

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.02.019

火的历史重建及其与气候变化和人类活动关系研究进展

江鸿¹, 饶志国²

1. 兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000

2. 湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410081

摘要:火是影响生态演化和物质循环的突发性驱动因素之一,在人类文明的进步中也有重要的作用。综述了全球范围内生物质燃料不完全燃烧产物——碳屑、树轮火疤、碳黑、多环芳烃和左旋葡聚糖,应用于火的历史重建的原理、方法及成果。总体而言,在时间尺度上,碳屑、碳黑和左旋葡聚糖多用于重建千年及更长时间尺度的火的历史;树轮火疤一般用于重建近数百年来林火的历史;多环芳烃则主要用于重建近200年(工业革命)以来人类生产生活中火的使用,指示了世界人口的迅猛增长和社会经济的飞速发展。对各种代用指标进行了比较,并分析了火的历史重建的复杂性。火的强度和频率,可反映气候快速变化过程以及气候的干湿程度;全新世以来的火的强度和频率,与人类活动高度相关。今后的研究应注意降低火的历史重建的不确定性,并加深对人类活动与火的历史关系的理解。

关键词:火的历史;气候变化;人类活动;火成碳;碳黑,多环芳烃;左旋葡聚糖

中图分类号:P534.63 **文献标识码:**A

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

JIANG Hong¹, RAO Zhiguo²

1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2. College of Resource and Environmental Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

Abstract: Fire plays an paroxysmal-driving role in the earth ecosystem, and is of great significance in the evolution of human civilization. This review has roundly summarized the principles, methods and achievements of fire history reconstruction in a global scale, taking biofuel incomplete combustion remains as proxies, which include charcoal, black carbon, tree-ring fire scar, polycyclic aromatic hydrocarbons and levoglucosan. In general, on the time scale, charcoal, black carbon and levoglucosan are mostly used as proxies of millennial-scale fire history or longer, tree-ring fire scar is often used for reconstructing forest fire history, and polycyclic aromatic hydrocarbons are usually used for reconstructing the fire usage history in human production and living after the Industrial Revolution 200 years ago, which demonstrate the quick increasing in human population and rapid development of the social economy. These proxies are compared, and their complexity analyzed in this paper. Fire have close affinities with processes of rapid climate change and wet-dry level of climate, while in the Holocene, they are closely related to human activities of producing and living. In the future research, efforts should be made to reduce the uncertainty of fire history reconstruction. Meanwhile, the relationship between fire history and human activities needs further research.

Key words: fire history; climate change; human activities; charcoal; pyrogenous carbon; polycyclic aromatic hydrocarbons; levoglucosan

火在生态系统中有着至关重要的作用。火燃烧生物质,其排放物能影响大气化学成分^[1-3];火对地表植物残体的燃烧,能为新生的植物幼苗腾出生长空间,还可以加速其中有机质的碳循环,是生物地球化学循环中不可或缺的一部分^[4-6];火还能够影响生

态系统的演替,也能保护草原生态系统的生物多样性^[7-9]。

火的使用提高了人类在不利环境条件下的生存能力,如生火做饭、照明取暖、驱赶猛兽等,让人类从众多物种中脱颖而出^[10]。火在人类文明的产生和

资助项目:国家自然科学基金面上项目“全新世气候变化的新疆天山石笋和阿勒泰山泥炭高分辨率记录及其与盆地湖泊记录的对比”(41372181);湖南省重点学科建设项目

作者简介:江鸿(1990—),男,硕士生,主要从事地球化学与全球变化研究,E-mail:j1212521@126.com

收稿日期:2016-08-03;**改回日期:**2016-12-15. 文凤英编辑

发展中,扮演着举足轻重的角色。进入全新世以来,人类文明经历了农耕文明、工业文明和信息文明3个发展阶段,这3个阶段的用火情况也各不相同:农耕文明用火主要是通过使用木柴、草料等生物质燃料;工业文明和信息文明多数依靠化石燃料,前者主要是燃煤,到后者的时代转型为石油和天然气。同时,用火不慎可能导致火灾,给生命财产造成严重损失。火灾也贯穿着人类文明发展的全程,加上人类活动对气候环境和生态系统的干扰日趋严重,使自然灾害异常频发,存在着巨大的生态危险。可见,火的合理使用和控制对维持一个和谐的人地关系是非常必要的。因此,关于火的研究得到科研工作者的广泛关注^[11-15]。

火可分为自然火与人为火两类。自然火的发生需要3个基本条件:充足的可燃物、适宜的气候背景和触发条件。在自然环境中,可燃物主要来自于生物质,生物质的充足与否主要取决于植被类型及其覆盖密度。在有充足生物质的基础上,还需要适当的气候条件,如降雨较少,空气干燥。火的触发条件有闪电、火山爆发、自燃等。人为火是指人类生产生活中所用到的火。用火多的地方,代表人类生产活动较为频繁,有较发达的文明或较高的生产力^[16-18]。可见,火与气候变化及人类活动都有密切的关联,对火的历史进行研究,有助于认识过去气候环境变化与人类文明变迁,也能为基于其他方法重建气候变

化或人类活动的结果提供有价值的参考。

目前,有关火的历史的研究已经在全球范围内广泛开展,主要研究地点的分布如图1所示。我国幅员辽阔,历史悠久,自然景观种类多样,具有开展火的历史研究的得天独厚的条件。本文主要基于不同代用指标,对火的历史重建的研究成果及其与气候变化和人类活动的关系做一个较为全面的综述,进而指出其中存在的一些问题及未来的研究方向,以期为进一步开展相关工作“抛砖引玉”。

1 研究进展

火的燃烧绝大多数都是消耗含碳元素的生物质或化石燃料。其不完全燃烧产物,主要有碳屑(charcoal)、树轮火疤(tree-ring fire scar)、碳黑(black carbon, BC)、多环芳烃(polycyclic aromatic carbons, PAHs)和左旋葡聚糖(levoglucosan, LG)。它们都对化学过程与生物代谢呈现惰性,能在环境中长期稳定地保存,是研究火历史的良好材料,我们将它们统称为火成碳。其中前两种的实验分析主要通过光学显微镜观察计数,是物理分析法;后三种通过元素分析或色谱分析,是化学分析法。

1.1 基于碳屑对火的历史重建

碳屑是有机质不完全燃烧所生成的小团块,广

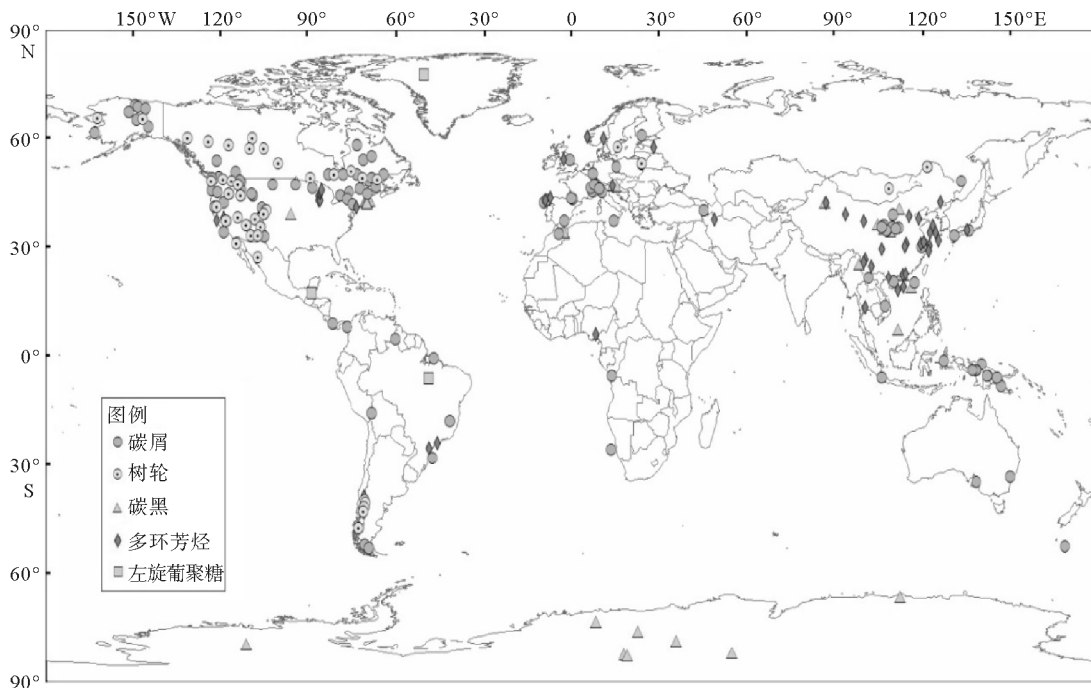


图1 现有的火的历史研究地点分布图(依据百余篇参考文献)

