

# 中国南方河道型水库 CO<sub>2</sub> 释放研究

汪福顺<sup>1</sup>, 王宝利<sup>2</sup>, 吴学谦<sup>1</sup>, 魏浩斌<sup>1</sup>, 贾晓斌<sup>1</sup>, 傅家楠<sup>1</sup>, 周涛<sup>1</sup>, 程天雨<sup>1</sup>

1. 上海大学 环境与化学工程学院, 上海 200444; 2. 天津大学 表层地球系统科学研究院, 天津 300072

**摘要:** 人工水库的温室气体释放是全球变化研究的重要热点问题。目前针对不同类型水库的相关研究仍然缺乏足够的案例。为认识河道型水库水气界面 CO<sub>2</sub> 释放特征, 于 2014—2015 年在江西省万安水库开展了季节性观测。采用 HydroC™/CO<sub>2</sub> 在线系统测定万安水库不同区域水体中  $p_{\text{CO}_2}$ , 同时测定了相关水质及气象参数。结果表明, 受水体滞留时间较短的影响, 万安水库水体没有明显的季节性热分层和化学分层现象。但相比于空间异质性, 该水库水质参数的季节性差异更为明显; 水气界面的 CO<sub>2</sub> 交换通量春季均值为 46.00 mmol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>, 夏季均值为 44.58 mmol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>, 秋季均值为 57.63 mmol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>, 冬季整体最低, 均值为 17.09 mmol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>。综合相关研究, 提出了水库 CO<sub>2</sub> 释放的滞留时间模式。

**关键词:** 万安水库; CO<sub>2</sub>; 通量; 滞留时间

中图分类号: P592 文章编号: 1007-2802(2017) 01-0040-08 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2017.01.005

## CO<sub>2</sub> Emission from the Wan'an Reservoir—Run-of-the-River Reservoir in Southern China

WANG Fu-shun<sup>1</sup>, WANG Bao-li<sup>2</sup>, WU Xue-qian<sup>1</sup>, WEI Hao-bin<sup>1</sup>, JIA Xiao-bin<sup>1</sup>,  
FU Jia-nan<sup>1</sup>, ZHOU Tao<sup>1</sup>, CHENG Tian-yu<sup>1</sup>

1. School of Environment and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2. Institute of Surface-Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract:** Green house gases emission from artificial reservoir is a hot spot in current researches on global climate change. However, related studies on the different types of reservoirs are still inadequate. In order to understand characteristics of the CO<sub>2</sub> emission from Run-of-the-river reservoir in southern China, a seasonal investigation on the Wan'an Reservoir in Jiangxi Province was carried out from 2014 to 2015. This study has used an online system (HydroC™/CO<sub>2</sub>) to measure  $p_{\text{CO}_2}$  in water, water quality parameters, and meteorological parameters at various sampling locations in this reservoir. The results show that due to the short time period of water retention, there is no seasonal thermal and chemical stratification in the water column of the Wan'an Reservoir. However, there are obvious seasonal differences of water quality parameters rather than the spatial heterogeneity; with respective average values of 46.00, 44.58, 57.63, and 17.09 mmol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup> for the CO<sub>2</sub> emission fluxes from water-air interface of the Wan'an Reservoir in Spring, Summer, Autumn, and Winter, respectively. Based on this study and other reports, a model for retention time of CO<sub>2</sub> emission from the reservoir has been proposed.

**Key words:** the Wan'an Reservoir; CO<sub>2</sub>; flux; retention time

长期以来,水电一直认为是迄今技术最成熟的、可大规模开发的获得清洁能源的主要途径。最新的一些研究却对这一认识提出了严重质疑(Giles 2006; Santos *et al.* 2006)。科学家们对寒温带及热带地区的部分水库观测发现,这些地区具有很高的 CO<sub>2</sub> 及 CH<sub>4</sub> 水面释放通量(Louis *et al.*, 2000; Fe-

arnside 2002, 2004; Rosa *et al.*, 2004; Abril *et al.*, 2005; Guérin *et al.*, 2006; Ramos *et al.*, 2009)。尤其是在一些热带地区的电站型水库,其生产单位电力所释放的 CO<sub>2</sub> 当量甚至远大于火力发电产生的 CO<sub>2</sub> 当量(Fearnside, 2001, 2002)。根据这些研究结论并结合其他一些有关水库的负面报道,使得人

收稿日期: 2016-09-17 收到 2016-10-23 改回

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0601003); 国家自然科学基金项目(41573064, 41273128)

作者简介: 汪福顺(1976-),男,研究员,获第16届侯德封奖,研究方向:水环境演变。E-mail: fswang@shu.edu.cn.

们开始激进地看待大坝继续存在的必要性 (Milliman, 1997; Ledec and Quintero, 2003; Hart *et al.*, 2002; Stokstad, 2006)。

然而, 现有的研究范例并不完全具备全球外推意义。水坝建成往往大量淹没陆地原生生态系统, 植被在随后的腐化降解过程中逐渐向水体释放无机形式的营养盐(包括 N、P 等), 同时释放温室气体(如  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  等)。在寒温带地区, 水坝建设往往淹没大量富含有机质的泥炭、沼泽地; 而在热带地区, 淹没区原始植被也具有相当高的生物量。 $\text{CH}_4$  及  $\text{CO}_2$  等温室气体主要由这些有机质的水下厌氧或耗氧降解产生。大量的有机质供应是温室气体产生的必要条件。温室气体产生的速率、向大气的释放通量还受到被淹没的生物量大小、坝址的气候状况、水库的水动力条件、水库运行时间、水坝泄水方式等多种因素的制约。此外, 由于河流普遍实行梯级水能开发, 在河流径向上的各级水库在水停留时间、水体分层结构等方面存在巨大差异, 现有的利用纬度模式或库龄模式进行的全球水库碳排放推广估算因此可能存在很大的不确定性 (Barros *et al.*, 2011); 因此, 有必要针对不同气候带, 不同类型水库开展相关工作。这一方面是水库温室效应科学评估的需求, 另一方面也是水库碳排放的全球尺度推广计算的依据。

