

四川盆地东部地区早中三叠世蒸发岩的锶同位素特征及其地质意义

丁婷^{1,2}, 袁苗¹, 刘成林^{3,4}, 赵艳军⁴, 朱志军¹, 杨庆坤^{1,5}

(1. 东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 330013; 2. 中国地质调查局 乌鲁木齐自然资源综合调查中心, 新疆 乌鲁木齐 830057; 3. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 4. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 5. 青海民族大学 旅游学院, 青海 西宁 810007)

摘要: 锶同位素已经成为全球海平面变化、造山运动、古气候和古环境等全球地质事件研究与对比的有效工具之一。本文以四川盆地东部地区早中三叠世蒸发岩的野外剖面 and 钻孔岩心为主要研究对象, 测试了碳酸盐岩、硫酸盐岩和石盐岩的锶同位素组成, 并建立了相应的锶同位素演化曲线。研究结果显示, 碳酸盐岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值平均为0.707 895, 硬石膏岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值平均为0.708 174, 石盐岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值平均为0.708 177, 同时碳酸盐岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值从早三叠世的0.707 413快速增加到中三叠世早期的0.708 515, 而后呈现下降趋势。从总体上看, 这些⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值与全球早中三叠世同期的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr值数据接近, 说明四川盆地东部地区早中三叠世钾盐的物质来源大部分为海水, 并沉积于海相沉积环境, 同时由于火山作用造成的温室效应也为钾盐沉积提供了气候条件。

关键词: 锶同位素; 蒸发岩; 古环境重建; 早中三叠世; 四川盆地东部地区

中图分类号: P588.24; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)06-0868-10

Characteristics of strontium isotope and the significance for the evaporites of Early and Middle Triassic in the eastern region of Sichuan Basin

DING Ting^{1,2}, YUAN Miao¹, LIU Cheng-lin^{3,4}, ZHAO Yan-jun⁴, ZHU Zhi-jun¹ and YANG Qing-kun^{1,5}

(1. East China university of Technology, Nanchang 330013, China; 2. Urumqi Comprehensive Survey Center on Natural Resources, China Geological Survey, Urumqi 830057, China; 3. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 4. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 5. School of Tourism, Qinghai Minzu University, Xining 810007, China)

Abstract: Strontium isotopes have become one of the effective tools for studying and comparing global geological events such as global sea level changes, orogeny, paleoclimate, and paleoenvironment. This article takes the field profiles and drilled cores of Early and Middle Triassic evaporites in the eastern region of Sichuan Basin as the main research objects, tests the strontium isotope compositions of carbonate rocks, sulfate rocks, and halite rocks, and establishes the corresponding strontium isotope evolution curves. The results show that the average ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr value of carbonate rocks is 0.707 895, the average ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr value of anhydrite rocks is 0.708 174, and the average ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr value of halite rocks is 0.708 177, and the ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr value of carbonate rocks increased rapidly from 0.707 413 in the Early Triassic to 0.708 515 in the early Middle Triassic, and then showed a downward trend. Overall, the ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr values are close to the published global ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr data of the same period in the Early and

收稿日期: 2023-07-06; 接受日期: 2023-10-15; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC2906603); 国家自然科学基金项目(41902065, 42362018); 第三次新疆综合科学考察项目课题(2022xjkk1303); 新疆重大科技专项(2022A03009-4)

作者简介: 丁婷(1989-), 女, 讲师, 主要从事盐湖及盐类矿产研究, E-mail: dingting886@hotmail.com。

Middle Triassic, indicating that the material source of the Early and Middle Triassic potassium salt in the eastern region of the Sichuan Basin is mostly seawater and deposited in a marine sedimentary environment. At the same time, the greenhouse effect caused by volcanic activity also provides climatic conditions for potassium salt deposition.

Key words: strontium isotope; evaporite; paleoenvironment reconstruction; Early-Middle Triassic; Sichuan Basin

Fund support: National Key Research and Development Program of China (2026YFC2906603); National Natural Science Foundation of China(41902065, 42362018); The Third Xinjiang Comprehensive Scientific Expedition Project(2022xjkk1303); Xinjiang Major Science and Technology Special Project (2022A03009-4)

锶元素在古海洋的研究中扮演着重要的角色(Wickman, 1948)。由于锶元素在海水中的残留时间长(约为 10^6 a),远远大于海水的混合时间(约为 10^3 a),所以在同一个时代,全球范围内锶的含量不存在区域差异,是均一的,锶同位素在地质历史时期的变化只与时间这一因素相关(Mearthur *et al.*, 2004; 沈立建等, 2021)。

锶同位素组成是海平面变化的灵敏指示剂(黄思静等, 2005, 2011; 胡作维等, 2008; Tripathiliu *et al.*, 2013)。海水中的锶有两个主要的来源:壳源和幔源。大陆古老的风化壳提供了壳源的锶,这种壳源锶的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 全球平均值为0.7119(Palmer and Edmond, 1989),而幔源的锶同位素则由大洋中脊的热液提供, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的全球平均值为0.7035(Palmer and Elderfield, 1985)。因来自于风化壳的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值比来自于幔源的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值要高,因此当 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值增高时,则说明来自于大陆风化壳的物源增多,从而推断出当时海平面降低;相反当 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较低时,则说明地壳活动强烈(如全球构造活动、造山运动等),导致来自幔源的物质来源增多,从而推断当时海平面升高。因此,海相碳酸盐岩、硫酸盐岩等一些内源沉积物的锶同位素可以用来研究海平面的变化,进而还可以用来研究海水成分的变化(Clocchiati *et al.*, 1994; Allègre *et al.*, 1996; Denison *et al.*, 1998; Kato and Billingham, 1999)。

Verizer等(1999)分析了全球显生宙海相碳酸盐岩样品锶同位素的变化特征,发现三叠纪海相碳酸盐的锶同位素特征变化非常剧烈,在二叠纪末—早三叠世 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值呈急剧上升趋势,早三叠世末到中三叠世早期,海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值则出现下降的趋势,这是因为在早三叠世晚期,生态得到了恢复,风化作用减小,同时全球发生了大量的地壳活动所致。而在中三叠世中期—晚三叠世早期,锶同位素特征则相对来说比较稳定,晚三叠世中期以后又出现了 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的增加。Warren(2010)、刘成林等

(2016)通过对含盐沉积岩的锶同位素分析,判断蒸发岩沉积的流体来源及其沉积环境的变化特征。刘超飞等(2015)获得的川东地区海相碳酸盐岩的锶同位素演化曲线显示与全球锶同位素演化曲线一致,呈现上升的趋势,开始上升速率较慢,后来急剧上升,在早中三叠世分界处达到了最大值。

