

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.600



同位素热年代学在页岩气勘探开发中的应用： 以华南地区为例

包汉勇¹, 张柏桥¹, 舒志国², 王超¹, 张梦吟¹, 何生³, 王进¹, 李凯¹

1. 中国石化江汉油田分公司勘探开发研究院, 湖北武汉 430223

2. 中国石化江汉油田分公司, 湖北潜江 433124

3. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

摘要: 随着同位素热年代学理论体系、分析测试和模拟技术的不断完善, 同位素热年代学已成为基础地质和常规油气勘探领域研究不可或缺的热点学科, 但对于其在页岩气勘探开发地质评价领域中的系统应用还关注较少。通过对页岩气勘探开发综合评价体系及同位素热年代学相关理论分析, 结合近年来华南地区多套页岩层系的勘探开发实践, 指出同位素热年代学在页岩地层对比, 页岩烃源评价中的生排烃史和构造热演化史、储集特征、保存条件评价中的核心指标(抬升剥蚀时间、剥蚀量的恢复及断裂活动期次)以及页岩可压性等多个方面的研究均可作为有效技术手段, 研究表明同位素热年代学在页岩气勘探开发领域应用前景极为广阔。

关键词: 同位素热年代学; 页岩气; 勘探开发; 华南地区; 石油地质。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2018)06-1861-11

收稿日期: 2018-02-05

Application of Isotopic Thermochronology in Shale Gas Exploration and Development—Case from South China

Bao Hanyong¹, Zhang Boqiao¹, Shu Zhiguo², Wang Chao¹, Zhang Mengyin¹, He Sheng³, Wang Jin¹, Li Kai¹

1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, SINOPEC Jiangnan Oilfield Company, Wuhan 430223, China

2. Jiangnan Oilfield Company, SINOPEC, Qianjiang 433124, China

3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: In recent years, with the continuous improvement of isotopic thermochronologic theory system, the test and simulation technology, the isotopic thermochronology has become the hot subject of basic geological research and conventional oil and gas exploration field. However, the systematic application of the system in the field of geological evaluation for shale gas exploration and development is still less concerned. Therefore, based on the comprehensive evaluation system of shale gas exploration and development and the related theories of isotopic thermochronology, combined with the exploration and development practice of several shale strata in South China of recent years, this paper suggests that isotopic geochronology is the core index in shale stratigraphy correlation, hydrocarbon generation and expulsion history, tectonic thermal evolution history, reservoir characteristics, preservation condition evaluation in shale source evaluation (such as uplift and denudation time, recovery of denudation and active period of fracture) and compressible shale. These aspects can be used as effective technical method. It shows that the application of isotopic thermochronology can be widely applied to the field of shale gas exploration and development.

Key words: isotopic thermochronology; shale gas; exploration and development; South China; petroleum geology.

基金项目: 国家科技重大专项项目(No.2016ZX05060); 国家自然科学基金项目(No.41702149); 中国石化科技项目(No.P17014-2)。

作者简介: 包汉勇(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事油气勘探开发研究。ORCID: 0000-0002-4657-9375. E-mail: geobhy@sina.com

引用格式: 包汉勇, 张柏桥, 舒志国, 等, 2018. 同位素热年代学在页岩气勘探开发中的应用: 以华南地区为例. 地球科学, 43(6): 1861-1871.

0 引言

近年来随着页岩气勘探开发理论和技术的快速突破,页岩气已成为国内外油气行业关注的焦点。近年来涪陵、长宁—威远、昭通、延安 4 个国家页岩示范区相继建立,特别是涪陵页岩气田至 2017 年底已累计建成产能达 $10 \times 10^9 \text{ m}^3$,提交页岩气探明储量达 $6 \times 10^{11} \text{ m}^3$,标志着我国首个大型页岩气田已经建成。与此同时,页岩气相关理论研究也取得了长足发展,国内外多位学者针对北美与中国地质特征的差异,提出了从页岩地层沉积特征、烃源特征、储集特征、保存条件、含气性、可压性和地表条件等多个方面开展页岩气选区评价,并对页岩气的赋存状态及富集规律等做了有益探讨(郭彤楼和刘若冰,2013;Zou *et al.*, 2015;戴方尧等,2017;孙健和包汉勇,2018),为我国页岩气勘探开发奠定了良好的地质理论基础。

同位素热年代学是一门以封闭温度和冷却年龄为核心,集同位素年代学、构造地质学、岩石矿物学及计算机模拟等为一体的综合性学科,经过几十年的发展,已经形成了较为系统的理论体系、技术方法,并在造山带隆升剥蚀、地质体定年、盆山耦合、成矿过程、盆地热史及常规油气成藏分析等多个方面得到了广泛应用(Reiners *et al.*, 2005;Reiners and Brandon, 2006;沈传波等, 2015;孔令耀等, 2017),但在页岩气勘探开发中的系统应用目前还较少见。为此,本文以华南地区多套页岩气勘探开发层系为例,系统论述了同位素热年代学在页岩气勘探开发地质评价中的应用。

1 页岩地层对比分析

页岩气选区评价的前提是需要明确优质页岩的沉积环境、物质来源及纵横展布规律。大量研究表明,形成于贫氧—厌氧的深水环境,富碳高硅的生源物质供给较多,厚度较大且分布稳定的暗色泥页岩往往是页岩气勘探开发的首选目标,而开展这些研究首先需要开展页岩地层精细划分与对比,针对局部区域开展页岩地层对比时常使用测井、地震、岩性分析等手段,这些手段在宏观区域内却难以有效展开,而多借助于古生物资料来开展页岩地层精细划分对比(陈旭等,2017),但对于前寒武系古生物化石较少或是取心资料较少的情况下,用生物地层的手段来开展页岩地层对比也难以实现。

事实上,学者可以通过同位素热年代学的相关定年技术很好地开展区域页岩地层对比研究,方法如下:(1)针对页岩一些含测年矿物的特殊夹层,如华南五峰组—龙马溪组下部页岩密集发育了一些凝灰岩夹层,对其开展测年研究,将夹层的年龄近似看成是页岩的年龄,对这些夹层可以利用封闭温度较高的 U-Pb 法,或是 U-Pb 法与封闭温度较低的 (U-Th)/He 双测年等方法测定地层年龄;(2)直接针对页岩中的一些放射性元素开展定年研究,如近年发展起来的 Re-Os 法等(Kendall *et al.*, 2006). Yamashita *et al.*(2007)指出海水中 Re、Os 主要以 ReO^{1-} 、 HOsO^{5-} 高价态迁移能力强的离子团存在,进入还原环境后,易被还原成低价态的离子从而被有机物吸附,这意味着页岩中 Re、Os 的富集与页岩沉积同时进行,并且 ^{187}Re 会经 β 衰变成 ^{187}Os ,利用这种衰变关系建立的 Re-Os 等时线年龄就代表了该套页岩的沉积年龄(Selby and Creaser, 2005;沈传波等, 2015;王富良等, 2016)。

