

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2011.04171

## 古风暴研究进展

田翠翠, 余克服

(中国科学院南海海洋研究所边缘海地质重点实验室, 广州 510301)

**摘要:**频发的强风暴活动及其带来的巨大损失引起了人们越来越多的关注,也引发了激烈的争议,如它是全球气候变暖的产物还是正常气候波动的结果。由于器测风暴记录的年限短,要更好地理解风暴的活动规律,需要扩展风暴记录年限,因此古风暴研究便应运而生。始于20世纪90年代,经过近十几年发展的古风暴研究无论是在方法还是在成果方面都取得了较大进步。在研究方法方面,从运用单一的风暴替代性指标到综合运用沉积学、古生物学、历史文献以及地球化学等替代性指标来恢复古风暴历史;在研究成果方面,对古风暴活动历史的了解被大幅度扩展,为认识风暴活动的周期性和长期变化趋势提供了条件。其中关于风暴活动与全球变暖的关系,最新结果表明二者之间是互为促进的,而并不是单纯的被动响应关系,即风暴活动增强会促进气候变暖,而气候变暖又会使风暴活动进一步增强。未来的古风暴研究,一方面需要继续完善基本原理、研究方法并发掘新的古风暴替代性指标;另一方面需要进一步扩展古风暴活动的年限,并综合多种古风暴替代性指标进行对比研究,提高古风暴年谱的时间和空间分辨率,促进对风暴发生规律的深入理解,为未来风暴活动的预测预报提供科学依据。

**关键词:**热带气旋;古风暴;替代性指标;全球变暖;周期性

**中图分类号:** P539.6      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0266-1492(2011)04-0171-07

气象学领域将热带洋面上生成发展的低气压系统称为热带气旋,它是一种破坏力很强的风暴。台风和飓风都属于北半球的热带气旋,其中台风专指在北太平洋西部(国际日期变更线以西,包括南海)洋面上发生的、中心附近最大持续风级达到12级及以上(即风速达32.7 m/s以上)的热带气旋;而飓风专指在大西洋或北太平洋东部的热带气旋;本文一并称之为风暴。在过去的6年里,仅墨西哥湾沿岸就发生了多次强烈的风暴事件,包括2004年的飓风Ivan(伊万),2005年的飓风Katrina(卡特里娜)和Rita(丽塔),2008年的Gustav(古斯塔夫)和Ike(艾克)。飓风Katrina在墨西哥湾的登陆让美国沿岸几大州的死亡总人数超过1200人,造成的经济损失更是远远超过2000亿美元<sup>[1]</sup>,一度成为2005年全球关注的一大焦点。2009年8月的莫拉克台风,给台湾岛造成了巨大的经济损失和人员死亡。风暴活动不仅给人类社会带来了严重的生命与财产损失,由此引发的风暴潮以及巨浪等也对脆弱的海岸生态系统等产生重大影响<sup>[2]</sup>。

近年来,随着风暴活动的频率、强度及其造成损

失的增加,风暴等极端气候事件引起了越来越多的关注。如其中一个重要的话题是,风暴活动究竟是全球气候变暖的产物<sup>[3-6]</sup>还是正常气候波动<sup>[7-8]</sup>的结果?由于现有器测风暴记录的有限性,远不足以谈论风暴活动的规律性<sup>[9]</sup>,因此急需扩展风暴活动记录的年限。正是在这一背景下,古风暴研究应运而生,并经过近十几年的发展,逐渐形成了一套属于自己的方法体系,对于认识风暴活动的规律起到了重要作用。本文从研究原理、方法和相关进展等方面综述古风暴研究的相关动态,以促进对本领域的了解。

### 1 研究原理

作为一种灾害性自然过程,热带风暴所经之处会对地貌、植被、沉积物等造成巨大扰动,其搬运的产物会堆积并保存于沿岸湖泊、沼泽等低洼地,形成风暴沉积层。由于风暴沉积层的颜色、产状、粒径、组分、生物组成等均有别于正常的沉积序列,以及风暴活动通常会带来大量的降雨,会导致沉积物同位素化学组分的变化等,这就为古风暴沉积物的识别提供了基本依据。古风暴发生的时候通常会导致大量的生物死亡,或导致新形成物质(如珊瑚、石笋等)的化学组分异常,测定这些生物死亡的年代或测定这些化学组分异常物质形成的年代,即可大体推断