四川盆地海相三叠系一直都是中国找钾的重要层位(林耀庭, 1994)。长期以来,由于石油、天然气、富钾卤水矿、石膏、杂卤石和盐矿等资源的勘探开发,前人对四川盆地三叠系成盐条件进行了大量工作,取得了较深入的认识,从蒸发岩的生成模式和成盐机理(蔡克勤等, 1986; 林耀庭, 1994, 1995, 2003, 2009; 黄建国, 1998; 陈莉琼等, 2010; 李凌等, 2012)、古地理古环境(林耀庭等, 2005; 郭旭升, 2010)、盐盆地的分布(黄东等, 2013)、岩系剖面地球化学特征(胡作维等, 2007)、盐类矿物组合(廖林志等, 1984; 陈继洲, 1990)、盐卤水文地球化学特征及富钾卤水成因(林耀庭等, 1996, 2002, 2004; 李亚文等, 1998)等方面进行了分析,认为三叠系盐盆的形成环境为浅水蒸发成盐。作为中国重要的找钾盆地之一(蔡克勤等, 1986; 林耀庭, 1994, 1995; 赵艳军等, 2015; 丁婷, 2017; 朱正杰等, 2021),四川盆地蒸发岩锶同位素的研究及其缺乏,大多都把重点放在碳酸盐岩的锶同位素研究上(黄思静等, 2006; 刘超飞等, 2015),鉴于此,本文重点对蒸发岩特别是硫酸盐(硬石膏)岩和石盐岩的锶同位素进行研究,从这一角度对四川盆地成钾条件进行分析和判断。

1 地质背景

四川盆地位于扬子地块的西部(图1),西以青藏高原东缘的松潘-甘孜褶皱带和龙门山冲断带为界,北以秦岭造山带南缘的米仓山穹隆和大巴山冲断带为界,东侧为华南造山带外缘的雪峰隆起和黔

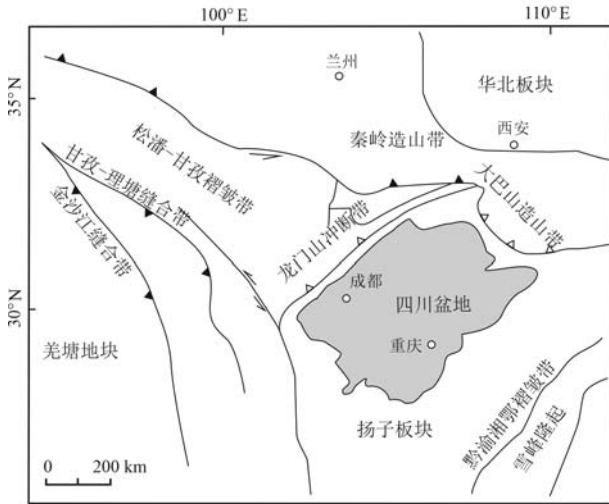


图1 四川盆地所处大地构造位置(孟昱璋, 2011)

Fig. 1 The tectonic location of the Sichuan Basin
(Meng Yuzhang, 2011)

渝湘鄂褶皱带,它是上扬子准地台内通过北东向及北西向交叉的深断裂活动形成的菱形构造-沉积盆地(翟光明, 1989; 林良彪等, 2007; 孟昱璋, 2011),下中三叠统的蒸发沉积作用就在这个断拗式构造盆地中进行(林耀庭等, 2002)。

四川盆地含盐地层主要出露于中下三叠统(朱正杰等, 2021)。下三叠统下部为飞仙关组(T_1f),上部为嘉陵江组(T_1j)。早三叠世初,整个四川盆地遭受海侵,飞仙关组为紫红色泥页岩夹泥灰岩、灰岩、鲕粒灰岩,属于滨浅海相沉积环境,不发育含盐层。嘉陵江组可分为5段:嘉一段(T_1j^1)为大套灰-深灰色泥细粉晶灰岩,夹少量泥灰岩、薄层灰白色石膏;嘉二段(T_1j^2)以灰-深灰色白云岩、硬石膏、含膏盐岩、膏质云岩、泥质云岩为主;嘉三段(T_1j^3)以碳酸盐岩为主,为灰岩夹白云质灰岩,间或发育白云岩和硬石膏层;嘉四段(T_1j^4)以厚层硬石膏、盐岩、膏质云岩、灰岩、灰色白云岩、膏质云岩为主,部分层位见有菱镁矿和杂卤石;嘉五段(T_1j^5)下部以灰色泥细粉晶灰岩、鲕粒灰岩夹硬石膏层为主,上部为硬石膏、盐岩、膏质云岩(龚大兴等, 2015)。

2 样品采集及测试方法

本次研究的三叠系碳酸盐岩样品共有24个,主要来自于四川盆地东部的重庆合川剖面、四川华蓥山/领水县的仰天窝剖面、重庆韭菜坡剖面、重庆石柱剖面、重庆云阳剖面(图2)。采样时,考虑到干扰

