

三峡澎溪河高阳平湖碳通量初步分析及不确定性*

徐琳琳^{1,2}, 李哲^{2,3**}, 李翀³, 陈永柏³, 郭劲松², 肖艳²

(1: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400044)

(2: 中国科学院重庆绿色智能技术研究院水库水环境重点实验室, 重庆 400714)

(3: 中国长江三峡集团, 北京 100038)

摘要: 为明确三峡水库支流澎溪河回水区的碳收支特征, 以澎溪河高阳平湖水域为研究对象, 建立了河道型水库主要路径碳收支估算方法, 对高阳平湖从 2011 年 9 月至 2012 年 8 月一个完整水文周年内主要路径的碳通量进行了收支动态分析。结果表明, 2011 年 9 月至 2012 年 8 月, 澎溪河高阳平湖水域河流输入的碳通量为 133548.55 t C, 输出的碳通量为 125651.82 t C, 水-气界面的扩散碳通量为 762.56 t C, 消落带土-气界面的扩散碳通量为 123.74 t C, 水中气泡的释放碳通量为 0.38 t C, 降水输入的碳通量为 104.58 t C, 全年高阳平湖水域碳的净积累量为 7114.63 t C, 宏观上呈现碳积累特征; 澎溪河高阳平湖水域水体碳素总体上呈现出河道型水库特有的纵向输移特征。高阳平湖水域上游大量碳素的输入及其在高阳平湖水域的滞留可能会是该水域水-气界面温室气体释放的主要来源。尽管总体上高阳平湖全年呈现出碳积累的特点, 但一些方法依然存在不确定性(水-气界面扩散碳通量和气泡释放碳通量的时空异质性等), 需要更系统、更长期的工作予以验证或改进。

关键词: 三峡水库; 澎溪河; 高阳平湖; 碳; 空间分布; 收支动态

A preliminary study of carbon balance and the uncertainty for Lake Gaoyang, Pengxi River of the Three Gorges Reservoir

XU Linlin^{1,2}, LI Zhe^{2,3**}, LI Chong³, CHEN Yongbo³, GUO Jinsong² & XIAO Yan²

(1: *Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P.R.China*)

(2: *Key Lab of Reservoir Water Environment, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, P.R.China*)

(3: *China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, P.R.China*)

Abstract: To understanding the carbon budget, our research chose Lake Gaoyang as object and established an estimate method of carbon budget. From September 2011 to August 2012, we analyzed the main path of carbon budget for the Lake Gaoyang in Pengxi River. The main conclusions for the one year are as follows; input carbon fluxes of river transport were 133548.55 t C, output carbon fluxes of river transport were 125651.82 t C, diffusive fluxes of water to air interface were 762.56 t C, diffusive fluxes of water-level-fluctuating zone were 123.74 t C, ebullition fluxes were 0.38 t C, input carbon fluxes of precipitation were 104.58 t C, and net accumulation of carbon fluxes of the Lake Gaoyang were 7114.63 t C. It was mainly in the form of dissolved inorganic carbon. The carbon in the water of the Lake Gaoyang in Pengxi River showed the characteristics of longitudinal transport along the river channel. Lots of carbon went into the uplift air and deposited in Lake Gaoyang from upstream. It may be the main source of greenhouse gases on the water to air interface. As a whole, Lake Gaoyang presents the characteristic of carbon accumulation throughout the year, but some methods remains uncertain for the spatial and temporal heterogeneity of water-gas interface diffusion flux and air release flux. We need more systematic and long-term work to verify or modify.

Keywords: Three Gorges Reservoir; Pengxi River; Lake Gaoyang; carbon; spatial distribution; budget

* 国家自然科学基金项目(51679226)和重庆市基础科学和前沿技术研究重点项目(CSTC2015JCYJBX0006)联合资助。2015-06-11 收稿; 2016-06-09 收修改稿。徐琳琳(1989~), 女, 硕士研究生; E-mail: xulinlin0707@163.com.

** 通信作者; E-mail: ZheLi81@sina.com.

河流通常是水体碳素在陆地生态系统和海洋间的转换过渡区域,其输送的溶解态物质和颗粒态物质占陆地向边缘海洋传输量的90%,在全球碳循环中有着举足轻重的作用^[1-3]. 筑坝蓄水对河流碳输送产生了显著影响,是近年来全球变化研究的热点之一^[4-5]. 尽管如此,目前对水库碳收支的研究依然有限,大部分研究以湖泊为对象开展. Hope 等在研究美国威斯康辛州 27 个湖泊中发现湖泊水体中的 CO_2 含量与流域及湖泊面积的比值有明显的正相关关系,说明流域输入是湖泊水体中碳素的主要来源^[8]. Richey 等对湖泊系统的碳路径进行了研究,发现湖泊除了从地表径流和地下水源获得碳以外,同时还能从上空物质中获得碳^[9-10]. Keller 等在对 Gatun 水库进行研究时发现,以气泡释放形式扩散的 CO_2 和 CH_4 通量范围分别为 500~1000 和 5~10 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ^[11]. Duchemin 等对加拿大寒带地区水库的温室气体释放通量进行了为期两年的研究,横向对比了水库温室气体的监测方法,并通过长期跟踪监测,构建了水库温室气体的估算评价体系^[12]. 嵇晓燕等利用静态箱法对太湖地区四季的水-气界面 CO_2 通量的季节变化特征进行了研究^[13].

目前国内研究大多只关注水库水-气界面 CO_2 和 CH_4 温室气体的通量特征,或从某单一方面研究温室气体的通量. 从水库关键界面碳通量和碳收支的角度来揭示筑坝蓄水对碳生物地球化学过程的影响,目前鲜有报道. 本研究以三峡水库典型支流澎溪河高阳平湖水域为研究对象,在高阳平湖关键界面碳通量观测基础上,对其碳收支进行初步分析,研究将为下一阶段开展水库碳循环模型研究奠定前期基础.

