

全球变暖是否导致台风增强: 古风暴学研究进展与启示

Kam-biu Liu (廖淦标), 范代读*

Department of Oceanography and Coastal Sciences, Louisiana State University, Baton Rouge LA 70803-4105, USA;

同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092;

华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062

* 联系人, E-mail: ddf@dfan@mail.tongji.edu.cn

2008-02-16 收稿, 2008-05-26 接受

国家自然科学基金(批准号: 40476028, 40576030)、教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-07-0619)和美国国家自然科学基金(批准号: #BCS-0213884)资助项目

摘要 近年来台风活动异常,它是全球变暖的结果,还是处在年代际变化的活跃期,已经成为全球气候变化研究争论的焦点和热点。由于台风器测年限太短,对台风生成、发展和演化的复杂过程和机制认识不足,特别是对破坏力巨大的超强台风活动规律的认识更是有限,因此亟需延长台风资料的时间序列。“古风暴学”便是应运而生的一门新学科,始于20世纪90年代,通过研究地质记录和历史文献,重建器测时代之前几百年至数千年的古台风活动规律。在对近十几年来古风暴学主要研究进展和研究成果进行综述的基础上,重点讨论了代用记录在古风暴学研究中的发展和前景。古风暴学研究开始由比较单一地依靠典型风暴沉积特征,逐步发展为综合运用微体化石、有机元素比值和同位素等方法,进行风暴事件沉积的判识。近年来又发展了树轮、洞穴石笋和珊瑚礁等年生长微层的氧同位素分析法。历史文献资料也得到比较系统的整编和分析。已有的研究表明,台风登陆频数与全新世气温长周期波动不存在线性正相关关系;台风活动与 ENSO 的关系是长期的、稳定的, La Niña 年登陆中国的台风数和登陆中、北美洲的飓风数明显多于 El Niño 年,这与现代台风观测资料的分析结果是一致的。另外,台风路径受副热带高压的影响,但二者之间的长周期关系仍不清楚。这些认识对于理解全球变化与台风趋势性变化有重要的指导意义。古风暴学研究今后需加强: () 代用记录形成和保存机制的研究; () 不同代用记录的对比验证; () 区分风暴沉积与海啸等其他高能事件沉积; () 古风暴强度的重建工作; () 数值模拟; () 区域性和全球性的古风暴学对比研究,增强台风发生机制与周期性的研究。

关键词
古风暴学
台风
灾害
重现期
代用记录
全球变暖

在新的千年里,台风(台风是热带气旋在西北太平洋的俗称,北美地区称之为飓风,南亚与澳大利亚统称旋风,为了行文方便,摘要与结论等处所使用的台风泛指热带气旋)如梦魇般给人类社会以巨大灾难,尤其是美国,飓风已位列引发自然灾害因素的榜首。2004~2005年西大西洋进入飓风频发期,特别是飓风卡特里娜袭击新奥尔良,共造成1600多人死亡和约800亿美元的经济损失,成为美国历史上经济损失最严重的一次,远远超过原居榜首的1992年飓风

安德鲁所造成的损失(265亿美元),其对美国社会、经济的影响急追“911”事件^[1]。世界其他地区的台风活动也诞生了多项新记录,如2004年有10个台风登陆日本,2005年5周内接连有5个台风影响库克岛,2006年在中国登陆的超强台风桑美和在澳洲登陆的超强旋风拉里等都刷新了当地的一些记录。

近期台风异常活动是全球气候变暖的必然结果^[2],还是台风年代际周期性变化的反映^[3,4],成为当前争论的焦点。刚刚出版的IPCC第4次评估报告指

出,当前可以比较确定地认为全球气候变暖将导致台风强度进一步增强,但对于“全球变暖是否导致台风频数也不断增加”的问题上存在较大的不确定性[5].近期较高分辨率的气候模型给出的情景,往往是全球台风频数并未随着气候变暖而明显增加,甚至可能发生减少[6].出现上述争论的主要原因是台风生成、发展和演化的复杂机制认识不足.此外,由于台风器测资料的年限太短,即使在美国也不超过150a的观测历史,对台风(尤其是强台风)的长周期变化更是认识不足.强台风虽然很少发生,但破坏力极强,是致灾的主要因素,因此极需延长台风活动记录的年限,以便更好地掌握超强台风的活动规律.

器测之前的古台风活动历史重建,主要通过研究地质记录和历史文献来实现.诞生于20世纪90年代初期的古风暴学,就是通过分析地质记录和历史文献,研究器测之前几百年至数千年前(目前通常达到六千年左右)古台风活动规律的一门新学科.经过十几年的发展,逐渐形成一套比较完整的理论体系,包括研究领域、方法、技术与手段,以及得出了一些重要研究结论,已经成为第四纪古气候学的重要组成部分[7-9].古风暴学研究不仅科学理论意义突出,而且有重要的社会实际应用价值,通过古风暴学研究可以估算研究区强台风登陆重现期的经验值,这是政府进行区域规划、制定灾害应急方案,以及保险公司进行风险评估等所必需的参数[9,10].

本文将详细介绍记录古风暴活动信息的各种代用记录,及由此进行古风暴活动规律研究的方法、基

本原理和研究新进展等,并对学科的发展予以展望.

1 古风暴学研究的代用记录

1.1 地质学代用记录

登陆台风是非常重要的地质学和生态学作用力,对海岸动力、沉积地貌和生态系统都会产生重大的影响(图1),这些影响均有可能被保存在地质记录中.通过选择适当的代用记录进行分析研究,可以恢复古台风活动的规律.这些代用记录包括沉积学的、古生物学的、有机地球化学的和稳定同位素地球化学等的指标.

台风活动的沉积学代用记录包括: 滨岸湖沼相的越岸沉积[11-13], 滨岸滩脊或贝壳堤[14,15], 浅海陆架的风暴沉积层序,常发育特征的丘状交错层理[16], 三角洲-河口湾相的风暴沉积层序[17-19], 环礁内侧礁坪或泻湖风暴沉积等[20].

()古生物学代用记录. 台风期间的强风浪与海流不仅使得浅海与滨岸地区沉积物发生强烈扰动和进行交换,而且向岸流和越岸流或浪可以将海相(微体)生物或生物化石带至滨岸,甚至障壁岛后的湖沼环境发生沉积.在近岸环境的沉积物中如果大量出现正常海相有孔虫、沟鞭藻和硅藻等微体化石,可藉此判识该沉积层为风暴成因[21-26].同样,滨岸冲越砂质沉积层中的植硅体、孢粉和炭屑含量,也可作为台风袭击对海岸生态影响程度的判别指标[24,26,27].

()有机元素或同位素代用记录. 与海相(微体)生物化石一样,台风期间一些海相有机质可随风暴

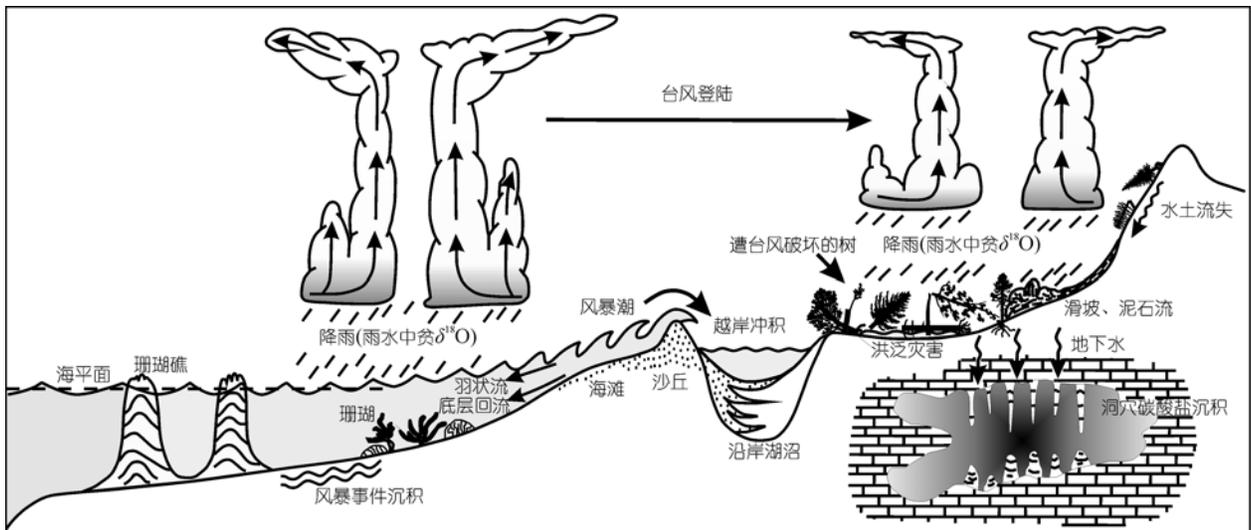


图1 古风暴学研究的沉积学、古生物学和地球化学代用记录(据文献[8]修改)

流搬运至河口海岸地区沉积下来。海相有机质与陆源有机质相比较, $\delta^{13}\text{C}$ 值较重, 但TOC/TN比值较小, 一般小于10^[28]。在河口地区, 风暴事件沉积中 $\delta^{13}\text{C}$ 比风暴过后的正常沉积偏重, 而TOC/TN比后者小, 是风暴潮入侵的反映。因此, 有机质同位素和元素比值可作为判别风暴沉积的重要标志之一^[19]。

