

文章编号:1004-8227(2011)02-0197-06

水库温室效应研究进展与主要影响因素分析

冉景江^{1,2}, 林初学¹, 郭劲松², 陈永柏¹, 蒋 滔²

(1. 中国长江三峡集团公司, 湖北 宜昌 443002; 2. 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

摘要:温室气体排放导致的全球变暖成为世界各国关注的焦点。目前,关于淡水水库的温室效应在全球气候变化中的作用也成为了科学家争论的问题。已有的研究表明,世界上很多为水力发电或其他目的建造的水库,因水库蓄水所导致土壤和植被的淹没而额外增加碳基温室气体二氧化碳(CO₂)和甲烷(CH₄)的释放。通过对国内外关于淡水水库温室气体研究方面文献的归纳,综述分析了水库温室效应观测研究案例、水库温室气体的产生机制、排放过程及其主要影响因素等方面的研究进展。为进一步从事水库温室气体研究、把握水库温室气体排放提供参考。

关键词:淡水水库;温室气体;气候变化;影响因素

文献标识码:A

近几十年来,由于矿物燃料燃烧、森林砍伐、人工湿地的增加、畜牧业等人为活动影响的加剧,温室气体排放显著增加,而这些增加的温室气体中只有一部分被自然碳汇吸收,从而导致大气中温室气体浓度增高,并很可能会加剧温室效应。在这些增温效应中因人类能源消耗大幅度增加而产生的温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)排放所导致的全球变暖逐渐成为一个主要的环境问题^[1~3]。随着水电开发和水利工程建设进程的加快,水库温室气体的排放问题也越来越受到关注,特别是最近 20 a 来关于人工水库的温室效应的争论时有发生^[4~8]。

科学家在北美及欧洲的北方寒带水库开展的主要研究得出了一些结论,如水力发电的平均总温室气体排放量是相同火力发电机组的 1/2~1/4,这里需注意的是水力发电的温室气体总排放量,严格来说衡量水力发电的温室效应作用应该考虑的是其净排放量,但是限于目前的研究技术与方法应用,尚不能对一个水力发电水库的净温室气体排放量作出较为准确的估算,相对于总排放量来说,净排放量应该小得很多。当然,已有的研究也表明,在一些特定情况下,热带地区的水库温室气体排放量可能会超过相同火力发电装机的排放量(如位于法属圭亚那的 Petit Saut 水库、和一些位于巴西的水库)。Fearnside^[9]的研究推测,在生命期的前 10 a,一座典型的

热带水库所释放的碳相当于一座能力与之等量的火电厂的 4 倍。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 的排放量可以占到全球排放量的 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^[10]。特别是在热带地区,越来越多的研究表明,大量被淹没的植被在高温下被腐蚀分解产生温室气体,水库成为了 CO₂ 和 CH₄ 温室气体的一个重要来源^[10~12]。但在此必须指出,上述研究结论多是基于个案研究再外延推广的估算,很少是建立在对水库或天然水体系统水-气界面通量的真实原位测量工作之上的。由于对水库成库前的温室气体排放情况的研究还不够充分,目前关于水库温室气体排放争论的焦点是总通量(测量所得)和净通量(总通量减去蓄水前自然状态的排放量)的差别,以及这种个案研究结论外推的科学合理性。

1 水库温室效应的国内外研究进展

1993~2003 年,加拿大魁北克水电管理局组织科学家在加拿大寒带地区的 205 个水生生态系统开展了气-水界面 CO₂、CH₄ 和一氧化二氮(N₂O)总通量测量工作,通过所开展的长期水库温室气体原位监测及不同类型水生生态系统的对比研究,对水库温室气体产生机制、影响因素、监测方法、实验手段等方

收稿日期:2010-03-16;修回日期:2010-05-05

基金项目:科技部项目推动中国绿色发展的重大战略及技术研究(2010CB955900);三峡水库温室气体监测与减排效益评估;中国长江三峡集团公司生态与环境保护科研项目:三峡水库温室气体效应监测与评估初步研究(0707435)

