

丁晓东, 郑立伟, 高树基. 新仙女木事件研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(10): 1095-1109, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2014.10.1095. [Ding Xiaodong, Zheng Liwei, Gao Shuji. A review on the Younger Dryas event[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(10): 1095-1109, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2014.10.1095.]

## 新仙女木事件研究进展\*

丁晓东, 郑立伟, 高树基

(厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室 福建 厦门 361102)

**摘要:**发生在 12.9 ~ 11.6 ka BP 的一次北半球气候快速变冷——新仙女木(YD)事件在过去 30 年来一直是古气候研究的热点。当下由于人类活动引起全球变暖, 研究类似的快速气候变化事件及其触发机制对于预测未来气候变化具有重要意义。然而时至今日, 科学界对 YD 事件的发生时间、气候效应、触发机制及其全球性意义依然存在很大争议。对比多个高分辨率记录探讨了 YD 事件的发生时间及其年代学意义, 详细总结了南、北半球中高纬地区及低纬地区近年来新发现的 YD 事件的记录及其气候效应, 重点讨论了 YD 事件触发机制假说的发展与争议, 并结合 YD 事件的研究现状提出了未来研究热点和重要方向。

**关键词:**快速气候变化; YD 事件; 时间标尺; 气候效应; 触发机制

中图分类号: P532 文献标志码: A 文章编号: 1001-8166(2014)10-1095-15

### 1 引言

新仙女木(Younger Dryas, YD)事件是末次冰期向全新世转换、急剧升温过程中的最后一次非轨道尺度的急剧降温事件。YD 事件的命名源自于 19 世纪晚期 20 世纪初期瑞典和丹麦的孢粉记录中发现的北极苔原植物仙女木(*Dryas Octopetala*)<sup>[1]</sup>。随后 YD 事件被广泛发现于北大西洋周围海相、陆相记录中<sup>[2~4]</sup>, 后来在北太平洋、亚洲、北美、热带地区, 甚至南半球均有发现<sup>[5,6]</sup>。YD 事件中格陵兰冰芯记录的当地的温度迅速降低到接近冰期时的水平(图 1)。在 YD 时期, 北美地区一些大型哺乳动物如猛犸象、巨型短面熊、剑齿虎等灭绝<sup>[7]</sup>, 随后南美地区又有大量哺乳动物灭绝<sup>[7,8]</sup>。与此同时, 北美克洛维斯文化(Clovis, 一种史前古印第安人文化)也在此时消亡<sup>[9,10]</sup>。YD 事件结束后, 地球快速过

渡到温暖的早全新世。由于时间上距离现在较近, 在全球范围内可获得的高分辨率记录较多, YD 事件也是迄今为止全球范围内研究最为详尽的快速气候变化事件。尽管如此, 目前为止科学界对 YD 事件的发生时间、全球性意义以及触发机制依然存在很大争议。研究 YD 事件在全球中的记录, 区域气候和生态环境对 YD 事件的响应及其可能的触发机制不仅促进和深化了科学界对千年尺度的气候突变事件的认识, 在当今大气 CO<sub>2</sub> 浓度急剧增长而导致全球变暖的背景下, 对于预测未来气候变化具有重要意义。

前人已有研究总结了 YD 事件的发生时间、全球记录、区域之间事件细节结构及转型模式以及触发机制<sup>[11~14]</sup>。但这些研究或各有侧重点, 或受限于早期记录的时间标尺和分辨率的影响。近年来, 高分辨率和高精度时标的记录不断涌现, 随着数值模

收稿日期: 2014-07-01; 修回日期: 2014-09-10.

\* 基金项目: 国家自然科学基金重大项目重大研究计划“南海水体硝酸盐动力学与水团示踪”(编号: 91328207); 国家自然科学基金面上项目“中国边缘海沉积物氮同位素时空变化与控制因子”(编号: 41176059)资助.

作者简介: 丁晓东(1988-), 男, 宁夏同心人, 博士研究生, 主要从事快速气候变化、海洋生物地球化学循环研究.

E-mail: dxid@stu.xmu.edu.cn

拟和理论研究的不断深入,又有一些新的触发机制假说被提出,因此本文旨在前人大量研究的基础上,比较不同地区高分辨率记录探讨 YD 事件的发生时间及其年代学意义,详细综述了近年来关于 YD 事件在南、北半球中高纬度、低纬地区海洋和陆地的记录及气候效应的研究,重点讨论了 YD 事件触发机制的争议,并结合 YD 事件的研究现状提出了未来研究热点和重要方向。

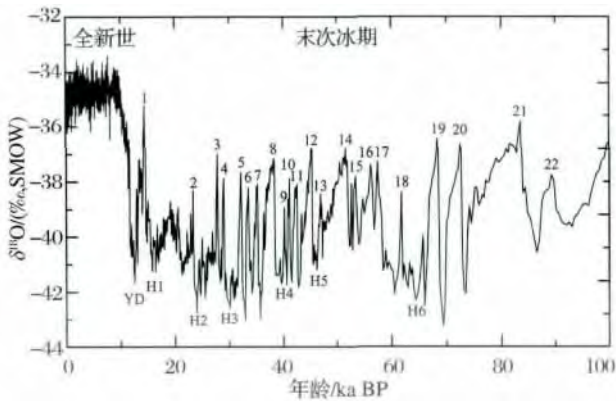


图1 格陵兰冰芯 GISP2 氧同位素记录<sup>[15]</sup>

Fig. 1 Oxygen Isotope record from GISP2 ice core, Greenland<sup>[15]</sup>

YD 表示新仙女木事件;1~22 表示 D/O 旋回;H1~H6 表示 H 事件  
YD: Younger Dryas event; 1~22: D/O events; H1~H6:  
Heinrich events

## 2 YD 事件发生时间

精确的独立定年是研究 YD 事件气候效应及其触发机制的先决条件。可通过同区域多个高分辨率

记录交互检验,不同区域气候系统和生态响应模式的精细对比获得 YD 事件精确的时间标尺。到目前为止,科学界对 YD 事件开始的准确时间尚无定论(图 2)。即使几个格陵兰冰芯 GRIP, GISP2 和 NGRIP 所界定 YD 事件的开始时间也各不相同<sup>[16]</sup>,这可能是由于人为计年的误差造成的。其中 NGRIP 的冰芯分辨率最高,但是其 YD 开始的标志也不明确,氧同位素( $\delta^{18}\text{O}$ )记录的格陵兰岛温度首次下降发生在  $(12\,875 \pm 59)$  a BP,温度下降到最低点时却在  $(12\,662 \pm 74)$  a BP,氢同位素( $\delta\text{D}$ )记录的格陵兰岛降水来源转变发生在  $(12\,847 \pm 3)$  a BP,一年之内即达到最低值<sup>[17]</sup>。此外,德国的火山湖 Meefelder Maar 湖的纹泥记录中,水生和陆生脂类生物标志物单体  $\delta\text{D}$  在 12 850 a BP 开始下降,表示气候变冷,与格陵兰冰芯记录一致,而 170 年之后,水生脂类单体  $\delta\text{D}$  再次显著下降,反映了当地环境变得干旱,Rach 等<sup>[18]</sup>认为这是欧洲西部水文环境对气候变冷的一个迟滞响应。这与 Brauer 等<sup>[19]</sup>先前研究发现当地冬天风暴强度在 12 679 a BP 突然增强一致。石笋记录的亚洲季风的 YD 事件开始于 12 800~12 850 a BP<sup>[20~22]</sup>,但是基于石笋年层记录的东亚季风过渡期较长,约为 380 年,比高纬冰芯记录长 130 年<sup>[23]</sup>。造成冰芯、湖泊沉积物以及石笋里的 YD 事件发生时间的差异可能有:①测年方法的差异和人为计数误差;②不规则沉积所致;③代用指标之间敏感性的差异;④区域环境气候响应的差异。

YD 事件的精确定年不仅具有重要的古气候学意义,对<sup>14</sup>C 年代学研究同样影响深远。大气中的

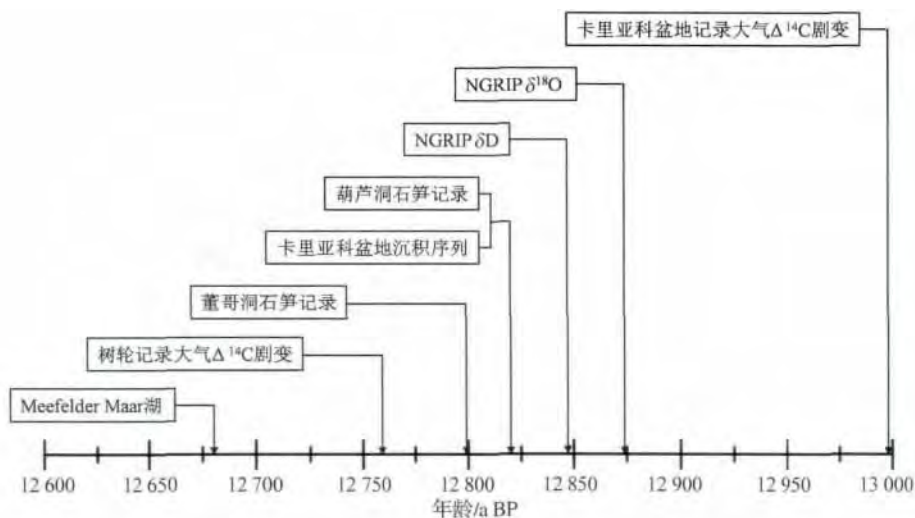


图2 不同记录 YD 事件发生时间比较

Fig. 2 Timing of the onset of the YD according to different records

$^{14}\text{C}$  的浓度 ( $\Delta^{14}\text{C}$ ) 会随着时间发生变化,会影响 $^{14}\text{C}$  测年的精度。如在 YD 事件初期,大气中 $^{14}\text{C}$  的剧烈变化给 $^{14}\text{C}$  定年带来了一定困难。在 YD 事件开始 200 年内,大气  $\Delta^{14}\text{C}$  增加了大约 50‰,其后缓慢下降<sup>[24]</sup>。虽然有人提出大气  $\Delta^{14}\text{C}$  在短时间内如此大的变化,可能是由太阳活动变化引起的<sup>[25,26]</sup>,但是 Hughen 等<sup>[27]</sup> 将卡里亚科盆地中的  $\Delta^{14}\text{C}$  记录与格陵兰冰芯中的大气 $^{10}\text{Be}$  记录比对发现,太阳活动并不能完全解释 YD 期间大气 $^{14}\text{C}$  的剧变,而是由北大西洋深层水的形成减少,部分关闭了表层水中 $^{14}\text{C}$  向海洋底部输送导致的。最近,Hua 等<sup>[28]</sup> 根据澳大利亚南面塔斯马尼亚岛树轮 $^{14}\text{C}$  记录指出这次大气 $^{14}\text{C}$  急剧变化应该发生在 12 760 cal BP,增加了 40‰,比卡里亚科盆地的 $^{14}\text{C}$  记录晚 240 年,并指出卡里亚科盆地和树轮的记录之间如此大的差异是因为在 YD 初期,受北大西洋经向翻转流 (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC) 减弱的影响,大洋的储库年龄发生了变化,此前的研究没有考虑到这一点。2009 年以前的树轮记录的大气 $^{14}\text{C}$  仅到 12.59 ka BP,老于 12.59 ka BP 的大气 $^{14}\text{C}$  记录则依赖于湖泊纹泥中的生物化石、海洋沉积中的有孔虫以及珊瑚<sup>[29]</sup>。但是这些记录计数较为困难,且容易受到储库年龄变化的影响。因此最新的国际 $^{14}\text{C}$  校正曲线 (IntCal13) 将其原来的这一部分海相记录 (12.55 ~ 12.9 ka BP) 去除,取而代之的是最近发现的树轮记录<sup>[28,30,31]</sup>。

