

# 全新世南海气候环境变化的珊瑚地球化学记录

邓文峰, 韦刚健, 陈雪霏, 肖杭芳, 郭炆锐

中国科学院 广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640

**摘要:**重建全新世以来南海气候环境演变记录对了解我国乃至东亚地区气候环境的演变规律具有重要的意义。造礁珊瑚在热带海洋气候环境演变研究方面具有独特的优势。最近二十年来,基于珊瑚地球化学记录的全新世南海气候环境演变研究取得了大量成果。本文对在季节-年际-年代际-千年际尺度的气候变化、海水 pH、生态演化和人类活动等研究方面获得的代表性成果进行了总结,提出传统的珊瑚古气候研究需要从重建气候环境记录、探讨气候变化问题上上升到研究珊瑚对气候环境变化的适应性演变机制、珊瑚礁生态系统和气候环境协同演化过程,以适应地球系统科学发展的要求。

**关键词:**南海; 珊瑚; 海洋表面温度; 海洋酸化; 降雨; 锶钙比; 氧同位素; 碳同位素; 硼同位素  
**中图分类号:** P593 **文章编号:** 1007-2802(2019)06-1057-16 **doi:** 10.19658/j.issn.1007-2802.2019.38.111

## Holocene Climate and Environmental Change in the South China Sea Recorded by Coral Geochemical Proxies

DENG Wen-feng, WEI Gang-jian, CHEN Xue-fei, XIAO Hang-fang, GUO Yang-rui

State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

**Abstract:** Knowledge of Holocene climate change in the South China Sea (SCS) is essential to better understand the evolution of climate and environment conditions in China and East Asia. In this regard, massive corals provide the most reliable archives, as they contain clear annual bands and have high growth rates, thereby providing detailed paleoclimate records of seasonal, annual, decadal, centennial and millennial variations. In recent two decades, a lot of research results have been achieved for the reconstruction of climate and environmental records during Holocene in the SCS. This review synthesized typical results on different time scales of climate change, seawater pH, ecosystem evolution and human activities, and suggested that coral-based paleoclimatology should be improved to study the coral adaptation mechanism to changing climate and environment and the co-evolution of coral reef ecosystem and climate change.

**Key words:** South China Sea; coral; sea surface temperature; ocean acidification; rainfall; Sr/Ca;  $\delta^{18}\text{O}$ ;  $\delta^{13}\text{C}$ ;  $\delta^{11}\text{B}$

## 0 引言

造礁珊瑚是热带海洋气候环境演变的最佳记录载体,其优势主要表现在以下这些方面:①珊瑚生长在热带海洋中,对气候环境的变化敏感,其骨骼的地球化学组成如 Sr/Ca、Mg/Ca、 $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{11}\text{B}$  等与温度、降雨、盐度和 pH 等气候环境变量可以建立定量关系;②珊瑚具有清晰的年生长纹层,并可以利用  $^{238}\text{U}$ - $^{234}\text{U}$ - $^{230}\text{Th}$  同位素体系精确定年,为气候环

境演变研究提供良好的时间标尺;③造礁珊瑚生长速率可以达到 10~20 mm/a,可以获取月甚至更高的时间分辨率记录;④造礁珊瑚持续生长可达数十年到数百年,可以提供持续的、长序列的气候环境记录。上世纪八九十年代以来,基于珊瑚地球化学的热带海洋气候环境重建研究迅速发展,取得了大量研究成果,主要体现在对海洋表面温度(sea surface temperature, SST)、海洋表面盐度(sea surface salinity, SSS)、降雨、蒸发、洋流和上升流、陆源径流

等记录的重建,并利用这些记录对季风、厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)、太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)等区域和全球气候系统进行研究,促进了对这些气候系统的形成机制、演化趋势的深入了解。

南海是西太平洋最大的边缘海,在季节-年际尺度上,南海气候同时受到东亚季风和 ENSO (Yan *et al.*, 2011),在年代际尺度上,PDO 对南海气候具有重要的影响(Yu and Qu, 2013)。因此,重建南海气候环境演变记录对了解我国乃至东亚地区气候环境的演变规律具有重要意义。南海珊瑚礁广泛发育,从近赤道的曾母暗沙,一直到南海北部海南岛、雷州半岛、涠洲岛及台湾岛都有分布(朱袁智, 1987;余克服, 2012),在热带海洋气候环境演变研究方面具有得天独厚的条件(余克服, 2012; Yu, 2012),最近二十年来,基于珊瑚地球化学记录的全新世南海气候环境演变取得了大量研究成果(详见下文引用文献,受篇幅限制,不能一一列举)。较早时期的研究利用珊瑚的生长速率来重建海洋表面温度的变化(聂宝符等, 1996),随后大量的研究集中在对不同海域现代造礁珊瑚元素、同位素地球化学组成与气候环境变量之间定量关系的标定并应用于海洋表面温度的重建(Shen *et al.*, 1996; 韦刚健和李献华, 1996; 韦刚健等, 1998a, 1998b, 2004; 余克服等, 1999, 2001; Wei *et al.*, 2000; 孙敏等, 2001; He *et al.*, 2002; Yu *et al.*, 2002, 2005a; Peng *et al.*, 2003; Sun *et al.*, 2004),进而转向重建一些重要时段的高分辨率气候记录,以探讨相关的气候系统(如季风气候和 ENSO 等)的变化特征(Wei *et al.*, 2004; Yu *et al.*, 2004, 2005b; Sun *et al.*, 2005; Wei *et al.*, 2007; Deng *et al.*, 2009)。近年来,我国学者在新的珊瑚地球化学体系、全球变暖和海洋酸化等研究方面开展了相关工作(Liu *et al.*, 2009, 2014, 2019; Wei *et al.*, 2009, 2015; Chen *et al.*, 2016, 2018, 2019; Deng *et al.*, 2017a, 2019)。尽管如此,已有的研究大都只关注对气候环境记录的重建,把珊瑚自身的生态演化过程排除在外,没有从气候环境和生态系统协同演化的角度进行系统地研究。本文对我国南海全新世气候环境变化的珊瑚地球化学记录研究方面的代表性成果进行了总结,对目前的研究现状、存在问题进行了分析,并对未来研究方向进行了展望,以期使基于珊瑚地球化学的气候环境演变研究适应当前地球系统科学的发展要求,服务于人类社会和自然生态系统的可持续发展。

## 1 季节尺度温度和降雨的解耦记录

温度和降雨是最核心的气候要素,其耦合关系决定不同的干湿冷暖组合,从而构成最基本的气候模态。东亚地区的气候主要受季风控制(An, 2000),降雨主要受季风影响。通常情况下,夏季风带来丰富的降雨,而冬季风导致相对干旱的气候条件。因此,降雨主要发生在温暖的季节(王绍武等, 2005),形成一种温度和降雨具有同步季节变化的气候特征。自然生态系统和人类活动也已适应这种温度-降雨同步变化的气候模式,例如中国南方的水稻种植通常在温暖多雨的夏季进行。

然而,气候变化具有不确定性(Reilly *et al.*, 2001; Karl and Trenberth, 2003; Webster *et al.*, 2003)。如果气候变化导致温度和降雨同步变化的气候模式发生变化而引起温雨解耦,降雨的季节分布模式就会发生变化,很可能出现夏季干旱而冬季多雨雪的情况。有研究表明,在西北太平洋的内陆地区,降水模式从末次冰期时的 10%~50%的冬季降水和 50%~90%的夏季降水演变成现在~75%的冬季降水和~25%的夏季降水(Takeuchi, 2007)。在东亚地区尚无类似的降雨季节分布变化的研究报道。降雨的季节变化会给自然生态系统和人类社会经济发展带来灾难性的后果。例如,2008年冬季持续1个多月的中国南方雨雪灾害(Ding *et al.*, 2009)导致至少129人死亡,1516.5亿元人民币的直接经济损失,受灾人口超过4亿,严重影响了工农业生产和人民生活(国家气候中心,2008)。因此,在灾害性气候事件频发的全球气候变化背景下,东亚地区的雨季时间变化可能对自然生态系统和人们生产生活造成不可估量的影响。

以往的古气候研究中虽然有少量关于温雨解耦的报道,但这些研究大都基于长时间尺度,比如千年尺度(Peterse *et al.*, 2011)、万年尺度(Scholz *et al.*, 2011)和百万年尺度(Nie *et al.*, 2013)。因此,季节尺度的温雨解耦在古气候研究中值得关注。了解季节尺度的温雨解耦,有助于为全面认识气候变化与人类活动和生态演变的关联提供重要依据。已往对季节尺度温雨解耦研究的欠缺,主要受制于两方面,一是需要高分辨率即至少月分辨率的气候记录,二是需要有独立的温度和降雨记录,而珊瑚地球化学指标的丰富性可以克服这两个问题而用于温度和降雨时间配置关系的研究。

珊瑚的 Sr/Ca 值很好地记录了海洋表面温度的

变化(Smith *et al.*, 1979; Beck *et al.*, 1992),  $\delta^{18}\text{O}$  同时受海洋表面温度和周围海水  $\delta^{18}\text{O}$  ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$ ) 的控制(Swart and Coleman, 1980; Dunbar and Wellington, 1981)。因此,从珊瑚  $\delta^{18}\text{O}$  中扣除利用 Sr/Ca 值估算的海洋表面温度对  $\delta^{18}\text{O}$  的贡献,剩余的  $\delta^{18}\text{O}$  部分(定义为  $\Delta\delta^{18}\text{O}$ )就可以用来指示  $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$  的变化(McCulloch *et al.*, 1994; Gagan *et al.*, 1998, 2000; Corrège, 2006; Guo *et al.*, 2016)。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$  的变化主要受蒸发和淡水输入二者之间的平衡控制,而后者和降雨密切相关(Watanabe *et al.*, 2001; Hendy *et al.*, 2002; Corrège, 2006)。在淡水输入对  $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$  变化起主要作用的地方, $\Delta\delta^{18}\text{O}$  的变化能很好地反映降雨的变化(McCulloch *et al.*, 1994; Shen *et al.*, 2005)。因为淡水的  $\Delta\delta^{18}\text{O}$  通常比海水的  $\Delta\delta^{18}\text{O}$  偏负,珊瑚的  $\Delta\delta^{18}\text{O}$  最小值指示了最大的淡水输入量,而最大的淡水输入量通常出现在雨季期间,因而  $\Delta\delta^{18}\text{O}$  最小值出现的时间代表了雨季时间。考虑到海洋表面温度的变化能明确地表明季节的变化,珊瑚的  $\Delta\delta^{18}\text{O}$  和 Sr/Ca 值之间的时间差能提供雨季的相关信息(Deng *et al.*, 2009)。这样就从单一载体中获得了独立的温度和降雨记录,利用交叉谱分析方法定量计算 Sr/Ca 值获得的海洋表面温度和  $\Delta\delta^{18}\text{O}$  的时间先后关系,就可以确定雨季发生的时间(Deng *et al.*, 2009)。

利用上述方法,季节性温雨解耦的古气候证据首次在中全新世海南岛的珊瑚记录中被发现。具体表现为,距今约 6500 年前海南岛的雨季主要发生在冬季,明显不同于现代的夏、秋季降雨的特征(Deng *et al.*, 2009)。进一步的研究还发现南海北部的雷州半岛自中-晚全新世以来,温度和降雨的时间先后关系一直在变化(表 1),温雨同步和温雨解耦交替出现(Deng *et al.*, 2014)。随后将范围进一步扩大到西南太平洋的研究表明,瓦鲁阿图中全新世距今约 6500 年前也存在季节尺度的温雨解耦。所以,中全新世以来整个西太平洋都存在季节尺度的温雨解耦(Deng and Wei, 2015)。根据最近的珊瑚古气候研究结果,这种季节尺度的温雨解耦可能也出现在末次间冰期的热带大西洋(Brocas *et al.*, 2018)。现代气象学研究结果也表明,中全新世这种气候格局在南美、非洲以及南北半球的高纬度地区正在演变成为现实(Feng *et al.*, 2013)。季节尺度的温雨解耦可能和季风强度的演化、热带辐合带和南太平洋辐合带的北移有关(Deng *et al.*, 2009, 2014; Deng and Wei, 2015),但需要结合进一步气