针对上述两种页岩定年思路,本次选取了华南地区两套页岩气勘探开发的主要层系上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组及下寒武统牛蹄塘组/水井沱组/荷塘组加以论述。其中,五峰组—龙马溪组页岩为涪陵、长宁—威远、昭通 3 个国家页岩示范区的主要目的层系,在华南地区广泛发育,胡艳华等(2009)、谢尚克等(2012)和罗华等(2016)分别对中扬子地区的湖北宜昌王家湾、湖北宣恩麻阳寨及湖南桃源郝坪等地五峰组顶部页岩中的凝灰岩夹层开展了锆石测年(图 1a),3 个区域实测年龄非常接近,分别为 $443 \pm 2 \text{ Ma}$ 、 $450 \pm 4 \text{ Ma}$ 、 $442 \pm 8 \text{ Ma}$ 。此外,本次对上扬子涪陵地区焦页 A 井五峰组—龙马溪组底部页岩中的凝灰岩夹层也开展了 U-Pb 同位素测年,该地区 U-Pb 同位素等时线年龄为 $438 \pm 18 \text{ Ma}$ (表 1,图 1b),表明整个中上扬子下部黑色页岩的发育时期应该在 $443 \pm 5 \text{ Ma}$,具有很好的区域对比性。对于另一套华南广泛发育的下寒武统黑色页岩,Jenkins *et al.*(2002)、Wang *et al.*(2012)采用了 U-Pb 法获取了云南梅树村、湖南杆于坪下寒武统黑色页岩的形成年代分别为 $538 \pm 1 \text{ Ma}$ 和 $523 \pm 7 \text{ Ma}$;Xu *et al.*(2011)、Fu *et al.*(2016)则采用了 Re-Os 等时线年龄法对这套页岩开展了测年,测得的这套页岩形成年代分别为 $521 \pm 5 \text{ Ma}$ 和 $524 \pm 9 \text{ Ma}$,两种方法测试结果呈现出高度的一致性,证实扬子地区下寒武统黑色页岩发育的底界在 $530 \pm 8 \text{ Ma}$,在整个华南地区也具有很好的可对比性。

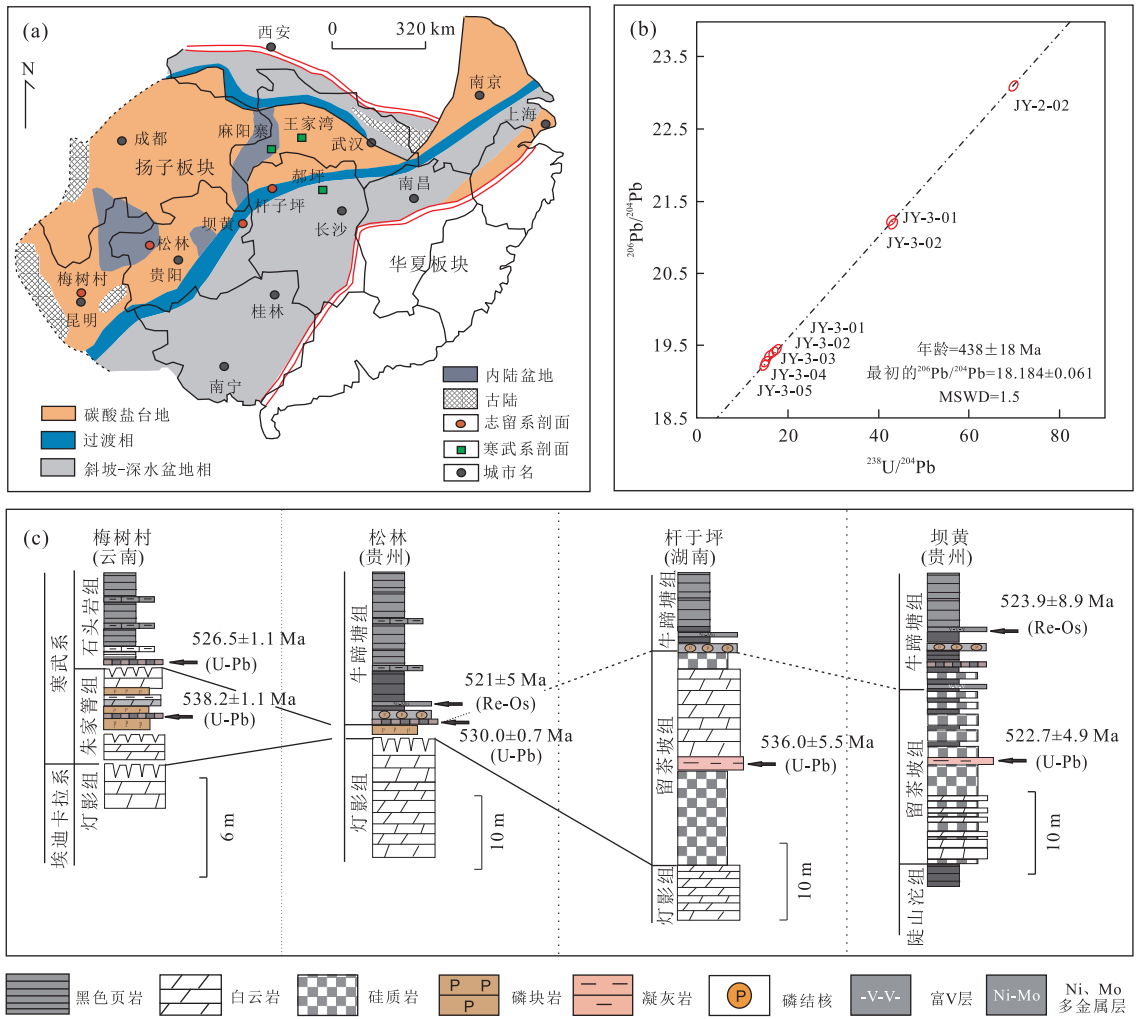


图 1 华南地区典型页岩测年观察点及同位素年龄分布特征

Fig.1 Characteristics of typical shale observation points and isotopic age distribution in South China

a.华南早寒武世岩相古地理及五峰组—龙马溪组、牛蹄塘组同位素测年点位分布;b.涪陵页岩气田焦页 A 井五峰组—龙马溪组凝灰岩夹层 U-Pb 同位素等时线年龄;c.华南地区牛蹄塘组同位素测年对比;据王富良等(2016)修改

表 1 焦页 A 井龙马溪组页岩中凝灰岩夹层锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 1 The isotopic analysis results of zircon U-Pb of the Longmaxi Formation in Jiaoye A well

样品编号	U(%)	Pb(μm)	²³⁸ U/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb
JYA-4-01	8.6	33.2	17.0	39.8	16.0	19.39
JYA-4-02	7.7	31.8	15.8	39.6	15.9	19.33
JYA-4-03	8.1	31.4	16.8	39.7	15.9	19.34
JYA-4-04	8.1	32.4	16.3	39.7	16.0	19.36
JYA-4-05	8.8	32.6	17.7	39.7	16.0	19.37
JYA-2-02	34.0	33.2	70.4	39.4	16.1	23.06
JYA-3-01	13.3	20.8	43.2	39.7	16.1	21.22
JYA-3-02	13.5	21.3	42.8	39.6	16.0	21.24

