



青海湖底沉积物的矿物物相及有机质保存研究

李善营¹, 于炳松¹, Hailiang Dong², 刘英超¹

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083 2. Department of Geology, Miami University, OH 45056, USA)

摘要: 盐湖沉积环境是烃源岩发育的重要地质环境。本文以青海湖湖底沉积物为例, 根据有机质与粘土矿物含量及矿物表面积的关系, 分析了矿物学因素对盐湖相富有机质沉积物中有机质保存的影响。研究发现, 湖底沉积物中有机质丰富, 为上层水中的浮游生物和由河流携带来的陆地高等植物两种来源。矿物物相分析发现沉积物中粘土矿物含量达到 32.4%, 以伊利石为主。沉积物经密度分离后测试发现, 有机碳含量与粘土矿物含量及矿物表面积之间具有很好的正相关性, 说明粘土矿物吸附是青海湖底沉积物中有机质的主要赋存形式。

关键词: 有机质, 粘土矿物, 矿物表面积, 吸附, 保存机理, 青海湖

中图分类号: P512.2; P57

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2006)06-0493-06

The mineralogical phase and preservation of organic matter in sediments of the Qinghai Lake

LI Shan-ying¹, YU Bing-song¹, DONG Hai-liang² and LIU Ying-chao¹

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Department of Geology, Miami University, OH 45056, USA)

Abstract: The saline lake is one of the most favorable environments for developing hydrocarbon source rocks. In this paper, a sample core from the Qinghai Lake was studied. Based on the relationship of the organic matter content and clay mineral content to the mineral surface area, the authors used the mineral component (or mineralogical phase) to analyze the preservation of organic matter in sediments. Organic matters from abundant terrigenous plants around the lake area composed mainly of microbes and algae are very rich in the lake. The mineralogical phase indicates that clay minerals are up to 32.4% in sediments at the bottom of the Qinghai Lake, with illite being the main component part. Density fractionation reveals that organic matter content is closely relevant to clay mineral content and mineral surface area in the salified Lake, suggesting that clay mineral adsorption is the major mechanism in the preservation of organic matter in sediments of the Qinghai Lake.

Key words: organic matter; clay mineral; mineral surface area; adsorption; preservation mechanism; Qinghai Lake

陆相生油气理论是中国科学家对石油地质学界的重大贡献, 并已为国际石油地质界所瞩目。近年来, 有关咸化湖沉积在油气生成中的作用和地位已日益为广大石油地质学家所重视(Kelts, 1988; 苗建

宇等, 2004)。对我国新生代地层来说, 咸化湖相沉积是最重要的生油岩系(孙镇城等, 1997)。由此可见, 盐湖沉积环境是烃源岩发育的重要地质环境之一。然而, 对于陆相湖盆环境中富有机质沉积物中

有机质含量与粘土矿物含量及矿物表面积的关系以及影响有机质保存的主要因素等方面,目前尚没有开展深入的研究。

富有机质沉积物中有机碳含量随着沉积环境的变化而出现波动现象(Bertrand, 1993)。多数学者认为,有机质的保存主要受两方面因素的控制,一是表层水和相邻流域的初始有机质生产力以及有机质生物降解等因素的影响,氧化还原条件影响生物分解有机质的强度;另一方面受有机质搬运模式、沉积物颗粒大小以及沉积速率的影响(Demaison and Moore, 1980)。青海湖现代沉积物以富含有机质为特征,是研究现代盐湖环境沉积物中有机质保存的理想地区。本文以青海湖湖底沉积物为例,根据有机质与粘土含量及矿物表面的关系,分析矿物学因素对盐湖相有机质保存的影响。

1 样品的采集与测试

笔者在青海湖二浪尖西北约 20 km 的湖盆深水处进行了沉积物的采样,取样点水深为 25 m(图 1)。沉积物样品采用重力取样器采取,取得沉积物柱样品长 25 cm。样品按 5 cm 长度分割后,获得 5 个样品,从下往上依次编号为 QH1~QH5。

