

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.206>



深时成煤演化与成煤环境分析

李 勇¹, 李 镔¹, 刘 乐¹, 丁 蓉^{2,3}, 李玉洁¹, 许卫凯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. 中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司, 北京 100095
3. 中石油煤层气有限责任公司, 北京 100028

摘 要: 成煤环境分析是认识煤系沉积过程、恢复古环境演化和深化煤地质学理论的重要基础。系统梳理了深时成煤环境演化特征、泥炭沼泽分布及动态变化,总结了基于显微组分、显微煤岩类型、矿物-元素地球化学和生物标志物等传统成煤环境分析方法,并讨论其适用性。结果表明,深时成煤环境演化受植物演替、气候变化和沉积体系调整共同控制,不同时代成煤植物、泥炭沼泽类型及沉积背景存在明显差异;泥炭沼泽广泛发育于三角洲平原、潮坪-潟湖、河流-湖泊及冲积平原等环境,其形成和保存受供水方式、水位状态、碎屑输入及海水影响等因素共同制约。传统煤相指标在成煤环境分析中具有重要作用,但其环境意义易受植被组成、分解作用、水位波动、外源输入及成岩-煤化改造等因素影响。成煤环境分析应更加重视沉积过程约束,强化对供水方式、水位状态、碎屑输入和保存条件等主控因素的综合识别。在已有成煤环境分类认识基础上,进一步归纳了低位、中位和高位泥炭沼泽的沉积过程特征及综合判识思路。鄂尔多斯盆地实例表明,该思路有助于揭示煤层形成环境的垂向演化规律,可为成煤环境恢复和煤系沉积研究提供参考。

关键词: 成煤环境;煤相;泥炭沼泽;沉积过程;鄂尔多斯盆地。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2026)07-2482-17

收稿日期: 2026-06-17

Deep-Time Coal-Forming Evolution and Perspectives on Coal-Forming Environment Analysis

Li Yong¹, Li Qiang¹, Liu Le¹, Ding Rong^{2,3}, Li Yujie¹, Xu Weikai¹

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China
2. China United Coalbed Methane National Engineering Research Center, Beijing 100095, China
3. PetroChina Coalbed Methane Co., Ltd., Beijing 100028, China

Abstract: Coal-forming environment analysis is an important basis for understanding coal-measure sedimentary processes, reconstructing paleoenvironmental evolution, and advancing coal geology theory. This paper systematically reviews the evolutionary characteristics of coal-forming environments through geologic time, the distribution and dynamic evolution of peat swamps, and traditional analytical methods for coal-forming environments based on macerals, microlithotypes, mineral-element geochemistry, and biomarkers, and discusses their applicability. The results show that the evolution of coal-forming environments through geologic time was jointly controlled by plant succession, climate change, and adjustments in sedimentary systems,

基金项目: 国家科技重大专项项目(No. 2025ZD1405700);中石油煤层气有限责任公司科技项目(No.2026-KJ-0101).

作者简介: 李勇(1988-),男,教授,博导,主要从煤层气开发地质教学和科研工作。ORCID: 0000-0001-8859-156X. E-mail: liyong@cumtb.edu.cn

引用格式: 李勇,李镔,刘乐,丁蓉,李玉洁,许卫凯,2026.深时成煤演化与成煤环境分析.地球科学,51(7):2482-2498.

Citation: Li Yong, Li Qiang, Liu Le, Ding Rong, Li Yujie, Xu Weikai, 2026. Deep-Time Coal-Forming Evolution and Perspectives on Coal-Forming Environment Analysis. *Earth Science*, 51(7): 2482-2498.

resulting in marked differences in coal-forming plants, peat swamp types, and depositional settings in different periods. Peat swamps are widely developed in delta plains, tidal flat-lagoon systems, fluvial-lacustrine settings, and alluvial plains, and their formation and preservation are jointly constrained by water supply pattern, water-table condition, clastic input, and marine influence. Traditional coal-facies indices play an important role in coal-forming environment analysis, but their environmental significance is readily affected by vegetation composition, decomposition, water-table fluctuations, allochthonous input, and diagenetic-coalification modification. On this basis, it is suggested that coal-forming environment analysis should place greater emphasis on depositional-process constraints and strengthen the integrated identification of key controlling factors such as water supply pattern, water-table condition, clastic input, and preservation conditions. It is further proposed that coal-forming peat swamps can be simplified into three types: low moor mire, transitional mire, and high moor mire. A case study from the Ordos Basin shows that this approach is helpful for revealing the vertical evolutionary pattern of coal-forming environments and can provide a reference for coal-forming environment reconstruction and coal-measure sedimentary research.

Key words: coal-forming environment; coal facies; peat swamp; depositional process; Ordos Basin.

0 引言

煤不仅是重要的能源矿产,也是认识地质历史时期环境演化的重要地质载体(李勇等,2022;秦勇,2025)。煤由泥炭在一定的沉积、成岩和煤化条件下演化形成,是一种可燃有机沉积岩。泥炭沼泽是主体成煤场所,也是研究成煤环境的基础对象。泥炭—煤炭的演化过程保存了古植被演替、古气候变化和沉积体系演化等信息,也直接影响煤层的厚度、连续性、结构复杂性和储层非均质性(韩德馨,1996;Fielding,2021;李勇等,2026)。

泥炭沼泽是土壤剖面中发育泥炭层的沼泽,属于湿地的一种(Mitsch and Gosselink,2000;Strack *et al.*,2022)。湿地的形成与陆生植物区系演化密切相关。随着植物类型和群落结构不断演化,地表覆盖型湿地、草本沼泽和森林沼泽等类型相继出现,形成了不同类型的泥炭沼泽(Greb *et al.*,2022)。不同泥炭沼泽在供水方式、水位状态、碎屑输入、海水影响和有机质保存条件等方面存在明显差异(Loisel *et al.*,2021;Strack *et al.*,2022),并进一步影响煤层的夹矸、灰分、硫分及煤岩组成(李增学等,2026;高爽等,2026)。

成煤环境研究经历了由沉积环境、煤岩类型和煤相的定性描述,向显微组分定量分析及煤岩学、矿物—元素地球化学和生物标志物等多指标综合研究的发展(Calder *et al.*,1991;Diessel,1992;韩德馨,1996;李勇等,2022;邵龙义等,2026)。近年来,深层煤层气和煤系关键金属矿产勘探开发不断推进,研究重点逐渐转向泥炭沼泽动态演化、古野火作用及传统煤相指标适用性的重新认识(Fielding,2021;Baker,2022;Greb *et al.*,2022;秦

勇,2025;高爽等,2026;李勇等,2026)。本文在此基础上,系统梳理深时成煤环境演化及泥炭沼泽分布特征,总结传统成煤环境分析方法,重点讨论传统煤相指标的多解性及其沉积过程约束,并进一步探讨成煤环境分析的发展方向,以期成煤环境重建和煤地质学理论认识深化提供参考。

1 深时成煤环境演化

成煤环境演化是陆地生态系统发展、气候变化和植物适应共同作用的结果,记录了全球碳循环、古气候及沉积过程的长期变化。陆生植物自泥盆纪开始发展,植物类型、群落结构和生态适应能力不断演化,泥炭沼泽的类型、分布范围及泥炭堆积方式也随之改变(Greb *et al.*,2022;薛进庄等,2022)。地质历史时期,成煤场所由早期滨水低洼环境逐步向陆内盆地扩展,成煤植物由低矮地被植物和原始维管植物逐步演替为森林植被及现代型湿地植物群落,泥炭沼泽的规模、类型和保存条件也日趋复杂(图1、图2)(杨起和韩德馨,1979;韩德馨和杨起,1980;Greb *et al.*,2022)。

晚奥陶世至早泥盆世,陆地表面主要由低矮植物和原始维管植物覆盖,湿地多分布于河道边缘、滨岸带及地形低洼区(Capel *et al.*,2022;Retallack,2022)。由于早期植物生物量较低,根系和木质组织尚不发育,有机质难以持续积累,通常只能形成富有机质沉积或煤线,尚不具备形成大规模煤层的条件(Hotton *et al.*,2001;Kennedy *et al.*,2013)。

中晚泥盆世,陆生植物的高度、组织结构和生态适应能力明显增强,植物群落逐渐由低矮草本类型向灌木和乔木类型演替,早期森林生态系统开始

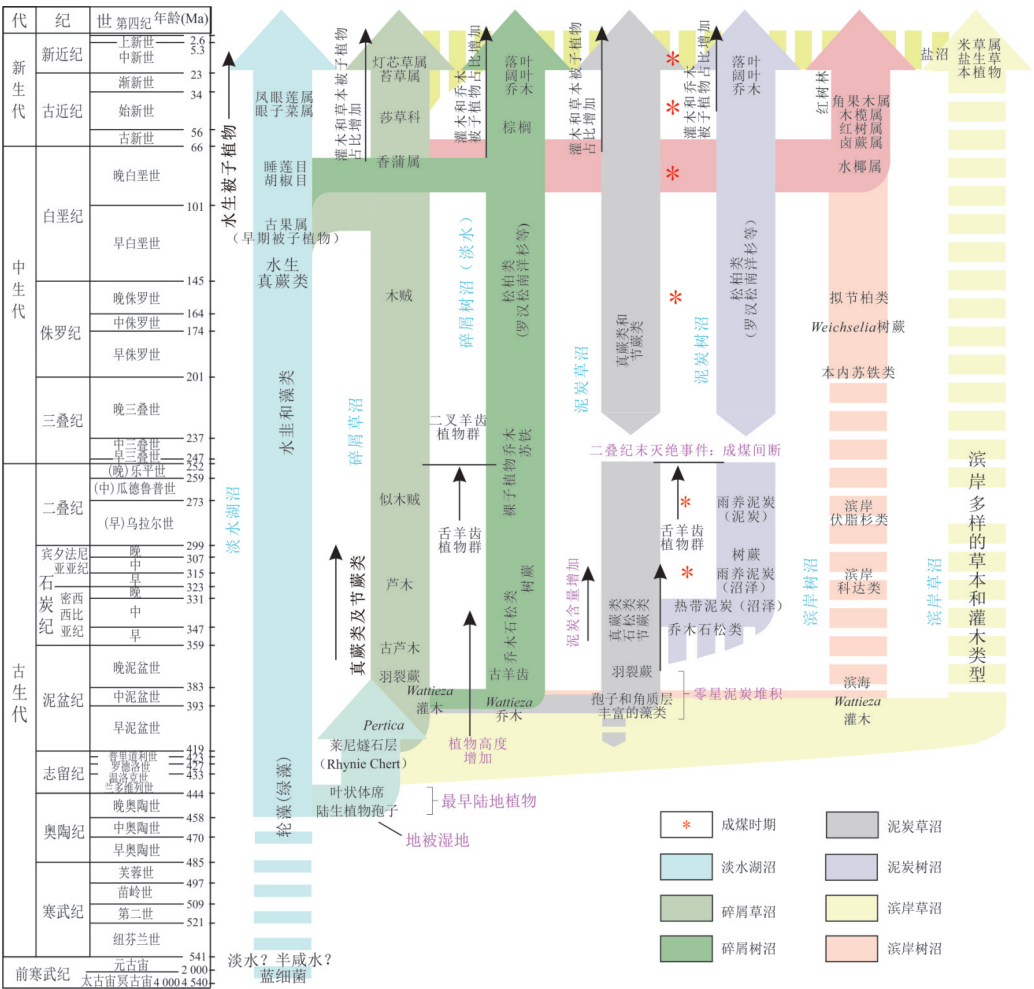


图 1 深时成煤环境演化及其植物背景(改自 Greb *et al.*, 2006, 2022)

