

塔里木古海湾新生代海退时限及方式的初步探讨

张 华¹⁾, 刘成林¹⁾, 曹养同¹⁾, 孙宏伟²⁾, 王立成¹⁾

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2) 中国地质大学(北京), 北京 100083

摘 要: 对库车盆地新生代 84 个石膏或硬石膏进行硫同位素分析, 用以划分该时期内海侵—海退旋回以及最终海退时限的标定。石膏 $\delta^{34}\text{S}$ 值演化特征显示, 库车盆地新生代经历了两次明显的海侵, 其分别为古新世中期和始新世中后期。库车盆地新生代最终海退时限与西部塔里木海湾在天山山前带的退缩时限相一致, 表明至少在渐新世中晚期塔里木海湾才完全消失。通过区域对比, 本文将新生代塔里木海湾的海退时限和方式概括为: ①始新世早期塔里木海湾在昆仑山前带的西段最先发生海退; ②之后, 海退向昆仑山东段开始迁移, 至始新世晚期海退延伸至盖孜、阿尔塔什等地; ③最终, 海退由南向北迁移至天山一带, 至渐新世末期特提斯海水完全退出塔里木地区。塔里木盆地新生代海退时限、方式进一步指示了印度—亚洲大陆碰撞所产生的构造作用具有明显的距离效应; 塔里木海湾新生代不同地区在海退时限上的不同步性说明, 塔里木盆地新生代海侵—海退旋回不是单一地受全球海平面升降的控制, 而是全球海平面变化以及区域构造活动等多种因素共同作用的结果。

关键词: 塔里木海湾; 硫同位素; 海退时限; 区域对比; 新生代

中图分类号: P534.61; P597.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2013.05.08

A Tentative Discussion on the Time and the Way of Marine Regression from Tarim Bay during the Cenozoic

ZHANG Hua¹⁾, LIU Cheng-lin¹⁾, CAO Yang-tong¹⁾, SUN Hong-wei²⁾, WANG Li-cheng¹⁾

1) MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083

Abstract: The sulfur isotope of eighty-four gypsums or anhydrites was used to mark the transgression-regression cycle and the time of final marine regression from Kuqa Basin during Cenozoic. $\delta^{34}\text{S}$ curve indicates that there exist two obvious transgression in Middle Paleocene and Middle-Late Eocene, respectively. The final marine regression from Kuqa Basin occurred at the end of Oligocene, which was time-equivalent with the regression from southwest Tarim in Tianshan area, indicating that the retreat of the sea water from Tarim Bay lasted until the end of Oligocene. Based on the regional contrasting study in this paper, the authors sum up the time and the style of the marine regression from Cenozoic Tarim Bay as follows: ① the initial retreat occurred at the beginning of Eocene to the west foot of the Kunlun Mountains; ② then the retreat moved to Kezi and Aertashi areas at the east foot of the Kunlun Mountains in late Eocene; ③ finally, the retreat migrated to the Tianshan Mountains at the end of Oligocene, which also represents the thorough marine regression from Tarim Bay. This way of marine regression from Tarim further implies that there existed a distant effect caused by India-Asia collision, and the asynchronism

本文由国家“973”计划项目(编号: 2011CB403000)和“十二五”国家科技支撑计划(编号: 2011BAB06B00)联合资助。

收稿日期: 2013-04-24; 改回日期: 2013-07-19。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 张华, 男, 1985 年出生。博士研究生。主要从事蒸发岩沉积盆地分析研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: zhhcdut@163.com。

of marine regression among different areas in Tarim Basin shows that the transgression-regression cycle of Tarim Bay in Cenozoic was not only controlled by global sea level eustasy but also by some other factors such as regional tectonism.

Key words: Tarim Bay; sulfur isotope; time of marine regression; regional contrast; Cenozoic

新特提斯关闭是新生代以来地球表面大洋和陆地演化史中的重要地质事件之一,探讨这一时期特提斯海退时限及海退方式对揭示新特提斯演化过程意义重要而明显。西藏和塔里木地区作为白垩纪以来特提斯的残留海沉积(余光明等, 1990; 吉磊, 1995; 唐天福等, 1989), 其新生代古地理环境的发展和演化与特提斯的发展、衰亡密切相关。目前, 关于西藏新生代海相沉积的研究较多(章炳高等, 1983; 徐钰林, 2000; Willems et al., 1996), 其最高海相层位结束所代表的时限已用作新特提斯海退的主要证据(李祥辉等, 2001; Searle et al., 1987; Deway et al., 1988; Liu et al., 1994), 乃至将其对应的时间用来代表这一地区印度—巴基斯坦次大陆和亚洲大陆碰撞的启动时间(Rowley, 1996, 1998)。相比而言, 塔里木地区这方面研究相对薄弱, 前期有关新生代塔里木古海湾的海退时限、方式的研究, 多将新生代塔里木海湾作为一个整体、且多从古生物方面对其进行讨论(郭宪璞, 1995; 郝诒纯等, 1980, 1987)。然而, 逐一发掘的地

质证据却表明, 新生代塔里木海湾的海退时限在不同地区具有明显的不同步性(Bosboom et al., 2011; Sun et al., 2013), 其海退方式尚待进一步考证。