### 3 YD 事件在全球的记录及其气候效应

#### 3.1 北半球中高纬地区

在北半球,格陵兰冰芯记录 YD 事件的信息最为丰富,GISP2 冰芯中氧同位素  $\delta^{18}\text{O}$  下降了约 3‰<sup>[15]</sup> (图 3A) 相当于温度下降了  $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[32]</sup>。格陵兰冰雪累积速率下降 40%,冰芯中粉尘、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^+$  离子浓度升高反映了西风增强、海洋风暴加剧<sup>[33]</sup>。Severinghaus 等<sup>[34]</sup> 研究 GISP2 冰芯气泡中氮气的稳定氮同位素 ( $\delta^{15}\text{N}$ ) 记录发现格陵兰岛年平均温度在 YD 期间气温比现在冷约  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而距离 GISP2 冰芯不到 500 km 的格陵兰东部的斯科斯比湾冰川雪线高度 (Equilibrium Line Altitudes, ELA) 记录的当地夏季温度仅比现在低  $4\sim 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[35]</sup>,这是由于季节因素,前者记录的是年平均温度,而 ELA 则记录的是夏季温度。可见 YD 期间格陵兰地区的寒冷气候主要表现在冬季,夏季温度的变化则相对温和,据此推断当地冬季气温在 YD 期间可能比现在冷  $20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[36]</sup>。

欧洲孢粉、湖泊沉积物碳酸钙  $\delta^{18}\text{O}$  以及石笋记录研究显示 YD 期间当地气候干旱,年均气温下降  $4\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[37~39]</sup>,摇蚊记录的夏季气温下降  $2\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[40]</sup>。由于北大西洋海冰扩张引起大气环流改变,西风带南移,冬季风暴增强<sup>[19,41]</sup>。瑞士阿尔卑斯山脉的冰川前进,岩石冰川带较现在低  $500\sim 600\text{ m}$ ,意味着年均气温可能比现在低  $3.5\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[42]</sup>。挪威、瑞典、芬兰等地大量的冰碛石研究表明 Scandinavian 冰川在 YD 期间也发生了冰川前进<sup>[43,44]</sup>。大西洋东北部伊比利亚沿岸海域海洋表层水温 (SST) 下降了  $2\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[45]</sup> (图 3B)。挪威海 SST 下降了约  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[46]</sup>,放射虫记录的夏季 SST 下降了约  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[47]</sup>。加拿大东部圣劳伦斯湾 SST 下降了  $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,融冰淡水流量减少,海冰覆盖面积大幅增加<sup>[48]</sup>。而在美国东南部沿岸 SST 则上升了约  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[49]</sup>,这是由于 AMOC 强度减弱,减少了向北输送的热量。McManus 等<sup>[50]</sup> 研究百慕大沉积物岩心中  $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$  比值的变化,也为 YD 期间 AMOC 减弱提供了直接证据 (图 3C)。

圣巴巴拉海盆沉积物岩芯生物扰动指数有着清晰的 YD 事件的记录,在 YD 期间,生物扰动加剧,反映了大洋深部溶解氧增加<sup>[51]</sup>,可能是生成了就近来源的中层水,而不是在暖期来自南大洋的表层水<sup>[52]</sup>,太平洋东北部 SST 下降  $> 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[53]</sup> (图 3D)。美国太平洋沿岸温度下降  $2\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[54]</sup>,但是气候湿润<sup>[55]</sup>,Kaufman 等<sup>[55]</sup> 认为可能是由于 YD 期间阿留申低压增强伴随着东太平洋冬季风暴轴北移导致冬季降水增加。美国中北部及加拿大地区孢粉、湖泊沉积物  $\delta^{18}\text{O}$  以及土壤  $\delta^{13}\text{C}$  研究表明该地区在 YD 期间气候干旱寒冷<sup>[56~58]</sup>,东北部湖泊沉积物的孢粉及生物标志物  $\delta\text{D}$  记录的年均气温下降了  $4\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[59]</sup>。西南部,啮齿动物粪化石  $\delta^{13}\text{C}$  记录的冬季最低温度下降了约  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[60]</sup>,湖泊沉积物、石笋以及湖泊水位记录表明当地在 YD 期间降雨增加<sup>[61~63]</sup>,这是由于北半球变冷引起极地急流南移,使该地区冬季降水增加<sup>[61]</sup>。北美山脉峡谷冰川和 Laurentide 冰盖南部边缘发生冰川前进<sup>[64,65]</sup>。

非洲北部的气候在 YD 期间较为干冷,非洲西北部沿岸的陆源输入记录显示在 YD 期间降尘增加,表明撒哈拉沙漠更为干旱<sup>[66]</sup>,与当地石笋记录一致,在 YD 期间降雨量显著下降<sup>[38]</sup>。这是由于 AMOC 减弱和北大西洋变冷导致热带辐合带 (Intertropical Convergence Zone, ITCZ) 南移和夏季季风减弱<sup>[67]</sup>。

我国青藏高原古里雅冰芯中清晰地记录着 YD 事件,在 YD 期间,该地区分 3 个阶段向干冷方向发展,最低温时几乎达到末次冰期时的温度,在整个 YD 时段,一直处于冷暖交替变化中<sup>[68]</sup>。沈永平等<sup>[69]</sup>总结了前人研究资料,发现在青藏高原及其周围地区 YD 事件广泛记录于孢粉、黄土、冰碛、冰芯和古湖泊记录中,古里雅冰帽前缘前进,并认为由于青藏高原的巨大面积和高度以及脆弱的冰冻圈结构,对新仙女木事件具有放大作用。周卫健等<sup>[70]</sup>研究沙漠/黄土过渡带的泥炭记录发现 YD 期间东亚季风区具有干冷—湿凉—干冷的气候振荡模式,类似的气候震荡模式在其他研究中也发现<sup>[71-73]</sup>。Wang 等<sup>[74]</sup>根据日本海、东海、南海和苏禄海的区域的 15 个沉积柱状样分析得出 YD 事件在整个西太平洋边缘海有明显记录,冬季 SST 下降 1.5~3.3 °C,表层水盐度升高。李铁刚等<sup>[75]</sup>最近研究黄海北部泥炭层沉积剖面孢粉记录发现在 YD 期间北黄海处于寒冷而湿润的环境。东亚季风区多个石笋记录表明在 YD 期间,东亚夏季季风变弱<sup>[20-22,76]</sup>(图 3E),而广东湖光岩玛珥湖记录表明在 YD 期间东亚冬季季风增强<sup>[77]</sup>,这是由于 ITCZ 南移所致。

### 3.2 低纬地区

1995 年之前,学术界一致认为低纬地区的气候在第四纪冰期旋回中没有明显的变化。然而 1996 年在加勒比海卡里亚科海盆获得的高沉积速率的长序列沉积物岩芯改变了这种认识。由于卡里亚科海盆大部分时期保持缺氧环境,可以很完整地保存年纹沉积序列,生产力的变化可以改变其年纹层的颜色,因此纹层的变化可以代表不同特征气候状态。该序列有着非常清晰的 YD 信号,在 YD 期间,沉积物颜色相比其上、下的暖期颜色突变明显<sup>[78]</sup>,基于 Mg/Ca 比值的 SST 记录下降了 3~4 °C<sup>[79]</sup>(图 3F),这可能是由于 ITCZ 南移导致信风强度和上升流的增加<sup>[78]</sup>,委内瑞拉的湖泊记录显示在 YD 期间气候干冷,冰川显著前进,ELA 较现在低 360~480 m,垂直植被带下降 400~500 m,相当于温度下降 2.2~3.8 °C<sup>[80,81]</sup>。降雨指标表明在 YD 期间,赤道北部降雨减少,南部降雨增加<sup>[82-84]</sup>。由于信风和上升流增强,非洲西南部沿岸 SST 下降 2~3 °C<sup>[85]</sup>。赤道非洲的 YD 记录较为一致,温度下降约 2 °C,气候干旱,降雨突然减少,湖泊水位下降,C<sub>4</sub> 植被增加<sup>[86-91]</sup>。

印度洋地区的 YD 重建记录较少,东部印尼群岛和西部莫桑比克海峡 SST 增加了 0.5~1 °C,盐度

升高,Levi 等<sup>[92]</sup>认为由印度洋向大西洋输送的表层暖水盐分和热量在此期间在赤道大西洋积聚,为后来 AMOC 强度恢复提供了有利条件。石笋记录显示印度夏季季风减弱<sup>[93,94]</sup>。阿拉伯海 SST 增加 0.5~1 °C,可能是受东北季风驱动的对流混合减弱或西南季风驱动的上升流减少所致<sup>[95,96]</sup>,生产力下降<sup>[97,98]</sup>。

赤道太平洋地区 YD 事件记录争议较大,这是由于高分辨率的 YD 记录较少,不同代用指标对气候的响应敏感程度不同,各个研究的定年精度也不尽相同。如 Corrège 等<sup>[99]</sup>研究热带南太平洋 Vanuatu 岛珊瑚 Sr/Ca 比发现当地 YD 期间 SST 较现在低约 4.5 °C,认为这是由南太平洋热带水团向赤道方向挤压,温跃层变浅所致。Asami 等<sup>[100]</sup>研究发现南赤道太平洋中部 SST 在 YD 期间下降约 1.5 °C。东赤道太平洋,Lea 等<sup>[101]</sup>基于 Mg/Ca 比值重建的 SST 在 YD 期间上升了约 2 °C,而基于烯酮类不饱和度 ( $U_{37}^{K'}$ ) 重建的 SST 在 YD 期间下降约 0.5 °C,生产力增加<sup>[102,103]</sup>,Kienast 等<sup>[102]</sup>认为可能是受大洋环流影响,上升流增强。西赤道太平洋,SST 记录在 YD 期间大都都有所升高<sup>[92,103-105]</sup>。东西赤道太平洋之间的温度梯度减小,东赤道太平洋经向温度梯度减小<sup>[106]</sup>,赤道西太平洋盐度增加<sup>[107]</sup>,说明热带太平洋在 YD 期间可能处于持久 El Niño 状态。