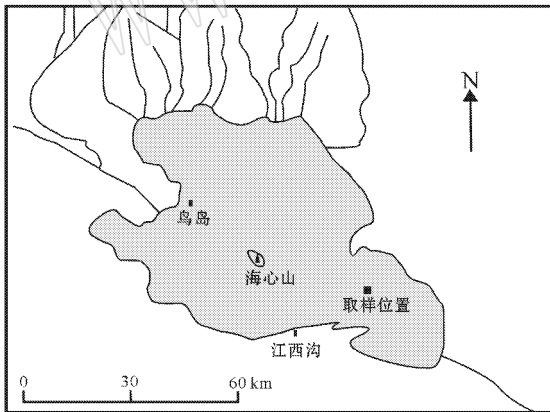


图 1 青海湖取样位置示意图

Fig. 1 Location of the studied borehole in the Qinghai Lake

有机质的相对密度较小,当有机质与粘土矿物结合形成有机质-粘土矿物集合体时,集合体的密度要小于纯粘土矿物的密度,因此密度分离被广泛应用于研究富有机质沉积物中有机质与矿物的关系(Turchenek and Oades, 1976; Golchin *et al.*, 1994; Hedges and Oades, 1997; Bock and Mayer, 2000)。

根据沉积物矿物物相分析和粘土矿物表面积(赵杏媛和张有瑜, 1990)按照 Mayer(1994a)的理论,具 1 m^2 表面积的矿物可吸附 1 mg 有机质,有机质密度为 1 g/mL ,可计算出青海湖沉积物中有机质-粘土矿物集合体的相对密度为 2.8 g/mL 。使用多钨酸钠溶液作为重液,通过高速离心的方法将样品分成低($\rho \leq 1.9 \text{ g/mL}$)中($1.9 < \rho \leq 2.8 \text{ g/mL}$)高($\rho > 2.8 \text{ g/mL}$)3 个密度组。本次研究对全样和密度分离后的沉积物进行了总有机碳(TOC)、X 衍射物相和结构(XRD)、扫描电镜(SEM)和矿物表面积(MSA)研究。密度分离和 MSA 测试在中国地质大学(北京)地学实验中心完成,TOC、XRD 和 SEM 在中国石油天然气股份有限公司中国石油勘探开发研究院实验中心完成。密度分离是常温下用 H. 5000R KOKUSAN 型离心机完成。TOC 分析是在常温、常压条件下用 LECO CS-400 碳硫分析仪完成,测试过程执行 GB/T19145-2003 标准。XRD 分析用 D/max 2500 X 射线衍射仪完成,执行 SY/T 5163-1995 标准。SEM 用 LEO-435VP 扫描电子显微镜完成,执行 SY/T5162-1997 标准。MSA 测试用 Autorsorb-1 型物理吸附仪(仪器型号:19990598)采用 BET-氮气等温线方法完成,执行 GB/T13390-92 标准。

2 分析结果

2.1 有机碳分析

青海湖湖底沉积物全样和不同密度组样品中有机碳分布见表 1。全样有机碳含量(ATOC)在 0.93%~2.01%之间,平均 1.25%。经密度分离后,

表 1 青海湖湖底沉积物不同密度组中有机碳分布表
Table 1 Distribution of organic carbon in various density ranges of the sediments from the bottom of the Qinghai Lake

深度/cm	编号	密度/ $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$	有机碳/%	
			分离样	全样
20~25	QH1-1	$1.9 < \rho \leq 2.8$	2.44	2.01
		$\rho > 2.8$	1.96	
15~20	QH1-2	$1.9 < \rho \leq 2.8$	1.31	1.12
		$\rho > 2.8$	1.11	
10~15	QH1-3	$1.9 < \rho \leq 2.8$	1.44	0.93
		$\rho > 2.8$	0.91	
5~10	QH1-4	$1.9 < \rho \leq 2.8$	1.08	0.99
		$\rho > 2.8$	0.99	
0~5	QH1-5	$1.9 < \rho \leq 2.8$	2.89	1.19
		$\rho > 2.8$	1.13	

中密度组有机碳含量($ATOC_{中}$)在 1.08% ~ 2.89% 之间,平均 1.95%;高密度组有机碳含量($ATOC_{高}$)在 0.91% ~ 1.96% 之间,平均 1.22%。全样有机碳饱和和炔色谱分析结果见图 2,可知碳数分布范围为 $C_{12} \sim C_{35}$,具明显的奇偶优势,以 C_{17} 和 C_{29} 为主的双峰型分布为特征。