Fig.1 Evolution of deep-time coal-forming environments and vegetation background (modified after Greb *et al.*, 2006, 2022)

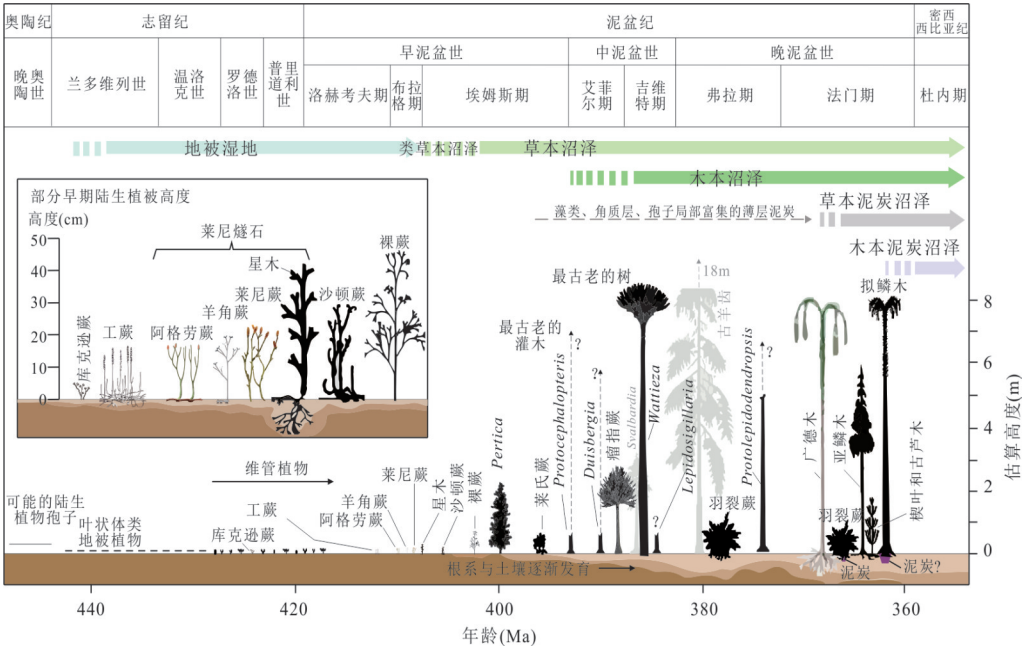


图 2 早期植被和沼泽环境演变(改自 Greb *et al.*, 2006, 2022)

Fig.2 The evolution of early vegetation and peatland environments (modified after Greb *et al.*, 2006, 2022)

形成 (Pawlik *et al.*, 2020). 湿地开始向湖滨、泛滥平原和滨海低洼地区扩展, 局部地区出现泥炭堆积和薄煤层, 标志着成煤环境由原始湿地向树木沼泽过渡 (Greb *et al.*, 2022).

石炭纪-二叠纪, 石松类、楔叶类、真蕨类、种子蕨类和裸子植物广泛发育, 大面积森林沼泽在低纬及中高纬地区相继形成, 泥炭堆积规模和持续性显著增强, 成为全球重要成煤期 (DiMichele *et al.*, 2001; Greb *et al.*, 2006). 随着气候和植物区系的变化, 泥炭沼泽由湿润热带森林沼泽逐渐向季节性湿地和中高纬森林沼泽扩展. 传统煤相分类和煤相指标也主要建立在这一时期煤层的研究基础之上.

中生代成煤植物以裸子植物和真蕨类为主, 泥炭沼泽主要发育于构造沉降较强的陆相盆地、湖滨平原和河流-三角洲体系. 与晚古生代广泛发育的森林沼泽相比, 中生代成煤作用的区域性更加明显, 受盆地沉降、湖平面变化、河流迁移和气候分异的影响较强. 白垩纪被子植物的出现和扩张, 进一步改变了湿地植被组成和生态结构 (Graham, 2011).

新生代以来, 被子植物逐渐占据主导地位, 适应淡水、半咸水及滨海环境的湿地植物群落不断分化, 泥炭沼泽逐步形成接近现代湿地的生态结构. 随着全球气候变化, 森林泥炭地、草本泥炭地和泥炭藓沼泽等不同类型进一步分化, 泥炭沼泽的分布表现出更加明显的纬度和水文差异 (Graham, 2011; Bouchenak-Khelladi *et al.*, 2014; Greb *et al.*, 2022).

2 泥炭沼泽分布及演化

2.1 泥炭沼泽发育环境

泥炭沼泽广泛分布于近岸海湾、三角洲平原、河流-湖泊及冲积平原等多种沉积环境, 其形成和演化受构造运动、地理格局、气候条件及植物群落等多因素共同控制 (图3) (陈钟惠, 1988). 陆相辫状河成煤条件较差, 煤层薄且连续性差. 冲积扇泥炭沼泽一般位于盆地边缘, 煤层薄而不稳定, 灰分产率较高. 陆相泥炭沼泽主体发育于河流和湖泊环境. 曲流河背景下, 废弃河道形成的泛滥平原低洼地更有利于泥炭堆积, 分布范围较广, 较易形成厚煤层. 湖泊型泥炭沼泽形成于湖泊淤浅和沼泽化过程中, 煤层常位于湖相暗色泥岩之上, 煤质一般较好.

海陆过渡环境也是泥炭沼泽广泛发育的重要场所, 常见于三角洲平原和分流间湾等部位, 形成的煤层分布广、厚度大、稳定性较好. 障壁岛-潟湖背景下, 泥炭多堆积于障壁后的潟湖沼泽和潮坪沼泽, 受海平面变化影响明显, 煤层中常见黄铁矿发育, 形成高硫煤. 潮上带至潮间带的低洼区, 即上三角洲平原至近岸带一带, 物源供给较充足, 水分条件较好, 植被生长旺盛, 泥炭较易形成并得到保存, 泥炭层通常较厚且连续 (Rydin and Jeglum, 2013; 李勇等, 2024).

煤系沉积环境变化较大, 潟湖与碳酸盐岩台地、潟湖与障壁后沼泽、三角洲平原、滨湖与沼泽、废弃曲流河与沼泽以及曲流河与沼泽等可形成不同的煤层-顶板组合关系, 对应发育厚层泥岩 (图4a)、中厚

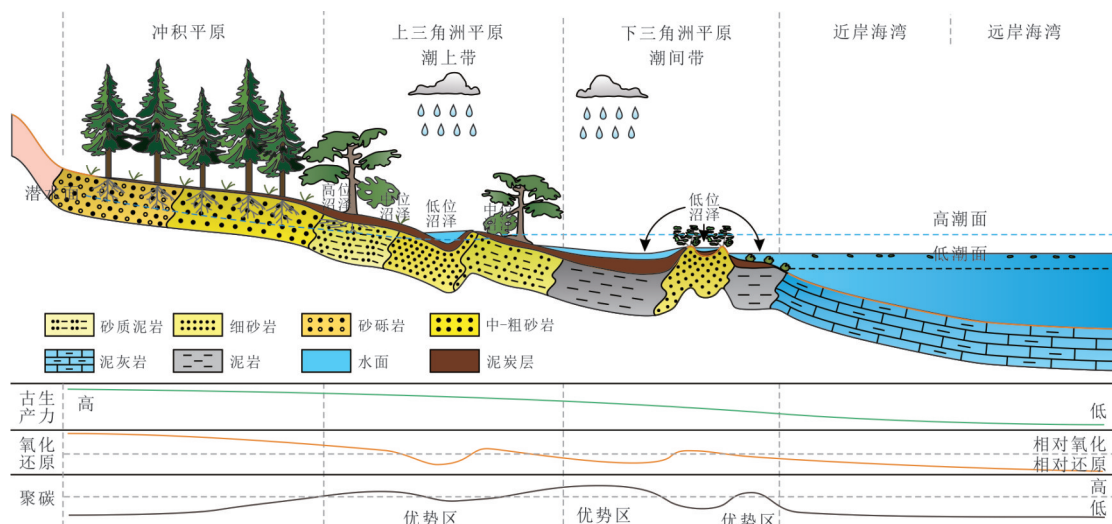


图3 不同沉积背景下泥炭沼泽分布

Fig.3 Distribution of peat swamps in different depositional environments

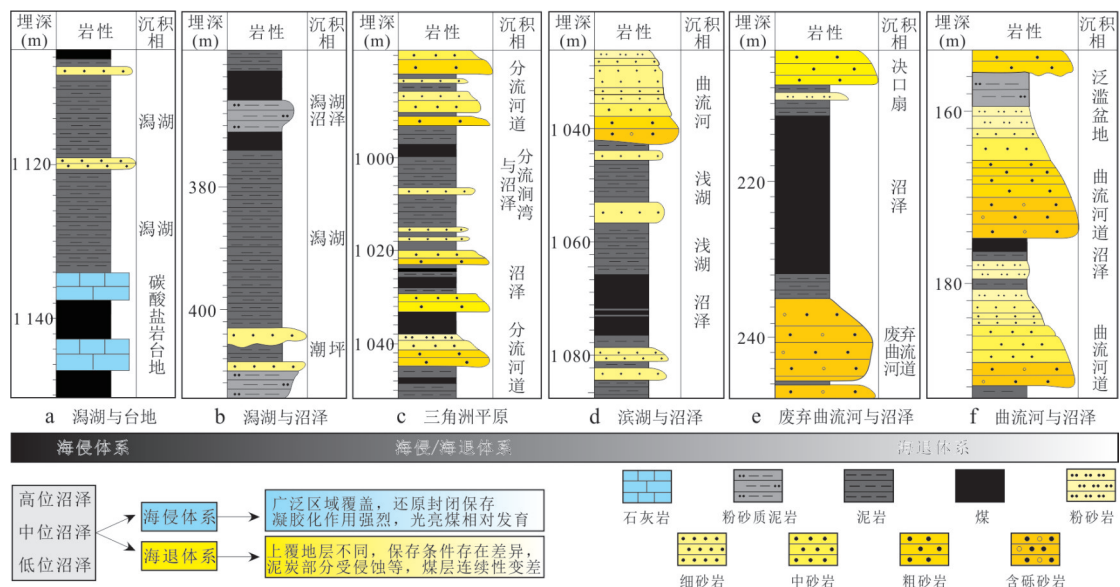


图 4 海侵、海退体系对成煤沼泽的影响(岩性柱子参考李勇等, 2024)

