

塔里木盆地南华纪—震旦纪构造—沉积格局

石开波^{1,2}, 刘波², 姜伟民^{1,2}, 罗清清^{1,2}, 高孝巧³[1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 北京大学石油与天然气研究中心, 北京 100871;
3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083]

摘要:塔里木盆地南华纪—震旦纪构造—沉积格局的深入研究是认识该期盆地构造属性、大陆裂谷形成演化及沉积充填过程的关键。通过对塔里木盆地周缘南华系—震旦系露头、盆地内部钻井及地震资料综合分析,结合前人发表的相关研究成果,对塔里木盆地南华纪—震旦纪构造—沉积格局进行探讨。研究表明,塔里木盆地经历了前南华纪南、北地块的拼合,形成统一的塔里木板块。南华纪—震旦纪,伴随着 Rodinia 超大陆的解体,塔里木盆地处于拉张构造背景,为大陆裂谷发育时期,并经历了3个演化阶段:①南华纪早期裂陷发育阶段(760~700 Ma),在盆地西部形成阿瓦提裂陷,东部形成满加尔南、北两支裂陷,南部在麦盖提地区形成 NW-SE 向裂陷;②南华纪晚期—震旦纪早期“裂—拗”体系的转变阶段(660~600 Ma);③震旦纪晚期拗陷演化阶段(580~540 Ma)。盆地构造格局控制了古地理特征及沉积组合,南华纪以裂陷沉积为主,在强烈拉张作用下形成了碎屑岩—火山岩沉积组合。震旦纪以拗陷沉积为主,塔里木盆地具有“南隆北拗”的古地理特征,发育碎屑岩沉积、碎屑岩—碳酸盐岩混合沉积和碳酸盐岩沉积3种类型沉积组合。

关键词:沉积组合;构造—沉积格局;大陆裂谷;南华纪;震旦纪;塔里木盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Nanhua-Sinian tectono-sedimentary framework of Tarim Basin, NW China

Shi Kaibo^{1,2}, Liu Bo², Jiang Weimin^{1,2}, Luo Qingqing^{1,2}, Gao Xiaoqiao³

[1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Institute of Oil & Gas, Peking University, Beijing 100871, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: The systematic study on the Nanhua-Sinian tectono-sedimentary framework in Tarim Basin is the key to understanding its tectonic attributes, formation and evolution of continental rifts, and sedimentary filling processes. Based on the comprehensive analysis of outcrops in the periphery of Tarim Basin, drilling and seismic data, and previous studies relevant, we discussed the Nanhua-Sinian tectono-sedimentary framework of Tarim Basin. Research shows that there were two individual massifs of the north and south of Tarim in the Pre-Nanhua. The convergence of the north and south massifs led to the final formation of the unified Tarim plate during the Late Pre-Nanhua. During the Nanhua to Sinian, the Tarim Basin was in an extensional tectonic setting as a result of breakup of the Rodinia supercontinent, and underwent the formation and evolution of continental rifts. The evolution of the basin may be divided into three stages: (1) the rifting stage during the Early Nanhua (760–700 Ma), (2) the rifting to depression transitional stage during the Late Nanhua–Early Sinian (660–600 Ma), and (3) the post-rift depression evolution stage during the Late Sinian (580–540 Ma). During the rifting stage, the Awati rift in the west, north and south Manjiaer rifts in the east and the NW- and SE-trending rifts in Maigaiti area in the south of the Tarim Basin formed. The tectonic framework of the basin controlled the paleogeographic characteristics and sedimentary assemblages. In the Nanhua, rifting predominated, resulting in clastic-volcanic rock assemblage under intensive extension. In the Sinian, depression predominated in Tarim Basin which showed the paleogeographic characteristics of uplift in the south and depression in the north, resulting in three types of sedimentary assemblages, i. e. clastic rock, mixed clastic-carbonate, and carbonate assemblages.

