

利用 Q 型聚类分析研究鄂尔多斯盆地多种能源矿产间的关系

潘爱芳^{1,2}, 王方一³, 张道法³, 赫 英⁴

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 中国石油天然气集团公司长庆油田分公司 第五采油厂, 陕西 西安 710021; 4. 西北大学 地质学系, 陕西 西安 710069)

摘要: 为揭示鄂尔多斯盆地多种能源矿产间的关系, 根据盆地石油、油气伴生水以及煤、煤层夹矸、铀矿及围岩样品的氯仿沥青中 57 种元素的分析结果, 进行了 Q 型聚类分析。结果表明: 侏罗系下统延安组石油、侏罗系中统直罗组石油与三叠系延长组石油有相近的成因特征; 三叠系延长组石油沥青、三叠系延长组含油砂岩沥青与侏罗系中统直罗组石油沥青具有类似的成因特征; 神木侏罗系下统延安组煤沥青、东胜侏罗系中统直罗组煤沥青、铜川陈家山侏罗系下统延安组煤层石油以及铜川陈家山侏罗系下统延安组煤沥青成因特征相近; 铜川陈家山侏罗系下统延安组煤层石油沥青可能与准格尔黑岱沟石炭二叠系煤沥青具有成因上的联系; 侏罗系下统延安组石油沥青与放射性铀矿的形成具有密切关系; 天然气的物质来源复杂, 且与石油和煤的进一步演化有一定关系。鄂尔多斯盆地多种能源矿产成因较复杂、相互间关系密切, 且具有多源性成藏(矿)特征。

关键词: 鄂尔多斯盆地; Q 型聚类; 流体; 能源矿产

中图分类号: P595; P618 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2010)01-0048-06

Q-clustering Analysis for Relationship Among Multiple Energy Mineral Deposits in Ordos Basin

PAN Ai-fang^{1,2}, WANG Fang-yi³, ZHANG Dao-fa³, HE Ying⁴

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. The Fifth Oil Production Factory, Changqing Oilfield Company, China National Petroleum Corporation, Xi'an 710021, Shaanxi, China; 4. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract In order to reveal the relationship among multiple energy mineral deposits in Ordos Basin, the contents of 57 elements of the oil, oilfield water and the chloroform bitumen of coal, gangue, uranium deposit and their wall rock was calculated by Q-clustering. The results showed that genetic features of the oil with Lower Jurassic Yan'an Formation and Middle Jurassic Zhiluo Formation and the petroleum asphalt with Triassic Yanchang Formation was similar; the petroleum asphalt of Triassic Yanchang Formation, the asphalt in oil sandstones of Triassic Yanchang Formation and the petroleum asphalt of Middle Jurassic Zhiluo Formation had similar genetic features; the coal asphalt of Lower Jurassic Yan'an Formation in Shenmu and Middle Jurassic Zhiluo Formation in Dongsheng, the petroleum and coal asphalt in the coal bed of Lower Jurassic Yan'an Formation in Chenjiashan of Tongchuan had similar genetic features; the petroleum asphalt in the coal bed of Lower Jurassic Yan'an Formation in Chenjiashan of Tongchuan was in connection with the coal asphalt of Permo Carboniferous in Haidaigou of Jungar; the petroleum asphalt of Lower Jurassic Yan'an Formation was closely related with the

收稿日期: 2009-05-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2003CB2146)

作者简介: 潘爱芳(1962-), 女, 河南叶县人, 教授, 理学博士, 从事地球化学、油田开发技术等研究。E-mail: pan aifang @126.com

enrichment of uranium mineralization; the origin of natural gas was complicated and related with the further evolvement of petroleum and coal. The origin of multiple energy mineral deposit was complicated, correlative and the mineralization/reservoiring was multi-source in Ordos Basin.