### 3.3 南半球中高纬地区

南半球是否也存在 YD 事件,最直接的证据应来自南极冰芯记录,但是早期由于南极冰芯冰层不像格陵兰冰芯那样具有年层特征,受定年精度所限,南极冰芯中并未发现明显的 YD 记录,直到南极冰芯和格陵兰冰芯中的甲烷分析结果均出现后,才使格陵兰冰芯计数年代能够应用于南极冰芯的记录<sup>[108]</sup>。在 YD 期间,南极冰芯中  $\delta^{18}O$  和  $\delta D$  值记录的温度上升<sup>[109-111]</sup>(图 3J)。大气 CO<sub>2</sub> 浓度上升约 20  $\mu L/L$ <sup>[112]</sup>(图 3I)。南大洋初级生产力增加,反映了由于西风带南移而引起上升流增强(图 3H)<sup>[113]</sup>,澳大利亚南部离岸区 SST 增加了约 2 °C<sup>[114]</sup>,新西兰西部塔斯曼海 SST 增加了约 1 °C<sup>[115]</sup>,东部离岸区 SST 增加了约 2 °C<sup>[116]</sup>,智利南部离岸区 SST 增加了约 2 °C<sup>[117]</sup>。大西洋东南部极地浮游有孔虫丰度在 YD 期间显著下降,表明当时为暖期<sup>[118]</sup>,西南部 SST 增加约 1 °C<sup>[49]</sup>。印度尼西亚、新西兰石笋和孢粉记录以及南美洲孢粉记录均显示在 YD 期间为暖期,澳洲—印尼夏季季风和南美夏季季风增强,降雨增加<sup>[119-123]</sup>(图 3G)。与此同时,新西兰地区及南

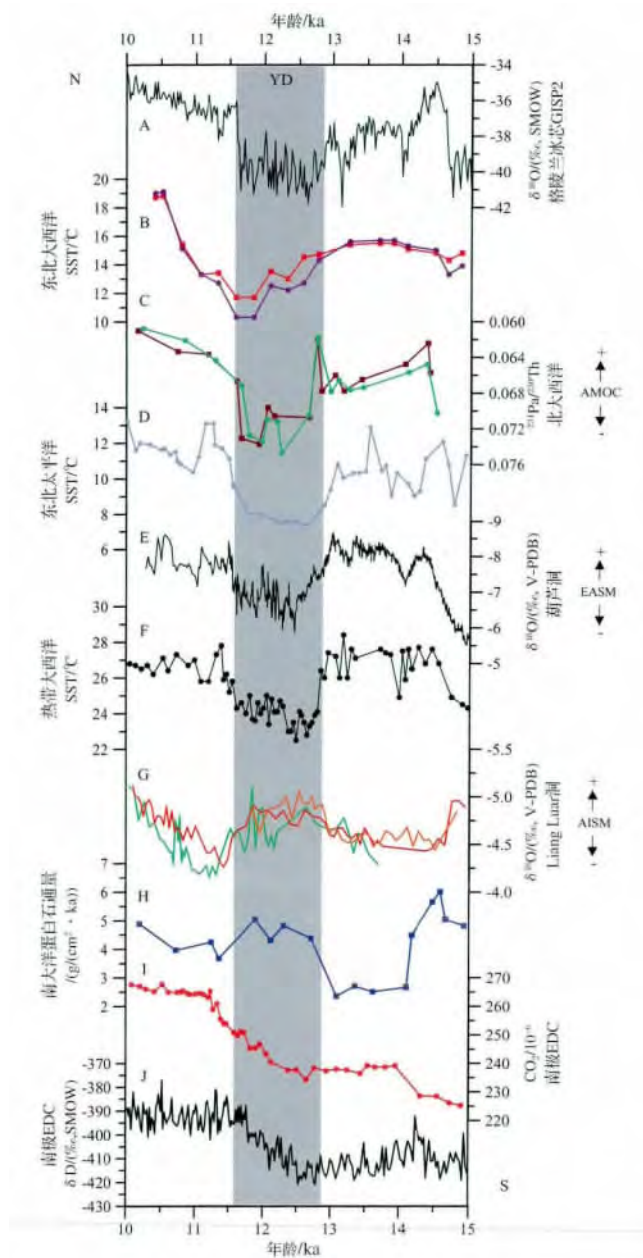


图 3 新仙女木事件全球记录

Fig. 3 Global records of YD event

A. GISP2 氧同位素记录<sup>[15]</sup>; B. 东北大西洋 SST 记录<sup>[45]</sup>; C. 北大西洋 <sup>231</sup>Pa/<sup>230</sup>Th 记录<sup>[50]</sup>; D. 东北太平洋 SST 记录<sup>[53]</sup>; E. 葫芦洞石笋记录<sup>[21]</sup>; F. 热带大西洋 SST 记录<sup>[79]</sup>; G. 印度尼西亚 Liang Luar 洞石笋记录<sup>[122]</sup>; H. 南大洋蛋白石通量<sup>[113]</sup>; I. 南极冰芯 EDC 大气 CO<sub>2</sub> 记录<sup>[112]</sup>; J. 南极冰芯 EDC 氢同位素记录<sup>[110]</sup>

A. Greenland ice core δ<sup>18</sup>O record<sup>[15]</sup>; B. NE Atlantic SST record<sup>[45]</sup>; C. <sup>231</sup>Pa/<sup>230</sup>Th record for the North Atlantic<sup>[50]</sup>; D. NE Pacific SST record<sup>[53]</sup>; E. Speleothem δ<sup>18</sup>O record of Hulu Cave<sup>[21]</sup>; F. Tropical Atlantic SST record<sup>[79]</sup>; G. Speleothem δ<sup>18</sup>O record of Liang Luar Cave, Indonesia<sup>[122]</sup>; H. Southern Ocean opal flux record<sup>[113]</sup>; I. Atmospheric CO<sub>2</sub> record from EDC ice core, Antarctic<sup>[112]</sup>; J. δD record from EDC ice core, Antarctic<sup>[110]</sup>

美洲 Patagonian 发生冰退<sup>[119, 124]</sup>。

相对于北半球的记录而言,热带区域及南半球的记录要少得多,各个记录的分辨率也较低,尽管如此,在已有的研究记录中,可以判断 YD 事件是一次全球性的气候变化事件,对全球的平均温度及水文循环有着重大影响。不仅在格陵兰岛、北大西洋毗邻区域有着清晰的记录,在北太平洋地区、北美洲、非洲、亚洲、热带地区甚至南半球都有着相应的记录。但事件的气候与环境效应因地而异,振荡模式在不同区域也有着不同的表现,事件内部结构和转型模式具有区域差异<sup>[12, 23]</sup>,如亚洲季风记录比格陵兰岛的温度记录转变慢,南半球的记录整体上转变较北半球要慢一些;在北半球范围内,其振幅随着纬度增加而增大,而南半球的记录多与北半球呈反相位<sup>[6]</sup>,这是由两极翘翘板(Bipolar Seesaw)机制所驱动<sup>[118, 125]</sup>,热盐环流变缓,减弱了半球间的热量输送,使北半球冷南半球暖。由于北半球高纬度地区变冷的程度强于南半球高纬度变暖的程度,从而导致全球平均变冷约 0.6 °C,北半球冰川前进,海冰覆盖大幅增加<sup>[6]</sup>,这可能是由于陆地多分布在北半球,海洋则主要在南半球,而陆地对气候变化的响应则更为敏感。

### 4 YD 事件的触发机制讨论

YD 事件是一次全球性的气候突变事件已毋庸置疑,但是对于其触发机制,科学界至今未能找到一个令人满意的答案,关于 YD 事件的触发机制的争议甚至愈演愈烈。Berger<sup>[126]</sup>早在 1990 年在总结前人研究基础上就提出了 3 种可能的触发机制:①气候系统内部的正反馈效应(反照率、CO<sub>2</sub>、大洋环流);②大陆冰盖的崩塌;③气候系统外部驱动(太阳辐射、火山喷发和宇宙尘埃等)。此后,随着数值模拟和理论研究的不断深入,新的触发机制假说不断被提出,目前主要有以下几种观点:

#### 4.1 融冰淡水驱动假说

该假说认为北大西洋地区由于冰川融水排入导致北大西洋深层水(North Atlantic Deep Water, NADW)生成的停止,减缓了 AMOC,从而使得北大西洋地区不能获得通过洋流获得的低纬度热量,最终触发 YD 事件<sup>[127-129]</sup>。但是该理论在冰川融水注入区域及路径在认识上尚未统一(图 4)<sup>[129-131]</sup>。该假说最早认为是北美 Laurentide 冰盖西南部冰缘湖 Agassiz 湖北部湖岸线冰坝崩塌后,产生了新的出口,于是通向密西西比河的出口被废弃了,其排水改

道圣劳伦斯河,大量淡水排入北大西洋触发 YD 事件<sup>[129]</sup>。Broecker 等<sup>[129]</sup>发现密西西比河河口沉积物有孔虫壳体  $\delta^{18}\text{O}$  在 YD 期间增加了 3‰,认为这是由于密西西比河向墨西哥湾输入的淡水减少所致,支持 Agassiz 湖排水改道的假说。但是在该地区的地貌勘察中并未发现洪水留下的古河道地质证据<sup>[132,133]</sup>。此外,Lowell 等<sup>[65]</sup>发现 Agassiz 湖东部出口是在 YD 之后才打开的。密西西比河河口沉积物有孔虫壳体  $\delta^{18}\text{O}$  升高也可能是冰川融水减少造成的而非融水改道<sup>[134]</sup>。Broecker<sup>[133]</sup>也曾提出另外一个可能性来回避这个矛盾,即 Agassiz 湖水可能从冰层之下流入大洋。Tarasov 等<sup>[130,131]</sup>根据模型的结果提出可触发 YD 事件的融冰淡水不是来自 Agassiz 湖,而是来自加拿大 Keewatin 冰穹,融冰淡水流经 Fram 海峡,注入格陵兰—冰岛—挪威海,即北大西洋深层水形成的海域,继而触发 YD 事件。Murton 等<sup>[135]</sup>在加拿大北极沿海平原的 Mackenzie 流域发现了洪水沉积,定年发现其发生在约 12 900 cal BP,认为这是 Agassiz 湖暴发洪水经过西北通道所留下来的。Not 等<sup>[136]</sup>在北冰洋中部 Lomonosov 海岭的沉积物岩芯中发现在 YD 开始时,有大量的来自加拿大的石灰石碎屑,认为这是包括 Agassiz 湖和 Keewatin 冰穹融冰淡水经由北部通道带入北冰洋,进一步支持了这一假说。黄恩清等<sup>[137]</sup>通过对比末次冰消期的气候变冷事件和冰川融水事件,发现二者在变化振幅上是没有可比性的,末次冰消期规模最大的

