

南海北部陆缘黏土矿物组合特征与地质意义

吴梦霜^{1,2}, 邵磊¹, 庞雄², 梁建设³

(1. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092; 2. 中国海洋石油(中国)有限公司深圳分公司研究院, 广州 510240;
3. 中国海洋石油(中国)有限公司研究总院, 北京 100027)

摘要: 采用沉积矿物分析方法对南海北部九口探井渐新世—中新世沉积物进行系统的黏土矿物分析。结果表明: 南海北部沉积物黏土矿物组成随时间及空间呈现规律性变化, 黏土矿物伊/蒙转化深度具有自北向南逐步变浅的规律, 与地温梯度升高变化趋势基本一致, 这种黏土矿物伊/蒙转化的变化规律反映了南海北部洋陆过渡地壳减薄, 莫霍面抬升, 热流值升高的趋势。通过黏土矿物组合演变特征与热流变化趋势的相关关系, 可以预测区域性温度场变化规律, 加深对南海北部洋陆过渡地壳厚度变化的认识。

关键词: 南海; 黏土矿物; 成岩作用; 大地热流值; 地温梯度
中图分类号: P736.21 **文献标志码:** A

Characteristics of Clay Mineral Assemblage in Northern South China Sea Continental Margin and Its Geological Implications

WU Mengshuang^{1,2}, SHAO Lei¹, PANG Xiong², LIANG Jianshe³

(1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Research Institute of CNOOC Ltd. (Shenzhen), Guangzhou 510240, China; 3. Research Institute of CNOOC Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: The clay minerals of sediments from 9 wells in the northern South China Sea during the period from Oligocene to Miocene were systemically analyzed based on sedimentary mineral analytical methods. Results show these clay minerals assemblage changes regularity with time and space. Illite-smectite transition depth decreases from north to south, which is similar to the increasing trend of geothermal gradients. This illite-smectite transition pattern reflects the thinning of the oceanic-continental transitional crust in the northern South China Sea, and the uplifting of Moho surface, and the increasing of thermal flow index. The study of the

relationship between clay mineral assemblage evolution and the trend of thermal flow change can help to forecast regional temperature field change law and understand thickness change of the oceanic-continental transitional crust in the northern South China Sea.

Key words: South China Sea; clay mineral; diagenesis; geothermal heat flow; geothermal gradient

黏土矿物组合、化学成分、结构有序性、结晶度及黏土矿物类型的转变等特征可以反映黏土矿物形成时的物理化学条件。蒙脱石向伊利石转化的主要控制因素包括: 温度、压力、埋藏时间、孔隙流体的化学成分和含水量、原始蒙脱石的化学成分以及寄主岩岩性等^[1-2]。研究表明, 伊/蒙间层矿物、黏土矿物中伊利石的结晶度与所经历的最高古地温有着密切关系。随温度的升高, 蒙脱石发生脱水, 晶体中八面体 Al³⁺ 对四面体 Si⁴⁺ 进行替代, 引起层间负电价增加, 而沉积物孔隙中游离的 K⁺ 进入晶层, 达到电价平衡, 形成伊/蒙混层, 这种过程持续进行, 造成蒙脱石最终消失, 全部形成伊利石^[3-4]。由于这种关系在成岩埋藏过程中具有不可逆性, 使黏土矿物组成具有指示古地温的能力, 通过研究沉积物中黏土矿物组成特征可获得研究区古地温及古地温梯度的分布信息^[3-4]。

南海作为一个典型的西太平洋边缘海在古环境及海陆交互作用研究中具有重要地位。南海北部陆架—陆坡区面积 17.5 万 km², 由陆架—陆坡及深水区组成, 水深从 30~3 000 m 不等。重力和深部地震探测揭示出南海北部陆缘区莫霍面等深线呈北东向展布, 由陆架区的 30 km 深抬升至大陆坡脚处的 14~15 km, 在海盆内部莫霍面埋深则减小到不足

