

# Research Advancement on the Paleofire Occurrences and Its Significance of Global Change since the Last Deglaciation

Hongye Liu<sup>1</sup>, Yansheng Gu<sup>2,3</sup>, Shenggao Cheng<sup>1\*</sup>, Ting Huang<sup>4</sup>, He Xiao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan Hubei

<sup>2</sup>The State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, Wuhan Hubei

<sup>3</sup>Hubei Key Laboratory of Wetland Evolution & Ecological Restoration, Wuhan Botanical Garden, CAS, Wuhan Hubei

<sup>4</sup>School of Resources of Environmental & Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang Jiangxi

Email: \*hoyeliu@cug.edu.cn

Received: Feb. 8<sup>th</sup>, 2018; accepted: Feb. 21<sup>st</sup>, 2018; published: Feb. 28<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Paleofire reconstruction has become a hot topic in global change research with the discovery and wide application of more and more paleofire indexes. The Holocene was a period that had a close relation with mankind, so the research was conducted to investigate how the paleofire evolution responded to the different climatic and environmental conditions, which provided enlightenment for prediction of fire activity. Paleofire research demonstrated that fire occurrences were driven by warm-dry condition on the global scale. In China, the paleofire occurrences responded to the monsoon evolution during the early and middle Holocene. During late Holecene, human activity has an important effect on fire frequency. This combination of current climate change and paleo-fire research achievement revealed that the global temperature increasing has shortened the fire cycle and enhanced the ignition possibility. The instability and non-uniformity of precipitation inter-annual variability and regional distribution increased the chance of fire in drying years and arid regions. In future work, we should focus on the reconstruction of high-resolution paleofire evolution and investigate the mechanisms of interactions between fire, climate and human activities, because of the increasing temperature and frequency of extreme climatic events in the coming decades. The research discusses the response and effect of fire on climate change and terrestrial ecosystems under the general background of global warming, which provided the natural background reference for human adaptation and prevention.

## Keywords

Paleofire, Last Deglaciation, Global Change

---

\*通讯作者。

# 末次冰消期以来火灾发生及全球变化意义研究进展

刘红叶<sup>1</sup>, 顾延生<sup>2,3</sup>, 程胜高<sup>1\*</sup>, 黄庭<sup>4</sup>, 肖河<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉

<sup>2</sup>生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北 武汉

<sup>3</sup>中科院武汉植物园湿地演化与生态恢复湖北省重点实验室, 湖北 武汉

<sup>4</sup>南昌大学, 资源环境与化工学院, 江西 南昌

Email: hoyeliu@cug.edu.cn

收稿日期: 2018年2月8日; 录用日期: 2018年2月21日; 发布日期: 2018年2月28日

## 摘要

随着越来越多的古火灾代用指标的发现与应用, 古火灾重建已经成为目前全球变化研究的热点问题。全新世是与人类关系最为密切的一个时期, 因此分析末次冰消期以来不同气候环境背景下火演化, 为预测未来火活动提供启示。古火灾研究结果表明, 在全球尺度上, 火灾发生的主要驱动机制是暖干气候。我国大部分地区早中全新世火灾的发生响应了亚洲季风变化而晚全新世主要受人类活动影响。结合当前气候变化及古火灾研究成果, 揭示了目前全球增温缩短了火周期, 增加了引燃的可能性, 年际降水变化的不稳定和区域分布的不均匀使干旱年份和干旱区域火灾发生的可能性增加。由于未来几十年温度将持续上升, 极端气候事件出现的频率也将增加, 高分辨率的古火灾历史重建, 火灾-气候相互作用机制的研究势在必行。探讨全球变暖的情形下火灾对全球变化的响应及对陆地生态系统的影响, 为人类适应及预防提供自然背景参照。

## 关键词

古火灾, 末次冰消期, 全球变化

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

末次冰消期以来的火灾与气候多以第四纪沉积物作为研究对象, 利用第四纪地质学、年代学、沉积学、微体化石等手段探讨末次冰消期以来古火灾发生的年代、频率、强度及机制。到目前为止, 火干扰动力学的研究还不深入, 许多问题还未解决, 虽然人类活动加强、环境污染日益严重、新物种入侵、植被组合多样化、难以预测的气候变化等增加了天然火发生的随机性及局地性, 使过去火事件研究应用于将来火灾预测的目标更加难以实现[1] [2] [3]。然而, 近年来随着全球气候的变暖, 火灾与气候的关系问题日益突出, 火灾发生多是对极端气候(高温、干旱)的即时响应。因此, 长期以来气候-火灾之间的相

互作用有助于我们探寻火灾发生的气候背景及基本规律[4] [5] [6]。

全球气候变化已经对社会经济发展和自然生态系统造成了重大的影响,是人类面临的重大挑战之一。目前全球变化引起的全球变暖、持续干旱、夏季少雨等现象导致全球各地火灾频发,高频率、高强度的火灾导致森林退化及片段化,栖息地破坏,生物多样性下降[7]。近年来的厄尔尼诺现象也被认为是导致一些地区火灾发生的重要因素之一[8]。随着气候的周期性变化,火灾的多发年和少发年也有准周期的波动。极端高温或干旱是天然火发生及蔓延的主要气候背景,根据气候模拟,在 CO<sub>2</sub> 增加一倍的情况下,未来 100 年增温幅度能够达到 1.4°C~5.8°C [9],因此,天然火发生与全球气候变化的关系引起越来越多研究者的关注,目前却还没有具体的针对气候变化下的火灾预防措施和应对措施。末次冰消期以来的全新世是距离人类最近的一个时期,过去气候变化诱导下火灾发生的频率与强度的研究,对我们全面了解亚轨道千年尺度上火灾的时空序列演变与分布及过去火事件如何响应气候变化等科学问题提供了重要依据,为以后火灾发生的预测提供了基本信息,对于高温或干旱期间森林火灾的预防和扑救将有重要意义。本文主要回顾古火灾研究的发展史,介绍了目前古火灾研究的替代性指标,总结末次冰消期以来火灾 - 气候相关性研究的突破性进展,分析全球变化背景下火灾活动并对未来火灾研究的发展进行预测。

## 2. 古火灾研究简史

古火灾研究最早始于 20 世纪中期。1941 年,欧洲学者 Iversen 首次利用显微镜对陆地、湖泊沉积中的微观炭屑进行了观察分析。尽管该研究的主要目的是针对孢粉探讨人类活动对植被覆盖的影响,然而,炭屑的发现,仍然是一项开创性的工作,提出了一个新的研究领域,跨越时间空间尺度,为地质历史时期古火灾数据收集提供了可能,为古火灾研究提供了有力的证据[10]。20 世纪 60 年代后,光学显微镜的广泛应用,使炭屑的鉴定分类更加明确[11],为古火灾重建奠定基础。1973 年 Smith 等第一次在海洋沉积物中发现黑碳并对其进行了测量,为古火灾研究提供了又一新的指标,该成果引起科研工作者的极大兴趣并开始致力于扩展和完善黑碳对于火灾的指示作用,试着用黑碳重建古火灾历史并反演过去的气候环境变化,古火灾研究开始萌芽[12]。20 世纪 80 年代,首次“国际火历史”会议在美国召开[13],标志着古火灾研究进入了新时期。1996 年,“加拿大全国森林火灾研讨会”指出,保存在各个地质历史时期地层中的木炭是古火灾历史数据获取的主要途径,木炭作为古火灾代用指标得到认可。1997 年,在英国召开的“古火灾环境学研讨会”对于木炭的埋葬学、古火灾和现代火灾进行了深入交流和探讨,进一步明确了古火灾指标的价值和古火灾重建的重要意义。Pyne 等(1996)和 Scott (2000)根据宏观木炭所提供的地质历史时期火灾数据,发现最古老的炭化植物化石出现于晚志留世 - 早泥盆世[8] [14] [15],由此推断地球上最早的火灾发生于距今约 3.5~4.0 亿年。而二叠纪木炭已广泛分布于美洲、欧洲、非洲、亚洲及澳大利亚,由此推断,二叠纪火灾已经广布全球,成为陆地生态系统的普遍现象。我国古火灾研究起步晚,主要借鉴国外已有研究成果和经验发展起来,目前仍处于探索阶段。