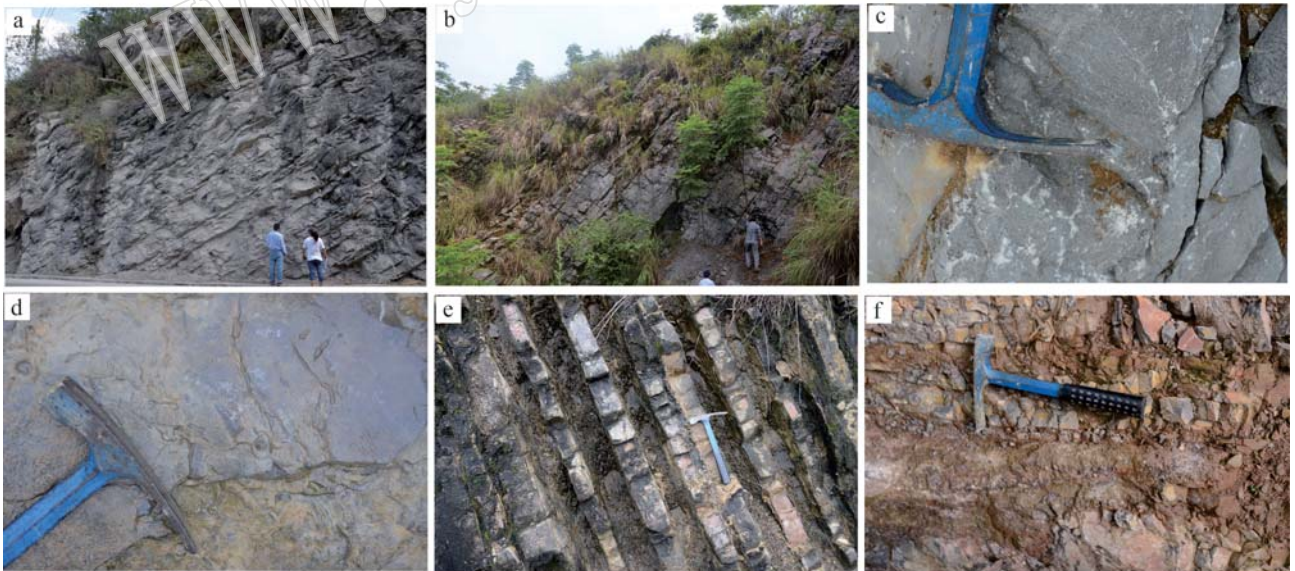


图2 野外剖面及样品照片

Fig. 2 Field section and sample photos

a—仰天窝剖面的嘉陵江组; b—云阳剖面的巴东组; c—韭菜坡剖面的飞仙关组; d—韭菜坡剖面的嘉陵江组; e—合川剖面的嘉陵江组; f—合川剖面的雷口坡组

a—Jialingjiang Formation in Yangtianwo section; b—Badong Formation in Yunyang section; c—Feixianguan Formation in Jiukaipo section; d—Jialingjiang Formation in Jiukaipo section; e—Jialingjiang Formation in Hechuan section; f—Leikoupo Formation in Hechuan section

因素对测试结果的影响,只采取无后期蚀变、无方解石脉充填、无破碎现象的新鲜岩石。样品控制层位为飞仙关组、嘉陵江组和雷口坡组(在云阳和石柱地区中三叠统为巴东组)。硫酸盐岩样品主要来自于重庆忠县 ZK01 井(图 3b),石盐岩样品主要来自重庆的长平 3 井(图 3a)。

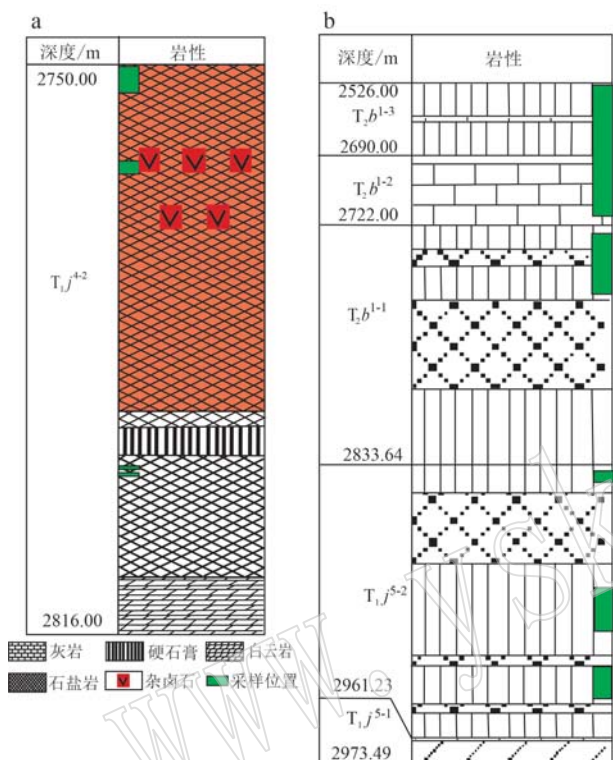


图 3 长平 3 井(a)和 ZK01 井(b)的采样岩性柱 (引自汪明泉, 2017)

Fig. 3 The lithology of well CP3(a) and well ZK01(b) (from Wang Mingquan, 2017)

本次碳酸盐岩样品的锶同位素分析测试主要在中国科学院广州地球化学研究所完成,硫酸盐岩和石盐岩样品的锶同位素分析在澳大利亚昆士兰大学完成。锶同位素分析流程主要是加 1 mL 的 2 mol/L 的 HNO₃ 将样品溶解后蒸干,再用 HNO₃ 和 HF 将样品粉末溶解,用 AG-50W-8X 柱分离出 Sr 蒸干后稀释,在 ThermoFisher 公司的 Neptune Plus 型的 MC-ICP-MS 上测试,测试采用 NBS987 的国际标准。

3 锶同位素分析结果

3.1 碳酸盐岩锶同位素特征

碳酸盐岩样品的锶同位素分析数据见表 1。由表 1 可见,早中三叠世碳酸盐岩样品的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值

表 1 早中三叠世碳酸盐岩样品的锶同位素分析数据
Table 1 Strontium isotopes of the carbonate rocks of the Early and Middle Triassic

样品号	地层	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	样品号	地层	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr
ZCL-58	飞仙关组	0.707 445	ZCL-81	嘉陵江组	0.708 044
ZCL-56	飞仙关组	0.707 456	ZCL-62	嘉陵江组	0.708 119
ZCL-55	飞仙关组	0.707 458	ZCL-87	嘉陵江组	0.708 150
ZCL-54	飞仙关组	0.707 492	ZCL-90	嘉陵江组	0.708 164
ZCL-50	飞仙关组	0.707 413	ZCL-89	嘉陵江组	0.708 183
ZCL-05	嘉陵江组	0.707 435	ZCL-88	嘉陵江组	0.708 194
ZCL-40	嘉陵江组	0.707 500	ZCL-86	嘉陵江组	0.708 207
ZCL-49	嘉陵江组	0.707 505	ZCL-08	嘉陵江组	0.708 314
ZCL-59	嘉陵江组	0.707 603	ZCL-43	雷口坡组	0.708 048
ZCL-80-2	嘉陵江组	0.707 889	ZCL-69	雷口坡组	0.708 190
ZCL-03	嘉陵江组	0.707 915	ZCL-79	雷口坡组	0.708 320
ZCL-16	嘉陵江组	0.707 919	ZCL-67	雷口坡组	0.708 515

分布范围为 0.707 413 ~ 0.708 515,平均值为 0.707 895,其中小于等于 0.707 5 的样品有 7 个,占整个样品数的 29%; 0.707 5~0.708 0 的样品数有 5 个,占整个样品数的 21%; 0.708 0~0.708 5 的样品数有 11 个,占 46%;大于 0.708 5 的样品数的 1 个,占整个样品的 4%。

不同层位样品的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值也不同。从图 4 可以看出,飞仙关组的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值最低,最小值为 0.707 413,最大值为 0.707 492,平均值为 0.707 453;嘉陵江组的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 最大值为 0.708 314,最小值则为 0.707 435,平均值为 0.707 943;雷口坡组的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值的最小值为 0.708 048,最大值为 0.708 515,平均值为 0.708 268。总体看来,从早三叠世到中三叠世早期,锶同位素呈快速增长的趋势,并随后下降。

