

文章编号: 1000-4734(2001)04-0708-05

用镜质体反射率重建沉积盆地构造演化特征

李荣西¹ 张锡云² 金奎励³

(1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学开放研究实验室, 贵州 贵阳 550002;

2. 长安大学 地球科学与国土资源学院 陕西 西安 710054;

3. 中国矿业大学, 北京 100083)

摘要: 本文以渤海湾盆地为例, 讨论通过定量研究镜质体反射率剖面资料来重建沉积盆地构造演化特征。结果表明渤海湾盆地曾经历过与印支运动和燕山运动相对应的两次重要的构造抬升、剥蚀事件。估算的这两次构造抬升作用剥蚀的地层厚度分别平均约为 1110 m 和 900 m, 剥蚀速率分别为 35 ~ 82 m/Ma 和 8 ~ 17 m/Ma。研究表明渤海湾盆地不同地史时期古地温梯度不同, 中生代古地温梯度 (4.33 ~ 4.67 °C/100 m) 明显高于晚古生代 (3.49 ~ 3.92 °C/100 m) 和新生代 (3.75 ~ 3.76 °C/100 m) 以及现代地温梯度 (3.5 ~ 3.7 °C/100 m), 这表明本区在中生代时曾出现过高热异常。镜质体反射率剖面回归参数 (热响应因子 b) 反映出渤海湾盆地在新生代沉降速度明显加大, 此时控制盆地沉降作用的构造背景发生了重大的变化, 强烈的拗陷和断裂作用取代了晚古生代地台和中生代的断陷而成为本区最重要的构造特征。

关键词: 镜质体反射率; 构造演化; 沉积盆地

中图分类号: P542 文献标识码: A

作者简介: 李荣西, 男, 1966年生, 博士后, 油气地质与勘探。

镜质体是沉积岩中最常见的固体形态有机质, 其反射率 (VR_0) 随热演化程度增加而增大, 但不会因热演化程度减弱而减小, 因此长期以来它做为一种地质温度计被广泛用于研究烃源岩成熟度和沉积盆地热演化历史^[1~3]。本文以渤海湾盆地为例, 讨论应用镜质体反射率资料来恢复重建沉积盆地构造演化历史, 并确定在不同构造抬升期间的地层剥蚀厚度和剥蚀速率。

1 镜质体反射率与热演化之间的关系

镜质体反射率 (VR_0) 一般随热演化程度或埋藏深度增大而增加, 其实质是在热动力作用下镜质体化学结构变化的物理光学反映。根据化学动力学一级反应式 $dx/dt = -k_1 \cdot x$ (x 为反应物浓度, t 为反应时间, k 为反应速度常数) 和 Arrhenius 公式 $k_i = A_i \cdot \exp(-E_i/RT)$ 可知, 物质反应速率与温度成指数增加关系, 而与时间成线性增加关系。那么, 对沉积盆地中的镜质体来说, 其反射率

(VR_0) 与埋藏深度 (H) (其与温度为正相关关系) 之间的相关关系可用下面回归分析方程式表示:

$$VR_0 = ab^H \quad (1)$$

式中 VR_0 为在深度 H 处的镜质体反射率, a 为一常数, 它对应于 $H=0$ 时的镜质体反射率, b 为热响应因子, 是反映 VR_0 (%) 随深度 H (m) 变化速率 (%/m) 的一个参数, 它是反映盆地沉降速率的一个重要参数, 其对数 ($\ln b$) 相当于有机质煤化梯度^[3]。将 (1) 式进行对数变换, 可得到下式:

$$\ln VR_0 = \ln a + H \ln b \quad (2)$$

表明镜质体反射率 (VR_0) 的对数 ($\ln VR_0$) 与深度 H 之间为一直线方程关系。

构造演化特征控制着沉积盆地的形成和演化, 同时也决定了盆地地壳结构、热流、沉降速率等。在沉积盆地内, 沿剖面方向, 不同构造层或地层的镜质体反射率对数随深度变化特征也不相同, 用 (2) 式作出的其关系图 (直线段) 的斜率不同。具体分析, 相邻地层的关系图即线段之间会出现以下几种情况: ① 拐点, 表明上、下两套地层是连续沉积的, 但它们形成于不同的热背景 (地温梯度) 条件下, 可以是上陡下缓, 也可以是上缓下陡, 这与地热演化及构造演化过程有关; ② 错断,

