

中国北方宁南盆地古近纪晚期咸化湖盆演化及其区域地质意义

吴小力¹⁾, 李荣西¹⁾, 胡建民²⁾, 程敬华¹⁾, 赵帮胜¹⁾, 刘福田¹⁾, 李得路¹⁾, 覃小丽¹⁾, 李佳佳¹⁾, 刘博彪¹⁾

1) 长安大学 地球科学与资源学院, 西安, 710054; 2) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081

内容提要:本文以宁南盆地北部的贺家口子清水营组剖面为研究目标,对古近纪晚期清水营组的岩性特征、石膏主元素地球化学特征和泥岩有机地球化学特征进行研究,结果表明:清水营组岩性以灰绿—紫红色泥岩、石膏及二者互层为主,可划分为8个二级沉积旋回和3个一级沉积旋回。石膏中CaO含量反映了咸化湖盆中石膏的化学沉积作用,Al₂O₃等为陆源碎屑来源,清水营组下段为盐湖深水环境沉积的纯净石膏;中段石膏沉积的水体较浅。清水营组下段地层泥岩TOC和生烃潜量(S₁+S₂)较高,说明在咸化湖盆演化早期气候较湿润、水体较深;而泥岩降解潜力相对小,反映有机质以高等植物来源为主,陆源输入较多。在此研究基础上,认为宁南盆地清水营组沉积包括:蒸发岩的沉积和碎屑岩的沉积;咸化湖盆演化尚未达到钾盐等盐岩沉淀的高浓缩阶段。咸化湖盆演化主要经历了早期封闭深水盐湖发育阶段、中期封闭浅水盐湖鼎盛阶段和晚期开阔浅水盐湖消亡阶段。宁南盆地古近纪晚期咸化湖盆演化与盆地的持续构造沉降和各次级沉积拗陷最终连为统一的湖泊这一重大区域沉积事件有明显的响应关系。

关键词:咸化湖盆;蒸发岩;石膏;古近纪晚期;宁南盆地

在蒸发作用下,湖盆水体中盐类物质浓度逐渐增加以至产生沉淀,形成的化学沉积岩称为“蒸发岩”,包括碳酸盐岩、硫酸盐岩和氯化物岩等(Mcintyre, 1988; Li Yong et al., 2006; Warren, 2010; Yuan Jianying et al., 2016; Bosboom et al., 2014)。蒸发岩属于化学沉积岩,其形成本质为湖盆水体浓缩而盐度增加,因不同盐类溶解度不同,会依次在湖底产生碳酸盐—硫酸盐—氯化盐等蒸发岩沉积序列,这一过程称为湖盆咸化演化过程(Yuan Jianqi et al., 1983; Sun Dapeng et al., 1995; Lowenstein et al., 2009)。蒸发岩在我国广泛发育,主要分布在东部的渤海湾盆地、南襄盆地和江汉盆地,以及西部的塔里木盆地和柴达木盆地等;白垩系和第三系是我国蒸发岩的主要发育层位(Wu Chongyun, 1993; Feng Zengzhao, 1994; Li Yong et al., 2006; Zhao Zhengyu et al., 2007)。

宁南盆地位于宁夏南部现今新生代沉积地层较广泛分布地区,因后期强烈改造,现今地貌已不具盆地形态,包括六盘山地区及其北部至中卫以南的古近系—新近系广泛出露和分布区(Tang Xiyuan,

1988)。宁南盆地新生界主体缺失古新统,古近系和新近系所含地层自下而上依次为:寺口子组和清水营组、红柳沟组和干河沟组(Deng Hui, 2014)。目前关于宁南盆地的研主要包括:地层对比划分(宁夏回族自治区地质矿产局, 1990, 1996),沉积环境与沉积相研究(Zhang Jin et al., 2005; Fang Jianjun et al., 2009)以及宁南盆地的构造发育机制的研究(Tang Xiyuan et al., 1988; Zhang Jin et al., 2005; Liu Chiyang et al., 2006; Fang Jianjun et al., 2009; Wang Weitao, 2011)。宁南盆地古近系晚期清水营组普遍发育石膏和泥岩的互层,在盆地北部中宁县贺家口子剖面的石膏岩发育累积厚度很大,接近石膏矿床的规模,反映了干旱、封闭的咸化湖盆沉积特征。但是对宁南盆地清水营组沉积时期咸化湖盆详细演化阶段的研究却很少,更缺乏咸化湖盆演化和区域构造演化、沉积作用过程的响应关系研究。

本文在前人研究基础上,以宁南盆地北部的贺家口子清水营组剖面为研究目标,通过野外剖面测量、样品采集和分析测试等手段,对宁南盆地古近系晚期清水营组的岩性特征、石膏主元素地球化学特

注:本文为国家自然科学基金项目(编号:41173055)和中央高校基本科研业务费专项资金(编号:310827172101)联合资助的成果。

收稿日期:2016-10-08;改回日期:2017-02-21;责任编辑:郝梓国,黄敏。

作者简介:吴小力,男,1989年生。博士研究生,从事沉积学及油气成藏地质学研究。Email:wxlgeo@163.com。

征、泥岩有机地球化学特征进行研究,分析了宁南盆地古近纪晚期咸化湖盆演化特征,并在此基础上探讨了咸化湖盆演化对区域地质的响应意义。

1 区域地质背景

宁南盆地是在始新世早中期,鄂尔多斯盆地边缘部裂陷解体的大构造背景下发育的断陷盆地(图 1),后期受到青藏高原隆升向外扩展挤压增强的响应而发生冲断、褶皱变形和构造抬升,盆地遭受强烈改造,现今已经不具盆地形态,属于改造残留盆地(Liu Chiyang et al., 2006; Fang Jianjun et al., 2009; Deng Hui, 2014)。宁南盆地主体位于宁夏南部,泛指银川地堑以南古近系红色地层广泛分布的地区。盆地基底主要为前新生界地层,受早白垩世六盘山等盆地发育和后期区域抬升剥蚀的影响,基底地层明显不同,最新地层为下白垩统,最老地层为元古界,但以下白垩统为主(Fang Jianjun et al., 2009; Deng Hui, 2014)。宁南盆地自下而上依次发育寺口子组、清水营组、红柳沟组和干河沟组地层。

早中始新世,鄂尔多斯盆地西缘南侧开始了裂

陷活动,宁南盆地开始发育,沉积始新统寺口子组河流—冲积扇砂砾岩(图 2);裂陷作用在渐新世仍在持续,使得各个凹陷沉积范围扩大,由于渐新世气候异常干旱(Wang Weitao, 2011),蒸发剧烈发育了内陆干旱湖泊相的泥岩、石膏岩互层的沉积地层;新近纪盆地在经历了一次构造挤压抬升后,沉积范围进一步扩大,发育了河流—湖泊相的泥质岩和细碎屑岩为主的红柳沟组地层;在中新世晚期,青藏高原发生明显隆升,对高原周边环境的远程挤压效应增强,盆地逐渐萎缩,湖相地层减少到消失,宁南盆地沉积了以细碎屑岩和粗碎屑岩为主要岩性的干河沟组(Liu Chiyang et al., 2006; Fang Jianjun et al., 2009; Deng Hui, 2014)。

2 清水营组的岩性特征与沉积环境

咸化湖盆的沉积作用包括两大类:蒸发岩的沉积作用和碎屑岩的沉积作用,这两种沉积作用在盆地发育过程中同时进行,形成了在蒸发岩盆地中蒸发岩和碎屑岩共存的沉积序列(Jin Qiang et al., 2000; Yue Zhipeng et al., 2006)。在湖盆水体浓缩期,随着湖盆水体浓缩、面积减少,以蒸发岩沉积为

