

doi:10.3799/dqkx.2016.063

近 2 Ma BP 以来地球轨道参数周期上全球海平面变化机制

李文宝^{1,2}, 王汝建^{1*}

1. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 020092

2. 内蒙古农业大学水资源保护与利用自治区重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010018

摘要: 海平面的变化往往对区域生态环境、社会经济造成严重影响。通过对全球相对海平面变化(relative sea level, 简称 RSL)记录的再分析结果, 合成了近 2 Ma BP 以来的全球 RSL 变化记录, 分析了合成 RSL 记录对原始 RSL 记录数理特征的继承性, 并基于频谱、滤波等数理分析验证了合成 RSL 记录的合理性。在此基础上, 讨论了合成 RSL 与大气 CO₂ 浓度、中高纬度海域表层海水温度(sea surface temperature, 简称 SST)、全球大洋底栖氧同位素($\delta^{18}\text{O}_\text{B}$)等参数指标间的相关性, 结果显示: (1) 合成 RSL 不仅与原始 RSL 记录的变化趋势基本一致, 继承了原始 RSL 记录对全球气候变化的响应特征, 而且显示出合成 RSL 记录对地球轨道参数周期变化响应明显; (2) 近 2 Ma BP 以来, 在冰期-间冰期旋回中, 合成 RSL 与 $\delta^{18}\text{O}_\text{B}$ 变化呈良好的负相关, 相关系数 r 平均值可以达到约 0.81, 高于合成 RSL 与大气 CO₂ 浓度及中高纬度海域 SST 变化的相关系数; (3) 在地球轨道参数周期上, 合成 RSL 与极地冰盖体积($\delta^{18}\text{O}_\text{B}$)的变化几乎同时, 在偏心率周期上, 合成 RSL 落后于 SST 和大气 CO₂ 浓度变化; 在斜率周期上, 合成 RSL 落后于 SST 变化而领先于大气 CO₂ 浓度变化。推测这些变化的诱导因素可能是在太阳辐射量改变的前提下, 大气 CO₂ 浓度及大洋 SST 变化对极地冰盖体积产生了差异影响, 进而引起海平面发生变化。

关键词: 海平面; 极地冰盖; 相关性; 2 Ma BP; 气候变化。

中图分类号: P736.2

文章编号: 1000-2383(2016)05-0742-15

收稿日期: 2016-01-11

Mechanism of Sea Level Change at the Earth Orbital Parameter Cycles during the Last 2 Ma BP

Li Wenbao^{1,2}, Wang Rujian^{1*}

1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 020092, China

2. Inner Mongolia Autonomous Region Key Laboratory of Water Resources Protecting and Utilization, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

Abstract: Sea level change usually has great impact on global (or regional) ecological environment and social economy. Based on the published records of relative sea level (RSL), one new stacked RSL is reconstructed in this paper, and the correlations between the new stacked RSL and original records are analyzed. In addition, the reliability and rationality of the new stacked RSL are tested and verified respectively by Spectrum and Filtering analysis. Furthermore, the evolutionary history and correlations between the stacked RSL and atmospheric CO₂ concentration, sea surface temperature (SST) in middle-high latitudinal oceans and benthic oxygen isotope ($\delta^{18}\text{O}_\text{B}$) record are separately discussed in detail. The results show that: (1) the new stacked RSL has the similar change trend to the original RSL records during the last 2 Ma BP, and the correlation coefficients are all nearly 0.9. Meanwhile, the new stacked RSL also responds well to the global climate change events at the earth orbital parameter cycles; (2) The new stacked RSL and LR04- $\delta^{18}\text{O}_\text{B}$ have high negative correlation in glacial-interglacial cycles during the last 2 Ma BP, with the correlation coefficient of about 0.81, which is much higher than those of the new stacked RSL with SST and atmospheric CO₂ concentration; (3) Based on the cross-spectral analytical results between the new stacked RSL and CO₂, SST

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(No.2012CB957701); 国家自然科学基金项目(No.41406056); 南北极环境综合考察与评估专项(Nos. CHINARE2015-03-02, CHINARE2015-01-02).

作者简介: 李文宝(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要从事第四纪地质学、古海洋与古气候学研究, E-mail: tianshitd@126.com

* **通讯作者:** 王汝建, E-mail: rjwang@tongji.edu.cn

引用格式: 李文宝, 王汝建, 2016. 近 2 Ma BP 以来地球轨道参数周期上全球海平面变化机制. 地球科学, 41(5): 742-756.

and $\delta^{18}\text{O}_\text{B}$, individually, the new stacked RSL is nearly in phase with $\delta^{18}\text{O}_\text{B}$, and both lags SST and CO_2 at the eccentricity band, and lags SST but leads CO_2 at the obliquity band. It is concluded that the polar ice sheet volume was influenced by changes of SST and atmospheric CO_2 concentration, which might be caused by the change of solar insolation and finally influenced the sea level change at the earth orbital parameter cycles.

Key words: sea level; polar ice sheet; correlations; 2 Ma BP; climate change.

0 引言

进入 20 世纪以来,地球环境变化的周期性逐渐成为地球科学领域研究的重点内容,在不同时间尺度上,气候变化的驱动机制逐渐被发现(Hays *et al.*, 1976; Imbrie, 1982).特别是“米兰科维奇学说”的建立,为在地球轨道参数周期上解释地球环境的变化提供了理论依据(Imbrie, 1982);由于地球公转及自转过程中轨道形态的改变,使得地球中高纬度地区接收的太阳辐射量出现周期性变化,分别为偏心率周期(约 100 ka)、斜率周期(约 40 ka)和岁差周期(约 23 ka 或 19 ka)(Hays *et al.*, 1976; Imbrie, 1982; Laskar *et al.*, 2004).这些变化与极地冰盖体积、北大西洋深层水(NADW)发育等过程之间存在着相关性,表明了第四纪以来冰期—间冰期气候旋回的形成机制.在此基础上,全球相对海平面变化(relative sea level, 简称 RSL)作为地球大规模冰川活动的重要反馈,也已经成为分析全球环境周期性变化的重要指标(Zachos *et al.*, 2001; 时小军等, 2007; Jung and Kroon, 2011; Woodroffe and Webster, 2014; Basavaiah *et al.*, 2015).

第四纪以来,由于海—陆分布格局趋于稳定,构造运动等引起的海平面变化已经逐渐失去主导地位(Haq *et al.*, 1987; Miller *et al.*, 2005; Haq and Schutter, 2008),由地球轨道参数变化引起的全球(或区域)气候环境等的周期性变化不仅导致全球大规模冰川活动的出现,而且可能逐渐成为第四纪以来全球海平面变化的主要原因之一(陈长霖, 2010; Chen *et al.*, 2015; Pittet *et al.*, 2014; 边叶萍等, 2015).同时,海平面变化不仅是对全球气候环境变化的反馈,还是制约人类社会发展的的重要因素.

时至今日,全球有超过 60% 的人口居住在沿海地区,在中国这一比例为 40%.同时,沿海地区往往是区域经济相对发达的地区,在人类社会过程中至关重要(吴涛等, 2006; IPCC, 2007).但是,一旦海平面出现异常变化,特别是持续的快速上升,将会对这些地区造成毁灭性打击.根据联合国政府间气候变化专业委员会(IPCC)报告,过去 50 a 里,全球

海平面上升速率约 0.3~0.7 mm/a (IPCC, 2007; Wunsch *et al.*, 2007; 颜梅等, 2008).而在中国,近 30 a 来,沿海地区的海平面平均上升速率约为 2.6 mm/a,远远高于全球海平面变化(何蕾等, 2014; 王国栋等, 2014; 张静和方明强, 2015).显然,研究第四纪以来地球轨道参数周期上全球海平面的变化特征及影响因素,将为分析不同时间尺度上全球或区域海平面变化幅度和规律提供重要的理论支持.同时,现有研究表明,海平面变化的根本原因不外乎海水质量和海水体积的改变两种主要因素(Gouretski, 2007; Wunsch *et al.*, 2007; 陈长霖, 2010; Woodroffe and Webster, 2014).因此,在地质历史时期,极地冰盖体积、大洋水体温度等直接因素以及大气 CO_2 浓度改变等间接因素可能与海平面变化存在着密切的联系.

基于此,本文将根据已经发表的 RSL 重建数据,在数理分析的基础上,对约 2 Ma BP 以来的全球 RSL 的演化规律进行深入研究;并进一步结合极地冰盖体积(以大洋底栖有孔虫氧同位素—— $\delta^{18}\text{O}_\text{B}$ 为指标, Lisiecki and Raymo, 2005)、大气 CO_2 浓度(Lüthi *et al.*, 2008)、中高纬度海水表层温度(sea surface temperature, 简称 SST)等指标参数(Lawrence *et al.*, 2009; Martinez-Garcia *et al.*, 2010; 李文宝等, 未发表资料),对近 2 Ma BP 以来的全球海平面变化特征进行详细分析,综合探讨了地球轨道参数周期尺度上全球海平面变化的主要影响因素,为深入分析气候变化条件下近现代全球或区域性的海平面变化机制提供理论基础.

