

全新世千百年尺度气候波动机制

何文雨^{1, 2)}, 旺罗¹⁾

1) 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京, 100029;

2) 中国科学院大学, 北京, 100049



内容提要:全新世(11.7 ka BP)作为最年轻的地质年代,其气候变化相对晚更新世冰期稳定,但仍存在千百年尺度的气候波动。造成这些气候波动的可能有多种原因,但至今还没有统一的认识。这一时期的气候变化与人类发展有密切的关系,因此其短尺度的气候变化越来越受到学界的关注,已经开展了大量的研究。通过对文献资料分析,综述了全新世千百年尺度的气候突变的原因。全新世早期温度普遍升高主要与太阳活动变化有关,期间冰盖消融与海洋环流作用引起百年尺度的气候事件。全新世中期气温最高,但也发现多次干冷气候事件,主要为冰川活动导致。全新世晚期温度降低,主要是以火山活动导致的气候变冷。其他因素如地球轨道参数、潮汐作用、冰川作用、海洋环流等在全新世各个时期对气候造成影响。

关键词:全新世;气候突变;驱动机制;千百年尺度

近年来,随着气候突发事件发生的频率的增加,人们开始对未来气候变化越来越关注。全新世(11.7 ka BP)又称冰后期,是距离人类最近的地质年代。人类社会文明的一切发生、发展、繁荣、进步都出现在此时期,全新世的气候变化与人类社会的发展有密切的关系。所以全新世的千百年尺度的气候波动不仅为评估未来气候变化的发展趋势,以及揭示气候变化和人类生存与发展以及适应具有非常重要的科学价值。

20世纪70年代前,人们普遍认为全新世的气候比较稳定(Denton and Karlén, 1973; Dansgaard and Johnsen, 1993)。但后期研究发现,全新世气候的主要特征为渐变和突变(Mayewski et al., 2004),即使是被称为全新世最适宜期的全新世大暖期(施雅风等, 1993)也存在多次干冷性气候突变事件。实际上早在70年代初,就有学者根据中国历史纪录(竺可桢, 1972)和北半球高纬度地区冰川活动(Denton and Karlén, 1973)提出全新世气候不稳定的观点,但直到Bond等将北大西洋中发现的千年尺度冰筏事件与太阳活动联系起来(Bond et al., 1997),学术界才开始重视全新世气候突变。

根据冰川进退、植物花粉、湖泊沉积等多种代用记录重建结果发现,全新世存在明显的一系列千百年

尺度的气候波动(Bond et al., 1997; Bond et al., 2001; Wanner et al., 2008; 方修琦和侯光良, 2011; Marcott et al., 2013)。例如,北大西洋海洋沉积物记录的8次冷事件(Bond et al., 1997)。王绍武和董光荣(2002)通过对冰芯、冰川雪线、黄土、花粉及考古史料等综合分析,发现中国在11~1 ka BP也出现过多次冷事件。

目前对全新世千百年尺度的气候波动的原因机制尚不明确,存在各种假设猜想。已经提出了各种驱动力来解释全新世全球和区域的千百年尺度的气候异常(Liu Zhengyu et al., 2014a, 2014b)。如太阳辐照度变化(Bond et al., 1997; Bond et al., 2001)、月球潮汐周期(Keeling and Whorf, 2000)和海洋内部振荡(Denton and Broecker, 2008)。全新世气候波动产生原因可分为地球外部因素和地球内部因素。

1 外部因素

天文因子是气候变化的外部原因,主要从3个方面影响地球气候:太阳活动、地球轨道和潮汐因素。

1.1 太阳活动

作为一颗活跃的恒星,太阳所产生的能量一直是地球气候系统的主要驱动因素(洪业汤等,

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:4227011679)的成果。

收稿日期:2023-02-24;改回日期:2023-05-27;网络首发:2023-08-20;责任编辑:李明,章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2023.08.022

作者简介:何文雨,女,1999年生,博士研究生,主要从事末次冰消期以来气候和生物多样性研究;Email: hewenyu@mail.iggcas.ac.cn。

1998)。

1.1.1 古气候记录

Bond 等(2001)将在北大西洋冰筏沉积记录中发现的突变周期与太阳活动相联系,发现它们之间具有很高的相关性(0.44~0.56)。而在其他古气候记录中,同样发现与太阳活动周期相近的气候波动,如中国东北部金川泥炭纤维的 $\delta^{18}\text{O}$ 中记录下来 80~162 a 和 249 a 的气候波动(洪业汤等,1998);维也纳盆地沉积物中记录了 80 a、120 a、208 a、500 a、1000 a、1500 a 和 2300 a 的气候波动周期(Kern et al., 2012);早全新世期间地中海西部的花粉记录反映出约 900 a 周期的气候波动(Büntgen et al., 2016);东亚地区花粉记录中发现 500 a 周期的气候波动(Xu Deke et al., 2014)。这些不同尺度的气候变化与太阳活动周期密切相关,因此许多学者推测这些气候波动是太阳活动导致,但其影响机制尚不明确(Shindell et al., 2001)。

1.1.2 影响机制

目前主要存在 3 种机制解释太阳活动如何地球气候的影响(Engelsvan, 2012),一种为太阳总辐照度直接影响地球能量平衡导致气候波动,一种太阳紫外线辐照度变化会影响气候,第三种为宇宙射线引起的云量变化引起地球气候变化。

1.1.2.1 太阳总辐照度直接影响

太阳活动的变化直接影响地球的能量平衡(Engelsvan, 2012)。过去几十年里,在大气层顶部测定的 11 a 周期的太阳活动导致的辐照度变化为 1 W/m^2 ,导致的全球平均温度变化约为 0.07°C (Gray et al., 2010)。通过分析宇宙成因同位素的浓度,例如极地冰核中的铍(^{10}Be)和树木年轮中的碳(^{14}C),以及过去 400 a 太阳黑子的报告数量(Crowley 2000; Gray et al., 2010; Usoskin, 2017),近似地重建和确定过去的太阳总辐照度(图 1)(Steinhilber et al., 2009)。但有学者提出百年尺度的太阳总辐照度变化非常小(谭明等, 2006; Shapiro et al., 2011),这种变化足以引起气候波动吗?

有学者提出一种“自上而下”机制放大了太阳总辐照度的小变化(Nesje et al., 2004; Engelsvan, 2012)。主要因为海洋对太阳热量的吸收,特别是在太阳总辐照度增加时,海洋吸收因为吸收太阳的热量提高导致蒸发量增加,导致降水增加(Cubasch et al., 2006; Gray et al., 2010; Engelsvan, 2012)。而降水的增加则会进一步引起信风增强、赤道太平洋深水流上涌增加,进而引起海平面温度降低,与更

强烈的哈德环流一致(Meehl et al., 2004; Gray et al., 2010; Engelsvan, 2012)。而强烈的大气环流增加副热带地区的下沉,使云层减少,地球表面对太阳辐照度的吸收增加(Meehl et al., 2004; Gray et al., 2010; Engelsvan, 2012)。

1.1.2.2 太阳紫外线辐照度变化

太阳辐射的紫外线部分具有很大的变化(Gray et al., 2010)。当紫外线增加时,增加地球平流层臭氧的含量,导致平流层风的变化和吸收的太阳能量的增加,从而使平流层加热(Haigh, 1996)。而平流层的温度变化会影响到对流层的温度和风的变化(Lockwood et al., 2010)。有大气模型模拟表明,在一个太阳周期的最大值时,紫外线辐射增加 1%,就会使平流层中的臭氧浓度增加 1%~2%(Engelsvan, 2012)。Haigh 通过模拟发现,当平流层中臭氧增加,哈德利环流的纬度范围会扩大,同时中纬度风暴轨道也向极地迁移(Haigh, 1996)。这将导致中纬度地区变暖,区域降水减少,热带地区变湿。

1.1.2.3 宇宙射线引起的云量变化

云层通过改变地球的反照率和加强温室效应对地球气候造成影响(Lockwood, 2012)。Svensmark 等调查了宇宙射线通量和云层形成的影响,发现太阳活动和云层覆盖之间存在着强烈的关联(Svensmark and Friis-Christensen, 1997)。在宇宙射线通量低的时候,低层大气(3 km 以下)的云层含有较少的液态水(Svensmark et al., 2009)。此外,气溶胶的相对丰度(有可能演变成云的凝结核)在这些时期也会减少,这就为太阳活动和云的形成提供了一个因果机制,从而影响大气活动。而 Kirkby 等(2011)实验结果表明,宇宙射线确实对大气有影响,因为高能质子会增加纳米级粒子的产生。然而,云的形成和宇宙射线之间的联系还远未牢固确立,且云对气候变化的影响非常复杂,还需要进一步研究。

除了太阳活动变化导致气候波动以外,地球所接受的太阳总辐射量变化也会导致气候波动,这种情况则与地球轨道变化相关。

1.2 地球轨道变化

太阳辐射作为地球表面主要热量来源,除自身活动影响辐射强度,地球的轨道几何形状通过调节入射太阳辐射的变化对气候产生深远的影响(Thirumalai et al., 2020)。这种对气候的影响机制被称为轨道强迫理论,也被称为米兰科维奇轨道强迫理论。

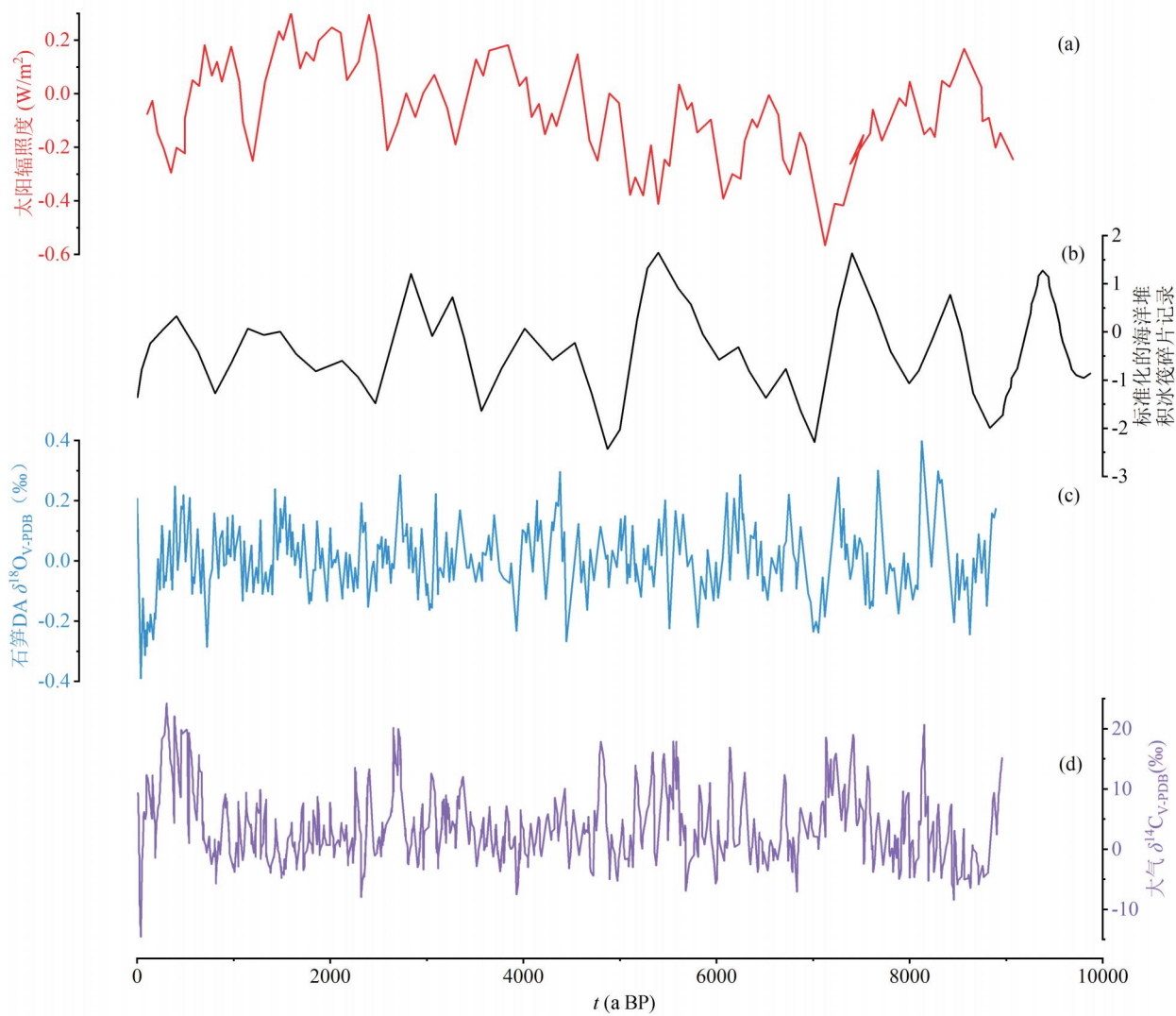


图 1 过去 9000 a 太阳活动变化重建: (a) 过去 9000 a 太阳总辐照强度变化(Steinhilber et al. , 2009); (b) 标准化的海洋堆积冰筏碎片(IRD)记录(Wanner et al. , 2011); (c) 石笋 DA $\delta^{18}\text{O}$ 记录(Wang Yongjin et al. , 2005); (d) 大气中的 $\delta^{14}\text{C}$ 记录(Wang Yongjin et al. , 2005)。较高的太阳辐照度(较小的 $\delta^{14}\text{C}$)对应于较强的亚洲季风活动(较小的 DA $\delta^{18}\text{O}$ 值)(Wang Yongjin et al. , 2005)

