第 28 卷 第 1 期
2026 年 2 月

古 地 理 学 报
JOURNAL OF PALAEOGEOGRAPHY (Chinese Edition)

Vol. 28 No. 1
Feb. 2026

**文章编号**：1671-1505(2026)01-0044-24 **DOI**:10.7605/gdlxb.2026.003

# 中国煤相研究进展及相关问题探讨*

邵龙义[1] 齐争辉[1] 唐跃刚[1] 王东东[2] 鲁 静[1] 刘萌乐[1]
连豪杰[1] 周 凯[1] 侯海海[3] 代世峰[1]

1 中国矿业大学（北京）地球科学与测绘工程学院，北京 100083
2 山东科技大学地球科学与工程学院，山东青岛 266590
3 辽宁工程技术大学矿业学院，辽宁阜新 123000

**摘 要** 煤相即煤的沉积相，是指煤的原始成因类型，取决于古泥炭沼泽的类型。煤相研究经过 70 多年的发展，取得了丰富的成果，结构保存指数（TPI）、凝胶化指数（GI）、地下水流动指数（GWI）、植被指数（Ⅵ）等煤相成因参数被先后提出。Diessel 使用 TPI-GI 图解划分出了干燥森林沼泽、潮湿森林沼泽、草本沼泽和草木混生沼泽等煤相类型。中国主要聚煤期的煤相特征表现为，华北石炭—二叠纪煤以过渡沼泽—潮湿森林沼泽为主，华南晚二叠世煤以过渡沼泽相为主，北方的早—中侏罗世煤优势煤相为潮湿森林沼泽—干燥森林沼泽相，东北早白垩世煤以潮湿森林沼泽相为主。这些特征说明不同聚煤期的成煤沼泽类型、成煤植物和古气候条件等具有明显差异。随着深部煤层气和煤系关键金属等研究的深入，煤相研究在这些资源勘探中的应用重新获得了关注。不同沼泽形成的煤层在煤岩煤质条件上具有明显差异，因此可以将煤相分析应用于煤生烃能力评价、煤储集层物性分析和煤系共生矿物预测。近年来，随着对含煤岩系沉积环境、沼泽演化和古野火事件研究的不断深入，已有的各类煤相参数作为含煤岩系及煤层沉积环境指标的合理性受到了一定质疑，煤相参数的内涵及使用仍需进一步完善。为了煤相研究的持续发展，今后需推动煤相分析基础理论的研究，尤其是显微组分成因和现代泥炭沼泽环境的研究，并需要加强煤相分析在实际生产工作中的应用。

**关键词** 煤相 显微煤岩组分 聚煤古地理 沼泽环境 煤相参数

**第一作者简介** 邵龙义，男，1964 年生，博士生导师，中国矿业大学（北京）地球科学与测绘工程学院教授，工学博士学位，长期从事沉积学和煤田地质学教学及研究工作。E-mail：ShaoL@cumtb.edu.cn。齐争辉，男，2002 年生，博士研究生，专业方向为沉积学和煤田地质学。E-mail：jasper1003@126.com。

**中图分类号**：P618.11 **文献标志码**：A

# Progress of coal facies analysis in China and discussion on related issues

SHAO Longyi[1] QI Zhenghui[1] TANG Yuegang[1] WANG Dongdong[2] LU Jing[1] LIU Mengle[1]
LIAN Haojie[1] ZHOU Kai[1] HOU Haihai[3] DAI Shifeng[1]

1 *College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing* 100083, *China*
2 *College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Shandong Qingdao* 266590, *China*
3 *College of Mining, Liaoning Technical University, Liaoning Fuxin* 123000, *China*

**Abstract** Coal facies, referring to the sedimentary facies of coal, denote the original genetic type

* 国家自然科学基金项目（编号：42321002，42530208，42302126）资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42321002, 42530208, 42302126)]
收稿日期：2025-12-01 改回日期：2025-12-17

of coal, which is determined by the type of ancient peat swamp. After more than 70 years of development, coal facies research has achieved significant progress, with successive establishment of genetic parameters such as the Tissue Preservation Index (TPI), Gelification Index (GI), Groundwater Influence Index (GWI), and Vegetation Index (VI). Diessel classified coal facies types into dry forest swamp, wet forest swamp, marsh, and fen, using TPI-GI discrimination diagram. Chinese scholars have summarized the coal facies characteristics of major coal-accumulating periods in China: the Carboniferous-Permian coals in the North China coal-accumulating area are dominated by transition marsh-wet forest swamp facies; the Late Permian coals in the South China coal-accumulating area are mainly composed of transition marsh facies; the Early-Middle Jurassic coals in the Northwest China coal-accumulating area are characterized by the dominance of wet forest swamp-dry forest swamp facies; and the Early Cretaceous coals in the Northeast China coal-accumulating area are dominated by wet forest swamp facies. These characteristics reflect that significant differences exist in the types of coal-forming swamps, coal-forming plants, and paleoclimatic conditions across different coal-accumulating periods. With the discovery of unconventional resources such as deep coalbed methane and critical metals in coal-bearing series, the application of coal facies in the development of these resources has regained attention. Coal formed in different mires exhibit inherent differences in coal petrological and quality characteristics, and thus, the coal facies analysis can be applied to the evaluation of coal hydrocarbon generation potential, reservoir physical property analysis, and prediction of coal-associated resources. In recent years, with the deepening research on the sedimentary environment of coal-bearing series, mire evolution, and paleowildfire events, the rationality of using coal facies parameters such as TPI and GI as indicators for the sedimentary environment of coal-bearing series and coal has been questioned to a certain extent. The rationalization and standardized use of coal facies parameters urgently require discussion and resolution. For the sustainable development of coal facies research, future efforts should be focused on advancing the basic theories of coal facies analysis-especially the research on the genesis of macerals and modern peat mire environments and strengthening the application of coal facies analysis in practical production to better promote the utilization of mineral resources in coal-bearing series.

**Key words**　coal facies, macerals, coal-accumulating palaeogeography, swamp environment, coal facies index

**About the first authors**　SHAO Longyi, born in 1964, Ph.D. supervisor, is a professor at the College of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing). He holds a Doctor of Engineering degree and has long been engaged in teaching and research on sedimentology and coalfield geology. E-mail: ShaoL@cumtb.edu.cn. QI Zhenghui, born in 2002, Ph.D. candidate, is specializing in sedimentology and coalfield geology. E-mail: jasper1003@126.com.

## 0　引言

煤相是煤的沉积相，反映煤的原始成因类型，它取决于古泥炭沼泽的类型（Teichmüller，1989）。煤相研究的根本是煤和煤层的成因问题（金士蒲格，1955），即成煤原始物质及其聚积形式、古地理环境、原始有机质的保存和转变过程。煤相概念自热姆丘日尼柯夫（Ю. А. Жемчужиков）于 1951 年提出以来，煤相研究经过 70 多年的发展（热姆丘日尼柯夫，1965；Stach *et al.*，1982；Taylor *et al.*，1998），其理论方法逐步完善，煤相分析方法的标准化，使得煤相分析成为成煤环境研究的重要方法。现在煤相分析进入了基础研究和应用实践共同发展的阶段，但随着显微煤岩组分成因研究的深入和现代泥炭地垂向序列的剖析，煤相参数的使用也遇到一定挑战（Esterle and Ferm，1994；Scott and Glasspool，2007；Dai *et al.*，2020），以煤

相参数作为成煤沉积环境指标的合理性需要进一步深入探讨。

煤相分析是含煤沉积学研究和煤田地质学研究的重要方法。志留纪陆地维管植物的出现触发了陆地有机碳生产的大规模聚集（薛进庄等，2022），同时也启动了人类生存赖以依靠的煤炭资源的形成（杨起和韩德馨，1979）。陆地植物的出现和繁盛，不仅会影响沉积区陆源物质的组成和通量，导致一系列地貌与沉积过程的变化，还会影响大陆风化作用，从而进一步影响元素的迁移成矿（Lucas，2001；Vannoppen *et al.*，2015；薛进庄等，2022），这些地质信息则会伴随煤层的形成而保存在含煤地层中。不仅如此，煤层作为地质信息的重要载体还蕴含着丰富的“深时”古气候、盆地演化、古生物和古生态及重大地质事件等信息（邵龙义等，2021），煤相研究的相关方法在这些信息的提取分析中发挥着不可替代的作用。同时作为含煤岩系沉积学的重要内容，煤相研究在分析煤系烃源岩的空间分布和生烃潜力（Damoulianou *et al.*，2022）、煤储集层物性特征的变化（Lu *et al.*，2020；Zhang *et al.*，2020）等方面具有重要作用。因此，煤相参数在全世界范围的煤系资源研究利用中发挥着越来越重要的作用。

本研究以中国数据为基础，对煤相研究在中国的发展过程及进展、主要的研究分析方法和中国各主要聚煤期的煤相特征进行了总结，列举了近年来煤相分析在煤炭资源勘查方面的具体应用，并对煤相分析研究中煤相参数的使用、显微煤岩组分的成因和古今泥炭地对比等问题进行了讨论，最后对煤相研究的发展趋势进行展望。

## 1 煤相研究历史沿革

煤相研究是在煤岩学和煤成因类型研究的基础上发展起来的（韩德馨，1996），早期相关工作为煤相概念的提出奠定了基础。“煤相”一词最早是由苏联学者热姆丘日尼科夫在 1951 年提出的（涅菲捷耶娃，1959；热姆丘日尼柯夫，1965），他首先将“相”的概念引入到煤田地质领域，提出了“煤相”，认为煤相体现泥炭的成因类型，是成煤条件、成煤过程及成煤物质等综合特征。热姆丘日尼科夫也对煤相进行了初步的划分，提出干燥森林沼泽相、深积水沼泽相、河漫流水沼泽相、滨海咸水淤浅潟湖相、淡水植物丛生湖泊相或淤浅湖泊相 5 种煤相类型。在此之后，前苏联多位学者还从煤的成因类型与沉积环境的关系出发，结合煤岩学特征及成煤沼泽环境特征划分煤相类型，同时提出煤层并不是单纯的一种沼泽相，而是多相的结合体（金士蒲格，1955；涅菲捷耶娃，1959；瓦尔茨，1986）。

在苏联学者开始系统研究煤相的同时，中国和欧美国家也开始了对煤相的研究。谢家荣（1955）在中国初步开展了煤成因类型的研究。德国学者 M. Teichmüller 以鲁尔地区石炭纪烟煤和下莱茵河地区的古近纪褐煤为研究对象，利用古植物学和煤岩学的方法，研究古植物的群落及其相对应的显微组分，建立了森林沼泽相、苔藓沼泽相、芦苇沼泽相及含水生植物的开阔水域相 4 种煤相类型（Teichmüller，1962）。英国学者 Smith（1962）结合孢粉学和煤岩学研究，在英国上石炭统威斯特法阶煤层划分出了 4 个小孢子组合相带（植被组合类型）：鳞木孢相、环带孢相、过渡相和水泛相，每种孢子相代表一种煤相类型。Hacquebard 和 Donaldson（1969）通过煤岩学的方法，参考 M. Teichmüller 等人的分类方案，在加拿大宾夕法尼亚亚纪煤层划分出了陆地森林沼泽相、森林沼泽相、芦苇沼泽相和开放沼泽相等 4 种煤相类型，同时提出了以煤的显微煤岩类型为分类依据的四端元双三角煤相图解。在此之后，多位学者不断发展以显微煤岩类型和显微组分为基准的煤相图解，使煤相图解分析逐渐成熟（Shibaoka and Smyth，1975；Marchioni，1980；Singh and Singh，1996；Sen *et al.*，2016）。

在 1982 年，M. Teichmüller 在《Stach's Textbook of Coal Petrology》一书（Stach *et al.*，1982）中对煤相的概念作了进一步的阐述，即“煤相是指煤的原始成因类型，它取决于泥炭形成时的环境”，并提出了煤层原始特征的决定因素包括堆积方式（原地生成、异地生成）、植物群落、沉积环境（浅沼、湖沼、微咸水—咸水、钙质的）、营养物质供给（贫养分、富养分）、pH 值及相关的细菌活动性和硫的供给、泥炭温度、氧化还原电位。M. Teichmüller 的定义中强调了 2 个基本点，一是煤的原始成因类型，即古泥炭类型；二是泥炭的形成环境，即古泥炭沼泽类型。由此看出，煤相的建

立和划分应当在恢复古泥炭沼泽类型和查明古泥炭特征的前提下，在泥炭沼泽内部进行。目前，M. Teichmüller 的定义得到了广大煤田地质工作者的认同和支持，是煤相的确切定义。

煤相确切定义的提出，标志着煤相研究从理论奠基阶段迈入系统发展阶段，这一时期煤相研究取得了长足发展。Harvey 和 Dilon（1985）在研究美国 Illinois 煤的时候，提出镜惰比（V/I）煤相参数，反映成煤泥炭沼泽中氧化—还原性的变化。此后，Diessel（1986）在研究澳大利亚二叠纪冈瓦纳烟煤时，提出了新的适合烟煤的煤相参数，即凝胶化作用指数（Gelification Index，GI）和结构保存指数（Tissue Preservation Index，TPI）。Diessel 用不同显微组分组合的比值作为煤相分析的参数，并建立 TPI-GI 图解来反映泥炭沼泽的沉积环境，划分出草本沼泽、潮湿森林沼泽和干燥森林沼泽 3 种基本的泥炭沼泽类型，这种方法在煤相分析工作中得到了大家广泛地使用。之后 Calder 等（1991）进一步发展了 Diessel 的理论，提出了植被指数（Vegetation Index，VI）和地下水流动指数（Groundwater Influence Index，GWI）。随着研究的深入，煤相研究的范畴扩展到了针对所有沉积有机质的有机相。Rogers（1979）将煤相的概念扩大到沉积盆地中的分散有机质的研究，提出了有机相（Organic Facies）的概念。Jones（1987）提出了生烃能力、有机化学、早期成岩环境、沉积学和原始有机质输入量等明确的有机相划分指标。改革开放后，中国煤相研究也取得了长足发展。杨起和韩德馨（1979）、王生维和庄新国（1990）、赵师庆等（1994）、姚素平等（1997）、杨建业等（2000）针对中国华北、华南、东北、西北等地区的主要含煤地层，系统开展煤层沉积环境研究，综合引入煤岩学、沉积学、古植物学及大地构造学等多学科方法，获得了覆盖中国主要聚煤区的成果，有力地推动了煤相分析方法在中国的推广与深化。

进入新世纪后，煤相研究进入精细应用阶段，这一阶段以煤相分析在全球范围内的广泛应用为主要特征。国内外学者围绕煤系资源高效开发与清洁利用的核心需求开展了一系列系统研究，这些研究包括含煤岩系古环境和古气候（Mitrović *et al.*，2016）、煤及共伴生矿产资源开发（代世峰等，2007；Oskay *et al.*，2019；Zhang *et al.*，2020）和煤炭资源清洁利用（唐跃刚等，2025）等方面。这一阶段也有新的理论和方法的提出，Petersen 和 Ratanasthien（2011）提出适用于低煤阶煤的湿度指数（Wetness Index，WI）和组织指数（Tissue Index，TI），为低煤阶煤沼泽重建提供了关键指标。Sen 等（2016）讨论了煤相多维度综合分析的修正方法。这些理论创新与多领域应用拓展完善了煤相研究体系，推动了煤相研究向“精准化、多学科、绿色化”的方向深度发展。

## 2　煤相分析方法

煤相的研究方法从相关概念被提出之后便一直在不断发展，早期以定性表征泥炭沼泽类型的方法为主，后来采用煤相图版和煤相参数等标准化模式判定煤相类型，现今则多采用煤岩学、沉积学、有机岩石学和地球化学等多学科综合划分煤相（图 1；朱雪芬，1985a，1985b；Ivanova and Zaitseva，2004；Zaitseva *et al.*，2004；Suárez-Ruiz *et al.*，2012）。煤相分析需要确定 3 个基本因素（Stach *et al.*，1982）：（1）成煤植物原始群落；（2）泥炭堆积作用类型（原地或异地）；（3）沉积环境（包括水深、盐度、pH 值、微生物活动、硫分与养分的补给、氧化还原电位等）。具体来说，煤相研究的经典方法有如下几类：

