

羌塘盆地晚侏罗世夏里组磁学参数指示的 沉积环境及其成盐意义

曾永耀¹⁾, 何沛锋¹⁾, 赵涛¹⁾, 祁红梅¹⁾, 赵培植¹⁾, 高磊¹⁾, 王建设²⁾, 张伟^{3,4)}

1) 兰州资源环境职业技术学院, 兰州, 730030;

2) 兰州大学地质科学与矿产资源学院, 甘肃省西部矿产资源重点实验室, 兰州, 730000;

3) 中国科学院青藏高原研究所, 北京, 100101; 4) 中国科学院大学, 北京, 100049

内容提要:羌塘盆地位于青藏高原中部, 是一个具有沉积钠盐、钾盐远景的蒸发岩盆地。最近在羌塘盆地上侏罗统夏里组中发现多处具有钾、钠异常的盐泉这一重要的找钾盐线索, 然而目前对上侏罗统夏里组的古环境演变仍然不甚了解, 限制了对晚侏罗世羌塘盆地的成盐(成钾)条件和可能的层位等重大科学问题的理解。因此本文以热磁分析为主, 对羌塘盆地雁石坪地区上侏罗统夏里组沉积物进行高分辨率岩石磁学研究, 并讨论其古环境意义。最后, 根据成盐(成钾)理论, 综合分析羌塘盆地上侏罗统夏里组成盐(成钾)的构造、气候和物源条件。 κ - T 曲线、磁滞回线和热退磁结果共同表明磁铁矿和赤铁矿是夏里组的主要载磁矿物; 磁学参数分析表明夏里组上段赤铁矿含量相对增加, 揭示夏里组上段形成于干旱气候环境; 综合分析构造、气候和物源条件表明, 羌塘盆地上侏罗统夏里组上段最为具备良好的成盐(成钾)条件。

关键词:岩石磁学; 晚侏罗世; 羌塘盆地; 夏里组; 沉积环境; 成盐

根据《中国环境状况公报》统计, 目前中国约 60% 的耕地缺钾, 而国内钾盐产量远不能满足农业发展的需求, 致使中国钾盐进口量连年居高不下。另外, International Fertilizer Industry Association (国际肥料工业协会)统计还表明, 2010 年中国钾肥进口量约 700 万吨, 对外依存度高达 60%, 而全球约 70% 的钾盐被国外矿业巨头所垄断, 致使中国进口钾盐价格一直在高位运行。鉴于此, 国务院《关于加强地质工作的决定》将钾盐列为最急缺的战略性矿产资源之一。自 20 世纪 50 年代以来, 我国已探明的钾盐主要为陆相盐湖, 其地质储量约 10 亿吨, 远不能满足农业发展的需求 (Zheng Mianping et al., 2006)。然而国外钾盐矿床勘探实践表明, 全球约 90% 的大型、巨型钾盐矿床都形成于海相盆地, 这与海盆面积大、海水中钾元素含量高有密切关系 (Hite, 1982; Liu Chenglin et al., 2010; Warren, 2010)。由此可见, 只有取得海相盆地找钾盐的重大突破, 才能缓解中国急缺钾盐的被动局面 (Liu Chenglin et al., 2010; Zheng Mianping et al.,

2010; Niu Xingshen et al., 2013, 2014a, 2014b)。

羌塘盆地位于青藏高原中部 (图 1a), 是一个具有远景沉积钠盐和钾盐的蒸发岩盆地 (Zheng Mianping et al., 2010)。20 世纪 90 年代以来, 随着一系列地质填图、油气和盐湖资源等科研项目的开展, 在羌塘盆地侏罗纪地层陆续发现大量石膏层、石膏丘露头 (Li Yalin et al., 2008; Li Zhongxiong et al., 2010; Wu Tao et al., 2010; 图 1b), 特别是最近在羌塘盆地上侏罗统夏里组中发现多处具有钾、钠异常的地表盐泉这一重要的找钾盐线索 (Niu Xingshen et al., 2013, 2014 a, 2014b; 图 1b)。然而迄今为止, 从环境磁学角度对羌塘盆地上侏罗统夏里组古环境演化开展研究的还为数不多。由于沉积物的磁学参数可以指示沉积物中磁性矿物的含量、类型和磁畴等重要信息, 进而可以利用磁学信息反演古环境 (Dekkers, 1997), 因此本文选取羌塘盆地侏罗系地层较完整出露的雁石坪剖面为研究对象, 以磁学参数为研究方法, 系统分析夏里组古环境演化规律。除此之外, 根据成盐(成钾)理论, 钾盐是

注: 本文为国家“973”重点基础研究发展计划项目 (编号 2011CB403000)、甘肃省高等学校科研项目 (编号 2017A-169) 和兰州资源环境职业技术学院科研项目 (编号 Z2016-36) 联合资助的成果。

收稿日期: 2017-04-05; 改回日期: 2017-08-23; 责任编辑: 周健。

作者简介: 曾永耀, 男, 1980 年生。博士, 主要从事沉积盆地分析等方面的研究。Email: ruoshuizeng@126.com。

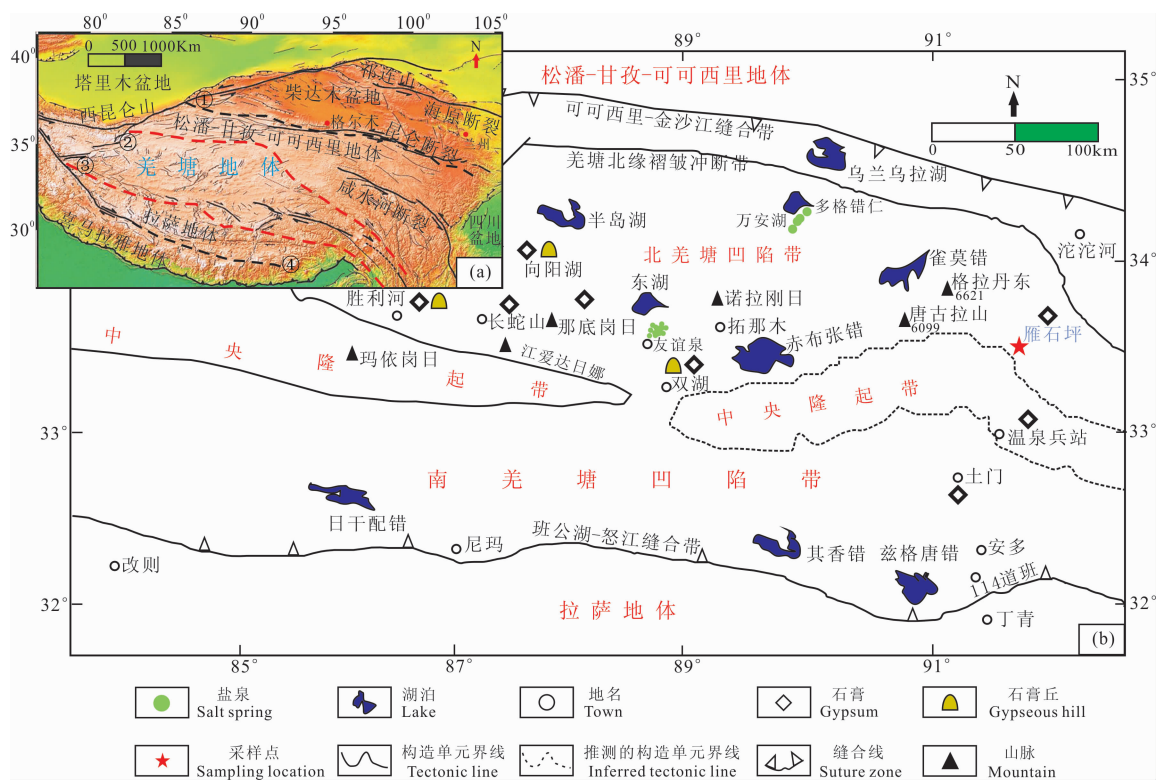


图 1 羌塘盆地大地构造简图(a,据 Tapponnier et al. , 2001)和蒸发岩分布示意图 (b,据 Li Yalin et al. , 2008;Li Zhongxiong et al. , 2010;Wu Tao et al. , 2010)

