

水利工程对岩溶水体碳循环的影响

李强

(中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室,广西 桂林 541004)

摘要:为认识水利工程建设对岩溶库区温室气体排放的影响,本文对岩溶区水利工程破坏岩溶水体 DIC 的稳定性、增加温室气体排放以及水利工程建设所带来的水体富营养化问题进行了初步总结。结果表明,水利工程不仅打破了岩溶水体 DIC 的自身稳定性,加速水体无机 CO_2 逸出过程,导致 CaCO_3 发生沉淀,而且还通过改变岩溶水动力条件、加速温室气体排放等途径来提高岩溶水体的碳储存、转移、形成与分解过程。与此同时作者还建议:(1)尽快开展岩溶水体温室气体排放的定性分析与定量计算工作,并与不同排放源的温室气体释放效应进行对比;(2)温室气体排放的估算须建立在岩溶碳循环研究基础上,从时间和空间尺度上分析影响岩溶水体温室气体排放过程的关键因素,并把岩溶水体温室气体排放纳入整个岩溶生态系统的生命周期中进行考虑。

关键词:岩溶;水利工程;DIC 稳定性;温室气体;富营养化

中图分类号:X142 **文献标识码:**A

0 引言

随着国民经济的飞跃发展,我国在岩溶区进行了大规模的水利工程建设(水库、水电站等)。这些水利工程在岩溶区的防洪、发电、航运以及抗旱等方面具有举足轻重的作用,然而针对这些水利工程建设后对岩溶水体正常碳循环和碳通量的影响,目前在岩溶区鲜有相关报道^[1]。1993年,Rudd等^[2]首次提及水库释放温室气体,水电站可能是温室气体的重要排放源。20世纪90年代末,世界大坝委员会在对修建大坝产生的环境与社会效应评估中增加了大坝水库对温室效应的影响^[3]。Fearnside等^[4]针对亚马逊热带雨林地区一个极特殊的水库温室气体排放进行了研究,认为:“在热带雨林地区建成的水电站,最初10年中,水库甲烷和二氧化碳的释放量约为同量级化石燃料电厂的4倍”。由于在探讨岩溶区水利工程对温室

气体排放影响时,不能简单地套用国外已有的研究结论。因此,为更好认识水利工程建设对岩溶库区温室气体排放的影响,本文拟从水利工程对岩溶区水体 DIC 稳定性影响、水体温室气体的产生及排放机制和 水体富营养化方面展开讨论。

1 水利工程修建破坏了岩溶水体 DIC 稳定性

CO_2 -水-碳酸盐岩三相不平衡的开放系统中存在 $\text{Ca}_x\text{Mg}(1-x)\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow x\text{Ca}^{2+} + (1-x)\text{Mg}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ 反应过程^[5],并受当地气候环境、地质背景、水化学特征、水动力条件、生物等方面物理和化学因素的影响。张英骏等^[6]研究发现:水中大量气泡的产生大大增加了水-气界面的面积,促使 CO_2 迅速逃逸,致使 CaCO_3 沉淀。根据伯努利理论方程: $P + \rho gh + \rho V^2 / 2 = C$,可知速度的增加将导致内部

基金项目:“中国地质调查局百名青年地质人才培养计划”、国家自然科学基金(41003038)、广西自然科学基金(2011GXNSFD018002, 2011GXNSFA018006,2010GXNSFB013004)和岩溶地质研究所项目(D201307)

作者简介:李强(1978-),男,博士,副研究员,主要从事岩溶生物地球化学研究。E-mail:glqiangli@163.com。

收稿日期:2013-06-13

压力的减小,高速水流内部会出现低压区,这些低压区进一步发展则形成气泡并造成 CO_2 逸出。此外,在快速运动的薄层水流处,水层变薄,流速加快,水温升高,造成局部地区的低压甚至负压,使水中的 CO_2 易于释放,从而产生 CaCO_3 沉淀^[7]。在我国岩溶山区的森林中,溪流水的 pH 值一般较低,并具有较高的 HCO_3^- ,但沿溪而下,pH 值则常逐渐升高,并伴随钙华沉积。此种现象在瀑布上、下游最明显,特别是在水流湍急的地段, CaCO_3 的沉积速度也愈快。大量事实表明,岩溶水体水动力条件的改变将会影响 CaCO_3 的沉积^[8-9]。