() 稳定同位素代用记录。台风常伴随着强降雨, 由于强对流和充分时间的分馏作用, 台风降雨与低纬雷暴降雨相比较, 前者的雨水 $\delta^{18}\text{O}$ 值可能比后者明显偏小, 通常低10‰左右^[29,30]。台风过后, 强降雨带来的贫¹⁸O雨水在地表和地下水中可以停留数周, 通过生物和化学过程, 贫¹⁸O的信息进入到树轮、珊瑚骨架和洞穴石笋的生长微层中(图1)。引入稳定同位素分析方法, 研究树轮的纤维素^[31,32]、洞穴石笋的碳酸钙^[33]和珊瑚礁的文石骨架^[34,35]的氧同位素组成, 可以提取受台风影响的信息。高分辨率 $\delta^{18}\text{O}$ 数据已经用于过去几十年至数百年台风活动规律的研究, 成为古风暴学研究新的、有前途的代用记录。

1.2 历史文献中的文字代用记录

台风期间的狂风、暴雨、风暴潮和巨浪, 以及相伴而生的龙卷风、洪水及滑坡、泥石流等地质灾害, 对人类社会造成巨大影响^[1]。当人类开始用文字记录历史时, 也逐渐开始了对台风灾害及其影响的文字记录。古台风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。不同地区台风活动的文献记载时间跨度大不相同, 但大多不超过几百年, 只有在中国可能获得上千年的台风活动文字记载^[36,37]。

尽管与地质记录相比较年限较短, 但台风活动文字记录有着明显的优势, 即时间准确度和分辨率非常高, 可以具体到年、月, 甚至是事件发生的当日。当一些研究区地质和历史文献记录都可以同时获取时, 这两种资料就可以相互比对、验证, 提高研究结果的可信度。

2 风暴沉积的古风暴学研究

2.1 滨岸湖沼相的冲越沉积

古风暴学研究最早始于墨西哥湾沿岸^[11,38]。那里的障壁沙岛呈链状分布, 其陆侧发育沼泽、泻湖或湖泊等。这些有障壁的沉积环境只有很少量的陆源沉积物输入, 正常天气时风平浪静, 以泥质沉积为主, 且富含有机质。强台风登陆时, 风暴增水与波浪增水

相叠加, 越过数米高的海岸沙丘, 在其陆侧的湖沼相形成冲越沉积, 大量的粗颗粒砂从海滩和沙丘上侵蚀搬运至此沉积下来。冲越砂层底部与富含有机质的、暗色泥质层呈突变接触, 二者颜色上深、浅相间, 粒度上粗细分明(图2(a)), 很容易通过肉眼进行区分^[11,12]。此外, 根据沉积物中生物化石组合特征的变化, 可以示踪粗颗粒沉积物的来源, 辅助判识砂质夹层的风暴成因^[22,23,26,27]。

在地质历史时期, 障壁岛后的沉积环境可能不间断地接受冲越事件沉积, 形成一系列夹在暗色泥质沉积中的浅色粗粒沉积层。通过¹⁴C、²¹⁰Pb和¹³⁷Cs等测年方法建立这些冲越沉积的年代学框架, 统计一定时间内冲越沉积的层数(图2(b)), 可以近似地估算古台风在研究区登陆的重现期^[7,11~13,39~41]。

与古台风发生频次的估算相比较, 由冲越沉积特征来确定古台风强度是非常困难的。一般来说, 台风强度与风暴增水有较好的对应关系, 台风越强, 对应的风暴潮也越强, 相应形成的冲越扇越大。因此, 与现代台风在滨岸湖泊所形成的冲越扇体分布范围的观察相结合, 可以大致判断形成古冲越扇沉积的台风强度。如1979年在亚拉巴马州登陆的一级飓风Frederic, 其在谢尔比湖(Lake Shelby)所形成的冲越砂质沉积只局限在湖缘, 未能到达湖中心, 由此可推断湖中心钻孔所揭示的砂质沉积应该是一级或二级飓风所形成的^[11]。此外, 根据同一钻井中的砂层厚度变化可以近似地判断古风暴强度, 即砂层厚度越大, 对应的古风暴应该越强^[12]。

2.2 滩脊或贝壳堤

滩脊或贝壳堤都是平行于海岸展布的、狭长的堆积体, 由砂、贝壳碎屑或二者混合组成。这里的贝壳堤专指发育在泥质海岸盐沼带的滩脊, 主要由贝壳碎屑组成, 含少量的砂或砾, 单个贝壳堤厚一般2~2.5 m, 宽数十米至300 m不等, 沿岸纵向延伸达几公里至数十公里^[42]。贝壳堤主要分布在大河三角洲平原, 与泥沙供应和风浪条件有关, 是强风浪作用下海岸蚀退的产物, 可能指示某个时期台风活动比较活跃, 是进行古风暴学研究的重要代用记录之一。古贝壳堤在中国大河三角洲平原上广为分布, 可开展相关方面的古风暴学研究。

滩脊专指沙质海岸的沿岸堤, 也可以主要由贝壳碎屑组成。低缓的滩脊由一般的冲浪即可形成, 而相对高陡的滩脊(高出海平面2~6 m)通常被认为是风

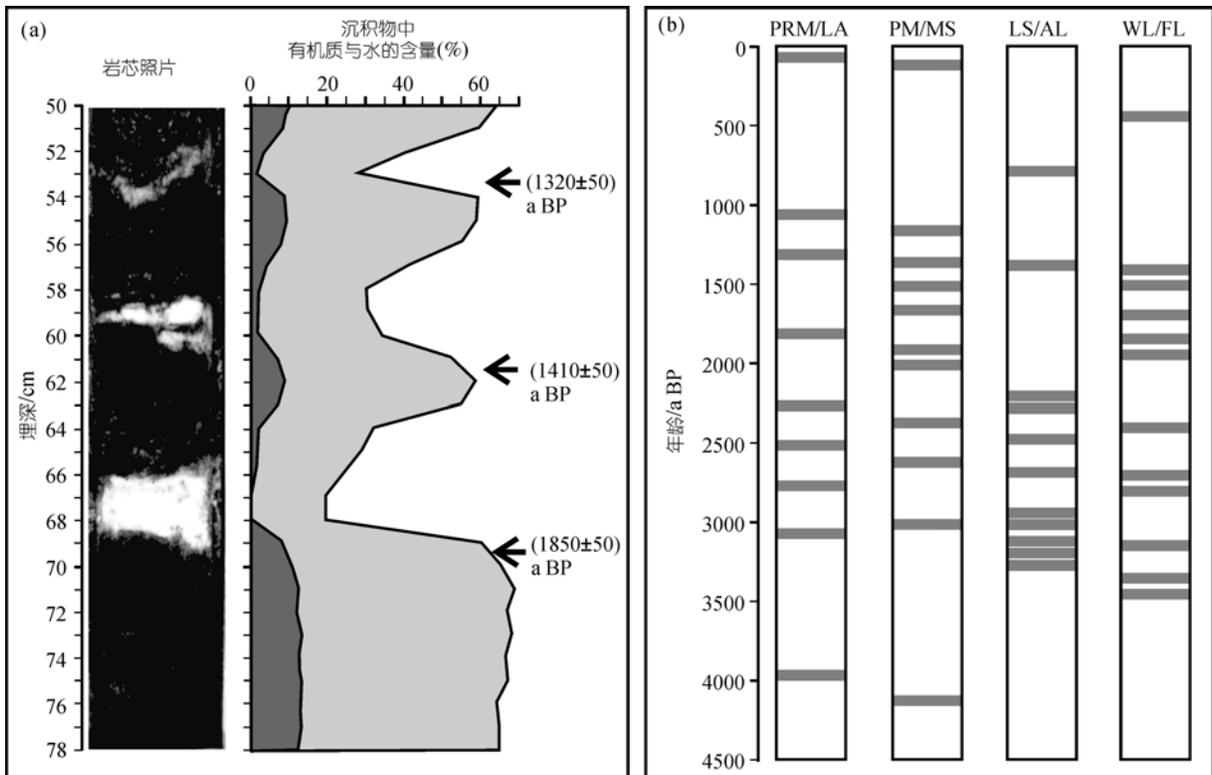


图2 墨西哥沿岸湖沼相风暴沉积特征与古风暴学研究(据文献 [8, 12] 修改)

(a) 湖沼相风暴成因的砂质层与暗层泥质层交互, 右侧箭头标注的是 ^{14}C 年龄; (b) 由风暴沉积序列分析得到的过去 4500 a 在墨西哥沿岸强飓风登陆的周期性规律, 灰色横条表示强飓风登陆事件, 4 个柱子分别代表 4 个研究区(由西往东): PRM/LA, 路易斯安娜州的珍珠河盐沼, PM/MS, 密西西比州的帕斯卡古拉盐沼, LS/AL, 亚拉巴马州的谢尔比湖, WL/FL, 佛罗里达州的西湖