1 数据来源与分析方法

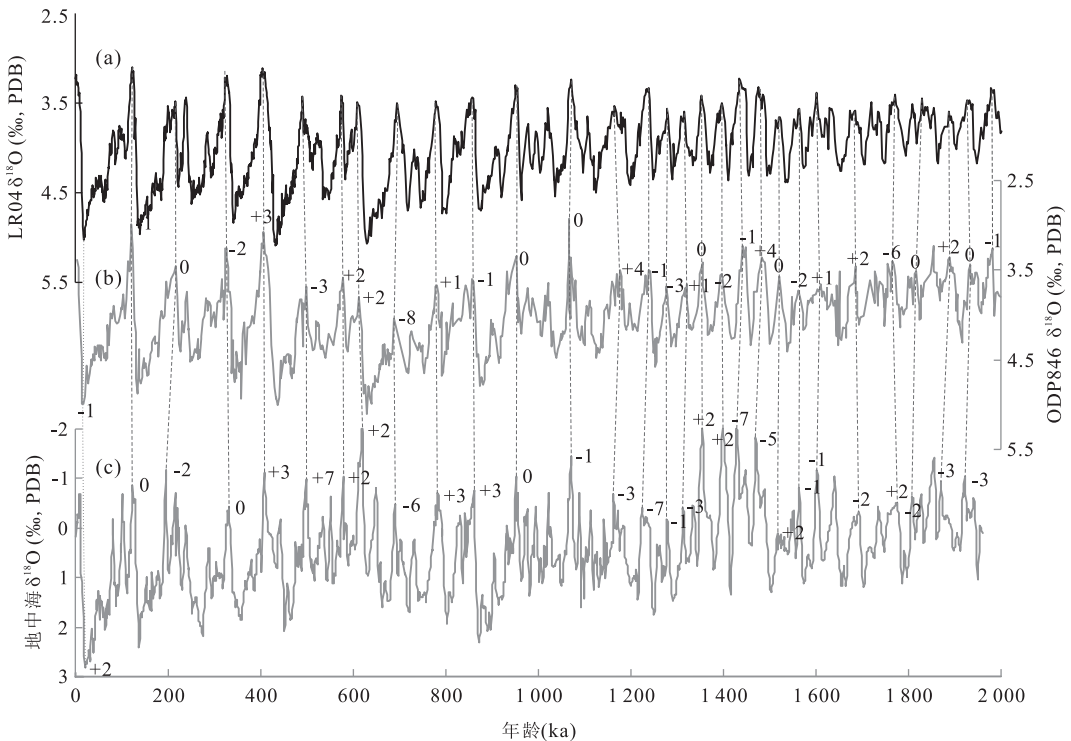
1.1 数据来源

多年来,不同时间尺度上全球 RSL 变化的研究成果不断涌现,例如:Waelbroeck *et al.* (2002) 利用氧同位素等记录重建了近 0.45 Ma 的全球 RSL 变化历史; Miller *et al.* (2005) 利用地球物理方法并结合 $\delta^{18}\text{O}$ 等参数指标重建了中生代以来近 543 Ma 的全球 RSL 变化历史; Rohling *et al.* (2014) 利用地中

表 1 文章涉及到数据的来源

Table 1 Resources of data in this paper

参数	时间长度(Ma)	原始平均分辨率(ka)	参考文献	备注
	0.45	0.5	Waelbroeck <i>et al.</i> , 2002	仅作为参考
RSL	543.00	≥ 5.0	Miller <i>et al.</i> , 2005	0~9.25 Ma, 平均分辨率为 5 ka
	5.30	2.0~3.0	Rohling <i>et al.</i> , 2014	—
	3.50	3.0	Martnez-Garcia <i>et al.</i> , 2010	北太平洋 ODP882
SST	4.01	4.0	Lawrence <i>et al.</i> , 2009	北大西洋 ODP982
	3.60	3.2	Martnez-Garcia <i>et al.</i> , 2010	南大洋 ODP1090
	1.96	1.5	本文, 未发表数据	南大洋 ODP1170
	CO ₂	0.79	0.7	Lüthi <i>et al.</i> , 2008
LR04- $\delta^{18}\text{O}_B$	5.30	2.5	Lisiecki and Raymo, 2005	全球底栖有孔虫氧同位素合成曲线

图 1 LR04- $\delta^{18}\text{O}$ 记录和 ODP846- $\delta^{18}\text{O}$ 、地中海- $\delta^{18}\text{O}$ 记录的对比Fig.1 Comparison between LR04- $\delta^{18}\text{O}$ stack and ODP846- $\delta^{18}\text{O}$, Mediterranean $\delta^{18}\text{O}$ stack

a. LR04- $\delta^{18}\text{O}$ 记录 (Lisiecki and Raymo, 2005); b. ODP846- $\delta^{18}\text{O}$ 记录 (Shackleton *et al.*, 1995); c. 地中海- $\delta^{18}\text{O}$ 记录 (Lourens, 2004; Wang *et al.*, 2010). 图(b)和(c)中数值表示 ODP846- $\delta^{18}\text{O}$ 和地中海- $\delta^{18}\text{O}$ 记录与 LR04- $\delta^{18}\text{O}$ 记录“峰对峰, 谷对谷”的对比中的年龄差异

海合成的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录方法重建了近 5.3 Ma 的全球 RSL 变化历史. 虽然不同的全球 RSL 重建记录的分辨率及偏移幅度存在差异, 但是都反映了全球海平面变化的基本情况.

同时, 反映全球环境演变的其他指标参数也不断更新, 如 SST 记录、大气 CO_2 浓度变化记录及 LR04 全球大洋 $\delta^{18}\text{O}_B$ 合成数据 (LR04- $\delta^{18}\text{O}_B$) 等 (表 1), 这为本文分析海平面变化与不同的环境演变指标参数间的相互关系提供了基础.

1.2 分析方法

虽然不同的全球 RSL 重建记录的分辨率及偏

移幅度不相同, 但却都反映了地质历史上全球海平面的基本变化情况及其对气候环境演变过程的响应. 基于此, 为了更好地了解全球 RSL 的变化特征, 本文以 Miller *et al.* (2005) 和 Rohling *et al.* (2014) 发表的涵盖第四纪近 2 Ma BP 以来的 RSL 重建记录为依据, 同时参考 Waelbroeck *et al.* (2002) 的 RSL 记录, 对上述 RSL 数据进行了再分析, 进而得到合成 RSL 记录 (Miller *et al.*, 2005; Rohling *et al.*, 2014, 表 1).

当然, 由于原始 RSL 记录的原始年龄模式的建立模式存在差异: 如 Miller *et al.* (2005) 重建的 RSL

记录(0~6.1 Ma)依据的 ODP846 站位的年龄模式来源于 SPB90-SCHPS9 模式;Rohling *et al.*(2014)重建的 RSL 记录依据的地中海氧同位素地层年龄模式则源于参考文献 Lourens(2004)和 Wang *et al.*(2010).基于此,本文以 Wang *et al.*(2010)为基础,在数据合成之前,通过 ODP846- $\delta^{18}\text{O}$ 及地中海- $\delta^{18}\text{O}$ 记录与 LR04- $\delta^{18}\text{O}$ 记录的“峰对峰,谷对谷”的对比,在确定相同“峰或谷”的时间差异后,通过内插值等再分析进行年龄框架调整(图 1),进而将上述两个主要的 RSL 记录的年龄模式统一调整为 LR04 时间模式(Wang *et al.*,2010;马文涛,2011).

为了验证本文合成 RSL 记录的合理性,笔者分别对合成 RSL 和原始 RSL 变化记录之间的相关性进行了分析,同时对合成 RSL 记录进行了频谱、滤波等数理分析.进一步结合其他指标参数,如大气 CO_2 浓度变化(Lüthi *et al.*,2008)、中高纬度海域 SST 变化(Lawrence *et al.*,2009;Martnez-Garcia *et al.*,2010;李文宝等,未发表资料)及 LR04- $\delta^{18}\text{O}_\text{B}$ 记录(Lisiecki and Raymo,2005)等进行了交叉频谱分析.同样,在数据分析之前,笔者将各个环境演变指标参数的年龄模式统一转化为 LR04 时间模式,并在分析前进行了 1 ka 的内插值处理.

笔者采用 Grinsted *et al.*(2004)开发的 Cross-wavelet & Coherence 软件包在 Matlab 软件环境下对合成 RSL 记录与其他指标参数进行小波分析;利用 Paillard *et al.*(1996)开发的 ANALYSERIES 软

件对地球轨道参数周期上的滤波进行分析;并主要利用 Schulz and Mudelsee(2002)开发的 REDFIT 频谱分析软件来进行频谱分析;利用美国布朗大学 Howell(2001)开发的基于 Macintosh 操作系统的 ARAND 软件包对相同时间序列的两个指标参数的交叉频谱及其相位进行分析.

2 结果

2.1 合成 RSL 记录对原始 RSL 记录数据特征的继承

第四纪近 2 Ma BP 以来,虽然不同的海平面变化重建记录在变化幅度上存在一定的差异,但是它们在地球轨道参数周期上的整体变化趋势却基本一致.而经过加权平均后得到的合成 RSL 记录继承了各原始 RSL 记录的基本变化趋势,初步证明了本文合成 RSL 数据(平均分辨率约 2~3 ka)存在较高质量的可靠性(图 2).当然,为了进一步验证合成 RSL 记录的继承性,本节对合成 RSL 记录和原始 RSL 记录间的相互关系也进行了分析.

合成 RSL 与原始 RSL 记录之间显示出了很好的相关性,其中合成 RSL 与 Miller *et al.*(2005)重建的 RSL 记录的相关系数 r 值较高,可以达到 0.9(相关方程: $y = 0.845 3x + 10.50, r^2 = 0.822 1$);与 Rohling *et al.*(2014)重建的 RSL 记录的相关系数 r 值略低,约为 0.88(相关方程: $y = 0.716 8x - 19.711, r^2 = 0.780 1$).整体上,合成 RSL 与原始

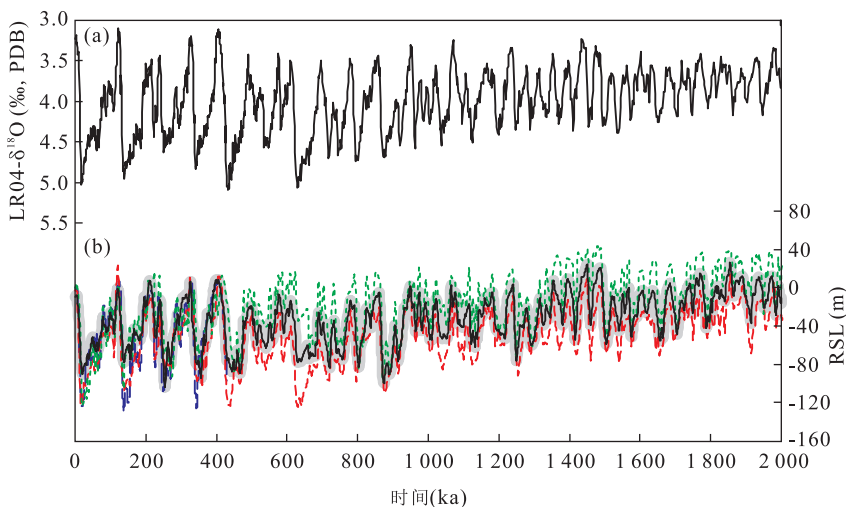


图 2 近 2 Ma BP 以来合成 RSL 与 LR04- $\delta^{18}\text{O}_\text{B}$ 记录变化

Fig.2 Changes of RSL stack and LR04 stack during the last 2 Ma BP

a. LR04- $\delta^{18}\text{O}_\text{B}$ 记录(Lisiecki and Raymo,2005); b. 近 2 Ma 以来合成 RSL 变化记录(黑色实线);红色虚线来源于 Miller *et al.*(2005);绿色虚线来源于 Rohling *et al.*(2014);蓝色虚线来源于 Waelbroeck *et al.*(2002),作为参考记录.拟合方法为将各个记录的线性趋势去掉,再计算平均值后加上平均线性趋势得到

