

doi:10.3799/dqkx.2014.017

松辽盆地嫩江组油页岩发育控制因素

贾建亮^{1,2,3}, 刘招君², Achim Bechtel³, Reinhard F. Sachsenhofer³,
孙平昌², Susanne A. I. Strobl³

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

2. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

3. 雷奥本大学应用地球科学和地球物理系, 奥地利雷奥本 A-8700

摘要: 松辽盆地嫩江组一段和二段发育的油页岩是极其优质烃源岩, 生物标志化合物参数指示油页岩母质生源主要来自于水生生物其繁盛受温湿气候和湖泊富营养化控制。岩石学、元素地球化学、生物标志化合物等参数表明, 高盐和缺氧条件下的稳定水体分层是嫩一段油页岩沉积时期有机质保存的主控因素, 而嫩二段油页岩沉积时期水体盐度分层明显减弱, 此时藻类个体增大和孤立藻数量增多条件下的高生物生产力有利于有机质富集。为揭示嫩江组不同沉积环境下油页岩发育的控制因素, 建立了嫩一段油页岩沉积时期保存条件控制和嫩二段油页岩沉积时期生物生产力控制的两种有机质富集模式, 这对含氧淡水大型陆相湖泊的有机质富集成因探讨具有重要借鉴意义。

关键词: 油页岩; 生物标志化合物; 生物生产力; 保存条件; 石油地质; 松辽盆地; 嫩江组。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2014)02-0174-13

收稿日期: 2013-07-22

Major Factors Controlling Formation of Oil Shale in Nenjiang Formation of Songliao Basin

Jia Jianliang^{1,2,3}, Liu Zhaojun², Achim Bechtel³, Reinhard F. Sachsenhofer³,
Sun Pingchang², Susanne A. I. Strobl³

1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

3. Department Applied Geosciences and Geophysics, Montanuniversität Leoben, Leoben A-8700, Austria

Abstract: Oil shales are present in the Nenjiang Formation of Songliao basin, representing excellent source rocks. Their biomarker compositions provide evidence for a major contribution of aquatic organism. Phytoplankton blooms were promoted by warm-humid climate, and lake eutrophication. Based on the parameters from petrology, element geochemistry and biomarker, a stratified water column with high salinity and anoxic bottom water conditions contributes to OM (organic matter) preservation in the lower oil shale layer. In contrast, under decreased salinity stratified water, high bioproduction in combination with OM preservation favoured by enhanced algae sizes and telalginite concentrations are suggested as the OM enrichment mechanisms in the upper oil shale layer. In this study, a model of predominant preservation within the lower oil shale layer and a model of dominant productivity within the upper oil shale layer are established. This result can be used as an important indicator for probing into the genesis of OM enrichment in the large continental lake with partial oxygenation and fresh water.

Key words: oil shale; biomarker composition; bioproduction; preservation; petroleum geology; Songliao basin; Nenjiang Formation.

沉积物中有机质富集需要增强湖泊自身生物生产力、降低有机质分解且减弱陆源碎屑物质稀释

(Bohacs *et al.*, 2000).研究表明, 有机质富集受诸多因素影响, 包括生物生产力、大陆风化作用、沉积速

率、粘土矿物、氧化还原条件、海平面变化及沉积环境等(Mayer, 1994; Kennedy *et al.*, 2002; 陈践发等, 2006; Zonneveld *et al.*, 2010; Bechtel *et al.*, 2012; 李红敬等, 2012).一般而言,有机质输入主要由初级生产力控制,而保存条件与氧化还原条件关系密切(Katz, 2005; Tyson, 2005).Tyson and Pearson(1991)认为有机质富集的主控因素是沉积或底层水的缺氧条件,而 Pederson and Calvert(1990)、Goncalves(2002)和 Harris *et al.*(2004)认为其主控因素是形成有机质的生物生产力.Carroll and Bohacs(1999, 2001)强调构造和气候控制下的湖泊充填类型控制烃源岩发育.朱光有和金强(2002)以及颜佳新和刘新宇(2007)揭示高生物生产率和缺氧条件是湖盆或海洋有机质沉积并保存的主控因素.Kennedy *et al.*(2002)和 Zonneveld *et al.*(2010)强调大陆风化和粘土矿物的分布模式与有机质的保存有更加紧密联系.

学者们对松辽盆地富有机质泥页岩沉积的青一段和嫩一段的古环境条件已做过大量研究(Feng *et al.*, 2009, 2011; Wang *et al.*, 2011; Bechtel *et al.*, 2012),而对嫩二段富有机质沉积的精细研究较少(Wang *et al.*, 2011; Song *et al.*, 2012);有些学者认为嫩二段暗色泥岩是在缺氧环境下形成的(王东坡等, 1995),认识到此时油页岩沉积时巨大湖泊水体中明显增多的氧含量和降低的盐度(Bechtel *et al.*, 2012),但对其有机质富集成因尚不明确.因此,本文将根据连续钻井岩心样品的地球化学指标,明确嫩一段和嫩二段油页岩沉积时期的水介质条件,着重探讨油页岩发育时有机质输入、保存及稀释影响因素间的差异,从而揭示嫩江组不同沉积环境下影响油页岩有机质富集的控制因素.嫩二段油页岩沉积时期含氧淡水大型陆相湖泊的有机质富集成因探讨,是本项研究的创新性认识,有助于打破松辽盆地嫩江组暗色泥岩沉积于缺氧的分层水体的传统认识.

1 地质背景及样品选择

松辽盆地是中国典型大型坳陷晚白垩纪含油气及油页岩盆地,覆盖面积为 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$ (高瑞祺和蔡希源, 1997).松辽盆地的形成和发展主要分为4个构造演化阶段,坳陷期地层划分成6个一级构造单元(Feng *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2013).松辽盆地蕴藏丰富的油页岩资源,主要沉积于裂后热沉降

阶段的青山口组和嫩江组时期(贾建亮等, 2011; Jia *et al.*, 2012).嫩江组是松辽盆地发育优质烃源岩的重要时期,主要形成于嫩一段和嫩二段沉积时期,此时古构造、古气候及古环境演化对油页岩的形成起到重要作用(贾建亮, 2012).

嫩一段沉积时期(K_2n_1),湖盆继承了姚家组基准面快速上升的发育趋势,沉降速度加快,湖水迅速扩张并近乎覆盖全盆地(冯志强等, 2012);盆地中部发育半深湖—深湖相沉积,覆盖面积 $7.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ (Feng *et al.*, 2010),在西部、南部及东部三面湖泊范围已超出现今盆地边界;此时,沉积的最大特点是北部水系的三角洲前缘到深湖区发育大型重力流水道(冯志强等, 2006)(图1).嫩二段沉积早期($K_2n_2^1$),湖盆面积进一步扩大,现今盆地范围内几乎全部为半深湖—深湖区(禚喜准等, 2009),覆盖面积高达 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ (Feng *et al.*, 2010)(图1),仅在北部发育小范围的滨浅湖和三角洲沉积;此时,发生了全盆地规模最大的一次湖侵事件,沉积大面积灰黑色泥页岩,特别在底部形成了全盆分布的优质油页岩,可作为全区地层对比的标志层.嫩二段沉积晚期($K_2n_2^2$),盆地东部开始抬升,沉积范围自东向西逐渐减小,物源方向发生了重大改变,由原来的南北向转为东西向,使盆地东部发育大规模三角洲沉积,沉积物快速向湖区推进,使湖泊范围萎缩,不足最大面积时一半,主要分布在盆地西部(张顺等, 2011)(图1).

嫩江组测试样品取自中央坳陷区的全井段连续取芯井Zk3389,井深721.9 m.钻孔从下到上依次钻遇姚家组顶部地层、嫩江组及之上地层,油页岩主要发育在嫩一段下部和嫩二段底部,厚度分别为7.6 m和7.9 m(图1).油页岩主要为灰黑色(图1a)、灰褐色(图1b)和黑色(图1c),块状层理和平行层理发育.本文从目的层段选择51个连续的泥岩或油页岩样品(图1),进行莱科和岩石热解分析,并选择对应样品进行生物标志化合物、元素、同位素、有机显微组分、X-衍射等分析.