1 材料与方法

高阳平湖水域(图 1)地处澎溪河下游永久回水区中部,具有类似湖泊的地貌环境及水文水力特征. 受水库运行影响,在三峡水库季节性水位涨落下呈现出“浅水湖泊-深水湖泊”的交替变化特征,在库区中段支流回水区或库湾中具有典型性和代表性. 研究时间为一个完整水文周年(2011 年 9 月-2012 年 8 月),共设置高阳平湖入口、湖心、出口、库湾平台(含消落带)4 个采样点(图 2),逐月开展跟踪观测.

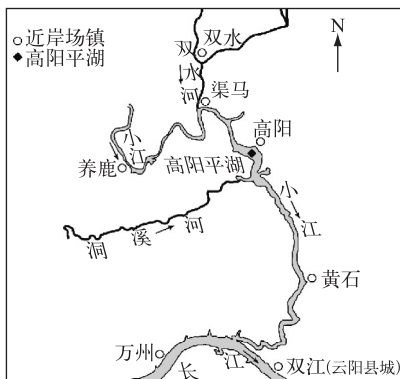


图 1 澎溪河高阳平湖位置

Fig.1 Backwater area of Pengxi River and Lake Gaoyang

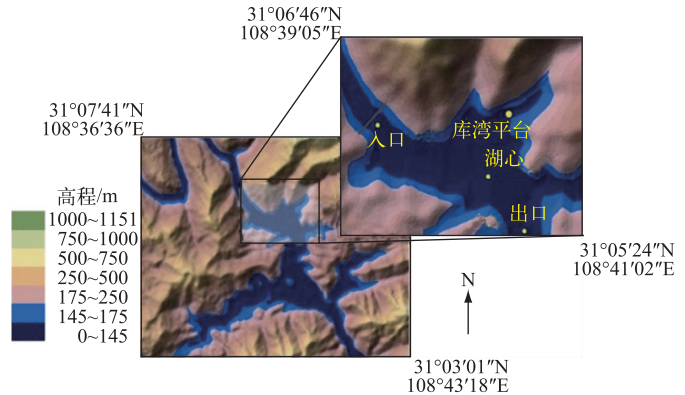


图 2 高阳平湖采样点位置

Fig.2 Location of sampling sites in Lake Gaoyang

从水库生态系统外部来看,水体碳素的迁移过程主要包括河流输送、水-气界面气体扩散、土-气界面气体扩散、气泡释放以及降水输送等(图 3). 作为一个独立的系统,本研究着重考虑了出入系统各关键界面的碳通量情况,而关于系统内部的一些过程则并不予考虑,主要原因有以下几个方面:

1) 藻类初级生产(光合固碳)和细菌降解作用(好氧产生 CO_2 、厌氧产生 CH_4), 均将调节改变水体中的 CO_2 或 CH_4 浓度,并最终通过水-气界面气体交换予以实现. 水-气界面静态箱法所测试的 CO_2 和 CH_4 通量值(正值代表水体向大气释放;负值代表水体从大气吸收),既包含了藻类光合呼吸导致的 CO_2 吸收,也包括了水体中因细菌降解等向大气释放的 CO_2 和 CH_4 . 不仅是水体中 CO_2 和 CH_4 源、汇“双向”过程汇总后的一个表现结果,也是水体和大气中 CO_2 、 CH_4 浓度相互关系的表现.

2) 本研究中测试的河流输入、输出部分, 包含了泥沙的输入、输出, 关于泥沙(含碳)在高阳平湖内沉积, 研究认为该部分属于系统内部碳在高阳平湖中积累的结果。

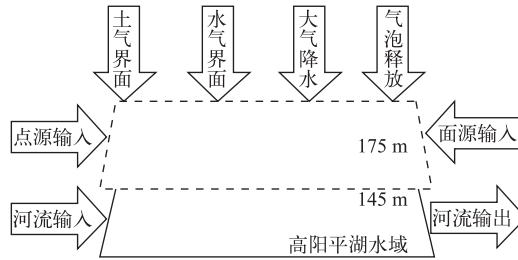


图3 高阳平湖水域水体碳素迁移过程示意

Fig.3 Sketch of water carbon migration process of Lake Gaoyang

进一步将该收支方案进行概化或简化:

1) 高阳平湖控制断面(高阳平湖入口至其出口断面)水域面积大约为 3~4 km², 近岸高阳镇场镇污水收集后排至该水域下游. 故在对高阳平湖碳收支的初步估算中, 近岸场镇点源对该水域的碳输入可忽略不计。

2) 高阳平湖为典型的过水型湖泊, 其控制断面的流域面积仅为 5~6 km², 流域面积相对较小, 沿岸并无大面积农田耕作, 且空间边界为 175 m 水位线(包含了低水位运行时期时消落所带来的碳输入), 因此研究认为相对于河流纵向输送, 175 m 水位线以上区域的面源所带来的碳输入可忽略. 故对高阳平湖碳收支的初步估算中, 暂不涉及面源所带来的碳输入。

3) 本研究对消落带土-气界面进行了监测, 但消落带在裸露期间可能因陆生植被恢复出现碳汇, 植被在受淹后可能被降解, 对水-气界面 CO₂、CH₄ 通量有所贡献. 受实验条件所限, 因植被恢复期间出现碳汇部分并未予以考虑. 而植被受淹后可能降解并对水-气界面 CO₂、CH₄ 的贡献量研究认为已经隐含在水-气界面 CO₂、CH₄ 的监测结果中, 故并不予以额外单独计算。

故主要针对上述 5 个主要碳路径对高阳平湖水域进行碳收支估算和分析。

现场测试分析指标包括: 采用 YSI[®] 63 型 pH 测量仪测定水体 pH 值(精度 0.01 个 pH); 采用 YSI ProODO 溶解氧仪测定水温及溶解氧(DO)(精度分别为 0.1℃ 和 0.01 mg/L); 碱度(TA)采用 HACH 公司的微量滴定器及标准硫酸溶液现场滴定(精度为 1.25 μl); 现场还测定风速、气温等. 现场采样结束后, 将各断面水样带回实验室于 48 h 内完成其他指标的分析测试工作。