Fig. 1 The tectonic map of the Qiangtang Basin (a, compiled from Tapponnier et al. , 2001) and the distribution map of evaporites in the basin (b, cited from Li Yalin et al. , 2008; Li Zhongxiong et al. , 2010; Wu Tao et al. , 2010)

①—康西瓦-玛沁缝合带;②—可可西里-金沙江缝合带;③—班公湖-怒江缝合带;④—印度河-雅鲁藏布江缝合带
①—Kengxiwar-Maqen suture zone; ②—Hoh Xil-Jinsha suture zone; ③—Bangong-Nujiang suture zone;
④—Indus-Yalung Zangpo suture zone

“构造-气候-物源”三要素耦合作用的产物(Liu Chenglin et al. , 2010,2015;Warren,2010),因此在研究羌塘盆地上侏罗统夏里组古环境演化规律的基础上,本文还进一步讨论了夏里组的成盐(成钾)条件和层位等科学问题。

1 地质背景及剖面描述

1.1 羌塘盆地侏罗纪演化史

羌塘盆地起源于冈瓦那大陆,在中、晚三叠世和松潘-甘孜-可可西里地体碰撞并形成可可西里-金沙江缝合带(Sengör,1987;Yin & Harrison,2000;Zhang Hongrui et al. , 2010;Liu Chiyang et al. , 2016;图 1a);随后,在中、晚侏罗世一早白垩世和拉萨地体穿时碰撞并形成班公湖-怒江缝合带(Yin & Harrison,2000;Kapp et al. , 2007;Zhu et al. , 2011;Yan et al. , 2016;Zhang Tengjiao et al. , 2017;图 1a)。羌塘盆地由北羌塘盆地、南羌塘盆地和中央隆起带三个二级构造单元组成(Tapponnier

et al. , 2001;图 1b)。羌塘盆地在侏罗纪的演化过程如下:

(1)羌塘盆地在侏罗纪的演化肇始于晚三叠世的陆表海盆地,此时中央隆起带以南隆起成为剥蚀区(Chen Wenxi & Wang Jian,2009;Wang Jian et al. , 2010)。随后,在晚三叠世诺利期,松潘-甘孜-可可西里地体遭受强烈挤压,导致羌塘盆地北部隆起和陆表海盆终结(Chen Wenxi & Wang Jian,2009;Wang Jian et al. , 2010)。上述过程已被大量出露于羌塘盆地北部的古风化壳所证实(Chen Wenxi & Wang Jian,2009;Wang Jian et al. , 2010;Fu Xiugen et al. , 2013)。晚三叠世诺利期一瑞提期,在拉张背景下羌塘盆地南部地壳破裂形成裂陷盆地(Wang Jian et al. , 2010;Fu Xiugen et al. , 2013)。

(2)早侏罗世羌塘盆地北部发生强烈裂陷作用形成裂陷盆地(Chen Wenxi & Wang Jian,2009)。此时在羌塘盆地形成了完整的“两凹一隆”格局(北

羌塘凹陷、南羌塘凹陷和中央隆起带)。随后,中侏罗世随着北羌塘盆地和南羌塘盆地的俯冲以及班公湖-怒江洋的扩张,出现大规模海侵事件,导致中央隆起带被淹没,北羌塘盆地和南羌塘盆地连为一体(Nan Zhengbing et al. , 2013)。接着,在中、晚侏罗世羌塘盆地相继发生海退和另一个海侵事件(Wang Jian et al. , 2010;Nan Zhengbing et al. , 2013)。

(3)晚侏罗世—早白垩世,拉萨地体和羌塘地体自东向西穿时碰撞导致班公湖-怒江洋盆逐渐闭合(Yin & Harrison,2000;Yan et al. , 2016),即侏罗纪羌塘海相盆地演化终结(Fu Xiugen et al. , 2013)。上述过程最终导致中、晚侏罗世—早白垩世在羌塘盆地形成一个海侵→海退→海侵→海退的演化旋回(Tan Fuwen et al. , 2004;Nan Zhengbing et al. , 2013)。

1.2 雁石坪剖面描述

羌塘盆地广泛发育中、晚侏罗世海相地层(Fu Xiugen et al. , 2013;图 2a),从下到上依次为雀莫错组、布曲组、夏里组、索瓦组和雪山组(中国地质调查局等,2004;图 2b),并且上述地层具有“三层砂岩夹两层灰岩”的岩性组合特点,即雀莫错组、夏里组和雪山组以碎屑岩为主,而布曲组和索瓦组以灰岩

为主,上述各组之间均为整合接触(图 2b)。

雁石坪剖面(N 33°33′19.9″~N 33°35′11.3″, E 92°01′57.3″~E 92°03′44.3″)位于西藏自治区安多县唐古拉山北翼雁石坪镇一带(图 1b;图 2a),该剖面从下到上依次包括雀莫错组、布曲组、夏里组和索瓦组,夏里组为实测地层。

夏里组实测厚 608 m(图 3a)。主要发育紫红色、(黄)灰绿色砂岩,粉砂岩,泥岩和灰黑色微晶灰岩,生物灰岩韵律旋回。该套地层普遍出露水平层理、沙纹层理、透镜状层理、波状层理和羽状交错层理(图 3b)。除此之外,薄层石膏(约 560 m;图 3c)、干裂构造(约 320 m;图 3d)以及石膏晶体(约 400 m、480 m)也出露于夏里组上段,在剖面约 40 ~ 140 m 大量发育双壳类化石(图 3e)。最近,综合古生物地层学和磁性地层学,初步建立了夏里组地层年代框架,具体的研究主要有:Cheng Jinhui & He Chengquan(2006)根据腕足、菊石和孢粉,确定夏里组的古生物年代为卡洛-牛津期(Callovia-Oxfordian);Fang Xiaomin et al. (2016)古地磁测年表明夏里组磁性地层年代约为 164.0~160.2 Ma。上述成果为进一步研究该地区古环境演化提供了可靠的时间标尺。

