



## 中国西北地区中晚全新世火历史集成重建与气候演化

刘剑波, 李建勇, 韩岳婷, 杨锐, 韩潇潇, 徐浩

### Integrated reconstruction of fire history and climatic changes in Northwest China since mid-late Holocene

LIU Jianbo, LI Jianyong, HAN Yueting, YANG Rui, HAN Xiaoxiao, and XU Hao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023022302>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### 火的历史重建及其与气候变化和人类活动关系研究进展

Research progress on fire history reconstruction and its implications for climate change and human activities

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(2): 185-197

#### 过去5万年来珠江流域火历史的南海沉积记录

FIRE HISTORY IN PEARL RIVER BASIN SINCE 50 KAPB: SEDIMENT RECORDS FROM THE SOUTH CHINA SEA

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(3): 47-57

#### 巴丹吉林沙漠南缘高台盐湖记录的中晚全新世气候变化

Mid-to-Late Holocene climate changes on the southern margin of the Badain Jaran Desert: Evidence from the Gaotai Lake sediments

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(4): 192-203

#### 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): 77-89

#### 全新世以来福建宁德地区环境演变及人类活动的孢粉记录

Palynological evidence for palaeoenvironmental change and human activity in Ningde of Fujian Province during Holocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(3): 170-181

#### 2.5 Ma以来中国陆地孢粉记录反映的古气候变化

Climate changes on Chinese continent since 2.5 Ma: Evidence from fossil pollen records

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(4): 175-191



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘剑波, 李建勇, 韩岳婷, 等. 中国西北地区中晚全新世火历史集成重建与气候演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(1): 156-169.  
LIU Jianbo, LI Jianyong, HAN Yueting, et al. Integrated reconstruction of fire history and climatic changes in Northwest China since mid-late Holocene[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(1): 156-169.

# 中国西北地区中晚全新世火历史集成重建与气候演化

刘剑波, 李建勇, 韩岳婷, 杨锐, 韩潇潇, 徐浩

西北大学城市与环境学院, 西安 710127

**摘要:** 为了探讨西北地区古火演化及其驱动机制, 基于 28 个样点的炭屑和黑碳记录, 集成重建该区 8 kaBP 的古火变化序列; 同时结合古植被、古气候、历史文献等记录, 分析了古火活动与气候变化和人类活动之间的关系。结果表明: 西北地区中晚全新世火历史可以划分为 4 个阶段; ① 火活动波动阶段 (8~6 kaBP), 古火事件发生频繁, 主要受气候变化的影响; ② 火活动平稳阶段 (6~4 kaBP), 气候趋于暖湿化, 植被有所发展, 贮藏了一定的燃烧质; ③ 火活动快速上升阶段 (4~2 kaBP), 人类活动成为火事件的主要影响因素, 古火活动频率呈现不断上升的趋势; ④ 火活动大范围发生阶段 (2~0 kaBP), 气候由湿冷向干冷转化, 生物质干燥易燃, 农业快速发展, 朝代更替和战争频繁, 火活动异常剧烈。

**关键词:** 炭屑; 黑碳; 火历史; 气候演化; 人类活动; 西北地区

中图分类号: P532

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023022302

## Integrated reconstruction of fire history and climatic changes in Northwest China since mid-late Holocene

LIU Jianbo, LI Jianyong, HAN Yueting, YANG Rui, HAN Xiaoxiao, XU Hao

College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China

**Abstract:** A total of 28 records of charcoal and black carbon were used to reconstruct the evolution and driving mechanism of paleofire events in Northwest China in the past 8 ka. Combined with paleovegetation, paleoclimate, and historical records, relationship among paleofire activity, climate change, and human impact was analyzed. Results show that during the middle and late Holocene, fire history in Northwest China can be divided into four stages: (1) the fluctuation stage of fire activity (8~6 kaBP), paleofire events occurred frequently and were mainly affected by climate change; (2) the stable stage of fire activity (6~4 kaBP), when the climate tended to be warm and humid, vegetation developed and stored a certain amount of combustible material; (3) the rapid rise stage of fire activity (4~2 kaBP), human activities became the main influencing factor for fire events, and the frequency of fire activities showed a rising trend; (4) the stage of large-scale fire activity (2~0 kaBP), the climate changed from wet-cold to dry-cold, biomass was dry and flammable, agriculture developed rapidly, dynasty changed and frequent wars occurred, and the fire activity was exceptionally intense.

**Key words:** charcoal; black carbon; paleofire; climate evolution; human activities; Northwest China

火作为生态系统重要影响因子之一, 直接影响着生态系统的结构、功能以及生物化学循环<sup>[1-3]</sup>。利用炭屑、黑碳等代用指标重建长时间尺度火历史, 剖析火事件与气候变化以及人类活动之间复杂响应关系已经成为当今热点议题。火可通过破坏地表植被组成, 释放大气气溶胶和温室气体, 进而影响全球气候, 是气候变化的重要驱动力之一, 同时气候可影响植被生产力以及生物质燃烧的可用性从而控制火事件的发生<sup>[4-5]</sup>。火的使用使人类在相

对恶劣环境中的生存能力不断增强, 如生火做饭、照明取暖、驱赶猛兽等, 同时烧荒垦殖、战争事件、人口迁移、开山伐木等活动也影响着火历史的发展<sup>[6-8]</sup>。因我国西北地区连续性和年龄框架均较好的炭屑或黑碳记录比较有限, 且多集中于陕甘地区, 针对西北地区大范围火历史集成重建研究则相对匮乏, 导致对我国西北地区长时间尺度上火活动演变与气候变化、人类活动之间的关系存在认知不足的问题。系统性研究中晚全新世火活动时空分布特征、

资助项目: 国家自然科学基金“新疆西部博尔塔拉河流域相对花粉产量估算及其应用”(41801090)

作者简介: 刘剑波 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事第四纪环境研究, E-mail: 2410386566@qq.com

通讯作者: 李建勇 (1987—), 男, 教授, 主要从事气候变化与植被生态恢复、人类活动与环境相互作用等方面的研究, E-mail: lijy@nwu.edu.cn

收稿日期: 2023-02-23; 改回日期: 2023-04-13. 文凤英编辑

演化规律及驱动机制,清晰地理解区域火活动机制与气候因子、植物特征以及人类活动之间的关联,对预测全球变暖背景下未来火的演化趋势具有现实指导意义。

有机质不完全燃烧生成的炭屑、黑碳广泛存在于各种环境介质中,是最早应用于重建火历史的代用指标。根据炭屑、黑碳沉积含量以及迁移情况分析火事件的大小及区域,根据样品所在地层定年结果来获得火事件的发生年代,从而重建长时间尺度上的火历史已在全球范围内展开研究<sup>[9-12]</sup>。Novenko E Y 等<sup>[13]</sup>根据炭屑沉积记录重建了西伯利亚普托拉纳高原晚全新世火历史,表明普托拉纳高原 3.0~2.0 kaBP 之间的火活动相对剧烈,宏观炭屑沉积量在近地面沉积物中达到最大值,说明该地区晚全新世以来随着气候变干变冷,火事件的频率和面积都有所增加;庞洋<sup>[14]</sup>等综合对比分析了中国中东部季风区全新世以来的炭屑和黑碳沉积记录,发现该区域全新世火活动呈现出较大的时空差异,区域火活动的活跃期从东北至东南呈现随纬度降低而降低的趋势;裴文强等<sup>[15]</sup>根据黑碳沉积记录探讨了长江、珠江流域火历史及其与气候的关系,均发现在没有明显人类干扰的中全新世,自然火活动在暖湿期更强,在晚全新世约 3.0~2.9 kaBP 火活动显著降低,明显受到了人类活动的强烈干扰。本文利用中国西北地区炭屑或黑碳沉积记录,结合孢粉、氧同位素、人口、战争等代用指标,旨在集成重建中国西北地区 8 kaBP 火历史,并探讨其与气候变化以及人类活动之间复杂的响应关系。

## 1 研究区域及方法

西北地区是当今中国的七大地理分区之一,位于黄土高原—黄河中上游以西,昆仑山-阿尔金山-祁连山和长城以北,包括陕甘青宁新 5 省,深居内陆,距海遥远,高原山地居多,地形较高,降水稀少,气候干旱,且降水自东向西递减<sup>[16-20]</sup>。西北地区是古丝绸之路和当代陆上丝绸之路经济带的核心区,是连接东西方贸易和文化交流的重要通道之一,系统性研究西北地区中晚全新世火活动演化规律,清晰地理解大范围火活动机制与气候变化以及人类活动之间的响应关系,对预测全国,甚至全球变暖背景下未来火活动演化趋势具有现实指导意义。

生物质燃料在不完全燃烧过程中会产生丰富的碳物质,包括炭屑、黑碳、元素碳、焦炭、火成碳等。炭屑通常被认为是生物质燃料在低温燃烧过

程中轻微焦炭化的植物残体,元素碳及火成碳都称为黑碳。炭屑和黑碳粒径大小、搬运距离不一,通常黑碳可迁移上千千米,常指示较大范围的区域性火事件;炭屑通常用来指示局域范围内的火事件<sup>[3,7,9-10,14]</sup>。本文收集整理了中国西北地区炭屑、黑碳沉积记录,并对其进行了筛选总结,用来集成重建西北地区中晚全新世火历史,所取数据必须满足以下原则:(1)位于我国西北地区的湖泊、沼泽、黄土沉积物中的炭屑或黑碳沉积记录;(2)所有沉积记录必须连续完整;(3)沉积记录必须足以反映 5 kaBP 左右火历史;(4)研究剖面分辨率相对较高,且具有良好的年代框架。根据以上原则,本文共得到 23 组西北地区炭屑记录,5 组黑碳记录以及 9 组孢粉记录(图 1、表 1)。利用 GetData Graph digitizer 2.26 软件对所有记录进行数字化提取,在所有可用年龄基础上使用线性插值建立年代与浓度的关系。因不同样点的炭屑或黑碳记录(如浓度、通量)可能存在多个量级的差异,为使不同地点或不同时间分辨率的记录之间可进行有意义的比较,需按照 Richard 和 Carcaillet 等使用的方法对每个研究点数据进行 Z-scores 处理<sup>[48-52]</sup>得到标准化火活动指数(NFAI),NFAI 不会扭曲各个样点的原始火活动变化模式,使所有炭屑或黑碳序列在同一尺度上具有可比性,从而减少沉积速率、植被类型、集水区地形对沉积记录的影响。

