

文章编号:1000-1964(2001)02-0195-06

## 渤海湾盆地三叠系沉积厚度恢复及其意义

朱炎铭, 秦 勇, 范炳恒, 李田忠, 姜 波

(中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:**综合运用现代油气地质理论及镜质组反射率测定等现代分析测试方法,分析了渤海湾地区的构造演化及古地温场特征;采用 EASY%R<sub>o</sub> 数值模拟技术对大量钻孔进行了埋藏史反演,首次较为细致合理地恢复了渤海湾地区三叠系原始沉积厚度。结果表明,华北晚古生代巨型沉积盆地的发育历史一直延续至印支中期,古生界在印支期末埋藏可达 2 500~4 000 m,埋藏深度及其在空间上的展布特征主要受控于三叠系的原始沉积厚度。

**关键词:**数值模拟;镜质组反射率;三叠系;古生界

**中图分类号:** P 53 **文献标识码:** A

华北地区的古生界烃源岩在形成后经历了多次的构造抬升、剥蚀和再埋藏的过程,正确地恢复或估计每期的剥蚀量对评价古生界有机质成熟度演化历程具有重要意义。由于三叠纪时沉积作用在华北地台上广泛发生,沉积厚度大,导致古生界烃源岩普遍发生生烃演化,但受后期构造变动的影响,剥蚀作用剧烈,不仅三叠系被大量剥蚀,且许多地区古生界也遭受不同程度的剥蚀。因此,印支期剥蚀量的多少,特别是对三叠系原始沉积厚度的判断,直接影响到对古生界有机质演化程度的研究。

### 1 区域构造背景

渤海湾盆地是华北地台东缘最大的新生代断陷区。区内的负向构造包括黄骅、冀中、临清、东濮、济阳、渤中、辽河等坳陷(图1)。

从构造意义上来说,渤海湾盆地系指“东临胶东隆起,西与太行山隆起为邻,北至燕山台褶带,南抵豫淮台褶带”的广大地区,北东南西向反 S 形分布,总面积约 60 万 km<sup>2</sup>,是叠加在华北古生代克拉通巨型坳陷(地台盖层)之上的中、新生代界裂谷盆地。盆地中烃源岩赋存于 3 大套沉积岩系,即下新生界、上古生界、下古生界和中上元古界。对于古生界来说,所谓的“渤海湾盆地”只是华北巨型克拉通坳陷盆地的一个组成部分。

从板块构造格局划分,渤海湾盆地主体位于华北古板块东部,是叠置在华北地台基底上从中生代

开始发育的断陷盆地,盆地的形成和发展受华北古板块与周缘板块相互作用的控制。板块活动的多期性和复杂性,造成盆地构造—热事件的多旋回性和沉积作用的多旋回性,形成多层位、多类型的油气源岩,并多次生烃,使渤海湾深层具有多层系、多期次复合成烃的特点。

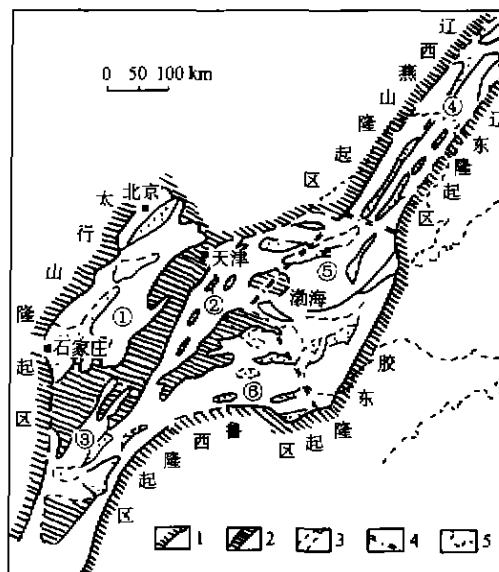


图1 渤海湾盆地构造分区图(据漆家福等,1994)  
Fig.1 Tectonic distribution map of the Bohaiwan Basin  
(after Qi Jiafu et al, 1994)

1. 盆地边界; 2. 隆起; 3. 坳陷内凸起;
4. 构造单元之间的大致界线; 5. 海岸线
- ①. 冀中坳陷; ②. 黄骅坳陷; ③. 临清—东濮坳陷;
- ④. 辽河坳陷; ⑤. 渤中坳陷; ⑥. 济阳坳陷

