

北羌塘盆地中侏罗统夏里组蒸发岩锶同位素 地球化学特征及物质来源*

杜少荣, 苗忠英**, 郑绵平, 张永生, 张雪飞, 陈文西

(中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037)

摘要 北羌塘盆地位于青藏高原的中部, 属东特提斯构造域, 是一个具有成盐远景的蒸发岩盆地。前人对盆地的研究多局限于层序地层、构造运动、油气成藏等, 对于盆地内蒸发岩的研究, 特别是其成矿流体来源的研究报道较少。文章通过对北羌塘盆地龙尾湖 QY-1 钻孔中硬石膏岩层锶同位素进行测定, 首次对盆地中侏罗统夏里组蒸发岩成矿流体的来源进行探讨。结果表明, 笔者所分析的样品的锶同位素比值变化范围为 0.707 475~0.709 048, 均值 0.708 331, 与同时期全球海水锶同位素比值(0.706 860~0.707 081)相比略高, 表明成矿流体来源主要是海水。结合前人对羌塘盆地构造运动与盆地演化的认识, 认为陆源锶的输入造成了本区的锶同位素比值高于同期海水。此外, 钻孔中的同位素组成与前人公布的全球中侏罗世(164~160.2 Ma)海水锶同位素曲线具有较好的对比性, 中晚侏罗世羌塘盆地海侵海退作用的强弱是控制盆地夏里组锶同位素演化的主要因素。

关键词 地球化学; 中侏罗统; 夏里组; 硬石膏; 锶同位素; 物质来源; 北羌塘盆地

中图分类号: P618.78

文献标志码: A

Strontium isotopic geochemical characteristics and origin of evaporites from Middle Jurassic Xiali Formation in North Qiangtang Basin

DU ShaoRong, MIAO ZhongYing, ZHENG MianPing, ZHANG YongSheng, ZHANG XueFei and CHEN WenXi

(MNR Key Laboratory of Saltlake Resources and Environment, Institute of Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China)

Abstract

The North Qiangtang Basin is an evaporite basin with a prospect of salt formation, located in the middle of the Qinghai-Tibet Plateau, belonging to the East Tethys tectonic domain. Previous studies on the basin were mostly limited to sequence stratigraphy, tectonic evolution, oil and gas accumulation, etc., while the study on evaporites, especially the data on the source of the salt forming fluids is missing. This study presents the strontium isotope analytical results of the anhydrite strata from the Longwei lake QY-1 borehole in the North Qiangtang Basin, and the source of the evaporite ore-forming fluids of the Middle-Jurassic Xiali Formation is explored for the first time. The results show that the strontium isotope ratio of evaporites in this area vary from 0.707 475 to 0.709 048, with an average of 0.708 331, which is slightly higher than the global seawater (0.706 860 to 0.707 081) during the same period, indicating that the source of ore-forming fluids is mainly seawater. Based on previous under-

* 本文得到中国地质调查局地质调查二级项目“思茅盆地中生代海相钾盐资源调查评价(编号: DD20201115)”和国家重点研发计划子课题“特提斯东段深部海相钾盐勘查增储示范(编号: 2017YFC0602801)”联合资助

第一作者简介 杜少荣, 男, 1989 年生, 博士研究生, 矿产普查与勘探专业。Email: shr_du@163.com

** 通讯作者 苗忠英, 男, 1982 年生, 博士, 副研究员, 主要研究方向为油气、钾盐等沉积矿产资源的成因机理和分布规律。Email: zhongying@foxmail.com

收稿日期 2020-10-08; 改回日期 2021-06-25。孟秋熠编辑。

standings of the tectonic movement and basin evolution in the Qiangtang Basin, we believed that the injection of terrigenous strontium has caused the higher strontium isotope ratio in this area, which shows continental water has mixed. In addition, the strontium isotope compositions of the samples have good comparability with the global Middle-Jurassic seawater strontium isotope curve published by previous researchers. The strength of the transgression and regression in the North Qiangtang Basin during the Middle and Late Jurassic is the main factor which controls the strontium isotopic evolution of the Xiali Formation.

Key Words: geochemistry, Middle-Jurassic Xiali Formation, anhydrite, strontium isotope, origin, North Qiangtang Basin

锶主要以4种稳定同位素形式存在于地壳中,分别为 ^{88}Sr 、 ^{87}Sr 、 ^{86}Sr 、 ^{84}Sr ,相较于其他元素及同位素具有一定的特殊性(Céline et al., 2001; Dickin et al., 2005)。锶及其同位素是研究水文循环、水岩作用机制、古气候、古海洋环境、古盐度等的重要工具手段(贺秀斌等, 1997; 黄思静等, 2006; 吕苑苑等, 2014; Jones et al., 1994; Bruckshen et al., 1995; He et al., 1997; Rosemary et al., 1998; Callegaro et al., 2012; Wierzbowski et al., 2012; Wortmann et al., 2012; Tripathi et al., 2013; Belén et al., 2013)。锶在海水中残留时间(约106 a)大于海水的混合时间(约 10^3 a),因此,在同一地质历史时期,全球范围内海水中的锶组成是一致的(McArthur et al., 2001; 黄思静等, 2005),且锶在化学、生物化学作用过程中几乎不会发生同位素分馏。不同储库中锶同位素比值不同,故 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值可作为物质来源、迁移的示踪剂(Jyotirajan et al., 2003; Banner et al., 1994)。

蒸发岩(石膏,石盐,碳酸盐等)的锶可以用来分析其成矿物质来源,异常的锶同位素比值可以指示水体沉积环境的变化。不同来源的锶其同位素比值不一(Veizer et al., 1975),例如陆壳来源的锶其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值大于海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素比值,地幔来源的锶其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值相对最小。在蒸发岩同一地层中,通过纵向上 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的变化可以解释古海平面升降,其比值的变化可以指示海侵、海退事件(郑绵平等, 2012; 李明慧等, 2016)。锶同位素具有不易分馏的特殊性,且在各个地质历史时期,锶同位素组成有一定的差异,因此,根据不同地质历史时期的海相蒸发岩中的锶同位素比值不仅可以重建各个时期全球海水锶同位素地层年代曲线,同时也可用以分析各个历史时期全球锶的循环(黄思静等, 2006; Veizer et al., 1975)。羌塘盆地作为东特提斯构造域的重要组成部分,区内有大量蒸发岩(膏岩)露头分布,且主要分布于中上侏罗统(李亚林等,

2008)。近来许多学者进行了大量的研究,但公开发表的资料中关于蒸发岩岩盐锶同位素的数据较少,且前人对锶同位素的研究旨在探讨北羌塘盆地海平面变化、沉积环境及气候演化等(尹观等, 1998; 谢渊等, 2000; 石和等, 2005; 刘建清等, 2007; 潘桂秋等, 2015; 孙伟等, 2015)。关于盆地蒸发岩锶同位素的研究,目前仅牛新生等(2014)根据友谊泉地区侏罗系发育的盐泉水锶、硫同位素分析了盆地的成钾条件,然而,利用锶同位素来探讨蒸发岩成矿物质来源的报道基本为空白。

文章通过对北羌塘盆地南缘布署的QY-1井岩芯样品中膏岩锶同位素地球化学特征进行研究,不仅丰富了盆地内蒸发岩锶同位素数据,而且对于了解盆地内蒸发岩成矿流体的物质来源提供了重要依据。此外,通过与全球锶同位素年代曲线进行对比,进一步深入认识锶同位素比值变化的驱动机制,并划分其演化阶段。

1 地质背景

羌塘盆地位于青藏高原的中部,是中国侏罗纪海相地层分布最广的地区,也是中国具有成盐远景的矿集区之一(郑绵平等, 2015)。盆地发育于元古宙变质岩系组成的双基底之上,南北两侧受班公湖-怒江缝合带、可可西里-金沙江缝合带夹持,区内的缝合带对本区的构造具有控制作用(黄继均, 2001; 尹福光, 2003)(图1)。根据盆地基底构造特征可将其划分为两凹一隆的格局(李廷栋等, 1989; 肖序常等, 1990; 赵兵等, 2002; 王成善等, 2004)。中央隆起带呈东西向延伸,位于戈木日、玛依岗日、双湖、唐古拉山一线;北羌塘盆地呈东西向延伸,并发育北西向延伸的次级凸起和凹陷,地表出露侏罗纪和少量的上三叠纪;南羌塘主要出露上古生界和中生界,以海相浅变质砂板岩、碳酸盐岩、碎屑岩等为主(王剑等,

