



南海西沙过去千年降雨变化及其影响因素

孙立广, 晏宏, 王玉宏

中国科学技术大学地球与空间科学学院极地环境研究室, 合肥 230026

E-mail: slg@ustc.edu.cn

2011-12-28 收稿, 2012-02-28 接受

国家自然科学基金(40730107)和国家重点基础研究发展计划(2010CB428902)资助

摘要 热带太平洋水循环对全球气候具有非常重要的意义. 虽然在年际尺度上, 厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)与沃克环流的变化对热带太平洋降雨具有显著的影响. 但是在世纪尺度上, 目前的古气候研究结果大多都认为赤道辐合带(Intertropical Convergence Zone, ITCZ)的整体摆动才是热带太平洋过去千年降雨变化的主要原因. 这些研究结果显示在小冰期期间(LIA, AD 1400~1850)ITCZ 出现了南移, 这一南移使得现代 ITCZ 北界附近的区域在小冰期期间降雨减少, 而在南界附近的降雨则出现增多. 利用湖泊沉积物多个指标重建的中国南海西沙东岛近千年的降雨变化显示, 东岛在中世纪暖期(MWP, AD 1000~1400)和现代温暖期(AD 1850~2000)降雨较少, 而在小冰期期间则表现为湿润. 考虑到东岛的地理位置, 这样的降雨变化很难被 ITCZ 整体摆动理论所解释. 结合现代器测资料的分析, 东岛的降雨变化很有可能主要受到了太平洋沃克环流变化的影响. 这一结果说明热带地区过去千年降雨变化不仅仅受到 ITCZ 的整体摆动控制, 其他气候系统如 ENSO/沃克环流的变化也起到了重要的作用. 进一步综合热带太平洋地区已有的古降雨记录对过去 2000 年南方涛动指数进行了定量重建, 结果显示沃克环流变化与太阳活动之间存在明显的关联.

关键词

南海西沙
降雨
过去千年
赤道辐合带
沃克环流
南方涛动

热带太平洋是地球大气中水汽的重要来源地, 它的水循环过程与厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)结合在一起^[1], 不仅可以对热带地区气候产生作用, 还可以通过哈得来环流等大气环流系统对中高纬度地区气候产生显著的影响^[1~4]. 因此研究历史时期热带太平洋水循环对了解全球气候变化有重要意义.

热带地区的降雨主要发生在呈纬向带状分布的赤道辐合带(ITCZ)上, 这里是南北信风交汇的区域, 也是对流作用最为强烈的地区. 赤道辐合带的位置并不固定, 它的位置变化是热带地区降雨空间分布的主要影响因素之一. 在季节尺度上, 该降雨带会随着太阳直射点的季节性变化而出现南北摆动, 在北半球夏季时位置偏北, 冬季偏南. 除了季节性周期摆动外, 在年以上时间尺度, ITCZ 位置还能出现整体移动, 这是热带地区年代际、世纪尺度、甚至轨道尺

度降雨变化的主要影响因素^[5~7].

除了 ITCZ 的变化外, ENSO 以及与其相关的沃克环流变化也是影响热带太平洋地区年以上时间尺度降雨变化的重要因素^[1]. 当厄尔尼诺事件发生时, 太平洋沃克环流减弱, 原本位于西太平洋暖池区域的沃克环流上升支减弱并东移到中太平洋, 使得西太平洋地区降雨减少, 而中太平洋降雨增多; 与此同时, 位于东太平洋的沃克环流下沉支也相应减弱, 下沉支的减弱会使得东太平洋地区对流作用迅速增强, 降雨甚至出现数量级上的增长^[1,8].

虽然 ENSO 及沃克环流的变化是目前热带乃至全球气候年际异常的最强信号. 但是对于更长时间尺度上(世纪尺度等)沃克环流对热带太平洋降雨空间分布的影响目前还缺乏一个整体认识. 关于 ITCZ 摆动和沃克环流变化在影响世纪尺度热带太平洋降

雨变化中的地位以及相互关系也还没有明确的结论. 本文将以南海西沙群岛的研究工作为基础, 综合目前热带太平洋地区已有的古气候资料, 对这一问题进行分析讨论.

1 ITCZ 摆动理论

ITCZ 摆动理论通常用来解释热带地区轨道尺度的降雨变化. Haug 等人^[7]发现, 在现代 ITCZ 北界附近的加勒比海地区, 降雨自全新世大暖期(距今 8000 年左右)以来呈现逐渐减少的趋势, 而在同经度的南美 ITCZ 南界附近, 则出现了相反的变化^[9]. Haug 等人^[7]认为这种情况的出现可能反应了全新世大暖期以来 ITCZ 的整体南移, 这种南移使得 ITCZ 北界附近的区域降雨逐渐减少, 而南界附近的降雨逐渐增多. 全新世大暖期以来 ITCZ 南移后来也被来自非洲^[10]、西亚^[11,12]、东亚^[13~15]等其他地区的证据所证实. 对于中晚全新世 ITCZ 的南移机制, 普遍认为与米兰科维奇理论的 21 ka 周期有关^[7], 根据米兰科维奇理论, 在中晚全新世, 北半球夏季接受的太阳辐射逐渐减少, 而南半球夏季接受的太阳辐射逐渐增多. 北半球夏季太阳辐射的减少使得 ITCZ 往北的幅度逐渐减小, 而南半球太阳辐射的增加则使得 ITCZ 更加偏南, 从而出现 ITCZ 整体南移现象.