## 3. 火灾的替代性指标

火灾发生后通常会在周围环境中留下燃烧痕迹及产物,因此,可以通过岩石圈(磁学参数、地球化学)、生物圈(孢粉学、古生态学、炭屑及树木年代学)甚至人类圈(考古学、历史图鉴)的历史档案中获取信息重建古火灾事件[14]。从天然档案的古火灾替代指标中获取的信息通常会出现不连续、难以解释的情况,并且会受到沉积环境等多种因素的影响,导致古火灾历史重建与现实或多或少会有一些差异。因此,获取非常准确的古火灾序列对古火灾研究者来说是一个挑战[16]。目前对于末次冰消期火灾事件重建的研究多是以泥炭、黄土、湖泊、海洋沉积物为研究对象,以燃烧产物(炭屑、黑碳)为古火灾代用指标,结合沉积环境的氧化还原特征及微体植物化石,探讨火灾 - 气候 - 植被之间的耦合性。当然,不同指标所反

映的沉积环境信息、时间跨度、火灾的时空分布及分辨率等也存在差异。

### 3.1. 树木年轮火灾学

树木年轮火灾学重建古火灾事件主要采用树木年轮火疤记录和历史档案资料进行分析。不同方向和高度的火疤,记录了不同时期的林火。树木年轮火疤记录可以追溯近代森林火灾历史,因而被广泛应用[17]。利用树轮开展林火研究不但可以记录火灾发生的不同年代,如果获取样本量的区域尺度足够大,还可以分析火灾的空间分布特征。虽然树轮年代学准确描述了过去的火灾历史,但因为其记录年代有限,对较长时间尺度上的深入分析有局限性[18]。

### 3.2. 沉积中的炭屑分析

炭屑是植物不完全燃烧产生的无机碳化合物,能在湖泊、泥炭、海洋等沉积物中长期保存下来,是反映古火灾事件的直接证据。炭屑的产量与分布取决于地质历史时期火灾发生的频率、强度、范围和变化。通过炭屑的定量统计和形态分析,可以重建连续几千甚至几万年天然火事件的历史记录,因此,炭屑作为古火灾替代指标在沉积物中被广泛应用。相对于树木火疤,炭屑不仅应用时间尺度长,能反映火灾事件的时间跨度[19],且不同粒径炭屑的分布可以反映火灾源的距离,粒径较大(>100~200  $\mu\text{m}$ )的炭屑通常不会迁移很远,因此可以反映区域火灾事件[20] [21] [22]。

### 3.3. 燃烧后的分子标志物

化学标志物是由不同分子组成的火灾事件的化学示踪剂,是新兴的古火灾代理指标[23],这些化合物在燃烧时产生、挥发,并快速凝结在炭屑、灰烬和其他较重的颗粒甚至类似于焦油等的半流体物质当中。分子标志物也可能来源于火灾产物的分解、成岩作用及其他理化性质转换等,这种情况下通常被认为是火灾的次生产物。近几年,利用分子标志物重建古火灾事件才广泛开展起来,但仍存在一定的局限性,例如一些化学标志物主要存在于工业革命之后的沉积物中,工业革命之前的沉积物中化学标志物含量很低,难以检测[24];对于不同沉积成岩环境中分子标志物的稳定性、持久性及降解机制的研究仍不成熟。因此,利用分子标志物重建古火灾事件多集中于表层沉积而很少应用于长时间尺度的研究。

### 3.4. 磁性矿物

火灾的发生会直接或者间接的影响周围环境的磁学参数。火烧过程中,土壤中的顺磁性铁矿物或者是燃料中的痕量铁被转化成二次强铁磁性氧化物,而这些强铁磁性氧化物是磁铁矿和磁赤铁矿的重要组成部分[25] [26]。火烧之后,集水区域磁性风化层的侵蚀可能导致亚铁磁性粒子的流入进而在湖底沉积物中形成磁层。当然,其他因素也可能导致局部区域土壤中磁性矿物含量增加,如黄土-古土壤中的磁学信号反映了富含铁矿物的土壤暴露于高温多雨条件下的成壤及风化过程,而火灾也可能引发相同的磁学信号[27] [28]。随处可见的趋磁细菌也可能引起土壤及沉积环境中磁学参数的改变[28] [29],空气中的磁污染以及除火灾之外其他因素引起侵蚀作用的增强(尤其是基岩中含有大量的磁性矿物)都可能导致沉积物中磁学信号的峰值[29]。沉积物中磁学参数是重建火灾历史和古生态的一个有前景的替代指标[30] [31]。此外,磁学参数的深入研究有可能反映过去火灾事件发生的强度、类型及频率,为区分天然火和人为火提供新的可能性。不足之处是磁学参数容易受到外界干扰因素的影响,因此在火灾历史重建研究中应用还不是很多。

### 3.5. 多指标结合重建长期古火灾序列

随着研究的不断深入,越来越多的学者试图通过多指标结合理解长时间尺度上气候-火灾-植被的

相互作用及火灾过后生态系统的响应模式。炭屑和孢粉结合定量分析是目前为止探讨气候、植被、火灾及人类活动之间的相互关系的重要手段之一[21]。然而,孢粉易受到风、水流等外力的搬运无法完全反映原地植被丰度。最近研究表明,火灾时期,沉积物中含有丰富的燃烧植硅体,燃烧植硅体峰值对应炭屑的峰值[7],而植硅体受外力影响较少,可以反映原地植被面貌,因此,植硅体在恢复古气候、古植被重建古火灾方面有一定优势。中国开展恢复古火灾-古气候的研究较晚,目前运用古气候记录(炭屑、孢粉等)对火与气候变化及植被类型之间关系的综合研究还相对较少。对火灾-气候耦合性进行长期、深入、全面和系统的研究是国内古环境研究的重要发展方向之一。

