

奈曼凹陷北部义县组-九佛堂组沉积-地球化学环境恢复及其意义

刘海艳¹, 刘兴周¹, 蔡国刚¹, 裴家学¹, 冉波¹, 杨雪¹, 王辉¹, 崔向东¹,
何绍勇¹, 李秀明¹, 王智勇¹, 李丽¹, 李德华²

(1. 中国石油辽河油田分公司勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010; 2. 中国石油辽河油田(盘锦)储气库有限公司,
辽宁 盘锦 124010)

摘要: 为了确定奈曼凹陷北部下白垩统义县组-九佛堂组地球化学特征及古沉积环境,选取北部位于沉积中心附近的N10、NA-2井进行了岩相学分析,并对其中泥岩和蒸发岩样品进行了主量、微量元素、碳氧同位素和有机碳、热解、族组成等测试,系统分析了研究区的古氧化-还原条件、古盐度、古水深、古气候以及湖泊水体封闭性特征。研究结果表明,奈曼凹陷北部义县组沉积早期为火山岩相,沉积中期和末期主要为扇三角洲-湖相沉积体系,沉积末期局部地区为发育不同类型蒸发岩的滨浅湖相。 Cu/Zn 、 Sr/Ba 、 Sr/Cu 、 Rb/Sr 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MnO}$ 、 Ga/Sr 等敏感元素或元素比值指示,义县组中期到末期气候由半湿润-半干旱变为干旱,水体环境也随之由偏氧化的半封闭-半开放到弱氧化-弱还原的完全闭塞,沉积地球化学环境由淡水-半咸水深湖变为咸化浅湖。九佛堂组则为半封闭条件下的氧化淡水深湖沉积,气候与义县组沉积中期相似。义县组沉积中期、末期和九佛堂组时期的沉积环境均适合生物繁殖,有利于泥质烃源岩的发育,而厚层蒸发岩溶蚀孔、晶间孔缝发育,能够成为良好的储集空间,有利于油气富集。

关键词: 古沉积环境; 元素地球化学; 蒸发岩; 义县组; 九佛堂组; 奈曼凹陷

中图分类号: TE121.3⁺1; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)02-0325-20

Sedimentary geochemical environment restoration of Yixian Formation and Jiufotang Formation in the northern part of Naiman sag and its significance

LIU Hai-yan¹, LIU Xing-zhou¹, CAI Guo-gang¹, PEI Jia-xue¹, RAN Bo¹, YANG Xue¹, WANG Hui¹,
CUI Xiang-dong¹, HE Shao-yong¹, LI Xiu-ming¹, WANG Zhi-yong¹, LI Li¹ and LI De-hua²

(1. Exploration & Development Research Institute of Liaohe Oilfield Branch Company, PetroChina, Panjin 124010, China;
2. Gas Storage Limited Company of Liaohe Oilfield(Panjin), PetroChina, Panjin 124010, China)

Abstract: In order to determine the geochemical characteristics and paleosedimentary environment of the Lower Cretaceous Yixian Formation and Jiufotang Formation in the northern part of the Naiman sag, petrographic analysis was conducted on N10 and NA-2 wells located near the sedimentary center in the north. Samples of mudstone and evaporite were tested for major and trace elements, carbon and oxygen isotopes, organic carbon, pyrolysis, and group composition. The paleoredox conditions, paleosalinity, paleowater depth, paleoclimate, and lake water sealing characteristics of the study area were systematically analyzed. The study shows that they were volcanic facies in

收稿日期: 2023-12-16; 接受日期: 2024-12-10; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科学与技术开发项目(2022KT0502); 辽河油田重大科技专项(2024KJZX-04, 2024QZJC-04)

作者简介: 刘海艳(1984-), 女, 学士, 高级工程师, 主要从事石油地质综合研究工作, E-mail: lidehua011@163.com。

the early sedimentary period of Yixian Formation in the northern part of the Naiman sag, mainly fan delta-lacustrine depositional-lake facies sedimentary systems in the middle and late sedimentary period, and local shore-shallow lacustrine facies of different types of evaporites in the late sedimentary period. Sensitive elements or element ratios such as Cu/Zn, Sr/Ba, Sr/Cu, Rb/Sr, Fe₂O₃/MnO, Ga, Sr indicate that the climate of Yixian Formation changed from semi-humid-semi-arid to arid from the middle period to the end period, the water environment also changed from semi-closed-semi-open with partial oxidation to completely closed with weak oxidation-weak reduction, and the sedimentary geochemistry environment changed from freshwater-brackish deep lake to brackish shallow lake. The Jiufotang Formation is a semi-enclosed deep lake sedimentation of oxidized fresh water with a climate similar to that of the middle of the Yixian Formation. The sedimentary environment during the middle and late periods of the Yixian Formation and the Jiufotang Formation were suitable for biological reproduction, which were favorable for the development of argillaceous source rocks. And for the development of pores and intercocrystalline pores of thick-layer evaporites, which can become good reservoir spaces, they are favorable for oil and gas enrichment.

Key words: paleosedimentary environment; elemental geochemistry; evaporate; Yixian Formation; Jiufotang Formation; Naiman sag

Fund support: China National Petroleum Corporation Scientific Research and Technology Development Project (2022KT0502); The Major Science and Technology Special Project of Liaohe Oilfield(2024KJZX-04, 2024QZJC-04)

奈曼凹陷位于开鲁盆地西南侧。开鲁盆地受燕山运动影响,中生代晚期岩浆活动频繁,尤其是晚侏罗世和早白垩世火山活动对研究区的构造变形和岩性组合产生明显影响(陈义贤等,1997;李伍平等,2002;汪洋等,2003)。目前关于开鲁盆地义县时期热河生物群地层古生物方面研究较多(李凤霞,2005;吴炳伟,2006,2007),但对其沉积古环境、古地理及古气候方面的研究较少。开鲁盆地奈曼凹陷由于经历了复杂的构造演化,原始沉积地层受到严重破坏,古湖盆沉积环境恢复工作难度大。国内学者针对其沉积碎屑岩物质来源、烃源岩特征、沉积和储层特征等方面进行了较多研究(苑洪瑞,2007;王莹等,2009;赵兴齐等,2011,2012,2013;裴家学,2015;田涯,2018),尚未有学者对其古沉积环境进行恢复。随着奈曼凹陷北部多口探井在下白垩统义县组钻遇泥岩和蒸发岩,证实了义县组并非只是火成岩建造,还存在着不同类型的沉积岩,包括砂砾岩、砂岩、泥岩和蒸发岩等。笔者以最能反映原地沉积环境特征的泥岩和蒸发岩为切入点,对奈曼中生代残留型凹陷早白垩世义县组-九佛堂组沉积时期古湖盆环境进行了恢复。

沉积岩中的部分元素对沉积水体的变化有较高的敏感性,是进行古沉积环境恢复和古气候分析的重要依据(张天福等,2016)。利用Cu、Zn、V、Cr、Ni、Co等对氧化-还原条件敏感的元素(Jones and Manning, 1994; 范萌萌等, 2019)可以判断当时沉积

时的氧化-还原条件。利用Ga、Sr、Sr/Ba等元素含量或比值(李成凤等,1988; 王敏芳等,2005; 钱利军等,2012; 王峰等,2017; 付金华等,2018; 刘鑫等,2021; 丁婷等,2023)能够推测古沉积水体盐度。利用Sr/Cu、MnO/TiO₂等指标(周洪瑞等,1999; 席胜利等,2004; 张才利等,2011; 梁文君等,2015; 范萌萌等,2019)可以估算古沉积水深的大致变化。利用Rb/Sr、Sr/Cu、Fe₂O₃/MnO、CaO/(MgO+Al₂O₃)等指标(范玉海等,2012; 付金华等,2018; 谭聪等,2019; 刘鑫等,2021)可以研究古气候的变化情况,利用碳氧同位素可以推测湖泊水体的封闭状态。因此,通过对沉积岩中的泥岩和蒸发岩进行元素地球化学分析,能更好地对古沉积环境进行定量评估和恢复。

奈曼凹陷N10井及其北部由于受抬升作用影响,下白垩统九佛堂组沉积岩成岩作用弱,烃源岩成熟度偏低,生成的油气少。因此,下伏义县组的古沉积环境特征和泥质烃源岩发育情况,对于奈曼凹陷北部的深层勘探具有重要的现实意义。本文对奈曼凹陷北部岩石样品进行了主量元素和微量元素测试,分析了研究区义县组-九佛堂组的氧化-还原条件、古盐度、古水深、古气候和湖泊水体的封闭性等沉积特征,恢复了奈曼凹陷北部义县组-九佛堂组的古沉积环境,这有利于加深对奈曼凹陷北部不同岩石类型形成条件的认识,也有利于评价烃源岩和储层特征,为研究区油气勘探提供重要的指导作用。

1 地质背景

奈曼凹陷是开鲁盆地西南侧的一个典型的中生代残留型断陷湖盆, 分布面积约 800 km²。凹陷主要

受西边界断层控制形成, 总体形态呈 NE 向狭长形, 可划分为 3 个次级构造单元, 分别为西部陡坡带、中央洼陷带和东部斜坡带。奈曼凹陷中生代的形成演化经历了多次的挤压逆冲与伸展裂陷交替作用, 构造变迁较为剧烈(图 1)。

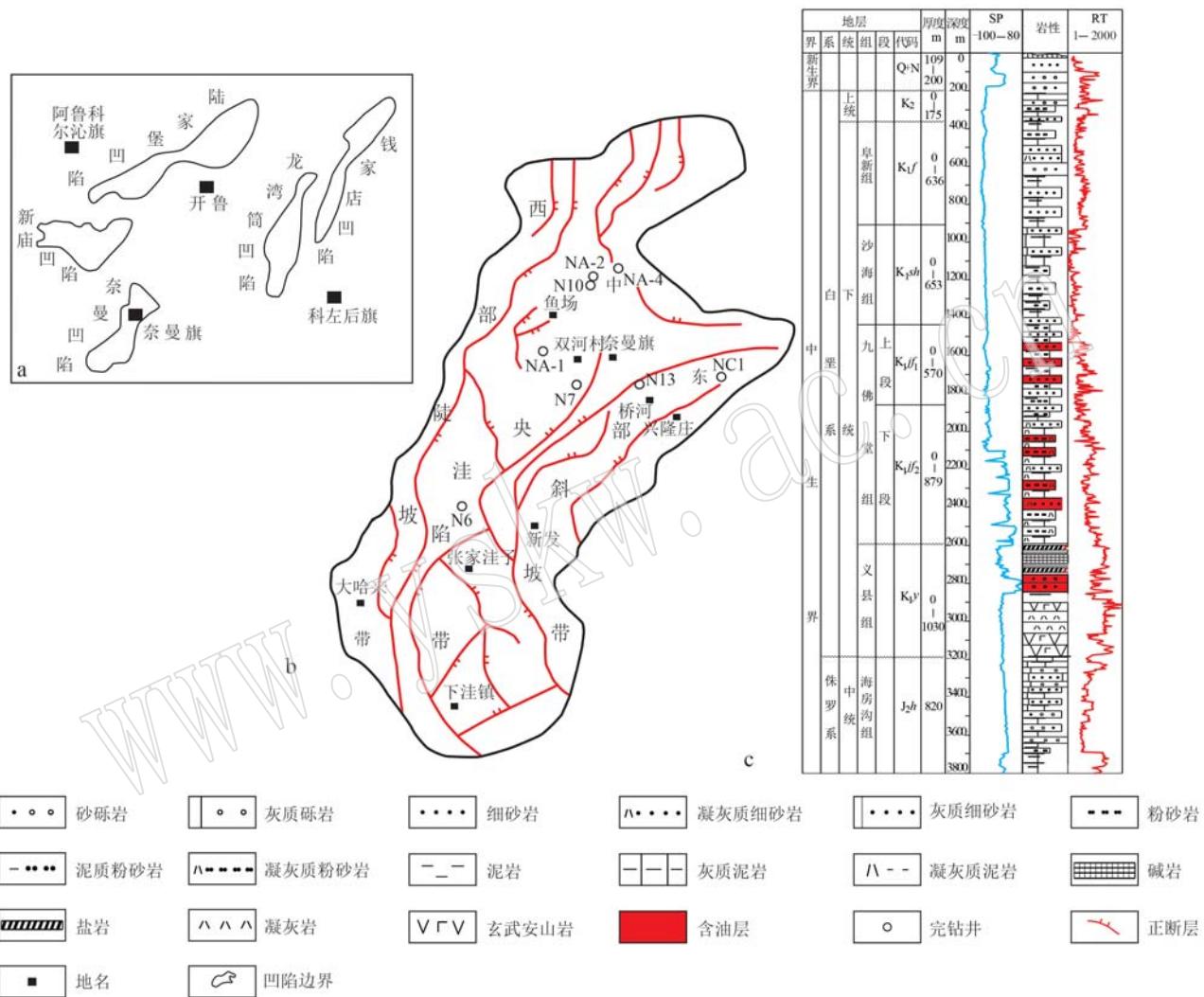


图 1 研究区所在位置(a)、开鲁盆地奈曼凹陷九佛堂组下段顶界断裂纲要图(b)和地层综合柱状图(c)