## 2 结果

中国西北地区地处欧亚大陆腹地,自东往西分别处于季风区、季风—西风过渡区、西风区,生态脆弱且敏感,却是文化交流融合的重要区域<sup>[33,43,53-55]</sup>,且保留了较多古气候信息记录载体,保存了丰富的火事件和环境变化的连续记录。根据 28 组西北地区炭屑或黑碳记录,结合孢粉、氧同位素、人口、战争等代用指标,剖析火事件发生的主要影响因素,可将中国西北地区 8 kaBP 以来火历史划分为 4 个阶段:

### (1) 受气候影响的火活动波动阶段(8~6 kaBP)

根据西北地区全新世湿度变化模式,前期研究区受西风影响的区域气候干旱,抑制了植被发展,受季风影响的区域气候湿润,不利于火事件的发生。此阶段西北地区火活动总体处于一般水平,但随着季风的减弱使得火活动出现较大波动,此波动与相同时期全国火历史重建记录具有一致性。

### (2) 植被发展与火活动平稳阶段(6~4 kaBP)

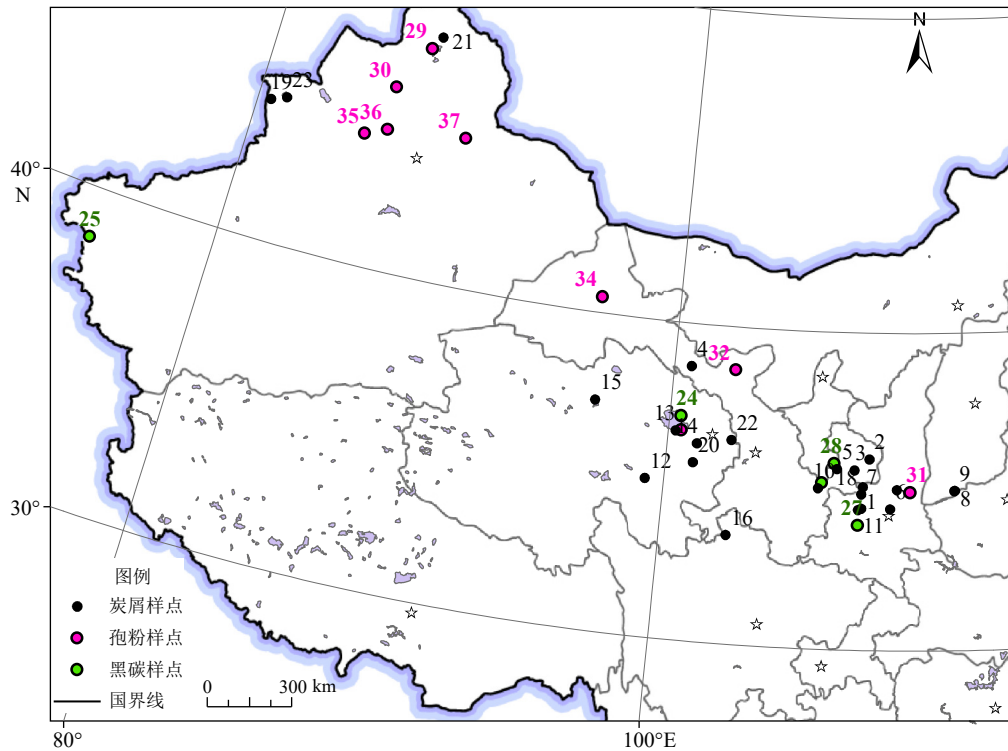


图1 本文综述的中国西北地区全新世炭屑、黑碳、孢粉沉积记录研究点位分布示意图  
审图号 GS(2019)1823 号。

Fig.1 Schematic diagram of the distribution of research sites on the Holocene charcoal, black carbon, and sporopollen deposition records in Northwest China

Drawing review number: GS(2019)1823.

其间炭屑与黑碳所记录的火活动呈现出不同的变化规律,根据炭屑记录,此阶段火活动总体水平较低,未见明显波动,而黑碳记录则表明此阶段火活动出现多次峰值且波动明显。此阶段为中国五帝时期、新石器时代晚期,人类用火方式的不断发展可能是造成此差异的根本原因。根据气候指标以及西北地区孢粉组合分析,此时气候好转使得西北地区植被快速发展,积累了一定的燃烧质。

### (3) 人为诱发火事件快速上升阶段(4~2 kaBP)

此阶段气候波动剧烈,炭屑与黑碳所记录的火活动也呈现出不同的变化规律。炭屑记录表明火活动在4~2 kaBP呈现不断上升的趋势,而黑碳记录的火活动趋势表现为先上升再下降,在4~3 kaBP之间的断崖式降温期间,两种代用指标趋势相同。在整个西北地区温度下降、湿度波动较大的背景下,火活动一直处于较高水平,黑碳记录所呈现的火活动趋势甚至达到中晚全新世的最高峰,此时农业活动的迅速发展、人类活动的不断加剧主导了火事件的发生。

(4) 晚全新世火事件大范围发生阶段(2~0 kaBP)

2 kaBP至今是与现代气候相衔接的时期,其间气候寒冷化、干旱化明显,人类活动剧烈,战争频发,火活动受气候变化和人类活动的共同驱动,炭屑及黑碳火活动指数处于高值,表明火活动剧烈(图2)。

## 3 讨论

### 3.1 受气候制约的火活动波动阶段(8~6 kaBP)

8~4 kaBP属于全新世大暖期阶段,根据炭屑和黑碳重建结果,西北地区绝大多数时期内火活动趋势较为平稳,表明整个时期火活动处于一般水平。根据氧同位素及碳酸盐指数对比(图3),结合西北地区湿度变化模式(图2)及孢粉记录,认为大部分时期内中国西北地区受西风影响的新疆、青海和甘肃部分地区气候干燥,不适宜植被发展,总花粉浓度不高,森林植被稀少,燃烧质短缺,造成整个阶段火活动水平一般;处于季风区的陕西、宁夏以及甘肃部分地区气候湿润,可燃物含水率高,抑制了火事件的发生(图4),因此8~6 kaBP我国西北



表 1 中国西北地区中晚全新世火记录不完全统计

Table 1 Statistics of the Middle and Late Holocene fire records (incomplete) in Northwest China

序号	点位	地点	位置	指标	研究方法	测年	文献
1	JYC	扶风蒋阳村	34°28'N、107°53'E	炭屑	薄片计数法	OSL	[21]
2	MJY	甘肃合水马家塬	36°2'N、108°10'E	炭屑	薄片计数法	OSL	[22]
3	HGZ	陇东后官寨	35°41'N、107°35'E	炭屑	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[23]
4	QC	陇东桥村	38°39'N、100°43'E	炭屑	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[23]
5	ZJC	甘肃平凉赵家村	35°41'51.9"N、106°52'57.8"E	炭屑	薄片计数法	OSL	[24]
6	YGZ	高陵杨官寨	34°28'13"N、109°0'59"E	炭屑	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[25]
7	ETC	黄土高原二塘村	34°55'12"N、107°52'12"E	炭屑	薄片计数法	OSL	[26]
8	DXF-N	黄土高原东夏丰北	35°2'24"N、111°34'48"E	炭屑	薄片计数法	OSL	[26]
9	DXF-S	黄土高原东夏丰南	35°1'48"N、111°34'12"E	炭屑	薄片计数法	OSL	[26]
10	XJN	黄土高原徐建遗址	35°4'48"N、106°9'0"E	炭屑	薄片计数法	OSL	[26]
11	WLP	岐山五里铺	34°26'N、107°45'E	炭屑	薄片计数法	OSL	[27]
12	XDW	青藏高原下大武地区	35°0'6.9"N、99°15'37.7"E	炭屑	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[28]
13	JXG	青海湖江西沟	36°35'25"N、100°17'47"E	炭屑	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[29]
14	QLB	青海湖盆地	36°14'58"N、101°12'16"E	炭屑	薄片计数法	OSL	[27]
15	HL-1	青海可鲁克湖	37°16'N、96°54'E	炭屑	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[30]
16	ZB08-C1	若尔盖盆地	33°27'N、102°38'E	炭屑	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[31]
17	YHC	陕西白水尧禾村	35°4'27"N、109°16'45"E	炭屑	薄片计数法	OSL	[24]
18	XHC	咸阳长武	35°08'50"N、107°55'55.5"E	炭屑	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[32]
19	WQ-1	新疆天山	44°9'7"N、80°11'E	炭屑	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[33]
20	KE	青海共和盆地	35°38.7'N、101°06'E	炭屑	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[34]
21	ALHK	新疆阿拉哈克盐湖	47°41'37"N、87°32'40.5"E	炭屑	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[35]
22	DZP	青海高庙盆地	36°26'28"N、102°34'51"E	炭屑	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[19]
23	SLMH	新疆赛里木湖	44°35'N、81°15'E	炭屑	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[36]
24	CCC	宁夏彭阳	35°52'N、106°46'E	黑碳	化学氧化法	AMS <sup>14</sup> C	[37]
25	CDL12A	青海草裕滩湖	37°3'50.4"N、100°27'43.2"E	黑碳	化学氧化法	AMS <sup>14</sup> C	[38]
26	PG1950	新疆卡拉库里湖	38°26'20.4"N、75°3'25.2"E	黑碳	化学氧化法	AMS <sup>14</sup> C	[38]
27	GSA07	六盘山天池	35°15'0"N、106°18'0"E	黑碳	化学氧化法	AMS <sup>14</sup> C	[38]
28	YHC16A	陕西玉皇池	33°56'24"N、107°45'36"E	黑碳	化学氧化法	AMS <sup>14</sup> C	[38]
29	HLGU	新疆乌伦古湖	47°15'43.2"N、87°9'21.6"E	孢粉	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[39]
30	ML-1	新疆玛纳斯湖	45°48'10.44"N、85°57'33.84"E	孢粉	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[40]
31	WN	陕西渭南	34°59'17.7"N、109°48'44.3"E	孢粉	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[41]
32	SJC	青海三角城	38°38'49.2"N、102°33'7.2"E	孢粉	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[42]
33	QJ-2000	青海湖	36°37'N、100°31'E	孢粉	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[43]
34	JDG	甘肃九道沟	40°30'N、96°39'E	孢粉	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[44]
35	MGH	新疆蘑菇湖湿地	44°25'39.3"N、85°54'35.6"E	孢粉	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[45]
36	CTHC	新疆草滩湖村湿地	44°25'06"N、86°01.26'E	孢粉	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[46]
37	DDHZ	新疆东道海子	44°41.7'N、89°33.5'E	孢粉	薄片计数法	AMS <sup>14</sup> C	[47]

