

三峡水库澎溪河消落区土-气界面 CO₂和 CH₄通量初探*

李 哲, 张利萍, 王 琳, 郭劲松, 高 旭, 方 芳, 蒋 滔
(重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 水库近岸湿地(消落区)温室气体(CO₂、CH₄)产汇是水库温室气体效应问题的重要组成部分. 本文以三峡水库支流澎溪河的白家溪、养鹿两处大面积消落区为研究对象, 于2010年6—9月水库低水位运行期间, 对近岸消落区土-气界面CO₂、CH₄通量进行监测. 白家溪消落区土-气界面CO₂通量均值为 12.38 ± 2.42 mmol/(m²·h); CH₄通量均值为 0.0112 ± 0.0064 mmol/(m²·h). 养鹿消落区CO₂、CH₄通量均值分别为 10.54 ± 5.17 、 0.14 ± 0.16 mmol/(m²·h). 总体上, 6—9月土-气界面CO₂通量呈增加趋势, 而CH₄通量水平呈现显著的递减趋势. 消落区土地裸露后植被恢复, 在一定程度上促进了土壤有机质含量的增加, 使得6—9月CO₂释放通量的总体趋势有所增加. 消落区退耕后, 其甲烷氧化菌的活性得到恢复, 加之在土地裸露晾晒过程中土壤透气性增强, 使得消落区土壤对大气中CH₄吸收氧化潜势增强. 尽管如此, 仍需进一步的研究以明晰消落区土-气界面CO₂、CH₄产汇的主要影响因素.

关键词: 三峡水库; 澎溪河; 消落区; CO₂; CH₄; 通量

Preliminary study of CO₂ and CH₄ fluxes at soil-air interface in drawdown area of the Pengxi River of the Three Gorges Reservoir

LI Zhe, ZHANG Liping, WANG Lin, GUO Jinsong, GAO Xu, FANG Fang & JIANG Tao
(Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The CO₂ and CH₄ fluxes on wetland (water level drawdown) area of reservoirs are crucial parts of the scientific research of reservoir Green House Gas emission. CO₂ and CH₄ fluxes at soil-water interface of Baijiayi and Yanglu drawdown areas in the Pengxi River were studied from June to September in 2010. Baijiayi drawdown area has a mean CO₂ flux of 12.38 ± 2.42 mmol/(m²·h), while its mean CH₄ flux is 0.0112 ± 0.0064 mmol/(m²·h). The mean fluxes of CO₂ and CH₄ at soil-air interface in Yanglu drawdown area are 10.54 ± 5.17 mmol/(m²·h) and 0.14 ± 0.16 mmol/(m²·h), respectively. A significant increase of CO₂ flux and a comparable decrease of CH₄ during the study period have been observed. Recovery of the vegetation and an increase in soil organic matter contents are generally regarded as the primary reason for the increase of CO₂ flux. Loss of water in soils during the period increases the intensities of oxygen transfer from air to soils, which could help to increase the activities of methanotrophic bacteria, and to increase the capability of CH₄ sink in the drawdown zone. However, it is suggested that further study should be taken on elucidating the co-effect of CO₂ and CH₄ fluxes by the reservoir operation and land-use history in this area.

Keywords: Three Gorges Reservoir; Pengxi River; drawdown area; CO₂; CH₄; fluxes

筑坝蓄水将不可避免淹没一定量的土地与植被, 导致淹没区内陆地生态系统贮存的有机碳转化为CO₂或CH₄等温室气体释放入大气, 水库温室气体效应成为近年来备受关注的生态环境问题^[1-2]. Louis等^[2]估测每年世界上所有水库释放大约 7×10^7 t CH₄和 1×10^9 t CO₂, 而水库CH₄的排放量可占到全球排放量的12%, 占人类排放的1/7左右, 其中90%的排放量来自于热带地区. 近年来的主要观点认为水库温室气体效应同水库所处的气候带和库龄(淹没时间)等因素密切相关^[3-5], 但现有工作在研究深度和系统性等方面依然十分不足, 在科学上和研究方法上还有争议.

* 国家自然科学基金项目(51009155, 51179215)和重庆市自然科学基金项目(CSTC2010BB0228)联合资助. 2012-09-03收稿; 2013-02-26收修改稿. 李哲, 男, 1981年生, 副教授; E-mail: zheli81@sina.com.

