中国科学: 地球科学 2025 年 第 55 卷 第 10 期: 3383 ~ 3400
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

华北克拉通南部破坏及其与煤系页岩气富集的关系

王鹏[1], 琚宜文[1*], 李国富[2], 蒋恕[3], 张金川[4], 肖蕾[1], 王巍[1], 高健[1]

1. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 地球系统数值模拟与应用全国重点实验室, 北京 101408
2. 煤与煤层气共采国家重点实验室, 晋城 048012
3. 中国地质大学(武汉), 构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074
4. 中国地质大学(北京), 自然资源部页岩气资源战略评价重点实验室, 北京 100083
* 通讯作者, E-mail: juyw03@163.com

收稿日期: 2025-04-19; 收修改稿日期: 2025-07-12; 接受日期: 2025-07-28; 网络版发表日期: 2025-09-18
国家重点研发计划项目(2023YFF0804300)、国家自然科学基金项目(42372153, 41530315)、国家科技重大专项课题项目(2016ZX05066、2017ZX05064)和中国科学院战略性先导科技专项课题项目(XDA05030100)资助

摘要 华北克拉通南部煤系页岩气的生成机制与富集规律对深部能源勘探具有重要指导意义. 本研究以华北克拉通南部淮北矿区为研究对象, 通过盆地模拟、岩石热解及岩浆岩地球化学分析, 系统揭示了华北克拉通破坏背景下煤系页岩气的富集机理. 结果表明: 华北克拉通南部煤系自形成后主要发育三期早白垩世岩浆活动(143~104Ma). 其全岩弧型地球化学特征, 并具有俯冲板片熔融成因的埃达克质岩石属性以及Sr-Nd同位素特征[$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$=0.707~0.712, $\varepsilon_{Nd}(t)$=−12.63~−9.18]指示其受控于西太平洋板块的后撤作用, 与华北克拉通破坏背景一致. 这一热事件导致区域热流值跃升至130mW m^{-2}, 显著加速了二叠系煤系页岩的热演化进程, 山西组与下石盒子组页岩的R_o分别达到1.10%和1.33%, 促使重质油热解为轻质油及湿气, 形成页岩气主生烃期. 然而, 克拉通破坏亦伴随强烈构造抬升, 研究区累计剥蚀量超过2000m, 地层压力降低导致部分气体解吸逸散, 凸显其“促生烃-限保存”的双重效应. 综合构造变形强度与岩浆活动时空分布, 提出弱构造变形区叠加早白垩世岩浆侵入的区域为页岩气富集有利靶区. 该成果明确了克拉通破坏背景下页岩气“热演化控生、构造活动控存”的成藏模式, 为华北及类似复杂构造区页岩气勘探提供重要指向.

关键词 西太平洋板块, 华北克拉通破坏, 淮北矿区, 构造-岩浆-热演化, 煤系页岩气

1 引言

气候变化是地球生态系统和人类社会面临的巨大危机, 尽快实现碳中和已成为全球应对气候变化的共识(邹才能等, 2024b). 天然气低碳优势显著, 尤其是以页岩气为代表的清洁能源的高效勘探与开发将在实现这一目标中发挥关键作用(Evro等, 2024; Mohammed等, 2024; 邹才能等, 2024a). 沉积盆地内的构造-岩浆-热演化控制着盆地内油气生成、运移及保存(Cao等, 2009; Peng等, 2023; Delhaye-Prat等, 2024). 与北美的页岩气勘探开发不同, 我国的沉积盆地演化具有多阶段性, 构造活动方向与性质各异, 涵盖反复挤压、伸展

中文引用格式: 王鹏, 琚宜文, 李国富, 蒋恕, 张金川, 肖蕾, 王巍, 高健. 2025. 华北克拉通南部破坏及其与煤系页岩气富集的关系. 中国科学: 地球科学, 55(10): 3383–3400, doi: 10.1360/SSTe-2025-0102
英文引用格式: Wang P, Ju Y, Li G, Jiang S, Zhang J, Xiao L, Wang W, Gao J. 2025. Destruction of the southern part of the North China Craton and its relationship with enrichment of shale gas in coal measures. Science China Earth Sciences, 68(10): 3250–3267, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1655-0

© 2025 《中国科学》杂志社

及隆升剥蚀等作用, 致使地质结构形变既复杂又剧烈(Ju等, 2021). 此外, 岩浆活动引发了区域构造-热事件, 显著改变了盆地的古地温场和热流场(任战利等, 2007; Yu等, 2018; 邱楠生等, 2020), 进而控制了煤系页岩的成熟、生烃和油气运移(Yu等, 2020; Chen等, 2023).

华北克拉通盆地沉积大规模的石炭-二叠系海陆过渡相含煤地层, 煤系富有机质页岩发育, 具有单层薄、累积厚度大、频繁互层、有机质含量较高等特点, 主要在大型坳陷和断陷盆地发育, 其热演化多处于高熟-过熟阶段, 生烃潜力显著(琚宜文等, 2016; 邹才能等, 2019; Peng等, 2023). 与该区域上古生界煤层气勘探开发不同, 煤层气以吸附状态为主、生成并储存于煤层及其围岩中, 而页岩气主要赋存于富有机质页岩层系, 以吸附态或游离相为主要赋存相态. 在早白垩世, 由于西太平洋板块的俯冲和后撤(Liu等, 2024; Ni等, 2024; 徐夕生等, 2024), 华北克拉通遭受了明显的减薄和破坏(朱日祥等, 2012; 郑建平和戴宏坤, 2018; 郑永飞等, 2018; 汤艳杰等, 2021; 杨进辉等, 2021; Wu等, 2022), 这一过程引发了华北克拉通中许多裂谷盆地的形成(Liu等, 2013; Deng等, 2024; Ma等, 2024). 同时, 该构造事件导致了古生代烃源岩大量生烃、运移并形成大规模的页岩油气藏(朱光等, 2018; 朱日祥和徐义刚, 2019; 刘全有等, 2024). 关于华北克拉通破坏及其煤系页岩气富集之间的关系在鄂尔多斯盆地东缘和渤海湾盆地部分地区得到了相应的研究(Zou等, 2024). 鄂尔多斯盆地东部上古生界烃源岩受到早白垩世构造-热事件的显著影响, 页岩气的大规模生成和聚集发生在晚侏罗世到早白垩世, 以强烈的构造活动为特征(Yu等, 2020). 渤海湾盆地黄骅坳陷早白垩世岩浆岩广泛发育, 直接覆于上古生界含煤岩系之上或侵入其中, 诱导烃源岩加速生烃(Jin等, 2020; Fu等, 2022), 同时晚白垩世主要的北东向和北西向断层导致断层-背斜圈闭体系的形成(Yang等, 2024).

与上面两个盆地不同, 华北克拉通盆地南部由于受到中生代华南-华北板块俯冲碰撞以及早白垩世西太平洋板块俯冲的影响, 导致该区域具有复杂的构造-岩浆-热演化过程, 大量煤系页岩气在此阶段生成(Ju等, 2018; Fan等, 2023). 前人通过对淮北矿区构造演化进行分析, 明确了构造活动对煤层气生成的控制过程(武昱东等, 2009), 并且通过对淮北矿区古热流值分布特征探讨了该区域煤层气资源的分布特征(谭静强等, 2010). 张文永等(2018)系统评估两淮地区煤系气资源潜力, 创新提出多气种协同开发系统方案. 赵志义等(2019)深入探讨了两淮煤田煤层气与页岩气共存的富集规律, 并据此圈定了4个勘探潜力较大的目标区. 此外, 余坤等(2023)基于盆地模拟技术, 重建了华北克拉通南部自中生代以来的古地温场及热流场演化历史以及煤系页岩成熟和生烃过程, 揭示了构造-热演化对煤系气富集的影响. 然而, 由于该区域构造-热演化过程具有多期次和复杂性, 从中生代早期受控于华南-华北板块俯冲碰撞到中生代晚期受西太平洋板块俯冲影响, 目前还没有研究证明该区域构造-热演化和煤系页岩气富集与华北克拉通破坏之间具有相应的联系. 因此, 本研究以华北克拉通南部淮北矿区为靶区, 通过镜质组反射率、岩石热解和盆地模拟技术多种手段阐明华北克拉通南部晚古生代以来的构造-热演化与煤系页岩成熟、生烃过程. 同时对矿区侵入的岩浆岩进行地球化学分析, 结合锆石定年数据, 揭示西太平洋板块俯冲背景下岩浆岩侵入对煤系的影响, 从而构建克拉通盆地形成与破坏的页岩气生成-保存耦合机制, 为破坏区煤系页岩气勘探部署提供理论支撑.

2 区域地质背景

华北克拉通盆地南部位于华北板块的南缘, 与秦岭-大别造山带相接, 东侧通过郯庐断裂带与华南板块相邻. 淮北矿区位于蚌埠隆起之上, 由于早期华南板块的俯冲作用, 该地区形成了大量近东西走向的断裂构造, 这些断裂对矿区的最初构造格局起到了主导控制作用. 晚期受太平洋板块俯冲的影响, 矿区发育有大量近南北方向的断裂及褶皱, 这些构造与先前的东西走向断裂相互交错、叠加, 最终造成了类似网格状的断块结构分布(图1a).

古生代早期, 华北克拉通盆地南部处于被动大陆边缘. 晚奥陶世-早石炭世, 该区由于地壳长期隆升及剥蚀, 奥陶纪顶部、志留纪、泥盆纪和下石炭统的地层大范围缺失, 因而出现了多条大型不整合界面(Yu等, 2018). 自晚石炭世以来, 海水多次侵入与退却, 沉积环境反复变化, 促使沉积物逐步堆积. 石炭-二叠纪期间, 含煤地层沉积在奥陶系碳酸盐岩的剥蚀面之上, 逐层堆积, 依次发育太原组、山西组、下石盒子组及上石盒子组, 显示出明显的海陆过渡沉积特征. 三叠

