

文章编号: 1001-5485(2011)10-0197-08

清江流域水布垭水库温室气体交换通量 监测与分析研究

赵登忠^{1,2}, 谭德宝¹, 汪朝辉¹, 郝超英¹

(1. 长江科学院 空间信息技术应用研究所, 武汉 430010; 2. 中国长江三峡集团公司, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 为了研究水库温室气体源汇变化, 选择清江流域水布垭水库作为研究案例, 在2010年5月和10月开展了2次原位观测试验, 获取了水布垭水库水气界面二氧化碳和甲烷交换通量、水体上空大气温室气体浓度垂直变化规律及水环境因子。结果表明: 水布垭水库2010年5月份水体上空大气二氧化碳浓度在0.5 m高度以下最高, 其中表层水温对水库水体二氧化碳源汇地位具有重要的影响; 2010年10月份水布垭水库水气界面二氧化碳和甲烷交换通量呈排放状态, 平均通量分别为 $3\,740.92 \pm 1\,872.56 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $1.22 \pm 0.57 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 但比世界温带和热带主要水库要低得多, 接近于中国太湖和东湖等自然水体排放水平; 二氧化碳通量的空间分布从上游到坝前呈现升高的趋势, 而甲烷的空间分布趋势则呈现相反的趋势。研究将为我国水库温室气体科学研究提供了宝贵的示范案例, 为开展水电清洁能源开发提供科学支撑。

关键词: 水布垭水库; 水库温室气体; 交换通量; 水气界面

中图分类号: X16 **文献标识码:** A

1 概述

温室气体 (Greenhouse Gas, GHG) 主要包括二氧化碳 (CO_2)、甲烷 (CH_4) 和一氧化二氮 (N_2O) 等痕量气体, 主要来源于水体、陆地和人类活动等, 是全球气候变化的重要驱动因素。随着以煤炭和石油为主的化石能源大量利用, 常常伴随着大量温室气体排放, 对全球或局部气候产生温室效应, 导致全球或局部范围自然灾害发生的频率和深度大幅增加^[1]。为了减少温室气体的排放, 近年来以风电、核电为代表的新型能源以及水电清洁能源得到蓬勃发展, 其中水电生产不消耗任何化石燃料能够提供大量清洁能源, 从而在促进经济发展的同时大幅度减少温室气体排放, 是唯一可大规模开发并具有明显温室气体减排效益的绿色能源, 已成为世界多数国家能源发展战略的主流认识^[2-4]。然而, 近年来水电作为一种可持续发展利用的清洁能源在温室气体排放方面受到关注, 与科学技术发展历程中遭受许多非议一样, 水坝工程并未因为其给人类带来巨大益处而免受指责^[5,6]。

发电水库的温室气体排放是复杂的科学问题, 有关研究成果表明不同气候带、不同地理区域、不同

水库以及水库不同运用阶段的温室气体源汇变化均表现出很强的个案特征^[7]。国际学术界主要在巴西、巴拿马、法属圭亚那、北美其它地区以及斯堪的纳维亚地区开展了水库淹没区温室气体源汇变化长期原位监测及不同类型水生生态系统对比研究^[8-14]。我国科学家主要在湿地、湖泊等水体温室气体做了监测及分析研究^[15-20], 陈永根等采用静态箱-气相色谱法对中国不同地区的8个湖泊冬季水体水-气界面甲烷通量进行了24 h连续观测, 对中国湖泊冬季甲烷的总释放量进行了估算^[21]。但是我国尤其是长江上游流域大型水库大部分属于河道型水库, 库区多位于高山峻岭地区, 石质库岸较多, 与世界其它地区水库存在较大的差异, 还未有系统全面的原始观测数据积累, 国外研究结果也不能说明其源汇地位^[22]。鉴于我国水库的特点及系统观测数据的缺乏, 非常需要在水库温室气体观测数据积累、观测方法与分析标准以及内在产生机制等方面开展研究。

水库温室气体源汇变化可以从重要界面交换通量和水库上空大气温室气体浓度2个方面进行测定, 重要界面交换通量是大气温室气体浓度变化的根源, 而大气温室气体浓度变化是交换通量的直接表现。因此, 本文选择清江流域水布垭水库做为典

收稿日期: 2011-01-27

基金项目: 水利部公益性科研院所基本科研业务费项目 (CKSF2010008)

作者简介: 赵登忠 (1978-) 男, 山东莘县人, 高级工程师, 主要从事陆面数据同化、水库温室气体、遥感地表参数反演等方面的研究 (电话) 027-82826895 (电子信箱) njuzhaodz@163.com。

型研究区,分别在2010年5月8日和10月26日开展了水库上空大气二氧化碳浓度垂直变化、水气界面交换通量进行了原位观测,试图了解水库近水面大气二氧化碳的浓度时空变化特征及其与水环境之间的相互关系,对中国水电可持续发展和节能减排战略的顺利实施具有重要意义。

2 研究区与实验方案

2.1 研究区介绍

清江水布垭水电站坝址位于巴东县境内(如图1所示)。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,两岸大部分区域非常陡峭,库区内人类活动较少,没有污染型的大型工矿企业,水质较好。水库正常蓄水位400 m,最低和最高水位分别是372.21 m和396.62 m(近期水位变化见图2)。库容43.12亿 m^3 ,总库容45.8亿 m^3 ,装机容量1600 MW,是以发电、防洪、航运为主,并兼顾其它的水利枢纽工程。