收稿日期: 2013-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(91128207, 40976023); 国家科技重大专项(2011ZX05025-006); 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2007CB819501, 2009CB219400)

第一作者: 吴梦霜(1973—), 女, 理学博士, 主要研究方向为沉积学。E-mail: wumsh@cnooc.com.cn

通讯作者: 邵磊(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 理学博士, 主要研究方向为沉积学。E-mail: lshao@tongji.edu.cn

12 km^[5-6],由陆向海莫霍面逐步变浅的趋势十分明显,地温梯度也由陆架区的 2.60 °C · (100 m)⁻¹ 升高到海盆内的 8.20 °C · (100 m)⁻¹,大地热流值随陆壳减薄而升高的趋势极为明显^[7-9].源自华南大陆的珠江自渐新世以来为南海北部提供了大量陆源物质,是该地区沉积物的主要供给者^[10],其中的黏土矿物随着沉积位置不同,其转化深度存在明显差异.本文从沉积物黏土矿物组合演化特征的角度出发,通过对南海北部陆架—陆坡过渡带代表性样品进行系统分析,结合地温梯度及大地热流值的变化,探讨南海北部陆壳向洋壳过渡带大地热流演化规律对黏土矿物组成的控制作用.

1 材料及方法

研究样品选择南海北部珠江口盆地从北至南浅水区的 H9 和 X33 井,陆架坡折带附近的 L19, P33 和 P35 井以及深水区 B6, L3, L9, L4 井共计九口井,并结合南海北部深水区 ODP1148 站的分析结果(见图 1),对各井渐新世到中新世地层的黏土矿物组合进行对比性研究.

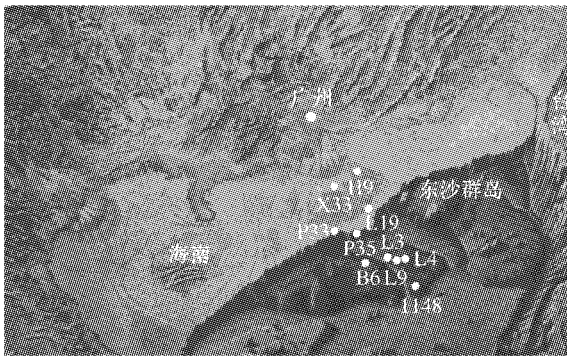


图1 南海北部研究区采样井位分布图

Fig.1 Locations of sample wells in the northern of South China Sea

黏土矿物分析方法采取沉降法,提取 $< 2 \mu\text{m}$ 的黏土颗粒制成定向样后,进行X射线衍射(XRD)分析^[1,11],样品处理在同济大学海洋地质国家重点实验室完成.在分析过程中制备了三种定向样(自然样,高温样和乙二醇样),具体方法见文献^[11].XRD分析使用荷兰 Philips 公司生产的 X'Pert Pro 型 X 射线衍射仪,电压 35 kV,电流 25 MA,角度 3°~35°,狭缝二分之一,扫描速度为 0.57 (°) · s⁻¹,在华东师范大学资源与环境科学学院地理系 XRD 实验室测试完成.

经过分析,样品中黏土矿物以蒙脱石、伊利石、

伊/蒙混层、高岭石和绿泥石组成.黏土矿物质量分数的计算是在乙二醇曲线上进行.通过数据处理得出沉积物样品中各黏土矿物质量分数深度分布,再根据已知地层年龄框架,通过内插法获得各井样品黏土矿物质量分数随地层年代的分布规律.

2 结果及讨论

沉积物中黏土矿物质量分数及组合特征主要受两种因素控制,即沉积环境和成岩作用.在沉积物沉积以后,沉积岩中黏土矿物质量分数及组合变化特征主要由埋藏深度以及成岩作用程度等因素控制^[1-4, 12].研究表明,随着埋藏深度(温压)加大,黏土矿物中蒙脱石向伊利石的转化有明显的规律性^[1-4, 13].在早成岩到中成岩阶段 A 期的深度,主要分布着蒙脱石;在中成岩半成熟至成熟阶段深度,主要分布着混层黏土;在中成岩的成熟 B 期,特别是过成熟之下的深度,主要分布着伊利石与绿泥石矿物.高岭石主要分布在中成岩成熟期之上的深度,其质量分数变化随着深度的增加而减少.