象学模型研究来证实。

表 1 交叉谱分析方法获得的雷州半岛中-晚全新世不同时段 Sr/Ca-SST 和  $\Delta\delta^{18}\text{O}$  的时间差

Table 1 Time offsets between Sr/Ca-SST and  $\Delta\delta^{18}\text{O}$ , as estimated by the cross-spectral analysis

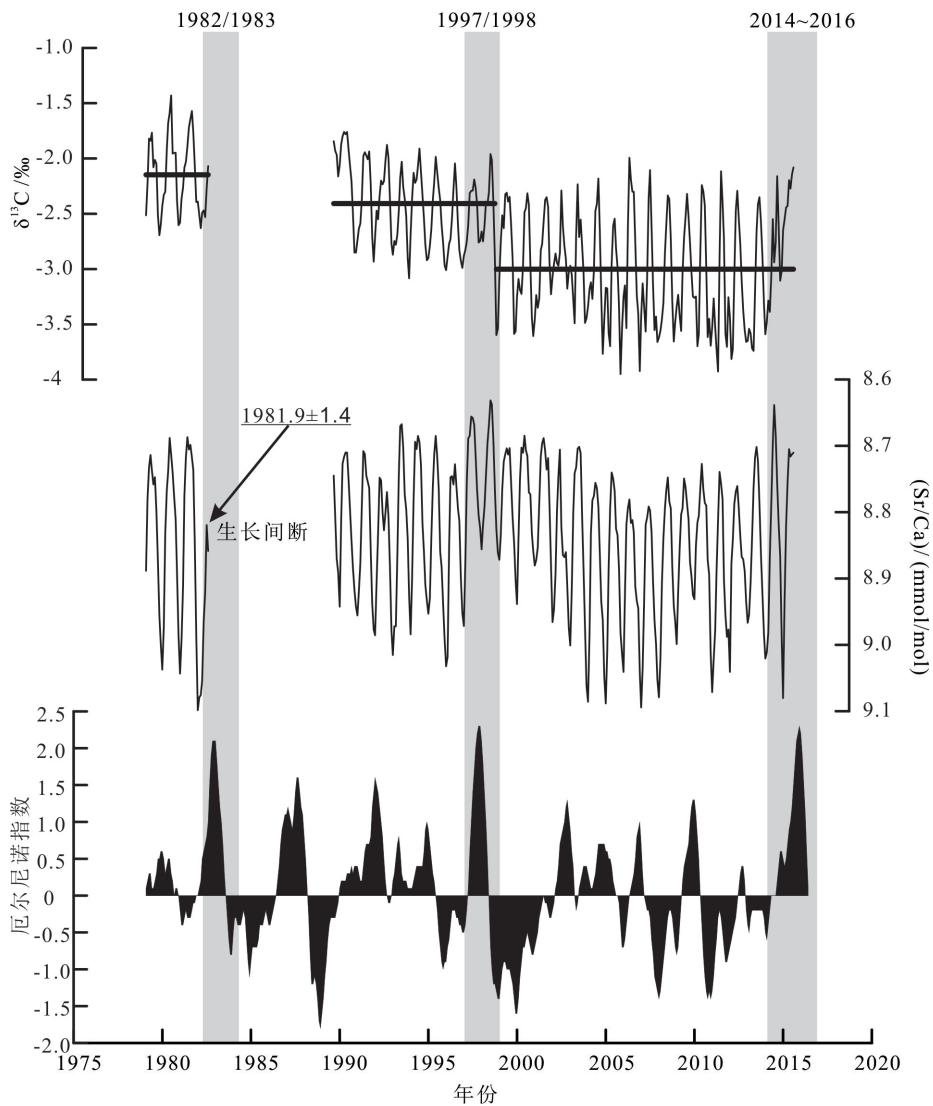
年代	相位角/°	时间差/月	器测或重建的降雨时间
1989~2001	-80±10	-2.5±0.3	6~10月
~1 513 a BP (~487 AD)	-121±20	-4.0±0.7	8~12月
~2 541 a BP (~541 BC)	106±10	3.5±0.3	1~4月
~5 011 a BP (~3 011 BC)	140±3	4.5±0.1	12~3月
~5 906 a BP (~3 906 BC)	0	0	无规则
~6 789 a BP (~4 789 BC)	-129±15	-4.3±0.5	8~12月

注:负的相位角表示  $\Delta\delta^{18}\text{O}$  滞后 SST,正的相位角表示  $\Delta\delta^{18}\text{O}$  超前 SST。据 Deng 等(2014)修改。

## 2 超强厄尔尼诺事件记录

在利用珊瑚或其他载体比如砗磲研究过去的厄尔尼诺活动时,通常是利用其地球化学记录中存在的 2~7 年的周期变化来指示过去厄尔尼诺的活动(Peng *et al.*, 2003; Sun *et al.*, 2004, 2005; Wei *et al.*, 2007; Su *et al.*, 2010; Song *et al.*, 2012; Yan *et al.*, 2017)。但这种方法的可靠性尚未得到验证,而最好的验证方法就是利用现代珊瑚的地球化学记录和现代厄尔尼诺的活动进行对照研究。

对西沙七连屿海域的一个生长时期跨越现代 3 次超强厄尔尼诺事件(1982~1983, 1997~1998, 2014~2016)的现代珊瑚的 Sr/Ca、 $\Delta\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$  和厄尔尼诺指数的对比研究表明,该珊瑚可靠地记录了当地的海水环境变化信息和超强厄尔尼诺的活动,但是对其他强度的厄尔尼诺的活动的响应并不敏感(Wang *et al.*, 2018)。1997~1998 和 2014~2016 这两次超强的厄尔尼诺事件对应于异常低的 Sr/Ca 值,而 1982~1983 这次超强的厄尔尼诺则导致了珊瑚的热白化死亡,被利用 U-Th 定年获得的生长间断记录下来(图 1)。珊瑚  $\delta^{13}\text{C}$  的序列整体上呈现 3 个依次明显降低的台阶式变化,每次降低均发生在超强厄尔尼诺事件之后,可能是厄尔尼诺事件期间的高温导致共生虫黄藻密度的降低而引起其对碳的利用的变化,最终导致珊瑚  $\delta^{13}\text{C}$  的降低。另外,不同类型的虫黄藻对高温的耐受能力有差别(Berkelmans and Van Oppen, 2006)。因此,珊瑚的  $\delta^{13}\text{C}$  的台阶式变化也可能是珊瑚自身为了生存选择性地利用不同的更耐高温的虫黄藻种类对碳的不同利用程度造成的。由于厄尔尼诺期间南海的降雨和温度都会增加,对  $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$  和海洋表面盐度产



据 Wang 等(2018)修改

图 1 西沙珊瑚地球化学指标记录的 3 次超强厄尔尼诺事件

Fig. 1 Three super El Niño events recorded by the geochemical proxies in a *Porites* coral from Xisha Islands, South China Sea

生的作用会相互抵消,所以尽管珊瑚的  $\Delta\delta^{18}\text{O}$  记录了  $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$  和海洋表面盐度的变化,但并未完整记录所有不同强度的厄尔尼诺的活动。上述结果表明,南海珊瑚的地球化学指标在记录除超强之外的其他强度的厄尔尼诺的活动方面的作用有限(Wang *et al.*, 2018),其原因可能是南海并不是位于厄尔尼诺的核心活动区域,普通强度厄尔尼诺的信号被珊瑚记录的程度有限。

### 3 年代际气候变化记录

太平洋年代际振荡是具有类似厄尔尼诺空间结构但周期更长的一种太平洋区域气候变率(Mantua *et al.*, 1997; Mantua and Hare, 2002),对泛太平洋地区的气候环境如温度、降雨等具有重要的影响

(Power *et al.*, 1999a, 1999b; Salinger *et al.*, 2001; Mantua and Hare, 2002; Gordon and Giulivi, 2004; Yuan and Miyamoto, 2004; Fu *et al.*, 2008; Mao *et al.*, 2011; Cai and Van Rensch, 2012)。作为西北太平洋最大的边缘海,南海一直没有过去太平洋年代际振荡活动记录报道。此外,太平洋年代际振荡的活动机制极其复杂,难以利用简单的数值模拟来解释(Wang and Picaut, 2004),对于其起源于热带、热带以外的高纬海域还是热带与高纬相互作用尚无定论(Gu and Philander 1997; Zhang *et al.*, 1998; Barnett *et al.*, 1999; Kleeman *et al.*, 1999; Jin, 2001)。

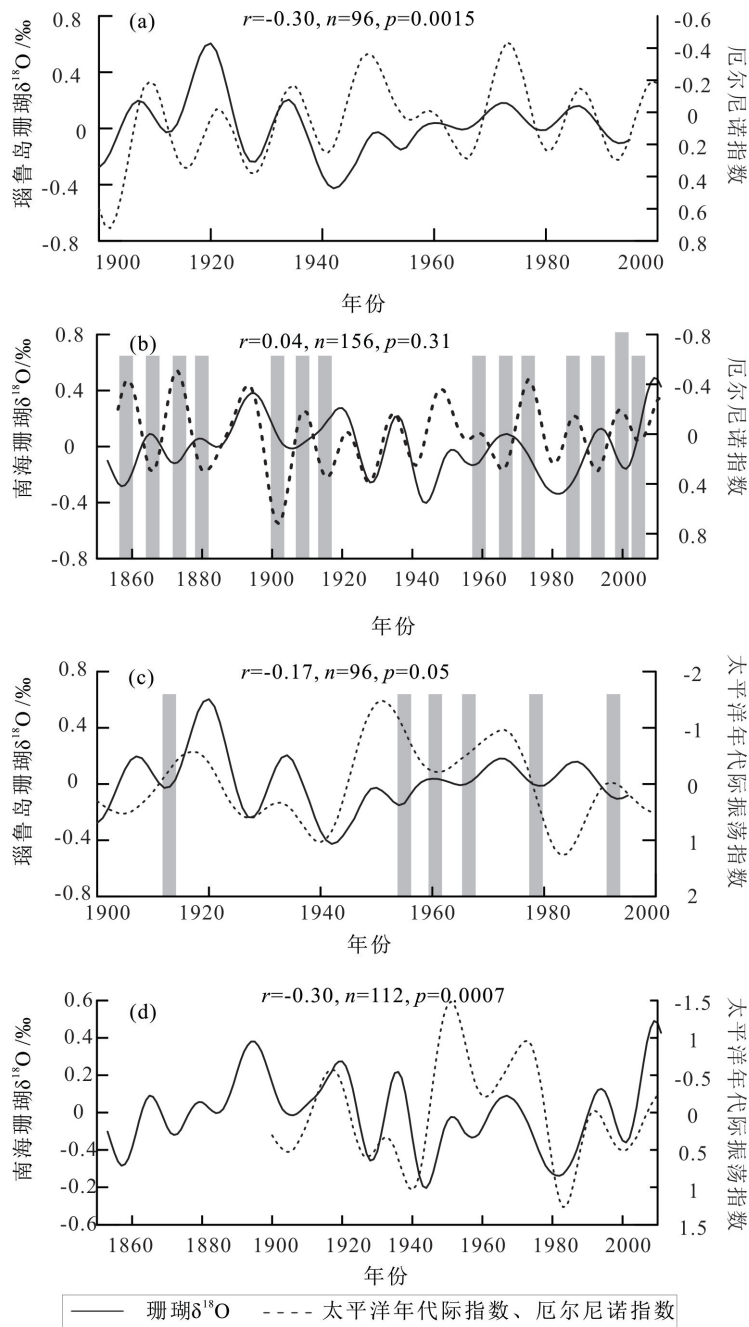
南海北部珊瑚的年分辨率珊瑚地球化学指标的年代际变化和太平洋年代际振荡指数具有较好

