

原位与异位泥炭沼泽形成与演化的古地理特征^{*}李增学¹ 李莹² 郑雪¹ 张晖³
李旭超¹ 王东东¹ 刘海燕¹ 赵洪刚¹

1 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛 266590

2 山东交通学院交通土建工程学院, 山东济南 250357

3 山东省煤田地质规划勘察研究院, 山东济南 250104

摘 要 以晚古生代华北陆表海盆地、中国南海边缘海盆地等 4 个成煤盆地为解剖对象, 进行原位泥炭沼泽和异位泥炭沼泽形成及演化特点的比较分析。指出了原位与异位泥炭沼泽所形成煤层的识别标志, 总结了 2 类不同属性的泥炭沼泽在泥炭物质聚集/积、所形成煤层结构、煤分层与夹石层之间的界面特点、古土壤层等的差异性, 重点阐明了“异位泥炭沼泽”的属性特点。研究认为泥炭沼泽是发生成煤作用的载体, 是沉积环境的重要类型, 是盆地古地理中的特殊景观。其意义和价值表现在: 盆地属性不同, 原位与异位泥炭沼泽的古地理特征不同, 2 类泥炭沼泽发育、演化是盆地成煤环境演化中的重要事件; 晚古生代华北陆表海盆地海侵事件的频发, 使得泥炭沼泽在受到抑制的同时, 也使得泥炭物质得以保存, 形成海侵层与煤层直接接触的特殊组合, 海侵事件形成典型的原位泥炭沼泽古地理景观; 黄县陆相湖泊断陷盆地和珠江口盆地北部坳陷盆地泥炭沼泽形成与演化分析表明, 构造活动对盆地充填与泥炭沼泽发育、演化起主导作用, 陡坡发育不稳定的原位泥炭沼泽、缓坡发育稳定的原位泥炭沼泽, 而在盆地演化关键期, 盆地水域区形成了稳定的异位泥炭沼泽, 形成了煤与油页岩组合的特殊沉积组合。

关键词 异位泥炭沼泽 成煤古地理 煤层结构 海侵成煤 泥炭物质聚集/积

第一作者简介 李增学, 男, 1954 年生, 1995 年获中国地质大学(北京)煤田、油气地质与勘探专业博士学位, 现为山东科技大学地球科学与工程学院教授, 博士生导师, 主要从事能源地质学、沉积学和层序地层学方面的教学和研究。E-mail: lizengxue@126.com。

通讯作者简介 郑雪, 女, 1989 年生, 2018 年获中国矿业大学(北京)地球化学专业博士学位, 现为山东科技大学地球科学与工程学院副教授, 主要从事煤系关键金属、煤地质学的研究。E-mail: zhengxue@sdust.edu.cn。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

Palaeogeographic characteristics of the formation and evolution
of autochthonous and allochthonous peat miresLI Zengxue¹ LI Ying² ZHENG Xue¹ ZHANG Hui³
LI Xuchao¹ WANG Dongdong¹ LIU Haiyan¹ ZHAO Honggang¹

1 College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Shandong Qingdao 266590, China

谨以此文纪念冯增昭先生 100 周年诞辰。

* 国家自然科学基金项目(编号: 42272205, 42372201)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42272205, 42372201)]

收稿日期: 2025-08-23 改回日期: 2025-10-23

2 College of Traffic Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Ji'nan 250357, China

3 Shandong Provincial Institute of Coal Geological Planning and Exploration, Ji'nan 250104, China

Abstract Four representative coal-bearing basins, including the Late Paleozoic North China epicontinental sea basin and the marginal sea basins of the South China Sea, were selected for a comparative analysis of the formation and evolutionary characteristics of autochthonous and allochthonous peat mires. The identification features for coal seams formed by autochthonous and allochthonous peat mires are proposed, and the differences between the two types of peat mires are summarized in terms of peat material accumulation, coal seam architecture, coal-interbed interfaces, and paleosol development. In addition, the characteristic attributes of allochthonous peat mires are elucidated. Research indicates that peat mires serve as the primary carriers of coal formation, represent a key type of sedimentary environment, and constitute a distinctive and significant feature of basin palaeogeography. Its significance and value lie in the following aspects: the attributes of sedimentary basins vary, and the palaeogeographic characteristics of autochthonous and allochthonous peat mires differ accordingly. The development and evolution of two mire types constitute important events in the evolution of coal-forming environments within basins; during the Late Paleozoic, frequent marine transgressions in the North China Basin not only suppressed peat mire development but also preserved peat material, producing a distinctive stratigraphic association in which marine transgressive layers are in direct contact with coal seams. The palaeogeography of transgression events represents a typical landscape of autochthonous peat mires; analysis of peat mire formation and evolution in the Huangxian terrestrial lacustrine faulted basin and the northern depression of the Pearl River Mouth Basin reveals that tectonic activity exerted a primary control on basin infill as well as on the development and evolution of peat mires. On steep slopes, unstable autochthonous mires were established, whereas stable autochthonous mires formed on gentle slopes. During critical stages of basin evolution, stable allochthonous mires developed in lacustrine or shallow-water settings, giving rise to the distinctive coal-oil shale assemblages.

Key words allochthonous peat mires, coal-forming palaeogeography, coal seam structure, transgressive coal formation, peat material accumulation

About the first author LI Zengxue, born in 1954, obtained a doctoral degree in coalfield, oil and gas geology, and Exploration from China University of Geosciences (Beijing) in 1995, is currently a professor and doctoral supervisor at the College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology. He is mainly engaged in teaching and research in the fields of energy geology, sedimentology, and sequence stratigraphy. E-mail: lizengxue@126.com.

About the corresponding author ZHENG Xue, born in 1989, obtained a doctoral degree in geochemistry from China University of Mining and Technology (Beijing) in 2018, is currently an associate professor at the School of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology. She is mainly engaged in research on key metals in coal measures and coal geology. E-mail: zhengxue@sdust.edu.cn.

0 引言

泥炭沼泽是成煤盆地中一种特殊的古环境类型(杨起和韩德馨, 1979; 韩德馨和杨起, 1980; 邵震杰等, 1993; 李增学等, 2009; Li *et al.*, 2009), 泥炭物质是植物遗体经过生物物理与生物化学作用

形成的产物。恢复泥炭物质的聚积环境及背景条件、形成过程中的生物群特征及其相互作用等是有关含煤地层共伴生矿产形成理论中的重要研究课题(Doyle *et al.*, 2010; Fagherazzi *et al.*, 2019; Dai *et al.*, 2020; Utescher *et al.*, 2021; Delusina

et al., 2022; Zhang *et al.*, 2022; 秦勇, 2025)。国外学者认为泥炭沉积物得以保存下来, 区域构造作用和海平面变化导致的基准面升降、沉积物自身的压实作用等是重要的控制因素(Prokopovich, 1985; Van Asselen *et al.*, 2009, 2010; Flores, 2013)。

泥炭物质形成与聚集/积的间歇性与连续性实际上是由于泥炭沼泽被破坏与重建导致的, 已有的煤地质学理论(李增学等, 2009; Li *et al.*, 2009)对于解释一个完整煤层的形成可能是合理的、有用的, 但事实上一个完整煤层内部会存在很多沉积学、古地理和古构造上的差异性(李增学等, 2021; Li *et al.*, 2021a, 2021b)。导致泥炭沼泽的破坏作用是一个较为复杂的、敏感的、多变的过程。同时泥炭沼泽破坏作用又为泥炭物质的另一种运移、聚集/积方式(如分散漂移、重力流携带等)创造了条件(李增学等, 2022)。

全球气候变化引起的水文或植被变化, 可能对泥炭地微生物及其相关的生物地球化学特征产生重大影响(Wang *et al.*, 2019)。泥炭沼泽具有复杂的生物学特性(Lindsay, 2018), 煤的形成过程大致也是如此(O'Keefe *et al.*, 2011, 2013)。泥炭物质的形成仅仅是煤形成过程中的前期阶段, 煤的最终形成也许已经与泥炭沼泽没有必然关系了。植物繁盛到泥炭物质再到煤的形成与沉积岩的形成在机制上存在重大差异, 煤的形成除了具有非有机质沉积的一般特点外, 更重要的是其具有的特殊性、敏感性。煤的绝对主体是有机质, 其物质的主体组成比较单纯。但是煤(层)中蕴含的沉积学信息是很丰富的。如植物生长的环境、气候变化、水动力、内源与外源物质交互等信息, 是地球系统中的重要组成部分。煤的形成过程还具有敏感性(Li *et al.*, 2021a), 这是因为有机质对环境、物质演化、背景条件等的变化具有十分明显的敏感性, 如森林失火、洪水与风暴事件、暴露氧化等, 都会使泥炭的聚集/积终止甚至泥炭沼泽遭到毁灭性破坏。因此, 从植物到泥炭, 再到煤的形成过程是一种特殊的“源汇系统”, 该系统并不完全符合无机碎屑物质形成、搬运、聚集沉积的分异规律(Li *et al.*, 2021b; Zhao *et al.*, 2021)。

从事煤地质研究的学者与煤炭勘探工程技术人员, 通过多年的实践和探索, 逐步认识到泥炭沼泽这个煤地质学所特有的核心概念, 由于涉及到沉积

学、古地理学, 以及盆地分析和层序地层学等学科交叉问题, 特别是上述几个学科的新理论、新方法、新模式不断涌现, 冲击和动摇了煤地质学一些原有的基础理论。人们发现泥炭沼泽存在若干理论阐述不清的问题。如发现的所有煤层层位是不是一定代表泥炭沼泽环境单元? 是不是可以作为恢复盆地成煤环境的证据? 是不是可以据此追踪植物生长的古地理景观? 巨厚煤层的形成能否用传统的泥炭沼泽及泥炭物质持续性聚积/集进行科学合理地解释? 这些问题都尚没有完全确定的答案。

煤的沉积学, 除了具有一般沉积学共性外, 具有特殊性, 集中表现在形成煤的物质完全不同于无机物质, 不是剥蚀搬运而来, 而是植物生长死亡的遗骸经生物物理和生物化学作用形成, 因而不能生硬地套用“源—渠—汇系统”理论解释煤的形成。因此陆源碎屑沉积学研究思路与方法可能不能完美地解释泥炭沼泽破坏及泥炭物质聚集/聚积机理。此外, 泥炭沼泽发育时期共伴生矿产形成与富集已经成为重要的研究问题(成贤康等, 2021; 孙蓓蕾等, 2022; 王国权等, 2022; Sun *et al.*, 2022, 2023)。

作者通过长期的煤地质学理论与应用研究实践, 尤其是近年来所从事的成煤盆地泥炭沼泽演化机制研究, 逐渐认识到煤地质学理论需要进行创新性突破, 继而提出了泥炭沼泽具有“原位与异位属性”特点, 并指出不是个别成煤盆地具有这样的属性, 而是地质历史中所有成煤盆地都具有的特点, 具有普遍性。

泥炭沼泽的原位性与异位性属性研究的主要意义和价值在于: (1) 20 世纪七八十年代, 研究聚煤规律还是比较粗糙的, 即把一个地层系统中统或组的所有煤层累加在一起, 分析累积厚度变化, 寻找聚煤带、聚煤中心。这就必然掩盖了一个盆地不同时期和不同阶段成煤作用的特殊性, 也可能导致不同煤层形成过程中规律的相互抵消。(2) 李思田先生在 1990 年代提出了“富煤单元”的概念(李思田等, 1992), 用以研究具体煤层形成的规律性, 已达到精细的程度。(3) 异地煤概念虽然提出比较早, 但研究比较薄弱, 没有形成系统的理论成果。即在地质剖面上看起来可以进行对比的同一个煤层, 可能存在一部分是原地煤, 而另一部分可能是异地煤, 这需要进行细致对比才能识别出来。王华、吴冲龙等相继发表了关于异地煤研究成

果(王华等, 1999, 2000; 吴冲龙, 1994; 吴冲龙等, 2003, 2006), 使得聚煤规律研究的理论更加丰富。煤地质研究者意识到, 不能简单地认为煤层对应的环境就是泥炭沼泽。但仍然存在对于异地煤概念泛化的现象。(4) 随着研究的深入, 发现形成煤层的环境是复杂的, 煤层的属性形成并不是“非原地煤即异地煤”那么简单划分, 而是有更深层的科学问题, 即泥炭沼泽具有原位性和异位性。(5) 泥炭沼泽原位与异位属性研究的最终归宿, 是科学地揭示煤及共伴生矿产富集规律。聚煤规律研究, 说到底就是研究盆地成煤最有利的古地理环境。如果没有分析具体煤层是原位泥炭沼泽形成的, 还是异位泥炭沼泽形成的, 或者是异地煤, 那么最终获得的所谓聚煤规律结果, 就可能存在一些谬误而不符合成煤的客观规律。只有做深入研究和细致剖析才能获得正确认识。在此基础上获得聚煤规律, 才更符合沉积盆地成煤的客观规律。

