

三峡水库夏季干流、支流(草堂河)水体的二氧化碳分压及扩散通量

吴学谦¹, 操满¹, 傅家楠¹, 魏浩斌¹, 贾晓斌¹, 邓兵², 汪福顺¹

(1. 上海大学 环境与化学工程学院, 上海 200444;

2. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 2013年5—7月对三峡水库库区干流及支流草堂河水体CO₂分压(p_{CO_2})进行走航观测. 结果表明: 夏季草堂河表层 p_{CO_2} 为15.8~226.4 Pa, 三峡水库库区干流表层 p_{CO_2} 为198.8~261.1 Pa. 对支流草堂河剖面监测发现, 表层 p_{CO_2} 最低为15.8 Pa, 随着深度增加, p_{CO_2} 快速增加, 在水深5 m后逐渐稳定, 最大值为294.2 Pa. 通过计算, 支流草堂河在5, 6, 7月的CO₂通量分别为16.46, -4.91和30.85 mmol·m⁻²·d⁻¹, 库区干流CO₂通量为45.83 mmol·m⁻²·d⁻¹. 因此, 三峡库区干流表现为CO₂的“源”, 支流草堂河CO₂释放远小于库区干流, 6月份表现为“汇”.

关键词: 温室气体; 二氧化碳分压; 二氧化碳通量; 草堂河; 三峡库区

中图分类号: X 142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2861(2015)03-0311-08

Partial pressure and diffusion flux of dissolved carbon dioxide in the main stream of the Three Gorge Reservoir and the Caotang River in summer

WU Xue-qian¹, CAO Man¹, FU Jia-nan¹, WEI Hao-bin¹, JIA Xiao-bin¹,
DENG Bing², WANG Fu-shun¹

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University,
Shanghai 200444, China;

2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University,
Shanghai 200062, China)

Abstract: From May 2013 to July 2013, monthly cruise investigation was conducted to study the partial pressure of dissolved carbon dioxide (p_{CO_2}) in the main stream of the Three Gorge Reservoir and its tributary, the Caotang River. The results show that p_{CO_2} in the surface water of the Caotang River varied from 15.8 to 226.4 Pa, and 198.8 to 261.1 Pa for the main stream of the Three Gorge Reservoir. Along the water column of the Caotang River, the lowest value of p_{CO_2} in surface water was 15.8 Pa, and increased rapidly with the depth, and kept stable below 5 m with a maximum value of 294.2 Pa. According to calculations, emission fluxes of CO₂ in the Caotang River in the period of investigation

收稿日期: 2015-05-20

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07104-001); 国家自然科学基金资助项目(41273128, 41473082)

通信作者: 汪福顺(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为地球化学. E-mail: fswang@shu.edu.cn.

were about 16.46, 4.91 and 30.85 mmol m⁻²·d⁻¹, respectively. In the main stream of the Three Gorge Reservoir, this flux was 48.54 mmol·m⁻²·d⁻¹. The results show that the main stream of the Three Gorge Reservoir is a source for atmospheric CO₂, and the tributary Caotang River emits less CO₂ than the main stream, even a sink for atmospheric CO₂ on June.

Key words: greenhouse gas; partial pressure of carbon dioxide; diffusion flux of carbon dioxide; the Caotang River; the Three Gorge Reservoir

工业革命以来,土地利用的变化和化石燃料的大量使用使得大气温室气体的浓度不断增加,全球变暖成为公认事实^[1]. 全球变暖引发的一系列问题,对人类生存环境与国民经济的可持续发展造成了不利影响. 为减少温室气体排放,近年来水电、风电清洁能源以及核电新能源得到迅速发展,其中水电能够提供大量清洁能源,在促进经济发展的同时减少了大量温室气体的排放,因此已成为多数国家能源发展战略的重要方向^[2-4]. 1993年, Rud等^[5]发表评论,称水库生产单位能量产生的温室气体不为零. Duchemin等^[6]首次对水库水气界面上的温室气体通量进行了测量,这引发了各国学者对水库温室气体排放的研究.