Fig. 1 Location of the work area(a), the outline map of the top boundary fault in the lower section of the Jiufotang Formation in Naiman sag(b) and comprehensive stratigraphic column chart(c) of Kailu Basin

奈曼凹陷地层自下而上依次为: 前中生界基底, 中生界下三叠统哈达陶勒盖组, 中侏罗统海房沟组, 下白垩统义县组、九佛堂组、沙海组、阜新组, 上白垩统(下部地层缺失)和新生界。

奈曼凹陷北部下白垩统义县组揭露地层较厚, 最大厚度大于 1 000 m, 分布范围较广, 下部发育大套灰色、绿灰色、紫红色中酸性火山喷出岩、杂色火山角砾岩等。中上部发育灰色、深灰色泥岩夹薄层砂

岩, 上部局部地区发育蒸发岩层。九佛堂组下段地层最大厚度大于 800 m, 岩性为灰色、深灰色凝灰质细砂岩、粉砂岩与凝灰质泥岩不等厚互层, 局部发育杂色砂砾岩。

2 样品与实验方法

本次研究选取了 N10 井义县组-九佛堂组 20 个

非等间隔的泥岩和蒸发岩样品,去除风化表面后将新鲜样品切下密封保存,进行主量元素、微量元素和碳氧同位素分析测试,分析测试实验均在东北石油大学地球科学学院完成。全岩主量元素含量分析采用帕纳科 Axios Max X 荧光光谱仪,检测条件为温度 27℃,湿度 38%,执行的检测依据为 GB/T14506.28-2010。主量元素分析谱线均为 Ka,标准曲线利用国家标准物质岩石系列 GBW07101-14、土壤系列 GSS07401-08、水系沉积物系列 GBW07302-12 建立。数据校正采用理论 a 系数法,测试相对标准偏差 (relative standard deviation, RSD) <2%。

微量元素分析采用美国 ThermoFisher 公司的电感耦合等离子体质谱仪(仪器型号 ICAP-RQ),样品粉碎至 200 目以下,置于烘箱中在 105℃下烘 2~3 h,取出后置于干燥器中冷却至室温;称取 0.1 g 样品于微波消解罐中加入 2 mL HF、2 mL HCl 和 6 mL HNO₃,反应 20 min 后,按照微波消解程序升温至 185℃消解 45 min,再转移至赶酸器于 160℃ 赶酸 90 min,转移至 50 mL 的塑料定量管定容,静置过液后取上清液待测。用内标法直接测定,通过标准曲线校正计算出微量元素含量。

碳氧同位素的分析仪器为 ThermoFishe 253 plus 稳定同位素质谱仪,首先将样品研磨至 200 目,加热去除吸附水后,置于真空反应器中,采用磷酸法测试,在 25℃恒温条件下反应 24 h,然后纯化、收集生成的 CO₂ 气体,在稳定同位素质谱仪上测定碳和氧同位素组成,最后测试结果以相对 V-PDB 值的形式给出。碳同位素测试标准为 GBW04417,测试数据按碳、氧同位素国际标准(PDB 标准) 计算,标准偏差

±0.2‰。

选取 NA-2、N10 等井义县组-九佛堂组 48 个泥岩样品进行有机碳、热解和岩石可溶有机质族组成等测试,测试实验在辽河油田勘探开发研究院完成。有机碳含量的测定是在实验室条件下用稀盐酸去除样品中的无机碳后,经高温氧气流燃烧,使总有机碳充分转化为二氧化碳,再经 LECO CSe400 测定仪检测(GB/T 19145-2003);热解实验在 Rock-Eval II 型检测仪(GB/T18602-2012)中完成,样品经氢气流加热至 300℃,得到游离烃量(S₁),再从 300℃ 加热至 600℃,得到热解烃量(S₂),筛选标准 420℃ < t_{max} < 500℃;岩石中可溶有机质族组分测量采用索氏抽提法,样品经索氏抽提 72 h 后,称取适量氯仿沥青“A”,用正己烷(30 mL)沉淀沥青质,之后用柱色层法(氯化铝 2 g+硅胶 3 g)进行分离,分别用石油醚(30 mL)、二氯甲烷和石油醚(20 mL,体积比 2:1 混合)、氯仿(10 mL)和无水乙醇(10 mL)依次分离,最终可以得到饱和烃、芳香烃、非烃及沥青质组分(SY/T 5119-2016)。

3 沉积环境特征

3.1 岩石和矿物学特征

(1) 岩石矿物组成

通过岩石全岩定量分析,义县组中部(K₁y₂)含粉砂质泥岩中,黏土矿物含量为 3.3%~20.6% (表 1),平均值为 11.2%,石英和长石含量较高,说明湖盆受沉积碎屑岩注入影响较大,还含有一定含量的内生矿物碳酸盐岩和方沸石。

表 1 奈曼凹陷北部 N10 井义县组-九佛堂组岩石矿物成分
Table 1 Mineral compositions of rocks in the Yixian Formation and the Jiufotang Formation from Well N10 in the north of Naiman sag

层位	样品数	黏土矿物	石英	长石	碳酸盐岩	方沸石	蒸发岩	其他矿物	w _B /%
K ₁ jf	84	1.1~36.5(7.5)	8.9~85.2(38.9)	9.0~66.4(37.9)	0~40.5(8.6)	-	-	0~9.7(0.6)	
K ₁ y ₃	73	0~29.1(6.7)	0~57.9(3.3)	0~73.0(18.2)	0~55.5(5.0)	0~33.6(2.3)	0~100.0(63.6)	0~15.1(1.0)	
K ₁ y ₂	8	3.3~20.6(11.2)	0~54.2(24.9)	7.7~78.5(34.1)	2.8~52.2(15.1)	0~28.2(12.9)	-	0~6.6(1.8)	

括号中数据为平均值。

义县组上部(K₁y₃)蒸发岩层段的黏土矿物含量为 0~29.1% (表 1),平均值为 6.7%,石英含量一般情况下较低,但长石含量较高,蒸发岩含量为 0~100.0%,平均值为 63.6%。蒸发岩矿物种类比较丰富,其中,天然碱含量为 0~100.0%,平均值为 24.5%,石盐含量为 0~91.5%,平均值为 8.9%,碳钠

钙石含量为 0~40.1%,平均值为 6.8%,碳氢钠石含量为 0~86.9%,平均值为 6.9%,硅硼钠石含量为 0~43.6%,平均值为 3.2%。还有一定含量的碳钠镁石和碳氢钠镁石。

九佛堂组(K₁jf)岩石中黏土矿物含量为 1.1%~36.5% (表 1),平均 7.5%,石英和长石含量较高,沉积

碎屑岩物源注入多,自生矿物碳酸盐岩含量不均一,分布范围0~40.5%,平均值为8.6%,不含方沸石。

(2) 蒸发岩矿物特征及成因

由于研究区在义县组沉积末期发现了化学沉积岩——蒸发岩,所以着重阐述一下不同类型蒸发岩的矿物特征及其成因。

天然碱:为水合碳酸氢钠,灰色、黄白色或无色,透明-微透明,玻璃光泽,镜下呈柱状、块状或纤维状。通常所说的天然碱,是指主要化学成分为碳酸钠和碳酸氢钠的一类矿物,倍半碳酸钠($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)是常见的典型天然碱矿物,所以称为天然碱或晶碱石,指示气候干旱、水体较浅。

石盐:无色透明,含杂质时呈浅灰、黄、红、黑等颜色,玻璃光泽,镜下呈粗晶、细晶、晶粒状、颗粒状(图2a、2b、2c、2e、2f)。一般情况下,单晶体呈立方体形状,在立方体晶面上常有阶梯状凹陷,集合体常呈粒状或块状。新鲜面呈玻璃光泽,潮解后表面呈油脂光泽,石盐的溶解度较高,一般在靠近洼陷中心水体略深的位置结晶析出。

碳钠钙石:无色-淡黄色,透明-微透明,玻璃光

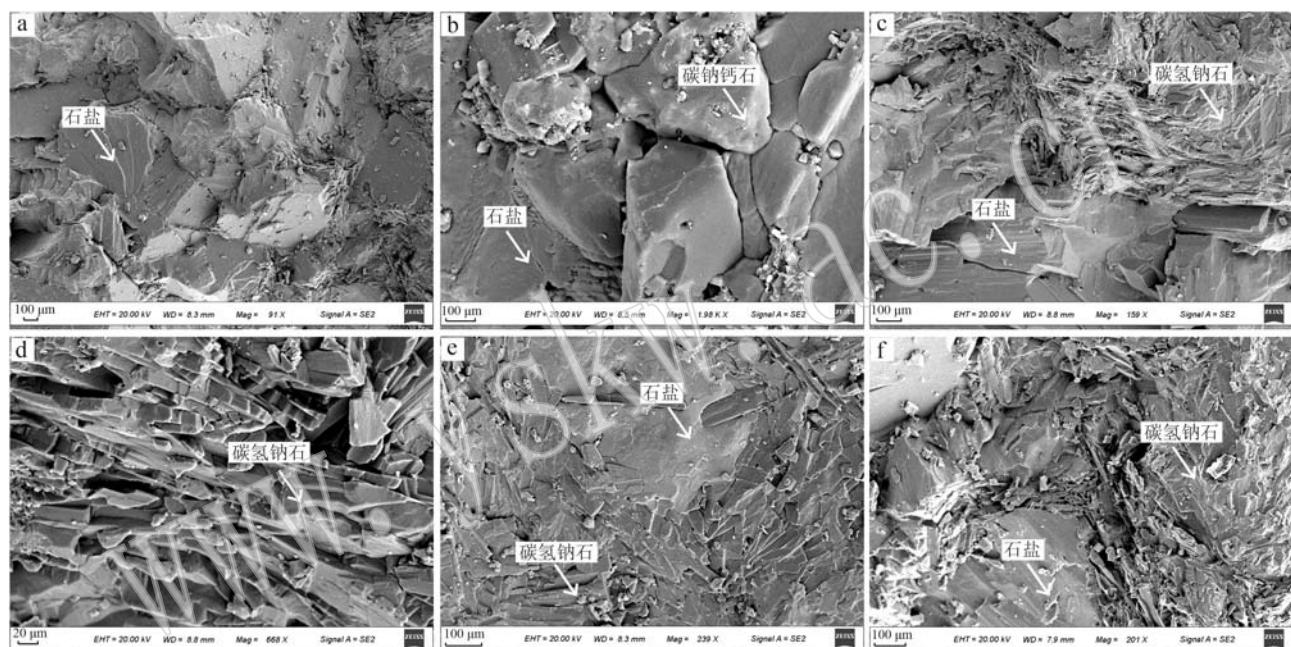


图2 奈曼凹陷北部蒸发岩矿物特征

Fig. 2 The mineral characteristics of evaporites in the north of Naiman sag

a—石盐, N10井, 1 488.2 m; b—石盐、碳钠钙石及晶间孔隙, N10井, 1 488.2 m; c—粗晶石盐、板条状碳氢钠石及晶间孔隙, N10井, 1 488.2 m; d—板条状碳氢钠石及晶间孔隙, N10井, 1 488.2 m; e—石盐、碳氢钠石及晶间孔隙, N10井, 1 488.2 m; f—板条状碳氢钠石、石盐及晶间孔隙, N10井, 1 488.2 m

a—halite, Well N10, 1 488.2 m; b—the halite, shortite and intercrystalline pores and fissures, Well N10, 1 488.2 m; c—coarse crystal halite, lath-shaped wegscheiderite and intercrystalline pores, Well N10, 1 488.2 m; d—lath-shaped wegscheiderite and intercrystalline pores and fissures, Well N10, 1 488.2 m; e—the halite, wegscheiderite and intercrystalline pores, Well N10, 1 488.2 m; f—lath-shaped wegscheiderite, the halite and intercrystalline pores and fissures, Well N10, 1 488.2 m

泽,镜下晶体呈粗晶状、晶粒状、板条状、斑点状或条带状(图2b)。由前期碱湖沉积矿物经成岩作用形成,首先形成钠钙碳酸盐矿物单斜钠钙石,之后转变为钙水碱,更高温度下转变为碳钠钙石,表明成岩作用较强,一般为中成岩-晚成岩时期的产物,指示水体较浅,常与天然碱伴生。

碳氢钠石:无色-淡黄色,透明-微透明,玻璃光泽,镜下呈条带状或长板状(图2c、2d、2e、2f),由钠

碳酸盐矿物天然碱、苏打石在成岩期脱水转变而成。前体天然碱、苏打石等在饱和碳酸氢盐水体中稳定沉淀形成,具完好无溶蚀的晶形和底部生长形态,指示碱湖沉积中心为常年生化学分层水体,水动力不强。