河道型水库兼具湖泊自养型和河流异养型水生生态系统的双重特性, 通常具有水体滞留时间较短、能源密度较大等特点, 是流域综合水能开发中的一种重要类型。研究这一类型水库, 对于全面认识流域综合水能开发的碳排放具有重要意义。因此, 本项研究选择典型的河道型水库——万安水库, 开展水气界面碳交换研究, 揭示水库  $\text{CO}_2$  界面交换的季节性特征, 认识这一类型水库碳交换特征的生物地球化学机制, 以及通过对比来探讨水库水体停留时间与大气  $\text{CO}_2$  交换的关系。

## 1 研究区域与研究方法

万安水库位于赣江中上游, 属于典型的河道型水库, 库区位于低山与丘陵区, 主要由变质岩系和花岗岩体组成。万安水库于 20 世纪 90 年代开始蓄水发电, 库龄超过 20 年。根据赣江的地理特征和万安水库的地形, 从水库上游至大坝下游, 共设置 9 个采样点位(图 1)。其中 G-1 和 G-2 为河流区, 分别代表贡水与章水; G-3 位于贡水和章水交汇区, 是万安水库回水区上沿; G-3 和 G-4 位于库区上游, 为

河库过渡区; G-5 和 G-6 位于库区的中游, G-7 位于库区的下游, 这 3 个点是水库的湖泊区; G-8 和 G-9 分别为大坝的尾水和大坝下游。

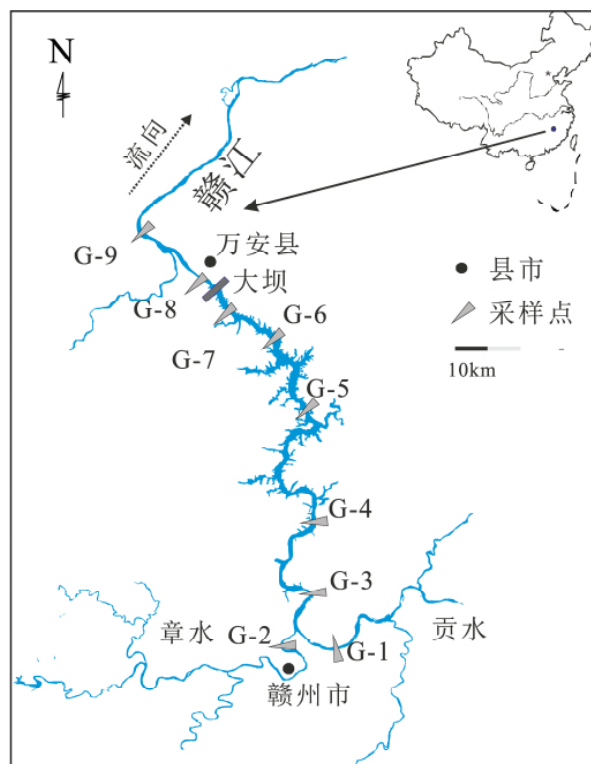


图 1 万安水库采样点位图

Fig.1 The sampling sites of the Wan'an Reservoir

本研究于 2014 年 9 月至 2015 年 6 月, 按照春 (3 月)、夏 (6 月)、秋 (9 月)、冬 (12 月) 4 个季节分别对万安水库进行了野外观测。使用便携式仪器 PROVA-05 测定实时气温和风速。利用潜水泵 (型号: 100QJ2-50/10) 抽取不同深度水, 自表层到水下 5 m 每隔 1 m 为一个取样点, 水下 5 m 至底层每隔 5 m 为一个取样点。用浊度仪 (型号: MI415) 检测水体浊度, 用德国 HydroCT<sup>TM</sup>/CO<sub>2</sub> 在线检测系统测定水体  $p_{\text{CO}_2}$ 。用美国 YSI-6600 在线检测系统测定水体的深度、温度、pH 值、Chl-a 及溶氧。

水-气界面  $\text{CO}_2$  的扩散通量, 由公式 (1) 计算 (Cole and Caraco, 1998; Crusius and Wanninkhof, 2003; Wanninkhof, 2014)。

$$F = (\text{CO}_{2w} - \text{CO}_{2g}) \times k = (p_{\text{CO}_{2w}} - p_{\text{CO}_{2g}}) \times K_H \times k \quad (1)$$

式中:  $F$  表示  $\text{CO}_2$  的扩散通量 ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ), 若  $F < 0$  表示水体吸收  $\text{CO}_2$ , 若  $F > 0$  则表示水体释放  $\text{CO}_2$ ;  $\text{CO}_{2g}$  表示水面上方空气中  $\text{CO}_2$  的浓度,  $\text{CO}_{2w}$  表示水中  $\text{CO}_2$  的浓度;  $K_H$  表示亨利系数, 可由公式 (2) 计算得到;  $k$  表示气体交换系数;  $p_{\text{CO}_{2w}}$  表示水中

CO<sub>2</sub> 的分压  $p_{\text{CO}_2\text{g}}$  表示空气中 CO<sub>2</sub> 的分压(本研究用 38.5 Pa)。

$$K_{\text{H}} = -58.0931 + 90.5069 \times \left( \frac{100}{T_{\text{x}}} \right) + 22.294 \times \ln \left( \frac{T_{\text{k}}}{100} \right) \quad (2)$$

式中:  $T_{\text{k}}$  表示开尔文温度(K)。

$k$  受到风速、温度、流速等多种因素的影响,导致  $k$  有许多中计算方式,对于水库而言,本文采用经验公式(3)来计算。

$$k = [2.07 + (0.215 \times v_{10}^{1.7})] \times \left( \frac{SC_{\text{CO}_2}}{600} \right)^x \quad (3)$$

式中:  $v_{10}$  表示水面上方 10 m 处的风速(m/s);  $SC_{\text{CO}_2}$  为 CO<sub>2</sub> 的施密特数,取决于温度;  $x$  取决于  $v_{10}$ ,若  $v_{10} < 3.7$  m/s 则  $x = -2/3$ ,若  $v_{10} > 3.7$  m/s 则  $x = -1/2$ 。