2 油页岩地球化学特征

嫩二段油页岩总有机碳(TOC)含量为5.3%~11.9%,平均值7.9%,高于嫩一段油页岩的TOC含量(平均值为6.4%;最高为8.8%)(表1);然而,嫩江组油页岩段的TOC含量远高于所有泥岩段(0.7%~3.9%,平均值为2.1%)(表1),表明嫩江组油页岩沉积时期有机质富集.嫩一段和嫩二段油页

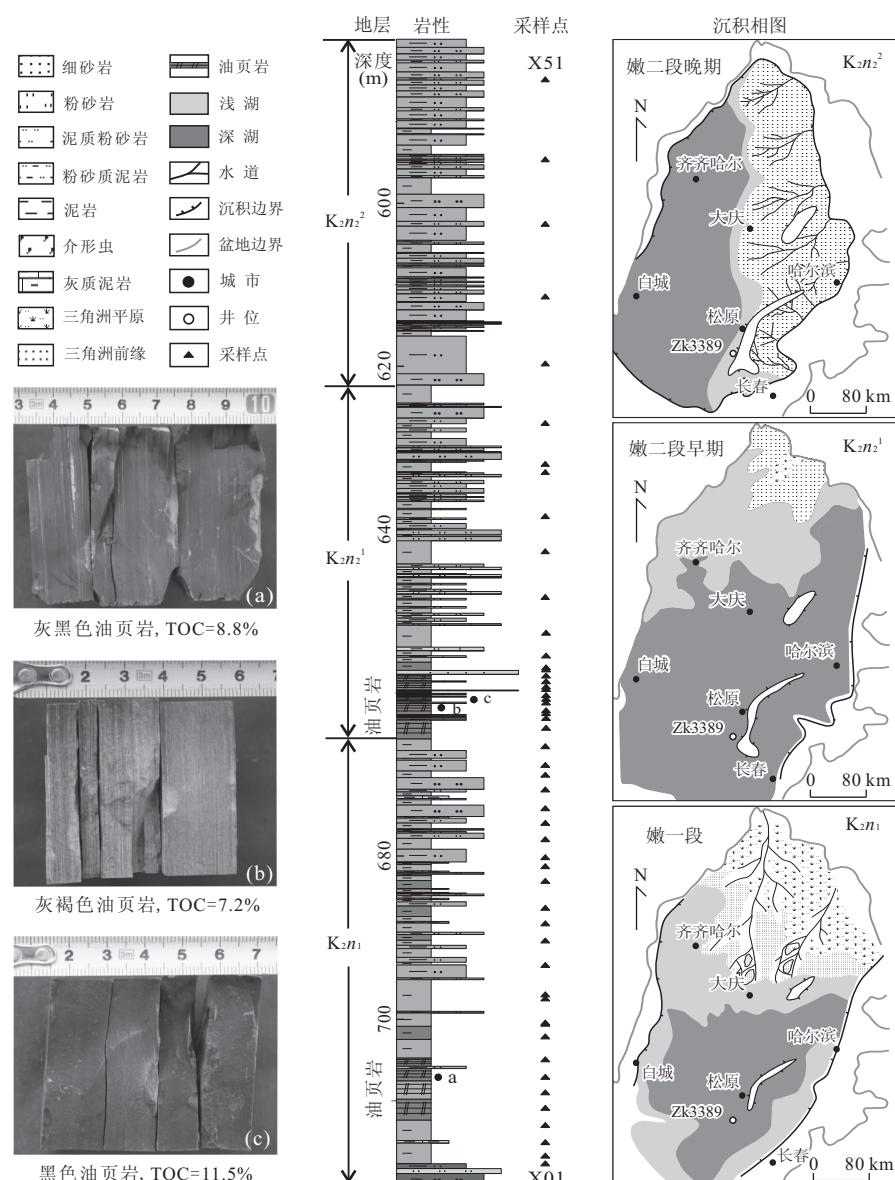


图1 嫩江组Zk3389井岩性剖面及沉积相分布

Fig.1 Lithologic profile of Well Zk3389 and areal distribution of sedimentary facies from the Nenjiang Formation

表1 嫩江组体积和元素地球化学指标

Table 1 Bulk geochemical and element geochemical parameters in the Nenjiang Formation

层位	岩性	响应值	TOC(%)	T _{max} (℃)	HI (mg/g TOC)	P(%)	Ti(%)	Sr/Ba	V/Ni	Sr/Cu	$\delta^{18}\text{O}$ (10 ⁻³ , PDB)
嫩二 晚期	泥岩段	均值/n=5	1.9	435	206	0.09	0.31	0.41	3.5	5.4	-11.0
		范围	1.7~2.5	434~439	100~299	0.08~0.09	0.27~0.35	0.40~0.42	3.2~3.8	5.4~5.5	-11.3~-10.8
嫩二 早期	泥岩段	均值/n=8	2.7	437	445	0.04	0.22	0.41	2.8	3.0	-12.6
		范围	2.0~3.9	427~441	282~556	0.04~0.04	0.16~0.27	0.38~0.44	1.6~3.4	2.8~3.0	/
嫩一 时期	油页岩段	均值/n=13	7.9	434	682	0.16	0.24	0.47	3.2	2.4	-12.5
		范围	5.3~11.9	427~437	614~736	0.05~0.39	0.18~0.29	0.38~0.62	2.1~3.9	1.7~3.6	-12.9~-12.0
嫩一 时期	泥岩段	均值/n=16	1.8	435	414	0.07	0.27	0.97	4.3	9.6	-7.7
		范围	0.7~3.4	432~440	109~632	0.04~0.12	0.25~0.29	0.68~1.12	2.4~5.2	6.2~13.6	-10.4~-5.6
嫩一 时期	油页岩段	均值/n=6	6.4	435	696	0.06	0.27	0.77	4.5	4.4	-9.3
		范围	4.7~8.8	431~438	666~737	0.04~0.09	0.26~0.27	0.64~0.90	4.4~4.7	2.8~6.4	/