从南海北部陆架—陆坡—深水区三个代表性探井的黏土矿物质量分数随深度变化曲线图(见图 2)可见:南海北部地区沉积物中蒙脱石质量分数随埋藏深度的增加而显著减少,从浅部最高的 80% 左右逐渐减少到深部的 0% (见图 2c),伊/蒙混层则从 0% 增加到近 30% (见图 2a, b);无论在陆架区还是深水区,高岭石在不同深度段质量分数均出现了异常增加的现象(见图 2a, c),其应是成岩过程中矿物发生次生蚀变产生新的自生高岭石所致.研究表明,有机质的转化和有机酸的形成排出对自生高岭石的形成有着重要作用,有机酸除提供了有利于自生高岭石形成和保存的酸性条件外,还加速了长石类矿物的溶解,促进了层状硅酸盐矿物向高岭石的转化,使高岭石质量分数增高^[14-16].

总体而言,南海北部沉积物中蒙脱石和高岭石质量分数随沉积物成岩作用的增强逐步减少,伊利石和绿泥石质量分数则相应增加,最后伊利石平均质量分数为 50%~60%.因此,可以认为南海北部黏土矿物质量分数变化主要由成岩作用强度控制.但是,位于深海洋壳附近的 ODP1148 钻孔的黏土矿物质量分数变化与其他探井情况大相径庭(见图 2d),主要表现在蒙脱石质量分数从上到下逐步增高的特征,其根本原因在于 ODP1148 站的沉积物尚未进入固结成岩阶段,完全不受成岩作用的影响^[17],其黏土

