

内蒙古乌拉特后旗乌兰剖面记录的 早白垩世火灾事件

张瑞¹⁾, 戴霜¹⁾, 张明震¹⁾, 赵杰^{1,2)}, 汪禄波¹⁾, 张莉莉¹⁾, 张翔^{1,3)}, 刘海娇¹⁾

1) 兰州大学西部环境教育部重点实验室 & 西部环境与气候变化研究院, 兰州, 730000;

2) 中国科学院北京地质与地球物理研究所, 北京, 100081; 3) 甘肃省地矿局地调院, 兰州, 730000

内容提要:古火灾事件研究对于重建当时的古气候及古地理具有重要的意义, 白垩纪是全球火灾事件最盛行的时期之一, 但在我国目前报道较少。本文通过对内蒙银根—额济纳旗盆地东部乌兰剖面早白垩世砂岩中发现的大量炭屑的显微形貌特征观察和多环芳烃(PAHs)测定, 发现炭屑燃烧痕迹明显, 木质细胞结构保存完好; 同时在样品中检出了燃烧源的多环芳烃(PAHs)菲、蒽、苯并荧蒹、苯并[e]芘等, 证实炭屑是火灾产物, 燃烧温度可达520℃以上。结合沉积环境分析、孢粉资料和岩石磁化率测量, 认为乌兰剖面上3个炭屑密集层代表该区在早白垩世经历了3个大火频发时期, 炭屑是火灾过程中松柏类和杉科类等高大乔木燃烧后的残留物, 并推测大部分炭屑是由周边地区发生火灾堆积, 后期通过快速搬运而来, 结合前人在霍林河煤田发现的早白垩世火灾事件, 推断我国华北地区在早白垩世大火频发, 是早白垩世北半球中纬度火灾带的组成部分。

关键词:炭屑; 多环芳烃; 古火灾; 内蒙古银根—额济纳旗盆地; 早白垩世

火灾事件作为陆生环境常见的一种自然现象, 它的发生与当地的植被和气候背景关系密切(David et al., 2009), 因而在古环境研究中, 可以作为恢复过去环境变化的重要信息(Chaloner, 1989; Jones et al., 1991a)。对于古火灾事件特别是发生在第三纪以前的古火灾事件的甄别和火灾信息的提取, 沉积物中保存的炭屑是最重要的材料(Scott et al., 2000b; 占长林等, 2011; 沈文杰等, 2012)。近年来随着显微技术和有机地球化学测量等技术的进步, 使得研究炭屑的微观结构并进行树种鉴别成为可能(沈文杰等, 2008; 占长林等, 2011), 从而为恢复当时的古植被和古气候环境提供了新的途径。更为重要的是, 随着全球古火灾事件研究资料的不断积累, 发现白垩纪是中—新生代全球火灾事件发生频次相对较高的时期(Scott, 1989; Scott et al., 2000b; Bond et al., 2010; Joseph et al., 2011), 并认为白垩纪火灾事件频发与当时裸子植物的繁盛与被子植物的兴起有关(Bond et al., 2010; Sarah et al., 2012), 这些研究对认识白垩纪气候环境和生态环境演变提供了重要的依据。相对来说, 目前发现的白垩纪火灾事件大

多集中在北半球中纬度地区的美洲和欧洲西部地区(Glasspool et al., 2004; Bond et al., 2010; Sarah et al., 2012), 见图1a; 而在亚洲大陆则只有零星报道(续颜, 2011), 一定程度上制约着对于全球火灾事件及其环境意义的认识。本文在国家自然科学基金(41272127, 40972025, 41021091)的共同资助下, 通过对在内蒙银根—额济纳旗盆地东南乌兰剖面(图1b)下白垩统砂岩中首次发现的炭屑的形貌和芳香烃类测量, 结合其他资料, 确认该炭屑层是发生在早白垩世中晚期火灾事件的遗留, 这为认识我国北部白垩纪以来的环境格局形成演变、丰富全球古火灾事件研究提供了资料。

1 研究区背景与炭屑层特征

银根—额济纳旗盆地(简称银—额盆地)位于内蒙古自治区西部, 东南以狼山为界, 西南以北大山—雅布赖山为界, 向北延展至中蒙边境, 呈弧形展布, 是中生代发育起来的断陷盆地。盆地经历了多次发生—发展—萎缩的旋回(李文厚, 1997; 吴少波等, 2003), 其中白垩纪是盆地重要的演化时期, 沉积了

注: 本文为国家自然科学基金(41272127, 40972025, 41021091)共同资助。

收稿日期: 2013-07-30; 改回日期: 2014-04-02; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 张瑞, 女, 1988年生。硕士研究生。第四纪地质学专业。通讯地址: 730000, 兰州大学西部环境教育部重点实验室 & 西部环境与气候变化研究院; Email: zr11@lzu.edu.cn。通讯作者: 戴霜, 男, 1967年生。教授。第四纪地质学专业。通讯地址: 730000, 兰州大学西部环境教育部重点实验室 & 西部环境与气候变化研究院; Email: daisher@lzu.edu.cn。

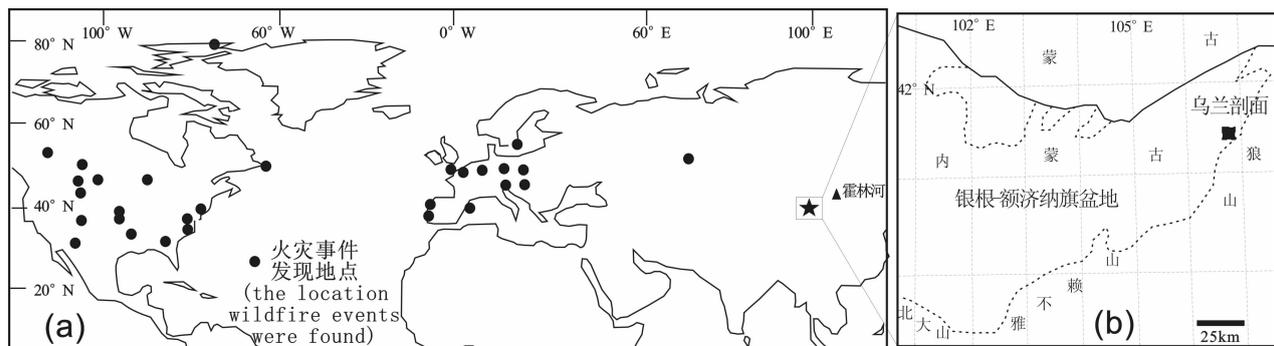


图1 白垩纪火灾事件发现地点(a,据 Bond et al.,2010 改编)及内蒙古乌兰剖面的位置(b)

Fig.1 The sites of cretaceous wildfire events (a,modified from Bond et al.,2010) and the location of Wulan section in Inner Mongolia (b)

