

· 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 ·

塔里木盆地晚寒武世 SPICE 事件的生物响应 及油气资源效应

程斌¹, 王浩哲², 韦志伟³, 廖泽文^{1*}

1. 中国科学院广州地球化学研究所 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州 510640;
2. 中国地质调查局 武汉地质调查中心, 武汉 430205;
3. 中国有色桂林矿产地质研究院, 广西 桂林 541004

晚寒武世 SPICE 事件 (Steptoean 正碳同位素漂移事件, 497~494 Ma) 是地质历史时期全球最大碳循环扰动之一, 伴随着海洋生物灭绝、浮游生物革命与规模性有机碳埋藏等过程。该事件的触发机制、生物响应及油气资源效应等问题仍不清楚。本工作对塔里木盆地上寒武统不同沉积相 (浅海相、斜坡相、深海相) 地层剖面及台盆区海相原油开展了系统的生物-油气地球化学研究工作。通过对比不同沉积相剖面上的有机-无机碳同位素演化曲线, 明确了 SPICE 事件在不同海洋沉积环境中的不同步性, 揭示了浮游生物为适应极端环境而在不同深度海洋区域的动态演化过程, 强调了晚寒武世海洋生物灭绝与更替受到

海水深度梯度的控制。晚寒武世海洋浮游生物为适应大气 CO₂ 浓度降低的极端环境而调整了生存策略, 通过摄取海水中 HCO₃⁻ (CCM 机制) 来维持生命活动, 维持了海洋初级生产力的相对稳定, 为上寒武统烃源岩的发育奠定了基础。通过开展塔里木盆地沉积相特征对比与油-源对比, 提出了晚寒武世时期塔里木盆地台盆区泻湖相沉积环境可能发育了上寒武统烃源岩, 并对台盆区富集 ¹³C/亏损 ²H 的海相原油具有重要贡献。

关键词: SPICE 事件; 生物响应; CCM 机制; 上寒武统烃源岩; 塔里木盆地

· 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 ·

黄铁矿微量元素及硫同位素组成示踪富有机质 黑色页岩中的热液流体循环 ——以川东地区五峰-龙马溪组为例

李劭杰¹, 肖七林^{1*}, 蔡苏阳¹

1. 长江大学, 武汉 430100

识别沉积盆地中的热液活动对于理解富有机质沉积物的形成和演化具有重要意义。我国中上扬子地区蕴藏着大量的天然气资源和密西西比河谷型(MVT) 锌铅矿床。天然气资源主要分布在四川盆地内部, 而锌铅矿床则分布在盆地周边地区。这种独特的分布模式表明, 天然气富集区与矿集区的边界区域可能存在广泛的热液-有机质交互作用过程。四川盆地东部出露了典型的奥陶系/志留系(五峰组/龙马溪组) 富有机质黑色页岩露头。黄铁矿在该剖面中广泛分布, 是研究热液特征及其对富有机质沉积物的潜在影响的天然实验室。我们在研究区识别出了与碳酸盐脉体伴生的黄铁矿, 这组黄铁矿(“B组”) 通常具有适中的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(0.78‰~8.86‰), 以及更高的微量元素含量。这些特征表明, 这组黄铁矿可能是通过局部热液流体活动形成。此外, 微量元素含量相对较低的黄铁矿可以进一步分为两组, 包括一组具有

较低 $\delta^{34}\text{S}$ 值的黄铁矿(-18.06‰~-1.15‰; “A组”), 以及一组具有较高 $\delta^{34}\text{S}$ 值的黄铁矿(10.55‰~37.62‰; “C组”)。A组和C组的黄铁矿可能分别通过细菌硫酸盐还原作用(BSR)和热化学硫酸盐还原作用(TSR)形成。与流体相关的、富含微量金属的黄铁矿的发现表明, 黑色页岩中的流体循环具有活化、迁移和再沉淀微量元素的能力。此外, 富含金属的热液流体还可能促进四川盆地内有机质的成熟。本案例研究的结果, 结合之前在四川盆地中心发现的热液流体和盆地周边的锌铅矿集区, 暗示中上扬子地区可能存在一个广泛的埃迪卡拉纪-古生代流体循环系统。

关键词: 中上扬子地区; 奥陶系五峰组-志留系龙马溪组; 黑色页岩; 黄铁矿微量元素及硫同位素组成; 热液流体活动

第一作者简介: 李劭杰(1990-), 特任教授, 研究方向: 油气地球化学、油气成藏年代学. Email: shaojie.li@yangtzeu.edu.cn.

*通信作者简介: 肖七林(1980-), 教授, 研究方向: 油气地球化学、油气成藏动力学、非常规油气地质-地球化学. Email: qilinxiao@cug.edu.cn.

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

元古代中期海洋硫化程度的降低促进了 早期真核生物的演化

隋佩珊^{1*}, 张少兵¹, 卫炜¹, 黄方¹

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

元古代中期 (1.8~0.8 Ga) 是地质历史演化的关键时期, 承接了古元古代和新元古代两次大氧化事件, 见证了真核生物的起源和多细胞化过程。传统观点认为, 元古代中期环境演化相对停滞, 大气及海洋氧含量低, 真核生物演化受限, 被称为枯燥的十亿年。然而, 越来越多的研究发现, 以低氧为特征的元古代中期的海洋仍然存在几次脉冲式氧化事件, 尤其是在 ca. 1.57 Ga 和 ca. 1.4 Ga。与此同时, 元古代中期越来越多的真核生物化石记录, 尤其是高于庄组三段中最古老的多细胞宏体真核生物化石记录, 表明此时期真核生物生态系统比以往认为的更为活跃。因此, 对于元古代中期海洋氧化还原状态演化及其与真核生物的起源和多样性之间的关系尚存争议。我们分析了元古代中期华北克拉通延庆地区高于庄组钙质页岩

淋滤组分的 V 同位素组成 ($\delta^{51}\text{V}_{\text{leach}}$)。研究样品的 V 富集程度与 $\delta^{51}\text{V}_{\text{leach}}$ 之间有显著的相关性, 说明这些沉积物的 $\delta^{51}\text{V}_{\text{leach}}$ 变化受到了局部储库的影响。基于平衡分馏模型, 我们重建了元古代中期~1.57 Ga 广海的 $\delta^{51}\text{V}_{\text{OSW}}$ 值及广海氧化还原状态演化。结果显示, 元古代中期广海 $\delta^{51}\text{V}_{\text{OSW}}$ 值从-0.36‰和-0.34‰增加到-0.11‰, 海洋氧化还原环境从广泛硫化转变为广泛缺氧, 海洋硫化程度显著降低, 海底氧化面积占比和可利用溶解氧含量显著增多。这种海洋环境的转变可能改善了海洋宜居性, 从而促进了多细胞宏体真核生物的出现和演化。

关键词: 元古代中期; 古海洋; 氧化还原; V 同位素; 真核生物

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

重庆城口陡山沱组锰矿沉积环境与沉淀机制

罗旭文¹, 樊海峰^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

锰是国家战略紧缺关键矿产之一, 被广泛用于钢铁工业和新能源汽车、新材料等战略新兴产业。近年来, 我国在锰矿资源勘查方面取得了显著进展, 例如在城口地区探获了高燕和修齐大型锰矿床。尽管前人对扬子北缘城口碳酸锰矿床进行了系统研究, 但在沉积环境和矿床成因等核心问题上仍存在较大争议, 导致城口锰矿成矿规律尚未得到充分阐明。为了更全面地了解城口锰矿床的沉积环境, 本研究测定了城口典型锰矿床的氮同位素组成 ($\delta^{15}\text{N}$)。结果显示, 城口锰矿床的 N 同位素组成 (平均值为 7.27‰) 明显高于同时期海洋 (大约 5‰), 这表明城口次级盆地的氮循环主要以反硝化作用和/或氨的厌氧氧化为主。结合城口锰矿铁化学组分和草莓状黄铁矿粒径的分析, 本文认为锰矿是在氧化还原分层的水柱中沉积形

成的, 在 (次) 氧化环境下以锰氧化物的形式沉淀并富集, 在缺氧底层水中还原为 Mn (II), 并以菱锰矿的形式保存。最近有学者对城口锰矿石 Mo 同位素 ($\delta^{98}\text{Mo} = -1.3\text{‰} \sim 0$) 研究也提出了类似的观点。然而, 新的数据并不支持这一观点, 强烈正的铊 (Tl) 同位素组成 ($\epsilon^{205}\text{Tl} = 6.2 \text{‰} \pm 0.8 \text{‰}$, 类似于现代铁锰结壳) 表明, 锰矿在氧化水体中以锰氧化物的形成沉淀在沉积物-水界面, 随后在硫化沉积物中还原和再活化, 最终形成锰碳酸盐。总体而言, 本研究不仅提出了城口锰矿形成的修正模型, 而且也在地史时期锰矿成因探究提供了新的视角。