三峡工程举世瞩目,也是近年来国内外水库温室气体效应研究讨论的热点区域.国内的普遍观点认为^[6-7],三峡水库深水河道型特征使其拥有相对较大的岸线系数和相对较小的淹没面积,水库整体混合程度和覆氧水平较优,不利于底层 CH₄ 释放,加之建库前系统的清库工作,CO₂、CH₄ 等释放潜势远低于热带水库.此外,成库后水库生态系统中藻类生长繁盛促使生产力水平显著高于天然河道,对碳汇贡献明显^[8].尽管如此,对于水库调度运行形成的近 400 km² 近岸次生湿地(消落区),其温室气体产汇特征仍无系统、清晰的回答.Chen 等^[9]于 2009 年的监测结果认为三峡新生水库湿地产生了大量 CH₄,其强度并不亚于热带水库.但其最近研究则认为三峡水库 CH₄ 整体释放水平并不高^[10].消落区属水生-陆生过渡型的湿地生态系统,在反季节的受淹-曝晒作用下,三峡库区消落区关键生源要素的生物地球化学循环具有独特性,其碳的源汇格局具有复杂性^[11].

本文以三峡水库澎溪河的白家溪、养鹿消落区为研究对象,于 2010 年 6—9 月对消落区土-气界面 CO₂、CH₄ 通量特征进行逐月跟踪观测,并结合土壤相关理化指标的跟踪观测结果,对该区域消落区温室气体通量特征进行初步探讨,为进一步阐释三峡水库近岸湿地(消落区)温室气体通量特征提供研究基础.

1 材料与方法

1.1 研究区域

澎溪河流域位于三峡水库中段(31°00′~31°42′N,107°56′~108°54′E),流域面积 5172.5 km²,干流全长 182.4 km.三峡成库后,澎溪河消落区总面积 55.47 km²,是三峡水库支流中消落区面积最大的支流,其消落区主要分布于开县县城(汉丰湖)、开县厚坝、渠口-铺溪、白家溪、养鹿等地.其中,白家溪、养鹿地貌特征相似(图 1),均为主河道近岸的大面积台地,台地平均标高为 150~155 m,两个消落区之间为峡谷,相隔约 10 km.在成库前该区域为村庄、农田,主要作物为水稻、玉米,经果林作物主要为柑橘.清库后为荒地,部分近岸后靠搬迁住户在消落区开垦农田,主要种植一季的水稻、玉米.土壤类型多为紫色土.白家溪、养鹿消落区照片见图 2.

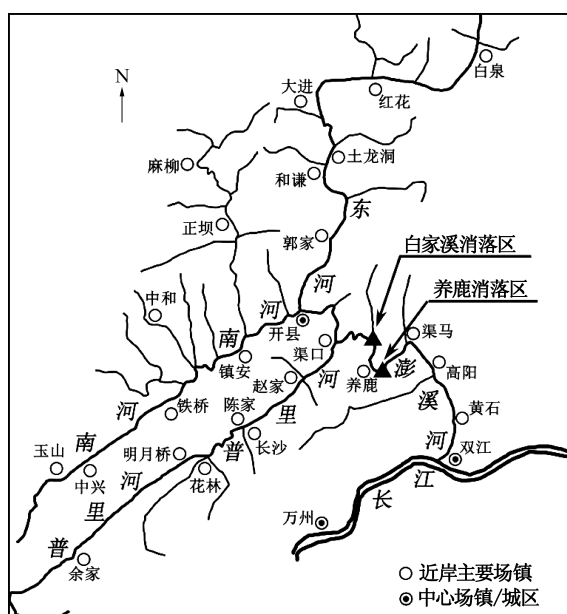


图 1 三峡澎溪河水系与白家溪、养鹿消落区

Fig.1 Drainage system of the Pengxi River of Three Gorges Reservoir and the Baijiayi and Yanglu drawdown areas

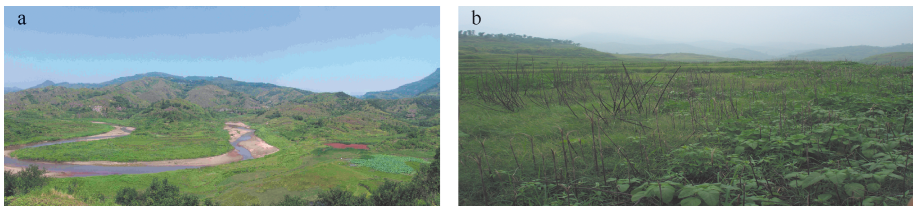


图2 三峡澎溪河白家溪(a)、养鹿(b)消落区实景照片

Fig. 2 Photos of the drawdown areas of Baijiayi (a) and Yanglu (b) of Pengxi River of Three Gorges Reservoir

