

煤系地层沉积环境分析与煤层对比方法

柴亚鑫

山西省煤炭地质一一四勘查院有限公司 山西 长治 046000

摘要：煤系地层是一系列以含煤系为主的沉积岩，其成因与特殊的沉积环境有很大关系；而煤层对比，就是通过辨识煤的特性标记，在不同的空间上，在同一时间点上形成等时或同相对应，为煤田地质勘查、资源评价和矿山规划提供依据。通过对沉积环境的研究，可明确其背景条件，煤层对比则解决空间对应问题，两者互为支持，从而为煤炭资源的科学开采奠定了基础。

关键词：煤系地层；沉积环境；煤层对比

1 煤系地层沉积环境分析与煤层对比概述

煤系地层中的沉积环境及其煤层对比。是通过对煤层中碎屑岩、泥岩、灰岩及其它岩石类型的岩石组合和沉积结构的研究，结合古生物化石和地球化学指标，重建古地形、古气候和水动力条件，探讨其发育的时空特征，为认识煤层的厚度、煤层厚度及其空间展布提供依据^[1]。

2 煤系地层沉积环境分析与煤层对比价值

2.1 煤系地层沉积环境分析价值

煤系地层沉积环境分析是研究煤层成因及时空分布的基本方法，其关键是从沉积学角度剖析影响其发育的地质环境，明确其物质组成、结构特征和时空分布特征的内在机理。以古气候、古地理、水动力条件和物质来源等因素为纽带，是联系古地质过程和煤系特征的纽带，是影响泥炭湿地形成和发展的关键因素。从理论上讲，古气候是泥炭沼泽形成的先决条件。暖湿的气候条件有利于高级植被的繁盛，是泥炭沉积形成的重要物质来源；然而，在极端气候条件下，泥炭地极容易被表碛所覆或氧化，从而造成厚壁或连续的断裂。而在陆表海或内陆湖缘，由于地貌的起伏和沉积环境的改变，地区泥炭湿地得以继续发展，并形成厚层稳定的煤层。然而，在较强的山地冲积扇-河系，由于地势高差大，水动力条件较为复杂，导致泥煤湿地多为孤立透镜状分布，且煤厚和连续度明显下降。而煤的构造和煤的来源又受水动力学和物质供应的限制。在低能量和还原水动力学条件下，可以有效地抑制陆源碎屑的混合，从而使煤中的灰分下降，并有利于有机碳的保持；而高能量流体则可将其携带的大量碎屑物进行稀释，从而产生具有夹矸特征的复合构造煤。物源供给的性质也可改变顶板和顶板的岩性，并直接反应了沉积环境的化学状况，如：顶部和底部富钙常代表微咸水，而顶部和底部均由硅质碎屑灰岩控制。综上，煤系地层沉积环境分析的理论价值

在于构建环境—煤的内在关联演化模型，为认识煤系地层的物质组成、结构演化和时空分布规律奠定基础，并为古气候、古植被、古构造等古环境恢复等古气候、古植被、古构造等方面的重要沉积学依据^[2]。

2.2 煤层对比价值

煤系地层对比是将点和面相结合的关键技术，其实质在于以煤的特殊性和代表性为基础，在多个时空尺度上构建煤系等时联动关系，从而揭示煤系地层的序列构造和演变。煤层对比是一种比较独特的岩层比较，其理论依据来自于煤本身的物性和空间展布特征，即：煤是由泥炭化、煤化作用形成的，其宏观特征和显微特征均表现出明显的可识别性，是煤系地层对比最为可信的指标。从理论上讲煤层对比的核心价值体现在三个方面：一是建立煤系地层等时人格框架；通过辨识具有一定区域性特征的煤构造，将煤系各层位锚定于相同的时标上，以克服因缺少化石或类似岩石而造成的等时不清的难题。二是查明煤层的旋回构造和沉积不连续性。煤系地层的发育和不连续是一个由碎屑岩系组成的一个完整的地层旋回，这个完整的地层旋回起始于碎屑岩系或泥炭，通过地层的比较，可以确定其旋回的期次，从而恢复该时期的构造活动。三是体现了不同地区的地质情况差异。各地区煤系沉积特性的研究，可以直接反映沉积环境的侧向变化，从而为研究沉积中心迁移、古地理演化等问题提供重要制约。另外，通过对煤系地层的比较，可以进一步完善煤系地层序列地层学的研究方法。在层序-地层学上，煤层多发育于海进系统域的顶端或较高的系统域，它们的展布规模和厚度能够指示出区域内的相对海面高度，因此，利用煤体之间的相互关系可以提高序列的精确程度，从而使得煤系地层的年代和沉积学研究更加符合逻辑和系统。