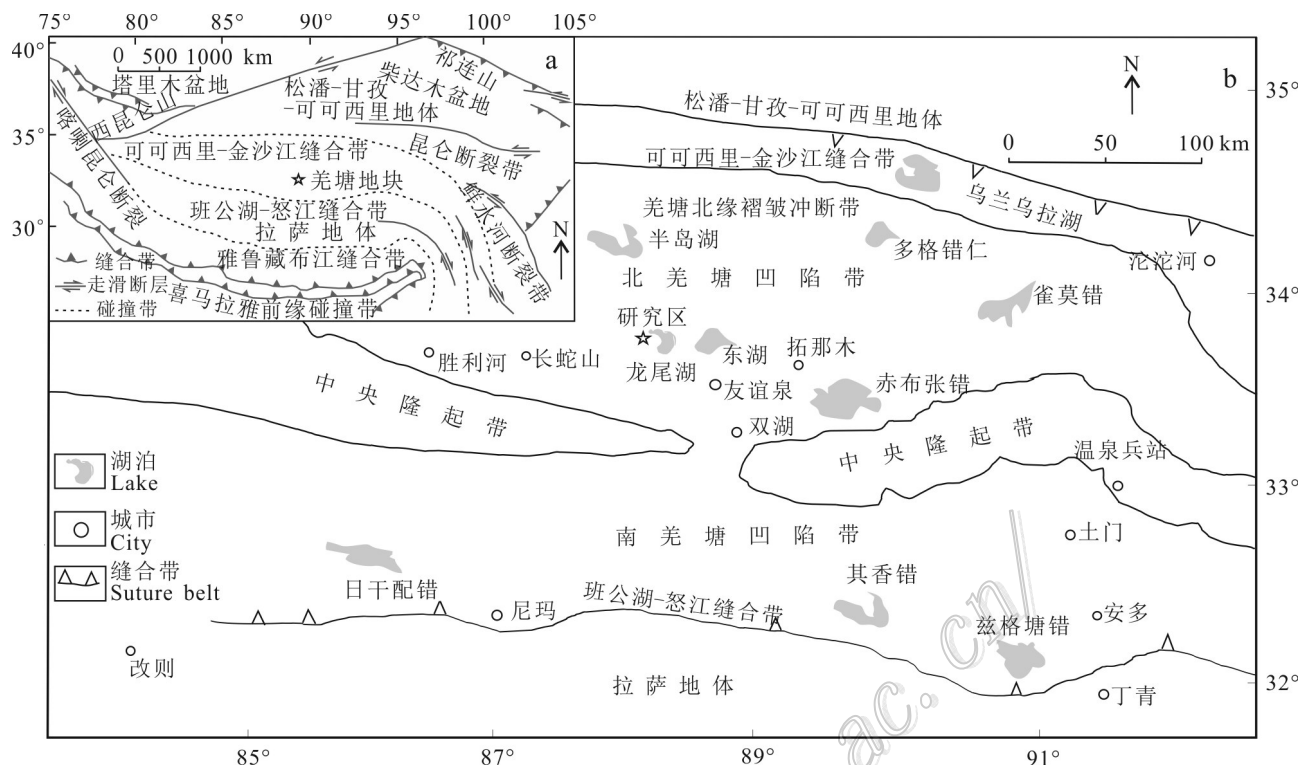


图1 北羌塘盆地龙尾湖区域位置(a)及构造纲要图(b)(据刘建清等,2007等修改)

Fig.1 Regional location (a) and tectonic framework (b) of the Longwei lake area in North Qiangtang Basin(modified after Liu et al., 2007)

2018)。研究区位于北羌塘盆地龙尾湖地区,该区侏罗系以海相沉积为主,与底部三叠纪的沉积地层呈不整合接触。盆地内侏罗系自下而上为那底岗日、雀莫组、布曲组、夏里组、索瓦组,那底岗日龙尾湖地区主要见夏里组、索瓦组(图2)。夏里组由杂色碎屑岩夹少量灰岩、石膏层组成;索瓦组为泥晶灰岩、鲕粒灰岩和石膏层(牛新生等,2014)。盆地内中生代侏罗系石膏分布广泛,目前已发现的膏岩点位多达几百个,且主要分布于中侏罗统的雀莫错组、布曲组、夏里组及上侏罗统索瓦里组中,其中,夏里组分布最为广泛(李勇等,2001)。

2 样品采集及分析方法

2.1 样品采集

本文分析的样品来自于北羌塘盆地那底岗日的龙尾湖地区,地理坐标N33°9'2.40",E88°2'29"。井口周边出露的地层为夏里组,其余在井口周边出露的地层还有侏罗统雀莫错组、布曲组、索瓦组,以及始新统的康托组、喷呐湖组以及更新统。开孔的层

位为夏里组(图2),取样深度和样品的岩性如图3所示,完钻井深298.86 m,未钻穿夏里组。钻孔岩性主要由大量的膏岩夹少量的杂色碎屑岩、灰岩组成,中间夹有数条宽1~5 cm的泥质条带,膏岩层的底部与含有机质泥质条带与薄板状钙质粉砂交替的含砂泥岩接触。

本次研究共获取样品39个,其中膏岩样34个,灰岩、白云岩各1个,3个深色泥岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值用以与膏岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值进行对比。硬石膏主要成层状、透镜状分布在地层之中,8.00~279.74 m均为膏岩(图3),选取的样品进行锶同位素测试,总共获取有效数据39组。

2.2 实验方法

具体操作方法流程是:首先,将样品粉碎至200目,取100 mg粉末用0.8 mol/L的盐酸溶于Teflon杯中。离心后的清液经过装有AG50W-X8树脂的离子交换柱分离和纯化,以盐酸为淋洗剂,分离出纯净的锶,之后在Phoenix热表面电离质谱仪上完成测试。

