https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.447



内蒙古巴音戈壁盆地塔木素碱矿Na一碳酸盐成因模式

戴朝成^{1,2},钟炽涛¹,刘晓东^{1,2},向 龙¹,许亚鑫¹

1. 东华理工大学地球科学学院,江西南昌 330013

2. 东华理工大学核资源与环境重点实验室,江西南昌 330013

摘 要:内蒙古巴音戈壁盆地哈日凹陷下白垩统巴音戈壁组沉积时期为典型的碳酸盐型碱湖,盆地咸化过程中发育大量的Na-碳酸盐类矿物.通过对巴音戈壁组碱矿层中似层状、斑点状和脉状Na-碳酸盐矿物开展了电子探针、X衍射、碳氧同位素和激光拉曼光谱等分析,结果表明碱矿层中Na-碳酸盐矿物主要为天然碱、苏打石、碳钠钙石、碳钠镁石和磷碳镁钠石.除Na-碳酸盐外,岩石中含少量黄铁矿、钠型菱沸石、硅硼钠石和钠长石等热液矿物.碳、氧同位素研究结果表明巴音戈壁盆地下白垩统碱矿层形成于封闭的碱湖环境,碳酸盐矿物形成温度为34~80℃(平均值57℃),受热水喷流沉积作用和蒸发作用双重控制,碱矿层中硅酸盐矿物首先形成,然后形成白云石和方解石,在Ca²⁺、Mg²⁺消耗殆尽后,天然碱和苏打石发生沉淀,由于热水带来充足的Na⁺,前期形成白云石和方解石发生交代作用形成碳钠钙石和碳钠镁石.在矿物学和地球化学综合分析基础上,建立了热水喷流和蒸发沉积双重控制下的碱湖Na-碳酸盐岩沉积模式,以期为碱矿勘查提供新的思路.
关键词:巴音戈壁盆地;巴音戈壁组;碱矿;Na-碳酸盐;成因模式;矿床学.
中图分类号: P611

Genetic Model of Na-Cabonate in Tamusu Trona Deposit, Bayingobi Basin, Inner Mongolia

Dai Chaocheng^{1,2}, Zhong Chitao¹, Liu Xiaodong^{1,2}, Xiang Long¹, Xu Yaxin¹

1. College of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

2. State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

Abstract: The Lower Cretaceous Bayingobi Formation in the Hari sag, Bayingobi basin, Inner Mongolia, is a typical carbonatetype alkaline lake during the depositional period, and a large amount of Na-carbonate minerals developed during the salinization of the basin. In this paper, electron probe, X-diffraction, carbon and oxygen isotope and laser Raman spectroscopy were carried out to analyze the layered, speckled and vein-like Na-carbonate minerals in the trona layers of the Bayingobi Formation. The Nacarbonate minerals in the trona layer are mainly composed of trona, nahcolite, shortite, eitelite and bradleyite, with a small amount of hydrothermal minerals such as pyrite, chabazite-Na, searlesite and albite. The results of carbon and oxygen isotope testings show that the Lower Cretaceous trona layers in the Bayingobi basin were formed in a closed alkaline lake environment, the Na-carbonate minerals were formed at a temperature range of 34-80 °C (average 57 °C). Under control of exhalative deposition and evaporation, silicate minerals were first formed in the trona layers, and then dolomite and calcite were formed, after Ca²⁺ and

基金项目:国家自然科学基金(No. 42302044);国防科技工业局项目(No.科工二司[2014]1587号);中国铀业有限公司一东华理工大学核资源与 环境国家重点实验室联合创新基金(No. 2022NRE-LH-01).

作者简介:戴朝成(1980-),男,副教授,博士,从事地层学研究.ORCID:0000-0003-2139-9914. E-mail:daichaocheng@qq.com

引用格式:戴朝成,钟炽涛,刘晓东,向龙,许亚鑫,2024.内蒙古巴音戈壁盆地塔木素碱矿 Na-碳酸盐成因模式.地球科学,49(4):1207-1223.

Citation: Dai Chaocheng, Zhong Chitao, Liu Xiaodong, Xiang Long, Xu Yaxin, 2024. Genetic Model of Na-Cabonate in Tamusu Trona Deposit, Bayingobi Basin, Inner Mongolia. *Earth Science*, 49(4):1207-1223.

 Mg^{2+} were almost consumed, trona and nacholite were precipitated. With sufficient Na^+ brought by the hydrotherm, the early formed dolomite and calcite underwent metasomatism to form dawsonite and dawsonite. Based on the comprehensive analysis of mineralogy and geochemistry, the Na-carbonate sedimentary model of alkaline lake is established, which is controlled by hydrothermal exhalation and evaporative deposition, it can provide a new idea for the exploration of trona deposit.

Key words: Bayingobi basin; Bayingobi Formation; trona deposit; Na-carbonate; genetic model; ore deposit geology.

0 引言

Na-碳酸盐包括天然碱(Na₃(HCO₃)(CO₃)· 2H₂O)、苏打石(Na(HCO₃))、碳钠钙石(Na₂Ca₂(CO₃)₃)、 钙水碱(Na₂Ca(CO₃)₂·2H₂O)、单斜钠钙石(Na₂Ca (CO₃)₂•5H₂O)、磷碳镁钠石(Na₃Mg(PO₄)(CO₃))、 氯碳钠镁石($Na_3Mg(CO_3)_2Cl$)、碳钠镁石(Na_2Mg (CO₃)₂)和碳钠铝石(NaAl(OH)₂CO₃),它们被认为 是一种形成于碱性湖泊中,pH值为9~12之间的蒸 发矿物,与火山碎屑沉积、热液活动和高浓度极端 环境生物关系密切.现代碱性湖泊存在于世界各地 的干旱地区,但Na-碳酸盐湖泊分布主要在东非裂 谷地区,由火山活动提供的富钠粗面熔岩主导,导 致大量盐度、深度和化学成分不同的高碱性湖泊的 形成 (Renaut et al., 1994; García-Veigas et al., 2013;王力宝等, 2020),这些碱性湖泊水源可能来 自深层热液系统(Renaut et al., 2013),现代碱湖中 Na-碳酸盐矿物为间歇性沉积物,大多未被保留 下来.

第四纪以前地层中Na-碳酸盐较为罕见,国外 仅有少数碱矿床中有此类矿物分布,如美国怀俄明 州 Bridger 盆地始新统绿河组 WilkinsPeak 段(Jagniecki et al., 2013)、科罗拉多高原 PiceanceGreek 盆 地始新统绿河组 PiceanceGreek 段 (Smith et al., 2008)、土耳其安卡拉省 Beypazari 盆地中新统 Hirka 组 (İnci et al., 1988; García-Veigas et al., 2013). 我国也仅发现3个盆地中发育此类矿物:新疆准噶 尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组(曹剑等, 2015)、河 南南襄盆地泌阳凹陷始新统桃园组和内蒙古巴音 戈壁盆地白垩系巴音戈壁组(王吉平等, 1991),作 为中国地质学会2020年度"十大地质找矿成果"之 一"内蒙古阿拉善右旗塔木素矿区发现超大型天然 碱矿",获得固体天然碱矿石资源量1.078 Gt,矿物 资源量(Na₂CO₃+NaHCO₃) 709.09 Mt,其中控制的 天然碱矿石资源量 608.84 Mt,矿物资源量 406.33 Mt,是我国乃至亚洲目前已查明天然碱储量 最大的碱矿.