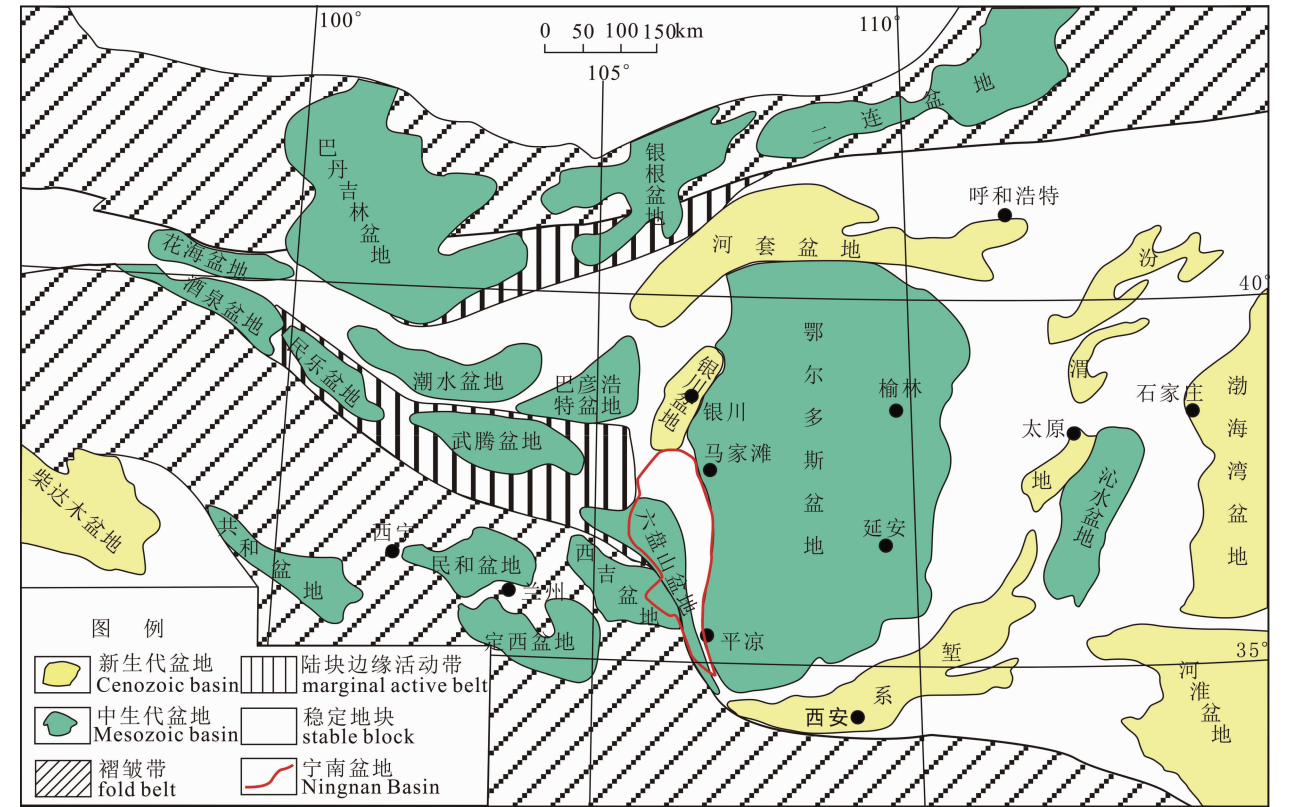


图 1 中国北方宁南盆地范围及鄂尔多斯周缘盆地分布(据刘池洋, 2006)

Fig. 1 Sedimentary basins around the Ordos basin and the location of the Ningnan Basin, North China (modified after Liu Chiyang, 2006)

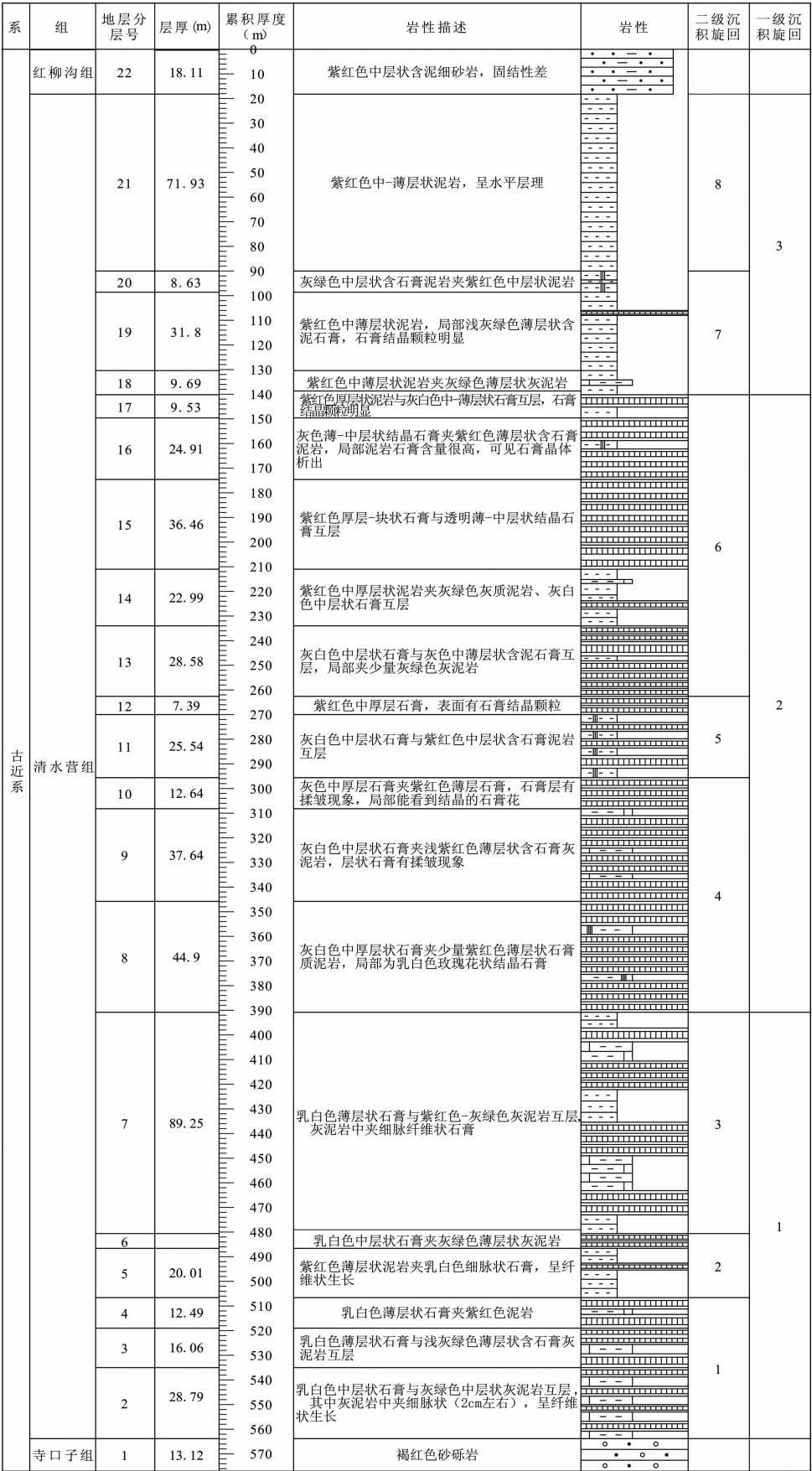


图 3 中国北方宁南盆地清水营组岩性柱状图及沉积旋回划分

Fig. 3 Lithological column and sedimentary cycles of Qingshuiying Formation in Ningnan basin, North China



图 4 中国北方宁南盆地清水营组野外露头及岩性特征

Fig. 4 Sections and lithology of Qingshuiying Formation in Ningnan basin, North China

(a)—灰绿色薄层状泥岩(远照);(b)—灰绿色薄层状泥岩(近照);(c)—层状石膏(近照);(d)—层状石膏(远照);

(e)—纤维状石膏和蜂窝状石膏;(f)—结晶状石膏

(a)—Gray-green thin mudstone(distant view);(b)—gray-green thin mudstone(close view);(c)—bedded gypsum(close view);

(d)—bedded gypsum(distant view);(e)—filament gypsum and honeycomb gypsum;(f)—crystal gypsum

湖盆水体在先沉积的碎屑岩中渗流形成(Wu Tao et al., 2010),也可能与后期的构造运动有关(Xu Tianguang et al., 1997);而结晶状石膏和蜂窝状石膏反映盐湖边缘的浅水—滨岸沉积环境(Wu Tao et al., 2010)。

根据地层剖面岩性划分的二级沉积旋回为 1 个“碎屑岩—蒸发岩”沉积组合;一级沉积旋回为清水营组地层的 3 个岩性分段。结合沉积旋回的划分和不同岩性的环境指示意义,认为宁南盆地古近纪晚期咸化湖盆演化经历的 3 种沉积环境(图 5)。