2 次融冰事件(MWP-1A 和 MWP1-B)并未引起北半球的严寒气候,而 2 个最大的气候冷事件(YD 和 H1 事件)却未见大规模的冰川融水进入大洋,Agassiz 湖规模最大的一次排水事件所引起的 8.2 ka 冷事件其变冷幅度与 YD 事件无法相提并论。这意味着冰川融水与气候之间的关系并不像早前所认为的那样简单。因此冰川融水在 YD 事件中的作用可能需要重新评价。

#### 4.2 彗星撞击假说(Younger Dryas Impact Hypothesis, YDIH)

Firestone 等<sup>[9]</sup>在北美多个地方的地层中发现富勒烯(即  $\text{C}_{60}$ ,一种形似足球的碳分子,被认为是超新星产物)、纳米钻石、金属铌、高温燃烧产生的小颗粒以及格陵兰冰芯中的硝酸盐和氨峰值,定年结果显示这些实物出现的地层(Younger Dryas Boundary, YDB)与 YD 事件开始的时间一致。基于此他们认为,来自外太空的彗星或者陨石曾撞击过地球或者在大气层爆炸,引起大面积森林大火,导致大量大型哺乳动物由于食物匮乏而灭绝,其所释放出来的热量加速了 Laurentide 冰盖的融化,排放大量的淡水到北大西洋,触发了 YD 事件。其后有大量报道发表支持这一假说<sup>[138-141]</sup>。Kennett 等<sup>[138]</sup>在北美多个 YDB 地层中发现大量纳米钻石,一直被视为该假说最有力的证据之一。Bunch 等<sup>[141]</sup>在北美、欧洲以及亚洲大陆 18 个不同的地方 YD 开始时的地层中发现了上述被认为是大爆炸的代用指标,此外还在其中 3 个地方发现了先前没有报道的类似火山渣状的物体(Scoria-like objects)及熔融玻璃(认为是陨石爆炸所产生)。Wittke 等<sup>[140]</sup>估算在 YD 开始时大约有 1 000 万 t 高温产生的小球体分布在约 5 000  $\text{km}^2$  的陆地上,进一步支持该假说。不过该假说提出在科学界也引起了巨大的争议<sup>[142-144]</sup>。其中提出的很多作为大爆炸的证据被质疑,Scott 等<sup>[145]</sup>在美国加利福尼亚州 Channel 岛更新世—全新世地层发现,先前报道的碳质球体(carbonaceous spherules)在整个地层中普遍存在。并质疑所谓的 carbonaceous spherules 可能是真菌菌核,普遍存在于土壤中。而 Surovell 等<sup>[146]</sup>也没有在 YDB 地层中发现先前报道的磁性微球体(magnetic microspherules)。Daulton 等<sup>[147]</sup>在 YD 地层没有发现纳米钻石,认为先前的报道可能误将石墨烯/石墨烷的氧化聚合物当做纳米钻石。Paquay 等<sup>[148]</sup>在 YDB 沉积物中没有发现先前报道的高浓度铌元素。随后,YDB 地层中的其他作为陨石撞击的代用指标也逐渐被否定<sup>[142-144]</sup>。

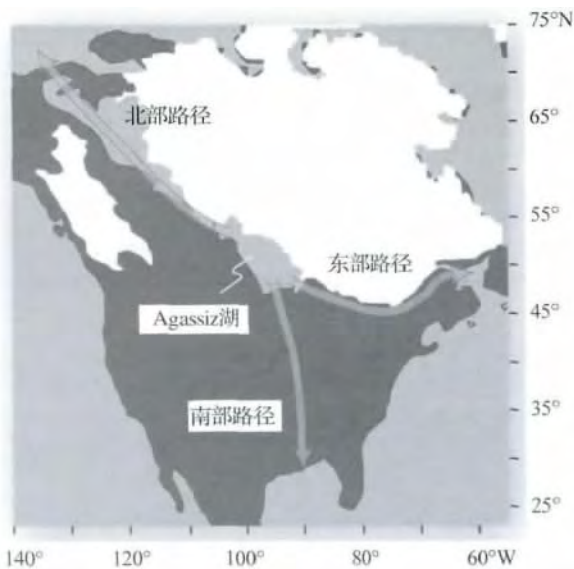


图4 Agassiz 湖水可能的排水通道<sup>[133]</sup>

Fig. 4 Possible drainage pathway of Lake Agassiz<sup>[133]</sup>

van Hoesen 等<sup>[144]</sup>认为该假说成立的最基本 2 个前提是:①发生陨石爆炸;②陨石爆炸引起的大面积森林大火和大型动物突然灭绝。但是目前还没有非常明确的证据表明陨石爆炸发生,而关于大型动物是突然灭绝还是逐渐消亡目前还在争论中,如果是逐渐消亡,则不需要用陨石爆炸来解释。最近,Meltzer 等<sup>[149]</sup>研究该假说的支持者先前报道的分布在北美、南美、欧洲和中东的 29 个 YDB 地层的年代学发现,其中仅有 3 个地方与 YD 事件发生时间一致,其余的则均远早于或晚于 YD 事件发生的时间。最近,Holliday 等<sup>[150]</sup>从地貌学证据、沉积环境、地球化学代用指标、考古学、生态学证据以及年代学控制几个方面综述了近年来 YDIH 的相关研究,认为该假说的理论基础是自相矛盾的,否定了该假说。

#### 4.3 气候自然变化假说

近年来越来越多的人认为 YD 事件或许是自然气候变化的一部分,而非一次独特的气候反转事件<sup>[134, 151-154]</sup>。Bond<sup>[154]</sup>早在 1997 年就将 YD 事件视为冰期延续到全新世的千年尺度准周期气候振荡的一部分。Sima 等<sup>[151]</sup>利用海洋—冰盖模型分析认为,大规模海洋环流自我维持振荡的间断性重启导致 YD 事件的发生,类似 YD 事件可能在之前的冰消期中也会出现,因此 YD 事件并不是末次冰消期的一种特有现象,而是所有冰消期的一个固有特征,根据冰消期持续时间长短,一次冰消期内可能出现多次类 YD 事件。中国神农架石笋记录中发现在倒数第三次冰消期存在一个千年级冷事件,这一事件与 YD 事件的特征具有相似性,说明亚洲季风在末次冰消期类似 YD 事件的快速气候变化也可能在更早的冰期—间冰期转换过程中发生<sup>[152, 153]</sup>。基于此,Broecker 等<sup>[134]</sup>认为在过去 4 次冰消期中,在北半球亚洲季风都存在持续约 6 000 年的弱季风状态,在各冰消期或存在差异,如在第二次和第四次冰消期表现为 1 次长时间的弱季风状态,而在末次和倒数第三次冰消期则分为 2 次较短的弱季风时期。而亚洲季风较弱的同时,北半球气候寒冷,由于两极翘翘板机制,南半球变暖,南大洋释放出大量 CO<sub>2</sub> (图 31) 完成冰期间冰期的转换。

#### 4.4 大气驱动假说

也有不少人认为大气环流的改变可能触发 YD 事件<sup>[19, 155, 156]</sup>,而非其响应结果。Brauer 等<sup>[19]</sup>提出大气环流的改变是欧洲气候突变与 AMOC 重组相互联系的枢纽,他们认为 AMOC 减弱不能完全解释欧洲及格陵兰岛在 YD 期间的降温,而就目前的 YD

记录来看,尚不能区分 AMOC 减弱是北大西洋地区冷事件的驱动力还是其响应结果。北大西洋地区变冷,海冰扩张,引起西风带在冬季加强,盛行纬向环流,并向赤道方向迁移,从而减少了向欧洲的水热输送<sup>[18, 19, 41]</sup>。Eisenman 等<sup>[156]</sup>根据模型结果提出 Laurentide 冰盖消退可引起北大西洋上空风场北移,瞬变涡活动加剧,净降水量增加,导致 AMOC 减弱,引起海冰覆盖面积增加(且具有正反馈效应),继而导致北半球气候变冷(图 5)。



图 5 大气环流驱动假说示意图<sup>[156]</sup>

Fig. 5 Schematic of the atmospheric circulation forcing mechanism<sup>[156]</sup>

#### 4.5 低纬驱动假说

低纬地区是现代气候系统年际变化的重要驱动,也是全球气候中主要的水汽和热量来源<sup>[157]</sup>。在现代年际—年代际全球气候振荡很多是由低纬地区通过 SSTs 变化及热带对流活动所驱动,热带太平洋通过低纬水汽通量变化可能影响到 AMOC 的强弱<sup>[158]</sup>。Clement 等<sup>[159]</sup>基于赤道海—气耦合模式发现过去 500 ka 以来,在特定的轨道尺度下,ENSO 振荡可以突然停止几个世纪,赤道太平洋的 SST 梯度增大,呈 La Niña 相,继而使赤道大西洋淡水输出量减少,AMOC 减弱,从而引起类似 YD 事件的全球性的快速降温。此外,冰消期西太平洋暖池区变暖领先于北半球冰盖消融<sup>[160, 161]</sup>,古生产力演变与大气 CO<sub>2</sub> 浓度之间存在良好的对应性<sup>[162]</sup>,显示了低纬过程在全球气候变化中可能具有调节甚至驱动作用<sup>[107, 163]</sup>。YD 期间,一些低纬记录的变化也非常剧烈,而模型结果表明,AMOC 减弱并不能够完全解释低纬地区如此大的变化<sup>[158]</sup>。因此不能排除低纬过程在 YD 事件中的驱动作用。

#### 4.6 其他假说

YD 事件的触发机制还有一些假说,Renssen 等<sup>[26]</sup>曾提出太阳活动变化也可能是 YD 事件触发机制之一,太阳活动减弱引起大气环流的改变导致两半球中纬度风暴路径及相应的降雨带向赤道方向

移动,从而造成了极地气团的扩张。这些变化可能导致北美和北欧冰盖稳定性减弱,冰山融化加上由于雨带的改变引起从陆地注入海洋的淡水位置的改变,扰动大洋环流从而触发了 YD 事件<sup>[25,26]</sup>。此外, Fairbanks<sup>[164]</sup>认为 YD 事件是末次冰消期 2 次大融冰事件 MWP-1A 和 MPW-1B 之间的海平面回升减缓期。Bard 等<sup>[165]</sup>利用 Tahiti 岛珊瑚礁重建了末次冰消期的海平面变化也支持这一假说。这几种假说前人已有详细讨论<sup>[14,74]</sup>,这里不再赘述。

对比 YD 事件与末次冰期千年尺度气候振荡的相似之处(D/O 振荡和 H 事件,图 1),并联系到全新世北大西洋冷事件<sup>[154,166]</sup>,其更有可能是 Bond<sup>[154]</sup>提出冰期千年尺度的气候振荡延续到冰消期的表现,受 AMOC 强度变化驱动。目前科学界对 YD 事件的触发机制争论不休,也说明了全球气候系统的复杂性,人类对气候系统内部各子系统之间的相互关系与作用还知之甚少。可以说 YD 事件的发生并非是某种单一驱动的结果,如 AMOC 减弱本身不足以解释全球如此大范围的气候剧变。而是各种不同机制(如 AMOC 变化、低纬过程、海冰覆盖以及大气环流的变化)相互作用及反馈所形成的<sup>[19]</sup>,这一问题的完全解决有待新的证据和对地球气候系统内部各个子系统相互关系的进一步认识,将南、北半球、高、低纬度以及全球季风系统作为一个有机整体,从更长时间尺度的气候变化中看待 YD 事件,更有助于科学家们理解 YD 事件的触发机制。

