



中国东部地区全新世气候演化及其与气候事件的对应性

王江月, 白伟明, 王照波, 王明辉, 李宝杰

The Holocene climatic evolution in Eastern China and its bearing on climatic events

WANG Jiangyue, BAI Weiming, WANG Zhaobo, WANG Minghui, and LI Baojie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021122001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

全新世中国大河三角洲沉积演化模式转化及其对人类活动的响应

Changes of evolution models of China's large river deltas since Holocene and their responses to anthropogenic activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 77

渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194

珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202

南黄海中部隆起晚新近纪—第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化

Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 25

江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义

Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 210

科学计量：中国海洋地质40年发展历程与研究热点分析

Forty years development of marine geology in China: Evidence from scientometrics

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 1



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王江月, 白伟明, 王照波, 等. 中国东部地区全新世气候演化及其与气候事件的对应性 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(2): 167-177.
WANG Jiangyue, BAI Weiming, WANG Zhaobo, et al. The Holocene climatic evolution in Eastern China and its bearing on climatic events[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(2): 167-177.

中国东部地区全新世气候演化及其与气候事件的对应性

王江月^{1,2}, 白伟明³, 王照波^{1,4,5}, 王明辉⁴, 李宝杰⁵

1. 自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室, 山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室, 济南 250013
2. The university of Sheffield, Sheffield S10 2TN, UK, England
3. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237
4. 临沂沂蒙山世界地质公园管理局, 临沂 273304
5. 山东指南针矿产勘查有限公司, 临沂 276006

摘要: 在格陵兰 GISP2 冰芯气候演化曲线及北半球 30°~90°N 全新世气候演化综合曲线的基础上, 统合了中国东部地区近年获得的全新世洞穴石笋、黄土沉积、湖泊沉积等典型气候演化曲线, 建立了全新世气候节律分期, 划分了 11 个暖期 (编号 W1—W11), 10 个冷期 (编号 C1—C10)。以此为基础, 首次将中国东部全新世发生的洪水、海进、海退、冰川、冰冻等各类气候事件进行对应性分析, 确认了中国在全新世存在一个千年尺度的节律性气候演化特征。综合各类气候事件后显示, 编号为 C2、C4、C6 的冷期降温幅度较大, 分别对应于 10、8.2、5.3 kaBP 的强冷事件。编号为 W5 的暖期时段, 对应于 7.2 kaBP 的大暖期。研究发现, 全新世气候变化在中国东部产生了同步的陆海联动效应。

关键词: 气候节律; 千年尺度; 冷暖旋回; 大暖期; 全新世

中图分类号: P532 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021122001

The Holocene climatic evolution in Eastern China and its bearing on climatic events

WANG Jiangyue^{1,2}, BAI Weiming³, WANG Zhaobo^{1,4,5}, WANG Minghui⁴, LI Baojie⁵

1. Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resource Utilization, MNR; Shandong Provincial Key Laboratory of Metallogenic Geological Process and Resource Utilization, Jinan 250013, China
2. The University of Sheffield, Sheffield S10 2TN, UK, England
3. Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266237, China
4. Yimeng National Geological Park Management Office, Linyi 273304, China
5. Shandong Compass Mineral Exploration co., Ltd, Linyi 276006, China

Abstract: Based on the Holocene climate evolution curve constructed with the Greenland ice core GISP2 and the integrated climate curves at the latitude of 30°~90°N, as well as the climate evolutionary curves recently acquired from the Holocene cave stalagmites, loess and lake sediments, the Holocene climatic rhythm stages has been established by this paper for Eastern China, which consists of 11 warm periods (numbered W1-W11) and 10 cold periods (numbered C1-C10). Correspondingly, the analysis of Holocene climatic events, such as floods, transgressions, regressions, glaciers, freezing and other climate events in the eastern China is conducted. Evidence confirms that there is a millennium scale rhythmical climate evolution in China during the Holocene. The cooling periods numbered C2, C4 and C6 have showed the considerable cooling and may correspond to the cooling events in 10, 8.2 and 5.3 kaBP, respectively. The warming period numbered W5 is corresponding to the Megathermal around 7 kaBP. It indicates that the Holocene climate change in eastern China is obviously influenced by land-sea interactions.

Key words: climate rhythm stages; millennial scale; cycle of cooling and warm periods; megathermal; Holocene

资助项目: 自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室和山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室资助开放课题“山东蒙山全新世冰川遗迹堆积年龄与气候变化”(KFKT202121)

作者简介: 王江月 (1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事第四纪地质与气候演化研究, E-mail: jiang8yue25@163.com

通讯作者: 白伟明 (1975—), 男, 正高级工程师, 主要从事岩土工程、测量工程及第四纪地质研究, E-mail: qdbwm@163.com

收稿日期: 2021-12-20; **改回日期:** 2022-02-14. 周立君编辑

全新世最初由 Gerivais 在 1869 年提出,后经第 24 届国际地质学会推荐,于 1932 年被国际第四纪委员会采用,并规定其底界划在 10000 aBP^[1]。全新世以新仙女木事件(Younger Dryas Event)的结束为起点,¹⁴C 校正后日历年龄为 11627±472 cal.aBP^[2]。最新的国际年代地层表将 4.2 与 8.2 kaBP 作为全新世晚、中、早的划分时间^[3]。

全新世气候并非都温暖湿润,如 Lelstol 在 1960 年就把欧洲的全新世划分出 4 次寒冷期,4 次寒冷期的时间分别为 8250、5350、2780 aBP(称为新冰期)、1550—1900 AD(称为小冰期)^[1]。近年来,越来越多的气候记录揭示了全新世气候的不稳定性,全新世气候事件主要包括全新世大暖期^[4]、多次极端冷事件(11.1 ka 事件、10.3 ka 事件、9.4 ka 事件、8.2 ka 事件、6.4 ka 事件、5.3 ka 事件、4.2 ka 事件、2.8 ka 事件、1.5 ka 事件以及 0.5 ka 小冰期等)^[5]。近些年,中国在贵州董哥洞洞穴石笋、湖北大九湖湖泊沉积、陕西岐山黄土沉积、内蒙巴彦查干湖湖泊沉积中(图 1),均获得了全新世气候演化曲线。此外,王照波等^[6]对山东蒙山的冰川遗迹进行了多种方法测年,确认了全新世 10、8.2、5.3 kaBP 的 3 次强降温事件^[7-10]。Bond 整理了格陵兰 GISP2 冰芯气候演化曲线,在全新世划分出 8 次降温事件(图 2a),因此,全新世节律性降温事件被称作

“Bond 事件”^[11-12]。Wanner 等认为 Bond 事件可能主要局限在北大西洋及其周边区域,其影响范围可能偶尔会扩展到亚洲,甚至南半球^[13]。Wanner 等的这一观点显然受到近年中国东部全新世气候研究相关成果的冲击,Bond 事件不仅在东亚地区普遍存在,并且借助东亚冷槽^[10]南下延伸到中纬度地区。安芷生^[14]对黄土记录的分析也指出中国存在千年尺度的气候震荡。王绍武等^[15]专门综述了全新世千年尺度气候变率的有关研究成果。

很明显,中国东部地区在全新世期间也经历了多期次节律性的冷事件,综合近年中国的洞穴石笋、湖泊沉积、黄土沉积等形成的全新世气候演化曲线,建立气候演化节律分期,以此为基础,对中国全新世洪水、海进、海退、冰川等各类气候事件进行对应性分析,建立各类气候事件与气候节律性演化曲线之间的内在关系,对理解中国全新世气候演化特征具有重要意义。

