

三峡澎溪河水域 CO₂ 与 CH₄ 年总通量估算

李 哲¹, 白 镭², 蒋 滔³, 郭劲松¹, 刘 静¹

(1. 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400044; 2. 四川省建筑设计院, 四川 成都 610017;

3. 重庆市农业科学院农业工程研究所, 重庆 401329)

摘要: 以2010年6月~2011年5月三峡澎溪河回水区 CO₂ 与 CH₄ 通量监测数据为基础, 参考澎溪河高阳平湖水域全年4次的24 h昼夜连续跟踪观测结果, 对每月各采样点的日通量值进行估算。提出了水下地形划分法和环境因素控制法, 将各采样点日通量数据外延至整个回水区水域, 并估算了澎溪河回水区水域 CO₂ 与 CH₄ 年总通量值。研究期间, 澎溪河回水区全年各采样点 CO₂ 通量均值为 $(3.05 \pm 0.46) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; CH₄ 为 $(0.0501 \pm 0.0096) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。以水下地形法为基础, 该水域全年 CO₂ 和 CH₄ 总通量分别为 40 060.5 t 和 540.9 t; 以环境因素控制法为基础, 全年 CO₂ 与 CH₄ 总通量分别为 39 073.0 t 和 467.2 t。以环境要素控制法为参考, 该水域 CO₂ 全年平均释放强度为 $43.26 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 在全球水库数据序列中处于中等略偏高水平, CH₄ 全年平均释放强度为 $1.42 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 在全球水库序列中处于中等水平。

关键词: 三峡水库; 澎溪河; CO₂; CH₄; 年总通量

中图分类号: TV 121.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-6791(2013)04-0551-09

筑坝蓄水导致 CO₂、CH₄ 等温室气体释放问题近年来备受关[1]。水库的温室气体效应问题不仅关系到对水电能源清洁、绿色属性的科学判断, 也对全球陆地生态系统碳循环产生一定影响[1]。自20世纪90年代开始, 对不同类型、气候条件、库龄的水库进行了跟踪观测[2-3], 并开展了对全球水库温室气体通量特征进行横向上的比较与分析评估[4]。但由于横向上的简单比较缺乏系统考虑水库不同时空条件下通量差别, 加之水库自身在库型、坝型、淹没区域面积、淹没区有机质含量、气候气象条件、水库调度运行特征、流域背景与人类活动强度等各个方面均存在显著差异[5], 还难以对上述各方面的影响进行定量解析, 故近年来的观点着重强调了对单一水库进行系统深入研究以客观评价其温室气体效应。

水库温室气体总通量估算是明确水库温室气体实际释放量的重要基础, 是评价水库温室气体效应的关键[6]。在现有以定位跟踪观测为基础的水库温室气体效应监测体系下, 实现对水库温室气体通量的估算需在时间上和空间上对现有点状瞬时观测数据进行科学外推。联合国教科文组织(UNESCO)和国际水电协会(IHA)2011年颁布的《淡水水库温室气体监测导则》中提供了通量估算的总体思路[6], 但其操作性不强, 如何在时间上对日通量数据进行外推, 如何确定一个采样点所能够代表的水域面积并未有明确、可行的方法, 不同水库所适用的通量估算方法仍有待实践与验证。

作为中国目前库容最大的水库, 三峡水库温室气体效应近年来亦颇受关注。尽管峡谷河道型的三峡水库具有相对较小的淹没面积[7], 建库前通过有效的清库工作极大减少了所淹没的有机质总量, 建库后保持了相对较优的水动力条件有利于促进 CH₄ 氧化[8]; 这些特征有利于减少整个水库温室气体释放, 但对水域面积超过 1 000 km² 的三峡水库, 如何实现其总通量水平的估算仍有待研究。本研究尝试以三峡水库典型支流澎溪河为研究对象, 以2010年6月至2011年5月定位观测数据为基础, 使用两种估算方法对澎溪河回水区水域 CO₂ 与 CH₄ 通量进行估算, 以期探索三峡水库温室气体总通量估算提供前期探索与技术支持。

收稿日期: 2012-10-15; **网络出版时间:** 2013-04-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/KCMS/detail/32.1309.P.20130410.1725.012.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51009155; 51179215)