测试采用的标准为GB/T17672-1999《岩石中铅、锶、钍同位素测定方法》。选取的锶同位素标准物

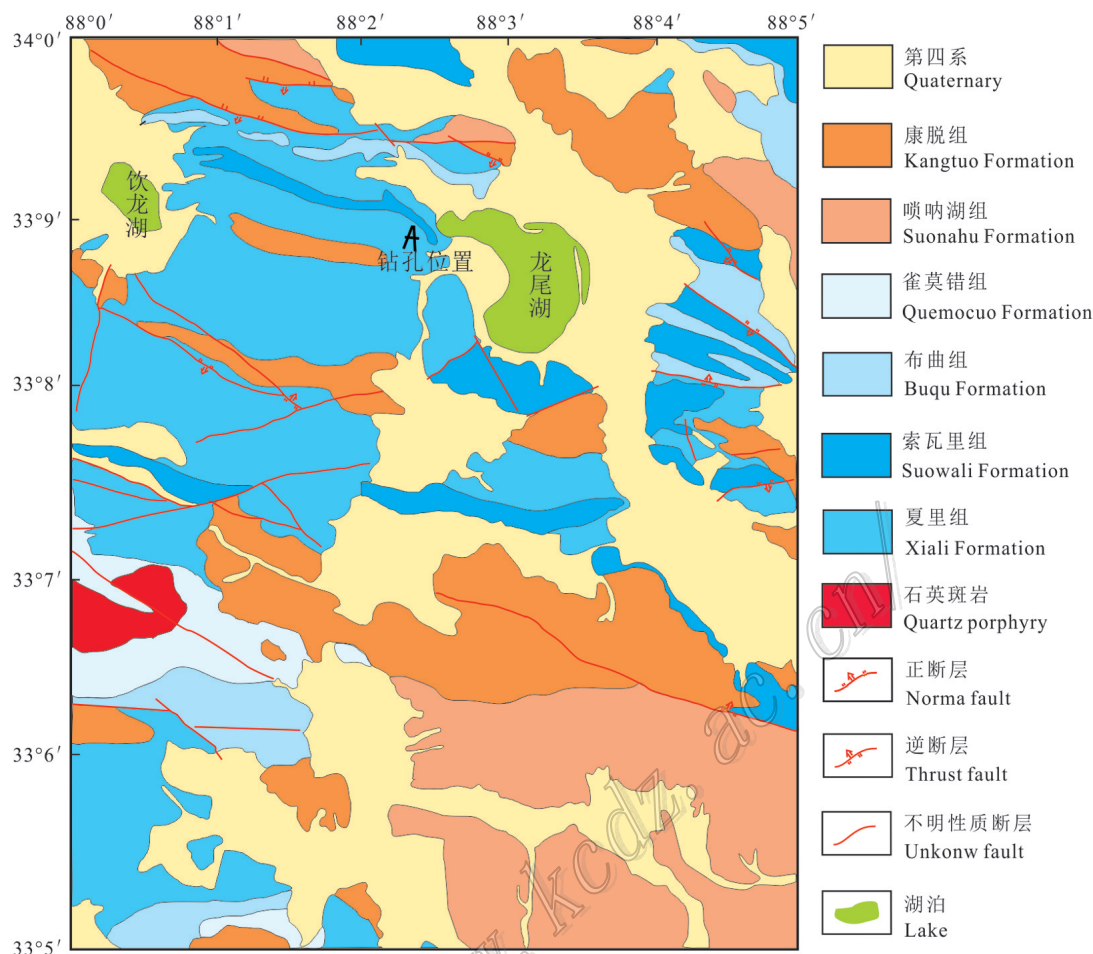


图2 龙尾湖地区区域地质图(据牛新生等,2014修改)

Fig.2 Regional geological map of Longwei Lake area (modified after Niu et al., 2014)

质为NBSSRM987,测得的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值平均值为 $(0.710\ 34 \pm 0.000\ 26)$ ($2\sigma, n=6$)。样品锶同位素测试分析在核工业北京地质研究院完成。

3 实验结果

3.1 数据有效性分析

为保证测试的数据能够较好的代表蒸发岩成矿流体物质来源的信息,本文从样品的特征、成岩变化、实验条件等几个方面分析了数据的有效性。测试样品以硫酸盐(石膏)为主,少量为碳酸盐(白云岩、灰岩),两者在沉积过程中元素配分模式、沉积速度、成岩过程中矿物的重结晶速度等类似,故二者的判断指标可在一定的程度上通用(黄思静等,2005)。在实验开始前选取岩芯中较为纯净的石膏样品,并进行镜下鉴定。

样品均较为纯净,正交光下色彩鲜艳,单偏光下显示大多数具有完整晶型,如3组解理构成的假立方体结构(图4a、b),板状双晶结构(图4c),单晶结构(图4d、e)。实验过程中考虑到单次测试可能造成的影响,对本次测试的样品进行了重复测试工作,保证实验测试结果的可靠性,测试结果在误差范围内,表明该测试结果可靠。

3.2 锶同位素组成

北羌塘盆地龙尾湖地区夏里组地层样品锶同位素测试结果见表1,锶同位素(石膏、灰岩、白云岩)处于0.707 474~0.709 048之间,均值为0.708 331。在244.46 m处的灰色硬石膏层内出现最低值0.707 474,在底部279.74 m处的深灰色含泥灰岩层内出现最高值0.709 480。整个地层自下而上,锶同位素比值可划分为3段,经历了先降—后升—再降。北羌塘盆地龙尾湖地区QY-1井膏岩样品包括:粉-细晶硬石

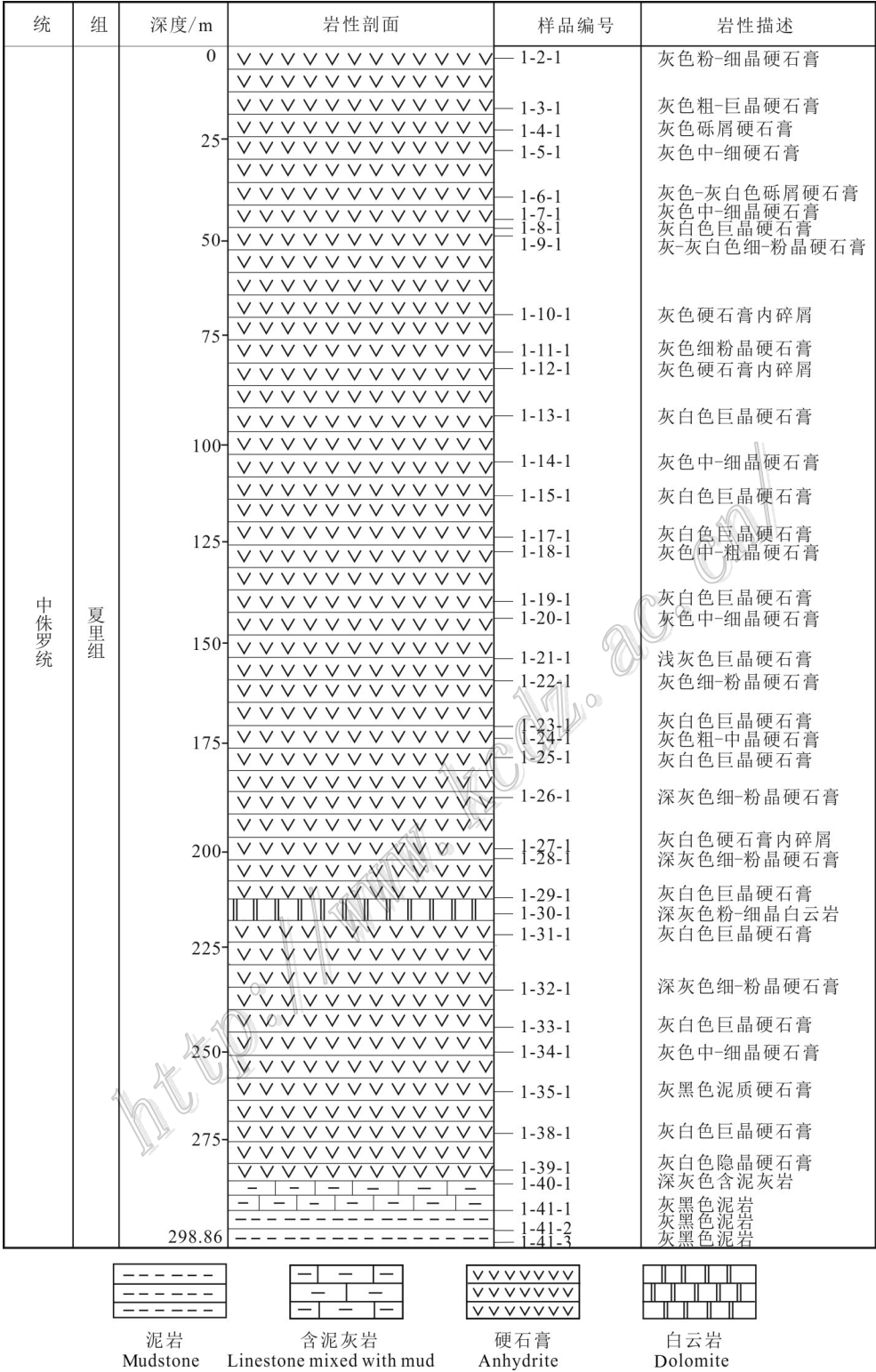


图3 北羌塘盆地QY-1钻孔柱状图
Fig.3 Drill hole logging of QY-1 borehole in North Qiangtang Basin

膏、中-细晶硬石膏、巨晶硬石膏、砾屑硬石膏,且地层中的石膏以巨晶硬石膏为主,粉-细晶石膏次之,中-细晶硬石膏最少,其中,大量巨晶硬石膏的出现可能是早期形成的石膏受到外部水体的注入发生溶