而  $v_{10}$  可以通过公式(4)计算获得,  $SC_{\text{CO}_2}$  由公式(5)计算获得

$$v_{10} = 1.22 \times v_1 \quad (4)$$

式中:  $v_1$  表示在水面上方 1 m 处的风速(m/s)。

$$SC_{\text{CO}_2} = 1911.1 - 118.11t + 3.4527t^2 - 0.04132t^3 \quad (5)$$

式中:  $t$  表示表层水的温度(°C)

## 2 结果

### 2.1 现场水质参数沿程变化

万安水库水体温度呈现出明显的季节变化。从水库分层水体来看,冬季表、底层温差很小,这是由于冬季温度较低,表层水体密度较大,从而增大水体的垂直交换。夏季有弱分层的现象,但表、底层的温差变化也不大。春、秋两季则表现出明显的过渡特性(图2)。总体而言,万安水库没有出现明显季节性热分层现象,这与湖泊型水库(如新安江水库)明显不同。同时也表明了该水库上下层水体之间的混合较好。

河流中 pH 值主要受到流域的岩性、气候、水体中碳酸盐平衡体系、以及水生生物的光合与呼吸平

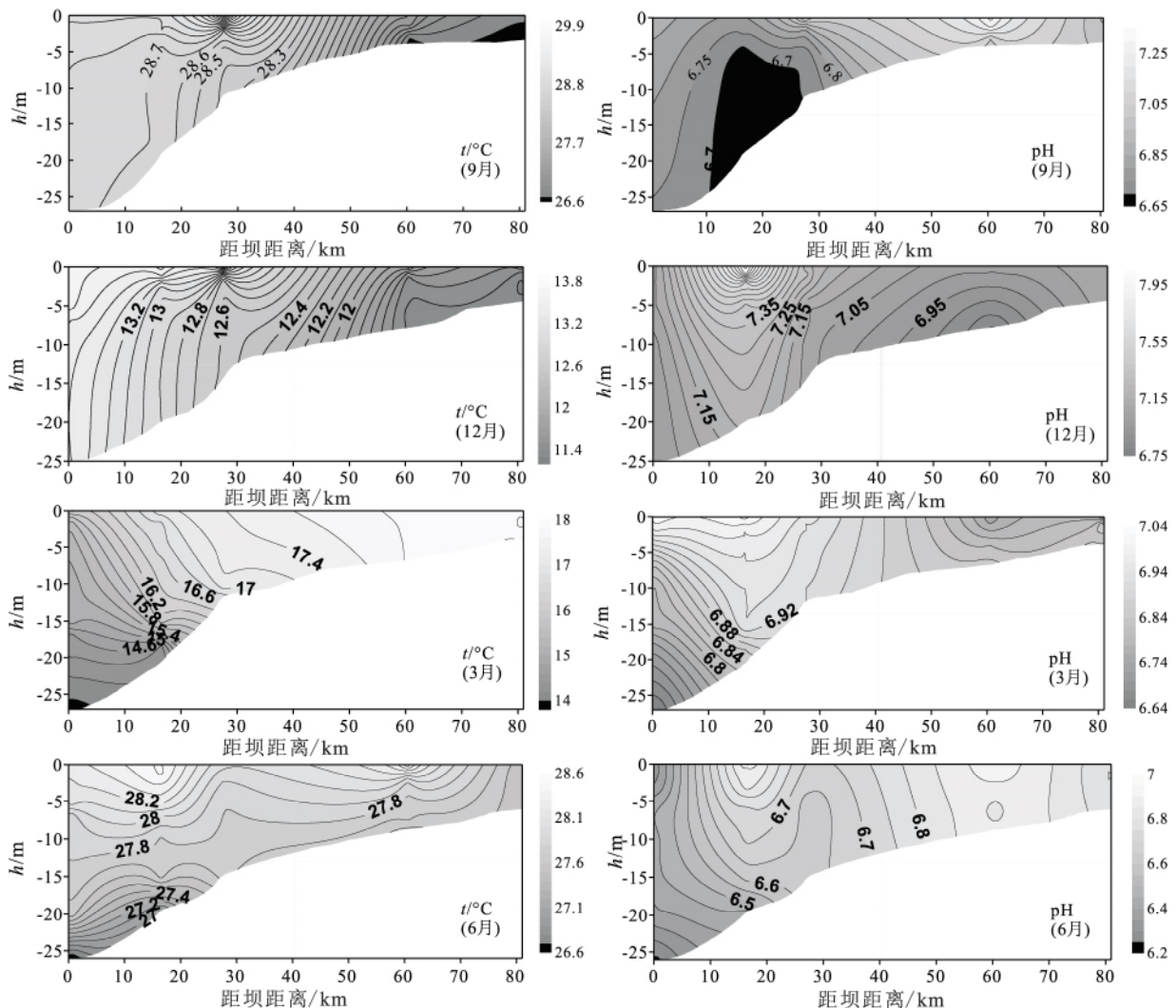


图2 万安水库水温( $t$ )、pH 值沿程分布

Fig.2 The variation of temperatures( $t$ ) and pH values of the water in the Wan'an Reservoir

衡等多因素控制,是水体水质的重要指标。一般而言,夏季气温高,表层水体光合作用强烈吸收  $\text{CO}_2$ ,从而使得 pH 值偏高,而冬季由于光合作用较弱,导致水体 pH 值偏低。万安水库水体 pH 值秋季为 6.66~7.31,冬季为 6.79~8.02,春季为 6.64~7.03,夏季为 6.24~6.96。总体上,冬季 pH 值偏高,夏季偏低,这与湖泊型水库夏高冬低呈现相反的趋势(Wang *et al.*, 2015)。

DO 含量是水体中光合过程与呼吸过程的重要指示。万安水库水体 DO 呈现出明显的变化,秋季为 4.09~7.54 mg/L,冬季为 8.37~11.77 mg/L,春季为 6.17~9.26 mg/L,夏季为 0.66~7.39 mg/L。总体而言,冬季 DO 含量最高,表层水体甚至超过大气  $\text{O}_2$  的饱和溶解度。这与冬季 pH 值最高相吻合(图 2),表明万安水库水体在冬季具有较强的光合