收稿日期: 2001-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 40173005); 中国博士后科学基金 (1999/10); 贵州省自然科学基金 (99-3091)

这表明上、下两套地层之间存在不整合面,揭示了一次构造运动和地层却失事件;③为一条连续的线段,表明上、下两套地层为连续沉积。

2 渤海湾盆地镜质体反射率剖面

渤海湾盆地是我国东部最大的一个新生代含油气盆地,它是在古生代稳定地台基础上,经过中生代一早第三纪的断陷构造演化阶段后,在晚第三纪至第四纪形成的一个由多个大型拗陷构成的沉积盆地。本文选择渤海湾盆地济阳拗陷北部的义135井和义155井岩芯保存较齐全的两口钻井岩芯样,系统地测量其剖面上石炭—二叠系、侏罗—白垩系和第三系地层的镜质体反射率。测量用的仪器是配有光度计和数字显示仪的Leitz MPV-II显微镜,用50×油浸物镜和10×目镜,平均镜质体反射率按Stach等^[3]描述的方法进行计算。图1和图2分别为义135和义155井的镜质体反射率(对数)剖面图。表1列出了它们的有关回归参数。

美国学者Barker等^[4,5]详细研究过镜质体反射率与古地温之间的关系,通过对600多个镜质体反射 VR_0 值和其经历的最大温度 T_{peak} 统计分析,得出如下关系^[4]:

$$\ln(VR_0) = 0.0078 T_{peak} - 1.2 \quad (3)$$

Barker认为(3)式是普遍性的,是一个较好的绝对地质温度计,其应用一般不会出现明显的误差,出现偏差的原因可能有:①古地温测量不准,应选择能代表最高温度 T_{peak} 的值;② VR_0 测量不准;③风化露头样品不适合分析;④ $VR_0 < 0.4\%$ 时可靠性较差。本文应用(3)式,通过镜质体反射率计算了其经历的最大古地温,由古地温与深度之间线性回归统计分析,得出本区不同时期的古地温梯度(表2)。可以看出本区不同地史时期古地温梯度不同,晚古生代时为 $3.49 \sim 3.92 \text{ } ^\circ\text{C}/100\text{m}$,中生代时为 $4.33 \sim 4.67 \text{ } ^\circ\text{C}/100\text{m}$,新生代为 $3.75 \sim 3.76 \text{ } ^\circ\text{C}/100\text{m}$ 。据研究,渤海湾盆地现代地温梯度在 $2.9 \sim 3.7 \text{ } ^\circ\text{C}/100\text{m}$ 之间,一般在 $3.5 \sim 3.7 \text{ } ^\circ\text{C}/100\text{m}$ 之间^[6,9],该值与本文得出的新生代地温梯度非常相似,说明本区新生代古地温梯度与现代值相近。但中生代古地温梯度却明显高于晚古生代、新生代以及现代地温梯度,这表明本区在中生代时曾出现过高热异常现象。

另外,从有机质煤化梯度(即热响应因子 b 的对数 $\ln b$)也能反映出古地温梯度。煤化梯度

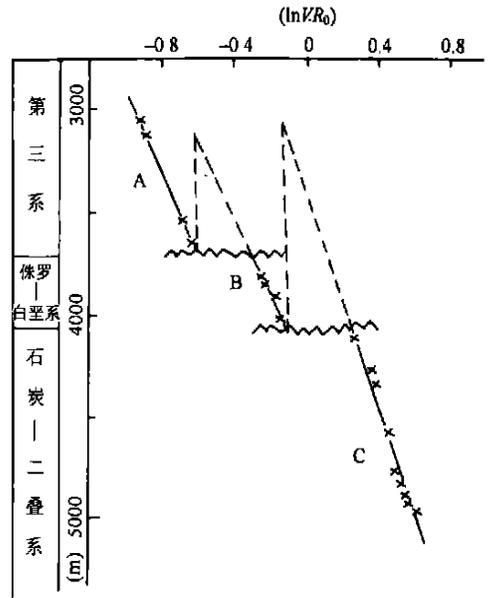


图1 义135井镜质体反射率(对数)剖面图
Fig. 1. Vitinite reflectance profile of well Yi 135.