暴成因的, 而且含有大量的贝壳碎屑 [43]。在澳洲昆士兰沿岸和岛屿, 这一类型的滩脊非常发育(图 3), 主要由砾石级的珊瑚碎屑组成, 大堡礁上的活珊瑚是其沉积物主要来源 [9, 14]。在台风季节珊瑚被暴风浪打碎后, 向海或向岸搬运。向岸搬运的珊瑚碎屑与砂质沉积物在岸上堆积形成风暴沙脊, 每次风暴沉积都可能包含一系列沉积地貌单元: 滨面、滩肩、滩脊和冲越沉积等 [14]。新的风暴沙脊叠置在老的沙脊向海一侧, 中间以明显的间断面相隔 [9, 14]。由于风暴沉积的珊瑚碎屑主要来自活的珊瑚体, 因此测试这些珊瑚碎屑的年龄, 就可以得出古风暴发生的时间。沿垂直于岸线的断面, 详细观测和取样进行 ^{14}C 年龄测试, 可以得到向海一侧连续叠置的风暴事件沉积的年龄序列(图 3), 由此可以分析研究区强台风登陆的重现期。依据单个风暴沙脊的高度, 结合现代风暴沙脊观测和数值模拟, 可以近似估算古风暴的强度 [15, 44]。

库拉科岛上的风暴沙脊群研究表明, 过去的 6000 a 里至少有 22 次强风暴发生, 强风暴重现期约

280 a。夏洛特公主湾的风暴沙脊群研究揭示, 过去的 3000 a 里至少有 12 次强风暴登陆, 重现期约为 180 a [14] (图 3)。根据风暴沙脊高度估算, 认为萨氏 5 级或至少 4 级以上的超强旋风才足以形成如此高度的风暴沙脊。由此估算, 超强旋风袭击大堡礁的重现期约为 200~300 a [14, 15]。这远远高于从旋风流观测数据得出的结果, 后者认为, 发生超强旋风登陆的几率是几千年一次 [45]。如凯恩斯市及周边地区, 整个 20 世纪都没发生过超强旋风在此登陆, 但根据地质学代用记录研究和数值模拟, 19 世纪至少有两次超强旋风登陆凯恩斯市 [44]。2006 年 3 月 5 级超强旋风拉里在凯恩斯市附近登陆, 再次说明超强旋风存在百年尺度的周期变化。

2.3 三角洲-河口湾相风暴沉积层序

陆架风暴沉积研究始于 20 世纪 60 年代, 于 80 年代达到高潮, 提出了开阔陆架风暴流沉积理论, 被认为与浊流沉积理论一样在沉积学研究史上具有里程碑意义 [46, 47]。但这与 20 世纪 90 年代兴起的古风暴

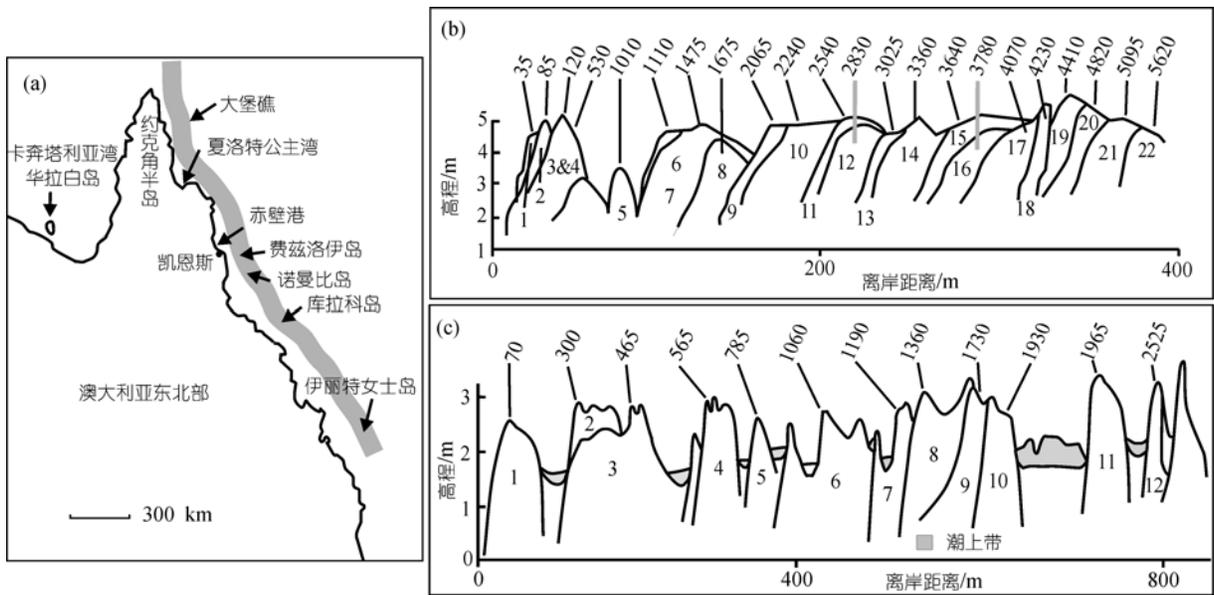


图3 澳洲东北海岸风暴沙脊与古风暴学研究(据文献 [14, 15]修改)

(a) 风暴成因的沙脊群剖面位置; (b)和(c)为分别位于库拉科岛和夏洛特公主湾的沙脊群剖面所揭示的强风暴沉积及其年龄

学研究没有必然的联系, 主要因为陆架水动力强、生物扰动剧烈, 风暴沉积容易遭受破坏和改造, 难于满足高分辨率的风暴学研究。近年来开展的陆架现代风暴沉积学研究表明, 风暴沉积的生成与保存取决于沉积物供应和沉积速率。在大河三角洲地区, 沉积物供应丰富, 沉积速率高, 尽管也存在改造和保存问题, 但强风暴事件沉积基本得以保存 [118, 48-50], 可以进行高分辨率的风暴学研究。

在泥质海岸和陆架, 一次风暴过程先以侵蚀开始, 底质沉积物发生冲刷、再悬浮, 风暴最强时海底刷深也基本达到最大, 形成侵蚀面。当风暴开始衰减, 粗的沉积物首先沉积下来, 形成侵蚀面之上的砂质单层, 层厚不等, 底部见粗砾或贝壳碎屑等, 向上逐渐变细。在风暴衰减晚期开始细颗粒沉积, 与正常天气条件下的细颗粒沉积无明显差别, 二者构成泥质单层(图 4)。侵蚀面和砂、泥质单层交互构成的小型层序是泥质海岸和陆架典型的风暴沉积特征 [118, 48-56]。

由于河口地区水动力复杂, 洪水事件、大小潮旋回也可能形成类似于砂、泥质单层交互的小型层序, 在实际研究工作中, 往往结合其他判识风暴沉积的代用记录, 来确定小型层序是风暴成因。陆源和海洋源具有不同的有机质TOC/TN元素比值和C、N稳定同位素组成 [28], 上述特征已被广泛应用于河口及陆架海的物源示踪及相关的物理、生物化学过程研究

[57-59], 也可作为风暴期间沉积物和有机质再悬浮、搬运和重新分布的重要示踪标志 [60]。在长江三角洲层中, 砂质单层中的 $\delta^{13}\text{C}$ 比上覆泥质单层更偏正, 而前者TOC/TN比值通常比后者更小(图4)。这表明砂质单层的海洋源有机质含量比泥质单层的高, 与沉积学成因解释相一致, 反映砂质单层是风暴期间强风浪形成的粗粒沉积层, 并相对富集风暴潮携带来的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高和TOC/TN比值较低的海洋源有机质。泥质单层是风暴过后河口地区正常的沉积层, 沉积物较细, 且 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低, TOC/TN比值较高, 是河口地区存在大量的陆源有机质输入的表现。

有孔虫组合也是河口地区识别风暴沉积的一个重要标志。珠江口内正常沉积层中有孔虫以原地埋藏群为主, 有孔虫丰度低, 分异度低, 优势度高, 以广盐性种类为主, 畸形壳体普遍, 幼体和成体混生, 不见浮游类有孔虫。风暴沉积层则有孔虫分异度高, 优势度低, 广盐性属种和窄盐种混杂, 出现大量的浅海或较深水底栖种和浮游种有孔虫壳体, 且以小个体壳为主, 反映有孔虫壳体经过一定距离搬运, 并以异地埋藏群为主 [21]。利用有孔虫组合作为风暴沉积的识别标志, 在珠江口水下三角洲打的十余米钻孔岩芯中, 最多识别出 17 个风暴层, 依据 ^{14}C 测年估算, 沉积这些风暴层的古台风重现期约为 350 a, 可能相当于萨氏 4~5 级的强台风 [17], 这是中国首次利用地

