中国科学: 地球科学 2021 年 第 51 卷 第 5 期: 753 ~ 762
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

中国北疆泥盆纪角质残植煤的发现及其对比研究

宋到福[1*], 王铁冠[1], 钟宁宁[1], 陈媛[1], 何登发[2], 李涤[2]

1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;
2. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083
* 通讯作者, E-mail: songdaofu2008@163.com

收稿日期: 2020-06-17; 收修改稿日期: 2020-10-08; 接受日期: 2020-10-13; 网络版发表日期: 2021-02-03
国家自然科学基金项目(批准号: 42073069)资助

摘要 泥盆纪角质残植煤是陆生植物早期演化阶段形成的特殊煤种. 此前, 中国只在南方扬子地区有过发现, 其中以云南禄劝泥盆纪角质残植煤最为有名. 近年来, 我们在准噶尔盆地西北缘布龙果尔地区的泥盆纪地层中发现和证实了此特殊煤种的存在, 且其地质时代与云南禄劝角质残植煤一致, 为中泥盆世吉维特期. 北疆泥盆纪角质残植煤层状结构特征明显, 似纸片或树叶叠置而成, 因而此类型煤种又常被称为纸煤或叶片状煤. 其显微组分以条带状厚壁角质体为主, 含量均在60%以上, 个别样品中角质体含量可达80%以上, 条带状均质镜质体含量次之. 北疆与云南禄劝角质残植煤的显微组分组成特征相似, 但二者在成煤植物、成煤条件方面存在明显差异. 北疆泥盆纪角质残植煤成煤植物主要为原始石松类, 成煤环境为区域性河流或河漫滩; 而云南禄劝角质残植煤的成煤植物主要为原始蕨类, 其次为石松, 成煤环境为滨海-潟湖环境, 受海侵作用明显. 北疆与禄劝泥盆纪角质残植煤抽提物饱和烃馏分均以丰富的四环二萜烷为主, 但二者四环二萜烷的种类却明显不同, 前者以阿替烷为主, 后者以扁枝烷为主, 这可能与二者成煤植物不同有关.

关键词 北疆地区, 泥盆纪, 角质残植煤, 煤岩学, 生物标志物, 成煤植物

1 引言

在聚煤地质历史中, 泥盆纪占有特殊的地位. 泥盆纪既是全球性海陆变迁的转折时期, 又是植物从海洋走向陆地的过渡时期. 随着早期陆生植物的演化, 特别是维管植物的出现及发展, 泥盆纪时期陆地生态系统、大气、气候、环境等均发生了巨大变化(Algeo和Scheckler, 1998; Wilson等, 2017), 并于中泥盆世吉维特期在低纬度地区出现了首个由维管植物形成的森林, 因而泥盆纪成为了地史上最早形成腐植煤的聚煤时代(韩德馨等, 1996; Stein等, 2012; Giesen和Berry, 2013). 虽然泥盆纪时期的聚煤作用并不广泛, 且煤层较薄, 一般不具工业价值, 然而有关泥盆纪腐植煤的研究能够提供早期陆生植物演化及当时的古气候条件等重要信息, 具有十分重要的科学价值.

角质残植煤是指壳质组含量占有机显微组分60%以上, 且以角质体为主的特殊煤种(韩德馨等, 1996). 角质体来源于高等植物的叶和嫩枝、幼芽、果实的表

中文引用格式: 宋到福, 王铁冠, 钟宁宁, 陈媛, 何登发, 李涤. 2021. 中国北疆泥盆纪角质残植煤的发现及其对比研究. 中国科学: 地球科学, 51(5): 753–762, doi: 10.1360/SSTe-2020-0156
英文引用格式: Song D, Wang T, Zhong N, Chen Y, He D, Li D. 2021. Discovery of cutinitic liptobiolith in northwestern China and a comparative study with Luquan Devonian coal. Science China Earth Sciences, 64(4): 642–650, https://doi.org/10.1007/s11430-020-9688-1

© 2021 《中国科学》杂志社

皮所覆盖的角质层. 虽然角质层是化学稳定性最高的植物组织之一, 但角质体在煤岩中一般只是作为次要有机显微组分出现, 大量角质体的富集是非常少见的. 泥盆纪角质残植煤是陆生植物早期演化阶段形成的特殊煤种(Stach等, 1982; Nip等, 1989). 早期蕨类、石松等最原始的维管植物为了适应陆地环境, 防止水分过度蒸发、抵御细菌微生物的侵害以及防止强烈的紫外线照射, 在嫩枝、细茎上演化出一层厚厚的角质层(Kerstiens, 1996; Nawrath, 2006; Leide等, 2011). 然而由于早期原始维管植物的木质部并不发育, 因而在合适的条件下就沉积形成了以角质体为主要显微组分的角质残植煤. 此煤种特殊的组分、结构和成因特征研究可以提供泥盆纪时期古气候、古地理、古环境, 尤其是早期陆生植物演化等方面的重要信息.

泥盆纪角质残植煤只在世界范围内有限的几个地区有过发现, 如德国、西伯利亚、哈萨克斯坦及中国等地区(Ammosov, 1964; 韩德馨, 1964; 盛国英等, 1991; Volkova, 1994; 程顶胜等, 1995). 此前, 中国泥盆纪角质残植煤只在南方扬子地区有过发现与报道, 如云南禄劝、华坪和四川渡口地区等, 其中以云南禄劝角质残植煤最为著名(韩德馨, 1964; Han, 1989; 盛国英等, 1991; Sheng等, 1992; 韩德馨等, 1993, 1996; 程顶胜等, 1995, 1997; 权彪和韩德馨, 1997, 1998; Dai等, 2006; 孙德伟等, 2007; 刘文斌等, 2008). 近年来, 我们首次在北疆地区泥盆纪地层中发现和证实此特殊煤种的存在. 通过对云南禄劝与北疆泥盆纪角质残植煤进行研究, 对比分析了泥盆纪时期中国南方扬子与北疆准噶尔地区在成煤环境、成煤植物、古环境及古地理等方面的差异.