作用。从水层剖面上看,夏季表、底层水体 DO 差异相对较大,且底层 DO 低于其他季节底层的数据,这一方面跟水体具有弱的热分层有关,也与底层有机质分解有关。

水体浊度不仅反映水体水动力特点,也对水生光合作用产生重要影响。万安水库水体浊度季节变化较大(图 3):秋季为 3.34~32.37 NTU,冬季为 2.85~17.80 NTU,春季为 1.44~34.40 NTU,夏季为 11.72~46.93 NTU。总体上,从上游河道向库区,沿程浊度基本表现出逐渐降低的态势。河流区水位较浅,流速较快,相对而言浊度较大;沿着水库方向随着流速减缓,浊度有所下降,经过大坝的拦截作用,使得浊度进一步降低。相比较而言,整体上冬季浊度最低,水库处于蓄水期,水体流速较缓,水体相对澄清,加上赣南地区冬季气温较高,从而有利

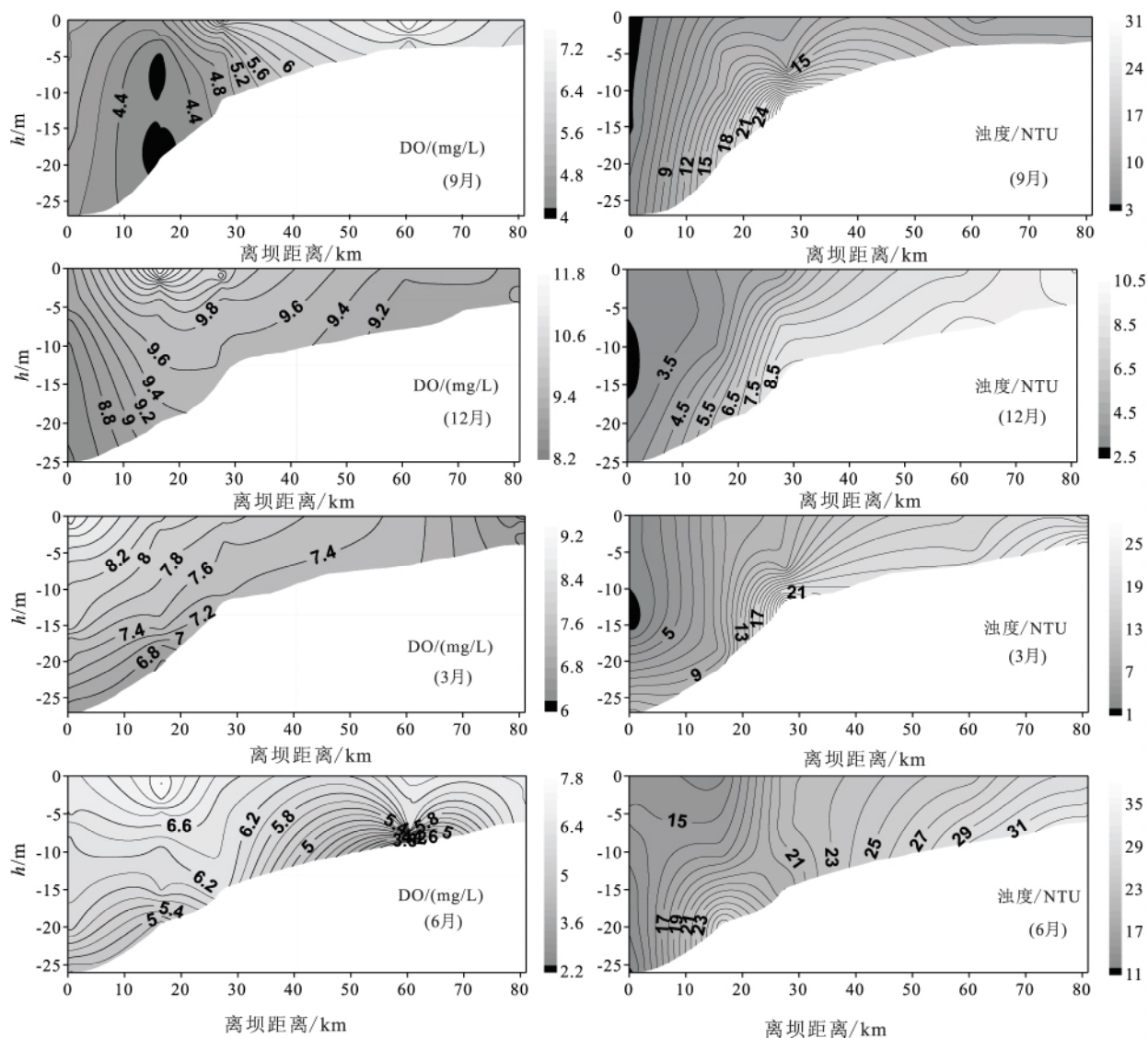


图3 万安水库溶解氧(DO)、浊度(NTU)沿程分布

Fig.3 The variation of DO values and turbidities of the water in the Wan'an Reservoir



于表层光合的进行。夏季浊度最高,导致透光性降低,限制了光合作用的进行。

### 2.2 万安水库沿程 $p_{\text{CO}_2}$ 变化

万安水库水体  $p_{\text{CO}_2}$  秋季均值 309.9 Pa,变化范围为 133.1~400.3 Pa; 冬季均值 124.2 Pa,变化范围为 15.9~166.9 Pa; 春季均值 233.5 Pa,变化范围 128.1~399.3 Pa; 夏季均值 226.5 Pa,变化范围为 128.1~416.8 Pa。整体上,冬季  $p_{\text{CO}_2}$  相对偏低,库区表层水体甚至低于大气  $\text{CO}_2$  水平(图4)。水体的剖面上  $p_{\text{CO}_2}$  随着深度的增加而逐渐增大。这与有机质沉降及分解有关。