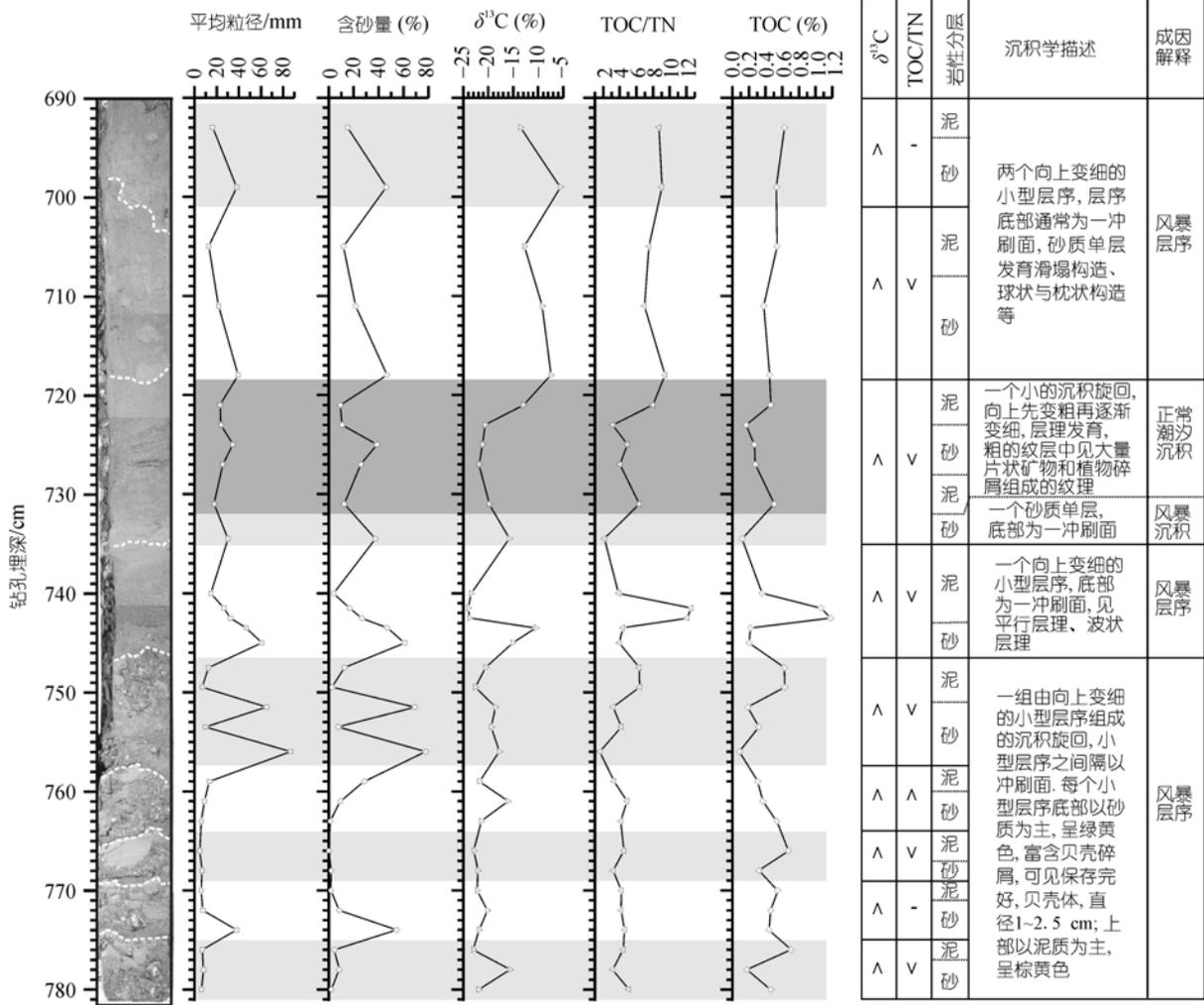


图4 长江三角洲风暴沉积层序的沉积学和有机地球化学判别标志

图中“δ¹³C”一栏中“^(v)”表示小型层序中底部砂质单层(砂)比上部泥质单层(泥) δ¹³C 更偏正(负); “TOC/TN”一栏中“^(v)”表示砂质单层比泥质单层 TOC/TN 比值更大(小); “-”表示砂、泥质单层 δ¹³C 或 TOC/TN 比值没有明显的变化

质记录比较详细地研究全新世台风暴潮活动频次。

3 洞穴石笋微层、树轮等精细稳定同位素记录的热带风暴活动

3.1 洞穴石笋

石笋微层特征(灰度和厚度)、稳定同位素和微量元素组成均是气候变化的重要代用指标, 已广泛应用于过去几千年至数十万年的古气候(降雨和气温)和古生态研究。只是最近十年, 才开始有人撰文论证, 石笋微层的 δ¹⁸O 值负向漂移可能记录了台风活动的信息 [61,62], 但受微区取样技术和仪器测量精度(对分析样品重量的要求)的限制, 他们的研究大多只能获得了年代际台风活动频次的信息, 无法分辨出单个

台风事件。

石笋微层厚度通常为几十微米, 很少超过 100 μm。只有微区取样的厚度小于年生长微层的厚度, 才能获得台风降雨的短时事件信息。另外, 选择沉积速率较高的石笋也可以提高时间分辨率。Frappier 等人 [33] 对采自伯利兹某一洞穴仍在生长的石笋进行年代学和氧同位素测试分析, 微区采样间距为 20 μm, 时间分辨率可达到数周至月(图 5)。采用二元逻辑回归模型对台风引起的 δ¹⁸O 值负向漂移事件进行诊断, 并与最近二十几年登陆或影响至研究区的飓风实测资料进行比较, 识别率很高, 并且可以识别出短期内(两周)相继发生的两次飓风强降雨事件(图 5)。分析还表明, δ¹⁸O 值负向偏移的幅度与台风的强度呈明显

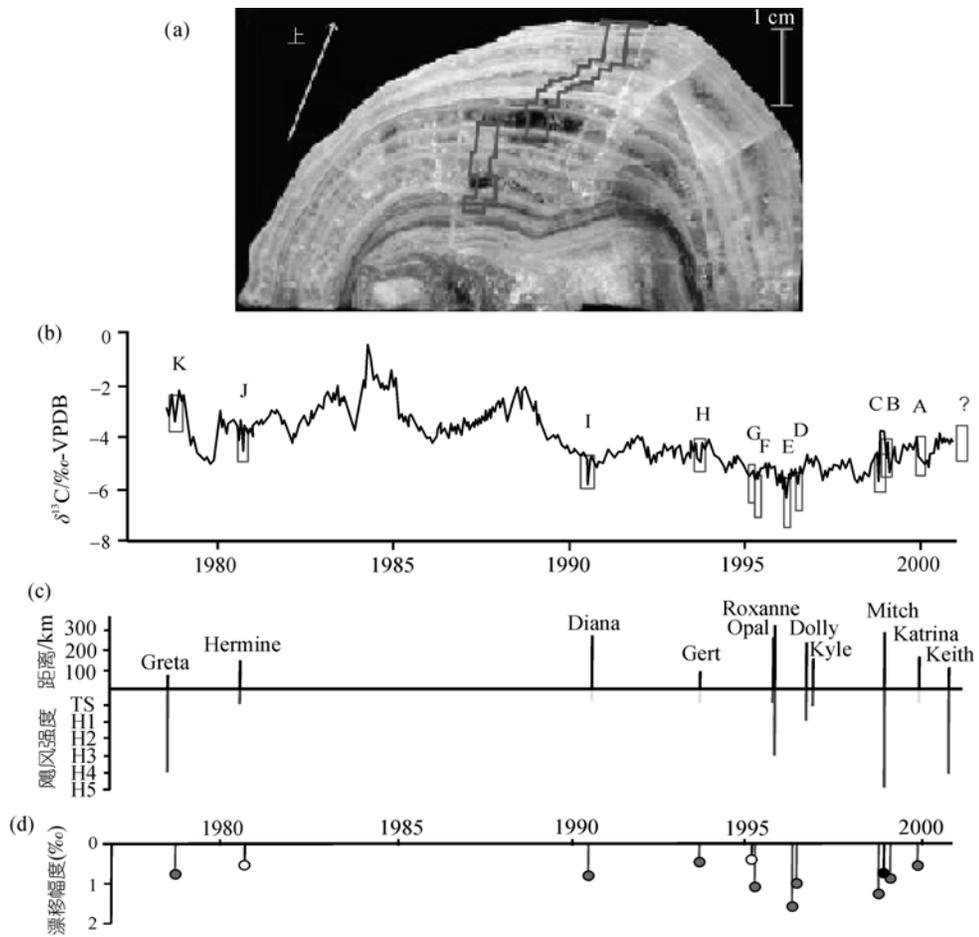


图5 伯利兹洞穴石笋氧同位素负向漂移记录的飓风活动频数和强度(据文献 [33]修改)

(a) 被测试的石笋切面; (b) 氧同位素曲线与受飓风影响形成的负向漂移事件(A~K); (c) 观测记录的飓风中心与伯利兹洞穴的距离及飓风强度; (d) 利用二元逻辑回归模型判断飓风引起 $\delta^{18}\text{O}$ 值负向漂移事件的强度

的线性相关关系(图 5)。因此,通过高分辨率的洞穴石笋代用指标的研究,可以较精确地重建研究区古飓风的影响频次和强度。

3.2 树轮

树轮纤维素的氧同位素气候学研究始于 20 个世纪 70 年代,已广泛用于过去数千年的古气候参数(包括温度、降水量等)的重建。只是到了 21 世纪,才开始有人尝试运用树轮氧同位素组成作为台风降雨的代用记录,重建古台风的活动历史 [31,32]。Miller 等人 [31,32] 对美国东南部乔治亚州长叶松树轮的晚材纤维素进行高分辨率的氧同位素组成分析,重建了该地区 220 a (1770~1990) 的飓风活动历史(图 6)。其中,1940~1990 代用记录指示的飓风活动年份与飓风实测资料进行详细对比,结果表明,50 a 的飓风活动代用记录里只发生一次误判,即有一次代用记录恢复

的飓风活动找不到相应的实测资料来支持。美国从 1855 年开始有比较可靠的飓风活动资料可供查证,在 1855~1990 年间,代用记录恢复的飓风活动只发生 3 次漏判(图 6(c))。由此可见,树轮氧同位素可作为研究古台风活动的重要代用记录,由此可以恢复过去几百至上千年的古台风活动历史 [31]。

