

· 水库与环境 ·

猫跳河流域梯级开发水库夏季甲烷排放研究

杨 妍¹, 刘丛强², 吴 攀¹, 刘小龙²

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550003

2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 夏季对猫跳河流域梯级开发的各水库在坝前采集分层水样并进行分析, 结果表明水的温度和溶解氧都会影响甲烷的产生和分布; 其中红枫水库和百花水库存在 2 个温度不连续层, 在连续层以下以厌氧环境为主, 产生大量的甲烷气体; 修文水库以及红岩水库在整个剖面上只产生少量的甲烷气体。水库甲烷的产生与世界上水库湖泊内甲烷的产生相似, 水库以底层泄水的方式排放到大坝下游对于温室气体释放来说影响重大, 而水库则有可能改变了原来河流的甲烷含量的分配, 说明梯级水库的建设使用对甲烷的排放影响很大, 这在水电开发的环境保护中应当引起重视。

关键词: 环境工程学; 甲烷; 溶解氧; 泄水方式; 梯级水库

中图分类号: X143 文献标志码: B 文章编号: 1007-0133(2009)03-0012-05

0 引言

甲烷(CH_4)是由沉积物中的有机质在厌氧条件下被细菌降解的产物, 它是大气中最主要的温室气体之一, 其浓度的不断增加是引起全球变暖的重要原因之一。根据世界各国政府间气候变化委员会 (IPCC) 第 2 次全球气候变化的科学评估报告, 甲烷温室效应约占所有温室气体总效应的 23%, 其余为二氧化碳(CO_2)和氧化亚氮(N_2O)。在过去的 20 年里面, 大气中 CH_4 浓度的年平均增长率为 1.1%, 它对全球气候变暖的增温贡献是 15%, 它的增温效应虽然次于 CO_2 (CO_2 增温贡献是 60%), 但是若考虑 20 年时间尺度, 单位质量 CH_4 的增温潜势为 CO_2 的 62 倍, 因此减少 CH_4 排放对缓和全球增温趋势比减少 CO_2 的排放更为有效^[1]。

目前, 世界河流正受到筑坝拦截的广泛影响^[2,5], 因为河流筑坝拦截形成水库后, 水生生态系统由底栖附着生物为主的“河流型”异养体系逐渐向以浮游生物为主的“湖沼型”自养体系演化; 但是, 水库的水文过程、水体滞留时间等方面与自然湖泊又有比较大的区别, 所以尽管筑坝拦截极大的改变了河流原有的自然过程, 但是对水库“湖沼学过程”的研究仍然十分的不足。由于探索温室气体的“碳源”、“碳汇”及地域排放特征一直是全球气候变化领域研究的核心内容, 而以前一贯认为水电是清洁能源, 然而越来越多的研究表明水库修建后产生了更多的温室气体如 CH_4 、 N_2O 、 CO_2 , 因此水库已经是温室气体排放到大气中的一个重要来源^[3]。水体在梯级开发的河流上由于水量、物质等的上下承接关系, 可能表现出更为复杂

的累积效应。目前世界上对于温室气体研究以往主要集中在湿地、稻田等方面, 而对水库温室气体的研究还比较少, 主要集中在巴西、美国、加拿大北部等地区的少数水库^[4]。

2007 年 8 月, 对乌江中上游南岸最大的支流——猫跳河上的梯级水库进行了 CH_4 的观测研究, 目的是揭示水库 CH_4 的产生与释放机理, 探讨水坝拦截对于 CH_4 排放的影响。因为整个长江流域均处在相似纬度带, 河流水库化导致的水生生态系统的演化方向可能具有一致性, 尤其是当选择某一小流域的梯级水库进行研究时, 区域内水库的地理环境、气候条件相同, 而拦截蓄水的时间不同, 同时它们在有限区域内形成梯级系列, 上级水库的下泄水是下一级水库的直接来水补给, 通过多级水库的叠加, 更有利于观察水电开发对温室气体产生释放的影响。本研究可为估算水库温室气体排放量、减少水利工程与水电开发过程中水库温室气体的排放提供参考。