作者简介:冉景江(1970~),男,重庆人,博士,主要从事水环境、水生态保护与研究。E-mail:ran_jingjiang@ctgpc.com.cn

面进行了较全面的深入分析。该研究为后来从事水库温室气体研究起到了理论与方法上的指导作用。从 2006 年开始,联合国教科文组织领导下的国际水电协会(IHA)在全世界范围内组织了 70 余名科学家专门开展了针对淡水水库温室气体的研究项目,该项目尝试从实验方法、数据库建设、模型计算与测量参数选择上对全球水库温室气体的研究提供一种标准性的指导,其研究基本上代表了当前世界上对水库温室气体研究的前沿。随着 IHA 淡水水库温室气体项目的实施与深入,也逐步带动了世界上更多的国家参与到水库温室气体的研究工作中来。

1.1 国外水库温室气体(CO_2 、 CH_4)排放研究

(1)北美温带地区水库淹没区 CO_2 、 CH_4 “汇”/“源”变化的研究;(2)南美热带雨林区关于水库温室气体释放研究,如:巴西、巴拿马和法属圭亚那等国开展的相关研究;(3)北美其它地区以及斯堪的纳维亚地区的研究;(4)采用生命周期理论(Life-Cycles)和全能源链分析(Full Energy Chain, FENCH)水电的气候变化贡献;(5)IHA 关于水库温室气体排放研究项目(2006~2011)。

1.2 国内水库温室效应研究工作

(1)中国科学院地化所(贵阳)刘丛强^[13]研究员在乌江流域梯级水库开展的碳排放研究;(2)中国水利水电科学研究院王雨春研究员等在长江三峡库区干、支流区域进行的水域碳通量的巡航测量研究;(3)重庆大学郭劲松教授、袁兴中教授^[14],三峡大学刘德富教授等在小江、彭溪河、香溪河等三峡库区支流上进行的水体温室气体原位监测及消落带区域的温室气体排放研究工作;(4)中国科学院遥感与应用研究所吴炳方研究员、长江科学院谭德宝研究员等在三峡库区及清江流域梯级水库里利用空间遥感技术与实地的原位监测相结合的水库温室气体研究工作。

总体来说,目前针对水库温室效应的研究在科学界并没有得出完全令人信服的一致性的研究结论,从研究方法、测量手段到计算模型等均未有一个形成共识的标准。因此,目前对水库温室效应的研究尚缺乏一个公认的客观的、权威的论断,有鉴于此相关研究仍需继续深入。

2 水库中温室气体产生的机制与排放过程分析

2.1 水库水体碳来源

要研究水库温室的产生机制就不得不考虑水库

中碳元素的变化、迁移情况,在水库中碳的转移变化无非存在物理迁移、化学、生物转化等这样的几个过程。决定水库中碳迁移转化的化学过程、地貌过程和生物过程同自然水域生态系统中的类似。但是,被水库淹没的陆地生态系统(土壤和植被),可能引起水库中上述过程的临时改变。水库中碳的来源有多种途径:(1)水库蓄水后淹没大量储存在植被和土壤中的碳,包括枯枝落叶和逐渐落入水中的树叶^[17~20];(2)从上游汇入到水库中的有机物(含来自于自然农田生态系统或是城市中的污水),雨季尤为重要;(3)水库中生长和死亡的浮游和水生生物;(4)生长于消落带的植被;(5)流域内受侵蚀土壤所带来的碳。这些被水库淹没的大量土地和植被为温室气体的产生提供大量原料。一方面细菌分解沉积物中的有机物,使溶解的有机碳及其颗粒释放出温室气体^[15]。另一方面水库中生长的水生、浮游生物的呼吸作用也释放温室气体^[16]。在北方寒带水库,环境跟进研究项目清楚地显示这些改变不会超过 10 a。但是在热带水库,根据积水条件的情况,这些变化会持续更长的时间^[15]。