为保证大坝安全,水利工程建设过程中通常修建巨大的溢洪道,而发电水库为了有足够的动力来运行水轮机,大部分进水口的设计非常接近水库底部。岩溶水在通过溢洪道或者水轮机时,可产生瀑布跌水效应。此外,通过岩溶动力系统概念模型可以看出(图1),水体的固-水和水-气界面的动态平衡将被打破,造成二氧化碳溢出并生成碳酸钙沉淀^[10]。而 Fearnside 则利用可口可乐来形象解释当岩溶水通过水轮机和溢洪道时,由于水动力条件的改变导致岩溶水体的 DIC 稳定性被破坏,进而使得水中原本处于平衡状态的 CO_2 气体释放出来^[4],以此说明这一复杂的溶解无机碳变化过程。

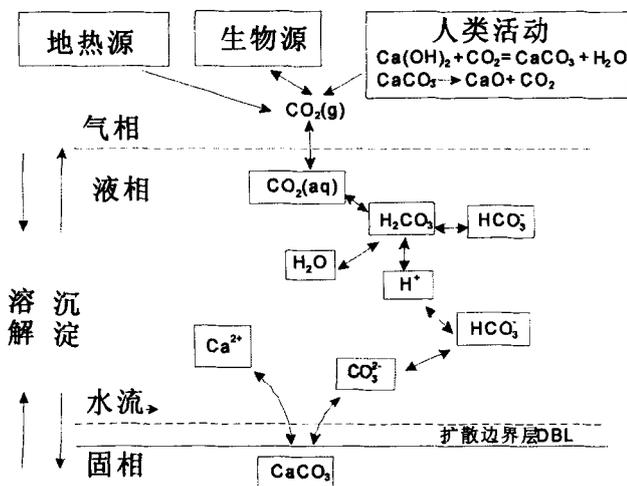


图1 岩溶动力系统概念模型(据袁道先,2008)

Fig. 1 Conceptual model of the karst dynamics system

2 水利工程修建造成了岩溶水体温室气体排放的增加

大坝拦截蓄水后,土地利用格局改变,河流原有的输送物质通量、组成及时空过程被打破,并使得大

量储存在植被和土壤中的碳被淹没,加之通过陆地雨水径流和河流携带的有机物、生长于消落带的植被以及水库中生长和死亡的浮游和水生生物在库区汇集(图2)^[11],将改变周围环境中碳、氮循环,影响该地域温室气体的原始排放情况^[12-15]。

进入库区的有机沉积物具有明显的表层富积现象,并通过一系列的氧化还原反应生成甲烷和二氧化碳,改变水-气界面温室气体排放通量。在有氧环境下,好氧细菌分解库区中的有机物,主要产生二氧化碳;而在缺氧环境下,在产甲烷菌的参与下主要产生甲烷以及少量的二氧化碳。产甲烷细菌通过两种方式制造甲烷:一种是以有机沉积物通过水解、发酵产生的有机酸、乙醇及各种无机化合物为底物,并在厌氧条件下将这些有机酸和乙醇转化成甲烷和二氧化碳($\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$);另一种是将 CO_2 直接转化成甲烷($\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$),并改变岩溶水体 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ 动态平衡,产生碳酸钙沉积^[10,16]。此外,大坝拦截蓄水后,水库成为氮的重要汇集区,可转化态的氮在生化作用下通过参与氮的界面循环,释放出氧化亚氮^[17]。

来源于水库有机沉积物的温室气体,则通过水面自由扩散、气泡排放、水轮机和溢洪道、大坝下游河流排放。水-气界面气体通量由大气和水体分压差、大气交换系数决定^[18];通过气泡排放的温室气体主要为甲烷和二氧化碳,其中甲烷一部分通过扩散上升到水面,在上升过程中,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,而二氧化碳则很少被微生物吸收,直接通过水泡释放到大气中或是被生物重新利用^[16];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^[4](图2)。

Duchemin E 和 Lucotte M^[19]对水库水-气界面上的温室气体通量进行测定和计算,认为在有氧环境下,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;而在缺氧环境下,产甲烷菌的活动占优势,主要产生甲烷及少量二氧化碳,进而成为温室气体重要的排放源^[20]。在热带地区的水库, CO_2 和 CH_4 的排放量分别高达 $8\ 100\ \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $1\ 140\ \text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ^[19,21-22]。喻元秀等^[23]对位于亚热带季风气候带的山区峡谷型水库——洪家渡水库的研究结果显示,虽然与世界上其他水库相比,洪家渡水库库区二氧化碳释放通量较低,但水库总体表现为二氧化碳的源,