基金项目:国家“973”课题(2007CB815905);国家自然科学基金项目(40830852,41025007)

作者简介:田翠翠(1986—),女,研究生,从事珊瑚古气候研究, E-mail: cct1234@163.com

收稿日期:2011-02-23;改回日期:2011-06-30. 文凤英编辑

古风暴发生的年代。这就是目前古风暴研究的基本原理。随着测年技术的提高和古风暴指示物识别方法的完善,古风暴发生年代的确定精度也在大幅度提高。

## 2 研究方法

### 2.1 沉积学古风暴指示物

沉积学古风暴指示物在地质学证据中应用最早,也最广,大体包括:

(1) 越岸风暴沉积:发育于滨岸低洼地如湖泊、沼泽湿地等地貌带<sup>[10-13]</sup>。这些地貌部位正常情况下以泥质沉积为主,且富含有机质,但风暴登陆时会带来海滩、沙丘上的物质并沉积下来,因此可直接从沉积物的颜色、粒度异常上识别出风暴沉积层<sup>[10-11,14]</sup>。然后通过<sup>14</sup>C、<sup>210</sup>Pb和<sup>137</sup>Cs等测年方法确定古风暴发生的年代。

(2) 风暴沙脊<sup>[15-18]</sup>:是受波浪和风的作用形成的平行于海岸的线状沙体。可以从沉积构造、沉积物粒度、组分以及沙脊高度上等区别是波浪堆积还是风成堆积形成,或是二者共同作用的产物<sup>[16,19]</sup>。在澳大利亚大堡礁附近,由砾石级的珊瑚碎屑组成的风暴沙脊非常发育<sup>[16,19]</sup>,风暴登陆时,生长的珊瑚被风暴浪打碎并向岸搬运,使珊瑚碎屑与砂质沉积物在岸上堆积形成风暴沙脊。因此可以通过测珊瑚碎屑的年龄来推测风暴发生的时间;还可依据单个风暴沙脊高度,结合数值模拟来估算古风暴的强度<sup>[15,19]</sup>。

(3) 珊瑚礁泻湖风暴沉积<sup>[20-21]</sup>:珊瑚礁泻湖的沉积物主要来自礁坪和泻湖原生生物,一般比较细。当风暴发生时,大量的外礁坪粗粒沉积物以及被风暴折断的珊瑚枝等砾块,会被水流搬运到泻湖中并沉积下来,造成沉积速率和沉积物粒度的异常。再结合<sup>14</sup>C或铀系定年法等可确定古风暴的活动历史。

(4) 风暴搬运堆积的大型块状珊瑚礁石<sup>[21-24]</sup>:强风暴作用将生长于水下的大型块状珊瑚搬运到珊瑚礁或海滩上,导致珊瑚死亡,测定珊瑚表面的年代,亦即风暴发生的年代,尤其是强风暴活动发生的年代,需要注意两个问题,一是确认风暴搬运前珊瑚是否活着;二是确信搬运的珊瑚礁石之后是否经过了二次侵蚀作用<sup>[23]</sup>,这些因素都会影响判断风暴活动发生的年代。

(5) 生物指标:风暴形成的向岸流和越岸流等可将海相(微体)生物或生物化石带至滨岸、障壁岛后的湖沼环境沉积下来,这类生物包括海相有孔虫、沟鞭藻和硅藻等<sup>[25-29]</sup>,因此,可以通过这些生物学特征进行古风暴层的判定。另外,滨岸冲越砂质沉积层中的其他物质含量如植硅体、孢粉和炭屑含量等也可作为风暴登陆对海岸生态影响程度的判别指标<sup>[26,28,30]</sup>。