1 原位与异位泥炭沼泽的含义与差异性特点

1.1 不同成煤盆地成煤环境比较分析

本研究基于作者近期对华北石炭纪—二叠纪陆

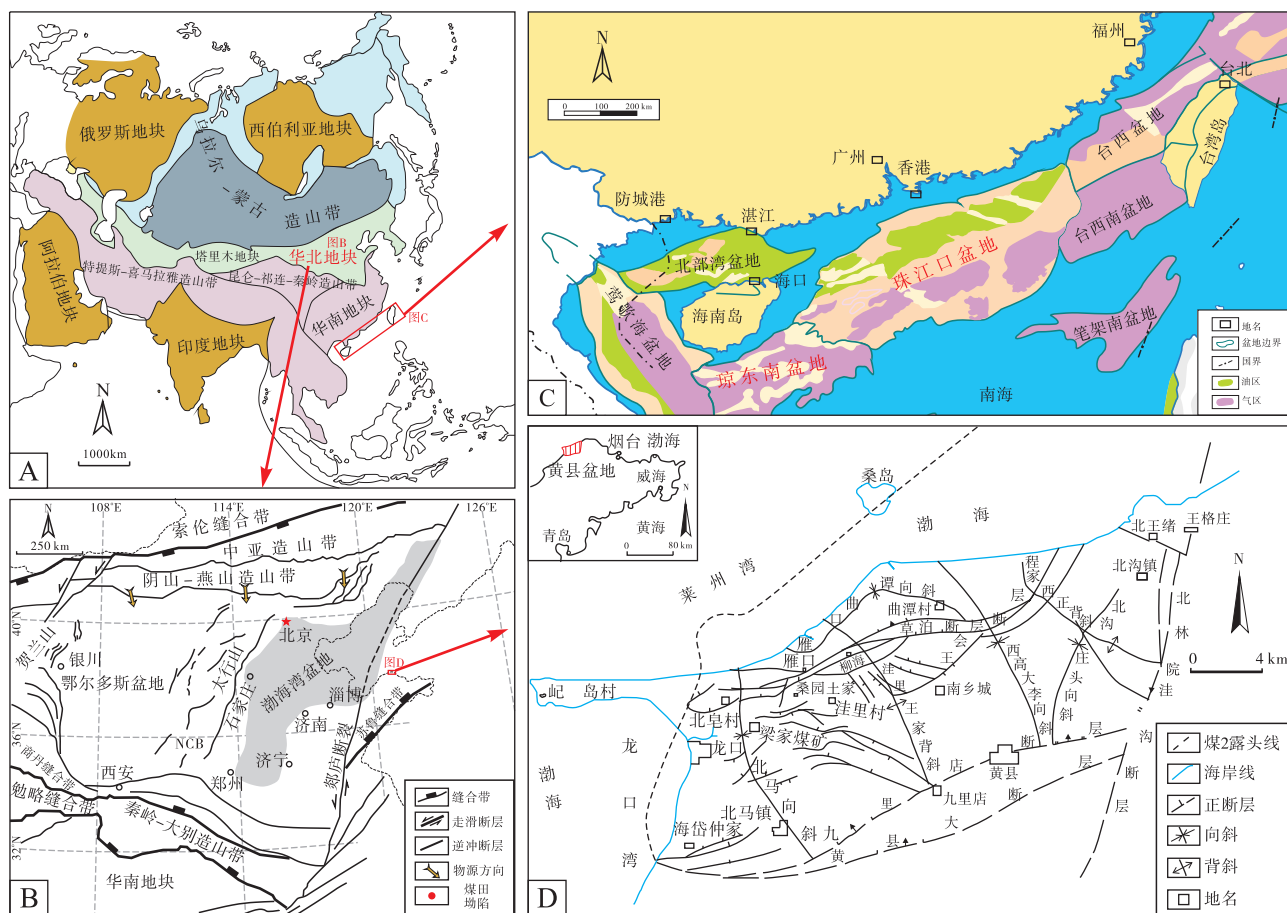
表海盆地、中国南海边缘海盆地、黄县陆相断陷与珠江口北部陆相拗陷沉积充填、煤岩组分与煤质关键指标及成煤环境研究, 尤其是泥炭沼泽发育及泥炭物质形成及聚集/积特点、泥炭沼泽破坏与重建过程的比较分析, 发现了几个典型盆地成煤期泥炭沼泽属性上存在的不同特点(表 1; 图 1)。可以看出, 虽然不是同时期的沉积盆地, 但都发生过重要的成煤作用。相对而言, 所形成煤层的厚度、结构、稳定性、煤岩煤质(尤其是煤中灰分、硫分、挥发分, 煤的显微组分如镜质组和惰质组等)特征, 都具有明显的差异性(表 1)。

华北石炭纪—二叠纪大型陆表海盆地形成的煤层以薄层为主, 分布稳定, 较大范围可以对比。薄煤层一般为简单结构, 若煤层为结构复杂, 则含多层夹石层, 但单层煤层总厚度一般不超过 10 m, 含煤充填中海相灰岩与煤层组合为鲜明特色; 中国南海边缘海盆地与珠江口盆地北部拗陷形成的煤层层数较多, 单层极薄, 仅局部厚度稍大, 为极不稳定—不稳定煤层, 横向难以对比, 相变快; 黄县陆相断陷盆地形成的煤层层数不多, 单层煤厚 1.04 ~ 13.7 m, 稳定性比较复杂, 不稳定、较稳定、稳定煤层均有发育, 大部分煤层区域分布较稳定, 煤与油页岩组合关系呈复杂关系(李增学等, 2010a;

表 1 4 个典型盆地地层及沉积特点比较

Table 1 Comparison of stratigraphic and sedimentary characteristics of four typical basins

比较内容	华北 C ₂ -P ₁ 盆地, 以山东及邻区为例(李增学, 1994; 李增学等, 1996, 1998, 2001, 2003)	南海盆地, 以琼东南盆地为例(李增学等, 2010a, 2010b; Wang <i>et al.</i> , 2020a, 2021; Zhao <i>et al.</i> , 2021; 张功成等, 2022)	黄县盆地(李增学等, 1998, 1999, 2000; 王东东等, 2016; 孔凡飞等, 2019; 吴悦等, 2023)	珠江口盆地, 以北部拗陷为例(Liu <i>et al.</i> , 2024)
盆地性质	稳定板内大型陆表海成煤盆地	边缘海盆地, 发育多个断陷/拗陷盆地	陆相断陷湖泊盆地	陆相断—拗湖泊转换阶段盆地
煤系时代	晚石炭世至早二叠世本溪期与太原期	古近纪与新近纪崖城期和陵水期	始新世李家崖期	始新世恩平期
煤层特点	以薄层为主, 分布稳定, 较大范围可以对比。海相灰岩与煤层组合为鲜明特色	层数较多, 单层极薄, 顶底板界面不清, 极不稳定—不稳定分布, 横向难以对比, 相变快	层数不多, 单层煤厚 1.04 ~ 13.7 m, 不稳定、较稳定、稳定煤层均有发育, 大部分煤层区域分布较稳定。煤与油页岩组合关系呈复杂关系	层数较多, 单层极薄, 局部厚度稍大, 极不稳定—不稳定煤层, 横向难以对比, 相变快
成煤环境及泥炭沼泽特点	潮坪、尤其是泥坪与混合坪演化而来的泥炭沼泽。煤层底部岩层中发育植物根系化石或痕迹。原位、原地成煤	冲积扇、辫状河三角洲沉积、三角洲沉积平原低洼发育泥炭沼泽。原位泥炭沼泽、异地成煤	辫状河三角洲平原沼泽、滨湖沼泽。原位、异位泥炭沼泽	辫状河三角洲平原和前缘沼泽、滨湖沼泽。原位、异位泥炭沼泽
煤岩组分与煤质关键指标	镜质组: > 80% 惰质组: < 6.7% 壳质组: < 7.8% 灰分 Ad: < 20% 硫分 St,d: > 1% 挥发分 Vdaf: > 40%	镜质组: > 80% 惰质组: > 0.4% 壳质组: < 1% 灰分 Ad: > 40% 硫分 St,d: < 1%; > 2% 挥发分 Vdaf: ~ 40%	镜质组: > 85% 惰质组: > 6% 壳质组: > 7% 灰分 Ad: < 20% 硫分 St,d: < 1% 挥发分 Vdaf: > 40%	镜质组: > 85% 惰质组: > 0.4% 壳质组: > 12% 灰分 Ad: ~ 40% 硫分 St,d: ~ 1% 挥发分 Vdaf: ~ 40%



A—亚洲简化构造图 (据 Zheng *et al.*, 2013; 曹代勇等, 2018; 修改); B—华北克拉通及其邻区简化构造图 (据 Liu *et al.*, 2013; 有修改); C—中国南海边缘海盆地主要盆地分布 (李增学等, 2022), 琼东南和珠江口盆地 (施和生等, 2014; 刘志峰等, 2017; 游君君等, 2020); D—山东黄县盆地构造格架 (李增学等, 1998, 1999)

图 1 解剖泥炭沼泽形成演化及比较研究的典型成煤盆地

Fig. 1 Typical coal basins for dissection of peat mires formation, evolution and comparative study

米立军等, 2010)。

几个典型盆地沉积体系及成煤环境, 尤其是泥炭沼泽发育及演化特点也具有显著的差异性。华北石炭纪一二叠纪陆表海盆地主要含煤地层为本溪组、太原组, 成煤沉积体系为潮坪—潟湖—潮坪、障壁—潟湖等, 泥炭沼泽主要由泥坪与混合坪演化而来。煤层底部岩层中发育植物根系化石或痕迹。分析认为这类盆地发育的泥炭沼泽为原位属性, 煤层多为原地煤。中国南海边缘海盆地 (以琼东南盆地为例) 主要含煤地层为崖城组和陵水组。主要成煤沉积体系为冲积扇、辫状河—三角洲、潮坪—潟湖、三角洲等, 泥炭沼泽主要发育于上述沉积体系平原或相对低洼区, 比较局限。成煤盆地环境单元结构复杂, 如断陷—拗陷盆地中发育多个次级凹陷与凸起, 控制着泥炭沼泽的发育与演化 (李

增学等, 2010a)。根据对煤层的煤岩、煤质特征以及煤层与其顶底部沉积特征分析, 认为琼东南盆地泥炭沼泽为原位泥炭沼泽成煤和异地成煤 2 种类型 (李增学等, 2010a; Wang *et al.*, 2020a, 2021; Li *et al.*, 2021a, 2021b)。黄县陆相断陷盆地主要含煤地层为李家崖组, 珠江口北部拗陷主要含煤地层为恩平组。该 2 个盆地的成煤环境为辫状河三角洲平原沼泽、滨湖沼泽。成煤期中在较深水区域发育较厚的煤层, 黄县盆地出现煤/油页岩/煤或油页岩/煤/油页岩等不同组合, 认为发育原位和异位泥炭沼泽 2 种类型。

1.2 原位与异位泥炭沼泽的含义及差异性

基于作者长期对不同成煤盆地泥炭沼泽形成与演化, 以及泥炭物质聚集/积特点的系统研究, 尤

其是近年对华北晚古生代大型陆表海盆地、中国南海新生代边缘海盆地（重点是琼东南盆地）、山东黄县古近纪断陷盆地，以及珠江口盆地北部坳陷带含煤沉积特征、泥炭沼泽发育及泥炭物质聚积规律分析，提出了“原位泥炭沼泽”与“异位泥炭沼泽”2个概念。

“原位泥炭沼泽”概念中，植物繁盛及其遗骸堆积、泥炭化作用形成泥炭物质，以及最终形成煤的整个过程都发生在植物生长地，其理想状态是指泥炭沼泽发育与演化的背景条件（区域构造、气候适宜、没有较大规模的地质灾害事件如大规模洪水事件、地震、风暴潮事件等）是稳定的，植物

繁盛地、泥炭化作用发生地、最终煤的形成地，三地一致(图 2)。原位泥炭沼泽的就是传统意义所定义的泥炭沼泽概念。

“异位泥炭沼泽”概念中，植物死亡后的遗骸转化为泥炭物质的作用过程，不是发生在植物生长和长期繁殖的原地理位置与沉积环境，而是植物遗骸不断被搬运至盆地的一种特殊地理位置与水域环境下，发生持续性聚集/积和泥炭化作用，最终形成泥炭聚积层。此种情况下，泥炭层形成的沉积环境与其下伏沉积层的沉积环境，没有成因上的继承性关系，即泥炭化作用发生过程与植被生长的背景是无关的(图 2)。理想状态下形成的异位泥炭沼泽