1.2 采样测试与分析方法

根据消落区土壤与植被特征,在白家溪、养鹿消落区各选择2个采样点开展研究(表1),温室气体通量监测时间为2010年6月至9月,每月1次,采样时间为每月8日11:00—15:00之间.消落区土-气界面温室气体采样采用透明静态箱,方法参照文献[12].采样时,使用针筒每5 min抽取100 ml气样于气袋中,取样时间共20 min.气袋取回实验室后48 h内完成气体分析.气样分析采用Aglient®GC7820A气相色谱仪.气体为十通阀进样,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器转化,最后用FID检测器检测.通过测定气样浓度变化率计算CO₂及CH₄的交换通量^[13],公式为:

$$Flux = \frac{SL \cdot P \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot V}{SP \cdot R(273.15 + T)S} \tag{1}$$

表1 澎溪河白家溪、养鹿消落区采样点特征描述

Tab. 1 General description of sampling sites in Baijiayi and Yanglu drawdown areas in the Pengxi River

采样点	高程范围	现状特征	采样点植被群落	土地利用历史
白家溪 01 (31°8'26"N,108°33'36"E)	158 ~ 160 m	荒弃水稻田,部分被重新垦殖	白茅、苍耳	水稻田(梯田)
白家溪 02 (31°8'16"N,108°33'30"E)	150 ~ 153 m	沙质荒地,枯草地	狗压根、双穗雀稗、水蓼	旱地、经果林
养鹿 01 (31°4'58"N,108°33'50"E)	150 ~ 152 m	沙质荒地,植被盖度较低	牛鞭草、狗压根、双穗雀稗	水稻田、旱地
养鹿 02 (31°5'8"N,108°33'52"E)	155 ~ 158 m	荒地、枯草地	空心莲子草、白苞蒿	旱地、经果林

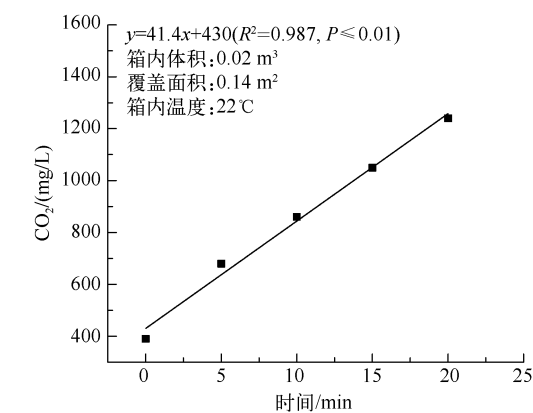


图3 2010年6月白家溪01样点静态箱取样测试与拟合结果

Fig. 3 Measurement and fitting results from static-chamber method in 01 sampling sites of Baijiayi drawdown area in June, 2010

式中, $Flux$ 为温室气体气体扩散通量($mg/(m^2 \cdot h)$); SL 为时间-浓度关系图中的斜率($\mu atm/min$ 或 $mg/(L \cdot s)$); P 为监测时的大气环境压力(kPa); F_1 为 mg/L 到 $\mu g/m^3$ 的转换系数; F_2 为分钟到小时的转换系数,60; V 为静态箱内套入的空气体积(m^3); SP 为标准大气压,101.325 kPa ; S 为箱体所覆盖的土-气界面面积(m^2); T 为监测时的箱内温度($^{\circ}C$). 计算后,使用摩尔质量换算成 CO_2 或 CH_4 的摩尔浓度通量. 监测中要求 $R^2_{CO_2} \geq 0.9$, $R^2_{CH_4} \geq 0.8$. 2010年6月白家溪土-气界面 CO_2 通量的静态箱现场取样测试及拟合见图3.