### 2.2 历史文献中的风暴记录

古风暴活动的历史文献记录可见于史书、地方志、地方报纸和民间文学作品(包括旅行日记、航海日志、诗歌)等。由于各地区文明起源程度不同,对风暴活动的文献记载时间跨度也不同,但大多不超过几百年,中国可能有上千年的风暴活动的文字记载<sup>[31-30]</sup>。尽管历史文献记录年限普遍较短且不完整,但却因时间准确度和分辨率高而有着显著的优势。若能同时获得地质和历史文献记录,则可大大提高研究结果的可信度。

### 2.3 树轮中的氧同位素记录

树轮纤维素中的氧同位素已被广泛应用于古温度、古降水研究<sup>[34-35]</sup>。Mora等<sup>[36]</sup>认为风暴来临时,空气中的<sup>18</sup>O含量会减少,带来的雨水中<sup>18</sup>O的含量也会明显低于平时低纬度地区降水中<sup>18</sup>O的含量,这些低<sup>18</sup>O含量的水分被树木吸收后,就会作为风暴的特征符号保存于植物纤维中。因此,树木年轮中 $\delta^{18}\text{O}$ 的异常可用来指示风暴的发生。据此,Miller等<sup>[37]</sup>重建了美国东南部乔治亚州近220 a(1770—1990年)的风暴活动历史,且重建的结果与器测记录(1940—1990年)对比只有一次误判。

### 2.4 石笋中的氧同位素记录

由风暴引起的降雨平均 $\delta^{18}\text{O}$ 要比其他的夏季降雨低6‰左右<sup>[38-39]</sup>,这种风暴降水形成贫 $\delta^{18}\text{O}$ 水便相应地记录于石笋中,因此可借石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 的负偏移指示古风暴事件<sup>[40-41]</sup>。Frappier等<sup>[42]</sup>研究了伯利兹中部23年石笋月-周分辨率的石笋氧同位素记录及其与所经历的11个热带风暴相联系,显示石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 值的突然减少基本上都对应对应着热带风暴降雨事件,准确率非常高。石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 不仅能重建高分辨率风暴事件发生的频率,还能对单个风暴事件的强度进行推测<sup>[42]</sup>。

### 3 古风暴研究的主要进展

#### 3.1 全球变暖背景下的风暴活动变化趋势

强风暴活动对人类社会有深刻的影响,因此,研究全球变暖的大背景下风暴活动的规律和趋势非常必要。有模拟表明在 CO<sub>2</sub> 增加的情况下,风暴强度呈增加趋势<sup>[5,43]</sup>。对全球 35 年(1970—2004 年)间的风暴活动统计分析发现<sup>[3]</sup>,除北大西洋风暴活动在 1995 年之后明显增加以外,全球大多数地区的风暴频数并没有随 SST 的增加而出现趋势性变化。但风暴强度方面,强风暴活动呈明显增加趋势,尤其是在北太平洋、印度洋以及西南太平洋。Emanuel 用 PDI 指数来指示风暴活动的潜在破坏性,结果也显示近 30 年的风暴强度在增加<sup>[4]</sup>。矛盾的是,美国风暴活动损失并没有呈现上升趋势<sup>[44]</sup>。

此外,Bengtsson 等<sup>[45]</sup>以及 Sugi 等<sup>[46]</sup>利用高分辨率模型模拟发现随着温室气体增加和气候变暖,全球风暴活动频率呈现明显的下降趋势。其他模拟结果表明在未来变暖的背景下,全球弱风暴活动将减小,而强风暴活动的变化则取决于 SST 的空间特征<sup>[47]</sup>;可能受 SST 异常影响,不同区域风暴活动频率的变化会有所差异<sup>[46-47]</sup>。