## 4. 古火灾的时空分布

### 4.1. 古火灾的空间分布

距今约 4.3 亿年前植物成功登陆后不久,火便成为出现在各个地质历史时期的自然现象,并影响着全球生态系统的模式和进程,包括植被分布、碳循环和气候变化。利用古火灾代用指标开展火灾历史研究目的是获得较长时间尺度上的火灾发生事件,从而可以计算出火灾发生的频率和周期,进而对未来火事件进行预测并及时防范。火灾发生的周期受植被组成、地形地势、气候变化、人类活动等多种条件影响。不同的植被组成其火灾周期不同,如针叶树种的火灾周期较短而阔叶树种的火灾周期较长。西、南坡向地形火灾频率比东、北向火灾频率高,坡越陡,火势蔓延越快[32]。在北美洲,欧洲人到北美定居后的生产、生活活动对火灾周期产生较大影响,20 世纪中后期各国的火灾抑制政策也加大了火灾间隔,但同时也使火灾强度和风险进一步加大[33]。火灾的强度、频率、周期等时间格局与空间尺度具有一定的对应关联特征[34],空间上局部尺度通常以小火为主,而区域尺度上是大火事件[35]。小火发生频率较高,强度低;大火发生的频率较低,但强度高[36],大火一般发生在大范围的干旱年代[37]。利用古火灾记录结合植物化石还可以分析火灾与物种演替之间的关系。火灾频率的降低会导致火敏感植被种类的增加,Wallenius 等(2007)重建芬兰南部森林火历史表明 17 和 18 世纪是以松科为主,20 世纪初云杉种群开始更新,这与火灾的历史演化有一定关系[38]。但火灾影响群落演替的机理还不清楚,有待进一步开展深入研究[39]。火灾不仅是对周围环境的及时响应,同时,火灾的发生对局部环境也产生重要影响,引起局部微气候的改变。

全球炭屑数据库(GPD)显示(图 1),目前古火灾研究在空间尺度上主要分布在美洲及欧洲西部,我国森林火灾的空间分布具有很强的地域性,主要集中发生在云南、四川、贵州、湖南、黑龙江等省份,人为因素导致的火灾占 90%以上,雷击火主要发生在黑龙江大兴安岭林区[40]。



Figure 1. Locations of paleofire records from the global charcoal database [41]

图 1. 全球古火灾研究分布图[41]

## 4.2. 古火灾时间分布

从时间尺度上看,我国古火灾重建主要集中在全新世以来的气候变化及人类活动。长时间尺度的研究集中在中国中部地区,多以黄土-古土壤沉积序列为主要载体,以炭屑为主要研究指标,展开了一系列古火灾研究。古火灾研究还可以分析不同地质历史时期火灾的变化情况,通过对比同一地质历史时期的环境气候变化及人类活动推断火灾发生及变化的驱动机制。温度与降雨是分析火灾变化最为普遍的气候驱动因素,这方面国内外也开展了较多的研究,末次冰消期以来的全新世是距离我们最近的一个地质历史时期,因此探讨全新世火灾发生气候原因更有利于预测未来全球变化对火灾的作用机制。

美国过去 50 年古火灾的研究多集中在西北内陆、落基山脉、加利福尼亚及美国西南部。全新世以来美国部分区域高分辨率的炭屑研究表明,美国中低纬度区域全新世的火灾活动主要受控于温度与降水的变化[42] [43]。长时间尺度上,火灾的发生主要是由于气候异常导致植被类型及组成的改变,易燃可燃物增多,进而引发火灾行为。短时间尺度上,植被组成和结构并未发生明显改变,气候异常仍旧导致火灾发生频率改变,在末次冰盛期,气候以冷干为主[44],几乎没有火灾活动;而在早中全新世,由于温度升高,夏季持续干旱,降水减少,火灾事件发生频率较高[45],6 ky 以来土地利用迅速增加可能是 6~4 ky 以来的火灾活动增加的主要原因,晚全新世气候转变为温凉湿润,低纬度区域火灾活动频率下降,现代森林开始发育 [46] [47]。北美火灾指数与温度异常值具有很好的一致性,自全新世以来,随着温度的升高,火灾指数也同步增加(图 2)。

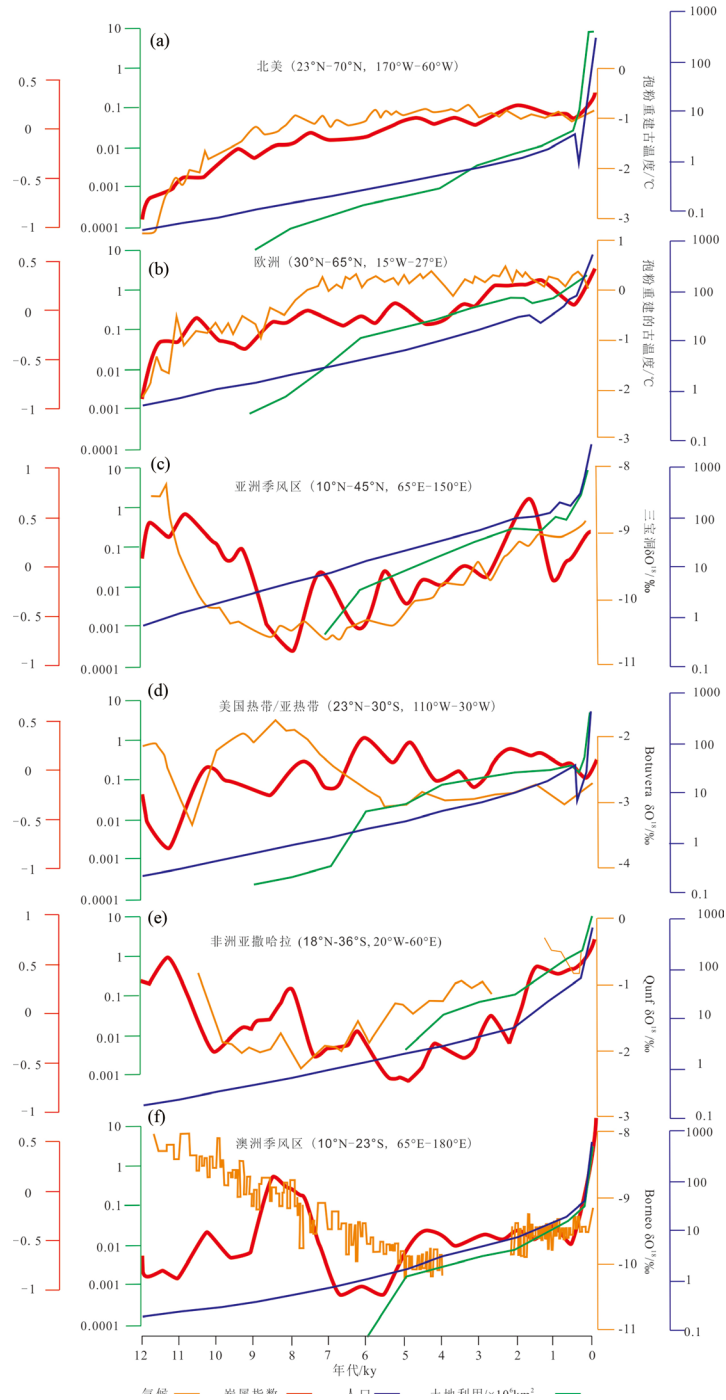
澳洲季风区过去 20 ky 年来火灾事件与气候变化具有很好的同步性,表明在这些时期火灾的发生主要受环境压力作用[48]。在晚更新世至全新世转换期由于受夏季风和西风带影响,引起温度和降水变化,火灾事件也随之波动。中全新世大暖期(10~7 ky)持续的温暖导致火灾事件频发,火灾多发时期也包括 ENSO 强盛期(5~4 ky、1.2~0.8 ky)而在南半球,ENSO 最大的特点之一就是干旱[49]。全新世期间火灾发生的主要控制因素是气候,气候突变时期通常伴随高频率火灾事件[31]。