Fig.4 Effects of marine transgression and regression systems on coal-forming swamps (lithological column modified after Li *et al.*, 2024)

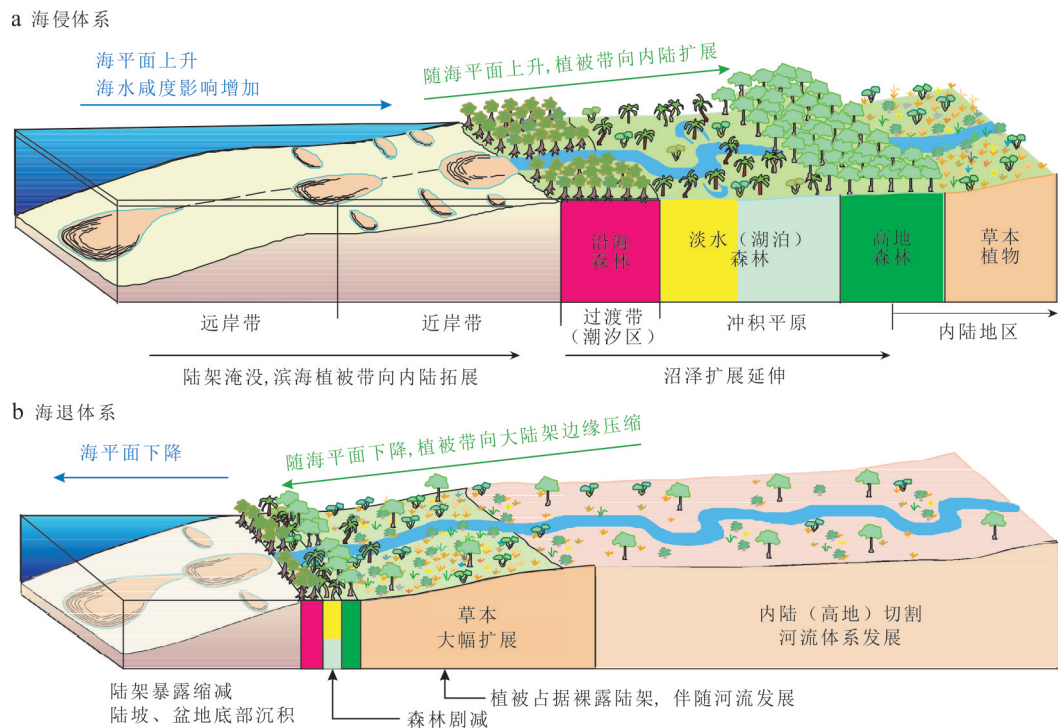


图 5 海侵-海退过程中泥炭沼泽迁移及保存模式(改自 Poumot, 1989; Demchuck *et al.*, 2004)

Fig.5 Migration and preservation models of peat swamps during marine transgression and regression (revised from Poumot, 1989; Demchuck *et al.*, 2004)

层泥质岩夹砂岩或砂质泥岩(图 4b、4c)、厚层石灰岩(图 4d)、不稳定泥质岩-砂岩(图 4e)和厚层砂岩(图 4f)等 5 类顶板类型.煤层差异不仅表现在煤层与上覆岩层组合上,也表现在煤层结构和宏观煤岩类型差异上.

2.2 海侵-海退对泥炭沼泽影响

海侵与海退过程对成煤环境演化具有直接且重要的影响.海侵期海平面上升导致沿海地区盐度增加,沼泽体系整体向内陆迁移,盐沼植被逐渐取代淡水植被,海洋生物进入内陆沉积体系,内陆沼

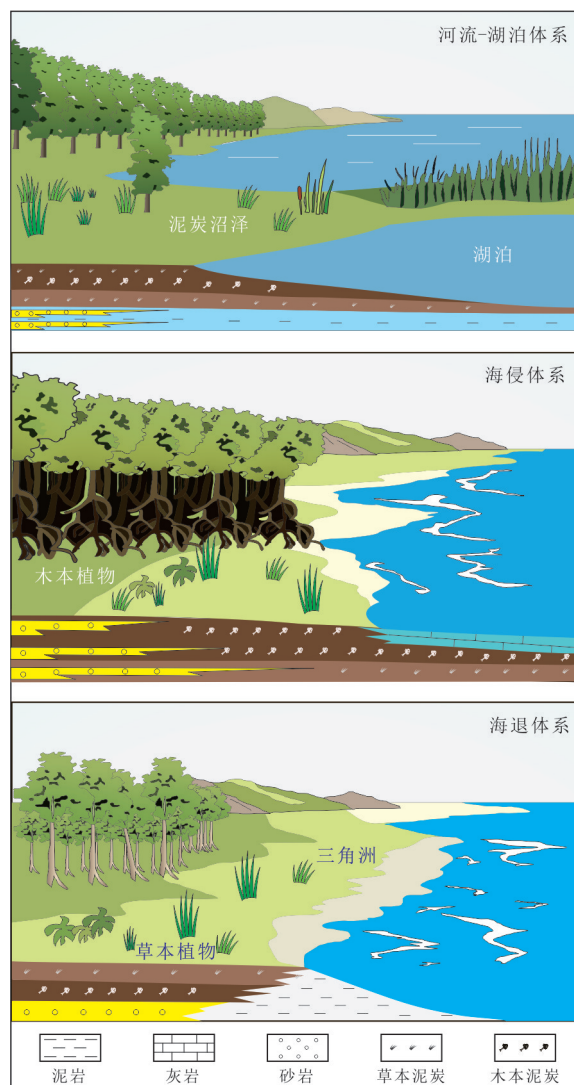


图6 三种典型泥炭沼泽动态演化模式

Fig.6 Dynamic evolutionary models of three typical peat swamps

泽发育空间相应缩小,同时易形成灰岩等海相或过渡相沉积.以华北克拉通石炭系8号煤为例,晚石炭世-早二叠世期间研究区经历了多期海侵海退变化(李勇等,2017).本溪组底部发育灰岩,指示海侵背景;随后海退导致基底暴露,沼泽环境建立并积累厚层泥炭,其后发生的快速海侵形成区域连续分布的灰岩沉积,早期沉积的厚层泥炭被迅速封闭并压实,从而发育形成分布广泛、稳定连续的8号煤层(图5a).

海退期海平面下降导致陆架暴露,沿海沼泽向内陆压缩,而冲积平原沼泽则向海方向扩展;内陆植被逐渐取代沿海植被,原潮间带常被砂体覆盖,形成广泛分布的泥岩与砂岩沉积(图5b).以山西组煤层为例,其以陆相沼泽沉积为主,表现为泥炭原地堆积并伴随季节性湿地演化特征.该时期蕨类、

石松类等植物大量繁殖并转化为泥炭,而河流改道、降水波动及陆源碎屑输入等外部因素对泥炭堆积过程具有显著影响,尤其是碎屑物质输入常促使煤层中夹矸层发育(李勇等,2026).陆相沼泽更易受到碎屑供给干扰,煤层结构相对复杂,常表现为多层叠置及夹矸层间隔的特征(图4c~4f).

2.3 泥炭沼泽动态演化模式

稳定的淡水环境中,泥炭沼泽可形成于湖泊或浅水洼地(图6a).沉积层序底部通常为湖相细粒沉积(湖泥),反映相对较深的水体条件;随着水体变浅、有机质生产增强,湖泥上覆富有机质的细粒沉积(腐泥),指示水体静稳、底部缺氧.进一步向上,挺水植物开始定殖,沉积物由矿质主导转为有机质占优,形成以草本植物为主的泥炭层.在水体进一步变浅并趋于稳定后,沼泽环境抬升至接近地表,泥炭逐渐演化为以木本或苔藓类植物为主的中高位泥炭.这种环境总体表现为由碎屑沉积向泥炭沉积的连续过渡,碎屑输入逐渐减弱,植被由水生-挺水草本向高位沼泽植物演替.

海侵背景下的淡水、半咸水和咸水环境影响的地层连续分布(图6b).在海侵控制的滨海地区,泥炭形成并非单一垂向演化,而是沿盐度与水位梯度呈现明显的横向分带.陆侧仍发育淡水草本沼泽泥炭,向海侧逐渐过渡为半咸水环境下的草本-灌木泥炭,并最终演化为红树林等控制的泥炭或泥灰质沉积.在该体系中,碎屑沉积与泥炭沉积可同期并存,也会出现泥炭与碳酸盐岩的组合.有机质沉积在不同盐度环境中同时发生,缓慢海侵背景下植被会由淡水草本向耐盐木本(红树林)替代,快速海侵背景下已有的泥炭沼泽被覆盖保存.

海退过程中原先受海水影响的泥炭体系逐步向陆相环境演化(图6c).沉积层序底部通常为海相或半咸水条件下形成的木本泥炭,反映潮汐与盐度仍具一定影响;随着海水退却,淡水条件增强,沉积物中常出现泥炭与黏土互层,指示三角洲或滨岸环境下的周期性碎屑输入.进一步向上,泥炭类型转为淡水森林或沼泽泥炭,显示陆源供给增强、盐度降低和植被向陆相类型演替.植被由耐盐木本向淡水木本或草本过渡,沉积体系与滨岸-三角洲碎屑体系密切伴生.