关键词: 城口锰矿; 氮同位素; 氧化还原环境; 铊同位素; 沉淀机制

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42073016、42121003、92062221、U2244210); 贵州省 2020、2021 年度科技补助项目 (GZ2020SIG、GZ2021SIG)

第一作者简介: 罗旭文 (1999-), 硕士研究生, 研究方向: 矿床地球化学. E-mail: luoxuwen@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 樊海峰 (1981-), 研究员, 研究方向: 矿床地球化学. Email: fanhaifeng@mail.gyig.ac.cn

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

埃迪卡拉纪末期升高的海洋生产力及其在 Shuram Excursion 恢复中的作用：来自锌同位素的证据

佟金祚¹, 程猛^{1*}, 李超¹

1. 成都理工大学 沉积地质研究院, 成都 610059

埃迪卡拉纪晚期发生了地质历史上最大一次无机碳同位素负偏事件, 即 Shuram Excursion 或 DOUNCE (Grotzinger et al., 2011)。通常认为, 该事件的恢复与海洋生产力的升高有关 (Canadas et al., 2024), 但缺乏直接的证据。海洋沉积物的锌同位素是约束海洋生产力及有机质埋藏的有效指标 (Zhong et al., 2024)。为了重建海洋生产力演化及其在 Shuram Excursion 事件恢复中的作用, 我们对华南陡山沱组九龙湾剖面 and ZK6305 钻孔的四段黑色页岩沉积开展了 Zn 同位素、主-微量元素和铁组分分析。结果显示, 铁组分及氧化还原敏感元素指标指示研究样品主要形成于硫化的沉积环境中, 盐度重建指标 (即 B/Ga) 指示南华盆地具有中到强的局限性。类似于现代的波罗的海, 这样的环境有利于 H₂S

对水体中 Zn 的完全捕获, 使得沉积物可以有效的记录海水的同位素组成 (Vance et al., 2016)。Zn 同位素在研究剖面上部显示出升高的趋势 (九龙湾: 从+0.31‰升至+0.70‰; ZK6305: 从+0.35‰ 升至+0.62‰), 这可能反映了升高的海洋生产力导致的有机质埋藏的增加。有机质的大量埋藏移除轻碳, 驱动海洋无机碳同位素的恢复。同时, 沉积物中颗粒有机质相较溶解有机质的增加导致了有机碳同位素组成重新与无机碳同位素耦合。我们的研究为生产力增强驱动 Shuram Excursion 恢复提供了重要证据。

关键词: 华南; 碳同位素; 碳循环; 铁组分; 古盐度

第一作者简介: 佟金祚, 博士研究生, 研究方向: 古海洋 Zn-Cu 同位素。Email: jin.zuo@qq.com

通讯作者简介: 程猛, 研究员, 研究方向: 地球早期古环境演化。Email: mengcheng@cdut.edu.cn

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

四川盆地北部地区中二叠统茅口组上段硅质及含硅质岩类成因研究

刘沛云¹, 胡广^{1*}

1. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 成都 610500

四川盆地茅口组勘探历史悠久, 近年来滩相白云岩储层接连获高产工业气流, 成为勘探热点。在勘探中发现白云岩发育层段常有硅质岩伴生, 其以不连续结核状或连续层状产出, 形态多样, 分布广泛。目前对茅口组这套硅质岩的硅源及成因仍存在争议。本文以四川盆地北部地区中二叠统茅口组上段(茅二上亚段)硅质岩为研究对象, 选取马槽沟、西北乡、雪玉洞等 8 个野外剖面, 通过岩石学观察、主微量元素分析及硅氧同位分析, 系统探讨硅质岩的硅质来源与成因机制。根据野外产出特征及样品二氧化硅含量, 将研究样品分为四类: 层状硅质岩、层状含硅质岩类、结核状硅质岩和结核状含硅质岩类。层状硅质岩在深水斜坡和浅水碳酸盐台地均有产出, 前者含放射虫且钙质生屑局部硅化、泥质含量高, 后者基质完全硅化; 层状含硅质岩类仅一件样品, 发育于深水环境, 含重结晶放射虫; 结核状硅质岩及含硅质岩类主要产出于浅水碳酸盐台地, 由微晶石英和玉髓组成, 含不等量碳酸盐, 生屑和基质均发生硅化。地球化学特征显示, 四类岩石的 $Al/(Al+Fe+Mn)$ 比值(接近 0.6)显著高于纯热液成因硅质岩的元素比值(0.01), $Al-Fe-Mn$ 三角图解

集中于富 Al 端; Y/Ho 比值(均值 40~50)指示海水沉积环境而非热液环境, 并混有少量陆源淡水; 稀土元素总量较低(数个 ppm), 稀土配分模式呈左倾趋势, 具明显 Ce 负异常, Eu 无正异常(除部分结核状硅质岩 Eu 正异常外), 与典型海水中生物成因硅质岩特征一致。硅氧同位素组成显示, 除一件层状硅质岩样品具热液成因特征($\delta^{30}Si=-1.9\%$, $\delta^{18}O=22.8\%$)外, 其余样品 $\delta^{30}Si$ 值为 0.3‰~1.5‰, $\delta^{18}O$ 值为 29.0‰~33.1‰, 与生物成因硅质岩特征相符。综合研究表明, 研究区硅质岩主要为生物成因, 硅质放射虫是主要硅源, 部分层状硅质岩和结核状含硅质岩受热液叠加影响。深水环境的层状硅质岩是放射虫死亡后直接沉积、成岩形成; 浅水环境的层状硅质岩、结核状硅质岩及含硅质岩类则受控于海侵背景下上升流作用, 深水中溶解的生物硅被搬运至浅水环境, 通过交代碳酸盐岩形成。另外, 盆地基底断裂引发的热液活动参与了浅水环境的硅质运移, 在局部形成混合硅源交代作用下的结核状硅质岩。

关键词: 四川盆地; 茅口组; 硅质岩; 地球化学; 成因机制

基金项目: 中石油科技部创新联盟体项目(2020CX010302)

第一作者简介: 刘沛云(2000-), 硕士研究生, 研究方向: 地球化学. Email: 1445282150@qq.com

*通信作者简介: 胡广(1978-), 教授, 博士生导师, 研究方向: 地球化学. E-mail: guanghu1198119@163.com

· 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 ·

鄂西地区上二叠统页岩解吸气天然气地球化学特征及成因分析

崔亚圣¹, 李乐^{1*}, 杨欢¹, 王伟¹, 辛杰¹, 余浩宇¹, 胡远清¹

1. 湖北省地质科学研究所 湖北省地质局, 武汉 430034

近年来,上二叠统页岩气勘探在扬子板块的鄂西及川东地区不断取得重要突破,早期研究已在气藏相关的沉积环境、孔隙结构及储层评价等方面取得了诸多重要认识,但在气藏的气体组成、烃类同位素分馏机制以及气藏成因等方面尚缺系统研究,制约了气藏成藏过程的深化理解及综合利用。本研究聚焦于鄂西地区上二叠统大隆组页岩,基于现场 28 个小时的长时间连续解吸实验,结合气体组分与同位素分析,系统总结了气藏天然气地球化学特征及其成因进行了初步探讨。

结果表明:(1)大隆组页岩解吸气中以 CH₄ (78.81%~91.18%/85.54%) 为主、包含少量 C₂H₆ (1.56%~3.63%/2.46%), N₂ (5.74%~18.94%/11.43%) 和 CO₂ (0.18%~0.90%/0.63%), 含微量硫化氢 (0.55~1.06 ppm/0.69 ppm)。受吸附-扩散效应影响,解吸呈现出初始、中期和末期三阶段变化,其中,烃类 (CH₄、C₂H₆) 及主要非烃组分 (N₂、CO₂) 在中期解吸阶段 (7~25 小时) 的组成最能代表储层原始气体特征。(2)大隆组页岩解吸气中的乙烷碳同位素