RSL 记录之间的相关系数 r 值在 0.9 左右,这说明了本文合成 RSL 数据基本保留了原始 RSL 数据的对全球气候或环境演变过程的响应特征,继承了原始 RSL 记录的数理特性,因此可以说合成 RSL 是合理的。

2.2 合成 RSL 记录对地球轨道参数周期变化的响应

近 2 Ma BP 以来,“中更新世气候转型”(mid pleistocene transition,简称 MPT)事件成为全球气候最主要的变化特征之一。“MPT”事件主要表现为全球气候变化由 40 ka 周期为主导转变为以 100 ka 周期为主导(Clark *et al.*, 2006; Jin *et al.*, 2009; Almogi-Labin, 2011)。虽然“MPT”并不是一蹴而就的突发性事件,而是持续数十万年的气候过渡(Clark and Pollard, 1998; Li *et al.*, 2008),但是多数研究者认为“MPT”出现在 900 ka 前后(Massch, 1988; Li *et al.*, 2008; Kemp *et al.*, 2010)。鉴于此,在分析合成 RSL 记录与原始 RSL 记录之间继承性的基础上,笔者以 900 ka 作为“MPT”事件的中心参考界限,对合成 RSL 记录进行了频谱分析。

在“MPT”事件之前的 2 000~900 ka,合成 RSL 记录的主导周期为 40 ka 斜率周期,而 100 ka 偏心率周期信号并不明显(图 3a);“MPT”事件之后的 900~0 ka,合成 RSL 记录的主导周期转变为 100 ka 偏心率周期,而 40 ka 斜率周期信号相对减弱(图 3b),这一变化对应了“MPT”事件前后,在地球轨道参数周期上全球气候变化主导周期的改变(Massch, 1988; Kemp *et al.*, 2010)。

合成的近 2 Ma BP 以来的 RSL 记录不仅具有

明显的地球轨道参数周期变化(置信度超过 99%),而且明显响应于“MPT”事件的发生(图 3)。很显然,这说明合成 RSL 记录可以有效反映地球环境与气候的周期性变化特征。

2.3 合成 RSL 记录的滤波分析结果

滤波分析可以很好地显示不同记录在特定地质历史时期内周期演变规律及不同周期变化在时间上的差异性。而笔者对地球轨道参数周期上合成 RSL 记录及 LR04- $\delta^{18}\text{O}_B$ 记录滤波分析的结果及振幅相位关系的进行了对比,结果很好地证明了合成 RSL 年龄框架的可信性。

首先,合成 RSL 记录在 100 ka 偏心率周期上的滤波振幅度于 700 ka 前后开始明显增强,而 40 ka 斜率周期的滤波振幅在 700 ka 之后开始出现减弱,响应了“MPT”事件中全球气候主导周期的转型(Clark and Pollard, 1998; Huybers, 2011)(图 4a, 4b);其次,在地球轨道参数周期上,合成 RSL 记录滤波结果与 LR04- $\delta^{18}\text{O}_B$ 滤波结果的相位基本一致。尽管在偏心率周期上,合成 RSL 与 LR04- $\delta^{18}\text{O}_B$ 的滤波相位在“MPT”事件之前的对应关系并不好,但是自“MPT”以来,两者滤波相位的对应关系开始出现显著一致(图 4b);而在斜率和岁差周期上,虽然合成 RSL 与 LR04- $\delta^{18}\text{O}_B$ 记录的滤波振幅强弱程度存在差异,但是两者滤波相位关系均存在明显的一致性,显示两者在地球轨道参数周期上变化的同时性(图 4c, 4d),进一步说明了合成 RSL 记录年龄框架的可靠性。

总之,通过对合成 RSL 记录的上述数理分析,结

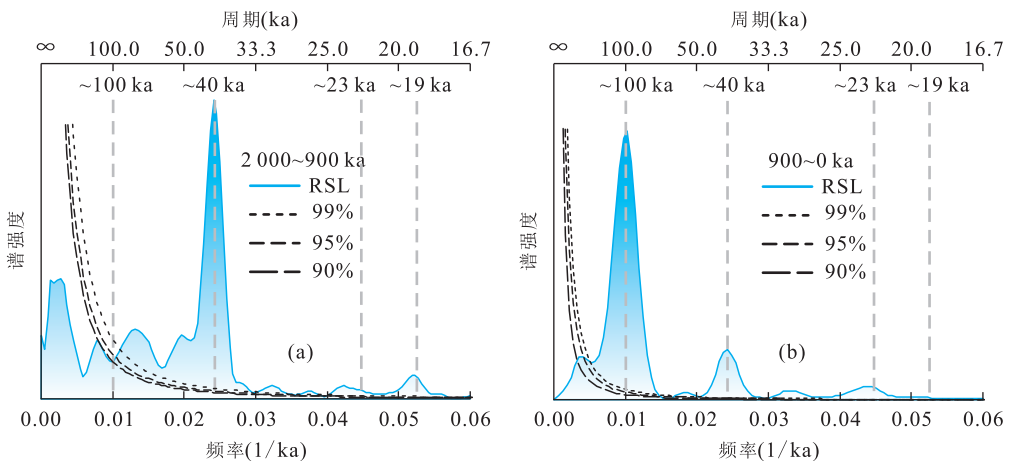


图 3 近 2 Ma BP 以来合成 RSL 记录的频谱分析

Fig.3 Spectrum results of RSL stack during the last 2 Ma BP

a. 2 000~900 ka 时间段 RSL 的频谱分析结果,显示较强的 40 ka 周期,100 ka 周期信号不明显;b. 900~0 ka 时间段 RSL 的频谱分析结果,显示较强的 100 ka 周期和较弱的 40 ka 周期.90%、95%、99%表示置信度,分析软件为 Redfit35(Schulz and Mudelsee, 2002)

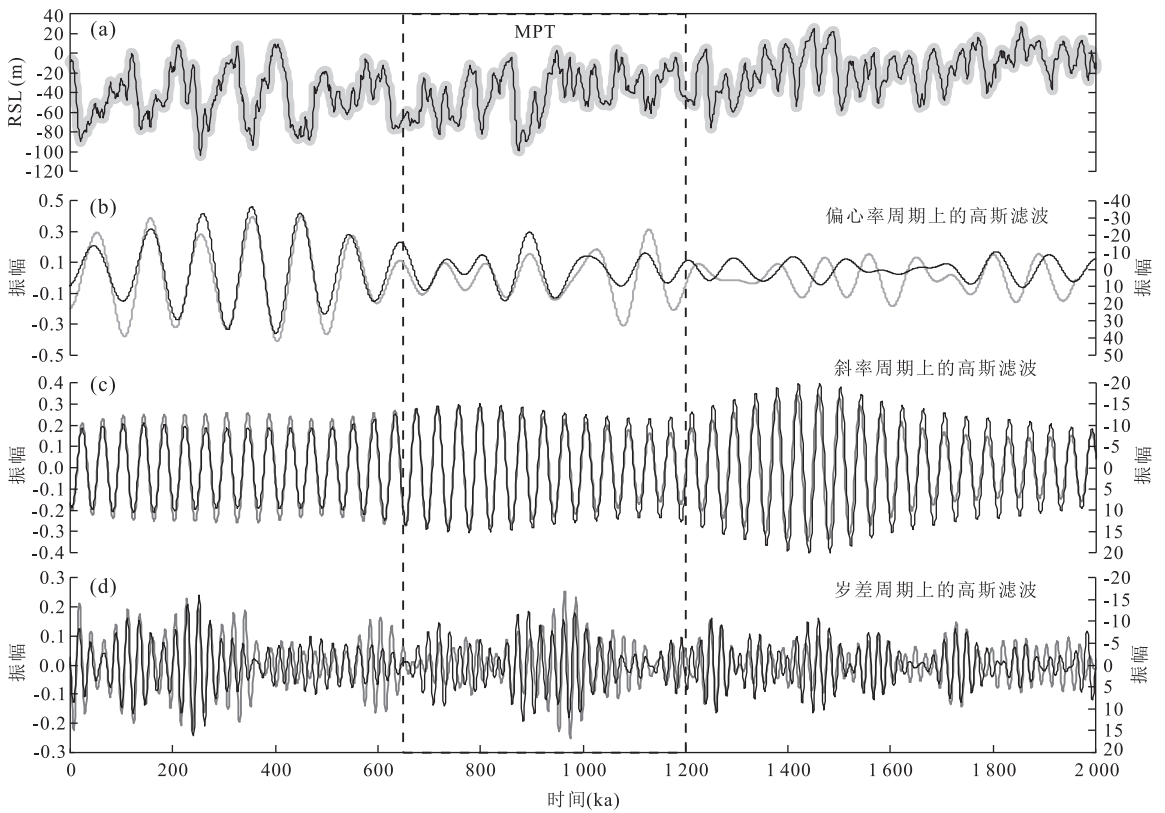


图 4 近 2 Ma BP 以来合成 RSL 记录与 LR04- $\delta^{18}O_B$ 在地球轨道参数周期上的滤波分析

Fig.4 Filtering results of RSL stack and LR04- $\delta^{18}O_B$ stack in orbital cycles during the last 2 Ma BP

a.为合成 RSL 记录;b.100 ka 偏心率周期滤波;c.40 ka 斜率周期滤波;d.20 ka 岁差周期滤波的中心频率和带宽分别为 0.01 ka^{-1} 和 $0.003 \text{ 105 ka}^{-1}$ 、 $0.024 \text{ 390 ka}^{-1}$ 和 $0.002 \text{ 654 ka}^{-1}$ 及 $0.047 \text{ 610 ka}^{-1}$ 和 $0.010 \text{ 250 ka}^{-1}$,黑色曲线代表合成的 RSL 记录的滤波,右侧纵横数据代表 RSL 记录的滤波振幅;灰色曲线代表 LR04- $\delta^{18}O_B$ 记录的滤波,左侧纵横数据代表 LR04- $\delta^{18}O_B$ 记录的滤波振幅.图中矩形框指示“MPT”事件发生的主要阶段

果充分证明本文所综合建立的 RSL 记录具有较高的继承性及合理性;其不仅与原始 RSL 记录的变化趋势一致(相关系数均接近 0.9),而且继承了各 RSL 记录对气候环境演变事件的响应特征.同时,近 2 Ma BP 以来合成 RSL 明显响应于地球轨道参数周期上的全球性气候事件(如“MPT”事件等)的发生及主导周期的变化.这说明本文所合成的 RSL 记录能够反映近 2 Ma BP 以来的全球海平面变化对全球气候事件演化的响应特征及其可能的影响因素.