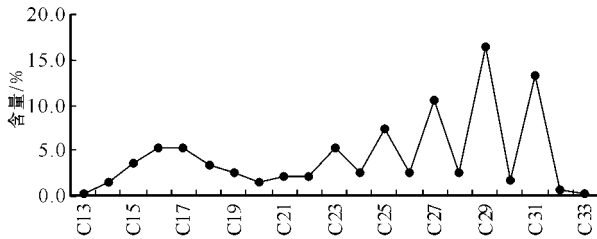


图 2 全样饱和和炔色谱分析 C_n 含量分布曲线

Fig. 2 Distribution of the C_n content in the saturated hydrocarbon of the sediments

2.1 矿物物相分析及密度分离

青海湖湖底现代沉积物矿物物相分析结果见表 2。采样区青海湖湖底现代沉积物矿物组成以粘土矿物为主,平均含量为 32.4%,其次为碳酸盐矿物(文石、方解石、白云石)和陆源碎屑矿物(石英、长石、角闪石),含量分别占 27.0% 和 21.0%。粘土矿物中伊利石占绝对优势,其次为绿泥石、埃洛石。

密度分离后低密度组分含量小于 0.2%,经 SEM 分析揭示主要由分散状的孢子体及少量矿物

表 2 青海湖湖底沉积物物相分析表 %
Table 2 Analytical results of minerals in the sediments from the bottom of the Qinghai Lake

样品名称	QH1	QH2	QH3	平均
石英	14.6	13.1	13.1	13.6
长石	11.4	11.2	11.1	11.2
方解石	9.7	8.1	8.8	8.9
泥炭	8.1	7.8	7.8	7.9
文石	15.5	16.3	16.1	16.0
白云石	2.5	1.9	2.1	2.2
角闪石	1.3	1.2	0.2	1.1
埃洛石	1.9	1.4	1.7	1.7
伊利石	20.9	22.3	22.8	22.0
绿泥石	9.0	8.9	8.4	8.8
总量	94.8	92.4	92.0	93.1

杂质组成。而对中、高密度组的 SEM 观察显示,中等密度组矿物成分以粘土矿物为主,伊利石和绿泥石为主要成分,含少量 I/S 混层,高密度组以石英、长石和方解石为主,粘土矿物很少(图 3)。XRD 矿物定量分析结果显示中密度组粘土矿物含量在 34.0% ~ 65.8% 之间,平均 50.9%(表 3)。

通常分离干酪根等分散状有机物所需重液的密度为 1.7~1.8 g/mL,而本文实验中使用的重液密度为 1.9 g/mL(关平等,1998)。由于重液的密度较大,可使分散状的有机物充分地悬浮起来而进入低密度组分中,所以基本上能使分散状的有机质进入低密度组中,而中、高密度组中有机质则主要为吸附

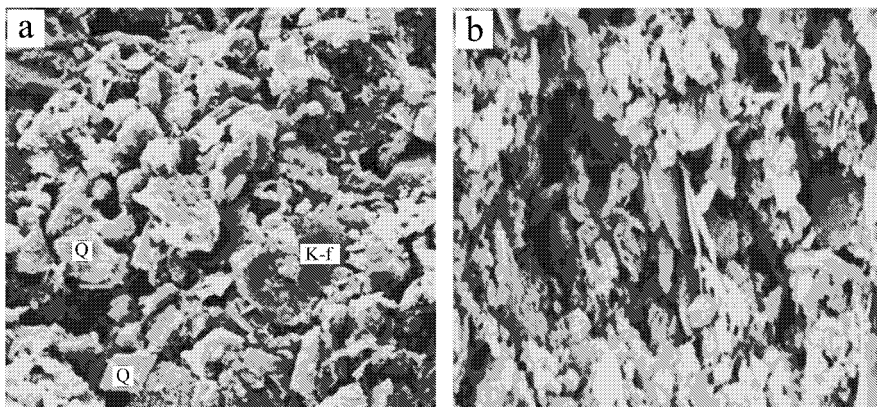


图 3 扫描电镜下不同密度组中的矿物形态

Fig. 3 SEM Photographs of minerals in various density ranges of the sediments

a—高密度组中石英(Q)和长石(K-f),5 000 X; b—中密度组中片状伊利石,5 000 X

a—quartz and feldspar from high-density separate, 5 000 X; b—illite from medium-density separate, 5 000 X