碳氢钠镁石:无色-黄色,透明-半透明,玻璃光泽,镜下呈粗晶、集合体状,在地层中,一般呈斑点状共生在泥岩中,通常形成于水体较浅的环境中。

碳钠镁石：无色或白色，透明，玻璃光泽，产于白云质岩石中的自生矿物，其物质来源于碱性深成火成岩，一般呈纹层状产出，形成于水体较浅的环境中。

3.2 沉积相特征

3.2.1 义县组沉积相类型和特征

奈曼凹陷北部义县组受火山作用、构造作用和

沉积作用的多重控制，主要发育了火山岩相、扇三角洲相、深湖-半深湖相等沉积相类型（图3）。

（1）火山岩相：义县组早期火山喷发活动强烈，火山岩广泛分布，岩性以灰色、绿灰色、紫红色中酸性火山喷出岩、杂色火山角砾岩为主。义县组中后期火山间歇性喷发，岩性主要为绿灰色、杂色火山角砾岩，属于火山岩相，此时期火山岩相分布局限，主

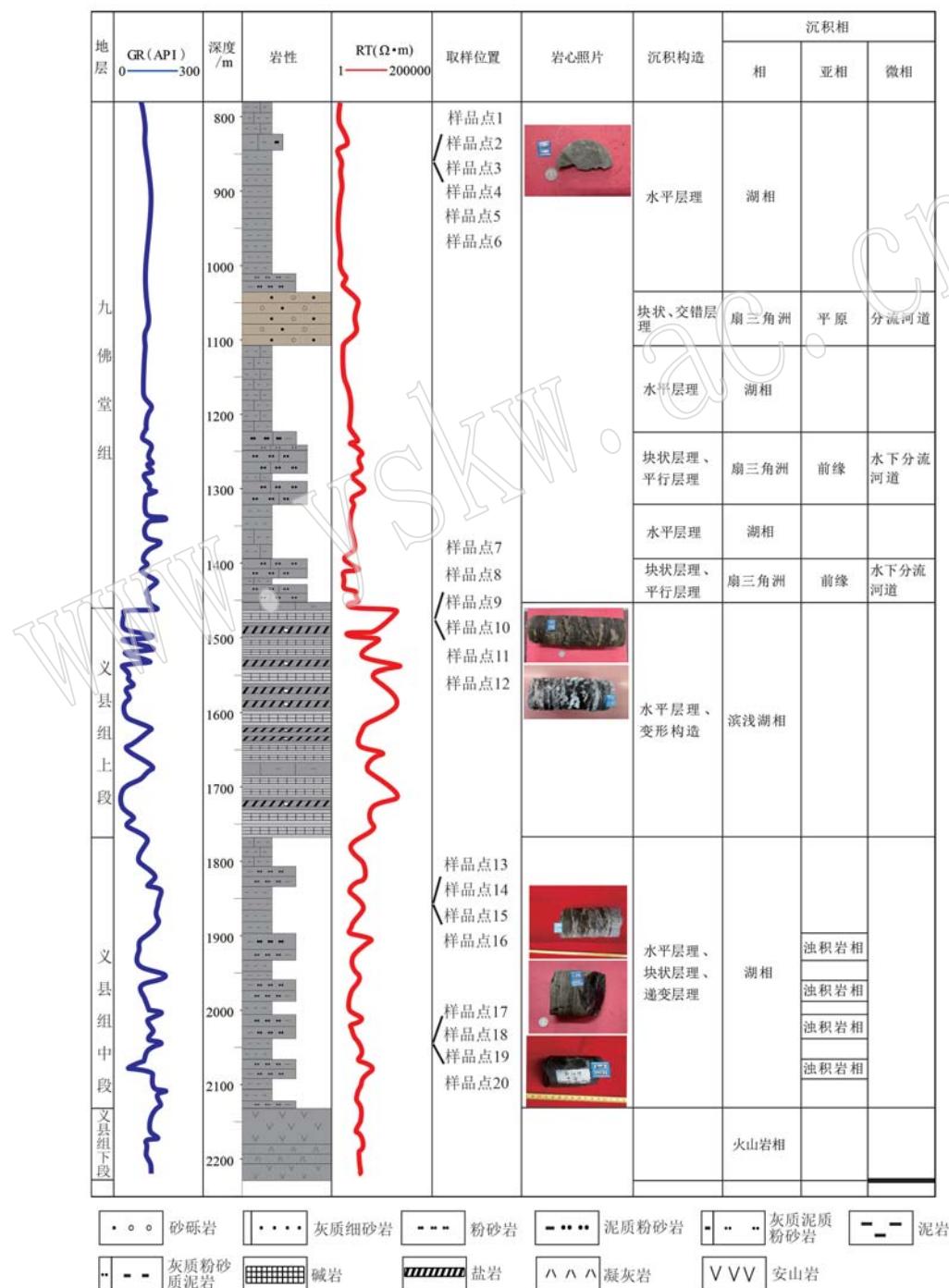


图3 奈曼凹陷北部N10井柱状图

Fig. 3 The histogram of Well N10 in the north of Naiman sag

要分布在西部陡坡带边缘处,N27和N21井处发育火山角砾岩相。

(2) 扇三角洲相: 主要发育扇三角洲平原相和前缘相。

扇三角洲平原相: 由大套杂色、灰色砂砾岩、含砾砂岩和细砂岩构成。垂向上具下粗上细的间断性正韵律, 分选差。块状层理发育, 局部地区发育板状交错层理以及冲刷-充填构造。在靠近西侧断裂带的局部地区发育。

扇三角洲前缘相: 由灰色砂砾岩、含砾砂岩和中砂岩构成, 前端还有部分的灰色细砂岩、粉砂岩, 分选中等, 垂向层序结构特征与陆上分流河道相似, 但砂岩颜色变暗, 为扇三角洲前缘水下分流河道沉积, 沉积构造以小型交错层理为主, 见块状层理、波

状层理和平行层理, 岩石底部凹凸不平, 为冲刷面构造, 顶部可受后期水流和波浪的改造, 有时出现脉状层理及水平层理。岩石成分以长英质为主, 杂基较多, 成熟度较低, 分选性较差, 磨圆度以棱角-次棱角状为主, 为物源快速堆积的产物。该沉积相类型在义县组沉积中期和末期发育, 平面分布范围比扇三角洲平原相分布广, 由西侧断裂带向湖盆延伸。

(3) 深湖-半深湖相: 以灰色、灰黑色泥岩为主(图4a、4b), 局部为泥质粉砂岩(图4c)、含碳酸盐粉砂岩, 泥岩为块状层理或水平层理, 成分以黏土矿物和长英质矿物为主, 黏土矿物中伊蒙混层含量占70%以上, 反映成岩作用较弱。在义县组沉积中期和末期发育, 由于此时期研究区位于洼陷中心, 所以深湖-半深湖相平面分布范围较广。



图4 奈曼凹陷北部义县组中期泥岩和泥质粉砂岩岩相特征

Fig. 4 Lithofacies characteristics of mudstones and argillaceous siltstones in the middle period of Yixian Formation in the north of Naiman sag

a—深灰色泥岩,N10井,1 884.5 m; b—深灰色泥岩,N10井,2 051.2 m; c—灰色泥质粉砂岩,N10井,1 883.5 m
a—the dark gray mudstone, Well N10, 1 884.5 m; b—the dark gray mudstone, Well N10, 2 051.2 m; c—the grey argillaceous siltstone, Well N10, 1 883.5 m

(4) 滨浅湖相: 在义县组沉积末期发育, 分布范围局限, 以各种产状的蒸发岩为主。研究区蒸发岩的产状根据蒸发岩含量和形状划分为3类: 块状蒸发岩、层状或似层状蒸发岩和不规则状蒸发岩。蒸发岩矿物的类型、产状和沉积构造的差异受沉积卤水的来源、盐度、水深、水动力条件和底水含氧量等的控制(刘庆等, 2009)。

① 块状蒸发岩: 形成于蒸发岩发育的鼎盛时期, 为浅水湖相沉积环境, 白色或无色透明, 块状结构, 说明当时盐源比较充足, 水体盐度高, 可能为浅水中相对较深的沉积环境, 水动力条件弱, 底水含氧量不充足(图5a、5b)。② 层状或似层状蒸发岩: 这种类型的蒸发岩, 仍然处于浅水沉积环境。但与块状蒸发岩相比, 水体较浅, 蒸发岩的物质来源不充

足, 含量降低, 与泥岩呈互层状产出(图5c、5d)。由于蒸发岩各类矿物的稳定性比其他沉积岩矿物差, 在沉积、成岩以及成岩后期经常发生溶解、交代和相互转化作用, 而形成不同的产状类型, 呈平直条带状、纹层状、肠状、弯曲状等形态产出。③ 不规则状蒸发岩: 这种类型的蒸发岩呈不规则状在泥岩中产出, 由于水体动荡, 蒸发岩沉积不稳定, 与泥岩频繁互层, 也可能是原生蒸发岩矿物发生次生溶解, 重新结晶析出, 在泥岩夹层中呈镶嵌状、线条状、斑块状、颗粒状、不规则透镜状等各种形态产出(图5e、5f), 表明蒸发岩的物质来源明显不充足, 且水动力条件不均一或发生了次生溶解作用。

通过孢粉化石鉴定, N10井1 525.0~2 208.0 m深度的义县组样品孢粉组合中各种松柏类植物的无



图 5 奈曼凹陷北部蒸发岩矿物类型和产状

Fig. 5 Mineral types and occurrences of evaporites in the north of Naiman sag

a—块状蒸发岩, N10井, 1 487.3 m; b—块状蒸发岩, N10井, 1 487.4 m; c—似层状蒸发岩, NA-2井, 1 621.97 m; d—层状蒸发岩, NA-2井, 1 603.74 m; e—颗粒状蒸发岩, NA-2井, 1 637.92 m; f—斑块状蒸发岩, NA-2井, 1 603.59 m
 a—the blocky evaporite, Well N10, 1 487.3 m; b—the blocky evaporite, Well N10, 1 487.4 m; c—layer -liked evaporite, Well NA-2, 1 621.97 m;
 d—layered evaporite, Well NA-2, 1 603.74 m; e—the granular evaporite, Well NA-2, 1 637.92 m; f—the patchy evaporite, Well NA-2, 1 603.59 m

肋双囊类花粉占明显优势, 蕨类植物孢子很少, 未见被子植物花粉。常见的孢粉类化石包括原始松柏粉、原始松粉、假云杉粉、拟云杉粉等属。无突肋纹孢属孢子和膜环弱缝孢属孢子的组合特征在义县组地层中常见。

3.2.2 九佛堂组沉积相类型和特征

九佛堂组处于盆地的快速裂陷期, 受控于边界断层的强烈活动, 西部陡坡带发育扇三角洲-湖相沉积体系。主要沉积相类型包括: ① 扇三角洲平原相, 在九佛堂组沉积早期和末期均发育, 分布范围局限, 在断层下降盘东侧边缘处呈条带状分布(地震相为楔形杂乱反射), 在 NA-1、NA-3、N27 和 N21 等井见到紫红色、灰绿色泥质砂砾岩、灰色砂砾岩和紫红色泥岩沉积(图 6a~6d), 说明当时水体很浅或为陆上沉积, 多为氧化沉积环境(刘晓丽等, 2023)。② 扇三角洲前缘相, 在九佛堂组沉积早期和末期均有发育, 分布范围广, 前缘砂体由西侧物源区向前延伸(地震相为前积反射-平行弱反射), 兼具有重力流和牵引流特征, 岩性以灰色凝灰质细砂岩、凝灰质粉砂岩为主(图 6e), 成分主要为岩屑砂岩和长石岩屑

砂岩, 分选中等, 呈次棱-次圆状, 线-点接触, 成分和结构成熟度较低, 沉积构造为块状层理、粒序层理、平行层理和砂纹层理、中型交错层理等, 大型交错层理不发育。主要发育前缘水下分流河道和席状砂沉积微相。③ 深湖-半深湖相: 在九佛堂组沉积早期和末期均发育, 由于沉积中心位于奈曼凹陷北部, 该相类型分布范围较广, 以灰色、深灰色凝灰质泥岩、泥岩为主(图 6f), 夹薄层泥质粉砂岩, 沉积构造为水平层理和块状层理, 岩石成分主要为伊蒙混层, 成岩作用弱。

九佛堂组古生物化石包括: ① 介形类化石组合为维提姆女星女星介-清河门湖女星介组合, 主要化石有维提姆女星女星介、杨柳屯假伟星女星介、头台玉门女星介相似种、清河门湖女星介、梯形唇女星介、窄达尔文介、义县玻璃介小狼星介和细弯狼星介等。② 孢粉化石组合特征为: 裸子植物花粉以松科为主; 古型松柏进一步增加; 克拉梭粉属、罗汉松粉属、单远极沟粉属有一定数量。③ 蕨类植物孢子较多, 突肋纹孢属、拟套环孢属较多, 小个体三缝孢、棒瘤孢属等也常见。

