



## 地史植物主导净积聚煤

石彦强 石雅锟

### 引用本文：

石彦强, 石雅锟. 地史植物主导净积聚煤[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12): 224–238.

SHI Yanqiang, SHI Yakun. Geological history plants dominated the net accumulation of coal[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 224–238.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1461>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 厚煤层成因机制：受天文周期控制的多期泥炭沼泽叠加模式

Genetic mechanism of thick coal seams: astronomical-forcing superimposed multi-staged swamp model

煤炭科学技术. 2022, 50(1): 186–195 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/34c167e4-ea75-4e17-8762-1dab7ccebd4>

##### 青龙寺井田主采煤层古泥炭沼泽演化规律研究

Study on evolution law of ancient peat swamp from main coal seam in Qinglongsi Minefield

煤炭科学技术. 2021, 49(3): 181–188 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.03.025>

##### 柱状聚能药管聚能罩角度对煤层爆破增透效果试验研究

Experimental study on the effect of the angle of the shaped charge tube on the penetration enhancement of coal seam blasting

煤炭科学技术. 2024, 52(3): 129–138 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0714>

##### 古建筑压煤开采对斜坡上覆堆积层变形扰动影响研究

Study on influence of coal mining under ancient building on deformation disturbance of overlying accumulation layer on slope

煤炭科学技术. 2024, 52(10): 169–180 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1395>

##### 动态回采工作面煤壁瓦斯涌出数值计算及现场应用

Numerical calculation and field application of gas emission from coal wall in dynamic mining face

煤炭科学技术. 2021, 49(6): 195–204 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/0113b7fd-5631-4685-96a5-c4009645040c>

##### 地面压裂井衰竭期井下接替抽采时空衔接关系研究

Research on temporalspatial relationship between ground fracturing wells and underground drilling for substitution drainage of during extraction exhaustion period

煤炭科学技术. 2022, 50(12): 73–82 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.mcq22-04>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

## 地球科学与工程



移动扫码阅读

石彦强, 石雅锟. 地史植物主导净积聚煤[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12): 224–238.  
SHI Yanqiang, SHI Yakun. Geological history plants dominated the net accumulation of coal[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 224–238.

# 地史植物主导净积聚煤

石彦强<sup>1,2</sup>, 石雅锟<sup>3</sup>

(1. 中煤地质集团有限公司, 北京 100040; 2. 北京大地高科地质勘查有限公司, 北京 100040;  
3. 山西省煤炭地质一一四勘查院有限公司, 山西 长治 046011)

**摘要:**为了探寻厚煤层大范围纯净累积机制, 反思聚煤作用的主控因素, 研究地史植物演化更替及作用效应, 应用历史比较法推导出聚煤期是各时期植物发展到鼎盛阶段形成的, 聚煤期植物拓殖能力强、群体效应显著, 占据聚煤作用的主导地位。在聚煤期植被禁锢下, 盆地碎屑只能在有限的空间内周期性活动, 形成漫长的碎屑贫化期与短暂的碎屑爆发期。在碎屑贫化期, 海/湖滩被充分夷平, 基底环境“废弃”, 水体清澈、植被茂密、泥炭沼泽广布, 盆地流体已成为原地聚煤的水源和异地聚煤的载体, 同生碎屑附近可以纯净聚煤。随着海/湖水进退, 泥炭沼泽可以跨越不同基底环境扩展, 甚至扩展到整个聚煤盆地, 改善环境水文, 提高地下水位, 并进一步改变区域气候, 动态泥炭沼泽原地多层叠置, 在有利区段形成厚煤层; 在植被构筑的净环境中, 部分植物、泥炭等异地运移到海/湖中, 于沼泽湖累积超厚煤层。原地聚煤与异地聚煤协调转化, 在良性循环中可持续发展, 形成旋回净积的动态聚煤模式。植被阻止了碎屑的输入, 海进过程水体清澈, 有利于海相泥炭发育和紧之随其后的碳酸盐岩生成, 代替了水进序列的陆源碎屑沉积, 形成石灰岩与煤层直接接触的海陆交互相“约代尔”旋回。在碎屑爆发期, 陆源碎屑库崩溃, 部分碎屑冲越到泥炭沼泽边缘形成岩、煤穿插互层, 部分被泥炭筏载运移到泥炭沼泽内断续沉积, 可形成煤中零星分布的大块沉积角砾岩, 而大量碎屑被沼泽河输送到海/湖三角洲沉积。聚煤过程中的植物作用可以合理解释煤炭地质中的一些“异常”现象, 填补煤地质研究的空白。

**关键词:**聚煤期植物作用; 动态聚煤模式; 碎屑贫化期; 碎屑爆发期; 动态泥炭沼泽; 异地聚煤

**中图分类号:**P611.2+2; P531   **文献标志码:**A   **文章编号:**0253-2336(2024)12-0224-15

## Geological history plants dominated the net accumulation of coal

SHI Yanqiang<sup>1,2</sup>, SHI Yakun<sup>3</sup>

(1. China Coal Geology Group Co., Ltd., Beijing 100040, China; 2. Beijing Dadigaoke Geological Exploration Co.,Ltd., Beijing 100040, China;  
3. Shanxi Province Coal Geology 114 Prospecting Institute Co.,Ltd., Changzhi 046011, China)

**Abstract:** In order to explore the large-scale pure accumulation mechanism of thick coal seams, reflect on the main controlling factors of coal accumulation, and study the evolution and replacement of geological history plants and their effect, the historical comparison method was applied to deduce that the coal accumulation period was formed when plants in each period developed to the peak stage, and plants in the coal accumulation period had strong colonization ability and significant group effect, occupying the dominant position of coal accumulation. Confined by the vegetation during the coal accumulation period, the clasts in the basin can only move periodically in a limited space, forming a long clastic depletion period and a short clastic explosion period. During the debris depletion period, the sea / lake beach is fully flattened, the basement environment is “abandoned”, the water body is clear, the vegetation is dense, and the peat marshes are widely distributed. The basin fluid has become the water source of in-situ coal accumulation and the carrier of coal accumulation in differ-

收稿日期: 2023-11-24    策划编辑: 常 琳    责任编辑: 钱小静    DOI: 10.12438/cst.2023-1461

作者简介: 石彦强(1966—), 男, 山西太谷人, 正高级工程师。E-mail: shxshyq@126.com

通讯作者: 石雅锟(1992—), 男, 山西太谷人, 工程师。E-mail: 364392131@qq.com

ent places, and pure coal can be accumulated near the syngenetic debris. With the advance and retreat of sea / lake water, peat bogs can expand across different basement environments, and even extend to the whole coal accumulation basin, improve environmental hydrology, raise groundwater level, and further change the regional climate. Dynamic peat bogs are superimposed in situ in multiple layers, forming thick coal layers in favorable sections; In the net environment constructed by vegetation, some plants and peat migrate to the sea / Lake in different places and accumulate ultra thick coal seams in the marsh lake. Coordinated transformation of in-situ coal accumulation and remote coal accumulation, sustainable development in a virtuous cycle, and the formation of a dynamic coal accumulation model of cyclic net accumulation. Vegetation prevents the input of detritus. The clear water body during transgression is conducive to the development of marine peat and the formation of carbonate rocks, replacing the terrigenous detritus deposition of transgressive sequence, forming the sea land interaction “Yoredale” cycle in which limestone and coal seams are in direct contact. During the clastic explosion period, the terrigenous clastic reservoir collapsed, some clasts rushed to the edge of the peat swamp to form rock and coal interbedding, and some were transported by peat rafts into the peat swamp to deposit intermittently, forming large sedimentary breccia scattered in the coal, while a large number of clasts were transported to the sea / lake delta by the swamp river. The plant action in the process of coal accumulation can reasonably explain some “abnormal” phenomena in coal geology and fill the blank of coal geology research.

**Key words:** vegetation during coal accumulation; dynamic coal accumulation mode; debris depletion period; clastic eruption period; dynamic peat swamp; gather coal in different places

## 0 引言

聚煤模式是反映成煤物质演化聚集过程的标准样式,是从煤炭勘查和开采实践中提炼出来的,与现代泥炭形成过程相比较,通过证据链推演、概括总结和抽象升华的规律性认识。是在实践和认识过程中经受检验和完善的,具有普遍适用的预测模型。

百余年来,煤地质工作者为了追寻煤的形成演化过程,进行了大量的探索和尝试<sup>[1-5]</sup>。从 FERM (1976)、HORNE 等(1978)建立三角洲聚煤模式后,各种聚煤模式像雨后春笋一样蜂拥而起,包括河流~三角洲模式、滨岸障壁潟湖模式、冲积扇模式、湖泊模式、砂质辫状河模式等,还有多堡岛成煤模式、泥炭坪成煤模式及碳酸盐岩台地成煤模式等<sup>[6-7]</sup>,各种模式异彩纷呈。而同是三角洲,各自成煤模式也不尽相同,如现代的黄河三角洲与密西西比河三角洲、尼日尔三角洲的泥炭聚集就存在很大的差异。由此看来,似乎任何一种环境都可以聚煤,而其模式又各不相同。

MCCABE(1984)考察了现代大量泥炭沼泽,认为活动碎屑环境中只能形成炭质泥岩,而不可能形成低灰煤层,至多形成高灰煤;还认为大多数煤层与其下伏沉积物之间存在明显的沉积间断(其实很可能是因为碎屑贫化的结果),煤层形成于碎屑环境废弃后的平静泥炭沼泽~漂浮沼泽或高位沼泽;煤层底板沉积环境不能代表煤层本身的沉积环境,并建议以煤层顶板的沉积环境分析来揭示煤层本身的沉积环境。之后,一些旧的废弃活动碎屑环境聚煤模式重新得到重视,并提出一些新的废弃活动碎屑环境聚煤模式,诸如废弃冲积扇聚煤模式、废弃河道聚煤模

式、废弃三角洲聚煤模式、废弃潮坪聚煤模式等<sup>[6,8]</sup>。

然而,用极端值检验往往是考量一个理论正确与否的放大镜。厚煤层的成因一直是困扰煤地质研究向前发展的阻力,超厚煤层依然是许多聚煤模式难以逾越的坎,是令人质疑和诟病的地方,也是反对有机成煤者常用的例证,是各种聚煤模式的试金石。后来吴冲龙等<sup>[9-13]</sup>在研究中国中、新生代内陆断陷盆地特厚煤层时,提出了“异地—微异地复合湖泊聚煤模式”,并进一步分为“抚顺亚模式”、“阜新亚模式”、“先锋亚模式”和“小龙潭亚模式”<sup>[14]</sup>,认为MCCABE等看到的现代高灰分异地泥炭层是直接来自河流的一次性搬运产物,而古代低灰分厚煤层则不一定是这样,水下重力流等二次作用可能使异地煤中无机碎屑与泥炭碎屑分离<sup>[8]</sup>;庄军<sup>[15]</sup>研究鄂尔多斯盆地南部巨厚煤层时,认为是不同类型的泥炭沼泽相互演变与叠加形成的;王东东等<sup>[14,16]</sup>超厚煤层的多阶段泥炭地叠加成因模式。