表 3 中等密度组中粘土矿物和有机碳含量表 %

Table 3 Clay mineral and organic carbon contents of the medium-density range

编号	粘土矿物	有机碳
QH1-1	63.4	2.83
QH1-2	34.0	1.31
QH1-3	45.2	1.44
QH1-4	46.1	1.08
QH1-5	65.8	2.89

态的有机质,也就是倍受关注的有机质-矿物集合体(Bock and Mayer, 2000; Furukawa, 2000; Pichevina, 2004)。

2.3 矿物表面积分析

青海湖富有机质沉积物不同密度组中 MSA 见表 4,可见中密度组沉积物 MSA 在 5.59~19.89 m^2/g 之间,平均 10.61 m^2/g (AMSA 中);高密度组 MSA 在 4.87~6.26 m^2/g ,平均 5.72 m^2/g (AMSA 高),中密度组 MSA 是高密度组的 1.2~4.2 倍。

表 4 不同密度组中矿物表面积的大小 m^2/g

Table 4 Mineral surface areas in different densities

编号	密度/ $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	矿物表面积
QH1-1	$1.9 < \rho \leq 2.8$	5.59
QH1-1	$\rho > 2.8$	4.87
QH1-1	$1.9 < \rho \leq 2.8$	19.89
QH1-2	$1.9 < \rho \leq 2.8$	6.65
QH1-2	$\rho > 2.8$	5.61
QH1-3	$1.9 < \rho \leq 2.8$	10.31
QH1-3	$\rho > 2.8$	6.26
QH1-5	$\rho > 2.8$	6.12

3 讨论

3.1 有机质来源

已有研究通常认为, C_{27} 、 C_{29} 、 C_{31} 高碳数为主的生物标志物代表陆源高等植物来源。高等植物来源的碳数奇偶优势特别明显,可高达 10,而菌藻类低等生物中低碳正烷烃的丰度较高(王铁冠, 1990; 张渠等, 2005)。由全样饱和烃色谱分析 C_n 含量分布曲线(图 1)可反映有机质主要来源是上层水中的浮游生物和由河流携带来的陆地高等植物。湖内丰富的藻类及周围的河流为沉积物中的有机质提供了物质来源(中国科学院兰州地质研究所等, 1979; 张枝焕等, 2000)。

3.2 有机碳含量与矿物表面积的关系

有机碳在样品不同密度组中分布有很大差异,表现为中密度组富含有机碳,高密度组中有机碳含量相对较低($\text{ATOC} = 1.25\%$, $\text{ATOC}_{\text{中}} = 1.95\%$, $\text{ATOC}_{\text{高}} = 1.22\%$),中密度组有机碳含量相对全样和高密度组分别增加了 56.0% 和 59.8%。XRD 矿物定量分析结果显示,全样粘土矿物含量平均为 32.4%,中等密度组粘土矿物含量平均为 50.9%,中密度组粘土矿物含量相对全样增加了 57.1%,这与中密度组有机碳较全样的增量 56.0% 具有良好的正相关性。矿物表面积分析表明,中密度组平均表面积为 10.61 m^2/g ,高密度组平均为 5.72 m^2/g ,中密度组表面积相对高密度组增加了 85.5%,这与中密度组中有机碳含量相对高密度组的增量 59.8% 也具有良好的正相关性。

通过中密度组与全沉积物样品和高密度组对比,有机质含量的增加与粘土矿物的富集以及由此造成的矿物表面积增加的正相关性,揭示了粘土矿物表面积大小是影响沉积物中有机质丰度的重要因素之一。Hedges 等人发现在河三角洲沉积物中,99% 有机质以可溶和微粒有机体两种方式存在于矿物颗粒表面,矿物表面积大小的改变会直接影响有机质在水体和沉积物中的分布(Hedges and Keil, 1999; Rupert *et al.*, 2001)。