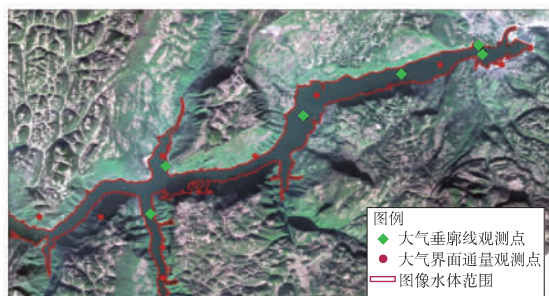


图1 清江流域水布垭水库温室气体观测点位置示意图

Fig. 1 The location of greenhouse gas emission measurement points at Shuibuya reservoir in Qingjiang River Basin

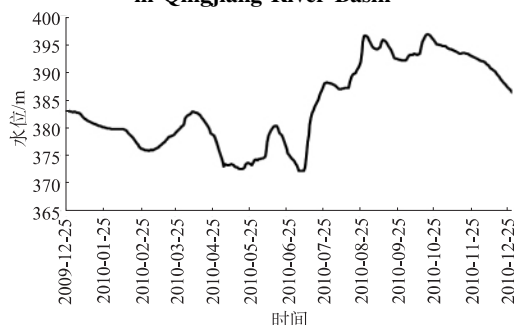


图2 清江流域水布垭水库坝前水位时间变化示意图

Fig. 2 Change of water level in front of the dam of Shuibuya Reservoir

2.2 观测实验方案

为了获取水布垭水库上空大气二氧化碳垂直剖

面变化特征,试验方案在2010年5月8日采用探空气球方法在水库典型特征观测点的不同高度大气层中抽取大气,直接利用观测仪器进行测试,得到距离水面0.2、0.5、1.5、3、12、25、40 m大气层二氧化碳的浓度信息;试验方案在2010年10月26日采用国际上流行的静态浮箱法对水气界面二氧化碳和甲烷交换通量进行原位观测。大气二氧化碳浓度观测仪器采用了国际上公认的Picarra G1101-i二氧化碳观测仪和LGR便携式温室气体通量仪,原位观测点如图1所示,图中红色点为水气界面通量观测点,黑色为水库上空大气温室气体浓度垂直廓线观测点,红线为水库水体范围。

3 材料与方法

3.1 观测方法

水库温室气体源汇变化原位观测在每个典型观测点主要涉及二氧化碳大气浓度变化、水气界面交换通量及影响因素3个部分,其中大气浓度垂直廓线观测主要采用探空气球抽取气体进行现场测定的方法,将硅胶管固定在连接气球软绳的不同高度节点上,在探空气球放置一定高度时将硅胶管另一端连接到温室气体浓度测定仪器上,然后抽取不同高度大气到温室气体浓度测定仪器内部腔室进行测定,得到痕量气体浓度变化曲线,待曲线稳定后取其平均值作为具体高度上的二氧化碳浓度值,同时取得浓度数据的标准差等指标。

水气界面交换通量则采用静态箱法进行,此种方法在水体表面覆盖一个顶部密封箱体,箱体底部中空,收集表层水体以扩散方式交换的二氧化碳和甲烷气体,根据箱体内待测气体浓度随时间的变化率来计算被覆盖水体待测气体的排放通量。本研究采用的不锈钢浮箱箱体高度为50 cm,直径为40 cm,采用不透光不散热的硒膜将箱体覆盖,减少光线和热量对甲烷的影响,采样箱内部装有小型风扇,用以充分混合箱内气体,采样箱上部密封,开有2个小孔,分别连接风扇电源线和采样用气体导管。然后将浮箱放置在水面,通过连接箱体和温室气体测定仪器的硅胶管连续抽取浮箱内气体,输入温室气体测定仪器的内部腔室进行分析,得到浮箱内二氧化碳和甲烷浓度的时间变化曲线,最后根据曲线变化斜率和箱体规格计算水面交换通量。本研究在每个观测点利用一个浮箱只能观测到一条典型曲线,计算得到一个通量值,没有开展数据质量控制方面的计算,但由于温室气体测定仪器可以得到连续

的曲线,其精度完全可以保证。

水环境和气象影响因素均采用便携式观测设备进行测定,其中气象参数观测仪器为 Kestrel 便携式气象观测仪、水体电导率观测仪器为 YSI EC300 观测仪、水质观测仪器为 YSI6600 多参数水质监测仪和 Hach 水质探测仪。本研究在每个观测点可以得到一系列水环境和气象因子,通过计算平均值和标准误差进行数据质量控制。

3.2 水气界面交换通量计算方法

水气界面二氧化碳和甲烷交换通量是指单位时间内单位面积上温室气体浓度变化量,正值表示气体从水体向大气排放,负值表示水体吸收大气该气体,本文采用通量计算公式为

$$F = \frac{F_1 \times F_2 \times V \times \Delta C}{F_3 \times A \times \Delta t} \quad (1)$$

式中: F 为气体交换通量($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); F_1 为 ppm 与 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的单位转换系数(二氧化碳为 1 798.45; 甲烷为 655.47); F_2 为 min 与 d 的转换系数(1 440); V 为进入浮箱的空气量体积(m^3); A 为水上部分浮箱的表面积(m^2); F_3 为 μg 与 mg 的单位转换系数(1 000); $\frac{\Delta C}{\Delta t}$ 是温室气体在观测时间内浓度随时间变化的直线斜率($10^{-6}/\text{min}$)。