相比较而言,万安水库表层水体  $p_{\text{CO}_2}$  的季节性变化更为明显: 秋季均值为 230.4 Pa、冬季均值为 100.3 Pa、春季均值为 200.8 Pa、夏季均值为 187.0 Pa。在河流流向上,水库的中心区域普遍具有更低的  $p_{\text{CO}_2}$ ,这是由于库心区域水位相对较深,水面较宽,流速较缓,水体浊度降低,有利于光合作用进行,并吸收水中  $\text{CO}_2$ 。

### 2.3 水气界面 $\text{CO}_2$ 扩散通量特征

根据  $\text{CO}_2$  扩散通量公式,分别对 G-1 至 G-9 各站点水气界面  $\text{CO}_2$  交换通量进行计算(表1)。结果表明:  $\text{CO}_2$  交换通量存在显著的季节性差异,春季均值为  $46.00 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,夏季均值为  $44.58 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,秋季均值为  $57.63 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,

表1 万安水库水气界面  $\text{CO}_2$  释放通量

Table 1 The emission flux of  $\text{CO}_2$  from water-air interface of the Wan'an Reservoir ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ )

点位	春季	夏季	秋季	冬季
G-1	34.20	32.25	69.48	11.22
G-2	56.05	67.95	57.93	23.92
G-3	95.01	54.59	51.17	23.40
G-4	56.09	42.29	28.07	26.21
G-5	41.64	48.76	41.32	10.23
G-6	37.62	26.94	78.12	-6.30
G-7	25.28	54.96	79.81	22.32
G-8	39.31	32.62	74.38	27.51
G-9	28.82	40.85	38.36	15.34
河流区	45.12	50.10	63.71	17.57
过渡区	75.55	48.44	39.62	24.80
中心库区	34.85	43.55	66.42	8.75
坝后泄水	34.06	36.73	56.37	21.42

冬季均值为  $17.09 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。冬季整体最低,尤其在 G-6 点位出现吸收大气  $\text{CO}_2$  的现象。

进一步将万安水库进行区段划分: G-1 和 G-2 的均值作为河流区通量、G-3 和 G-4 的均值作为过渡区通量、G-5、G-6 和 G-7 的均值作为中心库区通量、G-8 和 G-9 的均值作为坝后泄水区通量(表1)。除秋季外,中心库区具有相对更低的水气界面  $\text{CO}_2$  扩散通量。坝后泄水区  $\text{CO}_2$  扩散通量与河流区相近,水体特性更加接近于自然河流。

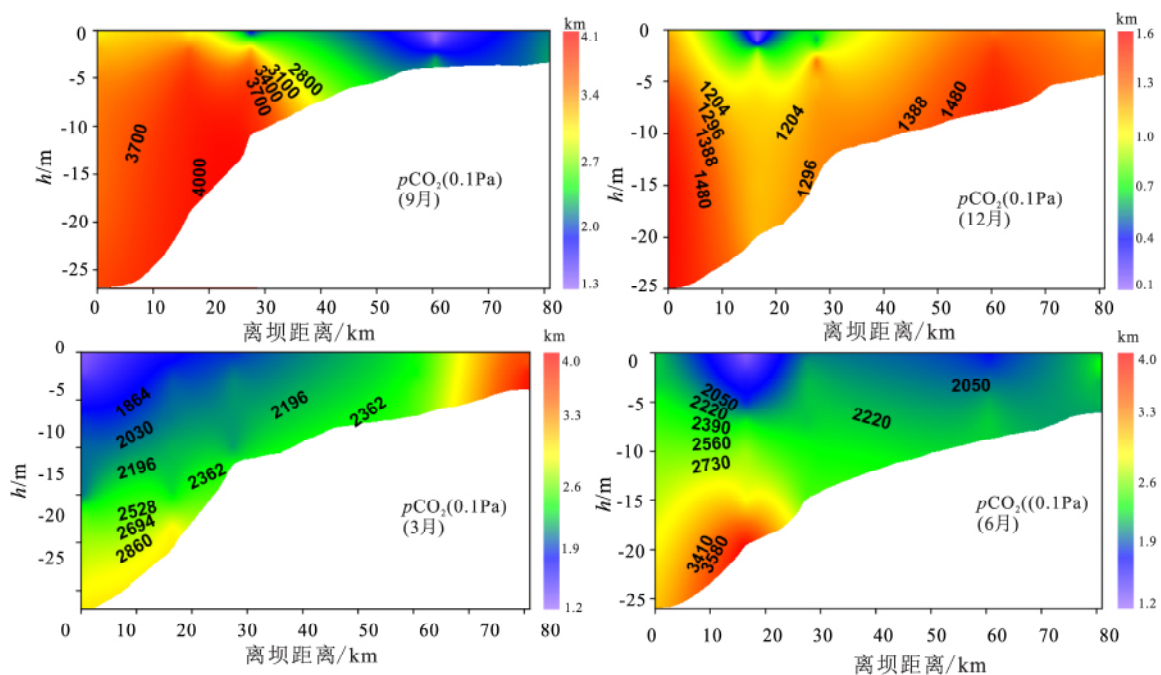


图4 万安水库水体  $p_{\text{CO}_2}$  时空分布

Fig.4 The temporal and special variation of  $p_{\text{CO}_2}$  values of the water in the Wan'an Reservoir

### 3 讨论

水体中溶解无机碳主要来源于流域化学风化输入,少量由大气降水输入。在特定流域背景下,对水体中碳酸盐平衡体系产生碳贡献的主要过程为有机质的降解过程,包括流域输入的外源性有机质和河道内自生形成的内源性有机质;以及水生光合作用过程。前者增加水体中  $p_{\text{CO}_2}$ ,同时降低水体中 DO 及 pH 值;后一过程则正好相反。当天然河流拦截筑坝形成水库后,水库水体剖面上逐渐发育季节性热分层。发育程度受控于水体的停留时间。此外,随着水动力条件减弱,上层水体透明度增加,这一过程将导致水生光合作用增强,并吸收水体中溶解  $\text{CO}_2$ 、增加水体 DO 水平;相反,受到沉降作用的影响,沉积物表层及下层水体中有机质降解作用增强,这一过程消耗水体中 DO 并增加  $p_{\text{CO}_2}$ 。因此,相比于下层水体,水库上层水体通常具有更高的 DO 含量,及更低的  $p_{\text{CO}_2}$ ,相应地 pH 值更高,特别是在水体热分层期间(图 2,图 3)。万安水库水体中  $p_{\text{CO}_2}$  与 DO、pH 值的相关分析证实了光合作用与降解过程的转换(图 5)。

