

冯宁,秦西伟,马玉亮,等.柴北缘马海盆地晶间卤水地球化学特征及成因探讨[J].盐湖研究,2025,33(6):29-38.

Feng N, Qin X W, Ma Y L, et al. Discussion on the geochemical characteristics and genesis of intercrystalline brine in the Mahai basin, northern Margin of Qaidam basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 2025, 33(6): 29-38.

DOI: 10.3724/j.whyj.2025023

CSTR: 32273.14.j.whyj.2025023

柴北缘马海盆地晶间卤水地球化学特征及成因探讨

冯 宁^{1,2}, 秦西伟^{1,2,3*}, 马玉亮^{4,5,6}, 张 帆^{1,2}, 刘瑞博^{1,2}, 蒋子文^{1,2},
刘成林⁷, 丁兆鹏^{1,2}

(1. 青海大学地质工程学院, 青海 西宁 810016; 2. 青藏高原北缘新生代资源环境重点实验室, 青海 西宁 810016; 3. 国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司, 新疆 哈密 839000; 4. 中国地质大学(武汉)高等研究院, 湖北 武汉 430074; 5. 青海省第四地质勘查院, 青海 西宁 810001; 6. 青海省页岩气资源重点实验室, 青海 西宁 810001; 7. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要:马海盆地位于柴达木盆地北部, 卤水资源丰富, 但关于晶间卤水的系统研究仍相对薄弱, 缺乏深入的水文地球化学分析。文章以马海盆地晶间卤水为研究对象, 结合水化学特征与 δD 、 $\delta^{18}O$ 、 $\delta^{34}S$ 和 δ^7Li 等同位素组成, 探讨其水文地球化学特征及成因, 并构建晶间卤水成因模式。研究表明, 马海盆地晶间卤水pH为7.67~8.07, TDS为315.30~335.00 g/L, 属高矿化度、弱碱性的Cl-SO₄型晶间卤水。水化学分析表明, 晶间卤水的溶质主要源于石盐、钾盐和石膏等矿物的溶解, 水化学演化过程受蒸发浓缩、水-岩作用及阳离子交换作用的控制, 储层封闭性较差, 变质程度较低。氢、氧同位素值分别为-38.60‰~-22.80‰和-1.30‰~3.20‰, 表明晶间卤水起源于大气降水或冰雪融水, 并经历了显著的蒸发浓缩和水岩作用。硫同位素值为9.50‰~11.80‰, 进一步反映出储层封闭性较差, 且可能存在深部流体的混合补给。锂同位素值为30.49‰~32.74‰, 进一步揭示晶间卤水主要受冲积扇地下水(55.56%~73.71%)和Ca-Cl泉水(26.29%~44.44%)的混合补给。综合分析认为, 马海盆地晶间卤水的形成受大气降水的入渗补给、石盐及钾盐的溶滤、深部流体的混合及蒸发浓缩等水文地球化学过程共同作用, 最终形成其现今的地球化学特征。该研究成果对于深化马海盆地卤水成因研究、提升资源评价水平及促进可持续开发具有重要意义。

关键词:晶间卤水; 地球化学特征; 稳定同位素; 成因; 马海盆地

中图分类号: P619.211

文献标志码: A

文章编号: 1008-858X(2025)06-0029-10

盐湖卤水富含锂、钾、硼、溴、碘等资源元素, 因其储量丰富、元素含量高, 被视为重要的液体矿产资源^[1-3]。这些资源广泛应用于新能源、电子、化工、医药等领域, 对国家资源安全和经济发展具有重要的战略意义^[4, 5]。近年来, 随着全球新能源产业的快速发展, 对锂、钾、硼等关键矿产的需求大幅增长, 使盐湖资源的战略价值日益凸显^[3, 6]。在盐湖资源开发不断推进的背景下, 卤水的形成机制、地球化学特征及其分布规律逐渐成为研究的热点问题^[7-10]。深入解析卤水的形成与演化过程, 不仅有助于揭示盐湖体

系的物质来源与地球化学过程, 也能为资源的科学评价和合理利用提供重要的理论支撑。

柴达木盆地是中国最重要的盐湖资源富集区之一, 其独特的“高山—深盆”构造环境为卤水的形成和富集创造了有利条件^[1, 9]。盆地内发育多个富含钾、锂、硼等矿产资源的盐湖系统, 其中马海盆地位于柴达木盆地东北部次级构造盆地内, 卤水资源丰富, 具有较高的工业开发价值^[11, 12]。水化学分析和同位素示踪技术是研究卤水成因及其水文地球化学过程的重要手段。其中, 稳定同位素(如氢、氧、硫、

收稿日期: 2025-03-03; 修回日期: 2025-04-08

基金项目:青海省盐湖地质与环境重点实验室开放基金项目(2024-KFKT-B07); 青海大学部省合建盐湖化工大型系列研究设施自主课题(2024-DXSSZZ-01); 青海省地质矿产勘查开发局地质勘查项目(2023-03-18, 63000000024T000002987); 青海大学大学生科研训练计划项目(SRT202526)

作者简介:冯宁(1999—), 男, 在读硕士研究生, 研究方向: 盐湖地质及战略资源勘探。Email: 1344876240@qq.com。

通信作者:秦西伟(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事盐湖卤水及地下水地球化学等研究工作。Email: 495975224@qq.com。

锂同位素)分析可用于示踪卤水的水源补给、成因演化及水岩相互作用,从而深入理解卤水的成因及水文地质背景^[9,13,14]。已有研究主要围绕马海盆地深部卤水及承压卤水的成因、矿床评价及元素演化展开,认为马海盆地富钾卤水的形成受多种地质过程共同控制,包括溶滤作用、水-岩相互作用、沉积水与外源水体(如河水、高钙水)的混合,以及大气降水入渗、吸附作用和蒸发浓缩等^[15-17]。同时,稳定同位素分析进一步揭示了水源类型与补给机制,指出地下水的继承性补给对富钾卤水的形成具有重要影响^[18-21],丰富了深层卤水的成因理论,深化了其演化机制的系统理解。

尽管上述研究为理解马海盆地卤水的形成机制提供了重要参考,但针对晶间卤水的系统研究仍较为薄弱,尤其在水化学特征、稳定同位素组成及成因机制等方面尚缺乏系统分析,多因素耦合机制尚未厘清。基于此,本文以马海盆地晶间卤水为研究对象,综合运用水化学分析和 δD 、 $\delta^{18}O$ 、 $\delta^{34}S$ 、 δ^7Li 等稳定同位素指标,系统探讨该区域晶间卤水的水文地球化学特征及其成因机制,探讨晶间卤水与深层卤水之间的关联性,揭示二者在成矿作用中的耦合机制,构建晶间卤水的成因模式。研究成果可进一步深化对马海盆地卤水成因及演化机制的认识,为该区域卤水资源的可持续开发与利用提供科学依据。

1 区域地质背景

柴达木盆地位于青海省西北部,是青藏高原东北部大型山间断陷构造形成的“高山—深盆”地貌单元^[1,15,22]。盆地被北部祁连山脉、南部昆仑山脉、西部阿尔金山脉所包围,构造上受昆北断裂、阿尔金断裂和宗务隆山断裂控制,形成了北西—南东向展布的汇水盆地^[11,18](图1)。盆地内地形起伏较小,丘陵与沙漠间的低洼地带形成了多个相互独立、规模不一的封闭式内陆盐湖次级盆地。这些次级盆地是柴达木盆地主要的沉积中心,大面积分布的第四系松散沉积物和化学盐类沉积物为地下卤水的赋存提供了良好的空间^[16-20]。

