

鲁西南 YZK-3 钻孔的盐类矿物和锶同位素组成 及其地质意义^{*}

李兆强¹ 李明慧² 宋香锁^{3,4,5} 高黎明⁶ 唐璐璐^{3,4,5}
刘凤臣^{3,4,5} 杨 斌^{3,4,5} 余武生² 路淑毅⁷ 张译文²

1 山东省肥城市自然资源和规划局, 山东肥城 271600

2 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101

3 山东省地质科学研究院, 山东济南 250013

4 国土资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室, 山东济南 250013

5 山东省金属矿产成矿地质过程与综合利用重点实验室, 山东济南 250013

6 山东省曹县自然资源和规划局, 山东曹县 274400

7 河南省地震局, 河南郑州 450018

摘 要 鲁西南黄岗潜凹陷发现了盐储量达到亿吨级的古近纪盐类矿床, 该矿床是中国东部罕见的超大型岩盐矿, 深入研究该矿床成因对丰富中国的盐类矿床理论具有重要意义。本文选取 YZK-3 钻孔中 519.9 m 的含盐沉积物, 从成因矿物学的角度, 详细分析了矿物成因、成盐环境和成矿物质来源。盐类矿物中, 碳酸盐矿物以方解石、白云石、铁白云石为主, 文石少量; 硫酸盐矿物主要是硬石膏, 少量石膏和天青石; 氯化物矿物只出现石盐一种矿物。根据这些矿物的分布特征和成因判断, 始新世中晚期—渐新世时期古湖泊的演化过程为: 淡水湖—咸水湖—盐湖—咸水湖—淡水湖。石盐和硬石膏的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.711227~0.71177, 远高于同时代海水的。结合热液研究成果综合判断, 黄岗潜凹陷成盐卤水中没有发现海相信息。除了岩石风化外, 受大气降水影响的深部热液也是不可忽视的成盐物质来源。

关键词 石盐 石膏 硬石膏 锶同位素 古近系 黄岗潜凹陷

第一作者简介 李兆强, 男, 1972 年生, 高级工程师, 研究方向为地质勘查找矿。E-mail: gtjlzq@126.com。

通讯作者简介 杨斌, 男, 1975 年生, 研究员, 研究方向为地质勘查找矿。E-mail: yangbin71311@163.com。

中图分类号: P612 文献标志码: A

Evaporates and strontium isotopes of borehole YZK-3 in southwest Shandong Province and their geological implications

LI Zhaoqiang¹ LI Minghui² SONG Xiangsuo^{3,4,5} GAO Liming⁶ TANG Lulu^{3,4,5}
LIU Fengchen^{3,4,5} YANG Bin^{3,4,5} YU Wusheng² LU Shuyi⁷ Zhang Yiwen²

1 Feicheng Natural Resources and Planning Bureau of Shandong Province, Shandong Feicheng 271600, China

2 Institute of Tibetan Plateau, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 Shandong Institute of Geological Sciences, Jinan 250013, China

4 Key Laboratory of Gold Mineralization Processes and Resource Utilization, Ministry of land and Resources, Jinan 250013, China

5 Key Laboratory of Metallogenic Geological Process and Resources Utilization in Shandong Province, Jinan 250013, China

6 Cao County Natural Resources and Planning Bureau of Shandong Province, Shandong Caoxian 274400, China

7 Henan Earthquake Agency, Zhengzhou 450018, China

Abstract A massive Tertiary salt deposit containing 10 billion tons has been identified in the Huanggang buried sag of southwestern Shandong Province. This deposit is a rare super-large rock salt deposit in eastern China. To investigate the material sources and depositional environment of this salt formation, we conducted a comprehensive analysis of salt mineral assemblages, stratigraphic distributions, and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic compositions in halite and anhydrite from a 520-meter core (Borehole YZK-3) situated at the basin margin. Among the salt minerals, carbonate minerals mainly contained calcite, dolomite, ankerite and minor aragonite. Sulfate minerals contained anhydrite, with minor gypsum and celestite. Chloride minerals were composed of only halite. Based on their distribution and genesis, the paleolake evolution during the Middle-Late Eocene to Oligocene progressed through five distinct stages: freshwater $\rightarrow$ brackish $\rightarrow$ saline $\rightarrow$ brackish $\rightarrow$ freshwater lake systems. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios measured in halite and anhydrite (0.711227–0.71177) significantly exceed contemporaneous seawater values. This isotopic disparity, combined with existing hydrothermal research data, demonstrates the absence of marine influences in the brine system. Substantial contributions from deep hydrothermal fluids mixed with meteoric waters was an important source of salt material.

Key words halite, gypsum, anhydrite, strontium isotope, Paleogene, Huanggang buried sag

About the first author LI Zhaoqiang, born in 1972, senior engineer, is mainly engaged in research on geological survey and prospecting. E-mail: gtjlzq@126.com.

About the corresponding author YANG Bin, born in 1975, researcher, is mainly engaged in research on geological survey and prospecting. E-mail: yangbin71311@163.com.

华北是中国中生代重要的成盐区之一，其中山东地区发育大量盐类矿床，如大汶口盆地、平邑盆地和枣庄盆地等（刘群等，1987）。自 20 世纪 60 年代以来，多家科研院所及地勘单位在鲁西南地区开展了大量基础地质及针对石油、煤炭、钾盐等矿产的勘查工作。1980—1984 年，由山东省地矿局负责，联合多家单位合作完成了“鲁西南地区下第三系成钾条件研究”项目，系统阐述了鲁西南地区成盐成钾地质条件，总结了区域盐类矿床找矿前景（唐璐璐等，2021）。2005—2007 年，山东省地质科学研究院在单县南部地区开展煤炭预查，通过地震勘查揭示古近系官庄群大汶口组（成盐层位）在黄岗潜凹陷内发育良好。自 2009 年以来，通过地震、可控源音频大地电磁测深、测井等多种技术手段，开展盐矿预查和普查，并于 2017 年、2019 年在单县杨楼、黄岗施工千米钻孔，发现古近系岩盐总资源量超过 $240 \times 10^8 \text{ t}$ ，标志着山东省岩盐找矿再次取得重大突破，对鲁西隆起区

古近系盆地找矿具有重要指导作用（唐璐璐等，2021）。

鲁西南盐矿床是中国东部罕见的超大型岩盐矿，单孔累计盐层厚度超过 320 m，单盐层厚度超过 53 m，赋存深度 1200~1800 m，NaCl 平均品位为 52.05%~92.00%，是迄今为止鲁西南地区发现的单孔累计见矿厚度最大、埋藏最浅的岩盐矿床（唐璐璐等，2021；仵康林等，2023）。该矿床矿层厚、质纯、埋深适中、产状平缓稳定，适合大规模机械化开采，为山东省实施“突破菏泽、鲁西崛起”战略提供了充沛的资源保障。与此同时，该矿床具备建设盐穴储气储能库的地质条件，对于未来岩盐矿开采溶腔储（备）气、保障清洁能源供应等，具有重要的现实及战略意义（唐璐璐等，2021；仵康林等，2023）。另外，深层卤水中可能伴生钾、锂等资源（仵康林等，2023），而锂、钾均是中国的战略性关键矿产资源，对外依存度高，若后续探明锂、钾盐伴生资源，将显著缓解资源安

全压力。

大型盆地的形成一般都与构造作用有关,其中裂陷作用控制了中国华北盆地的分布,即华北大陆裂谷系、近海大陆边缘、裂谷系断裂构造控制了盆地的分布和排列方向(刘群等,1987)。国外大型一超大型盐类矿床一般形成于稳定的克拉通巨型盆地中,但中国大陆由于经历复杂的构造运动而缺少这类盆地。郯庐断裂带上的黄岗潜凹陷发现大型盐类矿床,值得关注和进一步研究。