与水体停留时间较长的湖泊型水库不同(如新安江水库、洪家渡水库)(喻元秀等,2008; Wang *et al.*, 2015),万安水库为日调节水库类型,水体平均停留时间为 10~14 d。受此影响,万安水库库区河流基本呈现一维流态,剖面水体保持了较好的混合状态。因此,万安水库总体上没有出现明显的热分层、化学分层现象。水库水体参数的季节性差异比空间差异更为显著。显然,万安水库的河流特征更为明显,水气界面的  $\text{CO}_2$  交换通量也更接近自然河流。值得注意的是,万安水库冬季水气界面  $\text{CO}_2$  交换通量达到最低,与多数相关报道明显不同(喻元

秀等,2008; Wang *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2015)。这主要是由于万安水库所处的赣南地区在冬季仍具有较高气温,而且水体浊度远比其他季节低。这导致了水库表层水体光合作用增强,并使得表层水体中溶解  $\text{CO}_2$  被大量吸收,特别是在中心库区。

随着世界河流的广泛拦截筑坝,人工水库已经成为了陆地水文系统中的重要水文单元。例如,中国仅长江流域内就已建成了近 50 000 多座大小各型水库。水体流动是控制江河基本特性的“首要变量”,筑坝拦截引起的流场调整毫无疑问会显著改变河流生态系统的结构和功能(Hart *et al.*, 2002)。拦截蓄水后,河流发生的最显著变化是水体滞留时间增加,同时也意味着水库水深、水动力、透明度、沉积物搬运、水体层化等方面与天然河流发生了显著变化。拦截后形成的“蓄水河流”和自然河流也因此存在显著不同的水环境演化特征。水坝拦截不仅改变了河流的水文过程,也对河流以碳为核心的元素生物地球化学循环产生深远影响(Dynesius and Nilsson, 1994; Vörösmarty *et al.*, 1997)。其中,水库碳排放在过去十多年中受到了广泛关注,一些学者还对水库碳排放进行全球性估算(如, Louis *et al.*, 2000; Barros *et al.*, 2011; Raymond *et al.*, 2013)。由于在全球水库水面积数据、水气交换系数设定、引用文献的代表性等方面存在差异,这些估值表现出较大的变化。因此,在进行大尺度推广运用时,推广依据及其合理性成为制约估算结果可靠性的重要因素。Barros 等(2011)率先提出了水库碳排放的库龄模式及纬度模式。由于这 2 种模式没有考虑水库类型差异,其推广估算结果实际上并不精细。事实上,受流域综合水能开发中的定位差异,水库具有的不同调节类型(如,从日调节到多年调节等),这主要表现在水体滞留时间的差异上。

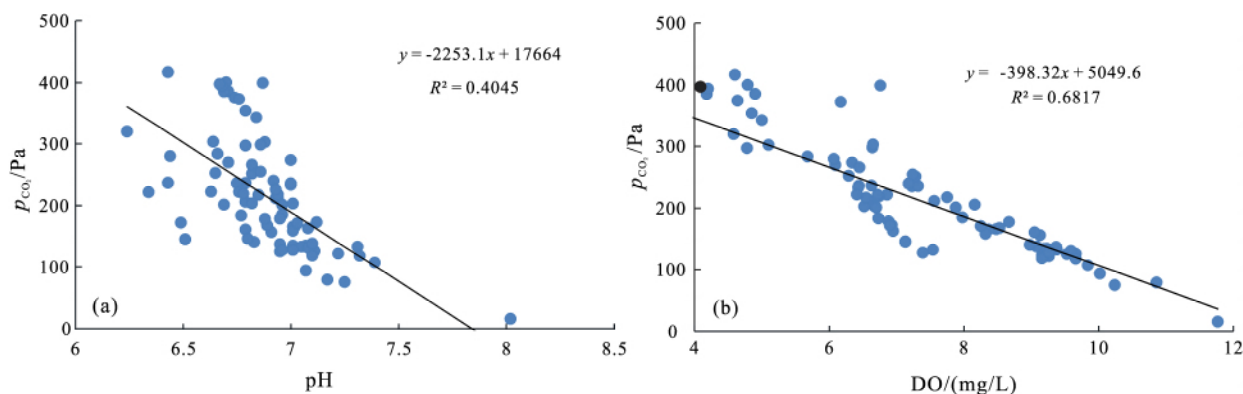
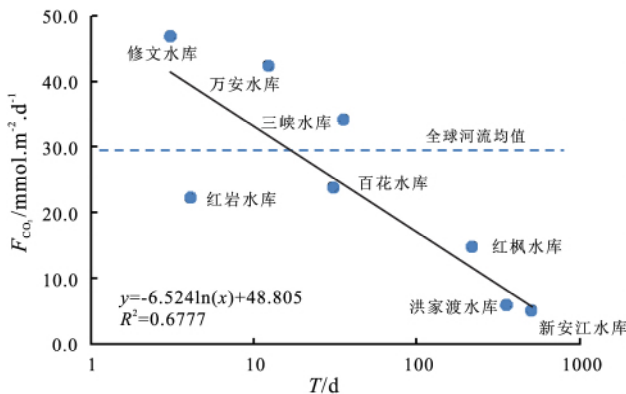


图5 万安水库  $p_{\text{CO}_2}$  与 pH 值和 DO 的线性关系

Fig.5 Linear relationship between  $p_{\text{CO}_2}$  and pH, DO values of the water in the Wan'an Reservoir

对于滞留时间较短的水库,如修文水库(Wang *et al.*, 2011),其水动力条件、水体浊度、混合状况等方面均接近天然河流,水生生态系统也表现为河流的“异养”特性。因此,受到有机质分解作用的影响,水体中通常具有较高的  $\text{CO}_2$  分压。相反,在具有较长水体滞留时间水库中,如新安江水库(Wang *et al.*, 2015),库区水体通常发育季节性热分层,进一步发育出生物分层及化学分层。水生生态系统也更接近天然湖泊的“自养”特征,这导致了水库光合作用的增强,并大量吸收水体中溶解  $\text{CO}_2$ ,因此显著降低表层水体  $\text{CO}_2$  分压水平。