2.2 水库中温室气体产生机制

水库淹没陆地生态系统中的碳并释放进入水体,淹没土壤的化学性质被改变,导致不稳定碳和营养物质释放到水中,并在一定时间内改变着水体里的生物化学参数,进而将影响新环境中温室气体的动力学过程,这主要体现在将加强水体里细菌、浮游生物和鱼类群落的活动性,从而刺激水库生态系统的全面生产,这在热带地区尤为明显^[17]。有氧环境下,好氧细菌分解库底大量被淹没的有机物和溶解在水中的溶解有机碳、颗粒有机碳,主要产生 CO_2 ;缺氧环境下,产 CH_4 菌的活动占优势,主要产生 CH_4 及少量 CO_2 ,沉积物中产生的 CH_4 不全进入到气泡中,其中一部分通过扩散上升到水面。上升过程中,水中氧浓度呈上升趋势,悬浮的细菌通过化合 CH_4 和氧获得能量^[18~22]。因此,产生的 CH_4 大部分被生活在有氧、缺氧临界面的甲烷氧化菌消耗掉, CO_2 则很少被微生物吸收,直接转移到水中最后释放到大气中或是被生物重新利用^[23]。

有关水库的生态环境可以从文献中查到比较详尽的研究记载。但是,这些研究中大部分都是基于短期的观测数据,因而无法对水库的作用机理进行深入了解。为了对水库温室气体排放的动力学有更好了解,最好能采用长期观测的方式,因为在水库建成后的最初几年,碳在该环境中的循环是动态的。

2.3 水库温室气体排放途径

通常对水库温室气体排放的评价大多是基于总排放而言。总排放是指直接从水库水面测得的气体通量,净排放则扣除了建造水库之前自然生态系统已经存在的排放^[24]。因此,针对水库的温室气体排放,仅考虑成库后水库温室气体产生是不全面的,还应考虑建坝前天然水体的排放,同时也应考虑水库其它的排放途径。当然,水库在全球温室效应中的作用主要应该考虑到的是水库成库前后的净排放。

水体中气体进入大气的途径有3种:液相扩散、气泡和植物传输^[25,26]。气泡传输是浅水无植物区域最主要的传输方式。而植物传输是有植物生长的区域甲烷传输的主要形式。对于水库而言,由于修坝,导致的水体深度增加,已有的研究表明在平均水深超过30 m的水域,由于静水压力的作用,气泡排放情形基本不出现^[27]。但是当水通过水轮机和溢洪道时由于压力和温度场的变化会导致大量的气体从水中逃逸出来。具体来说,水库温室气体排放的主要区域包括:水库江面自然排放、水库消落带、库尾沉积物汇集区域、库湾支流易出现富营养化区域水体、水轮机和溢洪道、大坝下游河流。

3 水库温室气体排放影响因素分析

温室气体排放通量是由气体产生过程和传输过程共同决定的,对于 CH_4 气体来说,氧化过程也是一个重要的决定因素。温室气体产生的通量过程受到多种因素的影响:(1)水库淹没区域的土壤类型;(2)水库库龄的影响,不同水库库龄决定了水库淹没区域及沉积物的物化特征;(3)水库水深度的影响,水库的水深度决定了水体内部特别是通过底部沉积物的物理化学作用产生的 CH_4 与 CO_2 排放到大气的过程;(4)所处纬度带以及气候条件的影响;(5)水库的物化与生物因素的作用。

3.1 水库淹没区域的土壤类型

由于水库成库必将导致一些陆地土壤、植物被淹没,因此对土壤质地及植物种类的淹没状况的研究在水库温室效应研究中变得尤为必要。Normand Thérien 和 Ken Morrison 从 James 海湾的陆地采集代表性的植被和土壤样本,将它们浸没于玻璃器皿中,设置试验观测排放的 CO_2 和 CH_4 排放量,整个试验历时约1 a。研究表明,对于一定的土壤试样在水体中,温度是产生 CO_2 的主要控制因素,溶解氧浓度是另一个关键因素。在他们的研究设置的 pH

范围内,pH对 CO_2 的产生没有影响(通常认为在pH值 ≥ 8 的情况下对温室气体的产生有明显的影 响)。有氧和较高温度条件下 CO_2 的产生量十分显著,但缺氧条件下的产生量更高^[28]。