3 煤系地层沉积环境分析与煤层对比方法

3.1 煤系地层沉积环境分析

沉积环境是指在不同的区域，以及不同的物理、化学、生物等多种因素综合起来的环境。从沉积物中提取出成煤期的古环境信息，揭示煤成藏的地质条件，是研究煤系沉积环境的关键。

3.1.1 沉积环境的主要类型及特征

煤系沉积环境复杂多变，水动力条件、沉积物供应状况、古植被发育程度和结构稳定性等都会对煤层厚度、结构和分布产生显著的影响。其主要类别有：（1）大陆冲洪型沉积环境。该环境主要发育有间断的流水活动，岩性主要为砾岩和砂岩，具有较好的颗粒级和颗粒级，层理以交错层理和平行层理为主，并含有大量的植物残体。这一地区水动力强烈，沉积速度快，不适合植被的长期稳定沉积，往往只在沟间凹地和废弃水道中产生不稳定的薄层煤层，且侧向连续性较差。（2）湖区生态系统。根据湖深的不同，将其划分为湖滨带、浅湖和半深湖-深湖亚生态系统。滨湖环境水体浅，波浪起伏，沉积物沙-粉砂，有波浪纹和透镜纹，可以发展湿地，并能产生巨厚度的煤层；浅湖生态具有较好的水质，主要由粉砂岩和粘土岩组成，具有较强的横向层理，当湖域萎缩时，可产生湖沼型，且厚度中等，分布广泛；在该地区，以暗色粘土岩和油页岩为主的半深湖-深湖型，缺少形成煤炭的物质基础。（3）湿地生境。根据其所处的水域特征，可将其划分为浅水湿地和咸水湿地两类。湖泊湿地具有较深、流动性差、富含养分且生长有高等植物的特性，其尸体经过泥炭转化后，会产生大量的泥炭沉积，是厚煤层的主要形成场所。盐沼湿地是由含盐量 $>0.5\%$ 的海洋性湿地组成，具有较强的耐盐能力，泥炭堆积速率慢，煤层薄且硫分高。（4）三角洲生态系统。由三角洲平原、三角洲前缘和前三角洲亚气候组成的海陆或湖泊-陆地相结合的复杂生态系统是煤炭成煤的中心地带，支流河道为其提供了大量的泥沙，洼地内的植被发育良好，形成了厚而稳定的煤层。三角洲前缘区主要是沙相沉积，具有较大的水力作用，而且煤层较薄，夹矸较多；前三角洲地区主要是黏土质和海洋生物沉积物，其形成环境较差。由于河流的频繁移动，在三角洲地区形成了多层、厚度变化较大的煤层^[3]。

3.1.2 沉积环境的控制因素

煤系组分沉积环境的发生和演变是多要素共同作用的结果，其关键在于物料供应-可容纳空间-古植物之间的动态平衡。（1）构造运动。在稳定的结构环境中，沉积过程中，稳定的地层沉降速度较慢，可容纳空间和泥沙供应达到均衡，从而形成稳定的厚层稳定煤层。活动构造背景如板缘，具有快速或不均匀沉降、可容纳空间变

异大等特点，常被具有较高强度的水流所取代，且煤层薄且结构复杂。（2）古气候。影响古植物种类和沉积速率的因素：湿热的环境如热带-亚热带，有利于高等植物繁盛，其生物量快速积累；在干燥和低温条件下，植被受到限制，很难产生泥炭；随着季节等因素的影响，湿地覆盖的厚度发生了明显的改变，而其中的夹矸数量也在不断增加。（3）古地理。决定沉积环境的空间格局：古纬度控制气候带分布、古地形影响水动力条件，如缓降坡有利于湿地扩张，斜坡主要是表碛堆积，古海陆分布变化，对沉积环境的盐度场和源区的方向有很大的影响。

（4）古植物与古水文。古植物是成煤的物质基础：在成煤过程中，植物种类对泥炭化学成分有显著影响。古水文条件控制沼泽的氧化还原环境，停滞水体利于植物遗体保存，流动水体导致植物遗体分解，难以形成泥炭。