对海水硫酸盐及石膏的硫同位素研究表明, 在石膏形成过程中一般只伴随很小的硫同位素分馏, 海水母液和石膏的同位素差值仅为 0‰~2.4‰(Ault et al., 1959; Thode et al., 1961, 1965; Raab et al., 1991)。因此, 在研究古代蒸发岩沉积过程中, 石膏沉积时造成的同位素分馏是很微弱的甚至可以忽略不计(Holser et al., 1966)。在时间上, 由于硫在海洋中残留的时间远远大于海洋混合的时间, 因而地质时期中同一时代全球海水硫在同位素组成上是均一的, 从而导致地质历史中海洋 $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ 比值往往是时间的函数; 在空间上, 受盆地的硫源以及沉积体系的封闭和开放程度等因素影响, 同一时代、不同沉积背景下的硫同位素在组成上却往往表现出较大差异。鉴于此, 本文拟借用石膏硫同位素的上述特性, 对库车第三系最终海退时限进行初步限定, 同时结

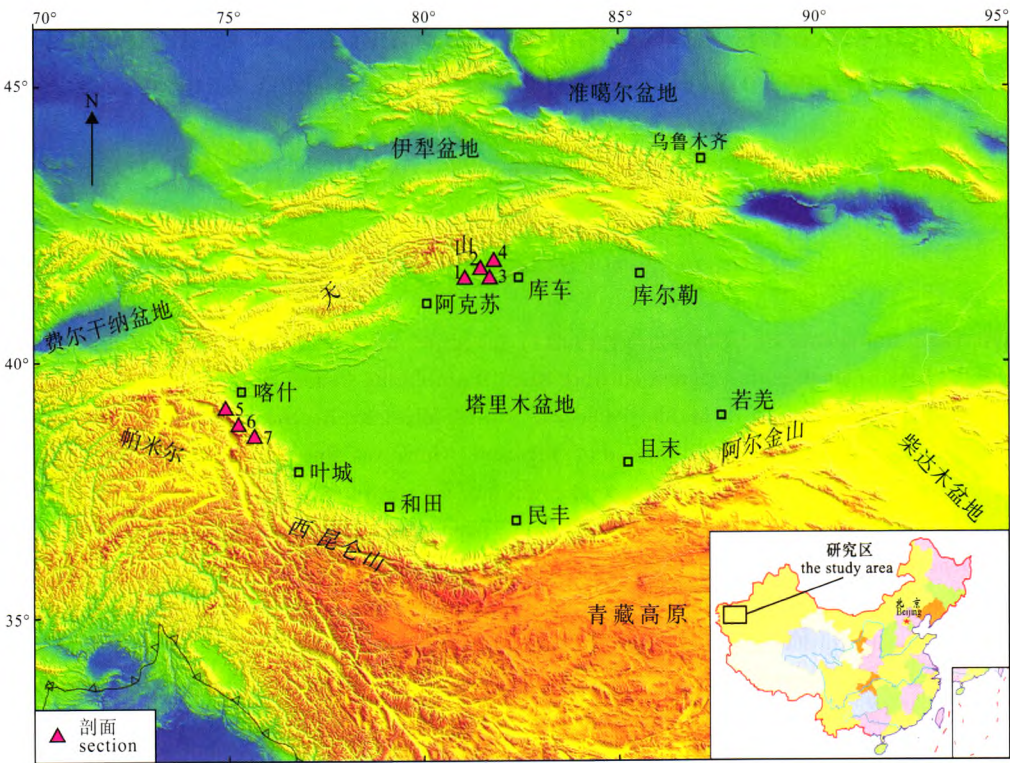


图 1 塔里木盆地及周围造山系卫星影像图

Fig. 1 Satellite image of Tarim Basin and its surrounding orogens

1-小库孜拜; 2-包孜墩; 3-乔尔禾; 4-盐山口; 5-乌依塔克; 6-盖孜; 7-阿尔塔什

1-Xiaokuzibai; 2-Baozidun; 3-Qiaorhe; 4-Yanshankou; 5-Wuyitake; 6-Kezi; 7-Aertashi

合其他新近研究成果(刘成林等, 2013; 邢万里等, 2013), 探讨新生代塔里木海湾的海退时限及海退方式。

现今的塔里木盆地为环形山链所环绕, 北缘为天山弧形山链, 南缘为西昆仑—阿尔金弧形山链(图 1)。印度—亚洲碰撞导致塔里木盆地西南缘的喜马拉雅西构造结的形成与不断推进, 使特提斯构造体系与古亚洲构造体系在西构造结处靠拢及对接, 导致塔里木盆地最后定型(许志琴等, 2011)。早白垩世以来, 塔里木盆地与其西部的塔吉克盆地、费尔干纳盆地等经阿莱依海峡相互连通, 在印度板块向北推移及当时的洋中脊扩张和收缩影响下(田在艺等, 1990; 丁道桂等, 1996; 刘训等, 1997), 西部特提斯海水入侵塔里木盆地, 形成一个向西开口的袋状海湾(郝治纯等, 1980; 唐天福等, 1989; 丁孝忠等, 2002)。晚白垩世, 西部特提斯海侵作用加强, 塔里木盆地西部海水沿着天山前低地在靠近柯坪隆起的低洼处侵入到塔北地区(郭宪璞等, 2002)。在干旱气候、海侵—海退作用以及古地理格局等多种因素控制下, 塔里木盆地西南部、北部新生代地层中广泛发育了一套以石膏、石盐为主的蒸发岩序列。