2 页岩生烃演化中的应用

从页岩进入生烃门限开始,随着热演化程度升高,逐渐进入到大量生排烃阶段,直至生烃停止.不

同的生烃演化阶段,页岩的生烃潜力、储集物性、保存条件和赋存状态均存在较大差异.其中生烃潜力、储集物性和有效保存条件是控制页岩气资源规模的核心因素,赋存状态的差异是页岩气开发技术政策

表 2 焦页 A 井龙马溪组页岩中自生伊利石 K-Ar 同位素分析结果

Table 2 The K-Ar isotopic analysis results of authigenic illites of the Longmaxi Formation in Jiaoye A well

样品编号	样品称重 (g)	钾含量 (%)	$^{40}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$ (%)	$^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ (%)	放射成因氩 (mol/g)	^{40}K 含量 (mol/g)	$^{40}\text{Ar}_{\text{放}}/^{40}\text{Ar}$ (%)	$^{40}\text{Ar}_{\text{放}}/^{40}\text{K}$ (%)	年龄值 (Ma, 1σ)
JYA-01	0.013	5.62	6.43	1 794.78	1.96E-07	1.68E-07	96.67	0.012	190.85 ± 2.16
JYA-02	0.014	6.16	6.99	2 301.88	2.12E-09	1.84E-07	97.34	0.012	188.7 ± 1.95

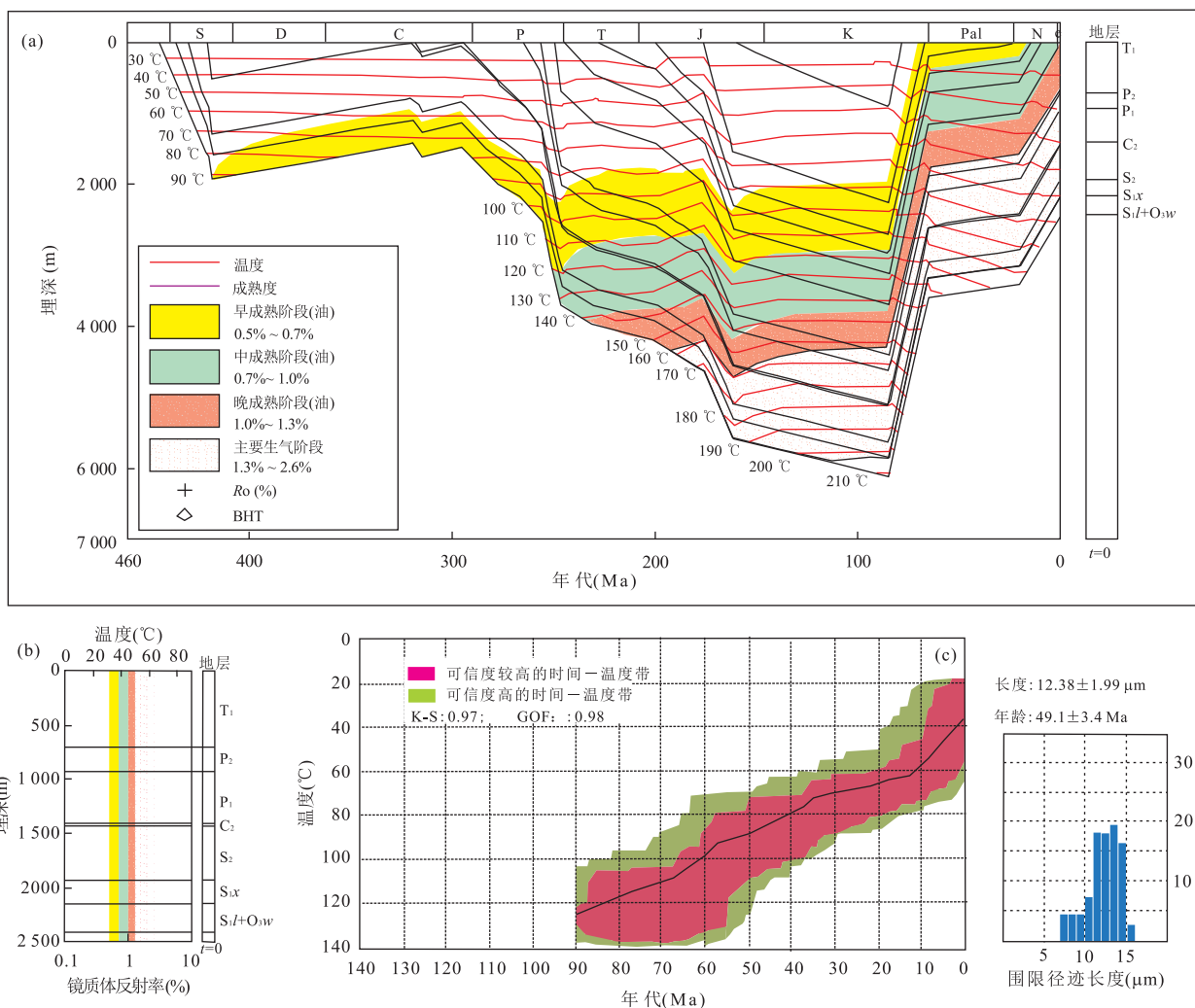


图 2 焦页 A 井埋藏史、热史综合模拟

Fig. 2 Comprehensive simulation diagrams of buried history and thermal history of Jiaoye A well

a. 焦页 A 井五峰组—龙马溪组页岩埋藏史、热史模拟; b. 焦页 A 井 Ro 分布规律; c. 焦页 A 井邻区露头侏罗系砂岩 AFT 热模拟

制定基础,要评价页岩的生烃演化史,核心是要明确页岩大规模生排烃的时间及页岩层系所经历的热演化历史,针对这两方面的研究,同位素热年代学可提供较好的解决思路。

2.1 页岩大规模生排烃时间研究

对于常规油气藏而言,同位素定年技术是油气成藏年代学研究的重要技术,并形成了多种较为完善的方法体系。目前常用的是自生伊利石 K-Ar 和 ^{39}Ar - ^{40}Ar 法,其原理是在富含 K 的水介质中,储层

(如砂岩等)矿物颗粒间发育自生伊利石,当烃类注入达到较高的油气饱和度后,自生伊利石便终止生长,因而可以用自生伊利石的最新年龄来表征油气藏形成的年龄。与常规气藏多需要经过大规模的油气运聚后才能富集成藏相比,页岩气源储一体,或仅发生过短距离的烃类运聚,但从目前华南多套已开发的页岩层系来看,页岩层系内或是紧邻的层系中多会有厚薄不一的砂岩夹层发育,如涪陵页岩气田五峰组—龙马溪组页岩气开发层段的中部和顶部均

有砂岩的发育,因而可将这些紧邻层系中利用同位素自生伊利石法测得的年龄当作页岩大规模生排烃的年龄.此外还可通过对页岩中的原油、沥青、干酪根等中 U-Pb、Pb-Pb、Rb-Sr 和 Sm-Nd 等同位素测年来开展大规模生排烃时间研究,如 Selby and Creaser(2005)、Rooney *et al.*(2012)基于 Re、Os 等同位素进入烃类演化系统后地质时钟就开始启动的原理,指出可将原油、沥青等测得 Re-Os 同位素年龄作为油气的生成年龄.

