

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2025.168

引用格式: 段野,李礼,王春伟. 碳同位素分析技术在非常规油气地质研究中的应用[J]. 中国地质调查,2025,12(4): 1-8.
(Duan Y, Li L, Wang C W. Application of carbon isotope analysis technology in unconventional oil and gas geological research[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(4): 1-8.)

碳同位素分析技术在非常规油气地质研究中的应用

段野^{1,2}, 李礼³, 王春伟^{4*}

(1. 中国科学院南京地质古生物研究所, 江苏 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中石化经纬有限公司胜利地质录井公司, 山东 东营 257000; 4. 中石化经纬有限公司地质
测控技术研究院, 山东 青岛 266000)

摘要: 随着对非常规油气资源勘探开发的深入, 碳同位素分析技术已成为揭示油气成因及成藏、富集产出等方面的关键手段, 但目前对碳同位素分析技术在非常规油气地质研究中应用的总结较少。通过明确碳同位素分析技术的流程及关键参数, 梳理其在非常规油气地质研究的应用情况, 阐述目前存在的问题及发展方向。研究认为: 碳同位素分析技术可以进行油气成因判定、油气源对比、成熟度预测、储层连通性及物性判别、“甜点”评价及产能预测 5 个重点方向的应用研究, 在非常规油气地质研究领域具有较好的应用效果。目前碳同位素分析技术存在样品代表性及预处理不足、标准化体系未统一、碳同位素分馏复杂等推广应用方面的困难与挑战, 正朝着高精度、原位化和动态监测方向发展。此外, 碳同位素分析技术在碳排放溯源、CO₂ 地质封存及地热等场景也具有广阔的发展前景。研究成果可为碳同位素分析技术在非常规油气地质研究中的推广应用提供参考。

关键词: 碳同位素分析技术; 非常规油气; 应用进展; 困难与挑战; 发展前景

中图分类号: P618.13; TE122.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2025)04-0001-08

0 引言

在全球能源结构转型的背景下, 非常规油气资源已成为保障能源安全的核心战略资源^[1-2]。页岩油气、致密油气等非常规体系的复杂成藏机制与动态演化过程对传统地球化学表征技术提出了严峻挑战^[3-4]。近年来, 随着高精度质谱分析技术的突破性进展, 碳同位素分馏效应的解析精度达到 0.1‰^[5], 碳同位素分析技术凭借其独特的地球化学示踪能力, 为研究在微观尺度下揭示油气生成、运移、聚集的过程提供了全新视角^[6-7]。在页岩油气中, 甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 值的垂向演化特征有效揭示了有机质热演化阶段的分界阈值^[8]; 在致密油气中, C₆ ~ C₇ 轻烃单体同位素异常已成为识别微裂缝优势运

移通道的关键指标^[9]。碳同位素分析技术推动非常规油气研究从“经验类比”向“定量预测”跨越, 为页岩油气地质工程“甜点”预测、致密油气成藏过程研究等提供理论支撑, 在石油和天然气勘探开发中对碳同位素分析技术的应用越发广泛。

前人对碳同位素分析技术在油气勘探与开发中的应用已进行过深入研究, 但目前对碳同位素分析技术在非常规油气地质研究中应用的总结较少。通过明确碳同位素分析技术的流程及关键参数, 梳理碳同位素分析技术在非常规油气地质研究中油气成因判定、油气源对比、成熟度预测、储层连通性及物性判别、“甜点”评价及产能预测 5 个方面的应用, 阐述了现存问题及技术瓶颈, 指出未来的发展方向, 为该技术在非常规油气地质中的应用提供参考与借鉴。

收稿日期: 2025-04-26; 修订日期: 2025-07-30。

基金项目: 深地国家科技重大专项“沉积盆地天然氢气成藏机制与资源探测(编号: 2024ZD10)”资助。

第一作者简介: 段野(1990—), 男, 高级工程师, 博士在读, 主要从事石油地质综合研究工作。Email: xianjian678@126.com。

通信作者简介: 王春伟(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事油气藏地质研究工作。Email: happylife138647@163.com。

1 碳同位素分析的流程及关键参数

1.1 分析主要流程

(1) 样品采集与处理。对钻井工程中不同深度

地层返出的钻井液所携带的烃类气体($C_1 \sim C_5$)进行脱气处理,再用密闭容器定量采集脱气得到的钻井液气(钻井液循环带上的地层破碎释放气),同时用密封罐对从静止岩屑中解析出来,再通过纳米孔隙逸散的天然气进行定量采集^[10](图1)。