注:体积和同位素参数测试于奥地利 Montanuniversität Leoben 有机地球化学实验室;元素测试于核工业北京地质研究院分析测试研究中心。

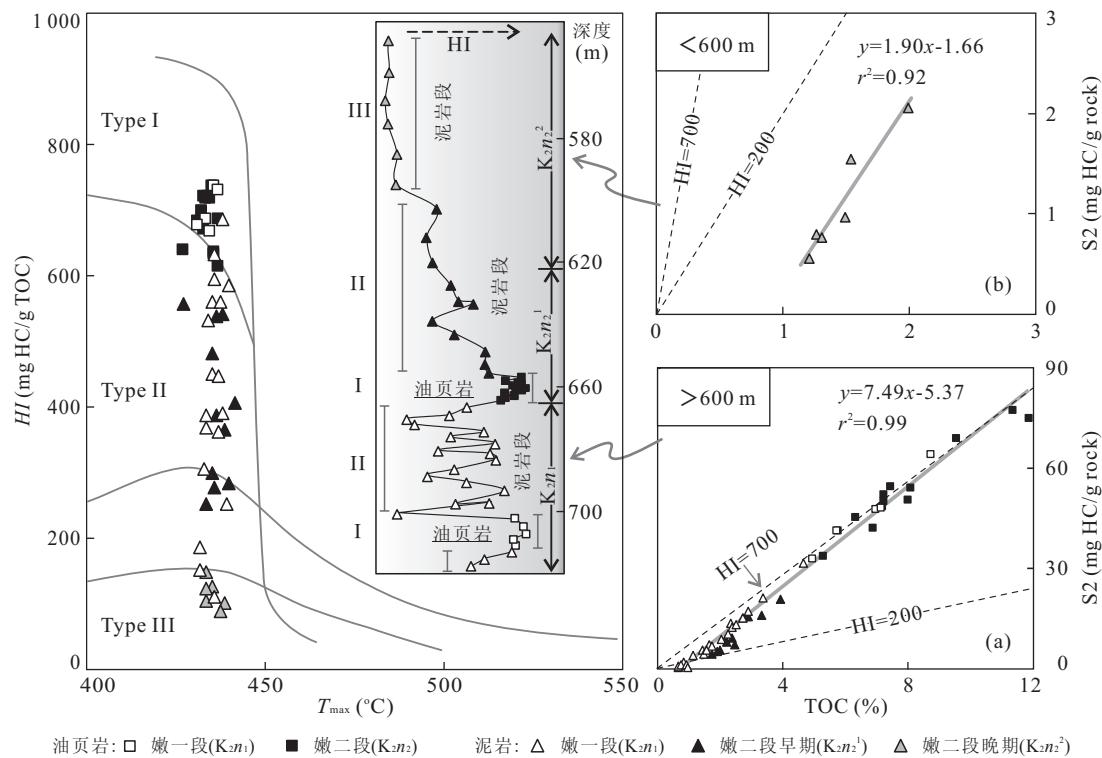


图2 嫩江组有机质类型交会

Fig.2 Cross plot of kerogen types in the Nenjiang Formation

表2 嫩江组生物标志化合物指标

Table 2 Biomarker parameters from the Nenjiang formation

层位	岩性	响应值	CPI	Pr/Ph	C_{27}/C_{29}	4-甲基 甾烷	藿烷 含量	$22S/(22S+22R)$ 升藿烷	伽马蜡 烷指数	MTTC 比值	β -胡萝卜 卜烷	芳基类异 戊二烯	甾类/ 藿类
嫩二 早期	泥岩	均值/n=3	2.7	1.4	0.60	555	257	0.40	0.12	0.75	7	0.3	2.8
	段	范围	2.4~3.1	1.2~1.5	(0.4~0.8)	396~835	201~358	0.38~0.41	0.09~0.15	0.72~0.76	5~10	0.2~0.4	2.6~3.2
	油页 岩段	均值/n=7	2.7	1.2	0.71	797	534	0.35	0.10	0.80	13	0.8	2.6
	岩段	范围	2.2~3.1	0.9~1.4	(0.6~0.9)	570~1 017	249~851	0.34~0.36	0.07~0.14	0.69~0.88	3~26	0.5~1.5	2.0~3.3
嫩一 时期	泥岩	均值/n=6	1.4	0.4	0.70	579	516	0.40	0.33	0.51	55	1.5	2.3
	段	范围	1.2~1.6	0.3~0.5	(0.6~0.8)	217~1 016	250~747	0.37~0.44	0.19~0.52	0.37~0.63	27~88	0.8~2.4	1.4~3.3
	油页 岩段	均值/n=3	1.4	0.3	0.66	764	628	0.38	0.25	0.49	64	1.9	1.8
	岩段	范围	1.3~1.6	0.3~0.4	(0.6~0.8)	301~1 004	372~807	0.37~0.39	0.22~0.29	0.39~0.58	51~78	1.1~2.0	1.6~2.0

注:样品数据测试于奥地利 Montanuniversität Leoben 有机地球化学实验室;4-甲基甾烷、藿烷含量、 β -胡萝卜烷、芳基类异戊二烯,单位为 $\mu\text{g/g TOC}$ 。

岩均具有很高的氢指数(HI)(614~737 mg HC/g TOC),平均值为 688 mg HC/g TOC,远高于泥岩的 377 mg HC/g TOC(表 1),反映了油页岩的高热降解烃能力。嫩一段和嫩二段油页岩的 T_{\max} 值为 427 °C ~ 437 °C,多数低于 434 °C,而泥岩段约 436 °C(表 1),表明钻井位置嫩江组沉积物整体上表现出较低有机质成熟度,生物标志化合物参数 22S/(22S+22R) 升藿烷(0.34~0.44<0.6;表 2)(Peters et al., 2005; Jia et al., 2013)也进一步验证了这一结果。

HI 和 T_{\max} 交会图(图 2)指示油页岩段主要为 I 型干酪根,表明油页岩沉积时期水生生物对有机质初级生产力起到决定作用。600 m 之下泥岩段(主体为嫩一段和嫩二段早期)的氢指数(HI)呈现较大的分布范围(109~632 HC/g TOC)(表 1,图 2),S2 和 TOC 交会图(Langford and Blanc-Valleron, 1990)显示这些泥岩“真正的 HI 值”(>700 HC/g TOC)与油页岩相似(斜率 = 7.5; $r^2 = 0.99$)(图 2a),泥岩的 HI 值剧烈波动主要受加强的碎屑物质影响,故这些泥岩实际应该表现出水生生物生源的 I 型干酪

根优势,600 m 之上泥岩段(主体为嫩二段晚期)的氢指数明显降低($<150 \text{ mg HC/g TOC}$)(表 1,图 2),而 S2 和 TOC 交会图显示真正的 HI 值 $<200 \text{ HC/g TOC}$ (斜率 = 1.9; $r^2 = 0.92$)(图 2b),表明此时为陆源高等植物(III型干酪根)的母质生源占优势。因此,湖相沉积中“纯净”的具有 I 型干酪根的油页岩表现出高有机质丰度特征,表征为碎屑影响的 I 型干酪根的泥岩有机质丰度明显降低,而具有强烈陆源碎屑稀释作用下的 III 干酪根的泥岩有机质丰度整体很低。

3 有机母质生源及成因探讨

有机母质生源组合及其发育程度对湖泊初级生物生产力起到决定性作用,其组合特征及发育程度往往受湖泊自身演化或水介质条件影响。

3.1 有机母质生源的生物标志化合物证据

生物标志化合物参数是指示有机母质生源的良好指标。规则甾烷 C_{27} – C_{29} 间的含量关系可以用来判断有机质的原始母质类型,高含量的规则甾烷 C_{27} 表明有机质中藻类占优势,而高含量的规则甾烷 C_{29} 指示较高的陆源高等植物输入(Volkman, 1986; Bechtel *et al.*, 2007)。然而,近来生物标志化合物大量研究结果表明微藻类含有高比例的 25-乙基胆甾醇(Volkman *et al.*, 1999);一般 C_{30} 甲藻甾醇结构的甲基甾类化合物被认为是沟鞭藻的标志物(Robinson *et al.*, 1984),而其他 C_{30} 4-甲基甾类化合物往往与海相或湖相前驱物有关(Volkman *et al.*, 1990; Peters *et al.*, 2005),主要来源于沟鞭藻生物体中的 4α -甲基甾醇,故 4-甲基甾烷能为有机质富集提供母源藻类物质。此外,饱和烃—芳烃的甾类与藿类化合

物相对含量可以反映藻类和高等植物—细菌对源岩贡献,高的甾类/藿类化合物比值指示有机质主要来源于浮游生物和底栖藻类生物(Moldowan *et al.*, 1985),其低比值反映陆源植物或微生物改造过的有机质(Tissot and Welte, 1984)。

嫩一段油页岩中检测出较低的 C_{27}/C_{29} 甾烷比值(0.66),而嫩二段油页岩中略高(0.71)(表 2),指示水生生物生源优势不明显;然而,嫩江组油页岩段的高甾类/藿类化合物比值(1.6~3.3)反映沉积时期水生生物生源的显著优势,且嫩二段油页岩(2.6)相比嫩一段油页岩(1.8)优势更加明显(表 2)。分析表明,对于 C_{27}/C_{29} 甾烷与甾类/藿类比值反映母质生源的差异,很可能是受 4-甲基甾烷含量影响。嫩江组沉积物中检测出大量的 4-甲基甾烷(图 3a),油页岩段的含量($780 \mu\text{g/g TOC}$)要远高于泥岩段($567 \mu\text{g/g TOC}$)(表 2),表明油页岩沉积时期具有高的初级生物生产力,而泥岩段因碎屑物质影响而使初级生产力大大降低;嫩二段油页岩中 4-甲基甾烷含量($797 \mu\text{g/g TOC}$)相比嫩一段油页岩($764 \mu\text{g/g TOC}$)更具优势(表 2),从而使其具有更高的甾类/藿类化合物比值和初级生物生产力。

综上所述,嫩江组油页岩沉积时有机母质来源主要为水生生物,与 HI 和 T_{\max} 交会图(图 2)分析结果吻合。嫩二段油页岩比嫩一段油页岩沉积时期的水生生物生源更占优势,此时湖泊水体中具有更高的初级生物生产力。

3.2 有机母质生源的影响因素探讨

古气候被认为是影响有机质生源及发育的主控因素,稳定氧同位素和 Sr/Cu 比值是恢复古气候的良好指标(Stuiver, 1970; Lerman and Baccini, 1978)。一般而言, $\delta^{18}\text{O}$ 值随着温度的升高而减小,

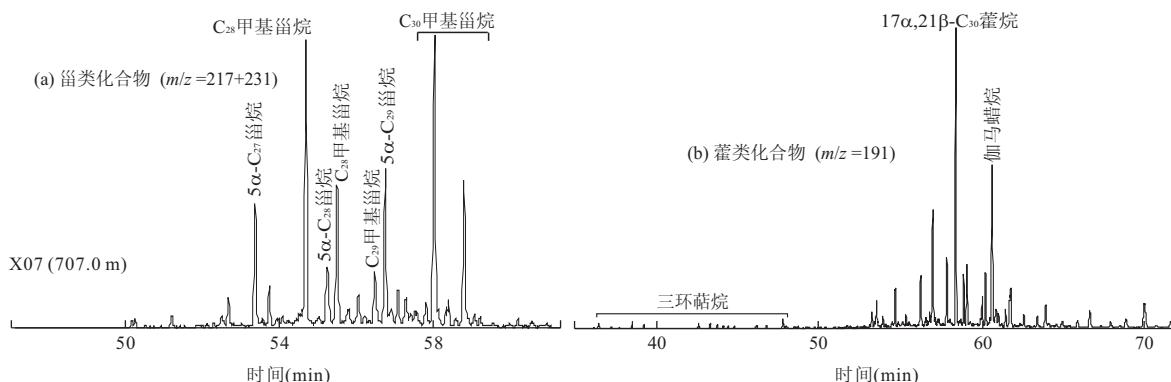


图 3 嫩江组油页岩饱和烃质量色谱图(GC-MS)

