



新闻动态

您现在的位置: 首页 > 新闻动态 > 学术前沿

- 图片新闻
- 头条新闻
- 通知公告
- 学术活动
- 综合新闻
- 科研动态
- 研究亮点
- 学术前沿

## 【前沿报道】Science Advances: 海-气交换不平衡增加冰期海洋碳存储

2019-09-02 | 【大 中 小】【打印】【关闭】

南极冰芯记录显示,冰期大气CO<sub>2</sub>浓度比间冰期平均低~90ppm(相当于~200Pg C),且CO<sub>2</sub>的变化与温度变化具有很好的一致性(Luthi et al., 2008)(图1)。冰期消失的大气CO<sub>2</sub>去向何处?受哪些机制控制?这些问题一直是古气候学界亟需解决的重大科学问题。海洋碳库储量约为38000 Pg C(3.8×10<sup>19</sup>g C),相当于大气碳库的60多倍,通过海气交换,海洋生物量的变化以及海洋物理/化学状态的变化,是调控冰期-间冰期大气CO<sub>2</sub>变化的主要碳库。海洋无机碳库(DIC)的变化主要涉及到两个方面的碳循环过程:溶解泵和生物泵。温度决定CO<sub>2</sub>在海水中的溶解度,温度越低,CO<sub>2</sub>溶解度越大。当表层洋流将热带地区海水输送到高纬度地区时,海水冷却,通过海气交换吸收大气中CO<sub>2</sub>,导致表层海水较高的即时溶解无机碳浓度(C<sub>pref</sub>),并在高纬地区注入到深海,这一过程即为溶解泵(图2A)。生物泵(C<sub>reg</sub>)则指海洋浮游生物通过光合作用固定大气CO<sub>2</sub>,以颗粒有机物(软组织泵: C<sub>soft</sub>)和无机碳(无机碳泵: C<sub>CaCO3</sub>)的形式下沉并矿化分解向深海输送溶解无机碳的过程(图2A)。

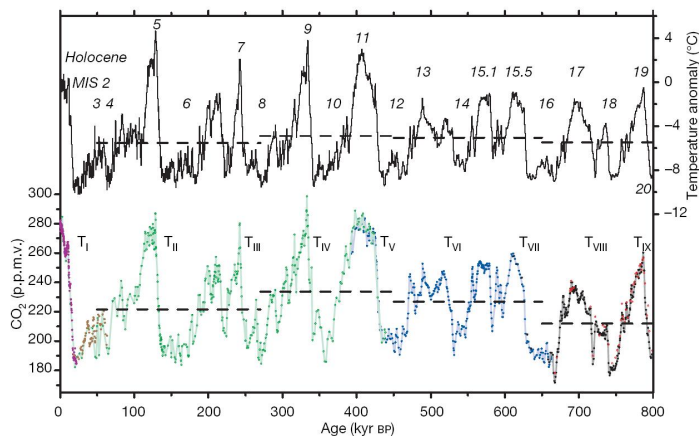


图1 冰期-间冰期大气CO<sub>2</sub>浓度和温度记录(Luthi et al., 2008)

基于碳泵的变化,许多假说被提出来解释冰期大气CO<sub>2</sub>浓度的降低。这些假说大体上可分为两类。其一是冰期温度降低增强溶解泵。理论计算表明冰期全球平均海面温度降低~2.5℃将导致大气CO<sub>2</sub>浓度降低25ppm,只能解释大约1/4冰期CO<sub>2</sub>变化量(Williams and Follows, 2011)。其二是增加冰期生物泵效率。可通过三种方式来实现:(1)海洋环流重组,大约能解释~40ppm冰期CO<sub>2</sub>变化(Brovkin et al., 2007);(2)海冰范围扩张,大约能解释~67ppm冰期CO<sub>2</sub>变化;(3)Fe施肥,仅能解释~5-28ppm的CO<sub>2</sub>变化量(Martin, 1990)。这些假说均隐含一个前提,即海-气交换平衡。然而,海水碳酸盐系统由溶解CO<sub>2</sub>、碳酸根和碳酸氢根组成,对海水CO<sub>2</sub>分压变化具有较强的缓冲效应,导致海水同大气的平衡交换非常慢(~1年)。因此,大部分表层海水同大气并未达到交换平衡。比如,在高纬地区,海水变冷吸收大气CO<sub>2</sub>,由于平衡交换时间较慢,使得这些水体在下沉时实际含有的CO<sub>2</sub>量比理论上能够从大气中吸收的要少的多。而在上升流区域,洋流将生物矿化产生的CO<sub>2</sub>带到表层,由于缓慢的气体交换过程,海水脱气并不完全,使得这些水体下沉时实际含有的CO<sub>2</sub>量比理论上能够从大气中吸收的要多。类似的不平衡过程使得准确定量海洋DIC分布、评估各种过程对冰期CO<sub>2</sub>的贡献变得异常困难。