Fig. 1 Reconstruction of solar activity changes over the past 9000 a. (a) variation in total solar irradiance intensity over the past 9000 a (Steinhilber et al. , 2009); (b) standardized oceanic accumulation of ice raft debris (IRD) records(Wanner et al. , 2011); (c) time series of Stalagmite DA $\delta^{18}\text{O}$ records (Wang Yongjin et al. , 2005); (d) time series of atmospheric $\delta^{14}\text{C}$ records. Higher solar irradiance (smaller $\delta^{14}\text{C}$) corresponds to stronger Asian monsoon activity (smaller DA $\delta^{18}\text{O}$ values) (Wang Yongjin et al. , 2005)

1.2.1 地球轨道周期

20 世纪 30 年代,米兰科维奇提出地球轨道对地球气候的影响(杨志根, 2001),从轨道偏心率、地轴倾斜度和岁差三个角度解释了地球轨道尺度的气候波动。

1.2.2 影响机制

但地球轨道变化尺度至少从万年起步,如何造

成千百年尺度的气候波动还存在很大的讨论空间。但研究发现,地球轨道也存在千年尺度的周期变化。如汪品先等(2018)提出 1/4 岁差周期,但在全新世的地质记录中还未明确发现。现在主要观点为地球轨道变化调剂太阳辐射量的时空分配,驱动气候变化,如冰雪覆盖率变化,地表反照率变化,大气水汽含量、海洋环流、大气中 CO_2 浓度等一系列变化

(Berger, 1988; 石正国等, 2020)。

全新世期间,北半球除劳伦泰冰盖影响外的地区,其气候变化主要受轨道强迫影响(Renssen et al., 2009)。11.7~7 ka BP,北半球的夏季日照多,但因为冰盖作用的影响,气候温和凉爽(Renssen et al., 2009)。7~4.2 ka BP,这一时期北半球中高纬度地区夏季温度较高(Alverson, 2003),季风活动相对全新世早期减弱(Wanner et al., 2008)。4.2 ka BP以后,北半球夏季日照减少,温度下降,气候转冷(George et al., 1973)。

除日照强度的变化直接影响温度变化外,模拟实验还发现大气—海洋—海冰之间的相互作用在轨道强迫中发挥了巨大作用(Zhang Xu et al., 2021)。北半球低纬度地区的夏季日照强度变化触发北大西洋径向翻转环流的突变,引起北大西洋低纬度地区的水汽循环变化(Notaro et al., 2008)。北半球高纬度地区对太阳辐射变化敏感(Zhang Xu et al., 2021),在大气—海洋—海冰的相互作用下,导致了千年尺度的气候波动(Sun Youbin et al., 2021)。而在南半球,春季日照减少时,南大洋的调节作用会导致大陆气候存在滞后效应,引起千年尺度的夏季降温(Ferris et al., 2011)。

轨道强迫现在只能通过太阳辐射变化解释机制,而更加细节的其他演化还需要进一步研究。其主要通过小波分析反映出相关性强度,且不同指标物受到多种因素影响,尚不能精确反映出来周期变化。

1.3 潮汐作用

除太阳活动和地球轨道驱动地球气候波动外,研究发现月球的潮汐作用同样影响地球的气候。

1.3.1 月球轨道周期

月球的轨道运动与地球类似,存在周期性的变化(汪品先等, 2018)。月球与地球之间的白道面和地球与太阳之间的黄道面存在夹角,其交点被称为“月交点”,存在约18.6 a的周期。在后期研究发现月交点还存在长达1800 a的长周期(Keeling and Whorf, 2000),这一周期在美国中北部、欧洲北部的湖泊沉积物和南极半岛附近的海洋沉积中观察到,推测潮汐作用影响了这些地区的气候(Keeling and Whorf, 1997; Warner et al., 2002; Khider et al., 2014)。

1.3.2 影响机制

这种强迫主要通过驱动海洋底层流,影响海洋环流作用,产生气候波动。从公元1855 a到1900 a

以及1945 a以来的全球观测中发现海面温度存在周期性的变化,Keeling 对其解释为:强烈的海洋潮汐作用导致海水垂直混合,导致更深处的、温度更低的水与表层水进行交换,引起海洋表面温度降低(Keeling and Whorf, 1997)。北半球的冷水有孔虫组合序列和南极帕尔默深海岩芯的沉积物中都发现了这种海洋与气候之间的响应(图2)(Warner et al., 2002)。但这种1800 a的潮汐周期是否有足够的动力引起深层混合还存在争议。

2 内部因素

全新世千百年尺度的气候波动,除天文因素以外,地球内部的各种反馈作用对其也有很大的影响,甚至没有太阳辐射的波动,地球内部因素的相互作用同样能独立引起全新世发生千百年尺度的气候波动。如Khider等(2014)发现热带太平洋西部的海洋表面温度的千年尺度变化是由于深海环流变化造成。此外,冰盖作用、火山活动和人类活动等也不同程度的影响着地球气候。

2.1 冰川作用

作为间冰期,全新世早期在北美和欧亚大陆还存在大型陆地冰川(Renssen et al., 2009),如芬诺斯卡迪亚冰盖一直持续到9 ka BP(LindÉn et al., 2006),劳伦泰冰盖大量残余物最晚到7 ka BP消失(Carlson et al., 2008)。中晚期全新世温度降低后,冰川在3.3~2.4 ka BP与过去几个世纪的小冰期里又发生了不同程度的扩张。而在过去2 ka,全球冰川保持着扩张模式(Solomina et al., 2016)。

重建的冰川历史在本质上是由气候输入的综合因素迫使的,因此很难量化和评估。因此,用冰川波动的时间序列作为古气候的代用指标,确定相关的气候作用力,并构建气候—冰川模型,并非易事。

2.1.1 全新世冰川发展

冰川的演化和响应都影响着气候。研究发现,全新世早期北半球中高纬度地区冰川变化在千年尺度上一致(图3)(Wanner et al., 2011),冰川体积退缩到现代大小,在全新世后半期逐渐扩大,直到小冰期达到最大(Olga and Solomina, 2015)。全新世晚期北半球冰川体积变化有较大的差异,如中亚(Zhang Chengjun and Mischke, 2009)、欧洲(Ivy-Ochs et al., 2009)地区晚全新世冰川扩张,而在加拿大地区(Menounos et al., 2009)冰川体积变化趋势为相对下降。南半球地区,如新西兰(Putnam et al., 2012)和安第斯山脉(Rodbell et al., 2008)的

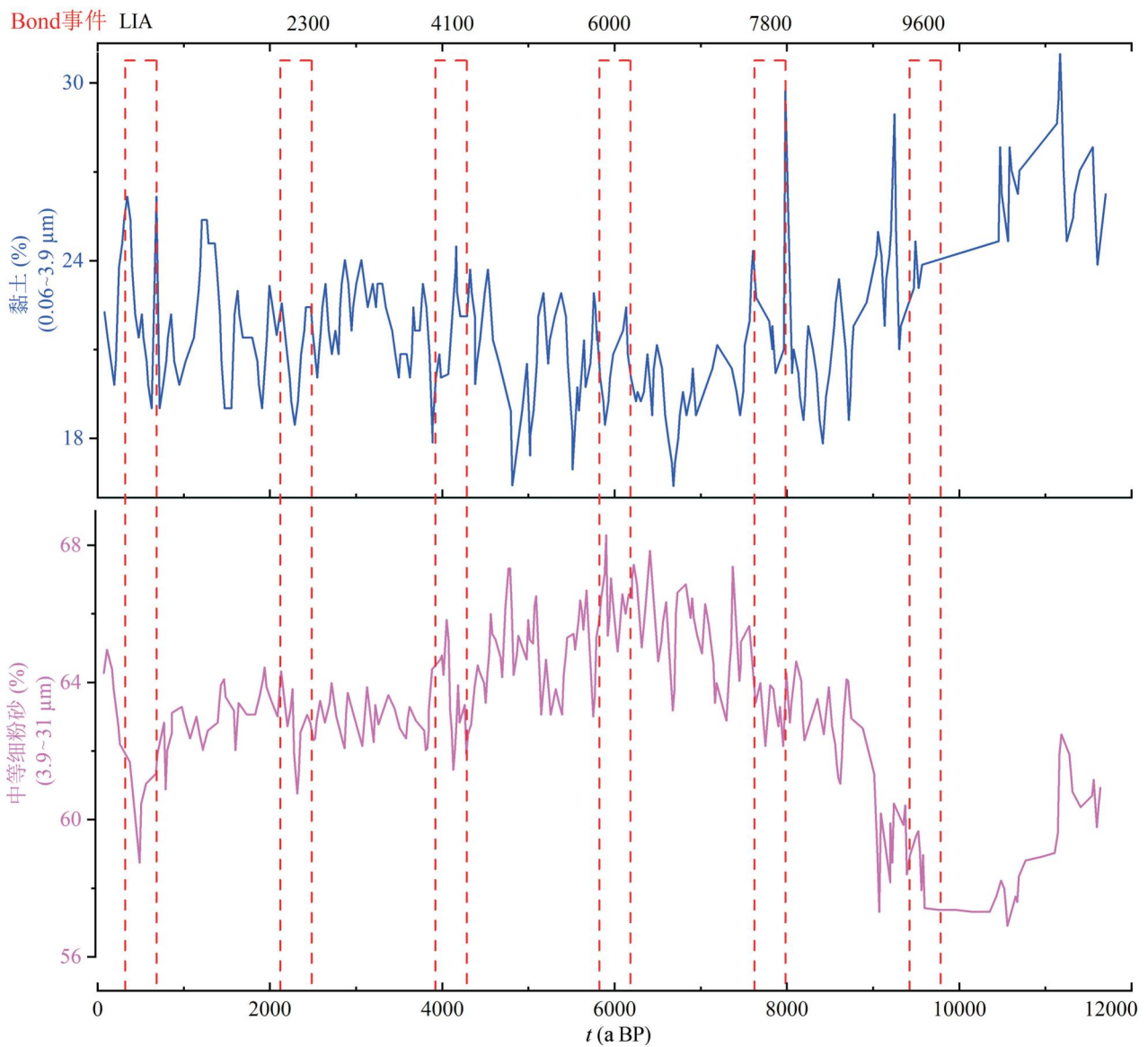


图 2 1800 a 潮汐周期: 帕尔默深海的 1098B 号大洋钻探计划岩芯的中等细粉砂和黏土含量 1800 a 的周期较为明显, 中等细粉砂的最小值与所提出的 Bond 事件的前三个时间点相对应(Warner et al. , 2002)

