

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.602



南黄海中部隆起晚白垩世以来地层剥蚀的磷灰石裂变径迹分析

庞玉茂^{1,3}, 郭兴伟^{2,3*}, 韩作振^{1,3}, 张训华^{3,4}, 朱晓青^{2,3}

1. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛 266590

2. 青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266071

3. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071

4. 中国地质调查局南京地调中心, 江苏南京 210016

摘要: 南黄海中部隆起自印支期以来经历显著的构造隆升及剥蚀过程。基于大陆架科学钻探 CSDP-2 井的钻井岩心, 应用磷灰石裂变径迹技术研究了南黄海中部隆起晚白垩世以来的剥蚀过程及响应特征。所获得的 8 个磷灰石样品的裂变径迹年龄显示出两个年龄组, 除单个样品为 38 ± 3 Ma 外, 其余样品都集中在 $(52 \pm 4) \sim (65 \pm 5)$ Ma 范围内, 基本反映了同一期构造热事件年龄, 并且均远小于样品所处的二叠纪年龄, 表明样品完全退火并记录了晚白垩世以来的热历史。样品热史模拟结果表明, 基于泥岩镜质体反射率计算的最高古地温处于样品退火带温区范围内, 各样品从晚白垩世早期(约 100 Ma)以来经历持续的降温过程, 在约 80~75 Ma 开始进入部分退火带。南黄海中部隆起第一期快速冷却降温过程出现在晚白垩世末期, 并持续至古新世早期, 随后进入古近纪表现为持续相对缓慢的降温过程, 降温幅度约 30 °C, 渐新世末期到中新世早期存在另一期快速冷却过程。热史模拟结果较好地指示了南黄海中部隆起晚白垩世以来的地层剥蚀响应特征。

关键词: 南黄海中部隆起; 地层剥蚀; 磷灰石裂变径迹; 低温热年代学; 石油地质。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2018)06-1921-10

收稿日期: 2017-11-30

Apatite Fission Track Constrains on Denudation since Late Cretaceous in Central Uplift, South Yellow Sea Basin

Pang Yumao^{1,3}, Guo Xingwei^{2,3*}, Han Zuozhen^{1,3}, Zhang Xunhua^{3,4}, Zhu Xiaoping^{2,3}

1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

4. Nanjing Institutes of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Nanjing 210016, China

Abstract: Significant tectonic uplift and denudation occurred in central uplift of the South Yellow Sea basin (SYSB) since Late Cretaceous. Based on the drilling cores of CSDP-2 well which is supported and carried out by the Continental Scientific Drilling Project (CSDP) of China Geological Survey (CGS), the denudation and related characteristics of thermal history since Late Cretaceous in central uplift of SYSB were analyzed by apatite fission track (AFT) technique. The eight AFT ages obtained show two age groups, with one at (38 ± 3) Ma, and the others ranging from (52 ± 4) Ma to (65 ± 5) Ma which all are much younger than the age of Permian where all samples locate, indicating that the samples were completely annealed and recorded

基金项目: 国家海洋地质专项(No.DD20160147); 国家自然科学基金项目(Nos.41776081, 41402182, 41372108); 中国博士后科学基金资助项目(No. 2017M620290); 山东省自然科学基金资助项目(No.ZR2018BD026); 全国地质调查项目(No.121201102000150009); 山东科技大学科研创新团队支持计划项目(No.2015TDJH101)。

作者简介: 庞玉茂(1987-), 男, 博士, 主要从事海洋地质、构造地质及石油地质研究。ORCID: 0000-0002-1380-0634. E-mail: pangyumao@126.com

* **通讯作者:** 郭兴伟, E-mail: xwguo_qd@126.com

引用格式: 庞玉茂, 郭兴伟, 韩作振, 等, 2018. 南黄海中部隆起晚白垩世以来地层剥蚀的磷灰石裂变径迹分析. 地球科学, 43(6): 1921-1930.

the thermal history since Late Cretaceous. Modeling results of thermal history show that the peak paleo-geotemperature calculated by testing data of vitrinite reflectance (R_o) is within the range of the temperature interval of annealing zone of AFT. All samples suffered continuous cooling processes from the early stage of Late Cretaceous (ca.100 Ma) and started to enter into partial annealing zone (PAZ) at about 80–75 Ma. The first rapid cooling process began at the end of Late Cretaceous, and continued to the Early Paleocene, then was followed by a stage of slow cooling process during Paleogene. Some samples show the other rapid cooling process which is weaker than the first that occurred from the Late Oligocene to Early Miocene. The AFT ages and modeling results of thermal history significantly show the denudation and related characteristics since Late Cretaceous in central uplift of SYSB.

Key words: central uplift of South Yellow Sea basin; denudation; apatite fission track; low-temperature thermochronology; petroleum geology.

0 引言

南黄海盆地是下扬子地块向海域的延伸,是发育在前震旦纪基底之上的中、古生界海相与中、新生界陆相多旋回叠合盆地(Yi *et al.*, 2003; 徐行等, 2011; 张训华等, 2013; 杨长清等, 2014).南黄海中部隆起是当前盆地资源调查的重点区域,但因长期缺乏钻井,研究程度极低,张训华等(2014)认为中部隆起印支期以来经历显著的构造隆升及剥蚀过程,中生界残余较少,其形成演化过程复杂.2014—2016年中国东部海区大陆架科学钻探计划(Continental Shelf Drilling Program, CSDP)在南黄海中部隆起实施钻探了一口 2 800 m 的全取心科学钻探井(CSDP-2井),该井是目前南黄海中部隆起的唯一深钻,是揭示中—古生代海相地层发育,恢复其沉积及构造演化的基准井.CSDP-2 井首次揭示印支不整合面深度为 596 m(自海底),该不整合面在中部隆起既是新近系—第四系底界,又是下三叠统灰岩的顶界(张训华等, 2014).在中部隆起,该不整合面之下地层具有强烈的挤压变形及逆冲推覆现象,呈现显著的角度不整合接触关系,CSDP-2 井在印支面之下依序钻遇下三叠系青龙组及上千米厚的古生界,古生物分析揭示该井最深可能钻遇奥陶系(郭兴伟等, 2017).与传统的镜质体反射率等古温标相比,磷灰石/锆石裂变径迹等低温热年代学方法可以定量恢复热地质过程的时间—温度轨迹,通过随机反演可获取构造隆升及剥蚀阶段的完整热演化史,进而对其隆升、剥蚀过程进行精细刻画.地层剥蚀过程是进行热史重建的关键要素,而热演化史研究既是盆地模拟的重要内容,又是烃源岩评价及含油气系统模拟的基础.在 CSDP-2 井已经揭示南黄海多套中、古生界优质烃源岩的背景下(蔡来星等, 2017; 肖国林等, 2017),本项研究可为南黄海盆地油气资源调

查奠定基础.