具体到过去千年, 目前的研究结果大多认为 ITCZ 的整体移动依然是热带地区降雨变化的主要影响因素^[5,6]. 过去千年可以分为 3 个主要的阶段, 中世纪暖期, 小冰期以及现代温暖期. 对于中世纪暖期和小冰期的时间, 目前还没有非常统一的结论, 最早提出中世纪暖期是基于欧洲文献记录显示在 AD 1100~

1200 年比较温暖^[16]; 后来 Jones 和 Mann^[17]建议用 AD 900~1300 和 1300~1900 来界定中世纪暖期和小冰期; 最近 Mann 等人^[18]又使用 950~1250 和 1400~1700 来讨论中世纪暖期和小冰期. 从热带地区的研究来看, 小冰期在 1400~1850 年比较清晰^[5,19,20], 因此本文在讨论的时候暂且用 1400~1850 代表小冰期. Newton 等人^[6]对热带地区过去千年降雨变化进行了总结, 认为在小冰期期间, 位于现代 ITCZ 北界附近的加勒比海^[7]、尤卡坦半岛^[21]、阿拉伯半岛^[22]、巴基斯坦^[23]以及南中国海^[24]均出现了降雨减少的情况. 而在现代 ITCZ 南界附近的印度尼西亚^[6]、南美^[9,25,26]等地区则出现了降雨增多的情况. 因此得出小冰期 ITCZ 南移的结论. 这一结论随后又被不少来自热带太平洋^[5]、东亚^[27,28]、东南亚^[19,29,30]等地区的降雨记录所证实(图 1, 表 1). 但是与轨道尺度 ITCZ 摆动可以用米兰科维奇理论解释不同, 目前对于小冰期 ITCZ 整体南移缺乏一个明确的机制. 因为在过去千年, 由于轨道尺度米兰科维奇理论所引起的太阳辐射南北分布差异并不明显, 反而是太阳活动导致的太阳辐射变化起到了主要的作用^[33]. 总的来说, 小冰期 ITCZ 是否像轨道尺度一样出现了南移, 它的南移是否在解释热带地区降雨方面具有普适性以及 ITCZ 南移的机制目前都还存在着疑问.

2 南海西沙过去千年降雨变化的恢复及其对 ITCZ 摆动理论普适性的质疑

在 Newton 等人^[6]对热带地区降雨记录进行总结并以此证明小冰期 ITCZ 南移之后, 又有不少关于过去千年降雨重建的记录被报道, 这些记录里面有一

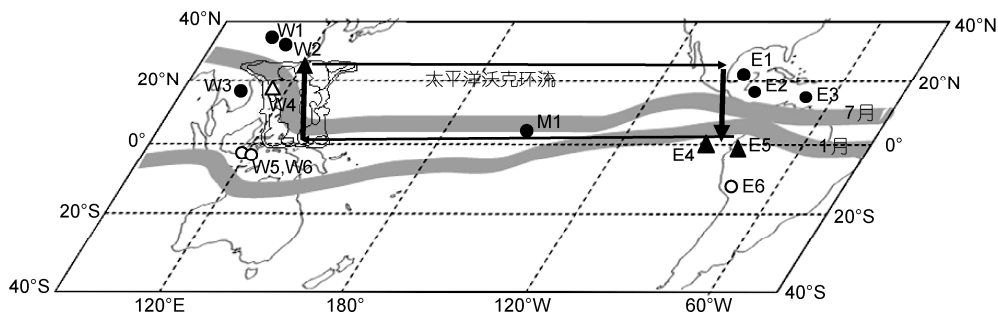


图 1 现代 1 和 7 月 ITCZ 的位置^[6]以及太平洋沃克环流示意图

有关过去千年亚洲-西太平洋^[6,15,19,20,27,29,30], 中太平洋^[5]和东太平洋^[7,21,25,26,31,32]的古降雨记录位置也被标出. 实心点表示小冰期相对干旱的区域, 空心点表示小冰期相对湿润的区域. 圆圈表示区域降雨变化可以被 ITCZ 摆动所解释, 三角形表示区域降雨变化不能被 ITCZ 摆动所解释

表 1 图 1 中过去千年降雨记录的详细信息

编号	文献	发表年	经度	纬度	代用材料	小冰期干湿状况
W1	Zhang 等人 ^[27]	2008	105°00'E	33°19'N	石笋	干旱
W2	Hu 等人 ^[15]	2008	110°25'E	30°27'N	石笋	干旱
W3	Buckley 等人 ^[30]	2010	104°36'E	14°19'N	树轮	干旱
W4	Yan 等人 ^[20]	2011	112°44'E	16°40'N	湖泊沉积物	湿润
W5	Oppo 等人 ^[19]	2009	117°29'E	5°12'S	海洋沉积物	湿润
W6	Tierney 等人 ^[29]	2010	117°29'E	5°12'S	海洋沉积物	湿润
M1	Sachs 等人 ^[5]	2009	160°25'W	4°43'N	湖泊沉积物	干旱
E1	Hodell 等人 ^[21]	2005	89°25'W	21°43'N	湖泊沉积物	干旱
E2	Hodell 等人 ^[21]	2005	89°50'W	17°13'N	湖泊沉积物	干旱
E3	Haug 等人 ^[7]	2001	65°10'W	10°42'N	海洋沉积物	干旱
E4	Conroy 等人 ^[31]	2008	89°18'W	0.8°S	湖泊沉积物	干旱
E5	Moy 等人 ^[32]	2002	79°14'W	2°46'S	湖泊沉积物	干旱
E6	Rein 等人 ^[25]	2005	77°39'W	12°03'S	湖泊沉积物	湿润

部分是支持小冰期 ITCZ 南移的,但也有些记录与小冰期 ITCZ 南移并不相符.比如位于现代 ITCZ 北界附近的阿曼石笋记录^[12]、中国贵州龙泉石笋记录^[34]、雷州半岛的湖泊记录^[35]等在小冰期期间降雨并没有减少,甚至比中世纪暖期还要多.而位于 ITCZ 南界附近的一些南美降雨记录在小冰期期间也并没有出现增加^[31,32].这些记录的出现使得我们对小冰期 ITCZ 的整体南移以及利用 ITCZ 整体南移解释过去千年热带降雨记录的普适性产生了怀疑.