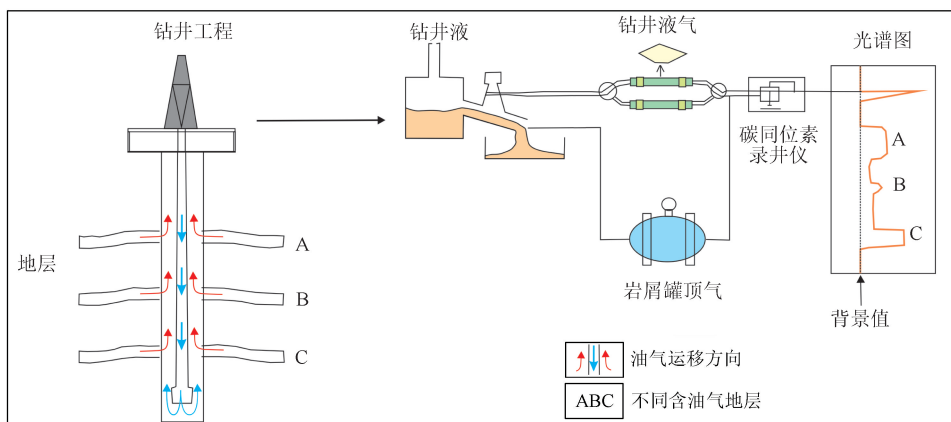


图1 碳同位素分析工作流程

Fig.1 Work flow of carbon isotope analysis

(2) 样品分析与检测。首先,提前对碳同位素录井仪设备进行2~3 h预热,并通过标气校准确保数据可靠性;其次,将收集到的两类气体通过碳同位素录井仪,对气体组分进行分离,按轻组分在前、重组分在后的顺序将不同组分依次燃烧;再次,利用燃烧后形成的 CO_2 中 ^{12}C 、 ^{13}C 等不同碳同位素分子键对红外激光的吸收特征不同,测量不同组分的 $\delta^{12}C$ 值和 $\delta^{13}C$ 值^[11];最后,将不同组分的 $\delta^{13}C$ 值变化按照对应的地层深度绘制光谱图(图1)。

1.2 关键参数及指示意义

碳同位素由稳定同位素(^{12}C 、 ^{13}C)和放射性同位素(^{14}C)构成,其中 ^{12}C 和 ^{13}C 的原子丰度分别为98.90%和1.10%^[10]。在自然界中,碳同位素比值 $R(R = ^{13}C/^{12}C)$ 与 $\delta^{13}C$ 值($\delta^{13}C = [(R \text{ 样品}/R \text{ 标准}) - 1] \times 1000\text{‰}$)是表征碳同位素组成的核心参数,一般通过测定油气中单个烃类分子的 $\delta^{13}C$ 值来进行油气地质研究^[12]。

(1) 甲烷碳同位素值($\delta^{13}C_1$)指甲烷中碳稳定同位素 ^{13}C 相对于国际标准物质的丰度差异,该参数记录了碳元素在甲烷生成、运移及保存过程中的同位素特征^[12],甲烷碳同位素的空间分布可指示储层封盖条件或流体运移路径,是解析天然气成因、热演化阶段及地质过程的关键地球化学指标。

(2) 乙烷碳同位素值($\delta^{13}C_2$)指乙烷中碳稳定

同位素 ^{13}C 相对于国际标准物质的丰度差异,该参数记录了乙烷形成过程中碳同位素的特征^[13-14],在油气地球化学中,乙烷与甲烷碳同位素值的协同分析可有效识别多源天然气混合过程。

(3) 烷烃气碳同位素值($\delta^{13}C_{1-n}$)指天然气中不同碳数烷烃的碳稳定同位素 ^{13}C 相对于国际标准物质的丰度差异,该参数通过同位素分馏效应揭示烷烃气的成因类型与演化规律^[15]。由于烷烃气碳同位素组成具有组合碳同位素特征, $\delta^{13}C$ 值依次递增被称为正碳同位素系列($\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 < \delta^{13}C_4$), $\delta^{13}C$ 值依次递减被称为负碳同位素系列($\delta^{13}C_1 > \delta^{13}C_2 > \delta^{13}C_3 > \delta^{13}C_4$)。正碳同位素系列表征有机成因原生烷烃气,负碳同位素系列一般表征无机成因原生烷烃气,而沉积盆地中零星出现的负碳同位素系列是由正碳同位素系列在高温条件下经过次生改造所致,规模性次生型负碳同位素系列的出现是油气演化进入过成熟阶段的标志。

(4) 碳同位素分馏是指由于碳同位素的物理化学性质差异,导致其在自然界化学反应、生物代谢及物理迁移过程中发生选择性富集或贫化的现象^[16-17],被广泛应用于重建古气候环境、示踪生物代谢途径以及校正放射性碳测年数据等方面的研究^[11,18]。

(5) 碳同位素倒转。指烷烃气中 $\delta^{13}C$ 值不按碳数递增(正碳同位素系列)或递减(负碳同位素

系列)规律排列,反而出现同位素比值异常反向分布的现象。该现象主要成因包括不同成因天然气混合、高温高压条件下干酪根热降解气与原油热裂解气的叠加作用等。因此,页岩油气储层中碳同位素倒转可以通过干酪根裂解气与滞留烃裂解气的混合比例、超压封闭环境及吸附解吸分馏效应识别,进而反映储层纳米孔隙发育程度与裂缝连通性,最终指示天然气成因类型、评估页岩气储层物性及产能^[19]。