磷灰石裂变径迹作为近年来迅速发展的低温热年代学分析技术,已被广泛应用于沉积盆地热史恢复、造山带隆升剥蚀及古地形重建等方面,成为该领域研究的重要趋势(Yuan *et al.*, 2006; Zheng *et al.*, 2006; Shen *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2015; Zhu *et al.*, 2016).该方法是建立在磷灰石中 ^{238}U 的自发裂变径迹在地质时期内受热而发生退火作用的基础之上,其分析的基础是裂变径迹的受热退火属性,即裂变径迹伴随升温过程而表现出的径迹长度缩短、密度减小的特征.磷灰石裂变径迹热史模拟主要是基于径迹年龄和径迹长度所蕴含的热演化信息,选定合理的退火模型,设定相应的约束条件和动力学参数,通过随机反演法来得到最优的热史过程(Donelick *et al.*, 1999, 2005; Ketcham, 2005a; Lisker *et al.*, 2009),通常采用蒙特卡罗(Monte Carlo)法随机模拟,在实际应用中,可将镜质体反射率 R_o 参考进来,以达到最佳的热史模拟结果(Zhu *et al.*, 2016).本次研究依托 CSDP-2 井岩心的磷灰石裂变径迹测试数据,对南黄海中部隆起晚白垩世以来地层剥蚀过程及热年代学响应特征进行了研究,研究成果对于当前南黄海盆地构造演化及油气资源评价等有重要意义.

1 地质背景

南黄海位于我国大陆与朝鲜半岛之间,南北长约为 870 km,东西宽约为 550 km,总面积约为 $32 \times 10^4 \text{ km}^2$.根据其陆相断陷盆地的沉积范围,自北而南可划分为千里岩隆起、北部坳陷、中部隆起、南部坳陷及勿南沙隆起等 5 个次级构造单元.其中,南黄海中部隆起呈近东—西走向发育,南、北分别相接于南部坳陷和北部坳陷,西邻千里岩隆起南部及苏北盆地北

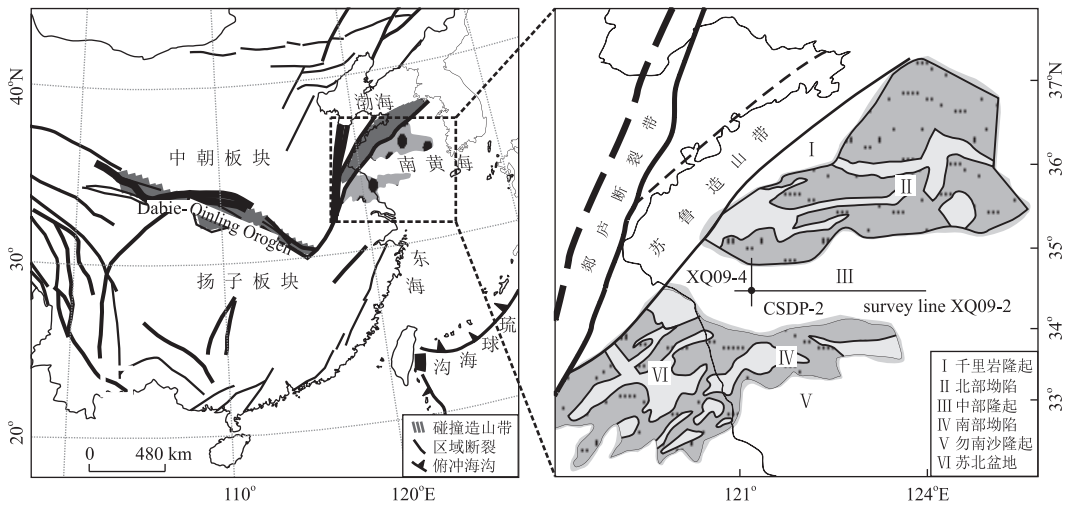


图 1 南黄海盆地构造纲要图及中部隆起位置

Fig.1 Tectonic outline map of South Yellow Sea basin and the location of the central uplift

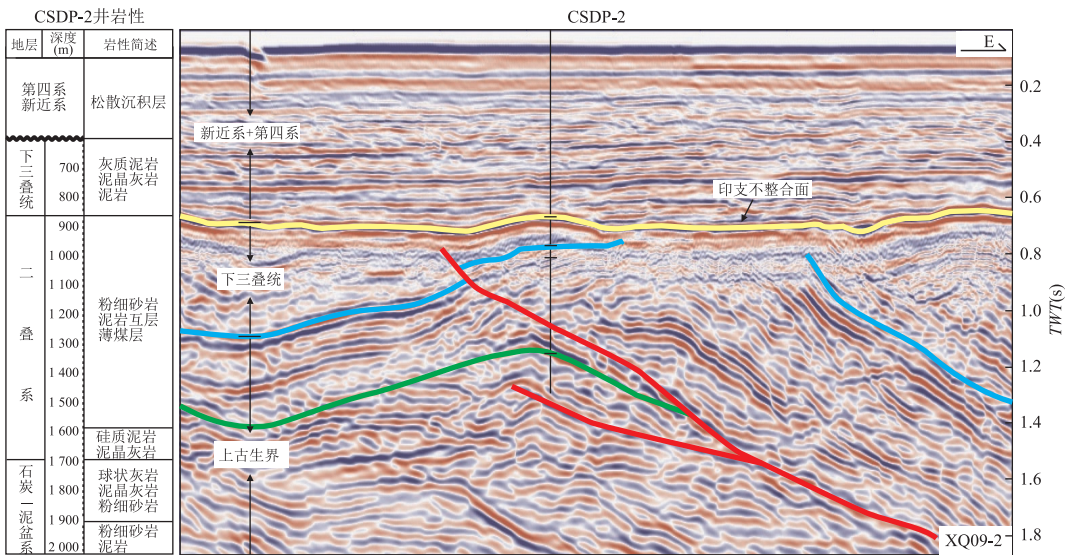


图 2 南黄海中部隆起典型地震剖面及 CSDP-2 井钻探揭示地层

Fig.2 Seismic profile through CSDP-2 well in the central uplift of South Yellow Sea and the stratigraphic framework revealed by the CSDP-2 well