1 中国东部全新世气候演化特征

1.1 北半球全新世气候演化特征

Marcott 等^[16]收集了全球 73 条符合要求的全新世温度记录,基于 5°×5°格点数据的面积加权平均,

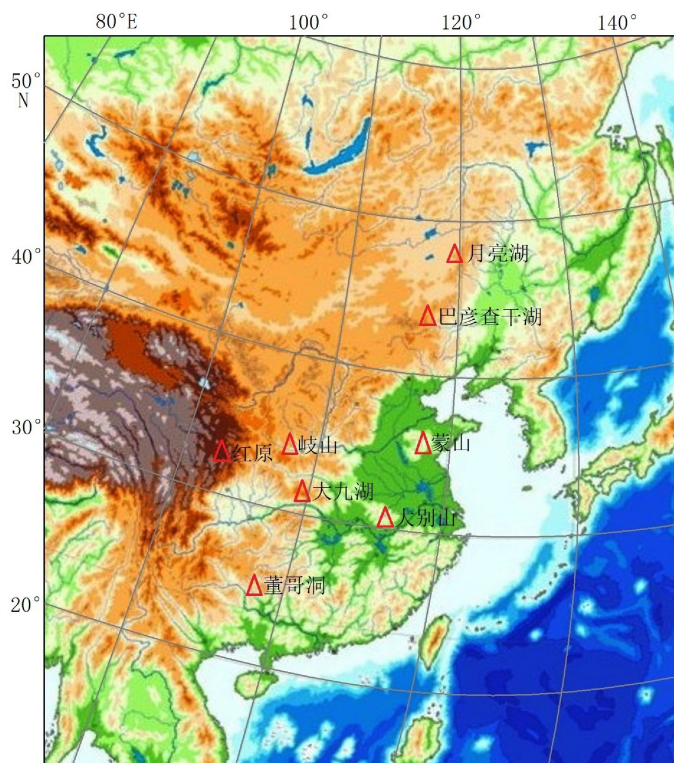


图 1 中国东部全新世重要气候数据研究点分布位置

Fig.1 The distribution of research sites which recorded important Holocene climatic fluctuations in eastern China

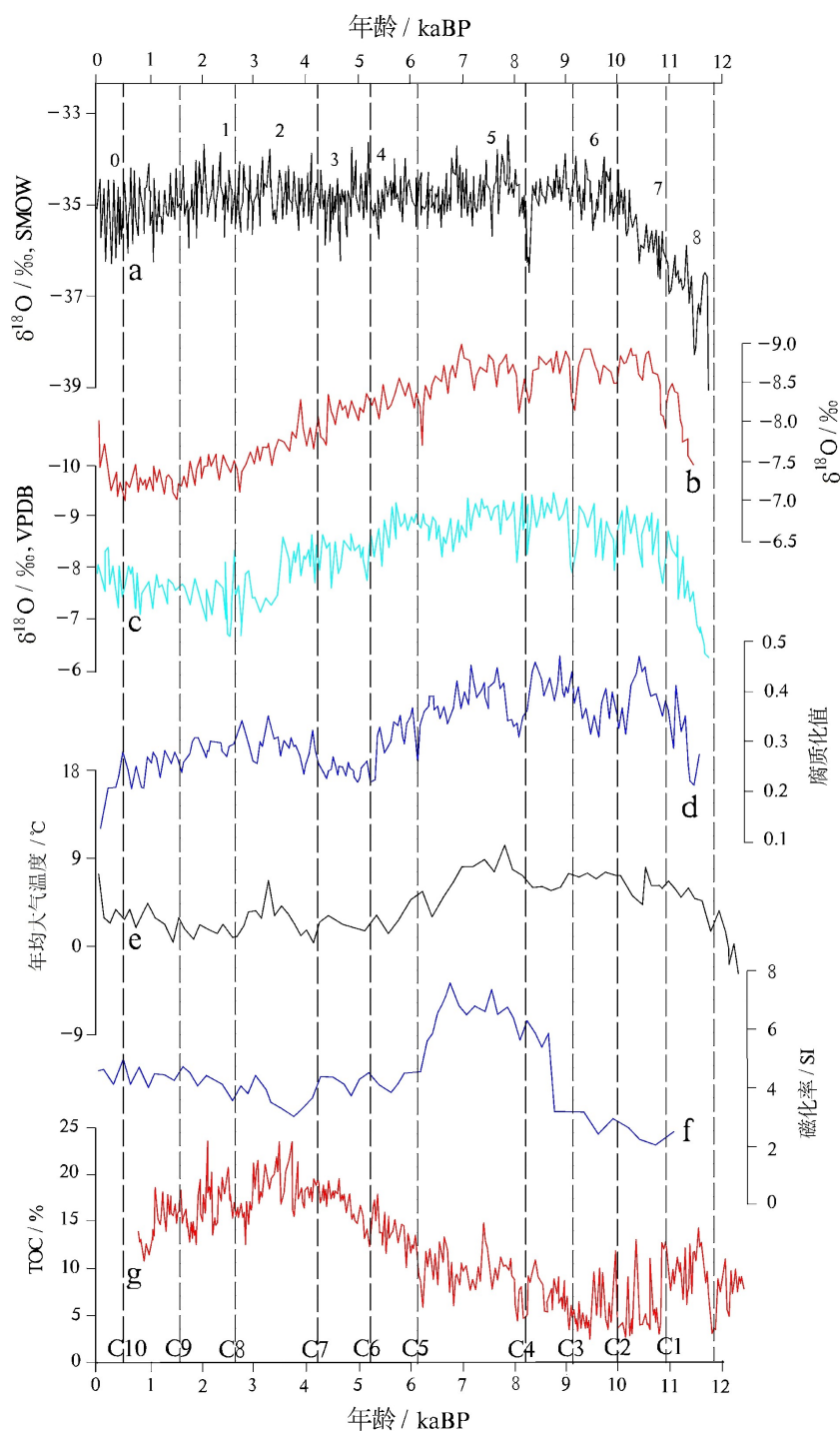


图 2 中国东部全新世气候演化曲线

图中竖虚线代表降温期峰值, C1-C10 为冷期编号。a. 格陵兰 GISP2 冰芯气候演化曲线^[12], 曲线旁数字为 Bond 确定的降温期次; b. 北纬 30°~90°N 综合气候演化曲线^[16]; c. 贵州省董哥洞石笋气候演化曲线^[18]; d. 四川省红原泥炭腐殖质含量变化曲线^[23]; e. 湖北省神农架大九湖泥炭沉积反映的温度变化曲线^[24]; f. 陕西省岐山全新世黄土剖面磁化率曲线图^[28]; g. 大兴安岭中段月亮湖沉积物反映的气候演化曲线^[27]。

Fig.2 The Holocene climatic evolution curve of Eastern China

The horizontal dotted lines represent the mid-value of cooling periods, C1-C10 are the numbers of the cold periods.