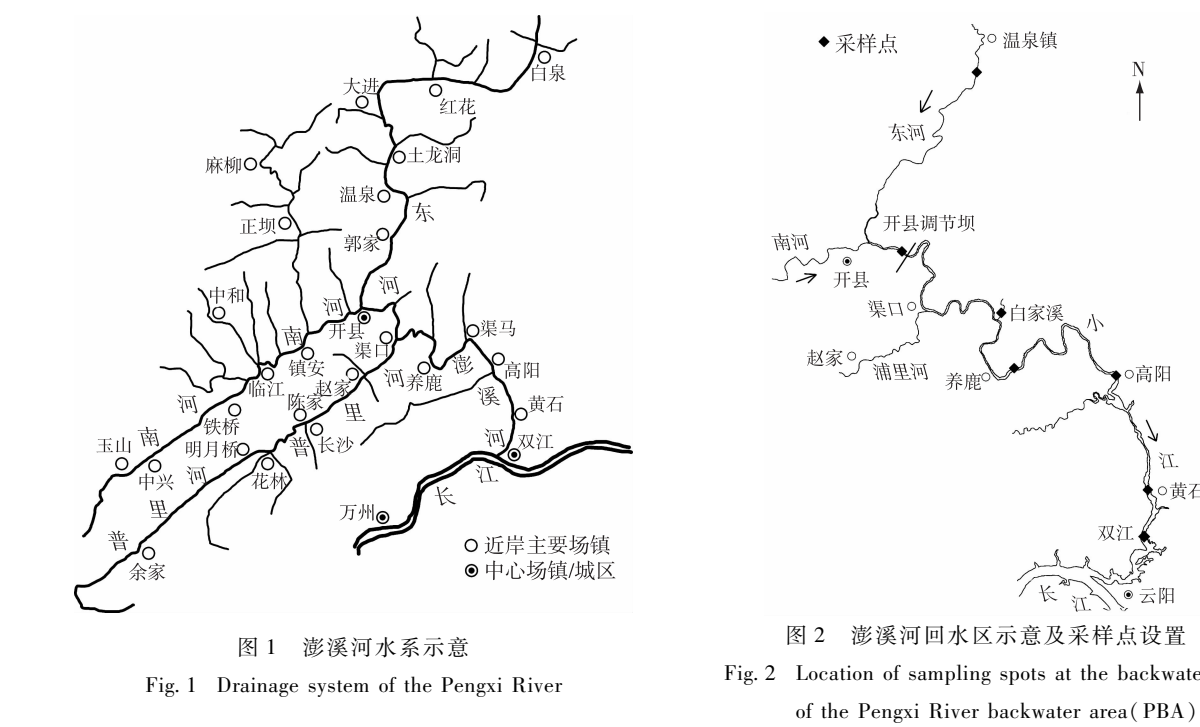
作者简介: 李哲(1981-), 男, 福建漳州人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水库生态学研究。E-mail: ZheLi81@sina.com

1 材料与方法

1.1 研究区域与监测方案

澎溪河(又称“小江”)是三峡库区中段长江北岸一级支流(图 1),河口距三峡大坝坝址约 247 km,流域面积 5 172.5 km²,干流全长 182.4 km,坝前 145 m 下回水区全长约 60 km。三峡水库坝前 175 m 下澎溪河形成回水区总长度超过 90 km,回水区末端在南河回溯至开县临江镇,在东河至开县郭家镇。

根据上、中、下游的河道特征、水文水动力条件、岸栖植被等特点,充分考虑对澎溪河回水区水域生态系统的代表性,研究共布置 7 个采样点见图 2。各采样点特征见表 1。逐月采样每月 1 次,定时于 6 日(上游)、8 日(中游)、10~11 日(下游)完成上、中、下游的采样工作,每个采样点具体采样时间见表 1。本研究以 2010 年 6 月至 2011 年 5 月一个完整周年期间的监测数据为基础,对澎溪河回水区温室气体通量开展估算。



现场测试分析指标包括:pH 值、溶解氧(DO)、水温、气温等。其中,采用 YSI[®]pH100 现场测定 pH 值(精度分别为 0.01 个单位);采用 YSI[®] ProODO 测定水温、DO(测试精度分别为 0.1℃, 0.01 mg/L);现场

气温、大气压采用手持式数字大气压计测得。水-气界面 CO₂、CH₄扩散通量采用静态箱法测量^[19]。气样分析采用安捷伦 7820 型气相色谱仪。气体采用十通阀进样,CH₄经 TDX-01 色谱柱分离后直接用 FID 检测器检测,而 CO₂先经 TDX-01 柱分离后再通过甲烷转化炉转化,最后用 FID 检测器检验。气体浓度变化的线性相关性系数 R²均大于 0.95,满足采样实验要求。气体交换通量计算方法见文献[9]。氮、磷等营养盐以及叶绿素 a(Chla)等生境关键指标测定方法参照文献[10]进行。

表 1 澎溪河各采样点情况 ^[9]			
Table 1 Characteristics of sampling spots in the Pengxi River ^[9]			
采样点	坐标		采样时间
上游	温泉	31°20'01.3"N 108°30'48.8"E	10:00
	开县	31°11'12.9"N 108°26'34.2"E	16:00
中游	白家溪	31°06'48.5"N 108°32'56.5"E	13:00
	养鹿	31°05'07.7"N 108°33'47.6"E	11:00
下游	高阳	31°05'48.2"N 108°40'20.1"E	10:00
	黄石	31°00'29.4"N 108°42'39.5"E	14:00
	双江	30°56'51.1"N 108°41'37.5"E	16:00

1.2 澎溪河回水区水域温室气体通量估算方案

1.2.1 回水区空间范围确定

在三峡水库“蓄清排浑”的调度方案下, 水库 145 ~ 175 m 的动态调蓄和天然径流过程将迫使水库末端区域呈现天然河道和水库交替变动的状态, 水库边界将随着回水区空间范围变化而改变。在此影响下, 澎溪河回水区末段(开县汉丰湖至云阳养鹿段)在三峡水库夏季低水位运行期间呈现天然河道特征, 而在冬季高水位运行期间近岸消落区被淹而成为水库一部分。因此, 为定量估算澎溪河回水区温室气体通量, 需确定三峡水库调度运行下澎溪河回水区(水库水域)的空间边界范围及其水域面积; 确定水库空间范围内所涵盖的采样点, 以实现对外延估算。