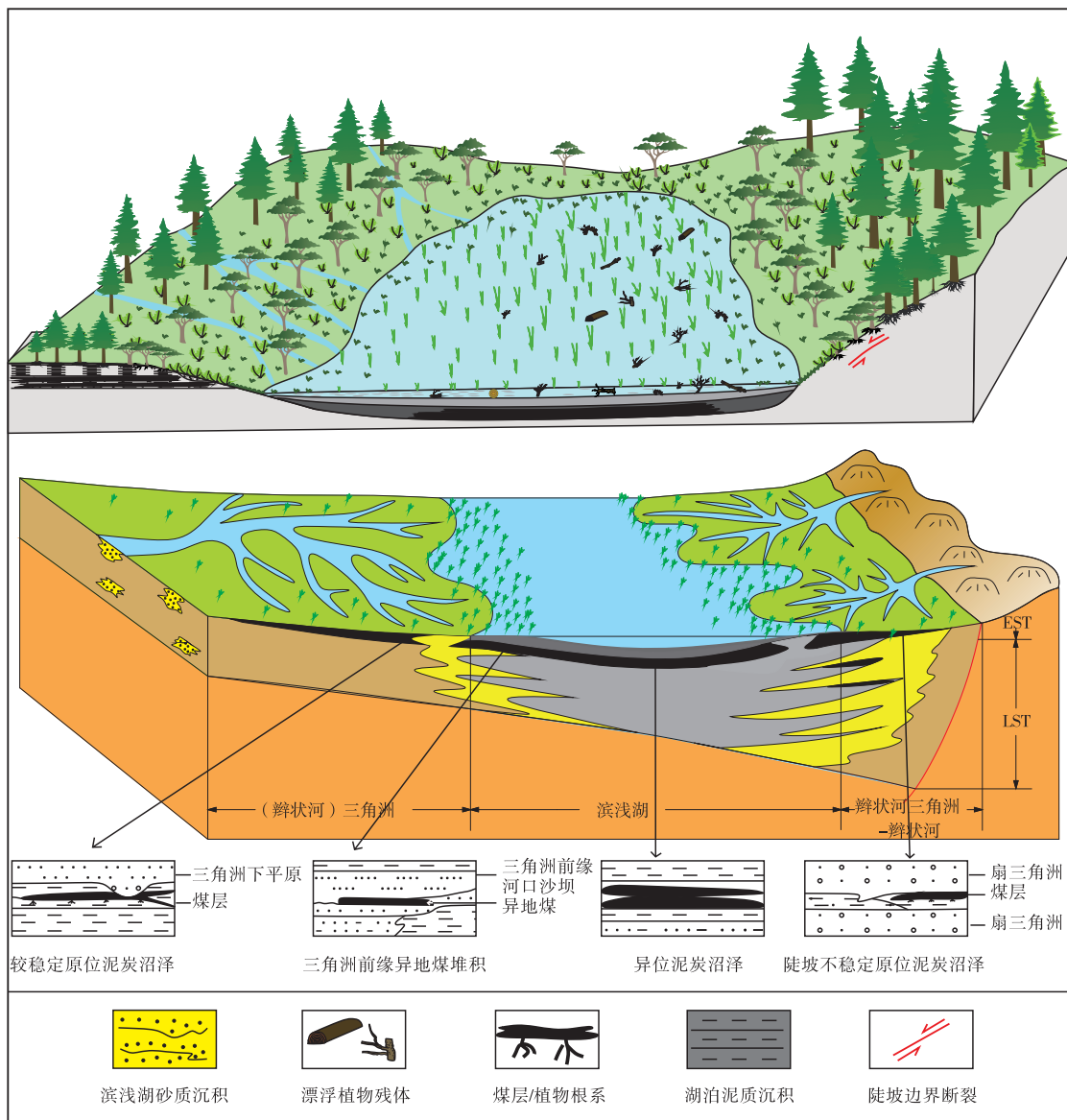


图 2 断陷盆地缓坡/陡坡异位泥炭沼泽和原位泥炭沼泽模式（以黄县盆地为例）

Fig. 2 Allochthonous and autochthonous peat mire models of gentle/steep slope in fault basins(a case study of the Huangxian Basin)

模式是：原位泥炭沼泽—植物遗骸/泥炭物质被弱的水动力搬移至覆水区域—发生泥炭化作用/大量泥炭物质聚集/积—异位泥炭沼泽。原位沼泽为异位泥炭沼泽的物质供应源（植物遗骸和初期形成的泥炭物质），其搬运方式为大面积水循环漂流式，即没有明显的大型河道发育，属于内源搬运/聚集。因此搬运过程中裹挟的无机物质很少，因此最终所形成的煤的灰分较低。异位泥炭沼泽可以在盆地背景、构造条件、水动力条件、陆源物源条件等的协同作用下，连续接受大量植物遗体或泥炭物质，并发生持续性的泥炭化作用。

“原位泥炭沼泽”与“异位泥炭沼泽”核心区别是泥炭沼泽的环境属性(表 2)，而不仅仅是物质沉积作用是发生于原地还是异地。“原地煤”与“异地煤”指的是泥炭物质聚积及最终形成的产物的属性，而不是指沉积环境。简言之，“异地煤”指的是泥炭沼泽形成的泥炭物质是由于外力作用下（牵引流或重力流）发生运移，在非泥炭沼泽环境中沉积下来并最终成煤。岩石学属性更贴切。异地煤形成的环境，不是泥炭沼泽。

2 原位与异位泥炭沼泽古地理特征

前人进行了大量有关成煤盆地及成煤古地理、聚煤规律和赋煤特征（杨起和韩德馨，1979；韩德馨和杨起，1980；李思田等，1993；李增学等，1998；曹代勇等，2018）、煤系岩石学及地球化学（Sun *et al.*，2002；Sun，2003）、华北成煤盆地煤

层中野火事件的发现及古气候分析（Sun *et al.*，2002；Xu *et al.*，2020）等研究，取得了丰富成果。在地质历史中，可以依据植物演化的重要阶段与成煤期所具有的特殊古地理，对泥炭沼泽进行深入研究和再认识（Dai *et al.*，2020）。泥炭沼泽在一个盆地中具有特殊位置，是一种特殊的沉积环境，泥炭物质聚集/积形成的沉积体，是一种特殊的沉积相。研究表明，华北煤层中富集锂元素与泥炭沼泽发育的背景密不可分（孙蓓蕾等，2024）。追根溯源，泥炭沼泽属性不同，可能导致煤中物质组成具有很大的差异性。

2.1 华北陆表海盆地原位泥炭沼泽古地理特征：以最大海泛期成煤为例

华北晚石炭世至早二叠世陆表海成煤盆地是原位泥炭沼泽成煤的典型代表。

在华北晚古生代陆表海盆地充填沉积序列中，有 2 种较为典型的沉积组合，也代表了 2 种泥炭沼泽演化模式（李增学等，2010c）。一是垂向沉积结构存在间断面，沉积了不连续沉积组合，但在时间序列上是连续的，其间的土壤层沉积代表了一种暴露剥蚀或沉积间断；二是在潮坪环境发生沼泽化，逐渐泥炭沼泽化是一个连续过程。在煤层与海侵层的组合中，煤层底部岩层为古土壤层，植物根系化石（遗迹）发育(图 3)，并可以进行大范围同期同相追踪对比。

陆表海盆地泥炭沼泽破坏是由于突发性的、大规模的海侵所导致，海水快速淹没了已经普遍发育

表 2 原位泥炭沼泽与异位泥炭沼泽关键属性及煤层差异性特点

Table 2 Key attributes of autochthonous and allochthonous peat mires and differential characteristics of coal seams

泥炭沼泽类型	关键属性	关键特点
原位泥炭沼泽	理想状态是指泥炭沼泽发育与演化的背景条件下,植物繁盛持续时间较长,植物遗骸堆积,经泥炭化作用形成泥炭物质。植物繁盛地、遗骸堆积区与泥炭物质堆积区是一致的	薄煤层一般为简单结构,若为厚煤层,则结构复杂,含多层夹石层;煤分层厚度大于夹石层厚度; 夹石层厚度小于 0.5 m; 煤的灰分含量低,一般小于 10%; 夹石层中可见植物根化石或遗迹; 煤层底板一般为根土岩(古土壤层); 一般为薄煤层,但也可能形成厚煤层,但易出现分叉、尖灭现象
异位泥炭沼泽	植物死亡后的遗骸转化为泥炭物质的作用过程,是植物遗骸不断被搬运至盆地的一种特殊地理位置与水域环境下,发生泥炭化作用,最终形成泥炭聚积层。植物繁盛地、遗骸堆积区与泥炭物质堆积区是不一致的。即泥炭化作用发生过程与植被生长的背景是无关的	所形成的煤层为厚煤层,或超厚煤层,其煤层结构复杂,含多层夹石层;煤分层厚度大于夹石层厚度; 夹石层厚度小于 0.5 m; 煤分层与夹石层之间界面清楚、平整; 煤的灰分含量低,一般小于 10%,但略高于原位煤; 夹石层中未见植物根化石(非古土壤层); 煤层顶、底岩层一般为较深水沉积,为非土壤层; 多形成厚煤层,且分布范围大、稳定

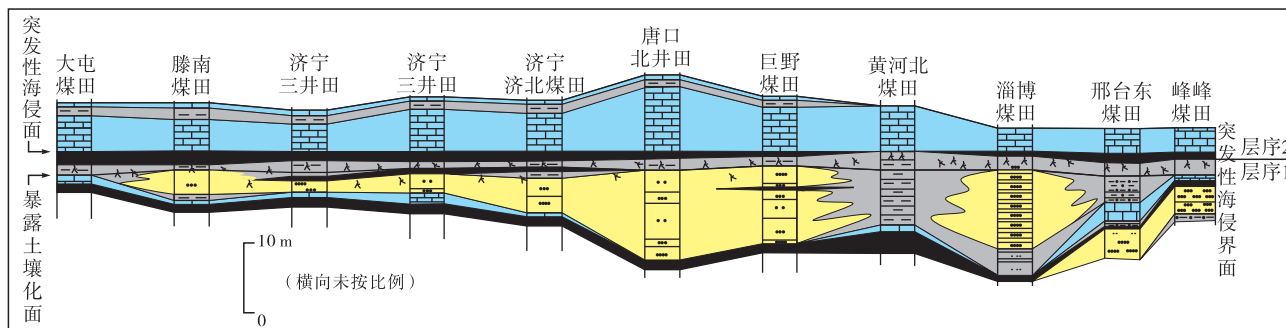


图 3 山东及河北地区大范围石灰岩与煤层组合典型剖面 (据李增学等, 2001; 有修改)

Fig. 3 Typical section of large-scale limestone and coal seam combinations in Shandong and Hebei regions (modified from Li *et al.*, 2001)

的泥炭沼泽, 破坏了泥炭沼泽环境, 终止了泥炭沼泽的发育。从形式上看, 海侵似乎并没有把原有的沼泽破坏掉, 实际上破坏了泥炭沼泽的地理景观。

2.1.1 晚石炭世

晚石炭世华北板块主要为陆表海沉积环境, 为海陆交互相沉积, 仅在北部阴山古隆起附近发育河流及三角洲沉积。此时华北处于赤道地区, 气候温暖湿润, 广大地区处于一个广海的环境, 海水进退频繁。海水最初由较低的部位侵入到华北腹地。盆地中至东南缘区由于地形较低, 成为水体较深的一个区域 (李增学和魏久传, 1998; 李增学等, 2003)。由于西伯利亚板块与华北板块挤压, 致使华北北部隆升, 形成重要的物源区, 主要是由富含燧石的碳酸盐岩、石英砂岩组成。晚石炭世海水自东北方向侵入, 且海水进退频繁, 形成了典型的陆表海沉积环境, 沉积相主要为台地相、潮坪相和潟湖相等 (图 4)。

2.1.2 早二叠世

早二叠世华北陆表海盆地中部地势较低, 整体为一个向东开口的大型箕状拗陷盆地。海水主要是从东南侵入盆地, 早期海侵范围较广, 除阴山古隆起南缘狭窄地段外, 海水漫及全区, 呈现滨海—浅海环境, 西部古水深较深的贺兰坳拉槽地区, 成为主要的海相沉积地区 (李增学等, 1998; 李增学等, 2003)。

早二叠世, 华北盆地沉积相带在空间展布具有“南北分带、东西展布”大格局特色。且由南而北, 沉积相由陆相、海陆过渡相向海相过渡, 北部地区主要以冲积扇、河流、三角洲沉积体系为主, 南部地区为潮坪、障壁—潟湖沉积体系, 并与台地

共生 (图 5)。早二叠世为一重要成煤期。该时期海侵沉积与煤层组合更为普遍, 是海侵事件成煤的重要频发时期。

华北大型陆表海盆地海平面变化是盆地充填与泥炭沼泽发育、演化、泥炭物质形成与聚积的主要控制因素, 也是泥炭沼泽破坏的影响因素。在潮坪沉积体系和障壁—潟湖沉积体系基础上发育的潮坪泥炭沼泽, 广泛性分布, 可称为“毯式分布模式”, 是具鲜明特色的原位泥炭沼泽成煤。泥炭沼泽受海平面变化的控制, 其发育、发展以及破坏和重建都与海平面变化密切相关。

2.1.3 海侵事件是原位泥炭沼泽发育的典型动力机制

由于晚古生代整个华北盆地极其平缓的地形, 海侵与海退导致大范围发生水域与陆地的交替。海进初期, 导致大范围土壤湿润, 植物开始苗生, 植物群落更替与死亡的遗体堆积成为泥炭的最初物质来源, 因受外界影响较小, 除非有大规模的海水侵入, 植物生长可持续数万年。

陆表海盆地突发性的海侵, 甚至呈倒灌式的海流, 又使得海洋的湿润气候大规模向陆地迁移。在晚古生代早二叠世, 海侵与海退呈现多旋回、多级次特点, 即长周期旋回中叠加了中、短周期旋回, 导致含煤沉积地层的旋回结构十分清楚, 这种旋回是复式结构型的。海侵事件的频发, 使得泥炭沼泽在受到抑制的同时, 也使得泥炭物质得以保存, 形成海侵层与煤层直接接触的特殊组合, 成为大型陆表海盆地成煤的一大特色。现代泥炭沼泽研究表明, 泥炭物质形成过程中释放的 CO_2 通量对温度的波动非常敏感, 随着温度升高, CO_2 释放通量均

Fig. 5 Lithofacies palaeogeographic map of the maximum marine transgression phase during the Permian in North China

有逐渐升高的趋势,从而影响到两极冰川的融化、全球海平面变化与全球的气候 (Page *et al.*, 2002; Cristea *et al.*, 2014; Castro *et al.*, 2015), 对人类社会生活发展有着较大的影响。

2.2 黄县古近纪断陷盆地异位泥炭沼泽古地理特征

黄县盆地为陆相湖泊断陷盆地,有 2 个重要聚煤期。早期聚煤作用发生于李家崖组沉积早期,在盆地经历初期强烈裂陷后,基底缓慢下沉并趋于稳定,盆地水域开始扩张时期形成泥炭沼泽而成煤。晚期聚煤作用发生于李家崖组沉积晚期,其特征与早期基本相同。可以看出,泥炭沼泽发育及聚煤作用受控于湖盆水域体制的变化,而盆地的低水位、湖扩张和高水位体系域的发育又受控于盆缘断裂构造活动。因此,盆缘构造活动是泥炭沼泽形成与泥炭物质聚积的主要控制因素。黄县盆地成煤期的构造作用不仅控制沉积相带以及含煤地层的分布,同时也影响煤层的发育与厚度。