特征 (-37.84‰~-29.51‰) 指示其为油型气来源, $\delta^{13}\text{C-C1}$ versus C1/(C2 + C3), $\delta^{13}\text{C-C1}$ versus $\delta^2\text{H-C1}$, $\delta^{13}\text{C-C1}$ versus $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ 图解则指示其为晚期热成因气,碳同位素倒转现象的出现则表明气藏内出现了干酪根原生气及油/凝析油次生气的混合。(3)气藏中的非烃气体的出现推测为无机-有机混合来源。其中, N₂ 主要来源于富铵黏土矿物的热分解 (孤峰组中粘土含量为 21.9%)。CO₂ versus $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ 图解以及 $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ (-8.01‰~-5.93‰) 指示 CO₂ 以无机来源为主) 可能为碳酸盐矿物热分解产物,含少量有机成因 CO₂ 混入。地层热演化程度与广泛发育的草莓状黄铁矿指示 H₂S 可能为有机质热裂解或热化学硫酸盐还原 (TSR) 的产物。

研究成果为页岩气资源评价与成藏机理研究提供了关键地球化学证据,支撑了鄂西地区及类似构造区页岩气高效勘探。

关键词: 页岩解析气; 吸附-扩散; 碳同位素倒转; 大隆组; 鄂西

基金项目: 湖北省自然科学基金 (2022CFB490), 湖北省地质局科技项目 (KJ2024-2)

第一作者简介: 崔亚圣 (1994-), 工程师, 研究方向: 石油与天然气地质. Email: yashengcui@163.com

*通信作者简介: 李乐 (1985-), 博士, 副研究员, 研究方向: 非常规油气地质. Email: santali2005@gmail.com

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

四川盆地南部五峰组-龙马溪组有机质 孔隙结构及分形特征

管全中^{1*}, 陈诚¹

1. 成都理工大学, 成都 610059

有机质孔是页岩气储层中重要的储集空间, 约占总孔隙度的 50%。采用扫描电镜、低压 N₂ 吸附、热分析、图像统计和分形理论等综合分析方法, 定量表征了五峰-下龙马溪组有机质孔的结构特征与复杂性。五峰-下龙马溪组具有较高的有机质丰度, 平均为 3.20%。有机质孔一般较发育, 主要分布于有机质集合体、有机质-黏土矿物复合体及草莓状黄铁矿内部有机质之中, 其形态一般呈椭圆状、纺锤状, 主要孔径呈现 10~40、100~160 nm 的双峰分布, 可能受到扫描电镜观测的限制。同一口井中埋藏较深页岩中有机质孔较多, 但深层气井与中浅层气井中有机质孔发育程度基本相当。分形维数值可用于表征有机质孔的复杂性, 其中有机质大孔 (D>50) 较有机质中孔

(D2-50) 复杂, 有机质中孔又较有机质小孔 (D<2) 复杂。大孔与中孔的发育是造成有机质孔非均质性的关键因素。同一口井中有机质孔的复杂性随页岩埋藏深度的增加而逐渐增大, 深层气井中有机质孔的复杂性与中浅层气井基本相当。页岩中有机质孔的结构特征与分形特征主要受组分、成岩作用和构造作用等控制。下龙马溪页岩具有较高的生物石英含量和有机质较强的生烃能力, 这种组成对有机质孔隙起到很好的多向挤压屏蔽作用, 从而形成无定向的宏孔和中孔, 导致下龙马溪页岩有机质孔隙结构复杂度增加。

关键词: 四川盆地; 五峰组-龙马溪组; 有机孔; 分形

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

四川盆地筇竹寺组黑色岩系与油气成藏及铅锌成矿间的关系研究

王国芝^{1,2*}, 肖钰于², 付于真², 雷庆², 李娜², 刘刚², 王昱睿²

1. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 成都 610059;

2. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059

许多黑色岩系既是油气藏的烃源岩, 又是成矿的矿源岩。四川盆地下寒武统筇竹寺组黑色岩系集中分布于盆地周缘的地表或者深埋于地腹, 它们是盆内灯影组和龙王庙组天然气藏重要的烃源岩。四川盆地周缘的 MVT 型铅锌矿床, 主要产于该套黑色岩系下伏的灯影组和麦地坪组白云岩中, 矿体沿古岩溶界面分布, 在空间上它们常与古油气藏(沥青)相互包容密切共生。

通过对盆地北缘马元铅锌矿、盆地西南缘唐家山铅锌矿和雪区铅锌矿中沥青的生物标志化合物研究表明, 沥青的形成环境、母质来源、CPI、OEP、萜烷化合物分子参数、甾烷分子参数均可与筇竹寺黑色岩系很好的对比, 说明筇竹寺组黑色岩系是这些古油气藏重要的烃源岩。研究表明, 盆地北缘和盆地西南缘与铅锌矿共生的古油气藏的油源, 可能分别来自于近邻和盆内绵阳-长宁拉张槽内的筇竹寺组烃源岩。

对盆地北缘、盆地西南缘和川中腹地筇竹寺组烃源岩中 Pb 和 Zn 含量的分析表明, 部分烃源岩中 Pb 和 Zn 元素异常富集, 绝大多数样品中 Pb 的含量可达地壳克拉克值的 1.7~5.9 倍; Zn 的含量普遍低于地壳克拉克值, 仅个别样品中 Zn 的含量达地壳克拉克值的 1.9~8.8 倍。通过扫描电镜分析表明, 烃源岩中可见丰度不等的 μm 级方铅矿、闪锌矿、重晶石和立方体状或草莓状黄铁矿。这些特征表明, 烃源岩具有提供成矿所需金属元素的潜力。

对盆地北缘不同地区和盆地西南缘雪区与铅锌

矿共生古油气藏内沥青的 Pb、Zn 含量分析表明, 绝大多数样品中 Pb 的含量达地壳克拉克值的 2~36 倍, 极个别样品可达 162~625 倍; 大多数样品中 Zn 的含量可达地壳克拉克值的 2~10 倍, 极个别样品可达 36~132 倍。对它们的扫描电镜分析表明, 在沥青内部可见丰富的 μm 级方铅矿、闪锌矿、重晶石和粒状黄铁矿。沥青中 Pb、Zn 含量远高于 MVT 型铅锌矿床成矿流体所需要的 Pb (2.0×10^{-6}) 和 Zn (13×10^{-6}) 含量, 表明石油可能也是成矿的初始流体。沥青中 Pb 和 Zn 的含量均大大地高于烃源岩中 Pb 和 Zn 的含量, 暗示着在油气生成过程中烃类对成矿金属元素有一个再富集的过程。

综上所述, 筇竹寺组黑色岩系不仅为与铅锌矿共生的古油气藏提供油源, 同时也为铅锌成矿提供了成矿所需的金属元素, 它具有双源层的作用。在黑色岩系初始沉积成岩阶段, 有机质对成矿金属元素可能进行了预富集形成了矿源层; 在成烃过程中, 烃源岩中的 Pb、Zn 被烃类萃取和进一步富集形成初始成矿流体和油藏流体; 其后, 金属元素可能与石油中卟啉化合物或非卟啉化合物形成金属-有机络合物形式搬运和聚集。烃源岩和沥青中 μm 级方铅矿和闪锌矿的存在, 说明金属元素也可能以 μm 级硫化物形式搬运和聚集。研究发现, 形成古油藏时可能并未成矿, 成矿可能主要发生于古油藏向古气藏转换后的古气藏破坏过程中。

关键词: 筇竹寺组; 烃源岩; 矿源层; 成矿成藏

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42373075)

通信作者简介: 王国芝 (1964-), 教授, 研究方向: 地质流体与成储成矿

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

砂岩型铀矿衰变的地质效应

吴立群^{1*}, 焦养泉¹, 张帆¹, 孙钰函¹

1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074

在传统的硬岩型铀矿床及其附近地区, 由于矿石中铀品位较高和铀元素富集的时间较长, 发现了很多铀矿衰变地质效应, 比如: 铀矿的放射性可影响大地热流, 其衰变热构成了地球内部的重要热能之一, 铀矿放射性可对围岩矿物晶格造成破坏, 被称为辐射损伤。然而, 在砂岩型铀矿中, 由于砂岩铀矿品位较低、矿床形成时间相对较短, 导致其对围岩影响强度不够, 铀矿衰变地质效应特别是生热效应微弱, 因此, 关于砂岩型铀矿的放射性地质效应系统研究较少。但是, 实际上古老的砂岩型铀矿在成矿后, 漫长的衰变也能对周围地质环境和围