1 塔里木盆地新生代蒸发岩硫同位素特征

为了尽量反映库车盆地新生代蒸发岩硫同位素在横向上和垂向上的变化, 本次测试分别选择库车盆地的小库孜拜、乔尔禾以及包孜墩等剖面, 对硫同位素样品进行采集; 与此同时, 为了对比工作的开展, 选择莎车盆地阿尔塔什剖面石膏样品进行分析(图 1)。测试过程中, 为了避免泥质或其他物质的混入造成的硫同位素分析误差, 首先在显微镜下挑选纯净的石膏或硬石膏晶体, 然后用去离子水快速清洗矿物表面的杂质, 同时低温烘干后研磨至 200 目制样分析。样品测试工作由中国地质科学院矿产

资源研究所完成, 分析仪器为 MAT-251EM 型质谱计, 分析精度为 2‰。相关数据列入表 1。

2 数据分析

现代大洋中溶解硫酸盐与海相成因蒸发岩具有相似的硫同位素组成, 海相蒸发岩及其所反映的古海洋硫酸盐的同位素组成只在狭窄的范围内变化(Holser et al., 1966, 李任伟等, 1989), 其 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围稳定在 21‰左右(Kampschulte et al., 2004; Strauss, 1999)。全球第三纪发育的海相蒸发岩和现代海洋硫酸盐的硫同位素组成已无明显差别, $\delta^{34}\text{S}$ 最大不超过 25‰(李任伟等, 1989); 而陆相湖盆中硫酸盐硫同位素组成变化往往较大(郑喜玉等, 1988; 史忠生等, 2005), 甚至在同一湖盆中不同环境下的硫同位素组成也具有显著差异。大气降水以及天然河水 $\delta^{34}\text{S}$ 值普遍分布在 10‰以下(章振国等, 2010), 大气降水中 $\delta^{34}\text{S}$ 值一般为 0‰~5‰, 天然淡水 $\delta^{34}\text{S}$ 值约为 5‰~10‰(Holser et al., 1966)。而在海陆交互相中, 由于大陆淡水和海水的共同作用, 石膏硫同位素组成往往兼有两者的特点, $\delta^{34}\text{S}$ 值通常为 15‰~10‰(Tabakh et al., 1998, 1999)。此外, 表生环境中, 生物作用引起的硫同位素分馏也是硫同位素组成发生变化的主要原因, 这一分馏作用可以导致 $\delta^{34}\text{S}$ 值的差别达到 50‰~60‰(Fry et al., 1986)。细菌硫酸盐还原反应(BSR)使环境中溶解态硫酸盐 SO_4^{2-} 还原形成有机硫、硫化物及 H_2S , 该过程中对重硫同位素的歧视效应, 最终导致生成硫化物的硫同位素显著亏损 ^{34}S (Chambers et al., 1979; Kaplan et al., 1964), 而残余的硫酸盐往往明显富集 ^{34}S 。

从表 1 中可以看出, 塔里木盆地第三系石膏 $\delta^{34}\text{S}$ 值具有总体偏小, 且分布范围较为集中的特点。这与形成于有机质堆积速度较快、介质环境缺氧的强还原环境中的硫酸盐, 如四川盆地 T_1^2 段石膏

表 1 塔里木盆地第三系硫同位素组成特征
Table 1 Sulfur isotope composition of Tertiary evaporites in Tarim Basin

地区	剖面	层位	样品数	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}(\text{‰})$			同期海水 $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}(\text{‰})^*$
				变化范围	差值	均值	
莎车	阿尔塔什	E_1	15	16.59-20.59	4	19.9	17~22
		E_1 下亚段	5	17-20	3	18.66	
	小库孜拜	E_1 中亚段	18	11.6-15.9	4.3	14.05	
		E_1 上— E_2 下	16	9.1-13.8	4.2	10.95	
库车	包孜墩	E_2 中亚段	2	18.4-18.5	0.1	18.45	
		E_2 上亚段	2	12.7-15.9	3.2	14.3	
	乔尔禾	E_3	18	10.1-13.3	3.2	11.87	
	盐山口东	N_1	23	6.1-12.7	6.6	9.54	

注: *据 Kampschulte et al., 2004。

3 讨论及结论

3.1 新生代塔里木海湾海退时限

塔里木海湾的最终封闭也就意味着海水完全退出,这一事件的最直接标志就是区内的最终海退的时限或者最高海相层位。因此,讨论塔里木海湾的封闭时间,实际上也就是寻求对境内最终海退时限或者确定最高海相层位。