巨厚的白垩系陆相冲洪积—河湖相沉积(卫平生等,2005;陈会军等,2009;吴仁贵等,2009)。白垩系地层自下而上可划分为下白垩统巴音戈壁组、苏红图组、银根组和上白垩统乌兰苏海组,其中巴音戈壁组为一套洪积—河流相—湖相砾岩、砂岩、泥岩及页岩、泥灰岩,苏红图组为一套泥岩、砂岩夹火山岩,银根组为一套砂泥岩组合,乌兰乌海组由砂岩、泥岩组成。前人通过对苏红图组火山岩同位素测量,获得了该火山岩的 K-Ar 年代在 $116.7 \pm 1.8 \sim 104.4 \pm 2.3$ Ma 之间(张爱平,2002;吴仁贵等,2009), $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$ 年代在 $114.1 \pm 0.3 \sim 105.55 \pm 4.03$ Ma 之间(Zhu R X et al.,2008)。结合轮藻(彭维松等,2003)和介形虫(付国斌等,2007)资料,巴音戈壁组和苏红图组的地质年代应属巴雷姆期至阿尔布期。

在盆地东南缘,白垩系出露较好,其中在乌拉特后旗赛乌素镇东南乌兰沟(位置见图 1b)白垩系出露厚约 1000m,由巴音戈壁组和苏红图组成(见图 2a)。巴音戈壁组分为上、下两段,下段下部为洪积扇相砾岩、含砾砂岩,厚 248m,砾石呈次棱角状,砾石分选性差,磨圆度差,砾石成分主要为石英岩、花岗岩、片岩等,与盆地南侧狼山北坡出露的晚太古界色尔腾山群岩性相当;上部厚 87m,为辫状河相砂岩、砂质泥岩,在底部砂岩层内含硅化木(见图 2b 中 255m、257m 照片)及大量炭屑。据张明震等(2013)观察,硅化木化石零散埋葬,杂乱地横卧于地层中,大小不一,大小一般为 $3\text{cm} \sim 5\text{cm} \times 3\text{cm} \sim 10\text{cm}$,由硅化和碳化两部分组成,碳化层多在表面及内部格架中,局部木纤维清晰可见。巴音戈壁组上段厚 196m,由滨浅湖相泥岩、砂岩、页岩组成,水平层理发育,夹有多层泥灰岩、灰岩,并见有多层油页岩,在下部砂岩中也发现有炭屑沉积(见图 2c)。苏红图组也分为上、下两段,其中下段下部厚 82m,为河流

—湖沼相砂岩,夹有泥岩、薄层油页岩,水平层理发育,砂岩底部有炭屑成层沉积(见图 2c);下段上部厚 175m,为滨浅湖相砂岩、泥岩及页岩,见有炭屑(见图 2c)。苏红图组上段下部厚 25m,为辫状河相砂岩、砂质泥岩,上部厚度大于 287m,为冲积扇相砾岩夹含砾砂岩、泥质砂岩透镜体及安山质凝灰岩、砾岩,在安山质凝灰岩产出硅化木化石。化石体积较大但保存不完整,木化石表面未见有碳化组织(张明震等,2013),见图 2b 中 933m、935m、936m 处照片。

本次工作在乌兰剖面地层厚度 250~668m 间发现 3 层炭屑层(见图 2a),根据区域地层资料及邻区钻孔(查参 1 井,距剖面约 100km)中火山岩年代(张爱平,2002)对比,炭屑层产出部位地层时代大致为巴雷姆中期—阿普第晚期。第一层位于巴音戈壁组下段上部(剖面地层厚度 250m 处)砂岩中,该段为辫状河相沉积(见图 2a),由含砾砂岩与泥质砂岩相间分布,见有硅化木及植物叶片化石;在该层砂岩底部中炭屑成层堆积,炭屑层厚 0.5~0.8cm,炭屑含量约 20%~30%,炭屑为黑色,呈条带、团斑状产出,大小一般为 $0.1\text{cm} \times 0.2\text{cm} \sim 0.2\text{cm} \times 0.5\text{cm}$ (见图 2c)。第二层位于巴音戈壁组上段下部(剖面地层厚度 336m 和 370m 处)砂岩、泥岩层中,该段为浅—滨湖相沉积,波状层理、水平层理发育,由深黑色油页岩与灰绿色砂岩、泥岩互层组成,见有两小层炭屑层,其中第一小层位于剖面厚度 336m 处,岩性为浅灰绿色砂岩,厚 10cm,炭屑稀疏分布,含量约 10%,大小一般为 $0.2\text{cm} \times 0.5\text{cm} \sim 0.2\text{cm} \times 1.2\text{cm}$,该层下部为纸片状黑色油页岩,上部为厚约 34m 的灰绿色含砾砂岩夹砾岩,砂岩发育斜层理(见图 2a);第二小层位于 370m 处,厚 30cm,岩性为灰绿色泥岩,见有植物叶片和炭屑,炭屑成层分布,含量 8%~15%,大小一般为 $0.1\text{cm} \times 0.5\text{cm} \sim 0.2\text{cm}$