首次获得了全球全新世以来时间分辨率大于 300 a 的温度模拟集成记录, 其按照 60° 纬度为间隔, 分别形成了 30°~90°N、30°N~30°S、30°~90°S 3 个区域的全新世温度变化记录。图 2b 为 30°~90°N 区

域内全新世气候演化趋势, 尤其 $\delta^{18}\text{O}$ 反映的气候曲线(以下简称北半球综合曲线), 更加清晰地展现了 30°~90°N 这一区域的气候演化特征。该曲线较好地反映了全新世的降温期, 代表了 30°~90°N 区域

气候演化的基本特征。

1.2 中国东部全新世气候演化曲线特征

近年,中国学者也对国内全新世气候演化进行了研究,通过石笋、黄土沉积、湖泊沉积等载体研究获得了多介质的气候演化曲线,同时,近年来对洪水事件、海侵海退事件、冰川冰冻事件的研究,也获得了大量有重要气候意义的年代数据成果。本文重点探讨中国东部(105°E以东)^[17]全新世气候演化特征。

1.2.1 洞穴石笋中的气候演化信息

洞穴石笋在气候演化研究中具有重要意义,近年来获得了大量的气候演化曲线,如董哥洞^[18]和尚洞^[19]、三宝洞^[20]等,但董哥洞全新世石笋研究具有较强的代表性,程海等^[21]对比研究了南京葫芦洞与董哥洞的氧同位素记录,发现虽然两洞相距千里,但具有很好的一致性。董哥洞位于贵州省荔波县洞塘乡老场村东(位置见图1),洞口高程为680 m^[18]。Dykoski等对董哥洞的石笋进行了研究,获得了全新世以来的 $\delta^{18}\text{O}$ 演化曲线(图2c,以下简称董哥洞曲线)^[22]。 $\delta^{18}\text{O}$ 数值的增大,指示该段时间降雨量减少,东亚季风减弱,对应于北极地区的降温事件,如11.2、9.16、8.2 kaBP降温事件均有明显的反映。董哥洞居于中国南部,这表明全新世时期的降温事件已经深远影响到中国南方地区。

1.2.2 湖泊沉积中的气候演化信息

Yu等对青藏高原东缘四川红原泥炭腐殖质含量进行了研究,获得了腐殖质含量变化曲线图(图2d,位置见图1,以下简称红原曲线),分辨出7次冷事件,分别为1.5、3.5、5.2、6.2、8.0、9.6~10.1、11.1 kaBP^[23]。Zhang等对湖北神农架大九湖泥炭沉积物的元素地球化学、同位素地球化学及孢粉记录进行了研究,发现中国东部存在明显的8.2与9.2 kaBP降温事件,而9.2 kaBP事件的降温幅度远远超过了8.2 kaBP事件,除此之外,还存在明显的4.7~5.7 kaBP降温事件(图2e,位置见图1,以下简称大九湖曲线)^[24]。宁凯根据巴丹吉林沙漠湖泊沉积孢粉和正构烷烃记录还原了全新世环境变化,分辨出9.4、8.2、5.4、2.8和1.4 kaBP的干旱事件^[25]。赵艳等根据内蒙古巴彦查干湖(位置见图1)的孢粉记录,发现在5.4 kaBP时存在“崩溃式”植被突变,当时植被类型由针阔混交林退化为荒漠草原。同时还识别出4.2 kaBP气候突变事件^[26]。李倩对大兴安岭中段的月亮湖(位置见图1,以下简称月亮湖曲线)全新世的沉积记录进行了较为详细的研究,获得了相关气候演化的曲

线,曲线中的升温、降温期段与其他曲线对应的较为吻合(图2g)^[27]。

1.2.3 黄土沉积中的气候演化信息

张宗祜对陕西岐山黄土剖面进行研究,绘制了全新世磁化率曲线图(图2f,位置见图1,以下简称岐山曲线),提出在全新世存在11.0、10.5、5.4和3 kaBP等几次降温期,曲线中9.0~6.0 kaBP期间显示为全新世的高温期,但由于测年数值分布不均匀,8.2 kaBP降温事件在曲线中没有得到准确的显示^[28],但王艳娟对陕西五丈原一带全新世黄土进行了较详细的测年研究,剖面记录了8.3、5.7、5.3 kaBP前后出现明显的降温,并提出8.6~8.3、5.7、5.3、4.0 kaBP等几个显著的降温事件产生了范围较广的影响,对人类文明的发展起到不可忽视的影响^[29]。

上述通过不同载体获得的全新世气候演化曲线,虽然由于采样点密度、年龄测试误差等会使得曲线拐点存在微量的漂移,但各种载体形成的气候曲线均显示出较强的对应性,综合各曲线进行对比分析,发现Marcott等综合30°~90°N区间气候资料绘制的气候演化曲线^[16]参考意义重大,大多气候演化降温拐点都能够得到显示。全新世期间的升温、降温节律性具有明显时段性,尤其降温事件会在曲线中形成凸出的显示,10.9、10.0 kaBP降温事件在格陵兰GISP2冰芯、北半球综合曲线、董哥洞曲线、红原曲线中有明显的显示;9.1、8.2、6.2、4.2、2.8 kaBP降温事件在各气候曲线中均有较好的显示;5.3 kaBP事件在董哥洞曲线、红原曲线、月亮湖曲线中反映突出;1.5 kaBP降温事件在北半球综合曲线、红原曲线中有显示;0.5 kaBP降温事件在北半球综合曲线、董哥洞曲线中有对应显示。有些曲线中会存在个别拐点的缺失或弱显示,这可能与样点的采集密度、原始沉积速率、测年误差等因素有关。

根据降温事件在气候曲线中的显示,可以划分出10个冷期(编号为C1—C10)、11个暖期(编号为W1—W11),见图2和表1。降温时段的峰值点,分布在0.5、1.5、2.8、4.2、5.3、6.2、8.2、9.1、10.0、10.9 kaBP,两个降温峰值之间存在一个暖期。

2 中国东部全新世气候事件与气候演化间的对应性

通过洞穴石笋、湖泊沉积、黄土沉积等获得的气候演化曲线,只能间接反映气候节律性冷暖变化规律及存续的大致时段,但相应时段的气候具体状况,则需要通过具体的气候事件来对应分析其环境

表 1 全新世气候演化分期与洪水、海侵、冰退、冰川、冰冻等气候事件年龄数据对应表
Table 1 The division of Holocene climatic evolution stages and their correlation with the dating data of flood events, transgression events, glaciation events and freezing events

事件类型	W1	C1	W2	C2	W3	C3	W4	C4	W5	C5	W6	C6	W7	C7	W8	C8	W9	C9	W10	C11	W11	参考文献
格陵兰GISP2冰芯降温事件	11.1			10.3		9.4		8.6		7.4		5.2		4.0		2.7		1.6		0.5		Bond等 ^[12]
陕西岐山黄土剖面	10.8					7.5						5.0		4.0		3.0			0.8, 1.2			张宗祜 ^[28]
沂河、沭河流域																					王江月 ^[30]	
汉江上游晏家棚															2.8~3.2		1.6~1.8		0.9~1.0			吉琳等 ^[31]
河南安阳三杨庄									7.2~7.0		6.0~6.7		4.5		3.5		2.2~2.1					刘耀亮 ^[32]
河南北洛河宜君段									7.4~7.6		5.0~5.8		4.0~4.2									Zhang Y Z ^[33]
二里头遗址											5.5~6.0				3.8~4.0		1.7~1.8					Zhang Y Z ^[33]
渭河支流石川							8.9~9.2				6.2~6.6		4.1~4.7		3.7~3.9		2.3~2.6					He Z等 ^[34]
漆水河杨凌													4.0~4.3		3.0~3.1							黄春长等 ^[35]
渭河天水															3.0~3.2		1.6~1.8					石彬楠等 ^[36]
泾河高陵													4.0~4.2		2.8~3.2							顾洪亮等 ^[37]
晋陕峡谷吉县							8.5~9.0								3.0~3.2							郝高建等 ^[38]
晋陕峡谷马头关															3.0~3.4		1.7~1.9					刘雯瑾等 ^[39]
晋陕峡谷柳林滩			10.2~10.8		9.6~10.6																	刘雯瑾等 ^[40]
晋陕峡谷龙门															2.9~3.2		1.7~1.8		0.61~0.77			石彬楠等 ^[41]
菏泽															3.5~4.0							Yu S Y等 ^[42]
平邑万寿湖										6.0							1.9		1.1, 1.2			本文
海退事件											5.4				3.0		2.5					周廷儒等 ^[43]
贝壳沉积																						刘国海等 ^[44]
大连地区									>7.0						3.4		1.5~2.0					雷雁翔等 ^[45]
渤海湾BXZK13							8.7															
海退事件								8.2				5.3										韩喜彬等 ^[46]
山东蒙山				10.0				8.2				5.3										王照波 ^[8-10]
内蒙凉城								8.0		6.0												周廷儒等 ^[43]
峰值年龄	11.3	10.9	10.5	10.0	9.6	9.1	8.5	8.2	7.2	6.2	5.8	5.3	4.5	4.2	3.5	2.8	2.1	1.5	1.0	0.5		
气候事件				鳄鱼冰期				拦马冰期	湖沼沉积		万寿湖	清荣冰期					万寿湖					沙窝洪水