3.2 库龄的影响

水库蓄水后,水中不稳定有机物的分解造成大量温室气体排放大气。微生物分解大量被淹没有机物中的不稳定碳是造成新建水库 CO_2 和 CH_4 高排放的主要原因。通常温室气体排放通量在水库蓄水3~6 a后达到最大,之后逐渐降低,到第10 a,水库的 CO_2 排放通量与自然湖泊极度相似(如图1、图2)^[29]。

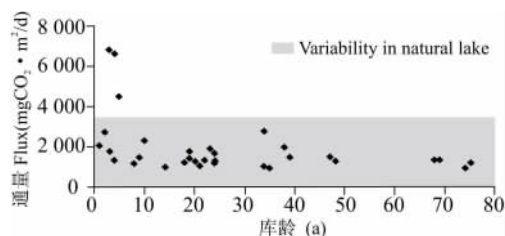


图1 魁北克北部地区水库水-气界面 CO_2 通量随库龄的变化过程^[29]

Fig. 1 Variation of CO_2 Flux at Water-atmosphere Interface with the Age of Reservoir over the North of Quebec Region, China

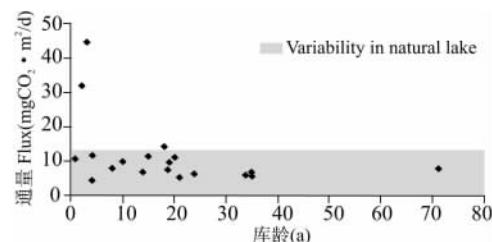


图2 魁北克北部地区水库水-气界面 CH_4 通量随库龄的变化过程^[29]

Fig. 2 Variation of CH_4 Flux at Water-atmosphere Interface with the Age of Reservoir over the North of Quebec Region, China

3.3 水深的影响

水库水体里的细菌在缺氧的水中分解有机物产生 CH_4 气体,热带水库的底层严重消耗氧气,一些 CH_4 气泡在上升到水面过程中被氧化为 CO_2 。而在水库浅水区 CH_4 气泡在被氧化之前能够到达水面,造成大量 CH_4 排放。同样由于较大的水深所产生的强大静水压力的作用,使得溶解在水中的 CH_4 、 CO_2 不容易被释放进入大气。Gosse等研究发现在法属圭亚拉的Petit Saut水库中,不同水深区域的 CO_2 、 CH_4 、溶解氧的含量存在着明显的变化^[30],如图3所示。

3.4 气候条件的影响

位于不同气候带的水库温室气体排放存在着明

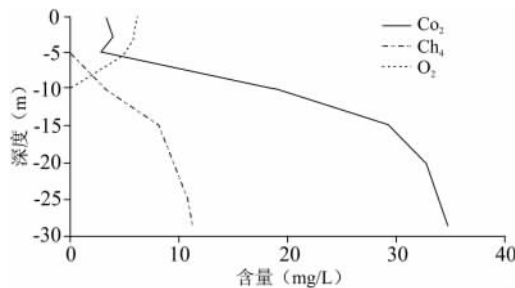


图 3 2002 年 1 月 Petit Saut 水库溶解氧、甲烷和二氧化碳浓度随深度变化的剖面图^[30]

Fig. 3 Vertical Variation of O_2 , CH_4 and CO_2 Concentration with Water Depth over the Petit Saut Reservoir in Jan. 2002

显差异,其中通过气候带直接影响水库温室气体排放通量的两个重要因素是水温 and 风速。水温影响气体在水中的溶解度。在大气压一定的情况下,气体在水中的溶解度与温度成反比,温度升高,气体溶解度降低,气体从水面逸出;温度降低,气体溶解度增加,气体可从大气进入水体。这也是热带地区温室气体排放高的一个原因。此外,水温还影响气泡的形成。Lousi 等^[31]认为水温较高的沉积物中积累的 CH_4 量大于扩散到水中的量,导致 CH_4 过饱和而形成气泡。风的影响主要体现在水-气界面出的扩散、交换速率的影响方面。