收稿日期: 2000-06-05

基金项目: 中国石油天然气总公司“九五”科技工程资助项目(970206); 中国矿业大学校基金资助

作者简介: 朱炎铭(1963-),男,江苏省丹阳市人,中国矿业大学副教授,工学博士,从事煤油气地质方面的研究。

## 2 剥蚀地层的反演

### 2.1 EASY% $R_o$ 数值模拟

在构造作用强烈的地区,生烃源岩自埋藏以来可能经历了埋藏—抬升—再埋藏等复杂的过程,因此,对于生烃源岩剥蚀史(地层剥蚀厚度)的认识和恢复,是正确认识生烃源岩埋藏史的关键,国内外已有许多学者对埋藏史的恢复作过深入的探讨<sup>[1~3]</sup>。

业已证明,镜质组的受热时间与受热温度互成函数关系,受热时间的确定是利用镜质组反射率来反演受热温度的关键之一。鉴于这种因果关系,众多的学者在利用镜质组反射率来恢复烃源岩的受热历史方面进行了广泛的研究<sup>[6]</sup>,自 50 年代至今,这类模式的发展已经历了简单函数关系模式、受热时间-温度经验模式、反应活化能-温度函数模式和并行反应动力学模式等 4 个阶段,建立起反演有机质成熟-受热历史的数十种镜质组反射率化学动力学模式<sup>[7]</sup>。

但是,先前的诸多模式均存在着某些方面的不足、或代表性不强,或操纵过于复杂,或未考虑有机质热演化中存在的平行反应等,导致其应用受到一定程度的限制<sup>[3]</sup>。因此,国内外学者一直在致力于寻找一种既能反映有机质真实演化历程,又便于操作、使用的数值模拟方法。由 Burnham (1989), Sweeney (1990) 等建立的 EASY% $R_o$  法正是这种努力的最新成果而得到了迅速推广,并被认为是精确适用且优于其它模拟方法的一种有效方法<sup>[8,10]</sup>。

EASY% $R_o$  法以热模拟实验为基础,吸收了其它方法的主要优点,考虑到镜质组化学组成的不均

一性,把有机质复杂的热降解反应视为一系列具有相同频率因子的平行反应,依据 Arrhenius 反应方程建立起适用于有机质的化学反应动力学模型,以定量地描述镜质组反射率与受热历史、有机质化学组成等之间的相互关系,其基本方程如下

$$R_o = \exp(-1.6 + 3.7F) \quad (0 < F < 8.5),$$

式中  $F$  为反应物转化因子(即反应程度),是通过综合考虑特定温度下脱水、脱氧、脱甲烷、脱脂肪基等平行反应活化能而求出。

### 2.2 单井厚度反演

渤海湾地区的古生界自形成以来,遭受了印支运动、燕山运动和喜山运动等多期构造交替,烃源岩经历了不均一的抬升、变形、埋藏,甚至岩浆活动等一系列地质作用,形成了复杂的埋藏-受热-生烃演化历史,导致了烃源岩生烃演化的不连续性和分阶段性。因此,如何正确地恢复其构造运动史、古地温史,是揭示古生界生烃演化的关键,也是正确进行单井厚度反演的前提。

在收集和实测了研究区大量的镜质组反射率(或海相镜质组反射率)的基础上,经过对所有的数据进行全面的、系统的分析研究,合理地消除因局部异常而导致的镜质组反射率畸变(如:火山活动),从而提高分析研究的可靠性。采用 EASY% $R_o$  数值模拟反演技术,对各单井进行反复反演拟合,揭示渤海湾盆地单井古生界烃源岩的埋藏历史,从而恢复出该井的三叠系原始沉积厚度。表 1 是黄骅坳陷歧古 1 井下二叠系烃源岩的 EASY% $R_o$  数值模拟结果,揭示三叠系原始沉积厚度为:1 725 m (表 1)。

表 1 歧古 1 井下二叠统烃源岩的 EASY% $R_o$  数值模拟(下二叠系顶部  $R_o=0.86\%$ )  
Table 1 EASY% $R_o$  numerical simulation result of lower Permian in Qigu-1 well