盐类矿床的形成一般需要具备3个基本条件:封闭盆地或沉积凹陷、持续干旱的气候和充足的物质来源(曲一华等,1979;刘群等,1987;Lowenstein *et al.*, 1989; Warren, 1989; 齐丽丽, 2010; Li *et al.*, 2015)。物质来源是盐类矿床的研究重点之一,通常主要来自海水、陆源水或热液(季克俭和吕凤翔, 2007; Warren, 2010; Li *et al.*, 2015; 李明慧等, 2016)。黄岗潜凹陷的成盐时代为始新世中晚期—渐新世,但物源存在争议,其中鲁西南地区为陆相环境(李增学等, 2012; 刁海忠等, 2019),邻近的洪泽、丰县以及山东大汶口、东营、三水等地的成盐物质均以陆源水为主,而汶东盆地的放射虫化石及汶口盆地的苔藓虫化石、有孔虫化石和海绿石矿物等说明海水的存在,由此推断大汶口—蒙阴断陷内始新世成盐期经历过海侵(朱猛, 2015)。冯晓杰等(1999)列举了国内外一些文献,指出在远离海洋的内陆沉积盆地也

发现过一些类似的生物化石,否认大汶口和蒙阴断陷内出现过海侵。因此,黄岗潜凹陷在成盐过程中是否发生过海侵,需要开展进一步的研究。同时,鲁西南地区温泉发育,又位于著名的郯庐大断裂之上,那么黄岗潜凹陷盐类矿床是否还存在热液来源?基于该思考,本研究选取山东黄岗潜凹陷千米钻孔 YZK-3 的含盐沉积物,从成因矿物学和锶同位素的角度,探讨黄岗潜凹陷大型盐类矿床的物质来源及成盐环境。

1 地质概况

鲁西南地区位于山东省西南部,靠近江苏、安徽、河南,大地构造位置靠近郯庐断裂带的华北板块东南缘,隶属于华北板块中的鲁西块体,总体上是一个以大型隆起为背景的地质构造单元。区内中生代断层较发育,其中聊城—兰考断裂是鲁西地块与华北拗陷的分界性深大断裂(郑德顺等, 2012)。这些断层将该地区分割成多个凹陷或凸起,如菏泽凸起、嘉祥凸起、成武凹陷、济宁潜凹陷、黄岗潜凹陷等Ⅳ、Ⅴ级构造单元(图1),构成了复杂的构造格局。研究区是位于华北板块鲁西隆起区的鲁西南潜隆起的黄岗潜凹陷(图1),与华北地区许多盆地相似,黄岗潜凹陷也受控于郯庐断裂,形成于白垩纪晚期(刘群等, 1987)。中晚始新世是郯庐断裂右旋剪切活动最强烈的时期,伴有基性—酸性岩浆岩侵入,发育巨厚新生代地层



图1 鲁西南黄岗潜凹陷 YZK-3 钻孔位置

Fig. 1 Borehole YZK-3 location in Huanggang buried sag in southwest Shandong Province

(程裕淇, 1994)。研究区地层由老到新发育有：新太古宙泰山岩群、奥陶系马家沟群、石炭系一二叠系月门沟群、二叠系石盒子群、古近系官庄群、新近系黄骅群和第四系。古近系官庄群主要为浅湖、咸湖沉积, 岩石色调杂、粒度细。新近系黄骅群为以紫红色、灰绿色为主的泥岩夹粉—细砂岩, 近底部普遍存在含砾砂岩或砂砾岩, 局部含石膏晶体或条带, 不整合于官庄群之上, 厚度一般为 300~500 m。第四纪沉积物主要是砂、细砂、粉砂及黏土等。盐类矿物主要出现在古近系的官庄群大汶口组。黄岗潜凹陷位于鲁西南黄泛冲积平原, 目前被第四系松散堆积物所覆盖。

2 材料与方法

YZK-3 钻孔 (34°36′43.4″N, 116°13′38″E) 位于黄岗潜凹陷的边缘。根据钻探项目的整体设计任务, 从古近系开始取样, 即从 635.38 m 开始。虽然含盐沉积物的厚度很大, 但只有 965.18~961.50 m 为纯盐岩层。其中, 965.18~964.73 m 为纯石盐层, 石盐晶体无色透明, 呈块状; 963.88~961.50 m 为石盐、硬石膏互层, 石盐层厚度仅 10~20 cm, 硬石膏层厚度约几个毫米至几个厘米。依据古地磁测试结果, 得到其年代范围为 56—23 Ma^①, 即钻孔样品为始新世和渐新世的沉积物。

矿物测试: 样品间隔为 2 m, 共 243 个。每个样品重约 2 g, 室内自然风干, 研磨至 150 目左右。用 X 射线粉末衍射仪进行矿物种类和含量的分析, 仪器型号和参数为: D/max, Cu, K α , 40 kV, 40 mA, step 0.02° (2 θ)。该测试在北京北达燕园微构测试中心完成。

锶同位素测试: 在纯盐层挑选结晶程度好、粒度较大的 5 个石盐和 2 个硬石膏样品进行锶同位素测试。硬石膏前处理方法参考 Li 等 (2017), 具体步骤如下: (1) 室温下, 将硬石膏晶体放入超纯水中进行充分软化分离; 12 h 后用超纯水反复清洗, 去除硬石膏表面附着杂质; 将洗干净的硬石膏置于滤纸上, 在室温下晾干 1 周。(2) 称取 55 mg 左右放入 50 mL 离心管内, 再加入 50 mL 超纯水, 加 HNO₃ (69.8%) 1~2 滴加速硬石膏溶解, 放置 1

周, 期间不时摇晃使溶解反应充分进行。(3) 取 15 mL 左右样品放入离心管内, 在离心机上离心 (2500 r/min) 30 min, 取上清液用 0.45 μ m 微孔滤膜过滤, 定容备用。石盐的前处理步骤参考孙淑蕊 (2019), 具体步骤如下: (1) 取适量石盐置于研钵磨碎至 200 目以下。(2) 称取石盐约 50 mg 放入样品瓶, 加入 50 mL 超纯水, 静置 1~2 h, 期间不时摇晃使其充分溶解。(3) 将溶解后的石盐溶液样品用 0.45 μ m 微孔滤膜过滤, 取部分定容备用。对于硬石膏和石盐过滤后的溶液采用标准离子交换法收集 Sr, 根据核工业北京地质研究院的标准处理程序进行 Sr 同位素分离、收集和测试, 测试仪器为 Phoenix 热离子质谱仪, 标定值 NBS987 为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7100$, 误差 2σ 小于 0.000017。

3 结果

3.1 YZK-3 钻孔岩心特征

635.38~862.88 m: 砂岩与泥岩互层, 部分砂岩呈团块状和团粒状, 其中 712.38~862.88 m 段多数层位出现纹层。

862.88~1099.98 m: 泥岩与蒸发岩互层, 泥岩大部分呈薄层状。其中, 965.18~971.88 m 段含灰白色石盐晶体和块状硬石膏晶体; 971.88~981.78 m 段为灰色泥岩、含膏泥岩及硬石膏层互层, 硬石膏层厚 0.3~19 cm, 泥岩水平层理发育; 981.78~1042.03 m 段为灰色含膏泥岩、硬石膏层互层, 硬石膏层厚 0.3~25 cm。