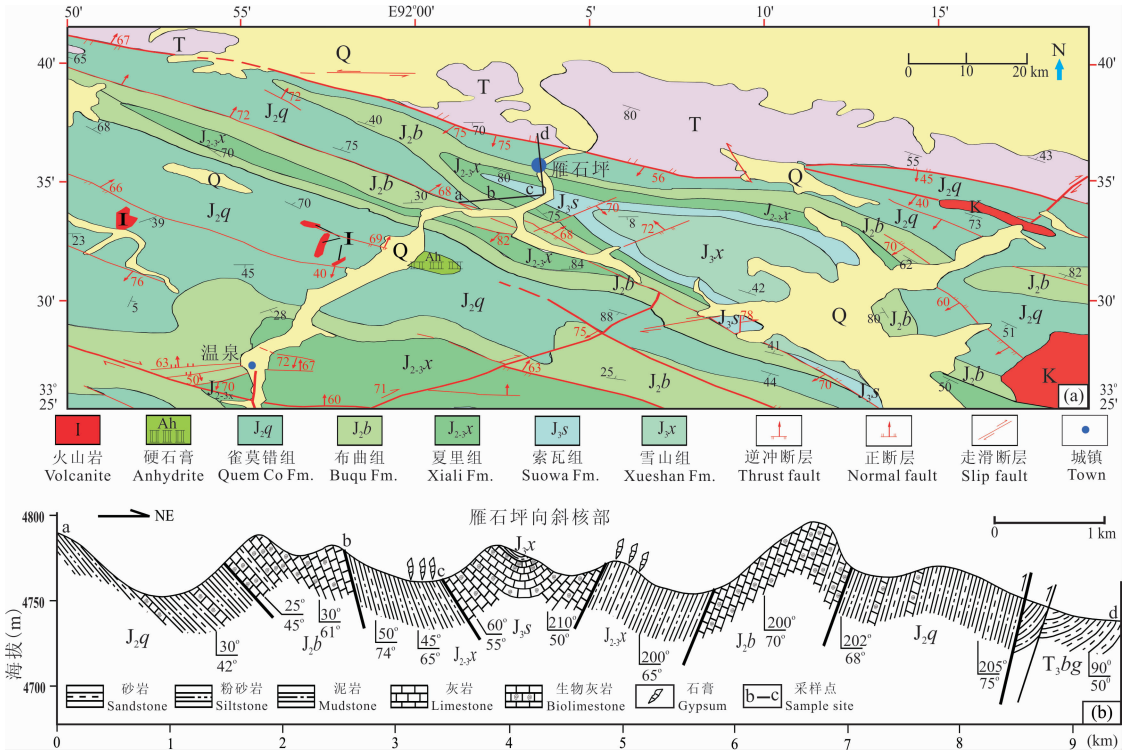


图 2 雁石坪地区区域地质图(a,引自中国地质调查局等,2004)及雁石坪剖面横剖面图(b)

Fig. 2 Geologic map of the Yanshiping area (a, compiled from 1 : 250 000 scale geologic maps, Geological Survey of China et al. ,2004) and cross section of the Yanshiping area (b)

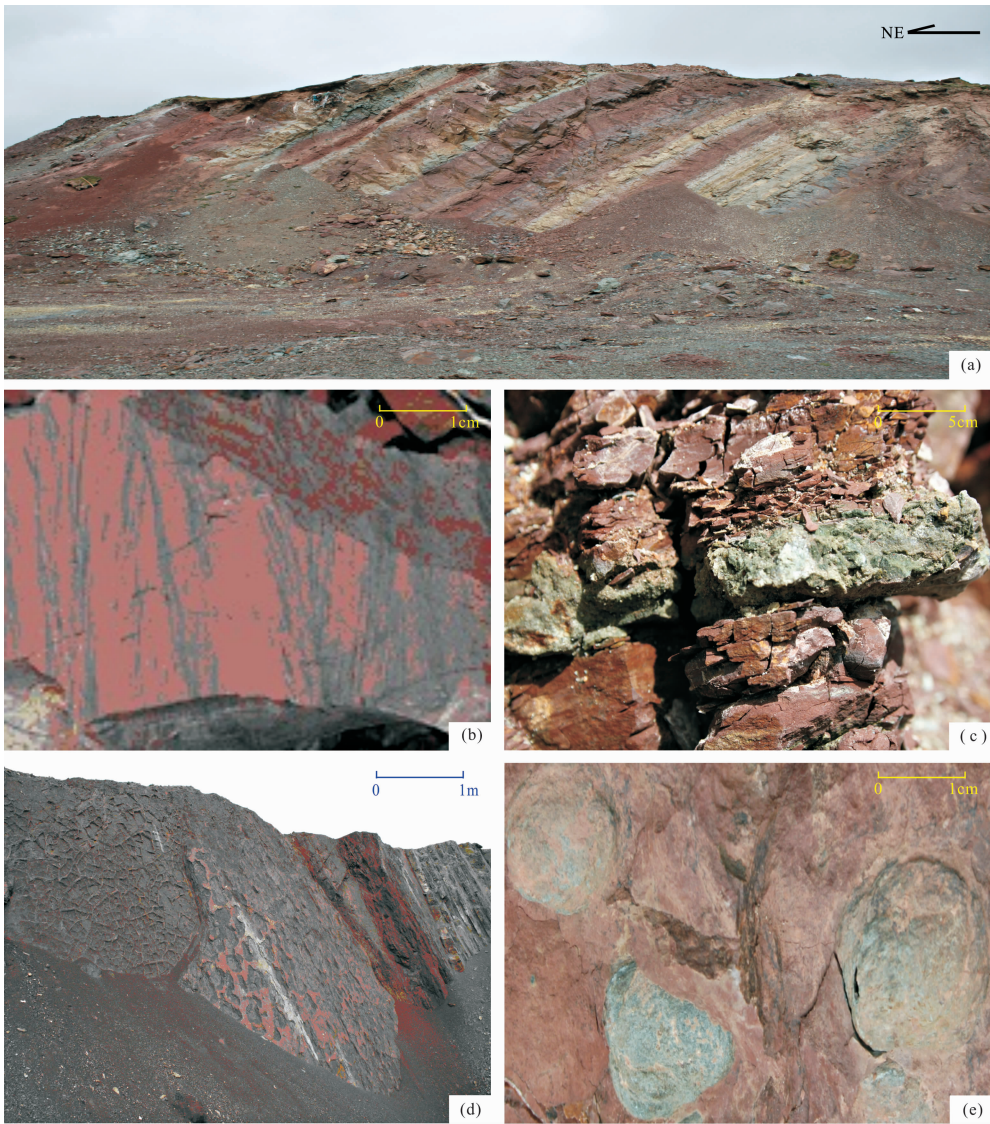


图 3 雁石坪地区夏里组野外露头、沉积构造和化石

Fig. 3 Representative field photos of the outcrop, sedimentary structures and fossils in the Xiali Fm of Yanshiping area

(a)—夏里组上段野外露头;(b)—羽状交错层理;(c)—薄层石膏;(d)—泥裂构造;(e)—双壳类化石

(a)—Field photo in the Upper Xiali Fm. ; (b)—herringbone cross bedding; (c)—thinly bedded gypsum; (d)—mud cracks; (e)—bivalve fossils

2 采样、实验及结果

除个别地层因沉积物严重覆盖未采样外,夏里组磁学样品按 2 m 等间距采样。采样方法为 Model Do26-T6 型钻机取样法和手标本定向采样法。其中,钻机取样 221 块,手标本定向取样 82 块,共采集样品 303 块。在实验室将每个采样点的样品加工成 3 套平行古地磁定向样品。磁化率随温度变化曲线(κ - T)测量利用 MFK-1 卡帕桥及其 CS-4 温度控制系统,最大加热温度为 700 $^{\circ}\text{C}$,测量时样品处于氩气环境。测试过程中每个干样的平均重量约为 0.1~0.2 g;磁滞回线测量在室温下利用 MicroMag 2900

型变梯度磁力仪,所加的最大场强为 $\pm 500\text{ mT}$,测量结果经过顺磁校正,测试过程中每个干样的平均重量约为 0.01 g。同时用磁天平(VFTB)测量饱和磁化强度(M_s)、饱和剩磁(M_{rs})、矫顽力(B_c)和剩磁矫顽力(B_{cr})等磁滞参数。 κ - T 曲线和磁滞回线测量分别在中科院青藏高原研究所和德国图宾根大学古地磁实验室完成。样品的磁化率(χ)利用 Bartington MS2 型双频磁化率仪测量,分别测量样品的低频(0.47 kHz)和低频(4.7 kHz)磁化率值,本次实验磁化率值为三次测量的平均值,测量时每个样品的称量精度约为 0.01g。利用热退磁法分离样品特征剩磁的过程为:对样品进行分步退磁和剩

磁测量,当加热温度小于 550 ℃时,退磁温度间隔为 50 ℃,当加热温度在 550~690 ℃时,退磁温度间隔为 10~30 ℃,热退磁的最高温度为 690 ℃。磁化率测量和热退磁实验在兰州大学古地磁实验室完成。