2.2.1 典型煤与油页岩组合中的异位泥炭沼泽成因组合

黄县盆地煤与油页岩共生组合是一大特色。煤与油页岩共生组合主要存在 6 种类型(图 6): A—煤层-油页岩组合 (C-OS); B—油页岩-煤层组合 (OS-C); C—油页岩-煤层-油页岩组合 (OS-C-OS); D—煤层-油页岩-煤层组合 (C-OS-C); E—油页岩-其他沉积-煤层组合 (OS-M/S-C); F—煤层、油页岩横向相变组合 (C=OS, 如华北

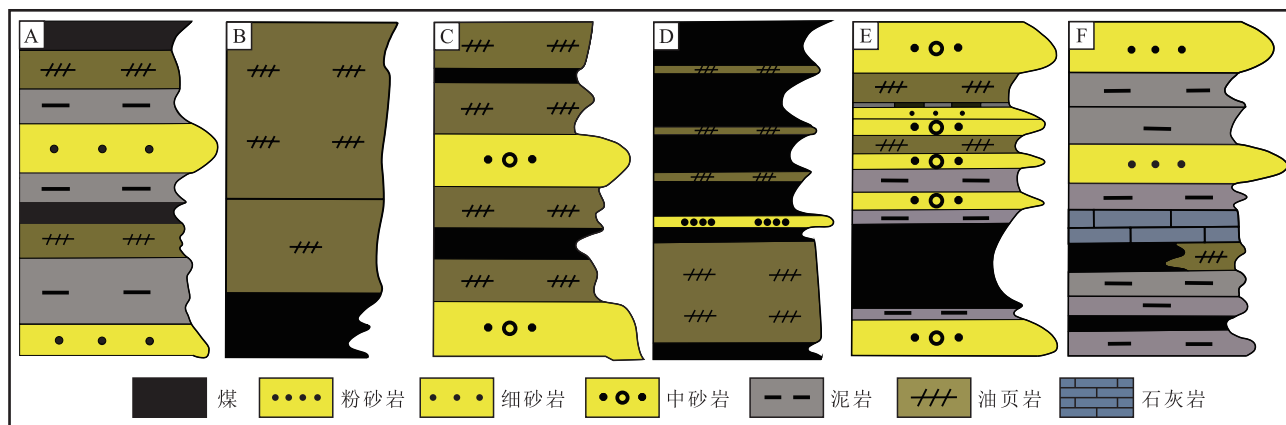
石炭—二叠纪煤系,多出现在大型拗陷盆地中)。其中:煤层/油页岩组合 (C-OS),油页岩/煤层组合 (OS-C),油页岩/煤层/油页岩组合 (OS-C-OS),煤层/油页岩/煤层组合 (C-OS-C),应属于异位泥炭沼泽形成的。其关键判断依据是:煤与油页岩的形成环境具有很大的差异性,油页岩较泥炭物质形成的水体环境深,且具有较强的还原性;油页岩作为煤层的直接底板,或者煤与油页岩呈互层状,且油页岩中没有植物的根部化石(含遗迹)。

黄县盆地的发育与演化主要受到盆缘断层的控制。黄县大断层形成时期较早,北林院—洼沟断层则形成时期较晚(陈海泓和孙枢, 1988),黄县大断层被北林院—洼沟断层切割。黄县大断层和北林院—洼沟断层形成的隆起区为黄县盆地的物源区,且黄县大断层所处的隆起区物源更为充足。盆地主干断裂的差异性沉降决定盆地沉积的分布,为成煤提供必要的空间条件。

2.2.2 黄县盆地成煤作用及古地理特点

层序地层形成机制中的可容空间分析,对于泥炭聚积机制,即成煤作用,是比较核心的科学问题。当可容空间增加速率过快或过慢时,或者速率适宜但持续时间较短时,均不利于厚煤层的发育(邵龙义等, 2009; Wang *et al.*, 2020b)。

黄县盆地的聚煤作用是在基准面缓慢上升过程中发生的。当研究区发育辫状河三角洲平原沉积时,煤层在最大湖泛面时期发育厚度最大。该部位泥炭供应较充分,可容空间不足,在最大湖泛面时期基准面最高,提供最大的可容空间来堆积泥炭,



A—煤层/油页岩组合; B—油页岩/煤层组合; C—油页岩/煤层/油页岩组合; D—煤层/油页岩/煤层组合;

E—油页岩/其他沉积/煤层组合; F—煤层/油页岩横向相变组合

图 6 煤与油页岩 6 种组合类型

Fig. 6 Six types of combinations of coal and oil shale

此时泥炭堆积速率与可容空间产生速率之间最接近均衡状态，最有利于形成厚煤层。当研究区发育辫状河三角洲前缘沉积时，水体深度大于辫状河三角洲平原，在湖平面达到最大湖泛面之前，泥炭堆积速率与可容空间产生速率之间达到均衡状态，因而发育较厚的煤层。这实际上是异位泥炭沼泽发育时期。以往认为，当水平面继续升高到最大湖泛面时，水体较深，可容空间较大，造成泥炭供应不足（即欠补偿），不利于形成厚煤层。但是，在异位泥炭沼泽发育期，水域扩张期伴随着基准面上升，由于稳定的植物遗骸及已经形成的泥炭物质源源不断运移至湖盆较深水区，发生聚集/积，一般利于发育厚度较大的煤层（图 7），且表现为煤-油页岩-煤等较为复杂的组合，但煤中灰分并不高。

黄县陆相湖泊断陷盆地盆缘主断裂构造活动对盆地充填与泥炭沼泽发育、演化起主导作用。该类泥炭沼泽为陡坡不稳定型原位泥炭沼泽。沉积体系是泥炭物质形成与聚积的主要影响因素，也是泥炭沼泽破坏的关键影响因素（李增学等，2022）。在冲积扇、扇三角洲、辫状河三角洲沉积体系基础上发育的泥炭沼泽，具有相对的稳定性。由于海水侵入影响了盆地的覆水深度和植物类型，因此，形成了煤与油页岩组合的特殊沉积组合，即异位泥炭沼泽成煤。

2.3 琼东南盆地原位泥炭沼泽与异地煤古地理特征

2.3.1 崖城组发育原地煤和异地煤

通过钻井岩心、测井数据分析，以及煤岩组分和关键煤质指标（如灰分）含量，对琼东南盆地原地煤与异地煤进行了识别（图 8）。原地煤有如下识别标志：泥炭沼泽中，植物残体在原地堆积，形成单独层位，并最终成煤。煤层底板为泥岩，可见植物根系（根土岩），煤层与底板为渐变沉积；煤层的结构构造完整，光泽较强；煤的灰分产率相对较低，平均 22%。此类原地煤为原位泥炭沼泽所形成。

异地煤识别标志：植物残体或泥炭被冲积体系（扇三角洲、辫状河三角洲）搬运至植物生长地之外的河口地区，再次堆积形成单独层位，并最终成煤。煤层底板为砂岩等，底板中无植物根系（根土岩），煤层与底板突变沉积；煤层的结构构造较破碎，光泽较暗淡；煤的灰分产率相对较高，平均 52%。

2.3.2 古地理特征

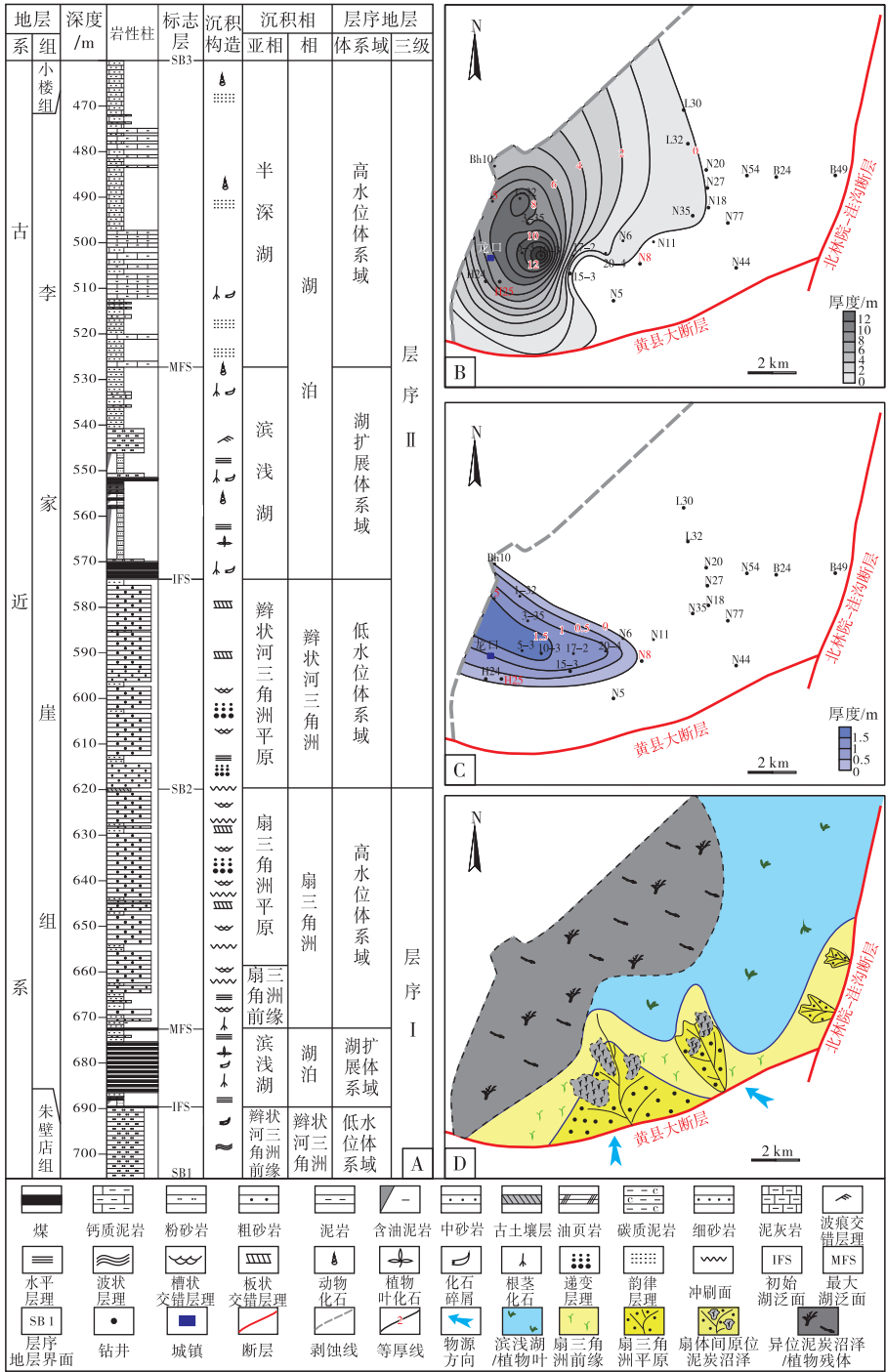
崖城期，海水从东部的长昌凹陷和西部的陵水凹陷 2 个方向向盆地中部入侵，由陆相逐渐变为海陆交互相沉积。海水的入侵导致古隆起相继没入水下，近隆起地区广泛发育海岸平原、潮坪等沉积，这些相区利于陆生植物繁盛，因此煤系发育。不同地区构造活动的差异性，导致了沉积相带发育的差异性，进而使得崖城组不同地区的聚煤作用具有较大的差异性。

崖城组沉积期，盆地北部坳陷带的主要活动断裂导致崖北和松西凹陷北缘发育条带状展布的扇三角洲群；在松东凹陷南侧盆缘由于断裂活动性弱，扇三角洲基本不发育；崖北凹陷断裂基本不活动，在中北部水体较深部位发育潟湖沉积；崖北凹陷南部，地形较平缓且无河流发育，利于潮坪相发育；松东凹陷北部和崖南凹陷西部，由于河流的输入而发育规模相对较大的辫状河三角洲（图 9）。泥炭沼泽主要发育于辫状河三角洲平原低洼区，范围比较小，多个泥炭沼泽在整个琼东南盆地呈孤立状分布，在沉积体系废弃期则可能连成一体。总体上，该盆地泥炭沼泽时常被破坏，泥炭物质被冲积体系水体搬运至河口区卸载堆积，形成冲积卸载型异地煤（李增学等，2022）。

2.4 珠江口盆地北部新生代坳陷带异位泥炭沼泽成煤古地理特点（以珠 I 坳陷恩平组为例）

通过连井剖面对比分析（图 10），该区发育有辫状河三角洲上、下平原沉积和前缘沉积以及滨浅湖沉积，北侧持续发育辫状河三角洲前缘沉积，中部发育滨浅湖沉积，向南发育辫状河三角洲前缘沉积，南部存在较大的地层缺失，发育辫状河三角洲上平原沉积。中部滨浅湖沉积环境中有多层煤层发育，这是异位泥炭沼泽成煤的突出特色。

辫状河三角洲为主的成煤模式（图 11 左侧）：本区发育了大量的辫状河三角洲，这些辫状河三角洲大都分布在构造转换带的缓坡带，水体相对较浅，分布面积广，利于大面积成煤。面积较大的辫状河三角平原可以进一步细分为上平原和下平原，以最大高潮线为界。其中最有利于煤层发育的部位是辫状河三角洲下平原沼泽及其与前缘分流间湾沼泽的过渡部位。随着水平面的升降，三角洲平原不



A—层序 I 岩性及沉积相特征；B—扩张体系域煤层厚度等值线图；C—油页岩厚度等值线图；D—岩相古地理图

图 7 山东黄县盆地古近系李家崖组层序 I 煤层与油页岩分布及古地理简图（据孔凡飞等，2019；有修改）

Fig. 7 Distribution and palaeogeographic map of sequence I coal seams and oil shales in the Paleogene Lijiaya Formation of the Huangxian Basin, Shandong Province (modified from Kong *et al.*, 2019)