#### 3.2 风暴活动的周期性研究

Liu 和 Feam<sup>[10]</sup>对阿拉巴马海岸湖泊沉积相的研究重建了该区近 5 000 多年的风暴活动,指出强风暴活动存在约 600 年周期;之后又根据墨西哥湾沿岸的湖泊沉积<sup>[11]</sup>把风暴活动记录扩展到了 7 000 年前,发现近 3 400 年间出现过 12 次强风暴,约 280 年周期;而整个 7 000 年内古风暴活动则呈现千年尺度的周期,其中 5 000~3 400 aBP 和 0~1 000 aBP 是风暴活动平静期,3 400~1 000 aBP 是风暴活动活跃期;估计这种千年尺度周期性可能与百慕大高压强度以及位置的移动有关。Donnelly 等<sup>[48]</sup>利用加勒比海泻湖沉积记录恢复了过去 5 000 年的西北大西洋的强风暴活动,也显示风暴活动呈现百年到千年尺度的周期性,不同的是 5 400~3 600 aBP 和 2 500~1 000 aBP 是风暴活动活跃期,3 600~2 500 aBP 为风暴活动相对平静期,因为风暴活动相对活跃期对应着低 SST,因此他们认为大气的动力学条件如 ENSO 和西非季风等才是调控风暴活动的最主要因素。余克服等<sup>[24]</sup>利用南海南部由风暴搬运的珊瑚礁石重建了近 1 000 年的风暴活动历

史,显示出平均约 160 年的周期。之后他们又利用珊瑚礁泻湖沉积<sup>[21]</sup>重建了近 4 000 年风暴活动,结果显示,过去 4 000 年内发生过至少 20 次强风暴事件,其中 13 次发生在近 1 000 年之内;古风暴活动的周期受太阳活动的制约。Goldenberg 等<sup>[8]</sup>指出近 10 年来大西洋频发的飓风活动属于数十年周期 (Atlantic Multidecadal Oscillation 即 AMO)波动的正常现象,并指出这种状况还将持续约 10~40 年。西欧海岸的器测记录以及文献记载都显示,不管是在空间上还是在时间上风暴活动都呈现出年际以及年代际尺度的振荡<sup>[49]</sup>。由于器测风暴记录的年限短,通过各种代用指标重建古风暴记录仍是当前周期性研究中的一个重要内容。

#### 3.3 风暴活动与 ENSO 的关系

热带太平洋地区年际风暴活动主要受 ENSO 影响<sup>[50-52]</sup>。厄尔尼诺事件不仅影响着西北太平洋风暴形成的位置,也影响着风暴活动的频数,但由于分析方法、数据来源以及厄尔尼诺事件定义等原因使得该结论仍存在争议<sup>[53]</sup>。一般厄尔尼诺期间,中部和东部赤道太平洋海水表层温度比正常年份高,季风槽向东延伸,使得风暴在东部更远的地方形成;而拉尼娜年,强的东信风控制着西北太平洋,使得季风槽以及风暴形成地点位于偏西部<sup>[54]</sup>。Elsner 和 Liu<sup>[55]</sup>依据西北太平洋器测的风暴数据以及中国广东省的历史文献研究,认为上述推论是合理的,并把该理论命名为厄尔尼诺南方涛动-台风理论 (ENSO-typhoon hypothesis),即厄尔尼诺事件期间,风暴形成地点向东偏移并向北折回,登陆中国的几率变小;相反拉尼娜年的时候,风暴更有可能影响中国<sup>[56]</sup>。Donnelly 和 Woodruff<sup>[48]</sup>重建的过去 5 000 年西北大西洋风暴记录显示其与 ENSO 及西非季风强度有关,强风暴事件多发生在厄尔尼诺年。而在更短的时间尺度上,ENSO 事件对风暴活动以及降水都有影响,且呈现季节性变化<sup>[57]</sup>。

#### 3.4 风暴活动与温度之间的相互作用

人们一般关注全球气候变暖对风暴频率和强度的影响,但越来越多的迹象表明风暴活动好像不只是单纯的对气候变化的被动响应,而是在气候动力学中发挥着积极作用,尤其是在大洋垂向混合中扮演着重要的角色<sup>[58-60]</sup>。而这种垂向混合对维持大规模的大洋环流起着重要作用,进而影响着全球热量的传输<sup>[61]</sup>。因此,通过大洋的垂向混合和热量传输的反馈作用,风暴活动与全球的温度变化之间有着