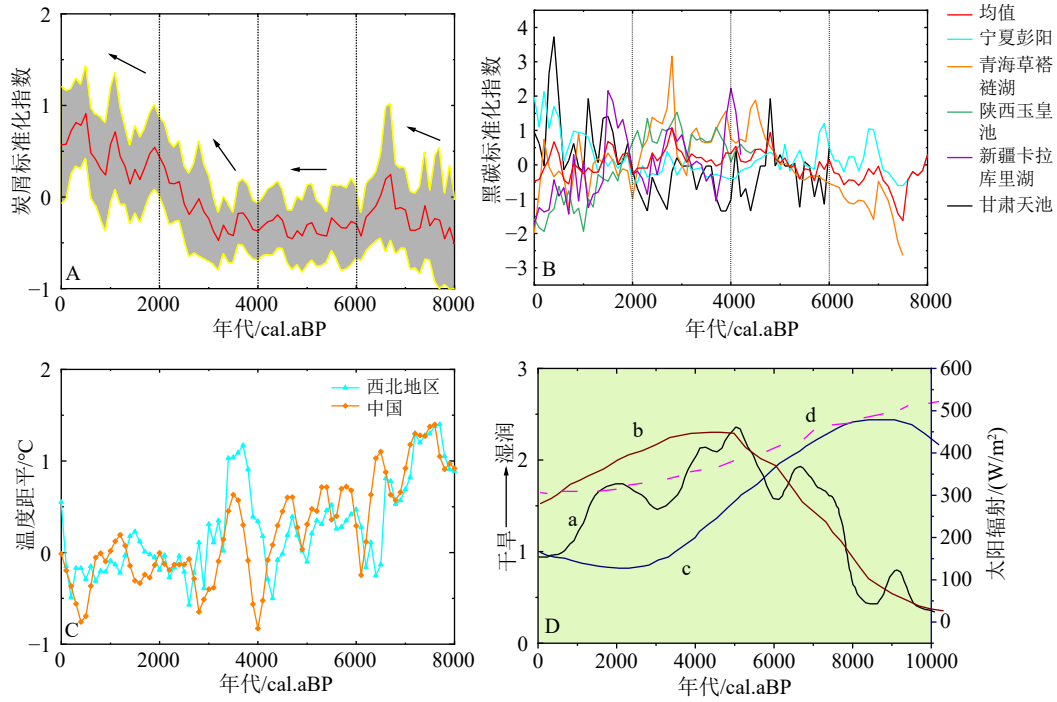


图2 西北地区火活动及气候指标对比

A: 西北地区 8 kaBP 炭屑记录归一化指数(本文); B: 黑碳标准化指数(本文); C: 西北地区与中国全域温度距平<sup>[56-59]</sup>;  
 D: 西北地区湿度变化模式<sup>[55]</sup>, 其中 a 为湿度变化曲线, b 为西风模式, c 为东亚季风模式, d 为太阳辐射。

Fig.2 Comparison of fire activity and climate index in Northwest China

A: Normalization index of 8 kaBP charcoal recorded in Northwest China (this paper); B: carbon black standardization index (this paper); C: global temperature anomaly between Northwest China and entire China<sup>[56-59]</sup>; D: humidity change model in Northwest China<sup>[55]</sup>, a: humidity change curve; b: westerly wind model; c: East Asian monsoon model; d: solar radiation.

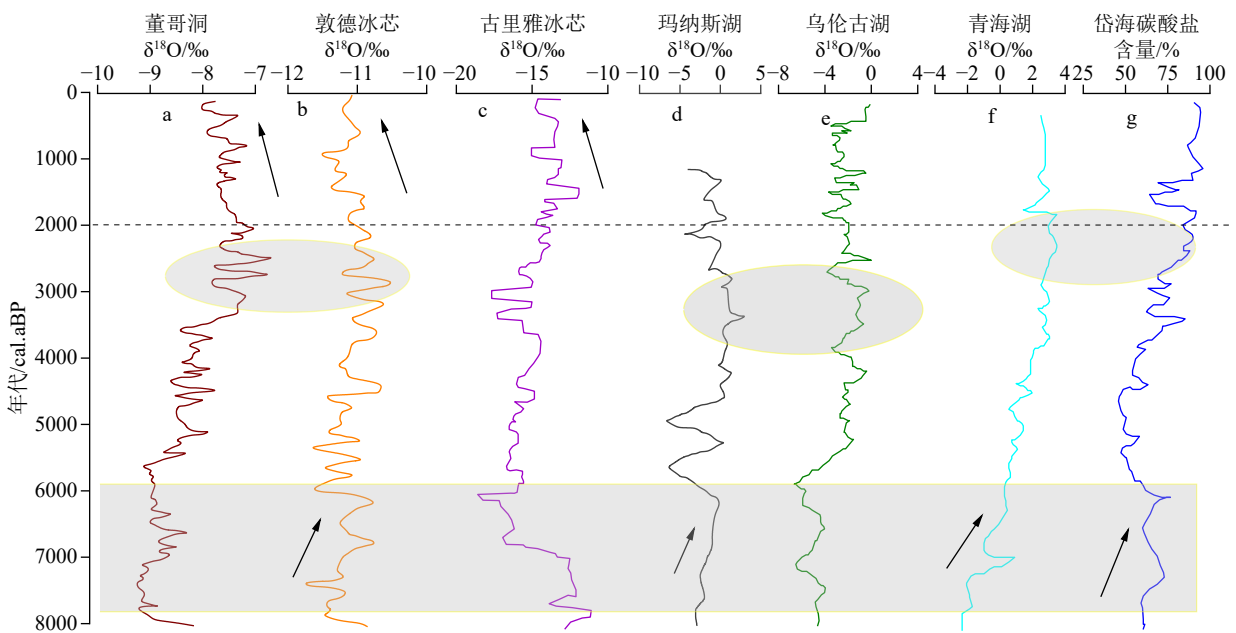


图3 氧同位素及碳酸盐指数对比

a: 董哥洞<sup>[60]</sup>, b: 敦德冰芯<sup>[32]</sup>, c: 古里雅冰芯<sup>[32]</sup>, d: 玛纳斯湖<sup>[55]</sup>, e: 乌伦古湖<sup>[55]</sup>, f: 青海湖<sup>[55]</sup>, g: 岱海碳酸盐含量<sup>[55]</sup>

Fig.3 Comparison of oxygen isotope ( $\delta^{18}O$ ) and carbonate index

a: Dongge Cave<sup>[60]</sup>, b: Dunde Ice Core<sup>[32]</sup>, c: Guriya Ice Core<sup>[32]</sup>, d: Manas Lake<sup>[55]</sup>, e: Wulungu Lake<sup>[55]</sup>, f: Qinghai Lake<sup>[55]</sup>,  
 g: carbonate content in Daihai Lake<sup>[55]</sup>.

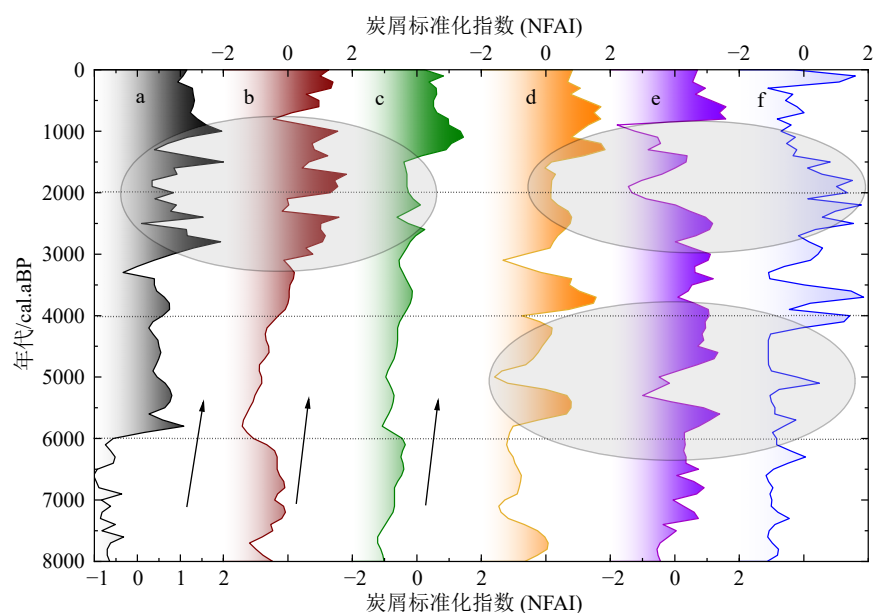


图 4 西北季风区与西风区火活动标准化指数对比

a: 高陵杨官寨<sup>[25]</sup>, b: 东夏丰北<sup>[26]</sup>, c: 陕西白水尧禾村<sup>[24]</sup>, d: 青海共和盆地<sup>[34]</sup>, e: 可鲁克湖<sup>[30]</sup>, f: 新疆天山<sup>[33]</sup>。

Fig.4 Comparison of fire activity standardization index between northwest monsoon region and westerly region

a: Yangguanzhai in Gaoling<sup>[25]</sup>, b: DongXiaFengbei<sup>[26]</sup>, c: Yaohe Village in Baishui, Shaanxi<sup>[24]</sup>, d: Gonghe Basin in Qinghai<sup>[34]</sup>, e: Keruk Lake in Xinjian<sup>[35]</sup>, f: Tianshan Mountain in Xinjiang<sup>[38]</sup>.