本研究采用澎溪河 30 m 数字高程提取(数据源 ASTER-GDEM V2)并结合遥感影像数据(数据源 Landsat TM/ETM)修正, 确定坝前 175 m 澎溪河回水区水域面积约为 92 km², 坝前 145 m 时约为 22.5 km²; 以 5 m 水位等间隔提取 145 ~ 175 m 间共 7 个点的实际水域面积, 以指数模型拟合坝前水位 145 ~ 175 m 澎溪河水域面积同水位的统计关系, 拟合结果见图 3。结合研究期间(2010 年 6 月至 2011 年 5 月)坝前水位日变化过程(图 4)和澎溪河回水区一维水动力模型^[11], 推算并获取研究期间澎溪河水域面积的变化。根据上述空间分析结果, 确定了典型时段澎溪河回水区(水库边界内)所包含的采样点, 见表 2。

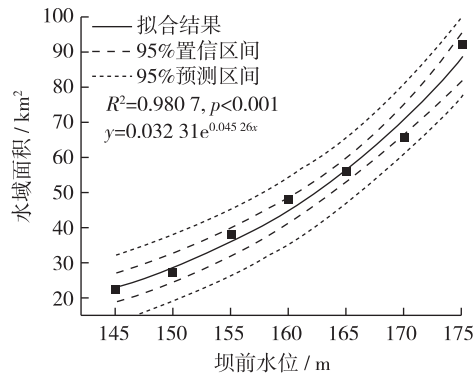


图 3 澎溪河回水区水域面积同坝前水位关系
Fig. 3 Relationship between water surface area and water level at dam site

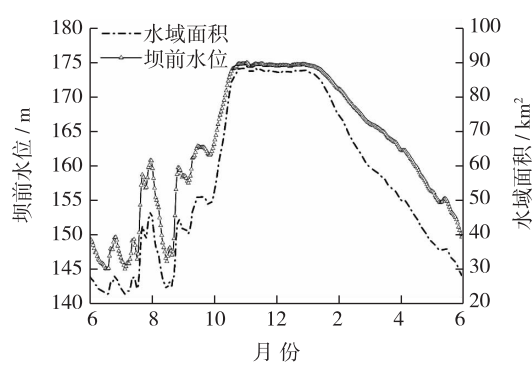


图 4 2010 年 6 月 ~ 2011 年 5 月水位变化情况与澎溪河回水区水域面积变化过程
Fig. 4 Daily variations of water level at dam site and water surface area in the PBA

表 2 典型时段澎溪河回水区(水库边界)所涵盖采样点情况

Table 2 Sampling site in the PBA in specific typical period

年份	典型时段/d	平均水位/m(变化范围)	平均水域面积/km ² (变化范围)	所涵盖的采样点名称(自上游起)
2010	93(6月下旬至9月中旬)	153.46 ± 0.62(145.13 ~ 162.93)	34.79 ± 0.98(23.02 ~ 51.50)	养鹿、高阳、黄石、双江
	112(9月下旬至1月上旬)	172.59 ± 0.39(161.64 ~ 175.00)	81.00 ± 1.21(48.59 ~ 88.97)	开县、白家溪、养鹿、高阳、黄石、双江
2011	80(1月中旬至3月下旬)	168.28 ± 0.38(162.72 ~ 174.21)	66.40 ± 1.16(51.02 ~ 85.82)	开县、白家溪、养鹿、高阳、黄石、双江
	80(4月上旬至6月中旬)	154.63 ± 0.59(145.14 ~ 162.46)	36.37 ± 0.94(23.02 ~ 50.43)	白家溪、养鹿、高阳、黄石、双江

1.2.2 瞬时监测结果在时间上的外延

对点状瞬时监测数据在时间上外延是将每月的瞬时监测值外延至全天日通量, 并以全天日通量为代表反映采样当月通量水平进而求出全年总通量值。假设采样频次为每月 1 次, 采样时间为采样日 t 当日 h 时($h = 1 \sim 24$), 在 h 时采集的水库温室气体时通量强度为 F_{th} , 且 F_{th} 在全天日总通量 F_t 中所占比重为 α , 故以 F_{th} 外推 F_t 的计算方法为

$$F_t = \frac{F_{th}}{\alpha} \quad (1)$$

理论上, α 是 h 的函数($\alpha = \alpha(h)$), 即为时通量对日总通量的贡献率, 需根据采样当日温室气体通量昼夜

变化特征获取。但限于人力物力条件，对每个采样点逐月开展昼夜观测并不现实。故本研究考虑进行以下概化：假定全年逐月观测中存在特定典型时期，该时期内澎溪河水生生态系统具有一定的相似性，使得该时期内各采样点温室气体昼夜变化过程相近；因此，可在该时期内选择某一典型日对代表性采样点温室气体昼夜通量过程进行观测，获取当天不同时段 α 值，并借以对典型时期内其他月份、其他采样点的日通量进行估算。

为此，本研究在前期大量研究积累基础上，综合水库调度运行特征、气候气象特征、浮游植物演替等水生生态过程，对澎溪河回水区水生生态特征定性划分为4个时段，即A时段：6月下旬至9月中旬；B时段：9月下旬至1月上旬；C时段：1月中旬至3月下旬；D时段：4月上旬至6月中旬。