的对应关系和一致的变化模式,很好地记录了近200年来南海北部气候变化对太平洋年代际振荡活动的响应,这是首次在南海古气候记录中发现的年代际气候变化对太平洋年代际振荡活动响应的直接证据(Deng *et al.*, 2013)。在此基础上,通过对比研究南海北部和赤道太平洋瑙鲁岛的珊瑚  $\delta^{18}\text{O}$  记录,发现在年代际尺度上,南海北部珊瑚  $\delta^{18}\text{O}$  主要响应太平洋年代际振荡,而瑙鲁岛的珊瑚  $\delta^{18}\text{O}$  则主要响应厄尔尼诺-南方涛动的活动(图2),可能表明

热带和高纬度太平洋年代际变率分别起源于热带和高纬度当地,而不是单纯的热带起源或高纬度起源(Deng and Wei, 2014)。

#### 4 近2000年来的气候环境变化记录

人类排放导致的全球变暖是当前全球变化研究的热点之一,根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)模型预测的结果,到2100年全球地表平均温度至少要比现在高4.8℃(IPCC, 2013)。但长



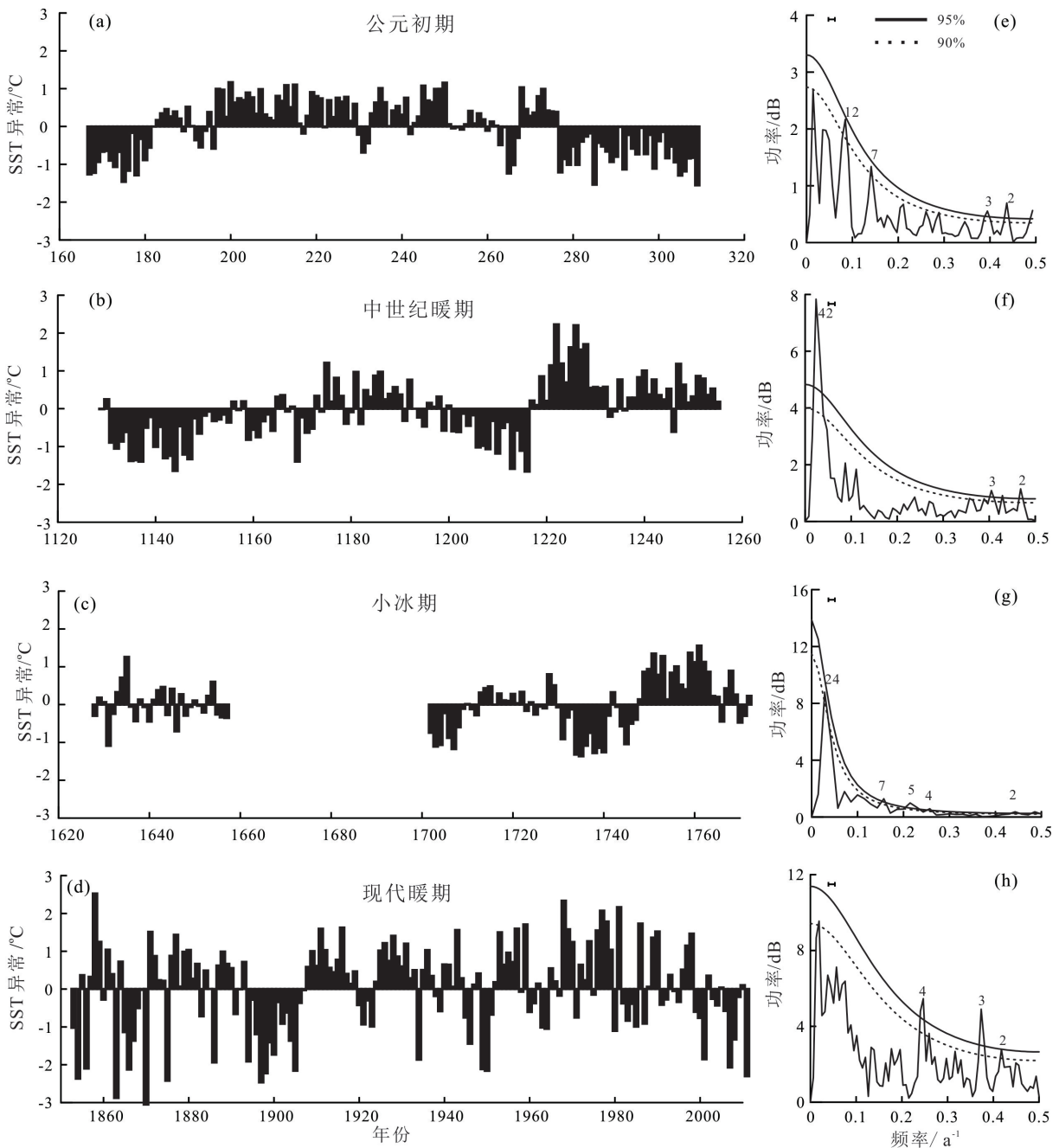
据 Deng 和 Wei(2014) 修改

图2 珊瑚  $\delta^{18}\text{O}$  和厄尔尼诺指数、太平洋年代际振荡指数变化序列

期以来,人类活动导致的全球变暖是否真实存在一直存在激烈的争论(Schneider, 1990; Khandekar *et al.*, 2005)。争论的原因,除了政治方面之外,还有以下科学原因。首先,IPCC的预测模型主要基于陆地观测记录建立,而全球各个地方的重建记录的变化趋势并不一致,也不存在线性的变暖趋势(Mann *et al.*, 2007)。其次,占地球表面绝大部分面积的海洋的高分辨率气候记录相当欠缺,绝大部分高分辨记录来自于高纬陆地,来自热带海洋的记录非常

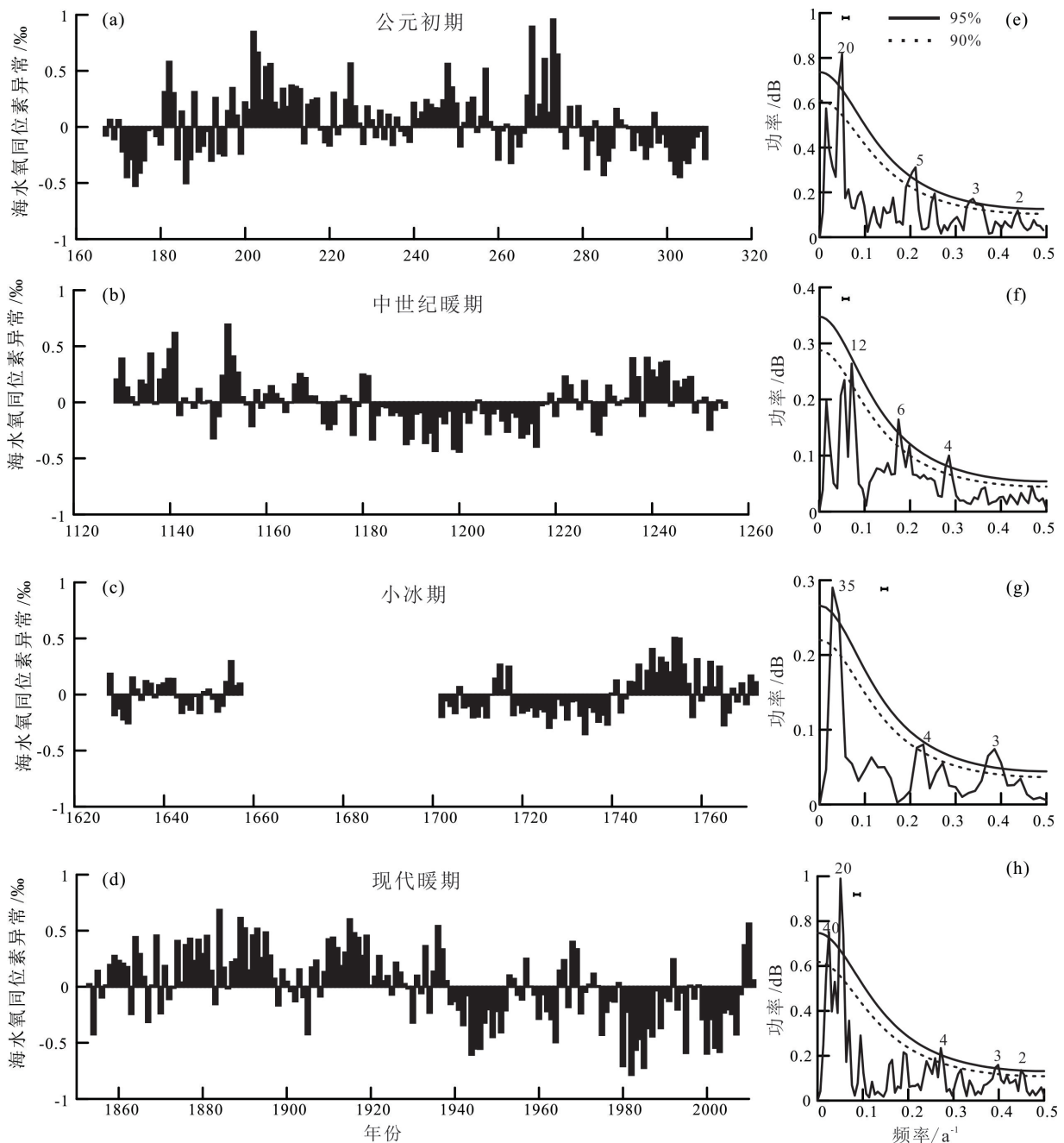
有限(Mann *et al.*, 2008)。热带海洋记录的欠缺,导致对整个海洋是否变暖还存在很大争议,对南海地区千年气候变化是否响应全球变暖的认识也仍然不足。

最近有研究者利用造礁珊瑚的 Sr/Ca、 $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  重建了我国南海北部近 2000 年以来重要特征气候时段的海洋表面温度、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$  和珊瑚固碳的演变记录(Deng *et al.*, 2017a, 2017b; Xiao *et al.*, 2017)。这些特征气候时段包括气候变化主要受自



据 Deng 等(2019)修改

图3 近 2000 年以来不同时期南海北部海洋表面温度的异常幅度和变化频率



据 Deng 等 (2019) 修改

图 4 近 2000 年以来不同时期南海北部海水  $\delta^{18}\text{O}$  的异常幅度和变化频率

Fig. 4 The anomalies and variability of sea water  $\delta^{18}\text{O}$  during different periods over the past 2000 years

然因素驱动的公元初期、中世纪暖期和小冰期,以及气候变化被认为是受到人类活动影响的现代暖期。重建结果表明,公元初期和小冰期具有相似的气候条件,海洋表面温度和  $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$  的长期平均值接近,处于相对寒冷潮湿的气候状态,而中世纪暖期和现代暖期具有相似的气候条件,海洋表面温度和  $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$  的长期平均值接近,处于相对温暖干燥的气候状态 (Deng *et al.*, 2017a; Xiao *et al.*, 2017)。尽管如此,现代暖期的海洋表面温度 (图 3) 和  $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$