前人普遍认为Na-碳酸盐矿物为蒸发成因,纵 观世界上Na一碳酸盐沉积,不管是现代碱湖还是富 Na-碳酸盐地层大多处于深大断裂盆地中,受深层 热水影响(Helvaci, 2019; 李玉龙等, 2021). 大多数 现代碱湖中没有 Na-碳酸盐矿物沉积或者只是短 暂沉积.我国学者文冬光和曾建华(1997)在泌阳碱 矿研究中发现天然碱和苏打石常呈似层状和团块 状,Na-碳酸盐矿物之间交代现象常见,用蒸发沉 积模式难以解释,认为可能是特定水一岩反应后生 矿床.准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组和巴音戈 壁盆地白垩系巴音戈壁组下伏多为火山岩,更为特 别的是塔木素碱矿在盆地中仅分布在底部为火山 岩区域.国内外碱矿多是石油勘探过程中偶然发 现,按照传统蒸发模式到碱湖中心寻找碱矿难以成 功,目前的Na-碳酸盐蒸发成因机制还存在诸多疑 问.因此,本文以巴音戈壁组Na-碳酸盐矿物为研 究对象,通过显微镜下观察、X衍射、电子探针、激光 拉曼和同位素地球化学等分析,探讨Na-碳酸盐矿 物成因模式,以期为碱矿勘查提供新的思路.

1 地质背景

巴音戈壁盆地位于中蒙两国的边境处,内蒙古 高原巴丹吉林沙漠的东北部.属于塔里木板块、哈 萨克斯坦板块、西伯利亚板块和华北四大板块构造 陆一陆碰撞的结合部位,横跨4个性质不同的大地 构造单元,盆地整体近东西向(童勤龙等,2023).哈 日凹陷位于盆地中北部(图1),东部与巴布拉海凸 起相接,南部与宗乃山隆起相邻,西部与洪吉尔凸 起相邻,北部为中蒙边界.在平面上,哈日凹陷呈北 东向的近"S"形,具有东断西超的结构特征,次级构 造单元可分为东部陡坡带、中央深凹带和西部斜坡 带.哈日凹陷中生代在盆地整体构造演化的基础 上,经历了4期重要的构造运动,包括三叠纪一侏罗 纪的热拱隆升、早白垩世早期的断陷、早白垩世晚 期的断坳和晚白垩世坳陷.这些构造运动导致凹陷 内张性断裂发育,其中以凹陷边界的基底断裂和控 制凹陷发展的同沉积断裂规模最大,同时伴随着多



图 1 哈日凹陷区位及构造单元划分(a)、构造剖面(b)及地层柱状图(据陈志鹏和任战利, 2018)(c) Fig.1 Location and structural unit division of Hari sag (a), structural section (b) and stratigraphic histogram(after Chen and Ren, 2018)(c)

期岩浆活动和火山喷发.

盆地基底在太古界、元古界时期形成,主要为 变质岩.盖层由中生代沉积所形成,发育有侏罗 系、白垩系和第四系地层,其中侏罗系沉积地层主 要为含煤粗碎屑岩,岩性以杂色砾岩、砂岩为主,底 部发育有细砂岩,偶夹砾岩及泥页岩;顶部为深灰 色及黑色凝灰岩夹火山角砾岩.白垩系地层是盖 层的沉积主体.下白垩统发育巴音戈壁组和苏红 图组,上白垩统发育乌兰苏海组.巴音戈壁组底部 为一套厚层火山岩,其上覆为滨浅湖和半深湖灰 色一暗灰色白云质泥岩沉积,苏红图组为深灰色、 灰色、褐色含灰质或含白云质泥岩不等厚互层,夹 薄层粉砂岩.碱矿赋存于下白垩统巴音戈壁组,岩 性为白云质泥岩夹碱矿层.

2 样品采集及研究方法

本次研究的样品取自塔木素碱矿 zky001、 zky203、zk40和zky03等钻井岩心,岩心进行观察描述后制作岩石薄片,通过牙钻将样品中浅色和深色 矿物进行粉碎,薄片采用偏光显微镜鉴定、激光拉 曼光谱分析和电子探针分析,粉末样进行全岩X衍 射分析和碳、氧同位素分析,所有测试均在东华理 工大学核资源与环境国家重点实验室完成.激光拉 曼光谱采用英国 RENISHAW-RM2000型激光拉 曼光谱仪,测试温度 20℃,Si标准样品拉曼位移值

为 520 cm⁻¹, 选用的激光波长为 532 nm, 激光器为 风冷式Ar离子激光器,扫描时间30s,扫描次数1~ 2次,扫描范围100~5000 cm⁻¹,精度1 cm⁻¹.电子探 针仪器型号为JEOLJXA-8800M,测试工作条件 为:加速电压15 kV,加速电流20 nA,束斑直径 1 µm.所有测试数据均进行了 ZAF 校正处理 .Na、 Mg、Al、Si、K、Ca、Fe元素特征峰的测量时间为 10 s, Ti和Mn元素特征峰的测量时间为20 s,上下 背景的测量时间分别是峰测量时间的一半.所使用 的标样如下:透长石(K),镁铝榴石(Fe,Al),方解石 (Ca)、白云石(Mg),硬玉(Na),蔷薇辉石(Mn), 橄 榄石(Si),金红石(Ti),石盐(Cl).碳氧同位素的实 验仪器为MAT-253气体同位素比值质谱仪,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,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.分析过程中采用标 样 GBW04417 (δ^{13} C=1.61‰; δ^{18} O=-11.59‰, PDB 标准)和 NBS-19 (δ¹³C=1.92‰; δ¹⁸O= 2.19‰, PDB标准)进行质量监控,分析误差 $\pm 0.2\%$.

3 分析结果

3.1 碱矿层岩石学特征

塔木素碱矿区位于巴音戈壁盆地哈日凹陷内, 天然碱矿层赋存于下白垩统巴音戈壁组二段,岩性 为白云质泥岩夹碱矿层,碱矿可分为7个矿组和19 个矿层;矿层总体呈北东向,埋深沿走向在盆地中 心变化不大,向盆地边缘埋深逐渐变浅.矿层厚度 总体表现出湖盆中心厚度大,向湖盆边缘逐渐变薄. 各矿组之间层位相对稳定,特别是Ⅱ、Ⅲ矿组,层间 距大且稳定,层间距约20m;天然碱矿在垂向上,沉 积韵律较为明显,其中Ⅰ、Ⅲ、V、Ⅲ矿组矿石类型 以苏打石为主,Ⅱ、Ⅳ、Ⅵ矿组以天然碱为主;成碱 周期表现为下部苏打石,上部天然碱,周而复始,从 而形成Ⅰ和Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ、Ⅴ和Ⅱ、Ⅲ共计4个大的成 碱周期(图 2a). 矿组内部结构复杂, 部分矿体呈脉 状和透镜状,白云质泥岩夹层厚度大于单层矿体的 厚度,单个矿层内岩性韵律分布,底部为暗色纹层 状白云质泥岩,中部为斑点状白云质泥岩,上部为 苏打石或天然碱矿层(图 2b, 2c).

3.2 矿物镜下特征和 X 衍射分析

塔木素碱矿床中矿物主要由Na一碳酸盐、方解 石、白云石和长石组成,Na一碳酸盐主要为天然碱、 苏打石、碳钠钙石、碳钠镁石、氯碳钠镁石和碳钠铝 石等(图3),除Na-碳酸盐外还发育有硅硼钠石、 硼砂和针状黄铁矿等矿物(图4a~4c),矿物成因较 为复杂,如苏打石和天然碱既有似层状,又有团块 状分布(图4d),苏打石在岩心中呈棱柱状集合体, 晶体无色透明,呈簇状集合体的形式生长.天然碱 在岩心中多呈无色一白色的板柱状集合体,硬度较 小,板状晶体之间常有硬石膏分布,镜下多呈板状 巨形晶(图3),与天然碱伴生的矿物有代表热液成 因的硅硼钠石,天然碱边缘明显被溶蚀,晶间生长 有硅硼钠石,硅硼钠石的晶型受天然碱所控制,其 形成晚于天然碱.碳钠钙石在岩心中大多以蠕虫状 或斑状出现在细纹层中或均匀分布于白云质泥岩 中(图3),矿物晶体具粗一巨晶结构,多呈板条状, 具定向性,局部为集合体产出,常与氯碳钠镁石伴 生,碳钠钙石在矿物生长过程中造成纹层软沉积变 形,为准同生作用的产物(图4e).碳钠镁石在岩心 中多呈粗斑状,晶体无色较粗大,晶体长度约在 30~50 µm, 宽度约在 20~30 µm(图 3).Na-碳酸盐 矿物之间交代现象常见,如碳钠钙石交代天然碱、 碳钠镁石交代碳钠钙石等(图4f).暗色纹层状泥岩 X射线粉晶衍射分析结果如图5所示,矿物以白云 石和钠长石为主.