通过在上述典型时段中的2010年8月、11月、2011年2月、5月分别在澎溪河高阳平湖采样点开展4次昼夜连续跟踪观测，获取了 α 的昼夜动态信息，据此对逐月监测中的日通量值进行外延。各采样点在不同时段内时通量对日通量的贡献率 α 见表3。

表 3 各采样点时通量对日总通量的贡献率 α %

Table 3 Contribution of hourly fluxes to daily fluxes among sampling spots

典型 时段	温泉		开县		白家溪		养鹿		高阳		黄石		双江	
	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄
A	—	—	—	—	—	—	-27.38	15.47	-18.32	9.51	-31.63	18.57	-38.78	11.32
B	—	—	6.74	4.86	4.57	11.41	4.49	9.91	4.41	8.42	4.57	11.41	6.74	4.86
C	—	—	11.76	17.14	8.90	11.17	13.11	6.02	17.07	10.62	8.90	11.17	11.76	17.14
D	—	—	—	—	-11.93	13.89	-5.45	0.67	-4.37	0.68	-11.93	13.89	-15.72	67.36

注：“—”表示不在水库水域范围内，不予考虑，下同。

1.2.3 定位监测结果在空间上的外延

空间上对点状数据进行外延的核心是确定采样点所能代表的回水区水域面积，并赋予其权重以加权计算整个回水区(水库边界范围内)的总通量值。本研究提出了两种方法对澎溪河各采样点所能代表的水域面积进行划分。

(1) 水下地形划分法 认为采样点所处河段因河道地形具有相似性，使其在水域形态、水文水动力条件、水生生态过程等方面均具有相近特征。故结合河道地形特征和野外考察经验，对所选择采样点上下游具有相似性的河段进行划分，确定该采样点所能代表的河段长度及其所对应的水域面积。

本研究以1:2 000 澎溪河水下地形为基础对各采样点所控制的区域进行划分，划分结果：① 双江控制区域：澎溪河河口至上游牛栏溪处(现沪蓉高速云阳澎溪河大桥处)河段，澎溪河回水区下游入江段，河道断面放宽，深泓处高程小于110 m，水流较缓且易受长江干流回灌顶托等影响，水力条件复杂；② 黄石控制区域：澎溪河下游牛栏溪至上游代李子高阳大桥处，为“V”型峡谷顺直河道，深泓处高程为110~120 m，水力条件单一；③ 高阳控制区域：代李子高阳大桥至上游小江电站大桥处受淹后形成的开阔平湖水域，过水型湖泊，水域面积为4~5 km²，深泓处高程为120~130 m；④ 养鹿控制区域：小江电站大桥经渠马镇至上游白家溪出口之间的“V”型峡谷河段，深泓处高程为130~140 m；⑤ 白家溪控制区域：澎溪河白家溪至上游渠口之间的河段，除渠口处小部分河段为“V”型峡谷河段外，其余均为大面积河谷平坝型消落区(白家溪、铺溪等)，高程为140~160 m，是澎溪河回水区消落区集中的区域之一；⑥ 开县控制区：代表了蓄水

表 4 基于水下地形划分法不同时段
各采样点所代表水域面积比例 %
Table 4 Water surface area ratio of sampling spots in
different periods based on underwater topological method

时段	开县	白家溪	养鹿	高阳	黄石	双江
A	—	—	34.36	23.22	23.63	18.79
B	15.9	20.23	21.37	16.59	14.44	11.47
C	8.6	14.55	22.38	18.63	18.61	17.23
D	—	19.39	28.48	17.31	21.18	13.64

后在开县县城附近至厚坝之间形成的一大片消落区，面积超过10 km²，高程为160~170 m。

在不同时段内上述采样点所代表的澎溪河回水区水域面积比例见表4。

(2) 环境因素控制法 认为水域生态系统中温室气体产汇过程受水质理化特征影响显著，不同采样点间水质理化特征的空间差异是导致采样点间温室气体通量存在差别的原因。故可采用超标倍数赋权的方法，将不同

采样点间环境因素权值归一化,确定不同采样点水域温室气体通量水平所占权重,进而计算每个采样点所代表的水域面积。计算公式如下:

$$\omega_i = \frac{\sum_{j=1}^m \frac{x_{ji}}{s_{ji}}}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{x_{ji}}{s_{ji}}} \quad (2)$$

式中 ω_i 为每月各采样点 ($i=1, \dots, n$) 水面面积控制权重值; s_{ji} 为每月所选择的水质理化指标 ($j=1, \dots, m$) 的标准值, 本研究中以算术平均值代替; x_{ji} 为每月各采样点各理化指标实际观测值。

由于不同温室气体汇产机制存在差异, 对其通量产生影响的环境因素各不相同, 故对于不同温室气体而言, 环境因素控制法所计算获得的水面面积控制权重值亦有差别。初步研究发现, 澎溪河回水区 CO₂ 通量的主要影响因素是 pH、Chla^[12-13]; 而水温可能是 CH₄ 通量的主要影响因素^[13]。故以各采样点 pH、Chla 均值为标准, 计算采样点 CO₂ 通量的水面面积控制权重; 以水温均值为标准, 计算采样点 CH₄ 通量的水面面积控制权重。计算结果见表 5。