2.1 南海西沙的位置特征

杨彩富等人^[36]曾对 1991~2001 年南海高空 500 hPa 的 ITCZ 位置进行了统计,结果表明,南海现代 ITCZ 在北纬 3.3°(1 月)到北纬 17.9°(8 月)之间摆动.南海西沙群岛(北纬 16.7°)位于现代 ITCZ 北界附近,因此这里的降雨记录可以用来检验 ITCZ 摆动理论的正确性.如果 ITCZ 在小冰期出现了整体的南移,那么在这一区域应该出现相对干旱的状态.在 Newton 等人^[6]的文章中,曾经引用 Wang 等人^[24]在南海的工作来证明小冰期 ITCZ 的南移.但是这个引用是存在问题的,首先 Wang 等人^[24]的数据分辨率过低;其次根据这些数据^[24],很难得出小冰期干旱的结论,反而有可能得出略微湿润的结论.

2.2 南海西沙过去千年的降雨变化

我们从南海东岛牛塘采集了 DY2(126 cm), DY4 (117 cm)和 DY6(116 cm) 3 根沉积柱^[20,37~40].东岛是一个热带珊瑚礁岛,岛屿面积约 1.55 km².牛塘是位

于西南沙堤之内的一个淡水湖,长约 150 m,宽 15 m.牛塘表现为水文学上的封闭,其周边靠近岛屿内部的三面几乎都被珊瑚礁石所包围,所有牛塘水主要来自大气降水和沙堤方向的坡面漫流^[20].当前牛塘的水深大约为 0.5 m,而且基本保持稳定,这可能主要是牛塘水和海水相互渗透导致的.3 根沉积柱的详细地球化学分析显示,牛塘沉积记录主要分为 3 个单元,且 3 个单元之间存在明显的界限.在底部为明显的泻湖相珊瑚砂沉积(DY2 的 126~96 cm, DY4 的 117~87 cm, DY6 这部分缺失);泻湖相沉积之后是明显的湖泊相沉积,但是在湖泊沉积的中间夹杂了一层海相珊瑚砂沉积(DY2 的 88~83 cm, DY4 的 69~58 cm 和 DY6 的 116~112 cm).对于湖泊相沉积物中的这一海相夹层,孙立广等人^[41]认为是一次风暴潮沉积,是由台风或者海啸引起的.为了排除这一突发性风暴潮沉积对原有沉积物的冲刷搅动,本研究中主要对风暴潮沉积上部的沉积物进行分析.岩性分析、年代学结果以及粒度分析结果都表明,上部单元(DY2 上部 83 cm, DY4 上部 58 cm 和 DY6 上部 112 cm)的沉积序列具有很好的连续性和一致性,并且沉积环境稳定没有受到明显的后期干扰,通过 AMS¹⁴C 定年结果得到的这一部分时间跨度为 AD 1024±30 到 AD 2003(详细的岩性描述、粒度分析以及年代学框架请见文献[20,38]).

对于湖泊沉积物粒度特征的研究表明,湖泊沉积物粒度主要受到湖泊水位、集水区地表环境以及水动力作用强弱的影响^[32,42].牛塘水体与南海的相互渗透使牛塘水位能够保持在水深 0.5 m 左右的相对稳

定状态, 湖泊水深不应是粒度大幅度变化的主要因素。同时牛塘水主要来自沙堤方向的坡面漫流^[20], 沙堤侧面目前大部分仍然裸露, 只有少量草类生长。而且沙堤土壤的贫有机质特征(主要由白色珊瑚砂组成)也表明沙堤在历史时期不曾有大规模的植被覆盖, 因此集水区环境特征变化也不是沉积物粒度变化的主要因素。因此, 与降雨量密切相关的水动力作用强度可能是湖泊沉积物粒度变化的主要因素。在降雨量大的湿润年份, 沉积下来的物质具有较大的粒径; 反之, 沉积物粒径减小^[20]。

对于过去千年的变化, 3 根沉积柱粒度剖面波动幅度较大且保持很好的一致性(图 2)。大致表现为在 AD 1400 年之前粒度偏小(对应中世纪暖期), 指示该时期降雨较少; 在 AD 1400~1850 粒度偏大(对应小冰期), 降雨增多; AD 1850 之后粒度重新变小。沉积物粒度变化显示的区域降雨量变化也被与介形类壳体稳定同位素恢复的区域有效湿度一致^[38]。在大约 AD 1400 年之前, 较小的沉积物粒度与偏正的介形类壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值对应, 表明东岛处于较为干旱状态。而在 AD 1400~1850 年期间, 沉积物粒度变大, 介形类壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏负, 共同指示较为湿润的状态。

这个结果显然不能用 ITCZ 整体摆动理论来解释, 据此, 虽然不能否认小冰期 ITCZ 的南移, 但至少说明了 ITCZ 南移在解释热带地区过去千年降雨变化时并没有普适性, 或者说除了 ITCZ 的整体摆动外, 还有其他因素也可以影响热带地区过去千年降雨变化。