3 讨论

3.1 地球轨道参数周期尺度上合成 RSL 的周期演化
自“米兰科维奇学说”建立并成功解释地球轨道参数周期上气候变化的周期性以来,不同周期上气候变化的影响因素的差异也逐渐被认识(Hays *et al.*, 1976; Imbrie, 1982; Huybers, 2011).同样地,海平面变化作为全球或区域气候演变的重要反馈,

其在不同地球轨道参数周期上的变化特征也已经成为古气候与古海洋学研究的重点之一(Zachos *et al.*, 2001; Haq and Schutter, 2008; Rohling *et al.*, 2014).

近 2 Ma BP 以来,合成 RSL 整体上呈现出阶段性下降趋势,特别是伴随“MPT”事件的出现,合成 RSL 记录不仅出现快速的下降,而且其在冰期一间冰期旋回中的变化幅度也出现明显的增加(图 5a).当然,合成 RSL 的整体变化趋势与其他气候演变参数的变化趋势基本一致,对应了近 2 Ma BP 以来全球气候逐渐变冷(Zachos *et al.*, 2008)、大气 CO_2 浓度(Lüthi *et al.*, 2008)以及中高纬度海域 SST 下降等气候环境的演变(Lawrence *et al.*, 2009; Martinez-Garcia *et al.*, 2010; 李文宝等,未发表资料)(图 5).近 2 Ma BP 以来,虽然构造因素不再是全球海平面变化的主导因素,但是伴随两极冰盖的发育与变化,全球气候开始出现明显的冰期一间冰期旋回变化(Lisiecki and Raymo, 2005);同时,一些

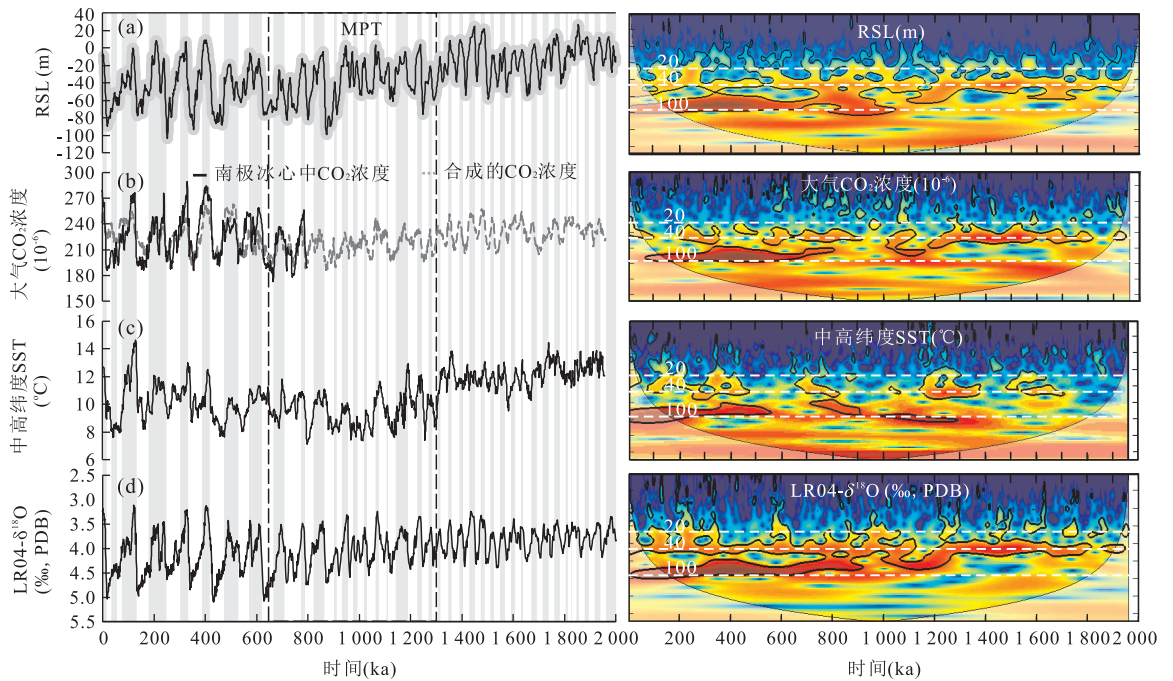


图 5 近 2 Ma BP 以来合成 RSL 记录与大气 CO_2 浓度、SST、LR04- $\delta^{18}\text{O}_B$ 记录变化对比

Fig.5 Comparison between RSL stack and CO_2 , SST and $\delta^{18}\text{O}_B$ records during the last 2 Ma BP

a. 合成 RSL 变化趋势及其小波分析; b. 近 800 ka BP 以来南极冰心中大气 CO_2 浓度记录和近 2 Ma BP 以来合成大气 CO_2 浓度变化及其小波分析, 2 Ma BP 以来的大气 CO_2 浓度变化计算方法来自参考文献 (Lüthi *et al.*, 2008; Lisiecki, 2010), 得出公式: 大气 CO_2 浓度 = $1/2 \times 60.092 \times (\delta^{13}\text{C}_{B-南大洋} + \delta^{13}\text{C}_{B-北大西洋}) + 239.35$, 相关系数 r 大于 0.6, $\delta^{13}\text{C}_B$ 数据来源于 Wang *et al.* (2010); c. 合成中高纬度 SST 变化趋势 (数据来源见表 1) 及其小波分析; d. LR04- $\delta^{18}\text{O}_B$ 变化趋势及其小波分析. 图中纵向阴影代表间冰期; 小波分析结果中黑色等值线代表红噪声假设下显著性水平为 5% 的区域. 小波分析方法由 Grinsted *et al.* (2004) 提供

全球性环境气候事件的发生, 例如, “MPT” 事件中发生的全球气候主导周期的变化 (Clark & Pollard, 1998; Jian *et al.*, 2000; Schmieder *et al.*, 2000; Jin *et al.*, 2009) 及大洋环流的改变 (Toggweiler *et al.*, 2006; Rohling *et al.*, 2009) 等不仅会对不同指标参数的演变产生影响, 也会影响到海平面的演变 (李文宝和王汝建, 2014; Chen *et al.*, 2015), 导致海平面产生阶段性变化.

另一方面, 合成 RSL 记录中 100 ka 偏心率周期的信号出现在 1 030 ka 前后, 随后开始逐渐加强, 且在 700 ka 前后达到最显著, 对应于 “MPT” 事件的发展过程. 当然, 近 2 Ma BP 以来, 合成 RSL 记录中的斜率、岁差周期信号同样明显, 显示了合成 RSL 变化对地球轨道参数周期变化的响应 (图 5a).

在地球轨道参数周期上, 合成 RSL 变化的主导周期演化特征与大气 CO_2 浓度、中高纬度海域 SST 等其他参数相比略有差异 (图 5), 不仅显示不同指标参数可能受到不同因素的影响, 同时也说明了合成 RSL 的变化与上述环境演变指标参数间存在联系. 例如, 末次冰期以来, 全球海平面出现快速上升.

在冰川开始消融的间冰期, 海平面的上升速率可以达到 $1.5 \text{ m}/100 \text{ a}$ (Grant *et al.*, 2012; Rohling *et al.*, 2014). 而在此时期, 大洋底层水中 $\delta^{18}\text{O}_B$ 出现约 0.95‰ 的偏移, 大气 CO_2 浓度出现超过 150×10^{-6} 的上升, 大洋 SST 的平均值也会出现近 2°C 的上升 (Toggweiler *et al.*, 2006; Lüthi *et al.*, 2008; Fischer *et al.*, 2010; Grant *et al.*, 2012; Rohling *et al.*, 2014). 因此, 这些指标参数在同一阶段出现变化的特点, 也再次说明了它们之间必然存在某种联系. 当然, 由于海平面变化主要受到海水体积及质量的影响, 因此极地冰盖体积的变化可能与海平面变化的关系最为直接 (Lambeck and Chappell, 2001; Lisiecki and Raymo, 2005; Rohling *et al.*, 2014) (图 5d).

近现代海平面变化影响因素的分析结果显示, 气候环境变化是影响全球或区域海平面变化的主要因素之一 (Grant *et al.*, 2012; Wahl *et al.*, 2013; 张静和方明强, 2015). 而在地质历史时期, 一些典型的气候环境指标参数的改变, 如大气 CO_2 浓度、海水温度改变、极地冰盖体积的改变等可能会对海平面

变化产生不同影响,进而成为第四纪以来影响海平面变化的主要因素(Rohling *et al.*, 2007, 2009).

3.2 海平面变化的影响因素分析

作为第四纪以来全球或区域气候环境变化的重要指标参数,大气 CO₂ 浓度、中高纬度海域的 SST、极地冰盖体积($\delta^{18}\text{O}_\text{B}$)等的变化将会对海平面变化产生一定程度的影响.极地冰盖体积的改变在很大程度上会影响到海水的总体质量(Rohling *et al.*, 2007, 2013);而大气 CO₂ 浓度及 SST 的变化不仅可以影响到极地冰盖体积的变化,而且还可以对海水的物理性质产生影响,进而影响海水的“比容海平面”(Woodroffe and Webster, 2014; 何蕾等, 2014; 张静和方明强, 2015).因此,通过合成 RSL 与上述指标参数在地球轨道参数周期上的数理分析,可以深入研究海平面变化与其他气候环境指标参数之间的演变关系.

在分析过程中,为了尽可能去除各个记录中由于快速气候变化等事件引起的突变,笔者将在讨论不同指标参数相关性的基础上,对各指标参数记录进行冰期与间冰期平均值的计算,进而分析合成 RSL 与 CO₂ 浓度、SST、 $\delta^{18}\text{O}_\text{B}$ 等参数之间在地球轨道参数周期上的相互关系.

3.2.1 合成 RSL 与大气 CO₂ 浓度的关系 近现代海平面变化研究结果显示,工业革命以来,伴随化石性燃料的普遍使用,大量 CO₂ 被排放到大气中,导致全球气候出现变暖迹象,极地冰盖融化加剧,伴随而来的就是全球海平面的快速上升(张建立, 2006; 颜梅等, 2008).在地质历史上,大气 CO₂ 浓度的改变与极地冰盖体积变化之间存在明显的相关性(Lüthi *et al.*, 2008; Fischer *et al.*, 2010),而在此,其与 RSL 变化的关系也将得到进一步分析.