表 5 基于环境因素控制法的各采样点 CO₂ 和 CH₄ 通量水面面积控制权重

%

Table 5 Water surface area ratio of sampling spots for CO₂ and CH₄ flux based on environmental controlling factors

月份	所属时段	CO ₂						CH ₄					
		开县	白家溪	养鹿	高阳	黄石	双江	开县	白家溪	养鹿	高阳	黄石	双江
2010 年 6 月	D	—	16.51	15.58	15.11	18.96	33.84	—	17.04	17.31	20.81	23.05	21.79
2010 年 7 月	A	—	—	12.98	24.92	37.53	24.57	—	—	23.87	25.69	25.87	24.57
2010 年 8 月	A	—	—	30.29	23.33	26.00	20.38	—	—	24.56	25.96	24.26	25.22
2010 年 9 月	A	—	—	22.40	20.41	30.30	26.90	—	—	25.44	24.66	24.95	24.95
2010 年 10 月	B	20.43	14.58	19.36	16.24	12.32	17.07	16.80	17.49	16.94	16.46	16.05	16.26
2010 年 11 月	B	22.85	13.84	13.15	13.80	17.01	19.35	16.43	16.90	16.98	16.43	16.67	16.59
2010 年 12 月	B	16.54	11.26	14.00	22.98	19.09	16.13	16.78	16.00	16.29	17.26	16.88	16.78
2011 年 1 月	C	38.21	12.27	12.39	13.37	12.14	11.61	15.02	17.00	16.75	16.50	17.36	17.36
2011 年 2 月	C	34.13	16.40	17.16	11.62	10.32	10.37	13.60	15.71	16.92	17.37	17.37	19.03
2011 年 3 月	C	9.00	11.09	9.96	11.70	14.10	44.14	14.82	16.31	16.56	15.94	17.93	18.43
2011 年 4 月	D	—	13.53	12.41	13.38	44.17	16.51	—	19.27	19.15	20.90	20.40	20.28
2011 年 5 月	D	—	12.22	12.60	35.35	14.14	25.69	—	20.42	20.72	20.72	19.29	18.84

2 结果与分析

2.1 各采样点 CO₂ 和 CH₄ 逐月变化过程

研究期间, 澎溪河各采样点 CO₂ 和 CH₄ 监测结果统计见表 6。全年各采样点 CO₂ 通量算术平均值为 (3.05 ± 0.46) mmol/(m²·h), 变化范围为 $-2.24 \sim 21.54$ mmol/(m²·h); CH₄ 通量均值为 (0.0501 ± 0.0096) mmol/(m²·h), 变化范围为 $0.0012 \sim 0.5251$ mmol/(m²·h)。各采样点逐月变化特征见图 5。

表 6 各采样点 CO₂ 和 CH₄ 时通量监测统计结果

Table 6 Results of hourly CO₂ and CH₄ fluxes among the sampling spots from field monitoring

采样点	CO ₂ 时通量/(mmol·m ⁻² ·h ⁻¹)		CH ₄ 时通量/(mmol·m ⁻² ·h ⁻¹)	
	均值	变化范围	均值	变化范围
温泉	6.23 ± 0.93	0.84 ~ 11.73	0.0245 ± 0.0058	0.0061 ~ 0.0705
开县	5.33 ± 1.75	-0.43 ~ 21.54	0.1184 ± 0.0476	0.0039 ~ 0.5251
白家溪	2.45 ± 1.25	-1.52 ~ 13.87	0.0521 ± 0.0245	0.0020 ~ 0.2996
养鹿	3.39 ± 1.49	-1.69 ~ 12.50	0.0665 ± 0.0297	0.0012 ~ 0.2628
高阳	1.20 ± 0.64	-1.53 ~ 5.36	0.0564 ± 0.0233	0.0053 ~ 0.2352
黄石	2.06 ± 0.92	-1.40 ~ 6.59	0.0299 ± 0.0071	0.0035 ~ 0.0707
双江	0.71 ± 0.44	-2.24 ~ 2.58	0.0074 ± 0.0016	0.0028 ~ 0.0203

2.2 各采样点日通量估算

根据 24 h 高阳平湖 CO₂、CH₄ 通量的观测结果, 根据日通量贡献率 α 和式 (1), 采用表 3 的时通量对不同典型时段水库范围内各采样点日通量进行估算, 各采样点的统计结果见表 7。

