显微煤岩组分分析及在古野火研究中的应用

Pre-pub. on line: www.geojournals.cn/georev

侯海海,何倩,黄乡琴

辽宁工程技术大学矿业学院,辽宁阜新,123000

内容提要:显微煤岩组分定义和分类的中国国家标准自中国煤田地质专业委员会煤岩学组成立以来历经33 a(1980-2013年)完成,国际标准“ICCP system 1994”是国际煤和有机岩石学委员会(ICCP)历经26 a(1991-2017年)完成,但经过数十年发展国内外分类方案仍存在诸多差异。通过对比中国和国际显微组分分类方案,发现中国三次分类方案的演变主要体现在具体分类类别上,与国际显微组分分类方案的差别主要体现在镜质组和类脂组的分类类别和成因差异。建议根据研究习惯和交流对象合理选择分类方案,但需要明确不同分类方案下的显微(亚)组分类型。惰质组是煤中最常见和最重要的显微组分组之一,常作为古野火发生的指示物。利用惰质组中丝质体反射率可推算燃烧温度,从而判断古野火发生强度及类型,根据惰质组相对含量可厘定古氧气含量,惰质组在大气圈和岩石圈的滞留和沉积过程可分析古野火对古生态系统的影响。古野火作为古生态的重要影响因子,显微煤岩组分分析可以揭示古大气成分和古生态群落演替等信息,有助于人类探究当前环境下全球气候变暖和关键地质历史时期古生物灭绝原因。

关键词:显微煤岩组分分类;惰质组;古野火;古氧气厘定;古生态

煤作为世界上最重要的化工原料和主要能源(王震等,2016;王佟等,2017),直接燃烧不仅无法对其物尽其用,还会造成资源的大量浪费及严重的环境污染(Khankari and Karmakar,2018)。依据国家“双碳”目标和当前煤炭清洁、低碳、高效利用的发展趋势,显微煤岩组分科学分类及深入分析可为煤炭高效转化的实现提供决策和技术支撑(孔维璐,2021;吴天才等,2022)。显微煤岩组分研究即是从源头出发,发展煤的分级分质利用,提高煤转化效率,符合煤炭清洁高效利用的长远发展趋势(Li Peng et al., 2019;史航等,2019;赵云鹏等,2019)。随着国内外煤地质和煤化工的广泛应用,显微煤岩组分术语的差异和混用问题层出不穷,厘清二者差异和对应关系成为了系统研究显微煤岩组分的前提和基础,唯有规范使用术语才能更好的进行工业应用和国内外学术交流。

显微煤岩组分分析作为煤地质学重要的基础研究内容,近年来在泥炭沼泽地古气候、古环境分析(姜寿昶等,2023)、煤层气勘探开发(许浩等,2016)、煤化工(吴天才等,2022)和煤矿采空区 CO_2 地质封存(周晋辉等,2024)等方面的应用越来越广,受到了广大地质学者的持续关注。古野火这一自然现象百万年来一直作为影响和调节全球生态气候的枢纽(占长林等,2011),它的发生对古生物群落演替(张潇等,2024)、古气候分析和地质历史时期的碳循环起着重要影响作用,而识别古野火事件则是研究的前提(Degani - Schmidt et al., 2015;El Atfy et al., 2019;Scott and Damblon,2010)。随着对指示古野火事件的显微标志物——惰质组的发现与研究,越来越多学者借助它的含量和空间分布对古野火特征进行研究,进而来揭开聚煤期古生态气候和古环境演化的神秘面纱。另外,古野火事件中显微煤岩组分分析还可以厘定古大气成分,有学者基于大量的惰质组含量数据,重建了中国各聚煤期大气氧含量变化曲线,结果显示整个显生宙氧含量在15%至30%之间波动(Wang Dongdong et al., 2021),在古气候和古环境厘定的基础上进一步推断古生态群落演替规律(Shao Longyi et al., 2023)。

本次研究在对比国内和国际显微煤岩组分分类的基础上,综述了显微煤岩组分分析在古气候、古大

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:42102223)和中国博士后科学基金资助项目(编号:2021M693844,2022T150284)的成果。

收稿日期:2024-08-05;改回日期:2024-10-10;网络首发:2024-11-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2024.11.001

作者简介:侯海海,男,1986年生,博士,教授,主要从事含煤岩系沉积学的教学和科研;Email: houhaihai@lntu.edu.cn。

气成分及氧含量厘定等方面的进展，提出了显微煤岩组分分析的应用展望，有助于人类探究当前环境下全球气候变暖和关键地质历史时期古生物灭绝的原因。

1 显微煤岩组分分类

1.1 显微煤岩组分分类方案的发展进程

显微煤岩组分划分和命名是煤岩学研究的基础。近几十年来，随着煤炭工业的发展和国际学术交流日益增多，国内和国际显微组分分类及命名方案亟待提出并完善。基于此背景，我国在 20 世纪 80 年代初期便成立了中国煤田地质专业委员会煤岩学组。委员会的成立为我国《烟煤显微组分分类》方案的研究与更迭奠定了基石，从成立至今先后制定烟煤显微组分分类 GB/T 15588-1995、GB/T 15588-2001 和 GB/T 15588-2013 3 个分类方案。这 3 个分类方案中烟煤显微组分的分类名称和代号，适用于烟煤的资源评价、加工利用和成因研究等方面的生产、科研及教学工作，与我国煤炭工艺性质与国情相适配，为国内学者进行煤岩学以及显微煤岩组分分析等方面提供统一术语。这 3 个分类方案皆采用成因与工艺性质相结合的原则，以显微镜油浸反射光下的特征为主，结合透射光和荧光特征进行分类。首先根据煤中有机成分的颜色、反射率、突起、形态和结构特征，划分出显微组分组；再根据细胞结构保存程度、形态、大小以及光性特征的差别，将显微组分组进一步划分为显微组分和显微亚组分。上述 3 个分类方案在引用标准、具体分类方案（即显微组分组、显微组分、显微亚组分等）和特征描述等诸多方面不断更新，例如国标 1995 版划分出了半镜质组、菌类体及其相关显微亚组分，后续更新的国标 2001 版删去了半镜质组和菌类体并新增了分泌体和真菌体，并在 1995 版的基础上增加了显微组分的英文名称。目前没有单独的无烟煤显微组分分类方案国家标准，煤化程度与烟煤相近的无烟煤可参照使用 GB/T 15588-2013 的分类方案。

褐煤是煤化程度最低的煤，其有机质中保留了较多原始成煤植物分解过程中的特征，因而与烟煤、无烟煤的显微组分有明显的不同。中国国家标准暂时缺乏有关褐煤显微煤岩组分的分类方案，有关《木质褐煤显微组分分类》于 2023 年 12 月方才正式起草，目前一般使用《国际煤岩学手册》和“ICCP system 1994”中有关腐植体的显微组分定义和分类方案，将褐煤显微组分划分为腐植组、惰质组和稳定组等三个显微组分组。国际煤岩学委员会（ICCP）工作小组于 2005 年对原方案中腐植体的分类进行了修订（Sýkorová et al., 2005），将无结构腐植体这一显微组分组（Humocollinite）更改为凝胶腐植体（Gelohuminite），并删去了显微亚组分结构腐木质体（Texto-ulminite）和充分分解腐木质体（Eu-ulmminite），同时将木质结构体和腐木质体显微组分细分为两类显微组分种（A—暗色，B—浅色），该方案适用于褐煤和亚烟煤（Sýkorová et al., 2005；代世峰等，2021a）。当褐煤演变成烟煤后，褐煤的 3 个显微组分组分别与烟煤的镜质组、惰质组和类脂组相当，两者的主要区别在于腐植组和镜质组，但腐植组和镜质组以及各自次级的显微组分、亚组分之间基本上能做到一一对应。另外，煤化程度与烟煤接近的褐煤也可参照使用 GB/T 15588-2013 的分类方案。

1.2 国内外显微煤岩组分分类的异同

国外学者对煤炭分类研究可追溯到 19 世纪 20 年代，有关显微煤岩组分的研究在显微镜应用普及后进入了快速发展阶段。煤的显微组成复杂多变，各组分镜下特征不一且性质差异较大，这既为其分类工作提供了研究依据，但同时也在一定程度上加大了分类研究的难度。目前，国内外显微煤岩组分的研究多集中在烟煤，且变质程度与烟煤相似的褐煤和无烟煤显微组分分类也可以参照烟煤进行，因此在综合对比国内外主流的烟煤显微煤岩组分分类方案基础上，总结了各方案在分类依据和分类类别等方面的差异。

国际上有关显微煤岩组分的分类方案具体分为两类，首先提出的是 Stopes Heerlen 烟煤显微组分分类方案，但随着煤岩学工作的推进与更迭该方案已然无法与相关研究适配（Stopes, 1935）。为制定出适配性和全面性高且便于煤岩学研究使用的分类方案，ICCP 在前人工作的基础上制定并修改了分类方案的内容，以反射光下的观察特征为依据重新确立了有关镜质体、惰质体、腐植体和类脂体的定义和分类，并将该分类方案统一命名为“ICCP system 1994”（代世峰等，2021b, c）。Stopes Heerlen 分类系统与“ICCP system 1994”的不同点在于：① 后者提出了显微组分组、显微组分亚组、显微组分三个类别，前者分类方案并无亚组这一类别。② 两者分类依据不同。后者将反射率高低、植物组织的破坏程度以及形态和凝胶化程度作为划分依据；在该方案中还删减了部分不太常用的参数（如折射率等），同时增

表 1 中国国标 2013 版与 ICCP (1994) 分类依据和原则对比表

Table 1 Comparison of National Standards (2013) and ICCP (1994) Classification basis Principles

差异类别	国家标准《烟煤显微组分分类》(2013)	ICCP system 1994
分类级别	显微组分组—显微组分—显微亚组分	显微组分组—显微组分亚组—显微组分
分类依据	成因和工艺性质相结合为原则;显微镜油浸反射光下特征结合透射光和荧光特征为依据	反射光下特征为依据
三大显微组分定义	镜质组:由成煤植物的木质纤维组织经过腐植化和凝胶化作用形成的显微组分	镜质体:归为灰色显微组分组,其反射率介于暗色类脂组和浅色惰质组之间
	惰质组:主要由木质纤维组织经过丝炭化作用转化而成的显微组分,也有一小部分来自真菌遗体,或是在热演化过程中形成的次生组分	惰质体:存在于低、中阶煤和低、中变质程度的沉积岩中的显微组分组
	类脂组:主要来源于高等植物的繁殖器官、保护组织、分泌物和菌藻类,以及与上述物质相关的降解物,也称为壳质组	类脂体:源自非腐植化植物组织的一类显微组分,包括孢粉素、树脂、蜡和脂肪等相对富氢的残余物,在同一煤样的所有显微组分中其反射率最低
显微组分划分差异	①均质镜质体(即 ICCP 胶质结构体)—无结构镜质体; ②基质镜质体(即 ICCP 胶质碎屑体)—无结构镜质体; ③碎屑惰质体; ④多划分出树皮体 Barkinite 和荧光体 Fluorinite	①胶质结构体(即国标均质镜质体)—结构镜质体; ②胶质碎屑体(即国标基质镜质体)—碎屑镜质体; ③惰质碎屑体; ④多划分出叶绿素体 Chlorophyllinite