断迁移，泥炭沼泽也随之迁移，导致成煤环境和煤层分布的复杂性。

在辫状河三角洲上平原沼泽，辫状河河道较为活跃、水动力强、频繁改道等，导致成煤环境稳定性

差，煤层发育层数偏少、厚度偏小(0~0.79 m/层)。

在辫状河三角洲下平原沼泽—前缘分流间湾沼泽，辫状河道变窄、水动力变弱、沉积环境相对稳定，煤层层数较多、厚度稍大(0~0.87 m/层)，

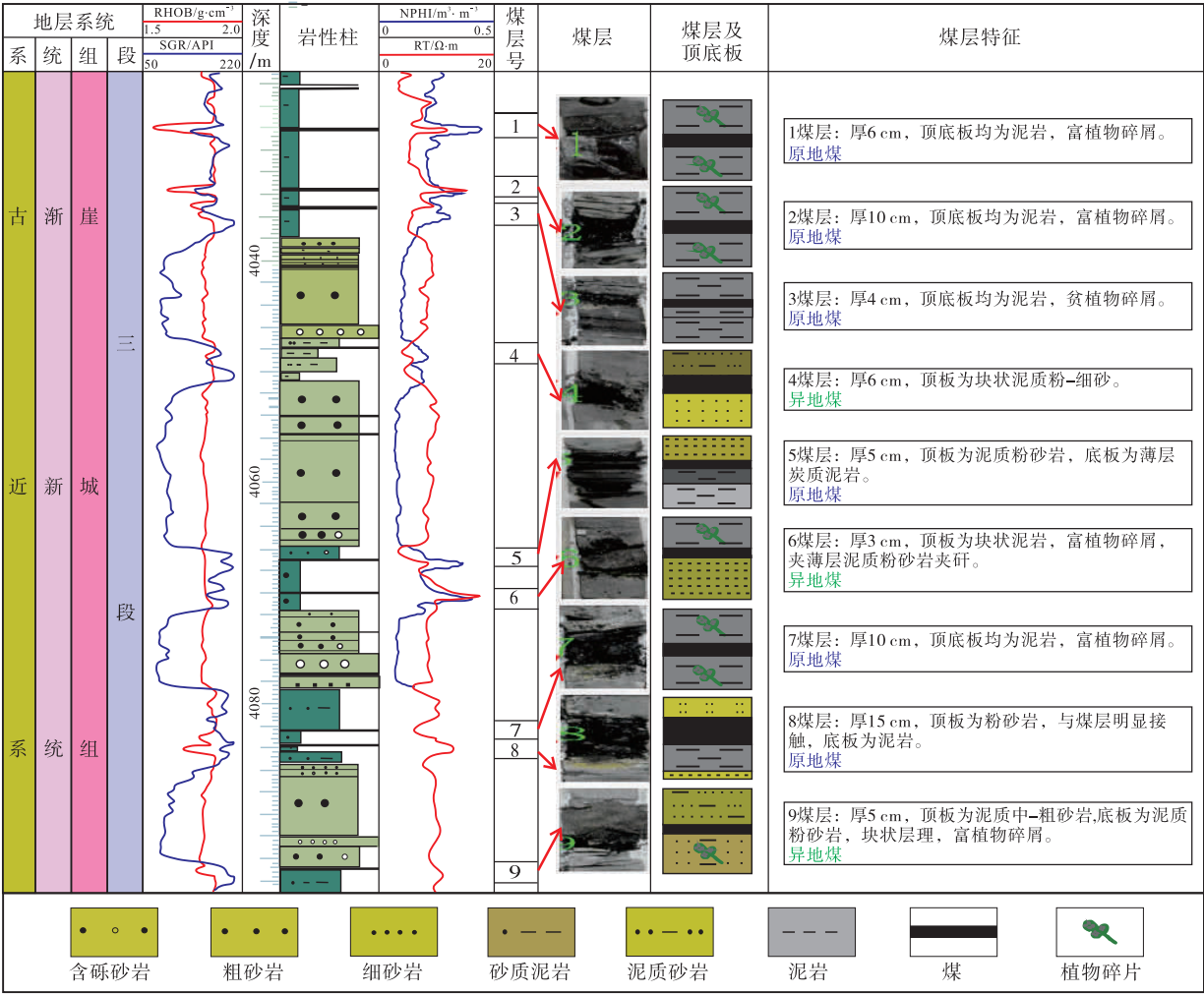


图 8 琼东南盆地 YC13-1-A2 井原地煤、异地煤识别柱状图 (据李增学等, 2022)
Fig. 8 Histogram of autochthonous coal and allochthonous coal identification of Well YC13-1-A2
in Qiongdongnan Basin (after Li *et al.*, 2022)

特别是在较为稳定的辫状河三角洲分流间湾和三角洲间湾环境。

湖沼—辫状河三角洲成煤模式(图 11 右侧): 本区的凹陷有的地区水体很浅, 受湖平面升降的影响, 间歇性地发育湖沼环境而成煤。煤主要发育在湖扩张阶段的湖沼环境, 频繁的水退—水进过程控制泥炭沼泽(煤)的发育与消亡, 或者由于湖水的扩张, 湖沼逐渐演化为浅湖, 成煤环境不断扩展到辫状河三角洲平原。湖沼泥炭沼泽的煤层, 层数中等, 厚度中等(0~0.8 m/层)。

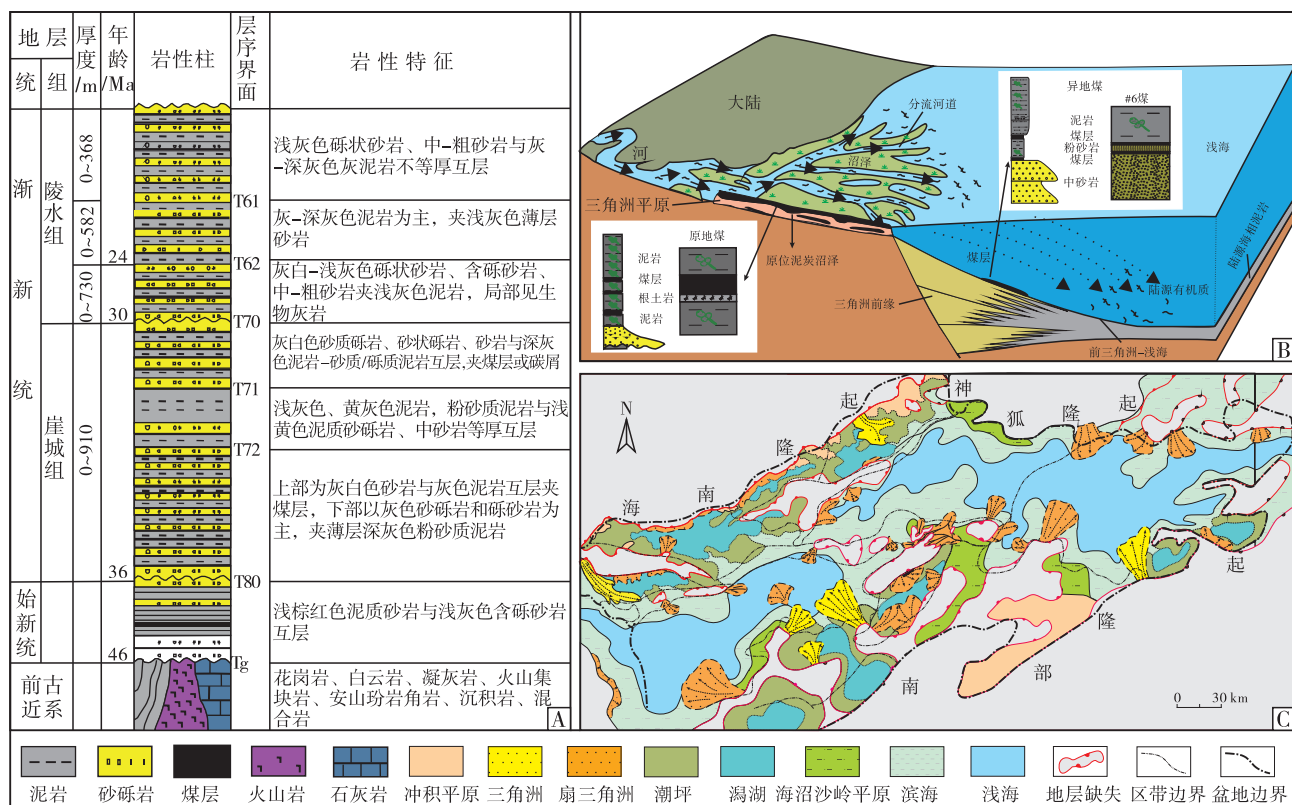
在滨浅湖湖沼水位较低时, 湖沼较为发育, 利于发育泥炭沼泽而成煤。随着湖水扩张, 湖沼变为浅湖, 原位泥炭沼泽发育逐渐结束。该过程多期重复, 发育多层薄煤层(图 10 和图 11 中部)。

当湖盆周围发育辫状河三角洲时, 随着湖水扩张, 湖沼逐渐演化为浅湖, 而有利的原位泥炭沼泽成煤环境则逐渐从湖沼向辫状河三角洲环境迁移。滨浅湖异位泥炭沼泽发育, 原位泥炭沼泽区的植物遗骸和已经基本形成的泥炭物质源源不断地运移至滨浅湖, 甚至深湖区, 发生泥炭沼泽化。即滨浅湖逐渐演化为异位泥炭沼泽, 且形成了较为稳定分布的、厚度较大的煤层(图 11 中部)。

3 原位泥炭沼泽和异位泥炭沼泽所形成煤层的关键差异性

3.1 大型陆表海成煤盆地与大型边缘海盆地成煤古地理特征比较

华北陆表海盆地, 其范围与华北、东北南部地



A—崖城组岩性特征；B—沉积模式图；C—古地理恢复

图 9 琼东南盆地崖城组沉积期古地理格局

Fig. 9 Palaeogeographic pattern of the Yacheng Formation sedimentary period in Qiongdongnan Basin

层区的华北地台大体相当。华北石炭纪—二叠纪形成了面积达 $80 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的世界罕见的巨型成煤区，因而吸引了大批中外地学工作者对本区开展地层、古生物和矿物的研究（李增学等，1998）。

南海构造演化史表现为构造旋回性的特点（张功成等，2015；Zhang *et al.*，2017），可分为古南海形成与发育、古南海消减和新南海发展、南海快速沉降与萎缩等 3 个阶段。始新世以后发生的欧亚板块与印度板块碰撞，导致两板块之间的深层软流圈在南北向应力的作用下向东南流动，而在东南方向受到了太平洋板块的阻挡，形成地幔柱上升流，导致了新南海的形成。自早渐新世至中新世，是古南海消减和新南海形成、发展阶段，是南海边缘发育含煤沉积的重要时期。

与稳定大陆边缘海盆地不同，中国南海边缘海盆地演化及成煤作用与地质历史中的各类成煤盆地演化及成煤作用进行比较，除了上述的差异性外，在成煤盆地总体演化规律上，具有特殊性。中国南海边缘海盆地的构造活动性，导致陆缘盆地多元

化、复杂化。中国南海边缘海基底并不是完整的统一体，而是断裂构造很发育、活动性很强的。这类具有构造活动性的边缘海盆地的成煤作用，其独特性在于具有很强的分散性、间歇性、短暂性和复杂性。

通过对上述对 2 类大型成煤盆地及海平面变化机制有关的对比分析可以看出，陆表海盆地与南海边缘海盆地成煤特点存在以下共性：（1）在重要成煤时期，发生规模较大的成煤作用，且都是以主要发育薄煤层及极薄煤层甚至煤线为特色，煤层薄，但层数多。已有研究者进行了专门论述（Li *et al.*，2009，2011；米立军等，2010）。（2）海平面变化是控制盆地充填与成煤的主要因素，海平面升降及进退，深刻地影响着盆地充填和泥炭沼泽形成及演化。（3）在盆地的沉积与演化过程中，陆海相互作用为主要特色，即盆地演化和沉积都既与陆密切相关，又与海密切相关。（4）成煤沉积体系具有相似性，成煤沉积体系大都为三角洲、障壁—潟湖、潮坪以及扇—三角洲等。（5）成煤作用的总