2 碳同位素分析技术在非常规油气地质中的应用

在传统油气勘探开发中,碳同位素分析技术在油源对比、成熟度判断中有较好的应用。对于非常规油气来说,稳定碳同位素值与油气的生成和来源存在直接关系,涵盖了烃源岩中有机质来源、有机质成熟度等重要地球化学信息,为油气成藏组合的分析和产油层的判别提供直接证据,还可以应用碳同位素的分馏特征进行储层连通性及物性研究、“甜点”评价及产能预测。

2.1 油气成因判定

(1)区分有机与无机成因。有机成因的油气来源于古代生物遗体的分解,生物过程(如光合作用)优先吸收较轻的 ^{12}C ,导致有机物及其衍生的油气中 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低,而无机成因的油气形成于地幔或地壳深部的非生物化学反应(如费托合成或高温高压下的水-岩作用),这些过程缺乏生物分馏效应,生成的烃类 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高。通过测定油气中碳同位素的组成,有机成因油气中 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值通常为 $-55\text{‰} \sim -30\text{‰}$,而无机成因油气中 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值则通常为 $-20\text{‰} \sim -10\text{‰}$ ^[3,20]。

(2)母质类型与沉积环境识别。母质类型方面,I型(湖相藻类)和II型(海相浮游生物)有机质富集轻碳同位素(^{12}C),其生成的原油中 $\delta^{13}\text{C}$ 值较轻(通常 $< -30\text{‰}$);III型(陆生高等植物)及煤系有机质中木质素等富集 ^{13}C ,生成的油气 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏重($-28\text{‰} \sim -24\text{‰}$)^[20]。沉积环境方面,海相烃源岩原油的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 $< -30\text{‰}$,湖相原油的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-29.5\text{‰} \sim -28\text{‰}$,陆相煤系地层原油 $\delta^{13}\text{C}$ 值 $> -28\text{‰}$,反映不同环境中生物群落及碳循环的差异^[21-22]。此外,正构烷烃与类异戊二烯烃的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分馏模式(如湖相原油中二者 $\delta^{13}\text{C}$ 值相近,陆相原油

中类异戊二烯的 $\delta^{13}\text{C}$ 值更轻)可进一步辅助判别沉积环境。

戴金星等^[3]系统研究了通过气体碳同位素特征判断油气成因,形成了判别图版;肖光武等^[23]在松辽盆地古龙青山口组典型页岩油井中开展碳同位素随钻检测,通过油气成因判别图版,认为投点均落在油型气区,指示典型的正序演化序列,属II型油型气。

2.2 油气源对比

(1)运移路径示踪。非常规油气分为自生自储式和非自生自储式。文杰等^[24]对页岩油等自生自储式的非常规油气开展研究发现,页岩油气存在微运移:一是连续页岩层系内烃类通过页理缝等通道向有机质含量较低的层段迁移富集;二是烃类向页岩内部的砂质/钙质夹层运移。对于致密油气等非自生自储的非常规油气,存在油气初次运移及二次运移。当非常规油气生成时,烃源岩中有机质的类型和成熟度决定了初始碳同位素组成。在运移过程中,受扩散、吸附、生物降解等作用影响,较轻的 ^{12}C 可能优先迁移或发生分馏,导致不同位置油气中的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 值呈现规律性变化。通过分析区域油气样品的同位素梯度及分馏模式,可推断油气运移方向、路径及运移过程中的物理化学作用。一般而言,沿油气运移路径,轻同位素(^{12}C)优先迁移会导致残余烃类中 $\delta^{13}\text{C}$ 值逐渐偏重,断裂带内不同层位原油的碳同位素差异可定位运移主通道^[3]。

(2)多源贡献判别。复杂构造区油气常由多套烃源岩混合形成。受母质类型、沉积环境及热演化程度控制,不同烃源岩中有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的表现不同。当多源油气混合时,其同位素组成(如甲烷、乙烷等单体烃的 $\delta^{13}\text{C}$ 值)会呈现特定混合比例下的同位素特征,通过数学模型解析同位素的混合特征,可定量判别不同烃源岩的贡献比例及混合过程^[25]。

(3)储层内油气分异分析。当非常规油气因原油密度、极性等物性差异在储层内分层或分相时,轻组分(如甲烷)富集 ^{12}C ,导致 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏轻,重组分(如沥青质)富集 ^{13}C ,导致 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏重,通过分析储层内不同相态或空间位置的烃类同位素梯度,可揭示分异强度、相态演化及流体动态调整过程^[26]。

2.3 成熟度预测

非常规油气与常规油气在有机质成熟度研究方面具有一定差异。在常规油气研究中,一般认为烃源岩达到生烃门限并经历充分排烃,而非常规油气(如页岩油气)的有机质成熟度范围更宽泛,既可发育在低成熟阶段,也可存在于高过成熟阶段。在非常规油气热演化过程中,有机质裂解产生的烃类碳同位素组成随成熟度升高呈现规律性变化,如甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 值随成熟度增加而变重,结合烃源岩母质类型及定量关系式,通过对比实测与理论同位素值,可定量评价有机质的成熟度阶段及热演化历史。