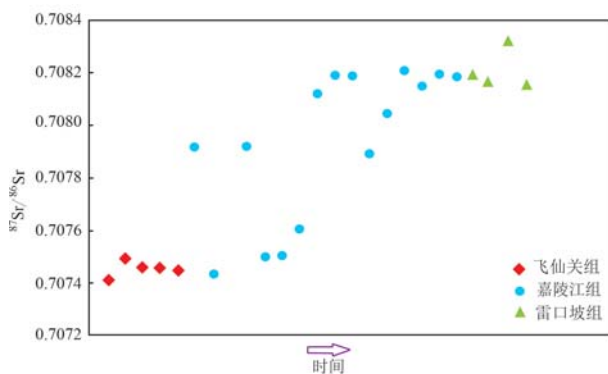


图 4 碳酸盐岩的锶同位素值在早中三叠世的分布图
Fig. 4 Strontium isotopes diagram of carbonate rocks in Early and Middle Triassic

3.2 硫酸盐岩锶同位素特征

硫酸盐岩(硬石膏岩)样品来自重庆忠县的 ZK01 井,主要层位为中三叠统巴东组。总共测了 76

个样,其中有3个灰岩样品,73个硬石膏岩样品,它们的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值比较稳定,最大值为0.708 307,最小值为0.708 149,平均值为0.708 174(表2)。

3.3 石盐岩锶同位素特征

石盐岩样品主要来自于重庆长寿的长平三井嘉陵江组四亚段橘红色石盐岩,属于强氧化环境下形成的

石盐。它们的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 最小值为0.708 151,最大值为0.708 257,平均值为0.708 177(表3)。

4 讨论

从图4可以看出碳酸盐岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值从飞仙

表2 ZK01井硫酸盐岩样品的锶同位素分析数据

Table 2 The strontium isotopes of the sulfate rocks in ZK01

样品号	深度/m	岩性	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	样品号	深度/m	岩性	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
ZK3-01	2 547.98	硬石膏岩	0.708 216	ZK3-42	2 650.25	硬石膏岩	0.708 229
ZK3-02	2 528.69	硬石膏岩	0.708 255	ZK3-43	2 656.19	硬石膏岩	0.708 167
ZK3-03	2 531.70	硬石膏岩	0.708 219	ZK3-44	2 652.05	硬石膏岩	0.708 182
ZK3-04	2 537.55	硬石膏岩	0.708 213	ZK3-45	2 657.58	硬石膏岩(泥质重)	0.708 171
ZK3-05	2 534.30	硬石膏岩	0.708 223	ZK3-46	2 560.62	硬石膏岩	0.708 167
ZK3-06	2 543.08	硬石膏岩	0.708 224	ZK3-47	2 673.94	硬石膏岩	0.708 173
ZK3-07	2 539.53	硬石膏岩	0.708 246	ZK3-48	2 675.99	硬石膏岩	0.708 164
ZK3-08	2 544.54	硬石膏岩	0.708 213	ZK3-49	2 664.39	硬石膏岩	0.708 163
ZK3-09	2 546.56	硬石膏岩	0.708 213	ZK3-50	2 665.42	硬石膏岩	0.708 186
ZK3-10	2 547.87	硬石膏岩	0.708 215	ZK3-51	2 664.75	硬石膏岩	0.708 166
ZK3-11	2 549.74	白云质硬石膏岩	0.708 204	ZK3-51	2 670.68	硬石膏岩	0.708 159
ZK3-12	2 550.07	白云质硬石膏岩	0.708 270	ZK3-52	2 679.00	硬石膏岩	0.708 172
ZK3-13	2 550.44	白云质硬石膏岩	0.708 223	ZK3-53	2 680.70	硬石膏岩	0.708 165
ZK3-14	2 550.84	硬石膏岩	0.708 289	ZK3-54	2 683.58	硬石膏岩	0.708 158
ZK3-15	2 551.10	硬石膏岩	0.708 224	ZK3-54	2 699.80	硬石膏岩	0.708 171
ZK3-16	2 551.42	硬石膏岩	0.708 293	ZK3-55	2 760.21	硬石膏岩	0.708 170
ZK3-17	2 551.93	硬石膏岩	0.708 284	ZK3-56	2 760.25	硬石膏岩	0.708 160
ZK3-18	2 552.15	硬石膏岩	0.708 277	ZK3-56	2 812.12	硬石膏岩	0.708 163
ZK3-19	2 552.46	硬石膏岩	0.708 307	ZK3-57	2 816.51	硬石膏岩	0.708 163
ZK3-20	2 552.79	硬石膏岩	0.708 210	ZK3-58	2 819.31	硬石膏岩	0.708 189
ZK3-21	2 554.00	硬石膏岩	0.708 189	ZK3-59	2 821.21	硬石膏岩	0.708 169
ZK3-22	2 554.20	硬石膏岩	0.708 206	ZK3-60	2 823.75	硬石膏岩	0.708 173
ZK3-22	2 561.18	硬石膏岩	0.708 211	ZK3-61	2 825.61	硬石膏岩	0.708 165
ZK3-23	2 555.70	硬石膏岩	0.708 224	ZK3-62	2 826.65	硬石膏岩	0.708 189
ZK3-23	2 568.30	灰岩	0.708 221	ZK3-63	2 827.27	硬石膏岩	0.708 181
ZK3-24	2 574.34	灰岩	0.708 225	ZK3-64	2 828.19	硬石膏岩	0.708 175
ZK3-25	2 590.50	灰岩	0.708 200	ZK3-65	2 829.07	硬石膏岩	0.708 149
ZK3-26	2 599.49	硬石膏岩	0.708 204	ZK3-65	2 829.97	硬石膏岩	0.708 171
ZK3-27	2 597.21	硬石膏岩	0.708 176	ZK3-66	2 830.48	硬石膏岩	0.708 174
ZK3-28	2 602.66	硬石膏岩	0.708 224	ZK3-67	2 831.75	硬石膏岩	0.708 178
ZK3-29	2 603.76	硬石膏岩	0.708 198	ZK3-68	2 832.40	硬石膏岩	0.708 175
ZK3-30	2 609.50	硬石膏岩	0.708 190	ZK3-69	2 833.01	硬石膏岩	0.708 176
ZK3-31	2 615.88	硬石膏岩	0.708 195	ZK3-70	2 834.54	硬石膏岩	0.708 175
ZK3-32	2 613.49	硬石膏岩	0.708 181	ZK3-70	2 835.23	硬石膏岩	0.708 165
ZK3-33	2 618.39	硬石膏岩	0.708 190	ZK3-71	2 836.75	硬石膏岩	0.708 211
ZK3-34	2 620.12	硬石膏岩	0.708 178	ZK3-71	2 837.23	硬石膏岩	0.708 203
ZK3-35	2 623.82	硬石膏岩	0.708 190	ZK3-72	2 838.98	硬石膏岩	0.708 179
ZK3-36	2 627.80	硬石膏岩与白云质泥岩互层	0.708 239	ZK3-73	2 839.75	硬石膏岩	0.708 166
ZK3-37	2 631.41	含盐硬石膏岩	0.708 184	ZK3-74	2 940.45	硬石膏岩	0.708 193
ZK3-38	2 635.48	硬石膏岩	0.708 183	ZK3-74	2 842.64	硬石膏岩	0.708 175
ZK3-39	2 638.40	硬石膏岩	0.708 222	ZK3-75	2 958.24	硬石膏岩	0.708 203
ZK3-40	2 641.06	硬石膏岩	0.708 157	ZK3-75	2 959.42	硬石膏岩	0.708 188
ZK3-41	2 647.93	硬石膏岩	0.708 170	ZK3-76	2 960.40	硬石膏岩	0.708 167

