

水库温室气体排放及其影响因素

赵小杰^{1,2}, 赵同谦², 郑华^{1*}, 段晓男¹, 陈法霖^{1,3}, 欧阳志云¹, 王效科¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 河南理工大学资源与环境学院, 焦作 454000; 3. 湖南农业大学农学院, 长沙 410128)

摘要: 水库是温室气体的一个重要排放源, 探讨水库温室气体排放及其影响因素有利于精确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排放。本文阐述了水库中温室气体的产生机制, 总结了水库温室气体的 3 个排放途径: 水库自然排放、水轮机和溢洪道、大坝下游河流, 从水库特征、气候、水体 pH 值、水库中植被状况等角度深入探讨了水库温室气体排放的影响因素。最后, 重点分析了水库温室气体排放的空间异质性以及研究结果不确定性的产生根源, 并对今后的研究重点进行了展望。

关键词: 水库; 温室气体; 排放机制; 通量

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)08-2377-08

Greenhouse Gas Emission from Reservoir and Its Influence Factors

ZHAO Xiao-jie^{1,2}, ZHAO Tong-qian², ZHENG Hua¹, DUAN Xiao-nan¹, CHEN Fa-lin^{1,3}, OUYANG Zhi-yun¹, WANG Xiao-ke¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 3. Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Reservoirs are significant sources of emissions of the greenhouse gases. Discussing greenhouse gas emission from the reservoirs and its influence factors are propitious to evaluate emission of the greenhouse gas accurately, reduce gas emission under hydraulic engineering and hydropower development. This paper expatiates the mechanism of the greenhouse gas production, sums three approaches of the greenhouse gas emission, which are emissions from nature emission of the reservoirs, turbines and spillways and downstream of the dam, respectively. Effects of greenhouse gas emission were discussed from character of the reservoirs, climate, pH of the water, vegetation growing in the reservoirs and so on. Finally, it has analyzed the heterogeneity of the greenhouse gas emission as well as the root of the uncertainty and carried on the forecast with emphasis to the next research.

Key words: reservoir; greenhouse gas; emission mechanism; flux

近几十年来, 大气中二氧化碳和甲烷 2 种主要温室气体浓度不断增加, 随之加强的温室效应逐渐成为了一个主要的环境问题^[1~3]。人们普遍认为化石燃料燃烧是大气中温室气体增加的主要来源。但是, 人工水库排放到大气中的温室气体越来越引起人们的注意, 在学术界也引起了激烈的争论^[4~8]。越来越多的研究也表明, 水库已经是二氧化碳和甲烷排放到大气中的一个重要来源, 特别是在热带地区, 大量被淹没的植被加上高温导致库底产生大量温室气体^[9~12]。Fearnside^[13]的研究结果推测, 在生命期的前 10 a, 一座典型的热带水坝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 甲烷和 1×10^9 t 二氧化碳, 而水库甲烷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^[14]。

目前针对温室气体的研究主要集中在湿地、稻

田等方面, 而对水库温室气体的研究还较少, 且主要集中在巴西、美国、法属圭亚那和加拿大北部等一些地区的少数水库^[15]。随着水电开发和水利工程建设进程的加快, 水库温室气体排放越来越受关注^[3,7~9], 但水库温室气体进入大气是一个动态变化的生物地球化学过程, 包括气体的产生、传输和排放, 并且影响水库温室气体排放的因素很多, 而这些过程和因素直接导致了水库温室气体排放的不确定性。本文综述了水库温室气体的产生机制、排放过程及其影响因素, 以期精确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排放提供参考。

收稿日期: 2007-08-28; 修订日期: 2008-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50639070)

作者简介: 赵小杰 (1981 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态系统生态学。

* 通讯联系人, E-mail: zhenghua@rcees.ac.cn

1 水库中温室气体产生的机制

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^[16].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^[17].