3.3 激光拉曼光谱分析

针对不同的Na-碳酸盐矿物采用激光拉曼分 析进行进一步的精确识别,分析位置如图3中红点 所示,点位干净且无明显裂隙和包体.激光拉曼光 谱谱图(图3)显示塔木素巴音戈壁组天然碱具有 188 cm⁻¹ 与 1 062 cm⁻¹ 两个特征峰, 与美国 Wyoming州绿河组产出天然碱激光拉曼光谱谱图中的 特征峰基本一致(https://rruff.info/trona/display= default/R050228);苏打石具有 685 cm⁻¹、1 045 cm⁻¹ 和1268 cm⁻¹等多个特征峰,与美国 Colorado 州产 出苏打石激光拉曼光谱谱图中的特征峰基本一致 (http://rruff.info/euclase/display=default/R070237); 碳钠钙石具有265 cm⁻¹、1069 cm⁻¹和1089 cm⁻¹等多 个特征峰,与美国Wyoming州产出碳钠钙石激光拉 曼光谱谱图中的特征峰基本一致(https://rruff.info/shortite/display=default/R040184);碳钠镁石仅 具有1089 cm⁻¹这个特征峰,与美国 Wyoming 州



Fig.2 Histogram of alkali ore bed in Bayingobi Formation a. zky001 井巴音戈壁组二段柱状图;b. 图 a 局部放大岩性柱;c. 图 b 钻井岩心照片

Greenriver产出碳钠钙石激光拉曼光谱谱图中的特征峰基本一致(http://rruff.info/euclase/display= default/R110214).碳钠铝石具有260 cm⁻¹、 588 cm⁻¹和1090 cm⁻¹等多个特征峰,与加拿大 Québec省产出的碳钠铝石激光拉曼光谱谱图中的 特征峰基本一致(https://rruff.info/dawsonite/display=default/R050641).

3.4 电子探针特征

本次探针分析选取了10种测试元素或化合物 (Cl、CaO、FeO、F、SiO₂、MgO、SO₃、P₂O₅、Na₂O、 B₂O₃).样品中的CaO含量范围为30%~60%,Na₂O 含量范围为3%~29%,平均为11.6%;部分测点含 SiO₂,含量范围为38%~60%;部分测点含少量 B₂O₃,含量范围为1%~5%;MgO、P₂O₅、SO₃与F含 量总体较低(表1).表明样品中含Na-Ca-型碳酸盐 矿物,少数样品含硅酸盐矿物,无硫酸盐矿物.

3.5 碳氧同位素分析

研究区样品碳、氧同位素结果如下表2所示.巴 音戈壁组 δ^{13} C 值介于 -2.63% ~8.88%,平均值为 $3.17\%, \delta^{18}$ O 值介于 -10.25% ~ -0.78%,平均值为 -5.72%;天然碱和苏打石 δ^{13} C 值介于 1.20% ~ 8.88%,均值为 $3.65\%, \delta^{18}$ O 值介于 -10.25% ~ -0.78%,平均值为 -4.83%;碳钠钙石 δ^{13} C 值介于 -2.63% ~8.88%,均值为 $3.17\%, \delta^{18}$ O 值介于

表1 巴音戈壁盆地碱矿层矿物电子探针定量分析数据(%)

Table 1 EPMA quantitative analysis data of trona deposit minerals in Bayingobi basin

				1	•	, ,		1		5 0			
序号	样品 编号	Cl	CaO	FeO	F	SiO_2	MgO	SO_3	P_2O_5	Na ₂ O	B_2O_3	合计 (%)	矿物 名称
1	zk40-1-1	0.499	3.799	0.185	/	0.147	0.006	0.067	1.074	1.362	/	7.026	碳钠 钙石
3	zk40-2-1	0.018	/	/	0.004	0.006	0.008	0.013	/	21.517	2.341	23.901	苏打石
4	zk40-2-2	0.016	/	0.005	0.042	0.007	0.014	0.010	0.012	14.637	/	14.721	苏打石
6	zk40-3-2	0.015	0.015	0.027	0.029	0.014	0.011	0.025	0.002	9.576	/	9.699	苏打石
7	zk40-4-1	0.002	0.065	0.083	0.022	0.101	0.025	0.020	0.020	29.750	2.948	33.027	苏打石
8	zk40-4-2	0.007	0.036	0.022	0.097	0.025	/	0.021	/	7.791	2.839	10.795	苏打石
9	zk40-5-1	/	/	0.039	0.013	0.012	0.017	/	/	10.249	/	10.325	苏打石
10	zk 40 - 5 - 2	0.008	0.015	/	0.064	0.008	0.011	0.020	0.010	15.387	2.965	18.459	苏打石
11	zk40-6-1	0.040	0.053	0.011	0.028	0.012	/	0.033	0.034	8.919	2.761	11.870	苏打石
12	zk40-6-2	0.005	/	0.028	0.049	0.002	/	0.015	/	29.754	1.433	31.264	苏打石
13	zk40-7-1	0.006	0.021	0.044	0.017	0.009	/	0.015	0.005	27.257	/	27.366	苏打石
14	zk40-7-2	0.008	/	/	0.096	0.014	0.002	0.004	0.021	16.968	8.735	25.806	苏打石
15	zky001-1-1	0.002	42.108	0.028	/	/	/	/	0.035	21.228	/	63.401	碳钠 钙石
16	zky001-1-2	0.016	49.370	/	/	/	/	/	0.019	10.847	4.186	64.434	碳钠 钙石
18	zky001-1-4	0.009	45.686	0.017	/	/	/	/	0.054	10.738	/	56.502	碳钠 钙石
19	zky001-2-1	0.014	49.429	/	/	/	/	/	0.004	8.203	1.150	58.797	碳钠 钙石
20	zky001-2-2	0.083	30.861	0.686	/	5.510	0.006	0.040	0.021	14.797	/	51.985	碳钠 钙石
21	zky001-2-3	/	49.723	0.034	/	/	0.010	0.004	/	9.137	/	58.908	碳钠 钙石
22	zky001-2-4	0.008	49.086	/	/	/	/	0.009	0.007	10.734	/	59.842	碳钠 钙石
23	zky001-3-1	/	38.699	/	/	/	/	0.013	/	14.226	/	52.938	碳钠 钙石
24	zky001-3-2	/	43.068	/	/	/	/	0.014	0.002	12.825	/	55.909	碳钠 钙石
25	zky001-4-1	/	48.122	/	/	/	0.010	0.018	0.054	9.015	/	57.219	碳钠 钙石
26	zky001-4-2	0.004	44.877	0.017	/	/	/	/	0.013	12.111	/	57.021	碳钠 钙石