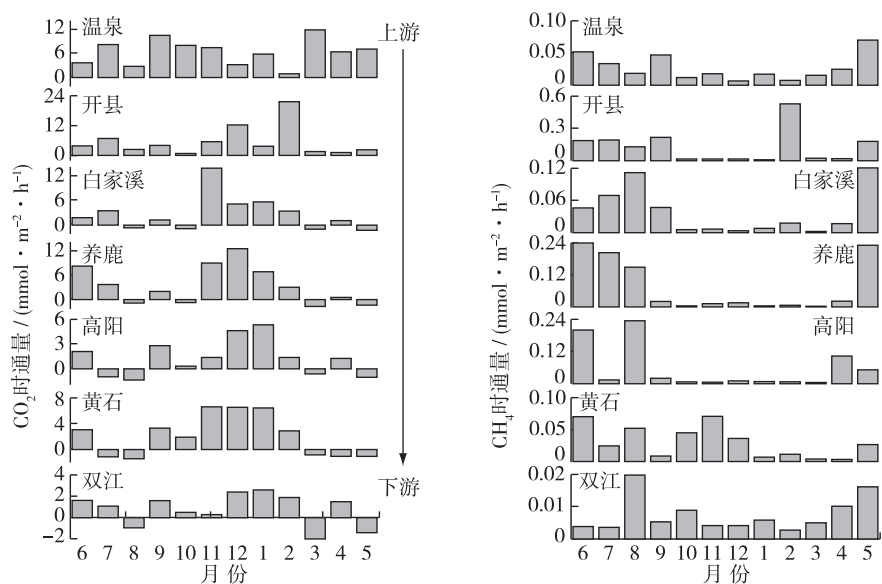


图 5 各采样点 CO₂ 和 CH₄ 时通量逐月变化过程

Fig. 5 Seasonal variations of hourly CO₂ and CH₄ fluxes among sampling spots

表 7 各采样点 CO₂ 和 CH₄ 日通量统计结果

Table 7 Daily fluxes of CO₂ and CH₄ among sampling spots

采样点	CO ₂ 日通量/(mmol · m ⁻² · d ⁻¹)		CH ₄ 日通量/(mmol · m ⁻² · d ⁻¹)	
	均值	变化范围	均值	变化范围
开县	81.13 ± 34.45	-6.38 ~ 183.64	0.637 0 ± 0.486 3	0.022 5 ~ 3.063 4
白家溪	52.18 ± 34.51	-23.03 ~ 303.55	0.327 0 ± 0.230 9	0.017 8 ~ 2.156 7
养鹿	31.81 ± 31.69	-148.54 ~ 278.30	6.660 6 ± 4.092 7	0.019 4 ~ 39.220 0
高阳	10.51 ± 10.77	-45.16 ~ 104.34	4.651 6 ± 2.632 2	0.049 8 ~ 29.700 0
黄石	33.80 ± 16.46	-26.32 ~ 144.19	0.225 5 ± 0.056 6	0.024 9 ~ 0.619 2
双江	4.11 ± 4.31	-19.01 ~ 34.99	0.060 1 ± 0.017 6	0.005 7 ~ 0.183 0

2.3 日通量估算在空间上的外延与全年总通量估算

根据前述 1.2.3 节的思路,以采样当月平均水域面积为基础,对澎溪河每月回水区水域内 CO₂、CH₄ 总通量进行估算,两种方法估算结果见表 8。根据逐月估算结果,以水下地形法为基础,澎溪河全年 CO₂、CH₄ 总通量分别为 40 060.5 t、540.9 t;以环境因素控制法为基础,澎溪河全年 CO₂、CH₄ 总通量分别为 39 073.0 t、467.2 t。

表 8 澎溪河回水区逐月 CO₂ 和 CH₄ 通量统计结果

Table 8 Monthly fluxes of CO₂ and CH₄ in the PBA

月份	当月水域面积均值/ km ²	水下地形划分法/t		环境要素控制法/t	
		CO ₂	CH ₄	CO ₂	CH ₄
2010 年 6 月	25.65	-2 008.8	203.0	-1 362.4	161.8
2010 年 7 月	31.06	-123.6	8.1	13.3	6.1
2010 年 8 月	33.93	211.4	16.9	212.1	16.6
2010 年 9 月	47.60	-575.1	3.1	-555.7	2.9
2010 年 10 月	76.00	-182.5	5.4	-93.5	5.9
2010 年 11 月	87.84	16 643.5	7.2	13 505.3	7.7
2010 年 12 月	87.57	18 220.6	6.5	16 520.0	6.8
2011 年 1 月	82.57	5 203.8	2.4	4 613.5	2.3
2011 年 2 月	67.23	2 995.6	10.5	6 471.4	14.9
2011 年 3 月	56.06	-713.6	1.1	-889.3	1.3
2011 年 4 月	45.33	-450.0	77.4	-192.6	82.6
2011 年 5 月	34.58	839.3	199.3	831.0	158.2
全年合计		40 060.5	540.9	39 073.0	467.2

3 讨 论

3.1 对数据外推方法局限性的讨论

在时通量到日通量的外推中,前述1.2.2节的假定,研究使用了高阳平湖采样点全年4次24 h昼夜连续观测结果作为依据将各采样点瞬时通量数据外推至全天通量值。该方案虽基于有限条件下的优化,但其局限性不可回避。一方面,以高阳平湖采样点的昼夜过程 α 估算其他采样点的日通量,使澎溪河各采样点的昼夜过程被“同质化”,并可能影响各采样点逐月监测序列的变化特征。为判别上述影响是否存在,研究通过相关性分析发现,各采样点的逐月日通量估算结果同它们瞬时通量的实际监测结果保持较优的统计相关性(Spearman 相关系数 $r \geq 0.7$, $p \leq 0.05$),说明本研究所采用的日通量估算方案在一定程度上保持了瞬时监测数据的逐月变化特征,即便是经过高阳平湖通量全年4次昼夜过程的“复制”,各采样点日通量的全年逐月变化过程未有统计意义上的显著改变,故在现有条件下上述方案可能是有效、可行的选择。尽管如此,上述影响仍难以消除,在有限采样点条件下如何实现优化将是后续研究工作的重点。另一方面,所划分的典型时段虽基于前期研究积累,但仍需进一步验证和修正。由于整个水库生态系统依然处于快速发育与演化阶段,典型时段划分是否具有普适性和可推广性依然值得进一步深入研究。