库区水体界面二氧化碳日平均交换通量达到 $4.87 \sim 7.79 \text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。法属圭亚那 Petit Saut 水库自 1994 年蓄水以来,现场测量证明了热带水库排放大量的 CO_2 和 CH_4 ,且 CH_4 的氧化将可能耗费整个水力系统(包括水库和大坝下游河流)的氧气^[12]。Louis 等估算,在所有人为排放的温室气体全球变暖

潜势(GWP)中,水库排放的温室气体对温室效应的贡献约占 7%,因此应将水库温室气体排放纳入全球碳循环模型和全球温室气体的清单^[24]。由此,可以认为受人类活动干扰的岩溶水域将增加岩溶碳通量,改变岩溶碳循环模式。

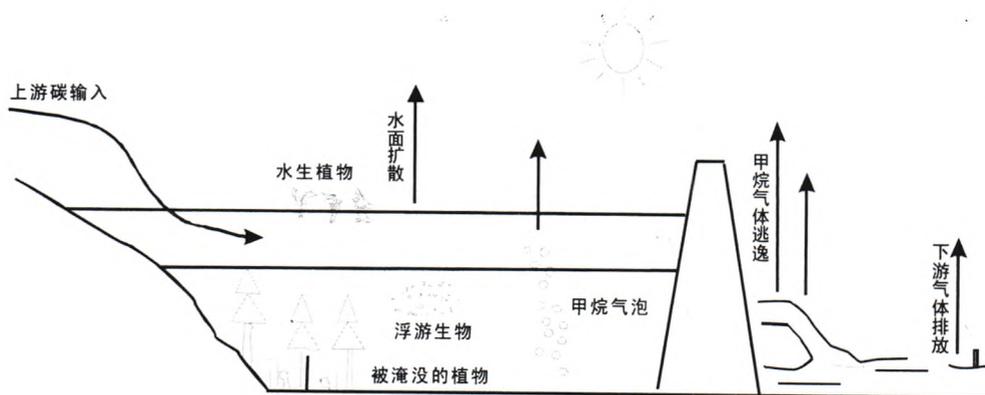


图 2 水库温室气体的排放途径(据赵小杰等,2008)

Fig. 2 Emission approaches of greenhouse gas derived from reservoir

3 水利工程修建造成水体富营养化

水库筑坝后,生活污水和工业废水的排入以及养殖业的开展,使得 N、P 等主要生源要素在库区汇集^[25]。因而,水库富营养化导致浮游植物的生物量增加,就会使得水体中的有机聚集体增加。所谓的有机聚集体,就是指水体中由活的或已经死亡的浮游动植物、原生动物、微生物及其代谢产物与水体中其他有机(主要是水生或陆生动植物残体)或无机颗粒经絮凝作用或自身分泌黏液黏合而形成的不规则多孔颗粒物。

氮和磷作为水生植物的必需营养元素,支持着生物初级生产。水库筑坝后,水体流速减缓,水生藻类尤其是浮游藻类的生长条件更加优越,易出现富营养化。富营养化水体提供了生物初级生产所需的营养元素,但是由于浮游生物的爆发性增长,水体颜色加深,影响光的通透性,反过来会降低生物的初级生产。Huttunen 等^[21]的研究表明,如果有长期可利用的氮和磷供给,水体中碳循环以及初级生产可保证数十年甲烷和二氧化碳的大量排放。孙玮玮等^[26]通过研究长江三角洲平原河网发现,河网水体溶存 CH_4 浓度和 N_2O 浓度分别在 $(0.30 \pm 0.03) \sim (6.66 \pm 0.14) \mu\text{mol}/\text{L}$ 之间和 $(13.8 \pm 2.33) \sim (435 \pm 116) \text{ nmol}/\text{L}$ 之间,溶存 CH_4 饱和度达到 $(468 \pm 49.0) \sim (11560 \pm 235)\%$,而溶存 N_2O 饱和度达到 $(175 \pm 29.5) \sim$