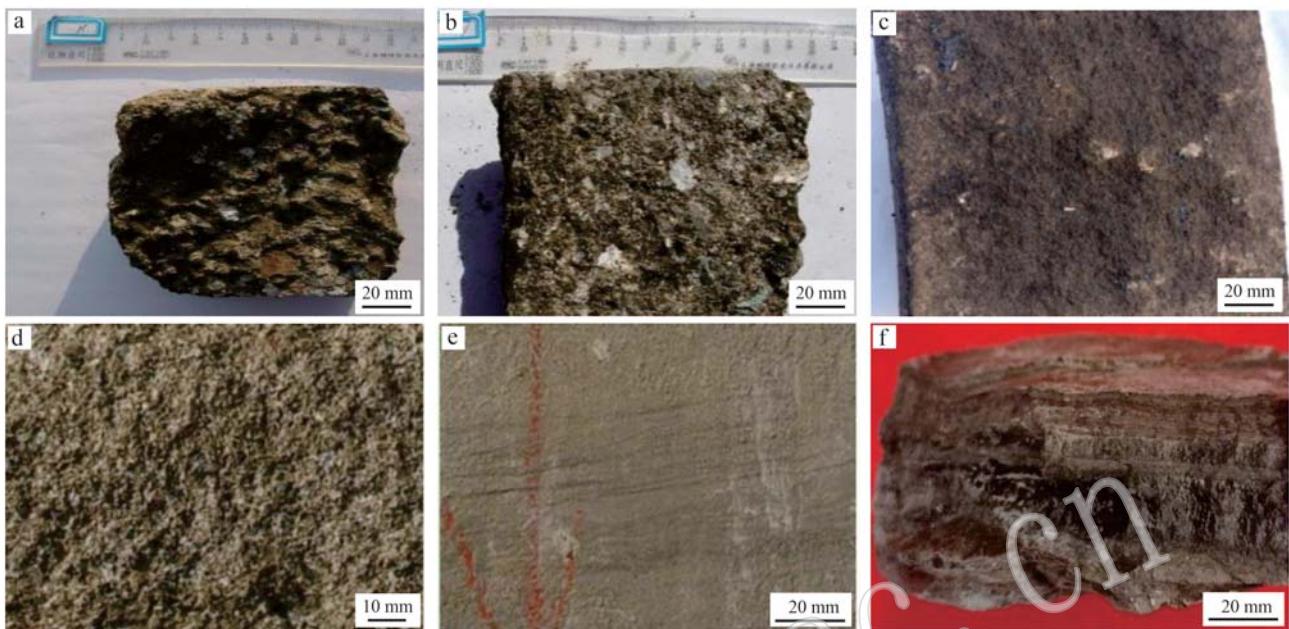


图 6 奈曼凹陷北部九佛堂组砂砾岩、细砂岩和泥岩岩相特征

Fig. 6 Lithofacies characteristics of glutenites, fine sandstones and mudstones in Jiufotang Formation in the north of Naiman sag
 a—棕色砂砾岩, 块状层理, NA-1 井, 1 562.84 m; b—棕色砂砾岩, 块状层理, NA-3 井, 1 562.96 m; c—深灰色含油粗砂岩, 块状层理, NA-3 井, 1 409.9 m; d—棕色砂砾岩, 块状层理, NA-1 井, 1 765.83 m; e—灰白色细砂岩, 平行层理, NA-1 井, 1 909.18 m; f—深灰色沥青质泥岩, 水平层理, NA-4 井, 589.65 m
 a—the brown conglomerate, massive bedding, Well NA-1, 1 562.84 m; b—the brown conglomerate, massive bedding, Well NA-3, 1 562.96 m; c—the dark gray oil bearing coarse sandstone, massive bedding, Well NA-3, 1 409.9 m; d—the brown conglomerate, massive bedding, Well NA-1, 1 765.83 m; e—the gray-white fine sandstone, parallel bedding, Well NA-1, 1 909.18 m; f—the dark grey asphalt mudstone, horizontal bedding, Well NA-4, 589.65 m

4 沉积古地球化学环境恢复

4.1 氧化-还原条件

含氧量的高低对沉积环境中有机质的发育情况有很大的影响, 氧含量高则有机质容易遭受氧化分解, 能够保存下来的有机质含量少, 生烃潜力差; 氧含量低时, 处于还原条件, 则有利于有机质的保存, 一般具有较高的生烃潜力。对氧化-还原条件较为敏感的有 V、Cr、Co、Sc、La、Ni、Cu、Th、U、Zn 等微量元素(Jones and Manning, 1994; 付金华等, 2018)。其中, V、Cr、Ni 和 Co 元素易在还原环境中富集, V 的沉积速率更高; Ni、Cr 和 Co 常以离子的形式存在于氧化环境中, Co 比 Ni 优先活化(王峰等, 2017), 所以, Cu/Zn、V/Cr、V/(V+Ni) 和 Ni/Co 值可以较好地指示沉积水体的氧化-还原条件(Hatch and Leventhal, 1992; Jones and Manning, 1994; Wignall and Twitchett, 1996; 吴智平等, 2000; Rimmer, 2004; Scheffler *et al.*, 2006)(表 2)。

(1) Cu/Zn 值

$\text{Cu}/\text{Zn} > 0.63$ 指示氧化环境, $0.21 \sim 0.63$ 指示弱氧化-弱还原环境, < 0.21 指示还原环境。研究区 Cu/Zn 值为 $0.32 \sim 2.87$, 平均 1.22 (表 2、图 7), 反映义县组沉积中期处于偏氧化环境, 义县组沉积末期处于弱氧化-弱还原环境, 到九佛堂组时期又处于偏氧化环境。

(2) V/Cr 值

$\text{V}/\text{Cr} < 2.00$ 指示氧化环境, $2.00 \sim 4.25$ 指示弱氧化-弱还原环境, > 4.25 指示还原环境。研究区 V/Cr 值为 $0.67 \sim 2.64$, 平均 1.20 , 也指示义县组沉积中期处于偏氧化环境, 义县组沉积末期处于氧化到弱氧化-弱还原的过渡环境, 到九佛堂组时期又处于偏氧化环境。

(3) Ni/Co 值

$\text{Ni}/\text{Co} < 5$ 指示氧化环境, $5 \sim 7$ 指示弱氧化-弱还原环境, > 7 指示还原环境。研究区 Ni/Co 值为 $0.79 \sim 15.40$, 平均 2.31 , 也具有明显的氧化环境特点。此项指标指示, 义县组到九佛堂组时期一直处于偏

表2 秦漫凹陷北部N10井义县组-九佛堂组岩石的主要和微量元素含量

Table 2 Major and trace elements in Yixian Formation and Jiufotang Formation from Well N10 in the north of Naiman sag

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
样品号	泥岩	泥岩	泥岩	蒸发现晶岩	蒸发现晶岩	蒸发现晶岩	蒸发现晶岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩							
样品类型	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩							
深度/m	854.10	854.50	855.00	855.50	856.00	856.50	1 486.50	1 487.10	1 487.60	1 488.00	1 488.50	1 489.00	1 489.50	1 883.30	1 883.60	1 884.50	2 025.00	2 025.60	2 026.10	
主量元素($w_B/\%$)																				
SiO ₂	55.96	51.23	58.03	60.32	58.21	59.93	6.09	9.32	4.12	4.96	6.12	6.93	59.11	67.01	68.32	67.19	58.65	54.23	61.02	60.76
Al ₂ O ₃	12.36	13.51	12.95	12.32	11.23	13.57	2.86	1.96	4.65	3.21	2.12	2.45	11.85	12.07	11.56	13.52	11.25	9.23	12.65	13.12
MgO	2.07	2.45	3.21	3.32	2.23	2.92	0.11	0.23	0.05	0.21	0.65	0.13	1.32	1.22	0.98	1.96	2.52	1.98	2.87	2.78
Na ₂ O	2.15	1.22	1.97	2.12	1.56	1.93	37.94	36.23	45.56	40.12	51.12	31.12	2.98	3.73	2.14	3.12	3.48	4.85	4.16	4.56
K ₂ O	3.12	3.10	4.01	4.21	3.35	3.64	0.67	0.24	0.12	0.65	1.12	1.11	2.75	3.23	3.85	2.45	2.12	2.66	2.31	2.83
P ₂ O ₅	0.15	0.24	0.15	0.16	0.21	0.18	0.11	0.21	0.05	0.45	0.00	0.24	0.21	0.14	0.21	0.18	0.52	0.65	0.82	0.35
TiO ₂	0.84	0.54	0.97	0.45	0.66	0.64	0.01	0.12	0.00	0.00	0.00	0.15	0.68	0.50	0.45	0.65	0.95	0.78	0.46	0.61
CaO	7.22	3.95	4.45	5.15	6.32	5.46	0.84	1.23	1.83	1.02	0.95	1.21	1.21	1.26	1.96	1.11	3.82	4.12	3.02	3.21
Fe ₂ O ₃	3.86	5.99	4.03	5.21	4.68	4.83	0.25	0.45	1.54	0.14	0.79	0.19	4.12	3.93	2.96	3.16	2.41	3.21	2.98	4.54
MnO	0.14	0.22	0.14	0.21	0.15	0.10	0.25	0.29	0.13	0.38	0.23	0.34	0.13	0.13	0.21	0.08	0.16	0.14	0.09	0.09
烧失量	7.12	8.12	4.52	6.45	7.22	6.79	51.37	46.23	39.56	45.15	40.13	55.12	9.12	6.70	6.12	4.23	5.69	7.56	8.12	7.22
微量元素($w_B/10^{-6}$)																				
BaO	723.63	672.36	710.23	700.12	682.21	706.99	58.23	55.03	54.12	50.16	58.15	56.17	1 170.56	1 200.64	1 050.26	1 174.25	548.56	498.63	512.36	572.52
NiO	26.35	19.45	26.69	19.26	21.32	22.79	2.58	2.12	2.45	3.12	3.12	2.65	22.33	27.94	21.32	26.54	24.12	24.56	21.36	27.32
Cr ₂ O ₃	50.45	55.65	71.23	59.56	61.23	65.36	226.57	198.25	199.54	216.21	224.12	221.56	54.87	60.19	54.65	59.15	796.36	800.25	820.66	872.06
CuO	89.32	91.25	94.56	89.36	98.12	99.60	37.13	34.45	36.45	38.12	36.11	34.65	1 274.25	1 395.75	985.63	1 154.12	502.36	549.63	569.36	544.81
ZrO ₂	211.12	212.25	230.12	199.32	210.23	234.89	24.92	26.54	27.45	26.12	28.24	21.19	174.25	215.16	224.67	187.56	319.65	301.10	296.89	313.23
SrO	582.19	594.56	567.15	597.65	556.35	601.43	49.30	46.54	46.12	42.21	50.86	47.82	165.85	219.79	198.78	201.20	402.32	4 236.96	487.26	455.28
微量元素($w_B/10^{-6}$)																				
Li	35.64	32.12	28.23	30.12	29.35	31.15	12.54	11.25	12.45	16.23	15.21	13.52	26.18	24.12	25.62	29.26	28.46	36.54	31.29	
Be	4.12	3.85	2.93	2.99	3.03	3.10	0.92	1.12	1.85	1.08	2.11	2.08	0.87	1.87	1.86	1.33	2.12	2.65	4.12	2.50
V	85.39	101.45	100.37	87.12	98.36	70.02	37.38	40.21	29.63	34.28	39.56	47.25	59.36	66.45	60.12	74.61	63.23	59.65	71.09	77.80
Cr	98.23	108.66	101.23	100.56	112.12	104.56	24.00	26.12	20.12	22.49	19.25	22.45	73.15	89.23	69.45	78.12	78.15	88.56	82.27	
Co	87.25	86.52	80.23	81.10	88.23	82.71	4.05	5.15	6.12	5.13	6.78	4.69	4.85	84.41	80.12	80.96	54.12	56.32	64.21	55.14
Ni	157.32	135.96	142.36	96.31	131.12	73.79	12.16	9.25	6.35	11.78	14.98	19.73	74.69	66.37	70.96	94.36	64.12	76.12	63.98	64.44
Cu	30.68	104.63	79.63	106.21	46.33	43.07	10.78	14.89	9.56	11.33	19.21	15.45	27.69	54.65	186.95	154.30	87.66	121.24	94.60	18.32
Zn	46.23	54.54	48.63	49.56	50.12	51.74	33.36	30.15	28.96	27.15	31.22	32.45	30.20	69.57	65.23	64.12	48.63	49.56	46.69	51.35
Ga	18.25	19.47	15.66	19.23	19.26	18.14	5.09	6.45	5.46	5.45	5.89	4.12	14.35	14.65	13.96	12.65	16.45	15.05		
Rb	45.32	130.67	163.10	128.57	94.23	86.83	30.60	64.32	160.62	152.61	65.28	129.11	142.90	78.93	147.00	177.14	155.59	162.22	175.06	92.00