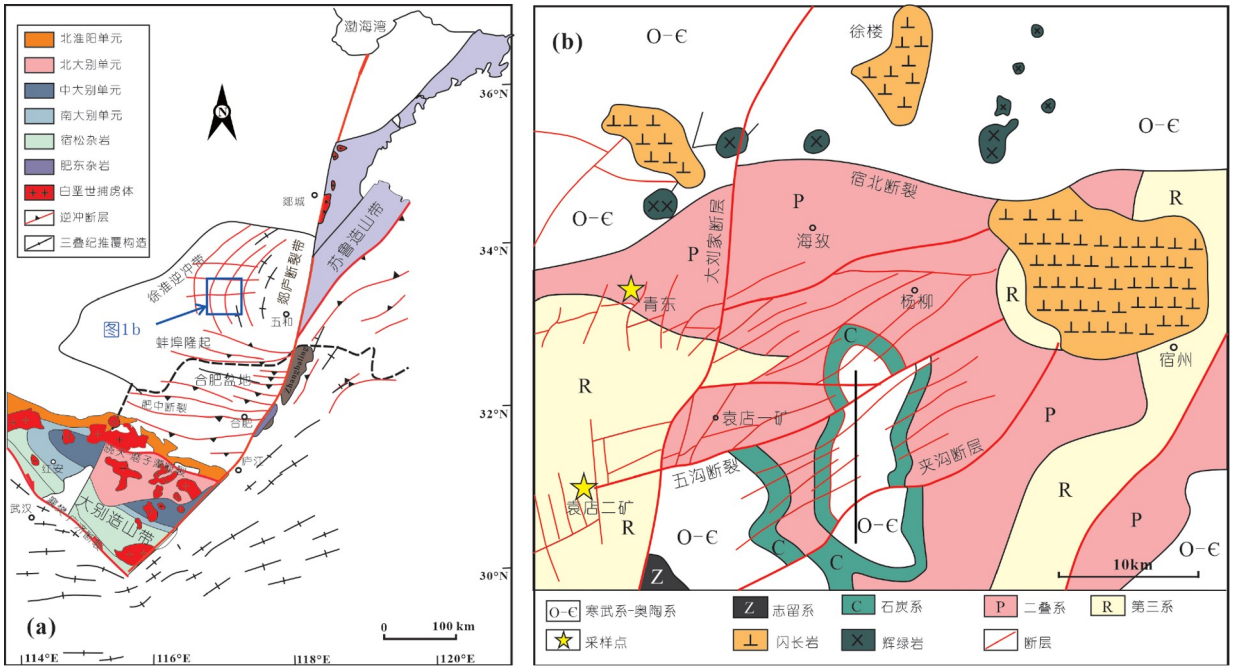


图 1　华北板块南部构造框架图和淮北矿区地质图

(a) 华北克拉通盆地南部构造格局, 东西向和南北向断裂与褶皱交汇叠加, 形成网格状构造格局; (b) 淮北矿区地质图以及采样点

纪至白垩纪, 由于构造活动的影响, 华北南缘经历了地壳上升, 形成了紫红色及黄绿色河流-湖泊环境的砂质、泥质沉积. 剧烈的造山作用使基底不断抬高, 中生代地层遭受大量剥蚀, 淮北矿区因此只零星保留三叠纪、侏罗纪和白垩纪的地层(Tong等, 2018; Song等, 2023). 自古近纪起, 盆地逐渐恢复沉降, 部分区域重新发生沉积作用. 到中新世时期, 研究区整体继续下沉, 新近纪及第四纪沉积层在此地广泛分布. 总体而言, 淮北矿区自古生代至今的沉积环境经历了陆表海过渡与陆相沉积的变化, 沉积岩系包括奥陶系、石炭系、二叠系及新生代层序. 该区域的主力含煤地层单元包括石炭-二叠系太原组、早二叠世山西组以及中二叠世下石盒子组. 此外, 西太平洋板块俯冲及大别造山带的影响导致该区域出现多期岩浆活动(如图1b), 岩浆岩侵入煤系, 从而促进了煤系的热演化进程(屈凯旋和郭少斌, 2022).

3　样品和实验

3.1　样品

本次研究共收集淮北矿区青东矿QD12井、QD9井以及袁店二矿YD2-37井岩芯样品25块, 其中包括16块下石盒子组页岩样品、2块山西组页岩样品以及4块辉长岩样和3块花岗闪长岩样, 采样位置见图1. 所有采集到的样品均密封于样品袋内, 便于后续进行镜质组反射率测定、岩石热解分析以及地球化学相关实验.

3.2　镜质体反射率测试和岩石热解实验

镜质组反射率的测定被广泛认为是判定沉积有机质成熟度的有效手段之一. 本研究将全部样品先进行机械粉碎, 得到粗颗粒后, 利用环氧树脂进行包埋. 待样品固化后, 再对其进行研磨和抛光处理, 最终通过Axio Imager Mlm型显微光度计测量其最大镜质组反射率值($R_{o,\ max}$). 岩石热解是岩石在无氧条件下受热发生分解的过程. 使用Rock-Eval岩石热解仪通过预先设定的加热过程进行热解, 获得岩石的含气量(S_0)、孔隙中以游离或吸附形式存在的烃类(S_1)、干酪根热解生成的烃(S_2)、热解释放的二氧化碳(S_3)、岩石热解的最高温度(T_{max})以及热解后剩余的有机碳(S_4)等参数, 并用于推算岩石总有机碳(TOC)含量. 本研究中, 样品粉末以25 ℃ min^{-1}的速率加热, 温度范围设置在300~600 ℃. 烃源岩的氢指数(HI)则按照国家标准GB/

T 18602-2012的方法, 通过岩石热解实验获得.

3.3 盆地模拟

沉积地层的岩性特征、地质年代以及沉积-剥蚀过程, 是分析盆地演化的关键基础. 本研究以淮北矿区的青东矿、袁店二矿三口井为代表, 利用PetroMod 1D盆地模拟软件重建了研究区的埋藏与热演化史. 地层数据主要来源于地质报告、钻孔资料和相关文献, 包括地层的绝对年龄、沉积与非沉积阶段及剥蚀事件, 用于建立盆地模拟的地质模型. 镜质组反射率(R_o)反映了有机质经历的最高古温度, 可用于恢复烃源岩的热演化史. 本研究采用EASY% R_o模型(Sweeney和Burnham, 1990)计算烃源岩成熟度, 并通过数值模拟分析了煤系地层的构造和热历史, 以及烃源岩的成熟、生烃和排烃过程. 本次模拟所用的地质参数见表1.

3.4 锆石LA-ICP-MS U-Pb定年

锆石和LA-ICP-MS样品靶在廊坊宇能地质服务公司进行分选和制作完成, 锆石U-Pb定年在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成, 采用Resolution SE型193nm DUV激光剥蚀系统联用Agilent 7900 ICP-MS开展分析. 91500作为外标进行同位素分馏校正, 以GJ-1为主校正标样, Si元素作内标物质, 实现锆石微量组分定量计算. 基于ICP-MS Data-Cal平台完成样品同位素比、年龄值及元素丰度校正计算. U-Pb 年龄谐和图使用软件Isoplotr 绘制.

3.5 全岩主微量元素以及全岩Sr-Nd同位素测试

全岩主量元素、微量元素以及全岩Sr-Nd同位素在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成. 全岩主微量元素分析采用Agilent 7900型电感耦合等离子体质谱仪完成测试, Sr-Nd同位素测定则依托Thermo Fisher Neptune XT MC-ICP MS实施. 样品制备流程如下: 将200目粒径样品置于105℃恒温烘箱进行12h干燥处理; 精确称取0.05~0.2g粉末样品装入聚四氟乙烯消解罐; 逐滴加注1~3mL优级纯硝酸与等量纯氢氟酸混合液; 密封钢套后转移至190℃热台持续消解24h以上; 冷却开罐后将消解产物移至140℃电热板蒸至近干状态; 添加1mL浓硝酸进行二次蒸干以彻底去除氟化物残留; 使用1mol L^{-1}盐酸溶液溶解干燥残渣制备待分离样液; 经阳离子交换柱分离获取Rb/Sr/稀土元素(rare earth element, REE)组分(分析精度大于0.002%); 最终采用选择性螯合树脂完成钕元素的提纯处理.

4 结果

4.1 有机地球化学特征

淮北矿区煤系页岩的热成熟度分布较为均匀, R_o值为1.09%至1.74%, 平均值约1.25%, 处于生油到湿气生成阶段. 其中, 青东矿的页岩样品R_o均值(约1.20%)略低于袁店二矿的R_o均值(约1.28%). 煤系页岩样品的TOC含量范围为0.15wt%~5.66wt%, 其中袁店二矿的TOC均值约为0.78wt%, 青东矿的TOC均值约为

表 1 盆地模拟基本地质参数[a)]

地层年龄(Ma)	地层代号	深度(m)	厚度(m)	事件类型	古剥蚀(m)	岩性	油气系统单元	大地热流(mW m^{-2})
0	Q	0	92	沉积		砂砾岩		56
2.58	N	92	145	沉积		砂岩		66
23.03	E	237	0	剥蚀				70
65	K	237	0	剥蚀	−2200			86
145	J	237	0	剥蚀				76
201	T	237	0	沉积		砂岩		72
252	P_3s	237	0	沉积		砂岩	上覆岩层	65
259	P_2sh	745	508	沉积		细砂岩	致密层	62
265	P_2x	945	200	沉积		泥页岩	烃源岩	60
272	P_1s	1075	130	沉积		泥页岩	烃源岩	58
295	C_2-P_1t	1180	105	沉积		石灰岩	下伏岩层	56

a) P_2sh, 上石盒子组; P_2x, 下石盒子组; P_1s, 山西组; 地层数据来自钻孔剖面图, 大地热流数据来自Yu等(2018)

1.32wt%. 岩石热解分析表明, 所有样品T_{max}分布于338~550℃. 袁店二矿样品T_{max}值为338~550℃, 平均值约510℃, 显著高于青东矿区样品(451~527℃, 均值475℃). 页岩游离烃(S_1)释放强度0.01~0.16mg g^{-1}, 裂解烃(S_2)生成量0.03~4.77mg g^{-1}, 氢指数(HI)介于5.28~84.28mg HC (g TOC)$^{-1}$(表2). HI-T_{max}协变关系指示有机母质为腐殖型(III型)干酪根, 青东矿区主体处于生油窗, 局部进入生气窗; 袁店样品整体达高成熟生气阶段(图2a). TOC与S_2相关性表征研究区页岩生烃能力呈较差-优良连续分布态势. 袁店二矿的生烃潜力普遍较差, 青东矿部分样品达到中等, 而淮北其他岩浆岩侵入地区的页岩样品生烃潜力可达到好, 这表明岩浆活动促进了页岩生烃(图2b).

4.2　埋藏史和热演化史

淮北矿区含煤地层埋藏-热演化模拟结果见图3a. 实测镜质体反射率与模型曲线高度契合(图3b), 验证了模拟可靠性. 该区煤系沉积后经历三期构造-热演化阶段: 快速沉降阶段: 晚石炭世开始, 沉降速率从5m Ma^{-1}增至25m Ma^{-1}. 至晚三叠世, 最大埋深约3000m, 伴随地温梯度递增, 最深处温度达130℃. 抬升剥蚀阶段: 早侏罗世至古近纪, 区域发生隆升导致地层剥蚀, 平均剥蚀速率近10m Ma^{-1}. 矿区东部煤系直接暴露地表致使热成熟停滞. 值得注意的是早白垩世岩浆活动使区域热流峰值达130mW m^{-2}(图3c), 地温梯度跃升至65℃ km^{-1}, 煤系温度近165℃, 显著促进有机质成熟化. 均衡沉降阶段(N-Q): 新近纪至今, 该区域持续缓慢沉降, 热流值稳定在55~59mW m^{-2}, 地温梯度28~32℃ km^{-1}(图3c), 属正常地温状态.

4.3　锆石U-Pb年代学

本文对青东矿的闪长岩QD-M1、QD-M2和袁店二矿的辉长岩YD2-31、YD2-32样品进行了锆石U-Pb定年. 本次研究挑选用于LA-ICP-MS U-Pb测年的锆石均呈自形至半自形. 阴极发光图像清晰显示出韵律环带或条带状吸收结构. 结合其较高的Th/U比值, 揭示这些锆石形成于岩浆环境(Koschek, 1993). 锆石U-Pb定年结果的处理依据其年龄差异: 对>1000Ma的样品采用^{207}Pb/^{206}Pb法定年, 而对<1000Ma的样品则采用^{206}Pb/^{238}U法定年.