地区火活动整体趋势较为平稳,但也存在较为明显的波动时期,如在 7.5、6.5 kaBP 左右都出现峰值,表明火事件发生的频次有所增加,燃烧面积有所扩大。郭超等对中国内陆湖泊沉积物多指标分析表明,受西风影响,愈深入西北内陆早中全新世愈干旱,且随着东亚季风在 7.0 kaBP 开始减弱,受季风影响的区域气候也开始变干<sup>[55-61]</sup>,可能造成了火事件的波动。根据黑碳记录,在 7~6.5 kaBP 左右火活动出现几次峰值,同样表现为火活动较为剧烈。

8~6 kaBP 为中国全新世大暖期鼎盛时期<sup>[34-35]</sup>,西北地区的降温以及干旱化增加了火事件发生的概率。根据施雅风等<sup>[61]</sup>对中国全新世大暖期的气候波动事件重建结果,在 7.2~6 kaBP 左右气温下降、降雨减少;谭志海等<sup>[22]</sup>关于陇东黄土高原北部全新世火历史重建结果表明,在中全新世气候适宜的环境下,陇东黄土高原北部发生自然野火几率很小,但 MJY-A 剖面古土壤地层的底部有高浓度粗粒木炭屑出现,并呈现 3~4 次峰值波动,可能与气候突变有关,与本文重建的火活动波动时期相对应。

### 3.2 植被发展与火活动平稳阶段 (6~4 kaBP)

6~4 kaBP 为中国五帝时期、新石器时代晚期,中原大地已经出现了人类文明的萌芽,认识此阶段的火历史以及气候变化对理解中国古文明发展有重要意义。6~4 kaBP 炭屑与黑碳所记录的火活动

指数存在显著差异,炭屑记录表明此阶段火活动水平较弱,而黑碳记录则表明此阶段火活动相对较强(图 5)。相比炭屑,黑碳粒径更小,更容易在风力、大气循环、地表径流等的作用下沉积于各种介质中<sup>[18]</sup>,从而指示远距离火事件;而炭屑样点多靠近文化遗址,从而指示局域性火事件<sup>[14]</sup>。根据温度及湿度曲线(图 2),6~4.5 kaBP 气候好转,西北地区气候温暖稍湿,对比孢粉记录,整个西北地区森林覆盖率较小,草本植物作为优势物种大量生长,如肖霞云等<sup>[39]</sup>关于新疆乌伦古湖全新世以来高分辨率的孢粉记录表明整个剖面的孢粉组合中乔木花粉含量较低,旱生草本在孢粉组合中都占绝对优势;王芳等<sup>[41]</sup>对渭南地区全新世以来的孢粉组合与古环境研究中发现中全新世孢粉组合以草本植物为主,说明该地区气候温暖较湿,大规模火事件不容易发生,但不排除气候突变引起的局部地区小规模火事件。气候指标表明我国西北地区在 5.5~5 kaBP、4.2~4 kaBP 左右各存在一次气候突变<sup>[61-63]</sup>,可能与热盐环流的突然减弱有关,其间火事件时有发生,但规模较小。余英浩等<sup>[30]</sup>对青海可鲁克湖沉积记录分析表明,5.5、4.5 kaBP 左右微炭屑(<50 μm)都存在峰值;张山佳等<sup>[38]</sup>对丝绸之路中一东段中晚全新世古火历史研究中发现甘肃六盘山天池焦炭与烟炱含量在 5~4.5 kaBP 存在多次峰值,但天池炭屑浓度较为平稳,草裕褡湖记录的古火在 5.5 kaBP 开始呈上升

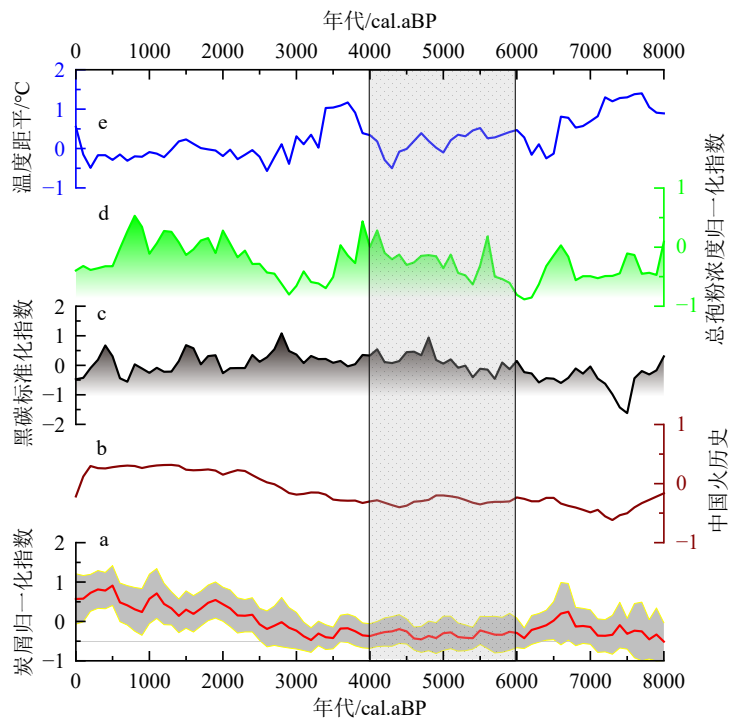


图5 西北地区火历史与全国火历史及气候、植被指数对比

a: 8 kaBP 炭屑归一化指数(本文), b: 全国火历史趋势<sup>[38]</sup>, c: 黑碳标准化指数(本文), d: 孢粉浓度标准化指数(本文), e: 温度距平<sup>[56-59]</sup>。

Fig.5 Comparison of fire history in Northwest China with China's national fire history and climate vegetation index

a: 8 kaBP normalized index of carbon chips (this paper), b: national fire historical trend<sup>[38]</sup>, c: normalized index of carbon black (this paper), d: normalized index of sporopollen concentration (in this paper), e: temperature anomaly<sup>[56-59]</sup>.

趋势,并在 5.5~4.4 kaBP 出现峰值。气候突变导致发生小规模火事件,产生的黑碳随风力或者水流聚集可能是造成其含量在 5.5~4 kaBP 期间增大的原因。根据湿度曲线描述的西北地区干湿状况,在 4.5 kaBP 之后湿度开始大幅度增大,气候向湿润化发展,西北地区孢粉浓度也呈现上升趋势,如毛洪亮等<sup>[44]</sup>通过对甘肃疏勒河冲积扇绿洲全新世孢粉组合分析,发现 4.5 kaBP 之后研究区针阔混交林开始发展,同时草原面积有所减少,沼泽、河道面积减小。根据西北地区孢粉组合特征分析,推测当时气候温暖稍湿,不利于火的发生,但积累了较为丰富的生物质。

### 3.3 人为诱发火事件快速上升阶段(4~2 kaBP)

炭屑重建结果表明在 4~2 kaBP 火活动呈现持续上升的态势,而黑碳重建结果则表现为先上升后下降的趋势,在气候湿润不利于火事件发生的前提下,人类文明的快速发展可能是造成此差异的根本原因。中晚全新世以来,人类活动范围不断扩大,人为火事件成为火历史的重要组成部分<sup>[63-67]</sup>。人类文明发展过程中的人口迁移、烧植轮作、开山伐木、战争事件等都会影响火成炭的时空分布,从而影响火历史的发展趋势。

4~2 kaBP 为中国的夏商周三代,古文献中有大量关于商末时期洪涝、雨土、饥荒和动乱的记述。吴文祥等<sup>[67-69]</sup>关于中原地区气候与人类文明发展的研究表明,4 kaBP 前后发生了一次重要的广域性,甚至全球性的降温事件,从地质自然气候记录来看,这一时期我国北方地区气候主要表现为湿冷。如处于西风区的新疆博斯腾湖在约 6.0~1.5 kaBP 期间蒿藜比(A/C)值指示的流域湿度增加,盘星藻指示湖泊深度最大,为全新世最湿润时期<sup>[70]</sup>;巴里坤湖  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$  和粒度指标的综合分析表明,中晚全新世气候波动剧烈,湿润化趋势明显<sup>[71]</sup>。此阶段处于遗址区域的样点炭屑含量快速上升,如黄土高原徐建遗址、高陵杨官寨遗址等<sup>[25-27]</sup>指示了人类活动对火历史的影响。同时气候突变对我国西北地区文明发展产生了较大的冲击,其主要标志是新石器文化发生衰落或终结,同时具有先进文明的农业民族开始逐渐进入西北地区,如甘青地区的青铜文化等<sup>[72]</sup>,此阶段农业生产以及冶炼活动在我国西北地区得到快速发展,“刀耕火种”的农业活动、河西走廊地区人类的冶炼活动大大增加了火事件发生的可能<sup>[73-75]</sup>。青藏高原下大武地区在 3.7~1.8 kaBP 是处于相对湿冷的阶段,炭屑平均浓度值



呈逐渐增大趋势, 细炭屑颗粒的平均浓度达到了前所未有的高值, 表明区域火的趋势增强<sup>[28]</sup>。在气候不利于古火发生的背景下, 人类活动可能是下大武地区火事件的主要驱动因素。3 kaBP 左右人类已经能在高海拔地区长期生存<sup>[58,76]</sup>, 炭屑以及粟黍等农作物等花粉浓度开始不断增加, 如周新郢等<sup>[23]</sup>对陇东地区历史农业发展研究中提到此时期黄土高原西部地区农业生产工具大量出现, 表明农业经济比重的增加和农业技术水平的提高。以灌丛草原为主的黄土地区易于进行原始农业的烧垦活动, 可能造成了炭屑和黑碳含量的不断积累, 表现为火活动逐渐升高的趋势<sup>[77-80]</sup>。根据<sup>14</sup>C 年代重建的人类定居强度在 3.5~2.8 kaBP 出现显著的峰值, 与玉皇池记录的古火增加相对应<sup>[38,74,75,81-82]</sup>。这一阶段属于青铜时代晚期和铁器时代早期, 考古证据表明秦岭及周边地区有大量该时期的遗址被发现, 手工业和青铜铸造活动快速发展; 先周文化在关中盆地西部建立起来<sup>[21,22,24,47,74,77,83]</sup>, 先周部落的人群大规模农业、冶金等活动很可能造成了 3 kaBP 之后火频率的增加; 在关中盆地西部的 LJC 和 LJY 剖面, 黑碳

和微炭屑记录都在这一时期出现明显的峰值且波动较大, 相似的现象在关中盆地东部的 YHC 剖面中也有所体现。陕西玉皇池焦炭与烟炱比值稳定波动并保持在低值, 表明火事件以高强度、明燃过程为主<sup>[38]</sup>。可见在 4~2 kaBP 期间, 气候湿润寒冷, 灾害事件频发, 不利于火事件发生的背景下, 人类活动的加剧使火活动呈现出较高水平。

### 3.4 晚全新世火事件大范围发生阶段 (2~0 kaBP)

晚全新世以来炭屑与黑碳沉积量不断增多, 重建结果表明火事件频发, 且范围大、频率高, 火活动剧烈。对比各项指标, 自 2 kaBP 之后, 温度持续降低, 湿度下降, 同时中国耕地面积快速增加, 北方人口快速上涨, 战争数量也呈现多次峰值(图 6), 气候干冷化以及人类文明快速发展造成此时期中国西北地区火活动出现历史最高峰<sup>[82-89]</sup>。