Key words: sedimentary assemblage, tectono-sedimentary framework, continental rift, Nanhua, Sinian, Tarim Basin

收稿日期:2018-05-16;修订日期:2018-07-07。

第一作者简介:石开波(1988—),男,博士后,盆地构造—沉积演化、碳酸盐岩沉积—成岩作用。E-mail:shikaibo@pku.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41572117);国家科技重大专项(2017ZX05005003)。

塔里木盆地是一个发育在塔里木板块内的大型叠合盆地^[1],面积 $56 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。现今盆地及周缘保存了相对完整的新元古代地质记录,涉及 Rodinia 超大陆的聚合—裂解过程、多期冰川事件、多期次火山活动等^[2-14]。新元古代,塔里木盆地在 Rodinia 超大陆中位于澳大利亚板块北缘^[15-19],伴随着 Rodinia 超大陆的解体,南华纪初期,塔里木盆地整体处于拉张构造背景,在盆地内部及周缘发育了一系列的裂谷或裂陷^[20-26]。针对南华纪—震旦纪盆地构造背景和盆地类型,前人研究认为,塔里木盆地整体处于伸展构造背景,南华纪为裂陷发育期,震旦纪演化为克拉通内拗陷盆地^[1,21-22,27-31]。对于南华纪—震旦纪盆地构造—沉积格局,裂陷的具体发育位置、发育模式以及沉积充填序列等方面缺乏系统的研究。近年来,随着钻井资料以及高品质地震资料的不断完善,有条件对南华纪—震旦纪盆地构造—沉积格局开展进一步地系统研究,将对认识塔里木盆地早期构造—沉积演化具有重要的科学意义,同时对塔里木盆地新元古界—下古生界油气勘探提供基础地质支撑。

1 区域地质背景

塔里木板块是一个具有古老大陆地壳基底的、自新元古代 Rodinia 超大陆裂解出来的、古生代独立的古陆块。塔里木盆地是塔里木板块的核心稳定区部分,

现今塔里木盆地夹持于天山、西昆仑山和阿尔金山 3 大褶皱造山带之间,整体呈菱形,东西向展布。盆地周缘发育 4 个隆起带,包括塔西北部柯坪断隆、塔西南部铁克里克隆起带、塔东北部库鲁克塔格隆起带和塔东南部阿尔金隆起带。根据前人对盆地构造分区的研究,将塔里木盆地自北向南划分为库车拗陷、塔北隆起、北部拗陷、中央隆起、西南拗陷、塔南隆起和东南拗陷等 7 个一级构造单元^[28],整体具有隆—拗相间的特征(图 1)。现今南华系、震旦系露头主要分布于塔西北阿克苏—乌什地区,塔西南铁克里克及新藏公路一带及塔东北库鲁克塔格南、北两侧,在塔东南阿尔金地区缺失,未见到南华系—震旦系出露。盆地内部目前有部分钻遇南华系—震旦系钻井,如塔北地区星火 1 井、温参 1 井、尉犁 1 井,塔东地区东探 1 井、塔东 1 井、塔东 2 井、尉犁 1 井等,另有多口钻遇前寒武系基底/火山岩的钻井(图 1)。

2 南华系—震旦系分布

2.1 南华系—震旦系划分

根据中国地层委员会 2014 年划分方案,将南华系底界年龄界定为 780 Ma,顶界年龄界定为 635 Ma,相当于国际地层表中成冰系(Cryogenian)中—上部。南华系三分:下、中南华统界线年龄为 725 Ma,中、上南华统界线年龄为 660 Ma。震旦系底界年龄 635 Ma,