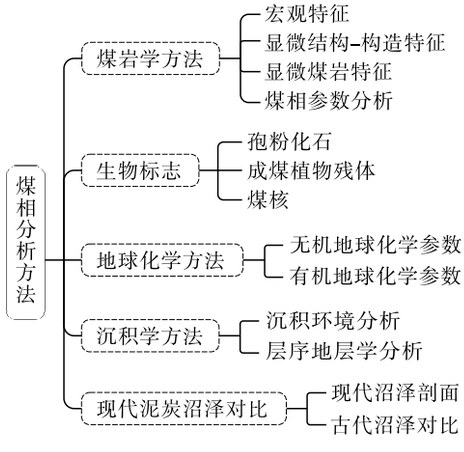



图 1　煤相分析方法

Fig. 1　Coal facies analysis methods

### 2.1　煤岩学方法

煤岩特征是反映煤层成因最直接、最可靠的标志之一，煤岩学方法主要利用从煤宏观特征和微观

特征提取出的成因标志来反映成煤沼泽环境特征，并由显微组分的定量统计结果引入定量化成因参数，进而对煤相类型进行划分。

### 2.1.1 煤宏观特征反映的煤相

在野外现场和井下的条件下，可以根据煤的宏观特征对煤相进行初步划分（涅菲捷耶娃，1959），其中最常用的是宏观煤岩组分和宏观煤岩类型。

宏观煤岩组分包括镜煤、亮煤、暗煤和丝炭（韩德馨，1996），镜煤和亮煤是植物的木质纤维组织经过凝胶化作用形成的，是森林沼泽在较深覆水的条件下形成的，其中亮煤的形成过程中掺入了其他组分或矿物杂质。暗煤是森林沼泽边缘的产物，覆水较浅。丝炭是由木质纤维组织经氧化或者野火不完全燃烧形成的，是干燥森林的产物。

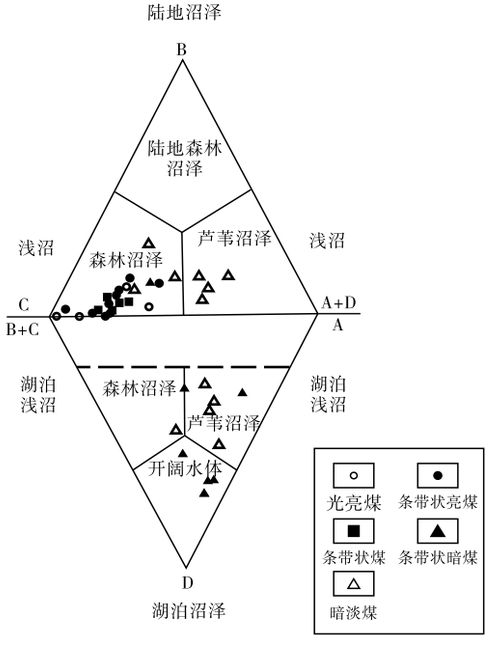
宏观煤岩类型是宏观煤岩组分的典型共生组合，依据煤中光亮组分（镜煤和亮煤）的含量可划分出光亮煤、半亮煤、半暗煤和暗淡煤等 4 种宏观煤岩类型（全国煤炭标准化技术委员会，2000）。在该标准中光亮煤的光亮组分占比在 80% 以上，光泽性强；半亮煤的光亮组分占比 50%～80%，光泽也较强；半暗煤光亮组分占比 20%～50%，光泽较弱；暗淡煤光亮组分占比小于 20%，光泽暗淡。不同宏观类型的煤其形成环境亦不相同，光亮煤形成于泥炭沼泽中覆水较深、还原性强的静水环境，半亮煤多形成于泥炭沼泽中覆水条件中等的过渡环境，半暗煤形成于开放或覆水条件较差的泥炭沼泽环境，暗淡煤形成于强氧化或暴露环境，如泥炭沼泽的边缘地带（李增学，2009）。

### 2.1.2 显微煤岩特征反映的煤相

显微镜下可辨别的煤中有机组成单元称为显微组分（韩德馨，1996）。目前使用的显微组分分类方案主要是国际煤和有机岩石学委员会（ICCP）提出的分类方案，即“ICCP System 1994”。该分类将煤的显微组分分为镜质组、腐植组、惰质组和类脂组等 4 类（ICCP，1998，2001；Sýkorová *et al.*，2005；Pickel *et al.*，2017），其中镜质组的分类通常适用于中阶煤和高阶煤及其相应变质程度沉积岩中的分散有机质；腐植组的分类适用于低阶煤及其相应变质程度沉积岩中的分散有机质；惰质组和类脂组分类适用于所有煤化作用程度的煤和变质程度的沉积岩中的分散有机质。代世峰等（2021a，2021b，2021c，2021d）对这一分类进行过详细解析。

显微煤岩类型是煤显微组分的自然共生组合（全国煤炭标准化技术委员会，2013）。以单组分组或多组分组的含量是否大于 95% 划分出微镜煤、微类脂煤、微惰煤、微亮煤、微镜惰煤、微暗煤、微三合煤等 7 种显微煤岩类型，还可根据具体显微组分类型的含量组合进一步划分出多种显微煤岩亚类型。不同的显微煤岩类型代表着不同的泥炭沼泽环境，如微镜煤形成于高地下水位和隔绝空气的环境、微亮煤形成于潮湿的森林沼泽、含丝质体或半丝质体的微暗煤代表氧化的泥炭表面环境（Taylor *et al.*，1998）。

Marchioni（1980）整合前人工作，对 Hacquebard 和 Donaldson（1969）煤相图解进行修改和完善，提出 A、B、C、D 等 4 种显微煤岩类型组合，其中，A 代表“微孢子亮煤+微暗亮煤+微镜惰脂煤”，B 代表“丝质微亮煤+微镜惰煤（惰质组为主）”，C 代表“微亮煤（镜质组为主）+微镜煤+微角质亮煤+微镜惰煤（镜质组为主）”，D 代表“微亮暗煤+微暗煤+微粗粒煤+微碳质矿物岩”，利用这 4 种组合可以绘制出煤相的双三角判别图




A=微孢子亮煤+微暗亮煤+微镜惰脂煤；B=丝质微亮煤+微镜惰煤（惰质组为主）；C=微亮煤（镜质组为主）+微镜煤+微角质亮煤+微镜惰煤（镜质组为主）；D=微亮暗煤+微暗煤+微粗粒煤+微碳质矿物岩

图 2 Marchioni（1980）双三角煤相图解

Fig. 2 Marchioni（1980）double triangular coal facies diagram

（图 2），其中上部三角代表比较干燥的条件，且越向顶端越干燥，下部三角代表比较潮湿的条件，且越向底部越潮湿。在具体进行分析时，当数据中暗淡端元 D<20%，使用上三角图解，此时 A 与 D 合并计算，然后与 B、C 端元进行比较来划分环境；同理当 D>20%时，使用下三角图解，将 B 与 C 合并，然后与 A、D 端元进行比较来划分环境条件。陆地沼泽中，丝质微亮煤形成于干燥森林沼泽，浅沼地带的森林沼泽和芦苇沼泽代表相对潮湿的条件。湖泊沼泽中，下部三角最下端部分代表水下沉积的开放沼泽，森林沼泽和芦苇沼泽代表相对潮湿的条件（Marchioni，1980）。

Smyth（1984）提出了煤相研究中的三端元三角煤相图解（图 3），以镜质组含量 50%线表示氧化的有机质与未氧化的有机质分界线，这条线以上的高值区表示以未氧化有机质为主，以下则以氧化有机质为主，Smyth 认为微暗煤和微惰煤主要形成于湖泊和下三角洲平原，微镜煤和微亮煤则富集于上三角洲平原和潟湖中。

### 2.1.3　显微结构—构造特征反映的煤相

煤的显微结构是指各种显微组分的大小、形态以及植物组织结构的保存程度，煤的显微构造是指煤的各种显微组分的组合面貌和空间分布状态（韩德馨，1996）。显微结构标志中的形态特征决定了其空间分布状态，因此显微构造在一定程度上受显微结构的制约（马兴祥，1988）。

碎屑状结构—碎粒状构造，各种显微组分以碎屑状产出，主要有惰质碎屑体、类脂碎屑体、镜质碎屑体及少量的凝胶体和孢子体、角质体等，常见细分散状的黏土矿物。主要显微煤岩类型为微暗煤及微三合煤等，反映较干燥的条件。

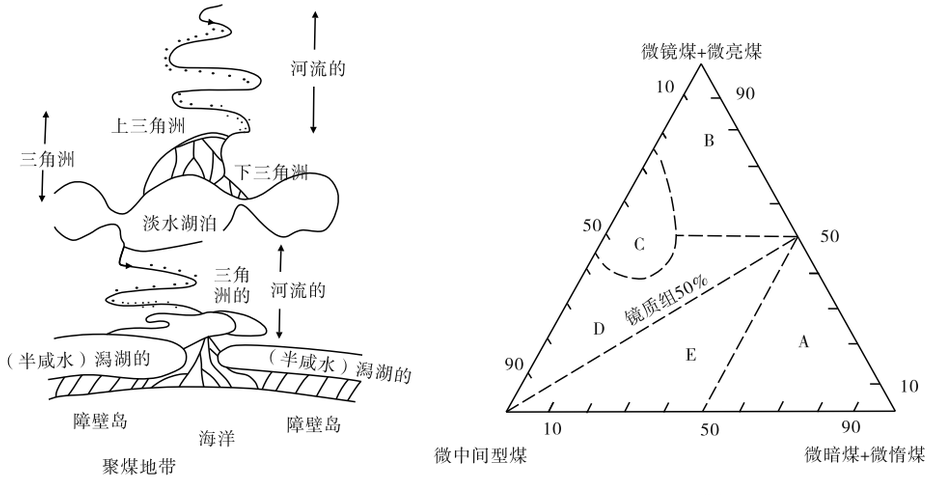
条带状结构—条带状平行构造是煤中具条带状、线理状的显微组分在垂向上呈平行或近平行相互叠置的特征。显微组分主要是镜质结构体、角质体、木栓质体等，常伴生黄铁矿。显微煤岩类型主要是微镜煤、微亮煤及少量的微镜煤等。反映一种弱氧化、强凝胶化的还原性条件。

斑块状结构—斑块状平行构造指煤中颗粒长度大于 100 μm 的非条带状显微组分所具有的特征。一般是由丝质体和半丝质体及少量颗粒较大的孤立团块凝胶体、粗粒体等组分构成。微惰煤是最主要的显微煤岩类型，煤中的丝炭分层主要是森林野火的产物。

复合结构—交织状构造是一种非单一型的显微结构构造类型，由碎屑状结构与非条带状的镜质结构体、胶质结构体复合而成。主要显微组分为惰质碎屑体、类脂碎屑体、孢子体及少量的镜质碎屑体和团块凝胶体等，并常见细分散状黏土矿物和块状黄铁矿，代表泥炭表层遭受氧化和生物腐解的产物。

## 2.2　生物特征标志反映的煤相

不同的泥炭沼泽会发育不同的生物群落，从而形成具有不同生物标志的煤层（Teichmüller，




a—煤的沉积环境；b—相关的显微煤岩类型。A-湖泊的，B-河流的，C-半咸水的，D-上三角洲的，E-下三角洲的

图 3　Smyth（1984）的煤相三角图解

Fig. 3　Triangular diagram of coal facies proposed by Smyth（1984）

1989）。

孢粉母体植物生态习性可以反映沉积环境特征、植物演化以及泥炭聚集阶段（Muir and Sarjeant，1978；Van de Wetering *et al.*，2013；Sahoo *et al.*，2020），Smith（1962）结合孢粉学和煤岩学研究，发现英国石炭系威斯特法阶煤层中不同层位的小孢子优势种不同，而且在变化顺序上也有一定的规律，划分出了 4 个反映植被组合类型的小孢子组合相带（植被组合类型）：鳞木孢相（Lycospore）、环带孢相（Densospore）、过渡相（Transition）和水泛相（Incursion），每个相带被认为代表一种煤相类型，每个煤相有其不同的岩石学特征和水文学特征，相的优势种是识别该相的基础。但是孢粉组合分析植物群落的方法存在一定争议，风和流水等营力可以将植物孢粉搬运至沼泽。因此，沼泽中的孢粉并不总是能够代表生长于沼泽中的成煤植物，应用优势孢粉来推断成煤植物群落可能只适应于森林沼泽，或者成煤植物类型较为单一的沼泽（Cohen and Spackman，1972）。

成煤植物残体也是判断煤相类型的重要标志，根据植物残体的起源，可以恢复古植物群落（Stach *et al.*，1982），M. Teichmüller 在重建莱茵河地区科隆褐煤植物群落和沼泽类型的过程中，划分出芦苇沼泽和开阔水域、具紫树科（*Nyssaceae*）和落羽杉科（*Taxodiaceae*）的潮湿森林沼泽、具杨梅科（*Myricaceae*）和鞣木科（*Cyrillaceae*）的稍干燥灌木林沼泽、具红杉属（*Sequoia*）的干燥针叶树森林沼泽 5 种沼泽类型（图 4；Teichmüller，1989；Taylor *et al.*，1998），发育不同植物群落的沼泽所形成的泥炭，最终会形成具有不同宏观和显微煤岩特征的褐煤。大部分褐煤都起源于森林沼泽，在温暖潮湿气候下，沼泽中乔木植物的比例增加，形成泥炭的植物常具有广泛分布的板状根系、特化的气生根、支柱根以及膨大的茎基部。森林沼泽中水生植物群可以在水中乔木之间生长，中间还有厚的藻丛，如紫树科—落羽杉科森林沼泽。在重建植物群落的过程中，叶表皮、木质部、种子以及角质层等原地生成的植物遗体可以用来恢复植物群落，而花粉和孢子则有一部分是由外界媒介搬运过来的，同时煤层顶底板植物化石恢复泥炭沼泽的植被也存在一定局限性，这些化石更多情况下反映沼泽开始发育或者消退时的植被类型，并不一定能真正代表泥炭沼泽植物（张泓和沈光隆，1995；周春光等，1998）。

煤核是煤中的矿化结核，代表煤层形成时的古泥炭沼泽植被类型，可能包含形成煤层最主要的直接物质成分，能够清晰、完整地反映成煤植物的生长状况和种属器官特征，指示成煤沼泽中生长的成煤植物种属、形状、生活环境和演变关系（方爱民，2003；Siewers and Phillips，2015；Raymond *et al.*，2019）。煤核主要在石炭纪和二叠纪煤中产出，但也有古近纪煤核的发现（阎文英，1988）。煤核以钙质、黄铁矿质和硅质为主。钙质结核指示泥炭沼泽可能遭受过海侵，其中所含的古植物和藻类还可在一定程度上表明海侵事件类型（张鹏飞等，2001）；黄铁矿结核可以指示缺氧的环境，特别是当黄铁矿随缺氧底栖生物及其活动遗迹出现时（Chrpa *et al.*，2023）；硅质结核则可能是成壤作用过程中游离的 $SiO_2$ 随水流进入沼泽形成的（邱明等，1985）。

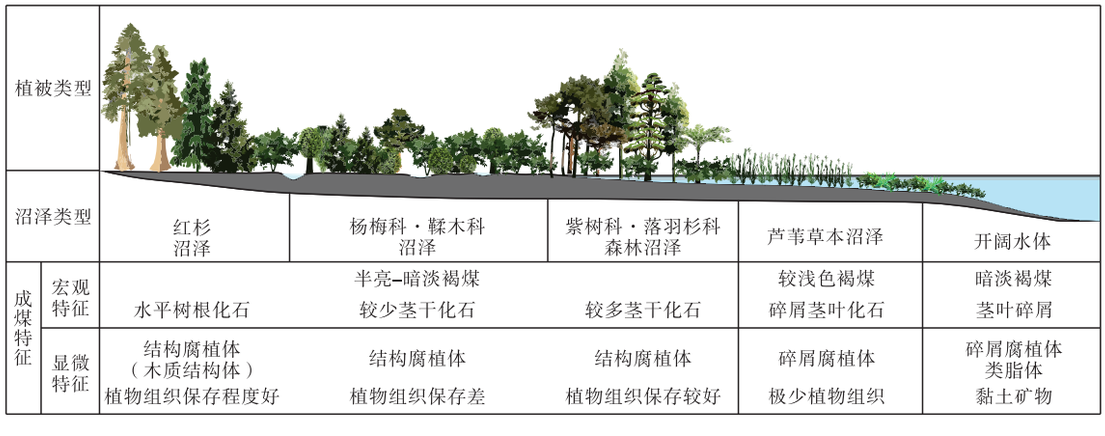



图 4 德国莱茵湾新近系褐煤的煤相模式图（据 Teichmüller，1989）

Fig. 4 Coal facies model of the Neogene lignite in the Rhine Bay，Germany（after Teichmüller，1989）

