

柴达木巴伦马海盆地晶间卤水成因及成矿潜力评价*

冯 宁^{1,2}, 秦西伟^{1,2,3,4**}, 马玉亮^{5,6,7}, 潘 彤⁸, 陈建洲^{6,7}, 丁成旺^{6,7}, 蒋子文^{1,2}, 张 冬^{6,7}, 刘成林⁹, 李庆宽³, 任二峰^{1,2}, 张 帆^{1,2}

(1: 青海大学, 地质工程学院, 西宁 810016)

(2: 青藏高原北缘新生代资源环境重点实验室, 西宁 810016)

(3: 中国科学院青海盐湖研究所, 西宁 810008)

(4: 国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司, 哈密 839000)

(5: 中国地质大学(武汉)高等研究院, 武汉 430074)

(6: 青海省第四地质勘查院, 西宁 810001)

(7: 青海省页岩气资源重点实验室, 西宁 810001)

(8: 青海省地质矿产勘查开发局, 西宁 810001)

(9: 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074)

摘 要: 柴达木巴伦马海盆地卤水资源储量丰富, 然而其成因机理及卤水资源潜力尚不明确。本研究以巴伦马海盆地晶间卤水为研究对象, 开展了元素及氢氧同位素地球化学研究, 系统分析了其水源、溶质来源、演化过程及成因模式, 探讨了钾硼锂资源元素的找矿潜力。研究表明, 巴伦马海盆地北部晶间卤水水化学类型为硫酸镁亚型, 南部以氯化物型水为主, 卤水溶质主要源于石盐、钾盐和石膏等矿物的溶解, 蒸发浓缩、水岩反应及阳离子交换作用控制了卤水的水化学过程, 南部氯化物型水可能受沿断裂渗流深部 Ca-Cl 水体影响。水化学特征系数显示, 研究区晶间卤水为岩盐溶滤成因水, 含盐地层封闭性差, 变质程度较低。氢氧同位素显示, 晶间卤水主要水源为祁连山的大气降水或冰雪融水, 主要补给源为鱼卡河水和流经冲积扇的浅层地下水, 强烈的蒸发浓缩和水岩作用对晶间卤水矿床的形成产生了重大影响。南北地区水化学类型和空间分布的差异与这两种来源的补给和混合有着根本的联系, 可概括为巴伦马海盆地晶间卤水“溶滤补给+深部补给”二元成矿模式。研究区晶间卤水钾硼锂资源潜力较大, 综合水化学特征系数, 赋卤层厚度、区域成盐演化过程, 钻孔 ZK7618、ZK8014、ZK8024 和 ZK8431 附近可能为找矿有利靶区。

关键词: 卤水成因; 水化学特征; 氢氧同位素; 盐岩溶滤; 蒸发浓缩; 成矿潜力

Origin and mineralization potential evaluation of intercrystalline brine formation of the Balun Mahai Basin, Qaidam*

Feng Ning^{1,2}, Qin Xiwei^{1,2,3,4**}, Ma Yuliang^{5,6,7}, Pan Tong⁸, Chen Jianzhou^{6,7}, Ding Chengwang^{6,7}, Jiang Ziwen^{1,2}, Zhang Dong^{6,7}, Liu Chenglin⁹, Li Qingkuan³, Ren Erfeng^{1,2} & Zhang Fan^{1,2}

(1: School of Geological Engineering, Qinghai University, Xining 810016, P.R.China)

(2: Key Laboratory of Cenozoic Resource & Environment in North Margin of the Tibetan Plateau, Xining 810016, P.R.China)

* 2024-10-21 收稿; 2024-04-12 收修改稿。

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(63000000024T000002987)和青海大学大学生科研训练计划项目 (SRT202430)联合资助。

** 通讯作者: E-mail: 495975224@qq.com.

(3: *Qinghai Institute of Salt Lake Research, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, P.R.China*)

(4: *SDI Xinjiang Lop Nur Potash Salt Co., LTD., Hami 839000, P.R.China*)

(5: *Institute of Advanced Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, P.R.China*)

(6: *The Fourth Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Xining 810016, P.R.China*)

(7: *Qinghai Key Laboratory of Shale Gas Resources, Xining 810016, P.R.China*)

(8: *Qinghai Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Xining 810016, P.R.China*)

(9: *School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, P.R.China*)

Abstract: The Balun Mahai Basin of Qaidam is characterised by the presence of substantial brine resources; however, further research is required to ascertain the genetic mechanism and potential of these resources. The present study focuses on the intercrystalline brine in the Balema Lake Basin, conducting geochemical research on elements and hydrogen-oxygen isotopes to systematically analyse its water source, solute origins, evolution process, and genesis model. The study also explores the mining potential of potassium, boron, and lithium elements. The results indicate that the intercrystalline brine in the northern part of the Balema Lake Basin is of the magnesium sulfate subtype, while the southern part predominantly features chloride water. The solutes present in the brine are primarily derived from the dissolution of halite, potassium salts, and gypsum. The water chemistry is controlled by a combination of evaporation, water-rock reactions, and cation exchange. The chloride-type water in the southern region may be influenced by deep Ca-Cl water that is known to flow along faults. The water chemistry characteristics indicate that the intercrystalline brine is formed by halite dissolution, with low metamorphic degree and poor sealing in the salt-bearing layers. Hydrogen-oxygen isotopes indicate that the primary water source of the intercrystalline brine is atmospheric precipitation or snowmelt from the Qilian Mountains, with the predominant recharge sources being the Yuka River and shallow groundwater that courses through the alluvial fan. The impact of strong evaporation and water-rock interactions on the formation of the brine deposits is significant. The differences in water chemistry types and spatial distribution between the northern and southern regions are fundamentally related to the recharge and mixing of these two sources. The genesis of the brine can be summarised as a dual "dissolution recharge + deep recharge" mining model. The study area has been found to have considerable potential for potassium, boron, and lithium resources. The drilling sites ZK7618, ZK8014, ZK8024, and ZK8431 are likely to be favourable targets for mineral exploration, based on the comprehensive water chemistry characteristics, salt layer thickness, regional salt formation evolution process.

Keywords: Brine genesis; Hydrochemical characteristics; Hydrogen-oxygen isotopes; Halite dissolution; Evaporation concentration; Mineralization potential

世界正处于百年之未有大变局，各国对硼、锂、钾等战略性矿产资源的需求量日益增加，尽管中国是全球矿产资源生产第一大国，但战略矿产资源对外依存度居高不下^[1-4]。钾被称为“粮食的粮食”，作为农用钾肥原料，关系着国家农业生产的命脉，是我国严重短缺的战略性矿产资源^[5-6]。锂被称为“21 世纪的能源金属”，是新兴战略关键矿产资源，在新能源、新材料、电池产业以及碳中和领域应用广阔，对保障我国能源安全具有重要意义^[7-8]。硼是重要的非金属战略矿产资源，广泛应用于信息技术、新能源和高端制造等产业^[9]。地下卤水富含硼、锂、钾、铷、铯、溴、碘及重金属铅锌铜等有用元素，储量丰富，元素含量高，是一种可供开发利用的重要液体矿产资源^[10-16]。

柴达木盆地具有典型的“高山深盆”构造环境，周边岩石风化、含盐地层淋滤等作用将有益组分经地表水、地下水携带汇入盆地，使得盆地内蕴藏着丰富的钾、钠、镁、锂、硼、溴、碘等盐类矿产，成为我国主要的盐湖资源富集区^[10,17]。巴伦马海盆地位于柴达木盆地东北部次级构造盆地内，具有丰富的盐湖卤水资源。马海盐湖及其周边盆地的富钾承压卤水和相关矿产资源研究已取得诸多进展。研究表明，卤水的成因复杂，涉及溶滤水与沉积水的混合作用，可能与下伏盐岩层的溶解、蒸发残余等多源性因素相关。此外，K-Mg 元素的变化趋势与盆地演化存在对应关系，对于卤水矿床的评价和利用具有重要意义。河水和高钙水的补给与混合作用对盆地的形成和演化起着关键性作用。近年来，在巴伦马海盆地第四系含盐地层中发现了黏土型锂矿，且该黏土层与卤水矿、固体盐矿共生，能够作为储卤围岩，并通过水岩反应选择性吸附成盐离子。因此，研究晶间卤水的成因机理及元素成矿潜力对于探索黏土地层稀有轻金属矿的富集规

律具有重要意义。尽管已有一定研究基础,但关于赋存在第四系含盐地层中的晶间卤水成因机理、矿层空间分布及元素富集机制仍需进一步深入探讨。

本文通过对巴伦马海盆地晶间卤水、深层孔隙卤水及昆特依盐湖卤水的水化学特征和氢氧同位素特征的对比研究,系统分析了研究区晶间卤水的成因演化模式、水源特征及成盐元素的溶质来源,评估了钾、硼、锂等资源元素的成矿潜力。基于研究结果,本文构建了研究区晶间卤水的二元成矿模式,揭示了卤水矿床的多源性特征及其演化过程,为类似盐湖盆地的资源评价提供了理论依据。研究成果不仅深化了对马海盆地成矿机制的理解,也为未来的资源勘探与开发利用提供了重要的科学指导。

1 研究区概况

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,是中国三大内陆盆地之一^[23]。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,受昆北断裂、阿尔金断裂、宗务隆山断裂构造运动形成北西-南东向展布的汇水盆地^[24-26]。盆地内地形起伏不大,在丘陵和沙漠间的较低洼地区形成彼此隔绝,大小不均的封闭式内陆盐湖次级盆地。这些盐湖次级盆地是柴达木盆地的主要聚积区^[27],内沉积了大面积的第四系松散堆积物和化学盐类沉积物,从而为地下卤水的赋存提供了相应的空间。

研究区位于柴达木盆地东北部次级构造盆地——马海盆地内(38°03'~38°15'W, 94°03'~94°16'E),属大地构造一级单元-柴达木准地台之北侧,横跨柴达木北缘台缘褶皱带,柴北缘残山断褶带,柴达木盆地地台拗,沉积和贮存了丰厚的蒸发岩^[28]。研究区以北为呈北西-南东向分布的赛什腾山,属中~高山,海拔3500 m以上,南侧为丘陵盆地,盐渍土覆盖的平原。研究区大部分地区为平坦的盐湖沉积平原,海拔2743~2750 m,比高一般2~5 m,西部及南部为风蚀残丘地形。区内总的地势特点为西高东低,南高北低,区域上地势总的为四周高,中间低,为周边的各大水系及盐分汇集于此的封闭性盆地。巴伦马海盆地作为马海盆地的一部分,属柴达木盆地内的更新世-全新世次级成盐盆地,故研究区内地层、构造及沉积特征等基本沿袭了整个马海盆地的地质特征^[29](图1)。区域范围内绝大部分地区分布新生界、元古界和中生界地层。总体来说,区内沉积厚度较大,具有较为复杂地质构造和频繁的岩浆岩活动,加里东期、华力西期、印支-燕山期侵入岩均在区内有分布。巴伦马海盆地构造较为简单,以新生代褶皱为主,褶皱、断裂构造发育。研究区褶皱强烈,北部地层为向南西倾的单斜层,南部地层总的向北西倾的宽缓褶皱,构成巴伦马海成盐盆地的向斜构造特征。断层均为喜山晚期以来的新构造活动断裂,经物探资料证实,巴伦马海盆地北侧有隐伏断裂存在、规模最大者即鸵南断裂F1,平行于赛什腾山褶皱带发育,断裂的总体走向北西,在噶斯河下游被北东向隐伏断裂逆时针错开,断层向南东延伸。根据遥感资料,在盆地内存在若干条北西向的深大断裂带,在盆地西北地区存在北东向的断裂。研究区主要断裂构造有北东向的鹊南断裂F2和北西向的潜南断裂F3,这两条主要断裂带构成了巴伦马海盆地的主体。研究区南部还存在着北西向的冷七断裂F4^[30-31]。研究区第四纪地层的沉积特征、矿体特征、石盐、钾盐以及卤水受断裂带控制明显,断裂对研究区内地下卤水的成矿及渗流具有重要意义。

巴伦马海盆地内第四系地层广泛分布,地表出露地层有全新世(Qh)和晚更新世(Qp3),中更新世(Qp2)和早更新世(Qp1)地层在地表未出露,仅在钻孔中下部才见到,各类地层之间关系主要为整合接触和不整合接触(附图1)。对比第四纪各时期沉积特征发现巴伦马海盆地经历了水体由深变浅的过程,早更新世(Qp1)主要发育冲积相、浅湖相滨湖相,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)粘土夹淤泥、石盐岩相。晚更新世(Qp3)发育的地层主要以发育浅湖相为主,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,主要为粘土、淤泥、含粉砂粘土互层岩相。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^[29,33-35]。整体反映气候由早更新世相对湿润的半干旱环境向全新世的干旱环境演变,湖盆面积沿着中(早更新世)→大(中-晚更新世)→小(全新世)趋势演变,且沉积中心具有自北向南迁移的特征。