据文献[17],随着方法和手段的更新,聚煤模式也从传统陆相和海相成煤,发展到海侵过程成煤<sup>[18]</sup>、幕式聚煤<sup>[19]</sup>、海侵事件成煤<sup>[20]</sup>、海相层滞后时段成煤<sup>[21]</sup>、动态聚煤模式<sup>[22]</sup>,到多元聚煤理论体系及聚煤模式<sup>[23]</sup>等。

煤层特别是具有工业价值的煤层多可以大范围追索,有的甚至可以遍布整个聚煤盆地,远远超出了任何一种碎屑沉积环境的规模<sup>[22]</sup>。郭敏泰等<sup>[24]</sup>提出了盆控型泥炭沼泽和附属型泥炭沼泽聚煤理论;程爱国等<sup>[2]</sup>概括为泥炭沼泽体系。

至此,无环境不模式,无盆地不模式,直到研究者人手一模式。聚煤模式到了百花齐放、百家争鸣的兴盛时期,也说明聚煤过程的特殊性、复杂性及隐蔽性。

以上模式历经 40 多年的实践检验,且经常被推翻、重建和修订。聚煤模式的演变,映射了人们对煤成因认识的心路历程。其实,并不是每一个煤层、煤盆地,都特殊到要用一个独立的模式去刻画的地步,内在成因机制仍需要深入解读:

1)为什么成煤泥炭沼泽不受碎屑侵扰,能够形成多层叠置的厚煤层?

2)为什么成煤泥炭沼泽可以跨越不同基底环境扩展?甚至扩展到整个聚煤盆地!

3)为什么河流、潮流、“重力流”等异地搬运植物、泥炭富集成厚~超厚煤层过程中,没有或很少有陆源碎屑加入?

4)为什么海陆交互相煤系中,大多煤层直接顶板就是石灰岩?

5)为什么靠近陆源的煤层中会出现零星分布的大块沉积角砾岩?

MCCABE(1984)、邵龙义等<sup>[7]</sup>和王东东等<sup>[14]</sup>也都注意到,泥炭沉积并不总是与局部的陆源碎屑沉积供给同时发生的;在大多数情况下,在近海(湖)地区的泥炭沼泽发育阶段,局部的陆源碎屑供应已经被某种机理切断了。

针对以上问题有必要跨越更高维度条分缕析、溯本追源,重新反思聚煤作用的形成和控制因素。

## 1 聚煤作用的主要控制因素分析

以往的聚煤作用研究中,主要强调古构造、古地理和古气候条件<sup>[1-5]</sup>,近年来古火山、古野火对聚煤

作用的影响也越来越得到重视,现就关键问题分析讨论。

### 1.1 构造作用

构造环境是聚煤作用的基础。频繁的构造活动部位不利于聚煤。郭敏泰等<sup>[24]</sup>认为盆控型泥炭沼泽出现于盆缘和基底构造活动弱化期,程爱国等<sup>[2]</sup>盆地基底稳定是泥炭沼泽长期稳定发育的前提条件。

构造作用不仅导致岩石形变位移、地表形态变化等,而且也会影响地表气候环境和沉积作用的变迁,从而也影响植物分布与演化,进而影响到聚煤期的形成和延续、聚煤期内聚煤作用的地质分区<sup>[5]</sup>;同样,植被的分布和扩展也会改善地表气候,对构造作用形成的地貌和地表岩体的风化、剥蚀、搬运、沉积也具有控制作用。

在聚煤期内,构造运动直接或间接地作用于成煤植物、泥炭沼泽及其形成的古地理环境,从而控制聚煤演化,进一步控制煤系旋回结构,煤层厚度、结构、煤质特征,富煤带展布等;然而,在聚煤期间,因同沉积断层、差异沉降等构造导致地表升降的动荡环境中,能够保持植物泥炭纯净累积,形成像德国下莱茵新近纪褐煤层(图 1)<sup>[1,3]</sup>和抚顺盆地超厚煤层(图 2)<sup>[10-11]</sup>等低灰分优质煤层的关键控制因素,应该另归功于聚煤期植被的保护<sup>[25]</sup>。

### 1.2 古地理

如果盆地地势明显,剥蚀强烈,陆源碎屑物供给充分,环境频繁变迁,并不利于植物稳定生长和纯净聚集。因此,聚煤作用通常发生在盆地充填变缓的

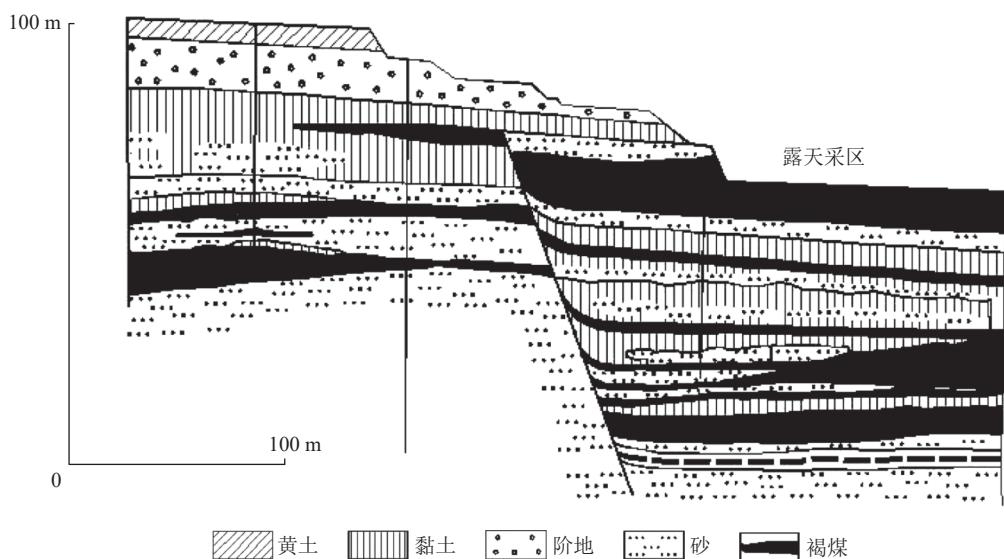
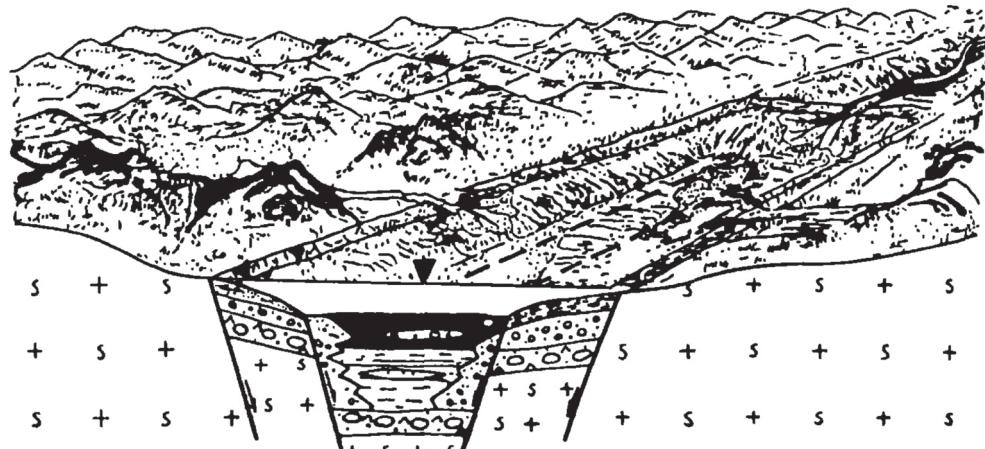


图 1 聚煤期植物作用下的德国下莱茵地区新近纪同沉积断裂附近褐煤层沉积剖面<sup>[3]</sup>

Fig.1 Sedimentary profile of brown coal seams near Neogene synsedimentary faults in the Lower Rhine region of Germany under the influence of plants during the coal accumulation period<sup>[3]</sup>

图2 抚顺盆地下第三系超厚煤层堆积的环境模式<sup>[11]</sup>Fig.2 Environmental patterns of the accumulation of ultra thick coal seams in the Lower Tertiary of the Fushun Basin<sup>[11]</sup>

中后期,程保洲等<sup>[24]</sup>进一步限定为:主要聚煤作用往往出现在陆源衰退近枯竭的盆地广泛准夷平时期,其时入盆水系细流化、清澈化,碎屑输入贫乏,进积退化,泥炭沼泽广布。

在煤层底板与下伏“宿主”环境之间,往往存在厚度薄、延时长的细碎屑沉积,曾被解释为活动碎屑环境废弃沉积<sup>[6,8]</sup>;进一步研究认为是陆源和基底碎屑被植被禁锢后,盆地活动碎屑贫化的结果<sup>[25]</sup>。在碎屑贫化期,煤层与下伏碎屑三角洲、潮坪等“宿主”环境之间的关系逐渐被冲刷淡化,水介质将有限的碎屑充分冲洗运移,拓展成平坦广阔的海/湖滩平原,类似于尚冠雄<sup>[26]</sup>的“基盘”,从而将聚煤的环境因素推到更大的控制尺度。

盆地成煤泥炭沼泽发育程度及叠合强聚煤带分布,是聚煤期植被控制下碎屑爆发、贫化与海/湖水进、退等综合作用的结果。在华北早二叠世聚煤期间,叠合滨岸带附近的泥炭聚集时间长,同时遭受海/湖水及陆源碎屑破坏小,是富煤带分布的有利部位。如晋东南厚5~8 m的3号煤层,发育稳定,只是局部很有限的条带遭受同生碎屑影响和后来河流下切冲刷,号称“八百里大香煤”;该煤层向东南盆地中心方向变薄,到河南、江苏一带变为同层位1~2 m的2号煤层;向北陆源方向也分岔变薄,在太原西山分岔为1~3 m的2、3、4号煤层,到近盆地边缘的大同以北逐渐变薄直至尖灭<sup>[26]</sup>。需要说明的是,在局部隆升/盆地残留的类陆岛/半岛似的物源附近,由于先遭植被的保护和陆源丰富营养的水源滋育,以及后来泥炭滑积,也会导致局部煤层出现异常增厚的可能,但连续性不是太好,如华北聚煤盆地二叠纪吕梁古隆起附近的煤层<sup>[24,27-28]</sup>。由此也显示,似吕梁古隆起这样的局部陆源,并不能代表盆地总的地形趋