交叉频谱结果显示,近 2 Ma BP 以来合成 RSL 变化与大气 CO₂ 浓度变化在偏心率周期与斜率周期上均具有良好的相关性(图 6a);在 95%置信度以上,两者的相关系数均超过 0.9(表 2).在偏心率周期上,合成 RSL 变化落后于大气 CO₂ 浓度变化,相位差为 $-12.3^\circ \pm 15.2^\circ$ (约 3.4 ± 4.2 ka);在斜率周期上,合成 RSL 变化领先于大气 CO₂ 浓度变化,相位差为 $23.5^\circ \pm 8.0^\circ$ (约 2.6 ± 0.8 ka).而在岁差周期上,两者的相关性较低,在 95%置信度以上,相关系数均没有达到 0.9.当然,在 23 ka 岁差周期上,两者的相关系数相对较高,为 0.74,相位差为 $30.2^\circ \pm 31.3^\circ$ (约 1.9 ± 2.0 ka)(表 2).

近 2 Ma BP 以来,大气 CO₂ 浓度变化与合成

RSL 变化表现出较好的正相关性,两者之间的相关系数 r 约为 0.65.在冰期—间冰期旋回中,两者的相关系数随着气候的周期性变化出现一定程度的差异:在间冰期,两者的相关系数 r 约为 0.67;而在冰期,两者的相关系数 r 约为 0.46,这显示在气候相对温暖的间冰期,大气 CO₂ 浓度变化对海平面变化的影响要比在寒冷的冰期更加明显(图 6a).

尽管大气 CO₂ 浓度的变化不会直接影响到海平面的变化,不过大气中的 CO₂ 早已成为公认的温室气体之一,其含量的增加往往会导致全球气候的变暖,引起极地冰盖体积的缩减(Lüthi *et al.*, 2008; Rohling *et al.*, 2013).例如,末次冰期以来大气 CO₂ 浓度上升幅度超过 150×10^{-6} 时,中低纬度海域的海平面上升约 130 m(Lambeck *et al.*, 2002; Lüthi *et al.*, 2008; Grant *et al.*, 2012).第四纪以来,海平面的上升往往对应于气候的变暖阶段(Miller *et al.*, 2005; Zachos *et al.*, 2008; 陈长霖等, 2012);在间冰期,海平面上升的同时,大气 CO₂ 浓度升高,全球变暖,极地冰盖体积减小;而在冰期,情况正好相反(Lüthi *et al.*, 2008; Rohling *et al.*, 2009).因此,基于两者的良好相关性,可以说大气 CO₂ 浓度变化通过间接改变海水的质量及比容进而影响到海平面的变化.而在冰期—间冰期旋回中,大气 CO₂ 浓度与海平面变化相关性的差异可能是由于大气 CO₂ 浓度变化与极地冰盖体积等参数变化出现的不同步有关(Rohling *et al.*, 2013).

3.2.2 合成 RSL 与中高纬度海域 SST 的关系 温度变化是海水的主要物理特征之一,而海水温度的改变则是引起大洋环流变化的主要因素之一(Martnez-Garcia *et al.*, 2010).与大气 CO₂ 浓度变化相似,海水温度特别是中高纬度海域 SST 的改变不仅可以直接对海洋的“比容海平面”产生影响,而且还会通过改变大洋环流进一步影响到极地冰盖体积的大小(Broecker, 1991; 颜梅等, 2008; Martnez-Garcia *et al.*, 2010).

交叉频谱分析结果显示,近 2 Ma BP 以来,合成 RSL 变化与中高纬度海域的 SST 变化在偏心率和斜率周期上存在明显相关性,相关系数超过 0.9(图 6b);在偏心率及斜率周期上,合成 RSL 变化均落后于 SST 变化,相位差分别为 $-29.70^\circ \pm 18.1^\circ$ (约 8.3 ± 5.0 ka)、 $-27.70^\circ \pm 16.1^\circ$ (约 3.1 ± 1.8 ka).在岁差周期上,由于两者的相关性较低(在 95%置信度以上,相关系数均没有达到 0.9),这里不做讨论(表 2).

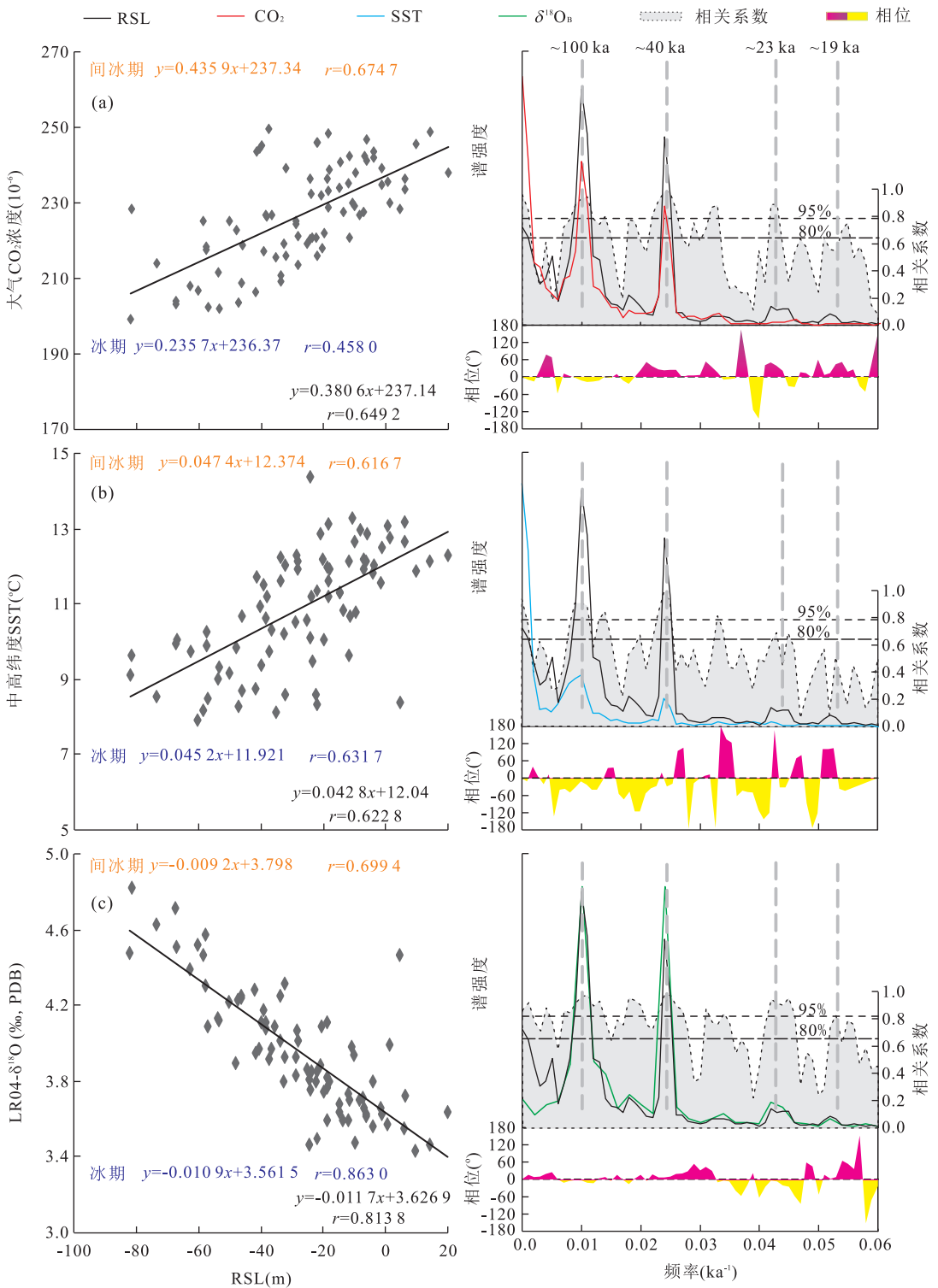


图 6 近 2 Ma BP 以来合成 RSL 与各参数的相关性及其交叉频谱分析

Fig.6 Relationships and cross-spectral analyses between RSL stack and other proxies

a.合成 RSL 与大气 CO₂ 浓度变化相关性及其交叉频谱分析;b.合成 RSL 与中高纬度 SST 变化相关性及其交叉频谱分析;c.合成 RSL 记录与 LR04-δ¹⁸O_B 记录相关性及其交叉频谱分析.左侧相关性分析图中蓝色字体为冰期相关性,红色为间冰期相关性,黑色为近 2 Ma BP 以来冰期一中间冰期旋回中的相关性(图中相关性分析数据为各参数指标在冰期,间冰期内的平均值;频谱分析数据为插值后的数据);右侧频谱图中段划线代表 80%置信度,点划线代表 95%置信度,交叉频谱图中带黄一紫色阴影区表示相位关系及偏差,80%或 95%代表置信度.分别对大气 CO₂ 浓度与合成 RSL 值进行了 800 ka BP 以来与 2 Ma BP 以来的交叉频谱分析,结果基本一致.图中为近 2 Ma BP 以来的交叉频谱分析结果

表2 合成 RSL 变化与其他参数在地球轨道参数周期上的相关性

Table 2 Cross-spectral relationships and coherencies between RSL stack and other proxies

	偏心率周期(100 ka)		斜率周期(40 ka)		岁差周期(23 ka)		岁差周期(19 ka)	
	相关系数	相位差 ^a	相关系数	相位差	相关系数	相位差	相关系数	相位差
RSL vs CO ₂	0.930 9	-12.30°±15.2°	0.980 2	23.50°±8.0°	0.742 5	30.20°±31.3°	0.553 4	28.20°±46.1°
RSL vs SST	0.904 2	-29.70°±18.1°	0.928 8	-27.20°±16.1°	0.564 1	-80.30°±45.4°	0.295 8	-2.60°±66.4°
RSL vs δ ¹⁸ O _B	0.981 6	-3.60°±11.1°	0.969 5	7.70°±9.7°	0.911 0	-6.10°±17.4°	0.781 7	6.10°±28.9°

注：“*”相位差为正值代表 RSL 变化领先其他参数，负值代表 RSL 变化落后其他参数。

近 2 Ma BP 以来合成 RSL 变化与中高纬度海域 SST 的变化呈现正相关，相关系数 r 约为 0.62。在冰期—间冰期旋回中，两者的相关性表现为冰期相关系数(r 约为 0.63)相对较高，间冰期相对较低(r 约为 0.62)的变化特征，这与上述合成 RSL 与大气 CO₂ 浓度变化在冰期—间冰期旋回中的相互关系呈相反的趋势；即中高纬度海域 SST 的改变在冰期对 RSL 变化的影响程度可能更明显一些(图 6b)。