4 结果讨论与分析

4.1 水布垭水库上空二氧化碳浓度垂直变化

水库上空大气二氧化碳浓度是研究水库温室气体源汇变化重要指标,其时空变化是水库水体、水库附近陆地植被及土壤二氧化碳循环共同作用的结果,可以间接地表明水库在二氧化碳区域循环过程中的作用与地位。

水布垭水库二氧化碳浓度大气垂直剖面 7 个观测点基本情况如图 3 所示,图中横坐标为观测高度,

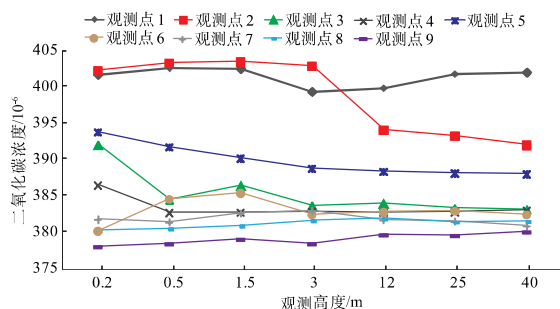


图 3 清江流域水布垭水库上空二氧化碳浓度垂直变化特征观测示意图

Fig. 3 The vertical profile of carbon dioxide concentration above Shuibuya Reservoir

纵坐标为二氧化碳浓度。从图中可以看出,除观测点 6 和 7 外,其它观测点大气二氧化碳浓度变化趋势相似,均在距离水面 0.2 m 处的浓度最高,越向上越低,但总体上讲所有观测点均是近水面二氧化碳浓度较高。观测点 6 和 7 处二氧化碳浓度也是在 0.5 ~ 3 m 范围内达到最高点,在 25 m 和 40 m 的高空条件下,二氧化碳浓度显著降低,说明水库水面附近二氧化碳浓度较高,而在高空由于二氧化碳的消散作用而降低。同时还可以发现不同位置的观测点大气二氧化碳浓度变化的幅度也不相同,其中以坝前观测点 1 和观测点 2 的观测浓度变化最为剧烈,二者的总体浓度也比其它观测点高出近 20×10^{-6} ,在 390×10^{-6} 和 405×10^{-6} 之间变化。其原因是由于水库上游淹没土壤和植被以及地表径流输入有机质均积聚在坝前,导致坝前水体溶解有机质增多,二氧化碳向大气扩散的速度加快,但是坝前水面相对于干流并不宽阔,大气不容易扩散,增大了坝前大气二氧化碳变化速度和幅度。在观测点 1 和观测点 2 水体叶绿素比其它区域高,而其温度较低,仅为 17.3°C ,观测时当地气温仅为 18.1°C ,两者在 12 m 高度浓度变化表现出较大的差异是因为观测位置地区的差异,观测点 1 库岸非常陡峭,受地形的阻碍作用二氧化碳浓度在垂直尺度上的变化并不是很显著,而观测点 2 地形则较为平缓,二氧化碳浓度在 12 m 高度以上更容易受到风的影响,其浓度显著降低。另外,观测点 5、6、7 均位于水库干流,其浓度变化范围非常一致,均在 $380 \sim 386 \times 10^{-6}$ 之间变化,在 0.2 ~ 3 m 高度上的浓度最高,在 0.2 m 高度以上较为相似,说明水库干流的二氧化碳交换水平非常相似,这种现象与水库干流具有一致的水环境特征、水速以及消落带土壤植被特征有关,3 个观测点的叶绿素指标非常相近。观测点 3 和 4 均处于水库支流与干流的交叉处,但两者二氧化碳浓度具有显著的差异,观测点 3 二氧化碳浓度水平与位于干流的观测点 5、6 和 7 非常相似,而观测点 4 的二氧化碳浓度水平介于坝前与干流位置二氧化碳水平之间。详细分析表明,观测点 3 所处支流较为短小,导致外部输入有机质还未充分溶解,表现为叶绿素仅为 $0.92 \mu\text{g}/\text{L}$;而观测点 4 所处支流侧较为细长,外部输入有机质经过长时间输送过程而充分溶解,其叶绿素侧高达 $1.25 \mu\text{g}/\text{L}$ 。虽然叶绿素浓度水平并不能代表水体有机质,但可以间接表明两者之间的关系。

4.2 水布垭水库水气界面温室气体浓度变化

为了获取水布垭水库二氧化碳和甲烷交换通量,需要观测水库水体水气界面温室气体浓度变化特征,本文采用静态浮箱法在水库坝前、支流及干流

上游等典型区域设置观测点开展试验工作。图4至图6为2010年10月26日在水布垭水库1号、6号和10号观测点水气界面温室气体浓度变化规律,原位观测仪器为LGR便携式温室气体通量仪。从图中可以看出,水体水气界面二氧化碳浓度均是从大气本底值 380×10^{-6} 左右开始随时间而升高,曲线呈线性关系,其拟合曲线相关系数均在0.95以上,说明浮箱内二氧化碳浓度在均匀升高,6号观测点浓度变化曲线呈现抛物线形状是因为浮箱内气体浓度