加了显微组分的化学特征描述;使用低阶煤、中阶煤和高阶煤分别代替了褐煤、烟煤和无烟煤;将随机反射率 0. 5% Rr 作为低、中阶煤的分界线(ICCP, 1998;代世峰等,2021b);且后者镜质组的分类常常适用于中、高阶煤以及相应变质程度的沉积岩中分散的有机物;惰质组和类脂组分类则适用于所有煤化作用程度的煤。

目前使用最广泛的显微煤岩组分分类方案是中国国家最新标准 GB/T 15588-2013 和由 ICCP 划分的“ICCP system 1994”,两者所包含内容十分详尽且全面,但在分类依据和分类类别等方面存在着部分差异(表 1)。本文统一采用中国国家标准分类方案对显微煤岩组分专业术语进行叙述。两者显微煤岩组分具体分类及对比见表 2。分类结果对比来看,除类脂组划分有较大出入外,惰质组的显微(亚)组分完全可以做到一一对应,镜质组的显微(亚)组分基本上可以做到一一对应,不过是在成因和命名规则上有些许区别。因此,掌握国际和国内分类标准差异及其显微(亚)组分对应关系,有助于更有效的国内外煤岩学及其相关研究的交流和推广。鉴于目前国内外分类存异,建议根据研究习惯和交流对象合理选择分类方案,但需要明确不同分类方案下的显微(亚)组分类型。

表 2 国际和国内显微煤岩组分分类标准对比(ICCP system 1994 与 GB/T 15588-2013)

Table 2 Comparison of International and Domestic Classification for coal macerals (ICCP system 1994 and GB/T 15588-2013)

组 GROUP	ICCP 亚组 SUBGROUP	ICCP 显微组分 MACERAL	中国国标 2013 分类中显微(亚)组分
镜质体/镜质组 VITRINITE	结构镜质体 Telovitrinite	镜质结构体 Telinite 胶质结构体 Collotelinite	结构镜质体 1 Telinite1 结构镜质体 2 Telinite2 均质镜质体 Telocollinite
	碎屑镜质体 Detrovitrinite	镜质碎屑体 Vitrodetrinite 胶质碎屑体 Collodetrinite	碎屑镜质体 Vitrodetrinite 基质镜质体 Desmocollinite
	凝胶镜质体 Gelovitrinite	团块凝胶体 Corpogelinite 凝胶体 Gelinite	团块镜质体 Corpogelinite 胶质镜质体 Gelocollinite
惰质体/惰质组 INERTINITE		丝质体 Fusinite 半丝质体 Semifusinite 真菌体 Funginite 分泌体 Secretinite 粗粒体 Macrinite 微粒体 Micrinite 惰质碎屑体 Inertodetrinite	丝质体 Fusinite 半丝质体 Semifusinite 真菌体 Funginite 分泌体 Secretinite 粗粒体 Macrinite 微粒体 Micrinite 碎屑惰质体 Inertodetrinite
类脂体/类脂组/壳质组 LIPTINITE/EXINITE		角质体 Cutinite 木栓质体 Suberinite 孢子体 Sporinite 树脂体 Resinite 渗出沥青体 Exsudatinite 藻类体 Alginite 类脂碎屑体 Liptodetrinite 沥青质体 Bituminite 叶绿素体 Chlorophyllinite	角质体 Cutinite 木栓质体 Suberinite 孢粉体 Sporinite 树脂体 Resinite 渗出沥青体 Exsudatinite 藻类体 Alginite 碎屑壳质体 Liptodetrinite 沥青质体 Bituminite 树皮体 Barkinite 荧光体 Fluorinite

2 显微煤岩组分分析在古野火研究中的应用

在第四纪之前地质时期的燃烧称作古野火事件(许云等,2022),植被的发育情况、气候干湿程度和大气中氧含量决定着野火的发生规模和频率(Brown et al., 2012)。由于古野火火源种类多,燃烧强度大,持续时间长,对生态系统破坏严重,已被列为世界十大自然灾害之一。泥盆纪陆地植被的出现为古野火的发生提供了燃料,久而久之古野火事件的发生与地球系统的演替变得更加密不可分(占长林等,2011)。惰质组,大多由植物组织在野火事件中不完全燃烧而产生,故又称丝炭或者化石木炭,国内外学者将其作为古野火事件的识别标志,分析古野火、成煤时期古气候和动植物群落演替三者之间的内在联系,在一定程度上有助于人类探究当前环境下全球气候变暖和古生物灭绝原因。

2.1 惰质组的物质来源及成因

中国现行国标 GB/T 15588-2013 将惰质组的成因分为 3 个方面:①由木质纤维组织经过丝炭化作用转化而成,这类成因是惰质组显微组分的主要成因,如丝质体、半丝质体等;②小部分来自真菌遗体,如真菌体;③在热演化过程中形成的次生组分,如微粒体。目前学界对于惰质组的成因仍具争议,主要分为野火成因、氧化成因和生物成因 3 类。

(1)野火成因:Schopf(1975)首次提出煤中惰质组是由大火燃烧形成的观点,经后人研究该观点被广泛接受并应用。Stach 等(1982)指出,丝质体和大部分半丝质体主要是由生物质燃料的不完全燃烧形成的。Diessel(2010)认为惰质组主要是野火成因,部分半丝质体有可能源于氧化成因。Scott(2010)认为煤岩显微组分中的惰质组等同于化石木炭。煤中丝质体和半丝质体是惰质组最主要的显微组分,同时也都是古野火的指示物(Glasspool and Scott,2010),丝质体产生于较高温的热火,半丝质体产生于温度较低的冷火,二者反射率差异源于燃烧温度、时间和初始燃烧条件。除丝质体和半丝质体外,极少部分惰质组的显微组分可能并非源于野火成因,但它们的含量占比往往低于 10%(韩德馨和杨起,1980)且对惰质组成因判断的影响微乎其微(Diessel,2010),因此大多使用“惰质组的野火成因”替代“丝质体和半丝质体的野火成因”(邵龙义等,2024)。碎屑惰质体有不同植物组织来源(如植物细胞壁或其填充物、已分解组织中的鞣质、氧化孢子、真菌成分),它们都遭受过一定程度的丝炭化作用,很多碎屑惰质体来源于野火后的泥炭残骸(Goodarzi,1985a,b)。

(2)氧化成因:该观点认为丝质体与半丝质体是在泥炭化作用阶段有机质经强烈氧化蚀变形成的,在氧化过程中脱水、失氧、失氢,从而富含碳,是有机质在泥炭沼泽中经缓慢氧化作用形成的(韩德馨,1996;Moore et al., 1996;Hower et al., 2023)。Stach 等(1982)通过实验发现,在 100℃ 温度条件下结合浓硫酸的作用,不同煤阶煤的镜质组和惰质组反射率均有明显升高,但需要注意的是自然界很难达到该实验的强酸条件,同时氧化丝质体/半丝质体很难保存,且在大多数低阶煤中,惰质组的反射率明显高于镜质组,因此惰质组可能并非由氧化作用产生。

(3)生物成因:研究表明部分粗粒体来源于真菌和细菌的代谢产物,孤立存在的粗粒体的集合体可能来自粪化石(Stach et al., 1982)。O'Keefe 等(2013)认为有一些惰质组是由原始或腐蚀变质后的真菌材料发生生物化学变化而形成的。Guo Yingting 和 Bustin(1998)对被真菌腐蚀的木材和未经腐蚀的木材进行燃烧实验,结果表明真菌并未直接参与木炭或煤中惰质组的形成,两种木材的木炭反射率都随着温度的升高而升高,真菌的参与往往会导致植物物质分解和破碎,提高植物的燃烧效率,进而产生惰质组。

2.2 古野火识别的煤岩学标志

古野火识别的方法包括煤岩学、多环芳烃、植物形态学、碳同位素和孢粉学等。其中煤岩学是含煤地层古野火识别的常用方法,借助煤中惰质组含量、惰质组反射率等参数判别古野火发生的频率、类型和强度。

丝炭(charcoal)或称炭屑、木炭,为生物材料(包括动物和植物体)缺氧时不完全燃烧所形成,它的化学性质极其稳定,因而很容易被沉积地层所保存,被认为是发生古野火的最重要也是最直接的证据,可作为研究古野火的理想标志物(Patterson et al., 1987;Scott and Glasspool,2007;Friis et al., 2010)。沉积物中丝炭以植物木质素起源最为普遍,植物体受到剧烈高温时,组织中纤维素及细胞膜发生分解,生成大量挥发组分,其中包括 CO、CO_2 及 CH_4 等,而这些气体与大气中氧混合后燃烧,发生反应生成热,如果反应因缺氧停止,丝炭将被当作残余固体保存。Scott(2000)将丝炭作为古野火判别最

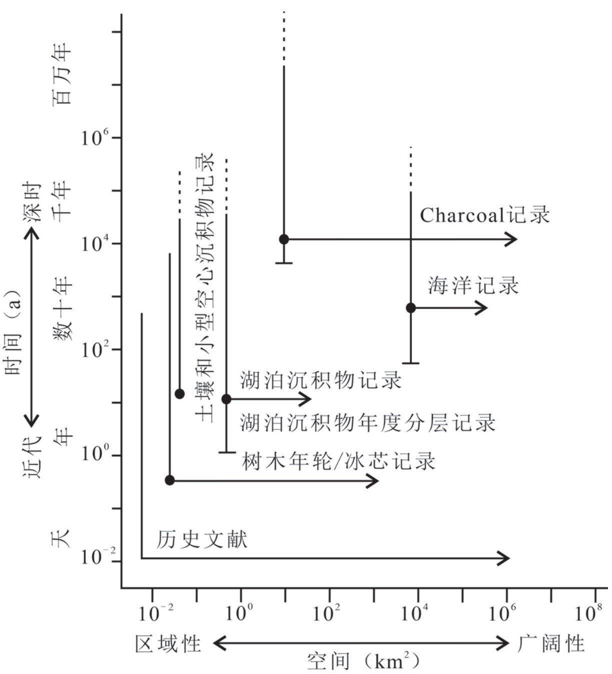

图 1 野火在空间尺度上特征的指示标志

(据 Cope and Chaloner,1980 和 Gavin et al., 2007 修改)

Fig. 1 Sign of wildfire features at spatial scale(modified from Cope and Chaloner, 1980; Gavin et al., 2007)

主要的标志,并将其分为宏观丝炭(>1 mm)、中观丝炭(180 μm~1 mm)和微观丝炭(<180 μm)。后经对比研究认为:宏观和中观丝炭等同于煤中丝质体和半丝质体,微观丝炭等同于泥质岩中的丝质体(Scott,2010)。