Fig.1 The spatial distribution of study sites related to the fire history(Based on more than 100 references)

泛存在于各种地质体中。它可直接指示火的存在,是最早用于重建火的代用指标。碳屑的分析方法有薄片法、筛选法、孢粉流程法、化学分析法等,根据碳屑粒径大小的不同,其提取的方法也不同^[23]。李小强利用筛选法提取粒径大于 $125\mu\text{m}$ 的碳屑,利用孢粉流程法获得粒径小于 $125\mu\text{m}$ 的碳屑^[24]。碳屑粒径的大小影响了它们在环境中的迁移和沉积的情况^[23]。其中较小的颗粒易被风力或流水运送而最终沉积,可指示上风向或流域内的火;较大的颗粒会沉积在离火源较近的地方,指示附近的火。一般通过光学显微镜或扫描电镜对碳屑进行观察和统计。

Maxwell 根据柬埔寨东北热带雨林湖泊碳屑沉积的分析结果,指出在人类定居以前,该地区火的规模频率与夏季风强度呈负相关;刚开始有人类活动时,雨林部分的碳屑沉积源自于人类的烧殖垦荒;近 2500 年沉积的碳屑则主要出自于人类活动^[19]。谭志海等人研究了陕西周原地区全新世黄土沉积中的碳屑沉积序列,指出全新世大暖期气候湿润,野火发生较少;到 3100aBP 先周人开始定居周原地区,人类活动加强,加上气候变得干旱,使当地碳屑沉积增多^[20]。

目前,已有的碳屑时空分布信息已被汇总在全球碳屑数据库(Global Charcoal Database, GCD, http://www.bridge.bris.ac.uk/projects/QUEST_IGBP_Global_Palaeofire_WG)^[25]。Marlon 等人利用 GCD 重建了美国西部近 1500 年火的历史,结果表明当地在中世纪气候异常时期火较多,在中世纪气候异常到小冰期的过渡期火发生更多,而在小冰期火相对较少。他们还发现,在 19 世纪,人类对当地的快速开发提高了火的发生频率,到 20 世纪政府加强了对自然火灾的管理,使火频率陡然下降^[14]。Blarquez 等人通过 GCD 对加拿大东部森林火的历史进行了研究,结果发现,当转向对火不利的湿冷气候时,植被却从不易起火的阔叶林演替为容易起火的针叶林,火并没有明显减少^[11]。

碳屑研究的实验方法与孢粉分析很类似。其实,在用显微镜进行孢粉分析的过程中,就常常会发现碳屑^[23]。进一步地,孢粉能指示气候背景,因此,将孢粉和碳屑联合分析,不但能重建火的历史,还能了解火发生的气候背景和植被条件^[13,26,27],甚至有助于认识人类用火的变迁^[28]。Tinner 等人对阿拉斯加两处湖泊沉积物的碳屑-孢粉进行联合分析,结果表明从末次冰消期到中全新世,孢粉种类变化与自然火强度的变化有很好的对应关系^[29]。Tan 等人利用陕西关中平原的碳屑记录来反映该地区的火

的历史,结合孢粉、古地磁数据进行分析,发现早、晚全新世当地以草原植被为主,火频率较高;中全新世暖期则森林植被发育,火发生较少^[30]。

1.2 基于树轮火疤对火的历史重建

林火过后,部分乔木仅被烧坏而没有被烧死,它们能继续生长,年轮形状会出现严重的变形,称为树轮火疤。树轮火疤是火的一种记录形式。同时分析火疤前后的树轮宽窄,也能获取火发生的气候背景^[31-34]。Trouet 等人研究了美国西部 4 个区域的森林火疤,指出公元 1400 年之后的夏季干旱年代,火的分布最广;到 16 世纪末,因小冰期的影响,异常的低温使火明显减少了^[33]。Kitzberger 等人利用北美洲西部的树轮火疤重建了公元 1550 年以后的林火,发现厄尔尼诺-南方涛动与太平洋年代际涛动是火的重要驱动因子,并推断在当今气候变暖的背景下,类似海气耦合模式的频繁变化令森林火灾的管理不容乐观^[31]。王晓春等综述了美国西部的树轮火疤的研究成果,提出森林火灾易发生在厄尔尼诺向拉尼娜转换的年份^[32]。Niklasson 等对波兰南部的阿尔卑斯山森林的树轮火疤进行统计分析,发现当地 18 世纪时火较多,原因主要是当时森林中养蜂产业盛行,人类活动频繁;进入 19 世纪,火发生的频率明显减少,是政府实行森林防火政策的结果^[34]。

1.3 基于碳黑的火的历史重建

有机质的不完全燃烧能生成更小的黑炭颗粒,这类颗粒粒径通常为 $0.1\sim 1.0\mu\text{m}$,进入空气可以气溶胶的形式存在,这种颗粒通常被称为碳黑(关于碳黑的定义目前并不明确,和碳屑也没有确定的界限,本文在分析方法上将两者作一区别)。BC 会在风力作用下,甚至大气循环的作用下传播,最后在重力的作用下沉积于多种地质体中。它也可能被地表径流搬运至湖泊或海洋而沉积。研究者对含 BC 的样品,通过光学方法^[37]、元素分析法^[38]和苯多羧酸法^[39]等方法进行分析,从而确认火的存在与否和规模大小,再根据样品所在地层的定年结果来获得火的发生年代。

Lehndorff 等利用苯多羧酸法对德国西部一处玛珥湖的 BC 沉积进行分析,结果表明在晚更新世 BC 沉积速率较高,最高到 $7.7\text{gBC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;到 13.7kaBP 的末次冰消期时段,BC 沉积速率较低,稳定在 $2.5\text{gBC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;到新石器时代,又回升到 $7\sim 9\text{gBC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,可能是人类烧殖垦荒的缘故^[39]。Wang 等人在分析内蒙古岱海的全新世 BC 沉积时,

援引他人的孢粉序列,通过对比,发现在中晚全新世,火的频率和人类活动强度有正相关关系^[36]。

目前有关 BC 重建古火的研究报道中,通常会将样品中的碳元素进行 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素分析,以了解火发生的植被和气候背景^[40-42]。Zhang 等人将 BC 与 $\delta^{13}\text{C}$ 的联合分析运用于云南省 5 处湖泊沉积的研究,结果表明,近 18.5ka 来,中国西南地区火的强度与印度夏季风强度呈显著的负相关^[42]。贾国东等研究了南沙海区末次冰期以来的 BC 沉积记录,指出 10kaBP 前,末次冰期 BC 沉积速率较高,且波动频繁,特别是在 18kaBP 的盛冰期阶段, $\delta^{13}\text{C}$ 分析表明,其中有部分 BC 来自于南海周围的高山灌丛的火;进入全新世后,BC 输入减弱,可能是因为气候变暖使降雨量增大进而使火减少^[43]。 $\delta^{13}\text{C}$ 与 BC 的联用也可用于揭示近代工业文明用火的演变历程。Sun 等人对珠江口的近海沉积物的研究采用了类似的方法,研究结果表明珠江三角洲从 1950 年到 1980 年主要燃料从薪柴变成了煤炭;1990 年以后 BC 含量显著降低,这是政府对环境污染治理和石油天然气普及使用的结果^[44]。

1.4 基于多环芳烃的火的历史重建

PAHs 是生物质燃料或化石燃料不完全燃烧后的产物,主要以气溶胶和固体的形式存在于环境之中,随着环数增多,分子量加大,其固相比例也就越高。PAHs 可通过风力、流水输送、生物富集等方式在自然界中迁移,几乎无处不在。PAHs 化学性质稳定,难以被生物利用,可在地层中积累。PAHs 作为代用指标研究火的历史可追溯至 20 世纪 80 年代,Venkatesan 和 Dahl 在新西兰、意大利和丹麦的白垩纪晚期地层中发现了 PAHs,这是该时期火频发的判据之一^[45]。从时间尺度来看,早至中生代^[46-48],再近一些到白垩纪晚期^[45,49]、新生代^[50],近到千年、百年和数十年尺度^[17,51,52],均有利用 PAHs 重建火的历史的报道。Denis 等人用高效液相色谱-荧光检测器分析了美国西南一高山湖泊的 PAHs 沉积序列。他们将分析结果与碳屑沉积记录和火的历史的文献记载分别作了对比,结果表明 PAHs 能够指示历史时期内火的多发期^[53]。因此,作为火成碳的一种,PAHs 也可用于火的历史重建。