Clark 首次研究了整个全新世欧洲中部的火灾记录。而近期的研究主要集中在欧洲南部的阿尔比斯山脉[19]。欧洲部分地区的炭屑记录发现,早全新世的暖-干气候造成了火灾的频发,中全新世,人口扩张,刀耕火种文明的到来导致森林被砍伐,生态系统改变,地中海盆地常绿硬叶林扩张,而寒冷的温带森林中裸子植物成为优势种。火灾事件的发生在早全新世主要受气候控制,在中晚全新世主要受人类活动影响(图 2)。因此推测在未来全球变暖的气候背景下,天火的发生频率将增加[50] [51]。

非洲地区的古火灾研究相对较少,主要集中在中南部地区,非洲中部亚撒哈拉地区的炭屑指数与降水具有明显相关性,在新仙女木时期,由于强冷湿气候,火灾频率达到最低值,此后,降水量迅速下降,而在早中全新世,随着降水量的下降,火灾频率同步上升,自 6.5 ky 前降水下降,火灾频率随之上升,自 2.5 ky 前人类活动迅速增加火灾事件出现大幅度增长(图 2),非洲北部古火灾研究也表明,在长时间尺度上,火灾活动主要受气候驱动[52]。

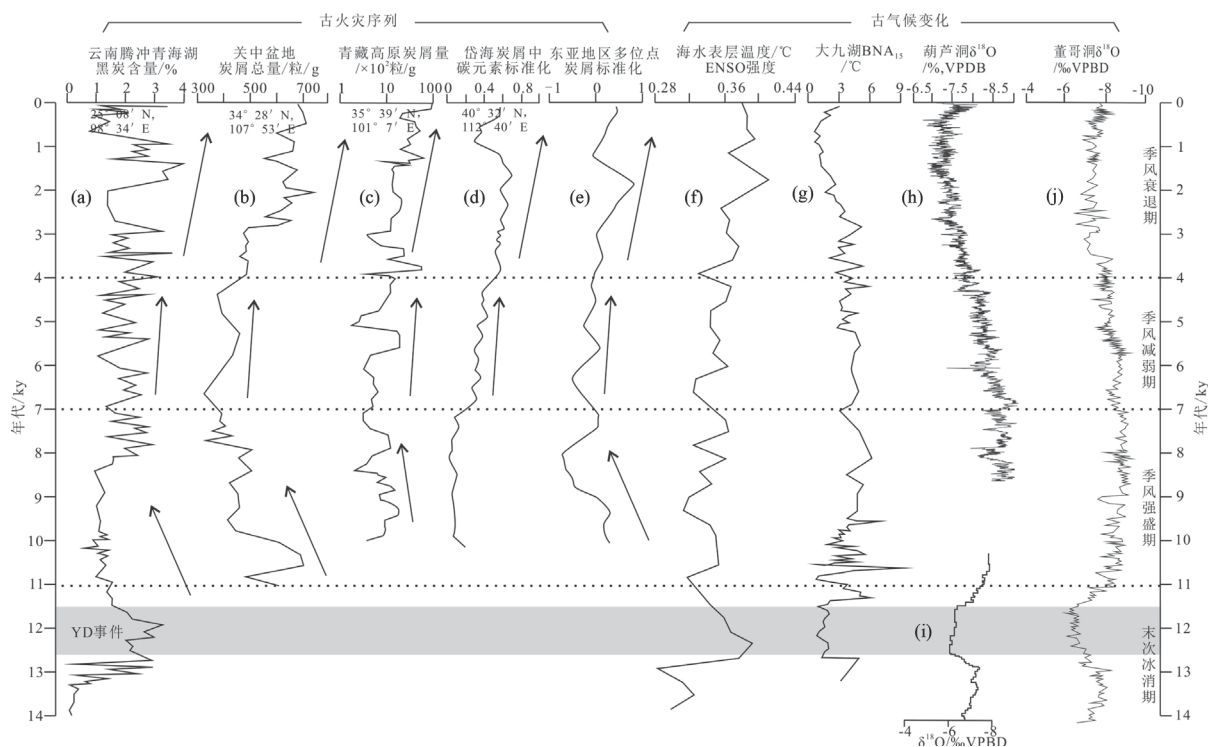
亚洲季风区全新世炭屑指数与季风强度呈现明显的负相关,早全新世季风活动弱,夏季降水减少,火灾事件频发,早中全新世季风持续增强,伴随着降水的增加,火灾发生频率大幅度下降,中全新世大暖期炭屑指数下降至最低值,由中全新世至晚全新世,季风强度缓慢下降,火灾事件发生频率同步缓慢上升(图 2)。

虽然人类活动等因素干扰了火灾对气候的及时响应,使火灾发生具有局地性,但我国部分地区古火灾仍然显示出火灾与气候的强相关(图 3),中东部地区强烈的火灾活动多在 10 ky 前结束,随着增强的夏季风带来暖湿的气候,导致早中全新世较低的火事件。自 7 ky 以来,季风衰退,火灾频率同步缓慢增加,而晚全新世全国各地火灾频发主要受季风衰退和人为活动影响。中国东北泥炭地火灾-气候-人类活动



**Figure 2.** The correlation of continental biomass burning trends (smoothed with a 500-years line and shown with 95% bootstrap confidence intervals) with paleoclimate (orange lines), population estimates (blue lines) and area-weighted cultivated area (green lines) [58]. (a) North America; (b) Europe; (c) the Asian monsoon area; (d) the America topics; (e) sub-Saharan Africa and the Australian monsoon area. Paleoclimate data include pollen-inferred temperatures for North America [59] and mean annual temperature for Europe [60];  $\delta^{18}O$  values in speleothem records (smoothed with a 500-years line) from sanbao cave, China [61] [62]; Btuvera cave, Brazil [63]; Qunf cave, Oman [64]; and north Boreno caves, Borneo [65]

**图 2.** 全球陆地生物量燃烧(500年平滑曲线, 95%的置信区间)与古气候(橘色实线)、人口(蓝色实线)、土地利用(绿色实线)的相关性[58]。(a) 北美; (b) 欧洲; (c) 亚洲季风区; (d) 美国热带/亚热带地区; (e) 非洲亚撒哈拉地区; (f) 澳洲季风区。孢粉重建的北美温度[59]和欧洲年平均温度[60]; 中国三宝洞[61] [62], 巴西 Btuvera 洞[63], 阿曼 Qunf 洞[64]和石笋  $\delta^{18}O$  值(500年平滑曲线) [65]



**Figure 3.** The correlation between paleofire and paleoclimate in China. (a) Paleofire sequence of Tengchongqinghai Lake from Yunnan [66]; (b) Paleofire sequences from Guanzhong Basin [67]; (c) Paleofire sequence of Xiqin Mountain from Tibet Plateau [68]; (d) Paleofire sequence from Daihai Lake [69]; (e) the composite standardized and smoothed (250- and 500-yr windows) biomass burning record from 36 sites in eastern Asia [69]; (f) ENSO amplitude (Standard deviation of Niño3.4 interannual (1.5~7 years) sea surface temperature variability) based on a transient Coupled General Circulation Model simulation in 300-year windows [70]; (g) Paleotemperature sequence from Dajiuhu peatland [71]; (h)~(i): East Asian Summer Monsoon from Hulu Cave [72] [73]; (j) Indian Summer Monsoon from Dongge Cave [74]