1.1 水库中碳的来源

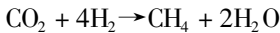
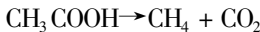
水库中碳的来源有多种途径(图 1):①水库蓄水后淹没大量储存在植被和土壤中的碳,包括枯枝落叶和逐渐落入水中的树叶^[18~21];②从上游冲入到水库中的有机物(来自于自然,农田生态系统或是城市中的污水),雨季尤为重要^[10];③水库中生长和死亡的浮游和水生生物;④生长于消落带的植被;⑤流域内受侵蚀土壤所带来的碳^[16].

1.2 水库中温室气体产生过程

水库淹没陆地生态系统后,将会改变被淹没土壤的化学性质,导致不稳定碳和营养物质释放到水中^[22,23].这些元素加强细菌、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,很快导

致缺氧状态,且在热带地区尤为明显^[24].

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有机碳、有机碳颗粒,主要产生二氧化碳;缺氧环境下,产甲烷菌的活动占优势,主要产生甲烷,及少量二氧化碳.此外,还会形成生物惰性残余,腐殖酸和黄酸^[17].产甲烷细菌通过 2 种方式制造甲烷:一种是将 CO₂ 转化成甲烷;另一种是以甲基分子(主要是乙酸)为底物进行反应^[25].首先,土壤及沉积物中的碳水化合物,甘油和蛋白质水解、发酵产生有机酸、乙醇及各种无机化合物.接着在厌氧条件下,细菌将这些有机酸和乙醇转化成甲烷和二氧化碳.



沉积物中产生的甲烷不全进入到气泡中,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甲烷和氧获得能量^[19].因此,产生的 CH₄ 大部分被生活在有氧-缺氧临界面的甲烷氧化菌消耗掉,二氧化碳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

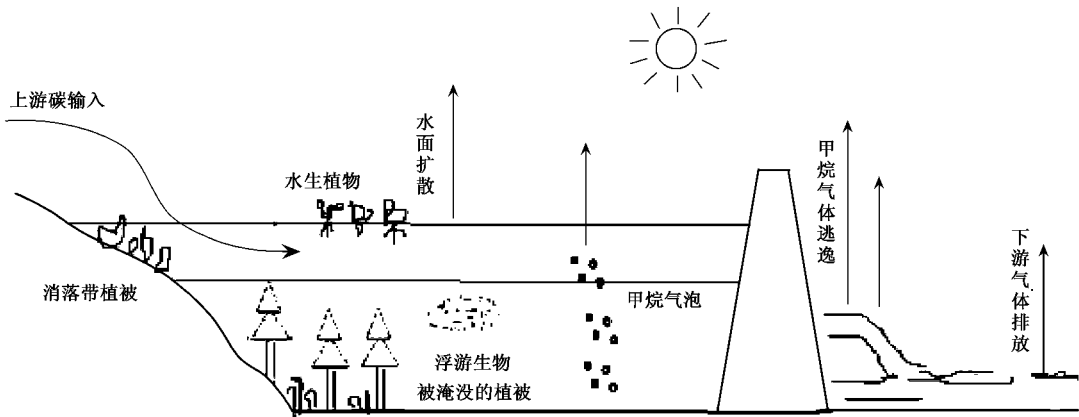


图 1 水库温室气体的排放途径(据参考文献[22]修改)

Fig.1 Emission approaches of greenhouse gas derived from reservoir

是被生物重新利用.

2 水库温室气体排放

已有研究表明,水库已经是大气中二氧化碳和甲烷的一个重要来源,特别是在热带地区,CO₂ 和 CH₄ 的排放量分别高达 8 100 mg•(m²•d)⁻¹ 和 1 140 mg•(m²•d)⁻¹(表 1).