续表 2
Continued Table 2

样品号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
样品类型	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	泥岩	
深度/m	854.10	854.50	855.00	855.50	856.00	856.50	1 486.50	1 487.10	1 487.60	1 488.00	1 488.50	1 489.00	1 489.50	1 490.00	1 491.00	1 492.00	1 493.00	1 494.00	1 495.00	
Sr	148.20	537.20	397.30	557.80	210.30	110.10	911.30	712.30	960.70	805.10	773.06	622.39	148.51	85.10	535.30	524.00	385.70	423.10	406.10	
Zr	127.65	112.36	124.15	136.45	115.36	110.13	30.57	29.45	24.63	31.12	19.45	24.63	98.63	85.15	78.26	91.25	104.32	84.63	88.21	
Nb	16.52	11.82	10.12	11.82	11.15	12.77	4.58	3.58	6.45	4.65	4.12	4.12	4.85	10.05	9.25	9.45	9.12	11.12	10.13	
Mo	0.96	0.54	0.82	0.46	0.54	0.60	1.28	1.02	1.85	1.28	2.02	1.02	1.88	0.44	0.12	0.46	0.45	0.87	0.64	
Cd	0.17	0.11	0.08	0.19	0.12	0.13	0.12	0.11	0.21	0.16	0.10	0.19	0.10	0.15	0.56	0.23	0.21	0.06	0.52	
In	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.04	0.02	0.01	0.05	0.07	0.00	0.00	0.00	0.04	0.05	0.06	0.06	0.04	0.06	
Sb	0.45	0.56	0.23	0.21	0.36	0.38	0.46	0.57	1.12	1.54	0.78	0.85	0.40	0.63	0.78	0.28	0.85	0.28	0.31	
Cs	5.17	5.12	5.46	5.19	6.15	6.76	2.14	3.78	2.48	2.65	3.12	2.84	2.10	3.63	4.65	4.12	4.12	7.12	7.15	
Ba	1 386.39	2 935.96	2 134.12	2 756.32	963.56	664.69	1 504.91	823.33	723.63	856.32	697.54	613.65	665.36	443.90	1 896.36	1 541.69	995.36	1 023.45	1 280.36	
Hf	4.12	3.85	2.96	3.96	3.12	3.30	0.72	0.32	0.45	0.78	0.45	0.99	0.65	2.42	1.95	2.10	3.21	1.95	2.16	
Ta	1.85	2.12	1.55	1.85	1.01	1.12	0.27	0.15	0.10	0.12	0.20	0.45	0.18	0.95	1.23	0.80	0.45	0.58	1.45	
W	287.25	289.63	316.55	356.65	302.56	339.05	0.43	0.22	0.20	0.85	0.87	0.45	0.41	428.36	385.22	406.52	221.30	187.26	243.32	
Re	0.01	0.00	0.05	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	
Tl	1.10	0.11	0.48	0.12	0.54	0.68	0.27	0.15	0.34	0.15	0.20	0.30	0.52	0.52	0.85	0.58	0.64	0.64	0.55	
Pb	31.30	35.21	29.65	31.20	35.01	34.04	7.22	8.23	7.12	7.96	9.32	10.11	32.12	33.06	30.63	28.32	25.96	25.16	23.63	
Bi	0.65	0.65	0.19	0.23	0.11	0.27	0.12	0.10	0.10	0.25	0.27	0.18	0.21	0.12	0.10	0.20	0.21	0.96	0.41	
U	3.45	3.74	3.98	4.12	4.98	4.07	1.90	2.15	2.11	1.56	1.87	1.52	1.58	2.23	2.30	2.49	2.91	1.96	2.54	
元素比值																				
Cu/Zn	0.66	1.92	1.64	2.14	0.92	0.83	0.32	0.49	0.33	0.42	0.62	0.48	0.92	0.79	2.87	2.41	1.80	2.45	2.03	
V/Cr	0.87	0.93	0.99	0.87	0.88	0.67	1.56	1.54	1.47	1.52	2.06	2.10	2.64	0.91	0.67	1.07	0.81	0.76	0.80	
Ni/Co	1.80	1.57	1.77	1.19	1.49	0.89	3.00	1.80	1.04	2.30	2.21	4.21	15.40	0.79	0.89	1.17	1.18	1.35	1.00	
V/(V+Ni)	0.35	0.43	0.41	0.47	0.43	0.49	0.75	0.81	0.82	0.74	0.73	0.71	0.44	0.50	0.46	0.44	0.50	0.44	0.53	
Sr/Ba	0.11	0.18	0.19	0.20	0.22	0.17	0.61	0.87	1.33	0.94	1.11	1.01	0.22	0.19	0.28	0.34	0.39	0.41	0.32	
Sr/Cu	4.83	5.13	4.99	5.25	4.54	2.56	84.54	47.84	100.49	71.06	40.24	40.28	5.36	1.56	2.86	3.40	4.40	3.49	4.29	
Rb/Sr	0.31	0.24	0.41	0.23	0.45	0.79	0.03	0.09	0.17	0.19	0.08	0.21	0.96	0.93	0.27	0.34	0.40	0.38	0.43	
Fe ₂ O ₃ /MnO	27.57	27.23	28.79	24.81	31.20	48.30	1.00	1.55	11.85	0.37	3.43	0.56	31.69	35.73	22.77	15.05	30.13	20.06	21.29	
CaO/(MgO + Al ₂ O ₃)	0.50	0.25	0.28	0.33	0.47	0.33	0.28	0.56	0.39	0.30	0.34	0.47	0.09	0.16	0.07	0.28	0.37	0.19	0.20	

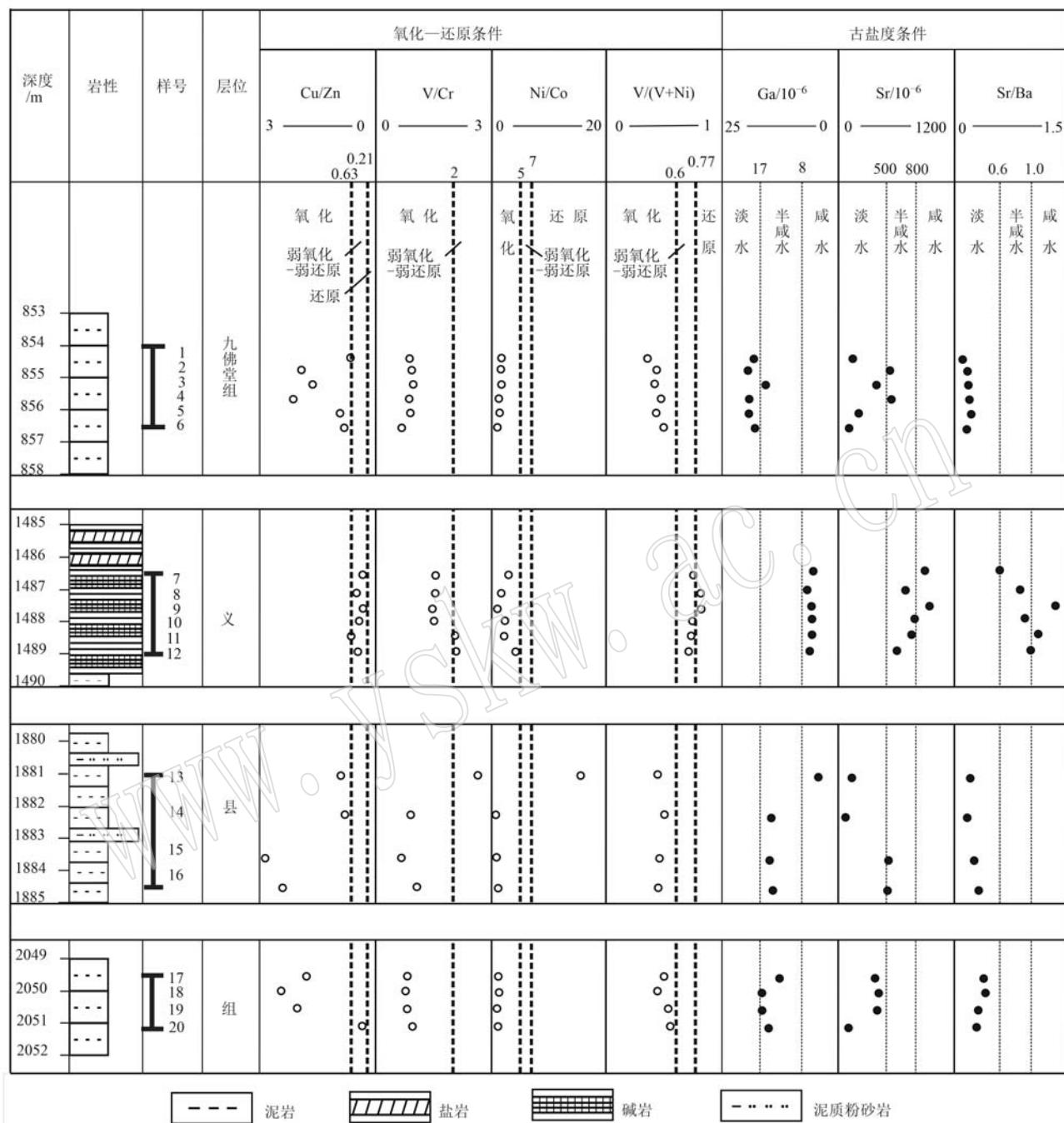


图 7 奈曼凹陷北部义县组-九佛堂组氧化-还原和古盐度条件变化

Fig. 7 The changes of oxidation-reduction and paleosalinity conditions in Yixian Formation and Jiufotang Formation in the north of Naiman sag

氧化环境,只在义县组局部时期出现过还原环境。

(4) V/(V+Ni)值

$V/(V+Ni) < 0.60$ 指示氧化环境, $0.60 \sim 0.77$ 指示弱氧化-弱还原环境, > 0.77 指示还原环境。研究区 $V/(V+Ni)$ 值为 $0.35 \sim 0.82$, 平均 0.55 , 指示义县组沉积中期处于偏氧化环境, 义县组沉积末期处于

弱氧化-弱还原到还原沉积环境, 到九佛堂组时期又处于偏氧化环境。

综上所述, 义县组沉积中期主要处于偏氧化环境, 沉积末期蒸发岩发育时期, 处于弱氧化-弱还原沉积环境, 九佛堂组沉积时期又处于氧化沉积环境。

4.2 古盐度条件

(1) 古盐度敏感元素含量

古盐度有助于判断沉积时期水体的性质。Ga、Sr、Ni、Ba 等微量元素含量对沉积水体的盐度变化十分敏感,一般 $Ga > 17 \times 10^{-6}$ 指示淡水环境, $Ga = 8 \times 10^{-6} \sim 17 \times 10^{-6}$ 指示半咸水环境, $Ga < 8 \times 10^{-6}$ 指示咸水环境; $Sr < 500 \times 10^{-6}$ 指示淡水环境, $Sr = 500 \times 10^{-6} \sim 800 \times 10^{-6}$ 指示半咸水环境, $Sr > 800 \times 10^{-6}$ 指示咸水环境(范萌萌等, 2019)。研究区样品的 Ga 含量为 $4.12 \times 10^{-6} \sim 19.47 \times 10^{-6}$, 平均 12.57×10^{-6} , 反映义县组从中期到末期处于半咸水到咸水沉积环境, 到九佛堂组时期又处于淡水-半咸水沉积环境。 Sr 含量为 $85.1 \times 10^{-6} \sim 960.7 \times 10^{-6}$, 平均 468.10×10^{-6} , 表明义县组沉积中期处于淡水或者淡水-半咸水环境, 沉积末期处于半咸水-咸水环境, 到九佛堂组时期, 又处于淡水-半咸水沉积环境(图 7)。

(2) Sr/Ba 值

Sr/Ba 通常可作为古盐度的判别指标。在淡水环境中 Sr 和 Ba 不易沉积, 并且 Sr 的迁移能力更高, 当水体盐度增加, Sr 的溶解性高于 Ba , Ba 会以 $BaSO_4$ 的形式沉淀, Sr 依旧作为离子溶于水中(王峰等, 2017; 黄云飞等, 2017)。因此, Sr 含量越高, 表明水质越咸, Sr/Ba 值的高值也代表咸水沉积环境。当沉积物的 Sr/Ba 值小于 0.6 时, 为淡水沉积, Sr/Ba 值为 0.6~1.0 时, 为半咸水沉积, Sr/Ba 值大于 1.0 时, 为咸水沉积(王益友等, 1979)。研究区 Sr/Ba 值为 $0.11 \sim 1.33$, 平均 0.47, 说明义县组中期到末期处于从淡水到半咸水-咸水的沉积环境, 九佛堂组时期处于淡水沉积环境。

综上所述, 义县组沉积中期主要处于淡水-半咸水沉积环境, 沉积末期蒸发岩发育时期处于半咸水-咸水沉积环境, 九佛堂组时期又处于淡水沉积环境。

4.3 古水深条件

Ca/Cu 与 Ba 相似, 入湖河流中 Ca^{2+} 和 Cu^{2+} 的碳酸盐或硫酸盐溶解度相对较小, 在深水环境中会先于 Sr^{2+} 沉淀而析出, 故 Sr/Cu 值增大意味着湖泊盐度增大, 沉积水体深度减小(林晓慧等, 2019)。研究区样品 Sr/Cu 值为 $1.56 \sim 100.49$, 平均 22.15, 反映了义县组水体由深变浅、到九佛堂组时期又变深的过程(图 8)。所以, 义县组沉积中期主要处于深水沉积环境, 沉积末期蒸发岩发育时期处于浅水沉积环境, 有利于蒸发岩发育, 到了九佛堂组时期又处于深水沉积环境。