**图 3.** 中国部分古火灾序列及气候对比。(a) 云南腾冲青海湖古火灾序列[66]; (b) 关中盆地古火灾序列[67]; (c) 青藏高原西秦山古火灾序列[68]; (d) 内蒙古岱海湖古火灾序列[69]; (e) 东亚 36 个位点古火灾序列综合标准化[69]; (f) 海水表面温度变化[70]; (g) 大九湖 BNA<sub>15</sub>重建的古温度序列[71]; (h)~(i) 葫芦洞  $\delta^{18}\text{O}$ 记录的东亚季风[72] [73]; (j) 董哥洞  $\delta^{18}\text{O}$ 记录的印度季风[74]

之间的相关性研究共发现两次特大火灾事件分别在是  $5120 \pm 66$  cal. yr B.P.,  $1288 \pm 8$  cal. yr B.P., 第一次火灾发生的主要是由于中全新世持续干旱的气候引起; 第二次火灾事件主要受到汉农业文化影响[40]。东南部晚全新世植被与火灾事件重建研究表明, 4 ky 至今研究区至少发生了 6 次火灾事件, 桉木属和腐殖化记录了晚全新世东亚季风减弱导致降水减少, 因此森林火灾发生频率增加[53]。中部湖泊钻孔的孢粉及炭屑分析资料表明, 湖湖沉积物孢粉 - 炭屑组合记录的全新世以来植被与气候演变。认为研究区干湿状况变化显著, 炭屑面积浓度峰值出现在干旱期及人类活动增强期[54]。中国南部西双版纳热带雨林古火灾事件研究表明, 热带雨林气候模式为凉湿 - 暖干交替出现, 火灾事件多发生在干旱时期, 火灾与干旱事件相互作用影响热带雨林的生态系统[7]。

美国、澳大利亚和非洲对于古火灾的研究主要集中于长时间尺度上火灾 - 气候之间的耦合性, 一般情况下, 暖干气候使火灾发生的频率增加, 而欧洲对于古火灾的研究多集中于中全新世以来人类活动导致火灾发生, 对于长时间尺度上火灾事件的研究有待加强[55] [56] [57]。

## 5. 火灾及全球变化意义

全球正在经历以变暖为特征的气候变化过程。火作为全球生态系统重要的干扰因子, 气候变化直接



或间接影响到燃烧环境, 一般情况下, 气温高、降水少易引发火灾。气候变暖使很多区域呈现暖干化趋势, 导致火灾频率、火灾强度和过火面积增加, 还延长整个火险期; 可燃物达到着火点需要一定的热量, 这种热量主要来源于周围环境的温度, 因此, 高温还导致可燃物更加易燃[75]。气候变暖引发的极端气候事件(强降水、飓风、干旱和冰冻灾害等)会导致大量植被受损和死亡, 地表易燃可燃物猛增, 火灾发生的危险性增大。如 2008 年初发生在我国长江流域至江南地区百年一遇的低温雨雪冰冻灾害, 导致林木大批折断, 地表可燃物猛增 2~10 倍, 平均地表可燃物载量超过 50 t/hm<sup>2</sup>, 部分严重地段达到 100 t/hm<sup>2</sup> 以上, 已超过可发生高强度林火和大火的标准(30 t/hm<sup>2</sup>) [76]。预期气候变暖情景下, 未来全球大部分区域的林火天气状况会更加严峻, 林火数量将比当前状况更多, 林火强度更大。林火的发生亦与干旱严重程度和持续时间有关。海洋沉积物黑碳记录显示, 冰期黑碳浓度远远高于间冰期, 原因可能是冰期气候干冷, 火灾的发生频次比较高[77] [78] [79]。大兴安岭林区春季特大森林火灾与火灾发生前气象因子相互关系的研究中发现, 43.9% 的特大森林火是由前期湿或者特湿转为后期干或者特干导致发生的, 长期持续干旱容易导致特大火灾的发生[80]。

美国部分地区研究表明, 在十年尺度上, 火灾的发生受到 ENSO 的影响, 多数火灾年倾向于在 El Niño 事件向 La Niña 事件转换时发生, 火灾减少年与 ENSO 减弱年较同步[81] [82]。据统计, 世界历史上 78% 的森林大火发生在 El Niño 年[82]。我国气候条件相对复杂, 不同类型不同发展阶段的厄尔尼诺现象对不同区域的影响不同, 因此, ENSO 事件对我国气候的影响需要进一步研究。一般来说, 厄尔尼诺引起的高温和干旱天气会导致东北地区的森林火灾变得严重。由于华北地区没有大面积片林分布, 而且交通方便, 人口密度大, 虽然火灾天气条件严峻, 但不易发生火灾[83]。

火不仅即时响应气候的变化, 同时对气候变化具有反馈作用, 火灾的发生可能导致森林碳循环的改变, 使森林成为大气中 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的源, 造成大气中 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 浓度升高, 除此之外, 燃烧产生的固体颗粒物也会引起空气污染, 植被燃烧产生的卤代烷会破坏臭氧层, 从而进一步加强全球变暖趋势, 形成恶性循环, 干扰全球气候变化[84]。

## 6. 结论与研究展望

全球古火灾序列综合对比研究表明, 在全新世早期, 火灾发生的频率低, 周期长, 而在全新世中期, 火灾频率增加, 这与全新世早期至中期, 全球升温具有一致性。然而许多研究区域在早全新世火灾频率很高, 可能受局部环境及其他因素影响。晚全新世全球火灾频率普遍增加, 显然受人类活动影响。目前, 随着更多的火灾代用指标的发现与应用, 关于火灾历史重建已经取得了突破性进展, 并得到了一些有意义的结论, 预计未来可能的发展主要体现在以下几个方面:

1) 综合不同地区, 不同指标发现, 不同时间尺度及空间尺度的古火灾序列研究得到的结论也不大一致。为更好的理解火灾历史, 保证重建古火灾序列的可靠性和完整性, 在半球甚至全球尺度上不同地质记录进行对比, 多指标相结合弥补单一记录存在的缺陷, 高分辨率地恢复过去的火灾事件, 可能会成为火灾历史重建未来发展的一个重要方向。

2) 火灾代用指标分析方法、分类鉴定、埋藏学及现代过程研究可能是今后研究中一个挑战, 代用指标的沉积、迁移和保存是古火灾研究的基础和依据, 目前关于火灾机制的研究更多的是结合同一地质历史时期的环境状况和人类活动推断火灾发生的原因, 因此, 熟悉掌握代用指标的特征及属种鉴定, 对于区分天然火和人工火, 在火灾发生机制、强度等研究中发挥作用应该会是未来研究的趋势。

3) 近年来, 世界各地火灾频繁, 受人为活动干扰和气候变化的影响更加频繁。火灾的时空分布也变得更加难以预测。重建火灾历史, 特别是近几千年来火事件(火灾发生的频率、强度、大小、范围等), 有助于理解气候变化、人类活动和火事件之间的相互作用机制, 揭示火活动的变化特征。

4) 近期火灾的发生与全球变化及人类活动密不可分, 为最大化降低火灾引起的资源损失及环境破坏, 火灾预防工作变得尤为重要。比如定期清除枯枝落叶以减少易燃可燃物; 人为种植难燃树种以降低森林燃烧性; 建设防火林带、防火线及雷电检测以阻止火灾蔓延并预防雷击火等; 高温干旱气候时, 适当投入人力物力做好相应的防范工作。