值得说明的是,通常对水库温室气体排放的评价大部分是基于总排放而言.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生态系统已经存在的排放^[30].目前已有的研究表明,只考虑水库水面的温室气体测量会产生误导.因此不仅要考虑建坝前天然水体的排放,也要考虑水库其它的排放途径.鉴于温室气体对全球变暖的

表 1 不同水库水面温室气体的排放

Table 1 Emission of greenhouse gas from different reservoir surface							
气候带	水库名称	位置	面积 /km ²	库龄 /a	CO ₂ /mg·(m ² ·d) ⁻¹	CH ₄ /mg·(m ² ·d) ⁻¹	文献
温带	Cabonga	魁北克	400	68 ~ 70	800	7.5	[12]
	Lokkaf	芬兰	417	28	1 848	5	[26]
	Porttipahtaf	芬兰	214	25	1 572	13	[26]
	F. D. Roosevelt	美国	306	—	—	2.3	[27]
	Dworshak	美国	37	—	- 1 030	3.4	[27]
	Shasta	美国	77	—	1 356	11.1	[27]
热带	Gatun Lake	巴拿马	430	84	—	412	[28]
	Curua-Una	巴西	72	21	2 900	66	[29]
	Tucunui	巴西	2 800	13	—	190	[19]
	Balbina	巴西	70 600	—	3 344 ± 2 024	33.6 ± 48	[9]
	Samuel	巴西	29 700	10	8 100	160	[19]
	Petit Saut	圭亚那	300	1 ~ 2	4 460	1 140	[14]

影响,水库二氧化碳排放完全不同于甲烷排放.由于一部分观测的二氧化碳通量会被水库中的水生生物通过光合作用摄取,因此,排放出的二氧化碳不能全部用来计算净影响.虽然甲烷最终也转化为二氧化碳,但是甲烷不直接进入光合作用中.因此二氧化碳的排放一部分归结于自然界中水面大气和水之间的碳循环,另一部分则归结于有机物的分解^[31].

天然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^[25,32].气泡传输是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^[25].对于水库而言,有与天然水体不同的地方,例如:当水通过水轮机和溢洪道时由于压力和温度的变化会导致大量的温室气体从水中逃逸出来.具体来说,水库温室气体排放途径主要包括:水库自然排放、水轮机和溢洪道、大坝下游河流(图 1).

2.1 水库中的自然排放

水库中自然排放是指细菌分解被淹没有机物释放的温室气体通过扩散和气泡方式经过水-气界面排放到大气中.目前对水库中温室气体排放研究大部分是基于经过水面扩散到大气中的通量,对于气泡排放的研究较少.深水环境下由于静水压力的存在,气泡难以形成,因此气体排放的主要途径是通过扩散方式,而对于浅水区域来说,气泡的形成和传输是不容忽视的,甲烷气泡通量有时达到扩散通量的 20%^[20],而 Huttunen 等^[33]的研究结果显示在浅水地区甲烷气泡的排放通量比水面扩散排放量还要大,因此气泡是甲烷气体排放到大气中的一个重要途径^[34].由于 CO₂ 在水中的溶解度较高,因此气泡中 CO₂ 含量较少^[35,36],甚至不到扩散通量的 1% ~

2%^[20].环境变量可能会影响气泡排放,比如水深、水库运营情况等^[37,38].通常由于气候和天气变化例如温度和降雨影响,温室气体排放呈现波动^[39,40].

2.2 水轮机和溢洪道

为了有足够的动力来运行水轮机,大部分水电站大坝进水口的设计非常接近水库底部.当富含气体的水通过水轮机时,静水压力突然降低,根据亨利定律,大量气体会从水中逃逸出来.这个过程发生很快,对于甲烷来说氧化细菌没有时间氧化,从而导致大量气体释放到空气中.此外,水通过溢洪道时的逃逸通量不仅与压力的降低有关,还与水流出方式有关^[31].而如果水库总是保持满水位的话,那么溢洪道的甲烷排放通量将会是巨大的^[41].

Fearnside^[31]通过理论计算来研究水如何离开大坝.他用可口可乐做了一个对比,来解释当水通过水轮机和溢洪道时由于压力变化大量溶解在水中的甲烷气体释放出来的现象.对此 Rosa 等^[8]却持不同的看法,认为 Fearnside 夸大了水库的碳元素释放量,他们认为当瓶子打开时并不是所有气体都立刻逃逸出来,而是在很长时间内都可以看见气泡上升.按照 Fearnside 的观点,如果水通过水轮机时大量甲烷气体逃逸出来,那么大坝下游河流中的甲烷浓度会很低.而已有研究表明大坝下游河流中甲烷浓度有时会高于上游^[9].