野火发生的机制十分复杂,早期研究普遍认同其发生主要受到燃料条件和气候条件的影响。但随着对古野火的深入研究表明,气候与植被燃料所存在的差异对野火发生频率、强度等特征均存在显著影响,因此古野火的发生与发展状态不能仅仅利用现代火灾与植被的联系来解释。由于指示野火标志物的时空分布差异,除了百万年级别的丝炭研究,新的研究方向需要将现代火灾的实验、观测和卫星数据与涵盖千百年尺度的树木年轮记录、跨越千年时间尺度的海洋沉积物、湖泊沉积物、土壤和冰芯记录以及追溯到更早时间的地质档案联系起来(刘恋等,2012;汪青,2012;Kang Shichang et al., 2022)(图 1)。正是由于丝炭的性质稳定,可为具有千年甚至百万年历史的野火评价提供依据(Cope and Chaloner,1980;杜建峰等,2022),国外学者通过对英国志留纪侯墨期地层中的丝炭进行研究,将地球上最早的野火记录约束到约 430 Ma 前(Glasspool and Gastaldo,2022)。基于不同沉积物中野火发生标志物的研究,将今论古,可进一步了解在空间尺度上影响火灾发生和蔓延的因素,如燃料、天气和气候条件,以及植被和气候在构建大陆尺度火灾模式中的作用(Gavin et al., 2007)。

2.3　惰质组分析在古野火研究中的应用

(1)古野火的类型。惰质组反射率可恢复地史时期古野火燃烧温度、燃烧区域与野火类型等特征(Brown et al., 2012),惰质组反射率测定的主要目标是丝质体、半丝质体和碎屑惰质体(图 2a~c)。利用孢粉学计数对惰质组进行定量可推测古野火发生的频率(Clark and Hussey,1996)。惰质组含量可指示野火发生时的植被种类(Han Lei et al., 2023),若惰质组含量占比大而类脂组含量占比小时,指示着成煤时期植被种类主要是灌木、乔木(李鑫,2010;龚清,2015)。研究认为当煤中惰质组含量大于 30%时,可称为“富惰质组煤”,当惰质组含量大于 50%时,称“惰质组煤”,惰质组富集主要是由频繁且强度较低的古野火引起(Zhou Jiamin et al., 2024)。在扫描电镜下,可以根据不同类型炭化植物组织的大致形态和解剖特征进行辨识(图 2d~f),对宏观丝炭的解剖学研究可划分植被的具体种类,对其气孔密度进行圈定可指示古野火发生时大气中的二氧化碳含量,进而确定其对气候变化的影响(Royer,2001;Friis et al., 2006;Wang Shuai et al., 2019)(图 3)。根据燃烧的生态系统和位置,结合野外观察和测量,将野火分为森林野火和更开阔的环境野火(现代通常称为草原火)(Scott, 1989; Petersen,1993;Hui Jianguo et al., 2024)。根据燃烧物质和温度的不同,利用丝质体反射率可以恢复古野火的燃烧温度并确定其类型,森林野火可以分为 3 种类型:地下火、地表火和林冠火(Perrakis et al., 2023;Guo Hanwen et al., 2024)(图 4)。① 燃烧地表落叶层之下有机质的地下火,温度在 300℃左右;② 燃烧地表落叶层、草本植物和灌木的地表火,温度在 600℃左右;③ 燃烧树木树冠和大型灌木的树冠火,温度在 800℃左右,甚至更高(Scott and Jones, 1994; Perrakis et al., 2023; Guo Hanwen et al., 2024)。Jones(1997)最早得出了惰质组反射率与形成温度之间的非线性对应关系并沿用至今,燃烧温度大致可以通过公式进行计算(Guo and Bustin, 1998; Sellwood and Valdes, 2008; Petersen and Lindström,2012):

$$T = 184.10 + 117.76R_o(r^2 = 0.91)$$

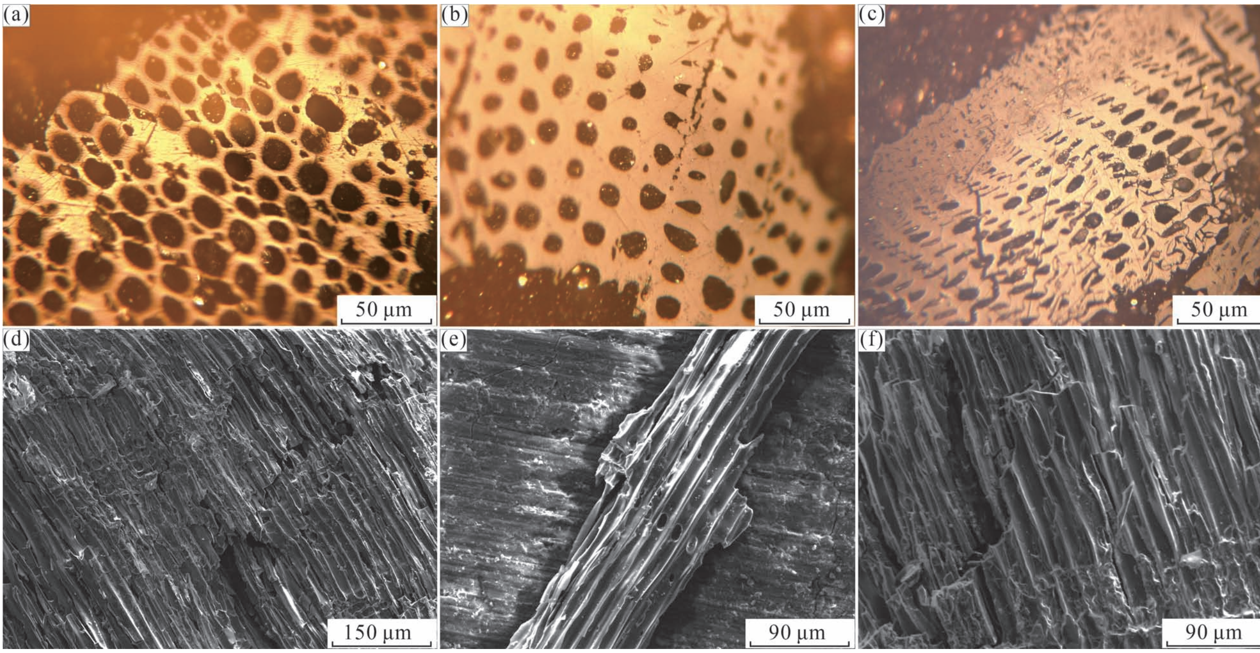

图 2 新疆准噶尔盆地南部郝家沟剖面典型丝质体显微镜下与扫描电镜特征图

Fig. 2 Typical characteristics of fusinite under microscopy and scanning electron microscopy from the Haojiagou section in the southern Junggar Basin, Xinjiang

(a)丝质体,上三叠统郝家沟组,准噶尔盆地南缘,偏光显微镜;(b)、(c)丝质体,下侏罗统八道湾组,准噶尔盆地南缘,偏光显微镜;(d)—(f)丝质体纵切面的植物细胞和管腔,下侏罗统八道湾组,准噶尔盆地南缘,扫描电镜

(a) fusinite, Upper Triassic Haojiagou Formation, southern Junggar Basin, polarizing microscope; (b), (c) fusinite, Lower Jurassic Badaowan Formation, southern Junggar Basin, polarizing microscope; (d)—(f) cross-sectional view of plant cells and spore cavity of fusinite, Lower Jurassic Badaowan Formation, southern Junggar Basin, scanning electron microscope

近年来有部分学者依据不同参数建立了修正模型(Yan Zhiming et al., 2019):

$$T = 224.53+94.57R_o\ (r^2=0.9606)$$

其中,T 为惰质组形成时的温度;R_o 为所测得煤的惰质组反射率;r^2 是相关系数。

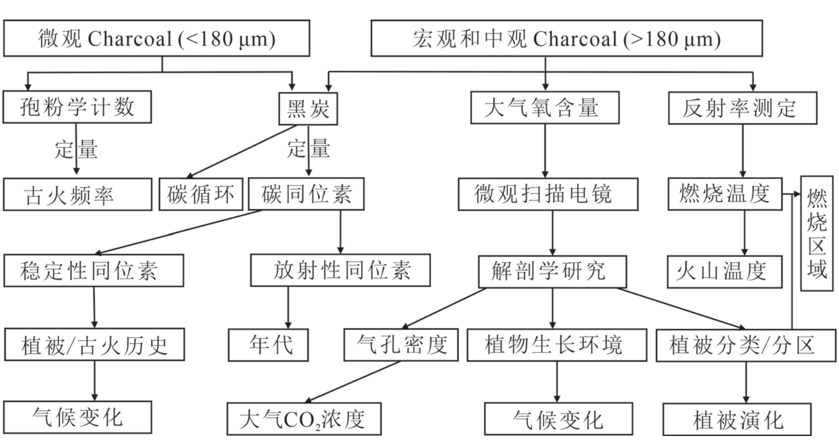

图 3 Charcoal 的研究方法和应用领域(据 Scott,2010;许云,2019 修改)

Fig. 3 Research methods and application fields of charcoal (modified from Scott,2010; Xu Yun,2019&)

利用惰质组反射率判别古野火类型的研究在不同地区不同层位均有体现(Wang Shuai et al., 2019;杨博等,2022)。鄂尔多斯盆地中侏罗统煤层中的惰质组反射率测量结果为 0.657~1.494%,对应野火的燃烧温度为 261~360℃(Zhang Zhihui et al., 2020),古野火类型以低温的地下火和地表火为主(许云等,2022);新疆准噶尔盆地南缘中侏罗统西山窑组煤岩学分析结果证实野火普遍存在,且大多数野火是低水平地表火和高水平地下火(Hou Haihai et al., 2022),准噶尔盆地东部中侏罗统煤层惰质组含量及其反射率等特征反映出该煤层沉积过程中至少经历了 3 次野火频繁期,且以中低温地下火为主(杨博等,2022),新疆大龙口地区木炭化石的反射率测定结果反映出该区古野火发生的层位及古环境信息(蔡垚峰,2019);东北地