续表1													
序号	样品 编号	Cl	CaO	FeO	F	SiO_2	MgO	SO_3	P_2O_5	Na ₂ O	B_2O_3	合计 (%)	矿物 名称
27	zky001-5-1	0.004	40.985	0.011	/	/	/	/	0.298	11.504	1.939	54.740	碳钠 钙石
28	zky001-5-2	/	45.006	0.028	/	/	/	/	0.028	11.895	1.289	58.246	碳钠 钙石
29	zky001-5-3	0.017	46.880	0.045	/	/	/	/	0.024	11.445	2.374	60.781	碳钠 钙石
30	zky001-5-4	0.010	45.249	0.051	/	/	0.028	/	0.013	11.414	/	56.763	碳钠 钙石
31	zky001-6-1	0.128	33.311	0.119	/	0.141	0.024	0.063	0.046	9.207	/	43.010	碳钠 钙石
32	zky001-6-2	0.021	43.974	0.011	/	/	/	/	0.042	14.206	0.642	58.891	碳钠 钙石
33	zky001-6-3	0.008	46.507	/	/	/	/	0.002	0.002	13.688	3.495	63.700	碳钠 钙石
34	zky001-6-4	0.026	47.114	0.080	/	/	0.012	0.009	0.009	13.368	3.233	63.845	碳钠 钙石
35	zky 001-6-5	/	46.193	0.131	/	/	/	0.002	/	13.667	0.313	60.306	碳钠 钙石
36	zky001-7-1	0.010	0.045	/	/	59.460	/	0.034	0.017	1.239	/	60.803	钠长石
37	zky001-7-2	0.110	0.026	/	/	58.950	0.022	0.019	0.037	1.098	/	60.237	钠长石
38	zky001-7-3	0.033	0.083	0.057	/	55.161	/	0.003	0.085	1.178	/	56.593	钠长石
39	zky001-8-1	0.022	46.325	/	/	/	0.002	/	0.044	12.040	1.208	59.636	碳钠 钙石
40	zky001-8-2	/	45.292	0.057	/	/	0.018	0.002	/	12.062	/	57.431	碳钠 钙石
41	zky001-9-1	0.036	45.919	0.011	/	/	/	0.011	0.022	10.690	1.835	58.516	碳钠 钙石
42	zky001-9-2	0.003	39.520	/	/	/	0.036	/	/	12.449	/	52.007	碳钠 钙石
43	zky001-9-3	/	40.567	/	/	/	0.002	0.006	0.031	11.306	/	51.912	碳钠 钙石
44	zky001-9-4	/	45.076	/	/	/	/	/	0.035	10.249	1.607	56.967	碳钠 钙石
45	zky03(574)-1	0.002	3.718	0.091	/	58.814	0.010	0.011	0.030	10.414	/	73.090	钠菱 沸石
46	zky03(574)-2	/	0.070	0.119	/	64.745	0.010	0.014	/	12.729	/	77.687	钠菱 沸石
47	zky03(574)-3	0.006	2.888	0.102	/	60.940	0.020	0.004	/	10.875	/	74.834	钠菱 沸石
48	zky03(574)-4	/	11.115	20.778	/	38.533	6.959	0.036	/	1.553	4.874	83.848	黄铁矿
49	zky03(574)-5	0.010	0.064	0.193	/	60.852	/	/	/	1.322	/	62.439	钠长石
50	zky03(572)-1-1	0.081	36.923	0.161	/	0.567	0.036	/	0.011	12.647	/	50.408	碳钠 钙石

续表1													
序号	样品 编号	Cl	CaO	FeO	F	SiO_2	MgO	SO_3	P_2O_5	Na ₂ O	B_2O_3	合计 (%)	矿物 名称
51	zky03(572)-2-1	0.010	38.526	0.028	0.276	/	/	0.028	/	16.523	3.226	58.499	碳钠 钙石
52	zky03(572)-2-2	0.011	49.438	0.006	/	/	/	/	/	5.836	/	55.289	方解石
53	zky03(572)-3-1	0.022	0.918	0.067	/	62.659	0.005	0.096	0.014	11.937	5.495	81.208	硅硼 钠石
54	zky03(572)-4-1	0.001	37.614	0.011	0.107	/	0.014	0.010	/	17.933	/	55.645	碳钠 钙石
55	zky03(572)-4-2	0.028	49.992	0.084	/	/	0.015	/	0.042	6.728	/	56.883	碳钠 钙石
56	zky03(572)-5-1	0.013	61.140	0.237	0.001	/	0.141	0.023	0.048	0.082	3.267	64.949	方解石
57	zky03(572)-5-2	0.001	46.290	0.022	0.238	/	0.004	0.014	0.019	11.566	/	58.054	碳钠 钙石
58	zky03(572)-5-3	0.005	44.361	0.028	0.137	/	/	/	/	18.290	/	62.762	碳钠 钙石
59	zky03(572)-6-1	/	46.007	0.039	0.045	/	8.728	/	7.521	15.235	/	77.556	磷碳镁 钠石
60	zky03(572)-6-2	0.015	49.681	/	/	0.013	/	/	0.026	7.971	/	57.703	碳钠 钙石
61	zky03(572)-7-1	0.012	50.520	/	0.286	/	/	/	0.332	9.973	/	61.000	碳钠 钙石
62	zky03(572)-7-2	0.001	51.302	/	0.175	/	/	0.016	/	17.74	4.512	73.672	碳钠 钙石
63	zky03(572)-7-3	0.007	46.875	/	0.113	/	0.011		/	8.156	2.527	57.639	碳钠 钙石
64	zky03(572)-8-1	/	49.038	0.113	/	0.093	0.184	0.010	/	7.834	/	57.272	碳钠 钙石
65	zky03(572)-8-2	0.001	50.770	0.124	/	/	0.021	0.070	0.006	6.360	/	57.352	碳钠 钙石
66	zky03(572)-8-3	/	49.560	0.084	0.182	/	/	/	/	17.029	/	66.778	碳钠钙石

-10.25‰~-0.78‰,平均值为-5.72‰;白云质泥 岩δ¹³C值介于-2.63‰~7.22‰,均值为2.74‰, δ¹⁸O值介于-9.68‰~-2.47‰,平均值为 -7.28‰.17个样品中δ¹⁸O值均大于-12‰,表明测 试结果受成岩作用的影响较小,其碳、氧同位素组 成代表了沉积时期原始湖水的碳氧同位素组成特 征,能够用来反映原始的沉积环境信息,三者碳、氧 同位素值十分相近,代表具有相同的沉积和成岩 环境.

4 讨论

4.1 沉积环境

元素地球化学目前已被广泛应用于研究沉积 岩的古环境特征(Keith *et al.*, 1964; Zuo *et al.*, 2023).本文将利用碳氧同位素的特征来研究分析巴 音戈壁盆地下白垩统碳酸钠盐岩的沉积环境.湖泊 沉积的碳酸盐矿物中δ¹³C和δ¹⁸O受气候因素和外来 水体的影响(刘安等,2021).①气温升高促进水体蒸 发,富含δ¹²C的CO₂易从湖水中散失,造成湖水δ¹³C 含量增加,封闭型湖盆中δ¹³C含量易受此因素影响 (刘庆,2017);同时湖水每降低温度1℃,碳酸盐矿

样品编号	岩心照片	镜下照片	拉曼光谱图	矿物名称
zk40-1		2 01 0.5 mm	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	天然碱
zk40-2		L Contraction of the second seco	$\begin{array}{c} 5 0000\\ 4 0000\\ 2 0000\\ 2 0000\\ 2 0000\\ 2 0000\\ 2 0000\\ 2 0000\\ 2 0000\\ 2 0000\\ 2 0000\\ 2 00\\ 2 0\\ 2 0$	苏打石
zky001-2		2 1 0,5 mm	$\begin{array}{c} 8 000 \\ 6 000 \\ 4 000 \\ \hline \\ 2 000 \\ \hline \\ 2 000 \\ \hline \\ 2 000 \\ \hline \\ \\ 8 0 \\ \hline \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\$	碳钠钙石
zky03-5	2 cm		$\begin{smallmatrix} 6 & 000 \\ 5 & 000 \\ 1 & 000 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\$	碳钠镁石
zky03-2		0.5 mm	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	碳钠铝石

图 3 巴音戈壁盆地塔木素碱矿中Na-碳酸盐矿物特征 Fig.3 Characteristics of Na-carbonate minerals in the Tamusu Trona deposit in the Bayingobi basin

物中δ¹⁸O值降低 0.4‰(伊海生等, 2007).②当有大量外来水体注入时,湖泊的碳酸盐岩δ¹⁸O值变低; 水生生物在进行光合作用时,优先与较轻的δ¹²C反应,δ¹³C就会在水体中富集,造成了同位素之间的 分馏.