夏里组代表性样品的 κ - T 曲线(图 4 a、b)、磁滞回线(图 4 c、d)和热退磁(图 5)结果如下。

加热过程的 κ - T 曲线能较好地揭示磁性矿物的物理化学变化,例如指示磁性矿物的种类和粒度等(Deng Chenglong et al., 2001)。图 4 a、b 为夏里组代表性样品的 κ - T 曲线,变化特征主要有两种类型:第一种为,当加热温度递增到约 580 ℃时,磁化率显著下降,显示出磁铁矿的解阻温度,直至加热温度继续上升到约 680 ℃时,磁化率减小为零,显示出赤铁矿的解阻温度(图 4a);第二种为,随着加热温度的升高磁化率逐渐降低,在加热到约 580 ℃时,磁化率轻微降低,随着加热温度的继续升高,在约 680 ℃时磁化率显著降低直至为零,显示出赤铁矿的解阻温度(图 4b)。另外, κ - T 曲线中冷却曲线均在加热曲线上方(图 4 a、b),表明样品在加热过程生

成了新的强磁性矿物(Pan Yongxin et al., 2000)。

磁滞行为受控于磁性矿物的类型,因此可以利用磁滞回线揭示沉积物中磁性矿物的组成(Tauxe et al., 1996)。图 4 c、d 为夏里组代表性样品的磁滞回线,其变化特征也有两种类型:第一种为,磁滞回线在约 250 mT 的外加磁场下接近闭合,其矫顽力和剩磁矫顽力值均较小,指示样品的载磁矿物为低矫顽力磁性矿物(图 4c);第二种为,磁滞回线在约 500 mT 的外加磁场下接近闭合,其矫顽力和剩磁矫顽力值均较大,指示样品的载磁矿物为高矫顽力磁性矿物(图 4d)。

夏里组热退磁结果表明大部分样品(约 74%)的黏滞剩磁在约 300 ℃左右被清除,继续加热后,在约 400 ~ 580 ℃剩磁方向稳定趋向原点,能较好地分离出高温剩磁分量,代表了特征剩磁(ChRM)的矢量方向,表明样品的载磁矿物主要为磁铁矿(图 5a、b);除此之外,还有少量样品(约 18%)随着加热温度的升高剩磁强度不断降低,在约 630 ~ 690 ℃剩磁矢量稳定趋向原点并且剩磁强度降至天然剩磁

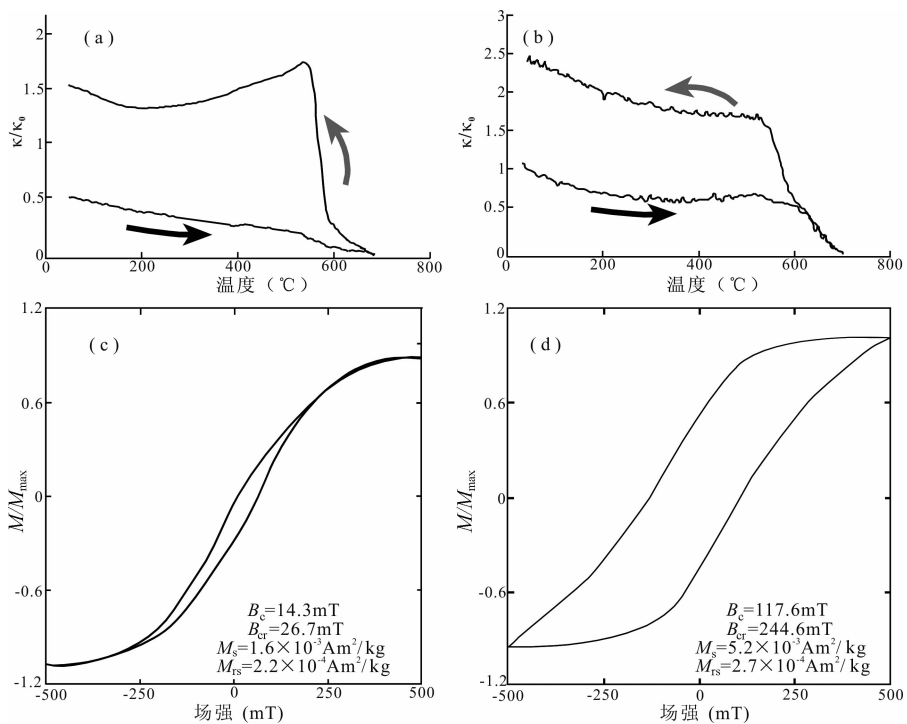


图 4 雁石坪地区夏里组代表性样品的 κ - T 曲线(a、b,黑色和灰色箭头分别代表加热和冷却过程)和经过顺磁校正的磁滞回线(c、d)

Fig. 4 κ - T curves (a, b) and hysteresis loops after paramagnetic correction (c, d) of the Xiali Fm in Yanshiping area (black and gray arrows in the κ - T curves representing the heating and cooling curves)

(a)—58m 处的灰绿色砂岩;(b)—456m 处的紫红色砂岩;(c)—114m 处的灰绿色粉砂岩;(d)—417.5m 处的紫红色泥岩
(a)—Grayish green sandstone in the 58m;(b)—purple red sandstone in the 456m;(c)—grayish green siltstone in the 114m;
(d)—purple red mudstone in the 417.5m

(NRM)的 5% 以下,代表了特征剩磁方向,表明夏里组样品的载磁矿物还有赤铁矿(图 5c、d)。

结合夏里组岩石磁学(图 4)以及热退磁(图 5)结果表明,夏里组的载磁矿物为磁铁矿和赤铁矿。退磁强度分析表明,夏里组大部分样品的天然剩磁强度在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ A/m 之间,主导强度为 10^{-5} A/m。另外,夏里组磁化率测试结果见图 6 a。

3 讨论

3.1 夏里组古环境分析

夏里组磁化率随地层厚度垂向变化趋势见图 6a。图 6a 表明,磁化率除在约 480 m 处出现最大值外,垂向变化可以划分为两段:① 夏里组下段(0~480 m、约 164.0~160.9 Ma),磁化率随着地层厚度的增加具有较为明显的递增趋势,磁化率的变化范围在 $4.62 \times 10^{-8} \sim 27.3 \times 10^{-8}$ m³/kg 之间,平均值为 17.6×10^{-8} m³/kg,最大值出现在下段上部;② 夏里组上段(约 480~608 m、约 160.9~160.2 Ma),磁化率随地层厚度增加而具有较为明显的递减趋势,磁化率的变化范围在 $7.36 \times 10^{-8} \sim 27.3 \times 10^{-8}$ m³/kg 之间,平均值为 14.7×10^{-8} m³/kg。

磁化率是反映亚铁磁性物质的代用指标之一,与磁铁矿等软磁性矿物含量呈正相关(Zhang Weiguo et al., 2008),因此夏里组磁化率含量的变化趋势可以说明,在夏里组下段从剖面底部向上,磁铁矿含量有递增趋势;到夏里组上段磁铁矿含量递减;另外,磁铁矿的 $B_{cr} < 100$ mT,赤铁矿的 B_{cr} 在约 300~1800 mT 之间(Jia Hailin et al., 2004; Wang Zhanghua et al., 2008)。夏里组代表性样品的 B_{cr} 测试表明,其值在 16.8~1046.68 mT 之间,这进一步说明,夏里组载磁矿物主要为低矫顽力的磁铁矿和高矫顽力的赤铁矿,特别是夏里组样品中 B_{cr} 值较高的赤铁矿主要位于夏里组上段。对于夏里组载磁矿物的上述变化规律和利用漫反射光谱法测量夏里组赤铁矿含量所取得的结果是一致的。例如, Zeng Yongyao et al. (2014)根据漫反射光谱法测量表明,从下段到上段夏里组赤铁矿含量的平均值递增了 1.34 倍(图 6b)。

赤铁矿主要形成于热带、亚热带的强氧化干旱环境,具有明显的气候指示意义,是指示干旱气候的代用指标之一(Ji Junfeng et al., 2007)。岩石磁学(图 4)以及漫反射光谱测量结果(Zeng Yongyao et