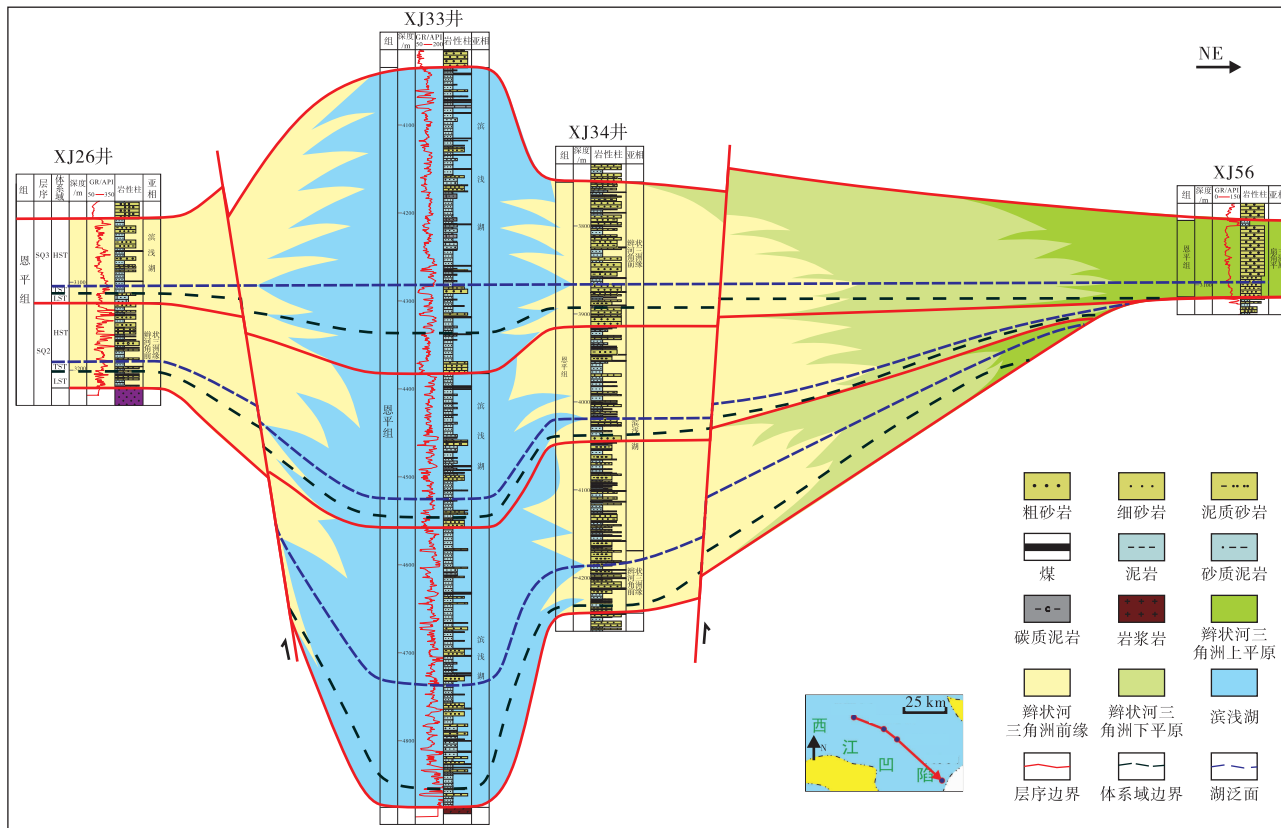


图 10 西江凹陷中部恩平组沉积相划分与对比剖面图

Fig. 10 Sedimentary facies division and comparative profile of the Enping Formation in central part of Xijiang sag

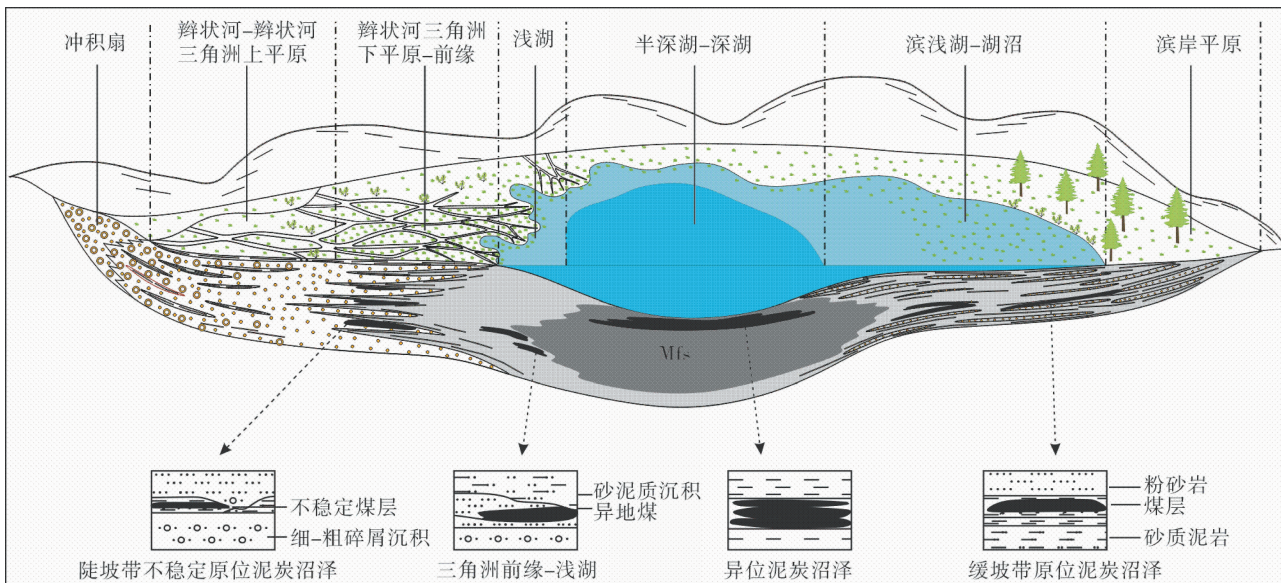


图 11 珠 I 坳陷恩平组典型成煤模式（由坳陷不同成煤区拟合）

Fig. 11 Typical coal formation model of the Enping Formation in Zhu I Depression

(Composed of different coal-forming areas in the depression)

体机制具有相似性，即易于成煤作用发生的古地理都与三角洲、潮坪—潟湖等沉积体系在形成、演化

过程中泥炭沼泽化有密切关系。

陆表海盆地与边缘海盆地成煤存在以下差异

性：(1) 时代不同：华北大型陆表海成煤盆地形成于晚古生代，而南海大陆边缘海盆地形成发育于新生代，成煤作用背景发生了巨大变化。(2) 海平面变化的作用机制具有很大的差异性：华北陆表海盆地为板内克拉通盆地，海平面变化具有事件性，海退时期整体基本为陆，海侵时期表现为浅海，海平面变化是控制盆地充填沉积和泥炭沼泽形成演化的最关键因素，泥炭沼泽具有很典型的原位性。因此形成了典型海相沉积与煤层的互层组合，旋回十分清楚。而南海新生代边缘海盆地，海平面变化与构造活动共同作用、控制盆地的充填和泥炭沼泽形成与破坏过程，在盆地成煤作用的关键期，构造作用显得更重要。泥炭沼泽具有原位性特点，在泥炭沼泽破坏时，泥炭物质被搬运至河口及三角洲前缘区，形成异地煤。(3) 盆地结构不同，包括盆地基底、深部过程都具有很大的差异，陆—海作用强度和机制不同。华北陆表海盆地为板内克拉通盆地，属于大型拗陷盆地。中国南海边缘海盆地，基底为由陆壳向洋壳过渡带，基底结构比较复杂。南海大陆边缘发育多级构造，发育多个具有一定独立性的断陷盆地。(4) 虽然 2 类盆地都发育薄煤层及极薄煤层，但是稳定性和可对比性不同。陆表海盆地形成的煤层虽然比较薄，但具有很强的稳定性，可以进行大范围追踪对比。边缘海盆地形成的煤层不但很薄，而且具有不稳定性 and 不可对比性 (Li *et al.*, 2009, 2011; 米立军等, 2010)。(5) 成煤物质的聚积或聚集特征不同，即陆表海盆地可以清楚地找到聚集/积带、聚集/积区和富集中心，向海或向陆的迁移性规律显著。而中国南海边缘海盆地，在整体边缘海盆地内部发育多个次级盆地，且多为断陷构造盆地，如琼东南盆地就是其中典型盆地之一。中国南海边缘海盆地成煤作用的迁移性由于盆地演化与充填作用受控因素复杂而呈现复杂性，成煤区带的分布呈现呈分散性的串珠状，富集区和中心呈现分散状。

3.2 陆相成煤盆地含煤沉积特色与比较

黄县盆地古近纪湖泊成煤盆地与珠江口盆地北部拗陷成煤盆地，尽管盆地属性有较大差异，分属陆相湖泊断陷盆地、陆相湖泊拗陷盆地。但珠江口盆地兼有断陷盆地特色，将珠江口盆地界定为拗陷—断陷盆地更为符合盆地特色。两盆地的含煤沉积充填均主要发育冲积扇、扇三角洲、辫状河三角洲

和湖泊沉积，煤层主要发育在滨浅湖沼泽、辫状河三角平原沼泽和前缘分流间湾沼泽。

珠江口盆地之珠 I 拗陷恩平组主要发育辫状河三角洲、湖泊、扇三角洲等。辫状河三角洲和滨浅湖频繁交互，成煤环境稳定性差。辫状河三角洲体系中的上、下平原沼泽、辫状河三角洲间湾、滨浅湖沼泽是发育煤层的主要场所。

2 个陆相湖泊成煤盆地所形成的泥炭沼泽及泥炭物质聚积主要在湖扩张体系域的辫状河三角洲、滨浅湖环境。黄县陆相断陷湖泊成煤盆地厚度较大的煤层主要发育在扩张体系域早期的辫状河三角洲前部湖沼环境，而珠江口盆地北部湖泊拗陷成煤盆地所形成的煤层，层数虽然较多，但均为薄煤层、煤层顶底板界面多不清晰。

4 结论、讨论与展望

4.1 主要结论

1) 基于作者长期煤地质学基础理论与应用研究，尤其是近期对 4 个典型成煤盆地泥炭沼泽形成与演化分析，本研究提出了“原位与异位泥炭沼泽”概念，指出了“原位泥炭沼泽”与“异位泥炭沼泽”所形成的煤层的识别标志。总结了“原位泥炭沼泽”和“异位泥炭沼泽”在泥炭物质聚集/积、所形成煤层结构、煤分层与夹石层之间的界面特点、古土壤层等的差异性，重点阐明了“异位泥炭沼泽”的属性特点。异位泥炭沼泽可以在盆地背景、构造条件、水动力条件、陆源物源条件等的协同作用下，连续接受大量植物遗骸或泥炭物质，并发生持续性的泥炭化作用。

2) 原位和异位泥炭沼泽研究的古地理意义和价值表现在以下几个方面：(1) 盆地属性不同，原位与异位泥炭沼泽的古地理特征不同，2 类泥炭沼泽发育、演化是盆地成煤环境演化中的重要事件。(2) 晚古生代华北陆表海盆地原位泥炭沼泽发育及泥炭物质形成及聚集/积特点及体现的古地理意义在于，海侵事件的频发，使得泥炭沼泽在受到抑制的同时，也使得泥炭物质得以保存，形成海侵层与煤层直接接触的特殊组合，成为大型陆表海盆地成煤的一大特色。(3) 黄县陆相湖泊断陷盆地和珠江口盆地北部拗陷盆地泥炭沼泽形成与演化分析表明，构造活动对盆地充填与泥炭沼泽发育、演化

起主导作用。陡坡发育不稳定型原位泥炭沼泽、缓坡发育稳定的原位泥炭沼泽。在盆地演化关键期,盆地水域区形成了稳定的异位泥炭沼泽,形成了较厚的煤层。黄县盆地由于海水侵入影响了盆地的覆水深度和植物繁殖类型,因此,形成了煤与油页岩组合的特殊沉积组合,为异位泥炭沼泽成煤。

4.2 讨论

1) 关于“原地煤”与“异地煤”概念。这是煤地质学比较古老的 2 个概念。从沉积学与沉积岩石学有关岩石定名规范出发,原地煤与异地煤应属于岩石学概念,即可以认为原地煤、异地煤是一类岩石。但在煤之前冠以“原地、异地”这样的前置词,就带有了成因含义,这就使得沉积学与沉积岩石学研究者很难理解和接受。如沉积岩是不能划分为“原地岩和异地岩”的。

原地煤是指植物遗体经过一系列物理的、化学的及生物物理、生物化学作用形成泥炭物质后,即泥炭化过程基本完成后,或者泥炭化作用完成后已经进入到煤化作用阶段并形成了的煤(杨起和韩德馨,1980)。植物生长的原地、泥炭化作用发生的原地、最终形成煤的原地,三地一致即为原地煤。异地煤是泥炭物质甚至已经形成的煤,被搬运至盆地的其他位置(沼泽以外的较远区域)发生聚集/积,在上覆沉积物或水体压力作用下,发生压实和变质作用而形成的煤。这种情况下基本上不会再发生泥炭化作用(可能有成岩泥炭化作用发生)。植物生长地、泥炭物质聚集/积地、煤的形成地,三地不一致。两者的关键时间节点是泥炭化作用是否已基本完成,而不是植物遗体仍处于原始状态。如果是植物遗体被搬运,且发生特异埋藏,已经失去了发生泥炭化作用的基本条件,则可能形成硅化木。因此,不能与原位泥炭沼泽与异位泥炭沼泽这 2 个概念相混淆。

作者建议逐步舍弃“原地煤”这个概念。因为原地煤概念比较笼统和简单化,容易被泛化使用,导致其失去了古地理学价值。鉴于泥炭沼泽在成煤古地理特征上已经有了原位和异位属性之分,原地煤最初赋予的涵义已经被取代。

2) “微异地煤”,建议舍弃不用。植物遗骸和泥炭物质被搬运距离尺度不好界定,是被搬运到沼泽之外还是在沼泽内部搬运,无法识别清楚。因此此概念已经没有了环境和古地理意义。

3) “异地煤”实际上指的是对在植物生长和泥炭沼泽之外的区域所形成的煤的总称。研究表明,根据搬运动力学机制不同,可以形成不同的异地煤类型,如风暴异地煤(胡益成和苏华成,1992;胡益成和廖玉枝,1999)、盆地陡坡滑塌或滑坡型异地煤(王华等,1999,2000;吴冲龙,1994;吴冲龙等,2003,2006)、河口与三角洲前缘卸载型异地煤(李增学等,2022)等等。

随着研究的深入,异地煤的分类可以结合沉积学理论形成新的命名方式,如“风暴异地煤”实际就是“风暴煤”(可细分为“近源风暴煤”、“远源风暴煤”),这与风暴岩含义是相当的。重力流形成的异地煤,可以根据重力流属性界定是什么煤,如滑塌煤、坡积煤、浊积煤等等。将这类异地煤与其共生共存的上下部岩层进行沉积环境分析,有其古地理学的特殊作用和价值。