根据不同调节类型水库的上述差异,本研究综合了相关报道,以水体滞留时间为梯度,提出水库  $\text{CO}_2$  释放的水体滞留时间模式(图6)。考虑到采样频次及代表性问题,同时避免气候带差异带来潜在影响,本研究仅统计了长江流域的部分水库。从图6可以看出,滞留时间较短的水库  $\text{CO}_2$  释放通量更接近天然河流。此外,由于这些水库处于同一气候带,但具有差异很大的  $\text{CO}_2$  释放通量,这表明纬度模式具有很大的局限性。因此,进一步完善滞留时间模式,探讨大尺度推广估算的可行性将是未来需要开展的工作。



数据来源: 修文、红岩、红枫、百花水库(Wang *et al.*, 2011); 洪家渡水库(喻元秀等, 2008); 新安江水库(Wang *et al.*, 2015); 三峡水库(本课题组未发布数据); 万安水库(本研究)

图6 水库水体滞留时间与水气界面  $\text{CO}_2$  释放通量的关系

Fig.6 Relationship between the  $F\text{-CO}_2$  value and water retention time in different reservoirs

## 4 结论

(1) 作为典型的河道型水库,万安水库没有发育明显的水体热分层及化学分层现象。相应地,河流水质参数在水库上下游之间保持较好的连续性。万安水库的  $\text{CO}_2$  释放特征也因此保持了河流特点;

(2) 相比于文献报道的纬度模式,本文提出的

滞留时间模式考虑了水库的类型差异,更能适合流域水能开发的现状。

## 参考文献 (References):

- Abril G, Guérin F, Richard S, Delmas R, Galy-Lacaux C, Gosse P, Tremblay A, Varfalvy L, Dos Santos M A, Matvienko B. 2005. Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana). *Global Biogeochemical Cycles*, 19(6): GB4007
- Barros N, Cole J J, Tranvik L J, Prairie Y T, Bastviken D, Huszar V L M, Del Giorgio P, Roland F. 2011. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature Geoscience*, 4(9): 593-596
- Cole J J, Caraco N F. 1998. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of  $\text{SF}_6$ . *Limnology and Oceanography*, 43(4): 647-656
- Crusius J, Wanninkhof R. 2003. Gas transfer velocities measured at low wind speed over a lake. *Limnology and Oceanography*, 48(3): 1010-1017
- Dos Santos M A, Rosa L P, Sikar B, Sikar E, Dos Santos E O D. 2006. Gross greenhouse gas fluxes from hydro-power reservoir compared to thermo-power plants. *Energy Policy*, 34(4): 481-488
- Dynesius M, Nilsson C. 1994. Fragmentation and flow regulation of river systems in the northern third of the world. *Science*, 266(5186): 753-762
- Fearnside P M. 2001. Environmental impacts of Brazil's Tucuruí Dam: Unlearned lessons for hydroelectric development in Amazonia. *Environmental Management*, 27(3): 377-396
- Fearnside P M. 2002. Greenhouse gas emissions from a hydroelectric reservoir (Brazil's Tucuruí Dam) and the energy policy implications. *Water, Air and Soil Pollution*, 133(1-4): 69-96
- Fearnside P M. 2004. Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: Controversies provide a springboard for rethinking a supposedly 'clean' energy source. *An editorial comment. Climatic Change*, 66(1-2): 1-8
- Giles J. 2006. Methane quashes green credentials of hydropower. *Nature*, 444(7119): 524-525
- Guérin F, Abril G, Richard S, Burban B, Reynouard C, Seyler P, Delmas R. 2006. Methane and carbon dioxide emissions from tropical reservoirs: Significance of downstream rivers. *Geophysical Research Letters*, 33(21): L21407
- Hart D D, Johnson T E, Bushaw-Newton K L, Horwitz R J, Bednarek A T, Charles D F, Kreeger D A, Velinsky D J. 2002. Dam Removal: Challenges and opportunities for ecological research and river restoration. *Bioscience*, 52(8): 669-682
- Ledec G, Quintero J. 2003. Good dams and bad dams: Environmental criteria for site selection of hydroelectric projects. In: Latin America and Caribbean Region, Environmentally and Socially Sustainable Development Department (LCSES). Washington D C: The World Bank
- Louis V L S, Kelly C A, Duchemin É, Rudd J W M, Rosenberg D M. 2000. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere.

- phere: A global estimate. *BioScience*, 50(9): 766–775
- Milliman J D. 1997. Blessed dams or damned dams? *Nature*, 386(6623): 325–327
- Ramos F M, Bambace L A W, Lima I B T, Rosa R R, Mazzi E A, Fernside P M. 2009. Methane stocks in tropical hydropower reservoirs as a potential energy source. *Climatic Change*, 93(1): 1–13
- Raymond P A, Hartmann J, Lauerwald R, Sobek S, McDonald C, Hoover M, Butman D, Striegl R, Mayorga E, Humborg C, Kortelainen P, Dürr H, Meybeck M, Ciais P, Guth P. 2013. Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature*, 503(7476): 355–359
- Rosa L P, Dos Santos M A, Matvienko B, Dos Santos E O, Sikar E. 2004. Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical regions. *Climatic Change*, 66(1–2): 9–21
- Stokstad E. 2006. Big dams ready for teardown. *Science*, 314(5799): 584
- Vörösmarty C J, Sharma K P, Fekete B M, Copeland H, Holden J, Mar-ble J, Lough J A. 1997. The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world. *Ambio*, 26(7): 210–219
- Wang F S, Wang B L, Liu C Q, Wang Y C, Guan J, Liu X L, Yu Y X. 2011. Carbon dioxide emission from surface water in cascade reservoirs–river system on the Maotiao River, southwest of China. *Atmospheric Environment*, 45(23): 3827–3834
- Wang F S, Cao M, Wang B L, Fu J N, Luo W Y, Ma J. 2015. Seasonal variation of CO<sub>2</sub> diffusion flux from a large subtropical reservoir in East China. *Atmospheric Environment*, 103: 129–137
- Wanninkhof R. 2014. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited. *Limnology and Oceanography-Methods*, 12(6): 351–362
- 喻元秀, 刘丛强, 汪福顺, 王宝利, 王仕禄, 刘芳. 2008. 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. *生态学杂志*, 27(7): 1193–1199
- (本文责任编辑: 刘莹; 英文审校: 张兴春)