3 传统成煤环境分析方法

成煤环境分析的核心,是通过煤层及其围岩所

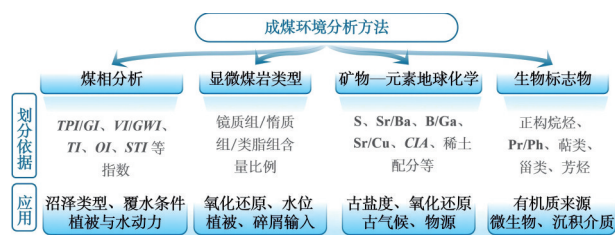


图 7 成煤环境分析方法

Fig. 7 Analysis methods of coal-forming environments

保存的沉积、煤岩学和地球化学信息,恢复泥炭形成与保存时期的水文条件、植被背景、碎屑输入、氧化还原状态及沉积体系位置.长期以来,成煤环境分析形成了以煤岩学为基础、以地球化学和生物标志物为补充的技术路线(图7).

3.1 基于显微组分的煤相分析方法

1951年,学者IO.A.热姆丘日尼柯夫提出“煤相”一词,用以概括成煤条件、成煤过程和成煤物质等综合特征(韩德馨,1996).在此基础上,涅菲吉耶娃于1956年划分出植物丛生湖泊相、覆水沼泽相、“干燥”沼泽相、流水河漫沼泽相、潟湖沼泽相和滨海强覆水沼泽相等6种类型(韩德馨,1996).这一阶段主要根据沼泽环境差异对煤相进行定性划分.20世纪60年代以后,煤相研究开始更多引入煤岩学证据.Teichmüller在研究古近系褐煤时,根据植物残体来源及其保存特征,将煤相划分为森林沼泽、苔藓沼泽、芦苇沼泽和含水生植物的开阔水域4类,并建立了煤相类型与岩石类型、显微煤岩组合之间的对应关系(斯塔赫,1990).随后,Hacquebard和Donaldson在加拿大石炭纪煤层研究中,进一步结合显微煤岩类型建立了四端元双三角煤相解释图版(Hacquebard and Donaldson, 1969),Marchioni又对该图版进行了修订(Marchioni, 1980).Smyth(1979, 1984)随后提出三端元三角图解,并对显微煤岩类型与成煤环境之间的关系作了进一步阐述.这一时期,煤相研究开始由定性描述逐步转向定量和半定量分析.

20世纪80年代以来,基于显微组分比值的煤相分析方法得到广泛应用.Diessel(1992)提出凝胶化指数(GI)和结构保存指数(TPI),将显微组分定量分析引入成煤环境研究.Calder *et al.*(1991)在此基础上进一步提出植被指数(VI)和地下水指数(GWI),用于补充TPI-GI体系在环境解释中的不足.此后,显微组分比值和相关图

版逐渐成为煤相分析的重要工具,并被广泛用于泥炭沼泽类型划分和成煤环境恢复.

TPI主要反映植物组织的保存程度,常用于区分木本植物占优势的森林型沼泽与组织破坏较强的草本或碎屑主导环境.GI主要反映植物组织的凝胶化程度,多用于判断水位变化及还原条件强弱.VI和GWl分别用于表征植被类型和地下水补给强度,是对TPI-GI体系的重要补充.除此之外,镜质比也常用于反映泥炭堆积过程中氧化作用与有机质保存条件的相对变化.除显微组分比值外,基于显微组分含量建立的三端元三角图也被广泛用于煤相分析.以镜质组、惰质组和类脂组为端元的V-I-L三角图,可综合判别泥炭沼泽的氧化程度、营养条件和有机质来源特征.一些针对特定盆地或煤层建立的显微组分三角图,还可进一步揭示泥炭堆积过程中保存、分解和丝炭化作用之间的相对关系(表1).

TPI-GI图解显示,鄂尔多斯盆地临兴地区8+9号煤层样品主要落在湿地草本沼泽相,少量样品分布于浅覆水森林沼泽相;榆林地区样品则主要分布于低位沼泽相、湿地草本沼泽相和湿地森林沼泽相.VI-GWI图解中,两地区样品却主要落入高位沼泽范围,表明不同煤相图解对同一批样品可能给出不同的环境解释(图8).

这种差异与各指标的理论基础和参数构成有关.TPI主要反映植物组织的保存和破碎程度,GI主要反映凝胶化与氧化作用的相对强弱;VI侧重区分木本与草本或水生植物输入,GWI则同时受到凝胶化组分和矿物质含量的影响.因此,各指标所记录的并非同一环境属性,其变化还可能受到植被组成、分解程度、水位波动、碎屑输入和有机质搬运等多种因素共同控制(Crosdale, 1993; Dehmer, 1995; Scott, 2002; Moore and Shearer, 2003).尤其是GWl中包含矿物质组分,其升高既可能与地下水补给有关,也可能反映河流、潮汐或海侵作用造成的外源碎屑输入,不能简单等同于某一种泥炭沼泽类型.

此外,TPI-GI和VI-GWI图解分别建立于特定煤层、植物群落和显微组分分类体系之上,其环境分区边界具有一定的区域性.对于厚度较大的煤层,泥炭堆积期间往往经历水位升降、植被演替和碎屑供给变化,单个样品只能反映局部层段或某一演化阶段.比值型参数在分母组分含量较低时还可能出现数值放大,从而使投点位置发生明显偏移.

表 1 主要煤相指标及其对沉积环境指示意义

Table 1 Main coal facies indicators and their implications for depositional environments

煤相指标	反映特征	指标范围	文献
结构保存指数(TPI)	(结构镜质体+丝质体+半丝质体)/(碎屑镜质体+碎屑惰质体+无结构镜质体+粗粒体)	TPI越高指示植物组织保存越好或成煤植物以木本为主	Diessel, 1992
凝胶化指数(GI)	(镜质体+粗粒体)/(丝质体+半丝质体+碎屑惰质体)	GI>2:覆水深; GI≤2:覆水浅	Diessel, 1992
地下水指数(GWI)	(凝胶化镜质体+团块镜质体+矿物质)/(结构镜质体1+无结构镜质体+碎屑镜质体)	GWl越高,水动力越强	Calder <i>et al.</i> , 1991
植被指数(VI)	(结构镜质体1+无结构镜质体+丝质体+半丝质体+木栓质体+树脂体)/(碎屑镜质体+碎屑惰质体+藻类体+碎屑壳质体+孢子体+角质体)	VI<1:草本植物或水生植物; VI≥1:木本植物	Calder <i>et al.</i> , 1991
搬运指数(TI)	(壳屑体+镜屑体+惰屑体+团块镜质体+树脂体+孢子体+角质体)/(丝质体+结构镜质体+基质镜质体+粗粒体)	TI值越大,水动力条件越强、搬运作用越显著	马兴祥, 1988
氧化指数(OI)	(粗粒体+惰屑体)/其他有机显微组分	OI>1为氧化环境, OI<1为还原环境	马兴祥, 1988
沼泽类型指数(STI)	(微壳煤+微亮煤+微暗煤+微惰屑煤+微粗粒煤+微三合煤+原煤灰分)/(微镜煤+微丝煤+微半丝煤)	停滞沼泽(STI<0.1)、过渡沼泽(0.1<STI<1)和流水沼泽(STI>1)	马兴祥, 1988

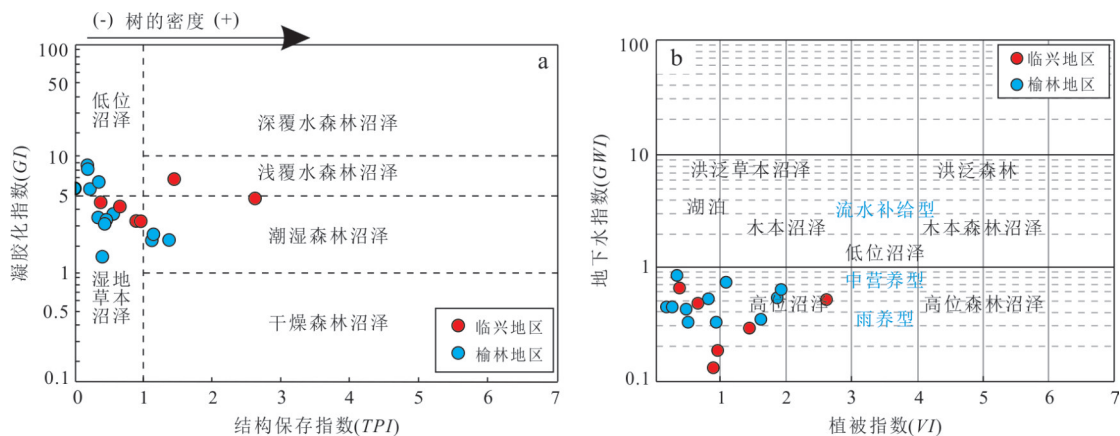


图 8 TPI-GI图解和 VI-GWI图解

Fig.8 TPI-GI diagram and VI-GWI diagram

a. 据 Diessel, 1992; b. 据 Calder *et al.*, 1991

3.2 基于显微煤岩类型的分析方法

显微煤岩类型是不同显微组分按一定比例组合形成的共生体,是煤岩微观组成的综合表达.在垂直层理切面上,其最小识别尺度为厚度不小于 50 μm,或面积不小于 50 μm×50 μm.在这一尺度内,根据镜质组、惰质组和类脂组含量,以 5% 为界,可划分为单组分、双组分和三组分显微煤岩类型(图 9).单组分类型中某一显微组分含量大于 95%;双组分类型中两种显微组分含量均不小于 5%,且二者之和大于 95%;三组分类型中三种显微组分含量均不小于 5%.据此可识别 9 种显微煤岩类型组,包括微镜煤、微壳

煤、微惰煤、微亮煤、微镜惰煤、微暗煤、微暗亮煤、微镜惰壳煤和微亮暗煤.其中,后 3 种在《斯塔赫煤岩学教程》和《中国煤岩学图鉴》中统一归为微三合煤(斯塔赫等, 1990; 杨永宽, 1996).