Fig.3 Mass chromatograms of oil shale in the Nenjiang Formation

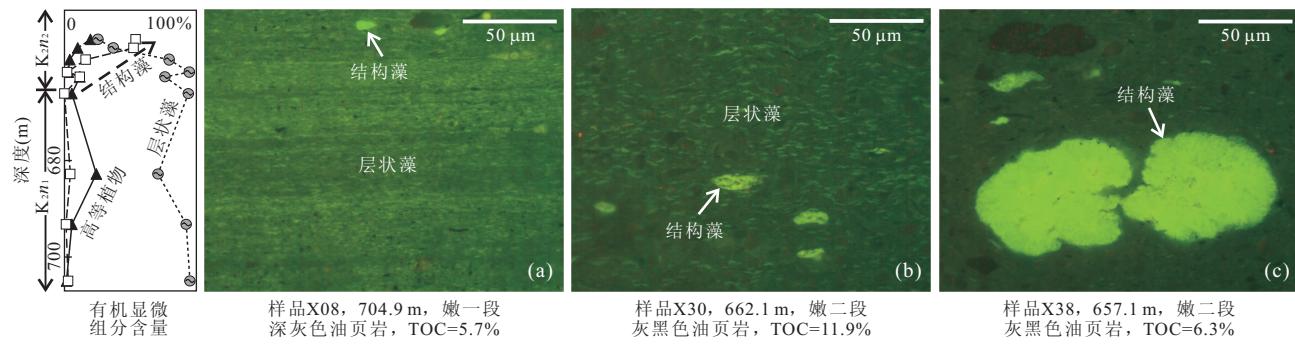


图4 嫩江组油页岩反射荧光显微照片

Fig.4 Maceral photographs of oil shales from the Nenjiang Formation

有机显微组分主要包括代表水生低等植物的层状藻和结构藻及代表陆源高等植物的镜质体、孢子体和惰质体

Sr/Cu 比值随着湿度的加强而减小。通过 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 Sr/Cu 比值分析(表1),嫩一段油页岩(-9.3×10^{-3} ;4.4)沉积于温暖湿润气候条件,而嫩一段上部泥岩沉积时期(-7.7×10^{-3} ;9.6)气候逐渐变的干燥;嫩二油页岩沉积时期(-12.5×10^{-3} ;2.4)气候更加温暖湿润,而嫩二晚期泥岩段(-11.0×10^{-3} ;5.4)指示气候逐渐变得干冷。温暖湿润的气候有利于陆源营养物质的注入并促进浮游生物的繁盛(Talbot,1988),故嫩二段油页岩沉积时期有机质高度富集可能与极其温暖湿润的气候有关。

沉积环境也将影响有机质生源及发育程度,嫩一段和嫩二段油页岩沉积时期,较大的湖泊范围限制了陆源高等植物的输入且促进了湖泊水生生物的积聚。嫩二段沉积早期,油页岩沉积时期的藻类勃发促使有机母质生源中水生生物的绝对优势,而泥岩段水生生物发育逐渐减弱(表2);嫩二段沉积晚期,高等植物对有机母质生源起到主要贡献(图2)。此外,湖面上升有利于水生生物的繁盛,主要归因于湖侵作用带来的大量营养物质。磷(P)元素是指示湖泊富营养化程度的良好指标(Carpenter, 2008; Schindler *et al.*, 2008),嫩二段油页岩沉积时期高的P元素含量(0.16%;表1)和甾类/霍类化合物比值(2.6;表2)指示此时湖泊高度富营养化,导致藻数量的增多及藻类型的变化(图4)。因此,极其温暖湿润气候控制下的湖泊富营养化,是嫩二段油页岩沉积时期水生生物繁盛的重要因素。

通过光片鉴定的有机岩石学方法获得的结构藻/层状藻含量比值变化可以指示藻类—微生物作用的强弱程度,层状藻主要来源于浮游生物和底栖生物(如绿藻、蓝绿菌等),而结构藻包含所有孤立藻(如含硫树脂、葡萄藻等)(Bechtel *et al.*, 2012)。嫩二段油页岩中层状藻含量急剧减少而结构藻含量对应

增加(图4),表明湖泊环境变化促使结构藻逐渐繁盛。因此,嫩二段油页岩中结构藻/层状藻含量比值发生变化(图4),表明此时湖泊增强的孤立藻贡献(如葡萄藻)和减弱的微生物作用,CPI值的变化也验证了这一观点。相比嫩一段沉积物的较低CPI值(1.2~1.6;表2),嫩二段早期沉积物检测出明显增大的CPI值(2.2~3.1;表2),指示维管植物或葡萄藻(A种)对有机质输入贡献的明显加强。因此,不同有机母质生源对不同沉积环境的依赖程度存在较大差异。

4 有机质保存的影响因素探讨

沉积物中有机质保存是一个复杂的物理和化学过程,诸多因素已被证实对有机质埋藏与保存起控制作用(Zonneveld *et al.*, 2010)。

4.1 水介质条件

湖泊环境中,高盐和缺氧水介质条件下的稳定水体分层,是形成湖相优质烃源岩的重要影响因素(Hao *et al.*, 2011)。气候变化导致的湖平面升降,对湖泊水体盐度和氧化还原条件起到重要作用。目前,元素比值和生物标志化合物特征参数已被广泛的应用于水体盐度和氧化还原条件的重建。

Sr 与 Ba 元素因其不同沉积环境中地球化学行为的差异而被广泛应用于古盐度指示(刘宝珺, 1980), Sr/Ba 比值越高,盐度越高,反之越低(邓宏文和钱凯, 1993),嫩一段沉积物中 Sr/Ba 比值(0.87)明显高于嫩二段(0.41)(表1)。大量证据表明,伽马蜡烷可以指示沉积时水体的盐度分层(Sininghe Damsté *et al.*, 1995; Grice *et al.*, 1998),高盐环境中水体常为密度分层,故伽马蜡烷常与高盐环境伴生(张立平等, 1999);嫩一段沉积物中检测出

高丰度的伽马蜡烷(图 3b),而嫩二段含量明显降低(表 2).尽管目前对甲基化烷基色瞒系列(MTTCs)的生物来源不明确,但它已被广泛用于古盐度重建(Sinninghe Damsté *et al.*, 1993; Barakat and Rullkötter, 1997; Peters *et al.*, 2005);一般认为非盐湖环境富含三—甲基化烷基色瞒,而咸水环境为单一和双—甲基化烷基色瞒优势,故可以利用三—甲基化烷基色瞒与总甲基化烷基色瞒的比值,即 MTTC 比值(Sinninghe Damsté *et al.*, 1987)来反映水体盐度,MTTC 比值越高,盐度越低,反之盐度越高,嫩二段沉积物(0.78)相比嫩一段(0.50)检测出更高的 MTTC 比值(表 2),与 Wang *et al.*(2011)检测结果吻合.因此,根据不同时期 Sr/Ba 比值、伽马蜡烷指数和 MTTC 比值的指示可知(表 1 和表 2),嫩一段油页岩沉积时期呈现较高盐度(分层),上部泥岩沉积时期因气候干燥使盐度升高,嫩二段油页岩沉积时期因极其温湿气候下大量淡水注入(湖侵作用)使湖泊盐度明显降低,嫩二段晚期因构造主导的湖盆快速萎缩且三角洲发育对湖泊盐度进一步稀释.因此,嫩一段油页岩沉积时期指示了一种盐度分层的水体条件,而嫩二段油页岩沉积时期的盐度分层明显减弱.

V 和 Ni 元素的相对含量受沉积环境控制(Lewan, 1984),高的 V/Ni 可以指示缺氧还原的水体环境,而低的 V/Ni 一般指示还原环境(Peters and Moldowan, 1993),嫩一段沉积物中 V/Ni(4.4)明显高于嫩二段(3.2)(表 1).一般而言,Pr/Ph>3.0 指示氧化的沉积环境,Pr/Ph<1.0 反映早期成岩过程中的强还原条件,而 Pr/Ph 在 1.0~3.0 间可以指示一种贫氧的沉积环境(Didyk *et al.*, 1978),嫩二段沉积物(1.3)相比嫩一段(0.35)明显具有更高 Pr/Ph(表 2),Wang *et al.*(2011)检测结果也验证了这一点. β -胡萝卜素是高度不饱和的烯烃,需要在强还原环境中才能转化成 β -胡萝卜烷,故 β -胡萝卜烷主要存在于缺氧、含盐湖沉积中的藻类有机质,可以指示强还原条件导致的盐度分层(Peters *et al.*, 2005),嫩一段沉积物($60 \mu\text{g/g}$ TOC)相比嫩二段($10 \mu\text{g/g}$ TOC)检测出明显优势的 β -胡萝卜烷含量(表 2).因此,根据不同时期 V/Ni、Pr/Ph 和 β -胡萝卜烷含量的指示可知(表 1; 表 2),嫩一段油页岩沉积时期指示一种缺氧的水体环境,上部泥岩沉积时期水体还原性略降低;嫩二段油页岩沉积时期因大量淡水注入使湖泊氧含量明显增多,嫩二段晚期因湖盆萎缩及三角洲泛滥使水体富氧.