3 过去千年南海西沙降雨变化与太平洋沃克环流的关联

对南海西沙群岛 1958~2005 年气象资料分析显示, 该地区降雨量的年际变化主要受太平洋沃克环流的控制^[43]。在厄尔尼诺期间, 沃克环流减弱, 该地区降雨量减少; 在拉尼娜期间, 降雨增多(图 3)。1958~2005 年降雨量与南方涛动指数(SOI, 指示沃克环流强弱)的统计分析也表现出显著的相关性^[43]。基于这一过程, 东岛过去千年降雨变化有可能就反映了太平洋沃克环流的强弱变化。

3.1 东岛沉积记录与沃克环流变化的关系

DY6 沉积柱的分辨率较高(5 a/样品), 有较好的铅铀定年控制。对最近 140 年的 DY6 沉积物粒度和

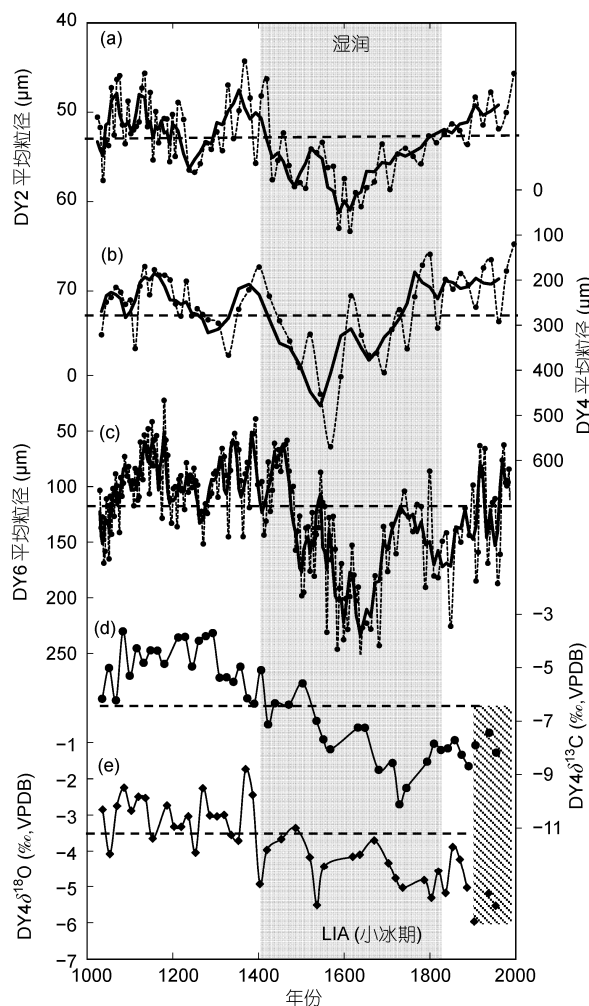


图 2 来自南海西沙东岛牛塘的替代性指标指示小冰期湿润^[20,38]

(a) DY2 平均粒径; (b) DY4 平均粒径; (c) DY6 平均粒径; (d) DY4 介形类壳体碳同位素; (e) DY4 介形类壳体氧同位素(斜线框表示表层的介形类壳体数目较少)

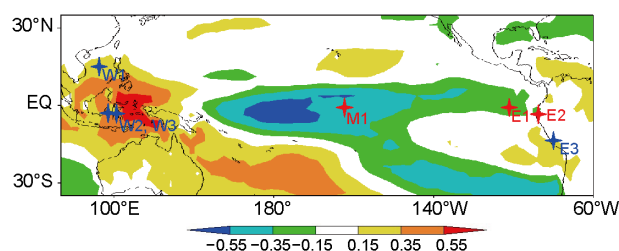


图 3 1979 年 1 月至 2010 年 12 月热带太平洋月降雨(NCEP reanalysis2)与 SOI 的统计相关性

只画出显著相关区域(95%)。位于显著相关区内的古降雨记录也被标出^[5,6,19,20,25,26,29,31,32]。红色的表示小冰期干旱, 蓝色的表示小冰期湿润

器测 SOI 指数(5 a 平均)进行了统计分析. 结果表明两者之间存在显著的正相关关系($r=0.58$, $P<0.01$)^[20]. 低的 SOI 指数对应于东岛较小的沉积物粒度, 与器测资料分析得到的沃克环流减弱时该地区降雨减少对应, 说明东岛沉积记录确实可以在一定程度上反应过去千年太平洋沃克环流的变化.

3.2 热带太平洋降雨记录的综合空间分析

虽然东岛的沉积记录与 SOI 表现出统计的相关性, 能够在一定程度上代表沃克环流的变化. 但是沃克环流是一种大尺度的空间环流, 在东岛重建的沃克环流信号有可能受区域气候背景等噪音的影响. 要进一步确认太平洋沃克环流的变化, 需要对热带太平洋地区过去千年降雨记录进行综合的比较分析(图 3).

从对现代器测资料的分析结果来看, 热带西太平洋与热带中东太平洋的降雨对沃克环流变化的响应是不同的^[1]. 当沃克环流强时, 西太平洋地区对流作用强, 降雨多; 而东太平洋的降雨则由于下沉流的加强而减少. 当沃克环流减弱并东移时, 西太平洋对流减弱, 降雨减少, 而中东太平洋降雨则增加. 热带东西太平洋表现出反向变化的“跷跷板”效应^[1]. 如果重建的南海西沙降雨可以反映沃克环流强度变化, 那么它应该与热带西太平洋地区其他降雨记录变化一致, 而与热带中、东太平洋的降雨记录表现出相反的变化.