现有研究表明:水库所处的气候带、地理位置以及其运用阶段、库龄等,都对其温室气体的源汇关系产生了重要影响,表现出个案特征^[7]. 目前相关研究主要集中在巴西^[8]、巴拿马^[9]、法属圭亚那^[10]、北美^[11]、加拿大^[12]、芬兰^[13]等地的水库淹没区的温室气体源汇关系,获得的结论在一定程度上更新了人们对水库温室气体排放的认知,即水库在运行过程中释放一定的温室气体,并且在极端的情况下,其排放系数甚至会高于火电. 我国科学家在这方面的研究更偏重于自然湖泊与富营养化水库监测及分析研究^[14-15]. 人工水库的温室气体产生、释放以及通量关系的研究相对较少,但逐渐引起了人们的重视.

三峡水库是三峡水电站建成后蓄水形成的人工湖泊,成库后正常蓄水位为175 m,水域面积达1 085 km². 作为世界著名的水电工程,三峡水库的温室气体排放一直受到各方面的关注. 本研究通过夏季对三峡库区干流、支流草堂河水体CO₂分压及其扩散通量的测量,试图了解CO₂浓度变化的时空特征与其影响因素,从而为研究水库温室气体的排放提供参考资料.

1 研究地区与方法

1.1 研究地区概况

三峡水库东起湖北省宜昌市,西迄重庆巴县(东经106°~111°58',北纬28°01'~31°45'). 三峡库区干流水面宽度一般为0.7~1.7 km,支流的河面宽约0.3~0.6 km. 草堂河(东经108°14'~109°25',北纬30°35'~31°26')位于奉节县东部,是长江的一级支流,河长33.3 km,流域面积210.0 km²,平均流量7.51 m³/s,流域内森林植被稀疏,水土流失严重. 与汾河、石马河2条支流在白帝城汇合后注入长江.

1.2 样品采集与分析

2013年5—7月,对三峡库区干流、支流草堂河进行按月走航监测,选取长江干流(CJ)、草堂河上游(CT01)、草堂河中游(CT02)和草堂河下游(CT03)4个采样点,走航距离约为3.5 km,如图1所示. 水样采集使用深井泵间隔抽取不同深度水体,水下0~5 m,每隔1 m取样,水深5 m以下,每隔5 m取样分析. 现场用二氧化碳传感器Hydro CTM/CO₂对其进行CO₂分压(pCO₂)分析,同时用YSI水质参数仪测定酸碱度(pH)、水温(T)、溶解氧(dissolved oxygen, DO)、叶绿素a(Chl-a),用浊度仪测定水体浊度.

