



塔里木盆地西南凹陷古新统巨厚海相石膏岩 沉积特征及环境意义*

高 超^{1,2,3}, 曹养同^{4**}, 刘成林⁴, 焦鹏程⁴, 徐海明⁴

(1 中国地质科学院, 北京 100037; 2 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 3 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 4 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)

摘 要 塔里木盆地(简称塔,下同)西南凹陷古新世阿尔塔什组发育巨厚层海相石膏岩,夹薄层泥岩、粉砂岩及灰岩,是塔西南凹陷断续海侵环境下多期次蒸发沉积的产物。野外调查显示,该层海相石膏岩出现于皮拉里、阿尔塔什、麻扎塔格及大山口地区的阿尔塔什组露头剖面。石膏岩在凹陷内分布广泛,在西昆仑山前、南天山山前及麦盖提斜坡带均有发育且沉积厚度比较稳定。石膏岩中主要盐类矿物为石膏、硬石膏。扫描电镜分析发现,石膏岩中尚含石盐、钙芒硝及含钾镁的硫酸盐等;石膏岩样品中石盐、石膏、硬石膏等多呈细晶或自形微晶,推测阿尔塔什组沉积期,古盐湖曾出现过富钾卤水。通过对皮拉里剖面石膏岩样品进行地球化学分析,揭示该地区古新世古盐湖演化过程中出现 2 个相对富钾峰值。在古盐湖演化过程中,由于多期次特提斯海水的侵入,凹陷内部阿尔塔时期发育了碎屑岩—巨厚层石膏岩—碎屑岩的沉积韵律,古盐湖卤水表现为淡—咸—淡的变化规律。伴随着阿尔塔时期 4 次大规模的海侵,石膏岩沉积从西昆仑山前扩展到麦盖提斜坡地带,海侵范围也逐渐扩大。在阿尔塔什组顶部发育中厚层灰岩,显示在阿尔塔什组沉积晚期,塔西南凹陷沉积环境从●湖相逐渐向浅海相环境演变。

关键词 地质学 古新世 石膏岩 沉积特征 环境意义 塔里木盆地西南凹陷

中图分类号: P619.261

文献标志码: A

Sedimentary characteristics of Paleocene huge marine gypsum rock in southwestern depression of Tarim Basin and its environmental significance

GAO Chao^{1,2,3}, CAO YangTong⁴, LIU ChengLin⁴, JIAO PengCheng⁴ and XU HaiMing⁴

(1 Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 China University of Geoscience, Wuhan 430074, Hubei, China; 3 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, Shandong, China; 4 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

Huge-thickness marine gypsum rock were deposited in southwestern Tarim Basin during the Aertashi Formation of the Paleocene. Which is composed of marine gypsum rock and intercalated with thin mudstone, siltstone and limestone beds, represents cycling transgression and regression in southwestern Tarim Basin from the Paratethys Ocean to the west. Through field survey, large amounts of marine gypsum rocks in the Aertashi Formation were found in Pilali, Aertashi, Mazartag, and Dashankou areas. In this depression, gypsum rock with

* 本文得到国家重点基础研究计划“973”项目(编号:2011CB403007)和“十二五”科技支撑项目(编号:2011BAB06B06)联合资助

第一作者简介 高 超,男,1984 年生,博士研究生,地球探测与信息技术专业。Email: chaochao135@126.com

** 通讯作者 曹养同,男,1975 年生,助理研究员,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: cyt1941@126.com

收稿日期 2016-09-13; 改回日期 2016-10-14。秦思婷编辑。

stable deposition thickness is widely distributed and developed in the West Kunlun and South Tianshan piedmont as well as on the Maigaiti slope. Major minerals in gypsum rock are gypsum and anhydrite. SEM analysis shows that the gypsum rock contains halite, glauberite, potassium-bearing magnesium sulfate, and clay minerals that are mainly finely crystalline or microcrystalline, indicative of the potassium-rich brine entry into the depression during the deposition of the Aertashi Formation. Geochemical analysis of gypsum rock of the Pilali section reveals that two peaks relatively rich in potassium occurred during the ancient saline lake evolution in Paleocene. Sedimentary rhythms of clastic rock-thick gypsum rock-clastic rock were developed in the depression during the Aertashi period because of multi-stage transgression by the Paratethys seawater, accompanied by variation of seawater salinity from brackish to saline and to brackish. Gypsum rock of the Aertashi Formation expanded from west Kunlun Mountains to Maigaiti slope due to four large-scale transgressions, indicating gradually widening transgression by that time. Medium-thick limestone beds developed in the upper part of the Aertashi Formation suggests that the sedimentary environment had evolved from the lagoon to the shallow sea in southwestern depression of Tarim Basin by the end of the generation of the Aertashi Formation.

Key words: geology, Paleocene, gypsum, sedimentary characteristics, environmental significance, southwestern depression of Tarim Basin

近年来的研究表明,晚白垩世—新近纪,塔里木盆地发生多次大规模的海侵-海退(Burtman, 2000; Bosboom et al., 2011, 2014; 郭宪濮等, 2002; 曹养同, 2016; 张华, 2013; 2015; 张亮等, 2015)。在海侵、海退的过程中,由于盐湖水体发生从淡—咸—盐的旋回变化,相应的沉积物发生由碎屑岩—膏岩—盐岩的旋回变化(曹养同等, 2016),从而在蒸发岩盆地中形成含盐系地层。塔西南凹陷蒸发岩沉积与特提斯多期海退-海侵有关,晚白垩世—古近纪蒸发岩主要沉积于吐依洛克组和阿爾塔什组,前者受海退环境控制,主要沉积泥岩、含膏泥岩夹石盐岩(透镜体状),后者受断续海侵环境控制,主要发育厚层石膏岩、硬石膏岩,并夹中薄层泥岩及灰岩。阿爾塔什组顶部常发育中厚层灰岩,反映古盐湖演化后期海侵范围扩大,湖水水体加深(曹养同等, 2016)。塔西南凹陷古新统阿爾塔什组石膏岩中硫同位素变化处于同期海水硫同位素变化范围内,反映石膏岩具有海相特征(张华等, 2013)。野外地质调查,发现凹陷内皮拉里剖面阿爾塔什组石膏岩厚度达到 300 m,其石膏晶体中发现石盐、天青石、含钾硫酸镁、白云石等矿物。鉴于阿爾塔什组发育巨厚石膏层及盐矿物种类较丰富,本文试图对凹陷阿爾塔什组剖面露头石膏岩层位、分布、石膏晶间盐类矿物及石膏岩沉积韵律、环境等方面进行研究,探讨阿爾塔什组巨厚海相石膏岩的沉积特征,揭示古盐湖演化历史,从而进一步探讨其环境意义。

1 地质背景

塔西南凹陷位于新疆天山南麓和昆仑山北坡之间,面积约 10 万平方公里,为塔里木盆地西南部最大的一个次级盆地。凹陷内部次级构造分异显著,类型多样,从西昆仑山前到凹陷内部依次为西昆仑山前构造带、中部凹陷带(喀什凹陷和叶城-和田凹陷)、麦盖提斜坡带及巴楚隆起带(刘生国等, 1998; 张达景等, 2007; 方爱民等, 2009)等二级构造单元(图 1)。早白垩世塔西南凹陷为一断陷盆地,东高西低,沉积相主要受西昆仑山及南天山物源影响,自西向东沉积厚度变薄,发育冲积扇、扇三角洲及滨浅湖沉积(贾进华, 2009),晚白垩世—古近纪前陆盆地发展(王永等, 1996; 马华东等, 2003; 邵龙义等, 2006)。晚白垩世初期—渐新世末期,由于多期特提斯海海水的入侵,使塔西南凹陷内发育了一套碳酸盐岩、石膏岩、石盐岩和陆源碎屑岩的沉积盖层(表 1)。古新世初期,伴随着特提斯海水侵入到塔西南凹陷,在该区域发育了封闭的●湖与海湾环境,同时受强烈的陆源碎屑物影响(马华东等, 2003),发育石膏岩和碳酸盐岩沉积。阿爾塔什组中下段厚层石膏岩发育,与上白垩统吐依洛克组呈平行不整合接触。受强烈的陆源碎屑岩控制,发育蒸发岩台地,辫状河三角洲等,为亚热带干旱气候(邵龙义等, 2006)。