(图 4) 的变化幅度和频率均比其他时期要高 (Deng *et al.*, 2019)。这一结果可能表明,工业化革命以来人类活动的加剧对热带海洋表面温度升高和  $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$  变化绝对值的影响并不显著,但人类活动导致了海洋表面温度和  $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$  变化幅度和频率的升高 (Deng *et al.*, 2019)。对于珊瑚固碳而言,工业化革命以前珊瑚的  $\delta^{13}\text{C}$  与太阳辐照量具有耦合的变化和显著的正相关关系,主要受珊瑚共生虫黄藻的光合作用的影响;但工业化革命以来,珊瑚的  $\delta^{13}\text{C}$  与太阳辐照量呈

现负相关关系,表现出和大气  $\text{CO}_2$  的含量和  $\delta^{13}\text{C}$  组成耦合变化的规律,这表明珊瑚固碳过程中碳的来源发生了明显变化,意味着人类排放  $\text{CO}_2$  对表层海洋的碳循环产生了显著影响(Deng *et al.*, 2017b, 2019)。这些结果为更准确地评估人类活动对气候变化的影响提供了新的证据(Deng *et al.*, 2019)。

需要注意的是,全球变暖大背景下海洋表面温度的确有升高的趋势,但这种升温到底是由人类活动导致的还是由正常的自然气候变化引起的尚不明确,而且不同的重建结果并不一致,这种不一致性的情况在南海也存在(Yan *et al.*, 2015; Deng *et al.*, 2017a; Chen *et al.*, 2018),因此,还需要更多的海洋表面温度重建记录并进行自然背景和人类活动背景下的对比研究。另外,已有研究表明全球变暖和  $\text{CO}_2$  排放会导致海陆温差加大而驱动沿岸上升流加强,这会导致沿岸海水温度随着全球变暖呈现降低的趋势(McGregor *et al.*, 2007, 2015; Abram *et al.*, 2016),相应地,近岸海水温度可能会出现下降的趋势,比如海南岛东部的珊瑚就很好地记录了琼东上升流导致的海洋表面温度降低的趋势(Liu *et al.*, 2013; Deng *et al.*, 2019)。因此,即便人类活动会导致全球海洋表面温度升高,但这种温度升高在不同海域可能会有不同的表现,对开放大洋海洋表面温度的影响可能更大,但需要开展不同海域的对比研究。

## 5 海水 pH 重建记录

工业化革命以来,人类排放导致的大气  $\text{CO}_2$  含量迅速增加引起海洋酸化,并对海洋生态系统带来严重威胁。近年来,海洋酸化引起了学术界、政府、媒体以及公众的广泛关注。海水的酸碱度用 pH 值衡量,但 pH 的准确测定存在一定难度,不是常规的海洋环境监测项目,国际上已有的持续时间超过 20 年的海水 pH 观测记录寥寥无几(Dore *et al.*, 2009; Bates *et al.*, 2014)。序列最长的大西洋的 Bermuda 站(Bermuda Atlantic Time-series Study, BATS)和太平洋的 Hawaii 站(Hawaii Ocean Time-series, HOTs)的观测分别始于 1983 年和 1988 年,这些观测记录均呈现出持续的酸化趋势, pH 下降速率介于  $(-0.0013 \pm 0.0003) \sim (-0.0026 \pm 0.0006) \text{ a}^{-1}$  之间。这些观测都是基于低生产力的开阔大洋海域,但海水 pH 及碳酸系统的变化存在明显的空间差异,在近岸或者高生产力的海域(如珊瑚礁广泛发育的海域),表层海水 pH 值的变化与开阔大洋有明显的不同

(Breitburg *et al.*, 2015; Busch *et al.*, 2015; Wahl *et al.*, 2016)。例如,在墨西哥湾的不同区域,过去 40 年间海水 pH 降低的速率差别相当大  $(-0.0014 \sim -0.0180 \text{ a}^{-1})$ ,有些地方甚至出现 pH 升高的趋势(Hu *et al.*, 2015)。此外,已有的观测记录最长也就 30 年左右,对于工业革命前不存在大气  $\text{CO}_2$  胁迫背景下高分辨率的海水 pH 变化规律目前更是一无所知。因此,对于海水 pH 演变历史、气候变化和人类活动对海水 pH 的影响等问题的认识还非常欠缺,这些知识的欠缺无疑妨碍了我们对人类排放  $\text{CO}_2$  的增加引起的海洋酸化进程及其对海洋生态环境的影响的深入了解。

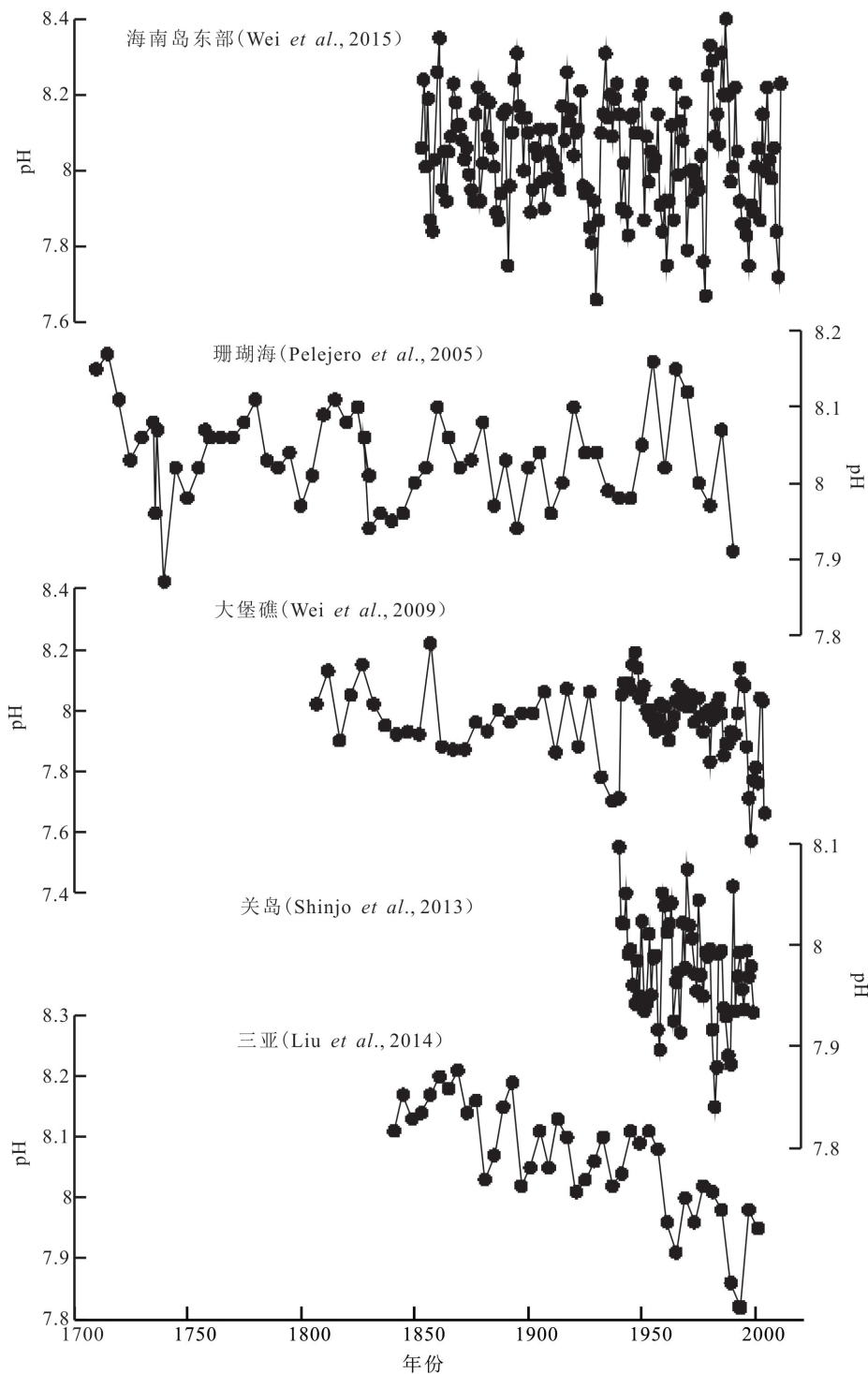
珊瑚骨骼的  $\delta^{11}\text{B}$  是重建海水 pH 的理想指标(Trotter *et al.*, 2011; McCulloch *et al.*, 2012)。利用珊瑚  $\delta^{11}\text{B}$  和 pH 的定量关系,西太平洋、大西洋等一些典型珊瑚礁区最近二三百年来海水 pH 变化的时间序列被陆续重建起来。我国学者在海洋酸化的珊瑚地球化学记录研究方面起步较早(Liu *et al.*, 2009; Wei *et al.*, 2009),取得了一些国际同行广泛关注的成果,基本处于国际领先水平并跑的状态。较早的研究发现,从全新世气候最适宜期到工业化革命以前,南海海水 pH 具有逐渐升高的趋势,但工业化革命以来海水 pH 显著降低,表明人类活动排放的大气  $\text{CO}_2$  的增加的确导致了海洋的酸化(Liu *et al.*, 2009)。但全新世最适宜期的海水 pH 值甚至比现代暖期的更低,具体原因还不得而知(Liu *et al.*, 2009)。利用海南岛南部珊瑚  $\delta^{11}\text{B}$  重建的中世纪暖期 AD 1048~1079 年和现代暖期 AD 1838~2001 年的海水 pH 记录表明,AD 1048~1079 期间和 AD 1830~1870 期间的海水 pH 并没有明显的差别,但 20 世纪期间前所未有的海水 pH 的异常持续降低和大气  $\text{CO}_2$  的增加同步变化,并和亚洲冬季风强度的年代际变化同相变化,大气  $\text{CO}_2$  的增加和全球变暖的耦合导致冬季风强度的减弱可能加速了南海海洋酸化进程(Liu *et al.*, 2014)。利用海南岛东部珊瑚  $\delta^{11}\text{B}$  重建的过去 159 年的海水 pH 记录表明,海水 pH 并没有表现出持续降低的趋势,而是具有显著的年代际变化特征,进一步的研究表明,海水 pH 的年代际变化与夏季风驱动的琼东上升流引起的营养输入和表层海水生产力的年代际变化有关,陆源输入以及太平洋年代际振荡和厄尔尼诺-南方涛动等海气相互作用系统的影响相对较小(Wei *et al.*, 2015)。

总体上,全球各个海域的 pH 重建记录大都显示了较明显的酸化趋势,但所有记录都没有表现出



线性响应大气 CO<sub>2</sub> 含量变化的趋势,反而都表现出显著的周期性波动如类似太平洋年代际振荡的周期性波动(图 5)(Pelejero *et al.*, 2005; Wei *et al.*, 2009; Shinjo *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2014; D'Olivo *et al.*, 2015; Goodkin *et al.*, 2015; Wei *et al.*, 2015),这意味着人类活动导致的大气 CO<sub>2</sub> 含量的

增加并不是影响珊瑚礁海水 pH 变化的唯一因素,珊瑚礁海水 pH 的变化还存在其他的自然控制过程。深入分析发现,澳大利亚东部离岸珊瑚礁海水 pH 对太平洋年代际振荡的响应最显著(Pelejero *et al.*, 2005; Wei *et al.*, 2009),在近岸海域的海水 pH 受陆源营养输入的调控(D'Olivo *et al.*, 2015)。