Key words: Ordos Basin; Q-clustering; fluid; energy mineral deposit

0 引言

在含油气盆地中,石油、天然气、煤等非金属矿与某些金属矿床的共存乃至共生的实例屡见不鲜^[1-6]。其中,石油与天然气的关系十分密切,且石油与油型气具有亲缘关系,因而在学科研究和勘探开发中一直将油、气密切地结合在一起,且总体研究程度较高^[7];从 20 世纪 40 至 50 年代,开始认识到煤和煤系地层可形成具有工业价值的天然气资源,到 80 年代煤成油又开始成为研究和讨论的热点,相关理论也得以快速发展^[8]。中国在 20 世纪 80 年代初开始煤成气的研究,经过 20 多年的发展,在煤成气聚集带研究、气体同位素判识煤成气、煤系烃源岩成烃模拟及演化实验、二次生烃理论等方面达到了国际先进水平^[8-9];铀矿与油、气、煤分属于无机和有机矿床类型,因受传统研究思维的影响,就他们之间的内在关系研究非常有限,但随着对铀富集成矿作用的深入研究,也逐步认识到其相互间的关系,如在铀矿形成中有机质及其产物是最常见和最重要的还原剂之一^[10-12]。

盆地中有机(油、气、煤)与无机(铀矿、钾盐等)、金属与非金属、气体与液体能源矿产共存甚至共生现象十分普遍。这种能源矿产同盆共存的现象必然存在内在的联系以及直接或间接的依存关系,但目前更多的还是对单一矿种的研究,在研究方法上彼此很少相互参照^[13]。在开展成因方面的地球化学研究时,大多仍然偏重于用有机地球化学方法研究有机矿产^[14-15]、无机地球化学方法研究无机矿产^[16]的手段。目前正在尝试通过对有机矿产研究中相对薄弱的无机地球化学的探讨,揭示有机与无机矿产的关系;通过有机能源矿产中无机组分的研究揭示有机能源矿产成藏(矿)的有关问题;对选取的无机与有机能源矿产间纽带与信息载体的研究,是认识能源矿产的成藏成矿规律以及揭示能源矿产的富集共存机制的有效手段之一^[17]。

石油与天然气既是矿产又是一种地下流体,地层水是盆地流体重要的组成部分之一;而氯仿沥青 A(以下简称沥青)是从能源矿产(油气、煤和铀)及

其所在岩石中通过有机溶剂直接抽提出的有机流体,且是岩石中的流体或流体作用的产物。在地下深部复杂的地质环境条件及其演化过程中,上述流体并非孤立,它们不仅存在相互间的作用,同时还在不断地与周围介质发生物质交换;它们不仅与金属矿床的形成密切相关,而且对有机能源矿产的成藏(矿)作用也具有重要意义^[17]。因此,上述流体应当既是携带多种能源矿产成藏(矿)重要信息的载体,又是联系这些能源矿产之间关系的纽带。基于此,笔者试图通过对这些地质流体中微量元素的 Q 型聚类分析,能够在一定程度上对各种能源矿产间的关系及深部流体在各种能源矿产成藏(矿)作用中的贡献特征有所揭示。

1 研究区基本地质特征

鄂尔多斯盆地被认为是中国乃至东亚最稳定的构造单元之一。盆地内部被河流切割冲刷出露的近乎水平的、未变质的、未有明显断裂发育的中生界河湖相地层是其最为典型的标志,且盆地边缘区断裂发育,地震频繁发生,构造活动强烈,盆地内部却相对平静。然而,近年来一些研究成果表明,鄂尔多斯盆地内部自古生代以来有过多期构造运动乃至新构造活动^[18-23],多期的构造活动必然伴有相应的构造-热事件与多期成藏作用,而构造-热事件的发生与深部流体密切相关^[26],并会导致深部流体顺同生构造向上喷溢^[7]。已有研究表明,鄂尔多斯盆地基底断裂的存在与活动和地球化学场特征等都反映出盆地内存在深部流体活动,基底断裂的活动为深部流体的运移并参与多种能源矿产的成藏成矿作用提供了有利条件^[27-30]。