3.1.3 沉积环境的识别标志

利用岩石理化性质和生物特征反演出其沉积环境是研究沉积环境的重要方法。（1）岩性岩相标志。岩石类型与结构：碎屑岩的粒度、分选、磨圆反映水动力强度；黏土岩颜色：灰色/黑色→还原环境，如沼泽、深湖；红色/棕色→氧化环境，如河漫滩；碳酸盐岩指示化学沉积环境如浅海、潟湖。层理类型：水平层理→低能静水环境，如深湖；交错层理→高能流动环境，如河道；透镜状层理→潮汐环境；层面构造：波痕→浅水环境，泥裂→暴露环境，如潮上带。



图1 碎屑岩



图2 黏土岩



图3 碳酸盐岩

（2）古生物标志。植物化石：煤层中的植物化石的种类和保存状况指示了该地区的植物种类和运输范围；保存完好的植物化石→原位埋葬，例如湿地；断裂的部分，例如河流的迁移；通过对松科孢粉和孢粉结合的研究，可以较好地还原出松科孢粉、冷凉、蕨类植物孢子、暖湿的环境。动物化石：海洋中的生物化石是反映大洋生态的重要指标；淡水生物可作为湖/河生态的标志；没有生物或只含有少量的植被碎片，表明大陆的冲积型/洪积型。



图4 植物化石



图5 动物化石

(3) 地球化学标志。元素比值：硼/镓比值区分海陆环境海相 >4.5 ，陆相 <3.3 ；锶/钡比值指示盐度高盐度环境Sr富集，Sr/Ba >1 ；低盐度环境Ba富集，Sr/Ba <1 。同位素组成：碳同位素反映植物类型；氧同位素可反演古水温^[4]。表1为化学标志元素比值。

表1 化学标志元素比值

元素比值	环境区分	具体数值范围
硼/镓 (B/Ga)	海陆环境	海相 >4.5 ；陆相 <3.3
锶/钡 (Sr/Ba)	盐度指示	高盐度环境：Sr富集，Sr/Ba >1 ；低盐度环境：Ba富集，Sr/Ba <1

3.2 煤层对比方法

煤层对比的特异标记相结合，在各剖面中构建煤的空间对应，其关键在于区别等质性和同源性。对比方法可以分成常规造影和新造影的两种，这两种对比的组合可以提高造影的准确性。

3.2.1 传统对比方法

(1) 地层岩性比例。标志层比对：以分布广泛，特征明显，易于识别的特定地层为对照基准面标志层应具备：①具有良好的侧向稳定性；②具有特殊的岩石/岩相；③岩性组合序列对比：通过煤系中岩性-煤层组合的旋回性进行对比，旋回结构反映沉积环境的周期性变化，同一旋回内的煤层具有等时性。

(2) 煤系地层性质的比较。煤厚与构造：煤厚稳定、矸层数量和是比较的直接指标同一层煤与多层夹矸煤。煤岩煤质特性：煤岩组分在纵向和侧向上的变异具有重要的指示作用，例如：湖泊水位升高，惰质体增多，火发生，惰质体增多；煤的灰分A、挥发分V和硫分S在不同区域的空间分异特征：同一种煤的灰分/硫分含量的变异主要受控于其附近河流灰分高、海相环境硫分高等沉积环境，而其它地区的煤却没有这种规律。表2为不同环境条件下煤的显微组分及主要化学指标示例表。

表2 不同环境条件下煤的显微组分及主要化学指标示例表

情况	镜质体含量 (%)	惰质体含量 (%)	灰分A (%)	挥发分V (%)	硫分S (%)
湖泊水位升高前	30-40	20-30	10-20 (内陆河流附近煤)、5-10 (远离河流的煤)	25-35	0.5-1.5 (内陆煤)、1.5-3.0 (海相环境附近煤)
湖泊水位升高后	40-50	20-30	10-20 (内陆河流附近煤)、5-10 (远离河流的煤)	25-35	0.5-1.5 (内陆煤)、1.5-3.0 (海相环境附近煤)
火灾发生后	30-40	30-40	10-20 (内陆河流附近煤)、5-10 (远离河流的煤)	25-35	0.5-1.5 (内陆煤)、1.5-3.0 (海相环境附近煤)

(3) 古生物对比。植物化石的组合比较：煤层中或夹矸中的植物化石组合具有“指纹”特征，在相同的煤层中，其生物组成是相同的，而在其他地区，由于沉积条件的不同，其生物组成也有很大的差别。孢粉对照：

