

文章编号: 0258-7106 (2014) 05-0993-10

羌塘盆地中-晚侏罗世夏里期气候演化特征 及其成盐意义*

曾永耀, 潘佳秋, 马丽芳, 鲍 晶, 宋春晖, 杨积伟

(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, 甘肃 兰州 730000)

摘 要 中-晚侏罗世随着劳亚大陆与冈瓦纳大陆的裂解、北大西洋的开启以及古特提斯洋的闭合, 导致全球海平面的改变和气候波动。在中-晚侏罗世交界的卡洛期-牛津期, 西特提斯域广大地区的气候从冷湿转变为干热, 羌塘盆地位于特提斯喜马拉雅构造域东段, 它是否也有类似的气候变化特征? 文章对羌塘盆地雁石坪剖面中、上侏罗统夏里组沉积物中 CaCO_3 、赤铁矿和针铁矿环境代用指标进行了测定, 并结合岩性和沉积相变化分析了该区古气候变化, 研究表明: 中-晚侏罗世交界时期, 羌塘盆地雁石坪地区气候变化经历了早期(163.8~162 Ma)相对冷湿、中期(162~161.4 Ma)半干旱以及晚期(161.4~159.6 Ma)干旱 3 个演化阶段。显示羌塘盆地中-晚侏罗世交界时期(163.8~159.6 Ma)的气候变化与同一时期的西特提斯构造域气候变化趋势一致, 为羌塘盆地侏罗纪可能的成盐潜力研究和评价提供了重要的古气候依据。

关键词 地质学; CaCO_3 ; 赤铁矿; 针铁矿; 气候演化; 中-晚侏罗世; 夏里组; 羌塘盆地

中图分类号: P619.211

文献标志码: A

Palaeoclimatic evolution of Qiangtang Basin during Middle-Late Jurassic Xiali period and its salt-forming significance

ZENG YongYao, PAN JiaQiu, MA LiFang, BAO Jing, SONG ChunHui and YANG JiWei

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

Abstract

The separation of Laurasia land and Gondwana land and the opening of the Atlantic Ocean as well as the extinction of the Palaeotethys Ocean in late Jurassic probably led to severe sea level change and climate fluctuation. Recent studies show that global climate was not always warm in late Jurassic. On the contrary, the world underwent a violent period of climate change, turning from cold wet to drought and hot during the Callovian-Oxfordian transition of the vast region of the west Tethys. In order to determine whether similar climate shifts might have happened in the East Tethys, the authors took the sediments from the Xiali Formation of Yanshiping Section in the Qiangtang Basin as the study object, measured CaCO_3 , hematite and goethite, and analyzed lithologic changes with the purpose of summarizing the characteristics of the palaeoclimatic evolution. Some conclusions have been reached: Climate change in 163.8~159.6 Ma could be generally divided into three stages. The first stage(163.8~162 Ma)was probably humid, the second stage(162~161.4 Ma)might have been semiarid and the third stage(161.4~159.6 Ma)was characterized by aridification. It is thus held that the climate change at

* 本文得到国家 973 重点基础研究发展计划项目(编号: 2011CB403003)的资助

第一作者简介 曾永耀, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事古气候演化研究。Email: ruoshuizeng@126.com

收稿日期 2013-10-31; 改回日期 2014-08-18。秦思婷编辑。

the late stage of the Middle Jurassic period (163.8 ~ 159.6 Ma) of the Qiangtang Basin in East Tethys responded to the Paleoclimatic evolution of West Tethys. In the light of climate evolution, the results achieved by the authors will help to evaluate the halite-forming potential at the late stage of the Middle Jurassic period.

Key words: geology, CaCO_3 , hematite, goethite, climate change, Middle-Late Jurassic, Xiali Formation, Qiangtang Basin

目前世界上已发现的巨型钾盐矿床基本属于海相沉积,这与海盆面积大、海水中钾元素含量高具有密切关系(Warren, 2010)。因此,只有取得海相地层找钾的重大突破,才能从根本上解决中国钾盐自给的问题(唐敏等, 2009; 郑绵平等, 2010)。自上世纪以来,中国在海相地层找钾方面开展了一系列工作。刘群等(1997)通过对鄂尔多斯盆地中-下奥陶统钻井的研究,首次在该地区发现薄层钾盐;林耀庭等(1998)在四川盆地的三叠纪海相地层发现了高矿化度的富钾卤水;郑绵平等(2006)在上扬子盆地的川南长宁也发现了巨厚的石盐层,并有确凿的K元素水化学异常证据;王立成等(2013)论证了上扬子盆地华南地块灯影组的成钾可行性;伯英等(2013)在莎车盆地、库车盆地分别发现了硫酸盐型和氯化物型水化学特征异常,并圈定了该地区水化学方法找钾靶区。羌塘盆地是中国侏罗纪海相地层分布最广的地区,随着1:20万区域地质填图以及油气和盐湖资源调查等项目的开展,在羌北地区陆续发现了数处规模不等的中-上侏罗统石膏层和石膏丘露头(苏铁牛等, 2007; 李亚林等, 2008; 李忠雄等, 2008; 2010; 吴滔等, 2010),特别是在羌塘盆地发现多处盐泉,其盐泉水成分达到了硫酸镁盐的沉积,接近钾盐沉积指标(郑绵平等, 2010)。

晚侏罗世是全球第二个主要的海相钾盐形成时期,该时期沉积的钾盐量占资源总量的10.27%(刘成林等, 2006; 2010)。如在西特提斯的墨西哥、中特提斯的土库曼、乌兹别克斯坦和阿富汗等地,相继发现了侏罗纪的钾盐矿床(图1)(郑绵平等, 2010; 2012),而位于东特提斯的羌塘盆地在中-晚侏罗世,处于干旱炎热的赤道以北的低纬度地区(程鑫等, 2012),是特提斯洋在闭合过程中形成的具有丰富海源补给的局限海泻湖盆地,因此,该地区具有较利于成盐的古地理和古气候条件(郑绵平等, 2006; 2010; Zheng et al., 2011)。由于该区高寒缺氧、大部分为无人区,研究程度较低,迫切需要进行可能的成盐机制和潜力研究。