$(4914 \pm 1304)\%$,都处于高度过饱和状态。夏季 7 月河网水体一大气界面 CH_4 和 N_2O 排放通量达到 $(778 \pm 59.8) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $236 \pm 63.6 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。此外,王洪君等^[27]通过定位观测发现,富营养化湖泊的植被型湖滨带的 N_2O 通量平均高达 $190.7 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,裸露型湖滨带为 $81.6 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,而没有受富营养化影响的开阔水体则为 $10.5 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。从而说明,富营养化的水库是温室气体重要排放源。

因此,岩溶区水库的富营养化不仅给库区社会、经济和环境的可持续发展造成严重影响,而且还影响库区的碳循环过程。

4 结束语

大规模的水利建设将对岩溶水体产生多层次的影响。尽管目前许多研究和认识更多停留在区域层面上,但“蓄水河流”景观格局作为影响全球河流碳循环过程的重大人为干扰因素已经引起整个学术界的关注。由此可知,水利工程打破岩溶水体 DIC 原有稳定性,加速水体无机 CO_2 逸出过程,导致 CaCO_3 发生沉淀。

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,在时间和空间上存在不确定性。在岩溶区,水利工程在改变岩溶水动力条件、加速温室气

体的排放使这种不确定性加强的同时,也加速了岩溶水体的碳储存、转移、形成与分解过程。

在今后开展岩溶水体温室气体的排放研究时应深入考虑以下两方面:首先,在流域尺度上开展岩溶碳循环研究时必须估算温室气体的净排放;其次,从时间和空间尺度上分析影响岩溶水体温室气体排放过程的关键因素,并将岩溶水体温室气体排放纳入整个岩溶生态系统的生命周期来考虑。

目前,国内关于岩溶水体的温室气体排放研究处于起步阶段,大量的定性分析和定量计算需尽快开展,并与不同排放源的温室气体释放效应对比,从而为今后开展岩溶水体温室气体排放问题的研究提供有力支持。

致谢:感谢审稿专家以及韦复才研究员提出的宝贵建议,在此一并感谢!

参考文献

- [1] Fushun Wang, Baoli Wang, Congqiang Liu, et al. Carbon dioxide emission from surface water in cascade reservoirs—river system on the Maotiao river, southwest of China[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45:3827—3834.
- [2] 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.
- [3] Dos Santos M A, Rosy L P, Sikar B, et al. Cross greenhouse gas fluxes from hydropower reservoir compared to thermo power plants[J]. *Energy Policy*, 2006, 34:481—488.
- [4] 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.
- [5] Legrand H E. Hydrological and ecological problems of karst regions—hydrological actions on limestone regions cause distinctive ecological problems [J]. *Science*, 1973, 179(4076):859—864.
- [6] 张英骏,程星,祝安.石灰华沉积机制的实验研究[J]. *中国岩溶*, 1994, 13(3):197—205.
- [7] Nielsen A L. Kinetics of precipitation [M]. Macmillan, New York, 1964.
- [8] 刘再华,袁道先,何师意,等.四川黄龙沟景区钙华的起源和形成机理研究[J]. *地球化学*, 2003, 32(1):1—10.
- [9] Liu Zaihua, Svensson U, Dreybrodt W, et al. Hydrodynamic control of inorganic calcite precipitation in Huanglong Ravine, China: Field measurements and theoretical prediction of deposition rates[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(15):3087—3097.
- [10] 袁道先,章程.岩溶动力学的理论探索与实践[J]. *地球学报*, 2008, 29(3):355—365.
- [11] 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.
- [12] Gwenaël A, Frédéric G, Sandrine R, 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.
- [13] Philip M F. Do hydroelectric dams mitigate global warming? The case of Brazil's CuruÁ-una dam[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2005, 10(4): 675—691.
- [14] Delmas Robert, Galy-Lacaux Corinne, Richard Sandrine. 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.
- [15] Luiz P R, Marco A D, Bohdan M, et al. Biogenic gas production from major Amazon reservoirs, Brazil[J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17(7): 1443—1450.
- [16] Rosa L P, Santos M A D, Matvienko B, et al. Biogenic gas production from major Amazon[J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17:1443—1450.
- [17] 王禄仕,柴蓓蓓,刘虹,等.水源水库沉积物中氮的形态分布特征[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 5(42): 734—740.
- [18] 李香华.太湖水—气界面温室气体通量及时空变化特征研究[D].南京:河海大学,2005.
- [19] Duchemin E, Lucotte M, Canuel R, et al. Production of the greenhouse gases CH₄ and CO₂ by hydroelectric reservoirs of the boreal region[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(4): 529—540.
- [20] Luiz Pinguelli Rosa, Marco Aurélio dos Santos. Certainty and uncertainty in the science of greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs[M]. South Africa: World Commission on Dams, 2000:1—102.
- [21] Huttunen J T, V(a)isanen T S, Hellsten S K. Fluxes of CH₄, CO₂, and N₂O in hydroelectric reservoirs Lokka and Porttipahta in the northern boreal zone in Finland[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 16(1):3—17.
- [22] Nicolas Soumis, Éric Duchemin, René Canuel, et al. Greenhouse gas emissions from reservoirs of the western United States[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18:1—11.
- [23] 喻元秀,刘丛强,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.
- [24] Louis S L, Carol A K, Éric Duchemin, et al. Reservoir Surfaces as Sources of Greenhouse Gases to the Atmosphere: A Global Estimate [J]. *BioScience*, 2000, 50(9): 766—775.
- [25] 刘丛强,汪福顺,王雨春,等.河流筑坝拦截的水环境响应——来自地球化学的视角[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(4): 384—396.
- [26] 孙玮玮,王东启,陈振楼,等.长江三角洲平原河网水体溶存CH₄和N₂O浓度及其排放通量[J]. *中国科学 B辑:化学*, 2009, 39(2):165—175.
- [27] 王洪君,王为东,卢金伟,等.湖滨带温室气体氧化亚氮(N₂O)排放研究[J]. *生态环境*, 2006, 15(2):270—275.