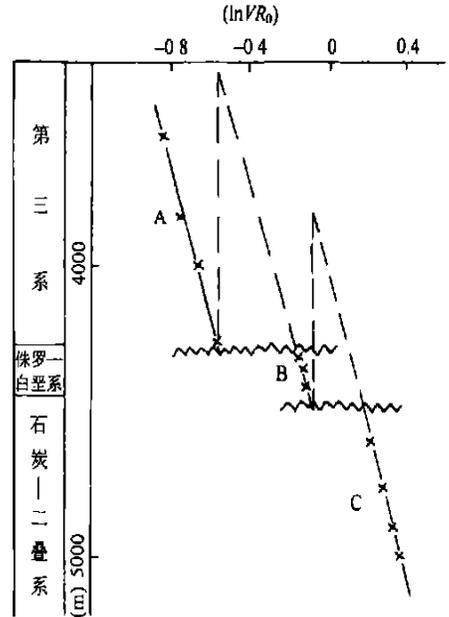


图2 义155井镜质体反射率(对数)剖面图
Fig. 2. Vitinite reflectance profile of well Yi 155.

($\ln b$, 也称为碳化梯度)表示 VR_0 随深度(H)增加的程度,它不仅取决于煤阶,而更重要的是其取决于有机质煤化时的地温梯度^[3],因而它也是反映古地温状况的一个重要指标。例如,德国鲁尔盆地属次华力西带前渊盆地,其埋深受热时间与北阿尔卑斯前渊磨拉石盆地基本相似,而前者的煤化梯度($0.5\% \sim 1.0\%/km$)比后者($0.03\% \sim 0.09\%/km$)高出一个数量级,其主要原因就是鲁

尔盆地古地温梯度高达 $6.0 \sim 8.0 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ m}$, 而磨拉石盆地只有 $1.5 \sim 2.3 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ ^[3]。我国鄂尔多斯盆地三叠系有机质煤化梯度 ($\ln b$) 为 $0.36\%/\text{km}$, 三叠纪时的古地温梯度高达 $5.7 \text{ } ^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ ^[10]。渤海湾盆地侏罗-白垩系为 $0.33\% \sim 0.34\%/\text{km}$, 这一

数值与德国鲁尔盆地和我国鄂尔多斯盆地在一个数量级上, 暗示它们的古地温梯度也应该相近, 从分析结果看(表 2), 本区中生代古地温梯度较高, 但比德国鲁尔盆地和鄂尔多斯盆地稍低, 从它们三者煤化梯度大小对比看, 基本相符。

表 1 义 135 井和义 155 井镜质体反射率剖面回归直线方程及有关参数

Table 1. Regression equation and parameters for vitrinite reflectance profile of wells Yi 135 and Yi 155

井号	层位	线段	$a/\%$	$b/(\%/\text{m})$	煤化梯度 ($\ln b$)	相关系数(r)	直线方程 ($\ln VR_0 = \ln a + H \ln b$)
义 135 井 (图 1)	新生界	A	0.1913	1.00024	0.24	0.9765	$\ln VR_0 = 0.00024H - 1.654$
	中生界	B	0.212	1.00034	0.34	0.9756	$\ln VR_0 = 0.00034H - 1.5512$
	晚古生界	C	0.2972	1.00030	0.30	0.9347	$\ln VR_0 = 0.0003H - 1.2133$
义 135 井 (图 2)	新生界	A	0.1440	1.00026	0.26	0.9938	$\ln VR_0 = 0.00026H - 1.9315$
	中生界	B	0.2045	1.00033	0.33	0.9857	$\ln VR_0 = 0.00033H - 1.5874$
	晚古生界	C	0.2023	1.00031	0.31	0.9875	$\ln VR_0 = 0.00031H - 1.5978$

表 2 渤海湾盆地古地温梯度计算结果

Table 2. The paleogeothermal gradient of the Bohaiwan Basin

井号	时代	古地温梯度 ($^\circ\text{C}/100\text{m}$)	煤化梯度($\ln b$)	回归方程 $T=f(H)$	相关系数(r)
义 135	新生代	3.75	0.24	$T=0.0375H-73.747$	0.92
	中生代	4.33	0.34	$T=0.0433H-40.181$	0.98
	晚古生代	3.49	0.30	$T=0.0349H-45.814$	0.93
义 135	新生代	3.76	0.26	$T=0.0376H-87.73$	0.99
	中生代	4.67	0.33	$T=0.0467H-68.002$	0.96
	晚古生代	3.92	0.31	$T=0.0392H-43.639$	0.98