2 样品采集与分析

为了研究盆地内多种能源矿产之间的关系,笔者采集了鄂尔多斯盆地不同矿区和不同层位的石油、天然气、岩芯、岩石样品,采样位置见图 1。其中,采集煤及煤层夹矸样品 325 件;石油和天然气样品 17 件;油气伴生水样 8 件;铀矿及其围岩样品 58 件;此外,为保持介质状态一致,对煤、煤层夹矸

以及铀矿及其围岩等 62 件样品进行了沥青抽提^[1]。所获得的流体样品送国家地质测试中心进行元素含量测定,分析质量达到或优于国家标准。

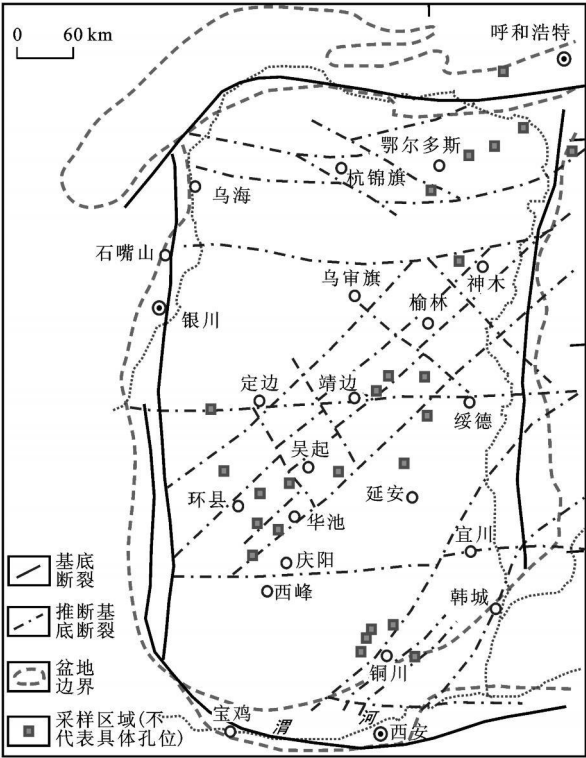


图 1 采样位置
Fig. 1 Sampling Positions

3 样本分组

在 Q 型聚类分析中,通常认为构成一个族群中的各样本间存在相似性或相关性。距离系数越小,则其相似性越强,相互之间的关系越密切,且将距离系数中值(0.5)视为界定样本间是否具有相关性或相似性的界限点。基于这一数学原理,笔者以盆地北部、中部和南部不同区段、不同时代、不同能源矿产沥青、油气伴生水以及石油中的 Li、Be、Sc、Ti、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Rb、Sr、Y、Zr、Nb、Mo、Ag、Cd、In、Sn、Cs、Ba、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Hf、Ta、W、Tl、Pb、Bi、Th、U、Au、V、Ge、As、Al、Ca、Fe、K、Mg、Na、P、B 等 57 种元素分析结果为对象,并根据流体类型、产出层位、所在地的能源矿产类型以及所处不同位置,共分了 16 个样本或基本组并分别用 Q₁~Q₁₆ 表示(表 1)。各组样品元素含量值为采集到的该样本组各样品分析结果的平均值,个别样本组中只有一个分析样品,则直接取用该样品分析值(表 1),并