## 2.3　地球化学特征反映煤相

地球化学是沉积环境分析的经典方法，在煤相分析中，地化参数可以作为确定沼泽环境性质的辅助方法（Gayer *et al.*，1999）。煤中硫的含量是较好的古盐度较好的指标，煤层顶板为海相或与海水有关的沉积物时，煤中的硫含量明显增高（Chou，2012）。在煤灰中，一些元素氧化物的比值可以表征某些成因意义，如灰成分指数 $K=(SiO_2+Al_2O_3)/(CaO+MgO+Fe_2O_3)$，但这些参数易受到成岩后生作用的影响，在煤的灰分产率很高时应剔除成岩、后生矿物（代世峰等，2005）。由于煤的显微组分会对微量元素进行选择性的吸收，以及煤层受到成煤时代、煤化作用等因素的影响导致煤层中微量元素与普通地层中的微量元素出现差异，因此通过硼元素法、碳氧同位素法、特定元素（P、Sr）含量及元素比值（Sr/Cu、Mg/Ca、Sr/Ba、E/Cl 和 B/Ga）、氧化还原敏感元素（Mo、U、V、Ni、Ce、Eu）等沉积学经典指标判断沉积环境会出现一定误差，一般情况下，这些指标所反映的结果仅仅表明成煤环境的变化具有与普通地层变化类似的趋势（付金华等，2018）。有机地化参数，如姥鲛烷/植烷、氢指数 HI、生烃势 $S_1+S_2$、氯仿沥青“A”抽提物及其饱和烃分离以及生物标志化合物的分析，也可以用来推测成煤环境的氧化还原性、介质的盐度及植物来源等成因条件（唐跃刚，1997）。

## 2.4　沉积学特征反映的煤相

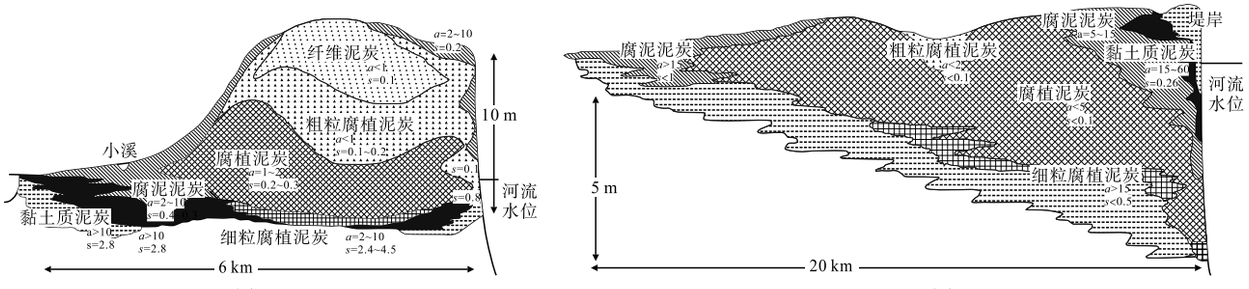
沉积学分析虽然不能直接划分出煤层的煤相类型，但是可以从含煤岩系整体出发，以宏观的角度分析所研究层位的煤相特征，建立煤相研究的总体背景（张鹏飞等，1993）。煤层顶底板、煤中夹矸以及整个含煤地层都可以用来分析沉积环境，从而提供煤相分析的背景资料（秦勇等，2008）。通过对含煤地层进行沉积学分析，可分析出当时的成煤环境，结合其他的煤相方法，可以准确地划分煤相类型，也可以调和单纯依据煤层参数分析所得结果与依据传统沉积学分析所得结果之间的矛盾。煤层顶底板的沉积学特征更可以反映煤层形成前后的古地理、古环境、古气候及古构造等控制聚煤作用发生的一系列因素（Lu *et al.*，2017）。煤层夹矸的沉积学特征则不仅可以反映夹矸的独特成因，还可以用来推断聚煤作用过程中所发生的一系列特殊事件，利于恢复泥炭沼泽的发育过程。

目前对于含煤地层，其沉积学和层序地层学研究与煤岩学研究的联系较弱，多围绕煤层厚度变化及其与体系域之间的关系（Dim *et al.*，2019；Li *et al.*，2021；OpluŠtil *et al.*，2024），而煤岩煤质特征与沉积学的关联性讨论较少（Diessel，2007）。鲁静等（2014）以柴达木盆地北缘大煤沟矿区早—中侏罗世含煤地层为研究对象，划分出沼泽体系的沉积亚相，建立了基于氧化还原性、水体能量和受陆源沉积物影响程度 3 个指标的煤相确定方法，恢复了煤相演化史，揭示了陆相盆地沼泽沉积特征及沉积演化史，并确定了层序格架内煤相演化与沼泽环境特征关系。

## 2.5　根据现代泥炭沼泽对比古代泥炭沼泽

对现代泥炭沼泽的研究可以类比古代泥炭沼泽的形成和演化，根据现代聚炭沉积盆地来探讨煤的形成，建立煤相类比模式（赵红艳等，2002）。泥炭地质学家在研究泥炭与煤形成环境的对比时，通常会结合含煤岩系的沉积学、构造地质学、煤岩学以及孢粉学研究，同时对沼泽沉积本体进行矿物学、地球化学和岩石学分析（冷雪天等，1997）。

在马来西亚和印度尼西亚苏门答腊的沉积三角洲环境发育着一系列厚层穹丘状泥炭矿床，这些泥炭矿床厚度大、分布广、发育质量好且以木本植物为主，是理想的现代泥炭沼泽与古代泥炭沼泽类比对象。Esterle 和 Ferm（1994）发现该地区泥炭类型在垂向和侧向的分布特点相似，自下而上呈高灰高硫泥炭或腐泥泥炭—细粒腐植泥炭—粗粒腐植泥炭—纤维素泥炭分布（图 5），侧向上，穹隆状泥炭地由中心向边缘，由富含结构腐植组分的根系泥炭转变为高分解的富含细屑腐植组分的木本泥炭，并伴有木质碎块最大粒径向上、向周缘减小的宏观特征。微观上，向上植物组织保存变好、无结构的基质减少，这一规律表示着凝胶化作用的减弱，由此产生向上变亮的煤岩类型系统。这一现象说明泥炭地离子供给和 pH 值变化不仅对植物生长，也对显微组分和矿物质有深刻影响。但是受植物分带和植被类型等因素的限制，这一对比模式以对比新生代或者部分晚白垩世的泥炭沼泽为主，对比其他更古老的泥炭沼泽则需要进一步研究（彭格林等，1994）。




（a） （b）

a—马来西亚沙捞越 Baram 泥炭矿床的截面；b—印度尼西亚苏门答腊 Jambi 泥炭矿床的截面。*a*-灰分，*s*-硫分

图 5 Baram 和 Jambi 泥炭矿床的截面图（据 Esterle and Ferm，1994）

Fig. 5 Generalised cross section of the Baram and Jambi peat deposit (after Esterle and Ferm, 1994)

## 3 常用煤相参数及煤相模式

在实际的研究工作中，使用最广泛的煤相分析方法是定量化成因参数分析，这些成因参数根据显微煤岩组分的组成特征对成煤沼泽类型进行划分，使用较多的煤相参数有 Diessel(1986)的结构保存指数(TPI)和凝胶化指数(GI)、Calder 等(1991)的地下水流动指数(GWI)和植被指数(VI)以及 Harvey 和 Dillon(1985)提出的镜惰比（V/I）。

### 3.1 TPI 和 GI

结构保存指数（TPI）是指煤中有结构的植物组织与无结构的植物细小碎片之比，反映了泥炭沼泽中植物体遭受搬运及氧化作用的程度（Diessel，1986）。一般情况下，当泥炭沉积时，环境处于干燥氧化或者极端潮湿的条件下，此时形成的煤 TPI 值较低；当环境处于弱氧化的、一般潮湿的条件下，此时煤的 TPI 值较高。一些特殊组分的富集，如丝质体，也会使 TPI 值变大。TPI 用下列公式计算（Diessel，1992）：

$$\text{结构保存指数(TPI)} = \frac{\text{镜质结构体} + \text{胶质结构体} + \text{丝质体} + \text{半丝质体}}{\text{碎屑镜质体} + \text{凝胶镜质体} + \text{惰质碎屑体} + \text{粗粒体}}$$

凝胶化指数（GI）是指煤中的凝胶化组分与丝炭化组分之比。在成煤作用过程中，泥炭沼泽的覆水程度在很大程度上影响了植物残体的凝胶化作用，因此，凝胶化指数的值可以反映泥炭沼泽中的水位高低情况和植物残体的凝胶化程度（Diessel，1986）。当泥炭沼泽潮湿覆水时，形成的煤表现出较高的 GI 值；反之，当泥炭沼泽处于相对干燥的环境中，形成的煤 GI 值较小。GI 用下列公式计算（Diessel，1992）：

$$\text{凝胶化指数(GI)} = \frac{\text{粗粒体} + \text{镜质组}}{\text{丝质体} + \text{半丝质体} + \text{惰质碎屑体}}$$

Diessel（1986，1992）在研究澳大利亚 Hunter Valley 二叠纪烟煤时，利用这 2 个参数建立了 TPI-GI 图解(图 6)，用以论证煤相标志与成煤环境的关系。在三角洲进积的过程中，在下三角洲平原形成的煤具有高黄铁矿含量和高胶质碎屑体含量的特征，代表受海水影响和木质组织来源缺乏，这种环境常发育草本沼泽（高 GI 值，低 TPI 值）；当上三角洲平原进积到下三角洲平原之上时，草本沼泽被潮湿森林沼泽代替，木质组织增加且保存条件较好，同时覆水程度降低使得丝质体和半丝质体含量增加，使得 GI 值降低，TPI 值增高；在山前冲积平原的高度富氧环境条件下，凝胶化组分减少，而有结构的惰质组被破碎形成惰质碎屑体，所形成的煤较其他环境 GI 值和 TPI 值均降低。

### 3.2 GWI 和 VI

地下水流动指数（GWI）用来表示地下水对泥炭沼泽的控制程度，地下水位的变化和矿物含量(Calder *et al.*，1991)。一般情况下，煤中的显微组分分解程度较高和矿物含量较高，反映沉积环境中的较高水位，此时，植物组织凝胶化程度也会很高，导致 GWI 值较高。GWI 用下列公式计算(Calder *et al.*，1991)：

$$\text{地下水流动指数(GWI)} = \frac{\text{凝胶镜质体} + \text{矿物组分}}{\text{结构镜质体} + \text{胶质碎屑体}}$$

植被指数（VI）是富木质素组分与贫木质素

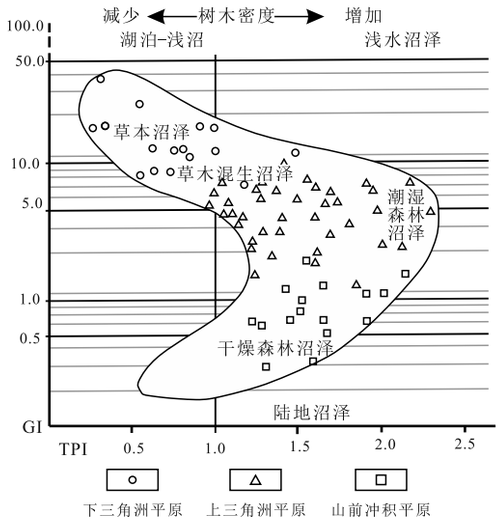



图 6　Diessel（1986）TPI-GI 图解

Fig. 6　Diessel（1986）TPI-GI diagram

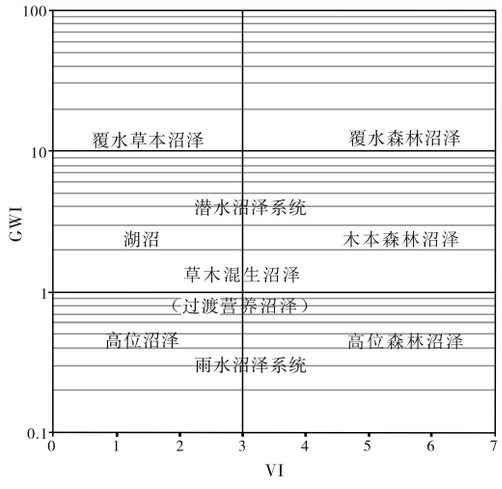



图 7　Calder（1991）VI-GWI 图解

Fig. 7　Calder（1991）VI-GWI diagram

组分之比，指示反映成煤植物类型以及成煤植物的保存程度（Calder *et al.*，1991）。当煤中植物细胞被破坏程度小、保存程度好时，VI 值较高，同时成煤植物具有较好的森林亲和性，相反，较低的 VI 值则说明成煤植物与草本植物密切相关。VI 值按下式计算（Calder *et al.*，1991）：

$$\text{植被指数(VI)} = \frac{\text{结构镜质体} + \text{丝质体} + \text{半丝质体} + \text{木栓质体} + \text{树脂体}}{\text{胶质碎屑体} + \text{惰质碎屑体} + \text{类脂碎屑体} + \text{藻类体} + \text{孢子体} + \text{角质体}}$$

Calder 等（1991）、Calder（1993）在研究加拿大 Cumberland 盆地晚石炭世烟煤时，运用这 2 个指数，建立 VI-GWI 图解（图 7）并用来划分煤相。以 VI=3 划分出 2 种植被类型的沼泽，分别为 VI<3 草本沼泽和 VI>3 木本沼泽。凝胶化组分含量的增加表明地下水影响程度的增强，即从雨水沼泽系统演变为潜水沼泽系统。GWI<0.5 表示沼泽为雨水供给的沼泽系统，0.5<GWI<3 表示沼泽处于雨水供给沼泽向潜水供给过渡的中营养或混合营养沼泽，GWI 值在 3 以上则转化为潜水供给的沼泽系统，在 3~5 之间代表开放的湖泊沼泽，而超过 5 则表示沼泽被水淹没从而形成碳质泥岩，这些沼泽中占主导地位的植被类型由 VI 值决定。

### 3.3　V/I（镜惰比）

镜惰比即镜质组与惰质组含量的比值（Harvey and Dillon，1985），这一数值既反映了镜质组和惰质组之间的含量变化，在一定程度上也反映了成煤泥炭沼泽中氧化还原性的变化。在比较干燥的氧化条件下，镜质组含量较低，V/I 一般小于 1.2，少数在 1.0~1.5 之间；而在比较潮湿的还原条件下，惰质组十分贫乏，V/I 一般大于 2。

除以上几种煤相参数和图解外，氧化指数（OI）、破碎指数（BI）、丝炭化指数（FI）、湿度指数（WI）、组织指数（TI）、流动性指数（MI）以及 F-T-D 图解、三元图解等也被用来划分煤相类型（马兴祥，1988；Petersen and Ratanasthien，2011；Suárez-Ruiz *et al.*，2012），这些方法本质上仍是使用表征成煤沼泽环境特征的显微组分含量比值来进行分析的，根据研究区煤层的实际情况选取或调整相应的参数来达到定量分析沼泽环境的目的。

## 4　中国主要聚煤时代煤层的煤相特征

聚煤作用的发生和强弱受控于构造、气候、环境和植物类型等条件（邵龙义等，2021），在地质历史中，全球性重大地质活动会导致上述条件发生变化，进而使得不同时期的植物繁茂程度与聚煤条件产生显著差异，最终造成各地质历史阶段的聚煤作用强度出现明显波动。中国聚煤期跨度广泛，从古生代到新生代都有聚煤作用的发生，就聚煤作用强度来说，晚石炭世—早二叠世、晚二叠世、早—中侏罗世、早白垩世等 4 个聚煤期的聚煤作用最强（曹代勇等，2016；秦勇，2017；Shao *et al.*，2020）。本研究以 Diessel（1986）煤相模式为基

础，结合中国煤的煤岩特征和研究现状，确定了 5 种煤相类型，并基于已发表的显微组分数据，划分主要聚煤期的煤相类型，构建相应的煤相模式。

### 4.1 晚石炭世—早二叠世煤相特征

晚石炭世—早二叠世的聚煤作用活跃区以华北聚煤区鄂尔多斯盆地及其附近的聚煤盆地为主要代表。鄂尔多斯盆地在晚石炭世—早二叠世处于低纬度热带地区(图 8-a)，成煤植物主要包括石松纲、楔叶纲、瓢叶目、真蕨纲、种子蕨纲、苏铁纲和科达纲等类群 (Wang *et al.*, 2012)。该区域煤相类型通常划分为覆水草本沼泽相、过渡沼泽相、覆水森林沼泽相、潮湿森林沼泽相、干燥森林沼泽相等 5 种类型(图 8-b, 8-c)。煤相分析结果显示华北地区晚石炭世—早二叠世煤层以过渡沼泽—潮湿森林沼泽为主，覆水草木沼泽—覆水森林沼泽也有发育。

