

doi:10.3799/dqkx.2015.176

柴北缘西段古一新近纪古气候演化

贾艳艳^{1,2,3,4}, 邢学军⁵, 孙国强^{1,2}, 史基安^{1,2*}, 刘士杰⁴

1. 甘肃省油气资源研究重点实验室, 甘肃兰州 730000

2. 中国科学院油气资源研究重点实验室, 甘肃兰州 730000

3. 中国科学院大学, 北京 100049

4. 中国石油冀东油田公司勘探开发研究院, 河北唐山 063004

5. 中国石油冀东油田公司钻采工艺研究院, 河北唐山 063004

摘要: 古气候是陆相湖盆层序地层形成的主要沉积动力学因素之一。古一新近纪柴北缘西段及周边地区古气候演化过程复杂, 目前就古气候演化过程还存在争议, 利用地球化学方法对重点井的岩心和岩屑进行元素、TOC 和碳氧稳定同位素测定。各古气候指标之间的相关性分析表明: Sr/Ba、Rb/Sr、Sr/Ca、TOC 和氯离子含量可作为研究区恢复古气候的指标, $\delta^{13}\text{C}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 不能指示出该区的古气候演化过程。重点井全井段的岩屑氯离子含量分析表明: 柴北缘西段古一新近纪古气候经历了干旱—潮湿—干旱的演化过程, 从路乐河组到下干柴沟组上段沉积期古气候由干旱逐渐向潮湿的方向演化, 呈现了 7 个旋回, 湖盆水体盐度降低, 总体来说气候潮湿, 水体为微咸水; 从上干柴沟组到狮子沟组沉积期古气候从潮湿向干旱方向演化, 呈现了 12 个旋回, 古水介质经历了微咸水至半咸水的演化过程。

关键词: 柴北缘西段; 古一新近纪; 地球化学; 古气候; 演化。

中图分类号: P66

文章编号: 1000-2383(2015)12-1955-13

收稿日期: 2015-02-24

The Paleogene-Neogene Paleoclimate Evolution in Western Sector of Northern Margin of Qaidam Basin

Jia Yanyan^{1,2,3,4}, Xing Xuejun⁵, Sun Guoqiang^{1,2}, Shi Ji'an^{1,2*}, Liu Shijie⁴

1. Key Laboratory of Petroleum Resources of Gansu Province, Lanzhou 730000, China

2. Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

4. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Jidong Oilfield Company, PetroChina, Tangshan 063004, China

5. Research Institute of Drilling & Production Technology, Jidong Oilfield Company, PetroChina, Tangshan 063004, China

Abstract: Paleoclimate is one of the main sedimentary dynamic factors for the formation of sequence stratigraphy of continental basin. The Paleogene-Neogene paleoclimate evolution in western sector of northern margin of Qaidam basin and surrounding areas was complex, but now paleoclimate evolution remains controversial. The elements, TOC and C, O stable isotope content of key well cores and rock debris were measured by geochemical methods. Correlation analysis between paleoclimate indicators shows that: Sr/Ba, Rb/Sr, Sr/Ca, TOC and chloride ion content can be the paleoclimate recovery indicators, however, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ can't indicate the paleoclimate evolution process in the study area. Analysis of rock debris chloride ion data of key wells shows that the paleoclimate evolution process in the study area is arid-humid-arid. From Lulehe Formation to upper Shanggancaigou Formation, the paleoclimate gradually evolved from arid to humid climate, including 7 cycles, and lake water salinity decreased, the climate was humid and water was brackish overall. From Shanggancaigou Formation to Shizigou Formation, the paleoclimate evolved from humid to arid, including 12 cycles.

基金项目: 中国科学院 2012 年度“西部之光”人才计划支持项目、甘肃省科技计划 (No. 1308RJZA310); 甘肃省重点实验室专项 (No. 1309RTSA041)。

作者简介: 贾艳艳 (1987—), 女, 博士, 主要从事含油气盆地石油地质学及沉积储层研究。E-mail: jia yanyanz2@163.com

* **通讯作者:** 史基安, E-mail: jashi@lzb.ac.cn

引用格式: 贾艳艳, 邢学军, 孙国强, 等, 2015. 柴北缘西段古一新近纪古气候演化. 地球科学——中国地质大学学报, 40(12): 1955-1967.

and brackish water changed to medium brackish water.

Key words: western sector of northern margin of Qaidam basin; Paleogene-Neogene; geochemistry; paleoclimate; evolution.

0 引言

古气候是控制湖盆演化的主要因素之一,正确全面认识柴北缘西段古一新近纪古气候演化可为分析湖盆演化奠定基础,有利于研究人员进行烃源岩与储集砂体评价.古一新近纪柴北缘西段及周边地区古气候演化过程相对复杂,许多学者都对其进行了研究.Wang *et al.* (1999)通过对柴西地区3个钻井岩心植物化石的花粉分析,认为柴达木盆地相对干燥的气候分布在3个阶段,即晚古新世、渐新世和上新世至更新世,而相对湿润的古气候分布于早古新世、始新世和中新世3个时期,渐新世时期的气候干燥是由行星季风控制下的亚热带高压带造成的,而上新一更新世气候干燥主要是周围山脉和青藏高原的隆升所致.Andrea *et al.* (2009)根据碳氧稳定同位素对古气候的指示研究了柴达木盆地北部红三旱地区古气候的演化特征,揭示了从始新世至渐新世气候是由潮湿转向干冷,古气候在18~16 Ma前后经历了干冷向湿冷的气候转变,上新世为寒冷干旱的气候特征.Wang *et al.* (2013)通过对柴达木盆地北缘大红沟、路乐河和怀头他拉3个剖面地层沉积物中的矿物成分分析,揭示出53.5~2.5 Ma时期柴北缘古气候演化可分为4个阶段:53.5~40.0 Ma为温暖的季节性干旱气候,40.0~26.0 Ma为寒冷的干旱气候,26.0~13.5 Ma为温暖的潮湿气候,13.5~2.5 Ma为寒冷的干旱性气候.Song *et al.* (2013)通过对柴达木盆地东北部始新世至中新世大红沟剖面沉积物的全岩地球化学、粘土矿物、沉积物颜色和花粉化石分析,揭示了该地区该时期的古气候特征,即中始新世(48.5~40.5 Ma)时期气候温暖湿润;晚始新世至早渐新世(40.5~30.0 Ma)时期古气候湿度和温度伴随全球变冷有所降低;早渐新世至中渐新世(30.0~27.2 Ma)时期古气候湿度和温度具有升高趋势;晚渐新世至早中新世(27.2~21.5 Ma)时期,气候温暖湿润;早中新世—中中新世(21.5~18.5 Ma)时期气候明显趋于干旱.综上所述,古一新近纪柴北缘西段及周边地区古气候演化过程复杂,目前就古气候演化过程还存在争议,这可能是由于古环境是一个开放体系,不可避免地受到外界环境干扰,地层沉积物或沉积物所含古气候指标信息受古地理、沉积中心和沉积相带影响,在不同地区

可能指示不同的古气候特征,根据个别构造剖面恢复的古气候演化过程并不是非常准确.本文以柴北缘西段43口探井的全井段岩屑的古盐度信息恢复该地区古气候演化过程,以期消除沉积相带、古地理和沉积物搬运距离等因素对恢复古气候的影响.

古盐度是指保存于古沉积物之中的盐度,是指示地质历史时期中沉积环境变化的一个重要标志.古气候与封闭性湖盆古盐度之间存在密切联系,通常潮湿气候使得湖水盐度淡化,沉积物中的古盐度偏低,而干旱气候使得湖盆水体浓缩,沉积物中的古盐度偏高(Fritz, 1996; Patrickson *et al.*, 2010; Kemp *et al.*, 2012; Solotchina *et al.*, 2014),因此,古盐度恢复是认识古气候的一种重要方法.除此之外,生物化石、沉积物特征和沉积物所含矿物特征也可响应古气候(李明慧和康世昌, 2007; 方小敏等, 2008; 徐兆辉等, 2011; 王小群和王兰生, 2013).本文尝试通过泥岩地球化学指标定性恢复柴北缘西段湖盆的古盐度,以此说明古气候演化特征,将为柴北缘西段沉积环境的认识奠定基础.

1 地质背景

柴达木盆地是我国西部重要的中新生代含油气盆地,柴达木盆地北缘(简称“柴北缘”)位于盆地西北部阿尔金山系和祁连山系交会处,是盆地的一级构造单元(图1).古一新近纪柴北缘处于稳定沉降期,为开阔内陆大型山间封闭性湖盆.柴北缘古一新近纪沉积面积经历了扩大和收缩的过程,主要以滨浅湖和三角洲前缘沉积为主,少量分布辫状河和三角洲平原沉积(张锐等, 2011).沉积相呈北西向展布(李明杰等, 2005),沉积中心在盆地中央的一里坪附近.