剖面位置见图 1

部的滨海隆起,东侧延伸至勿南沙隆起(图 1)。

位于下扬子区的南黄海盆地受印支运动影响,伴随着古特提斯洋的逐步消亡,扬子块体与华北板块碰撞拼合并最终形成秦岭—大别—苏鲁褶皱造山带(姚永坚等, 2005; 侯方辉等, 2008; 张训华等, 2014)。南黄海中部隆起在形成演化过程中经历了多期构造叠加及改造,构造特征复杂,尤其是中三叠世末开始的印支运动和侏罗—白垩纪期间的燕山构造运动,导致中部隆起区域抬升并遭受强烈的剥蚀作用,成为中部隆起典型的地质特征之一,与南黄海盆地南部和北部坳陷相比,中部隆起明显缺失侏罗

系—古近系的地层(图 2)。

三叠纪末期到早侏罗世期间,在苏鲁造山带南侧开始发育中生代前陆盆地,即南黄海北部坳陷的雏形,南缘台地区则开始转变为中部隆起(侯方辉等, 2008; 张训华等, 2013; 杨长清等, 2014)。晚侏罗世到早白垩世期间,南黄海区域应力调整改造,印支运动导致的挤压应力场开始减弱,局部地区已转换为伸展应力背景,部分断层开始发生反转,并由前陆盆地演化过渡为断陷盆地演化性质;此时,中部隆起构造不断抬升,沉积作用逐步减弱。自晚白垩世开始,南黄海盆地基本进入陆相断陷盆地演化阶段,中

部隆起开始经历快速的剥蚀过程;古新世期间,南黄海区域伸展作用继续增强,千里岩隆起、中部隆起及勿南沙隆起持续向盆地供应碎屑物源;至始新世期间,南黄海盆地两坳夹一隆的构造格局已经发育成型;渐新世期间,盆地内凹—凸构造差异分化作用开始减弱,沉积范围大幅扩大,地层沉积向盆地凸起或隆起带超覆,直到渐新世末—中新世早期,南黄海盆地开始统一为拗陷沉积环境,并最终发育为现今地质结构(姚永坚等,2005;侯方辉等,2008;杨长清等,2014;庞玉茂,2017)。

2 样品及实验方法

本次采样选取 CSDP-2 井上段(井深 596 ~ 2 000 m段)的重点层位,即二叠系碎屑岩岩心样品 8 块,全部为砂岩,单个样品重量均超过 1.5 kg,以获取足够数量的磷灰石单矿物颗粒。首先将获取的砂岩样品物理粉碎,保证粉碎后粒径大小与单颗粒矿物粒度匹配,然后采用传统方法进行粗选,再利用重液及电磁选等手段,进行磷灰石单矿物聚集提纯,最后在显微镜下识别、分选获得磷灰石单矿物,每个样品点获取的磷灰石单矿物颗粒数均超过 50 颗,平均颗粒数为 150 颗左右。

磷灰石裂变径迹测试由北京泽康恩公司协助完成,主要试验流程及参数如下:首先将磷灰石单颗粒排列于玻璃薄片上,并用环氧树脂进行滴固,再分别进行研磨和抛光,保证矿物内表面漏出,然后在 25 °C 温度下利用 6.6% 浓度硝酸蚀刻 30 s 以揭示磷灰石自发裂变径迹,之后把矿物与低铀含量的白云母外探测器一同放入反应堆进行辐照,辐照完成后在 25 °C 温度下利用 40% 氢氟酸蚀刻 20 s 以揭示磷灰石诱发裂变径迹,中子通量采用 CN5 铀玻璃进行标定(Bellemans *et al.*, 1995)。自发及诱发裂变径迹

密度采用高精度光学显微镜测量系统,选取平行于 *c* 轴的晶柱面进行测量,水平封闭径迹长度(Gleadow *et al.*, 1986),并根据 Green(1986)建议的程序测定。年龄值依据 IUGS 推荐的 ξ 常数法和标准裂变径迹年龄方程进行计算(Hurford and Green, 1982)。依据 Green(1981)的方法进行误差计算,采用 $P(\chi^2)$ 值来评价测试的单颗粒年龄是否属于同一年龄组(Galbraith, 1981), $P(\chi^2) < 5\%$ 表明单颗粒年龄是不均匀分布的,当获得年龄分散时,则基于泊松变异的常规分析无效,而用表征权重平均年龄的“中心年龄”取代(袁万明等,2011)。

另外,在本次裂变径迹测试样品深度附近,选取 4 个泥岩样品进行了镜质体反射率测试,测试仪器为 DMLPWITH MSP200 镜质组反射率测定仪,测试环境温度 23 °C,环境湿度 45%。

3 实验结果及分析

本次实验共获取裂变径迹数据 8 个(表 1)。

样品年龄最小为 38 ± 3 Ma,最大为 65 ± 5 Ma,总体变化幅度较大,但其中 7 个样品年龄集中在 $(52 \pm 4) \sim (65 \pm 5)$ Ma 范围内,CSDP-2-2 样品年龄值与基本处于相同深度层的 CSDP-2-1 及 CSDP-2-3 的相比明显偏小,可能与样品本身特性有关,其表观年龄的地质意义并不明确,故本次研究暂不涉及该样品。其余样品基本反映了同一期构造热事件年龄,样品年龄均远小于样品所处的二叠纪年龄,表明样品后期全部发生完全退火作用,样品磷灰石裂变径迹记录了所在地层单元晚白垩世以来经历的热史过程。各个样品年龄的 $P(\chi^2)$ 值介于 27.8% ~ 96.6%,其中 6 个样品 $P(\chi^2)$ 大于 80%,只有 1 个样品 $P(\chi^2)$ 为 27.8%,均远高于 5% 的判别临界值,表示均为同组年龄,即样品年龄值具有确切的地质意

