

浅覆盖区陆相盆地高频层序划分与岩石化学的对比

——以大兴安岭北段上黑龙江盆地绣峰组为例

任凤和^{1,2}, 杨晓平³, 周兴福², 李仰春³

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 黑龙江省地质调查总院, 黑龙江哈尔滨 150036

3. 黑龙江省地质调查研究总院齐齐哈尔分院, 黑龙江齐齐哈尔 161005

摘要: 利用岩石化学中各种氧化物及相关比值在陆相盆地沉积作用中的不同表现性质, 讨论了上黑龙江盆地绣峰组Ⅳ级层序形成的气候、水体、沉积体系及基准面变化特征。绣峰组Ⅳ级层序自下部向中部 Fe_2O_3 、 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 、 K_2O 、 Na_2O 等值逐渐减小; MnO 、 FeO 、 MgO 、 LOS 等含量逐渐增高; 层序中部向上部 Fe_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 等值逐渐增大, MnO 、 FeO 等含量逐渐减少, 显示了绣峰组Ⅳ级层序在气候旋回控制下由水体加深、气候潮湿向水体变浅、气候干旱演变的中期基准面对称旋回特征。这一研究成果为陆相盆地高频层序划分提供了新思路。

关键词: 岩石化学; 高频层序; 绣峰组; 陆相盆地; 浅覆盖区。

中图分类号: P53; P59

文章编号: 1000-2383(2004)06-0711-05

收稿日期: 2004-08-28

Comparison of High-Frequency Sequence Division and Petrochemistry in the Continental Basin of Thin Cover Area:

Example with Xiufeng Formation of Upper Heilongjiang Basin in North Daxing'anling

REN Feng-he^{1,2}, YANG Xiao-ping³, ZHOU Xing-fu², LI Yang-chun³

1. School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Heilongjiang Institute of Geological Survey, Harbin 150036, China

3. Qoqihar Branch, Research Institute of Regional Geological Survey of Heilongjiang, Qoqihar 161005, China

Abstract: Use different expressions of the various oxides and relevant ratio of lithochemistry in continental basin, this paper discusses the forming climate, water body, depositional system and base level characteristics of level IV sequence in Xiufeng Formation of upper Heilongjiang basin. Fe_2O_3 , $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, K_2O , Na_2O , etc. decreased gradually from bottom to middle in level IV sequence of Xiufeng Formation; MnO , FeO , MgO , LOS , etc. increased gradually; from middle to top, Fe_2O_3 , K_2O , Na_2O , etc. increased gradually, MnO , FeO , etc. decreased. The symmetrical cycle characteristics show that the base level of the middle period is from a deep water body and a damp climate, changing to a shallow water body and dry climate in level IV sequence of Xiufeng Formation. This study provides a new thought for high frequency sequence division of continental basin.

Key words: petrochemistry; high-frequency sequence; Xiufeng Formation; continental basin; shallow cover area.

上黑龙江盆地是中国东北典型的浅覆盖陆相断陷盆地(图1), 盆内钻孔、露头资料少, 以往地质工作研究程度低, 对盆地层序地层研究较少。笔者等通过几年来在上黑龙江盆地沉积岩区工作, 发现该盆

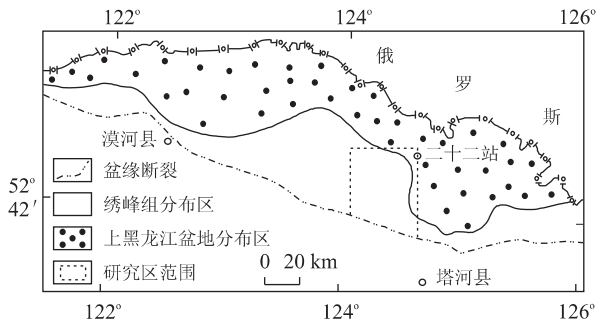


图 1 上黑龙江盆地绣峰组分布

Fig. 1 Distribution of Xiufeng Formation in upper Heilongjiang basin

地沉积作用、地层结构变化有一定规律性,且重要沉积—构造界面易于识别,较适合层序地层划分,根据陆相盆地层序地层理论(解习农等,1996;郭建华等,1998;罗立民,1999;李增学等,2000;池秋鄂和龚福华,2001;刘招君等,2002),对该盆地进行了低频(构造)层序(I、II、III级)和低频(IV级)层序划分和研究。在高频(IV级)层序研究中发现,层序内沉积岩岩石化学各氧化物含量变化与高频层序成因沉积体系变化之间存在明显的相关性,暗示岩石化学成分与高频层序变化存在某种内在的成因联系。本文在上黑龙江盆地绣峰组高频层序划分基础上,从岩石化学角度对高频层序作了进一步研究。

