植物和藻类大量繁殖,水生植物和藻类生长繁殖进行光合作用吸收大量的CO₂,因此表现为水体对CO₂的弱吸收。9月份随着山区温度的逐渐下降和入库水温度的降低,水生植物和藻类繁殖减缓,它们对CO₂的吸收逐渐减弱,同时夏季暴雨和径流带来的大量腐殖质和营养物质逐步分解和腐烂排放出CO₂,因此该时段监测的数据表现为水库水体CO₂的弱排放。11月份水体中的腐殖质和营养物质继续分解和排放CO₂,同时由于水温进一步降低,大量的藻类和浮游生物死亡,光合作用减弱,死亡的藻类和水生植物分解也排出CO₂,春夏季消落带生长的植被被水淹没,随着淹没时间的推移,也逐渐腐烂分解,释放CO₂气体,所以此时段监测实验表明水库水体CO₂排放较为明显。

3.2 水布垭水库CO₂排放的空间差异

根据水布垭水库九个采样点水气界面原位观测CO₂排放通量数据,借助于地理信息系统Kriging插值技术在水库水体范围内进行插值计算处理,以获取水库不同观测时段CO₂排放通量的空间分布特征。插值结果表明:7月份水布垭水库CO₂排放通量空间分异主要表现为水库上游入口和典型支流的吸收最显著,坝前水体CO₂吸收居中,而水库中部范围内水体对CO₂吸收较差,见图3。9月份和11月份水布垭水库CO₂排放通量空间分异比

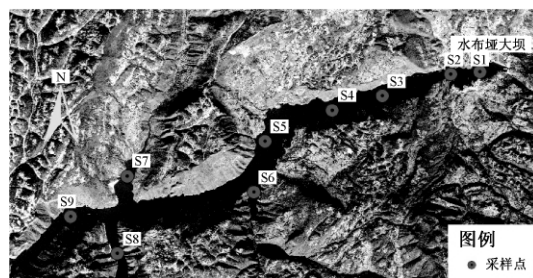


图1 水布垭水库及采样点位置

Fig. 1 Shuibuya reservoir and sampling points

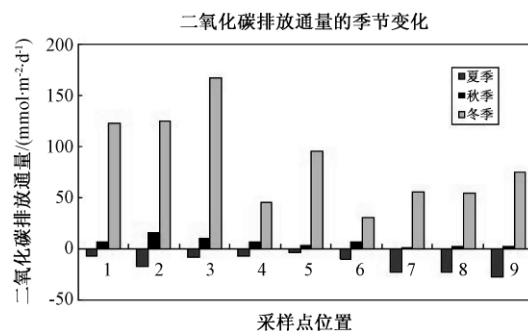


图2 CO₂排放通量的季节变化

Fig. 2 Seasonal changes of CO₂ emission flux

较相似,从水库上游到坝前,排放量依次增加,到坝前区域排放量达到最大见图 4、5。

3.3 水布垭水库 CO₂ 排放通量与环境因子的响应关系

水库改变河流生态环境、河流水位、流速、流量、泥沙等水文情势,从而会干扰河流碳输运的自然过程,加速或减缓碳在库区的沉淀和分解以及生物过程与化学过程,使得河流作为陆地碳的输出通道作用发生了波动和变化^[5]。为了探索水库 CO₂ 排放通量对环境因子的响应,项目组同时观测了水体的 pH 值、水温、电导率、溶解氧、叶绿素 a、透明度、大气的气温、大气压、风速、水体总碳、溶解有机碳、溶解无机碳等环境因子参数。

1) 水布垭水库 CO₂ 排放通量与叶绿素的响应关系

监测结果表明:水体中叶绿素 a 浓度与 CO₂ 排放通量之间表现出较好的线性负相关,见图 6, $R^2 = 0.718$,置信度水平较高,叶绿素浓度越高,CO₂ 排放量越低,说明叶绿素是影响水体 CO₂ 排放的一个重要因素。主要是因为叶绿素浓度主要反映水体中浮游植物和藻类的数量的一个重要指标,水体中藻类和浮游植物生长繁殖进行光合作用需要吸收大量的 CO₂,所以同步监测的叶绿素浓度越高,光合作用吸收的 CO₂ 就越多,其水体 CO₂ 排放通量就越低。