## 基金项目

中央高校新青年教师科研启动基金项目(CUGW140908); 国家自然科学基金项目(41072023, 41402312)。

## 参考文献 (References)

- [1] Figueiral, I. and Mosbrugger, V. (2000) A Review of Charcoal Analysis as a Tool for Assessing Quaternary and Tertiary Environments: Achievements and Limits. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **164**, 397-407. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00195-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00195-4)
- [2] Pierce, J.L., Meyer, G.A. and Jull, A.J.T. (2004) Fire-Induced Erosion and Millennial-Scale Climate Change in Northern Ponderosa Pine Forests. *Nature*, **432**, 87-90. <https://doi.org/10.1038/nature03058>
- [3] Finsinger, W. and Tinner, W. (2005) Minimum Count Sums for Charcoal-Concentration Estimates in Pollen Slides: Accuracy and Potential Errors. *The Holocene*, **15**, 293-297. <https://doi.org/10.1191/0959683605h1808rr>
- [4] Levine, J.S., Cofer, W.R., Cahoon Jr., D.R., et al. (1995) Biomass Burning a Driver for Global Change. *Environmental Science and Technology*, **29**, 120-125.
- [5] Heyerdahl, E.K. and Card, V. (2000) Implication of Palaeorecords for Ecosystem Management. *Trees*, **15**, 49-50.
- [6] Fernando, R. and Hermann, B. (2012) Late Quaternary Vegetation, Climate and Fire Dynamics, and Evidence of Early to Mid-Holocene Polylepis Forests in the Jimbura Region of the Southernmost Ecuadorian Andes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **350-352**, 247-257. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.07.004>
- [7] Gu, Y.S., Pearsall, D.M., Xie, S.C., et al. (2008) Vegetation and Fire History of a Chinese Site in Southern Tropical Xishuangbanna Derived from Phytolith and Charcoal Records from Holocene Sediments. *Journal of Biogeography*, **35**, 325-341.
- [8] Scott, A.C. (2000) The Pre-Quaternary History of Fire. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **164**, 281-329. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(00\)00192-9](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(00)00192-9)
- [9] IPCC (2001) Climate change 2001. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY. USA, 881 p.
- [10] Iversen, J. (1941) Land Occupation in Danmark's Stone Age: A Pollen-Analytical Study of the Influence of Farmer Culture on the Vegetational Development. *Danmarks Geologiske Undersogelse II*, **66**, 1-68.
- [11] Thery, P.I., Chabal, L. and Chrzavzez, J. (2010) Anthracology and Taphonomy from Wood Gathering to Charcoal Analysis. A Review of the Taphonomic Processes Modifying Charcoal Assemblages, in Archaeological Contexts. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **291**, 142-153. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.09.016>
- [12] Smith, D.M., Griffin, J.J. and Goldberg, E.D. (1973) Elemental Carbon in Marine Sediments: A Baseline for Burning. *Science*, **241**, 268-270. <https://doi.org/10.1038/241268a0>
- [13] Swetnam, T.W. and Dieterich, J.H. (1983) Fire History of Ponderosa Pine Forests in the Gila Wilderness, New Mexico. *Proceedings, Symposium and Workshop on Wilderness Fire*, Missoula, 15-18 November 1983, 254-262.
- [14] Pyne, S.J., Andrews, D.L. and Richard, P.L. (1996) Introduction to Wildland Fire. John Wiley & Sons Inc., New York.
- [15] Bowman, D.M.J.S., Balch, J.K., Artaxo, P., et al. (2009) Fire in the Earth System. *Science*, **324**, 481-484. <https://doi.org/10.1126/science.1163886>
- [16] Gutsell, S.L. and Johnson, E.A. (1996) How Fire Scars Are Formed: Coupling a Disturbance Process to Its Ecological Effect. *Canadian Journal of Forest Research*, **26**, 166-174. <https://doi.org/10.1139/x26-020>
- [17] Baker, W.L. and Ehle, D.S. (2001) Uncertainty in Surface-Fire History: The Case of Ponderosa Pine Forests in the Western United States. *Canadian Journal of Forest Research*, **31**, 1205-1226. <https://doi.org/10.1139/x01-046>
- [18] 王晓春, 及莹. 树木年轮火历史研究进展[J]. 植物生态学, 2009, 33(3): 587-597.
- [19] Clark, J.S., Lynch, J.A., Stocks, B.J., et al. (1998) Relationships between Charcoal Particles in Air and Sediments in West-Central Siberia. *The Holocene*, **8**, 19-29. <https://doi.org/10.1191/095968398672501165>

- [20] Clark, J.S., Royall, P.D. and Chumbley, C. (1996) The Role of Fire during Climate Change in an Eastern Deciduous Forest at Devil's Bathtub, New York. *Ecology*, **77**, 2148-2166. <https://doi.org/10.2307/2265709>
- [21] Tinner, W., Conedera, M., Ammann, B., *et al.* (1998) Pollen and Charcoal in Lake Sediments Compared with Historically Documented Forest Fires in Southern Switzerland since AD 1920. *The Holocene*, **8**, 31-42. <https://doi.org/10.1191/095968398667205430>
- [22] Carcaillet, C., Bouvie, M., Fréchette, B., *et al.* (2001) Comparison of Pollen-Slide and Sieving Methods in Lacustrine Charcoal Analyses for Local and Regional Fire History. *The Holocene*, **11**, 467-476. <https://doi.org/10.1191/095968301678302904>
- [23] Simoneit, B.R.T. (2002) Biomass Burning—A Review of Organic Tracers for Smoke from Incomplete Combustion. *Applied Geochemistry*, **17**, 129-162. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00061-0](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00061-0)
- [24] Kawamura, K., Suzuki, I., Fuji, Y., *et al.* (1994) Ice Core Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons over the Past 400 Years. *Naturwissenschaften*, **81**, 502-505. <https://doi.org/10.1007/BF01132682>
- [25] Crockford, R.H. and Willett, I.R. (2001) Application of Mineral Magnetism to Describe Profile Development of Toposequences of a Sedimentary Soil in South-Eastern Australia. *Australian Journal of Soil Research*, **39**, 927-949. <https://doi.org/10.1071/SR00077>
- [26] Lu, G.N., Dang, Z., Tao, X.Q., *et al.* (2007) Modeling and Prediction of Photolysis Half-Lives of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Aerosols by Quantum Chemical Descriptors. *Science of the Total Environment*, **373**, 289-296. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.08.045>
- [27] Ortega-Guerrero, B., Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., *et al.* (2004) Magnetic Mineralogy in Barranca Tlalpan Exposure Paleosols, Tlaxcala, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, **21**, 120-132.
- [28] Simmons, S.L., Sievert, S.M., Frankel, R.B., *et al.* (2004) Spatiotemporal Distribution of Marine Magnetotactic Bacteria in a Seasonally Stratified Coastal Salt Pond. *Applied and Environmental Microbiology*, **70**, 6230-6239. <https://doi.org/10.1128/AEM.70.10.6230-6239.2004>
- [29] Oldfield, F. and Crowther, J. (2007) Establishing Fire Incidence in Temperate Soils using Magnetic Measurements. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **249**, 362-369. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.02.007>
- [30] Ketterings, Q.M., Bigham, J.M. and Laperche, V. (2000) Changes in Soil Mineralogy and Texture Caused by Slash-and-Burn Fires in Sumatra, Indonesia. *Soil Science Society of America Journal*, **64**, 1108-1117. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6431108x>
- [31] Blake, W.H., Wallbrink, P.J., Doerr, S.H., *et al.* (2006) Magnetic Enhancement in Wildfire-Affected Soil and Its Potential for Sediment-Source Attribution. *Earth Surface Processes and Landforms*, **31**, 249-264. <https://doi.org/10.1002/esp.1247>
- [32] Taylor, A.H., Trouet, V. and Skinner, C.N. (2008) Climatic Influences on Fire Regimes in Montane Forests of the Southern Cascades, California, USA. *International Journal of Wildland Fire*, **17**, 60-71. <https://doi.org/10.1071/WF07033>
- [33] Brown, P.M. and Sieg, C.H. (1999) Historical Variability in Fire at the Ponderosa Pine—Northern Great Plains Prairie Ecotone, Southeastern Black Hills, South Dakota. *Eco-Science*, **6**, 539-547. <https://doi.org/10.1080/11956860.1999.11682563>
- [34] Grissino-Mayer, H.D., Romme, W.H., Floyd, M.L., *et al.* (2004) Climatic and Human Influences on Fire Regimes of the Southern San Juan Mountains, Colorado, USA. *Ecology*, **85**, 1708-1724. <https://doi.org/10.1890/02-0425>
- [35] Swetnam, T.W. and Baisan, C.H. (2003) Tree-Ring Reconstructions of Fire and Climate History in the Sierra Nevada and Southwestern United States. In: Veblen, T.T., Baker, W.L., Montenegro, G. and Swetnam, T.W., Eds., *Fire and Climatic Change in Temperate Ecosystems of the Western Americas*, Springer-Verlag, New York, 158-195. [https://doi.org/10.1007/0-387-21710-X\\_6](https://doi.org/10.1007/0-387-21710-X_6)
- [36] Guyette, R.P. and Spetich, M.A. (2003) Fire History of Oak-Pine Forests in the Lower Boston Mountains, Arkansas, USA. *Forest Ecology and Management*, **180**, 463-474. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00613-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00613-8)
- [37] Sibold, J.S., Veblen, T.T. and Gonzalez, M.E. (2006) Spatial and Temporal Variation in Historic Fire Regimes in Subalpine Forests across the Colorado Front Range in Rocky Mountain National Park, Colorado, USA. *Journal of Biogeography*, **32**, 631-647. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01404.x>
- [38] Wallenius, T.H., Lilja, S. and Kuuluvainen, T. (2007) Fire History and Tree Species Composition in Managed Picea Abies Stands in Southern Finland: Implications for Restoration. *Forest Ecology and Management*, **250**, 89-95. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.03.016>
- [39] Niklasson, M. and Drakenberg, B. (2001) A 600-Year Tree-Ring Fire History from Norra Kvills National Park, Southern Sweden: Implications for Conservation Strategies in the Hemiboreal Zone. *Biological Conservation*, **101**, 63-71. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(01\)00050-7](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(01)00050-7)