在气候方面, 2 kaBP 至今气候宏观上表现为较为寒冷略干, 其间也有较大范围的波动, 分别在约 1.9 kaBP 前后(东汉末年)、1.4 kaBP 前后(隋朝末年)、1 kaBP 前后(五代十国)、0.9 kaBP 前后(北宋

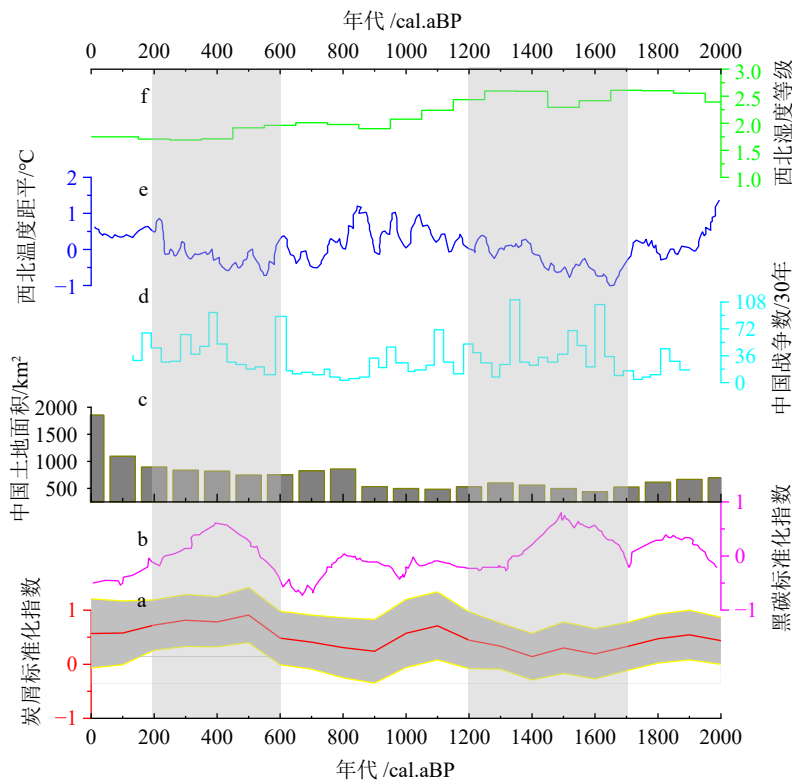


图 6 西北地区 2 kaBP 火历史与战争、气候指数对比

a: 炭屑标准化指数(本文), b: 黑碳标准化指数(本文), c: 耕地面积变化<sup>[87]</sup>, d: 每 30 年战争数<sup>[87]</sup>, e: 温度<sup>[56-59]</sup>, f: 湿度指数<sup>[53]</sup>。

Fig.6 Comparison of 2 kaBP fire history, war, and climate index in Northwest China

a: Standardized index of charcoal (this paper), b: standardized index of carbon black (this paper), c: change of cultivated land area<sup>[87]</sup>, d: number of wars every 30 years<sup>[87]</sup>, e: temperature<sup>[56-59]</sup>, f: humidity index<sup>[53]</sup>.

末年)、0.3 kaBP 前后(明朝末年)有5次干冷气候的低谷期<sup>[88-91]</sup>。河西走廊中部盐池自中全新世以来退缩明显、疏勒河流量减小以及流域的剖面记录也揭示了晚全新世干旱化的事实<sup>[92]</sup>;晚全新世以来新疆玛纳斯湖、艾比湖、赛里木湖和巴里坤湖地区的植被类型虽然以荒漠草原、草甸草原为主,但植被组分中的耐旱成分逐渐增加,在乌伦古湖和巴里坤湖地区出现了荒漠植被<sup>[93-98]</sup>。这些证据表明,研究区域在晚全新世的气候表现为湿度降低、干旱化程度增加。干旱的气候容易使植被长期处于缺水状态,变得干燥易燃,增大了地方性火事件发生的可能,如若尔盖泥炭地1.4 kaBP 至今炭屑浓度明显变大,说明火事件的强度变大<sup>[31]</sup>;卡拉库里湖晚全新世焦炭与烟炱的比值整体上较为稳定,呈下降的变化趋势,表明古火一直以草原火为主,高燃烧效率的明燃过程有所增加<sup>[38]</sup>。黄土高原地区晚全新世以来炭屑浓度急剧攀升,指示火活动频繁且规模较大<sup>[14]</sup>;1 kaBP 前后青海草滩湖沉积记录揭示的火历史出现历史最高峰,与青海古城火历史重建记录相一致<sup>[38]</sup>。以上研究均表明,2 kaBP 至今,我国西北地区,甚至整个中亚地区,气候持续干旱化,造成了火事件的大范围发生,使炭屑黑碳大量沉积,但气候干旱化并非火事件持续增加的唯一因素。

2 kaBP 至今也是我国朝代更替、战争频发、农业快速发展的时期。在干冷的气候背景下,人类活动进一步增加了火事件发生的可能。有学者认为此阶段气候恶化促使北方游牧民族南侵,造成社会动乱、朝代更替、战争频发,而火自古就在军事上发挥着重要作用<sup>[97-98]</sup>,从而引发了火事件大量发生。据史料记载,1.7~0.5 kaBP 期间在1.6、1.2、0.9、0.6 kaBP 出现4次火活动峰值,与此同时河西走廊的战争次数在这些时期也出现高值,分别对应于东晋、唐朝、北宋、明朝时期,指示它们之间有内在联系。据统计,两千余年历史时期的火灾事故原因中,战争引起的火灾数量最多、规模最大<sup>[99]</sup>。同时也有研究表明青铜器晚期人类冶炼技术快速发展,开山伐木炼铜铸铁使得植被大量被破坏,孢粉记录出现多次断崖式下降,造成炭屑和黑碳的大量沉积<sup>[28-29,36-37,39-40,78,88,92,100]</sup>。两汉时期,黑碳记录揭示的火历史再次出现显著峰值,同时期人口数量普遍增长,人类农业、冶炼、取暖等用火活动可能造成了大量黑碳的释放。ZJC 剖面中,秦汉时期炭屑浓度出现高值,可能与该时期建造长城、大量开垦土地有关<sup>[21-22,24,60]</sup>。此外,开始于春秋时期的冶铁活动,至汉代有了快速的发展,汉代先民大量砍伐树木用于

冶铁,对环境造成破坏同时也影响了火历史的发展。晚全新世以来 JYC 剖面 and WLP 剖面的现代黄土沉积层木炭屑浓度达到峰值<sup>[21,27]</sup>,印证了2 kaBP 以来随着人口迁移以及农业需要,渭河流域人类放火烧荒、开垦土地使生物质大范围燃烧,同时造成炭屑和黑碳大量沉积。各朝代的农业发展对火事件的发生都有较大的促进作用<sup>[23,54,66,74,75]</sup>,秦汉时期黄土高原农业土地开发达到高潮,耕地面积不断扩大;唐末渭河流域大规模土地利用增大了整个流域的燃烧活动;北宋时期随着黄土高原地区人口增加和城市聚落规模扩大,人们放火毁林和开垦土地、发展谷物种植业等活动不断加强;明初到万历年间,甘青地区耕地由16300顷增加到45993顷,增加2.82倍,耕地面积的增加反映了人口的增加或迁移以及人类活动范围的扩大,火事件发生的可能性也随之增大。综上,在气候条件以及人类活动共同驱动下,2 kaBP 至今炭屑和黑碳大量沉积,古火频繁且规模较大,是火事件大范围发生时段<sup>[85,87,90,101]</sup>。但近百余年火活动呈现下降趋势,可能因为农牧业活动持续性增强减少了可燃物质累积并降低了地表景观的连续性,有效抑制了部分火事件的发生。

## 4 结论

西北地区中晚全新世火历史可以划分为4个阶段:

(1) 受气候影响的火活动波动阶段(8~6 kaBP)。西风区的干旱以及季风区的湿润同时造成区域火活动处于一般水平,随着东亚季风减弱陕甘宁地区出现阶段性干冷,造成火事件趋势的波动。

(2) 植被发展与火活动平稳阶段(6~4 kaBP)。西风区以及季风区气候好转,西北地区形成较为开阔的生态景观,抑制了火事件的蔓延,使火活动整体处于一般水平,同时植被得以发展。

(3) 人为诱发火事件快速上升阶段(4~2 kaBP)。在寒冷且湿润的气候背景下,我国西北地区古火的演化打破了此前长期由气候控制的变化模式,转向由人类活动主导,如青铜时代河西走廊地区人类的冶炼活动、快速发展的农业以及频繁战争事件。同时人类活动对火事件的影响是动态变化的,并非简单的促进或抑制火事件的发生,这有助于理解人类活动对地球系统改造的时空演变历程,为理解“人类世”这个热点科学问题提供了新的见解。

(4) 晚全新世火事件大范围发生阶段(2~0 kaBP)。气候干冷,人类活动剧烈,战争频发,火事件受气候

变化和人类活动的共同驱动,整个西北地区火活动剧烈。同时近百余年火活动呈现下降趋势,可能因为农牧业活动持续性增强减少了可燃物质累积并降低了地表景观的连续性,有效抑制了部分火事件的发生。