2.2.1 封闭深水盐湖环境

清水营组下段地层主要以灰绿色泥岩和石膏的互层发育为主,石膏较纯净,以薄层状石膏和少量纤维状发育为主,说明为深水沉积形成;而灰绿色灰质泥岩的发育也说明泥岩沉积时期以较深水的还原环境为主。而石膏和泥岩的互层发育反映清水营组沉

积早期宁南盆相对封闭,在区域气候干湿交替下咸化湖泊湖水浓缩和稀释作用交替进行,为封闭深水盐湖环境。

2.2.2 封闭浅水盐湖环境

清水营组中段地层主要以厚层状石膏的发育为主,夹少量的紫红色为泥岩。石膏以厚层状石膏、蜂窝状石膏和结晶状石膏发育为主,反映石膏为浅—滨湖等浅水沉积环境形成;而少量紫红色泥岩的发育说明在气候持续干旱条件下地表入湖流水变少,带入湖盆的物源碎屑较少,且泥岩主要在浅水氧化带中沉积而被氧化为紫红色。由于气候持续干旱,咸化湖盆在封闭蒸发作用下湖水浓缩变浅,由早期的深湖相变为滨浅湖相为主,形成了典型的封闭浅水盐湖环境。

2.2.3 开阔咸湖环境

清水营组上段地层主要以紫红色中—薄层泥岩

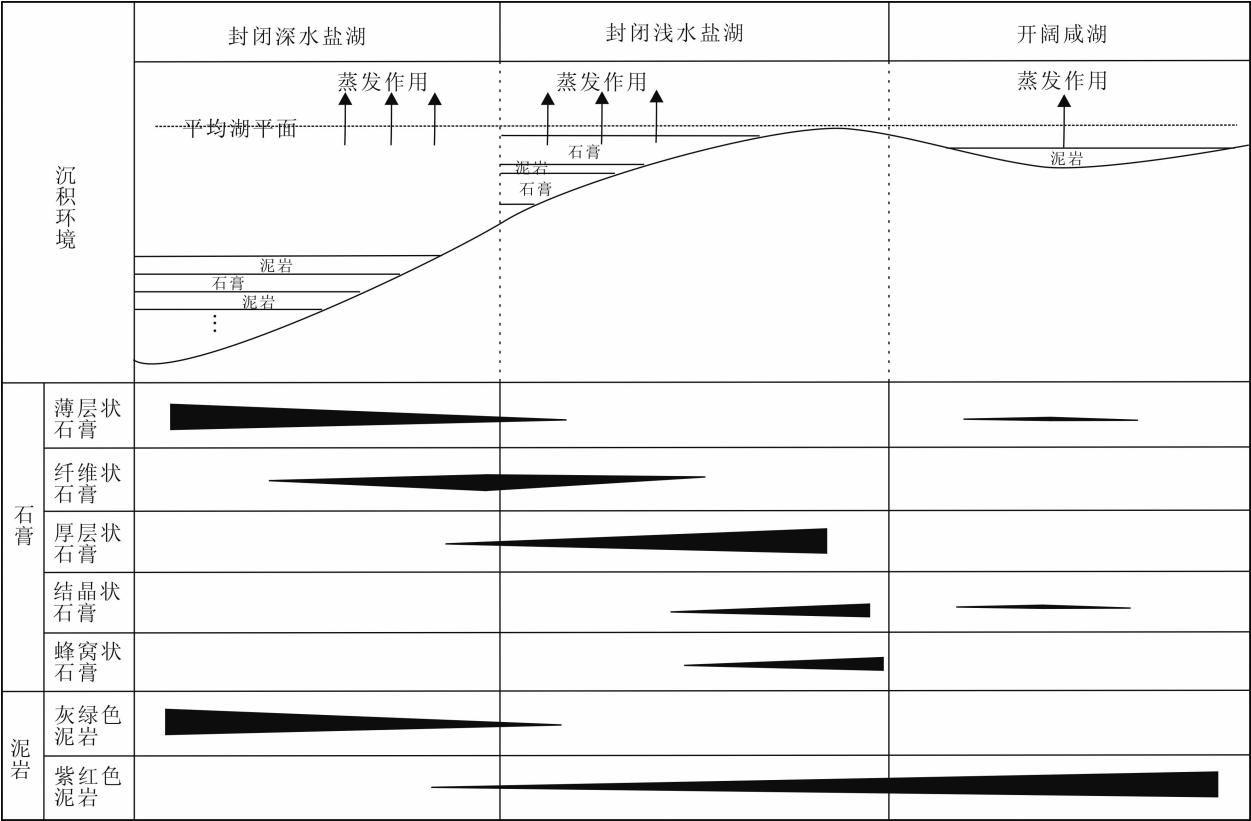


图 5 中国北方宁南盆地清水营组岩石类型及沉积环境

Fig. 5 Rock types and sedimentary environment of Qingshuiying Formation in Ningnan basin, North China

为主,偶夹薄层状石膏。石膏层发育在本段下部且规模很小,主要为层状和结晶状石膏,反映浅水沉积的石膏为主;紫红色泥岩的发育说明在沉积环境变化后,咸化湖盆湖水浓缩终止,石膏沉淀结束,开始以碎屑岩沉积为主,但湖水仍然较浅,泥岩沉积在水体较浅的空气氧化带内,被氧化为紫红色。结合前人研究(Fang Jianjun et al. ,2009;Deng Hui,2014)可知:在清水营组沉积后期,宁南盆地各次级凹陷连为统一的湖泊,结束了互相独立的封闭蒸发演化,变为了开阔的咸湖环境。

3 石膏主量元素分析

主量元素作为造岩元素,其含量与组成岩石的主要矿物相一致(Deng Hongwen, 1993),通过石膏主量元素分析,可以从元素地球化学的角度更准确地研究石膏的矿物组成和相应沉积环境(Ying Lichao et al. ,2012;Lan Xianhong, et al. ,2014),进而对咸化湖盆演化特征进行进一步分析。

本次研究主要采集了清水营组 20 块石膏样品进行主量元素测试,主要测试项目包括:MgO、CaO、Na₂O、K₂O、SiO₂、Al₂O₃、Ti₂O 和 P₂O₅(表 1)。在此基础

上绘制了清水营组石膏主量元素剖面分布图(图 6)。

表 1 清水营组石膏主量元素含量
Table 1 Concentration of major elements of gypsum
in Qingshuiying Formation

序号	岩性	MgO (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Ti ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)
1	层状石膏	0.115	28.57	0.07	0.103	1.6	0.478	0.021	0.009
2	层状石膏	0.151	28.68	0.078	0.082	1.27	0.424	0.017	0.01
3	层状石膏	0.107	28.84	0.073	0.076	1.09	0.321	0.014	0.008
4	结晶状石膏	0.304	28.83	0.06	0.091	1.15	0.348	0.019	0.01
5	结晶状石膏	0.067	28.99	0.062	0.022	0.35	0.126	0.006	0.007
6	结晶状石膏	0.087	28.81	0.073	0.06	1.33	0.257	0.017	0.014
7	结晶状石膏	0.069	29.01	0.094	0.042	0.526	0.169	0.009	0.006
8	纤维状石膏	0.121	28.85	0.063	0.046	0.974	0.247	0.012	0.008
9	纤维状石膏	0.219	28.39	0.065	0.129	1.55	0.468	0.024	0.01
10	纤维状石膏	0.065	29.12	0.148	0.033	0.687	0.131	0.013	0.007
11	纤维状石膏	0.123	28.89	0.106	0.056	0.667	0.195	0.01	0.006
12	纤维状石膏	0.922	27.09	0.49	0.301	4.95	1.06	0.053	0.017
13	纤维状石膏	0.148	28.71	0.054	0.054	0.957	0.18	0.012	0.009
14	纤维状石膏	0.272	28.14	0.148	0.147	2.33	0.576	0.026	0.012
15	纤维状石膏	0.419	27.84	0.155	0.194	3.18	0.766	0.041	0.017
16	层状石膏	0.105	28.81	0.093	0.045	0.801	0.21	0.013	0.009
17	层状石膏	0.717	27.6	0.163	0.227	3.84	0.9	0.046	0.014
18	层状石膏	0.893	27.64	0.165	0.16	4.51	0.695	0.041	0.018
19	层状石膏	0.814	26.16	0.191	0.377	6.27	1.52	0.073	0.029
20	层状石膏	0.237	27.63	0.188	0.17	4.84	0.76	0.05	0.014