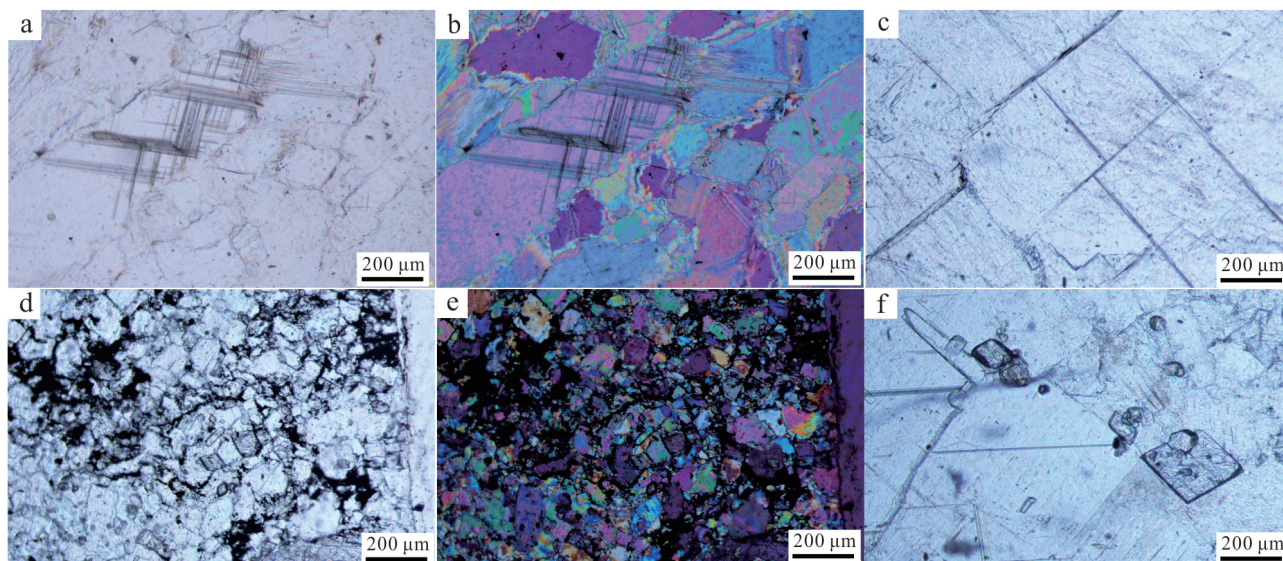


图4 北羌塘盆地中侏罗统夏里组硬石膏及其显微结构特征

a, b. 单偏光和正交光对比照片, 3组解理构成的假立方体, 正交光下为浅红色, 中-细晶硬石膏; c. 单偏光, 板状双晶结构, 可见相交成直角的解理缝, 巨晶硬石膏; d, e. 单偏光和正交光下细-粉晶硬石膏, 干涉色为浅绿色; f. 板状单晶结构, 中-细晶硬石膏

Fig.4 Anhydrite and microstructure characteristics of the Middle Jurassic Xiali Formation in the North Qiangtang Basin (in single polarized light)

a, b. Single polarized light and orthogonal light contrast photo, three sets of cleavage pseudo cubes, light red under orthogonal light, medium-fine grain anhydrite; c. Single polarized light, plate-like twin structure, visible intersection right-angled cleavage joints, giant crystal anhydrite; d, e. Fine-powder grain anhydrite under single polarized light and orthogonal light, Interference color is light green; f. Plate structure, medium-fine grain anhydrite

解重新结晶析出形成。研究区夏里组的锶同位素比值, 随石膏结晶程度变化, 其值表现有一定的差异, 巨晶硬石膏的锶同位素比值整体较大, 中-细晶硬石膏次之, 细-粉晶硬石膏最小。

4 讨论

4.1 蒸发岩成矿流体的来源

蒸发岩成矿流体的来源有海水、陆源水、地幔流体, 相比陆源水体, 海水中的锶同位素比值受地幔热液蚀变的影响更大, 现代海水锶同位素比值为0.709 023, 而陆源水中的锶同位素比值远高于该值 (Burke et al., 1982; Palmer et al., 1985; Hess et al., 1986; McArthur et al., 1992; Krishnaswami, 1992), 因此, 锶同位素比值是区分成矿流体来源的重要依据。

在不同的地质历史时期海水锶同位素比值是变化的, 前人据此绘制了全球海水锶同位素年代曲线。侏罗纪一早白垩世, 泛大陆发生裂解, 全球海水锶同

位素比值总体上呈现降低的趋势, 在中晚侏罗世达到历史最低值, 而层序地层及现有的研究认为这一时期海水锶同位素比值为0.706 860~0.707 081。

北羌塘盆地处青藏高原的中部构造活动较为强烈地带, 中央隆起在早、晚侏罗世有较为完整的冷却抬升事件, 南、北羌塘盆地被隔离, 沉积相为浅滩、局限台地, 在中-晚侏罗世可可西里-金沙江缝合带已闭合, 北羌塘盆地成半封闭环境 (杨桂芳等, 2003; 王剑等, 2018; 吴珍汉等, 2019; 陈兰等, 2003; 李永铁等, 2006)。已有的古生物化石和元素地球化学研究认为, 中-晚侏罗世羌塘盆地处于赤道以北的低纬度地区, 且气候炎热干旱 (张玉修等, 2006), 因此, 中-晚侏罗世北羌塘盆地具备形成蒸发岩的沉积环境和古气候条件。

研究区膏岩、灰岩、白云岩样中测得锶同位素比值介于0.707 474~0.709 048, 其中, 灰岩(1-39-1)和白云岩(1-30-1)中的锶同位素比值分别为0.707 481和0.708 213 (图5), 可与刘建清等 (2007) 在北羌塘盆地龙尾错地区黑尖山、新月山东、黑石河3条剖面

表1 北羌塘盆地龙尾湖中侏罗统夏里组锶同位素

Table 1 Strontium isotopes of the Middle Jurassic Xiali Formation in Longwei Lake, North Qiangtang Basin

样品编号	取样深度/m	岩性描述	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ
1-2-1	11.42	灰色粉-细晶硬石膏	0.707 475	0.000 016
1-3-1	17.5	灰色粗-巨晶硬石膏	0.708 059	0.000 016
1-4-1	20.6	灰色砾屑硬石膏	0.708 202	0.000 017
1-5-1	25.7	灰色中-细晶硬石膏	0.708 248	0.000 013
1-6-1	36.69	灰色-灰白色砾屑硬石膏	0.708 348	0.000 013
1-7-1	42.4	灰色中-细晶硬石膏	0.708 514	0.000 017
1-8-1	43.56	灰白色巨晶硬石膏	0.708 732	0.000 030
1-9-1	46.46	灰-灰白色细-粉晶硬石膏	0.708 259	0.000 015
1-10-1	65.81	灰色硬石膏内碎屑	0.708 046	0.000 023
1-11-1	75.16	灰色细粉晶硬石膏	0.708 126	0.000 018
1-12-1	79.27	灰色硬石膏内碎屑	0.707 981	0.000 016
1-13-1	91.65	灰白色巨晶硬石膏	0.708 220	0.000 018
1-14-1	103.01	灰色中-细晶硬石膏	0.708 105	0.000 016
1-15-1	111.34	灰白色巨晶硬石膏	0.708 771	0.000 033
1-17-1	121.42	灰白色巨晶硬石膏	0.708 223	0.000 029
1-18-1	128.15	灰色中-粗晶硬石膏	0.708 014	0.000 022
1-19-1	140.31	灰白色巨晶硬石膏	0.708 812	0.000 023
1-20-1	144.63	灰色中-细晶硬石膏	0.708 600	0.000 021
1-21-1	154.26	浅灰色巨晶硬石膏	0.708 708	0.000 015
1-22-1	159.85	灰色细-粉晶硬石膏	0.708 296	0.000 022
1-23-1	170.99	灰白色巨晶硬石膏	0.708 188	0.000 018
1-24-1	173.86	灰色粗-中晶硬石膏	0.708 695	0.000 028
1-25-1	178.52	灰白色巨晶硬石膏	0.708 696	0.000 013
1-26-1	188.25	深灰色细-粉晶硬石膏	0.708 309	0.000 016
1-27-1	200.74	灰白色硬石膏内碎屑	0.708 013	0.000 023
1-28-1	203.02	深灰色细-粉晶硬石膏	0.708 275	0.000 015
1-29-1	212.77	灰白色巨晶硬石膏	0.708 117	0.000 017
1-30-1	216.65	深灰色粉-细晶白云岩	0.708 213	0.000 016
1-31-1	221.86	灰白色巨晶硬石膏	0.708 765	0.000 020
1-32-1	227.2	深灰色细-粉晶硬石膏	0.708 576	0.000 018
1-33-1	240.86	灰白色巨晶硬石膏	0.708 983	0.000 015
1-34-1	244.46	灰色中-细晶硬石膏	0.707 474	0.000 018
1-35-1	260.32	灰黑色泥质硬石膏	0.708 265	0.000 016
1-38-1	264.04	灰白色巨晶硬石膏	0.708 895	0.000 020
1-39-1	270.70	灰白色隐晶质石膏	0.707 481	0.000 018
1-40-1	279.74	深灰色含泥灰岩	0.709 480	0.000 015
1-41-1	282.93	灰黑色泥质岩	0.713 841	0.000 016
1-41-2	289.56	灰黑色泥质岩	0.714 915	0.000 021
1-41-3	294	灰黑色泥质岩	0.719 545	0.000 017