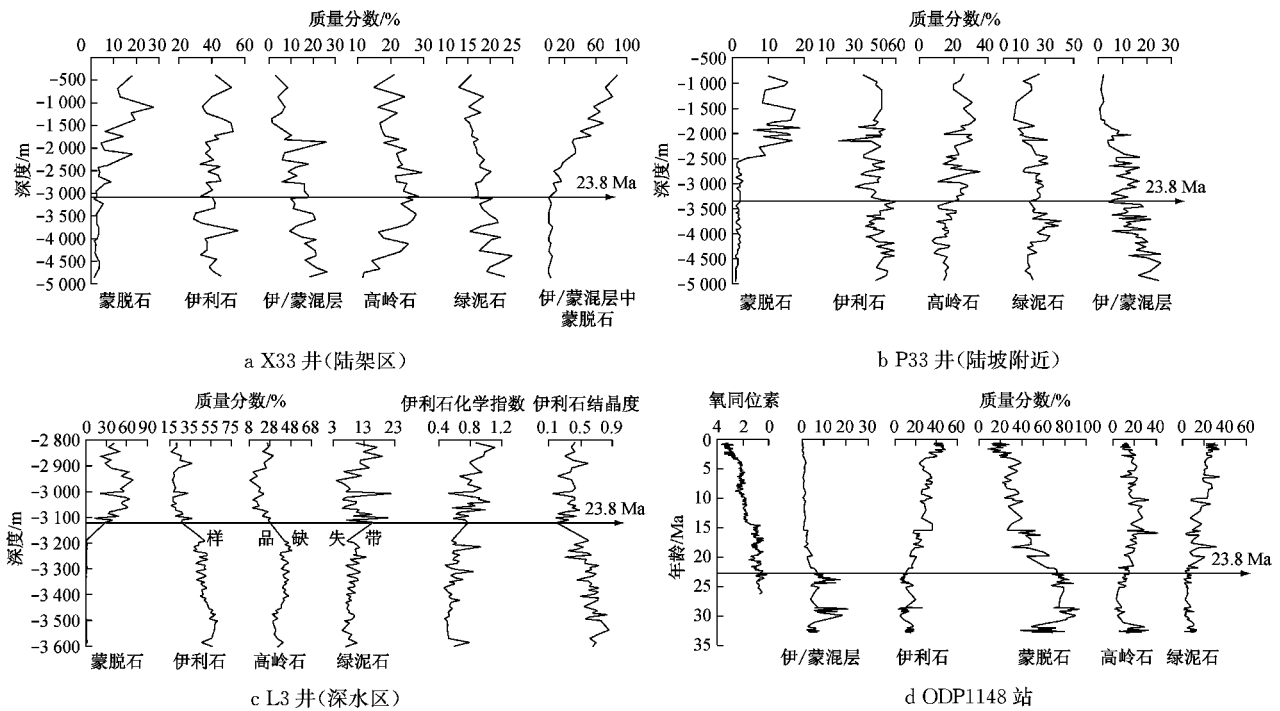


图 2 南海北部典型井黏土矿物组成质量分数变化曲线

Fig. 2 Content change curve of clay mineral assemblage of typical wells in the northern of South China Sea

矿物质量分数变化规律与其他进入成岩作用的探井表现不同。

在黏土矿物中最有意义的成岩反应是伊/蒙间层矿物中蒙脱石向伊利石的转变。蒙脱石是典型的以水合阳离子及水分子作为层间物的 2:1 型的黏土矿物,随着埋藏深度的增加,在一定的温度和压力作用下,一部分水从层间失掉,造成层间塌陷, K^+ 离子的吸附及晶格的重新排列形成伊/蒙混层,进而变成伊利石。控制蒙脱石转变为伊利石的因素有埋藏深度、时间、地温梯度及基本离子的活化性等^[1-4,13]。埋藏深度直接导致沉积物所处的地温、压力及化学成分的改变,促使蒙脱石里四个单分子水层厚的层间水或结合水发生脱离, K^+ 离子填充在晶格间永久固定,阻止黏土再膨胀,在这种转化过程中温度是重要的因素。随着埋藏深度和温度的增加,这种转变的程度趋于增强,并表现为一种不可逆的反应系列,因而黏土矿物质量分数的变化对成岩温度和热流体反应十分灵敏,这也是利用它来进行沉积物成岩阶段以及地热流体特征研究的依据所在^[1,18-19]。

从表 1 可以看出,位于南海北部陆架上的 X33 井蒙脱石消失的深度在 3 400 m 左右,向南到达南部深水区的 L4 井,蒙脱石消失深度仅为 1 331 m,显示出从陆架浅海区向南部陆坡深水区,蒙脱石消失的地层埋深具有逐渐变浅的趋势。对应各井的地温梯度从北部陆架 X33 井的 $2.62\text{ }^\circ\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$,到

南部深水区 L9 井的 $5.81\text{ }^\circ\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$,实测的大地热流值也相应从北部的 $65\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 升高到南部的 $71\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$,表明南海北部从陆架—陆坡—深水区伴随地壳厚度的逐渐减薄,地温梯度呈逐渐升高的趋势(见表 1)。

表 1 南海北部典型井黏土矿物蒙脱石消失深度及地温梯度变化

Table.1 Depth of smectite's disappearance and the change of geothermal gradient in typical wells in the northern of South China Sea

位置	井位	方向	蒙脱石消失深度/m	地温梯度/ $(^\circ\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1})$	大地热流值/ $(\text{mW}\cdot\text{m}^{-2})$	地壳厚度/km
陆架区	X33		3 400	2.62	65	30
	H9	北	3 360	3.18		
	P33		2 410	3.56		
陆坡带附近	L19	南	2 841	3.85	70	14
	P35		2 760	3.93		
	B6		2 549	4.58		
	L3		1 616	5.00		
深水区	L9		1 406	5.81	71	14
	L4		1 331	5.08		

有机质镜质体反射率 R_0 。常用来作为最高古温标,对有效的最高古温度反应敏感,黏土矿物中蒙脱石向伊利石转化过程也是最高古温度(T_{max})的具体体现。分析结果显示,九口井黏土矿物类型均具有从蒙脱石-伊/蒙无序间层段向伊/蒙有序间层段-伊利石转化的过程,蒙脱石消失深度的 R_0 均达到 0.5;在