本次针对涪陵页岩气田龙马溪组下部页岩层段中的粉砂岩夹层开展了自生伊利石 K-Ar 和流体包裹体 Rb-Sr 同位素年代学研究.结果表明,该套页岩储层自生伊利石 K-Ar 同位素记录的油气成藏时间为 189 ± 2 Ma(表 2),流体包裹体 Rb-Sr 同位素等时线年龄为 188 ± 9 Ma,两种方法测试吻合度极高,表明涪陵页岩气田五峰组—龙马溪组页岩大规模生排烃的时间应为早侏罗世.

2.2 页岩热演化史研究

对于页岩热演化史的研究可概述为两类,一类是利用盆地热动力学模型来加以拟合;另一类是利用古温标法来模拟,而同位素热年代学中有多个指标,如 Ar-Ar、Rb-Sr、U-Pb、FT(裂变径迹)、(U-Th)/He 等均可作为古温标来开展热史分析.其中,

因磷灰石裂变径迹(apatite fission track, AFT)的退火温度与页岩生排烃的温度范围相近,加上其独特的退火敏感性,为目前同位素热年代学中最为常用的热史模拟方法.

本次研究以磷灰石裂变径迹(图 2c)和镜质体反射率(图 2b)结果为约束,开展了涪陵焦页 A 井热史模拟(图 2a).结果表明,焦页 A 井五峰组—龙马溪组页岩在距今 420 Ma 左右开始进入生烃门限;二叠纪中后期,进入中成熟阶段($R_o > 0.7\%$),温度为 $120\text{ }^\circ\text{C}$;由于受晚二叠世早期—中三叠世地层快速沉降和晚二叠世初邻区峨眉山玄武岩喷发的共同影响,页岩在早三叠世初期由中成熟阶段经历晚成熟阶段后,便快速进入到生湿气阶段,所对应深度和温度约为 4 000 m 和 $140\text{ }^\circ\text{C}$,也是自此开始进入前文提到的大规模生排烃阶段;之后页岩热演化程度快速增高,由高成熟阶段快速进入到过成熟阶段,至中侏罗世末期, R_o 值增大到 2.6% 以上;晚白垩世 85 Ma 左右,页岩达到最大埋深约为 6 000 m, R_o 演化达到最大值 2.9%,热演化基本停止.

3 页岩储集性能分析

物性的高低决定了页岩储集空间的大小,孔隙

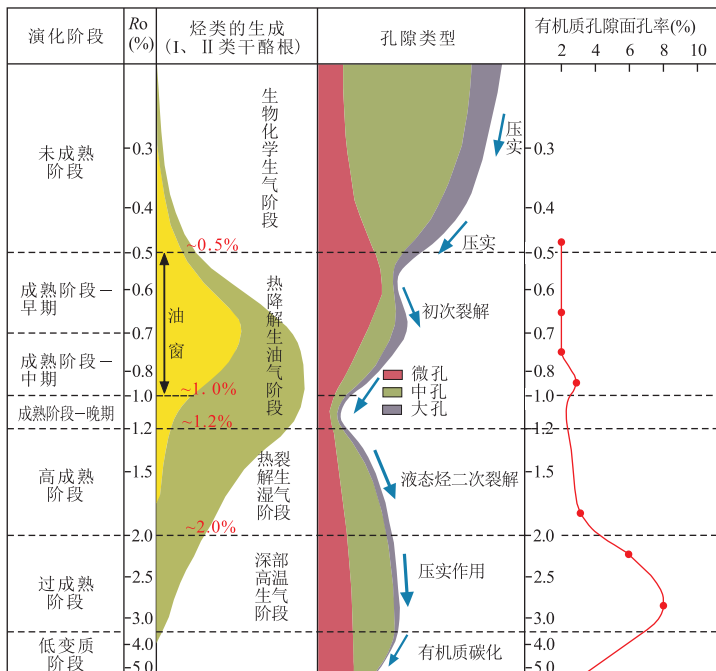


图 3 I、II 型干酪根页岩不同热成熟阶段孔隙类型与孔隙体积演化示意

Fig.3 A schematic diagram of pore type and pore volume evolution at different thermal ripening stages of type I and type II kerogen shales

类型和孔径的大小决定了页岩吸附能力和原始渗透率的高低,与常规砂岩因压实、胶结等成岩作用导致孔隙度随埋深和成熟度增加而单一降低不同,富含有机质页岩会随着热演化程度的增高,出现较为复杂的变化。以 I、II 型干酪根为例(图 3),未成熟阶段($R_o < 0.5\%$)受早期压实作用的影响,孔隙度会随着成熟度的增加逐渐变低。成熟早、中期($0.5\% < R_o < 1.0\%$),随着有机质开始大量生烃,有机孔开始大量发育,孔隙度会逐渐增大。成熟晚期($1.0\% < R_o < 1.2\%$),因原油裂解程度较低,且干酪根初次裂解气较少,孔隙流体压力较小,页岩有机质孔隙被液态烃、大分子沥青等堵塞,限制了干酪根初次裂解所生成的少量气体流通,使得该演化阶段有机孔不发育。过成熟阶段($1.2\% < R_o < (3.5\% \sim 4.0\%)$),随着干酪根和沥青的裂解,有机孔逐渐增多,孔隙度会变大。低级变质阶段($R_o > (3.5\% \sim 4\%)$),有机质开始碳化,在压实作用下有机孔塌陷,总孔隙度变低(Waples, 2000)。

前文已经阐述,同位素热年代学可以很好地表征页岩的热演化史,如通过焦页 A 井的热模拟表明,其经历的最大古埋深达到了 6 000 m,对应的 R_o 在 $2.6\% \sim 2.9\%$,这一阶段页岩储集物性好,储集性能优,如焦页 A 井五峰组—龙马溪组页岩实测的平均孔隙度介于 $4.0\% \sim 6.0\%$,以有机孔为主,且孔径较大,以中—大孔为主;与之相反,当页岩经历的最大古埋深和热演化程度较大时,以湘鄂西地区峰地 1 井牛蹄塘组页岩为例,最大古埋深超过 8 000 m,

R_o 在 3.8% 以上,实测的孔隙度多小于 3.0% ,有机孔不发育,以无机孔为主,且孔径也较小,多为微孔。

4 页岩气保存条件分析中的应用

相对于北美整体处于大的克拉通背景,华南地区经历了多期构造叠加改造,保存条件是我国页岩气选区评价的关键指标。华南地区页岩气近年的勘探开发实践表明,页岩大规模生烃后抬升剥蚀的时间早晚、剥蚀量的大小、断裂及与之伴生的裂缝发育的年代早晚均会对页岩气的保存产生明显影响。而同位素热年代学在这 3 个方面可开展针对性的研究。

4.1 抬升剥蚀的时间

自页岩大规模生烃后,大尺度的抬升剥蚀,一方面会使得页岩上覆顶板或之上更为广泛的“盖层”形成释重裂缝和构造裂缝,提高顶板层的孔隙度和渗透率,从而降低油气顶底板的封盖能力;另一方面,也使得页岩本身发生脆性破裂,地层先成裂缝处于开启状态,流体发生迁移,层内压力降低,吸附气逐渐解吸,甚至散失。对于抬升剥蚀的时间,用同位素热年代学中的多种方法,特别是 AFT 和 (U-Th)/He 等低温热年代学等方法均可以较准确的求得。地层抬升剥蚀后,页岩生烃作用停止,后期演化过程中页岩没有气体的持续补充,而页岩气的散失却以不同的速率持续进行。因而,对于大规模生排烃时间大体相同的页岩而言,抬升时间早晚决定了散失量的