马海盆地位于柴达木盆地内,为更新世-全新世次级成盐盆地,其地层、构造及沉积特征基本延续了柴达木盆地的地质演化过程^[11,20]。研究区主要分布新生界、元古界和中生界地层,新生代以来构造活动显著,形成了以褶皱和断裂为主的构造格局(图1)。其中,盆地构造受北西向驼南断裂、潜南断裂、冷七断裂及北东向鹊南断裂控制。这些断裂对第四纪沉积作用、矿体赋存及卤水富集起到了关键作用^[22]。第四系地层广泛分布,地表出露层位包括全新世(Qh)和晚更新世(Qp³),而中更新世(Qp²)及早更新世(Qp¹)地层主要见于钻孔下部,各地层之间主要为

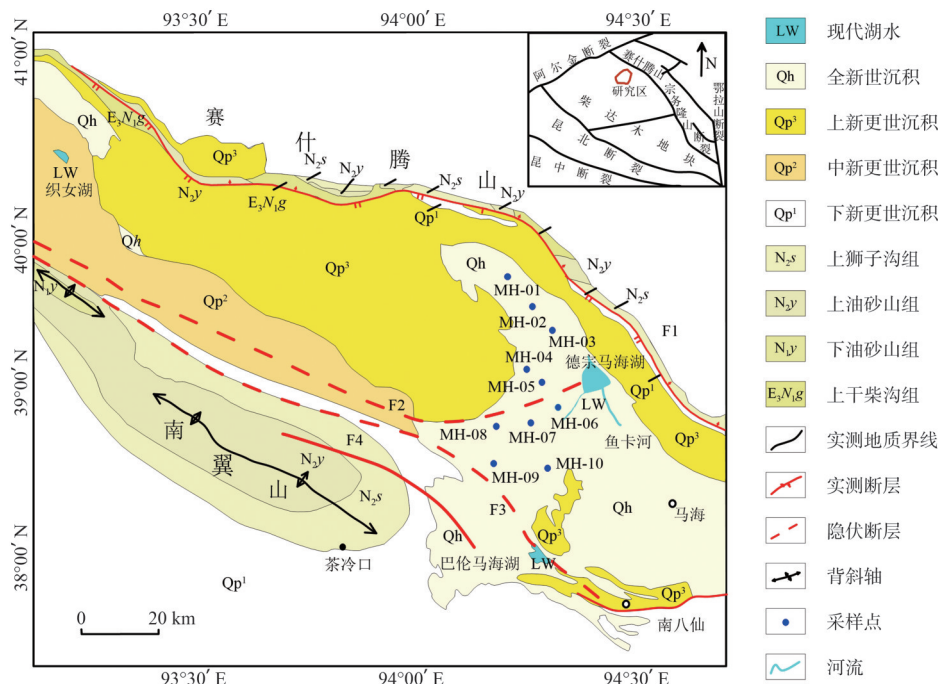


图1 马海盆地地质构造简图及样品采样位置(改编自文献[22])

Fig. 1 Geological structure schematic, and sample collection locations of Mahai Basin (adapted from [22])

整合或不整合接触。沉积相特征显示,早更新世(Qp¹)主要发育冲积相、浅湖相和滨湖相,少见盐湖相发育。中更新世(Qp²)主要发育浅湖相,主要为含粉砂(石膏)黏土夹淤泥、石盐岩相。晚更新世(Qp³)发育的地层主要以浅湖相发育为主,盐湖相发育规模较中更新世有所扩大,滨湖相发育面积较中更新世有所缩减,主要为黏土、淤泥、含粉砂黏土互层岩相。全新世(Qh)地层仅在中东部地区有所发育,以盐湖相和滨湖相为主,盐湖相和滨湖相发育面积较上更新世有所缩减,岩性为含粉砂的中粗粒石盐,局部含光卤石、钾石盐。对比各时期沉积特征可见,马海盆地经历了湖水由深变浅的演化过程,湖盆面积呈现早更新世(较小)→中-晚更新世(较大)→全新世(缩小)的变化趋势。

马海盆地晶间卤水主要赋存于全新世岩盐层内,埋深18.52 m以内,该层为马海盆地卤水钾矿的主要含卤层^[19]。岩性以含粉砂的中粗粒石盐为主,局部见光卤石及钾石盐。研究区内主要河流包括鱼卡河、噶喇河和南八仙河,巴伦马海湖和德宗马海湖为主要地表水体,并位于水文地质单元的最终排泄区。其中,鱼卡河是盆地内最大且唯一的常年性河流,其余河流在到达冲积扇前大部分已渗透入地下。鱼卡河的部分地表径流直接汇入德宗马海湖,另一部分则渗入冲积扇并通过地下水溢流补给马海盆地。此外,地下水在流入终端盐湖前,部分以冷泉形式溢出,补给巴伦马海湖。另一重要水源为高钙Ca-Cl泉水,该泉沿柴达木盆地北部古近系-新近系与第四纪地层间的不整合断裂带,由地形驱动的地下水环流作用出露于地表,为马海盆地的地下水系统提供补给^[19,20]。

2 样品采集及测试分析

为研究马海盆地晶间卤水地球化学特征及成因,于2023年7月开展野外实地考察,并从研究区新钻孔中采集了10组晶间卤水样品。样品采集深度约15 m,采样点分布如图1所示。在正式采样前,用待采集的卤水润洗高密度聚乙烯瓶3次,以减少外界污染影响。随后,采用排空法将样品瓶灌满卤水,并用封口膜密封瓶口,以防止同位素分馏影响测试结果。每个水样采集500 mL。

卤水样品的常微量离子成分分析由中国科学院青海盐湖研究所分析测试中心完成,主要测试指标

包括K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、CO₃²⁻和Li⁺含量,以及氢氧同位素组成、pH值、密度和矿化度(TDS)。其中K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻和SO₄²⁻的含量采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)测定,误差小于5%;HCO₃⁻和CO₃²⁻用HCl滴定法测定,误差小于0.3%;Li⁺采用ICP-OES法测定,分析精度优于5‰;pH值用玻璃电极法测定,分析精度优于1.0%;密度用比重计法测定,分析精度优于1.0%;TDS用重量法。

卤水样品的H、O、S、Li同位素由北京核工业地质研究院分析测试研究中心完成测定。H、O同位素采用Flash EA元素分析仪和MAT253质谱仪测定,检测结果以标准平均海洋水(V-SMOW)的 δD_{V-SMOW} 和 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值来表示,分析精度分别优于1‰和0.2‰。S同位素采用Delta vplus气体同位素质谱计测定,检测结果以相对国际标准(V-CDT)的 $\delta^{34}S_{V-CDT}$ 值来表示,分析精度优于0.1‰。Li同位素采用MC-ICP-MS等离子体质谱计测定,使用标准样品交叉法校正仪器的质量分馏,分析精度优于0.5‰。