盐类矿床的形成是构造、气候和物源等多种因素耦合作用的结果,即在干旱的气候条件下,在封闭或半封闭的滨海、泻湖盆地中,当蒸发量远超过补给量时,海水便按以下顺序(石膏→石盐→钾、镁盐→光卤石→水氯镁石)蒸发、浓缩、结晶、析出各种盐类矿物,因此,适宜的气候因素是成盐的先决条件(Borchert et al., 1964; 瓦里亚什科, 1965; 陈郁华, 1983)。近年的研究表明,西特提斯的广大地区在中-晚侏罗世(卡洛期-牛津期)气候从冷湿转变为干热,并且部分地区出露石膏层(Vakhrameev, 1991; Riboulleau et al., 1998; Aarssen et al., 2000; Abbink et al., 2001; Malchus, 2002; Dromart et al., 2003a; 2003b; Gröcke et al., 2003; Lécuyer et al., 2003),由此可见,研究东特提斯羌塘盆地中-晚侏罗世的气候演化规律,是评价该地区是否可能成盐的前提条件。

近年来,随着漫反射光谱法(DRS)对沉积物中赤铁矿和针铁矿含量定量测定的日益成熟,赤铁矿和针铁矿作为一种气候代用指标,在黄土-古土壤、湖泊和海洋沉积物的研究中取得了良好效果。Harris等(1999)利用针铁矿/(针铁矿+赤铁矿)比值,反演了Amazon盆地更新世以来的降雨量变化。刘连文等(2005)对南海“太阳号”95航次17954钻孔220 ka以来的沉积物进行了DRS分析,认为红度值反映了沉积物中铁氧化物的含量,可作为东亚夏季风的替代指标。季峻峰等(2007)通过分析多个黄土-古土壤剖面中赤铁矿/针铁矿比值,发现该比值可作为东亚季风干湿变化的代用指标。Zhang等(2007)利用ODP 1143钻孔中沉积物的赤铁矿/针铁矿比值,重建了东南亚600 ka以来的降雨量变化,并通过和中国南方石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 值进行比较,进一步确定了该比值的可靠性。由此可见,沉积物中赤铁矿、针铁矿含量和赤铁矿/针铁矿比值都具有良好的气候变化指示意义。本文针对特提斯洋在闭合过程中形成的羌北局限海泻湖盆地,通过对其夏里组沉积物中 CaCO_3 、赤铁矿、针铁矿等环境代用指标的

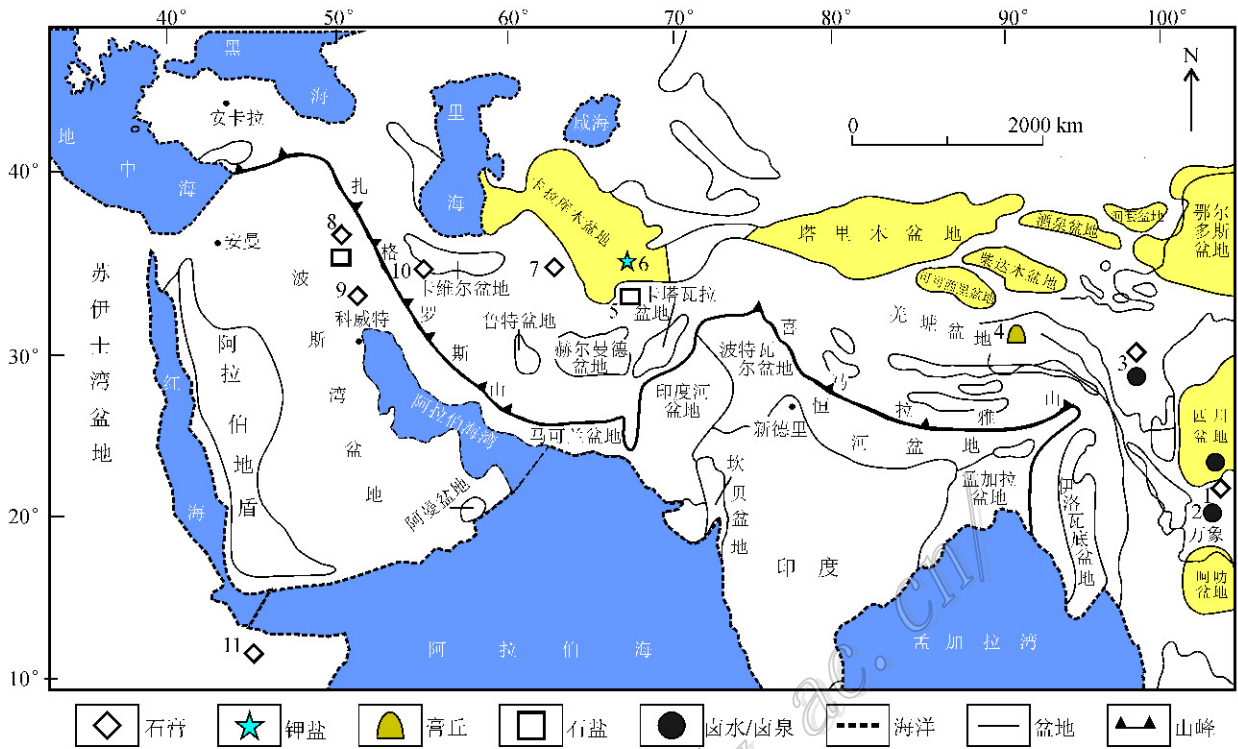


图 1 中-东特提斯构造域盆地及蒸发岩分布示意图(盆地分布数据引自王成善等,2004;蒸发岩分布数据引自郑绵平等,2010;2012)

1—四川盆地卤水; 2—滇西(德钦-永平)石膏、盐泉; 3—昌都石膏、盐泉; 4—羌塘盆地北部向阳湖-雁石坪膏丘; 5—塔吉克-阿富汗石盐; 6—土库曼-乌兹别克(卡拉库姆)钾盐; 7—伊朗东波斯湾石膏; 8—沙特阿拉伯石盐、石膏; 9—卡塔尔-科威特石膏; 10—伊拉克石膏; 11—索马里石膏

Fig. 1 Distribution of basins and evaporites in the middle-east Tethys tectonic domain
(The distribution of basins after Wang et al., 2004; that of evaporites after Zheng et al., 2010; 2012)

1—Brine of Sichuan Basin; 2—Gypsum and saline springs in Deqin-Yongping; 3—Gypsum and saline springs in Changdu; 4—Gypsum in Xiangyanghu-Yanshiping of northern Qiangtang Basin; 5—Halite in Tadjikistan and Afghanistan; 6—Sylvite in Turkmenistan and Uzbekistan (Karakum); 7—Gypsum in eastern Persian Gulf of Iran; 8—Gypsum and halite in Saudi Arabia; 9—Gypsum in Kuwait and Qatar; 10—Gypsum in Iraq; 11—Gypsum in Somalia