青东矿QD-M1、QD-M2样品中25颗锆石年代学分析结果显示(图4), 其中10颗锆石具有较新的^{206}Pb/^{238}U年龄, 分布于126~132Ma, 加权平均年龄为(130.1±1.8)Ma(n=10; MSWD=1.4), 其余锆石颗粒揭示了继承年龄, 主要有两个峰值: 2.5Ga和1.8Ga. 袁店二矿YD2-31样品中20颗锆石年代学分析结果显示(图4), 其中8颗锆石具有较新的^{206}Pb/^{238}U年龄, 分布于97~108Ma, 加权平均年龄为(104.2±1.0)Ma(n=8;

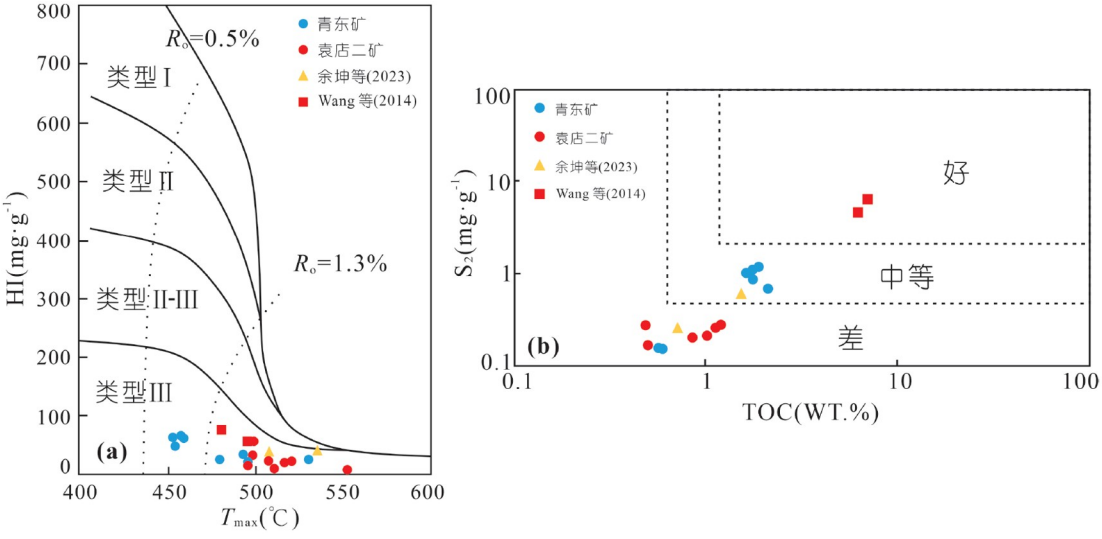


图 2　有机地球化学参数关系图

(a) T_{max}与HI; (b) TOC与S_2(底图据Espitalie等, 1985)

表 2　样品信息和岩石热解实验结果[a)]

地层	样品号	深度(m)	岩性	T_{max}(℃)	S_1(mg g^{-1})	S_2(mg g^{-1})	S_1+S_2(mg g^{-1})	TOC(wt%)	$R_{o,max}$(%)	HI
山西组	YD2-8	816	页岩	492.8	0.02	0.20	0.22	0.86	1.38	22.86
山西组	YD2-10	811	页岩	495.6	0.02	0.16	0.18	0.50	1.20	32.24
下石盒子组	YD2-28	720	页岩	356.2	0.01	0.01	0.02	0.15		6.33
下石盒子组	YD2-29	718	页岩	549.5	0.04	0.03	0.07	0.61		5.25
下石盒子组	YD2-34	709	页岩	495.8	0.07	0.27	0.34	0.48		56.47
下石盒子组	YD2-35	706	页岩	338.1	0.07	0.08	0.14	0.28		27.27
下石盒子组	YD2-36	703	页岩	508.7	0.03	0.04	0.07	0.47		8.05
下石盒子组	YD2-38	699	页岩	514.2	0.07	0.21	0.28	1.02	1.37	20.26
下石盒子组	YD2-39	697	页岩	516.4	0.03	0.27	0.30	1.18	1.19	22.81
下石盒子组	YD2-40	695	页岩	506.3	0.03	0.26	0.28	1.14	1.26	22.60
下石盒子组	QD12-5	843	页岩	451.1	0.14	1.08	1.22	1.74	1.12	62.10
下石盒子组	QD12-7	840	页岩	526.8	0.01	0.08	0.10	0.33	1.47	25.08
下石盒子组	QD12-8	838	页岩	456.1	0.12	1.00	1.12	1.63	1.21	61.31
下石盒子组	QD12-10	829	页岩	454.4	0.09	1.15	1.24	1.85	1.09	62.08
下石盒子组	QD12-11	827	页岩	452.3	0.06	0.87	0.92	1.74	1.18	49.75
下石盒子组	QD9-6	897	页岩	477.0	0.04	0.15	0.19	0.59	1.16	25.73
下石盒子组	QD9-7	895	页岩	492.3	0.02	0.15	0.17	0.57	1.14	26.33
下石盒子组	QD9-9	891	页岩	490.4	0.06	0.67	0.73	2.11	1.24	31.77
山西组	YS3*	1068	页岩	506	0.01	0.24	0.25	0.71	1.56	33.80
山西组	YS4*	1097	页岩	535	0.09	0.62	0.71	1.58	1.74	39.24
山西组	HB-HZ-2**	–	页岩	490	0.16	3.3	3.46	5.41	1.52	61.00
山西组	HB-LH-4**	–	页岩	479	0.3	4.77	5.07	5.66	1.28	84.28

a) *指代余坤等(2023); **指代Wang G等(2014)

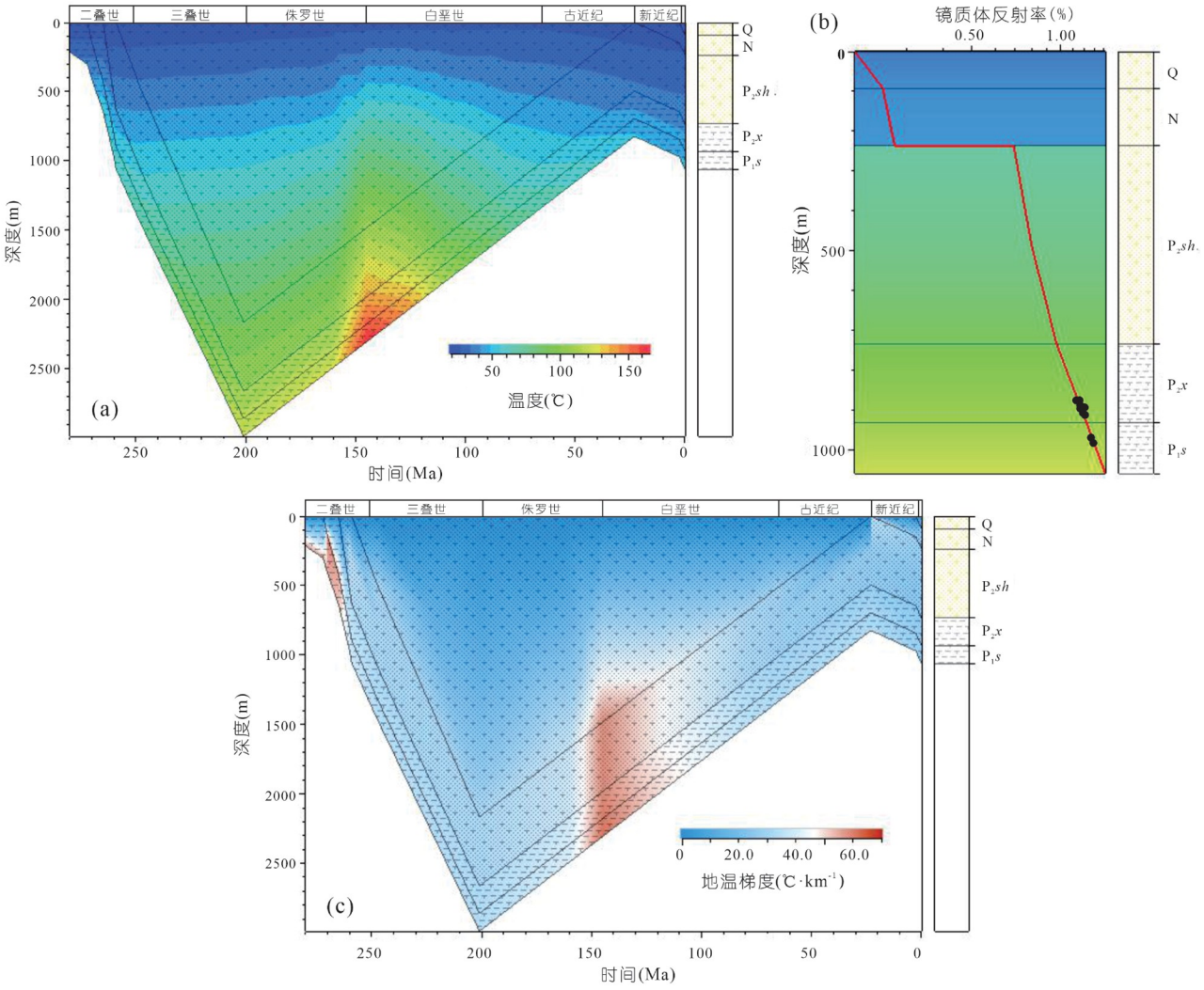


图 3　淮北矿区煤系埋藏-热演化史以及古地温梯度模拟结果

MSWD=1.9), 其余锆石则记录了多期次年龄信息, 峰值跨越古元古代到古生代(2352~425Ma). 此外, 样品YD2-32的定年数据中识别出一颗锆石, 其年龄值指示了早白垩世早期起始阶段(143.2±1.8)Ma, 我们认为代表了其结晶年龄, 同时具有古元古代至中生代继承/捕获锆石(2289~250Ma).

总之, 淮北矿区岩浆岩记录了三个年龄组: 早白垩世初(143Ma)、早白垩世早期(~130Ma)和早白垩世末(104Ma).