此外,Pr/Ph 和 MTTC 比值交会图上(图 5; Schwark *et al.*, 1998),嫩一段沉积物整体上指示中等盐度的水体条件,而嫩二段沉积物反映一种微咸水—淡水条件.因此,嫩一段油页岩沉积于盐度分层且缺氧的水体条件,而嫩二段油页岩沉积时水体盐度降低且氧含量增多.然而,由于嫩二段时期水体分层明显减弱,使湖泊透光带发生明显下移,为水生生物的繁盛提供更广阔的空间,从而引起藻类型发生剧烈变化(层状藻数量明显减少、结构藻优势加强; 图 4),表明结构藻更加适应当时的水介质条件而大量繁盛,这将有利于增强湖泊初级生物生产力.

4.2 物理影响因素

有机体的物理特征(如结构、大小、重量等)可能对有机体自身的暴露氧化时间或其它分解作用有直接影响,对有机质的快速埋藏和保存起到至关重要作用(Zonneveld *et al.*, 2010).较小有机体在湖泊水体中会有较长的滞留时间,从而使其遭受相对增强的生物和化学分解作用;较大有机体的较快下沉速率,将大大降低停留在水体中的分解作用(Shanks *et al.*, 1980; 张永刚等, 2007).有机显微组分分析表明,不管是结构藻还是层状藻,从嫩一段沉积早期到嫩二段沉积早期,藻类个体整体呈现出增大的趋势(图 4a~4c),嫩二段油页岩的结构藻个体最大高达 $60 \mu\text{m}$ (图 4c);此外,嫩二段沉积物中结构藻含量明显增多,表明孤立藻对有机质的贡献增强.因此,嫩二段油页岩沉积时期藻类个体和数量加强的物理特性,将有助于有机质的保存效率.

大量研究表明,粘土矿物对有机质的吸附作用将对有机质的埋藏和保存起到决定性作用,粘土是有机质富集的重要载体(Mayer, 1994; Kennedy *et al.*, 2002; Arnarson and Keil, 2005; Zonneveld *et al.*, 2010; 蔡进功等, 2012).Mayer(1994)认为绝大多数有机质以单分子层形式覆盖于矿物表面或填充在矿物颗粒间的微孔隙中,从而粘土矿物的吸附作用是有机质保存的重要方式(Hedges and Keil, 1995).嫩江组有机碳与粘土矿物含量密切相关(图 6),粘土含量越高,则有机碳含量越高,表明粘土矿物可能影响有机质的物理保存(Mayer *et al.*, 2004).同时,有机碳与粘土矿物含量的这一正相关性,也可能指示增多的营养物质供给导致生物生产力提高.

此外,微生物活动将促进有机质的生物降解,而加强其氧化分解作用.芳基类戊二烯被认为来自绿硫菌体内的芳构化类胡萝卜素(Summons and

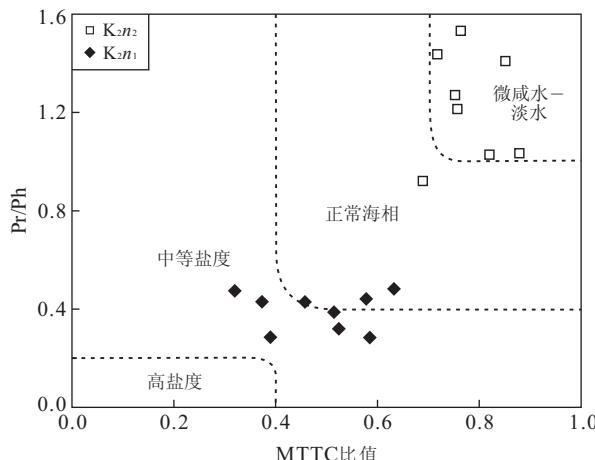


图5 嫩江组MTTC比值与Pr/Ph交会(底图据Schwark *et al.*, 1998)

Fig.5 Plot of MTTC ratio vs. Pr/Ph for the Nenjiang Formation

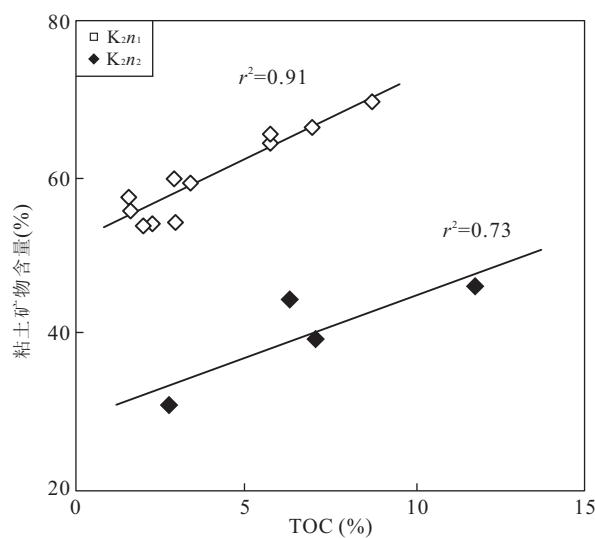


图6 嫩江组TOC与粘土矿物含量交会
Fig.6 Plot of TOC and clay mineral contents from the Nenjiang Formation

Powell, 1987; 李振西等, 1998), 萘烷的生物前驱物很可能是细菌化萘烷多羟基化合物, 故高含量的萘烷和芳基类异戊二烯常指示强烈的微生物活动(Bechtel *et al.*, 2007, 2012). 嫩一段沉积物中检测出相对较高含量的萘烷(572 $\mu\text{g/g}$ TOC)和芳基类异戊二烯(1.7 $\mu\text{g/g}$ TOC)(表2), 而嫩二段沉积物中含量较低(分别为395和0.55 $\mu\text{g/g}$ TOC)(表2), 表明嫩二段沉积时期具有相对较弱的微生物活动, 这将减弱有机质的生物降解作用而加强其保存。

因此, 嫩二段油页岩沉积时期藻类个体的增大和孤立藻数量的增多, 将提高有机质在水体中的下

沉速率, 加之较弱的微生物降解作用可以弥补较差的水介质条件(弱盐度分层且贫氧)对有机质分解, 将有利于加强此时有机质的有效保存; 嫩一段油页岩沉积时期, 高盐和缺氧条件下的稳定水体分层是此时有机质保存的主控因素。

5 有机质稀释的影响因素探讨

源区陆源碎屑物质的输入程度对于有机质富集起到重要作用, 主要归因于陆源碎屑里含有湖泊生物繁盛的营养物质, 但过多的陆源碎屑物质输入会对有机质的保存起到强烈稀释作用, 而适量陆源碎屑物质输入可以保证在对有机质稀释作用不是很强的前提下还带来陆源营养物质促进湖泊水生生物发育. 通常, 可以利用元素的迁移和沉积分异原理进行陆源碎屑物质输入程度的定性研究. 外源元素钛(Ti)主要集中在粘土矿物中, 需通过元素搬运才能入湖, 从而能明确的指示陆源碎屑物质的输入程度(邓宏文和钱凯, 1993). 一般而言, Ti元素含量越高, 陆源碎屑物质输入越多(Kennedy *et al.*, 2002). 尽管如此, 陆源碎屑的输入往往会受气候、构造及沉积环境等因素影响。

嫩一段和嫩二段沉积早期, 大规模湖侵作用促使湖泊相非常发育(图1), 此时整体上表现出较低的碎屑物质输入(0.16%~0.29% Ti; 表1), 从而对有机质富集的稀释作用较弱; 尽管如此, 嫩二段油页岩沉积早期(0.24% Ti)相比嫩一段(0.27% Ti), 具有略低的陆源碎屑物质输入. 嫩二段沉积晚期, 因盆地东部构造隆升促使湖盆规模急剧减小, 东部三角洲发育使短轴物源快速入湖而带来较多碎屑物质(0.27%~0.35% Ti; 表1)和陆源高等植物(图2), 对此时有机质富集起到强烈稀释作用, 从而使有机质富集程度很低(1.9% TOC; 表1), 表现出较低的生物生产力。

6 结论与讨论

嫩江组油页岩沉积时期, 嫩二段(7.9% TOC)相比嫩一段具有更高的有机质丰度(6.4% TOC), 有机母质生源均表现出I型干酪根的水生藻类优势, 嫩一段藻类生源以层状藻占绝对优势(图7a), 而嫩二段时期层状藻数量明显减少, 而结构藻优势加强(图7b); 此外, 嫩二段沉积晚期有机质丰度很