2) 水布垭水库 CO₂ 排放通量与溶解氧的响应关系

水体中溶解氧的含量对水生生物的新陈代谢及元素的循环起重要的作用,水生植物的光合作用增加了水中的溶解氧,呼吸作用要消耗水中的溶解氧,而水体环境的有氧和缺氧状态直接决定了水中有机物的降解^[6]。水布垭水库 CO₂ 排放通量与溶解氧的相关分析表明,两者之间呈现较为显著的负相关关系(见图 7), $R^2 = 0.863$,溶解氧含量越高,CO₂ 排放量就越低。这主要是由于两个方面的原因造成:①当水体中有机物含量较低,其分解不需要大量氧的时候,水体环境中处于有氧状态,溶解氧的含量较高,较低含量的有机物分解释放出来的 CO₂ 量也不高;②水体中水生植物和藻类的光合作用增加了水中的溶解氧,同时光合作用吸收 CO₂,因而水体溶解氧较高时,水体排出的 CO₂ 的通量降低。

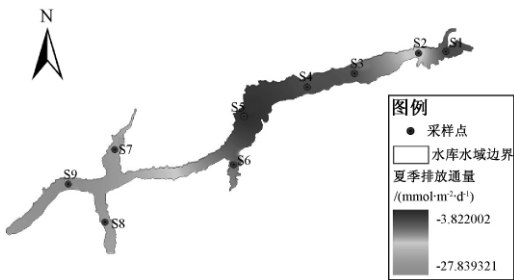


图 3 夏季 CO₂ 排放通量的空间差异
Fig. 3 Spatial distribution of CO₂ emission flux in summer

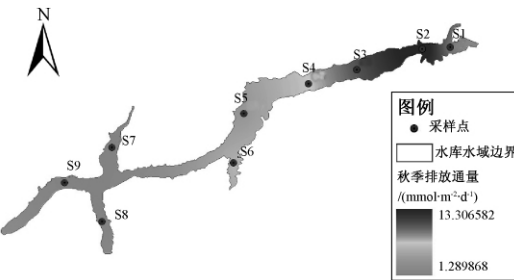


图 4 秋季 CO₂ 排放通量的空间差异
Fig. 4 Spatial distribution of CO₂ emission flux in autumn

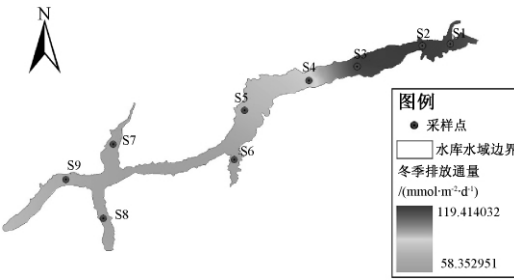


图 5 冬季 CO₂ 排放通量的空间差异
Fig. 5 Spatial distribution of CO₂ emission flux in winter

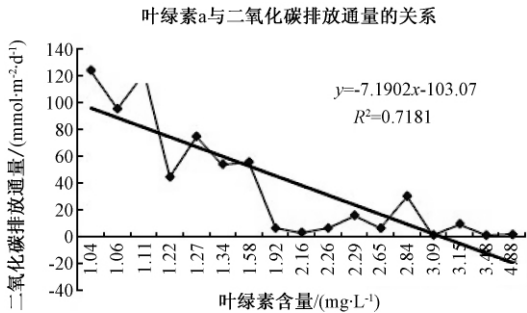


图 6 叶绿素 a 与 CO₂ 排放通量的关系
Fig. 6 Correlationship between chlorophyll a concentration and CO₂ emission flux

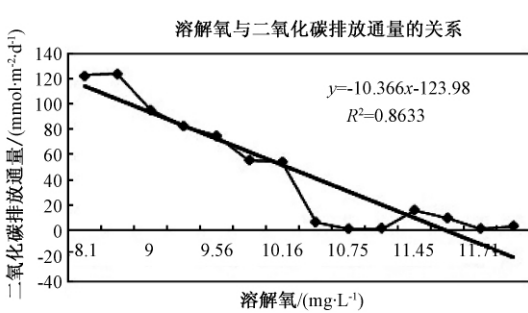


图 7 溶解氧与 CO₂ 排放通量的关系
Fig. 7 Correlationship between dissolved oxygen and CO₂ emission flux