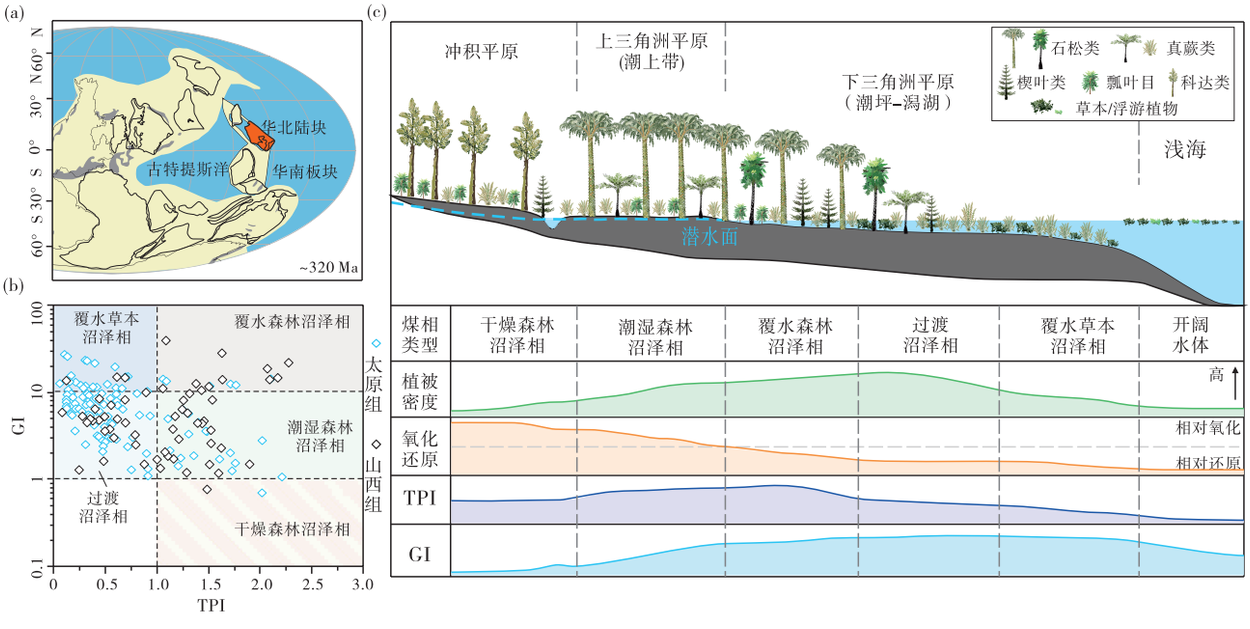
### 4.2 晚二叠世煤相特征

中国晚二叠世的聚煤作用活跃区以华南聚煤区为主要代表。华南地区在晚二叠世处于低纬度热带地区(图 9-a)，成煤植物主要有鳞木、辉木、封印木和少量松柏植物 (郭英廷, 1990; 唐跃刚等, 2011)。华南地区 TPI-GI 图特征(图 9-b, 9-c) 与华北地区晚石炭—早二叠世煤层相似，GI 值在 1~10 之间，TPI 值大部分在 1.5 以下，煤相类型以过渡沼泽为主，成煤植物以在过渡沼泽—潮湿森林沼泽发育的草本植物和木本植物为主。

### 4.3 早—中侏罗世煤相特征

中国早—中侏罗世煤层主要分布在西北地区和鄂尔多斯盆地，两地区在早—中侏罗世处于中—高纬度地区(图 10-a)，气候较为温暖湿润 (黄磊等, 2023)，成煤植物群同属侏罗纪北方植物区系(辛存林等, 2022)，以银杏纲、真蕨纲、松柏科植物为主。

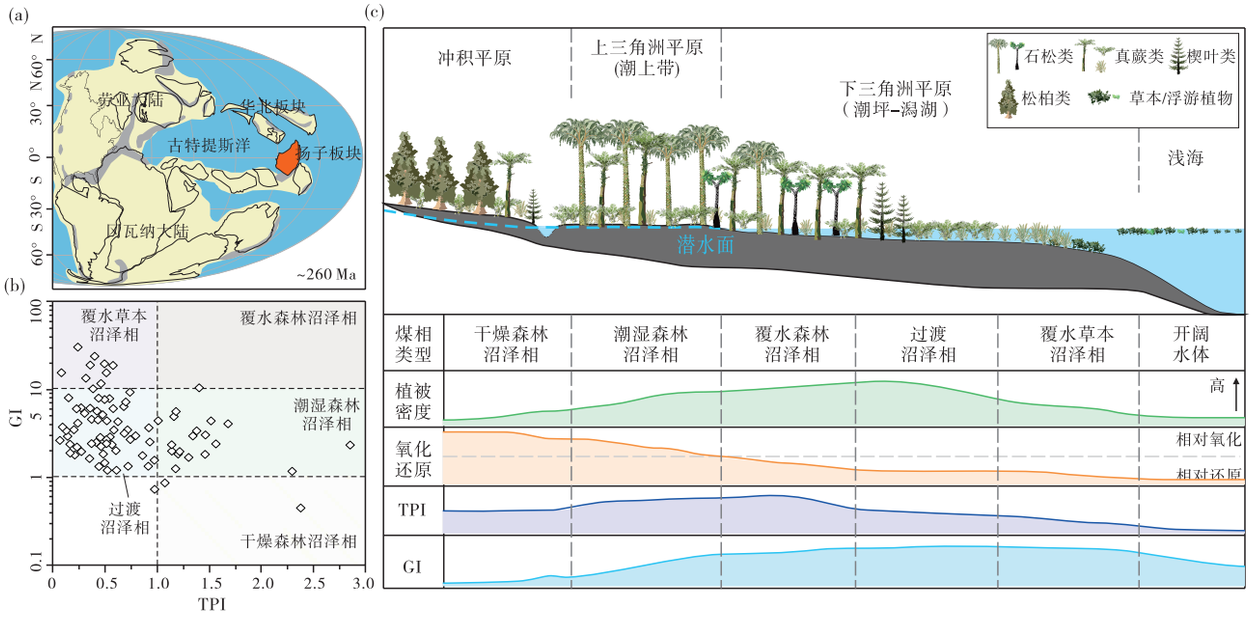
鄂尔多斯盆地中侏罗统延安组煤相研究多集中在盆地东北部神木煤田和东胜煤田 (康希栋等, 1992; 沈阳阳等, 2023; Lü *et al.*, 2023; 李美芬等, 2024)，划分出覆水草本沼泽、过渡沼泽、覆水森林沼泽、潮湿森林沼泽和干燥森林沼泽等 5 种煤相类型。东胜煤田延安组煤(图 10-b, 10-c) 具有高 TPI 特征，成煤植物以木本植物为主，植物细胞结构保存完好，受降解的强度低；而 GI 值的变化幅度较大，成煤沼泽的覆水程度和植物遗骸的凝胶化程度变化较大。西北地区的煤相研究以中侏




a—晚石炭世—早二叠世全球古板块分布 (据李江海和姜洪福, 2013, 修改)；b—鄂尔多斯盆地晚石炭世—早二叠世太原组和山西组煤相参数图解，数据来自文献 (Zhang *et al.*, 2010; 李清, 2014; 马伟竣, 2014; Li and Wu, 2017; Jiu *et al.*, 2021; 赵伟波等, 2023; 沈柏坪等, 2024; Xiao *et al.*, 2024)；c—鄂尔多斯盆地晚石炭世—早二叠世煤层煤相模式

图 8 鄂尔多斯盆地晚石炭世—早二叠世煤相分析

Fig. 8 Coal facies analysis diagram of the Late Carboniferous-Early Permian coal in Ordos Basin




a—晚二叠世全球古板块分布（据李江海和姜洪福，2013，修改）；b—华南地区晚二叠世煤层煤相参数图解，数据来自文献（郭亚楠等，2009；秦身钧等，2018；林雨涵，2022；Mu *et al.*，2025）；c—华南地区晚二叠世煤层煤相模式

图 9　华南地区晚二叠世煤层煤相分析

Fig. 9　Coal facies analysis diagram of the Late Permian coal in South China

罗世西山窑组居多，其参数分析结果与延安组类似（图 10-b，10-c），沼泽类型以干燥森林沼泽相到覆水森林沼泽相为主，森林沼泽占主要优势，仅少部分区域煤层发育过渡沼泽（李鑫等，2010；Zhou *et al.*，2018；何建国等，2022）。

### 4.4　早白垩世煤相特征

早白垩世煤层以东北地区发育最好，如二连盆地和三江盆地等聚煤盆地，形成的煤层厚度大、分布范围广。早白垩世东北地区处于中—高纬度地区（图 11-a），气候较为温暖湿润，成煤植物以裸子植物为主、蕨类植物为重要补充。煤相参数分析显示（图 11-b），早白垩世煤的 TPI 值和 GI 值均较高，大部分都大于 1，其中 TPI 值集中在 1~10 之间。二连盆地与三江盆地煤相分布类型相似，煤相类型以潮湿森林沼泽和较浅覆水森林沼泽为主，总体反映了早白垩世煤层主要形成于相对低能和还原的沼泽环境（图 11-c）。

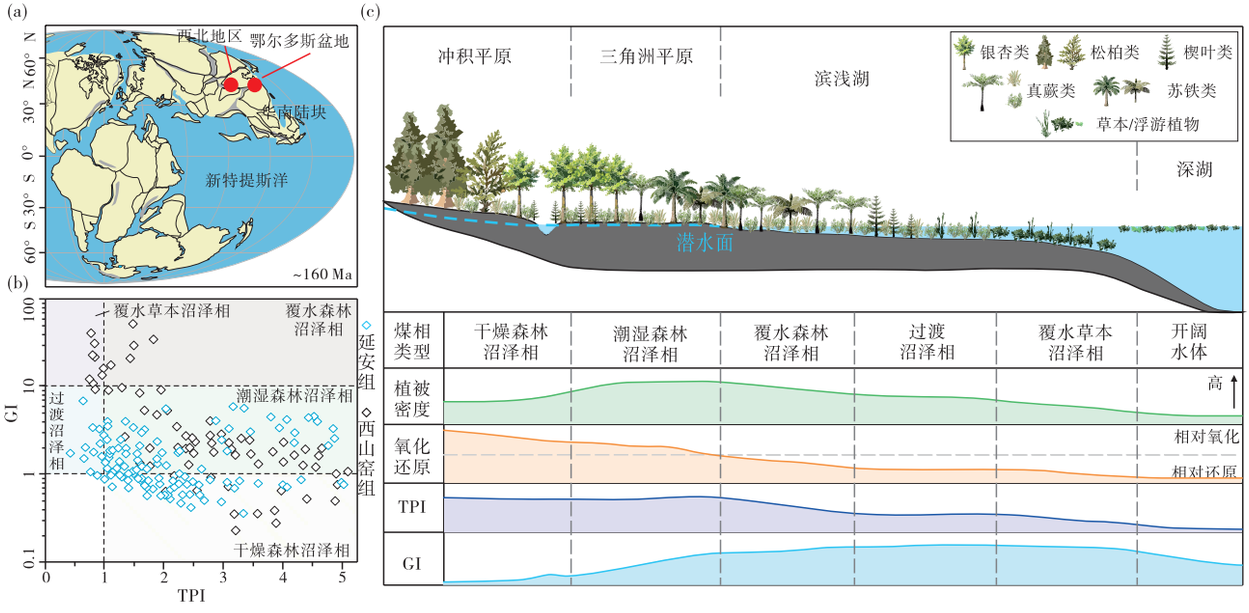
## 5　煤相分析的应用

### 5.1　古环境和古气候研究

在系统研究含煤岩系时，煤相分析可以作为研究煤层成因、古沼泽演化和古气候条件的强有力手段（侯贤旭等，2013），恢复成煤沼泽环境，为整个含煤岩系沉积环境的研究奠定基础（图 12）。

成煤沼泽演化会反映在煤层（泥炭体）的垂向叠置上（邵龙义等，2022），因此煤层煤相演化序列可以反映沼泽演化过程。煤相参数结合有机岩石学和地球化学指标，有助于更好地建立煤层剖面的沼泽演化过程（Sosnowski and Jelonek，2022；Wei *et al.*，2023；赵伟波等，2023）。Kumar 等（2024）在研究印度西北部 Barmer 盆地古近系褐煤时，结合煤相分析和有机岩石学分析，恢复出泥炭沼泽从潮湿的森林沼泽到碎屑草本沼泽的演化过程，证实了泥炭是在海侵过程中聚集的。

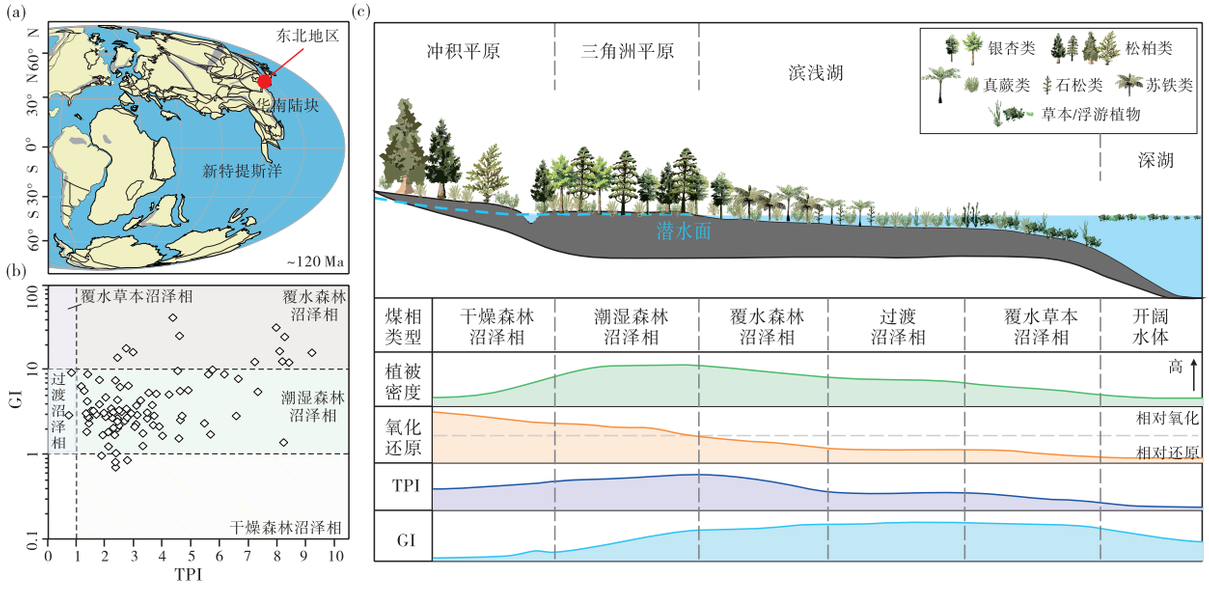
煤层本身也是古环境和古气候信息的记录者（Karayigit *et al.*，2020；邵龙义等，2021），通过煤中生物化石和生物标志物的分析可以提取沼泽植被群落、水体盐度、氧化还原条件和基准面变化等信息，从而进行沼泽生物群落恢复和古环境的重建（Mitrović *et al.*，2016）。煤相参数结合有机地球化学、孢粉学指标及同位素特征的多角度分析也是恢复植被群落和古环境的有效方法（Çelik *et al.*，2021；Panda *et al.*，2022；Hisham and Zainal Abi-




a—早—中侏罗世全球古板块分布（李江海和姜洪福，2013）；b—西北地区中西山窑组和鄂尔多斯盆地延安组煤层煤相参数图解，数据来自文献（王绍清和唐跃刚，2007；李鑫等，2010；张冀等，2015；Zhou *et al.*，2018；何建国等，2022；沈阳阳等，2023；Lü *et al.*，2023；李美芬等，2024）；c—早—中侏罗世煤层煤相模式

图 10 中国北方中侏罗世煤层煤相分析

Fig. 10 Coal facies analysis diagram of the Middle Jurassic coal in northern China




a—早白垩世全球古板块分布（李江海和姜洪福，2013）；b—东北地区早白垩世煤层煤相参数图解，数据来自文献（付黎明等，2011；杨瑾，2021）；c—早白垩世煤层煤相模式

图 11 东北地区早白垩世煤层煤相分析图

Fig. 11 Coal facies analysis diagram of the Early Cretaceous coal in Northeast China

din，2023）。煤层还可以记录地质历史中大气颗粒的沉降历史，高位沼泽以降雨为主要营养源，受地下水影响较小，因此高位沼泽形成的煤层可以更好地保存沉降下来的大气颗粒，从而可用来分析地质历史过程中的大气活动和变化（刘萌乐等，2025；Wang *et al.*，2025）。

## 5.2　煤系油气资源勘探与开发

煤相分析是沼泽环境研究和煤层物性特征之间的桥梁。煤相通过调控沉积环境的水动力条件、氧化还原状态、植物残体输入类型及分解转化强度，在根本上控制着煤的基本组分，决定煤的煤岩煤质特征，从而控制煤系油气资源的勘探开发潜力（张鹏飞等，1997；康世龙，2021；李勇，2022；Flores and Moore，2024）。