1 CH_4 排放研究的材料和方法

1.1 研究区概况和采样点设置

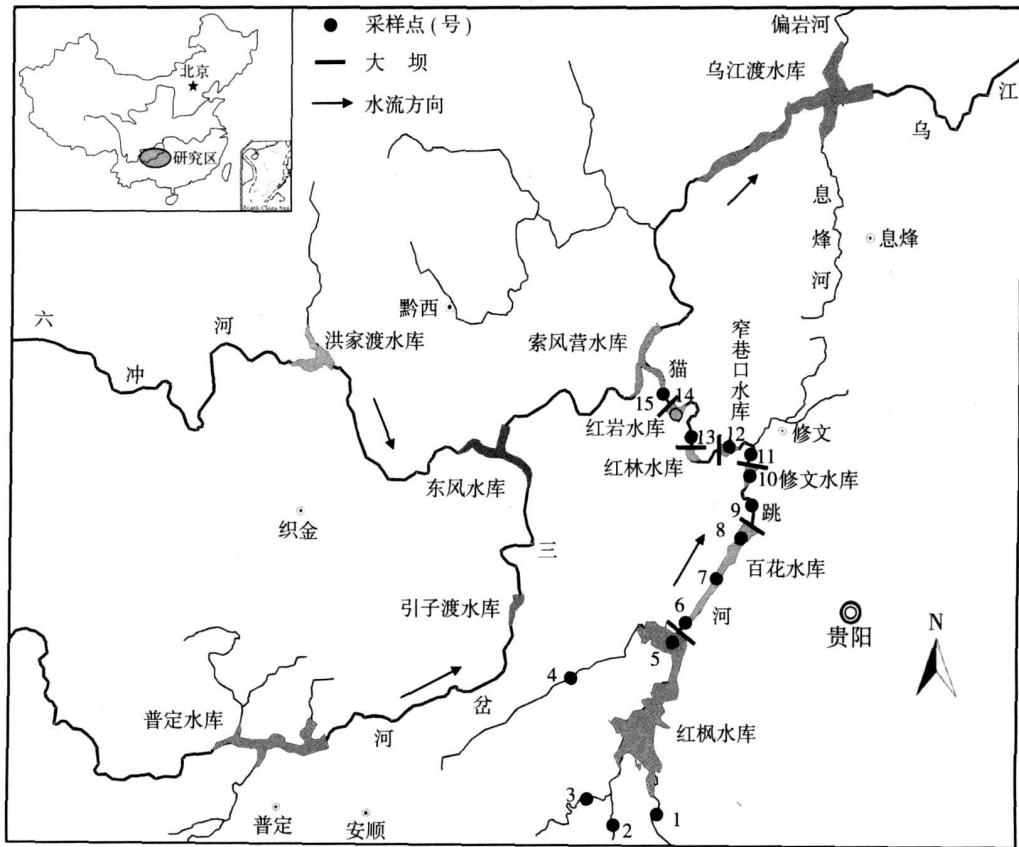
猫跳河全长 181 km, 流域面积 3 195 km², 天然总落差 548.6 m, 是我国第 1 条完成梯级开发的河流, 本研究采样点布置见图 1。

图 1 中, 采样点 1~4 号和 7 号为河流采样点,

收稿日期: 2009-03-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (90610037); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (kzcx2-yw-137)。

作者简介: 杨 妍 (1981—), 女, 贵州省贵阳市人, 在读研究生, 贵州大学环境工程专业。

图 1 猫跳河流域水库夏季 CH_4 排放研究采样点布置示意图

5 8 10 12 14 号为坝前采样点; 6 9 11 13 15 号为下泄水采样点。猫跳河流域 1~6 级水库分别为红枫、百花、修文、窄巷子、红林、红岩, 其中红林水库和窄巷子水库由于引水方式不同渐渐失去了水库的特点。本文主要选取了红枫、百花、修文、红岩水库作为重点研究对象, 这 4 个水库采样点的布设不考虑水库的近岸区, 因水库的近岸区会有水生植物分布, 其根系有机分泌物在厌氧条件下有利于 CH_4 的产生, 而库区面积较宽广, 若以近岸区的 CH_4 浓度代表整个水库 CH_4 的浓度将会高估水库水体对大气 CH_4 的贡献, 且本次主要是为了研究河流经过筑坝拦截后 CH_4 浓度的变化情况, 因此在这 4 个电站坝前中间均设置 1 个采样点, 并采集其下泄水。