进行了 Q 型聚类分析(或称 Q 族群分析)。

表 1 鄂尔多斯盆地流体分组及其编号
Tab. 1 Grouping and Their Number of Fluids in Ordos Basin

分组编号	各分组流体性质或类型
Q ₁	三叠系延长组石油(9 个样本平均)
Q ₂	三叠系延长组石油沥青(9 个样本平均)
Q ₃	侏罗系下统延安组石油(4 个样本平均)
Q ₄	侏罗系下统延安组石油沥青(4 个样本平均)
Q ₅	侏罗系中统直罗组石油(1 个样本)
Q ₆	侏罗系中统直罗组石油沥青(1 个样本)
Q ₇	铜川陈家山侏罗系下统延安组煤层石油(1 个样本)
Q ₈	铜川陈家山侏罗系下统延安组煤层石油沥青(1 个样本)
Q ₉	三叠系延长组含油砂岩沥青(4 个样本平均)
Q ₁₀	准格尔黑岱沟石炭二叠系煤沥青(4 个样本平均)
Q ₁₁	神木侏罗系下统延安组煤沥青(4 个样本平均)
Q ₁₂	铜川陈家山侏罗系下统延安组煤沥青(4 个样本平均)
Q ₁₃	东胜侏罗系中统直罗组煤沥青(2 个样本平均)
Q ₁₄	侏罗系中统直罗组含油砂岩沥青(1 个样本)
Q ₁₅	奥陶系马家沟组天然气伴生水(2 个样本平均)
Q ₁₆	三叠系延长组石油伴生水(6 个样本平均)

4 结果与讨论

根据所分的 16 个样本计算了能源矿产伴生流体(样本)间的欧式距离系数(表 2),并按逐步形成法计算和绘制了相应谱系图(图 2)。由图 2 和表 2 可见,参加统计的 16 个样本共构成 6 个基本族群,分别用序号 I、II、III、IV、V 和 VI 表示。

表 2 能源矿产伴生流体族群组距离系数
Tab. 2 Distance Coefficient of Cluster Groups on Satellitefluids of Energy Mineral Deposits

族群编号	族群组成	距离系数
I	Q ₁ -Q ₃ -Q ₅ -Q ₁₆	0.268 3
II	Q ₂ -Q ₉ -Q ₆	0.150 1
III	Q ₇ -Q ₁₁ -Q ₁₂ -Q ₁₃	0.159 7
IV	Q ₈ -Q ₁₀	0.177 7
V	Q ₄ -Q ₁₄	0.112 9
VI	Q ₁₅ 与 Q ₂ -Q ₉ -Q ₆ -Q ₇ -Q ₁₁ -Q ₁₂ -Q ₁₃ -Q ₈ -Q ₁₀ -Q ₄ -Q ₁₄	0.354 7