表 3 长平 3 井石盐岩样品的锶同位素分析数据

Table 3 Strontium isotopes of the halite rocks in well CP3

样品号	深度/m	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	样品号	深度/m	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
cp-01	2 749.86	0.708 234	cp-07	2 769.57	0.708 257
cp-02	2 751.25	0.708 166	cp-08	2 771.40	0.708 226
cp-03	2 753.11	0.708 151	cp-09	2 776.99	0.708 208
cp-04	2 758.84	0.708 194	cp-10	2 778.09	0.708 190
cp-05	2 763.45	0.708 204	cp-11	2 778.98	0.708 220
cp-06	2 765.55	0.708 207			

关组期到雷口坡组期呈现一个逐渐增加的趋势,这与公布的全球三叠系锶同位素值(Verizer *et al.*, 1999)有一定的一致性,即从二叠纪末到早三叠世末 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值是逐渐增大的,到早三叠世末达到最大值,而中三叠世开始下降。前人(Verizer *et al.*, 1999)认为在早三叠世末期达到最大值的这种现象与火山活动有关,上扬子板块上下三叠统广泛分布的绿豆岩(即水云母质粘土岩)证明其时本区与世界其他地区一样,火山活动比较频繁。

从图 5 中可以看出,随着深度的增加,硬石膏岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值不断变小,即从嘉陵江组到雷口坡组该值不断变小,这与全球三叠系和前文论述的碳酸盐岩的锶同位素组成从嘉陵江组到雷口坡组数值不断变小趋势是一致的。在本区钻孔内早中三叠世分界线附近有绿豆岩分布,而绿豆岩为喷发的酸性火山物质经过大气搬运、降落及蚀变而成(刘宝珺, 1981; 余子昭, 1992; 朱立军, 1995; 陈忠等, 1999),主要含有石英、长石和黏土矿物,其中黏土矿物成分主要是伊蒙混层,少量为伊利石(谢韬等,

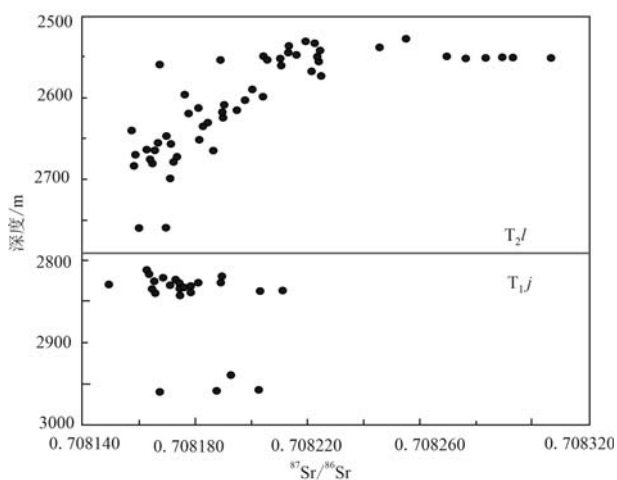
图 5 忠县 ZK01 井硬石膏岩样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分布图

Fig. 5 Strontium isotope distribution of anhydrite rocks in well ZK01

2013; 孙艳等, 2017; 马圣钞等, 2019; 王宁祖等, 2019; 芦云飞等, 2020)或锂绿磷石-蒙脱石无序混合矿物(汤志凯, 1996)。这也说明在早三叠世锶的来源主要是壳源,而在早三叠世末期由于火山活动的影响,锶同位素的来源主要是幔源。

图 6 中长平 3 井石盐岩的层位为嘉陵江组四亚段。从图 6 中可以看出,随着深度的增加, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值总体上是增大的,在沉积前期整个 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值偏大,后期则偏小。

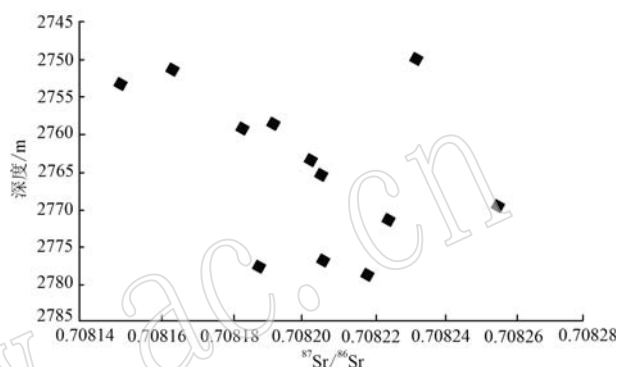
图 6 长平 3 井石盐岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分布图

Fig. 6 Strontium isotope distribution of halite rocks in well CP3

综上所述,四川盆地东部地区碳酸盐岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值最小,硫酸盐岩其次,而石盐岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值最高。这 3 种岩石类型的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值都与已公布的其他地区三叠纪的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(Verizer *et al.*, 1999; 黄思静等, 2005, 2011; 胡作维等, 2008; Tripathiliu *et al.*, 2013)基本一致,趋势一致。同时比较碳酸盐岩、硫酸盐岩、石盐岩,锶同位素随着蒸发浓缩,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值相应地增加,这符合同位素的分馏规律。此地区在早中三叠世处在一个高温地区,同位素分馏明显。

早三叠世飞仙关组 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值比较低,是因为在这一时期,生物处在一个生物复原期,全球古陆缺乏植被的保护、侵蚀作用和风化速率加快等(Korte *et al.*, 2006; Sun *et al.*, 2016),全球古陆的强烈侵蚀作用造成壳源放射性成因锶的增加,是全球海水锶同位素快速急剧上升的主要控制因素,而在早三叠世末达到了最大值。其后该值下降的速率快,这也证明当时在四川盆地早中三叠世时期有很频繁的火山活动,这与绿豆岩的出露相对应。