(1) $\delta^{13}\text{C}_1$ 值随成熟度的演化规律。对于腐泥型与腐殖型有机质生成的天然气,随热演化程度升高,甲烷碳同位素富集 ^{13}C , 表现为 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值增大。一般而言,油气低成熟演化阶段 ($R_o < 0.7\%$) 的甲烷 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值通常低于 -50‰ , 油气中等成熟演化阶段 (R_o 为 $0.7\% \sim 1.3\%$) 的甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-50\text{‰} \sim -40\text{‰}$, 油气高成熟演化阶段 (R_o 为 $1.3\% \sim 2.0\%$) 的甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-40\text{‰} \sim -35\text{‰}$, 油气过成熟演化阶段 ($R_o > 2.0\%$) 的甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 值高于 -35‰ [27]。

(2) $\delta^{13}\text{C}_1$ 值与 R_o 的定量关系。陈建平等 [27] 和徐伟 [28] 对我国不同油气田的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值与 R_o 进行了相关性分析,并总结出两者的定量关系式,将 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值与烃源岩热史、埋藏史进行关联,可定量确定不同油气源的 R_o , 进而判断油气的演化阶段,公式为

$$\delta^{13}\text{C}_1 = 15.4 \times \lg R_o - 42.5, \quad (1)$$

$$\delta^{13}\text{C}_1 = 15.4 \times \lg R_o - 37.5. \quad (2)$$

式中: $\delta^{13}\text{C}_1$ 为甲烷碳 ^{13}C 同位素值, ‰ , R_o 为镜质体反射率, $\%$ 。式(1)为油型气,式(2)为煤型气。

徐伟 [28] 利用渤海湾盆地 C27 井 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值计算天然气成熟度,辅助确定了井区天然气成藏过程,指导了天然气高效开发。将典型高产井的 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值代入式(2)计算,可得到平均镜质体反射率 R_o 值为 1.63% , 而该井煤系地层分析化验得到的煤岩镜质体反射率 R_o 值为 $1.21\% \sim 1.45\%$ 。结合区域古生界烃源岩与成熟度的正相关关系,认为井区天然气来自比该井产层埋藏略深的相邻断块,揭示了相邻断块中的碳酸盐岩储层通过正断层抬升至上古生界煤系烃源岩,从而形成源储主体对接的成藏模式(图2)。

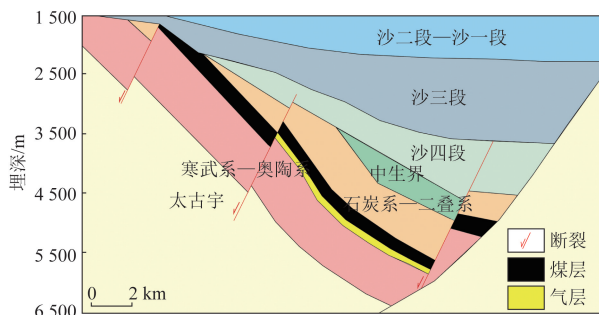


图2 渤海湾盆地 C27 井区煤系气成藏模式示意图 [26]

Fig. 2 Schematic diagram of coal bearing gas reservoir formation model in well C27 area of Bohai Bay Basin [26]

2.4 储层连通性及物性判别

在储层物性及连通性方面,常规油气储层一般具有较好的连通性和统一的油水界面,非常规油气储层普遍致密且连通性差,有时缺乏统一油水界面。

(1) 储层物性。基于非常规油气储层内流体运移和相态分异过程中产生的同位素分馏效应,当轻质烃类(如甲烷)在储层孔隙介质中发生优先运移时,因分子扩散作用导致 ^{12}C 富集, $\delta^{13}\text{C}$ 值变小,而重质组分(如沥青质)因黏滞阻力滞留于低渗透区域,导致 ^{13}C 富集, $\delta^{13}\text{C}$ 值变大。在其他地质条件相对一致的情况下,通过测定储层不同位置烃类的 $\delta^{13}\text{C}$ 梯度,结合流体的运移路径,可反演储层物性特征,即储层内 $\delta^{13}\text{C}$ 值的垂向梯度变化可表征渗透率分布 [3, 29]。

(2) 储层连通性。与利用碳同位素研究储层物性类似,通过分析非常规油气储层内油气的 $\delta^{13}\text{C}$ 值空间分布特征,来判断储层间的连通性。在其他地质条件相对一致的情况下,当储层内部流体 $\delta^{13}\text{C}$ 值较为均一时,通常指示流体长期混合或高效连通,反映储层内部无显著隔挡层或断层阻隔;当 $\delta^{13}\text{C}$ 值发生显著波动时,则可能表征储层存在非渗透隔夹层、局部封闭断层或独立流体系统 [29-30]。

2.5 “甜点”评价及产能预测

与常规油气不同,非常规油气储层非均质性更强,加之多采用人工压裂等手段进行储层改造,其“甜点”评价与产能预测也更为复杂。

(1) 评价含油气“甜点”。在油气生成、运移和聚集过程中, ^{12}C 和 ^{13}C 因质量差异及化学键强度不同,会通过物理分馏和化学分馏发生选择性分异,导致不同储层段烃类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈现规律性变化 [31]。一般而言,高丰度烃类聚集的“甜点”往往