3 结 果

马海盆地晶间卤水各离子浓度及氢氧硫锂同位素测定结果见表1。研究区晶间卤水的密度为1.21~1.22 g/cm³,平均为1.21 g/cm³;pH为7.67~8.07,呈弱碱性;TDS为315.30~335.00 g/L,平均为325.73 g/L。K⁺含量范围为3.37~8.29 g/L,平均为5.94 g/L;Na⁺含量范围为92.40~110.00 g/L,平均为100.34 g/L;Ca²⁺含量范围为0.39~0.78 g/L,平均为0.56 g/L;Mg²⁺含量范围为11.97~22.90 g/L,平均为16.33 g/L;Cl⁻含量范围为181.60~195.00 g/L,平均为188.81 g/L;SO₄²⁻含量范围为9.47~21.10 g/L,平均为15.11 g/L;HCO₃⁻含量范围为0.16~0.52 g/L,平均为0.28 g/L;未检测出CO₃²⁻;Li⁺含量范围为11.50~31.20 mg/L,平均为19.72 mg/L。阴阳离子含量排列顺序为Cl⁻>SO₄²⁻>HCO₃⁻,Na⁺>Mg²⁺>K⁺>Ca²⁺。马海盆地晶间卤水为Na⁺和Cl⁻占主要优势的高矿化度弱碱性卤水。

研究区晶间卤水的 δD_{V-SMOW} 值为-38.60‰~-22.80‰,平均为-31.54‰; $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 值为-1.30‰~-3.20‰,平均为-1.31‰; $\delta^{34}S_{V-CDT}$ 值为9.50‰~-11.80‰,平均为10.44‰; δ^7Li 值为30.49‰~32.74‰,平均为31.73‰。

表1 马海盆地晶间卤水水化学组成及H-O-S-Li同位素值

Table 1 Chemical compositions and H-O-S-Li isotopes value of intercrystalline brine in Mahai Basin																	
取样 编号	深度/ m	密度/ (g·cm ⁻³)	pH	TDS	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Li	δD _{V-SMOW}	δ ¹⁸ O _{V-SMOW}	δ ³⁴ S _{V-CDT}	δ ⁷ Li	
												/(g·L ⁻¹)	/(mg·L ⁻¹)	‰	‰	‰	‰
MH-01	9.56	1.21	7.93	329.90	8.29	98.55	0.58	14.06	193.20	15.18	0.18	16.80	-30.20	3.20	—	—	
MH-02	7.55	1.22	8.01	327.80	6.02	104.00	0.61	11.97	185.50	19.64	0.18	17.90	—	—	—	31.56	
MH-03	15.66	1.22	7.91	326.00	6.65	103.40	0.68	12.10	184.20	18.86	0.18	21.00	-32.40	0.30	—	32.73	
MH-04	20.21	1.22	7.85	326.40	5.46	92.40	0.45	19.32	192.10	16.61	0.21	24.30	—	—	10.80	—	
MH-05	18.56	1.22	7.91	315.30	5.49	99.70	0.61	13.72	181.60	14.14	0.16	31.20	-35.40	2.20	—	—	
MH-06	17.41	1.21	7.67	317.00	6.49	95.30	0.39	17.50	184.00	13.80	0.30	18.20	—	—	—	—	
MH-07	9.19	1.22	7.74	333.00	6.60	94.30	0.78	22.90	188.00	21.10	0.27	11.50	—	—	11.80	32.74	
MH-08	12.52	1.22	8.07	335.00	7.22	97.00	0.59	22.50	195.00	12.40	0.38	19.50	-22.80	2.90	10.10	—	
MH-09	10.97	1.21	7.99	323.00	3.99	107.00	0.42	14.50	188.00	9.47	0.35	17.90	-38.60	-1.30	9.60	30.49	
MH-10	19.14	1.21	8.05	325.00	3.37	110.00	0.48	12.50	189.00	9.53	0.52	18.40	—	—	9.50	31.37	

注：“—”表示未检测。

4 讨 论

4.1 晶间卤水水化学特征与溶质来源

4.1.1 水化学类型及离子分析

为深入探究马海盆地晶间卤水成因,本研究引入鱼卡河^[17]及砂砾型深层孔隙卤水^[21]数据进行对比分析。砂砾型深层孔隙卤水位于柴达木盆地北缘赛什腾山山前冲洪积扇更新统砂砾石层中,具有典型的多阶段、多空间演化的特征。地下水的水化学类型可综合反映其赋存条件、水岩相互作用及水文地球化学环境^[23]。依据 Hardie 和 Eugster 提出的化学分类方法^[24],研究区晶间卤水为 Cl-SO₄ 型,砂砾型深层孔隙卤水为 Ca-Cl 型,而鱼卡河水的水化学类型位于 Na-HCO₃-SO₄ 型和 Cl-SO₄ 型的过渡区域,表明其可能是马海盆地晶间卤水的主要补给来源(图 2)。

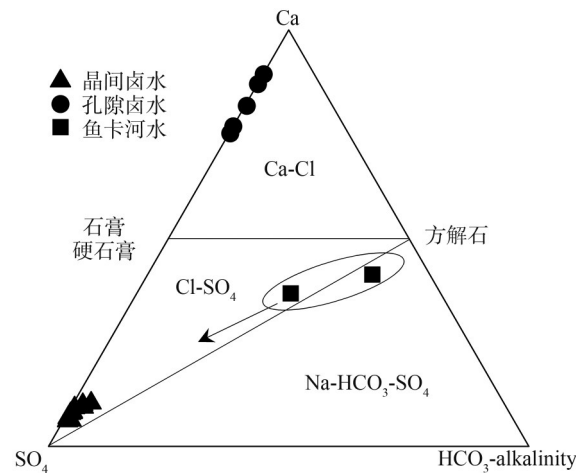


图2 马海盆地中不同水体Ca-SO₄-HCO₃三元相图(鱼卡河水引自文献[17];砂砾型深层孔隙卤水引自文献[21])
Fig.2 Ca-SO₄-HCO₃-alkalinity triangle equivalent diagram of various waters in Mahai Basin (The Yuqia River waters cited from [17]; the gravel-type deep brines cited from[21])

Ca-SO₄-HCO₃ 三元相图还可进一步揭示地下水化学成分的演化过程^[23]。研究区晶间卤水样点分布于 Cl-SO₄ 区域,并呈现向 SO₄ 端元富集的趋势,表明溶质成分主要来源于石膏、硬石膏的溶解。相比之下,砂砾型深层孔隙卤水样点集中于 Ca-Cl 区域,反映其深部水体特征,并指示其形成环境较为封闭,具有较强的还原性。

TDS 与 $\rho(Cl^-)$ 的比值关系常用于判断卤水的溶质来源及演化特征^[25-27]。研究区晶间卤水和砂砾型深层孔隙卤水样点均分布在青海湖水蒸发曲线附近[图 3(a)],表明其在形成过程中经历了显著的水岩相互作用或蒸发浓缩,导致离子浓度不断升高并富集。然而,相较于蒸发曲线,卤水样点发生偏移,推测原生卤水形成后可能受到次生改造作用的影响,导致其地球化学组成发生变化。 $\gamma(Na^+ + K^+)$ 与 $\gamma(Cl^-)$ 的比值关系常用于示踪 K⁺、Na⁺ 和 Cl⁻ 的主要来源^[28]。研究区晶间卤水和砂砾型深层孔隙卤水样点均分布在 1:1 线附近[图 3(b)],表明 K⁺、Na⁺ 和 Cl⁻ 主要来源于石盐溶滤。此外,K⁺、Na⁺ 略低于 Cl⁻,可能与阳离子交替吸附作用有关。 $\gamma(Ca^{2+})$ 与 $\gamma(SO_4^{2-})$ 的比值关系可用于判断 Ca²⁺ 的来源^[29]。研究区晶间卤水样点都在 1:1 线以下[图 3(c)],表明卤水中的 Ca²⁺ 主要来源为石膏的溶解。砂砾型深层孔隙卤水样点则位于 1:1 线以上,表明其 Ca²⁺ 除了石膏溶解外,还可能受深部地质环境的影响。 $\gamma(Ca^{2+} + Mg^{2+} - HCO_3^-)$ 与 $\gamma(SO_4^{2-} + Cl^- - Na^+)$ 的比值可用于分析 SO₄²⁻ 的来源^[30]。若 SO₄²⁻ 完全来源于石膏的溶解,该比值应为 1。研究区晶间卤水和砂砾型深层孔隙卤水样点均分布在 1:1 线附近[图 3(d)],表明 SO₄²⁻ 主要来源于石膏的溶解。