4.4 古气候条件

(1) Rb/Sr 值

Rb 为喜湿型元素, Sr 为喜干型元素, 其比值可以有效地反映古气候的变化。 Rb/Sr 值在干旱环境中比较低, 在湿润环境中则较高(刘鑫等, 2021)。研究区 Rb/Sr 值为 $0.03 \sim 0.96$, 平均 0.39(图 5), 反映了义县组中期为半湿润-半干旱气候, 沉积末期出现了干旱气候, 到九佛堂组时期又处于半湿润-半干旱气候。

(2) Sr/Cu 值

Sr/Cu 值对古气候的变化也有较强的指示作用, 小于 10 指示温暖湿润的气候, 大于 10 指示干燥炎热的气候(范萌萌等, 2019)。研究区 Sr/Cu 值为 $1.56 \sim 100.49$, 平均 22.15, 反映义县组中期整体处于湿润气候, 沉积末期出现干旱气候, 蒸发岩发育, 到九佛堂时期, 又处于湿润气候。

(3) Fe_2O_3/MnO 值

Mn 在干旱环境中含量比较高, 在相对潮湿的条件下含量较低, Fe 在潮湿环境中易以 $Fe(OH)_3$ 胶体形式快速沉淀, 因此, 沉积物中 Fe_2O_3/MnO 的高值指示温湿气候, 低值指示干热气候(宋明水, 2005)。研究区 Fe_2O_3/MnO 值为 $0.37 \sim 50.44$, 平均 21.69, 反映义县组沉积中期处于偏湿润气候, 沉积末期处于干旱气候, 到了九佛堂组时期又处于偏湿润气候。

(4) $CaO/(MgO+Al_2O_3)$ 值

这项指标对气候的变化也较为敏感, 可以反映气温的高低程度, $CaO/(MgO+Al_2O_3)$ 值越大, 代表的气温就相对越高(范萌萌等, 2019)。研究区 $CaO/(MgO+Al_2O_3)$ 值为 $0.07 \sim 0.56$, 平均 0.30, 也反映义县组沉积中期主要处于湿润气候, 到了义县组沉积末期偏向干旱气候, 到了九佛堂组时期处于半干旱-半湿润气候。

综上所述, 奈曼凹陷北部义县组沉积中期处于半湿润-半干旱气候, 沉积末期处于干旱气候, 水体蒸发有利于蒸发岩达到过饱和, 结晶析出。九佛堂组沉积时期又转为处于半湿润-半干旱气候。

4.5 湖泊水体的封闭性

在一个水文条件开放的湖泊内, 水体快速更替, 停留时间短, 湖水的碳、氧同位素组分更多地反映了注入水的同位素特征(刘传联, 1998; 宋明水, 2005), 这时候碳同位素和氧同位素变化是独立的, 碳氧同位素的相关系数相对较小。若湖泊的水文条件相对封闭, 注入水量小, 停留时间长, 其碳氧同位

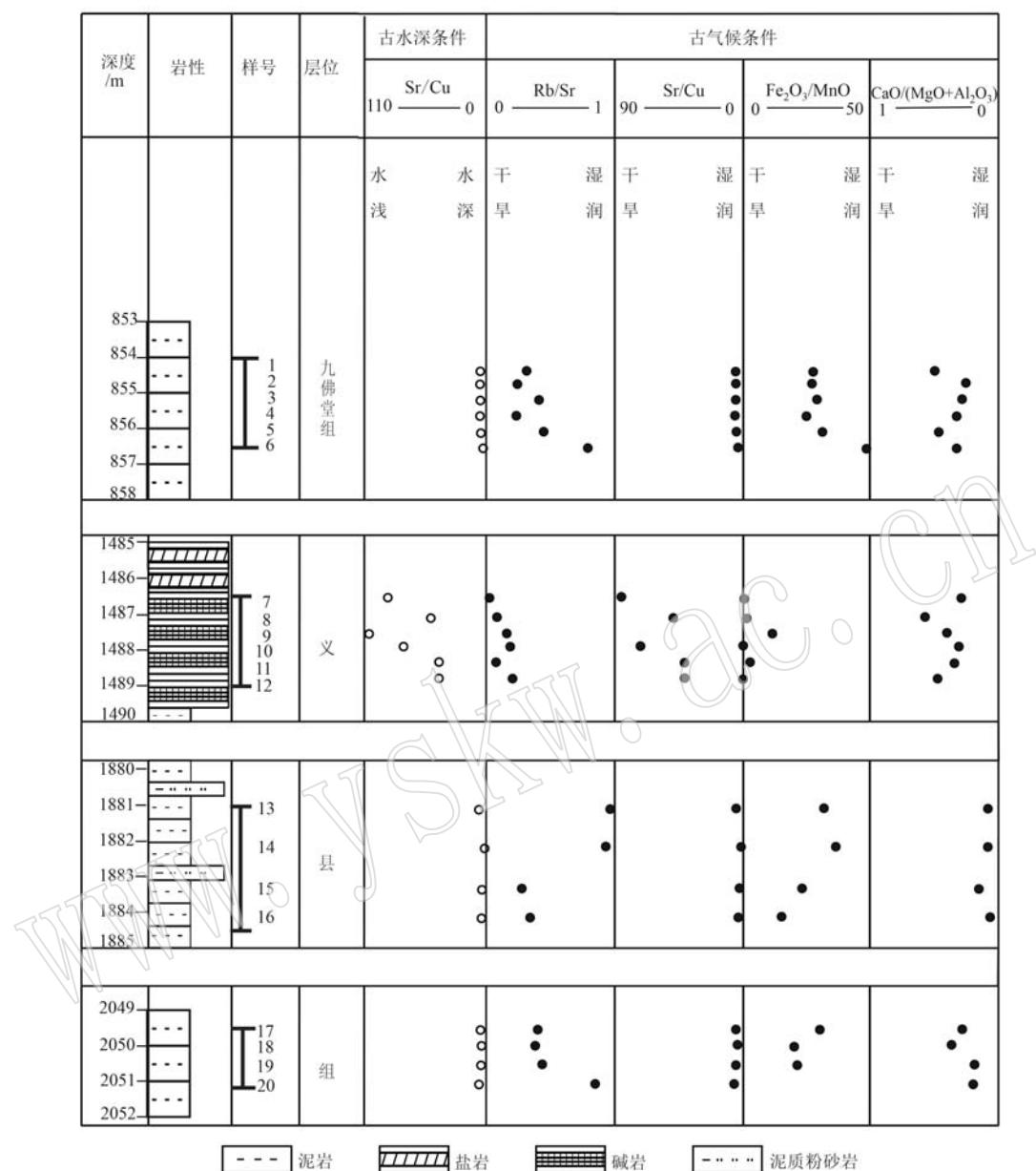


图 8 奈曼凹陷北部义县组-九佛堂组古水深和古气候条件变化

Fig. 8 The changes of paleowater depth and paleoclimatic conditions in Yixian Formation and Jiufotang Formation in the north of Naiman sag

素变化基本受蒸发作用及湖泊水体大小的影响, 随着蒸发作用变强, 较轻的¹⁶O 和¹²C 优先逸出, 造成水体中的¹⁸O 和¹³C 含量增加, 从而使湖水中的碳、氧同位素值同步增加。奈曼凹陷北部碳氧同位素研究显示, 义县组沉积中期碳同位素为 0.41‰~3.59‰, 平均值为 2.20‰, 氧同位素为 -18.16‰~-12.52‰, 平均值为 -15.36‰; 义县组沉积末期碳同位素为 2.05‰~4.37‰, 平均值为 2.86‰, 氧同位素为 -5.61‰~-2.00‰, 平均值为 -4.14‰, 碳氧同位素

值都偏高; 九佛堂组碳同位素为 1.94‰~3.12‰, 平均值为 2.36‰, 氧同位素为 -9.21‰~-7.65‰, 平均值为 -8.46‰, 碳氧同位素值都略低。义县组沉积末期碳同位素明显增加, 氧同位素也略有增加, 反映了湖盆水体具有一定封闭性的特征。图 9 中义县组沉积末期碳氧同位素值落在世界封闭型湖泊范围内, 表明此时期湖盆处于闭塞环境, 组成蒸发岩的物质无法流出, 在湖盆内聚集, 有利于形成蒸发岩。而义县组沉积中期碳氧同位素较低, 水体处于半封闭-

半开放状态。九佛堂组沉积时期,碳氧同位素略低,湖泊水体也基本处于半封闭的状态。

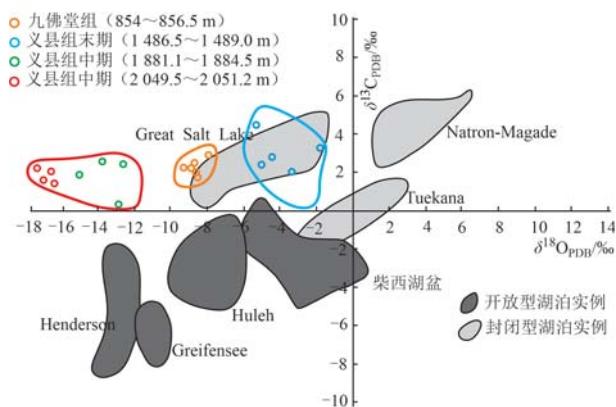


图 9 奈曼凹陷北部义县组-九佛堂组古湖泊特征
(戴朝成等, 2024)

Fig. 9 Paleolimnological characteristics in Yixian Formation and Jiufotang Formation in the north of Naiman sag
 (Dai Chaocheng *et al.*, 2024)

4.6 沉积环境演化特征

奈曼凹陷北部早白垩世早期,在区域性地幔隆起背景下,地壳上部出现拉张应力环境,火山大规模喷发活动后,形成大规模的火山喷发岩。这时期的控凹断裂沿着断裂面滑动,以垂直运动为主。到了义县组沉积中期,湖盆继续受断裂活动的影响,形成深陷环境,水体较深,主体为半深湖、深湖相沉积,洼陷中心物源供给不充足,沉积岩以灰色、灰黑色泥岩、粉砂质泥岩为主,为淡水环境;洼陷边缘存在物源供给,有砂体注入。到了义县组沉积末期,构造活动减弱,受断裂作用影响局部地区形成封闭湖盆,为

滨浅湖沉积环境，在干旱气候环境下，湖水逐渐浓缩，水体变浅，结晶析出蒸发岩。此时，周边凸起为石炭世-侏罗世的火山岩，含有丰富的 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 等，能够成为湖盆持续供给蒸发岩的物质来源；一方面，有机质分解提供一部分 CO_2 ，另一方面，在细菌作用下可发生下列反应： $\text{SO}_4^{2-} + 2 \text{C} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{S} + 2 \text{CO}_2 + 2 \text{OH}^- \rightarrow \text{H}_2\text{S} \uparrow + 2 \text{HCO}_3^{2-}$ ，也产生一部分 CO_2 ；早白垩时期频繁的火山活动，导致深部物质通过断裂上涌，提供了大量 CO_2 及富含 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 等离子的热液；持续干旱气候导致湖水高度浓缩达到饱和，结晶析出蒸发岩（图 10）。到了九佛堂组沉积时期，构造活动再次增强，湖盆进入快速裂陷期，为扇三角洲-半深湖、深湖相沉积体系，研究区所在位置为淡水-微咸水的深水沉积，气候半湿润-半干旱。

5 对油气勘探的启示作用

5.1 烃源岩特征

勘探实践表明,奈曼凹陷北部存在义县组和九佛堂组两套主力烃源岩(刘海艳等,2022),两套烃源岩所处的沉积中心均位于北部。通过上述沉积古环境恢复认为,义县组主体以淡水-半咸水的深水沉积环境为主,九佛堂组水质偏淡,也为深水沉积环境,这两种类型的沉积环境均适合生物繁殖,有机质丰度高(表3),有利于义县组和九佛堂组泥质烃源岩的发育,为油气藏形成提供了良好的物质基础。