因储层物性好、油气富集,使得气态烃的 $\delta^{13}\text{C}$ 值梯度明显增大(如 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与 $\delta^{13}\text{C}_7$ 差值扩大),反映烃类富集过程中同位素分馏作用加剧^[31-32]。此外,还可以结合碳同位素分析油气成因及运移路径,进一步提升“甜点”识别的准确性。

(2)进行产能预测。同样利用轻质烃类(如甲烷)在储层孔隙介质中优先运移时因分子扩散作用导致 $\delta^{13}\text{C}$ 值变小,而重质组分(如沥青质)因黏滞阻力滞留于低渗透区域导致 $\delta^{13}\text{C}$ 值变大的原理,通过测定储层不同区域烃类的 $\delta^{13}\text{C}$ 分馏程度,结合孔隙结构、成熟度模型及流体运移路径模拟,可建立产能与同位素分馏程度的定量关系模型。在其他地质工程条件相对一致的情况下,非常规油气开发中产出的甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈现阶段性演化特征:初期随吸附气释放, $\delta^{13}\text{C}$ 值持续变小;压裂增产阶段因游离气比例增加导致 $\delta^{13}\text{C}$ 值短期变大;当产量达到峰值后, $\delta^{13}\text{C}$ 值再次变小,反映储层内部扩散效应加剧及渗透率各向异性对油气运移的调控^[33]。

杨光等^[33]通过深入研究页岩气吸附特征和渗流机理,系统监测页岩气生产井天然气样品的甲烷碳同位素特征,并结合生产历史数据与产量递减规律来预测页岩气井早期产量。例如,在四川盆地威远地区龙马溪组典型页岩气井中,生产气甲烷碳同位素与产气量变化有良好的对应关系,结合生产实际,可有效指导页岩气开发。

3 现存问题

碳同位素分析技术作为地球化学领域的重要技术手段,在非常规油气勘探与开发中发挥了关键作用,但其应用仍存在多个亟待解决的瓶颈问题,制约了对参数的精准解释与推广应用。

(1)样品代表性与预处理影响着分析精度。碳同位素数据的可靠性高度依赖样品的原位性与代表性,但实际采样与分析常面临污染等问题^[10]。若样品采集未覆盖储层不同渗透性或成熟度区域,可能导致 $\delta^{13}\text{C}$ 值梯度分布不完整,难以精确表征流体运移路径及储层非均质性特征。在样品预处理过程中,如果未彻底去除碳酸盐等无机碳,会引入外源性碳干扰,导致有机碳同位素值偏移。当取样及处理温度过高(如 $>100\text{ }^{\circ}\text{C}$)或保存条件不当,可能引发有机质挥发或微生物降解,造成同位素比值

出现系统性偏差。

(2)标准化体系未统一制约了碳同位素分析技术的推广应用。全球范围内的碳同位素分析标准尚未完全统一,不同实验室的仪器校准方法、数据处理流程存在差异,导致不同区域的碳同位素分析数据对比可信度下降,碳同位素分析结果缺乏一定的普适性,制约着碳同位素分析技术的推广应用^[3,10]。

(3)碳同位素分馏的复杂性为数据解释带来挑战。碳同位素分馏过程受控于物理(扩散、吸附)、化学(热解、氧化还原)及生物(微生物降解)等多重机制,但不同机制间的耦合作用尚未被完全厘清^[15-16]。对于碳同位素值变化规律的分析,仅考虑单一因素往往降低了解释结果的准确性。碳同位素值的变化可能同时受渗透率各向异性、地层水溶解等多种因素共同影响,难以区分决定碳同位素变化的主要因素。

4 前景展望

碳同位素分析技术正朝着高精度、原位化和动态监测方向发展。加强碳同位素分析技术的标准化体系建设,可有效提高其分析精度;加强碳同位素分析技术与地震波阻抗、岩石热解参数等油气领域多专业数据联合分析,有效提高其解释准确度,可使碳同位素分析技术在非常规油气地质研究领域具有更大的发展空间。此外,在保障能源安全、支撑“双碳”目标的经济发展目标下,碳同位素分析技术在油气生产全生命周期碳排放溯源、 CO_2 地质封存及油气-地热开发等场景中同样具有广阔的发展前景。

5 结论

(1)在非常规油气勘探开发中,碳同位素分析技术可以进行有机与无机成因区分、母质类型与沉积环境识别、运移路径示踪、多源贡献判别、层内油气分异分析、成熟度定量预测、储层物性及连通性判断、含油气“甜点”评价及产能预测等研究,在油源对比等非常规油气地质研究方面具有较好的应用效果。

(2)碳同位素分析技术作为地球化学领域的重要技术手段,其应用中存在样品代表性与预处理不

足、标准化体系未统一、碳同位素分馏复杂等推广应用方面的困难与挑战。随着碳同位素分析技术朝着高精度、原位化和动态监测方向发展,在保障能源安全、支撑“双碳”目标的经济发展目标下,碳同位素分析技术在非常规油气地质研究及碳排放溯源、CO₂ 地质封存及地热综合利用等场景中具有广阔的发展前景。

参考文献 (References):