1 绣峰组高频层序

绣峰组分布在上黑龙江盆地靠近盆缘一带,是上黑龙江盆地在中侏罗世快速沉降期沉积产物,相当于盆地第1个III级层序,属盆地早期低水位—湖侵体系域沉积,内部由5个IV级层序组成,中、上部3个IV级层序顶底较齐全,岩石化学样品分布均匀,其间由较明显的冲刷界面分割,层序结构总体为退积型,下部由辫状河相砂岩、砾岩组成,中部由曲流河及浅湖相砂岩、粉砂岩组成,上部由曲流河相砂岩、粉砂岩组成,多发育钙质、铁质砂岩层。3个层序均表现由底向上岩石粒度变细再变粗型;显示水体由浅变深再变浅的沉积旋回特征,与Cross(1994)高分辨率层序中期基准面对称旋回十分吻合。说明该3个IV级层序具有下部水体浅、气候较干旱,中部水体深、气候较潮湿,上部水体又变浅、气候变干旱的气候变化旋回特征,与Fisher、Mitchum(罗立民,1999)、郭建华等(1998)、罗立民(1999)、池秋鄂和龚

福华(2001)、刘招君等(2002)所述高频层序受米兰科维奇地球运动周期影响的气候变化控制的理论相符。

2 岩石化学特征

沉积岩的粒度、碎屑组分对岩石化学成分有一定影响,本次研究在绣峰组不同层位中共采取了37个岩石化学样品,其氧化物含量在砂岩—泥岩中均有不同程度变化,为了保证样品分析结果的统一性和准确性,本文在绣峰组中上部3个IV级层序内均匀地选择了16个粒度、碎屑成分变化较小的细砂岩与粉砂岩样品,其分析结果见表1。

2.1 Fe_2O_3 、 FeO

沉积岩中Fe主要赋存在副矿物中,如磁铁矿、褐铁矿、黄铁矿及黑云母、石榴石。表生作用的陆相沉积,尤其是河流沉积作用是在氧化环境下进行的,沉积过程中原岩中黄铁矿、菱铁矿等低价铁多与氧结合,形成 Fe^{3+} 。当温度增高到 10°C 时, Fe^{2+} 在原岩未完全分解之前,可以从铝硅酸盐矿物晶格中就地氧化为 Fe^{3+} 。陆相盆地中以河湖沉积作用为主,且断陷盆地中河流沉积作用更为发育,一般沉积作用多在 10°C 以上进行,所以在陆相断陷盆地沉积过程中 Fe^{3+} 较稳定,易形成褐铁矿(Fe_2O_3)等高氧铁质矿物沉淀,使得岩石中 Fe_2O_3 大于 FeO (刘英俊等,1984)。

在沉积过程中,沉积物被不断埋藏,与底层水隔绝,处在还原状态,并随着(沉降)速度加大,水体加深还原性增高,沉积物先前沉积的 Fe^{3+} 矿物多被还原成 Fe^{2+} ,形成还原条件下稳定的低价氧化铁矿物(绿泥石),导致沉积岩中的 Fe_2O_3 小于 FeO (刘英俊等,1984)。从表1中可见,绣峰组岩石中 Fe_2O_3 普遍小于 FeO ,说明该组在沉积成岩过程中总体为还原环境,总体反映了盆地沉降与埋藏(沉积)速度较快特征。局部 Fe_2O_3 大于 FeO ,说明沉积成岩过程中存在一段氧化过程,从层序地层上看(图2),该种氧化标志主要发育在层序顶部,并且从层序底部和中部 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 值逐渐减少,由中部向上部 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 值逐渐增高,说明在沉积成岩过程中,层序下部因沉降速度快,水体变深,气候变潮湿,还原性增强;中部→上部沉降速率降低,沉积速率加大,水体变浅,气候变干旱,氧的含量增多,还原性减弱,氧化性增高,此特征与绣峰组3个IV级层序内沉积体系变化非常吻合。层序顶部埋深最浅,氧的含量也最