2 北疆泥盆纪角质残植煤的发现

北疆泥盆纪角质残植煤发现于准噶尔盆地西北缘和布克赛尔地区(宋到福, 2012; Song等, 2017). 在准噶尔盆地西北缘分布有众多的中新生代山间盆地, 包括塔城盆地、托斯特盆地、和什托洛盖盆地及和丰盆地, 泥盆纪角质残植煤便出露于和丰盆地南缘的布龙果尔坳陷内(图1), 恰好处于谢米斯台与沙尔布尔提褶皱造山带的交汇部位, 其产出层位为泥盆纪呼吉尔斯特组(D_2h). 呼吉尔斯特组地层按岩性可以划分为两部分: 下部为火山岩段, 岩性主要有深色杏仁状橄榄玄武岩、黄绿色凝灰岩、凝灰质角砾岩及少量灰黑色泥质粉砂岩; 上部为正常碎屑岩段, 其岩性主要为灰色薄层砂岩、砂砾岩, 黄绿色细砂岩、粉砂岩夹碳质泥岩及薄煤层和煤线(包括角质残植煤). 呼吉尔斯特组顶部发育一套粗面岩建造, 产出稳定, 在整个谢米斯台山东端均有出露, 厚度大约为15m左右, 可以作为区域性的标志层.

呼吉尔斯特组地层自建立以来, 其地质时代就被笼统定为中泥盆世, 被认为可能代表中泥盆世晚期的一套地层(侯洪飞等, 1979; 窦亚伟, 1983; 肖世禄等, 1992). 和布克赛尔地区呼吉尔斯特组地层中产有大量的植物化石, 该植物群被称为呼吉尔斯特植物群, 是中国北方区中泥盆世晚期植物群的典型代表(徐洪河等, 2015). 有关该植物群微体化石、煤岩学、孢粉组合等大量的研究证实, 呼吉尔斯特组具体的地质时代为中泥盆世晚期, 相当于吉维特期(蔡重阳和王怿, 1995; 卢礼昌, 1997; 蔡重阳, 2000; 王怿等, 2004; Xu等, 2012a, 2014; 徐洪河等, 2015). 这与中国南方云南禄劝地区泥盆纪角质残植煤的产出时代一致(盛国英等, 1991; 韩德馨等, 1993; 程顶胜等, 1995).

3 北疆泥盆纪角质残植煤产状及有机显微组分特征

3.1 北疆泥盆纪角质残植煤的产状及宏观特征

北疆泥盆纪角质残植煤出露不稳定, 厚度只有几厘米到十几厘米(图2a、2b), 最厚可达40cm左右, 沿走向煤层厚度变化明显, 局部可见煤层尖灭或夹矸增多等现象. 在远离煤层主体出露部位, 还可见富含角质体残片的含砾砂岩(图2c). 角质残植煤外观总体呈黑色, 但因风化及夹矸增多亦可呈灰白、深灰、黄褐等颜色, 新鲜切面具有油脂光泽. 该特殊煤种最为明显的特征是层状结构特征明显, 宛如一层层纸片或树叶叠置在一起, 因而它们又常被称为“纸煤”或“叶片煤”(图2d~2f). 遭受风化后薄片可层层剥离, 不透明, 微具弹性; 层状角质残植煤局部可发生褶曲变形(图2d). 北疆泥盆纪角质残植煤已经成熟并大量生烃, 在煤层顶部普遍可见一层固体沥青(图2a、2b), 而且煤层上下地层的孔隙、空洞也均已被固体沥青所填满, 表明角质残植煤或角质碎屑具有很强的生烃能力.

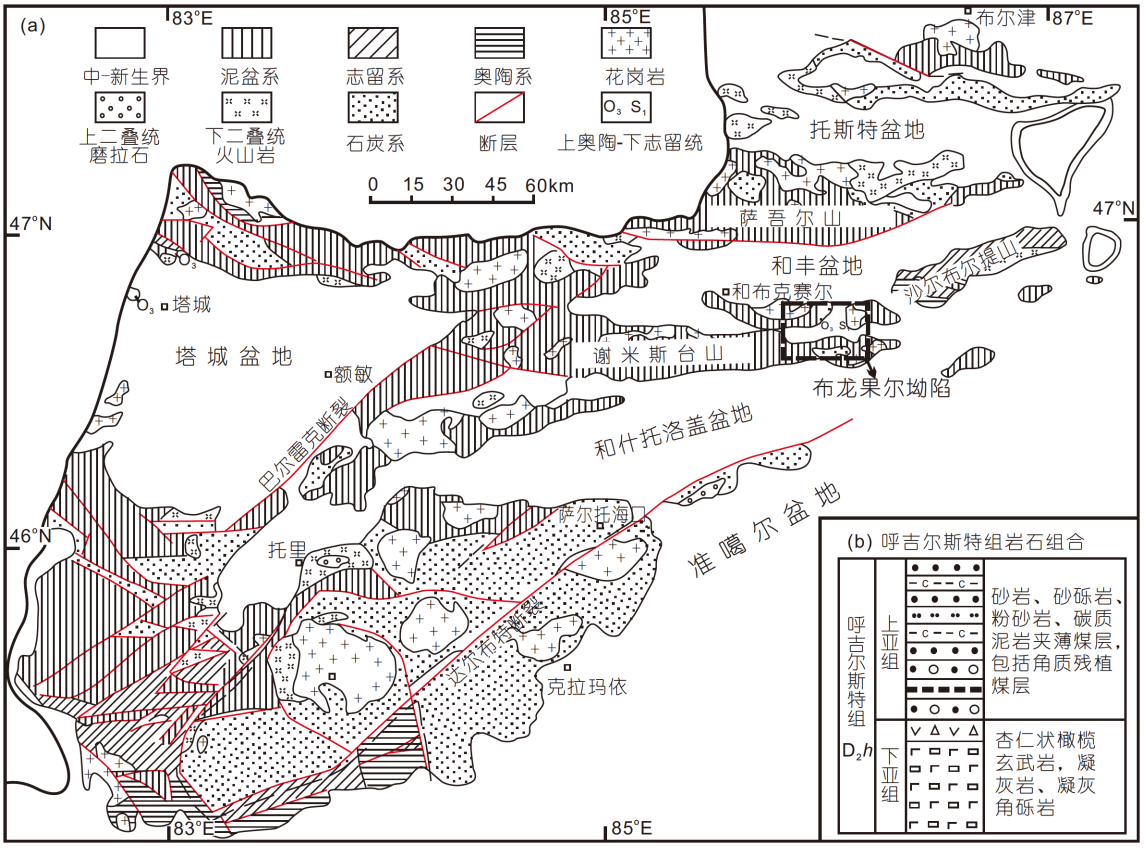

图 1　准噶尔盆地西北缘区域地质图(a)与呼吉尔斯特组岩石组合柱状图(b)