在采样点日通量监测数据的空间外延方面,尽管环境因素控制法计算所得 CO₂、CH₄ 全年总通量结果小于水下地形划分法,但两种方法估算结果无显著统计差异,年通量相对误差(以水下地形划分法为基础):CO₂ 仅相差 2.47%,CH₄ 相差 13.63%。两种方法估算的逐月通量数据序列之间具有较优的线性相关性,两种方法间 CO₂ 逐月通量序列的 Spearman 相关系数 $r = 0.993$ ($p \leq 0.01$); CH₄ 逐月通量序列的 Spearman 相关系数 $r = 0.979$ ($p \leq 0.01$),说明两种方法之间具有好的统一性和可比性,对澎溪河回水区水域 CO₂、CH₄ 空间外延基本可行。

从具体操作实践上,两种方法各有特点。水下地形划分法主要依靠河道地形特征和现场调查经验,其原理简单,计算方便,但在划分采样点所反映的不同水域时具有较大的主观性。而环境因素控制法主要依赖于同水库温室气体产汇最为相关的几个环境因子,通过归一化处理对不同采样点赋权。尽管该方法相对于水下地形划分法具有一定的数据基础,较为客观,且参数选择可根据实际研究情况调整和修正,相对较为灵活,但该方法需基于前期充分研究积累,筛选和比较密切相关的环境参量,计算相对复杂。此外,为实现温室气体通量归一化而选取的环境参量标准值仍需探讨。

3.2 澎溪河回水区 CO₂ 和 CH₄ 通量强度同全球水库的比较分析

在对澎溪河回水区水域全年 CO₂、CH₄ 通量进行估算的基础上,本研究计算了全年澎溪河回水区水域 CO₂、CH₄ 的平均通量强度(图6)。2010年6月~2011年5月,澎溪河回水区全年平均水域面积为 56.25 km²。以环境要素控制法为参考,CO₂ 全年平均释放强度为 43.26 mmol/(m²·d); CH₄ 全年平均释放强度为 1.42 mmol/(m²·d)。以 Barros 等^[4]对全球水库温室气体排放情况统计结果为参照(图6),澎溪河回水

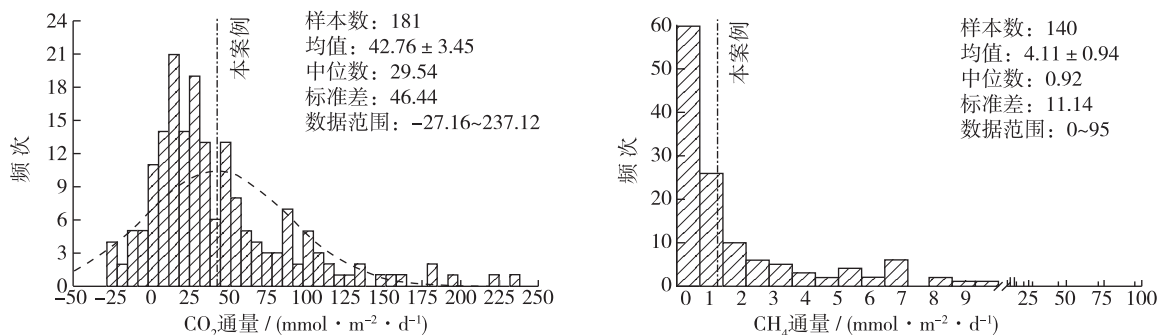


图6 澎溪河回水区水域 CO₂ 和 CH₄ 年平均释放强度同全球水库序列的比较

Fig. 6 Comparison of CO₂ and CH₄ fluxes in PBA to global data sets

区水域 CO_2 释放通量略高于 Barros 等^[4] 所收集 181 个数据样本的平均值, 在数据序列中处于中等偏高的水平; CH_4 释放通量则远远小于 Barros 等^[4] 140 个数据样本的平均值, 但在数据序列中总体处于中等水平。尽管如此, 由于澎溪河入库背景(温泉)具有较高的 CO_2 和 CH_4 通量特征, 下一步将着重围绕筑坝蓄水对澎溪河流域温室气体产汇的实际影响(净通量)开展研究。

4 结 论

(1) 2010 年 6 月至 2011 年 5 月的一个完整水文周期内, 澎溪河水域全年各采样点 CO_2 通量算术平均值为 $(3.05 \pm 0.46) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 变化范围为 $-2.24 \sim 21.54 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; CH_4 的算术平均值为 $(0.0501 \pm 0.0096) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 变化范围为 $0.0012 \sim 0.5251 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

(2) 采用不同方法对澎溪河回水区 CO_2 、 CH_4 监测数据进行了时空外延, 以水下地形法为基础, 澎溪河全年 CO_2 、 CH_4 总通量分别为 40 060.5 t、540.9 t; 以环境因素控制法为基础, 澎溪河全年 CO_2 、 CH_4 总通量分别为 39 073.0 t、467.2 t。