时代	$t/\text{Ma}$	$t_{\text{受热}}/\text{Ma}$	$T/\text{K}$	$\theta/^\circ\text{C}$	加热速率/ ( $\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ )	转化率	$R_o/\%$	$\lg R_o$	地温梯度/ ( $^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ )	P 底埋深/m
P <sub>1</sub>	290	0.00	288.0	15.0	0.00	0.00	0.22	-0.665	3.0	0
P <sub>2</sub>	256.1	33.90	302.5	29.5	$1.35 \times 10^{-14}$	$9.00 \times 10^{-2}$	0.30	-0.520	3.0	441
T <sub>3</sub>	230	60.00	352.00	79.0	$6.00 \times 10^{-14}$	$2.10 \times 10^{-1}$	0.47	-0.328	3.3	2 166
J <sub>1-2</sub>	208	82.00	293.50	20.5	$-8.41 \times 10^{-14}$	$2.20 \times 10^{-1}$	0.49	-0.312	3.3	166
J <sub>3</sub> -K <sub>1</sub>	157.1	132.90	334.00	61.0	$2.52 \times 10^{-14}$	$2.21 \times 10^{-1}$	0.49	-0.311	6.0	766
K <sub>2</sub>	97	193.00	350.80	77.8	$8.85 \times 10^{-15}$	$2.48 \times 10^{-1}$	0.54	-0.267	6.5	966
EK	65	225.00	302.40	29.4	$-4.79 \times 10^{-14}$	$2.50 \times 10^{-1}$	0.55	-0.264	3.5	411
N	23.3	266.70	339.00	66.0	$2.78 \times 10^{-14}$	$2.50 \times 10^{-1}$	0.55	-0.263	3.3	1 546
Q	1.64	288.34	408.10	135.1	$1.01 \times 10^{-13}$	$3.74 \times 10^{-1}$	0.86	-0.065	3.3	3 641

### 3 三叠系原始沉积厚度

渤海湾地区的古生界烃源岩在形成后经历了多次的构造抬升、剥蚀和再埋藏的过程,正确地恢复或估计各期的剥蚀量对剖析古生界生烃历程具有十分重要的作用。三叠纪沉积作用在华北地台上曾广泛发生过,其沉积厚度大,古生界埋藏深,并普遍发生生烃演化。但是,受后期构造变动的影响,不仅三叠系被大量剥蚀,许多地区的上古生界也遭受不同程度的剥蚀。因此,对印支期剥蚀作用的合理认识,不仅可为解决华北古生界在印支期构造—埋藏史这一长期争而未决的关键问题提供新的线索,而且将直接影响到对古生界有机质演化进程的正确评价。

印支期剥蚀地层厚度恢复的关键,在于合理恢复三叠系原始沉积厚度。关于华北地区三叠系的

发育特征,目前主要存在两种观点。其一,三叠纪期间华北地台的東西差异更趋明显,以太行山为界呈东隆西拗的态势,西部鄂尔多斯为一大型的陆内盆地,东部为互相隔绝的小型内陆盆地<sup>[11]</sup>。然而,近20年来大量的石油物探及钻井资料,揭示了华北东部巨厚三叠系的存在,从根本上改变了上述认识。其二,中三叠世期间华北地台内部曾存在一个统一的巨型盆地,呈东西展布,北界为晋北—平泉一线,南界大致在渭南—淮北一线,最西可达贺兰山西侧,总面积近900 000 km<sup>2</sup>,在陕西铜川—河南济源一带存在东西向的深水湖盆或沉积中心<sup>[11]</sup>。本研究成果证实并补充完善了第2种观点。

大量钻探资料表明,在包括辽河拗陷在内的渤海湾地区,无论在隆起上,还是拗陷内,下一中三叠统陆相沉积曾普遍发育(表2)。

表2 渤海湾盆地部分钻井三叠系残留厚度统计  
Table 2 Denuded thickness of Triassic in some wells of the Bohaiwan Basin

构造位置	井号	残留厚度/m	构造位置	井号	残留厚度/m
黄骅拗陷	塘沽凹陷 塘参1	684.0	冀中拗陷	桐1	128.5
	歧口凹陷 岐古1	461.0		桐9	125.5
	港古1-1	183.5		桐11	128.5
	南皮凹陷 官古1	484.0	文安凹陷	苏1	446.5
	孔店凸起 孔古2	341.5		苏13	892.5
	徐黑凸起 徐13	557.0		苏18	744.0
临清拗陷	徐1	492.0	刘村代凸起	皇2	597.0
	南官凹陷 官1	162.0	观城凹陷 范古1		460.0
	巨鹿凹陷 巨参1	593.0	东濮拗陷	开3	592.5
	丘县凹陷 丘4(T+J)	1 792.5		开4	417.0
馆陶低凸起	馆深1(T+J)	1 239.5		庆古1	634.0
	葛5	539.5	海通集凹陷 庆古2		>200
	大城凸起 葛8	546.0	高平集斜坡 长2		74.0
沧县隆起	里坦凹陷 大4	771.5	埕宁隆起 北西斜坡 庄30		343.5