据陈雪霏等(2016)修改

图 5 利用珊瑚 δ<sup>11</sup>B 重建的全球不同海域的海水 pH 记录

在我国南海北部海南岛周边,海水 pH 变化受东亚季风活动的影响,其中在东部地区受夏季风控制的琼东上升流带来的深层水的营养输入的影响(Wei *et al.*, 2015),而在南部的三亚海域与冬季风的活动有关(Liu *et al.*, 2014);在西北太平洋的关岛海域,太平洋年代际振荡和厄尔尼诺均对海水 pH 产生影响,但影响并不显著(Wei *et al.*, 2015)。由此可见,太平洋年代际振荡、厄尔尼诺和季风等自然气候控制因素以及它们引起的风速、洋流、陆源输入乃至营养输入的变化等均直接影响海水的 pH 值。更为重要的是,这些带有显著区域特征的海水 pH 值的变化很大程度上还受珊瑚礁生物活动控制的表层海水碳酸系统化学的影响。已有的观测结果显示,珊瑚礁海水 pH 值的周-日变化幅度高达 0.5~0.6,并与珊瑚礁区生物的光合作用/呼吸作用同步变化(Dai *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2015)。海水 pH 控制因素的复杂性很大程度上干扰了对人类活动导致的海洋酸化的评估。要解决这一问题,需要重建包括工业革命前后各自特征气候时段的历史时期不同珊瑚礁海水 pH 值的演变记录,在此基础上了解特定海域表层海水 pH 控制机制,剖析珊瑚礁海水 pH 在自然因素控制下的背景演变特征及其与相关的气候环境因素之间的关系,这样才能从海水 pH 记录中剥离自然因素的贡献,从而更准确地了解人类活动对海水 pH 的影响和大气 CO<sub>2</sub> 含量升高引起的海洋酸化效应。

## 6 生态演化记录

珊瑚的高精度定年是利用珊瑚进行气候环境演变研究的基础,除此以外,配合其他珊瑚地球化学指标的应用,珊瑚年代学在珊瑚礁生态系统演化研究方面起到了非常重要的作用,在南海的相关研究中获得了一系列重要成果。

较早的研究利用 TIMS 铀系定年法获得了雷州半岛灯楼脚珊瑚礁的年龄结构,结果表明海平面在中全新世位于现代潮高基准面 2.9~3.8 m 以上,大量的珊瑚发育在此阶段,说明中全新世的海洋表面温度和海洋表面盐度最适合珊瑚生长,是南海珊瑚礁发育的最适宜期(Zhao and Yu, 2002)。基于雷州半岛一个角孔珊瑚礁剖面的铀系和<sup>14</sup>C 定年结果,并结合珊瑚骨骼生长率和密度带、Sr/Ca、珊瑚礁地质和生态特征的分析结果,发现该角孔珊瑚礁剖面发育的时期距今约 7500~7000 年前(中全新世气候适宜期)且至少可分为 9 个阶段,每一阶段的持续时间约 20~50 年,之后在冬季突然出现一次低温

事件,导致角孔珊瑚大量死亡,形成间断面,如此循环往复,形成厚逾 4 m 的角孔珊瑚礁坪。根据角孔珊瑚大量死亡并结合现代珊瑚礁白化的特点即珊瑚礁大面积变白死亡,该研究认为中全新世导致雷州半岛大量角孔珊瑚的突然死亡是一种低温导致的珊瑚礁白化现象,据此首次提出了珊瑚冷白化(Cold bleaching)的概念(Yu *et al.*, 2004),而在此之前,学术界一般认为珊瑚的死亡大都是热白化导致。另一项基于南沙群岛珊瑚高精度铀系年代学的研究重建了近 200 年来 El Niño 高温导致珊瑚礁热白化的历史记录(Yu *et al.*, 2006),该项研究曾是国际上最早关于历史时期珊瑚礁白化研究的报道。最近一项基于海南岛东部珊瑚铀系年代学和 Sr/Ca 的研究发现,早在距今约 4000 年以前,南海珊瑚就出现了高温导致的热白化死亡事件(Xu *et al.*, 2018b),从而表明珊瑚礁热白化并不是现代全球变暖导致的新现象。

最新的利用珊瑚铀系年代学对大亚湾和三亚珊瑚的研究表明,中全新世气候最适宜期、中世纪暖期和现代暖期是全新世南海北部珊瑚的 3 个生长盛期,中全新世平均海洋表面温度比现代高 2 °C,因此推测在人类活动对珊瑚礁胁迫压力不增加的前提下,南海北部亚热带高纬度海域将成为珊瑚礁应对全球变暖的“避难所”(Clark *et al.*, 2018; Yan *et al.*, 2019)。值得一提的是,对大亚湾、涠洲岛的现代滨珊瑚的调查研究表明,南海高纬度海域人类活动密集,富营养化和大型生物侵蚀对珊瑚的生长发育极其不利(陈天然等,2013;Chen *et al.*, 2013)。

## 7 人类活动记录

工业化革命以来,人类活动的加剧对海洋环境和生态系统产生了显著影响。其中,河口、海岸带地区的人类活动活跃,陆源营养盐等的输入增加引起了沿岸水体大规模的富营养化(Cloern *et al.*, 2001; Diaz and Rosenberg, 2008),沿岸珊瑚礁生态系统也受到了影响,相应地,人类活动的相关信息和痕迹也很好地被珊瑚地球化学指标记录下来。对大亚湾珊瑚的研究发现,珊瑚骨骼的 Fe/Ca、Mn/Ca 和 Zn/Ca 等很好地记录了人类工业活动对近岸海洋的重金属污染(Chen *et al.*, 2010),富营养区珊瑚骨骼的 P/Ca 很好地记录了人类活动如海水养殖、废水排放等引起的营养盐输入的增加(Chen and Yu, 2011)。基于三亚珊瑚的研究发现,其骨骼的稀土元素和 Ba/Ca 值可能记录了 1870 年以来的地下水排放记录,因此是潜在的重建地下水排放记录

的地球化学指标(Jiang *et al.*, 2018)。对涠洲岛珊瑚的研究发现,其骨骼  $\delta^{13}\text{C}$  显著偏负的时间对应于石油开采过程中的原油泄漏和船舶燃油泄漏的时间,很好地记录了人类活动过程中的石油污染事件(Xu *et al.*, 2018a)。

## 8 问题与展望

近二十年来,基于珊瑚地球化学的气候环境演变研究在记录重建方面取得了大量研究成果,为了解海洋气候环境的演化规律提供了不可或缺的材料,为预测未来的气候环境变化提供了科学证据。但是,珊瑚是生物活动的产物,在记录气候环境变化的同时会受到气候环境变化的影响,同时自身也会通过生理调节来适应气候环境的变化。因此,珊瑚生长和气候环境变化实际上是一个协同演化的过程,以往珊瑚古气候研究将珊瑚自身的演化排除在外而单纯注重气候环境的记录重建具有一定的局限性,这忽略了气候环境演变研究的终极目标,即为人类社会和自然生态系统的可持续发展服务。在当前全球变暖、海洋酸化和人类活动等多重胁迫下,传统的珊瑚古气候研究也必然需要进行转型并被赋予新的使命,即从单纯地重建气候环境记录、探讨气候变化问题升华到研究珊瑚对气候环境变化的适应性演变机制、研究珊瑚礁生态系统和气候环境协同演化、相互作用和反馈机制,这也是地球系统科学的重要研究内容之一。

造礁珊瑚的钙化能力极强,比海洋中其他的钙质生物和相同海水化学条件下结晶形成的无机成因碳酸盐的钙化速率都要高数倍之多,这说明珊瑚自身能够改变内部钙化的环境,从而提高其钙化速率。并且,珊瑚的钙化作用还与其自身、及其共生的虫黄藻的新陈代谢过程有关(Al-Horani *et al.*, 2003)。珊瑚需要依靠虫黄藻的自养过程(即光合作用和呼吸作用)产生的能量(ATP)来进行钙化作用。例如,珊瑚体内钙离子的主动运输是一个消耗能量的过程(Al-Horani *et al.*, 2003)。因此,珊瑚的钙化机制是一个较为复杂、且有多种珊瑚生物活动参与的过程,对珊瑚钙化流体(calcifying fluid, cf)的组成、不同离子(钙、碳)的运输方式,以及生物新陈代谢与其他过程之间关联的研究,都是我们认识珊瑚钙化机制和其对气候环境变化的适应性调节的重要环节。最新的利用珊瑚地球化学指标研究珊瑚对气候环境变化的适应性演变机制的应用实例是发现了珊瑚通过调节钙化流体的碳酸系统化学组成来适应海洋表面温度升高和pH降低。利用

珊瑚的  $\delta^{11}\text{B-B/Ca}$  体系可以重建钙化流体  $\text{pH}_{\text{cf}}$  和钙化流体的溶解无机碳浓度  $\text{DIC}_{\text{cf}}$ (Allison *et al.*, 2014, 2018; Allison, 2017; McCulloch *et al.*, 2017; Ross *et al.*, 2017),进而可以用来研究珊瑚内部钙化流体碳酸系统的化学组成。基于该方法的研究表明珊瑚自身具有改造钙化流体的能力,可以通过富集  $\text{DIC}_{\text{cf}}$  和提高  $\text{pH}_{\text{cf}}$  来满足钙化需求从而适应气候环境变化(McCulloch *et al.*, 2017; Schoepf *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2019)。这种创新性的研究方法为研究珊瑚对气候变化和人类活动双重胁迫的响应和适应机制提供了新的途径。另一项基于珊瑚地球化学指标研究珊瑚钙化机制的新技术是利用拉曼光谱获得珊瑚骨骼文石的饱和度  $\Omega_{\text{ar}}$  的变化信息,以此重建珊瑚钙化过程来探讨珊瑚对气候和环境变化的适应机制(DeCarlo *et al.*, 2017, 2018a, 2018b; Ross *et al.*, 2018)。

近年来,非传统稳定同位素地球化学的迅猛发展也为研究珊瑚对气候和环境变化的适应机制提供了潜在的替代指标。很多非传统稳定同位素对应的元素都是生源要素,存在显著的生物利用,生物利用过程可能会导致相应的同位素分馏,进而这些同位素能记录生物活动的相关信息。例如,Ca是碳酸盐主要组成元素,同时也参与光合作用,保护叶绿素(Tanaka and Tsuji, 1980),Sr是动、植物必需的微量元素,参与藻类光合作用(Hong *et al.*, 2016),Mo是固氮酶和反硝化酶的重要组成元素(Mendel and Kruse, 2012),珊瑚虫和共生藻  $\delta^{65}\text{Cu}$  和  $\delta^{66}\text{Zn}$  是潜在的热胁迫指标(Ferrier-Pagès *et al.*, 2018)。珊瑚骨骼非传统稳定同位素的研究目前还处在起步阶段,可喜的是,我国学者这方面的工作已经展开并取得了高质量的研究成果(Chen *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2019)。

**致谢:**感谢广西大学余克服教授、澳大利亚昆士兰大学赵建新教授对作者的长期支持!

## 参考文献 (References):

- Abram N J, McGregor H V, Tierney J E, Evans M N, McKay N P, Kaufman D S. the PAGES 2k Consortium. 2016. Early onset of industrial-era warming across the oceans and continents. *Nature*, 536 (7617): 411-418
- Al-Horani F A, Al-Moghrabi S M, De Beer D. 2003. The mechanism of calcification and its relation to photosynthesis and respiration in the scleractinian coral *Galaxea fascicularis*. *Marine Biology*, 142(3): 419-426
- Allison N, Cohen I, Finch A A, Erez J, Tudhope A W. 2014. Corals