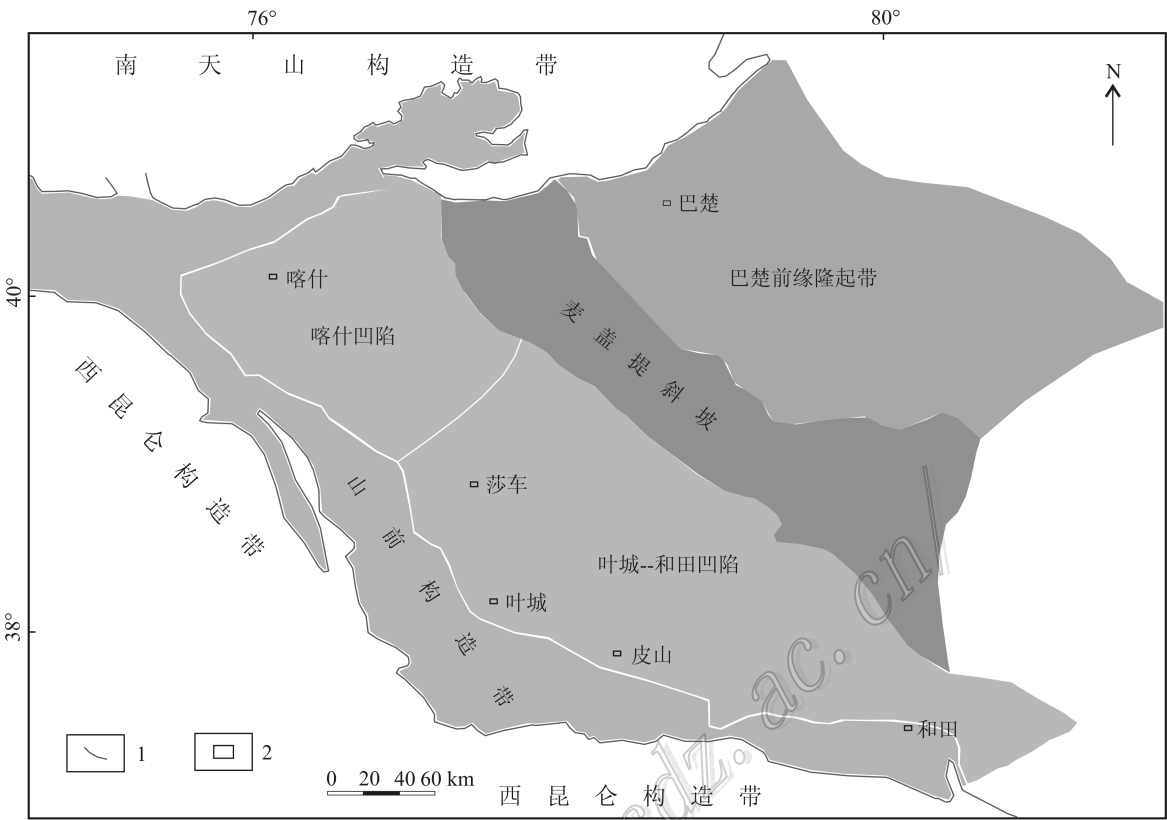


图 1 塔西南凹陷构造分区图(张达景,2007;方爱民等,2009;曹养同等,2016)
1—构造边界线; 2—城市

Fig. 1 Sketch map of tectonic division of the southwestern Tarim Basin (modified after Zhang et al. , 2007; Fang et al. , 2009; Cao et al. , 2016)
1—Tectonic boundary; 2—City

表 1 塔西南凹陷地层表(刘成林等,2015)
Table 1 Strata in southwestern Tarim depression (after Liu et al. , 2015)

地层时代				地层代号	厚度/m	与下部地层接触关系	岩性
界	系	统	群、组				
新生界	古近系	渐新统	巴什布拉克组	E _{2-3b}	87~126	整合	紫红色中-薄层中砂岩、细砂岩、粉砂质泥岩与泥质粉砂岩互层
			乌拉根组	E _{2w}	10~180	整合	灰绿色泥岩、泥质粉砂岩、生物碎屑灰岩
		始新统	卡拉塔尔组	E _{2k}	30~150	整合	灰色亮晶灰岩，生物碎屑灰岩、生物礁灰岩，生物以牡蛎为主
			齐姆根组	E _{1-2q}	20~120	整合	下部灰绿色泥岩夹薄层碳酸盐岩；上部紫红色泥岩、泥质粉砂岩
		古新统	阿尔塔什组	E _{1a}	20~310	假整合	灰白色厚层-块状石膏岩，上部厚层微晶灰岩、泥灰岩
中生界	白垩系	上统	吐依洛克组	K _{2t}	5~40	整合	紫红色薄层粉砂岩、泥岩、含膏泥岩、盐质粉砂岩、含砾盐岩，夹薄层石膏
			依格孜牙组	K _{2y}	10~160	整合	肉红色、灰红色灰岩、含固着蛤生物碎屑灰岩
			乌依塔格组	K _{2w}	20~50	整合	薄层泥岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩
			库克拜组	K _{2k}	90~180	整合	泥岩、泥质粉砂岩，砂质砾岩，上段薄层砂岩、粉砂质泥岩，夹薄层石膏
		下统	克孜勒苏群	K _{1kz}	25~67	平行不整合	紫褐色中厚层砾岩、砂砾岩、砂岩夹紫红色薄层泥岩、膏泥岩

2 石膏岩地层分布特征

塔西南凹陷古新统阿尔塔什组发育巨厚海相石膏岩沉积,是特提斯海断续海侵的产物。阿尔塔时期,海水自乌恰西部侵入,被西昆仑山隔挡,在塔西南凹陷形成潟湖、浅水蒸发岩台地相沉积,表现为巨厚层海相石膏岩的广泛分布(曹养同等,2016)。由图 2 可知,在阿尔塔时期整个凹陷内部均有石膏岩分布,石膏岩露头在西昆仑山前、南天山山前及东部麦盖提斜坡均有发育,其中,西昆仑山山前厚度最大,向南、向东石膏岩厚度和规模都逐渐变小。在西昆仑山前有 2 处石膏岩的沉积中心,厚度均达到 200 m 以上。

本次主要选取 4 条典型剖面,自北西南东依次为西昆仑山前的阿尔塔什、皮拉里剖面及麦盖提斜坡上的大山口、麻扎塔格剖面,4 条剖面石膏岩出露及岩性见图 3。阿尔塔什剖面位于阿尔塔什西,叶尔羌河北岸,剖面阿尔塔什组上部岩性主要为红色

的含膏泥岩夹灰绿色泥岩、粉砂岩,下部岩性为灰白色巨厚层团块状石膏夹泥岩,石膏层厚约 300 m(图 3a)。皮拉里剖面位于塔里木盆地西南部皮拉里乡的东北部,盖孜河西北岸,剖面阿尔塔什组上部岩性主要为灰岩及厚层石膏岩,夹灰绿色砂砾岩,下部为棕红色、深褐色砂岩、泥岩互层,石膏岩厚度近 270 m(图 3b)。麻扎塔格剖面位于塔西南凹陷麦盖提斜坡上,含巨厚石膏团块、厚层白云岩夹中-薄层灰绿色、褐红色泥岩、粉砂岩(图 3c)。大山口含膏系剖面位于奥兹格尔他乌构造带西南缘,剖面阿尔塔什组下部为紫红色泥岩、粉砂岩夹中厚层膏岩,上部为紫红色泥岩、粉砂岩(图 3d)。