但是现在很少有研究尝试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^[24,27]. Duchemin 等^[24]认为水轮机在温室气体排放方面扮演的角色较小,Fearnside^[41]的结果显示甲烷气体通过水轮机和溢洪道的排放有时候甚至占到整个水库排放的 70% 左右.Roehm 等^[42]认为产生这种差异的

原因可能是方法不同和可利用的数据有限^[42].

2.3 大坝下游河流

目前在评价水库温室气体排放时经常会忽视大坝下游河流中的排放^[14]. 经过水轮机的水中仍然含有大量甲烷气体^[11]. Guérin 等^[9]认为大坝下游河流中的甲烷浓度大约是天然河流中的 100 倍. 他们通过对 Petit Saut 水库的测量, 发现大坝下游 Similar 河中甲烷浓度是水库上游浓度的 80 ~ 100 倍. 大坝下游河流中富含的甲烷和二氧化碳一方面来自于水库均温层^[10], 另一方面来自河流周围环境, 比如洪泛区^[43]或者是土壤和地下水^[44]. 尽管大坝下游河流相关的面积较小, 但是它们是水库表面排放的一个重要的组成部分, Balbina、Samuel 和 Petit 3 个水库下游河流分别贡献了水库水面甲烷排放总量的 23%、5% 和 9% ~ 33%^[9].

此外, 生长在消落带的植被由于周期性被水淹没, 也是温室气体产生的重要场所^[16,41].

3 水库温室气体排放影响因素

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. 这些过程受到多种因素的影响比如水库库龄、水温、水位、植被状况以及被淹没有机物的数量.

3.1 水库特征

(1) 土壤质地 大部分的水库建设并不是为了发电而是为了其它目的, 包括洪水控制、水供应、灌溉、导航、娱乐和水产业^[45]. 不同地貌特征的土壤和植物中储存的有机碳数量是不同的. 如果被淹没的是泥炭地, 由于其可储存大量的有机碳, 可以在很长时间内逐渐分解为温室气体排放到大气中. 因此淹没泥炭地的库区释放的温室气体在很长时间内都要比那些建在森林高地上和峡谷内土壤层较薄或没有泥炭沉积物的库区要多^[14].

(2) 水库库龄 水库蓄水后不稳定有机物的分解造成了大量温室气体排放到大气中^[22]. 而微生物分解大量被淹没有机物中的不稳定碳是造成新水库二氧化碳和甲烷高排放的原因, 比如存在于树叶和干草中的有机碳会很快分解, 随后是树木和土壤中碳的缓慢分解^[20]. 通常温室气体排放通量在水库蓄水 2 ~ 3 a 后达到最大, 之后逐渐降低^[19].

甲烷的扩散通量在蓄水 1 a 后达到最大, 之后由于在含氧层被氧化而快速的降低^[3]. 蓄水几年后, 起初的生物腐烂分解完后, 碳排放达到一个稳定值.

Tremblay 等^[46,47]对加拿大北部和美国西部半干旱地区水库的研究发现 10 a 库龄水库的 CO_2 通量与湖泊高度相似. Abril 等^[10]对 Petit Saut 水库的研究结果显示, 蓄水后的前 3 a 总碳排放量是 $(0.37 \pm 0.01) \text{ Mt} \cdot \text{a}^{-1}$ [CO_2 , $(0.30 \pm 0.02) \text{ Mt} \cdot \text{a}^{-1}$; CH_4 , $(0.07 \pm 0.01) \text{ Mt} \cdot \text{a}^{-1}$], 从 2000 年开始减少到 $(0.12 \pm 0.01) \text{ Mt} \cdot \text{a}^{-1}$ [CO_2 , $(0.10 \pm 0.01) \text{ Mt} \cdot \text{a}^{-1}$; CH_4 , $(0.016 \pm 0.006) \text{ Mt} \cdot \text{a}^{-1}$].