巴伦马海盆地的气候特点表现为典型的内陆沙漠型干旱气候^[36],降水稀少且蒸发强烈,年平均气温为

2.1 °C，多年平均降水量为 29.6 mm，蒸发度为 3040 mm。研究区的主要河流如鱼卡河、噶喇河和南八仙河均属内流水系，巴伦马海湖为区内唯一的地表水体，并位于水文地质单元的最终排泄区。该地区的地质主要为第四系湖泊相沉积，盐类矿物（如石盐和石膏）占据主导地位。松散的沉积结构和良好的孔隙发育提供了地下水储存空间，干旱气候加速了地下水的蒸发，为卤水的形成提供了基础。根据地下水的赋存条件、水理性质及分布规律，区内地下水类型主要分为松散岩类孔隙卤水和化学岩类晶间卤水。本研究重点为化学岩类晶间卤水，其中卤水层主要由全新世和上更新世的化学沉积物构成，岩性包括含粉砂的石盐、含石膏芒硝的石盐和中粗粒石盐，隔水层为含石膏的砂质粘土(附图 I)。赋卤层孔隙度为 19.26%，给水度为 9.83%，厚度为 0.76~15.90 m，平均厚度为 6.9 m，与基底地形密切相关且与其它层具有较好的水力联系。该层的沉积中心分布在盆地的中部和南部，其中最大盐层厚度分别为 13.10 m 和 15.90 m(图 1b)。

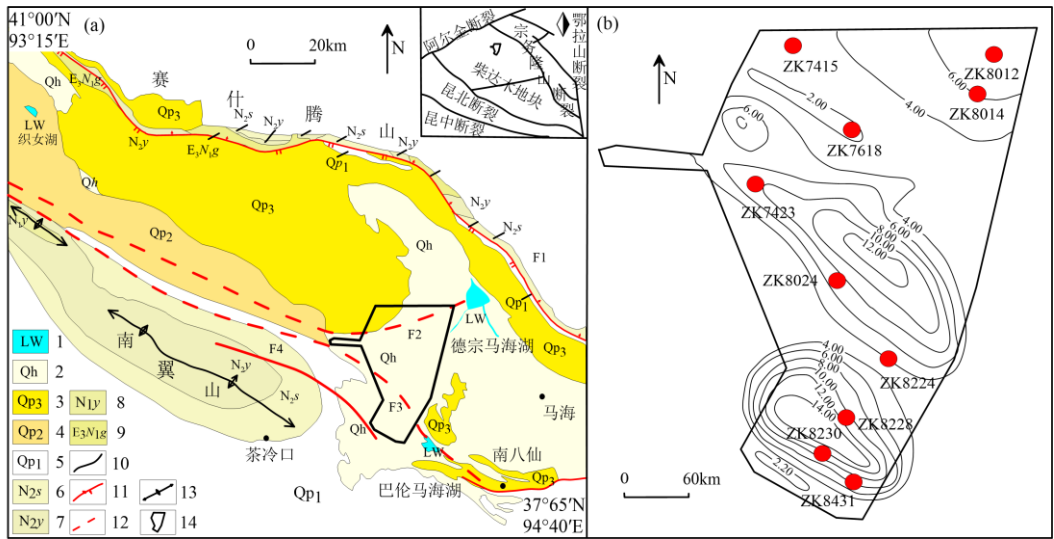


图 1 (a)巴伦马海盆地地质构造简图^[32]; (b)巴伦马海盆地晶间卤水矿层等厚线图及样品采样位置(1-现代湖水; 2-全新世沉积; 3-上更新世沉积; 4-中更新世沉积; 5-下更新世沉积; 6-下狮子沟组; 7-上油砂山组; 8-下油砂山组; 9-上干柴沟组; 10-实测地质界线; 11-实测逆断层; 12-实测平推断层; 13-背斜轴; 14-研究区范围; F1-驼南断裂, F2-鹊南断裂, F3-潜南断裂, F4-冷七断裂)

Fig.1 (a) Geologic structure schematic map of Balun Mahai Basin^[32]; (b) Isopach map and sampling location of intergranular subsurface brine in Balun Mahai Basin

2 样品采集与分析方法

2023 年 6 月，对巴伦马海盆地进行了野外实地考察，并在新进钻孔中采集了 10 件晶间卤水样品。采样点的空间分布如图 1(b) 所示，基本覆盖了研究区晶间卤水沉积中心。样品采集自全新世冲洪积相和湖积相沉积储卤地层，采样深度一般约 10 m。在采集晶间卤水时，严格按照《卤水和盐的分析方法》中卤水样品的采集方法操作，保证所采集样品满足分析检测的要求。为避免其它水体对样品的影响，待钻孔完成取芯工作以后，应先将钻孔中原有的卤水抽出，用拉活塞等方法洗孔，至水清砂净再采集样品。用待采集的现场水样润洗取样瓶 2~3 遍，润洗后的水不要倒回，防止造成人为误差。收集到的晶间卤水样品经过 0.45 μm 过滤器过滤至预清洗的 200 mL 取样瓶中，并立即用封口膜密封瓶口，以防止同位素分馏的发生。样品瓶身详细标注样品名称、编号及采样点等信息。所有水化学及同位素分析均在取样后一周内完成，以确保数据的准确性和代表性。

卤水样品水化学检测分析根据《卤水和盐的分析方法》测定离子含量。本次卤水测试项目有常量元素离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-})含量和微量元素离子(B^{3+} 、 Li^+ 和 Br^-)含量、氢氧

同位素、pH 值、密度以及矿化度(TDS)等,所有分析均在采样后一周内进行。卤水的常、微量元素离子元素含量由中国科学院青海盐湖研究所分析测试中心完成测定。采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)测定 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的浓度,误差小于 5%;用 HCl 滴定 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} ,误差小于 0.3%;采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定微量元素 B_2O_3 、 Li^+ 和 Br^- ,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%;总溶解固体(TDS)为离子质量浓度的总和。经过对水化学测试数据的电荷平衡验证,离子平衡误差在 $\pm 5\%$ 内,表明水样测试结果较为可靠。卤水的氢氧同位素由北京核工业地质研究院分析测试研究中心测定,所用仪器为 Flash EA 元素分析仪和 MAT253 质谱仪。在分析过程中,采用高纯氦气冲洗 Flash EA 元素分析仪,以去除空气并减少 H_2 和 CO 的本底。当炉温达到 1380 $^{\circ}C$ 且本底信号降至 50 mV 以下时,将蒸馏处理过的卤水与过量碳反应,生成 H_2 和 CO 气体,通过色谱柱分离后分别进入质谱 MAT253 进行分析。检测结果以标准平均海洋水(SMOW)作为标准,最后所得的氢氧同位素比率的结果记为 $\delta D_{V-SMOW}(\text{‰})$ 和 $\delta^{18}O_{V-SMOW}(\text{‰})$,分析精度分别优于 $\pm 1\text{‰}$ 和 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

3 结果与讨论

对巴伦马海盆地晶间卤水常、微量元素及氢氧同位素进行分析测试工作,测定结果如附表 1 所示。为进一步研究该区域晶间卤水的成因及溶质来源,本研究选择昆特依盐湖卤水和马海盆地深层孔隙卤水作为对照样品进行比较分析。这种对比有助于揭示不同来源的卤水在元素组成和同位素特征上的差异,从而为研究区晶间卤水的形成机制和溶质来源提供更多参考依据。

3.1 卤水矿化特征及水化学类型

巴伦马海盆地晶间卤水水化学测试结果如表 1, pH 值为 7.40~8.07,密度为 1.21~1.22 g/mL,矿化度为 271.00~331.00 g/L,属高矿化度弱碱性卤水。与砂砾岩型孔隙卤水相比,研究区晶间卤水的 pH 和矿化度较高,可能与卤水在形成过程中经历了溶滤盐岩或强烈的蒸发浓缩作用有关,导致离子浓度升高并富集。因此,推测该区域晶间卤水为典型的内陆蒸发浓缩型卤水。

地下水的水化学类型可以综合反映地下水的赋存条件、水岩反应及其水文地球化学环境^[37]。Piper 图显示(附图 II),研究区晶间卤水、昆特依盐湖卤水和砂砾岩型孔隙卤水的阳离子主要集中在 Na^+ + K^+ 端元(C 区),阴离子落在 Cl^- 端元(G 区),表明这些卤水样品的阳离子以 Na^+ 、 K^+ 为主,阴离子以 Cl^- 型为主,含少量 SO_4^{2-} ,水化学类型为 $Cl-Na$ 型。瓦良什科水化学分类方法符合高矿化度卤水的自然演化过程,有助于了解卤水的演化过程和阶段,并预测卤水的演化方向及析盐种类^[38]。研究区晶间卤水的瓦良什科水化学类型划分为氯化物型和硫酸镁亚型,以 ZK7423-ZK8024 孔一线为界,北部为硫酸镁亚型水,南部为氯化物型水。昆特依盐湖卤水为硫酸镁亚型,砂砾岩型孔隙卤水为氯化物型。氯化物型卤水一般多见于深成环境,但浅部地下卤水由于阳离子交替吸附作用也可能形成氯化物型卤水^[39]。因此,推测巴伦马海盆地的氯化物型晶间卤水可能受深部水体补给或发生了阳离子交替吸附作用,这与研究区南部存在深大断裂的地质特征一致。

3.2 元素地球化学特征

研究区晶间卤水的矿化度较高,平均值为 312 g/L,北部硫酸镁亚型卤水中 Na^+ > Mg^{2+} > K^+ > Ca^{2+} , K^+ 含量普遍较高,平均为 6.14 g/L,远超单独开采指标 3.1g/L(附表 2),为富钾卤水。南部氯化物型卤水中 Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+ , K^+ 含量平均为 2.37g/L,超综合利用指标 1.5g/L(附表 2), K^+ 含量在研究区北部更具找矿潜力;研究区晶间卤水阴离子中 Cl^- 占主要优势,硫酸镁亚型卤水 SO_4^{2-} 含量和 HCO_3^- 含量均要高于氯化物型卤水。研究区硫酸镁亚型卤水相对贫 Ca^{2+} 、富 SO_4^{2-} ,这可能是由于强烈蒸发浓缩作用使得石膏率先饱和, Ca^{2+} 从卤水中沉淀出来,盐岩溶滤作用使得卤水 K^+ 浓度逐渐超过了 Ca^{2+} 浓度,氯化物开始达到饱和状态,开始出现岩盐沉淀^[10],推测盐岩溶滤作用、蒸发浓缩作用是控制巴伦马海盆地硫酸镁亚型卤水的主控因素。研究区氯化物型卤水 Ca^{2+} 和 Cl^- 含量较高,与砂砾岩型孔隙卤水相似,推测氯化物型卤水存在深部水体的补给,白云岩化作用造成了 Mg^{2+} 含量减少而 Ca^{2+} 含量增加,同时硫酸盐的还原作用造成了 SO_4^{2-} 的减少,所以深部卤体经断裂的渗流作用补给是研究区氯化物型卤水水化学演化的主控因素。

卤水中微量元素 B_2O_3 、Li 和 Br 的含量变化，可以指示卤水的浓缩程度和卤水流经岩层的沉积环境^[41-42]，卤水浓缩程度越高、盐类矿物沉积阶段越晚，盐类矿物及残留液中 B_2O_3 和 Br 含量越高^[43]。研究区晶间卤水微量元素绝对含量较低，但相对于昆特依盐湖卤水和砂砾岩型孔隙卤水更加富集硼锂。具体来看，研究区晶间卤水 B_2O_3 平均含量 0.46 g/L，超过综合利用工业指标 0.4g/L(附表 2)，显示其在该指标上具有一定的经济潜力。硫酸镁亚型卤水 Li 平均含量为 15.63 mg/L，已达到综合利用工业指标 13.1 mg/L (附表 2)；相比之下，氯化物型卤水 Li 平均含量为 5.20 mg/L，未达到综合利用工业指标(附表 2)。Br 含量为平均含量 32.11 mg/L，均未达到综合利用工业指标(附表 2)，远远低于海水的平均值(67.00 mg/L)，间接指示研究区晶间卤水为陆相成因，具有典型内陆盐湖的特征。

3.3 离子分析及元素相关性分析

Gibbs 通过分析地下水的溶质来源及演化过程，能够揭示水化学演变的主导因素^[44-45]。根据 Gibbs 模型，地下水水化学过程的主要控制因素有大气降水、岩石风化和蒸发浓缩^[46-47]。研究区晶间卤水、昆特依盐湖卤水和砂砾岩型孔隙卤水均落在“蒸发浓缩型”端元(附图 III)，指示蒸发浓缩作用是控制研究区卤水水化学过程的主要因素，大气降水及岩石风化对地下卤水溶质来源贡献较小。

Ca^{2+}/Na^+ 同 HCO_3^-/Na^+ 摩尔比值图可用来定性判断盐岩溶解、硅酸盐岩和碳酸盐岩风化对地下卤水溶质来源贡献^[48]。研究区晶间卤水、昆特依盐湖卤水和砂砾岩型孔隙卤水的分析结果显示，这些水样均落在“蒸发盐岩溶解”端元区，远离“硅酸盐岩风化”和“碳酸盐岩风化”端元(附图 IV)，表明研究区卤水主要受盐岩溶滤作用的控制，而硅酸盐和碳酸盐风化对溶质来源的影响较小。