现代的色谱技术可对 PAHs 快速、准确地定量分析(检出限 1~10ng/g)和定性分析(确定不同 PAHs 的分子结构)。美国环境保护署(United States Environmental Protection Agency, USEPA)公布了 16 种在环境中常见的 PAHs,在文献中

常被简称为 16 PAHs。其中分子量最小的萘(分子量 128)有 2 个芳香环;分子量最大(276)的为苯并(ghi)芘,含 6 个芳香环。分子量较轻的 8 种常称为低分子量(low molecular weight, LMW) PAHs,简称 LMW-PAHs,分子量较重的 8 种常称为高分子量(high molecular weight, HMW) PAHs,简称 HMW-PAHs。有研究表明^[54],LMW-PAHs 指示燃烧温度低、规模较小的火,如温带草原、热带稀树草原(Savanna 植被)上的自清型的野火,家庭生活用火也属于此范畴;HMW-PAHs 则反映规模大、温度高的火,如大规模的森林火灾^[53]、工业生产、交通工具消耗石油燃料^[51,54]等。因此,PAHs 的定性分析可用来指示火的规模和属性。此外,地层中不同 PAHs 含量的比率可指示其来源。Yunker 等人确立了判定 PAHs 来源的 4 个比例^[55],不同比例对应的 PAHs 来源如表 1 所示,这些判定标准被后续研究广泛引用^[50,56-59]。

表 1 指示 PAHs 生成来源的 4 个比例^[50,56-59]

Table 1 Four proportions which indicate the source of PAHs^[50, 56-59]

	石油源	燃烧源 (化石燃料)	燃烧源 (生物质燃料)
ANT/(ANT+PHE)	0~0.1	0.1~1	
FLA/(FLA+PYR)	0~0.4	0.4~0.5	0.5~1
BaA/(BaA+CHR)	0~0.2	0.35~1	
IP/(IP+BghiP)	0~0.2	0.2~0.5	0.5~1

注:表中 ANT、PHE、FLA、PYR、BaA、CHR、IP、BghiP 分别指蒽(Anthracene)、菲(Phenanthrene)、荧蒽(Fluoranthene)、芘(Pyrene)、苯并[a]蒽(Benz[a]anthracene)、蒾(Chrysene)、茚并(1,2,3-cd)芘(Indeno[1,2,3-cd]pyrene)、苯并(ghi)芘(Benzo[ghi]perylene),它们都属于多环芳烃分子。

PAHs 来源的 4 个比例表明 PAHs 并非都是生物质不完全燃烧的产物。古地层中有些种类 PAHs 并非不完全燃烧的产物,最常见的是芘(Perylene),它可能是地质成岩作用^[48,60]或植物和腐生生物^[18,50]新陈代谢所生成的。地质成岩作用还可以生成萜烯(Retene)、卡达烯(Cadalene)、西蒙内利烯(Simonellite)等^[47,61]。但这些物质并不会干扰 PAHs 对火的历史重建的准确度。这是因为色谱法可同时进行定性和定量的分析,其定性结果可将非火成的 PAHs 剔除,其定量结果能给出所有种类 PAHs 的浓度。然后根据不同地层 HMW-PAHs 与 LMW-PAHs 的比率确定火的规模,依照“4 个比例”判断 PAHs 的来源,即可得到火的历史重建结果。

自然火的规模或频率能够反映当时的气候背景

与环境状态。因此,PAHs 对火的历史重建可间接反映过去的气候和环境的变化。Jiang 等人研究了澳大利亚西北部的早三叠纪和中侏罗纪地层中的 PAHs,结果表明,湿润的季风性气候是火频发的主要原因^[47]。喜马拉雅山的隆起深刻地影响了南亚地区的气候环境,Hossain 等人发现孟加拉国东北的 Bengal 盆地的 PAHs 沉积很好地记录了这次气候环境变化过程。他们利用该盆地中的 PAHs 沉积序列阐述了喜马拉雅山隆起的 3 个阶段:第一阶段,也就是喜马拉雅山隆起的初期,对应的地层中的 PAHs 含量较少,且以 4—5 环的 PAHs 为主,这些是草地植被的小规模火的产物,其中草地植被指示相对干旱的气候;第二阶段,喜马拉雅山继续隆起,地层中仍有 LMW-PAHs 的存在,但 6 环的 HMW-PAHs 远比第一阶段的多,说明这段时期内多发规模很大的林火,可见第二阶段该地区植被更加茂密,气候明显比第一阶段更加湿润;第三阶段,喜马拉雅山的海拔进一步提高,丰沛的降水减少了火发生的几率,使得对应年代的地层中 PAHs 含量明显减少,同时高茎植物、真菌等的代谢产物 PER 含量显著增多,表明气候已变得相当湿润,这与现代南亚地区的气候状况是一致的^[50]。

在千年尺度上,PAHs 能够反映不同历史时期人类的生产方式、生产力水平以及社会文明的兴衰等。从整体上看,地层中 PAHs 的沉积速率和人类活动强度呈正相关,但已有的报道不多。Bandowe 等人研究了德国一玛珥湖 PAHs 的沉积序列,结果表明各地层中 PAHs 沉积速率有显著差异,从低到高的顺序为:早中世纪<前罗马铁器时代<罗马时代<晚中世纪与文艺复兴时期<早工业化时期<后工业时代。这个顺序表明 PAHs 的沉积速率与生产力水平呈显著的正相关^[18]。刘建华等人在湖北梁子湖的 PAHs 沉积序列中发现春秋战国时期的峰值,他们结合史料进行分析,认为原因可能是该时期当地有较发达的社会生产力,表现为大规模的围湖造田,以及金属冶炼和制陶业较为兴盛^[62]。Zou 等人分析湖北麻城金罗家遗址中的 PAHs,根据定年结果,发现该地区西周末年与明末清初属于干冷气候,并推断这个时期内人类活动加强,战争动乱较为频繁^[17]。

PAHs 作为重建火的历史的代用指标,更多地揭示了近 200 年工业革命后人类在生产和生活用火情况,且我国的研究点较为密集,如图 1 所示。家庭生活用火和工业生产用火消耗生物质燃料或石油燃料,这些燃料的不完全燃烧会释放出大量的

PAHs。PAHs 在环境中迁移最终沉积,沉积物由深部到表层按年代积累,不同年代的沉积层 PAHs 浓度不同,可反映对应年代的人口数量^[57,58]和经济水平^[56,63]等。Yuan 等人取黄河入海口处的沉积物,其 PAHs 浓度序列反映了近 50 年来中国华北的社会经济变迁:1961-1964 年 PAHs 的峰值指示该段时间内经济的快速发展和胜利油田的投入使用,1970 年左右的低谷则对应文革时期经济增长的停滞,1980 年后的地层中 PAHs 浓度显著提高则表明实行“改革开放”政策以后工业产值与社会经济有了飞速的发展^[56]。Guo 等对华北白洋淀湖底 PAHs 沉积序列的分析结果也表明“改革开放”政策实行之后,PAHs 沉积速率明显提高。值得一提的是,在他们的 PAHs 沉积序列中,1940 年左右也存在一个峰值,这对应了抗日战争和解放战争的时期^[59]。Liu 等分析重庆梁滩河沉积物近 90 年 PAHs 的记录,发现 PAHs 含量随时间而增多,和能源消耗量、人口数量、公路里程都有很好的正相关关系,相关系数分别高达 0.963、0.927、0.954。在该地层中有对应 20 世纪 40 年代的 PAHs 峰值,这指示了抗日战争和解放战争这两大历史事件^[57]。