- concentrate dissolved inorganic carbon to facilitate calcification. *Nature Communications*, 5: 5741
- Allison N, Cole C, Hintz C, Hintz K, Rae J, Finch A. 2018. The effect of ocean acidification on tropical coral calcification: Insights from calcification fluid DIC chemistry. *Chemical Geology*, 497: 162–169
- Allison N. 2017. Reconstructing coral calcification fluid dissolved inorganic carbon chemistry from skeletal boron: An exploration of potential controls on coral aragonite B/Ca. *Heliyon*, 3(8): e00387
- An Z S. 2000. The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate. *Quaternary Science Reviews*, 19(1–5): 171–187
- Barnett T P, Pierce D W, Saravanan R, Schneider N, Dommenges D, Latif M. 1999. Origins of the midlatitude Pacific decadal variability. *Geophysical Research Letters*, 26(10): 1453–1456
- Bates N R, Astor Y M, Church M J, Currie K, Dore J E, González-Dávila M, Lorenzoni L, Muller-Karger F, Olafsson J, Santana-Casiano J M. 2014. A time-series view of changing ocean chemistry due to ocean uptake of anthropogenic CO<sub>2</sub> and ocean acidification. *Oceanography*, 27(1): 126–141
- Beck J W, Edwards R L, Ito E, Taylor F W, Recy J, Rougerie F, Joannot P, Henin C. 1992. Sea-surface temperature from coral skeletal strontium/calcium ratios. *Science*, 257(5070): 644–647
- Berkelmans R, Van Oppen M J H. 2006. The role of zooxanthellae in the thermal tolerance of corals: A ‘nugget of hope’ for coral reefs in an era of climate change. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 273(1599): 2305–2312
- Breitburg D L, Salisbury J, Bernhard J M, Cai W J, Dupont S, Doney S C, Kroeker K J, Levin L A, Long W C, Milke L M, Miller S H, Phelan B, Passow U, Seibel B A, Todgham A E, Tarrant A M. 2015. And on top of all that... Coping with ocean acidification in the midst of many stressors. *Oceanography*, 28(2): 48–61
- Brocas W M, Felis T, Gierz P, Lohmann G, Werner M, Obert J C, Scholz D, Kölling M, Scheffers S R. 2018. Last interglacial hydroclimate seasonality reconstructed from Tropical Atlantic Corals. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 33(2): 198–213
- Busch D S, O’Donnell M J, Hauri C, Mach K J, Poach M, Doney S C, Signorini S R. 2015. Understanding, characterizing, and communicating responses to ocean acidification: Challenges and uncertainties. *Oceanography*, 28(2): 30–39
- Cai W J, Van Rensch P. 2012. The 2011 southeast Queensland extreme summer rainfall: A confirmation of a negative Pacific Decadal Oscillation phase? *Geophysical Research Letters*, 39(8): L08702, doi: 10.1029/2011GL050820
- Chen T R, Cobb K M, Roff G, Zhao J X, Yang H Q, Hu M H, Zhao K. 2018. Coral-derived Western Pacific tropical sea surface temperatures during the last Millennium. *Geophysical Research Letters*, 45(8): 3542–3549
- Chen T R, Li S, Yu K F. 2013. Macrobioerosion in *Porites* corals in subtropical northern South China Sea: A limiting factor for high-latitude reef framework development. *Coral Reefs*, 32(1): 101–108
- Chen T R, Yu K F. 2011. P/Ca in coral skeleton as a geochemical proxy for seawater phosphorus variation in Daya Bay, northern South China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 62(10): 2114–2121
- Chen T R, Yu K F, Li S, Price G J, Shi Q, Wei G J. 2010. Heavy metal pollution recorded in *Porites* corals from Daya Bay, northern South China Sea. *Marine Environmental Research*, 70(3–4): 318–326
- Chen X F, Deng W F, Zhu H L, Zhang Z F, Wei G J, McCulloch M T. 2016. Assessment of coral  $\delta^{44/40}\text{Ca}$  as a paleoclimate proxy in the Great Barrier Reef of Australia. *Chemical Geology*, 435: 71–78
- Chen X F, D’Olivo J P, Wei G J, McCulloch M. 2019. Anthropogenic ocean warming and acidification recorded by Sr/Ca, Li/Mg,  $\delta^{11}\text{B}$  and B/Ca in *Porites* coral from the Kimberley region of northwestern Australia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 528: 50–59
- Chen X F, Wei G J, Xie L H, Deng W F, Sun Y L, Wang Z B, Ke T. 2015. Biological controls on diurnal variations in seawater trace element concentrations and carbonate chemistry on a coral reef. *Marine Chemistry*, 176: 1–8
- Clark T R, Chen X F, Leonard N D, Liu F Y, Guo Y R, Zeng T, Wei G J, Zhao J X. 2018. Episodic coral growth in China’s subtropical coral communities linked to broad-scale climatic change. *Geology*, 47(1): 79–82
- Cloern J E. 2001. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series*, 210: 223–253
- Corrège T. 2006. Sea surface temperature and salinity reconstruction from coral geochemical tracers. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 232(2–4): 408–428
- Dai M H, Lu Z M, Zhai W D, Chen B S, Cao Z M, Zhou K B, Cai W J, Chenc C T A. 2009. Diurnal variations of surface seawater pCO<sub>2</sub> in contrasting coastal environments. *Limnology and Oceanography*, 54(3): 735–745
- DeCarlo T M, Comeau S, Cornwall C E, McCulloch M T. 2018b. Coral resistance to ocean acidification linked to increased calcium at the site of calcification. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1878): 20180564, doi: 10.1098/rspb.2018.0564
- DeCarlo T M, D’Olivo J P, Foster T, Holcomb M, Becker T, McCulloch M T. 2017. Coral calcifying fluid aragonite saturation states derived from Raman spectroscopy. *Biogeosciences*, 14(22): 5253–5269
- DeCarlo T M, Ren H J, Farfan G A. 2018a. The origin and role of organic matrix in coral calcification: Insights from comparing coral skeleton and abiogenic aragonite. *Frontiers in Marine Science*, 5: 170
- Deng W F, Chen X F, Wei G J, Zeng T, Zhao J X. 2017b. Decoupling of coral skeletal  $\delta^{13}\text{C}$  and solar irradiance over the past millennium caused by the oceanic Suess effect. *Paleoceanography*, 32(2): 161–171
- Deng W F, Liu X, Chen X F, Wei G J, Zeng T, Xie L H, Zhao J X. 2017a. A comparison of the climates of the medieval climate anomaly, Little Ice Age, and Current Warm Period reconstructed using coral records from the northern South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(1): 264–275
- Deng W F, Wei G J, Li X H, Yu K F, Zhao J X, Sun W D, Liu Y. 2009. Paleoprecipitation record from coral Sr/Ca and  $\delta^{18}\text{O}$  during the mid Holocene in the northern South China Sea. *The Holocene*, 19(6): 811–821
- Deng W F, Wei G J, Xie L H, Ke T, Wang Z B, Zeng T, Liu Y.

2013. Variations in the Pacific Decadal Oscillation since 1853 in a coral record from the northern South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(5): 2358–2366
- Deng W F, Wei G J, Yu K F, Zhao J X. 2014. Variations in the timing of the rainy season in the northern South China Sea during the middle to late Holocene. *Paleoceanography*, 29(2): 115–125
- Deng W F, Wei G J, Zhao J X, Zeng T. 2019. Anthropogenic effects on tropical oceanic climate change and variability: An insight from the South China Sea over the past 2000 years. *Quaternary Science Reviews*, 206: 56–64
- Deng W F, Wei G J. 2014. Local origins of interdecadal Pacific variability in the tropical and North Pacific Ocean: Evidence from a comparative study of coral oxygen isotope records. *Geo-Marine Letters*, 34(4): 345–352
- Deng W F, Wei G J. 2015. Decoupling of seasonal temperature and precipitation over the western Pacific during the early mid-Holocene. *International Journal of Climatology*, 35(5): 794–800
- Diaz R J, Rosenberg R. 2008. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 321(5891): 926–929
- Ding Y H, Jia X L, Wang Z Y, Chen X Y, Chen L J. 2009. A contrasting study of freezing disasters in January 2008 and in winter of 1954/1955 in China. *Frontiers of Earth Science in China*, 3(2): 129–145
- D'Olivo J P, McCulloch M T, Eggins S M, Trotter J. 2015. Coral records of reef-water pH across the central Great Barrier Reef, Australia: Assessing the influence of river runoff on inshore reefs. *Biogeosciences*, 12(4): 1223–1236
- Dore J E, Lukas R, Sadler D W, Church M J, Karl D M. 2009. Physical and biogeochemical modulation of ocean acidification in the central North Pacific. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(30): 12235–12240
- Dunbar R B, Wellington G M. 1981. Stable isotopes in a branching coral monitor seasonal temperature variation. *Nature*, 293(5832): 453–455
- Feng X, Porporato A, Rodriguez-Iturbe I. 2013. Changes in rainfall seasonality in the tropics. *Nature Climate Change*, 3(9): 811–815
- Ferrier-Pagès C, Sauzéat L, Balter V. 2018. Coral bleaching is linked to the capacity of the animal host to supply essential metals to the symbionts. *Global Change Biology*, 24(7): 3145–3157
- Fu C B, Jiang Z H, Guan Z Y, He J H, Xu Z F. 2008. Interdecadal climate variability in China associated with the Pacific Decadal Oscillation. In: Fu C B, Jiang Z H, Guan Z Y, He J H, Xu Z F, eds. *Regional Climate Studies of China*. Berlin, Heidelberg: Springer, 97–117
- Gagan M K, Ayliffe L K, Beck J W, Cole J E, Druffel E R M, Dunbar R B, Schrag D P. 2000. New views of tropical paleoclimates from corals. *Quaternary Science Reviews*, 19(1–5): 45–64
- Gagan M K, Ayliffe L K, Hopley D, Cali J A, Mortimer G E, Chappell J, McCulloch M T, Head M J. 1998. Temperature and surface-ocean water balance of the mid-Holocene tropical Western Pacific. *Science*, 279(5353): 1014–1018
- Goodkin N F, Wang B S, You C F, Hughen K A, Grunmet-Prouty N, Bates N R, Doney S C. 2015. Ocean circulation and biogeochemistry moderate interannual and decadal surface water pH changes in the Sargasso Sea. *Geophysical Research Letters*, 42(12): 4931–4939
- Gordon A L, Giulivi C F. 2004. Pacific decadal oscillation and sea level in the Japan/East sea. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 51(5): 653–663
- Gu D F, Philander S G H. 1997. Interdecadal climate fluctuations that depend on exchanges between the tropics and extratropics. *Science*, 275(5301): 805–807
- Guo Y R, Deng W F, Chen X F, Wei G J, Yu K F, Zhao J X. 2016. Saltier sea surface water conditions recorded by multiple mid-Holocene corals in the northern South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(8): 6323–6330
- He X X, Liu D Y, Peng Z C, Liu W Q. 2002. Monthly sea surface temperature records reconstructed by  $\delta^{18}\text{O}$  of reef-building coral in the east of Hainan Island, South China Sea. *Science in China Series B: Chemistry*, 45(S1): 130–136
- Hendy E J, Gagan M K, Alibert C A, McCulloch M T, Lough J M, Isdale P J. 2002. Abrupt decrease in tropical Pacific sea surface salinity at end of little ice age. *Science*, 295(5559): 1511–1514
- Hong H J, Ryu J, Park I S, Ryu T, Chung K S, Kim B G. 2016. Investigation of the strontium (Sr(II)) adsorption of an alginate microsphere as a low-cost adsorbent for removal and recovery from seawater. *Journal of Environmental Management*, 165: 263–270
- Hu X P, Pollack J B, McCutcheon M R, Montagna P A, Ouyang Z X. 2015. Long-term alkalinity decrease and acidification of estuaries in northwestern Gulf of Mexico. *Environmental Science & Technology*, 49(6): 3401–3409
- IPCC. 2013. *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge: Cambridge University Press
- Jiang W, Yu K F, Song Y X, Zhao J X, Feng Y X, Wang Y H, Xu S D. 2018. Coral geochemical record of submarine groundwater discharge back to 1870 in the northern South China Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 507: 30–38
- Jin F-F. 2001. Low-frequency modes of tropical ocean dynamics. *Journal of Climate*, 14(18): 3874–3881
- Karl T R, Trenberth K E. 2003. Modern global climate change. *Science*, 302(5651): 1719–1723
- Khandekar M L, Murty T S, Chittibabu P. 2005. The global warming debate: A review of the state of science. *Pure and Applied Geophysics*, 162(8–9): 1557–1586
- Kleeman R, McCreary Jr J P, Klingner B A. 1999. A mechanism for generating ENSO decadal variability. *Geophysical Research Letters*, 26(12): 1743–1746
- Liu Y, Li X H, Zeng Z, Yu H M, Huang F, Felis T, Shen C C. 2019. Annually-resolved coral skeletal  $\delta^{138/134}\text{Ba}$  records: A new proxy for oceanic Ba cycling. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 247: 27–39
- Liu Y, Liu W G, Peng Z C, Xiao Y K, Wei G J, Sun W D, He J F, Liu G J, Chou G L. 2009. Instability of seawater pH in the South China Sea during the mid-late Holocene: Evidence from boron iso-