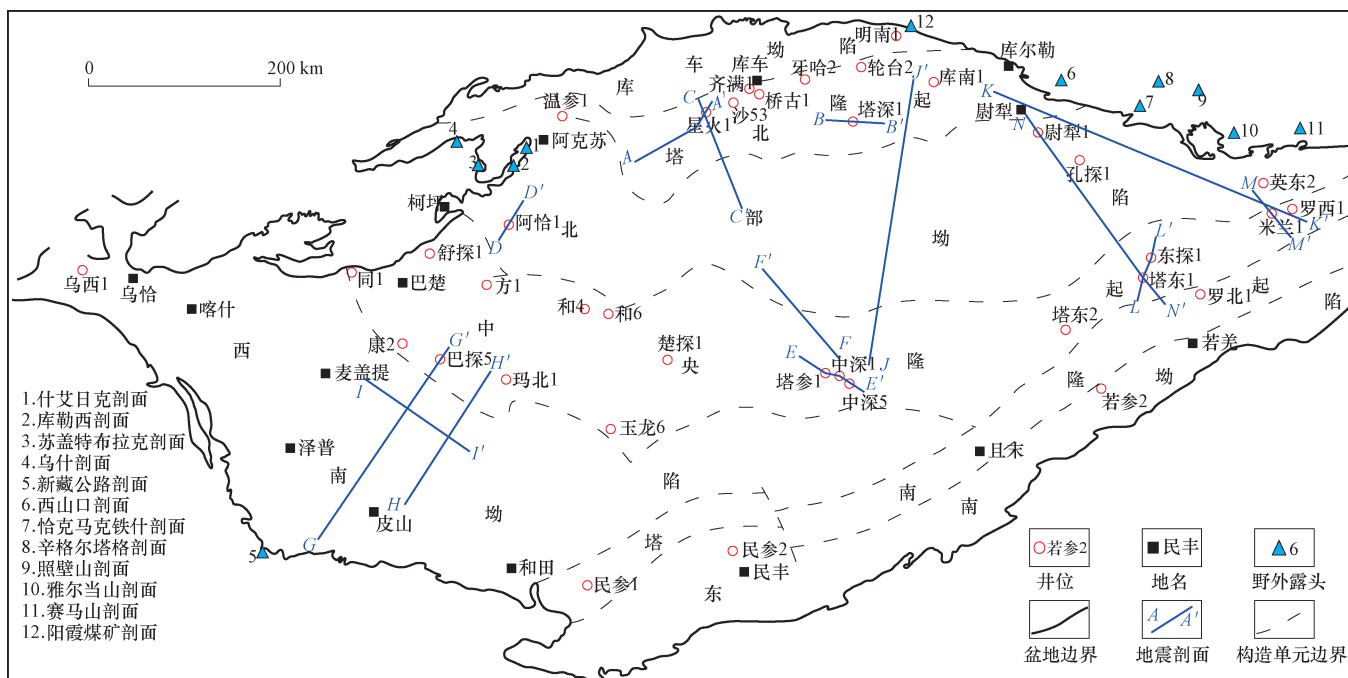


图 1 塔里木盆地构造区划及主要钻井井位

Fig. 1 Tectonic division and key well locations in Tarim Basin

顶界年龄 541 Ma, 与国际地层表中埃迪卡拉系 (Ediacaran) 相当。震旦系两分: 上、下震旦统界线年龄为 580 Ma。

南华系-震旦系在盆地不同分区地层划分方案不同, 前人对盆地周缘南华系-震旦系划分做过大量的工作, 但由于南华系-震旦系时代较老, 古生物资料有限, 部分地层时代无法准确限定^[27,32]。近年来针对塔里木周缘南华系-震旦系中大量的火山岩及碎屑岩年代学研究^[2-4,6,9-13,33-40]、C 同位素地层划分对比、元素地球化学以及冰川等区域事件性沉积研究^[41-45], 对准确划分塔里木盆地南华系-震旦系起了很好的限定。结合上述研究成果, 以前人对于塔里木盆地南华系-震旦系划分为基础, 根据作者对塔里木盆地周缘南华系-震旦系划分对比研究, 建立了塔里木盆地南华系-震旦系划分对比方案(表1)。