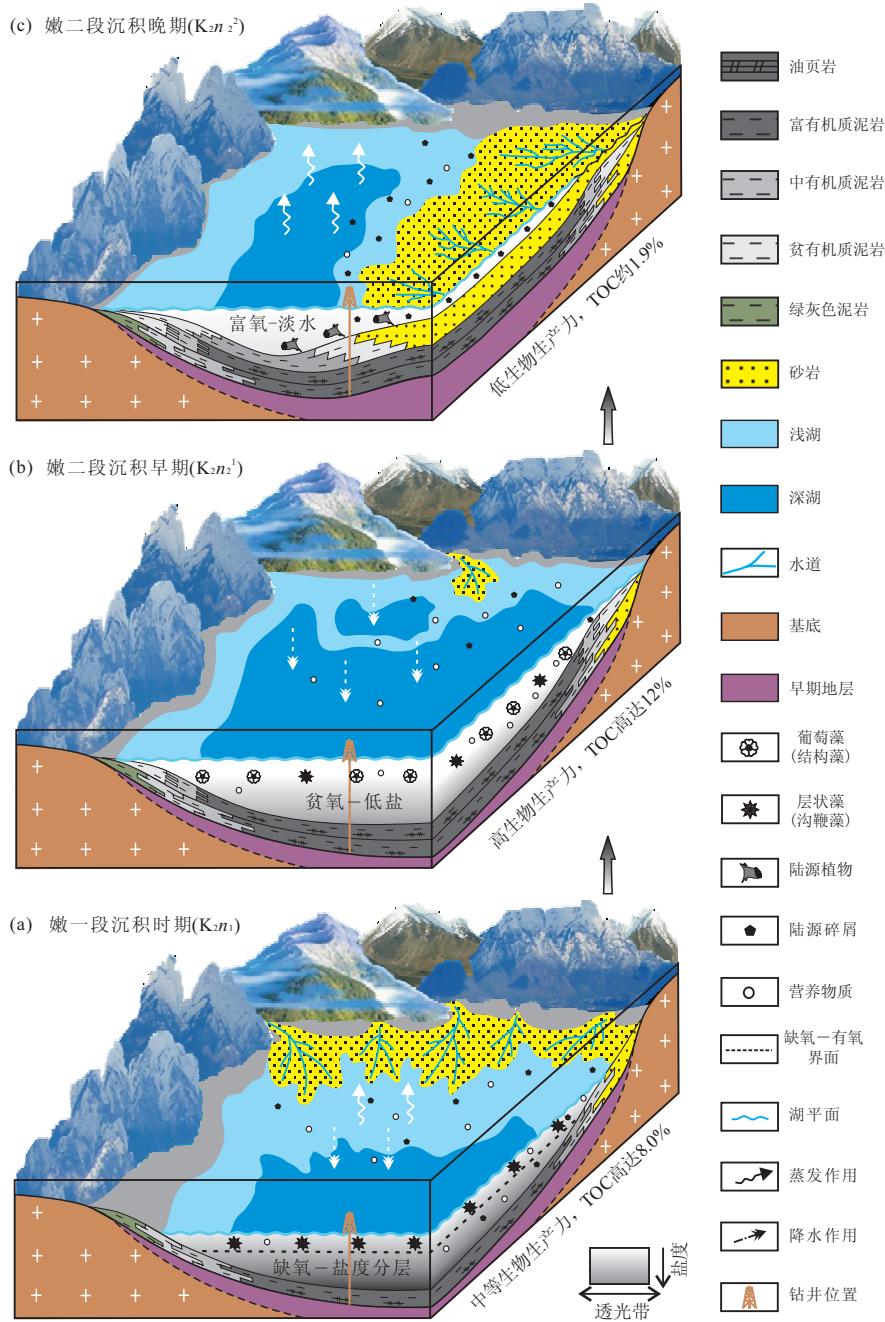


图 7 松辽盆地嫩江组有机质富集模式

Fig.7 Enrichment models of organic matter in the Nenjiang Formation of the Songliao basin

低(1.9% TOC),有机母质生源以III型干酪根的陆源高等植物占优势(图7c).嫩二段油页岩沉积时期,生物标志化合物参数指示湖泊水体透光带具有更高的生物生产力(图7b),极其温暖湿润气候控制下的湖泊富营养化是水生生物繁盛的重要诱因。

嫩一段油页岩沉积于盐度分层且缺氧的水体条件(图7a),而嫩二段油页岩沉积时水体盐度明显降低且氧含量增多(图7b).尽管如此,嫩二段油页岩沉积时期藻类个体的增大和孤立藻数量的增多,将

有利于提高水体中有机质的保存效率.因此,高盐和缺氧条件下的稳定水体分层是嫩一段油页岩沉积时有机质保存的主控因素,而藻类个体增大和孤立藻数量增多是嫩二段油页岩沉积时有机质保存的重要因素.此外,不能忽略微生物活动和碎屑物质输入等因素对有机质降解和稀释的影响.

综上所述,良好的保存条件是嫩一段油页岩沉积时有机质富集的主导因素,高生物生产力是嫩二段油页岩沉积时有机质富集的主导因素.因此,根据

影响有机质富集的不同因素在不同沉积时期所起作用的差异,建立了嫩一段油页岩沉积时期保存条件控制的有机质富集模式(图7a)和嫩二段油页岩沉积时期生物生产力控制的有机质富集模式(图7b),从而可以揭示嫩江组不同沉积环境下油页岩发育的主控因素,这对含氧淡水大型陆相湖泊的有机质富集成因探讨具有重要借鉴意义。

References

- Arnarson, T. S., Keil, R. G., 2005. Influence of Organic-Mineral Aggregates on Microbial Degradation of the Dinoflagellate *Scrippsiella Trochoidea*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(8):2111—2117. doi:10.1016/j.gca.2004.11.004
- Barakat, A. O., Rulkötter, J., 1997. A Comparative Study of Molecular Paleosalinity Indicators: Chromans, Tocopherols and C₂₀ Isoprenoid Thiophenes in Miocene Lake Sediments (Nördlinger Ries, Southern Germany). *Aquatic Geochemistry*, 3: 169—190. doi: 10.1023/A:1009645510876
- Bechtel, A., Jia, J.L., Strobl, S.A.I., et al., 2012. Paleoenvironmental Conditions during Deposition of the Upper Cretaceous Oil Shale Sequences in the Songliao Basin (NE China): Implications from Geochemical Analyses. *Organic Geochemistry*, 46(5):76—95. doi:10.1016/j.orggeochem.2012.02.003
- Bechtel, A., Reischenbacher, D., Sachsenhofer, R.F., et al., 2007. Paleogeography and Paleoenvironment of the Upper Miocene Zillingdorf Lignite Deposit (Austria). *International Journal of Coal Geology*, 69(3):119—143. doi: 10.1016/j.coal.2006.03.001
- Bohacs, K.M., Carroll, A.R., Neal, J.E., et al., 2000. Lake-Basin Type, Source Potential, and Hydrocarbon Character: An Integrated Sequence-Stratigraphic Geochemical Framework. In: Glerlowksi-Kordes, E.H., Kelts, K.P., eds., *Lake Basins through Space and Time*. AAPG Studies in Geology, 46:3—34.
- Cai, J.G., Lu, L.F., Bao, Y.J., et al., 2012. The Significance and Variation Characteristics of Interlayer Water in Smectite of Hydrocarbon Source Rocks. *Sci. China: Earth Sci.*, 42(4):483—491 (in Chinese).
- Carpenter, S.R., 2008. Phosphorous Control is Critical to Mitigating Eutrophication. *Proceedings of the National Academy of Science USA*, 105(32): 11039—11040. doi:10.1073/pnas.0806112105
- Carroll, A.R., Bohacs, K.M., 1999. Stratigraphic Classification of Ancient Lakes: Balancing Tectonic and Climatic Controls. *Geology*, 27 (2): 99—102. doi: 10.1130/0091-7613(1999)027<0099:SCOALB>2.3.CO;2
- Carroll, A.R., Bohacs, K.M., 2001. Lake-Type Controls on Petroleum Source Rock Potential in Nonmarine Basins. *AAPG Bulletin*, 85 (6): 1033—1053. doi: 10.1306/8626CA5F—173B—11D7—8645000102C1865D
- Chen, J.F., Zhang, S.C., Sun, S.L., et al., 2006. Main Factors Influencing Marine Carbonate Source Rock Formation. *Acta Geologica Sinica*, 80 (3): 467—472 (in Chinese with English abstract).
- Deng, H.W., Qian, K., 1993. Analysis on Sedimentary Geochemistry and Environment. Science Technology Press, Lanzhou (in Chinese).
- Didyk, B.M., Simoneit, B.R.T., Brassell, S.C., et al., 1978. Organic Geochemical Indicators of Paleo-environmental Conditions of Sedimentation. *Nature*, 272: 216—222. doi:10.1038/272216a0
- Feng, Z.H., Fang, W., Li, Z.G., et al., 2011. Depositional Environment of Terrestrial Petroleum Source Rocks and Geochemical Indicators in the Songliao Basin. *Sci. China: Earth Sci.*, 54 (9): 1304—1317. doi: 10.1007/s11430-011-4268-0
- Feng, Z.H., Fang, W., Wang, X., et al., 2009. Microfossils and Molecular Records in Oil Shales of the Songliao Basin and Implications for Paleo-Depositional Environment. *Science in China (Ser. D)*, 52(10): 1559—1571. doi: 10.1007/s11430-009-0121-0
- Feng, Z.Q., Jia, C.Z., Xie, X.N., et al., 2010. Tectonostratigraphic Units and Stratigraphic Sequences of the Non-marine Songliao Basin, Northeast China. *Basin Research*, 22(1): 79—95. doi: 10.1111/j.1365—2117.2009.00445.x
- Feng, Z.Q., Zhang, S., Fu, X.L., 2012. Depositional Evolution and Accumulation Response of Yaojia-Nenjiang Formation in Songliao Basin. *Earth Science Frontiers*, 19(1): 78—88 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Z.Q., Zhang, S., Xie, X.N., et al., 2006. Discovery of a Large-Scale Lacustrine Subaqueous Channel in the Nenjiang Formation of the Songliao Basin and Its Implication on Petroleum Geology. *Acta Geologica Sinica*, 80 (8): 1226—1232 (in Chinese with English abstract).
- Gao, R.Q., Cai, X.Y., 1997. Field Formation Conditions and Distribution Rules in Songliao Basin. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Goncalves, F.T.T., 2002. Organic and Isotope Geochemistry of the Early Cretaceous Rift Sequence in the Camamu Basin, Brazil: Paleolimnological Inferences and Source Rock Models. *Organic Geochemistry*, 33 (1): 67—80.