3 样品及测试方法

本次分析测试的样品采自塔西南凹陷皮拉里地区蒸发岩露头剖面,该剖面位于塔里木盆地西南部皮拉里乡的东北部,盖孜河西北岸(图 2)。露头主要出露古新世早期的阿尔塔什组(E_{1a}),岩性主要为灰

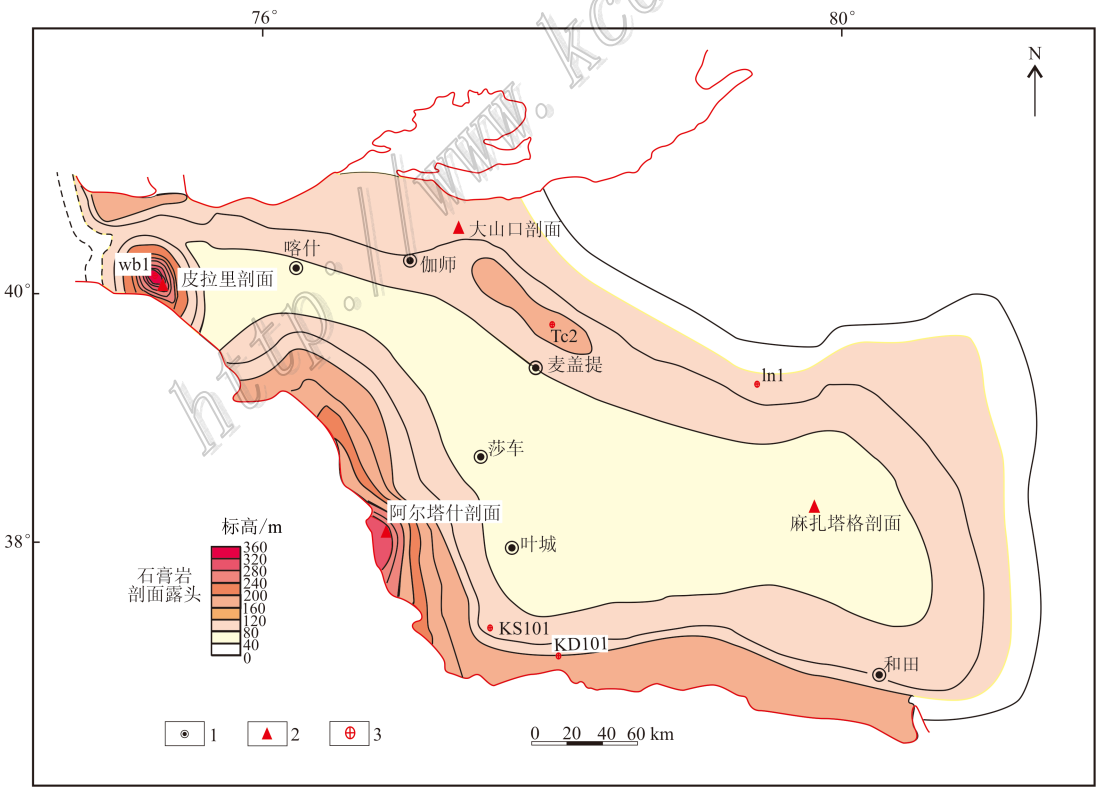


图 2 古新世阿尔塔什期石膏岩等厚度趋势分布图(据刘成林等,2015)

1—城市; 2—石膏岩露头; 3—钻孔

Fig. 2 The gypsum rocks and the thickness trend distribution in Paleocene Aertashen Group (after Liu et al., 2015)

1—City; 2—Gypsum rock outcrops; 3—Drill hole

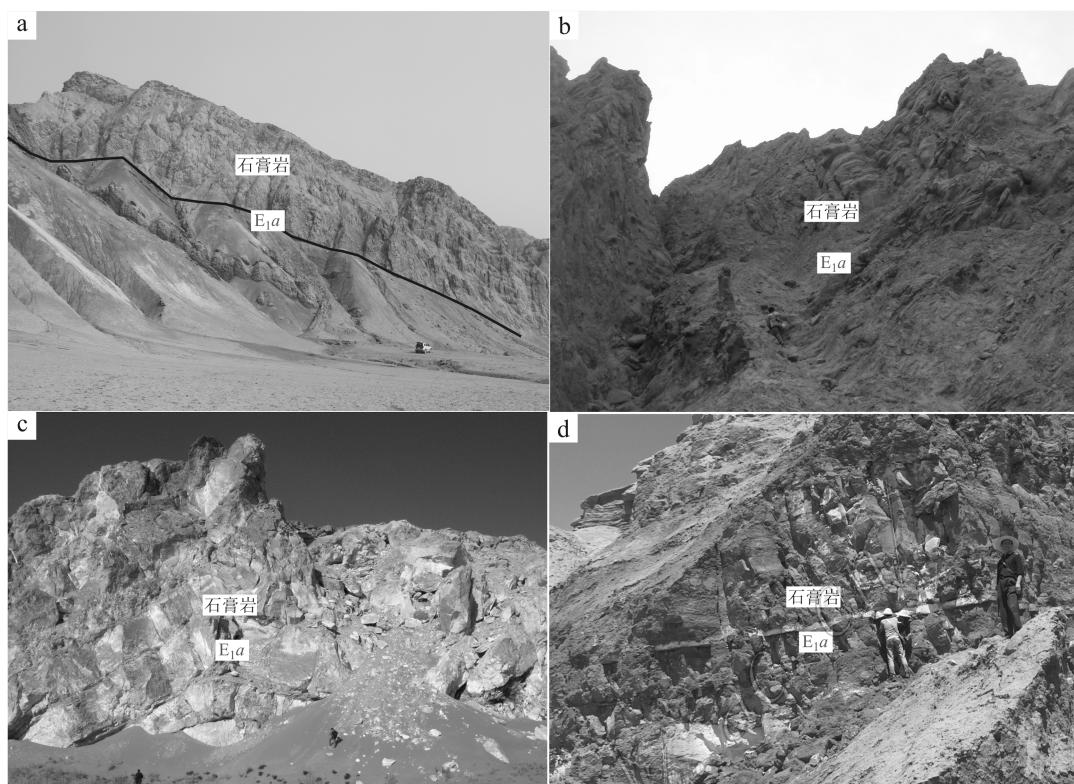


图3 塔西南凹陷石膏岩露头及岩性特征

a. 阿尔塔什剖面灰绿色泥岩与灰白色厚层石膏岩互层; b. 皮拉里剖面巨厚层石膏夹灰绿色砂砾岩; c. 麻扎塔格石膏岩露头, 石膏岩夹灰绿色、褐红色泥岩; d. 大山口剖面褐红色泥岩与厚层石膏互层

Fig. 3 Gypsum rock outcrops and lithology in southwestern depression of Tarim Basin

a. Aertashen and grayish green mudstone interbedded with gray thick layer of gypsum rock layer; b. The thick layer of plaster bandage celadon glutenite along Pilali section; c. Mazhatage gypsum rock outcrops, brownish red or grayish green mud ; d. Brownish red mudstone rock interbedded with thick layer of plaster layer along Dashankou section

白色石膏岩、硬石膏岩夹灰绿色、褐红色中-薄层泥岩及中厚层灰岩。对样品进行了薄片鉴定、扫描电镜分析、地球化学分析等。

本次薄片鉴定样品共22件,均为阿尔塔什组的石膏岩,利用LEICA2500P显微镜完成;扫描电镜样品共21件,采用的仪器是TESCAN-VEGA扫描电镜和INCA-X射线能谱分析仪,分析测试单位为中国石油勘探开发研究院;地球化学分析样品34件,主要分析 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 五项(误差小于1%),分析测试单位为中国地质科学院矿产资源研究所表生地球化学实验室。