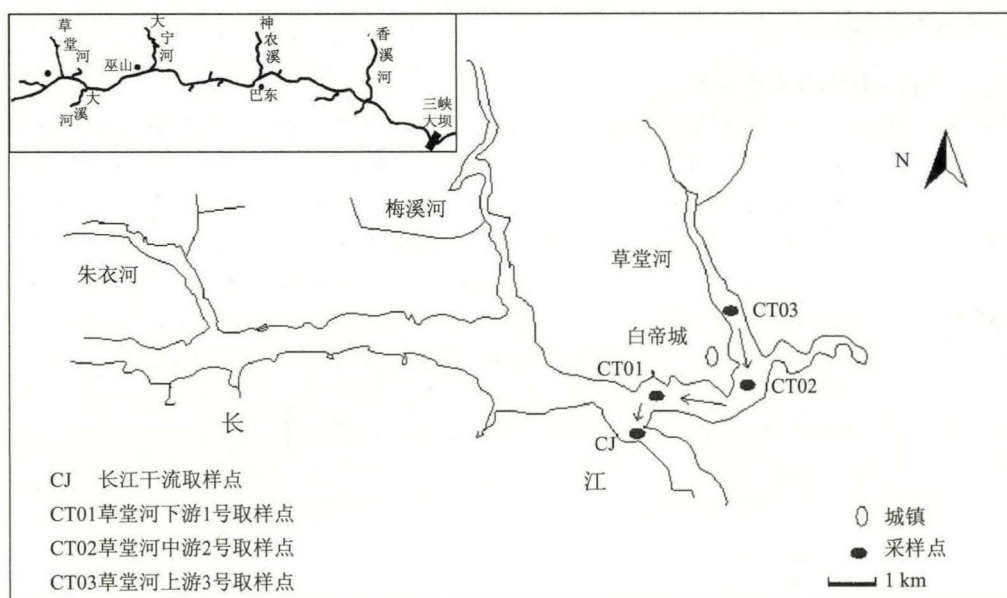


图1 研究区域与研究点位

Fig.1 Studied area and sampling sites

1.3 数据处理

水-气界面的 CO_2 扩散主要受大气和水中二氧化碳分压差、流速、风速和温度等因素影响。通常情况下, 二氧化碳在水-气界面的扩散通量采用下式计算^[16-18]:

$$F = k \times (p_{\text{CO}_2} - g_{\text{sat}}) \times k_{\text{H}}, \quad (1)$$

式中, F 表示水-气界面 CO_2 的扩散通量 ($F > 0$ 表示水体向大气中释放 CO_2 , $F < 0$ 表示水体吸收 CO_2)^[19], k 为气体交换系数, p_{CO_2} 为水体 CO_2 分压, g_{sat} 为大气 CO_2 分压 (38 Pa), k_{H} 为亨利系数。受温度和盐度的影响, k_{H} 根据下式计算^[20]:

$$\ln k_{\text{H}} = -58.0931 + 90.5069 \times (100/T_{\text{K}}) + 22.294 \times \ln (T_{\text{K}}/100), \quad (2)$$

式中, T_{K} 表示开尔文温度。

气体交换系数 k 会受温度、风速、水体浊度等影响, 采用下式计算^[17-18,21]:

$$k = k_{600} (Sc/600)^{-0.67}, \quad (3)$$

$$Sc = 1911.1 - 118.11t + 3.4527t^2 - 0.04132t^3, \quad (4)$$

$$k_{600} = 2.07 + 0.215U_{10}^{1.7}, \quad (5)$$

$$U_{10} = 1.22U_1, \quad (6)$$

式中, Sc 为 CO_2 的施密特数, k_{600} 表示 20°C 、施密特数为 600 时 CO_2 的标准气体交换系数, U_1 表示水面上的风速, U_{10} 表示水面上方 10 m 处的风速, t 为水温。

2 结果与讨论

2.1 研究区水体表层参数变化

监测结果显示, 观测期间干流表层水体温度为 24.2~25.1 °C, 支流草堂河表层水温为 22.1~27.3 °C. 库区干流表层水体中 p_{CO_2} 变化为 198.8~261.1 Pa, 月际波动较小, 支流草堂河表层水体 p_{CO_2} 变化为 15.8~226.4 Pa, 波动范围大. 从河口 (CT01) 到支流上游 (CT03), p_{CO_2} 逐渐减小, 并且显著低于干流 (见图 2). 此外, 从干流到支流, pH, DO, Chl-a 逐渐增大, 其中 6 月份 pH 值平均为 8.44、Chl-a 平均值为 20.7 $\mu\text{g/L}$, p_{CO_2} 平均值为 18.8 Pa (见图 2). 夏季水体温度较高时, 太阳辐射增强有利于藻类大量繁殖, 光合作用的增强. 水体中 CO_2 含量由生物光合作用与有氧呼吸共同决定, 光合作用占主导作用时^[22], 水体 CO_2 分压下降.