测得的夏里组碳酸盐的锶同位素比值(0.706 770~0.709 835)对比,也可与盆地内侏罗系盐泉水的锶同位素比值(牛新生等,2014)对比。本区测得的锶同位素比值主体较同时期海水的锶同位素比值

高,但是明显低于陆源锶同位素比值。

基础地质研究结果表明,中-晚侏罗世羌塘盆地存在多次海侵(刘建清等,2007;黄思静等,2006),而北羌塘盆地又具备封存海水、蒸发析盐的条件,所

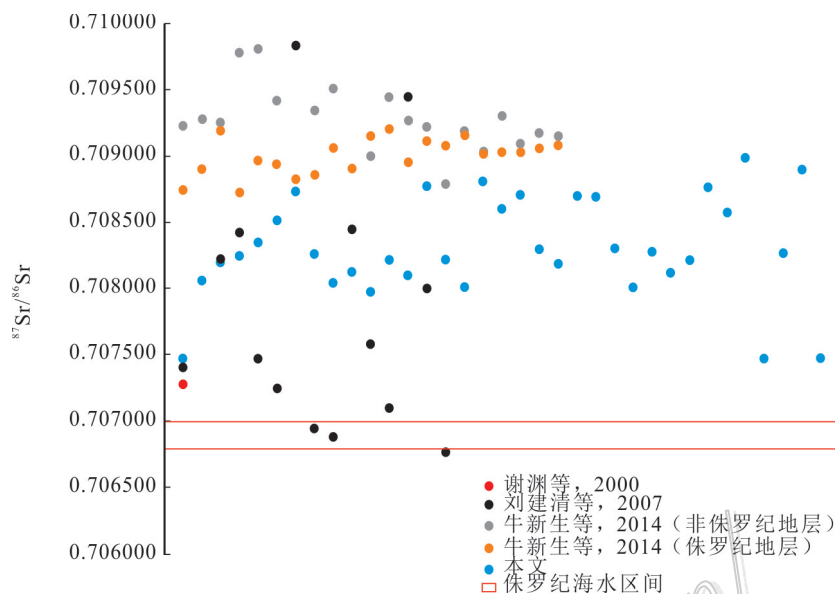


图5 QY-1 锶同位素分布及侏罗纪海水锶同位素区间图(侏罗纪地层)

Fig.5 Strontium isotope distribution of QY-1 borehole and strontium isotope interval of Jurassic seawater map

以尽管笔者测得样品锶同位素比值略高于同期海水,但是海相特征依然很强,这说明成矿流体的主要物源为海水。牛新生等(2014)研究了北羌塘盆地内源泉河、东温泉、多格错仁南岸盐泉水的水化学特征,认为盐泉水在运移过程中溶解了侏罗系的石膏,其中的硫同位素值位于侏罗纪海水的硫同位素值范围内,进而得出蒸发岩(膏岩)的成矿流体来自于侏罗纪海水的结论,这从另一方面佐证了文章结论。

夏里组海水蒸发析出石膏的之后多次受陆源水补给的影响,表现在硬石膏多次重结晶,形成晶型粗大的巨晶硬石膏。由于这一时期,中央隆起带和东昆仑造山带均出露地表,可向盆地内提供陆源锶,因此,这种重结晶的硬石膏锶同位素比值明显高于原生的粉-细晶硬石膏。

综上所述,北羌塘盆地夏里组蒸发岩形成于半封闭的沉积环境,经过多期海侵补给,为蒸发岩提供成矿流体。同时,在蒸发析盐阶段受陆源水补给的影响,导致样品锶同位素的值虽然明显低于陆源锶,但是总体高于同期海水的锶同位素比值。

4.2 研究区锶同位素演化的全球对比

在羌塘盆地双湖地区夏里组中发现了中、晚侏罗世卡洛期双壳类化石组合及菊石组合化石 *Cyathi-*

dites-Osmundacidites-Deltoidospora, 同时,化石资料测试的夏里组磁性地层年代在 160.2~164 Ma 之间(肖传桃等,2000;曾永耀等,2015)。本文以前人测得的年龄为基础,结合 McArthur 等(2001)绘制的全球海水锶同位素年代曲线进行年龄标定和对比(图6)。根据锶同位素组成等值对比原则,从整体上看,研究区夏里组锶同位素值演化与 McArthur 等(2001)公布的侏罗纪全球海水锶同位素曲线的具有一定的对比性。结合刘建清等(2007)公布的龙尾湖地区夏里组海平面的变化,将本区锶同位素演化划分为3个阶段:

第1阶段(294~244.46 m):膏岩锶同位素比值整体下降,均值为 0.708 028。由早期的灰黑色泥岩、含泥灰岩沉积演变为膏岩的沉积,锶同位素比值波动较大,表明为动荡的沉积环境,沉积发生的大致时间为 164~163.2 Ma。除底部泥质灰岩的锶同位素异常外,整体显示水体淡至咸,夏里组沉积的早期盆地处于海侵作用的晚期,气候潮湿,降雨量较大,有陆源水的输入,但对盆地蒸发岩成矿流体的影响很小,这一认识也得到了其他证据的支持,例如曾永耀等(2019)根据雁石坪地区夏里组中的环境代用指标分析认为夏里组下段为淡水环境,侏罗世全球海平面总体呈先上升、后下降,承接于布曲组最大海侵期。谭富文等(2015)根据对那底岗日地区夏里组 REE、