3) 水布垭水库 CO₂ 排放通量与水体总碳的响应关系

水体中总有机碳是以碳的含量表示水体中含碳有机物质总量的综合指标。当水体温度、压力、氧气等条件合适的条件下,水中的有机物质会随着时间的推移逐步分解,以 CO₂ 和 CH₄ 的形式释放出来。水布垭水库 CO₂ 排

放通量与水体总有机碳相关分析表明,CO₂ 排放量与水体总有机碳含量呈较为显著的正相关关系(见图 8), $R^2 = 0.63$,说明水体总有机碳是影响水库 CO₂ 排放通量的一个重要因素。

4) 水布垭水库 CO₂ 排放通量与温度、pH 值、透明度等环境因素的响应关系

研究结果表明:水布垭水库 CO₂ 排放通量与温度的相关性较差,相关系数低于 0.2。7 月 9 月,11 月这三个时段的气温和水温是逐步降低的,而 CO₂ 排放通量没有表现出逐步降低,7 月份温度较高,水体 CO₂ 通量表现为吸收,9 月份表现为弱排放,11 月份表现为较强的排放,所以温度对于 CO₂ 排放的影响不显著,并不是温度越高,CO₂ 排放通量就越高。这主要是因为水生生态系统是一个复杂的生态系统,水体 CO₂ 排放是一个复杂的生化过程,受到众多因素的综合影响,比如水生植物及藻类的繁殖与生长进行的光合作用和呼吸作用等。由于本研究三次采样的时间间隔较长,代表不同的季节,因此不排除在某一个更小的时段区间内,温度与 CO₂ 排放通量呈现较好的相关性的可能性。水布垭水库处于清江流域上游,库区污染较少,水体 pH 值较稳定,表现为弱碱性,波动不大,其与 CO₂ 排放通量的相关性不显著。水布垭水库水质较好,水体透明度较好,比较稳定,与 CO₂ 排放通量的相关性不显著。

3.4 水布垭水库 CO₂ 排放与国内外其他研究的比较

水布垭水库三个时段的实验结果表明水体 7 月份水库水体为 CO₂ 的“汇”,最大吸收通量为 15.19 mmol/(m²·d),最显著的吸收通量出现在典型支流,这与相关单位同一时段在三峡库区监测的结果较为一致。9 月份和 11 月份观测的最大排放通量和最小排放通量分别为 166.863 mmol/(m²·d)和 1.05 mmol/(m²·d),与世界上其他水库相比,见表 1,水布垭水库 CO₂ 的释放通量居中^[7]。水布垭水库 2006 年开始蓄水,至今蓄水运行 5 年,水库的泥沙淤积、淹没植物的分解、水生生物量等都在变化中。植物枝叶的腐蚀分解,降雨径流带来的营养物质,消落带植被以及泥沙中碳储存的分解释放也在不断的平衡中,所以不同水库运行时间与水库运行方式对 CO₂ 排放也有一定的影响^[8]。

表 1 世界上主要研究水库 CO₂ 排放通量比较

Table 1 Comparisons of CO₂ emission flux in main reservoirs of the world

水库名称	所属国家	气候带	库龄	水气界面 CO ₂ 通量 /(mmol·m ⁻² ·d ⁻¹)	数据来源
Cabonga	加拿大	温带	70	18.2	Duchemin E,1995
F. D. Roosevelt	美国	温带	18	-9.9	Soumis N,2004
Dworshak	美国	温带	39	-23.4	Soumis N,2004
Cunta-Una	巴西	热带	21	65.9	Duchemin E,2000
Samuel	巴西	热带	10	184.1	Rosa L,2003
Petit Saut	圭亚那	热带	2	101.3	Louis V,2000
云贵高原湖泊	中国	亚热带	—	10	王士禄,2003
红枫湖	中国	亚热带	53	20.2	刘丛强,2007
水布垭	中国	亚热带	5	-15.19~166.83	本研究

4 结论

通过对水布垭水库水体 CO₂ 排放通量的监测,以及相关水环境因素的观测,进一步分析对比表明:水布垭水库 CO₂ 排放通量表现出明显的季节差异性,水体在不同时段表现为 CO₂ 的“汇”或 CO₂ 的“源”,但总体表现为 CO₂ 的排放。CO₂ 排放通量的空间分异显著,主要表现为夏季水库上游入口和典型支流的吸收最显著,坝前水体 CO₂ 吸收居中,而水库中部范围内水体对 CO₂ 吸收较差。9 月份和 11 月份水布垭水库 CO₂ 排放通量空间分异相似,从水库上游到坝前,排放量依次增加,到坝前区域排放量达到最大。