注: W编号为升温期, C编号为降温期; 表中数据为年龄值, 单位为ka。

状况,当气候曲线与气候事件的测年精度准确可靠时,具体的气候事件与气候演化曲线之间应相互约束,且存在较高的吻合性,也就是说,洪水、海进事件应与暖期吻合,冰川、冷冻、海退事件应与冷期吻合。近些年,伴随测年技术的发展,中国东部有关全新世时段内的洪水、海侵、海退、冰川等气候事件的测年研究,为气候事件与气候曲线间的对应性研究提供了基本的数据前提。将气候事件发生时间对应到表 1 中,从而可以检视不同研究者发现的不同类型、不同期次的气候事件与气候演化曲线之间的对应性。当然,由于介质原始沉积速率、采样密度与精度、测年数据误差等,从而会导致一定时段气候事件的缺失或偏离。

2.1 洪水事件的对应性

全新世节律性气候演化过程中,其升温时段必然伴有对应的气候事件,如频发的洪水事件也被研究者所追踪。笔者根据山东沂沭河流域的洪水滞留沉积物,捕捉到发生在 0.8、1.2 kaBP 的两次洪水事件^[30]对应于 W10 升温时段。吉琳等在汉江上游晏家棚段识别出了 3 次洪水事件,OSL 测年结果显示 3 期特大洪水事件分别发生于 0.9~1.0、1.6~1.8 和 2.8~3.2 kaBP,基本可以对应到 W10、W9、W8 三期升温时段^[31]。刘耀亮对于河南安阳三杨庄沉积剖面进行了研究,分辨出 5 期洪水事件^[32],其中 7.0~7.2、6.7~6.0、2.2~2.1 kaBP 较吻合于 W5、W6、W9 三期升温时段,4.5~2.3 kaBP 洪水事件跨过了 W7、W8 两次升温时段,该洪水事件剖面仅有 4 个测年数据,大多数的数据为内插所得,影响了事件时期的精度。安阳三杨庄剖面对于全新世气候、古文化的演化研究具有重要意义,应当进行更为密集的测年研究与事件分辨。Zhang 等在河南北洛河宜君段分辨出 3 期洪水^[33],分别为 4.0~4.2 kaBP (W7?)、5.0~5.8 kaBP (W6)、7.4~7.6 kaBP (W5),但 4.0~4.2 kaBP 的洪水事件年龄进入降温期 C7 时

段,应该是测试误差所致。此外,Zhang 在二里头遗址剖面分辨出 3 期洪水,分别为 1.7~1.8 kaBP (W9)、3.8~4.0 kaBP (W8)、5.5~6.0 kaBP (W6),对应性较好。He 等^[34]在渭河支流石川河分辨出 5 期洪水,分别为 2.3~2.6 kaBP (W9)、3.7~3.9 kaBP (W8)、4.1~4.7 kaBP (W7)、6.2~6.6 kaBP (W6)、8.9~9.2 kaBP (W4),相应时段存在微弱的偏离,且地层中缺失了 W5 大暖期时段的洪水事件。黄春长等^[35]、石彬楠等^[36]、顾洪亮等^[37]、郝高建等^[38]、刘雯瑾等^[39-40]、石彬楠等^[41]、Yu 等^[42]对黄河流域洪水期次的研究,也均显示出较好的对应性。近年,笔者在蒙山兰溪上游一次洪水滞留物中获得 1.1 和 1.2 kaBP 两个年龄,对应于 W10 升温时段。张鹏等^[47]对黄河流域的洪水滞留沉积物测年数据进行了整理,滞留沉积物的年龄与本文划分为全新世暖期有很好的对应性。3.0~4.2 kaBP,黄河流域洪水事件频发,且集中于 3.0~3.2 kaBP (W8)和 4.0~4.2 kaBP (W7)。笔者在平邑县城东万寿湖中采集光释光年龄样品,经青岛海洋地质研究所测试,获得 1.9 kaBP 的洪水沉积年龄,对应于 W9 升温时段。在下层洪水砂层中获得 6.0 kaBP 的沉积年龄,对应于 W6 升温时段(表 2)。

2.2 海侵、海退事件的对应性

海侵事件是由于陆地冰川融化导致海平面上升造成的,因此全新世的海侵事件是升温时段的产物,而海退事件则对应于降温时段,这在全新世也有清晰的表现。

周廷儒等对山东福山黄海海岸高出现代海平面 15 m 的贝壳层进行测年,获得¹⁴C 年龄为 5420±95 aBP;在芝罘岛北口邱家庄全新世剖面底部洪坡积物之上的贝壳沉积中,获得¹⁴C 年龄为 2540±75 aBP^[43],这代表着两次高海面的升温时段,分别对应于 W6、W9 两个升温时段。黄海西岸的苏北滨海平原普遍发育三道贝壳堤,据顾家裕等^[48]测年研

表 2 蒙山及周边全新世洪水事件光释光年龄
Table 2 OSL dating data of Holocene flood events in Mengshan and surrounding areas

采样位置	样品编号	岩性	U/(μg/g)	Th/(μg/g)	K/%	含水量/%	等效剂量/Gy	年龄/ka	误差/ka
平邑万寿湖畔 (35°31'31.28"N、117°40'09.47"E)	WS01	粉细砂	1.83	10.93	1.88	22.81	7.2	1.9	±0.2
	WS02	中粗砂	2.14	10.73	1.91	19.14	23.4	6.0	±0.6
兰溪峡谷上游 (35°33'37.25"N、117°49'48.33"E)	QR01	中细砂	1.03	9.51	1.44	8.62	3.5	1.2	±0.1
	QR02	中细砂	1.21	9.38	1.61	2.83	3.6	1.1	±0.1

注:中全新世大暖期(W5时段)之前的洪水沉积,极有可能由于大暖期的重大洪水事件的冲刷而不易保存,相应数据极为稀少。

究, 分别获得贝壳 ^{14}C 年龄为 6539 ± 79 、 5677 ± 75 、 3882 ± 69 aBP, 3 次海侵较好地对应于 W5、W6、W8 暖期阶段。