紧密的联系<sup>[62]</sup>。

Fedorov 等<sup>[63]</sup>指出风暴活动的增加是影响早更新世气候的一个关键因素,其热量反馈作用使得气候一直维持在偏暖的状态,即类似于恒定的厄尔尼诺状态。这对温室气体、全球变暖与风暴活动之间的关系研究具有启示意义。一般认为,大洋变暖,海水分层加强,则垂向上的混合变少<sup>[64-65]</sup>。Fedorov 等<sup>[63]</sup>则认为变暖的热带大洋实际上使得垂向混合加强,因为可能形成更多的风暴。虽然风暴过程是短暂的,但却在大规模上影响着大气和海洋环境,后者又进一步影响风暴的形成和强度。但是问题在于还不知道这种短暂的风暴活动能够引起多大程度的大洋垂向混合,因此,今后会较多地关注风暴活动与气候变化的相互作用。一个例子是,Romps 等<sup>[66]</sup>通过分析 23 年的卫星图片以及风暴路径资料,发现风暴可以把水气带入到平流层,平流层水气增多后会致大气升温<sup>[67]</sup>,从而增加了全球变暖的趋势<sup>[66]</sup>。而全球变暖又会进一步影响风暴的频率和强度<sup>[4]</sup>,这样便形成了风暴活动与温度之间的一个可能的正反馈机制。

#### 4 结论与展望

风暴活动增强与全球变暖的关系还存在很大的争议,重要原因在于器测风暴资料年限偏短,难以准确识别风暴活动的规律性,因此,催生了古风暴的研究。自 20 世纪 90 年代以来,古风暴研究发展迅速,在基本原理、研究方法和研究成果等方面都取得了很大进步,成为古气候研究的重要组成部分。

随着研究的发展,指示古风暴的标志物从起初单一的沉积学指标扩展到生物学、历史文献、同位素地球化学等多个替代性指标,不同指标之间进行交叉与融合,如器测资料与文献记录的结合、珊瑚泻湖沉积与风暴搬运的珊瑚礁石的结合、沉积物粒度与孢粉研究相结合、湖泊沉积记录与生物氧碳同位素相结合等,使对古风暴的判别更加准确;并且定年方法也进一步完善,铀系方法测定的珊瑚和石笋的年代精度相当之高。古风暴研究成果对于认识风暴活动规律发挥着越来越重要的作用,如发现风暴活动与温度之间存在相互作用的关系,风暴活动增强会促进气候变暖,而气候变暖又会使风暴活动进一步增强。

全球变暖与风暴活动之间的关系仍不确定,因此,利用各种古风暴替代性指标在时间上、空间上扩张古风暴活动的历史仍是一个重要任务;同时需要

进一步发展新的古风暴替代性指标,并开展多指标综合研究,便于从更长的时间范围内了解风暴活动与全球气候变化的关系,以加强对风暴活动规律的了解。

#### 参考文献 (References)

- [1] Congleton R. The story of Katrina: New Orleans and the political economy of catastrophe[J]. *Public Choice*, 2006, 127(1): 5-30.
- [2] Bianchette T A, Liu K B, Lam N S N, et al. Ecological impacts of Hurricane Ivan on the gulf coast of Alabama: A remote sensing study[J]. *Journal of Coastal Research*, 2009, SI56: 1622-1626.
- [3] Webster P J, Holland G J, Curry J A, et al. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment[J]. *Science*, 2005, 309(5742): 1844-1846.
- [4] Emanuel K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years[J]. *Nature*, 2005, 436(7051): 686-688.
- [5] Knutson T R, Tuleya R E. Impact of CO<sub>2</sub>-induced warming on simulated hurricane intensity and precipitation: Sensitivity to the choice of climate model and convective parameterization [J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(18): 3477-3495.
- [6] Bender M A, Knutson T R, Tuleya R E, et al. Modeled impact of anthropogenic warming on the frequency of intense Atlantic hurricanes[J]. *Science*, 2010, 327(5964): 454-458.
- [7] Chan J C L. Comment on "Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment"[J]. *Science*, 2006, 311(5768): 1713.
- [8] Goldenberg S B, Landsea Liu K B, Fearn M L. Lake-sediment record of late Holocene hurricane activities from coastal Alabama[J]. *Geology*, 1993, 21(9): 793-796.
- [9] Landsea C W, Harper B A, Hoarau K, et al. Can we detect trends in extreme tropical cyclones? [J] *Science*, 2006, 313(5786): 452-454.
- [10] Fearn M L. Reconstruction of prehistoric landfall frequencies of catastrophic hurricanes in northwestern Florida from lake sediment records[J]. *Quaternary Research*, 2000, 54(2): 238-245.
- [11] Liu K B, C W, Mestas-Nunez A M, et al. The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications [J]. *Science*, 2001, 293(5529): 474-479.
- [12] Donnelly J P, Butler J, Roll S, et al. A backbarrier overwash record of intense storms from Brigantine, New Jersey[J]. *Marine Geology*, 2004, 210(1-4): 107-121.
- [13] McCloskey T A, Keller G. 5 000 year sedimentary record of hurricane strikes on the central coast of Belize[J]. *Quaternary International*, 2009, 195: 53-68.
- [14] Williams H F L. Storm surge deposition by hurricane Ike on the Mcfaddin National Wildlife Refuge, Texas: implications for paleotempestology studies[J]. *The Journal of Foraminif-*