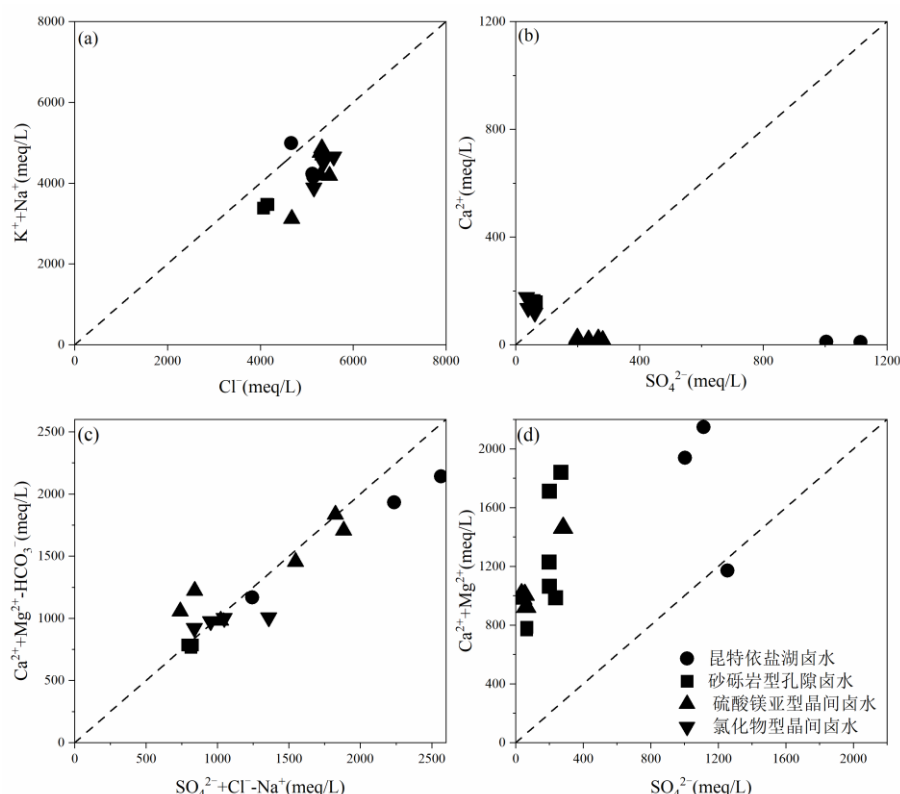


图2 巴伦马海盆地晶间卤水、昆特依盐湖卤水和砂砾岩型孔隙卤水离子比值相关关系

(a) $(K^++Na^++Mg^{2+})/Cl^-$; (b) Ca^{2+}/SO_4^{2-} ; (c) $(Ca^{2+}+Mg^{2+}+HCO_3^-)/(SO_4^{2-}+Cl^- -Na^+)$;
(d) $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/(SO_4^{2-}+HCO_3^-)$

Fig.2 Correlation diagram of water ion ratio of intercrystalline brine in Balun Mahai Basin, brine in Kuntanyi Salt Lake and gravel-type brine in Mahai Basin: (a) $(K^++Na^++Mg^{2+})/Cl^-$; (b) Ca^{2+}/SO_4^{2-} ;

$$(c) (Ca^{2+}+Mg^{2+}-HCO_3^-)/(SO_4^{2-}+Cl^-+Na^+); (d) (Ca^{2+}+Mg^{2+})/(SO_4^{2-})$$

地下水中阴、阳离子比值图可以反映地下水的溶质来源及演化过程^[49]。 $(K^++Na^+)/Cl^-$ 图解可以用来判断 K^+ 、 Na^+ 和 Cl^- 的主要来源^[50-51]。研究区晶间卤水、昆特依盐湖卤水和马海深部孔隙卤水样点几乎都落在 1:1 线上(图 2a), 表明上述卤水具有溶滤卤水成因, K^+ 、 Na^+ 和 Cl^- 基本源于盐岩的溶解作用。此外, K^+ 、 Na^+ 要低于 Cl^- 说明卤水可能发生了阳离子交替吸附作用。 Ca^{2+}/SO_4^{2-} 图解可以用来判断地下水中 Ca^{2+} 的主要来源。研究区硫酸镁亚型晶间卤水和昆特依盐湖卤水样点都分布在 1:1 线以下(图 2b), 说明卤水中 Ca^{2+} 的主要来源为石膏矿物的溶解。与昆特依盐湖卤水相比, 研究区的 Ca^{2+} 浓度较高, 可能发生了强烈的阳离子交换作用。氯化物型晶间卤水和深部孔隙卤水样点都分布在 1:1 线以上, 表明这些卤水中 Ca^{2+} 来源不仅有石膏溶解, 还可能受到深成环境或深部 Ca-Cl 水体的补给影响, 进一步证实了瓦良什科水化学分类对水化学类型的推断。 $(Ca^{2+}+Mg^{2+}-HCO_3^-)/(SO_4^{2-}+Cl^-+Na^+)$ 图解可以用来判断地下水中 SO_4^{2-} 的主要来源^[52-53]。水样中石膏溶解的 Ca^{2+} 浓度和 SO_4^{2-} 浓度分别用 $(Ca^{2+}+Mg^{2+}-HCO_3^-)$ 和 $(SO_4^{2-}+Cl^-+Na^+)$ 表示, 若水样中 SO_4^{2-} 全部来自石膏的溶解, 那么比值应为 1。研究区晶间卤水、昆特依盐湖卤水和砂砾岩型孔隙卤水样点都分布在 1:1 线左右(图 2c), 表明上述卤水中的 SO_4^{2-} 主要来自石膏的溶解。 $(Ca^{2+}+Mg^{2+})/(SO_4^{2-})$ 图解可以用来判断 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的主要来源, 研究区晶间卤水、昆特依盐湖卤水和马海深部孔隙卤水样点几乎都落在 1:1 线以上(图 2d), 表明研究区晶间卤水、昆特依盐湖卤水和马海深部孔隙卤水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要来自于石膏等硫酸盐矿物的溶解。

$[(Ca^{2+}+Mg^{2+})-(SO_4^{2-}+HCO_3^-)]/(Na^++K^+-Cl^-)$ 图解可以用来判别地下水阳离子交替吸附作用, 认为靠近 $Y=-X$ 直线的地下水经历了强烈的阳离子交替吸附作用^[54]。CAI 指数可用于分析地下水发生阳离子交替吸附作用的方向及强弱^[55], 计算公式如(1)、(2)所示:

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

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

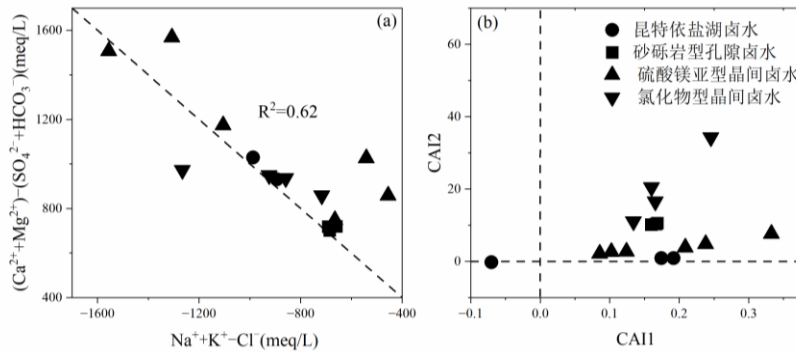


图 3 巴伦马海盆地晶间卤水、昆特依盐湖卤水和砂砾岩型孔隙卤水:

(a) $(Ca^{2+}+Mg^{2+})-(SO_4^{2-}+HCO_3^-)-(Na^++K^+-Cl^-)$; (b) CAI1-CAI2

Fig.3 Intercrystalline brine in Balun Mahai Basin, brine in Kuntayi Salt Lake and gravel-type brine in Mahai Basin: (a) $(Ca^{2+}+Mg^{2+})-(SO_4^{2-}+HCO_3^-)-(Na^++K^+-Cl^-)$; (b) CAI1-CAI2

当地下水中 K^+ 和 Na^+ 被吸附, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 被解吸时, CAI 均表现为正值, 即为正向阳离子交换作用, 反之 CAI 均表现为负值, 即为负向阳离子交换作用。氯碱指数的绝对值越大, 表明发生的阳离子交替吸附程度越高。研究区晶间卤水、昆特依盐湖卤水和马海深部孔隙卤水样点几乎都落在 $Y=-X$ 直线附近(图 3a), 表明弱碱性环境促使了研究区晶间卤水、昆特依盐湖卤水和马海深部孔隙卤水离子交换作用, 导致地下卤水的 Na^+ 浓度由于释放而升高, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 由于吸附而浓度降低, 指示阳离子交替吸附对卤水化学组分的

变化起到了十分重要的作用。研究区晶间卤水、昆特依盐湖卤水和马海深部孔隙卤水样点的 CAI 都大于 0(图 3b)，表明在卤水演化过程中阳离子发生了正向的交替吸附作用，导致卤水的 K^+ 和 Na^+ 被吸附而浓度降低， Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 由于被解吸而浓度升高。对比分析表明，氯化物型卤水的交替吸附作用较强，可能与其深部水体的来源和水化学演化过程中的深成环境特征有关，与前文的离子分析结果相吻合。

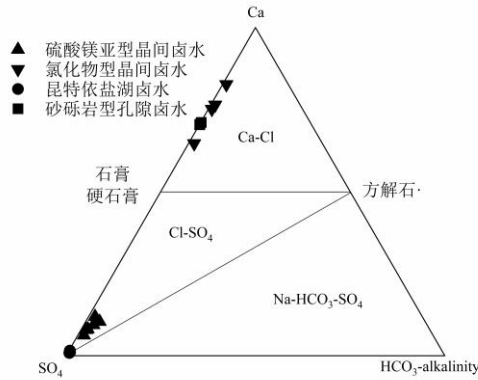


图 4 巴伦马海盆地晶间卤水、昆特依盐湖卤水和砂砾岩型孔隙卤水 $Ca-SO_4-HCO_3$ 三元图
Fig.4 $Ca-SO_4-HCO_3$ of intercrystalline brine in Balun Mahai Basin, brine in Kuntayi Salt Lake and gravel-type brine in Mahai

地下卤水通常赋存在岩盐分布区，可反映卤水流经岩盐层溶滤和水体演化的信息^[56-57]。 $Ca-SO_4-HCO_3$ 三元相图可以反映地下水化学成分演变，富 $Cl-SO_4$ 卤水成因主要有硫化矿物或自然硫的氧化，风吹石膏的溶滤和埋藏石膏/硬石膏的溶滤和再循环。如图 4 所示，研究区硫酸镁亚型晶间卤水和昆特依盐湖卤水分布在 $Cl-SO_4$ 区域，并向着 SO_4 的终端富集，表明该卤水的物质来源为石膏、硬石膏的溶滤。研究区氯化物型晶间卤水和砂砾岩型孔隙卤水分布在 $Ca-Cl$ 区域，表明研究区氯化物型晶间卤水可能受到深部水体的补给，断裂为深部水体的向上运动提供了潜在的通道。

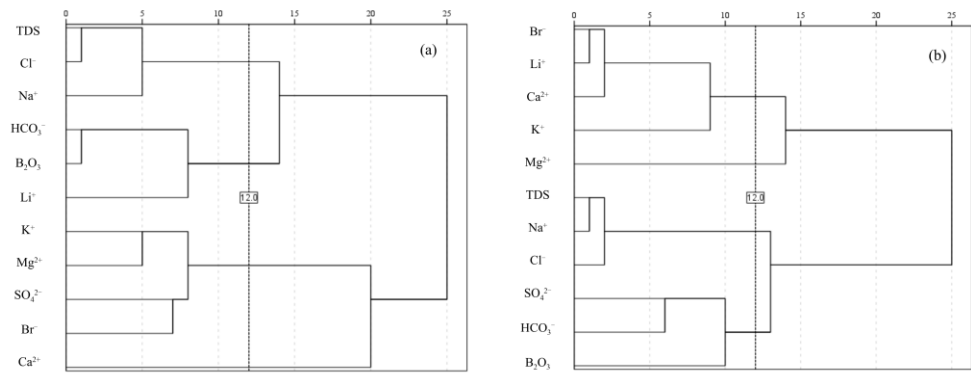


图 5 巴伦马海盆地(a)硫酸镁亚型(b)氯化物型晶间卤水基本组分聚类分析谱系
Fig.5 Cluster analysis of basic components of (a) magnesium sulfate subtype (b) chloride type intercrystalline brine in Balun Mahai Basin

聚类分析方法能有效的揭示地下卤水中主微量离子分类及其相关程度^[51]。如图 5 所示，研究区硫酸镁亚型卤水 TDS 与 Cl^- 、 Na^+ 聚为一类，表明石盐溶滤作用是卤水矿化度增高的主要因素； HCO_3^- 、 B_2O_3 和 Li^+ 聚为一类，表明研究区硫酸镁亚型卤水 B_2O_3 和 Li^+ 主要为陆相来源，即大气降水风化淋滤周围岩石所

致； K^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Br^- 与 Ca^{2+} 聚为一类，表明卤水存在石膏等硫酸盐矿物的溶滤。 Ca^{2+} 和 Br^- 一般来源于油田水， Li^+ 和 B^{3+} 一般来源于火山喷发物^[58]。研究区氯化物型卤水 Br^- 、 Li^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 和 Mg^{2+} 聚为一类，反映了卤水受到深部来源补给的影响；TDS与 Na^+ 、 Cl^- 聚为一类，表明石盐溶解是组成氯化物型卤水溶质来源的主要因素； SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 B_2O_3 聚为一类，说明氯化物型卤水 B_2O_3 主要源于大气降水风化淋滤周围岩石所致。

综上所述，蒸发浓缩作用、盐岩溶滤作用及阳离子交换作用控制了研究区晶间卤水的主要水文地球化学过程，卤水溶质来源主要为石盐、钾石盐、光卤石和石膏等矿物的溶解，并为典型的盐岩溶滤成因提供了证据。研究区第四系地层广泛发育的石盐和含石膏石盐等矿物，也进一步证实了盐岩溶滤作用在巴伦马海盆地晶间卤水形成中的重要作用。

3.4 化学平衡状态与水岩反应

海水蒸发轨迹(SET)可以反映天然水体在蒸发过程中盐分的析出顺序和沉积盆地中的卤水成因，Br作为地下水循环中的保守元素，几乎不参加任何成岩反应，Br离子比值图可用于判断地下水成因和水体的演化过程^[59-62]。