4.1 族群 I

该族群的样本组成为三叠系延长组石油、侏罗系下统延安组石油、侏罗系中统直罗组石油、三

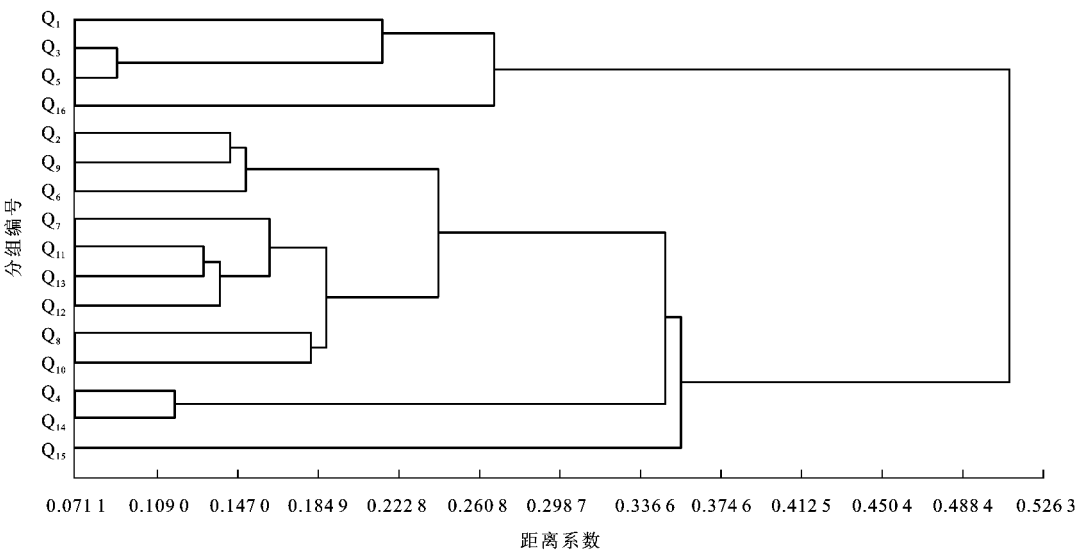


图 2 鄂尔多斯盆地能源矿产伴生流体 57 种元素 Q 型聚类分析

Fig. 2 Q clustering Analysis for 57 Elements of Satellite fluids of Energy Mineral Deposits in Ordos Basin

叠系延长组石油伴生水,即{ $Q_1-Q_3-Q_5-Q_{16}$ }。该族群包括了参加统计的所有石油和石油伴生水的集合,其中有三叠系上统延长组的石油、侏罗系下统延安组石油和侏罗系中统直罗组石油。该族群的距离系数为 0.268 3,因此,可能有相近的成因特征。

该族群内部,侏罗系下统延安组石油和侏罗系中统直罗组石油构成一个基本样本对{ Q_3-Q_5 } ,两样本间的关系最为密切,距离系数为 0.087 9。反映其元素富集特点与元素组合特征都非常接近。原因可能有 2 个方面: 他们的赋存层位虽然分属 2 个组,但都是侏罗系地层; 参加统计的样品均采自马岭、木铂、环县和华池一带,同处于盆地西南部、中央古隆起和北东向基底断裂的西南端,他们还具有相同的构造位置。因此,可能反映了延安组石油和直罗组石油具有相似的成因。

三叠系延长组石油、侏罗系下统延安组石油及中统直罗组石油之间构成了一个次级族群组{ $Q_1-Q_3-Q_5$ } (图 2), 这 3 个样本间仍具有较好的相关性,其距离系数为 0.212 5,但比样本对{ Q_3-Q_5 } 的距离系数要大。主要原因可能是,样本对{ Q_3-Q_5 } 赋存于侏罗系地层,而样本{ Q_1 } 赋存于三叠系地层,因此其与{ Q_3-Q_5 } 存在赋存层位的差异。

三叠系延长组石油伴生水{ Q_{16} } 和该族中石油族群组{ $Q_1-Q_3-Q_5$ } 之间距离系数为 0.239 8,表明石油伴生水虽然与该族群中的石油有一定成因联系,但由于流体性质的不同,导致其元素的含量

特征与石油尚有一定的区别。

4.2 族群 II

该族群的样本组成为三叠系延长组石油沥青、三叠系延长组含油砂岩沥青、侏罗系中统直罗组石油沥青,即{ $Q_2-Q_9-Q_6$ } ,距离系数为 0.150 1,反映了样本间的相似性较强、相关性较好,具有类似的成因特征。该族群最明显的特征是样本均为与石油相关的沥青,不同的是沥青的赋存层位不同。

在该族群内部,三叠系延长组石油沥青和三叠系延长组含油砂岩沥青构成一个基本样本对{ Q_2-Q_9 } ,其距离系数为 0.140 3,为强相关,表明具有相似的元素地球化学特征。2 个样本之所以具有强相关性,是由于他们均赋存于三叠系延长组之中,且又都是从石油中提取的,反映了两者具有相似的物质组成。侏罗系中统直罗组石油沥青虽然也是从含油砂岩中提取的,但与前两者的赋存层位不同,因此,与样本对{ Q_2-Q_9 } 的距离系数为 0.150 1。与前两者(样本对{ Q_2-Q_9 })的距离系数相比,该系数稍大,但仍具有较强的相关性,由此可能反映了延长组石油与直罗组石油在成因或物质成分上具相似性。

