

松辽盆地白垩纪湖侵沉积层序 与湖海沟通事件的地球化学记录

王璞珺 杜小弟 王东坡

(长春地质学院能源地质系)

〔内容提要〕 松辽白垩纪近海陆相盆地最大湖侵期的泉头组—嫩江组时期,可能发生了三次较大规模的海水入侵事件,时间分别为泉三、四段—青一段(阿尔布期),青二、三段顶部(土伦期)和嫩一、二段(晚桑托—早坎佩尼期)。海水注入使湖盆的水文地球化学和环境地球化学条件均发生改变,并在层序中留下沉积记录。海进期主要表现为:①重同位素组份增加,直至与同期海相层序的同位素组成相同;②介质的盐度指标(Sr/Ba)、碱度指标 $(Ca+Mg)/(Si+Al)$ 、还原性指标 $(Zn+Ni)/Ga$ 和硫通量指标(S 归一化含量)均系统增加。相反,海退期则上述指标显著降低。根据沉积层序的同位素组成、同期海水的同位素组成和同位素分馏的质量平衡关系,可求出研究层段内同位素的海水来源与淡水来源的比例(混合度)为0—5。并由此恢复出海平面升降曲线。

关键词 近海陆相盆地 湖海沟通事件 沉积地球化学记录

松辽盆地是白垩纪的近海陆相盆地,其最大湖侵期的沉积层序中(K_1q-K_2n)在生物学、矿物学和元素地球化学等方面偶具咸水环境特征。主要的微咸—半咸水生物有鱼类:吉林鱼(*Jilinichthys*)、哈马鱼(*Hama*)、松花江鱼(*Sungrichthys*)和鲎(*Selachii, indet*)等;双壳类:二区肋蛤(*Musculus*)、壳莱蛤(*Mytilus*)和线纹蛤(*Striaca*);半咸水沟鞭藻类:*Kioka sium*, *Dinogymnipsis* 和 *Cleitospaeridium* 等。反映水体咸化的自生矿物主要有:(伊利石质)海绿石、白云质泥灰岩和(铁质)白云石[●]。元素地球化学对泉头—嫩江组整个层序的古盐度分析表明,最大盐度不是出现在干旱气候期,而是出现在气候温湿、淡水补给量增大的两次湖侵高峰期(青一段和嫩一、二段),而且各湖侵期内古盐度具有随水深增加的特点[●]。这一古盐度特征不仅反映湖盆具有盐度分层性质,而且说明古盐度受非气候因素控制。王璞珺、王东坡曾将其解释成“可能的湖海沟通成因”。然而,大型内陆湖泊通过自身的重力分层,也会导致底层环境的盐度升高,进而使沉积层序在生物、矿物和元素地化方面出现“咸化”特征。

所以,导致白垩纪松辽湖盆水体咸化的主导因素是什么?是否就是因为海水的注入,还是由于大型内陆湖泊的自身重力分层?这样一个基础性问题始终未能得出有说服力的答案。另外,有关湖—海沟通的时限、方式以及湖海沟通作用与海侵和海平面升降的关系等问题也

●本文1995年1月2日收稿

●王璞珺,松辽盆地白垩纪湖海沟通事件及其与全球白垩系的对比,长春地质学院博士论文。

●王东坡、刘招君、王璞珺等,松辽盆地中生代主要目的层段的沉积相研究及生储盖探讨,国家重点攻关项目(75-54-01-11-01)专题研究报告。

尚不清楚。本文通过 S、C、O 和 Sr 同位素研究,证实松辽盆地白垩纪湖侵层序中有同期海相同位素来源;通过同位素地球化学和元素地球化学研究,得出海水-淡水混合度指标,从而得出海平面变化曲线,并由此确定出湖-海沟通时限。

1 海侵沉积层序的同位素地球化学特征与海水-淡水混合度指标

作者在松辽盆地三肇、农安、青山口和姚家等地进行了系统的剖面测制和连续采样,对泉头组红层中的蒸发盐,青山口组、姚家组和嫩江组中的黄铁矿,嫩江组中的白云岩、灰岩进行了系统的矿物分离和单矿物挑选,测定其 $\delta^{34}\text{S}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(图 1、图 2),获得了松辽盆地白垩纪湖侵沉积层序(K_1q-K_2n)的同位素分布有三个主要特点:①波动范围大($\delta^{34}\text{S}\text{‰}$ 为 $-31.3-+20.8$),且波动频率高,在仅数米的相邻层位内,同位素值的相对变化可达 100%以上;②有三个较明显的同位素高峰期,分别出现在泉三、四段—青一段、青二、三段顶部和嫩一、二段,分别相当于中一晚阿尔布期、土仑期和早桑托期—晚坎佩尼期(图 2);③部分数据与相应的同期海相沉积同位素组成相同(图 1)。