1099.98 m 之下: 重新变为泥岩与砂岩互层, 并夹有粉砂岩和细砂岩。

3.2 盐类矿物

X 射线结果显示, YZK-3 钻孔中盐类矿物种类比较多, 碳酸盐矿物、硫酸盐矿物和氯化物均有发育 (图 2)。矿物种类的鉴定主要依据矿物的特征衍射峰, 如铁白云石的判断依据是 d 值为 2.90 Å、2.20 Å、2.02 Å、1.79 Å 的衍射峰 (图 3, 参考的 PDF 卡片编号为 33-0282)。碳酸盐矿物主要包括方解石和铁白云石, 含少量文石和微量白云石, 总含量为 2%~82%。方解石是钻孔中主要的碳酸盐

① 张伟林尚未发表数据。

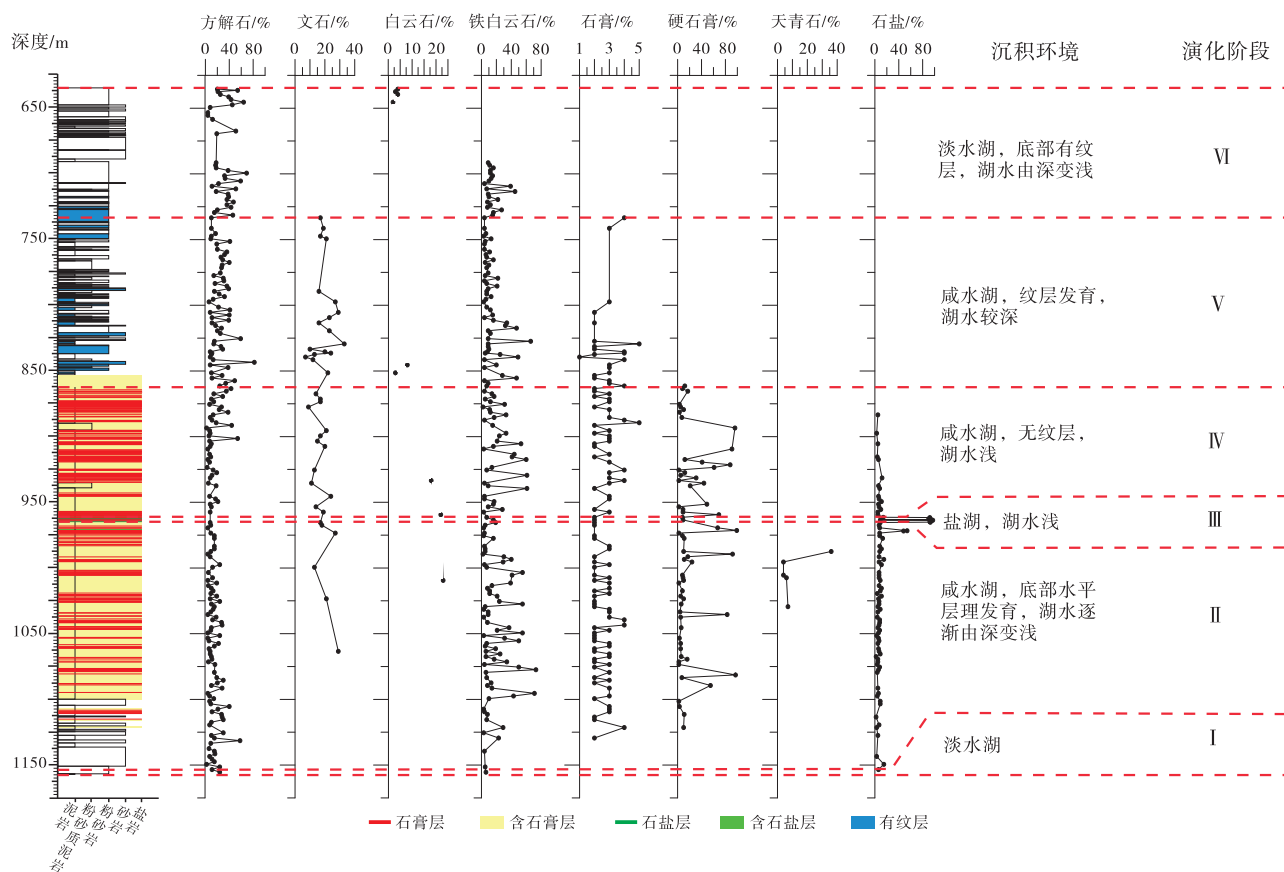


图 2 鲁西南 YZK-3 钻孔含盐层位的岩性、盐类矿物含量及沉积环境

Fig. 2 Lithology, mineral content and sedimentary environment of halite bearing intervals in borehole YZK-3 in southwest Shandong Province

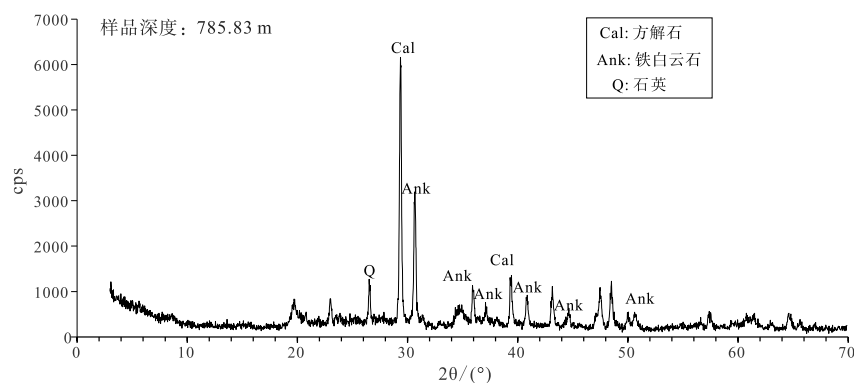


图 3 鲁西南 YZK-3 钻孔样品 XRD 图谱

Fig. 3 X-ray diffraction patterns of sample from borehole YZK-3 in southwest Shandong Province

矿物之一, 含量 2%~74%, 其中钻孔下半部分方解石含量变化波动较小, 从 861.38 m 处开始波动幅度增大, 在 843.38 m 处达最大, 为 74%。文石出现层位较少, 含量 7%~33%, 最高值出现在 829.38 m 处, 与方解石最大含量层位 (843.38 m) 接近。含白云石的层位极少, 含量较低, 为 2%~

23%。铁白云石广泛分布, 从底部至上部约 50 m 均有铁白云石赋存, 含量为 2%~73%, 最高含量出现在 1077.38 m 处, 但其波动幅度与方解石相反, 中下部分波动幅度大。硫酸盐矿物以石膏分布最广, 含量为 1%~5%; 硬石膏主要分布在 1121.38~861.38 m 之间, 含量 2%~97%; 天青石

仅出现在 1029.38 m、1007.38 ~ 1005.38 m、995.38 m 和 987.38 m 处。氯化物只有石盐，仅出现在钻孔下部，具体深度为 969.98 ~ 969.63 m 和 965.18 ~ 961.63 m，含量为 2%~97%，且石盐晶体呈块状，颗粒大小约数毫米。

3.3 锶同位素

YZK-3 钻孔石盐层与硬石膏层的锶同位素测试结果见表 1。先析出的硬石膏层 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值高，为 0.711534~0.711770，后析出的石盐层 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较低，为 0.711227~0.711482。

表 1 鲁西南 YZK-3 钻孔石盐与石膏的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值

Table 1 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of halite and gypsum from borehole YZK-3 in southwest Shandong Province

样品号	深度/m	矿物	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
YZK3-326.25	961.63	石盐	0.711 307
YZK3-327.50	962.88	石盐	0.711 482
YZK3-328.50	963.88	石盐	0.711 227
YZK3-328.60	963.98	石盐	0.711 262
YZK3-329.50	964.88	石盐	0.711 280
YZK3-334.25	969.63	石膏	0.711 534
YZK3-334.60	969.98	石膏	0.711 770