2.2 盆地周缘南华系-震旦系

2.2.1 南华系

塔里木盆地东北地区南华系主要分布于库鲁克塔格地区, 以火山岩、冰川沉积和陆源碎屑沉积为主, 不整合覆盖于下伏地层之上。贝义西组为第一期冰川沉积, 与扬子地区长安冰期相当; 照壁山组为间冰期沉积; 阿勒通沟组下部为第二期冰川沉积, 上部为间冰期沉积, 与扬子地区古城冰期一大塘坡间冰期对应; 特瑞艾肯组为第三期冰川沉积, 与扬子地区南沱冰期对应。从分布上看, 该区南华系地层具有北厚南薄的特征, 在

南区火山作用强烈, 为火山活动中心, 北区火山作用较弱, 为裂陷沉积中心。从沉积特征上看, 南区发育三角洲-陆棚沉积体系, 北区为滨岸-陆棚沉积体系^[26,46](图2)。

塔里木盆地西北地区南华系主要分布在阿克苏-乌什以南地区, 南华系未见底, 与下伏地层之间关系不清。巧恩布拉克组可划分为上段、中段和下段: 下段与塔里木盆地东北缘贝义西组及照壁山组对应, 为滨岸-陆棚环境沉积; 巧恩布拉克组中-上段与阿勒通沟组对应, 巧恩布拉克组中段为深水浊积岩夹冰川沉积, 巧恩布拉克组上段整体为滨岸环境沉积; 尤尔美那克组与特瑞艾肯组对应, 与下伏巧恩布拉克组之间为角度不整合接触, 整体为一套紫红色、灰绿色冰碛岩, 为大陆冰川堆积(图2)。

塔里木盆地西南地区南华系主要分布于叶城以南的新藏公路一带。牙拉古孜组相当于塔里木盆地东北缘贝义西组、照壁山组, 上部岩性以灰绿、紫灰色纹层状硅质岩、硅质泥岩为主, 底部硅质泥岩与岩屑长石砂岩、粉砂岩互层, 发育极细密的水平纹层, 表明形成于深水陆棚环境; 波龙组相当于塔里木盆地东北缘阿勒通沟组下段, 为冰川混杂堆积夹纹层状硅质泥岩, 硅质泥岩中发育极细密的水平纹理, 为冰海相夹陆棚相沉积; 克里西组与塔里木盆地东北缘阿勒通沟组上段相当, 为冰川消融后的间冰期陆棚-滨岸环境沉积。雨塘组与塔里木盆地东北缘特瑞艾肯组相当, 下部为灰绿色状纹层硅质泥岩、粉砂质泥岩, 之上为紫褐色块状

表1 塔里木盆地南华系-震旦系划分对比

Table 1 Stratigraphic classification and correlation of the Nanhua-Sinian in Tarim Basin

年代地层单元				年代界限 (Ma)	塔西北地区	塔东北地区	塔西南地区	扬子地区	事件地层		
上覆地层					寒武系 玉尔吐斯组	寒武系 西山布拉克组	泥盆系 奇自拉夫组	寒武系 筇竹寺组			
新元古界	埃迪卡拉系	震旦系	上统	541	奇格布拉克组		汉格尔乔克组 ▲	克孜苏胡木组	灯影组	←冰期沉积	
				水泉组							
		下统	580	苏盖特布拉克组	上段	育青沟组	库爾卡克组	上段	陡山沱组		
			下段		扎摩克提组	下段					
	成冰系	南华系	上统	635	尤尔美那克组 ▲		特瑞艾肯组 ▲		雨塘组 ▲	南沱组 ▲	←冰期沉积
			中统	660	巧恩布拉克组	上段	阿勒通沟组 ▲	恰克马克力克群	克里西组	大塘坡组	
				中段 ▲		波龙组 ▲			古城组 ▲	←冰期沉积	
				下统		725	下段	照壁山组	牙拉古孜组	富禄组	
					贝义西组 ▲		长安组 ▲	←冰期沉积			
	下伏地层				780	青白口系 阿克苏群?	青白口系 帕尔岗塔格群	青白口系 苏库罗克群	青白口系 板溪群		