岩造成种种辐射痕迹, 研究团队在鄂尔多斯北部和南部的古老砂岩型铀矿附近发现由于其衰变引起的围岩有机质成熟度“跃升突变”、钠长石红化和石英、锆石碎屑颗粒的辐射损伤“裂变径迹”等现象。其中, 碳质碎屑 R_o 跃升突变现象和规律的发现, 不仅阐明了碳质碎屑与铀矿的相互作用与成因联系, 更重要的是为研究砂岩型铀矿衰变的地质效应这一科学问题提供了很好的切入点。

关键词: 砂岩型铀矿; 铀矿衰变; 碳质碎屑; 辐射损伤

基金项目: 国家自然科学基金项目(42172128)

第一作者(通讯作者)简介: 吴立群(1979-), 副教授, 博士生导师, 研究方向: 盆地铀资源. Email: 176781317@qq.com

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

玛湖凹陷二叠系风城组含碱页岩层系中 关键金属元素富集特征

刘新宇¹, 杨勇强^{1*}

1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266000

准噶尔盆地西北缘玛湖凹陷在二叠系风城组发育最古老的碱湖, 火山作用较强, 盆地中部发育厚层含碱页岩。本文在岩心系统描述的基础上, 利用 XRD、MICRO-XRF、ICP-MS、ICP-OES、LA-ICP-MS 等测试手段, 对碱矿和关键金属元素赋存特征和分布规律进行了总结。研究表明火山物质的持续供给和气候作用的周期性波动, 造成了暗色沉凝灰岩和浅色碱层的交替发育, 沉凝灰岩中发育成岩期形成的条带状和团块状的碳钠镁石、碳钠钙石等矿物, 浅色碱层主要由碳氢钠石和天然碱组成。通过主微量元素分析发现暗色沉凝灰岩层中的关键金属元素含量远大于浅色碱层, Li、Ga、Rb、Cs、Ta 等元素

呈分散状富集于凝灰质基质中, 表明其多为沉积成因; 而 Sr、Y 等元素以及稀土元素在碳钠钙石脉体中富集, 表明其易于随成岩流体迁移; Cd、W 两种元素分布均匀。火山碎屑的注入、物质的空落及深部热流体活动为碱矿和关键金属元素的形成提供了物质基础。建立关键金属元素矿产资源在火山、热液、陆源碎屑等多源控制下碱湖中的富集模式, 对此类盆地中碱矿和关键金属元素矿产资源的勘探和开发有着重要的意义。

关键词: 玛湖凹陷; 页岩; 碱矿; 关键金属元素矿产

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

华南地区黑色页岩中钒有利富集条件与过程

杨立飞^{1*}

1. 东华理工大学 地球科学学院, 南昌 330013

华南黑色岩系普遍富钒, 然而其富集条件与富集过程缺乏精细研究, 限制了对黑色岩型钒矿成矿机理。系统沉积岩相学、同位素、元素地球化学研究表明, 下寒武统黑色岩系沉积环境变化明显, 对钒富集过程起到重要控制作用, 缺氧、高生产力、半局限性、温暖湿润等古海洋环境有利于促使钒富集成矿。精细矿物学与地球化学研究显示, 钒除富集在有机质中, 可形成钒独立矿物——曼纳德石 ($[\text{Ba}\cdot\text{H}_2\text{O}]\text{Ti}_6\text{V}_2\text{O}_{16}$, $a = b = 14.346(7) \text{ \AA}$, $c = 5.899(1) \text{ \AA}$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, $I41/a$, $Z=4$)。钒与氧原子形成 V-O_2 -化学键占据固定晶格位置, 少量钒以 V^{4+} 形式通过类质同象形式替换 Ti^{4+} 。为钒富集过程提供了重要矿物学约束。综合以上研究, 本次研究探讨了钒富集过程: 1) 氧化环境

下, 钒主要以 V^{5+} 形式溶于海水; 2) 早寒武世海生生物活动和 Fe 、 Al 氧化物颗粒吸附作用促进了 V^{5+} 初始富集; 3) V^{5+} 在缺氧条件下被有机质(生物残骸)还原为 V^{4+} , 并通过有机质络合作用进一步积累; 4) V^{4+} 被还原剂 S^{2-} 进一步还原为 V^{3+} , 以曼纳德石形式再次高度富集, 少量 V^{3+} 以类质同象形式进入黏土矿中。同时, 约束了钒富集条件, 钒在黑色页岩中富集是早寒武世海生生物大爆发、还原剂 (S^{2-})、生物成因 Ba 和碎屑来源 Ti 等多条件耦合, 决定了其成矿具有鲜明的时-空专属性。

关键词: 黑色页岩; 钒矿; 富集成矿条件; 成矿过程

第一作者简介: 杨立飞 (1991-), 讲师, 研究方向: 沉积环境与多金属成矿过程. Email: lfyang@ecut.edu.cn

*通信作者简介: 杨立飞 (1991-), 讲师, 研究方向: 沉积环境与多金属成矿过程. Email: lfyang@ecut.edu.cn

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

从源岩大数据讨论黑色页岩成因和预测

王飞宇^{1*}, 冯伟平², 赵陶然¹

1. 中国石油大学(北京), 北京 102200;

2. 中国地质科学院, 北京 100083

富有机质源岩形成和空间分布是我们关注的一个重要科学问题, 许多人认为与全球火山活动、热液作用、极热事件、大洋缺氧事件、生物灭绝事件等关键地质事件密切相关, 在有机地球化学中一般认为富有机质源岩的形成主要受生产力, 保存条件(缺氧事件)和稀释作用 3 个方面因素控制。长期的油气勘探积累了大量源岩数据(主要是 TOC, 热解, 有机岩石学和分子地球化学数据)。过去的 20 年我们分析了中国和全球典型盆地油气系统和烃源岩数据, 本文主要从源岩大数据的分析, 讨论富有机质源岩形成的控制因素和预测模型, 以及这个领域中一些争论性问题。

(1) 富有机质源岩形成是否有旋回性? 天文旋回是否控制了源岩的发育? 烃源岩形成本质上是地质历史上通过光合作用形成有机质的保存, 目前全球源岩显生宙以来地层中源岩层段分布大致是明确的, 源岩层段对应的时限约为几到几十 Ma, 大尺度上难以得出天文旋回如何控制全球源岩发育。讨论源岩形成的天文因素时大多数研究基于一个源岩层段内, 时限约为几个 Ma 内, 这个时间尺度沉积岩定年数据本身精度有限, 较小尺度的旋回性主要与沉积相和气候有关。

(2) 保存条件(缺氧事件): 绝大多数高有机质丰度页岩形成于缺氧环境, 高生产力偏氧化环境下形成的源岩很少见到(如东欧的奥陶系 Kukersite 页岩)。从源岩分布实际数据, 全球性缺氧事件这种提法有些夸大了, 即使是 J-K, 也只是在全球的若干盆地中, 存在可对比的缺氧事件, 并没有全球性大范围分布的缺氧事件形成的源岩。

(3) 生产力: 大多数的研究认为源岩形成于高生产力, 但是地质历史上有机生产力恢复很难, 生产力的准确概念主要基于现代环境, 另一方面, 只有生产力的不到 0.1%才保存为沉积物中有机质, 古生产力恢复分析令人信服的证据并不多, 从古生产力来预测古代源岩分布不大可行。

(4) 源岩 HI-TOC 阈值函数关系: 全球海相和湖相页岩 HI 与 TOC 之间存在阈值函数关系, 普遍来说未熟-临界成熟阶段 TOC 小于 1%, HI 一般小于 200 mg/g TOC, 当 TOC 小于 2%~3%, HI 随 TOC 增高而增加, 当 TOC 大于 2%~3%这一阈值区间, HI 保持恒定, 介于 600~700 mg/g TOC, 不同地区 TOC 阈值不同, 如刚果海白垩系源岩和鄂尔多斯盆地长 7 源岩约为 5%, 而柴达木盆地古近系咸水湖相源岩只有 0.5%~1%, TOC 阈值与有机质输入, 保存条件和稀释作用有关。

(5) 火山作用和烃源岩: 许多人认为火山作用(特别是火山灰)提供了丰富的营养元素, 促进了藻类勃发, 从而有利于源岩形成。但从更细英尺度的富有机质源岩的具体分布, 它与火山灰层并没有相关性, 高有机质丰度层段与最大洪泛面显示了良好相关。