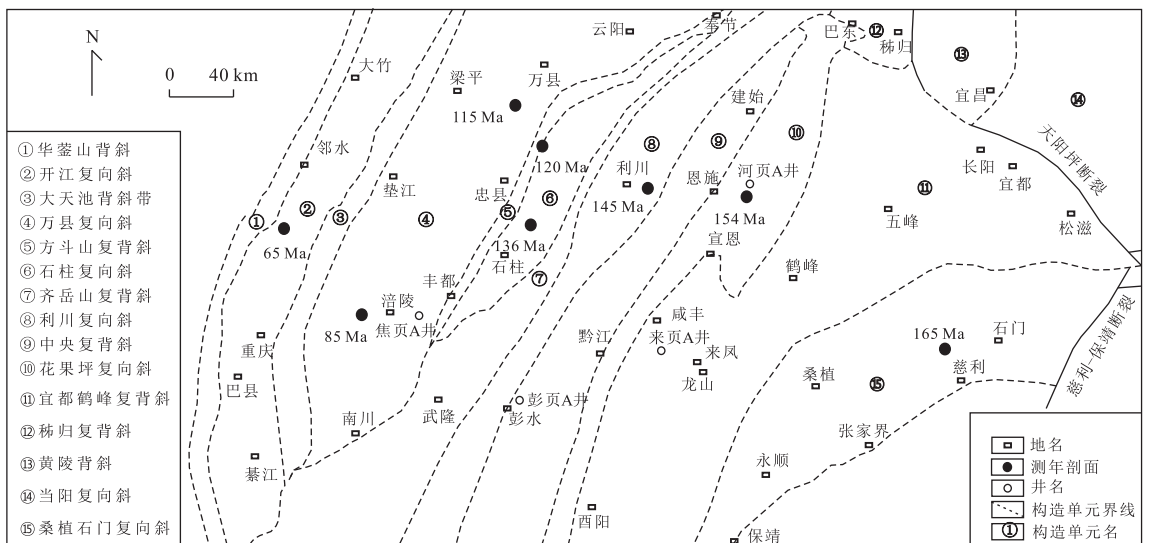


图 4 湘鄂西—渝东地区地层磷灰石裂变径迹热史模拟分布

Fig. 4 Thermal history simulation distribution map of apatite fission track of the formation of West Hunan-Hubei-East Chongqing area
数据来源自梅康夫等(2010)

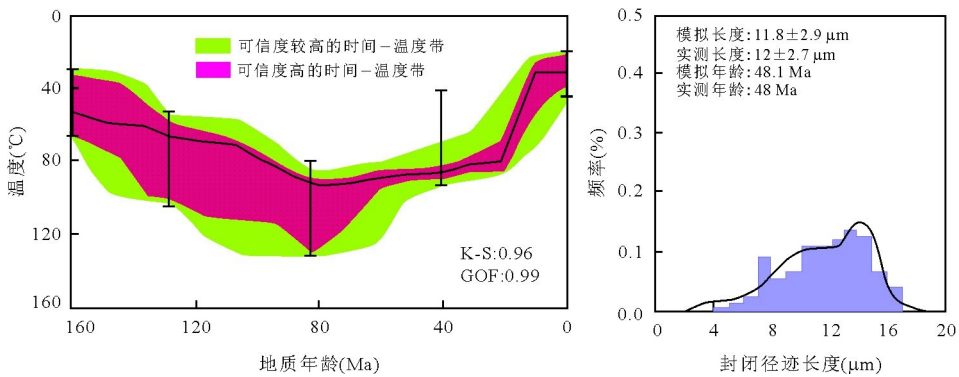


图 5 桑木场样品磷灰石裂变径迹热史模拟

Fig.5 Thermal history simulation of apatite fission track of Sangmushang

数据源自邓宾等(2013)

大小,抬升时间越晚越有利于页岩气的保存。

以湘鄂西—渝东地区五峰组—龙马溪组为例,磷灰石裂变径迹分析表明,该区域页岩气层由东向西开始持续抬升的起始时间跨度较长,从 165 Ma 过渡到 85 Ma,并表现出从早到晚有序递进的特征(梅廉夫等,2010)(图 4)。这也就导致自西向东页岩气保存条件逐渐变差,抬升剥蚀晚的涪陵地区五峰组—龙马溪组页岩隆升剥蚀的时间为 85 Ma,如焦页 A 井等多口井测试日产量在 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上,向东隆升剥蚀较早(120~140 Ma)的武隆—彭水地区,如彭页 A 井等多口井测试日产量介于 $3 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4 \text{ m}^3$,而再向东如咸丰—来凤等地区,如来页 A 井等多口井测试日产量多小于 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$,甚至是未见明显气体显示。

4.2 剥蚀量的大小

目前,恢复地层剥蚀厚度的方法很多,有镜质体反射率法、声波时差法、地层对比法、沉积速率法、地震剖面法、磷灰石裂变径迹法和最高古地温法等,其中,磷灰石裂变径迹法是同位素热年代学中常作为恢复地层剥蚀厚度的方法,基于磷灰石裂变径迹的径迹年龄、径迹长度等参数不仅反映了样品在达到最大埋深(封闭温度)的时间,而且还详尽记录了样品的地质热史(退火)过程。因此,根据裂变径迹单颗粒年龄、径迹长度及分布特征,利用不同退火模型可以重建样品构造抬升和热演化史,进一步结合古地温梯度可以定量反演地质体的隆升剥蚀速率,推算地层剥蚀厚度。

以湘鄂西—渝东地区的桑木场和河页 A 井为例,西部靠近四川盆地的中央复背斜南段桑木场 ADX4 样品磷灰石裂变径迹资料的热史反演结果表明(图 5),样品在 80 Ma 达到最大埋深,经历最大温

度为 $86 \text{ }^\circ\text{C}$,之后进入缓慢抬升阶段,到喜山期 20 Ma 快速隆升至地表。根据大地热流、油气勘探井间测温以及镜质体反射率恢复古地温梯度等资料,取古地温梯度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ 和古地表温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$,计算获得的桑木场地表剥蚀量为 2 650 m,剥蚀层位为 J_3 -K。基于类似原理,计算得出花果坪复向斜河页 A 井剥蚀量约 4 700 m。两者相比,桑木场附近的彭页 A 井测试日产量为 $3 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4 \text{ m}^3$,而河页 A 井未获工业气流,这也说明剥蚀量越大,保存条件越差。