- [40] Jiang, W.Y., Suzanne, A.G.L. and Neil, O. (2008) Natural and Anthropogenic Forest Fires Recorded in the Holocene Pollen Record from a Jinchuan Peat Bog, Northeastern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **261**, 47-57. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.01.007>
- [41] Power, M.J., Marlon, J., Ortiz, N., *et al.* (2008) Changes in Fire Regimes since the Last Glacial Maximum: An Assessment Based on a Global Synthesis and Analysis of Charcoal Data. *Climate Dynamics*, **30**, 887-907. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0334-x>
- [42] Whitlock, C., Marlon, J., Briles, C., *et al.* (2008) Long-Term Relations among Fire, Fuel, and Climate in the North-Western US Based on Lake-Sediment Studies. *International Journal of Wildland Fire*, **17**, 72-83. <https://doi.org/10.1071/WF07025>
- [43] Whitlock, C., Bianchi, M.M., Bartlein, P.J., *et al.* (2006) Postglacial Vegetation, Climate, and Fire History along the East Side of the Andes (lat 41-42.5 S), Argentina. *Quaternary Research*, **66**, 187-201. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2006.04.004>
- [44] Bartlein, P.J., Anderson, K.H., Anderson, P.M., *et al.* (1998) Paleoclimatic Simulations for North America over the Past 21,000 Years: Features of the Simulated Climate and Comparisons with Paleoenvironmental Data. *Quaternary Science Reviews*, **17**, 549-585. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(98\)00012-2](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(98)00012-2)
- [45] Thompson, R., Whitlock, C., Bartlein, P.J., *et al.* (1993) Climate Changes in the Western United States since 18,000 yr BP. In: Wright Jr., H.E., Kutzbach, J.E., Webb, T., Ruddiman, W.F., Street-Perrott, F.A. and Bartlein, P.J., Eds., *Global Climates since the Last Glacial Maximum*, University of Minnesota Press, Minneapolis, 468-513.
- [46] Megan, K.W., Cathy, W. and Patrick, J.B. (2008) A 14,300-Year-Long Record of Fire-Vegetation-Climate Linkages at Battle Ground Lake, Southwestern Washington. *Quaternary Research*, **70**, 251-264. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2008.05.002>
- [47] Power, M.J., Whitlock, C. and Bartlein, P.J. (2011) Postglacial Fire, Vegetation, and Climate History across an Elevational Gradient in the Northern Rocky Mountains, USA and Canada. *Quaternary Science Reviews*, **30**, 2520-2533. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.04.012>
- [48] Alan, N.W., Scott, D.M., Scott, A.S., *et al.* (2015) Exploring the Relationship between Aboriginal Population Indices and Fire in Australia over the Last 20,000 Years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **432**, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.04.030>
- [49] Ross, J. (2013) A Continent of Nations: The Emergence of New Regionally Distinct Rock Art Styles across Australia. *Quaternary International*, **285**, 161-171. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.01.007>
- [50] Olsson, F., Gaillard, M.J. and Lemdahl, G.A. (2010) Continuous Record of Fire Covering the Last 10,500 Calendar Years from Southern Sweden—The Role of Climate and Human Activities. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **291**, 128-141. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.07.013>
- [51] Rius, D., Vanni re, B., Galop, D., *et al.* (2011) Holocene Fire Regime Changes from Multiple-Site Sedimentary Charcoal Analyses in the Lourdes Basin (Pyrenees, France). *Quaternary Science Reviews*, **30**, 1696-1709. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.03.014>
- [52] Reddad, H., Etabaai, I., Rhoujjati, A., *et al.* (2013) Fire Activity in North West Africa during the Last 30,000 Cal Years BP Inferred from a Charcoal Record from Lake Ifrah (Middle Atlas-Morocco): Climatic Implications. *Journal of African Earth Sciences*, **84**, 47-53. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2013.03.007>
- [53] Huang, K.Y., Zheng, Z. and Liao, W.B. (2014) Reconstructing Late Holocene Vegetation and Fire Histories in Monsoonal Region of Southeastern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **393**, 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.11.005>
- [54] 吴立, 王心源, 张广胜, 等. 安徽巢湖湖泊沉积物孢粉-炭屑组合记录的全新世以来植被与气候演变[J]. 古地理学报, 2008, 10(2): 183-192.
- [55] Black, M.P., Mooney, S.D. and Haberle, S.G. (2007) The Fire, Human and Climate Nexus in the Sydney Basin, Eastern Australia. *The Holocene*, **17**, 469-480. <https://doi.org/10.1177/0959683607077024>
- [56] Sheridan, G., Lane, P., Sherwin, C. and Noske, P. (2011) Christopher B S. Post-Fire Changes in Sediment Rating Curves in a Wet Eucalyptus Forest in SE Australia. *Journal of Hydrology*, **409**, 183-195. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.016>
- [57] Colin, J.C.M. and Michael, F.J.P. (2014) Holocene Climate-Fire-Vegetation Interactions at a Subalpine Watershed in Southeastern British Columbia, Canada. *Quaternary Research*, **81**, 228-239. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2013.12.002>
- [58] Marlon, J.R., Bartlein, P.J., Danianu, A.L., *et al.* (2013) Global Biomass Burning: A Synthesis and Review of Holocene Paleofire Records and Their Controls. *Quaternary Science Reviews*, **65**, 5-25. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.11.029>