1.2 样品的采集

2007 年 8 月对猫跳河流域的红枫、百花、修文、红岩 4 个水库坝前垂直剖面上采集分层水、坝后采集下泄水, 现场利用水质参数仪 YS 测定水样溶解氧 (DO)、温度 (T)、PH 值等参数, 用血清瓶封装水样并加高汞保护, 尽快带回实验室利用高效气相色谱测定样品中 CH_4 的含量。

1.3 样品的分析与计算

水样中 CH_4 浓度测定方法为顶空平衡法, 具体步骤如下: 在实验室往样品瓶中注入不含 N_2O

的高纯 N_2 , 同时排出等体积水; 在恒温水浴振荡器内剧烈振荡 30 min, 使气体在气液两相间达到充分平衡, 然后用气相色谱测定顶空中 CH_4 的浓度, 就可以换算出水样中 CH_4 的浓度。气相色谱的测定条件是配有火焰离子化检测器 (FD) 的 HP6890 气相色谱仪, N_2 做载气, 流速为 20 mL/min, TDX-O₂ 柱分离, 监测器温度为 250℃, 柱温为 90℃。结果得到理想的 CH_4 峰, 标准曲线的相关系数达到 0.999。根据该曲线得到的大气 CH_4 浓度为 (1.7~1.9) $\mu\text{L/L}$, 水样中 CH_4 的浓度换算方法如下:

$$C_{\text{CH}_4} = C \times V_{\text{hs}} / V_{\text{w}}$$

式中, C 是顶空中 CH_4 的浓度, 也就是仪器测出的浓度; V_{hs} 为顶空的体积, 用充气前玻璃瓶和水样的总重减去充 N_2 后的玻璃瓶重和水重代替; V_{w} 为测量时瓶中水样的体积, 用充 N_2 后的瓶重和水重减去瓶净重代替。

2 结果与讨论

2.1 结果

2.1.1 水库水温与 CH_4 含量的关系

水库水温的高低是自然气候综合效应的结果, 水温的高低差异可能引起水库内的水体对流, 从而影响水库内部物质的迁移改变, 而水库水体温度在垂直剖面上的差异, 使水库上下水体在化学条件和

生物活性上具有明显的不同。 CH_4 是有机物在厌氧微生物的作用下分解产生的,而温度对微生物的活性具有重要的影响,因此温度对 CH_4 的浓度有重要影响^[3]。另外,水温还影响气体在水中的溶解度,气体在水中的溶解度与温度成反比,温度高的水体溶解度低,气体会从水面逸出。

红枫水库和百花水库均存在热分层现象即温度不连续层,即 HDL(Primary discontinuity layer)和 SDL(secondary discontinuity layer),出现温度不连续层现象直接影响着化学物质的分配和变化,各化学参数也在这 2 个分层区发生了明显不同的变化规律,对气体在上下层水体之间的交换起重要的作用,这与王仕禄等发现的现象一致^[6];而库容量和来源相对小很多的红岩水库和修文水库则没有发现温度不连续层。红枫水库表层水体 CH_4 含量变化不大,到 10 m 深处突然增大到 $189.96 \mu\text{L/L}$,到 15 m 深处又减少到 $80.38 \mu\text{L/L}$,之后含量又急剧增高,在接近底部时又上升到与 10 m 深处 CH_4 含量差不多;百花水库表层到 10 m 深处 CH_4 含量逐渐降低,之后又急剧升高,到达底部时含量达 $994.884 \mu\text{L/L}$ 。修文水库表层水体的 CH_4 含量随深度逐渐升高,红岩水库的 CH_4 含量随深度逐渐减少,2 个水库变化幅度均不大。红枫水库在夏季(8 月)底层与表层水温相差 4.54°C ,百花水库底层与表层水温相差达到近 16°C ,由图 2 可以看出百花水库底层水体温度明显很低,仅 9.98°C ,而温度低的水体,溶解度高,气体就会溶解到水体里面,故可以说明百花水库的底部 CH_4 含量明显高于红枫水库底部,也高于其他两库。