1.1 河流输送碳通量

将高阳平湖水域看作一个整体, 水体碳素的河流输送包括河流输入和河流输出两条路径. 上游水体中的碳素通过河流输入进入高阳平湖, 高阳平湖中的碳素又通过河流输出流向下游, 两者的差值即为高阳平湖水域在河流输送过程中输入或输出的水体碳素通量. 通过公式计算, 即可估算出高阳平湖水域每个月河流输送过程中所产生的碳通量. 本研究中, 高阳平湖入口和出口采样点均设置 3 个平行采样断面, 每个月的采样深度根据实际水深而确定, 对各采样深度水样进行等量混合后完成测试工作, 然后取 3 个平行断面的平均值作为河流输送和输出碳通量。

$$G_1 = 86400Q_1 \cdot C_1 \cdot t \quad (1)$$

式中, G_1 为河流输送碳通量(g), Q_1 为河流流量(m³/s), C_1 为水体碳素平均浓度(mg/L), t 为采样月份的天数(d)。

河流输入、输出中的总碳量等于溶解性无机碳(DIC)、溶解性有机碳(DOC)和颗粒态碳(PC)三者之和(即: TC=DIC+DOC+PC). DIC 浓度现场滴定, DOC 浓度采用 Shimazu[®] TOC-V 总碳分析仪(精度为 1.5% 以内)测定, PC 和颗粒有机碳(POC)浓度采用 EuroVector[®], EA3000 元素分析仪(精度为 0.05%~0.15%)测定. 采集的原水通过 450℃ 预燃烧 4 h 的 Whatman[®] GF/F 膜, 滤液存放于玻璃管中, 加入饱和氯化汞溶液于 0~4℃ 低温保存, 用于 DOC 浓度的测定; 所得滤膜一式两份, 一份用于 PC 浓度的测定, 另一份用 1 mol/L 的

盐酸酸化以去除颗粒无机碳(PIC),并用蒸馏水清洗3次,用于POC浓度的测定。两份滤膜均烘干至恒重放于封口袋中,-20℃冷冻保存,一周内完成分析。研究期间,每月定时在高阳平湖入口和出口采样点采集水样,测试碳浓度,分别代表河流输入和输出的碳浓度。

由于在高阳平湖水域没有独立的水文站测定水文数据,以温泉水文站为参考点来推算高阳平湖水域河流量值。温泉水文站控制流域面积为1241.1 km²,而高阳平湖水域控制流域面积约为4820 km²。根据两个断面的控制流域面积,即可简单推算出高阳平湖水域的河流流量^[16]:

$$Q_1 = 3.875Q_0 \quad (2)$$

式中, Q_0 为温泉水文站河流量(m³/s)。

1.2 水-气界面气体扩散碳通量

研究将高阳平湖划分为3部分,高阳平湖入口、湖心和出口3个采样点数据分布代表这3部分的水-气界面气体扩散通量。通过公式计算即可估算出水-气界面温室气体(CO₂和CH₄)扩散碳通量:

$$G_2 = \sum_{j=1}^3 \frac{3F_{lux_j} \cdot S_j \cdot t}{125} \quad (3)$$

式中, G_2 为水-气界面气体扩散碳通量(g); F_{lux_j} 为各采样点的扩散通量(mg/(m²·h)); S_j 为各采样点的水域面积; $j=1,2,3$ 分别代表高阳平湖入口、湖心和出口采样点。

采用浮箱法监测水-气界面气体扩散碳通量。研究采用改良型静态箱进行野外监测,其箱体材料为聚乙烯塑料,外观为长方体,外部有隔热保温包裹。改良型静态箱三边尺寸为长×宽×高=450 mm×350 mm×150 mm,箱内设有风扇用来混匀气体,同时还设有感温探头用来测量箱内温度,每一采样点均设置两个静态箱。采气全程时间为10 min,采样间隔2 min,每个采样点共取气6次。采样时用针筒抽取静态箱内气体100 ml,注入铝箔采气袋后保存,在48 h内使用Agilent GC 7820气相色谱仪完成气体浓度分析测试,并通过模型公式^[17]计算得到水-气界面气体(CO₂和CH₄)扩散碳通量:

$$F_{lux} = \frac{k \cdot P \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot V_2}{SP \cdot (273.15 + T) \cdot S_2} \quad (4)$$

式中, k 为测试气体浓度变化斜率(mg/(L·s)); P 为监测时的大气环境压力(kPa); F_1 为分钟到小时的转换系数,60; F_2 为ppm到μg/m³的转换系数; V_2 为静态箱内空气体积(L); SP 为标准大气(101.325 kPa); T 为气温(°C); S_2 为静态箱所覆盖水面面积(m²)。

依据高阳平湖水域水下地形图,选取175 m水位线为空间边界,以在边界面上到两个采样点间距离相同点的连线为划分边界,对整个高阳平湖进行划分。通过划分后测量计算,高阳平湖入口、湖心和出口3个采样点分别代表了高阳平湖22%、57%和21%的水域面积。考虑到三峡水库调蓄作用将引起水位的变化,将高阳平湖水域面积同水位进行回归分析,即可通过水位高低来推算出高阳平湖水域面积。

1.3 土-气界面气体扩散碳通量

受三峡水库调蓄的影响,在夏季低水位运行期,高阳平湖水域会在175 m水位线以下形成大片近岸消落带区域。土壤中含有丰富的有机碳,土-气界面温室气体的扩散同样也是碳收支路径中重要环节。通过公式即可估算出高阳平湖水域近岸消落带土-气界面温室气体扩散碳通量:

$$G_3 = \frac{3F_{lux} \cdot S_3 \cdot t}{125} \quad (5)$$

式中, G_3 为土-气界面气体扩散碳通量(g); S_3 为采样月份的消落带面积。

在2012年3—8月夏季低水位运行期对近岸消落带土-气界面温室气体扩散通量进行监测,综合考查后,采样点选择在高阳平湖水域李家坝处近岸消落带区域。每月在高阳平湖水域消落带中选取3种不同类型土地性质(草地、花生地和玉米地)的采样点,采用静态箱法,采样时间均设置在上午11:00左右。采样提前2 d在采样点处理设静态箱底座,使其适应周围土壤环境,采样时采用水封法保证静态箱内密封完全,每一采样点均设置两个静态箱。分别采集0、10、20和30 min共4次样品,采样时用针筒通过三通阀抽取静态箱内气体,注入铝箔采气袋后保存,此后处理方法与水-气界面气体相同。

在高阳平湖水域水下地形图中找出175 m水位线和145 m水位线之间的消落带区域,选择各个特征边

坡测量其近岸消落带边坡坡度值,最后取平均值推算出高阳平湖水域综合边坡坡度值为 30.9° . 由于已知在各个水位高度下高阳平湖水域面积,故通过边坡坡度值即可推算出在各个水位高度下的消落带面积.