在成岩过程中，若埋藏温度超过 50 ℃，或者孔隙水或流体盐度较高时，都可能发生石膏到硬石膏的转化 (El Tabakh *et al.*, 1998)。石膏转化过程是失去结晶水的过程，矿物的阳离子不会流失，即锶同位素并没有发生变化。因此，YZK-3 钻孔的硬石膏锶同位素与石膏和石盐一样，均具有指示意义。

4 讨论

4.1 盐类矿物及环境意义

盐类矿物的析出及其溶解度和当时卤水的浓度有关，一般经历 6 个阶段：(1) 碳酸盐矿物—石膏阶段；(2) 石盐沉积阶段；(3) 硫酸钠、镁盐阶段；(4) 钾镁盐沉积阶段；(5) 光卤石沉积阶段；(6) 水氯镁石沉积阶段 (赵澄林和朱筱敏, 2001)。上述过程中，先析出的矿物指示湖水盐度低，后析出的矿物指示湖水盐度高。YZK-3 钻孔的碳酸盐矿物有方解石、文石、白云石和铁白云石，自然环境下这些碳酸盐矿物的析出基本上都会

有微生物的参与，且与 Mg/Ca 摩尔比值密切相关 (Müller *et al.*, 1972; Davis *et al.*, 2000; Li *et al.*, 2009)。通常，方解石先析出；Mg/Ca = 2 ~ 12，文石析出；Mg/Ca > 12，白云石析出 (Müller *et al.*, 1972)。方解石普遍存在于各类湖泊沉积物中，包括淡水湖 (王苏民和窦鸿身, 1998; 郑喜玉等, 2002)，因此方解石盐度指示意义明显低于文石和白云石。

文石一般出现在咸水湖和盐湖环境中，可以作为湖水咸化指标。主要原因为：(1) 文石为亚稳定矿物，湖泊沉积物中的文石一般被认为是湖泊内的自生矿物 (曲一华等, 1979; Li *et al.*, 2021)；(2) 在千万年尺度的成岩过程中，文石会转化为方解石，而未发生转化的文石则基本保留了其析出时的环境信息。

白云石的成因复杂，在实验室中至今无法在无机条件下合成白云石，而蒸发作用和微生物介导是白云石矿物形成的重要影响因素，这是目前关于其成因的共识 (Land, 1998; 王晓晓等, 2020)。蒸发作用为白云石的形成提供了足够浓度的 Mg^{2+} ，微生物的介导作用有助于 Mg^{2+} 克服动力学障碍，进入碳酸钙晶格形成白云石 (Last, 1990; Land, 1998; Bontognali *et al.*, 2010; Warren, 2010)。另外，白云石也可以由岩石风化搬运入湖。因此，YZK-3 钻孔的白云石主要受蒸发作用影响，但不能排除外源白云石的存在。

铁白云石是白云石的一种，与白云石一样都是复盐矿物，即是在早期单盐矿物的基础上形成的，而不是从水体中直接析出的 (Eugster and Hardie, 1978)。铁白云石是 YZK-3 钻孔主要矿物之一，最高含量超过 60% (图 2)。该矿物有热液和沉积 2 种成因 (曲一华等, 1979)。热液成因是指铁白云石在高温高压条件下的形成，而沉积成因则涉及地表条件下的微生物作用。在富铁流体中，铁白云石比方解石和白云石更加稳定 (You *et al.*, 2013)。受埋藏或热液作用影响，古湖泊沉积物中普遍存在热液成因的铁白云石，如柴达木盆地西部千米钻孔 SG-1 (王晓晓等, 2020)，准格尔盆地东部吉木萨尔凹陷 (钟大康等, 2018) 和内蒙古二连盆地 (张帅等, 2018, 2020) 均存在与热液作用或火山活动有关的白云石。

YZK-3 钻孔中还出现了大量硫酸盐矿物，如

石膏、硬石膏和少量天青石。根据海水蒸发实验,石膏析出时水体盐度是海水的 5 倍左右 (Warren, 1989), 故石膏的出现指示了水体的咸化和盐度的变化。在漫长的地质作用过程中, 石膏会转化为硬石膏 (El-Tabakh *et al.*, 1998), 因此 YZK-3 钻孔的硬石膏可能是石膏转化形成。钻孔中还出现了另一种硫酸盐矿物天青石 (SrSO_4), 该矿物可以从海水或卤水中析出, 也可以在热液阶段形成 (曲一华等, 1979; Li *et al.*, 2010, 2013)。中国的天青石主要出现在柴达木盆地, 锶的来源与热液活动有关 (曲一华等, 1979; 马顺清等, 2012)。结合铁白云石的大量出现, 推测 YZK-3 钻孔中少量天青石的形成可能与热液有关。

YZK-3 钻孔中的氯化物只有石盐。海水蒸发实验中, 石盐晶体析出时水体的盐度为海水的 11~12 倍 (Warren, 1989), 由此推测单个石盐晶体或少量石盐析出时湖水盐度约 35~42 g/L, 但仍然低于现代盐湖的盐度定义值 50 g/L (郑喜玉等, 2002)。湖泊沉积物中纯石盐层一般出现在盐湖环境中 (Li *et al.*, 2010, 2013)。

4.2 古湖水特征

根据以上矿物成因分析以及沉积特征的变化, 将研究区始新世中晚期—渐新世的古湖水演化分为 6 个阶段 (图 2):

1) 1157.08–1153.38 m: 为淡水湖, 仅发育方解石, 无文石、白云石、石膏和石盐等盐类矿物出现, 沉积物主要是褐色粉—细砂岩。沉积物孔隙水中的 Na^+ 、 K^+ 等离子含量非常低, 最低含量分别为 0.02 mg/g 和 0.008 mg/g (路淑毅, 2022), 也佐证了本阶段为淡水湖环境 (盐度小于 1 g/L)。

2) 1153.38–965.18 m: 为咸水湖, 出现石盐、石膏及硬石膏层。底部水平层理发育, 上部无水平层理, 说明湖水逐渐由深变浅, 气候比前一阶段明显变干。

3) 965.18–961.5 m: 出现多个石盐层。YZK-3 钻孔位于湖盆边缘, 盐层厚度小, 推测湖泊中心区的石盐层厚度更大。这也足以说明湖水盐度升高, 湖泊可能演变为盐湖。

4) 961.5–862.88 m: 石盐层消失, 沉积物依然含有石盐, 且石膏大量存在, 说明湖水盐度降低, 但依然为咸水湖, 没有纹层, 湖水浅。

5) 862.88–733.38 m: 石盐消失, 沉积物中文石、石膏依然存在, 说明湖泊仍为咸水湖。大量纹层发育, 说明湖水较深、水动力条件弱。纹层指示典型的静滞深水沉积环境 (Wang *et al.*, 2012), 即水体处于密度或盐度分层状态, 上下对流较弱, 底部水体具有静滞特点, 细粒物质均匀混合后, 呈悬浮状态缓慢沉降到平坦的湖底, 指示半深水—深水的沉积环境。这说明此时古湖水稳定, 水动力条件比较弱, 气候相对湿润。

6) 733.38–635.38 m: 石盐、文石、石膏均消失, 指示湖泊演变为淡水湖。虽然白云石也受蒸发作用影响, 但湖泊沉积物中普遍存在外源白云石, 而且铁白云石受热液影响大, 因此在没有文石、石膏的环境中, 白云石不作为独立依据判定湖水盐度。该阶段早期 (733.38~712.38 m) 存在少量纹层, 712.38 m 至钻孔顶部纹层消失, 且颜色出现较多褐色, 说明湖水逐渐变浅, 沉积环境演化为氧化环境。