表 1 绣峰组主要化学成分分析

Table 1 Major chemical compositions of Xiufeng Formation

 $w_B/\%$

氧化物	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
K ₂ O	3.36	2.81	2.3	2.9	4.0	3.1	3.33	3.1	3.08	2.8	2.5	2.75	3.79	4.35	4.1	2.94
Na ₂ O	4.26	3.0	2.95	2.95	3.16	2.95	3.03	2.9	2.43	2.8	2.35	2.78	3.85	3.3	3.45	3.91
Fe ₂ O ₃	0.86	0.21	1.68	1.29	2.57	1.06	1.55	1.58	2.86	1.05	1.76	1.55	1.75	0.62	0.59	1.1
FeO	1.90	2.54	2.66	2.88	1.90	2.68	2.54	2.80	2.32	3.16	2.73	2.89	1.58	1.02	0.76	1.94
Fe ³⁺ /Fe ²⁺	0.41	0.07	0.57	0.41	1.23	0.37	0.56	0.5	1.12	0.3	0.59	0.49	1.01	0.56	0.69	0.52
SiO ₂	68.76	70.34	70.28	68.96	68.8	66.64	70.58	66.64	67.68	68.9	72.4	71.58	72.96	74.12	74.44	73.0
Al ₂ O ₃	14.1	13.55	14.42	14.64	15.01	14.39	13.55	13.28	12.63	13.92	12.26	13.33	13.55	13.52	13.25	13.0
MgO	1.08	1.45	1.52	1.94	0.27	2.17	2.04	1.68	1.78	1.7	1.86	1.78	0.34	0.5	0.65	0.86
CaO	1.54	1.97	0.73	0.88	3.0	2.44	1.09	3.42	2.55	1.49	1.02	0.91	0.77	0.84	0.4	0.67
MnO	0.02	0.07	0.06	0.02	0.09	0.07	0.08	0.06	0.07	0.07	0.07	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
MnO/MgO	0.019	0.05	0.04	0.03	0.07	0.04	0.03	0.05	0.03	0.04	0.04	0.04	0.06	0.04	0.03	0.02
LOS	2.14	3.64	2.64	3.16	2.64	3.72	2.1	3.82	3.58	2.84	2.26	1.82	1.26	0.98	0.96	2.0

注:样品由黑龙江省地调总院齐齐哈尔分院测试。

多, Fe^{3+}/Fe^{2+} 最高。($Fe^{3+} > Fe^{2+}$), 反映了暴陆氧化状态特点, 可以判断其上部没有很快被新的沉积物覆盖, 而处于一种短暂的沉积间断状态。宏观上层序顶部发育褐红色铁质砂岩层, 在盆地分布较稳定, 有一定对比性, 代表盆地内一种等时性的暴陆沉积间断, 对于盆地的层序地层划分具有重要标志意义。

成岩后期, 绣峰组沉积物主要经历了构造抬升、掀斜及风化作用。构造作用对铁的变化影响不大, 即使断裂、节理附近常形成一些矿化、蚀变, 在采样过程中也可以避开; 风化作用会使岩石中 Fe^{3+} 增高, 而对 Fe^{3+}/Fe^{2+} 值在各单层间的异常差变化影响很小。所以利用 Fe_2O_3 、 FeO 含量变化确定氧化暴陆界面及研究层序内部水体、气候变化在浅覆盖区是一种有效的方法。

2.2 K₂O、Na₂O

K、Na 主要赋存在含 K、Na 的硅酸盐矿物中(长石), 在表生作用中 K、Na 含量主要受气候条件、岩石组分及粒度等影响(刘英俊等, 1984; 南京大学地质系, 1984), 绣峰组岩石物质主要来自上黑龙江盆地南缘古生代酸性岩浆岩地区, 物源类型较简单, 细砂岩、粉砂岩主要由长石、石英组成, 长石含量较稳定, 多在 40%~50% 之间, 本文选择的细砂岩、粉砂岩样品粒度较小, 所以样品中岩石组分和粒度对岩石中 K、Na 含量影响很小。K、Na 在沉积作用中均具有由干燥→潮湿气候含量逐渐减少的特点。因为潮湿气候条件下, 盆地内水的补给量大于蒸发量, 含 K、Na 的硅酸盐矿物易溶解并形成可溶性盐赋存在水体中, 以致被水体搬运走(刘英俊等, 1984; 南京大学地质系, 1984)。在干燥气候条件下, 盆地内水的