- topic composition of corals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73 (5): 1264–1272
- Liu Y, Peng Z C, Shen C C, Zhou R J, Song S H, Shi Z G, Chen T G, Wei G J, DeLong K L. 2013. Recent 121-year variability of western boundary upwelling in the northern South China Sea. *Geophysical Research Letters*, 40(12): 3180–3183
- Liu Y, Peng Z C, Zhou R J, Song S H, Liu W G, You C F, Lin Y P, Yu K F, Wu C C, Wei G J, Xie L H, Burr G S, Shen C C. 2014. Acceleration of modern acidification in the South China Sea driven by anthropogenic CO<sub>2</sub>. *Scientific Reports*, 4: 5148
- Mann M E, Rutherford S, Wahl E, Ammann C. 2007. Robustness of proxy-based climate field reconstruction methods. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112 ( D12 ): D12109, doi: 10.1029/2006JD008272
- Mann M E, Zhang Z H, Hughes M K, Bradley R S, Miller S K, Rutherford S, Ni F B. 2008. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(36): 13252–13257
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, Wallace J M, Francis R C. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(6): 1069–1079
- Mantua N J, Hare S R. 2002. The Pacific decadal oscillation. *Journal of Oceanography*, 58(1): 35–44
- Mao J Y, Chan J C L, Wu G X. 2011. Interannual variations of early summer monsoon rainfall over South China under different PDO backgrounds. *International Journal of Climatology*, 31(6): 847–862
- McCulloch M T, D'Olivo J P, Falter J, Holcomb M, Trotter J A. 2017. Coral calcification in a changing World and the interactive dynamics of pH and DIC upregulation. *Nature Communications*, 8: 15686
- McCulloch M T, Gagan M K, Mortimer G E, Chivas A R, Isdale P J. 1994. A high-resolution Sr/Ca and δ<sup>18</sup>O coral record from the Great Barrier Reef, Australia, and the 1982–1983 El-Niño. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(12): 2747–2754
- McCulloch M, Falter J, Trotter J, Montagna P. 2012. Coral resilience to ocean acidification and global warming through pH up-regulation. *Nature Climate Change*, 2(8): 623–627
- McGregor H V, Dima M, Fischer H W, Mulitza S. 2007. Rapid 20<sup>th</sup>-century increase in coastal upwelling off northwest Africa. *Science*, 315(5812): 637–639
- McGregor H V, Evans M N, Goosse H, Leduc G, Martrat B, Addison J A, Mortyn P G, Oppo D W, Seidenkrantz M S, Sicre M A, Phipps S J, Selvaraj K, Thirumalai K, Filipsson H L, Ersek V. 2015. Robust global ocean cooling trend for the pre-industrial Common Era. *Nature Geoscience*, 8(9): 671–677
- Mendel R R, Kruse T. 2012. Cell biology of molybdenum in plants and humans. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) -Molecular Cell Research*, 1823(9): 1568–1579
- Nie J S, Song Y G, King J W, Zhang R, Fang X M. 2013. Six million years of magnetic grain-size records reveal that temperature and precipitation were decoupled on the Chinese Loess Plateau during ~4.5–2.6 Ma. *Quaternary Research*, 79(3): 465–470
- Pelejero C, Calvo E, McCulloch M T, Marshall J F, Gagan M K, Lough J M, Opdyke B N. 2005. Preindustrial to modern interdecadal variability in coral reef pH. *Science*, 309(5744): 2204–2207
- Peng Z C, Chen T G, Nie B F, Head M J, He X X, Zhou W J. 2003. Coral δ<sup>18</sup>O records as an indicator of winter monsoon intensity in the South China Sea. *Quaternary Research*, 59(3): 285–292
- Peterse F, Prins M A, Beets C J, Troelstra S R, Zheng H B, Gu Z Y, Schouten S, Damsté J S S. 2011. Decoupled warming and monsoon precipitation in East Asia over the last deglaciation. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1–2): 256–264
- Power S, Casey T, Folland C, Colman A, Mehta V. 1999a. Inter-decadal modulation of the impact of ENSO on Australia. *Climate Dynamics*, 15(5): 319–324
- Power S, Tseitkin F, Mehta V, Lavery B, Torok S, Holbrook N. 1999b. Decadal climate variability in Australia during the twentieth century. *International Journal of Climatology*, 19(2): 169–184
- Reilly J, Stone P H, Forest C E, Webster M D, Jacoby H D, Prinn R G. 2001. Climate change: Uncertainty and climate change assessments. *Science*, 293(5529): 430–433
- Ross C L, Falter J L, McCulloch M T. 2017. Active modulation of the calcifying fluid carbonate chemistry (δ<sup>11</sup>B, B/Ca) and seasonally invariant coral calcification at sub-tropical limits. *Scientific Reports*, 7(1): 13830
- Ross C L, Schoepf V, DeCarlo T M, McCulloch M T. 2018. Mechanisms and seasonal drivers of calcification in the temperate coral *Turbinaria reniformis* at its latitudinal limits. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285 ( 1879 ): 20180215, doi: 10.1098/rspb.2018.0215
- Salinger M J, Renwick J A, Mullan A B. 2001. Interdecadal Pacific Oscillation and South Pacific climate. *International Journal of Climatology*, 21(14): 1705–1721
- Schneider S. 1990. The global warming debate: Science or politics? *Environmental Science & Technology*, 24(4): 432–435
- Schoepf V, Jury C P, Toonen R J, McCulloch M T. 2017. Coral calcification mechanisms facilitate adaptive responses to ocean acidification. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284 ( 1868 ): 20172117, doi: 10.1098/rspb.2017.2117
- Scholz D, Hoffmann D, Spötl C, Hopercoft P, Mangini A, Richter D K. 2011. Decoupled evolution of temperature and precipitation in western Germany during the Last Interglacial reconstructed from a precisely dated speleothem. *Mineralogical Magazine*, 75: 1823
- Shen C C, Lee T, Chen C Y, Wang C H, Dai C F, Li L A. 1996. The calibration of D[Sr/Ca] versus sea surface temperature relationship for *Porites* corals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(20): 3849–3858
- Shen C C, Lee T, Liu K K, Hsu H H, Edwards R L, Wang C H, Lee M Y, Chen Y G, Lee H J, Sun H T. 2005. An evaluation of quantitative reconstruction of past precipitation records using coral skeletal Sr/Ca and δ<sup>18</sup>O data. *Earth and Planetary Science Letters*, 237(3–4): 370–386
- Shinjo P, Asami R, Huang K F, You C F, Iryu Y. 2013. Ocean acidification trend in the tropical North Pacific since the mid-20th century

- reconstructed from a coral archive. *Marine Geology*, 342: 58–64
- Smith S V, Buddemeier R W, Redalje R C, Houck J E. 1979. Strontium-calcium thermometry in coral skeletons. *Science*, 204(4391): 404–407
- Song S H, Peng Z C, Zhou W J, Liu W G, Liu Y, Chen T G. 2012. Variation of the winter monsoon in South China Sea over the past 183 years: Evidence from oxygen isotopes in coral. *Global and Planetary Change*, 98–99: 131–138
- Su R X, Sun D H, Chen H, Chen X M, Li Z J. 2010. Evolution of Asian monsoon variability revealed by oxygen isotopic record of middle Holocene massive coral in the northern South China Sea. *Quaternary International*, 213(1–2): 56–68
- Sun D H, Gagan M K, Cheng H, Scott-Gagan H, Dykoski C A, Edwards R L, Su R X. 2005. Seasonal and interannual variability of the Mid-Holocene East Asian monsoon in coral  $\delta^{18}\text{O}$  records from the South China Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 237(1–2): 69–84
- Sun Y L, Sun M, Wei G J, Lee T, Nie B F, Yu Z W. 2004. Strontium contents of a *Porites* coral from Xisha Island, South China Sea: A proxy for sea-surface temperature of the 20th century. *Paleoceanography*, 19(2): PA2004, doi: 10.1029/2003PA000959
- Swart P K, Coleman M L. 1980. Isotopic data for scleractinian corals explain their palaeotemperature uncertainties. *Nature*, 283(5747): 557–559
- Takeuchi A. 2007. Decoupling the ancient hydrologic system from the modern hydrologic system of Pacific Northwest in the United States: Implications for the evolution of topography, climate, and environment. Doctoral Thesis. Washington, United States: Washington State University
- Tanaka A, Tsuji H. 1980. Effects of calcium on chlorophyll synthesis and stability in the early phase of greening in cucumber cotyledons. *Plant Physiology*, 65(6): 1211–1215
- Trotter J, Montagna P, McCulloch M, Silenzi S, Reynaud S, Mortimer G, Martin S, Ferrier-Pagès C, Gattuso J P, Rodolfo-Metalpa R. 2011. Quantifying the pH ‘vital effect’ in the temperate zooxanthellate coral *Cladocora caespitosa*: Validation of the boron seawater pH proxy. *Earth and Planetary Science Letters*, 303(3–4): 163–173
- Wahl M, Saderne V, Sawall Y. 2016. How good are we at assessing the impact of ocean acidification in coastal systems? Limitations, omissions and strengths of commonly used experimental approaches with special emphasis on the neglected role of fluctuations. *Marine and Freshwater Research*, 67(1): 25–36
- Wang C Z, Picaut J. 2004. Understanding ENSO physics-A review. In: Wang C Z, Xie S P, Carton J A (eds.). *Earth’s climate: the ocean-atmosphere interaction*. Washington: American Geophysical Union, 21–48
- Wang X J, Deng W F, Liu X, Wei G J, Chen X F, Zhao J X, Cai G Q, Zeng T. 2018. Super instrumental El Niño events recorded by a *Porites* coral from the South China Sea. *Coral Reefs*, 37(1): 295–308
- Watanabe T, Winter A, Oba T. 2001. Seasonal changes in sea surface temperature and salinity during the Little Ice Age in the Caribbean Sea deduced from Mg/Ca and  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  ratios in corals. *Marine Geology*, 173(1–4): 21–35
- Webster M, Forest C, Reilly J, Babiker M, Kicklighter D, Mayer M, Prinn R, Sarofim M, Sokolov A, Stone P, Wang C E. 2003. Uncertainty analysis of climate change and policy response. *Climatic Change*, 61(3): 295–320
- Wei G J, Deng W F, Yu K F, Li X H, Sun W D, Zhao J X. 2007. Sea surface temperature records in the northern South China Sea from mid-Holocene coral Sr/Ca ratios. *Paleoceanography*, 22(3): PA3206, doi: 10.1029/2006PA001270
- Wei G J, McCulloch M T, Mortimer G, Deng W F, Xie L H. 2009. Evidence for ocean acidification in the Great Barrier Reef of Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(8): 2332–2346
- Wei G J, Sun M, Li X H, Nie B F. 2000. Mg/Ca, Sr/Ca and U/Ca ratios of a porites coral from Sanya Bay, Hainan Island, South China Sea and their relationships to sea surface temperature. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 162(1–2): 59–74
- Wei G J, Wang Z B, Ke T, Liu Y, Deng W F, Chen X F, Xu J F, Zeng T, Xie L H. 2015. Decadal variability in seawater pH in the West Pacific: Evidence from coral  $\delta^{11}\text{B}$  records. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(11): 7166–7181
- Wei G J, Yu K F, Zhao J X. 2004. Sea surface temperature variations recorded on coralline Sr/Ca ratios during Mid-Late Holocene in Leizhou Peninsula. *Chinese Science Bulletin*, 49(17): 1876–1881
- Xiao H F, Deng W F, Chen X F, Wei G J, Zeng T, Zhao J X. 2017. Wet and cold climate conditions recorded by coral geochemical proxies during the beginning of the first millennium CE in the northern South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 135: 25–34
- Xu S D, Yu K F, Tao S C, Wu C C, Wang Y H, Jiang W, Wang S P, Shen C C. 2018b. Evidence for the thermal bleaching of porites corals From 4.0 ka B.P. in the Northern South China Sea. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123(1): 79–94
- Xu S D, Yu K F, Wang Y H, Liu T, Jiang W, Wang S P, Chu M H. 2018a. Oil spill recorded by skeletal  $\delta^{13}\text{C}$  of *Porites* corals in Weizhou Island, Beibu Gulf, Northern South China Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 207: 338–344
- Yan H, Liu C C, Zhang W C, Li M, Zheng X F, Wei G J, Xie L H, Deng W F, Sun L G. 2017. ENSO variability around 2000 years ago recorded by *Tridacna gigas*  $\delta^{18}\text{O}$  from the South China Sea. *Quaternary International*, 452: 148–154
- Yan H, Soon W, Wang Y H. 2015. A composite sea surface temperature record of the northern South China Sea for the past 2500 years: A unique look into seasonality and seasonal climate changes during warm and cold periods. *Earth-Science Reviews*, 141: 122–135
- Yan H, Sun L G, Oppo D W, Wang Y H, Liu Z H, Xie Z Q, Liu X D, Cheng W H. 2011. South China Sea hydrological changes and Pacific Walker Circulation variations over the last millennium. *Nature Communications*, 2: 293
- Yan S, Zhao J X, Lau A Y A, Roff G, Leonard N D, Clark T R, Nguyen A D, Feng Y X, Wei G J, Deng W F, Chen X F. 2019. Episodic reef growth in the northern South China Sea linked to warm climate during the past 7,000 years: Potential for future coral refugia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(4): 1032–1043