## 5 结语与展望

好莱坞电影《后天》给我们描绘了一个由于气候变化导致人类生存环境急剧恶化的场面,该电影中的场景正是基于 Broecker 提出的大洋传送带是气候突变的触发器这一理论而拍摄的:随着全球不断变暖,极地冰川迅速融化,导致北大西洋深层水的形成停滞,大洋传送带被关闭,导致全球气候突变。虽然电影里的场景未必会真的发生,但是其背后的科学性是不容忽视的。持续燃烧化石燃料,二氧化碳不断积聚在大气中,这会对地球气候系统、生态环境和人类社会产生怎样的影响?这是当前人类社会面临的重大挑战。

YD 事件是离我们最近、记录最多也是研究最多的一次全球大幅度快速气候反转事件。尽管过去 30 年来,科学家们已经对 YD 事件进行了大量研究,但是至今对 YD 事件的发生时间,不同地区的气候效应以及触发机制没有共识。要解决这些问题,以

下几方面的工作将是 YD 事件未来的研究热点和重要方向:

(1) 具有历史观地看待 YD 事件。将 YD 事件置于更长时间尺度的气候变化中来看待。对比探讨 YD 事件与末次冰期千年尺度气候振荡(D/O 旋回和 H 事件)的异同和相互关系,一些记录(石笋、卡里亚科盆地纹泥等)中能同时看到三者的信号,另一些记录中却只有其中 2 种,如格陵兰冰芯、圣巴巴拉海盆记录中只有 YD 事件和 D/O 旋回,而阿拉伯海上流记录只有 YD 和 H 事件的印记。即 YD 事件既表现出与 D/O 旋回、H 事件一致的共性,也有其独有的特征。此外,在更早的冰消期中,有的冰消期如倒数第三次冰消期有类似 YD 的反转事件,而其他的则没有或者说尚未发现,当然这受限于目前已有记录的分辨率,因此有必要在更多的长时间尺度的高分辨率记录中寻找类似 YD 事件是否也存在于其他冰消期之中,以期能够更清楚地了解 YD 事件是气候自然变化的一部分还是仅发生在末次冰消期中的一次反常事件。

(2) NADW 的强度变弱对于 YD 事件以及末次冰期其他千年尺度的气候振荡的重要性不言而喻,但是目前科学界对 YD 期间 NADW 减缓机制还不够明确。其是否由 Agassiz 湖水的一次排水事件或是 Keewatin 冰穹的融冰淡水所致,以及融冰淡水的注入路径尚在争议之中。而根据模型结果提出北大西洋上空的净降水量的改变对 NADW 强度的影响也不容忽视。今后,找出融冰淡水的确切来源和排水路径,以及评估北大西洋降水量的变化对 NADW 强度的影响将成为能否解决 YD 期间 NADW 减缓机制问题的重要研究方向。

(3) 重视低纬度和南半球的研究。低纬地区作为全球热带以外的最主要的水汽、热量来源,也是最大的降水及对流活动中心,其水热状况对全球气候系统及大气环流在短时间尺度上有着重大影响。而越来越多的研究也认识到低纬过程如季风和 EN-SO 不仅仅只是追随高纬度气候变化,也可能调节甚至驱动全球变化<sup>[167]</sup>。在南半球,尤其是南大洋在全球气候系统中也有着举足轻重的地位,作为全球热盐环流的重要组成部分有力地调节着南北半球间的热量平衡。全球气候系统是一个整体,牵一发而动全身<sup>[168]</sup>。从这个意义上说,了解气候系统,应获取更多低纬度、大洋以及南半球的高分辨率记录,探讨两半球之间气候变化的相位关系与相互联系,高、低纬过程及其反馈效应,更清楚地了解低纬地区



以及南半球在 YD 事件中的角色。

(4) 加强 YD 期间数十年及百年尺度气候振荡研究。已有许多研究证实 YD 事件内部气候存在高度不稳定性<sup>[12]</sup>,其百年尺度次级旋回变幅达 YD 事件整体振幅 2/3<sup>[15]</sup>,中低纬大西洋海洋沉积记录显示热带气候存在一系列数十年尺度的快速振荡<sup>[27,78,82]</sup>。最近,高分辨率石笋记录也显示 YD 期间东亚季风存在多个百年尺度的振荡<sup>[20,169]</sup>。但是上述不同记录的演化趋势和振幅存在很大差异,这可能与不同代用指标的气候意义以及区域气候差异有关。观测和地质记录显示,热带大西洋和太平洋水汽循环与亚洲季风在数十年尺度上联系紧密<sup>[22,170]</sup>。而 Liu 等<sup>[169]</sup>研究发现,YD 期间亚洲季风振荡存在 200 年的周期,与格陵兰冰芯的<sup>10</sup>Be 一致,认为这可能和太阳辐射输出及快速大气环流重组有关。目前,科学界对 YD 期间高频度的气候振荡研究还较少,对其驱动机制也知之甚少。研究 YD 事件在数十年及百年尺度的气候振荡及其驱动机制,对于研究现代气候变化具有极其重要的价值。因此,未来还需要获取更多高分辨率地质记录(冰芯、石笋及纹泥等)和建立精确的次级事件的时间标尺,将有助于科学界对数十年及百年尺度气候变变化了解。

(5) 相较于 YD 事件的开始,其结束机制则少有人关注,而事实上,YD 事件结束时表现更为迅速,冰芯记录中的温度上升 5~10 °C,冰雪累积速率翻倍,风暴频率显著减少,夏季时间变长,这些变化在几年至几十年内完成<sup>[33,171]</sup>。Pearce 等<sup>[172]</sup>研究纽芬兰 Placentia 湾沉积物岩芯发现在 YD 结束前,由 AMOC 强度恢复所驱动,拉布拉多寒流影响减弱,墨西哥湾流北移,海冰消融,提出一系列的洋流的变化发生在大气环流的改变之前,触发了 YD—全新世气候转变。可见 AMOC 不仅是 YD 事件发生的重要驱动之一,在 YD 结束向全新世转变的过程中,也扮演着极其重要的角色。冰芯中的粉尘记录变化要早于 δD 记录,意即亚洲沙漠变得湿润先于格陵兰岛升温发生,反映了低纬 ITCZ 对北半球高纬地区气候突变影响深远<sup>[17]</sup>。当然,要充分了解 YD 事件结束的机制还有待于新的证据和模型去验证。

(6) 研究古气候的最终目的是为了理解现在和预测未来。加强对气候系统内部各个子系统(大气—海洋—冰盖—陆地—生物圈)之间的相互作用及反馈的认识,高、低纬并重,从全球尺度上通过多学科、多手段结合地球系统模式探讨类似 YD 事件

的驱动机制及其气候和生态效应,以期能够促进和深化科学界对千年尺度气候突变的理解和认识,更准确地预测未来气候变化的趋势。

总之,作为了解快速气候变化的窗口之一,YD 事件在未来很长一段时间内,依然会吸引着古气候学家们的关注。

#### 参考文献(References):

- [1] Jessen K. Some west Baltic pollen diagrams [J]. *Quartär*, 1938, 1: 124-139.
- [2] Johnsen S, Clausen H B, Dansgaard W, et al. Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core [J]. *Nature*, 1992, 359(6 393): 311-313.
- [3] Dansgaard W, Johnsen S, Clausen H, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record [J]. *Nature*, 1993, 364(6 434): 218-220.
- [4] Bond G, Broecker W, Johnsen S, et al. Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice [J]. *Nature*, 1993, 365(6 442): 143-147.
- [5] Clark P U, Pisias N G, Stocker T F, et al. The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change [J]. *Nature*, 2002, 415(6 874): 863-869.
- [6] Shakun J D, Carlson A E. A global perspective on last glacial maximum to Holocene climate change [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(15): 1 801-1 816.
- [7] Barnosky A D, Koch P L, Feranec R S, et al. Assessing the causes of late Pleistocene extinctions on the continents [J]. *Science*, 2004, 306(5 693): 70-75.
- [8] Fiedel S. Sudden deaths: The chronology of terminal Pleistocene megafaunal extinction [M] // Haynes G, et al, eds. *American Megafaunal Extinctions at the end of the Pleistocene*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2009: 21-37.
- [9] Firestone R B, West A, Kennett J P, et al. Evidence for an extraterrestrial impact 12 900 years ago that contributed to the megafaunal extinctions and the Younger Dryas cooling [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(41): 16 016-16 021.
- [10] Meltzer D J, Holliday V T. Would North American paleoindians have noticed Younger Dryas age climate changes? [J]. *Journal of World Prehistory*, 2010, 23(1): 1-41.
- [11] Carlson A E. The Younger Dryas climate event [M] // Elias S A, et al, eds. *The Encyclopedia of Quaternary Science 3 (2nd)*. Columbia, USA: Elsevier, 2013: 126-134.
- [12] Liu Dianbing. Recent progress on studies of the spatial structure and dynamics for the Younger Dryas event [J]. *Geological Review*, 2012, 58(2): 341-349. [刘殿兵. 新仙女木(YD)事件区域特征及动力机制研究新进展[J]. 地质论评, 2012, 58(2): 341-349.]
- [13] Fiedel S J. The mysterious onset of the Younger Dryas [J]. *Quaternary International*, 2011, 242(2): 262-266.
- [14] Li Chaoliu, Kang Shichang. Progress in studies on the Younger