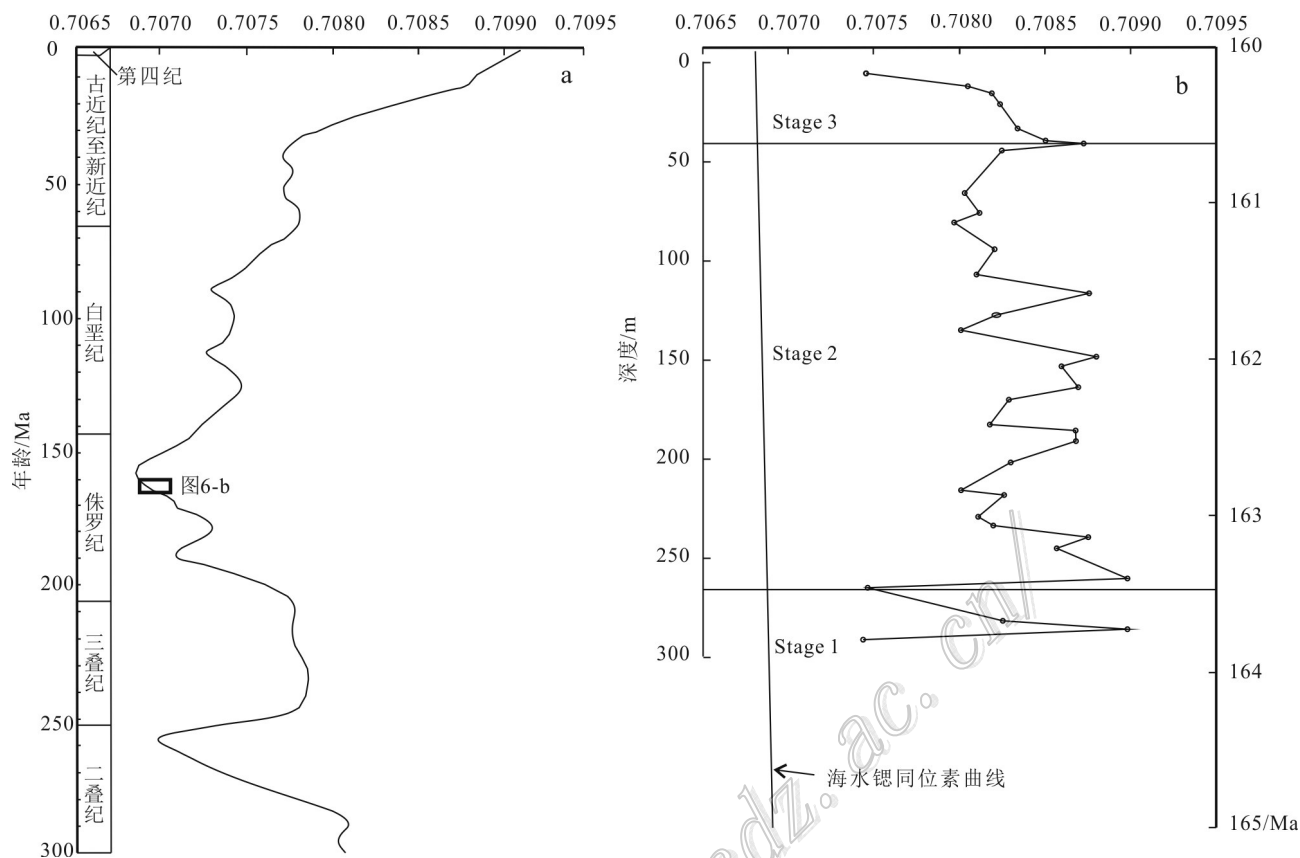


图6 北羌塘盆地区内蒸发岩与全球海水锶同位素比值对比图(a, 数据来源于Mcarthur et al., 2001; b, 本文数据)

Fig.6 Comparison with global seawater strontium isotope ratio(a, data from Mcarthur et al., 2001; b, this study)

TOC等的含量变化,认为夏里组下段气候相对湿润;张洒等(2015)根据雁石坪地区夏里组 CaCO_3 质量分数和明度指标变化规律,发现夏里组下段 CaCO_3 质量分数值较低(平均值6.73%)、明度指标最小(均值10 080.5),可见生物化石碎片,指示相对湿润的古气候。

第2阶段(244.46~43.56 m): 锶同位素比值较高,均值为0.708 374,整体波动不大,呈逐渐升高的趋势。这一时期结合曾永耀等(2019)的古地磁年龄大致为163.5~160.4 Ma。来自陆源锶的输入稳定,中-晚侏罗世北羌塘盆地北侧和中央隆起地带抬升,羌塘盆地持续海退,气候变干,盆地出露的陆地面积增加,海平面趋于下降,对应海平面相对低水位时期,受陆源水注入的影响较沉积的早期大。锶同位素值较第1阶段波动较小,水体达到咸水-超咸水环境(张玉修等,2006;曾永耀等,2015)。

第3阶段(43.56~11.42 m): 锶同位素比值降低,

呈下降趋势,波动较缓,与全球锶同位素比值变化趋势一致。这一时期(大致处于160.4~160.2 Ma)之后夏里组海平面最低,气候干旱,中央隆起在中侏罗世时期构造活动强烈,泛大陆裂解幔源锶的补给造成锶同位素比值偏低(蔚远江等,2002;曾胜强等,2012;吴珍汉等,2019)。区域内锶同位素比值为0.708 225,与同时期海水的区间值相近,说明此时幔源锶输入的影响强于陆源水体,或陆源水体本身的影响已经减弱。

需要注意的是,中-晚侏罗世全球锶同位素数据库目前积累的数据相对较少,尽管北羌塘盆地内的蒸发岩发育,但是笔者研究的对象仅局限于龙尾湖附近钻孔的岩芯样品,未对全盆地进行取样调查,因此,本研究对于相关研究仅引玉之砖,在丰富中晚侏罗世全球锶同位素数据库的同时,未来在探讨羌塘盆地内更大范围蒸发岩的物质来源、成矿机制、有利成矿区等方面还有很多工作可做。

5 结 论

(1) 膏岩和灰岩锶同位素比值区间为0.707 475~0.709 048,介于中生代海水和陆源水之间。结合前人关于盆地的演化、地球化学、矿物特征等,得出该盆地内蒸发岩成矿流体主要来自于海水,同时有陆源水的混入,且混入的陆源锶造成了本区蒸发岩锶同位素值偏高。

(2) 锶同位素演化曲线整体上呈先下降、后上升、再下降的趋势,其演化曲线与已公布的同时期(164~160.2 Ma)全球锶同位素曲线有较好的对比性。中-晚侏罗世北羌塘盆地的构造活动,全球海平面的变化和侵蚀作用的强弱是控制本区夏里组锶同位素演化曲线的主要因素,此外,中央隆起带的活动,对蒸发岩锶同位素组成也有一定的影响。

References

- Banner J L, Musgrove M and Capo R C. 1994. Tracing ground-water evolution in a limestone aquifer using Sr isotopes: Effects of multiple sources of dissolved ions and mineral-solution reactions[J]. *Geology*, 22(8):687-690.
- Belén G A, and Jacinto A A. 2013. Sources of sr and s in aluminum-phosphate-sulfate minerals in Early-Middle Triassic sandstones (Iberian ranges, Spain) and paleoenvironmental implications for the West Tethys[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 83(5):406-426.
- Bruckschen P, Bruhn F and Veizer J. 1995. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic evolution of Lower Carboniferous seawater: Dinantian of western Europe[J]. *Sedimentary Geology*, 100(1):63-81.
- Burke W H, Denison R E and Hetherington E A. 1982. Variation of seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ throughout Phanerozoic time[J]. *Geology*, 10(10):516-519.
- Callegaro S, Rigo M and Chiaradia M. 2012. Latest Triassic marine Sr isotopic variations, possible causes and implications[J]. *Terra Nova*, 24(2):130-135.
- Céline D, Bernard D and Louis M F. 2001. Erosion of decan traps determined by river geochemistry: Impact on the global climate and the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of seawater[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 188(3): 459-474.
- Chen L, Yin H S and Hu R Z. 2003. Discovery and significance of Jurassic coccidia fossils in Qiangtang Area, northern Tibet[J]. *Earth Science Frontiers*, 4: 613-618(in Chinese with English abstract).
- Dickin A. 2005. Radiogenic isotope geology(2nd)[M]. Cambridge: Cambridge University Press. 1-472.
- He X B. 1997. Geochemical research and application prospects of trace element strontium and its isotopes[J]. *Adv Ance in Earth Science*, 1: 16-20(in Chinese with English abstract).
- Hess J, Bender M L and Schilling J G. 1986. Evolution of the ratio of strontium-87 to strontium-86 in seawater from cretaceous to present[J]. *Science*, 231(4741): 979-984.
- Huang J J. 2001. Structural characteristics and evolution of the Qiangtang Basin in northern Tibet[J]. *Regional Geology of China*, 2: 178-186(in Chinese with English abstract).
- Huang S J, Wu S J, Sun Z L, Pei C R and Hu Z W. 2005. Seawater strontium isotopes and paleo-oceanic events over the past 260 Ma[J]. *Earth Science Frontiers*, 2:133-141(in Chinese with English abstract).
- Huang S J, Qin H R, Hu Z W, Wu S J, Sun Z L and Pei C R. 2006. Geochemical characteristics of different clam shells in the Late Cretaceous in southern Tibet and their preservation of Paleo-ocean information[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1: 68-74(in Chinese with English abstract).
- Jones C E, Jenkyns H C, Coe A L and Hesselbo S P. 1994. Strontium isotope variations in Jurassic and Cretaceous seawater[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58:3061-3074.
- Jyotirajan S, Ray A, Veizer J and Davis W J. 2003. C, O, Sr and Pb isotope systematics of carbonate sequences of the Vindhyan supergroup, India: Age, diagenesis, correlations and implications for global events[J]. *Precambrian Research*, 121(1):103-140.
- Krishnaswami S, Trivedi J R, Sarin M M, Ramesh R R and Sharma K K. 1992. Strontium isotopes and rubidium in the Ganga Brahmaputra river system: Weathering in the Himalaya, fluxes to the Bay of Bengal and contributions to the evolution of oceanic $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 109(1-2):243-253.
- Li M H, Yan M D, Fang X M, Zhang Z J and Sun S R. 2016. New ideas on the origins of potash deposits in Yunnan China and Laos[J]. *Geological Journal of China Universities*, 22(1):60-65(in Chinese with English abstract).
- Li T D, Li G C, Xiao X C, Chang C F, Teng J W and Yuan X C. 1989. On the crustal evolution and uplifting mechanism of the Qinghai-Tibet plateau[A]. Abstracts of papers from institute of geophysics, Chinese academy of science (1984) [C]. 59-61(in Chinese with English abstract).
- Li Y, Wang C S, Yin H S, Shi H, Lin J H, Zhu L D and Li X H. 2001. Fill models of in the Qiangtang composite foreland basin in Qinghai—Xizang Plateau, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1: 20-27(in Chinese with English abstract).
- Li Y L, Wang C S and Li Y T. 2008. Characteristics of the Jurassic saline deposits and its significance to hydrocarbon accumulation in Qiangtang basin of Tibet area[J]. *Acta Petrolei Sinica* 2:173-178 (in Chinese with English abstract).
- Li Y T, Tan F W, Wang J and Guo Z J. 2006. Lithofacies palaeogeography and oil-gas prospectivity of the Buqu age and Xiali age of