$\gamma(Ca^{2+} + Mg^{2+} - SO_4^{2-} - HCO_3^-)$ 与 $\gamma(Na^+ - Cl^-)$ 的比值

关系可反映卤水是否发生阳离子交替吸附作用^[31]。研究区晶间卤水和砂砾型深层孔隙卤水样点均分布在 $Y = -X$ 直线附近[图 3(e)], 表明弱碱性环境促使卤水发生了阳离子交替吸附作用。 CAI (Cation Exchange Index)指数可用于判断阳离子交替吸附作用的方向及强度^[32], 计算公式如(1)、(2)所示:

$$CAI1 = \frac{Cl^- - (K^+ + Na^+)}{Cl^-} \quad (1)$$

$$CAI2 = \frac{Cl^- - (K^+ + Na^+)}{SO_4^{2-} + HCO_3^-} \quad (2)$$

研究区晶间卤水和砂砾型深层孔隙卤水的 CAI 均大于 0[图 3(f)], 表明在演化过程中发生了正向阳离子交替吸附作用, 即 K^+ 和 Na^+ 被吸附导致浓度降低, 而 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 因解吸浓度升高。此外, 砂砾型深层孔隙卤水的 CAI 指数高于晶间卤水, 说明其阳离子交替吸附作用更为显著。

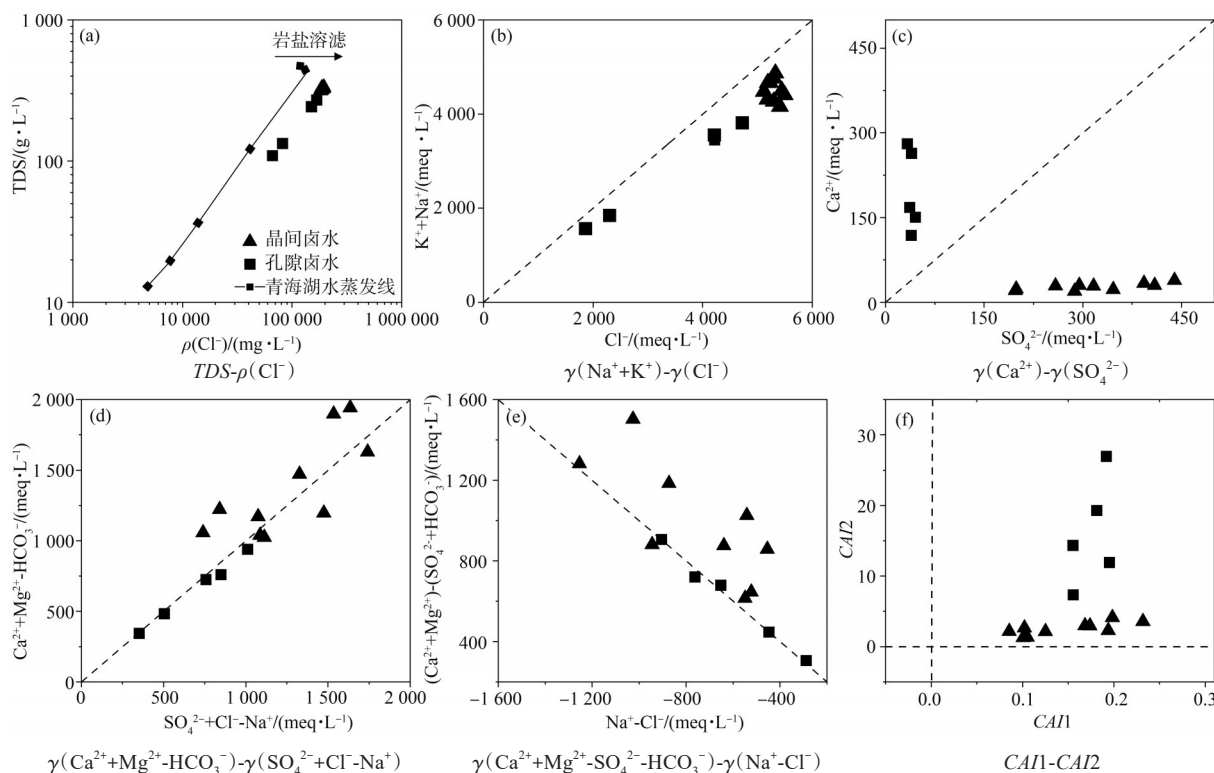


图3 马海盆地不同水体离子比值相关关系图

Fig. 3 Correlation diagram of ion ratios in various waters of Mahai Basin

4.1.2 水化学特征系数

水化学特征系数可用于判别卤水的成因类型、浓缩阶段及沉积环境等特征^[17,18,21]。本研究采用钠氯系数 ($\gamma(Na^+)/\gamma(Cl^-)$)、钙镁系数 ($n(Ca^{2+})/n(Mg^{2+})$)、脱硫系数 ($\gamma(SO_4^{2-}) \times 50/\gamma(Cl^-)$) 以及氯镁系数 ($n(Cl^-)/n(Mg^{2+})$) 对马海盆地晶间卤水的水化学特征进行分析(表2)。

钠氯系数可指示卤水中钠盐的富集程度、地层封闭性及变质程度^[7,33]。标准海水的钠氯系数为 0.87, 盐岩溶滤卤水一般大于 0.87, 而沉积变质卤水则小于 0.87。若为地下水溶滤地层中的钾盐或石盐, 该值可能降低^[34]。研究区晶间卤水的钠氯系数范围为 0.74 ~ 0.90, 表明其主要来源于岩盐溶滤, 并可能继承了柴达木古湖水的水化学特征。此外, 部

分样点的钠氯系数偏低, 推测可能与溶滤地层中的钾盐相关。钙镁系数可反映卤水的变质程度^[7]。通常, 深层地下卤水的钙镁系数大于 3, 若小于 3, 则表明卤水封闭时间短, 变质程度低。研究区晶间卤水的钙镁系数为 0.01 ~ 0.03, 说明其封闭时间短, 封闭性较差, 变质程度较低, 与浅层晶间卤水所处的相对开放地质环境一致。脱硫系数用于评估储层封闭性^[7,21]。在还原环境下, SO_4^{2-} 发生分解, 导致该值降低, 越接近 0 时说明封闭性较强。氯镁系数可反映卤水运移过程中的水岩反应和阳离子交替吸附程度, 数值越高, 表明卤水的封闭条件越好, 封闭时间也就越长^[33]。研究区晶间卤水脱硫系数为 1.86 ~ 4.15, 氯镁系数 2.78 ~ 5.24, 表明其还原不完全, 封闭性较差, 封闭时间短, 受浅层氧化作用影响较强, 阳