注:据渤海湾各油田钻井资料。

三叠系残留厚度的统计表明,无论是拗陷还是隆起,或者次级凹陷、次级凸起,都有一系列钻井钻遇三叠系,揭示了三叠系沉积作用在区内具有普遍性,三叠系残余厚度的差异显然是后期构造分异所造成的。三叠纪地层的广泛分布,反映了渤海湾地区,乃至整个华北地台,当时应是一个较为稳定的大型统一陆相沉积盆地<sup>[12,11]</sup>。然而,在大量文献资料中未见有渤海湾地区三叠系原始沉积厚度方面的详细研究资料。为此,本次研究在详细分析盆地内钻遇三叠系残余厚度的基础上,采用大量的镜质组(或海相镜质体)反射率数据,结合磷灰石裂变径迹、包裹体测温的测试资料,运用EASY%R数值模拟技术,就渤海湾内67口代表性单井的三叠系

原始厚度进行了恢复,不仅证实了三叠系普遍存在,而且首次展现出渤海湾地区三叠系原始沉积厚度的分布面貌,并为古生界基础“三史”及生烃史的分析提供了定量依据(图2)。

研究结果表明,渤海湾地区的三叠系原始沉积厚度变化于1 400~3 000 m之间,在空间上具有明显的展布规律(图2)。三叠纪沉积作用明显受控于当时EW向展布的区域构造,等厚带总体上呈近EW向产出,增厚带与减薄带相间分布,并具有“南厚北薄”的厚度变化趋势。其中,济阳拗陷、东濮拗陷的沉积厚度较大,一般大于2 000 m;冀中拗陷、黄骅拗陷等处相对偏低,多小于2 000 m。



图2 渤海湾盆地三叠统沉积厚度等值线图

Fig. 2 Sedimentary thickness isolines of Triassic in Bohaiwan Basin

#### 4 三叠系沉积厚度恢复的地质意义

##### 4.1 区域地质意义

华北地区巨厚三叠系的存在,表明了整个华北地台至少到中三叠世时仍维持着统一的沉积盆地面貌。中三叠世末的印支运动,是中国大陆地质演化史的转折点,晚三叠世华北板块分别与西伯利亚板块和扬子板块碰撞对接,形成统一的中国大陆,并成为欧亚大陆板块的一部分。板块的碰撞产生了巨大SN向挤压应力,在板块南北两缘产生了与对接带平行的逆冲推覆构造,而在板块内部,最重要的构造效应是造成华北板块的整体抬升,致使大部分区域的三叠系被不同程度剥蚀,许多地区的剥蚀程度深及古生界,现三叠系残留厚度一般数百米,厚者近千米。因此,印支运动在华北地台内的表现同样是非常强烈的,它导致渤海湾地区的剥蚀厚度

可能在1500 m以上,也即地壳至少整体抬升了近1500 m。

对于渤海湾地区,印支运动的划时代意义还在于结束了长期以来近EW向的构造格局和古地理轮廓,形成以NE-NNE向构造线为主的格局。此外,还配套发育NW-NWW向的构造,形成了渤海湾乃至中国东部中、新生代时期的复合构造格架。发育了一系列NE向的宽缓褶曲构造,并伴有由SE向NW的逆冲断层作用,在济阳坳陷、黄骅坳陷、临清坳陷、沧县隆起等处都发现了逆冲断裂构造的存在,显示了造山作用的特点。典型的逆冲断层发生在黄骅坳陷的孔西构造带上,卷入的变形地层主要有古生界和下一中三叠统,有些地方甚至影响到早侏罗世地层<sup>[13]</sup>。

##### 4.2 古生界烃源岩生烃评价

华北地台的盖层发展阶段为整体升降,并自加

里东期进入构造稳定阶段,古生界各层系的厚度在空间上相对较稳定。在加里东期,奥陶系经历了形成后的初次埋藏,但埋藏深度较浅,中奥陶统底面的埋藏多浅于1 000 m。

加里东后期至海西早期的构造抬升,致使下古生界经历了长达1.3亿年的风化剥蚀。据济阳坳陷桩古1井、黄骅坳陷歧古1井和孔古3井、仓县隆起泊古1井、冀中坳陷大参1井等的数值模拟反演结果,奥陶系的剥蚀量在89~452 m之间,一般均在250 m以上。因此,这一时期的剥蚀时间虽长,但剥蚀作用并不是特别强烈。