2 古气候指标

古盐度恢复古气候的地球化学方法主要有常量元素法、稳定同位素法、微量元素法和元素比值法等.由于古环境是一个开放体系,不可避免地受到外界环境的干扰,为了使古盐度恢复的结果更加接近实际,应该对多种指标进行论证.封闭性湖相沉积物中的氯离子含量主要受气候变化影响,在干旱季节,湖水蒸发量大,盐度升高,沉积物及孔隙水中的氯离

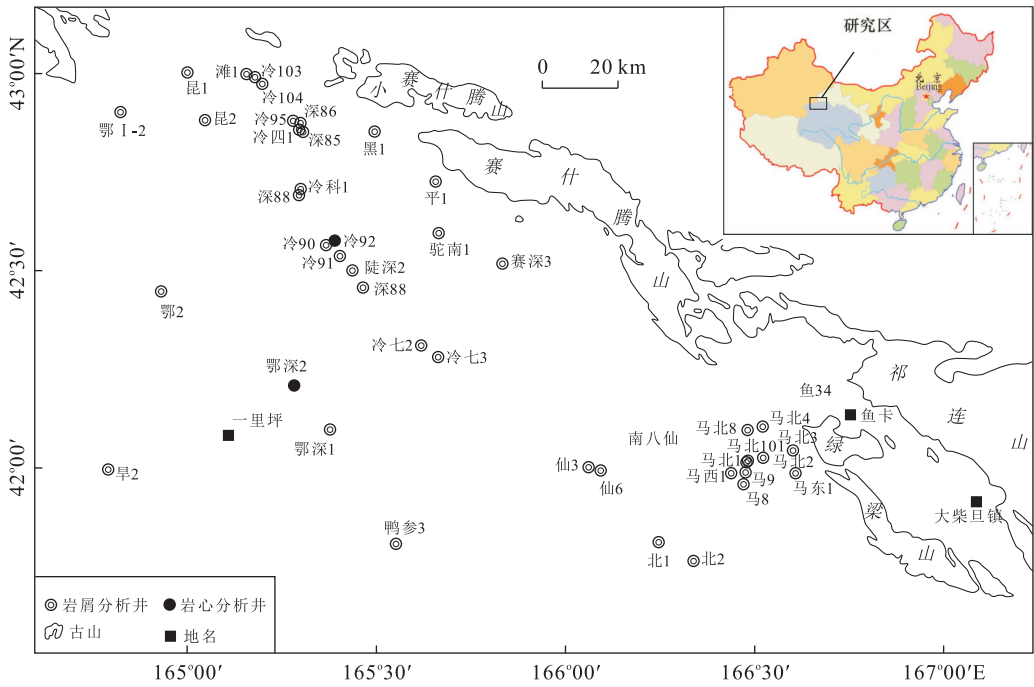


图 1 柴北缘西段地理位置及分析井位置分布

Fig.1 The location of western sector of northern margin of Qaidam basin and analysis wells

子含量呈高值,甚至可能形成氯盐矿物被沉积,而潮湿环境与其相反;通常封闭性湖相泥岩中氯离子含量随水体盐度的增加而增加,可灵敏地反映气候的变化(王永等,2004,张洪等,2004;胡思虎等,2012).在湖泊沉积物中,自生碳酸盐岩中的碳氧稳定同位素含量是研究古气候和古环境演化的常用指标(Matthews *et al.*,1996;伊海生等,2007),由于同位素的分馏和水文平衡作用使得 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 $\delta^{13}\text{C}$ 值在干旱时期表现为高值,潮湿环境为低值(Stuiver,1970;Kelts and Talbot,1990;Lazar and Erea,1992;Henderson,2003).湖泊沉积物中的总有机碳含量(TOC)是反映湖泊沉积物中有机质含量的最基本参数,是恢复古气候和判断沉积环境的主要指标之一,通常情况下,TOC 高值反映湿热的环境,而低值反映干冷的环境(陈敬安等,2013).元素比值法通常比单个元素能更多地包含古气候和水体古盐度的信息(熊小辉和肖加飞,2011),如 Sr/Ba 、 Rb/Sr 和 Sr/Ca 等. Sr/Ba 和 Sr/Ca 通常作为水体古盐度的判断指标,与古盐度呈正相关关系(郑荣才和柳梅青,1999;陈洪德等,2011),在湿热气候时期,降雨量大,物源区化学风化较强,大量的 Sr 随河水流入湖泊在水体中富集,而 Ca 、 Ba 离子在河口或近岸附近沉降,沉积物中的 Sr/Ba 、 Sr/Ca 较低,而在干旱气候时期则相反.在表生条件下, Rb 和 Sr 具有明显不

同的地球化学性质, Rb/Sr 可作为古盐度古气候的恢复指标,通常 Rb/Sr 的低值指示弱化学分化,气候干冷,而高值代表化学风化作用强、湿热的气候(金章东和张恩楼,2002).

本文对湖泊相鄂深 1 和冷 92 井取心井段进行系统取样及相关地球化学实验分析,并对柴北缘西段 43 口探井全井段岩屑的氯离子含量进行分析,井位位置如图 1 所示.文中使用的 Ba 、 Sr 、 Ca 、 Rb 元素含量由日本理学公司生产的 X 射线荧光光谱仪 3080E3X 测定,精度为 $\pm 10\%$,取样 14 块;TOC 测定由美国 LECO 公司生产的 CS-344 碳硫分析仪完成,精度为 $\pm 0.5\%$,取样 25 块;碳氧稳定同位素测定所用仪器是德国菲尼根公司生产的稳定同位素质谱计 MAT252,精度为 $\pm 0.2\%$,取样 25 块;样品的氯离子含量测定采用硝酸银滴定法测量,相对偏差小于 10% ,岩性取样 14 块.为了排除泥浆、钻井液等对实验结果的影响,在岩屑(心)中心未受污染部位取约 30 g 样品,研磨粉碎完全通过标准筛(0.6 mm),放入烘箱内,在 $105 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,烘 4 h 后,置于干燥器内待测.具体执行遵照 SY/T 5503-2009《岩石氯盐含量测定方法》,岩样经去离子水浸泡、萃取、过滤,测定萃取液中氯离子含量,再计算出岩样的氯盐含量(以氯化钠计).岩屑氯离子含量测定由青海油田分公司完成,其余均由中科院地质与

地球物理研究所油气资源研究重点实验室完成.

3 古气候指标相关性分析

若用单个古盐度古气候指标进行分析会带来一定的误差,甚至是错误的结论,笔者通过对古盐度古气候指标之间的相关性分析,试论证适合研究区古盐度古气候恢复的指标.

笔者根据实验分析数据建立了 Sr/Ba、Rb/Sr、Sr/Ca、TOC、 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 与氯离子含量之间的相关关系.分析表明: Sr/Ba、Sr/Ca 与氯离子含量呈正相关, Sr/Ba、Sr/Ca 比值随盐度增加而增大,在干旱环境中呈高值; Rb/Sr、TOC、 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 与氯离子含量呈负相关, Rb/Sr、TOC、 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 随盐度的增加而减少,在干旱环境中呈低值(图 2).根据古盐度古气候恢复指标的原理可知,沉积物中碳酸盐岩的 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 与氯离子含量应呈正相关性,说明本文研究区内 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 受沉积或成岩环境的影响,不具有古盐度古气候指示意义. $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 与 TOC 呈正相关,且相关性较好(图 3),这可能是因为研究区沉积岩中的碳酸盐岩矿物多数是在成岩阶段形成或湖泊自生碳酸盐岩在成岩阶段发生溶解再沉淀,成岩阶段生成碳酸盐岩的 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 反映了孔隙水的盐度,易受有机质分解影响.在干旱季

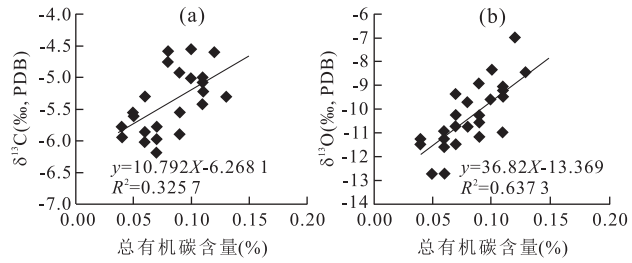


图 3 碳氧稳定同位素与有机碳含量相关关系

Fig.3 The correlation between carbon, oxygen stable isotope and organic carbon content

节,湖水水体较浅,滨岸或湖底沉积环境为氧化或弱氧化环境,有机质沉积后发生分解并释放¹⁶O和¹²C物质,使得成岩环境中显示为低 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 特性,故此时形成的沉积岩表现出 TOC、 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 偏低特性,而在潮湿季节,生物生长快,数量多,湖水水体深,湖底为弱还原或还原环境,有机质埋藏后不易分解,对成岩环境的影响减弱,此时形成的湖泊沉积岩中 TOC 为高值,碳酸盐岩中的 $\delta^{13}C$ 与 $\delta^{18}O$ 偏重(张水昌等,2006;刘昊年等,2008;王琪等,2010).因此笔者可以得出结论: Sr/Ba、Rb/Sr、Sr/Ca、TOC 和氯离子含量可作为研究区内古盐度古气候恢复的指标, $\delta^{13}C$ 值与 $\delta^{18}O$ 值不能反映出该地区沉积物沉积时的古盐度古气候信息.