不同显微煤岩类型常对应不同的泥炭沼泽条件.富镜质组的显微煤岩类型通常与植物组织保存较好、水位相对稳定的环境有关;富惰质组类型多反映氧化作用增强、干湿变化频繁或局部火灾影响;富类脂组类型则常与孢粉、水生有机质输入或特定植被背景有关.宏观煤岩类型亮煤、暗煤、镜煤、丝炭和夹矸等的发育特征,不仅反映煤层内部物质组成和条带结构变化,也与泥炭沼泽的供水条

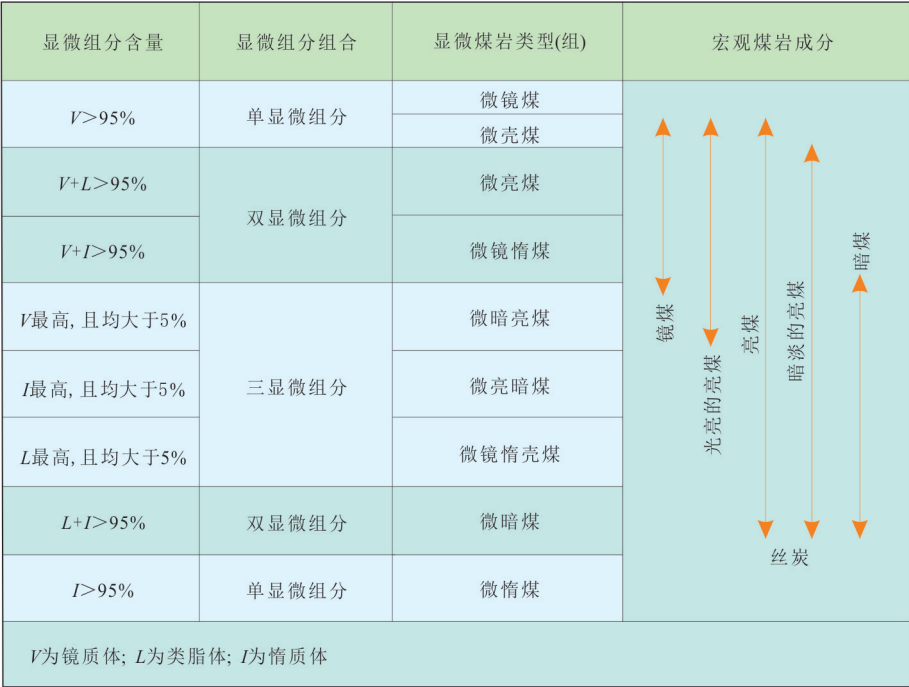


图9 显微组分、显微煤岩类型与宏观煤岩成分含量关系对比

Fig.9 Comparison of maceral composition, microlithotypes and macroscopic coal lithotype contents

件、矿物质输入和保存环境密切相关。因此,显微煤岩类型分析通常需要与宏观煤岩描述、煤层分层和煤层结构观察结合使用,才能在不同尺度上较全面地判识成煤环境。

显微煤岩类型三角图是基于“三大显微组分相对含量-显微煤岩类型”关系建立的可视化分类方法。该方法通过将显微煤岩类型划分的定量阈值及组分组合关系映射到三角坐标空间中,实现了分类规则的直观表达(图 10a)(Lester *et al.*, 2003)。其优势在于为显微煤岩类型分析,尤其是自动化和半自动化识别,提供了统一且可量化的判别标准,既体现了显微煤岩类型“组分共生组合”的理论内涵,又兼顾了煤岩学研究的工程应用价值。Hunt(1982)则不同于传统仅依据显微组分比例进行分类的方法,引入“条带宽度”参数,将煤的条带结构定量划分为粗条带、中等条带、细条带和极细条带等类型,并进一步建立其与显微煤岩类型空间分布特征之间的联系(图 10b)。在沉积环境方面,Hunt and Hobday(1984)指出,不同条带类型与成煤环境之间具有较好的对应关系:辫状河-冲积扇环境形成的煤以中等条带为主,曲流河环境以极细条带为主,上三角洲平原以细条带为主,下三角洲平原则以粗条带为主。

Marchioni(1980)提出了四组分泥炭图解(图 10c),认为泥炭沉积环境与泥炭沼泽中的水深密

切相关,而水深变化直接控制植被类型的发育及有机质的保存方式。泥炭沼泽按水位条件划分为陆地沼泽带(高水位以上)、湿草地沼泽带(高、低水位之间)和湖泊沼泽带(水下沉积区)3个带。上述分带与 Teichmüller(1950)提出的四类沼泽环境(即煤相)具有较好的对应关系,分别为陆地森林沼泽、森林沼泽、芦苇沼泽和开放沼泽。不同煤相条件下形成的煤表现出特征性的显微煤岩类型组合:陆地森林沼泽煤以微丝质亮煤为主要特征;芦苇沼泽煤以微角质亮煤和微暗亮煤为主;森林沼泽煤则以富含镜质体的微亮煤及含少量壳质组分的微亮煤为特征;开放沼泽煤通常以微亮暗煤、微暗煤与碳质泥岩共生为显著特征。

3.3 基于矿物-元素地球化学的分析方法

矿物组成和元素地球化学特征是成煤环境分析的重要补充手段,尤其在判别海水影响、氧化还原条件、碎屑输入强度和古气候背景等方面具有较强约束意义。与煤岩学方法相比,矿物-元素地球化学方法更侧重恢复泥炭形成和保存时的化学环境及物源背景。

煤中矿物主要包括黏土矿物、硫化物矿物(黄铁矿)、碳酸盐矿物和氧化物矿物(石英)等,其类型与含量受沉积环境、供水方式和成岩作用共同控制。其中,黄铁矿常被视为海水或咸水影响的重要标志

化.与显微煤岩分析相比,生物标志物方法在识别有机质来源和细微环境差异方面具有一定优势.

生物标志物有明显局限.一方面,生物标志物对煤阶较敏感,随着煤化程度升高,其原始环境信息会逐渐减弱;另一方面,样品前处理、测试成本和解释复杂度较高,不适合大规模常规使用.因此,在传统成煤环境分析体系中,生物标志物方法更多用于对煤岩学或地球化学判断进行补充验证,而较少单独作为主体判别手段.

4 沉积过程约束下传统煤相指标的多解性认识

传统煤相指标在成煤环境分析中应用广泛,尤其是基于显微组分比例和组合关系建立的 *TPI*、*GI*、*VI*、*GW* 及镜惰比等参数,长期被用于恢复泥炭沼泽的水位状态、植被类型、氧化还原条件和地下水补给方式.这类方法之所以被广泛接受,一方面是测试方法成熟、资料获取相对方便,另一方面是为煤相分析提供了较为清晰的定量或半定量表达方式.但是当这些响应特征受到多重沉积过程叠加控制时,同一指标就可能对应不同成因背景,不同指标之间也可能出现彼此矛盾的环境解释,在成煤环境连续演化背景下往往表现出明显的多解性.

4.1 显微组分环境响应的非唯一性

基于显微组分的煤相指标之所以容易产生多解性,首先在于显微组分本身并不对应单一环境意义.镜质组、惰质组和类脂组虽然都具有一定的环境指示价值,但其形成和富集往往受到多个因素共同控制.

镜质组通常被认为与木质植物贡献、组织保存及凝胶化作用有关,因此常被解释为较稳定、较湿润和相对还原的成煤环境标志.但实际上,镜质组含量不仅受地下水位和保存条件控制,也受植物类型、沉积速率及压实过程影响.某些木本植物占优的环境,即使水位波动较大,也可能形成较高比例的镜质组;相反,在草本植物占优且有机质破碎较强的环境中,即便水位较高,镜质组比例也未必显著升高.

惰质组常被视为氧化作用增强、干旱波动或火灾干扰的反映,因此惰质组含量升高通常被解释为相对暴露、干湿变化频繁的环境.但惰质组的来源并不单一.除氧化作用外,局部火灾、植物组织的不同保存路径、后期氧化改造乃至热演化作用都可能导致惰质组富集.高惰质组既可能指示长期干旱,

也可能只是局部火事件或后期改造结果,因此不能简单将其与“氧化型沼泽”直接对应.

类脂组常被用来指示富营养环境、水生植物或藻类输入,也常与停滞水体或海侵影响联系起来.但类脂组成分复杂,既可能来自孢粉、角质层、树脂和藻类等原位输入,也可能受到外源生物碎屑输入影响.因此,类脂组富集并不一定就是富营养停滞环境,也可能与局部孢粉聚集、海侵背景下的藻类输入或特定植被组合有关.

Crosdale (1993) 基于现代泥炭研究指出,显微组分比值难以可靠地区分不同类型的沼泽环境,其根本原因在于植物组织的保存程度主要受分解过程及后期环境变化控制,而非初始植被类型或水文条件所决定. Dehmer (1995) 进一步指出,植物组织的保存特征主要受 pH 条件、营养状况以及干湿变化频率等因素制约,而并非沼泽类型本身的直接反映. Moore and Shearer (1997) 发现加里曼丹泥炭地水位下降可导致深部泥炭迅速氧化,从而显著改变显微组分比例; Itoh *et al.* (2017) 和 Kool *et al.* (2006) 的研究表明,人为排水引发的泥炭氧化同样会破坏显微组分的稳定性.

4.2 沉积过程对煤相指标的影响

泥炭沼泽并不是一个静止的环境单元,而是受供水方式、水位波动、营养条件、微生物活动、碎屑输入和火灾等多种过程持续影响的动态系统.正是在这些过程控制下,煤相指标所依据的显微组分比例不断发生变化.