3 构造事件的重建

从图 1 和图 2 可以看出, 义 135 井和义 155 井的镜质体反射率剖面均呈错断的三条线断, 在图中分别用 A、B、C 表示, 它们分别代表了新生代、中生代和晚古生代三套地层镜质体反射率随深度变化情况。相邻线段错断位置分别位于石炭一二叠系与侏罗-白垩系之间和侏罗-白垩系与第三系之间, 它们分别揭示了中生代与晚古生代、新生代与中生代地层之间存在着不整合面, 中生代和晚古生代地层分别遭受过不同程度的剥蚀作用。从回归分析参数计算结果看, VR_0 的对数 $\ln VR_0$ 与埋深(H)之间呈良好的线性相关关系, 相关系数多在 0.98 左右(表 1)。表 3 列出了镜质体反射率剖面所揭示的构造意义。

线段 B 与 C 之间的错断揭示了晚古生代(石炭一二叠系)与中生代(侏罗-白垩系)之间存在着沉积间断或缺失。目前在济阳拗陷还未发现三叠系地层, 仅在其西临的临清拗陷东部发现了中

下三叠统的陆相红色泥砂质沉积岩系。区域地质研究一般认为三叠系地层在华北地区是普遍沉积的, 在渤海湾地区三叠系地层缺失原因不是沉积缺失, 而是剥蚀缺失, 晚三叠世的印支运动使本区抬升隆起、沉积间断, 而且使原有的沉积地层遭受剥蚀^[6,7]。

表 3 镜质体反射率剖面及其构造意义

Table 3. Vitrinite reflectance profiles and their tectonic implications

剖面特征(图 1, 图 2)	构造意义
$\frac{A}{C}$ 线段 A 与 C 之间错断	燕山运动, 晚白垩世未抬升、剥蚀
$\frac{B}{C}$ 线段 B 与 C 之间错断	印支运动, 晚三叠世未抬升、剥蚀

区域地质分析表明侏罗-白垩纪时期华北地区整体处于抬升剥蚀期, 但在渤海湾盆地此时却发生了强烈的断陷构造运动, 形成了断陷盆地, 沉积了巨厚的陆相碎屑岩及中基性火山岩建造, 直

到晚白垩世时整体抬升降起, 遭受剥蚀, 线段 A 与 B 之间的错断即记录和揭示了这一次构造剥蚀事件。

线段 A、B、C 三者的斜率变化即它们回归参数热响应因子 b (表 1) 的不同反映出不同时期其沉降速度的差异, 从而进一步揭示了不同时期控制济阳拗陷沉积作用的构造背景的差异性。

4 地层剥蚀厚度的确定

由前面讨论可知, 镜质体反射率 VR_0 (%) 与深度 H 之间存在式 (1) 所示的函数关系, 可将式 (1) 镜质体反射率剖面上相邻两条线段所对应的方程联立成方程组, 求解二元一次方程组即可得出相邻线段之间不整合所代表的剥蚀厚度。用此方法对义 135 井和义 155 井计算结果见表 4。

表 4 晚古生代和中生代末期构造运动造成的地层剥蚀厚度和剥蚀速率

Table 4. The depth and rate of tectonic erosion at the end of Late Paleozoic and Late Mesozoic

井号	不整合面	剥蚀时间	Z_E/m	$E_R/(m/Ma)$
义 135 (图 1)	A/B B/C	中生代末 三叠纪末	856 1200	8~14 60~82
义 155 (图 2)	A/B B/C	中生代末 三叠纪末	1200 1520	13~17 35~43