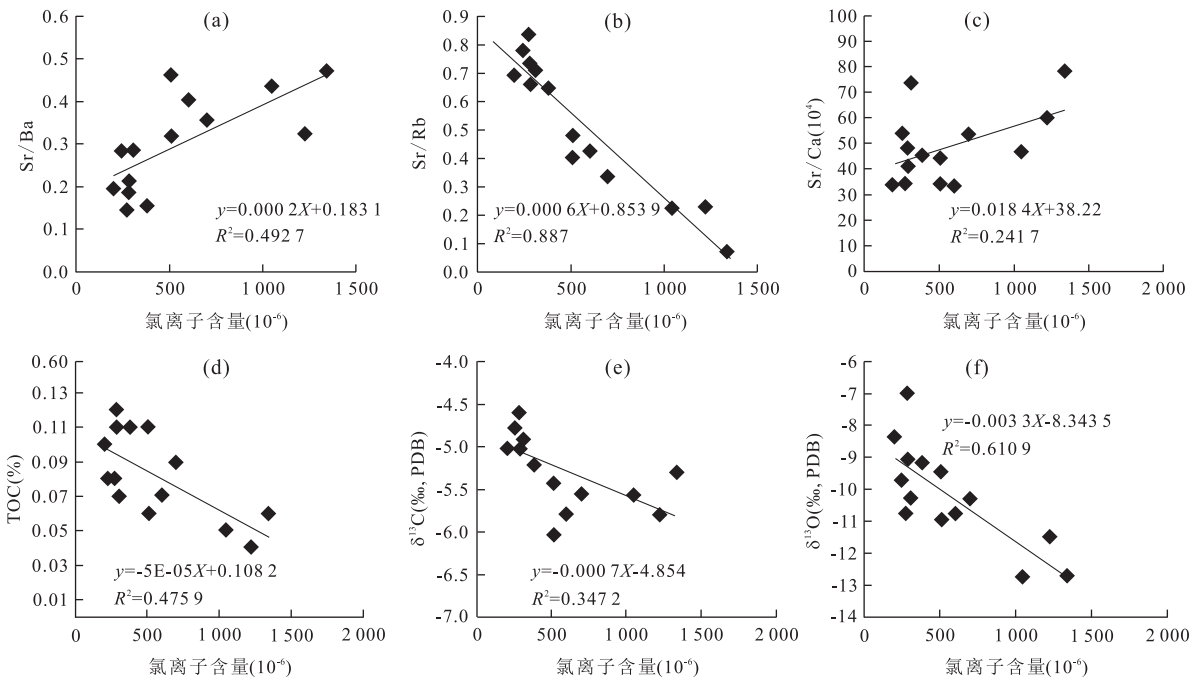


图 2 Sr/Ba、Sr/Rb、Sr/Ca、TOC、 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 与氯离子含量的相关关系

Fig.2 The correlation between Sr/Ba, Sr/Rb, Sr/Ca, TOC, $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$ and chloride ion content

4 柴北缘西段古气候演化过程

沉积岩中氯离子含量在恢复古气候时具有指示范围大的特点,可以覆盖从潮湿到极度干旱整个气候区间,灵敏度高,可反映封闭性湖泊流域内的古气候演化特征(韩文霞,2008)。据古气候指标相关性分析可知,氯离子含量适合研究区古盐度古气候恢复。笔者根据青海油田提供钻探井的基本信息和岩屑氯离子含量数据,选取了柴北缘西段 43 口井(图 1),平面上几乎涵盖了柴北缘西段主要构造带,纵向上包含了柴北缘西段古一新近纪所有地层,即狮子沟组(N_2^3 , 2.8~8.0 Ma)、上油砂山组(N_2^2 , 8~15 Ma)、下油砂山组(N_2^1 , 15~22 Ma)、上干柴沟组(N_1 , 22.0~35.5 Ma)、下干柴沟组上段(E_3^2 , 35.5~42.8 Ma)、下干柴沟组下段(E_3^1 , 42.8~45 Ma)和路乐河组(E_{1+2} , 45.0~55.8 Ma)。通过平面上大范围数据,以期消除湖泊内古地理、沉积相带和沉积物搬运距离对古盐度恢复的影响。

柴北缘西段古一新近纪沉积岩中氯离子含量呈高一低一高特征,表明古气候经历了干旱—潮湿—干旱的演化(图 4),并且古气候演化具有高频波动的特征,此观点与前人研究结果相符(韩文霞,2008;宋博文等,2014);并根据柴达木盆地古一新近纪泥岩氯度与湖水类型关系(表 1)确定了湖盆古盐度演化过程,即柴北缘西段古一新近纪整体上经历了微咸水到半咸水的演化过程,这个结论与赵加凡等(2005)的研究结果一致。从路乐河组到下干柴沟组上段沉积时期的古气候由干旱逐渐向潮湿的方向演

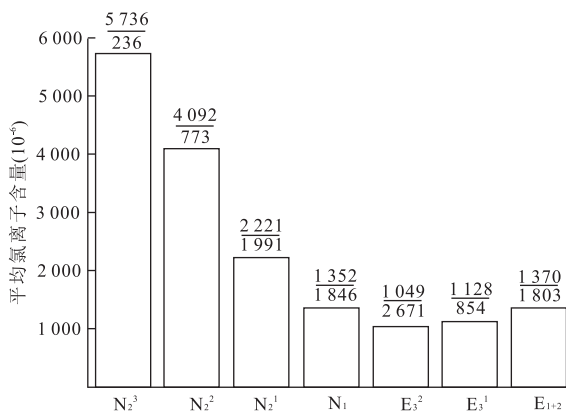


图 4 柴北缘西段古近系—新近系岩屑氯离子含量分布

Fig.4 The Paleogene-Neogene Chloride ion content distribution of rock debris in western sector of northern margin of Qaidam basin

分子为岩屑氯离子含量,分母为取样数量

化,湖盆水体的盐度降低,但该时期古气候总体上潮湿,湖盆盐度为微咸水;从上干柴沟组到狮子沟组沉积期古气候从潮湿向干旱方向演化,在下油砂山组沉积期湖盆水体已经处于半咸水,上油砂山组和狮子沟组沉积期古气候进一步干旱,湖水盐度升高,湖盆大面积萎缩。上干柴沟组出现轮藻化石,轮藻是一种淡水至半咸水水生植物,淡水水体的浅水和静水环境是轮藻发育的最有利场所(吉利明等,2007),下油砂山组出现半美星介化石,上油砂山组出现较老类型正星介,星介动物群多数属于半咸水介形类群(孙镇城等,2003),这也从另一个方面说明从上干柴沟组到上油砂山组水体逐渐浓缩咸化。

4.1 路乐河组沉积期古气候特征

柴达木盆地古气候演化过程受全球古气候变化、青藏高原隆升和北特提斯海消退共同控制。已有研究资料表明,路乐河组沉积时期,柴达木盆地位于北特提斯海主体东南边,地处约 $34^{\circ}\text{N} \sim 36^{\circ}\text{N}$,而当时亚热带副高压带北部边缘约在 $40^{\circ}\text{N} \sim 45^{\circ}\text{N}$,因此当时柴达木盆地气候可能完全受亚热带副高的控制,气候炎热,降雨较少(韩文霞,2008)。该时期柴北缘西段沉积岩中的平均氯离子含量为 1370×10^{-6} ,水体整体为微咸水,水体盐度受古气候波动影响表现为在微咸水与半咸水之间波动。由多口井的岩屑氯离子含量变化特征推知该时期古盐度经历了两次较大的波动,即路乐河组沉积期可划分出两个古气候旋回(图 5)。