土壤样品是笔者所在课题组全年3次消落区土壤大面积采样期间采集的,采样时间分别为2010年4月(消落区初露)、7月(主汛期)、9月中旬(汛末). 其中4月份采样时,前述样点并未出露,故采集近岸消落区土壤. 现场测试分析指标包括:经纬度、土壤

pH、氧化还原电位(Eh)、电导率和含水率. 采集土样时,使用洛阳铲采集表层土(0~20 cm),为了使所采样品具有代表性,在1 m 范围内采集4~5 个不同土样,捡掉砾石、动植物残体等,充分混合后用四分法缩分至1 kg 左右,装入聚乙烯袋密封保存. 将样品带回实验室后,先用冷冻干燥器低温冷冻干燥,再采用瓷碾钵将其碾磨成粉末,过100 目的不锈钢筛. 最后将处理后的样品装入聚乙烯密封袋中,存储于-20℃冰箱中以备化学分析. 土壤有机质、全氮、全磷等土壤指标的采样测试方法参照《土壤农业化学分析方法》^[13]进行.

坝前水位数据下载自中国长江三峡集团公司网站(<http://www.ctgpc.com.cn>),化学实验分析及计算得出的数据全部录入 SPSS 或 Origin 软件进行统计分析.

2 结果与分析

2.1 CO₂、CH₄ 通量强度特征

2010 年6—9 月,白家溪消落区土-气界面 CO₂ 通量均值为 12.38 ± 2.42 mmol/(m²·h);CH₄ 通量均值为 0.0112 ± 0.0064 mmol/(m²·h). 养鹿消落区相应的 CO₂ 通量均值为 10.54 ± 5.17 mmol/(m²·h),略低于白家溪消落区 CO₂ 通量水平;其 CH₄ 通量均值为 0.14 ± 0.16 mmol/(m²·h),显著低于养鹿 CH₄ 通量水平($P \leq 0.05$, t -检验). 研究期间,白家溪消落区 CO₂ 通量水平总体呈升高的趋势,CO₂ 通量6 月为 13.88 ± 6.03 mmol/(m²·h),7 月为研究期间最低水平(6.30 ± 4.01 mmol/(m²·h)),此后逐渐升高至9 月的 17.88 ± 12.38 mmol/(m²·h). 养鹿消落区 CO₂ 通量在7 月出现峰值(24.73 ± 6.11 mmol/(m²·h)),在8 月达到研究期间最低水平(2.62 ± 1.07 mmol/(m²·h)),9 月 CO₂ 通量回升至 10.54 ± 5.17 mmol/(m²·h). 两处消落区土-气 CH₄ 通量呈现近似指数下降的趋势.6 月白家溪消落区土-气 CH₄ 通量为 0.026 ± 0.012 mmol/(m²·h),此后 CH₄ 通量水平逐月递减,至9 月出现负值,为 -0.00217 ± 0.00144 mmol/(m²·h). 养鹿消落区土-气 CH₄ 通量的指数下降特征更为显著,6 月出现峰值 0.63 ± 0.43 mmol/(m²·h),7 月出现源汇转化,CH₄ 通量为 -0.0169 ± 0.0081 mmol/(m²·h). 8 月养鹿消落区 CH₄ 的汇通量水平达到最大,为 -0.0308 ± 0.0102 mmol/(m²·h),但在9 月则略回升至 -0.01408 ± 0.0004 mmol/(m²·h)(图4). 本研究 CH₄ 通量水平较 Chen 等在该区域的前期研究低^[9]. 但由于 Chen 等^[9]的研究主要集中于消落区刚初露时期(Newly Created Mashies),结合本研究中6 月初露时期研究水平相比,二者差异不大.