4.3 断裂活动年代

在构造相当稳定的区域断裂及与之伴生的裂缝系统,对页岩气储渗能力有一定的正面提升作用,但对于我国南方经历了多期构造改造的区域而言,更多地表现在对页岩气保存条件的破坏上,会打破页岩气层的物理—化学平衡,气体沿断裂或裂缝低势区逸散,特别是因页岩先成页理缝较发育,具备极好的横向扩散能力,当遇到通天断层或是高角度裂缝时,极易导致气体散失。这就意味着如果断裂活动的时期在页岩大规模生烃之前,页岩气的保存条件将会迅速变差,据此情况断裂活动年代的确定就显得尤为重要了。

Stockli(2005)指出断裂大规模活动期间,周缘地温场会发生调整,一旦温度增高至同位素热年代学测年体系相应的封闭温度,那么学者们就可以借助测年技术如采用方解石 U-Pb、伊利石 K-Ar 和 ^{40}Ar - ^{39}Ar 、锆石或磷灰石 FT 开展断裂活动年代研究。近年来,同位素热年代学在这方面研究取得了长足发展,对于大规模的断裂活动,过去常采用对断裂两盘相应地层分别取样测试,近年来,学者们分别选取了断裂带及周围未变形岩样就脆性断裂的活动时限

开展了研究(Stockli, 2005;王先美等, 2008).以四川盆地南缘丁山地区两口五峰组—龙马溪组页岩气井DY1和DY2为例,两口井目的层系在印支期就进入生气高峰,齐岳山断裂获得断层泥中绢云母⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄为136 Ma(何治亮等, 2011),两口井处于同一个鼻状断背斜,DY1井距东部构造主控断裂——齐岳山断裂仅8.5 km,DY2井距离该断层20 km以上,钻后证实,DY1井含气性要明显差于DY2井;地层压力系数DY2井为1.55,而DY1井只有1.08;测试日产量DY2井为10.5×10⁴ m³,而DY1井只有3.4×10⁴ m³.这也很好地说明断裂活动年代对页岩气保存条件研究极为重要.

5 页岩可压性分析

与常规油气明显不同的是页岩气具备极低的渗透率,单井无明显的自然产能,必须经过大规模的压裂改造,形成复杂缝网后才能实现商业开发.目前多

个高产的页岩气层如我国华南的五峰组—龙马溪组页岩、北美的Barnett、Woodford等页岩页理均较发育,表明页理对页岩气高产起到了积极作用.究其原因,一方面是因为与页理相伴生的页理缝是页岩气良好的储集空间和渗流通道;另一方面是因为页理面上下岩石力学性质差异明显,为页岩中先存的结构弱面,在对地层倾角较小的页岩层进行压裂改造时,易顺页理面形成剪切缝(何柏等, 2017),从而有利于压裂改造时平面上波及较大的范围.而影响页理发育的极为重要的因素为沉积速率,沉积速率越慢,越易于页理的形成,反之不利于页理的发育.以涪陵页岩气田焦页A井为例,焦页A井五峰组—龙马溪组下部含气页岩段厚89 m,水平井穿行的最佳层段为下部①~③小层,大体对应于陈旭等(2017)提出的WF2-LM3这6个笔石带,页岩厚度约18 m,沉积时间经历了5.25 Ma,平均沉积速率极低,只有3.4 m/Ma,而之上的层段沉积速率多在10 m/Ma以上(图6).而从页理发育的密度来看,下部①~③

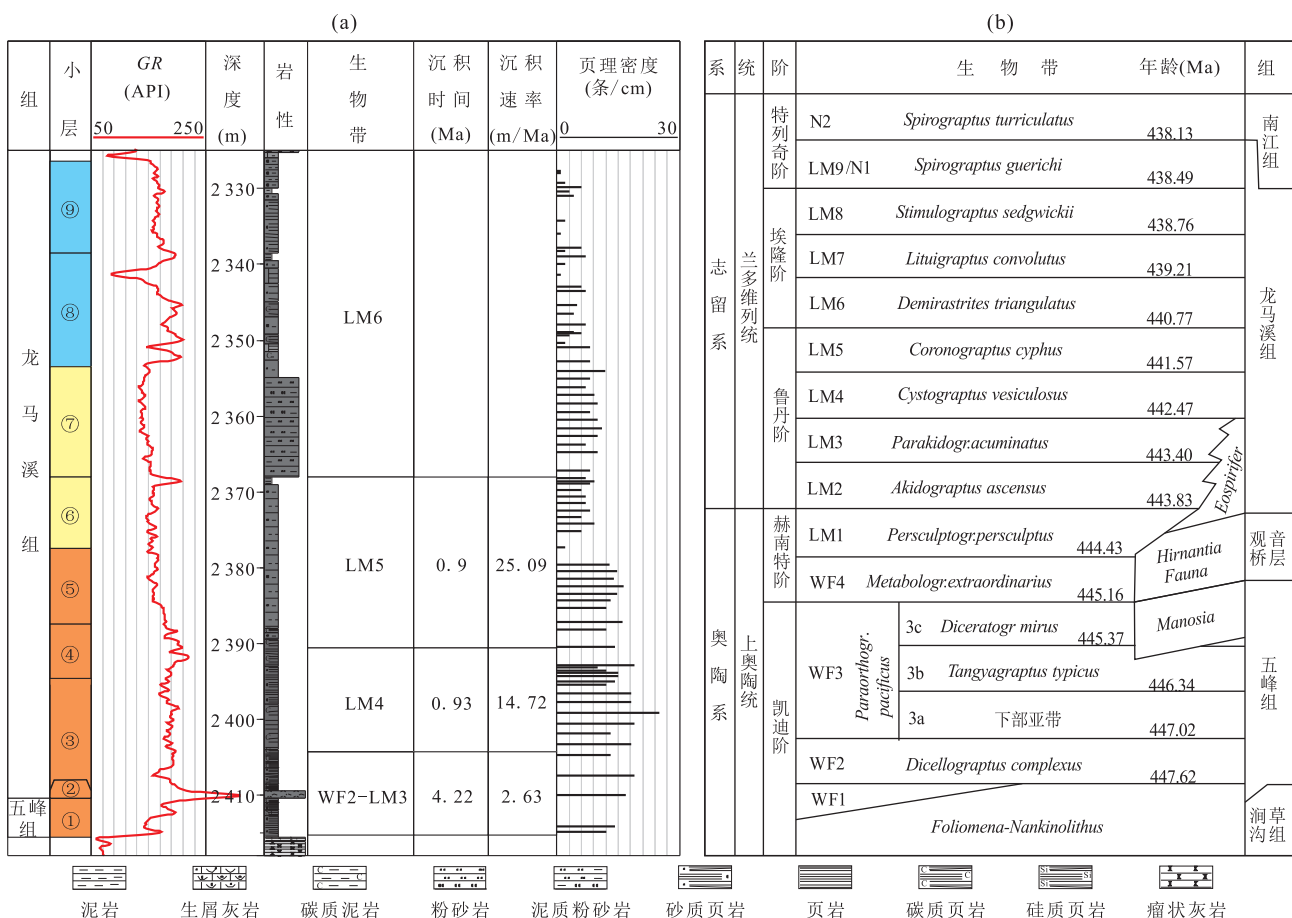


图 6 焦页 A 井笔石带特征

Fig.6 Graphitic characteristics of Jiaoye A well

a.焦页 A 井笔石带划分;b.扬子地区上奥陶统一兰多维列统笔石带划分

小层的密度要明显大于上部层段,相应的压裂改造效果下部①~③小层也明显好于上部层段.这就意味着,如果能用同位素热年代学的方法确定不同页岩段的顶底,算出沉积速率时,就可大体推算页理的发育密度,进而判断页岩的可压性(图 6).