2.1.2 溶解氧(DO)

水体中溶解氧的含量对水生生物的新陈代谢及元素的循环起重要的作用,水生植物的光合作用增加了水中的溶解氧,呼吸作用要消耗水中的溶解氧,而水体环境的有氧和缺氧状态直接决定了水中有机物的降解。

从图 2 可以看出猫跳河流域 4 级水库中,上下水层溶解氧浓度明显差异,其变化幅度十分显著,上层水体中溶解氧较高,而在一定水深约 8~10 m 溶解氧先后降低到最低值,并一直保持到底部。如果当水体被大量的有机物污染时,由于有机物的分解需要,会导致水中溶解氧降低,进而导致 CH_4 气体的产生。红枫、百花水库底层水体中溶解氧均接近零,百花水库更是达到负值,所以红枫、百花水库底层水中 CH_4 含量很高,远高于其他 2 个水库。红枫水库 CH_4 含量在 $4.906 \sim 190.896 \mu\text{L/L}$ 之间,平均值为 $79.669 \mu\text{L/L}$;百花水库 CH_4 含量在

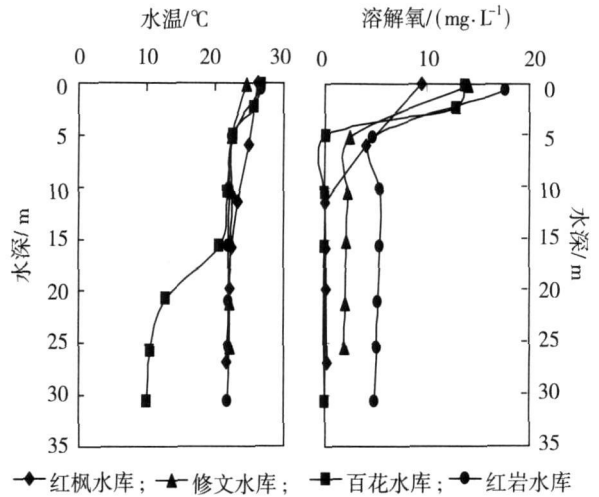


图 2 猫跳河流域 4 个水库垂直水体中水温、溶解氧随水深变化的曲线

$6.033 \sim 994.884 \mu\text{L/L}$ 之间,平均值为 $220.28 \mu\text{L/L}$;修文水库 CH_4 含量在 $1.568 \sim 5.919 \mu\text{L/L}$ 之间,平均值为 $3.11 \mu\text{L/L}$;红岩水库 CH_4 含量在 $1.765 \sim 0.326 \mu\text{L/L}$ 之间,平均值为 $0.768 \mu\text{L/L}$ 。最后一级水库红岩水库的 CH_4 含量比前 3 个水库明显减少。

另外,水库中 pH 值的变化影响到水体中各类物质的迁移和转化过程。从图 3 中可以看出,总体上 4 个水库水体均呈弱碱性,每个水库 pH 最大值均在 9 左右,4 个水库的 pH 变化趋势基本相同,除红枫水库在 6 m 深处突然升高外,其余的 3 个水库都在 5 m 深处开始增大,平均 pH 均在 8 以下,且差别不大。有研究发现,水库中的 pH 主要受 CO_2 含量的影响,而猫跳河流域的 4 个水库地处喀斯特地区,是世界上酸沉降比较严重的地区之一,但是水体并没有出现酸化现象。