(3) 以环境要素控制法为参考, CO_2 全年平均释放强度为 $43.26 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 在全球水库数据序列中处于中等略偏高水平; CH_4 全年平均释放强度为 $1.42 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 在全球水库数据序列中呈中等水平。

参考文献:

- [1] St LOUIS V, KELLY C, DUCHEMIN É, et al. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate [J]. *BioScience*, 2000, 50: 766-775
- [2] DUCHEMIN É, LUCOTTE M, CAMUEL R. Production of the greenhouse gases CH_4 and CO_2 by hydroelectric reservoirs in the boreal region [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9: 529-540.
- [3] ÅBERG J, BERGSTRÖM A K, ALGESTEN G, et al. A comparison of the carbon balances of a natural lake (L rtr sket) and a hydroelectric reservoir (L Skinnmuddselet) in northern Sweden [J]. *Water Research*, 2004, 38: 531-538.
- [4] BARROS N, COLE J J, TRANVIK L J, et al. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4: 593-596.
- [5] ALLAN R, FORSTNER, SALOMONS W. Greenhouse gas emissions-fluxes and process: Hydroelectric reservoirs and natural environments [M]. New York: Springer, 2005.
- [6] GOLDENFUM J. GHG measurement guidelines for freshwater reservoirs [M]. London: The International Hydropower Association, 2010: 1-20.
- [7] 王从峰, 肖尚斌, 陈小燕. 三峡水库减排温室气体效应的初步分析 [J]. 人民长江, 2011, 42(1): 18-21. (WANG Congfeng, XIAO Shangbin, CHEN Xiaoyan. Preliminary analysis on reduction effect of greenhouse gas emission by TGP reservoir [J]. *Yangtze River*, 2011, 42(1): 18-21. (in Chinese))
- [8] 吴炳方, 陈永柏, 曾源, 等. 三峡水库发电和航运的碳减排效果评价 [J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(3): 257-261. (WU Bingfang, CHEN Yongbai, ZENG Yuan, et al. Evaluation on effectiveness of carbon emission reduction of the power generation and shipping functions of the Three Gorges Reservoir [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(3): 257-261. (in Chinese))
- [9] 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 [J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1463-1470. (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 [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(5): 1463-1470. (in Chinese))
- [10] 国家环境保护总局. 水与废水监测方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243-285. (National Environmental Protection Agency. *Monitoring methods for water & wastewater* [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 243-285. (in Chinese))
- [11] 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 [J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2012, 35(5): 143-150. (LI Zhe, GUO Jinsong, FANG Fang, et al. 1-D hydrodynamic model on Pengxi (Xiaojiang) River backwater area

- in the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2012, 35(5): 143-150. (in Chinese))
- [12] 郭劲松, 蒋滔, 李哲, 等. 三峡水库澎溪河春季水华期 $p(\text{CO}_2)$ 及影响因素分析[J]. 水科学进展, 2011, 22(6): 829-838. (GUO Jinsong, JIANG Tao, LI Zhe, et al. Analysis on partial pressure of CO_2 and influencing factors during spring phytoplankton bloom in the backwater area of Xiaojiang River in Three Gorges Reservoir[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 829-838. (in Chinese))
- [13] 李哲, 白镭, 郭劲松, 等. 三峡水库两条支流水-气界面 CO_2 、 CH_4 通量比较初探[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1008-1016. (LI Zhe, BAI Lei, GUO Jinsong, et al. Comparative study on water-air CO_2 、 CH_4 flux in two tributaries in the Three Gorges Reservoir, China [J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 1008-1016. (in Chinese))

Estimation on annual water-air CO₂ and CH₄ fluxes in Pengxi River, Three Gorges Reservoir*

LI Zhe¹, BAI Lei², JIANG Tao³, GUO Jingsong¹, LIU Jing¹

(1. College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Sichuan Provincial Architecture Design Institute, Chengdu 610017, China;

3. Agricultural Engineering Institute, Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China)

Abstract: Estimation on annual greenhouse gas fluxes in reservoirs is crucial for the assessment of reservoir greenhouse gas effects. A 1a research was conducted in Pengxi River backwater area, Three Gorges Reservoir to estimate annual water-air CO₂ and CH₄ fluxes. Taken the 24h continuous monitoring data in Gaoyang Lake as reference, 2 methods, i. e. underwater topographical method and environmental controlling factor method, were carried out to estimate the annual fluxes based on monthly field data. The field sampling results showed that mean value of the CO₂ fluxes among the sampling spot was $(3.05 \pm 0.46) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, while that of CH₄ was $(0.0501 \pm 0.0096) \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. The annual estimation of CO₂ and CH₄ fluxes in the Pengxi River backwater area based on underwater topographical method was 40 060.5 t and 540.9 t respectively. With the environmental controlling factor method, the annual estimation of CO₂ and CH₄ fluxes was 39 073.0 t and 467.2 t respectively. Taken the annual estimation result from environmental controlling factor method as reference, the weighted average CO₂ fluxes during the study was $43.26 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, while that of CH₄ was $1.42 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. Generally, both of the CO₂ and CH₄ weight average fluxes were shown to be in the mid-range in the global data sets, although that of CO₂ was showed in slightly higher bound.

Key words: Three Gorges Reservoir; Pengxi River; CO₂; CH₄; estimation of annual fluxes

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51009155; No. 51179215).