注: ▲冰碛岩发育层位 ~~~~ 角度不整合 - - - - 平行不整合

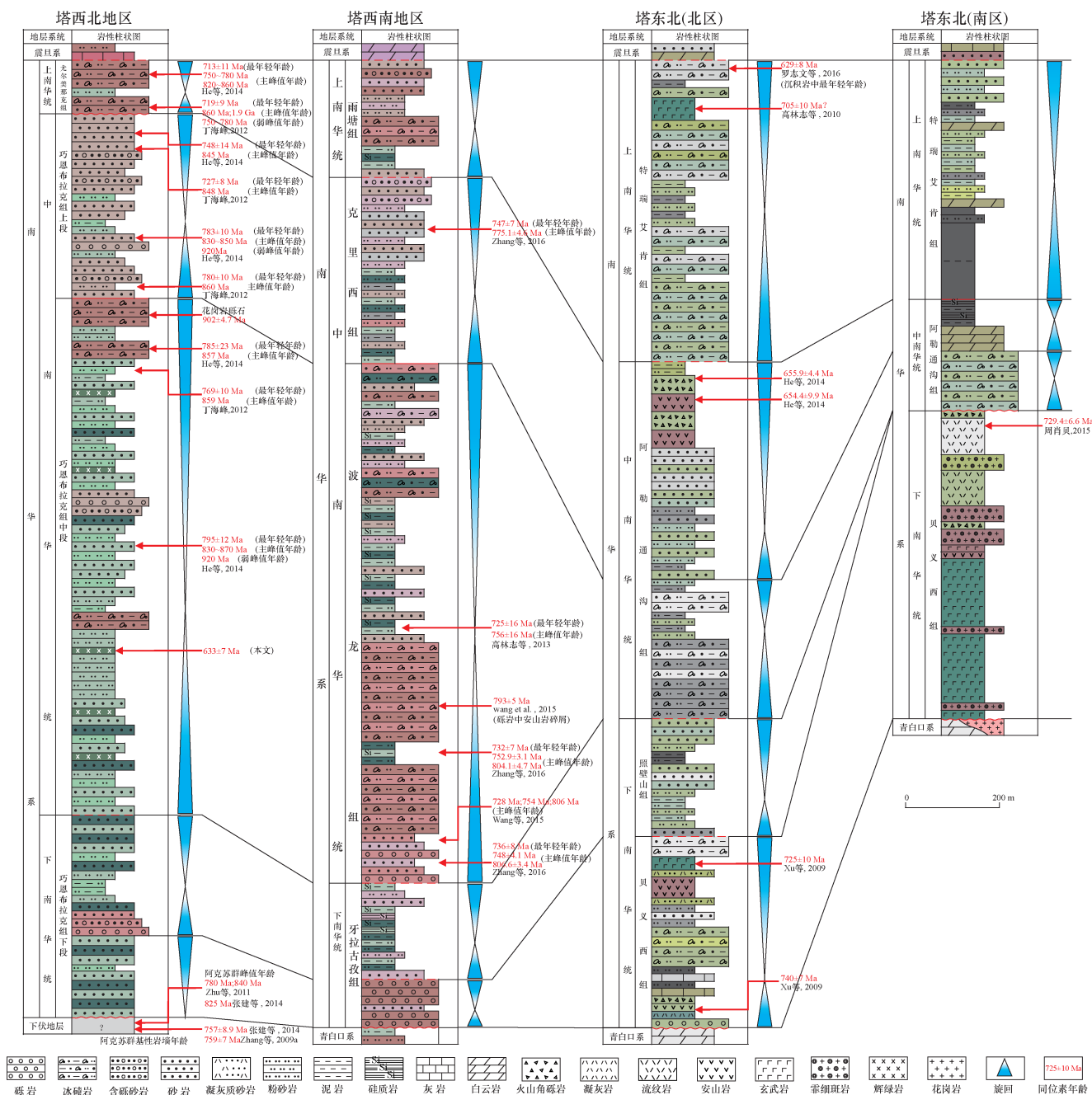


图2 塔里木盆地边缘露头南华系对比

Fig. 2 Stratigraphic correlation of the Nanhua in outcrops in the periphery of Tarim Basin

