

大坝和河湖交汇对长江干流水体碳酸盐动态平衡和 CO₂ 排放的影响研究

赵楚

南京师范大学

摘要：大坝建设的兴起以及河湖的交汇对溶解无机碳（DIC）的传输和转化产生了深刻的影响。深入了解大坝运行和湖泊补给驱动下河流连续体中碳酸盐系统的平衡机制和 DIC 有机来源的变化，对于调控温室气体排放和评估 DIC 对全球碳循环的影响至关重要。通过对长江干流水体(重庆至上海段)中碳酸盐系统(DIC、CO₃²⁻和 CO₂)、DOM 分子结构(FT-ICR MS)和稳定同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$)的分析，研究了三峡大坝运行和湖泊汇入对长江表层水体碳酸盐平衡和 CO₂ 排放的影响。结果表明，2022 年 7 月和 8 月长江干流 DIC 浓度从上游($2253.10 \pm 46.81 \mu\text{mol L}^{-1}$)至下游($1844.01 \pm 220.63 \mu\text{mol L}^{-1}$)呈现逐渐下降的变化趋势,而 pCO₂ 和 DIC 的有机来源占比则从上游($1490.63 \pm 244.60 \mu\text{atm}$, $12.13 \pm 3.09\%$)至下游($1620.45 \pm 266.02 \mu\text{atm}$, $23.05 \pm 6.12\%$)逐渐增加。SEM 模型揭示了三峡大坝运行后，沉积物矿化驱动的 pH 值下降导致库区 DIC 浓度的逐年增加，由此造成的碳酸盐缓冲效应增强使得库区单位面积 CO₂ 通量(FCO₂)下降，但筑坝造成的集水区面积增加使得库区表层水体 CO₂ 排放总量高于三峡大坝运行前。利用超平面学习嵌套 SHAP 算法揭示 DOM 中高含氧不饱和化合物(HUPS-H)对 pCO₂ 的正贡献，这与 HUPS-H 输入造成的 DIC 有机源增加有关。DIC 有机源的增加削弱了长江中游碳酸盐缓冲效应并促进了来自库区高浓度 HCO₃⁻向 CO₂ 的转化，并形成 CO₂ 排放热点区域。长江下游 $\delta^{18}\text{O}$ 与 DIC 的负相关关系反映了洞庭湖和鄱阳湖汇入降低了 DIC 浓度及其碳酸盐风化来源。但与筑坝前相比，长江下游 DIC 的浓度有所增加。我们预估由筑坝造成的上游和中游 FCO₂ 的增加($14.18 \pm 5.70 \text{ Gg} \cdot \text{mth}^{-1}$)在距出海口 835~863km 被下游增强的碳酸盐缓冲效应所抵消。研究强调了大坝和河湖交汇对河流连续体中碳酸盐动态平衡和 CO₂ 排放的重要影响。特别是，由特殊气候事件造成的 DIC 来源变化对河流 CO₂ 排放的影响在岩溶区域更应该被关注。

关键词：长江,碳酸盐系统,CO₂ 排放,FT-ICR MS,机器学习