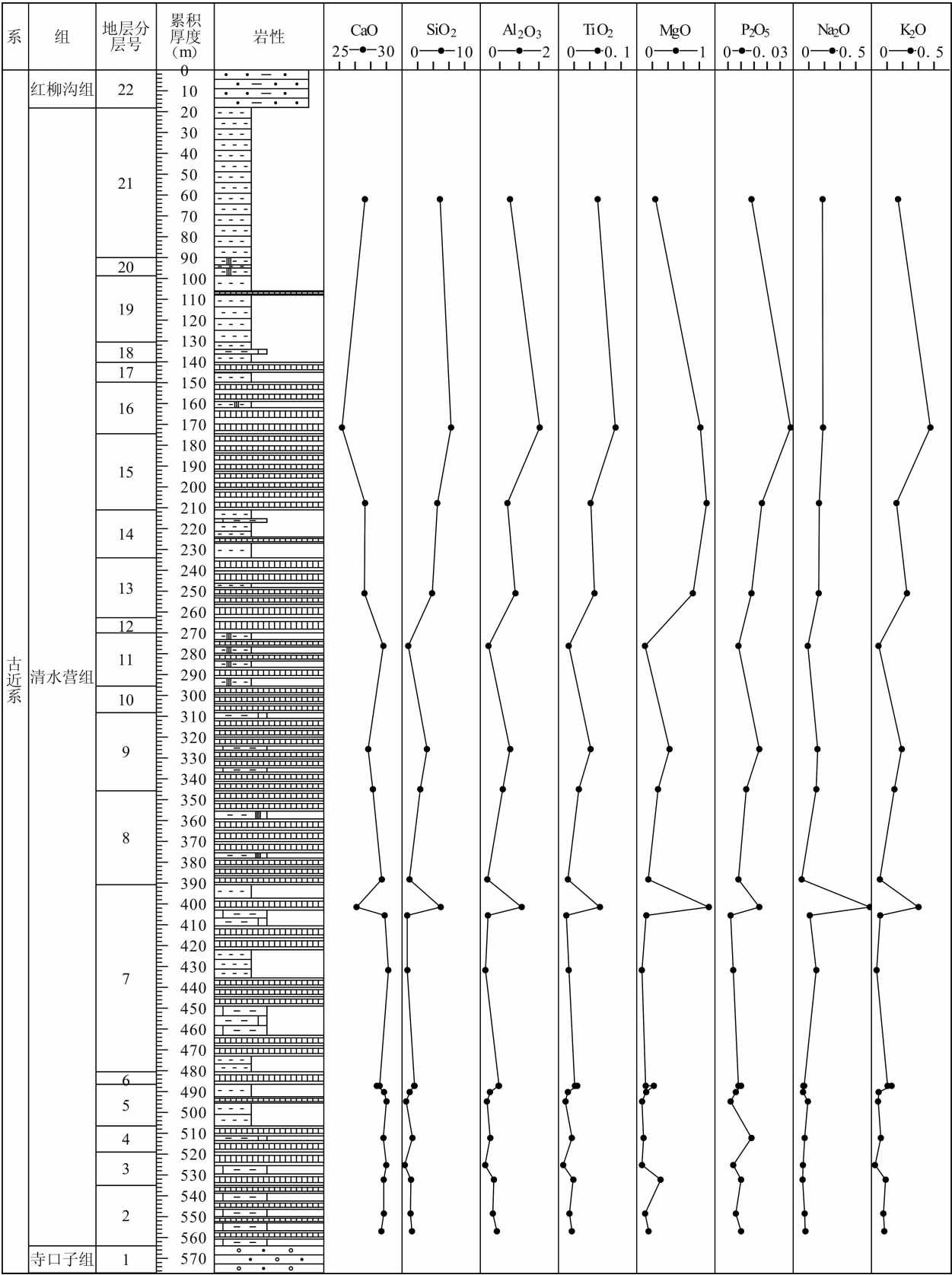


图 6 清水营组石膏主量元素(%)剖面变化图

Fig. 6 Distribution of major elements(%) of gypsum in Qingshuiying Formation profile

根据主量元素的富集规律(Deng Hongwen,1993; Yang Jianghai et al,2007;Ji Yunping,2016),在石膏岩中主要存在 2 种元素富集作用:陆源碎屑物质输入和咸化湖盆盐类物质的沉淀成岩作用。据此分析, SiO_2 、 Al_2O_3 、 Ti_2O 和 P_2O_5 的含量主要反映了陆源碎屑物质输入程度; CaO 的富集反映了咸化湖盆中 CaSO_4 在咸水中沉淀作用;而 MgO 、 Na_2O 和 K_2O 的来源上述 2 种元素富集作用都有可能,但是根据研究区常量元素在剖面上的变化情况和 MgO 、 Na_2O 和 K_2O 与 Al_2O_3 的相关性(图 7b、图 7c 和图 7d)分析,其含量变化和 Al_2O_3 的变化一致,具有极强的相关性,因此石膏中的 MgO 、 Na_2O 和 K_2O 的主要为陆源碎屑来源,而非盐类物质的浓缩沉淀作用。

从石膏主量元素分析来看,主要有如下认识:

(1)石膏中 CaO 和 Al_2O_3 含量呈明显的负相关性(图 7a),说明在咸化湖盆沉积过程中蒸发岩的沉积作用和碎屑岩的沉积作用为互相“对立”的沉积过程。

(2) CaO 含量反映了咸化湖盆中石膏的化学沉积作用; Al_2O_3 含量和 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Ti_2O 和 P_2O_5 含量呈明显的正相关性,说明它们为陆源碎屑来源,反映碎屑岩的沉积作用;其中 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 主要为陆源碎屑来源而非盐类物质蒸发沉淀来源,说明宁南盆地清水营组沉积时期,咸化湖盆演化尚未达到盐岩(钾盐等)沉淀的高浓缩阶段。

(3)清水营组下段(2~7 层), CaO 含量较高, MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Ti_2O 和 P_2O_5 含量较低,反映石膏岩为深水水体分层沉积的纯净石膏。而第 7 层顶部出现 CaO 的低值区,说明存在一次大的陆源碎屑输