势,也不能左右盆地总的富煤带的展布,因此常被区域研究所忽略。

### 1.3 火山活动

虽然火山活动短期会释放大量还原性气体、与O<sub>2</sub>反应造成O<sub>2</sub>含量短暂下降,但其后的火山岩风化是一个漫长过程,因此短期的O<sub>2</sub>消耗相对于地史植物增氧是微不足道的;反而,火山岩风化和营养元素的活化迁移会促进生物量的提升,尤其是火山岩中释放的磷元素,是让海洋肥沃的重要机制,冥古宙生物圈普遍贫磷;后来磷元素的注入,激发了菌藻等植物量的提升,进而提高氧气生成效率<sup>[29]</sup>;白楠等<sup>[30]</sup>也认为火山喷发引起的“肥沃效应”有助于生物高产;赵国春等<sup>[31]</sup>,超级地幔柱巨量玄武质岩浆的喷发会导致大气中CO<sub>2</sub>浓度的增加,形成温暖潮湿性的气候(Greenhouse),有利于生命复苏或大爆发。

早石炭世以来,曾发生过多次大火成岩省事件,各大火成岩省的喷发年龄与期间各生物群灭绝的时间存在对应关系,如:峨眉山、西伯利亚、德干大陆溢流玄武岩和中大西洋火山作用分别与瓜德鲁普世末(中~晚二叠世分界)、二叠纪末、白垩纪末和三叠纪末的生物灭绝事件年龄相近。但是,将大火成岩省、极端气候变化和生物灭绝加以关联的机制十分复杂,目前并没有很好地被模型化<sup>[32]</sup>。典型大火成岩省火山活动,会释放巨量的火山灰、H<sub>2</sub>S、SO<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>等,会造成短期内的“火山冬天”和长期的温室效应、海洋酸化、酸雨等灾难性事件。火山作用可能不是生物灭绝的诱因,但会给生物灭绝之前的生态系统造成一定压力<sup>[33]</sup>。

目前尚未找到火山导致全球气候干旱的确凿证据。火山活动与成煤并不矛盾,如喜马拉雅—潘伽大火成岩省事件(~280 Ma)与华北早二叠世山西期

煤系对应,大多煤系中都能找到同期火山喷发的证据<sup>[24,33-34]</sup>(图3);著名的中国西南二叠纪晚期大火成

岩省峨眉山玄武岩喷发后,依然有宣威组、龙潭组等大量植物成煤<sup>[35-36]</sup>。

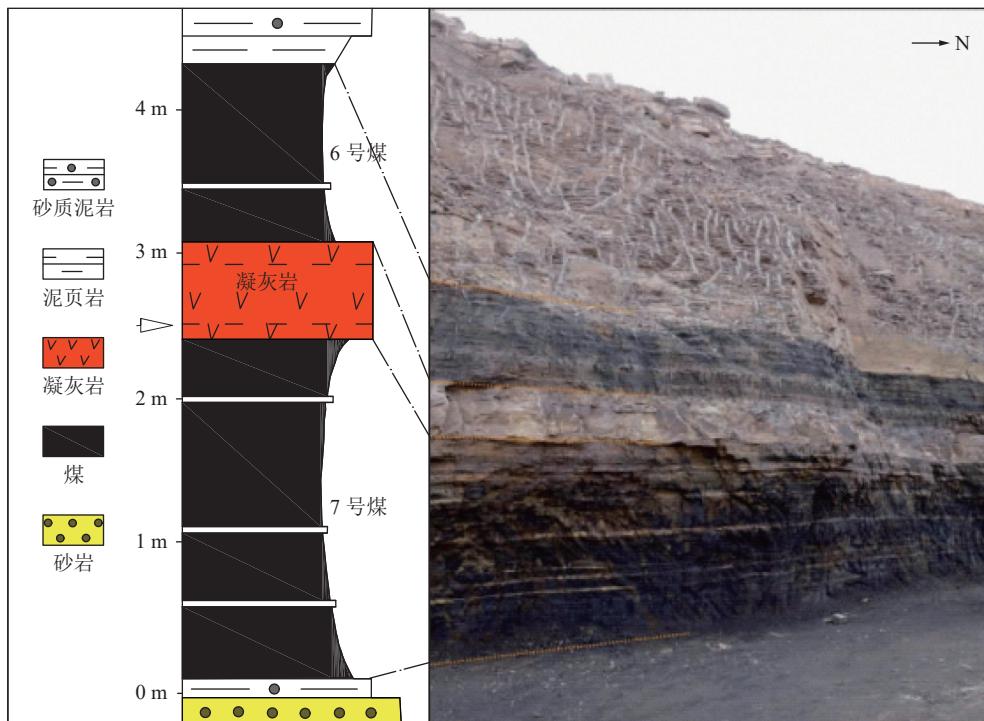


图3 内蒙古乌达煤田早二叠世煤层中的凝灰岩夹矸<sup>[34]</sup>

Fig.3 Gangue tuff in Early Permian coal seams in Wuda coalfield, Inner Mongolia<sup>[34]</sup>

#### 1.4 古野火事件

古野火事件是对原地泥炭沼泽成煤的又一挑战。近年来,越来越多的研究认为煤中的惰质组主要为不完全燃烧产物,包括丝炭和多环芳烃中的稠环芳香烃,都很好地指示了古野火事件。全球大气中古氧气浓度是煤中惰质组丰度的主控因素,而气候、沉积环境、差异沉降等因素的影响,导致了煤中惰质组丰度的区域和局部变化<sup>[5]</sup>。由此也说明:持续的高降水量和潮湿气候才是保护泥炭沼泽免受野火燃烧破坏,长期稳定发育的先决条件<sup>[2,36]</sup>而潮湿气候的保持又与植被、泥炭沼泽的规模化发展不可分割。

#### 1.5 气候变化

地球气候变化的主因是太阳辐射和大气环流,大火成岩省事件也会对区域气候产生一定的影响。

气候变化通过改变植物的生存和演化,从而影响聚煤期的形成和发展,影响成煤泥炭的堆积和赋存。6亿年前的震旦纪大批生物群的出现,以及2.52亿年前二叠~三叠纪之交的动物大灭绝等地质突变期中的温度、氧气含量等大气环境,以及古海洋缺氧、硫化等水化学条件,是控制宏体生物演化的关键环境因素;而期中的微体生物群不仅灵敏地记录了这样的变化,而且还积极参与改造地球环境,使其

处于不断自我调节的状态<sup>[37]</sup>。

不可否认,气候变差(包括火山活动可能导致的干旱)是约束、妨碍或阻扰植物生长发育的关键因素,也是迫使植物更替和创新性进化的主要诱因之一。虽然植物的出现、发展、鼎盛、衰落、演替与气候变化关系密切,但聚煤作用是各期植物群体演化到鼎盛阶段才发生的<sup>[25]</sup>。

聚煤期,潮湿气候是泥炭沼泽发育的基本条件<sup>[2]</sup>,古气候格局决定了聚煤域的分布。如现代大气环流构成了地球上的3条潮湿带和相间的两条干旱带,泥炭分布在潮湿带中<sup>[38]</sup>;持续的高降水量是保持泥炭连续堆积的先决条件<sup>[39]</sup>,二叠纪华北聚煤盆地北侧内蒙海槽的关闭,导致北部转为大陆性气候,降水量减少,聚煤带南迁<sup>[24,26]</sup>。

中国几十年退耕、禁牧和植树造林对区域气候的明显改善,近年全球植被增加导致降水量增加、蒸发量减少<sup>[25]</sup>。因此,无论从地球的气候演化<sup>[40]</sup>,还是近年来的环境变化,植物所起的作用都是毋容置疑的。

综合以上分析,虽然古构造稳定、古气候湿润、古地理和缓、古火山及古野火稀落等是聚煤作用的基础,但均尚不足以成为植物、泥炭纯净累积聚煤关键的主导因素。吴冲龙等<sup>[8]</sup>,根据沉积学家广泛应用

的工作准则,“使高灰煤转变成低灰煤的适当机制”的证据首先应当在煤层内部去寻找,应当重视煤层本身的沉积特征分析;石彦强等<sup>[22]</sup>提出了动态聚煤模式,认为地史聚煤期植物强盛,对陆源和基底碎屑有很强的限制作用。

## 2 聚煤期植物的主导作用

聚煤作用是古植物、古气候、古地理、古水文、古构造等各种因素联合作用的结果,各因素之间又互相影响、相互制约。煤主要是由植物形成的,没有植物的发展、演化,地质历史中就不可能有真正的聚煤作用发生。辩证唯物主义认为内因是事物发展变化的根本原因,人类战天斗地改造山河的壮举不断涌现,生物地质作用逐渐被人们认识和接受,笔者(2023)论述了聚煤期的形成和植物作用效应<sup>[23]</sup>。

现代植物能够稳固地表碎屑、涵养水源,进一步发育泥炭沼泽,规模化发展能够调节气候,具有适应并改造环境的生存潜力<sup>[25]</sup>。

地史时期的植物从低等到高等、从水生到陆生,从菌藻植物到裸蕨植物、蕨类植物、裸子植物、被子植物,经历了5个发展时期,每个时期的植物群又历经了出现、发展、鼎盛、衰落的过程,各个聚煤期就是各时期植物发展演化到鼎盛阶段——植物大爆发形成的。在漫长的地史演化进程,聚煤期植物固碳量异常陡增,并且集中在几个主要时段形成大量煤炭聚集,仅蕨类植物鼎盛阶段的石炭二叠纪就形成并保存达6.96万亿t的优质煤炭;但在其他时段,甚至就连植物化石都难以留存,特别典型的是蕨类植物衰落而裸子植物又尚未发展的早三叠世,全球没有确切的聚煤发生,谓之“煤隙”<sup>[39]</sup>。而同样是聚煤期,泥盆纪以前形成的煤层并不多,以石煤(腐泥煤)、残植煤为主,灰分高<sup>[1,3]</sup>,除菌藻类、裸蕨类等植物生产量有限外,陆地裸露、聚煤过程缺乏植被保护,保存条件差也是重要的原因<sup>[25]</sup>;第四纪以来因人类、草食动物、飞禽等天敌的出现,以及孳生病害的打击,植物逐渐趋向衰落,再加上分解木质素微生物的出现,破坏了大量表层植物残体和泥炭,致使全球泥炭地不到陆地总面积的3%<sup>[41]</sup>。

基于以上分析,石彦强<sup>[25]</sup>引用“将今论古”原理,一方面,通过调查现代植物的生存潜力,植物固定碎屑、涵养水源、调节气候的功能,分析现代泥炭沼泽形成演化过程;另一方面,通过地史古生物化石组合、年代地层中煤系煤层的间歇性分布特征、盆地煤层煤质的展布规律等一系列研究成果资料,分析地