3.5 物化与生物因素的影响

水库的物化与生物因素是影响水库温室气体产生的最主要因素,在理化因素里,水库所处区域的经度、纬度、水体的透明度(真光层深度)、pH 值、碱度、TOC/DOC 含量、叶绿素含量、浮游生物量、水体停留时间/电导率等都是影响水库温室气体排放的重要因素。生物因素的影响主要体现在两个方面:(1)在自养状态下,水体中植物的光合初级生产大于呼吸消耗,碳被固定,导致水体中 CO_2 分压降低,从而使得水库吸收大气中的 CO_2 ;(2)在异养状态下,呼吸作用较强, CO_2 的分压增加,大于大气中的 CO_2 分压从而释放 CO_2 大气中。同样,水体中的水生生物(含细菌类)量的变化也会导致 CH_4 产生情况的改变。图 4 反映了 CO_2 排放通量与总浮游生物呼吸量(TPR)间的关系^[32]。

3.6 其他因素的影响

水库的修建总会受到水库管理者的调控影响,如梯级调度、防洪、发电、航运、灌溉等等人为控制因素的作用将在一定程度上改变水库的物化、生物因素,从而作用到水库的温室气体排放。如何有效地通过人为控制作用减少水库的温室气体排放应成为今后水库温室气体研究的一个重要方向,特别是在

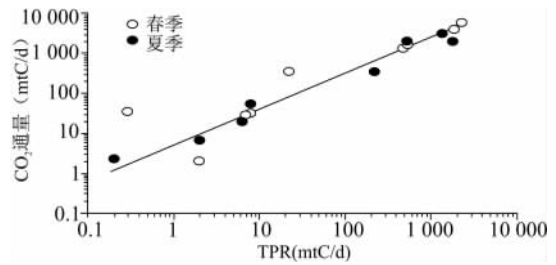


图 4 Robert-Bourrasa 内 4 个水库和 4 个湖泊春季(○)和夏季(●) CO_2 排放通量与总浮游生物

呼吸量(TPR)间的关系(据文献[32]修改)
Fig. 4 Relationship Between CO_2 Emission Flux and TPR in Spring(○)and Summer(●)at Four Reservoirs and Four Lakes over the Robert-Bourrasa Region(modified according to reference[32])

一些生态脆弱区。

修建水库过程中,不同的国家采取的环境策略也不一致,在巴西等南美热带国家,修建水库是不会在建坝前做清库工作,因此蓄水后导致淹没区的原本丰茂的植被被淹没,而且很多是平原型水库,其水库水深相对较浅,为被淹没的植被转化为 CH_4 、 CO_2 提供了很好的物化条件。相对来说,我国在新修建水库时候均采取了较为彻底的清库行为,减少了一定的产生温室气体的有机碳来源。

水库温室气体研究作为一种实证性研究,对水库温室气体的实际测量将决定水库温室气体研究是否正确反映真实现状的一个重要指标,而不同测量方法之间也存在较大的差异,因此,测量方法与技术的选择既是水库温室气体研究的一个重要影响因素,又是需要重点克服的一个研究内容。

4 水库温室气体效应研究存在的问题与展望

国外在水库温室气体研究方面的工作已经开展了 20 多 a,国内从事这项研究是在最近几年内,已有的文献资料显示,针对这样的研究尚存在如下一些问题:

(1)针对水库温室气体的研究缺乏一个通行的实际测量方法与数据计算标准,实验模型多停留在经验阶段。已有研究结论多是基于不同区域的个案水库进行的独立监测、评价,不同取样水库排放温室气体的通量测量方法,将使结果具有明显的差异,从而限制了统计比较分析,并只能用来进行趋势分析。

(2)到目前为止获得的温室气体通量数据平均值具有一定的不确定性,很多是基于推测的结果,数

据缺乏代表性与说服力。另外,对于不同水库之间存在的共同性与差异性缺乏有效的了解分析,而不同区域、不同水库的温室气体排放情况之间尚缺乏一个共识的可比标准。

(3)水库温室气体排放的测量方法尚需改进,不同的测量方法之间得出的结果差异较大。且已有的测量方法受人工操作及环境因素的影响很大,可以考虑实现在线自动测量。其次,现有的现场测量多集中在针对水库某几个点上的测量,因此这样的现场试验测量和评价只能反映整个区域的部分情况,目前尚缺乏水库大面积监测数据来对整个研究区域进行评估。