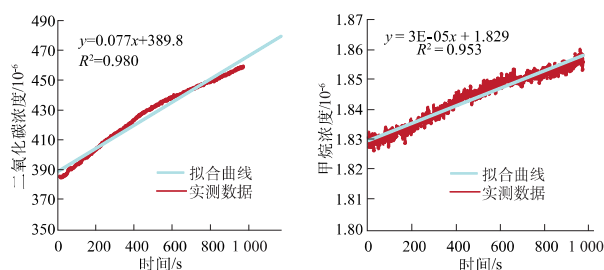


图4 清江流域水布垭水库2010年10月观测点1
水气界面温室气体浓度变化

Fig. 4 Changes of greenhouse gas concentration from water-atmosphere interface at No. 1 measurement point of Shuibuya Reservoir in October, 2010

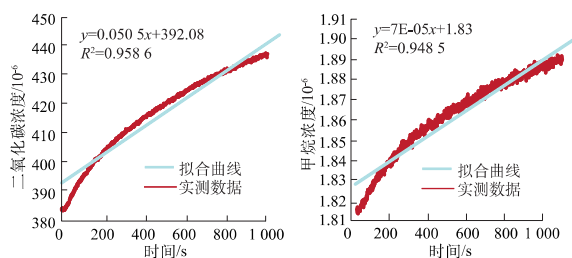


图5 清江流域水布垭水库2010年10月观测点6
水气界面温室气体浓度变化

Fig. 5 Changes of greenhouse gas concentration from water-atmosphere interface at No. 6 measurement point on Shuibuya Reservoir in October, 2010

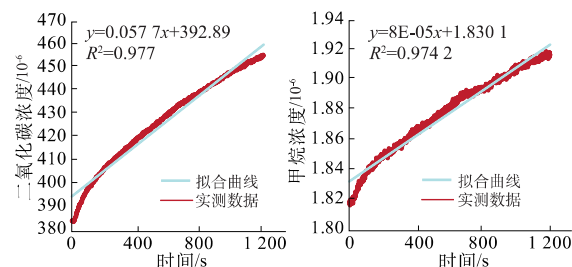


图6 清江流域水布垭水库2010年10月观测点10
水气界面温室气体浓度变化

Fig. 6 Changes of greenhouse gas concentration from water-atmosphere interface at No. 10 measurement point on Shuibuya Reservoir in October, 2010

受到气压和二氧化碳甲烷的积累影响,从而影响了水体二氧化碳的排放速度和通量。甲烷浓度同样从 1.82×10^{-6} 的大气本底值开始呈线性升高,与二氧化碳浓度变化具有相同的变化特征,其拟合曲线相关系数也在0.95以上,但变化幅度仅在 0.1×10^{-6} 以内,说明水体的甲烷排放量相对于二氧化碳非常低。

4.3 水布垭水库水气界面温室气体交换通量

图7为2010年5月8日观测结果,从图中可看出所有观测点二氧化碳通量均在 $400 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 以下,观测点4和7由于波浪较大,可能有外部气体进入箱体导致观测数据无效,实际上只有5个观测点数据。其中,观测点1和2在水布垭大坝前位置,其通量均在 $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 以下;观测点3在水库港湾,其二氧化碳交换通量为 $341.85 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,在所有有效观测点中是最高的,也可以从0.2 m高度大气二氧化碳浓度空间分布可以看出,在此点其浓度也是最高的。观测点5和6距离较近,均在水库中游,其观测时间分别为5月8日11:28和5月9日12:48,因此2个采样点水气界面二氧化碳通量分别为 $169.37 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $152.28 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,非常接近。

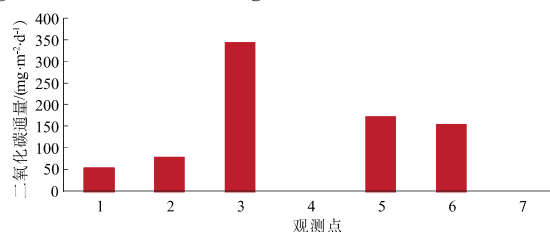


图7 2010年5月08日水布垭水库水体水气界面
二氧化碳交换通量变化

Fig. 7 Changes of carbon dioxide flux from the water-atmosphere interface on Shuibuya Reservoir on May 08, 2010

图8为2010年10月份水布垭水库水气界面二氧化碳10个观测点交换通量变化示意图,从图中可以看出,二氧化碳交换通量在 $2000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $7000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 的范围内变化,均为正值,说明在本次观测试验中水库水体是排放的,并且相对于其它月份整体通量较高,总体变化趋势是坝前排放通量较高,而在上游排放通量较低,在4号和6号观测点其交换通量最小,这2个点分别位于水库干流和支流上,气象指标分析表明4号观测点观测时气温仅为 9.8°C ,是所有观测点中最低的;同时4号观测点水体叶绿素含量仅为 $1.92 \mu\text{g/L}$,也是所有观测点中最低的。总体上看,观测点1、2和3处交换通量分别为 5384.13 、 5454.05 、 $7341.99 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,三者的观测气温分别为 10.9 、 11.2 、 11.2°C ,相对于其他观测点较低,其中观测点1和观测点2观测时水面非常平

静 天气为阴天,可能是导致 2 个测点出现高排放量的原因 3 号观测点为最大交换通量,位于靠近大坝位置,但是比更接近大坝的 1 号和 2 号观测点交换通量更高,表明水气界面二氧化碳交换通量不仅与大坝位置有关系,还与水库库岸周围地形和水质存在显著的关系,因为地形的变化将极大地影响风速,而风速则直接影响到水气界面温室气体扩散速度,水质条件将极大地影响水体温室气体产生机制。另外,观测点 6、7 和 8 均处于水库支流库湾,其二氧化碳交换通量分别为 $1\,328.55$ 、 $2\,447.33$ 、 $2\,377.41\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,相对于其它观测点较低;3 个观测点观测时间气温为 11.7 、 13.1 、 13.3°C ,比其他位置观测点高约 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 。