3.3 有机质的粘土矿物表面吸附机理

近年来,越来越多的学者证实海相泥质烃源岩中有机质以纳米-分子级颗粒化学吸附的形式被吸附到矿物表面上进行保存(Keil and Hedges, 1993; Mayer 1994a; Hedges and Keil, 1995, 1999; Hedges and Oades, 1997; Thorarinn *et al.*, 2001; 于炳松等, 2004)。他们发现:①现代海洋大陆边缘富有机质沉积物矿物表面积与总有机质碳含量之间存在明显的相关关系(Mayer *et al.*, 1988; Keil *et al.*, 1994a; Mayer, 1994a, 1994b; Bergamashi *et al.*, 1997, 1998; Mayer, 1999; Bock and Mayer, 2000);②TEM 图像也显示了有机碳在矿物表面的不规则吸附包壳(Bishop *et al.*, 1992; Ransom *et al.*, 1997; Ransom *et al.*, 1998);③矿物粒度分离表明,沉积物中只有不到 10% 的有机质呈颗粒状与矿物共生,现代海岸沉积物中被矿物吸附而稳定存在了数百年的沉积有机质一旦被解吸,很快就被喜氧细菌所降解(Keil and Hedges, 1993; Bergamashi *et al.*, 1997),说明矿物表面对有机分子的吸附是海相黑色

页岩中有机质保存的主要因素。

青海湖浅层沉积物矿物中未发现蒙脱石(表2),排除了蒙脱石内表面吸附有机碳组分的可能性。伊利石等粘土矿物的表面积可达 $30 \text{ m}^2/\text{g}$,而碎屑矿物如石英、长石等的表面积仅为 $5 \text{ m}^2/\text{g}$ 左右,因此,沉积物样品的矿物表面积的大小主要取决于样品中粘土矿物的含量(Oladipo *et al.*, 2004),中密度组矿物以粘土矿物为主,从而具有较大的矿物表面积。同时,中密度组与全样和高密度组对比发现,其中有机质含量与粘土矿物的富集以及由此造成的矿物表面积的增加,揭示了粘土矿物的表面吸附应是青海湖底沉积物中有机质的主要赋存形式和保存机理。有机质被粘土矿物吸附可以阻止生物对有机质的降解,这在土壤中(Nelson *et al.*, 1994)和沉积物中(Keil *et al.*, 1994b; Salmon *et al.*, 2000)已被证实。蔡进功(2004)发现在干酪根TG和DTA曲线上 350°C 以前存在一个放热峰,是干酪根处理过程中粘土矿物层间有机质释放所致,证明了粘土矿物与有机质结合的能力较强,很好地起到了保护有机质的作用。

4 结论

通过上述对有机碳含量、矿物物相和矿物表面积的综合分析,可以得到以下几点结论:

(1)青海湖底沉积物中总有机碳含量较高,达 $0.93\% \sim 2.01\%$,通过生物标志物组合和湖泊现代环境条件分析发现,青海湖底沉积物中的有机质具有陆地高等植物和湖中菌藻类两部分来源的特征。

(2)青海湖浅层沉积物中粘土矿物含量高,且以伊利石为主。沉积物的密度分离显示,中密度组中粘土矿物含量明显增加,矿物表面积也相应增加,有机质也同时富集在中密度组中,这说明青海湖底沉积物中的有机质通过粘土矿物吸附,以有机质-粘土矿物集合体的形式存在。

(3)青海湖沉积物中有机碳的含量与粘土矿物的含量及矿物表面积之间具有很好的正相关性,说明粘土矿物的表面吸附是青海湖底沉积物中有机质的主要赋存形式。

Reference

Bergamashi B A, Tsamakidis E, Keil R A, *et al.* 1997. The effect of

grain size and surface area on organic matter, lignin and carbohydrate concentration, and molecular compositions in Peru Margin sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61: 1247~1260.

Bertrand P, Lallier Verges E and Boussafir M. 1993. Enhancement of accumulation and anoxic degradation of organic matter controlled by cyclic productivity: a model[J]. *Organic Geochemistry*, 22: 511~520.

Bishop A N, Kearsley A T and Patience R L. 1992. Analysis of sedimentary organic materials by scanning electron microscopy: The application of back scattered electron imagery and light element X-ray microanalysis[J]. *Organic Geochemistry*, 18: 431~446.