4.3 族群 III

该族群由 4 个样本组成: 神木侏罗系下统延安组煤沥青、东胜侏罗系中统直罗组煤沥青、铜川陈家山侏罗系下统延安组煤沥青、铜川陈家山侏罗系下统延安组煤层石油,即{ $Q_{11}-Q_{13}-Q_{12}-Q_7$ } 。该族群与侏罗系煤及煤层石油有关,距离系数为

Q 159 7, 表明样本间元素地球化学特征关系密切, 表现为该族群整体上相似性较好、相关性较强, 故成因特征相近。

在族群内部, 神木侏罗系下统延安组煤沥青与东胜侏罗系中统直罗组煤沥青构成一个基本样本对{ $Q_{11}-Q_{13}$ }。两样本间具强相关性, 距离系数仅为 0.130 7, 表明侏罗系下统延安组和侏罗系中统直罗组的煤关系密切, 二者可能具有相似的沉积环境和相近的流体活动特征。

神木侏罗系下统延安组煤沥青、东胜侏罗系中统直罗组煤沥青与铜川陈家山侏罗系下统延安组煤沥青构成了一个次级族群组样本对{ $Q_{11}-Q_{13}-Q_{12}$ }}, 距离系数为 0.138 1, 表明样本对{ $Q_{11}-Q_{13}$ }与样本{ Q_{12} }具有较强的相关性, 由此表明铜川陈家山侏罗系下统延安组煤层石油与侏罗系下统延安组煤及中统直罗组煤具有较为密切的关系, 在成因或物质成分上具有一定联系。

4.4 族群 IV

该族群由 2 个样本组成: 铜川陈家山侏罗系下统延安组煤层石油沥青、准格尔黑岱沟石炭二叠系煤沥青, 即{ Q_8-Q_{10} }。两者的距离系数为 0.177 7。表明 2 个样本具有相似的元素地球化学特征, 陈家山延安组煤层石油沥青可能与石炭二叠系的煤具有成因上的联系。

由以上结果并结合图 2 发现, 盆地内石油集中在族群 I 之中, 唯有陈家山延安组煤层石油位于族群 II, 而且与侏罗系下统延安组煤及中统直罗组煤沥青关系密切。与此同时, 陈家山延安组煤层石油沥青与黑岱沟石炭二叠系煤沥青具有相似的成因特征。由此表明, 陈家山延安组煤层石油与盆地石油的元素地球化学特征不同, 故两者的成因不同, 陈家山延安组煤层石油在成因上可能与侏罗系延安组煤及石炭二叠系煤具有一定的联系, 不排除是这两套煤系地层热演化的产物。

4.5 族群 V

该族群由 2 个样本组成: 侏罗系下统延安组石油沥青、侏罗系中统直罗组含铀砂岩沥青, 即{ Q_4-Q_{14} }。族群距离系数为 0.112 9, 显示两者具有相似的元素地球化学特征, 说明侏罗系下统延安组石油沥青与放射性铀矿的形成具有密切关系。

从以上 Q 族群分析结果可以看到, 侏罗系中统直罗组含铀砂岩沥青与侏罗系下统延安组石油沥青之间在同一族群之中, 但侏罗系下统延安组石油

沥青与侏罗系下统延安组石油并未在同一族群中, 反映两者的地球化学特征相离甚远。由此说明侏罗系下统延安组石油沥青对直罗组地层中铀的活化、迁移、富集可能具有重要作用。

4.6 族群 VI

该族群由奥陶系马家沟组天然气伴生水{ Q_{15} }与沥青族群{ $Q_2-Q_9-Q_6-Q_7-Q_{11}-Q_{12}-Q_{13}-Q_8-Q_{10}-Q_4-Q_{14}$ }构成, 距离系数为 0.354 7。表明天然气的形成和石油沥青、煤沥青具有某种关系, 进而说明天然气物质来源复杂(可能含有煤型气、油型气、生物气、深源气等), 且与石油和煤的进一步演化具有一定关系。