1.5 基于左旋葡聚糖及其异构体的火的历史重建

左旋葡聚糖学名为 1,6-脱水-β-D-吡喃葡萄糖酐(1,6-anhydro-β-D-glucopyranose),是纤维素中快速热解的产物^[64]。左旋葡聚糖在生物质燃烧中排放量很大;其化学性质稳定,可在大气、水体、土壤中传播,并沉积于地质体长期保存。LG 一般通过色谱法进行分析。有研究结果显示 LG 记录了 7000 年前的林火^[65]。因此,LG 被科研工作者用作研究火的示踪物质^[66,67]。

Schüepbach 等人以中美洲的一处湖泊沉积物的钻心为研究对象,分析了其中碳屑和 LG 的全新世沉积记录,结果发现二者在沉积速率上有很好的相关性,这说明 LG 也能用来重建全新世轨道尺度的火历史。其中碳屑和 LG 的高峰均出现在 9.5~6.0、3.7、2.7kaBP。他们援引了前人的孢粉数据和古土壤序列,判定 9.5~6.0kaBP 火频发主要归因于有利于火发生的气候背景,3.7kaBP 左右的碳屑与 LG 的高通量源自于人类活动;2.7kaBP 的峰值则指示了玛雅文明^[67]。Zennaro 等人发现格陵兰冰心中 LG 的沉积速率从 15kaBP 开始升高,于 2.5kaBP 达到最大值。他们认为 LG 逐渐增多是因为气候变暖使火有所增多,2.5kaBP 的最大值则是人类焚烧式地开发森林所导致的^[68]。

2 不同代用指标的比较与火的历史重建的复杂性

2.1 不同火的重建方法的比较

综观已有的全新世尺度火的历史重建的研究成果,大多数还是以碳屑重建方法获取的。碳屑指标获取的范围广,但凡沉积物中几乎都有它的存在,其重建火的历史的时间尺度也最宽,从百万年的地质时期到近数百年都有报道。但它也有一些缺点。如碳屑的统计分析是靠肉眼通过显微镜观察和计数的,这样会引入视觉误差,降低重建结果的准确度。而且,在显微镜下观察和计数的工作量很大,枯燥乏味而且耗时,这为实验操作者带来了一定劳力上的负担。树轮火疤有定年精准的优点,树轮中早材和晚材的差异甚至可以用于判定火发生的季节。赵志奎对大兴安岭地区近 200 多年来的树轮火疤的分析结果表明,火最容易发生在春夏之交^[69]。但树轮火疤在应用上有很大的时空局限性。它所能重建的火历史通常在近千年以内,这是受树木生长寿命所限的。很显然,树轮火疤研究区域也是有限的,只能用来重建森林景观中的火。此外,与碳屑类似,树轮火疤定年在实验操作上也有耗时费力的问题。

BC、PAHs 和 LG 多数是采用化学方法进行分析的。化学分析方法相对快速便捷,省去了碳屑和树轮机械计数所耗费的大量时间和劳力。化学分析方法向定量分析更进一步,这使未来的火的历史研究有了减小分析误差、增强可靠度和提高分辨率的潜力。综观已有的 BC 或 PAHs 重建火的历史的研究成果,大多数有揭示火的历史与人类活动的关系。可见,利用 BC 或 PAHs 对火的历史进行重建,有助

于我们了解在历史上,人地关系是如何变迁和发展的。但它们也有各自的缺点:BC 的缺点是它的分类和定义不明确^[70],测量标准有不确定性^[71];PAHs 经过多年的沉积会有部分降解^[72],这可能会使长时间尺度的火的历史重建有一定的不准确。LG 在反映气候变化上和指示人类活动上均有报道,但相关研究成果不多。LG 来源较为专一,能特异性地指示纤维素的燃烧,但不适用于工业革命以来的、有大量化石燃料消耗的火的历史重建。

对各种代用指标的特性总结如表 2 所示。

2.2 火的历史重建的复杂性

基于各种代用指标的火的历史重建结果,都有一定的复杂性和不确定性。首先,从火成碳生成到保存的过程中,因大气或水文的作用影响到了火成碳保存的空间分布,使研究样点和原火发生地点有空间差^[23,73]。这增加了火的历史重建的复杂程度,从而增加了重建结果的不确定性^[18,21,36],甚至出现分歧^[30]。Daniau 等人对非洲西南海域中碳屑沉积的研究中,考虑了风向、河流以及洋流对碳屑沉积分布的影响^[21]。Bandowe 等分析了德国一处玛珥湖的 PAHs 沉积序列,认为这里近代沉积的 PAHs 主要是由盛行西风从西部一些城市带来,然后沉降的^[18]。Tan 等在对黄土高原火的历史重建中,发现利用碳屑与 BC 重建,得到的火的多发期并不一致,他们认为可能的原因是这两种代用指标的迁移机制不同^[30]。综上可见,在火历史的研究中,要充分考虑火成碳生成后空间迁移的问题,如研究样点的盛行风向和水文条件等。如果是在季风区,需要考虑火多发的季节和该季节内的风向和水文条件。此外,从火成碳的生成到最终沉积,也有一定的时间差,这可能会引入火的历史重建的年代误差。

表 2 各种代用指标的特性
Table 2 Characters of different proxies

	样品来源	检测方法	研究区域	年代跨度(数量级)	地域跨度
碳屑	湖泊沉积物、黄土、深海沉积物	显微镜观察计数,常与孢粉联合分析	森林景观、草原景观、人类活动区域	$10^6 \sim 10^2$ a	样点附近、湖泊或海洋集水区
树轮火疤	森林乔木	树轮火疤定年统计	森林景观	$10^2 \sim 10$ a	样点本地
BC	湖泊沉积物、黄土、深海沉积物、冰心	光学分析法、元素分析法、苯多羧酸法,常与 $\delta^{13}\text{C}$ 联合分析	森林景观、草原景观、人类活动区域	$10^6 \sim 10^2$ a	样点周围数百公里、湖泊或海洋集水区
PAHs	湖泊沉积物、黄土	色谱法	森林景观、草原景观、人类活动区域	$10^8 \sim 10$ a	样点周围数百公里甚至上千公里、湖泊或海洋集水区
LG	湖泊沉积物、冰心	色谱法	森林景观、草原景观、人类活动区域	10^3 a	样点周围数百公里、湖泊或海洋集水区

其次,各种代用指标在迁移转化过程中,可能会降解,从而会降低它们在沉积环境中的保存通量,这也提高了火的历史重建的不确定性。目前关于碳屑的降解的研究和讨论,还甚为少见。对于 BC、PAHs 与 LG,它们在生成后,很大一部分会以气溶胶的形式存在,这使它们在空气中容易被光化学氧化^[74-76]。如果代用指标主要是通过大气沉降而沉积的,如高山湖泊或远洋沉积,就应充分考虑传播过程中的光化学氧化所引起的损失。此外,也有 BC^[77,78]、PAHs^[79,80]在土壤中降解的报道。这两种代用指标从生成到进入地质载体,很多情况会先进入土壤。在这种情况下,土壤中的降解过程也会造成一定的损失。在沉积物中,BC^[74]和 PAHs^[72]均可能被微生物降解。沉积物中主要是无氧环境。在无氧条件下,PAHs 的降解是非常慢速的,而且需要借助 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Fe^{3+} 等电子受体才能进行降解^[81]。但在已有的火的历史重建的研究成果中,很少涉及到关于代用指标降解的讨论。值得注意的是,由于降解作用的存在,若某个代用指标的重建序列中有几个相近的沉积通量,那么,其中年代越久远的,指示的火强度会越大。树轮火疤重建火的历史也有一定的不确定性。森林中火先后多次发生,后发生的火可能把过去火所生成的火疤彻底烧掉,这可能会导致对火频率的低估^[82]。

3 火的历史与气候变化和人类活动的关系

3.1 火的历史与气候变化

3.1.1 气候快速变化过程中的火的历史

近 30 年,全球经历了一个快速变暖的过程,寒温带春季融雪期提早,半湿润区夏季趋于干旱,都在很大程度上提高了自然火的发生几率^[83,84]。West-erling 等分析了 1980 年以后美国西部的火灾档案记录,发现该地区火灾的频率对气候变暖有明显的响应^[83]。Jolly 等对 1979—2013 年的全球气象数据与自然火记录作了统计分析,发现在该段时期内,全球每年火多发期的时长提高了 18.7%,受火影响的面积增加了一倍^[12]。全球变暖使自然火灾对生态环境造成威胁,因此,关于火灾对气候变化的响应的研究得到了广泛关注^[12,33,85-88]。为了能对火灾更好地预测和管理,需要对历史时期中不同气候环境下的火时空分布差异有更准确、更深入的了解。