4.1.1 湖泊的封闭与开放性处于强蒸发的沉积环境湖相原生碳酸盐矿物中碳、氧同位素的变化规律受到水体开放程度的影响(曲长胜等,2017).碳氧同位素投点常用来鉴别湖泊的开放性或者封闭

性,国内外典型的封闭型咸水、半咸水湖泊中,δ¹⁸O 值和δ¹³C值的投点大多落在第1、第2象限(Talbot, 1990; 王春连等,2013),在δ¹³C和δ¹⁸O坐标系中(图 6),研究区碱矿层样品碳氧同位素绝大多数位于第 2象限内的大盐湖周边,表明早白垩世哈日凹陷为 一个封闭性较强的陆内断陷湖盆,沉积期湖盆面积 较小,约2400km².与大盐湖相比,碳同位素基本相 近,但氧同位素存在一定差别,白云质泥岩氧同位 素偏负,Na-碳酸盐氧同位素偏正,显示白云质泥



图4 巴音戈壁盆地塔木素碱矿中常见矿物

Fig.4 Common minerals in the Tamusu Trona deposit in the Bayingobi Basin

a. 硅硼钠石,zky03井,572m,正交偏光;b. 硼砂,zky203井,433.71m,单偏光;c. 针状黄铁矿,zky03井,574m,BSE图像;d. 碳钠钙石和 天然碱,zk203井,447m,岩心照片;e. 碳钠钙石生长过程中造成纹层软沉积变形,碳钠镁石交代碳钠钙石,zky001井,433m,正交偏光; f. 碳钠镁石沿矿物边部和解理交代碳钠钙石,zky001井,433m,正交偏光

岩和Na-碳酸盐形成不同阶段.个别样品投点落在 第3象限内,可能是在沉积过程中,岩石中的矿物会 发生一系列譬如生烃、生物降解的化学反应,造成 同位素的变化(Hendy, 1971).

4.1.2 古盐度 古湖泊的盐度指数可以通过湖相 碳酸盐的碳氧同位素反映,Keith *et al.* (1964)提出 利用碳酸盐岩的δ¹⁸O和δ¹³C区分侏罗世及时代更新 的咸水碳酸盐岩和淡水碳酸盐岩的公式(1):

Z=2.048(δ¹³C+50)+0.498(δ¹⁸O+50), (1) 式中:δ¹⁸O和δ¹³C的单位为‰;Z值小于120时,为淡 水沉积环境;Z值大于120时,为海相沉积环境或陆 相咸化湖泊(刘志波等,2021;许亚鑫等,2022).通过 对研究区碱矿层碳酸盐矿物碳氧同位素计算Z值 (表2),巴音戈壁组碱矿层样品Z值范围在120.7~ 142.8之间,平均值为130.95,为咸水环境.Sr/Ba和 Rb/K比值也是介质盐度良好的标志之一,可作为 判定环境古盐度的重要指标,陈志鹏(2018)通过哈 日凹陷巴音戈壁组元素分析,Sr/Ba和Rb/K比值分 别为0.39~1.45和0.0021~0.0063,平均分别为 0.7400和0.0046,表明早白垩世哈日凹陷湖盆为咸 水的沉积环境.

4.1.3 古温度 δ¹⁸O 与水体温度关系最为密切,在 盐度较为稳定的条件下,δ¹⁸O 随温度升高而降低.本 文采用 O'Neil(1969)提出的适用于 0~500 ℃无机 成因碳酸盐-水之间的氧同位素温度分馏方程 公式(2):

$$t = 16.9 - 4.38(\delta^{18}O_{V-PDB,C} - \delta^{18}O_{V-PDB,p}) + 0.10(\delta^{18}O_{V-PDB,C} + \delta^{18}O_{V-PDB,p})^2, \qquad (2)$$

式中:t表示温度,单位为℃;δ¹⁸O_{V-PDB,C}为样品的δ¹⁸O 值,单位为‰;δ¹⁸O_{V-PDB,P}为古水体的δ¹⁸O值,单位 为‰.由于直接获取沉积期同时期湖水的δ¹⁸O值的 难度较大,常采用借鉴或类比的方法.前人在计算 青藏高原及邻近盆地白垩纪水体温度时,常借鉴青 海湖实测的δ¹⁸O值(3.078‰)作为同期湖水氧同位 素值,因为青海湖是我国内陆最大的封闭湖泊,湖 水的pH值为9.2,盐度为16‰,为碱性咸水,青海湖 地区在早白垩世与研究区具有类似的湖盆环境(卢 凤艳和安芷生,2010;文华国等,2014;陈志鹏和任 战利,2018;许亚鑫等,2022),因此,本次计算公式 中沉积同期湖水的氧同位素含量也采用青海湖实 测δ¹⁸O_{V-PDB}为3.078‰(卢凤艳和安芷生,2010).计算 结果表明,巴音戈壁盆地早白垩世碳酸盐矿物形成 温度为34~80℃(平均值57℃).酒泉盆地青西凹陷 下白垩统下沟组热水沉积形成温度为57~105℃, 平均为79℃(文华国等,2014);哈日凹陷下白垩统 热水沉积岩温度为44~86℃,平均为62℃(陈志鹏 和任战利等, 2018).经对比,研究区温度明显低于 酒泉盆地,与陈志鹏(2018)计算温度相近.





4.2 Na-碳酸盐与热水沉积关系

热水沉积岩研究近年来取得极大进展(侯增谦 等,1996;郑荣才等,2018;钟大康等,2018).准噶 尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组大部分学者认同热 水沉积岩观点(蒋宜勤等,2012;赵研等,2020; Guo et al.,2021),巴音戈壁盆地白垩系巴音戈壁组 也有学者提出热水沉积观点(陈志鹏等,2018;向 龙等,2019;许亚鑫等,2022),风城组与巴音戈壁 组在岩石学和矿物学上具有非常相似的特征:白云 石+斜长石+碳钠钙石+碳钠镁石+硅硼钠石,同 时风城组和巴音戈壁组多存在碱矿层,多种证据表 明 Na-碳酸盐的成因与热水喷流沉积存在着密切 关系.风城组硅硼钠石硼同位素分析结果显示,硅 硼钠石样品的δ¹¹B 值介于 0.33%~2.13%,平均值 为 1.08%(赵研等,2020),其δ¹¹B 特征明显不同于 海相蒸发岩及碳酸盐岩的特征,反而与陆相沉积物、滇藏地热带热水体系以及国内外较多的热水沉积矿床的δ¹¹B特征相一致.更为特别的是,塔木素碱矿在盆地中仅分布于底部火山岩区域,含矿层岩性较单一,除Na-碳酸盐矿物外,暗色部分纹层发育,主要成分为白云石(69%)和钠长石(31%),另外发育少量热液矿物,如针状黄铁矿和硅硼钠石,基本未见黏土矿物,与正常湖相沉积差异明显,巴音戈壁组暗色泥岩可定名为热水沉积白云质钠长石岩.