煤地质学有其独特的概念系统,更具有与相关学科交叉发展的空间。对上述问题讨论的目的,就是为了学科交叉、融合,以促进学科发展和进步。

4.3 展望

本研究提出了“原位与异位泥炭沼泽”概念,不是仅限于这个概念的阐述上,而是对煤地质学中关于泥炭沼泽概念的重新思考和厘定。其重要的价值在于所具有的普遍性和成煤盆地聚煤规律研究的实际应用。如成煤盆地聚煤规律研究中的核心科学问题实际上是原位和异位泥炭沼泽古地理景观的恢复。进而则是基于泥炭沼泽研究对于煤及共伴生矿产形成理论和应用的提升。

“异位泥炭沼泽”虽然是一个崭新的概念,但总体上并没有全面否定泥炭沼泽概念的重要基础作用和价值。尤其对于分析成煤作用机制及含煤地层多种矿产形成、富集规律具有重要的指导价值,从理论上解决含煤地层尤其是煤层中隐藏的若干沉积学的、煤系有益矿产形成的耦合关系等科学问题,是非常重要的。

因此,有以下几个方向需要深入探索:

1) 异位泥炭沼泽涉及到传统煤地质学基础、形成与演化的条件、高等植物长期繁盛的土壤支撑力以及土壤土力学等不同方面内容,对于更科学地探索泥炭物质聚积/集的持续性机制是非常重要的。

2) 关于大范围稳定分布的厚煤层、超厚煤层形成及其规律性的研究,汲取当代沉积学、地层

学、层序地层学等最新进展, 需要进一步进行开拓和创新。

3) 关于异位泥炭沼泽与煤中关键金属富集机制、关于古森林失火的事件性与煤岩组分差异性机制、关于深水区泥炭化作用持续性, 以及关于古气候带与成煤作用强度的研究等等, 都是煤地质学基础理论更进一步丰富和发展的重要方向和研究领域。

同时, 必须指出异位泥炭沼泽形成与演化的若干问题还需继续深入剖析和完善, 其在煤地质学基础概念体系和在沉积学、古地理学中的重要意义及价值, 以及对于推动含煤地层、成煤盆地整个成矿机制及共生矿产形成理论的升华, 还需要进行更多的研究工作。

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. 2018. 中国煤田构造格局与构造控煤作用. 北京: 科学出版社, 1-415. [Cao D Y, Ning S Z, Guo A J, Li H T, Chen L M, Liu K, Tan J Q. 2018. Tectonic Framework of Coalfields and Tectonic Control of Coal-Seams in China. Beijing: Science Press, 1-415]
- 陈海泓, 孙枢. 1988. 黄县盆地第三纪含煤岩系岩相与沉积环境. 岩石学报, 4(2): 50-58. [Chen H H, Sun S. 1988. Lithofacies and depositional environments of the tertiary coal-bearing series in Huangxian Basin, Shandong Province. Acta Petrologica Sinica, 4(2): 50-58]
- 成贤康, 孙蓓蕾, 刘超, 曾凡桂, 解锡超, 畅向东. 2021. 富锂煤层碎屑物源探讨: 以平朔矿区安家岭煤矿太原组煤层为例. 煤炭学报, 46(7): 2346-2359. [Cheng X K, Sun B L, Liu C, Zeng F G, Xie X C, Chang X D. 2021. Provenance of debris in lithium-rich coal seam: a case study of Taiyuan group coal seam in Anjialing Coal Mine, Pingshuo mining area. Journal of China Coal Society, 46(7): 2346-2359]
- 韩德馨, 杨起. 1980. 中国煤田地质学(下册). 北京: 煤炭工业出版社, 1-415. [Han D X, Yang Q. 1980. Coal Geology of China(Volume II). Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1-415]
- 胡益成, 苏华成. 1992. 河南晚石炭世含煤地层中的风暴异地煤. 煤田地质与勘探, 20(3): 1-5. [Hu Y C, Su H C. 1992. The storm allochthony coal of late Carboniferous coal-bearing formation in Henan Province. Coal Geology & Exploration, 20(3): 1-5]
- 胡益成, 廖玉枝. 1999. 华北盆地南部早二叠世早期聚煤作用的成因机制. 地学前缘, 6(S1): 111-115. [Hu Y C, Liao Y Z. 1999. Genetic mechanism of early Permian coal accumulation in the southern North China basin. Earth Science Frontiers, 6(S1): 111-115]
- 孔凡飞, 贾强, 李增学, 吕大炜, 刘海燕, 王东东, 韩乔羽. 2019. 山东黄县盆地古近系李家崖组含煤岩系沉积相特征及演化. 古地理学报, 21(3): 469-478. [Kong F F, Jia Q, Li Z X, Lü D W, Liu H Y, Wang D D, Han Q Y. 2019. Sedimentary facies characteristics and evolution of coal-bearing rock series of the Paleogene Lijiaya Formation in Huangxian Basin, Shandong Province. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 21(3): 469-478]
- 李思田, 程守田, 杨士恭, 黄其胜, 解习农, 焦养泉, 卢宗盛, 赵根榕. 1992. 鄂尔多斯盆地东北部层序地层及沉积体系分析—侏罗系富煤单元的形成、分布及预测基础. 北京: 地质出版社, 1-194. [Li S T, Cheng S T, Yang S G, Huang Q S, Xie X N, Jiao Y Q, Lu Z S, Zhao G R. 1992. Sequence Stratigraphic Research and Sedimentary System Analysis in Northeastern Ordos Basin—The Formation, Distribution and Predicting Basis of Jurassic Coal Rich Units. Beijing: Geological Publishing House, 1-194]
- 李思田, 李楨, 林畅松, 杨士恭, 解习农. 1993. 含煤盆地层序地层分析的几个基本问题. 煤田地质与勘探, 21(4): 1-9. [Li S T, Li Z, Lin C S, Yang S G, Xie X N. 1993. Some fundamental problems about sequence stratigraphic analysis of coal basin. Coal Geology & Exploration, 21(4): 1-9]
- 李增学. 1994. 内陆表海聚煤盆地的层序地层分析—华北内陆表海聚煤盆地的研究进展. 地球科学进展, 9(6): 65-70. [Li Z X. 1994. Sequence stratigraphical analysis of epicontinental coal accumulation basin—Research advances in epicontinental coal accumulation basin of North China. Advances in Earth Science, 9(6): 65-70]
- 李增学, 魏久传. 1998. 华北陆表海盆地南部层序地层分析. 北京: 地质出版社, 1-273. [Li Z X, Wei J C. 1998. Sequence Stratigraphic Analysis of the Southern Part of the Epicontinental Basin in Northern China. Beijing: Geological Publishing House, 1-273]
- 李增学, 魏久传, 王明镇, 李守春. 1996. 华北南部晚古生代陆表海盆地层序地层格架与海平面变化. 岩相古地理, 16(5): 1-11. [Li Z X, Wei J C, Wang M Z, Li S C. 1996. Sequence stratigraphic framework and sea-level changes in the late palaeozoic epicontinental basin in Northern China. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 16(5): 1-11]
- 李增学, 魏久传, 李守春, 韩美莲, 兰恒星. 1998. 黄县早第三纪断陷盆地充填特征及层序划分. 岩相古地理, 18(4): 1-8. [Li Z X, Wei J C, Li S C, Han M L, Lan H X. 1998. The basin-filling features and sequence division in the Paleogene Huangxian Fault Basin, Shandong. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 18(4): 1-8]
- 李增学, 魏久传, 兰恒星, 韩美莲. 1999. 黄县盆地盆缘断裂活动的阶段性及沉积充填样式. 煤田地质与勘探, 27(6): 4-8. [Li Z X, Wei J C, Lan H X, Han M L. 1999. The active stages of the boundary faulting and the deposition-filling pattern in Huangxian Faulted Basin. Coal Geology & Exploration, 27(6): 4-8]
- 李增学, 魏久传, 兰恒星, 韩美莲, 李守春. 2000. 黄县早第三纪断陷盆地高分辨率层序地层划分. 中国煤田地质, 12(1): 9-12. [Li Z X, Wei J C, Lan H X, Han M L, Li S C. 2000. The high-resolution sequence division in Paleogene Fault Basin of Huangxian. Coal Geology of China, 12(1): 9-12]
- 李增学, 魏久传, 韩美莲. 2001. 海侵事件成煤作用: 一种新的聚煤模式. 地球科学进展, 16(1): 120-124. [Li Z X, Wei J C, Han M L.

2001. Coal formation in transgressive events: a new pattern of coal accumulation. *Advance in Earth Sciences*, 16(1): 120–124]
- 李增学, 余继峰, 郭建斌, 韩美莲. 2003. 陆表海盆地海侵事件成煤作用机制分析. *沉积学报*, 21(2): 288–296, 306. [Li Z X, Yu J F, Guo J B, Han M L. 2003. Analysis on coal formation under transgression events and its mechanism in epicontinental sea basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(2): 288–296, 306]
- 李增学, 魏久传, 余继峰, 王明镇. 2009. 煤地质学. 北京: 地质出版社, 1–298. [Li Z X, Wei J C, Yu J F, Wang M Z. 2009. *Coal Geology*. Beijing: Geological Publishing House, 1–298]
- 李增学, 张功成, 王东东, 李莹, 刘海燕, 吕大伟. 2010a. 海域区古近系含煤地层基准面旋回识别与对比: 以琼东南盆地为例. *现代地质*, 24(6): 1178–1185. [Li Z X, Zhang G C, Wang D D, Li Y, Liu H Y, Lü D W. 2010a. Identification and correlation of base-level cycles of coal-bearing strata in Paleogene system of China Seas: taking the case of Qiongdongnan Basin as an example. *Geoscience*, 24(6): 1178–1185]
- 李增学, 何玉平, 刘海燕, 吕大伟. 2010b. 琼东南盆地崖城组煤的沉积学特征与聚煤模式. *石油学报*, 31(4): 542–547. [Li Z X, He Y P, Liu H Y, Lü D W. 2010b. Sedimentology characteristics and coal-forming models in Yacheng Formation of Qiongdongnan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 31(4): 542–547]
- 李增学, 魏久传, 余继峰, 韩美莲, 刘海燕, 吕大伟, 刘莹. 2010c. 海侵事件与海侵成煤机制研究. 北京: 地质出版社, 1–219. [Li Z X, Wei J C, Yu J F, Han M L, Liu H Y, Lü D W, Liu Y. 2010c. *Haiqinshijian Yu Haiqinchengmei Jizhi Yanjiu*. Beijing: Geological Publishing House, 1–219]
- 李增学, 李莹, 刘海燕, 王东东, 王平丽, 宋广增, 李晓静, 贾强, 赵洪刚. 2021. 岩相古地理优势相方法及应用: 兼谈“广义”与“狭义”岩相古地理及若干新的研究方向. *古地理论*, 23(3): 489–506. [Li Z X, Li Y, Liu H Y, Wang D D, Wang P L, Song G Z, Li X J, Jia Q, Zhao H G. 2021. Method and application of lithofacies Palaeogeographic dominant facies: also discuss the lithofacies Palaeogeography in broad and narrow sense and some new research directions. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23(3): 489–506]
- 李增学, 刘莹, 李晓静, 张功成, 孙瑞, 王东东, 尹露生, 刘佳敏. 2022. 琼东南盆地古近纪泥炭沼泽破坏与重建作用对煤型源岩物质形成的控制. *石油与天然气地质*, 43(6): 1309–1320. [Li Z X, Liu Y, Li X J, Zhang G C, Sun R, Wang D D, Yin L S, Liu J M. 2022. The control of Paleogene peat swamp destruction and reconstruction on the formation of coal-type source material in the Qiongdongnan Basin. *Oil & Gas Geology*, 43(6): 1309–1320]
- 刘志峰, 吴克强, 柯岭, 王升兰, 于开平, 朱文奇. 2017. 珠江口盆地珠一坳陷北部洼陷带油气成藏主控因素. *石油与天然气地质*, 38(3): 561–569. [Liu Z F, Wu K Q, Ke L, Wang S L, Yu K P, Zhu W Q. 2017. Main factors controlling hydrocarbon accumulation in northern subsag belt of the Zhu-1 Depression, Pearl River Mouth Basin. *Oil & Gas Geology*, 38(3): 561–569]
- 米立军, 王东东, 李增学, 刘海燕, 何玉平. 2010. 琼东南盆地崖城组高分辨率层序地层格架与煤层形成特征. *石油学报*, 31(4): 534–541. [Mi L J, Wang D D, Li Z X, Liu H Y, He Y P. 2010. High-resolution sequence stratigraphic framework and coal-forming features in Yacheng Formation of Qiongdongnan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 31(4): 534–541]
- 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. [Qin Y. 2025. Advances and trends of modern and contemporary research on the geology of coal-measure minerals in China. *Coal Geology & Exploration*, 53(1): 12–35]
- 施和生, 何敏, 张丽丽, 余秋华, 庞雄, 钟志洪, 刘丽华. 2014. 珠江口盆地(东部)油气地质特征、成藏规律及下一步勘探策略. *中国海上油气*, 26(3): 11–22. [Shi H S, He M, Zhang L L, Yu Q H, Pang X, Zhong Z H, Liu L H. 2014. Hydrocarbon geology, accumulation pattern and the next exploration strategy in the eastern Pearl River Mouth basin. *China Offshore Oil and Gas*, 26(3): 11–22]
- 邵龙义, 鲁静, 汪浩, 张鹏飞. 2009. 中国含煤岩系层序地层学研究进展. *沉积学报*, 27(5): 904–914. [Shao L Y, Lu J, Wang H, Zhang P F. 2009. Developments of coal measures sequence stratigraphy in China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(5): 904–914]
- 邵震杰, 任文忠, 陈家良. 1993. 煤田地质学. 北京: 煤炭工业出版社, 1–139. [Shao Z J, Ren W Z, Chen J L. 1993. *Coalfield Geology*. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1–139]
- 孙蓓蕾, 孔艳磊, 王国权, 刘超, IKEH Justin Tobechukwu. 2022. 高锂无烟煤中不同赋存态锂同位素组成趋同特征及其机理. *煤炭学报*, 47(5): 1773–1781. [Sun B L, Kong Y L, Wang G Q, Liu C, Tobechukwu I. 2022. Convergence and its mechanism of lithium isotopic composition with different occurrence states in Li-rich anthracite. *Journal of China Coal Society*, 47(5): 1773–1781]
- 孙蓓蕾, 王瑶, 李宝庆, 刘超, 郭洁明, 张星星. 2024. 原位微区分析华北典型富锂煤中关键金属赋存规律. *地质学报*, 98(8): 2424–2438. [Sun B L, Wang Y, Li B Q, Liu C, Guo Z M, Zhang X X. 2024. In-situ microanalysis of critical metal occurrences in high-lithium coals of North China. *Acta Geologica Sinica*, 98(8): 2424–2438]
- 王东东, 李增学, 吕大伟, 刘海燕, 王平丽, 冯婷婷. 2016. 陆相断陷盆地煤与油页岩共生组合及其层序地层特征. *地球科学*, 41(3): 508–522. [Wang D D, Li Z X, Lü D W, Liu H Y, Wang P L, Feng T T. 2016. Coal and oil shale paragenetic assemblage and sequence stratigraphic features in continental faulted basin. *Earth Science*, 41(3): 508–522]
- 王国权, 孙蓓蕾, 刘超, 武杰, 潘欣雨, 曾凡桂. 2022. 古泥炭沉积环境及其对微量元素的控制: 以宁武煤田东露天煤矿11#煤层为例. *古地理论*, 24(6): 1210–1223. [Wang G Q, Sun B L, Liu C, Wu J, Pan X Y, Zeng F G. 2022. Paleo-peat sedimentary environment and controlling on trace elements: example from the 11# coal seam in Donglutian Coalmine of Ningwu Coalfield. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(6): 1210–1223]
- 王华, 吴冲龙, Louis Courel, Michel Guiraud. 1999. 法国、中国断陷盆地厚煤层堆积机制分析. *地学前缘*, 6(S1): 157–166. [Wang H, Wu C L, Courel L, Guiraud M. 1999. Analysis on accumulation