- eral Research, 2010, 40(3): 210-219.
- [15] Nott J, Hayne M. High frequency of 'super-cyclones' along the Great Barrier Reef over the past 5 000 years[J]. *Nature*, 2001, 413(6855): 508-512.
- [16] Nott J, Smithers S, Walsh K, et al. Sand beach ridges record 6 000 year history of extreme tropical cyclone activity in northeastern Australia [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(15-16): 1511-1520.
- [17] Forsyth A J, Nott J, Bateman M D. Beach ridge plain evidence of a variable late-Holocene tropical cyclone climate, North Queensland, Australia[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 297(3-4): 707-716.
- [18] Nott J. A 6 000 year tropical cyclone record from Western Australia[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30(5-6): 713-722.
- [19] Nott J F. Intensity of prehistoric tropical cyclones[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2003, 108(D7): 4212.
- [20] Yu K F, Zhao J X, Wang P X, et al. High-precision TIMS U-series and AMS C-14 dating of a coral reef lagoon sediment core from southern South China Sea[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(17-18): 2420-2430.
- [21] Yu K F, Zhao J X, Shi Q, et al. Reconstruction of storm/tsunami records over the last 4 000 years using transported coral blocks and lagoon sediments in the southern South China Sea[J]. *Quaternary International*, 2009, 195: 128-137.
- [22] Maouche S, Morhange C, Meghraoui M. Large boulder accumulation on the Algerian coast evidence tsunami events in the western Mediterranean[J]. *Marine Geology*, 2009, 262(1-4): 96-104.
- [23] Zhao J X, Neil D T, Feng Y X, et al. High-precision U-series dating of very young cyclone-transported coral reef blocks from Heron and Wistari reefs, southern Great Barrier Reef, Australia[J]. *Quaternary International*, 2009, 195: 122-127.
- [24] Yu K F, Zhao J X, Collerson K D, et al. Storm cycles in the last millennium recorded in Yongshu Reef, southern South China Sea [J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2004, 210(1): 89-100.
- [25] Hippensteel S P, Martin R E. Foraminifera as an indicator of overwash deposits, barrier island sediment supply, and barrier island evolution: Folly Island, South Carolina[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 149(1-4): 115-125.
- [26] Zong Y Q, Tooley M J. Evidence of mid-Holocene storm-surge deposits from Morecambe Bay, northwest England; a biostratigraphical approach [J]. *Quaternary International*, 1999, 55(1): 43-50.
- [27] Scott D, Collins E S, Gayes P T, et al. Records of prehistoric hurricanes on the South Carolina coast based on micropaleontological and sedimentological evidence, with comparison to other Atlantic Coast records[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2003, 115(9): 1027.
- [28] Liu K B, Lu H Y, Shen C M. A 1 200-year proxy record of hurricanes and fires from the Gulf of Mexico coast: testing the hypothesis of hurricane-fire interactions[J]. *Quaternary Research*, 2008, 69(1): 29-41.
- [29] Lario J. Tsunami vs. storm surge deposits: a review of the sedimentological and geomorphological records of extreme wave events(EWE) during the Holocene in the Gulf of Cadiz, Spain[J]. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues*, 2010, 54(3): 301-316.
- [30] Lu H Y, Liu K B. Phytolith assemblages as indicators of coastal environmental changes and hurricane overwash deposition[J]. *Holocene*, 2005, 15(7): 965-972.
- [31] Liu K B, Shen C M, Louie K S. A 1 000-year history of typhoon landfalls in Guangdong, southern China, reconstructed from Chinese historical documentary records[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2001, 91(3): 453-464.
- [32] Garcia-Herrera R, Gimeno L, Ribera P, et al. New records of Atlantic hurricanes from Spanish documentary sources[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2005, 110(D3): D03109.
- [33] Louie K S, Liu K B. Earliest historical records of typhoons in China[J]. *Journal of Historical Geography*, 2003, 29(3): 299-316.
- [34] Esper J, Cook E R, Schweingruber F H. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability[J]. *Science*, 2002, 295(5563): 2250-2253.
- [35] Li Z-H. Micro-scale analysis of tree-ring  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  on  $\alpha$ -cellulose spline reveals high-resolution intra-annual climate variability and tropical cyclone activity[J]. *Chemical Geology*, 2011, 284(1-2): 138-147.
- [36] Mora C I, Miller D L, Grissino-Mayer H D. Tempest in a tree ring: Paleotempestology and the record of past hurricanes[J]. *Sediment Record*, 2006, 4(3): 4-8.
- [37] Miller D L, Mora C I, Grissino-Mayer H D, et al. Tree-ring isotope records of tropical cyclone activity[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(39): 14294-14297.
- [38] Lawrence J R, Gedzelman S D. Low stable isotope ratios of tropical cyclone rains [J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(5): 527-530.
- [39] Gedzelman S, Lawrence J, Gamache J, et al. Probing hurricanes with stable isotopes of rain and water vapor [J]. *Monthly Weather Review*, 2003, 131(6): 1112-1127.
- [40] Malmquist D L. Oxygen isotopes in cave stalagmites as a proxy record of past tropical cyclone activity[J]. *22nd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*, 1997: 393-394.
- [41] Schwehr K A. Oxygen isotopic variations of soda straw cave deposits from the Yucatan Peninsula; A test of their use as a paleoprecipitation tool[C]. *Houston, University of Houston*, 1998.