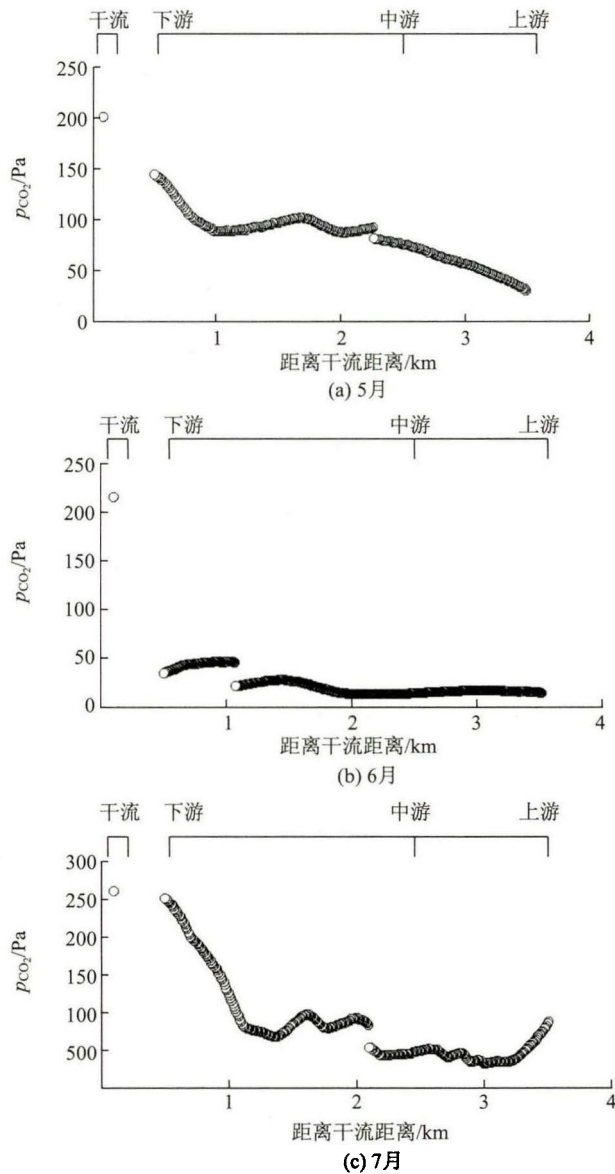


图 2 表层水体 CO_2 分压走航监测结果

Fig. 2 Result of the cruise monitoring of p_{CO_2} in the surface water

2.2 研究区干、支流剖面参数分析

三峡干、支流水体在水库蓄水后由于水位的变动处于频繁交换状态,这使得支流库湾水体的理化特性受到一定影响. 作为典型的“河道型”水库,库区干流一维流动特征显著,而对于支流草堂河,水动力特征受到上流来水及蓄水带来的影响,不能简单概化为一维特征,在水体剖面上会形成明显的分层现象^[23].

夏季草堂河水体剖面上呈现明显的垂向分层现象. 以库区干、支流的交汇点 CT01 为起点,绘制库区支流草堂河3个断面水体参数的剖面变化(见图3和4). 监测结果表明, pH 值在表层水体中最大并随着水体深度的增加快速下降,在水下5 m处趋于稳定. 与 pH 参数变化规律相反, $p\text{CO}_2$ 在各表层水体中最小,随着水体深度增加而变大,从表层到水下5 m处, $p\text{CO}_2$ 迅速增加,水体表面5 m以下趋于平衡,为 199.9~294.1 Pa.