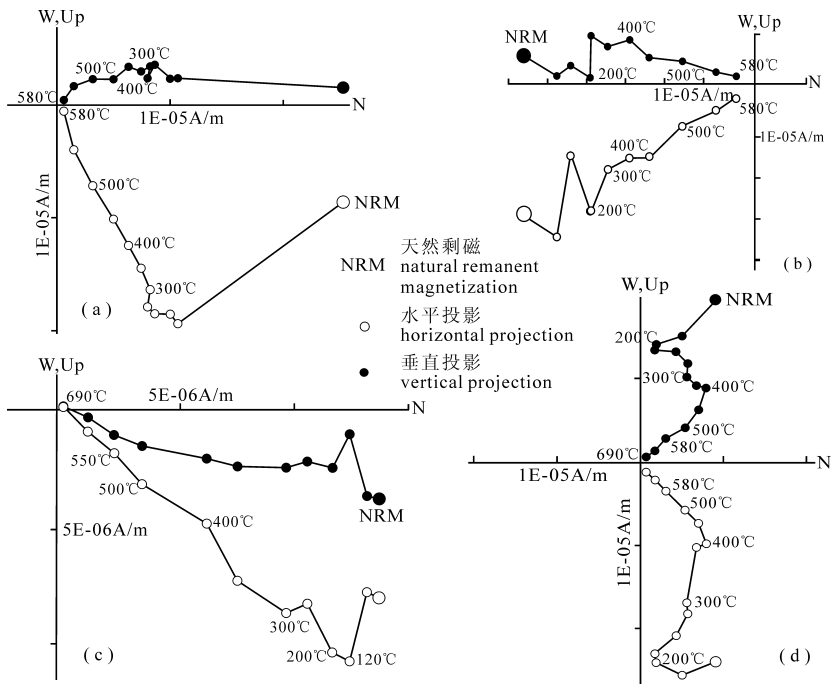


图 5 雁石坪地区夏里组代表性样品热退磁正交投影图

Orthogonal projections of representative alternating field demagnetization of the Xiali Fm. in Yanshiping area (directions are plotted in tilt-corrected coordinates)

a) — 83m 处的灰绿色砂质泥岩; (b) — 257m 处的灰绿色砂岩; (c) — 414m 处的紫红色粉砂岩; (d) — 552m 处的紫红色砂岩
Grayish green silty mudstone in the 83m; (b) — grayish green sandstone in the 257m; (c) — purple red siltstone in the 414m; (d) — purple red sandstone in the 552m

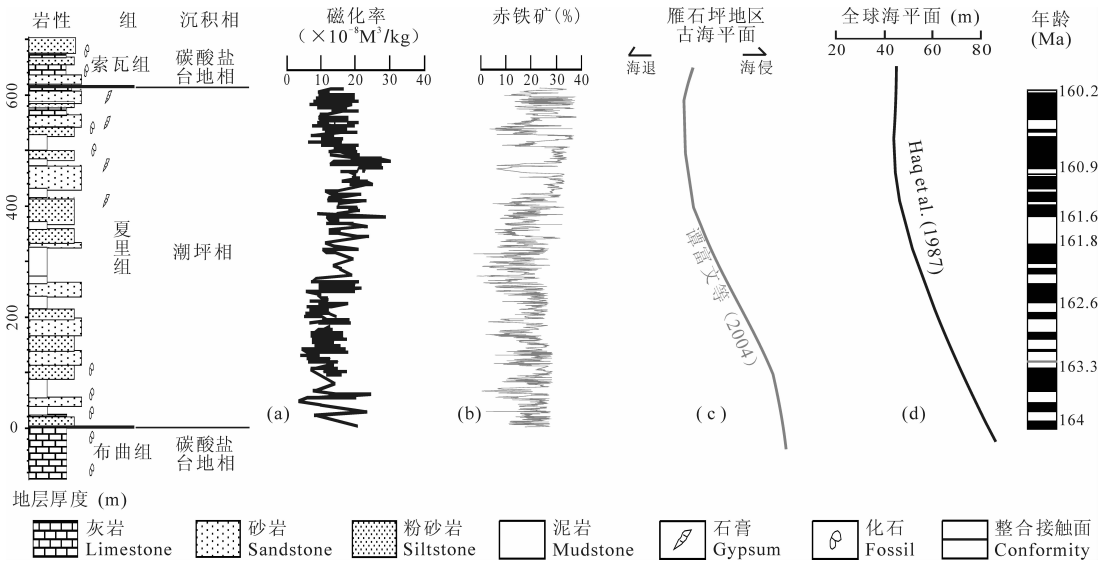


图 6 雁石坪地区夏里组磁化率(a)、赤铁矿含量(b)及古海平面随深度变化曲线图(c) (夏里组赤铁矿含量曲线引自 Zeng Yongyao et al. , 2014、古海平面变化曲线引自 Tan Fuwen et al. , 2004、全球海平面变化曲线引自 Haq et al. , 1987)
Fig. 6 Vertical variation of magnetic susceptibility (a), hematite (b) and sea level (c) of the Xiali Fm. in Yanshiping area (Hematite cited from Zeng Yongyao et al. , 2014; Sea level cited from Tan Fuwen et al. , 2004; Global sea level cited from Haq et al. , 1987)

al. , 2014;图 6b)均表明夏里组上段赤铁矿含量明显递增,赤铁矿含量的这一变化趋势表明夏里组上段形成于干旱气候。夏里组上段的干旱事件也被沉积物的颜色所记录,例如夏里组上段沉积物的红色明显增强(图 3a)。另外,对比夏里组的古海平面和全球同时期海平面变化曲线,发现夏里组上段的干旱事件对应于全球海平面的下降期(图 6c、d)。亦即,随着全球海平面的不断下降,夏里组上段间歇性暴露于水面,不断接受风化改造,致使夏里组上段普遍出露羽状交错层理(图 3b)、泥裂构造(图 3d)等代表浅水环境的沉积构造。因此,本文的岩石磁学测试结果与赤铁矿含量的相对增加(Zeng Yongyao et al. , 2014)所揭示的古气候演化规律相一致,说明夏里组上段海平面较低、气候干旱。这一认识也得到了其他证据的支持。例如,Tan Fuwen et al. (2004)、Song Chunhui et al. (2017)通过对羌塘盆地雁石坪及其周边地区上侏罗统夏里组的稳定同位素以及 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等古气候代用指标的测量,均认为夏里组上段气候干旱。

3.2 夏里组成盐(成钾)条件分析

盆地水系中的金属阳离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等)和阴离子(CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 等),在适宜的构造、气候和物源条件下蒸发、浓缩,便沉积以碳酸盐、硫酸盐、氯化物等为代表的各种盐类矿床(Liu Chenglin et al. , 2010;Zheng Mianping et

al. , 2010)。由此可见,形成钾盐或者钠盐需要具备适宜的构造条件(封闭、半封闭的凹陷区、裂陷区、裂谷带、坳陷盆地等)、促进蒸发的气候条件(持续干旱的气候条件有利于卤水蒸发、浓缩而析出钠盐、钾盐)以及丰富的物源补给条件(多期次的海水补给是形成钠盐、钾盐矿床最主要的物质来源)(Liu Chenglin et al. , 2010, 2015; Warren, 2010; Zheng Mianping et al. , 2010)。因此接下来,将从构造、气候以及物源条件相互耦合的角度,分析羌塘盆地上侏罗统夏里组的成盐(成钾)条件。

早一中侏罗世在拉张背景下,羌塘盆地逐渐转变为裂陷盆地(Chen Wenxi & Wang Jian, 2009),紧接着在中一晚侏罗世,随着全球海平面的变化以及班公湖-怒江洋盆的开合演化,羌塘盆地相继发生了 2 次海侵和 2 次海退,形成了一个完整的海侵→海退→海侵→海退旋回(Nan Zhengbing et al. , 2013)。羌塘盆地第 2 次海退发生在晚侏罗世全球海平面下降的宏观背景下,随着羌塘盆地海平面的不断下降(Chen Wenxi & Wang Jian, 2009; Nan Zhengbing et al. , 2013),中央隆起区暴露地表(Xie Yuan et al. , 2002;图 1b),盆地内水体逐步向西北退缩,裸露的中央隆起区在雁石坪地区形成了一个封闭、半封闭的凹陷区(Li Jianguo et al. , 2011),该封闭、半封闭的凹陷区为晚侏罗世羌塘盆地形成钠盐、钾盐提供了较为有利的宏观构造