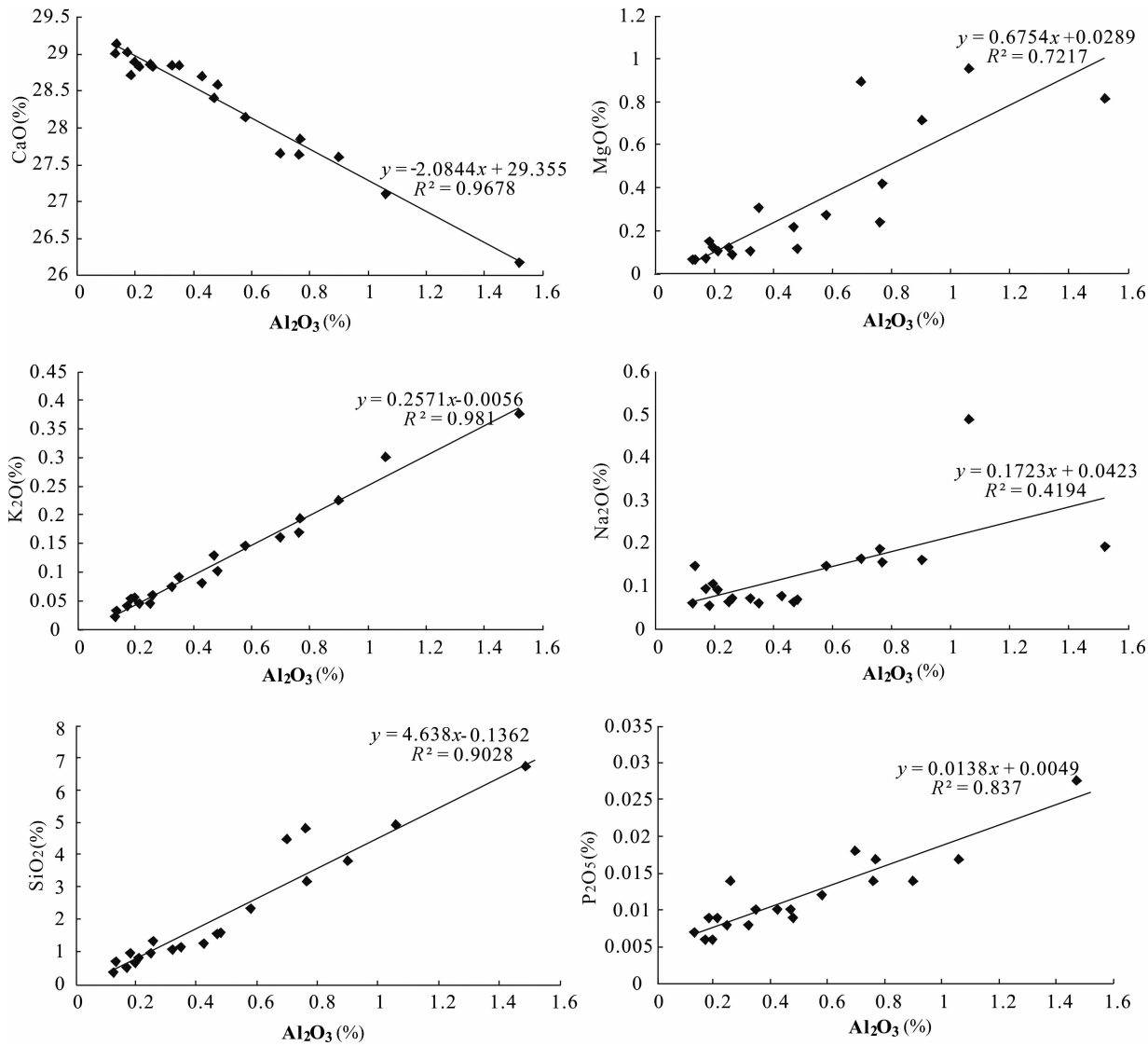


图 7 清水营组石膏主量元素相关性分析图

Fig. 7 Correlation analysis of major elements of gypsum in Qingshuiying Formation

入事件,可能为一期洪水事件,同时 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Ti_2O 和 P_2O_5 含量变低,印证了石膏中混入了较多陆源碎屑物质的推测。

(4)清水营组中段(8~17 层), CaO 含量变化较大,但总体呈向上变小趋势,同时 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Ti_2O 和 P_2O_5 含量较高,总体呈向上变大趋势,这些综合反映清水营组中段石膏沉积的水深变浅,浅水区沉积的石膏陆源碎屑混入增多。

(5)清水营组上段(18~21 层),石膏发育很少,本段下部发育的少量的薄层状和结晶状石膏, CaO 含量中等,可能反映在清水营沉积后期沉积环境变化,湖泊水体有所变深,石膏陆源碎屑混入减少。

4 泥岩有机地化特征

咸化湖盆的沉积作用既包括蒸发岩的沉积又包括碎屑岩的沉积,而在宁南盆地清水营组中沉积的碎屑岩主要为泥岩,泥岩中的有机质蕴含着丰富的地球化学信息,是湖泊古环境研究的重要基础资料(Miao Zhongying et al.,2014)。因此通过对清水营组泥岩的有机地化特征进行研究,也能从另一个的角度对古近纪晚期宁南盆地的咸化湖盆演化特征进行探究。

4.1 有机质丰度

有机质丰度是指单位岩石中有机质的数量,而影响泥岩中的有机质丰度的主要因素为:有机质来源和保存条件(Zhang Huifang,2016)。在陆相咸化湖盆中,泥岩中的有机质丰度高反映沉积期气候较湿润、水体较深,生物生产率较高、有机质保存条件好。通过对清水营组 38 件泥岩样品进行 TOC 和岩石热解测试,结果显示(图 8):清水营组下段地层 TOC 和生烃潜量(S_1+S_2)为整个地层最高,向上变小,说明在咸化湖盆演化早期气候间断湿润、水体较深,而之后气候变得持续干旱、水体变浅,有机质产率和保存条件均变差。在清水营组中段 9~11 层 TOC 和生烃潜力(S_1+S_2)出现高值,反映在此地层沉积期气候较短暂湿润、水体相对较深(图 9)。

4.2 有机质类型

湖相沉积物有机质有 2 种来源,分别为外源有机质和内源有机质。外源有机质主要为河流从陆地带来的陆生高等植物;而内源有机质主要为生长在湖泊中的水生生物(Miao Zhongying et al.,2014)。如果有机质中以陆生高等植物来源的有机质为主,则有机质类型偏腐殖型,有效碳含量少,降解潜力小(Qin Jianzhong,2005);如果有以水生生物来源的有机质为主,则有机质类型偏腐泥型,有效碳含量大,降解潜力

大。从清水营组降解潜力剖面来看(图 8),清水营组下段泥岩降解潜力相对小,反映有机质以高等植物来源为主,正好印证了咸化湖盆演化早期陆源输入较多、水体较深的特征;而清水营组中段泥岩降解潜力相对大,反映有机质以水生生物来源的为主,推测其主要为发育在咸湖中的少量嗜盐生物提供。

4.3 有机质演化程度

本次研究测试了贺家口子清水营组泥岩 5 件样品的镜质体反射率(R_o),结果显示: R_o 分布在 0.55%~0.66%之间,平均为 0.60%(表 2)。依据烃源岩成熟度阶段划分标准(Qin Jianzhong,2005),研究区所有样品都是处于低成熟生烃阶段,说明有机质演化以厌氧细菌的生物化学作用为主。

在岩石热解参数中产率指数(S_1/S_1+S_2)反映有机质中已生烃率,可以很好的表征有机质的演化程度。从清水营组有机质产率指数剖面来看,产率指数波动很大,说明咸化湖盆演化过程中水体涨落频繁,沉积环境氧化-还原条件周期变化;而清水营组下段和上段有机质产率指数相对较高,说明在宁南盆地清水营组沉积期咸化湖泊演化的早期和晚期湖水相对较深,为还原条件,有利于厌氧细菌的生物化学作用对有机质的分解。

表 2 清水营组泥岩镜质体反射率(R_o)
Table 2 R_o of mudstone in Qingshuiying Formation

样品名	HP014-01	HP020-01	HP028-02	HP041-08	HP044-05
R_o (%)	0.6	0.66	0.55	0.6	0.57

5 讨论

5.1 咸化湖盆演化特征

古近纪晚期,宁南盆地在持续的构造裂陷作用下盆地进一步发育,但是由于区域气候的干旱化、炎热化(Gu Yansheng et al.,2000),使得湖盆水体持续浓缩、咸化,使得清水营组沉积时期宁南盆地经历了一个典型的咸化湖盆演化序列。

通过上述对贺家口子清水营组剖面的岩性特征、石膏主量元素分析和泥岩的有机地球化学特征研究,认为宁南盆地清水营组沉积作用包括蒸发岩的沉积和碎屑岩的沉积,而且咸化湖盆在尚未达到盐岩(钾盐等)沉淀的高浓缩演化阶段时,开始淡化消亡。宁南盆地古近纪晚期咸化湖盆演化主要经历了三个阶段。