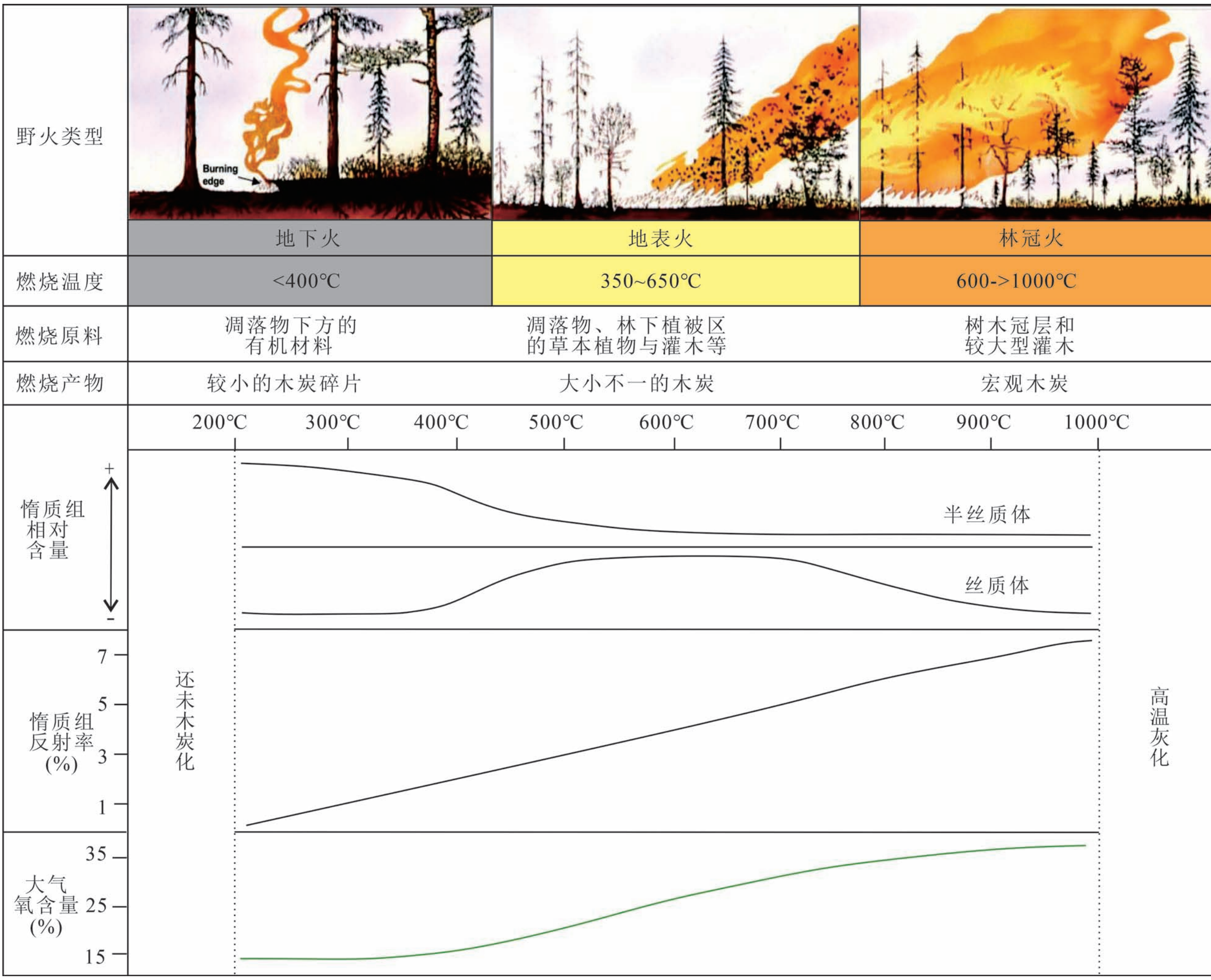

图 4 野火类型及特征(据 Scott et al., 2014 和邵龙义等,2024 修改)

Fig. 4 Wildfire type and characteristics(modified from Scott et al., 2014; Shao Longyi et al., 2024&)

区早白垩世古野火以地表火为主(Wang Shuai et al., 2019);依据平顶山煤田下二叠统山西组煤的惰质组反射率测量结果,推断出古野火以低温和中温的地表火为主(Gao Di et al., 2023)。印度古尔哈褐煤矿的古近纪褐煤及其伴生沉积物的惰质组含量及反射率测定结果表明,该研究区古野火燃烧温度介于 300~798℃,相对应的野火类型主要为地下火,其次为地表火和林冠火(Shukla et al., 2023);瑞士及丹麦三叠系和侏罗系界线处样品的惰质组反射率测量和孢粉学数据表明,界线前期沼泽野火以高温林冠火为主,晚期的沼泽野火更频繁,但以较低温地表火为主(Petersen and Lindström, 2012)。综上,显微煤岩组分分析在揭示野火事件及其古气候之间的响应关系方面有着显著成效(Page et al., 2002;Wolbach et al., 2003),且研究古野火对古气候的影响对如何应对当前环境下全球气候变暖具有重要的指示性意义。

(2)古大气含氧量的厘定。野火的产生主要受热量、燃料、大气含氧量以及大气水分的影响(Glasspool et al., 2015)。关于着火的临界氧气条件此前已有诸多学者进行了相关研究,在不同的时空尺度和观测建模下,不同学者提出的着火点氧气含量稍有不同,现在大部分学者认为可供燃烧的最低氧含量为 15%(Pausas and Keeley,2009;张新智等,2022)。当氧气含量高于 35%时,植物几乎能在一切状态下被点燃且完全燃烧(Pausas and Keeley, 2009)。当氧气水平在高于 18.5%时野火可处于蔓延趋势,而当氧气含量低于 18.5%时,野火活动将被显著抑制,并且在低于 16%时趋于停止(Belcher and McElwain, 2008)。当今大气氧气含量大约是

21%,且经研究发现显生宙时期大气氧含量发生过明显的波动(Clark et al., 1996;Scott and Glasspool, 2006)。大陆植被是一种潜在的燃料来源,但其水分含量的异质性决定了其易燃性(Watson and Lovelock,2013)。在大多数情况下,燃料的水分需要首先排出才能点燃,因此含水量较高的燃料需要更长的加热时间。根据丝炭记录,燃料燃烧需要16%至30%的氧含量。当氧含量低于16%时,即使燃料的水分含量很低,它也不会被点燃。相反,高氧水平可以促进高湿度燃料的燃烧(Watson and Lovelock,2013)。

深时地质时期的大气氧含量厘定主要依靠模型计算。前人根据有机物和海洋碳酸盐的碳同位素记录对古氧含量进行了估算,推测出侏罗纪氧气水平低于16%,在如此低氧气含量水平下燃烧是很困难的(Belcher et al., 2010),这与当时惰质组的大量存在以及野火大范围频繁燃烧的证据相悖。国外学者根据修订后的预测模型,计算出侏罗纪大气氧含量水平范围为20%~27%(Millspaugh and Whitlock, 1995)。Glasspool 和 Scott(2010)根据惰质组含量计算400 Ma以来的大气氧含量(氧气的体积分数),并基于大量相关数据修正完善模型,建立了惰质组与氧含量的线性关系:

$$I = 0.5 - 0.5\cos\left\{\frac{\pi[V(O_2) - V(O_2)_{min}]}{[V(O_2)_{max} - V(O_2)_{min}]^n}\right\}$$
$$[V(O_2)_{min} < V(O_2) < V(O_2)_{max}]$$

基于此公式,重新计算了晚古生代的大气氧含量,氧含量在乌拉尔世(早二叠世)中—晚期达到最大值28%(Glasspool et al., 2015)。其中 I 是惰质组含量,$V(O_2)$ 是大气氧含量(氧气的体积分数),$V(O_2)_{min}$ 是惰质组含量为0时的大气氧含量,$V(O_2)_{max}$ 是惰质组含量达到100%时的大气氧含量,n 是控制s曲线的最大陡度。有多位学者利用此模型对研究区煤样中的惰质组含量进行研究,厘定出了多个地区成煤时期的大气氧含量,如云南晚二叠世的大气氧含量为28%(Shao Longyi et al., 2012);华北盆地以南的平顶山煤田下二叠统山西组古大气含氧量为24.29%(Gao Di et al., 2023);东北早白垩世阿尔布阶和阿普特阶的大气氧含量分别为24.7%和25.3%(Wang Shuai et al., 2019);鄂尔多斯盆地中侏罗统阿林阶成煤时期的大气氧含量约为29%(Zhang Zhihui et al., 2020);新疆准南中侏罗统西山窑组下段、中段和上段的无矿物基平均惰质组含量分别为40.5%、22.6%和16.1%,对应西山窑组下部、中部、上部氧含量依次为26.78%、24.55%和23.55%(Hou Haihai et al., 2022)。

3 古野火事件对古生态系统的影响

古往今来,野火事件在全球范围均有不同程度的频发,作为地球历史的积极参与者,极大的影响着古今全球气候、动植物演化、生态循环以及元素的分布变迁,现代野火更是严重的影响了人类的社会经济活动和生命安全。野火与生态系统之间的存在显著的正反馈关系,厘清野火生态效应在全球气候变暖、生物大灭绝等方面具有重大指示意义。

(1)野火与植物的相互影响。野火对植物的生长环境、种群组成和发育结构有重大影响。野火事件的频发摧毁植被,同时释放出了大量排放物,能够引发地区生态系统的跳跃或倒退演化,严重破坏着地表植物生态群落原有的演替进程,还在一定程度上影响着植物多样性和部分植物器官的演化方式(Belcher and McElwain,2008)。Archibald 等(2018)指出仅通过对气候和土壤的研究不足以解释野火和植被的演化模式,由此重新建立了"植物特征如何影响生态系统可燃性的概念框架"(图5)。野火发生机制受生态系统可燃性和气候条件影响,就长时间尺度而言,生物圈演化和大气圈碳元素、磷元素分别控制着植被分布和大气成分,大气成分不仅能够影响燃料的可燃性,还会影响植被的生长状态,各种因素相互反馈影响着野火的发生机制;较短时间尺度而言,动植物群落的分布决定了野火燃烧燃料的数量,野火在燃烧时会释放出大量的温室气体和气溶胶等排放物(Burazer et al., 2020;胡海清等,

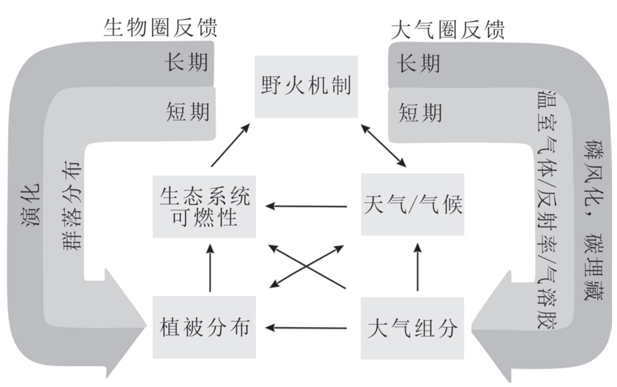

图5 野火对大气圈和生物圈的影响
(据 Archibald et al., 2018 修改)
Fig. 5 Impact of wildfire activities on the atmosphere and biosphere processes(modified from Archibald et al., 2018)

2020;高仲亮等,2021),前者会使全球温室效应加剧,后者则会导致大气的反射改变或是增大叶片气孔导度、增强植被光合作用,从而直接或间接地参与到常见元素(碳、氧)的自然循环中(图 5)(Kump, 1988; Lenton and Watson, 2000;张原等,2024),进而影响野火的燃烧机制。无论是长期还是短期效应,野火都通过生物圈和大气圈进行能量和物质交换以及生物群落演替和进化发挥作用。植物与野火之间存在着相互演化关系,植被对野火的耐受程度随着植物的进化发生改变,从晚古生代开始植物—野火相互作用的演变过程可以概括为不耐火—可以抵御火—需要火(Glasspool et al., 2015),如现代桉树能够适应高频野火环境,在很大程度上与其在白垩纪到古近纪长时间频繁发生野火演替有关(Brown et al., 2012)。反过来植被的易燃性又可以改变野火状态,且在一定程度上影响着全球生物地球化学过程,如美国夏威夷野火燃烧程度愈渐剧烈,这与该岛上植被干旱程度的增加有关。

(2)野火与动物的相互影响。野火对动物的影响可分为直接影响和间接影响,其中直接影响是烧死动物或燃烧释放有毒气体使动物窒息死亡,造成动物的数量和种类的改变进而影响动物的多样性和演替进程(Russell and Tomeček, 2016),如澳大利亚 2019 年的特大规模野火持续了 7 个月,超过 12.5 亿只动物葬生于此,近 100 种动物面临着灭绝的风险(Deb et al., 2020)。高泰(2023)基于云南松林火灾后鸟类多样性和演替进程研究,发现高强度火会显著降低鸟类的多样性,干扰体型较大鸟类、食种鸟类、地面筑巢鸟类的多样性,显著降低杂食性、食花性、食虫性鸟类、灌丛筑巢等鸟类的多样性。间接影响体现在野火影响陆生动物生存的地区气候,烧焦的植被和土地对该地区的热量吸收和动物的分布有影响;野火燃烧减少溪边植被,增加水底沉积物,水温提高往往使水生动物栖息地恶化,增加疫病感染率,这些都间接地影响动物的生存环境(Russell and Tomeček, 2016)。