- doi:10.1016/S0146-6380(01)00128-0
- Grice, K., Schouten, S., Peters, K. E., et al., 1998. Molecular Isotopic Characterisation of Hydrocarbon Biomarkers in Palaeocene-Eocene Evaporitic, Lacustrine Source Rocks from the Jianghan Basin, China. *Organic Geochemistry*, 29(5-7): 1745-1764. doi:10.1016/S0146-6380(98)00075-8
- Hao, F., Zhou, X. H., Zhu, Y. M., et al., 2011. Lacustrine Source Rock Deposition in Response to Co-evolution of Environments and Organisms Controlled by Tectonic Subsidence and Climate, Bohai Bay Basin, China. *Organic Geochemistry*, 42(4): 323-339. doi:10.1016/j.orggeochem.2011.01.010
- Harris, N.B., Freeman, K.H., Pancost, R.D., et al., 2004. The Character and Origin of Lacustrine Source Rocks in the Lower Cretaceous Synrift Section, Congo Basin, West Africa. *AAPG Bulletin*, 88(8): 1163-1184. doi:10.1306/02260403069
- Hedges, J. I., Keil, R. G., 1995. Sedimentary Organic Matter Preservation: An Assessment and Speculative Synthesis. *Marine Chemistry*, 49(2-3): 81-115. doi:10.1016/0304-4203(95)00008-F
- Jia, J. L., 2012. Research on the Recognition and Resource Evaluation of the Upper Cretaceous Oil Shale Based on Geochemistry-Geophysics Technique in the Songliao Basin (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Jia, J. L., Liu, Z. J., Bechtel, A., et al., 2013. Tectonic and Climate Control of Oil Shale Deposition in the Upper Cretaceous Qingshankou Formation (Songliao Basin, NE China). *International Journal of Earth Sciences*, 102(6): 1717-1734. doi:10.1007/s00531-013-0903-7
- Jia, J. L., Liu, Z. J., Guo, W., et al., 2011. Application of Geological Analogy to Assess Oil Shale Resources of Depression Basin: An Example from Upper Cretaceous Songliao Basin. *Journal of China Coal Society*, 36(9): 1475-1480 (in Chinese with English abstract).
- Jia, J. L., Liu, Z. J., Meng, Q. T., et al., 2012. Quantitative Evaluation of Oil Shale Based on Well Log and 3-D Seismic Technique in the Songliao Basin, NE China. *Oil Shale*, 29(2): 128-150. doi:10.3176/oil.2012.2.04
- Katz, B. J., 2005. Controlling Factors on Source Rock Development—A Review of Productivity, Preservation and Sedimentation Rate. In: Harris, N.B., ed., *The Deposition of Organic-Carbon-Rich Sediments: Models, Mechanisms, and Consequences*. SEPM Special Publication, 82: 7-16.
- Kennedy, M.J., Pevear, D.R., Hill, R.J., 2002. Mineral Surface Control of Organic Carbon in Black Shale. *Science*, 295(5555): 657-660. doi:10.1126/science.1066611
- Langford, F. F., Blanc-Valleron, M. M., 1990. Interpreting Rock-Eval Pyrolysis Data Using Graphs of Pyrolyzable Hydrocarbons vs. Total Organic Carbon. *AAPG Bulletin*, 74(6): 799-804.
- Lerman, A., Baccini, P., 1978. Lakes—Chemistry, Geology, Physics. Springer Verlag, Berlin.
- Lewan, M.D., 1984. Factors Controlling the Proportionality of Vanadium to Nickel in Crude Oils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(11): 2231-2238. doi:10.1016/0016-7037(84)90219-9
- Li, H. J., Xie, X. N., Huang, J. H., et al., 2012. Main Factors Controlling the Formation of Excellent Marine Source Rocks in Permian Maokou Formation of Northwest Sichuan, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(1): 171-180 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. X., Fan, P., Li, J. G., et al., 1998. An Application of Aryl Isoprenoids in Indicating Sedimentary Environments. *Acta Sedimentologica Sinica*, 16(2): 9-13 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B. J., 1980. *Sedimentary Petrology*. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Mayer, L. M., 1994. Surface Area Control of Organic Carbon Accumulation in Continental Shelf Sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(4): 1271-1284. doi:10.1016/0016-7037(94)90381-6
- Mayer, L. M., 2004. The Inertness of Being Organic. *Marine Chemistry*, 92(1-4): 135-140. doi:10.1016/j.marchem.2004.06.022
- Moldowan, J. M., Seifert, W. K., Gallegos, E. J., 1985. Relationship between Petroleum Composition and Depositional Environment of Petroleum Source Rocks. *AAPG Bulletin*, 69(8): 1255-1268.
- Pedersen, T. F., Calvert, S. E., 1990. Anoxia versus Productivity: What Controls the Formation of Organic-Carbon-Rich Sediments and Sedimentary Rock? *AAPG Bulletin*, 74(4): 454-466.
- Peters, K. E., Moldowan, J. M., 1993. *The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments*. Prentice Hall Englewood Cliffs, New Jersey.
- Peters, K. E., Walters, C. C., Moldowan, J. M., 2005. *The Biomarker Guide, Biomarkers and Isotopes in Petroleum Exploration and Earth History*. Cambridge University Press, New York.
- Robinson, N., Eglinton, G., Brassell, S. C., et al., 1984. Dino-