### 参考文献 (References)

- [1] 张健平, 吕厚远. 现代植物炭屑形态的初步分析及其古环境意义 [J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 857-863. [ZHANG Jianping, LÜ Houyuan. Preliminary study of charcoal morphology and its environmental significance[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(5): 857-863.]
- [2] Zhang Z Q, Zhong J J, Lv X G, et al. Climate, vegetation, and human influences on late-Holocene fire regimes in the Sanjiang plain, north-eastern China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 438: 1-8.
- [3] 李宜垠, 侯树芳, 赵鹏飞. 微炭屑的几种统计方法比较及其对人类活动的指示意义 [J]. 第四纪研究, 2010, 30(2): 356-363. [LI Yiyin, HOU Shufang, ZHAO Pengfei. Comparison of different quantification methods for microfossil charcoal concentration and the implication for human activities[J]. Quaternary Sciences, 2010, 30(2): 356-363.]
- [4] Xue J B, Zhong W, Li Q, et al. Holocene fire history in eastern monsoonal region of China and its controls[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 496: 136-145.
- [5] Miao Y F, Song Y G, Li Y, et al. Late Pleistocene fire in the Ili Basin, Central Asia, and its potential links to paleoclimate change and human activities[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 547: 109700.
- [6] Ji P P, Chen J H, Zhou A F, et al. Biofuels reserve controlled wildfire regimes since the last deglaciation: a record from Gonghai Lake, North China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(16): e2021GL094042.
- [7] 占长林, 曹军骥, 韩永明, 等. 古火灾历史重建的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2011, 26(12): 1248-1259. [ZHAN Changlin, CAO Junji, HAN Yongming, et al. Research progress on reconstruction of paleofire history[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(12): 1248-1259.]
- [8] 江鸿, 饶志国. 火的历史重建及其与气候变化和人类活动关系研究进展 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(2): 185-197. [JIANG Hong, RAO Zhiguo. Research progress on fire history reconstruction and its implications for climate change and human activities[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(2): 185-197.]
- [9] 穆燕, 秦小光, 刘嘉麒, 等. 黑碳的研究历史与现状 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(1): 143-155. [MU Yan, QIN Xiaoguang, LIU Jiaqi, et al. A review of black carbon study: history and current status[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(1): 143-155.]
- [10] 吕静, 王宇飞, 李承森. 古炭屑与古森林火 [J]. 古地理学报, 2002, 4(2): 71-76. [LÜ Jing, WANG Yufei, LI Chengsen. Fossil charcoal and ancient forest fire[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2002, 4(2): 71-76.]
- [11] 徐鑫, 李宜垠. 基于3种不同类型的炭屑数据定量重建大兴安岭火历史的结果对比 [J]. 第四纪研究, 2015, 35(4): 960-966. [XU Xin, LI Yiyin. Comparison of the fire history reconstructions from three different kinds of charcoal data on the same site, Daxing'an Mountain[J]. *Quaternary Sciences*, 2015, 35(4): 960-966.]
- [12] 杜建峰, 王宁练, 李建勇, 等. 洛阳盆地全新世炭屑记录及其古环境意义 [J]. 第四纪研究, 2022, 42(2): 383-396. [DU Jianfeng, WANG Ninglian, LI Jianyong, et al. Charcoal records of Holocene loess-soil sequences and palaeoenvironmental significance in the Luoyang Basin[J]. *Quaternary Sciences*, 2022, 42(2): 383-396.]
- [13] Novenko E Y, Rudenko O V, Mazei N G, et al. Late-Holocene vegetation and fire history in Western Putorana Plateau (subarctic Siberia, Russia)[J]. *The Holocene*, 2022, 32(5): 433-441.
- [14] 庞洋, 周斌, 徐向春, 等. 中国东部季风区全新世火历史及其影响因素 [J]. 第四纪研究, 2022, 42(2): 368-382. [PANG Yang, ZHOU Bin, XU Xiangchun, et al. Holocene fire history and its influencing factors in the monsoon region of East China[J]. *Quaternary Sciences*, 2022, 42(2): 368-382.]
- [15] 裴文强. 中国边缘海黑碳记录的长江、珠江流域火历史 [D]. 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所)博士学位论文, 2020. [PEI Wenqiang. Fire history in the Yangtze River and Pearl River Basins: black carbon records from the China seas[D]. Doctor Dissertation of Institute of Oceanography, China Academy of Sciences, 2020.]
- [16] 李明, 孙洪泉, 苏志诚. 中国西北气候干湿变化研究进展 [J]. 地理研究, 2021, 40(4): 1180-1194. [LI Ming, SUN Hongquan, SU Zhicheng. Research progress in dry/wet climate variation in Northwest China[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(4): 1180-1194.]
- [17] 徐国昌, 姚辉. 中国西部全新世历史气候的变化 [J]. 水科学进展, 1991, 2(4): 277-288. [XU Guochang, YAO Hui. Historical climate changes of the West China in the Holocene[J]. *Advances in Water Science*, 1991, 2(4): 277-288.]
- [18] 姚铁锋, 王霞, 谢淦, 等. 新疆地区全新世植被演替与气候环境演变 [J]. 科学通报, 2015, 60(31): 2963-2976. [YAO Yifeng, WANG Xia, XIE Gan, et al. Holocene vegetation succession and climate-environment change in Xinjiang Region[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(31): 2963-2976.]
- [19] 刘瑾. 内蒙古中东部湖泊沉积记录的全新世以来的气候变化 [D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2017. [LIU Jin. Paleoclimate changes during Holocene recorded by lake sediment in central East Inner Mongolia[D]. Doctor Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2017.]
- [20] 王瞭瞭. 多种代用气候指标揭示的西部干旱区全新世气候环境变化 [D]. 兰州大学硕士学位论文, 2009. [WANG Liangliang. Multi-proxy data analysis on Holocene climate changes in western arid China[D]. Master Dissertation of Lanzhou University, 2009.]
- [21] 谭志海, 黄春长, 庞奖励, 等. 渭河流域全新世土壤剖面木炭屑记录及其古环境意义 [J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 25-30. [TAN Zhihai, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Charcoal records of Holocene loess-soil sequences and its palaeoenvironmental significance in Weihe River Drainage[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(1): 25-30.]



- [22] 谭志海, 黄春长, 庞奖励, 等. 陇东黄土高原北部全新世野火历史的木炭屑记录 [J]. *第四纪研究*, 2008, 28(4): 733-738. [TAN Zhihai, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Charcoal recorded Holocene fire history in the northern part of the Longdong Loess Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 733-738.]
- [23] 周新郢, 李小强, 赵克良, 等. 陇东地区新石器时代的早期农业及环境效应 [J]. *科学通报*, 2011, 56(4-5): 318-326. [ZHOU Xinying, LI Xiaoqiang, ZHAO Keliang, et al. Early agricultural development and environmental effects in the Neolithic Longdong basin (eastern Gansu)[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(8): 762-771.]
- [24] 谭志海, 黄春长, 庞奖励, 等. 渭河流域全新世以来野火历史与人类土地利用的炭屑记录 [J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2014, 44(4): 1297-1306. [TAN Zhihai, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Wildfire history and human land use over Weihe River Basin Since Holocene: evidence from charcoal records[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2014, 44(4): 1297-1306.]
- [25] 范汇晨. 高陵杨官寨遗址剖面全新世火历史的黑碳记录与人类活动 [D]. 西安工程大学硕士学位论文, 2017. [FAN Huichen. The black carbon record of Holocene fire history and human activities in the Yangguanzhai archeological site of Gaoling[D]. Master Dissertation of Xi'an Polytechnic University, 2017.]
- [26] Huang C C, Pang J L, Chen S E, et al. Charcoal records of fire history in the Holocene loess-soil sequences over the southern Loess Plateau of China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 239(1-2): 28-44.
- [27] Tan Z H, Huang C C, Pang J L, et al. Holocene wildfires related to climate and land-use change over the Weihe River Basin, China[J]. *Quaternary International*, 2011, 234(1-2): 167-173.
- [28] 赵亚娟, 侯光良, 鄂崇毅, 等. 青藏高原下大武地区炭屑浓度所反映的环境演变与人类活动 [J]. *地球环境学报*, 2016, 7(1): 19-26. [ZHAO Yajuan, HOU Guangliang, E Chongyi, et al. Charcoal concentration reflect of environment change and human activities in Xiadawu Relic, Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Earth Environment*, 2016, 7(1): 19-26.]
- [29] 姜莹莹, 鄂崇毅, 侯光良, 等. 青海湖江西沟 2 号遗址炭屑浓度反映的环境变化与人类活动 [J]. *地球环境学报*, 2015, 6(2): 98-105. [JIANG Yingying, E Chongyi, HOU Guangliang, et al. Charcoal concentration reflect of environment change and human activities in Qinghai-Lake JXG2 relic[J]. *Journal of Earth Environment*, 2015, 6(2): 98-105.]
- [30] 余英浩, 金映豫, 徐德克, 等. 青海可鲁克湖孢粉记录的 14 cal. ka B. P. 以来植被和气候演化历史 [J]. *第四纪研究*, 2021, 41(5): 1229-1243. [YU Yinghao, JIN Yingyu, XU Deke, et al. Vegetational and climatic changes in the Hurleg Lake, Qinghai, during the last 14000 years[J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41(5): 1229-1243.]
- [31] 赵文伟. 若尔盖泥炭地孢粉和炭屑记录的全新世环境变化 [D]. 兰州大学硕士学位论文, 2012. [ZHAO Wenwei. Holocene environmental changes inferred by pollen and charcoal records from the Zoige Basin[D]. Master Dissertation of Lanzhou University, 2012.]
- [32] 邓琴. 宝鸡地区全新世的气候环境变迁 [D]. 长安大学硕士学位论文, 2011. [DENG Qin. The climatic evolution during the Holocene in the Baoji region[D]. Master Dissertation of Chang'an University, 2011.]
- [33] Li J Y, Wang N L. Holocene grassland fire dynamics and forcing factors in continental interior of China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(13): e2020GL088049.
- [34] Miao Y F, Zhang D J, Cai X M, et al. Holocene fire on the northeast Tibetan Plateau in relation to climate change and human activity[J]. *Quaternary International*, 2017, 443: 124-131.
- [35] 李玉梅. 新疆北部典型湿地 4700 年以来环境和植被演变研究 [D]. 吉林大学博士学位论文, 2019. [LI Yumei. Vegetation and environment changes of the typical wetland since 4700 yr BP in the northern part of Xinjiang[D]. Doctor Dissertation of Jilin University, 2019.]
- [36] 蒋庆丰, 季峻峰, 沈吉, 等. 赛里木湖孢粉记录的亚洲内陆西风区全新世植被与气候变化 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(2): 243-255. [JIANG Qingfeng, JI Junfeng, SHEN Ji, et al. Holocene vegetational and climatic variation in westerly-dominated areas of Central Asia inferred from the Sayram Lake in northern Xinjiang, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(3): 339-353.]
- [37] 孙斌. 陇东地区全新世土壤剖面的黑碳记录及环境变化 [D]. 西安工程大学硕士学位论文, 2016. [[SUN Bin. Holocene records of Black Carbon in the loess and paleo-soil profiles and it's environmental changes in Longdong region[D]. Master Dissertation of Xi'an Polytechnic University, 2016.]
- [38] 张山佳. 丝绸之路中—东段中晚全新世古火历史时空差异及影响因素研究 [D]. 兰州大学博士学位论文, 2016. [ZHANG Shanjia. Temporal-spatial differences and influencing factors of paleo-fire history during middle and late Holocene in northwest China[D]. Doctor Dissertation of Lanzhou University, 2016.]
- [39] 肖霞云, 蒋庆丰, 刘兴起, 等. 新疆乌伦古湖全新世以来高分辨率的孢粉记录与环境变迁 [J]. *微生物学报*, 2006, 23(1): 77-86. [XIAO Xiayun, JIANG Qingfeng, LIU Xingqi, et al. High resolution sporopollen record and environmental change since Holocene in the Wulungu Lake, Xinjiang[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2006, 23(1): 77-86.]
- [40] 孙湘君, 杜乃秋, 翁成郁, 等. 新疆玛纳斯湖盆周围近 14000 年以来的古植被古环境 [J]. *第四纪研究*, 1994, 14(3): 239-248. [SUN Xiangujun, DU Naiqiu, WENG Chengyu, et al. Paleovegetation and paleoenvironment of Manasi Lake, Xinjiang, N. W. China during the last 14000 years[J]. *Quaternary Sciences*, 1994, 14(3): 239-248.]
- [41] 王芳. 渭南地区全新世以来的孢粉组合与古环境 [D]. 石家庄经济学院硕士学位论文, 2015. [WANG Fang. Research of structural geology and genesis of Pollen assemblages and Paleoenvironment since Holocene in the Weinan region[D]. Master Dissertation of Shijiazhuang University of Economics, 2015.]
- [42] 靳立亚, 陈发虎, 朱艳. 西北干旱区湖泊沉积记录反映的全新世气候波动周期性变化 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(2): 101-108. [JIN Liya, CHEN Fahu, ZHU Yan. Holocene climatic periodicities recorded from lake sediments in the arid-semiarid areas of Northwestern China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, 24(2): 101-108.]
- [43] Shen J, Liu X Q, Wang S M, et al. Palaeoclimatic changes in the Qinghai Lake area during the last 18, 000 years[J]. *Quaternary International*, 2005, 136(1): 131-140.