关于塔里木盆地最终海退时限的讨论前期多基于有孔虫类型和形态的研究,并认为有孔虫的出现可能反映了当时的海侵过程(雍天寿等, 1986; 王弭力等, 1999; 郝诒纯等, 1982)。基于前人对有孔虫的研究,笔者将塔里木盆地中新世以来的有孔虫发育特点总结如下: (1)在时间上和空间上分布较广,从中新世至第四纪,从离西部海域最近的乌恰至库车、甚至更远的罗布泊都有发育; (2)数量较多,但种类单调; (3)畸变现象十分普遍; (4)正常海相有孔虫大量缺乏; (5)几乎都生长于半咸水环境,且常与淡水介形虫及轮藻共生。上述事实表明,塔里木盆地内中新世及其以后的有孔虫极有可能是在早期过程中,局部地区(如洼地、断陷)保留下来的有孔虫孑遗,其后在适宜条件下生存、繁衍的产物;而有孔虫性状发生的畸变,是其自身对环境变化及时做出的调整和长期适应的结果。因此,笔者认为塔里木盆地

中新世或更新地层中有孔虫的出现,更可能反映早期海侵波及的范围,而不是中新世或以后时间内真正意义上的海侵。

本次石膏硫同位素研究结果表明,在渐新世中晚期库车盆地具有典型的内陆湖泊或盐湖的性质,暗示在该时期及以后库车盆地完全与塔西南海湾失去了联系。而在塔里木盆地的西部,最靠近古海域的斯木哈纳到巴什布拉克的广大地区(包括前天山卡巴加特隆起带、盖孜克阿尔特断裂带),中新统岩相都是以河流相和冲洪积相砂泥岩、砂砾岩以及山麓冲洪积砂砾岩为主(雍天寿等, 1986),表明塔西南海在天山山前带海退的最终时限与库车盆地最终的海退时限大致相当。而这一时限与来自天山北翼中生界和南天山前陆冲断褶皱带西段中新统的磷灰石裂变径迹分析指示的天山冷却年龄(25~23 Ma)(Hendrix et al., 1994)以及天山南麓沉积速率明显加快的时限(渐新世—早中新世)(Allen et al., 1991; Windley et al., 1990; Yin et al., 1998)具有良好的等时性。来自费尔干纳盆地、锡尔河等地马萨格特群(E₃—N₁)中下部由冲-洪积以及湖湘砖红色粘土、粉砂岩构成的下部磨拉石沉积、阿富汗—塔吉克盆地渐新统上部—中新统的巨厚陆相磨拉石不整合于海相下第三系地层之上以及卡拉库姆盆地渐新世末期至中新世地层岩性的剧烈转换(贾承造等, 2001)等地质证据同样表明,

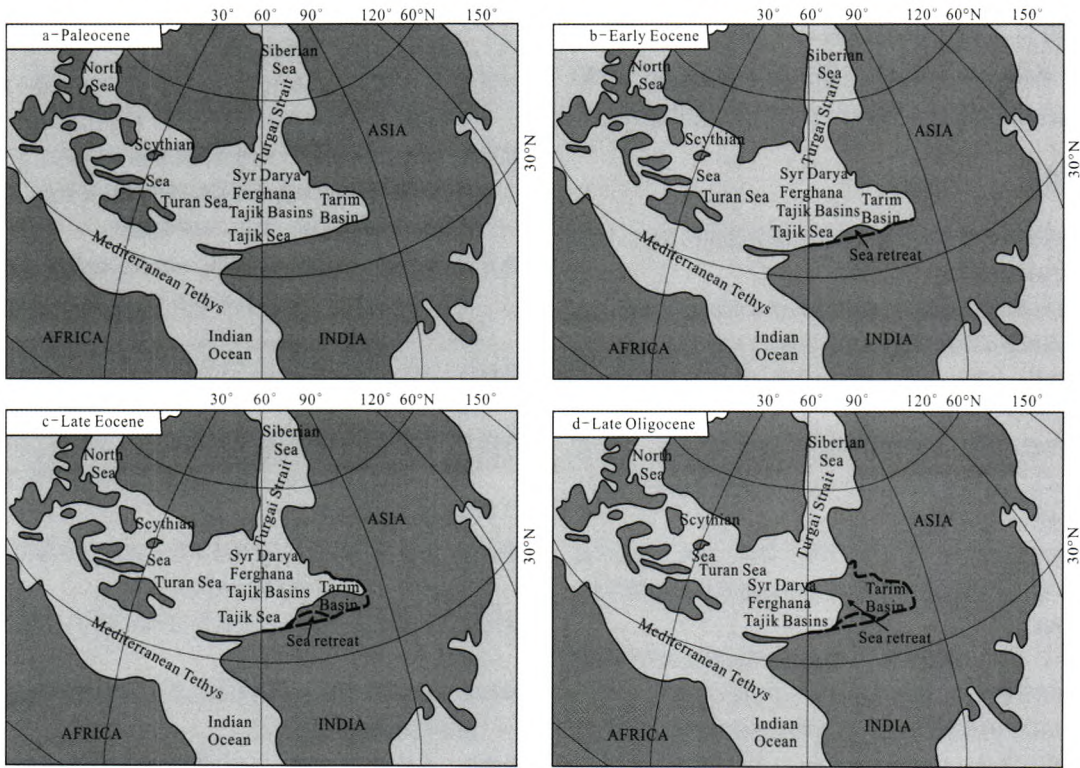


图 4 新生代塔里木海湾海退方式示意图(底图据 Bosboom et al., 2011)
Fig. 4 Schematic diagram of the closure of Tarim sea during the Cenozoic(base map after Bosboom et al., 2011)