测定,探求羌北盆地中-晚侏罗世的气候演化规律,以期捕获重大干旱事件,为该盆地是否可能成盐的研究提供古气候约束。

1 地质背景

羌塘盆地夹持于可可西里-金沙江缝合带与班公湖-怒江缝合带之间,南北宽 300 km,东西长 640 km,面积约 $1.92 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。该盆地是在前古生界结晶基底和褶皱基底上发育的,以中生界海相地层为主的残留盆地,根据地球物理资料和沉积充填特征,由北而南划分为北羌塘凹陷带、中央隆起带和南羌塘凹陷带 3 个次级构造单元(图 2)(Fu et al., 2013; 王剑等, 2010)。羌塘盆地是全球特提斯构造

域的重要组成部分,其大地构造位置处于特提斯-喜马拉雅构造域的东段,是中国中生代海相地层分布最广的地区之一。尤其是唐古拉山北坡的雁石坪地区,是中国侏罗纪海相地层发育最好的地区(夏国清等,2010)。

雁石坪剖面(北纬: $33^{\circ}33'19.9'' \sim 33^{\circ}35'11.3''$, 东经: $92^{\circ}01'57.3'' \sim 92^{\circ}03'44.3''$)位于西藏自治区安多县雁石坪镇一带(图 3),海拔 4891 m,该剖面侏罗系出露完整,化石丰富。根据青海省 1:20 万区域地质调查资料,结合岩性和化石特征,将该剖面侏罗系从古到新依次划分为雀莫错组、布曲组、夏里组、索瓦组和雪山组,具有“三砂夹两灰”的岩性组合特点(图 3),即雀莫错组、夏里组和雪山组的岩性以碎屑岩为主,而布曲组和索瓦组以灰岩为主,各组之间

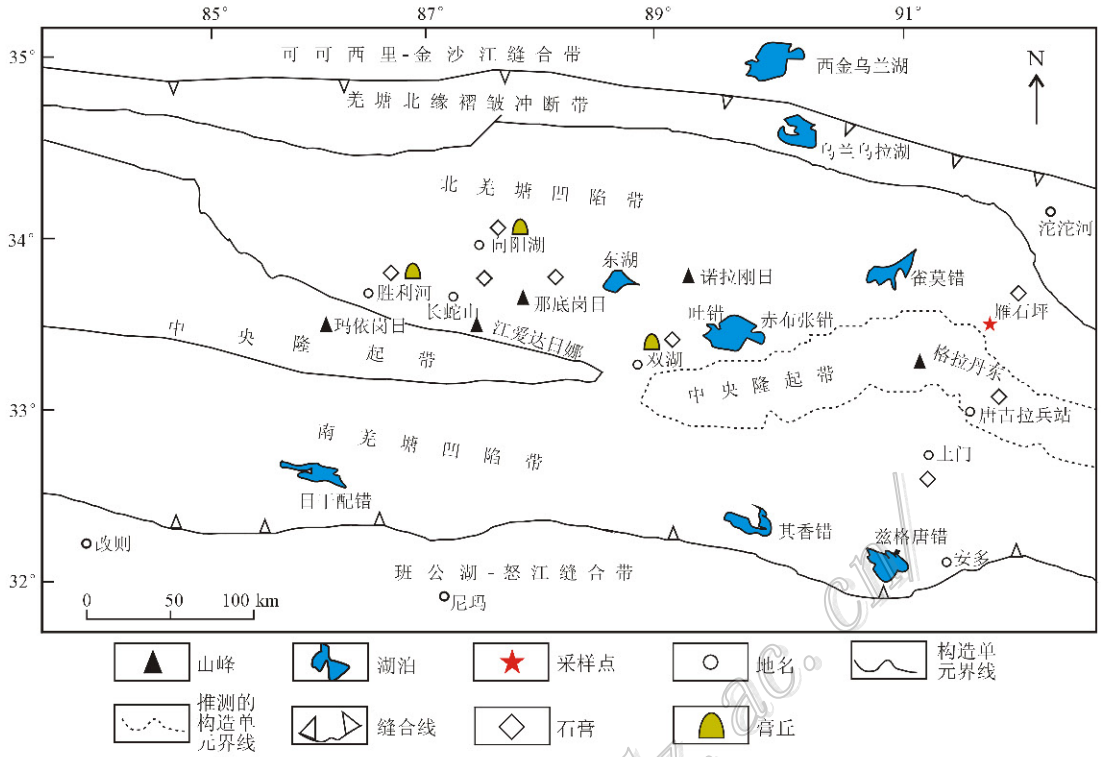


图 2 羌塘盆地大地构造及蒸发岩分布示意图(大地构造图引自王剑等,2010;
蒸发岩分布图引自李亚林等,2008;李忠雄等,2008;2010;吴滔等,2010)

Fig. 2 Tectonic map of the Qiangtang Basin showing distribution of evaporites (tectonic map after Wang et al. , 2010;
evaporite distribution map after Li Y L et al. , 2008; Li Z X et al. , 2008; 2010; Wu et al. , 2010)