3.2　北疆泥盆纪角质残植煤的显微煤岩学特征

北疆泥盆纪角质残植煤有机显微组分以角质体为主, 含量一般在60%以上, 部分样品中角质体含量可达80%以上, 其次为镜质体, 主要为均质镜质体, 含量<35%, 另外还含少量壳屑体、镜屑体、孢子体和惰屑体(表1). 在垂向切面上, 角质体与镜质体呈长条带状平行交替叠置. 在遭受风化作用后或在外力作用下, 角质残植煤可沿泥质隔层一层层剥离, 每层剥离薄片均是由两侧条带状角质体及夹在中间的镜质体组成, 这其实反映了原始成煤植物叶片或嫩枝的轮廓特征(图3). 角质体厚度一般在50~230μm, 为厚壁角质体, 反映了中泥盆世原始蕨类与石松植物为了适应陆地环境、防止水分过度蒸发、抵御细菌微生物的侵害以及防止强烈的紫外线照射, 角质化组织比较发育. 多数情况下叶片状角质体具不明显的锯齿状内缘, 连续状. 由于角质体特别坚韧, 因而在反射光下常呈明显突起.

与角质体共生的均质镜质体发育垂直层理方向的裂纹, 呈断续状, 断续是内生裂隙发育造成的, 一方面反映中泥盆世原始蕨类与石松类植物木质部还不发育, 另一方面说明其是植物木质组织经强烈凝胶化作用后又经煤化过程脱水收缩而成(图3a~3c). 叶片状角质残植煤中的均质镜质体与其上下边缘的镶边角质体表现为一个整体, 呈断续状的均质镜质体条带厚薄有变化, 但都随连续状角质体延伸而延伸, 随其弯曲而弯曲, 局部有尖灭, 反映了中泥盆世叶片状角质残植煤是由原始陆生植物的角质体与凝胶化物质共同组成的. 样品实测的镜质组最高反射率介于0.58~0.65%, 角质体反射率介于0.16~0.25%. 被角质体镶边的均质镜质体主要来源于植物的叶片和嫩枝, 又被称为“叶镜质体”(韩德馨等, 1996). 叶镜质体及其他被大量富氢角质体包围的镜质组的反射率非常容易受到抑制, 因而在低煤化阶段, 其反射率往往低于正常镜质组(Hutton和Cook, 1980; Price和Baker, 1985; 韩德馨等, 1996).