4 石膏岩微观特征

依据野外岩性观察,利用薄片鉴定、扫描电镜分析手段,对皮拉皮剖面石膏岩样品进行分析,初步确

定剖面露头中主要的盐类矿物为石盐、石膏、硬石膏、含钾硫酸镁、天青石、钙芒硝等。其中,原生盐类矿物主要为石盐、石膏,次生盐类矿物为硬石膏、含钾硫酸镁、钙芒硝等,赋存层位为古新统阿尔塔什组(E_1a)。

4.1 分析测试结果

对剖面采集的21块岩矿样品经过扫描电镜分析,共发现5种盐类矿物,包括石盐、天青石、石膏、钙芒硝、含钾硫酸镁、白云石。扫描电镜结果显示,皮壳状石盐分布于石膏晶间(图4a),石盐能谱图见图4b;在04KS-PPLL-G87样品和04KS-PPLL-G116样品中,发现板状、片状石膏及灰白色天青石(图4c~e),天青石呈不规则状镶嵌于石膏间隙中;在04KS-PPLL-G87样品中发现花瓣状钙芒硝与溶蚀状石盐共生(图4f、g);在04KS-PPLL-G100石膏岩样品中发现溶蚀状含钾硫酸镁矿物。含钾硫酸镁矿

物电镜照片及能谱见图 4h、i。

对皮拉里剖面的 22 件样品进行薄片鉴定,样品基本上为石膏岩,可分为微晶石膏岩(图 4j)及硬石膏岩等(图 4k)。石膏岩呈灰白色,薄片下石膏多为浅黄色,呈粒状、团簇状,晶体多为 0.5~1.0 mm 的微细晶。

4.2 盐类矿物特征分析

扫描电镜结果显示(图 4),石膏岩中石盐、含钾硫酸镁等矿物可能是后期富钾卤水交代原生石膏形成,溶蚀状含钾硫酸镁与石膏之间界线不明显,呈过渡关系(图 4h)石膏晶间皮壳状石盐(图 4a)以及石盐晶体赋存于石膏晶体之间,指示了后期残余浓缩卤水在重力作用下进入膏盐裂隙中而形成了皮壳状石盐。此外,石膏晶间大量天青石的发现,说明古卤水中锶的含量较高,且与石膏同时沉积(图 4c),说明该地区曾接受富锶水体的补给。经扫描电镜及能谱仪分析,皮拉里剖面中石膏固体样品中发现钙芒硝、石盐、含钾硫酸镁等矿物,显示残余卤水浓度较高,富 K、Na、Ca 等离子,推测该地区在古新世可能已达到石盐沉积阶段,局部可能出现富钾镁盐卤水。

在剖面石膏岩晶体中发现次生花瓣状钙芒硝(图 4f),与石盐共生于石膏晶间。与石盐共生成因的钙芒硝,其形成条件相对苛刻,要求盐湖卤水 $n(\text{Ca}^{2+})/2n(\text{Na}^{+})$ 为 1:243~1:1346,即要求盐湖卤水富钠、低钙(朱井泉等,1989;杨清堂等,1989;曹养同等,2016),否则,盐湖演化过程中,随着富钙水的补充,盐湖卤水钙含量过高,易形成石膏。

薄片鉴定结果显示,石膏岩样品中石盐、石膏及硬石膏等多成细晶或自形微晶,是盐类矿物快速从卤水中结晶的结果,显示当时古湖水浓度较高。

5 地球化学特征

5.1 地球化学分析

对皮拉里剖面上采集的 34 件样品进行化学分析,其中大部分样品为石膏岩。主要分析项目分别为 K^{+} 、 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 离子共 5 项(表 2)。从表 2 可知, $w(\text{K}^{+})$ 范围为 0.022%~0.197%,平均 0.090%,相对比于库车盆地 DZK01 钻孔石盐岩芯中 $w(\text{K}^{+})$ (范围 0~0.151%,平均 0.049%)(据刘成林等,2012),塔西南凹陷蒸发岩中含有相对较高的钾含量。

地层剖面柱状图及离子浓度曲线见图 5。由图

5 可知,所测剖面岩性大部分为石膏岩,夹泥岩、粉砂岩、含膏泥岩等。由离子浓度曲线变化趋势可知,在 460 m 和 500 m 位置出现了 2 个钾含量的高峰期,相对应的是钙和硫酸根含量出现低值,且测得 2 段钾的高峰期值样品均采自石膏岩样品中。

5.2 地球化学分析

样品中各剖面离子在纵向上的变化规律(图 5)。从图 5 可以看出,皮拉里剖面在古新世阿尔塔什组沉积期,塔西南拗陷古盐湖演化至少出现 2 次古湖水浓缩趋势及可能 2 次富钾期。自剖面底部向上,2 次富钾高峰 $w(\text{K}^{+})$ 分别达到 0.210%、0.197%。其对应样品编号分别为 201004KS-PLL-G66、201004KS-PLL-G111,石膏岩样品 201004KS-PLL-G55、201004KS-PLL-G88 中发现石盐,说明古盐湖演化过程中卤水可能达到石盐沉积阶段,形成富钾镁卤水。在这 2 个钾含量相对峰值期,大量富 K、Mg 卤水沿着石膏晶间裂隙侵入石膏层交代 Ca^{+} 、 SO_4^{2-} 离子,形成含钾硫酸镁等矿物,后期古盐湖残余卤水浓缩过程中,形成富含 K、Mg 离子的溶液,使得此阶段 K、Mg 离子含量增高,K 离子含量出现相对峰值。

6 石膏岩沉积特征与环境意义

6.1 石膏岩沉积韵律

依据盐湖在演化过程中古湖水淡—咸—盐的变化关系,相应地沉积物由碎屑岩—膏岩—盐岩变化,对塔西南凹陷 4 条露头剖面,按岩性变化和单层厚度(代表一定沉积时间间隔)进行沉积韵律划分,单层厚度为 10~90 m 的地层组成的韵律定为三级韵律,向上逐级合并成二级韵律,单层(组合)厚度从 60~540 m 合并成一级韵律(沉积旋回)。通过对野外实测剖面沉积韵律划分及旋回识别,共识别出 1 期蒸发岩沉积旋回。

塔西南凹陷 4 条实测剖面,野外均未见到岩盐露头,仅见到巨厚膏岩或碎屑岩夹薄层石膏。据此对塔西南凹陷 4 条实测含膏系剖面进行韵律及沉积旋回识别,结果见表 3。

结合图 6,对比 4 条剖面古新世阿尔塔什组蒸发岩沉积韵律特征,发现巨厚膏岩夹薄层泥岩沉积基本位于 E_{1a} 层位,如阿尔塔什剖面、大山口剖面 and 麻扎塔格剖面,巨厚膏岩沉积位于 E_{1a} 的下部,即古新世阿尔塔什早期,皮拉里剖面巨厚石膏岩沉积位于