4.3 Na-碳酸盐成因模式

4.3.1 成矿物质来源 碱矿形成需要充足的 Na⁺和 CO₂, Eugster(1965)通过对肯尼亚 Magadi 湖和美国 加利福尼亚州 Searles 湖的研究发现, Na-碳酸盐的 物源来自岩浆和热液活动中富 Na⁺和富 CO₂的高碱 性水, 这两者对于能够形成沉淀出纯碱矿床的卤水

Table	Table 2 Carbon and oxygen isotope analysis and test results of trona deposit in Bayingobi basin									
样品号	层位	岩性/矿物	深度(m)	$\delta^{13}C_{\rm VPDB}(\%_0)$	$\delta^{18}O_{VPDB}(\%_0)$	Ζ				
Z-8		白云质泥岩	341.0	3.08	-9.56	128.84				
Z-2		白云质泥岩	387.0	7.22	-5.83	139.19				
Z-3		白云质泥岩	403.0	-2.63	-2.47	120.67				
Z-9		白云质泥岩	407.0	1.83	-9.68	126.22				
Z-4		白云质泥岩	433.0	0.28	-9.27	123.25				
Z-5		白云质泥岩	433.7	5.09	-4.62	135.42				
Z-6		白云质泥岩	471.8	3.72	-8.04	130.90				
Z-7		白云质泥岩	574.0	3.35	-8.75	129.79				
Z-11		苏打石	387.0	1.72	-10.25	125.72				
Z-18	田立上陸加	苏打石	407.0	2.78	-3.73	131.13				
Z-17	亡百人壁组	苏打石、天然碱	341.0	2.22	-2.86	130.43				
Z-1		天然碱	337.0	8.88	-5.38	142.80				
Z-12		天然碱	403.0	1.20	-9.93	124.81				
Z-13		天然碱	433.0	4.44	-0.91	135.94				
Z-14		天然碱	433.7	4.31	-0.78	135.73				
Z-15		碳钠钙石	471.8	3.77	-1.80	134.11				
Z-16		碳钠钙石	574.0	2.66	-3.34	131.08				
min				-2.63	-10.25	120.67				
max				8.88	-0.78	142.81				
average				3.17	-5.72	130.95				

表 2 巴音戈壁盆地碱矿层碳氧同位素分析测试结果

δ¹⁸O_{VPDB,P})²,其中,δ¹³C_{VPDB}为样品的δ¹³C值,单位为‰;δ¹⁸O_{VPDB,C}为样品的δ¹⁸O值,单位为‰;δ¹⁸O_{VPDB,P}为古水体的δ¹⁸O值,单位为‰,温度 t 的单位为℃.





非常重要.Smith(2008)认为岩浆热液在水一岩反应 过程中带来富CO₂热水对Na-碳酸盐形成起到决 定性作用,Hammond et al.(2019)通过对 Bridger 盆 地绿河组古地理分析,得出该盆地绿河组Na-碳酸 盐成矿物质来源于科罗拉多成矿带,火山活动对注 入湖泊水体的化学组成产生了重要影响.

巴音戈壁盆地发育多个次级凹陷,仅哈日凹陷 内发现有碱矿沉积,该凹陷在平面上可划分为西部 斜坡带、北部次凹和南部次凹三个构造单元,北部 次凹和南部次凹平面上沿着东部断裂带分布,火山 岩厚度受东部断裂带控制,碱矿层分布与火山岩分 布基本一致(图7),早白垩世火山活动应该能为碱 矿形成提供充足的Na⁺和CO₂,火山物质为塔木素 碱矿主要成矿物质来源.

4.3.2 矿物形成过程及 Na-碳酸盐成因模式 塔 木素碱矿共发育8个成碱周期(图2a),每一个周期 代表着一次喷流事件,单个矿层内岩性韵律分布, 具有由暗色纹层状白云质泥岩、斑点状白云质泥岩 和苏打石或天然碱矿层组成岩性组合特征(图2b), 主要矿物形成可划分为4个阶段:

第1阶段:湖盆在一个缺氧的弱碱性湖泊深部, 热液喷流与湖底沉积物接触,来自深部喷流的火山 物质以及外来黏土矿物与碱性湖水接触反应先形 成钠型菱沸石与钠长石等硅酸盐矿物(图8a)(Sur-



图 7 巴音戈壁组火山岩平面分布 Fig 7 Plane distribution of volcanic rocks of the Bayingobi Formation

dam et al., 1972),使得湖盆中心基本未见黏土矿

第2阶段:在湖盆蒸发过程中,随着水体盐度的 增加,形成化变层,盐湖半结晶分层,而此时陆源碎 屑物质又不能及时供应,底部卤水处于一个静止低 温的缺氧环境,此时 Mg²⁺和 Ca²⁺优先和水体中丰富 的 CO₃²⁻结合形成白云石和方解石(图 8b).

第3阶段:白云石和方解石的沉淀消耗了卤水 中的 Ca²⁺和 Mg²⁺,湖盆处于碱性环境,Na⁺浓度较 高.由于热液上涌,热液活动携带较高浓度的 CO₂进 入湖盆之中,为天然碱和苏打石的成盐提供碳源. 当湖底温度较高时,不利于天然碱的沉淀(Eugster *et al.*,1965),因此,苏打石率先沉淀出来,而随着热 液的停歇,湖底温度逐渐下降,天然碱沉淀发生沉 淀(图 8c),随着湖水和热液的进一步混合,其物质 浓度不再满足天然碱的沉淀,因此在单个成碱周期 内,苏打石位于下部而天然碱位于上部.

第4阶段:湖泊进一步蒸发干涸,在埋藏过程 中,沉积物尚未被压实,水体中剩余的Na⁺与方解石 物,与正常陆相盆地存在较大差别.

发生水-岩反应形成碳钠钙石,挤压原始纹层,造 成碳钠钙石生长过程中使得纹层发生软沉积变形 (图 4e).而后部分碳钠镁石交代碳钠钙石(图 4f,图 8d).Jagniecki *et al.*(2013)通过对美国怀俄明州绿河 盆地Wilkins Peak 段中碳钠钙石的实验研究,模拟 Na₂CO₃-CaCO₃-H₂O体系中碳钠钙石的形成得出: 在1个大气压下,Na₂Ca(CO₃)₂•2H₂O+CaCO₃= Na₂Ca₂(CO₃)₃+2H₂O反应形成温度约55±2℃.平 衡温度低于先前由Smith *et al.*(2008)确定的90± 25℃.这项研究也表明,由于地表温度过低,碳钠钙 石不会出现在地表的碱性环境中,是热液交代的 结果.

在巴音戈壁组矿物形成过程和地球化学分析 基础上,建立了Na-碳酸盐成因模式(图8),碱矿 形成与热水喷流沉积作用相关,成矿物质来源于地 球内部热水系统,热水喷流形成富Na⁺卤水池,矿床 形成由热水沉积和蒸发作用双重控制.碳酸盐矿物



Fig. 8 Schematic diagram of the genetic model of Na-carbonate

表现出白云石/方解石→天然碱→苏打石→碳钠钙石 →碳钠镁石的形成序列,碳钠钙石和碳钠镁石形成 于最后阶段,可作为找碱矿标志性矿物,在将来碱 矿勘查工作中,应重点关注陆相湖盆中热水沉积岩 发育区域.

5 结论

(1) 塔木素碱矿床中矿物主要由 Na-碳酸盐、 方解石、白云石、长石组成,除 Na-碳酸盐外还发育 有硅硼钠石、硼砂和针状黄铁矿等热液矿物,与正 常湖相沉积差异明显,巴音戈壁组暗色泥岩可定名 为热水沉积白云质钠长石岩.

(2)碳、氧同位素数据表明塔木素地区下白垩 统巴音戈壁组形成于封闭的咸湖环境,形成温度介 于 34~80℃,平均值 57℃.

(3)建立了热水喷流和蒸发沉积双重控制下的 碱湖 Na-碳酸盐岩沉积模式,碳酸盐矿物表现出白 云石/方解石-天然碱-苏打石-碳钠钙石-碳钠 镁石的形成序列.