- Yu K F, Liu T S, Chen T G, Zhong J L, Zhao H T. 2002. High-resolution climate recorded in the  $\delta^{13}\text{C}$  of *Porites lutea* from Nansha Islands of China. *Progress in Natural Science*, 12(4): 284-288
- Yu K F, Zhao J X, Liu T S, Wei G H, Wang P X, Collerson K D. 2004. High-frequency winter cooling and reef coral mortality during the Holocene climatic optimum. *Earth and Planetary Science Letters*, 224(1-2): 143-155
- Yu K F, Zhao J X, Shi Q, Chen T G, Wang P X, Collerson K D, Liu T S. 2006. U-series dating of dead *Porites* corals in the South China Sea: Evidence for episodic coral mortality over the past two centuries. *Quaternary Geochronology*, 1(2): 129-141
- Yu K F, Zhao J X, Wei G J, Cheng X R, Chen T G, Felis T, Wang P X, Liu T S. 2005a.  $\delta^{18}\text{O}$ , Sr/Ca and Mg/Ca records of *Porites lutea* corals from Leizhou Peninsula, northern South China Sea, and their applicability as paleoclimatic indicators. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 218(1-2): 57-73
- Yu K F, Zhao J X, Wei G J, Cheng X R, Wang P X. 2005b. Mid-late Holocene monsoon climate retrieved from seasonal Sr/Ca and  $\delta^{18}\text{O}$  records of *Porites lutea* corals at Leizhou Peninsula, northern coast of South China Sea. *Global and Planetary Change*, 47(2-4): 301-316
- Yu K F. 2012. Coral reefs in the South China Sea: Their response to and records on past environmental changes. *Science China Earth Sciences*, 55(8): 1217-1229
- Yu K, Qu T D. 2013. Imprint of the Pacific Decadal oscillation on the South China Sea throughflow variability. *Journal of Climate*, 26(24): 9797-9805
- Yuan F S, Miyamoto S. 2004. Influence of the Pacific Decadal Oscillation on hydrochemistry of the Rio Grande, USA, and Mexico. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(12): Q12010, doi: 10.1029/2004GC000769
- Zhang C L, Huang H, Ye C, Huang L M, Li X B, Lian J S, Liu S. 2013. Diurnal and seasonal variations of carbonate system parameters on Luhuitou fringing reef, Sanya Bay, Hainan Island, South China Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 96: 65-74
- Zhang R-H, Rothstein L M, Busalacchi A J. 1998. Origin of upper-ocean warming and El Niño change on decadal scales in the tropical Pacific Ocean. *Nature*, 391(6670): 879-883
- Zhao J X, Yu K F. 2002. Timing of Holocene sea-level highstands by mass spectrometric U-series ages of a coral reef from Leizhou Peninsula, South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 47(4): 348-352
- 陈天然, 郑兆勇, 莫少华, 汤超莲, 周雄. 2013. 涠洲岛滨珊瑚中的生物侵蚀及其环境指示意义. *科学通报*, 58(17): 1574-1582
- 陈雪霏, 韦刚健, 邓文峰, 邹洁琼. 2016. 珊瑚礁海水 pH 变化及其对海洋酸化的意义. *热带地理*, 36(1): 41-47
- 国家气候中心. 2008. 2008 年初我国南方低温雨雪冰冻灾害及气候分析. 北京: 气象出版社
- 聂宝符, 陈特固, 梁美桃, 王有强, 钟晋梁, 朱袁智. 1996. 近百年来南海北部珊瑚生长率与海面温度变化的关系. *中国科学(D 辑)*, 26(1): 59-66
- 孙敏, 李太枫, 孙亚莉, 聂宝符. 2001. 西沙珊瑚铀温度计: 便捷高精度海洋古水温代用指标. *地球化学*, 30(1): 102-105
- 王绍武, 伍荣生, 杨修群. 2005. 中国的气候变化. 见: 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 编. *中国气候与环境演变*. 北京: 科学出版社, 63-103
- 韦刚健, 李献华, 刘海臣, 孙敏. 1998a. 珊瑚中微量铀的 ID-ICP-MS 高精度测定及其在珊瑚 U/Ca 温度计研究中的应用. *地球化学*, 27(2): 125-131
- 韦刚健, 李献华, 聂宝符, 孙敏, 刘海臣. 1998b. 南海北部滨珊瑚高分辨率 Mg/Ca 温度计. *科学通报*, 43(15): 1658-1661
- 韦刚健, 李献华. 1996. 高分辨率古海水温度记录: 珊瑚 Sr/Ca 比值. *矿物岩石地球化学通报*, 15(1): 18-21
- 韦刚健, 余克服, 李献华, 赵建新, 孙亚莉, 孙敏, 聂宝符. 2004. 南海北部珊瑚 Sr/Ca 和 Mg/Ca 温度计及高分辨率 SST 记录重建尝试. *第四纪研究*, 24(3): 325-331
- 余克服, 陈特固, 黄鼎成, 赵焕庭, 钟晋梁, 刘东生. 2001. 中国南沙群岛滨珊瑚  $\delta^{18}\text{O}$  的高分辨率气候记录. *科学通报*, 46(14): 1199-1204
- 余克服, 黄耀生, 陈特固, 刘东生, 赵焕庭, 林颖. 1999. 雷州半岛造礁珊瑚 *Porites lutea* 月分辨率的  $\delta^{18}\text{O}$  温度计研究. *第四纪研究*, (1): 67-72
- 余克服. 2012. 南海珊瑚礁及其对全新世环境变化的记录与响应. *中国科学(D 辑)*, 42(8): 1160-1172
- 朱袁智. 1987. 海南岛珊瑚礁的发育. *矿物岩石地球化学通报*, 6(4): 217-218

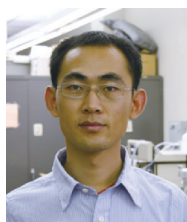
(本文责任编辑:刘莹;英文审校:肖保华)



## 特约主题信息

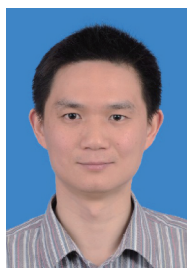
编者按语: 侯德封奖从设立至今已三十余年,共表彰了 153 名优秀的青年科技工作者。2018 年举办的第 17 届侯德封奖共评选出 21 名获奖人。三十多年来,学会在举办侯德封奖的过程中一直坚持“公平、公开、公正”和鼓励创新的原则,为发现人才、培养人才做出了积极的努力,并得到了社会各界的赞赏和肯定。为了宣传获奖人的成果,本刊自 1997 年起特辟“侯德封奖获奖者论文”栏目刊载获奖人的学术论文,产生了很好的社会效益。从 2019 年第 1 期起,本刊陆续刊登了第 17 届侯德封奖 21 位获奖人的学术论文,以飨读者。

### 专栏作者简介



冯东,男,38岁,中国科学院南海海洋研究所研究员,博士生导师。从事海底冷泉沉积地球化学研究。发现了富甲烷环境自生碳酸盐岩晶格硫具有独特的同位素特征,明确了冷泉活动主要在低海

平面时发育,揭示了冷泉系统微量元素的富集机制,发现了冷泉双壳类化能自养过程的同位素“指纹”记录。研究为甲烷流体渗漏搭建了从“现代过程”迈向“古代记录”的桥梁,为准确评估海底冷泉和天然气水合物分解释放甲烷对深部碳库和碳循环的影响等提供理论支撑。



邓文峰,男,39岁,中国科学院广州地球化学研究所研究员,博士生导师。从事气候变化与环境演变研究。目前重点开展南海及西太平洋全新世以来的气候变化与环境演变研究。近年来的研究成果发现了南海-西太平洋中

全新世季节尺度“温雨解耦”的气候特征,揭示了近2000年以来南海-西太平洋地区年代际-百年尺度气候变化对区域及全球气候变化的响应机制,探讨了珊瑚骨骼中碳、钙等同位素体系对气候环境要素及生物活动的响应机理。



黄汝锦,男,39岁,中国科学院地球环境研究所研究员,博士生导师。从事大气化学和空气污染研究。目前主要从事大气气溶胶化学、来源、演化机制及光学性质研究。近年来的研究揭示了我国

灰霾期间二次气溶胶对大气细颗粒物的重要贡献;率先提出重霾期间二次有机气溶胶的贡献与二次无机气溶胶同等重要;通过开展低温烟羽箱研究,揭示了低温、弱光照条件下二次有机气溶胶的快速生成机制;同时,较系统研究我国城市和高原地区大气气溶胶的理化特征、来源和时空分布特征。



巫翔,男,40岁,中国地质大学(武汉)教授,博士生导师。研究方向为高压矿物学,目前致力于地球及行星深部物质演化过程的相关研究。近年来开展了大洋板块深俯

冲至下地幔的效应及其机制研究,提出下地幔顶部-中部地震波速不均一性的新解释;率先开展了后钙钛矿在核幔边界(D"层)温压条件下的原位变形实验研究,并明确了环太平洋带下D"层剪切波速异常的机理。此外,还致力于原位高压实验技术的改进及研制,推动国内水热大腔体技术与同步辐射谱学技术相结合及应用。