在气候快速变化的时期内,火通常是多发

的^[22,89,90]。已有的研究表明,在白垩纪向第三纪过渡的时期,气候变化迅速,从温暖湿润向寒冷干燥迅速转化^[91],这可能是恐龙灭绝的原因之一。在同时期的地层中,也有大量火成碳的检出,说明该时期内的火是非常普遍的^[89,92,93]。在百万年尺度上,Bird 等人对赤道非洲西海域海底沉积物中的 BC 进行元素分析,结果表明,南撒哈拉 170kaBP 以来,火发生最为频繁的时期是全球气候由间冰期向冰期过渡的时段^[35]。

从末次冰盛期到早全新世也有一系列的气候快速变化事件,也对应着火的多发期。Marlon 等对北美洲 35 处沉积物中的 BC 和孢粉记录作了分析,结果表明 BC 沉积速率的峰值对应了 13.9、13.2 和 11.7kaBP 的气候快速变化事件^[90]。Daniau 等人在伊比利亚半岛西南海域的海底碳屑沉积序列中发现,碳屑峰值与 D/O 振荡和 Heinrich 事件有很好的对应关系^[22]。此外,新仙女木事件^[94]、末次冰消期^[95]与火的频发也有很好的年代对应。在世纪尺度上,在 1.1 节关于 GCD 的论述中,述及了在百年尺度上,中世纪气候异常向小冰期过渡的时期,出现了火多发的高峰^[14]。

3.1.2 火的历史与气候干湿变化

从现有的研究成果来看,气候干湿变化是影响古火的首要因素。关于这点,不同研究者的结论有所不同,大体可分为两种:“干旱说”和“湿润说”。

其中“干旱说”认为,干旱的气候背景能提供更多的有利于火发生的天气条件,导致了火的多发^[33,42,96-100]。Wang 等人研究了黄土高原中部的一处 BC 沉积序列,结果表明 BC 沉积速率的变动与 23ka 的岁差周期有很强的对应关系,其中在气候冷干的时期,BC 的沉积速率最高^[99]。Zhang 等研究了云南腾冲的一处湖泊中的 18.5ka 时 BC 沉积序列,发现 BC 的高沉积速率对应了印度季风减弱的时期^[42]。Trouet 等分析了美国西部公元 1400 年以来的树轮火疤记录,认为火强度与夏季干旱程度呈正相关,高温年更易引发大规模的火^[33]。

“湿润说”认为在相对湿润的气候背景下,火更容易发生。因为只有保持一定的湿润度,才能给养足够的植被,为火的发生提供足够的生物质燃料^[21,22,47,101,102]。如果气候过于干旱,生物质积累不足,就没有足够的燃料支持火的燃烧。Daniau 等人分析了非洲西南海域海底的 BC 沉积记录,揭示了过去 170ka 有 6 个对应湿润气候期的火的多发期^[21]。在 3.1.1 节提及过的 Daniau 一文,也发现在气候湿润期内火的强度较高,原因是气候湿润时

植被生物量大,可为火的发生提供足够的燃料载量^[22]。李兴华等人分析了1981—2010年内蒙的草原火灾统计数据,发现随着气候趋于暖干,草原火灾呈逐年递减的趋势^[102]。

从已有研究结果来看,“湿润说”的研究样点主要分布于半干旱区域,在这些区域内,火发生的限制因子是生物质燃料。只有在气候相对湿润的时期,才能积累足够的生物质燃料,为火的多发提供必要的燃料条件。而持“干旱说”的研究者,他们的研究区域集中在湿润半湿润地区,这些地域植被覆盖茂密,生物质燃料充足,但气候湿润,阴雨天多,在这种情况下,适宜火发生的天气背景就成为了限制因子。我们可将以上两种情况形象地总结为“草原上的‘湿润说’,森林里的‘干旱说’”。在我国农牧交错带的南北两侧,上述两种情况形成鲜明的对比。南侧为季风区北缘,植被以森林为主,生物量较大,有足够的生物质燃料积累。秋冬两季所积累的落叶枯枝,待春季积雪融化后暴露于空气中,加之春季干燥多风,稍加引燃即可引发火。黑龙江省^[97,103]、山西省^[104]等地林业部门对当地森林火灾的统计结果印证了以上推断。而在农牧交错带北侧主要是草原景观,生物量相对较少。在湿润期,充足的水分条件使夏秋两季能积累丰富的生物质燃料,到冬季为积雪所覆盖,翌年春季积雪融化,大量的枯草在空气中裸露,再加上干燥多风的天气条件,火的多发就是必然的^[101,102]。近3000年来,不同历史时期季风强度不一,农牧交错带随之北进或南退。对目前的农牧交错带而言,若在季风强的历史时期,该地带森林发育,生物量足,干燥的天气为火发生的限制条件,在这种情况下,“干旱说”成立。反之季风弱的时期,森林退化,草原带南移,生物量少。该时期内某些异常湿润年可积累较多的生物质燃料,在整体干旱的气候背景下,火发生的几率就会明显提高,这种情况符合“湿润说”的观点。可见,在历史时期内,我国农牧交错带的火的时空分布应该能够较可靠地反映季风的进退,也可能指示其中短时期的气候异常事件。但目前相关的研究报道还较少,只限于黄土高原中南部^[16,30,98,99]和内蒙古岱海^[36]的研究样点,且时间分辨率不足,没能重建年代际和年际的气候异常事件,相关的研究亟待开展。

3.2 火的历史与人类活动

进入全新世后,随着农业的逐渐发展,人口数量增加,人类的活动范围逐渐扩大,人类用火也逐渐增多,成为了火的历史的重要组成部分。重建人类用

火仍是以BC、PAHs、LG等火成碳为代用指标。如热带雨林的湖泊沉积中,有报道人类用火的火成碳记录^[19,105],黄土高原也有因人类的农业活动导致的地层中较高含量的火成碳^[16,30]。在青铜时代、铁器时代,金属的冶炼消耗大量的生物质燃料,这也会在地层中留下大量火成碳^[18,106]。如1.4节中刘建华等人^[62]和Zou等人^[17]的研究成果均表明冶炼业的兴盛导致PAHs高沉积通量。还有,人类对自然的快速开发同样伴随着火成碳的大量产生。如19世纪的西进运动,人类对美国西部森林快速开发增强了当地火的强度^[14]。又如前文所述,近200年地层中的PAHs和人口密度、社会经济水平有很强的正相关关系。

从时间尺度来看,目前关于人类与火的历史关系的研究,主要集中在工业革命后的200多年,千年尺度的研究只重建了时间分辨率较低的历史文明时期,如仰韶文化^[16]、玛雅文明^[67]、青铜时代^[106]、铁器时代^[17]、罗马时代和中世纪^[18]等等。而历史事件通常是年代际或年际尺度的,如太平盛世的文景之治39年,开元盛世30年;又如战争事件的汉武帝驱逐匈奴14年,安史之乱8年等等;饥荒、洪涝等自然灾害则是年际尺度,为能重建此类历史事件,必须提高火的历史重建的分辨率。

人类文明与火的使用的关系是多种多样的,比如在文明发达的地域人口一般较为密集,生产生活用火就会留下较多的火成碳记录。这样看来,人类的一年四季每日不断地用火所产生的火成碳并不比偶发的森林、草原火灾的要少。另外,火成碳记录能指示人类生产模式的变迁^[28]。从烧殖轮作,到丰收后的秸秆焚烧,再到石油燃料的消耗,这些生产活动所生成的火成碳,在时空分布上与物理化学性质上会有较大的差异^[16,51]。人类的其他文化活动,如大兴土木搞建设、焚香烧纸祭祖等都会有大量火成碳的生成。再者,一段时期内的社会动荡所导致的人口迁移、战争事件^[32,57,59],都可能会在很大程度上影响火成碳的时空分布。因此,对火成碳的分析能够对人类活动进行重建,将其重建结果与已有的古气候古环境记录进行对比,可以让我们对历史时期的人地关系有更深入和更准确的了解,甚至对一些历史事件的社会背景或环境条件可能有新的认识。这为今后相关政策的制定,小到区域的火灾管理,大到长期的发展规划,都能提供有价值的参考。