将东岛恢复的区域降雨变化结果与西太平洋印度尼西亚附近恢复的降雨变化记录进行对比^[6,19,29], 结果表明他们之间非常一致(图 3). 印度尼西亚海表面盐度恢复结果显示在中世纪暖期(1000~1400)盐度偏高, 指示相对干旱的气候; 而在小冰期期间(1400~1850), 盐度偏低, 表明区域降雨量增加. 小冰期之后, 盐度重新上升, 降雨减少, 这与东岛沉积粒度的变化趋势一致^[6,19]. 除了海表面盐度变化外, 印度尼西亚附近海洋沉积物植蜡单体氘同位素的重建结果也发现在小冰期时, 氘同位素相对偏负, 指示相对湿润的气候^[29]. 西太平洋记录之间的一致性说明在最近千年的降雨变化中, 整个西太平洋地区有可能是保持同步变化的.

将西太平洋和中东太平洋过去千年降雨记录进行对比, 结果显示在热带太平洋东西两端, 过去千年的降雨量变化存在“跷跷板”效应(图 3). 在中世纪暖

期, 西太平洋地区处于比较干旱的状态^[6,19,20,29], 而此时来自东太平洋地区沃克环流下沉支核心区域的加拉帕格斯降雨记录以及中太平洋地区华盛顿岛记录则表明在中、东太平洋此时处于明显的湿润期^[5,31]. 这种西干东湿的状态与现代观测过程中厄尔尼诺期间弱的沃克环流状态非常吻合, 可能指示了该时期沃克环流的偏弱. 随后在 AD 1400~1850 期间, 西太平洋地区由干转湿^[6,19,20,29], 而中、东太平洋则由湿转干^[5,32], 这种变化与现代器测资料中的拉尼娜期间沃克环流增强情况一致, 说明小冰期沃克环流增强. 小冰期之后(1850~), 西太平洋重新变干旱^[6,19,20,29], 而中、东太平洋变湿^[5,31], 对应于沃克环流的重新减弱, 这种减弱现象也被最近一百多年器测资料所证实^[44].

4 过去千年太平洋沃克环流变化(SOI)的重建

南方涛动(SO)及其伴随的太平洋沃克环流(PWC)变化, 是当前热带太平洋地区气候年际异常的主要因素. 同时它与全球季风, ITCZ 等气候系统之间存在着明显的相互作用, 也是全球气候年际异常的重要影响因素. 不少研究都曾致力于扩展器测的 SOI 指数^[45~48], 但是由于 SOI 是一种气压指数, 很难对其进行重建, 因此几乎所有的此类扩展记录大多都短于 500 年. 此外, PWC 是大尺度的气候系统(横跨整个太平洋地区), 而先前出现的扩展记录大多是通过单点的气候记录来恢复的, 很容易受到局地气候背景的影响, 因此存在很大的不确定性, 而且记录之间存在不统一特征.

传统的南方涛动指数(SOI)是利用气压差来定义的(西太平洋 Darwin 站与中太平洋 Tahiti 站的气压差, 西太平洋气压与中东太平洋气压变化表现为跷跷板效应)^[49], 当气压差大时沃克环流强. 从器测资料的情况来看, 除了气压跷跷板特征之外, 东西热带太平洋的降雨在响应沃克环流变化过程中也表现出跷跷板效应^[1]. 西太平洋降雨与沃克环流强度成显著正相关, 而中东太平洋地区则表现出反相关. 由于热带太平洋东西两岸的降雨也存在与气压类似的跷跷板效应, 因此可尝试利用热带太平洋东西两岸的降雨差来重建沃克环流强度.

为了验证这一方法的可能性, 对已有古气候记录的两个区域(西太平洋的印度尼西亚和东太平洋的

加拉帕格斯)的现代器测降雨资料(1951~1997 年)进行了分析. 首先分别将两个降雨序列进行 Z-scores 标准化, 然后用西太平洋序列减去相应的东太平洋序列得到利用降雨重建的 SOI 替代性指标 SOIpr(图 4, 具体方法见文献[50]). 结果表明利用降雨资料重建的 SOIpr 与器测的 SOI 指数之间具有很好的一致性 ($r=0.701$, $P<0.0001$), 11 a 平滑之后的一致性也很好 ($r=0.7$, $P<0.0001$), 说明利用热带太平洋东西两岸的降雨资料重建年际-年代际 SOI 变化是可行的.

与利用现代降雨资料重建类似, 将东太平洋加拉帕格斯^[32]和西太平洋印度尼西亚^[19]的古降雨记录取共同区段(AD 25~1955)分别进行 Z-scores 标准化, 然后用西太平洋记录减去东太平洋记录得到重建的 SOIpr (详细方法及误差分析见文献[50]). 重建的 SOIpr 覆盖公元 25 年至 1955 年, 远长于目前已有的一些 SOI 指数重建. 重建的南方涛动在过去 2000 年表现出明显的 5 个阶段, 在暖期, AD 50~400(罗马温暖期), AD 1000~1400(中世纪暖期)和 AD 1850~现代(现代温暖期)时偏负, 指示较弱的沃克环流; 而在相对寒冷期则偏强(图 5)^[50].

5 热带太平洋将会进入拉尼娜态吗?