本次研究中碳酸盐岩、硫酸盐岩和石盐岩的锶同位素特征表明,四川盆地早中三叠世的成钾物质

来源大部分为海水,沉积于海相的沉积环境,同时由于火山作用造成的温室效应也为钾盐沉积提供了气候条件。

5 结论

四川盆地早中三叠世蒸发岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与世界其他地区的三叠纪蒸发岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值基本一致,基本上在早三叠世数值比较低,然后急剧上升,在早三叠世末达到最大值。这与世界上其他地区的锶同位素特征有着很强的一致性。四川盆地早中三叠世钾盐的物质来源主要是海水,同时火山作用也提供了部分的物质来源,成钾环境为海相沉积环境。

致谢 感谢北京西城区办公室汪明泉博士在样品收集和实验过程中给予的帮助,感谢百色学院朱正杰教授在采样过程中给予的帮助,审稿专家提出了建设性修改意见,在此一并表示谢意。

References

- Allègre C J, Dupré B, Nègre P, *et al.* 1996. Sr-Nd-Pb isotope systematics in Amazon and Congo River systems: Constraints about erosion processes[J]. *Chem. Geol.*, 13: 93~112.
- Cai Keqin and Yuan Jianqi. 1986. Metallogenic conditions and prospecting direction of Triassic potassium salt in Sichuan[J]. *Chemical and Mineral Geology*, 8(2): 4~12 (in Chinese).
- Chen Liqiong, Shen Zhaoguo, Hou Fanghao, *et al.* 2010. Formation environment of Triassic evaporite rock basin and dolostone reservoirs in Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, (4): 334~340 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jizhou. 1990. Discussion on the formation of potassium salt minerals in the Lower and Middle Triassic Series in Sichuan Basin[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 2: 1~14 (in Chinese).
- Chen Zhong, Tang Hongming and Shen Mingdao. 1999. New analysis on the composition of "mung bean rock"[J]. *Journal of Southwest Petroleum*, 21(1): 39~42 (in Chinese).
- Clocchiatti R, Moro A, Del A, *et al.* 1994. Assessment of shallow magmatic system: The 1888-90 eruption, Vulcano Island[J]. *Italy Bull. Volcanol*, 56: 466~486.
- Denison D G T, Mallick B K and Smith A F M. 1998. A Bayesian CART algorithm[J]. *Biometrika*, 85: 363~377.
- Ding Ting. 2017. The Early-Middle Triassic Paloclimate and Paloenvironment Rebutite in Sichuan Basin—From Isotope and Element Geochemistry[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Gong Daxing, Zhou Jiayun, Wu Chihua, *et al.* 2015. Lithofacies paleogeography and salt-forming model of Lower-Middle Triassic in the Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 2 075~2 086 (in Chinese with English abstract).
- Guo Xusheng. 2010. Litho-paleogeographic evolution in the Middle-Late Triassic in western Sichuan Province and its significance for petroleum exploration[J]. *Oil & Gas Geology*, 31(5): 610~619 (in Chinese with English abstract).
- Huang Dong, Yang Guang, Yang Tianquan, *et al.* 2013. Triassic Leikoupo salt distribution and evolution in Sichuan Basin[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 35(2): 37~42 (in Chinese with English abstract).
- Huang Jianguo. 1998. The Triassic potash deposits in China: An example from the Sichuan Basin[J]. *Lithofacies and Palaeogeography*, 18: 23~43 (in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Huang Yulan, Ye Fang, *et al.* 2011. A comparative study on strontium isotope composition of dolomites and their coeval seawater in the Late Permian-Early Triassic, NE Sichuan basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3 831~3 842 (in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Sun Zhilei, Wu Sujuan, *et al.* 2006. Strontium isotope composition and control factors of global seawater in Triassic[J]. *Journal of Mineralogy & Petrology*, 26: 43~48 (in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Wu Sujuan, Sun Zhilei, *et al.* 2005. Seawater strontium isotopes and paleo-oceanic events over the past 260 Ma[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 133~141 (in Chinese with English abstract).
- Hu Zuwei, Huang Sijing, Wang Qingdong, *et al.* 2007. Strontium isotopic characteristics near the Feixianguan-Chialingchiang Formation boundary from a Lower Triassic section in eastern Sichuan[J]. *Journal of Stratigraphy*, 31(4): 354~360 (in Chinese with English abstract).
- Hu Zuwei, Huang Sijing, Wang Qingdong, *et al.* 2008. Strontium isotope composition and evolution of marine Triassic and compared with the global in Huaying Mountain, Eastern Sichuan[J]. *Science in China Earth Science*, 38(2): 157~166 (in Chinese with English abstract).