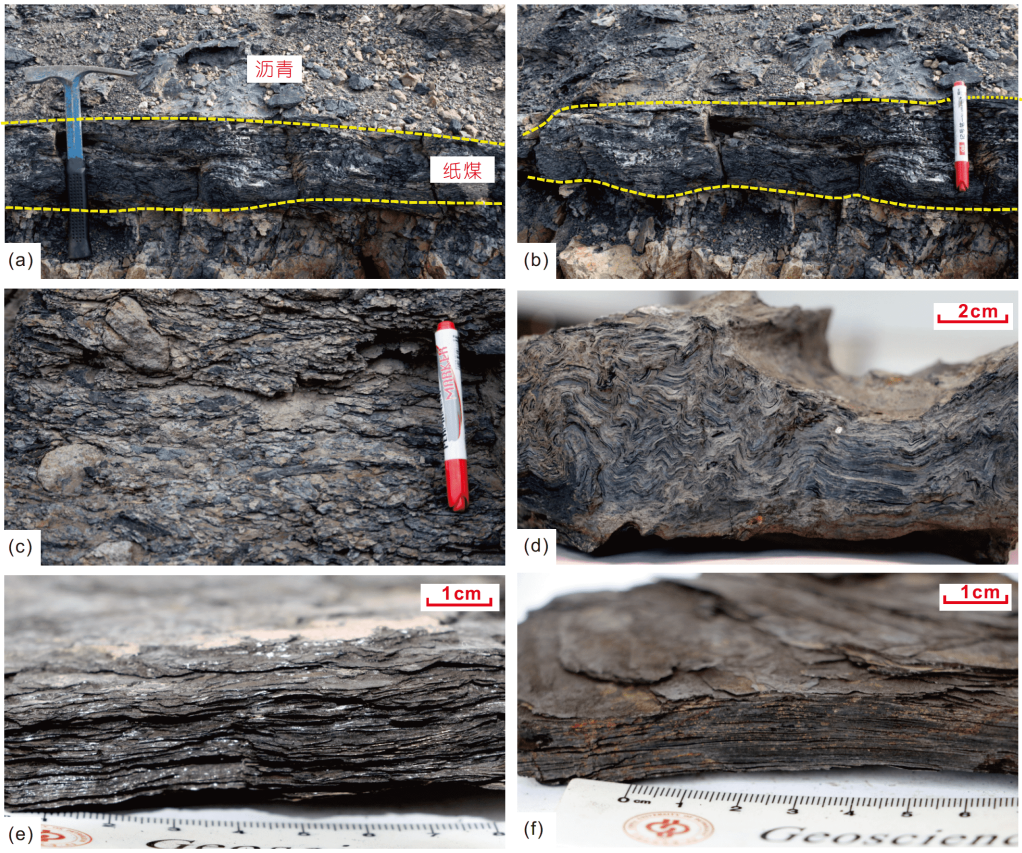

图 2　北疆泥盆纪角质残植煤的产状及宏观特征

表 1　北疆泥盆纪角质残植煤显微煤岩组分、反射率及其他地化参数

样品编号	显微煤岩组分(vol%, 无矿物基)						镜质组反射率 $R_{o,max}$(%)	角质体反射率 $R_{o,max}$(%)	惰屑体反射率 $R_{o,max}$(%)	B元素 (μg g^{-1})	Th/U
	角质体	均质镜质体	壳屑体	镜屑体	惰屑体	孢子体					
BCC-1	69.0	28.3	1.3	0.8	0.6	0	0.62	0.19	1.12	2.95	2.97
BCC-2	80.1	15.9	2.6	1.0	0.4	0	0.64	0.22	1.22	4.76	3.98
BCC-3	65.5	31.3	1.5	1.2	0.4	0.1	0.58	0.20	1.13	0.87	2.75
BCC-4	66.7	30.2	1.2	1.0	0.8	0.1	0.65	0.25	1.34	2.80	2.64
BCC-5	70.2	25.6	2.2	1.7	0.3	0	0.65	0.23	1.30	2.76	3.96
BCC-6	70.6	26.5	1.6	0.8	0.5	0	0.58	0.16	1.08	0.54	3.40

根据程顶胜等(1995)建立的泥盆纪角质残植煤中富氢镜质组与正常镜质组反射率之间的关系，北疆泥盆纪角质残植煤对应的正常镜质组反射率应该介于0.80~0.90%，变质程度已达气-肥煤阶段，这也与样品已大量生烃相吻合. 显微镜下，镜质体均无荧光，角质体呈现暗褐色荧光或无荧光，但在均质镜质体裂隙及泥质隔层空隙中残存有大量的液态烃类，荧光强烈(图3d、3f、3h). 强烈的风氧化作用可能是造成北疆角质残植煤角质体荧光较弱或消失的主要原因，如云南禄劝泥盆纪上部煤层出露地表，遭受强烈的风氧化作用，其角质体仅具有非常弱的褐色荧光，其荧光强度比其下部未风化煤低数十倍(程顶胜等, 1995).

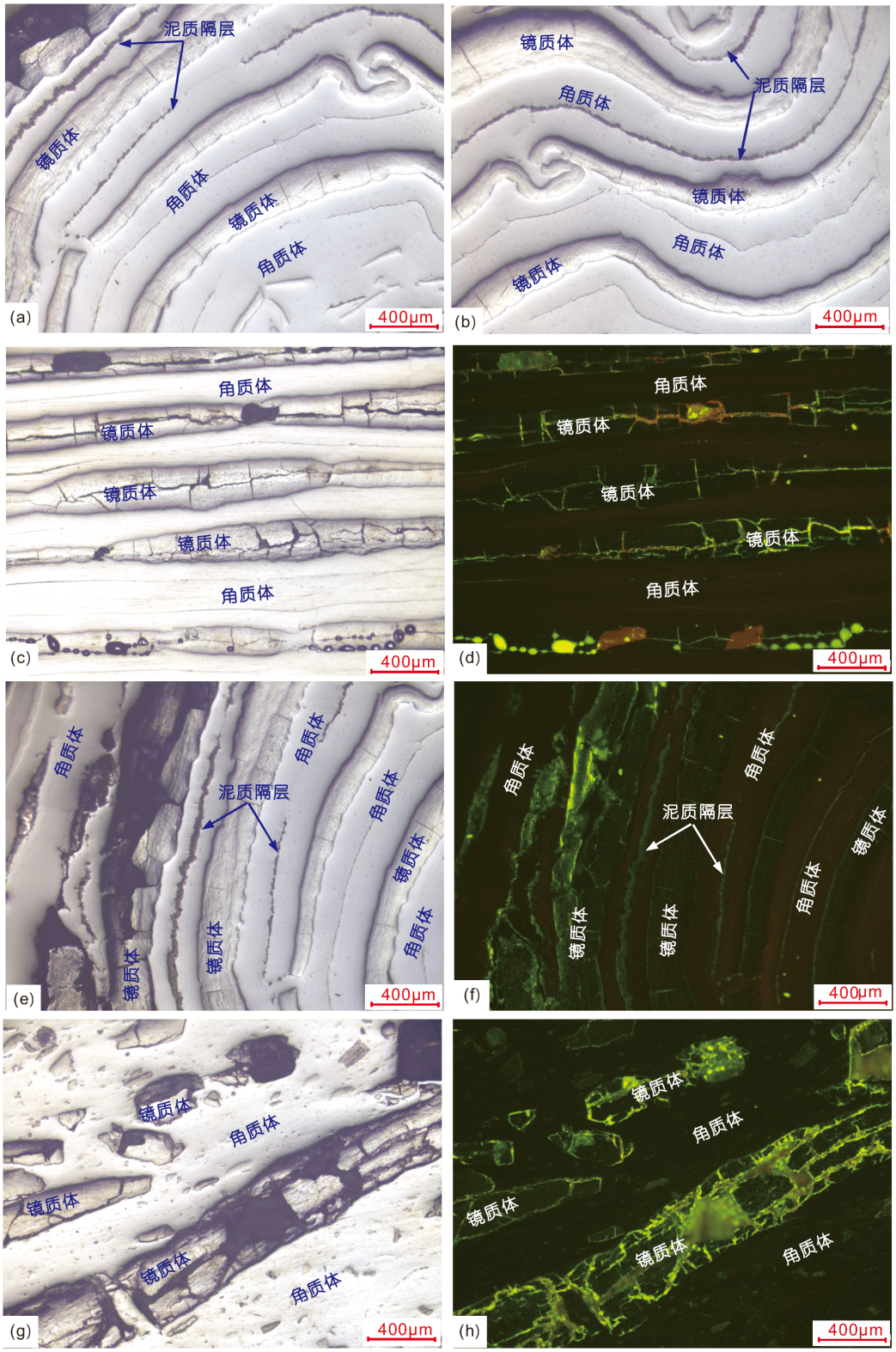

图 3　北疆泥盆纪角质残植煤的微观特征

(a)、(b)、(c)、(e)、(g)为反射光; (d)、(f)、(h)为荧光

4 北疆与云南禄劝泥盆纪角质残植煤的对比研究

4.1 云南禄劝泥盆纪角质残植煤的产层及煤岩学特征

云南禄劝角质残植煤产出于中泥盆统海口组中, 该组为一套以灰紫色、灰绿色泥岩、页岩和粉砂岩为主, 夹浅色砂岩及碳酸盐岩的含煤岩系(韩德馨等, 1996). 煤层不稳定, 呈透镜状, 厚度10~30cm. 禄劝角质残植煤基本属于原地成因类型, 时代相当于中泥盆世吉维特早期(权彪, 1989; 权彪和韩德馨, 1998; 刘文斌等, 2008).