4.2 下干柴沟组沉积期古气候特征

下干柴沟组下段和下干柴沟组上段平均氯离子含量分别为 1128×10^{-6} 和 1049×10^{-6} ,表现出路乐河组至下干柴沟组上段沉积期古气候表现出由干旱逐渐向潮湿方向演化,水体盐度降低。由于 45~38 Ma 期间,印度板块向北漂移与亚洲板块碰撞,形成青藏高原第 1 期隆升,也是喜马拉雅第 1 幕运动(施雅风等,1998;赵加凡等,2004),促使柴达木盆地向北偏移;此时全球迎来长期降温期,由于赤道与极地之间的温差加大,西风带向南偏移,柴达木盆地进入西风带和亚热带副高的过渡地区。当降温时,西风带南移,亚热带副高南撤,柴北缘西段处于西风带控制,给柴北缘带来大量降水,湿度增加;当升温时,西风带北撤,亚热带副高北移,柴北缘西段处于亚热带副高控制,气候炎热干燥。随着柴达木盆地持续北移,全球逐渐变冷,西风带控制柴北缘西段气候的能力增强,气候逐渐转向潮湿,湖水水体盐度降低。下干柴沟组在古气候向潮湿方向演化的背景下,经历了 5 个古气候

表 1 柴达木盆地古—新近纪泥岩氯度(10^{-6})与湖水类型关系

Table 1 The relationship of Paleogene-Neogene mudstone chlorine level (10^{-6}) and water type of Qaidam basin

	淡水	微咸水	半咸水	咸水	盐水
柴达木盆地湖水	0~200	200~1 650	1 650~12 800	12 800~28 500	大于 28 500
海水	0~260	260~2 750	2 750~16 604	16 604~33 224	大于 33 224

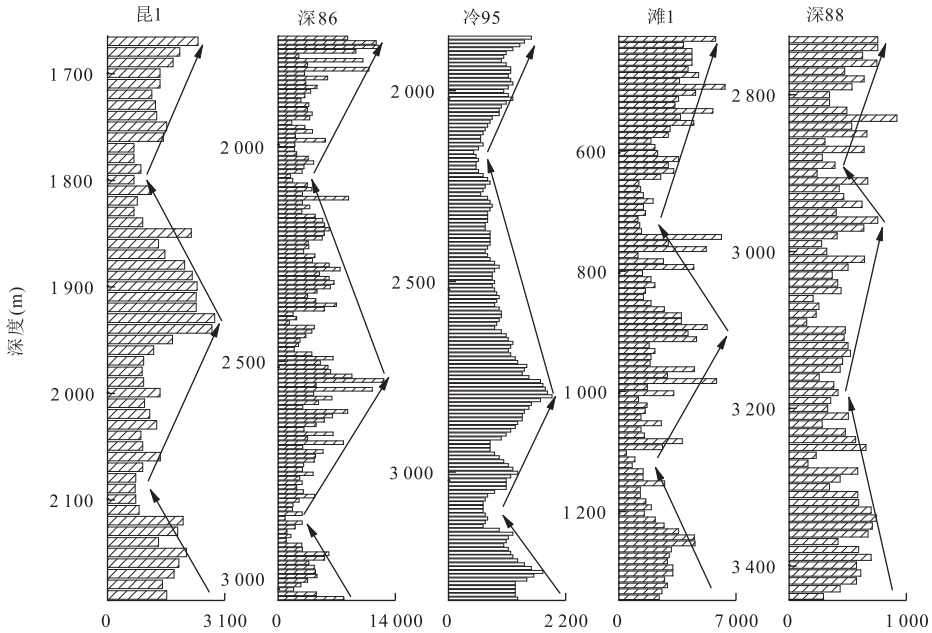


图 5 路乐河组沉积期氯离子含量(10^{-6})演化特征

Fig.5 Evolution characteristics of Chloride ion content (10^{-6}) of Lulehe Formation

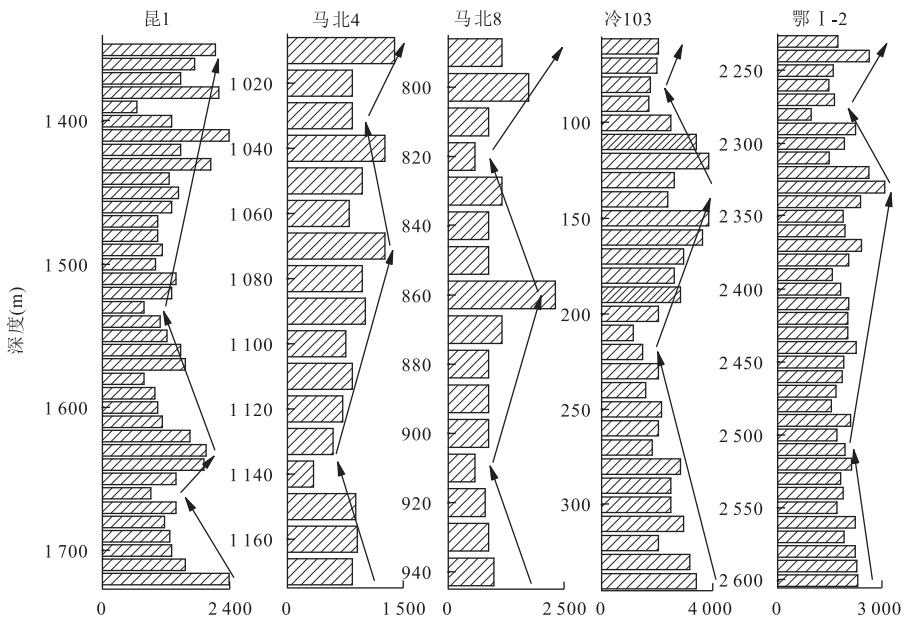


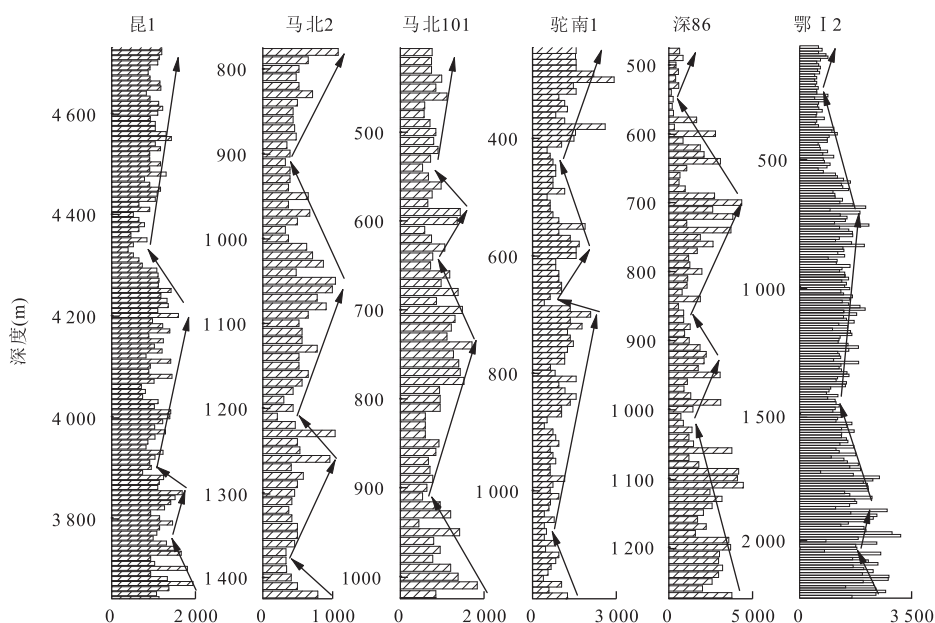
图 6 下干柴沟组下段沉积期氯离子含量(10^{-6})演化特征

Fig.6 Evolution characteristics of Chloride ion content (10^{-6}) of Lower Xiaganchaigou Formation

旋回,下干柴沟组下段和下干柴沟组上段分别经历了 2 次与 3 次古气候旋回(图 6,图 7)。

4.3 上干柴沟组沉积期古气候特征

在上干柴沟组沉积期,全球气候发生了剧烈的

图 7 下干柴沟组上段沉积期氯离子含量(10^{-6})演化特征Fig.7 Evolution characteristics of Chloride ion content (10^{-6}) of Upper Xiaganchaigou Formation

降温事件, 南极冰盖出现, 同时印度板块进一步与亚洲板块碰撞, 亚洲陆地面积增加, 共同促使东亚夏季季风雏形开始出现(刘东生等, 1998), 而此时北特提斯开始萎缩, 西风所带来的降雨减少, 大陆性气候逐渐增强, 使得亚洲大陆中部地区有所变干(Ramstein *et al.*, 1997). 可能这些因素综合导致了柴北缘西段在上干柴沟组沉积时期古气候相对干旱, 湖水盐度有所升高, 氯离子平均含量为 $1\ 352 \times 10^{-6}$, 分布范围为 $67 \times 10^{-6} \sim 10\ 230 \times 10^{-6}$, 古气候主要表现出 3 个旋回(图 8), 但总体而言还处于微咸水, 说明当时柴北缘西段出现了轻微干旱. 该时期在柴达木盆地周边地区也出现了干旱化的现象, 通过对酒泉盆地西端火烧沟剖面孢粉记录分析表明, 在 37.0~33.4 Ma 期间耐旱植物藜粉属、白刺粉属和麻黄粉属含量增高并达到高值, 表明该时期酒泉盆地气候转向干冷(苗运法等, 2008); 西宁盆地在 32.8~26.0 Ma 期间的沉积物颜色和 CaCO_3 含量变化情况也表明此区域内气候干旱程度的增强(徐丽等, 2009).