- [44] 毛洪亮, 赵华, 卢演传, 等. 甘肃疏勒河冲积扇绿洲全新世孢粉组合和环境演化 [J]. *地球学报*, 2007, 28(6): 528-534. [MAO Hongliang, ZHAO Hua, LU Yanchou, et al. Pollen assemblages and environment evolution in Shule River alluvial fan oasis of Gansu[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2007, 28(6): 528-534.]
- [45] 段晓红, 张芸, 杨振京, 等. 新疆石河子蘑菇湖湿地 4800 年以来的环境演变 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(4): 203-211. [DUAN Xiaohong, ZHANG Yun, YANG Zhenjing, et al. Environmental evolution of the Moguhu Wetland of Shihezi City in Xinjiang since 4800 cal. a BP[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(4): 203-211.]
- [46] 张芸, 孔昭宸, 倪健, 等. 新疆草滩湖村湿地 4550 年以来的孢粉记录和环境演变 [J]. *科学通报*, 2008, 53(3): 306-316. [ZHANG Yun, KONG Zhaochen, NI Jian, et al. Pollen record and environmental evolution of Caotanhū wetland in Xinjiang since 4550 cal. a BP[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(7): 1049-1061.]
- [47] 阎顺, 李树峰, 孔昭宸, 等. 乌鲁木齐东道海子剖面的孢粉分析及其反映的环境变化 [J]. *第四纪研究*, 2004, 24(4): 463-468. [YAN Shun, LI Shufeng, KONG Zhaochen, et al. The pollen analyses and environment changes of the Dongdaohaizi area in Ürümqi, Xinjiang[J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(4): 463-468.]
- [48] Carcaillet C, Richard P J H. Holocene changes in seasonal precipitation highlighted by fire incidence in eastern Canada[J]. *Climate Dynamics*, 2000, 16(7): 549-559.
- [49] Carcaillet C, Bouvier M, Fréchette B, et al. Comparison of pollen-slide and sieving methods in lacustrine charcoal analyses for local and regional fire history[J]. *The Holocene*, 2001, 11(4): 467-476.
- [50] Carcaillet C, Almquist H, Asnong H, et al. Holocene biomass burning and global dynamics of the carbon cycle[J]. *Chemosphere*, 2002, 49(8): 845-863.
- [51] 狄丽颖, 孙仁义. 中国森林火灾研究综述 [J]. *灾害学*, 2007, 22(4): 118-123. [DI Liying, SUN Renyi. Summarization of research on forest fire in China[J]. *Journal of Catastrophology*, 2007, 22(4): 118-123.]
- [52] Xu Q H, Tian F, Bunting M J, et al. Pollen source areas of lakes with inflowing rivers: modern pollen influx data from Lake Baiyangdian, China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 37: 81-91.
- [53] 张恩源. 中国西北全新世湿度时空变化集成及区域史前人类活动 [D]. 兰州大学硕士学位论文, 2020. [ZHANG Enyuan. Spatiotemporal changes of Holocene moisture across northwestern China and regional prehistoric human activities[D]. Master Dissertation of Lanzhou University, 2020.]
- [54] Zhang D L, Huang X Z, Liu Q, et al. Holocene fire records and their drivers in the westerlies-dominated Central Asia[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 833: 155153.
- [55] 郭超, 马玉贞, 胡彩莉, 等. 中国内陆区湖泊沉积所反映的全新世干湿变化 [J]. *地理科学进展*, 2014, 33(6): 786-798. [GUO Chao, MA Yuzhen, HU Caili, et al. Holocene humidity changes in inland China inferred from lake sediments[J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(6): 786-798.]
- [56] 侯光良, 方修琦. 中国全新世分区气温序列集成重建及特征分析 [J]. *古地理学报*, 2012, 14(2): 243-252. [HOU Guangliang, FANG Xiuqi. Characteristics analysis and synthetical reconstruction of regional temperature series of the Holocene in China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(2): 243-252.]
- [57] 侯光良, 方修琦. 中国全新世气温变化特征 [J]. *地理科学进展*, 2011, 30(9): 1075-1080. [HOU Guangliang, FANG Xiuqi. Characteristics of Holocene temperature change in China[J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(9): 1075-1080.]
- [58] 方修琦, 侯光良. 中国全新世气温序列的集成重建 [J]. *地理科学*, 2011, 31(4): 385-393. [FANG Xiuqi, HOU Guangliang. Synthetically reconstructed Holocene temperature change in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(4): 385-393.]
- [59] 葛全胜, 王顺兵, 郑景云. 过去 5000 年中国气温变化序列重建 [J]. *自然科学进展*, 2006, 16(6): 689-696. [GE Quansheng, WANG Shunbing, ZHENG Jingyun. Reconstruction of temperature change sequence in China in the past 5000 years[J]. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(6): 689-696.]
- [60] 谭志海, 龙艳侠, 范汇晨, 等. 史前关中盆地土壤剖面的黑碳与炭屑记录 [J]. *土壤通报*, 2016, 47(3): 518-524. [TAN Zhihai, LONG Yanxia, FAN Huichen, et al. Records of charcoal and black carbon in Holocene loess-paleosol profiles from Guanzhong Basin[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(3): 518-524.]
- [61] 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*, 1992(12): 1300-1308. [SHI Yafeng, KONG Zhaochen, WANG Sumin, et al. Climate fluctuations and important events during the Holocene great warm period in China[J]. *Scientia Sinica: Chimica*, 1992(12): 1300-1308.]
- [62] 王绍武, 闻新宇, 黄建斌. 五帝时代 (距今 6-4 千年) 中国的气候 [J]. *中国历史地理论丛*, 2011, 26(2): 5-13. [WANG Shaowu, WEN Xinyu, HUANG Jianbin. Climate in China during the Five-Emperor Period: 6-4 kaBP[J]. *Journal of Chinese Historical Geography*, 2011, 26(2): 5-13.]
- [63] 侯小青, 侯光良, 王芳芳, 等. 中国北方全新世降水分区对比分析 [J]. *青海环境*, 2017, 27(3): 126-130, 139. [HOU Xiaoqing, HOU Guangliang, WANG Fangfang, et al. Comparative analysis of Holocene precipitation zoning in northern China[J]. *Journal of Qinghai Environment*, 2017, 27(3): 126-130, 139.]
- [64] 李小强, 安芷生, 周杰, 等. 全新世黄土高原塬区植被特征 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(3): 109-114. [LI Xiaoqiang, AN Zhisheng, ZHOU Jie, et al. Characteristics of vegetation in the Loess plateau area since Holocene[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(3): 109-114.]
- [65] 李小强, 赵宏丽, 闫敏华, 等. 东北三江平原全新世火演化及其与植被和气候的关系 [J]. *地理科学*, 2005, 25(2): 177-182. [LI Xiaoqiang, ZHAO Hongli, YAN Minhua, et al. Fire variations and Relationship among Fire and Vegetation and Climate during Holocene at Sanjiang Plain, Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(2): 177-182.]
- [66] 李小强. 中国全新世气候和农业活动研究新进展 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(12): 1919-1928. [LI Xiaoqiang. New progress in the Holocene climate and agriculture research in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(12): 2027-2036.]
- [67] 吴文祥, 刘东生. 4000aB.P. 前后东亚季风变迁与中原周围地区新