姚菁^[49]在渤海南岸的 LZ908 孔中分辨出一层有机质泥炭沉积层, 获得的 AMS ^{14}C 年龄为 8.24 ± 0.054 kaBP, 这次明显的海退事件是由 8.2 kaBP 事件引起的, 其高度对应于 C4 降温时段。李凤林等^[50]根据渤海海岸海相生物化石分辨出 9.1、8.6、7.3 kaBP 3 次海侵事件, 其中 8.6 kaBP 海侵对应于 W4 暖期, 7.3 kaBP 对应于 W5 暖期, 9.1 kaBP 数据存在偏差, 尚需讨论。此外认为, 7.3 kaBP 海侵事件形成了贝壳堤和牡蛎礁组成的第 I 道海岸线, 形成年龄为 7.7~7.2 kaBP, 也是最老的海岸线, 属于大暖期的鼎盛时期。庄振业等^[51]根据渤海南岸的贝壳堤分辨出一次 6.0~5.7 kaBP 海侵事件, 该事件与 W6 暖期相吻合。刘国海等对大连地区全新世泥炭沉积与渤海海面波动进行了研究, 得出在大于 7.0 kaBP 的时段达到了最大海侵范围^[44], 这与 W5 升温时段为全新世大暖期相吻合。此外还在大连渤海海岸发现 3.4 与 1.5~2.0 kaBP 的两期贝壳堤, 代表了两次海侵事件, 这对应于 W8、W9 两个升温时段。雷雁翔等^[45]通过渤海湾沿岸 BXZK13 钻孔恢复晚更新世以来黄河三角洲沉积环境, 其划分的地层单元 U4 为 8.7 kaBP 的潮坪—浅海相, 为海侵事件, 与本文划分的全新世 W4 暖期相对应。

韩喜彬等^[46]对东海 QC2 孔上部全新世剖面进行了详细的分层研究, 从中分辨出全新世仙女木事件、8.2 kaBP 事件以及对应于 C4 降温时段的拦马冰期, 发现的中全新世气候衰退事件 (MHCR, 5.3 kaBP) 对应于 C6 降温时段的清荣冰期, 这是全新世降温事件在海洋沉积过程中的直观反映。王可等^[52]根据东海 MD06-3040 孔的粒度分析, 也分辨出 8.2 kaBP 冷事件与 7.0 kaBP 高海平面事件, EM1% 粒度图解上较好地反映了 8.2、6.2、4.2 kaBP 冷事件的存在, 这与 C4、C5、C7 降温时段吻合。

2.3 冰川、冰冻事件的对应性

冰碛是冰川事件的直接产物, 冰碛的堆积年龄则反映了冰期发生的时间。原则上, 冰期不能发生在升温时段, 只能发生在降温时段。

王照波等^[6-10]对蒙山的冰川遗迹通过测年研究证实为 10.0、8.2、5.3 kaBP 3 次全新世冰川事件的遗存, 分别对应于 C2、C4、C6 降温时段。周廷儒等在内蒙古凉城全新世地层中发现两层融冻褶皱, 获得的 ^{14}C 年龄分别为 8005 ± 100 和 6039 ± 90 aBP^[43], 这也

是 C4、C5 两次降温事件的直观反映。王照波^[10]在大别山白马尖东谷对称排列的右列侧碛垄中获得 7.65 kaBP 的冰碛堆积年龄, 对应于 C4 降温时段的拦马冰期。

丁敏综合研究后认为, 全新世众多的气候事件中, 尤其以 8.2 kaBP (C4)、5.5 kaBP (C6)、4.2 kaBP (C7) 气候事件对于区域环境和社会文明产生影响最大^[53]。陶士臣等专门论述了 4.2 kaBP 降温事件^[54]。吴文祥等专门论述了 5.5 kaBP (C6) 事件^[55]。刘浴辉^[56]、崔英方等^[57]、王绍武^[58]等专门论述了 8.2 kaBP (C4) 事件。

气候事件是全球气候演化背景下产生的, 因此, 中国全新世气候事件也必然具有区域性, 通过对上述气候事件与气候演化曲线的对应性分析认为降温期与黄土沉积、冰川冰冻事件、海退事件具有时段上的一致性; 升温期与洪水事件、海侵事件、高湖面事件在时段上具有一致性, 上述冷暖两类气候事件在时间演化序列上反映出近似齿轮式的耦合关系。

3 讨论

Alley 等^[59]、Dansgaard 等^[60]、安芷生^[14]、王绍武^[15]等曾提出全新世气候演化存在千年周期节律的认识。本次通过综合全新世各类介质获得的气候演化曲线, 以及与洪水、海侵、海退、冰川、冰冻等气候事件的对应性, 也显示中国东部全新世气候存在明显节律性波动, 全新世降温时段峰值之间的平均时间为 1.15 ka, 也即千年周期。

在气候分期的基础上, 对全新世的洪水事件、海侵事件、海退事件、冰川事件与气候分期进行的对应性分析, 发现中国东部气候事件与气候演化曲线之间存在较高的吻合度, 其中 10.0、8.2、5.3 kaBP 强冷事件已经获得了冰碛研究及测年数据的佐证。周廷儒等在内蒙凉城全新世地层中发现两层融冻褶皱, 获得 ^{14}C 年龄分别为 8005 ± 100 和 6039 ± 90 aBP^[43], 也对应于 8.2 与 6.2 kaBP 两期降温事件。这显示了中国东部气候演化曲线中反映的强冷事件是确实存在的, 且降温幅度较大。韩喜彬等在东海 QC2 孔上部分辨出全新世 8.2、5.3 kaBP 两期海面暴露事件^[46], 则吻合了中国东部的全新世降温事件, 这显示, 全新世降温事件在陆地、海洋之间会产生同步的联动效应。除此之外, 气候演化曲线中反映的较为突出的 6.2、4.2 kaBP 降温事件也应有对应的冷事件遗迹的存在, 但目前尚未发现, 这在将来

的冰冻遗迹、冰川遗迹、近海岩芯等气候事件的研究中值得关注。

大暖期,是指全新世期间气候最温暖的时段^[61],目前关于全新世大暖期的具体时段的划分,尚没有形成统一的认识。Renssen等^[62]指出大暖期为11.0~5.0 kaBP,张风菊等认为大暖期在6 kaBP^[63],朱彤^[64]提出7~5 kaBP为全新世大暖期,施雅风等认为全新世大暖期为7.2~6.0 kaBP^[65],计宏祥则认为全新世大暖期出现在8.5~3.0 kaBP^[66],张振克等^[67]提出全新世大暖期为8.1~3.0 kaBP,胡玉蓉^[68]等认为海南岛的大暖期为7.4~2.7 kaBP,俞凯峰^[69]提出全新世大暖期的时间为9~5 kaBP。上述关于大暖期起止时间的确定,多跨越了8.2、5.3 kaBP等强冷事件,基于中国东部全新世多介质气候演化曲线(图2),以及气候事件的对应性研究(表1),本文认为大暖期的中心时间约为7.2 kaBP,处于8.2 kaBP强冷事件与6.2 kaBP强冷事件之间的高温时段。全新世大暖期在山东地区形成了广泛的沼泽化沉积,王世进等^[70]在黑土湖组灰黑色黏土中取得热释光年龄结果为7380±560 aBP;刘国海等^[44]对大连地区全新世泥炭沉积与海面波动进行研究,得出在7.0 kaBP达到了最大海侵范围的结论。此外,在河南安阳发现了7.2~7.0 kaBP洪水事件,北洛河发现了7.6~7.4 kaBP洪水事件,这些事件与气候曲线显示的大暖期时段都高度吻合。

4 结论

(1) 中国东部地区全新世气候事件与气候演化曲线之间存在明显的对应性,且具有千年尺度的节律性波动特征。其中10.0、8.2、5.3 kaBP等强冷事件已经获得冰川冰冻事件、海退事件年龄数据的佐证。

(2) 研究认为全新世大暖期的峰值时间约在7.2 kaBP,位于8.2 kaBP强冷事件与6.2 kaBP强冷事件之间,这与鲁西广泛沼泽化事件(7.3 kaBP)、全新世渤海海面最大海侵事件(7.0 kaBP)相吻合,这均表明中国东部全新世气候变化存在同步的陆海联动效应。

致谢: 本项研究过程中得到山东地质科学研究院李大鹏研究员,自然资源部中国地质调查局青岛海洋地质研究所何乐龙、张剑提供的帮助,在此表示感谢!