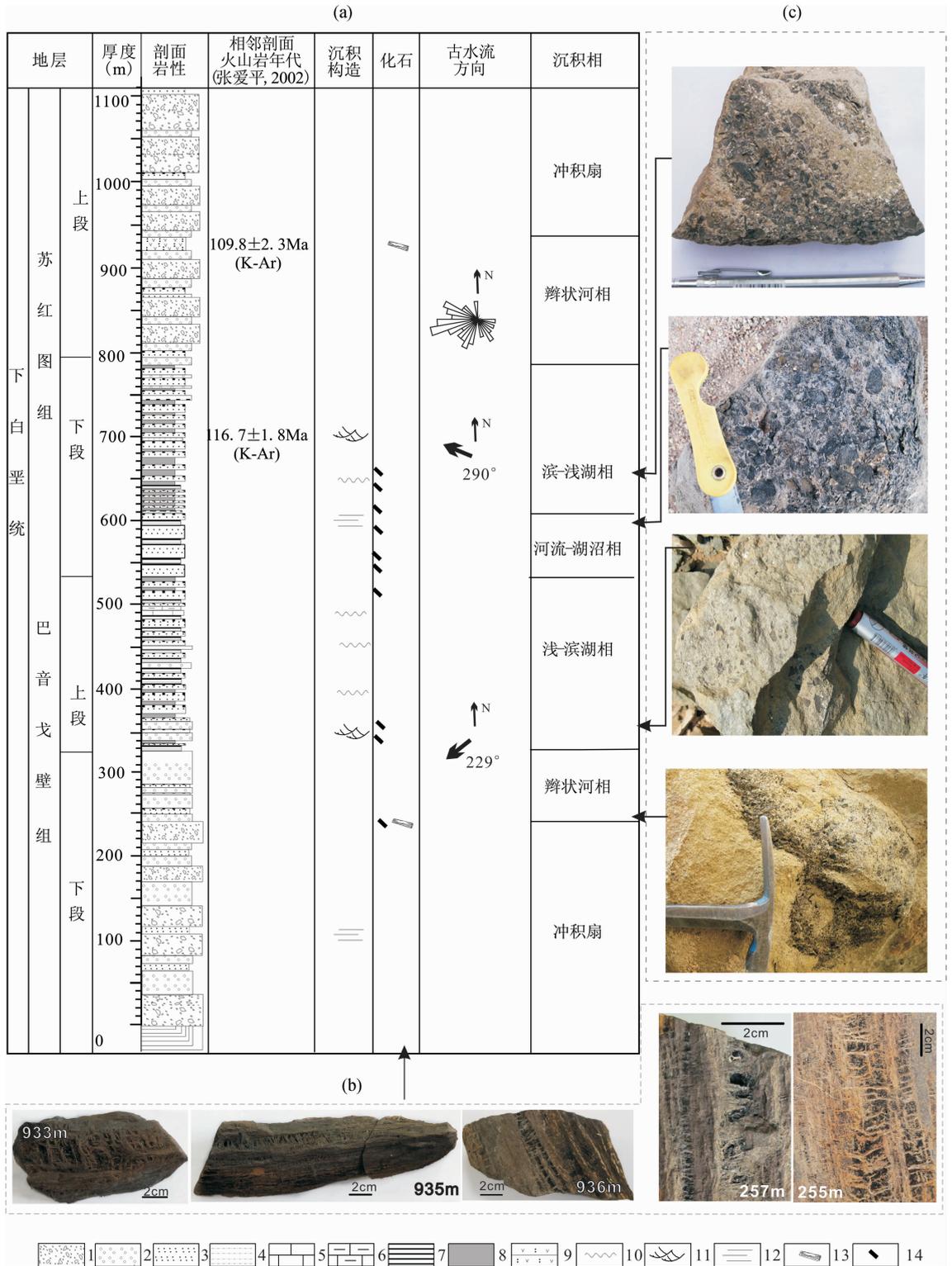


图 2 内蒙乌拉特后旗乌兰剖面下白垩统地层沉积及炭屑产出层位、炭屑特征

Fig. 2 Early Cretaceous stratigraphy and sedimentary character and the charcoal position and feature on the Wulan section in the Urat Back Banner of Inner Mongolia

1—砾岩; 2—含砾砂岩; 3—砂岩; 4—粉砂岩; 5—灰岩; 6—泥灰岩; 7—油页岩; 8—泥岩; 9—安山质凝灰岩;

10—波状层理; 11—斜层理; 12—水平层理; 13—硅化木; 14—炭屑

1—Conglomerate; 2—pebbly sandstone; 3—sandstone; 4—siltstone; 5—limestone; 6—marlstone; 7—oil stone; 8—mudstone; 9—andesitic tuff; 10—current bedding; 11—cross bedding; 12—horizontal bedding; 13—petrified woods; 14—carbon dust

×1.5cm,该层向上为砂岩。第三层产于苏红图组下段(剖面地层厚度558~668m)厚约110m的砂岩、泥岩、页岩中(见图2a),沉积相为河流—湖沼相及滨—浅湖相,岩性为褐红色至灰绿色砂岩夹灰绿色泥岩、黑色页岩,砂岩波状层理,偶见斜层理,分别在558~604m、608~613m、642~668m层段砂岩与泥岩、页岩交互处的砂岩中见有多层炭屑,呈层状产出,层厚约0.5~1.2cm,炭屑含量20%~40%不等,大小一般为0.1cm×0.5cm~0.2cm×1.5cm(见图2c)。

各炭屑层炭屑特征基本相似,为黑色,性脆、易碎,炭屑粉末黑色染手,具有丝绢光泽,具有明显的丝炭特征。炭屑形态多样,有柱状、片状、块状及条状等,野外采集时肉眼可清晰辨别,与现代木材外部烧焦存留的特征相似。

2 材料与方 法

本文选取了炭屑较为丰富的第三炭屑层炭屑的两个样品(分别在剖面地层厚度591m和645m处),进行了扫描电镜观察分析、树种鉴定和多环芳烃测定。另外,为了判断炭屑来源,对含碳屑层及临近岩层岩石的磁化率进行了测量。

扫描电镜(SEM)测试前,将炭屑直接用小刀剥离,根据木材的横纵方向,制2组切片(横、纵切面),置于电镜座上喷金,在扫描电镜(SEM)下观察并照像。磁化率测量时,样品在实验室中自然风干,在玛瑙研钵中轻轻磨细后装在2cm×2cm×2cm的聚乙烯样品盒中,称重后在兰州大学环境磁学实验室用Bartington MS2磁化率仪分别测量3个方向的高、低频磁化率值,经平均后得到样品的高、低频磁化率值,质量校正后获得样品的质量磁化率。

多环芳烃(PAHs)的测定在中国科学院兰州油气中心进行,PAHs的提取采用超声萃取方式,测量用GC/MS联用仪完成。首先,为保证测量炭屑的PAHs,在实验室利用小刀,尽量剥离含炭屑砂岩中的纯炭屑,连同含少量砂岩成分的炭屑样品(保证足够的样品量)共50g进行干燥,研磨至约100目;然后用配比为93/7的二氯甲烷/甲醇浸泡样品,放置48h,每隔一段时间将样品充分震荡;之后使用配比为93/7的二氯甲烷/甲醇重复三次超声萃取,单次超声时间为15min,萃取完毕后,将提取液过滤后风干;然后使用配比为1/1的正己烷/二氯甲烷过硅胶柱分离,分离出的芳烃组分取1mg待测。上机测试使用(HP6890/HP5973N)GC/MS联用仪完成。测

试中色谱条件:进样口温度:280℃;载气:氦气;色谱柱:HP-5弹性石英毛细管柱(30m×0.25mm×0.25μm);升温程序:始温80℃,恒温1min,以3℃/min升温至280℃,保持30min。质谱离子源为EI源,离子源温度:230℃;四极杆温度:180℃;离子源电离能:70eV;接口温度:280℃;采集方式:全扫描;质量范围:50~550amu。

3 实验结果

3.1 炭屑的微观结构特征

木炭是植物不完全燃烧产生的灰黑—黑色无机碳化合物,具有难以溶解、易于保存的特点,沉积岩中的木炭能保存完好的植物细胞结构,大部分炭屑样品在电镜下都可观察到整齐均质的细胞结构(Tanner et al.,2012)。由于木炭具有性脆、易染手并具有黑色粉末状擦痕等特征,有别于无植物细胞结构并具有贝壳状断口的镜煤和具有明亮细胞壁的矿化木(Scott,2009),因此通常根据木炭特有的宏观特征判断发现的黑色碎屑确为木炭,并在实验室内观察显微特征,鉴定植物种类。