(4) 塔木素碱矿 Na-碳酸盐矿物成因模式可以 指导碱矿勘查,碳钠钙石和碳钠镁石形成于最后阶 段,热水沉积地层中发育此类矿物代表成矿过程中 Na⁺充足,地层中可能存在碱矿层,因此,碳钠钙石 和碳钠镁石可以作为碱矿找矿标志性矿物.

References

Cao, J., Lei, D.W., Li, Y.W., et al., 2015. Ancient High-Quality Alkaline Lacustrine Source Rocks Discovered in the Lower Permian Fengcheng Formation, Junggar Basin. Acta Petrolei Sinica, 36(7): 781-790 (in Chinese with English abstract).

- Chen, Z.P., Ren, Z.L., Yu, C.Y., et al., 2018. Characteristics and Genetic Analysis of Hydrothermal Sediment of Lower Cretaceous in Hari Depression, Yin' e Basin. *Earth Science*, 43(6): 1941-1956 (in Chinese with English abstract).
- Eugster, H. P., Smith, G. I., 1965. Mineral Equilibria in the Searles Lake Evaporites, California. *Journal of Petrolo*gy, 6(3): 473-522. https://doi.org/10.1093/petrology/ 6.3.473
- García-Veigas, J., Gündoğan, İ., Helvacı, C., 2013. A Genetic Model for Na-Carbonate Mineral Precipitation in the Miocene Beypazarı Trona Deposit, Ankara Province, Turkey. Sedimentary Geology, 294: 315-327. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2013.06.011
- Guo, P., Wen, H., Gibert, L., et al., 2021. Deposition and Diagenesis of the Early Permian Volcanic-Related Alkaline Playa-Lake Dolomitic Shales, NW Junggar Basin, NW China. Marine and Petroleum Geology, 123: 104780. https://doi. org/10.1016/j. marpetgeo.2020.104780
- Hammond, A. P., Carroll, A. R., Parrish, E. C., et al., 2019. The Aspen Paleoriver: Linking Eocene Magmatism to the World's Largest Na-Carbonate Evaporite (Wyoming, USA). *Geology*, 47(11): 1020-1024. https: //doi.org/10.1130/g46419.1
- Helvacı, C., 2019. Turkish Trona Deposits: Geological Setting, Genesis and Overview of the Deposits. Modern Approaches in Solid Earth Sciences. Springer International Publishing, Cham. 599-633. https://doi.org/ 10.1007/978-3-030-02950-0_12
- Hendy, C. H., 1971. The Isotopic Geochemistry of Speleothems—I. The Calculation of the Effects of Different Modes of Formation on the Isotopic Composition of Speleothems and Their Applicability as Palaeoclimatic Indicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 35(8): 801— 824. https://doi.org/10.1016/0016-7037(71)90127-X
- Hou, Z. Q., Mo, X. X., 1996. The Present and Future Investigation of the Modern Seafloor Hydrothermal Processes and Mineralization. *Earth Science Frontiers*, 3(4): 263-273 (in Chinese with English abstract).
- İncı, U., Helvaci, C., Yağmurlu, F., 1988. Stratigraphy of Beypazarı Neogene Basin, Central Anatolia, Turkey. Newsletters on Stratigraphy, 18(3): 165-182. https:// doi.org/10.1127/nos/18/1988/165
- Jagniecki, E.A., Jenkins, D.M., Lowenstein, T.K., et al., 2013. Experimental Study of Shortite (Na₂Ca₂(CO₃)₃)

Formation and Application to the Burial History of the Wilkins Peak Member, Green River Basin, Wyoming, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 115: 31-45. https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.04.005

- Jiang, Y.Q., Wen, H.G., Qi, L.Q., et al., 2012. Salt Minerals and Their Genesis of the Permian Fengcheng Formation in Urho Area, Junggar Basin. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 32(2): 105-114 (in Chinese with English abstract).
- Keith, M. L., Weber, J. N., 1964. Carbon and Oxygen Isotopic Composition of Selected Limestones and Fossils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(10/11): 1787– 1816. https://doi.org/10.1016/0016-7037(64)90022-5
- Li, Y. L., Miao, W. L., Zhang, X. Y., et al., 2021. Hydrochemical Characteristics and Salt-Formation Elements Sources of Li-Rich Brines in Kushui Lake, West Kunlun. *Earth Science*, 46(11): 4161-4174 (in Chinese with English abstract).
- Liu, A., Chen, L., Chen, X.H., et al., 2021. Carbon and Oxygen Isotopic Characteristics of Devonian in Central Hunan Depression and Its Paleoenvironmental Significance. *Earth Science*, 46(4): 1269-1281 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C.L., Zhao, Q.H., Wang, P.X., 2001. Correlation between Carbon and Oxygen Isotopic Ratios of Lacustrine Carbonates and Types of Oil-Producing Paleolakes. *Geochimica*, 30(4): 363-367 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q., 2017. Composition and Geologic Significance of Carbon and Oxygen Isotopes in Hydrocarbon Source Rocks, Dongying Sag, Bohai Bay Basin. *Petroleum Geology and Experiment*, 39(2): 247-252 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z.B., Xing, F.C., Hu, H.R., et al., 2021. Multiple Genesis of Dolomite in Lower Ordovician Tongzi Formation in Sichuan Basin. *Earth Science*, 46(2):583-599 (in Chinese with English abstract).
- Lu, F. Y., An, Z.S., 2010. Climatic and Environmental Significance of Ostracod Abundance and Their Shell Oxygen Isotope from Lake Qinghai Surface Sediments. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30(5): 119-128 (in Chinese with English abstract).
- O'Neil, J. R., Clayton, R. N., Mayeda, T. K., 1969. Oxygen Isotope Fractionation in Divalent Metal Carbonates. *The Journal of Chemical Physics*, 51(12): 5547-5558. https://doi.org/10.1063/1.1671982
- Qu, C.S., Qiu, L.W., Yang, Y.Q., et al., 2017. Carbon and Oxygen Isotope Compositions of Carbonatic Rock

from Permian Lucaogou Formation in the Jimsar Sag, NW China and Their Paleolimnological Significance. Acta Geologica Sinica, 91(3): 605-616 (in Chinese with English abstract).

- Renaut, R. W., Owen, R. B., Jones, B., et al., 2013. Impact of Lake-Level Changes on the Formation of Thermogene Travertine in Continental Rifts: Evidence from Lake Bogoria, Kenya Rift Valley. *Sedimentology*, 60 (2): 428-468. https://doi. org/10.1111/j. 1365-3091.2012.01347.x
- Renaut, R. W., Tiercelin, J. J., 1994. Lake Bogoria, Kenya Rift Valley—A Sedimentological Overview. Sedimentology and Geochemistry of Modern and Ancient Saline Lakes. SEPM (Society for Sedimentary Geology), Tulsa: 101-123. https://doi.org/10.2110/pec.94.50.0101
- Smith, M. E., Carroll, A. R., Singer, B. S., 2008. Synoptic Reconstruction of a Major Ancient Lake System: Eocene Green River Formation, Western United States. *Geological Society of America Bulletin*, 120(1/2): 54-84. https://doi.org/10.1130/b26073.1
- Surdam, R. C., Parker, R. D., 1972. Authigenic Aluminosilicate Minerals in the Tuffaceous Rocks of the Green River Formation, Wyoming. *Geological Society of America Bulletin*, 83(3): 689. https://doi. org/10.1130/0016-7606(1972)83[689: aamitt]2.0.co;2
- Talbot, M. R., 1990. A Review of the Palaeohydrological Interpretation of Carbon and Oxygen Isotopic Ratios in Primary Lacustrine Carbonates. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 80(4): 261–279. https://doi.org/ 10.1016/0168-9622(90)90009-2
- Tong, Q.L., Ye, F.W., Qin, M.K., 2023. U-Pb Chronology of Detrital Zircons from Lower Cretaceous in Xinniwusu Sag, Bayingobi Basin and Its Geological Significance. *Earth Science*, 48(10): 3613-3630(in Chinese with English abstract).
- Wang, C.L., Liu, C.L., Xu, H.M., et al., 2013. Carbon and Oxygen Isotopes Characteristics of Palaeocene Saline Lake Facies Carbonates in Jiangling Depression and Their Environmental Significance. Acta Geoscientia Sinica, 34(5): 567-576 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. P., Zhang, Y. X., Yang, Q. T., et al., 1991. The Geological Characteristics and Origin of the Anpeng Alkali Deposit. *Geological Review*, 37(1): 42-50 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L.B., Hou, G.F., Bian, B.L., et al., 2020. The Role of Modern Alkaline Lakes in Explaining the Sedimentary Environment of the Fengcheng Formation, Mahu Depression. Acta Sedimentologica Sinica, 38(5):

 $913\!-\!922$ (in Chinese with English abstract).