参考文献 (References)

- [1] 徐馨. 全新世气候期划分初步综合[J]. 贵州地质, 1989(1): 39-48. [XU Xin. The preliminary study on division of Holocene climatic age [J]. Guizhou Geology, 1989(1): 39-48.]
- [2] 吕雁斌. 新疆东部巴里坤湖记录的全新世气候变化研究[D]. 兰州大学博士学位论文, 2011: 1-145 [LV Yanbin. Holocene climate change recorded by Lake Balikun, eastern Xinjiang[D]. Doctor Dissertation of Lanzhou University, 2011: 1-145.]
- [3] Cohen K M, Finney D A, Gibbard P L, et al. The ICS international chronostratigraphic chart [J]. *Episodes*, 2013, 36(3): 199-204.
- [4] 安芷生, 波特 S, 吴锡豪, 等. 中国中、东部全新世气候适宜期与东亚夏季风变迁[J]. 科学通报, 1993, 38(14): 1302-1305. [AN Zhisheng, Peter S, WU Xihao, et al. Holocene climatic Optimum and East Asian Summer monsoon change in central and eastern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(14): 1302-1305.]
- [5] 杨仲康. 南北极与中国近海典型地区全新世气候变化与环境事件研究[D]. 中国科学技术大学博士学位论文, 2019: 11-13 [YANG Zhongkang. Holocene climatic changes and environmental events in typical areas of Arctic, Antarctic and coastal China regions[D]. Doctor Dissertation of University of Science and Technology of China, 2019: 11-13.]
- [6] 王照波, 卞青, 李大鹏, 等. 山东蒙山第四纪冰川组合遗迹的发现及初步研究[J]. 地质论评, 2017, 63(1): 134-142. [WANG Zhaobo, BIAN Qing, LI Dapeng, et al. Discovery of the quaternary glacial relics in mount Mengshan, Shandong province [J]. *Geological Review*, 2017, 63(1): 134-142.]
- [7] 王照波, 张剑, 王江月, 等. 山东蒙山第四纪冰川遗迹光释光测年研究及冰期划分与对比[J]. 地质论评, 2017, 63(3): 694-702. [WANG Zhaobo, ZHANG Jian, WANG Jiangyue, et al. A study on Quaternary glaciation moraines in Mount Mengshan, Shandong province with Optically Stimulated Luminescence (OSL) and comparison of glacial period division [J]. *Geological Review*, 2017, 63(3): 694-702.]
- [8] 王照波, 王江月, 冯金华, 等. 山东蒙山全新世冰川遗迹的发现及确认: 来自宇生核素年龄证据[J]. 山东国土资源, 2018, 34(6): 1-7. [WANG Zhaobo, WANG Jiangyue, FENG Jinhua, et al. Discovery and recognition of Holocene glacial remains in Mengshan mountain in Shandong province: evidences from cosmogenic isotopes dating Age [J]. *Shandong Land and Resources*, 2018, 34(6): 1-7.]
- [9] Wang Z B, Wang J Y, He L L, et al. Glacier relics of the last glacial and Holocene periods discovered in the middle-low mountains of Eastern China: sedimentary sequences and environmental evolution of Mengshan mountain in Shandong province since 80 ka [J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 2020, 94(1): 141-151.
- [10] 王照波. 中国新生代冰川与环境演化[M]. 北京: 地质出版社, 2021: 105-113 [WANG Zhaobo. Cenozoic Glaciers and Environmental Evolution in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2021: 105-113.]
- [11] Bond G, Kromer B, Beer J, et al. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene [J]. *Science*, 2001, 294(5549): 2130-2136.

- [12] Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in north Atlantic Holocene and glacial climates [J]. *Science*, 1997, 278 (5341): 1257-1266.
- [13] Wanner H, Mercolli L, Grosjean M, et al. Holocene climate variability and change; a data-based review [J]. *Journal of the Geological Society*, 2015, 172 (2): 254-263.
- [14] An Z S. The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19 (1-5): 171-187.
- [15] 王绍武, 谢志辉. 千年尺度气候变率的研究[J]. *地质学前沿*, 2002, 9 (1): 143-153. [WANG Shaowu, XIE Zhiping. climate variability at millennial time scales [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9 (1): 143-153.]
- [16] Marcott S A, Shakun J D, Clark P U, et al. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11, 300 years [J]. *Science*, 2013, 339 (6124): 1198-1201.
- [17] 施雅风, 崔之久, 李吉均, 等. 中国东部第四纪冰川与环境问题[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 1-5 [SHI Yafeng, CUI Zhijiu, LI Jijun, et al. Quaternary Glacial and Environmental Issues in Eastern China[M]. Beijing: Science Press, 1989: 1-5.]
- [18] 赵侃. 贵州董哥洞近1000年石笋纹层年代学与同位素气候重建[D]. 南京师范大学博士学位论文, 2011: 13-15 [ZHAO Kan. Annually-counting chronology and isotopic climate reconstruction over the past millennia from stalagmites in Dongge cave[D]. Doctor Dissertation of Nanjing Normal University, 2011: 13-15.]
- [19] 黄俊华, 胡超涌, 周群峰, 等. 长江中上游和尚洞石笋的高分辨率同位素、微量元素记录及古气候研究[J]. *沉积学报*, 2002, 20 (3): 442-446. [HUANG Junhua, HU Chaoyong, ZHOU Qunfeng, et al. Study on high-resolution carbon, oxygen isotope and trace element record sand paleoclimate from Heshang Cave, the middle reach of the Yangtse river [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20 (3): 442-446.]
- [20] 董进国, 刁伟, 孔兴功. 湖北三宝洞石笋 ^{238}U 值变化的古气候意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33 (1): 129-135. [DONG Jinguo, DIAO Wei, KONG Xingong. Variation in Uranium Isotopes of stalagmites from Sanbao Cave, Hubei province: implications for palaeoclimate [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33 (1): 129-135.]
- [21] 程海, 艾思本, 王先锋, 等. 中国南方石笋氧同位素记录的重要意义[J]. *第四纪研究*, 2005, 25 (2): 157-163. [CHENG Hai, AI Siben, WANG Xianfeng, et al. Oxygen isotope records of stalagmites from Southern China [J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25 (2): 157-163.]
- [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 (1-2): 71-86.
- [23] Yu X F, Zhou W J, Franzen L G, et al. High-resolution peat records for Holocene monsoon history in the eastern Tibetan Plateau [J]. *Science in China: Series D*, 2006, 49 (6): 615-621.
- [24] Zhang W C, Yan H, Dodson J, et al. The 9.2 ka event in Asian summer monsoon area: the strongest millennial scale collapse of the monsoon during the Holocene [J]. *Climate Dynamics*, 2018, 50 (7): 2767-2782.
- [25] 宁凯. 巴丹吉林沙漠湖泊沉积孢粉和正构烷烃记录的全新世环境变化[D]. 兰州大学博士学位论文, 2018: 1-22 [NING Kai. Holocene environmental evolution implied by pollen and N-alkanes in ground-water recharge lake, Badain Jaran desert, Northwestern China[D]. Doctor Dissertation of Lanzhou University, 2018: 1-22.]
- [26] 赵艳, 刘耀亮, 郭正堂, 等. 全新世气候渐变导致中亚地区植被突变[J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 60 (7): 1317-1327. [ZHAO Yan, LIU Yaoliang, GUO Zhengtang, et al. Abrupt vegetation shifts caused by gradual climate changes in central Asia during the Holocene [J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60 (7): 1317-1327.]
- [27] 李倩. 大兴安岭中段月亮湖记录的21kaBP以来高分辨率古气候变化: 来自TOC、TN及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的证据[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2011: 1-66 [LI Qian. A high resolution climate record of Moon Lake in the middle part of Daxing'an mountain range in Northwest China during the last 21ka: from evidence of TOC, TN and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ [D]. Master Dissertation of China University of Geoscience(Beijing), 2011: 1-66.]
- [28] 张宗祜. 中国北方晚更新世以来地质环境及未来生存环境变化趋势[J]. *第四纪研究*, 2011, 21 (3): 208-217. [ZHANG Zonghu. Geological environment since the late Pleistocene and the future environment evolution trend for existence in northern China [J]. *Quaternary Science*, 2011, 21 (3): 208-217.]
- [29] 王艳娟. 关中西部地区全新世的气候环境演变[D]. 长安大学硕士学位论文, 2010: 38-40 [WANG Yanjuan. The climatic evolution during the Holocene in the western of Guanzhong Region[D]. Master Dissertation of Chang'an University, 2010: 38-40.]
- [30] 王江月. “寒亭组”是山东唐宋时期两期洪水的产物: 基于洮河沙带调查及光释光测年研究[J]. *山东国土资源*, 2019, 35 (7): 46-50. [WANG Jiangyue. "Hanting Formation" is the product of two periods of Flood in Tang and Song dynasties in Shandong province: based on investigation and optical luminescence dating of Shuhe sand belt [J]. *Shandong Land and Resources*, 2019, 35 (7): 46-50.]
- [31] 吉琳, 庞奖励, 黄春长, 等. 汉江上游晏家棚段全新世古洪水研究[J]. *地球科学进展*, 2015, 30 (4): 487-494. [JI Lin, PANG Jiangli, HUANG Chunchang, et al. Holocene palaeoflood studies of the Yanjiapeng reach in the upper Hanjiang River, China [J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30 (4): 487-494.]
- [32] 刘耀亮. 河南三杨庄全新世以来的气候变化与洪水事件的沉积记录[D]. 河北师范大学硕士学位论文, 2013: 1-58 [LIU Yaoliang. Holocene climate change and flood events documented by sedimentary record in Sanyangzhuang Site, Henan province, China[D]. Master Dissertation of Hebei Normal University, 2013: 1-58.]
- [33] Zhang Y Z, Huang C C, Tan Z H, et al. Prehistoric and historic overbank floods in the Luoyang Basin along the Luohe River, middle Yellow River basin, China [J]. *Quaternary International*, 2019, 521: 118-128.
- [34] He Z, Long H, Yang L H, et al. Luminescence dating of a fluvial sequence using different grain size fractions and implications on Holocene flooding activities in Weihe Basin, central China [J]. *Quaternary Geochronology*, 2019, 49: 123-130.
- [35] 黄春长, 庞奖励, 查小春, 等. 黄河流域关中盆地史前大洪水研究: 以周原漆河谷地为例[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41 (11): 1658-1669. [HUANG Chunchang, PANG Jiangli, ZHA Xiaochun, et al. Pre-historical floods in the Guanzhong basin in the Yellow River drainage