- [42] Frappier A B, Sahagian D, Carpenter S J, et al. Stalagmite stable isotope record of recent tropical cyclone events[J]. *Geology*, 2007, 35(2): 111-114.
- [43] Knutson T R. Simulated increase of hurricane intensities in a CO<sub>2</sub>-warmed climate[J]. *Science*, 1998, 279(5353): 1018-1021.
- [44] Pielke R A. Meteorology: Are there trends in hurricane destruction? [J] *Nature*, 2005, 438(7071): E11.
- [45] Bengtsson L, Botzet M, Esch M. Will greenhouse gas-induced warming over the next 50 years lead to higher frequency and greater intensity of hurricanes? [J] *Tellus A*, 1996, 48(1): 57-73.
- [46] Sugi M, Noda A, Sato N. Influence of the global warming on tropical cyclone climatology: An experiment with the JMA global model[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2002, 80(2): 249-272.
- [47] Yoshimura J, Sugi M, Noda A. Influence of greenhouse warming on tropical cyclone frequency[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2006, 84(2): 405-428.
- [48] Donnelly J P, Woodruff J D. Intense hurricane activity over the past 5 000 years controlled by El Niño and the West African monsoon[J]. *Nature*, 2007, 447(7143): 465-468.
- [49] Clarke M L, Rendell H M. The impact of North Atlantic storminess on western European coasts: A review[J]. *Quaternary International*, 2009, 195(1-2): 31-41.
- [50] Chan J C L. Tropical cyclone activity over the western North Pacific associated with El Niño and La Niña events[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(16): 2960-2972.
- [51] Wu M C, Chang W L, Leung W M. Impacts of El Niño-Southern Oscillation events on tropical cyclone landfalling activity in the western North Pacific[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(6): 1419-1428.
- [52] Zhao H, Wu L, Zhou W. Assessing the influence of the ENSO on tropical cyclone prevailing tracks in the western North Pacific[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2010, 27(6): 1361-1371.
- [53] Wang B, Chan J C L. How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western North Pacific[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(13): 1643-1658.
- [54] Lander M A. An exploratory analysis of the relationship between tropical storm formation in the western North Pacific and ENSO[J]. *Monthly Weather Review*, 1994, 122(4): 636-651.
- [55] Elsner J B, Liu K B. Examining the ENSO-typhoon hypothesis[J]. *Climate Research*, 2003, 25(1): 43-54.
- [56] Saunders M A, Chandler R E, Merchant C J, et al. Atlantic hurricanes and NW Pacific typhoons: ENSO spatial impacts on occurrence and landfall[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(8): 1147-1150.
- [57] Lyon B, Camargo S J. The seasonally-varying influence of ENSO on rainfall and tropical cyclone activity in the Philippines[J]. *Climate Dynamics*, 2009, 32(1): 125-141.
- [58] Srivir R L, Huber M. Observational evidence for an ocean heat pump induced by tropical cyclones[J]. *Nature*, 2007, 447(7144): 577-580.
- [59] Korty R L, Emanuel K A, Scott J R. Tropical cyclone-induced upper-ocean mixing and climate: Application to equable climates[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21(4): 638-654.
- [60] Jansen M, Ferrari R. Impact of the latitudinal distribution of tropical cyclones on ocean heat transport[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L06604.
- [61] Wunsch C, Ferrari R. Vertical mixing, energy and the general circulation of the oceans[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2004, 36: 281-314.
- [62] Srivir R L. Tropical cyclones in the mix[J]. *Nature*, 2010, 463(7284): 1032-1033.
- [63] Fedorov A V, Brierley C M, Emanuel K. Tropical cyclones and permanent El Niño in the early Pliocene epoch[J]. *Nature*, 2010, 463(7284): 1066-1070.
- [64] Fedorov A V, Dekens P S, McCarthy M, et al. The Pliocene paradox(mechanisms for a permanent El Niño)[J]. *Science*, 2006, 312(5779): 1485-1489.
- [65] Philander S G, Fedorov A V. Role of tropics in changing the response to Milankovich forcing some three million years ago [J]. *Paleoceanography*, 2003, 18(2): 1045.
- [66] Romps D M, Kuang Z M. Overshooting convection in tropical cyclones[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(9): L09804.
- [67] Shindell D T. Climate and ozone response to increased stratospheric water vapor[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(8): 1551-1554.