根据其种类和含量建立“孢粉谱”，发现同一套煤中的孢粉具有一定的相似之处，而不同的煤则有一定的差别。表3为不同煤的孢粉对照数据。

表3 不同煤的孢粉对照数据示例

煤层类型	主要孢粉种类	含量特征 (占比)	孢粉谱特征
煤层A (浅湖沼泽成因)	蕨类植物孢子 (水龙骨科、桫椤科)、裸子植物花粉 (松属、云杉属)	蕨类孢子占比60%-70%，裸子花粉占比20%-30%	以蕨类孢子为主导，裸子花粉次之，整体呈现暖湿环境下的孢粉组合特征
煤层B (河流冲积平原沼泽成因)	被子植物花粉 (桦属、栎属)、蕨类孢子 (凤尾蕨科)	被子植物花粉占比50%-60%，蕨类孢子占比30%-40%	被子植物花粉含量高，反映相对开阔、湿润的陆生环境
煤层C (滨海盐沼成因)	耐盐被子植物花粉 (盐角草属、碱蓬属)、裸子植物花粉 (麻黄属)	耐盐被子植物花粉占比40% - 50%，麻黄属花粉占比25%-35%	含大量耐盐孢粉类型，体现微咸水至咸水环境特征

3.2.2 现代技术方法

近年来，随着地球物理和地球化学技术的进步，使得对比准确度大大提升，特别是在构造复杂、传统标志不清晰的地区，更是得到了广泛应用。(1) 地球物理测井对比。应用测井资料来研究煤系响应特性，其关键

在于其“曲线形态”和“数值特征”是否一致。天然伽马(GR)曲线：由于煤中有机物含量较高，所含的放射性物质含量较小，所以其GR较小，而围岩的GR较高，属于“低GR标志”。电阻率(RT)曲线：煤层为高阻体，电阻率 $>1000\Omega \cdot m$ ，围岩电阻率低，形成“高阻

尖峰”。密度 (DEN) 曲线: 煤的密度较小 ($1.2\text{-}1.5 \text{ g/cm}^3$) , 远小于周围围岩 ($2.0\text{-}2.7 \text{ g/cm}^3$) , 易产生 “低密度槽” 。表4为数据特征表格对比。

表4 数据特征表格对比

测井方法	煤层数值特征	围岩数值特征	曲线形态特征
天然伽马 (GR)	数值较小 (通常 $< 50 \text{ API}$)	数值较高 (通常 $> 80 \text{ API}$)	煤层呈现明显的“低GR”平直或微幅波动曲线, 与围岩的高值曲线形成显著反差
电阻率 (RT)	数值较高 (通常 $> 1000 \Omega \cdot \text{m}$)	数值较低 (通常 $< 500 \Omega \cdot \text{m}$)	煤层表现为陡峭的“高阻尖峰”, 曲线在煤层段急剧上升后快速下降, 围岩段曲线平缓且数值低
密度 (DEN)	数值较小 ($1.2\text{-}1.5 \text{ g/cm}^3$)	数值较大 ($2.0\text{-}2.7 \text{ g/cm}^3$)	煤层段曲线形成明显的“低密度槽”, 呈现下凹形态, 围岩段曲线数值高且相对平稳

(2) 微量元素。根据同一批煤具有相似的地化环境, 其成分具有相似的成分这一基本原则, 运用煤的成分“指纹特征”进行比较。微量元素比较: 煤中微量元素的浓度和比例具有起源上的继承关系, 而在其他地区, 由于物源和沉积环境的差异, 造成了煤中微量元素的差异。同位素比较: 煤的氢同位素和碳同位素可以指示出该地区的植被和环境; 利用S同位素可以区别海相硫与陆相硫。

(3) 放射性同位素测年对比。通过对煤系及上、下两层的测年资料, 进行煤的年龄测定, 从而达到年龄-地层比较的目的。通常的做法有: 镍石U-Pb测年: 通过对

煤顶/底板砂岩进行镍石定年, 确定其形成年代; 沥青铀钍测年: 适合于含有铀矿石的煤; AMS碳同位素测年: 对新煤 ($< 50,000$ 年) 进行年代测定。同时发育于同一时期的煤, 具有一定的年代学意义, 是进行不同地区之间比较的“时间标尺”。

(4) 三维地震对比利用三维地震资料的反射特性, 对煤的空间连续性和结构形式进行研究。由于煤体与周围煤体之间存在明显的疏密差别, 会产生强烈的反射界面, 其振幅、频率、同相轴的连续性可以指示煤体的厚度和结构损伤^[5]。