2.2 讨论

2.2.1 水库中 CH_4 产生和释放的影响因素

水库中 CH_4 的产生与排放^[7,23,78]可以用图 4 来表示。水体温度与含氧状况会影响水体中 CH_4 的浓度,水体的营养状况也可能影响到沉积物中有机物的含量,从而影响 CH_4 的产生及 CH_4 的浓度。红枫水库与百花水库均属于富营养化水库,沉积物中产生的 CH_4 不会完全进入大气中,只有一部分通过扩散上升到水面进入大气,而另外的大部分却被生活在有氧-缺氧界面的 CH_4 氧化菌消耗掉。为了满足发电的需要,许多水库通常尽可能的修建高坝以获得最大的发电势能^[21,25],因而大多水库水深较大,如百花水库最大水深为 45 m。由于在深水环境下 CH_4 气体排放的主要方式是扩散,在浅水环境有研究显示 CH_4 的排放量比水面扩散释放

量大, 因此可以说气泡是 CH_4 排放到大气的一个重要方式。在大坝下游的河流中, 由于一些通过大坝的水体来不及与细菌反应, 下泻水中仍然含有大量的 CH_4 气体, 并且会从水中逃逸出来, 释放到空气中^{[7] 2379}。

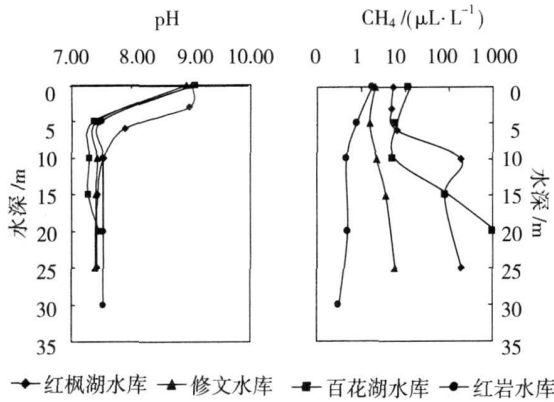


图3 猫跳河流域4个水库垂直水体中 pH、 CH_4 浓度随水深度的变化曲线

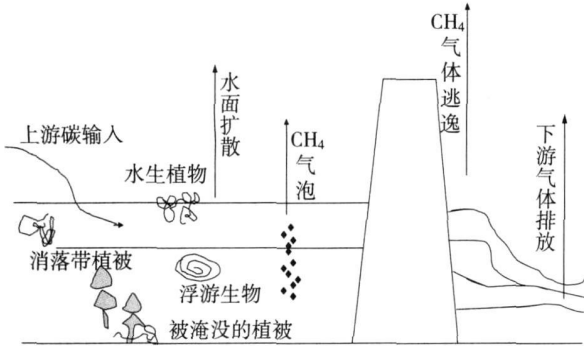


图4 水库温室气体产生与排放途径

猫跳河流域 4 个水库的 CH_4 浓度与温度和溶解氧的关系见图 5。由图 5 可知红枫水库和百花水库底部溶解氧含量都非常低, 而 CH_4 含量又比较高, 说明在水库底部厌氧环境下沉积物降解产生的 CH_4 未被氧化, 而是在水库底得到了一定的积累; 另外温度较低的水体中 CH_4 含量比较高, 如百花水库与红枫水库表现就较为明显。

2.2.2 猫跳河梯级开发对于 CH_4 排放的影响

由于猫跳河 4 级水库均采用底层泄水方式, 下泄水体中除红岩水库外其余 3 个水库下泄水中 CH_4 含量均高于坝前表层水, 说明一些通过大坝的水体中的 CH_4 来不及与细菌反应, 所以下泻水中仍然含有大量的 CH_4 气体; 并且上一个水库的下泄水中 CH_4 含量明显高于下一个水库入库水体中的 CH_4 含量, 说明水体与大气接触面积增多, 大量的 CH_4 气体从水中逃逸出来, 使 CH_4 大量排入大气, 到下一个水库 CH_4 又开始积累增多, 说明水库有可能改变了原来河流的 CH_4 含量的分配。 CH_4 与表层水、下泄水的关系见图 6。图 6 中单号点表示