表 1 磷灰石裂变径迹测试结果

Table 1 Analytical results of apatite fission track

原样号	垂深(m)	颗粒数	$\rho_s(10^5/\text{cm}^2)(N_s)$	$\rho_i(10^5/\text{cm}^2)(N_i)$	$\rho_d(10^5/\text{cm}^2)(N_d)$	$P(\chi^2)(\%)$	中心年龄 $t(\text{Ma})(\pm 1\sigma)$	$L(\mu\text{m})(N)$
CSDP-2-1	1 305.8	35	3.808(752)	19.095(3 771)	14.587(7 124)	89.4	59(±4)	12.9±1.7(101)
CSDP-2-2	1 306.6	35	1.711(394)	13.091(3 015)	14.168(7 124)	96.6	38(±3)	12.8±2.1(99)
CSDP-2-3	1 311.7	35	4.224(546)	21.978(2 841)	13.541(7 124)	82.2	52(±4)	13.2±1.7(103)
CSDP-2-4	1 342.6	35	3.716(721)	18.248(3 541)	12.676(7 124)	27.8	52(±4)	13.0±1.9(111)
CSDP-2-5	1 358.8	36	5.442(306)	20.897(1 175)	12.075(7 124)	80.2	65(±5)	12.5±1.9(53)
CSDP-2-6	1 379.9	34	2.927(261)	15.018(1339)	16.472(7 124)	84.1	64(±6)	12.7±1.6(96)
CSDP-2-7	1 431.2	35	4.347(682)	25.063(3 932)	15.843(7 124)	94.3	56(±3)	12.5±1.9(103)
CSDP-2-8	1 437.6	35	4.327(618)	21.333(3 047)	15.424(7 124)	83.4	64(±4)	12.9±1.4(102)

注: ρ_s 为自发径迹密度; ρ_i 为诱发径迹密度; ρ_d 为标准径迹密度; N_s 为自发径迹数; N_i 为诱发径迹数; N_d 为标准径迹数; N 为径迹长度数。

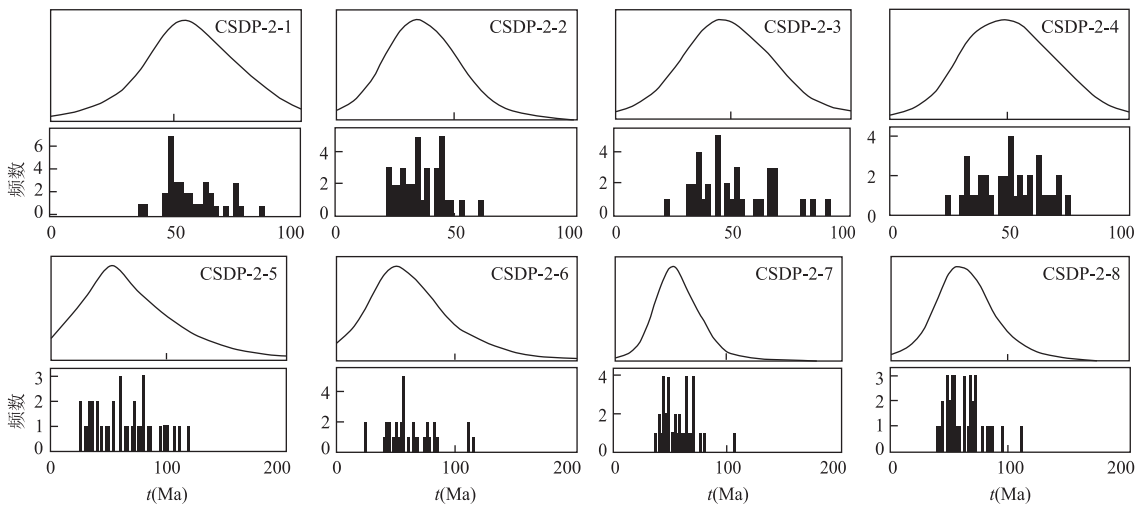


图 3 磷灰石样品裂变径迹单颗粒年龄直方图及频率曲线

Fig.3 Histograms of apatite single grain ages for each sample and their frequency curves

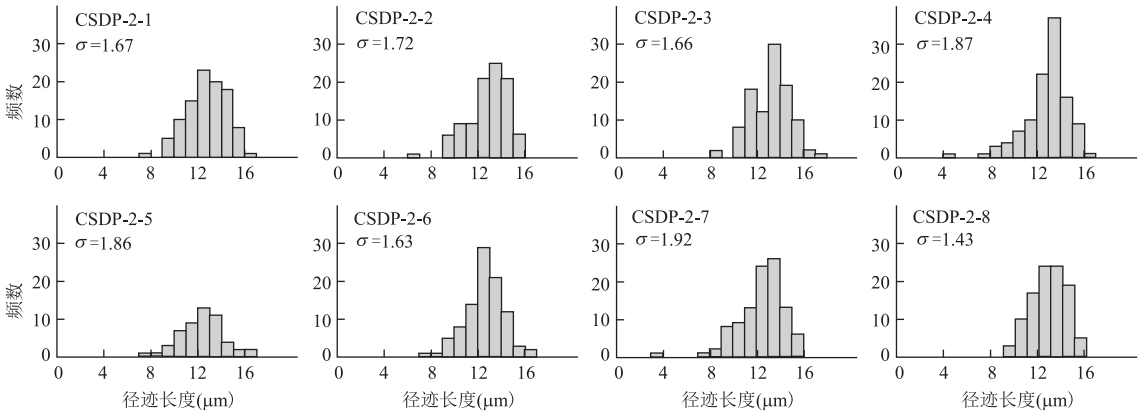


图 4 磷灰石样品裂变径迹长度分布直方图

Fig.4 Distribution histograms of apatite fission track lengths

义.单颗粒年龄统计直方图显示为典型单峰式分布(图 3),表明其受单一主体热事件影响。

样品的裂变径迹平均长度介于 $(12.5 \pm 1.9) \sim (13.2 \pm 1.7) \mu\text{m}$,样品整体径迹长度变化不大,但每个样品的径迹长度标准差较大,反映样品在磷灰石裂变径迹退火带滞留时间较长,且径迹长度差异可能受样品所处深度影响,样品径迹长度分布统计直方图均表现为单峰,反映最后一次综合地质热事件影响的结果(图 4)。