## ADVANCES IN THE STUDY OF PALEOTEMPESTOLOGY

TIAN Cuicui, YU Kefu

(Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China)

**Abstract:** The recent increase in intense storm (tropical cyclone) activities and huge storm losses has attracted great interests and triggered a hot debate over whether it is linked to global warming or only a part of the large interdecadal variability. Due to the short instrumental record, it's difficult for us to understand the complex processes and mechanism of storm generation and development. Therefore, in order to extend the time span of storm activity records, a new young science—Paleotempestology emerged in the early 1990s. In the past more than 10 years, significant progress has been achieved in both methodology and findings in Paleotempestology. The methodology has been evolving from a single proxy to multi-proxy techniques by integrating various proxies of geologic evidence, microfossils, historical documents and geochemistry to reconstruct the storm history. Talking about findings, the history of storm records has been greatly extended and this provides a sufficient condition for the study of storm periodicity and long-term trends. As to the heated debate on the link between the increased storm and global warming, a new study suggests that the storm activities do not just passively respond to climate change, and storm activities may be closely tied to global temperature patterns through feedbacks—the storm activities may accelerate the global warming, and as a feedback, global warming will increase storms. As to the future research of Paleotempestology, we should improve the basic theory and methods to explore new proxies in Paleotempestology, and further extend the time span of storm activity records and integrate various proxies to establish high-resolution storm records to understand the process and mechanism of storm generation and development so as to provide a scientific basis for storm forecasting.

**Key words:** tropical cyclone; Paleotempestology; proxies; global warming; periodicity