煤作为重要烃源岩可以为邻近油气储集层提供油气来源，相同成熟度下，不同煤相的煤岩也具有不同的生烃潜力，对煤层（烃源岩）进行煤相分析，是煤成烃资源评价的有效手段之一（Guatame *et al.*，2023；Li *et al.*，2023；Kong *et al.*，2025）。Damoulianou 等（2022）在研究希腊晚白垩世富有机质沉积时，也指出不同沼泽形成的煤层及富有机质页岩具有不同的生烃潜力，尽管之后受到的地质作用可能会有不同，但在排除这些作用的差异后，发现在一定范围内，泥炭沼泽水体的加深会有利于增强煤层及富有机质页岩的生烃能力。唐跃刚（1997）在研究吐哈盆地侏罗纪煤系煤成油（富油煤）时，划分出了干燥泥炭沼泽相、森林泥炭沼泽相、活水泥炭沼泽相、开阔水体相等 4 种煤相类型，并分析了不同煤相类型的有机地球化学特征，发现随着沼泽从不覆水到覆水、从干燥到潮湿，氢指数 HI、生烃势 $S_1+S_2$、降解潜力 D 等指数均有较大程度增加，说明不同的煤相类型生烃潜力具有较大差异（张鹏飞等，1997）。

同样，煤相也间接控制着煤层含气性和孔隙性等特征（唐书恒等，2008；Lu *et al.*，2020；Lou *et al.*，2022）。鄂尔多斯盆地东南部延川南煤层气田 2 号煤层主要形成于覆水相对较深、还原性较强的下三角洲平原环境，煤相与煤层气含量分布一致性较好，煤层厚度大、高镜惰比和低灰分的煤层中煤层气含量较高（李清，2014）。煤层孔隙的发育与煤岩类型相关，进而受控于煤相的发育，森林沼泽成煤植物以木本植物为主，木质组织保存好，组织孔发育，大孔占比与 TPI 值正相关；草本沼泽成煤植物低等，凝胶化作用使得植物组织及组织孔消失，后期气泡变孔作用形成的孔隙保存在软流组分中，形成在胶质碎屑体和团块凝胶体等组分中的气孔群（赵伟波等，2023）。Chang 等（2025）使用地球物理方法，对煤层的自然伽马（GR）、声波时差（AC）和补偿中子测井（CNL）3 种测井信号进行分析，这 3 种测井结果的垂向分布特征存在显著差异，从而预测出湿润森林沼泽相、湿润草本沼泽相和覆水草本沼泽相 3 种煤相类型，使得在盆地尺度上预测煤相带成为可能。

## 5.3　煤中关键金属与稀土元素富集预测

近年来，随着“煤系战略性金属”成为研究热点（代世峰等，2020），煤相分析可以作为解释这些元素在煤层中富集规律的重要工具。特定的泥炭沼泽环境具有特定的地球化学条件（如 pH 值、Eh 值、有机质类型、水动力条件等），这些条件直接控制了金属元素的迁移、吸附、沉淀和富集过程。

不同的泥炭沼泽环境是不同类型的地球化学障，即元素迁移受阻并富集的地段，潮湿森林沼泽和较深水的覆水沼泽通常形成强还原、富有机质的酸性环境。在这种环境下，有机质（尤其是腐植酸）对金属离子有极强的络合和吸附能力，有利于 U、Ga、Ge 等元素富集（王文峰等，2011；Dai *et al.*，2012；王文峰等，2021）。冲积平原沼泽水位波动大、氧化作用较强，金属元素可能以氧化物形式富集，或被大量带入的黏土矿物（如高岭石、伊利石）通过离子交换吸附而固定，部分 Li 的富集与陆源矿物含量高度相关（Sun *et al.*，2022）。Wang 等（2024）建立了乌兰图嘎 6 号煤低位木本沼泽—草本沼泽—季节性高位沼泽的煤相序列，且煤中 Ge 含量依次降低，同时结合沼泽还原性评价，发现强烈的还原作用和胶结作用有利于 Ge 富集。王金喜（2019）对宁武盆地石炭—二叠系煤进行了煤相序列的控 Li 效应分析，煤相序列具有明显的旋回性，随着海平面的升降，沼泽具有从低位开放沼泽向陆相干燥森林沼泽演化的趋势。Li 的富集受海水作用影响，在潮坪环境，由水流带入沼泽的陆源物质增多，Li 的富集水平较高，下三角洲平原环境水动力条件变弱，物源逐渐减少使得 Li 含量较低，上三角洲平原环境由于强淡水作用使 Li 富集减少，浅覆水森林沼泽的水介质条件和水动力强度都较为适中，是最利于 Li 富集的沼泽环境。

## 5.4　煤炭资源洁净化利用

清洁高效利用是煤炭资源今后加工利用的重要

方向（唐书恒等，2006；王双明等，2023），煤的岩石学组成（显微组分和矿物学特征）是其物理和化学性质的基础，从而决定了它在洗选、转化和利用过程中的表现。煤相分析在洗选和加工领域的应用侧重于预测煤炭的加工行为，从而帮助优化分选工艺并最终提升产品质量和回收率。

聚煤期植被类型和沼泽环境是影响煤中有机质特征的首要因素（刘大锰等，2002；唐跃刚等，2025），成煤期沼泽的植物和微生物群落不同，元素发生差异化富集，使得形成煤层的煤质条件不同。洁净煤利用首先需要去除煤中的有害元素，即去除环境有害元素（如 S、As、Hg、Pb 等）和工业有害元素（如 Na、K、Ca、Si 等），其中煤相分析可以预测其中多种同生有害元素的富集。煤中 S 是典型受海水影响的元素，多为沼泽发育期间海水侵入富集（Chou，1990；Liu *et al.*，2001；Shao *et al.*，2003），部分为高碱地下水浸入成因（Querol *et al.*，1996），在弱还原和弱碱性的条件下易形成高含量的含硫矿物和煤中有机硫。煤中 As 也有同生成因，低等植物通常较高等植物易吸收 As，故腐植煤中 As 含量通常较低（郑刘根等，2006），这为煤相预测煤中 As 的分布提供了依据。

## 6 煤相应用的局限性

煤相分析，尤其是煤相参数在世界范围内含煤沉积研究中的应用十分广泛，已经成为了煤系资源研究利用的基础工作。近年来，随着对含煤沉积环境、沼泽演化的研究不断深入，人们渐渐发现最初提出的煤相参数似乎并不适用于所有的煤层，尤其是不同时代、不同成煤植物、不同区域的煤。关于使用煤相指标作为含煤岩系及煤层沉积环境指标的合理性，学者们进行了广泛的讨论。Dai 等（2020）建议对已有煤相参数方法应谨慎使用，认为煤相参数方法存在较多问题，例如部分显微煤岩组分成因并没有定论、煤化作用可能会改变显微组分的特征、煤相参数可能会因为植被类型不同而产生差异，因此使用单一的煤相参数来分析成煤沼泽环境具有很大的局限性。Diessel 的 TPI-GI 模型是针对澳大利亚新南威尔士州 Hunter Valley 盆地的二叠纪冈瓦纳煤提出的，不适用于不同植物群或地质年代的煤（Dai *et al.*，2020）。邵龙义等（2021）回顾了煤相的发展历程和研究进展，并肯定了在煤相概念被系统地提出之后煤相分析在国内外的应用实践，以及对含煤岩系古地理及古环境研究的推动作用，同时也注意到了煤中显微组分的成因问题，所以在应用煤相参数时应当具体问题具体分析。

### 6.1 不同聚煤期和聚煤区的限制

学者们经常关注的一个问题是不同聚煤期或聚煤区形成的煤是否具有特征的煤岩组成和工艺性质。Diessel（2007）认为他最初提出的参数模型（TPI 和 GI）是为澳大利亚新南威尔士州的二叠纪烟煤建立的，对于其他植物区系或时代形成的煤，

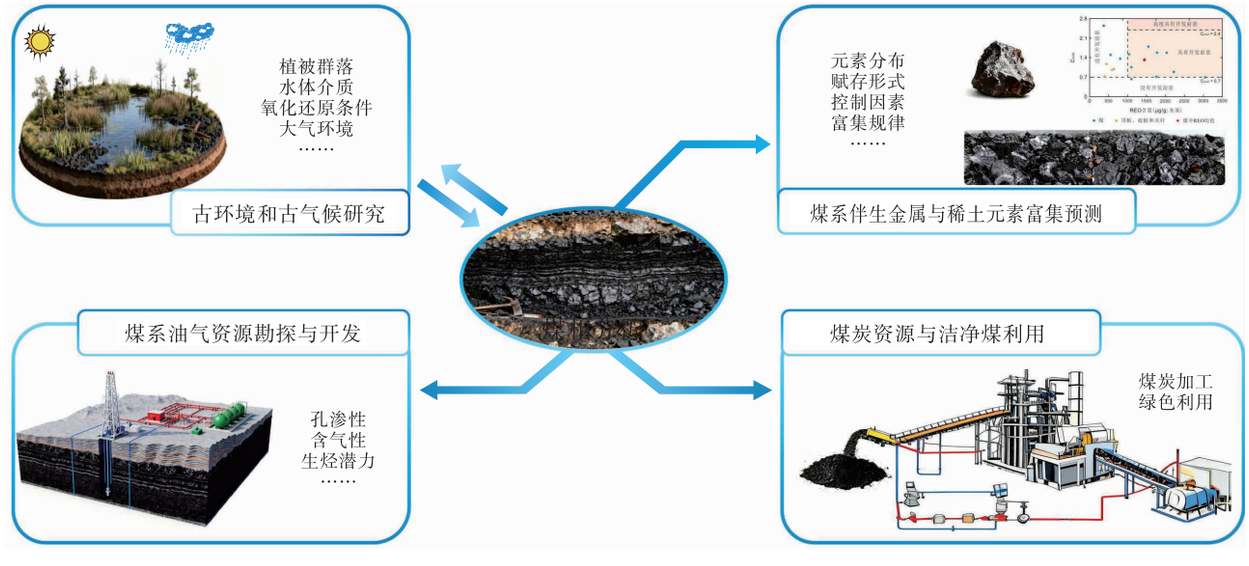



图 12 煤相的应用

Fig. 12 Applications of coal facies

如同时期的安加拉植物群和华夏植物群以及更年轻的裸子和被子植物群形成的煤，应当极其慎重地使用。韩德馨（1996）总结了中国不同聚煤期和聚煤区的煤成因类型和煤岩组分变化，认为早古生代成煤环境以浅海为主，成煤植物为藻类及其他低等浮游生物，从而形成了特殊的腐泥无烟煤，进入晚古生代以后，陆生高等植物开始出现并形成茂密的沼泽森林，煤的成因类型主要属于腐植煤，腐泥煤和腐植—腐泥煤在各聚煤期仅分布在个别地区，残植煤比较少，成煤环境由晚古生代的海陆过渡相的滨海平原、三角洲平原等向中新生代和新生代的大、中、小型内陆盆地演化。

以上研究说明特定聚煤期或聚煤区形成的煤往往会具有其独特的煤岩特征，因此研究某些特定煤层时使用的理论和测试方法未必具有普适性。聚煤期或聚煤区对煤相参数应用最大的影响在于，我们在研究工作中不能将 Diessel、Calder 等人提出的煤相参数简单地直接应用在所研究的煤中，必须考虑成煤植物和成煤沼泽的时空分布变化，考虑不同聚煤期和聚煤区所形成煤的特殊性。

### 6.2　惰质组的成因问题

煤中显微组分的成因问题已经有很多讨论，但仍有部分显微组分的成因没有得到普遍共识，尤其是煤中惰质组的成因。惰质组的化学前身和植物前身被认为大体上与镜质组相似，即主要来自植物细胞壁的纤维素和木质素（杨起和韩德馨，1979；Stach *et al.*，1982），但是其后续在成煤作用中的变化存在有较多争议。经典的煤岩学教材（Stach *et al.*，1982；Taylor *et al.*，1998）认为惰质组主要是成煤植物在泥炭沼泽中经丝炭化作用形成的，包括氧化降解及沼泽森林野火。但是有些学者（Scott，1989；邵龙义等，2024；Sun，2024）认为煤中惰质组主要是森林野火的产物，是植物燃烧形成的木炭沉积到泥炭层中经过煤化作用形成的。同时，有人认为煤中的一些惰质组还可能是真菌和节肢动物活动的产物（Moore *et al.*，1996；Hower *et al.*，2013）。

惰质组不同成因的提出，对煤相参数应用的合理性提出了挑战。惰质组显微组分应用于煤相参数分析的前提是惰质组含量、组分的变化会受沉积环境的控制，如沼泽的氧化还原条件、水动力环境、植被类型等，不同环境介质条件下形成的惰质组具有明显差异性。野火的发生并不会明显受沉积环境的影响，而是更多地受大气氧含量、植被丰度、气候湿润程度的影响（Zhou *et al.*，2024）。因此，惰质组野火成因的提出要求煤相参数做出相应修正，修正后的煤相参数在用于沼泽成因分析时，能够获得更切合实际的结果。

### 6.3　古代煤层与现代泥炭地的对比工作

“将今论古”是地质工作中的常用方法，是通过观察研究现存的地质作用的遗迹，结合地质学规律，以今天的地质现象推测曾经发生的地质作用过程。“将今论古”思想在地质工作中应用十分广泛，是恢复远古地质作用和解释地质体成因的基本方法之一，但是这种方法似乎在古泥炭沼泽恢复中存在不合理性（Hawke *et al.*，1999）。

在其他对象的研究中，如沉积岩，普遍认为这些地质体在现代的形成原理和过程与古代是一致的。但是对于泥炭来说，这一条件并不一定成立，其主要原因是生命的演化具有阶段性。在地质历史中，主要成煤植物经历了早期维管植物—蕨类和古老裸子植物—裸子植物—被子植物（童金南和殷鸿福，2007）4 个演化阶段，每种成煤植物都具有其独特的物质组成和器官结构，并且其中大部分的植物已经灭绝，因此无法找到与古成煤沼泽完全对应的现代泥炭沼泽，成煤时代越古老，形成煤层的沼泽与现代泥炭沼泽对比时误差也就越大。一个典型的例子就是巨厚煤层的形成（邵龙义等，2022），在全球范围内不乏厚度达百米的煤层，形成这些煤层的泥炭层则至少有数百米甚至上千米厚，而现代泥炭沼泽中，10 m 以上的泥炭层已是罕见（Ryer and Langer，1980）。因此，从整个地质历史尺度来看，“将今论古”的方法在恢复古泥炭地方面并非完全合理。当古泥炭地成因模型与现代泥炭沼泽的形成机制发生冲突时，需要综合考虑多重地质因素，审慎地排除不合理的情况，这样才能促进现代泥炭沼泽与古泥炭地恢复工作的可持续发展。

## 7　煤相分析研究的展望

煤相参数从 Diessel（1986）提出至今，经过了近 40 年的发展，其间衍生出了很多新的参数，用于分析不同成煤沼泽形成的煤。近年来，尽管煤

相参数在世界范围内含煤沉积研究中的应用十分广泛，但是中国煤相参数分析的理论研究方面的进展却屈指可数。不论是成煤时代和成煤区域形成煤的差异问题，还是野火形成惰质组的成因问题，这些问题的出现都使得煤相参数分析方法要进行改进，煤相参数的合理化和规范化使用亟待讨论解决。同时在“碳达峰、碳中和”目标的指引下，煤炭资源清洁绿色利用是大势所趋，煤相作为控制煤岩特征的核心地质要素，未来必将在煤层（岩）气、煤中关键金属等煤系资源开发利用中发挥更大作用。此外，煤相分析亦应在研究煤层成因、古沼泽演化以及地球深时古气候研究中起到重要作用。

为了煤相分析研究的持续发展，在后续的研究工作中应当注重以下几个方面：

1）亟需利用多学科研究方法凝练出符合实际地质背景的煤相参数。由于煤层成因问题十分复杂，仅用 1 种或几种煤相分析方法在实际研究工作可能会存在较大偏差。矿物学、岩石学、古生物学、地球化学等多学科综合分析，在各种方法所得结果互相支撑印证的时候，才能得到可靠的接近实际情况的煤相参数。

2）进一步深化煤相分析的基础理论和分析方法研究。今后应当加强煤相分析方法的基础理论研究工作，例如不同聚煤期成煤植物不同，可能需要不同的煤相参数进行表征，此外惰质组野火成因的提出亦需要煤相参数做出相应调整和改进。同时加强人工智能在煤相研究中的应用，如煤岩显微组分智能识别与定量分析、多源数据融合与煤相/煤质预测建模、聚煤环境智能重建与动态模拟等。

3）重视煤相研究的古气候意义。深时古气候是目前地质学研究的热点，煤相受到沼泽古水文、古植被及古气候条件的影响，因此煤相特征可以反映深时古气候特征，例如温室期和冰室期的煤相特征的差别。将来在进行不同聚煤期古气候研究时，应该重视煤相甚至泥质岩有机相所提供的古气候信息。

4）加强煤相分析在实际生产工作中的导向应用。含煤岩系沉积环境分析是聚煤规律探究、煤系矿产资源勘探利用开发的基础工作，是相关研究无法回避的内容。在实际生产工作中，紧密围绕“碳达峰、碳中和”目标，深化煤相对深部煤层气甜点区预测、煤基特种材料原料优选、富油煤的勘探开发、页岩气勘探中的页岩有机质富集规律、煤中关键金属的勘探以及 $CO_2$ 地质封存煤层筛选等方面的指导作用，总结煤相分析的应用实践规律，推动煤系矿产资源的开发和利用。