条件(Fang Xiaomin et al. , 2016; Song Chunhui et al. , 2017)。

前文磁学与赤铁矿测试、分析表明,夏里组上段形成于干旱气候环境,这一干旱气候为夏里组上段形成钠盐、钾盐提供了良好的气候条件。这是因为:第一,雁石坪及其毗邻地区夏里组上段广泛出露石膏层、石膏丘露头(Li Yalin et al. , 2008; Li Zhongxiong et al. , 2010; Wu Tao et al. , 2010),说明羌塘盆地已经演化到开始沉积硫酸盐的阶段;第二, Song Chunhui et al. , (2017)通过计算羌塘盆地雁石坪地区夏里组上段的 $\text{Ba}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}$ 和 Na^+-Cl^- 离子的相关系数认为夏里组上段开始进入沉积硫酸盐或者氯化物早期的阶段。另外,晚侏罗世的干旱气候导致沉积蒸发岩并不是一个孤立事件,例如,大量的 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素研究表明,中、晚侏罗世的卡洛—牛津交互期,西特提斯广大地区的气候也从湿润转变为干旱(Riboulleau et al. , 1998; Lécuyer et al. , 2003),这一气候变化为西特提斯地区在晚侏罗世沉积蒸发岩(石膏层、岩盐和钾盐)奠定了一定的古气候条件(Aurell et al. , 1994; Legaretta & Uliana, 1996)。

中、晚侏罗世伴随着班公湖-怒江洋盆的开合演化,羌塘盆地出现了海侵→海退→海侵→海退的演化旋回,该旋回为在羌塘盆地沉积蒸发岩提供了丰富的物源补给条件(Zheng Mianping et al. , 2010; Niu Xingshen et al. , 2013, 2014 a, 2014b),最近在羌塘盆地上侏罗统夏里组中发现的石膏层(Li Yalin et al. , 2008; Li Zhongxiong et al. , 2010; Wu Tao et al. , 2010; 图 1b)和盐泉就是例证(Niu Xingshen et al. , 2013, 2014 a, 2014b; 图 1b)。除此之外, Song Chunhui et al. (2017)通过测量夏里组的 Cl^- 、 K^+ 和 Na^+ 离子等物源指标,定量揭示出上述物源指标在夏里组上段均有明显的递增趋势(上段的 Cl^- 、 K^+ 和 Na^+ 离子含量平均值分别是下段的 1.8、2.4 和 1.7 倍),同时对上述物源指标的相关性计算表明,夏里组上段的 K^+-Cl^- ($r=0.73$) 和 Na^+-Cl^- ($r=0.90$) 的相关性明显大于下段。

更重要的是,尽管海水是海相钾盐矿床最主要的物质来源,但是地质历史时期,海水的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 离子浓度却不断变化,导致形成“方解石海”和“文石海”(Sandberg, 1983)。“方解石海”的特征是,海水中 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}<2$, 容易形成以 NaCl 和 KCl 为代表的氯化物型蒸发岩(Hardie, 1996; Lowenstein et al. , 2001)。相反“文石海”的特征

是,海水中 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}>2$, 容易形成以石膏为代表的硫酸盐型蒸发岩(Hardie, 1996; Lowenstein et al. , 2001)。由此可见, $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 离子比值是判断形成不同类型蒸发岩的重要指标之一(Sandberg, 1983; Hardie, 1996; Lowenstein et al. , 2001)。Hardie(1996)和 Lowenstein et al. (2001)研究表明中、晚侏罗世的卡洛—牛津交互期全球海水为“方解石海”,并且形成了一定的 KCl 和 NaCl 型蒸发岩。而 Song Chunhui et al. (2017)对夏里组 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 离子测试表明,夏里组上段 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 离子平均值=1.82,这从理论上进一步表明夏里组上段具备沉积氯化物型蒸发岩的条件。由此可见,夏里组具有形成钠盐、钾盐的物源补给条件。

因此,综上所述羌塘盆地上侏罗统夏里组上段具备良好的成盐(成钾)的构造、气候和物源条件。

4 结论

- (1)结合夏里组的热退磁以及岩石磁学结果表明,夏里组的载磁矿物主要为磁铁矿和赤铁矿。
- (2)磁学参数结果分析表明夏里组上段的赤铁矿含量相对增加,揭示夏里组上段形成于干旱气候环境。
- (3)综合分析构造、气候和物源条件表明,羌塘盆地上侏罗统夏里组上段最为具备良好的成盐(成钾)条件。

致谢:本项目的实施得到了中科院青藏高原研究所方小敏、颜茂都研究员以及兰州大学宋春晖教授的悉心指导。除此之外,匿名审稿人的建设性建议也为本文的出版增色颇多,在此一并衷心感谢!

References

Aurell M, Fernandez L S, Melendez G. 1994. The Middle-Upper Jurassic oolitic ironstone bed in the Iberian Range (Spain), eustatic implications. *Geobios*, 17: 549~561.

Chen Wenxi, Wang Jian. 2009. The formation and evolution of the Qiangtang Basin during the Late Triassic-Middle Jurassic period in northern Tibet. *Geology in China*, 36(3): 682~693 (in Chinese with English abstract).

Cheng Jinhui, He Chengquan. 2006. Middle-Late Jurassic marine dinoflagellate cysts from the eastern Qiangtang Basin in the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Progress in Natural Science Special Issue*, 16: 274~283.

Dekkers M J. 1997. Environmental magnetism: an introduction. *Geologie en Mijnbouw*, 76(12): 163~182.