显微组分受多种非沉积因素影响,其环境指示意义具有明显不稳定性.显微组分比例易受到沉积前后多种过程的共同制约,主要包括:(1)pH 与营养条件,酸性、高营养或矿质贫乏环境可加速植物组织分解,导致 *TPI* 降低或类脂组富集,其变化未必对应沉积环境差异 (Bouchenak-Khelladi *et al.*, 2014);(2)水文波动与干湿变化,干旱暴露或季节性水位下降可增强氧化作用并提高惰质组含量,即使原始环境并非氧化型沼泽 (Scott, 2002);(3)野火干扰,火灾可显著增加丝质体和半丝质体含量,使惰质组富集,从而掩盖原始水文条件,高惰质组并非必然指示氧化型沼泽 (Moore and Shearer, 2003);(4)生物化学分解与微生物活动,真菌和微生物作用可削弱木质组织保存程度,在植被类型未变化条件下降低 *TPI* 和 *VI*;(5)外源物质输入,类脂组含量升高既可能反映富营养、停滞水

体,也可能与藻类、孢粉输入或海侵作用有关。

4.3 成岩-煤化作用对煤相指标的改造

泥炭在向褐煤、烟煤乃至无烟煤演化过程中,会经历压实、脱水、重组、热演化及局部热液改造等一系列变化使煤中显微组分特征逐步偏离泥炭形成时的原始状态,削弱传统煤相指标对初始环境的直接记录能力,具体体现在:(1)压实作用,地层压实可加剧木质组织破碎,使 *TPI* 值降低,但该变化主要反映成岩阶段的物理作用,而非沉积环境差异;(2)煤化作用,随煤化程度提高,部分显微组分发生同化或重构,碎屑镜质体与无结构镜质体等类型难以区分,类脂组亦易发生降解或转化;(3)热液活动与成岩水化学变化方面,局部热液作用可导致镜质组反射率升高及凝胶化增强,使 *GI* 和 *GWI* 偏离其原有的环境指示意义。综上,成煤后经历的物理-化学演化过程使煤中显微组分特征难以真实、稳定地保留泥炭阶段的环境信息。

5 基于沉积过程约束的泥炭沼泽分类

传统煤相指标在成煤环境分析中具有重要价值,但其环境解释常受到植被差异、分解作用、水位波动、碎屑输入及成岩-煤化改造等多种因素共同影响。前文已经表明,显微组分比例和煤相指数所反映的往往是泥炭形成与演化过程中的某些响应特征,而不是某一种环境类型本身。在这种情况下,若仍以复杂煤相名称为目标进行环境命名,不仅容易出现多解性,也不利于不同沉积背景下结果的统一对比。因此,有必要从沉积过程出发,对泥炭沼泽类型进行更简化、更具约束性的归纳。

5.1 简化泥炭沼泽类型划分

泥炭沼泽本质上是一个连续演化的沉积系统,不同类型之间常呈渐变关系,而不是绝对分隔的静态单元。水位升降、地下水补给变化、海水影响增强或减弱、碎屑物质输入增多或减少,都会使泥炭沼泽在空间上迁移,在垂向上转换。本文提出泥炭沼泽简化分类思路,其出发点不是取代传统煤相分析,而是从沉积过程角度提取对成煤环境最关键、也最稳定的控制因素:(1)以供水方式为主线。泥炭沼泽的形成和演化,首先受控于地下水、大气降水及海水等不同水源的补给方式及其相对强弱。(2)以水位状态和稳定性为核心。长期高水位、波动水位和降水主导的相对封闭环境,在有机质保存、氧化

分解和植被类型等方面均存在明显差异。(3)以外源碎屑输入强度为约束。泥炭沼泽虽然以有机质沉积为主,但其形成环境往往与河流、潮道、岸线迁移等沉积体系变化紧密相关。碎屑输入的多少,不仅影响灰分、夹矸和煤层稳定性,也影响泥炭保存条件。基于供水方式、水位状态及外源碎屑输入的差异,可将成煤泥炭沼泽概括为低位沼泽、中位沼泽和高位沼泽三类。这种划分方式借鉴了现代泥炭地研究中对低位沼泽、过渡沼泽和高位沼泽的基本认识,同时结合煤系沉积特点进行了适当简化(图11)。

5.2 成煤沼泽垂向演化分析

为验证上述简化泥炭沼泽划分框架在实际煤系研究中的适用性,本文以鄂尔多斯盆地深部煤层为例,结合钻井取心、煤岩学测试及测井资料,对煤层形成环境的垂向演化特征进行综合分析。以临兴区块某井为例,该井煤层埋深约1500 m,煤厚5.2 m,成煤期沉积背景总体受海陆过渡环境控制。本溪组主要发育于障壁-潮坪-潟湖体系,而山西组以三角洲平原沉积为主,二者在供水方式、碎屑输入强度及水位稳定性方面存在明显差异。采用传统煤相指标体系(如 *TPI-GI* 图解)对该煤层进行判释时,不同煤相类型在垂向上频繁交替,煤相名称复杂,且指标变化缺乏明确的沉积过程指向性,难以直观反映成煤环境的演化规律。这一现象本质上反映了煤相指标对连续演化泥炭环境的响应不稳定性,而非煤层形成环境本身的高度离散。

在简化泥炭沼泽划分框架下,通过综合分析自然伽马、灰分产率及镜惰比的协同变化特征,可识别煤层垂向上由低位沼泽向高位沼泽演化,再向低位沼泽回返的整体趋势(图12)。该演化过程与区域沉积背景中海侵-海退旋回控制下的水位变化及碎屑供给强度变化具有良好对应关系。需要指出的是,该划分结果并非依赖单一指标的绝对阈值,而是基于多参数之间的相对变化关系进行解释。例如,低位沼泽阶段通常表现为灰分较高、*GR* 值波动明显及镜惰比偏高,反映地下水补给充足、还原性较强但碎屑输入相对活跃的沉积环境;高位沼泽阶段则以低灰分、低 *GR* 值及较低镜惰比为特征,指示以大气降水为主控、矿物质输入受限,通常具有较好的有机质保存条件(李勇等, 2026)。因此,该简化框架的优势不在于提供精细化煤相名称,而在于通过有限、稳定且工程可获取的指标组合,揭示成煤环境的主控过程与演化方向,从而为深层煤层气

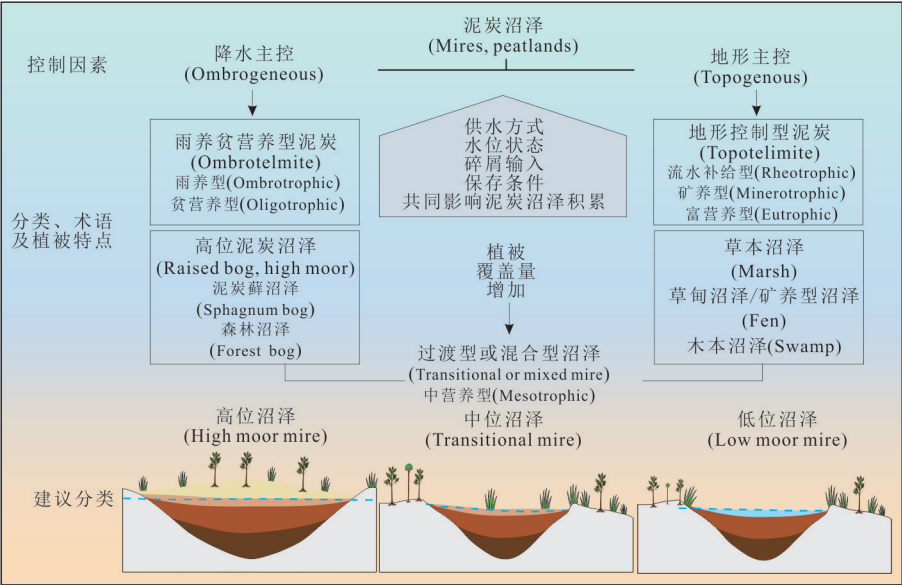


图 11 泥炭沼泽术语及分类体系

Fig.11 Terminology and classification system for peatlands

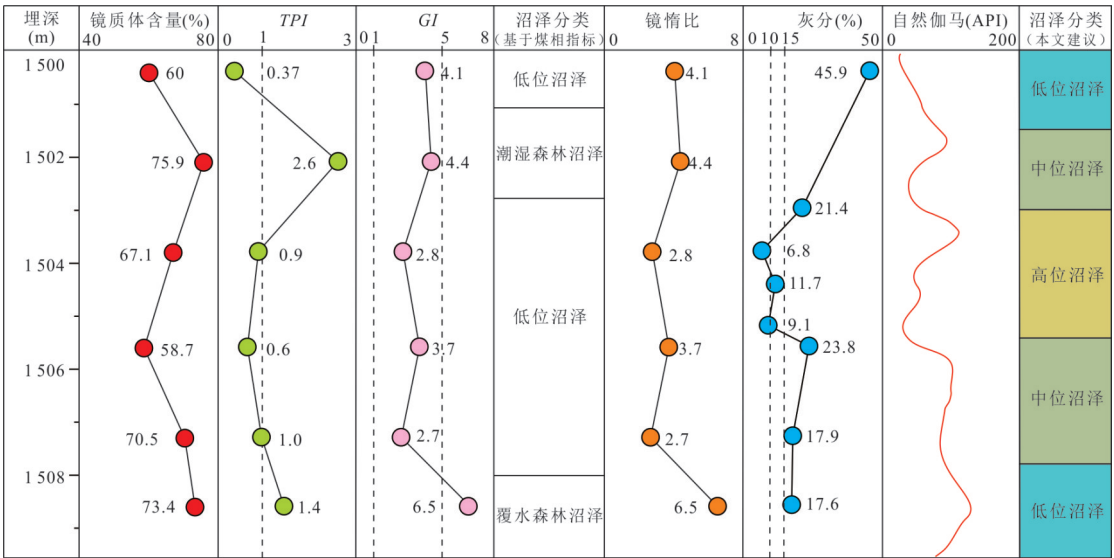


图 12 鄂尔多斯盆地东北部成煤沼泽垂向演化趋势

Fig.12 Vertical evolutionary trend of coal-forming swamps in the northeastern Ordos Basin

储层评价及煤系沉积过程研究提供更具可操作性的环境约束。

对成煤环境恢复来说,这种方法至少有3点启示:(1)煤层垂向变化受供水方式、水位状态和外源输入强弱的连续调整,而不宜直接理解为多个离散煤相类型的机械叠置;(2)传统煤相指标仍可继续使用,但更适合作为过程约束信息,而不是单独作为最终环境命名依据;(3)灰分、GR和镜情比等参数虽然相对简单,但由于与碎屑输入、水文条件和保存状态关系较直接,在成煤环境演化分析中反而具有较好的实用性和稳定性。值得注意的是,对于优质煤岩的形成,需要同时考虑水进、水退等总体的沉积背景。