4 结论和展望

总结现有的火的历史重建的成果,主要是碳屑、

BC、树轮火疤、PAHs 和 LG 等火成碳应用于火的历史重建的研究成果,显示了火的历史与古气候变化和人类活动之间具有某些紧密的联系。在古气候方面,火的历史与气候的快速变化过程及气候的干湿度有较好的相关性;在人类活动方面,一些历史文明时期通常能够在火的历史重建结果中得到体现。工业革命以后,人类活动对自然环境的干扰与日俱增,地层中 PAHs 通量的快速上升能反映人口数量的急剧增长与社会经济的高速发展。可见,火的历史重建结果,能在一定程度上揭示过去的人地关系。今后的研究可从以下几个方面寻找新的思路:

(1)降低火的历史重建结果的不确定性

火的历史重建的各类代用指标,其生成后在环境中迁移、转化和降解,这增加了火的历史重建的复杂性,也降低了火的历史重建结果的准确度。今后应当深入研究这些代用指标在环境中迁移转化的机制,以及在地质载体中随时间的降解情况,为火的历史重建提供参考,从而降低重建结果的不确定性。

(2)深入工业革命前火的历史与人类活动的关系的研究

工业革命以来的人类用火历史,目前已有较多较深入的研究。更长时间尺度的火的历史重建结果,主要集中在分析火的历史与气候变化之间的关系。然而数百甚至近几千年至工业革命前这个时间段的火的历史,可能与气候变化和人类活动之间都有重要的关系,如何区分自然(气候)与非自然(人类活动)因素影响对该时段的火的历史的影响,需要在后续的研究中重点加以关注。

(3)结合史料,加强我国历史时期火的历史的研究

我国历史悠久,历史文献资料在年代上较为连续,且丰富详实,这些历史文献资料是进行火的历史研究的宝贵资源和财富。若能将我国历史文献中的相关记载与高分辨率的沉积物火成碳记录及古气候记录进行对比分析,或许可以进一步地明晰我国历史时期的火的历史与气候变化和与人类活动之间的复杂关系。

参考文献 (References)

- [1] Hao W M, Ward D E, Olbu G, et al. Emissions of CO₂, CO, and hydrocarbons from fires in diverse African savanna ecosystems[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D19): 23577-23584.
- [2] Blomqvist P, Persson B, Simonson M. Fire emissions of organics into the atmosphere[J]. *Fire Technology*, 2007, 43(3): 213-231.
- [3] Al-Naiema I, Estillore A D, Mudunkotuwa I A, et al. Impacts of co-firing biomass on emissions of particulate matter to the atmosphere[J]. *Fuel*, 2015, 162: 111-120.
- [4] Bowman D M J S, Balch J K, Artaxo P, et al. Fire in the earth system[J]. *Science*, 2009, 324(5926): 481-484.
- [5] 吕爱锋, 田汉勤. 气候变化、火干扰与生态系统生产力[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(2): 242-251. [Lü Aifeng, TIAN Han-qin. Interaction among climatic change, fire disturbance and ecosystem productivity[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(2): 242-251.]
- [6] Li F, Bond-Lamberty B, Levis S. Quantifying the role of fire in the Earth system - Part 2: Impact on the net carbon balance of global terrestrial ecosystems for the 20th Century[J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(5): 1345-1360.
- [7] 周道玮. 草地火的生态学意义[J]. *草业科学*, 1994, 11(2): 10-14. [ZHOU Daowei. The ecological significance of grassland fire[J]. *Pratacultural Science*, 1994, 11(2): 10-14.]
- [8] 黄文几. 火的生态学意义[J]. *自然杂志*, 1983, 6(6): 425-430, 480. [HUANG Wenji. The eco-significance of fire[J]. *Nature Magazine*, 1983, 6(6): 425-429, 480.]
- [9] Van Langevelde F, Van De Vijver C A D M, Kumar L, et al. Effects of fire and herbivory on the stability of savanna ecosystems[J]. *Ecology*, 2003, 84(2): 337-350.
- [10] 周振宇, 关莹, 王春雪, 等. 旧石器时代的火塘与古人类用火[J]. *人类学学报*, 2012, 31(1): 24-40. [ZHOU Zhenyu, GUAN Ying, WANG Chunxue, et al. Remains of human Fire-use: An overview of paleolithic hearth and human fire-use behavior[J]. *Acta Anthropologica Sinica*, 2012, 31(1): 24-40.]
- [11] Blarquez O, Ali A A, Girardin M P, et al. Regional paleofire regimes affected by non-uniform climate, vegetation and human drivers[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 13356.
- [12] Jolly W M, Cochrane M A, Freeborn P H, et al. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7537.
- [13] Marlon J, Bartlein P J, Whitlock C. Fire-fuel-climate linkages in the northwestern USA during the Holocene[J]. *The Holocene*, 2006, 16(8): 1059-1071.
- [14] Marlon J R, Bartlein P J, Gavin D G, et al. Long-term perspective on wildfires in the western USA[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(9): 3203-3204.
- [15] Boer M M, Price O F, Bradstock R A. Wildfires: Weigh policy effectiveness[J]. *Science*, 2015, 350(6263): 920.
- [16] 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.
- [17] Zou S L, Li R C, Xie S C, et al. Paleofire indicated by polycyclic aromatic hydrocarbons in soil of Jinluojia archaeological site, Hubei, China[J]. *Journal of Earth Science*, 2010, 21(3): 247-256.