横向上, 沉积物 R_0 达到 0.5 的地层深度从北向南逐渐变浅, 反映的地温梯度相对应逐步升高 (见图 3)。从 X33 井和 P33 井可以看出, 蒙脱石质量分数变化

与 R_0 及 T_{max} 具有明显的相关关系 (见图 4), 说明温度是蒙脱石向伊利石转化的主控因素, 蒙脱石消失深度可以用来反映地温场的变化。

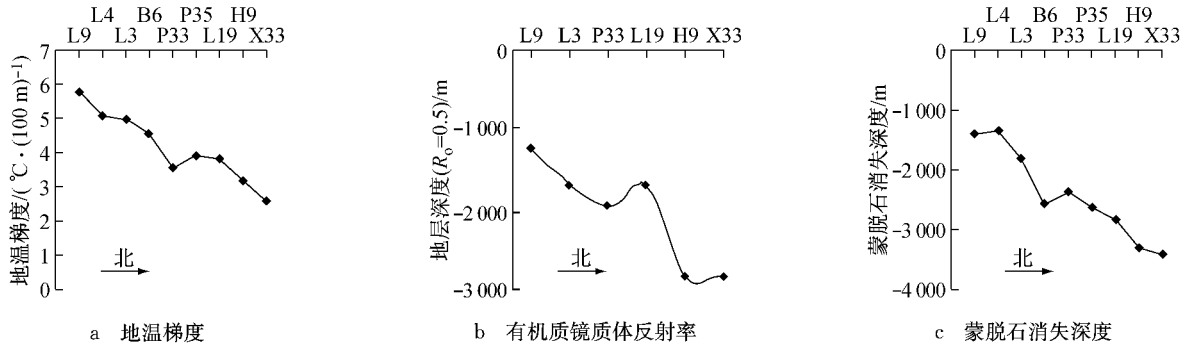


图 3 南海北部地温梯度、有机质镜质体反射率 R_0 、蒙脱石消失深度从南向北变化趋势
Fig. 3 Geothermal gradients, R_0 , smectite disappearance depth from south to north in the northern South China Sea

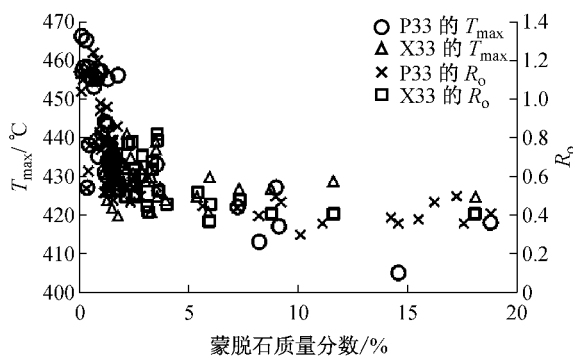


图 4 X33 及 P33 蒙脱石质量分数与 T_{max} 及 R_0 散点图
Fig. 4 Plots of smectite content, T_{max} and R_0 in X33 and P33

米立军等^[20]发表的南海北部大地热流分布图显示 (见图 5), 南海北部大地热流在平面上具有从陆架—陆坡到深海区逐渐增高的趋势, 热流值从陆架区的 $60 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右向南, 经中央隆起带到南部深水处达到 $70 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右^[21-22], 与本文研究所得结果完全吻合。施小斌等^[7]认为由于莫霍面抬升, 造成南海北部地区热流沿北北西向南南东方向由陆向海逐步增高。因此, 本地区大地构造背景是导致南海北部地温场从北向南有规律变化的主要控制因素^[23-25]。由于南海北部莫霍面呈北北西—南南东向的抬升, 陆壳由陆向海逐步减薄, 造成南海北部热流值由陆架区向海盆方向逐渐增加, 地幔热流分配也随之改变^[26] (见图 6), 使不同区域的黏土矿物类型及转化深度明显不同。图 6 中虚线为投影, 实线为实际井点。