但是, 巴拿马的 Gatun 湖在 84 a 后甲烷排放量是 $412 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 还呈现较高的排放. Keller 等^[28]的研究结果显示温室气体排放与水库库龄之间的相关性较低^[28]. 这说明在有的老水库中, 除水库中一些浮游生物自生的有机物外, 其它的碳源比如上游流域有机物的输入(生物和土壤中的碳, 废水中的有机碳)也成为了重要的分解对象^[15]. 在 60 a 库龄水库中仍然可以找到完好无损的树枝、树干、树根和下层土壤中的腐殖质^[48]. 同样, Lokka 水库蓄水 30 a 后甲烷排放通量也呈现较高排放, 这意味着库底仍然在进行着强烈的厌氧分解, 而浅水区水对土壤的侵蚀也会为水库提供有机碳^[26]. 这就可以很好的解释在一些老水库中仍然存在着大量的 CH_4 和 CO_2 气体排放.

(3) 水深 细菌在缺氧的水中分解有机物产生甲烷气体, 热带水库的底层严重消耗氧气, 一些甲烷气泡在上升到水面过程中被氧化为二氧化碳. 而在水库浅水区甲烷气泡在被氧化之前能够到达水面, 造成大量甲烷排放^[44]. Rosa 等^[19]发现在 Samuel 水库中, 水深 < 5 m 的地方甲烷通过气泡的排放量在 $60 \sim 70 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间变化, 而 > 5 m 的地方排放量是 $2 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 对于 Tucuru 水库, 甲烷气泡排放量在 $0.5 \sim 30 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间变化, 最大值也是发生在浅水区, 与 Samuel 水库相类似^[19].

(4) 水位变化 当水库中的水位回落时, 植被会在暴露的陆地上重新生长. 当水位上升和洪水淹没这些暴露的陆地后, 绿色的软体生物会快速的腐烂, 在缺氧的条件下释放出甲烷气体^[15]. 这些区域通常是浅水区, 因此在甲烷被氧化为二氧化碳前形成的部分气泡可以到达水面. 频繁的水位下降引起水面波动致使压力改变, 影响气泡的比率, 所以较大的水面波动会导致较大的甲烷排放量^[28]. 比如 Samuel 水库在季节性的洪水中以气泡形式释放的甲烷气体有 $15.3 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ^[49].

3.2 气候

位于不同气候带水库的温室气体排放存在着明显差异(表 1),其中通过气候带直接影响水库温室气体排放通量的 2 个重要因素是水温 and 风.

① 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,溶解度降低,气体从水面逸出;温度降低,溶解度增加,气体从大气进入水体.这也是热带地区温室气体排放高的一个原因(见表 1).此外,水温还影响气泡的形成.Lousi 等^[14]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.

② 风是影响气体排放的一个重要因素.不仅影响气体散发强度,还通过 2 种途径来影响气泡的产生.首先,促进深水层中的氧化作用,抑制产甲烷菌活动.其次,对水的搅动可以加速气泡释放. Rosa 等^[19]认为搅动释放的大部分是成形气泡,气泡释放量的增加只是暂时的,一段时间后就会减少,在平静水面测量的结果和有风作用环境下测量的结果存在着差异性.

3.3 水体 pH 值

水库淹没植物和森林土壤会造成无机盐和营养物质淋溶到水体中,而微生物对被淹没土壤中的植物和腐殖质进行分解时会消耗掉溶解氧并释放 CO_2 ,导致 pH 值变小^[50]. pH 值影响水体中 CO_2 浓度,当 pH 值较高时,水体中游离的 CO_2 就会转变为碳酸盐,水体中 CO_2 分压就会降低,导致水中溶解的 CO_2 处于不饱和状态,促使大气中 CO_2 进入到水体中,相反当 pH 值较低时 CO_2 则从水体向大气中扩散. Therrien 等^[47]发现当 pH 值 > 8 时,所观测的湖泊和水库会从大气中吸收 CO_2 气体,水体成为 CO_2 的汇.