SST 的变化首先反映了海水比热容的变化，其次 SST 的变化又会反馈到极地冰盖体积的改变上(Toggweiler, 2009)。在冰期—间冰期旋回中，SST 的下降(或上升)对应于海平面的下降(或上升)，这说明两者之间存在一定的相关性：例如，在末次间冰期，大洋平均 SST 比现代海水 SST 高出约 2 °C，对应于全球平均海平面上升 4~6 m (Neumann and Hearty, 1996; McCulloch and Esat, 2000; Rohling *et al.*, 2007; Grant *et al.*, 2012)。当然，由于 SST 变化区域差异明显，可能最终导致近 2 Ma BP 以来中高纬度海域 SST 的变化与 RSL 的相关性并不高。不可否认，中高纬度海域的 SST 变化与极地冰盖体积之间存在一定的联系(McCulloch and Esat, 2000; Rohling *et al.*, 2007)，即 SST 变化也可以对 RSL 的变化产生一定程度的影响。

3.2.3 合成 RSL 与极地冰盖体积(δ¹⁸O_B)的关系

在古气候与古海洋学研究中，底栖有孔虫壳体的氧同位素值(δ¹⁸O_B)变化往往可以稳定地指示极地冰盖体积的扩张或缩小(即气候的冷或暖)(Lisiecki and Raymo, 2005)，因此成为了古气候与古海洋学研究中的重要指标参数之一。众多已经发表的海平面变化重建记录也是基于 δ¹⁸O_B 变化分析得到的(Rohling *et al.*, 2007, 2014; Grant *et al.*, 2012)，因此通过分析近 2 Ma BP 以来 RSL 变化与 LR04-δ¹⁸O_B 记录之间的关系，可以为深入研究极地冰盖变化与海平面变化之间的关系提供参考。

交叉频谱分析结果显示，合成 RSL 与 LR04-δ¹⁸O_B 变化在地球轨道参数周期上存在良好的相关性且两者几乎同时变化(图 6c)：在偏心率周

期上，合成 RSL 变化与 δ¹⁸O_B 变化的相位差为 -3.6°±11.2°(约 1.0±3.1 ka)；在斜率周期上，合成 RSL 变化与 δ¹⁸O_B 变化的相位差为 7.7°±9.9°(约 2.1±2.8 ka)；在 23 ka 岁差周期上，合成 RSL 变化与 δ¹⁸O_B 变化的相位差为 -6.1°±17.4°(约 1.7±4.8 ka)；而在 19 ka 岁差周期上，两者的相关性较低(在 95% 置信度以上，相关系数均没有达到 0.9)，同样不做讨论(表 2)。当然，由于上述周期上两者相位偏差幅度均在误差范围之内且考虑到数据本身的误差范围，因此可以认为两者同时变化(Tian *et al.*, 2004)。

近 2 Ma BP 以来，合成 RSL 变化与 δ¹⁸O_B 变化呈负相关且相关性良好，相关系数 r 值可达到 0.81，远高于合成 RSL 与 SST 及大气 CO₂ 浓度变化的相关系数，显示极地冰盖体积的变化对海平面变化的影响最为显著。因此可以说对海平面变化影响最为明显的因素是海水质量的变化，而 δ¹⁸O_B 变化所代表的极地冰盖体积变化正好反映了这一点。冰期，极地冰盖体积增加，海平面下降，δ¹⁸O_B 偏重；间冰期则出现相反的变化。同时，在冰期—间冰期旋回中，RSL 与 δ¹⁸O_B 变化的相关系数 r 在冰期约为 0.87；在间冰期内相关系数 r 约为 0.70。这说明冰期极地冰盖体积的改变对 RSL 变化的影响程度比间冰期明显一些(图 6c)。

整体来看，在冰期—间冰期旋回中，合成 RSL 变化与 δ¹⁸O_B 变化(代表极地冰盖体积的变化)的相关性最高，与中高纬度海域的 SST 的相关性最低。同时，合成 RSL 与各指标参数在地球轨道参数周期上的相位关系分析结果显示：合成 RSL 变化与 δ¹⁸O_B 变化几乎同步；而在 100 ka 偏心率周期上，其落后于 SST 与大气 CO₂ 浓度变化且落后 SST 变化最多；在 40 ka 斜率周期上，则落后于 SST 变化，而领先于大气 CO₂ 浓度变化(表 2)。

显然，各个轨道参数周期在这一过程中扮演了不同的角色。古气候与古海洋学研究结果显示：自两极冰盖形成以来，全球气候变化就受到地球轨道参数变化驱动的以斜率周期为代表的“高纬冰盖”

(Hays *et al.*, 1976; Lisiecki and Raymo, 2005; Bell *et al.*, 2015; Maslin and Brierley, 2015) 和以岁差周期为代表的“低纬季风”两大作用的共同影响(汪品先, 2006; 汪品先等, 2006; Huybers, 2011; Lisiecki, 2014), 这些过程不仅导致了地球轨道参数周期对全球海平面变化的影响过程更加复杂(王艳红等, 2004; Nerem *et al.*, 2006; 时小军等, 2007), 而且在不同地球轨道参数周期上, 引起海平面变化与其他环境演变参数的关系出现改变。

极地冰盖体积的大小直接影响到海洋水体质量的多少。不过在地球轨道参数周期上, 极地冰盖体积大小的改变又受到诸如大气 CO₂ 浓度、海水 SST 变化等因素的影响(McCulloch and Esat, 2000; Rohling *et al.*, 2007, 2014; Grant *et al.*, 2012)。在有关南大洋过程的研究中, 研究者发现在偏心率周期上, 南大洋中高纬度海域 SST 领先于大气 CO₂ 浓度的改变和极地冰盖体积大小($\delta^{18}\text{O}_\text{B}$)的改变, 而大气 CO₂ 浓度的改变又领先于极地冰盖体积大小的改变(Toggweiler, 2009; Li *et al.*, 2010)。这不仅与文中三者在偏心率周期上的相位关系基本一致, 而且在某种程度上确立了第四纪以来极地冰盖体积变化在海平面变化过程中的主要地位。

“米兰科维奇学说”表明, 地球轨道参数周期性的改变首先会影响到地球接收太阳辐射量的多少(Hays *et al.*, 1976; Huybers, 2011)。太阳光辐射在地球表面, 会引起大洋表层水体的温度即 SST 改变以及陆地、海洋等碳储库的变化(导致大气 CO₂ 浓度出现变化)(汪品先等, 2006; Toggweiler *et al.*, 2006; Fischer *et al.*, 2010)。而中高纬度大洋 SST 的改变一方面会加热大气并影响到极地冰盖体积; 另一方面, 太阳辐射量在冰期阶段的改变又会对大气环流(如西风带的迁移)产生影响, 即以斜率周期为代表的“高纬冰盖”变化效应, 进而对中高纬度海域底层水循环产生明显影响, 导致大洋底层水体中的 CO₂ 被释放出来, 这也解释了为什么大气 CO₂ 浓度在斜率周期上落后于 RSL 变化且在冰期对 RSL 的影响相对较弱。而大气 CO₂ 浓度的改变同样会对大气温度产生影响(Anderson *et al.*, 2009; Toggweiler, 2009)。最终, 升高的 SST 及大气温度将对极地冰盖产生影响, 进而导致海平面产生变化(Rohling *et al.*, 2007; Grant *et al.*, 2012)。当然, 不同气候演变指标参数对这一过程的响应快慢并不一致, 进而导致不同地球轨道参数周期上合成 RSL 与其他参数的前后关系出现差异。

总之, 合成 RSL 与 $\delta^{18}\text{O}_\text{B}$ 等环境演变指标参数在地球轨道参数周期上的相关性及其交叉频谱分析结果显示: 近 2 Ma BP 以来, 海平面变化与极地冰盖体积变化的相关性最为明显, 且两者几乎同时变化; 而这些变化的诱导因素则可以归结为地球轨道参数周期上太阳辐射量改变而引起的大洋表层水体温度以及大气 CO₂ 浓度的变化。特别地, 中高纬度海域 SST 及极地冰盖体积变化对海平面变化的影响在冰期比间冰期明显; 大气 CO₂ 浓度变化对海平面变化的影响则间冰期更加明显。

4 结论

通过对已经发表的全球海平面变化记录的再分析, 笔者合成了新的 RSL 记录, 并结合大气 CO₂ 浓度、LR04- $\delta^{18}\text{O}_\text{B}$ 以及中高纬度海域 SST 等记录, 在地球轨道参数周期上对近 2 Ma BP 以来海平面变化特征及影响因素进行了综合分析, 得出如下结论:

(1) 通过数据再分析建立了近 2 Ma BP 以来的 RSL 记录, 而频谱、滤波等分析结果显示合成 RSL 记录不仅与原始 RSL 记录拥有相似的变化趋势, 且相互间相关性良好, 相关系数均接近 0.9, 显示合成 RSL 继承了原始 RSL 记录对全球气候演变的响应特征。同时, 合成 RSL 记录明显响应于“MPT”等全球性事件及气候演变主导周期的改变。

(2) 在地球轨道参数周期上, 合成 RSL 变化与 $\delta^{18}\text{O}_\text{B}$ 变化的相关性最高(r 值约为 0.81), 与大气 CO₂ 浓度变化的相关性居中(r 值约为 0.65), 与中高纬度海域的 SST 的相关性最低(r 平均值为 0.63), 显示极地冰盖体积的变化对海平面变化的影响最为显著。同时, 合成 RSL 与 $\delta^{18}\text{O}_\text{B}$ 变化的相关系数 r 在冰期约为 0.87, 在间冰期内相关系数 r 约为 0.70, 这说明冰期极地冰盖体积的改变对海平面变化的影响程度比间冰期明显一些。

(3) 相位关系分析显示, 在地球轨道参数周期上, 合成 RSL 的变化与 $\delta^{18}\text{O}_\text{B}$ 变化几乎同步; 在偏心率周期上, 落后于 SST 与大气 CO₂ 浓度变化; 在斜率周期上, 落后于 SST 变化, 而领先于大气 CO₂ 浓度变化。这些变化的诱导因素可以归结为由于不同地球轨道参数周期上太阳辐射量改变引起的大洋表层水温度与大气 CO₂ 浓度的相应变化以及各个指标参数对这一过程的响应快慢并不一致。特别地, 中高纬度海域 SST 及极地冰盖体积对 RSL 的影响在冰期比间冰期略显明显, 而大气 CO₂ 浓度变化对

RSL的影响在间冰期比冰期略明显。

致谢:感谢两位匿名审稿专家及编委会专家提出的宝贵意见!