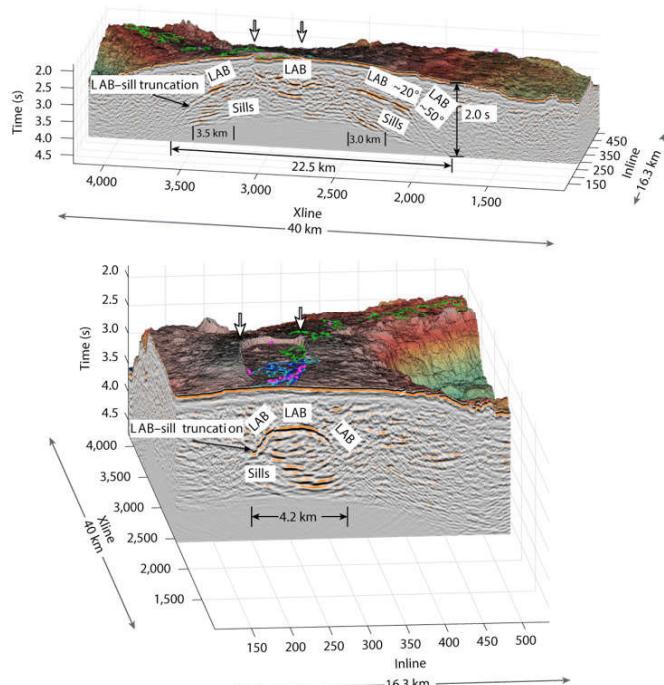
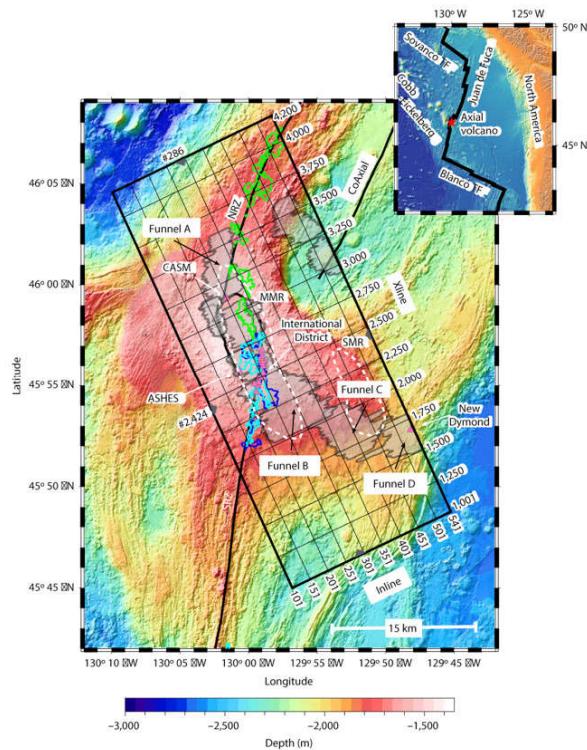


图6 三维地震的反射界面



图7 振幅切片

结语

煤系地层沉积环境分析与煤层对比是煤田地质研究的两大支柱。沉积环境分析通过研究岩性岩相、古生物、地球化学等标志，揭示煤层形成的古地理、古气

候、构造背景，区分不同沉积环境对煤层的影响；煤层对比则通过传统方法与现代技术的结合，建立煤层的时空对应关系，解决哪层是哪层的问题。二者的有机结合，不仅是煤资源勘探开发的技术基础，也为理解地质历史时期的环境变化提供了关键信息。

参考文献

- [1] 牛鸿波, 刘已盛, 陈大勇, 等. 煤系地层合采气井生产动态预测及效果分析[J]. 中国矿业, 2025, 34(01): 183-191.
- [2] 王红岩, 段瑶瑶, 刘洪林, 等. 煤层气水平井开发的理论技术初探——兼论煤层气和页岩气开发条件对比[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(04): 47-59.
- [3] 杜贤军, 牛浩, 李明阳, 等. 综合物探对多煤层采空区综合勘查对比研究[J]. 山东国土资源, 2024, 40(02): 27-32.
- [4] 李全贵, 凌发平, 胡千庭, 等. 煤系地层弹性波阶段性衰减特性分析[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(03): 466-477.
- [5] 王子源. 煤炭与煤层气资源勘查技术体系对比研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023, (07): 175-177.