4.4　岩浆岩地球化学特征

淮北辉长岩和花岗闪长岩的主量元素及微量元素分析结果(表3)显示, 几个样品产生了非常高的烧失量(LOI=4.89wt%~13.30wt%), 我们认为是天然夹杂物引起的(而不是变更/风化), 几乎没有变化的Zr/Ti-Nb/Y图表明蚀变/风化对主量元素地球化学的影响不大(图5a). 样品经去除烧失量校正处理, 主量元素校正至100%, 以消除挥发分影响. 其中, 辉长岩的SiO_2含量为42.58wt%~50.97wt%, 全碱(Na_2O+K_2O)含量为2.62wt%~4.08wt%, Al_2O_3含量为12.22wt%~15.2wt%, 具有相对变化大的MgO含量(4.69wt%~9.63wt%)和TFe_2O_3含量(9.26wt%~10.79wt%). 花岗闪长岩的SiO_2含量为57.45wt%~62.69wt%, 全碱(Na_2O+K_2O)含量为4.19wt%~9.15wt%, Al_2O_3含量为14.19wt%~16.12wt%. 在Sr/Y-Y

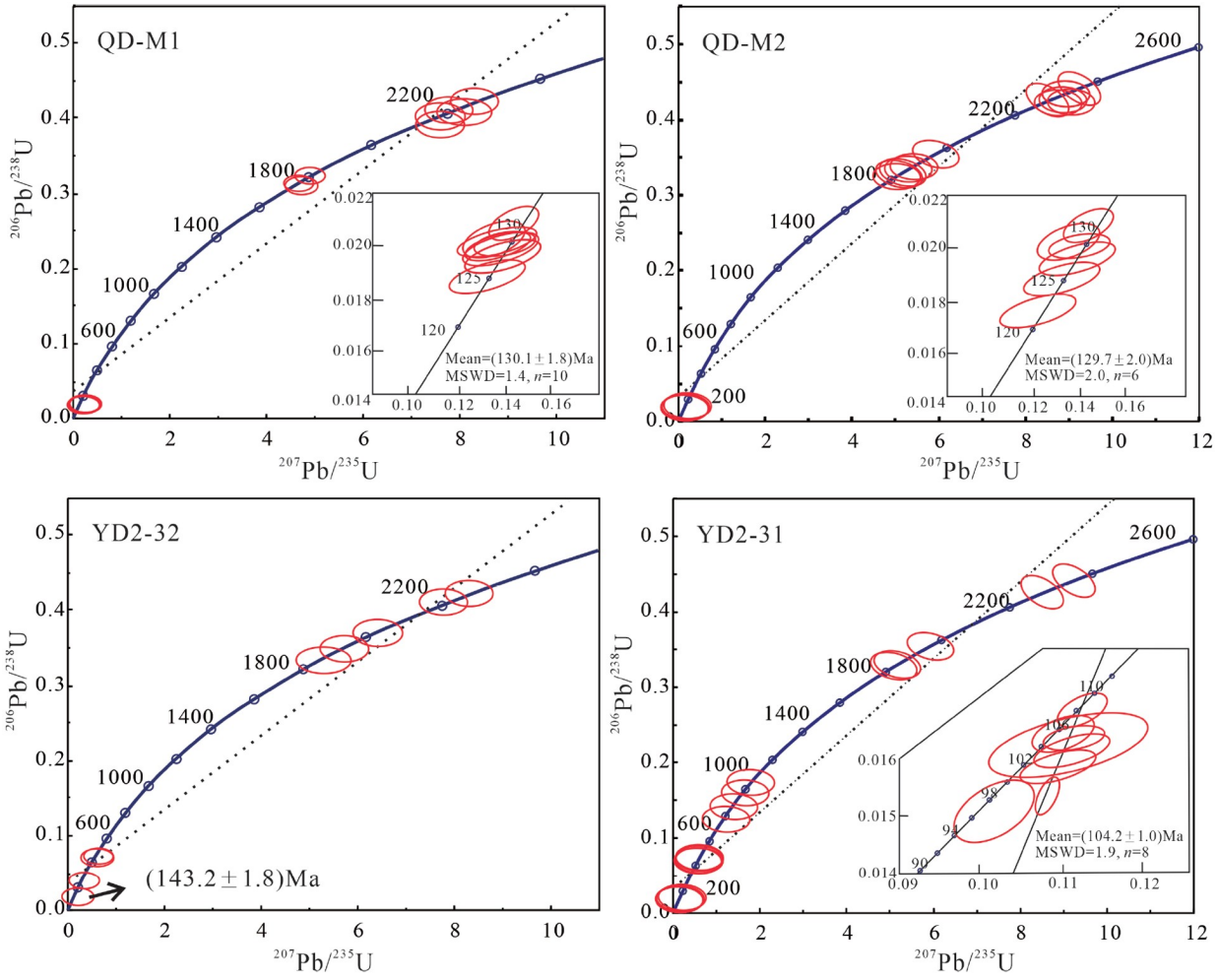


图 4　淮北矿区岩浆岩锆石LA-MC-ICP-MS U-Pb协和图

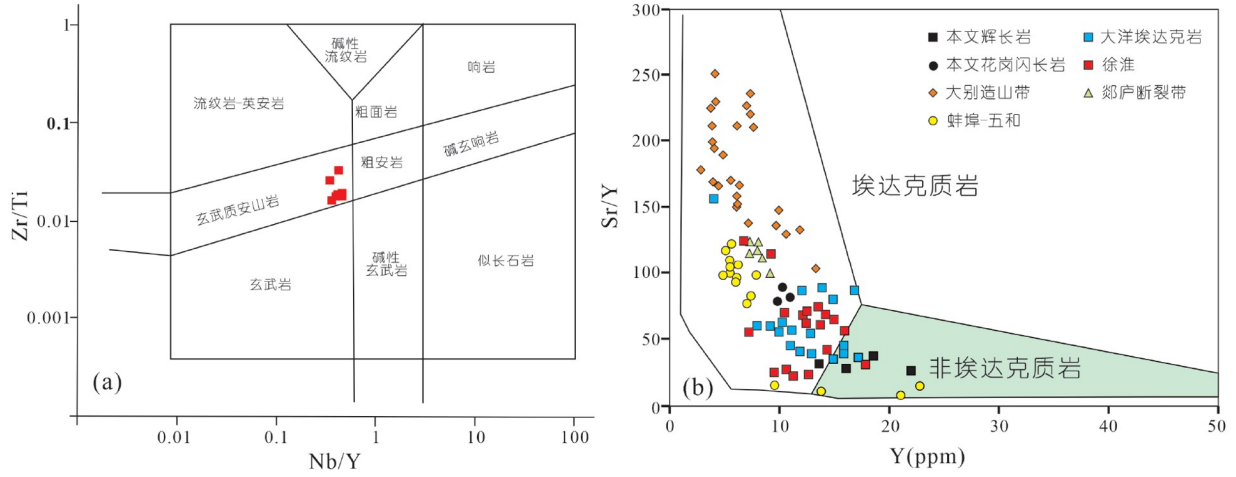


图 5　华北盆地南部淮北矿区岩浆岩地球化学图

(a) Zr/Ti-Nb/Y(据Pearce, 1996); (b) Sr/Y-Y(据Defant和Drummond, 1990)

表 3　淮北矿区岩浆岩样品的主微量元素组成

组分	YD2-30	YD2-31	YD2-32	YD2-33	QD-M1	QD-M2	QD-M3
SiO_2(%)	47.94	50.97	49.56	42.58	62.69	61.98	57.45
TiO_2(%)	0.40	0.86	0.67	0.80	0.47	0.41	0.52
Al_2O_3(%)	12.22	14.73	15.20	13.90	14.19	14.36	16.12
TFe_2O_3(%)	10.79	10.37	9.26	10.40	5.73	4.86	5.89
MnO(%)	0.12	0.15	0.15	0.13	0.05	0.05	0.07
MgO(%)	6.51	6.37	4.69	9.63	4.63	3.03	2.87
CaO(%)	5.51	7.69	9.20	6.35	2.94	3.55	3.21
Na_2O(%)	2.98	2.93	2.61	2.08	3.26	5.03	4.96
K_2O(%)	1.10	0.76	0.58	0.54	0.93	1.64	4.49
P_2O_5(%)	0.10	0.26	0.21	0.24	0.16	0.14	0.16
LOI(%)	12.11	4.89	7.85	13.30	4.89	4.63	4.23
总计(%)	99.78	99.98	99.98	99.95	99.93	99.69	99.96
Sc(ppm)	9.51	21.94	23.96	19.83	16.45	13.29	16.00
V(ppm)	82.29	143.40	120.80	128.90	122.00	93.50	112.40
Cr(ppm)	68.93	192.20	258.60	181.80	210.10	173.80	210.05
Co(ppm)	17.18	43.17	44.38	36.51	22.72	17.22	20.41
Ni(ppm)	39.94	124.70	141.50	87.74	85.36	75.78	79.29
Cu(ppm)	14.72	47.14	58.77	50.33	28.77	1980.89	2065.89
Zn(ppm)	64.51	112.40	84.84	92.53	77.73	1239.87	1242.87
Ga(ppm)	11.29	15.75	14.72	14.60	15.77	18.10	17.89
Rb(ppm)	9.10	20.03	10.64	4.51	26.09	37.11	37.36
Sr(ppm)	153.00	766.70	920.70	229.80	174.80	500.65	426.25
Zr(ppm)	85.95	113.50	90.20	123.90	66.45	68.99	90.93
Nb(ppm)	6.20	9.29	7.26	10.02	3.33	3.40	4.20
Cs(ppm)	0.52	0.49	0.26	0.20	0.58	1.47	0.60
Ba(ppm)	118.70	803.40	718.30	156.50	112.00	597.00	1188.00
Hf(ppm)	2.11	2.53	2.02	2.71	1.93	2.04	2.53
Ta(ppm)	0.45	0.49	0.34	0.46	0.20	0.20	0.26
Pb(ppm)	9.96	11.42	9.56	14.33	49.69	143.55	135.10
Th(ppm)	6.35	8.70	6.46	8.67	3.69	2.97	4.32
U(ppm)	1.54	1.52	1.14	1.57	1.28	1.24	1.44
La(ppm)	37.51	47.65	36.91	44.24	12.00	10.77	15.03
Ce(ppm)	71.72	89.20	69.34	85.42	24.53	21.91	29.84
Pr(ppm)	7.77	10.15	7.94	9.79	2.97	2.70	3.61
Nd(ppm)	32.02	36.57	28.70	35.62	12.43	11.34	14.94
Sm(ppm)	5.82	5.40	4.35	5.37	2.57	2.34	3.02
Eu(ppm)	1.54	1.68	1.43	1.27	0.77	0.82	1.14
Gd(ppm)	5.90	5.05	4.08	4.97	2.44	2.30	3.04
Tb(ppm)	0.75	0.66	0.54	0.65	0.36	0.31	0.41
Dy(ppm)	4.34	3.52	2.87	3.43	2.00	1.71	2.22

(续表3)

组分	YD2-30	YD2-31	YD2-32	YD2-33	QD-M1	QD-M2	QD-M3
Ho(ppm)	0.84	0.69	0.57	0.67	0.39	0.34	0.43
Er(ppm)	2.50	2.01	1.65	1.91	1.18	1.00	1.27
Tm(ppm)	0.33	0.29	0.24	0.27	0.18	0.15	0.18
Yb(ppm)	2.26	1.80	1.50	1.72	1.17	0.98	1.22
Lu(ppm)	0.32	0.28	0.23	0.26	0.18	0.15	0.19
Y(ppm)	22.79	18.42	15.25	18.25	10.15	8.94	11.44
REE(ppm)	173.62	204.94	160.35	195.60	63.16	56.83	76.54
LREE(ppm)	156.38	190.65	148.67	181.71	55.27	49.88	67.57
HREE(ppm)	17.24	14.29	11.67	13.89	7.89	6.95	8.97
LREE/HREE	9.07	13.34	12.74	13.08	7.01	7.21	7.48
Sr/Y	6.71	41.62	60.37	12.59	17.22	62.07	35.23
La/Yb	16.57	26.50	24.66	25.72	10.29	11.18	12.20
$(La/Yb)_N$	11.26	18.00	16.75	17.47	7.38	8.02	8.75
$(La/Sm)_N$	4.03	5.51	5.30	5.14	2.92	2.86	3.08
$(Dy/Yb)_N$	1.26	1.28	1.26	1.31	1.12	1.47	1.52
$(Gd/Yb)_N$	2.11	2.27	2.21	2.34	1.69	1.96	2.00
δEu	0.80	0.98	1.03	0.75	0.94	1.09	1.11
δCe	1.02	0.98	0.98	0.99	0.99	0.98	0.98

图解中，花岗闪长岩则主要落入埃达克质岩石中(图5b).