6 成煤环境分析认识及发展趋势

成煤环境分析经历了由定性描述向综合定量分析,再向多尺度动态重建不断发展的过程。早期研究主要以单一煤层及其顶底板岩系为对象,依托地层学、岩相学、煤岩学和古生物学等方法,建立了基本的成煤环境分类框架。随着研究深入,研究对

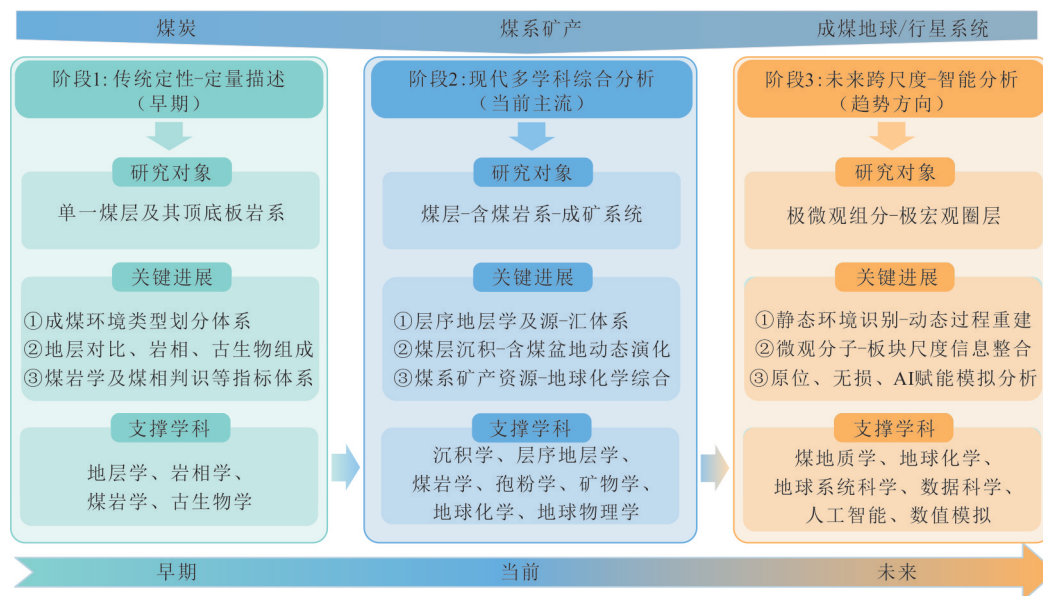


图13 成煤环境分析认识及发展趋势

Fig.13 Insights and future trends of coal-forming environment research

象逐步由单一煤层扩展到含煤岩系、沉积体系和盆地充填系统,层序地层学、沉积学、煤岩学、孢粉学、矿物学、地球化学和地球物理学等多学科方法开始综合应用,成煤环境分析也由静态环境识别转向聚煤规律、沉积体系演化和盆地尺度综合恢复.当前,成煤环境研究正在进一步向多尺度、综合化方向发展,研究内容不仅涉及煤层本身,也延伸到煤层内部结构、煤系沉积演化及煤系多资源富集背景,数据集成、数值模拟和智能分析等方法的引入,正在推动成煤环境分析由静态判识向动态过程重建转变(图13).

传统成煤环境分析多以煤相命名为主要目标,通常依据显微组分、显微煤岩类型及相关指数对煤层形成环境进行划分.这类方法在煤岩学研究中具有重要意义,但煤层记录的并不是单一、静止的环境,而是泥炭沼泽在供水方式、水位状态、碎屑输入、海水影响和植被变化共同作用下形成的连续演化过程,传统煤相指标反映的更多是这一过程中的局部响应特征,不一定能与具体环境类型建立稳定对应关系.不同分析方法还具有不同适用尺度,显微组分、显微煤岩类型和生物标志物等方法更适合样品或层段尺度研究,而在单煤层、煤组和区块尺度上,煤层内部煤岩组成、灰分、夹矸及测井响应的变化,往往更多反映沉积体系迁移和泥炭堆积条件的整体调整.因此,成煤环境分析应更加重视多参数联合约束、沉积过程动态重建和多尺度综合解释,研究重点应由复杂煤相

名称的细化,转向对供水方式、水位稳定性、碎屑输入和保存条件等主控因素的识别.从沉积过程出发,将低位、中位和高位泥炭沼泽作为成煤环境分析的基本框架,有助于提高不同沉积背景下环境解释的稳定性和可比性,也可为煤系沉积研究和相关资源评价提供更清晰的分析路径.

7 结论

(1)深时成煤环境演化受植物演替、气候变化和沉积体系调整共同控制,不同时代成煤植物类型、泥炭沼泽结构及沉积背景存在明显差异.晚古生代森林沼泽是传统煤相模式建立的重要背景,而中生代和新生代成煤环境在植被组成、供水方式和沉积体系上均发生了明显变化.因此,成煤环境分析不能脱离时代背景和沉积过程,简单套用既有煤相图版和显微组分指标.

(2)传统成煤环境分析方法,包括基于显微组分的煤相指标、显微煤岩类型、矿物-元素地球化学和生物标志物方法等,均具有重要应用价值,但其解释结果往往反映的是泥炭形成与保存过程中的局部响应特征,而不是具体沉积环境类型本身.显微组分比例及相关煤相指数易受植被组成、分解作用、水位波动、外源输入以及成岩-煤化改造等多因素共同影响,因而在成煤环境连续演化背景下具有明显多解性.成煤环境分析的重点应由单纯煤相命名,转向对供水方式、水位

状态、碎屑输入和保存条件等主控因素的识别。

(3) 基于沉积过程约束, 将成煤泥炭沼泽简化为低位、中位和高位三类, 有助于从更高层级上归纳不同煤层形成环境的主导差异。其中, 低位沼泽主要受地下水补给控制, 外源碎屑和矿物质输入相对较强; 中位沼泽表现为地下水与降水共同影响、水位波动较明显的过渡环境; 高位沼泽则以降水主导、外源输入较弱为主要特征。自然伽马值、灰分产率和镜质体/惰质体比值可作为识别泥炭沼泽类型及其垂向演化的重要约束参数。

References

- Baker, S. J., 2022. Fossil Evidence that Increased Wild-fire Activity Occurs in Tandem with Periods of Global Warming in Earth's Past. *Earth-Science Reviews*, 224: 103871. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103871>
- Böcker, J., Littke, R., Hartkopf-Fröder, C., et al., 2013. Organic Geochemistry of Duckmantian (Pennsylvanian) Coals from the Ruhr Basin, Western Germany. *International Journal of Coal Geology*, 107: 112–126. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.08.002>
- Bouchenak-Khelladi, Y., Muasya, A. M., Linder, H. P., 2014. A Revised Evolutionary History of Poales: Origins and Diversification: Evolutionary History of Poales. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 175(1): 4–16. <https://doi.org/10.1111/boj.12160>
- Calder, J. H., 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 de la Societe Geologique de France*, 162: 283–298.
- Capel, E., Cleal, C. J., Xue, J. Z., et al., 2022. The Silurian-Devonian Terrestrial Revolution: Diversity Patterns and Sampling Bias of the Vascular Plant Macrofossil Record. *Earth-Science Reviews*, 231: 104085. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104085>
- Chen, Z. H., 1988. Sedimentary Environment of Coal and Coal-bearing Strata. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Crosdale, P. J., 1993. Coal Maceral Ratios as Indicators of Environment of Deposition: Do They Work for Ombrogenous Mires? An Example from the Miocene of New Zealand. *Organic Geochemistry*, 20(6): 797–809. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(93\)90064-1](https://doi.org/10.1016/0146-6380(93)90064-1)
- Dehmer, J., 1995. Petrological and Organic Geochemical Investigation of Recent Peats with Known Environments of Deposition. *International Journal of Coal Geology*, 28 (2–4): 111–138. [https://doi.org/10.1016/0166-5166\(95\)00016-X](https://doi.org/10.1016/0166-5166(95)00016-X)
- Demchuck, T., Gonzalez-Guzman, E., Gordon, I. R., et al., 2004. An Integrated Chronostratigraphy for the Oficina Formation at Petrozuata, Venezuela: A Year 2003 Evaluation Based on Additional Stratigraphic and Micropaleontological Data. *Palynology*, 28: 239.
- Diessel, C. F. K., 1992. Coal-bearing Depositional Systems. Springer-Verlag, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-75668-9>
- DiMichele, W. A., Stein, W. E., Bateman, R. M., 2001. Ecological Sorting of Vascular Plant Classes during the Paleozoic Evolutionary Radiation. In: Allmon, W., Bottinger, D. J., eds., *Evolutionary Paleoecology: The Ecological Context of Macroevolutionary Change*. Columbia University Press, New York, 285–336.
- Duan, Y., Duan, M. C., Wu, Y. Z., et al., 2017. Impact of Formation Environment of Coal-Forming Material on Hydrogen and Carbon Isotopic Compositions of Thermogenic Coalbed Gas: Thermal Simulation of Herbaceous Marsh Peats Formed under Different Climatic Environments. *Earth Science*, 42(9): 1541–1548 (in Chinese with English abstract).
- Fielding, C. R., 2021. Late Palaeozoic Cyclothem—A Review of Their Stratigraphy and Sedimentology. *Earth-Science Reviews*, 217: 103612. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103612>
- Gao, S., Li, Y., Liu, L., et al., 2026. Paleo-Wildfire Records and Carbon Cycle Effects in Peat(Coal-Forming) Bogs. *Acta Sedimentologica Sinica*, 44(3): 883–902 (in Chinese with English abstract).
- Graham, A., 1999. Late Cretaceous and Cenozoic History of North American Vegetation. Oxford University Press, Oxford.
- Graham, A., 2011. The Age and Diversification of Terrestrial New World Ecosystems through Cretaceous and Cenozoic Time. *American Journal of Botany*, 98(3): 336–351. <https://doi.org/10.3732/ajb.1000353>
- Greb, S. F., DiMichele, W. A., Gastaldo, R. A., 2006. Evolution and Importance of Wetlands in Earth History. In: Greb, S. F., DiMichele, W. A., eds., *Wetlands through Time*. Geological Society of America, New York, 1–40. [https://doi.org/10.1130/2006.2399\(01\)](https://doi.org/10.1130/2006.2399(01))
- Greb, S. F., DiMichele, W. A., Gastaldo, R. A., et al., 2022. Prehistoric Wetlands. In: Tockner, K., ed., *Encyclopedia of Inland Waters (Second Edition)*. Elsevier, Amsterdam.