References

- Anderson, R. F., Ali, S., Bradtmiller, L. I., et al., 2009. Wind-Driven Upwelling in the Southern Ocean and the Deglacial Rise in Atmospheric CO₂. *Science*, 323 (5920): 1443—1448. doi: 10.1126/science.1167441
- Almogi-Labin, A., 2011. The Paleoclimate of the Eastern Mediterranean during the Transition from Early to Mid Pleistocene (900 to 700 ka) Based on Marine and Non-Marine Records: An Integrated Overview. *Journal of Human Evolution*, 60 (4): 428—436. doi: 10.1016/j.jhevol.2010.03.007
- Bian, Y. P., Li, J. B., Jian, Z. M., et al., 2015. Vegetation and Climate Changes around Celebes Sea during Holocene. *Earth Science*, 40(5): 870—880 (in Chinese with English abstract).
- Basavaiah, N., Babu, J. L. V. M., Gawali, P. B., et al., 2015. Late Quaternary Environmental and Sea Level Changes from Kolleru Lake, SE India: Inferences from Mineral Magnetic, Geochemical and Textural Analyses. *Quaternary International*, 279—280: 197—208. doi: 10.1016/j.quaint.2014.12.018
- Bell, D. B., Jung, S. J. A., Kroon, D., 2015. The Plio-Pleistocene Development of Atlantic Deep-Water Circulation and Its Influence on Climate Trends. *Quaternary Science Reviews*, 123(6): 265—282. doi: 10.1016/j.quascirev.2015.06.026
- Broecker, W., 1991. The Great Ocean Conveyor. *Oceanography*, 4(2): 79—89. doi: 10.5670/oceanog.1991.07
- Chen, C. L., 2010. Long Term Trends in Global Sea Level-Analysis and Predictions(Dissertation). Ocean University of China, Qingdao (in Chinese with English abstract).
- Chen, C. L., Zuo, C. J., Du, L., et al., 2012. Long Term Trends in Global Sea Level under IPCC Sres A2 Scenario. *Acta Oceanologica Sinica*, 34(1): 29—38 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X., Wang, C. S., Wu, H. C., et al., 2015. Orbitally Forced Sea-Level Changes in the Upper Turonian-Lower Coniacian of the Tethyan Himalaya, Southern Tibet. *Cretaceous Research*, 56: 691—701. doi: 10.1016/j.cretres.2014.07.010
- Clark, P. U., Pollard, D., 1998. Origin of the Middle Pleistocene Transition by Ice Sheet Erosion of Regolith. *Paleoceanography*, 13(1): 1—9. doi: 10.1029/97pa02660
- Clark, P. U., Archer, D., Pollard, D., et al., 2006. The Middle Pleistocene Transition: Characteristics, Mechanisms, and Implications for Long-Term Changes in Atmospheric PCO₂. *Quaternary Science Reviews*, 25 (23—24): 3150—3184. doi: 10.1016/j.quascirev.2006.07.008
- Fischer, H., Schmitt, J., Lüthi, D., et al., 2010. The Role of Southern Ocean Processes in Orbital and Millennial CO₂ Variations—A Synthesis. *Quaternary Science Reviews*, 29 (1—2): 193—205. doi: 10.1016/j.quascirev.2009.06.007
- Gouretski, V., Koltermann, K. P., 2007. How Much is the Ocean Really Warming? *Geophysical Research Letters*, 34(1): L01610. doi: 10.1029/2006gl027834
- Grinsted, A., Moore, J. C., Jevrejeva, S., 2004. Application of the Cross Wavelet Transform and Wavelet Coherence to Geophysical Time Series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11 (5/6): 561—566. doi: 10.5194/npg—11—561—2004
- Grant, K. M., Rohling, E. J., Bar-Matthews, M., et al., 2012. Rapid Coupling between Ice Volume and Polar Temperature over the Past 150 000 Years. *Nature*, 43 (491): 744—747. doi: 10.1038/nature11593
- Haq, B. U., Schutter, S. R., 2008. A Chronology of Paleozoic Sea-Level Changes. *Science*, 322(5898): 64—68. doi: 10.1126/science.1161648
- Haq, B. U., Hardenbol, J., Vail, P. R., 1987. Chronology of Fluctuating Sea Levels since the Triassic. *Science*, 235 (4793): 1156—1167. doi: 10.1126/science.235.4793.1156
- Hays, J. D., Imbrie, J., Shackleton, N. J., 1976. Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science*, 194(4270): 1121—1132. doi: 10.1126/science.194.4270.1121
- He, L., Li, G. S., Li, K., et al., 2014. Changes and trends of sea level in the Pearl River Delta in the last 50 Years. *Geographical Research*, 33(5): 987—1000 (in Chinese with English abstract).
- Howell, P., 2001. ARAND time series and spectral analysis package for the Marcintosh, Brown University. IGBP PAGES/World Data Center for Paleoclimatology Data Contribution Series # 2001—044. NOAA/NGDC Paleoclimatology Program, Boulder, Colorado, USA.
- Huybers, P., 2011. Combined Obliquity and Precession Pacing of Late Pleistocene Deglaciations. *Nature*, 480 (7376): 229—232. doi: 10.1038/nature10626
- Imbrie, J., 1982. Astronomical Theory of the Pleistocene Ice Ages: A Brief Historical Review. *Icarus*, 50 (2—3): 408—422. doi: 10.1016/0019—1035(82)90132—4

- IPCC, 2007. Climate Change 2007; The Physical Science Basis. In: Solomon, S., Qin D., Manning, M., eds., Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Cambridge University Press, Cambridge.
- Jian, Z.M., Wang, P.X., Chen, M.P., et al., 2000. Foraminiferal Responses to Major Pleistocene Paleoceanographic Changes in the Southern South China Sea. *Paleoceanography*, 15(2): 229–243. doi: 10.1029/1999pa000431
- Jin, Z.D., Bickle, M.J., Chapman, H.J., et al., 2009. Early to Mid-Pleistocene Ostracod $\Delta^{18}\text{O}$ and $\Delta^{13}\text{C}$ in the Central Tibetan Plateau: Implication for Indian Monsoon Change. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 280(3–4): 406–414. doi: 10.1016/j.palaeo.2009.06.028
- Jung, S.J.A., Kroon, D., 2011. Quantifying Rates of Change in Ocean Conditions with Implications for Timing of Sea Level Change. *Global and Planetary Change*, 79(3–4): 204–213. doi: 10.1016/j.gloplacha.2010.11.004
- Kemp, A.E.S., Grigorov, I., Pearce, R.B., et al., 2010. Migration of the Antarctic Polar Front through the Mid-Pleistocene Transition: Evidence and Climatic Implications. *Quaternary Science Reviews*, 29(17–18): 1993–2009. doi: 10.1016/j.quascirev.2010.04.027
- Lambeck, K., Chappell, J., 2001. Sea Level Change through the Last Glacial Cycle. *Science*, 292(5517): 679–686. doi: 10.1126/science.1059549
- Lambeck, K., Esat, T.M., Potter, E.K., 2002. Links between Climate and Sea Levels for the Past Three Million Years. *Nature*, 419(6903): 199–206. doi: 10.1038/nature01089
- Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., et al., 2004. A Long-Term Numerical Solution for the Insolation Quantities of the Earth. *Astronomy and Astrophysics*, 428(1): 261–285. doi: 10.1051/0004-6361:20041335
- Lawrence, K.T., Herbert, T.D., Brown, C.M., et al., 2009. High-Amplitude Variations in North Atlantic Sea Surface Temperature during the Early Pliocene Warm Period. *Paleoceanography*, 24(2): PA2218. doi: 10.1029/2008pa001669
- Li, Q.Y., Wang, P.X., Zhao, Q.H., et al., 2008. Paleoceanography of the Mid-Pleistocene South China Sea. *Quaternary Science Reviews*, 27(11–12): 1217–1233. doi: 10.1016/j.quascirev.2008.02.007
- Li, W.B., Wang, R.J., Xiang, F., et al., 2010. Sea Surface Temperature and Subtropical Front Movement in the South Tasman Sea during the last 800 Ka. *Chinese Science Bulletin*, 55(29): 3338–3344. doi: 10.1007/s11434-010-4074-7
- Li, W.B., Wang, R.J., 2014. Research of the Mechanism of Sea Level Change during the Last 100 Ma. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 34(1): 117–127 (in Chinese with English abstract).
- Lisiecki, L.E., 2010. A benthic $\delta^{13}\text{C}$ -Based Proxy for Atmospheric $p\text{CO}_2$ over the Last 1.5 Myr. *Geophysical Research Letters*, 37, L21708. doi: 10.1029/2010GL045109
- Lisiecki, L.E., Raymo, M.E., 2005. A Pliocene-Pleistocene Stack of 57 Globally Distributed Benthic $\delta^{18}\text{O}$ Records. *Paleoceanography*, 20(1): 1–16. doi: 10.1029/2004pa001071
- Lisiecki, L.E., 2014. Atlantic Overturning Responses to Obliquity and Precession over the Last 3 Myr. *Paleoceanography*, 29(2): 71–86. doi: 10.1002/2013pa002505
- Lourens, L.J., 2004. Revised Tuning of Ocean Drilling Program Site 964 and KC01B (Mediterranean) and Implications for the $\delta^{18}\text{O}$, Tephra, Calcareous Nannofossil, and Geomagnetic Reversal Chronologies of the Past 1.1 Myr. *Paleoceanography*, 19(3): PA3010. doi: 10.1029/2003pa000997
- Lüthi, D., Floch, M.L., Bereiter, B., et al., 2008. High-Resolution Carbon Dioxide Concentration Record 650 000–800 000 Years before Present. *Nature*, 453(7193): 379–382. doi: 10.1038/nature06949
- Ma, W.T., 2011. Box Model Simulation of Orbital Cyclicity in the Late Cenozoic Ice Sheet and Oceanic Carbon Reservoir Changes (Dissertation). Tongji University, Shanghai (in Chinese with English abstract).
- Maasch, K., 1988. Statistical Detection of the Mid-Pleistocene Transition. *Climate Dynamics*, 2(3): 133–143. doi: 10.1007/bf01053471
- Maslin, M.A., Brierley, C.M., 2015. The Role of Orbital Forcing in the Early Middle Pleistocene Transition. *Quaternary International*, 389: 47–55. doi: 10.1016/j.quaint.2015.01.047
- Martinez-Garcia, A., Rosell-Mele, A., McClymont, E.L., et al., 2010. Subpolar Link to the Emergence of the Modern Equatorial Pacific Cold Tongue. *Science*, 328(5985): 1550–1553. doi: 10.1126/science.1184480
- McCulloch, M.T., Esat, T., 2000. The Coral Record of Last Interglacial Sea Levels and Sea Surface Temperatures. *Chemical Geology*, 169(1–2): 107–129. doi: 10.1016/S0009-2541(00)00260-6
- Miller, K.G., Komazin, M.A., Browning, J.V., et al., 2005. The Phanerozoic Record of Global Sea-Level Change. *Science*, 310: 1293–1298.
- Nerem, R.S., Leuliette, É., Cazenave, A., 2006. Present-Day