从早石炭世晚期开始,整个华北地区复又下降

接受沉积。到三叠系末,古生界地层达到最大埋藏深度。其中:下古生界马家沟组底面的埋深在济阳坳陷、东濮坳陷、临清坳陷可达3 000~3 600 m,在黄骅坳陷、冀中坳陷一般在2 000~3 000 m之间;上古生界太原组组底面的埋深在济阳坳陷、东濮坳陷、临清坳陷为2 500~3 500 m,在黄骅坳陷、冀中坳陷多为2 200~2 600 m。导致渤海湾地区古生界烃源岩普遍发生一次生烃作用,上古生界有机质成熟度最高可达0.7% ( $R_o$ ),而下古生界则高达0.85% ( $R_o$ ) (图3)。由图2和图3的相互关系可以看出:古生界烃源岩有机质成熟度 ( $R_o$ ) 的高低变化与三叠系的沉积厚度分布具有直接关系。

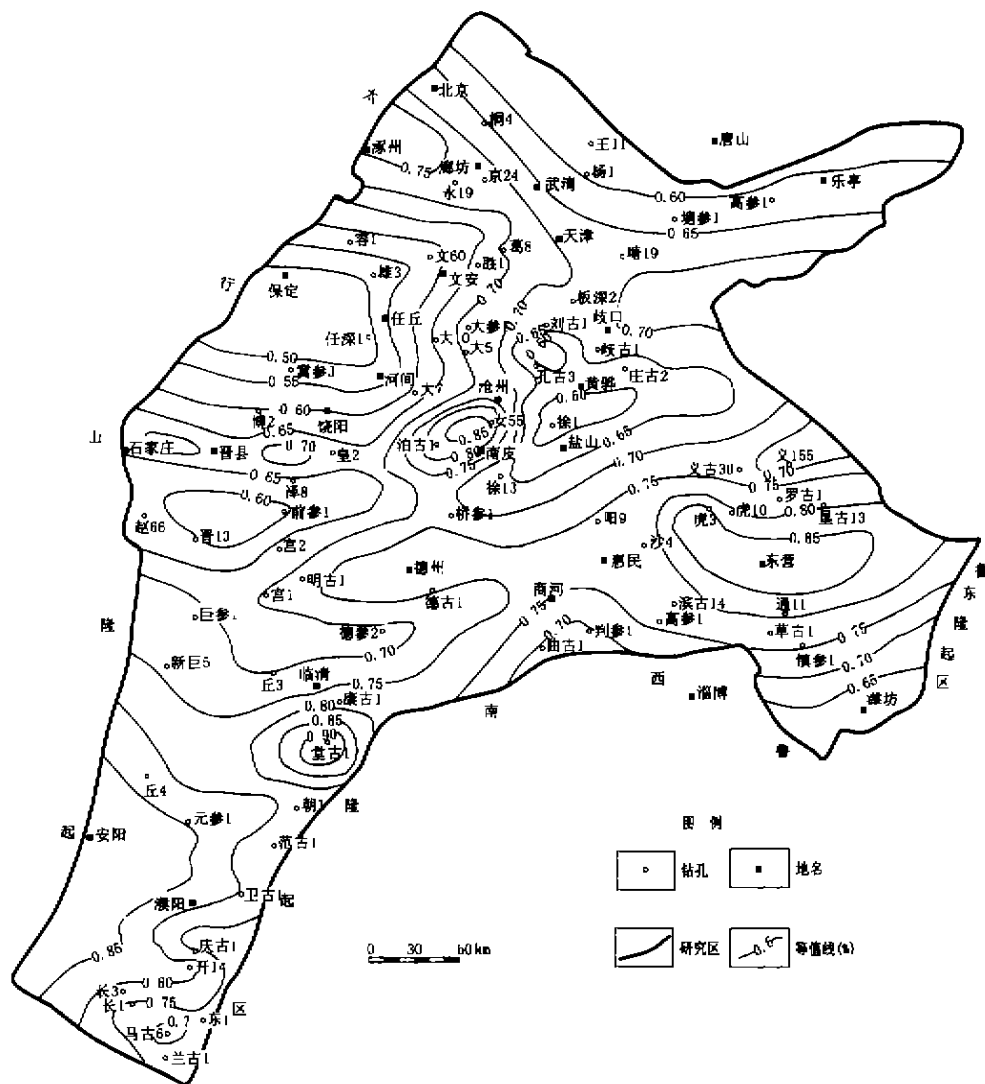


图3 渤海湾地区印支期末奥陶系烃源岩镜质组反射率等值线图

Fig. 3 Isolines of vitrinite reflectance of the Ordovician source rocks to the end of indo-China epoch in the Bohaiwan Basin