淮北辉长岩具有相对较高的稀土元素丰度，总(Σ)REE含量(66.38~204.94ppm，平均141.2ppm1ppm=1μg g^{-1})，而花岗闪长岩样品具有相对较低的总(Σ)REE含量(50.51~113.45ppm, 平均81.87ppm). 在经球粒陨石标准化的稀土元素分配模式图中，两类岩石样品均表现出显著的轻、重稀土分馏特征，呈现轻稀土元素(light rare earth element, LREEs)富集与重稀土元素(heavy rare earth element, HREEs)贫化的趋势, 构成典型的向右倾斜分配模式(图6a). 此外, 该样品具有不明显的Eu异常和Ce异常. 在原始地幔标准化图中，辉长岩和花岗闪长岩Pb和Sr呈明显的正异常，Ta、Nb和Ti呈负异常(图6b), 均表现出富集大离子亲石元素(large-ion lithophile elements, LILE)、亏损高场强元素(high-field-strength elements, HFSE).

淮北岩浆岩具有相对富集的全岩Sr同位素组成, 其$^{87}Sr/^{86}Sr$值为0.707262~0.713038, 以该岩体形成时代进行校正, 其$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$值为0.7071~0.7122. 此外, 样品的全岩Nd同位素组成显示出相对亏损的性质，$^{143}Nd/^{144}Nd$值为0.511931~0.512069，$\varepsilon_{Nd}(t)$值为−12.63~−9.18. 在全岩Sr-Nd同位素图上, 样品落入与俯冲相关的大洋沉积物区.

5 讨论

5.1 华北克拉通南部岩浆岩形成的构造背景

围绕华北克拉通破坏的时间、规模、机制和对金属等矿产资源的影响已经进行大量的研究(Liu等, 2017; Ma和Xu, 2021; 朱光等, 2021), 目前已经明确西太平洋俯冲板块后撤始于~145Ma, 表明华北克拉通破坏的起始时间(朱日祥和徐义刚, 2019). 在130~120Ma期间，西太平洋板块转变为高角度俯冲、回转与后撤速率达到最大，导致华北克拉通岩石圈地幔性质的转变以及伸展/减薄，最终导致克拉通破坏(朱日祥等, 2012). 在晚白垩世初, 华北克拉通峰期破坏中止(朱光等, 2021). 本文中淮北矿区岩浆岩年龄正好与华北克拉通破坏初始时间、峰期时间和峰期结束时间(Liu等, 2018; Zhang等, 2019; Su等, 2020; 朱光等, 2021)相对应，暗示该区域地球动力学机制与华北克拉通破坏相

一致.

淮北矿区辉长岩具有较低的SiO_2含量(42.58wt%~50.97wt%)、相对高的MgO含量(4.69wt%~9.63wt%)和Cr、Ni含量(分别为68.93~258.6ppm、39.94~141.5ppm), 指示其源自地幔源区的部分熔融作用(Rudnick和Fountain, 1995). 岩浆岩的球粒陨石标准化图显示出明显的轻重稀土元素分异[$(La/Yb)_N$ = 11.26~18.00], [$(La/Sm)_N$ =4.03~5.51], $(Gd/Yb)_N$ = 2.11~2.34, $(Dy/Yb)_N$= 1.26~1.31](图6a), 与岛弧玄武岩的典型稀土元素配分模式相似. 经原始地幔标准化后, 辉长岩和花岗闪长岩均呈现出富集大离子亲石元素而亏损高场强元素的特征, 例如Pb和Sr呈明显的正异常, Ta-Nb和Ti呈负异常(图6b). 一般来说, 在俯冲相关的富集过程中, 大离子亲石元素很容易被作为含水流体的交代介质从板块中移动到地幔中, 而高场强元素由于在含水流体中的相容性较低, 流动性很小, 导致含量很低(Plank和Langmuir, 1998; Miao等, 2011). 因此, 本文基性岩样品是次大陆地幔源岩浆与地壳物质(包括较老的俯冲相关成分)进行不同程度的富集的结果(Santosh等, 2016).

此外, 淮北花岗闪长岩具有较高的Mg含量(MgO, 2.87~4.63)和低K_2O/Na_2O(0.35~0.54), Rb/Y和Nb/Y比值较低(表明地壳熔体富集程度较低). 在Sr/Y-$(La/Yb)_N$图上, 俯冲大洋板片和拆沉大陆下地壳的部分熔融成因具有不同的趋势(Liu等, 2010). 这是因为洋壳的$(La/Yb)_N$比加厚的大陆下地壳低, 同时海底蚀变可以提高蚀变洋壳的Sr浓度. 徐淮埃达克岩在Sr/Y-$(La/Yb)_N$图上呈现出与俯冲大洋板片熔融形成的埃达克岩相一致(图7a). 相比之下, 来自郯庐断裂带南段和蚌埠地区的埃达克岩主要落在由加厚大陆下地壳的埃达克岩定义的区域(图7a). 同样, 徐淮埃达克岩的$(Dy/Yb)_N$比值也高于郯庐断裂带南端和蚌埠埃达克岩, 落入大洋埃达克岩的低$(La/Yb)_N$和高$(Dy/Yb)_N$区域(图7b). 并且徐淮埃达克岩的MgO-SiO_2和低K_2O/Na_2O-高Al_2O_3含量与大洋板块熔体的基本特征一致(图7c, 7d), 但与增厚大陆下地壳形成的埃达克岩(Richards和Kerrich, 2007)明显不同. 此外, 样品Sr-Nd同位素$^{87}Sr/^{86}Sr_i$ (0.7071~0.7122), $\varepsilon_{Nd}(t)$(−12.63~−9.18)与俯冲相关的大洋沉积物区相近, 和起源于华南-华北俯冲碰撞后伸展的大别造山带岩浆岩(−15.0~−23.1)具有显著的差异. 结合同时期区域上广泛发育的花岗质岩浆作用、变质核杂岩、大规模金-钼矿床以及伸展盆地(Meng等, 2019; 朱光等, 2021; Qiu等, 2023), 表明早白垩世华北克拉通南部处于强烈伸展的构造背景, 该时期中基性岩浆岩的形成与克拉通破坏动力学背景密切相关, 其地球动力学机制主要受控于西太平洋板块后撤引发的岩石圈伸展, 而非扬子陆块俯冲碰撞后的构造松弛.

5.2　华北克拉通南部煤系页岩气的生成过程

构造-热耦合过程是页岩气系统演化的核心驱动力, 其通过控制有机质热成熟度直接影响气藏形成与改造(Yu等, 2018). 针对华北克拉通南缘淮北矿区, 煤系页岩气生成过程可划分为三个特征鲜明的构造-热演化期, 如图8.

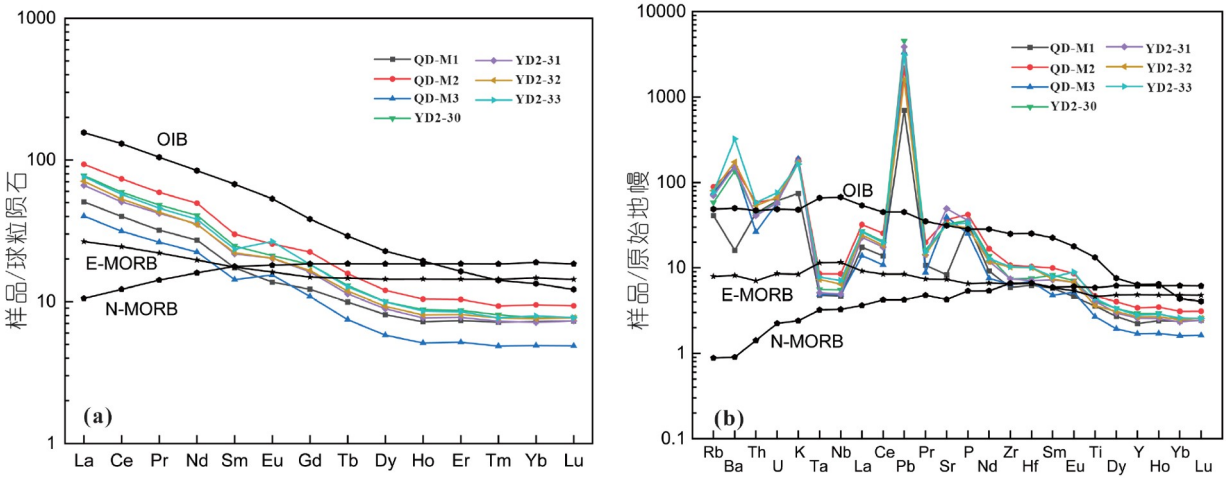


图 6　淮北岩浆岩样品球粒陨石归一化全岩稀土元素图(a)和原始地幔归一化蛛网图(b)

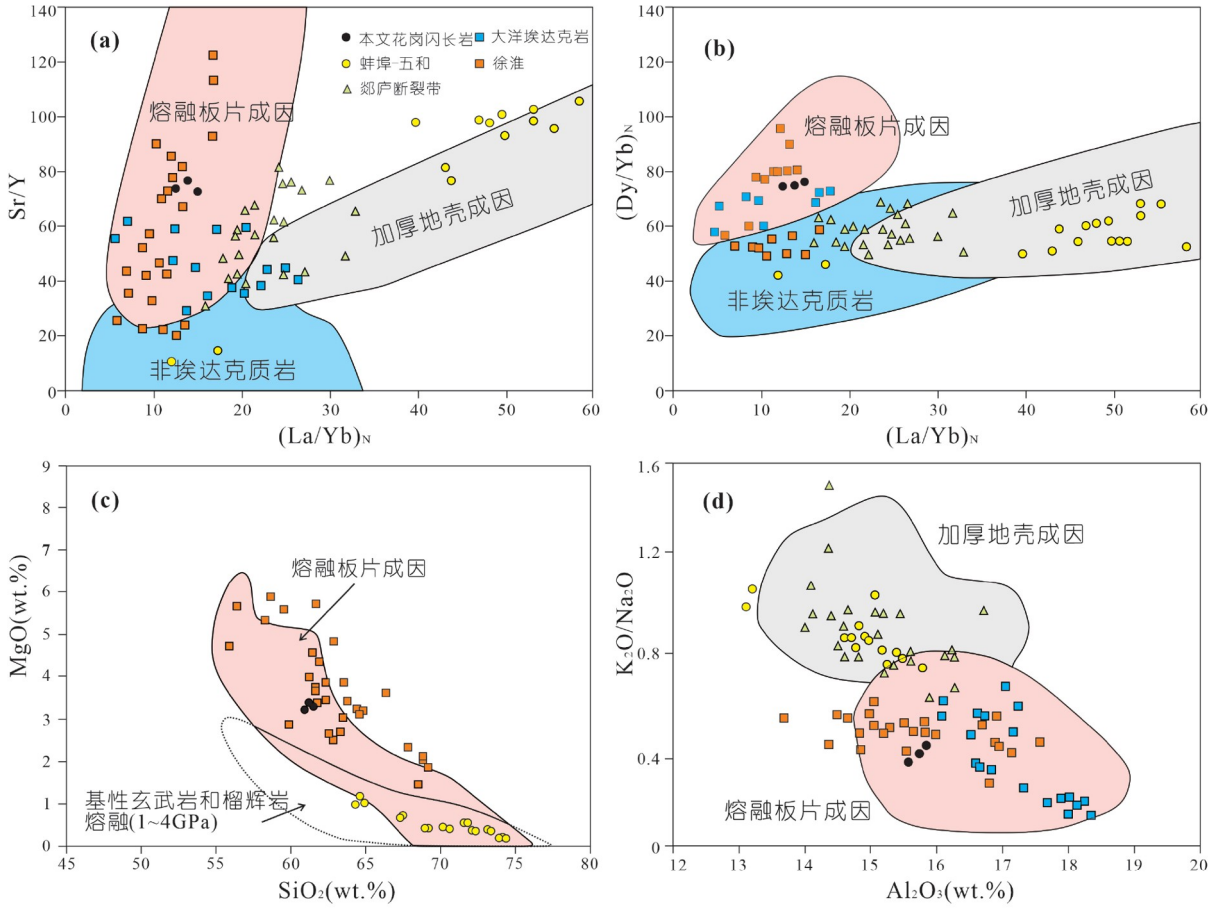


图 7　淮北埃达克质岩判别图

数据来自Defant等(1991)、Stern和Kilian(1996)、Aguillón-Robles等(2001)、Kamei等(2009)、Liu等(2010)、Liu等(2012)、Zhang等(2013)和Wu等(2023)