Fig. 2 1800 a tidal cycle: A more pronounced cycle of 1800 a for the moderate fine sands and clay content clay content of the ocean drilling program core No. 1098B from Palmer Deep, with a minimum value of moderate fine sands corresponding to the first three time points of the proposed Bond event (Warner et al. , 2002)

陆地冰川从全新世早期开始, 体积一直减小。关于两半球冰川活动不同步的原因还没有统一的机制解释, 因为冰川活动除了会受气候影响外, 还会受所在区域地形的影响(Oerlemans, 2005)。且冰川波动的时间不连续(Solomina, 2015), 冰碛物的分辨率普遍较低, 只有少数地区如阿尔卑斯山和纳维亚半岛地区的冰碛物能达到 10 a(Holzhäuser et al. , 2005) 甚至年际分辨率(Beedle et al. , 2009)。所以全新世冰川变化的重建还需继续深入研究。

2.1.2 影响因素

全新世早期北半球的冰川呈百年尺度的增长与劳伦泰冰盖的淡水注入有关(Nesje et al. , 2004)。劳伦泰冰盖融化产生的淡水注入大西洋, 导致拉布拉多海的深水流形成减缓, 在 9~7 ka BP 时间内, 大西洋经向翻转环流和相关海洋热输送减少约 30%, 伴随着北大西洋显著冷却, 导致冰川扩张(Alley and Ágústsdóttir, 2005)。在 8 ka BP 以后, 北半球的冰川活动长期变化趋势与轨道变化相关, 冰川退缩, 但

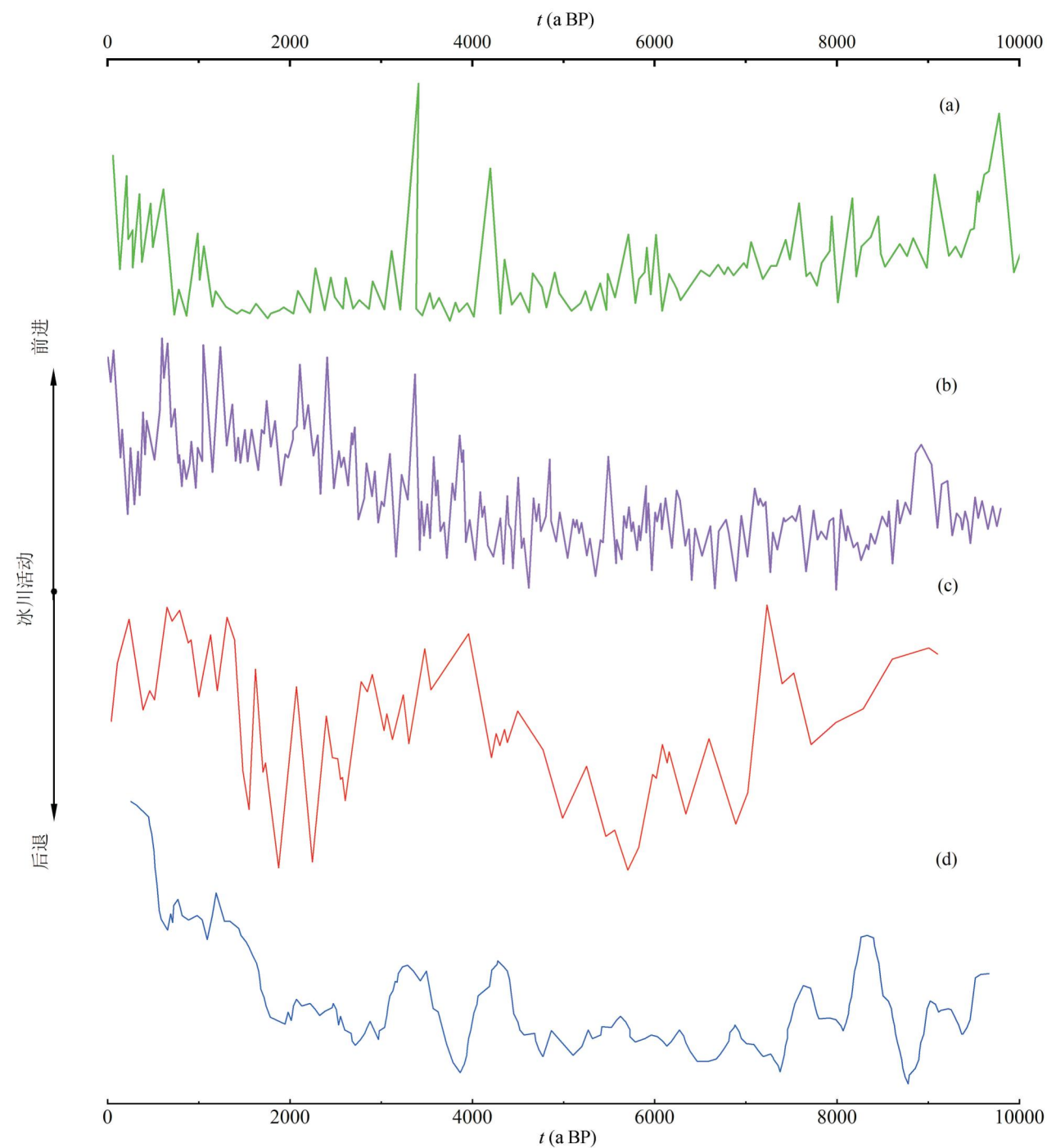


图 3 全新世冰川活动变化:(a) Hajeren 湖中干物质密度指示冰川变化(Bilt et al. , 2015);(b) Vårr Bilt 等的记录,使用标准化的钛与非相干散射和相干散射之和的比值指示冰川变化(Røthe et al. , 2018);(c) Okstindan 重建冰川(Bakke et al. , 2010);(d) 冰川推进总量(Wanner et al. , 2011)

Fig. 3 Changes in Holocene glacial activity: (a) dry matter density in Lake Hajeren indicating glacier changes (van der Bilt et al. , 2015); (b) records of Vårr Bilt et al. , using standardized Ti/inc +coh values indicating glacier changes(Røthe et al. , 2018); (c) Okstindan reconstructed glaciers (Bakke et al. , 2010); (d) sum of the glacier advance (Wanner et al. , 2011)

没有达到现代冰川的规模(Gayer et al. , 2006)。而在 4 ka BP 以后的冰川扩张与北大西洋冷却事件基本一致(Solomina, 2015),可能是因为北极地区的海

冰扩张导致的温度的下降导致(Miller et al. , 2013)。全新世早中期建热带地区冰川的活动建模出来

的变化与轨道作用力相似,但根据沉积记录重建的冰川活动 (Rodbell et al. , 2008) 与模拟记录相反 (Jomelli et al. , 2014), 与南半球的沉积记录的重建相似。这种矛盾可能因为热带冰川的分辨率低,数据少导致。此外,在 3 ka BP, 有沉积记录显示在南乔治半岛地区的冰川在温暖时期也显示扩张的趋势 (Bentley et al. , 2007), 这种现象的发生机制还不明确, 是否与冰川活动的定年问题有关还需要进一步研究。

2.1.3 影响机制

Denton 等 (1973) 很早提出, 全新世的冰川波动在百年到千年时间尺度全球同步, 这些冰川的消融和扩张对地球气候的影响有多种解释机制。冰川反射太阳辐射强度达 65%~80% (汪品先等, 2018), 即这种反射机制在全新世期间随冰川面积变化而影响地球气候。但这种影响机制存在明显的滞后现象。

而冰川融化的淡水也会导致气候波动。有人提出, 劳伦泰冰盖在全新世早期消融产生融水, 有的暂时储存在冰原边缘的冰封湖中, 有的沿地表径流进入海洋 (Nesje et al. , 2004)。水量、流速、地理位置、大陆排水系统的分流与冰山融合相互作用, 可能对温盐环流造成影响 (Fisher et al. , 2002)。而冰盖融水产生的地表径流变化, 可能是引起全新世早期 11~10 ka BP, 密西西比河地区气候变得干燥寒冷的原因 (Marshall and Clarke, 1999)。根据北大西洋周边陆地的沉积记录分析, 8.2 ka 事件与北美大陆冰盖消融过程中冰成湖溃决有关。而淡水径流改道引起北大西洋洋流及其附近北欧海域的气候变化, 这些气候突变事件在北欧海域、苏格兰和挪威的高分辨全新世早期气候记录中被记录下来, 几乎都在同一时间段发生 (Clark et al. , 2001)。

此外, 还有人提出这些淡水进入海洋之后, 通过影响大洋环流对水汽和热量的输送, 进一步扩大冰川对气候影响的范围。如模拟发现冰川体积轻微变化就能通过调整北大西洋的热量分布和海冰面积, 诱发大西洋经向环流模式的突然转变, 影响气候 (Zhang Xu et al. , 2014), 如全新世中晚期约 1.5 ka 的气候周期变化与北大西洋冰川消融遥相关 (Buntgen et al. , 2016)。现在还有研究认为冰川在消融后, 因为负荷的减小从而导致火山喷发影响气候, 这部分我们将在火山活动部分展开分析。

2.2 火山活动

火山活动是气候变化的主要驱动因素, 对地球的气候变化影响非常重要 (李平原等, 2012)。其

主要与其他气候因素和反馈作用等诱发了全半球百年至千年规模的变化, 在全新世百年至千年尺度的温度变化方面发挥了关键作用。

2.2.1 全新世火山活动

全新世期间火山活动较为频繁 (图 4) (Marcott et al. , 2013; Sigl et al. , 2015), 根据现有文献记载, 9~8 ka BP 和全新世后期的小冰期时期, 有一系列的大型火山爆发 (Kobashi et al. , 2017)。尤其 8.6~8 ka BP 期间, 火山活动最为强烈, 这一时期也恰恰是劳伦泰冰盖消融时期, 因此提出, 8.2 ka 降温事件可能是因为劳伦泰冰盖的消融加强了火山活动, 导致了该时期的温度下降 (Nesje et al. , 2004; Kobashi et al. , 2017)。而 5.5~4 ka BP, 几乎没有大型的火山活动 (Kobashi et al. , 2017)。晚全新世火山爆发集中时期与气候冷期的可比的时期主要在 3~2 ka BP 前后 (图 4a、b)。

2.2.2 火山活动影响气候因素

火山活动对气候变化的影响受多种因素的制约。首先不同类型的火山喷发对气候的影响方式不同, 如中酸性普林尼式火山和中小规模玄武质裂隙式喷发主要造成气候变冷, 引起短期气候变化; 而大火成岩省通过喷发大量的温室气体, 导致气候变暖 (郭正府等, 2002)。但全新世还没有发现大火成岩省的喷发记录, 主要为中小规模的火山活动。其次, 火山喷发物质要对气候造成影响, 其喷发量需在至少 5 Mt 的二氧化硫等气溶胶注入到平流层中, 这些气溶胶在平流层中弥散数周, 并停留数年, 从而对地表温度造成显著的环境效应 (Marshall et al. , 2022)。

此外, 还有研究发现, 火山所处的地理位置不同和喷发季节不同也会造成不同气候的变化。高纬度地区的火山活动影响范围相对较小, 但是, 高纬度地区的平流层底界更低, 因此火山喷发物质更容易到达平流层。而低纬度地区的火山则能向两个半球扩散, 影响范围更广 (Toohey et al. , 2019)。季节上, 研究这发现公元 946 年长白山的一次大喷发, 虽然其规模达到 7 级, 二氧化硫含量高达 45 Mt (Iacovino et al. , 2016), 但因其所喷发的季节所处冬季, 所以影响不明显, 因此有学者提出冬季火山喷发的影响要比夏季喷发小 (Kravitz and Robock, 2011)。