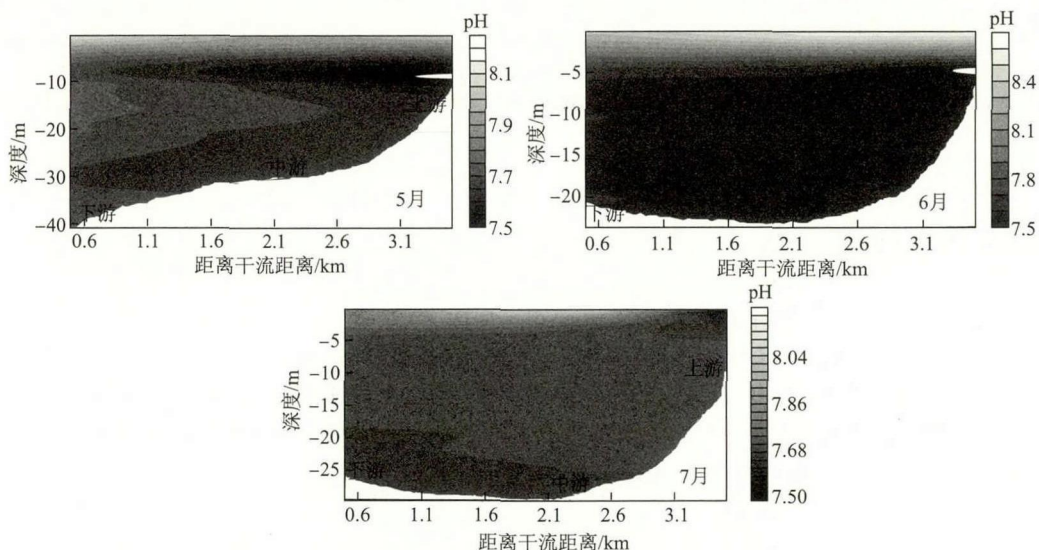


图3 草堂河水体剖面的 pH

Fig. 3 Result of pH of vertical section monitoring in the Caotang River

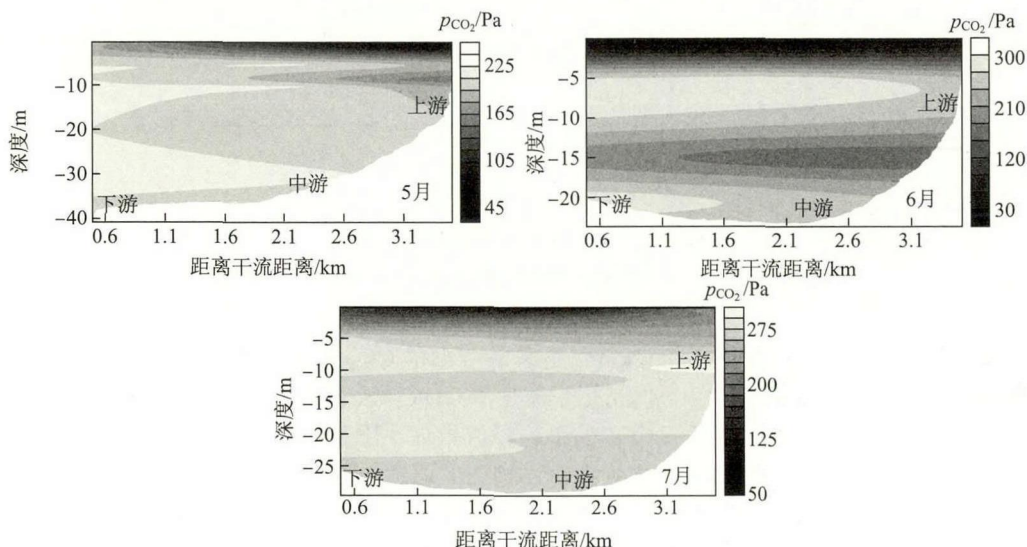


图4 草堂河水体剖面的 CO_2 分压

Fig. 4 Result of $p\text{CO}_2$ of vertical section monitoring in the Caotang River

图5为剖面水体 $p\text{CO}_2$ 与 pH 的相关性. 可以看出, 在垂直剖面上水体 $p\text{CO}_2$ 与 pH 呈负相关. 在夏季温度较高、阳光充足的情况下, 上层水体中由光合作用占据主导作用, 浮游植物等生长状况良好, 通过光合作用大量消耗水体中 CO_2 , 释放 O_2 , 从而使 pH 升高; 随着水体深度的增加, 水体中无机碳平衡逐渐由呼吸作用占主导, 水体中 $p\text{CO}_2$ 升高, pH 下降.