- 石器文化的衰落[J]. 第四纪研究, 2004, 24(3): 278-284. [WU Wenxiang, LIU Dongsheng. Variations in east Asia monsoon around 4000. B. P. and the collapse of neolithic cultures around central plain[J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(3): 278-284.]
- [68] 吴文祥, 刘东生. 4000aB. P. 前后降温事件与中华文明的诞生[J]. 第四纪研究, 2001, 21(5): 443-451. [WU Wenxiang, LIU Dongsheng. 4000a B. P. event and its implications for the origin of Ancient Chinese civilization[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(5): 443-451.]
- [69] 吴文祥, 周扬, 胡莹. 甘青地区全新世环境变迁与新石器文化兴衰[J]. 中原文物, 2009(4): 31-37. [WU Wenxiang, ZHOU Yang, HU Ying. Holocene climate change and the rise and fall of Neolithic cultures in the Ganqing areas[J]. Cultural Relics of Central China, 2009(4): 31-37.]
- [70] 陈发虎, 黄小忠, 杨美临, 等. 亚洲中部干旱区全新世气候变化的西风模式: 以新疆博斯腾湖记录为例[J]. 第四纪研究, 2006, 26(6): 881-887. [CHEN Fahu, HUANG Xiaozhong, YANG Meilin, et al. Westerly dominated Holocene climate model in arid central Asia: case study on Bosten Lake, Xinjiang, China[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(6): 881-887.]
- [71] 赵凯华. 艾比湖地区中全新世以来孢粉组合与古气候定量重建[D]. 石家庄经济学院硕士学位论文, 2013. [ZHAO Kaihua. Palynological assemblages and Paleoclimate quantitative reconstruction in the Ebinur Lake region since the Holocene[D]. Master Dissertation of Shijiazhuang University of Economics, 2013.]
- [72] 安成邦, 陈发虎, 冯兆东. 甘青地区中晚全新世植被变化与人类活动[J]. 干旱区地理, 2002, 25(2): 160-164. [AN Chengbang, CHEN Fahu, FENG Zhaodong. Study on the relationship between the vegetation change and the human activities in the Gansu-Qinghai region during the period from mid-to late-Holocene[J]. Arid Land Geography, 2002, 25(2): 160-164.]
- [73] 马琴玉. 北宋对黄河流域植被的破坏及影响[D]. 西北师范大学硕士学位论文, 2019. [MA Qinyu. Destruction and influence of Northern Song dynasty on vegetation in Yellow River Basin[D]. Master Dissertation of Northwest Normal University, 2019.]
- [74] 尚雪, 张鹏程, 周新邵, 等. 陕西下河遗址新石器时代早期农业活动初探[J]. 考古与文物, 2012(4): 55-59, 103. [SHANG Xue, ZHANG Pengcheng, ZHOU Xinying, et al. A preliminary study on early agricultural activities at the Neolithic site of Xiahe in Shaanxi Province[J]. Archaeology and Cultural Relics, 2012(4): 55-59, 103.]
- [75] 樊志民, 冯凤. 关于历史上的旱灾与农业问题研究[J]. 中国农史, 1988(1): 33-39, 49. [FAN Zhimin, FENG Feng. Study on drought and agricultural problems in history[J]. Agricultural Archaeology, 1988(1): 33-39, 49.]
- [76] 方修琦, 刘翠华, 侯光良. 中国全新世暖期降水格局的集成重建[J]. 地理科学, 2011, 31(11): 1287-1292. [FANG Xiuqi, LIU Cuihua, HOU Guangliang. Reconstruction of precipitation pattern of China in the Holocene Megathermal[J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(11): 1287-1292.]
- [77] 王菊婵. 关中东部全新世黄土序列记录的气候变化[D]. 长安大学硕士学位论文, 2011. [WANG Juchan. A record on the climate change during Holocene in the eastern of Guanzhong[D]. Master Dissertation of Chang'an University, 2011.]
- [78] 唐领余, 李春海, 安成邦, 等. 黄土高原西部 4 万多年以来植被与环境变化的孢粉记录[J]. 古生物学报, 2007, 46(1): 45-61. [TANG Lingyu, LI Chunhai, AN Chengbang, et al. Vegetation history of the western loess plateau of China during the last 40ka based on pollen record[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2007, 46(1): 45-61.]
- [79] 黄春长. 黄土高原南部晚更新世黄土古土壤与气候变迁[J]. 地理学报, 1989, 44(1): 1-10. [HUANG Chunchang. Loss-palaeosol and climatic changes on southern loess plateau in late Pleistocene[J]. Acta Geographica Sinica, 1989, 44(1): 1-10.]
- [80] 黄春长. 渭河流域 3100 年前资源退化与人类关系演变[J]. 地理科学, 2001, 21(1): 30-35. [HUANG Chunchang. The deterioration of land resources and the change in Human-Earth relationships in the Weihe River Basin at 3100 a B. P. [J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(1): 30-35.]
- [81] 莫多闻, 李非, 李水城, 等. 甘肃葫芦河流域中全新世环境演化及其对人类活动的影响[J]. 地理学报, 1996, 51(1): 59-69. [MO Duowen, LI Fei, LI Shuicheng, et al. A preliminary study on the paleoenvironment of the middle Holocene in the Hulu river area in Gansu province and its effects on human activity[J]. Acta Geographica Sinica, 1996, 51(1): 59-69.]
- [82] 方修琦, 章文波, 张兰生. 全新世暖期我国土地利用的格局及其意义[J]. 自然资源学报, 1998, 13(1): 16-22. [FANG Xiuqi, ZHANG Wenbo, ZHANG Lansheng. The land use arrangement of china in the Holocene Megathermal period and its significance[J]. Journal of Natural Resources, 1998, 13(1): 16-22.]
- [83] 赵景波, 侯雨坚, 杜娟, 等. 关中平原全新世环境演变[J]. 干旱区地理, 2003, 26(1): 17-22. [ZHAO Jingbo, HOU Yongjian, DU Juan, et al. Holocene environmental changes in the Guanzhong Plain[J]. Arid Land Geography, 2003, 26(1): 17-22.]
- [84] 金勇强. 宋夏战争与黄土高原地区生态环境关系研究[D]. 陕西师范大学硕士学位论文, 2007. [JIN Yongqiang. Song and the tangut war and the loess plateau area ecological environment relations studies[D]. Master Dissertation of Shaanxi Normal University, 2007.]
- [85] 尹君, 罗玉洪, 方修琦, 等. 西汉至五代中国盛世及朝代更替的气候变化和农业丰歉背景[J]. 地球环境学报, 2014, 5(6): 400-409. [YIN Jun, LUO Yuhong, FANG Xiuqi, et al. The climatic and harvest backgrounds of dynastic flourishing ages and transitions in China during 210 BC to 960 AD[J]. Journal of Earth Environment, 2014, 5(6): 400-409.]
- [86] 刘璐, 苏筠, 方修琦. 中国西汉至清代北方农牧民族战争及其与温度变化的关联[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2016, 52(4): 450-457. [LIU Lu, SU Yun, FANG Xiuqi. Wars between farming and nomadic groups from Western Han Dynasty to Qing Dynasty in north China and relationship with temperature change[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2016, 52(4): 450-457.]
- [87] Tan L C, Cai Y J, An Z S, et al. Centennial-to decadal-scale monsoon precipitation variability in the semi-humid region, northern China during the last 1860 years: records from stalagmites in Huangye Cave[J]. The Holocene, 2011, 21(2): 287-296.
- [88] 刘俊霞. 秦汉时期西北农业开发与生态环境问题研究[D]. 西北农林科技大学硕士学位论文, 2008. [LIU Junxia. A study on north-

- est agricultural development and ecological environment problems in Qin and Han dynasties[D]. Master Dissertation of Northwest A&F University, 2008.]
- [89] 杜娟. 秦汉时期关中农业土地利用区域特征及影响因素[J]. 西北大学学报:自然科学版, 2014, 44(1): 150-155. [DU Juan. The regional characteristics and influence factors of agricultural land use in Guanzhong area during Qin and Han Dynasties[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2014, 44(1): 150-155.]
- [90] 杨保, 施雅风, 李恒鹏. 过去 2 ka 气候变化研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1): 110-117. [YANG Bao, SHI Yafeng, LI Heng-peng. Some advances in climatic change over the past two millennia[J]. *Advances in Earth Science*, 2002, 17(1): 110-117.]
- [91] 任国玉, 姜大膀, 燕青. 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[J]. 第四纪研究, 2021, 41(3): 824-841. [REN Guoyu, JIANG Dabang, YAN Qing. Characteristics, drivers and feedbacks of paleo-climatic variations and the implications for modern climate change research[J]. *Quaternary Sciences*, 2021, 41(3): 824-841.]
- [92] 王岳, 李育, 张成琦. 河西走廊东西段全新世古湖泊演化对比研究[J]. 第四纪研究, 2017, 37(3): 581-596. [WANG Yue, LI Yu, ZHANG Chengqi. The comparative study of paleolakes evolution between the eastern and western parts of the Hexi Corridor in Holocene[J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(3): 581-596.]
- [93] 陶士臣. 新疆东部湖泊沉积花粉记录的全新世植被与环境[D]. 兰州大学博士学位论文, 2011. [TAO Shichen. Pollen record of vegetation and environmental changes from lakes' sediment in eastern Xinjiang China, during the Holocene[D]. Doctor Dissertation of Lanzhou University, 2011.]
- [94] 宋姝瑶. 新疆艾比湖湿地全新世以来环境演变研究[D]. 河北地质大学硕士学位论文, 2016. [SONG Shuyao. Holocene climate change in the Ebinur Lake wetland, Xinjiang, China[D]. Master Dissertation of Hebei Geo University, 2016.]
- [95] 韩淑妮, 袁玉江. 新疆巴里坤湖 35000 年来古气候变化序列[J]. 地理学报, 1990, 45(3): 350-362. [HAN Shutu, YUAN Yujiang. The sequence of paleoclimatic variation of Balikun lake of Xinjiang in the part 35000 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1990, 45(3): 350-362.]
- [96] 薛积彬, 钟巍. 新疆巴里坤湖全新世环境记录及区域对比研究[J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 610-620. [XUE Jibin, ZHONG Wei. Holocene climate change recorded by lacustrine sediments in Barkol Lake and its regional comparison[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 610-620.]
- [97] 徐和阳. 历史气候变迁对中国古代社会影响的研究综述[J]. 哈尔滨学院学报, 2013, 34(9): 99-101. [XU Heyang. Research summary on historical climate change impact on ancient Chinese society[J]. Journal of Harbin University, 2013, 34(9): 99-101.]
- [98] 刘家坤. 火攻在中国历代战争中的运用和发展[J]. 军事历史研究, 2001(4): 99-103. [LIU Jiakun. The application and development of fire attack in the feudal dynasties of past ages[J]. *Military Historical Research*, 2001(4): 99-103.]
- [99] 钟茂华. 中国火灾史(秦朝~1949年)简析[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(5): 67-71. [ZHONG Maohua. Brief analysis on history of fire in China (221 B. C. ~ 1949 A. D.)[J]. *China Safety Science Journal*, 2004, 14(5): 67-71.]
- [100] 杨铭, 柳春鸣. 西周时期的气候变化与民族迁徙[J]. 中原文物, 1997(2): 77-83. [YANG Ming, LIU Chunming. Climate change and ethnic migration in the Western Zhou Dynasty[J]. Cultural Relics of Central China, 1997(2): 77-83.]
- [101] Tan L C, Cai Y J, Cheng H, et al. Centennial-to decadal-scale monsoon precipitation variations in the upper Hanjiang River region, China over the past 6650 years[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 482: 580-590.