3.4 水库中植被的生长状况

大部分影响 CO_2 通量变化的因素如光照、风速、水体透明度、土壤类型等都与浮游植物初级生产有关.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;而在异养状态下,呼吸作用较强, CO_2 分压会相应的增加^[51].水库中水生生物也会影响 CH_4 通量变化.在 Varzea 湖的研究中,有浮游植物覆盖的水面释放的甲烷是开阔水面的 3.25 倍^[13]. 1992 年 9 月 Tucuruí 水库水面有浮游植物的区域通过气泡释放的甲烷量是河道开阔水域的 1 056 倍,是水面有直立树木水域的 0.8 倍,没有直立树木水域的 5.8 倍^[49].

3.5 其它因素

冬季时由于水面冰盖的存在,水-大界面的气体交换被阻挡,因此气体会在水中累积,等到春天冰雪融化时再释放出来^[52,53].此外溶解在水中有机的光氧化作用不仅可以产生温室气体,还可以通过影响初级生产、次级生产来影响水体生态系统和大气之间的碳交换.在计算水体生态系统和水库二氧化碳净排放平衡时应该考虑光氧化作用,因为这部分占全部排放的 6% ~ 28% 左右^[54].

由于水库水面温室气体排放受多种因素的影响,如水库库龄、水温、生物泵等,同一水库不同区域的排放变化较大(很大程度是由于水深度的变化,暴露于风和阳光下的程度,水生植物的生长情况),在年间变化,季节间,昼夜之间都有变化.因此若要全面掌握水库温室气体通量的变化特征,需要在水库的不同库区,不同季节和气候条件下,进行大量的观测研究.

4 水库温室气体排放研究存在的问题及研究展望

尽管对于水库温室气体排放的研究开展很多,但其中的一些不确定性一直是科学家们争论的焦点,存在问题主要在于:

(1)评价过程中忽视了许多突发事件.由于一些原因的存在,目前对水库温室气体排放的评价比较保守,评价过程中也忽视了许多突发事件^[41].比如暴风雨可以引起湖面的波动,使得深水处饱和的甲烷气体释放出来从而导致此处高于水库表面的平均通量^[12].

(2)观测方法的制约.首先,常用的观测方法是浮箱法和边界层法,而这 2 种方法都存在有各自的缺点. Matthews 等^[56]认为浮箱法测得通量比水面实际通量要高,而边界层法则受到风速的影响.其次,目前测量水-气界面气体通量的方法只能代表较小水面和短暂时间内的通量^[57],很少研究结果是基于直接、系统的水-气界面通量测量(比如对大面积水域进行连续采样)^[58];以前的研究者对水库直接的通量测量都不能代表水库的排放类型和周围的自然生态系统,因此,关于总排放和净排放的不确定性也已成为争论的焦点^[46].再次,热带水库如 Petit Saut 和 Tucuruí 水库,较大的昼夜差异使得气体浓度可能变化较快.雨季初几天,河流流量快速增加,水库中水的滞留时间减少,这种变化很难用传统的技术来观测^[10].就每一天来说,由于风速和波浪的作用,白天甲烷的排放量会高于晚上^[28].许多研究测量方法

没有进行 24 h 连续监控,这也是不确定因素的一个来源。

(3)试验设计的缺陷 在绝大多数的研究中温室气体通量的测定仅仅是在洪水淹没后进行,而缺少洪水淹没前排放到大气中的实际通量,由于缺少淹没前二氧化碳和甲烷通量数据,对于水库净影响的理解也就不够全面^[58];大部分的通量估计是在温带地区的水库,热带地区可利用的数据较少,而热带地区和温带地区水库排放明显不同。另外,有限的大坝研究数量和采样点的空间和时间局限,导致有些结果和发现也具有一定不确定性^[15]。

(4)估算方法的不足 用不同年代的数据估算某一年的排放也会增加不确定性。Rosa 等^[8]认为 Fearnside 利用不同年代的数据来估算 1990 年的排放量,增加了不确定性。

可见,今后的水库温室气体排放研究中应该着重考虑:如何减少不确定因素;对水库的整个生命周期进行评价,包括建坝前已经存在的排放和大坝退役后的排放;进一步加强对水轮机和下游河流中温室气体排放的研究;确定整个流域内碳的来源(自然和人为来源)。