Bock M J and Mayer L M. 2000. Mesodensity organo-clay associations in a near-shore sediment[J]. *Marine Geology*, 163: 65~75.

Cai Jingong. 2004. Mudsediments and organo-clay mineral association in mudstone[M]. Beijing: Science Press, 120~122 (in Chinese).

Demaison G J and Moore G T. 1980. Anoxic environments and oil source bed genesis[J]. *AAPG Bulletin*, 64: 1179~1209.

Furukawa. 2000. Energy-filtering transmission electron microscopy (EFTEM) and electron energy-loss spectroscopy (EELS) investigation of clay-organic matter aggregates in aquatic sediments[J]. *Organic Geochemistry*, 31: 735~744.

Golchin A, Oades J, Skjemstad, J, *et al.* 1994. Soil structure and carbon cycling[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 32: 1043~1068.

Guan Ping, Xu Yongchang and Liu Wenhui. 1998. Different pathway in preservation of organic matter in hydrocarbon source rocks and its estimation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(14): 1556~1559 (in Chinese).

Hedges J I and Keil R G. 1995. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis[J]. *Marine Chemistry*, 49: 81~115.

Hedges J I and Keil R G. 1999. Organic geochemical perspective on estuarine processes: Sorption reactions and consequences[J]. *Marine Chemistry*, 65: 55~65.

Hedges J I and Oades J M. 1997. Comparative organic geochemistries of soils and marine sediment[J]. *Organic Geochemistry*, 27: 319~361.

Keil R G and Hedges J I. 1993. Sorption of organic matter to mineral surfaces and the preservation of organic material in coastal marine sediments[J]. *Chemical Geology*, 107: 385~388.

Keil R G, Montlucon D B, Prah F G, *et al.* 1994b. Sorptive preservation of labile organic matter in marine sediment[J]. *Nature*, 370: 549~552.

Keil R G, Tsamakidis E, Fuh C B, *et al.* 1994a. Mineralogical and textural controls on the organic composition of coastal marine sediments: hydrodynamic separation using SPLITT-fractionation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58: 879~893.

Kelts K. 1988. Environments of deposition of lacustrine petroleum source rocks: an introduction[A]. Fleet A J. *Lacustrine Petroleum Source Rocks*[C]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, The Geological Society, 3~26.