新特提斯海在其北缘的封闭于渐新世末期业已完成。

3.2 新生代塔里木海湾海退方式

与塔里木海湾在天山山前带海退时限形成显著差异的是,海湾在昆仑山山前带的海退时限似乎要更早一些。Bosboom 等(2011)通过对昆仑山前阿尔塔什(Aertashi)、盖孜(Kezi)等地新生代地层的岩性、生物地层以及孢粉的研究,将塔里木海湾新生代最终海退时限限定为始新世普利亚本阶最早期(earliest Priabonian),时限为 37 Ma。而来自昆仑山前带奥依塔格剖面(Oytag)的研究却表明,新生代塔里木海湾在奥依塔格地区的最终海退时限为始新世早期(47 Ma)(Sun et al., 2013)。从上可以看出,尽管新生代塔里木海湾在昆仑山前不同地区其最终封闭时限有所不同,但在整体上却明显早于其在天山山前带的封闭时限。据此我们将新生代塔里木海湾的海退时限和海退方式概括如下(图 4): ①始新世早期(47 Ma)塔里木海湾在昆仑山前带的西段最先发生海退; ②之后,海退向昆仑山东段开始迁移,至始新世晚期(37 Ma)海退延伸至盖孜、阿尔塔什等地; ③最终,海退由南向北迁移至天山一带,至渐新世末期特提斯海水完全退出塔里木地区,与此同时,与塔里木毗邻的中亚各盆地亦发生大规模海退。塔里木海湾新生代的海退时限和海退方式进一步暗示了印度—亚洲大陆碰撞所产生的构造作用具有明显的距离效应;而塔里木海湾新生代不同地区在海退时限上的不同步性说明,塔里木海湾新生代海侵—海退旋回不是单一的受全球海平面升降的控制,而是全球海平面变化以及区域构造活动等多种因素共同作用的结果。

参考文献:

- 陈锦石, 储雪蕾, 邵茂茸. 1986. 三叠纪海的硫同位素[J]. 地质科学, 4: 330-338.
- 陈林容. 2010. 四川盆地海相三叠纪硫同位素组成与地质成因分析[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 23(2): 238-248.
- 丁道桂, 汤良杰. 1996. 塔里木盆地的形成与演化[M]. 南京: 河海大学出版社.
- 丁孝忠, 郭宪璞, 彭阳, 纪云龙, 李喜臣, 张韬, 刘丽军, 王易农. 2002. 新疆塔里木盆地白垩纪—第三纪层序地层学研究[J]. 地球学报, 23(3): 243-248.
- 郭宪璞, 丁孝忠, 何希贤, 李汉敏, 苏新, 彭阳. 2002. 塔里木盆地中新生代海侵和海相地层研究的新进展[J]. 地质学报, 76(3): 299-307.
- 郭宪璞. 1995. 塔里木盆地西部白垩纪—古新世有孔虫群落的划分及其环境意义[J]. 地球学报, 16(1): 75-86.
- 郝治纯, 曾学鲁, 郭宪璞. 1987. 新疆塔里木盆地西部海相白垩纪及其沉积环境探讨[J]. 地质学报, 61(3): 205-217.
- 郝治纯, 曾学鲁, 袁松余, 何希贤. 1982. 新疆塔里木盆地中新世有孔虫及地质意义[J]. 地球学报, 4(1): 69-82.
- 郝治纯, 曾学鲁. 1980. 新疆喀什盆地早第三纪有孔虫[J]. 古生物学报, 19(2): 152-167.
- 吉磊. 1995. 西藏岗巴地区始新统遮普惹组的沉积微相和沉积环境[J]. 沉积学报, 13(增刊): 88-95.
- 贾承造, 杨树峰, 陈汉林. 2001. 特提斯北缘盆地群构造地质与天然气[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 李任伟, 辛茂安. 1989. 东濮盆地蒸发岩的成因[J]. 沉积学报, 7(4): 141-147.