树轮氧同位素组成除了与源水(降雨)同位素组成密切相关,还受其他多种环境因素影响,包括温度、土壤类型与湿度和降水量等,因此,该代用记录只能用于古台风活动频次的重建研究,无法恢复古台风的强度 [30,31]。此外,受取样精度的限制,所讨论的树轮氧同位素值通常是季节性生长纹(晚材:6 月中旬至 11 月间的生长纹)氧同位素组成的平均值,因此,无法讨论一个台风季节里是受一次还是多次台风影响。而且台风降雨致土壤孔隙水贫 ^{18}O 的时间间隔不

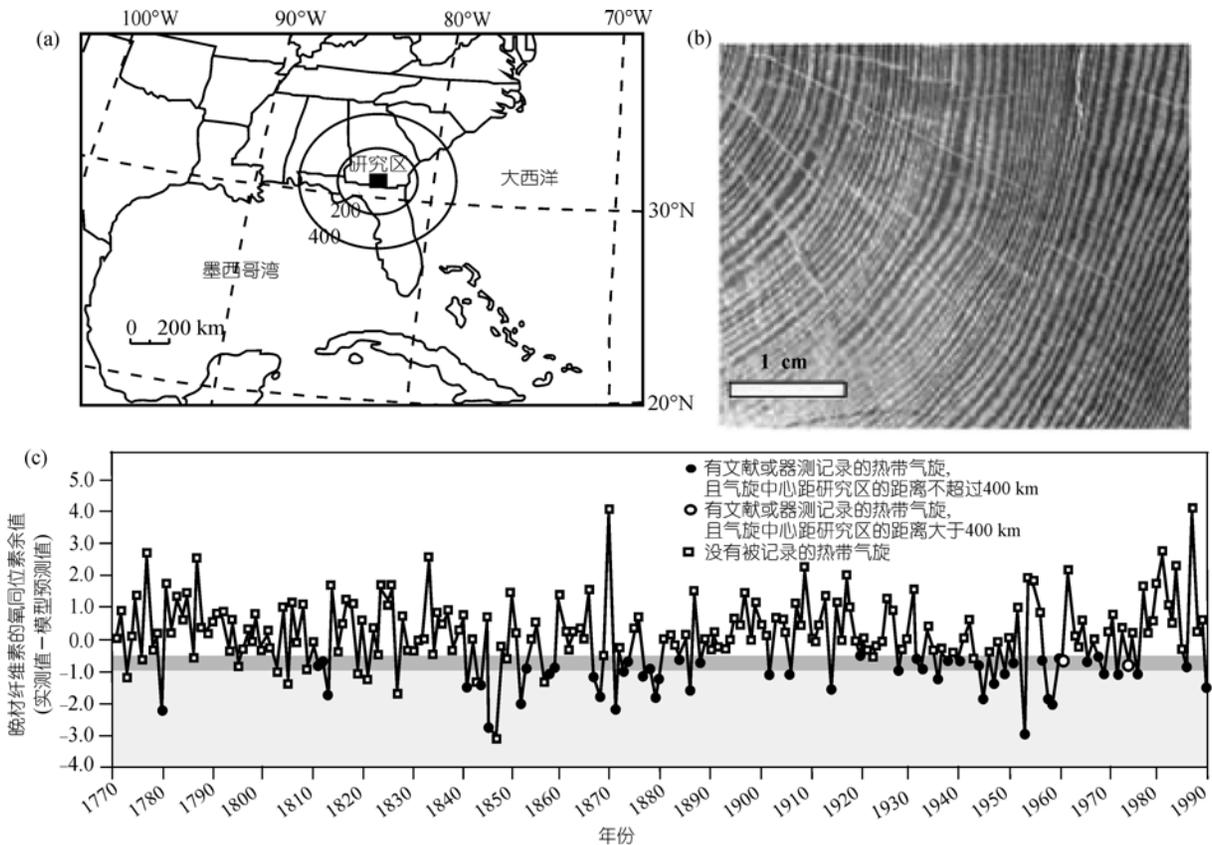


图6 树轮纤维素氧同位素组成变化所记录的飓风活动(据文献 [31, 32]修改)

(a) 研究区位置, (b) 被测试的树轮切面, (c) 根据树轮中晚材的氧同位素余值(实测值-模型预测值)诊断为受飓风影响形成的负向漂移事件(余值<-0.5), 并与飓风的历史或观测记录进行对比说明该诊断的正误率

超过数周, 用几个月的平均值可能弱化台风降雨对树轮同位素组成的影响, 甚至完成消失, 无法用于重建古台风活动的历史. 因此, 需要对树轮的季节性生长纹层作进一步的分层氧同位素组成分析, 以保证古台风活动历史重建的分辨率 [31].

4 历史文献记录的古风暴学研究

在全球易受台风影响的国家, 根据历史长短可分为两类: 文明古国中的中国与印度和新兴国家中的美国与澳大利亚等 [37]. 澳大利亚在 18 世纪欧洲移民到来之前没有什么文字记录. 美国、墨西哥及其他加勒比海国家在 15 世纪末哥伦布发现美洲之旅以前也不存在文字记录, 该地区最早一次关于飓风的文字记录就是 500 多年前哥伦布在加勒比海航行遭遇飓风亲身经历的描述, 其后对飓风的描述可见于地方日报、航海日志、庄园日记和年鉴中, 一些学者已经对近 500 a 来的飓风历史资料进行整编出版 [63, 64]. 这些历史记录以描述性为主, 而且区域性差别较大,

但可用来统计和分析特定地区受飓风影响的频次. 如南卡罗莱纳州过去 223 a (1778~2000) 的飓风登陆文字资料研究表明, 19 世纪 30 年代和 1880~1910 期间是有史以来飓风登陆最频繁的时期 [65]. 从加勒比海地区 1500~1900 期间飓风发生频次来看, 16 和 18 世纪是两个飓风活动相对活跃期, 最活跃阶段出现在 1766~1780, 夹在中间的 17 世纪是飓风活动相对平静期 [66].

印度的历史资料保存得较差, 没有太多的台风活动文字资料可以考证 [37]. 中国是以保存完好的、悠久的历史文献著称, 最早的历史文献是 3000 a 前篆刻在动物骨骼和龟板上的甲骨文, 有 2000 多年比较丰富的天气与气候文字记录, 其中近 1000 a 来的记录基本上是连续的 [67]. 历史文献中对台风直接定义的词: 大风、飓、飓风、台风, 以及对伴随现象或灾害描述的词: 如大风雨、风潮、海溢、海塘损等. 据现有资料分析, 最早的“大风海溢”事件记录可以追

溯到公元 228 年 [36],“颶”字最早出现于南朝刘宋年间(420~479 年)沈怀远所撰的《南越志》[37]。目前可以明确考证的最早的台风登陆文字记载是公元 816 年台风在山东密州(今高密)登陆 [37]。从宋朝开始有比较系统的台风灾害记录,可见于史书中的《五行志》,但史书中记录的只是在中国登陆的强台风并造成重大灾害的部分。记录台风登陆信息最多的、最全的应该是方志,特别是华东、华南沿海县市的方志。根据这些方志整编的台风灾害史料可见于各种自然灾害或气象记录汇编的书籍 [36,68~73]。对台风历史资料作进一步的统计分析,台风登陆频数明显存在年代际(50 a 左右)和百年尺度的变化周期 [74],其中约 50 a 的变化周期可能与太平洋年代际振荡(PDO)有关 [75]。此外,历史上中国登陆台风频数与 ENSO 存在明显的相关关系,即 La Niña 年登陆台风数明显多于 El Niño 年,这与近 50 a 来观测资料的分析结果相一致 [69]。

5 古风暴活动与气候变化的关系

5.1 古风暴活动与全新世气温变化的关系

全新世气温存在明显的阶段性变化,包括全新世大暖期、中世纪暖期及其后的小冰期等。研究冷期和暖期的古风暴活动信息有助于理解当前全球日趋变暖背景下台风活动可能发生的趋势性变化。在过去十几年的古风暴学研究中,有几个研究实例可以将古台风活动追溯到五六千年前。澳洲昆士兰沿岸贝壳沙脊研究表明,过去 6000 a 里超强旋风登陆的几率基本不变,重现期约 200~300 a(图 3),由此认为全新世大暖期的暖湿气候并未导致超强旋风频数的增加 [14,15]。美国墨西哥湾沿岸是开展古风暴学研究最早、最详细的地区,十几年的研究结果总结认为,该地区古台风活动明显存在千年尺度的周期性变化,1000~3800 a BP 是超强台风登陆较频繁的活跃期,3800 a BP 之前和近 1000 a 则是台风登陆相对较少的平静期 [7,12]。这一周期性变化与全新世气温变化周期并不相符,如 4000~6000 a BP 的全新世大暖期并未出现超强台风频发现象,反而是台风相对平静期。由此反映,墨西哥湾沿岸超强台风千年尺度的变化规律不是全新世气温变化引起的,它可能与台风路径受副热带高压长周期位移的控制有关 [12]。