- mechanism and sedimentary conditions of thick coalbeds in Sino-French faulted coal basins. *Earth Science Frontiers*, 6 (S1): 157–166]
- 王华,肖军,张瑞生,王根发,杨红. 2000. 对厚煤层独特沉积条件研究的综述与思考. *地质科技情报*, 19(3): 44–48. [Wang H, Xiao J, Zhang R S, Wang G F, Yang H. 2000. Review of analysis on the sedimentary conditions of thick coalbeds. *Geological Science and Technology Information*, 19(3): 44–48]
- 吴冲龙. 1994. 抚顺盆地的滑积煤及特厚煤层的成因模式. *科学通报*, 39(23): 2175–2177. [Wu C L. 1994. The genesis model of the coal and extra-thick coal seam in the Fushun Basin. *Chinese Science Bulletin*, 39(23): 2175–2177]
- 吴冲龙,李绍虎,王根发,罗映娟. 2003. 陆相断陷盆地特厚煤层异地堆积的新模式. *地球科学*, 28(3): 289–296. [Wu C L, Li S H, Wang G F, Luo Y J. 2003. New evidence and new model about allochthonous accumulation of extra-thick coal beds in continental fault basin, China. *Earth Science*, 28(3): 289–296]
- 吴冲龙,李绍虎,王根发,刘刚,孔春芳. 2006. 先锋盆地超厚优质煤层的异地成因模式. *沉积学报*, 24(1): 1–9. [Wu C L, Li S H, Wang G F, Liu G, Kong C F. 2006. Genetic model about the extra-thick and high quality coalbed in Xianfeng Basin, Yunnan Province, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(1): 1–9]
- 吴悦,王东东,王海亮,刘海燕,李增学,郑雪. 2023. 近海断陷盆地古近纪煤系沉积控煤作用与成煤模式: 以山东黄县盆地为例. *煤田地质与勘探*, 51(4): 23–36. [Wu Y, Wang D D, Wang H L, Liu H Y, Li Z X, Zheng X. 2023. Sedimentary coal-controlling effect and coal-forming model of Paleogene coal measures in paralic faulted basin: a case study of Huangxian Basin, Shandong Province. *Coal Geology & Exploration*, 51(4): 23–36]
- 杨起,韩德馨. 1979. *中国煤田地质学(上册)*. 北京: 煤炭工业出版社, 1–507. [Yang Q, Han D X. 1979. *Coalfield Geology of China (Volume I)*. Beijing: Coal Industry Press, 1–507]
- 游君君,杨希冰,雷明珠,梁刚,汪紫菱. 2020. 珠江口盆地珠三拗陷不同沉积环境下烃源岩和原油中长链三环萜烷、二环倍半萜烷分布特征及地球化学意义. *天然气地球科学*, 31(7): 904–914. [You J J, Yang X B, Lei M Z, Liang G, Wang Z L. 2020. The characteristics and significances of cheilanthane tricyclic terpanes and bicyclic sesquiterpanes in source rocks and oils under different depositional environments in Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin. *Natural Gas Geoscience*, 31(7): 904–914]
- 张功成,屈红军,刘世翔,谢晓军,赵钊,沈怀磊. 2015. 边缘海构造旋回控制南海深水油气成藏. *石油学报*, 36(5): 533–545. [Zhang G C, Qu H J, Liu S X, Xie X J, Zhao Z, Shen H L. 2015. Tectonic cycle of marginal sea controlled the hydrocarbon accumulation in deep-water areas of South China Sea. *Acta Petrolei Sinica*, 36(5): 533–545]
- 张功成,陈莹,李增学,李友川,兰蕾,刘世翔,孙瑞. 2022. 中国海域煤型油气成因理论. *石油与天然气地质*, 43(3): 553–565. [Zhang G C, Chen Y, Li Z X, Li Y C, Lan L, Liu S X, Sun R. 2022. Theory on genesis of coaliferous petroleum in the China Sea. *Oil & Gas Geology*, 43(3): 553–565]
- Castro L M, Miranda M, Fernández B. 2015. Evaluation of TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) in a mountainous region of the central Andes range with a Mediterranean climate. *Hydrology Research*, 46(1): 89–105.
- Cristea G, Cuna S M, Fărcaș S, Tanțău I, Dordai E, Măgdaș D A. 2014. Carbon isotope composition as indicator for climatic changes during the middle and late Holocene in a peat bog from Maramureș Mountains (Romania). *The Holocene*, 24(1): 15–23.
- 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.
- Delusina I, Starratt S W, Verosub K L. 2022. Environmental evolution of peat in the Sacramento-San Joaquin Delta (California) during the Middle and Late Holocene as deduced from pollen, diatoms and magnetism. *Quaternary International*, 621: 50–61.
- Doyle T W, Krauss K W, Conner W H, From A S. 2010. Predicting the retreat and migration of tidal forests along the northern Gulf of Mexico under sea-level rise. *Forest Ecology and Management*, 259(4): 770–777.
- Fagherazzi S, Anisfeld S C, Blum L K, Long E V, Feagin R A, Fernandes A, Kearney W S, Williams K. 2019. Sea level rise and the dynamics of the marsh-upland boundary. *Frontiers in Environmental Science*, 7: 25.
- Flores R M. 2013. *Coal and Coalbed Gas: Fueling the Future*. Waltham, Massachusetts: Newnes, 1–432.
- Li Z X, Han M L, Zhang G C, Liu H Y, Wang D D, Lü D W, Li Y. 2009. Sedimentological characteristics of the coal seams of Yacheng Formation in Qiongdongnan Basin, China. *Energy Exploration & Exploitation*, 27(6): 411–424.
- Li Z X, Lü D W, Han M L, Liu H Y, Zhang G C, Wang D D. 2011. Coal forming environments of the Third Member of Yacheng Formation of the Paleogene in Qiongdongnan Basin for an example. *Energy Exploration & Exploitation*, 29(2): 179–195.
- Li Z X, Zeng Q B, Xu M, Wang D D, Song G Z, Wang P L, Li X J, Zheng X. 2021a. Peat formation and accumulation mechanism in northern marginal basin of South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 40(2): 95–106.
- Li Z X, Li Y, Wang D D, Wang P L, Zhang G C, Liu H Y, Liu Y, Li X J, Song G Z. 2021b. Source-to-sink system for peat accumulation in marginal basins of the South China Sea with the Qiongdongnan Basin as an example. *Australian Journal of Earth Sciences*, 68(3): 421–439.
- Lindsay R. 2018. Peatland (mire types): based on origin and behavior of water, peat genesis, landscape position, and climate. In: *The Wetland Book*. Dordrecht: Springer Netherlands, 251–273.
- Liu S F, Su S, Zhang G W. 2013. Early Mesozoic basin development in

- North China: indications of cratonic deformation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 221–236.
- Liu Y, Huang S B, Wang D D, Li N, Yin Y T, Chen Y, Li Z X. 2024. Astronomical influence of the development of Paleogene thin coal seam groups in offshore Lacustrine basins: a case study of the Zhu I Depression's Enping Formation located in the northern section of the South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 43(5): 1–16.
- O'Keefe J M K, Hower J C, Finkelman R F, Drew J W, Stucker J D. 2011. Petrographic, geochemical, and mycological aspects of Miocene coals from the Nováky and Handlová mining districts, Slovakia. *International Journal of Coal Geology*, 87(3–4): 268–281.
- O'Keefe J M K, Bechtel A, Christanis K, Dai S F, DiMichele W A, Eble C F, Esterle J S, Mastalerz M, Raymond A L, Valentim B V, Wagner N J, Ward C R, Hower J C. 2013. On the fundamental difference between coal rank and coal type. *International Journal of Coal Geology*, 118: 58–87.
- Page S E, Siegert F, Rieley J O, Boehm H D V, Jaya A, Limin S. 2002. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature*, 420(6911): 61–65.
- Prokopovich N P. 1985. Subsidence of peat in California and Florida. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 22(4): 395–420.
- 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 B L, Guo Z M, Liu C, Kong Y L, French D, Zhu Z L. 2023. Lithium isotopic composition of two high-lithium coals and their fractions with different lithium occurrence modes, Shanxi Province, China. *International Journal of Coal Geology*, 277: 104338.
- Sun Y Z. 2003. Petrologic and geochemical characteristics of “barkinite” from the Dahe mine, Guizhou Province, China. *International Journal of Coal Geology*, 56(3–4): 269–276.
- Sun Y Z, Püttmann W, Kalkreuth W, Horsfield B. 2002. Petrologic and geochemical characteristics of seam 9–3 and seam 2, Xingtai Coalfield, Northern China. *International Journal of Coal Geology*, 49(4): 251–262.
- Utescher T, Ashraf A R, Kern A K, Mosbrugger V. 2021. Diversity patterns in microfloras recovered from Miocene brown coals of the lower Rhine Basin reveal distinct coupling of the structure of the peat-forming vegetation and continental climate variability. *Geological Journal*, 56(2): 768–785.
- Van Asselen S, Stouthamer E, Van Asch T W J. 2009. Effects of peat compaction on delta evolution: a review on processes, responses, measuring and modeling. *Earth-Science Reviews*, 92(1–2): 35–51.
- Van Asselen S, Stouthamer E, Smith N D. 2010. Factors controlling peat compaction in alluvial floodplains: a case study in the cold-temperate Cumberland marshes, Canada. *Journal of Sedimentary Research*, 80(2): 155–166.
- Wang D D, Dong G Q, Zhang G C, Li Z X, Mao Q, Song G Z. 2020a. Coal seam development characteristics and distribution predictions in marginal sea basins: Oligocene Yacheng Formation coal measures, Qiongdongnan Basin, northern region of the South China Sea. *Australian Journal of Earth Sciences*, 67(3): 393–409.
- Wang D D, Zhang G C, Li Z X, Dong G Q, Sun R, Guo S, Wu Y. 2021. The development characteristics and distribution predictions of the Paleogene coal-measure source rock in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 95(1): 105–120.
- Wang M, Tian J Q, Bu Z J, Lamit L J, Chen H, Zhu Q A, Peng C H. 2019. Structural and functional differentiation of the microbial community in the surface and subsurface peat of two minerotrophic fens in China. *Plant and Soil*, 437(1): 21–40.
- Wang S, Shao L Y, Wang D D, Hilton J, Guo B, Lu J. 2020b. Controls on accumulation of anomalously thick coals: implications for sequence stratigraphic analysis. *Sedimentology*, 67(2): 991–1013.
- Xu Y, Uhl D, Zhang N, Zhao C L, Qin S J, Liang H D, Sun Y Z. 2020. Evidence of widespread wildfires in coal seams from the Middle Jurassic of Northwest China and its impact on paleoclimate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 559: 109819.
- Zhang G C, Tang W, Xie X J, Zhao Z G, Zhao Z. 2017. Petroleum geological characteristics of two basin belts in southern continental margin in South China Sea. *Petroleum Exploration and Development*, 44(6): 849–859.
- Zhang Y, Gao C Y, Zhang S Q, Yang P, Meyers P A, Wang G P. 2022. Significance of different n-alkane biomarker distributions in four same-age peat sequences around the edges of a small maar lake in China. *Science of the Total Environment*, 826: 154137.
- Zhao H G, Li Y, Chang X C, Li Z X, Liu H Y, Zhao C L. 2021. A comparative study of the coal-forming characteristics of marginal sea basins and epicontinental sea basins. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 95(1): 121–130.
- Zheng Y F, Xiao W J, Zhao G C. 2013. Introduction to tectonics of China. *Gondwana Research*, 23(4): 1189–1206.

(责任编辑 李新坡)