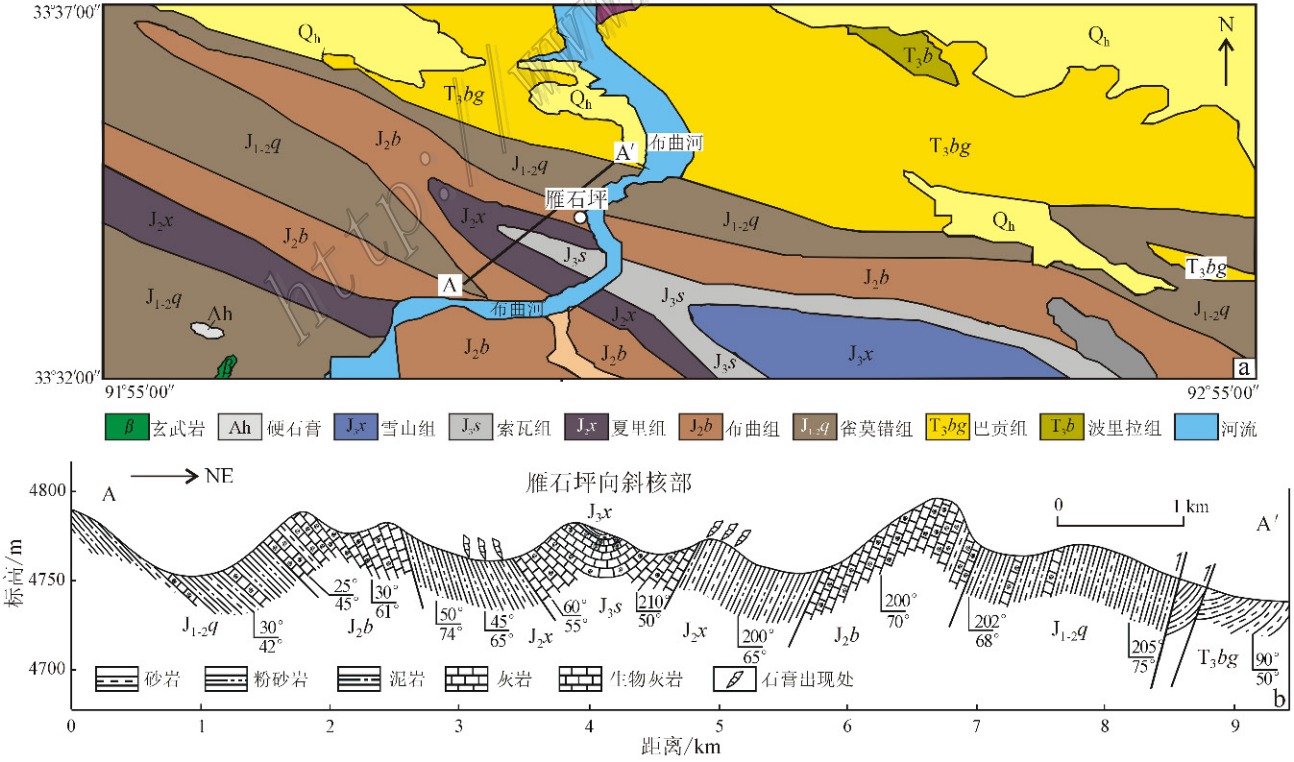


图 3 羌塘盆地雁石坪地区地质图(a)与雁石坪剖面图(b)

Fig. 3 Geological map of the Yanshiping section(a)and cross section of the Yanshiping area (b)

均为整合接触关系(王成善等, 2004)。

肖传桃等(2004)在羌塘盆地双湖地区夏里组发现了中侏罗世卡洛期常见的 *Cyathidites-Osmundacidites-Deltoidospora* 孢粉组合以及古地中海卡洛期常见的 *Parvaamussium subpersonatum-Protocardia lyxetti-Pholadomya socialis qinghaiensis* 双壳类分子组合。同时, 在土门地区夏里组发现了 *Erymnoceras coronatum* 菊石层, *Erymnoceras* 是中侏罗世卡洛期的标准化石, 广泛发育于欧洲及古地中海地区的卡洛期地层。陈兰等(2005)在雁石坪地区夏里组中, 还发现了中侏罗世卡洛期的 *Anisocardia tenera-Modiolus bipartitus* 腕足类化石组合。结合生物地层宏观年代, 笔者研究团队对夏里组开展了高分辨率磁性地层年代研究(古地磁测年结果另文发表), 确定夏里组地层年代为 163.8~159.6 Ma, 属于卡洛期-牛津期。

雁石坪剖面夏里组实测厚度为 607.6 m(剖面 2046~2653.6 m), 发育一套以细砂岩、粉砂岩和泥岩为主的紫红色与灰绿色韵律互层, 夹灰岩或泥灰岩, 上部发育多层石膏。其中, 砂岩具细砂状结构, 孔隙式胶结, 分选性好; 碎屑成分中, 石英含量为 50%~85%、长石含量为 5%~15%、岩屑含量为 4%~45%, 钙质和硅质胶结物含量为 5%~15%。夏里组含少量双壳类、腕足类化石及陆生植物化石碎片。其中, 双壳化石组合均为生存于半咸水环境的广盐性双壳类(陈兰等, 2005)。该组沉积构造可见波痕、透镜状、脉状及平行层理、羽状交错层理和潮汐层理等。根据上述岩性、沉积构造和化石特征, 判断该组为潮坪环境沉积产物。

2 样品采集、测量与结果

2.1 样品采集与测量

样品采集于雁石坪剖面夏里组, 按 0.5 m 等间距采样(其中, 出现石膏层则以间距为 10 cm 加密采样), 共采集 1104 块样品。沉积物 CaCO_3 含量和色度测试, 分别在兰州大学甘肃省西部矿产资源重点实验室和中国科学院青藏高原研究所完成。沉积物色度测试时, 先将样品放入 40℃ 的烘箱中烘干, 然后将样品研磨至 200 目以下, 取 2~3 g 压片固定后, 用 TU-1901 型分光光度计进行光谱扫描, 仪器测量范围为 360~850 nm, 标准白板用硫酸钡制作。

根据晶体场理论, 过渡族元素铁的 d 轨道电子在不同晶体场中会发生不同的能量分裂, 从而吸收

特定波长的光, 使不同的铁氧化物具有各自特征的反射光谱。因此, 对样品进行漫反射光谱(DRS)测量, 可以分别鉴定出针铁矿和赤铁矿的含量(Deaton et al., 1991; Schwertmann, 1971; 1988)。Deaton 等(1991)通过人工配制不同浓度的赤铁矿或针铁矿样品, 发现赤铁矿或针铁矿的含量与漫反射光谱一阶导数图谱特征峰的峰值有密切关系。季峻峰等(2007)在黄土-古土壤研究中, 通过 CBD 法(柠檬酸盐-重碳酸盐-连二亚硫酸盐)去除选定样品中的赤铁矿和针铁矿, 以消除基体效应, 从而获得样品的自然基体, 然后在该基体中加入不同含量的赤铁矿和针铁矿, 制成标准样品。在自然基体下建立标准曲线, 从而可定量计算样品中的赤铁矿和针铁矿含量。

季峻峰等(2007)的研究表明, 在以黄土为基体的赤铁矿和针铁矿 DRS 光谱一阶导数(1DV)图谱中, 赤铁矿只有 1 个显著的 DRS 峰(位于 565~575 nm), 当赤铁矿含量增加时, 峰增高。与赤铁矿不同, 针铁矿有 2 个 DRS 峰(主峰在 535 nm, 次峰在 435 nm), 峰高也随针铁矿含量的增加而增加。利用一阶导数法计算针铁矿和赤铁矿的含量, 对可见光波段 400~700 nm 进行漫反射光谱测试, 以 2 nm 为间隔采集数据, 获得连续的光谱数据。对该反射率数据使用 Origin 软件进行一阶导数求导, 分别求得一阶导数图谱位于 435 nm 和 565~575 nm 之间的峰高, 它们分别对应针铁矿和赤铁矿的含量。