Deng Chenglong, Zhu Rixiang, Jackson M J, Verosub K L, Singer

- M J. 2001. Variability of the temperature-dependent susceptibility of the Holocene eolian deposits in the Chinese loess plateau: A pedogenesis indicator. *Physics and Chemistry of the Earth*, 26(11~12): 873~878.
- Fang Xiaoming, Song Chunhui, Yan Maodu, Zan Jinbo, Liu Chenglin, Sha Jingen, Zhang Weiling, Zeng Yongyao, Wu Song, Zhang Dawen. 2016. Mesozoic litho-and magneto-stratigraphic evidence from the central Tibetan Plateau for megamonsoon evolution and potential evaporates. *Gondwana Research*, 37: 110~129.
- Fu Xiugen, Wang Jian, Tan Fuwen. 2013. Gas hydrate formation and accumulation potential in the Qiangtang Basin, northern Tibet, China. *Energy Conversion and Management*, 73: 186~194.
- Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic (250 million years ago to present). *Science*, 235(1): 156~167.
- Hardie L A. 1996. Secular variation in seawater chemistry: an explanation for the coupled secular variation in the mineralogies of marine limestones and potash evaporates over the past 600 m. y. *Geology*, 24(3): 279~283.
- Hite R J. 1982. Progress report on the potash deposits of the Khrat Plateau. Thailand. United States Department of the Interior Geological Survey, 5~32.
- Ji Junfeng, Chen Jun, Balsam W, Liu Lianwen, Chen Yang, Zhao Liang, Zhou Wei. 2007. Quantitative analysis of hematite and goethite in the Chinese loess-paleosol sequences and its implication for dry and humid variability. *Quaternary Sciences*, 27(2): 221~229 (in Chinese with English abstract).
- Jia Hailin, Liu Cangyu, Zhang Weiguo, Meng Yi, Hong Xueqing. 2004. Magnetic Properties of Core CY from Chongming Island, the Yangtze Estuary and Its Environmental Significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(1): 117~123 (in Chinese with English abstract).
- Kapp P, DeCelles P G, Gehrels G E, Heizler M, Ding Ling. 2007. Geological records of the Lhasa-Qiangtang and Indo-Asian collisions in the Nima area of central Tibet. *GSA Bulletin*, 119: 917~932.
- Lécuyer C, Picard S, Garcia J P, Sheppard S M F, Grandjean P, Dromart G. 2003. Thermal evolution of Tethyan surface waters during the Middle-Late Jurassic: Evidence from $\delta^{18}\text{O}$ values of marine fish teeth. *Paleoceanography*, 18(3): 1076.
- Legaretta L, Uliana M A. 1996. The Jurassic succession in west central Argentina: stratal patterns, sequences and paleogeographic evolution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 120: 303~330.
- Li Yalin, Wang Chengshan, Li Yongtie. 2008. Characteristics of Jurassic saline deposits and its significance to hydrocarbon accumulation in Qiangtang Basin of Tibet area. *Acta Petrolei Sinica*, 29(2): 173~178 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhongxiong, He Jianglin, Xiong Xingguo, Wu Tao, Bai Peirong. 2010. The Upper Jurassic-Lower Cretaceous Shenglihe oil shales and their Formation in the Qiangtang Basin, Northern Xizang. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(2): 265~272 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianguo, Riding J B, Cheng Jinhui, He Chengquan. 2011. Latest Jurassic-earliest Cretaceous (Tithonian-Berriasian) dinoflagellate cysts from the Yanshiping Group of the northern Qinghai-Xizang Plateau, western China. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 166: 38~45.
- Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Wang Mili. 2010. A tentative discussion on exploration model for potash deposits in basins of China. *Mineral Deposits*, 29(4): 581~592 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Zhao Yanjun, Fang Xiaomin, Lv Fenglin, Wang Licheng, Yan Maodu, Zhang Hua, Ding Ting. 2015. Plate Tectonics Control on the Distribution and Formation of the Marine Potash Deposits. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 1893~1907.
- Liu Chiyang, Zheng Menglin, Yang Xingke, He Bizhu, Ren Zhanli, Guo Pei. 2016. Evolution and Late Modification of Mesozoic Marine Qiangtang Basin and Its Hydrocarbon Occurrence. *Acta Geologica Sinica*, 90(11): 3259~3291 (in Chinese with English abstract).
- Lowenstein T K, Timofeeff M N, Brennan S T. 2001. Oscillations in Phanerozoic seawater chemistry: Evidences from fluid inclusions. *Science*, 294: 1086~1088.
- Nan Zhengbing, Zhang Yanling, Li Yongtie, Tan Fuwen. 2013. Evolution characteristics of the Qiangtang Basin in the Mesozoic Era. *Natural Gas Geoscience*, 24(3): 534~540 (in Chinese with English abstract).
- Niu Xingshen, Chen Wenxi, Liu Xifang. 2013. Geochemical Characteristic on Salt Springs and potash perspective in Doai Coring Area of Qiangtang Basin. *Geoscience*, 27(3): 620~628 (in Chinese with English abstract).
- Niu Xingshen, Liu Xifang, Chen Wenxi. 2014a. Hydrochemical Characteristic and Origin for Salt Springs Water in Doai Coring Area of North Qiangtang Basin, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 88(6): 1003~1010 (in Chinese with English abstract).
- Niu Xingshen, Liu Xifang, Chen Wenxi. 2014b. Hydrochemical Characteristic and evaporate-generating indicators of Youyiquan area in North Qiangtang Basin, Tibet. *Mineral Deposits*, 33(5): 1003~1010 (in Chinese with English abstract).
- Pan Yongxin, Zhu Rixiang, Banerjee S K, Gill J, Williams Q. 2000. Rock magnetic properties related to thermal treatment of siderite: behavior and interpretation. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 105(B1): 783~794.
- Riboulleau A, Baudin F, Daux V, Hantzpergue P, Renard M, Zakharov V. 1998. Evolution de la paléotempérature de eaux de la plate-forme russe au cours du Jurassique supérieur. *C. R. Acad. Sci.*, 326: 239~246.
- Sandberg A. 1983. Anoscillating trend in Phanerozoic non-skeletal carbonate mineralogy. *Nature*, 305: 19~22.
- Sengör A M C. 1987. Tectonics of the Tethysides; Orogenic collage

- development in a collisional setting. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 15: 213~244.
- Song Chunhui, Zeng Yongyao, Yan Maodu, Fang Xiaoming, Feng Ying, Pan Jiaqiu, Liu Xifang, Meng Qingquan, Hu Chunhua, Zhong Sirui. 2017. Sedimentary Conditions of Evaporites in the Late Jurassic Xiali Formation, Qiangtang Basin: Evidence from Geochemistry Records. *Acta Geologica Sinica* (English Edition), 91(1): 156~174.
- Tauxe L, Mullender T A T, Pick T. 1996. Potbellies, wasp-waists, and superparamagnetism in magnetic hysteresis. *Journal of Geophysical Research*, 101(B1): 571~583.
- Tapponnier P, Xu Zhiqin, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G, Yang Jinsui. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau. *Science*, 294: 1671~1677.
- Tan Fuwen, Wang Jian, Wang Xiaolong, Du Baiwei. 2004. Analysis of carbon and oxygen isotope composition and sedimentary environment of the Yanshiping area of the Qiangtang Basin in Middle-Late Jurassic. *Acta Geoscientica Sinica*, 25(2): 119~126 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhanghua, Zhang Dan, Li Xiao, Tao Shikang, Xie Yan. 2008. Magnetic properties and relevant minerals of Late Cenozoic sediments in the Yangtze river delta and their implications. *Geology in China*, 35(4): 670~682 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jian, Fu Xiugen, Tan Fuwen. 2010. A new sedimentary model for the Qiangtang Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(5): 884~892 (in Chinese with English abstract).
- Warren J K. 2010. Evaporates through time: Tectonic, climatic and eustatic control marine and nonmarine deposits. *Earth Science Reviews*, 98(3~4): 217~268.
- Wu Tao, Xiong Xingguo, Yi Chengxing, Bai Peirong, He Yongzhong, Liu Zhencai. 2010. Gypsolyte sedimentary environment of Upper Jurassic Lower Cretaceous in Shenglihe area in northern Qiangtang Basin. *Xingjiang Petroleum Geology*, 31(4): 376~378 (in Chinese with English abstract).
- Xie Yuan, Wang Jian, Liu Jiaduo, Luo Jianning, Zhang Shaonan, Yang Baoxing, Li Minghui. 2002. Carbon, oxygen and strontium isotopic responses of carbonate rocks and the Middle Jurassic sequence stratigraphy in the Nadigangri area, Qiangtang Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(2): 188~196 (in Chinese with English abstract).
- Yan Maodu, Zhang Dawen, Fang Xiaoming, Ren Haidong, Zhang Weiling, Zan Jinbo, Song Chunhui, Zhang Tao. 2016. Paleomagnetic data bearing on the Mesozoic deformation of the Qiangtang Block; implications for the evolution of the Paleo-and Meso-Tethys. *Gondwana Research*, 39: 292~316.
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211~280.
- Zeng Yongyao, Bao Jing, Ma Lifang, Pan Jiaqiu, Song Chunhui, Yang Jiwei. 2014. The Paleoclimatic's evolution and the implication of halite-forming of Qiangtang Basin during the Middle-Late Jurassic of Xiali Age. *Mineral Deposits*, 33(5): 993~1002 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Weiguo, Xing Yu, Yu Lizhon, Lu Min. 2008. Distinguishing sediments from the Yangtze and Yellow Rivers, China; a mineral magnetic approach. *The Holocene*, 18(7): 1139~1145.
- Zhang Hongrui, Hou Zengqian, Yang Tiannan, Song Yucai, Li Zheng, Wang Zhaolin, Wang Xiaohu, Wang Yuankui, Liu Qun. 2010. Subduction-related Quartz Syenite Porphyries in the Eastern Qiangtang Terrane, Qinghai-Xizang Plateau. *Geological Review*, 56(3): 403~412.
- Zhang Tengjiao, Chen Ying, Li Youguo. 2017. Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry Characteristics of the North Qingcaoshan Granodiorite in the Southern Margin of Qiangtang, Tibet, and their Metallogenic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 91(8): 1729~1742 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Mianping, Qi Wen, Zhang Yongsheng. 2006. Present situation of potash resources and direction of potash search in China. *Geological Bulletin of China*, 25(11): 1239~1246 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Mianping, Yuan Heran, Zhang Yongsheng, Liu Xifang, Chen Wenxi, Li Jinsuo. 2010. Regional distribution and prospects of potash in China. *Acta Geologica Sinica*, 84(11): 1523~1553 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Niu Yaoling, Mo Xuanxue, Chung Sunlin, Hou Zengqian, Wang Liquan, Wu Fuyuan. 2011. The Lhasa Terrane: record of a microcontinent and its histories of drift and growth. *Earth and Planetary Science Letters*, 301: 241~255.