水库水体 CO₂ 排放通量对环境因素的响应较为明显,叶绿素 a 浓度、溶解氧含量、水体总有机碳含量 3 个因素是影响 CO₂ 排放通量的重要因素。其中叶绿素 a 浓度、溶解氧含量与 CO₂ 排放通量之间呈典型的负相关关

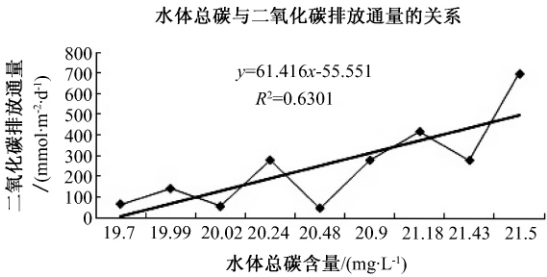


图 8 水体总有机碳与 CO₂ 排放通量的关系
Fig. 8 Correlationship between total organic carbon and CO₂ emission flux

系,水体总有机碳与 CO₂ 排放通量呈显著的正相关关系。温度、pH 值和透明度对于 CO₂ 排放通量的影响较小。水库水体 CO₂ 排放通量还受到水库运行时间与水库运行方式的影响。

参考文献:

- [1] 戴会超,李华,郑铁刚. 水库水域生态系统温室气体排放测量技术 [J]. 中国工程科学 2010, 12(9): 21-28.
DAI Huichao, LI Hua, ZHENG Tiegang. The measuring techniques of greenhouse gas emission from reservoir aquatic ecosystem [J]. China Engineering Science 2010, 12(9): 21-28. (in Chinese)
- [2] 王毅勇,陈卫卫,赵志春. 三江平原寒地稻田 CH₄、N₂O 排放特征及排放量估算 [J]. 农业工程学报 2008, 24(10): 170-176.
WANG Yiyong, CHEN Weiwei, ZHAO Zhichun, et al. Characteristics and estimation of CH₄, N₂O emission from cold paddy field in the Sanjiang plain [J]. Transactions of the CSAE 2008, 24(10): 170-176. (in Chinese)
- [3] 喻元秀,刘丛强,汪福顺. 洪家渡水库溶解二氧化碳分压的时空分布特征及其扩散通量 [J]. 生态学杂志, 2008, 27(7): 1193-1199.
YU Yuanxiu, LIU Congqiang, WANG Fushun. Spatiotemporal characteristics and diffusion flux of partial pressure of dissolved carbon dioxide in Hongjiadu reservoir [J]. Chinese Journal of Ecology 2008, 27(7): 1193-1199. (in Chinese)
- [4] 杨妍,刘丛强,吴攀. 猫跳河流域梯级开发水库夏季甲烷排放研究 [J]. 贵州水力发电 2009, 23(3): 12-17.
YANG Yan, LIU Congqiang, WU Pan. Study on methane emission of cascade reservoirs on Maotiaohe river basin in summer [J]. Guizhou Water Power, 2009, 23(3): 12-17. (in Chinese)
- [5] 吕东珂,于红贤,马成学. 泥河水库春季水-气界面二氧化碳通量与其影响因子的相关性分析 [J]. 湿地科学与管理 2010, 6(2): 44-49.
LU Dongke, YU Hongxian, MA Xuecheng. The correlation analysis between CO₂ at the water-air interface and environment [J]. 2010, 6(2): 44-49. (in Chinese)
- [6] 陈进,黄薇. 水库温室气体排放问题初探 [J]. 长江科学院院报 2008, 25(6): 1-5.
CHEN Jin, HUANG Wei. Problem on greenhouse gas emissions of reservoir [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute 2008, 25(6): 1-5. (in Chinese)
- [7] Rosa L P, Santos M A D, Matvienko B, et al. Biogenic gas production from major Amazon reservoirs [J]. Hydrological Processes. 2003, 17: 1443-1450.
- [8] 赵小杰,赵同谦,郑华. 水库温室气体排放及其影响因素 [J]. 环境科学 2008, 29(8): 2377-2384.
ZHAO Xiaojie, ZHAO Tongqian, ZHENG Hua. Greenhouse gas emission from reservoir and its influence factors [J]. Environmental Science 2008, 29(8): 2377-2384. (in Chinese)