动物对野火的影响作用极其细微,只在某种特定的条件下对野火能起到促进或阻碍作用。野生动物的生活、栖息、取食等自身生态活动可导致易燃性因素增加,部分动物的活动与习性可影响野火的发生,即改变野火的燃料数量和形式、燃烧区域和状态以及直接或间接参与燃料的生成和分解等方面(Foster et al., 2020)。如"火鹰"为捕食到猎物,会将燃烧的树枝叼到未燃烧区域使猎物跑出,从而扩大野火燃烧区域(Bonta et al., 2017);鹿、麋等草食性动物进食林下植物和枯枝落叶可减少可燃物容量从而抑制野火的发生;动物行走时所踩出的凹陷又可以帮助防火带的建立,阻碍野火的蔓延。

(3)野火与古生态系统的相互影响。规模大、持续时间长的野火事件对动植物和气候产生重要影响,而气候的变化又会影响生态系统。野火产生的烟雾颗粒主要由有机碳(OC)和黑碳(BC)组成,OC 由于经历光化学反应,其寿命很短,只有几个小时(Forrister et al., 2015),BC 难降解,其光吸收更持久,烟雾中的 BC 质量分数决定着烟羽上升的速度。一项模拟研究发现(Mills et al., 2008),核武器爆炸引发火灾中产生的 BC 加热了空气,并将大量的水蒸气输送到平流层上层,破坏了平流层的臭氧(图 6),这不仅会改变地球的辐射平衡,还可能加剧全球气候的变暖。相较于图 5 中的长期—短期机制而言,图 6 则具体地展示了野火燃烧的短期效应机制,野火燃烧后释放的温室气体、气溶胶等物质进入大气圈层,加剧温室效应并使得臭氧层被破坏,促进植物进行光合作用产生氧气,同时由于 C、N、P、S 等元素的加入提高了水体初级生产力,使得大气氧含量升高,为野火燃烧提供了正反馈。如东南亚热带森林地区于 1997 年发生的野火,共释放了约 0.08~0.252 Gt 的 CO_2(Page et al., 2002),巨量的温室气体造成了气候变暖,气候变化导致了海洋的富铁营养化,从而使印度洋上的珊瑚礁大量死亡。野火是造成史前数次生物大灭绝的主控因素(Shao Longyi et al., 2012;方琳浩等,2022;侯海海等,2023;Zhang Peixin et al., 2023),如二叠纪—三叠纪、白垩纪—古近纪之交由火山活动引发的全球性的野火造成了陆生和水生生物大灭绝,它不仅改变了陆生植物的演替和物种多样性,还造成了水生需氧生物的覆灭和生态系统的恶化(Zhang Peixin et al., 2023)。

野火事件的频繁发生会对地球系统造成长期的影响,遭受野火灼烧过后的土壤更容易被剥蚀搬运,地表土壤内的磷元素随着径流进入海水,使得海洋初级生产力提高,进而促进氧含量的持续上升,最终致使野火更易产生(Berner, 2023)。各个圈层间的循环是影响地球系统的先决条件,目前研究证实野火事件对气候与生态环境的影响极大,且两者的周期性变化是它们相互制约的结果(Bowman et al., 2009),在某种程度上可认为野火的发生实际上是对极端气候如高温或干旱的响应(吕大炜等,2024)。植被的生长演化也与野火和气候存在相关

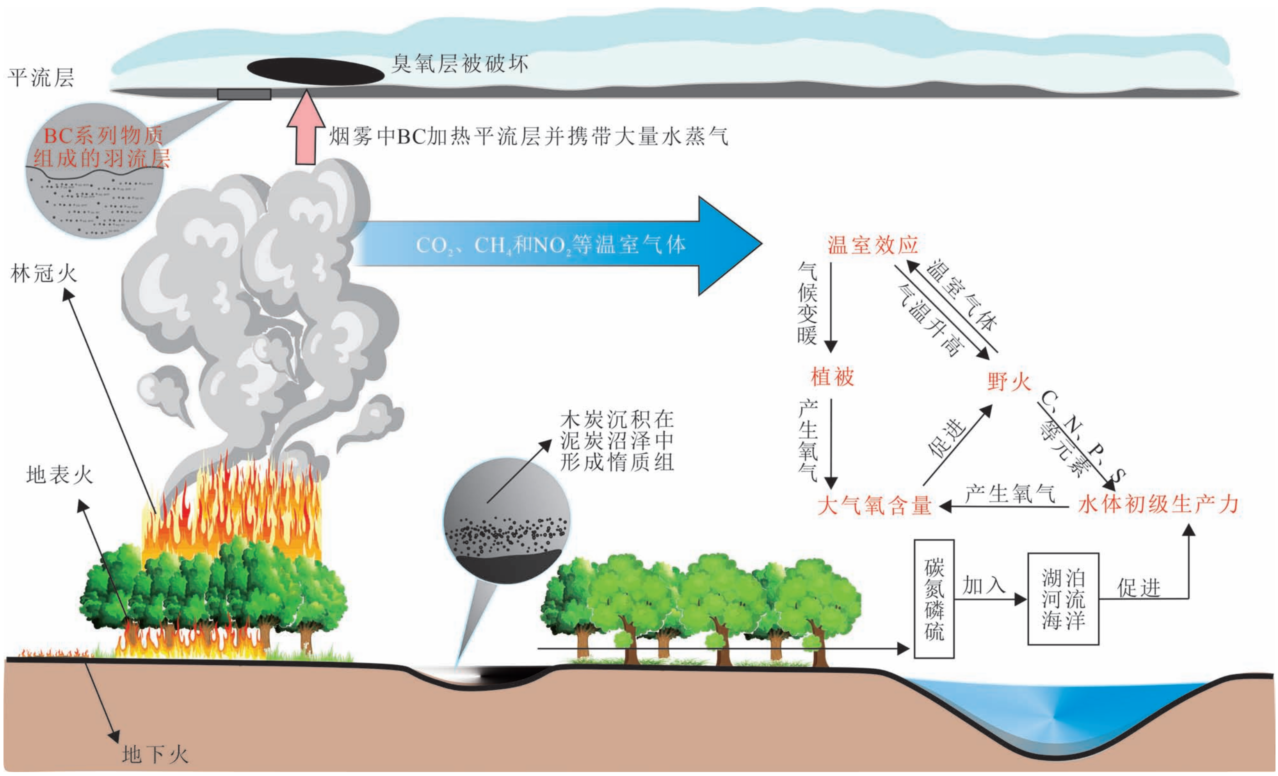

图 6 野火对气候的影响及其与生态系统破坏正反馈模式图(据 Schach at et al., 2018 和 Yu Pengfei et al., 2019 修改)

Fig. 6 Wildfire effects on climate and its ecosystem destruction positive feedback pattern

(modified from Schachat et al., 2018; Yu Pengfei et al., 2019)

性。首先,在燃烧过程中植被体内的碳、氮等元素会转化到所形成的温室气体中,根据气候模拟结果显示,当大气 CO_2 含量增加一倍时未来 100 年气温增幅达到 1.4℃~5.8℃(Griggs and Noguer,2002)。其次,当气候受野火影响,由先前转为不适宜植被生长条件时,野火的燃料数目将会随之减少,可燃物载量的变化又会制约野火发生的强度、持续时间及频率。

4 结论和展望

(1)与“ICCP system 1994”分类相比较,我国烟煤显微煤岩组分分类方案既有特色,也有差异。特色主要体现在类脂组中的树皮体和荧光体等特有的显微亚组分分类,国内外现行分类方案的差异主要体现在分类依据、分类原则、3 种显微组分组的具体定义等 3 个方面。建议进一步掌握国际和国内分类标准差异及其显微(亚)组分对应关系,根据研究习惯和交流对象合理选择分类方案。

(2)显微煤岩组分的成因分类推进了成煤期古野火及其古生态的深入研究。古野火事件与古生态演化变迁关联密切,在生物大灭绝与全球极端气候响应等方面扮演重要角色。显微煤岩组分分析作为古野火特征评价的有效手段,可通过惰质组反射率的大小推算燃烧温度从而判断古野火发生强度及类型;借助惰质组含量可推算出古氧气含量,从而进一步分析古气候演变条件。

(3)野火燃烧会释放出大量的温室气体和气溶胶等排放物,严重影响了古大气和动植物生存环境,从而进一步威胁着生态系统,而生态系统的改变又会制约野火发生的强度、持续时间及野火频率发生变化,因此野火与生态系统之间存在着相互影响和制约的关系,在此基础上提出了野火和生态系统的正反馈模式。

(4)不同成煤期、不同纬度带显微煤岩组分分析及其反映的古野火数据还需要进一步丰富,构建大数据驱动下的全球惰质组时空分布数据库。在全球极端气候事件频发背景下,借助现代野火与生态气候的反馈机制,结合跨越千年时间尺度的树木年轮记录、海洋沉积物、湖泊沉积物、土壤和冰芯记录,对比分析现代火灾与古野火发生机制,量化不同因素的相对重要性,更好地阐明并预测未来由于气候

变化导致的野火频率和强度。

参 考 文 献 / References

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

蔡垚峰. 2019. 新疆和华南二叠纪——三叠纪之交的野火事件. 导师：张华. 合肥：中国科学技术大学硕士学位论文：1~96.

代世峰，刘晶晶，唐跃刚，姜尧发，任德贻，赵峰华，邵龙义，赵蕾. 2021a. 煤的显微组分定义与分类(ICCP system 1994)解析Ⅲ：腐植体. 煤炭学报，46(8)：2623~2636.

代世峰，唐跃刚，姜尧发，刘晶晶，任德贻，赵峰华，王西勃. 2021b. 煤的显微组分定义与分类(ICCP system 1994)解析Ⅰ：镜质体. 煤炭学报，46(7)：1821~1832.

代世峰，赵蕾，唐跃刚，任德贻，魏强，姜尧发，刘晶晶，赵峰华. 2021c. 煤的显微组分定义与分类(ICCP system 1994)解析Ⅳ：类脂体. 煤炭学报，46(9)：2965~2983.

杜建峰，王宁练，李建勇，李书恒，张玉柱，陈小俊，牛地园. 2022. 洛阳盆地全新世炭屑记录及其古环境意义. 第四纪研究，42(2)：383~396.

方琳浩，彭博，邓胜徽，卢远征，张新智，邱若原，彭佳里，张小宇，鲜本忠，师生宝. 2022. 塔里木盆地库车河剖面有机碳同位素地层学及三叠系—侏罗系界线. 沉积学报，40(6)：1635~1648.

高泰. 2023. 云南松林不同火烧强度对鸟类群落影响的时空效应. 导师：王荣兴. 大理：大理大学硕士学位论文：1~60.