离子交替吸附作用较弱。

综合钠氯、钙镁、脱硫和氯镁系数,研究表明马海盆地晶间卤水的储层环境较为开放,封闭时间短,变质程度低,主要来源于岩盐地层的溶滤补给。

表2 马海盆地晶间卤水特征系数一览表
Table 2 The chemical composition of intercrystalline brine in Mahai Basin

取样编号	$\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$	$n(\text{Ca}^{2+})/n(\text{Mg}^{2+})$	$\gamma(\text{SO}_4^{2-}) \times 50/\gamma(\text{Cl}^-)$	$n(\text{Cl}^-)/n(\text{Mg}^{2+})$
MH-01	0.79	0.02	2.91	4.64
MH-02	0.87	0.03	3.92	5.24
MH-03	0.87	0.03	3.79	5.15
MH-04	0.74	0.01	3.20	3.36
MH-05	0.85	0.03	2.88	4.47
MH-06	0.80	0.01	2.77	3.55
MH-07	0.77	0.02	4.15	2.78
MH-08	0.77	0.02	2.35	2.93
MH-09	0.88	0.02	1.86	4.38
MH-10	0.90	0.02	1.86	5.11

4.2 晶间卤水同位素特征与指示意义

4.2.1 氢氧同位素特征与水源分析

氢、氧同位素可有效指示地下卤水的成盐演化及其物质来源^[7,9,35,36]。研究区晶间卤水和砂砾型深层孔隙卤水的氢、氧同位素均位于全球大气降水线(GMWL: $\delta D = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$)^[37]和柴达木盆地大气降水

线(LMWL: $\delta D = 4.48 \times \delta^{18}\text{O} - 4$)^[16]的右下方[图4(a)],表明卤水的主要补给来源可能为祁连山区的大气降水或冰雪融水。晶间卤水表现出明显的¹⁸O富集(右漂移)特征,且位于局地蒸发线附近(LEL: $\delta D = 4.33 \times \delta^{18}\text{O} - 35$)^[38],反映出马海盆地干旱气候下卤水经历了强烈的蒸发作用。对比发现,晶间卤水的¹⁸O右漂移程度强于砂砾型深层孔隙卤水,说明其受到更强的蒸发影响。这与马海盆地浅层地下水更易受蒸发浓缩作用一致,而深层孔隙卤水受地层封闭影响较强,蒸发作用相对较弱。

水汽来源、迁移过程及气象因素不同,全球大气降水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 存在不同程度的分馏,导致GMWL和LMWL斜率、截距有所差异。氘盈余($d\text{-Excess} = \delta D - 8 \times \delta^{18}\text{O}$)用于揭示地下水的水文循环及水岩作用的程度^[39,40]。研究区晶间卤水和砂砾型深层孔隙卤水的d-Excess值分别为-55.80‰~-28.20‰和-25.31‰~-7.11‰,均值分别为-43.11‰和-17.00‰,且 $\delta^{18}\text{O}$ 与d-Excess值呈显著负相关($R^2 = 0.87$ 和 $R^2 = 0.99$),表明卤水经历了充分的水岩相互作用,其中砂砾型深层孔隙卤水的水岩反应程度更强,表明其与围岩长期接触,经历了更充分的矿物溶解与离子交换过程[图4(b)]。

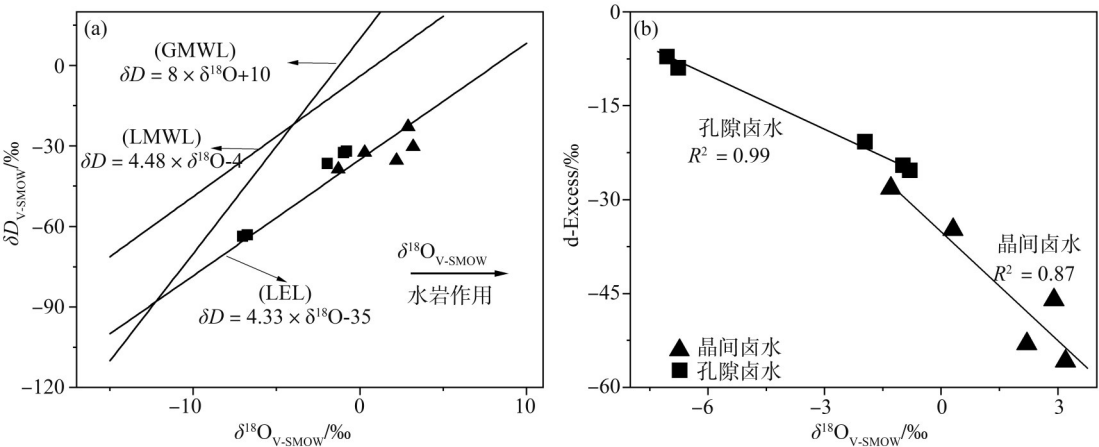


图4 (a)马海盆地不同水体氢氧同位素(a)与氘盈余(b)关系图
Fig. 4 (a) Hydrogen and oxygen isotope geochemical characteristics; (b) $\delta^{18}\text{O}$ vs. d-Excess in various waters of Mahai Basin

4.2.2 硫同位素特征及指示意义

硫同位素可以有效追踪卤水中的硫来源,揭示其补给特征及沉积演化过程^[9,41]。不同岩石类型具有显著的硫同位素组成差异,典型的值范围如下:沉积岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为-40‰~+50‰,变质岩为-20‰~+20‰,花岗岩为-13.4‰~+26.7‰,天然水一般低于10‰,现代海水为19.0‰~24.3‰^[42]。研究区晶间卤

水的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为9.50‰~11.80‰,均值为10.44‰,与现代盐湖浅表层卤水^[43,44]相似,但低于深层卤水^[45]。这可能与晶间卤水储层环境封闭性较差、水岩作用较弱、还原作用不足等因素有关,导致其 $\delta^{34}\text{S}$ 值相对较低, SO_4^{2-} 含量较高。此外,晶间卤水的 $\delta^{34}\text{S}$ 值高于柴北缘古近系地层硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(8.65‰)^[21],表明岩盐溶滤并非唯一的硫来源,推测深部流体可能也

为卤水提供了硫同位素物质。综合分析,研究区晶间卤水的硫同位素特征表明其主要来源为浅表盐湖,但深部流体的贡献也不可忽视(图5)。 $\delta^{34}\text{S}$ 较高可能反映了水岩相互作用的影响,且可能有部分深层流体参与了硫的迁移与转化,这与研究区南北存在深大断裂的地质特征相吻合。

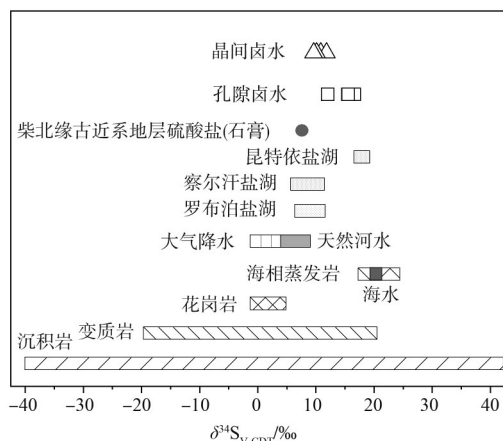


图5 不同水体和岩体 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布图^[42-45]

Fig. 5 The $\delta^{34}\text{S}$ values in different water and rocks^[42-45]