史植物发生、发展、繁盛、衰落的演替历程,以及各聚煤期的形成演化。运用比较沉积学的分析方法将2者分阶段不同功能进行类比,通过一系列证据链推演,推导出:聚煤期植物本能激发生长旺盛,又尚未遭受天敌、病害等阻碍,具有强劲的拓殖能力和群体效应,占据聚煤作用的主导地位,能够限制和引导其他因素向有利于自身植物、泥炭纯净累积的方向发展。

## 3 植物主导下的动态聚煤模式

煤田勘查揭示的聚煤盆地与现代沉积盆地存在很大的差异。地史上的聚煤景观距我们太遥远了,甚至都难以想象它的宏伟和瑰丽!从目前聚煤盆地样式联想,尚可参照的是位于南美洲北部面积达560万km<sup>2</sup>辽阔平坦、构造较稳定、气候湿润、植被茂密的亚马孙平原(图4)。权且借此平面景观与图5剖面沉积演化相结合,分析和研究聚煤过程和作用模式。

### 3.1 植被禁锢下的碎屑环境

在聚煤期植被、泥炭沼泽围限下,盆地碎屑只能在有限的空间内周期性活动,形成漫长的碎屑贫化期(图5a、图5c、图5d)与短暂的碎屑爆发期(图5b)。在碎屑贫化期,盆地碎屑环境已落于次要的被动地位<sup>[25]</sup>,能够保持植物、泥炭不受陆源和基底碎屑的侵扰,纯净累积形成低灰分的优质煤层。

#### 3.1.1 聚煤盆地边缘

在盆缘,植被禁锢边坡及碎屑,累积成较陡的碎屑库;与之相邻的泥炭沼泽得到丰富陆源营养水供给,快速堆积,势能增大(图5a、图5d)<sup>[28]</sup>。

海退、构造活动、气候恶化等致使植被、泥炭沼泽结构改变,固持力减弱,由大暴雨、大地震、陆源隆升等突变事件导致碎屑液化,碎屑库根部泥炭饱水膨胀,支撑力变差,边坡失稳崩溃,进入碎屑爆发期,部分岩块碎屑冲越到泥炭网上,撕裂成泥炭筏,被泥炭筏载运移到泥炭沼泽中,形成角砾岩与煤层交互穿插的沉积结构;部分被泥炭筏载运移到沼泽河中,流向泥炭沼泽内部断续沉积,可形成煤层中零星分布的大块沉积角砾岩<sup>[28]</sup>;而大量碎屑像脱缰的野马,冲破植被束缚,顺沼泽河奔流而去,穿越整个泥炭沼泽,将碎屑输送到海/湖三角洲(图5b)。

碎屑库被冲刷完毕后,植被又重新恢复统治地位,陆源和基底碎屑被固定,进入碎屑贫化期,碎屑库开始新的累积(图5c—图5d)。

#### 3.1.2 盆地冲积平原

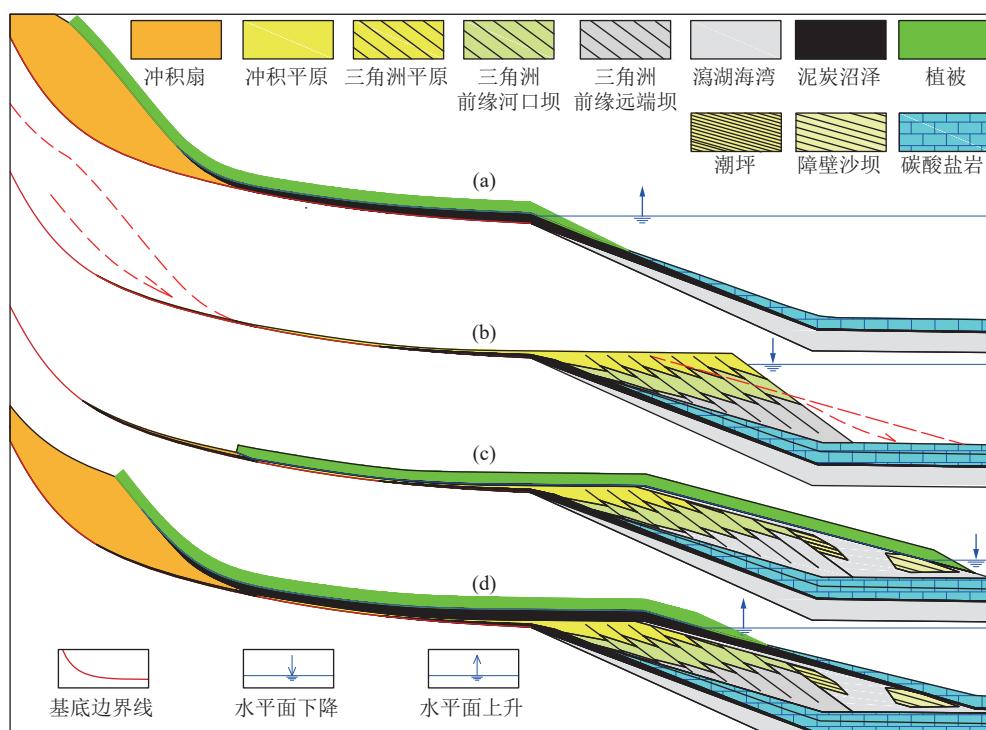
碎屑贫化期,在广阔平坦的滨海冲积平原上发



(图片来源：地图窝 <http://www.onegreen.net/maps/HTML/49856.html>)

图4 亚马孙平原地势及局部影像

Fig.4 Topographic map of the Amazon Plain and a small portion of aerial photography



注：为明显表示，垂直比例尺放大。

图5 动态聚煤模式中陆源碎屑库、平原沼泽河、滨海/湖三角洲及约代尔旋回剖面演化

Fig.5 Evolution map of terrigenous clastic reservoir, plain swamp River, coastal/lake delta and Yoredale cycle profile in dynamic coal accumulation model

育植被和动态泥炭沼泽,占据盆地演化的主导地位,将陆源和基底碎屑牢牢控制在有限的条带内,动态泥炭沼泽随着海水进退多层叠置,在有利区段纯净累积形成厚煤层;动态泥炭沼泽中的碎屑河流清澈,主要运载植物残体和泥炭等有机质,成为动态泥炭沼泽的重要补给水源,如程保洲<sup>[24]</sup>揭示的山西晚古生代聚煤。

碎屑爆发期,沼泽河流输送大量陆源碎屑,形成周期性发育的、分选较好的多阶带状砂体<sup>[25]</sup>与河道附近有限的天然堤、决口扇等溢岸沉积。

### 3.1.3 海/湖岸附近

海/湖退后,陆源碎屑库崩溃进入碎屑爆发期,沼泽河流将碎屑周期性地输送到海/湖盆形成建设性三角洲沉积。

海/湖退后期,植被恢复统治,进入碎屑贫化期,海/湖浪和潮流将有限的三角洲碎屑充分运移,冲刷成广阔平坦的席状砂和浅滩湖沼(图 5b—图 5c);随着残余碎屑日趋稳定,海/湖生物增加,由微生物、藻类、大型动植物等生成释放的生物聚合物与微生物等相结合共同构成生物膜及黏附层,增加滨海/湖沉积物表层的黏聚力<sup>[42]</sup>,固定基底碎屑,使水体更加清澈。植被跟进海/湖退改造后的三角洲前缘、泻湖、海湾,以致碳酸盐岩台地之上发育(图 5c)。

海/湖进时,类似红树林植被压伏了海浪潮汐的冲刷,泥炭沼泽得以有效保存;海/湖进淹没泥炭沼泽后,泥炭表层生长大量菌藻类水草等水生植物,继续形成泥炭堆积;沼泽河流搬运来的大量植物残体和泥炭等有机质,与偶然风暴潮冲蚀的海/湖岸红树林及泥炭,被潮流和海/湖流源源不断的输送到海/湖盆中,如果能够长期纯净累积可形成厚~超厚煤层;深覆水后,碳酸盐岩大量快速沉积,形成煤层顶板石灰岩<sup>[43]</sup>,代替了水进序列的陆源碎屑沉积,保护成煤泥炭免受后期冲刷破坏(图 5c—图 5d)。

由此,形成自下而上由根土岩→煤层→石灰岩→碎屑岩→根土岩组成的约代尔旋回<sup>[43]</sup>。

## 3.2 植物主导下的原地聚煤

现在是打开过去的钥匙。煤是由泥炭转化成的,对现代泥炭沼泽发育程度(包括广度、纯度等)的研究和解读,能够帮助我们更好地推导地史成煤泥炭沼泽的发展过程。

### 3.2.1 现代泥炭沼泽

现代泥炭具有地带性和区域性的分布特征。全球 95% 的泥炭资源,集中分布在潮湿的北温带和赤道带 2 个强泥炭堆积带内<sup>[38]</sup>。

#### 3.2.1.1 全球最大的现代泥炭沼泽

目前地球上最大的泥炭沼泽区位于俄罗斯西伯利亚西部低地,东西长 1 800 km,南北宽 800 km。地势低平,区域植被覆盖率高,涵养水源能力强;高寒融雪补给量大,河流排水不畅、低洼积水;气温低,蒸发量小;地下永久冻土阻隔,不易下渗,泥炭沼泽能够长期保持较高水位。泥炭约形成于 11500 年前并迅速扩展,贫营养沼泽十分发育。探明的泥炭地面积 3 000 万 hm<sup>2</sup>,泥炭储量 960 亿 t,约占全球总储量的 20%。

其中位于额尔齐斯河与鄂毕河之间的瓦休甘泥炭沼泽,面积达 530 万 hm<sup>2</sup>,是世界上最大的泥炭地,泥炭堆积旺盛,泥炭覆盖率高达 70%~80%,泥炭平均厚度达 4~5 m,最厚可达 8 m,储量 143 亿 t<sup>[44-45]</sup>。