炭屑在扫描电镜下木材的显微结构十分清晰,木炭细胞结构保存完好,591m处样品(图3a、3b)管胞壁较厚,界线清楚,管胞壁厚度1~2μm左右,未见胞间层;横切面具明显四方形或顺径向延伸的长方形,排列整齐,由于切片方位不理想,木管纤维径向直径无法估计;管胞壁上交叉场纹孔及纹孔特征十分明显,木炭大致可见均质整齐的细胞结构。645m处样品(图3c、3d)管胞壁排列整齐,见有单列射线细胞;横切面管胞为具圆角的长方形,排列整齐,径向直径10~15μm,壁厚为5μm左右,可见射线细胞;径切面管胞壁平整但破碎,管胞径壁上具缘纹孔单列,纹孔呈椭圆形,紧密排列,直径多为6~8μm。经兰州大学闫德飞副教授鉴定,这种细胞结构与松柏类树木的细胞结构特征相似,这与剖面上孢粉以松柏类的两囊类和薄壁粉占优势(张明震等,2013)的事实一致。

3.2 多环芳烃(PAHs)分析结果

多环芳烃(PAHs)是指分子中含有两个或两个以上苯环结构的化合物,具有高度芳构化结构和较强的稳定性,常见多环芳烃化合物共有16种,广泛分布于土壤和海洋沉积物中(Schmidt et al.,2000; Simoneit et al.,2000;沈文杰,2007;康延菊,2008)。PAHs的来源有两类,一类是燃烧源的PAHs,多为不饱和的4环、5环的PAHs,包括菲(Phe)、荧蒽

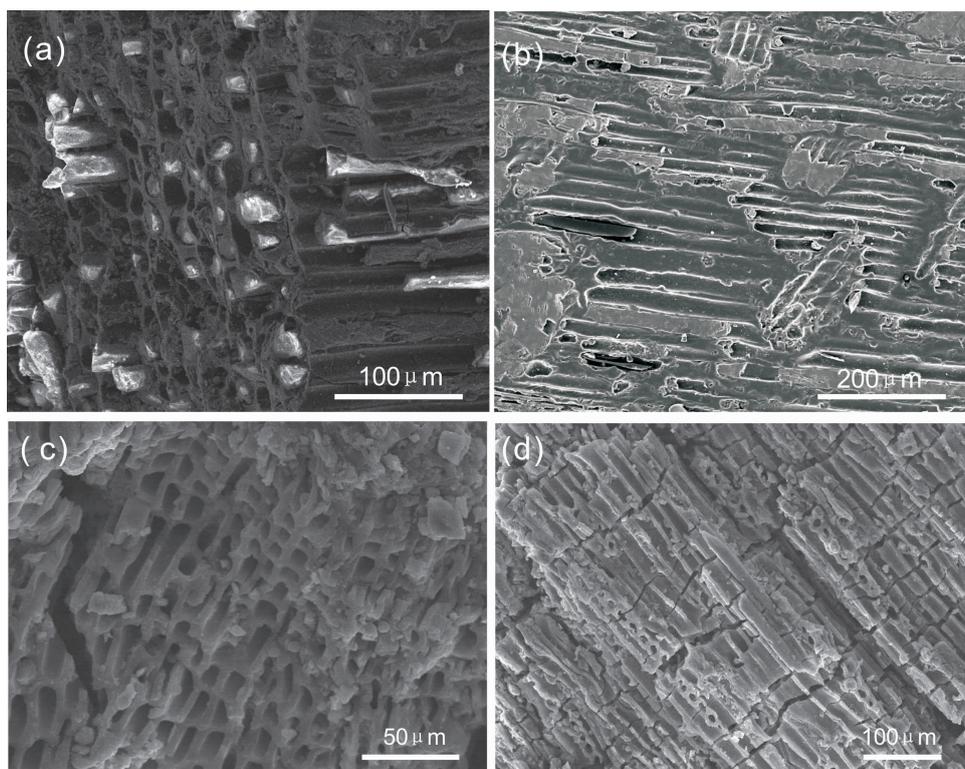


图 3 SEM 下的内蒙古乌拉特后旗乌兰剖面白垩纪火灾炭屑特征

Fig. 3 SEM of charcoal of the Early Cretaceous wildfire on the Wulan section in the Urat Back Banner of Inner Mongolia

- (a)—591m 处炭屑横剖面; (b)—591m 处炭屑纵剖面; (c)—645m 处炭屑横剖面; (d)—645m 处炭屑纵剖面
 (a)—charcoal transverse polished of 591 meter; (b)—charcoal longitudinal polished of 591 meter;
 (c)—charcoal transverse polished of 645 meter; (d)—charcoal longitudinal polished of 645 meter

(Fla)、芘(Pyr)、苯并荧蒽(BaAn)、苯并芘[B(a+e)p]等;另一类是微生物或成岩过程中降解生成的 PAHs,如萜烯(Retene)、芘(Pery)系列化合物等(沈文杰,2007)。燃烧来源的 PAHs 一般与黑碳(Black Carbon)伴生,在沉积物中保存时间较长,特别是 5 环 PAHs 之一的苯并[e]芘(Bep)最稳定,是最典型的燃烧源 PAHs,因而是验证火灾事件的一项重要指标(Jiang C et al.,1998)。

本次测试的样品中,非燃烧源的 PAHs 含量较低,包括萘(Nap)、苊稀(Any)、苊(Flu)、芴(Phe)等指标均未被检出;而能够较好指示燃烧源的 4 环、5 环的 PAHs 如菲(Phe)、荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、屈(Chr)、苯并荧蒽(BaAn)、苯并[e]芘(Bep)都被检出(见图 4)。从 591m 处样品(图 4a)中可以看出,荧蒽(Fla)峰值最高,菲(Phe)、芘(Pyr)峰值较低,屈(Chr)、苯并荧蒽(BaAn)和苯并[e]芘(Bep)的峰值最低,大致说明荧蒽(Fla)含量最高,苯并[e]芘(Bep)含量最低。645m 样品(图 4b)中荧蒽(Fla)峰值最高,菲(Phe)、芘(Pyr)苯并荧蒽(BaAn)和苯并

[e]芘(Bep)的峰值次之,屈(Chr)的峰值最低,大致说明荧蒽(Fla)含量最高,屈(Chr)含量最低。苯并[e]芘(Bep)作为指示燃烧源最稳定的 PAHs,在我们的样品中被发现,结合样品炭屑为主要成分这一事实,说明炭屑是由燃烧生成的。

4 炭屑记录的火灾事件分析

从目前已经获得的关于古火灾的研究资料来看,燃烧炭屑是最直观的鉴别古火灾的依据,它具有特征的丝绢光泽,炭屑大多保留碳化后的木质纤维结构,含有燃烧源的多环芳烃如苯并[e]芘(Bep)等(Scott et al.,2000b;占长林等,2011;Wenjie S et al,2011;沈文杰等,2012;Lawrence et al.,2012)。另外,沉积物中含有的黑碳(Schmidt et al.,2000;Goldberg,1985;Masiello,2004;Smith et al.,1973;沈文杰,2007;)、煤炭中含有的惰性煤质素(Jones et al.,1993;Glasspool,2000;Scott,2000a;Shao L et al.2012)及沉积物的磁化率等磁性参数的陡然升高也是判断古火灾的依据。本文发现的 3 层炭