注: Z_E 为用公式法计算的剥蚀厚度; E_R 为剥蚀速率; 时间界限以文献 [6] 的绝对年龄数据为依据

5 剥蚀速率的确定

由前面分析计算可知, 济阳拗陷自晚三叠世沉积间断后处于抬升剥蚀状态, 直到中侏罗世接受新的沉积时已将三迭纪的地层几乎剥蚀殆尽, 这期间剥蚀的地层厚度约 650~1520 m (表 4), 平均约为 1110 m。中—晚侏罗世时本区接受了一套陆相碎屑岩夹火山岩沉积, 晚侏罗世—早白垩世因燕山运动而又抬升降起, 遭受剥蚀, 直到新生界才接受沉积, 这期间剥蚀厚度约 650~1200 m, 平均约 900 m。在这样一个沉降埋藏与抬升剥蚀历史和时间框架下, 位于不整合面下的地层剥蚀速率 (E_R) 可由下式得出:

$$E_R = Z_E / t \quad (3)$$

式中 t 为剥蚀作用持续时间间隔, 以 Ma 为单位, 时间计算以文献 [6] 上的绝对年龄为标准计算, 结果见表 4。可以看出, 三叠纪末期的剥蚀速率较大, 达 35~82 m/Ma, 这说明与剥蚀有关的构造运动 (即印支运动) 比较强烈, 地壳抬升幅度较大。

中生代末的燕山运动造成的剥蚀速率较小, 约为 8~17 m/Ma, 这与其断陷构造差异性升降运动有关。热响应因子 b 是反映盆地沉降速率的一个重要参数, 该值越小, 其反映出盆地沉降速率越大^[3], 从热响应因子 b 值看 (表 1), 新生代地层较中生代和晚古生代地层的 b 值都小, 反映出新生代时本区沉降速度明显加大, 这表明在此时晚古生代地台和中生代的差异性断陷构造背景不再是控制盆地沉降作用的主要因素, 取而代之的是强烈的拗陷和断裂作用引起盆地快速下降和沉积作用。

6 讨论与结论

区域地质研究表明渤海湾盆地自晚古生代以来经历过三次区域性构造抬升与剥蚀作用, 具有复杂的构造演化特征。

(1) (前) 印支期埋藏与抬升作用。渤海湾盆地普遍发育晚古生代石炭—二叠纪煤系地层, 但是本区中生界沉积地层分布区域有限, 其分布特征主要受盆地基底断裂控制, 目前在济阳拗陷还未发现三叠系地层, 仅在相邻的临清拗陷东部发现了中、下三叠统陆相红色泥砂质沉积岩系。一般认为华北地区三叠系地层是普遍沉积的, 在渤海湾盆地一带中、下三叠统普遍缺失的原因不是沉积缺失, 而是剥蚀缺失^[6,7]。晚三叠世的印支运动使本区抬升降起, 而且使原有沉积地层遭受严重剥蚀。

(2) 燕山期埋藏与抬升作用。这一时期华北地台整体处于隆起构造背景之下, 在渤海湾盆地的一些凹陷里普遍沉积了早中侏罗世的泥砂质含煤岩系 (坊子组 $J_{(1+2)}f$, 三台组 J_{2S})^[6]。晚侏罗—早白垩世时本区发生强烈断陷运动和岩浆活动, 区内沉积了一套厚度较大的中基性火山岩及陆相碎屑岩建造, 之后整体抬升降起。

(3) 新生代理藏与抬升作用。自新生代 (孔店组沉积早期) 以来, 本区进入一个较长期的快速沉降阶段, 直到早第三纪晚期 (相当于东营组沉积晚期), 本区曾一度抬升降起, 据东营凹陷磷灰石裂变径迹分析表明, 在 20~30 Ma 间有一个明显的冷却史^[8], 这是由于东营组沉积末期抬升剥蚀引起的。晚第三纪至第四纪, 本区为连续的稳定沉降阶段。

本文应用镜质体反射率资料揭示的渤海湾盆地的地层不整合及其对应的构造抬升与剥蚀事件与区域地质研究结果一致, 说明镜质体反射率剖

面分析是定量研究沉积盆地构造演化特征的一种有效手段。研究表明渤海湾盆地不同地史时期古地温梯度不同, 晚古生代时为 $3.49 \sim 3.92$ $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 中生代时为 $4.33 \sim 4.67$ $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 新生代为 $3.75 \sim 3.76$ $^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 其与本区现代古地温梯度值相近。中生代古地温梯度却明显高于晚古生代、新生代以及现代地温梯度, 这表明本区在中生代时曾出现过高热异常现象。渤海湾盆地在三叠纪末的印支运动抬升剥蚀的地层厚度约 $650 \sim 1520\text{ m}$ (平均为 1110 m), 其剥蚀速率为 $35 \sim 82\text{ m}/\text{Ma}$ 。在晚侏罗世—早白垩世末的燕山运动抬升