古近纪发生了多次气候快速变化事件, 包括全球变暖和全球变冷, 如古新世—始新世极热事件 (PETM) 等。沉积环境呈多样化, 各种成因类型的沉积物蕴藏的资源也出现多样化。鲁西南地区资源丰富, 除了盐类矿产外, 还有大量煤田发育, 比如形成于 70.87–61.05 Ma 的滕县煤田、形成于 122.86–61 Ma 的巨野煤田 (赵民等, 2000), 说明古近纪早期鲁西南地区依然为潮湿气候条件; 之后, 气候开始向干旱转化。长期干旱的气候环境是盐类矿产形成的必要条件, 黄岗潜凹陷大型盐类矿床的发现, 说明始新世至渐新世鲁西南地区持续干旱, 但由于缺少具体的年代数据, 更详细的气候环境变化有待后续进行深入研究。

4.3 物源探讨

物质来源是蒸发盐矿床研究的重要内容之一。识别海水、陆源水和热液水的指标有多种, 如矿物种类和稳定同位素 (锶同位素、硼同位素、硫同位素等) (El Tabakh *et al.*, 1998; 刘成林等, 1999; Tan *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2015, 2018)。矿物指标中, 只有碳酸钠具有陆源指示意义, 其他蒸发盐矿物在海、陆相中均有出现 (Warren, 1989; Li *et al.*, 2015, 2018)。

石盐、石膏、硬石膏在海陆环境中均可以出现, 本身不具有物源指示意义, 但其锶同位素可以

指示物质来源。锶同位素主要以 ^{84}Sr 、 ^{86}Sr 、 ^{87}Sr 、 ^{88}Sr 共 4 种形式存在，分馏非常小，基本不受地质作用、生物新陈代谢等影响，在同一地质时期和同一水文系统内， $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与物质来源有关 (McArthur, 1994; Flecker and Ellam, 1999; Tan *et al.*, 2010)。海、陆相环境下，锶同位素差异明显，其中陆相环境中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值变化较大，而且一般高于海水，如现代海水中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 0.709175 ~ 0.709235，河水为 0.7074 ~ 0.803 (McArthur, 1994; Flecker and Ellam, 1999; Krabbenhöft *et al.*, 2010)。因此，锶同位素被广泛应用于蒸发盐类矿床的物源判断。如柴达木盆地作为典型陆相封闭盆地，其第四纪石膏层锶同位素值 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.7110$) 远超同期海水 (图 4)，印证了其陆源主导的成盐机制。老挝呵叻盆地晚白垩纪石盐中部分 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值大于同时代海水，部分 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值明显趋近海水演化曲线，反映该区成盐过程中存在残留海水 (Li *et al.*, 2018; 图 4)。

YZK-3 钻孔中石盐和硬石膏的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值均远远高于古近纪海水的值 (图 4)，表明成盐物质来源并非海相。与鲁西和鲁西南地区岩石相比，YZK-3 钻孔盐类矿物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值大于幔源碳酸岩和正长岩，位于富钾火山岩的范围内 (图 4)。YZK-3 钻孔的矿物组合 (碳酸盐、石盐、石膏) 及沉积序列均呈典型陆相湖泊特征，因此推断山东黄岗潜凹陷成盐卤水系统未受海水影响，其物质来源主要以岩石风化产物为主。

深部热液几乎是所有盐类矿床都存在的一种物质来源 (e.g., Warren, 1989; Li *et al.*, 2015, 2018)，比如柴达木盆地虽然是典型的陆相盆地，

但也存在热液补给 (Lowenstein *et al.*, 1989)，老挝呵叻大型钾盐盆地以及中国云南的兰坪思茅盐类矿床，几十年来一直存在海陆物源之争，但深部热液的存在是没有争议的 (曲一华等, 1990; Li *et al.*, 2015, 2018)。YZK-3 钻孔中存在与热液关系密切的铁白云石，该矿物主要分布在钻孔中、下部，可能的原因是热液流体从地球深部向上进入盆地，深部的沉积物温度高，在高温条件下有利于 Fe^{2+} 进入矿物晶格。热液作用下形成白云石和铁白云石是普遍的现象，魏世林等 (2024) 综述了这方面的文献，认为湖泊沉积物中白云石主要受控于蒸发作用影响，但热液活动的影响同样普遍存在。

研究区存在深部热液的直接证据是关于地热的相关研究。如嘉祥潜凸起南部及鱼台凹陷勘查到的奥陶系马家沟群地热井，热储层顶板埋深分别为 1272 m、2089 m，井底物探测温分别为 54.3 °C、74.5 °C，井口温度分别为 48 °C、68.5 °C (秦鹏等, 2024)。地热水的化学成分以 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等离子为主，如菏泽地区地热水化学类型为 Na-Ca- SO_4 离子型，矿化度为 3.6 ~ 4.1 g/L，总硬度为 1.5 ~ 1.8 g/L，pH 值为 6.92 ~ 7.40 (王福花等, 2008)。鲁西南地区地热类型为中低温型层状热储，热源来自地球深部岩浆热液活动及放射性元素衰变，局部地带受断裂构造活动影响形成对流型热传导，分布面积广，岩层厚度比较稳定 (王福花等, 2008; 康凤新, 2018; 郭国强等, 2022; 秦鹏等, 2024)。推测黄岗潜凹陷也可能存在热液补给，这些热液中的水源与大气降水相关 (图 5)。鲁西南地区热水与西藏和云南地区温泉水一样，均落在全球大气降水线附近，但鲁西南地热

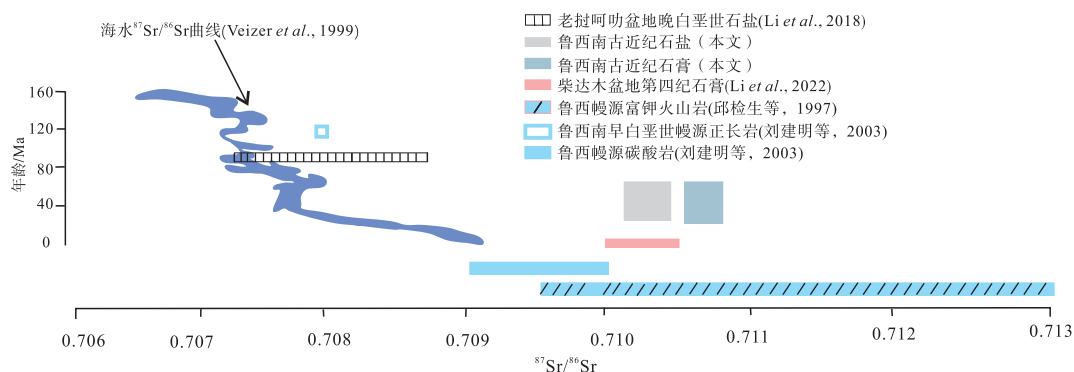


图 4 鲁西南 YZK-3 钻孔石盐和硬石膏的锶同位素及其与同时代海水及其他区域的对比

Fig. 4 Comparison of Sr isotopes of halite and anhydrite from borehole YZK-3 in southwest Shandong Province with contemporaneous seawater and other areas