- Dryas event and its trigger mechanisms [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(4): 568-576. [李潮流, 康世昌. 全球新仙女木事件的恢复及其触发机制研究进展 [J]. 冰川冻土, 2006, 28(4): 568-576.]
- [15] Stuiver M, Grootes P M. GISP2 oxygen isotope ratios [J]. *Quaternary Research* 2000, 53(3): 277-284.
- [16] Southon J. A first step to reconciling the GRIP and GISP2 ice-core chronologies, 0-14,500 yr BP [J]. *Quaternary Research*, 2002, 57(1): 32-37.
- [17] Steffensen J P, Andersen K K, Bigler M *et al.* High-resolution Greenland ice core data show abrupt climate change happens in few years [J]. *Science*, 2008, 321(5889): 680-684.
- [18] Rach O, Brauer A, Wilkes H, *et al.* Delayed hydrological response to Greenland cooling at the onset of the Younger Dryas in western Europe [J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(2): 109-112.
- [19] Brauer A, Haug G H, Dulski P, *et al.* An abrupt wind shift in western Europe at the onset of the Younger Dryas cold period [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(8): 520-523.
- [20] Ma Z, Cheng H, Tan M, *et al.* Timing and structure of the Younger Dryas event in northern China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 41: 83-93.
- [21] Wang Y, Cheng H, Edwards R L, *et al.* A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China [J]. *Science*, 2001, 294(5550): 2345-2348.
- [22] 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 [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233(1): 71-86.
- [23] Liu D, Wang Y, Cheng H, *et al.* A detailed comparison of Asian Monsoon intensity and Greenland temperature during the Allerød and Younger Dryas events [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 272(3): 691-697.
- [24] Hughen K A, Overpeck J T, Lehman S J, *et al.* Deglacial changes in ocean circulation from an extended radiocarbon calibration [J]. *Nature*, 1998, 391(6662): 65-68.
- [25] Goslar T, Arnold M, Tisnerat-Laborde N, *et al.* Variations of Younger Dryas atmospheric radiocarbon explicable without ocean circulation changes [J]. *Nature*, 2000, 403(6772): 877-880.
- [26] Renssen H, Geel B, Plicht J, *et al.* Reduced solar activity as a trigger for the start of the Younger Dryas? [J]. *Quaternary International* 2000, 68: 373-383.
- [27] Hughen K A, Southon J R, Lehman S J, *et al.* Synchronous radiocarbon and climate shifts during the last deglaciation [J]. *Science*, 2000, 290(5498): 1951-1954.
- [28] Hua Q, Barbetti M, Fink D, *et al.* Atmospheric  $^{14}\text{C}$  variations derived from tree rings during the early Younger Dryas [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(25): 2982-2990.
- [29] Reimer P J, Baillie M G, Bard E, *et al.* IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP [J]. 2009.
- [30] Muscheler R, Kromer B, Björck S, *et al.* Tree rings and ice cores reveal  $^{14}\text{C}$  calibration uncertainties during the Younger Dryas [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(4): 263-267.
- [31] Reimer P J, Bard E, Bayliss A, *et al.* IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP [J]. *Radiocarbon*, 2013, 55(4): 1869-1887.
- [32] Cuffey K M, Clow G D. Temperature, accumulation, and ice sheet elevation in central Greenland through the last deglacial transition [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1997, 102(C12): 26383-26396.
- [33] Alley R B. The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(1): 213-226.
- [34] Severinghaus J P, Sowers T, Brook E J, *et al.* Timing of abrupt climate change at the end of the Younger Dryas interval from thermally fractionated gases in polar ice [J]. *Nature*, 1998, 391(6663): 141-146.
- [35] Kelly M A, Lowell T V, Hall B L, *et al.* A  $^{10}\text{Be}$  chronology of lateglacial and Holocene mountain glaciation in the Scoresby Sund region, east Greenland: Implications for seasonality during lateglacial time [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(25): 2273-2282.
- [36] Denton G, Alley R, Comer G, *et al.* The role of seasonality in abrupt climate change [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(10/11): 1159-1182.
- [37] Brauer A, Endres C, Günter C, *et al.* High resolution sediment and vegetation responses to Younger Dryas climate change in varved lake sediments from Meerfelder Maar, Germany [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1999, 18(3): 321-329.
- [38] Genty D, Blamart D, Ghaleb B, *et al.* Timing and dynamics of the last deglaciation from European and North African  $\delta^{13}\text{C}$  stalagmite profiles-comparison with Chinese and South Hemisphere stalagmites [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(17): 2118-2142.
- [39] von Grafenstein U, Erlenkeuser H, Brauer A, *et al.* A mid-European decadal isotope-climate record from 15,500 to 5000 years BP [J]. *Science*, 1999, 284(5420): 1654-1657.
- [40] Heiri O, Cremer H, Engels S *et al.* Lateglacial summer temperatures in the Northwest European lowlands: A chironomid record from Hijkermeer, the Netherlands [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(19): 2420-2437.
- [41] Bakke J, Lie Ø, Heegaard E, *et al.* Rapid oceanic and atmospheric changes during the Younger Dryas cold period [J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(3): 202-205.
- [42] Ivy-Ochs S, Kerschner H, Maisch M, *et al.* Latest Pleistocene and Holocene glacier variations in the European Alps [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(21): 2137-2149.
- [43] Andersen B G, Lundqvist J, Saarnisto M. The Younger Dryas margin of the Scandinavian ice sheet-An introduction [J]. *Quaternary International*, 1995, 28: 145-146.
- [44] Lohne S, Mangerud J, Svendsen J I. Timing of the younger dryas glacial maximum in western Norway [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2012, 27(1): 81-88.
- [45] Bard E. Hydrological impact of Heinrich events in the subtropical

- Northeast Atlantic [J]. *Science*, 2000, 289 (5 483): 1 321-1 324.
- [46] Benway H M, McManus J F, Oppo D W, *et al.* Hydrographic changes in the eastern subpolar North Atlantic during the last deglaciation [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29 (23): 3 336-3 345.
- [47] Dolven J K, Cortese G, Björklund K R. A high-resolution radiolarian-derived paleotemperature record for the Late Pleistocene-Holocene in the Norwegian Sea [J]. *Paleoceanography*, 2002, 17 (4): 24-21-24-13.
- [48] de Vernal A, Hillaire-Marcel C, Bilodeau G. Reduced meltwater outflow from the Laurentide ice margin during the Younger Dryas [J]. *Nature*, 1996, 381: 774-777.
- [49] Carlson A E, Oppo D W, Came R E, *et al.* Subtropical Atlantic salinity variability and Atlantic meridional circulation during the last deglaciation [J]. *Geology*, 2008, 36 (12): 991-994.
- [50] McManus J, Francois R, Gherardi J M, *et al.* Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes [J]. *Nature*, 2004, 428 (6 985): 834-837.
- [51] Behl R J. Sedimentary facies and sedimentology of the late Quaternary Santa Barbara Basin, site 893 [C] // Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 146, Part II. College Station, TX (Ocean Drilling Program), 1995:295-308.
- [52] Kennett J, Ingram B. A 20 000-year record of ocean circulation and climate change from the Santa Barbara Basin [J]. *Nature*, 1995, 377 (6 549): 510-514.
- [53] Barron J A, Heusser L, Herbert T, *et al.* High-resolution climatic evolution of coastal northern California during the past 16 000 years [J]. *Paleoceanography*, 2003, 18 (1), doi: 10. 1029/2002PA000768.
- [54] MacDonald G M, Moser K A, Bloom A M, *et al.* Evidence of temperature depression and hydrological variations in the eastern Sierra Nevada during the Younger Dryas stade [J]. *Quaternary Research*, 2008, 70 (2): 131-140.
- [55] Kaufman D S, Anderson R S, Hu F S, *et al.* Evidence for a variable and wet Younger Dryas in southern Alaska [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29 (11): 1 445-1 452.
- [56] Dorale J, Wozniak L, Bettis E, *et al.* Isotopic evidence for Younger Dryas aridity in the North American midcontinent [J]. *Geology*, 2010, 38 (6): 519-522.
- [57] Shuman B, Bartlein P J, Webb T. The magnitudes of millennial- and orbital-scale climatic change in eastern North America during the Late Quaternary [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24 (20): 2 194-2 206.
- [58] Yu Z, Eicher U. Abrupt climate oscillations during the last deglaciation in central North America [J]. *Science*, 1998, 282 (5 397): 2 235-2 238.
- [59] Hou J, Huang Y, Oswald W W, *et al.* Centennial-scale compound-specific hydrogen isotope record of Pleistocene-Holocene climate transition from southern New England [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34 (19), doi:10. 1029/2007GL030303.
- [60] Cole K L, Arundel S T. Carbon isotopes from fossil packrat pellets and elevational movements of Utah agave plants reveal the Younger Dryas cold period in Grand Canyon, Arizona [J]. *Geology*, 2005, 33 (9): 713-716.
- [61] Asmerom Y, Polyak V J, Burns S J. Variable winter moisture in the southwestern United States linked to rapid glacial climate shifts [J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3 (2): 114-117.
- [62] Benson L, Burdett J, Lund S, *et al.* Nearly synchronous climate change in the Northern Hemisphere during the last glacial termination [J]. *Nature*, 1997, 388 (6 639): 263-265.
- [63] Pigati J S, Bright J E, Shanahan T M, *et al.* Late Pleistocene paleohydrology near the boundary of the Sonoran and Chihuahuan Deserts, southeastern Arizona, USA [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28 (3): 286-300.
- [64] Davis P T, Menounos B, Osborn G. Holocene and latest Pleistocene alpine glacier fluctuations: A global perspective [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28 (21): 2 021-2 033.
- [65] Lowell T V, Fisher T G, Hajdas I, *et al.* Radiocarbon deglaciation chronology of the Thunder Bay, Ontario area and implications for ice sheet retreat patterns [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28 (17): 1 597-1 607.
- [66] deMenocal P, Joseph O, Guilderson T, *et al.* Coherent high- and low-latitude climate variability during the Holocene warm period [J]. *Science*, 2000, 288 (5 474): 2 198-2 202.
- [67] Stouffer R J, Yin J, Gregory J, *et al.* Investigating the causes of the response of the thermohaline circulation to past and future climate changes [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19 (8): 1 365-1 387.
- [68] Yang Zhihong, Yao Tandong, Huang Cuilan, *et al.* Younger Dryas event recorded in Guliya ice core [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42 (18): 1 975-1 978. [杨志红, 姚檀栋, 皇翠兰, 等. 古里雅冰芯中的新仙女木期事件记录 [J]. 科学通报, 1997, 42 (18): 1 975-1 978.]
- [69] Shen Yongping, Liu Guangxiu, Shi Yafeng, *et al.* Climate and environment in the Tibetan Plateau during the Younger Dryas cooling event [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18 (3): 219-227. [沈永平, 刘光秀, 施雅风, 等. 青藏高原新仙女木事件的气候与环境 [J]. 冰川冻土, 1996, 18 (3): 219-227.]
- [70] Zhou Weijian, Li Xiaoqiang, Dong Guangrong, *et al.* High resolution tufy record in desert/loess transition area during Younger Dryas period [J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 26 (2): 118-124. [周卫健, 李小强, 董光荣, 等. 新仙女木期沙漠/黄土过渡带高分辨率泥炭记录 [J]. 中国科学: D 辑, 1996, 26 (2): 118-124.]
- [71] Zhou Jie, Zhou Weijian, Chen Huizhong, *et al.* An evidence of East Asian summer monsoon precipitation in stability during Younger Dryas period [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44 (2): 205-208. [周杰, 周卫健, 陈惠忠, 等. 新仙女木时期东亚夏季风降水不稳定的证据 [J]. 科学通报, 1999, 44 (2): 205-208.]
- [72] Li Sen, Qiang Mingrui, Li Baosheng, *et al.* Rapid climate changes at northwestern margin of East Asian monsoon region during