1.4 气泡释放碳通量

受到三峡水库调蓄的影响,高阳平湖水域库湾近岸区域呈现出“落干-淹没”的交替特征. 野外观测发现,自入春开始淹没的库湾近岸区域存在气泡释放现象. 通过公式即可得到高阳平湖水域温室气体气泡释放碳通量:

$$G_4 = \sum_{i=1}^4 \frac{9}{31250} F_{bi} \cdot S_i \cdot t \quad (6)$$

式中, G_4 为气泡释放碳通量 (g); $i=1, 2, 3, 4$ 分别代表深度为 3、5、8 和 10 m 的采样点; F_{bi} 为各采样点气泡释放通量 ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$); S_i 为各采样深度所控制的水域面积.

研究时间为 2012 年 3—8 月,选取高阳平湖水域李家坝处库湾开展气泡监测,采样周期为每月一次,均在当月下旬,每次持续一周. 采样装置采用改进的倒置漏斗,由金属薄皮材料(马口铁)制作,在接缝处进行焊接密封,敞口部为镀锌钢圈包裹在金属薄皮材料内,其敞口直径为 750 mm,高为 1000 mm,集气瓶容积为 2 L,倒置漏斗敞口部分设置有配重 10 kg 的吊坠. 水面锚绳一端固定于岸边 175 m 水位线以上,另一端固定于位于库湾湖心的野外实验平台(平台处水下高程约为 138 m). 4 个气泡收集装置由浅至深地栓于水面锚绳下方,装置下部敞口处水深约为 1.5 m. 4 个采样点所在处垂向对应水深分别为 3、5、8 和 10 m (图 4). 随着坝前水位的变化,每月开展监测前预先调整 4 个采样点所处水平位置,确保其所在处对应水深自近岸处至湖心依次递增. 气泡收集期间,为避免收集气泡过多而重新溶于水,采气时间间隔为 24 h 并在现场完成气泡体积测定. 收集的气体用针筒注入铝箔采气袋保存,48 h 内使用 Agilent GC 7820 气相色谱仪完成气泡气体浓度分析测试. 气泡释放通量计算公式为:

$$F_{bi} = \frac{1000 \cdot C_4 \cdot V_4}{S_4 \cdot t_1} \quad (7)$$

式中, C_4 为气泡浓度 ($\mu\text{mol}/\text{L}$); V_4 为气泡收集的体积 (m^3); S_4 为倒置漏斗底面积 (m^2); t_1 为采样间隔时间 (d).

以上 4 个采样点由浅入深将整个高阳平湖湖面看作近似长方形构造,每个采样点来代表一个深度控制范围内的气泡释放通量水平,由浅至深依次代表近岸水深 10 m 以内湖面 36%、23%、23% 和 18% 的水域面积,再结合高阳平湖不同水位时的近岸边坡坡度,即可推算出各月高阳平湖水域温室气体气泡释放通量.

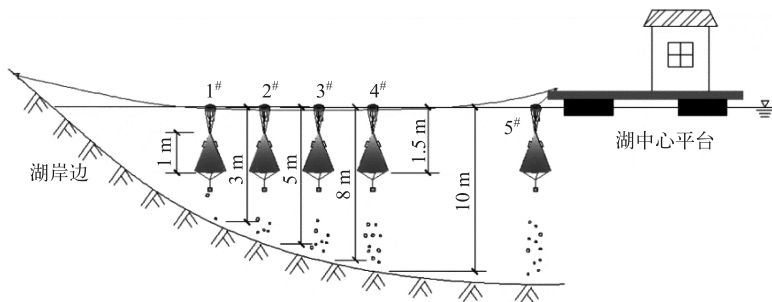


图 4 高阳平湖库湾气泡收集装置布置示意

Fig.4 Sketch of ebullition collecting funnels for collecting bubbles at the sampling estuary of Lake Gaoyang

1.5 降水输送碳通量

大气降水过程将会向水生生态环境中输入溶解态无机碳 (DIC),因此降水输送也被看作是高阳平湖水域碳收支过程的重要路径. 水域面积、降水量和降水碳浓度三者的乘积即为高阳平湖水域降水输送碳通量.

$$G_5 = 10^{-3} S_{175\text{m}} \cdot Q_5 \cdot C_5 \quad (8)$$

式中, G_5 为降水输送碳通量 (g); $S_{175\text{m}}$ 为水域面积 (m^2); Q_5 为采样月份的降雨量 (mm); C_5 为降水碳浓度

(mg/L).

选取高阳平湖水域4次典型短时强降水过程进行研究.在夏季低水位运行期和冬季高水位运行期各设置2次采样.每次降水过程前,高阳平湖水域天气均为多云,降水结束后天气慢慢转好.依次在高阳平湖入口、湖心和出口采集雨水水样,并同步观测其pH、水温等环境指标.现场利用塑料采样瓶将采集的雨水水样混合后,带回实验室在24 h内使用Shimadzu[®] TOC仪完成其碳浓度的测试,将4次采样结果取平均值即可得到高阳平湖水域降水输送过程中的水体碳素浓度.

水域面积同样通过模型公式进行推求,空间边界选择为高阳平湖水域175 m水位线,降水量通过高阳平湖野外气象站实测得到.野外气象站设在高阳平湖水域近岸,定期更换干燥剂和采集数据,可真实地反映出高阳平湖水域的各个气象指标.

1.6 数据处理

研究期间,所有数据统一录入Excel软件整理分类,并通过SPSS和Origin软件进行统计和图形分析,采用Spearman相关性分析说明数据间变化的线性相关性.

2 结果与分析

通过对高阳平湖水域主要路径碳收支估算方法的建立,利用对高阳平湖水域主要碳路径的监测数据,代入计算公式,即可对高阳平湖水域主要路径的碳收支情况进行估算与分析.