禄劝泥盆纪角质残植煤的叶片状结构明显, 显微组分组成与北疆角质残植煤相似, 以条带状角质体为主, 角质体含量一般也超过60%, 最高也可达90%以上, 既有厚壁角质体也有薄壁角质体; 镜质体含量次之, 含有少量孢子体(韩德馨, 1964; Han, 1989; 韩德馨等, 1993, 1996; 程顶胜等, 1995; Dai等, 2006; 刘文斌等, 2008). 与北疆泥盆纪角质残植煤不同, 禄劝角质残植煤的成熟度较低, 实测镜质组反射率介于0.37~0.59%, 其变质程度处于褐煤-长焰煤阶段(盛国英等, 1991; 程顶胜等, 1995, 1997; 韩德馨等, 1996; 程顶胜, 2006; Dai等, 2006; 刘文斌等, 2008).

4.2 北疆及云南禄劝泥盆纪角质残植煤的成煤植物

呼吉尔斯特植物群主要基于产自新疆北部呼吉尔斯特组上段地层中的植物化石组合而得名, 是中国北方区中泥盆世晚期植物群的典型代表(徐洪河等, 2015), 和布克赛尔县布龙果尔地区的呼吉尔斯特组地层便是该植物群最具代表性和研究最多的剖面之一. 该区呼吉尔斯特组地层中植物大化石由石松类、工蕨类、早期真蕨类和前裸子植物所组成, 且以石松植物占主体, 主要包括*Haskinsia*、*Colpodexylon*、*Leclercqia*和*Hoxtolgaya*等(王怿等, 2004; Xu等, 2008, 2011, 2012a; Xu和Wang, 2008, 2011; 徐洪河等, 2015); 孢子组合是以含众多的*Cymbosporites*为代表的具栎类型的三缝小孢子为特征, 该孢子的母体植物为石松类植物(卢礼昌, 1997; Xu等, 2012b, 2014). 虽然北疆泥盆纪角质残煤中未见丰富的孢子体, 但在角质残植煤顶、底板的泥岩、碳质泥岩、砂砾岩以及煤层砂岩透镜体与泥岩夹矸中, 均见到了大量的石松类大植物化石以及*Cymbosporites magnificus*类孢子体(母体植物为石松类植物). 特别是Xu等(2014)对研究区呼吉尔斯特组地层自下而上进行了连续采样分析, 结果证实该组古植物群均以石松类植物占据主体(Xu等, 2014; 徐洪河等, 2015). 以上证据表明, 北疆泥盆纪角质残植煤的主要成煤植物应该为原始的石松类.

云南禄劝地区海口组在临近的曲靖地区又被称为西冲组, 二者为同期异相的同一套地层(彭辉平等, 2016). 西冲组(海口组)地层中产出的植物组合被称为"西冲植物群", 是中国南方区代表性的中泥盆世晚期植物群(Givetian, Wang等, 2007). 前人研究表明, 西冲植物群代表了中泥盆世晚期非常特化的植物组合, 以地方性分子为主, 与同期的北疆呼吉尔斯特组植物群显著不同(Schweitzer和Cai, 1987; Wang和Berry, 2001; Wang等, 2007; 徐洪河等, 2015). 相应的, 北疆与云南禄劝泥盆纪角质残植煤的成煤植物也存在明显差异. 有关云南禄劝泥盆纪角质残植煤的成煤植物认识大同小异. 权彪和韩德馨等认为, 禄劝角质残植煤的成煤植物为原始蕨类植物(*Taeniocrada decheniana*)和原始石松类植物(如*Drepanophycus spinaeformis*), 其中又以原始蕨类植物*Taeniocrada decheniana*占优势(权彪, 1989; 权彪和韩德馨, 1997, 1998). 孙德伟等(2007)通过对云南禄劝角质残植煤的角质层进行再研究, 认为权彪和韩德馨(1997)鉴定的*Taeniocrada decheniana*应该为*Orestovis cf. devonica*植物类型, 因而认为蕨类植物*Orestovia cf. devonica*为云南禄劝角质残植煤的主要成煤植物. 总体来看, 禄劝泥盆纪角质残植煤的成煤植物主要为原始蕨类, 其次为石松类等(Han, 1989; 权彪, 1989; 程顶胜等, 1995; 韩德馨等, 1996; 权彪和韩德馨, 1997, 1998; Dai等, 2006). 与禄劝角质残植煤相似, 著名的西伯利亚库兹巴斯盆地的中泥盆世"巴尔扎斯煤"(角质残植煤, Givertian)的成煤植物亦为原始蕨类, 主要为*Orestovia(Himanthaliopsis) devonia* (Ergolskaya, 1936; 韩德馨, 1964).

中泥盆世时期, 新疆北部和布克赛尔地区与华南地区均处于古赤道热带地区, 但彼此相互孤立, 位于不同的古陆块上, 其中新疆北部和布克赛尔地区位于赤道以北, 而华南地区位于赤道以南(徐洪河等, 2015). 虽然北疆与云南角质残植煤均形成于热带气候, 然而它们的成煤环境却不尽相同. 有关北疆呼吉

尔斯特组地层沉积环境的认识存在两种不同观点，早前有学者认为该组为一套滨-浅海相沉积(卫巍等, 2009)，但随着对其岩相学的深入研究以及陆相植物化石的发现，越来越多的学者更趋向于认为该组应该为一套陆相河流碎屑岩沉积(Xu等, 2014; 龚一鸣和纵瑞文, 2015; 徐洪河等, 2015; 翁凯等, 2017; 张郁聆, 2018). 徐洪河等(2015)更是从岩石组合、植物化石、煤岩学及碳同位素组成等几个方面，论证了和布克赛尔地区呼吉尔斯特组为一套陆相河流沉积. 在研究过程中，我们对角质残植煤的元素组成进行了分析，极低的B元素含量(0.54~4.76 μg g^{-1})及高Th/U值(2.64~3.98)均进一步证实，北疆角质残植煤的沉积背景应该是陆相区域性河流或河漫滩，且未受海侵作用影响(表1; Chou, 1984; Goodarzi和Swaine, 1994; Zeng等, 2005; Dai等, 2006). 与此明显不同，禄劝泥盆纪角质残植煤沉积于滨海-潟湖环境，受海侵作用明显(程顶胜等, 1995; 权彪和韩德馨, 1997; Dai等, 2006).