剥蚀的地层厚度约 $650 \sim 1200\text{ m}$ (平均 900 m), 其剥蚀速率为 $8 \sim 17\text{ m}/\text{Ma}$ 。三叠纪末的剥蚀速率大, 证明与之相应的印支运动比较强烈, 地壳抬升幅度大, 晚侏罗—早白垩世末的剥蚀速率小, 这与燕山运动以断陷为主要特点的差异性升降运动有关。从镜质体反射率剖面得到的热响应因子 b 是恢复重建沉积盆地构造特征的一个很有用的参数, 该参数计算结果反映出渤海湾盆地在新生代的沉降速度明显加大, 说明此时控制盆地沉降的构造背景发生了重大的变化, 强烈的拗陷和断裂作用是引起盆地快速下降和沉积作用的主导因素。

参 考 文 献

- [1] 赵孟为. 划分成岩作用与埋藏变质作用指标及其界线[J]. 地质论评, 1995, 41(3): 238~244.
- [2] 李荣西. 有机质热演化与极低级变质作用[J]. 地质科技情报, 1996, 5(3): 64~66.
- [3] Stach E(著), 扬起(译). 斯塔赫煤岩学教程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1990.
- [4] Barker C E and Pawlewicz M J. The correlation of vitrinite reflectance with maximum temperature in humic organic matter[J]. *Lecture Notes in Earth Science*, 1986, 5: 79~81.
- [5] Barker C E and Goldstein R H. Fluid-inclusion technique for determining maximum temperature in calcite and its composition to the vitrinite reflectance geothermometer[J]. *Geology*, 1990, 18: 1003~1006.
- [6] 王秉海, 钱凯. 胜利油区地质研究与勘探实践[M]. 山东东营: 石油大学出版社, 1992.
- [7] 王鸿祯, 刘本培主编. 地史学教程[M]. 北京: 地质出版社, 1980.
- [8] 郭随平, 施小斌. 胜利油区东营凹陷热史分析—磷灰石裂变径迹证据[J]. 石油与天然气地质, 1996, 107(1): 32~36.
- [9] 蒋有录, 熊继辉. 临清拗陷东部地温及有机质热演化特征[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1997, 21(1): 6~9.
- [10] 赵孟为, Behr H J. 鄂尔多斯盆地三叠系镜质体反射率与地热史[J]. 石油学报, 1996, 17(2): 15~22.

APPLICATION OF VITRINITE REFLECTANCE TO RECONSTRUCTION OF THE TECTONIC FEATURES OF THE BOHAI GULF BASIN

Li Rongxi¹ Zhang Xiyun² Jin Kuili³

(1. Open Lab of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002;

2. Chang'an University, Xi'an 710054;

3. China University of Mining and Technology, Beijing 100083)

Abstract: Systematic measurements and quantitative analysis of vitrinite reflectance data from the Bohai Gulf Basin have revealed two tectonics and unconformities corresponding to the Late Paleozoic-Mesozoic (Indo-Sinian movement) and Mesozoic-Eocene (Yanshanian movement) boundaries. The estimated thickness of the section that was removed by erosion during this two tectonic events is about $650 \sim 1520\text{ m}$ (average 1110 m) and $650 \sim 1200\text{ m}$ (average 900 m), respectively. The rate of erosion is about $35 \sim 82\text{ m}/\text{Ma}$ and $8 \sim 17\text{ m}/\text{Ma}$ respectively, in which the first one (Indo-Sinian movement) is larger than the second one (Yanshanian movement), suggesting that the Indo-Sinian movement is more extensive and the uplift is stronger than that of the Yanshanian movement. The thermal response factor (b), which provides a useful tool for the sediment basin tectonics reconstruction, indicates a maximum subsidence rate of the Bohai Gulf Basin during the Eocene, which implies that the tectonic background had changed greatly since Eocene. Depression and faulting were the tectonic features in the Bohai Gulf Basin after that time.

Key words: vitrinite reflectance; tectonics; Bohai Gulf Basin