5 结语

(1) 族群侏罗系下统延安组石油—侏罗系中统直罗组石油—三叠系延长组石油—三叠系延长组石油伴生水的距离系数为 0.268 3, 可能有相近的成因特征; 族群三叠系延长组石油沥青—三叠系延长组含油砂岩沥青—侏罗系中统直罗组石油沥青的距离系数为 0.150 1, 具有类似的成因特征。

(2) 族群神木侏罗系下统延安组煤沥青—东胜侏罗系中统直罗组煤沥青—铜川陈家山侏罗系下统延安组煤沥青—铜川陈家山侏罗系下统延安组煤层石油的距离系数为 0.159 7, 显示了其相关性好, 成因特征相近; 族群铜川陈家山侏罗系下统延安组煤层石油沥青—准格尔黑岱沟石炭二叠系煤沥青的距离系数为 0.177 7, 故陈家山延安组煤层石油沥青可能与石炭二叠系的煤具有成因上的联系。

(3) 族群侏罗系下统延安组石油沥青—侏罗系中统直罗组含铀砂岩沥青间的距离系数为 0.112 9, 表明侏罗系下统延安组石油沥青与放射性铀矿的形成具有密切关系; 奥陶系马家沟组天然气伴生水与沥青族群的距离系数为 0.354 7。表明天然气的形成和石油沥青、煤沥青具有某种关系, 进而说明天然气组分复杂, 且与石油和煤的进一步演化具有一定的关系。

(4) 三叠系延长组石油沥青与侏罗系下统延安组石油不在同一族群之中; 侏罗系下统延安组石油与侏罗系下统延安组石油沥青不在同一族群之中; 侏罗系中统直罗组石油与侏罗系中统直罗组石油沥青不在同一族群之中; 铜川陈家山侏罗系下统延安组煤层石油与铜川陈家山侏罗系下统延安组煤

层石油沥青也不在同一族群之中。由此表明,鄂尔多斯盆地多种能源矿产成因较复杂、相互间关系密切,且具有多源性成藏(矿)特征。

国家地质测试中心邓月金博士在样品分析中提供了帮助,在此谨表谢忱。

参考文献:

- [1] 涂光炽.成煤、成油、成气、成盐和成金属矿之间的关系[J]. 有色金属矿产与勘查, 1994, 3(1): 1-3.
- [2] 刘池洋.沉积盆地动力学与盆地成藏(矿)系统[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(1): 1-23.
- [3] Bazhenova O K, Arefiev O A, Frolov E B. Oil of the Volcano Uzon Caldera, Kamchatka[J]. Organic Geochemistry, 1998, 29(1/3): 421-428.
- [4] Clifton C G, Walters C C, Simoneit B R T. Hydrothermal Petroleum from Yellowstone National Park, Wyoming, USA [J]. Applied Geochemistry, 1990, 5(1/2): 169-191.
- [5] Czochanska Z, Sheppard C M, Weston R J, et al. Organic Geochemistry of Sediments in New Zealand, Part I: a Biomarker Study of the Petroleum Seepage at the Geothermal Region of Waiotapu[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1986, 50(4): 507-515.
- [6] Tiercelin J J, Thouin C, Kalala T, et al. Discovery of Sub-lacustrine Hydrothermal Activity and Associated Massive Sulfides and Hydrocarbons in the North Tanganyika Trough, East African Rift[J]. Geology, 1989, 17(11): 1053-1056.
- [7] 刘池洋,谭成仟,孙卫等.多种能源矿产共存成藏(矿)机理与富集分布规律研究[C]//刘池洋.盆地多种能源矿产共存富集成藏(矿)研究现状.北京:科学出版社,2005:1-16
- [8] 钟宁宁,陈恭洋.煤系油气比分配控制因素及其与大中型气田的关系[M].北京:石油工业出版社,2002.
- [9] 李荣西.九十年代煤系烃源岩研究新进展[J].地质科技情报, 2000, 19(4): 55-59.
- [10] 张祖还.铀地球化学[M].北京:原子能出版社,1984.
- [11] Spirakis C S. The Roles of Organic Matter in the Formation of Uranium Deposits in Sedimentary Rocks[J]. Ore Geology Review, 1996, 11(1/3): 53-69.
- [12] Meunier J D, Landais P, Pagel M. Experimental Evidence of Uraninite Formation from Diagenesis of Uranium-rich Organic Matter[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990, 54(3): 809-817.
- [13] 杜乐天.盆地矿套[J].国外铀矿地质, 2002, 19(3): 140-146.
- [14] 陈建渝,朱芒征.含油气系统与有机地球化学的关系[J].石油与天然气地质, 1999, 20(3): 246-249.
- [15] 李贤庆,侯读杰,张爱云,等.鄂尔多斯中部奥陶系水溶烃的分子地球化学特征[J].沉积学报, 2002, 20(4): 710-715.
- [16] 朱西养,汪云亮,王志畅,等.东胜砂岩型铀矿微量元素地球化学特征初探[J].地质地球化学, 2003, 31(2): 39-45.
- [17] 潘爱芳,马润勇,黎荣剑.鄂尔多斯盆地深部流体地球化学研究[M].北京:石油工业出版社,2006.
- [18] 赵文智,胡素云,王泽成,等.鄂尔多斯盆地基底断裂在上三叠统延长组石油聚集中的控制作用[J].石油勘探与开发, 2003, 30(5): 1-5.
- [19] 王庭斌.新近纪以来中国构造演化特征与天然气田的分布格局[J].地学前缘, 2004, 11(4): 403-416.
- [20] 邱领军,张东阳,王宏科.鄂尔多斯盆地喜山期构造运动与油气成藏[J].石油学报, 2003, 24(2): 34-37.
- [21] 马润勇,彭建兵,袁志东,等.青藏高原隆升的黄土高原构造侵蚀效应[J].地球科学与环境学报, 2007, 29(3): 289-293.
- [22] 赵虹,党永胜,等.鄂尔多斯盆地姬塬地区三叠系延长组长2油层组储层特征及影响因素[J].西安科技大学学报, 2009, 29(5): 579-583.
- [23] 陈永胜,赵虹,郑小杰,等.鄂尔多斯盆地志丹探区延长组储层特征研究及评价[J].西北地质, 2009, 42(2): 83-88.
- [24] 白清华,柳益群,樊婷婷.鄂尔多斯盆地上三叠统延长组浊沸石分布及其成因分析[J].西北地质, 2009, 42(2): 100-107.
- [25] 郝世彦,魏仙样,魏建设.志丹油田寨科区延长组长2油层储集条件研究[J].西北地质, 2009, 42(3): 86-94.
- [26] 顾雪祥,王乾,付绍洪,等.分散元素超常富集的资源与环境效应:研究现状与发展趋势[J].成都理工大学学报:自然科学版, 2004, 31(1): 15-21.
- [27] 邓军,陈学明,饶轶群,等.南岭地区两种类型盆地的压实流体系统及其矿化作用[J].现代地质, 2004, 18(1): 1-7.
- [28] 潘爱芳,赫英,徐宝亮,等.鄂尔多斯盆地基底断裂地球化学特征研究[J].西北大学学报:自然科学版, 2005, 35(4): 440-444.
- [29] 潘爱芳,赫英,黎荣剑,等.鄂尔多斯盆地基底断裂与能源矿产成藏成矿的关系[J].大地构造与成矿学, 2005, 29(4): 459-464.
- [30] 潘爱芳,赫英,黎荣剑.鄂尔多斯盆地能源矿产氯仿沥青 Sm-Nd 同位素研究[J].中国地质, 2007, 34(3): 440-444.