- area: a case study along the Qishuihe River valley over the Zhouyuan loess tableland [J]. *Science Sinica(Terrae)*, 2011, 41 (11): 1658-1669.]
- [36] 石彬楠, 黄春长, 庞奖励, 等. 渭河上游天水东段全新世古洪水水文恢复研究[J]. *干旱区地理*, 2016, 39 (3): 573-581. [SHI Binnan, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Hydrological reconstructions of the Holocene Palaeoflood in the Tianshui East Reach of the upper Weihe River [J]. *Arid Land Geography*, 2016, 39 (3): 573-581.]
- [37] 顾洪亮, 黄春长, 周亚利, 等. 关中盆地杨官寨遗址古洪水事件释光测年[J]. *地理研究*, 2012, 31 (10): 1837-1848. [GU Hongliang, HUANG Chunchang, ZHOU Yali, et al. OSL dating study on the Palaeoflood events recorded in the Yangguanzhai Neolithic ruins in the Guanzhong basin [J]. *Geographical Research*, 2012, 31 (10): 1837-1848.]
- [38] 郝高建, 黄春长, 邢莹莹, 等. 黄河晋陕峡谷吉县段全新世古洪水水平流沉积特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25 (3): 106-112. [HAO Gaojian, HUANG Chunchang, XING Yingying, et al. Sedimentary characteristics of the slackwater deposits of Holocene extreme floods in the FJJ section in the Yellow River valley, Ji County [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25 (3): 106-112.]
- [39] 刘雯瑾, 黄春长, 庞奖励, 等. 黄河马头关段全新世古洪水水文恢复及气候背景研究[J]. *干旱区地理*, 2017, 40 (1): 85-93. [LIU Wenjin, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Holocene Palaeoflood and climatic changes at the Matouguan Reach of the Yellow River [J]. *Arid Land Geography*, 2017, 40 (1): 85-93.]
- [40] 刘雯瑾, 黄春长, 庞奖励, 等. 黄河柳林滩段全新世古洪水滞流沉积物物源研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30 (2): 136-142. [LIU Wenjin, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Study on provenance of Holocene flood slackwater deposits in the Liulintan reach of the Yellow River [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30 (2): 136-142.]
- [41] 石彬楠, 黄春长, 庞奖励, 等. 黄河龙门段商周转折时期的古洪水事件及气候背景[J]. *湖泊科学*, 2017, 29 (1): 234-245. [SHI Binnan, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Palaeoflood events and climate change at the turning time from the Shang to Zhou dynasty in the Longmen reach of the Yellow River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29 (1): 234-245.]
- [42] Yu S Y, Hou Z F, Chen X X, et al. Extreme flooding of the lower Yellow River near the North grippian-Meghalayan boundary: evidence from the Shilipu archaeological site in southwestern Shandong Province, China [J]. *Geomorphology*, 2020, 350: 106878.
- [43] 周廷儒, 张兰生, 李华章. 华北更新世最后冰期以来的气候变迁[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 1982 (1): 77-88. [ZHOU Yanru, ZHANG Lansheng, LI Huazhuang. The changes of climate in north China since the late glacial age of Pleistocene [J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 1982 (1): 77-88.]
- [44] 刘国海, 高善明, 李元芳, 等. 大连地区全新世泥炭沉积环境及海面波动[J]. *地理研究*, 1992, 11 (4): 38-46. [LIU Guohai, GAO Shanming, LI Yuanfang, et al. Sea-level fluctuation and deposit environment of the Holocene peat in Dalian region [J]. *Geographical Research*, 1992, 11 (4): 38-46.]
- [45] 雷雁翔, 何磊, 王玉敏, 等. 渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41 (6): 194-205. [LEI Yanxiang, HE Lei, WANG Yumin, et al. Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41 (6): 194-205.]
- [46] 韩喜彬, 李广雪, 杨子赓, 等. 中国东部陆架海对“新仙女木”事件的响应[J]. *海洋地质动态*, 2005, 21 (12): 1-5. [HAN Xibin, LI Guangxue, YANG Zigeng, et al. The response of the continental shelf seas in eastern China to the “Younger Dryas” Event [J]. *Marine Geology Letters*, 2005, 21 (12): 1-5.]
- [47] 张鹏, 杨劲松, 赵华, 等. 黄河流域全新世古洪水研究进展及展望[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40 (6): 178-188. [ZHANG Peng, YANG Jinsong, ZHAO Hua, et al. Research progress of the Holocene paleoflood in the Yellow River basin and a future prospect [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40 (6): 178-188.]
- [48] 顾家裕, 严钦尚, 虞志英. 苏北中部滨海平原贝壳砂堤[J]. *沉积学报*, 1983, 1 (2): 47-59. [GU Jiayu, YAN Qinchang, YU Zhiying. The cheniers of the northern coastal plain of Jiangsu province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1983, 1 (2): 47-59.]
- [49] 姚菁. 渤海南岸LZ908孔海陆交互相地层气候代用指标及沉积环境研究[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所)博士学位论文, 2014: 30-32 [YAO Jing. Climatic indicators and sedimentary environment studies inferred from transgressive and regressive sediments of core LZ908, south Bohai Sea[D]. Master Dissertation of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology), 2014: 30-32.]
- [50] 李凤林, 阎玉忠, 商志文, 等. 渤海西岸全新世气候演化与海陆变迁[J]. *地质学报*, 2014, 38 (2): 173-186. [LI Fenglin, YAN Yuzhong, SHANG Zhiwen, et al. Holocene climate evolution and land-sea changes on west Bohai Sea [J]. *Journal of Geology*, 2014, 38 (2): 173-186.]
- [51] 庄振业, 许卫东, 李学伦. 渤海南岸6000年来的岸线演变[J]. *青岛海洋大学学报*, 1991, 21 (2): 99-110. [ZHANG Zhenye, XU Weidong, LI Xuelun. The coastline evolution of the south coast of the Bohai Sea Since 6ka B. P. [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1991, 21 (2): 99-110.]
- [52] 王可, 郑洪波, Prins M, 等. 东海内陆架泥质沉积反映的古环境演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28 (4): 1-10. [WANG Ke, ZHENG Hongbo, Prins M, et al. High-resolution paleoenvironmental record of the mud sediments of the East China Sea inner shelf [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28 (4): 1-10.]
- [53] 丁敏. 关中盆地东部与西部全新世成壤强度演变与气候变化高分辨率对比研究[D]. 陕西师范大学博士学位论文, 2015: 1-38 [DING Min. The comparative study of Holocene pedogenic intensity evolution and High-resolution climate change in the eastern and western Guanzhong Basin[D]. Doctor Dissertation of Shanxi Normal University, 2015: 1-38.]
- [54] 陶士臣, 安成邦, 陈发虎, 等. 新疆托勒库勒湖孢粉记录的4.2 kaBP气候事件[J]. *古生物学报*, 2013, 52 (2): 234-242. [TAO Shichen, AN Chengbang, CHEN Fahu, et al. An abrupt climatic event around 4.2cal kaBP documented by fossil pollen of Tuolekule lake in the eastern