K和Na离子位于SET的上方(附图Va)，表明K和Na离子相对海水蒸发过程富集的，推测研究区晶间卤水主要溶质来源于石盐、钾石盐等盐类矿物的溶滤；Ca和Mg离子位于SET的上方(附图Vb,c)，表明Ca和Mg离子相对海水蒸发过程富集，这种富集可能与阳离子交替吸附作用有关，尤其是在氯化物型卤水中， Ca^{2+} 的富集可能受到深部水体的补给或含钙矿物(如氯化钙)的溶解影响。海水蒸发至岩盐饱和和沉淀之前，大气降水曲线(SET)保持恒定变化，岩盐溶滤成因水及海水和大气降水混合水的Cl相对于Br富集，研究区晶间卤水位于SET上方(附图Vd)，Cl相对Br富集，说明该卤水源于大气降水补给，溶质来源主要为岩盐溶滤。硫酸镁亚型卤水 SO_4 离子位于SET上部(附图Ve)，表明 SO_4 对于海水蒸发过程富集；氯化物型卤水 SO_4 离子位于SET下部，表明 SO_4 对于海水蒸发过程是相对亏损的，氯化物型卤水比硫酸镁亚型卤水相对亏损 HCO_3 ，比砂砾岩型孔隙卤水相对富集 HCO_3 (附图Vf)，上述现象进一步证实研究区氯化物型卤水存在深部水体的补给，白云岩化作用造成了Ca的更加富集，同时硫酸盐的还原作用造成了 SO_4 的亏损。研究区晶间卤水中的B、Li数据点均远高于SET对应值(附图Vg,h)，且大多数样点值高于昆特依盐湖卤水和砂砾岩型孔隙卤水，表明研究区晶间卤水中相对富集B、Li，因此具有开发利用的潜力，在后续的研究和资源评价中要重点关注。研究区晶间卤水样品的TDS(图6i)数据点都位于SET的上方，表明卤水受到了强烈的蒸发浓缩作用和盐岩溶滤作用。

研究表明，水岩反应在沉积盆地中主要存在以下四个过程^[61,63]：(1)斜长石、钾长石的钠长石化；(2)石盐的溶解或沉淀；(3)石膏、硬石膏或方解石的溶解或沉淀；(4)白云石化。Lee Davisson等在1966年建立了盆地流体关于Na和Ca的关系，Ca的富集和Na的亏损被定义为：

$$Ca_{excess} = \frac{2(Ca_{meas} - (Ca/Cl)_{sw} * Cl_{meas})}{40.08} \quad (3)$$

$$Na_{deficit} = \frac{(Na/Cl)_{sw} * Cl_{meas} - Na_{meas}}{22.99} \quad (4)$$

公式中， Ca_{meas} 、 Na_{meas} 和 Cl_{meas} 表示流体中各离子浓度， $(Ca/Cl)_{sw}$ 和 $(Na/Cl)_{sw}$ 表示海水的离子浓度比。 $Na_{deficit}/Ca_{excess}$ 图解可以预测出沉积盆地中不同水岩反应过程，斜长石发生钠长石化会导致1个 Ca^{2+} 被2个 Na^+ 置换且盆地流体线斜率为1，石盐溶解为正斜率的线性关系，白云石化和石膏的溶解会导致Ca的富集。海水在蒸发初期会发生方解石和石膏的沉淀，随着蒸发作用的持续 Ca_{excess} 值垂直下降，导致Ca的亏损；达到石盐饱和状态时， $Na_{deficit}$ 值会保持水平增长，导致Na的亏损。研究区硫酸镁亚型卤水和昆特依盐湖卤水卤水投点相似，所有点投在石盐溶解和石盐饱和至沉淀区域(图6)，表明研究区硫酸镁亚型卤水受强烈的蒸发浓缩作用导致石膏沉淀，这与赋卤层发育含石膏石盐层特征相符合。研究区氯化物型卤水和砂砾岩型孔隙卤水点位于白云石化附近，表明氯化物型卤水发生了白云石化作用。所以研究区晶间卤水的形成与演化受到了石盐溶解和蒸发浓缩的双重影响，深部水体的补给和白云岩化作用也对氯化物型卤水的化学组成产生了影响。

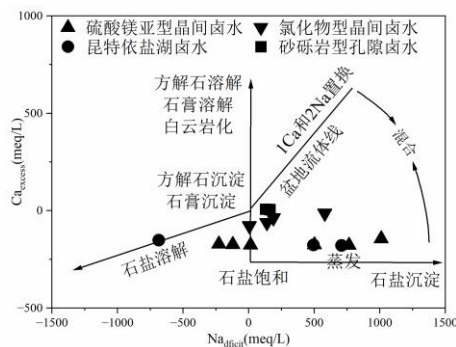


图 6 巴伦马海盆地晶间卤水、昆特依盐湖卤水和砂砾岩型孔隙卤水 $\text{Na}_{\text{deficit}}$ 和 $\text{Ca}_{\text{excess}}$ 的关系^[63]
Fig.6 $\text{Na}_{\text{deficit}}$ and $\text{Ca}_{\text{excess}}$ plot of intercrystalline brine in Balun Mahai Basin, brine in Kuntanyi Salt Lake and gravel-type brine in Mahai Basin^[63]

3.5 氢氧同位素地球化学特征

氢、氧同位素在研究地下卤水成盐演化过程及其物质来源时具有重要指示意义^[56,64]。研究区晶间卤水 δD 值为 -41.20‰ ~ -5.50‰ ，平均值为 -25.92‰ ， $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -2.00‰ ~ -6.50‰ ，平均值为 $+2.37\text{‰}$ (附表 1)。

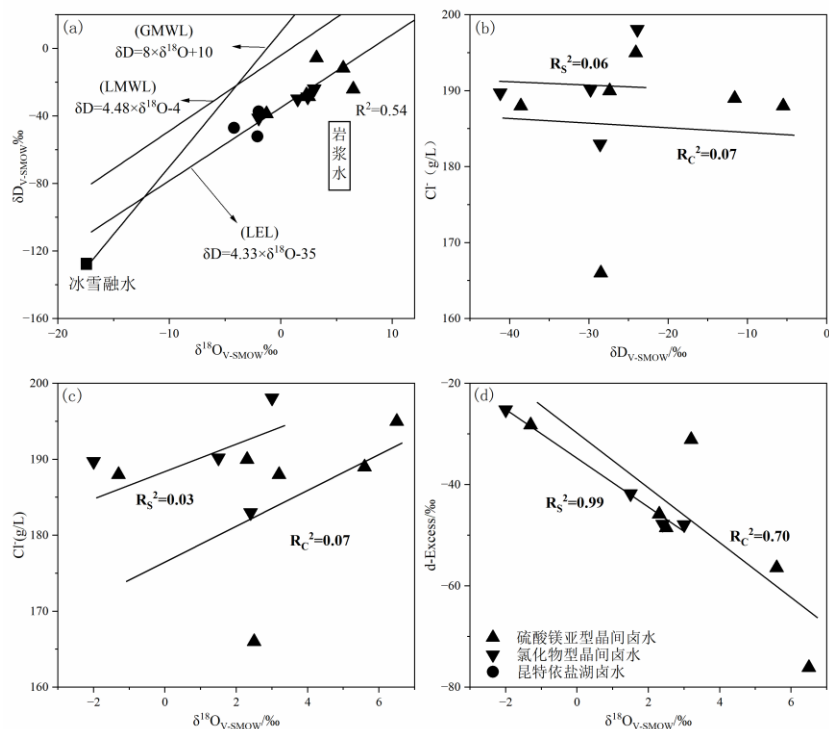


图 7 (a)巴伦马海盆地晶间卤水氢氧同位素地球化学特征;(b) δD 值与 Cl^- 离子;
(c) $\delta^{18}\text{O}$ 值与 Cl^- 离子; (d) $\delta^{18}\text{O}$ 与 d-Excess 关系图

Fig.7 (a) Hydrogen and oxygen isotope geochemical characteristics of intercrystalline brine in Balun Mahai Basin; (b) δD value and Cl^- ion; (c) $\delta^{18}\text{O}$ value and Cl^- ion; (d) Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and d-excess

研究区晶间卤水氢氧同位素投点均在全球大气降水线(GMWL)和柴达木盆地降水线 (LMWL) 附近，

远离岩浆水 ($\delta D=10‰\pm 2‰$, $\delta D=-20‰\pm 10‰$) 控制范围(图 7a), 推断其来源可能是祁连山的大气降水或冰雪融水。祁连山作为水源区域, 其降水量和冰雪融水为巴伦马海盆地的主要水源。经过山脉区域的水流汇集形成河流, 成为后续补给的重要途径。研究区晶间卤水具有很明显的“低氘高氧”特征, 其拟合线 ($\delta D=3.04\delta^{18}O-33.13$, $R^2=0.54$) 与马海盆地蒸发线(LEL)具有相似的演化趋势, 推测其受到了强烈的蒸发作用和水岩反应, 或与含氧盐矿物发生同位素交换, 导致同位素漂移现象。从图 7b 中可以观察到, 研究区晶间卤水 δD 值与 Cl^- 呈轻微负相关且相关性不大, δD 值随 Cl^- 浓度增加并未发生明显富集, 推断蒸发浓缩作用不是研究区晶间卤水溶质的富集的主要原因, 氯的主要来源应为盐岩溶滤作用。研究区晶间卤水 Cl^- 同 $\delta^{18}O$ 值呈轻微正相关(图 7c), 表明强烈的蒸发浓缩作用造成卤水中 ^{18}O 富集^[65]。

全球大气降水因水汽源地、运移过程和气象要素不尽相同, 导致 δD 、 $\delta^{18}O$ 分馏产生差异, 这种差异使 GMWL 与 LMWL 在斜率和截距上产生偏差, 即氘盈余(d-Excess), 定义式为: $d=\delta D-8\delta^{18}O$, 可以衡量大气降水中氢氧同位素平衡分馏被破坏的程度, 可表示在蒸发过程中的强烈程度, 水体中氘盈余值主要受水体来源及水岩作用影响^[66-68]。研究区晶间卤水的氘盈余值为-76.10~-24.80‰, 平均值-45.22‰, $\delta^{18}O$ 与 d-Excess 值呈现拟合较好的负相关性(图 7d), 证实了强烈的蒸发浓缩作用导致了研究区晶间卤水氢、氧同位素富集, 这与当地气候干旱, 降雨稀少有关。研究区晶间卤水还发生了水岩作用, 大气降水补入到地下后发生了同位素交换, 使得晶间卤水中 $\delta^{18}O$ 值升高, 因此最终导致 d 值减小, d 值越小说明发生得水岩反应越强烈。上述研究表明, 巴伦马海盆地“低氘高氧”晶间卤水的主要补给源为鱼卡河水和流经冲积扇的浅层地下水, 对晶间卤水矿床的形成产生了重大影响, 形成了典型的内陆盐湖卤水矿床。

4 晶间卤水成因研究

地下卤水成因复杂, 按其来源分为(1)沉积变质卤水(含盐地层沉积后封存遗留); (2)盐岩溶滤卤水(地表水或地下水渗入地层并溶滤蒸发岩); (3)混合起源的卤水(不同水体的混合)。地下卤水的水化学特征系数因卤水环境的不同而存在明显的差异, 可以用其来综合研究地下卤水成因演化、封闭条件和物质来源^[69]。

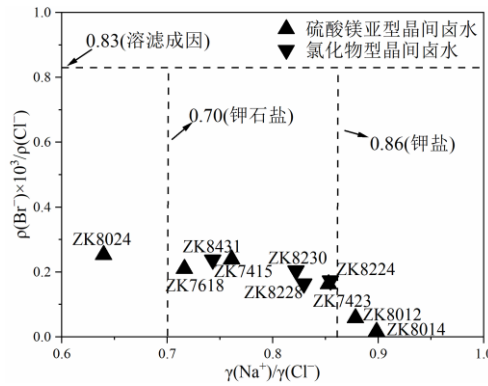


图 8 巴伦马海盆地晶间卤水溴氯系数 $\rho(Br^-)\times 10^3/\rho(Cl^-)$ 与钠氯系数 $\gamma(Na^+)/\gamma(Cl^-)$ 关系图
Fig.8 The relationship between $\rho(Br^-)\times 10^3/\rho(Cl^-)$ and $\gamma(Na^+)/\gamma(Cl^-)$
of intercrystalline brine in Balun Mahai Basin

Cl^- 是溶液中较为稳定的组分, 其离子比例不会因淡化而发生改变^[62]。钠氯系数 $\gamma(Na^+)/\gamma(Cl^-)$ 能反映出卤水中钠盐的富集程度、地层封闭程度和地层水变质程度以及活性等^[56]。溴氯系数 $\rho(Br^-)\times 10^3/\rho(Cl^-)$ 既可以反映卤水蒸发浓缩程度和变质情况, 还可作为钾盐找矿的标志, 离子比值越高说明卤水浓缩程度越高。一般认为, 标准海水的钠氯系数为 0.87, 溴氯系数为 3.4; 岩盐溶滤卤水的钠氯系数大于 0.87, 溴氯系数处于 0.083 到 0.83 之间; 沉积变质卤水的钠氯系数小于 0.87, 溴氯系数则大于 0.83。当地下水溶滤地层中的石盐岩-钾盐时, 该系数降至 0.86 左右; 当地下水溶滤地层中的钾石盐时, 降至 0.70 左右^[43]。研究区晶间卤水钠氯系数值为 0.64~0.90, 溴氯系数值为 0.02~0.25, 表明研究区晶间卤水为岩盐溶滤成因(图 8), 由