2.1 河流输送碳通量

河流输入碳通量峰值出现在2011年9月,为35216.89 t C,输出碳通量为33830.22 t C.河流输入最低值出现在2012年2月,仅为3110.05 t C,输出碳通量也仅为2939.03 t C.从2011年12月至2012年2月河流输入和输出的碳通量都处于较低水平,最高才达到4635.86 t C,且输入和输出变化趋势基本保持一致(图5).河流输入碳通量与输出碳通量呈显著正相关关系($r_{\text{输入-输出}}=0.999$, $\text{Sig.} \leq 0.01$),说明河流在输送水体碳素过程具有连续性.河流输入碳通量明显大于河流输出碳通量,这部分差值将滞留在高阳平湖水域中.从各形态碳来看,滞留的DIC、DOC、POC和PIC的逐月碳通量变化幅度较大,以DIC为主,仅DIC在2012年7月达到峰值,为3173.33 t C,POC和PIC均在2011年9月达到峰值,分别为583.83和537.43 t C(图5).

2.2 水-气界面气体扩散碳通量

CO₂扩散通量碳“源”峰值出现在2012年1月,为145.41 t C,而在2012年3月出现了碳“汇”的峰值,为-62.72 t C,从2012年5月之后均表现为碳“汇”,可能的原因是随着温度逐渐升高,浮游植物生长旺盛,光合作用吸收水体中的CO₂,使之表现为碳“汇”,这与蒋滔等^[18]发现的高阳平湖在低水位期水-气界面CO₂的特征相似.从2011年9月至2012年4月,CH₄虽表现为碳“源”,但基本保持较低值,而在2012年5、6月,CH₄扩散通量迅速上升并达到峰值(207.27 t C),随后又重新回到较低值.这可能是由于5、6月气温回升导致水温上升,使得产甲烷菌进入其适宜温度,促进淹没有机碳被分解从而产生大量CH₄扩散通量进入大气中,随后由于大量有机碳的分解使得水体重新回到平衡(图6a).

2.3 土-气界面气体扩散碳通量

土-气界面CO₂气体扩散通量在4、5月表现为碳“汇”,在5月达到峰值,为-45.34 t C.其余月份CO₂气体扩散通量均表现为碳“源”,在6月达到峰值,为93.01 t C.土-气界面CH₄气体扩散通量在研究期间均处于较低水平,大部分时间表现为碳“汇”,8月CH₄气体通量达到碳“汇”峰值,为-0.30 t C(图6b).

2.4 气泡释放碳通量

CO₂和CH₄的气泡释放通量均在2012年6月迅速上升达到峰值,此时CH₄气泡释放通量为0.27 t C,CO₂为0.01 t C,随后的7、8月气泡释放量又减小.CH₄气泡释放通量显著高于CO₂,且两者释放过程具有同步性(图7).

2.5 降水输送碳通量

从2011年12月至2012年2月大气降水输送碳量都比较低,且最低值在2012年2月,仅为0.02 t C;在2012年7月突然上升达到峰值,为31.04 t C.逐月降水输送碳通量变幅较大(图8).

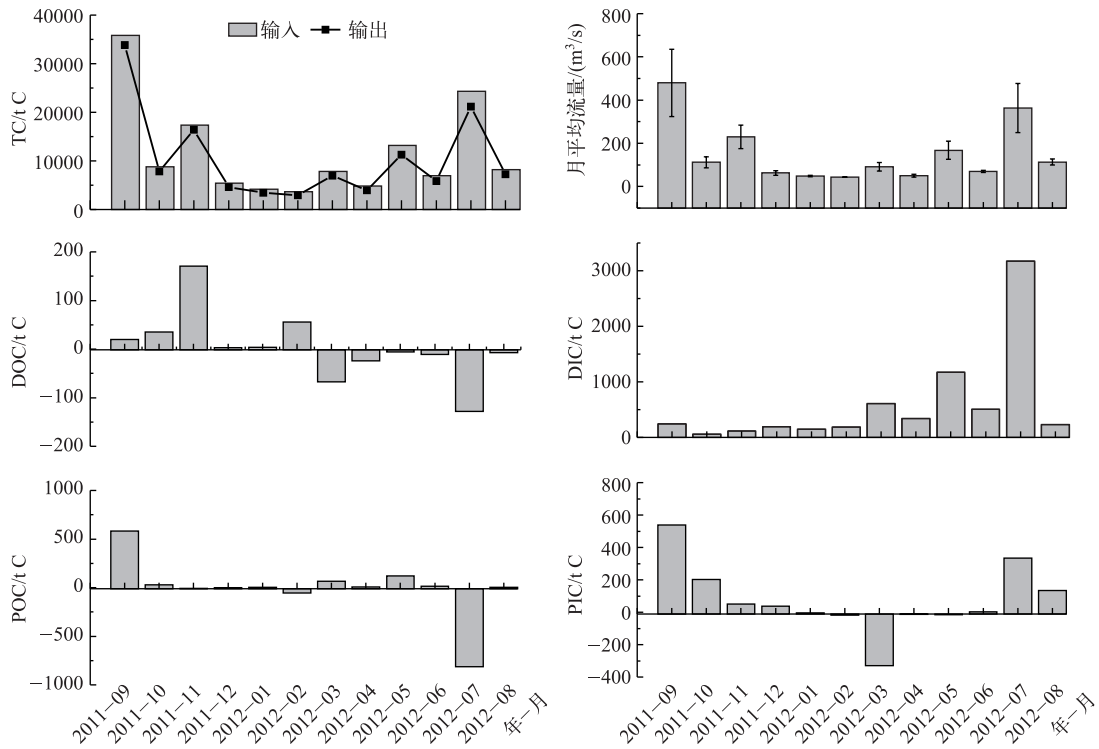


图5 高阳平湖河流输送总碳、各形态碳通量及河流流量

Fig.5 Carbon budget of river transport, different forms of carbon flux and flow of Lake Gaoyang