2.2 实验结果

雁石坪剖面夏里组沉积物 CaCO_3 、赤铁矿和针铁矿含量的高分辨率测量结果见图 4。根据沉积物中 CaCO_3 、赤铁矿、针铁矿含量及赤铁矿/针铁矿比值的变化趋势, 由下到上可以划分为 3 段(图 4), 各段参数含量的平均值见表 1。

第 I 段, 夏里组下段(剖面的 2046~2310 m)。该段的 $w(\text{CaCO}_3)$ 除在 2160~2300 m 处略有下降, 总体趋于平稳, 平均 $w(\text{CaCO}_3)$ 为 8.52%, 为全剖面最小; $w(\text{赤铁矿})$ 主要介于 12%~22%, 平均值 16.6%, 为全剖面最小; 而 $w(\text{针铁矿})$ 主要介于 20%~36%, 平均值 18.4%, 为全剖面最大(表 1)。

第 II 段, 夏里组中段(剖面的 2310~2405 m)。相对于第 I 段, 其 $w(\text{CaCO}_3)$ 明显增大, 平均值从第 I 段的 8.52% 增加到 11.9%, 含量递增明显, 主要在 25%~30% 之间; $w(\text{赤铁矿})$ 也呈上升趋势, 平均值从第 I 段的 16.6% 上升到 17.5%; $w(\text{针铁矿})$ 略有降低, 平均值从 18.4% 降低到 17.7%; 赤铁矿/针

表 1 羌塘盆地夏里组 CaCO_3 、赤铁矿、针铁矿含量及赤铁矿/针铁矿的平均值

Table 1 Average content of CaCO_3 , hematite, goethite and hematite/goethite of Xiali Formation in the Qiangtang Basin

阶段	剖面标高/m	$w(\text{CaCO}_3)$ 平均值/%	$w(\text{赤铁矿})$ 平均值/%	$w(\text{针铁矿})$ 平均值/%	赤铁矿/针铁矿平均值
第Ⅰ段	2046~2310	8.52	16.6	18.4	1.91
第Ⅱ段	2310~2405	11.9	17.5	17.7	3.89
第Ⅲ段	2405~2653.6	16.4	22.3	10.1	5.4

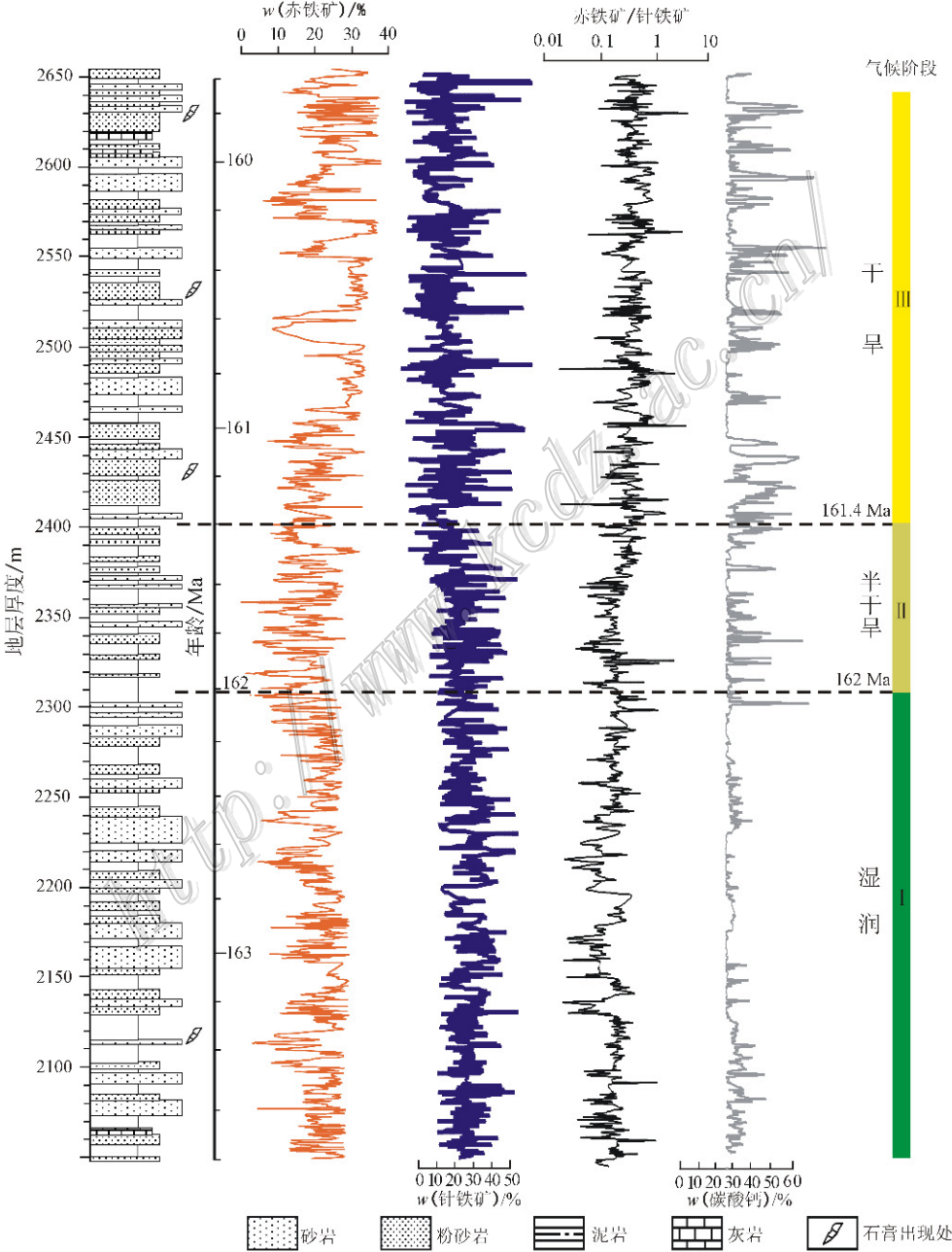


图 4 雁石坪剖面夏里组岩性和沉积物 CaCO_3 、赤铁矿、针铁矿含量以及赤铁矿/针铁矿比值的变化趋势

Fig. 4 Integrated diagrams of stratigraphy, CaCO_3 , hematite, goethite and hematite/goethite of Xiali Formation,