(1)早期封闭深水盐湖发育阶段

此阶段区域气候开始干旱化,但仍然以干湿气候交替为主;湖盆水体较深,有机质保存条件较好,发育灰绿色灰质泥岩和石膏的互层的清水营组下段地层,

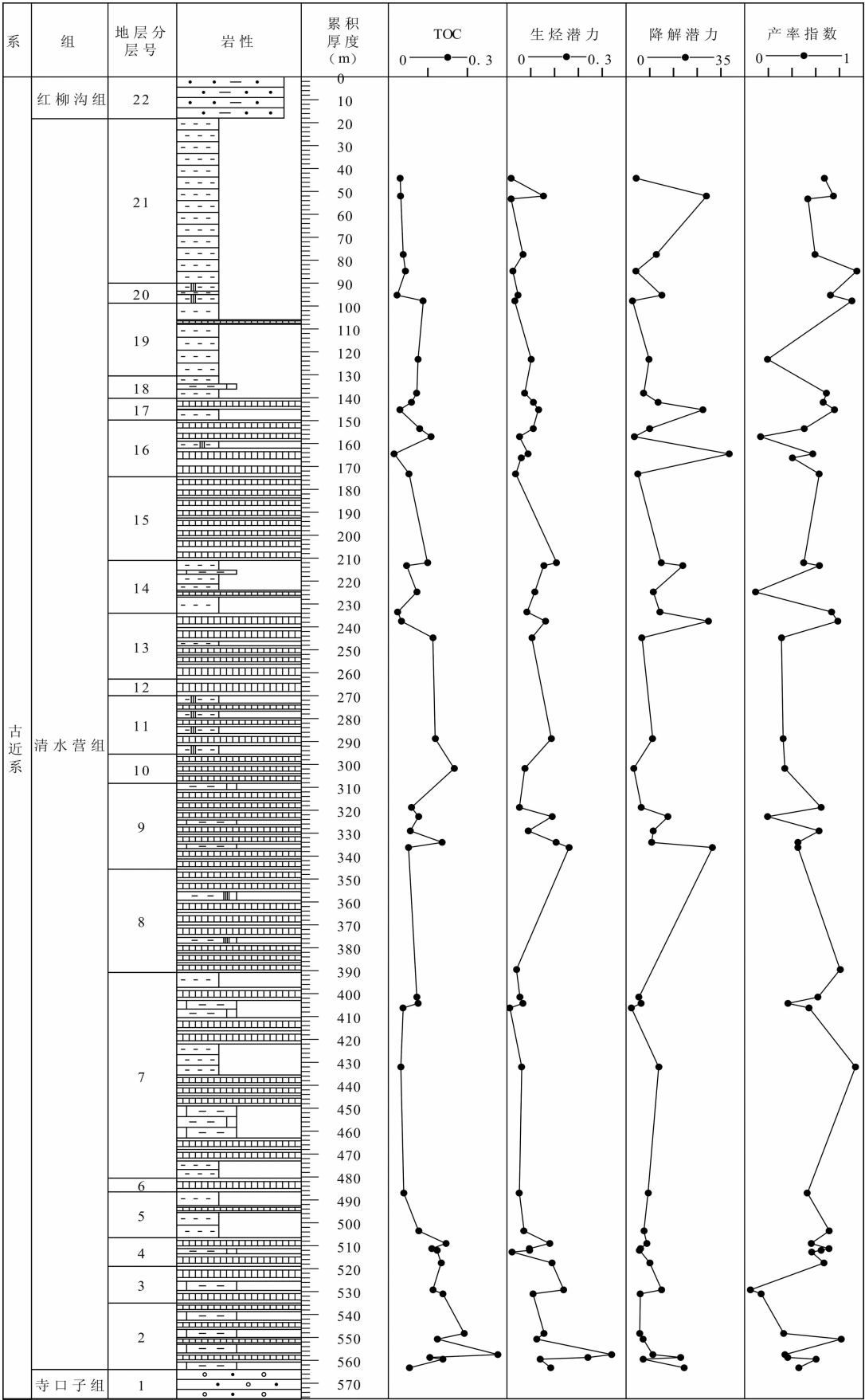


图 8 清水营组泥岩有机地化参数剖面变化图

Fig. 8 Distribution of organic geochemical parameters of mudstone in Qingshuiying Formation profile

石膏以薄层状石膏和少量纤维状发育为主,石膏较纯净;入湖的陆源碎屑物质较多,泥岩中有机质含量较高且陆源高等植物输入为主。

(2) 中期封闭浅水盐湖鼎盛阶段

此阶段区域气候持续炎热干旱;湖盆水体变浅,有机质保存条件较差,发育厚层状石膏夹少量的紫红色泥岩的清水营组中段地层。石膏以层状石膏、蜂窝状石膏和结晶状石膏发育为主,浅水沉积的石膏中混入较多的陆源碎屑物;入湖的高等植物有机质较少,泥岩中有机质含量较低且以湖泊中低等水生生物贡献为主。

(3) 晚期开阔浅水盐湖消亡阶段

此阶段区域气候持续干旱,但由于宁南盆地各次级拗陷连为统一的湖泊,结束了互相独立的封闭蒸发演化,湖盆水体相对有所变深,但仍然属于浅水环境,有机质保存条件较差。发育紫红色中—薄层泥岩为主,偶夹薄层状石膏的清水营组上段地层;石膏沉淀基本终止,入湖的陆源碎屑物质变多,开始以碎屑岩沉积为主,咸化湖盆演化结束。

5.2 区域地质意义

盐湖的形成和演化受到区域构造运动、物源补给和古气候等多种因素的影响,盐湖演化特征与区域构造演化、古沉积环境有重要的响应关系(Warren, 2010; Bosboom et al, 2014; Zhou Jiayun et al., 2016)。宁南盆地古近纪晚期清水营组主要发育石膏和泥岩等湖相沉积物,反映宁南盆地在清水营组沉积时期裂陷作用继续,盆地持续构造沉降,沉积范围比下伏的寺口子组有所扩大,这些都与宁南盆地构造演化过程的认识相一致。而在咸化湖盆演化的晚期,气候继续干热的条件下,蒸发岩沉淀停止,而转为泥岩沉积为主,正好反映了宁南盆地各次级沉积拗陷连为一起,沉积环境发生重大转变。

(1) 咸化湖盆演化早期,贺家口子所在的地区作为宁南盆地的一个独立拗陷,在快速裂陷作用下,盆地处于欠补偿状态,以深水沉积的灰绿色泥岩和石膏为主;

(2) 咸化湖盆演化中期,由于物源的快速供给和湖水的蒸发浓缩,水体变浅,沉积了厚层石膏和紫红色泥岩,说明此时研究区依然是独立的沉积拗陷;

(3) 咸化湖盆演化晚期,气候依然炎热干旱,但是咸化湖盆演化却未能发育到盐岩(钾盐等)沉淀的高浓缩阶段,而是转变为泥岩沉积为主,盐湖演化终止,反映宁南盆地沉积环境发生重大转变,盆地各次级拗陷独立、封闭演化结束,开始连为统一湖泊,宁

南盆地进入了一个新的盆地演化阶段。

6 结论

(1) 贺家口子剖面清水营组岩性以灰绿—紫红色泥岩、石膏岩及二者互层为主,其中石膏发育类型多样,主要包括:层状石膏、纤维状石膏、结晶状石膏和蜂窝状石膏。根据地层岩性剖面及岩性组合特征将清水营组划分为8个二级沉积旋回和3个一级沉积旋回,相应地将清水营组分为3个岩性段。

(2) 石膏中CaO含量反映了咸化湖盆中石膏的化学沉积作用, Al_2O_3 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 SiO_2 、 Ti_2O 和 P_2O_5 含量为陆源碎屑来源;清水营组下段石膏岩为深水沉积的纯净石膏;清水营组中段石膏沉积的水体变浅,浅水区沉积的石膏陆源碎屑混入增多。

(3) 清水营组下段地层泥岩TOC和生烃潜量(S_1+S_2)较高,说明在咸化湖盆演化早期气候较湿润、水体较深;而泥岩降解潜力相对小,反映清水营组下段地层有机质以高等植物来源为主,反映咸化湖盆演化早期陆源输入较多的特征;清水营组下段和上段有机质产率指数相对较高,说明在宁南盆地清水营组沉积期咸化湖泊演化的早期和晚期湖水相对较深,为相对还原水体环境。

(4) 宁南盆地清水营组沉积作用包括蒸发岩的沉积和碎屑岩的沉积,而且咸化湖盆演化尚未达到盐岩(钾盐等)沉淀的高浓缩阶段;咸化湖盆演化主要经历了早期封闭深水盐湖发育阶段、中期封闭浅水盐湖鼎盛阶段和晚期开阔浅水盐湖消亡阶段。宁南盆地古近纪晚期咸化湖盆演化对盆地的持续沉降和各次级沉积拗陷最终连为统一的湖泊这一重大区域沉积事件有很明显的响应。

References

- Bosboom R, Dupont ~ Nivet G, Grothe A. 2014. Linking Tarim Basin sea retreat (west China) and Asian aridification in the late Eocene. *Basin Research*, 26(5):621~640.
- Chang Huajin, Cao Guangchao, Peng Yangwei. 2012. Petrogenesis of late Eocene gypsum in Xining Basin. *Journal of Arid Land Resources & Environment*, 26(11):48~53 (in Chinese with English abstrat).
- Deng Hui. 2014. Cainozoic appearance and evolution of sedimentation ~ tectonics in Ningnan Basin. Xi'an: Northwestern University (in Chinese with English abstrat).
- Deng Hongwen, Qian Kai. 1993. Sedimentary geochemistry and environmental analysis. Lanzhou: Gansu science and technology press (in Chinese with English abstrat).
- Fang Jianjun. 2009. Tectonic Evolution and reformation of Ningnan