- [18] Musa Bandowe B A, Srinivasan P, Seelge M, et al. A 2600-year record of past polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) deposition at Holzmaar (Eifel, Germany)[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 401: 111-121.
- [19] Maxwell A L. Fire regimes in north-eastern Cambodian monsoonal forests, with a 9300-year sediment charcoal record[J]. *Journal of Biogeography*, 2004, 31(2): 225-239.
- [20] 谭志海, 黄春长, 庞奖励, 等. 周原全新世土壤剖面木炭屑与野火活动的关系研究[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(2): 31-33. [TAN Zhihai, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Relationship between soil charcoal in Holocene and wildfire in the Zhouyuan Region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(2): 31-33.]
- [21] Daniou A L, Sanchez Goni M F, Martinez P, et al. Orbital-scale climate forcing of grassland burning in southern Africa [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(13): 5069-5073.
- [22] Daniou A L, Sánchez-Goni M F, Beaufort L, et al. Dansgaard-Oeschger climatic variability revealed by fire emissions in southwestern Iberia [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(9-10): 1369-1383.
- [23] 沈吉, 薛滨, 吴敬禄, 等. 湖泊沉积与环境演化[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 282-286.[SHEN Ji, XUE Bin, WU Jinglu, et al. *Lake Deposition and Environmental Evolution*[M]. Beijing: Science Press, 2012: 282-286.]
- [24] 李小明, 周新鄂, 尚雪, 等. 黄土炭屑分级统计方法及其在火演化研究中的意义[J]. *湖泊科学*, 2006, 18(5): 540-544. [LI Xiaoqiang, ZHOU Xinying, SHANG Xue, et al. Different-(kPa/°C) size method of charcoal analysis in loess and its significance in the study of fire variation[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18(5): 540-544.]
- [25] Power M J, Marlon J, Ortiz N, et al. Changes in fire regimes since the Last Glacial Maximum: An assessment based on a global synthesis and analysis of charcoal data[J]. *Climate Dynamics*, 2008, 30(7-8): 887-907.
- [26] Tinner W, Conedera M, Ammann B, et al. Pollen and charcoal in lake sediments compared with historically documented forest fires in southern Switzerland since AD 1920[J]. *The Holocene*, 1998, 8(1): 31-42.
- [27] Behling H. Late glacial and Holocene vegetation, climate and fire history inferred from Lagoa Nova in the southeastern Brazilian lowland[J]. *Vegetation History and Archaeobotany*, 2003, 12(4): 263-270.
- [28] Behling H. A 2860-year high-resolution pollen and charcoal record from the Cordillera de Talamanca in Panama: a history of human and volcanic forest disturbance[J]. *The Holocene*, 2000, 10(3): 387-393.
- [29] Tinner W, Hu F S, Beer R, et al. Postglacial vegetational and fire history: Pollen, plant macrofossil and charcoal records from two Alaskan lakes[J]. *Vegetation History and Archaeobotany*, 2006, 15(4): 279-293.
- [30] Tan Z H, Han Y M, Cao J J, et al. Holocene wildfire history and human activity from high-resolution charcoal and elemental black carbon records in the Guanzhong Basin of the Loess Plateau, China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 109: 76-87.
- [31] Kitzberger T, Brown P M, Heyrdahl E K, et al. Contingent Pacific-Atlantic Ocean influence on multicentury wildfire synchrony over western North America[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(2): 543-548.
- [32] 王晓春, 及莹. 树木年轮火历史研究进展[J]. *植物生态学报*, 2009, 33(3): 587-597. [WANG Xiaochun, JI Ying. Review of advances in dendropyrochronology[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(3): 587-597.]
- [33] Trouet V, Taylor A H, Wahl E R, et al. Fire-climate interactions in the American West since 1400 CE[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(4): L04702.
- [34] Niklasson M, Zin E, Zielonka T, et al. A 350-year tree-ring fire record from Bialowieza Primeval Forest, Poland: Implications for Central European lowland fire history[J]. *Journal of Ecology*, 2010, 98(6): 1319-1329.
- [35] Bird M I, Cali J A. A million-year record of fire in sub-Saharan Africa[J]. *Nature*, 1998, 394(6695): 767-769.
- [36] Wang X, Xiao J L, Cui L L, et al. Holocene changes in fire frequency in the Daihai Lake region (North-Central China): indications and implications for an important role of human activity[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 59: 18-29.
- [37] 明镜, 效存德, 孙俊英. 雪中黑碳的测试分析方法综述[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(3): 859-863. [MING Jing, XI-AO Cunde, SUN Junying. The general statement on the measuring methods for black carbon in snow and ice[J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(3): 859-863.]
- [38] 王旭, 于赤灵, 彭平安, 等. 沉积物中黑碳的提取和测定方法: 误差分析和回收率实验[J]. *地球化学*, 2001, 30(5): 439-444. [WANG Xu, YU Chiling, PENG Pingan, et al. Extraction and determination of black carbon in sediments: Error analysis and recovery ratio experiment[J]. *Geochimica*, 2001, 30(5): 439-444.]
- [39] Lehnendorf E, Wolf M, Litt T, et al. 15,000 years of black carbon deposition - A post-glacial fire record from maar lake sediments (Germany) [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 110: 15-22.
- [40] Bird M I, Ascough P L. Isotopes in pyrogenic carbon: A review[J]. *Organic Geochemistry*, 2012, 42(12): 1529-1539.
- [41] Jia G D, Peng P A, Zhao Q H, et al. Changes in terrestrial ecosystem since 30 Ma in East Asia: Stable isotope evidence from black carbon in the South China Sea[J]. *Geology*, 2003, 31(12): 1093-1096.
- [42] Zhang E L, Sun W W, Zhao C, et al. 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[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 435: 86-94.
- [43] 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. [JIA Gu-

- odong, PENG Pingan, SHENG Guoying, et al. Sedimentary records of black carbon in the sea area of the Nansha Islands since the last glaciation[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(17): 1594-1597.]
- [44] Sun X S, Peng P A, Song J Z, et al. Sedimentary record of black carbon in the Pearl River estuary and adjacent northern South China Sea[J]. Applied Geochemistry, 2008, 23(12): 3464-3472.
- [45] Venkatesan M I, Dahl J. Organic geochemical evidence for global fires at the Cretaceous/Tertiary Boundary[J]. Nature, 1989, 338(6210): 57-60.
- [46] Nabbefeld B, Grice K, Summons R E, et al. Significance of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Permian/Triassic boundary sections[J]. Applied Geochemistry, 2010, 25(9): 1374-1382.
- [47] Jiang C Q, Alexander R, Kagi R I, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in ancient sediments and their relationships to palaeoclimate[J]. Organic Geochemistry, 1998, 29(5-7): 1721-1735.
- [48] Jiang C Q, Alexander R, Kagi R I, et al. Origin of perylene in ancient sediments and its geological significance[J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(12): 1545-1559.
- [49] Arinobu T, Ishiwatari R, Kaiho K, et al. Spike of pyrosynthetic polycyclic aromatic hydrocarbons associated with an abrupt decrease in $\delta^{13}\text{C}$ of a terrestrial biomarker at the Cretaceous-Tertiary boundary at Caravaca, Spain[J]. Geology, 1999, 27(8): 723-726.
- [50] Hossain H M Z, Sampei Y, Roser B P. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in late Eocene to early Pleistocene mudstones of the Sylhet succession, NE Bengal Basin, Bangladesh: Implications for source and paleoclimate conditions during Himalayan uplift[J]. Organic Geochemistry, 2013, 56: 25-39.
- [51] Sun L, Zang S Y. History of fuel consumption inferred from polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from the South Lianhuan Lake, Northeast China[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2012, 88(6): 1027-1032.
- [52] Barra R, Popp P, Quiroz R, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons fluxes during the past 50 years observed in dated sediment cores from Andean mountain lakes in central south Chile[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2006, 63(1): 52-60.
- [53] Denis E H, Toney J L, Tarozo R, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in lake sediments record historic fire events: Validation using HPLC-fluorescence detection[J]. Organic Geochemistry, 2012, 45: 7-17.
- [54] Mai B X, Qi S H, Zeng E Y, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the coastal region off Macao, China: Assessment of input sources and transport pathways using compositional analysis[J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(21): 4855-4863.
- [55] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, et al. PAHs in the Fraser River basin: A critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition[J]. Organic Geochemistry, 2002, 33(4): 489-515.
- [56] Yuan Z J, Liu G J, Wang R W, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from the Old Yellow River Estuary, China: Occurrence, sources, characterization and correlation with the relocation history of the Yellow River[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 109: 169-176.
- [57] Liu Y, Yu N, Li Z, et al. Sedimentary record of PAHs in the Liangtan River and its relation to socioeconomic development of Chongqing, Southwest China[J]. Chemosphere, 2012, 89(7): 893-899.
- [58] Guo J Y, Wu F C, Luo X J, et al. Anthropogenic input of polycyclic aromatic hydrocarbons into five lakes in Western China[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(6): 2175-2180.
- [59] Guo W, Pei Y S, Yang Z F, et al. Historical changes in polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) input in Lake Baiyangdian related to regional socio-economic development[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 187(1-3): 441-449.
- [60] Bakhtiari A R, Zakaria M P, Yaziz M I, et al. Vertical distribution and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons in anoxic sediment cores of Chini Lake, Malaysia: Perylene as indicator of land plant-derived hydrocarbons[J]. Applied Geochemistry, 2009, 24(9): 1777-1787.
- [61] Marynowski L, Kubik R, Uhl D, et al. Molecular composition of fossil charcoal and relationship with incomplete combustion of wood[J]. Organic Geochemistry, 2014, 77: 22-31.
- [62] 刘建华, 祁士华, 张干, 等. 湖北梁子湖沉积物正构烷烃与多环芳烃对环境变迁的记录[J]. 地球化学, 2004, 33(5): 501-506. [LIU Jianhua, QI Shihua, ZHANG Gan, et al. Response of the n-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons records in sediments from Lake Liangzi to the environmental change[J]. Geochimica, 2004, 33(5): 501-506.]
- [63] Liu L Y, Wang J Z, Wei G L, et al. Sediment records of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the continental shelf of China: Implications for evolving anthropogenic impacts[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(12): 6497-6504.
- [64] 刘军利. 木质纤维类生物质定向热解行为研究[D]. 中国林业科学研究院博士学位论文, 2011. [LIU Junli. Study on directed pyrolysis of lignocellulose biomass[D]. Doctor Dissertation of Chinese Academy of Forestry, 2011.]
- [65] Elias V O, Simoneit B R T, Cordeiro R C, et al. Evaluating levoglucosan as an indicator of biomass burning in Carajás, amazônia: A comparison to the charcoal record [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(2): 267-272.
- [66] Simoneit B R T, Schauer J J, Nolte C G, et al. Levoglucosan, a tracer for cellulose in biomass burning and atmospheric particles[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(2): 173-182.
- [67] Schüpbach S, Kirchgeorg T, Colombaroli D, et al. Combining charcoal sediment and molecular markers to infer a Holocene fire history in the Maya Lowlands of Petén, Guatemala