- 李祥辉, 王成善, 胡修棉. 2001. 西藏最新非碳酸盐海相沉积及其对新特提斯关闭的意义[J]. 地质学报, 75(3): 314-321.
- 林耀庭. 2003. 四川盆地三叠纪海相沉积石膏和卤水的硫同位素研究[J]. 盐湖研究, 11(2): 1-7.
- 刘成林, 曹养同, 杨海军, 焦鹏程, 顾乔元. 2013. 库车前陆盆地古近纪—新近纪盐湖环境变迁及其成钾效应探讨[J]. 地球学报, 34(5): 547-558.
- 刘成林, 王弼力, 焦鹏程. 1999. 新疆罗布泊盐湖氢氧锶硫同位素地球化学及钾矿成矿物质来源[J]. 矿床地质, 18(3): 268-275.
- 刘群, 陈郁华, 李银彩. 1987. 中国中、新生代陆源碎屑—化学岩型盐类沉积[M]. 北京: 科学技术出版社.
- 刘训, 吴绍祖, 傅德荣. 1997. 塔里木板块周缘的沉积—构造演化[M]. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社.
- 史忠生, 陈开远, 何生. 2005. 东濮盐湖古近系锶、硫、氧同位素组成及古环境意义[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 30(6): 430-436.
- 孙镇城, 杨藩, 张枝焕, 李守军, 李东明, 彭立才, 曾学鲁, 徐钰林, 茅绍智, 王强. 1997. 中国新生代咸化湖泊沉积环境与油气生成[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 唐天福, 杨恒仁, 蓝秀. 1989. 新疆塔里木盆地西部白垩纪至早第三纪海相地层及含油性[M]. 北京: 科学出版社.
- 田在艺, 柴桂林, 林梁. 1990. 塔里木盆地石油地质研究新进展[M]. 北京: 科学出版社.
- 王弼力, 黄兴根, 刘成林. 1999. 新疆罗布泊 K1 孔岩心中有孔虫化石的发现及其意义[J]. 地质论评, 45(2): 158-163.
- 魏新俊, 邵长铎, 王弼力, 赵德钧, 蔡克勤, 姜继学, 何国权, 胡文瑄. 1993. 柴达木盆地西部富钾盐湖物质组分、沉积特征及形成条件研究[M]. 北京: 地质出版社.
- 邢万里, 刘成林, 王安建, 焦鹏程, 李国武, 赵宪福, 高超. 2013. 库车前陆盆地古近系蒸发岩岩石学、矿物学与成钾环境分析——以 DZK01 孔岩芯为例[J]. 地球学报, 34(5): 559-566.
- 徐钰林. 2000. 西藏南部早第三纪钙质超微化石及东特提斯在西藏境内的封闭时限[J]. 现代地质, 14(3): 255-262.
- 许志琴, 李思田, 张建新, 杨经绥, 何碧竹, 李海兵, 林畅松, 蔡志慧. 2011. 塔里木地块与古亚洲/特提斯构造体系的对接[J]. 岩石学报, 27(1): 1-22.
- 雍天寿, 单金榜. 1986. 白垩纪及早第三纪塔里木海湾的形成与发展[J]. 沉积学报, 4(3): 67-75.
- 余光明, 王成善. 1990. 西藏特提斯沉积地质[M]. 北京: 地质出版社.
- 章炳高, 耿良玉. 1983. 西藏南部早第三纪地层的再认识[J]. 地层学杂志, 7(4): 310-312.
- 章振国, 高继雷, 张向文. 2010. 塔里木盆地古代蒸发岩硫同位素地球化学研究[J]. 甘肃地质, 19(1): 32-37.
- 郑喜玉, 唐渊, 徐昶. 1988. 西藏盐湖[M]. 北京: 科学技术出版社.