- Basin. Xi'an: Northwestern University (in Chinese with English abstrat).
- Feng Zengzhao. 1994. Sedimentology of China. Beijing: Petroleum industry press.
- Gong Daxing, Zhou Jiayun, Wu Chihua, Li Meng. 2015. Lithofacies Paleogeography and Salt forming Model of Lower Middle Triassic in the Sichuan Basin. *Acta Geologica Sinica*, (11): 2075~2086(in Chinese with English abstrat).
- Gu Yansheng, Li Changan, Guo Guangmeng, Huang Changsheng. 2000. tectonic-climatic events and environmental change of tertiary in northeastern margin of Qinghai-xizang (tibet) plateau. *Geologicalence & Technology Information*, 19(2):1~4(in Chinese with English abstrat).
- Jia Bin. 2015. The characteristics and genesis of salt minerals from the Fengcheng Formation in Urho Area, Junggar Basin. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstrat).
- Ji Yunping, Yang Zhenjing, Zhao Hua, Wang Kangli, Yang Jinsong, Dong Qiuyao. 2016. Climate change since the late Middle Pleistocene indicated by geochemical characteristics of major elements of Jing'erwa section in Yangyuan Basin, Hebei Province *Journal of Palaeogeography*, 18(3): 487~496 (in Chinese with English abstrat).
- Jin Qiang, Zha Ming. 2000. Co-sedimentation of Tertiary Evaporites and Oil source Rocks in the Western Qaidam Basin. *Scientia Geologica Sinica*, 35(4): 465~473 (in Chinese with English abstrat).
- Lan Xianhong, Zhang Zhixun, Wang Zhongbo, Cheng Xiaohui, Tian Zhenxing. 2014. Content distributions and its geological implication of majorelements in sediments from the continental shelf of the East China Sea during the late Pleistocene. *Jilin Daxue Xuebao*, 44(6): 1883~1891 (in Chinese with English abstrat).
- Li Yong, Zhong Jian hua, Wen Zhifeng, Duan Hongliang, Wang Haiqiao. 2006. Study on the Relationship Between Evaporate and Hydrocarbon Generation. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(4): 596~606(in Chinese with English abstrat).
- Liu ChengLin, Jiao Pengcheng, Wang ErliYang Zhichen, Li Shude, Chen Yongzhi. 2003. Characteristics of Diagenesis of the Quaternary Salt ~ Bearing Strata, Lop Nur Lake, Xinjiang. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(2): 240~246(in Chinese with English abstrat).
- Liu Chiyang, Zhao Hongge, Gui Xiaojun, Yue Leping, Zhao Junfeng, Wang Jianqiang. 2006. Space-Time Coordinate of the Evolution and Reformation and Mineralization Response in Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 617~638 (in Chinese with English abstrat).
- Liu Qing, Zhang Linye, Song Guoqi, Song Changyu, Wang Ru. 2009. Application of Occurrences of Gypsum Minerals in Saline Lacustrine Facies Analysis and Source Rocks Organic Geochemistry Evaluation: A Case Study of Wendong depression. *Geological Journal of China Universities*, 15(3): 371~379(in Chinese with English abstrat).
- Lowenstein T K, Risacher F. 2009. Closed Basin Brine Evolution and the Influence of Ca - Cl Inflow Waters: Death Valley and Bristol Dry Lake California, Qaidam Basin, China, and Salar de Atacama, Chile. *Aquatic Geochemistry*, 15(1~2): 71~94.
- Mcintyre J F. 1988. Presence and control of evaporite top seals on occurrence and distribution of hydrocarbon traps: main fairway, Central Overthrust belt, Wyoming and Utah. *AAPG (Am. Assoc. Pet. Geol.) Bull.*; (United States), 72:2.
- Miao Zhongying, Zheng Mianping, Zhang Zheng, Mao Liquan, Wang Jing. 2014. Application of lacustrine sedimentary organic geochemistry to reconstruction of paleoenvironment. *Mineral Deposits*, 33(5): 1108~1116(in Chinese with English abstrat).
- QinJianzgong. 2005. The hydrocarbon source rock of China. Beijing: Science Press(in Chinese with English abstrat).
- Sun Dapeng, Li Bingxiao, Ma Yuhua. 1995. An investigation on evaporating experiments for Qinghai lake water China. *Journal of Salt Lake Science*, (2): 10~19 (in Chinese with English abstrat).
- Wang Weitao. 2011. Sedimentary responses to the Cenozoic tectonic evolution of the northeastern corner of the Tibetan Plateau. Beijing: The Institute of Geology, China Seismological Bureau (in Chinese with English abstrat).
- Warren J K. Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits. *Earth-Science Reviews*, 2010, 98(3/4): 217~268.
- Wu Chongjun. 1993. Petroliferous basin sedimentology of China. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese with English abstrat).
- Wu Tao, Xiong Xingguo, Yi Chengxing, Bai Peirong, He Yongzhong, Liu Zhencai. 2010. Gypsolyte Sedimentary Environment of Upper Jurassic-Lower Cretaceous in Shenglihe Area in Northern Qiangtang Basin *Xinjiang Petroleum Geology*, 31(4): 376~378(in Chinese with English abstrat).
- Xiao Guoqiao, Zhou Xinying, Ge Junyi, Zhan Tao, Yao Zhengquan. 2010. Sedimentary characteristics and paleoenvironmental significance of late Eocene gypsum-mudstone cycles in the Xining basin, north eastern Tibetan plateau. *Quaternary Sciences*, 30(5): 919~924(in Chinese with English abstrat).
- Yang Jianghai, Du Yuansheng, Xu YaJun, Zhu Jie. 2007. Major element characteristics of sandstones and provenance analysis of basins. *Geology in China*, 34(6): 1032~1044(in Chinese with English abstrat).
- Ying Lichao, Liang Bin, Wang Quanwei. 2012. Major Elements Characters of the Middle Pleistocene Vermicular Red Clay from the Western Sichuan Plain. *Geological Journal of China Universities*, 18(4): 759~764.
- Yuan Jianqi, Huo Chengyu, Cai Keqin. 1983. The high mountain-deep basin saline environment—a new genetic model of salt deposits. *Geological Review*, 29(2): 63~69 (in Chinese with English abstrat).
- Yuan Jianying, Huang Chenggang, Xia Qingsong, Cao Zhenglin,