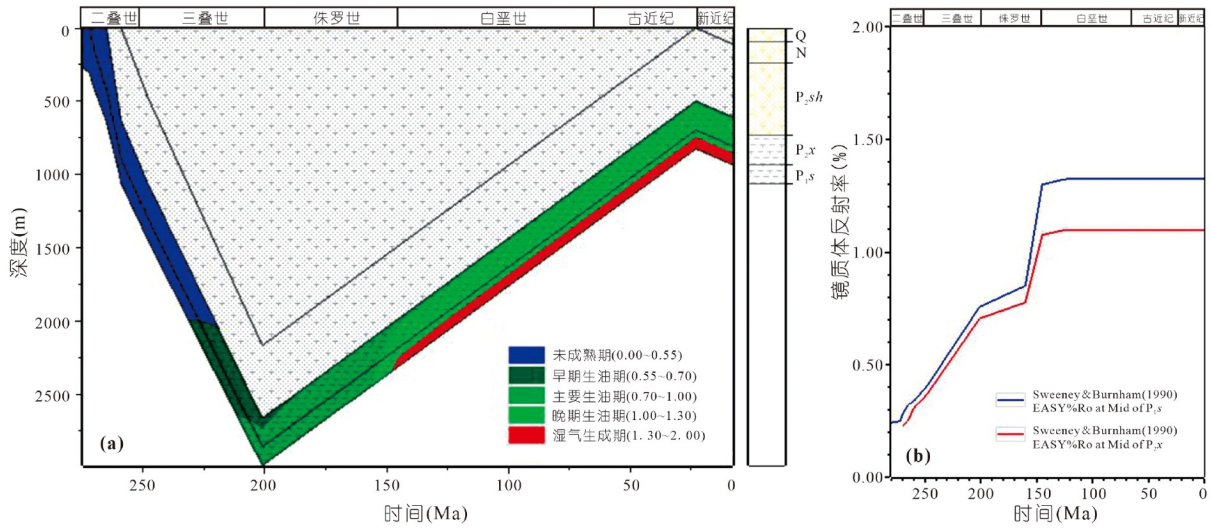


图 8　淮北矿区煤系地层烃源岩成熟史模拟结果

(1) 液态窗形成期: 晚石炭世至晚三叠世, 煤系埋深速率由20m Ma^{-1}增至33m Ma^{-1}, 古地温梯度自32℃ km^{-1}升至45℃ km^{-1}, 促使有机质经历深成变质作用(R_o=0.5%~0.9%). 至早侏罗世(~190Ma), 下石盒子组与山西组页岩实测R_o值分别达到0.72%与0.88%, 表明该套煤系页岩整体已进入生油窗阶段, 并伴有湿气产出.

(2) 热裂解气爆发期: 早白垩世初(~145Ma), 辉长岩侵入事件引发区域热流异常(峰值130mW m^{-2}), 研究区岩浆岩侵入体(规模50km^2)可引发半径5km的异常高热流区(>120mW m^{-2}), 高热流持续约5~10Ma. 数值模拟显示, 山西组R_o值在5Ma内由1.0%跃升至1.33%, 下石盒子组由0.85%增至1.10%(图8b). 当温度突破165℃时, 早期重质油发生热裂解, 生成轻质凝析油与富甲烷湿气.

(3) 气藏调整逸散期: 早白垩世晚期至古近纪, 受太平洋板块高角度俯冲远程效应影响(Liu等, 2017, 2021), 研究区隆升速率达12~15m Ma^{-1}, 剥蚀量逾2000m, 地层温度骤降30~50℃. 减压解吸作用导致吸附气逸失率超40%, 局部构造高部位气藏遭受生物降解, 形成现今"低丰度-高散失"的残余气藏格局.

烃源岩生-排烃时限的厘定是油气成藏期次解析的关键约束条件(Opera等, 2013). 基于煤系生烃过程与构造-热事件耦合分析, 本研究揭示淮北矿区页岩气成藏具两期演化特征: (1) 生烃期(250~125Ma): 煤系页岩于250Ma左右启动生烃作用, 约145Ma达到生烃强度峰值(图9a). 生烃过程受控于古地温梯度演变, 山西组与下石盒子组呈现同步生烃峰, 反映统一热动力学背景. 抬升剥蚀事件(125Ma左右)导致生烃速率衰减>80%, 有机质反应终止. (2) 排烃-运移期(250~110Ma): 山西组页岩生-排烃近乎同步(ΔT<5Myr), 约250Ma即启动排烃作用; 而下石盒子组排烃显著滞后(ΔT≈50Myr), 至约200Ma方达到排烃阈值. 早白垩世岩浆热事件(130~110Ma)使两套页岩排烃效率提升

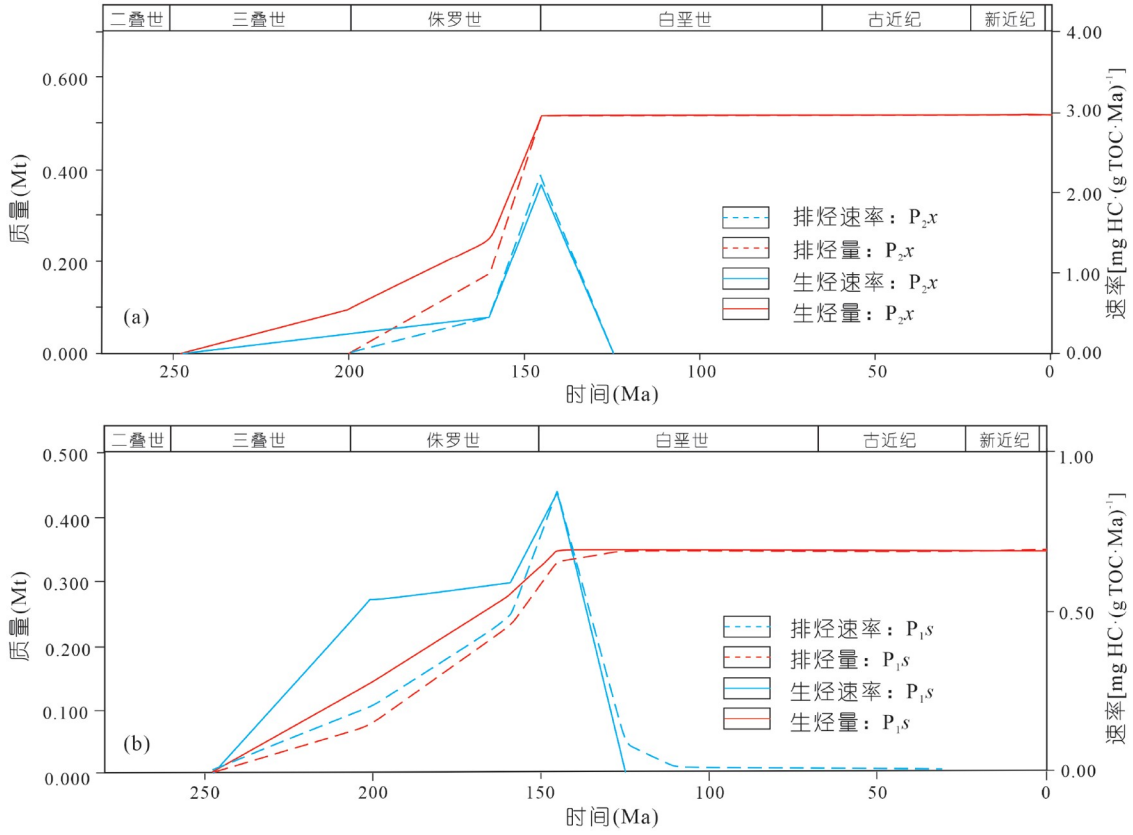


图 9　淮北矿区煤系页岩生排烃速率变化

(a) 下石盒子组煤系页岩生排烃速率变化; (b) 山西组煤系页岩生排烃速率变化

2~3倍(图9b). 至110Ma左右, 页岩储层含气饱和度较高, 超压作用驱动烃类向邻近砂岩储集体高效运移.

5.3 华北克拉通破坏与页岩气富集的关系

华北克拉通南部煤系页岩气的生成与成藏过程集中发生于早白垩世, 这一关键时期与克拉通破坏事件的时空耦合性揭示了深部动力学对能源系统的控制机制. 中生代以来, 华南板块与华北板块的陆陆碰撞及西太平洋板块的多阶段俯冲(Yu等, 2018), 共同塑造了华北南缘独特的构造-热演化格局(图10). 具体表现为: (1) 侏罗世期间, 扬子板块持续向南逆冲推覆, 引发大别造山带阶段性隆升(Qian等, 2015), 导致研究区整体抬升剥蚀, 古地温梯度由40°C km^{-1}骤降至25°C km^{-1}(图10a); (2) 早白垩世初期(~145Ma), 西太平洋板块俯冲角度由低角度急剧转变为高角度, 伴随俯冲带后撤速率达到峰值(郑永飞等, 2018), 触发克拉通岩石圈大规模伸展减薄, 诱发幔源岩浆大规模上涌(Tang等, 2023). 此时, 北东-北北东向高角度正断层系统叠加于印支期基底构造之上, 形成网格状断裂网络(Peng等, 2015), 不仅控制地温场空间异质性, 更通过深部流体携带深部高热流向浅部进行传输(刘全有等, 2019, 2024).

岩浆热效应在煤系演化中扮演双重角色: 宿北断裂带近50km^{2}的早白垩世初辉长岩体侵位导致邻近区域热流值跃升至100~130mW m^{-2}(图10b), 使得睢肖、临涣矿区煤层镜质体反射率由背景值0.6%升至2.5%~3.0%, 形成焦煤-无烟煤序列(Wang等, 2013). 热变质作用不仅促进有机质裂解生烃, 例如海孜煤矿碳氢化合物达340m^3 t^{-1}(Wang L等, 2014). 同时通过热液蚀变改造页岩孔隙结构, 使其比表面积增加30%~50%, 甲烷吸附容量提升至8~12cm^3 g^{-1}(图10b). 然而, 晚白垩世太平洋板块斜向俯冲引发构造体制转换(Zhu等, 2012), 区域进入均衡隆升阶段, 岩浆活动减弱(Liu等, 2017), 东部煤系地层抬升剥露导致地层压力系数降低, 诱发气藏裂解逸散(图10c). 值得注意的是, 构造转换带(如临涣区块的南坪向斜、宿南向斜、宿东向斜以及淮南矿区潘谢区块等)因断裂封堵与超压保存, 页岩含气量仍可达4~8m^3 t^{-1}(张文永等, 2018; 赵志义等, 2019), 揭示构造-热耦合过程对能源富集具有非均质性控制.