而除了上诉提到的火山内部的影响因素对气候的影响外, 现在还有研究认为, 火山地区的上覆负荷减小, 会促进火山的喷发从而影响气候。在冰岛

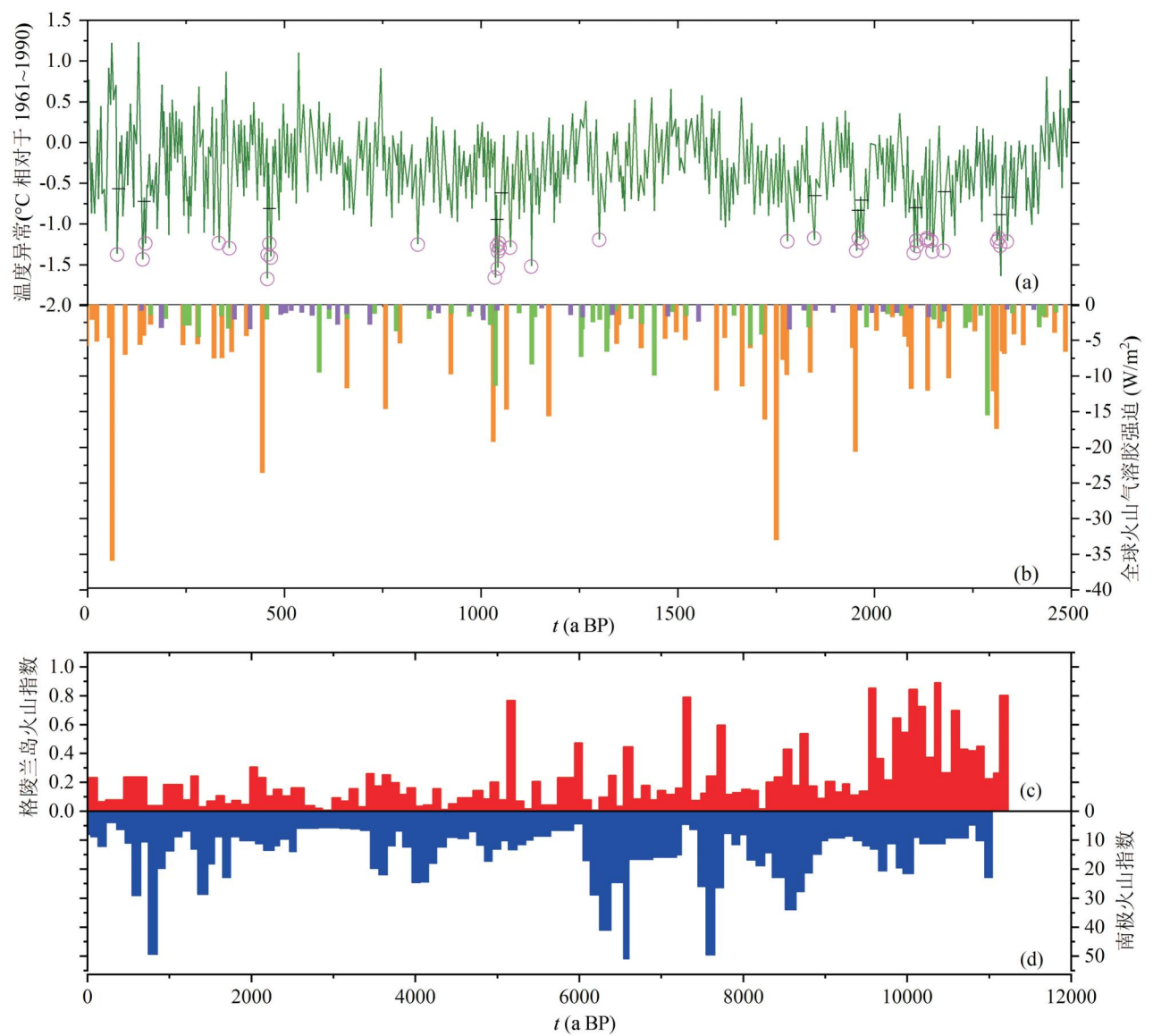


图 4 全新世火山活动:(a)过去 2.5 ka 欧洲和北极地区的夏季温度重建,并重建了 40 个最冷的单年和 12 个最冷的年份 (Sigl et al. , 2015);(b) 热带、北半球和南半球火山爆发的记录重建的全球火山气溶胶强迫 (Sigl et al. , 2015);(c) 格陵兰岛火山指数,以格林兰岛的火山硫酸盐浓度($\times 10^{-9}$)指示 (Marcott et al. , 2013);(d) 南极洲火山指数,以南极洲的火山硫酸盐通量指示(kg/km^2),以 100 a 为一个档次 (Marcott et al. , 2013)。绿色折线代表树轮记录,黑色短线代表 12 个最冷的十年,红色圆环代表 40 个最冷的年,橙色代表热带喷发,绿色代表北半球喷发,紫色代表南半球喷发

Fig. 4 The new world volcano activities: (a) summer temperature reconstructions for Europe and the Arctic for the last 2.5 ka with reconstructions of the 40 coldest single years and the 12 coldest years (Sigl et al. , 2015); (b) records of volcanic eruptions in the tropics, northern and southern hemispheres (Sigl et al. , 2015); (c) Greenland volcanic index indicated by volcanic sulfate concentrations ($\times 10^{-9}$) in Greenland (Sigl et al. , 2015); (d) Antarctica volcanic index indicated by volcanic sulfate fluxes in Antarctica (kg/km^2) in 100 a steps (Sigl et al. , 2015). Green line represents the tree ring record, black line represents the 12 minimum coldest decades, red circle represents the 40 minimum coldest years, orange bar represents the tropical eruption, green bar represents the Northern Hemisphere eruption, purple bar represents the Southern Hemisphere eruption

(Licciardi et al. , 2007)、法国和德国 (David et al. , 2006)、美国西部 (Bacon and Lanphere, 2006) 和智利 (Gardeweg et al. , 1998) 等地,冰山退缩与火山活动增加相一致。而全新世早中期火山活动增加的区域几乎都是冰山消融区域,因此推测是冰盖消融引起的地幔减压而导致的岩浆生产的增加,从而对气

候产生造成影响(Huybers and Langmuir, 2009)。

总体而言,火山活动影响气候变化的因素很多,但重建全新世的火山活动困难,因此,从全新世整体考虑火山活动如何影响了气候变化还需要继续研究。

2.2.3 影响机制

在格陵兰的温度重建中发现千百年时间尺度的温度下降、极地大气环流增强和亚洲季风活动的减弱等现象,与火山活动造成的千百年尺度的寒冷期一致(Kobashi et al., 2017)。在后期的气候模拟中发现,北半球地表温度千年尺度的气候变率与火山影响指数高度相关,超过 80% 的北半球气候变率可以用火山强迫来解释(Kobashi et al., 2017)。1991 年皮纳图博火山向大气中注入了约 1.7×10^7 二氧化硫,在地表辐射强度降低了约 4 W/m^2 ,导致地表温度降低了约 $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (Hansen et al., 1992)。而 13~7 ka BP 之间估计火山活动对大气中 CO_2 的上升有约 40 ppmv 的贡献,导致辐射强迫的增加约 1 W/m^2 (Huybers and Langmuir, 2009)。火山的 CO_2 作用力看似可以抵消每四年一次的类似皮纳图博的火山爆发,但实际上大气的 CO_2 不只是火山产生,体积分数 40×10^{-6} 左右的 CO_2 可能是海洋、生物等其他作用力产生的,还尚不明确全新世喷发产生的温室气体含量。像皮纳图博这样的大型喷发在全新世晚期大约每百年发生一次(Huybers and Langmuir, 2009),但地球气候受到这些因素的影响一般 8~10 a 就可以恢复了(万凌峰等, 2020),而为什么火山活动能够造成千百年尺度的增温或降温呢?

有气候模拟实验发现如果每 10 a 左右的时间发生一定规模的火山爆发,那么对地球可能造成百年或者千年尺度的降温(万凌峰等, 2020)。此外地球内部的反馈作用还可以保存火山爆发对气候的影响,如火山活动产生了突然的夏季冷却,而这种降温可以通过海冰/海洋反馈来维持(Miller et al., 2012),诱发北半球十年到百年的冷却(如小冰期)(Miller et al., 2012; Sigl et al., 2015)。Buntgen 等(2016)通过研究公元 536a、540a、547a 这三年连续持续火山喷发,发现其导致夏季和冬季温度变的更冷,高纬度地区海冰迅速扩张从而延长了冬季长度,导致 1.4 ka 冷事件发生。但晚全新世期间温度下降,虽然被认为是由于轨道强迫引起,但发现 43% 由轨道引起的冷却被不断增加的温室气体强迫补偿(Kobashi et al., 2017)。但模拟发现全新世中晚期间火山活动相对减少, CO_2 的排放减少,这些多出来的温室气体来源需要进一步研究。

2.3 环流系统

2.3.1 地球环流系统

占据地球表面 71% 的面积的海洋,在地球气候调节方面扮演着非常重要的角色。现代测试发现,中高纬度的 80%~90% 的热量需要大气和海洋来传输(Trenberth et al., 2001),长时间尺度的热量需要海洋环流来输送与分配(汪品先等,2018)。其主要由海水密度(温度和盐度的函数)和风卷应力控制,风力驱动上层的洋流,而温度、盐度和潮汐作用等驱动深层洋流(汪品先等,2018)。

2.3.2 影响机制

世界大洋的深层水团主要存在于北大西洋和南极两个地区,两者在不同的地质时期其通量不同。当淡水注入时,表层海水盐度降低导致海水分层,使得深层水的形成减少,引起大西洋翻转流减弱甚至停闭,让低纬度向高纬度输送热量减少,引起中高纬度地区气候变冷(Marshall and Speer, 2012)。这种温度和淡水影响下的大西洋径向翻转流变化,为千百年尺度的气候变化提供了良好的解释(图 5)(Alley and Ágústssdóttir, 2005; Wanner et al., 2011)。如全新世早期劳伦泰冰盖的融水影响温盐环流,北大西洋深水流与拉布拉多海缺乏深度对流(Renssen et al., 2010),导致了北大西洋地区气候变冷,导致“9.3 ka BP”、“8.2 ka BP”等事件的发生(图 5a, b)(George et al., 1973; Alley and Ágústssdóttir, 2005)。

但也有学者认为,单靠淡水注入改变海水密度不足以引起深层水团的减少,并认为海水的推动作用只能是风力和潮汐(Wunsch, 2002)。大洋环流中驱动力最强的环南极洋流(Marshall and Speer, 2012),由于埃克曼抽吸作用,才是大西洋径向环流的驱动力(Toggweiler and Samuels, 1998),而不是北大西洋的温盐环流作为驱动(Kuhlbrodt et al., 2007)。而大洋环流除了受到淡水的影响外,在潮汐的周期作用下,也对气候产生影响。在地中海的花粉记录与来自摩洛哥、冰岛、挪威和以色列的沉积记录之间对比发现存在周期为 1750 a 的气候波动(Alley and Ágústssdóttir, 2005)。这种周期与潮汐作用与月球的作用周期 1800 a 相近,认为这种周期性的变化原因是潮汐作用导致深层流的内部振荡产生,与北大西洋表层海洋环流动力学密切相关。除此之外,Hoogakke 等(2011)利用大西洋盆地的有孔虫氧同位素重建全新世的洋流演化,揭示了洋流变化与气候变化之间的紧密联系。该研究发现,中晚