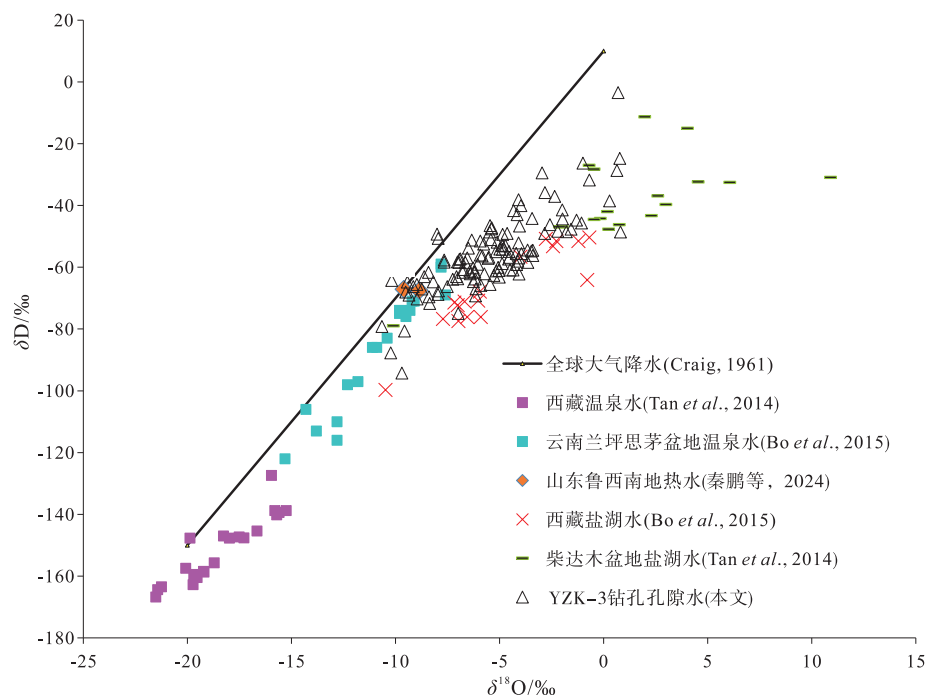


图 5 鲁西南 YZK-3 钻孔孔隙水^①与其他地区氢氧同位素的对比

Fig. 5 Comparison of $\delta^{18}\text{O}$ and δD of pore-water from borehole YZK-3 in southwest Shandong Province with those of other areas

水的氢氧同位素更偏正一些；类似地，YZK-3 钻孔孔隙水氢氧同位素与大气降水相比明显正向漂移，与西藏、柴达木盆地盐湖一样，均受到持续的蒸发作用影响。除了持续的干旱外，海拔效应、大陆效应等也会影响 YZK-3 钻孔所在的黄岗潜凹陷水体性质。来源于印度洋/太平洋的水汽，在经过海拔高、温度低的青藏高原地区时，水汽冷凝，重同位素 (^{18}O 、 ^2H) 优先凝结并随降水落下，剩余水汽中轻同位素比例升高，在低海拔地区（如云南、山东）降水分馏减弱，同位素值逐渐偏正（伍光和，2000）。

综上所述，黄岗潜凹陷成矿物源主要是陆源，含有受大气降水影响的深部热液，没有发现海相来源。

5 结论

1) 鲁西南黄岗潜凹陷 YZK-3 钻孔的盐类矿物种类、含量及分布揭示出始新世中晚期—渐新世古湖泊的演化过程为：淡水湖（1157.08 – 1153.38 m）→咸水湖（1153.38–965.18 m）→盐

湖（965.18 – 961.5 m）→浅咸水湖（961.5 – 862.88 m）→深咸水湖（862.88–733.38 m）→淡水湖（733.38–635.38 m）。

2) 综合 YZK-3 钻孔盐类矿物同位素和热液研究成果，推测黄岗潜凹陷盐类矿床的成盐卤水中没有海相信息。除了岩石风化的陆源物质之外，受大气降水影响的深部热液，也是不可忽视的物源之一。

参考文献 (References)

- 程裕祺. 1994. 中国区域地质概论. 北京: 地质出版社. [Cheng Y Q. 1994. Introduction to Regional Geology of China. Beijing: Geological Publishing House]
- 刁海忠, 王娟, 王继国. 2019. 山东古近纪含膏盆地的断裂控矿作用及成矿模式探讨. 矿业工程, 17(4): 8–11. [Diao H Z, Wang J, Wang J G. 2019. Discussion on ore-controlling of fracture structure and metallogenic model in Paleogene gypsum basin, Shandong Province. Mining Engineering, 17(4): 8–11]
- 冯晓杰, 渠永宏, 王洪江. 1999. 中国东部早第三纪海侵问题的研究. 西安工程学院学报, 21(3): 9–12. [Feng X J, Qu Y H, Wang H J. 1999. Studies on the transgression in Eocene Period in eastern China. Journal of Xi'an Engineering University, 21(3): 9–12]