**后记：**本文付梓之际，恰逢恩师冯增昭先生百年诞辰，谨以此文寄寓深切缅怀与崇高敬意。自 1983 年聆听先生《碳酸盐岩岩石学》课程始，第一作者与先生交往逾数十载，常参与先生召集的学术研讨，亲炙教诲，受益终身。先生毕生深耕地质教育与岩相古地理研究，开创性提出“单因素分析多因素综合作图法”，创立定量岩相古地理学，著书 20 余部，翻译引进外文经典，为学科发展奠基引路。退休后，先生仍躬耕不辍，创办《**古地理学报**》（中文版和英文版），推动成立岩相古地理专业委员会及国际古地理学会，以“有志者事竟成”的信念搭建学术平台，其筚路蓝缕的开拓精神与严谨治学的品格，深深感召后辈。先生对中国矿业大学（北京）地测学院及作者研究团队的长期支持，更令作者感念至深。值此百年华诞，敬忆先生学术丰碑与人格风范，愿其精神薪火永续，激励后辈笃行不怠。

## 参考文献（References）

曹代勇，宁树正，郭爱军，李焕同，陈利敏，刘亢，谭节庆，郑志红. 2016. 中国煤田构造格局及其基本特征. 矿业科学学报，1(1)：1-8. [Cao D Y，Ning S Z，Guo A J，Li H T，Chen L M，Liu K，Tan J Q，Zheng Z H. 2016. Basic characteristics of coalfield tectonic framework in China. Journal of Mining Science and Technology，1(1)：1-8]

代世峰，任德贻，唐跃刚. 2005. 煤中常量元素的赋存特征与研究意义. 煤田地质与勘探，33(2)：1-5. [Dai S F，Ren D Y，Tang Y G. 2005. Modes of occurrence of major elements in coal and their study significance. Coal Geology & Exploration，33(2)：1-5]

代世峰，任德贻，李生盛，赵蕾，张勇. 2007. 内蒙古准格尔黑岱沟主采煤层的煤相演替特征. 中国科学(D 辑：地球科学)，37(S1)：119-126. [Dai S F，Ren D Y，Li S S，Zhao L，Zhang Y. 2007. Coal facies succession characteristics of main coal seam in Heidaigou，Zhungeer，Inner Mongolia. Scientia Sinica (Terrae)，37 (S1)：119-126]

代世峰，赵蕾，魏强，宋晓林，王文峰，刘晶晶，段飘飘. 2020. 中国煤系中关键金属资源：富集类型与分布. 科学通报，65(33)：3715-3729. [Dai S F，Zhao L，Wei Q，Song X L，Wang W F，Liu J J，Duan P P. 2020. Resources of critical metals in coal-bearing sequences in China：Enrichment types and distribution. Chinese Science Bulletin，65(33)：3715-3729]

代世峰，唐跃刚，姜尧发，刘晶晶，任德贻，赵峰华，赵蕾，王西勃. 2021a. 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(6)：1821－1832.［Dai S F，Tang Y G，Jiang Y F，Liu J J，Ren D Y，Zhao F H，Zhao L，Wang X B. 2021a. 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］

代世峰，王绍清，唐跃刚，姜尧发，任德贻，赵蕾，赵峰华，邵龙义，左建平. 2021b. 煤的显微组分定义与分类（ICCP system 1994）解析Ⅱ：惰质体. 煤炭学报，46(7)：2212－2226.［Dai S F，Wang S Q，Tang Y G，Jiang Y F，Ren D Y，Zhao L，Zhao F H，Shao L Y，Zuo J P. 2021b. An in-depth interpretation of definition and classification of macerals in coal（ICCP system 1994）for Chinese Researchers，Ⅱ：Inertinite. Journal of China Coal Society，46(7)：2212－2226］

代世峰，刘晶晶，唐跃刚，姜尧发，任德贻，赵峰华，邵龙义，赵蕾. 2021c. 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.［Dai S F，Liu J J，Tang Y G，Jiang Y F，Ren D Y，Zhao F H，Shao L Y，Zhao L. 2021c. 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］

代世峰，赵蕾，唐跃刚，任德贻，魏强，姜尧发，刘晶晶，赵峰华. 2021d. 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.［Dai S F，Zhao L，Tang Y G，Ren D Y，Wei Q，Jiang Y F，Liu J J，Zhao F H. 2021d. 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］

方爱民，雷家锦，金奎励，卢继霞，侯泉林. 2003. 山西西山煤田 7 号煤层煤相研究. 中国煤田地质，15(5)：12－16.［Fang A M，Lei J J，Jin K L，Lu J X，Hou Q L. 2003. An anthracographic study on No. 7 coal in Xishan Coalfield，Shanxi. Coal Geology of China，15(5)：12－16］

付金华，李士祥，徐黎明，牛小兵. 2018. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段古沉积环境恢复及意义. 石油勘探与开发，45(6)：936－946.［Fu J H，Li S X，Xu L M，Niu X B. 2018. Paleo-sedimentary environmental restoration and its significance of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin，NW China. Petroleum Exploration and Development，45(6)：936－946］

付黎明，庄新国，李建伏，庞起发. 2011. 内蒙古早白垩世五间房含煤盆地煤层煤相分析. 煤田地质与勘探，39(3)：1－6，13.［Fu L M，Zhuang X G，Li J F，Pang Q F. 2011. The analysis on coal facies of coal seams in Early Cretaceous Wujianfang coal basin，Inner Mongolia. Coal Geology & Exploration，39(3)：1－6，13］

郭亚楠，赵博，解锡超，王凤娟，杨朔鹏，苏育飞，唐跃刚. 2009. 华南晚二叠世树皮煤的煤相特征及对比研究. 中国煤炭地质，21(12)：19－23.［Guo Y N，Zhao B，Xie X C，Wang F J，Yang S P，Su Y F，Tang Y G. 2009. Coal facies features and comparative study of Southern China Late Permian bark coal. Coal Geology of China，21(12)：19－23］

郭英廷. 1990. 贵州西部晚二叠世含煤地层的植物古生态. 煤炭学报，15(1)：48－54.［Guo Y T. 1990. Palaeoecology of flora from coal measures of upper Permian in western Guizhou. Journal of China Coal Society，15(1)：48－54］

韩德馨. 1996. 中国煤岩学. 江苏徐州：中国矿业大学出版社，1－599.［Han D X. 1996. Coal Petrology of China. Jiangsu Xuzhou：China University of Mining and Technology Press，1－599］

何建国，张静，马荣，项歆璇. 2022. 吐哈盆地大南湖矿区煤岩煤质特征及成煤环境分析. 中国煤炭，(1)：63－69.［He J G，Zhang J，Ma R，Xiang X X. 2022. Analysis of coal rock and coal quality characteristics and coal forming environment in Dananhu mining area in Turpan－Hami Basin. China Coal，(1)：63－69］

侯贤旭，唐跃刚，宋晓夏，杨明显，郭明涛，贾龙. 2013. 重庆中梁山矿区主要煤层的煤岩学和煤相特征. 煤田地质与勘探，41(5)：6－10.［Hou X X，Tang Y G，Song X X，Yang M X，Guo M T，Jia L. 2013. Coal petrology and coal facies of Zhongliangshan mining area，Chongqing. Coal Geology & Exploration，41(5)：6－10］

黄磊，张晓晶，李钢柱，季兴开，韩萱，王振义，刘志强，侯泽明，艾子涵. 2023. 鄂尔多斯东北部中侏罗世孢粉化石及古气候意义. 地质学报，97(5)：1390－1406.［Huang L，Zhang X J，Li G Z，Ji X K，Han X，Wang Z Y，Liu Z Q，Hou Z M，Ai Z H. 2023. Sporopollen assemblage from the Middle Jurassic of the northeastern Ordos Basin，Inner Mongolia，and their paleoclimatic implications. Acta Geologica Sinica，97(5)：1390－1406］

金士蒲格. 1955. 煤的成因类型与煤岩学研究. 北京：科学出版社，1－124.［Гинзбург. 1955. Genetic Types of Coal and Coal Petrological Studies. Beijing：Science Press，1－124］

康世龙. 2021. 古近系—新近系煤相模式及煤成烃研究. 中国矿业大学（北京）博士学位论文.［Kang S L. 2021. Coal facies model and coal-generated hydrocarbon of the Paleogene to Neogene coals. Doctoral dissertation of China University of Mining & Technology（Beijing）］

康希栋，杨起，潘治贵. 1992. 神木煤田延安组 $1^{-1}$、$1^{-2}$及 $2^{-2}$煤层的煤岩学特征及煤相划分. 地球科学，17(4)：421－429，T001.［Kang X D，Yang Q，Pan Z G. 1992. A study on coal petrology and facies of coal seam $1^{-1}$，$1^{-2}$，and $2^{-2}$，Shenmu coalfield，Ordos Basin. Earth Science，17(4)：421－429，T001］

冷雪天，李宜垠，С Г 别林格. 1997. 中国东北地区与白俄罗斯全新世成炭期对比及成因分析. 东北师大学报（自然科学版），29(1)：116－122.［Leng X T，Li Y Y，Bielinge C Г. 1997. Comparison and genetic analysis of Holocene char-forming period between Northeast China and Belarus. Journal of Northeast Normal University（Natural Science Edition），29(1)：116－122］

李江海，姜洪福. 2013. 全球古板块再造，岩相古地理及古环境图集. 北京：地质出版社，1－127.［Li J H，Jiang H F. 2013. Atlas of Global Paleoplate Reconstruction，Lithofacies Paleogeography and Paleoenvironment. Beijing：Geological Publishing House，1－127］

李美芬，马丹，李磊，韩智，蒋恒宇，崔曦，李瑶，李佳鑫，邱旺，王树斌. 2024. 鄂尔多斯盆地东胜煤田侏罗系煤中元素地球化学特征及其古环境意义. 地质学报，98(8)：2409－2423.［Li M F，Ma D，Li L，Han Z，Jiang H Y，Cui X，Li Y，Li J X，Qiu W，Wang S B. 2024. Geochemical characteristics of Jurassic coal in the Dongsheng

coalfield of Ordos Basin and their paleoenvironmental implications. Acta Geologica Sinica,98(8): 2409-2423]

李清. 2014. 山西延川南煤层气田 2 号煤层煤相研究: 煤层气开发选区意义. 石油实验地质,36(2): 245-248,256. [Li Q. 2014. Coal facies of No. 2 coal in Yanchuannan coal field of Shanxi: significance for constituencies of coalbed methane exploitation. Petroleum Geology & Experiment,36(2): 245-248,256]

李鑫,庄新国,周继兵,汪洪,马小平. 2010. 准东煤田中部矿区西山窑组巨厚煤层煤相分析. 地质科技情报,29(5): 84-88. [Li X, Zhuang X G,Zhou J B,Wang H,Ma X P. 2010. Coal facies analysis of thick coal seam of Middle Jurassic xishanyao formation in the middle part of eastern Junggar coal field, Xinjiang. Geological Science and Technology Information,29(5): 84-88]

李勇. 2022. 煤结构演化及燃料、原料和材料属性开发. 煤炭学报,47(11): 3936-3951. [Li Y. 2022. Coal structure evolution and its fuel, raw material and functional material properties development. Journal of China Coal Society,47(11): 3936-3951]

李增学. 2009. 煤地质学. 北京: 地质出版社. [Li Z X. 2009. Coal Geology. Beijing: Geological Publishing House]

林雨涵. 2022. 中国南方晚二叠世树皮煤地球化学特征及成煤环境. 中国矿业大学(北京)博士学位论文. [Lin Y H. 2022. Geochemical characteristics and forming environment of Late Permian bark coal in Southern China. Doctoral dissertation of China University of Mining & Technology(Beijing)]

刘大锰,刘志华,李运勇. 2002. 煤中有害物质及其对环境的影响研究进展. 地球科学进展,17(6): 840-847. [Liu D M,Liu Z H,Li Y Y. 2002. Advances in studies of harmful substances in coal and their impact on the environment. Advance in Earth Sciences, 17(6): 840-847]

刘萌乐,邵龙义,R. Fielding C,周凯,王鼎,齐争辉,鲁静. 2025. 煤地质学中沼泽的研究热点与术语建议: 基于 Web of Science 的文献计量分析. 沉积学报, 1-18. [Liu M L, Shao L Y, R. Fielding C, Zhou K, Wang D,Qi Z H, Lu J. 2025. Research fronts and terminology suggestions for mires incoal geology: a bibliometric analysis based on the Web of Science. Acta Sedimentologica Sinica, 1-18]

鲁静,邵龙义,杨敏芳,李永红,张正飞,王帅,云启成. 2014. 陆相盆地沼泽体系煤相演化、层序地层与古环境. 煤炭学报,39(12): 2473-2481. [Lu J,Shao L Y,Yang M F,Li Y H,Zhang Z F,Wang S,Yun Q C. 2014. Coal facies evolution, sequence stratigraphy and Palaeoenvironment of swamp in terrestrial basin. Journal of China Coal Society,39(12): 2473-2481]

马伟竣. 2014. 鄂尔多斯盆地延川南 2 号煤层煤相分析. 中国煤层气,11(2): 25-29. [Ma W J. 2014. Analysis of coal facies of No. 2 coal seam in yanchuannan block of Erdos Basin. China Coalbed Methane,11(2): 25-29]

马兴祥. 1988. 贵州水城晚二迭世主采煤层(C605,C409)的岩石学研究与煤相及古泥炭沼泽的演化. 中国矿业大学博士学位论文: 1-53. [Ma X X. 1988. Reserches in petrology, coal facies and swamp evolution of upper Permian main coal seams(C605,C409), Shuicheng mining-district,Guizhou Province. Doctoral dissertation of China University of Mining and Technology: 1-53]

涅菲捷耶娃著. 1959. 煤岩成分与煤层形成环境. 北京: 地质出版社. [Nefyodova. 1959. The composition of coal rocks and the environment of coal seam formation. Beijing: Geological Publishing House]

彭格林,张则有,伍大茂. 1994. 厚层泥炭的形成与现代聚煤作用. 湖南长沙: 中南工业大学出版社,1-112. [Peng G L,Zhang Z Y, Wu D M. 1994. Formation of Thick-bedded Peat and Modern Coal-accumulating Process. Hunan Changsha: Central South University of Technology Press,1-112]

秦身钧,陆青锋,吴士豪,薄朋慧. 2018. 重庆中梁山晚二叠世煤有机地球化学特征. 煤炭学报,43(7): 1973-1982. [Qin S J,Lu Q F,Wu S H,Bo P H. 2018. Organic geochemistry of the Late Permian coal from the Zhongliangshan Mine, Chongqing. Journal of China Coal Society,43(7): 1973-1982]

秦勇. 2017. 化石能源地质学导论. 江苏徐州: 中国矿业大学出版社, 1-426. [Qin Y. 2017. Introduction to Fossil Energy Geology. Jiangsu Xuzhou: china University of Mining and Technology Press, 1-426]

秦勇,王文峰,李壮福,夏筱红,吴艳艳. 2008. 海侵作用影响下的高分辨煤相序列及其古泥炭沼泽发育模式: 以山西北部安太堡上石炭统太原组 11 号煤层为例. 地质学报,82(2): 234-246. [Qin Y,Wang W F,Li Z F,Xia X H,Wu Y Y. 2008. High-resolution coal facies sequence and peat paleo-bog pattern during the transgression. Acta Geologica Sinica,82(2): 234-246]

邱明,童玉明,姚念民,李中明. 1985. 枫江溪矿区煤层硅质煤核成因及其环境的探讨. 沉积学报,3(1): 99-110,145. [Qiu M,Tong Y M,Yao N M,Li Z M. 1985. An approach on the genesis and the environment of the siliceous coal ball in the coal seam of Fengjiangxi coal field. Acta Sedimentologica Sinica,3(1): 99-110,145]

全国煤炭标准化技术委员会. 2000. 烟煤的宏观煤岩类型分类. 北京: 中国标准出版社. [Technical Committee on Coal of Standardization Administration of China. 2000. Classification of macrolithotype for bituminous coal. Beijing: Standards Press China]

全国煤炭标准化技术委员会. 2013. 显微煤岩类型分类. 北京: 中国标准出版社. [Technical Committee on Coal of Standardization Administration of China. 2013. Classification of microlithotype. Beijing: Standards Press China]

热姆丘日尼柯夫. 1965. 煤岩学原理. 北京: 科学出版社. [Ю.А. Жемчужиков. 1965. Principles of Coal Petrology. Beijing: Science Press]

邵龙义,徐小涛,王帅,王东东,高迪,王学天,鲁静. 2021. 中国含煤岩系古地理及古环境演化研究进展. 古地理学报,23(1): 19-38. [Shao L Y,Xu X T,Wang S,Wang D D,Gao D,Wang X T,Lu J. 2021. Research progress of Palaeogeography and Palaeoenvironmental evolution of coal-bearing series in China. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition),23(1): 19-38]