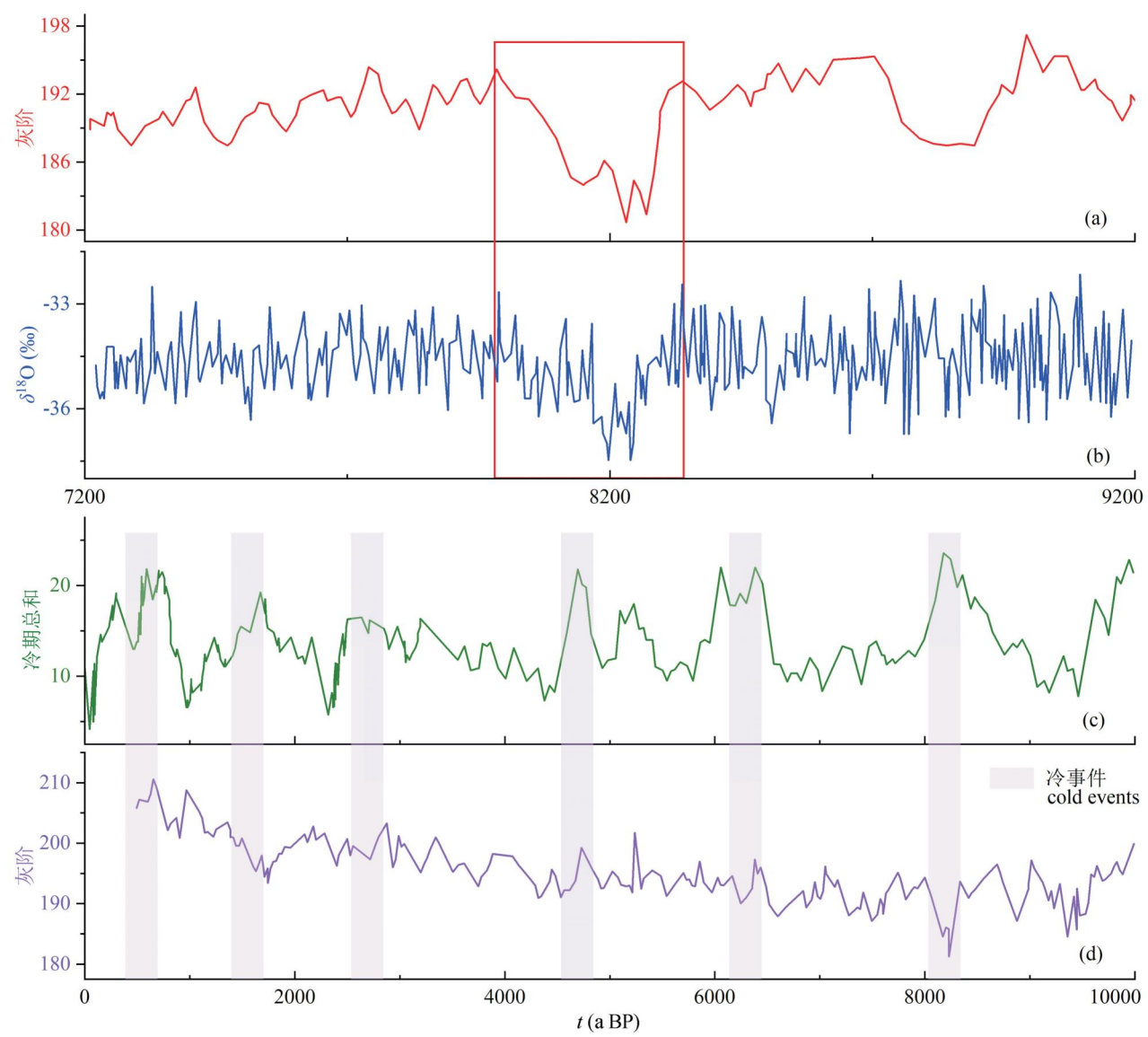


图 5 环流与全新世冷事件对比: (a) 委内瑞拉近海 Cariaco 盆地 PC56 号岩芯 8.2 ka BP 事件灰阶, 向上表示颜色较深的沉积物 (Alley and Ágústsson, 2005); (b) GISP2 岩芯高分辨率 $\delta^{18}\text{O}$ 冰芯记录 (Alley and Ágústsson, 2005); (c) 全新世冷期总和 (Wanner et al., 2011); (d) 委内瑞拉近海 Cariaco 盆地 PC56 号岩芯全新世期间的灰阶, 向上表示颜色较深的沉积物 (Alley and Ágústsson, 2005)

Fig. 5 Comparison of circulation and Holocene cold events: (a) gray scale of the 8.2 ka BP event in core PC56, Cariaco Basin, offshore Venezuela, upward indicating darker colored sediments (Alley and Ágústsson, 2005); (b) high-resolution $\delta^{18}\text{O}$ ice core record from core GISP2 (Alley and Ágústsson, 2005); (c) Holocene cold event (Wanner et al., 2011); (d) gray scale during the Holocene in core PC56, Cariaco Basin, offshore Venezuela, upward indicates darker colored sediments (Alley and Ágústsson, 2005)

全新世期间, 东北大西洋深层水重组并且环流减弱, 这种环流变化可能与太阳活动存在关联。

尽管影响洋流变化的因素尚待探讨, 但无疑洋流对气候的影响已被广泛证实。因此, 今后的研究应进一步深入研究影响洋流变化的因素, 以探讨千年尺度气候波动的根本原因。

2.4 其他因素

除冰川、火山、环流等对气候的影响, 温室气体对千年尺度的气候波动同样有影响。全新世大气中的温室气体含量发生变化, 早全新世 CO_2 含量较低, 中晚全新世体积分数增加约 20×10^{-6} , 工业革命到现在, 其体积分数已经超过 417×10^{-6} (Ren Guoyu,

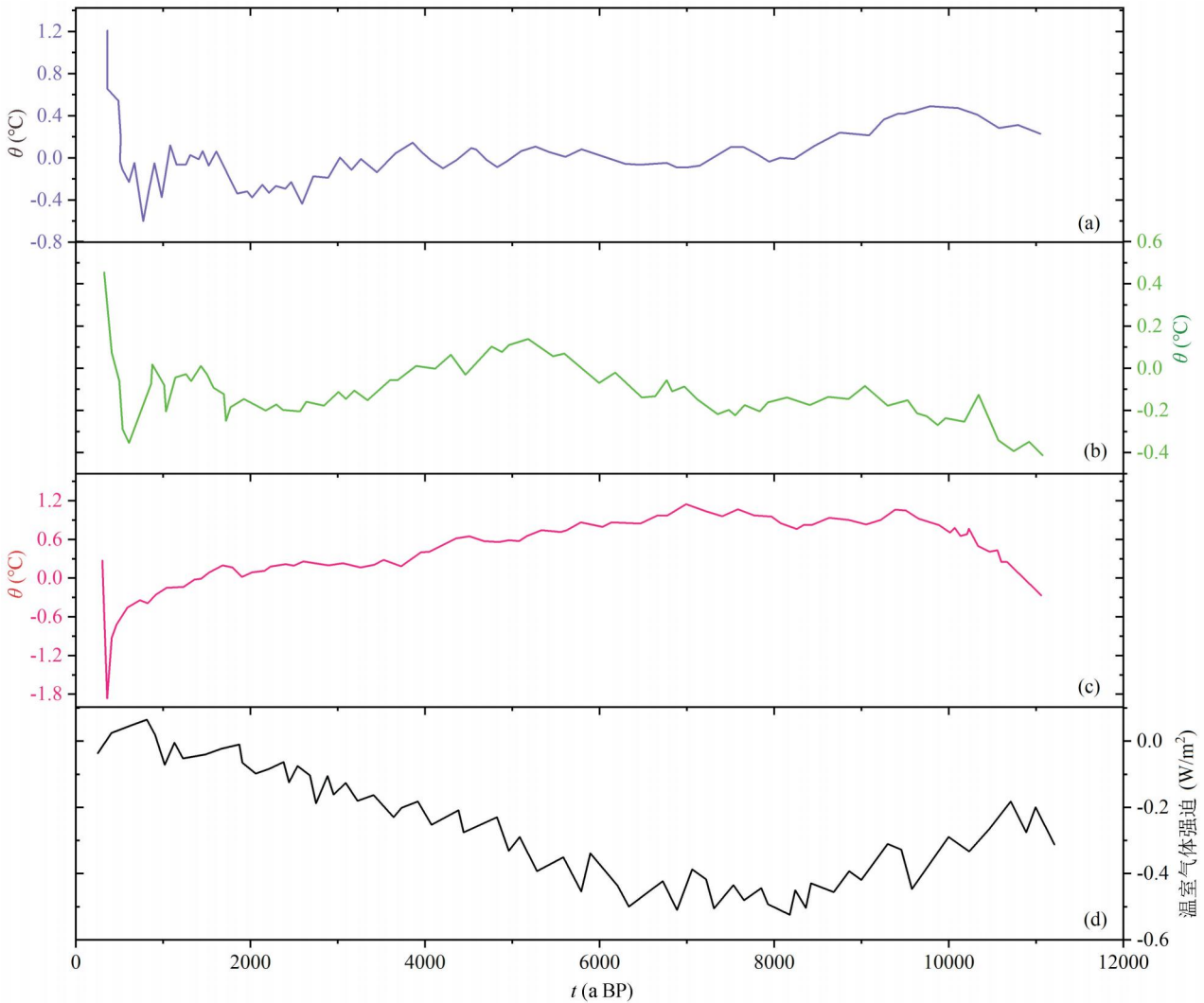


图 6 温室气体强迫与温度对比 (Marcott et al. , 2013) : (a) 30°N~90°N 的温度重建; (b) 30°N~30°S 的温度重建; (c) 30°S~90°S 的温度重建; (d) 全新世温室气体强迫

Fig. 6 Greenhouse gas forcing versus temperature (Marcott et al. , 2013) : (a) 30°N~90°N temperature reconstruction; (b) 30°N~30°S temperature reconstruction; (c) 30°S~90°S temperature reconstruction; (d) Holocene greenhouse gas forcing

2000)。虽然这产生的直接辐射强迫较小(图 6)(Marcott et al. , 2013),但通过气候系统的正反馈作用,已经造成全球地表温度从 7 ka BP 到现在已经动态升温 0.2 ~ 0.8 °C (Kutzbach et al. , 2011; Marcott et al. , 2013; Baker et al. , 2017)(图 6a、b、c)。可以说温室气体是中晚全新世温度小幅度增加的主要驱动因素(任国玉等,2021)。但在更细的尺度上,如百年、十年尺度的气候波动还不确定温室气体的变化到底是气候的驱动因素还是响应。但随着工业革命之后,温室气体排放增加,全球大气、大陆和海洋变暖几乎是由人类活动导致的。所以未来的气候变化中,温室气体可能是主要驱动因素。

3 全新世气候突变

随着高精度全新世气候变化研究的不断深入,越来越多的千年和百年尺度上的气候波动、周期性变化以及气候事件被揭示 (Denton and Karlén, 1973; Wanner et al. , 2014; Xu Deke et al. , 2014; Yi Liang et al. , 2015)。气候变化的周期性对预测非常关键,目前认为全新世存在各种尺度的气候周期,但这些周期导致的原因还没有明确的定论。现在关于 1500 a 和 500 a 的准周期讨论的最多,我们将着重讨论它们。

3.1 1500 a 准周期

Bond 首次提出全新世突变事件存在周期性,他从北大西洋沉积物中发现了一个平均 1470 ± 500 a 的周期 (Bond et al., 2001),并且这种信号已经在陆地湖泊、冰心和沙漠等地的气候记录中得到了证实。但随着越来越多的文献报道,1500 a 的气候突变周期的影响机制还没有精确的解释。虽然早期 Bond 提出 1500 a 的周期与太阳活动相关,但太阳活动的基本周期为 500 a 的未命名周期,1000 a 的 Eddy 周期和 2300 a 的 Hallstattzeit 周期,所以太阳活动作为该周期的驱动因子还存在许多争议。现在有学者发现,Bond 周期很可能与其他因素有关,例如 Debret 等 (2007) 通过小波分析,成功区分了 1000 a 和 2500 a 太阳强迫振荡以及 1500 a 海洋强迫振荡,认为 1500 a 的气候周期与海洋环流有关,而不是仅与太阳能输出的变化有关。类似的,Soon 等 (2014) 分析了南极冰芯的硝酸盐浓度重建结果,发现北大西洋、西太平洋暖池、南大洋和东亚季风区的变化呈现出 2300 a、1000 a 和 500 a 的基本太阳模式,而 1500~1800 a 周期可能是基本或派生模式的一部分,这表明 1500 a 的气候周期很可能不是单一因素驱动的结果。此外,Darby 等 (2012) 在北极涛动研究中发现的 1500 a 的准周期信号可能来自于气候系统内部变化或对低纬度太阳强迫的间接响应。