蒸发量大于补给量, 使水中 K、Na 含量增高形成 K、Na 盐矿物沉淀(刘英俊等, 1984; 南京大学地质系, 1984)。从图 2 中可见, 绣峰组岩石的 K₂O、Na₂O 含量自层序 IV₂、IV₃ 底部向中部逐渐减少, 由中部向上部逐渐增高; 表明沉积成岩过程中, 层序由下部向中部是在气候逐渐变潮湿环境下沉积的, 盆地内水的补给量大于蒸发量, 处于水体逐渐加深、基准面上升的快速沉降阶段; 自层序中部向上部气候逐渐变干燥, 盆地内水的蒸发量大于补给量, 进入水体变浅、基准面下降的缓慢沉降、快速沉积阶段。该种气候干湿变化旋回与沉积体系水环境变化及高分辨率层序基准面旋回变化特征十分吻合。层序顶部 K₂O、Na₂O 相对较高, 说明沉积作用是在干燥气候条件下进行的, 不难推断此时盆地内水的补给量小于蒸发量, 盆地内水量贫乏, 沉降和沉积速度缓慢, 显示饥饿沉积的特征。

2.3 MnO、MgO

Mn 在表生作用中与 Fe 的性质相似, 在氧化—还原条件下具有变价特点。氧化环境中 Mn 多以高价氧化物形式存在(软锰矿), 还原环境中则以低价 Mn^{2+} 形式赋存在矿物中(刘英俊等, 1984)。从绣峰组岩石 MnO 的含量曲线上看(图 2), MnO 的含量自层序下部向中部逐渐增多, 由中部向上部逐渐减少, 说明自层序下部向中部还原性逐渐增强, 暗示水体逐渐变深、气候逐渐变潮湿, 处于基准面上升的快速沉降阶段; 由中部向上部氧化性增强, 显示水体变浅、气候变干、基准面开始下降的沉降缓慢的沉积特点。层序顶部 MnO 含量最低, 表明该时沉积物埋藏最浅, 处于富氧、贫水、气候较干旱的沉积间断状态。