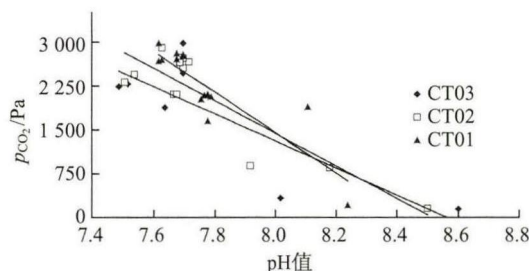


图 5 剖面水体 $p\text{CO}_2$ 与 pH 的相关性

Fig. 5 Regression analysis between $p\text{CO}_2$ and pH

2.3 水体 CO_2 释放通量与分析

库区受地形影响, 风力普遍偏小, 静风频率偏大, 年平均风速一般为 $0.5\sim 2.0\text{ m/s}$ ^[24]. 根据式(3)计算得到草堂河5, 6, 7月 k 的平均值分别为 $2.892, 3.251, 3.196\text{ cm/h}$, 而三峡干流较稳定, k 的平均值为 2.924 cm/h . 通过式(1)计算得到草堂河区域在5, 6, 7月上游、中游和下游的 CO_2 通量(见图6). 可以看出, 5, 6, 7月 CO_2 通量的平均值为 $16.46, -4.91$ 和 $30.85\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. 另外, 干流5, 6, 7月的 CO_2 通量分别为 $40.48, 42.52$ 与 $54.48\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (以上数据以 1.25 m/s 风速计算获得, 误差线数据是基于 0.5 和 2.0 m/s 风速计算获得). 上述结果表明, 草堂河5, 7月的 CO_2 通量与干流的 CO_2 释放通量 F 均大于0, 表现为大气 CO_2 的“源”, 草堂河6月的 CO_2 释放通量 F 小于0, 表现为大气 CO_2 的“汇”.

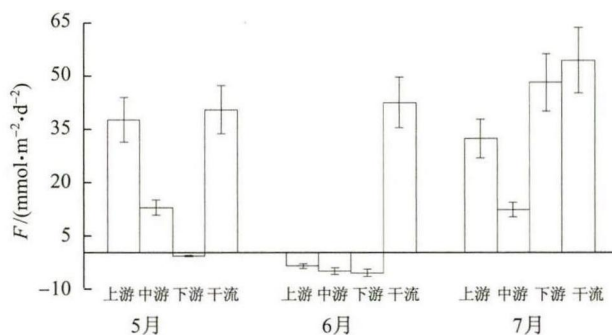


图 6 干、支流水体表面的 CO_2 通量

Fig. 6 F of surface water from the main stream and tributary

草堂河研究区域的面积约为 3.6 km^2 , 夏季5—7月的 CO_2 释放总量约为 $4.68\times 10^6\text{ mol}$; 而三峡蓄水后, 全库区面积约为 $1\,084\text{ km}^2$, 干流夏季 CO_2 释放总量约为 $4\,570.2\times 10^6\text{ mol}$. 根据图6进一步分析可知, 支流草堂河 CO_2 的平均释放量远小于干流的 CO_2 释放量, 甚至表现出对 CO_2 的吸收. 河流作为陆地生源要素向海洋输送的通道, 会携带大量流域内有机质, 因受到呼吸作用的影响, 干流水体流速与湍流度的值相对较高, 对水体中的 CO_2 向大气扩散具有加速作用^[25]; 而在部分支流区域, 因受到干流与地理特性的影响, 河流的流速降低, 为水体中浮游植物的生长创造了条件, 在夏季光合作用相对强烈的情况下, 减缓了 CO_2 的释放. 因此在评

估一个地区的 CO_2 分压时,应对整个研究区域进行考察,不能考虑局部流域。

3 结束语

(1) 对三峡坝区干流、支流草堂河进行走航监测,得到了表层水体的 p_{CO_2} , pH, DO 与 Chl-a 等参数。结果表明,干、支流表层水体 p_{CO_2} 存在明显差异,差异产生的原因主要是干、支流表层水体的光合作用强度不同。