高仲亮，魏建珩，龙腾腾，李智，周汝良，舒立福，王秋华. 2021. 气候变化背景下云南松林火灾害的响应规律研究. 西部林业科学，50(1)：12~18.

龚清. 2015. 准噶尔盆地南缘和东缘地区侏罗系沉积特征及构造背景. 导师：周洪瑞. 北京：中国地质大学(北京)硕士学位论文：1~83.

韩德馨，杨起. 1980. 中国煤田地质学——下册——中国聚煤规律. 北京：煤炭工业出版社：1~415.

韩德馨. 1996. 中国煤岩学. 徐州：中国矿业大学出版社：1~21.

侯海海，张华杰，邵龙义，高莲凤，刘书君. 2023. 三叠纪末期全球生物大灭绝事件研究综述. 地质论评，69(4)：1434~1448.

胡海清，罗碧珍，罗斯生，魏书精，王振师，李小川，刘菲. 2020. 林火干扰对森林生态系统碳库的影响研究进展. 林业科学，56(4)：160~169.

姜寿恕，赵德博，唐艺，李梦君，万世明. 2023. 沉积物中黑碳在古环境古气候研究中的应用. 海洋地质与第四纪地质，43(5)：119~135.

孔维璐. 2021. 煤岩显微组分对 CO_2 的吸附特性及其调控方法研究. 导师：张文军. 徐州：中国矿业大学硕士学位论文：1~83.

李鑫. 2010. 新疆准东煤田中部矿区中侏罗统西山窑组层序地层分析及聚煤规律研究. 导师：庄新. 武汉：中国地质大学硕士学位论文：1~57.

刘恋，周鑫，葛俊逸. 2012. 元素碳碳同位素在古环境研究中的应用. 地质论评，58(3)：526~532.

吕大炜，徐锦程，张之辉，高洁，杜文旭，张奥聪，王东东. 2024. 石炭纪全球野火事件分布及主控因素. 地质学报，98(6)：1893~1903.

邵龙义，周家民，Jones T P，华芳辉，徐小涛，闫志明，侯海海，王东东，鲁静. 2024. 煤中惰质组及其古环境意义：来自 AI 和大数据分析的启示. 中国科学：地球科学，54(6)：1806~1829.

史航，靳立军，魏宝勇，王明义，王德超，胡浩权. 2019. 大柳塔煤及显微组分在不同气氛下的热解行为. 煤炭学报，44(1)：316~322.

汪青. 2012. 土壤和沉积物中黑碳的环境行为及效应研究进展. 生态学报，32(1)：293~310.

王佟，张博，王庆伟，江涛. 2017. 中国绿色煤炭资源概念和内涵及评价. 煤田地质与勘探，45(1)：1~8+13.

王震，刘明明，郭海涛. 2016. 中国能源清洁低碳化利用的战略路径. 天然气工业，36(4)：96~102.

吴天才，李斐洋，于洋，马永祥. 2022. 煤炭显微煤岩组分与工业分析关系研究. 中国煤炭地质，34(1)：13~17+56.

许浩，汤达祯. 2016. 基于煤层气产出的煤岩学控制机理研究进展. 煤炭科学技术，44(6)：140~145+158.

许云，张宁，赵存良，梁汉东，孙玉壮. 2022. 鄂尔多斯盆地侏罗纪煤中古野火事件及其对古气候的影响. 中国地质，49(2)：643~654.

许云. 2019 中国西北地区中侏罗世煤中古野火证据及对古气候的影响. 导师：梁汉东. 北京：中国矿业大学(北京)博士学位论文：1~126.

杨博，田继军，冯烁，杨金辉，李勇泽. 2022. 准噶尔盆地东部中侏罗世煤中记录的古野火事件. 煤炭科学技术，50(7)：261~270.

占长林，曹军骥，韩永明，安芷生. 2011. 古火灾历史重建的研究进展. 地球科学进展，26(12)：1248~1259.

张潇，黄康有，贾鑫，万秋池，汤永杰，陈聪，郑卓. 2024. 末次冰期以来中国西南地区火灾活动历史及其对植被生态系统的影响. 第四纪研究，44(1)：59~71.

张新智，吕沛宗，方琳浩，杨涵，邓胜徽，卢远征，房亚男，张小宇，黄汝婷，梁佳宝，师生宝. 2022. 三叠纪—侏罗纪之交准噶尔盆地南缘野火记录及全球对比. 沉积学报，40(2)：473~483.

张原，梁尔源，汪涛，朴世龙. 2024. 火山喷发对陆地植被与碳循环影响的研究进展. 科学通报，69(2)：160~168.

赵云鹏，胡浩权，靳立军，魏贤勇. 2019. 矿物质对不同还原程度煤显微组分半焦燃烧特性影响. 化工学报，70(8)：2946~2953.

周晋辉，郭晓阳，赵博，金智新，邓存宝，刘继勇，王蒙. 2024. 煤岩体系微观组分及孔隙结构对甲烷吸附的影响研究. 矿业安全与环保，51(1)：51~60+69.

Archibald S，Lehmann C E R，Belcher C M，Bond W J，Bradstock R A，Daniau A L，Dexter K G，Forrestel E J，Greve M，He T，Higgins S I，Hoffmann W A，Lamont B B，McGlinn D J，Moncrieff G R，Osborne C P，Pausas J G，Price O，Ripley B S，Rogers B M，Schwilk D W，Simon M F，Turetsky M R，Van der Werf G R，Zanne A E. 2018. Biological and geophysical feedbacks with fire in the Earth system. Environmental Research Letters，13(3)：033003.

Belcher C M，Mander L，Rein G，Jervis F X，Haworth M，Hesselbo S P，Glasspool I J，McElwain J C. 2010. Increased fire activity at the Triassic/Jurassic boundary in Greenland due to climate-driven floral change. Nature Geoscience，3：426~429.

Belcher C M，McElwain J C. 2008. Limits for combustion in low O_2 Redefine paleoatmospheric predictions for the Mesozoic. Science，321(5893)：1197~1200.

Berner R A. 2003. The rise of trees and their effects on Paleozoic atmospheric CO_2 and O_2. Comptes Rendus Geoscience，335(16)：1173~1177.

Bonta M，Gosford R，Eussen D，Ferguson N，Loveless E，Witwer M. 2017. Intentional fire-spreading by "firehawk" raptors in northern Australia. Journal of Ethnobiology，37(4)：700.

Bowman D M J S，Balch J K，Artaxo P，Bond W J，Carlson J M，Cochrane M A，Pyne S J. 2009. Fire in the Earth system. Science，324(5926)：481~484.

Brown S A E，Scott A C，Glasspool I J，Collinson M E. 2012. Cretaceous wildfires and their impact on the Earth system.

Cretaceous Research, 36: 162~190.

Burazer N, Šajnovć A, Vasić N, Kašanin-Grubin M, Životić D, Mendonça Filho J G, Vulić P, Jovančićević B. 2020. Influence of paleoenvironmental conditions on distribution and relative abundance of saturated and aromatic hydrocarbons in sediments from the NW part of the Toplica basin, Serbia. Marine and Petroleum Geology, 115: 104252.

Cai Yaofeng. 2019&. Wildfire events in Xinjiang and South China at the turn of Permian—Triassic. Hefei: University of Science and Technology of China Master Thesis.

Clark J S, Hussey T C. 1996. Estimating the mass flux of charcoal from sedimentary records: Effects of particle size, morphology, and orientation. The Holocene, 6(2): 129~144.

Clark J S, Hussey T, Royall P D. 1996. Presettlement analogs for Quaternary fire regimes in eastern North America. Journal of Paleolimnology, 16(1): 79~96.

Cope M J, Chaloner W G. 1980. Fossil charcoal as evidence of past atmospheric composition. Nature, 283(5748): 647~649.

Dai Shifeng, Liu Jingjing, Tang Yuegang, Jiang Yaofa, Ren Deyi, Zhao Fenghua, Shao Longyi, Zhao Lei. 2021a&. An in-depth interpretation of definition and classification of macerals in coal (ICCP system 1994) for Chinese researchers, Ⅲ: Huminite. Journal of China Coal Society, 46(8): 2623~2636.

Dai Shifeng, Zhao Lei, Tang Yuegang, Ren Deyi, Wei Qiang, Jiang Yaofa, Liu Jingjing, Zhao Fenghua. 2021c&. An in-depth interpretation of definition and classification of macerals in coal (ICCP system 1994) for Chinese researchers, Ⅳ: Liptinite. Journal of China Coal Society, 46(9): 2965~2983.

Dai Shifeng, Tang Yuegang, Jiang Yaofa, Liu Jinjin, Ren Deyi, Zhao Fenghua, Wang Xibo. 2021b&. An in-depth interpretation of definition and classification of macerals in coal (ICCP system 1994) for Chinese researchers, I: Vitrinite. Journal of China Coal Society, 46(6): 1821~1832.

Deb P, Moradkhani H, Abbaszadeh P, Kiem A S, Engström J, Keellings D, Sharma A. 2020. Causes of the widespread 2019~2020 Australian bushfire season. Earth's Future, 8(11): e2020EF001671.

Degani-Schmidt I, Guerra-Sommer M, de Oliveira Mendonça J, Mendonça Filho J G, Jasper A, Cazzulo-Klepzig M, Iannuzzi R. 2015. Charcoalified logs as evidence of hypautochthonous/autochthonous wildfire events in a peat-forming environment from the Permian of southern Paraná Basin (Brazil). International Journal of Coal Geology, 146: 55~67.

Diessel C F K. 2010. The stratigraphic distribution of inertinite. International Journal of Coal Geology, 81(4): 251~268.

Du Jianfeng, Wang Ninglian, Li Jianyong, Li Shuheng, Zhang Yuzhu, Chen Xiaojun, Niu Diyuan. 2022&. Charcoal records of Holocene loess—soil sequences and palaeoenvironmental significance in the Luoyang basin. Quaternary Sciences, 42(2): 383~396.

El Atfy H, Anan T, Jasper A, Uhl D. 2019. Repeated occurrence of palaeo-wildfires during deposition of the Bahariya Formation (early Cenomanian) of Egypt. Journal of Palaeogeography, 8(1): 1~14.

Fang Linhao, Peng Bo, Deng Shenghui, Lu Yuanzheng, Zhang Xinzhi, Qiu Ruoyuan, Peng Jiali, Zhang Xiaoyu, Xian Benzhong, Shi Shengbao. 2022&. Organic carbon isotope stratigraphy in the kuqa river section, Tarim Basin, and the corresponding Triassic—Jurassic boundary. Acta Sedimentologica Sinica, 40(6): 1635~1648.

Forrister H, Liu Jiumeng, Scheuer E, Dibb J, Ziemba L, Thornhill K L, Anderson B, Diskin G, Perring A E, Schwarz J P, Campuzano-Jost P, Day D A, Palm B B, Jimenez J L, Nenes A, Weber R J. 2015. Evolution of brown carbon in wildfire plumes. Geophysical Research Letters, 42(11): 4623~4630.

Foster C N, Banks S C, Cary G J, Johnson C N, Lindenmayer D B, Valentine L E. 2020. Animals as agents in fire regimes. Trends in Ecology & Evolution, 35(4): 346~356.