值得注意的是, 重建得到的南方涛动指数过去千年的变化与太阳活动^[33]之间存在着显著的相关性

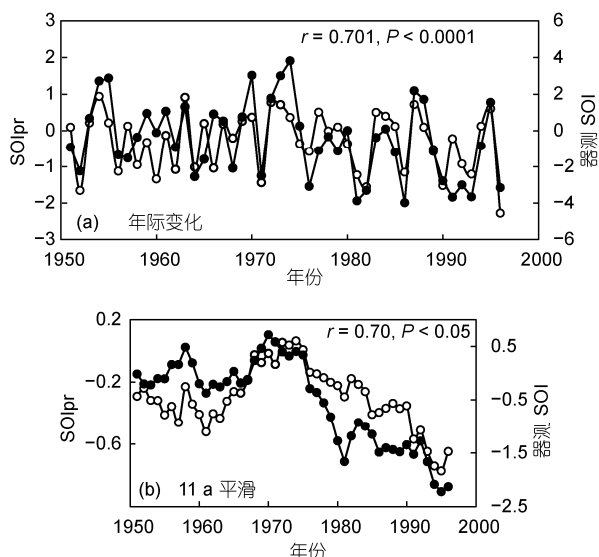


图 4 利用加拉帕格斯和印度尼西亚现代器测降雨资料(1951~1997 年)重建的 SOIpr 与器测 SOI 的比较^[50]
空心点为器测的 SOI 指数, 实心点为利用降雨资料重建的 SOIpr

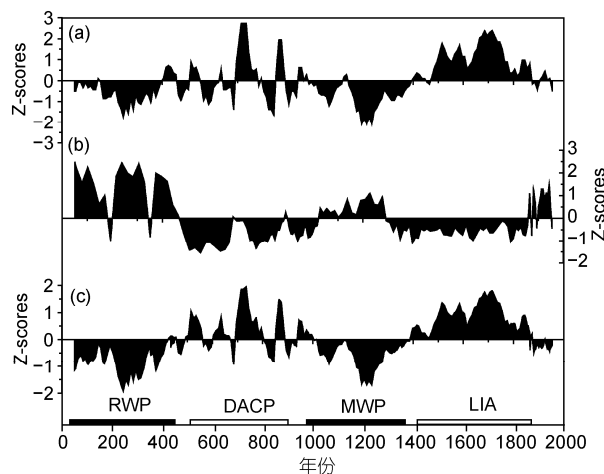


图 5 利用西太平洋印度尼西亚(a)^[19]和东太平洋加拉帕格斯(b)^[31]古降雨资料重建的过去 2000 年 SOIpr(c)^[50]
所有序列均进行了正交标准化

(图 6, 相关系数 $r=-0.77$, $P<0.05$), 在太阳活动强的中世纪暖期, 沃克环流弱, 而在太阳活动弱的小冰期, 沃克环流则偏强. 美国国家太阳观测台(National Solar Observatory, NSO)和美国大气动力研究实验室(Air Force Research Laboratory, AFRL)的中立科学家在 2011 年 6 月 14 日预测说在未来的一个太阳黑子周期中(第 25 太阳黑子周期), 太阳黑子数将会大大减少甚至消失 (<http://www.nso.edu/press/SolarActivityDrop.html>). 如果这预示着太阳活动在下一个百年尺度进入低迷期, 那么根据我们得到的沃克环流和太阳活动的关联, 这可能预示着热带太平洋将出现强沃克环流, 也就是进入拉尼娜态的时期. 这将为南海

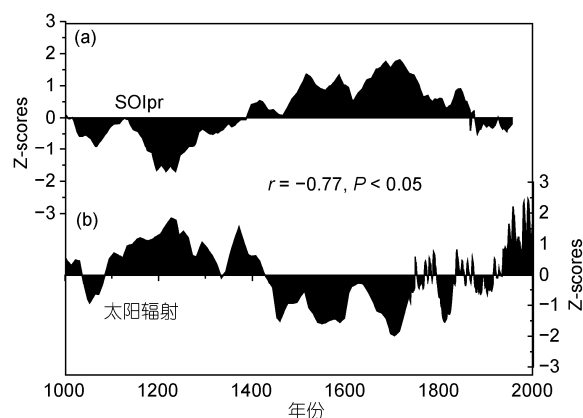


图 6 重建的 SOI 指数(a)与过去千年太阳辐射变化^[33](b)成反相关关系^[50]
两序列均进行了正交标准化

带来更多的降雨,并将对我国气候产生重要影响.

6 结论和存疑

通过对南海西沙过去千年降雨变化的重建,发现在现代 ITCZ 北界附近南海西沙小冰期(AD 1400~1850)期间出现了降雨增加的情况.这种情况的出现是当前 ITCZ 整体摆动理论所不能解释的.进一步结合器测资料并综合热带太平洋地区其他记录,可以看出,虽然 ITCZ 的整体摆动理论可能是热带地区过去千年降雨变化的主要原因;但是在热带太平洋地区,沃克环流的作用也非常明显,这种作用在赤道太平洋东西两岸现代沃克环流影响显著的区域尤为明显.本文不否认 ITCZ 的整体摆动可能是热带地区过去千年世纪尺度降雨变化的主要影响因素,但是除了 ITCZ 的整体摆动,由于 ENSO/沃克环流的变

化导致的 ITCZ 区域性强度变化或者形变同样也会对热带地区的降雨产生重要的影响.就目前的证据来看,ITCZ 整体摆动和沃克环流在影响热带太平洋地区过去千年降雨中的地位和相互作用还不是很清晰,还需要更多的研究.

通过综合热带太平洋降雨记录得出小冰期沃克环流增强是本研究的一个重要结论,这个结论对于理解过去千年太平洋 ENSO 的变化有重要的参考意义.值得注意的是,通过综合热带降雨记录得出的小冰期沃克环流增强结论与先前一些通过海温记录推断出的小冰期厄尔尼诺活动增强结论存在明显的差异^[51~53],这也是需要进一步深入研究的问题.此外,沃克环流在中世纪暖期、小冰期和现代温暖期的阶段性变化特征与太阳活动^[31]、北半球温度^[54]、东亚季风^[27]等气候系统之间的关联也是值得进一步探讨的问题.