邵龙义,党星宇,高祥宇,王东东,温和,王学天,高迪,鲁静. 2022. 厚煤层成因机制: 天文周期控制的多期次泥炭沼泽叠加模式. 煤炭科学技术,50(1): 186-195. [Shao L Y,Dang X Y,Gao X Y, Wang D D,Wen H,Wang X T,Gao D,Lu J. 2022. Genetic mechanism of thick coal seams: astronomical-forcing superimposed multi-staged swamp model. Coal Science and Technology, 50(1):

186-195]

邵龙义，周家民，Timothy P JONES，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. [Shao L Y，Zhou J M，Jones T P，Hua F H，Xu X T，Yan Z M，Hou H H，Wang D D，Lu J. 2024. Inertinite in coal and its paleoenvironmental significance：insights from AI and big data analysis. Scientia Sinica(Terrae)，54(6)：1806-1829]

沈柏坪，李荣相，白洪涛，朱连丰，雷虎，陆纪潮. 2024. 鄂尔多斯盆地宜川地区本溪组 8 号煤岩特征及成煤环境分析. 特种油气藏，31(6)：32-38. [Shen B P，Li R X，Bai H T，Zhu L F，Lei H，Lu J C. 2024. Analysis of coal rock characteristics and coal-forming environment of the No. 8 coal seam in the Benxi Formation in Yichuan area，Ordos Basin. Special Oil & Gas Reservoirs，31(6)：32-38]

沈阳阳，吕大炜，张之辉. 2023. 东胜煤田延安组层序地层学特征及煤相演化主控因素分析. 中国煤炭地质，35(1)：1-6，18. [Shen Y Y，Lyu D W，Zhang Z H. 2023. Analysis on sequence stratigraphy characteristics and main controlling factors of coal facies evolution of *Yan*'an formation，Dongsheng Coalfield. Coal Geology of China，35(1)：1-6，18]

唐书恒，秦勇，姜尧发. 2006. 中国洁净煤地质研究. 北京：地质出版社，1-242. [Tang S H，Qin Y，Jiang Y F. 2006. Geological Study on Clean Coal of China. Beijing：Geological Publishing House，1-242]

唐书恒，蔡超，朱宝存，段利江，张佳赞. 2008. 煤变质程度对煤储层物性的控制作用. 天然气工业，28(12)：30-33，53. [Tang S H，Cai C，Zhu B C，Duan L J，Zhang J Z. 2008. Control effect of coal metamorphic degree on physical properties of coal reservoirs. Natural Gas Industry，28(12)：30-33，53]

唐跃刚. 1997. 吐哈盆地煤相及碳质泥岩有机相研究. 见：张鹏飞，金奎励，吴涛，等. 吐哈盆地含煤沉积与煤成油. 北京：煤炭工业出版社，168-176. [Tang Y G. 1997. Study on coal facies and organic facies of carbonaceous mudstones in the Turpan-Hami Basin. In：Zhang P F，Jin K L，Wu T，*et al*(eds). Coal-bearing Sedimentation and Coal-formed Oil in the Turpan-Hami Basin. Beijing：China Coal Industry Publishing House，168-176]

唐跃刚，郭亚楠，王绍清. 2011. 中国特殊煤种：树皮煤的研究进展. 中国科学基金，25(3)：154-163. [Tang Y G，Guo Y N，Wang S Q. 2011. The Chinese typical coal type-bark coal：a review. Bulletin of National Natural Science Foundation of China，25(3)：154-163]

唐跃刚，王绍清，王晓帅，郭鑫，王亚丰，薛李苹，Harold H.Schobert. 2025. 洁净煤地质内涵、现状与未来发展方向. 煤田地质与勘探，53(1)：36-63. [Tang Y G，Wang S Q，Wang X S，Guo X，Wang Y F，Xue L P，Harold H S. 2025. Connotation，research status，and development directions of clean coal geology in China. Coal Geology & Exploration，53(1)：36-63]

童金南，殷鸿福. 2007. 古生物学. 北京：高等教育出版社. [Tong J N，Yin H F. 2007. Paleontology. Beijing：Higher Education Press]

瓦尔茨. 1986. 苏联煤岩学煤岩学原理和煤岩学研究方法. 北京：地质出版社，1-197. [Walts. 1986. Soviet Coal Petrology：Principles and Research Methods of Coal Petrology. Beijing：Geological Publishing House，1-197]

王金喜. 2019. 宁武盆地石炭二叠系煤中锂富集的沉积控制. 中国矿业大学(徐州)博士学位论文. [Wang J X. 2019. Sedimentary control of lithium enrichment in permo-Carboniferous coals from Ningwu basin，Shanxi，China. Doctoral dissertation of China University of Mining and Technology(Xuzhou)]

王绍清，唐跃刚. 2007. 神东矿区煤岩学特征及煤相. 中国煤田地质，19(5)：4-7，15. [Wang S Q，Tang Y G. 2007. Coal petrological characteristics and coal facies in Shendong mining area. Coal Geology of China，19(5)：4-7，15]

王生维，庄新国. 1990. 抚顺煤的有机地球化学特征及煤相浅析. 地球科学，(1)：57-64，125. [Wang S W，Zhuang X G. 1990. The organic geochemistry characteristics and coal facies analysis of different coal lithotypes in Fushun coal field. Earth Science，(1)：57-64，125]

王双明，申艳军，宋世杰，刘浪，顾霖骏，魏江波. 2023. “双碳”目标下煤炭能源地位变化与绿色低碳开发. 煤炭学报，48(7)：2599-2612. [Wang S M，Shen Y J，Song S J，Liu L，Gu L J，Wei J B. 2023. Change of coal energy status and green and low-carbon development under the “dual carbon” goal. Journal of China Coal Society，48(7)：2599-2612]

王文峰，秦勇，刘新花，赵建岭，王钧漪，吴国代，刘炯天. 2011. 内蒙古准格尔煤田煤中镓的分布赋存与富集成因. 中国科学：地球科学，41(2)：181-196. [Wang W F，Qin Y，Liu X H，Zhao J L，Wang J Y，Wu G D，Liu J T. 2011. Distribution，occurrence and enrichment of gallium in coal in Zhungeer coalfield，Inner Mongolia. Scientia Sinica(Terrae)，41(2)：181-196]

王文峰，王文龙，刘双双，白洪阳，王昱龙，段飘飘，秦可敏，陈义林. 2021. 煤中铀的赋存分布及其在利用过程中的迁移特征. 煤田地质与勘探，49(1)：65-80. [Wang W F，Wang W L，Liu S S，Bai H Y，Wang Y L，Duan P P，Qin K M，Chen Y L. 2021. Distribution and occurrence of uranium in coal and its migration behavior during the coal utilization. Coal Geology & Exploration，49(1)：65-80]

谢家荣. 1955. 煤的成因类型及其意义. 地质知识，(1)：3-5. [Hsieh C Y. 1955. Genetic types of coal and their significance. Geology in China，(1)：3-5]

辛存林，狄国芸，王晶菁，焦志鹏，刘松欣，赵涵. 2022. 甘肃宝积山盆地中侏罗世植物群地质时代及植物区系探讨. 古生物学报，61(2)：226-238. [Xin C L，Di G Y，Wang J J，Jiao Z P，Liu S X，Zhao H. 2022. Discussion on geological age and phytogeographic division of the Middle Jurassic flora in the Baojishan Basin of Gansu Province. Acta Palaeontologica Sinica，61(2)：226-238]

薛进庄，王嘉树，李炳鑫，黄璞，刘乐. 2022. 陆地植物的起源、早期演化及地球环境效应. 地球科学，47(10)：3648-3664. [Xue J Z，Wang J S，Li B X，Huang P，Liu L. 2022. Origin and early evolution of land plants and the effects on earth's environments. Earth Science，47(10)：3648-3664]

阎文英. 1988. 罗茨盆地锥形煤核的发现及其意义. 煤田地质与勘探，16(5)：19-20，73. [Yan W Y. 1988. Discovery of coal ball，the embryonic form of Roots Basin，and its significance. Coal Geology & Exploration，16(5)：19-20，73]

杨建业,任德贻,邵龙义. 2000. 沉积有机相在陆相层序地层格架中的分布特征:以吐哈盆地台北凹陷及准噶尔盆地南缘中侏罗世煤系为例. 沉积学报,18(4):585-589. [Yang J Y, Ren D Y, Shao L Y. 2000. The Distribution of Sedimentary Organic Facies in the Continental Facies Sequence Stratigraphic Framework: an example from Middle Jurassic coal bearing series in the Taibei sag of the Turpan Hami basin and Southern Junggar basin. Acta Sedimentologica Sinica,18(4): 585-589]

杨瑾. 2021. 三江盆地群主采煤层煤相演替特征及其对储层物性影响研究. 河南理工大学硕士学位论文. [Yang J. 2021. Coal facies succession characteristics of main coal seams in Sanjiang basin group and its influence on reservoir physical properties. Masteral dissertation of Henan Polytechnic University,1-261]

杨起,韩德馨. 1979. 中国煤田地质学(上册). 北京:煤炭工业出版社,1-261. [Yang Q, Han D X. 1979. Coalfield Geology of China (Volume 1). Beijing: China Coal Industry Publishing House]

姚素平,毛鹤龄,金奎励,魏辉. 1997. 准噶尔盆地侏罗系西山窑组沉积有机相研究及烃源岩评价. 中国矿业大学学报,26(1):60-64. [Yao S P, Mao H L, Jin K L, Wei H. 1997. Study of sedimentary organic facies and the evaluating of source rock on Xishanyao formation coal bearing strata of Jurassic system in Junggar Basin. Journal of China University of Mining & Technology,26(1): 60-64]

张泓,沈光隆. 1995. 煤古植物学:历史、现状与展望. 地球科学进展,10(2):159-163. [Zhang H, Shen G L. 1995. Coal Palaeobotany: history, status and future. Advances in Earth Science, 10(2): 159-163]

张冀,韦波,田继军,冯烁. 2015. 新疆哈密三塘湖特大整装煤田中—下侏罗统煤层煤质及煤相特征. 地质学报,89(5):917-930. [Zhang J, Wei B, Tian J J, Feng S. 2015. Characteristics of coal quality and coal facies of middle-Lower Jurassic coal seam in large ready coalfield of the santanghu basin, Hami, Xinjiang. Acta Geologica Sinica,89(5): 917-930]

张鹏飞,彭苏萍,邵龙义,刘钦甫,曲政,马兴祥,胡社荣,杨本才. 1993. 含煤岩系沉积环境分析. 北京:煤炭工业出版社,1-284. [Zhang P F, Peng S P, Shao L Y, Liu Q F, Qu Z, Ma X X, Hu S R, Yang B C. 1993. Sedimentary Environment Analysis of Coal-bearing Strata. Beijing: China Coal Industry Publishing House,1-284]

张鹏飞,金奎励,吴涛,王昌桂. 1997. 吐哈盆地含煤沉积与煤成油. 北京:煤炭工业出版社,1-269. [Zhang P F, Jin K L, Wu T, Wang C G. 1997. Coal-bearing Sedimentation and Coal-formed Oil in the Turpan-Hami Basin. Beijing: China Coal Industry Publishing House,1-269]

张鹏飞,邵龙义,代世峰. 2001. 华北地台晚古生代海侵模式雏议. 古地理学报,3(1):15-24. [Zhang P F, Shao L Y, Dai S F. 2001. Discussions on the transgression model of the late Palaeozoic in the North China platform. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition),3(1): 15-24]

赵红艳,王升忠,白燕,冷雪天. 2002. 近 10 年来我国泥炭地学的研究进展. 地球科学进展,17(6):848-854. [Zhao H Y, Wang S Z, Bai Y, Leng X T. 2002. Advance in Chinese peat geoscience in recent ten years. Advance in Earth Sciences,17(6): 848-854]

赵师庆,王飞宇,董名山. 1994. 论"沉煤环境—成煤类型—煤质特征"概略成因模型:Ⅰ.环境与煤相. 沉积学报,12(1):32-39. [Zhao S Q, Wang F Y, Dong M S. 1994. On the rough genetic model of "coal sinking environment-coal forming type-coal quality characteristics": Ⅰ. Environment and coal facies. Acta Sedimentologica Sinica,12(1): 32-39]

赵伟波,刘洪林,王怀厂,刘德勋,李晓波. 2023. 煤相对孔隙结构控制作用:以鄂尔多斯盆地榆林 8#煤为例. 煤炭科学技术, 1-17. (2023-11-20). [Zhao W B, Liu H L, Wang H C, Liu D X, Li X B. 2023. Research on the controlling effect of coal facies on pore structure: deeply buried coal seam 8 # in Yulin area, Ordos Basin for example. Coal Science and Technology, 1-17. (2023-11-20). https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=MTKJ20231025005&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ]

郑刘根,刘桂建,高连芬,彭子成. 2006. 中国煤中砷的含量分布、赋存状态、富集及环境意义. 地球学报,27(4):355-366. [Zheng L G, Liu G J, Gao L F, Peng Z C. 2006. Arsenic in Chinese coals: its abundance, distribution, modes of occurrence, enrichment processes, and environmental significance. Acta Geoscientica Sinica, 27(4): 355-366]

周春光,杨起,康西栋,汤达祯,刘大锰. 1998. 煤相研究进展. 中国煤田地质,10(4):17-23. [Zhou C G, Yang Q, Kang X D, Tang D Z, Liu D M. 1998. Advances in the study of coal facies. Coal Geology of China,10(4): 17-23]

朱雪芬. 1985a. 研究煤相的几种方法(一). 煤田地质与勘探,13(5):12-15,29. [Zhu X F. 1985a. Several methods of studying coal facies(1). Coal Geology & Exploration,13(5): 12-15,29]

朱雪芬. 1985b. 研究煤相的几种方法(二). 煤田地质与勘探,13(6):12-18. [Zhu X F. 1985b. Several methods of studying coal facies(2). Coal Geology & Exploration,13(6): 12-18]

Calder J H. 1993. The evolution of a ground-water-influenced (Westphalian B) peat-forming ecosystem in a piedmont setting: the No. 3 seam, Springhill coalfield, Cumberland Basin, Nova Scotia. Modern and Ancient Coal-Forming Environments. Geological Society of America: 153-180.

Calder J, Gibling M R, Mukhopadhyay P K. 1991. Peat formation in a westphalian B piedmont setting, cumberland basin, Nova Scotia: implications for the maceral-based interpretation of rheotrophic and raised paleomires. Bulletin-Societe Geologique de France,162(2): 283-298.

Çelik Y, Karayigit A I, Oskay R G, Kayseri-Özer M S, Christanis K, Hower J C, Querol X. 2021. A multidisciplinary study and Palaeoenvironmental interpretation of middle Miocene Keles lignite (Harmancık Basin, NW Turkey), with emphasis on syngenetic zeolite formation. International Journal of Coal Geology,237: 103691.

Chang X C, Ming D Q, Zhang J J, Vandeginste V, Wang H, Yin T T, Liu Y, Lang H L. 2025. Adsorption energy variation and prediction of different coal facies in deep coal reservoirs and spatial distribution using logging curves. Natural Resources Research,34: 3127-3153.

Chou C L. 1990. Geochemistry of Sulfur in Coal. Geochemistry of Sulfur

in Fossil Fuels. Washington, DC: American Chemical Society: 30-52.

Chou C L. 2012. Sulfur in coals: a review of geochemistry and origins. International Journal of Coal Geology, 100: 1-13.

Chrpa M E, Raymond A, Lamb W M, Laya J C. 2023. A marine origin of coal balls in the Midland and Illinois basins, USA. Communications Earth & Environment, 4: 214.

Cohen A D, Spackman W. 1972. Methods in peat petrology and their application to reconstruction of paleoenvironments. Geological Society of America Bulletin, 83: 129.

Dai S F, Wang X B, Seredin V V, Hower J C, Ward C R, O'Keefe J M K, Huang W H, Li T, Li X, Liu H D, Xue W F, Zhao L X. 2012. Petrology, mineralogy, and geochemistry of the Ge-rich coal from the Wulantuga Ge ore deposit, Inner Mongolia, China: new data and genetic implications. International Journal of Coal Geology, 90-91: 72-99.

Dai S F, Bechtel A, Eble C F, Flores R M, French D, Graham I T, Hood M M, Hower J C, Korasidis V A, Moore T A, Püttmann W, Wei Q, Zhao L, O'Keefe J M K. 2020. Recognition of peat depositional environments in coal: a review. International Journal of Coal Geology, 219: 103383.

Damoulianou M E, Kalaitzidis S, Pasadakis N. 2022. Turonian-Senonian organic-rich sedimentary strata and coal facies in Parnassos-Ghiona Unit, Central Greece: an assessment of Palaeoenvironmental setting and hydrocarbon generation potential. International Journal of Coal Geology, 258: 104029.