Yanshiping section

铁矿比值呈较明显的上升趋势, 平均值从 1.91% 上升到 3.89% (表 1)。

第Ⅲ段, 夏里组上段(剖面的 2405~2653.6 m)。从图 4 和表 1 可见, 该段相对于第Ⅰ、第Ⅱ段, $w(\text{CaCO}_3)$ 呈快速上升趋势, 平均值从第Ⅱ段的 11.9% 大幅递增至 16.4%, 在 2560 m 附近, $w(\text{CaCO}_3)$ 达到最大值, $w(\text{CaCO}_3)$ 主要介于 45%~50%; $w(\text{赤铁矿})$ 也呈明显上升的趋势, 和第Ⅰ、第Ⅱ段相比, 不仅平均值明显增大(从 17.5% 上升到 22.3%), 而且 $w(\text{赤铁矿})$ 最大值也出现在该段; $w(\text{针铁矿})$ 则显著降低, 平均值从 17.7% 下降到 10.1%; 赤铁矿/针铁矿比值轻微上升, 但变化幅度不大, 平均值从 3.89% 上升到 5.4% (见表 1)。

3 讨论

作为沉积物中的常见矿物, 赤铁矿和针铁矿是硅酸盐矿物风化成土的产物(Cornell et al., 1996)。一般认为赤铁矿形成于脱水反应, 干旱环境有利于形成赤铁矿; 针铁矿通常是从水溶液中直接沉淀形成, 因此, 潮湿环境利于其发育(Kampf et al., 1983; Trolard et al., 1987; Schwertmann, 1988)。大量研究表明, 沉积物中赤铁矿和针铁矿的含量与气候变化密切相关。如许多地区的土壤中都可以观测到, 当气候趋冷、趋湿, 赤铁矿向针铁矿转变, 这些土壤的红色也逐渐消失。热力学研究表明, 在相同水活度下, 较高的温度有利于针铁矿向赤铁矿转变; 而在相同的温度下, 较高的湿度有利于赤铁矿向针铁矿转变(Majzlan et al., 2003)。

蒸发岩是不同干旱程度的化学产物, 随着干旱化的加剧, 淡水湖泊开始咸化, 首先沉积碳酸盐, 进一步的干旱化使湖水浓缩达到硫酸盐的饱和度, 硫酸盐沉淀, 最终在极端干旱气候条件下, 湖水浓缩, 沉积氯化物盐类(Wasson et al., 1984; Sinha et al., 2004; Warren, 2010)。由此可见, 沉积物中的碳酸盐、赤铁矿和针铁矿具有良好的气候环境指示作用。

通过上述对夏里组沉积物中 CaCO_3 、赤铁矿和针铁矿含量变化的分析, 可将夏里期(163.8~159.6 Ma)的气候变化分为 3 个阶段(图 4)。

(1) 气候相对冷湿阶段(163.8~162 Ma)

该阶段对应图 4 的第Ⅰ段, 总体上以 CaCO_3 含量相对较低、针铁矿含量相对较高为特征。岩性以灰绿色砂岩、粉砂岩和灰绿色钙质泥岩或泥灰岩为

主, 在剖面 2160 m 左右出露铁质结核, 并含有大量的植物化石碎片。由此推断, 该阶段气候相对冷湿。谭富文等(2010)利用稀土元素总量(ΣREE), 结合总有机碳(TOC)含量和 EF_{Mn} 、 Sr/Cu 比值的变化特征, 发现由于晚侏罗世发生大规模海退, 羌塘盆地北侧的造山带、中央隆起带和东部地区迅速隆起, 为盆地提供了丰富的物源, 致使大量的 REE 和有机质入海, 导致 ΣREE 和 TOC 含量升高、 EF_{Mn} 和 Sr/Cu 比值降低, 进而推断该时期的气候也相对冷湿。另外, Podlaha 等(1998)、Gruszczynski(1998)、Barskov 等(2000)和 Jenkyns 等(2002)根据德国北部、英国、苏格兰、波兰和俄罗斯等地箭石(Belemnite rostra)的 $\delta^{18}\text{O}$ 值普遍下降, 认为西特提斯域的广大地区在卡洛期-牛津期存在一个明显的低温期, 该时期温度下降了 6~7℃; Malchus 等(2002)对英国和波兰西北部软体动物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值也有类似的认识。Abbink 等(2001)通过研究孢粉数据, 也发现北海(North Sea)南部有显著的降温过程。

(2) 气候半干旱阶段(162~161.4 Ma)

该阶段对应图 4 的第Ⅱ段, 相对于夏里组下段, 该段的 CaCO_3 含量、赤铁矿含量明显递增、针铁矿含量逐渐减小、赤铁矿/针铁矿比值相对增加。该阶段岩性主要为红色的砂岩、粉砂岩和泥岩, 夹泥灰岩。根据该段 CaCO_3 、赤铁矿、针铁矿的含量及赤铁矿/针铁矿比值变化曲线, 结合沉积物的颜色变化(总体上, 从下部以灰绿色为主转变为中部以红色为主), 推断气候开始逐渐干旱化, 相对夏里组下部和上部, 其为半干旱的气候条件。

(3) 气候持续干旱阶段(161.4~159.6 Ma)

该阶段对应图 4 的第Ⅲ段, 总体的 CaCO_3 和赤铁矿含量较高, 并呈增加趋势, 针铁矿含量降低, 赤铁矿/针铁矿比值相对较高。该段不同层位出露原生石膏, 发育水平层理、潮汐交错层理等泻湖-潮坪环境的沉积产物。基于对该段 CaCO_3 、赤铁矿含量的分析, 特别是石膏层的出现, 表明该段气候持续干旱。刘建清等(2007)在羌塘盆地扎仁地区上侏罗统夏里组沉积岩中, 发现以内环粉为主, 并含少量南洋杉粉属、苏铁粉属的孢粉组合, 根据内环粉的亲缘关系, 认为其属于生长在干旱的热带、亚热带型裸子植物掌鳞杉科(Chriolepidaceae), 进而认为夏里组上段地层形成于干旱气候环境。另外, Riboulleau 等(1998)研究了俄罗斯箭石化石(Belemnites)的氧同位素值, 也认为从早牛津期温度开始逐渐增高。

Benjamin(2008)通过巴黎盆地东部晚侏罗世牡蛎中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,反演了西特提斯洋的海面温度,认为早-中牛津期温度增加了 6°C ,晚牛津期 Transversarium Zone 地区最高温度达到 24°C 。Riboulleau 等(1998)、Wierzbowski(2002; 2004)和 Lécuyer 等(2003)通过来自北特提斯(Northern Tethys)鱼类牙齿化石的氧同位素值,以及 Abbink 等(2001)通过俄罗斯箭石(Belemnites)的氧同位素值、北海(North Sea)南部的孢粉数据,均认为牛津期的气候有变热的趋势。大量对孢粉、黏土矿物的研究均表明,随着温度的增加,北半球广泛存在一个气候干旱带(Hallam, 1985; Rioult et al., 1991; Abbink et al., 2001; Hauteville, 2005)。