于溶滤作用导致地层中的钾盐和盐岩溶解，进而使得钠氯系数偏低，这一现象与离子分析中物质来源的结果以及氢氧同位素分析受到大气降水影响的结论相吻合。

钙镁系数 $n(\text{Ca}^{2+})/n(\text{Mg}^{2+})$ 可反映地下卤水变质程度。深层地下卤水的钙镁系数一般都大于 3，若小于 3，表明地下卤水封闭时间短，变质程度低^[62,70]。研究区硫酸镁亚型晶间卤水的钙镁系数为 0.01~0.02，表明卤水封闭时间短，封闭性较差，变质程度较低，这与第四系地层广泛分布的松散堆积物和化学盐类沉积物相吻合；氯化物型晶间卤水的钙镁系数为 0.15~0.21，相比于硫酸镁亚型晶间卤水更高的钙镁系数，表明研究区南部晶间卤水形成时间较长，变质程度较高，这与水化学组成富 Ca^{2+} 、贫 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 是相一致的，间接证实了其存在深部水体补给，断裂发育对该区晶间卤水的渗流具有重要作用。

脱硫系数 $\gamma(\text{SO}_4^{2-}) \times 50/\gamma(\text{Cl}^-)$ 可用来判断地下卤水储层的封闭程度，硫酸盐在还原环境下发生分解，导致 SO_4^{2-} 含量减少，当该值越小越接近于 0 时，表明卤水储层的封闭还原性越好^[21,70]。氯镁系数 $n(\text{Cl}^-)/n(\text{Mg}^{2+})$ 可反映地下水在运移过程中的水岩反应和离子交替吸附程度，该系数越高，表明卤水的封闭条件越好，封闭时间也就越长^[71-72]。研究区硫酸镁亚型晶间卤水脱硫系数为 1.86~2.65，氯镁系数 2.78~5.54，氯化物型晶间卤水脱硫系数为 0.34~0.58，氯镁系数 6.19~6.68，表明硫酸镁亚型卤水较氯化物型卤水还原不彻底，封闭条件差，封闭时间短，受浅表层氧化作用的影响越强，而氯化物型卤水封闭条件好，存在硫酸盐的还原作用，间接证实了深部水体补给的存在，与研究区南部存在深大断裂带的地质特征是一致的。

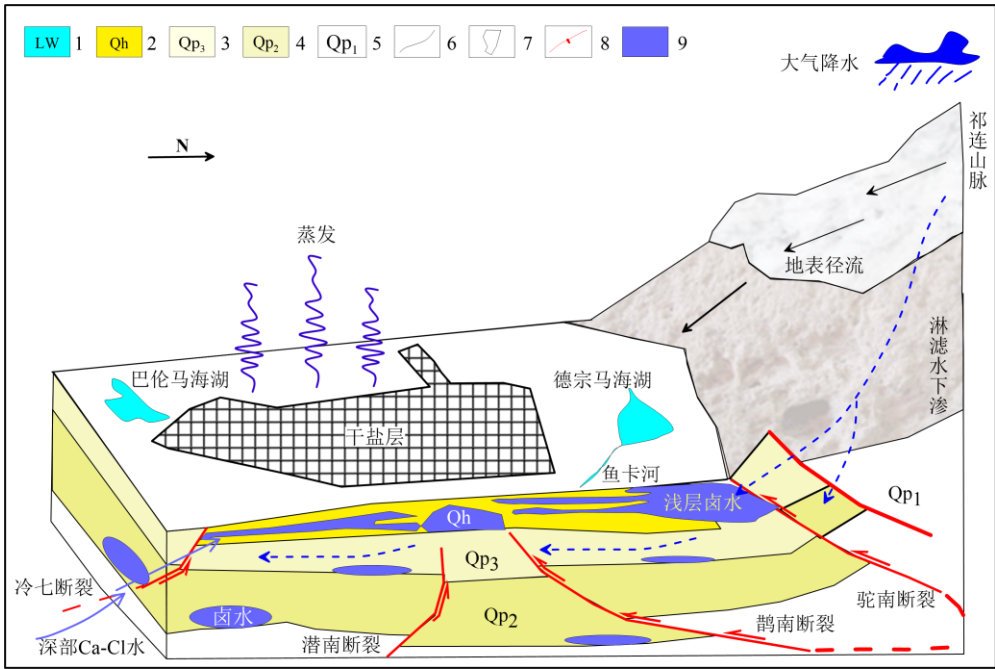


图 9 巴伦马海盆地晶间卤水成因模式简图(1-现代湖水；2-含粉砂的盐类湖泊化学沉积层，以石盐、钾盐和光卤石为主；3-碎屑沉积层与湖泊化学沉积交互沉积层，以黏土岩、砂质黏土岩、粉砂岩等为主；4-湖泊化学沉积层，以黏土岩为主夹粉砂岩；5-湖相碎屑沉积层，为砂质泥岩夹粉砂岩；6-实测地质界线；7-研究区范围；8-断层；9-卤水层)

Fig.9 Schematic diagram of genetic model of intercrystalline brine in Balun Mahai Basin

第四纪以来，喜马拉雅运动仍在不断进行，马海盆地北侧及其周边第三系褶皱带相对稳定，而巴伦马海盆地相对下降，形成了大量的褶皱和断裂^[16-17,20,34,73-74]。中更新世(Qp2)前马海盆地与柴达木盆地保持水力联系，所以二者的物质来源有相同的共性，主要来自盆地周边山区岩石的侵蚀风化、第三系含盐岩系的侵蚀风化以及深层卤水补给。中更新世(Qp2)末期至晚更新世(Qp3)早期第四次新构造运动控制着马海盆地

的发展,使盆地变成封闭盆地,源于北部的水系仍是矿区的主要补给源。距今3万年前开始的第五次新构造运动是一次规模巨大的运动,巴伦马海盆地处于封闭干旱的马海盆地内,地下水起源于北部、东部的祁连山脉高山区的大气降水和冰雪融水,巨厚层状松散堆积物为地下水的储存提供了巨大的空间,干旱的气候条件为卤水的形成提供了良好的外部条件。石盐、钾盐和石膏等矿物的溶解和强烈蒸发浓缩作用使得研究区晶间卤水矿化度升高和有用矿物元素富集。水系来源和补给方式的差异导致了巴伦马海盆地南北地区水化学类型的不同。北部主要由溶滤补给作用影响,形成了富含 K^+ 、 Mg^{2+} 的硫酸镁亚型卤水;而南部除了受潜水补给外,还受到深部水体沿冷七深大断裂带外溢的补给,最终形成了氯化物型卤水。南北地区水化学类型和空间分布的差异与这两种来源的补给和混合有着根本的联系,溶滤补给和深层补给共同贡献了现今巴伦马海盆地晶间卤水的基本面貌(图9)。

5 钾锂硼分布规律与成矿潜力评价

研究区晶间卤水为典型的内陆蒸发浓缩型卤水,极度干旱的气候为卤水浓缩成矿和盐类物质富集提供了必要的条件,大面积的第四系松散堆积物和化学盐类沉积物颗粒间的空隙或晶隙为研究区晶间卤水赋存提供了储卤空间,断裂、地层裂隙的发育为地下流体运移提供了通道,研究区晶间卤水具有丰富的钾锂硼资源,具有一定的成矿远景和找矿潜力。卤水化学组分在盐湖平面上的分布是随着盐湖的浓缩中心而变化的,一般赋卤层厚度越厚,找矿潜力也就越大,在研究区东北部 ZK8012 附近有一沉积中心,盐层厚度最大达 8.00 m,中北部 ZK7618 附近有一沉积中心,盐层厚度最大达 2.50 m,中部 ZJK7423-ZK8024-ZK8224 有一呈北西-南东向沉积中心,盐层厚度最大达 13.10 m,南部 ZK8228-ZK8230 有一呈北西-南东向沉积中心,沉积物最厚达 15.90 m(图 1c),这四个沉积中心理应为找矿靶区。但是由于受蒸发浓缩程度及其他因素的影响,元素含量会有所差异,所以需要结合区域成盐演化过程来进行综合判断。

研究区晶间卤水 B_2O_3 含量 299.00~815.00 mg/L, 平均含量 461.20 mg/L。研究区西南到东北方向 B_2O_3 含量逐渐增加(图 10a), 成硼潜力逐渐增优, ZK8014 位置出现 B_2O_3 含量异常高值, 因此研究区东北部可作为今后找硼的有利靶区。研究区晶间卤水 Li 元素含量 4.40~18.40 mg/L, 平均含量 11.46 mg/L。研究区自南到北 Li 含量逐渐增加(图 10b), 成锂潜力逐渐增优, ZK7618 和 ZK8014 一带出现 Li 含量异常, 因此研究区中北部可作为今后找锂的有利靶区。K 含量是卤水找钾的直接指标, 研究区北部硫酸镁亚型卤水为富钾卤水, K 含量(平均为 6.14 g/L)远超单独开采指标(附表 2), 具有成钾潜力; 南部虽赋卤层较厚, 但可能受深层卤水补给的影响导致钾含量偏低, 找矿潜力较差。研究区 K 含量从东南到西北方逐渐增加, 成钾潜力逐渐增优, 且 ZK7618 钻孔处 K 含量具有异常高值(图 10c), 可作为找钾的有利靶区。钾氯系数和钾含量系数的变化趋势相似(图 10d), 可以反映地下卤水的浓缩程度及钾盐的富集程度。一般认为, 溶滤卤水钾氯系数介于 10~20 时, 表明有异常存在, 大于 20 时, 表明卤水溶解钾盐层可能性极高(牛新生等, 2013; 伯英等, 2015)。研究区晶间卤水钾氯系数为 11.15~50.21, 平均为 24.10, 较高的钾氯系数值反映研究区晶间卤水溶滤地下钾盐层, 地下含盐地层可能达到钾盐或更为晚期的盐类矿物析出阶段, 与钾含量指示的找矿靶区保持一致。溴作为地下水中的保守元素, 随着蒸发浓缩作用的增强, 溴浓度快速增加, 溴氯系数可作为间接找钾指标, 对指导研究区晶间卤水找钾具有重要意义。溴氯系数大于 0.1 表明地下可能存在含钾盐层, 高于 0.35, 基本可以确定地下含有钾盐层。研究区地下卤水溴氯系数为 0.02~0.25, 表明地下可能存在含钾岩层, 可将 ZK7415 附近、ZK8024 附近和 ZK8431 附近作为找钾的远景区(图 10e)。钠氯系数可作为间接找钾指标, 当地下水溶滤地层中的石盐-钾盐岩时, 该系数降至 0.86 左右; 当地下水溶滤地层中的钾石盐时, 降至 0.70 左右, 对指导研究区晶间卤水找钾具有重要意义。研究区中部钠氯系数较低, 可能溶滤了钾盐层, 尤其在 ZK7618 和 ZK8024 附近、ZK8431 附近出现异常(图 10f), 表明地下可能存在含钾岩层, 可作为找钾的有利靶区。

综合分析晶间卤水的赋卤层厚度和一系列找矿指标, 表明研究区晶间卤水为溶滤卤水成因, 将 ZK8014 和 ZK8224 一带作为找硼的有利靶区, ZK7618 和 ZK8014 一带作为找锂的有利靶区, ZK7618、ZK8024 和 ZK8431 附近作为找钾的有利靶区, 在 ZK7415 附近虽也出现了明显的钾元素异常分布特征, 但由于赋卤层厚度相对较薄, 钾资源富集程度较低。