Friis E M, Pedersen K R, Crane P R. 2006. Cretaceous angiosperm flowers: Innovation and evolution in plant reproduction. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 232(2~4): 251~293.

Friis E M, Pedersen K R, Crane P R. 2010. Cretaceous diversification of angiosperms in the western part of the Iberian Peninsula. Review of Palaeobotany and Palynology, 162(3): 341~361.

Gao Di, Guo Huiling, Wang Juan, Shi Yi, Chen Di. 2023. Paleo-wildfires and their paleoclimatic effects in early Permian coal in the southern North China Basin. ACS Omega, 8(27): 24210~24217.

Gao Tai. 2023&. Spatio—temporal effects of fire severity on avian community in a Pinus yunnanensis forest. Supervisor: Wang Rongxing. Dali: Master Degree Dissertation of Dali University: 1~60.

Gao Zhongliang, Wei Jianheng, Long Tengteng, Li Zhi, Zhou Ruliang, Shu Lifu, Wang Qiuhua. 2021&. Response law of forest fire disasters of pinus yunnanensis under of climate change. Journal of West China Forestry Science, 50(1): 12~18.

Gavin D G, Hallett D J, Hu Feng sheng, Lertzman K P, Prichard S J, Brown K J, Lynch J A, Bartlein P, Peterson D L. 2007. Forest fire and climate change in western North America: Insights from sediment charcoal records. Frontiers in Ecology and the Environment, 5(9): 499~506.

Glasspool I J, Gastaldo R A. 2022. Silurian wildfire proxies and atmospheric oxygen. Geology, 50(9): 1048~1052.

Glasspool I J, Scott A C, Waltham D, Pronina N, Shao Longyi. 2015. The impact of fire on the Late Paleozoic Earth system. Frontiers in Plant Science, 6: 756.

Glasspool I J, Scott A C. 2010. Phanerozoic concentrations of atmospheric oxygen reconstructed from sedimentary charcoal. Nature Geoscience, 3: 627~630.

Gong Qing. 2015&. Sedimentary characteristics and tectonic setting of Jurassic in southern and eastern margin of Junggar basin. Beijing: China University of Geosciences Master Thesis.

Goodarzi F. 1985a. Organic petrology of Hat Creek coal deposit No. 1, British Columbia. International Journal of Coal Geology, 5(4): 377~396.

Goodarzi F. 1985b. Optically anisotropic fragments in a Western Canadian subbituminous coal. Fuel, 64(9): 1294~1300.

Griggs J D, Noguer M. 2002. Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Weather, 57(8): 267~269.

Guo Hanwen, Kong Linyi, Gao Yunji, Xiang Dong, Li Zhisheng, Gong Liang, Zhang Yuchun. 2024. Transition from surface fire to crown fire and effects of crown height, moisture content and tree flower. Fire Technology, 60(2): 1403~1419.

Guo Yingting, Bustin R M. 1998. FTIR spectroscopy and reflectance of modern charcoals and fungal decayed woods: Implications for studies of inertinite in coals. International Journal of Coal Geology, 37(1~2): 29~53.

Han Dexin, Yang Qi. 1980#. China Coalfield Geology-Volume II——China Coal Accumulation Law. Beijing: China Coal Industry Publishing House: 1~415.

Han Dexin. 1996#. Coal petrolgy of China. Xuzhou, China: China

University of Mining & Technology Press: 1~21.
Han Lei, Wu Guangtao, Sun Bainian. 2023. Evidence of palaeo-wildfire during the Early Cretaceous: Macro-charcoal from the chijinpu formation (early aptian) of Northwestern China. Historical Biology: 1~12.
Hou Haihai, Shao Longyi, Liang Guodong, Tang Yue, Zhang Huajie, Zhang Jiaqiang. 2022. Repeated wildfires in the Middle Jurassic xishanyao formation (aalenian and bajocian ages) in Northwestern China. Acta Geologica Sinica —— English Edition, 96(5): 1752~1763.
Hou Haihai, Zhang Huajie, Shao Longyi, Gao Lianfeng, Liu Shujun. 2023&. A review of global mass extinction events at the end of Triassic. Geological Review, 69(4): 1434~1448.
Hower J C, Rimmer S M, Eble C F. 2023. Revisiting the petrology of lower Pennsylvanian (Namurian and Langsettian) coals in southern West Virginia and southwestern Virginia, USA. International Journal of Coal Geology, 277: 104357.
Hu Haiqing, Luo Bizhen, Luo Sisheng, Wei Shujing, Wang Zhenshi, Li Xiaochuan, Liu Fei. 2020&. Research progress on effects of forest fire disturbance on carbon pool of forest ecosystem. Scientia Silvae Sinicae, 56(4): 160~169.
Hui Jianguo, Du Baoxia, Zhang Mingzhen, Lin Shaohua, Jiaoba Dunzhu, Zhang Jing, Dai Shuang, Li Aijing, Peng Jing, Liu Guolong. 2024. Early Cretaceous wildfires and their palaeoenvironmental significance in the Jiuxi Basin, Gansu Province, NorthWestern China. International Journal of Coal Geology, 283: 104446.
ICCP. 1998. The new vitrinite classification (ICCP System 1994). Fuel, 77(5): 349~358.
Jiang Shoushu, Zhao Debo, Tang Yi, Li Mengjun, Wan Shiming. 2023&. Application of black carbon in sediments in paleoenvironment and paleoclimate studies. Marine Geology & Quaternary Geology, 43(5): 119~135.
Jones T P. 1997. Fusain in Late Jurassic sediments from the witch ground graben, north sea, UK. Oceanographic Literature Review, 9(45): 1554.
Kang Shichang, Zhang Yulan, Chen Pengfei, Guo Junming, Zhang Qianggong, Cong Zhiyuan, Kaspari S, Tripathee L, Gao Tanguang, Niu Hewen, Zhong Xinyue, Chen Xintong, Hu Zhaofu, Li Xiaofei, Li Yang, Neupane B, Yan Fangping, Rupakheti D, Gul C, Zhang Wei, Wu Guangming, Yang Ling, Wang Zhaoqing, Li Chaoliu. 2022. Black carbon and organic carbon dataset over the Third Pole. Earth System Science Data, 14(2): 683~707.
Khankari G, Karmakar S. 2018. Power generation from fluegas waste heat in a 500 MWe subcritical coal-fired thermal power plant using solar assisted Kalina Cycle System 11. Applied Thermal Engineering, 138: 235~245.
Kong Weilu. 2021&. Research on the adsorption characteristics and regulation methods of CO_2 by coal rock macerals. Supervisor: Zhang Wenjun. Xuzhou: Master Degree Dissertation of China University of Mining and Technology: 1~83.
Kump L R. 1988. Terrestrial feedback in atmospheric oxygen regulation by fire and phosphorus. Nature, 335: 152~154.
Lenton T M, Watson A J. 2000. Redfield revisited: 2. What regulates the oxygen content of the atmosphere? Global Biogeochemical Cycles, 14(1): 249~268.
Li Peng, Zong Zhimin, Wei Xianyong, Wang Yugao, Fan Guixia. 2019. Structural features of liquefaction residue from Shenmu—Fugu subbituminous coal. Fuel, 242: 819~827.
Li Xin. 2010&. Sequence stratigraphic analysis and coal accumulation law of the Middle Jurassic xishanyao formation in the central mining area of Zhundong Coalfield, Xinjiang. Wuhan: China University of Geosciences Master Thesis: 1~57.
Liu Lian, Zhou Xin, Ge Junyi. 2012&. The application of carbon isotope of element carbon in the research of paleoenvironment. Geological Review, 58(3): 526~532.
Lü Dawei, Xu Jincheng, Zhang Zhihui, Gao Jie, Du Wenxu, Zhang Aocong, Wang Dongdong. 2024&. Distribution and controlling factors of the Carboniferous global wildfires. Acta Geologica Sinica, 98(6): 1893~1903.
Mills M J, Toon O B, Turco R P, Kinnison D E, Garcia R R. 2008. Massive global ozone loss predicted following regional nuclear conflict. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 105(14): 5307~5312.
Millspaugh S H, Whitlock C. 1995. A 750-year fire history based on lake sediment records in central Yellowstone National Park, USA. The Holocene, 5(3): 283~292.
Moore T A, Shearer J C, Miller S L. 1996. Fungal origin of oxidised plant material in the palangkaraya peat deposit, Kalimantan tengah, Indonesia: Implications for 'inertinite' formation in coal. International Journal of Coal Geology, 30(1~2): 1~23.
O'Keefe J M K, Bechtel A, Christanis K, Dai Shifeng, DiMichele W A, Eble C F, Esterle J S, Mastalerz M, Raymond A L, Valentim B V, Wagner N J, Ward C R, Hower J C. 2013. On the fundamental difference between coal rank and coal type. International Journal of Coal Geology, 118: 58~87.
Page S E, Siegert F, Rieley J O, Boehm H D V, Jaya A, Limin S. 2002. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. Nature, 420(6911): 61~65.
Patterson W A, Edwards K J, Maguire D J. 1987. Microscopic charcoal as a fossil indicator of fire. Quaternary Science Reviews, 6(1): 3~23.
Pausas J G, Keeley J E. 2009. A burning story: The role of fire in the history of life. BioScience, 59(7): 593~601.
Perrakis D D B, Cruz M G, Alexander M E, Hanes C C, Thompson D K, Taylor S W, Stocks B J. 2023. Improved logistic models of crown fire probability in Canadian conifer forests. International Journal of Wildland Fire, 32(10): 1455~1473.
Petersen H I, Lindström S. 2012. Synchronous wildfire activity rise and mire deforestation at the Triassic—Jurassic boundary. PLoS One, 7(10): e47236.
Petersen H I. 1993. Petrographic facies analysis of Lower and Middle Jurassic coal seams on the island of Bornholm, Denmark. International Journal of Coal Geology, 22(3~4): 189~216.
Royer D L. 2001. Stomatal density and stomatal index as indicators of paleoatmospheric CO_2 concentration. Review of Palaeobotany and Palynology, 114(1~2): 1~28.
Russell M, Tomeček J M. 2016. Effects of fire on wildlife. Texas A&M Agrilife Extension: 1~5.
Schachat S R, Labandeira C C, Saltzman M R, Cramer B D, Payne J L, Boyce C K. 2018. Phanerozoic $p(O_2)$ and the early evolution of terrestrial animals. Proceedings Biological Sciences, 285(1871): 20172631.
Schopf J M. 1975. Modes of fossil preservation. Review of Palaeobotany and Palynology, 20(1~2): 27~53.
Scott A C, Damblon F. 2010. Charcoal: Taphonomy and significance in geology, botany and archaeology. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 291(1~2): 1~10.
Scott A C, Glasspool I J. 2006. The diversification of Paleozoic fire systems and fluctuations in atmospheric oxygen concentration.

Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 103(29): 10861~10865.

Scott A C, Glasspool I J. 2007. Observations and experiments on the origin and formation of inertinite group macerals. International Journal of Coal Geology, 70(1~3): 53~66.

Scott A C, Jones T P. 1994. The nature and influence of fire in Carboniferous ecosystems. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 106(1~4): 91~112.

Scott A C. 1989. Observations on the nature and origin of fusain. International Journal of Coal Geology, 12(1~4): 443~475.