4.3　北疆及云南禄劝泥盆纪角质残植煤的有机地球化学组成特征

无论是未-低成熟云南禄劝角质残植煤还是成熟的北疆泥盆纪角质残植煤，饱和烃馏分均以丰富的四环二萜类化合物为主，正构烷烃含量很低，甾、藿类生物标志物含量更少(图4; 表2; 盛国英等, 1991; Sheng等, 1992; 程顶胜等, 1997; Song等, 2017). 角质残植煤中丰富的四环二萜类化合物的前驱物可能是原始陆生植物角质层的重要组成部分，且在水生生物向陆生植物进化过程中发挥了关键作用. 然而，禄劝及北疆泥盆纪角质残植煤中四环二萜类化合物的组成却不尽相同. 其中，禄劝角质残植煤中四环二萜类化合物主要为扁枝烷和白叶烷，北疆角质残植煤中四环二萜类以阿替烷类为主，这一差异应该与它们的成煤植物不同有关. 植物表皮角质层主要由角质和蜡质两部分组成. 其中，蜡质在植物抗逆中起到至关重要的作用，其主要成分为脂溶性的长链脂肪酸，是高等生源沉积物中正构烷烃最主要的来源. 然而，禄劝及北疆地区的角质残植煤中正构烷烃的含量却极低，这是否意味着最原始陆生植物角质层结构与现代植物可能并不相同，早期植物角质层可能并不发育角质蜡，角质蜡应该是在后期逐渐演化而来.

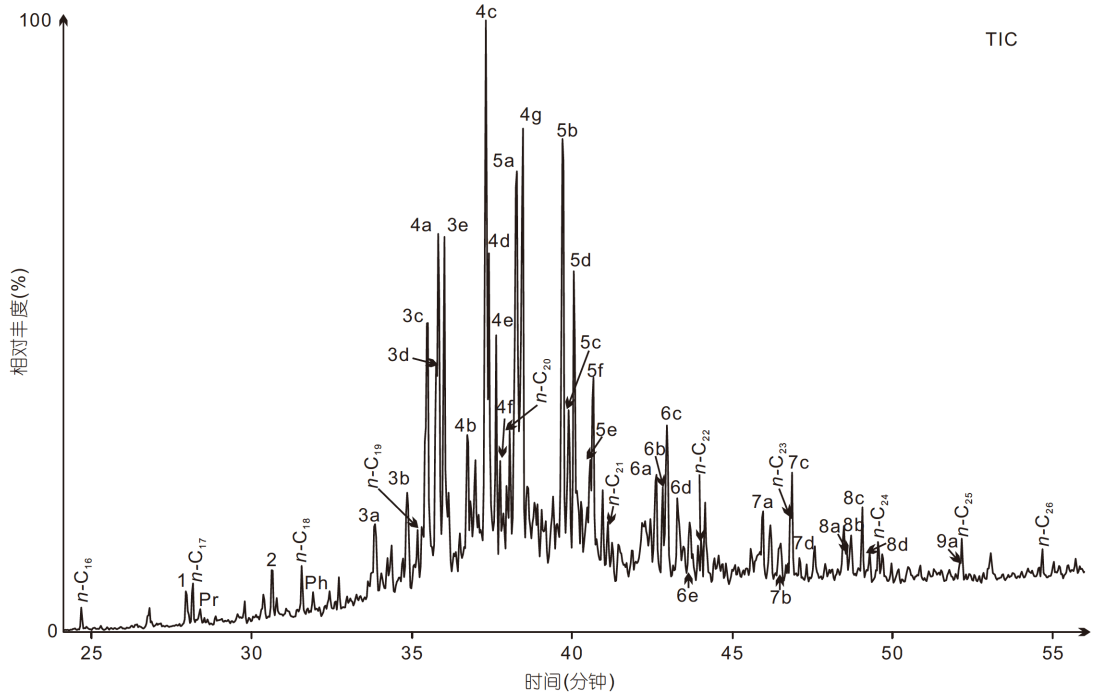

图 4　北疆泥盆纪角质残植煤抽提物饱和烃总离子流图

具体的分子化合物名称见表2

表 2　北疆泥盆纪角质残植煤萜类化合物鉴定结果[a)]

峰号	分子式	分子量	基峰(*m*/*z*)	关键离子碎片(*m*/*z*)	化合物名称
1	$C_{16}H_{28}$	220	149	109、205	三环萜
2	$C_{17}H_{30}$	234	149	109、121、219	
3a~3e	$C_{18}H_{30}$	246	231	109、149、175、217	脱甲基四环二萜烷
4a~4f	$C_{19}H_{32}$	260	245、189(4d), 231(4a)、123(4f)	109、163、189、217	
5a	$C_{20}H_{34}$	274	123	189、245、259	白叶烷
5b	$C_{20}H_{34}$	274	123	231、259	阿替烷-1(13βH)
5c	$C_{20}H_{34}$	274	259	161、189、245	20-降-甲基阿替烷
5d	$C_{20}H_{34}$	274	123	189、245、259	阿替烷-2(13αH)
5e	$C_{20}H_{34}$	274	259	109、203	19,20-二降-乙基阿替烷
5f	$C_{20}H_{34}$	274	94	109、123、203、217	19-降-甲基阿替烷
6	$C_{21}H_{36}$	288	123/217	203、217、259、273	长链四环二萜烷类化合物
7	$C_{22}H_{38}$	302	123/(231)	245、259、287	
8	$C_{23}H_{40}$	316	123	217、231、259、281、287、301	
9	$C_{24}H_{42}$	330	123	207、231、281、287、315	
10	$C_{25}H_{44}$	344	207	123、281、329	

a) 据Song等(2017)

5　结论

北疆与云南禄劝泥盆纪角质残植煤层状结构特征明显，似纸片或树叶叠置在一起，均为俗称的“纸煤”. 除宏观特征外，二者的显微组分组成也相似，均以条带状角质体为主，含量一般在60%以上. 其次为镜质体, 但前者变质程度相对较高.