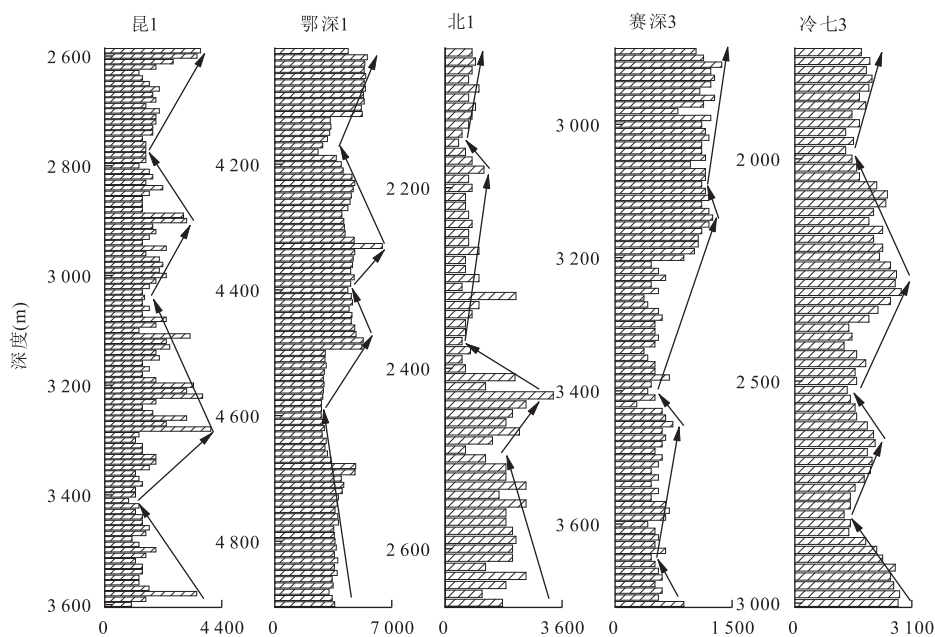
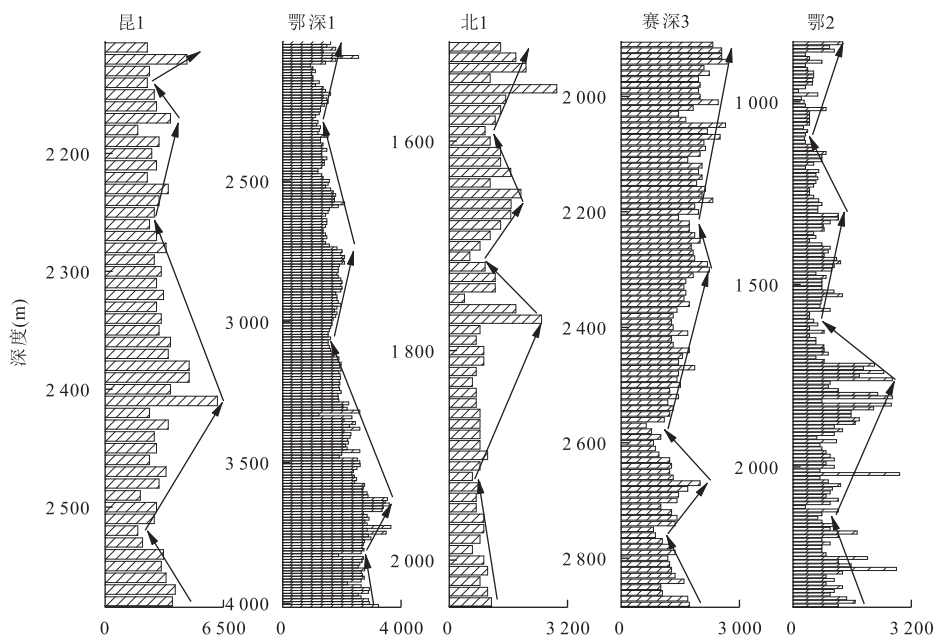
4.4 下油砂山组沉积期古气候特征

下油砂山组沉积期, 柴北缘西段沉积物中的氯离子含量在前期基础上增大, 平均值为 $2\ 221 \times 10^{-6}$, 湖水水体演变为半咸水, 气候在前期潮湿的基础上趋于干旱化, 湖水水体盐度逐渐增加, 古气候演化表现出 3 个旋回(图 9). 在 25~17 Ma 期间, 即喜马拉雅第 2 幕运动期间, 青藏高原 2 期隆起形成

2 000 m 以上的高原、热带大洋回暖与南半球越赤道气流增强、亚洲大陆扩张、北特提斯海消退和西太平洋边缘海的发展共同促使了亚洲季风系统的形成或增强(施雅风等, 1998), 柴北缘西段干旱程度加深. 通过对甘肃秦安红粘土的研究表明: 风尘和冬季风搬运体系可能在 22 Ma 前就已经存在(Guo *et al.*, 2002), 说明此时冬季季风已经发展到一定程度, 干旱化在亚洲内陆形成; 该时期柴西南地区的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 偏重和旱生植物富集也反映了柴达木盆地干燥和高蒸发的环境(Wang *et al.*, 1999; 尹成明等, 2007).

4.5 上油砂山组沉积期古气候特征

上油砂山组沉积期, 柴北缘西段沉积物中的氯离子含量在下油砂山组的基础上进一步增大, 平均值为 $4\ 092 \times 10^{-6}$, 湖水水体盐度明显增强, 古气候演化展现出 3 个旋回(图 10), 说明柴北缘西段该时期干旱化加剧. 在 17.0~4.8 Ma 时期, 柴西地区红沟子剖面沉积物中的氯离子和硫酸根离子含量增大, 也说明干旱程度增强(胡思虎等, 2012). 上油砂山组沉积时期亚洲季风系统的加强和亚洲内陆的干旱化加剧在柴达木盆地周边地区均有表现: 在 16~14 Ma 前后, 黄土高原的粉尘堆积速率和太平洋地区粉尘沉积通量出现了相对高值, 说明亚洲内陆干燥程度加重(Rea *et al.*, 1985; Guo *et al.*, 2002; 安芷生等, 2006); 南海 1145 孔记录的底栖有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 值从 17 Ma 开始增加, 在 16 Ma 达到高峰, $\delta^{13}\text{C}$ 重值

图 8 上干柴沟组沉积期氯离子含量(10^{-6})演化特征Fig.8 Evolution characteristics of Chloride ion content (10^{-6}) of Shangganchaigou Formation图 9 下油砂山组沉积期氯离子含量(10^{-6})演化特征Fig.9 Evolution characteristics of Chloride ion content (10^{-6}) of Xiayoushashan Formation

期持续至 14 Ma,也从另一角度指示了南海夏季风的增强(Wang,2003);在 15~10 Ma 时期青藏高原由原来的热带亚热带森林转化为温带森林,同时南极冰川扩大说明了全球气候的变冷(刘志飞和王成善,1998;Zachos,2001).该时期青藏高原东北缘的隆起使得西南方向的水汽难以进入盆地内部,同时全球降温也使得陆地水汽大量减少,出现全球性干

旱,因此全球性降温和青藏高原隆升是导致柴北缘西段上油砂组沉积期干旱的主要原因(韩文霞,2008).