近千年来古台风活动规律可以通过地质代用记录和历史文献研究来重建。Yu 等人 [20]对南海永曙礁

泻湖内风暴沉积的研究结果表明,过去 1000 a 共有 6 个强台风发生,其中有 4 次发生在 1000~1500 的中世纪暖期,两次发生在 1500~1900 的小冰期,可见强台风登陆频率与气温之间存在一定的相关性。除此之外,多数古风暴学研究结果认为,台风登陆频率与近千年来气温冷暖变化无明显关系。根据历史资料重建了过去千年台风登陆中国东南沿海的时间序列分析表明 [75](<http://data.typhoon.gov.cn/TYDATA500/index.htm>),17 世纪小冰期最盛期台风登陆东南沿海各省市的频数均出现峰值,19 世纪小冰期的另一次冷波动同样出现台风频数的峰值。同样的现象也发生在加勒比海和美国大西洋沿岸,风暴沉积记录研究表明 950~1700 是一个台风平静期,而在小冰期后半段却突转为台风频发期 [76,77]。波多黎各的历史记录同样表明,1550~1700 特大台风灾害只发生了 3 次,而 1700~1850 却有 16 次 [78]。由此可见,强台风发生频数与气温变化不是呈线性正相关关系,前者可能受其他多种因素制约。

5.2 古风暴活动与 ENSO 相位的关系

Donnelly 和 Woodruff [76]对比分析了过去 6000 a 波多黎各强台风登陆频数与 El Niño 事件 [79]的关系,发现强台风多发期对应于弱 El Niño 期,如 4400~3600 a BP,约 2500~1000 a BP 和 250 a BP 至今;反之,强台风少发期对应于强 El Niño 期,如约 3600~2500 和 1000~250 a BP [76]。根据历史资料,梁有叶和张德二 [69]统计分析了 1600~1911 期间 La Niña 年和 El Niño 年台风在广东、福建、浙江 3 省的登陆数,结果发现 La Niña 年登陆台风数明显多于 El Niño 年。上述结论与北美 [80]和西北太平洋 [81,82]现代台风观测资料的分析结果是一致的,可见台风活动与 ENSO 的关系是长期的、稳定的。

5.3 古风暴路径变化与副热带高压长周期位移之间的关系

通过区域古台风活动的对比研究,发现墨西哥湾沿岸可能与大西洋沿岸存在反相位关系 [7,12,25]。在墨西哥湾沿岸,1000~3800 a BP 是台风登陆较频繁的活跃期,3800 a BP 之前和近 1000 a 则是台风登陆相对较少的平静期 [7]。与此相反,大西洋沿岸近 1000 a 台风较频繁登陆,而 1000~3000 a BP 是一段相对平静期 [83]。这种千年尺度的台风变化周期可能与百慕大高压的长周期位移有关,当百慕大高压移向西南时,

可导致更多的飓风在海上转向并最终登陆墨西哥湾沿岸；反之，当百慕大高压移向东北，会有更多的飓风转向登陆大西洋海岸(图 7)。古气候研究表明，北大西洋环流在 3000~4000 a BP期间曾发生大规模的变化，导致百慕大高压向西南移动，可能由此造成墨西哥湾沿岸进入飓风多发时期 [7,12]。飓风的历史资料统计表明，美国墨西哥湾沿岸与大西洋沿岸飓风活动存在反相位关系，且与北大西洋涛动(NAO)有关，而后者又与百慕大高压的位置密切相关 [84]。值得注意的是，南卡罗莱纳州的古飓风活动研究结果支持上述假说 [25]，但纽约长岛(Long Island)的最新研究结果 [77]表明，与波多黎各古飓风活动规律一样，2500~1000 a BP是飓风活动相对活动期，近 1000 a是相对平静期，与墨西哥湾沿岸古飓风活动相一致，并不存在飓风路径因百慕大高压移动而偏转的现象 [76]。

广东省古台风活动的趋势性变化表明，台风登陆明显存在两个异常活跃期：1660~1680 和 1850~1880，这两个阶段又正好与华北和华中地区小冰期里两个极端冷干事件的发生时间相一致 [75]。由此推测，冷期西风带增强、副热带高压南移，可能导致台风路径南偏，使得登陆广东的台风明显增多，而在广东以北登陆的台风显著减少 [75]。但是，浙江、上海、江苏三省市的台风活动的历史资料(<http://data.typhoon.gov.cn/TYDATA500/index.htm>)分析表明，17 和 19 世纪发生于小冰期内的两次冷波动台风登陆频数并未减少，反而出现台风登陆频数的峰值。由此可见，台风路径虽受副热带高压的影响，但二者之间的长周期关系仍有待进一步研究。

6 结论与展望

近年来台风活动频次和强度都有加剧的趋势，根据器测资料分析，有人认为近期台风异常活动是全球变暖的结果 [2]，但反对的观点也不少，如认为当前只是处在台风年代际变化的频发期 [3,4]。引起争论的主要原因是台风器测年限太短，对台风生成、发展和演化的复杂机制认识不足，对于破坏力巨大的强台风的认识更是有限。为了延长台风活动记录的年限，更好地掌握强台风活动的规律性，一些学者通过历史文献和地质记录的研究，重建器测之前的古台风活动历史，由此诞生了一门新学科“古风暴学”。

经过十几年的发展，古风暴学的研究方法不断得到丰富。古风暴学的地质代用记录由原来比较单一的依靠风暴沉积特征，发展为综合运用微体化石(包括有孔虫、硅藻、植硅体、孢粉等)、沉积有机质同位素和元素比值等代用记录，进行风暴事件沉积的判别。滨岸湖沼相风暴成因的冲越沉积是目前综合运用各种地质学代用记录进行古风暴学研究最详细的对象，它与粗碎屑滩脊是进行强台风历史重建的最有效的风暴沉积记录。三角洲和泥质陆架区的风暴沉积层序存在改造和保存问题，但在沉积速率较快地区有望获得高分辨率的台风活动历史记录。近年来又发展了生物体和化学沉积稳定同位素的代用记录，利用树轮、珊瑚骨架和洞穴石笋生长微层的高分辨率 $\delta^{18}\text{O}$ 值来识别台风降雨的影响，重建高分辨率的古台风活动历史。台风活动的文字记录有时间准确和分辨率高的优势，但台风易发区各个国家的历史长短不一，台风活动文字记录和保存情况也

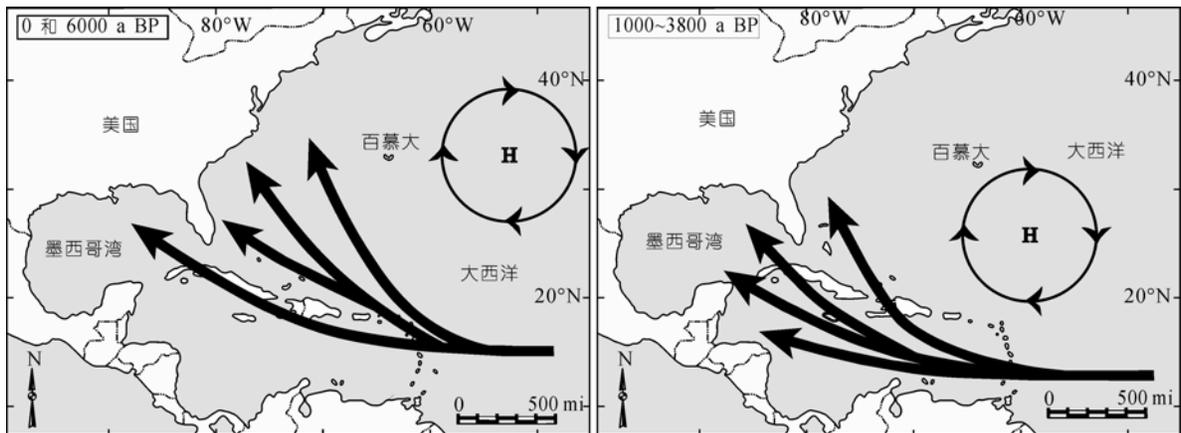


图 7 百慕大高压的长周期位移对飓风路径的影响(据文献 [12]修改)

注: 1 mi ≈ 1.609 km

各不相同。中国有近千年连续的、可以考证的台风历史资料，美国和加勒比地区也有 500 多年的飓风历史记录，这些资料已经部分整编出版，由此重建的台风频数的时间序列是认识台风长期变化的重要依据。在历史文献记录与现代器测资料有时间重叠的部分，描述性的文字资料与准确的观测数据比较，可以进一步考证历史记录的准确性，并进行各种台风术语的半定量解译。在一些可以同时找到风暴活动地质和历史文献记录的地区，进行对比分析，以提高研究结果的准确性。

风暴活动的各种代用记录在地质时期会经受改造，文字记录的详细程度也存在明显的历史年代和区域性特征，利用代用记录进行古风暴学研究时需要严格分析代用记录本身的可靠性。在太平洋和印度洋等海区，沿岸还会受到海啸的袭击，需要注意区分风暴沉积与海啸沉积。Sedimentary Geology 于 2007 年出版了一个专辑，共有 16 篇论文从不同角度讨论了海啸沉积的形成机制与识别特征^[85]，其中有两篇专门讨论了如何区分风暴沉积与海啸沉积的各种标志，包括沉积物粒级组成、沉积结构和粒序、沉积构造类型与组合、层序特征和厚度以及分布范围等^[86,87]。值得注意的是，风暴沉积与海啸沉积有很大的相似性，特别是在单个钻孔中难以区分，探槽剖面和多个钻孔分析相结合可以提高二者之间的辨识程度。

近年来的古风暴学研究也取得了许多重要结果，对于理解全球变暖与台风趋势性变化有重要指导意义。已有的结果表明，全新世大暖期的暖湿气候没有导致超强台风登陆频数的增加，近千年来各地台风登陆频数与百年尺度气温冷暖波动之间不存在线性正相关关系；相反，在小冰期的冷波动阶段出现台风登陆频数的峰值，究其原因尚需进一步研究。目前对全新世古风暴活动周期性的认识仍然有限，而且时间和空间的分辨率均不高，对全新世热带海洋表层