- Wen, D.G., Zeng, J.H., 1997. Geochemical Modeling of the Formation of Biyang Alkali Deposit. *Earth Science*, 22 (1): 69-73 (in Chinese with English abstract).
- Wen, H. G., Zheng, R. C., Qing, H. R., et al., 2014. Cretaceous Lacustrine Hydrothermal Primary Dolomite in the Qingxi Sag, Jiuquan Basin on the Northern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau. *Scientia Sinica (Terrae)*, 44(4): 591-604 (in Chinese).
- Xiang, L., Liu, X.D., Liu, P.H., et al., 2019. Genesis and Characteristics of Lacustrine Hydrothermal-Sedimentary Rock of the Lower Cretaceous in Yingejing Sag of Bayan Gebi Basin, Inner Mongolia. *Journal of Palaeogeography*, 21(5): 709-726 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y. X., Dai, C. C., Liu, X. D., et al., 2022. Geochemical Characteristics and Genesis of Lower Cretaceous Hydrothermal Sedimentary Rocks in Bayingebi Basin. *Geological Review*, 68(1): 122–137 (in Chinese with English abstract).
- Yi, H.S., Lin, J.H., Zhou, K.K., et al., 2007. Carbon and Oxygen Isotope Characteristics and Palaeoenvironmental Implication of the Cenozoic Lacustrine Carbonate Rocks in Northern Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Palaeogeography*, 9(3): 303-312 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., Guo, P., Lu, Z.Y., et al., 2020. Genesis of Reedmergnerite in the Lower Permian Fengcheng Formation of the Junggar Basin, NE China. Acta Sedimentologica Sinica, 38(5): 966-979 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, R. C., Wen, H. G., Li, Y., et al., 2018. Compositions and Texture of Lacustrine Exhalative Rocks from the Lower Cretaceous Xiagou Formation in Qingxi Sag of Jiuxi Basin, Gansu. *Journal of Palaeogeography*, 20 (1): 1-18 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, D.K., Yang, Z., Sun, H.T., et al., 2018. Petrological Characteristics of Hydrothermal-Sedimentary Rocks: A Case Study of the Lower Cretaceous Tengger Formation in the Baiyinchagan Sag of Erlian Basin, Inner Mongolia. *Journal of Palaeogeography*, 20(1): 19-32 (in Chinese with English abstract).
- Zuo, J. X., Zhu, X. J., Chen, Y. L., et al., 2023. Carbon Isotope from Shallow Marine System in North China: Implications for Stratigraphical Correlation and Sea-Level Changes in Cambrian. *Journal of Earth Science*, 34(6): 1777-1792. https://doi. org/10.1007/s12583-021-1463-6

中文参考文献

- 曹剑, 雷德文, 李玉文, 等, 2015. 古老碱湖优质烃源岩: 准 噶尔盆地下二叠统风城组. 石油学报, 36(7): 781-790.
- 陈志鹏,任战利,于春勇,等,2018.银额盆地哈日凹陷下白 垩统热水沉积岩特征及成因.地球科学,43(6):1941-1956.
- 侯增谦,莫宣学,1996.现代海底热液成矿作用研究现状及 发展方向.地学前缘,3(4):263-273.
- 蒋宜勤,文华国,祁利祺,等,2012. 准噶尔盆地乌尔禾地区 二叠系风城组盐类矿物和成因分析.矿物岩石,32(2): 105-114.
- 李玉龙, 苗卫良, 张西营, 等, 2021. 西昆仑地区苦水湖富锂 盐湖水化学特征及成盐元素来源. 地球科学, 46(11): 4161-4174.
- 刘安,陈林,陈孝红,等,2021.湘中坳陷泥盆系碳氧同位素 特征及其古环境意义.地球科学,46(4):1269-1281.
- 刘传联,赵泉鸿,汪品先,2001. 湖相碳酸盐氧碳同位素的 相关性与生油古湖泊类型. 地球化学,30(4):363-367.
- 刘庆,2017. 渤海湾盆地东营凹陷烃源岩碳氧同位素组成及 地质意义. 石油实验地质,39(2):247-252.
- 刘志波,邢凤存,胡华蕊,等,2021.四川盆地下奥陶统桐梓组 白云岩多元成因.地球科学,46(2):583-599.
- 卢凤艳,安芷生,2010. 青海湖表层沉积物介形虫丰度及其 壳体氧同位素的气候环境意义. 海洋地质与第四纪地 质,30(5):119-128.
- 曲长胜,邱隆伟,杨勇强,等,2017.吉木萨尔凹陷芦草沟组 碳酸盐岩碳氧同位素特征及其古湖泊学意义.地质学 报,91(3):605-616.
- 童勤龙,叶发旺,秦明宽,2023.巴音戈壁盆地新尼乌苏四 陷下白垩统碎屑锆石 U-Pb 年代学及其地质意义.地球 科学,48(10):3613-3630.

- 王春连,刘成林,徐海明,等,2013. 江陵凹陷古新世盐湖沉 积碳酸盐碳氧同位素组成及其环境意义. 地球学报, 34(5):567-576.
- 王吉平,张幼勋,杨清堂,等,1991.论河南安棚碱矿地质特 征及其成因.地质论评,37(1):42-50.
- 王力宝, 厚刚福, 卞保力, 等, 2020. 现代碱湖对玛湖凹陷风 城组沉积环境的启示. 沉积学报, 38(5): 913-922.
- 文冬光,曾建华,1997. 泌阳碱矿形成的地球化学模拟研究. 地球科学,22(1):69-73.
- 文华国,郑荣才,Qing,H.R.,等,2014. 青藏高原北缘酒泉 盆地青西凹陷白垩系湖相热水沉积原生白云岩.中国 科学(地球科学),44(4):591-604.
- 向龙,刘晓东,刘平辉,等,2019.内蒙古巴音戈壁盆地因格 井坳陷下白垩统湖相热水沉积岩特征及成因.古地理 学报,21(5):709-726.
- 许亚鑫,戴朝成,刘晓东,等,2022.巴音戈壁盆地下白垩统 热水沉积岩地球化学特征及成因探讨.地质论评,68 (1):122-137.
- 伊海生,林金辉,周恳恳,等,2007. 青藏高原北部新生代湖 相碳酸盐岩碳氧同位素特征及古环境意义. 古地理学 报,9(3):303-312.
- 赵研, 郭佩, 鲁子野, 等, 2020. 准噶尔盆地下二叠统风城组 硅硼钠石发育特征及其富集成因探讨. 沉积学报, 38 (5): 966-979.
- 郑荣才,文华国,李云,等,2018.甘肃酒西盆地青西凹陷下 白垩统下沟组湖相喷流岩物质组分与结构构造.古地 理学报,20(1):1-18.
- 钟大康,杨喆,孙海涛,等,2018. 热水沉积岩岩石学特征: 以内蒙古二连盆地白音查干凹陷下白垩统腾格尔组为 例.古地理学报,20(1):19-32.