中泥盆世，北疆准噶尔与云南禄劝地区均处于赤道附近的热带地区，但二者相互独立，位于不同的古陆块上，在成煤植物及成煤环境上均有明显差异. 北疆泥盆纪角质残植煤成煤植物主要为原始石松类，成煤环境为区域性河流或河漫滩；云南禄劝角质残植煤的成煤植物主要为原始蕨类，其次为石松，成煤环境为滨海-潟湖环境. 北疆与云南禄劝泥盆纪角质残植煤中丰富的四环二萜类化合物的前驱物应该是原始陆生植物角质层的重要组成部分，但其前驱物组成及其在水生生物向陆生植物演化过程中的生物功能尚不明确. 此外, 泥盆纪角质残植煤中低含量的正构烷烃是否意味着原始陆生植物的角质层结构与现代植物并不相同, 早期植物角质层是否发育角质蜡, 这些问题都值得进行一步探讨.

参考文献

蔡重阳. 2000. 非海相泥盆系-中国地层研究二十年(1979~1999). 合肥: 中国科技技术大学出版社. 95–217

蔡重阳, 王怿. 1995. 泥盆纪植物群. 见: 李星学, 主编. 中国地质时期植物群. 广州: 广东科技出版社. 22–57

程顶胜. 2006. 中国泥盆纪煤有机地球化学特征. 中国煤田地质, 18: 7–10

程顶胜, 韩德馨, 盛国英. 1997. 中国泥盆纪煤生物标志物组成及四环二萜烷的成因. 石油勘探与开发, 24: 42–46

程顶胜, 韩德馨, 王延斌, 肖贤明, 盛国英. 1995. 中国泥盆纪煤煤岩研究. 煤田地质与勘探, 23: 25–28

窦亚伟. 1983. 古植物学. 见: 新疆地质局区域地质调查大队和地质研究所, 新疆石油局地质调查处, 主编. 中国西北新疆乌鲁木齐地区古生物学说明. 北京: 地质出版社. 561–614

龚一鸣, 纵瑞文. 2015. 西准噶尔古生代地层区划及古地理演化. 地球科学-中国地质大学学报, 40: 461–484

韩德馨. 1964. 云南禄劝泥盆纪角质残植煤的煤岩研究. 煤炭学报, 1: 95–99

韩德馨, 任德贻, 王延斌, 金奎励, 毛鹤龄, 秦勇. 1996. 中国煤岩学.