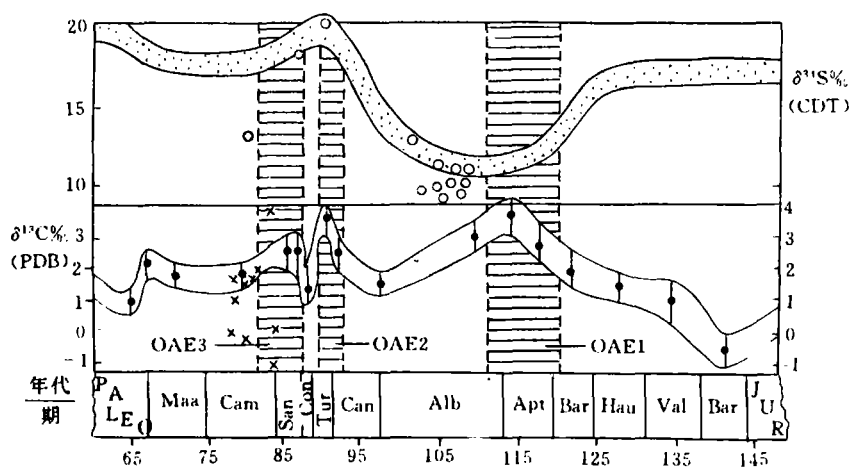


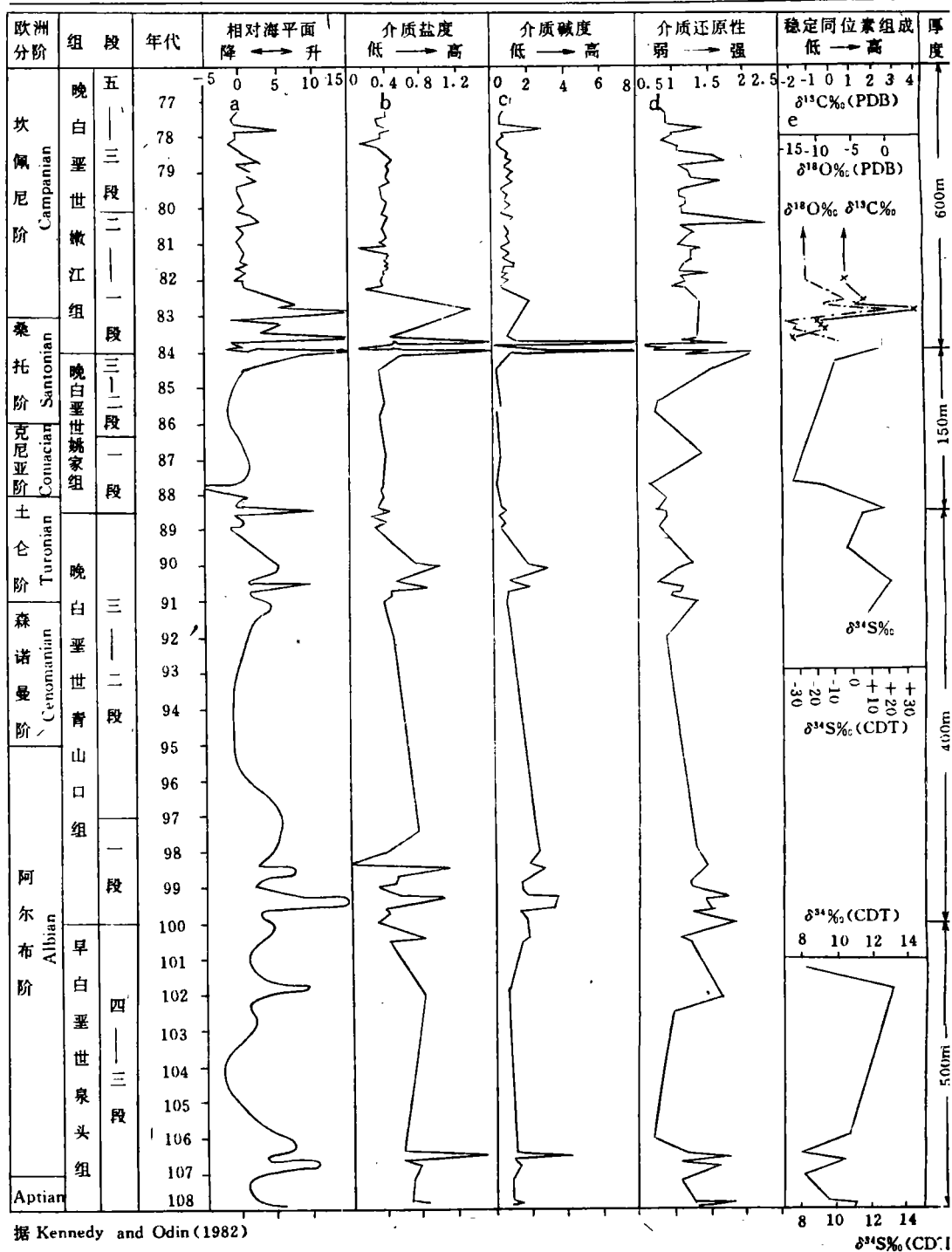
图 1 松辽盆地湖侵沉积层序 $\delta^{34}\text{S}\text{‰}$ (硫酸盐及硫化物)和 $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ (碳酸盐岩)与相应同期海相沉积(带状部分)的比较