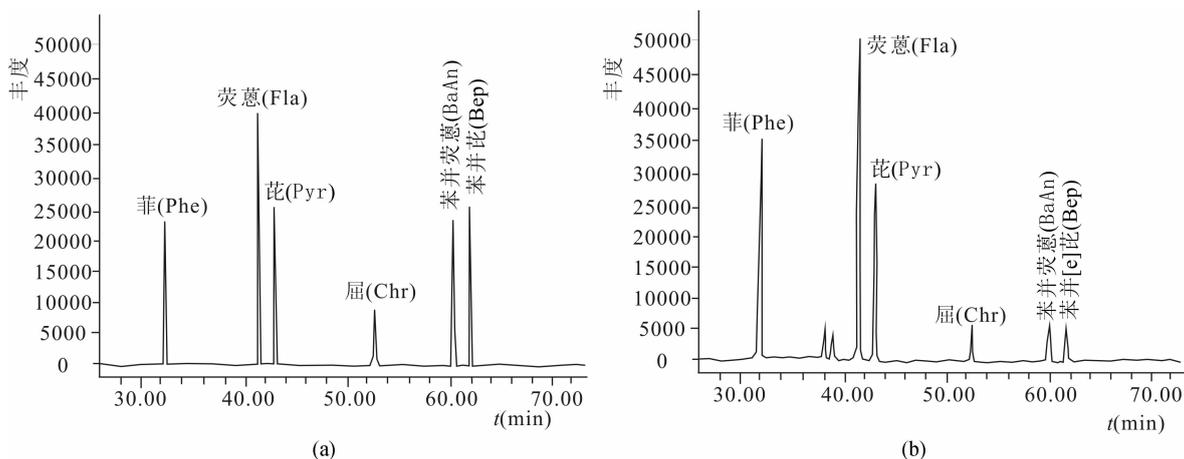


图4 内蒙古乌拉特后旗乌兰剖面白垩纪火灾炭屑样品的燃烧源 PAHs 的 GC-MS 图
Fig. 4 GC-MS of flaming source PAHs from charcoal samples of the Early Cretaceous wildfire
on the Wulan section in the Urat Back Banner of Inner Mongolia

(a)645m;(b)591m

屑,在地层中集中分布,炭屑具有明显的丝绢光泽,木质纤维结构清晰可见,纤维碳化均匀,细胞壁均质化,并检出了能指示燃烧事件的苯并[e]芘(Bep)等多环芳烃。同时,张明震等(2013)在分析剖面的抱粉样品时,发现了很多具丝炭特征的黑色碎片(图4);通常这些丝炭被认为是火灾事件的残留物(Batten, 1975; Jones, 1993; Jones et al., 1991b; Huang C et al., 2006; 谭志海等, 2008; 孙湘君等, 2000; 罗运利等, 2001)。因此,本文发现的炭屑应该是植物燃烧后残留物,说明当时发生过火灾事件(图5)。

对于火灾事件发生时的燃烧温度,一般根据木质细胞的均质化程度、木炭反射率及多环芳烃的出现来大致估计(Scott, 2000a; Rosa et al., 2008; Scott et al., 1994; Jones et al., 1991b)。当木材的燃烧温度达到 200℃时木炭易形成胞间层,还达不到均质化,而当燃烧温度达到 375℃时细胞壁见均质化(Scott, 2000a)。当温度达到 520℃时,产生芳烃(Rosa et al., 2008)。乌兰剖面上的炭屑具均质细胞壁,而且有燃烧源的苯并[e]芘(Bep)等多环芳烃(PAHs)的出现,推测当时的火灾燃烧温度达到 520℃以上。

炭屑在中—新生代地层中常见,一般零星出现。但乌兰剖面上发现的炭屑多集中分布,炭屑含量可达到 20%~40%不等(见图 2c)。乌兰剖面地层岩性主要为表生环境形成的砂岩、泥岩等,岩石成岩程度较差,炭屑层多现于砂岩底部,并成层堆积。从剖面沉积特征上,很难判断炭屑是就地沉积还是从异

地搬运而来。张明震等(2013)研究了剖面上硅化木的产出状态,发现剖面下部硅化木(对应于本文第一层炭屑层)埋藏环境为一间歇性汇水洼地,推测硅化木为异地搬运并被山前冲洪积物瞬间埋藏,可以推测该层中产出的炭屑也不排除外地搬运而来的可能,但从冲积扇相地层分布于山前有限的范围来看,其搬运距离应该不远,且来源于东南部山区。第二层炭屑层出现在滨湖相沉积的砂岩和泥岩中,其中第一小层以下为油页岩,向上为含砾砂岩,显示湖水由深变浅,湖岸边粗粒沉积物中的炭屑可能是从河流搬运而来,也可能是岸边树木燃烧后留存的。第二小层产于泥岩中,其上为砂岩,为滨浅湖相沉积,炭屑来源于第一小层类似。第三层炭屑层出现在河流相及湖沼相沉积中,炭屑赋存在河流相砂岩与湖沼相页岩交汇界面的砂岩一侧,可能指示炭屑在湖沼沉积后堆积,后被河流相砂岩覆盖,也可能是河流上游发生火灾后,炭屑随河水先搬运到湖沼位置,然后被后来的河沙覆盖。就目前现有的资料来看,很难判断是就地沉积还是外来搬运的。

我们利用火灾发生时,高温导致当地土壤氧化,从而使土壤中含水的铁氧化物(如针铁矿)转变为不含水的氧化物(如磁铁矿),从而导致土壤、沉积物磁化率升高 1~2 个数量级这一现象(Oldfield et al., 1981; Oldfield et al., 1985; Krawiecki, 1982; Mark et al., 2002; 阎桂林, 1996; 黄晓葛, 1999),对第三层炭屑层及邻近地层采样测量了样品的磁化率,发现炭屑层磁化率相对不含炭屑的岩石没有非常明显的升高(见表 1),说明炭屑是就地形成的可能性不大,