- [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 115: 123-131.
- [68] Zennaro P, Kehrwald N, Marlon J, et al. Europe on fire three thousand years ago: Arson or climate? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(12): 5023-5033.
- [69] 赵致奎. 基于树轮火疤重建大兴安岭北部林区火历史[D]. 东北林业大学硕士学位论文, 2010. [ZHAO Zhikui. Reconstruction of tree-ring fire history in the North Daxing' an Mountains[D]. Master Dissertation of Northeast Forestry University, 2010.]
- [70] 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.]
- [71] 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.]
- [72] Haritash A K, Kaushik C P. Biodegradation aspects of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 169(1-3): 1-15.
- [73] Tinner W, Hofstetter S, Zeugin F, et al. Long-distance transport of macroscopic charcoal by an intensive crown fire in the Swiss Alps - Implications for fire history reconstruction [J]. *The Holocene*, 2006, 16(2): 287-292.
- [74] 曹军骥, 占长林. 黑碳在全球气候和环境系统中的作用及其在相关研究中的意义[J]. *地球科学与环境学报*, 2011, 33(2): 177-184. [CAO Junji, ZHAN Changlin. Research significance and role of black carbon in the global climate and environmental systems[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(2): 177-184.]
- [75] Manahan S E. 环境化学[M]. 孙红文, 汪磊, 王翠萍, 等译. 9版. 北京: 高等教育出版社, 2013: 284. [Manahan S E. *Environmental Chemistry*[M]. SUN Hongwen, WANG Lei, WANG Cuiping, et al. Trans. 9th ed. Beijing: Higher Education Press, 2013: 284.]
- [76] Lai C Y, Liu Y C, Ma J Z, et al. Degradation kinetics of levoglucosan initiated by hydroxyl radical under different environmental conditions [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 91: 32-39.
- [77] Major J, Lehmann J, Rondon M, et al. Fate of soil-applied black carbon: Downward migration, leaching and soil respiration[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(4): 1366-1379.
- [78] Hockaday W C, Grannas A M, Kim S, et al. Direct molecular evidence for the degradation and mobility of black carbon in soils from ultrahigh-resolution mass spectral analysis of dissolved organic matter from a fire-impacted forest soil[J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(4): 501-510.
- [79] Johnsen A R, Karlson U. PAH degradation capacity of soil microbial communities - Does it depend on PAH exposure? [J]. *Microbial Ecology*, 2005, 50(4): 488-495.
- [80] Sayara T, Pognani M, Sarrà M, et al. Anaerobic degradation of PAHs in soil: Impacts of concentration and amendment stability on the PAHs degradation and biogas production[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2010, 64(4): 286-292.
- [81] Ghosal D, Ghosh S, Dutta T K, et al. Current state of knowledge in microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): A review[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: 1369.
- [82] Baker W L, Ehle D. Uncertainty in surface-fire history: The case of ponderosa pine forests in the western United States [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31(7): 1205-1226.
- [83] Westerling A L, Hidalgo H G, Cayan D R, et al. Warming and earlier spring increase western U.S. forest wildfire activity[J]. *Science*, 2006, 313(5789): 940-943.
- [84] Liu Y Q, Goodrick S L, Stanturf J A. Future U.S. wildfire potential trends projected using a dynamically downscaled climate change scenario[J]. *Forest Ecology And Management*, 2013, 294: 120-135.
- [85] Clark J S. Effect of climate change on fire regimes in northwestern Minnesota[J]. *Nature*, 1988, 334(6179): 233-235.
- [86] Parisien M A, Moritz M A. Environmental controls on the distribution of wildfire at multiple spatial scales[J]. *Ecological Monographs*, 2009, 79(1): 127-154.
- [87] Oris F, Asselin H, Ali A A, et al. Effect of increased fire activity on global warming in the boreal forest[J]. *Environmental Reviews*, 2014, 22(3): 206-219.
- [88] Goetz S J, Mack M C, Gurney K R, et al. Ecosystem responses to recent climate change and fire disturbance at northern high latitudes: Observations and model results contrasting northern Eurasia and North America[J]. *Environmental Research Letters*, 2007, 2(4): 045031.
- [89] Wolbach W S, Gilmour I, Anders E, et al. Global fire at the Cretaceous-Tertiary boundary[J]. *Nature*, 1988, 334(6184): 665-669.
- [90] Marlon J R, Bartlein P J, Walsh M K, et al. Wildfire responses to abrupt climate change in North America[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(8): 2519-2524.
- [91] Wolbach W S, Lewis R S, Andeers E. Cretaceous extinctions: Evidence for wildfires and search for meteoritic material[J]. *Science*, 1985, 230(4722): 167-170.
- [92] Belcher C M. Impacts and wildfires - An analysis of the K-T event [M]//Cockell C, Gilmour I, Koeberl C. *Biological Processes Associated with Impact Events*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006: 221-243.
- [93] Scott A C, Lomax B H, Collinson M E, et al. Fire across the K-T boundary: Initial results from the Sugarite Coal, New Mexico, USA [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2000, 164(1-4): 381-395.
- [94] Power M J, Marlon J R, Bartlein P J, et al. Fire history and the Global Charcoal Database: A new tool for hypothesis testing and data exploration[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology*

- tology, *Palaeoecology*, 2010, 291(1-2): 52-59.
- [95] Montoya E, Rull V. Gran Sabana fires (SE Venezuela): A paleoecological perspective[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30(23-24): 3430-3444.
- [96] Schoennagel T, Veblen T T, Romme W H, et al. Enso and PDO variability affect drought-induced fire occurrence in Rocky Mountain subalpine forests[J]. *Ecological Applications*, 2005, 15(6): 2000-2014.
- [97] 万里鹏, 关兴民, 万正奎, 等. 大兴安岭森林火灾的气候背景[J]. *森林防火*, 1996(2): 18-20. [WAN Lipeng, GUAN Xingmin, WAN Zhengkui, et al. The climate conditions of forest fire in Great Khingan[J]. *Forest Fire Prevention*, 1996(2): 18-20.]
- [98] Tan Z H, Huang C C, Pang J L, et al. Wildfire history and climatic change in the semi-arid loess tableland in the middle reaches of the Yellow River of China during the Holocene: Evidence from charcoal records[J]. *The Holocene*, 2013, 23(10): 1466-1476.
- [99] Wang X, Peng P A, Ding Z L. Black carbon records in Chinese Loess Plateau over the last two glacial cycles and implications for paleofires[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 223(1-2): 9-19.
- [100] 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, northeastern China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 438: 1-8.
- [101] 李兴华, 武文杰, 张存厚, 等. 气候变化对内蒙古东北部森林草原火灾的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(11): 114-119. [LI Xinghua, WU Wenjie, ZHANG Cunhou, et al. Influence of climate change on north-eastern of Inner Mongolia grassland forest fire[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(11): 114-119.]
- [102] 李兴华, 任丽媛, 刘秀荣. 气候变化对内蒙古草原火灾的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(4): 129-133. [LI Xinghua, REN Liyuan, LIU Xiurong. Impact of climate change on the grassland fires in Inner Mongolia[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(4): 129-133.]
- [103] 陶玉柱, 邸雪颖, 金森. 我国森林火灾发生的时空规律研究[J]. *世界林业研究*, 2013, 26(5): 75-80. [TAO Yuzhu, DI Xueying, JIN Sen. Research on temporal and spatial distribution of forest fire in China[J]. *World Forestry Research*, 2013, 26(5): 75-80.]
- [104] 狄丽颖, 张爱国, 张艳丽, 等. 山西省森林火灾的年变化特点和致灾原因分析[J]. *森林防火*, 2007(2): 19-22. [DI Liying, ZHANG Aiguo, ZHANG Yanli, et al. Analyses on annual change characteristics and causes of forest fires happened in Shanxi Province[J]. *Forest Fire Prevention*, 2007(2): 19-22.]
- [105] Gu Y S, Pearsall D M, Xie S C, et al. Vegetation and fire history of a Chinese site in southern tropical Xishuangbanna derived from phytolith and charcoal records from Holocene sediments[J]. *Journal of Biogeography*, 2008, 35(2): 325-341.
- [106] Vanni re B, Blarquez O, Rius D, et al. 7000-year human legacy of elevation-dependent European fire regimes [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 132: 206-212.