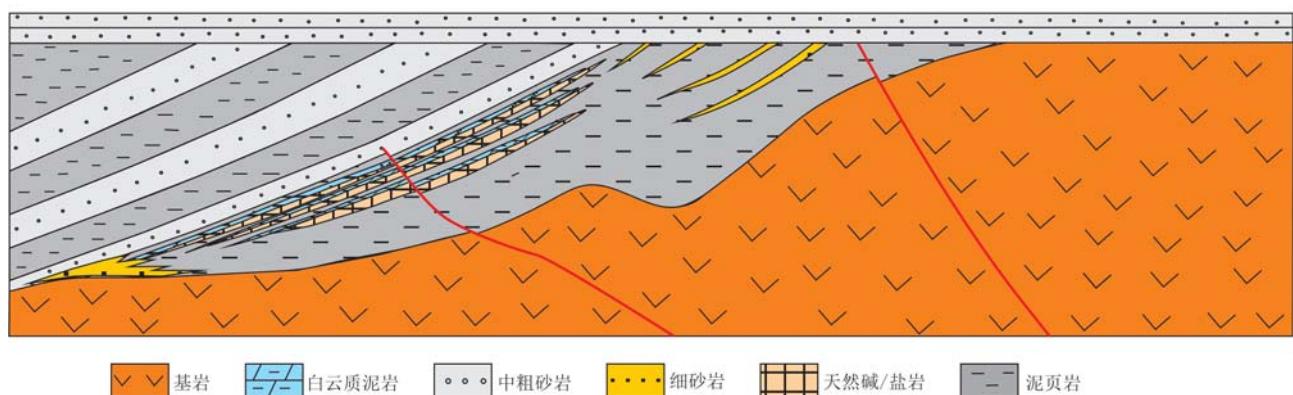


图 10 奈曼凹陷北部义县组沉积末期蒸发岩沉积特征

Fig. 10 The sedimentary characteristics of evaporites in the late depositional stage of Yixian Formation in the north of Naiman sag

表3 奈曼凹陷北部有机质丰度参数

Table 3 The parameters of abundance of organic matter in the north of Naiman sag

层位	有机碳/%	氯仿沥青“A”/%	生烃潜量/ 10^{-3}	总烃/ 10^{-6}
K ₁ jf	0.47~14.50(2.59)	0.009~1.7145(0.0355)	0.45~117.07(15.50)	14.00~1727.00(371.00)
K ₁ y	2.12~4.61(3.24)	0.1645~0.3712(0.2783)	10.99~24.32(17.98)	788.80~1917.09(1495.33)

括号中数字为平均值。

5.2 油碱共生关系探讨

Warren(2006)研究认为,蒸发环境能有效保存有机质,使有机质更丰富。在蒸发岩形成期,由于水体盐度增加或不同盐度水体的混合,底部高盐度水体近于停滞,生物体死后沉入水底,氧浓度的降低制约了绝大部分种类的生物生长,蓝绿藻和厌氧微生物细菌却可继续生存且繁盛(吴小力等,2017;王彦青等,2018)。在该环境下,沉积物免受生物的搅动,从而生产更多的有机质,形成好-优质的烃源岩。

在烃源岩排烃的过程中,义县组沉积末期蒸发岩盆地中烃源岩因有盐类物质的存在,加速了黏土矿物转化和脱水过程,为烃源岩早期生成烃类以水溶相排出提供了载体;盐类物质特殊的电性特征降

低了烃源岩对有机质的吸附,促进了油气的初次运移。而通过岩心照片、扫描电镜等分析,证实了N10和NA-2井蒸发岩中溶蚀孔、晶间孔缝较发育(图2),有利于烃源岩烃类物质的排出和运移、聚集,成为良好的储集空间,聚集大规模油藏(图11)。蒸发岩盐构造是指由于盐岩的流动形变所形成的地质变形体,它们包括变形体本身及其周围的变形岩层。蒸发岩的盐层在埋藏过程中由于变形会形成种类繁多的盐构造(田力丹等,2024),盐构造不仅为油气成藏提供了丰富的油气圈闭,而且还提供了良好的运移通道网络。奈曼凹陷北部蒸发岩层与泥岩生油层配置在一起,形成了顶部或侧向封堵型的岩性油气藏,具有油碱共生的特征,为蒸发岩中寻找油气有利勘探目标打下了良好的基础。

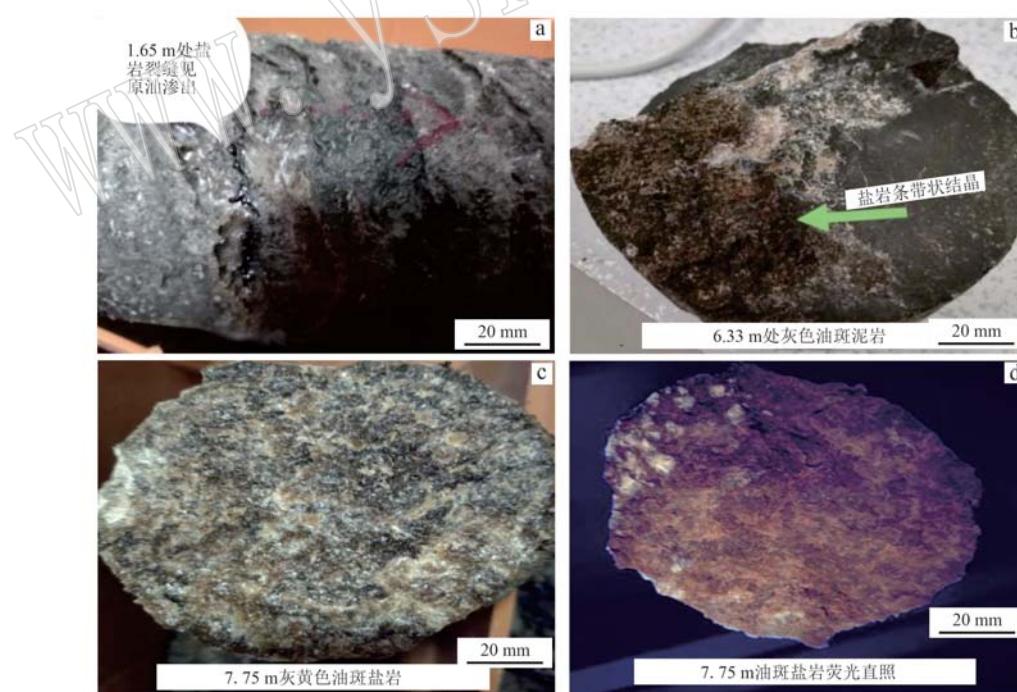


图11 奈曼凹陷北部义县组蒸发岩岩心含油特征照片

Fig. 11 The oil bearing characteristics photos of evaporite cores in the Yixian Formation in the north of Naiman sag

a—蒸发岩裂缝中含油,NA-2井,1476.68 m; b—蒸发岩溶蚀孔中含油,NA-2井,1506.49 m; c—蒸发岩中发育晶间孔隙,

NA-2井,1543.05 m; d—蒸发岩孔隙中含油,NA-2井,1543.05 m

a—oil in the cracks of evaporite, Well NA-2, 1476.68 m; b—oil in the dissolution pores of evaporite, Well NA-2, 1506.49 m;

c—intercrystalline pores in evaporite, Well NA-2, 1543.05 m; d—oil in the pores of evaporite, Well NA-2, 1543.05 m

6 结论

(1) 奈曼凹陷北部义县组受火山作用、构造作用和沉积作用的多重控制,主要发育火山岩相、扇三角洲相、深湖-半深湖相等多种沉积类型。义县组沉积早期为火山岩相,中期和末期以扇三角洲-湖相沉积体系为主,沉积末期局部地区发育不同类型的蒸发岩。

(2) 九佛堂组受控于西侧边界断层的影响,发育扇三角洲-湖相沉积体系,主要沉积相类型包括扇三角洲平原相、扇三角洲前缘相和深湖-半深湖相。

(3) 通过主、微量元素和碳氧同位素分析,义县组沉积中期到末期气候由半湿润-半干旱变为干旱,水体环境也随之由偏氧化的半封闭-半开放到弱氧化-弱还原的完全闭塞,沉积化学环境由淡水-半咸水深湖变为咸化浅湖。九佛堂组则为半封闭条件下的氧化淡水深湖沉积,气候为半湿润-半干旱。

(4) 奈曼凹陷北部存在义县组和九佛堂组两套主力烃源岩,从有机质丰度判断为好-优质烃源岩,蒸发岩溶蚀孔、晶间孔缝较发育,有利于烃源岩烃类物质的排出、运移和聚集,成为良好的储集空间,有利于油藏的形成。

(5) 沉积古环境的恢复,明确了奈曼凹陷北部沉积环境的演化特征,加深了对泥质烃源岩和蒸发岩形成条件的认识,对油气勘探具有重要的指导意义。

References

- Chen Yixian, Chen Wenji and Zhou Xinhua. 1997. Mesozoic Volcanic Rocks in Western Liaoning and Its Adjacent Areas: Chronology, Geochemistry and Tectonic Background [M]. Beijing: Seismological Press, 1~279 (in Chinese).
- Dai Chaocheng, Zhong Chitao, Liu Xiaodong, et al. 2024. Genetic model of Na-carbonate in Tamusu trona deposit, Bayingobi Basin, Inner Mongolia[J]. Earth Science, 49(4): 1 207~1 223 (in Chinese with English abstract).
- Ding Ting, Yuan Miao, Liu Chenglin, et al. 2023. Characteristics of strontium isotope and the significance for the evaporites of Early and Middle Triassic in the eastern region of Sichuan Basin[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 42(6): 868~877 (in Chinese with English abstract).
- Fan Mengmeng, Bu Jun, Zhao Xiaoyan, et al. 2019. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Yanchang Formation in southeastern Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 49(4): 633~642 (in Chinese).
- Fan Yuhai, Qu Hongjun, Wang Hui, et al. 2012. The application of trace elements analysis to identifying sedimentary media environment: A case study of Late Triassic strata in the middle part of western Ordos Basin[J]. Geology in China, 39(2): 382~389 (in Chinese).
- Fu Jinhua, Li Shixiang, Xu Liming, et al. 2018. Paleo-sedimentary environmental restoration and its significance of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 45(6): 936~946 (in Chinese with English abstract).
- Hatch J R and Leventhal J S. 1992. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U. S. A. [J]. Chemical Geology, 99(1~3): 65~82.
- Huang Yunfei, Zhang Changmin, Zhu Rui, et al. 2017. Paleosalinity restoration of lower Triassic Baikouquan Formation in Mahu Sag, Junggar basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 38(3): 269~275 (in Chinese).
- Jones B and Manning D A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of Palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. Chemical Geology, 111(1~4): 111~129.
- Li Chengfeng and Xiao Jifeng. 1988. The application of trace element to the study on paleosalinities in Shahejie Formation of Dongying basin, Shengli oilfield[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 6(4): 100~107 (in Chinese with English abstract).
- Li Fengxia. 2005. A sporopollen assemblage from the Early Cretaceous Fuxin Formation in the Kailu Basin, Nei Mongol[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 22(1): 87~96 (in Chinese).
- Li Wuping, Li Xianhua, Lu Fengxiang, et al. 2002. Geological characteristics and its setting for volcanic rocks of Early Cretaceous Yixian Formation in western Liaoning Province, Eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 18(2): 193~204 (in Chinese with English abstract).
- Liang Wenjun, Xiao Chuantao, Xiao Kai, et al. 2015. The relationship of Late Jurassic paleoenvironment and paleoclimate with geochemical elements in Amdo Country of northern Tibet[J]. Geology in China, 42(4): 1 079~1 091 (in Chinese with English abstract).