总的来说,1500 a 周期的影响机制除了考虑多种驱动因素的影响外,还需考虑到气候记录指标的样品问题和实验方法等影响 (Wunsch, 2000),还需要继续深入研究与探讨。

3.2 500 a 准周期

相比之下,500 a 的气候波动周期在气候记录中更为明显和稳定。因其与人类活动密切相关,因此引起了广泛的关注和研究 (Xu Deke et al., 2019; Li Hao et al., 2021)。目前的研究表明,全新世 500 a 的气候波动周期与太阳活动存在相关性,并且这种周期对人类活动有影响。但具体的影响机制还不清楚。因此未来的研究工作需要继续深入研究 500 a 周期的影响机制,有利于人类的生存和发展。

3.3 全新世突变事件触发机制

通过上述对全新世气候波动的影响因素及周期性的讨论,我们对全新世千百年尺度的气候变化有了全面的认识。但对全新世千百年尺度的气候分析中,除了要判断气候波动受何种因素影响外,气候突变的触发机制也是重中之重。分析气候波动的触发

以及传播机理,有助于我们更好的理解气候波动事件发生的规律与机理。

目前关于全新世气候突变的触发机理的研究主要集中在 8.2 ka BP 事件与小冰期。其作为全新世最强的一次冷事件,8.2 ka BP 事件是划分早全新世和中全新世的标志性事件。现在主要认为 8.2 ka BP 突变事件由北美大湖区劳伦泰冰盖消融导致 (Johnson and Clure, 1976; Clark et al., 2001; Nesje et al., 2004)。当劳伦泰冰盖消融,其融化产生的大量冰川融水注入哈得逊湾,通过哈得逊海峡流入拉布拉多海 (Barber et al., 1999)。而因为北大西洋和北冰洋注入的淡水流量增加,北大西洋西北底水流速减弱,再加上太阳活动活动的减弱,从而导致了该事件的发生 (Kleiven et al., 2008; 王绍武, 2008)。

相较之下,据现在最近的一次大幅度降温——小冰期的触发机制更清晰。目前主流观点认为,火山活动触发了小冰期的降温。虽然火山活动导致的降温最多持续十年,但这种降温会被北半球海洋大气海冰的反馈所放大,即温度的下降引发了海冰反馈,导致了大西洋翻转环流的减弱,进而导致了长时间的降温 (Miller et al., 2012; Bradley et al., 2016)。Wanner 等 (2022) 通过分析模拟显示出,小冰期的开始发生冰川前进的初步阶段,是受到 1200 a BP 和 1260 a BP 前后两组火山事件的显著影响,而小冰期的结束是在 19 世纪中期以后开始的。由于火山活动减少和太阳辐照度增加,出现了变暖。此外,冬季冰川的质量增加减少,温室气体的浓度也略有增加 (Sigl et al., 2015; Toohey and Sigl, 2017)。

相较 8.2 ka BP 与小冰期的研究,与众多社会文明演化相关的 4.2 ka BP 事件的触发机制还不明确。4 ka BP 以后太阳活动开始增加,但作为一次明显的冷事件,触发及影响该事件的因素应该考虑除太阳活动以外的因素。但当时火山活动的频率并不高,且在这时期也不存在大型冰盖消融,所以对该事件的触发机制,还需要继续深入研究。

通过以上讨论较多的突变事件的触发机制分析,我们不难看出这些突变事件的发生与地球内部驱动因素密切相关,如火山喷发和冰盖消融等。为了全面理解突变事件的空间特征,分析突变事件的起源和演化规律,在以后的研究工作中,我们需要结合数值模拟实验分析出这些驱动因素与气候变化的因果关系,从而正确理解突变事件的触发与结束。

4 总结

全新世千百年尺度的气候突变的发生受到多方面的因素影响,不同事件可能主导因素不同,也可能是多种因素叠加作用的结果。在千年尺度上,大洋温盐环流、轨道变化和潮汐作用可能是气候突变的重要因素;在百年时间尺度上,太阳活动、火山活动、海洋环流可能控制着全球气候变化和变率步调。在过去一万多年,这些驱动力和内部相互作用机制在不同阶段不同程度影响气候波动,明确这些驱动力对气候的影响机制,对揭示目前全球变暖的原因,以及理解导致的现今越来越多的气候突发事件,具有重要的科学意义。未来的气候如何变化,将以何种趋势变化,会受到什么因素的影响,与人类的生存于发展都有着密切联系。正确认识地球气候系统运行机制和预估未来气候变化趋势,有利于人类越来越发展。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

方修琦, 侯光良. 2011. 中国全新世气温序列的集成重建. 地理科学, 31: 385~393.

郭正府, 刘嘉麒. 2002. 火山活动与气候变化研究进展. 地球科学进展, 17(4): 595~604.

洪业汤, 姜洪波. 1998. 近 5000a 的气候波动与太阳变化. 中国科学: D 辑, 26: 491~497.

李平原, 刘秀铭, 刘植, 赵国永, 马明明, 吕镔, 郭晖. 2012. 火山活动对全球气候变化的影响. 亚热带资源与环境学报, 7(1): 1673~7105(2012)01-0083-06.

任国玉, 姜大膀, 燕青. 2021. 古气候演化特征、驱动与反馈及对现代气候变化研究的启示意义. 第四纪研究, 41(3): 824~841.

施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 唐领余, 王富葆, 姚檀栋, 赵希涛, 张丕远, 施少华. 1993. 中国全新世大暖期鼎盛阶段的气候与环境. 中国科学: B 辑, 23(8): 865~873.

石正国, 雷婧, 周朋, 任鑫. 2020. 轨道尺度亚洲气候演化机理的数值模拟: 历史与展望. 第四纪研究, 40: 10.

谭明, 邵雪梅, 刘晓宏, 蔡炳贵. 2006. 中国近千年石笋—树轮集成温度记录. 气候变化研究进展, 02: 113~116.

万凌峰, 刘健, 高超超, 孙炜毅, 宁亮, 严蜜. 2020. 全新世火山喷发对温度变化趋势影响的模拟研究. 第四纪研究, 40: 14.

汪品先, 田军, 黄恩清, 马文涛. 2018. 地球系统与演变. 北京: 科学出版社: 1~565.

王绍武, 董光荣. 2002. 中国西部环境演变评估. 第一卷, 中国西部环境特征及其演变. 北京: 科学出版社: 1~248.

王绍武. 2008. 8.2 ka BP 冷事件. 气候变化研究进展, 4: 193~194.

杨志根. 2001. 地球轨道根数变化与第四纪冰期. 天文学进展, 019: 445~456.

于革, 刘健. 2003. 全球 12000 a BP 以来火山爆发记录及对气候变化影响的评估. 湖泊科学, 15: 12~20.

竺可桢. 1972. 中国近五千年来气候变迁的初步研究. 考古学报,

(1): 15~38.

Alley R B, Ágústssdóttir A M. 2005. The 8 k event: cause and consequences of a major Holocene abrupt climate change. Quaternary Science Reviews, 24(10): 1123~1149.

Alverson K. 2004. Global change in the Holocene. Advancing Earth and Space Sciences, 85(20), 204~204.

Bacon C R, Lanphere M A. 2006. Eruptive history and geochronology of Mount Mazama and the Crater Lake region, Oregon. GSA Bulletin, 118(11~12): 1331~1359.

Baker J L, Lachniet M S, Chervyatsova O, Asmerom Y, Polyak V J. 2017. Holocene warming in western continental Eurasia driven by glacial retreat and greenhouse forcing. Nature Geoscience, 10(6): 430~435.

Bakke J, Dahl S O, Paasche Ø, Riis Simonsen J, Kvisvik B, Bakke K, Nesje A. 2010. A complete record of Holocene glacier variability at Austre Okstindbreen, northern Norway: an integrated approach. Quaternary Science Reviews, 29(9): 1246~1262.

Barber D C, Bilodeau G, Southon J, Morehead M D, Kerwin M W, McNeely R, Gagnon J M, Dyke A, Andrews J T, Jennings A E. 1999. Forcing of the cold event of 8,200 years ago by catastrophic drainage of Laurentide lakes. Nature, 400(6742): 344~348.

Beedle M J, Menounos B, Luckman B H, Wheate R. 2009. Annual push moraines as climate proxy. Geophysical Research Letters, 36(20).

Bentley M J, Evans D J A, Fogwill C J, Hansom J D, Sugden D E, Kubik P W. 2007. Glacial geomorphology and chronology of deglaciation, South Georgia, sub-Antarctic. Quaternary Science Reviews, 26(5): 644~677.

Berger A. 1988. Milankovitch Theory and climate. Reviews of Geophysics, 26(4): 624~657.

Bond G, Kromer B, Evans M N, Be Er J, Lotti R. 2001. Persistent solar influence on north Atlantic surface circulation during the Holocene. Science, 294: 2130~2136.

Bond G, Showers W, Cheseby M, Lotti R, Almasi P, Demeinoc P, Priore P, Cullen H, Hajdas I, Bonani G. 1997. A pervasive millennial-scale cycle in north Atlantic Holocene and glacial climates. Science, 278(5341): 1257~1266.

Bradley R S, Wanner H, Diaz H F. 2016. The medieval quiet period. The Holocene, 26(6): 990~993.

Büntgen U, Myglan V S, Ljungqvist F C, McCormick M, Di Cosmo N, Sigl M, Jungclaus J, Wagner S, Krusic P J, Esper J, Kaplan J O, de Vaan M A C, Luterbacher J, Wacker L, Tegel W, Kirdyanov A V. 2016. Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD. Nature Geoscience, 9(3): 231~236.

Carlson A E, LeGrande A N, Oppo D W, Came R E, Schmidt G A, Anslow F S, Licciardi J M, Obbink E A. 2008. Rapid early Holocene deglaciation of the Laurentide ice sheet. Nature Geoscience, 1(9): 620~624.

Clark P U, Marshall SJ, Clarke G K C, Hostetler S W, Licciardi J M, Teller J T. 2001. Freshwater forcing of abrupt climate change during the Last Glaciation. Science, 293(5528): 283~287.

Crowley T J. 2000. Causes of climate change over the past 1000 years. Science, 289(5477): 270~277.

Cubasch U, Zorita E, Kaspar F, Gonzalez-Rouco J F, Storch H v, Prömmel K. 2006. Simulation of the role of solar and orbital forcing on climate. Advances in Space Research, 37(8): 1629~1634.