南海北部大陆边缘地表热流比稳定大陆区高, 从陆架、陆坡至中央海盆, 地壳厚度逐渐减薄, 地表

热流值逐渐递增。来源于深部地幔热流占地表热流的百分比逐步加大, 地壳热流贡献减小。在地幔主动对流或被动上涌过程中, 上升地幔热物质带来的热量, 使地表大地热流值增高, 产生高热异常, 造成黏土矿物中伊/蒙转化深度变浅。本文揭示了黏土矿物组合特征及伊/蒙转化深度与南海北部陆缘地温场的耦合关系, 为准确阐明南海北部减薄洋陆过渡地壳深部热流的变化提供了新的佐证和研究手段。

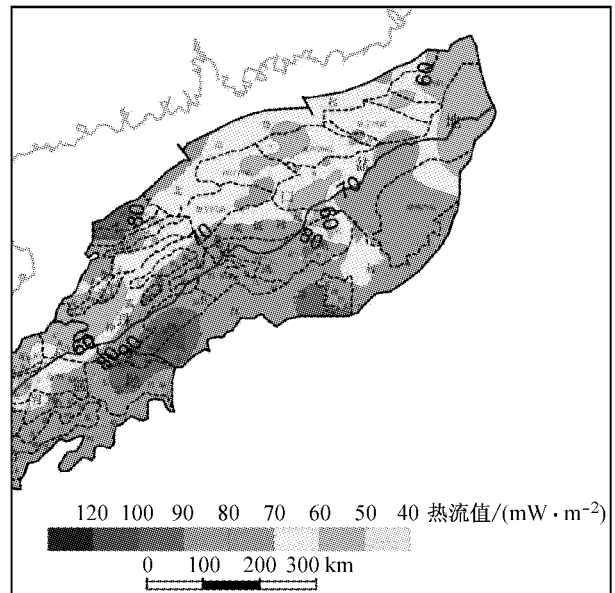


图 5 南海北部大地热流分布图^[20]
Fig. 5 Geothermal heat flow distribution in the northern of South China Sea^[20]

3 结论

沉积岩中黏土矿物组合特征及其类型的转化明

显受到区域大地热流场的控制. 本文从黏土矿物组合特征及演变规律的角度出发, 结合地温场及大地热流的变化趋势, 探讨了南海北部陆架—陆坡—深海区沉积岩黏土矿物组合的差异性及其影响因素, 发现南海北部黏土矿物组合从北部浅水区向南部深水区具有规律演化, 蒙脱石转化消失深度从北部浅水陆架区的 3 400 m, 中部陆坡区的 2 760 m, 到南部

深水区的 1 331 m, 从北向南蒙脱石转化消失深度逐步变浅, 伊利石质量分数则逐步增高. 相应的地温梯度、大地热流值从北向南也同步逐渐增大, 相互之间具有明显的相关关系. 因此, 蒙脱石消失深度可以用来反映该地区地温场的变化, 黏土矿物演化特征可以作为预测本区地温场及大地热流变化趋势的证据之一.