(6) 源岩生烃模型: 基于大数据, 从源岩层系统的 TI (SI/TOC) 和 HI 数据随深度和温度的变化, 可较好的限定出源岩实际生烃模型, 这种模型的精度和可靠性要高于模拟实验数据建立的模型。

关键词: 烃源岩; 大数据分析; 缺氧事件; 火山作用; 生烃模型

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

海相细粒陆源碎屑岩主要沉积构造类型及页岩气意义

施振生^{1*}

1. 中国石油勘探开发研究院 非常规研究所, 北京 100083

沉积构造不仅能揭示海相细粒陆源碎屑岩的形成环境和沉积时的古水动力条件, 还影响到页岩气储集层的渗透性及可压裂性。文中通过系统总结国内外相关研究成果, 明确了海相细粒陆源碎屑岩沉积构造的主要类型及成因。海相细粒陆源碎屑岩主要发育物理成因、化学成因和生物成因 3 类沉积构造: 物理成因构造主要有流动成因构造和软沉积物变形构造, 前者包括交错纹理、水平层理(纹理)、块状构造、递变纹理和复合纹理, 后者包括滑塌-滑移构造、负载构造、火焰状构造、球-枕构造、包

卷层理、扭曲纹理、碎裂纹理和坠石; 化学成因构造包括碳酸盐结核和黄铁矿结核; 生物成因构造主要有生物遗迹构造和生物扰动构造。该 3 类沉积构造主要为细粒浊流沉积、等深流沉积和远洋-半远洋沉积成因, 少数为沉积物变形成因。沉积构造类型直接影响页岩气储集层的渗透性、水力裂缝的生成及延展方向。

关键词: 海相细粒陆源碎屑岩; 水平纹理; 交错纹理; 递变纹理; 软沉积物变形; 沉积构造

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科技管理部 “十四五” 科技重大专项(编号: 2021DJ1901) 资助

第一作者简介: 施振生, 男, 1976 年生, 高级工程师, 博士生导师, 主要从事细粒沉积学与储层地质学研究。E-mail: shizs69@petrochina.com.cn

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

四川盆地五峰组—龙马溪组黑色页岩： 生物地层分布、沉积模式和页岩气潜力

聂海宽^{1,2,3*}, 陈清⁴, 李沛^{1,2,3}, 苏海琨⁵, 张珂⁵

1. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206;
2. 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 北京 102206;
3. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 102206;
4. 中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008;
5. 中国地质大学(北京), 北京 100083

上奥陶统五峰组至下志留统龙马溪组底部 WF2-LM4 笔石带页岩是重要的烃源岩层段, 也是页岩气的富集高产层段, 为了明确不同笔石带页岩的展布范围、发育特征和页岩气潜力, 本文基于四川盆地五峰组-龙马溪组主要页岩气井和典型剖面的资料, 通过笔石鉴定和基于笔石带特征的页岩等时地层测井划分两种方法对典型井笔石带进行了鉴定和划分, 分析了不同笔石带页岩的沉积环境、厚度等特征。明确了五峰组下部(奥陶纪凯迪阶晚期 447.62~445.16 Ma) *Dicellograptus complexus* biozone 和 *Paraorthograptus pacificus* biozone、五峰组观音桥层(奥陶纪赫南特阶早期 445.16~444.43 Ma) *Metabolograptus extraordinarius* biozone 和龙马溪组底部(奥陶纪赫南特阶晚期

444.43~443.83 Ma 和志留纪鲁丹阶早中期 443.83~441.57 Ma) *Metabolograptus Persculptus* biozone、*Akidograptus ascensus* biozone、*Parakidograptus acuminatus* biozone 和 *Cystograptus vesiculosus* biozone 七个笔石带页岩的沉积环境、岩性和厚度特征, 建立了不同笔石带页岩的沉积模式, 并结合勘探开发实践, 明确了不同笔石带的页岩气潜力。与中东-北非志留系海相 hot shale 相比, 我国南方奥陶系-志留系富有机质页岩主要发育于凯迪阶晚期至鲁丹阶早中期。研究成果有助于富有机质页岩的精细化分和页岩气甜点优选。

关键词: 页岩气; 笔石带; 等时地层; 五峰组-龙马溪组; 四川盆地

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

黑色页岩中的地质事件：必然还是巧合

何治亮¹, 张钰莹^{2*}

1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074;

2. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110819

黑色页岩的形成是地球系统多圈层(大气-海洋-生物-岩石圈)耦合作用的结果,其时空分布与多种地质事件如构造事件、火山事件、海侵事件/大洋缺氧事件(OAE)、气候突变、生物灭绝/辐射、热液事件等紧密关联。本文在对特提斯域及邻区中元古宙以来代表性黑色页岩分析的基础上,梳理了与其形成分布相关的各类地质作用与地质事件,提出控制黑色页岩形成的地质作用与事件可分为必然因素与偶然因素(巧合)。必然因素为黑色岩系形成过程中必不可少的条件,主要包括构造作用、海侵事件与火山活动,这些地质因素决定了黑色岩系形成的空间、有机质来源与保存等关键作用。从中元古宙到新生代,黑色页岩逐渐升高的出现频次与不断增强的板块活动相一致,构造作用通过板块的裂解与聚合改变页岩沉积可容空间与沉积物来源;此外,超大陆的裂解与聚合往往会引起其他地质事件(如地幔柱、火山活动、海平面上升等),对黑色页岩的沉积起关键作用。海平面的快速上升(海侵事件)会导致水体深度增加,水体滞留分层造成底部水缺氧有利于有机质的保存。火山活动向海洋输入大量生命元素触发了海洋生物的繁盛,为有机质沉积提供物质基础,释放的气体可降低海水氧含量,国内外页岩油气优质产层大多伴生火山灰层。偶然因素为黑色岩系形成过程中可能会伴随的

地质事件,但是其对黑色页岩的形成并非直接相关或者仅有局限的促进作用,主要包括热液事件、气候事件与生物的绝灭与辐射事件。海底热液口能够将地球内部的热量和化学物质传输至海洋中,提高古生产力;热液活动释放还原性气体促进有机质的保存。但热液活动的影响范围有限,对局部黑色岩系的形成起到促进作用而非必要条件。前人研究认为温暖气候有利于有机质的形成与保存;然而,毛小平等(2024)研究认为,寒温带虽然生产力低,但固碳效率高。我国的典型黑色岩系可形成于温室期,如二叠系龙潭组,也可形成于冰期,如奥陶系五峰组,因此气候事件对黑色岩系的影响需要综合其他因素确定。部分黑色页岩形成于生物大灭绝事件前后,然而更多黑色岩系的沉积与其无关,决定黑色页岩是否形成的是生物事件前后的构造-沉积环境因素。总体来说,多圈层与多重地质事件的耦合作用,构造-水文-气候-生物协同作用联合控制了规模性的黑色页岩的形成和分布,主要机制包括板块活动造成了多种相对局限盆地的地貌条件和稳定的欠补偿环境、适宜的气候和丰富的营养物导致旺盛的生产力、硫化与水体分层的缺氧环境导致有机质有效保存。

关键词: 黑色页岩; 地质事件; 沉积环境

第一作者简介: 何治亮(1963-), 教授, 研究方向: 石油地质学. Email: hezhiliang@sinopec.com

*通信作者简介: 张钰莹(1987-), 副教授, 研究方向: 石油地质学. Email: zhnagyuying@mail.neu.edu.cn

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

华南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩与多重地质事件耦合关系

张钰莹^{1*}

1. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110819

华南地区五峰组-龙马溪组黑色页岩是我国重要的页岩气资源富集层段, 主要发育于四川盆地及其周边地区, 形成于奥陶纪末至志留纪初的深水陆棚环境。奥陶纪与志留纪之交是地质历史上一个关键的转折期, 这一时期发生了许多重大地质事件, 对地球的气候、生物和构造格局产生了深远影响, 也对黑色页岩的形成起到至关重要的作用。奥陶纪-志留纪之交, 四川盆地的构造背景主要受扬子地块的稳定克拉通环境和加里东运动的影响, 盆地表现为克拉通内坳陷和克拉通边缘坳陷的复合性质, 晚奥陶世五峰组沉积期, 加里东运动导致川东南形成局限的深水海湾环境, 沉积了富有机质页岩。志留纪龙马溪组沉积特征, 四川盆地的沉积环境以深水陆棚为主。这期间火山活动频繁, 可能与扬子北缘秦岭洋闭合过程中的板块俯冲有关, 导致页岩中发育有多套钾质斑脱岩层。火山活动喷发释放的大量营养物质(如磷、氮等)进入水体, 能够显著提高初级生产力, 为黑色页岩中有机质的富集提供了物质基础。此外, 火山活动能够引发缺