Influence of hydraulic project on the carbon cycle in the karst reservoir

LI Qiang

(*Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MLR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China*)

Abstract: In recently, lots of dams are built for hydropower, reservoir and flooding control in China at karst area. To understand the effect of hydraulic project on the greenhouse gas emission from karst water reservoir and the disturbance on the carbon cycle in karst area, this paper presents a comprehensive overview on the greenhouse gas emissions based on relevant published studies.

Karst systems are sensitive to changes of many environmental factors, such as the atmospheric CO_2 partial pressure. So, the dams will produce the waterfall effect when karst water flows through the spillway or hydraulic turbine, the stability of DIC and the atmospheric CO_2 partial pressure will change, which will accelerate the emission of CO_2 and promote the precipitation of CaCO_3 .

Concerns about hydroelectric reservoir being important sources of greenhouse gases to the atmosphere have populated the specialized literature. The conversion of terrestrial land to an aquatic area for the creation of a reservoir is a major issue with regard to carbon cycle change in the production of carbon dioxide and methane. The impacts to carbon dynamics of impoundment in karst aquatic systems are mainly the result of three factors, (1) flooding of vegetation; (2) release of carbon from the flooded terrestrial biomass including soil organic matter; (3) the establishment of a new physical-chemical environment for carbon fixation and decomposition. So, the hydro-reservoirs produce biogenic gases through decomposing organic matter underwater. The bottom of the reservoir contains biomass that decomposes anaerobically, emitting principally CH_4 and N_2O , and secondarily CO_2 . In aerobic decomposition only CO_2 and N_2O are emitted.

Moreover, the karst hydro-reservoirs will receive allochthonous nutrients from their catchment areas via streams and through groundwater and surface water inflow. Increased nutrient input into karst hydro-reservoirs causes eutrophication. The increased availability of easily degradable autochthonous organic matter increases decomposition and oxygen consumption, promoting oxygen depletion in the water column and sediment. Anoxic conditions can increase CH_4 emissions from karst hydro-reservoirs by enhancing the CH_4 production and/or decreasing the CH_4 oxidation and low oxygen availability can also promote N_2O production. Nitrous oxide generation in karst hydro-reservoirs generally requires steep oxygen gradients allowing sequential aerobic nitrification and anaerobic denitrification to take place. This implies that the karst hydro-reservoirs could also be supersaturated with CH_4 and N_2O .

According to the results, the author provides the suggestion for the future study, (1) the qualitative analysis and quantitative calculation about greenhouse gas emissions from karst hydro-reservoirs must be carried out, and the emission rate from different carbon source should be compared; (2) the space-time analysis of the influence on the greenhouse gas emission should base on the karst carbon cycle and the life-cycle assessment methods for karst hydro-reservoirs should be considered.

Key words: karst; hydraulic projects; the stability of DIC; greenhouse gas; eutrophication

(编辑 韦复才)