(2) 干流 CO_2 分压显著高于支流草堂河 CO_2 分压,夏季干流 CO_2 释放通量平均为 $48.54 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,表现为大气 CO_2 的“源”;支流草堂河5,6,7月的 CO_2 释放通量分别为 16.46, -4.91 和 $30.85 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,明显低于干流 CO_2 释放通量,甚至表现为大气 CO_2 的“汇”(6月)。

(3) 库区干流在向外界输送的过程中会携带大量有机质,有机质通过呼吸作用降解,并向大气释放 CO_2 ;而支流因受到干流与地形等影响,流速减缓,有利于浮游植物生长,在光合作用的影响下降低了 CO_2 分压,减少了 CO_2 释放,甚至表现出对大气 CO_2 的吸收。

参考文献:

- [1] 何建坤,王宇,刘滨.全球应对气候变化对我国的挑战与对策[J].清华大学学报(哲学社会科学版),2013,22(5):75-83.
- [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.
- [3] 李海英,冯顺新,廖文根,等.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.
- [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.
- [5] RUD J, HARRIS R, KELLY C, et al. Are hydroelectric reservoirs significant sources of greenhouse gases [J]. *Ambio*, 1993, 22: 246-248.
- [6] DUCHEMIN E, LUCOTTE M. Production of the greenhouse gases CH_4 and CO_2 buried hydroelectric reservoirs of the boreal region [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1995, 9(4): 529-540.
- [7] TREMBLAY A, VARFALVY L, ROEHM C, et al. Greenhouse gas emissions: fluxes and process, Hydroelectric reservoirs and natural environments [R]. Environmental Science Series, New York: Springer, 2005: 233-250.
- [8] SANTOS M, ROSA L, SIKAR B, et al. Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants [J]. *Energy Policy*, 2006, 34(4): 281-288.
- [9] KELLER M, STALLARD R. Methane emission by bubbling from Gatun Lake, Panama [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(4): 529-540.
- [10] 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.
- [11] KELLY V. Influence of reservoirs on solute transport: a regional scale approach [J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(7): 1227-1249.
- [12] DEMARTY M, BASTIEN J, TREMBLAY A. Carbon dioxide and methane annual emission from Two Boreal Reservoirs and nearby lake in Quebec, Canada [J]. *Biogeosciences Discuss*, 2009, 6: 2939-2963.

- [13] HUTTUNEN J, AIM J, LIIKANEN 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(3): 609-621.
- [14] 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.
- [15] 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 of Geophysical Research*, 2009, 114: D18301.
- [16] JONSSON A, KARLSSON J, JANSSON M. Sources of carbon dioxide supersaturation in clearwater and humic lakes in northern Sweden [J]. *Ecosystems*, 2003, 6(3): 224-235.
- [17] WANNINKHOF R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(C5): 7373-7382.
- [18] COLE J, CARACO N. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF₆ [J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43(4): 647-656.
- [19] 喻元秀, 刘从强, 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.
- [20] DEMARTY M, BASTIEN J, TREMBLAY A. Annual follow-up of gross diffusive carbon dioxide and methane emissions from a boreal reservoir and two nearby lakes in Québec, Canada [J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(1): 41-53.
- [21] CRUSIUS J, WANNINKHOF R. Gas transfer velocities measured at low wind speed over a lake [J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(3): 1010-1017.
- [22] 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 p_{CO_2} 特征及扩散通量 [J]. *环境科学*, 2015, 36(1): 40-48.
- [23] 纪道斌, 刘德富, 杨正建, 等. 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析 [J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2010, 40(1): 101-112.
- [24] 王国庆, 张建云, 何瑞敏, 等. 三峡工程对区域气候影响有多大 [J]. *中国三峡*, 2009(11): 30-35.
- [25] 梅航远, 汪福顺, 姚臣湛, 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.