氧环境的形成, 这有利于有机质的保存。奥陶纪末期发生了赫南特冰期, 在五峰组顶部, 冰川作用导致气候寒冷干燥, 水体变浅, 沉积水体由还原条件变为氧化条件; 而龙马溪组沉积早期, 随着冰期结束, 气候变暖, 发生大规模快速海侵事件, 沉积水体变为缺氧的还原环境。晚奥陶世末期至早志留世初期, 全球发生了生物大灭绝事件, 导致生物多样性显著下降, 但五峰组和龙马溪组沉积物中仍保存了丰富的笔石、放射虫和海绵骨针等化石。总体而言, 奥陶纪与志留纪之交经历了加里东运动、生物大灭绝、海平面快速下降与上升、气候变冷与回暖以及频繁的火山活动等重大地质事件, 这些地质事件通过控制页岩沉积可容空间、沉积环境的氧化还原条件、生物初级生产力和陆源输入等因素, 共同促进了五峰组和龙马溪组黑色页岩的发育和有机质富集。

关键词: 五峰组; 龙马溪组; 黑色页岩; 地质事件; 沉积环境

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

晚寒武-早奥陶纪海洋沉积环境重建: 来自 Alum 页岩的地球化学证据

边雷博¹, 王晓梅^{1*}

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

晚寒武纪-早奥陶纪时期(500~480 百万年)是连接寒武纪生物大灭绝和奥陶纪生物大辐射的关键转折期。寒武纪晚期, 全球后生动物物种多样性在芙蓉世显著下降, 而奥陶纪生物大辐射事件中物种多样性增长了三倍。前人研究多集中于晚寒武世全球生物灭绝事件或奥陶纪生物大辐射事件的单独探讨, 而本研究则聚焦于揭示晚寒武-早奥陶世环境-生物转变的主要控制机制(Bian et al., 2023)。研究表明, 从苗岭世到芙蓉世早期, 沉积环境逐渐转变为硫化条件, 同时伴随着营养物质输入减少和水体循环受限, 多种地质因素的共同作用导致了全球碳同位素正漂移事件(Steptoean Positive Carbon Isotope Excursion)。在中芙蓉世早期, 强烈的火山活动可能引发了第二次生物灭绝事件。随后, 增强的大陆风化作用促进了地球降温, 并向生态系统输入更多营养物质, 从而推动了生物复苏。在早奥陶世初期, 尽管陆地营养物质输入减少,

但大规模的海水上涌降低了水体的硫化程度, 并为生物提供了必要的营养物质。此外, 我们通过汞地球化学方法研究了该时期的火山活动特征。结合钼-汞和钒- $\delta^{202}\text{Hg}$ 模型, 我们发现芙蓉世显著的汞富集伴随着正的 $\Delta^{199}\text{Hg}$ 、 $\Delta^{200}\text{Hg}$ 和 $\Delta^{201}\text{Hg}$ 值以及负的 $\Delta^{204}\text{Hg}$ 值, 这些特征表明汞可能通过大气长距离传输而来; 而早奥陶世的汞异常则以接近零的非质量分馏同位素值为特征, 表明其来源可能与海底火山(热液)活动有关。综上所述, 我们认为地表温度变化、营养物质输入以及底层硫化水体扩张与收缩的协同作用, 不仅有利于高有机质明矾页岩的沉积, 也可能是晚寒武-早奥陶世生物周转的主要驱动因素。这一过程体现了地球多圈层间物质与能量的相互作用及其对生物演化的深远影响。

关键词: Alum 页岩; 富有机质页岩; 晚寒武-早奥陶纪

第一作者简介: 边雷博, 博士后, 研究方向: 富有机质页岩沉积. Email: leibo19940528@foxmail.com

*通信作者简介: 王晓梅, 教授, 研究方向: 油气地球化学. Email: wxm01@petrochina.com.cn

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

二连盆地地下白垩统热水沉积岩的地球化学特征及有机质富集机制

吴飘^{1,2*}, 李渭^{1,2}, 马尚伟^{1,2}

1. 中国地质调查局西安地质调查中心(西北地质科技创新中心), 西安 710119;

2. 中国地质调查局北方古生界油气地质重点实验室, 西安 710119

二连盆地地下白垩统湖盆的水体咸淡性质认识存在争议, 白音查干凹陷以外的凹陷是否存在热水活动, 以及热水活动的资源环境效应尚不明确。据此, 以二连盆地巴音都兰、阿南和乌兰花三个洼槽云质岩发育层段为研究对象, 通过开展岩矿测试和地球化学分析, 利用 B 元素法等多种方法定量恢复了水体古盐度, 并结合热水活动的岩石学和地球化学特征研究, 明确了热水的性质及热水沉积烃源岩的有机质富集机制。研究表明, 二连盆地热水沉积岩包括云灰质岩石、含方沸石岩石和凝灰岩, 热水矿物以(铁)白云石为主, 其次为方沸石和自生石英。云灰质岩石的分布受二级控洼断裂控制, 形成于盐度为 35‰~120‰的中咸水环境, 具有 Al、Ti 相对亏损, Ca、Mg、Mn、Fe 相对富集, Li、Sb 显著富集或大量富

集等特征, 为湖相白烟型热水沉积岩。云灰质泥岩具有 C₂₈ 甾烷含量高、β-胡萝卜素含量高、甾藿比值高的特征, 凝灰质泥岩具有三环萜烷含量高、甾藿比值高的特征, 烃源岩的 TOC 与还原环境指标具有良好的正相关性。分析认为, 二连盆地存在广泛的热水活动, 热液通过断裂系统喷流进入湖盆并与湖水混合, 一方面使湖水中的 K、Na、Ca、Mg 等元素含量升高, 造成了湖盆咸化和水体盐度分层; 另一方面, 不同程度的咸化造成了不同类型的藻类繁盛, 并促进了缺氧环境的形成。盐度分层和缺氧环境的形成是咸水洼槽内有机质富集的主控因素。

关键词: 陆相热水沉积; 云灰质岩; 二连盆地; 生物标志化合物

· 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 ·

寒武纪早期扬子和塔里木地块缺氧陆架-盆地错时发育与差异古地理演化

陈代钊^{1*}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

扬子和塔里木地块作为中国两个主要的稳定陆块, 在寒武纪早期都发育了富有机质黑色页岩沉积, 并成为两大陆块重要的烃源岩, 同时也赋存了其他的重要矿产资源 (如磷、Ni-Mo-V 等多金属)。其中, 在扬子地区的有机质富集层系被称之为筇竹寺组 (或牛蹄塘组), 在塔里木盆地被称之为玉尔吐斯组, 二者 (特别是陆架坡折-斜坡沉积) 底部都发育硅磷之沉积, 表明它们都形成于洋流上升盛行的陆架, 这种状况也得到了地球化学证据的支持。而处于中低纬度的信风为陆块陆架区的洋流上涌 (上升流) 和持续高生产力提供了持续动力和营养物质, 因此, 这两大陆块在黑色页岩形成时期都应该都处于中低纬度信风带。但它们形成的时间明显不同 (错时), 扬子地块黑色页岩层系 (筇竹寺组或牛蹄塘组) 主体形成于第 3 世, 而塔里木地块的玉尔吐斯组则形成于第 2 世, 早于扬子地块的, 也就是说这两大陆块是在不同的时间段到达合适区域的。另外, 从两陆块寒武系底部沉

积序列的变化来看, 扬子地块寒武系底部开始主要为浅水碳酸盐岩序列 (小歪头山组及相当的待补段+中谊村段+大海段) 组成, 向上磷质成分 (甚至磷块岩) 幕式增加, 其上被筇竹寺组覆盖, 说明寒武纪开始时扬子地块是从赤道热带区逐渐向中低纬度漂移的; 而塔里木地块的寒武系同期地层则从富有机质的玉尔吐斯组开始, 上覆含海绵 (特别是古杯)-微生物礁、丘的肖尔布拉克组碳酸盐岩沉积序列 (第 3 阶), 说明寒武纪初时塔里木地块经历了从中低纬度向生物礁宜居的低纬区 (赤道区) 的漂移。正是在寒武纪初期这两大陆块漂移路径差异和有机质富集环境发育的地理专属性 (依赖) 造就了它们富有机质沉积的错时, 因此古地理格局与演化为适宜的有机质富集环境的发育提供了最基础性的背景和初始驱动力。