- Lanzhou Institute of Geology CAS, Institute of Hydrobiology CAS, Institute of Microbiology CAS, *et al.* 1979. Integration Report in Researching Qinghai Lake [M]. Beijing: Science Press, 24~64 (in Chinese).
- Mayer L M. 1994a. Relationships between mineral surfaces and organic carbon concentrations in soils and sediments [J]. *Chem. Geo.*, 114: 347~363.
- Mayer L M. 1994b. Relationship between mineral surfaces and organic carbon concentration in soils and sediments [J]. *Chemical Geology*, 114: 347~363.
- Mayer L M. 1999. Extent of coverage of mineral surfaces by organic matter in marine sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 207~215.
- Mayer L M, Macko S A and Cammen L. 1988. Provenance concentration and nature of sedimentary organic nitrogen in the Gulf of Maine [J]. *Marine Chemistry*, 25: 291~304.
- Miao Jianyu, Zhu Zongqi, Liu Wenrong, *et al.* 2004. Relationship between occurrence of organic matter and the primary migration of the hydrocarbon in argillaceous [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(11): 169~175 (in Chinese with English abstract).
- Nelson P N, Dector M C and Soulas G. 1994. Availability of organic carbon in soluble and particle-size fractions from a soil profile [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 26: 1549~1555.
- Oladipo E, Omotoso, Randy J, *et al.* 2004. High surface areas caused by smectitic interstratification of kaolinite and illite in Athabasca oil sands [J]. *Applied Clay Science*, 25: 37~47.
- Pichevina L, Philippe Bertrand P, Boussafirb M, *et al.* 2004. Organic matter accumulation and preservation controls in a deep sea modern environment: an example from Namibian slope sediments [J]. *Organic Geochemistry*, 35: 543~559.
- Ransom B, Bennett R H, Baerwald R, *et al.* 1997. TEM study of in situ organic matter on continental margins occurrence and the "monolayer" hypothesis [J]. *Marine Geology*, 138: 1~9.
- Ransom B, Dongseon K, Kastner M, *et al.* 1998. Organic matter preservation on continental slopes: Importance of mineralogy and surface area [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 1329~1345.
- Rupert, Adams and Bustin. 2001. The effects of surface area, grain size and mineralogy on organic matter sedimentation and preservation across the modern Squamish Delta, British Columbia: the potential role of sediment surface area in the formation of petroleum source rocks [J]. *International Journal of Coal Geology*, 46: 93~112.
- Salmon V, Derenne S and Lallier E. 2000. Protection of organic matter by mineral matrix in a Cenomanian black shale [J]. *Organic Geochemistry*, 31: 463~474.
- Sun Zhengcheng, Yang Fan, Zhang Zhihuan, *et al.* 1997. Condition of sedimentation and emergence of Petroleum in Cenozoic salified lake in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 338 (in Chinese).
- Thorarinn S and Richard G. 2001. Organic-mineral interactions in marine sediments studied using density fractionation and X-ray photoelectron spectroscopy [J]. *Organic Geochemistry*, 32: 1401~1415.
- Turchenek L W and Oades J M. 1976. Organo-mineral particles in soils [A]. Emerson W, Bond R and Dexter A. Modification of Soil Structure [C]. New York: John Wiley & Sons, 137~144.
- Wang Tieguan, Mei Bowen and Liu Houren. 1990. Geochemical research in studying biomake [M]. Wuhan: China University of Geoscience Press (in Chinese).
- Yu Bingsong, Dong Hailiang, Chen Jianqiang, *et al.* 2004. Occurrence of high mature organic matter in marine black shale source rocks of lower Cambrian from northern Tarim basin, China [J]. *Earth science - Journal of China university of geosciences*, 29(2): 198~202 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qu, Liang Shu and Zhang Zhirong. 2005. Gas chromatographic analysis of simulated biodegraded saturated hydrocarbon [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 27(1): 81~84 (in Chinese).
- Zhang Zhihuan, Yan Fan, Li Dongming, *et al.* 2000. The organic geochemistry research progress in Cenozoic salified lake in China [J]. *Advance in Earth Sciences*, 15(1): 65~69 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xingyuan and Zhang Youyu. 1990. Clay Minerals and Analysis of Clay Minerals [M]. Beijing: Ocean Press, 43~44 (in Chinese).

附中文参考文献

- 蔡进功. 2004. 泥质沉积物和泥岩中有机黏土复合体 [M]. 北京: 科学出版社, 120~122.
- 关平, 徐永昌, 刘文汇. 1998. 烃源岩有机质的不同赋存状态及定量估算 [J]. *科学通报*, 43(14): 1556~1559.
- 苗建宇, 祝总祺, 刘文荣, 等. 2004. 泥岩有机质的赋存状态与油气初次运移的关系 [J]. *沉积学报*, 22(11): 169~175.
- 孙镇城, 杨藩, 张枝焕, 等. 1997. 中国新生代咸化湖泊沉积环境与油气生成 [M]. 北京: 石油工业出版社, 338.
- 王铁冠, 梅博文, 刘厚仁. 1990. 生物标志物地球化学研究 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 于炳松, Dong H L, 陈建强, 等. 2004. 塔里木盆地地下寒武统底部高熟海相烃源岩中有机质的赋存状态 [J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 29(2): 198~202.
- 张渠, 梁舒, 张志荣, 等. 2005. 原油模拟生物降解的饱和烃色谱分析 [J]. *石油实验地质*, 27(1): 81~84.
- 张枝焕, 杨藩, 李东明, 等. 2000. 中国新生代咸化湖相有机地球化学研究进展 [J]. *地球科学进展*, 15(1): 65~69.
- 赵杏媛, 张有瑜. 1990. 粘土矿物与粘土矿物分析 [M]. 北京: 海洋出版社, 43~44.
- 中国科学院兰州地质研究所, 中国科学院水生生物研究所, 中国科学院微生物研究所, 等. 1979. 青海湖综合考察报告 [M]. 北京: 科学出版社, 24~64.