- Middle Jurassic[J]. *Journal of Palaeogeography*, 4: 499-508(in Chinese with English abstract).
- Li Y Y and Zheng M P. 2014. Progress in study of isotopic geochemistry of boron, lithium, strontium and chlorine in salt lakes[J]. *Mineral Deposits*, 33(5): 930-944(in Chinese with English abstract).
- Liu J Q, Jia B J, Yang P, Chen Y L, Pen B and Li Z J. 2007. The application of carbon, oxygen and strontium isotopes to the study of Middle-Upper Jurassic sequence stratigraphy in Longweicuo area, Qiangtang Basin[J]. *Acta Geosciences Sinica*, 3: 253-260(in Chinese with English abstract).
- Mcarthur J M, Kennedy W J and Gale A S. 1992. Strontium isotope stratigraphy in the Late Cretaceous: Intercontinental correlation of the Campanian/ Maastrichtian boundary[J]. *Terra Nova*, 4(3): 385-393.
- Mcarthur J M, Howarth R J and Bailey T R. 2001. Strontium isotope stratigraphy: Lowess version 3: Best fit to the marine Sr isotope curve for 0-509 Ma and accompanying look up table for deriving numerical age[J]. *The Journal of Geology*, 109(2): 155-170.
- Niu X S, Liu X F and Chen W X. 2014. The chemical characteristics and material source of salt spring water in the Duogcuoren area, North Qiangtang Basin, Tibet[J]. *Acta Geological sinica*, 88(6): 1003-1010(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*, 314(6011): 526-528.
- Pan G Q, Song C H, Bao J, Ma L F, Yan M D, Fang X M, Ying H and Yang Y B. 2015. Geochemical characteristics and salt-forming analysis of Jurassic strata in the Qiangtang basin[J]. *Acta Geological Sinica*, 89(11): 2152-2160(in Chinese with English abstract).
- Rosemary C, Capo A, Brian W, Stewart A, Oliver A and Chadwick B C. 1998. Chadwick. strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: Theory and methods[J]. *Han Journal of Agricultural Sciences*, 82(1):197-225.
- Shi H, Huang S J and Shen L C. 2005. Stratigraphical significance of the Sr isotopic evolutionary curve of the Late Cretaceous of Gangba, Tibet with discussions on some problems[J]. *Journal of Stratigraphy*, (1):28-33(in Chinese with English abstract).
- Sun W, Chen M, He J L, Cao J F and Wang D. 2015. Strontium isotope composition and evolution in the Sowa formation 'Bandaohu area' Qiangtang depression, Tibet[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(2):265-274(in Chinese with English abstract).
- Tan F W, Zhu L X, Fu X G and Feng X L. 2015. REE geochemistry of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous carbonate rocks and palaeoclimates in the Nadigangri region, Qiangtang basin[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 30(4): 92-96(in Chinese with English abstract).
- Tripathi J K, Bock B and Rajamani V. 2013. Nd and Sr isotope characteristics of Quaternary Indo-Gangetic plain sediments: Source distinctiveness in different geographic regions and its geological significance[J]. *Chemical Geology*, (344): 12-22.
- Veizer J. 1975. Possible use of strontium in sedimentary rocks as a pale-environmental indicator[J]. *Sedimentary Geology*, 5(1):5-22.
- Wang C S, Yin H S, Liu C Y, Li Y L, Zou Y R, Wu X H, Deng B and Yang X K. 2004. Discovery of paleo-oil reservoir in Qiangtang basin in Tibet and its geological significance[J]. *Oil & Gas Geology*, 2:139-143(in Chinese with English abstract).
- Wang J and Fu X G. 2018. Sedimentary evolution of the Qiangtang basin[J]. *Geology in China*, 45(2):237-259(in Chinese with English abstract).
- Wei Y J, Sun J M, Zhu Q Z, Yang B, Shen J S and Liu X B. 2002. Han C M. Preliminary research on the Mesozoic lithofacies-palaeogeography in the Chalangla area, Qiangtang basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2:229-237(in Chinese with English abstract).
- Wierzbowski H, Anczkiewicz R and Bazarnik J. 2012. Strontium isotope variations in Middle Jurassic (Late Bajocian-Callovian) seawater: Implications for Earth's tectonic activity and marine environments[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 334:171-181.
- Wortmann U G and Paytan A. 2012. Rapid variability of seawater chemistry over the past 130 million years[J]. *Science*, 337(6092): 334-336.
- Wu Z H, Zhao Z and Lu L. 2019. Uplifting evolution of the central uplift belt, Qiangtang: Constraints from tectono-thermochronology[J]. *Earth Science Frontiers*, 26(2):249-263(in Chinese with English abstract).
- Xiao C T, Li Y B, Hu M Y, Gong W P, Xiao A C, Lin K X and Zhang C S. 2000. Discovery of Jurassic reef in northern Tibet and its significance[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 3:52-56(in Chinese with English abstract).
- Xiao X C, Li T D, Li G C, Gao Y L and Xu Z Q. 1990. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Journal of Chinese Academy of Geological Sciences*, 1: 123-125(in Chinese with English abstract).
- Xie Y, Luo J N, Zhang X N, Yang B X, Liu J D and Li Y T. 2000. Palaeo-Ocean sedimentary environment during the Middle Jurassic in Nadigangri area, Qiangtang basin[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1:80-86(in Chinese with English abstract).
- Yang G F, Teng Y H, Zhuo S G and Lu B. 2003. Hydrocarbon accumulation conditions in Shuanghu area, Qiangtang basin, northern Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 4: 285-289(in Chinese with English abstract).
- Yin F G. 2003. Nature and origin of the central uplift in the Qiangtang Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 27(2):143-146(in Chinese with English abstract).
- Yin G and Wang C S. 1998. Strontium and sulfur isotope compositions and the significance of the palaeo-oceanic geology in the Middle Cretaceous in the South Tibet[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1: 107-111(in Chinese with English abstract).
- Zeng S Q, Zhu L X, Tan F W, Fu X G, Chen M and Feng X L. 2012.