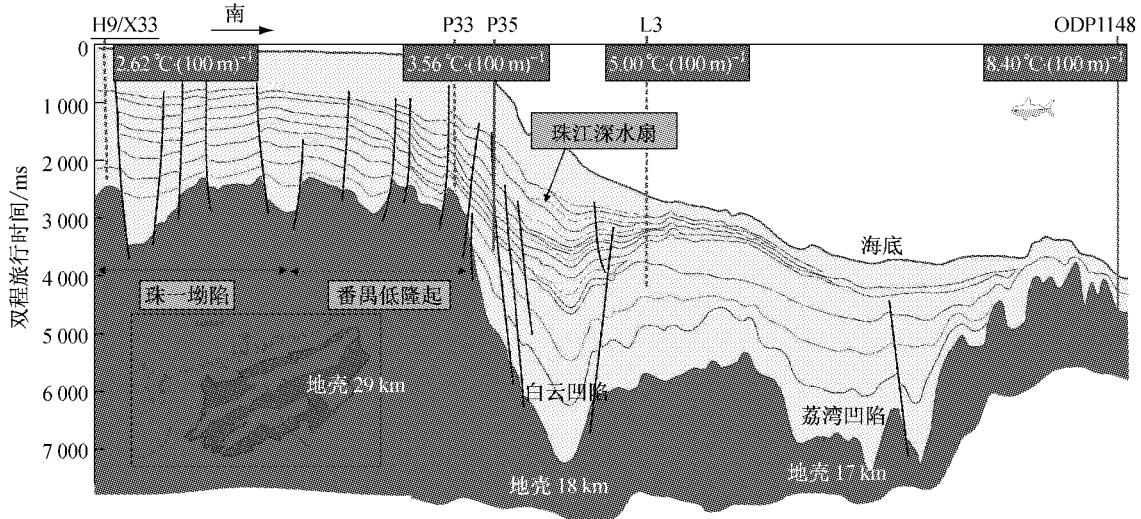


图 6 南海北部陆缘减薄的过渡地壳与地温梯度的关系

Fig.6 Relationship between the thinning transitional crust and geothermal gradient in the northern of South China Sea continental margin

参考文献:

- [1] 赵杏媛, 张有瑜. 黏土矿物与黏土矿物分析[M]. 北京: 海洋出版社, 1990.
ZHAO Xingyuan, ZHANG Youyu. Clay minerals and clay mineral analysis[M]. Beijing: Ocean Press, 1990.
- [2] Chamley H. Clay sedimentology[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1989: 359.
- [3] Weaver C E. Clays, muds and shales[M]. New York: Elsevier Science Publishing Company Inc, 1989.
- [4] Huang W L, Longo J M, Pevear D R. An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite and its use as a geothermometer[J]. Clays and Clay Minerals, 1993, 41(2): 162.
- [5] Nissen S S, Hayes D E, Yao B. Gravity, heat flow, and seismic constraints on the process of crustal extension: Northern margin of the South China Sea [J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(11): 22447.
- [6] 姚伯初, 曾维军, Hayes D E, 等. 中美合作调研南海地质专报 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994.
Yao B C, Zeng W J, Hayes D E, et al. The geological memoir of South China Sea surveyed jointly by China & USA [M]. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 1994.
- [7] 施小斌, 丘学林, 夏戡原, 等. 南海热流特征及其构造意义 [J]. 热带海洋学报, 2003, 22(2): 63.
- [8] 张健, 汪集旸. 南海北部大陆边缘深部地热特征 [J]. 科学通报, 2000, 45(10): 1095.
ZHANG Jian, WANG Jiyang. The characteristics of the thermal flow of the continental margin in northern South China Sea [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(10): 1095.
- [9] 张健, 汪集旸. 南海北部陆缘带构造扩张的深部地球动力学特征 [J]. 中国科学: D 辑, 2000, 30(6): 561.
ZHANG Jian, WANG Jiyang. The geodynamic characteristics of the tectonic extension of the northern South China Sea continental margin [J]. Science in China: Series D, 2000, 30(6): 561.
- [10] 邵磊, 庞雄, 乔培军, 等. 珠江口盆地的沉积充填与珠江的形成演变 [J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 179.
SHAO Lei, PANG Xiong, QIAO Peijun, et al. Sedimentary filling of the Pearl River Mouth Basin and its response to the evolution of the Pearl River [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(2): 179.
- [11] 张乃娴, 李幼琴. 黏土矿物研究方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.
ZHANG Naixian, LI Youqin. Clay mineral Research Methods [M]. Beijing: Science Press, 1990.
- [12] 林西生, 应凤祥. X 射线衍射分析技术及其地质应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1990.
LIN Xisheng, YING Fengxiang. X-ray diffraction analysis