参考文献:

- [1] Crowley T J. Causes of climate change over the past 1 000 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, Guérin F, *et al.* Long term greenhouse gas emissions from the hydroelectric reservoir of Petit Saut (French Guiana) and potential impacts [A]. In: Tremblay 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. 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**(1-2): 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**: 91-102.
- [9] Guérin F, Abri G, Richard S, *et al.* Methane and carbon dioxide emissions from tropical reservoirs: Significance of downstream rivers [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**: L21407.
- [10] Abril G, Guérin F, Richard S, *et al.* Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana) [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, **19**: 1-16.
- [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] Fearnside P M. Hydroelectric Dams in the Brazilian Amazon as Sources of 'Greenhouse' Gases [J]. *Environmental Conservation*, 1995, **22**(1): 7-19.
- [14] 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.
- [15] Santos M A D, Bohdan M, Rosa L P, *et al.* Gross Greenhouse Emission from Brazilian Hydro Reservoirs [A]. In: Tremblay 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.
- [16] 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.
- [17] 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. 1-102.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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 Technology*, 1997, **31**(5): 1334-1344.
- [21] 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.
- [22] McCull P. Loosening the Hydro industry's Grip on Reservoir Greenhouse Gas Emissions Research [R]. Berkeley: International Rivers Network, 2006. 1-25.
- [23] Friedl G, Wuest A. Disrupting biogeochemical cycles-Consequences of damming [J]. *Aquatic Sciences*, 2002, **64**(1): 55-65.
- [24] Duchemin E, Lucotte M, Canuel R. Comparison of static chamber