- Strata of the Late Mesozoic in the North of Qiangtang basin: A discovery of the Early Cretaceous marine strata[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(5): 825-833 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Y Y. 2015. Studies on the Jurassic Magneto stratigraphy and the formation conditions of salts in the Yanshiping area, North Qiangtang basin[D]. Supervisor: Song C H. Lanzhou: Lan Zhou University. 126p (in Chinese with English abstract).
- Zeng Y Y, Wang J S and Zhang W. 2019. The Paleo salinity of the Middle-Late Jurassic Xiali Formation in the Yanshiping section, Qiangtang basin[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 39(5): 539-548 (in Chinese with English abstract).
- Zhang S, Song C H, Liu C H, Liu C, Pan G Q, He P J and Meng Q Q. 2015. Mechanisms of the sedimentary cycles and climatic evolutions in Middle Jurassic Xiali Formation in Yanshiping area[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 51(3): 319-326 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y X, Li Y, Zhang K J and Li Y L. 2006. Characteristics of Middle-Upper Jurassic carbonate rocks and its environmental significance in Yicangma area, Qiangtang basin, Tibet[J]. *Geology of China*, 2: 393-400 (in Chinese with English abstract).
- Zhao B, Yin H S, Lin J H, Shi Z Q, Huang J J and Li B H. 2002. Cretaceous rock stratigraphy and sedimentary environment in Ulan Ula lake area, North Qiangtang[J]. *Geological Bulletin of China*, 11: 749-755 (in Chinese with English abstract).
- Zheng M P, Zhang Z, Liu X F and Yin H W. 2012. Potash exploration characteristics in China: New understanding and research progress[J]. *Acta Geosciences Sinica*, 33(3): 280-294 (in Chinese with English abstract).
- Zheng M P, Zhang Z, Hou X H and Lin Y J. 2015. The prospects and the mining development strategy of potassium resources in China[J]. *Land and Resources Information*, 10: 3-9 (in Chinese with English abstract).
- 65.
- 李廷栋, 李光岑, 肖序常, 常承法, 滕吉文, 袁学诚. 1989. 论青藏高原地壳演化和隆升机理[A]. 中国科学院地球物理研究所论文摘要集(1984)[C]. 59-61.
- 李亚林, 王成善, 李永铁. 2008. 西藏羌塘盆地侏罗系膏盐岩与油气成藏[J]. *石油学报*, 2: 173-178.
- 李永铁, 谭富文, 王剑, 郭祖军. 2006. 西藏羌塘盆地中侏罗世布曲期及夏里期岩相古地理与油气远景[J]. *古地理学报*, 4: 499-508.
- 李勇, 王成善, 伊海生, 石和, 林金辉, 朱利东, 李祥辉. 2001. 青藏高原中侏罗世—早白垩世羌塘复合型前陆盆地充填模式[J]. *沉积学报*, 1: 20-27.
- 刘建清, 贾保江, 杨平, 陈玉禄, 彭波, 李振江. 2007. 碳、氧、锶同位素在羌塘盆地龙尾错地区层序地层研究中的应用[J]. *地球学报*, 3: 253-260.
- 吕苑苑, 郑绵平. 2014. 盐湖硼、锂、锶、氯同位素地球化学研究进展[J]. *矿床地质*, 33(5): 930-944.
- 牛新生, 刘喜方, 陈文西. 2014. 西藏北羌塘盆地多格错仁地区盐泉水化学特征及其物质来源[J]. *地质学报*, 88(6): 1003-1010.
- 潘佳秋, 宋春晖, 鲍晶, 马丽芳, 颜茂都, 方小敏, 应红, 杨一博. 2015. 羌塘盆地侏罗系元素地球化学特征与成盐层位分析[J]. *地质学报*, 89(11): 2152-2160.
- 石和, 黄思静, 沈立成. 2005. 西藏岗巴晚白垩世锶同位素曲线的地层学意义及问题讨论[J]. *地层学杂志*, (1): 28-33.
- 孙伟, 陈明, 何江林, 曹竣锋, 王东. 2015. 西藏羌塘盆地半岛湖地区索瓦组锶同位素组成与演化[J]. *沉积学报*, 33(2): 265-274.
- 谭富文, 朱丽霞, 付修根, 冯兴雷. 2015. 羌塘盆地那底岗日地区上侏罗统一白垩统碳酸盐岩稀土元素地球化学与古气候[J]. *沉积与特提斯地质*, 30(4): 92-96.
- 王成善, 伊海生, 刘池洋, 李亚林, 邹铂荣, 伍新和, 邓斌, 杨兴科. 2004. 西藏羌塘盆地古油藏发现及其意义[J]. *石油与天然气地质*, 2: 139-143.
- 王剑, 付修根. 2018. 论羌塘盆地沉积演化[J]. *中国地质*, 45(2): 237-259.
- 蔚远江, 孙景民, 朱庆忠, 杨兵, 申军山, 刘宪斌, 韩春明. 2002. 羌塘盆地查郎拉地区中生代岩相古地理初探[J]. *沉积学报*, 2: 229-237.
- 吴珍汉, 赵珍, 陆露. 2019. 羌塘盆地中央隆起带的抬升演化: 构造-热年代学约束[J]. *地学前缘*, 26(2): 249-263.
- 肖传桃, 李艺斌, 胡明毅, 龚文平, 肖安成, 林克湘, 张存善. 2000. 藏北地区侏罗纪生物礁的发现及其意义[J]. *中国科学基金*, 3: 52-56.
- 肖序常, 李廷栋, 李光岑, 高延林, 许志琴. 1990. 青藏高原的构造演化[J]. *中国地质科学院院报*, 1: 123-125.
- 谢渊, 罗建宁, 张哨楠, 杨宝星, 刘家铎, 李永铁. 2000. 羌塘盆地那底岗日地区中侏罗世碳酸盐岩碳、氧、锶同位素与古海洋沉积环境[J]. *矿物岩石*, 1: 80-86.
- 杨桂芳, 滕玉洪, 卓胜广, 鲁兵. 2003. 藏北羌塘盆地双湖地区油气成藏条件[J]. *地质通报*, (4): 285-289.
- 尹福光. 2003. 羌塘盆地中央隆起性质与成因[J]. *大地构造与成矿学*, 27(2): 143-146.
- ### 附中文参考文献
- 陈兰, 伊海生, 胡瑞忠. 2003. 藏北羌塘地区侏罗纪颗石藻化石的发现及其意义[J]. *地学前缘*, 4: 613-618.
- 贺秀斌. 1997. 微量元素锶及其同位素的地球化学研究与应用前景[J]. *地球科学进展*, 1: 16-20.
- 黄继钧. 2001. 藏北羌塘盆地构造特征及演化[J]. *中国区域地质*, 2: 178-186.
- 黄思静, 吴素娟, 孙治雷, 裴昌蓉, 胡作维. 2005. 中生代海水锶同位素演化和古海洋事件[J]. *地学前缘*, 2: 133-141.
- 黄思静, 卿海若, 胡作维, 吴素娟, 孙治雷, 裴昌蓉. 2006. 西藏南部晚白垩世厚壳蛤不同壳层的地球化学特征及其对古海洋信息的保存性[J]. *沉积学报*, 1: 68-74.
- 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[J]. *高校地质学报*, 22(1): 60-

- 尹观,王成善.1998.西藏南部中白垩世的锶、硫同位素组成及其古海洋地质意义[J].沉积学报,(1):107-111.
- 曾胜强,朱丽霞,谭富文,付修根,陈明,冯兴雷.2012.北羌塘盆地晚中生代地层:早白垩世海相地层的发现[J].沉积学报,30(5):825-833.
- 曾永耀.2015.北羌塘盆地雁石坪地区侏罗纪磁性地层年代序列与成盐条件研究(博士论文)[D].导师:叶春晖.兰州:兰州大学.126页.
- 曾永耀,王建设,张伟.2019.羌塘盆地中晚侏罗世雁石坪剖面夏里组古盐度与成盐意义[J].矿物学报,39(5):539-548.
- 张洒,宋春晖,刘川,潘佳秋,何鹏举,孟庆泉.2015.羌塘盆地雁石坪地区中侏罗统夏里组沉积旋回与气候演化机制[J].兰州大学学报(自然科学版),51(3):319-326.
- 张玉修,李勇,张开均,李亚林.2006.西藏羌塘盆地依仓玛地区中上侏罗统碳酸盐岩特征及其环境意义[J].中国地质,2:393-400.
- 赵兵,伊海生,林金辉,时志强,黄继均,李保华.2002.北羌塘乌兰乌拉湖地区白垩纪岩石地层及沉积环境[J].地质通报,11:749-755.
- 郑绵平,张震,张永生,刘喜方,尹宏伟.2012.我国钾盐找矿规律新认识和进展[J].地球学报,33(3):280-294.
- 郑绵平,张震,侯献华,林勇杰.2015.中国钾资源远景与矿业发展战略[J].国土资源情报,10:3-9.

<http://www.kcdz.ac.cn/>