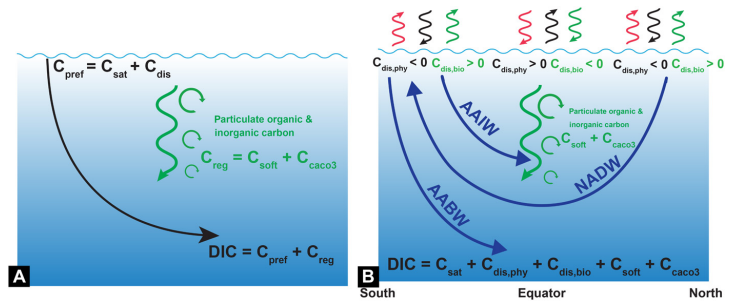


图2 海洋碳组分分解示意图 (Khatiwala et al., 2019)

近期,英国牛津大学Khatiwala教授及合作者在*Science Advances*上发表文章,巧妙地将溶解泵( $C_{pref}$ )分解为溶解平衡组分( $C_{sat}$ )、物理过程不平衡组分( $C_{dis,phy}$ )和生物过程不平衡组分( $C_{dis,bio}$ ) (图2B),试图定量海-气交换不平衡对冰期 $CO_2$ 变化的贡献。Khatiwala教授等将这一分解应用到海洋生物地球化学模型,模拟了冰期海洋各组分碳的变化情况,发现热带海洋和南大洋表层海水表现为正的海-气交换不平衡( $C_{dis}>0$ ),即为过饱和水体,当这些水体输送到深海,将增加海洋的碳储存;在副热带、北大西洋绕极区和北冰洋表层海水表现为负的海气交换不平衡( $C_{dis}<0$ ),即为不饱和水体,当这些水体输送到深海,将减少海洋的碳储存(图3)。模拟的各组分碳储库结果显示(图3A),同工业革命相比,冰期溶解平衡组分( $C_{sat}$ )和生物软组织( $C_{soft}$ )碳库分别减小 $\sim 800Pg$  C和 $\sim 200Pg$  C;而海-气交换不平衡组分( $C_{dis}$ )增加了 $\sim 800Pg$  C。这些结果说明海-气交换不平衡会显著影响深海溶解无机碳储库,而以往的研究均为考虑这一效应。

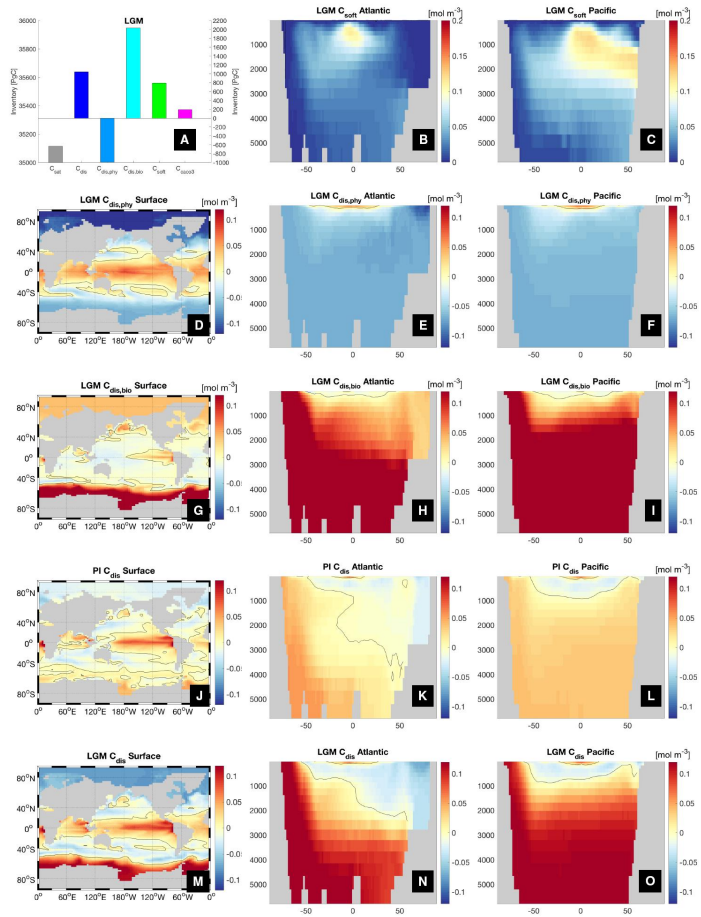


图3 末次冰盛期(LGM)平衡模拟海洋碳组分。(A)溶解平衡组分( $C_{sat}$ )碳库(左纵坐标)及其组分碳库(右纵坐标);(B-O)LGM及工业革命前(PI)表层海洋、大西洋和太平洋各组分碳组成(Khatiwala et al., 2019, supplementary materials)