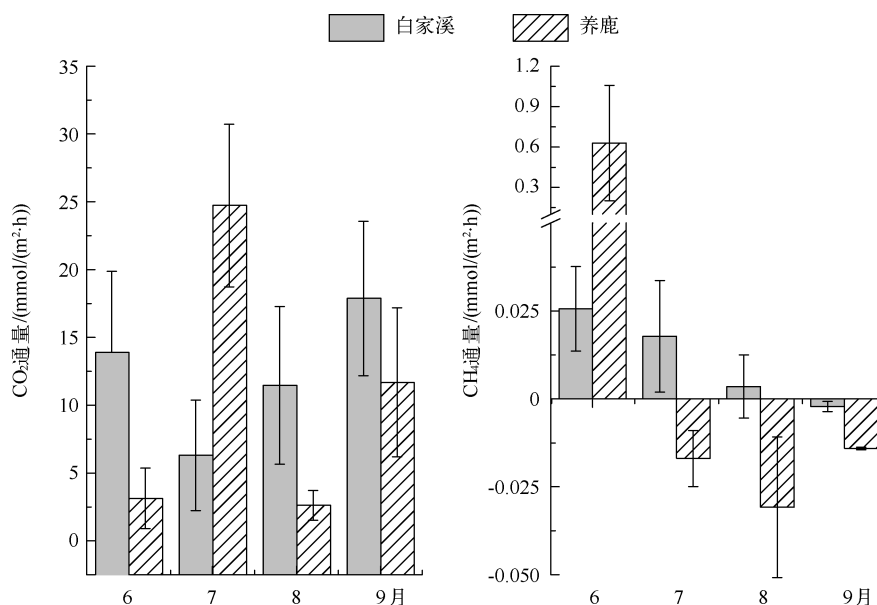


图4 白家溪、养鹿消落区 CO₂、CH₄ 通量逐月变化

Fig. 4 Monthly variations of CO₂ and CH₄ fluxes in Baijiayi and Yanglu drawdown areas

2.2 土壤相关指标变化过程

土壤温度与体积含水率是决定土壤透气性、Eh、pH、微生物活性以及温室气体扩散速率等的关键参量. 研究期间,白家溪、养鹿消落区土壤温度差别不大,均为 20℃ 左右,7、9 月逐渐上升. 养鹿消落区土壤体积含水率 4 月仅为 $28.9\% \pm 2.2\%$,7 月略有下降,但 9 月则升高至 $47.1\% \pm 7.2\%$. 白家溪消落区土壤体积含水率在 7 月达到最大,为 $51.9\% \pm 3.9\%$,在 9 月略有下降,但依然高于 4 月(图 5).

pH 和 Eh 影响着土壤有机质的合成和分解、微生物的活动、根系的生长发育等,并最终影响土壤温室气体通量强度. 研究期间,养鹿消落区 Eh 显著下降,出现从氧化态向还原态转变的特征,pH 则呈略微升高的趋势. 相比之下,白家溪土壤 Eh 均保持在氧化态,且 7 月最低;白家溪土壤 pH 在 7 月份出现较高水平,9 月份最低. 此外,养鹿消落区土壤电导率在研究期间下降趋势明显,白家溪消落区土壤电导率则在 7 月达到最高(图 5).

研究发现,白家溪消落区土壤有机质总体略高于养鹿消落区. 4—9 月白家溪、养鹿消落区土壤有机质增加趋势明显,白家溪消落区土壤有机质含量从 4 月的 $8.16 \pm 2.30 \text{ mg/g}$ 逐渐升高至 9 月的 $10.89 \pm 1.20 \text{ mg/g}$;养鹿消落区土壤有机质含量 4 月为 $7.80 \pm 2.28 \text{ mg/g}$,7 月略有下降,但 9 月升高至 $10.05 \pm 1.93 \text{ mg/g}$. 两个消落区土壤全氮含量变化趋势相似,7 月汛期土壤全氮出现下降的趋势,但在 9 月则出现显著增加的趋势,且全氮含量亦高于 4 月. 两个消落区土壤全磷含量总体上呈略下降的趋势. 总体上,养鹿消落区土壤全磷含量略高于白家溪消落区,但全氮含量则略低于白家溪消落区(图 5).