- Sea-Level Change; A Review. *Comptes Rendus Geoscience*, 338 (14 - 15): 1077 - 1083. doi: 10.1016/j.crte.2006.09.001
- Neumann, A. C., Hearty, P. J., 1996. Rapid Sea-Level Changes at the Close of the Last Interglacial (Substage 5e) Recorded in Bahamian Island Geology. *Geology*, 24 (9): 775. doi: 10.1130/0091 - 7613 (1996) 024 < 0775: rslcat > 2.3.co; 2
- Paillard, D., Labeyrie, L., Yiou, P., 1996. Macintosh Program Performs Time-Series Analysis. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 77 (39): 379. doi: 10.1029/96eo00259
- Pittet, B., Suan, G., Lenoir, F., et al., 2014. Carbon Isotope Evidence for Sedimentary Discontinuities in the Lower Toarcian of the Lusitanian Basin (Portugal); Sea Level Change at the Onset of the Oceanic Anoxic Event. *Sedimentary Geology*, 303: 1 - 14. doi: 10.1016/j.sedgeo.2014.01.001
- Rohling, E. J., Grant, K., Hemleben, C. H., et al., 2007. High Rates of Sea-Level Rise during the Last Interglacial Period. *Nature Geoscience*, 1 (1): 38 - 42. doi: 10.1038/ngeo.2007.28
- Rohling, E. J., Grant, K., Bolshaw, M., et al., 2009. Antarctic Temperature and Global Sea Level Closely Coupled over the Past Five Glacial Cycles. *Nature Geoscience*, 2 (7): 500 - 504. doi: 10.1038/ngeo557
- Rohling, E. J., Braun, K., Grant, K., et al., 2010. Comparison between Holocene and Marine Isotope Stage-11 Sea-Level Histories. *Earth and Planetary Science Letters*, 291 (1 - 4): 97 - 105. doi: 10.1016/j.epsl.2009.12.054
- Rohling, E. J., Haigh, I. D., Foster, G. L., et al., 2013. A Geological Perspective on Potential Future Sea-Level Rise. *Scientific Reports*, 3: 3461. doi: 10.1038/srep03461
- Rohling, E. J., Foster, G. L., Grant, K. M., et al., 2014. Sea-Level and Deep-Sea-Temperature Variability over the Past 5.3 Million Years. *Nature*, 508 (7497): 477 - 482. doi: 10.1038/nature13230
- Schmieder, F., Dobeneck, T. V., Bleil, U., 2000. The Mid-Pleistocene Climate Transition as Documented in the Deep South Atlantic Ocean; Initiation, Interim State and Terminal Event. *Earth and Planetary Science Letters*, 179 (3 - 4): 539 - 549. doi: 10.1016/S0012 - 821X(00)00143 - 6
- Schulz, M., Mudelsee, M., 2002. REDFIT: Estimating Red-Noise Spectra Directly from Unevenly Spaced Paleoclimatic Time Series. *Computers & Geosciences*, 28 (3): 421 - 426. doi: 10.1016/S0098 - 3004(01)00044 - 9
- Shackleton, N. J., Hall, M. A., Pate, D., 1995. Pliocene Stable Isotope stratigraphy of Site 846. In: Piasias, N. G., May-er, L., Janecek, T., eds., Proceedings of Ocean Drilling Program, Scientific Results, 138, College Station, TX (Ocean Drilling Program), 337 - 355.
- Shi, X. J., Yu, K. F., Chen, T. G., 2007. Progress in Researches on Sea-Level Changes in South China Sea since Mid-Holocene. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 27 (5): 121 - 132 (in Chinese with English abstract).
- Tian, J., Wang, P. X., Cheng, X. R., 2004. Responses of Foraminiferal Isotopic Variations at ODP Site 1143 in the Southern South China Sea to Orbital Forcing. *Science in China (Series D)*, 47 (10): 943. doi: 10.1360/03yd0129
- Toggweiler, J. R., Russell, J. L., Carson, S. R., 2006. Midlatitude Westerlies, Atmospheric CO₂, and Climate Change during the Ice Ages. *Paleoceanography*, 21 (2): 341 - 343. doi: 10.1029/2005pa001154
- Toggweiler, J. R., 2009. Shifting Westerlies. *Science*, 323: 1434 - 1435. doi: 10.1126/science.1169823
- Yan, M., Zuo, J. C., Fu, S. B., et al., 2008. Advances on Sea Level Variation Research in Global and China Sea. *Marine Environmental Science*, 27 (2): 197 - 200 (in Chinese with English abstract).
- Waelbroeck, C., Labeyrie, L., Michel, E., et al., 2002. Sea-Level and Deep Water Temperature Changes Derived from Benthic Foraminifera Isotopic Records. *Quaternary Science Reviews*, 21 (1 - 3): 295 - 305. doi: 10.1016/S0277 - 3791(01)00101 - 9
- Wahl, T., Haigh, I. D., Woodworth, P. L., et al., 2013. Observed Mean Sea Level Changes around the North Sea Coastline from 1 800 to Present. *Earth-Science Reviews*, 124: 51 - 67. doi: 10.1016/j.earscirev.2013.05.003
- Wang, P. X., Jian, Z. M., Liu, Z. F., 2006. Interactions Between the Earth Spheres; Deep-Sea Processes and Records (II): Tropical Forcing of Climate Changes and Carbon Cycling. *Advances in Earth Science*, 21 (4): 338 - 345 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. X., 2006. Orbital Forcing of the Low-Latitude Processes. *Quaternary Science*, 26 (5): 694 - 702 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. X., Tian, J., Lourens, L. J., 2010. Obscuring of Long Eccentricity Cyclicity in Pleistocene Oceanic Carbon Isotope Records. *Earth and Planetary Science Letters*, 290 (3 - 4): 319 - 330. doi: 10.1016/j.epsl.2009.12.028
- Wang, Y. H., Zhang, R. S., Xie, Z. R., et al., 2004. Calculation of Relative Sea Level Change of Mid-Jiangsu Coast in the Future. *Advances in Earth Science*, 19 (6): 992 - 996 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. D., Kang, J. C., Han, Q. C., et al., 2014. A Review on Sea-Level Change Research in Global and the China Sea

- in Recent Years. *Marine Sciences*, 38(5): 114–120 (in Chinese with English abstract).
- Woodroffe, C. D., Webster, J. M., 2014. Coral Reefs and Sea-Level Change. *Marine Geology*, 352: 248–267. doi: 10.1016/j.margeo.2013.12.006
- Wunsch, C., Ponte, R. M., Heimbach, P., 2007. Decadal Trends in Sea Level Patterns: 1993–2004. *Journal of Climate*, 20(24): 5889–5911. doi: 10.1175/2007jcli1840.1
- Wu, T., Kang J. C., Wang F., et al., 2006. The New Progresses on Global Sea Level Change. *Advances in Earth Science*, 21(7): 730–737 (in Chinese with English abstract).
- Zachos, J. C., Pagani, M., Sliam, L., et al., 2001. Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. *Science*, 292(5517): 686–693. doi: 10.1126/science.1059412
- Zachos, J. C., Dickens, G. R., Zeebe, R. E., 2008. An Early Cenozoic Perspective on Greenhouse Warming and Carbon-Cycle Dynamics. *Nature*, 451(7176): 279–283. doi: 10.1038/nature06588
- Zhang, J., Fang, M. Q., 2015. Sea Level Trends of China Seas from 1993 to 2012. *Periodical of Ocean University of China*, 45(1): 121–126 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. L., 2006. Global Sea Level Change and Influence of Steric Sea Level Change (Dissertation). Ocean University of China, Qingdao (in Chinese with English abstract).
- 世植被演化及气候变化. *地球科学*, 40(5): 870–880.
- 陈长霖, 2010. 全球海平面长期趋势变化及气候情景预测研究(博士学位论文). 青岛: 中国海洋大学.
- 陈长霖, 左军成, 杜凌, 等, 2012. IPCC 气候情景下全球海平面长期趋势变化. *海洋学报*, 34(1): 29–38.
- 何蕾, 李国胜, 李阔, 等, 2014. 1959 年来珠江三角洲地区的海平面变化与趋势. *地理研究*, 33(5): 987–1000.
- 李文宝, 王汝建, 2014. 近 100 Ma 以来海平面变化机制. *海洋地质与第四纪地质*, 34(1): 117–127.
- 马文涛, 2011. 新生代晚期冰盖与大洋碳储库变化的轨道周期及其数值模型分析(博士学位论文). 上海: 同济大学.
- 时小军, 余克服, 陈特固, 2007. 南海周边中全新世以来的海平面变化研究进展. *海洋地质与第四纪地质*, 7(5): 121–132.
- 汪品先, 2006. 低纬过程的轨道驱动. *第四纪研究*, 26(5): 694–702.
- 汪品先, 翦知潜, 刘志飞, 2006. 地球圈层相互作用中的深海过程和深海记录(II): 气候变化的热带驱动与碳循环. *地球科学进展*, 21(4): 338–345.
- 王国栋, 康建成, 韩钦臣, 等, 2014. 近代全球及中国海平面变化研究述评. *海洋科学*, 38(5): 114–120.
- 王艳红, 张忍顺, 谢志仁, 2004. 未来江苏中部沿海相对海面变化预测. *地球科学进展*, 19(6): 992–996.
- 吴涛, 康建成, 王芳, 等, 2006. 全球海平面变化研究新进展. *地球科学进展*, 21(7): 730–737.
- 颜梅, 左军成, 傅深波, 等, 2008. 全球及中国海平面变化研究进展. *海洋环境科学*, 27(2): 197–200.
- 张静, 方明强, 2015. 1993–2012 年中国海平面上升趋势. *中国海洋大学学报*, 45(1): 121–126.
- 张建立, 2006. 全球海平面变化规律及比容变化的影响(硕士学位论文). 青岛: 中国海洋大学.

附中文参考文献

边叶萍, 李家彪, 翦知潜, 等, 2015. 苏拉威西海周边地区全新