- Zhao Fan, Wan Chuanzhi, Panxing. 2016. The Characteristics of Carbonate Reservoir, and Formation Mechanism of Pores in the Saline Lacustrine Basin; A Case Study of the Lower Eocene Ganchaigou Formation in Western Qaidam Basin. *Geological Review*, 62(1):111~126.
- Yue Zhipeng, Zeng Jun, Gao Zhiwei, Liu Yuliang. 2006. Sedimentation mechanism of "gypsum rock" in Kongdian Formation and Sha 4 Member of Shahejie Formation in Huimin Sag—With the "gypsum rock" of Well MS1 as an example. *Petroleum Exploration & Development*, 33(5):591~595 (in Chinese with English abstrat).
- Zhang Jin, Ma Zongjin, Ren Wenjun. 2005. The Sedimentary Characteristics of Cenozoic Strata in Central and Southern Ningxia and Their Relationships with the Development of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 79(6):757~773 (in Chinese with English abstrat).
- Zhang Huifang, Wu Xinsong, Wang Bin, Duan Yunjiang, Qu Yang, Chen Defei. 2016. Research Progress of the Enrichment Mechanism of Sedimentary Organics in Lacustrine Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, (3):463~477 (in Chinese with English abstrat).
- Zhao Zhenyu, Zhou Yaoqi, Ma Xiaoming, Ji Guosheng. 2007. The impact of saline deposit upon the hydrocarbon accumulation in petroliferous basin. *Oil & Gas Geology*, 28(2):299~308 (in Chinese with English abstrat).
- Zhou Jiayun, Gong Daxing, Li Meng. 2015. The Characteristic of Evaporite Migration of Salt Basins and Its Tectonic Control in Triassic Sichuan Basin. *Acta Geologica Sinica*, (11):1945~1952 (in Chinese with English abstrat).
- Zhu Hongfa, Liu Cuizhang, Lin Fulv. 1986. Characteristics of sedimentary facie of salt sequences and origin of their rocks types in lower and middle Triassic, Sichuan basin. *Journal of Mineralogy and Petrology*, (3):76~86 (in Chinese with English abstrat).
- 常华进, 曹广超, 彭杨伟. 2012. 西宁盆地晚始新世石膏成因研究. *干旱区资源与环境*, 26(11):48~53.
- 邓宏文, 钱凯. 1993. *沉积地球化学与环境分析*. 兰州: 甘肃科技出版社.
- 邓辉. 2014. 宁南盆地新生代沉积—构造面貌及其演化. 西安: 西北大学.
- 房建军. 2009. 宁南盆地沉积构造演化与改造. 西安: 西北大学.
- 冯增昭. 1994. *中国沉积学*. 北京: 石油工业出版社.
- 龚大兴, 周家云, 吴驰华, 李萌. 2015. 四川盆地早中三叠世成盐期岩相古地理及成盐模式. *地质学报*, 89(11):2075~2086.
- 顾延生, 李长安, 郭广猛, 黄长生. 2000. 青藏高原东北缘第三纪构造—气候事件与环境变迁. *地质科技情报*, 19(2):1~4.
- 贾斌. 2015. 准噶尔盆地乌尔禾地区二叠系风城组盐类矿物特征及成因. 成都: 成都理工大学.
- 吉云平, 杨振京, 赵华, 王利康, 杨劲松, 董秋瑶. 2016. 河北阳原盆地井儿洼剖面常量元素地球化学特征揭示的中更新世晚期以来气候变化. *古地志学报*, 18(3):487~496.
- 金强, 查明. 2000. 柴达木盆地西部第三系蒸发岩与烃源岩共生沉积作用研究. *地质科学*, 35(4):465~473.
- 金强, 朱光有. 2006. 中国中新生代咸化湖盆烃源岩沉积的问题及相关进展. *高校地质学报*, 12(4):483~492.
- 蓝先洪, 张志珣, 王中波, 陈晓辉, 田振兴. 2014. 东海陆架晚更新世以来沉积物常量元素的分布及其地质意义. *吉林大学学报: 地球科学版*, 44(6):1883~1891.
- 李勇, 钟建华, 温志峰, 段宏亮, 王海侨. 2006. 蒸发岩与油气生成、保存的关系. *沉积学报*, 24(4):596~606.
- 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 岳乐平, 赵俊峰, 王建强. 2006. 鄂尔多斯盆地演化—改造的时空坐标及其成藏(矿)响应. *地质学报*, 80(5):617~638.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弼力, 杨智琛, 李树德, 陈永志. 2003. 罗布泊第四纪含盐系成岩作用特征研究. *沉积学报*, 21(2):240~246.
- 刘庆, 张林晔, 宋国奇, 宋长玉, 王茹. 2009. 利用石膏产状研究辽东盐湖相沉积与烃源岩特征. *高校地质学报*, 15(3):371~379.
- 苗忠英, 郑绵平, 张震, 毛立全, 王晶. 2014. 湖相沉积物有机地球化学在古环境研究中的应用. *矿床地质*, 33(5):1108~1116.
- 宁夏回族自治区地质矿产局. 1990. *宁夏回族自治区区域地质志*. 北京: 地质出版社.
- 宁夏回族自治区地质矿产局. 1996. *宁夏回族自治区岩石地层*. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 秦建中. 2005. *中国烃源岩*. 北京: 科学出版社.
- 汤锡元, 郭忠铭, 王定一. 1988. 鄂尔多斯盆地西部逆冲推覆构造带特征及其演化与油气勘探. *石油与天然气地质*, (1):1~10.
- 肖国桥, 周新郢, 葛俊逸, 詹涛, 姚政权. 2010. 西宁盆地晚始新世石膏—红色泥岩旋回的古环境指示. *第四纪研究*, 30(5):919~924.
- 徐天光, 顾家裕, 薛叔浩. 1997. 盐湖沉积硬石膏特征及其在油气勘探中的应用. *石油勘探与开发*, (5):54~57.
- 孙大鹏, 李秉孝, 马育华. 1995. 青海湖湖水的蒸发实验研究. *盐湖研究*, (2):10~19.
- 王伟涛. 2011. 宁夏南部新生代盆地沉积演化及其对青藏高原东北角构造变形的响应. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 吴崇筠. 1993. *中国含油气盆地沉积学*. 北京: 石油工业出版社.
- 吴滔, 熊兴国, 易成兴, 白培荣, 贺永忠, 刘贞才. 2010. 北羌塘拗陷胜利河组膏岩沉积环境. *新疆石油地质*, 31(4):376~378.
- 杨江海, 杜远生, 徐亚军, 朱杰. 2007. 砂岩的主量元素特征与盆地物源分析. *中国地质*, 34(6):1032~1044.
- 应立朝, 梁斌, 王全伟. 2012. 川西平原中更新世网纹红土主量元素地球化学特征. *高校地质学报*, (4):759~764.
- 袁见齐, 霍承禹, 蔡克勤. 1983. 高山深盆的成盐环境——一种新的成盐模式的剖析. *地质论评*, 29(2):63~69.
- 袁剑英, 黄成刚, 夏青松, 曹正林, 赵凡, 万传治, 潘星. 2016. 咸化湖盆碳酸盐岩储层特征及孔隙形成机理——以柴西地区始新统下干柴沟组为例. *地质论评*, 62(1):111~126.
- 岳志鹏, 曾俊, 高志卫, 刘玉亮. 2006. 惠民凹陷孔店组沙四段“膏盐岩”层沉积机理——以 MS1 井“膏盐岩”层分析为例. *石油勘探与开发*, 33(5):591~595.

张进, 马宗晋, 任文军. 2005. 宁夏中南部新生界沉积特征及其与青藏高原演化的关系. 地质学报, 79(6):757~773.

张慧芳, 吴欣松, 王斌, 段云江, 屈洋, 陈德飞. 2016. 陆相湖盆沉积有机质富集机理研究进展. 沉积学报, 34(3):463~477.

赵振宇, 周瑶琪, 马晓鸣, 冀国盛. 2007. 含油气盆地中膏盐岩层对油气成藏的重要影响. 石油与天然气地质, 28(2):299~308.

周家云, 龚大兴, 李萌. 2015. 四川盆地三叠纪蒸发岩特征、盐盆迁移及其构造控制. 地质学报, 89(11):1945~1952.

朱洪发, 刘翠章, 林付律. 1986. 四川盆地中下三叠系含盐系岩石类型的成因和沉积相特征. 矿物岩石, (3): 76~86.

Late Paleogene Saline Lake Evolution of the Ningnan Basin,
Northern China, and its Regional Geological Significance

WU Xiaoli¹⁾, LI Rongxi¹⁾, HU Jianmin²⁾ CHENG Jinghua¹⁾, ZHAO Bangsheng¹⁾,
LIU Futian¹⁾, LI Delu¹⁾, QIN Xiaoli¹⁾, LI Jiajia¹⁾, LIU Fubiao¹⁾

1) School of Earth Science and Resource, Chang'an University, Xi'an 710054;
2) Institute of geomechanics, CAGS, Beijing, 100081

Abstract

With the Hejiakouzi stratigraphic section of Qingshuiying Formation in the northern Ningnan basin chosen as the research target, this study carried out research of the lithology of Qingshuiying Formation, major element features of gypsum, and organic geochemical parameters of mudstone. The results show that lithology of Qingshuiying Formation is dominated by intercalated gray-green and purple mudstone and gypsum. The Qingshuiying Formation can be divided into eight secondary depositional cycles and three primary cycles. CaO content of gypsum reflects chemical deposition of gypsum in saline lake basin, with Al₂O₃ from terrigenous clastic sedimentation. The lower segment of the Qingshuiyin Formation is gypsum deposited in deep water of saline lake and the gypsum in middle segment was deposited in shallow water; mudstone in the lower part of the Qingshuiyin Formation contains high TOC and hydrocarbon potential (S₁ + S₂), indicating that climate was relatively humid and water was deep at early stage of saline lake evolution. Besides the decreasing degradation potential, organic matter was derived mainly from high plant sources, most of which were from land. The study shows that the Qingshuiying Formation in the Ningnan basin resulted from sedimentation of both evaporite and terrigenous clastic rock. But the evolution of saline lake did not reach the high evaporation stage at which halite (such as sylvine) can be precipitated. The Late Paleogene evolution of saline lake can be divided into early closed deep saline lake, middle closed shallow saline lake and late open shallow saline lake stages, and was good response to the continuing tectonic subsidence and the regional sedimentary event that all secondary sedimentary depressions developed into a unified lake.

Key words: saline lake; evaporate; gypsum; Late Paleogene; Ningnan Basin