关键词: 寒武纪早期; 富有机质沉积; 错时沉积; 古地理; 信风带

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

早寒武世古海洋中硅循环及其对页岩气富集的影响

高平^{1*}, 肖贤明¹

1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

最近,四川盆地下寒武统深层页岩气勘探取得重大突破(郭彤楼等, 2023; 郭旭升等, 2025),但下寒武统优质页岩储层具有多样性,其形成机理仍存在争议,制约了页岩气的进一步勘探与开发。研究发现,早寒武世古海洋富含硅质,硅循环处于无机沉淀至生物沉淀的过渡期(Gao et al., 2020; Jurkowska and Świerczewska-Gładysz, 2024),多样的硅循环方式导致了下寒武统页岩储层形成相对复杂的孔隙系统。但是,早寒武世古海洋硅循环对优质页岩储层发育以及页岩气富集的影响尚不清晰。

通过对中上扬子地区多口钻井和野外剖面下寒武统黑色页岩样品进行岩石学和地球化学分析,明确了早寒武世古海洋中硅质的主要来源以及硅质成岩演化路径,探讨了特殊地质背景下硅循环对下寒武统页岩储层发育的影响。研究结果表明:(1)早寒武世古海洋中硅质生物主要以硅质海绵骨针为主,其次为硅质放射虫,但硅质生物数量仍不足以完全控制硅循环,导致古海洋中可溶硅浓度相对较高;(2)下寒武统页岩和硅质沉积物中硅质来源和硅质成岩路径相

对复杂,不仅包含硅质生物骨骼的溶解-再沉淀和黏土矿物的成岩转化,还包含富硅质海洋/孔隙水中硅质的直接沉淀和硅质交代碳酸盐矿物/磷灰石矿物,从而形成各种各样的微晶石英颗粒;(3)下寒武统页岩中硅质成岩作用开始于同沉积-非常早成岩期,主要发生在地温区间 30~90 °C,并呈现出多幕次特征,反映出页岩储层中多期次的硅质胶结作用,早期广泛的硅质胶结作用可能会严重恶化孔隙;(4)硅质生物的种类以及自生石英的相对含量可以影响页岩储层中有机质孔隙的发育和保持。硅质放射虫和硅质海绵骨针分别为底栖类和浮游类生物,前者生存于透光带中,放射虫的勃发有利于富有机质页岩的形成,而后者生存于相对氧化的底水环境,不利于有机质保存以及富有机质页岩形成,造成不同区域下寒武统页岩中硅质与有机质埋藏的耦合或解耦,继而影响页岩储层孔隙发育与页岩气富集。

关键词: 黑色页岩; 下寒武统; 石英; 硅质成岩; 有机质

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

中国陆相湖盆细粒沉积岩纹层结构与甜点评价

朱如凯^{1*}

1. 中国石油勘探开发研究院 首席技术专家, 北京 100083

中国大陆主要经历了始特提斯 (Pt₂₋₃-Є1)、原特提斯 (Nh-D)、古特提斯 (C-T)、新特提斯 (J-Q) 4 个裂解-汇聚旋回。自二叠纪以来, 陆相裂谷与坳陷湖盆扩张期形成了淡水、微咸水、咸水和碱湖沉积, 发育多套陆相富有机质页岩, 蕴藏着丰富的页岩油资源。近期勘探在多个盆地获得突破, 获得了一批重要的储量发现。本文以中国陆相典型页岩油区带为研究对象, 综合利用 TOC、岩石热解、岩心薄片、场发射扫描电镜、物性分析、气体吸附、含油性评价等技术手段, 系统研究不同盆地页岩层系的纹层类型、组合与结构, 阐明纹层结构与矿物组成、有机地化、储集空间及含油性的关系, 探讨纹层结构差异性的影响因素及其对页岩油甜点评价的影响, 取得 4 项主要认识: (1) 陆相页岩纹层类型包括黏土矿物纹层、长英质纹层、碳酸盐纹层、凝灰质纹层、有机质纹层及碱性矿物纹层, 纹层类型与古湖盆水体环境密切相关, 水体盐度越大, 碳酸盐纹层与碱性矿物纹层发育比例越大。(2) 不同盆地纹层结构对应的储层品质差异明显: 松辽盆地白垩系青山口组黏土矿物纹层品质最好, 发育粒间孔与微裂缝发育; 鄂尔多斯盆地长 7

段长英质纹层品质最佳, 粒间孔发育比例高; 准噶尔盆地二叠系风城组和芦草沟组、渤海湾盆地古近系孔二段和柴达木下干柴沟组白云石纹层品质最好。(3) 矿物组成与热演化成熟度是影响纹层结构品质差异的关键, 长英质纹层、碳酸盐纹层对应的储层品质普遍优于黏土矿物纹层、碱性矿物纹层、凝灰质纹层及有机质纹层。在较高的热演化成熟度, 松辽盆地青山口组黏土矿物纹层优于长英质粉砂纹层。(4) 纹层结构直接影响了页岩系统的含油性、孔隙结构、矿物组成及储层物性, 不同盆地“甜点区/段”评价优势岩相对应的纹层结构具有差异。碱性湖盆与咸化湖盆页岩油应重点关注碳酸盐纹层与长英质粉砂纹层, 淡水-微咸水湖盆应优选长英质粉砂纹层, 随热演化成熟度的增高, 黏土矿物纹层的储层品质逐渐变好。相关认识可为进一步丰富和发展中国陆相页岩油理论、推动页岩油规模勘探与有效开发提供科学指导与技术支持。

关键词: 细粒沉积; 页岩油; 储层品质; 源储配置; 非常规油气

· 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 ·

川南地区龙潭组泥页岩地球化学特征及古环境意义 ——以兴文玉屏剖面为例

宁高飞¹, 曹涛涛^{1*}

1. 湖南科技大学 地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭 411201

为深入理解川南地区二叠世龙潭组泥页岩的沉积环境, 本文以兴文玉屏剖面为例, 开展了系统的有机地球化学、有机岩石学、主微量元素和稀土元素分析测试。结果表明, 研究区龙潭组泥页岩 TOC 含量平均为 2.69%, 显微组分以镜质组为主、其次为惰质体, 干酪根类型为 III 型, 为典型的倾气型烃源岩。主量元素以 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 和 K_2O 为主, 较低的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值表明主量元素的分布受黏土矿物含量的控制; 微量元素中 Ba、Cr 等元素略有亏损, Co、Cu、Ni 等元素较为富集; 稀土元素呈显著的轻重稀土分异现象, 轻重稀土比值 ($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$) 为 9.21。对龙潭组富有机质泥岩形成的沉积环境进行分析, $\text{La}/\text{Sc}-\text{Co}/\text{Th}$ 、 $\Sigma\text{REE}-\text{La}/\text{Yb}$ 与 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2-\text{TiO}_2$ 图解反映了研究区源岩以峨眉山高钛玄武岩为主、同时也有一部分花岗岩; $\text{La}-\text{Th}-\text{Sc}$ 、 $\text{Th}-\text{Sc}-\text{Zr}/10$ 以及 $\text{Th}-\text{Co}-\text{Zr}/10$ 图解指示物源区具被动陆缘

构造背景。化学蚀变指数 CIA 平均值为 83.90, 显示沉积期风化程度较高; Sr/Cu 平均值为 1.89、 MgO/CaO 平均值为 1.99, 表明研究区整体处于温暖湿润的古气候条件。 Sr/Ba 平均值为 1.05、 $100\times\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 平均值为 3.76, 指示湖泊水体为半咸水-咸水, 结合 Zr/Al 值 (均值 8.25×10^{-3}) 及 $100\times\text{Mn}/\text{Fe}$ 值 (均值 0.66) 以及区域沉积特征, 证实龙潭组泥页岩形成于近源浅水沉积环境。 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 平均值为 0.83、 Ni/Co 平均值为 4.77 和 Ceanom 平均值为 0.04 等特征, 判断研究区整体处于缺氧还原状态。总体而言, 川南地区龙潭组泥页岩具有较高的有机质含量和良好的生烃潜力, 富有机质泥页岩形成于温暖湿润气候下的半咸水-咸水缺氧还原的海陆过渡沉积环境。