对于页岩的定年,已经在前文分有、无火成岩等特殊夹层的两种情况进行论述,并且近年来也有一些学者对华南埃迪卡拉系陡山沱组上、下两套黑色页岩的形成时限和沉积速率作了研究.针对陡山沱组上部富碳质黑色页岩(陡四段),Zhu *et al.*(2013)对其底界开展了 Re-Os 同位素年龄测定,结果表明该段底部对应时间为 591.0 ± 5.3 Ma; Condon *et al.*(2005)对其顶部的凝灰岩夹层锆石 U-Pb 开展了测定,证实其顶部页岩形成年龄为 551.0 ± 0.7 Ma.针对陡山沱组下部富碳质黑色页岩(陡二段),Condon *et al.*(2005)对其下部锆石 U-Pb 开展测年,显示为 635 Ma 左右;刘鹏举等(2009)测得其顶部火山灰锆石 U-Pb 年龄为 614.0 ± 7.6 Ma,在两套页岩总厚度不超过 100 m 的情况下,计算出两套页岩沉积速率多小于 2 m/Ma,与涪陵页岩气田五峰组—龙马溪组大体相当,均具备极低的沉积速率.也正是因为这种极低的沉积速率,导致了陡山沱组两套页岩页理均较发育,并具备较好的可压性及物性条件,在黄陵隆起周缘多口页岩气井见到了良好的气体显示(王玉芳等,2017).

6 结论

本文通过对页岩气勘探开发评价体系及同位素热年代学相关理论综合分析,结合华南页岩气勘探开发的多个实例,指出同位素热年代学在页岩气勘探开发多个领域具备较好的应用前景.通过对页岩中含测年矿物的特殊夹层或是直接针对页岩中的一些放射性元素开展同位素热年代学定年研究,可很好地实现区域上页岩地层的精细对比.此外,同位素热年代学通过对页岩大规模生排烃时间及页岩层系所经历的热演化史的解剖,能很好地表征页岩的生烃特征;因为页岩热演化史很大程度上控制了页岩储集物性、孔隙类型和孔径大小,因而又可间接开展页岩的储集特征研究.同位素热年代学还可作为页岩气保存条件评价中隆升剥蚀时间、剥蚀量和断裂活动年代等关键参数研究的有效手段.另外,通过对页岩沉积速率的分析,可大体表征页岩页理发育的密度,进而可开展页岩可压性分析.

References

- Chen, X., Fan, J. X., Wang, W. H., et al., 2017. Stage-Progressive Distribution Pattern of the Lungmachi Black Graptolitic Shales from Guizhou to Chongqing, Central China. *Science China: Earth Sciences*, 47(6): 720—732 (in Chinese).
- Condon, D., Zhu, M. Y., Bowring, S., et al., 2005. U-Pb Ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China. *Science*, 308(5718): 95—98. <https://doi.org/10.1126/science.1107765>
- Dai, F. Y., Hao, F., Hu, H. Y., et al., 2017. Occurrence Mechanism and Key Controlling Factors of Wufeng-Longmaxi Shale Gas, Eastern Sichuan Basin. *Earth Science*, 42(7): 1185—1194 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.096>
- Deng, B., Liu, S. G., Wang, G. Z., et al., 2013. Cenozoic Uplift and Exhumation in Southern Sichuan Basin—Evidence from Low-Temperature Thermochronology. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(6): 1958—1973 (in Chinese with English abstract).
- Fu, Y., Dong, L., Li, C., et al., 2016. New Re-Os Isotopic Constrains on the Formation of the Metalliferous Deposits of the Lower Cambrian Niutitang Formation. *Journal of Earth Science*, 27(2): 271—281. <https://doi.org/10.1007/s12583-016-0606-7>
- Guo, T. L., Liu, R. B., 2013. Implication from Marine Shale Gas Exploration Breakthrough in Complicated Structural Area at High Thermal Stage: Taking Longmaxi Formation in Well JY1 as an Example. *Natural Gas Geoscience*, 24(4): 643—651 (in Chinese with English abstract).
- He, B., Xie, L. Z., Li, F. X., et al., 2017. Anisotropic Mechanism and Characteristics of Deformation and Failure of Longmaxi Shale. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 47(11): 107—118 (in Chinese with English abstract).
- He, Z. L., Wang, X. W., Li, S. J., et al., 2011. Yanshan Movement and Its Influence on Petroleum Preservation in Middle-Upper Yangtze Region. *Petroleum Geology & Experiment*, 33(1): 1—11 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Y. H., Sun, W. D., Ding, X., et al., 2009. Volcanic Event at the Ordovician-Silurian Boundary: The Message from K-Bentonite of Yangtze Block. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3298—3308 (in Chinese with English abstract).
- Jenkins, R. J. F., Cooper, J. A., Compston, W., 2002. Age and Biostratigraphy of Early Cambrian Tuffs from SE Australia and Southern China. *Journal of the Geological Society*, 159(6): 645—658. <https://doi.org/10.1144/0016-764901-127>