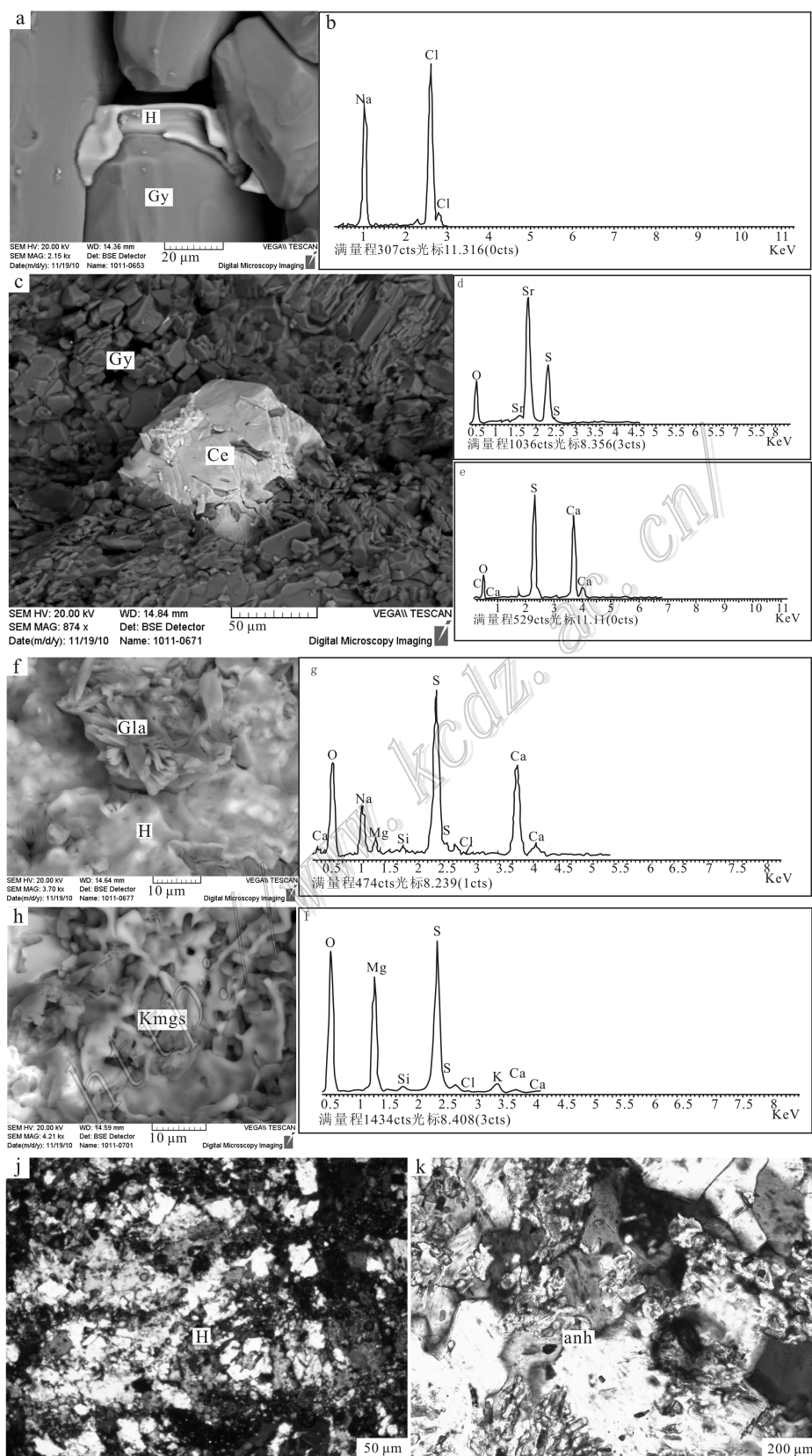


图 4 皮拉里剖面石膏岩中矿物特征

a. 石膏晶间皮壳状石盐; b. 石盐能谱图; c. 微晶石膏间晶状天青石; d. 天青石能谱图; e. 石膏能谱图; f. 花瓣状钙芒硝与溶蚀状石盐;
g. 钙芒硝能谱图; h. 溶蚀状含钾硫酸镁; i. 含钾硫酸镁能谱图; j. 微晶石膏岩; k. 石膏岩中硬石膏

Gy—石膏；Ce—天青石；Gla—钙芒硝；H—石盐；anh—硬石膏；Kmg—含钾硫酸镁

Fig. 4 The mineral characteristics of gypsum rock in pilali section

a. Crusty halite filling the gypsum ;b. Energy spectrum of halite ;c. Crystalline celestine between microcrystalline gypsum ;d. Energy spectrum of celestine ;e. Energy spectrum of gypsum ;f. Petals shaped glauberite and dissolution of rock salt ;g. Energy spectrum of glauberite ;h. Dissolution of potassium-bearing magnesium sulfate ;i. Energy spectrum of halite and potassium-bearing magnesium sulfate ;j. Microcrystalline gypsum rock ;k. Anhydrite in gypsum rock

Gy—Gypsum；Ce—Celestine；Gla—Glauberite；H—Halite；anh—Anhydrite；Kmg—Potassium magnesium sulfate

表 2 皮拉里剖面样品中化学分析结果

Table 2 Chemical analytical results in Pilali section samples

样品编号	w(B)/%				
	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻
201004KS-PLL-G41	0.012	0.022	0.055	22.720	54.490
201004KS-PLL-G43	0.044	0.142	0.866	8.216	0.380
201004KS-PLL-G44	0.016	0.032	0.067	22.490	52.620
201004KS-PLL-G49	0.024	0.058	0.176	21.944	29.300
201004KS-PLL-G50	0.020	0.035	0.112	22.051	51.420
201004KS-PLL-G53	0.037	0.142	0.557	8.728	7.350
201004KS-PLL-G54	0.363	0.100	0.304	20.811	43.840
201004KS-PLL-G55	0.366	0.104	0.155	22.265	51.360
201004KS-PLL-G57	0.012	0.049	0.190	21.321	45.550
201004KS-PLL-G60	0.013	0.111	0.309	20.802	45.050
201004KS-PLL-G66	0.063	0.210	0.886	11.047	2.580
201004KS-PLL-G69	0.027	0.113	0.532	16.255	29.250
201004KS-PLL-G73	0.024	0.059	0.130	21.984	47.360
201004KS-PLL-G74	0.022	0.128	0.278	20.903	45.270
201004KS-PLL-G77	0.036	0.105	0.307	14.742	29.080
201004KS-PLL-G81	0.016	0.025	0.056	23.633	56.850
201004KS-PLL-G88	0.354	0.029	0.106	23.154	55.150
201004KS-PLL-G89	0.076	0.065	0.387	26.223	60.310
201004KS-PLL-G93	0.019	0.144	0.781	12.943	1.920
201004KS-PLL-G94	0.010	0.023	0.060	23.258	55.530
201004KS-PLL-G96	0.018	0.098	0.555	10.824	16.240
201004KS-PLL-G97	0.033	0.037	0.144	24.148	57.290
201004KS-PLL-G98	0.023	0.055	0.224	22.957	53.280
201004KS-PLL-G100	0.194	0.056	0.304	23.304	52.400
201004KS-PLL-G105	0.025	0.133	0.745	22.894	44.340
201004KS-PLL-G106	0.749	0.042	0.098	25.494	61.350
201004KS-PLL-G109	0.015	0.061	0.197	23.239	55.150
201004KS-PLL-G110	0.232	0.186	6.180	15.664	3.680
201004KS-PLL-G111	5.297	0.197	2.791	21.599	10.320
201004KS-PLL-G114	0.048	0.152	0.919	19.489	37.200
201004KS-PLL-G116	0.071	0.028	0.100	24.770	58.060
201004KS-PLL-G118	0.030	0.109	2.077	23.860	43.630
201004KS-PLL-G119	0.016	0.116	0.626	21.805	46.700
201004KS-PLL-G121	0.040	0.081	0.473	21.044	48.340

注：分析测试单位为中国地质科学院矿产资源研究所盐矿分析实验室。

E_{1a} 的上部,即古新世阿尔塔时晚期。

对塔西南坳陷 4 条蒸发岩剖面进行沉积韵律划分,可知古新世阿尔塔时期皮拉里剖面及阿尔塔什剖面均发育 5 个明显的二级沉积韵律,即碎屑岩→含膏泥岩—碎屑岩—厚层石膏岩→灰岩(碳酸盐岩)的沉积韵律,表现为古湖水的淡—微咸—淡—咸—淡的变化规律；大山口剖面 and 麻扎塔格剖面均发育Ⅱ₂、Ⅱ₃₂个二级沉积韵律,即厚层石膏岩—碎屑岩