- Xinjiang Uyghur autonomous region [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2013, 52(2): 234-242.]
- [55] 吴文祥, 郑洪波, 侯梅, 等. 5.5cal.kBP气候事件、人口增长、条件限制与中国史前复杂社会产生[J]. *中国科学:地球科学*, 2018, 61(2): 134-148. [WU Wenxiang, ZHENG Hongbo, HOU Mei, et al. The 5.5cal.kBP climate event, population growth, circumscription and the emergence of the earliest complex societies in China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(2): 134-148.]
- [56] 刘浴辉. 东亚季风区8.2kaBP气候突变记录及其精细解剖[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2012: 1-66 [LIU Yuhui. The abrupt climate change record of 8.2kaBP event from east Asian monsoon area with its characteristics analysis[D]. Doctor Dissertation of China University of Geoscience, 2012: 1-66.]
- [57] 崔英方, 董进国, 赵侃. 基于石笋记录的小冰期与“8.2 kaBP”事件的对比研究[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(1): 40-49. [CUI Yingfa, DONG Jin'guo, ZHAO Kan. A comparative study on the little ice age and the '8.2 kaBP' event based on two stalagmite records from the Dongge cave, southwest China [J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(1): 40-49.]
- [58] 王绍武. 8.2 kaBP冷事件[J]. *气候变化研究进展*, 2008, 4(3): 193-194. [WANG Shaowu. 8.2 kaBP cold event [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(3): 193-194.]
- [59] Alley R B, Mayewski P A, Sowers T, et al. Holocene climatic instability: a prominent, widespread event 8200yr ago [J]. *Geology*, 1997, 25(6): 482-486.
- [60] 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(6434): 281-220.
- [61] 王绍武. 全新世大暖期[J]. *气候变化研究进展*, 2011, 7(5): 383-384. [WANG Shaowu. Megathermal [J]. *Advance in Climate Change Research*, 2011, 7(5): 383-384.]
- [62] Renssen H, Seppä H, Heiri O, et al. The spatial and temporal complexity of the Holocene thermal maximum [J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(6): 411-414.
- [63] 张风菊, 薛滨, 姚书春, 等. 全新世大暖期中国湖泊碳埋藏速率初步研究[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(2): 401-402. [ZHANG Fengju, XUE Bin, YAO Shuchun, et al. The organic carbon burial rates in Chinese Lake sediments during Holocene megathermal [J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(2): 401-402.]
- [64] 朱彤. 全新世大暖期7-5Ka. BP中国农业土地利用空间格局研究[D]. 甘肃农业大学硕士学位论文, 2019: 1-22 [ZHU Tong. Study of the spatial pattern of agricultural land use of China in the Holocene Megathermal[D]. Master Dissertation of Gansu Agriculture University, 2019: 1-22.]
- [65] 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件[J]. *中国科学(B辑)*, 1994, 37(3): 353-365. [SHI Yafeng, KONG Zhaochen, WANG Sumin, et al. The climatic fluctuation and important events of Holocene Megathermal in China [J]. *Science in China (Series B)*, 1994, 37(3): 353-365.]
- [66] 计宏祥. 中国全新世大暖期哺乳动物与气候波动[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1996(1): 5-16. [JI Hongxiang. Paleoclimatic fluctuations and mammals in Holocene megathermal in China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1996(1): 5-16.]
- [67] 张振克, 吴瑞金, 王苏民, 等. 全新世大暖期云南洱海环境演化的湖泊沉积记录[J]. *海洋与湖沼*, 2000, 31(2): 210-214. [ZHANG Zhenke, WU Ruijin, WANG Sumin, et al. Environmental evolution recorded by lake sediments from Erhai Lake, Yunnan province in Holocene megathermal [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(2): 210-214.]
- [68] 胡玉蓉, 颜家安. 海南岛全新世大暖期后的古气候波动分析[J]. *气象研究与应用*, 2009, 30(4): 42-44, 55. [HU Yurong, YAN Jiaan. Paleoclimate fluctuations analysis of Hainan islands after Holocene warm period [J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2009, 30(4): 42-44, 55.]
- [69] 俞凯峰. 末次盛冰期和全新世大暖期中国北方沙地古气候定量重建探索[D]. 南京大学硕士学位论文, 2013:1-43. [YU Kaifeng. A tentatively quantitative paleoclimate reconstruction of the dune fields of northern China during the Last Glacial Maximum and Holocene Optimum[D]. Master Dissertation of Nanjing University, 2013: 1-43.]
- [70] 王世进, 张富中, 孙天柱. 山东省平原地区第四纪全新世地层划分研究新进展[C]//地质与可持续发展: 华东六省一市地学科技论坛文集. 济南: 山东省科学技术协会, 2003: 26-28 [WANG Shijin, ZHANG Fuzhong, SUN Tianzhu. Study development on strata division of Quaternary Holocene in plain area, Shandong province[C]//Geology and Sustainable Development: Technology Forum Collection of Six Provinces and One City in East China. Ji'nan: Shandong Science and Technology Association, 2003: 26-28.]