致谢 感谢美国伍兹霍尔研究所的 Delia Oppo 和香港大学柳中晖在研究工作中的协助;感谢中国科学技术大学极地环境实验室的刘晓东、同济大学吴自军以及西沙水警区守备部队在采样过程中的帮助,感谢中国科学技术大学极地环境实验室贾楠协助完成图 1 的制作.

参考文献

- 1 Trenberth K E, Caron J M. The Southern Oscillation revisited: Sea level pressures, surface temperatures, and precipitation. *J Clim*, 2000, 13: 4358–4365
- 2 Trenberth K E, Branstator G W, Karoly D, et al. Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures. *J Geophys Res-Oceans*, 1998, 103: 14291–14324
- 3 司东, 丁一汇, 柳艳菊. 中国梅雨雨带年代际尺度上的北移及其原因. *科学通报*, 2010, 55: 63–73
- 4 汪品先. 全球季风的地质演变. *科学通报*, 2009, 54: 535–556
- 5 Sachs J P, Sachse D, Smittenberg R H, et al. Southward movement of the Pacific intertropical convergence zone AD 1400–1850. *Nature Geosci*, 2009, 2: 519–525
- 6 Newton A, Thunell R, Stott L. Climate and hydrographic variability in the Indo-Pacific Warm Pool during the last millennium. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L19710
- 7 Haug G, Hughen K, Sigman D, et al. Southward migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene. *Science*, 2001, 293: 1304
- 8 Deser C, Wallace J. Large-scale atmospheric circulation features of warm and cold episodes in the tropical Pacific. *J Clim*, 1990, 3: 1254–1281
- 9 Baker P, Seltzer G, Fritz S, et al. The history of South American tropical precipitation for the past 25000 years. *Science*, 2001, 291: 640–643
- 10 deMenocal P, Ortiz J, Guilderson T, et al. Abrupt onset and termination of the African Humid Period: Rapid climate responses to gradual insolation forcing. *Quat Sci Rev*, 2000, 19: 347–361
- 11 Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, et al. Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from Southern Oman. *Science*, 2003, 300: 1737–1739
- 12 Fleitmann D, Burns S J, Mangini A, et al. Holocene ITCZ and Indian monsoon dynamics recorded in stalagmites from Oman and Yemen (Socotra). *Quat Sci Rev*, 2007, 26: 170–188
- 13 Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 2005, 308: 854–857
- 14 Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H, et al. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 233: 71–86

- 15 Hu C, Henderson G, Huang J, et al. Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 266: 221–232
- 16 Lamb H. The early medieval warm epoch and its sequel. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Paleoecol*, 1965, 1: 13–37
- 17 Jones P, Mann M. Climate over past millennia. *Rev Geophys*, 2004, 42: RG2002
- 18 Mann M, Zhang Z, Rutherford S, et al. Global signatures and dynamical origins of the little ice age and medieval climate anomaly. *Science*, 2009, 326: 1256–1260
- 19 Oppo D W, Rosenthal Y, Linsley B K. 2000-year-long temperature and hydrology reconstructions from the Indo-Pacific warm pool. *Nature*, 2009, 460: 1113–1116
- 20 Yan H, Sun L, Oppo D W, et al. South China Sea hydrological changes and Pacific Walker Circulation variations over the last millennium. *Nature Commun*, 2011, 2: 293
- 21 Hodell D A, Brenner M, Curtis J H, et al. Climate change on the Yucatan Peninsula during the little ice age. *Quat Res*, 2005, 63: 109–121
- 22 Anderson D M, Overpeck J T, Gupta A K. Increase in the Asian southwest monsoon during the past four centuries. *Science*, 2002, 297: 596
- 23 Treydte K S, Schleser G H, Helle G, et al. The twentieth century was the wettest period in northern Pakistan over the past millennium. *Nature*, 2006, 440: 1179–1182
- 24 Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser H, et al. Holocene variations in Asian monsoon moisture: A bidecadal sediment record from the South China Sea. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 2889–2892
- 25 Rein B, Luckge A, Reinhardt L, et al. El Niño variability off Peru during the last 20000 years. *Paleoceanography*, 2005, 20: PA4003
- 26 Rein B, Luckge A, Sirocko F. A major Holocene ENSO anomaly during the Medieval period. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L17211
- 27 Zhang P Z, Cheng H, Edwards R L, et al. A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record. *Science*, 2008, 322: 940–942
- 28 Tan L C, Cai Y J, Yi L, et al. Precipitation variations of Longxi, northeast margin of Tibetan Plateau since AD 960 and their relationship with solar activity. *Clim Past*, 2008, 4: 19–28
- 29 Tierney J, Oppo D, Rosenthal Y, et al. Coordinated hydrological regimes in the Indo-Pacific region during the past two millennia. *Paleoceanography*, 2010, 25: PA1102
- 30 Buckley B, Anchukaitis K, Penny D, et al. Climate as a contributing factor in the demise of Angkor, Cambodia. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 6748–6752
- 31 Conroy J L, Overpeck J T, Cole J E, et al. Holocene changes in eastern tropical Pacific climate inferred from a Galapagos lake sediment record. *Quat Sci Rev*, 2008, 27: 1166–1180
- 32 Moy C M, Seltzer G O, Rodbell D T, et al. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch. *Nature*, 2002, 420: 162–165
- 33 Bard E, Raisbeck G, Yiou F, et al. Solar irradiance during the last 1200 years based on cosmogenic nuclides. *Tellus*, 2000, 52: 985–992
- 34 谭嘉铭, 袁道先, 林玉石, 等. 公元 8 世纪以来贵州荔波石笋高分辨率的气候变化记录. *中国岩溶*, 2008, 27: 266–272
- 35 储国强, 孙青. 中世纪暖期前后我国雷州半岛地区的古气候变化. *地质力学学报*, 2002, 8: 354–360
- 36 杨彩福, 焦新龙, 彭灿. 热带辐合带与南海气候. *海洋通报*, 2003, 22: 83–87
- 37 Yan H, Wang Y, Cheng W, et al. Millennial mercury records derived from ornithogenic sediment on Dongdao Island, South China Sea. *J Environ Sci*, 2011, 23: 1415–1423
- 38 Liu X D, Sun L G, Wei G J, et al. A 1100-year palaeoenvironmental record inferred from stable isotope and trace element compositions of ostracode and plant caryopses in sediments of Cattle Pond, Dongdao Island, South China Sea. *J Paleolimnol*, 2008, 40: 987–1002
- 39 Liu X D, Zhao S P, Sun L G, et al. Geochemical evidence for the variation of historical seabird population on Dongdao Island of the South China Sea. *J Paleolimnol*, 2006, 36: 259–279
- 40 Yan H, Sun L G, Wang Y H, et al. A 2000-year record of copper pollution in South China Sea derived from seabird excrements: A potential indicator for copper production and civilization of China. *J Paleolimnol*, 2010, 44: 431–442
- 41 孙立广, 刘晓东, 赵三平, 等. 记录: 1024 AD 前后南中国海最强烈的灾难事件. *中国科学技术大学学报*, 2007, 37: 986–994
- 42 Chen J A, Wan G J, Zhang D D, et al. Environmental records of lacustrine sediments in different time scales: Sediment grain size as an example. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2004, 47: 954–960
- 43 晏宏, 孙立广, 刘晓东, 等. 近 50 年来南海西沙群岛海域气候异常的 ENSO 效应. *热带海洋学报*, 2010, 29: 29–35
- 44 Vecchi G A, Soden B J, Wittenberg A T, et al. Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing. *Nature*, 2006, 441: 73–76
- 45 McGregor S, Timmermann A, Timm O. A unified proxy for ENSO and PDO variability since 1650. *Clim Past*, 2010, 6: 1–17
- 46 Braganza K, Gergis J, Power S, et al. A multiproxy index of the El Niño–Southern Oscillation, AD 1525–1982. *J Geophys Res*, 2009, 114: D05106
- 47 Stahle D, D'Arrigo R, Krusic P, et al. Experimental dendroclimatic reconstruction of the Southern Oscillation. *Bull Am Meteorol Soc*, 1998, 79: 2137–2151