References:

- ALLEN M B, WINDLEY B F, ZHANG Chi, ZHAO Zhong-yan, WANG Guang-rei. 1991. Basin evolution within and adjacent to the Tien Shan Range, NW China[J]. *Journal of the Geological Society*, 148(2): 369-378.
- AULT W U, KULP J L. 1959. Isotopic geochemistry of sulphur[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 16(4): 201-235.
- BOSBOOM R E, DUPONT-NIVET G, HOUBEN A J P, BRINKHUIS H, VILLA G, MANDIC O, STOICA M, ZACHARIASSE W J, GUO Zhao-jie, LI Chuan-xin, KRIJGSMAN W. 2011. Late Eocene sea retreat from the Tarim Basin(west China) and concomitant Asian Paleoenvironmental change[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 299: 385-398.
- CHAMBERS L A, TRUDINGER P A. 1979. Microbiological fractionation of stable sulfur isotopes: a review and critique[J]. *Geomicrobiology Journal*, (3): 249-293.
- CHEN Jin-shi, CHU Xue-lei, SHAO Mao-rong. 1986. Sulfur isotope of the Triassic sea[J]. *Chinese Journal of Geology*, 4: 330-338(in Chinese with English abstract).
- CHEN Lin-rong. 2010. Investigation on Sulfur isotopic composition and its geological genesis of marine Triassic anhydrite in Sichuan Basin[J]. *Journal of Sichuan University of Science and Engineering(Natural Science Edition)*, 23(2): 238-248(in Chinese with English abstract).
- DEWAY J F, ROBERT M S, CHANG Cheng-fa, SUN Yi-yin. 1988. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau[M]. *Phil. Trans. R. Soc. London, A*.327: 379-413.
- DING Dao-gui, TANG Liang-jie. 1996. Formation and evolution of the Tarim Basin[M]. Nanjing: Hehai Univ, Press House(in Chinese).
- DING Xiao-zhong, GUO Xian-pu, PENG Yang, JI Yun-long, LI XI-chen, ZHANG Tao, LIU Li-jun, WANG Yi-nong. 2002. A study of the Cretaceous-Tertiary sequence stratigraphy of Tarim Basin, Xinjiang[J]. *Acta geoscientia sinica*, 23(3): 243-248(in Chinese with English abstract).
- FRY B, COX J, GEST H, HAYES J M. 1986. Discrimination between ^{34}S and ^{32}S during bacterial metabolism of inorganic sulfur compounds[J]. *Journal of Bacteriology*, 165(1): 328-330.
- GUO Xian-pu, DING Xiao-zhong, HE Xi-xian, LI Han-min, SU Xin, PENG Yang. 2002. New progress in the Study of Marine Transgression Events and Marine Strata of the Mesozoic in the Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 76(3): 299-307(in Chinese with English abstract).
- GUO Xian-Pu. 1995. Cretaceous-Paleocene foraminifera communities from the western Tarim Basin and their environmental significance[J]. *Acta geoscientia sinica*, 16(1): 75-86(in Chinese with English abstract).
- HAO Yi-chun, ZENG Xue-lu, GUO Xian-pu. 1987. The marine Cretaceous in the western part of the Tarim Basin of Xinjiang and its depositional environments[J]. *Acta Geologica Sinica*, 61(3): 205-217(in Chinese with English abstract).
- HAO Yi-chun, ZENG Xue-lu, QIU Song-yu, HE Xi-xian. 1982. Miocene foraminifera of Tarim Basin, Xinjiang and their geological significance[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 4(1): 69-82(in Chinese with English abstract).
- HAO Yi-chun, ZENG Xue-lu. 1980. Foraminifera of the Early Tertiary in Kashi region of Xinjiang[J]. *Acta Palaeont. Sinica*, 19(2): 152-167(in Chinese with English abstract).
- HENDRIX S M, DUMITRU T A, GRAHAM S A. 1994. Late Oligocene-Early Miocene unroofing in Chinese Tian shan: An early effect of India-Asia collision[J]. *Geology*, 22(6): 487-490.
- HOLSER W T, KAPLAN I R. 1966. Isotope geochemistry of sedimentary sulfates[J]. *Chem Geol*, 1: 93-135.
- JI lei. 1995. Sedimentary Microfacies and Environments of Eocene Zhepure Formation in Gamba District, Xizang[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 13(supp.): 88-95(in Chinese with English abstract).
- JIA Cheng-zao, YANG Shu-feng, CHEN Han-lin. 2001. Tectonic geology and natural gas of north Tethys margin basins[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- KAMPSCHULTE A, STRAUSS H. 2004. The sulfur isotopic evolution of Phanerozoic seawater based on the analysis of structurally substituted sulfate in carbonates[J]. *Chemical Geology*, 204: 255-286.
- KAPLAN I R, RITTENBERG S C. 1964. Microbiological fractionation of sulfur isotopes[J]. *J. Gen. Microbiol.*, 34(2): 195-212.
- LI Ren-wei, XIN Mao-an. 1989. Origin of evaporates of Dongpu Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 7(4): 141-147(in Chinese with English abstract).
- LI Xiang-hui, WANG Cheng-shan, HU Xiu-mian. 2001. Latest Non-carbonate Marine Sediment in Tibet: Significance to Closure of the Neo-Tethys Sea[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(3): 314-321(in Chinese with English abstract).
- LIN Yao-ting. 2003. Study on Sulfur Isotopes of Trias Marine Deposit Gypsum and Brines in the Sichuan Basin[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 11(2): 1-7(in Chinese with English abstract).
- LIU Cheng-lin, CAO Yang-tong, YANG Hai-jun, JIAO Peng-cheng, GU Qiao-yuan. 2013. Discussion on Paleogene-Neogene Environmental Change of Salt Lakes in Kuqa Foreland Basin and Its Potash-forming Effect[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 34(5): 547-558(in Chinese with English abstract).
- LIU Cheng-lin, WANG Mi-li, JIAO Peng-cheng. 1999. Hydrogen, Oxygen, Strontium and Sulfur Isotopic Geochemistry and Potash-forming Material Sources of Lop Salt Lake, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 18(3): 268-275(in Chinese with English abstract).
- LIU Guang-hua, EINSELE G. 1994. Sedimentary history of the Tethyan basin in the Tibetan Himalayas[J]. *Geol. Rundsch*, 83(1): 32-61.
- LIU Qun, CHEN Yu-hua, LI Yin-cai. 1987. Mesozoic and Cenozoic salt deposition of terrigenous clastic chemical rock of China[M]. Beijing: Science and Technology Press(in Chinese).
- LIU Xun, WU Shao-zu, FU De-rong. 1997. The sedimen-