- Kendall, B., Creaser, R. A., Selby, D., 2006. Re-Os Geochronology of Postglacial Black Shales in Australia: Constraints on the Timing of "Sturtian" Glaciation. *Geology*, 34(9): 729–732. <https://doi.org/10.1130/g22775.1>
- Kong, L. Y., Mao, X. W., Chen, C., et al., 2017. Chronological Study on Detrital Zircons and Its Geological Significance from Mesoproterozoic Dagushi Group in the Dahongshan Area, North Margin of the Yangtze Block. *Earth Science*, 42(4): 485–501 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.039>
- Liu, P. J., Yin, C. Y., Gao, L. Z., et al., 2009. New Material of Microfossils from the Ediacaran Doushantuo Formation in the Zhangcunping Area, Yichang, Hubei Province and Its Zircon SHRIMP U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 54(6): 774–780 (in Chinese).
- Luo, H., He, R. L., Pan, L. K., et al., 2016. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age and Its Significance of Late Ordovician-Early Silurian Longmaxi Bentonite. *Resources Environment & Engineering*, 30(4): 547–550 (in Chinese with English abstract).
- Mei, L. F., Liu, Z. Q., Tang, J. G., et al., 2010. Mesozoic Intra-Continental Progressive Deformation in Western Hunan-Hubei-Eastern Sichuan Provinces of China: Evidence from Apatite Track and Balanced Cross-Section. *Earth Science*, 35(2): 161–174 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2010.017>
- Reiners, P. W., Brandon, M. T., 2006. Using Thermochronology to Understand Orogenic Erosion. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34(1): 419–466. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.125202>
- Reiners, P. W., Ehlers, T. A., Zeitler, P. K., 2005. Past, Present, and Future of Thermochronology. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 58: 1–18. <https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.1>
- Rooney, A. D., Selby, D., Lewan, M. D., et al., 2012. Evaluating Re-Os Systematics in Organic-Rich Sedimentary Rocks in Response to Petroleum Generation Using Hydrous Pyrolysis Experiments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 77(1): 275–291. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.11.006>
- Selby, D., Creaser, R. A., 2005. Direct Radiometric Dating of Hydrocarbon Deposits Using Rhenium-Osmium Isotopes. *Science*, 308(5726): 1293–1295. <https://doi.org/10.1126/science.1111081>
- Shen, C. B., Liu, Z. Y., Xiao, F., et al., 2015. Advancements of the Research on Re-Os Isotope System in Petroleum System. *Advances in Earth Science*, 30(2): 187–195 (in Chinese with English abstract).
- Stockli, D. F., 2005. Application of Low-Temperature Thermochronometry to Extensional Tectonic Settings. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1): 411–448. <https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.16>
- Sun, J., Bao, H. Y., 2018. Comprehensive Characterization of Shale Gas Reservoirs: A Case Study from Fuling Shale Gas Field. *Petroleum Geology & Experiment*, 40(1): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F. L., Fu, Y., Jiang, R., et al., 2016. Research Progress on Re-Os Isotopes Application in Dating and Paleoenvironmental Interpretation during the Neoproterozoic to Early Cambrian Periods. *Rock and Mineral Analysis*, 35(5): 530–541 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. M., Zhong, D. L., Wang, Y., 2008. A Case of Application Using Apatite Fission Track to Restrict Time of Brittle Fault Movement. *Progress in Geophysics*, 23(5): 1444–1455 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. Q., Shi, X. Y., Jiang, G. Q., et al., 2012. New U-Pb Age from the Basal Niutitang Formation in South China: Implications for Diachronous Development and Condensation of Stratigraphic Units across the Yangtze Platform at the Ediacaran-Cambrian Transition. *Journal of Asian Earth Sciences*, 48(8): 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.12.023>
- Wang, Y. F., Zhai, G. Y., Bao, S. J., et al., 2017. Evaluation of Sinian Doushantuo Formation Shale Gas Content and Fracturing Property of Eyangye1 Well in Hubei Province. *China Mining Magazine*, 26(6): 166–172 (in Chinese with English abstract).
- Waples, D. W., 2000. The Kinetics of In-Reservoir Oil Destruction and Gas Formation: Constraints from Experimental and Empirical Data, and from Thermodynamics. *Organic Geochemistry*, 31(6): 553–575. [https://doi.org/10.1016/s0146-6380\(00\)00023-1](https://doi.org/10.1016/s0146-6380(00)00023-1)
- Xie, S. K., Wang, Z. J., Wang, J., et al., 2012. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Bentonites from the Uppermost Part of the Ordovician Wufeng Formation in the Haoping Section, Taoyuan, Hunan. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32(4): 65–69 (in Chinese with English abstract).
- Xu, L. G., Lehmann, B., Mao, J. W., et al., 2011. Re-Os Age of Polymetallic Ni-Mo-PGE-Au Mineralization in Early Cambrian Black Shales of South China: A Reassessment. *Economic Geology*, 106(3): 511–522. <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.3.511>
- Yamashita, Y., Takahashi, Y., Haba, H., et al., 2007. Comparison of Reductive Accumulation of Re and Os in Sea-

water Sediment Systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(14): 3458—3475. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.05.003>

Zhu, B., Becker, H., Jiang, S. Y., et al., 2013. Re-Os Geochronology of Black Shales from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, Yangtze Platform, South China. *Precambrian Research*, 225: 67—76. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.02.002>

Zou, C. N., Yang, Z., Dai, J. X., et al., 2015. The Characteristics and Significance of Conventional and Unconventional Sinian-Silurian Gas Systems in the Sichuan Basin, Central China. *Marine and Petroleum Geology*, 64: 386—402. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.03.005>

附中文参考文献

陈旭, 樊隽轩, 王文卉, 等, 2017. 黔渝地区志留系龙马溪组黑色笔石页岩的阶段性渐进展布模式. *中国科学: 地球科学*, 47(6): 720—732.

戴方尧, 郝芳, 胡海燕, 等, 2017. 川东焦石坝五峰—龙马溪组页岩气赋存机理及主控因素. *地球科学*, 42(7): 1185—1194. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.096>

邓宾, 刘树根, 王国芝, 等, 2013. 四川盆地南部地区新生代隆升剥露研究——低温热年代学证据. *地球物理学报*, 56(6): 1958—1973.

郭彤楼, 刘若冰, 2013. 复杂构造区高演化程度海相页岩气勘探突破的启示——以四川盆地东部盆缘 JY1 井为例. *天然气地球科学*, 24(4): 643—651.

何柏, 谢凌志, 李凤霞, 等, 2017. 龙马溪页岩各向异性变形破坏特征及其机理研究. *中国科学: 物理学, 力学和天文学*, 47(11): 107—118.

何治亮, 汪新伟, 李双建, 等, 2011. 中上扬子地区燕山运动及

其对油气保存的影响. *石油实验地质*, 33(1): 1—11.

胡艳华, 孙卫东, 丁兴, 等, 2009. 奥陶纪—志留纪边界附近火山活动记录: 来自华南周缘钾质斑脱岩的信息. *岩石学报*, 25(12): 3298—3308.

孔令耀, 毛新武, 陈超, 等, 2017. 扬子北缘大洪山地区中元古代打鼓石群碎屑锆石年代学及其地质意义. *地球科学*, 42(4): 485—501.

刘鹏举, 尹崇玉, 高林志, 等, 2009. 湖北宜昌樟村坪埃迪卡拉系陡山沱组微体化石新材料及锆石 SHRIMP U-Pb 年龄. *科学通报*, 54(6): 774—780.

罗华, 何仁亮, 潘龙克, 等, 2016. 湖北宣恩县麻阳寨晚奥陶—早志留世龙马溪组斑脱岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *资源环境与工程*, 30(4): 547—550.

梅廉夫, 刘昭茜, 汤济广, 等, 2010. 湘鄂西—川东中生代陆内递进扩展变形: 来自裂变径迹和平衡剖面的证据. *地球科学*, 35(2): 161—174. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2010.017>

沈传波, 刘泽阳, 肖凡, 等, 2015. 石油系统 Re-Os 同位素体系封闭性研究进展. *地球科学进展*, 30(2): 187—195.

孙健, 包汉勇, 2018. 页岩气储层综合表征技术研究进展——以涪陵页岩气田为例. *石油实验地质*, 40(1): 1—12.

王富良, 付勇, 江冉, 等, 2016. Re-Os 同位素在晚新元古代至早寒武世测年及古环境演绎中的应用进展. *岩矿测试*, 35(5): 530—541.

王先美, 钟大赉, 王毅, 2008. 利用磷灰石裂变径迹约束脆性断裂活动的时限. *地球物理学进展*, 23(5): 1444—1455.

王玉芳, 翟刚毅, 包书景, 等, 2017. 鄂阳页 1 井陡山沱组页岩储层含气性及可压性评价. *中国矿业*, 26(6): 166—172.

谢尚克, 汪正江, 王剑, 等, 2012. 湖南桃源郝坪奥陶系五峰组顶部斑脱岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄. *沉积与特提斯地质*, 32(4): 65—69.