参 考 文 献

- 陈文西,王剑. 2009. 晚三叠世一中侏罗世羌塘盆地的形成与演化. *中国地质*, 36(3): 682~693.
- 季峻峰,陈骏, Balsam W, 刘连文, 陈旸, 赵良, 周玮. 2007. 黄土剖面中赤铁矿和针铁矿的定量分析与气候干湿变化研究. *第四纪研究*, 27(2): 221~229.
- 贾海林,刘苍字,张卫国,孟翔,洪雪晴. 2004. 崇明岛 CY 孔沉积物的磁性特征及其环境意义. *沉积学报*, 22(1): 117~123.
- 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藏. *石油学报*, 29(2): 173~178.
- 李忠雄,何江林,熊兴国,吴涛,白培荣. 2010. 藏北羌塘盆地上侏罗一下白垩统胜利河油页岩特征及其形成环境. *吉林大学学报(地球科学版)*, 40(2): 265~272.
- 刘成林,焦鹏程,王弭力. 2010. 盆地钾盐找矿模型探讨. *矿床地质*, 29(4): 581~592.
- 刘成林,赵艳军,方小敏,吕凤琳,王立成,颜茂都,张华,丁婷. 2015. 板块构造对海相钾盐矿床分布与成矿模式的控制. *地质学报*, 89(11): 1893~1907.
- 刘池洋,郑孟林,杨兴科,何碧竹,任战利,郭佩. 2016. 羌塘中生代海相盆地演化与后期改造及油气赋存. *地质学报*, 90(11): 3259~3291.
- 南征兵,张艳玲,李永铁,谭富文. 2013. 羌塘中生代盆地演化特征.

- 天然气地球科学, 24(3): 534~540.
- 牛新生, 陈文西, 刘喜方. 2013. 羌塘盆地多格错仁地区盐泉地球化学特征及成钾预测. 现代地质, 27(3): 621~628.
- 牛新生, 刘喜方, 陈文西. 2014a. 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. 地质学报, 88(6): 1003~1010.
- 牛新生, 刘喜方, 陈文西. 2014b. 西藏北羌塘盆地友谊泉水化学特征及成盐指示. 矿床地质, 33(5): 1003~1010.
- 谭富文, 王剑, 王小龙, 杜佰伟. 2004. 羌塘盆地雁石坪地区中一晚侏罗世碳、氧同位素特征与沉积环境分析. 地球学报, 25(2): 119~126.
- 王剑, 付修根, 谭富文, 陈明, 何江林. 2010. 羌塘中生代(T_3-K_1)盆地演化新模式. 沉积学报, 28(5): 884~892.
- 王张华, 张丹, 李晓, 陶士康, 解燕. 2008. 长江三角洲晚新生代沉积物磁性特征和磁性矿物及其指示意义. 中国地质, 35(4): 670~682.
- 吴滔, 熊兴国, 易成兴, 白培荣, 贺永忠, 刘贞才. 2010. 北羌塘坳陷胜利河组膏岩沉积环境. 新疆石油地质, 31(4): 376~378.
- 谢渊, 王剑. 2002. 羌塘盆地那底岗日地区中侏罗世层序地层与碳、氧、锶同位素响应. 沉积学报, 20(2): 188~196.
- 曾永耀, 潘佳秋, 马丽芳, 鲍晶, 宋春晖. 2014. 羌塘盆地中一晚侏罗世夏里期气候演化特征及其成盐意义. 矿床地质, 33(5): 993~1002.
- 张洪瑞, 侯增谦, 杨天南, 宋玉财, 王召林, 王晓虎, 汪元奎, 刘群. 2010. 青藏高原北羌塘南缘俯冲型石英正长斑岩的发现: 来自地球化学分析证据. 地质论评, 56(3): 403~412.
- 张腾蛟, 陈颖, 李佑国. 2017. 西藏羌塘南缘青草山北花岗岩闪长岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其成矿意义. 地质学报, 91(8): 1729~1742.
- 郑绵平, 齐文, 张永生. 2006. 中国钾盐地质资源现状与找钾方向初步分析. 地质通报, 25(11): 1239~1246.
- 郑绵平, 袁鹤然, 张永生, 刘喜方, 陈文西, 李金锁. 2010. 中国钾盐区域分布与找钾远景. 地质学报, 84(11): 1523~1553.
- 中国地质调查局, 成都地质调查中心. 2004. 青藏高原及邻区 1:25 万地质图. 成都: 成都地图出版社出版.

Magnetic Parameters of the Late Jurassic Xiali Formation, Qiangtang Basin: Implications for Sedimentary Environment and Salt Formation

ZENG Yongyao¹⁾, HE Peifeng¹⁾, ZHAO Tao¹⁾, QI Hongmei¹⁾, ZHAO Peizhi¹⁾,
GAO Lei¹⁾, WANG Jianshe²⁾, ZHANG Wei^{3,4)}

1) Lanzhou Resources & Environment Voc-tech College, Lanzhou, 730030;

2) School of Earth Sciences & Key Laboratory of Western China's Mineral Resources
(Gansu Province), Lanzhou University, Lanzhou, 730000;

3) Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese of Academy of Sciences, Beijing, 100101;

4) University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049

Abstract

The Qiangtang Basin, located in the central Tibetan Plateau, is an evaporate basin with deposited sodium salt and sylvite prospect. The recent discovery of salt springs with abnormally high sodium (Na^+) and potassium (K^+) contents in the Late Jurassic Xiali Formation provides an important clue for sylvite exploration. However, to date, there is little study about the paleo-environment of the Late Jurassic Xiali Formation, which largely constrain our understanding of key issues (such as formation conditions and possible layers of evaporates) in the Qiangtang Basin during late Jurassic. A high-resolution paleomagnetic analysis was performed on ~ 608 m thick of the Xiali Formation sediments in the Yanshiping section of the Qiangtang Basin to reconstruct the paleoclimatic history of the Qiangtang Basin during the Late Jurassic. At last, this study analyzed the integrated conditions of structure, climate and provenance with respect to the possible formation of potash and halite deposits in the Qiangtang Basin. The analysis of $\kappa-T$ diagram, hysteresis loop and thermal demagnetization demonstrates that magnetite and hematite are the primary magnetic minerals. Magnetic parameters of the rocks show an obviously increased content of hematite, revealing that the upper member of the Xiali Formation formed under an arid climate. The comprehensive studies on tectonism, paleoclimate and provenance reveal that the upper member of the Xiali Formation was favorable for the formation of evaporites in the Qiangtang Basin during the Late Jurassic.

Key words: rock magnetism; Middle-Late Jurassic; Qiangtang basin; Xiali Formation; sedimentary environment; salt formation