- flagellate Origin for Sedimentary 4-Methylsteroids and 5A(H)-Stanols. *Nature*, 308: 439—442. doi: 10.1038/308439a0
- Schindler, D.W., Hecky, R.E., Findlay, D.L., et al., 2008. Eutrophication of Lake cannot be Controlled by Reducing Nitrogen Input: Results of a 37-Year Whole-Ecosystem Experiment. *Proceedings of the National Academy of Science*, 105 (32): 11254—11258. doi: 10.1073/pnas.0805108105
- Schwark, L., Vliex, M., Schaeffer, P., 1998. Geochemical Characterization of Malm Zeta Laminated Carbonates from the Franconian Alb, SW-Germany (II). *Organic Geochemistry*, 29(8): 1921—1952. doi: 10.1016/s0146-6380(98)00192-2
- Shanks, A.L., Trent, J.D., 1980. Marine Snow: Sinking Rates and Potential Role in Vertical Flux. *Deep-Sea Research*, 27(2): 137—144. doi: 10.1016/0198-0149(80)90092-8
- Sinninghe Damsté, J.S., Keely, B.J., Betts, S.E., et al., 1993. Variations in Abundances and Distributions of Isoprenoid Chromans and Long-Chain Alkylbenzenes in Sediments of the Mulhouse Basin: A Molecular Sedimentary Record of Palaeosalinity. *Organic Geochemistry*, 20(8): 1201—1215. doi: 10.1016/0146-6380(93)90009-Z
- Sinninghe Damsté, J.S., Kenig, F., Koopmans, M.P., et al., 1995. Evidence for Gammacerane as an Indicator of Water Column Stratification. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(9): 1895—1900. doi: 10.1016/0016-7037(95)00073-9
- Sinninghe Damsté, J.S., Kock-van Dalen, A.C., de Leeuw, J.W., et al., 1987. The Identification of Mono-, Di-, and Trimethyl 2-Methyl-2 (4, 8, 12-Trimethyltridecyl) Chromans and Their Occurrence in Geosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(9): 2393-2400. doi: 10.1016/0016-7037(87)90292-4
- Song, Z.G., Qin, Y., Geroge, S.C., et al., 2012. A Biomarker Study of Depositional Paleoenvironments and Source Inputs for the Massive Formation of Upper Cretaceous Lacustrine Source Rocks in the Songliao Basin, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385(9): 137—151. doi: 10.1016/j.palaeo.2012.12.007
- Stuiver, M., 1970. Oxygen and Carbon Isotope Ratios of Freshwater Carbonates as Climatic Indicators. *Journal of Geophysical Research*, 75(27): 5247—5257. doi: 10.1029/JC075i027p05247
- Summons, R.E., Powell, T.G., 1987. Identification of Aryl Isoprenoids in Source Rocks and Crude Oils: Biological Markers for the Green Sulphur Bacteria. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51 (3): 557—566. doi: 10.1016/0016-7037(87)90069-X
- Talbot, M.R., 1988. The Origins of Lacustrine Oil Source Rocks: Evidence from the Lakes of Tropical Africa. *Geological Society, London, Special Publications*, 40: 29—43. doi: 10.1144/GSL.SP.1988.040.01.04
- Tissot, B.P., Welte, D.H., 1984. Petroleum Formation and Occurrence. Springer-Verlag, Berlin.
- Tyson, R.V., 2005. The “Productivity versus Preservation” Controversy: Cause, Flaws and Resolution. In: Harris, N.B., ed., The Deposition of Organic-Carbon-Rich Sediments: Models, Mechanisms, and Consequences. *SEPM Special Publication*, 82: 17—33.
- Tyson, R.V., Pearson, T.H., 1991. Modern and Ancient Continental Shelf Anoxia: An Overview. *Geological Society, London, Special Publication*, 58: 1—24. doi: 10.1144/GSL.SP.1991.058.01.01
- Volkman, J.K., 1986. A Review of Sterol Markers for Marine and Terrestrial Organic Matter. *Organic Geochemistry*, 9(2): 83—99. doi: 10.1016/0146-6380(86)90089-6
- Volkman, J.K., Barrett, S.M., Blackburn, S.I., 1999. Eustigmatophyte Microalgae are Potential Sources of C₂₉ Sterols, C₂₂-C₂₈ N-Alcohols and C₂₈-C₃₂ N-Alkyl Diols in Freshwater Environments. *Organic Geochemistry*, 30 (5): 307—318. doi: 10.1016/S0146-6380(99)00009-1
- Volkman, J.K., Kearney, P., Jeffrey, S.W., 1990. A New Source of 4-Methyl Steroids and 5A(H)-Stanols in Sediments; Prymnesiophyte Microalgae of the Genus Pavlova. *Organic Geochemistry*, 15 (5): 489—497. doi: 10.1016/0146-6380(90)90094-G
- Wang, C.S., Feng, Z.Q., Zhang, L.M., et al., 2013. Cretaceous Paleogeography and Paleoclimate and the Setting of SKI Borehole Sites in Songliao Basin, Northeast China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385(9): 17—30. doi: 10.1016/j.palaeo.2012.01.030
- Wang, D.P., Liu, L., Zhang, L.P., et al., 1995. *Palaeoclimatology, Sedimentary Cycle, Sequence Stratigraphy of Cretaceous in Songliao Basin*. Jilin University Press, Changchun (in Chinese).
- Wang, L., Song, Z., Yin, Q., et al., 2011. Paleosalinity Significance of Occurrence and Distribution of Methyltrimethyltridecyl Chromans in the Upper Crataceous Nenjiang Formation, Songliao Basin, China. *Organic Geochemistry*, 42 (11): 1411—1419. doi: 10.1016/j.orggeochem.2011.08.012
- Yan, J.X., Liu, X.Y., 2007. Geobiological Interpretation of the Deposits of the Middle Permian Marine Oxygen-Deficient Source Rocks in South China: A Working Hypothesis. *Earth Science—Journal of China University*

- of Geosciences*, 32(6): 789—796 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. P., Huang, D. F., Liao, Z. Q., 1999. Gammacerane Geochemical Indicator of Water Column Stratification. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(1): 136—140 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S., Fu, X. L., Zhang, C. C., 2011. Stratigraphic Sequences and Sedimentary Evolution in the Yaojia and Nenjiang Formations, Songliao Basin. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 31(2): 34—42 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. G., Cai, J. G., Xu, W. P., et al., 2007. Enrichment Mechanism of Organic Matter in the Muddy Hydrocarbon Source Rocks. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Zhu, G. Y., Jin, Q., 2002. Study on Source Rock Heterogeneity—A Case of Niu38 Well in Dongying Depression. *Acta Petrolei Sinica*, 23(5): 34—39 (in Chinese with English abstract).
- Zhuo, X. Z., Wang, Q., Zhu, X. M., et al., 2009. Relationship between Bottom Morphology of Lake Basin and Filling Sequence during Depression Period in the Southern Songliao Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 30(4): 536—541 (in Chinese with English abstract).
- Zonneveld, K. A. F., Versteegh, G. J. M., Kasten, S., et al., 2010. Selective Preservation of Organic Matter in Marine Environments: Processes and Impact on the Sedimentary Record. *Biogeosciences*, 7(2): 483—511. doi: 10.5194/bg-7-483-2010
- 邓宏文,钱凯,1993.沉积地球化学与环境分析.甘肃:科学出版社.
- 冯志强,张顺,付秀丽,2012.松辽盆地姚家组—嫩江组沉积演化与成藏响应.地学前缘,19(1): 78—88.
- 冯志强,张顺,解习农,等,2006.松辽盆地嫩江组大型陆相坳陷湖盆底水道的发现及其石油地质意义.地质学报,80(8): 1226—1232.
- 高瑞祺,蔡希源,1997.松辽盆地油气田形成条件与分布规律.北京:石油工业出版社.
- 贾建亮,2012.基于地球化学—地球物理的松辽盆地上白垩统油页岩识别与资源评价(博士学位论文).长春:吉林大学.
- 贾建亮,刘招君,郭巍,等,2011.地质类比法在坳陷盆地油页岩资源评价中的应用—以松辽盆地上白垩统为例.煤炭学报,36(9): 1475—1480.
- 李红敬,解习农,黄俊华,等,2012.川西北二叠系茅口组海相优质烃源岩发育控制因素.地球科学——中国地质学报,37(1): 171—180.
- 李振西,范璞,李景贵,等,1998.芳基类异戊二烯生标在指相上的应用.沉积学报,16(2): 9—13.
- 刘宝珺,1980.沉积岩石学.北京:地质出版社.
- 王东坡,刘立,张立平,等,1995.松辽盆地白垩纪古气候沉积旋回层序地层.长春:吉林大学出版社.
- 颜佳新,刘新宇,2007.从地球生物学角度讨论华南中二叠世海相烃源岩缺氧沉积环境成因模式.地球科学——中国地质大学学报,32 (6): 789—796.
- 张立平,黄第藩,廖志勤,1999.伽马蜡烷—水体分层的地球化学标志.沉积学报,17(1): 136—140.
- 张顺,付秀丽,张晨晨,2011.松辽盆地姚家组—嫩江组地层序及沉积演化.沉积与特提斯地质,31(2): 34—42.
- 张永刚,蔡进功,徐卫平,等,2007.泥质烃源岩中有机质富集机制.北京:石油工业出版社.
- 朱光有,金强,2002.烃源岩的非均质及其研究——以东营凹陷牛38井为例.石油学报,23(5): 34—39.
- 禚喜准,王琪,朱筱敏,等,2009.松辽盆地南部拗陷期湖盆底形演化及充填序列.石油学报,30(4): 536—541.

附中文参考文献

- 蔡进功,卢龙飞,包于进,等,2012.烃源岩中蒙皂石结合有机质后层间水的变化特征及其意义.中国科学:地球科学,42(4): 483—491.
- 陈践发,张水昌,孙省利,等,2006.海相碳酸盐岩优质烃源岩发育的主要影响因素.地质学报,80(3): 467—472.