4.6 狮子沟组沉积期古气候特征

狮子沟组沉积期,柴北缘西段沉积物中的氯离子含量平均值达到最大,为 $5\ 736 \times 10^{-6}$,湖水总体为半咸水,湖盆处于大面积萎缩期(赵加凡等,

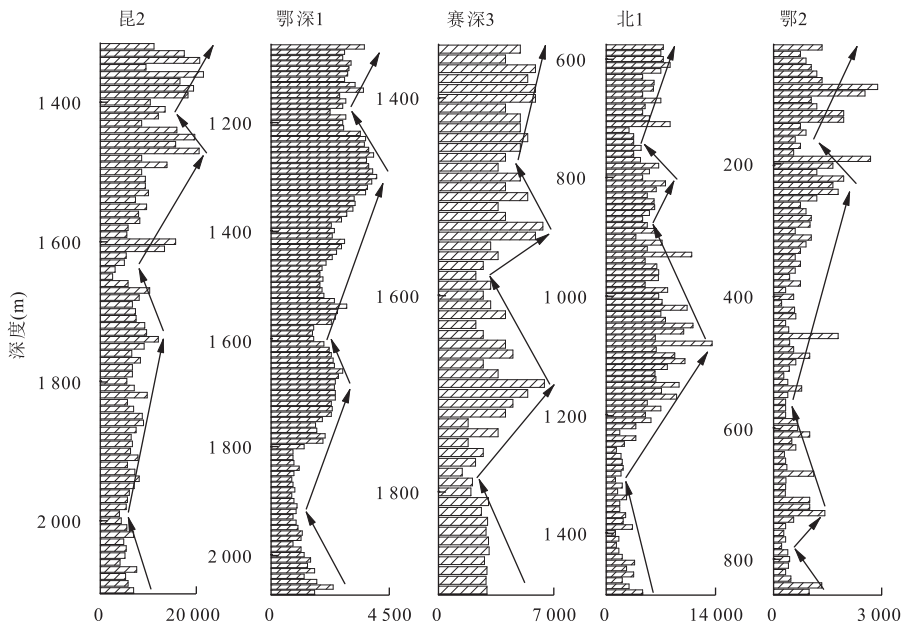


图 10 上油砂山组沉积期氯离子含量(10^{-6})演化特征

Fig.10 Evolution characteristics of Chloride ion content (10^{-6}) of Shangyoushashan Formation

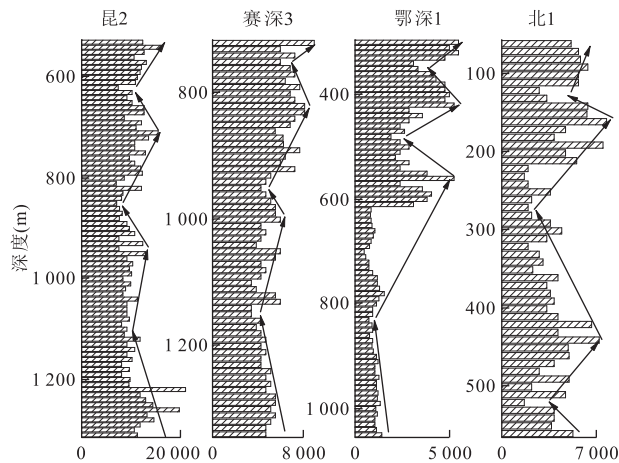


图 11 狮子沟组沉积期氯离子含量(10^{-6})演化特征

Fig.11 Evolution characteristics of Chloride ion content (10^{-6}) of Shizigou Formation

2004),古气候呈现了 3 个旋回(图 11).柴北缘地区碱石 1 井在狮子沟组沉积期,各类生物化石极少,以适合生存于咸水的正星介为主,说明水域咸化进一步加剧,气候进一步趋于干旱化(吉利明等,2007).狮子沟组沉积时期亚洲内部干旱化程度和季风加强,临夏盆地在 8 Ma 前后植被由温暖湿润的森林植被演化为干旱草原植被,沉积物颜色由紫红、褐红为主演变为褐黄色为主,说明该盆地在 8 Ma 左右干旱程度加剧(马玉贞等,1998;宋春晖等,2005);西宁盆地和贵德盆地的磁化率和非磁滞剩磁记录从 8.6 Ma 开始出现明显增加的趋势,并在 6.4 Ma 和

5.3 Ma 左右表现出两次快速增加,指示我国西北内陆干旱气候可能从 8.6 Ma 开始或加强,6.4 Ma 和 5.3 Ma 两次加速变干(方小敏等,2007;韩文霞,2008);8.2~6.2 Ma 前后秦安粉尘堆积速率明显增强,说明亚洲季风气候增强(Wang,2003).研究认为柴北缘西段,甚至是亚洲内陆气候干旱化的加剧,是青藏高原在 10~7 Ma 期间再次大规模隆升造成的,而全球降温、大洋蒸发减少和北特提斯海退至中亚且几乎消亡进一步加剧了柴北缘西段的干旱化(施雅风等,1998;陈隆勋等,1999;安芷生等,2006;韩文霞,2008).

上述分析表明:全球古气候变化、青藏高原隆升和北特提斯海缩退共同控制了柴北缘西段古气候演化,每一次青藏高原隆升都会在一定程度上影响柴北缘西段的古气候,而全球性降温和北特提斯海萎缩消亡也加重了柴北缘西段古气候的干旱.

5 结论

(1)通过对各古盐度古气候指标之间的相关性分析,Sr/Ba、Rb/Sr、Sr/Ca、TOC 和氯离子含量可作为本文研究区古盐度古气候恢复的指标,而 $\delta^{13}C$ 与 $\delta^{18}O$ 不能指示研究区沉积物沉积时古盐度和古气候的信息.

(2)柴北缘西段古一新近纪总体上经历了微咸水到半咸水的演化过程.路乐河组至下干柴沟组沉

积期古水介质盐度趋向于淡化,处于微咸水期;上干柴沟组至狮子沟组沉积期古水介质盐度逐渐升高,经历了微咸水到半咸水的演化过程。

(3)全球气候变化、青藏高原隆升和北特提斯海消退共同控制了柴北缘西段古气候演化,每一次青藏高原隆升都会在一定程度上影响柴北缘西段的古气候,而全球性降温和北特提斯海萎缩消亡加重了柴北缘西段古气候的干旱。柴北缘西段古一新近纪古气候总体经历了干旱—潮湿—干旱的演化过程,其中下干柴沟组上段沉积期气候最为潮湿。路乐河组至下干柴沟组上段沉积时期古气候从干旱逐渐向潮湿方向演化,呈现了 7 个古气候旋回,湖盆水体的盐度有所降低,但这个时期古气候总体上潮湿;上干柴沟组至狮子沟组沉积期古气候从潮湿向干旱方向演化,呈现了 12 个古气候旋回,狮子沟组沉积期古气候进一步干旱化,湖水盐度升高,湖盆大面积萎缩。

References

- An, Z. S., Zhang, P. Z., Wang, E. C., et al., 2006. Changes of the Monsoon-Arid Environment in China and Growth of the Tibetan Plateau since the Miocene. *Quaternary Sciences*, 26 (5): 678—693 (in Chinese with English abstract).
- Andrea, B. R., Bojar, A. V., Franz, N., et al., 2009. Monitoring Cenozoic Climate Evolution of Northeastern Tibet: Stable Isotope Constraints from the Western Qaidam Basin, China. *International Journal of Earth Sciences*, 98 (5): 1063—1075. doi: 10.1007/s00531-008-0304-5
- Chen, H. D., Li, J., Zhang, C. G., et al., 2011. Discussion of Sedimentary Environment and Its Geological Enlightenment of Shanxi Formation in Ordos Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(8): 2213—2229 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. A., Zeng, Y., Wang, J. F., et al., 2013. The Geochemical Records of Rb and Sr of Different Forms in Lake Sediments. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 32(4): 408—417 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2013.04.004
- Chen, L. X., Liu, J. P., Zhou, X. J., et al., 1999. Impact of Uplift of Qinghai-Xizang Plateau and Change of Land-Ocean Distribution on Climate over Asia. *Quaternary Sciences*, 19(4): 314—329 (in Chinese with English abstract).
- Fang, X. M., Song, C. H., Dai, S., et al., 2007. Cenozoic Deformation and Uplift of the NE Qinghai-Tibet Plateau: Evidence from High-Resolution Magnetostratigraphy and Basin Evolution. *Earth Science Frontiers*, 14 (1): 230—242 (in Chinese with English abstract).
- Fang, X. M., Wu, F. L., Han, W. X., et al., 2008. Plio-Pleistocene Drying Process of Asian Inland-Sporopollen and Salinity Records from Yahu Section in the Central Qaidam Basin. *Quaternary Sciences*, 28 (5): 874—882 (in Chinese with English abstract).
- Fritz, S. C., 1996. Paleolimnological Records of Climatic Change in North America. *Limnology and Oceanography*, 41(5): 882—889. doi: 10.4319/lo.1996.41.5.0882
- Guo, Z. T., Ruddiman, W. F., Hao, Q. Z., et al., 2002. Onset of Asian Desertification by 22 Myr Ago Inferred from Loess Deposits in China. *Nature*, 416 (6877): 159—163. doi: 10.1038/416159a
- Han, W. X., 2008. Climatic Records of Cenozoic Sediments from Qaidam Basin and Their Implications on Drying of Asian Inland (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Henderson, A. C. G., 2003. A Carbon- and Oxygen-Isotope Record of Recent Environmental Change from Qinghai Lake, NE Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 48 (14): 1463. doi: 10.1360/02wd0272
- Hu, S. H., Zhang, T., Gao, J. P., et al., 2012. The Miocene Climate Changes in Honggouzi Area of Western Qaidam Basin and Dominating Factors on Erosion Rate. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(6): 1106—1114 (in Chinese with English abstract).
- Ji, L. M., Qiao, Z. Z., Zhang, H. Q., et al., 2007. Micropalaeontology of Eocene Lower Ganchaigou Formation in the Kuntzei Depression of the Northern Margin of the Qaidam Basin. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 24 (1): 82—88 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1000-0674.2007.01.007
- Jin, Z. D., Zhang, E. L., 2002. Paleoclimate Implication of Rb/Sr Ratios from Lake Sediments. *Science Technology and Engineering*, 2 (3): 20—22 (in Chinese with English abstract).
- Kelts, K., Talbot, M., 1990. Lacustrine Carbonates as Geochemical Archives of Environmental Change and Biotic/Abiotic Interactions. In: Brock, T. D., ed., Brock/Springer Series in Contemporary Bioscience. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 288—315. doi: 10.1007/978-3-642-84077-7_15
- Kemp, J., Radke, L. C., Olley, J., et al., 2012. Holocene Lake Salinity Changes in the Wimmera, Southeastern Australia, Provide Evidence for Millennial-Scale Climate Variability. *Quaternary Research*, 77 (1): 65—76. doi: 10.1016/j.yqres.2011.09.013
- Lazar, B., Erez, J., 1992. Carbon Geochemistry of Marine-