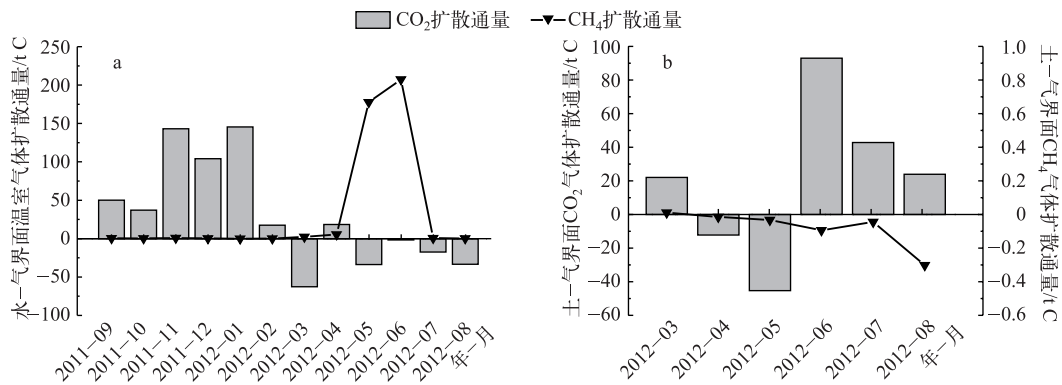


图6 高阳平湖水-气界面(a)和土-气界面(b)气体扩散碳通量

Fig.6 Diffusive fluxes of water to air interface (a) and water-level-fluctuating zone (b) of Lake Gaoyang

2.6 高阳平湖碳积累结果

对高阳平湖水域5个主要路径的碳收支进行逐月估算,得到一周年高阳平湖水域逐月碳收支情况。

水域整体上呈现出碳积累的特征,从2011年10月至2012年4月逐月碳积累都较低,在1月出现最低值,仅为6.83 t,峰值出现在2012年7月,为2572.10 t。逐月碳积累结果变幅比较明显(图9)。

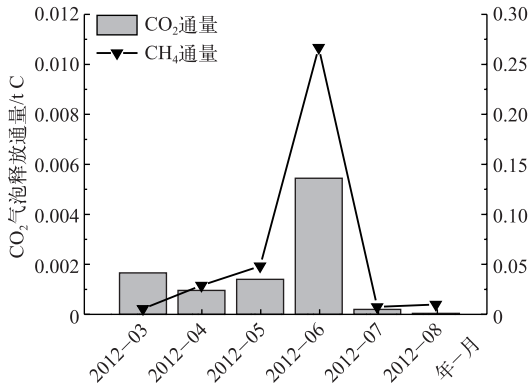


图7 高阳平湖温室气体气泡释放碳通量

Fig.7 Ebullition fluxes of Lake Gaoyang

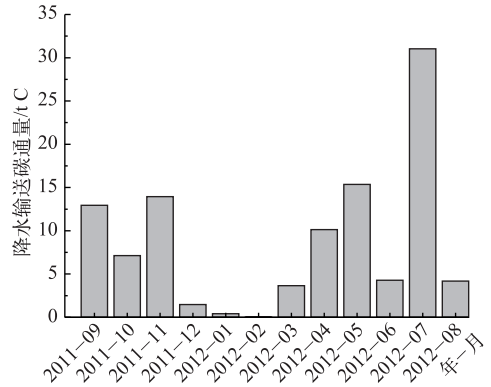


图8 高阳平湖大气降水输送碳通量

Fig.8 Carbon budget of precipitation of Lake Gaoyang

3 讨论

3.1 高阳平湖水域全年碳通量分析

对高阳平湖各个路径碳收支情况逐一进行全年核算(图10)。河流输入碳通量为133548.55 t C,输出碳通量为125651.82 t C,全年共有7896.73 t C在河流输送过程中滞留在该水域,其中DIC是主要部分,为6979.13 t C。水-气界面温室气体扩散碳通量整体表现为碳“源”,全年共有762.56 t C通过水-气界面从该水域进入大气中,其中CO₂气体扩散通量为366.69 t C,CH₄气体扩散通量为395.88 t C。近岸消落带土-气界面温室气体扩散碳通量整体也表现为碳“源”,全年共有123.74 t C通过土-气界面从土壤进入大气中,其中CO₂气体排放通量表现为碳“源”,为124.22 t C,而CH₄气体排放通量尽管表现为碳“汇”,但仅为-0.48 t C。温室气体气泡释放碳通量整体亦表现为碳“源”,但全年也仅有0.38 t C通过气泡释放的方式从该水域进入大气中,其中CH₄气体气泡释放通量为0.37 t C,而CO₂气体气泡释放通量仅为0.01 t C。全年还有104.58 t C通过大气降水的方式输入该水域中。

高阳平湖全年碳输入为133653.13 t C,碳支出为126538.50 t C,全年碳净积累量为7114.63 t C,总体呈现出碳积累的特征。碳积累现象主要同河流纵向输移过程中上下游碳的输入输出相关,这同高阳平湖为过水型湖泊的生态特征基本吻合。

在高阳平湖水域存在温室气体释放现象,其中通过水-气界面释放的比重最大,其次是通过土-气界面,而气泡释放对碳收支的贡献非常小。上游大量碳的输入和滞留可能是温室气体释放的来源。滞留在水域的碳在合适的情况下促使了CO₂和CH₄气体释放,使得该水域成为温室气体释放的碳“源”。高阳平湖水域源源不断的碳源输入可能导致温室气体释放现象的持久性存在。

3.2 不同碳路径的讨论

三峡水库生态系统碳循环过程在不同的时空区段内呈现明显差别^[19],高阳平湖水域的碳收支也存在着时间区段内的差别。

3.2.1 河流输送碳通量 在冬季高水位运行期和泄水期,河流输入和输出碳通量整体处于较低水平,且输入和输出通量基本保持一致;而在夏季低水位运行期有较高水平的碳通量输送,且输入碳通量明显大于输出