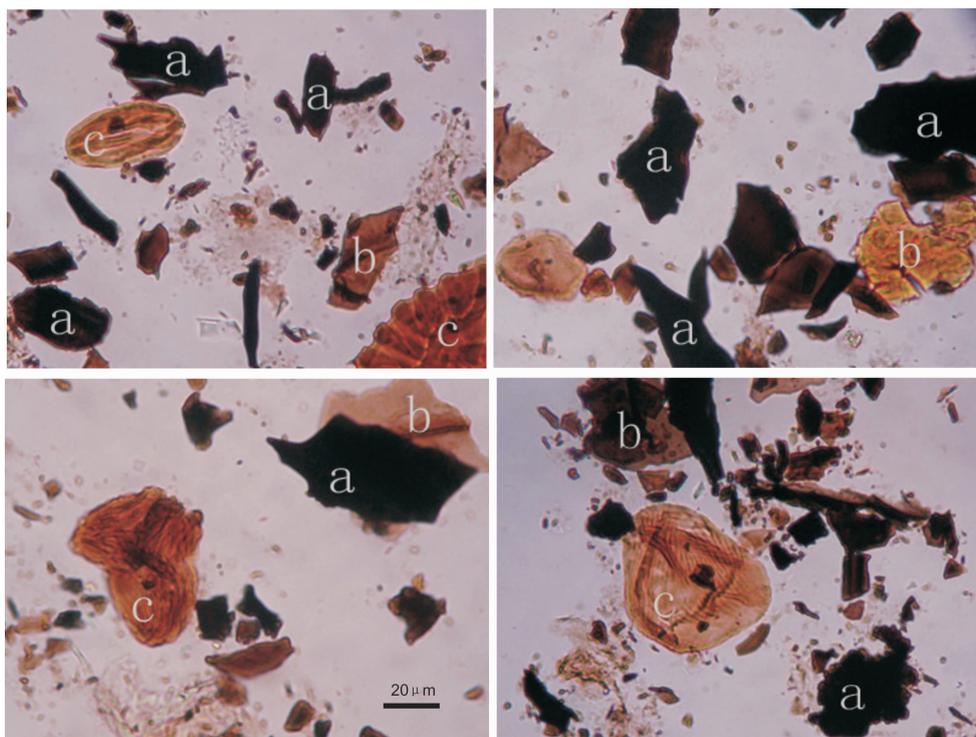


图 5 电子显微镜下丝炭与其他植物碎片化石

Fig. 5 Fusain and other plant fossils under the electronic microscope

(a) — 丝炭; (b) — 其他植物碎片; (c) — 孢粉化石

(a) — Fusain; (b) — other plant debris; (c) — palynofossils

很可能说明炭屑是由源区快速搬运而来。如果考虑样品磁化率总体偏低、说明砂岩中磁性矿物含量很少,大火燃烧对磁化率的改变不明显这一可能的话,476m 处的含炭屑样品的磁化率相比相临样品较高,可能说明 476m 处的炭屑来自就地燃烧,而其余层位(591m、616.5m、645m)的炭屑是源区快速搬运而来。通过对剖面上古水流方向统计(见图 2a)并对砾石成分进行分析,判断沉积物来自东—东南部狼山山区。因此,如果是异地搬运来的炭屑,则火灾发生在东南部狼山山区,剖面位于狼山山脚,故而搬运距离也不会太远。剖面上出现了 3 层不同厚度的含炭屑层,代表 3 个时间段的火灾频发时期。

早白垩世银根—额济纳旗盆地地处亚热带半干旱气候区,气候温暖湿润(殷鸿福,1988)。孢粉分析(张明震等,2013)发现,剖面 240~470m(巴音戈壁组下段上部—上段中下部)树木以喜湿冷的松柏类和杉科等高大乔木为主,而喜干热的掌鳞杉科相对较少,该段发现了两层集中分布的炭屑层;剖面 470~570m(巴音戈壁组上段上部)树木以喜干热的掌鳞杉科为主,杉科和松柏类含量低,植被覆盖较少,该段炭屑发现较少;剖面 570~780m(苏红图组下

段)掌鳞杉科占据主要地位,松柏类和杉科较少,炭屑层频繁出现。这种植被组合和炭屑层出现的对应关系说明,当时地表植被种类丰富,火灾频繁。

表 1 内蒙古乌兰剖面炭屑层及临近层位磁化率

Table 1 The magnetic susceptibility of the charcoal-bearing rocks and adjacent rocks on the Wulan section of Inner Mongolia

层位(m)	岩性	质量磁化率($\times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$)	
		低频	高频
472	紫红色火山碎屑岩	0.89	0.98
476	紫红色粗砂岩(含炭屑)	4.56	4.25
482	灰黄色含砾砂岩	1.59	1.52
590	紫红色粗砂岩	1.31	1.25
591	灰黄色粗砂岩(含碳屑)	2.89	2.45
616.5	灰黄色粗砂岩(含碳屑)	2.7	4.15
618	灰绿色粉砂岩	5.98	5.80
642	浅灰绿色砂岩	1.42	1.45
645	灰黄色粗砂岩(含碳屑)	1.48	0.66
646	灰绿色泥质砂岩	1.49	1.42

前人研究表明,早白垩世大气氧含量相对中生代其他时期处于较高的水平,不同研究方法获得的大气氧含量在 17%~29% 之间(Bergman et al., 2004; Falkowski et al., 2005; Glasspool et al.,

2010; Berner et al, 2006), 高于目前认为的含水植物持续燃烧所需要的最小大气氧含量值 15% (Belcher et al., 2008)。而火山喷发 (Batchelde, 1967) 或者雷电 (Scott, 1989)、陨石坠落等 (Scott, 1989; Scott, 2000a) 是触发火灾的导火线, 剖面所在的银根—额济纳旗盆地内火山活动频繁 (张爱平等, 2002; 卫生平等, 2005; 吴仁贵等, 2009), 可能是导致剖面所在位置或邻近地区在早白垩世发生大火事件的原因。

续颜 (2011) 在内蒙古东部霍林河煤田早白垩世砂岩层中也发现了大量硅化木、木炭及炭屑, 提出该地在早白垩世发生了大规模的火灾事件。霍林河煤田位于乌兰剖面东北约 1500km (见图 1a), 该火灾事件层中的孢粉组合揭示的时代为早白垩世巴雷姆晚期—阿普第早期, 孢粉植物组合中以松柏类植物为主, 火灾发生时的温度达到 500℃ 左右, 这与乌兰剖面的燃烧树种及燃烧温度大体一致。说明两处火灾在发生的时间和燃烧的植被种类等方面具有诸多相似之处, 可以推断在早白垩世巴雷姆期—阿普第期我国北方地区大火频发, 而且这一区域可能是早白垩世巴雷姆期—阿普第期北半球中纬度地区大火频发的组成部分。

5 结论

(1) 银根—额济纳旗盆地东部乌兰剖面下白垩统巴音戈壁组和苏红图组砂岩中含有 3 层密集炭屑层, 炭屑燃烧痕迹明显, 木质细胞结构保存完好, 样品中检出了燃烧来源的茛菪、菲、芘及屈、苯并茛菪和苯并芘, 表明炭屑是自树木大火的燃烧后的产物, 燃烧温度可能在 520℃ 以上。