- Lin Xiaohui, Zhan Zhaowen, Zou Yanrong, et al. 2019. Elemental geochemical characteristics of the Lucaogou Formation oil shale in the southeastern Junggar Basin and its depositional environmental implications [J]. *Geochimica*, 48(1): 67~78 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chuanlian. 1998. Carbon and oxygen isotopic compositions of lacustrine carbonates of the shahejie formation in the Dongying depression and their paleolimnological significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 16(3): 109~114 (in Chinese).
- Liu Haiyan, Pei Jiaxue, Yang Xue, et al. 2022. Geochemical characteristics and research significance of source rocks of Yixian Formation, northern Naiman [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 29(1): 31~37 (in Chinese).
- Liu Qing, Zhang Linye, Song Guoqi, et al. 2009. Application of occurrences of gypsum minerals in saline lacustrine facies analysis and source rocks organic geochemistry evaluation: A case study of Wending subdepression [J]. *Geological Journal of China Universities*, 15(3): 371~379 (in Chinese).
- Liu Xiaoli, Pei Jiaxue, Cai Guogang, et al. 2023. Sequence stratigraphy and sedimentary evolution during the rifting period of a half-graben basin: A case study of lower section of Jiufotang Formation in Naiman Depression, southwestern margin of the Songliao Basin [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 47(2): 91~103, 116, 10~11 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xin, Shang Ting, Tian Jingchun, et al. 2021. Paleo-sedimentary environmental conditions and its significance of Chang 4+5 Member of Triassic Yanchang Formation in the Zhenbei area, Ordos Basin, NW China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(11): 3 501~3 518 (in Chinese with English abstract).
- Pei Jiaxue. 2015. Forming conditions and identification of lithologic reservoirs in peripheral basin, Liaohe oilfield [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 22(3): 62~65, 153~154 (in Chinese with English abstract).
- Qian Lijun, Chen Hongde, Lin Liangbiao, et al. 2012. Geochemical characteristics and environmental implications of Middle Jurassic Shaximiao Formation, western margin of Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(6): 1 061~1 071 (in Chinese with English abstract).
- Rimmer S M. 2004. Geochemical paleoredox indicators in Devonian-Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA) [J]. *Chemical Geology*, 206(3~4): 373~391.
- Scheffler K, Buehmann D and Schwark L. 2006. Analysis of late Palaeozoic glacial to postglacial sedimentary successions in South Africa by geochemical proxies—Response to climate evolution and sedimentary environment [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 240(1~2): 184~203.
- Song Mingshui. 2005. Sedimentary environment geochemistry in the Shasi section of southern ramp, Dongying depression [J]. *Mineralogy and Petrology*, 25(1): 67~73 (in Chinese).
- Tan Cong, Yuan Xuanjun, Yu Bingsong, et al. 2019. Geochemical characteristics and paleoclimatic implications of the upper Permian and middle-lower Triassic strata in southern Ordos basin [J]. *Geoscience*, 33(3): 615~628 (in Chinese with English abstract).
- Tian Lidan, Song Yucai, Zhuang Liangliang, et al. 2024. Genetic relationship between Mississippi Valley-type (MVT) lead-zinc deposit and evaporite: A review [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 43(4): 1 012~1 033 (in Chinese with English abstract).
- Tian Ya. 2018. Geochemical characteristics of hydrocarbon source rocks in Naiman sag [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 32(5): 23~26, 122 (in Chinese with English abstract).
- Wang Feng, Liu Xianchun, Deng Xiuqin, et al. 2017. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Zhifang Formation in Ordos basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(6): 1 265~1 273 (in Chinese with English abstract).
- Wang Minfang, Jiao Yangquan, Wang Zhenghai, et al. 2005. Recovery paleosalinity in sedimentary environment—An example of mudstone in Shuixigou Group, southwestern margin of Turpan-Hami Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 26(6): 719~722 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yang, Ji Guangyi and Deng Jinfu. 2003. Jurassic-Early Cretaceous magmatism in the Yanshan Orogen: Characteristics and relations with orogenic evolution [J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 22(4): 344~349 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yanqing, Chen Yingbin, Hu Ye, et al. 2018. Discussion on hydrocarbon generation ability of evaporation environment: A case study of Leikoupo Formation in West Sichuan Depression [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 25(4): 426~430 (in Chinese).
- Wang Yiyu, Guo Wenying and Zhang Guodong. 1979. Application of some geochemical indicators in determining of sedimentary environment of the Funing Group (Paleogene), Jinhu depression, Jiangsu Province [J]. *Journal of Tongji University*, 7(2): 51~60 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ying, Hou Zhongjian and Liu Hongyan. 2009. Source provenance analysis for Cretaceous Jiufotang Formation in Naiman depression [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 16(2): 34~36, 105 (in Chinese with English abstract).

- nese with English abstract).
- Warren J K. 2006. *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons* [M]. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1~1019.
- Wignall P B and Twitchett R J. 1996. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction[J]. *Science*, 272(5 265): 1 155~1 158.
- Wu Bingwei. 2006. Early Cretaceous spore and pollen assemblages of Kailu Basin, Nei Mongol[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 45(4): 527~537 (in Chinese with English abstract).
- Wu Bingwei. 2007. Discovery of three Cretaceous biotas in the Kailu Basin of Inner Mongolia and their geological significance[J]. *Journal of Stratigraphy*, 31(3): 280~287 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xiaoli, Liu Hanlin, Li Rongxi, et al. 2017. Progress in researches of developmental rule and the hydrocarbon generation and expulsion characteristics of hydrocarbon source rocks in terrestrial evaporite basins of China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 36(4): 183~192 (in Chinese).
- Wu Zhiping and Zhou Yaoqi. 2000. Using the characteristic elements from meteoritic must in strata to calculate sedimentation rate[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(3): 395~399 (in Chinese).
- Xi Shengli, Zheng Congbin and Li Zhenhong. 2004. Geochemical characteristics and its sedimentary environment significance of the Ordovician in the western margin of Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 6(2): 196~206 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Hongrui. 2007. Reservoir features and evaluation for No. 1 block in Naiman area[J]. *Mud Logging Engineering*, 18(3): 29~33, 76 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Caili, Gao Along, Liu Zhe, et al. 2011. Study of character on sedimentary water and Palaeoclimate for Chang7 oil layer in Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 22(4): 582~587 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Tianfu, Sun Lixin, Zhang Yun, et al. 2016. Geochemical characteristics of the Jurassic Yan'an and Zhiluo Formations in the northern margin of Ordos Basin and their paleoenvironmental implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3 454~3 472 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xingqi, Chen Jianfa, Guo Wang, et al. 2013. Geochemical characteristics of aromatic hydrocarbon in crude oil and source rocks from Nai 1 block of Naiman depression, Kailu Basin[J]. *Geochimica*, 42(3): 262~273 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xingqi, Chen Jianfa, Zhang Chen, et al. 2011. Geochemical characteristics of hydrocarbon gases and its genetic analysis in Nai 1 block, Naiman oilfield[J]. *Natural Gas Geoscience*, 22(4): 715~722 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xingqi, Chen Jianfa, Zhang Chen, et al. 2012. Geochemical characteristics of crude oil and oil-source analysis in Nai 1 block for Naiman depression, Kailu Basin[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 36(3): 44~53 (in Chinese).
- Zhou Hongrui, Wang Ziqiang, Cui Xinsheng, et al. 1999. *Study of the Neoproterozoic Strata on the Southern of the North China Platform* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~90 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈义贤, 陈文寄, 周新华. 1997. 辽西及邻区中生代火山岩——年代学、地球化学和构造背景[M]. 北京: 地震出版社, 1~279.
- 戴朝成, 钟炽涛, 刘晓东, 等. 2024. 内蒙古巴音戈壁盆地塔木素碱矿 Na-碳酸盐成因模式[J]. *地球科学*, 49(4): 1 207~1 223.
- 丁婷, 袁苗, 刘成林, 等. 2023. 四川盆地东部地区早中三叠世蒸发岩的锶同位素特征及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 42(6): 868~877.
- 范萌萌, 卜军, 赵筱艳, 等. 2019. 鄂尔多斯盆地东南部延长组微量元素地球化学特征及环境指示意义[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 49(4): 633~642.
- 范玉海, 届红军, 王辉, 等. 2012. 微量元素分析在判别沉积介质环境中的应用——以鄂尔多斯盆地西部中区晚三叠世为例[J]. *中国地质*, 39(2): 382~389.
- 付金华, 李士祥, 徐黎明, 等. 2018. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段古沉积环境恢复及意义[J]. *石油勘探与开发*, 45(6): 936~946.
- 黄云飞, 张昌民, 朱锐, 等. 2017. 准噶尔盆地玛湖凹陷下三叠统百口泉组古盐度恢复[J]. *新疆石油地质*, 38(3): 269~275.
- 李成凤, 肖继风. 1988. 用微量元素研究胜利油田东营盆地沙河街组的古盐度[J]. *沉积学报*, 6(4): 100~107.
- 李凤霞. 2005. 内蒙古开鲁盆地早白垩世阜新组孢粉组合[J]. *微体古生物学报*, 22(1): 87~96.
- 李伍平, 李献华, 路凤香, 等. 2002. 辽西早白垩世义县组火山岩的地质特征及其构造背景[J]. *岩石学报*, 18(2): 193~204.
- 梁文君, 肖传桃, 肖凯, 等. 2015. 藏北安多晚侏罗世古环境、古气候与地球化学元素关系研究[J]. *中国地质*, 42(4): 1 079~1 091.
- 林晓慧, 詹兆文, 邹艳荣, 等. 2019. 准噶尔盆地东南缘芦草沟组油页岩元素地球化学特征及沉积环境意义[J]. *地球化学*, 48(1): 67~78.
- 刘传联. 1998. 东营凹陷沙河街组湖相碳酸盐岩碳氧同位素组分及

- 其古湖泊学意义[J]. 沉积学报, 16(3): 109~114.
- 刘海艳, 裴家学, 杨 雪, 等. 2022. 奈曼北部义县组烃源岩地球化学特征及研究意义[J]. 特种油气藏, 29(1): 31~37.
- 刘 庆, 张林晔, 宋国奇, 等. 2009. 利用石膏产状研究汶东盐湖相沉积与烃源岩特征[J]. 高校地质学报, 15(3): 371~379.
- 刘 鑫, 尚 婷, 田景春, 等. 2021. 鄂尔多斯盆地镇北地区延长组长4+5段沉积期古环境条件及意义[J]. 地质学报, 95(11): 3 501~3 518.
- 刘晓丽, 裴家学, 蔡国钢, 等. 2023. 箕状断陷湖盆裂陷期层序地层及沉积演化——以松辽盆地西南缘奈曼凹陷九佛堂组下段为例[J]. 东北石油大学学报, 47(2): 91~103, 116, 10~11.
- 裴家学. 2015. 辽河外围盆地岩性油藏形成条件及识别[J]. 特种油气藏, 22(3): 62~65, 153~154.
- 钱利军, 陈洪德, 林良彪, 等. 2012. 四川盆地西缘地区中侏罗统沙溪庙组地球化学特征及其环境意义[J]. 沉积学报, 30(6): 1061~1071.
- 宋明水. 2005. 东营凹陷南斜坡沙四段沉积环境的地球化学特征[J]. 矿物岩石, 25(1): 67~73.
- 谭 聪, 袁选俊, 于炳松, 等. 2019. 鄂尔多斯盆地南缘上二叠统——中下三叠统地球化学特征及其古气候、古环境指示意义[J]. 现代地质, 33(3): 615~628.
- 田力丹, 宋玉财, 庄亮亮, 等. 2024. 密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床与蒸发岩的成因关系[J]. 岩石矿物学杂志, 43(4): 1 012~1 033.
- 田 涯. 2018. 奈曼凹陷烃源岩地球化学特征[J]. 石油地质与工程, 32(5): 23~26, 122.
- 王 峰, 刘玄春, 邓秀芹, 等. 2017. 鄂尔多斯盆地纸坊组微量元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J]. 沉积学报, 35(6): 1 265~1 273.
- 王敏芳, 焦养泉, 王正海, 等. 2005. 沉积环境中古盐度的恢复——以吐哈盆地西南缘水西沟群泥岩为例[J]. 新疆石油地质, 26(6): 719~722.
- 王彦青, 陈迎宾, 胡 烨, 等. 2018. 蒸发环境烃源岩生烃能力探讨——以川西坳陷雷口坡组为例[J]. 断块油气田, 25(4): 426~430.
- 王益友, 郭文莹, 张国栋. 1979. 几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用[J]. 同济大学学报, 7(2): 51~60.
- 王 莹, 侯中健, 刘红岩. 2009. 奈曼凹陷白垩系九佛堂组物源分析[J]. 特种油气藏, 16(2): 34~36, 105.
- 汪 洋, 姬广义, 邓晋福. 2003. 燕山地区侏罗纪-白垩纪岩浆活动特征及其与造山演化的关系[J]. 矿物岩石地球化学通报, 22(4): 344~349.
- 吴炳伟. 2006. 内蒙古开鲁盆地早白垩世孢粉组合[J]. 古生物学报, 45(4): 527~537.
- 吴炳伟. 2007. 内蒙古开鲁盆地白垩纪三大生物群的发现及其地质意义[J]. 地层学杂志, 31(3): 280~287.
- 吴小力, 刘翰林, 李荣西, 等. 2017. 中国陆相蒸发岩盆地中烃源岩的发育规律及其生排烃特征研究进展[J]. 地质科技情报, 36(4): 183~192.
- 吴智平, 周瑶琪. 2000. 一种计算沉积速率的新方法——宇宙尘埃特征元素法[J]. 沉积学报, 18(3): 395~399.
- 席胜利, 郑聰斌, 李振宏. 2004. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系地球化学特征及其沉积环境意义[J]. 古地理学报, 6(2): 196~206.
- 苑洪瑞. 2007. 奈曼地区奈1区块储集层特征及评价[J]. 录井工程, 18(3): 29~33, 76.
- 张才利, 高阿龙, 刘 哲, 等. 2011. 鄂尔多斯盆地长7油层组沉积水体及古气候特征研究[J]. 天然气地球科学, 22(4): 582~587.
- 张天福, 孙立新, 张 云, 等. 2016. 鄂尔多斯盆地北缘侏罗纪延安组、直罗组泥岩微量、稀土元素地球化学特征及其古沉积环境意义[J]. 地质学报, 90(12): 3 454~3 472.
- 赵兴齐, 陈践发, 郭 望, 等. 2013. 开鲁盆地奈曼凹陷奈1区块原油及烃源岩芳烃地球化学特征[J]. 地球化学, 42(3): 262~273.
- 赵兴齐, 陈践发, 张 晨, 等. 2011. 奈曼油田奈1区块烃类气体地球化学特征及成因分析[J]. 天然气地球科学, 22(4): 715~722.
- 赵兴齐, 陈践发, 张 晨, 等. 2012. 开鲁盆地奈曼凹陷奈1区块原油地球化学特征及油源分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 36(3): 44~53.
- 周洪瑞, 王自强, 崔新省, 等. 1999. 华北地台南部中新元古界层系地层研究[M]. 北京: 地质出版社, 1~90.