- and thin boundary layer equation methods for measuring greenhouse gas emissions from large water bodies [J]. *Environmental Science and Technology*, 1999, **33**: 350-357.
- [25] 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.
- [26] Huttunen J T, Väisänen T S, Hellsten S K, *et al.* Fluxes of CH₄, CO₂, and N₂O in hydroelectric reservoirs Lokka and Porttipahta in the northern boreal zone in Finland [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, **16**(1): 3-17.
- [27] Soumis 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.
- [28] Keller M, Stallard R F. Methane Emission by Bubbling from Gatun Lake, Panama [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, **99**: 8307-8319.
- [29] 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.
- [30] Santos M A, Rosa L P, Matvienko B, *et al.* Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants [J]. *Energy Policy*, 2005, **34**(1): 481-488.
- [31] 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**(1-2): 1-8.
- [32] Joyce R, Jewell P W. Physical Controls on Methane Ebullition from Reservoirs and Lakes [J]. *Environmental and Engineering Geoscience*, 2003, **9**(2): 167-178.
- [33] Huttunen J T, Alm 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.
- [34] Kiene R P. Production and consumption of methane in aquatic systems [A]. In: Rogers J E, Whitman W B. (eds). *Microbial Production and Consumption of Greenhouse Gases: Methane, Nitrogen Oxides and Halomethanes* [C]. Washington D C: American Society for Microbiology, 1991. 111-146.
- [35] Rothfuss F, Conrad R. Effect of gas bubbles on the diffusive flux of methane in anoxic paddy soils [J]. *Limnology Oceanography*, 1998, **43**(7): 1511-1518.
- [36] Adams D D, Naguib M. Carbon gas cycling in the sediments of Plußsee, a northern German eutrophic lake, and 16 nearby water bodies of Schleswig-Holstein [J]. *Arch Hydrobiol Spec Issues Adv Limnol*, 1999, **54**: 91-104.
- [37] Marani L, Alvalá P C. Methane emissions from lakes and floodplains in Pantanal, Brazil [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**: 1627-1633.
- [38] Adams D D. Diffuse Flux of Greenhouse Gases - Methane and Carbon Dioxide-at the Sediment-Water Interface of Some Lakes and Reservoirs of the World [A]. In: Tremblay 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. 129-153.
- [39] Lima I B T. Biogeochemical distinction of methane releases from two Amazon hydro reservoirs [J]. *Chemosphere*, 2005, **59**(11): 1697-1702.
- [40] Nozhevnikova A N, Holliger C, Ammann A, *et al.* Methanogenesis in sediments from deep lakes at different temperatures (2-70°C) [J]. *Water Science Technology*, 1997, **36**(6): 57-64.
- [41] Fearnside 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): 69-96.
- [42] Roehm C, Tremblay A. Role of turbines in the carbon dioxide emissions from two boreal reservoirs, Québec, Canada [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111**: 1-9.
- [43] Richey J E, Devol A H, Wofsy S C, *et al.* Biogenic gases and the oxidation of carbon in Amazon river and floodplain waters [J]. *Limnology Oceanography*, 1988, **33**: 551-561.
- [44] Jones J B, Mulholland P J. Influence of drainage basin topography and elevation on carbon dioxide and methane supersaturation of stream water [J]. *Biogeochemistry*, 1998, **40**(1): 57-72.
- [45] Bergkamp G, McCartney M, Dugan P, *et al.* Dams, Ecosystem Functions and Environmental Restoration [R]. South Africa: World Commission Dams, 2000. 1-187.
- [46] Tremblay A, Therrien J, Hamlin B, *et al.* GHG Emissions from Boreal Reservoirs and Natural Aquatic Ecosystems [A]. In: Tremblay 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. 209-232.
- [47] Therrien J, Tremblay A, Jacques R B. CO₂ Emissions from Semi-Arid Reservoirs and Natural Aquatic Ecosystems [A]. In: Tremblay 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. 233-250.
- [48] Van Coillie R, Visser S A, Campbell P G C, *et al.* G. évaluation de la dégradation de bois de conifères immergés durant plus d'un demi-siècle dans un réservoir [J]. *Annales de Limnologie*, 1983, **19**: 129-134.
- [49] Rosa L P, Schaeffer R, Santos M A. Emissões de metano e dióxido de carbono de hidrelétricas na Amazônia comparadas às termelétricas equivalentes [J]. *Cadernos de Energia*, 1996, **9**: 109-157.
- [50] Dumestre J F, Vaquer A, Gosse P, *et al.* Bacterial ecology of a young equatorial hydroelectric reservoir (Petit Saut, French Guiana) [J]. *Hydrobiologia*, 1999, **400**: 75-83.
- [51] Carpenter S R, Cole J J, Hodgson J R, *et al.* Trophic cascades, nutrients, and lake productivity: whole-lake experiments [J]. *Ecological Monographs*, 2001, **71**(2): 63-186.
- [52] Striegl R G, Michmerhuizen C M. Hydrologic influence on methane and carbon dioxide dynamics at two north-central Minnesota lakes [J]. *Limnology Oceanography*, 1998, **43**(7): 1519-1529.
- [53] Duchemin E, Lucotte M, Canuel R, *et al.* First assessment of methane and carbon dioxide emissions from shallow and deep zones of

- boreal reservoirs upon ice break-up [J]. *Lakes Reservoirs: Research and Management*, 2006, **11**: 9-19.
- [54] Bastien J. Impacts of Ultraviolet Radiation on Aquatic Ecosystems: Greenhouse Gas Emissions and Implications for Hydroelectric Reservoirs [A]. In: Tremblay 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. 509-527.
- [55] Matthews C J D, Louis S V L, Hesslein R H. Comparison of Three Techniques Used To Measure Diffusive Gas Exchange from Sheltered Aquatic Surfaces [J]. *Environmental Science Technology*, 2003, **37**: 772-780.
- [56] Matthews C J D, Venkiteswaran J J, Louis V L S, *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 [A]. In: Tremblay 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. 355-382.
- [57] Hélie 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) [A]. In: Tremblay A, Varfalvy L, Roehm C, Gameau M (eds). *Greenhouse Gas Emissions-Fluxes and Processes. Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments* [C]. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2005. 339-354.
- [58] Tremblay A, Lambert M, Gagnon L. Do Hydroelectric Reservoirs Emit Greenhouse Gases? [J]. *Environmental Management*, 2004, **33**: S509-S517.