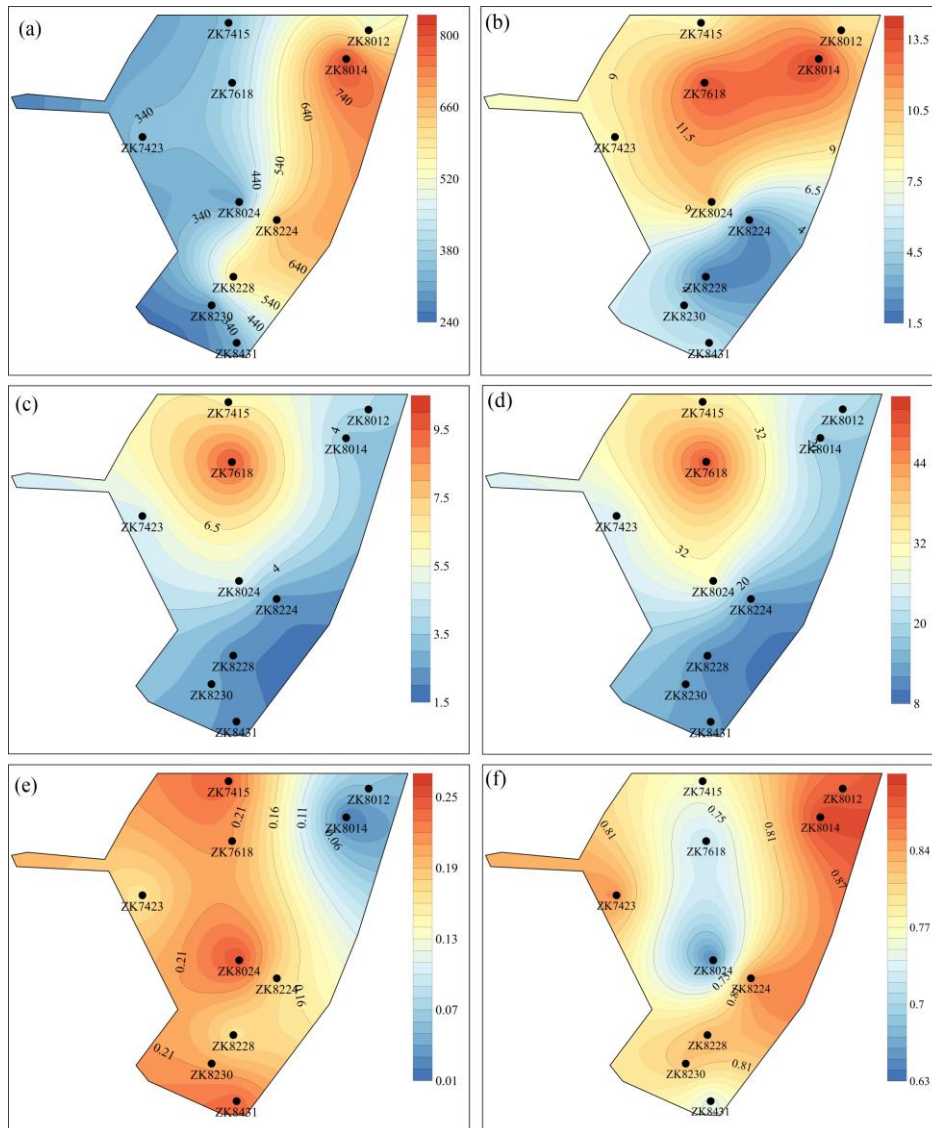


图 10 巴伦马海盆地晶间卤水(a) B_2O_3 含量; (b)Li 含量;(c)K 含量;(d)钾氯系数;
(e)溴氯系数;(f)钠氯系数分布等值线图

Fig.10Contour map of intercrystalline brine distribution about (a) $\rho(B_2O_3)$; (b) $\rho(Li)$; (c) $\rho(K)$;
(d) $\rho(K^+) \times 10^3 / \rho(Cl^-)$; (e) $\rho(Br^-) \times 10^3 / \rho(Cl^-)$; (f) $\gamma(Na^+) / \gamma(Cl^-)$ in Balun Mahai Basin

6 结论

通过对巴伦马海盆地晶间卤水水化学特征及氢氧同位素特征研究，结论如下：

- 1) 研究区晶间卤水属高矿化度弱碱性卤水，水化学类型以 ZK7423—ZK8024 孔一线为界，北部为硫酸镁亚型水，南部为氯化物型水。卤水主要受蒸发浓缩作用、盐岩溶滤作用及阳离子交换作用的控制，石盐、钾石盐、光卤石和石膏等矿物的溶解为晶间卤水提供了溶质来源。
- 2) 氢氧同位素研究表明，研究区“低氘高氧”晶间卤水来源于大气降水或冰雪融水，同位素漂移和氡盈余现象表明卤水受到了强烈的水岩反应和蒸发浓缩作用。
- 3) 水化学特征系数表明，研究区地下卤水封闭性条件较差，在迁移过程中发生了强烈的水岩反应和离

子交替吸附作用,为典型的岩盐溶滤成因水,南部氯化物型卤水除有大气降水补给外,还存在深部水体的补给,二者掺杂形成氯化物型卤水,可概括为巴伦马海盆地“溶滤补给+深部补给”二元成矿模式。

4)综合水化学找矿指标、赋卤层厚度、区域成盐演化特征,划定了 ZK7618、ZK8014、ZK8024、ZK8431 附近为资源元素钾硼锂潜在的找矿靶区,具有一定的成矿远景。

7 附件

附图 I-附图 V, 附表 I-附表 II 见电子版 (DOI: 10.18307/2026.0127)。

8 参考文献

- [1] Liu CL, Wang LC, Yan MD *et al.* The Mesozoic-Cenozoic tectonic settings, paleogeography and evaporitic sedimentation of Tethyan blocks within China: Implications for potash formation. *Ore Geology Reviews*, 2018, **102**: 406-425. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2018.09.002.
- [2] Li JS, Cai JF, Fan QS *et al.* Metallogenic geochemical system of K, B and Li resources in salt lakes of Qaidam Basin. *Journal of Salt Lake Research*, 2022, **30**(3): 12-20. DOI: 10.12119/j.yhyj.202203002. [李建森, 蔡进福, 樊启顺等. 柴达木盆地盐湖 K、B、Li 资源的成矿地球化学系统. 盐湖研究, 2022, **30**(3): 12-20.]
- [3] Tang J, Wang J, Chu Y *et al.* Lithium resource situation and countermeasures under new energy development strategy. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023(6): 71-76. [唐珏, 王俊, 储瑶等. 新能源发展战略下锂资源形势与对策. 矿产综合利用, 2023(6): 71-76.]
- [4] Pan T, Jia JT, Li DS *et al.* Metallogenic series and prospecting direction of salt and groundwater deposits in Qaidam Basin. *Journal of Earth Science and Environment*, 2024, **46**(01): 96~113. DOI:10.19814/j.jese.2023.10007. [潘彤, 贾建团, 李东生等. 柴达木盆地盐类及地下水矿床成矿系列与找矿方向. 地球科学与环境学报, 2024, **46**(1): 96-113.]
- [5] Wang ML, Liu CL, Jiao PC. Research progress and development status of potassium salt deposit in Lop Nur Salt Lake. *Geological Review*, 2006, (6): 757-764. DOI:10.16509/j.georeview.2006.06.005. [王弭力, 刘成林, 焦鹏程. 罗布泊盐湖钾盐矿床调查科研进展与开发现状. 地质论评, 2006, (6): 757-764.]
- [6] Qi ZY, Qu XR, Ma SL *et al.* Operational report of China's potassium fertilizer industry in 2018 and its development prediction. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2019, **34**(2): 1-4. [亓昭英, 屈小荣, 马锁立等. 2018 年我国钾肥行业运行报告及发展预测. 磷肥与复肥, 2019, **34**(2): 1-4.]
- [7] Choubey PK, Kim MS, Srivastava RR *et al.* Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element: Lithium. Part I: From mineral and brine resources. *Minerals Engineering*, 2016, **89**: 119-137. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.01.010.
- [8] Ding T, Zheng MP, Peng SP *et al.* Extracting lithium from salt lake with a high magnesium-to-lithium ratio: Research progress and prospect of lithium salt adsorbents. *Science & Technology Review*, 2020, **38**(14): 94-101. [丁涛, 郑绵平, 彭苏萍等. 盐湖提锂工艺——高镁锂比盐湖锂盐吸附剂研发进展. 科技导报, 2020, **38**(14): 94-101.]
- [9] Wang CL, Meng LY, Liu CL *et al.* A study of the genesis of Paleocene underground brine boron deposits in Jiangling Depression. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2021, **40**(1): 1-13. [王春连, 孟令阳, 刘成林等. 江陵凹陷古新世地下卤水型硼矿成因研究. 岩石矿物学杂志, 2021, **40**(1): 1-13.]
- [10] Yuan JQ, Huo CY, Cai KQ. Salt-forming environment in alpine basin: analysis of a new salt-forming model. *Geological Review*, 1983, (2): 159-165. DOI:10.16509/j.georeview. 1983.02.008. [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. 地质论评, 1983, (2): 159-165.]
- [11] Liu WG, Xiao YK, Peng ZC *et al.* Boron concentration and isotopic composition of halite from experiments and salt lakes in the Qaidam Basin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, **64**(13): 2177-2183. DOI: 10.1016/S0016-7037(00)00363-X.
- [12] Christmann P, Gloaguen E, Labbé JF *et al.* Global lithium resources and sustainability issues. *Lithium Process Chemistry*. Amsterdam: Elsevier, 2015: 1-40. DOI: 10.1016/b978-0-12-801417-2.00001-3.
- [13] Liu CL, Jiao PC, Sun XH *et al.* Research on potash forming and exploration progress in potash deposits in the lop nur salt lake. *Acta Geologica Sinica*, 2018, **92**(8): 1551-1570. [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. 地质学报, 2018, **92**(8): 1551-1570.]
- [14] Gil-Alana LA, Monge M. Lithium: Production and estimated consumption. Evidence of persistence. *Resources Policy*, 2019, **60**: 198-202. DOI: 10.1016/j.resourpol.2019.01.006.
- [15] Yu XC, Wang CL, Huang H *et al.* Origin and evolution of deep-seated K-rich brine in Paleogene of Qianjiang depression, Hubei Province. *Earth Science*, 2022, **47**(1): 122-135. [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. 地球科学, 2022, **47**(1): 122-135.]
- [16] Pan T, Chen JZ, Ding CW *et al.* Supernormal enrichment of lithium, rubidium and cesium and its development potential in the clay of salt lake of Qaidam

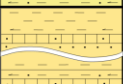
- Basin. *Geology in China*, 2023, **50**(6): 1925-1927. [潘彤, 陈建洲, 丁成旺等. 柴达木盆地盐湖黏土中锂、铷、铯超常富集及其开发潜力. 中国地质, 2023, **50**(6): 1925-1927.]
- [17] Pan T, Zhang JM, Li HP *et al.* Division of qaidam basin salt mineral metallogenic units. *Journal of Jilin university (earth sciences)*, 2022, **52**(5): 1446-1460. [潘彤, 张金明, 李洪普等. 柴达木盆地盐类矿产成矿单元划分. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, **52**(5): 1446-1460.]
- [18] 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[学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2015.
- [19] Yue X, Liu XX, Lu L *et al.* Hydrochemical characteristics and genesis of deep pore brine deposit in Mahai Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, **37**(3): 532-540. DOI:10.14027/j.issn.1000-0550.2018.160. [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. 沉积学报, 2019, **37**(3): 532-540.]
- [20] Yang FK, Fan QS, Han G *et al.* Origin and evolution of deep K-rich confined brine in Mahai Basin, Qinghai-Tibet Plateau. *Aquatic Geochemistry*, 2024, **30**(3): 239-258. DOI: 10.1007/s10498-024-09424-9.
- [21] Song HL, Fan QS, Li QK *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-Tibet Plateau. *Journal of Hydrology*, 2024, **632**: 130883. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.130883.
- [22] Ding CW, Ma YL, Chen JZ *et al.* Mineralogy and geochemical characteristics of rare elements in clays from balun Mahai salt lake of Qaidam Basin. *Journal of Salt Lake Research*, 2024, **32**(3): 32-39. DOI: 10.3724/j.yhyj.2024005. [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. 盐湖研究, 2024, **32**(3): 32-39.]
- [23] Tang LJ, Jin ZJ, Dai JS *et al.* Regional fault systems of Qaidam basin and adjacent orogenic belts. *Earth Science*, 2002, **27**(6): 676-682. DOI: 10.3321/j.issn:1000-2383.2002.06.004. [汤良杰, 金之钧, 戴俊生等. 柴达木盆地及相邻造山带区域断裂系统. 地球科学, 2002, **27**(6): 676-682.]
- [24] Wang E, Burchfiel BC. Late Cenozoic right-lateral movement along the Wenquan fault and associated deformation: Implications for the kinematic history of the Qaidam basin, northeastern Tibetan Plateau. *International Geology Review*, 2004, **46**(10): 861-879. DOI: 10.2747/0020-6814.46.10.861.
- [25] Wang J, Wang YJ, Liu ZC *et al.* Cenozoic environmental evolution of the Qaidam Basin and its implications for the uplift of the Tibetan Plateau and the drying of central Asia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, **152**(1/2): 37-47. DOI: 10.1016/S0031-0182(99)00038-3.
- [26] He Z, Zhang XY, Huang YM *et al.* Cenozoic tectonic movements of the north Qaidam basin and their effects on the evolution of salt lakes. *Journal of Salt Lake Research*, 2016, **24**(1): 1-7. [何照, 张西营, 黄聿铭等. 柴达木盆地北部新生代构造运动及其对盐湖演化的影响. 盐湖研究, 2016, **24**(1): 1-7.]
- [27] Ma X, Wang QC, Zhao YJ *et al.* Since the Middle Pleistocene sedimentary characteristics and environment evolution and enrichment of brine in the east salt lake of Mohair. *Geology of Chemical Minerals*, 2018, **40**(1): 1-6. [马骁, 王青春, 赵艳军等. 马海盐湖东部中更新世以来沉积特征、环境演变与卤水富集. 化工矿产地质, 2018, **40**(1): 1-6.]
- [28] 王弭力, 杨智琛, 刘成林等. 柴达木盆地北部盐湖钾矿床及其开发前景. 北京: 地质出版社, 1997.
- [29] Long PY, Zhao YJ, Hu YF *et al.* Occurrence characteristics and genetic study of potassium salt minerals in low grade solid potassium ore in the north section of Mahai salt lake. *Acta Geoscientica Sinica*, 2022, **43**(3): 338-346. [龙鹏宇, 赵艳军, 胡宇飞等. 马海盐湖北部矿段低品位固体钾矿中钾盐矿物的赋存特征及成因探讨. 地球学报, 2022, **43**(3): 338-346.]
- [30] Cui QG, Hou XX, Lai YW *et al.* Study on metallogenic regularities and metallogenic predication of potassium salt deposit in Zongmahaihu area of Qaidam Basin in Qinghai Province. *Shandong Land and Resources*, 2019, **35**(10): 17-25. [崔庆岗, 侯新星, 来永伟等. 柴达木盆地宗马海湖区钾盐矿床成矿规律与成矿预测研究. 山东国土资源, 2019, **35**(10): 17-25.]
- [31] Yao FJ, Jiao PC, Zhao YJ *et al.* Remote sensing identification of hidden halogen controlled structures in dry salt Lakes: A case study of Mahai Salt Lake. *Acta Geologica Sinica*, 2021, **95**(7): 2225-2237. [姚佛军, 焦鹏程, 赵艳军等. 干盐湖区隐伏控卤构造遥感识别研究—以马海盐湖为例. 地质学报, 2021, **95**(7): 2225-2237.]
- [32] Pan T, Chen JZ, Ding CW *et al.* Occurrence characteristics of lithium rare light metal clay-type deposits in Balunmahai Basin of Qaidam basin. *Gold Science and Technology*, 2023, **31**(3): 359-377. [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. 黄金科学技术, 2023, **31**(3): 359-377.]
- [33] Wei XJ, Jiang JX, Wang ML. Sedimentary characteristics of quaternary and evolution of saline lake of Mahai potash deposit. *Management & Strategy of Qinghai Land & Resources*, 1992(1): 40-52. [魏新俊, 姜继学, 王弭力. 马海钾矿第四纪沉积特征及盐湖演化. 青海地质, 1992(1): 40-52.]
- [34] Long PY, Zhao YJ, Hu YF *et al.* Occurrence characteristics and genetic study of potassium salt minerals in low grade solid potassium ore in the north section of Mahai salt lake. *Acta Geoscientica Sinica*, 2022, **43**(3): 338-346. [龙鹏宇, 赵艳军, 胡宇飞等. 马海盐湖北部矿段低品位固体钾矿中钾盐矿物的赋存特征及成因探讨. 地球学报, 2022, **43**(3): 338-346.]