^① 数据来自李明慧未发表数据。

- 郭国强,秦鹏,姚铮,贺春艳,罗怀东,王润生. 2022. 鱼台凹陷边部玄武岩覆盖区地热勘探方法及应用效果. 山东国土资源, 38(7): 25-30. [Guo G Q, Qin P, Yao Z, He C Y, Luo H D, Wang R S. 2022. Geothermal exploration method and application effect in basalt covered area at the edge of Yutai depression. Shandong Land and Resources, 38(7): 25-30]
- 季克俭,吕凤翔. 2007. 交代热液成矿学说: 热液矿床成因的佐证. 北京: 地质出版社, 330. [Ji K J, Lü F X. 2007. Metasomatic Hydrothermal Mineralization Theory: Evidence for the Genesis of Hydrothermal Ore Deposits. Beijing: Geological Publishing House, 330]
- 康凤新. 2018. 山东省地热清洁能源综合评价. 北京: 科学出版社, 1-20. [Kang F X. 2018. Assessment of Geothermal Resources in Shandong Province. Beijing: Science Press, 1-20]
- 李明慧,颜茂都,方小敏,张增杰,孙淑蕊. 2016. 云南兰坪—思茅盆地和老挝钾盐矿床物质来源新认识. 高校地质学报, 22(1): 60-65. [Li M H, Yan M D, Fang X M, Zhang Z J, Sun S R. 2016. New ideas on the origins of potash deposits in Yunnan China and Laos. Geological Journal of China Universities, 22(1): 60-65]
- 李增学,张功成,李莹,刘海燕,吕大炜,沈怀磊,尚鲁宁. 2012. 中国海湾区古近纪含煤盆地与煤系分布研究. 地学前缘, 19(4): 314-326. [Li Z X, Zhang G C, Li Y, Liu H Y, Lü D W, Shen H L, Shang L N. 2012. The Paleogene coal-bearing basin and coal-measures distribution of China sea area. Earth Science Frontiers, 19(4): 314-326]
- 刘成林,王弼力,焦鹏程. 1999. 新疆罗布泊盐湖氢氧锶硫同位素地球化学及钾矿成矿物质来源. 矿床地质, 18(3): 268-275. [Liu C L, Wang M L, Jiao P C. 1999. Hydrogen, oxygen, strontium and sulfur isotopic geochemistry and potash-forming material sources of Lop salt lake, Xinjiang. Mineral Deposits, 18(3): 268-275]
- 刘建明,张宏福,孙景贵,叶杰. 2003. 山东幔源岩浆岩的碳—氧和锶—钕同位素地球化学研究. 中国科学(D辑), 33(10): 921-930. [Liu J M, Zhang H F, Sun J G, Ye J. 2003. Carbon-oxygen and strontium-neodymium isotopic geochemistry of mantle source-derived magmatic rocks in Shandong Province. Science in China(Series D): 33(10): 921-930]
- 刘群,陈郁华,李银彩,蓝庆春,袁鹤然,闫东兰. 1987. 中国中、新生代陆源碎屑—化学岩型盐类沉积. 北京: 北京科学技术出版社, 1-154. [Liu Q, Chen Y H, Li Y C, Lan Q C, Yuan H R, Yan D L. 1987. Salt Sediments of Terrigenous Clastic-Chemogenic Type in Meso-Cenozoic of China. Beijing: Beijing Science and Technology Publishing House, 1-154]
- 路淑毅. 2022. 鲁西南单县盆地 46~21.8 Ma 碳酸盐成因矿物学及古环境意义. 中国地质大学(北京)硕士学位论文. [Lu S Y. 2022. Carbonate mineralogy and paleoenvironmental significance in the Shanxian Basin, southwestern Shandong during the period from 46 to 21.8 Ma. Masteral dissertation of China University of Geosciences (Beijing)]
- 马顺清,李善平,谢智勇,潘彤,白宗海,陈静,任华. 2012. 青海大风山天青石矿床地质特征及成因分析. 西北地质, 45(3): 130-140. [Ma S Q, Li S P, Xie Z Y, Pan T, Bai Z H, Chen J, Ren H. 2012. Characteristics and genetic analysis of celestite deposits in Dafeng Mountain area, Qinghai. Northwestern Geology, 45(3): 130-140]
- 齐丽丽. 2010. 山东省第三纪盐类矿产沉积主控因素的研究. 山东科技大学硕士学位论文. [Qi L L. 2010. Study on the main controlling factors of salt mineral deposits in the Tertiary period in Shandong Province. Masteral dissertation of Shandong University of Science and Technology]
- 邱检生,王德滋,曾家湖,McInnes B I A. 1997. 鲁西中生代富钾火山岩及煌斑岩微量元素和 Nd-Sr 同位素地球化学. 高校地质学报, 3(4): 384-395. [Qiu J S, Wang D Z, Zeng J H, McInnes B I A. 1997. Study on trace element and Nd-Sr isotopic geochemistry of Mesozoic potash-rich volcanic rocks and lamprophyres in western Shandong Province. Geological Journal of China Universities, 3(4): 384-395]
- 秦鹏,王振涛,韩淑敏,蒙永辉,李笑泉,常超鹏,王润生. 2024. 鲁西南潜隆起中部岩溶热储特征及其成因机制. 山东国土资源, 40(3): 109-115. [Qin P, Wang Z T, Han S M, Meng Y H, Li X Q, Chang C P, Wang R S. 2024. Characteristics and genetic mechanism of karst heat reservoir in the middle part of Southwest Buried Uplift in Shandong Province. Shandong Land and Resources, 40(3): 109-115]
- 曲一华,钱自强,韩蔚田. 1979. 盐类矿物鉴定手册. 北京: 地质出版社, 99-137. [Qu Y H, Qian Z Q, Han W T. 1979. Hand Book of Salt Minerals. Beijing: Geological Publishing House, 99-137]
- 孙淑蕊. 2019. 老挝万象盆地盐类矿床物源与成盐环境: 石盐成因矿物学约束. 中国科学院大学博士学位论文. [Sun S R. 2019. Source and formation environment of salt deposits in Vientiane Basin, Laos: constraints from mineralogy of rock salt genesis. Doctoral dissertation of University of Chinese Academy of Sciences]
- 唐璐璐,张尚坤,于学峰,田京祥,杨斌,罗文强,陈文韬,梁吉坡,马祥县,仵康林. 2021. 鲁西南黄岗潜凹陷岩盐矿地质特征及找矿远景. 山东国土资源, 37(6): 1-10. [Tang L L, Zhang S K, Yu X F, Tian J X, Yang B, Luo W Q, Chen W T, Liang J P, Ma X X, Wu K L. 2021. Geological characteristics and prospecting potentials of rock salt deposit in Huanggang subdepression in southwestern Shandong Province. Shandong Land and Resources, 37(6): 1-10]
- 王晓晓,韩作振,李明慧,方小敏,赵延洋. 2020. 柴达木盆地西部 SG-1 钻孔中白云石成因探讨. 高校地质学报, 26(5): 520-529. [Wang X X, Han Z Z, Li M H, Fang X M, Zhao Y Y. 2020. On the origin of dolomite in lacustrine sediments of the borehole SG-1 in western Qaidam Basin. Geological Journal of China Universities, 26(5): 520-529]
- 魏世林,焦鑫,柳益群,李红,周鼎武,吕亦然. 2024. 陆内裂谷湖相火山—热液沉积型白云岩研究进展. 古地质量, 26(5): 1037-1057. [Wei S L, Jiao X, Liu Y Q, Li H, Zhou D W, Lü Y R. 2024. Progress on volcanic-hydrothermal sedimentary dolostone in intracontinental lacustrine rift basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 26(5): 1037-1057]
- 王福花,侯欣英,孙鹏,柳耀君. 2008. 山东菏泽地区地热地质特征.