#### 3.2.1.2 典型热带雨林泥炭沼泽

马来西亚加里曼丹岛是茂密的热带雨林,由海向陆依次为红树林、淡水沼泽林(伴生着泥炭沼泽林)、山前热带雨林,上部山地雨林。

1) 茂密红树林笼罩整个潮间带,宽达数 km,在大河口可上溯数十千米。

2) 向内陆的冲积平原上,淡水沼泽林特别发育,在洪水未淹没地段发育重要的泥炭沼泽林。其中,① 北加里曼丹藓类泥炭沼泽,表面凸起高度 4~15 m,边缘坡度 0.4%~0.5%,像倒扣的盘子,主要受矿物质极贫乏的雨水补给,潜水面中心比周围高,植被呈同心环状分布,中心树木矮小,常具旱生特征<sup>[45]</sup>;② 在巴拉姆(Baram)河流域内约 95% 面积覆盖厚度大于 1 m 泥炭。其中三角洲洪泛平原,被巴拉姆河支流分割成面积从上游段 3 km×5 km~下游段 15 km×60 km 的双透镜体泥炭穹丘或平顶方丘,中心高出平均河水位 10 m。主体泥炭层厚 10~12 m,最厚达 20 余 m,总灰分<2%~5%,硫分<0.5%,只是泥炭层底部(1 m 以下)灰分可达 15% 左右,硫分为 4.5%<sup>[46]</sup>,巴拉姆三角洲泥炭约形成于 4500 年前,与海岸线进积保持一致,即使不记高分解界层,泥炭平均堆积速率也达 4.44 mm/a。泥炭底板位于海平面下 3~6 m,说明泥炭堆积以来盆地是沉降的,只是因泥炭累积速度大于盆地沉降速度,才表现为海退,平均速度 9 m/a<sup>[45]</sup>;③ 拉让河(Rajang)三角洲和海岸平原的 50%~80% 被厚 1~20 m 泥炭覆盖,总面积 11 000 km<sup>2</sup>。穹丘状厚层泥炭与侧缘硅质碎屑指状交互,表明 2 者的同时性<sup>[46]</sup>。

3) 再向内陆过渡到山前热带雨林和山地雨林,泥炭沼泽也逐渐减少;但到山地雨林的上部的一定

高度上,由于气候极为湿润,地形雨增多,泥炭沼泽又发育起来,只是泥炭分解度高,颜色较黑,结构较紧密,灰分多,有的成富有机质黑土<sup>[45]</sup>。

### 3.2.1.3 海草床

海草床能将有机碳封存于海底达数千年。如葡萄牙 Portlligat 沿岸海底埋藏 5 616 a 的海草碎屑物,厚达 4.3~11.7 m,并以 11 mm/a 的速度增加。这些海草碎屑和悬浮物中的有机碳能够被分解的只有不到 10%,绝大部分长期埋存于海底沉积物中。像这样数米厚的海草碎屑层,不仅见于地中海沿岸,而且在美国南部佛罗里达湾和澳大利亚西部鲨鱼湾也有<sup>[47]</sup>。

### 3.2.2 动态泥炭沼泽

聚煤期植物主导下的动态泥炭沼泽的发育规模和发展能力都高于现代泥炭沼泽<sup>[23]</sup>。现代泥炭沼泽一般都局限于在某一凹陷、湖/海滨、三角洲等独立发育;而动态泥炭沼泽是活动的、扩展的,常遍布于整个聚煤盆地,并随着海/湖水进退游移于基底不同碎屑环境之上,如华北石炭二叠纪聚煤盆地、鄂尔多斯侏罗纪聚煤盆地、新疆中生代聚煤盆地和东北中-新生代断陷盆地等主要煤层的成煤泥炭沼泽<sup>[2,8,11,26]</sup>。

1)泥炭沼泽的动态演化。在碎屑贫化期,河流被限制在很窄的条带内,变成滋养盆地泥炭沼泽的重要水源。海岸附近,泥炭表层类似红树林、海草等稠密的植被阻碍了海水进一步深入,上升的海水顶托沼泽淡水,促使泥炭沼泽持续向上发育;随着海水侵入,泥炭沼泽向上游迁移,占据河流冲积平原、间湖直至冲积扇前缘的广大区域形成泥炭堆积(图 5c—图 5d)。海退后,滨岸附近海浪和潮流将碎屑河流带来的有限的碎屑充分运移,拓展为广阔平坦的滩涂泥沼(图 5b—图 5c);随着陆源碎屑库清空,植被又重新恢复统治地位,碎屑输入贫化,植物、泥炭沼泽由三角洲平原向改造后的三角洲前缘、前三角洲泻湖海湾等遗留环境跟进,进一步占据变浅的碳酸盐台地之上发育,形成跨基底碎屑环境发展的辽阔的动态泥炭沼泽<sup>[43]</sup>(图 5c—图 5d)。

2)动态泥炭沼泽的水文环境。动态泥炭沼泽基本脱离了陆源碎屑的影响,在大气降水、地表径流和浅层地下水的滋育下,植物生长繁茂。植物阻止了陆源碎屑侵入,但并没有阻止 P、K、Ca、Mg、S、Si 等营养元素向动态泥炭沼泽内迁移;反而, pH 值偏低的沼泽河流更有利于营养元素的溶运,所以碎屑贫化形成特低灰分的泥炭,并不会像现代高位沼

泽<sup>[8,45]</sup>那样导致泥炭沼泽植物营养元素的贫乏。沼泽水动力平缓,下层静滞,微酸性水质可以长期保持,有利于植物残骸及泥炭保存,生物以能够适应微酸性介质为主,有助于动态泥炭沼泽的稳定持续生长发育。

3)动态泥炭沼泽的隔水层。泥炭沼泽深部泥炭化作用形成大量胶质体和析出的黏土层,偶然洪泛/海泛的黏土夹层,泥炭底板土壤淀积层,均类似很好的隔水层,阻止了沼泽水的下渗;泥炭组织也减缓了沼泽水的横向渗流,使沼泽水体能长期保持较高的水位<sup>[43]</sup>,保护泥炭在大范围内垂向加积。

### 3.2.3 多阶段泥炭旋回净积聚煤

在特定的古构造、古气候、古地理环境基础上,聚煤期植物群落规模化发育,植被、泥炭沼泽在自我完善的同时,也主动控制和引导周围环境向有利于自身发育的方向发展,禁锢地表碎屑,提高地下水位,改善区域气候,泥炭沼泽无论在垂向上,还是在横向,都不停地在运动。随着水体的进退,动态泥炭沼泽向陆地或水体方向旋回迁移,多阶段纯净累积聚煤。

1)水进阶段。泥炭沼泽整体向陆地方向扩展:  
①在靠海/湖一侧,煤中惰质组含量很低,而镜质组含量很高,形成连续沉积的水进型转换面<sup>[14]</sup>;后期出现相对深水的石灰岩、泥灰岩、泥岩等沉积,靠近三角洲陆源碎屑含量增加(图 5);②在广阔的滨海/湖平原和向陆一侧,泥炭连续堆积,煤中惰质组含量很低,而镜质组含量很高,形成连续沉积的水进型转换面<sup>[14]</sup>。

2)水退阶段。泥炭沼泽向水体方向退缩:  
①在向陆一侧,可能会出现暴露。由于植被限制,陆源碎屑供给贫乏,形成向上氧化的无沉积间断,煤的镜质组含量极低,惰质组含量极高<sup>[14]</sup>;碎屑爆发期,陆源碎屑库崩溃形成岩、煤穿插互层,部分被泥炭筏载运移到泥炭沼泽内,断续沉积可形成煤中零星大块角砾岩<sup>[28]</sup>,但因泥炭沼泽表层植物根茎与残骸交织构筑的网状结构较为牢固,泥炭被冲刷破坏的范围有限;  
②在广阔的滨海/湖平原上泥炭连续堆积,但煤中镜质组含量很低、而惰质组含量很高,形成水退型连续沉积转换面;后期不排除存在水退型间断面的可能<sup>[14]</sup>;碎屑爆发期靠近沼泽河有碎屑供给则形成夹矸;  
③在靠水体一侧,泥炭连续堆积,煤中镜质组含量降低,而惰质组含量增高,形成水退型连续沉积转换面<sup>[14]</sup>;河口区域形成三角洲及多重障壁体系沉积<sup>[2]</sup>,与下伏水进序列组成约代尔旋回<sup>[43]</sup>。

3)多阶段泥炭旋回净积。随着水体的进退,泥

炭沼泽横向迁移纵向叠加。当海/湖平面升降幅度总体呈上升的趋势下,动态泥炭沼泽长期旋回净积,在有利区段可形成大范围的灰分较低的厚煤层。如华北晚古生代的B、D煤组煤层几乎遍布超过150万km<sup>2</sup>的聚煤盆地<sup>[26]</sup>。

### 3.2.4 关键问题讨论

1)具有工业价值的煤层都可以大范围追索,有的甚至能够遍布整个聚煤盆地,无论从发展规模上还是从形成时间上,都远远超出了任何一种碎屑沉积环境的限度,因此仅用某一个碎屑沉积环境的发育来解释成煤泥炭沼泽的形成过程显然是不科学的。

2)在聚煤期植被控制下,同活动碎屑环境附近可以纯净累积形成灰分并不高的厚煤层;煤层厚度的变化主要受同生碎屑环境影响,主要为局部遭受同生冲刷、分岔变薄;煤层基底碎屑环境的“废弃”,其实是先遭植被控制下碎屑贫化的结果,煤层与其基底宿主环境之间往往存在时间跨度较大,碎屑贫乏、沉积物微弱、似“凝缩层”的连续沉积阶段(以往的研究中,因采样密度不够或其他原因,而得出无沉积间断的认识),所以煤厚、煤质与基底原碎屑环境关系不大,主要是继承其遗留的地形地貌发育;后期环境的影响可能会更大一些,主要表现在对成煤泥炭层的下切冲刷。

3)煤层主要形成于淡水泥炭沼泽,煤中的黄铁矿硫形成于前期泥炭沼泽发育的海岸环境和后来海侵及下渗,石灰岩直接下覆煤层硫高<sup>[22,24]</sup>。

## 3.3 植物主导下的异地聚煤

随着研究的深入,巨~超厚煤层的成因越来越得到煤地质学研究的关注,植物、泥炭异地搬运累积成为可能。

### 3.3.1 植物、泥炭异地搬运实例

#### 3.3.1.1 植物异地搬运

1)安徽安庆市袁柏村1972—2010年间,累计从长江底捞出700多棵阴沉木,其中最大一棵达30余m,树干直径3m,主根部比较完整;阴沉(乌)木也分布于四川各大江及其支流,尤以奉节县发现最多;在广西都安、青海黄河龙羊峡、湖南湘江、贵州六盘水、湖北利川等地,海南南渡江、昌化江、万泉河等流域也都发现了阴沉木<sup>[48]</sup>。

2)亚马孙河、刚果河等现代茂密雨林三角洲上常能见到河流从上游原始森林运载来的大量漂木<sup>[14]</sup>。

3)印度尼西亚加里曼丹马哈坎河热带雨林三角洲分流河道,将植物残骸输送到三角洲前缘,堆积在

潮坪上,形成厚2.5m的异地泥炭层<sup>[46]</sup>。

4)美国密执安州苏克湖发现一个吉尔伯特型植积三角洲,由砾级到粉砂级植物碎屑组成,有些地方高灰分泥炭厚达15m<sup>[11]</sup>。

5)河北省易县石岗村易水河湾,泥炭直接沉积于河床相的卵石层和花岗闪长岩基岩之上,泥炭层厚度变化大,距离几米可自1~2m厚变为几cm,夹着植物的壳果、树根及躺倒的树干<sup>[1,3,14]</sup>。