Scott A C. 2000. The Pre-Quaternary history of fire. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 164(1~4): 281~329.

Scott A C. 2010. Charcoal recognition, taphonomy and uses in palaeoenvironmental analysis. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 291(1~2): 11~39.

Scott A, Bowman D, Bond W, Pyne S, Alexander M E. 2014. Fire on earth: An introduction. John Wiley & Sons: 1~434.

Sellwood B W, Valdes P J. 2008. Jurassic climates. Proceedings of the Geologists' Association, 119(1): 5~17.

Shao Longyi, Hua Fanghui, Wang Juan, Ji Xingkai, Yan Zhiming, Zhang Tianchang, Wang Xuetian, Ma Shimin, Jones T, Lu Huinan. 2023. Palynological dynamics in the Late Permian and the Permian – Triassic transition in southwestern China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 619: 111540.

Shao Longyi, Wang Hao, Yu Xiaohui, Lu Jing, Zhang Mingquan. 2012. Paleo-fires and atmospheric oxygen levels in the latest Permian: Evidence from maceral compositions of coals in eastern Yunnan, Southern China. Acta Geologica Sinica —— English Edition, 86(4): 949~962.

Shao Longyi, Zhou Jiamin, Jones T P, Hua Fanghui, Xu Xiaotao, Yan Zhiming, Hou Haihai, Wang Dongdong, Lu Jing. 2024**&**. Inertinite in coal and its geoenvironmental significance: Insights from AI and big data analysis. Scientia Sinica (Terrae), 54(6): 1806~1829.

Shen Wenjie. 2007**&**. Mineral and geochemical explain of boundary events: Evidence from Meishan Permian—Triassic section. Supervisor: Yang Jianting, Sun Yongge. Guangzhou: Doctoral Degree Dissertation of Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences: 1~140.

Shi Hang, Jin Lijun, Wei Baoyong, Wang Mingyi, Wang Dechao, Hu Haoquan. 2019**&**. Pyrolysis behavior of Daliuta coal and its macerals under different atmospheres. Journal of China Coal Society, 44(1): 316~322.

Shukla A, Jasper A, Uhl D, Mathews R P, Singh V P, Chandra K, Chetia R, Shukla S, Mehrotra R C. 2023. Paleo-wildfire signatures revealing co-occurrence of angiosperm—gymnosperm in the early Paleogene: Evidences from woody charcoal and biomarker analysis from the gurha lignite mine, Rajasthan, India. International Journal of Coal Geology, 265: 104164.

Stach E, Mackowsky M T, Teichmüller M, Taylor G H, Chandra D, Teichmüller R. 1982. Stach's textbook of coal petrology. Berlin, Stuttgart: Gebrüder Borntraeger: 111~213.

Stopes M C. 1935. On the petrology of banded bituminous coals. Fuel, 14: 4~13.

Sýkorová I, Pickel W, Christanis K, Wolf M, Taylor G H, Flores D. 2005. Classification of huminite—ICCP system 1994. International Journal of Coal Geology, 62(1~2): 85~106.

Wang Dongdong, Yin Lusheng, Shao Longyi, Lyu Dawei, Liu Haiyan, Wang Shuai, Dong Guoqi. 2021. Characteristics and evolution of inertinite abundance and atmospheric PO2 during China's coal-forming periods. Journal of Palaeogeography, 10(2): 259~283.

Wang Qing. 2012**&**. A review of the environmental behavior and effects of black carbon in soils and sediments. Acta Ecologica Sinica, 32(1): 293~310.

Wang Shuai, Shao Longyi, Yan Zhiming, Shi Mingjian, Zhang Yunhe. 2019. Characteristics of Early Cretaceous wildfires in peat-forming environment, NE China. Journal of Palaeogeography, 8(1): 1~13.

Wang Tong, Zhang Bo, Wang Qingwei, Jiang Tao. 2017**&**. Green coal resources in China: Concept, characteristics and assessment. Coal Geology & Exploration, 45(1): 1~8+13.

Wang Zhen, Liu Mingming, Guo Haitao. 2016**&**. A strategic path for the goal of clean-and-low-carbon energy in China. Natural Gas Industry, 36(4): 96~102.

Watson A J, Lovelock J E. 2013. The dependence of flame spread and probability of ignition on atmospheric oxygen: An experimental investigation. John Wiley & Sons: 273~287.

Wolbach W S, Widicus S, Kyte F T. 2003. A search for soot from global wildfires in central Pacific Cretaceous—Tertiary boundary and other extinction and impact horizon sediments. Astrobiology, 3(1): 91~97.

Wu Tiancai, Li Feiyang, Yu Yang, Ma Yongxiang. 2022**&**. Study on relationship between coal macerals and proximate analysis. Coal Geology of China, 34(1): 13~17+56.

Xu Hao, Tang Dazhen. 2016**&**. Research progress of control mechanism of coal petrology on CBM production. Coal Science and Technology, 44(6): 140~145+158.

Xu Yun, Zhang Ning, Zhao Cunliang, Liang Handong, Sun Yuzhuang. 2022**&**. Wildfires in Jurassic coal seams from Ordos Basin and its impact on paleoclimate. Geology in China, 49(2): 643~654.

Xu Yun. 2019**&**. Evidence of Middle Jurassic wildfire in coal in Northwest China and its impact on paleoclimate. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing Doctoral Dissertation: 1~126.

Yan Zhiming, Shao Longyi, Glasspool I J, Wang Juan, Wang Xuetian, Wang Hao. 2019. Frequent and intense fires in the final coals of the Paleozoic indicate elevated atmospheric oxygen levels at the onset of the End-Permian Mass Extinction Event. International Journal of Coal Geology, 207: 75~83.

Yang Bo, Tian Jijun, Feng Shuo, Yang Jinhui, Li Yongze. 2022**&**. Wildfires recorded in Middle Jurassic coals in eastern of Junggar basin in Xinjiang, China. Coal Science and Technology, 50(7): 261~270.

Yu Pengfei, Toon O B, Bardeen C G, Zhu Yunqian, Rosenlof K H, Portmann R W, Thornberry T D, Gao Rushan, Davis S M, Wolf E T, de Gouw J, Peterson D A, Fromm M D, Robock A. 2019. Black carbon lofts wildfire smoke high into the stratosphere to form a persistent plume. Science, 365(6453): 587~590.

Zhan Changlin, Cao Junji, Han Yongming, An Zhisheng. 2011**&**. Research progress on reconstruction of paleofire history. Advances in Earth Science, 26(12): 1248~1259.

Zhang Peixin, Yang Minfang, Jiang Zhongfeng, Zhou Kai, Xu Xiaotao, Chen Huijuan, Zhu Xuran, Guo Yanghang, Ye Huajun, Zhang Yuchan, Shao Longyi, Lu Jing. 2023. Significant floral changes across the Permian—Triassic and Triassic—Jurassic transitions induced by widespread wildfires. Frontiers in Ecology and Evolution, 11: 1284482.

Zhang Xiao, Huang Kangyou, Jia Xin, Wan Qiuchi, Tang Yongjie, Chen Cong, Zheng Zhuo. 2024**&**. Reconstructing the historical fire activity and its influence on the vegetation ecosystem in Southwest China since the last glacial period. Quaternary Sciences, 44(1):

59~71.

Zhang Xinzhi, Lü Peizong, Fang Linhao, Yang Han, Deng Shenghui, Lu Yuanzheng, Fang Yanan, Zhang Xiaoyu, Huang Ruting, Liang Jiabao, Shi Shengbao. 2022&. Wildfire records across the Triassic—Jurassic boundary in the southern margin of the Junggar Basin, and global correlations. Acta Sedimentologica Sinica, 40(2): 473~483.

Zhang Yuan, Liang Eryuan, Wang Tao, Piao Shilong. 2024&. Research progresses on the impacts of volcanic eruptions on vegetation and terrestrial carbon cycle. Chinese Science Bulletin, 69(2): 160~168.

Zhang Zhihui, Wang Chengshan, Lü Dawei, Hay W W, Wang Tiantian, Cao Shuo. 2020. Precession-scale climate forcing of peatland wildfires during the early Middle Jurassic greenhouse period. Global and Planetary Change, 184: 103051.

Zhao Yunpeng, Hu Haoquan, Jin Lijun, Wei Xianyong. 2019&. Effect of minerals on semi-coke combustion characteristics of maceral with different reducibility. CIESC Journal, 70(8): 2946~2953.

Zhou Jiamin, Shao Longyi, Jones T P, Huang Yangyang, Chen Mengran, Hou Haihai, Lu Jing, Hilton J. 2024. Mechanisms of inertinite enrichment in Jurassic coals: Insights from a big data-driven review. Earth-Science Reviews, 257: 104889.

Zhou Jinhui, Guo Xiaoyang, Zhao Bo, Jin Zhixin, Deng Cunbao, Liu Jiyong, Wang Meng. 2024&. Study on the influence of microscopic components and pore structure of coal—rock system on methane adsorption. Mining Safety & Environmental Protection, 51(1): 51~60+69.

The analysis of coal macerals and its application in paleowildfires

HOU Haihai, HE Qian, HUANG Xiangqin

College of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning, 123000

Abstract: The Chinese National Standard for the definition and classification of coal macerals has been completed over 33 years (1980~2013) since the establishment of the Coal Petrology Group of the China Coalfield Geology Professional Committee, while the International Standard "ICCP system 1994" was completed over 26 years (1991~2017) by the International Committee on Coal and Organic Petrology (ICCP). However, after decades of development, there are still many differences in classification schemes at home and abroad. By comparing the Chinese classification scheme of bituminous coal maceral and "ICCP system 1994", it is found that the evolution differences of the Chinese tertiary classification scheme are mainly reflected in the specific classification categories, whereas the differences at home and abroad are mainly reflected in the maceral classification categories and causes of the vitrinite and the liptinite. It is suggested that reasonable scheme can be selected by scholars according to studying habits and communication object. However, it is necessary to clarify the maceral and sub-maceral types under different classification schemes. As one of the most common and important maceral groups in coal, inertinite can serve as an indicator for the occurrence of paleowildfires. The combustion temperature can be calculated based on the reflectivity of fusinite in the inertinite to determine the intensity and type of paleowildfires. The content of paleooxygen can be determined based on the relative content of inertinite. The retention and sedimentation of inertinite in the atmosphere and lithosphere can reflect the impact of paleowildfires on paleoecology. As an important influencing factor on paleoecology, paleowildfires can reveal information on the composition of the palaeoatmosphere and the succession of paleoecology communities through the analysis of macerals in coal. To some extent, this can help human explore the current global climate warming and the reasons for paleontological extinction during the key geological boundary.

Keywords: coal macerals classification; inertinite; paleowildfires; paleooxygen concentration; paleoecology

Acknowledgements: This study was financially supported by Natural Science Foundation of China (No. 42102223) and China Postdoctoral Science Foundation (Nos. 2021M693844, 2022T150284)

First author: HOU Haihai, male, born in 1986, Ph. D., professor, is mainly engaged in teaching and researching of sedimentology related in coal-bearing strata; Email: houhaihai@lntu.edu.cn

Manuscript received on: 2024-08-05; Accepted on: 2024-10-10; Published online on: 2024-11-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2024.11.001 **Edited by**: LIU Zhiqiang