在印支期末,华北东部在板块碰撞对接南北向挤压应力的作用下,再次整体抬升隆起,三叠系以

及古生界遭受剥蚀,最大剥蚀量达2 000 m以上,某些地区的上古生界甚至全部被剥蚀殆尽。

## 5 结束语

论文采用 EASY % $R_o$  数值模拟技术对大量钻井进行了埋藏史反演,细致合理地恢复了渤海湾地区三叠系原始沉积厚度,揭示了华北晚古生代巨型沉积盆地的发育历史一直延续至印支中期,古生界在印支期末埋藏可达 2 500~4 000 m,导致渤海湾地区古生界烃源岩普遍发生一次生烃作用,其埋藏深度及其在空间上的展布特征主要受控于三叠系的原始沉积厚度,同时也决定了古生界有机质成熟度的高低。

## 参考文献:

- [1] 何生,王青玲.关于用镜质组反射率恢复地层剥蚀厚度的讨论[J].地质论评,1989,35(2):119-126.
- [2] 陈明章,万龙贵.古地层厚度计算方法探讨[J].石油与天然气地质,1984,5(1):47-54.
- [3] 袁炳存,钱奕中.计算沉积层古厚度的逐层恢复法[J].石油实验地质,1986,8(3):253-262.
- [4] 郝石生,贺志勇,高耀斌,等.恢复地层剥蚀厚度的最优方法[J].沉积学报,1988,6(4):93-99.
- [5] Gurdish T M, Kendall S T, Lerche I, et al. Basin evaluation using burial history calculation: An overview[J]. AAPG, 1985, 69(1):92-105.
- [6] Wood D A. Relationship between thermal maturation indices calculated using Arrhenius equations and Lopatin method. implications for petroleum exploration[J]. AAPG Bulletin, 1988: 115-134.
- [7] 秦勇,宋党育.山西南部煤化作用及其占地热系统[M].北京:地质出版社,1988.
- [8] Sweeney J, Burnham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics[J]. Bull AAPG, 1990, 74(10): 1559-1570.
- [9] Little R, Bunker C, Luckye A. A new evaluation of palaeo-heat flow and eroded thickness for the Carboniferous Ruhr basin, western Germany[J]. Coal Geology, 1994, 26(11):155-183.
- [10] 杨森楠,杨巍然.中国区域大地构造学[M].北京:地质出版社,1985.
- [11] 刘绍龙.华北地区大型三叠纪原始盆地的存在[J].地质学报,1986,60(2):128-138.
- [12] 马文璞.区域构造解析[M].北京:地质出版社,1992.
- [13] 邓清禄,韦必则,杜国银,等.黄骅坳陷孔西潜山推覆构造的发现及意义[J].石油实验地质,1998,20(3): 223-226.

## Restoration and Significance of the Original thickness of Triassic System in Baohaiwan Bay Basin

ZHU Yan-ming, QIN yong, FAN Bing-heng, LI Tian-zhong, JIANG Bo

( College of Mineral Resource and Geoscience, CUMT, Xuzhou, Jiangsu 221008, China )

**Abstract:** The tectonic evolution and paleogeothermic field in the Bohaiwan Basin were analyzed based on the modern oil and gas geological theories and using the new method of measuring vitrinite reflectance. Having analyzed the data from a number of boreholes in the Baohaiwan Basin using the EASY % $R_o$  numerical simulation, the author revealed the depositional framework of Triassic for the first time. The result shows that the development history of the huge depositional basin of Late Paleozoic in Huabei area lasted to the middle period of the Indosinian movement, and the embedding depth of Paleozoic source rocks is from 2 500 m to 4 000 m. The embedding depth and space distribution of Paleozoic source rocks was mainly controlled by the original depositional thickness of Triassic system.

**Key words:** numerical simulation; vitrinite reflectance; Triassic system; Paleozoic