×碳酸盐岩(carbonate rock),○硫酸盐(sulfate),OAE. 大洋缺氧事件(oceanic anoxic event)
(底图据陈智樑,1989 改编)

Fig. 1 Comparison of $\delta^{34}\text{S}\text{‰}$ (sulfates and sulfides) and $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ (carbonate rocks) for the lake transgression sequences in the Songliao Basin with those for the corresponding synchronous normal marine sequences(banded zones)

初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值是样品形成之初同位素均一化时的原始同位素组成,是确定岩石成因的良好标志。作者选取泉三—四段蒸发盐岩样品,经等时线拟合确定其初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70713$,与同期海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 组成相当(0.7071—0.7077);选取嫩江组碳酸盐岩样品测得其初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7091$,比典型海相碳酸盐岩(初始比为 0.708)略低,但明显高于典型陆相碳酸盐岩(0.712—0.726)。

松辽盆地白垩纪湖侵层序的上述同位素组成特点说明:①同生期体系对于各同位素组分是封闭的;②层系中的同位素组分有同期海水来源。若令 $\delta\text{S}(\text{样})$ 、 $\delta\text{S}(\text{海})$ 和 $\delta\text{S}(\text{淡})$ 分别



据 Kennedy and Odin (1982)

图2 松辽盆地白垩系泉头—嫩江组湖侵沉积层序的地质时代、古环境指标、
稳定同位素分布特征及海平面升降曲线(说明见正文)

Fig. 2 Curves for sea-level changes (A), salinity (B), alkalinity (C), reducibility (D) and stable isotopic compositions (E) of the lake transgressive sequences in the Cretaceous Quantou—Nengjiang Formations in the Songliao Basin

代表样品、同期海水和陆源淡水的同位素组成,令 $W(\text{海})$ 和 $W(\text{淡})$ 代表同位素海相与陆相来源的总重量,则下面质量平衡关系式:

$$W(\text{海}) \times \delta S(\text{海}) + W(\text{淡}) \times \delta S(\text{淡}) = (W(\text{海}) + W(\text{淡})) \times \delta S(\text{样}) \tag{1}$$

由现代环境的研究(B. A. 格里年科, L. H. 格年科, 1980), 已知 $\delta S(\text{淡}) = \delta S(\text{海})/3$ 代入(1)式则可推导出同位素的海水来源与陆源淡水来源的重量比(混合度)为:

$$W(\text{海}):W(\text{淡}) = [\delta S(\text{样}) - \delta S(\text{海})/3] / [\delta S(\text{海}) - \delta S(\text{样})] \tag{2}$$

作者认为海水—淡水混合度指标,可以直接指示白垩纪时期与松辽湖盆相毗邻海域的海平面升降变化。在海平面相对上升的海侵期,进入盆地的海水增加,海相同位素的来源量增加,使“混合度”指标升高;相反则降低。以(2)式为基础,并结合“混合度”与反映介质环境特征的元素地化指标间的相关关系(将在后面讨论),可恢复出海平面变化曲线(图 2)。