- [59] Viau, A.E., Gajewski, K., Sawada, M.C., *et al.* (2006) Millennial-Scale Temperature Variations in North America during the Holocene. *Journal of Geophysical Research*, **111**, D09102. <https://doi.org/10.1029/2005JD006031>
- [60] Davis, B.A.S., Brewer, S., Stevenson, A.C. and Guiot, J. (2003) The Temperature of Europe during the Holocene Reconstructed from Pollen Data. *Quaternary Science Reviews*, **22**, 1701-1716.
- [61] Dong, J., Wang, Y., Cheng, H., *et al.* (2010) A High-Resolution Stalagmite Record of the Holocene East Asian Monsoon from Mt Shennongjia, Central China. *The Holocene*, **20**, 257-264. <https://doi.org/10.1177/0959683609350393>
- [62] Wang, Y.J., Cheng, H., Edwards, R.L., *et al.* (2008) Millennial- and Orbital-Scale Changes in the East Asian Monsoon over the Past 224,000 Years. *Nature*, **451**, 1090-1093. <https://doi.org/10.1038/nature06692>
- [63] Cruz, F.J., Burns, B., Karmann, I., *et al.* (2005) Insolation-Driven Changes in Atmospheric Circulation over the Past 116,000 Years in Sub-Tropical Brazil. *Nature*, **434**, 63-66. <https://doi.org/10.1038/nature03365>
- [64] Fleitmann, D., Burns, S.J., Mangini, A., *et al.* (2007) Holocene ITCZ and Indian Monsoon Dynamics Recorded in Stalagmites from Oman and Yemen (Socotra). *Quaternary Science Reviews*, **26**, 170-188. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2006.04.012>
- [65] Partin, J.W., Cobb, K.M., Adkins, J.F., *et al.* (2007) Millennial-Scale Trends in West Pacific Warm Pool Hydrology since the Last Glacial Maximum. *Nature*, **449**, 452-455. <https://doi.org/10.1038/nature06164>
- [66] Zhang, E.L., Sun, W.W., Zhao, C., *et al.* (2015) Linkages between Climate, Fire and Vegetation in Southwest China during the Last 18.5 Ka Based on a Sedimentary Record of Black Carbon and Its Isotopic Composition. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **435**, 86-94. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.06.004>
- [67] Tan, Z.H., Han, Y.M., Cao, J.J., *et al.* (2015) Holocene Wildfire History and Human Activity from High-Resolution Charcoal and Elemental Black Carbon Records in the Guanzhong Basin of the Loess Plateau, China. *Quaternary Science Reviews*, **109**, 76-87. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.11.013>
- [68] Miao, Y.F., Zhang, D.J., Cai, X.M., *et al.* (2017) Holocene Fire on the Northeast Tibetan Plateau in Relation to Climate Change and Human Activity. *Quaternary International*, **443**, 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.05.029>
- [69] Han, Y.M., Marlon, J.R., Cao, J.J., *et al.* (2012) Holocene Linkages between Char, Soot, Biomass Burning and Climate from Lake Daihai, China. *Global Biogeochemical Cycles*, **26**, 1-9. <https://doi.org/10.1029/2011GB004197>
- [70] Liu, Z.Y., Lu, Z.Y., Wen, X.Y., *et al.* (2014) Evolution and Forcing Mechanisms of El Niño over the Past 21,000 Years. *Nature*, **515**, 550-553. <https://doi.org/10.1038/nature13963>
- [71] Huang, X.Y., Meyers, P.A., Jia, C., *et al.* (2017) Paleotemperature Variability in Central China during the Last 13 ka Recorded by a Novel Microbial Lipid Proxy in the Dajihu Peat Deposit. *The Holocene*, **23**, 1123-1129. <https://doi.org/10.1177/0959683613483617>
- [72] Wang, Y.J., Cheng, H., Edwards, R.L., *et al.* (2001) A High-Resolute Absolute-Dated Late Pleistocene Monsoon Record from Hulu Cave, China. *Science*, **294**, 2345-2348. <https://doi.org/10.1126/science.1064618>
- [73] Wang, Y.J., Cheng, H., Edwards, R.L., *et al.* (2005) The Holocene Asian Monsoon: Links to Solar Changes and North Atlantic Climate. *Science*, **308**, 854-857. <https://doi.org/10.1126/science.1106296>
- [74] Dykoski, C.A., Edwards, R.L., Cheng, H., *et al.* (2005) A High-Resolution Absolute-Dated Holocene and Deglacial Asian Monsoon Record from Dongge Cave, China. *Earth and Planetary Science Letters*, **233**, 71-86. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.01.036>
- [75] 袁建新. 气象条件与森林火灾[J]. 内蒙古林业, 1983(3): 13.
- [76] 田晓瑞, 舒立福, 阿力甫江. 林火研究综述(III)——ENSO 对森林火灾的影响[J]. 世界林业研究, 2003, 16(5): 22-25.
- [77] Verardo, D.J. and Ruddiman, W.F. (1996) Late Pleistocene Charcoal in Tropical Atlantic Deep-Sea Sediments: Climatic and Geochemical Significance. *Geology*, **24**, 855-857. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<0855:LPCITA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<0855:LPCITA>2.3.CO;2)
- [78] 贾国东, 彭平安, 盛国英, 等. 南沙海区末次冰期以来黑碳的沉积记录[J]. 科学通报, 2000, 45(6): 646-650.
- [79] Sander van der, K., Wang, X., Peter, K., *et al.* (2000) A Late Quaternary Palaeoecological Record from the Banda Sea, Indonesia: Patterns of Vegetation, Climate and Biomass Burning in Indonesia and Northern Australia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **155**, 135-153. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(99\)00098-X](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(99)00098-X)
- [80] 万里鹏, 梁继国. 大兴安岭森林火灾的气候背景[J]. 森林防火, 1996(2): 18-20.
- [81] 顾雷, 魏科, 黄荣辉. 2008 年 1 月我国严重低温雨雪冰冻灾害与东亚季风系统异常的关系[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 405-418.
- [82] Kitzberger, T., Swetnam, T.W. and Veblen, T.T. (2001) Inter-Hemispheric Synchrony of Forest Fires and the El Niño-Southern Oscillation. *Global Ecology and Biogeography*, **10**, 315-326.

---

<https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2001.00234.x>

- [83] Swetnam, T.W. and Betancourt, J.L. (1990) Fire-Southern Oscillation Relations in the Southwestern United States. *Science*, **249**, 1017-1020. <https://doi.org/10.1126/science.249.4972.1017>
- [84] 田晓瑞, 舒立福, 王明玉. 1991-2000 年中国森林火灾直接释放碳量估算[J]. 火灾科学, 2003, 12(1): 6-10.

---

**Hans** 汉斯

**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)