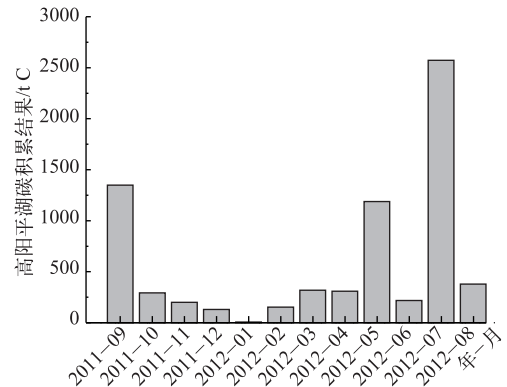


图9 高阳平湖碳积累结果

Fig.9 Carbon budget of Lake Gaoyang

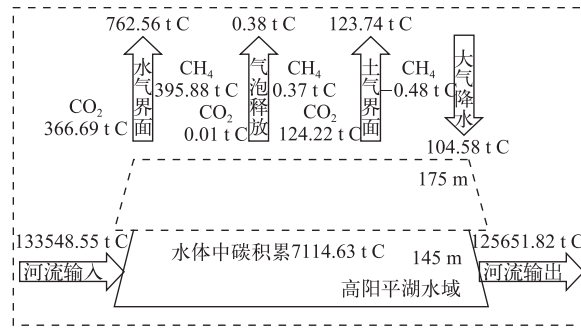


图 10 高阳平湖水域主要路径碳通量收支

Fig.10 The main path of water carbon budget of Lake Gaoyang

碳通量,这部分差值滞留在该水域中. 该水域的上游和下游均为河道型水域,河流在输送过程中由较窄的河道进入开阔的平湖水域时,流速的减缓可能会使水体携带的碳素在此区域滞留. 夏季低水位运行期,汛期河流流量较大且使得流速差异较大. 河流流量较大带来了较高的碳通量输送,流速的差异又使得碳素滞留效应增大. 而冬季高水位运行期时,流量大大减小,流速差异也随之变小,河流输送碳通量减小,水域内基本无碳素滞留现象. 在2012年7月,河流输送过程中就有2567.08 t C滞留在该水域.

3.2.2 水-气界面气体扩散碳通量 研究期间 CO_2 和 CH_4 扩散通量变幅均较大,冬季高水位运行期 CO_2 气体扩散通量表现为碳“源”且保持在较高水平,而 CH_4 气体扩散通量虽表现为碳“源”但水平较低,几乎无变幅;夏季低水位运行期 CO_2 气体扩散通量在大部分时间中为碳“汇”,而 CH_4 气体扩散通量表现更为活跃. 不同水位运行期水-气界面气体扩散通量的这种差异性与环境因素(pH、DO浓度、水温、叶绿素浓度等)有关,具体参照文献[19].

3.2.3 土-气界面气体扩散碳通量 在泄水期,土-气界面 CO_2 气体扩散通量整体表现为碳“汇”, CH_4 气体扩散通量也表现为碳“汇”;在低水位运行期土-气界面 CO_2 气体扩散通量整体表现为碳“源”, CH_4 气体扩散通量依旧表现为碳“汇”,且在6月达到碳“源”的峰值. 从全年来看,6月的水位最低,仅为146.94 m,此时消落带土壤面积为全年最大值,且有一部分长时间淹没区在此时露出水面,沉积的有机碳释放进入大气中,导致较高的 CO_2 气体扩散通量. 土-气界面总体对高阳平湖的水域碳收支的贡献较小.

3.2.4 气泡释放气体扩散碳通量 在泄水期, CO_2 和 CH_4 气泡释放通量均表现为碳“源”,且变幅不大;在低水位运行期, CO_2 和 CH_4 气泡释放通量的变幅大,在6月达到峰值,之后迅速下降为较低水平. 水温升高是导致气泡形成并释放的根本原因^[20],气温的上升很可能是6月气泡释放通量出现峰值的主要原因,但7月为主汛期,水体流动剧烈,库湾水位陡涨陡落,故尽管7月水温进一步升高,但水文水动力特征可能不利于气泡形成并释放,而进入8月伏旱期后,径流量下降,为气泡释放创造了稳定的缓流环境^[21-22].

3.2.5 降水输送碳通量 降水输送碳通量取决于降水量大小,在冬季高水位运行期降水量很小,大气降水输送碳通量也很小. 随着时间的推移,降水量的增加也使得大气降水输送相应增加. 7月为汛期,降雨量大,故大气降水输送碳通量也比较大.

高阳平湖水域逐月碳积累结果受季节和水库运行状态变化影响明显,在冬季高水位运行期碳积累处于低水平且变幅小;泄水期碳积累与高水位运行期相似(除5月变幅较大);而在夏季低水位运行期,各月碳积累变幅较大,整体碳通量远高于高水位运行期和泄水期. 5个不同路径下的碳通量受季节和水库运行状态变化影响明显导致整个水域碳通量变化明显.

3.3 高阳平湖碳收支的局限性和不确定性分析

本研究以宏观介质界面(水-气界面、土-气界面)和空间界面(控制断面)获得了一个完整周年内高阳平湖的碳通量收支情况. 尽管总体上高阳平湖全年呈现出碳积累的特点,但一些方法依然存在局限性或不确定性:

1) 对高阳平湖出入口的大断面测量依赖于每月1次的监测采样,监测结果的瞬变性及其代表性对研究

结果将可能产生显著的影响。

2) 水-气界面 CO_2 和 CH_4 扩散通量, 易受到现场风速、气压、温度改变等气象条件的干扰, 具有时空异质性特点。静态箱法通过测量箱体内容气体浓度变化的方法获得水-气界面 CO_2 和 CH_4 气体扩散通量, 虽然该方法被广为采用, 但它将在一定程度上改变现场的实际环境条件, 将可能使得水-气界面 CO_2 和 CH_4 扩散通量的测试值同实际情况之间存在偏差, 从而使得测试结果具有不确定性。

3) 同水-气界面扩散碳通量相似, 气泡释放碳通量亦具有极强的时空异质性。通常认为气泡产生同水温、水深、流速、湖底有机质含量等密切相关, 但在监测中并无法准确判定气泡释放空间和时间特点。故监测结果本身亦具有一定不确定性。

4) 高阳平湖的分层及季节变化会对 CO_2 和 CH_4 水平迁移产生影响, 深水水库温跃层以下的 CO_2 和 CH_4 可能在扩散到表层之前, 就通过河流输送到下游释放出来, 这个量可能很多, 但在水-气界面通量上反映不出来。