- [1] 张家强,毕彩芹,徐银波,等. 非常规油气地质调查工程进展与主要成果[J]. 中国地质调查,2023,10(1):1-19.
Zhang J Q, Bi C Q, Xu Y B, et al. Progresses and main achievements on unconventional oil and gas geological survey[J]. Geological Survey of China, 2023, 10(1): 1-19.
- [2] 赵群,赵萌,赵素平,等. 美国页岩油气发展现状、成本效益危机及解决方案[J]. 非常规油气,2023,10(5):1-7.
Zhao Q, Zhao M, Zhao S P, et al. The development status, cost-effectiveness crisis and solution of shale oil and gas in the United States[J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(5): 1-7.
- [3] 戴金星,倪云燕,龚德瑜,等. 中国大气田烷烃气碳同位素组成的若干特征[J]. 石油勘探与开发,2024,51(2):223-233.
Dai J X, Ni Y Y, Gong D Y, et al. Characteristics of carbon isotopic composition of alkane gas in large gas fields in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(2): 223-233.
- [4] 杨献忠,袁学银,王军,等. 金刚石矿物学、包裹体及碳稳定同位素研究综述[J]. 中国地质调查,2019,6(6):12-18.
Yang X Z, Yuan X Y, Wang J, et al. Review of mineralogy, inclusion and carbon stable isotopic studies of diamond[J]. Geological Survey of China, 2019, 6(6): 12-18.
- [5] 董海裕,邹雨,王国建,等. 深层天然气扩散行为与碳同位素分馏模型研究进展[J]. 太原理工大学学报,2023,54(4):599-608.
Dong H Y, Zou Y, Wang G J, et al. Research progress on diffusion behavior and carbon-isotope fractionation models of deep natural gas[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2023, 54(4): 599-608.
- [6] 王宁,明承栋,杨晨艺,等. 白云凹陷东部深水区混源油定量解析[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2022,41(6):24-31.
Wang N, Ming C D, Yang C Y, et al. Quantitative study on mixed source oil in deep water area of eastern Baiyun sag[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2022, 41(6): 24-31.
- [7] 陈聪,龙祖烈,熊永强,等. 白云凹陷烃源岩分布与油气源差异性分析[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2022,41(1):1-12.
Chen C, Long Z L, Xiong Y Q, et al. Analysis of source rock distribution and oil-gas source difference in Baiyun Sag[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2022, 41(1): 1-12.
- [8] 张群,何坤,李贤庆,等. 页岩高压解析放气过程中甲烷碳同位素分馏特征[J]. 天然气地球科学,2023,34(3):540-550.
Zhang Q, He K, Li X Q, et al. Characteristics of methane carbon isotope fractionation during high-pressure degassing of shale[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(3): 540-550.
- [9] 马冬晨,王文军,张婷,等. 正构烷烃单体碳同位素组成差异分析——以塔河油田奥陶系原油为例[J]. 沉积学报,2024,42(4):1411-1421.
Ma D C, Wang W J, Zhang T, et al. Analysis of carbon isotopic compositional differences of individual n-Alkane: Case study of ordovician crude oil in Tahe oilfield[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024, 42(4): 1411-1421.
- [10] 杨宗彩,徐学敏,杨佳佳,等. 沉积岩有机碳同位素组成测定的前处理方法研究[J]. 岩矿测试,2024,43(6):847-857.
Yang Z C, Xu X M, Yang J J, et al. A pre-treatment method for the determination of organic carbon isotope composition in sedimentary rocks[J]. Rock and Mineral Analysis, 2024, 43(6): 847-857.
- [11] 彭威龙,刘全有,胡国艺,等. 天然气形成过程中碳同位素分馏机理——来自热模拟实验的地球化学证据[J]. 石油勘探与开发,2020,47(5):972-983.
Peng W L, Liu Q Y, Hu G Y, et al. Mechanisms of carbon isotope fractionation in the process of natural gas generation: Geochemical evidence from thermal simulation experiment[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 972-983.
- [12] 张道锋,孟康,黄有根,等. 鄂尔多斯盆地石炭系本溪组煤岩解析气甲烷碳同位素特征及其地质意义[J/OL]. 天然气地球科学,1-24(2025-02-26)[2025-04-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1177.te.20250225.1906.006.html>.
Zhang D F, Meng K, Huang Y G, et al. Characteristics and geological significance of methane carbon isotope of released gas from Carboniferous Benxi coal rock in Ordos Basin[J/OL]. Natural Gas Geoscience, 1-24(2025-02-26)[2025-04-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1177.te.20250225.1906.006.html>.
- [13] 焦梦妍,袁玉洁,王俊,等. 奥陶纪/志留纪之交时期重大地质事件对沉积古环境及页岩有机质富集的影响——以中上扬子地区五峰组—龙马溪组页岩为例[J]. 非常规油气,2024,11(5):82-94.
Jiao M Y, Yuan Y J, Wang J, et al. Impacts of major geologic events on sedimentary paleoenvironments and organic matter enrichment of shales during the Ordovician-Silurian boundary: A case study of shales of Wufeng-Longmaxi formation in Middle and Upper Yangtze regions[J]. Unconventional Oil & Gas, 2024, 11(5): 82-94.
- [14] 万延周,陈春峰,王大卫,等. 东海盆地某凹陷中南部平湖组烃源岩有机质碳同位素组成特征[J]. 非常规油气,2020,7(2):18-25.
Wan Y Z, Chen C F, Wang D W, et al. The carbon isotopic component characteristics of organic matter of Pinghu formation source