4.2.3 锂同位素特征及补给特征

锂同位素在岩石风化、地下水演化和盐湖水文过程中具有良好的示踪作用^[21,46]。研究区不同水体的 $\delta^7\text{Li}$ 值具有明显差异,砂砾型深层孔隙卤水为24.18‰~44.50‰,均值为35.68‰,表现出高 $\delta^7\text{Li}$ 低锂的特征^[21];鱼卡河水的 $\delta^7\text{Li}$ 值为7.00‰~8.00‰,均值为7.53‰,表现出低 $\delta^7\text{Li}$ 低锂的特征;末端冲积扇水的 $\delta^7\text{Li}$ 值为21.00‰~27.60‰,均值为23.60‰,表现出相对高 $\delta^7\text{Li}$ 低锂的特征^[19]。晶间卤水的 $\delta^7\text{Li}$ 值介于冲积扇地下水和Ca-Cl泉水之间,呈现高 $\delta^7\text{Li}$ 高锂的特征。图6展示了马海盆地中不同水体的 $\delta^7\text{Li}$ 值分布情况,表明这些水体的 $\delta^7\text{Li}$ 值在源运过程中显示出不同的地球化学特征。

锂同位素分馏主要发生在黏土吸附和次生矿物形成过程中,盐湖演化后期光卤石沉淀会削弱其吸附作用。研究区晶间卤水主要赋存于岩盐或含粉砂岩盐层,其 $\delta^7\text{Li}$ 变化可能反映了河水和Ca-Cl泉水的混合作用,而非同位素分馏过程^[19]。为了定量分析冲积扇地下水(F_R)和Ca-Cl泉水(F_S)的贡献比例,基于Li同位素的质量平衡方程^[19]为:

$$(\delta^7\text{Li})_R \times F_R + (\delta^7\text{Li})_S \times F_S = (\delta^7\text{Li})_B \quad (3)$$

$$F_R + F_S = 1 \quad (4)$$

式中, $(\delta^7\text{Li})_R$ 、 $(\delta^7\text{Li})_S$ 、 $(\delta^7\text{Li})_B$ 分别代表冲积扇地下水、

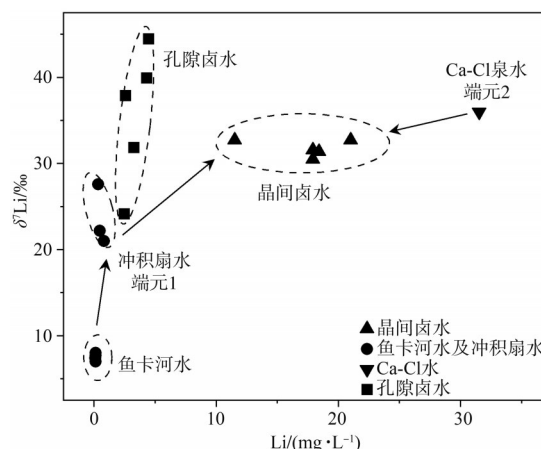


图6 不同水体 $\delta^7\text{Li}$ 值分布图(Ca-Cl泉水引自文献^[19])

Fig. 6 The $\delta^7\text{Li}$ values in different water (The Ca-Cl-type spring water cited from ^[19])

Ca-Cl泉水和研究区晶间卤水的 $\delta^7\text{Li}$ 值, F_R 、 F_S 为冲积扇地下水和Ca-Cl泉水的贡献比例。结果如表3所示,冲积扇地下水对研究区晶间卤水贡献比例为55.56%~73.71%,Ca-Cl泉水的贡献比例为26.29%~44.44%。马海盆地晶间卤水的水体主要源自山区的大气降水或冰雪融水形成的鱼卡河水,渗入冲积扇并通过地下水溢流补给研究区,其次还受到沿盆地南北部的深大断裂带上渗的深部Ca-Cl水体的补给,这两种不同来源的水体对研究区晶间卤水的形成产生了重要影响。综上,锂同位素特征反映了冲积扇地下水和泉水的混合过程,这些不同水体的掺混改变了卤水的化学成分及地球化学演化过程。

表3 马海盆地晶间卤水不同端元贡献比例

Table 3 Replenishment ratio by different end elements of intercrystalline brine in Mahai Basin

	%				
取样编号	MH-02	MH-03	MH-07	MH-09	MH-10
F_R	64.19	73.63	73.71	55.56	62.66
F_S	35.81	26.37	26.29	44.44	37.34

4.3 卤水地球化学特征对其成因的指示

马海盆地晶间卤水的成因受多种因素的综合作用,包括构造运动、气候变化以及水文地质条件等^[7,27,33]。自第四纪以来,喜马拉雅运动持续进行,马海盆地北部及周边的第三系褶皱带保持相对稳定,而盆地本身则持续下沉,发育出大量褶皱和断裂^[11,20]。作为柴达木“高山深盆”格局下的次级盆地,马海盆地的形成和演化受到柴达木盆地整体构造演化的约束,在物质来源方面既存在共性,也展现出一定的区域特征。中更新世(Qp^2)之前,马海盆地与柴

达木盆地保持水力联系,二者物质来源相似,主要包括盆地周边山区岩石的风化剥蚀、第三系含盐岩系的溶解作用及深层卤水的补给。至中更新世末期至晚更新世(Qp^3)早期,第四次新构造运动导致柴达木古湖的解体,冷湖构造的隆起使马海盆地变为封闭盆地,北部水系仍为主要补给源,后逐渐被东部鱼卡河水系代替。距今约3万年前,第五次新构造运动引发了大规模的抬升,加之气候极端干旱的影响,使盆地在全新世后基本处于盐湖环境,最终演化为干盐滩,高度浓缩的卤水被封存于盐层之中^[15]。

马海盆地晶间卤水的地球化学特征揭示了其成因模式。钠氯系数表明卤水主要受岩盐溶滤作用控制,因受到钾盐溶解的影响,使其值偏低。钙镁系数和氯镁系数反映其封闭性较差,封存时间较短,演化

程度较低,受浅层氧化作用影响较为明显。氢氧同位素特征表明,卤水主要来源于祁连山区的大气降水及冰雪融水,经历了强烈蒸发作用和水岩相互作用,并汇集形成鱼卡河水及流经冲积扇的浅层地下水。硫同位素特征表明,晶间卤水的 $\delta^{34}S$ 值较低,表明储层封闭性较差,且可能存在深部流体的补给。锂同位素分析表明,晶间卤水的 δ^7Li 值主要受到冲积扇地下水与Ca-Cl泉水混合作用的影响,冲积扇地下水贡献比例较高。综合分析表明,马海盆地晶间卤水的主要补给来源包括大气降水及冰雪融水,这些水体渗入冲积扇并通过地下水溢流补给卤水。在此过程中,卤水受岩盐及钾盐溶滤作用影响,并与沿深大断裂带上渗的深部流体发生部分混合,经历强烈蒸发浓缩后,最终形成了现今的晶间卤水特征(图7)。