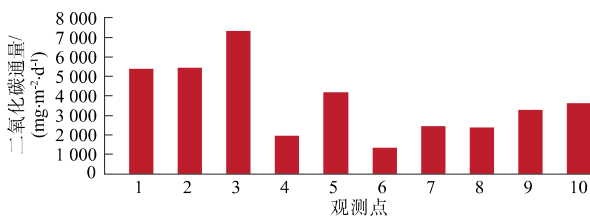


图 8 2010 年 10 月 26 日清江水布垭水库水体水气界面二氧化碳交换通量变化

Fig. 8 Changes of carbon dioxide flux from the water-atmosphere interface on Shuibuya Reservoir on October 26, 2010

图 9 为 2010 年 10 月 26 日水布垭水库水气界面甲烷交换通量空间变化情况,从图中可以看出本次观测总体上呈现排放的状态,但排放量值非常小,在 $0.56\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 到 $1.86\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 的范围内变化,总体变化趋势坝前到上游是逐渐升高的,与同时期二氧化碳通量的变化趋势相反。其中,观测点 1、2、3、4、5、9、10 依次位于从坝前到上游的干流上,观测点 6-8 位于支流库湾上。由于观测点 1、2 均位于坝前位置,两者甲烷通量非常相似;但观测点 3 和观测点 4 的甲烷通量差别较大,其原因可能是因为两者观测时气温差别比较大,分别为 11.2°C 和 9.8°C ,另外两者的水体叶绿素含量分别为 $3.15\text{ }\mu\text{g/L}$ 和 $1.92\text{ }\mu\text{g/L}$,观测点 4 的叶绿素低很多,两者的其它观测指标相差无几,说明气温和水体叶绿素含量 2 个指标对此次观测甲烷通量的影响较大。另外,观测点 6、7 和 8 均处于水库支流库湾,其交换通量分别为 0.56 、 1.35 、 $1.78\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,相对于其它观测点较高;3 个观测点观测时间气温为 11.7 、 13.1 、 13.3°C ,比其它位置观测点高约 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 。并且观测点 6 位于水库库湾内,其甲烷通量明显比位于支流上的观测点 7 和 8 低得多,同时还可以发现观测点 7 甲烷通量相对于观测点 8 要低,表明在支流上也表现出干流上同样的空间分布趋势。

为了能够与世界其它水库和自然水体进行比较,

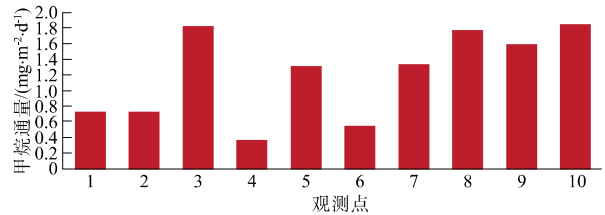


图 9 2010 年 10 月 26 日清江水布垭水库水体水气界面甲烷交换通量变化

Fig. 9 Changes of methane flux from the water-atmosphere interface on Shuibuya Reservoir on October 26, 2010

本文统计了世界温带与热带典型水库及中国典型湖泊水体二氧化碳排放通量基本情况(如表 1 和表 2 所示)。从表 1 中可以看出,加拿大和巴西等国家主要水库二氧化碳交换通量大部分在 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 以上,甚至达到 $9\,617\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 的交换通量。虽然表中的统计数据是水库全年的二氧化碳总排放量,但与水布垭水库二氧化碳交换通量存在数量级上的差别,从侧面说明我国清江流域水布垭水库二氧化碳交换通量并不高。还可以从表 2 中看出,与我国典型湖泊及小型水库相比其排放量更低,尤其是比太湖和武汉东湖自然水体的排放量低,说明水布垭水库二氧化碳交换通量已经达到自然水体的水平。

4.4 水布垭水库上空大气二氧化碳浓度与水环境指标的相互关系

一般情况下,水库水体二氧化碳的吸收、排放以及存储与相关水环境指标具有密切关系。本文观测试验方案同时观测了表层水温、水体叶绿素以及浊度等重要指标。因此,本文研究了水布垭水库上空大气二氧化碳浓度与水环境指标之间的相互关系,探索两者的相互影响机制。

水布垭水库水体上空 0.2 m 和 0.5 m 高度上空大气二氧化碳浓度与水体表层温度、水体叶绿素和浊度之间的关系如图 10 至图 12 所示。从图 10 中可以看出,水库水面 0.2 m 和 0.5 m 上空大气二氧化碳浓度与水体表层水温具有强烈的正相关关系,其相关系数均在 0.7 以上,在水面其它高度层上也发现了同样的趋势。从图 11 中可以看出,水库水面 0.2 m 和 0.5 m 高度层大气二氧化碳浓度与叶绿素浓度具有弱相关关系,相关系数仅在 0.4 左右。从图 12 可以看出 0.2 m 和 0.5 m 高度层大气二氧化碳浓度与水体浊度则完全没有相关关系。因此可以判定在表层水温、叶绿素浓度和浊度 3 个水环境指标中,表层水温对水库水体二氧化碳源汇地位具有决定性的作用,叶绿素次之,而浊度则完全没有关系。