冰川混杂堆积,表明为一次冰川作用沉积;上部暗紫色、紫灰色长石石英砂岩、石英砂岩夹含砾砂岩,发育平行层理及交错层理,为冰川消融后的滨岸环境沉积(图2)。

2.2.2 震旦系

塔里木盆地西北缘震旦系在阿克苏西南地区及尤尔美那克—苏盖特布拉克一带均有出露,震旦系与下伏阿克苏群/南华系尤尔美那克组为角度不整合接触,其上被下寒武统玉尔吐斯组不整合覆盖(图3,图4a),

自上而下划分为奇格布拉克组和苏盖特布拉克组。苏盖特布拉克组下段整体为一套紫红色砂岩沉积(图4a),苏盖特布拉克组上段与下段之间为平行不整合接触(图4a,b),发育一套碎屑岩—碳酸盐岩混合沉积体系。奇格布拉克组与苏盖特布拉克组之间为平行不整合接触(图4a,c),底部发育碎屑岩—碳酸盐岩混合沉积,之上发育碳酸盐岩沉积体系,顶部发育厚约38 m的风化壳(图4d)。

塔里木盆地东北地区震旦系自上而下划分为上震旦统育汉格尔夫乔克组、水泉组,下震旦统育肯沟组、扎

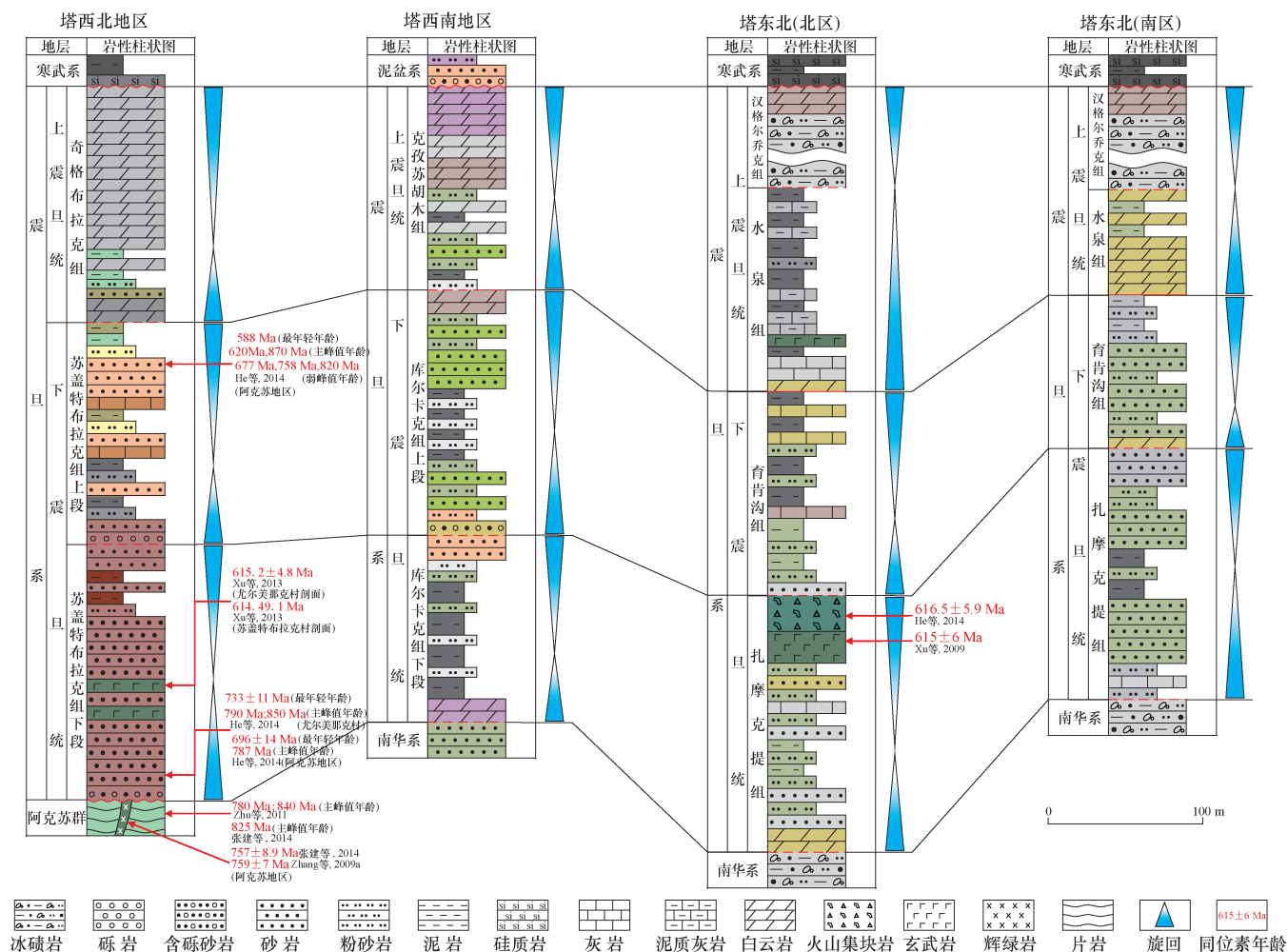


图3 塔里木盆地周围露头震旦系对比

Fig. 3 Stratigraphic correlation of the Sinian in outcrops in the periphery of Tarim Basin

摩克提组。震旦系与下伏南华系之间为平行不整合(图4e),下震旦统北区主体为陆棚相细碎屑岩沉积,南区继承了南华纪三角洲沉积体系(图3)。上震旦统南、北两区沉积差异逐渐减弱,碳酸盐岩含量逐渐增多,北区发育碳酸盐岩与细碎屑岩交互沉积,以陆棚相为主,南区以潮坪相白云岩及泥岩为主(图4f, g),震旦纪末期南、北两区均发育大陆冰川沉积(图3)。