- 山东国土资源, 24(4): 40–43. [Wang F H, Hou X Y, Sun P, Liu Y J. 2008. Geological characteristics of geothermal fields in Heze area of Shandong Province. *Land and Resources in Shandong Province*, 24(4): 40–43]
- 王苏民, 窦鸿身. 1998. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社. [Wang S M, Dou H S. 1998. *Lakes in China*. Beijing: Science Press]
- 伍光和. 2000. 自然地理学. 北京: 高等教育出版社. [Wu G H. 2000. *Physical Geography*. Beijing: Higher Education Press]
- 作康林, 唐璐璐, 杨斌, 常杰, 赵艳, 张尚坤, 罗文强, 刘凤臣, 梁吉坡, 闫诚. 2023. 山东单县岩盐矿床地质特征及找矿模型浅析. *山东国土资源*, 39(11): 49–58. [Wu K L, Tang L L, Yang B, Chang J, Zhao Y, Zhang S K, Luo W Q, Liu F C, Liang J P, Yan C. 2023. Study on geological characteristics and prospecting model of rock salt deposit in Shanxian County in Shandong Province. *Shandong Land and Resources*, 39(11): 49–58]
- 张帅, 柳益群, 焦鑫, 周鼎武, 张旭, 陆申童, 周宁超. 2018. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷中二叠统芦草沟组云质岩沉积环境及白云石成因探讨. *古地理学报*, 20(1): 33–48. [Zhang S, Liu Y Q, Jiao X, Zhou D W, Zhang X, Lu S T, Zhou N C. 2018. Sedimentary environment and formation mechanism of dolomitic rocks in the Middle Permian Lucaogou Formation, Jimusar Depression, Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 20(1): 33–48]
- 张帅, 柳益群, 李红, 焦鑫, 周鼎武. 2020. 准噶尔盆地东部中二叠统幔源热液沉积白云岩. *古地理学报*, 22(1): 111–128. [Zhang S, Liu Y Q, Li H, Jiao X, Zhou D W. 2020. Mantle-originated hydrothermal-sedimentary dolostone in the Middle Permian in eastern Junggar Basin, China. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 22(1): 111–128]
- 赵澄林, 朱筱敏. 2001. 沉积岩石学. 北京: 石油工业出版社. [Zhao C L, Zhu X M. 2001. *Sedimentary Petrology*. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 赵民, 黄春慧, 汤振清. 2000. 鲁西南主要煤田岩浆岩特征及对煤的影响. *煤田地质与勘探*, 28(2): 10–13 [Zhao M, Huang C H, Tang Z Q. 2000. Features of magmatite and influence on coal in main coalfields in southwestern Shandong. *Coal Geology & Exploration*, 28(2): 10–13]
- 郑德顺, 李明龙, 李守军. 2012. 鲁西南地区官庄群沉积特征与沉积环境分析. *沉积与特提斯地质*, 32(4): 1–7. [Zheng D S, Li M L, Li S J. 2012. Sedimentary characteristics and environments of the Guanzhuang Group in southwestern Shandong. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32(4): 1–7]
- 郑喜玉, 张明刚, 徐昶, 李秉孝. 2002. 中国盐湖志. 北京: 科学出版社. [Zheng X Y, Zhang M G, Xu C, Li B X. 2002. *Salt Lakes in China*. Beijing: Science Press]
- 钟大康, 杨喆, 孙海涛, 张硕. 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. [Zhong D K, Yang Z, Sun H T, Zhang S. 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* (Chinese Edition), 20(1): 19–32]
- 朱猛. 2015. 山东省大汶口盆地盐类矿床的地质成因探讨. *山东国土资源*, 31(1): 27–30. [Zhu M. 2015. Study on the origin of salt deposit in Dawenkou Basin in Shandong Province. *Shandong Land and Resources*, 31(1): 27–30]
- Bo Y, Liu C L, Zhao Y J, Wang L C. 2015. Chemical and isotopic characteristics and origin of spring waters in the Lanping–Simao Basin, Yunnan, Southwestern China. *Geochemistry*, 75: 287–300.
- Bontognali T R R, Vasconcelos C, Warthmann R J, Bernasconi S M, Dupraz C, Strohmenger C J, McKenzie J A. 2010. Dolomite formation within microbial mats in the coastal Sabkha of Abu Dhabi (United Arab Emirates). *Sedimentology*, 57(3): 824–844.
- Craig H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133: 1702–1703.
- Davis K J, Dove P M, De Yoreo J J. 2000. The role of Mg^{2+} as an impurity in calcite growth. *Science*, 290: 1134–1137.
- El Tabakh M, Schreiber B C, Utha-Aroon C, Coshell L, Warren J K. 1998. Diagenetic origin of basal anhydrite in the Cretaceous Maha Sarakham salt; Khorat Plateau, NE Thailand. *Sedimentology*, 45(3): 579–594.
- Eugster H P, Hardie L A. 1978. Saline lakes. In: Lerman A (ed). *Lakes: Chemistry, Geology, Physics*. New York: Springer-Verlag, 237–293.
- Flecker R, Ellam R M. 1999. Distinguishing climatic and tectonic signals in the sedimentary successions of marginal basins using Sr isotopes: an example from the Messinian salinity crisis, eastern Mediterranean. *Journal of the Geological Society (London)*, 156: 847–854.
- Krabbenhöft A, Eisenhauer A, Böhm F, Vollstaedt H, Fietzke J, Liebetrau V, Augustin N, Peucker-Ehrenbrink B, Müller M N, Horn C, Hansen B T, Nolte N, Wallmann K. 2010. Constraining the marine strontium budget with natural strontium isotope fractionations ($^{87}Sr/^{86}Sr$, $\delta^{88/86}Sr$) of carbonates, hydrothermal solutions and river waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74: 4097–4109.
- Land L S. 1998. Failure to precipitate dolomite at 25 °C from dilute solution despite 1000-fold oversaturation after 32 years. *Aquatic Geochemistry*, 4(3–4): 361–368.
- Last W M. 1990. Lacustrine dolomite: an overview of modern, Holocene, and Pleistocene occurrences. *Earth-Science Reviews*, 27(3): 221–263.
- Li J, Li M H, Fang X M, Zhang G X, Zhang W L, Liu X M. 2017. Isotopic composition of gypsum hydration water in deep Core SG-1, western Qaidam Basin (NE Tibetan Plateau): implications for paleoclimatic evolution. *Global and Planetary Change*, 155: 70–77.
- Li M H, Kang S C, Zhu L P, Wang F Y, Wang J B, Yi C L, Fang X M, Xie M P. 2009. On the unusual Holocene carbonate sediment in lake-Nam Co, central Tibet. *Journal of Mountain Science*, 6: 346–353.
- Li M H, Fang X M, Yi C L, Gao S P, Zhang W L, Galy A. 2010. Evaporite minerals and geochemistry of the upper 400 m sediments in a core from the western Qaidam Basin, Tibet. *Quaternary International*, 218(1–2): 176–189.

- Li M H, Fang X M, Wang J Y, Song Y G, Yang Y B, Zhang W L, Liu X M. 2013. Evaporite minerals of the lower 538.5 m sediments in a long core from the western Qaidam Basin, Tibet. *Quaternary International*, 298: 123–133.
- Li M H, Yan M D, Wang Z R, Liu X M, Fang X M, Li J. 2015. The origins of the Mengye potash deposit in the Lanping–Simao Basin, Yunnan Province, western China. *Ore Geology Reviews*, 69: 174–186.
- Li M H, Yan M D, Fang X M, Zhang Z J, Wang Z R, Li J, Sun S R, Liu X M. 2018. Origins of the mid-Cretaceous evaporite deposits of the Sakhon Nakhon Basin in Laos: evidence from the stable isotopes of halite. *Journal of Geochemical Exploration*, 184: 209–222.
- Li M H, Zhu L P, Wang J B, Ju J T, Liu C, Ma Q F, Xu T, Qiao B J, Wang X X. 2021. Holocene lake evolution and glacial fluctuations indicated by carbonate minerals and their isotopic compositions in the sediments of a glacial melt recharge lake on the northwestern Tibetan Plateau. *Frontiers in Earth Science*, 9: 656281.
- Li M H, Fang X M, Wang Z R, Li J, Yan M D, Galy A, Wang J Y, Lu S Y, Zhu L P. 2022. Using mineralogy and Sr-Nd isotopes of gypsum to constrain the provenance of sediments in the western Qaidam Basin, northern Tibetan Plateau: implications for neo-tectonic activities. *Journal of Asian Earth Sciences*, 223: 104983.
- Lowenstein T K, Spencer R J, Zhang P X. 1989. Origin of ancient potash evaporites: clues from the modern nonmarine Qaidam Basin of western China. *Science*, 245: 1090–1092.
- McArthur J M. 1994. Recent trends in strontium isotope stratigraphy. *Terra Nova*, 6: 331–358.
- Müller G, Irion G, Förstner U. 1972. Formation and diagenesis of inorganic Ca-Mg carbonates in the lacustrine environment. *Naturwissenschaften*, 59: 158–164.
- Tan H B, Ma H Z, Li B K, Zhang X Y, Xiao Y K. 2010. Strontium and boron isotopic constraint on the marine origin of the Khammuane potash deposits in southeastern Laos. *Chinese Science Bulletin*, 55(27): 3181–3188.
- Tan H B, Zhang Y F, Zhang W J, Kong N, Zhang Q, Huang J Z. 2014. Understanding the circulation of geothermal waters in the Tibetan Plateau using oxygen and hydrogen stable isotopes. *Applied Geochemistry*, 51: 23–32.
- Veizer J, Ala D, Azmy K, Bruckschen P, Buhl D, Bruhn F, Carden G A F, Diener A, Ebner S, Godderis Y, Jasper T, Korte C, Pawellek F, Podlaha O G, Strauss H. 1999. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater. *Chemical Geology*, 161(1–3): 59–88.
- Wang J, Fang X, Appel E, Song C. 2012. Pliocene-Pleistocene climate change at the NE Tibetan Plateau deduced from lithofacies variation in the drill core SG-1, western Qaidam Basin, China. *Journal of Sedimentary Research*, 82(12): 933–952.
- Warren J K. 1989. *Evaporite Sedimentology: Importance in Hydrocarbon Accumulation*. Prentice Hall: 1–37.
- Warren J K. 2010. Evaporites through time: tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits. *Earth-Science Reviews*, 98(3–4): 217–268.
- You X L, Sun S, Zhu J Q, Li Q, Hu W X, Dong H L. 2013. Microbially mediated dolomite in Cambrian stromatolites from the Tarim Basin, northwest China: implications for the role of organic substrate on dolomite precipitation. *Terra Nova*, 25(5): 387–395.

(责任编辑 张西娟)