2 海侵沉积层序的元素地球化学特征及其与“混合度”指标的相关性

作者在松辽盆地三肇、农安和姚家等地,对泉头—嫩江组湖侵沉积层序进行了系统剖面测制和连续采样,选取其中 226 件泥质岩样品分析其中 Si、Al 等 11 种常量元素和 Sr、Ba 等 23 种微量元素。根据元素的地球化学性质,并结合国内外的有关研究成果和实际应用效果,选择下面四个元素地化参数作为古沉积环境指标:①沉积介质的盐度指标(Sr/Ba);②碱度指标 $(\text{Ca} + \text{Mg}) \times 20 / (\text{Si} + \text{Al})$;③还原性指标 $(\text{Zn} + \text{Ni}) / \text{Ga} \times 5$;④硫通量指标(归一化硫含量)。各地化参数乘以相应系数,使各变量具有相同数量级。这些反映古水文和古环境特点的地球化学指标与由(2)式求得的“混合度”指标间有显著相关性(表 1),说明它们间有成因联系。由图 2 可见,环境地化指标与海平面升降曲线变化趋势相似,说明环境参数受海水入侵作用的影响。

表 1 海水-淡水混合度与沉积介质的环境地球化学指标间的相关关系

Table 1 Correlation of environmental geochemical indexes with marine fresh-water mixing degrees

相 地 化 指 标 数	参 数	$X_1 = \frac{\text{Sr}}{\text{Ba}}$	$X_2 = \frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{\text{Si} + \text{Al}}$	$X_3 = \frac{\text{Zn} + \text{Ni}}{\text{Ga}}$	$X_4 = \text{S 含量}$ (正归化)	$Y = \text{海水-淡水}$ 混合度
Sr/Ba		1.00	0.78	0.66	0.39	0.82
$(\text{Ca} + \text{Mg})/(\text{Si} + \text{Al})$		0.78	1.00	0.70	0.17	0.77
$(\text{Zn} + \text{Ni})/\text{Ga}$		0.66	0.70	1.00	0.26	0.70
S 含量(正归化)		0.39	0.17	0.26	1.00	0.68

注: $t(0.01) = 0.48$; 回归方程: $Y = 3.67X_1 + 1.45X_2 + 2.25X_3 + 0.96X_4 - 5.22$

3 问题讨论及有关说明

3.1 沉积层序的同位素组成、影响因素及其环境意义

沉积层序的现今同位素组成受同位素的初始组成(物源)和成岩—后生变化两方面的影响;而物源和成岩后生条件又均受多种复杂因素的影响。所以,同位素组成所反映的究竟是同生环境条件还是后期变化特点必须根据具体情况而定。本文同位素地化研究的目的是恢复古水文地化环境以判明同位素组分的原始来源。因此在样品选择上十分注意保证被测组分确属“同生沉积成因”,同时要完全避免遭受后期蚀变、淋滤、交代及风化等作用的影响。本文选用石膏(硬石膏)、重晶石和天青石用于硫酸盐的硫、锶同位素测定,选用黄铁矿(及闪锌

矿和方铅矿)用于硫化物的硫同位素分析,选用生物灰岩和白云岩结核用于碳、氧同位素和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素测定。通过野外的沉积序列、结构构造和室内的薄片鉴定和电镜-能谱的详细研究,证实上述被测样品均为“新鲜的同沉积组分”(如结核切割层理,膏盐被同生钙质结核挤压变形或包裹,黄铁矿呈草莓状,同生胶结作用等)。另外,所有样品碎至40—60目后,显微镜下仔细挑选其中新鲜的、未遭后期改造的样品。所以,作者认为本文的同位素分析结果能反映其原始组成或初始来源特征。

3.2 体系状态、同位素分馏效应及其对指相效果的影响

只有在封闭体系中形成的自生矿物才能直接反映沉积层序的同位素原始来源。在开放体系中(如海洋),自生矿物(如黄铁矿)的同位素组成是水体分馏以后的结果。另外,即使在开放体系中,若含同位素的各种组分能快速沉积固定(例如硫酸盐被还原成硫化物的速度很快或还原速率 $\geq$ 供给速率),则自生矿物亦可反映母体同位素组成。现代环境研究和蒸发实验结果证明,硫酸盐的化学沉淀作用不产生明显的同位素分馏,所以沉积蒸发盐岩的同位素组成可代表沉积介质的同位素组成;同时,封闭环境下的纯蒸发作用不改变体系中同位素的总体组成。作者对泉头组蒸发盐岩层序和嫩江组碳酸盐岩层序进行了Rb-Sr等时线的拟合度研究,蒸发盐层Rb-Sr等时线 $\gamma=0.9950$;碳酸盐层Rb-Sr等时线 $\gamma=0.9927$,说明这两套层序沉积至今始终保持了良好的封闭条件。从图2中黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 的波动特点看(青山口—姚家组),也可推知体系对同位素是封闭的,否则 $\delta^{34}\text{S}$ 将以波动范围很小的负值为主。另外,根据沉积相序和元素地化特点而进行的成因分析,表明硫供给量是形成硫酸盐(或硫化物)的控制因素,即硫的沉积固定速率 $\geq$ 供给速率。这些特征说明,研究层段的同位素组成应能够代表沉积介质的同位素特点,是符合本项目目的的良好环境指标。