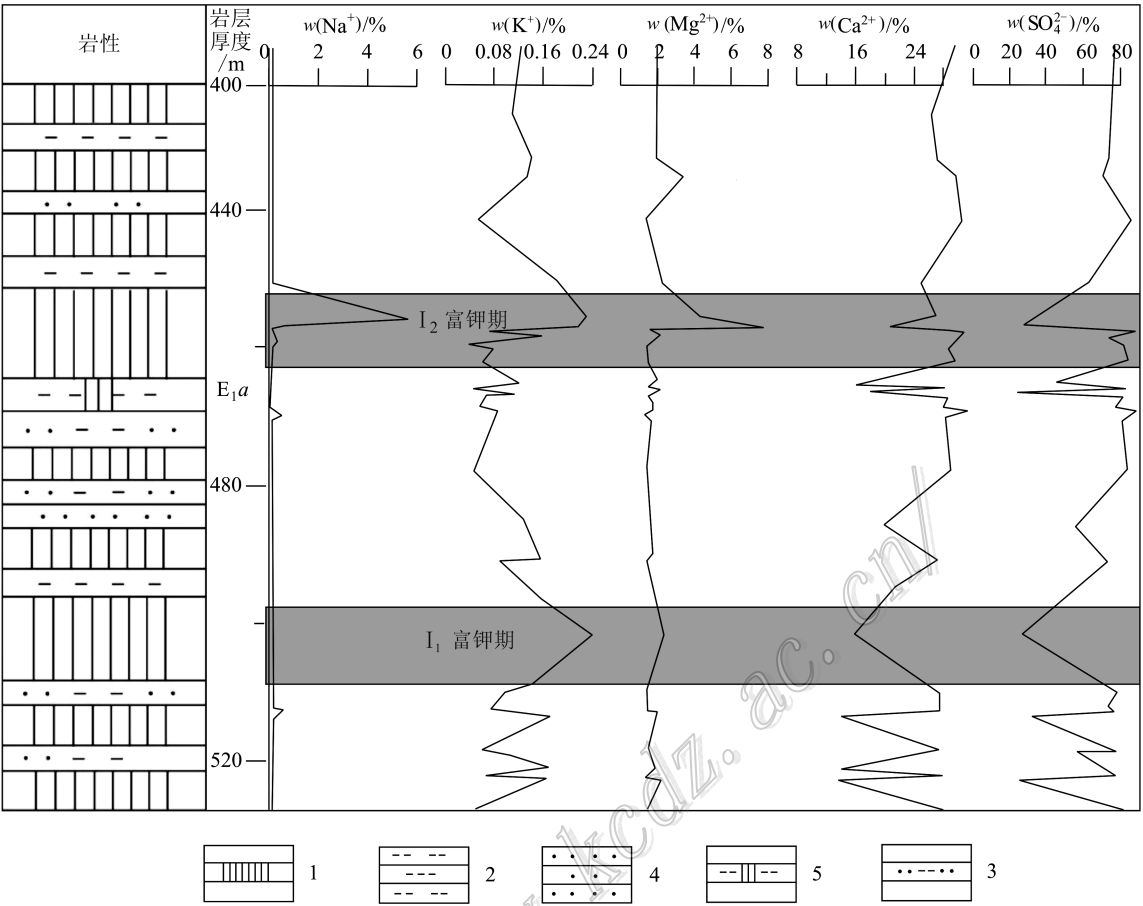


图 5 皮拉里地层剖面及离子浓度曲线对比

1—石膏岩；2—泥岩；3—粉砂岩；4—含膏泥岩；5—泥质粉砂岩

Fig. 5 The stratigraphic section and the concentration curve comparison of ions in pilali section

1—Gypsum rock; 2—Mudstone; 3—Siltstone; 4—Gypsum-bearing mudstone; 5—Argillaceous siltstone

表 3 塔西南凹陷剖面沉积韵律及旋回划分

Table 3 The Sedimentary rhythm and cycle divided of the section in southwest depression of Tarim Basin

剖面	一级韵律/个 (沉积旋回)	二级韵律/个	三级韵律/个
皮拉里剖面	1	5	6
阿尔塔什剖面	1	4	6
大山口剖面	1	2	6
麻扎塔格剖面	1	2	3

(麻扎塔格山发育白云岩)。Ⅱ₁ 沉积韵律以碎屑岩沉积为主,表现在皮拉里剖面 and 阿尔塔什剖面底部的砂砾岩、泥岩及含膏砂砾岩沉积;Ⅱ₂ 沉积韵律以厚层石膏岩及含膏碎屑岩沉积为主;Ⅱ₃ 沉积韵律仅在皮拉里和阿尔塔什剖面显示,均发育碎屑岩沉积;Ⅱ₄ 沉积韵律以皮拉皮剖面巨厚层石膏岩及阿尔塔什剖面厚层含膏碎屑岩沉积为主;Ⅱ₅ 沉积韵律在皮

拉里剖面发育厚层灰岩沉积,阿尔塔什剖面发育砂泥岩互层沉积。基本上反映了碎屑岩—膏岩—碎屑岩的沉积韵律变化特征,也反映了古盐湖在演化过程中古湖水的淡—咸—淡变化规律。4 条剖面石膏岩厚度均较大,显示在阿尔塔什期相当长的一段时间内,古湖水浓度较高,可知海侵为塔西南地区成岩提供了丰富的物质来源,推测该地区为有利成钾区。

6.2 石膏岩沉积环境意义

晚白垩世—古近纪早期的塔里木古海湾为半封闭的陆表海,水深 20~50 m,气候干燥炎热,为封闭的海湾和潟湖环境(雍天寿等,1986;曹养同,2016)。古新世早期,随着几次大规模的海侵,海水断续补给盐湖,形成厚层石膏岩夹薄层灰岩沉积。古新世晚期,伴随着特提斯海侵范围的扩大,海水水体加深,沉积物由石膏岩转变为灰岩;随着海侵范围进一步扩大,古盐湖的浓度降低,在阿尔塔什组顶部发育一