表 1 温带与热带主要水库温室气体 CO₂ 交换通量

Table 1 CO₂ fluxes from main reservoirs in temperate and tropic zones

水库名称	国家	气候带	CO ₂ 交换通量 / (mg · m ⁻² · d ⁻¹)	数据来源
Lokka	芬兰	温带	1 152	Huttunen et al. 2003
Porttipahta	芬兰	温带	1 680	Huttunen et al. 2003
Laforge-1	加拿大	温带	2 509	St. Louis et al. 2000
Robert- Bourassa	加拿大	温带	1 636	St. Louis et al. 2000
Eastmain pinica	加拿大	温带	3 764	St. Louis et al. 2000
Cabonga	加拿大	温带	1 527	St. Louis et al. 2000
Revelstoke	加拿大	温带	2 400	St. Louis et al. 2000
Kinsbasket	加拿大	温带	5 781	St. Louis et al. 2000
Arrow	加拿大	温带	4 187	St. Louis et al. 2000
Whatshan	加拿大	温带	3 147	St. Louis et al. 2000
Miranda	巴西	热带	3 212	St. Louis et al. 2000
TresMarias	巴西	热带	1 943	DosSantos et al. 2006
Barra Bonita	巴西	热带	4 729	DosSantos. et. al. 2006
Segredo	巴西	热带	4 066	DosSantos. et. al. 2006
Xingo	巴西	热带	9 617	DosSantos. et. al. 2006
Samuel	巴西	热带	3 659	DosSantos. et. al. 2006
Tucurui	巴西	热带	2 453	DosSantos. et. al. 2006
Curua-Una	巴西	热带	1 644	DosSantos et al. 2006
Serra da Mesa	巴西	热带	3 646	St. Louis et al. 2000
Tucurui	巴西	热带	516	St. Louis et al. 2000
Itaipu	巴西	热带	864	St. Louis et al. 2000
Petit Saut	圭亚那	热带	4 865	St. Louis et al. 2000

表 2 中国部分自然湖泊与水库温室气体(CO₂)
交换通量数据

Table 2 CO₂ fluxes from natural lakes and
reservoirs in China

水库名称	地区	气候带	CO ₂ 交换通量 / (mg · m ⁻² · d ⁻¹)	数据来源
云贵高原湖泊	云南	亚热带	480	王仕禄 2003
枫湖水库	贵州	亚热带	970	吕迎春 2007
洪家渡水库	贵州	亚热带	304	喻元秀 2008
普定水库	贵州	亚热带	-129	严国安 2001
引子渡水库	贵州	亚热带	473	严国安 2001
东风水库	贵州	亚热带	491	严国安 2001
索风营水库	贵州	亚热带	659	严国安 2001
乌江渡水库	贵州	亚热带	933	严国安 2001
五强溪水库	湖南	亚热带	852±412	严国安 2001
太湖	江苏	亚热带	1250	李香华 2005
东湖	湖北	亚热带	1386	邢阳平 2007

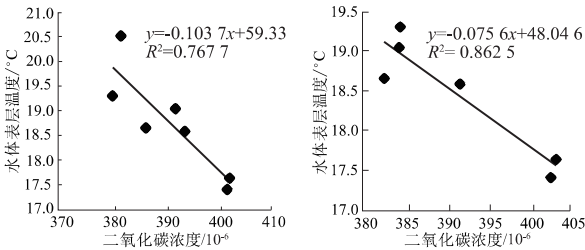


图 10 水布垭水库上空 0.2 和 0.5 m 高度大气
二氧化碳浓度与水体表层温度之间的关系

Fig. 10 Relationships between CO₂ concentration and
water surface temperature at 0.2 m and 0.5 m
above Shuibuya Reservoir

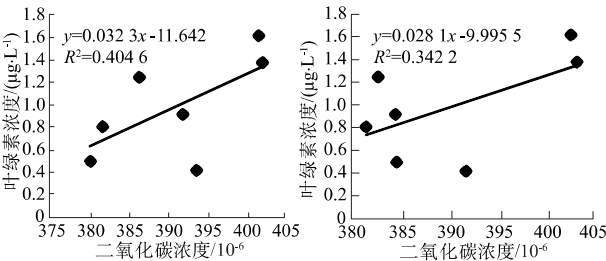


图 11 水布垭水库上空 0.2 和 0.5 m 高度大气二氧化碳
浓度与水体叶绿素浓度之间的关系

Fig. 11 Relationship between CO₂ concentration and
water chlorophyll concentration at 0.2 m and 0.5 m
above Shuibuya Reservoir

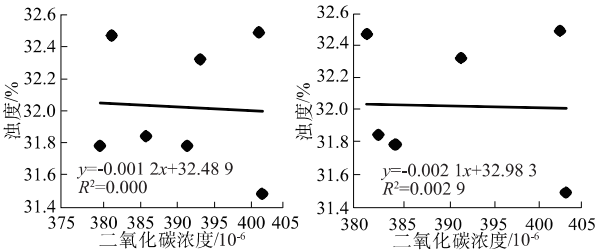


图 12 水布垭水库上空 0.2 和 0.5 m 高度大气二氧化碳
浓度与水体浊度之间的关系

Fig. 12 Relationship between CO₂ concentration
and water turbidity at 0.2 m and 0.5 m
above Shuibuya Reservoir

5 结 论

本文选择清江流域水布垭水库作为研究案例，分别在 2010 年 5 月和 10 月开展了水库温室气体原位观测试验，获取水库上空大气温室气体浓度变化、水气界面交换通量及其与水环境因子之间的关系。根据原位观测数据分析，可得到以下重要结论：