关键词: 龙潭组; 元素地球化学特征; 源岩类型; 古气候条件; 川南地区

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42472208); 湖南省自然科学基金项目 (No.2024JJ5145); 湖南省教育厅优秀青年基金项目 (No. 21B048); 湖南省自然资源厅科研项目 (No.20230149DZ) 联合资助

第一作者: 宁高飞, 硕士研究生, 地质工程专业。E-mail: 646268747@qq.com。

通信作者: 曹涛涛, 博士, 教授, 主要从事非常规油气地质与地球化学研究。E-mail: 515165359@163.com。

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

滇黔北坳陷上二叠统龙潭组海陆过渡相页岩 有机质富集机理及对页岩气勘探的指示意义

董田^{1*}, 何庆¹, 何生¹

1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074

目前我国南方海相页岩气已经得到商业开发,然而具有更大资源量的海陆过渡相页岩一直未能突破,总结其特征,主要体现在原始沉积环境的差异,导致有机、无机组分的差异,进而造成成岩作用和储层物性、含气性等差异性。为此,本研究结合系统的岩心描述、薄片和扫描电镜观察,矿物组分分析,元素地球化学分析、高分辨率扫描电镜-能谱元素-阴极发光原位观察、气体吸附技术以及高压甲烷等温吸附实验,以滇黔北坳陷上二叠统龙潭组页岩为例,恢复沉积古环境,剖析有机质丰度、类型、矿物组分变化的沉积机制。研究表明龙潭组海陆过渡相页岩的有机质富集机制与海相页岩较为不同,陆生高等植物碎片对于龙潭组页岩的有机碳含量具有重要贡献,因此,其有机碳含量较高。龙潭组页岩以黏土矿物为主,尽管也含有较多的石英,但多为碎屑来源。生物钡(Babio)和生物硅(Sibio)指标均表明龙潭组沉积时期的古生产力较低,因此,陆源有机质的输入、氧化还原条件和沉积速率是控制龙潭组有机质富集的主要因素。此外,龙潭组矿物组成在纵向上存在较大的非均质性,相比于下段,龙潭组中段和上段的菱铁矿含量、Al/(Al+Fe+Mn)比值、(Fe+Mn)/Ti 比值相对较高且具有明显的 Eu 正异常,表明龙潭组沉积的中期和晚期存在较为强烈的热液活动,而在龙潭组沉积的早期几乎没有热液流体的输入。

尽管龙潭组页岩有机质含量较高,但是存在较多的陆源有机质,因此,有机孔发育程度相对海相页岩要低。大量黏土矿物的存在使得龙潭组页岩发育较多黏土矿物收缩缝。龙潭组页岩的整体甲烷吸附能力也要低于海相页岩,但是龙潭组存在较多的细煤层,其甲烷吸附能力要远高于页岩。在仅考虑孔隙结构这单一因素的情况下,微孔可能对页岩的甲烷吸附能力贡献最大,中孔的贡献次之,大孔的贡献最低。尽管黏土矿物是龙潭组过渡性页岩的主要矿物成分,但它们对甲烷吸附能力的影响是相对有限的。为探究水分含量对龙潭组页岩甲烷吸附能力的影响,分别测定湿样和干样的甲烷吸附量。结果表明,水分的存在能够使得龙潭组页岩的甲烷吸附能力降低约 40%~50%。含水率可能是控制黏土含量丰富的过渡相页岩储层甲烷吸附能力的关键因素。通过对比在相同的实验温度(30 °C),相似的 TOC 含量的海相、陆相以及海陆过渡相页岩的甲烷吸附能力,发现过渡相页岩的甲烷吸附能力往往低于海相页岩,高于陆相页岩。因此相对于五峰-龙马溪海相页岩来说,龙潭组海陆过渡相的物质基础要差,但是考虑煤层的存在,其页岩气和煤层气的总量还是具有一定的商业价值。

关键词: 龙潭组; 海陆过渡相; 有机质富集; 储层物性; 甲烷吸附

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

华南中上扬子地区奥陶纪-志留纪之交化学风化作用与古海洋环境的耦合关系

户瑞宁^{1*}

1. 中南大学, 长沙 410000

重大地质事件对富有机质页岩形成的影响是地球科学领域的研究热点和前沿。在奥陶纪末期发生了显生宙的第一次生物大灭绝事件, 气候环境发生了显著变化, 化学风化作用占据主导地位, 同时沉积了五峰组-龙马溪组这套富有机质页岩。有机质的富集受控于底水的缺氧程度和初级生产力水平, 针对高生物生产力和缺氧条件的驱动机制目前仍存在较大争议, 特别是化学风化作用对古海洋环境的影响仍然知之甚少, 在一定程度上制约了对有机质富集机理的深入理解。本研究以华南中上扬子地区五峰组-龙马溪组页岩为研究对象, 通过开展有机地球化学和无机地球化学

的相关分析, 查明了奥陶纪-志留纪之交化学风化作用呈现“强-弱-强”的特征, 与底水“缺氧-氧化-缺氧”的氧化还原条件具有较好的对应关系; 明确了这一时期的古海洋以生物固氮作用为主, 同时伴有局部好氧氮循环, 不同氮循环模式反映了含氮营养库的空间分布非均质性, 与化学风化作用的差异性演化同样具有较好的响应关系。阐明化学风化作用对古海洋环境的影响对于深入理解有机质富集机理具有重要科学意义。

关键词: 奥陶纪-志留纪之交; 化学风化作用; 古海洋环境; 有机质富集

• 专题 12: 黑色页岩中的关键地质事件与资源能源效应 •

镉同位素示踪鄂尔多斯盆地长 7 段陆相湖盆 异常高初级生产力及其资源效应

殷皓铭², 卫炜², 荆振华^{1*}

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;

2. 中国科学技术大学, 合肥 230026

二叠纪末期, 地球经历了显生宙规模最大的生物灭绝事件, 导致约 90% 的海洋物种和 70% 的陆地物种灭绝。鄂尔多斯盆地是该生物大灭绝事件后, 全球最早恢复的湖泊生态系统, 延长组长 7 段黑色页岩中发现了最为完整的湖泊食物链, 前期研究认为是初级生产力的大幅提升提供了物质基础。但是, 针对湖泊初级生产力水平, 尚未开展系统评价。同时, 鄂尔多斯盆地是中国陆相页岩油的重要生产盆地, 保守评估其资源量可达百亿吨, 主产层即为延长组长 7 段, 最高总有机碳 (TOC) 含量可超过 30 wt.%。目前针对其异常高有机质富集的主控因素是高初级生产力还是良好的保存条件, 仍存在争议。因此, 深入研究鄂尔多斯湖盆长 7 段的初级生产力水平对理解中三叠生态复苏过程和油气资源的形成机制具有重要意义。研究团队利用鄂尔多斯盆地不同地区两口钻井 (N70 井和 F75 井) 的黑色页岩样品, 重点关注湖泊 Cd 循环和 Cd 同位素分馏过程以及氧化还原敏感元素的富集。其中, 盆地南部 N70 井 TOC 较高 (7.6 wt.%~32.6 wt.%), 北部 F75 井 TOC 含量相对较低 (3.4 wt.%~10.2 wt.%), 但与世界范围内黑色页岩 TOC 平均值相比也处于高值, 说明鄂尔多斯盆地长

7 段 TOC 含量整体较高。盆地南部火山活动频繁, 大量营养物质的输入造成藻类等初级生产者勃发, 完全利用了水体中 Cd; 异常高的生产力同时导致水体的缺氧甚至间歇硫化, 进一步促进了有机质的保存。北部地区受火山活动影响较小, 生产力相对南部较低, 水体中的 Cd 被部分利用; 弱氧化环境中仍保存了大量有机质, 表明该地区生产力仍处于较高水平。研究团队得出了两个认识: (1) 鄂尔多斯盆地长 7 段发育时期, 频繁的火山活动向湖泊系统输入了大量的营养物质, 显著提高了湖泊初级生产力水平, 为有机质的积累提供了物质基础, 是异常高有机质富集的主控因素, 而局部缺氧环境则进一步增强了有机质的保存效果; (2) 大量勃发的浮游植物和藻类等初级生产者, 为湖泊昆虫和鱼类等生物提供了丰富的食物来源, 同时大量温室气体以有机碳的形式保存改善了当时的气候条件, 两者共同造就了鄂尔多斯盆地成为全球二叠纪末生物大灭绝后生态系统最先恢复的湖盆。

关键词: 鄂尔多斯盆地; 初级生产力; 镉同位素; 火山活动; 页岩油