海水温度趋势性变化的认识和分辨率也有待提高，只有这样才能深入讨论二者之间的耦合关系。近期研究表明不同地区全新世气候变化并非同步^[5]，随着对全新世热带海洋表层海水温度趋势性变化认识的不断深入和分辨率的不断提高^[88-90]，将有助于我们更好地理解不同海区台风发生机制和周期性变化的规律。

强台风发生频数除与气温有关外，可能受其他多种气候因素所制约。其中，强台风登陆频数与 ENSO 的关系密切，La Niña 年登陆台风数明显多于 El Niño 年，这与现代台风观测资料的分析结果是一致的，并且台风活动与 ENSO 的关系可能是长期的、稳定的，这对于预测台风活动有重要意义。另外，一个地区台风登陆频数可能受副热带高压长周期位移的制约，如冷期副热带高压南压，可能导致台风路径偏南，使得南方省市进入台风频发期，而北方相对平静；反之，暖期副热带高压北移，可能导致台风登陆点明显北移。现代气象学研究结果也表明台风路径受副热带高压的影响，但二者之间的长周期关系仍有待进一步研究。

虽然一个地区强台风登陆频数存在明显的周期性变化，但它受多种气候因素所制约。未来全球将继续变暖，而台风的趋势性变化尚没有取得一致性认识，仍需加强全新世古风暴活动的研究。今后古风暴学研究应加强以下几个方面的研究：（ ）风暴活动沉积学、古生物学、沉积有机地球化学代用记录的形成和保存机制；（ ）不同代用记录的对比研究；（ ）注意区分风暴沉积与海啸等其他高能事件沉积；（ ）代用记录与风暴强度之间的对应关系；（ ）代用记录研究与数值模拟相结合；（ ）进行区域性和全球性的古风暴活动对比研究，结合全新世各海区海水表层古水温研究的最新成果，增强台风发生机制与周期性变化的研究。

参考文献

- 1 Fan D D. Variations in tropical cyclone activity and storm-surge devastation since the 1950s in China. Gulf Coast Assoc Geol Soc Trans, 2006, 56: 185—192
- 2 Emanuel K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. Nature, 2005, 436: 686—688[doi]
- 3 Chan J C L. Comment on Changes in tropical cyclone number, duration and intensity in a warming environment. Science, 2006, 311: 1713[doi]

- 4 Goldenberg S B, Landsea C W, Mesta-Nunez A M, et al. The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications. *Science*, 2001, 293: 474—479[[doi](#)]
- 5 IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- 6 Oouchi K, Yoshimura J, Yoshimura H, et al. Tropical cyclone climatology in a global-warming climate as simulated in a 20 km-mesh global atmospheric model: Frequency and wind intensity analysis. *J Meteorol Soc JPN*, 2006, 84: 259—276[[doi](#)]
- 7 Liu K B. Paleotempestology: Principles, methods, and examples from gulf coast lake sediments. In: Murnane R J, Liu K B, eds. *Hurricanes and Typhoons: Past, Present, and Future*. New York: Columbia University Press, 2004. 13—57
- 8 Liu K B. Paleotempestology. In: Elias S, ed. *Encyclopedia of Quaternary Science*. Amsterdam: Elsevier, 2007. 1978—1986
- 9 Nott J. Palaeotempestology: The study of prehistoric tropical cyclones—A review and implications for hazard assessment. *Environ Int*, 2004, 30: 433—447[[doi](#)]
- 10 Liu K B. Paleotempestology: Geographic solutions to hurricane hazard assessment and risk prediction. In: Warf B, Janelle D, Hansen K, eds. *WorldMinds: Geographical Perspectives on 100 Problems*. London: Kluwer Academic Publishers, 2004. 443—448
- 11 Liu K B, Fearn M L. Lake-sediment record of late Holocene hurricane activities from coastal Alabama. *Geology*, 1993, 21: 793—796[[doi](#)]
- 12 Liu K B, Fearn M L. Reconstruction of prehistoric landfall frequencies of catastrophic hurricanes in northwestern Florida from lake sediment records. *Quat Res*, 2000, 54: 238—245[[doi](#)]
- 13 Donnelly J P, Roll S, Wengren M, et al. Sedimentary evidence of intense hurricane strikes from New Jersey. *Geology*, 2001, 29: 615—618[[doi](#)]
- 14 Hayne M, Chappell J. Cyclone frequency during the last 5000 years from Curacoa Island, Queensland. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeocool*, 2001, 168: 201—219
- 15 Nott J, Hayne M. High frequency of super-cyclones along the Great Barrier Reef over the past 5000 years. *Nature*, 2001, 413: 508—512[[doi](#)]
- 16 Hamblin A P, Duke W L, Walker R G. Hummocky-cross stratification: Indicator of storm-dominated shallow-marine environments. *AAPG Bull*, 1979, 63: 460—461
- 17 李平日, 黄光庆, 王为, 等. 珠江口地区风暴潮沉积的研究. 广州: 广东科技出版社, 2002. 153
- 18 Allison M A, Sheremet A, Goñi M A, et al. Storm layer deposition on the Mississippi-Atchafalaya subaqueous delta generated by Hurricane Lili in 2002. *Cont Shelf Res*, 2005, 25: 2213—2232[[doi](#)]
- 19 Fan D D, Xu G D, Shi Z. Past typhoon activities reconstructed from sedimentary record in the Yangtze Delta, China. *AAG 2007 Annual Meeting Abstracts*, 2007. 365
- 20 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. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeocool*, 2004, 210: 89—100[[doi](#)]
- 21 黄光庆, 严维枢. 有孔虫指示的珠江口全新世风暴潮沉积信息. *科学通报*, 1997, 42(4): 423—426
- 22 Collins E S, Scott D B, Gayes P T. Hurricane records on the South Carolina coast: Can they be detected in the sediment record? *Quat Int*, 1999, 56: 15—26[[doi](#)]
- 23 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. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeocool*, 1999, 149: 115—125[[doi](#)]
- 24 Zong Y, Tooley M J. Evidence of mid-Holocene storm-surge deposits from Morecambe Bay, Northwest England: A biostratigraphical approach. *Quat Int*, 1999, 55: 43—50[[doi](#)]
- 25 Scott D B, 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 record. *Geol Soc Am Bull*, 2003, 115: 1027—1039[[doi](#)]
- 26 Liu K B, Lu H Y, Shen C. A 1200-year record of hurricanes and fires from the Gulf of Mexico coast: Testing the hypothesis of hurricane-fire interactions. *Quat Res*, 2008, 69: 29—41[[doi](#)]
- 27 Lu H Y, Liu K B. Phytolith assemblages as indicators of coastal environmental changes and hurricane overwash deposition. *Holocene*, 2005, 15: 965—972[[doi](#)]
- 28 Meyers P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chem Geol*, 1994, 114: 289—302[[doi](#)]
- 29 Lawrence J R, Gedzelman S D. Low stable isotope ratios of tropical cyclone rains. *Geophys Res Lett*, 1996, 23: 527—530[[doi](#)]
- 30 Lawrence J R, Gedzelman S D, Gamache J, et al. Stable isotope ratios: Hurricane Olivia—Stable isotope ratios of precipitation collected at 3 km elevation in Hurricane Olivia (1994). *J Atmos Chem*, 2002, 41: 67—82[[doi](#)]