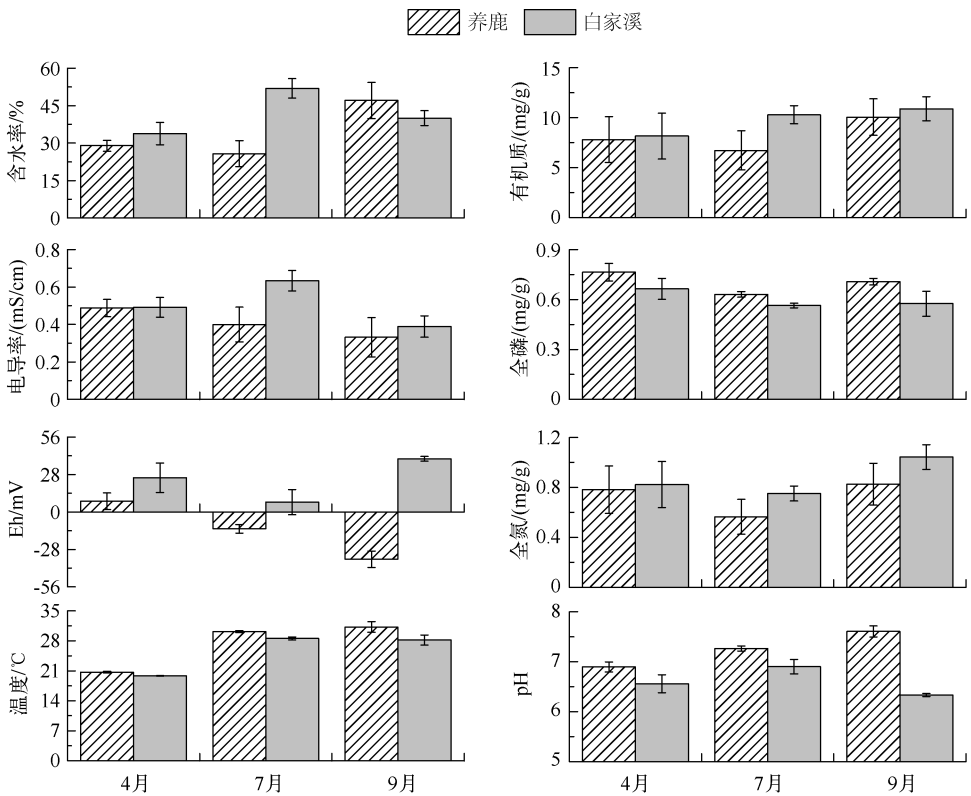


图 5 2010 年 4、7、9 月白家溪、养鹿消落区土壤各主要指标特征

Fig. 5 Soil characteristics in Baijiayi and Yanglu drawdown areas during April, July and September, 2010

3 讨论

本研究跟踪了一个较为完整的消落区陆地出露时期(6—9 月)的温室气体通量过程,可以发现总体上

CO₂ 的通量水平同土壤有机质含量变化较为密切,反映了土壤细菌的呼吸水平.一方面,消落区陆地裸露后植被恢复,消落区生产力水平升高,在一定程度上促进了土壤有机质含量的增加,使得6—9月 CO₂ 释放通量的总体趋势有所上升.另一方面,对各采样点横向上的比较可以看出,沙质荒地有机质含量较低,其 CO₂ 通量水平较低,而在植被盖度较高的荒草地或有机质含量较高的水稻田,CO₂ 通量水平相对较高.养鹿消落区整体有机质含量略低于白家溪消落区,其 CO₂ 通量水平总体上亦略低于白家溪消落区(图4).

土壤中 CH₄ 吸收是陆地生态系统的自然过程,IPCC 估计全球土壤对 CH₄ 吸收总量为 30 Tg/a^[14]. 在现有研究中,普遍认为土壤中好气微生物消耗大气中的 CH₄ 是陆地生态系统中最大的 CH₄ 汇^[14]. 影响土壤吸收 CH₄ 的主要因素包括:土壤渗透性、pH 值、扩散能力、氧气含量、温度、含水量等物理化学特征以及土壤耕作措施^[15]. 已有研究表明,pH 升高有利于 CH₄ 吸收,而农业耕作与施肥不利于土壤吸收 CH₄,CH₄ 吸收率与土壤水分含量呈负相关^[16]. 不仅如此,不同植被生长对土壤吸收 CH₄ 具有刺激或延缓的作用,通常不同土地利用类型下,土壤对 CH₄ 吸收强度顺序为林地≥草地≥可耕地^[14-16]. 研究期间出现的 CH₄ 通量源汇转化及其吸收通量递增趋势的现象,且吸收通量的范围同刘伟等^[17] 在内蒙古草原土壤 CH₄ 吸收的监测结果接近,也同 Hütsch^[18] 所获得数据同处于一个数量级范围,表明消落区温室气体通量在一定程度上同低水位裸露期间植被恢复、土壤理化性质改变密切相关.本研究暂未能对两处消落区土壤吸收的 CH₄ 机制进行更深入解析,但结合同期两处消落区土壤理化特征比较分析,研究尝试进行以下推测:消落区退耕后,其甲烷氧化菌的活性得到恢复,加之在土地出露与曝晒过程中土壤透气性增强,使得消落区土壤对大气中 CH₄ 吸收潜势增强,同时消落区植被恢复在一定程度上刺激了 CH₄ 汇的作用.尽管如此,不可忽略土地利用历史对消落区形成后温室气体通量的影响.本研究中白家溪、养鹿采样点在淹没前均为农业耕作土地,其 CO₂、CH₄ 产汇主要是受水库调度运行调控还是同其自身土地利用历史相关目前仍不得而知,更明晰的生态机制有待于下一步更系统的实验设计与更深入的研究.