综上所述,羌塘盆地在中-晚侏罗世夏里期,即163.8~159.6 Ma 期间的气候经由早期的冷湿、中期的半干旱演化到晚期的干热,与西特提斯同一时期气候从冷湿转变为干热的趋势相一致(Vakhrameev, 1991; Riboulleau et al., 1998; Aarssen et al., 2000; Malchus et al., 2002; Dromart et al., 2003a; 2003b; Gröcke et al., 2003; Lécuyer et al., 2003)。

4 结 论

本文通过对东特提斯羌塘盆地雁石坪地区中-上侏罗统夏里组沉积物中 CaCO_3 、赤铁矿和针铁矿等环境代用指标的测定,结合其岩性和沉积相的分析,得出以下结论:

(1) 该地区163.8~159.6 Ma 期间的气候变化可划分为早期(163.8~162 Ma)相对冷湿、中期(162~161.4 Ma)半干旱和晚期(161.4~159.6 Ma)持续干旱化3个阶段。

(2) 上述气候的转型与西特提斯同一时期气候从冷湿转变为干热的变化趋势相一致,中-晚侏罗世羌塘盆地的气候干旱化有利于成盐。

志 谢 本项目的完成得到了中国科学院青藏高原研究所方小敏、颜茂都研究员的悉心指导,得到中国科学院青藏高原研究所张大文、栗兵帅,兰州大学牛刚、吴松、张洒和张涛等同学在野外采样及室内工作中的帮助,最后对审稿专家在文章修改过程中的建设性意见表示衷心感谢!

参考文献/References

- 伯 英,焦鹏程,陈永志,曹养同. 2013. 塔里木盆地西南部和北部盐泉水化学特征及找钾指标探讨[J]. 地球学报, 34(5): 594-602.
- 陈 兰,伊海生,胡瑞忠. 2005. 羌塘盆地侏罗纪双壳类化石组合及古环境[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 3(5): 466-473.
- 陈郁华. 1983. 黄海水 25°C 恒温蒸发时的析盐序列及某些微量元素的分布规律[J]. 地质学报, 4: 379-390.
- 程 鑫,吴汉宁,刁宗宝. 2012. 羌北地块中晚侏罗世雁石坪群古地磁新结果[J]. 地球物理学报, 55(10): 3399-3409.
- 季峻峰,陈 骏,William L.B. 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[J]. 第四纪研究, 27(2): 221-229.
- 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[J]. 石油学报, 29(2): 173-178.
- 李忠雄,杜伟伟,汪正江,付修根,段志明. 2008. 藏北羌塘盆地中侏罗统石油地质特征[J]. 石油学报, 29(6): 797-803.
- 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[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 40(2): 265-272.
- 林耀庭,高立民. 1998. 四川盆地海相三叠系液态钾盐-富钾含钾气田卤水及其类型和意义[J]. 盐湖研究, 6(2-3): 27-36.
- 刘成林,王弼力,焦鹏程,陈永志. 2006. 世界主要古代钾盐找矿实践与中国找钾对策[J]. 化工矿产地质, 28(1): 1-8.
- 刘成林,焦鹏程,王弼力. 2010. 盆地钾盐找矿模型探讨[J]. 矿床地质, 29(4): 581-592.
- 刘建清,杨 平,陈文斌,陈文西,付修根. 2007. 西藏羌南坳陷中侏罗统夏里组硅化木的发现及意义[J]. 地质通报, 26(12): 1692-1696.
- 刘连文,郑洪波,葛 知. 2005. 南海沉积物漫反射光谱反映的220 ka 以来东亚夏季风变迁[J]. 地球科学, 30(5): 543-549.
- 刘 群,杜之岳,陈郁华,金若谷,袁鹤然,梁约翰. 1997. 陕北奥陶系和塔里木石炭系钾盐找矿远景[M]. 北京: 原子能出版社.
- 苏铁牛,张维忠,张树岐,张 辉. 2007. 西藏比洛错一带布曲组中段膏盐地层的地质特征[J]. 吉林地质, 26(2): 10-13.
- 谭富文,朱丽霞,付修根. 2010. 羌塘盆地那底岗日地区上侏罗统一下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): 342-351.
- 唐 敏,刘成林,焦鹏程,陈永志,曹养同,胡妍娜. 2009. 世界海相钾盐矿床特征定量分析及其意义[J]. 沉积学报, 27(2): 326-333.
- 瓦里亚什科. 1965. 钾盐矿床形成的地球化学规律[M]. 北京: 中国工业出版社.