- dam, 23—32. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819166-8.00066-9>
- Hacquebard, P. A., Donaldson, J. R., 1969. Carboniferous Coal Deposition Associated with Flood-Plain and Limnic Environments in Nova Scotia. Special Paper 114. Geological Society of America, New York, 143—191.
- Han, D. X., 1996. Coal Petrology of China. China University of Mining and Technology Press, Xuzhou (in Chinese).
- Han, D. X., Yang, Q., 1980. Coalfield Geology of China (Volume 2). China Coal Industry Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Hotton, C. L., Hueber, F. M., Griffing, D. H., et al., 2001. Early Terrestrial Plant Environments: An Example from the Emsian of Gaspé, Canada. Columbia University Press, New York, 179—212.
- Hunt, J. W., 1982. Relationship between Microlithotype and Maceral Compositions of Coals and Geological Setting of Coal Measures in the Permian Basins of Eastern Australia. *Australian Journal of Coal Geology*, 4: 484—502.
- Hunt, J. W., Hobday, D. K., 1984. Petrographic Composition and Sulphur Content of Coals Associated with Alluvial Fans in the Permian Sydney and Gunnedali Basins, Eastern Australia. *Special Publication of the International Association of Sedimentologists*, 7: 43—60.
- Itoh, M., Okimoto, Y., Hirano, T., et al., 2017. Factors Affecting Oxidative Peat Decomposition Due to Land Use in Tropical Peat Swamp Forests in Indonesia. *Science of the Total Environment*, 609: 906—915. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.132>
- Kennedy, K. L., Gibling, M. R., Eble, C. F., et al., 2013. Lower Devonian Coaly Shales of Northern New Brunswick, Canada: Plant Accumulations in the Early Stages of Terrestrial Colonization. *Journal of Sedimentary Research*, 83(12): 1202—1215. <https://doi.org/10.2110/jsr.2013.86>
- Kool, D. M., Buurman, P., Hoekman, D. H., 2006. Oxidation and Compaction of a Collapsed Peat Dome in Central Kalimantan. *Geoderma*, 137(1—2): 217—225. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.08.021>
- Lester, E., Watts, D., Cloke, M., et al., 2003. Automated Microlithotype Analysis on Particulate Coal. *Energy & Fuels*, 17(5): 1198—1209.
- Li, Y., Pan, S. Q., Ning, S. Z., et al., 2022. Connotation and Development of Coal-bearing Mineralogy—Also on Coal-bearing Mineralization System and Its Resource and Environmental Effects. *Scientia Sinica Terrae*, 52(10): 1948—1965 (in Chinese).
- Li, Y., Tang, D. Z., Niu, X. L., 2017. Sedimentary Features of C-P Coal bearing Strata Controlled by Variation of Accommodation Spaces in East Margin of Ordos Basin. *Journal of China Coal Society*, 42(7): 1828—1838 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Xu, F. Y., Tang, S. H., et al., 2024. Progress and Development Direction of Coalbed Methane (Coal-Rock Gas) Exploration and Development in the Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 44(10): 63—79 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., Zou, C. N., Liang, T. Q., et al., 2026. Classification of Coal-Forming Environments and Evolution of Coal Petrology. *Petroleum Exploration and Development*, 53(1): 107—118 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. X., Li, Y., Zheng, X., et al., 2026. Palaeogeographic Characteristics of the Formation and Evolution of Autochthonous and Allochthonous Peat Mires. *Journal of Palaeogeography*, 28(2): 447—467 (in Chinese with English abstract).
- Loisel, J., Gallego-Sala, A. V., Amesbury, M. J., et al., 2021. Expert Assessment of Future Vulnerability of the Global Peatland Carbon Sink. *Nature Climate Change*, 11(1): 70—77. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00944-0>
- Ma, X. X., 1988. Petrological Study and Coal Facies of the Main Minable Coal Seams in the Late Permian of Shuicheng, Guizhou (Dissertation). China University of Mining and Technology, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Marchioni, D. L., 1980. Petrography and Depositional Environment of the Liddell Seam, Upper Hunter Valley, New South Wales. *International Journal of Coal Geology*, 1(1): 35—61. [https://doi.org/10.1016/0166-5162\(80\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0166-5162(80)90005-1)
- Mitsch, W., Gosselink, J., 2000. Wetlands (Third edition). John Wiley & Sons, New York, 771—784.
- Moore, T. A., Shearer, J. C., 1997. Evidence for Aerobic Degradation and Implications for Palangka Rayapeat Sustainability. In: Rieley, J. O., Page, S. E., eds., Biodiversity and Sustainability of Tropical Peatlands. Samara Publishing, Cardigan, 157—167.
- Moore, T. A., Shearer, J. C., 2003. Peat/Coal Type and Depositional Environment—Are they Related? *International Journal of Coal Geology*, 56(3—4): 233—252. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(03\)00114-9](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(03)00114-9)
- Pawlik, L., Buma, B., Šamonil, P., et al., 2020. Impact of Trees and Forests on the Devonian Landscape and Weathering Processes with Implications to the Global

- Earth's System Properties—A Critical Review. *Earth Science Reviews*, 205: 103200. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103200>
- Poumot, C., 1989. Palynological Evidence for Eustatic Events in the Tropical Neogene. *Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf-Aquitaine*, 13 (2):437–453.
- Qin, Y., 2025. Progress and Trend of Modern Geological Research on Coal-bearing Minerals in China. *Coal Geology & Exploration*, 53(1): 12–35 (in Chinese with English abstract).
- Retallack, G. J., 2022. Ordovician-Devonian Lichen Canopies before Evolution of Woody Trees. *Gondwana Research*, 106: 211–223. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.01.010>
- Rydin, H., Jeglum, J. K., 2013. The Biology of Peatlands. Oxford University Press, Cambridge.
- Scott, A. C., 2002. Coal Petrology and the Origin of Coal Macerals: A Way ahead? *International Journal of Coal Geology*, 50(1–4): 119–134. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(02\)00116-7](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(02)00116-7)
- Shao, L. Y., Qi, Z. H., Tang, Y. G., et al., 2026. Progress of Coal Facies Analysis in China and Discussion on Related Issues. *Journal of Palaeogeography*, 28(1): 44–67 (in Chinese with English abstract).
- Smyth, M., 1979. Hydrocarbon Generation in the Fly Lake—Brolga Area of the Cooper Basin. *The APPEA Journal*, 19(1): 108–114. <https://doi.org/10.1071/aj78012>
- Smyth, M., 1984. Coal Microlithotypes to Sedimentary Environments in the Cooper Basin Australia. *Special Publications of the International Association of Sedimentologists*, 7: 333–347.
- Stach, E., Mackowsky, M. T., Teichmüller, M., et al., 1990. Stach's Textbook of Coal Petrology. China Coal Industry Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Strack, M., Davidson, S. J., Hirano, T., et al., 2022. The Potential of Peatlands as Nature-Based Climate Solutions. *Current Climate Change Reports*, 8(3): 71–82. <https://doi.org/10.1007/s40641-022-00183-9>
- Teichmüller, M., 1950. Zum Petrographischen Aufbau und Werdegang der Weichbraunkohle (mit Berücksichtigung genetischer Fragen der Steinkohlenpetrographie). *Geol. Jahrb.*, 64: 429–488.
- Xue, J. Z., Wang, J. S., Li, B. X., et al., 2022. Origin and Early Evolution of Land Plants and the Effects on Earth's Environments. *Earth Science*, 47(10): 3648–3664 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Q., Han, D. X., 1979. Coalfield Geology of China (Volume 1). China Coal Industry Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yang, Y. K., 1996. Atlas of Coal Petrology of China. China University of Mining and Technology Press, Xuzhou (in Chinese).

中文参考文献

- 陈钟惠, 1988. 煤和含煤岩系的沉积环境. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 段毅, 段明辰, 吴应忠, 等, 2017. 成煤母质形成环境对热成因煤层气氢碳同位素的影响: 不同气候环境的草本沼泽泥炭热模拟实验. *地球科学*, 42(9): 1541–1548.
- 高爽, 李勇, 刘乐, 等, 2026. 泥炭(成煤)沼泽古野火记录及碳循环效应. *沉积学报*, 44(3): 883–902.
- 韩德馨, 1996. 中国煤岩学. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- 韩德馨, 杨起, 1980. 中国煤田地质学下册. 北京: 煤炭工业出版社.
- 李勇, 潘松圻, 宁树正, 等, 2022. 煤系成矿学内涵与发展——兼论煤系成矿系统及其资源环境效应. *中国科学: 地球科学*, 52(10): 1948–1965.
- 李勇, 汤达祯, 牛鑫磊, 2017. 鄂尔多斯盆地东缘可容纳空间变化控制的 C-P 煤系沉积特征. *煤炭学报*, 42(7): 1828–1838.
- 李勇, 徐凤银, 唐书恒, 等, 2024. 鄂尔多斯盆地煤层(岩)气勘探开发进展及发展方向. *天然气工业*, 44(10): 63–79.
- 李勇, 邹才能, 梁天琦, 等, 2026. 成煤环境分类及煤岩形成演化. *石油勘探与开发*, 53(1): 107–118.
- 李增学, 李莹, 郑雪, 等, 2026. 原位与异位泥炭沼泽形成与演化的古地理特征. *古地理学报*, 28(2): 447–467.
- 马兴祥, 1988. 贵州水城晚二叠世主采煤层的岩石学研究及煤相(博士学位论文). 北京: 中国矿业大学.
- 秦勇, 2025. 中国煤系矿产近现代地质研究进展与走向. *煤田地质与勘探*, 53(1): 12–35.
- 邵龙义, 齐争辉, 唐跃刚, 等, 2026. 中国煤相研究进展及相关问题探讨. *古地理学报*, 28(1): 44–67.
- 斯塔赫, Mackowsky, M. T., Teichmüller, M., 等, 1990. 斯塔赫煤岩学教程. 杨起, 李宝芳, 黄家福, 等译. 北京: 煤炭工业出版社.
- 薛进庄, 王嘉树, 李炳鑫, 等, 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.
- 杨起, 韩德馨, 1979. 中国煤田地质学上册. 北京: 煤炭工业出版社.
- 杨永宽, 1996. 中国煤岩学图鉴. 徐州: 中国矿业大学出版社.