上述多尺度过程表明, 克拉通破坏与页岩气富集

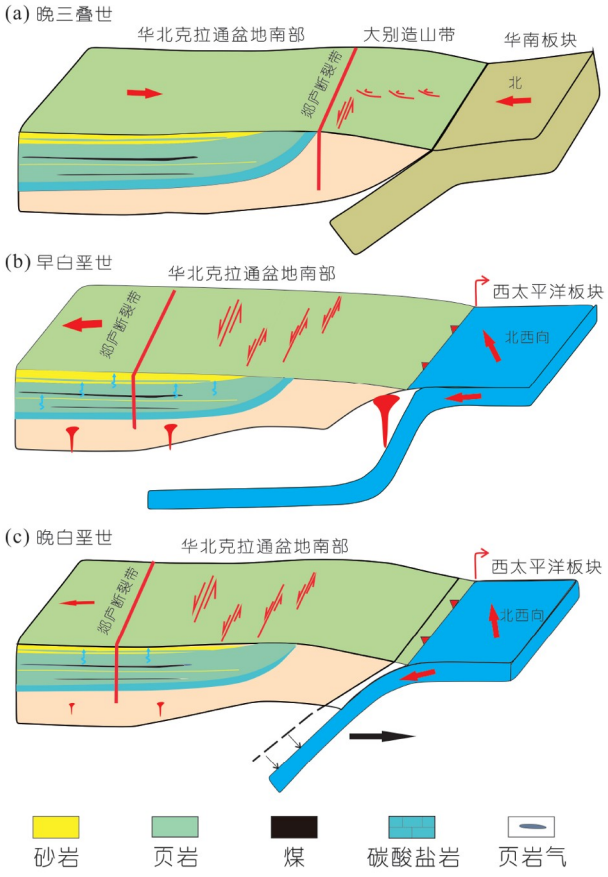


图 10 华北克拉通南部构造-岩浆-热演化和煤系页岩气生成与保存的耦合演化示意图

并非单一地质事件, 而是深部地幔动力学与浅表构造响应的级联效应. 该区域早期(145~120Ma)岩浆热事件导致持续的高地温背景, 显著了提升有机质生烃效率; 而晚期(<120Ma)弱构造变形区的微裂缝系统与致密盖层协同抑制烃类逸散, 具有"高效生烃-有限逸散"的耦合富集条件, 形成"热演化控生、构造活动控存"的成藏模式. 这一认识为华北克拉通破坏带煤系气勘探提供了新的地质模型. 今后需要优先关注早白垩世初岩浆侵入区与弱变形构造叠合部位(如宿北断裂北侧), 此类构造单元可能成为页岩气-煤层气协同开发的战略性靶区.

6 结论

(1) 华北克拉通南部淮北矿区主要发育三期岩浆活动: 早白垩世初(~143Ma)辉长岩、早白垩世早期花

岗闪长岩(128~130Ma)和早白垩世晚期(115~104Ma)辉长岩, 分别反映了克拉通破坏起始(~145Ma)、克拉通破坏(130~120Ma)峰期以及克拉通破坏结束事件(104Ma). 岩浆岩全岩弧型地球化学特征和Sr-Nd同位素特征($^{87}Sr/^{86}Sr_i$=0.707~0.712, $\varepsilon_{Nd}(t)$=−12.63~−9.18)指示其和华北克拉通破坏的地球动力学机制相同, 主要受控于太平洋板块的后撤作用.

(2) 华北克拉通南部煤系页岩气成烃过程可划分为三个演化阶段: 液态烃生成期、热裂解气形成期及气藏调整期. 晚侏罗世至早白垩世受强烈的岩浆热事件影响(峰值热流值达130mW m^{-2}), 区域热变质作用显著增强, 导致下二叠统下石盒子组和山西组页岩成熟度呈现阶梯式跃升, 其R_o值分别升高至1.10%和1.33%. 在165℃的高温条件下, 早期形成的重质原油经历热裂解作用, 逐步转化为轻质油与湿气, 并伴随次生热解气生成. 这一过程显示, 构造-热耦合机制通过控制有机质成熟度与烃类相态转化, 最终主导了页岩气系统的动态演化.

(3) 华北克拉通破坏对南部煤系页岩气富集具双重控制机制: 构造抬升-剥蚀效应抑制烃源岩热成熟度演化并加剧生烃后逸散; 同时俯冲后撤诱发的岩浆热扰动促使有机质快速成熟并显著提升生烃强度, 形成局部富集单元. 因此, 早白垩世岩浆热活动叠加弱构造变形作用的区域因具备“高效生烃-有限逸散”耦合条件, 可能成为煤系气协同开发的战略靶区.

参考文献

琚宜文, 戚宇, 房立志, 朱洪建, 王国昌, 王桂梁. 2016. 中国页岩气的储层类型及其制约因素. 地球科学进展, 31: 782–799

刘全有, 朱东亚, 孟庆强, 刘佳宜, 吴小奇, 周冰, Qi F U, 金之钧. 2019. 深部流体及有机-无机相互作用下油气形成的基本内涵. 中国科学: 地球科学, 49: 499–520

刘全有, 朱东亚, 孟庆强, 宋玉财, 吴小奇, 李鹏, 许汇源, 彭威龙, 黄晓伟, 刘佳宜, 魏永波, 金之钧. 2024. 地球多层圈有机-无机相互作用的资源效应. 天然气地球科学, 35: 741–762

邱楠生, 何丽娟, 常健, 朱传庆. 2020. 沉积盆地热历史重建研究进展与挑战. 石油实验地质, 42: 790–802

屈凯旋, 郭少斌. 2022. 南华北盆地太康隆起太原组砂岩储层致密成因及天然气充注特征. 石油科学通报, 7: 294–308

任战利, 张盛, 高胜利, 崔军平, 肖媛媛, 肖晖. 2007. 鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义. 中国科学D辑: 地球科学, (S1): 23–32

谭静强, 琚宜文, 张文永, 侯泉林, 谭永杰. 2010. 淮北煤田中南部大地热流及其煤层气资源效应. 中国科学: 地球科学, 40: 855–865

汤艳杰, 英基丰, 赵月鹏, 许欣然. 2021. 华北克拉通岩石圈地幔特征与演化过程. 中国科学: 地球科学, 51: 1489–1503

武昱东, 琚宜文, 侯泉林, 胡圣标, 倪善芹, 范俊佳. 2009. 淮北煤田宿临矿区构造——热演化对煤层气生成的控制. 自然科学进展, 19: 1134–1141

徐夕生, 黄周传, 姜鼎盛, 曾罡, 戴立群. 2024. 古太平洋板块的遗迹和残片——地球化学和地球物理学示踪. 中国科学: 地球科学, 54: 3091–3112

杨进辉, 许蕾, 孙金凤, 曾庆栋, 赵亚楠, 王浩, 朱昱升. 2021. 华北克拉通破坏与岩浆-成矿的深部动力学过程. 中国科学: 地球科学, 51: 1401–1419

余坤, 万志军, 琚宜文, 王朱亭, 赵帅, 乔鹏. 2023. 淮北杨柳矿区煤系构造热演化对页岩气生成与保存的影响. 地质学报, 97: 2690–2701

张文永, 朱文伟, 窦新钊, 赵志义, 胡广青, 丁海, 易小会. 2018. 两淮煤田煤系天然气勘探开发研究进展. 煤炭科学技术, 46: 245–251, 237

赵志义, 张文永, 孙贵, 窦新钊. 2019. 两淮含煤岩系煤层气与页岩气富集特征及共采选区评价. 安徽地质, 29: 179–183

郑永飞, 徐峥, 赵子福, 戴立群. 2018. 华北中生代镁铁质岩浆作用与克拉通减薄和破坏. 中国科学: 地球科学, 48: 379–414

郑建平, 戴宏坤. 2018. 西太平洋板片俯冲与后撤引起华北东部地幔置换并导致陆内盆-山耦合. 中国科学: 地球科学, 48: 436–456

朱光, 陆元超, 苏楠, 吴晓冬, 尹浩, 张帅, 谢成龙, 牛漫兰. 2021. 华北克拉通早白垩世地壳变形规律与动力学. 中国科学: 地球科学, 51: 1420–1443

朱光, 刘程, 顾承串, 张帅, 李云剑, 苏楠, 肖世椰. 2018. 郯庐断裂带晚中生代演化对西太平洋俯冲历史的指示. 中国科学: 地球科学, 48: 415–435

朱日祥, 徐义刚. 2019. 西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 49: 1346–1356

朱日祥, 徐义刚, 朱光, 张宏福, 夏群科, 郑天愉. 2012. 华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 42: 1135–1159

邹才能, 杨智, 黄士鹏, 马锋, 孙钦平, 李富恒, 潘松圻, 田文广. 2019. 煤系天然气的资源类型、形成分布与发展前景. 石油勘探与开发, 46: 433–442

邹才能, 董大忠, 熊伟, 傅国友, 赵群, 刘雯, 孔维亮, 张琴, 蔡光银, 王玉满, 梁峰, 刘翰林, 邱振. 2024a. 中国页岩气新区带、新层系和新类型勘探进展、挑战及对策. 石油与天然气地质, 45: 309–326

邹才能, 林敏捷, 马锋, 刘翰林, 杨智, 张国生, 杨依超, 关春晓, 梁英波, 王影, 熊波, 于豪, 余平. 2024b. 碳中和目标下中国天然气工业进展、挑战及对策. 石油勘探与开发, 51: 418–435

Aguillón-Robles A, Calmus T, Benoit M, Bellon H, Maury R C, Cotten

J, Bourgois J, Michaud F. 2001. Late Miocene adakites and Nb-enriched basalts from Vizcaino Peninsula, Mexico: Indicators of East Pacific Rise subduction below southern Baja California? Geology, 29: 531

Cao D, Li X, Deng J. 2009. Coupling effect between coalification and tectonic-thermal events—Geological records of geodynamics of sedimentary basin. Earth Sci Front, 16: 52–60

Chen J, Zhang H, Chang H, Wang Q. 2023. Research on main controlling factors of tight sandstone gas accumulation in coal-bearing strata in the southern North China Basin: Comparison with the Ordos Basin. Front Earth Sci, 10: 1037658

Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 347: 662–665

Defant M J, Richerson P M, De Boer J Z, Stewart R H, Maury R C, Bellon H, Drummond M S, Feigenson M D, Jackson T E. 1991. Dacite genesis via both slab melting and differentiation-petrogenesis of la-yeguada volcanic complex, panama. J Petrol, 32: 1101–1142

Delhaye-Prat V, Bourget J, Gaillot G, Gaillot J, Sapin F, Fillon C, Ye J, Wright T, Chaboureau A C, Buratti N, Magnier B, Belopolsky A, Bez M, Heumann M J, Sullivan M, Mathieu J P, Cole S, Ladner B, Bull J, Dal J A. 2024. Tectono-sedimentary evolution of the Suriname margin in the cretaceous: A sequence-stratigraphic framework. Earth-Sci Rev, 253: 104770