- 王成善,伊海生,刘池洋,李亚林,邹艳荣,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, 25(2): 139-143.
- 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[J]. 沉积学报, 28(5): 884-892.
- 王立成,刘成林,张华. 2013. 华南地块震旦纪晚期—早寒武世古大陆位置暨灯影组蒸发岩成钾条件分析[J]. 地球学报, 34(5): 585-593.
- 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[J]. 新疆石油地质, 31(4): 376-378.
- 夏国清,伊海生,黄华谷. 2010. 藏北雁石坪地区夏里组米级沉积旋回及成因[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 37(2): 133-139.
- 肖传桃,龚文平,胡明毅,李艺斌,柳书兵. 2004. 藏北地区中部侏罗纪生物地层层序[J]. 江汉石油学院学报, 26(4): 1-4.
- 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[J]. 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[J]. 地质学报, 84(11): 1523-1553.
- 郑绵平,张震,张永生,刘喜方,尹宏伟. 2012. 中国钾盐找矿规律新认识和进展[J]. 地球学报, 33(3): 280-294.
- Aarssen B G K, Alexander R and Kagi R I. 2000. Higher plant biomarkers reflect palaeovegetation changes during Jurassic times [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(8): 1417-1424.
- Abbink O, Targarona J, Brinkhuis H and Visscher H. 2001. Late Jurassic to earliest Cretaceous palaeoclimatic evolution of the southern North Sea[J]. *Global Planet Change*, 30(3-4): 231-256.
- Barskov I S and Kiyashko S I. 2000. Thermal regime variations in the Jurassic marine basin of the East European Platform at the Callovian/Oxfordian boundary: Evidence from stable isotopes in belemnite rostra[J]. *Doklady Earth Sciences*, 372: 643-645.
- Benjamin B, Emmanuelle Pucéat, Pierre P and Benoît V. 2008. Climatic fluctuations and seasonality during the Late Jurassic (Oxfordian-Early Kimmeridgian) inferred from $\delta^{18}O$ of Paris Basin oyster shells [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1-2): 58-67.
- Borchert H and Mui R O. 1964. Salt deposits-the origin, metamorphism and deformation of evaporates[M]. London: David Van Nostrand Company Limited. 338.
- Cornell R M and Schwertmann U. 1996. The Iron Oxides: Structure, properties, reactions, occurrence and uses[M]. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft. 573.
- Deaton B C and Balsam W L. 1991. Visible spectroscopy-a rapid method for determining hematite and goethite concentration in geological materials: Research method paper[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 61: 628-632.
- Dromart G, Garcia J P, Gaumet F, Picard S, Rousseau M, Atrops F, Lecuyer C and Sheppard S M F. 2003a. Perturbation of the carbon cycle at the middle/Late Jurassic transition: Geological and geochemical evidence[J]. *American Journal of Science*, 303, 667-707.
- Dromart G, Garcia J P, Picard S, Atrops F, Lecuyer C and Sheppard S M F. 2003b. Ice age at the Middle-Late Jurassic transition [J]? *Earth Planet Science Letter*, 213: 205-220.
- Fu X G, Jian W, Fu W T, Xing L F, Dong W and Jiang L H. 2013. Gas hydrate formation and accumulation potential in the Qiangtang Basin, northern Tibet, China[J]. *Energy Conversion and Management*, 73: 186-194.
- Gröcke D R, Price G D, Ruffell A H, Mutterlose J and Baraboshkin E. 2003. Isotopic evidence for Late Jurassic-Early Cretaceous climate change[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Paleocology*, 202: 97-118.
- Gruszczynski M. 1998. Chemistry of Jurassic seas and its bearing on the existing organic life[J]. *Acta Geologica Polonica*, 48: 1-29.
- Hallam A. 1985. A review of Mesozoic climate[J]. *Journal of the Geological Society of London*, 142(3): 433-445.
- Harris S E and Mix A C. 1999. Pleistocene precipitation balance in the Amazon Basin recorded in deep sea sediments[J]. *Quaternary Research*, 51: 14-26.
- Hauteville Y. 2005. Géochimie organique des séries argilo-carbonatées du Callovo-Oxfordien de l'Est du bassin de Paris et d'Angleterre. Variabilités et implications paléoenvironnementales (Ph. D. Thesis) [D]. Tutor: Michels R N. Université Henri Poincaré (Nancy I). 214.
- Jenkyns H C, Jones C E, Gröcke D R, Hesselbo S P and Parkinson D N. 2002. Chemostratigraphy of the Jurassic system: Applications, limitations and implications for paleoceanography[J]. *Journal of the Geological Society*, 159: 351-378.
- Kampf N and Schwertmann U. 1983. Goethite and hematite in a climosequence in southern Brazil and their application in classification of kaolinitic soils[J]. *Geoderma*, 29: 27-39.
- Lecuyer C, Picard S, Garcia J P, Sheppard S M F, Grandjean P and Dromart G. 2003. Thermal evolution of Tethyan surface waters during the Middle-Late Jurassic: Evidence from $\delta^{18}O$ values of marine fish teeth[J]. *Paleoceanography*, 18(3): 1076.
- Majzlan G K D and Navrotsky A. 2003. Thermodynamic properties of iron oxides: Part II. Enthalpies of formation and relative stability of goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$), lepidocrocite ($\gamma\text{-FeOOH}$) and maghemite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) [J]. *American Mineralogist*, 88: 855-859.
- Malchus N and Steuber T. 2002. Stable isotope records (O, C) of Jurassic aragonite shells from England and NW Poland: Palaeoecologic and environmental implications[J]. *Geobios*, 35: 29-39.

- Podlaha O G, Mutterlose J and Veizer J. 1998. Preservation of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ in belemnite rostra from the Jurassic-early Cretaceous successions[J]. *American Journal of Science*, 298: 324-347.
- Riboulleau A, Baudin F, Daux V, Hantzpergue P, Renar M and Zakharov V. 1998. Evolution de la paléotempérature des eaux de la plate-forme russe au cours du Jurassique supérieur[J]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 326, 239-246.
- Rioult M, Dugue O, Jan D C R, Ponsot C, Fily G, Moron J M and Vail P R. 1991. Outcrop sequence stratigraphy of the Anglo-Paris Basin, Middle to Upper Jurassic (Normandy, Maine, Dorset) [J]. *Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf-Aquitaine*, 15 (1): 101-194.
- Schwertmann U. 1971. Transformation of hematite to goethite in soils [J]. *Nature*, 232: 624-625.
- Schwertmann U. 1988. Occurrence and formation of ironoxides in various pedoenvironments[A]. In: Stucki J W, Goodman B A and Schwertmann U, eds. *Iron in soil sand clay minerals*[C]. Reidel Publishing Company Dordrecht. 267-308.
- Sinha R and Raymahashay B C. 2004. Evaporite mineralogy and geochemical evolution of the Sambhar Salt Lake, Thar Desert, Rajasthan, India[J]. *Sedimentary Geology*, 166: 59-71.
- Trolard F and Tardy Y. 1987. The Stabilities of gibbsite, boehmite, aluminous goethites and aluminous hematites in bauxites, ferricretes and laterit esasa function of water activity, temperature and particle size[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(4): 945-957.
- Vakhrameev V A. 1991. Jurassic and Cretaceous floras and climates of the Earth [M]. Cambridge: Cambridge University. 318.
- Warren J K. 2010. Evaporites through time: Tectonic, climatic and eustatic control sinmarine and nonmarine deposits[J]. *Earth Science Reviews*, 98(3-4): 217-268.
- Wasson R J, Smith G I and Agrawal D P. 1984. Late quaternary sediments, minerals, and inferred geochemical history of Didwana Lake, Thar Desert, India[J]. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 46(4): 345-372.
- Wierzbowski H. 2002. Detailed oxygen and carbon isotope stratigraphy of the Oxfordian in central Poland[J]. *Internal Journal of Earth Science*, 91(2): 304-314.
- Wierzbowski H. 2004. Carbon and oxygen isotope composition of Oxfordian-early Kimmeridgian belemnite rostra: palaeoenvironmental implications for Late Jurassic seas[J]. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 203 (1-2): 153-168.
- Zhang Y G, Ji J F, William L B, Liu L W and Chen J. 2007. High resolution hematite and goethite records from ODP 1143, South China Sea: Co-evolution of monsoonal precipitation and El Nifio over the past 600,000 years[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 264: 136-150.
- Zheng M P, Zhang Y S, Qi W and Liu X F. 2011. Thought and suggestion on regional analysis of potash and its prospecting evaluation in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(1): 17-50.