4 结论

2010 年6—9月,白家溪消落区土-气界面 CO₂ 通量均值为 12.38 ± 2.42 mmol/(m²·h);CH₄ 通量均值为 0.0112 ± 0.0064 mmol/(m²·h). 养鹿消落区 CO₂、CH₄ 通量均值分别为 10.54 ± 5.17 mmol/(m²·h)、 0.14 ± 0.16 mmol/(m²·h). 总体上,CO₂ 通量呈增加趋势,而 CH₄ 通量水平呈现显著的递减趋势,8月、9月出现对 CH₄ 吸收的现象.

消落区出露后植被恢复,在一定程度上促进了土壤有机质含量的增加,使得6—9月 CO₂ 释放通量的总体趋势有所增加.消落区退耕后,其甲烷氧化菌的活性得到恢复,加之在土地出露曝晒过程中土壤透气性增强,使得消落区土壤对大气中 CH₄ 吸收氧化潜势增强;另外,消落区植被恢复在一定程度上刺激了 CH₄ 汇的作用.尽管如此,仍需更进一步研究明晰消落区 CO₂、CH₄ 产汇是主要受水库调度运行调控还是受其自身土地利用历史影响.

5 参考文献

- [1] Fearnside PM. Greenhouse gas emissions from a hydroelectric reservoir (Brazil's Tucuruí dam) and the energy policy implications. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, **133**:69-96.
- [2] Louis VIST, Kelly C, Duchemin É *et al.* Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate. *BioScience*, 2000, **50**:766-775.
- [3] Barros N, Cole JJ, Tranvik LJ *et al.* Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature*, 2011, **4**:593-596.
- [4] Abril G, Delmas R, Jambert C *et al.* Gaseous emissions and oxygen consumption in hydroelectric dams: a case study in French Guyana. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, **11**:471-483.
- [5] Soumis N, Duchemin É, Canuel R *et al.* Greenhouse gas emissions from reservoirs of the western United States. *Global Biogeochem Cycles*, 2004, **18**:1-11.
- [6] 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. 人民长江,2011, **42**(1):18-21.

- [7] 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. 长江流域资源与环境, 2011, **20**: 251-255.
- [8] 郭劲松, 蒋 滔, 李 哲等. 三峡澎溪河春季水华期 $p(\text{CO}_2)$ 及影响因素分析. 水科学进展, 2011, **22**(6): 829-838.
- [9] Chen H, Wu Y, Yuan X *et al.* Methane emissions from newly created marshes in the drawdown area of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**: D18301. doi:10.1029/2009JD012410.
- [10] Chen H, Yuan X, Chen Z *et al.* Methane emissions from the surface of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**: D21306. doi:10.1029/2011JD016244.
- [11] 李伟萍, 曾 源, 吴炳方等. 三峡水库 156 米蓄水位消落区植被恢复监测研究. 长江流域资源与环境, 2011, **20**: 332-338.
- [12] 杜 睿, 王庚辰, 吕达仁等. 箱法在草地温室气体通量野外实验观测中的应用研究. 大气科学, 2001, **25**(1): 61-70.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [14] 王琛瑞, 黄国宏, 梁战备等. 大气甲烷的源和汇与土壤氧化(吸收)甲烷研究进展. 应用生态学报, 2002, **13**(12): 1707-1712.
- [15] 刘 芳, 刘从强, 王仕禄等. 黔中非农业土壤 CH_4 的地-气交换及其影响因素. 地球与环境, 2009, **37**(2): 147-152.
- [16] 陈书涛, 黄 耀, 郑循华等. 种植不同作物对农田 N_2O 和 CH_4 排放的影响及其驱动因子. 气候与环境研究, 2007, **12**(2): 147-155.
- [17] 刘 伟, 王继明, 王智平. 内蒙古典型草原植物功能型对土壤甲烷吸收的影响. 植物生态学报, 2011, **35**(3): 275-283.
- [18] Hütsch BW. Methane oxidation in arable soil as inhibited by ammonium, nitrite, and organic manure with respect to soil pH. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, **28**(1): 27-35.