为了弄清海洋各组分碳储库变化和冰期 $CO_2$ 变化的原因,Khatiwala等开展了一系列敏感性实验(图4)。结果表明:(1)由于海-气不平衡效应,冰期海洋环流的重组(即相对浅、弱的大西洋经向环流)和海冰范围的增加均导致大气 $CO_2$ 浓度增加,与解释冰期大气 $CO_2$ 降低背道而驰。该结果说明目前流行的解释冰期 $CO_2$ 变化的“环流重组”和“海冰”假说尚待商榷。(2)海-气交换不平衡显著提高了冰期降温和Fe施肥对 $CO_2$ 降低的贡献,大致能解释 $\sim 3/4$ 以上冰期 $CO_2$ 变化量。冰期海表温度变化的空间不均一性减弱了海表水不饱和状态,通过增加物理过程不平衡组分( $C_{dis,phy}$ ),

导致更多的碳被输送到深海，该过程大致能解释冰期大气CO<sub>2</sub>变化的一半。这些结果与冰芯记录的  
大气CO<sub>2</sub>与温度的紧密耦合是一致的。

该研究通过引入海气交换不平衡的概率到海洋生物地球化学模型中，发现不平衡过程在解释冰  
期-间冰期大气CO<sub>2</sub>浓度变化中起关键作用，这为今后进一步探讨冰期海洋碳循环过程提供了新的视  
野和约束。

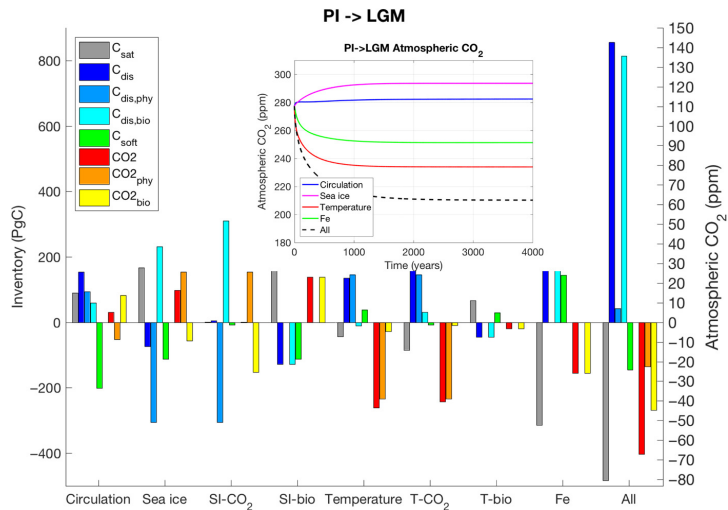


图4 工业革命前海洋碳循环对末次冰盛期扰动的敏感性实验结果。SI-CO<sub>2</sub> (T-CO<sub>2</sub>) 和SI-bio (T-bio) 指海冰 (温度) 仅影响海气CO<sub>2</sub>交换或生物过程的敏感性实验 (Khatiwala et al., 2019)

#### 主要参考文献

Brovkin V, Ganopolski A, Archer D, et al. Lowering of glacial atmospheric CO<sub>2</sub> in response to changes in oceanic circulation and marine biogeochemistry[J]. *Paleoceanography*, 2007, 22(4). (原文链接)

Khatiwala S, Schmittner A, Muglia J. Air-sea disequilibrium enhances ocean carbon storage during glacial periods[J]. *Science Advances*, 2019, 5(6): eaaw4981. (原文链接)

Lüthi D, Le Floch M, Bereiter B, et al. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present[J]. *Nature*, 2008, 453(7193): 379–382. (原文链接)

Martin J H. Glacial-interglacial CO<sub>2</sub> change: The iron hypothesis[J]. *Paleoceanography*, 1990, 5(1): 1–13. (原文链接)

Stephens B B, Keeling R F. The influence of Antarctic sea ice on glacial-interglacial CO<sub>2</sub> variations[J]. *Nature*, 2000, 404:171–174. (原文链接)

Williams R G, Follows M J. *Ocean Dynamics and the Carbon Cycle: Principles and Mechanisms*[M]. Cambridge University Press, 2011.

(撰稿: 陈祚伶/新生代室)