4 磷灰石裂变径迹年龄的地质意义

由前所述,南黄海中部隆起显著缺失侏罗系—古近系的地层,受印支期扬子块体与华北板块碰撞拼合的影响,三叠纪末期到早侏罗世是中部隆起发育的初期,至晚侏罗世到早白垩世期间,南黄海区域

应力调整改造,印支运动导致的挤压应力场开始减弱,局部地区已开始发生构造反转,并由前陆盆地过渡为断陷盆地性质,而中部隆起的构造抬升过程也基本完成,沉积作用逐步减弱(杨长清等,2014)。中部隆起局部残存的白垩系表明其中生代沉积作用可能持续到早白垩世(欧阳凯等,2009),自晚白垩世开始,南黄海盆地基本进入陆相断陷盆地演化阶段,中部隆起开始经历快速的剥蚀过程,并持续到渐新世末期,基于 CSDP-2 井估算的该阶段已剥蚀地层厚度为 $1\ 200 \sim 1\ 400\ \text{m}$ (庞玉茂,2017)。中新世以后,南黄海盆地整体沉降而形成现今地质结构。

本次测得的磷灰石样品裂变径迹年龄最大为 $65 \pm 5\ \text{Ma}$,最小为 $38 \pm 3\ \text{Ma}$,样品年龄统计直方图显示出两个年龄组(图 5),但除样品 CSDP-2-2 为 $38 \pm 3\ \text{Ma}$,其余样品均集中在 $(52 \pm 4) \sim (65 \pm 5)\ \text{Ma}$ 范围内,样品年龄在误差范围内基本反映了同一期构

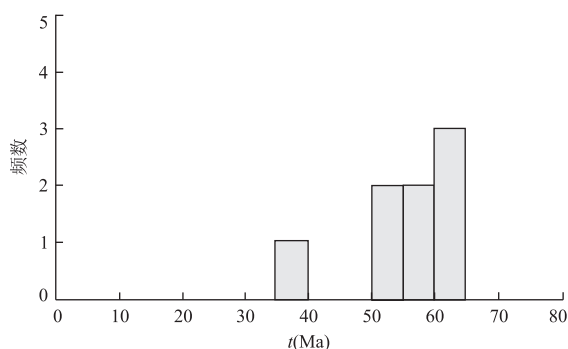


图 5 磷灰石裂变径迹年龄分布直方图

Fig.5 Distribution histogram of apatite fission track ages

造热事件效应,样品 CSDP-2-2 年龄异常可能与样品本身特性或其退火动力学特征有关,其表观年龄的地质意义并不明确.综合认为,采自印支面之下不同深度的二叠系样品裂变径迹年龄,应是中部隆起晚白垩世到渐新世期间地层剥蚀作用的响应.

5 热演化历史及对晚白垩世以来地层剥蚀的指示

5.1 热演化历史

本次研究选取的 8 个样品后期均经历完全退火,通常单颗粒样品裂变径迹总数统计量大于 50 条时可获得较为可信的热史反演结果,本批次数据中 CSDP-2-5 样品获取径迹条数为 53 条,其余样品均超过 100 条.基于 Ketcham *et al.*(1999)提出的退火模型,以样品 D_{par} 值作为输入退火动力学参数,将 80~120 °C 作为样品部分退火带温度范围,实际模拟温度从高于退火带温度(约 130 °C)到现今样品所处深度实测井温,通过 Monte Carlo(蒙特卡洛)法进行反演模拟.模拟过程中对模拟结果的判定标准包括两方面,一是模拟年龄与实测年龄的对比,另一个是模拟径迹长度与实测径迹长度对比,当两者均大于 0.05 时,模拟结果为可接受;当两者均大于 0.5 时,模拟结果为最佳($\text{good fit} \geq 50$ 条),本次研究选取径迹长度 GOF 大于 0.35 时,即认为样品实测值匹配模拟结果.CSDP-2-1、CSDP-2-3、CSDP-2-8 和 CSDP-2-9 四个样品均获得最佳的热史模拟路径(大于 50 条),其余样品未得到理想结果,得到了可接受的热史模拟路径($\text{acceptable fit} \geq 200$ 条),后续计划补样分析.其中 CSDP-2-1 和 CSDP-2-3 深度一致, CSDP-2-8 和 CSDP-2-9 深度一致,故选取了两个典

型样品实际模拟结果进行论述(图 6).

CSDP-2-1 样品径迹长度与 D_{par} 值相关性不明显,可能与封闭径迹集中于少数颗粒,且受 c 轴投影校正影响有关(Ketcham, 2005b).样品径迹长度呈单峰特征,略显负偏态特征(图 3),显示退火作用的中后期存在快速隆升过程,这与样品热史反演结果显示的渐新世末期的一期快速降温冷却事件一致.热史反演结果表明样品晚白垩世早期(约 100 Ma)以来经历持续的降温过程,期间包含两期快速降温过程,早白垩世尚未进入部分退火带,自晚白垩世(约 80~70 Ma)至古新世早期为一期冷却事件,古地温下降到约 80 °C,随后古新世中晚期至渐新世为相对缓慢地降温过程,渐新世末期开始降温幅度加快,并持续到中新世早期,古地温下降到约 40 °C,随后因盆地整体拗陷沉降重新接受沉积,古地温略微升高并基本保持恒定水平.

CSDP-2-8 样品的 $P(\chi^2)$ 为 83.4%,样品磷灰石颗粒为同一组分,但径迹长度与 D_{par} 值相关性不明显,原因可能与 CSDP-2-1 样品相似.该样品径迹长度呈单峰特征,径迹长度分布较为集中(图 3).模拟结果显示(图 6)该样品与 CSDP-2-1 样品进入部分退火带的时间与其深度的相关性并不明显,表明当时的古地温梯度相对不高.热史反演结果显示 CSDP-2-8 样品自晚白垩世(约 80 Ma)进入部分退火带,至晚白垩世末期开始一期快速冷却降温过程,古地温降至约 70~80 °C,随后进入缓慢冷却降温过程,降温幅度与 CSDP-2-1 样品反演结果相当,渐新世末期存在一期短暂的快速降温过程,并持续到中新世早期,随后古地温略微升高并基本保持恒定水平.