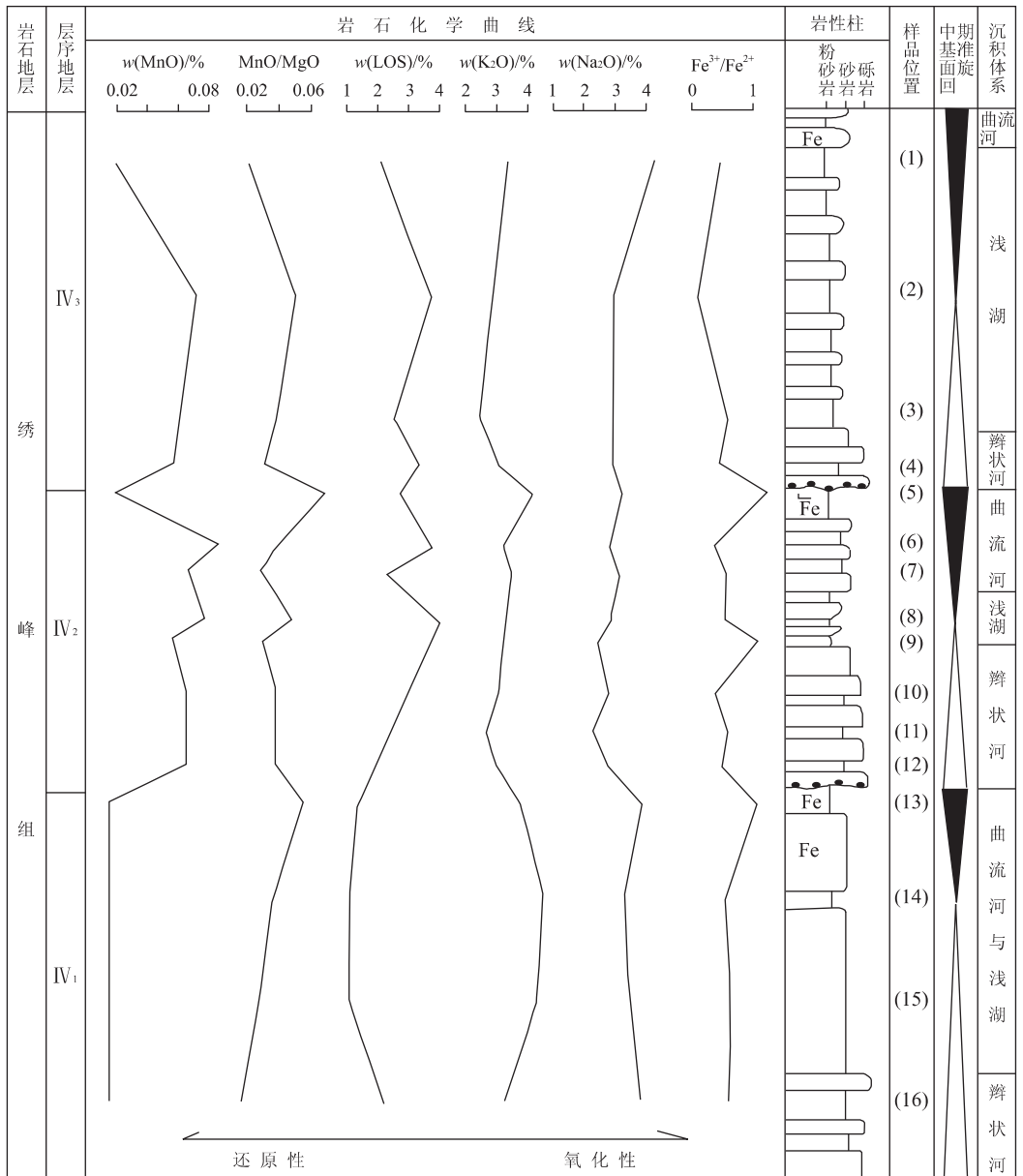


图 2 绣峰组 IV 级层序与岩石化学曲线对比

Fig. 2 IV level sequence and lithochemical chart contrasting of Xiufeng Formation

MgO 和 MnO 的性质相似, 均能在碱性还原状态下稳定存在. 但 Mg 的氧化程度和电价比较稳定, 碱性程度比 Mn 高, 还原电位(-2.375)比 Mn(1.49)低, 而 Mn 与氧的亲合力大于 Mg, 所以在表生作用中, MnO/MgO 的比值具有随着氧化性加强而增高的特点(刘英俊等, 1984). 从表 1 中可见, MgO 的含量在(1)、(5)、(13)样品中最低, 这 3 个样品位于层序顶部, 反映了层序顶部氧化作用强的特点, 其余样品位于层序中下部, MgO 含量相对较高, 说明其成岩过程中属于还原性环境. 从 MnO/MgO 比值曲线上看(图 2), MnO/MgO 比值在层序 IV₂ 中具有由下

部向中部逐渐变小, 再由中部向上部逐渐增大特点, 说明该层序由底部向中部氧化性变弱, 暗示水体逐渐变深、气候变潮湿、基准面快速上升的快速沉降的沉积特点; 层序中部向上部氧化性变强, 显示了水体变浅、氧气增多、气候变干、基准面下降的缓慢沉降的沉积特征. 层序 IV₁、IV₃ 部分 MnO/MgO 曲线与 IV₂ 曲线相似, IV₃ 上部和 IV₁ 下部 MnO/MgO 曲线形态与 IV₂ 曲线相反, 可能与局部环境有关.

2.4 烧失量

岩石化学成分烧失量(LOS)在沉积岩中基本上代表含水量和有机质含量大小, LOS 高说明有机质

和水含量高,代表温湿的还原环境,反之为氧化环境(南京大学地质系,1984)。从表 1 中可见绣峰组 16 个样品仅有 2 个在 0.96%~0.98%之间,其余多在 2%~4%之间,表明绣峰组总体沉积环境为还原环境,从层序对比曲线上看(图 2),由层序 IV₂、IV₃ 的底部向中部 LOS 逐渐增高,自中部向上部 LOS 又逐渐变低,基本呈对称旋回式变化,说明沉积过程中含水和有机质逐渐增多,自中部向上部则含水量与有机质逐渐减少,反映层序形成早中期为一个水体逐渐变深、气候逐渐潮湿的基准面上升过程,中晚期为水体变浅、气候变干旱的基准面下降过程,与绣峰组 IV 级层序内沉积体系变化吻合。