- rocks in the center and south part of a certain depression, East China Sea shelf basin [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2020, 7(2):18–25.
- [15] 廖芸,郭艳琴,陈志鹏,等. 烷烃碳同位素对页岩含气性的指示意义——以四川盆地及周缘龙马溪组为例[J]. *海相油气地质*, 2021, 26(3):224–230.
- Liao Y, Guo Y Q, Chen Z P, et al. Indicative significance of alkane carbon isotope to shale gas content: Taking Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its surrounding areas as example [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2021, 26(3):224–230.
- [16] 赵圣贤,杨学锋,刘永畅,等. 深层页岩气产出过程碳同位素分馏特征及其地质意义——以川南地区泸州区块奥陶系五峰组—志留系龙马溪组为例[J]. *天然气工业*, 2024, 44(8):72–84.
- Zhao S X, Yang X F, Liu Y Y, et al. Characteristics and geological implications of carbon isotope fractionation during deep shale gas production: A case study of the Ordovician Wufeng Formation – Silurian Longmaxi formation in the Luzhou Block of Southern Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(8):72–84.
- [17] 王学军,张学军,罗欢,等. 碳同位素分馏效应对深层原油来源判识的影响[J]. *油气地质与采收率*, 2024, 31(4):154–163.
- Wang X J, Zhang X J, Luo H, et al. Influences of carbon isotope fractionation effects on identification of deep crude oil sources [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2024, 31(4):154–163.
- [18] 陶成,王杰,申宝剑,等. 甲烷流动过程中碳同位素分馏实验[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(11):1709–1713.
- Tao C, Wang J, Shen B J, et al. Experimental study on carbon isotopic fractionation of methane flow [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(11):1709–1713.
- [19] 王卓,赵靖舟,陈军军,等. 伊陕斜坡高熟天然气特征及碳同位素倒转成因[J]. *非常规油气*, 2020, 7(2):35–40.
- Wang Z, Zhao J Z, Chen J J, et al. Characteristics and carbon isotope inversion genesis of high mature natural gas in Yishan Slope [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2020, 7(2):35–40.
- [20] 谷元龙,张仲达,于双,等. 准噶尔盆地玛湖凹陷西斜坡原油源解析:基于单体烃碳同位素组成、分子比值与浓度定量分析[J]. *地球化学*, 2023, 52(3):298–310.
- Gu Y L, Zhang Z D, Yu S, et al. Determination of oil sources on the western slope of Mahu Sag, Junggar Basin, based on compound – specific carbon isotopes and molecular parameters and concentrations [J]. *Geochimica*, 2023, 52(3):298–310.
- [21] 汤磊鑫,周虎,殷磊磊. 淮北地区含煤岩系有机地球化学特征及生烃潜力分析[J]. *非常规油气*, 2022, 9(6):51–60, 74.
- Tang L X, Zhou H, Yin L L. Analysis on organic geochemistry characteristics and hydrocarbon – generating potential of coal – bearing strata in Huaibei Area [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2022, 9(6):51–60, 74.
- [22] 李振雄,胡博文,王振华,等. 地质构造控制下地热流体水化学、同位素及循环特征——以蔚县盆地为例[J]. *中国地质调查*, 2024, 11(6):64–75.
- Li Z X, Hu B W, Wang Z H, et al. Hydrochemistry, isotope and circulation characteristics of geothermal fluids controlled by geological structure: A case study of Yuxian Basin [J]. *Geological Survey of China*, 2024, 11(6):64–75.
- [23] 肖光武,杨世亮. 碳同位素录井技术在古龙青山口组页岩油中的应用——以GY3井为例[J]. *录井工程*, 2022, 33(4):6–12.
- Xiao G W, Yang S L. Application of carbon isotope logging technology in shale oil of Gulong Qingshankou Fm: A case study of well GY3 [J]. *Mud Logging Engineering*, 2022, 33(4):6–12.
- [24] 文杰,徐尚,苟启洋,等. 页岩油微运移研究进展及意义[J]. *地质科技通报*, 2024, 43(4):1–14.
- Wen J, Xu S, Gou Q Y, et al. Research status and significance of shale oil micromigration [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2024, 43(4):1–14.
- [25] 李博傅,潘志强,何大祥,等. 利用生物标志物和正构烷烃单体烃碳同位素判识原油受气侵程度——以塔里木盆地塔中地区为例[J]. *天然气地球科学*, 2025, 36(4):665–676.
- Li B C, Pan Z Q, He D X, et al. Biomarker and carbon isotope of individual n – alkane as indicators to assess the degree of gas invasion of crude oil: A case study of Tazhong area, Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2025, 36(4):665–676.
- [26] 孙永革,孔丽姝,路清华,等. 塔里木盆地古城墟隆起顺南1井古油藏热裂解过程的分子碳同位素地球化学记录[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(5):904–911.
- Sun Y G, Kong L S, Lu Q H, et al. Molecular carbon isotopic geochemistry records of thermal cracking in the palaeo – reservoir of well Shunnan 1 in Guchengxu Uplift, Tarim Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(5):904–911.
- [27] 陈建平,王绪龙,陈践发,等. 甲烷碳同位素判识天然气及其源岩成熟度新公式[J]. *中国科学:地球科学*, 2021, 51(4):560–581.
- Chen J P, Wang X L, Chen J F, et al. A new formula for identifying the maturity of natural gas and its source rocks by methane carbon isotopes [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2021, 51(4):560–581.
- [28] 徐伟. 车镇凹陷车西北带下古生界煤成气成藏差异及模式分析[J]. *油气地质与采收率*, 2021, 28(5):13–21.
- Xu W. Differences and control modes of coal gas accumulations in Lower Paleozoic in northwest of Chezhen Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(5):13–21.
- [29] 胡益涛,张焕旭,倪朋勃,等. 多组分碳同位素录井在天然气勘探中的应用——以琼东南盆地BD21地区为例[J]. *物探与化探*, 2024, 48(2):348–355.
- Hu Y T, Zhang H X, Ni P B, et al. Application of multi – component carbon isotope logging in natural gas exploration: A case study of the BD21 area, Qiongdongnan Basin [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2024, 48(2):348–355.
- [30] 徐璐,刘睿,张康斌,等. 页岩气保存条件的碳同位素约束:以上扬子板块五峰—龙马溪组页岩为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 2024, 44(3):630–640.
- Xu L, Liu R, Zhang K B, et al. Shale gas preservation conditions