5.2 热史结果对地层剥蚀的指示

地震及钻井资料均揭示中部隆起印支面存在显著地层剥蚀(图 2).目前计算地层剥蚀量的方法较多,前期基于 CSDP-2 井相关的实测数据,采用声波时差法、古地温梯度法及地层趋势面法等估算的印支面剥蚀厚度为 1 200~1 400 m(庞玉茂,2017),将剥蚀厚度叠加到样品所处的印支面之下深度,可得到样品剥蚀作用发生之前的最大埋深约为 1 900~2 200 m,取古地表温度为 15 °C,参考南黄海盆地南部和北部拗陷古地温研究成果(杨树春等,2003;庞玉茂等,2017),认为南黄海达到最高古地温的时间为晚白垩世之前,即快速的剥蚀作用发生之前,并将中部隆起最高古地温梯度 G 近似取值为 50 °C/km,通过计算得到本批次 8 个样品在经历地层剥蚀之前的最高古地温约为 125 °C,近似为磷灰石样品退火

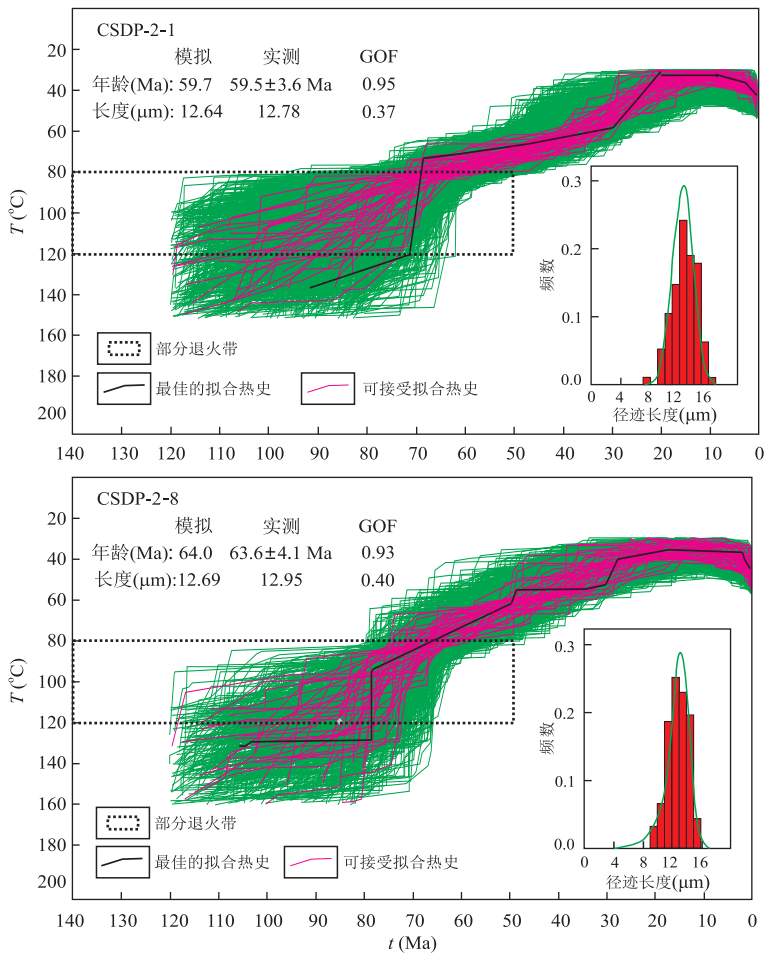


图 6 样品 CSDP-2-1 及 CSDP-2-8 样品裂变径迹热史模拟结果

Fig.6 Modeling results of thermal history from apatite fission track data of sample CSDP-2-1 and sample CSDP-2-8

带范围,指示了南黄海中部隆起晚白垩世以来地层剥蚀响应特征。

此外,对本批次裂变径迹测试样品深度附近选取的 4 个泥岩样品,镜质体反射率(R_o)测试结果分别为 0.77、1.26、0.76 和 0.73,对应深度分别为 1 298.2 m、1 395.3 m、1 464.6 m 和 1 480.8 m,根据 Burnham and Sweeney(1989)提出的动力学模型,可将样品 R_o 值换成最高古地温(T_{peak} , °C),为简化 R_o - T_{peak} 转换程序,胡圣标等(1999)假定初始沉积地层 R_o 值为 0.2%(地表温度 15 °C),根据上述 R_o 动力学模型制作了 R_o - T_{peak} - t 图,参照此图进行 R_o - T_{peak} 转换得到该 4 个样品经历的最高古地温分别为 131 °C、157 °C、122 °C 和 118 °C,也基本与裂变径迹退火带区间一致。

综合前述磷灰石裂变径迹样品热演化史反演结果,笔者认为自晚白垩世南黄海盆地基本进入陆相断陷盆地演化阶段开始,中部隆起经历长期的剥蚀过程,导致古地温持续降低。热史模拟结果显示样品在早白垩世期间尚未进入部分退火带,随后出现显

著的降温过程,自晚白垩世(约 80~75 Ma)至古新世早期为一期冷却事件,该期降温与中部隆起经历的快速剥蚀过程密切相关,而南黄海此时已进入伸展断陷盆地演化阶段,表明在早白垩世期间或之前,中部隆起已经发生大规模隆升,随后古新世中晚期至渐新世为相对缓慢的降温过程,整体仍以地层剥蚀导致的降温作用为主,但降温幅度的减弱可能与东亚陆缘该期普遍存在的岩浆侵入引起的增温效应有关。古近纪期间,中部隆起及南北部的勿南沙隆起、千里岩隆起成为南黄海盆地主要的沉积物源区,盆地两坳夹一隆的构造格局逐步形成;渐新世末以后,南黄海盆地统一转入拗陷发育,古地温波动不大。CSDP-2 井揭示中、古生界多套烃源岩在早白垩世末或已达到最高古地温,之后地层温度持续降低,有机质未能进一步增熟生烃,即海相烃源层没有发生显著的二次生烃,因此南黄海中、古生界海相地层应为油气勘探的重要目标。