对水库温室气体研究的未来展望:

(1)尽快地在全球范围内确定一个针对水库温室气体研究的统一的监测方法、测量参数标准和实验模拟模型,这方面 IHA 于 2006 年开始实施的全球水库温室气体研究项目正在从事这样的研究,按其研究计划,有望在 2011 年中达到这样的研究目标。

(2)今后研究应当包括对水库整个生命周期的评价,同时要考虑大坝建设前的排放量,尽可能地搞清楚建坝前后水库的碳排放,从而确定水库温室气体的净排放。应多进行碳循环那样的基础研究,确定整个流域面积的碳源(天然的和人为的)以及流域/水库系统的碳循环。这才是我们研究水库温室效应的最终目的。

另外,实验监测设计应该考虑到水库的长生命周期因素,能够在水库建库开始连续 10 a 以上的监测,才可能得出相对正确合理的水库温室气体排放变化过程。而水库的生命周期一般都长达 50~100 a,在这样的时间尺度下对水库进行全流域连续监测,应该成为今后水库温室气体研究的重要考虑。

参考文献:

- [1] CROWLEY T J. Causes of climate change over the past 1000 years[J]. *Science*, 2000, 289: 270~277.
- [2] TETT S F B, STOTT P A, ALLEN M R, et al. Causes of twentieth century temperature change near the earth's surface [J]. *Nature*, 1999, 399: 569~572.
- [3] DELMAS R, RICHARD S, GUERIN F, et al. Long term greenhouse gas emissions from the hydroelectric reservoir of Petit Saut (French Guiana) and potential impacts [C]// TREMBLAY A, VARFALVY L, ROEHM C, et al (eds). *Greenhouse Gas Emissions Fluxes and Processes. Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments*. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 293~312.
- [4] ROSA L P, SCHAEFFER R. Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs[J]. *AMBIO*, 1994, 23(2): 164~165.
- [5] RUDD J W M, HARRIS R, KELLY C A, et al. Are hydroelectric reservoirs significant sources of greenhouse gases[J]. *AMBIO*, 1993, 22(4): 246~248.
- [6] FEARNSIDE P M. Hydroelectric dams in Brazilian Amazonian: response to Rosa, Schaeffer and dos Santos [J]. *Environmental Conservation*, 1996, 23(2): 105~108.
- [7] FEARNSIDE P M. Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams Reply to Rosa et al [J]. *Climatic Change*, 2006, 75(122): 103~109.
- [8] ROSA L P, SANTOS M A D, MATVIENKO B, et al. Scientific errors in the Fearnside comments on greenhouse gas emissions (GHG) from hydroelectric dams and response to his political claiming [J]. *Climatic Change*, 2006, 75(122): 91~102.
- [9] ABRIL G, GUERIN F, RICHARD S, et al. Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 102 year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana) [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19: 1216.
- [10] FEARNSIDE P M. Hydroelectric Dams in the Brazilian Amazon as Sources of 'Greenhouse' Gases [J]. *Environmental Conservation*, 1995, 22(1): 7~19.
- [11] GALY L C, DELMAS R, JAMBERT C, et al. Gaseous emissions and oxygen consumption in hydroelectric dams: a case study in French Guyana [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 11(4): 471~483.
- [12] DUCHEMIN E, LUCOTTE M, CAMUEL R, et al. Production of the greenhouse gases CH₄ and CO₂ by hydroelectric reservoirs in the boreal region [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(4): 529~540.
- [13] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [14] 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.
- [15] FEARNSIDE P M. Do Hydroelectric Dams Mitigate Global Warming? The Case of Brazil's Curua-Una Dam [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2005, 10(4): 675~691.
- [16] ROSA L P, SANTOS M A. Certainty and Uncertainty in the Science of Greenhouse Gas Emissions from hydroelectric dams [R]. South Africa: World Commission on Dams, 2000: 112102.
- [17] DELMAS R, GALY L 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.
- [18] ROSA L P, SANTOS M A D, MATVIENKO B, et al. Biogenic gas production from major Amazon reservoirs [J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17: 1443~1450.