除上述方法可能存在的不确定性外, 在进行碳通量的计量中, 不同方法之间的监测误差和不确定性传递问题在本研究中并未予以考虑。上述方法的局限性或不确定性, 使得本研究结论依然需要更系统、更长期工作予以验证或改进。

4 参考文献

- [1] Meybeck M. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers. *American Journal of Science*, 1982, **282**(4): 401-405.
- [2] Ittekkot V. Global trends in the nature of organic matter in river suspensions. *Nature*, 1988, **332**(6163): 436-438.
- [3] Schlesinger WH, Melack JM. Transport of organic carbon in the world's rivers. *Tellus*, 1981, **33**(2): 172-187.
- [4] Yu Guirui, Fang Huajun, Fu Yuling *et al.* Research on carbon budget and carbon cycle of terrestrial ecosystems in regional scale: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(19): 5449-5459. [于贵瑞, 方华军, 伏玉玲等. 区域尺度陆地生态系统碳收支及其循环过程研究进展. 生态学报, 2011, **31**(19): 5449-5459.]
- [5] Sun Wei, Wu Rihan. The carbon balance and its spatial differentiation of the Yangtze River delta. *Geographical Research*, 2012, **31**(12): 2220-2228. [孙伟, 乌日汗. 长三角核心区碳收支平衡及其空间分异. 地理研究, 2012, **31**(12): 2220-2228.]
- [6] Ran Jingjiang, Lin Chuxue, Guo Jinsong *et al.* Reservoir greenhouse effect research progress and main influence factors analysis. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **20**(2): 197-202. [冉景江, 林初学, 郭劲松等. 水库温室效应研究进展与主要影响因素分析. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(2): 197-202.]
- [7] Chen Jin, Huang Wei. Greenhouse gas emission of reservoir. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2009, **25**(6): 1-5. [陈进, 黄薇. 水库温室气体排放问题初探. 长江科学院院报, 2009, **25**(6): 1-5.]
- [8] Hope D, Kratz TK, Riera JL. Relationship between pCO_2 and dissolved organic carbon in northern Wisconsin lakes. *Journal of Environmental Quality*, 1996, **25**(6): 1442-1445.
- [9] Richey JE, Wissmar RC, Devol AH *et al.* Carbon flow in four lake ecosystems: A structural approach. *Science*, 1978, **202**(4373): 1183-1186.
- [10] Richey JE, Hedges JI, Devol AH *et al.* Biogeochemistry of carbon in the Amazon River. *Limnology and Oceanography*, 1990, **35**(2): 352-371.
- [11] Keller M, Stallard RF. Methane emission by bubbling from Gatun Lake, Panama. *Journal of Geophysical Research*, 1994, **99**(D4): 8307-8319.
- [12] Duchemin E, Lucotte M, Canuel R *et al.* Production of the greenhouse gases CH_4 and CO_2 by hydroelectric reservoirs of the boreal region. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9**(4): 529-540.
- [13] Ji Xiaoyan, Cui Guangbo, Yang Longyuan *et al.* Measurement of the CO_2 flux on the water-air interface of Taihu Lake. *Environmental Science*, 2006, **27**(8): 1479-1486. [嵇晓燕, 崔广柏, 杨龙元等. 太湖水-气界面 CO_2 交换通量观测研究. 环境科学, 2006, **27**(8): 1479-1486.]
- [14] Li Z, Zhang Z, Xiao Y *et al.* Spatio-temporal variations of carbon dioxide and its gross emission regulated by artificial operation in a typical hydropower reservoir in China. *Environ Monit Assess*, 2014, **186**(5): 3023-3039.

- [15] López-Tarazón JA, López P, Lobera G *et al.* Suspended sediment, carbon and nitrogen transport in a regulated Pyrenean river. *Science of the Total Environment*, 2015, **540**: 133-143.
- [16] Li Zhe. The research of habitat transition and phytoplankton succession in the Xiaojiang river backwater area during the preliminary operation of the Three Gorges Reservoir [Dissertation]. Chongqing: Chongqing University, 2009. [李哲. 三峡水库运行初期小江回水区藻类生境变化与群落演替特征研究[学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2009.]
- [17] Lambert M, Fréchette JL. Analytical techniques for measuring fluxes of CO₂ and CH₄ from hydroelectric reservoirs and natural water bodies. In: Therrien AJ ed. GHG emissions from boreal reservoirs and natural aquatic ecosystems, in greenhouse gas emissions-fluxes and processes. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 37-60.
- [18] Jiang Tao, Guo Jinsong, Li Zhe *et al.* Air-water surface greenhouse gas flux in Pengxi river at different operational stages of the Three Gorges Reservoir. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1463-1470. [蒋滔, 郭劲松, 李哲等. 三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探. 环境科学, 2012, **33**(5): 1463-1470.]
- [19] Lu F, Yang L, Wang XK *et al.* Preliminary report on methane emissions from the three gorges reservoir in the summer drainage period. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(12): 2029-2033.
- [20] Duchemin E, Lucotte M, Canuel R *et al.* Comparison of greenhouse gas emissions from an old tropical reservoir with those from other reservoirs worldwide. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 2000, **27**: 1391-1395.
- [21] Li Zhe, Zhang Cheng, Liu Liang *et al.* Ebullition fluxes of CO₂ and CH₄ in Pengxi river, Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2014, **26**(5): 789-798. DOI:10.18307/2014.0518. [李哲, 张呈, 刘靛等. 三峡水库澎溪河 CO₂、CH₄ 气泡释放通量初探. 湖泊科学, 2014, **26**(5): 789-798.]
- [22] Li Zhe, Guo Jinsong, Fang Fang *et al.* 1D hydrodynamic model on Pengxi (Xiaojiang) river backwater area in the Three Gorges Reservoir. *Journal of Chongqing University*, 2012, **35**(5): 143-150. [李哲, 郭劲松, 方芳等. 三峡澎溪河(小江)回水区一维水动力特征研究. 重庆大学学报: 自然科学版, 2012, **35**(5): 143-150.]