Dansgaard W, Johnsen S. J. 1993. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice core record. Nature, 364: 218~

- 220.
- Darby D A, Ortiz J D, Grosch C E, Lund S P. 2012. 1,500-year cycle in the Arctic Oscillation identified in Holocene Arctic sea-ice drift. *Nature Geoscience*, 5(12): 897~900.
- David A G, Nowell M, Chris Jones, Pyle D M. 2006. Episodic Quaternary volcanism in France and Germany. *Journal of Quaternary Science*, 21(6): 645~675.
- Debret M, Bout-Roumazeilles V, Grousset F, Desmet M, McManus J F, Massei N, Sebag D, Petit J R, Copard Y, Trentesaux A. 2007. The origin of the 1500-year climate cycles in Holocene North-Atlantic records. *Climate Past*, 3(4): 569~575.
- Denton G H, Broecker W S. 2008. Wobbly ocean conveyor circulation during the Holocene? *Quaternary Science Reviews*, 27(21~22): 1939~1950.
- Denton G H, Karlén W. 1973. Holocene climatic variations—Their pattern and possible cause. *Quaternary Research*, 3(2): 155~205.
- Engels S, Van G B. 2012. The effects of changing solar activity on climate: contributions from palaeoclimatological studies. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2.
- Fang Xiuqi, Hou Guangliang. 2011. Synthetically reconstructed Holocene temperature change in China. *Scientia Geographica Sinica*, 31: 385~393.
- Ferris D G, Cole-Dai J, Reyes A R, Budner D M. 2011. South Pole ice core record of explosive volcanic eruptions in the first and second millennia A. D. and evidence of a large eruption in the tropics around 535 A. D. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 116: D17308.
- Fisher T, Smith D, Andrews J. 2002. Preboreal oscillation caused by a glacial lake Agassiz flood. *Quaternary Science Reviews*, 21(8): 873~878.
- Gardeweg M C, Sparks R S J, Matthews S J. 1998. Evolution of Lascar volcano, northern Chile. *Journal of the Geological Society*, 155(1): 89.
- Gayer E, Lavé J, Pik R, France-Lanord C. 2006. Monsoonal forcing of Holocene glacier fluctuations in Ganesh Himal (Central Nepal) constrained by cosmogenic ^3He exposure ages of garnets. *Earth and Planetary Science Letters*, 252(3): 275~288.
- George H, Denton W, Research K J Q. 1973. Holocene climatic variations their pattern and possible cause. *Quaternary Research*, 3(2): 155~205.
- Gray L J, Beer J, Geller M, Haigh J D, Lockwood M, Matthes K, Cubasch U, Fleitmann D, Harrison G, Hood L, Luterbacher J, Meehl G A, Shindell D, van Geel B, White W. 2010. Solar influences on climate. *Reviews of Geophysics*, 48(4).
- Guo Zhengfu, Liu Jiaqi. 2002. Research advance in effect of volcanism on climate changes. *Advance in Earth Sciences*, 17(4): 595~604.
- Haigh J. D. 1996. The impact of solar variability on climate. *Science*, 272(5264): 981~984.
- Hansen J, Lacis A, Ruedy R, Sato M. 1992. Potential climate impact of Mount Pinatubo eruption. *Geophysical Research Letters*, 19(2): 215~218.
- Holzhauser H, Magny M, Zumbühl H J. 2005. Glacier and lake level variations in west—central Europe over the last 3500 years. *The Holocene*, 15(6): 789~801.
- Hoogakker B A A, Chapman M R, McCave I N, Hillaire-Marcel C, Ellison C R W, Hall I R, Telford R J. 2011. Dynamics of North Atlantic deepwater masses during the Holocene. *Paleoceanography*, 26(4).
- Huybers P, Langmuir C. 2009. Feedback between deglaciation, volcanism, and atmospheric CO_2 . *Earth and Planetary Science Letters*, 286(3): 479~491.
- Iacovino K, Ju-Song K, Sisson T, Lowenstern J, Kuk-Hun R, Jong-Nam J, Kun-Ho S, Song-Hwan H, Oppenheimer C, Hammond J O S, Donovan A, Liu K W, Kum-Ran R. 2016. Quantifying gas emissions from the “Millennium Eruption” of Paektu volcano, Democratic People’s Republic of Korea/China. *Science Advances*, 2(11).
- Ivy-Ochs S, Kerschner H, Maisch M, Christl M, Kubik P, Schlüchter C. 2009. Latest Pleistocene and Holocene glacier variation in the European Alps. *Quaternary Science Reviews*, 28: 2137~2149.
- Johnson R G, McClure B T. 1976. A model for Northern Hemisphere continental ice sheet variation. *Quaternary Research*, 6(3): 325~353.
- Jomelli V, Favier V, Vuille M, Braucher R, Martin L, Blard P H, Colose C, Brunstein D, He F, Khodri M, Bourlès D L, Leanni L, Rinterknecht V, Grancher D, Francou B, Ceballos J L, Fonseca H, Liu Z, Otto-Bliesner B L. 2014. A major advance of tropical Andean glaciers during the Antarctic cold reversal. *Nature*, 513(7517): 224~228.
- Keeling C D, Whorf T P. 1997. Possible forcing of global temperature by the oceanic tides. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(16): 8321~8328.
- Keeling C D, Whorf T P. 2000. The 1,800-year oceanic tidal cycle: A possible cause of rapid climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(8): 3814~3819.
- Kern A K, Harzhauser M, Piller W E, Mandic O, Soliman A. 2012. Strong evidence for the influence of solar cycles on a Late Miocene lake system revealed by biotic and abiotic proxies. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 329~330(5): 124~136.
- Khider C S J, Stott L D. 2014. Assessing millennial-scale variability during the Holocene: A perspective from the western tropical Pacific. *Paleoceanography*, 29(3): 143~159.
- Khider D, Jackson C S, Stott L D. 2014. Assessing millennial~scale variability during the Holocene: A perspective from the western tropical Pacific. *Paleoceanography*, 29(3): 143~159.
- Kirkby J, Curtius J, Almeida J, Dunne E, Duplissy J, Ehrhart S, Franchin A, Gagné S, Ickes L, Kürten A, Kupc A, Metzger A, Riccobono F, Rondo L, Schobesberger S, Tsagkogeorgas G, Wimmer D, Amorim A, Bianchi F, Breitenlechner M, David A, Dommen J, Downard A, Ehn M, Flagan R C, Haider S, Hansel A, Hauser D, Jud W, Junninen H, Kreissl F, Kvashin A, Laaksonen A, Lehtipalo K, Lima J, Lovejoy E R, Makhmutov V, Mathot S, Mikkilä J, Minginette P, Mogo S, Nieminen T, Onnela A, Pereira P, Petäjä T, Schnitzhofer R, Seinfeld J H, Sipilä M, Stozhkov Y, Stratmann F, Tomé A, Vanhanen J, Viisanen Y, Vrtala A, Wagner P E, Walthert H, Weingartner E, Wex H, Winkler P M, Carslaw K S, Worsnop D R, Baltensperger U, Kulmala M. 2011. Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation. *Nature*, 476(7361): 429~433.
- Kleiven H F, Kissel C, Laj C, Ninnemann U S, Richter T O, Cortijo E. 2008. Reduced north atlantic deep water coeval with the glacial lake agassiz freshwater outburst. *Science*, 319(5859): 60~64.
- Kobashi T, Menviel L, Jeltsch-Thömmes A, Vinther B M, Box J E, Muscheler R, Nakaegawa T, Pfister P L, Döring M, Leuenberger M, Wanner H, Ohmura A. 2017. Volcanic influence on centennial

- to millennial Holocene Greenland temperature change. *Scientific Reports*, 7(1): 1441.
- Kravitz B, Robock A. 2011. Climate effects of high-latitude volcanic eruptions: Role of the time of year. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D1).
- Kuhlbrodt T, Griesel A, Montoya M, Levermann A, Hofmann M, Rahmstorf S. 2007. On the driving processes of the Atlantic meridional overturning circulation. *Reviews of Geophysics*, 45(2).
- Kutzbach J E, Vavrus S J, Ruddiman W F, Philippon-Berthier G. 2011. Comparisons of atmosphere—ocean simulations of greenhouse gas-induced climate change for pre-industrial and hypothetical ‘no-anthropogenic’ radiative forcing, relative to present day. *The Holocene*, 21(5): 793~801.
- Li Hao, Xu Deke, Shen Caiming, Cui Anning, Zuo Xinxin, Dong Yajie, Wang Can, Jin Yingyu, Yu Yinghao, Wu Naiqin, Lu Houyuan. 2021. Multi-centennial climate cycles and their impact on the Tubo Dynasty in the southern Tibetan Plateau. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 57: 8110584.
- Li Pingyuan, Liu Xiuming, Liu Zhi, Zhao Guoyong, Ma Mingming, Lv Bin, Guo Hui. 2012. Volcanic impacts on global climate changes. *Journal of Subtropical Resources and Environment*.
- Licciardi J M, Kurz M D, Curtice J M. 2007. Glacial and volcanic history of Icelandic table mountains from cosmogenic ³He exposure ages. *Quaternary Science Reviews*, 26(11): 1529~1546.
- LindÉN M, MÖLLER P E R, BjÖRCK S, Sandgren P E R. 2006. Holocene shore displacement and deglaciation chronology in Norrbotten, Sweden. *Boreas*, 35(1): 1~22.
- Liu Zhengyu, Lu Zhengyao, Wen Xinyu, Otto ~ Bliesner B L, Timmermann A, Cobb K M. 2014a. Evolution and forcing mechanisms of El Niño over the past 21,000 years. *Nature*, 515(7528): 550~553.
- Liu Zhengyu, Zhu Jiang, Rosenthal Y, Zhang X, Otto-Bliesner Bette L, Timmermann A, Smith Robin S, Lohmann G, Zheng W, Elison Timm O. 2014b. The Holocene temperature conundrum. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(34): E3501~E3505.
- Lockwood M, Bell C, Woollings T, Harrison R G, Gray L J, Haigh J D. 2010. Top-down solar modulation of climate: Evidence for centennial-scale change. *Environmental Research Letters*, 5: 034008.
- Lockwood M. 2012. Solar Influence on Global and Regional Climates. *Surveys in Geophysics*, 33(3): 503~534.
- Marcott S A, Shakun J D, Clark P U, Mix A C. 2013. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. *Science*, 339(6124): 1198~1201.
- Marshall J, Speer K. 2012. Closure of the meridional overturning circulation through Southern Ocean upwelling. *Nature Geoscience*, 5(3): 171~180.
- Marshall L R, Maters E C, Schmidt A, Timmreck C, Robock A, Toohey M. 2022. Volcanic effects on climate: recent advances and future avenues. *Bulletin of Volcanology*, 84(5): 54.
- Marshall S J, Clarke G K C. 1999. Modeling north American freshwater runoff through the Last Glacial Cycle. *Quaternary Research*, 52: 300~315.
- Mayewski P A, Rohling E E, Curt Stager J, Karlén W, Maasch K A, David Meeker L, Meyerson E A, Gasse F, van Kreveland S, Holmgren K, Lee-Thorp J, Rosqvist G, Rack F, Staubwasser M, Schneider R R, Steig E J. 2004. Holocene climate variability. *Quaternary Research*, 62(3): 243~255.
- Meehl G A, Washington W M, Ammann C M, Arblaster J M, Wigley T M L, Tebaldi C. 2004. Combinations of natural and anthropogenic forcings in twentieth-century climate. *Journal of Climate*, 17(19): 3721~3727.
- Menounos B, Osborn G, Clague J, Luckman B. 2009. Latest Pleistocene and Holocene glacier fluctuations in western Canada. *Quaternary Science Reviews*, 1877: 71~71.
- Miller G H, Briner J P, Refsnider K A, Lehman S J, Geirsdóttir Á, Larsen D J, Southon J R. 2013. Substantial agreement on the timing and magnitude of Late Holocene ice cap expansion between East Greenland and the Eastern Canadian Arctic: a commentary on Lowell et al., 2013. *Quaternary Science Reviews*, 77: 239~245.
- Miller G H, Geirsdóttir Á, Zhong Y, Larsen D J, Otto-Bliesner B L, Holland M M, Bailey D A, Refsnider K A, Lehman S J, Southon J R, Anderson C, Björnsson H, Thordarson T. 2012. Abrupt onset of the Little Ice Age triggered by volcanism and sustained by sea-ice/ocean feedbacks. *Geophysical Research Letters*, 39: L02708.
- Nesje A, Dahl S O, Bakke J. 2004. Were abrupt Lateglacial and early-Holocene climatic changes in northwest Europe linked to freshwater outbursts to the north Atlantic and Arctic oceans? *The Holocene*, 14(2): 299~310.
- Notaro M, Wang Y I, Liu Z, Gallimore R, Levis S. 2008. Combined statistical and dynamical assessment of simulated vegetation – rainfall interactions in north Africa during the mid-Holocene. *Global Change Biology*, 14(2): 347~368.
- Oerlemans J. 2005. Extracting a Climate Signal from 169 Glacier Records. *Science*, 308(5722): 675~677.
- Putnam A E, Schaefer J M, Denton G H, Barrell D J A, Finkel R C, Andersen B G, Schwartz R, Chinn T J H, Doughty A M. 2012. Regional climate control of glaciers in New Zealand and Europe during the preindustrial Holocene. *Nature Geoscience*, 5(9): 627~630.
- Ren Guoyu, Jiang Dabang, Yan Qing. 2021. Characteristics, drivers and feedbacks of paleoclimatic variations and the implications for modern climate change research. *Quaternary Sciences*, 41(3): 824~841.
- Ren Guoyu. 2000. Decline of the Mid to Late Holocene forests in China: Climatic change or human impact? *Journal of Quaternary Science*, 15(3): 273~281.
- Renssen H, Goosse H, Crosta X, Roche D M. 2010. Early Holocene Laurentide ice sheet deglaciation causes cooling in the high-latitude southern hemisphere through oceanic teleconnection. *Paleoceanography*, 25.
- Renssen H, Seppä H, Heiri O, Roche D M, Goosse H, Fichet F. 2009. The spatial and temporal complexity of the Holocene thermal maximum. *Nature Geoscience*, 2(6): 411~414.
- Rodbell D T, Seltzer G O, Mark B G, Smith J A, Abbott M B. 2008. Clastic sediment flux to tropical Andean lakes: records of glaciation and soil erosion. *Quaternary Science Reviews*, 27(15): 1612~1626.
- Røthe T O, Bakke J, Støren E W N, Bradley R S. 2018. Reconstructing Holocene glacier and climate fluctuations from lake sediments in Vårfluesjøen, northern Spitsbergen. *Frontiers in Earth Science*, 6.
- Shapiro A, Schmutz W, Rozanov E, Schöll M, Haberleiter M, Shapiro A, Nyeki S. 2011. A new approach to long-term reconstruction of the solar irradiance leads to large historical solar forcing. *Astronomy and Astrophysics*, 529: A69.