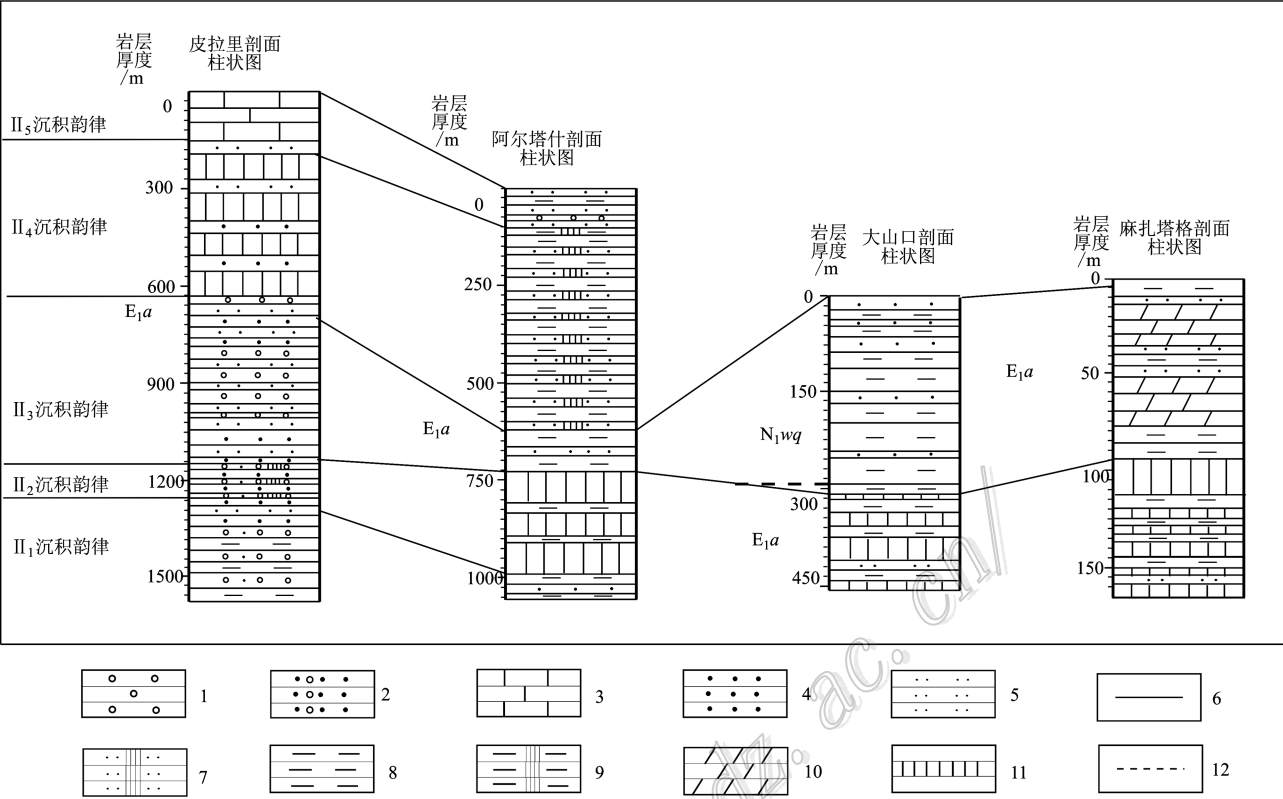


图 6 塔西南凹陷实测剖面沉积韵律对比图

1—砾岩；2—含砾砂岩；3—灰岩；4—细砂岩；5—粉砂岩；6—韵律界限；7—含膏粉砂岩；8—泥岩；9—含膏泥岩；10—白云岩；11—石膏岩；12—地层界限

Fig. 6 The measured profile sedimentary rhythm contrast figure in southwestern depression of Tarim Basin

1—Conglomeration; 2—Pebbly sandstone; 3—Limestone; 4—Fine sandstone; 5—Siltstone; 6—Prosodic boundaries; 7—Gypsum-bearing siltstone; 8—Mudstone; 9—Gypsum-bearing mudstone; 10—Dolomitite; 11—Gypsum; 12—Stratigraphic boundary

套中厚层灰岩，显示出沉积环境从潟湖相逐渐向浅海环境演变。

古近纪以来，全球发育的海相蒸发岩和现代海洋中硫同位素组成差异不大(李任伟等，1989)。对塔西南凹陷古新统阿尔塔什组大山口石膏岩 16 件样品进行硫同位素分析，并与塔西南凹陷阿尔塔什剖面及库车凹陷的几条剖面硫同位素进行对比研究(表 4)，可知大山口剖面 $\delta^{34}\text{S}$ 值的平均值为 18.9‰，处于同期海水的硫同位素范围内，且最大值与最小值差别不大。而位于该剖面东南部同期海侵所致的阿尔塔什地区的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 19.9‰，由此可见大山口地区与阿尔塔什地区的 $\delta^{34}\text{S}$ 值接近，石膏岩同样具有典型的海相沉积特征。大山口与阿尔塔什地区巨厚层石膏岩均是特提斯海侵的产物；随着海侵继续向东部继续扩张，海侵范围扩大，由于大气降水及河水的影响，导致库车凹陷内的 $\delta^{34}\text{S}$ 值继续降低，基本上介于 10‰~15‰(张华等，2013)，可见库车凹

陷石膏岩中硫同位素具有海陆交互相特征。

由图 2 可知，阿尔塔什剖面 and 皮拉里剖面分别位于西昆仑山前地带，皮拉里剖面更靠近多次的海侵通道的入口；大山口剖面位于南天山山前地带，麻扎塔格剖面位于麦盖提斜坡边缘，2 条剖面距离古海侵通道相对较远。通过 S 同位素量研究(张华等，2013)，推测古新世阿尔塔什期共有 4 期海水侵入塔里木盆地。海侵的范围和规模深刻影响着石膏岩及碎屑岩的沉积特征。第 1 次海侵发生在阿尔塔什初期，海水沿通道涌入塔西南地区，海水仅侵入到西昆仑山前的部分地区，由于地势高低起伏较大，受古湖水以及西昆仑山冲、洪积物的影响，使得皮拉里地区阿尔塔什组底部发育颗粒较大的砂砾岩沉积。随着海侵持续，海侵范围不断扩大，成盐物质不断补给沉积，皮拉里地区地势不断抬升，同时整个凹陷也不断抬升，为更大规模的海侵创造条件(王得林，1989)；第 2 期海侵，海水沿着西昆仑山前继续向东南部扩

表 4 塔里木盆地古近系硫同位素组成特征

Table 4 Sulfur isotope composition of Paleogene evaporites in Tarim Basin

地区	剖面	层位	样品数	$\delta^{34}\text{S}_{\text{DIP}}/\text{‰}$			同期海水的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{DIP}}/\text{‰}$ *
				变化范围	差值	均值	
塔西南	大山口	E _{1a}	16	17.9~20.6	2.7	18.9	17.0~22.0
	阿尔塔什**	E ₁	15	16.6~20.6	4.0	19.9	
库车**	小库孜拜	E ₁	10.9	9.1~20.0	10.9	14.6	
	包孜墩	E ₂	4	12.7~18.5	5.8	16.4	
	乔尔禾	E ₃	18	10.1~13.3	3.2	11.9	
	盐山口东	N ₁	23	6.1~12.7	6.6	9.5	

注：* 据 Kampschulte et al. , 2004 ; ** 张华,2013。

张,海侵范围到达阿尔塔什地区,由于古湖水浓度升高,在皮拉里地区沉积厚层的含碎屑膏岩及碎屑岩,受山间河水及淡水影响在阿尔塔什地区底部发育薄层泥岩、粉砂岩。阿尔塔什中期 随着第 3 次大规模海侵,海侵范围扩大,海水漫过凹陷内的隆起区,已到达麦盖提斜坡边缘,基本覆盖整个塔西南坳陷,在皮拉里及阿尔塔什地区沉积巨厚层的石膏岩,且在凹陷东端麦盖提斜坡边缘的麻扎塔格山及北部的大山口地区沉积厚层石膏岩,此外,东高西低的地势条件及海水动力条件的因素,形成沉积环境各不相同,西昆仑山前水体较深,因此石膏岩沉积厚度较大,麦盖提斜坡附近水体较浅,石膏岩沉积厚度较小,阿尔塔什晚期,第 4 次海侵范围进一步扩大,沿着巴楚隆起北缘低洼处侵入库车凹陷西部,加上河水与大气降水影响,在阿尔塔什组顶部发育碎屑岩沉积,也显示了古新世整个阿尔塔时期古湖水的淡—咸—淡的变化特征。

7 结 论

- (1) 自古新世以来,塔西南凹陷至少发生 4 次大规模的海侵,在第 3 次海侵期阿尔塔什组沉积了巨厚层的海相石膏岩,石膏岩在西昆仑山前厚度较大,显示该地区古湖水水体较深,可能为古盐湖的浓缩中心。
- (2) 石膏岩夹泥岩、灰岩沉积,反映了古盐湖演化后期海侵范围逐渐扩大,海侵间隔缩短,海水不断加深,在阿尔塔什组顶部发育中厚层灰岩,显示出塔西南凹陷沉积环境从 湖相逐渐向浅海环境演变。
- (3) 石膏岩地球化学分析结果显示,出现了 2 次钾含量相对峰值,推测古新世阿尔塔什期皮拉里地区达到古盐湖演化阶段,存在 2 期富钾卤水 石膏晶

间含钾矿物以及皮壳状石盐的发现,表明在海侵过程中发生过间歇性海退事件,在短时间高强度蒸发浓缩条件下,皮拉里地区可能达到钾镁盐析出阶段,为古盐湖的一个沉积中心。

志 谢 中航工业资源公司赵宪福参加了野外剖面测量工作,宣之强高工在薄片鉴定方面给予指导,在此一并表示感谢!

References

Bosboom R E, Dupont-Nivet G, Houben A J P, Brinkhuis H, Villa G, Mandic O, Stoica M, Achariasse W J, Guo Z and Li C. 2011. Late Eocene sea retreat from the Tarim Basin (West China) and concomitant Asian paleoenvironmental change [J]. *Palaeogeogr, Palaeoclimatol, Palaeoecol*, 299 : 385-398.