- tary-tectonic evolution of Tarim Plate and its surrounding area[M]. Urumqi: Xinjiang Science Technology and Hygiene Publishing House(K)(in Chinese).
- RAAB M, SPIRO B. 1991. Sulfur isotopic variations during seawater evaporation with fractional crystallization[J]. *Chem Geol*, 86(4): 323-333.
- ROWLEY D B. 1996. Age of initiation of collision between India and Asia: A review of stratigraphic data[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 145(1): 1-13.
- ROWLEY D B. 1998. Minimum age of initiation of collision between India and Asia north of the Everest based on the subsidence history of the Zhepure Mountain section[J]. *The Journal of Geology*, 106(2): 229-235.
- SEARLE M P, WINDLEY B F, COWARD M P. 1987. The closing of Tethys and tectonics of the Himalaya[J]. *GSA. Bull.*, 98(6): 678-701.
- SHI Zhong-sheng, CHEN Kai-yuan, HE Sheng. 2005. Strontium, Sulfur and Oxygen Isotopic Compositions and Significance of Paleoenvironment of Paleogene of Dongpu Depression[J]. *Earth Science-Journal of China University Geosciences*, 6(30): 430-436(in Chinese with English abstract).
- SUN Zhen-cheng, YANG Fan, ZHANG Zhi-huan, LI Shou-jun, LI Gong-ming, PENG Li-cai, ZENG Xue-lu, XU Yu-lin, MAO Shao-zhi, WANG Qiang. 1977. Sedimentary Environment and Hydrocarbon Generation of Cenozoic Brackish Lake in China[J]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- STRAUSS H. 1999. Geological evolution from isotope proxy signals-sulfur[J]. *Chemical Geology*, 161(1): 89-101.
- SUN Ji-min, JIANG Mao-sheng. 2013. Eocene seawater retreat from the southwest Tarim Basin and implications for early Cenozoic tectonic evolution in the Pamir Plateau[J]. *Tectonophysics*, 588(2): 27-38.
- TABAKH M E, SCHREIBER B C, UTHA A C. 1998. Diagenetic origin of Basal Anhydrite in Cretaceous Maha Sarakham salt, Khorat Plateau, NE Thailand[J]. *Sedimentology*, 45(3): 579-594.
- TABAKH M E, UTHA A C, SCHREIBER B C. 1999. Sedimentology of the Cretaceous Maha Sarakham Evaporites in the Khorat Plateau of Northeastern Thailand[J]. *Sedimentary Geology*, 123(1): 31-62.
- THODE H G, MONSTER J, DUNFORD H B. 1961. Sulphur isotope geochemistry[J]. *Geochimica. et Cosmochimica. Acta*, 25(3): 159-174.
- THODE H G, MONSTER J. 1965. Sulfur isotope geochemistry of petroleum, evaporites and ancient seas[J]. *AAPG Mem.*, 4: 367-377.
- TANG Tian-fu, YANG Heng-ren, LAN Xiu. 1989. Marine strata and oiliness of Cretaceous to early Tertiary in the west Tarim Basin of Xinjiang[J]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- TIAN Zai-yi, CHAI Gui-lin, LIN Liang. 1990. Formation and evolution of the Tarim Basin[M]. Xinjiang Petroleum Geology, 11(4): 259-275(in Chinese with English abstract).
- WANG Mi-li, HUANG Xing-gen, LIU Cheng-lin. 1999. The discovery of foraminiferal fossils in cores from Hole K1 in Lop Nur, Xinjiang[J]. *Geological Review*, 45(2): 158-163(in Chinese with English abstract).
- WEI Xin-jun, SHAO Chang-ze, WANG Mi-li, ZHAO De-jun, CAI Ke-qin, JIANG Ji-xue, HE Guo-quan, HU Wen-xuan. 1993. Material Composition, Sedimentary Characteristics and Formation Conditions of Potassium Salt in Western Qaidam Basin[J]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- WILLEMS H, ZHOU Z, ZHANG B, GRAFE K U. 1996. Stratigraphy of the Upper Cretaceous and Lower Tertiary Strata in the Tethyan Himalayas of Tibet(Tingri area, China)[J]. *Geol.Rundsch*, 85(4): 723-754.
- WINDLEY B F, ALLEN M B, ZHANG C. 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tien Shan Range, Central Asia[J]. *Geology*, 18(2): 128-131.
- XING Wan-li, LIU Cheng-lin, WANG An-jian, JIAO Peng-cheng, LI Guo-wu, ZHAO Xian-fu, GAO Chao. 2013. Analysis of Petrology, Mineralogy and K-forming Environment of Paleogene Evaporites in Kuqa Foreland Basin: A Case Study of Drill Hole DZK01[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(5): 559-566(in Chinese with English abstract).
- XU Yu-lin. 2000. Early Tertiary Calcareous Nannofossils from Southern Tibet and the Closing Time of East Tethys in Tibet[J]. *Journal of Graduate School, China University of Geosciences*, 14(3): 255-262(in Chinese with English abstract).
- XU Zhi-qin, LI Si-tian, ZHANG Jian-xin, YANG Jing-sui, HE Bi-zhu, LI Hai-bing, LIN Chang-song, CAI Zhi-hui. 2011. Paleozoic Asian and Tethyan tectonic systems with docking the Tarim block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 1-22(in Chinese with English abstract).
- YIN An, NIE S, CRAIG P, HARRISON T M, RYERSON F J. 1998. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tien Shan[J]. *Tectonics*, 17(1): 1-27.
- YONG Tian-Shou, SHAN Jin-bang. 1986. The development and formation in the Tarim Bay in Cretaceous-Paleogene ages[J]. *Acta Sediment. Sinica*, 4(3): 67-75(in Chinese with English abstract).
- YU Guang-ming. 1990. Sedimentary Geology of Tethys, Tibet[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- ZHANG Bing-gao, GE Liang-yu. 1983. Recognition of Early Cretaceous strata in southern Tibet[J]. *Journal of stratigraphy*, 7(4): 310-312(in Chinese).
- ZHANG Zhen-guo, GAO Ji-lei, ZHANG Xiang-wen. 2010. Geochemistry of sulfur isotope of Paleo-evaporites in Tarim Basin[J]. *Gansu Geology*, 19(1): 32-37(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Xi-yu, TANG Yuan, XU Chang. 1988. Tibet Saline Lake[M]. Beijing: Science and Technology Press(in Chinese).