6)煤系深灰~黑色泥岩、粉砂岩中的炭质、丰富的植物化石碎屑,砂岩中的煤化茎、煤纹、煤包体和层面的炭屑,以及其他河道砂岩中的硅化木,这些都是植物异地搬运的明显证据。

#### 3.3.1.2 泥炭异地搬运

1)泥炭浮岛。泥炭浮岛在全球泥炭沼泽发育的湖泊、海湾、河流边缘都有,它形成于泥炭沼泽饱水,气候转暖,深部泥炭被厌氧菌分解加快,生成大量甲烷气体,顶托上部泥炭分离并浮于水面,顺流滑向湖泊、河流。如:①2013年10月,美国明尼苏达州梅里菲尔德湾东部水面上突然出现一座泥炭浮岛,其总面积超过1万m<sup>2</sup>,岛上生长着矮草、菖蒲和低矮的柳树<sup>[49]</sup>;②佛罗里达西海岸潟湖泥炭岛上的大块泥炭顺流搬运,在搬运过程中逐渐破碎变细,之后堆积在潟湖或海岸附近<sup>[14]</sup>。

2)泥炭流。①1772—12—16,由于大雨,Solway泥炭沼泽的泥炭吸足了水,像巨大海绵似地膨胀,比周围异常突起,半凝固的黑色泥炭流滑向平原,其速度似熔岩流,泛滥覆盖了162hm<sup>2</sup>土地,吞没了若干茅舍。过后,原来的泥炭地最高点,降低了约7.6m<sup>[48]</sup>;②1831年1月,爱尔兰北西部爆发洪水,雪急剧融化,布鲁姆菲尔德和季伐之间的泥炭地崩塌,携带40hm<sup>2</sup>泥炭的黑色洪水沿着狭窄的河道流去,成为猛烈的激流,许多草地和耕地都被淹没,石南荒原、树木、泥、石被带走<sup>[48]</sup>;③1833年在爱尔兰西北郊的Donegal泥炭层4.3m处发现茅舍,内部充满泥炭,推断是被泥炭流所吞没的村庄<sup>[50]</sup>;④泥炭地的崩塌及其形成的泥炭流向低处倾泻,在湖、海和海湾淤积,这在波罗的海、德意志海岸等地方屡见不鲜<sup>[48]</sup>。

3)湖盆厚层泥炭。广西宾阳王灵泥炭矿,长190m、宽125m,平面呈椭圆状的岩溶湖盆中,赋存一层泥炭层,平均厚30m左右,最厚可达70.86m。泥炭层内含大量炭化的树叶、枝干,树干最大直径达0.8m。推测是异地成因的<sup>[51]</sup>。

以上事例充分展示了植物体、泥炭(包括泥炭浮岛、泥炭流)等的漂浮、搬运、沉积特征,结合异地煤

特征<sup>[8-13]</sup>,依据地质历史比较法,可推演到地史聚煤期植物、泥炭等有机质异地搬运沉积过程。

### 3.3.2 聚煤期植物、泥炭异地搬运沉积

#### 3.3.2.1 运移方式

在碎屑贫化期,聚煤期植被牢牢控制基底及陆源碎屑,构筑成植物茂密、水体清澈的盆地平原湖沼环境,流体以搬运有机质为主,主要有:①盆地沼泽河流长期清澈、低能,基本以搬运物源和沿途流水、滑塌、飓风等代入的植物茎叶枝干、泥炭等有机碎屑为主,及少量无机细碎屑物质。有机质在沼泽河流中的搬运方式主要有植物残体、泥炭碎屑等的悬移搬运,泥炭浮岛、泥炭筏搬运,腐植酸溶运;②海/湖岸附近,偶然风暴潮对沿岸植被和泥炭的剥蚀和搬运;③泥炭流搬运;④还有风对孢粉、树叶等的搬运等<sup>[24]</sup>。

#### 3.3.2.2 沉积方式和沉积特征组合

碎屑贫化期河流进入湖/海后,因水流扩散和/或受潮流顶托,流速减缓,以及密度、酸碱度的变化,河流携带的大部分无机碎屑(包括黏土胶体)和部分有机碎屑沉积下来,形成三角洲/高灰份的泥炭三角洲;部分有机碎屑和少量无机细碎屑被潮流和海/湖流搬运到更远的地方,根据不同物质、密度、形状、大小等分选性沉降沉积,其中黏土等碎屑物质因密度较大,先沉积下来形成夹矸,泥炭和植物残体密度较小,会在海/湖面上漂浮一段时间,等漂向更深的区域/水质澄清,植物残骸组织空隙充分饱水,才会慢速下沉累积<sup>[43]</sup>;风暴剥蚀和触发的水下重力流,驱动海/湖滨泥炭沼泽和沿岸三角洲、潮坪等沉积物复活,再次向海/湖中心运移,依比重差异分选,也促使无机碎屑与有机碎屑有效分离<sup>[13]</sup>。

1)近岸附近。在近岸附近,超厚煤层分岔,煤层与扇三角洲、浅水风暴重力流等碎屑岩频繁互层,如在抚顺盆地:①超厚煤层中可能夹有大量重力流形成的巨大泥岩楔;②出现大量的滑积煤和同沉积碎屑煤;③清晰可见腐植—腐泥煤与腐植煤构成的似复理石结构;④超厚煤层底板及其各个分层间没有根土岩<sup>[8]</sup>。

2)远岸方向上。向湖/海盆方向上,煤中夹矸逐渐变薄,由薄层到极薄层状,岩性由细砂岩、粉砂岩、泥岩到炭质泥岩,夹矸中常有含较多煤化木块、煤砾和细粒泥砾,显清晰的波状层理、粒序层理、旋卷层理或块状层理。煤层中还可见大小不等的砂泥质团块,指示突发性重力流事件沉积<sup>[13]</sup>;

3)深水环境。在海/湖深水环境植物泥炭等纯净

累积形成高质量的低灰煤。煤层中能见到由煤化植物碎屑构成的透镜状、细条带状、水平线理和块状构造,显示静湖沉积;在垂向上,每个煤分层中的灰分自下而上递减,到顶部又突然升高<sup>[13]</sup>。

在植积沼泽湖中,由于先遭植被控制,水体清澈,光照深度大,有利于藻类等微生物的繁衍生长。在浅湖区藻体与外来有机质交叉混合沉积,形成藻煤、烛藻煤和烛煤,如山西浑源太原组11号煤层和蒲县东河山西组2号煤层<sup>[24]</sup>;湖心区藻类等微生物体垂向加积可形成油页岩<sup>[5]</sup>,如黑龙江依兰盆地<sup>[52]</sup>、山东黄县盆地<sup>[53]</sup>、山东五图煤矿等<sup>[54]</sup>。

#### 3.3.3 异地沉积植物、泥炭等有机质的保存

由于海/湖可容纳空间大,只要聚煤期植被能够长期控制基底和陆源碎屑活动,盆地输入无机碎屑贫乏,河流就可以源源不断的将冲刷携带的植物和泥炭碎屑输送到海/湖盆沉积,而且海/湖中有有机质的再搬运和依比重差异分选性沉降沉积,能够在远岸方向形成灰分很低的植物泥炭等有机质累积。

相对于广海来说,湖泊(包括封闭潟湖)范围和深度有限、闭塞、低能、微酸性缺氧的水化学环境容易长期保持等优势,有利于植物、泥炭等有机质保存,在深水保护下,泥炭不再继续氧化,大大提高了煤中富氢镜质组含量<sup>[48]</sup>。因此,湖泊,特别是同沉积断陷盆地中后期的低能沼泽湖是超厚煤层聚集的有利场所。如我国中、新生代内陆小型盆地普遍赋存超厚煤层,这些煤层低硫、低灰,不仅是环保型优质化工用煤和动力用煤,而且是高烃转化率的优质液化石油用煤<sup>[13]</sup>。

#### 3.3.4 超厚煤层成因辨析

全球目前发现的超厚煤层有:澳大利亚吉普斯兰盆地总煤厚700多m,单层煤厚230m;加拿大哈溪煤田二号露天矿煤厚510m;中国胜利煤田东二号露天矿6煤厚244.7m,到中心3层煤近合并,最厚达320.65m;中国吐哈盆地沙尔湖坳陷西山窑组总厚301m,单层厚217.4m的煤层<sup>[14]</sup>。一般认为泥炭到煤的压缩比为6:1<sup>[48]</sup>,700m厚的煤层换算成原始泥炭,厚达4200m,即使按柴岫<sup>[45]</sup>热带雨林高达4.44mm/a的泥炭堆积速率计算,最少也要95万a。企求如此长的时期保持盆地均衡沉降、泥炭纯净累积,是非常严苛的。再者,从这些超厚煤层的结构和构造<sup>[8-13,55]</sup>也不难看出,用植被作用下的异地聚煤模式解释才更为合理。

在聚煤盆地充填变缓准平原化的中后期,植被、泥炭沼泽广泛发育,禁锢陆源和基底碎屑,沼泽河流、

风暴潮流等,将周围盆地及陆源的植物和泥炭等源源不断的输送到沼泽湖中,分选性沉降沉积。当沼泽湖处于构造沉降阶段(特别是同沉积断陷),植物有机质长期积累可以形成厚度巨大、灰分很低的优质煤层,如抚顺盆地超厚煤层<sup>[10]</sup>。

### 3.4 动态聚煤模式中各因素之间的关系和演化

聚煤期植被控制了基底和陆源碎屑活动,进入碎屑贫化期,泥炭沼泽得以扩展,横跨多个基底碎屑环境发育,并随着海/湖水进退纵向迁移,广泛拓展,改善环境水文,提高地下水位,进一步改变区域气候。植物与环境协同演化,并在良性循环中可持续稳定发育、拓殖,以至扩展到整个盆地冲积平原,长期延续、整体演化,形成以植物、泥炭等有机质为主体的,原地堆积与异地搬运沉积共生的、旋回净积的动态聚煤模式<sup>[25]</sup>。

动态聚煤模式反映的是聚煤过程中内在的和外在的各种因素在空间、时间上的互动、联动和运动。动态聚煤模式的关键在“动”,不仅表现为成煤植物内在功能上的主动性和区域上的移动性,而且更主要的是成煤环境的横向、纵向的动态演化,包括原地聚煤、异地聚煤及碎屑环境之间的互相牵制与协助,以及相互转化等。其中植物内在功能上的主动性表现为自我主动适应环境发育、主动控制和引导环境因素,包括控制基底碎屑活动、调节地表降水、影响环境气候。植物区域上的移动性表现在空间上的移动和扩展生长,创造有利条件原地聚煤;还表现为植物遗骸和泥炭在植被构建的净领域内,被外力移动搬运、于沼泽湖沉积聚煤。