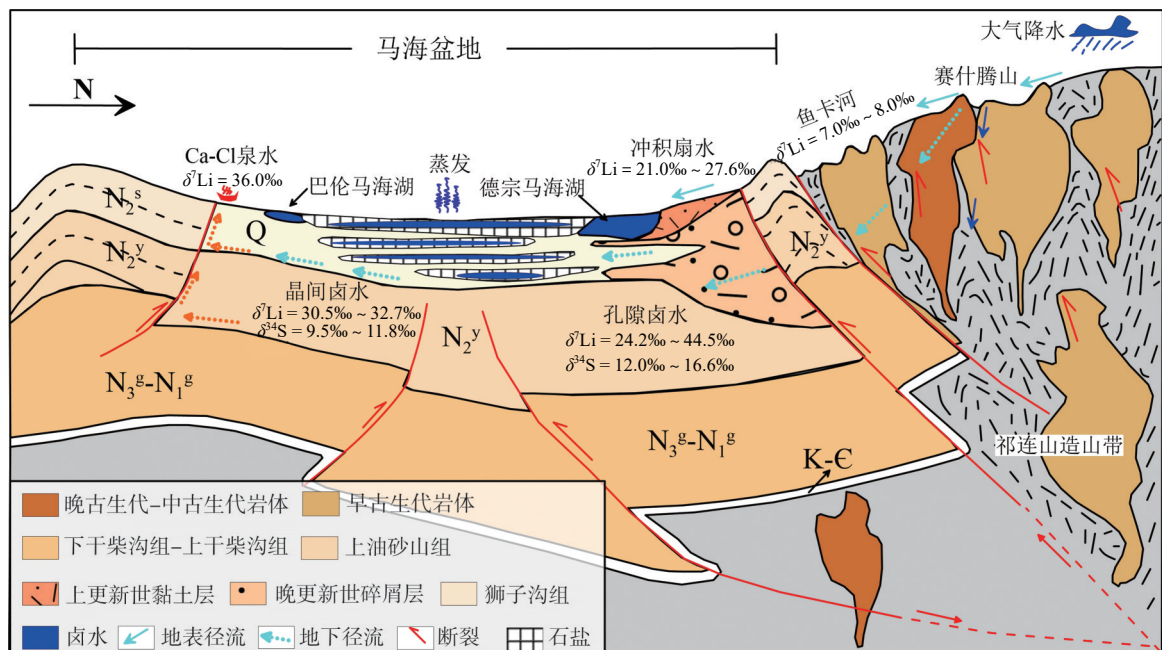


图7 马海盆地晶间卤水成因模式图(改编自文献[19]和[20])

Fig.7 Genetic model diagram of intercrystalline brine in Mahai Basin (adapted from [19] and [20])

5 结论

通过对马海盆地晶间卤水水化学特征及同位素组成特征分析,结论如下:

(1) 研究区晶间卤水为高矿化度弱碱性的 $Cl-SO_4$ 型卤水,主要受蒸发浓缩、盐岩溶滤作用及阳离子交换作用的影响,溶质来源主要为岩盐、钾盐和石膏等矿物。水化学特征表明其封闭性较差,演化程度较低,且受浅层氧化影响。

(2) 氢、氧同位素表明晶间卤水主要来源于赛什

腾山的大气降水及冰雪融水,并经历了水-岩作用和蒸发浓缩;硫同位素反映储层封闭性较差,可能受到深部流体物质补给影响;锂同位素定量分析晶间卤水主要受冲积扇地下水(55.56%~73.71%)和Ca-Cl泉水(26.29%~44.44%)混合补给,外源水体对卤水的形成起到了重要作用。

(3) 溶滤补给和深部补给的混合在晶间卤水的形成和演化中起着关键作用,晶间卤水与砂砾型深层孔隙卤水在成因来源及地球化学过程上存在显著差异。

参考文献

- [1] 袁见齐,霍承禹,蔡克勤.高山深盆的成盐环境——一种新的成盐模式的剖析[J].地质论评,1983,(2):159-165.
- [2] 刘成林,焦鹏程,孙小虹,等.罗布泊盐湖成钾规律研究与找矿进展[J].地质学报,2018,92(8):1551-1570.
- [3] 伊跃军,张秀峰,张利珍,等.中国钾盐资源开发利用现状及建议[J].无机盐工业,2024,56(10):12-19.
- [4] Liu C L, Wang L C, Yan M D, *et al.* The Mesozoic-Cenozoic tectonic settings, paleogeography and evaporitic sedimentation of Tethyan blocks within China: Implications for potash formation[J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 102: 406-425.
- [5] 韩佳欢,郑绵平,乜贞,等.我国深层地下卤水钾、锂资源及其开发前景[J].盐湖研究,2024,32(2):90-100.
- [6] Choubey P K, Kim M S, Srivastava R R, *et al.* Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element: Lithium. Part I: From mineral and brine resources[J]. *Minerals Engineering*, 2016, 89: 119 - 137.
- [7] 周训,曹琴,尹菲,等.四川盆地东部高褶带三叠系地层卤水和温泉的地球化学特征及成因[J].地质学报,2015,89(11):1908-1920.
- [8] 余小灿,王春连,黄华,等.湖北潜江凹陷古近系深层富钾卤水成因及演化[J].地球科学,2022,47(1):122-135.
- [9] 秦成功,许建新,韩积斌,等.柴达木盆地南翼山油田卤水的水化学特征和U、S同位素组成及成因探讨[J].盐湖研究,2024,32(3):40-52.
- [10] Zhong, J, Lin, Y, Wang, *et al.* Origin and formation mechanisms of potassium-and lithium-rich brines in the Triassic Strata of Northeastern Sichuan Basin, South China[J]. *Aquatic Geochemistry*, 2024, 30: 163-178.
- [11] 丁成旺,马玉亮,陈建洲,等.柴达木盆地巴仑马海盐湖黏土沉积矿物学及稀有稀散元素地球化学特征[J].盐湖研究,2024,32(3):32-39.
- [12] 李建森,李廷伟,马云麒,等.柴达木盆地卤水型Li、Rb关键金属矿产元素分布特征及富集机制[J].中国科学:地球科学,2022,52(3):474-485.
- [13] Li Q K, Fan Q S, Wang J P, *et al.* Hydrochemistry, distribution and formation of lithium-rich brines in salt lakes on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Minerals*, 2019, 9(9): 528-543.
- [14] Li Z J, Yang Q C, Ma H Y, *et al.* Isotopic and geochemical interpretation of groundwater under the influences of anthropogenic activities[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 576: 685-697.
- [15] 汤玉兰.青海马海盐湖富钾卤水地球化学特征及其成因研究[D].北京:中国地质大学(北京),2015.
- [16] 岳鑫,刘溪溪,路亮,等.马海盆地深部孔隙卤水矿床水化学特征及成因[J].沉积学报,2019,37(3):532-540.
- [17] Yang F K, Fan Q S, Han G, *et al.* Origin and evolution of deep k-rich confined brine in Mahai Basin, Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Aquatic Geochemistry*, 2024, 30, 239-258.
- [18] Zhao Y J, Wang N, Shen L J, *et al.* Contribution of deep material sources to shallow potash formation of the Quaternary Mahai Salt Lake in the Qaidam Basin: Evidence from isotopes and trace elements[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 95: 2062-2072.
- [19] Song H L, Fan Q S, Li Q K, *et al.* Ca-high water recharge and mixing constrain on evolution and K enrichment of brine deposits in the evaporite basin: Case and analogue study in the Qaidam Basin, Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 632, 130883.
- [20] Fan Q S, Han G, Chen T Y, *et al.* Inheritance recharge of subsurface brine constrains on formation of K-bearing sand-gravel brine in the alluvial fan zone of mountain-basin system on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 645, 132029.
- [21] 陈晶源,汪青川,陈金牛,等.柴北缘马海地区更新统砂砾型深层孔隙卤水成因探讨[J].地质论评,2025:1-13.
- [22] 潘彤,陈建洲,丁成旺,等.柴达木巴伦马海盆地锂稀有轻金属黏土型矿赋存特征[J].黄金科学技术,2023,31(3):359-377.
- [23] 牛新生,黄华,郑绵平.江汉盆地潜江凹陷地下卤水地球化学特征和分布规律[J].地学前缘,2021,28(6):56-65.
- [24] Hardie, L.A.; Eugster, H.P. The evolution of closed-basin brines. *Mineral*[J]. *Soc. Amer. Spec. Pap.* 1970, 3, 273-290.
- [25] 秦西伟,马海州,张西营,等.云南镇沅地区盐泉水成因与找钾研究[J].盐湖研究,2023,31(3):18-28.
- [26] 孙大鹏,李秉孝,马育华,等.青海湖湖水的蒸发实验研究[J].盐湖研究,1995,(2):10-19.
- [27] 张云献,师红杰,卫兴,等.东濮凹陷油田卤水地球化学特征及其指示意义[J].西安石油大学学报(自然科学版),2024,39(6):10-20.
- [28] 余石勇,刘孟,赵元艺,等.西藏麻米错盐湖大型锂硼矿盆地水化学特征[J].地质学报,2022,96(6):2195-2205.
- [29] Ahmed A, Clark I. Groundwater flow and geochemical evolution in the Central Flinders Ranges, South Australia[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 572: 837-851.
- [30] 郭小娇,王慧玮,石建省,等.白洋淀湿地地下水系统水化学变化特征及演化模式[J].地质学报,2022,96(2):656-672.
- [31] Choubey P K, Kim M S, Srivastava R R, *et al.* Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element: lithium. Part I: From mineral and brine resources[J]. *Minerals Engineering*, 2016, 89: 119-137.
- [32] Schoeller H. Qualitative evaluation of ground water resources (in methods and techniques of groundwater investigation and development). *Water Resource Series No.33*, UNESCO, Paris, 1967: 44-52.
- [33] 刘溪溪,岳鑫,袁文虎,等.柴达木盆地西部狮子沟背斜构造区深部卤水水化学特征及演化分析[J].盐湖研究,2019,27(1):73-81.
- [34] 伯英,刘成林,焦鹏程,等.塔里木盆地西南部及北部盐泉水化学特征及找钾指标探讨[J].地球学报,2013,34(5):594-602.
- [35] 李雯霞,张西营,苗卫良,等.柴达木盆地北缘冷湖三号构造油田水水化学特征[J].盐湖研究,2016,24(2):12-18.
- [36] 秦占杰,李庆宽,樊启顺,等.老挝甘蒙钾盐矿床钾镁盐矿层中裂隙水的地球化学特征及其成因探讨[J].地质学报,2018,92(8):1693-1706.
- [37] Craig, H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133, 1702-1703.
- [38] 朱谱成.鱼卡河中下游鱼卡—马海盆地地下水循环模式研究[D].长春:吉林大学,2015.
- [39] Dansgaard, W. Stable isotope in precipitation[J]. *Tellus*, 1964, 16, 436-468.
- [40] 赵佳怡,张薇,马峰,等.雄安新区容城地热田地热流体化学特征[J].地质学报,2020,94(7):1991-2001.
- [41] Fan Q S, Lowenstein Tim K, Wei H C, *et al.* Sr isotope and ma-