3 结论

通过以上几种氧化物含量及相关比值在层序纵向上分布特征分析,证实绣峰组 IV 级层序顶部代表氧化环境成因的 Fe₂O₃、Fe³⁺/Fe²⁺、MnO/MgO 及干燥环境成因的 K₂O、Na₂O 值相对较高,并且自层序下部向中部 Fe₂O₃、Fe³⁺/Fe²⁺、MnO/MgO、K₂O、Na₂O 值逐渐变小,指示还原环境 MnO、FeO、MgO、LOS 含量逐渐增高;由层序中部至上部 Fe₂O₃、Fe³⁺/Fe²⁺、MnO/MgO、K₂O、Na₂O 值逐渐增高,MnO、FeO、MgO、LOS 含量逐渐减少。表明绣峰组 IV 级层序由下部向中部是一种沉降速率逐渐增大,水体不断加深、气候逐渐趋向潮湿、还原性逐渐增强的基准面不断上升的沉积过程;由中部向上部为沉降速率减缓、水体变浅、气候变干、氧化性增强的基准面下降过程,顶部 Fe₂O₃、Fe³⁺/Fe²⁺ 等值高,代表了沉积间隔特征。这些特征与绣峰组 IV 级层序内沉积体系、沉积作用变化及典型高频层序沉积作用以及 Cross(1994)高分辨率中期基准面旋回理论非常吻合,表明绣峰组岩石化学与古气候、沉积体系变化之间存在自然的因果关系。因此,利用岩石化学方法研究浅覆盖区陆相高频层序沉积作用特点及正确识别层序界面是一种十分有效的方法。

References

Chi, Q. E., Gong, F. H., 2001. Foundation and application of sequence stratigraphy. Petroleum Industry Press, Beijing, 9-40 (in Chinese).
Cross, T. A., 1994. High resolution stratigraphic correlation

from the perspective of base-level cycles and sediment accommodation. In: Proceeding of northwestern European sequence stratigraphy congress, 105-123.

- Department of the Geology in Nanjing University, 1984. Geochemistry. Science Press, Beijing, 339-359 (in Chinese).
Guo, J. H., Gong, S. B., Wu, D. S., 1998. Sedimentary sequence of the T-R cycle and studied example in the continental fault lacustrine basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 16(1): 8-14 (in Chinese with English abstract).
Li, Z. X., Wei, J. C., Wei, Z. D., et al., 2000. Sequence stratigraphy of coal-bearing basins. Geological Publishing House, Beijing, 34-90 (in Chinese).
Liu, Y. J., Cao, L. M., Li, Z. L., et al., 1984. Element geochemistry. Science Press, Beijing, 21-100 (in Chinese).
Liu, Z. J., Dong, Q. S., Wang, S. M., et al., 2002. Introduction to continental sequence stratigraphy & application. Petroleum Industry Press, Beijing, 20-65 (in Chinese).
Luo, L. M., 1999. Three-dimensional high resolution sequence stratigraphy in river-lake depositional system. Geological Publishing House, Beijing, 17-60 (in Chinese).
Xie, X. N., Ren, J. Y., Jiao, Y. Q., et al., 1996. Tectonism of faulted basin and sequence pattern. *Geological Review*, 42(3): 239-244 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 池秋鄂, 龚福华, 2001. 层序地层学基础与应用. 北京: 石油工业出版社, 9-40.
南京大学地质系, 1984. 地球化学. 北京: 科学出版社, 339-359.
郭建华, 宫少波, 吴东胜, 1998. 陆相断陷湖盆 T-R 旋回沉积层序与研究实例. *沉积学报*, 16(1): 8-14.
李增学, 魏久传, 魏振岱, 等, 2000. 含煤盆地层序地层学. 北京: 地质出版社, 34-90.
刘英俊, 曹历明, 李兆麟, 等, 1984. 元素地球化学. 北京: 科学出版社, 21-100.
刘招君, 董清水, 王嗣敏, 等, 2002. 陆相层序地层学导论及应用. 北京: 石油工业出版社, 20-65.
罗立民, 1999. 河湖沉积体系三维高分辨层序地层学. 北京: 地质出版社, 17-60.
解习农, 任建业, 焦养泉, 等, 1996. 断陷盆地构造作用与层序样式. *地质论评*, 42(3): 239-244.