(1) 水布垭水库上空大气二氧化碳浓度在 0.5 m 高度以下最高，然后向上依次降低；

(2) 在表层水温、叶绿素浓度和浊度三个水环境影响指标中，表层水温对水库水体二氧化碳源汇

地位具有决定性的作用,叶绿素次之,而浊度则完全没有关系。

(3) 2010年10月份水布垭水库二氧化碳和甲烷交换通量呈现排放状态,但比世界温带和热带主要水库要低得多,接近于中国太湖和东湖自然水体的排放标准。

当然,本文的研究结论是根据有限的原位观测数据得出的,仅能说明具体观测时间的温室气体交换情况,还需要积累更多的原位观测数据,进行更加系统全面的科学研究,才能确定水布垭水库温室气体源汇地位。

参考文献:

- [1] IPCC. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4) [R]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007, 1-7.
- [2] 隋欣, 廖文根. 中国水电温室气体减排作用分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2010, 8(2): 133-137. (SUI Xin, LIAO Wen-gen. Analysis of Greenhouse Gas Emission Reduction of Hydropower in China [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2010, 8(2): 133-137. (in Chinese))
- [3] 李海英, 冯顺新, 廖文根. 全球气候变化背景下国际水电发展态势[J]. 中国水能及电气化, 2010, (10): 29-37. (LI Hai-ying, FENG Shun-xin, LIAO Wen-gen. Development Trend of International Hydropower in the Background of Global Climate Change [J]. China Waterpower & Electrification, 2010, (10): 29-37. (in Chinese))
- [4] 王文铭, 艾尉. 低碳经济背景下我国水电发展前景分析及建议[J]. 中国水利, 2010, (14): 25-26. (WANG Wen-ming, AI Wei. Prospect of Hydropower Development in China under the Background of Low-Carbon Economy and Advices [J]. China Water Resources, 2010, (14): 25-26. (in Chinese))
- [5] 林初学. 水坝工程建设争议的哲学思辨[J]. 中国三峡建设, 2006, (6): 11-15. (LIN Chu-xue. Philosophical Thinking on Dispute of Dam Construction [J]. China Three Gorges Construction, 2006, (6): 11-15. (in Chinese))
- [6] Dams and Development a New Framework for Decision-Making [R]. World Commission on Dams. The Report of the World Commission on Dams. Earthscan Publications Ltd, London and Sterling, VA, 2000: 258-262.
- [7] TREMBLAY A, VARFALVY L, ROEHM C, et al. Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes, Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments [R]. Environmental Science Series. Springer, Berlin, Heidelberg, New York 2005: 233-250.
- [8] DELMAS R, GALY-LACAUX C, RICHARD S. Emissions of Greenhouse Gases from the Tropical Hydroelectric Reservoir of Petit-Saut (French Guiana) Compared with Emissions from Thermal Alternatives [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2001, 15(4): 993-1003.
- [9] THERRIEN J, TREMBLAY A, JACQUES R. CO₂ Emissions from Semi-arid Reservoirs and Natural Aquatic Ecosystems [C] // Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes, Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments. Environmental Science Series. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2005: 233-250.
- [10] DEMARTY M, BASTIEN J, TREMBLAY A. Carbon Dioxide and Methane Annual Emissions from Two Boreal Reservoirs and Nearby Lakes in Quebec, Canada [J]. Biogeosciences Discuss, 2009, 6: 2939-2963.
- [11] DUCHEMIN E, LUCOTTE M, CANUEL R, et al. Production of the Greenhouse Gases CH₄ and CO₂ by Hydroelectric Reservoirs in the Boreal Region [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995, 9(4): 529-540.
- [12] KELLER M, STALLARD R F. Methane Emission by Bubbling from Gatun Lake, Panama [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(4): 8307-8319.
- [13] DUCHEMIN E, LUCOTTE M, CANUEL R, et al. Comparison of Greenhouse Gas Emissions from an Old Tropical Reservoir with Those from Other Reservoirs Worldwide [J]. Verh Internat Verein Limnol, 2000, 27: 1391-1395.
- [14] ABRIL G, GUERIN F, RICHARD S, et al. Carbon Dioxide and Methane Emissions and the Carbon Budget of a 10-years Old Tropical Reservoir (Petit-Saut, French Guiana) [J]. Global Biogeochemical Cycle, 2005, 19: doi: 10.292005GB002457.
- [15] DUAN X N, WANG X K, MU Y J, et al. Seasonal and Diurnal Variations in Methane Emissions from Wuliangsu Lake in Arid Regions of China [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39: 4479-4487.
- [16] 邢阳平. 长江中下游地区淡水湖泊水-气界面碳交换及机制研究[D]. 北京: 中国科学院水生生物研究所, 2007: 20-25. (XING Yang-ping. The Exchange of Carbon from Water-Atmosphere Interface of Freshwater Lakes in the Upper and Middle Stream of the Yangtze River [D]. Beijing: Institute of hydrobiology, Chinese academy of sciences, 2007: 20-25. (in Chinese))
- [17] 李香华. 太湖水-气界面温室气体通量及时空变化特征研究[D]. 南京: 河海大学, 2005. (LI Xiang-hua. The Fluxes and Spatial-Temporal Variation of Greenhouse Gas from Water-Atmosphere Interface on Taihu Lake [D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [18] 刘丛强, 吕迎春, 王仕禄, 等. 红枫湖夏季分层期间pCO₂分布规律的研究[J]. 水科学进展, 2007, 19: 107-110. (LIU Cong-qiang, LV Ying-chun, WANG Shi-lu, et al. Distribution of pCO₂ in Hongfeng Lake in Summer Stratification [J]. Advances in Water Science, 2007, 19: 107-110. (in Chinese))
- [19] 喻元秀, 刘丛强, 汪福顺, 等. 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 Yuan-xiu, LIU Cong-qiang, WANG Fu-shun, et al. Spatiotemporal Characteristics and Diffusion Flux of Partial Pressure of