Diessel C F K. 1986. On the correlation between coal facies and depositional environments. In: proceeding of the 20th Symposium. Advances in the Study of the Sydney Basin: Newcastle, Australia, 19-22.

Diessel C F K. 1992. Coal-Bearing Depositional Systems. Berlin, Heidelberg: Springer.

Diessel C F K. 2007. Utility of coal petrology for sequence-stratigraphic analysis. International Journal of Coal Geology, 70: 3-34.

Dim C I P, Onuoha K M, Okwara I C, Okonkwo I A, Ibemesi P O. 2019. Facies analysis and depositional environment of the Campano-Maastrichtian coal-bearing Mamu Formation in the Anambra Basin, Nigeria. Journal of African Earth Sciences, 152: 69-83.

Esterle J S, Ferm J C. 1994. Spatial variability in modern tropical peat deposits from Sarawak, Malaysia and Sumatra, Indonesia: analogues for coal. International Journal of Coal Geology, 26: 1-41.

Flores R M, Moore T A. 2024. Coal and Coalbed Gas (Second Edition). Elsevier: 1-748.

Gayer R A, Rose M, Dehmer J, Shao L Y. 1999. Impact of sulphur and trace element geochemistry on the utilization of a marine-influenced coal: case study from the South Wales Variscan foreland basin. International Journal of Coal Geology, 40: 151-174.

Guatame C, Rincón M, Bermúdez M A. 2023. Relationship between coal composition, coal facies, and desorbed methane gas content: thermal histories and exhumation processes in the middle Magdalena Valley basin, Colombia. Journal of South American Earth Sciences, 128: 104369.

Hacquebard P A, Donaldson J R. 1969. Carboniferous coal deposition associated with flood-plain and limnic environments in nova Scotia. In: Environments of Coal Deposition: Papers Presented at a Symposium by the Coal Geology Division of The Geological Society of America at the Annual Meeting Miami Beach, Florida, 1964. Geological Society of America: 143-192.

Harvey R D, Dillon J W. 1985. Maceral distributions in Illinois coals and their paleoenvironmental implications. International Journal of Coal Geology, 5: 141-165.

Hawke M I, Martini I P, Stasiuk L D. 1999. A comparison of temperate and boreal peats from Ontario, Canada: possible modern analogues for Permian coals. International Journal of Coal Geology, 41: 213-238.

Hisham N F, Zainal Abidin N S. 2023. Sedimentology and paleodepositional environment of the early-middle Miocene tanjong formation, southeast Sabah: evidence from bulk geochemistry and palynology analyses. Minerals, 13: 494.

Hower J C, O'Keefe J M K, Wagner N J, Dai S F, Wang X B, Xue W F. 2013. An investigation of Wulantuga coal (Cretaceous, Inner Mongolia) macerals: paleopathology of faunal and fungal invasions into wood and the recognizable clues for their activity. International Journal of Coal Geology, 114: 44-53.

ICCP. 1998. The new vitrinite classification (ICCP System 1994). Fuel, 77: 349-358.

ICCP. 2001. The new inertinite classification (ICCP System 1994). Fuel, 80: 459-471.

Ivanova A, Zaitseva L. 2004. Studies of the coal facies in Western Ukraine (the Lvov-Volyn basin). International Journal of Coal Geology, 58: 67-73.

Jiu B, Huang W H, Hao R L. 2021. A method for judging depositional environment of coal reservoir based on coal facies parameters and rare earth element parameters. Journal of Petroleum Science and Engineering, 207: 109128.

Jones R W. 1987. Organic Facies. In: AAPG. Organic Geochemistry in Oil Exploration. Amsterdam: Elsevier, 15-30.

Karayigit A I, Bircan C, Oskay R G, Türkmen İ, Querol X. 2020. The geology, mineralogy, petrography, and geochemistry of the Miocene Dursunbey coal within fluvio-lacustrine deposits, Balıkesir (Western Turkey). International Journal of Coal Geology, 228: 103548.

Kumar O P, Naik A S, Gopinathan P, Subramani T, Singh V, Singh P K, Shukla U K, Prabhu A. 2024. Petrographic and geochemical analysis of Barmer Basin Paleogene lignite deposits: insights into depositional environment and paleo-climate. Journal of Geochemical Exploration, 256: 107335.

Kong J T, Xiong X Y, Ding R. 2025. Sequence division and coal facies research methods of the deep No. 8 coal seam in the Daning-Jixian Block, eastern margin of Ordos basin. Scientific Reports, 15(1): 44036.

Li C M, Zeng J H, Liu H T, Li H J, Bu X Q, Liu S N. 2023. Sedimentary organic facies division and hydrocarbon-generation potential of source rocks in coal-bearing strata: a case study of the upper Paleozoic in

Huanghua depression, Bohai Basin, China. ACS Omega, 8: 28715-28732.

Li T, Wu C F. 2017. Coal facies characteristics and its control on methane content in South Yanchuan Block, Southeast Ordos Basin, China. International Journal of Green Energy, 14: 63-74.

Li Y N, Shao L Y, Fielding C R, Wang D W, Mu G Y. 2021. Sequence stratigraphy, paleogeography, and coal accumulation in a lowland alluvial plain, coastal plain, and shallow-marine setting: Upper Carboniferous-Permian of the Anyang-Hebi coalfield, Henan Province, North China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 567: 110287.

Liu D M, Yang Q, Tang D Z, Kang X D, Huang W H. 2001. Geochemistry of sulfur and elements in coals from the Antaibao surface mine, Pingshuo, Shanxi Province, China. International Journal of Coal Geology, 46: 51-64.

Lou Y, Su Y L, Wang W D, Xia P, Wang K, Xiong W, Yu Y, Shao L J, Yang F Q, Chen X P. 2022. Coal facies and its effects on pore characteristics of the Late Permian Longtan coal, western Guizhou, China. Geofluids: 6071514.

Lu J, Shao L Y, Yang M F, Zhou K, Wheeley J R, Wang H, Hilton J. 2017. Depositional model for peat swamp and coal facies evolution using sedimentology, coal macerals, geochemistry and sequence stratigraphy. Journal of Earth Science, 28: 1163-1177.

Lu Y J, Liu D M, Cai Y D, Li Q, Jia Q F. 2020. Pore-fractures of coalbed methane reservoir restricted by coal facies in sangjiang-Muling coal-bearing basins, Northeast China. Energies, 13: 1196.

Lucas Y. 2001. The role of plants in controlling rates and products of weathering: importance of biological pumping. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 29: 135-163.

Lv D W, Shen Y Y, Tom van Loon A J, Raji M, Zhang Z H, Song G Z, Ren Z H, Wang Y J, Wang D D. 2023. Sequence stratigraphy of the Middle Jurassic Yan'an Formation (NE Ordos Basin, China), relationship with climate conditions and basin evolution, and coal maceral's characteristics. Frontiers in Earth Science, 10: 1086298.

Marchioni D L. 1980. Petrography and depositional environment of the Liddell seam, upper hunter valley, New South Wales. International Journal of Coal Geology, 1: 35-61.

Mitrović D, Doković N, Životić D, Bechtel A, Šajnović A, Stojanović K. 2016. Petrographical and organic geochemical study of the Kovin lignite deposit, Serbia. International Journal of Coal Geology, 168: 80-107.

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: 1-23.

Mu X W, Song Y, Wang M, Feng G J, Zhou P M. 2025. Lithium occurrence and coal facies control of Longtan formation in Northern Guizhou, China. Frontiers in Earth Science, 13: 1570304.

Muir M D, Sarjeant W A S. 1978. The palynology of the Langdale beds (Middle Jurassic) of Yorkshire and its stratigraphical implications. Review of Palaeobotany and Palynology, 25: 193-239.

OpluŠtil S, Laurin J, Jureczka J, Nadłonek W, Naglik B, Horák J, Kedzior A, Lojka R, Nádaskay R, Sivek M. 2024. Depositional setting and sequence stratigraphy of Upper Mississippian coal-bearing paralic cyclothems in Upper Silesian foreland. International Journal of Coal Geology, 287: 104516.

Oskay R G, Bechtel A, Karayiğit A İ. 2019. Mineralogy, petrography and organic geochemistry of Miocene coal seams in the Kınık coalfield (Soma Basin-Western Turkey): insights into depositional environment and Palaeovegetation. International Journal of Coal Geology, 210: 103205.

Panda M, Equeenuddin S M, Mohanty D. 2022. Organic petrography and stable isotopic characteristics of Permian Talcher coal, India: implications on depositional environment. International Journal of Coal Geology, 264: 104130.

Petersen H I, Ratanasthien B. 2011. Coal facies in a Cenozoic paralic lignite bed, Krabi Basin, southern Thailand: changing peat-forming conditions related to relative sea-level controlled watertable variations. International Journal of Coal Geology, 87: 2-12.

Pickel W, Kus J, Flores D, Kalaitzidis S, Christanis K, Cardott B J, Misz-Kennan M, Rodrigues S, Hentschel A, Hamor-Vido M, Crosdale P, Wagner N. 2017. Classification of liptinite-ICCP system 1994. International Journal of Coal Geology, 169: 40-61.

Querol X, Cabrera L, Pickel W, López-Soler A, Hagemann H W, Fernández-Turiel J L. 1996. Geological controls on the coal quality of the Mequinenza subbituminous coal deposit, northeast Spain. International Journal of Coal Geology, 29: 67-91.

Raymond A, Lambert L L, Costanza S H. 2019. Are coal balls rare? a cyclostratigraphic analysis of coal-ball occurrence in North America. International Journal of Coal Geology, 206: 65-79.

Rogers M A. 1979. Application of organic facies concepts to hydrocarbon source rock evaluation. 10th World Petroleum Congress Proceedings, 2: 67-80.

Ryer T A, Langer A W. 1980. Thickness change involved in the peat-to-coal transformation for a bituminous coal of Cretaceous age in central Utah. SEPM Journal of Sedimentary Research, 50(3): 987-992.

Sahoo M, Goswami S, Aggarwal N, Pillai S S K. 2020. Palaeofloristics of lower Gondwana exposure near kumunda village, angul district, talcher basin, Odisha, India: a comprehensive study on megafloral and palynofloral assemblages. Journal of the Geological Society of India, 95: 241-254.

Scott A C. 1989. Observations on the nature and origin of fusain. International Journal of Coal Geology, 12: 443-475.

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: 53-66.

Sen S, Naskar S, Das S. 2016. Discussion on the concepts in paleoenvironmental reconstruction from coal macerals and petrographic indices. Marine & Petroleum Geology, 73: 371-91.

Shao L Y, Jones T, Gayer R, Dai S F, Li S S, Jiang Y F, Zhang P F. 2003. Petrology and geochemistry of the high-sulphur coals from the Upper Permian carbonate coal measures in the Heshan Coalfield, Southern

China. International Journal of Coal Geology, 55: 1-26.

Shao L Y, Wang X T, Wang D D, Li M P, Wang S, Li Y J, Shao K, Zhang C, Gao C X, Dong D X, Cheng A G, Lu J, Ji C W, Gao D. 2020. Sequence stratigraphy, paleogeography, and coal accumulation regularity of major coal-accumulating periods in China. International Journal of Coal Science & Technology, 7: 240-262.

Shibaoka M, Smyth M. 1975. Coal petrology and the formation of coal seams in some Australian sedimentary basins. Economic Geology, 70: 1463-1473.

Siewers F D, Phillips T L. 2015. Petrography and microanalysis of Pennsylvanian coal-ball concretions (Herrin Coal, Illinois Basin, USA): bearing on fossil plant preservation and coal-ball origins. Sedimentary Geology, 329: 130-148.

Singh M P, Singh P K. 1996. Petrographic characterization and evolution of the Permian coal deposits of the Rajmahal basin, Bihar, India. International Journal of Coal Geology, 29(1-3): 93-118.

Smith A H V. 1962. The Palaeoecology of Carboniferous peats based on the miospores and petrography of bituminous coals. Proceedings of the Yorkshire Geological Society, 33: 423-474.

Smyth M. 1984. Coal microlithtypes related to sedimentary environments in the Cooper Basin, Australlia. In: Sedimentology of Coal and Coal-bearing Sequences. International Association of Sedimentologists, Special Publication, 7: 333-347.

Sosnowski P, Jelonek I. 2022. Facies development of coal seams in the Knurów deposit (Upper Silesia, Poland). International Journal of Coal Geology, 261: 104073.

Stach E, Mackowsky M T, Teichmueller M, *et al*. 1982. Stach's Textbook of Coal Petrology, Third Ed. Berlin: Gebruder Borntraeger, 1-535.

Suárez-Ruiz I, Flores D, Mendonça Filho J G, Hackley P C. 2012. Review and update of the applications of organic petrology: Part 1, geological applications. International Journal of Coal Geology, 99: 54-112.

Sun B L, Liu Y X, Tajcmanova L, Liu C, Wu J. 2022. In-situ analysis of the lithium occurrence in the No. 11 coal from the Antaibao mining district, Ningwu Coalfield, northern China. Ore Geology Reviews, 144: 104825.

Sun Y Z. 2024. Review and update on the applications of inertinite macerals in coal geology, paleoclimatology, and paleoecology. Palaeoworld, 33(6): 1449-1463.

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: 85-106.

Taylor G H, Teichmüeller M, Davis A, Diessel C F K, Littke R, Robert P. 1998. Organic Petrology. Berlin-Stuttgart: Borntraeger, 1-704.

Teichmüller M. 1989. The genesis of coal from the viewpoint of coal geology. In: lyons P C, Alpern B(eds). Peat and Coal: Origin, Facies and Depositional Models. International Journal of Coal Geology, 12: 1-87

Van de Wetering N, Mendonça Filho J G, Esterle J. 2013. Palynofacies changes and their reflection on preservation of peat accumulation stages in the Late Permian coal measures of the Bowen Basin, Australia: a new system for coal palynofacies characterisation. International Journal of Coal Geology, 120: 57-70.

Vannoppen W, Vanmaercke M, De Baets S, Poesen J. 2015. A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates. Earth-Science Reviews, 150: 666-678.

Wang D D, Wang T, Lü D W, Zhang Z H, Hu H C, Zhang A C, Zhang M. 2025. Cenozoic climate cooling and Tibetan Plateau uplift jointly drive increased atmospheric dust deposition in Inland East Asia. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 676: 113177.

Wang J, Pfefferkorn H W, Zhang Y, Feng Z. 2012. Permian vegetational Pompeii from Inner Mongolia and its implications for landscape paleoecology and paleobiogeography of *Cathaysia*. PNAS, 109: 4927-4932.

Wang X S, Chen Y F, Tang Y G, Gupta R, Schobert H H, Hower J C, Shao L Y, Ma T D. 2024. Assessing the depositional environment of Cretaceous Ge-rich coals in the wulantuga mine, Shengli Coalfield, northeastern China. Energy & Fuels, 38(4): 2777-2789.

Wei J H, Wei Y C, Qin G H, Ning S Z, Cao D Y, Wang A M. 2023. Geochemistry, mineralogy, and coal petrology of No. 4 coal in sandaoling mine, Turpan-Hami Basin, northwest China: provenance and peat depositional environment. Minerals, 13: 837.

Xiao C Y, Han D L, Zhang J J, Chen S Z, Qin Z Y, Vandeginste V. 2024. Effect of coal rank and coal facies on nanopore-fracture structure heterogeneity in middle-rank coal reservoirs. ACS Omega, 9(30): 33279-33292.

Zaitseva L, Ivanova A, Zhernova H. 2004. Studies of the coal facies in eastern Ukraine. International Journal of Coal Geology, 58: 75-85.

Zhang S H, Tang S H, Tang D Z, Pan Z J, Yang F. 2010. The characteristics of coal reservoir pores and coal facies in Liulin district, Hedong coal field of China. International Journal of Coal Geology, 81: 117-127.

Zhang Z G, Qin Y, Yi T S, You Z J, Yang Z B. 2020. Pore structure characteristics of coal and their geological controlling factors in eastern Yunnan and western Guizhou, China. ACS Omega, 5(31): 19565-19578.

Zhou J M, Shao L Y, Jones T P, Huang Y Y, Chen M R, Hou H H, Lu J, Hilton J. 2024. Mechanisms of inertinite enrichment in Jurassic coals: insights from a Big Data-driven review. Earth-Science Reviews, 257: 104889.

Zhou S D, Liu D M, Cai Y D, Karpyn Z, Yao Y B. 2018. Petrographic controls on pore and fissure characteristics of coals from the southern Junggar Coalfield, northwest China. Energies, 11: 1556.

Teichmüller M. 1962. Die Genese der Kohle. In: C.R. 4 ième Congrès Int. Stratigr. Géol. Carbonifère: Heerlen, 1958, 3: 699-722.

Жемчужников Ю. А. 1951. Угленосная толща и методика её изучения. Зап. Лен. горн. ин-та, т. XXV, вып. II.

（责任编辑　李新坡）