- the last deglaciation [J]. *Geological Review*, 2004, 50(1): 106–112. [李森, 强明瑞, 李保生 等. 末次冰消期东亚季风区西北缘气候快速变化事件 [J]. 地质论评, 2004, 50(1): 106–112.]
- [73] Zhou W, Head M J, An Z, et al. Terrestrial evidence for a spatial structure of tropical–polar interconnections during the Younger Dryas episode [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 191(3): 231–239.
- [74] Wang P, Bian Y, Li B, et al. The Younger Dryas in the west Pacific marginal seas [J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 39: 522–532.
- [75] Li Tiegang, Chang Fengming, Yu Xinke. Younger Dryas event and formation of peat layers in the northern Yellow Sea [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(1): 321–329. [李铁刚, 常凤鸣, 于心科. Younger Dryas 事件与北黄海泥炭层的形成 [J]. 地学前缘, 2010, 17(1): 321–329.]
- [76] Shen C, Kano A, Hori M, et al. East Asian monsoon evolution and reconciliation of climate records from Japan and Greenland during the last deglaciation [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(23/24): 3 327–3 335.
- [77] Yancheva G, Nowaczyk N R, Mingram J, et al. Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon [J]. *Nature*, 2007, 445(7 123): 74–77.
- [78] Hughen K A, Overpeck J T, Peterson L C, et al. Rapid climate changes in the tropical Atlantic region during the last deglaciation [J]. *Nature*, 1996, 380(7): 51–54.
- [79] Lea D W. Synchronicity of tropical and high-latitude Atlantic temperatures over the last glacial termination [J]. *Science*, 2003, 301(5 638): 1 361–1 364.
- [80] Stansell N D, Abbott M B, Rull V, et al. Abrupt Younger Dryas cooling in the northern tropics recorded in lake sediments from the Venezuelan Andes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 293(1/2): 154–163.
- [81] Rull V, Stansell N D, Montoya E, et al. Palynological signal of the Younger Dryas in the tropical Venezuelan Andes [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(23/24): 3 045–3 056.
- [82] Haug G H, Hughen K A, Sigman D M, et al. Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene [J]. *Science*, 2001, 293(5 533): 1 304–1 308.
- [83] Jaeschke A, Rühlemann C, Arz H, et al. Coupling of millennial-scale changes in sea surface temperature and precipitation off northeastern Brazil with high-latitude climate shifts during the last glacial period [J]. *Paleoceanography*, 2007, 22(4), doi: 10. 1029/2006PA001391.
- [84] Wang X, Auler A S, Edwards R, et al. Millennial-scale precipitation changes in southern Brazil over the past 90 000 years [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(23), doi: 10. 1029/2007GL031149.
- [85] Farmer E C, Demenocal P B, Marchitto T M. Holocene and deglacial ocean temperature variability in the Benguela upwelling region: Implications for low-latitude atmospheric circulation [J]. *Paleoceanography*, 2005, 20(2), doi: 10. 1029/2007GL031149.
- [86] Gasse F. Hydrological changes in the African tropics since the Last Glacial Maximum [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(1): 189–211.
- [87] Powers L A. Large temperature variability in the southern African tropics since the Last Glacial Maximum [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(8), doi: 10. 1029/2004GL022014.
- [88] Tierney J E, Russell J M, Huang Y, et al. Northern hemisphere controls on tropical southeast African climate during the past 60 000 years [J]. *Science*, 2008, 322(5 899): 252–255.
- [89] Castañeda I S, Werner J P, Johnson T C. Wet and arid phases in the southeast African tropics since the Last Glacial Maximum [J]. *Geology*, 2007, 35(9): 823–826.
- [90] Weldeab S, Lea D W, Schneider R R, et al. 155 000 years of West African monsoon and ocean thermal evolution [J]. *Science*, 2007, 316(5 829): 1 303–1 307.
- [91] Schefuß E, Schouten S, Schneider R R. Climatic controls on central African hydrology during the past 20 000 years [J]. *Nature*, 2005, 437(7 061): 1 003–1 006.
- [92] Levi C, Labeyrie L, Bassinot F, et al. Low-latitude hydrological cycle and rapid climate changes during the last deglaciation [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2007, 8(5), doi: 10. 1029/2006GC001514.
- [93] Sinha A, Cannariato K G, Stott L D, et al. Variability of southwest Indian summer monsoon precipitation during the Bølling–Ålverød [J]. *Geology*, 2005, 33(10): 813–816.
- [94] Shakun J D, Burns S J, Fleitmann D, et al. A high-resolution, absolute-dated deglacial speleothem record of Indian Ocean climate from Socotra Island, Yemen [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 259(3/4): 442–456.
- [95] Anand P, Kroon D, Singh A D, et al. Coupled sea surface temperature–seawater  $\delta^{18}\text{O}$  reconstructions in the Arabian Sea at the millennial scale for the last 35 ka [J]. *Paleoceanography*, 2008, 23(4), doi: 10. 1029/2006PA001292.
- [96] Saher M H, Jung S J A, Elderfield H, et al. Sea surface temperatures of the western Arabian Sea during the last deglaciation [J]. *Paleoceanography*, 2007, 22(2), doi: 10. 1029/2006PA001292.
- [97] Altabet M A, Higginson M J, Murray D W. The effect of millennial-scale changes in Arabian Sea denitrification on atmospheric  $\text{CO}_2$  [J]. *Nature*, 2002, 415(6 868): 159–162.
- [98] Schulz H, von Rad U, Erlenkeuser H. Correlation between Arabian Sea and Greenland climate oscillations of the past 110 000 years [J]. *Nature*, 1998, 393(6 680): 54–57.
- [99] Corrège T, Gagan M K, Beck J W, et al. Interdecadal variation in the extent of South Pacific tropical waters during the Younger Dryas event [J]. *Nature*, 2004, 428(6 986): 927–929.
- [100] Asami R, Felis T, Deschamps P, et al. Evidence for tropical South Pacific climate change during the Younger Dryas and the Bølling–Ålverød from geochemical records of fossil Tahiti corals [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 288(1): 96–107.
- [101] Lea D W, Pak D K, Belanger C L, et al. Paleoclimate history

- of Galápagos surface waters over the last 135 000yr[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(11/12): 1 152-1 167.
- [102] Kienast M, Kienast S S, Calvert S E, et al. Eastern Pacific cooling and Atlantic overturning circulation during the last deglaciation[J]. *Nature*, 2006, 443(7 113): 846-849.
- [103] Koutavas A, Sachs J P. Northern timing of deglaciation in the eastern equatorial Pacific from alkenone paleothermometry[J]. *Paleoceanography*, 2008, 23(4) doi:10.2929/2009PA001593.
- [104] Linsley B K, Rosenthal Y, Oppo D W. Holocene evolution of the Indonesian throughflow and the western Pacific warm pool[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(8): 578-583.
- [105] Stott L, Timmermann A, Thunell R. Southern hemisphere and deep-sea warming led deglacial atmospheric CO<sub>2</sub> rise and tropical warming[J]. *Science*, 2007, 318(5 849): 435-438.
- [106] Koutavas A. El Niño-like pattern in ice age Tropical Pacific Sea surface temperature[J]. *Science*, 2002, 297(5 579): 226-230.
- [107] Stott L, Poulsen C, Lund S, et al. Super ENSO and global climate oscillations at millennial time scales[J]. *Science*, 2002, 297(5 579): 222-226.
- [108] Broecker W S. The Great Ocean Conveyor: Discovering the Trigger for Abrupt Climate Change [M]. Princeton/Oxford: Princeton University Press, 2010:40-51.
- [109] Barbante C, Barnola J M, Becagli S, et al. One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica[J]. *Nature*, 2006, 444(7 116): 195-198.
- [110] Jouzel J, Masson-Delmotte V, Cattani O, et al. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800 000 years[J]. *Science*, 2007, 317(5 839): 793-796.
- [111] Monnin E, Indermuhle A, Dallenbach A, et al. Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentrations over the Last Glacial Termination[J]. *Science*, 2001, 291(5 501): 112-114.
- [112] Laurantou A, Lavrič J V, Köhler P, et al. Constraint of the CO<sub>2</sub> rise by new atmospheric carbon isotopic measurements during the last deglaciation[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(2) doi:10.1029/2009GB003545.
- [113] Anderson R F, Ali S, Bradtmiller L I, et al. Wind-Driven Upwelling in the Southern Ocean and the deglacial rise in atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Science*, 2009, 323(5 920): 1 443-1 448.
- [114] Calvo E, Pelejero C, De Deckker P, et al. Antarctic deglacial pattern in a 30 kyr record of sea surface temperature offshore South Australia[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(13) doi:10.1029/2007GL029937.
- [115] Barrows T T, Lehman S J, Fifield L K, et al. Absence of cooling in New Zealand and the adjacent ocean during the Younger Dryas chronozone[J]. *Science*, 2007, 318(5 847): 86-89.
- [116] Pahnke K, Sachs J P. Sea surface temperatures of southern mid-latitudes 0-160 kyr BP[J]. *Paleoceanography*, 2006, 21(2) , doi:10.1029/2005PA001191.
- [117] Lamy F, Kaiser J, Arz H W, et al. Modulation of the bipolar seesaw in the Southeast Pacific during termination 1[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 259(3): 400-413.
- [118] Barker S, Diz P, Vautravers M J, et al. Interhemispheric Atlantic seesaw response during the last deglaciation[J]. *Nature*, 2009, 457(7 233): 1 097-1 102.
- [119] Moreno P, Kaplan M, Francois J, et al. Renewed glacial activity during the Antarctic cold reversal and persistence of cold conditions until 11.5 ka in southwestern Patagonia[J]. *Geology*, 2009, 37(4): 375-378.
- [120] Newnham R M, Lowe D J. Fine-resolution pollen record of late-glacial climate reversal from New Zealand[J]. *Geology*, 2000, 28(8): 759-762.
- [121] Williams P W, King D, Zhao J, et al. Late Pleistocene to Holocene composite speleothem <sup>18</sup>O and <sup>13</sup>C chronologies from South Island, New Zealand-did a global Younger Dryas really exist? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 230(3): 301-317.
- [122] Ayliffe L K, Gagan M K, Zhao J X, et al. Rapid interhemispheric climate links via the Australasian monsoon during the last deglaciation[J]. *Nat Communication*, 2013, 4: 2 908.
- [123] Singer C, Shulmeister J, McLea B. Evidence against a significant Younger Dryas cooling event in New Zealand[J]. *Science*, 1998, 281(5 378): 812-814.
- [124] Kaplan M R, Schaefer J M, Denton G H, et al. Glacier retreat in New Zealand during the Younger Dryas stadial[J]. *Nature*, 2010, 467(7 312): 194-197.
- [125] Broecker W S. Paleocan circulation during the last deglaciation: A bipolar seesaw? [J]. *Paleoceanography*, 1998, 13(2): 119-121.
- [126] Berger W H. The Younger Dryas cold spell-a quest for causes[J]. *Global and Planetary Change*, 1990, 3(3): 219-237.
- [127] Johnson R, McClure B. A model for Northern Hemisphere continental ice sheet variation[J]. *Quaternary Research*, 1976, 6(3): 325-353.
- [128] Rooth C. Hydrology and ocean circulation[J]. *Progress in Oceanography*, 1982, 11(2): 131-149.
- [129] Broecker W S, Kennett J P, Flower B P, et al. Routing of meltwater from the Laurentide Ice Sheet during the Younger Dryas cold episode[J]. *Nature*, 1989, 341: 318-321.
- [130] Tarasov L, Peltier W R. Arctic freshwater forcing of the Younger Dryas cold reversal[J]. *Nature*, 2005, 435(7 042): 662-665.
- [131] Tarasov L, Peltier W. A calibrated deglacial drainage chronology for the North American continent: Evidence of an Arctic trigger for the Younger Dryas [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(7): 659-688.
- [132] Lowell T, Waterson N, Fisher T, et al. Testing the Lake Agassiz meltwater trigger for the Younger Dryas[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2005, 86(40): 365-372.
- [133] Broecker W S. Was the Younger Dryas triggered by a flood? [J]. *Science*, 2006, 312(5 777): 1 146-1 148.
- [134] Broecker W S, Denton G H, Edwards R L, et al. Putting the Younger Dryas cold event into context[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(9/10): 1 078-1 081.
- [135] Murton J B, Bateman M D, Dallimore S R, et al. Identification