徐州: 中国矿业大学出版社. 169–175
韩德馨, 王延斌, 权彪, 程顶胜. 1993. 中国泥盆纪聚煤作用的演化. 煤田地质与勘探, 21: 1–6
侯洪飞, 项礼文, 赖才根, 林宝玉. 1979. 天山-兴安区古生代地层研究新进展. 地层学杂志, 3: 175–187
刘文斌, 胡凯, 秦建中, 陆现彩, 李志明, 姚素平. 2008. 云南禄劝残植煤的有机地球化学特征及其石油地质意义. 地球化学, 37: 68–76
卢礼昌. 1997. 新疆准噶尔盆地呼吉尔斯特组孢子组合. 微体古生物学报, 14: 295–314
彭辉平, 刘锋, 朱怀诚. 2016. 滇东曲靖、沾益地区下、中泥盆统岩石地层单位沿革概况及修改建议. 地层学杂志, 40: 318–334
权彪. 1989. 云南禄劝中泥盆世含煤岩系生物古生态研究. 硕士学位论文. 北京: 中国矿业大学. 1–90
权彪, 韩德馨. 1997. 华南中泥盆世成煤植物. 中国矿业大学学报, 26: 91–94
权彪, 韩德馨. 1998. 云南禄劝中泥世含煤岩系化石生态群落-兼论角质残植煤的成因. 中国矿业大学学报, 27: 298–301
盛国英, 傅家谟, 刘德汉, 陈小京, Simoneit B R T, 韩德馨. 1991. 富含于泥盆系角质残植煤中的四环二萜烷. 石油与天然气地质, 12: 107–116
宋到福. 2012. 准噶尔盆地西北缘布龙果尔泥盆系古油藏形成与破坏机制. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京). 17–19
孙德伟, 王怿, 徐洪河, 傅强. 2007. 云南禄劝中泥盆世晚期角质残植煤中植物角质层的再研究. 古生物学报, 46: 355–364
王怿, 徐洪河, 付强, 唐鹏. 2004. 新疆北部中泥盆世呼吉尔斯特组的一种细小植物. 古生物学报, 43: 461–471
卫巍, 庞绪勇, 王宇, 徐备. 2009. 北疆沙尔布尔提山地区早泥盆-早石炭世沉积相、物源演化及其意义. 岩石学报, 25: 689–698
翁凯, 徐学义, 马中平, 张雪, 成欢. 2017. 西准噶尔谢米斯台地区中泥盆统呼吉尔斯特组砂岩源区示踪. 新疆地质, 35: 127–133
肖世禄, 侯鸿飞, 吴绍祖. 1992. 新疆北部泥盆系研究. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社. 1–257
徐洪河, 蒋青, 张小乐, 王怿, 傅强, 冯净. 2015. 新疆西准噶尔中泥盆世呼吉尔斯特植物群的特征、时代、古环境以及古植物地理学意义. 古生物学报, 54: 230–239
张郁聆. 2018. 新疆东、西准噶尔中泥盆统典型剖面对比研究. 硕士学位论文. 西安: 长安大学. 49–51
Algeo T J, Scheckler S E. 1998. Terrestrial-marine teleconnections in the Devonian: Links between the evolution of land plants, weathering processes, and marine anoxic events. Philos Trans R Soc Lond B, 353: 113–130
Ammosov I I. 1964. Composition pétrographique des charbons humiques de l'USSR. Congr Intern Strat Geol Carbonifére, 3: 909–916
Chou C L. 1984. Relationship between geochemistry of coal and the nature of strata overlying the Herrin Coal in the Illinois Basin. Memoir Geol Soc China, 6: 269–280
Dai S F, Han D X, Chou C L. 2006. Petrography and geochemistry of the Middle Devonian coal from Luquan, Yunnan Province, China. Fuel, 85: 456–464
Ergolskaya Z V. 1936. Petrographic Study of Barzas Coals. Moscow: ONTI. 64
Giesen P, Berry C M. 2013. Reconstruction and growth of the early tree *Calamophyton* (Pseudosporochnales, Cladoxylopsida) based on exceptionally complete specimens from Lindlar, Germany (Mid-Devonian): Organic connection of *Calamophyton* branches and *Duisbergia* trunks. Int J Plant Sci, 174: 665–686
Goodarzi F, Swaine D J. 1994. Paleoenvironmental and environmental implications of the boron content of coals. Geol Surv Can Bull, 47: 1–46
Han D. 1989. The features of Devonian coal-bearing deposits in South China, the People's Republic of China. Int J Coal Geol, 12: 209–223
Hutton A C, Cook A C. 1980. Influence of alginite on the reflectance of vitrinite from Joadja, NSW, and some other coals and oil shales containing alginite. Fuel, 59: 711–714
Kerstiens G. 1996. Signalling across the divide: A wider perspective of cuticular structure—Function relationships. Trends Plant Sci, 1: 125–129
Leide J, Hildebrandt U, Vogg G, Riederer M. 2011. The positional sterile (ps) mutation affects cuticular transpiration and wax biosynthesis of tomato fruits. J Plant Physiol, 168: 871–877
Nawrath C. 2006. Unraveling the complex network of cuticular structure and function. Curr Opin Plant Biol, 9: 281–287
Nip M, De Leeuw J W, Schenck P A, Windig W, Meuzelaar H L C, Crelling J C. 1989. A flash pyrolysis and petrographic study of cutinite from the Indiana paper coal. Geochim Cosmochim Acta, 53: 671–683
Price L C, Baker C E. 1985. Suppression of vtrinite reflectance in amorphous rich kerogen—A major unrecognized problem. J Pet Geol, 8: 59–84
Schweitzer H J, Cai C Y. 1987. Beiträge zui Mittledevon-flora südchinas. Palaeontographica, 207B: 1–109
Sheng G, Simoneit B R T, Leif R N, Chen X, Fu J. 1992. Tetracyclic terpanes enriched in Devonian cuticle humic coals. Fuel, 71: 523–532
Song D, Simoneit B R T, He D. 2017. Abundant tetracyclic terpenoids in a Middle Devonian foliated cuticular liptobiolite coal from northwestern China. Org Geochem, 107: 9–20
Stach E, Taylor G H, Mackowsky M T, Chandra D, Teichmüller M, Teichmüller R. 1982. Stach's Textbook of Coal Petrology. Berlin: Gebrüder Bornträger. 105–107
Stein W E, Berry C M, Hernick L V A, Mannolini F. 2012. Surprisingly

complex community discovered in the mid-Devonian fossil forest at Gilboa. Nature, 483: 78–81

Volkova I B. 1994. Nature and composition of the Devonian coals of Russia. Energy Fuels, 8: 1489–1493

Wang Y, Berry C M. 2001. A new plant from the Xichong Formation (Middle Devonian), South China. Rev Palaeobot Palynol, 116: 73–85

Wang Y, Berry C M, Hao S G, Xu H H, Fu Q. 2007. The Xichong Flora of Yunnan, China: Diversity in late Mid Devonian plant assemblages. Geol J, 42: 339–350

Wilson J P, Montañez I P, White J D, DiMichele W A, McElwain J C, Poulsen C J, Hren M T. 2017. Dynamic Carboniferous tropical forests: New views of plant function and potential for physiological forcing of climate. New Phytol, 215: 1333–1353

Xu H H, Berry C M, Wang Y, Marshall J E A. 2011. A new species of *Leclercqia* Banks, Bonamo et Grierson (Lycopsida) from the Middle Devonian of North Xinjiang, China, with a possible climbing habit. Int J Plant Sci, 172: 836–846

Xu H H, Marshall J E A, Berry C M, Wang Y, Zhu H C, Wellman C H. 2012b. Mid Devonian megaspores from Yunnan and North Xinjiang, China: Their palaeogeographical and palaeoenvironmental significances. Palaeoworld, 21: 11–19

Xu H H, Marshall J E A, Wang Y, Zhu H C, Berry C M, Wellman C H. 2014. Devonian spores from an intra-oceanic volcanic arc, West Junggar (Xinjiang, China) and the palaeogeographical significance of the associated fossil plant beds. Rev Palaeobot Palynol, 206: 10–22

Xu H H, Wang Y. 2008. The palaeogeographical significance of specimens attributed to *Protolepidodendron scharyanum* Krejči (Lycopsida) from the Middle Devonian of North Xinjiang, China. Geol Mag, 145: 295–299

Xu H H, Wang Y. 2011. A neotype for *Colpodexylon* gracilentum Dou (Lycopsida) from the Middle Devonian of North Xinjiang, China. J Syst Evol, 49: 372–378

Xu H H, Wang Y I, Berry C M, Cai C Y. 2008. Two species of *Haskinsia* Griersonet Banks (Lycopsida) from the Middle Devonian of Xinjiang, China, and consideration of their palaeogeographical significance. Botan J Linnean Soc, 157: 633–644

Xu H H, Wang Y I, Wang Q I. 2012a. A new homosporous, arborescent lycopsid from the Middle Devonian of Xinjiang, Northwest China. Palaeontology, 55: 957–966

Zeng R S, Zhuang X G, Koukouzas N, Xu W D. 2005. Characterization of trace elements in sulphur-rich Late Permian coals in the Heshan coal field, Guangxi, South China. Int J Coal Geol, 61: 87–95

(责任编委: 秦勇)