- Dissolved Carbon Dioxide ($p\text{CO}_2$) in Hongjiadu Reservoir [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27 (7): 1193–1199. (in Chinese)
- [20] CHEN H, WU Y Y, YUAN X Z, *et al.* Methane Emissions from Newly Created Marshes in the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir [J]. Journal Geophysical Research, 2009, 114: d18301, 1–7.
- [21] 陈永根, 李香华, 胡志新, 等. 中国八大湖泊冬季水气界面 CO_2 通量 [J]. 生态环境, 2006, 15 (4): 665–669. (CHEN Yong-gen, LI Xiang-hua, HU Zhi-xin, *et al.* Carbon Dioxide Flux on the Water-Air Interface of the Eight Lakes in China in Winter [J]. Ecology and Environment, 2006, 15 (4): 665–669. (in Chinese))
- [22] JIM GILES. Methane Quashes Green Credentials of Hydropower [J]. Nature, 2006, 444 (30), 524–525.
- [23] HUTTUNEN J T, ALM J, LIKANEN A, *et al.* Fluxes of Methane, Carbon Dioxide and Nitrous Oxide in Boreal Lakes and Potential Anthropogenic Effects on the Aquatic Greenhouse Gas Emissions [J]. Chemosphere, 2003, 52: 609–621.
- [24] ST LOUIS V L, KELLY C A, DUCHEMIN E, *et al.* Sources of Greenhouse Gases to the Atmosphere: A Global Estimate [J]. BioScience, 2000, 50 (9): 766–775.
- [25] DOS SANTOS M A, Rosa L P, SIKAR B, *et al.* Gross Greenhouse Gas Fluxes from Hydropower Reservoir Compared to Thermo-Power Plants [J]. Energy Policy, 2006, 34: 481–488.
- [26] 王仕禄, 万国江, 刘丛强, 等. 云贵高原湖泊 CO_2 的地球化学变化及其大气 CO_2 源汇效应 [J]. 第四纪研究, 2003, 23 (5): 24–30. (WANG Shi-lu, WAN Guo-jiang, LIU Cong-qiang, *et al.* The Geochemical Changes and Source-Sink Effects of CO_2 in Lakes in Yunnan-Guizhou Plateau [J]. Quaternary Science, 2003, 23 (5): 24–30. (in Chinese))
- [27] 吕迎春, 刘丛强, 王仕禄, 等. 贵州喀斯特地区水库红枫湖、百花湖 $\text{P}(\text{CO}_2)$ 季节变化研究 [J]. 环境科学, 2007, 28 (18): 2674–2681. (LV Ying-chun, LIU Cong-qiang, WANG Shi-lu, *et al.* Seasonal Variation of $\text{P}(\text{CO}_2)$ in Two Reservoirs, Hongfeng and Baihua Lakes in Guizhou Province, China [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2007, 28 (18): 2674–2681. (in Chinese))
- [28] 严国安, 刘永定. 水生生态系统的碳循环及对大气 CO_2 的汇 [J]. 生态学报, 2001, 21 (5): 828–833. (YAN Guo-an, LIU Yong-ding. Aquatic Ecosystems: Carbon Cycle and as Atmospheric CO_2 Sink [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21 (5): 828–833. (in Chinese))

(编辑: 王 慰)

Measurement and Analysis of Greenhouse Gas Fluxes from Shuibuya Reservoir in Qingjiang River Basin

ZHAO Deng-zhong^{1, 2}, TAN De-bao¹, WANG Zhao-hui¹, HAO Chao-ying¹

(1. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

2. China Three Gorge Corporation, Yichang 443002, China)

Abstract: The Shuibuya Reservoir on Qingjiang River was selected to illustrate the source and sink of greenhouse gas from the cascade hydroelectric power stations. In-situ measurements were carried out in May and October, 2010 to obtain carbon dioxide and methane exchange fluxes from water-atmosphere interface of the reservoir, the vertical profile of greenhouse gas concentration above water-body and the aquatic environmental factors respectively. It is revealed that the highest carbon dioxide concentration measured in May, 2010 was below 0.5 meter in the vertical profile, and the water surface temperature has the largest effect on the concentration change and fluxes of carbon dioxide from the reservoir's water-body. Overall, carbon dioxide and methane was emitting from the water-atmosphere interface of Shuibuya Reservoir's water-body in October, 2010, with the mean fluxes amounting $3\,740.92 \pm 1\,872.56 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ and $1.22 \pm 0.57 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ respectively, close to those from Taihu Lake and East Lake and other natural water bodies in China, much lower than those from the reservoirs in the tropic or temperate zones. The carbon dioxide fluxes increased from the upstream to the dam; while methane fluxes presented to be the opposite. This study provided in-situ measured data for understanding the sink and source of greenhouse gas emission from reservoirs and scientific support for the development of hydroelectric clean energy of the upstream Yangtze River.

Key words: the Shuibuya reservoir; greenhouse gas emission from reservoir; exchange fluxes; water-atmosphere interface