- Derived Brines; I.¹³C Depletions due to Intense Photosynthesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56 (1): 335—345. doi:10.1016/0016-7037(92)90137-8
- Li, M. H., Kang, S. C., 2007. Responses of Lake Sediments to Paleoenvironmental and Paleoclimatic Changes in Tibetan Plateau. *Journal of Salt Lake Research*, 15(1): 63—72 (in Chinese with English abstract).
- Li, M. J., Zheng, M. L., Cao, C. C., et al., 2005. Formation and Evolution of Qaidam Paleogene and Neogene Basin. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 35(1): 87—90 (in Chinese with English abstract).
- Liu, T. S., Zheng, M. P., Guo, Z. T., 1998. Initiation and Evolution of the Asian Monsoon System Timely Coupled with the Ice-Sheet Growth and the Tectonic Movements in Asia. *Quaternary Sciences*, 18(3): 194—204 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. N., Deng, L. L., Gong, Y. C., et al., 2008. Carbonate Cements from Xujiahe Sandstone and Its Forming Mechanism, West Sichuan Depression. *Natural Gas Technology*, 2(5): 24—27, 78. (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. F., Wang, C. S., 1998. The Effects of Tibetan Plateau Uplift to Cenozoic Global Climate Change. *Exploration of Nature*, 17(3): 30—33 (in Chinese).
- Ma, Y. Z., Li, J. J., Fang, X. M., 1998. The Records of Red Layer Palynoflora Aged 30.6—5.0 Ma and Climate Evolution in Linxia Area. *Chinese Science Bulletin*, 43(3): 301—304 (in Chinese).
- Matthews, M. B., Ayalon, A., Matthews, A., et al., 1996. Carbon and Oxygen Isotope Study of the Active Water-Carbonate System in a Karstic Mediterranean Cave: Implication for Palaeoclimate Research in Semiarid Regions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(2): 337—347. doi:10.1016/0016-7037(95)00395-9
- Miao, Y. F., Fang, X. M., Song, Z. C., et al., 2008. Eocene Sporopollen Records and Ancient Climate Change of Northern Tibetan Plateau. *Science in China: Earth Sciences*, 38(2): 187—196 (in Chinese).
- Patrickson, S. J., Sack, D., Brunelle, A. R., et al., 2010. Late Pleistocene to Early Holocene Lake Level and Paleoclimate Insights from Stansbury Island, Bonneville Basin, Utah. *Quaternary Research*, 73(2): 237—246. doi:10.1016/j.yqres.2009.12.006
- Ramstein, G., Fluteau, F., Besse, J., et al., 1997. Effect of Orogeny, Plate Motion and Land-Sea Distribution on Eurasian Climate Change over the Past 30 Million Years. *Nature*, 386(6627): 788—795. doi:10.1038/386788a0
- Rea, D. K., Leinen, M., Janecek, T. R., 1985. Geologic Approach to the Long-Term History of Atmospheric Circulation. *Science*, 227(4688): 721—725. doi:10.1126/science.227.4688.721
- Shi, Y. F., Tang, M. C., Ma, Y. Z., 1998. Linkage between the Second Uplifting of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and the Initiation of the Asian Monsoon System. *Science in China: Earth Sciences*, 28(3): 263—271 (in Chinese). doi:10.1007/bf02878967
- Solotchina, E. P., Sklyarov, E. V., Solotchin, P. A., et al., 2014. Mineralogy and Crystal Chemistry of Carbonates from the Holocene Sediments of Lake Kiran (Western Transbaikalia): Connection with Paleoclimate. *Russian Geology and Geophysics*, 55(4): 472—482. doi:10.1016/j.rgg.2014.03.005
- Song, B. W., Xu, Y. D., Liang, Y. P., et al., 2014. Evolution of Cenozoic Sedimentary Basins in Western China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(8): 1035—1051.
- Song, B. W., Zhang, K. X., Lu, J. F., et al., 2013. The Middle Eocene to Early Miocene Integrated Sedimentary Record in the Qaidam Basin and Its Implications for Paleoclimate and Early Tibetan Plateau Uplift. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 50(2): 183—196. doi:10.1139/cjes-2012-0048
- Song, C. H., Bai, J. F., Zhao, Y. D., et al., 2005. The Color of Lacustrine Sediments Recorded Climatic Changes from 13 to 4.5 Myr in Linxia Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(3): 507—513 (in Chinese with English abstract). doi:10.3969/j.issn.1000-0550.2005.03.018
- Stuiver, M., 1970. Oxygen and Carbon Isotope Ratios of Fresh-Water Carbonates as Climatic Indicators. *Journal of Geophysical Research*, 75(27): 5247—5257. doi:10.1029/jc075i027p05247
- Sun, Z. C., Cao, L., Zhang, H. Q., et al., 2003. Evolution of Ostracoda of the Great Ice Age of Last Glacial Stage in Qaidam Basin. *Journal of Palaeogeography*, 5(3): 365—377 (in Chinese with English abstract). doi:10.3969/j.issn.1671-1505.2003.03.009
- Wang, C. W., Hong, H. L., Li, Z. H., et al., 2013. Climatic and Tectonic Evolution in the North Qaidam since the Cenozoic: Evidence from Sedimentology and Mineralogy. *Journal of Earth Science*, 24(3): 314—327. doi:10.1007/s12583-013-0332-3
- Wang, J., Wang, Y. J., Liu, Z. C., et al., 1999. Cenozoic Environmental Evolution of the Qaidam Basin and Its Implications for the Uplift of the Tibetan Plateau and the Dr-