- [35] Wang W, Jiang SY, Ge W *et al.* Geological characteristics and genetic mechanism of the lacustrine sedimentary clay type lithium deposit. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2024, **43**(1): 64-78, 6. [王微, 蒋少涌, 葛文等. 湖相沉积黏土型锂矿主要地质特征及成因. 矿物岩石地球化学通报, 2024, **43**(1): 64-78, 6.]
- [36] Xiang YX, Lou HJ, Zhang Z *et al.* Variations of annual average temperature and precipitation in the Mahai Basin in recent 40 years. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, **13**(6): 1040-1044. [项洋旭, 娄华君, 张征等. 马海盆地近 40 年以来气温、降水演变规律. 南水北调与水利科技, 2015, **13**(6): 1040-1044.]
- [37] Zheng ZX, Cui XS, Zhu PC *et al.* Hydrochemical and isotopic characteristics of the fracturing flowback fluids produced from the continental shale in the northern Qaidam basin. *Science Technology and Engineering*, 2021, **21**(14): 5710-5718. [郑昭贤, 崔小顺, 朱谱成等. 柴北缘陆相页岩压裂返排液水化学和同位素特征. 科学技术与工程, 2021, **21**(14): 5710-5718.]
- [38] Chen GD, Cai N, Liu JM *et al.* Study on chemical field characteristics of underground brine in north depression area of luobupo in Xinjiang uygur autonomous region. *Shandong Land and Resources*, 2013, **29**(2): 23-26. [陈国栋, 蔡娜, 刘继梅等. 新疆罗布泊罗北凹地地下卤水化学场特征研究. 山东国土资源, 2013, **29**(2): 23-26.]
- [39] Li YW, Li JS, Fan QS *et al.* Origin of deep intercrystalline brines from dayantan mine area in Qaidam Basin. *Journal of Salt Lake Research*, 2019, **27**(1): 82-88. [李昱文, 李建森, 樊启顺等. 柴达木盆地大盐滩矿区深层晶间卤水的成因. 盐湖研究, 2019, **27**(1): 82-88.]
- [40] A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1944, **25**(6): 914-928. DOI: 10.1029/TR025i006p00914.
- [41] Harder H. Boron content of sediments as a tool in facies analysis. *Sedimentary Geology*, 1970, **4**(1/2): 153-175. DOI: 10.1016/0037-0738(70)90009-6.
- [42] Chaussidon M, Jambon A. Boron content and isotopic composition of oceanic basalts: Geochemical and cosmochemical implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, **121**(3/4): 277-291. DOI: 10.1016/0012-821x(94)90073-6.
- [43] Qin XW, Ma HZ, Zhang XY *et al.* Hydrochemical characteristics of salt spring and potassium-prospecting in Changdu basin. *Journal of Salt Lake Research*, 2017, **25**(2): 28-39. [秦西伟, 马海州, 张西营等. 昌都地区盐泉水化学特征与找钾研究. 盐湖研究, 2017, **25**(2): 28-39.]
- [44] Gibbs RJ. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090. DOI: 10.1126/science.170.3962.1088.
- [45] Wu X An YH, Wei SB *et al.* Water chemistry and evolution of shallow groundwater in Dingxin Valley, lower reaches of Heihe River. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, **35**(9): 103-109. [吴玺, 安永会, 魏世博等. 黑河下游鼎新谷地浅层地下水水化学特征及演化规律. 干旱区资源与环境, 2021, **35**(9): 103-109.]
- [46] Feth JH, Gibbs RJ. Mechanisms controlling world water chemistry: Evaporation-crystallization process. *Science*, 1971, **172**(3985): 870-872. DOI: 10.1126/science.172.3985.870.
- [47] Li ZI, Yang QC, Yang YS *et al.* Isotopic and geochemical interpretation of groundwater under the influences of anthropogenic activities. *Journal of Hydrology*, 2019, **576**: 685-697. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.06.037.
- [48] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P *et al.* Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. *Chemical Geology*, 1999, **159**(1/2/3/4): 3-30. DOI: 10.1016/S0009-2541(99)00031-5.
- [49] Wu X, Zheng Y, Zhang J *et al.* Investigating hydrochemical groundwater processes in an inland agricultural area with limited data: A clustering approach. *Water*, 2017, **9**(9): 723. DOI: 10.3390/w9090723.
- [50] He TL, Xu JX, Han JB *et al.* Hydrogeochemical characteristics of Kulamulekesayi-Alaer River valley in northwestern Qaidam Basin. *Journal of Salt Lake Research*, 2017, **25**(2): 21-27. [何天丽, 许建新, 韩积斌等. 柴达木盆地西北部库拉木勒克萨伊河—阿拉尔河流域水化学特征分析. 盐湖研究, 2017, **25**(2): 21-27.]
- [51] Yu SY, Liu M, Zhao YY *et al.* Hydrochemical characteristics of large-scale lithium-boronmine basin in the Mami Co Saline Lake, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 2022, **96**(6): 2195-2205. [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. 地质学报, 2022, **96**(6): 2195-2205.]
- [52] Ahmed A, Clark I. Groundwater flow and geochemical evolution in the central flinders ranges, south Australia. *Science of the Total Environment*, 2016, **572**: 837-851. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.123.
- [53] Guo XJ, Wang HW, Shi JS *et al.* Characteristics and evolution model of hydrochemistry of groundwater system in Baiyangdian wetland. *Acta Geologica Sinica*, 2019, **96**(2): 656-672. [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. 地质学报, 2022, **96**(2): 656-672.]
- [54] Choubey PK, Kim MS, Srivastava RR *et al.* Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element: Lithium. Part I: From mineral and brine resources. *Minerals Engineering*, 2016, **89**: 119-137. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.01.010.

- [55] Schoeller H. Qualitative evaluation of ground water resources(in methods and techniques of groundwater investigation and development). Paris: Water Resource Series No.33, 1967: 44-52.
- [56] Fan QS, Ma HZ, Tan HB *et al.* Hydrochemical characteristics of brines and potassium-prospecting researches in western Qaidam Basin. *Acta Geoscientica Sinica*, 2007, **28**(5): 446-455. [樊启顺, 马海州, 谭红兵等. 柴达木盆地西部卤水水化学特征与找钾研究. 地球学报, 2007, **28**(5): 446-455.]
- [57] Bo Y, Liu CL, Jiao PC *et al.* Saline spring hydrochemical characteristics and indicators for potassium exploration in southwestern and northern Tarim basin, Xinjiang. *Acta Geoscientica Sinica*, 2013, **34**(5): 594-602. [伯英, 刘成林, 焦鹏程等. 塔里木盆地西南部和北部盐泉水化学特征及找钾指标探讨. 地球学报, 2013, **34**(5): 594-602.]
- [58] Li QK, Fan QS, Wang JP *et al.* Hydrochemistry, distribution and formation of lithium-rich brines in salt lakes on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Minerals*, 2019, **9**(9): 528. DOI: 10.3390/min9090528.
- [59] Carpenter AB. Origin and chemical evolution of brines in sedimentary basins. *SPE Annual Fall Technical Conference and Exhibition*. October 1-3, 1978. Houston, Texas. SPE, 1978: SPE-7504-MS.. DOI: 10.2118/7504-ms.
- [60] Zhou X, Li CJ. Seawater evaporation trajectories and their application. *Earth Science*, 1995, **20**(4): 410-414. [周训, 李慈君. 海水蒸发轨迹线及其应用. 地球科学, 1995, **20**(4): 410-414.]
- [61] Yu XC, Wang CL, Huang H *et al.* Origin and evolution of deep-seated K-rich brine in Paleogene of Qianjiang depression, Hubei Province. *Earth Science*, 2022, **47**(1): 122-135. [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. 地球科学, 2022, **47**(1): 122-135.]
- [62] Cao Q, Zhou X, Zhang H *et al.* Hydrochemical characteristics and genesis of the subsurface brines in the Wolonghe brine-bearing structure of Sichuan Basin. *Geological Bulletin of China*, 2015, **34**(5): 990-997. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2552.2015.05.019. [曹琴, 周训, 张欢等. 四川盆地卧龙河储卤构造地下卤水的水化学特征及成因. 地质通报, 2015, **34**(5): 990-997.]
- [63] Lee Davisson M, Criss RE. Na-Ca-Cl relations in basinal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, **60**(15): 2743-2752. DOI: 10.1016/0016-7037(96)00143-3.
- [64] Qin ZJ, Li QK, Fan QS *et al.* Geochemical characteristics and origin of fissure water in potassium-magnesium salt-bearing strata of khammouane potash deposits in Laos. *Acta Geologica Sinica*, 2018, **92**(8): 1693-1706. DOI: 10.3969/j.issn.0001-5717.2018.08.011. [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. 地质学报, 2018, **92**(8): 1693-1706.]
- [65] Lyu L, Li W, Liu YQ *et al.* Dynamic analysis of hydrochemistry and isotope of the karst spring of Jinlong Cave in the northern section of Taihang Mountains. *Carsologica Sinica*, 2023, **42**(1): 149-160, 181. DOI: 10.11932/karst20230111. [吕琳, 李伟, 刘元晴等. 太行山北段金龙洞岩溶泉水化学及同位素动态特征. 中国岩溶, 2023, **42**(1): 149-160, 181.]
- [66] Chao NY, Wang PY, Liu CF *et al.* Characteristic of deuterium excess parameter of groundwater in Hebei plain. *Carsologica Sinica*, 2004, **23**(4): 335-338. [晁念英, 王佩仪, 刘存富等. 河北平原地下水氘过量参数特征. 中国岩溶, 2004, **23**(4): 335-338.]
- [67] Yin G, Ni SJ, Gao ZY *et al.* Isotopic composition and evolution of deuterium excess parameters of brine in Sichuan Basin. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2008,(2): 56-62. [尹观, 倪师军, 高志友等. 四川盆地卤水同位素组成及氘过量参数演化规律. 矿物岩石, 2008,(2): 56-62.]
- [68] Zhao JY, Zhang W, Ma F *et al.* Chemical characteristics of thermal fluid in Rongcheng geothermal field, Xiongan New Area. *Acta Geologica Sinica*, 2019, **94**(7): 1991-2001. [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. 地质学报, 2020, **94**(7): 1991-2001.]
- [69] Han JB, Xu JX, Liu JB *et al.* Advance in hydrogeological study of subsurface brine. *Journal of Salt Lake Research*, 2018, **26**(4): 79-84, 90. [韩积斌, 许建新, 刘久波等. 地下卤水水文地质研究进展. 盐湖研究, 2018, **26**(4): 79-84, 90.]
- [70] Zhou X, Cao Q, Yin F *et al.* Geochemical characteristics and genesis of Triassic stratigraphic brines and hot springs in the high fold belt of eastern Sichuan Basin. *Acta Geologica Sinica*, 2015, **89**(11): 1908-1920. [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. 地质学报, 2015, **89**(11): 1908-1920.]
- [71] Li WX, Zhang XY, Miao WL *et al.* Hydrochemical characteristics of oilfield waters in Lenghu No. 3 structure area of north edge of Qaidam Basin. *Journal of Salt Lake Research*, 2016, **24**(2): 12-18. [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. 盐湖研究, 2016, **24**(2): 12-18.]
- [72] Han G, Fan QS, Liu JB *et al.* Origin and hydrochemistry of deep brines from anticlinal reservoir in the western-central Qaidam Basin. *Journal of Salt Lake Research*, 2021, **29**(4): 1-11. DOI: 10.12119/j.yhj.202104001. [韩光, 樊启顺, 刘久波等. 柴达木盆地中西部背斜构造深层卤水水化学特征与成因. 盐湖研究, 2021, **29**(4): 1-11.]
- [73] Tian B. Oolitic rocks and argillaceous aggregates in salt-bearing clastic layers in Mahai Basin. *Northwestern Geology*, 1991, **24**(3): 18-20. [田白. 马海

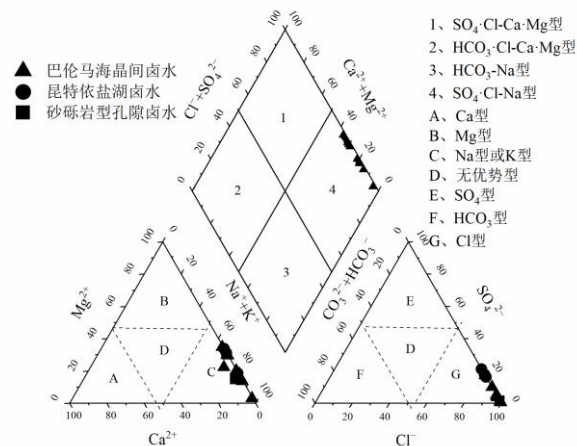
盆地含盐碎屑层中的鲕粒岩及泥质团粒岩. 西北地质, 1991, 24(3): 18-20.]