- 31 Miller D L, Mora C I, Grissino-Mayer H D, et al. Tree-ring isotope records of tropical cyclone activity. *Proc Natl Acad Sci*, 2006, 103: 14294—14297[[doi](#)]
- 32 Mora C I, Miller D L, Grissino-Mayer H D. Tempest in a tree ring: Paleotempestology and the record of past hurricanes. *Sediment Record*, 2006, 4(3): 4—8
- 33 Frappier A B, Carpenter S J, González L A, et al. Stalagmite stable isotope record of recent tropical cyclone events. *Geology*, 2007, 35(2): 111—114[[doi](#)]
- 34 Cohen A. Paleohurricanes day by day: Can we do it? In: *Research Update 2001, Risk Prediction Initiative, Proceedings of a workshop*. Hamilton, Bermuda. 2001
- 35 Hetzinger S, Pfeiffer M, Dullo W C, et al. Caribbean coral tracks Atlantic Multidecadal Oscillation and past hurricane activity. *Geology*, 2008, 36: 11—14[[doi](#)]
- 36 陆人骥. 中国历代灾害性海潮史料. 北京: 海洋出版社, 1984. 295
- 37 Louie K S, Liu K B. Earliest historical records of typhoons in China. *J Hist Geograp*, 2003, 29: 299—316[[doi](#)]
- 38 Davis R A Jr, Knowles S C, Bland M J. Role of hurricanes in the Holocene stratigraphy of estuaries: Examples from the Gulf Coast of Florida. *J Sediment Petrol*, 1989, 59: 1052—1061
- 39 Donnelly J P, Webb T. Backbarrier sedimentary records of intense hurricane landfalls in the northeastern United States. In: Murnane R J, Liu K B, eds. *Hurricanes and Typhoons: Past, Present, and Future*. New York: Columbia University Press, 2004. 58—95
- 40 Donnelly J P, Bryant S S, Butler J, et al. A 700 yr sedimentary record of intense hurricane landfalls in southern New England. *Geol Soc Am Bull*, 2001, 113: 714—727[[doi](#)]
- 41 Donnelly J P, Butler J, Roll S, et al. A backbarrier overwash record of intense storms from Brigantine, New Jersey. *Mar Geol*, 2004, 210: 107—121[[doi](#)]
- 42 刘苍宇, 吴立成, 曹敏. 长江三角洲南部古沙堤(冈身)沉积特征、成因及年代. *海洋学报*, 1985, 7(1): 55—66
- 43 Davis R A Jr, Fitzgerald D M. *Beaches and Coasts*. Malden: Blackwell Publishing, 2004. 419
- 44 Nott J. Intensity of prehistoric tropical cyclones. *J Geophys Res*, 2003, 108(D7): 4212—4223[[doi](#)]
- 45 Harper B. *Strom Tide Threat in Queensland: History, Prediction and Relative Risks*. Technical report 10, Queensland Department of Environment & Heritage, Brisbane, 1998
- 46 Aigner T. Calcareous tempestite: Storm-dominated stratification in upper Muschelkalk limestones. In: Einsele G, Scilacher A, eds. *Cyclic and Event Stratification*. New York: Springer, 1982. 180—198
- 47 孙枢, 李继亮. 我国浊流及其他重力流沉积研究进展概况和发展方向问题刍议. *沉积学报*, 1984, 2(4): 1—5
- 48 Fan D D, Li C X, Archer A W, et al. Temporal distribution of diastems in deposits of an open-coast tidal-flat with high suspended sediment concentrations. *Sediment Geol*, 2002, 152: 173—181[[doi](#)]
- 49 范代读. 潮坪韵律沉积的形成和保存及沉积间断的定量分析. 上海: 同济大学出版社, 2007. 110
- 50 Keen T R, Bentley S J, Vaughan C, et al. The generation and preservation of multiple hurricane beds in the northern Gulf of Mexico. *Mar Geol*, 2004, 210: 79—105[[doi](#)]
- 51 李从先, 李萍. 淤泥质海岸的沉积和砂体. *海洋与湖沼*, 1982, 13(1): 48—59
- 52 任美镔, 张忍顺, 杨巨海, 等. 风暴潮对淤泥质海岸的影响. *海洋地质与第四纪地质*, 1983, 3(4): 1—23
- 53 陈中原. 长江水下三角洲风暴潮沉积. 见: 严钦尚, 主编. *长江三角洲现代沉积研究*. 上海: 华东师范大学出版社, 1987. 246—257
- 54 李炎, 谢钦春. 杭州湾庵东浅滩地貌演变规律. *东海海洋*, 1993, 11(2): 25—33
- 55 许世远. 长江三角洲地区风暴沉积研究. 北京: 科学出版社, 1997. 150
- 56 Wang Z H, Saito Y, Hori K, et al. Yangtze offshore, China: Highly laminated sediments from the transition zone between subaqueous delta and the continental shelf. *Est Coast Shelf Sci*, 2005, 62: 161—168[[doi](#)]
- 57 蔡德陵, Tan F C, Edmond J M. 长江口区有机碳同位素地球化学. *地球化学*, 1992, 3: 305—312
- 58 Andrews J E, Greenaway A M, Dennis P F. Combined carbon isotope and C/N ratios as indicators of source and fate of organic matter in a poorly flushed, tropical estuary: Hunts Bay, Kingston Harbour, Jamaica. *Est, Coast Shelf Sci*, 1998, 46: 743—756[[doi](#)]
- 59 Kao S J, Lin F J, Liu K K. Organic carbon and nitrogen contents and their isotopic compositions in surficial sediments from the East China Sea shelf and the southern Okinawa Trough. *Deep-Sea Res PT II*, 2003, 11: 1203—1217[[doi](#)]
- 60 Goñi M A, Gordon E S, Monacci N M, et al. The effect of Hurricane Lili on the distribution of organic matter along the inner Louisiana shelf (Gulf of Mexico, USA). *Cont Shelf Res*, 2006, 26(17-18): 2260—2280[[doi](#)]
- 61 Malmquist D L. Oxygen isotopes in cave stalagmites as a proxy record of past tropical cyclone activity. In: *Proceedings of the 22nd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*. Fort Collins: American Meteorological Society, 1997. 393—394

- 62 Schwehr K A. Oxygen isotopic variations of soda straw cave deposits from the Yucatan Peninsula: A test of their use as a paleoprecipitation tool. Master Thesis. Houston: University of Houston, 1998
- 63 Ludlam D M. Early American hurricanes, 1492-1870. Boston: American Meteorological Society, 1963
- 64 Millás J C. Hurricanes of the Caribbean and Adjacent Regions, 1492-1800. Miami: Academy of the Arts and Sciences of the Americas, 1968
- 65 Mock C J. Tropical cyclone reconstructions from documentary records: Examples for South Carolina, United State. In: Murnane R J, Liu K B, eds. Hurricanes and Typhoons: Past, Present, and Future. New York: Columbia University Press, 2004. 121—148
- 66 Garcia Herrera R, Rubio F, Wheeler D, et al. The use of Spanish and British documentary sources in the investigation of Atlantic hurricane incidence in historical times. In: Murnane R J, Liu K B, eds. Hurricanes and Typhoons: Past, Present, and Future. New York: Columbia University Press, 2004. 149—176
- 67 王苏民, 刘健, 周静. 我国小冰期盛期的气候环境. 湖泊科学, 2003, 15(4): 369—376
- 68 张德二. 中国三千年气象记录总集. 南京: 凤凰出版社, 2004
- 69 梁有叶, 张德二. 最近一千年来我国的登陆台风及其与 ENSO 的关系. 气候变化研究进展, 2007, 3(2): 120—121
- 70 Lee K, Hsu S I. Typhoon records from ancient chronicles of Guangdong Province. Occasional Paper 98. Hong Kong: Department of Geography, Chinese University of Hong Kong, 1989. 59
- 71 乔盛西, 唐文雅. 广州地区旧志气候史料汇编与研究. 广州: 广东人民出版社, 1993. 722
- 72 袁志伦. 上海水旱灾害. 南京: 河海大学出版社, 1999
- 73 火恩杰, 刘昌森. 上海地区自然灾害史料汇编(公元 751—1949 年). 北京: 地震出版社, 2002
- 74 Chan J C L, Shi J E. Frequency of typhoon landfall over Guangdong Province of China during the period 1470-1931. Int J Climatol, 2000, 20: 183—190[doi]
- 75 Liu K B, Shen C, Louie K S. A 1000-year history of typhoon landfalls in Guangdong, southern China, reconstructed from Chinese historical documentary records. Ann Assoc Am Geograph, 2001, 91: 453—464[doi]
- 76 Donnelly J P, Woodruff J D. Intense hurricane activity over the past 5,000 years controlled by El Niño and the West African monsoon. Nature, 2007, 447: 465—468[doi]
- 77 Scileppi E, Donnelly J P. Sedimentary evidence of hurricane strikes in western Long Island, New York. Geochem Geophys Geosy, 2007, 8, Q06011 [doi]
- 78 Boose E R, Serrano M I, Folser D R. Landscape and regional impacts of hurricane in Puerto Rico. Ecol Monogr, 2004, 74: 335—352[doi]
- 79 Moy C M, Seltzer G O, Rodbell D T, et al. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescale during the Holocene epoch. Nature, 2002, 420: 162—165[doi]
- 80 Bove M C, Elsner J B, Landsea C W, et al. Effect of El Niño on US landfalling hurricanes, revisited. B Am Meteorol Soc, 1998, 79: 2477—2482[doi]
- 81 林惠娟, 张耀存. 影响我国热带气旋活动的气候特征及其与太平洋海温的关系. 热带气象学报, 2004, 20(4): 218—224
- 82 Elsner J B, Liu K B. Examining the ENSO-Typhoon hypothesis. Clim Res, 2003, 25: 43—54[doi]
- 83 Liu K B. Uncovering prehistoric hurricane activity. Am Sci, 2007, 95: 126—133
- 84 Elsner J B, Liu K B, Kocher B L. Spatial variations in major U.S. hurricane activity: Statistics and a physical mechanism. J Clim, 2000, 13: 2293—2305[doi]
- 85 Tappin D R. Sedimentary features of tsunami deposits—Their origin, recognition and discrimination: An introduction. Sediment Geol, 2007, 200: 151—154[doi]
- 86 Morton R A, Gelfenbaum G, Jaffe B E. Physical criteria for distinguishing sandy tsunami and storm deposits using modern examples. Sediment Geol, 2007, 200: 184—207[doi]
- 87 Kortekaas S, Dawson A G. Distinguishing tsunamis and storm deposits: An example from Martinhal, SW Portugal. Sediment Geol, 2007, 200: 208—221[doi]
- 88 Kim J H, Rimbu N, Lorenz S J, et al. North Pacific and North Atlantic sea-surface temperature variability during the Holocene. Quat Sci Rev, 2004, 23: 2141—2154[doi]
- 89 Stott L, Cannariato K G, Thunell R, et al. Decline in surface temperature and salinity in the western tropical Pacific Ocean in Holocene epoch. Nature, 2004, 431: 56—59[doi]
- 90 Lorentz S J, Kim J H, Rimbu N, et al. Orbitally driven insolation forcing on Holocene climate trends: Evidence from alkenone data and climate modeling. Paleoceanography, 2006, 21 [doi]