- technique and its geological application [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990.
- [13] Cuadros J. Modeling of smectite illitization in burial diagenesis environments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(16): 4181.
- [14] Corrado S, Bucci D D. Application of organic matter and clay mineral studies to the tectonic history of the Abruzzo-Molise-Sannio area, Central Apennines, Italy[J]. *Tectonophysics*, 1998, 285(1/2): 167.
- [15] Elliott W C, Edenfield A M. The kinetics of the smectite to illite transformation in Cretaceous Bentonites, Cerro Negro, New Mexico[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1999, 47(3): 286.
- [16] Honty M, Uhlík P. Smectite to illite alteration in salt-bearing bentonites (The East Slovak Basin) [J]. *Clays and Clay Minerals*, 2004, 52(5): 533.
- [17] 唐松, 邵磊, 赵泉鸿. 南海渐新世以来黏土矿物的演变特征及意义[J]. *沉积学报*, 2004, 22(2): 337.
TANG Song, SHAO Lei, ZHAO Quanhong. Characteristics of clay mineral in South China Sea Since Oligocene and its significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(2): 337.
- [18] 姚合法, 林承焰, 侯建国, 等. 苏北盆地黏土矿物转化模式与古地温[J]. *沉积学报*, 2004, 22(1): 29.
YAO Hefa, LIN Chengyan, HOU Jianguo, et al. The pattern of clay mineral transformation and paleo-temperature in north Jiangsu Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(1): 29.
- [19] 王丹萍, 杨凤丽, 江裕标, 等. 黏土矿物地温计在沉积盆地热演化研究中的应用[J]. *四川地质学报*, 2010, 30(3): 351.
WANG Danping, YANG Fengli, JIANG Yubiao, et al. The application of clay mineral geothermometer to the study of sedimentary basin thermal evolution [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2010, 30(3): 351.
- [20] 米立军, 张功成. 南海北部陆坡深水海域油气资源战略调查及评价[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
MI Lijun, ZHANG Gongcheng. The strategy research and evaluation of oil and gas in the slope area of the northern South China Sea [M]. Beijing: Geology Press, 2011.
- [21] 张健, 宋海斌. 南海北部大陆架盆地热结构[J]. *地质力学学报*, 2001, 7(3): 238.
ZHANG Jian, SONG Haibin. The thermal structure of main sedimentary basins in the northern margin of the South China Sea [J]. *Journal of Geomechanics*, 2001, 7(3): 238.
- [22] 徐行, 施小斌, 罗贤虎, 等. 南海北部海底地热测量的数据处理方法[J]. *现代地质*, 2006, 20(3): 457.
XU Hang, SHI Xiaobin, LUO Xianhu, et al. Data processing methods of marine geothermal measurement on the northern margin of the South China Sea[J]. *Geoscience*, 2006, 20(3): 457.
- [23] 刘绍文, 施小斌, 王良书, 等. 南海成因机制及北部岩石圈热-流变结构研究进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(4): 117.
LIU Shaowen, SHI Xiaobin, WANG Liangshu, et al. Recent advances in studies on the formation mechanism of the South China Sea and thermo-rheological structure of lithosphere in its northern margin: an overview [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(4): 117.
- [24] 何丽娟, 熊亮萍, 汪集旻. 南海盆地地热特征[J]. *中国海上油气: 地质*, 1998, 12(2): 87.
HE Lijuan, XIONG Liangping, WANG Jiyang. The geothermal characteristics in South China Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas: Geology*, 1998, 12(2): 87.
- [25] 饶春涛, 李平鲁. 珠江口盆地地热流研究[J]. *中国海上油气: 地质*, 1991, 5(6): 7.
RAO Chuntao, LI Pinglu. The thermal research of the Pearl River Mouth Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas: Geology*, 1991, 5(6): 7.
- [26] 庞雄, 陈长民, 彭大钧, 等. 南海珠江深水扇系统及油气[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
PANG Xiong, CHEN Changmin, PENG Dajun, et al. Petroleum prospect in deepwater fan system of the Pearl River in the South China Sea [M]. Beijing: Science Press, 2007.