- of Younger Dryas outburst flood path from Lake Agassiz to the Arctic Ocean [J]. *Nature*, 2010, 464 (7 289): 740-743.
- [136] Not C, Hillaire-Marcel C. Enhanced sea-ice export from the Arctic during the Younger Dryas [J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 647.
- [137] Huang Enqing, Tian Jun. Melt-Water-Pulse events and abrupt climate change of the last deglaciation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53 (12): 1 437-1 447. [黄恩清, 田军. 末次冰消期冰融水事件与气候突变 [J]. *科学通报*, 2008, 53 (12): 1 437-1 447.]
- [138] Kennett D J, Kennett J, West A, et al. Nanodiamonds in the Younger Dryas boundary sediment layer [J]. *Science*, 2009, 323 (5 910): 94-94.
- [139] Kurbatov A V, Mayewski P A, Steffensen J P, et al. Discovery of a nanodiamond-rich layer in the Greenland ice sheet [J]. *Journal of Glaciology*, 2010, 56 (199): 747-757.
- [140] Wittke J H, Weaver J C, Bunch T E, et al. Evidence for deposition of 10 million tonnes of impact spherules across four continents 12 800 y ago [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110 (23): E2088-E2097.
- [141] Bunch T E, Hermes R E, Moore A M, et al. Very high-temperature impact melt products as evidence for cosmic airbursts and impacts 12 900 years ago [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109 (28): E1903-E1912.
- [142] Pinter N, Scott A C, Daulton T L, et al. The Younger Dryas impact hypothesis: A requiem [J]. *Earth-Science Reviews*, 2011, 106 (3/4): 247-264.
- [143] Boslough M, Nicoll K, Holliday V, et al. Arguments and evidence against a Younger Dryas impact event [J]. *Geophysical Monograph Series*, 2012, 198: 13-26.
- [144] van Hoesen A, Hoek W Z, Pennock G M, et al. The Younger Dryas impact hypothesis: A critical review [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 83: 95-114.
- [145] Scott A C, Pinter N, Collinson M E, et al. Fungus, not comet or catastrophe, accounts for carbonaceous spherules in the Younger Dryas "impact layer" [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37 (14) doi:10.1029/2010GL043345.
- [146] Surovell T A, Holliday V T, Gingerich J A, et al. An independent evaluation of the Younger Dryas extraterrestrial impact hypothesis [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106 (43): 18 155-18 158.
- [147] Daulton T L, Pinter N, Scott A C. No evidence of nanodiamonds in Younger-Dryas sediments to support an impact event [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107 (37): 16 043-16 047.
- [148] Paquay F S, Goderis S, Ravizza G, et al. Absence of geochemical evidence for an impact event at the Bølling-Allerød/Younger Dryas transition [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106 (51): 21 505-21 510.
- [149] Meltzer D J, Holliday V T, Cannon M D, et al. Chronological evidence fails to support claim of an isochronous widespread layer of cosmic impact indicators dated to 12 800 years ago [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014 doi:10.1073/pnas.1401150111
- [150] Holliday V T, Surovell T, Meltzer D J, et al. The Younger Dryas impact hypothesis: A cosmic catastrophe [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2014, 29 (6): 515-530.
- [151] Sima A, Paul A, Schulz M. The Younger Dryas—an intrinsic feature of late Pleistocene climate change at millennial timescales [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 222 (3/4): 741-750.
- [152] Cheng H, Edwards R L, Broecker W S, et al. Ice age terminations [J]. *Science*, 2009, 326 (5 950): 248-252.
- [153] Chen S, Wang Y, Kong X, et al. A possible Younger Dryas-type event during Asian monsoonal Termination 3 [J]. *Science in China (Series D)*, 2006, 49 (9): 982-990.
- [154] Bond G. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates [J]. *Science*, 1997, 278 (5 341): 1 257-1 266.
- [155] Wunsch C. Abrupt climate change: An alternative view [J]. *Quaternary Research*, 2006, 65 (2): 191-203.
- [156] Eisenman I, Bitz C M, Tziperman E. Rain driven by receding ice sheets as a cause of past climate change [J]. *Paleoceanography*, 2009, 24 (4) doi:10.1029/2009PA001778.
- [157] Clement A C, Peterson L C. Mechanisms of abrupt climate change of the last glacial period [J]. *Reviews of Geophysics*, 2008, 46 (4) doi:10.1029/2006RG000204.
- [158] Seager R, Battisti D S. Challenges to our understanding of the general circulation: Abrupt climate change [M]//Loreanz E N, et al, eds. *The Global Circulation of the Atmosphere*. USA: Princeton University Press, 2007: 331-371.
- [159] Clement A C, Cane M A, Seager R. An orbitally driven tropical source for abrupt climate change [J]. *Journal of Climate*, 2001, 14 (11) doi:10.1175/1570-0442(2001)7014.
- [160] Rosenthal Y. The amplitude and phasing of climate change during the last deglaciation in the Sulu Sea, western equatorial Pacific [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30 (8) doi:10.1029/2002GL016612.
- [161] Lea D W. Climate impact of Late Quaternary Equatorial Pacific Sea surface temperature variations [J]. *Science*, 2000, 289 (5 485): 1 719-1 724.
- [162] Beaufort L, de Garidel-Thoron T, Mix A C, et al. ENSO-like forcing on oceanic primary production during the Late Pleistocene [J]. *Science*, 2001, 293 (5 539): 2 440-2 444.
- [163] Lea D W. The glacial tropical Pacific—not just a west side story [J]. *Science*, 2002, 297 (5 579): 202-203.
- [164] Fairbanks R G. A 17 000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation [J]. *Nature*, 1989, 342 (6 250): 637-642.
- [165] Bard E, Hamelin B, Delanghe-Sabatier D. Deglacial meltwater pulse 1B and Younger Dryas sea levels revisited with boreholes at Tahiti [J]. *Science*, 2010, 327 (5 970): 1 235-1237.
- [166] Bond G C, Showers W, Elliot M, et al. The North Atlantic's 1-

- 2 kyr climate rhythm: Relation to Heinrich events , Dansgaard/Oeschger cycles and the little ice age [J]. *Geophysical Monograph Series* , 1999 , 112 : 35-58.
- [167] Chang Fengming , Li Tiegang. Progress in the Paleoclimatology of the Western Pacific warm pool: A review [J]. *Advances in Earth Science* , 2013 , 28 (8) : 847-858. [常凤鸣, 李铁刚. 西太平洋暖池区古海洋学研究 [J]. 地球科学进展, 2013 , 28 (8) : 847-858. ]
- [168] Ma Hao , Wang Zhaomin , Shi Jiuxin. The role of the southern Ocean physical processes in global climate system [J]. *Advances in Earth Science* 2012 27(4) : 398-412. [马浩, 王召民, 史久新. 南大洋物理过程在全球气候系统中的作用 [J]. 地球科学进展, 2012 , 27 (4) : 398-412. ]
- [169] Liu D , Wang Y , Cheng H , *et al.* Centennial-scale Asian monsoon variability during the mid-Younger Dryas from Qingtian Cave , central China [J]. *Quaternary Research* , 2013 , 80 (2) : 199-206.
- [170] Latif M. Tropical Pacific/Atlantic Ocean interactions at multi-decadal time scales [J]. *Geophysical Research Letters* , 2001 , 28 (3) : 539-542.
- [171] Mayewski P A , Sneed S B , Birkel S D , *et al.* Holocene warming marked by abrupt onset of longer summers and reduced storm frequency around Greenland [J]. *Journal of Quaternary Science* , 2014 , 29 (1) : 99-104.
- [172] Pearce C , Seidenkrantz M S , Kuijpers A , *et al.* Ocean lead at the termination of the Younger Dryas cold spell [J]. *Nature Communication* , 2013 , 4 : 1 664.

## A Review on the Younger Dryas Event

Ding Xiaodong , Zheng Liwei , Gao Shuji

(State Key Laboratory of Marine Environmental Science , Xiamen University , Xiamen 361102 , China)

**Abstract:** The Younger Dryas (YD) event which lasted from 12.9 ~ 11.6 ka BP is a rapid return to near-glacial conditions with a major impact on global climate that punctuated last glacial-Holocene transition period. The YD event was firstly found in records of mid-high latitude Northern Europe and North Atlantic vicinities and later identified broadly in North Pacific Oceans , Asia , North America , tropics and even in South Hemisphere. The mechanism of YD event is not clear although tremendous efforts have been paid over the past 30 years. Even the precise timing , duration and global impact remain ambiguous. The understanding of the magnitude of YD-like event in temporal and spatial scales and its forcing mechanism may help us to forecast the possible environmental and ecological impacts in global scale due to anthropogenic forcing. This article reviewed the progress of studies on the YD event , including the most recent dating of the onset and geographic pattern of climatic impacts , and particularly the triggering mechanisms proposed in recent years. The disparities of precise dates among records for the YD onset may result from counting mistakes , regional environmental responses and rapid fluctuation of atmospheric  $^{14}\text{C}$ . Globally , the YD event was characterized by abrupt climate change with increasing anomalies in magnitude toward the poles and opposite signs between Hemispheres , which modulated by bipolar seesaw mechanism. It is generally accepted that the YD event is caused by a slowdown Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC). However , the triggering mechanism of this slowdown is debatable. Besides the earliest hypothesis of Lake Agassiz outburst , alternative mechanisms such as meltwater discharge into Arctic Ocean , extraterrestrial impact or atmospheric circulation forcing have been proposed under various supportive evidences. Tropical process was suggested to play an additional role in abrupt climate change , of which high latitude was thought to be the modulator. The newest hypothesis suggested that YD event was an integral part of natural climate oscillation rather than a freak excursion. Finally , future directions to have a complete understanding of the mechanisms of YD event are provided.

**Key words:** Abrupt climate change; Younger Dryas; Dating; Climatic effects; Triggering mechanism.