## • 亮点速读 •

### 分异的冲击熔岩席可能是冥古宙碎屑锆石的潜在来源之一

由于普遍缺少大于40亿年的岩石记录, 赋存在太古宙变质沉积岩中的冥古宙碎屑锆石构成了探索地球初期地壳演化及其动力学机制的唯一直接证据。因此, 较好地限制冥古宙碎屑锆石的来源和历史也就成为探索这一问题的关键。

爱尔兰学者 Kenny 博士及其合作者以前人研究比较详细的分异的萨德

伯里冲击熔岩席为研究对象, 首次采用锆石离子探针综合分析方法对该岩席进行了全地层采样分析, 结果显示, 其锆石 Ti 含量和相应的结晶温度计算结果完全覆盖了那些冥古宙锆石群组的相应数据范围。此外, 一个重要的地质事实是, 地球上的冲击熔岩席在水下冲击盆地分异最为强烈。因此, 该研究表明, 并不是所有的低 Ti 冥古

宙碎屑锆石都形成于板块边界的熔融过程中, 也可以形成于早期水地下壳遭受强烈陨石撞击所引起的冲击熔岩席结晶过程中。因此, 在应用低 Ti 冥古宙碎屑锆石探讨地球初期动力学机制时需更为谨慎, 要综合考虑沉积搬运过程中的优先选择和局限的碎屑源区等条件。

[以上成果来源于: Gavin G. Kenny, Martin J. Whitehouse, and Balz S. Kamber. Differentiated impact melt sheets may be a potential source of Hadean detrital zircon. *Geology* 44(6): 435–438]

(夏群科 供稿)



【编者按】侯德封奖从设立至今已近三十年,2016年举办了第16届侯德封奖评审,表彰了18名优秀的年青地学科技工作者。三十多年来学会在举办侯德封奖的过程中一直坚持“公平、公开、公正”和鼓励创新的原则,为发现人才、培养人才做出了积极的努力,并得到了社会各界的赞赏和肯定。为了宣传获奖人的成果,本刊特辟“登侯德封奖获奖者论文”栏目刊载获奖人的学术论文,产生了很好的社会效益。从本期起,本刊将陆续刊登第16届侯德封奖评选出的18位获奖人的学术论文,以飨读者。

## 作者简介



侯通,男,32岁,中国地质大学(北京)地球科学与资源学院副教授,硕士生导师。从事岩石学、实验岩石学和相关固体矿产成因研究。主要研究领域为火成岩有关的矿床成矿物质富集过程的实验研究。近年来针对岩浆系统中的相平衡、溶解度和元素的分配等及其与物理化学条件的关系,集中开展在挥发分作用下的系统的定量实验工作,为成岩成矿过程提供关键实验依据。



倪怀玮,男,35岁,中国科学技术大学教授,博士生导师。从事实验岩石学、计算地球化学和地球化学动力学研究。通过研究硅酸盐熔体和富水流体的物理化学性质以及挥发分演化,促进对地球内部状态和地质过程的认识。阐明了软流圈低速带和活动岩浆房的电导率异常机制,建立了研究火山喷发亟需的熔体水扩散系数模型,发展了硅酸盐熔体迁移性质的理论体系。



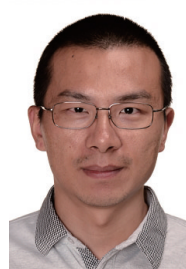
苏本勋,男,34岁,中国科学院地质与地球物理研究所研究员。从事镁铁-超镁铁岩的成岩成矿作用研究。研究成果包括:揭示了西秦岭层状岩石圈地幔结构,在汉诺坝首次发现假蓝宝石并厘定了幔源假蓝宝石成因;揭示了地幔交代作用中Li同位素的地球化学行为,研发了斜方辉石、单斜辉石和橄榄石的Li同位素标样;提出东天山-北山早二叠世镁铁-超镁铁岩的造山后伸展与地幔柱叠置成因模式及造山带岩体的铜镍成矿作用,在东天山首次发现阿拉斯加型岩体。



汪福顺,男,博士,40岁,上海大学环境与化学工程学院研究员,博士生导师。从事河流拦截产生的水环境演变研究。主要研究梯级水库温室气体释放、水库营养盐拦截效应及水库水环境研究的历史研究。近期提出了水库CO<sub>2</sub>释放的滞留时间模式,为大尺度推广研究奠定了基础。详细研究了水库对河流营养盐的拦截作用,及其对下游水体的环境影响。



杨燕,女,37岁,浙江大学地球科学学院副教授,硕士生导师。从事矿物谱学和矿物物理研究。主要研究地球深部矿物中的挥发分(OH和NH<sub>4</sub>)在高温下的振动,发现名义上无水矿物(NAMs)中,不同结合机理的OH具有不同的温度依赖性,并且H在晶体结构中随着温度变化会发生不同位置之间的迁移。为探讨水对地球深部物理性质和过程的影响机制提供新的依据。



张宝华,男,中国科学院地球化学研究所研究员,博士生导师。2014年入选中国科学院“百人计划”,2015年5月入中组部第六批“青年千人计划”。主要从事地球内部物质物性(电性、扩散性、热物理性质、部分熔融与剪切变形等)的高温高压实验与理论研究,近五年以来以第一作者在国际地学著名期刊上发表SCI论文20余篇;先后获中国科学院朱李月华奖(2008年)、安徽省优秀博士论文奖(2014年)、中国矿物岩石地球化学学会侯德封奖(2016年)。