6 结论

依托南黄海中部隆起首钻 CSDP-2 井岩心,应用磷灰石裂变径迹分析技术研究了中部隆起晚白垩世以来的地层剥蚀过程,获得的磷灰石样品的裂变径迹年龄具有 38 ± 3 Ma 和 $(52 \pm 4) \sim (65 \pm 5)$ Ma 两个年龄组,均远小于样品所处的二叠纪年龄,可较好地指示研究区晚白垩世到渐新世期间地层剥蚀作用。

样品热史反演结果表明,各样品自晚白垩世(约 80~75 Ma)开始进入部分退火带,至晚白垩世末期开始快速冷却降温过程,并持续至古新世早期,随后进入相对缓慢冷却降温期,降温幅度较前一期弱,渐新世末期到中新世早期存在另一期快速冷却过程,热史模拟结果较好地指示了南黄海中部隆起晚白垩世以来地层剥蚀响应特征。

根据泥岩样品镜质体反射率测试结果,计算得到样品经历的最高古地温与裂变径迹测试模拟结果一致。综合认为,南黄海中部隆起经历了印支—燕山期强烈的构造隆升及剥蚀作用,剥蚀过程大致发生于晚白垩世至渐新世末期,并于中新世开始经盆地统一沉降而形成现今的地质结构。

致谢:两位匿名审稿人在本文修改过程中提出的多项宝贵意见,极大地提升了论文质量并使作者受益匪浅;中国地质大学(北京)袁万明教授在实验测试中给予了重要指导,以及编辑部老师的辛苦付出,在此一并致谢!

References

Bellemans, F., de Corte, F., van den Haute, P., 1995. Composition of SRM and CN U-Doped Glasses: Significance for Their Use as Thermal Neutron Fluence Monitors in Fission Track Dating. *Radiation Measurements*, 24(2): 153—160. doi:10.1016/1350-4487(94)00100-f

Burnham, A. K., Sweeney, J. J., 1989. A Chemical Kinetic Model of Vitrinite Maturation and Reflectance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(10): 2649—2657. doi:10.1016/0016-7037(89)90136-1

Cai, L. X., Wang, J., Guo, X. W., et al., 2017. Characteristics of Sedimentary Facies and Source Rocks of Mesozoic-Paleozoic in Central Uplift of South Yellow Sea: A Case Study of CSDP-2 Coring Well. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 47(4): 1030—1046 (in Chinese with English abstract).

Donelick, R. A., Ketcham, R. A., Carlson, W. D., 1999. Variability of Apatite Fission-Track Annealing Kinetics; II,

Crystallographic Orientation Effects. *American Mineralogist*, 84(9): 1224—1234. doi:10.2138/am-1999-0902

Donelick, R. A., O'Sullivan, P. B., Ketcham, R. A., 2005. Apatite Fission-Track Analysis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1): 49—94. doi:10.2138/rmg.2005.58.3

Galbraith, R. F., 1981. On Statistical Models for Fission Track Counts: Reply. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 13(6): 485—488. doi:10.1007/bf01034500

Gleadow, A. J. W., Duddy, I. R., Green, P. F., et al., 1986. Confined Fission Track Lengths in Apatite: A Diagnostic Tool for Thermal History Analysis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 94(4): 405—415. doi:10.1007/bf00376334

Green, P. F., 1981. A New Look at Statistics in Fission-Track Dating. *Nuclear Tracks*, 5(1—2): 77—86. doi:10.1016/0191-278x(81)90029-9

Green, P. F., 1986. On the Thermo-Tectonic Evolution of Northern England: Evidence from Fission Track Analysis. *Geological Magazine*, 123(5): 493—506. doi:10.1017/s0016756800035081

Guo, X. W., Zhu, X. Q., Mu, L., et al., 2017. Discovery of Permian-Triassic Ammonoids in the Central Uplift of the South Yellow Sea and Its Geological Implications. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 37(3): 121—128 (in Chinese with English abstract).

Hou, F. H., Zhang, Z. X., Zhang, X. H., et al., 2008. Geologic Evolution and Tectonic Styles in the South Yellow Sea Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 28(5): 61—68 (in Chinese with English abstract).

Hu, S. B., Wang, J. Y., Zhang, R. Y., 1999. Estimation of the Amount of Uplift and Erosion across an Unconformity Using Vitrinite Reflectance Data. *Petroleum Exploration and Development*, 26(4): 42—45 (in Chinese with English abstract).

Hurford, A. J., Green, P. F., 1982. A Users' Guide to Fission Track Dating Calibration. *Earth and Planetary Science Letters*, 59(2): 343—354. doi:10.1016/0012-821x(82)90136-4

Ketcham, R. A., 2005a. Forward and Inverse Modeling of Low-Temperature Thermochronometry Data. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1): 275—314. doi:10.2138/rmg.2005.58.11

Ketcham, R. A., 2005b. The Role of Crystallographic Angle in Characterizing and Modeling Apatite Fission-Track Length Data. *Radiation Measurements*, 39(6): 595—601. doi:10.1016/j.radmeas.2004.07.008