在海水-淡水混合度的计算中(2式),蕴含着这样一个基本条件,即海水和陆源淡水是层序中同位素的两个主要来源。这实质上是根据现有研究成果而进行的合理近似。事实上,层序中的同位素是多源的,例如现代陆源 SO_4^{2-} 就有四种来源:①老蒸发盐层的溶解($\delta^{34}\text{S}$ 为 $+10—+30\%$);②火山气射源($\delta^{34}\text{S}$ 为 $-10—+15\%$);③老地层中黄铁矿的氧化($\delta^{34}\text{S}$ 为 $-40—+5\%$);④大气降水($\delta^{34}\text{S}$ 为 $+3—+15\%$)。根据沉积相古地理研究,松辽白垩系无老蒸发盐物源, K_1q-K_2n 期火山作用不强烈,富含黄铁矿的源岩不太发育,所以(2)式属合理近似。另外,火山气射源和黄铁矿氧化来源 $\delta^{34}\text{S}$ 的众数值,一般不高于大气降水 $\delta^{34}\text{S}$ 的众数值,所以这些组分的少量加入不应显著影响(2)式的计算结果。

3.3 关于松辽盆地白垩纪地层的时代划分

迄今许多研究者已对此做了大量工作,并提出多种划分方案。近年作者用K/Ar稀释法和Rb/Sr等时线法直接测定了松辽白垩系泉头—嫩江组泥质岩、(含泥)蒸发盐岩和碳酸盐岩的同位素年龄。图2的地质时代是根据这些同位素年龄的测试结果,在原地层年代的“趋势性划分方案”^①之基础上适当补充、调整而成。

欧洲分阶采用Kennedy和Odin(1982)划分方案。该方案是MEC(Mid-Cretaceous Events)计划的首选方案。松辽白垩系与欧洲阶的对比是以绝对年龄为根据的,这样便于松辽盆地与全球白垩系的对比(尽管分层界线不完全一致)。欧洲阶的汉译名称据《英汉地质词典》1983年版。

① 高瑞祺、萧德铭,大庆探区油气勘探新进展,大庆石油管理局勘探开发研究院(内刊),1991,6,P17。

3.4 关于测试数据

本文涉及到的测试数据主要有:常量和微量元素化学分析 226 件,同位素年龄测试 27 件,稳定同位素分析 36 件, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 测定 22 件。

所有样品的采集、加工、挑选和前期处理由王璞珺等完成;分析测试分别在长春地质学院分析测试中心、地科院矿床所同位素和中科院地质所同位素室完成。稳定同位素分析误差为 0.2‰,K/Ar 年龄测定误差 0.6—1.8Ma,Rb/Sr 等时线年龄测定误差 6—8Ma。

4 主要结论

1. 松辽盆地于白垩纪时期为近海陆相盆地。同期性的海水入侵事件在泉头—嫩江组的湖侵层序内留有沉积记录。除在生物、矿物和成烃作用方面的影响外,海侵期的沉积地球化学记录是:(1) ^{34}S 、 ^{18}O 和 ^{13}C 等重同位素组分明显增加,直至与同期海相层的同位素组成相同。层序中的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值与同期海水或相应海相层接近,而明显高于同期陆相沉积;(2)沉积介质的盐度(Sr/Ba)、碱度 $(\text{Ca} + \text{Mg})/(\text{Si} + \text{Al})$ 、还原性 $(\text{Zn} + \text{Ni})/\text{Ga}$ 以及归一化硫含量等元素地化指标显著升高。海退期则与此相反,上述各参数均普遍降低。

2. 根据湖侵沉积层序的同位素地化和元素地化特征,可恢复出同期的海平面相对变化曲线。结合相应的同位素测龄研究结果,可确定出在泉头—嫩江组期间,松辽盆地至少遭受了三次较大规模海水入侵作用的影响;时间分别为泉三、四段—青一段(阿尔布期),青二、三段顶部(土仑期)和嫩一、二段(晚桑托—早坎佩尼期)。