- ying of Central Asia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 152 (1-2): 37-47. doi: 10.1016/s0031-0182(99)00038-3
- Wang, P. X., 2003. Evolution of the South China Sea and Monsoon History Revealed in Deep-Sea Records. *Chinese Science Bulletin*, 48 (23): 2549-2561. doi: 10.1360/03wd0156
- Wang, Q., Hao, L. W., Chen, G. J., et al., 2010. Forming Mechanism of Carbonate Cements in Siliciclastic Sandstone of Zhuhai Formation in Baiyun Sag. *Acta Petrolei Sinica*, 31(4): 553-558, 565 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. Q., Wang, L. S., 2013. The Pollen and Spore Characteristics of the Diexi Ancient Dammed Lake on the Upstream of Minjiang River. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(5): 975-982.
- Wang, Y., Zhao, Z. H., Lin, J. X., 2004. Paleoclimate and Geochemical Composition of AK1 Core Sediments in Lop Nur, Xinjiang. *Acta Geoscientica Sinica*, 25 (6): 653-658 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, X. H., Xiao, J. F., 2011. Geochemical Indicators of Sedimentary Environments—A Summary. *Earth and Environment*, 39(3): 405-414 (in Chinese with English abstract).
- Xu, L., Miao, Y. F., Fang, X. M., et al., 2009. Middle Eocene-Oligocene Climatic Changes Recorded by Sedimentary Colors in the Xining Basin, in Northeastern Tibetan Plateau, NW China. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 45 (1): 12-19 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. H., Hu, S. Y., Wang, Z. C., et al., 2011. Restoration of Paleoclimate and Its Geological Significance: As an Example from Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29 (2): 235-244 (in Chinese with English abstract).
- Yi, H. S., Lin, J. H., Zhou, K. K., et al., 2007. Carbon and Oxygen Isotope Characteristics and Palaeoenvironmental Implication of the Cenozoic Lacustrine Carbonate Rocks in Northern Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Palaeogeography*, 9 (3): 303-312 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1671-1505.2007.03.008
- Yin, C. M., Li, W. M., Andrea, R., et al., 2007. Cenozoic Climate Changes in the Qaidam Basin, Western China: Evidenced from Carbon and Oxygen Stable Isotope. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37 (5): 901-907 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3969/j.issn.1671-5888.2007.05.009
- Zachos, J., 2001. Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present. *Science*, 292 (5517): 686-693. doi: 10.1126/science.1059412
- Zhang, H., Jin, H. L., Xiao, H. L., et al., 2004. Soluble Salt Sediments of East Juyan Lake and Its Indicating Palaeoclimate Environment Changes. *Journal of Desert Research*, 24 (4): 409-415 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R., Ji, Y. L., Sun, Y. E., 2011. A Study on PLC in Material of Automatic Sorting System. *Coal Technology*, 30(12): 119-120 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. C., Wang, R. L., Jin, Z. J., et al., 2006. The Relationship between the Cambrian-Ordovician High-TOC Source Rock Development and Palaeoenvironment Variations in the Tariam Basin, Western China: Carbon and Oxygen Isotope Evidence. *Acta Geologica Sinica*, 80 (3): 459-466 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. F., Chen, X. H., Du, Y. B., 2004. The Tertiary Sedimentary Evolution of the Qaidam Basin, Northwest China. *Petroleum Exploration and Development*, 31 (3): 41-44 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. F., Chen, X. H., Jin, L., 2005. Application of Stable Isotope in Tertiary Saline Lake of Qaidam Basin. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 35 (3): 342-346 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, R. C., Liu, M. Q., 1999. Study on Palaeosalinity of Chang-6 Oil Reservoir Set in Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 20 (1): 20-25 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 安芷生, 张培震, 王二七, 等, 2006. 中新世以来我国季风—干旱环境演化与青藏高原的生长. *第四纪研究*, 26(5): 678-693.
- 陈洪德, 李洁, 张成弓, 等, 2011. 鄂尔多斯盆地山西组沉积环境讨论及其地质启示. *岩石学报*, 27(8): 2213-2229.
- 陈敬安, 曾艳, 王敬富, 等, 2013. 湖泊沉积物不同赋存状态 Rb、Sr 地球化学记录研究. *矿物岩石地球化学通报*, 32 (4): 408-417.
- 陈隆勋, 刘骥平, 周秀骥, 等, 1999. 青藏高原隆起及海陆分布变化对亚洲大陆气候的影响. *第四纪研究*, 19(4): 314-329.
- 方小敏, 宋春晖, 戴霜, 等, 2007. 青藏高原东北部阶段性变形隆升: 西宁、贵德盆地高精度磁性地层和盆地演化记录. *地学前缘*, 14(1): 230-242.
- 方小敏, 吴福莉, 韩文霞, 等, 2008. 上新世—第四纪亚洲内陆干旱化过程——柴达木中部鸭湖剖面孢粉和盐类化学指标证据. *第四纪研究*, 28(5): 874-882.
- 韩文霞, 2008. 柴达木盆地新生代地层记录的亚洲内陆干旱

- 气候演化(博士学位论文).兰州:兰州大学.
- 胡思虎,张涛,高军平,等,2012.柴西红沟子地区中新世气候变化与侵蚀速率控制因素.沉积学报,30(6):1106-1114.
- 吉利明,乔子真,张海泉,等,2007.柴达木盆地北缘昆特依凹陷始新统下干柴沟组微体古生物研究.微体古生物学报,24(1):82-88.
- 金章东,张恩楼,2002.湖泊沉积物 Rb/Sr 比值的古气候意义.科学技术与工程,2(3):20-22.
- 李明慧,康世昌,2007.青藏高原湖泊沉积物对古气候环境变化的响应.盐湖研究,15(1):63-72.
- 李明杰,郑孟林,曹春潮,等,2005.柴达木古近纪—新近纪盆地的形成演化.西北大学学报:自然科学版,35(1):87-90.
- 刘东生,郑绵平,郭正堂,1998.亚洲季风系统的起源和发展及其与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性.第四纪研究,18(3):194-204.
- 刘昊年,邓丽丽,龚业超,等,2008.川西坳陷须家河组砂岩中碳酸盐胶结物及形成机制.天然气技术,2(5):24-27,78.
- 刘志飞,王成善,1998.青藏高原隆升对新生代全球气候变化的影响.大自然探索,17(3):30-33.
- 马玉贞,李吉均,方小敏,1998.临夏地区 30.6~5.0 Ma 红层孢粉植物群与气候演化记录.科学通报,43(3):301-304.
- 苗运法,方小敏,宋之琛,等,2008.青藏高原北部始新世孢粉记录与古环境变化.中国科学:地球科学,38(2):187-196.
- 施雅风,汤懋苍,马玉贞,1998.青藏高原二期隆升与亚洲季风孕育关系探讨.中国科学:地球科学,28(3):263-271.
- 宋博文,徐亚东,梁银平,等,2014.中国西部新生代沉积盆地演化.地球科学——中国地质大学学报,39(8):1035-1051.
- 宋春晖,白晋锋,赵彦德,等,2005.临夏盆地 13~4.4 Ma 湖相沉积物颜色记录的气候变化探讨.沉积学报,23(3):507-513.
- 孙镇城,曹丽,张海泉,等,2003.柴达木盆地全球末次冰期介形类动物群的演变.古地理学报,5(3):365-377.
- 王琪,郝乐伟,陈国俊,等,2010.白云凹陷珠海组砂岩中碳酸盐胶结物的形成机理.石油学报,31(4):553-558,565.
- 王小群,王兰生,2013.岷江叠溪古堰塞湖沉积物中孢粉特征.地球科学——中国地质大学学报,38(5):975-982.
- 王永,赵振宏,林景星,2004.罗布泊 AK1 孔沉积物地球化学组成与古气候.地球学报,25(6):653-658.
- 熊小辉,肖加飞,2011.沉积环境的地球化学示踪.地球与环境,39(3):405-414.
- 徐丽,苗运法,方小敏,等,2009.青藏高原东北部西宁盆地中始新世—渐新世沉积物颜色与气候变化.兰州大学学报:自然科学版,45(1):12-19.
- 徐兆辉,胡素云,汪泽成,等,2011.古气候恢复及其对沉积的控制作用——以四川盆地上三叠统须家河组为例.沉积学报,29(2):235-244.
- 伊海生,林金辉,周恩恩,等,2007.青藏高原北部新生代湖相碳酸盐岩碳氧同位素特征及古环境意义.古地理学报,9(3):303-312.
- 尹成明,李伟民,R.Andrea,等,2007.柴达木盆地新生代以来的气候变化研究:来自碳氧同位素的证据.吉林大学学报:地球科学版,37(5):901-907.
- 张洪,靳鹤龄,肖洪浪,等,2004.东居延海易溶盐沉积与古气候环境变化.中国沙漠,24(4):409-415.
- 张锐,纪友亮,孙永娥,2011.柴达木盆地北缘马海凸起古近系—新近系层序地层格架.煤炭技术,30(12):119-120.
- 张水昌,Wang,R.L.,金之钧,等,2006.塔里木盆地寒武纪—奥陶纪优质烃源岩沉积与古环境变化的关系:碳氧同位素新证据.地质学报,80(3):459-466.
- 赵加凡,陈小宏,杜业波,2004.柴达木第三纪湖盆沉积演化史.石油勘探与开发,31(3):41-44.
- 赵加凡,陈小宏,金龙,2005.柴达木盆地第三纪盐湖沉积环境分析.西北大学学报(自然科学版),35(3):342-346.
- 郑荣才,柳梅青,1999.鄂尔多斯盆地长 6 油层组古盐度研究.石油与天然气地质,20(1):20-25.