动态聚煤模式中的碎屑环境,虽然在碎屑爆发期会短暂中止和破坏沿途和附近的原地聚煤及异地聚煤;但在长期的碎屑贫化期,清澈的沼泽河流主要是为原地聚煤提供充足的营养水源,为异地聚煤输送植物残体、泥炭等有机质。湖泊的陆源和基底碎屑被植被固定后就转变为沼泽湖,成为异地聚煤的有利场所。

原地聚煤、异地聚煤在控盆植被禁锢下同生互补并相互转化,常出现在同期聚煤的盆地不同部位,或同一煤层形成的不同时期。沼泽湖填平后就转化为泥炭沼泽原地垂向堆积;泥炭沼泽被水进淹没、或内部差异沉降低洼充水,就转化为沼泽湖,接受周围植物有机质微异地、异地沉积聚煤,如山西浑源11号煤层和蒲县东河2号煤层<sup>[24]</sup>。

## 4 结 论

1)通过反思聚煤作用的主要控制因素,研究地

史植物演化更替及作用效应,应用历史比较法推导出聚煤期是各时期植物发展到鼎盛阶段形成的,聚煤期植物拓殖能力强、群体效应显著,占据聚煤作用的主导地位。

2)在聚煤期植被主导下,盆地碎屑只能在有限的空间内周期性活动,形成漫长的碎屑贫化期与短暂的碎屑爆发期。在碎屑贫化期,碎屑环境落于次要的被动地位,海/湖滩被充分夷平,基底环境“废弃”,盆地流体已成为原地聚煤的水源和异地聚煤的载体,同生碎屑附近可以纯净聚煤。随着海/湖水退,泥炭沼泽从海/湖三角洲平原向三角洲前缘、潟湖潮坪、碳酸盐台地跟进;随着海/湖水进,向陆到河流冲积平原、冲积扇裙等,以至扩展到陆源区。泥炭沼泽迁移和扩展,广泛发育,改善环境水文,提高地下水位,并进一步改变区域气候,动态泥炭沼泽原地多层次叠置,在有利区段形成厚煤层;部分植物、泥炭等异地运移到海/湖中,在封闭、低能、微酸性缺氧的沼泽湖累积超厚煤层。原地聚煤与异地聚煤相互补充、互相转化,在良性循环中可持续发展,形成旋回净积的动态聚煤模式。因此在聚煤期植被禁锢下:①成煤泥炭沼泽不受碎屑侵扰,能够旋回净积成多层次叠置的厚煤层,并且随着海/湖水进退可以跨越不同基底环境扩展,甚至扩展到整个聚煤盆地;②在植被构筑的净环境中,河流、潮流、泥炭流等异地搬运植物、泥炭过程,没有或很少有陆源碎屑加入,富集成厚~超厚煤层;③植被阻止了碎屑的输入,海进过程水体清澈,有利于海相泥炭发育和紧随其后的碳酸盐岩生成,代替了水进序列的陆源碎屑沉积,形成石灰岩与煤层直接接触的海陆交互相的“约代尔”旋回;④在碎屑爆发期,陆源碎屑库崩溃,部分碎屑冲越到泥炭沼泽中,形成碎屑与煤层交互穿插的沉积结构;部分陆源岩块碎屑冲越到泥炭筏上被泥炭筏载运移到泥炭沼泽内部断续沉积,可形成煤层中零星分布的大块沉积角砾岩;而大量碎屑被沼泽河输送到海/湖三角洲沉积。

3)煤层基底环境的“废弃”实际上是聚煤期植被作用下碎屑贫化的结果;成煤泥炭沼泽无论从规模上还是从时间上,都远远超出了任何一种碎屑沉积环境的限度。聚煤过程中的植物作用可以合理解释煤地质中的植物泥炭纯净累积聚煤、煤层大范围连续分布、煤中零星大块角砾岩、约代尔旋回等“异常”现象,填补煤地质研究的空白。

### 参考文献(References):

[1] 杨起, 韩德馨. 煤田地质基础理论 [M]. 北京: 煤炭工业出版社,

1979.

- [2] 中国煤炭地质总局. 中国聚煤作用系统分析 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001.
- [3] 李增学, 魏久传, 刘莹. 煤地质学 [M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [4] 刘焕杰, 桑树勋, 郭英海, 等. 我国含煤沉积学若干问题及展望[J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 129–132.
- LIU Huanjie, SANG Shuxun, GUO Yinghai, et al. Some problems and prospect for China on coal-bearing sedimentology [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(1): 129–132.
- [5] 邵龙义, 徐小涛, 王帅, 等. 中国含煤岩系古地理及古环境演化研究进展[J]. 古地理学报, 2021, 23(1): 19–38.
- SHAO Longyi, XU Xiaotao, WANG Shuai, et al. Research progress of palaeogeography and palaeoenvironmental evolution of coal-bearing series in China [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2021, 23(1): 19–38.
- [6] 桑树勋, 陈世悦, 刘焕杰. 华北晚古生代成煤环境与成煤模式多样性研究[J]. 地质科学, 2001, 36(2): 212–221.
- SANG Shuxun, CHEN Shiyue, LIU Huanjie. Study on diversity of Late Paleozoic coal-forming environments and models in North China [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2001, 36(2): 212–221.
- [7] 邵龙义, 鲁静, 汪浩, 等. 近海型含煤岩系沉积学及层序地层学研究进展[J]. 古地理学报, 2008, 10(6): 561–570.
- SHAO Longyi, LU Jing, WANG Hao, et al. Advances in sedimentology and sequence stratigraphy of paralic coal measures [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(6): 561–570.
- [8] 吴冲龙, 王根发, 李绍虎, 等. 陆相断陷盆地超厚煤层异地成因的探讨[J]. 地质科技情报, 1996, 15(2): 63–67.
- WU Chonglong, WANG Genfa, LI Shaohu, et al. Study on allochthonous genesis of ultra thick coalbeds in continental faulted basins [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 1996, 15(2): 63–67.
- [9] 吴冲龙. 抚顺盆地的滑积煤及超厚煤层的成因模式[J]. *科学通报*, 1994, 39(23): 2175–2177.
- WU Chonglong. Genetic model of the talcum coal and super thick coal seam in Fushun Basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39(23): 2175–2177.
- [10] 吴冲龙, 李绍虎, 黄凤鸣, 等. 抚顺盆地超厚煤层的沉积条件分析[J]. 煤田地质与勘探, 1997, 25(2): 1–6.
- WU Chonglong, LI Shaohu, HUANG Fengming, et al. Analysis on the sedimentary conditions of extra thick coal seam from Fushun coal field [J]. *Coal Geology & Exploration*, 1997, 25(2): 1–6.
- [11] 吴冲龙, 王华, 李绍虎, 等. 中国东北抚顺盆地超厚煤层的成因研究 [C]/2001年全国沉积学大会论文集. 武汉, 2001: 569–580.
- [12] 吴冲龙, 李绍虎, 王根发, 等. 陆相断陷盆地超厚煤层异地堆积的新模式[J]. 地球科学, 2003, 28(3): 289–296.
- WU Chonglong, LI Shaohu, WANG Genfa, et al. New evidence and new model about allochthonous accumulation of extra-thick coalbeds in continental fault basin, China [J]. *Earth Science*, 2003, 28(3): 289–296.
- [13] 吴冲龙, 李绍虎, 王根发, 等. 先锋盆地超厚优质煤层的异地成因模式[J]. 沉积学报, 2006, 24(1): 1–9.

WU Chonglong, LI Shaohu, WANG Genfa, et al. Genetic model about the extra-thick and high quality coalbed in Xianfeng Basin, Yunnan Province, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(1): 1–9.

- [14] 王东东, 邵龙义, 刘海燕, 等. 超厚煤层成因机制研究进展[J]. 煤炭学报, 2016, 41(6): 1487–1497.
- WANG Dongdong, SHAO Longyi, LIU Haiyan, et al. Research progress in formation mechanisms of super-thick coal seam [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(6): 1487–1497.
- [15] 庄军. 鄂尔多斯盆地南部巨厚煤层形成条件[J]. 煤田地质与勘探, 1995, 23(1): 9–13.
- ZHUANG Jun. Formation condition of thick coal seam in South Ordos Basin [J]. *Coal Geology & Exploration*, 1995, 23(1): 9–13.
- [16] 邵龙义, 王学天, 鲁静, 等. 再论中国含煤岩系沉积学研究进展及发展趋势[J]. 沉积学报, 2017, 35(5): 1016–1031.
- SHAO Longyi, WANG Xuetian, LU Jing, et al. A reappraisal on development and prospect of coal sedimentology in China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(5): 1016–1031.
- [17] 杨雯. 山西地块太原组含煤地层综合研究及石炭一二叠系界线划分[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
- YANG Wen. Comprehensive study on coal bearing strata of Taiyuan Formation in Shanxi block and boundary division of Carboniferous-Permian [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2018.
- [18] DIESSEL C F K. Coal-bearing depositional systems [M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1992.
- [19] 邵龙义, 张鹏飞, 刘钦甫, 等. 湘中下石炭统测水组沉积层序及幕式聚煤作用[J]. 地质论评, 1992, 38(1): 52–59.
- SHAO Longyi, ZHANG Pengfei, LIU Qinfu, et al. The lower carboniferous ceshui formation in central Hunan, South China: Depositional sequences and episodic coal accumulation [J]. *Geological Review*, 1992, 38(1): 52–59.
- [20] 李增学, 魏久传, 韩美莲. 海侵事件成煤作用: 一种新的聚煤模式[J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 120–124.
- LI Zengxue, WEI Jiuchuan, HAN Meilian. Coal formation in transgressive events—a new pattern of coal accumulation [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(1): 120–124.
- [21] 邵龙义, 陈家良, 李瑞军, 等. 广西合山晚二叠世碳酸盐岩型煤系层序地层分析[J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 168–174.
- SHAO Longyi, CHEN Jialiang, LI Ruijun, et al. A sequence stratigraphic interpretation on Late Permian carbonate coal measures in the Heshan coal field, Southern China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(1): 168–174.
- [22] 石彦强, 邢立杰. 动态聚煤模式——兼论成煤植物在聚煤环境中的主导作用[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(S1): 6–8, 39.
- SHI Yanqiang, XING Lijie. Dynamic coal accumulation model—also on the leading role of coal-forming plants in coal accumulation environment [J]. *Coal Geology of China*, 2009, 21(S1): 6–8, 39.
- [23] 李增学, 吕大伟, 王东东, 等. 多元聚煤理论体系及聚煤模式[J]. 地球学报, 2015, 36(3): 271–282.
- LI Zengxue, LU Dawei, WANG Dongdong, et al. The multiple