水库表层水, 双号点表示下泄水, 顺序为红枫、百花、修文、红岩水库。

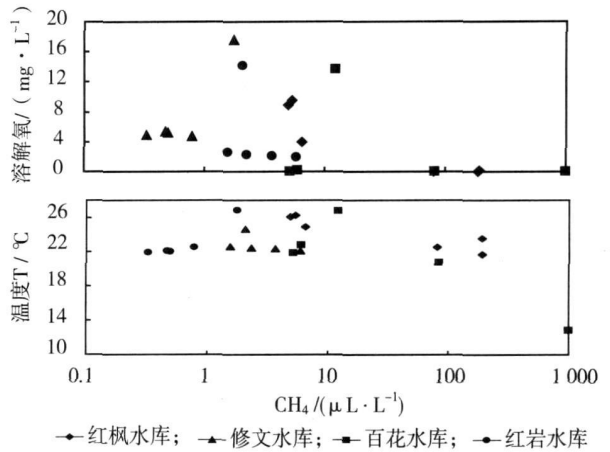


图5 猫跳河流域4个水库 CH_4 浓度与温度和溶解氧的关系

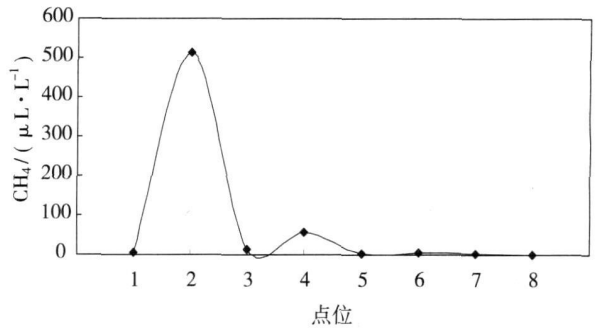


图6 猫跳河梯级水库 CH_4 与表层水、下泄水的关系

已有研究表明流动的河流经过水坝拦截后产生了更多的温室气体^[8]。本研究中, 入库河水的 CH_4 浓度一般较上一水库下泄水的 CH_4 含量有很大降低, 但进入库区后 CH_4 含量又开始升高, 这说明河流拦截蓄水形成水库后破坏了河流原有的连续性。一方面水利工程的修建往往会淹没原生的陆地植被, 导致温室气体的释放, 成为“碳源”; 另一方面筑坝后生产力、生物量的提高意味着无机碳的固定、同化, 在一定程度上又吸收了温室气体而成为“碳汇”^[9]。本研究还表明, 为了有足够的动力来运行水轮机, 大部分水电站进水口的设计都非常接近水库底部, 即底层泄水(目前很少有研究把水轮机排放确定为温室气体排放到大气中的潜在和额外来源^[10])。当富含气体的水通过水轮机时, 对于 CH_4 来说氧化细菌没有时间氧化, 导致 CH_4 气体在坝后以下泄水方式进入河流, 并在较短的时间内扩散到大气中, 由此造成下泄水温室气体的大量富集, 所以水库以底层泄水的方式排放到大坝下游对于温室气体释放来说影响是不容忽视的。另外, 水库修建后就会随之修建溢洪道, 而水通过溢洪道时的逃逸量与水的流出方式有关, 也就是说如果水库

总是保持满水位的话，则溢洪道的 CH₄ 排放量是比较巨大的，也是不容忽视的^[11]。

3 结论

在猫跳河流域梯级 4 个水库中，红枫水库和百花水库在水深 6 m 和 15 m 左右存在 2 个不连续的温度层，直接影响着水库中水温、溶解氧和 CH₄ 的分布，进而对 CH₄ 的产生和分布发生了重要的影响，且 HDL 层以上水体中 CH₄ 浓度比较低，而在底部主要为厌氧环境，产生 CH₄ 且 CH₄ 含量较高。