- jor ion compositional evidence for formation of Qarhan salt lake, western China. *Chemical Geology*, 2018, 497: 128-145.
- [42] Jochen Hoefs. *Stable Isotope Geochemistry* [M]. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [43] 焦鹏程, 刘成林, 王弭力, 等. 罗布泊盐湖钾盐矿床形成的地球化学研究[J]. *矿床地质*, 2006, 25(S1): 225-228.
- [44] 李庆宽. 察尔汗盐湖卤水硫同位素地球化学特征及影响因素 [D]. 中国科学院研究生院(青海盐湖研究所), 2016.
- [45] 王弭力, 杨智琛, 刘成林. 柴达木盆地北部盐湖钾矿床及其开发前景[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 1-173.
- [46] Yu X C, Liu C L, Wang C L, *et al.* Origin of Li brine-type deposits in the Cretaceous gypsum-bearing formation of the Jitai Basin, South China: Constraints from geochemistry and H, O, Li, B, and Sr isotopes[J]. *Applied Geochemistry* 2022, 139: 105257.

Discussion on the Geochemical Characteristics and Genesis of Intercrystalline Brine in the Mahai Basin, Northern Margin of Qaidam Basin

FENG Ning^{1,2}, QIN Xiwei^{1,2,3*}, MA Yuliang^{4,5,6}, ZHANG Fan^{1,2}, LIU Ruibo^{1,2},
JIANG Ziwen^{1,2}, LIU Chenglin⁷, DING Zhaopeng^{1,2}

(1. *School of Geological Engineering, Qinghai University, Xining, 810016, China*; 2. *Key Laboratory of Cenozoic Resource & Environment in North Margin of the Tibetan Plateau, Xining, 810016, China*; 3. *SDI Xinjiang Lop Nur Potash Salt Co., LTD., Hami, 839000, China*; 4. *Institute of Advanced Studies, China University of Geosciences, Wuhan, 430074, China*; 5. *The Fourth Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Xining, 810001, China*; 6. *Qinghai Key Laboratory of Shale Gas Resources, Xining, 810001, China*; 7. *School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan, 430074, China*)

Abstract: The Mahai Basin, situated in the northern Qaidam Basin, hosts abundant brine resources. However, systematic investigations of intercrystalline brines in the region remain limited, particularly regarding their hydrogeochemical evolution and genesis. This study focuses on the intercrystalline brines of the Mahai Basin, integrating major ion chemistry with stable isotopes (δD , $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{34}\text{S}$, and $\delta^7\text{Li}$) to characterize their hydrogeochemical signatures and elucidate their genetic mechanisms. A conceptual genetic model is subsequently proposed. The intercrystalline brine exhibits high salinity ($\text{TDS} = 315.30 \sim 335.00 \text{ g/L}$) and weak alkalinity ($\text{pH} = 7.67 \sim 8.07$), and is classified as Cl-SO_4 -type brine. Geochemical analyses suggest that solutes are predominantly derived from the dissolution of halite, potash salts, and gypsum. Brine evolution is governed by evaporation, water-rock interactions, and cation exchange, while relatively poor reservoir sealing and weak diagenesis are also indicated. The δD (-38.60‰ to -22.80‰) and $\delta^{18}\text{O}$ values (-1.30‰ to 3.20‰) indicate meteoric or glacial meltwater origin, subsequently modified by significant evaporation and water-rock interaction. The $\delta^{34}\text{S}$ values (9.50‰ to 11.80‰) imply limited reservoir confinement and potential contributions from deep-sourced fluids. The $\delta^7\text{Li}$ values (30.49‰ to 32.74‰) further reveal that the brine is predominantly recharged through mixing of groundwater of alluvial fan (55.56% - 73.71%) and Ca-Cl -type spring water (26.29% - 44.44%). Collectively, these findings demonstrate that the formation of intercrystalline brine in the Mahai Basin is driven by a combination of meteoric water infiltration, mineral dissolution, deep fluid mixing, and evaporative concentration. This study enhances the current understanding of brine genesis in arid continental basins and provides a theoretical framework for resource assessment and the sustainable development of saline groundwater systems.

Key words: Intercrystalline brine; Geochemical characteristics; Stable isotopes; Genesis; The Mahai Basin