and their carbon isotope constraints; a case study of the Wufeng – Longmaxi Shale in the Upper Yangtze Block[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2024, 44(3) : 630 – 640.

[31] 牛强,慈兴华. 碳同位素录井技术在胜利油区页岩油评价中的应用——以渤南洼陷 YYP 1 井为例[J]. *录井工程*, 2023, 34(2) : 9 – 14.

Niu Q, Ci X H. Application of carbon isotope mud logging technology in shale oil evaluation of Shengli Oilfield: A case study of well YYP 1, Bonan Sag[J]. *Mud Logging Engineering*, 2023, 34(2) : 9 – 14.

[32] 郝为,耿恒,王瑞科,等. 涪西南凹陷页岩油碳同位素录井特征分析[J]. *录井工程*, 2024, 35(4) : 32 – 38.

Hao W, Geng H, Wang R K, et al. Analysis of carbon isotope logging characteristics of shale oil in Weixinan Sag[J]. *Mud Logging Engineering*, 2024, 35(4) : 32 – 38.

[33] 杨光,孙合辉,吐洪江,等. 甲烷碳同位素在川南威远地区页岩气井产能预测中的应用[J]. *录井工程*, 2025, 36(1) : 27 – 33.

Yang G, Sun H H, Tu H J, et al. Application of methane carbon isotope in the productivity prediction of shale gas wells in Weiyuan area, southern Sichuan [J]. *Mud Logging Engineering*, 2025, 36(1) : 27 – 33.

Application of carbon isotope analysis technology in unconventional oil and gas geological research

DUAN Ye^{1,2}, LI Li³, WANG Chunwei⁴

(1. Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing Jiangsu, 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 3. Sinopec Jingwei Co., Ltd. Shengli Geological Logging Company, Dongying Shandong 257000, China; 4. Geological Measurement and Control Technology Research Institute of Sinopec Jingwei Co., Ltd., Qingdao Shandong 266000, China)

Abstract: The carbon isotope analysis technology has become a key means to reveal the genesis, accumulation, enrichment and output of oil and gas, with the in – depth exploration and development of unconventional oil and gas resources. However, relatively few summaries of the applications on carbon isotope analysis technology has been made in the geological research of unconventional oil and gas. By clarifying the process and key parameters of carbon isotope analysis, the authors in this paper have sorted out the application directions in the geological research of unconventional oil and gas and elaborated the existing problems and development directions. The research suggests that carbon isotope analysis can be applied in five key research directions, that is determining the genesis of oil and gas, comparing oil and gas sources, predicting maturity, identifying reservoir connectivity and physical properties, evaluating “sweet spots”, and predicting production capacity, which already have good application effects in the field of unconventional oil and gas geology research. At present, several difficulties and challenges existed in the promotion and application of carbon isotope analysis, including insufficient representativeness of samples and pre-treatment, lack of uniformity in the standardization system, and the complexity of carbon isotope fractionation. Therefore, the development direction of carbon isotope analysis is moving towards to high precision, in – situ and dynamic monitoring. Meanwhile, carbon isotope analysis also has broad development prospects in scenarios such as carbon emission traceability, CO₂ geological storage, and geothermal integration. The conclusions and understanding above could provide references for the promotion and application of carbon isotope analysis technology in unconventional oil and gas geological research.

Keywords: carbon isotope analysis technology; unconventional oil and gas; application progress; difficulties and challenges; development prospect

(责任编辑: 魏昊明)