Shi Yafeng, Kong Zhaochen, Wang Sumin, Tang Lingyu, Wang Fubao, Yao Tadong, Zhao Xitao, Zhang Piyuan, Shi Shaohua. 1993#. Climate and environment during the Holocene Warm Period in China. *Science in China (Series B)*, 23(8): 865~873.

Shi Zhengguo, Lei Jing, Zhou Peng, Ren Xin. 2020#. Numerical simulation researches on orbital-scale Asian climate dynamics: History and perspective. *Quaternary Sciences*, 40(1): 8~17.

Shindell D T, Schmidt G A, Mann M E, Rind D, Waple A. 2001. Solar forcing of regional climate change during the Maunder minimum. *Science*, 294(5549): 2149~2152.

Sigl M, Winstrup M, McConnell J R, Welten K C, Plunkett G, Ludlow F, Buntgen U, Caffee M, Chellman N, Dahl-Jensen D, Fischer H, Kipfstuhl S, Kostick C, Maselli O J, Mekhaldi F, Mulvaney R, Muscheler R, Pasteris D R, Pilcher J R, Salzer M, Schupbach S, Steffensen J P, Vinther B M, Woodruff T E. 2015. Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2,500 years. *Nature*, 523(7562): 543~549.

Solomina O N, Bradley R S, Hodgson D A, Ivy-Ochs S, Jomelli V, Mackintosh A N, Nesje A, Owen L A, Wanner H, Wiles G C. 2015. Holocene glacier fluctuations. *Quaternary Science Reviews*, 111: 9~34.

Solomina O N, Bradley R S, Jomelli V, Geirsdottir A, Kaufman D S, Koch J, McKay N P, Masiokas M, Miller G, Nesje A, Nicolussi K, Owen L A, Putnam A E, Wanner H, Wiles G, Yang B. 2016. Glacier fluctuations during the past 2000 years. *Quaternary Science Reviews*, 149: 61~90.

Soon W, Velasco Herrera V M, Selvaraj K, Traversi R, Usoskin I, Chen C T, Lou J Y, Kao S J, Carter R M, Pipin V, Severi M, Becagli S. 2014. A review of Holocene solar-linked climatic variation on centennial to millennial timescales: Physical processes, interpretative frameworks and a new multiple cross-wavelet transform algorithm. *Earth-Science Reviews*, 134: 1~15.

Steinhilber F, Beer J, Fröhlich C. 2009. Total solar irradiance during the Holocene. *Geophysical Research Letters*, 36(19).

Sun Youbin, McManus J F, Clemens S C, Zhang Xu, Vogel H, Hodell D A, Guo Fei, Wang Ting, Liu Xingxing, An Zhisheng. 2021. Persistent orbital influence on millennial climate variability through the Pleistocene. *Nature Geoscience*, 14(11): 812~818.

Svensmark H, Bondo T, Svensmark J. 2009. Cosmic ray decreases affect atmospheric aerosols and clouds. *Geophysical Research Letters*, 36(15).

Svensmark H, Friis-Christensen E. 1997. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage—a missing link in solar—climate relationships. *Journal of Atmospheric and Solar—Terrestrial Physics*, 59(11): 1225~1232.

Tan Ming, Shao Xuemei, Liu Xiaohong, Cai Binggui. 2006#. A 1000-year temperature records synthesized by combining stalagmite and tree rings from China. *Advances in Climate Change Research*, 2: 113~116.

Tang Hongye, Jiang Hongbo. 1998#. Climate fluctuations and solar variability over the last 5000a. *Science In China (Series D)*, 26: 491~497.

Thirumalai K, Clemens S C, Partin J W. 2020. Methane, monsoons, and modulation of millennial-scale climate. *Geophysical Research Letters*, 47(9).

Toggweiler J R, Samuels B. 1998. On the ocean's large-scale circulation near the limit of no vertical mixing. *Journal of Physical Oceanography*, 28(9): 1832~1852.

Toohey M, Krüger K, Schmidt H, Timmreck C, Sigl M, Stoffel M, Wilson R. 2019. Disproportionately strong climate forcing from extratropical explosive volcanic eruptions. *Nature Geoscience*, 12(2): 100~107.

Toohey M, Sigl M. 2017. Volcanic stratospheric sulfur injections and aerosol optical depth from 500 BCE to 1900 CE. *Earth System Science Data Discussions*, 9(2): 809~831.

Trenberth K E, Caron J M, Stepaniak D P. 2001. The atmospheric energy budget and implications for surface fluxes and ocean heat transports. *Climate Dynamics*, 17(4): 259~276.

Usoskin I G. 2017. A history of solar activity over millennia. *Living Reviews in Solar Physics*, 14(1): 3.

Van der Bilt W G M, Bakke J, Vasskog K, D'Andrea W J, Bradley R S, Ólafsdóttir S. 2015. Reconstruction of glacier variability from lake sediments reveals dynamic Holocene climate in Svalbard. *Quaternary Science Reviews*, 126: 201~218.

Wan Lingfeng, Liu Jian, Gao Chaochao, Sun Weiyi, Ning Liang, Yan Mi. 2020#. Study about influence of the Holocene volcanic eruptions on temperature variation trend by simulation. *Quaternary Sciences*, 40(6): 1597~1610.

Wang Pingxian, Tian Jun, Huang Enqing, Ma Wentao. 2018#. Earth system and evolution. Beijing: Science Press; 1~565.

Wang Shaowu, Dong Guangrong. 2002#. Assessment of environmental evolution in western china. Volume i, environmental characterization and evolution in western china. Beijing: Science Press; 1~248.

Wang Shaowu. 2008#. 8.2 ka BP Cold Event. *Advances In Climate Change Research*, 4: 193~194.

Wang Yongjin, Cheng Hai, Edwards R L, He Yaoqi, Kong Xinggong, An Zhisheng, Wu Jiangying, Kelly Megan J, Dykoski C A, Li Xiangdong. 2005. The Holocene Asian Monsoon; links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 308(5723): 854~857.

Wanner H, Beer J, Büttikofer J, Crowley T J, Cubasch U, Flückiger J, Goosse H, Grosjean M, Joos F, Kaplan J O, Küttel M, Müller S A, Prentice I C, Solomina O, Stocker T F, Tarasov P, Wagner M, Widmann M. 2008. Mid- to Late Holocene climate change: An overview. *Quaternary Science Reviews*, 27(19~20): 1791~1828.

Wanner H, Mercolli L, Grosjean M, Ritz S P. 2014. Holocene climate variability and change; a data based review. *Journal of the Geological Society*, 172(2): 254.

Wanner H, Pfister C, Neukom R. 2022. The variable European Little Ice Age. *Quaternary Science Reviews*, 287.

Wanner H, Solomina O, Grosjean M, Ritz S P, Jetel M. 2011. Structure and origin of Holocene cold events. *Quaternary Science Reviews*, 30(21~22): 3109~3123.

Warner N, Domack E, Warner C, Millenial. 2002. Millenial to decadal scale paleoenvironmental change during the Holocene in the Palmer Deep, Antarctica, as recorded by particle size analysis. *Paleoceanography*, 17.

Wunsch C. 2000. On sharp spectral lines in the climate record and the millennial peak. *Paleoceanography*, 15(4): 417~424.

Wunsch C. 2002. What Is the Thermohaline Circulation? *Science*, 298(5596): 1179~1181.

Xu Deke, Lu Houyuan, Chu Guoqiang, Liu Li, ShenCaiming, Li Fengjiang, Wang Can, Wu Naiqin. 2019. Synchronous 500-year oscillations of monsoon climate and human activity in Northeast Asia. *Nat Commun*, 10(1): 4105.

Xu Deke, Lu Houyuan, Chu Guoqiang, Wu Naiqin, Shen Caiming,

Wang Can, Mao Limi. 2014. 500-year climate cycles stacking of recent centennial warming documented in an East Asian pollen record. *Scientific Reports*, 4(1): 3611.

Yang Zhigen. 2001. Changes of the earth's orbital elements and the Quaternary glacial epoch. *Progress in Astronomy*, 4: 193~194.

Yi Liang, Chen Shenliang, Ortiz J D, Chen Guangquan, Peng Jun, Liu Feng, Chen Yanping, Deng Chenglong. 2015. 1500-year cycle dominated Holocene dynamics of the Yellow River delta, China. *The Holocene*, 26(2): 222~234.

Yu Ge, Liu Jian. 2003. Geological records of volcanic explosions during the last 12000 years and the volcanic impacts on climate changes. *Journal of Lake Sciences*, 15: 12~20.

Zhang Chengjun, Mischke S. 2009. A Lateglacial and Holocene lake record from the Nianbaoyeze Mountains and inferences of lake, glacier and climate evolution on the eastern Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 28(19): 1970~1983.

Zhang Xu, Barker S, Knorr G, Lohmann G, Drysdale R, Sun Y, Hodell D, Chen F. 2021. Direct astronomical influence on abrupt climate variability. *Nature Geoscience*, 14(11): 819~826.

Zhang Xu, Lohmann G, Knorr G, Purcell C. 2014. Abrupt glacial climate shifts controlled by ice sheet changes. *Nature*, 512(7514): 290~294.

Zhu Kezhen. 1972. A preliminary study of climate change in China over the last five thousand years. *Acta Archaeologica Sinica*, (1): 15~38.

Mechanisms of Holocene millennial-scale climate fluctuations

HE Wenyu^{1,2)}, WANG Luo¹⁾

1) Division of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029;

2) College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049

Objectives: Holocene (11.7 ka BP) is the name for the most recent interval of Earth's history and includes the present day. Its climate is stabler than the last glacial, but there are still abrupt climate changes, including centennial and millennial-scale climate fluctuations. What caused these changes have no consensus, and various mechanisms have been proposed. Moreover, the abrupt climate fluctuation during Holocene might be closely related to human civilization development. Therefore, the abrupt climate change has received more and more attention.

Results and Conclusion: Here we review the causes of abrupt climate changes at the centennial and millennial scale in the Holocene. The high temperature in the early Holocene was mainly associated with solar activity, the melting of ice caps and ocean circulation. The highest temperatures were observed in the middle Holocene, but several dry and cold climate events were also found, mainly due to glacial activity. The volcanic activity was the main factor causing the cooling climate in the late Holocene. Other factors such as orbital parameters, tidal action, glacial action, and ocean circulation influenced the climate during various periods of the Holocene.

Keywords: Holocene; abrupt climate change; climate forcings; millennial scale variability

First author: HE Wenyu, female, born in 1999, postgraduate student, is mainly engaged in climate change and biodiversity since the Last Deglaciation; Email: hewenyu@mail.iggcas.ac.cn

Manuscript received on: 2023-02-24; Accepted on: 2023-05-27; Published online on: 2023-08-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2023.08.022 **Edited by:** LI Ming, ZHANG Yuxu