在梯级水库的流域内，下泄水中的 CH₄ 在排放时会迅速扩散到大气中，而在下一水库又重新富集，说明水库有可能改变了原来河流的 CH₄ 含量的分配。对于梯级开发水库来说，选择泄水层位高程对于温室气体的排放至关重要，这在水电开发的环境保护中应当引起重视。

参考文献:

[1] 宋文质, 王少彬, 苏维翰, 等. 我国农田土壤的主要温室气体 CO₂, CH₄ 和 N₂O 排放研究 [J]. 环境科学, 1996 17 (1): 85—88

[2] 王雨春, 朱俊, 马梅, 尹澄清, 刘丛强. 西南峡谷型水库的季节性分层与水质的突发性恶化 [J]. 水库湖泊科学, 2005 17(1): 54—60

[3] Phil P M. Feamside Greenhouse Gas Emissions from Hydroelectric Dams: Reply to Rosa et al. Climatic Change 2006 75: 103—109

[4] Santos M A D, Bichard M, Rosa L P et al. Gross Green-

house Emission from Brazilian Hydro Reservoirs [J]. In Trambly A, Varfalvy L, Roehm C et al (eds). Greenhouse Gas Emissions Fluxes and Processes: Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments [C]. New York: Springer Berlin Heidelberg 2005: 267—291.

[5] Stadmark J, Leonardson L. Emissions of greenhouse gases from ponds constructed for nitrogen removal [J]. Ecological Engineering 2005 25: 542—551.

[6] 王仕禄, 刘丛强等. 贵州百花水库分层晚期有机质降解过程与溶解 N₂O 循环 [J]. 第四纪研究, 2004 24(5): 569—577.

[7] 赵小杰, 赵同谦, 郑华, 等. 水库温室气体排放及其影响因素 [J]. 环境科学, 2008 29(8): 2377—2384

[8] Kelly C A, Rudd J W M, Bodaly R A et al. Increases in fluxes of greenhouse gases and methylmercury following flooding of an experimental reservoir [J]. Environmental Science Technology 1997 31(5): 1334—1344

[9] 晏维金, 王蓓, 李新艳, 王芳. 河流溶存 N₂O 的环境化学过程及其在水—气界面交换过程的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2008 27(1).

[10] 于贵瑞等编著. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积 [M]. 北京气象出版社, 2003

[11] Sammis N, Duchemin E, Canuel R et al. Greenhouse gas emissions from reservoirs of the western United States [J]. Global Biogeochemical Cycles 2004 18: 1—11.

[12] Feamside P M. Greenhouse Gas Emissions From a Hydroelectric Reservoir (Brazil's Tucuruí Dam) and the Energy Policy Implications [J]. Water Air and Soil Pollution 2002 133(1—4).

Study on Methane Emission of Cascade Reservoirs on Maotiaohe River Basin in summer

YANG Yan, LIU Cong-qiang, WU Pan, LIU Xiao-long

(1. Resource & Environmental Engineering Institute of Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550003, China; 2. National Key Laboratory for Environmental Geochemistry of Geochemical Institute, Academy of Sciences of China, Guiyang, Guizhou 550002, China)

Abstract: According to analyzing the stratified water sample acquired from the front of dam in each reservoir of Maotiaohe river basin, the result indicated that both of the water temperature and dissolved oxygen would have influence. Occurring and distribution of methane. There were 2 temperature discontinuity layers both in Hongfeng and Baihua reservoir, but there would occur the mass methane under the continuity layer that put the anaerobic environment first. A little methane would occur on whole section both in Xiwen and Hongyan reservoir. The reservoirs were similar in methane occurring to the lakes in the world. Discharging to the downstream by bottom water release would greatly influence the greenhouse gas emission. The reservoirs probably changed the distribution of methane content of the river. It showed that building cascade reservoirs would greatly influence the methane emission. This would be pay attention to in environmental protection of hydropower development.

Key words: environmental engineering; methane; dissolved oxygen; water release method; cascade reservoirs