Bosboom R, Dupont-Nivet G, Grothe A, Brinkhuis H, Villa G, Mandic O, Stoica M, Huang W, Yang W, Guo Z and Krijgsman W. 2014. Linking Tarim Basin sea retreat (West China) and Asian aridification in the Late Eocene [J]. *Basin Research*, 26 : 621-640.

Burtman V S. 2000. Cenozoic crustal shortening between the Pamir and Tien Shan and a reconstruction of the Pamir-Tien Shan transition-zone for the retaceous and Palaeogene [J]. *Tectonophysics*, 319 : 69-92.

Cao Y T, Liu C L, Jiao P C, Zhang H, Wu K, Sun H W, Lü F L and Su Y. 2016. Evaporites deposits and prospect of potassium enrichment from Upper Cretaceous to Paleogene in Yarkand Basin, Xinjiang [J]. *Mineral Deposits*, 35 (2) : 300-314 (in Chinese with English abstract).

Fang A M, Ma J Y, Wang S G, Zhao Y and Hu J M. 2009. Sedimentary tectonic evolution of the southwestern of Tarim Basin and west Kunlun orogen since Late Paleozoic [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25

(12):3396-3406 (in Chinese with English abstract).

Gou X P, Ding X Z, He X X, Li H M, Su X and Peng Y. 2002. New progress in the study of marinetransgression events and marinestrata of the Meso-Cenozoic in the Tarim Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 26(3):300-307 (in Chinese with English abstract).

Jia J H. 2009. Sedimentary characteristics and palaeogeography of the early Cretaceous in Tarim Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 11(2):167-176 (in Chinese with English abstract).

Kampschulte A and 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.

Li R W and Xin M A. 1989. Origin of evaporates of Dongpu Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 7(4):141-147 (in Chinese with English abstract).

Liu C L, Jiao P C and Xu H M. 2012. The final report on potassium deposits exploration in the western of Kuqa Basin [R]. 1-228 (in Chinese with English abstract).

Liu C L, Cao Y T, Bo Y, Han E B, Wu K and Gao C. 2015. The final report on Sedimentary evolution and controlling factors of Mesozoic and Cenozoic sedimentary rocks in The Kashgar and its surrounding areas [R]. 1-144 (in Chinese with English abstract).

Liu S G, Xiao A C and Hu W S. 1998. Structural types and analysis of the southwest depression in Tarim Basin [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field Fault*, 6(2):1-4 (in Chinese with English abstract).

Ma H D and Yang Z J. 2003. Evolution of the Cenozoic in southwestern Tarim Basin [J]. *Xinjiang Geological*, 21(1):92-95 (in Chinese with English abstract).

Shao L Y, He Z P, Gu J Y, Luo W L, Jia J H, Liu Y F, Zhang L J and Zhang P F. 2006. Lithofacies palaeogeography of the paleogene in Tarim Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 8(3):353-364 (in Chinese with English abstract).

Wang D L. 1989. The feature of transgression and genetic model of the gypsum of palaeocene in Tarim Basin of Xinjiang [J]. *Xinjiang Geological*, 7(4):52-59.

Wang Y and Fu D R. 1996. The sedimentary-tectonic evolution of the southwest Tarim Basin from Cretaceous to Paleogene [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 17(1):32-40 (in Chinese with English abstract).

Yang Q T. 1989. The origin and sedimentary environment analysis of glauberite [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 7(3):137-141 (in Chinese with English abstract).

Yong T S and Shan J B. 1986. The development and formation in the Tarim Basin in Cretaceous-Paleogene ages [J]. *Acta Sedimentologica*

Sinica, 4(3):67-75 (in Chinese with English abstract).

Zhang D J, Hu J M, Meng Y F, Zheng M L and Fu M L. 2007. Characteristics of Qimugen thrust nappe structure in the southwestern Tarim Basin Xinjiang, China, and its relationship with hydrocarbon [J]. *Geological Bulletin of China*, 26(3):266-274 (in Chinese with English abstract).

Zhang H, Liu C L, Cao Y T, Sun H W and Wang L C. 2013. A tentative discussion on the time and the way of marine regression from Tarim Bay during the Cenozoic [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 34(5):577-584 (in Chinese with English abstract).

Zhang H, Liu C L, Jiao P C, Cao Y T and Han E B. 2015. Sedimentary condition and genetic mode of paleocene evaporites in the southwestern depression of the Tarim Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(11):2008-2035 (in Chinese with English abstract).

Zhang L, Han E B, Zhu L C, Zeng C M, Fan Q H, Wu K, Cao Y T and Jiao P C. 2015. Characteristics of evaporites sedimentary cycles and its controlling factors of Paleocene Aertashi Formation in the southwestern Tarim Depression [J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(11):2161-2170 (in Chinese with English abstract).

Zhu J Q and Hu W X. 1989. Types and geneses of glauberite in the Anning Basin, Yunnan Province [J]. *Journal of Hebei College of Geology*, 12(1):34-42 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

曹养同, 刘成林, 焦鹏程, 张华, 吴坤, 孙宏伟, 吕凤琳, 苏野. 2016. 新疆莎车盆地上白垩统一古近系蒸发岩沉积及成钾前景 [J]. *矿床地质*, 35(2):300-314.

方爱民, 马建英, 王世刚, 赵越, 胡健民. 2009. 西昆仑-塔西南坳陷晚古生代以来的沉积构造演化 [J]. *岩石学报*, 25(12):3396-3406.

郭宪濮, 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*, 26(3):300-307.

贾进华. 2009. 塔里木盆地早白垩世沉积相特征与古地理 [J]. *古地理学报*, 11(2):167-176.

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.

刘成林, 焦鹏程, 徐海明. 2012. 新疆库车盆地西部钾盐普查总结报告 [R]. 1-228.

刘成林, 曹养同, 伯英, 韩二斌, 吴坤, 高超. 2015. 喀什凹陷及周缘中新生代蒸发岩沉积演化及控制因素报告 [R]. 1-144.

刘生国, 肖安成, 胡望水. 1998. 塔里木盆地西南凹陷构造类型与分

- 析[J]. 断块油气田,6(2):1-4.
- 马华东,杨子江. 2003. 塔里木盆地西南新生代盆地演化特征[J]. 新疆地质,21(1):92-95.
- 邵龙义,何志平,顾家裕,罗文林,贾进华,刘永福,张丽娟,张鹏飞. 2006. 塔里木盆地古近纪岩相古地理[J]. 古地理学报 8(3):353-364.
- 王得林. 1989. 塔里木盆地古新世海进特征及石膏成因模式[J]. 新疆地质,7(4):52-59.
- 王永,傅德荣. 1996. 塔里木盆地西南部白垩纪—早第三纪沉积构造演化[J]. 地球学报,17(1):32-40.
- 杨清堂. 1989. 钙芒硝的成因和沉积环境简析[J]. 沉积学报,7(3):137-141.
- 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.
- 张达景,胡建民,蒙义峰,郑孟林,付茂兰. 2007. 塔里木盆地西南部齐姆根逆冲推覆构造的特征及其与油气关系[J]. 地质通报,26(3):266-274.
- 张华,刘成林,曹养同,孙宏伟,王立成. 2013. 塔里木古海湾新生代海退时限及方式的初步探讨[J]. 地球学报,34(5):577-584.
- 张华,刘成林,焦鹏程,曹养同,韩二斌. 2015. 塔西南凹陷古新统蒸发岩沉积条件及成因模式初探[J]. 地质学报,89(11):2028-2035.
- 张亮,韩二斌,朱礼春,曾昌民,范秋海,吴坤,曹养同,焦鹏程. 2015. 塔西南凹陷古新统阿尔塔什组蒸发岩沉积旋回特征及控制因素分析探讨[J]. 地质学报,89(11):2161-2170.
- 朱井泉,胡文. 1989. 云南安宁盆地钙芒硝的类型与成因[J]. 河北地质学院学报,12(1):34-42.