Ketcham, R. A., Donelick, R. A., Carlson, W. D., 1999. Varia-

- bility of Apatite Fission-Track Annealing Kinetics III: Extrapolation to Geological Time Scales. *American Mineralogist*, 84 (9): 1235 – 1255. doi: 10.2138/am-1999-0903
- Li, G. W., Tian, Y. T., Kohn, B. P., et al., 2015. Cenozoic Low Temperature Cooling History of the Northern Tethyan Himalaya in Zedang, SE Tibet and Its Implications. *Tectonophysics*, 643: 80–93. doi: 10.1016/j.tecto.2014.12.014
- Lisker, F., Ventura, B., Glasmacher, U. A., 2009. Apatite Thermochronology in Modern Geology. *Geological Society, London, Special Publications*, 324 (1): 1 – 23. doi: 10.1144/sp324.1
- Ouyang, K., Zhang, X. H., Li, G., 2009. Characteristics of Stratigraphic Distribution in the Middle Uplift of South Yellow Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 29 (1): 59–66 (in Chinese with English abstract).
- Pang, Y. M., 2017. Tectonic Thermal Evolution History of the Central Uplift of the South Yellow Sea Basin from CS-DP-2 Drilling Well (Dissertation). Institute of Oceanology of the Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 36–44 (in Chinese with English abstract).
- Pang, Y. M., Zhang, X. H., Guo, X. W., et al., 2017. Mesozoic and Cenozoic Tectono-Thermal Evolution in the Northern South Yellow Sea Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 60 (8): 3177–3190 (in Chinese with English abstract).
- Shen, C. B., Mei, L. F., Xu, S. H., 2009. Fission Track Dating of Mesozoic Sandstones and Its Tectonic Significance in the Eastern Sichuan Basin, China. *Radiation Measurements*, 44 (9–10): 945–949. doi: 10.1016/j.radmeas.2009.10.001
- Xiao, G. L., Cai, L. X., Guo, X. W., et al., 2017. Detailed Assessment of Meso-Paleozoic Hydrocarbon Source Rocks: Implications from Well CSDP-2 on the Central Uplift of the South Yellow Sea Basin. *Marine Geology Frontiers*, 33(12): 24–36 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X., Yao, Y. J., Feng, Z. Q., et al., 2011. Geophysical Cognition of Tectonic Evolution in the Northern South Yellow Sea. *Progress in Geophysics*, 26(4): 1266–1278 (in Chinese with English abstract).
- Yang, C. Q., Dong, H. P., Li, G., 2014. Formation and Tectonic Evolution of the Central Uplift of the South Yellow Sea Basin. *Marine Geology Frontiers*, 30 (7): 17–21 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. C., Hu, S. B., Cai, D. S., et al., 2003. Geothermal Field and Thermo-Tectonic Evolution in Southern South Yellow Sea Basin. *Chinese Science Bulletin*, 48 (14): 1564–1569 (in Chinese).
- Yao, Y. J., Xia, B., Feng, Z. Q., et al., 2005. Tectonic Evolution of the South Yellow Sea since the Paleozoic. *Petroleum Geology & Experiment*, 27(2): 124–128 (in Chinese with English abstract).
- Yi, S., Yi, S., Batten, D. J., et al., 2003. Cretaceous and Cenozoic Non-Marine Deposits of the Northern South Yellow Sea Basin, Offshore Western Korea: Palynostratigraphy and Palaeoenvironments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 191 (1): 15–44. doi: 10.1016/s0031-0182(02)00637-5
- Yuan, W. M., Carter, A., Dong, J. Q., et al., 2006. Mesozoic-Tertiary Exhumation History of the Altai Mountains, Northern Xinjiang, China: New Constraints from Apatite Fission Track Data. *Tectonophysics*, 412 (3–4): 183–193. doi: 10.1016/j.tecto.2005.09.007
- Yuan, W. M., Yang, Z. Q., Zhang, Z. C., et al., 2011. The Uplifting and Denudation of Main Huangshan Mountains, Anhui Province, China. *Science China: Earth Sciences*, 41 (10): 1435–1443 (in Chinese).
- Zhang, X. H., Yang, J. Y., Li, G., et al., 2014. Basement Structure and Distribution of Mesozoic-Paleozoic Marine Strata in the South Yellow Sea Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(12): 4041–4051 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. H., Zhang, Z. X., Lan, X. H., et al., 2013. Regional Geology in South Yellow Sea. Ocean Press, Beijing, 394–404 (in Chinese).
- Zheng, D. W., Zhang, P. Z., Wan, J. L., et al., 2006. Rapid Exhumation at ~8 Ma on the Liupan Shan Thrust Fault from Apatite Fission-Track Thermochronology: Implications for Growth of the Northeastern Tibetan Plateau Margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 248 (1–2): 198–208. doi: 10.1016/j.epsl.2006.05.023
- Zhu, C. Q., Qiu, N. S., Cao, H. Y., et al., 2016. Paleogeothermal Reconstruction and Thermal Evolution Modeling of Source Rocks in the Puguang Gas Field, Northeastern Sichuan Basin. *Journal of Earth Science*, 27(5): 796–806.

附中文参考文献

- 蔡来星, 王蛟, 郭兴伟, 等, 2017. 南黄海中部隆起中—古生界沉积相及烃源岩特征——以 CSDP-2 井为例. *吉林大学学报(地球科学版)*, 47(4): 1030–1406.
- 郭兴伟, 朱晓青, 牟林, 等, 2017. 南黄海中部隆起二叠纪—三叠纪菊石的发现及其意义. *海洋地质与第四纪地质*, 37 (3): 121–128.
- 侯方辉, 张志珣, 张训华, 等, 2008. 南黄海盆地地质演化及构造样式地震解释. *海洋地质与第四纪地质*, 28(5): 61–68.

- 胡圣标,汪集旸,张容燕,1999.利用镜质体反射率数据估算地层剥蚀厚度.石油勘探与开发,26(4): 42-45.
- 欧阳凯,张训华,李刚,2009.南黄海中部隆起地层分布特征.海洋地质与第四纪地质,29(1): 59-66.
- 庞玉茂,2017.基于 CSDP-2 井的南黄海中部隆起构造热演化史研究(博士学位论文).青岛:中国科学院海洋研究所,36-44.
- 庞玉茂,张训华,郭兴伟,等,2017.南黄海北部盆地中、新生代构造热演化史模拟研究.地球物理学报,60(8): 3177-3190.
- 肖国林,蔡来星,郭兴伟,等,2017.南黄海中部隆起 CSDP-2 井中-古生界烃源岩精细评价.海洋地质前沿,33(12): 24-36.
- 徐行,姚永坚,冯志强,等,2011.南黄海北部构造演化的地球物理认识.地球物理学进展,26(4): 1266-1278.
- 杨长清,董贺平,李刚,2014.南黄海盆地中部隆起的形成与演化.海洋地质前沿,30(7): 17-21.
- 杨树春,胡圣标,蔡东升,等,2003.南黄海南部盆地地温场特征及热-构造演化.科学通报,48(14): 1564-1569.
- 姚永坚,夏斌,冯志强,等,2005.南黄海古生代以来构造演化.石油实验地质,27(2): 124-128.
- 袁万明,杨志强,张招崇,等,2011.安徽省黄山山体的隆升与剥露.中国科学:地球科学,41(10): 1435-1443.
- 张训华,杨金玉,李刚,等,2014.南黄海盆地基底及海相中-古生界地层分布特征.地球物理学报,57(12): 4041-4051.
- 张训华,张志珣,蓝先洪,等,2013.南黄海区域地质.北京:海洋出版社,394-404.