- coal-forming theoretical system and its model[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2015, 36(3): 271–282.
- [24] 程保洲. 山西晚古生代沉积环境与聚煤规律 [M]. 太原: 山西科学技术出版社, 1992.
- [25] 石彦强. 聚煤期植物作用下的煤系旋回沉积 [J]. 地质论评, 2023, 69(4): 1285–1297.  
SHI Yanqiang. The cyclic sedimentation of coal-measure under the action of plants in the coal-forming period[J]. Geological Review, 2023, 69(4): 1285–1297.
- [26] 尚冠雄. 华北地台晚古生代煤地质学研究 [M]. 太原: 山西科学技术出版社, 1997.
- [27] 石彦强. 山西省朔州市平朔矿区井工三矿沉积环境及聚煤规律 [J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(12): 6–15.  
SHI Yanqiang. Study on coal measures sedimentary environment and coal accumulation pattern in underground coalmine No. 3, Pingshuo Mining area, Shuzhou City, Shanxi Province[J]. Coal Geology of China, 2019, 31(12): 6–15.
- [28] 石彦强. 山西平朔井工三矿煤系角砾岩特殊成因探讨 [J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3): 102–111.  
SHI Yanqiang. The origin of coal measure breccia in Jinggong No. 3 Coal Mine, Pingshuo, Shanxi[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(3): 102–111.
- [29] MEIXNEROVÁ J, BLUM J D, JOHNSON M W, et al. Mercury abundance and isotopic composition indicate subaerial volcanism prior to the end-Archean “whiff” of oxygen[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(33): e2107511118.
- [30] 白楠, 徐尚, 王雨轩, 等. 柴北缘鱼卡地区大煤沟组七段页岩岩相特征及沉积演化模式 [J]. 西北地质, 2021, 54(2): 74–85.  
BAI Nan, XU Shang, WANG Yuxuan, et al. Facies characteristics and sedimentary evolution model of the 7<sup>th</sup> member of dameigou formation in Yuqia area, North Qaidam Basin[J]. Northwestern Geology, 2021, 54(2): 74–85.
- [31] 赵国春, 韩以贵, 李建华, 等. 超大陆聚散的环境效应 [J]. 地质学报, 2022, 96(9): 3120–3127.  
ZHAO Guochun, HAN Yigui, LI Jianhua, et al. Environmental effects of assembly and breakup of supercontinents[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(9): 3120–3127.
- [32] 夏林圻, 徐学义, 李向民, 等. 亚洲3个大火成岩省(峨眉山、西伯利亚、德干)对比研究 [J]. 西北地质, 2012, 45(2): 1–26.  
XIA Linqi, XU Xueyi, LI Xiangmin, et al. Comparison of three large igneous provinces (Emeishan, Siberia, Deccan) in Asia[J]. Northwestern Geology, 2012, 45(2): 1–26.
- [33] 陈军, 徐义刚. 二叠纪大火成岩省的环境与生物效应: 进展与前瞻 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(3): 374–393.  
CHEN Jun, XU Yigang. Permian large igneous provinces and their impact on paleoenvironment and biodiversity: Progresses and perspectives[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2017, 36(3): 374–393.
- [34] 刘莉, 万明礼, 王军. 内蒙古乌达早二叠世火山凝灰岩植物群中长星叶 *Asterophyllites longifolius*(Sternberg) Brongniart 的形态复原与生态习性探讨 [J]. 古生物学报, 2017, 56(3): 357–373.  
LIU Li, WAN Mingli, WANG Jun. Reconstruction of asterophyl-
- lites longifolius( sternberg) brongniart from the early Permian Wuda tuff flora, Inner Mongolia, and its ecological significance[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2017, 56(3): 357–373.
- [35] 张文斌, 何碧, 陶刚, 等. 黔北新仁地区上二叠统龙潭组煤地质球化学特征及聚煤规律 [J]. 西北地质, 2020, 53(4): 51–65.  
ZHANG Wenbin, HE Bi, TAO Gang, et al. Geochemical characteristics and accumulation rules of coal in the upper Permian Longtan formation of xinren area, North Guizhou[J]. Northwest Geology, 2020, 53(4): 51–65.
- [36] 李聪聪, 孙顺新, 张光超. 滇东北峨眉山玄武岩对晚二叠世含煤建造的影响 [J]. 中国煤炭地质, 2013, 25(4): 1–6.  
LI Congcong, SUN Shunxin, ZHANG Guangchao. Impact from Emeishan basalt on Late Permian coal-bearing formation in north-eastern Yunnan[J]. *Coal Geology of China*, 2013, 25(4): 1–6.
- [37] 谢树成, 殷鸿福, 王风平, 等. 若干重大地质环境突变的地球生物学过程 [J]. 中国基础科学, 2015, 17(4): 30–34.  
XIE Shucheng, YIN Hongfu, WANG Fengping, et al. Geobiological processes during some critical environmental shifts in earth history[J]. China Basic Science, 2015, 17(4): 30–34.
- [38] 王铭, 刘子刚, 马学慧, 等. 世界泥炭分布规律 [J]. 湿地科学, 2013, 11(3): 339–346.  
WANG Ming, LIU Zigang, MA Xuehui, et al. Distribution law of peat in the world[J]. Wetland Science, 2013, 11(3): 339–346.
- [39] DAI S F, BECHTEL A, EBEL C F, et al. Recognition of peat depositional environments in coal: A review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2020, 219: 103383.
- [40] 殷鸿福, 喻建新, 罗根明, 等. 地史时期生物对冰室气候形成的作用 [J]. 地球科学, 2018, 43(11): 3809–3822.  
YIN Hongfu, YU Jianxin, LUO Genming, et al. Biotic influence on the formation of icehouse climates in geologic history[J]. Earth Science, 2018, 43(11): 3809–3822.
- [41] 刘子刚, 王铭, 马学慧. 世界泥炭地有机碳储量和有机碳密度 [J]. 湿地科学, 2014, 12(3): 279–285.  
LIU Zigang, WANG Ming, MA Xuehui. Estimation of organic carbon storage of peatlands in the world[J]. Wetland Science, 2014, 12(3): 279–285.
- [42] 林超然, 朱龙海, 胡日军, 等. 黏性沉积物可侵蚀性研究现状与展望 [J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(1): 1–17.  
LIN Chaoran, ZHU Longhai, HU Rijun, et al. Status quo and prospect of research on erodibility of viscous sediments[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(1): 1–17.
- [43] 石彦强. 约代尔旋回形成机制之我见——以华北克拉通晚古生代煤系沉积为例 [J]. 地质论评, 2021, 67(5): 1197–1206.  
SHI Yanqiang. My view on the formation mechanism of the yoredale cycle—a case study of Late Paleozoic coal formation deposits in the North China Craton[J]. Geological Review, 2021, 67(5): 1197–1206.
- [44] 刘子刚, 马学慧. 世界最大的泥炭地——俄罗斯瓦休甘泥炭沼泽 [J]. 湿地科学与管理, 2006, 2(3): 62–63.  
LIU Zigang, MA Xuehui. The largest peat land in the world - the vashugan peat swamp in Russia[J]. Wetland Science & Management, 2006, 2(3): 62–63.
- [45] 柴岫. 泥炭地学 [M]. 北京: 地质出版社, 1990.

- [46] 彭格林, 张则有, 伍大茂. 泥炭与煤形成环境对比研究现状[J]. 地球科学进展, 1999, 14(3): 247–255.  
PENG Gelin, ZHANG Zeyou, WU Damao. The study status of correlation of peat with coal forming environment[J]. Advances in Earth Science, 1999, 14(3): 247–255.
- [47] 邱广龙, 林幸助, 李宗善, 等. 海草生态系统的固碳机理及贡献[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1825–1832.  
QIU Guanglong, LIN Xingzhu, LI Zongshan, et al. Seagrass ecosystems: Contributions to and mechanisms of carbon sequestration[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6): 1825–1832.
- [48] 胡社荣, 薛丽娜, 黄灿, 等. 超厚煤层分布与成因模式[J]. 中国煤炭地质, 2011, 23(1): 1–5.  
HU Sherong, LIN Lina, HUANG Can, et al. Distribution and genetic model of extra-thick coal seams[J]. Coal Geology of China, 2011, 23(1): 1–5.
- [49] 段景颐. 泥炭沼泽那些事儿[J]. 大自然探索, 2020, 39(1): 36–41.  
DUAN Jingyi. About peat bogs[J]. Discovery of Nature, 2020, 39(1): 36–41.
- [50] 赵隆业. 煤层地质基础[M]. 北京: 地震出版社, 2000.
- [51] 尹善春. 厚层泥炭的形成研究 [C]//厚层泥炭的形成与现代聚煤作用. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994.
- [52] 王东东, 李增学, 王真奉, 等. 黑龙江依兰盆地古近系煤与油页岩共生特点及层序地层格架[J]. 中国煤炭地质, 2013, 25(12): 1–7.  
WANG Dongdong, LI Zengxue, WANG Zhenfeng, et al. Paleogene coal and oil shale paragenetic features and sequence stratigraphic framework in Yilan Basin, Heilongjiang[J]. Coal Geology of China, 2013, 25(12): 1–7.
- [53] 孔凡飞, 贾强, 李增学, 等. 山东黄县盆地古近系李家崖组含煤岩系沉积相特征及演化 [J]. 古地理学报, 2019, 21(3): 469–478.  
KONG Fanfei, JIA Qiang, LI Zengxue, et al. Sedimentary facies characteristics and evolution of coal-bearing rock series of the Paleogene Lijiaya Formation in Huangxian Basin, Shandong Province[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2019, 21(3): 469–478.
- [54] 徐小涛, 郝洪波, 王海亮, 等. 山东五图煤矿李家崖组煤与油页岩共生沉积特征研究[J]. 中国煤炭地质, 2016, 28(9): 1–9.  
XU Xiaotao, HAO Hongbo, WANG Hailiang, et al. Study on Lijiaya formation coal and oil shale paragenesis sedimentary features in Wutu coalmine[J]. Coal Geology of China, 2016, 28(9): 1–9.
- [55] 胡益成, 廖玉枝. 河南荥阳煤田早二叠世早期地层中异地煤的成因动力学研究[J]. 中国煤田地质, 2000, 12(2): 3–7.  
HU Yicheng, LIAO Yuzhi. Research on genetical dynamics of AllochthonousCoal in early Permian strata of XinggongCoal field, Henan Province[J]. Coal Geology of China, 2000, 12(2): 3–7.