- 48 Mann M, Gille E, Bradley R, et al. Global temperature patterns in past centuries: An interactive presentation. *Earth Interact*, 2000, 4: 1-1
- 49 Trenberth K. Signal versus noise in the Southern Oscillation. *Mon Weather Rev*, 1984, 112: 326-332
- 50 Yan H, Sun L, Wang Y, et al. A record of the Southern Oscillation Index for the past 2000 years from precipitation proxies. *Nat Geosci*, 2011, 4: 611-614
- 51 Cobb K M, Charles C D, Cheng H, et al. El Niño/Southern Oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium. *Nature*, 2003, 424: 271-276
- 52 Conroy J L, Overpeck J T, Cole J E. El Niño/Southern Oscillation and changes in the zonal gradient of tropical Pacific sea surface temperature over the last 1.2 ka. *PAGES News*, 2010, 18: 32-34
- 53 Graham N E, Hughes M K, Ammann C M, et al. Tropical Pacific mid-latitude teleconnections in medieval times. *Clim Change*, 2007, 83: 241-285
- 54 Mann M, Zhang Z, Hughes M, et al. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105: 13252

South China Sea hydrological changes over the past millennium

SUN LiGuang, YAN Hong & WANG YuHong

Institute of Polar Environment, Department of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

The tropical western Pacific is one of the major sources of heat and moisture for the globe and changes in the hydrology of the region greatly impact global climate, even at high latitudes. Rainfall in the tropical western Pacific varies in association with the regular seasonal changes in the Intertropical Convergence Zone (ITCZ)/monsoon coupled system. On inter-annual timescales, the El Niño-Southern Oscillation (ENSO), and thus the strength and position of the Pacific Walker Circulation (PWC), also affects regional precipitation patterns. The relative importance of north-south migrations of the ITCZ and ENSO and its associated PWC variability for past hydrological change in the western tropical Pacific is unclear. Here we show that north-south ITCZ migration has not been the only mechanism of tropical Pacific hydrologic variability during the last millennium, and that PWC variability has profoundly influenced tropical Pacific hydrology. We present hydrological reconstructions from Cattle Pond on Dongdao Island in the South China Sea, where multi-decadal rainfall and downcore grain-size variations are correlated to the Southern Oscillation Index during the instrumental era. Our downcore grain-size reconstructions indicate that this site received less precipitation during relatively warm periods (AD 1000-1400 and 1850-2000), compared to the cool period (AD 1400-1850). Including our new reconstructions in a synthesis of tropical Pacific records results in an implication of the PWC for the spatial pattern of hydrologic variability in the region.

South China Sea, precipitation, last millennium, Intertropical Convergence Zone, Walker circulation, Southern Oscillation

doi: 10.1360/972011-1842