- Kato H and Billingham M. 1999. Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system [C]//Proceedings 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality (IWAR'99). IEEE, 85~94.
- Korte C, Jasper T, Kozur H W, *et al.* 2006. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ record of Permian seawater[J]. *Paleogeography Paleoclimatology Paleocology*, 240; 89~107.
- Li Ling, Tan Xiucheng, Zou Chun, *et al.* 2012. Origin of the Leikoupo Formation gypsum-salt and migration evolution of the gypsum-salt pot in the Sichuan Basin, and their structural significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(2): 316~324(in Chinese with English abstract).
- Li Yawen and Cai Keqin. 1998. Origin of potassium-rich brine and the metamorphism of Triassic evaporites in Sichuan Basin[J]. *Geoscience*, 12(2): 222~228(in Chinese with English abstract).
- Liao Linzhi, Huang Fuhua, Liu Qianchao, *et al.* 1984. The characteristics and origins of Province in gypsum-anhydrite deposits in longuio arces eastern Sichuan[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1: 94~100(in Chinese with English abstract).
- Lin Liangbiao, Chen Hongde, Hu Xiaoqiang, *et al.* 2007. Classification of tectonic sequence and basin evolution of the upper Triassic in the Sichuan Basin[J]. *Journal of Stratigraphy*, 31(4): 415~422(in Chinese with English abstract).
- Lin Yaoting. 1994. On K-bearing property of the marine Triassic and search for potash salt in Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 14(2): 111~121(in Chinese with English abstract).
- Lin Yaoting. 1995. Metamorphism of Triassic salt depositions in Sichuan basin and its guide to prospecting for potash resources[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 17(2): 93~102(in Chinese with English abstract).
- Lin Yaoting. 2003. Study on sulfur isotopes of trias marine deposit gypsum and brines in the Sichuan Basin[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 11(2): 1~7(in Chinese with English abstract).
- Lin Yaoting. 2009. Cambrian bittern sediment characteristic and finding potassium prospect in Sichuan Basin[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 17(2): 13~20(in Chinese with English abstract).
- Lin Yaoting and He Jinqun. 2005. Study on palaeomagnetism and salt formation conditions of the stratum of Lower-Middle Trias Series (T_1j - T_2j) of Sichuan Basin[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 13: 1~4(in Chinese with English abstract).
- Lin Yaoting, He Jinqun and Wang Tianding. 2002. Geochemical characteristics of potassium-rich brine in Middle Triassic Chengdu Salt Basin of Sichuan Basin and its prospects for brine tapping[J]. *Chemical and Mineral Geology*, 24(2): 72~84(in Chinese with English abstract).
- Lin Yaoting, Yan Yangji and Wu Yinglin. 1996. High-grade brine in the Sichuan Basin: Hydrogeochemistry, origin and its resource significance[J]. *Sedimentary Facies and Paleogeography*, 16(4): 12~22(in Chinese with English abstract).
- Lin Yaoting, Yao Youcheng, Kang Zhenghua, *et al.* 2004. Study on the geochemical characteristics and resource significance of the highly mineralized potassium-rich brine in the Sichuan Xuanda Salt Basin [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 12(1): 8~18(in Chinese with English abstract).
- Liu Baojun. 1981. *Sedimentary Petrology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 144~155(in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Yu Xiaocan, Zhao Yanjun, *et al.* 2016. A tentative discussion on regional metallogenic background and mineralization mechanism of subterranean brines rich in potassium and lithium in South China Block[J]. *Mineral Deposit*, 35(6): 1119~1143(in Chinese with English abstract).
- Liu Chaofei, Cheng Chen, Zhang Delu, *et al.* 2015. The evolution of carbon and strontium isotopes in eastern Sichuan area during Early Triassic and its geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(2): 219~226(in Chinese with English abstract).
- Lu Yunfei, Meng Wanbin, Feng Mingshi, *et al.* 2020. Characteristics of the Middle Triassic mung beans rock in the Mount Emei area and their implications sedimentary environment [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 39(3): 626~636(in Chinese with English abstract).
- Ma Shengchao, Wang Denghong, Sun Yan, *et al.* 2019. Geochronology and geochemical characteristics of lower-middle triassic clay rock and their significances for prospecting clay-type lithium deposit[J]. *Earth Science*, 44(2): 427~440(in Chinese with English abstract).
- Mearthur J M, Mutterlose J, Price G D, *et al.* 2004. Belemnites of Valanginian, Hauterivian and Barremian age: Sr-isotope stratigraphy, composition ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, Na, Sr, Mg), and palaeo-oceanography[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 202(3): 253~272.
- Meng Yuzhang. 2011. The lithofacies-paleogeographic and the Natural Gas Accumulation of Jialingjiang Formation in Sichuan Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Palmer M R and Elderfield H. 1985. Sr isotope composition of sea water over the past 75 Myr[J]. *Nature*, 31: 526~528.
- Palmer M R and Edmond J M. 1989. The strontium isotope budget of the modern ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 92(1): 11~26.

- Shen Lijan, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, *et al.* 2021. Rb-Sr systematics of salt minerals in potash deposits of the Central Asia Basin and their significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(1): 99~108 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yan, Gao Yun, Wang Denghong, *et al.* 2017. Zircon U-Pb dating of 'Mung Bean Rock', in the Tongliang area, Chongqing and its geological significance[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 36(6): 649~658 (in Chinese with English abstract).
- Sun Y D, Windenbeck M, Joachimsk M M, *et al.* 2016. Chemical and oxygen isotope composition of gem-quality apatites: Implications for oxygen isotope reference materials for secondary ion mass spectrometry [J], *Chemical Geology*, 440: 164~178.
- Tang Zhikai. 1996. Test and examination of potash fertilizer making technology and comprehensive utilization from mung bean rock in Sichuan [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 16(1): 85~90 (in Chinese with English abstract).
- Tripathi J K, Bock B and Rajamani V. 2013. Nd and Sr isotope characteristics of Quaternary Indo-Gangdetic plain sediments: Source distinctiveness in different geographic regions and its geological significance [J]. *Chemical Geology*, (344): 12~22.
- Veizer J, Ala D, Azmy K, *et al.* 1999. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater[J]. *Chemical Geology*, 161: 59~88.
- Wang Ningzu, Zhang Xiangwen, He Bi, *et al.* 2019. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the mung bean rocks of the Middle Triassic Guanling Formation in Dazhai area of Qianxi County, Guizhou Province[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 39(1): 82~91 (in Chinese with English abstract).
- Wang Mingquan. 2017. Paleotemperature and Its Potash-forming Effect in Early and Middle Triassic in Eastern Sichuan Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences, 24~46 (in Chinese with English abstract).
- Warren J K. 2010. Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits [J]. *Earth-Science Reviews*, 98(3): 217~268.
- Wickman F E. 1948. Isotope ratios: A clue to the age of certain marine sediments[J]. *The Journal of Geology*, 56: 61~66.
- Xie Tao, Zhou Changyong, Zhang Qiyue, *et al.* 2013. Zircon U-Pb age for the a tuff before the luoping biota and its geological implication [J]. *Geological Review*, 59(1): 159~164 (in Chinese with English abstract).
- Yu Zizhao. 1992. My opinion on the geological significance of "mung bean rock" [J]. *Salt Industry History Research*, 1: 77~78 (in Chinese).
- Zhai Guangming. 1989. Petroleum Geology of China (Vol. 10) Sichuan Oil and Gas Area[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1~5 (in Chinese).
- Zhao Yanjun, Liu Chenglin, Gong Daxing, *et al.* 2015. The Luzhou-Kaijiang paleouplift control on the formation environments of Triassic salt and potassium in Eastern Sichuan [J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 1 983~1 989 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Lijun. 1995. The genesis and Characteristics of clay minerals of green-bean rock in Guizhou province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 15(1): 75~81 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Zhengjie, Yang Zhengzhou, Zhang Xiong, *et al.* 2021. Metallogenic conditions and target prediction of potash deposits in the Triassic Jialingjiang Formation, eastern Sichuan Basin[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(1): 39~48 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡克勤, 袁见齐. 1986. 四川三叠系钾盐成矿条件和找矿方向[J]. *化工矿产地质*, 8(2): 4~12.
- 陈莉琼, 沈昭国, 侯方浩, 等. 2010. 四川盆地三叠纪蒸发岩盆地形成环境及白云岩储层[J]. *石油实验地质*, (4): 334~340.
- 陈继洲. 1990. 试论四川盆地中、中三叠统钾盐矿物的形成[J]. *化工矿产地质*, 2: 1~14.
- 陈忠, 唐洪明, 沈明道, 等. 1999. "绿豆岩"组分新析[J]. *西南石油学院学报*, 21(1): 39~42.
- 丁婷. 2017. 四川盆地早中三叠世古气候、古环境重建——来自同位素及元素地球化学的约束[D]. 北京: 中国地质大学.
- 龚大兴, 周家云, 吴驰华, 等. 2015. 四川盆地早中三叠世成盐期岩相古地理及成盐模式[J]. *地质学报*. 89(11): 2 075~2 086.
- 郭旭升. 2010. 川西地区中、晚三叠世岩相古地理演化及勘探意义[J]. *石油与天然气地质*, 31(5): 610~619.
- 黄东, 杨光, 杨天泉, 等. 2013. 四川盆地中三叠世盐盆分布与演化特征研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 35(2): 37~42.
- 黄建国. 1998. 中国三叠纪钾盐沉积——以四川为例[J]. *岩相古地理*, 18(4): 23~43.
- 黄思静, 黄喻兰, 叶芳, 等. 2011. 四川盆地东北部晚二叠世-早三叠世白云岩与同期海水总同位素组成的对比研究[J]. *岩石学报*, 27(12): 3 831~3 842.
- 黄思静, 孙治雷, 吴素娟, 等. 2006. 三叠纪全球海水的总同位素组成及主要控制因素[J]. *矿物岩石*, 26(1): 43~48.
- 黄思静, 吴素娟, 孙治雷, 等. 2005. 中生代海水总同位素演化和