(2) 炭屑保存在河流或者滨浅湖沉积环境, 炭屑层对应植被种类丰富、覆盖程度较高的时期, 3 层炭屑层的出现指示在白垩纪中期银根—额济纳旗盆地经历了 3 个时间段火灾频发时期, 残存的炭屑是松柏类和杉科等高大乔木燃烧后残留物。沉积环境和含炭屑层岩石磁化率测量结果, 推测炭屑可能是由临近地区快速搬运而来。结合区域资料可以认为, 早白垩世巴雷姆期—阿普第期我国北方地区曾发生多次区域性大火。

致谢: 兰州大学地质与矿产资源学院闫德飞副教授对炭屑的植物种属的进行了鉴定, 中国科学院兰州油气中心王永莉研究员、吴应琴老师及高苑同学在样品测试中提供了帮助与支持, 在此一并致谢。

参 考 文 献

陈会军, 刘招君, 柳蓉, 郭巍, 肖国平, 吴彦斌, 付占荣, 史冀忠,

- 胡晓峰, 孟庆涛. 2009. 银额盆地白垩统巴音戈壁组油页岩特征及古环境. 吉林大学学报, 39(4): 669~675.
- 付国斌, 李罡, 任玉光, 任忠跃, 丁良堂. 2007. 内蒙古呼伦陶勒盖下白垩统巴音戈壁组的叶肢介化石. 古生物学报, 46(2): 244~248.
- 黄晓葛. 1999. 考古标本岩石磁性的初步研究. 地球物理学报, 42(5): 660~668.
- 康延菊. 2008. 中国近海沉积物中黑碳与多环芳烃的研究, 青岛: 中国科学院海洋研究所. 硕士论文.
- 李文厚. 1997. 苏红图—银根盆地白垩统层序地层学研究. 沉积学报, 15(3): 18~22.
- 罗运利, 陈怀成, 吴国焯, 孙湘君. 2001. 南海最近 3 个冰期旋回中的天然火与气候—ODP1144 孔深海沉积中的炭屑记录. 中国科学 D 辑, 31(10): 854~860.
- 彭维松, 王启飞, 薛铎, 卢辉楠, 张放. 2003. 内蒙古银根—额济纳旗盆地白垩纪轮藻化石. 微体古生物学报, 20(4): 365~376.
- 沈文杰. 2007. 二叠—三叠纪界线事件的矿物学—地球化学解译. 广州: 中国科学院地球化学研究所. 博士论文.
- 沈文杰, 林杨挺, 孙永革, 徐琳, 张华. 2008. 浙江省长兴县煤山剖面二叠—三叠系过渡地层中的黑碳记录及其地质意义. 岩石学报, 24(10): 2407~2414.
- 沈文杰, 张华, 孙永革, 林杨挺, 梁婷, 杨志军, 周永章. 2012. 二叠纪—三叠纪界线大火燃烧的地层记录: 研究进展回顾与评述. 地球科学进展, 27(6): 613~623.
- 孙湘君, 李逊, 陈怀成. 2000. 南海北部最近 37ka 以来天然火与气候. 中国科学(D 辑), 30(2): 163~168.
- 谭志海, 黄春长, 庞奖励, 周群英. 2008. 陇东黄土高原北部全新世野火历史的木炭屑记录. 第四纪研究, 28(4): 733~738.
- 卫平生, 姚清洲, 吴时国. 2005. 银根—额济纳旗盆地白垩纪地层、古生物群和古环境研究. 西安石油大学学报(自然科学版), 20(2): 17~22.
- 吴仁贵, 周万蓬, 刘平华, 张雷, 徐喆. 2009. 关于内蒙古巴音戈壁盆地早白垩世地层的讨论. 地层学杂志, 33(1): 87~90.
- 吴少波, 白玉宝, 杨友运. 2003. 内蒙古银根盆地白垩统沉积相. 古地理学报, 5(1): 36~43.
- 续颜. 2011. 内蒙古东部霍林河煤田早白垩世古火灾研究. 长春: 吉林大学地球科学学院. 博士论文.
- 阎桂林. 1996. 考古磁学—磁学在考古中的应用. 物探与化探, 20(2): 140~148.
- 殷鸿福. 1988. 中国古生物地理学. 北京: 中国地质大学出版社, 250~267.
- 占长林, 曹军骥, 韩永明, 安芷生. 2011. 火灾历史重建的研究进展. 地球科学进展, 26(12): 1248~1259.
- 张爱平. 2002. 内蒙古银根盆地查干凹陷构造特征及其与油气关系. 北京: 中国地质大学. 硕士论文.
- 张明震, 戴霜, 陈世强, 张文防, 张永全, 赵杰, 张莉莉, 张瑞. 2013. 内蒙古银根—额济纳旗盆地白垩统中硅化木化石及其沉积环境. 地质学报, 87(8): 1059~1066.
- Batten D J. 1975. Wealden palaeoecology from the distribution of plant fossils. Proc. Geol. Ass. London, 85: 433~458.
- Bergman N M, Lenton T M, Watson A J. 2004. COPSE: a new model of biogeochemical cycles over Phanerozoic time.