Deng T, Ma A, Chew D, Hu X, Wang P, Jibu Y. 2024. Revisiting the stratigraphical, sedimentological and provenance evolution of Lingshan Island, offshore of east China: Implications for the destruction of the north China craton. Mar Pet Geol, 161: 106701

Espitalie J, Deroo G, Marquis F. 1985. Rock-Eval pyrolysis and its applications (part 2). Rev I F Pet, 40: 755–784

Evro S, Oni B A, Tomomewo O S. 2024. Carbon neutrality and hydrogen energy systems. Int J Hydrogen Energy, 78: 1449–1467

Fan Z, Liu H, Liu J, Xue S, Zhang K, Xu H, Fang H. 2023. Modeling of supercritical CO_2 adsorption for low-permeability coal seam of Huainan-Huaibei Coalfield, China. ACS Omega, 8: 44195–44211

Fu M, Shan X, Zhang X, Yi J, Xu C, Wang C, Yue J. 2022. Geodynamic evolution of lithospheric removal of the North China Craton: Constraints from late Mesozoic volcanic rocks in the Bohai Bay Basin, East China. J Asian Earth Sci, 236: 105330

Jin F, Huang J, Pu X, Ma C, Fu L, Leng C, Lou D, Qin M. 2020. Characteristics of the Cretaceous magmatism in Huanghua depression and their relationships with hydrocarbon enrichment. J Earth Sci, 31: 1273–1292

Ju Y, Sun Y, Tan J, Bu H, Han K, Li X, Fang L. 2018. The composition, pore structure characterization and deformation mechanism of coal-bearing shales from tectonically altered coalfields in eastern China. Fuel, 234: 626–642

Ju Y, Yu K, Wang G, Li W, Zhang K, Li S, Guo L, Sun Y, Feng H, Qiao P, Ali R. 2021. Coupling response of the Meso-Cenozoic differential evolution of the North China Craton to lithospheric structural transformation. Earth-Sci Rev, 223: 103859

Kamei A, Miyake Y, Owada M, Kimura J I. 2009. A pseudo adakite derived from partial melting of tonalitic to granodioritic crust, Kyushu, southwest Japan arc. Lithos, 112: 615–625

Koschek G. 1993. Origin and significance of the SEM cathodoluminescence from zircon. J Microsc, 171: 223–232

Liu C, Zhu G, Zhang S, Gu C, Li Y, Su N, Xiao S. 2018. Mesozoic strike-slip movement of the Dunhua-Mishan Fault Zone in NE China: A response to oceanic plate subduction. Tectonophysics, 723: 201–222

Liu S A, Li S, Guo S, Hou Z, He Y. 2012. The Cretaceous adakitic-basaltic-granitic magma sequence on south-eastern margin of the North China Craton: Implications for lithospheric thinning mechanism. Lithos, 134: 163–178

Liu S A, Li S, He Y, Huang F. 2010. Geochemical contrasts between early Cretaceous ore-bearing and ore-barren high-Mg adakites in central-eastern China: Implications for petrogenesis and Cu-Au mineralization. Geochim Cosmochim Acta, 74: 7160–7178

Liu S, Ma P, Zhang B, Gurnis M. 2021. The horizontal slab beneath East Asia and its subdued surface dynamic response. J Geophys Res-Solid Earth, 126: e2020JB021156

Liu S, Su S, Zhang G. 2013. Early Mesozoic basin development in North China: Indications of cratonic deformation. J Asian Earth Sci, 62: 221–236

Liu S, Gurnis M, Ma P, Zhang B. 2017. Reconstruction of northeast Asian deformation integrated with western Pacific plate subduction since 200 Ma. Earth-Sci Rev, 175: 114–142

Liu S, Zhang B, Ma P, Williams S, Lin C, Wan N, Ran C, Gurnis M. 2024. Craton deformation from flat-slab subduction and rollback. Nat Geosci, 17: 936–943

Ma Q, Xu Y G. 2021. Magmatic perspective on subduction of Paleo-Pacific plate and initiation of big mantle wedge in East Asia. Earth-Sci Rev, 213: 103473

Ma Q, Zhong Y, Yin Q, Huyskens M H, Ma L, Xia X, Meng Q R, Zhou Z H, Xu Y G. 2024. High-resolution chronostratigraphy of late Mesozoic sequences in northern North China: Implications for the linkages among intracontinental orogeny, volcanism, Jehol Biota, and Pacific plate subduction. Geology, 52: 45–50

Meng Q R, Wu G L, Fan L G, Wei H H. 2019. Tectonic evolution of early Mesozoic sedimentary basins in the North China block. Earth-Sci Rev, 190: 416–438

Miao L, Zhang F, Fan W, Liu D. 2011. Neoproterozoic zircon

inheritance in eastern North China craton (China) Mesozoic igneous rocks: Derivation from the Yangtze craton and tectonic implications. Int Geol Rev, 53: 1464–1477

Mohammed S, Eljack F, Al-Sobhi S, Kazi M K. 2024. A systematic review: The role of emerging carbon capture and conversion technologies for energy transition to clean hydrogen. J Clean Prod, 447: 141506

Ni J, Wang R, Liu J, Wang Z, Li C, Ji L, Zhang J. 2024. Paleo-Pacific plate subduction direction change (122–118 Ma): Insight from late kinematic plutons in the Wulian metamorphic core complex, Jiaodong Peninsula, eastern China. GSA Bull, 136: 3705–3734

Opera A, Alizadeh B, Sarafdokht H, Janbaz M, Fouladvand R, Heidarifard M H. 2013. Burial history reconstruction and thermal maturity modeling for the Middle Cretaceous–Early Miocene Petroleum System, southern Dezful Embayment, SW Iran. Int J Coal Geol, 120: 1–14

Pearce J. 1996. A User's Guide to Basalt Discrimination Diagrams. Geol Assoc Canada Short Course Notes, 12: 79–113

Peng H, Wang J, Liu C, Zhao H, Huang L, Zhao X, Zhang S, Liang C, Wang Z, Cattò S, Jiao X, Zhang L, Zhang T, Zhang D, Zattin M. 2023. Long-term and multiple stage exhumation of the Ordos Basin, western North China Craton: Insights from seismic reflection, borehole and geochronological data. Earth-Sci Rev, 238: 104349

Peng T, Wu J W, Ren Z Q, Xu S P, Zhang H C. 2015. Distribution of terrestrial heat flow and structural control in Huainan-Huaibei Coalfield. Chin J Geophys, 58: 2391–2401

Plank T, Langmuir C H. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. Chem Geol, 145: 325–394

Qian T, Liu S, Li W, Gao T, Chen X. 2015. Early-Middle Jurassic evolution of the northern Yangtze foreland basin: A record of uplift following Triassic continent-continent collision to form the Qinling-Dabieshan orogenic belt. Int Geol Rev, 57: 327–341

Qiu H, Lin W, Chen Y, Faure M. 2023. Jurassic-Early Cretaceous tectonic evolution of the North China Craton and Yanshanian intracontinental orogeny in East Asia: New insights from a general review of stratigraphy, structures, and magmatism. Earth-Sci Rev, 237: 104320

Richards J P, Kerrich R. 2007. Special paper: Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis. Econ Geol, 102: 537–576

Rudnick R L, Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective. Rev Geophys, 33: 267–309

Santosh M, Teng X M, He X F, Tang L, Yang Q Y. 2016. Discovery of Neoarchean suprasubduction zone ophiolite suite from Yishui Complex in the North China Craton. Gondwana Res, 38: 1–27

Song X, Chen T, Zhang D. 2023. The acoustic characteristics of tectonically deformed coal in Huaibei Coalfield. Energies, 16: 5179

Stern C R, Kilian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone. Contrib Mineral Petrol, 123: 263–281

Su N, Zhu G, Liu C, Zhang S, Li Y, Yin H, Wu X. 2020. Alternation of back-arc extension and compression in an overriding plate: Evidence from Cretaceous structures in the western Liaoning region, eastern China. Int J Earth Sci-Geol Rund, 109: 707–727

Sweeney J J, Burnham A K. 1990. Evaluation of a simple-model of vitrinite reflectance based on chemical-kinetics. AAPG Bull, 74: 1559–1570

Tang J, Wang F, Wang Y N, Long X Y, Xu W L. 2023. Age, formation mechanisms, spatial extent, and geodynamic effects of the eastern and northeastern Asian big mantle wedges. Earth-Sci Rev, 237: 104324

Tong L, Luo Y, Zhou F, Wang Y, Li S, Jia L, Yue T. 2018. Genetic mechanisms of coalbed methane in typical districts from Huaibei Coalfield, Eastern China. Geodinamica Acta, 30: 241–248

Wang G, Ju Y, Bao Y, Yan Z, Li X, Bu H, Li Q. 2014. Coal-bearing organic shale geological evaluation of Huainan-Huaibei Coalfield, China. Energy Fuels, 28: 5031–5042

Wang H, Wang L, Cheng Y, Zhou H. 2013. Characteristics and dominant controlling factors of gas outburst in Huaibei coalfield and its countermeasures. Int J Min Sci Tech, 23: 591–596

Wang L, Cheng L, Cheng Y, Yin G, Cai C, Xu C, Jin K. 2014. Thermal effects of magmatic sills on coal seam metamorphism and gas occurrence. Bull Volcanol, 76: 1–6

Wu H, Liu S A, He Y, Li S. 2023. Mesozoic slab-derived magmas from mid-eastern China: Responses to a ridge-transform fault-ridge subduction system. Chem Geol, 617: 121259

Wu J, Lin Y A, Flament N, Wu J T J, Liu Y. 2022. Northwest Pacific-Izanagi plate tectonics since Cretaceous times from western Pacific mantle structure. Earth Planet Sci Lett, 583: 117445

Yang F, Yu Y, Zhang X, Chen Y, Liu Y, Zhang Z, Qi P, Niu Y. 2024. Mesozoic tectonic evolution and dynamic mechanisms of the northern Bozhong depression of the Bohai Bay Basin, eastern China. J Asian Earth Sci, 273: 106254

Yu K, Ju Y, Qi Y, Huang C, Zhu H. 2020. Geological process of Late Paleozoic shale gas generation in the eastern Ordos Basin, China: Revelations from geochemistry and basin modeling. Int J Coal Geol, 229: 103569

Yu K, Ju Y, Qian J, Qu Z, Shao C, Yu K, Shi Y. 2018. Burial and thermal evolution of coal-bearing strata and its mechanisms in the southern North China Basin since the late Paleozoic. Int J Coal

Geol, 198: 100–115

Zhang C, Ma C, Holtz F, Koepke J, Wolff P E, Berndt J. 2013. Mineralogical and geochemical constraints on contribution of magma mixing and fractional crystallization to high-Mg adakite-like diorites in eastern Dabie orogen, East China. Lithos, 172: 118–138

Zhang S, Zhu G, Liu C, Li Y, Su N, Xiao S. 2019. Episodicity of stress state in an overriding plate: Evidence from the Yalu River Fault Zone, East China. Gondwana Res, 71: 150–178

Zhu G, Jiang D, Zhang B, Chen Y. 2012. Destruction of the eastern North China Craton in a backarc setting: Evidence from crustal deformation kinematics. Gondwana Res, 22: 86–103

Zou C, Li Y, He X F, Santosh M, Yu K, Mitchell R N. 2024. Contrasting hydrocarbon reservoirs in the North China Craton in relation to inhomogeneous craton destruction. Earth-Sci Rev, 255: 104843

(责任编委: 刘少峰)