[74] Ma JY, Hu SZ, Tian XD. Sedimentary environment and exploitation of Maihai potash deposits in Qaidam Basin. *Journal of Salt Lake Research*, 2010, 18(3): 9-17. [马金元, 胡生忠, 田向东. 柴达木盆地马海钾盐矿床沉积环境与开发. 盐湖研究, 2010, 18(3): 9-17.]

纪	统	符号	柱状图	厚度(m)	岩性描述
第四纪	全新世	Qh		0.00~17.35	冲洪积、风积、湖积、湖沼沉积、化学沉积；砂砾石、褐黄色粉砂粘土,含粉砂的粘土，含石盐的粉细砂，含光卤石、钾石盐的粉细砂，含粉砂的石盐，粉砂石盐
	上更新世	Qp3		0.20~63.63	冲洪积、湖积、化学沉积；灰-灰白色砂砾，灰白色黄褐色含粉砂的石盐，粉砂石盐，含石膏粉砂之石盐。灰绿、黄绿含石膏粉砂之粘土、粉砂粘土
	中更新世	Qp2		100.06~160	湖积；土黄、黄绿色含石膏粉砂之粘土，粘土及砂砾、粉砂，局部夹盐层
	下更新世	Qp1		>177.22	湖积；灰绿、灰黄、灰一棕灰色泥岩、砂质泥岩夹砂岩、砾岩、泥灰岩及石盐石膏层

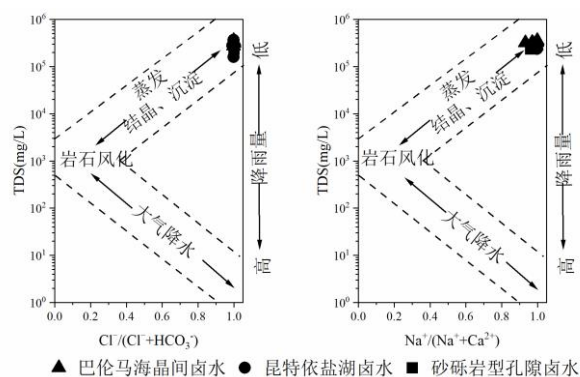
附图 I 巴伦马海盆第四纪地层综合柱状图^[32]

Append. Fig. I Composite column map of Quaternary stratigraphy in the Balun Mahai Basin^[32]



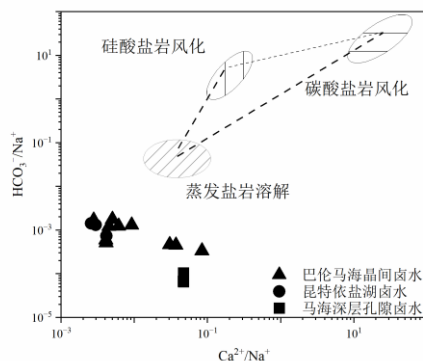
附图 II 巴伦马海盆地晶间卤水、昆特依盐湖卤水和砂砾岩型孔隙卤水 Piper 三线图^[40]

Append. Fig.II Piper map of intercrystalline brine in Balun Mahai Basin, brine in Kuntanyi Salt Lake and gravel-type brine in Mahai Basin^[40]



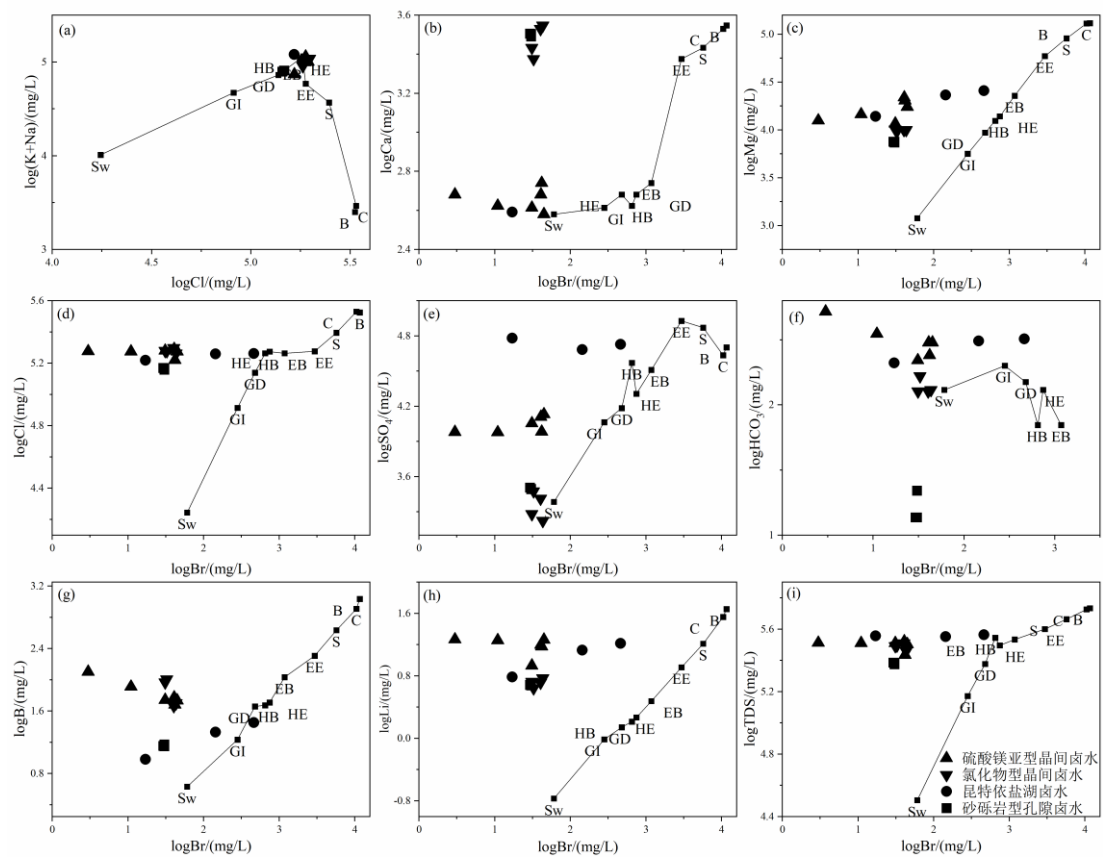
附图 III 巴伦马海盆地晶间卤水、昆特依盐湖卤水和砂砾岩型孔隙卤水 Gibbs 图^[44]

Append. Fig.III Gibbs map of intercrystalline brine in Balun Mahai Basin, brine in Kuntanyi Salt Lake and gravel-type brine in Mahai Basin^[44]



附图 IV 巴伦马海盆地晶间卤水、昆特依盐湖卤水和砂砾岩型孔隙卤水离子来源贡献图^[48]

Append. Fig.IV Water ion contribution map of intercrystalline brine in Balun Mahai Basin, brine in Kuntanyi Salt Lake and gravel-type brine in Mahai Basin^[48]



附图 V 巴伦马海盆地晶间卤水、昆特依盐湖卤水和砂砾岩型孔隙卤水 $\log(K+Na)$ 与 $\log Cl$ (a), $\log Ca$ (b), $\log Mg$ (c), $\log Cl$ (d), $\log SO_4$ (e), $\log HCO_3$ (f), $\log B$ (g), $\log Li$ (h), $\log TDS$ (i) 与 $\log Br$ 关系图^[59-60]
 Append. Fig.V Relationship between $\log(K+Na)$ and $\log Cl$ (a), $\log Ca$ (b), $\log Mg$ (c), $\log Cl$ (d), $\log SO_4$ (e), $\log HCO_3$ (f), $\log B$ (g), $\log Li$ (h), $\log TDS$ (i) and $\log Br$ of intercrystalline brine in Balun Mahai Basin, brine in Kuntayi Salt Lake and gravel-type brine in Mahai Basin^[59-60]
 (Sw, GB, GE, HB, HE, EB, EE, S, C, B 分别代表原始海水、石膏开始沉积、石膏沉积、石盐开始沉积、石盐沉积、泻利盐开始沉积、泻利盐沉积、钾石盐沉积、光卤石沉积、水氯镁石沉积)

附表1 巴伦马海盆地晶间卤水主微量元素含量成分表

Attached Tab.1 Major and trace elements content composition table of intercrystalline submerged brine in Balun Mahai Basin

样品位置	编号	密度 g/cm ³	pH	TDS g/L	K ⁺ g/L	Na ⁺ g/L	Ca ²⁺ g/L	Mg ²⁺ g/L	Cl ⁻ g/L	SO ₄ ²⁻ g/L	HCO ₃ ⁻ g/L
巴伦马海晶 间卤水	ZK7415	1.21	7.86	318.0 0	6.27	92.70	0.38	17.30	188.0 0	13.50	0.30
	ZK7423	1.22	7.64	323.0 0	4.76	105.0 0	0.41	11.60	190.0 0	11.30	0.22
	ZK7618	1.22	8.07	331.0 0	9.79	90.50	0.48	21.80	195.0 0	12.80	0.30
	ZK8012	1.21	7.99	323.0 0	3.99	107.0 0	0.42	14.50	188.0 0	9.47	0.35
	ZK8014	1.21	8.05	325.0 0	3.37	110.00	0.48	12.50	189.0 0	9.53	0.52
	ZK8024	1.22	7.40	271.0 0	5.02	68.80	0.55	20.20	166.0 0	9.58	0.24
	ZK8224	1.21	7.72	312.2 1	2.34	105.0 5	2.37	9.66	189.7 1	2.98	0.17
	ZK8228	1.21	7.78	309.5 4	2.12	102.2 3	2.71	10.11	190.2 0	1.91	0.13
	ZK8230	1.21	7.72	322.5 4	2.70	105.5 0	3.38	10.03	198.0 9	2.58	0.13
	ZK8431	1.21	7.55	288.0 0	2.32	88.10	3.52	10.00	183.0 0	1.67	0.13
昆特依盐湖 卤水 ^[39]	K-01*	—	—	365.7 4	18.06	84.88	0.19	25.66	182.4 9	53.47	0.32
	K-02*	—	—	356.0 8	13.27	89.45	0.23	23.13	181.8 4	48.17	0.31
	K-03*	—	—	360.0 3	12.3	107.5 0	0.39	13.82	165.5 0	60.23	0.21
砂砾岩型孔 隙卤水 ^[29]	MH-01*	1.17	7.42	241.7 1	2.57	78.43	3.19	7.51	146.8 1	3.10	0.02
	MH-02*	1.17	7.32	236.7 5	2.48	76.28	3.09	7.35	144.3 2	3.11	0.01
	MH-03*	1.16	7.32	242.4 4	2.59	78.22	3.20	7.50	147.6 4	3.20	0.01

(接上表)

样品位置	编号	B ₂ O ₃ mg/L	Li mg/L	Br mg/L	δD ‰	δ ¹⁸ O ‰	d-Excess ‰	水化学类型
巴伦马海 晶间卤水	ZK7415	349.00	18.20	45.00	-5.50	3.20	-31.10	硫酸镁亚型
	ZK7423	354.00	8.50	31.00	-27.40	2.30	-45.80	硫酸镁亚型
	ZK7618	383.00	15.80	41.00	-24.10	6.50	-76.10	硫酸镁亚型
	ZK8012	525.00	17.90	11.00	-38.60	-1.30	-28.20	硫酸镁亚型
	ZK8014	815.00	18.40	3.00	-11.60	5.60	-56.40	硫酸镁亚型
	ZK8024	308.00	15.00	42.00	-28.50	2.50	-48.50	硫酸镁亚型
	ZK8224	655.00	4.40	32.85	-41.20	-2.00	-25.20	氯化物型
	ZK8228	600.00	5.30	31.20	-29.80	1.50	-41.80	氯化物型
	ZK8230	299.00	5.20	40.50	-23.90	3.00	-47.90	氯化物型
	ZK8431	324.00	5.90	43.50	-28.60	2.40	-47.80	氯化物型
昆特依盐 湖卤水 ^[39]	K-01*	182.98	16.45	462.00	-37.30	-2.00	-21.30	硫酸镁亚型
	K-02*	138.38	13.40	145.00	-52.10	-2.10	-35.30	硫酸镁亚型
	K-03*	61.58	6.11	17.11	-47.00	-4.20	-13.40	硫酸镁亚型
马海深层 孔隙卤水 ^[29]	MH-01*	91.27	4.76	30.37	—	—	—	氯化物型
	MH-02*	95.57	4.81	30.33	—	—	—	氯化物型
	MH-03*	92.21	4.84	29.33	—	—	—	氯化物型

附表II 卤水开发利用工业指标

Attached Tab. 2 Industrial indicators of brine development and utilization				
内容	K ⁺ (g/L)	B ₂ O ₃ (g/L)	Li ⁺ (mg/L)	Br ⁻ (mg/L)
单独开采	3.10	1.00	24.60	300.00
综合利用	1.50	0.40	13.10	150.00