- 古海洋事件[J]. 地学前缘, 2: 133~141.
- 胡作维, 黄思静, 王庆东, 等. 2007. 川东下三叠统飞仙关组-嘉陵江组界线附近的锶同位素组成[J]. 地层学杂志, 31(4): 354~360.
- 胡作维, 黄思静, 王庆东, 等. 2008. 四川东部华蓥山海相三叠系锶同位素组成演化及其与全球对比[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2: 157~166.
- 李 凌, 谭秀成, 邹 春, 等. 2012. 四川盆地雷口坡组膏盐岩成因及膏盐盆迁移演化与构造意义[J]. 地质学报, 86(2): 316~324.
- 李亚文, 蔡克勤. 1998. 四川盆地三叠系蒸发岩的变质作用与富钾卤水的成因[J]. 现代地质, 12(2): 222~228.
- 廖林志, 黄馥华, 刘铅超, 等. 1984. 川东农乐石膏-硬石膏矿床中的杂卤石[J]. 矿物岩石, 1: 94~100.
- 林良彪, 陈洪德, 胡晓强, 等. 2007. 四川盆地上三叠统构造层序划分及盆地演化[J]. 地层学杂志, 31(4): 415~422.
- 林耀庭. 1994. 论四川盆地海相三叠系含钾性及找钾方向[J]. 四川地质学报, 14(2): 111~120.
- 林耀庭. 1995. 论四川盆地三叠系盐类变质作用及找钾方向[J]. 化工矿产地质, 17(2): 93~102.
- 林耀庭. 2003. 四川盆地三叠纪海相沉积石膏和卤水的硫同位素研究[J]. 盐湖研究, (2): 1~7.
- 林耀庭. 2009. 四川盆地寒武系盐卤沉积特征及找钾前景[J]. 盐湖研究, 17(2): 13~20.
- 林耀庭, 何金权. 2005. 四川盆地地下中三叠统盐系地层古地磁研究与成盐条件有关问题探讨[J]. 盐湖研究, 13(4): 1~4.
- 林耀庭, 何金权, 王田丁. 2002. 四川盆地中三叠统成都盐盆富钾卤水地球化学特征及其勘查开发前景研究[J]. 化工矿产地质, 24(2): 72~84.
- 林耀庭, 颜仰基, 吴应林. 1996. 四川盆地某地富矿卤水水文地球化学特征及其成因资源意义[J]. 岩相古地理, 16(4): 12~22.
- 林耀庭, 姚有成, 康正华, 等. 2004. 四川宣达盐盆富钾富矿卤水地球化学特征及资源意义研究[J]. 盐湖研究, 12(1): 8~18.
- 刘宝珺. 1981. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 144~155.
- 刘成林, 余小灿, 赵艳军, 等. 2016. 华南陆块液体钾、锂资源的区域成矿背景与成矿作用初探[J]. 矿床地质, 35(6): 1 119~1 143.
- 刘超飞, 程 晨, 张得鲁, 等. 2015. 川东地区早三叠世碳、锶同位素演化及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 34(2): 219~226.
- 芦云飞, 孟万斌, 冯明石, 等. 2020. 峨眉山中三叠统绿豆岩特征及其沉积环境指示[J]. 矿物岩石地球化学通报, 39(3): 626~636.
- 马圣钞, 王登红, 孙 艳, 等. 2019. 我国西南部 T_1/T_2 粘土岩地质年代学、地球化学特征及其对粘土型锂矿的找矿意义[J]. 地球科学, 44(2): 427~440.
- 孟昱璋. 2011. 四川盆地嘉陵江组岩相古地理与天然气成藏研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 沈立建, 刘成林, 焦鹏程, 等. 2021. 中亚盆地钾盐矿床盐类矿物 Rb-Sr 同位素体系研究及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 40(1): 99~108.
- 孙 艳, 高 允, 王登红, 等. 2017. 重庆铜梁地区“绿豆岩”中碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩矿测试, 36(6): 649~658.
- 汤志凯. 1996. 四川绿豆岩提取钾肥及其综合利用新工艺试验研究[J]. 四川地质学报, 16(1): 85~90.
- 王宁祖, 张向文, 何 碧, 等. 2019. 贵州省黔西县大寨地区中三叠统关岭组绿豆岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 矿物岩石, 39(1): 82~91.
- 汪明泉. 2017. 四川盆地东部早中三叠世古水温及其成钾效应[J]. 北京: 中国地质大学, 24~46.
- 谢 韬, 周长勇, 张启跃, 等. 2013. 罗平生物群下部凝灰岩锆石年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 59(1): 159~164.
- 余子昭. 1992. 关于“绿豆岩”地质意义之我见[J]. 盐业史研究, 1: 77~78.
- 翟光明. 1989. 中国石油地质志(卷十)四川油气区[M]. 北京: 石油工业出版社, 1~5.
- 赵艳军, 刘成林, 龚大兴, 等. 2015. 泸州-开江古隆起对川东三叠纪成盐成钾环境的控制作用[J]. 地质学报, 89(11): 1 983~1 989.
- 朱立军. 1995. 贵州绿豆岩中粘土矿物特征及其成因探讨[J]. 矿物学报, 15(1): 75~81.
- 朱正杰, 杨郑州, 张 雄, 等. 2021. 四川盆地东部三叠系嘉陵江组海相钾盐成矿分析及靶区预测[J]. 岩石矿物学杂志, 40(1): 39~48.