- American Journal of Science, 304:397~437.
- Belcher C M, McElwain J C. 2008. Limits for combustion in low O₂ redefine paleoatmospheric predictions for the Mesozoic. *Science*, 231:1197~1200.
- Berner R A. 2006. GEOCARBSULF: a combined model for Phanerozoic atmospheric O₂ and CO₂. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70:5653~5664.
- Bond W J And Scott A C. 2010. Fire and the spread of flowering plants in the Cretaceous. *New Phytologist*, 188: 1137~1150.
- Chaloner W G. 1989. Fossil charcoal as an indicator of palaeoatmospheric oxygen level. *Journal of the Geological Society*.
- Huang Chunchang, Pang Jiangl, Chen Shu'e, Su Hongxia, Han Jia, Cao Yanfeng, Zhao Wenyu, Tan Zhihai. 2006. Charcoal records of fire history in the Holocene loess-soil sequences over the southern Loess Plateau of China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 239: 28~44.
- David M J, Jennifer K B, Paulo A, Bond W J, Carlson J M, Cochrane M A, Antonio C M, DeFries R S, Doyle J C, Harrison S P, Johnston F H, Keeley J E, Krawchuk M A, Kull C A, Marston J B, Moritz M A, Prentice I C, Roos C I, Scott A C, Swetnam T W, Werf G R, Pyne S J. 2009. Fire in the Earth System. *Science*, 324:481~484.
- Falkowski P G, Katz M E, Milligan A J, Fennel K, Cramer B S, Aubry M P, Berner R A, Novacek M J, Zapol W M. 2005. The rise of oxygen over the past 205 million years and the evolution of large placental mammals. *Science*, 309: 2202~2204.
- Glasspool and Scott. 2010. Phanerozoic concentrations of atmospheric oxygen reconstructed from sedimentary charcoal. *Nature*, DOI: 10.1038/NGE0923.
- Glasspool I J, Edwards D and Axe L. 2004. Charcoal in the Silurian as evidence for the earliest wildfire. *Geology*, 32: 381~383.
- Glasspool I J. 2000. A major fire event recored in the mesofossils and petrology of the Late Permian, Lower Whybrow coal seam, Sydney Basin, Australia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164(1~4):357~380.
- Goldberg E D. 1985. Black carbon in the environment. New York: John Wiley and Sons, 199.
- Jiang Chunqing, Alexander R, Robert I K, Murray A P. 1998. Polycyclic aromatic hydrocarbons in ancient sediments and their relationships to palaeoclimate. *Organic Geochemistry*, 29(5~7): 1721~1735.
- Jones T P, Scott A C, and Matthey D P. 1993. Investigation of "fusain transition fossils" from the Lower Carboniferous; Carboniferous with modern partially charred wood. *International Journal of Coal Geology*, 22(1): 37~59.
- Jones T P. 1993. New morphological and chemical evidence for a wildfire origin for fusain from comparisons with modern charcoal. *Special Papers in Palaeontology*, 49: 113~123.
- Jones T P. and Chaloner W G. 1991a. Fossil charcoal, its recognition and paleoatmospheric significance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 97: 39~50.
- Jones T P, Scott A C, Cope M. 1991b. Reflectance measurements and the temperature of formation of modern charcoals and implications for studies of fusain. *Bull. Soc. Géol. France*, 162: 193~200.
- Joseph J W, William D G, Brooks S J, Coe A L, Xu S. 2011. Vegetation, climate and fire in the eastern Andes (Bolivia) during the last 18, 000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 312: 115~126.
- Krawiecki A. 1982. The burning of the hillfort at Maiden Castle, Bickerton Hill, Cheshire. Unpubl. BSc thesis. Department of Geography, University of Liverpool.
- Mark W H and Alex Chepstow-Lusty. 2002. Magnetic properties of charcoal rich deposits associated with a Roman bath-house, Butrint (Southern Albania), 27(25~31): 1333~1341.
- Lawrence H T, Xin Wang, Morabito A C. 2012. Fossil charcoal from the Middle Jurassic of the Ordos Basin, China and its paleoatmospheric implications. *Geoscience Frontiers*, 3(4) : 493~502.
- Masiello C A. 2004. New directions in black carbon organic geochemistry. *Marine Chemistry*, 92(1/4): 201~213.
- Oldfield F, Thompson R and Dickson D P. 1981. Artificial enhancement of stream bedload: a hydrological application of superparamagnetism. *Phys. Earth Planet. Int.*, 26,107~124.
- Oldfield F, Krawiecki A, Maher B, Taylor J J, Twigger S. 1985. The role of mineral magnetic measurements in archaeology. *Palaeoenvironmental investigations: research design, methods and data analysis*, 1985: 29~43.
- Rosa J M, González-Pérez J A, González-Vázquez R, Knicker H, Capel E L, Manning D A, González F J. 2008. Use of pyrolysis/GC-MS combined with thermal analysis to monitor C and N changes in soil organic matter from a Mediterranean fire affected forest. *Catena*, 74: 296~303.
- Sarah 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.
- Schmidt M W and Noack A G. 2000. Black carbon in soils and sediments: analysis, distribution, implications, and current challenges. *Global Biogeochemical Cycles*, 14(3):777~793.
- Scott A C. 1989. Observations on the nature and origin of fusain. *International Journal of Coal Geology*, 12:443~475.
- Scott A C, Jones T P. 1994. The nature and influence of fire in Carboniferous ecosystems. *Palaeogeography Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 106: 91~112.
- Scott A C. 2000a. The pre-quaternary history of fire. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 164: 281~329.
- Scott A C, Lomax B H, Collinson M E, Upchurch G R, Beerling D J. 2000b. Fire across the K-T boundary: initial results from the Sugarite Coal, New Mexico, USA. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164: 381~395.
- 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*, 86 (4):949~962.
- Simoneit B R, Rogge W F, Lange Q, Jaffe R. 2000. Molecular characterization of smoke from campfire burning of pine wood (*Pinus elliottii*). *Chemosphere: Global Change Science*, 2:107~122.
- Smith D M, Griffin J J, Goldberg E D. 1973. Element carbon in marine sediments: A base line for burning. *Science*, 241: 268~270.
- Tanner L H, Wang X, Morabito A C. 2012. Fossil charcoal from the Middle Jurassic of the Ordos Basin, China and its paleoatmospheric implications. *Geoscience Frontiers*, 3 (4) : 493~502.
- Wenjie Shen, Yongge Sun, Yangting Lin, Dehan Liu, Pingxia Chai. 2011. Evidence for wildfire in the Meishan section and implications for Permian-Triassic events. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75 (2011) :1992~2006.
- Zhu Rixiang, Pan Yongxin, He Huaiyu, Qin Huafeng, Ren Shoumai. 2008. Palaeomagnetism and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age from a Cretaceous volcanic sequence, Inner Mongolia, China: Implications for the field variation during the Cretaceous normal superchron. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 169, 59~75.

Early Cretaceous Paleo-Wildfire Events Recorded on the Wulan Section in the Urat Back Banner of Inner Mongolia, China

ZHANG Rui¹⁾, DAI Shuang¹⁾, ZHANG Mingzhen¹⁾, ZHAO Jie^{1,2)}, WANG Lubo¹⁾,
ZHANG lili¹⁾, ZHANG Xiang^{1,3)}, LIU Haijiao¹⁾

1) *Research School of Arid Environment and Climate Change, & Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou, 730000;*

2) *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100081;*

3) *Geological Survey Institute of Gansu Province, Lanzhou, 730000*

Abstract

The Paleo-wildfire event was a common phenomenon during the Cretaceous, it is significant to research these Palaeo-wildfire events for understanding the palaeoclimate and palaeogeography. But there are little report in China. We firstly found three charcoal-bearing layers in the early Cretaceous strata on the Wulan section in the east of Yingen-Ejinaqi basin, Inner Mongolia. There are obvious burning feature and undestroyed structure of wood cells in the charcoal. Meanwhile, the measurement of the PAHs shows the occurrence of the Phe, Fla, Pyr, Chr, BaAn, Bep, etc., which employed the combustion sources in the samples. These demonstrate that the charcoal was the remains of the wildfire, which the combustion temperature would be higher than 520°C. In conjunction with the analysis of palynologic data and sedimentary environment as well as measurement of the magnetic susceptibility, we propose these charcoal-bearing layers on the Wulan section probably indicate three stages of wildfire in early Cretaceous. The wildfire might happened in adjacent region with the flourishing tall arbors, including Coniferae and Taxodiaceae. Considering these finds and the wildfire in the Huolinhe coal by other researchers may suggest that the north of China had happened frequent wildfire events during the early Cretaceous, and it was the part of the wildfire belt in the mid-latitude area of northern hemisphere during the Cretaceous.

Key words: charcoal; PAHs; paleo-wildfire; Yingen-Gejina Basin; Inner Mongolia; Early Cretaceous