参 考 文 献

- 中国科学院南京古生物研究所,1976,中国的瓣鳃类化石,科学出版社。
- 王璞珺、刘招君、刘万洙、杜小弟,1991,元素地球化学-数理统计法在松南陆相盆地分析中的应用,沉积学报 9 卷 3 期。
- 王璞珺、刘万洙、王东坡,1994,白垩纪非海相沉积层序同位素年龄的直接测定研究及盆地分析中的同位素年代学方法,世界地质 9 卷 4 期。
- 刘英俊等,1984,元素地球化学,科学出版社。
- 邢顺涂、肖祝胜、张书贵,1985,泰康湖湾海绿石矿物学特征及其形成条件的探讨,松辽陆相盆地石油地质,石油工业出版社。
- 刘平略、周厚清、康桂云,1986,松辽盆地元素分析及其与沉积环境的关系,大庆石油地质与开发 5 卷 2 期。
- 张弥曼、周家健,1978,我国东部中、新生代含油地层中的鱼化石及有关沉积环境的讨论,古脊椎动物与古人类。
- 陈智梁,1989,富有机碳的中白垩世地层的地层学,地球化学和古海洋学,岩相古地理 9 卷 1 期。
- 高瑞祺、何承金、乔秀云,1992,松辽盆地白垩纪两次海侵的沟鞭藻类新属种,古生物学报 31 卷 1 期。
- Faure, G. and Powell, J. L., 1975, 锶同位素地质学(贵阳地化所译),科学出版社。
- B. A. 格里年科, L. H. 格里年科, 1980, 硫同位素地球化学(赵瑞译),科学出版社。
- Burke, W. H. et al., 1982. Variation of seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ throughout Phanerozoic time. *Geology*, Vol. 10, pp. 516—519.
- Spears, D. A., and Amin, M. A. 1981. Geochemistry and mineralogy of marine and non-marine Namurian black shales from the Tanaley borehole, Derbyshire. *Sedimentology*, Vol. 28, pp. 407—417.
- Taylor, S. R., 1983. A stable isotope study of the Mercia Mudstones (Keuper Marl) and associated sulphate horizons in the English Midlands. *Sedimentology*, Vol. 30, pp. 11—31.
- Reyment, R. A. and Bengtson, P., 1986. Events of the Mid-Cretaceous. *Physics and Chemistry of the Earth* (Vol. 16), Oxford, Pergamon Press, p. 1.

Zaback, A., 1993. Sulfur circulation between water and sediment. *Geology*, Vol. 21, No. 2, pp. 142—145.

GEOCHEMICAL RECORDS OF THE CRETACEOUS LACUSTRINE TRANSGRESSIVE SEQUENCES AND THE MARINE-LAKE CONNECTING EVENTS IN THE SONGLIAO BASIN, NORTHEAST CHINA

Wang Pujun Du Xiaodi Wang Dongpo

Geoenergy Department, Changchun University of Earth Sciences

ABSTRACT

Situated in the northeast of China (42—49°N, 120—128°E), the Songliao Basin is a Cretaceous nearshore continental basin which has been affected significantly by the adjacent marine transgression/regression. The authors have recognized in this paper three main marine transgressive records on the maximum lacustrine transgressive sequences of the basin, which occurred separately during the deposition of the third and fourth members of the Lower Cretaceous Quantou Formation (Albian), the top of the second and third members of the Upper Cretaceous Qingshankou Formation (Turonian), and the first and second members of the Upper Cretaceous Nenjiang Formation (late Santonian—early Campanian). Besides fossil and mineralogical evidences, the marine transgressive geochemical records on the continental basin sequences are; (1) the sharp increase of the heavier isotopes of ^{34}S , ^{18}O and ^{13}C , and the ratios of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, even up to those of the synchronous normal marine sequences, and (2) the sharp increase of the geochemical indexes for salinity (Sr/Ba), alkalinity $(\text{Ca}+\text{Mg})/(\text{Si}+\text{Al})$, reducibility $(\text{Ni}+\text{Zn})/\text{Ga}$ and sulfur flux (S-normalized concentration).

The relative sea-level curves have been reconstructed based on the geochemical records cited above using mass balance equation. The mass ratios of marine water to fresh water range between 0 and 15 which are calculated by the “mixing degree” method.

Key words: nearshore continental basin, marine-lake connecting events, sedimentary geochemical records