- [19] KELLY C A, RUDD J W M, BODALY R A, et al. Increases in fluxes of greenhouse gases and methyl mercury following flooding of an experimental reservoir[J]. *Environmental Science and Technology*, 1997, 31(5): 1334~1344.
- [20] GALY L C, DELMAS R, KOUADIO G, et al. Long-term greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical forest regions [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, 13(2): 503~517.
- [21] McCULL P. Loosening the Hudro industry's Grip on Reservoir Greenhouse Gas Emissions Research[R]. Berkeley: International Rivers Network, 2006.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] DUCHEMIN E, LUCOTTE M, CANUEL R, et al. Comparison of greenhouse gas emissions from an old tropical reservoir with those from other reservoirs worldwide[J]. *Verh Internati Verein Limnol*, 2000, 27: 1391~1395.
- [25] SANTOS M A, ROSA L P, MATVIENKO B, et al. Gross greenhouse gas fluxes from hydro2power reservoir compared to thermo2power plants[J]. *Energy Policy*, 2005, 34(1): 481~488.
- [26] FEARNside P M. Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: Controversies provide a springboard for rethinking a supposedly 'clean' energy source [J]. *Climatic Change*, 2004, 66: 122~128.
- [27] CORY J D, MATTHEW S, VENKITESWARAN J J, et al. The Use of Carbon Mass Budgets and Stable Carbon Isotopes to Examine Processes Affecting CO₂ and CH₄ Production in the Experimental FLUDEX Reservoirs [C]. *Greenhouse gas emissions-fluxes and processes/Environmental science*, 2005.
- [28] THERIEN N, MORRISON K. Production of GHG from the decomposition of in vitro inundated phytomass and soil [C]. *Greenhouse gas emissions-fluxes and processes/Environmental science*, 2005.
- [29] TREMBLAY A, THERRIEN J. GHG emissions from Boreal reservoirs and natural aquatic ecosystems [C]. *Greenhouse gas emissions-fluxes and processes/Environmental science*, 2005.
- [30] GOSSE P, ABRIL G, GUERIN F, et al. Evolution and relationships of greenhouse gases and dissolved oxygen during 1994-2003 in a river downstream of a tropical reservoir [J]. *International Association of Theoretical and Applied Limnology*, 2005, 29 (No. Pt2).
- [31] LOUIS V L S, KELLY C A, DUCHEMIN E, et al. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: A global estimate [J]. *Bioscience*, 2000, 50(9): 766~775.
- [32] HELIE J F, CLAUDE H M. Diffusive CO₂ Flux at the air-water interface of the Robert-Bourassa hydroelectric reservoir in Northern Québec: Isotopic approach (13C) [C]. *Greenhouse gas emissions-fluxes and processes/Environmental science*, 2005.

ADVANCES IN RESERVOIR GREENHOUSE EFFECTS AND PRINCIPAL INFLUENCE FACTORS ANALYSIS

RAN Jing-jiang^{1,2}, LIN Chu-xue¹, GUO Jin-song², CHEN Yong-bo¹, JIANG Tao²

(1. China Three Gorges Corporation, Yichang 443002, China;

2. Institute of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Global climate warming resulted from greenhouse gas emission already has attracted more and more attentions from governments and the public all over the world. At present, the status of greenhouse effect from large freshwater reservoirs in global climate warming became a debated issue in the academic community around the world gradually. The previous studies showed that some reservoirs for hydro-electronic generation or other purposes in Canada, U. S. A, Brazil and other counties would release additional greenhouse gas (CO₂ and CH₄) into atmosphere due to the inundation of soil and vegetation in reservoir area as a result of the construction and impoundment of reservoir. In this paper, an overview of greenhouse effect of reservoir on the global warming was addressed in order to understand the advances in greenhouse gas researches at home and abroad. It should be illustrated that some key issues, including observation of reservoirs greenhouse effect, case studies, the inner mechanism, emission processes and main influence factor of greenhouse gas from reservoirs, were discussed and summarized for the sake of obtaining more information about the emission of greenhouse gas from freshwater reservoirs and providing constructive guide for hydro-electronic development in China.

Key words: freshwater reservoir; greenhouse gas; climate change; influencing factors