塔里木盆地西南地区震旦系与下伏南华系之间为平行不整合接触,其上被泥盆系/石炭系不整合覆盖。自上而下划分为上震旦统克孜苏胡木组、下震旦统库尔卡克组。库尔卡克组下段以黑色、灰黑色泥岩为主,夹少量粉砂岩,上段为一套紫红色砂岩、粉砂岩,顶部发育灰色条带状白云岩,整体为陆棚-滨岸的沉积环境(图3)。上震旦统克孜苏胡木组与下震旦统库尔卡克组之间平行不整合接触,下部以白云岩和泥质粉砂岩不等厚互层为特征,上部以灰、紫红色玫瑰色白云岩为主,为潮坪环境沉积(图3)。

2.3 盆地内部南华系-震旦系

2.3.1 塔北地区

塔北地区目前未有钻遇南华系的在钻井,温参1井、星火1井和桥古1井等钻遇震旦系,其钻遇的震旦系具有相似的特征。苏盖特布拉克组(厚72~85 m)主要为一套碎屑岩-碳酸盐岩混合沉积体系;奇格布拉克组(厚160~184 m),岩性主要为泥晶白云岩、泥质白云岩,与上覆地层之间为不整合接触。星火1井震旦系下伏为千枚岩及花岗片麻岩,花岗片麻岩年龄为832 Ma^[47],温参1井震旦系之下为绿泥片岩、石英片岩等变质岩,碎屑锆石年龄主要分布于800 Ma左右及1900~1800 Ma^[37,47]。在塔北阳霞煤矿出露前寒武系石英片岩,其碎屑锆石年龄主要在800 Ma左右^[48]。另外在塔北地区多口钻井均钻遇到该套变质基底,从岩性组合及碎屑锆石年龄分布上与阿克苏群可对比。塔北地区亦有多口井钻遇前寒武系基底花岗

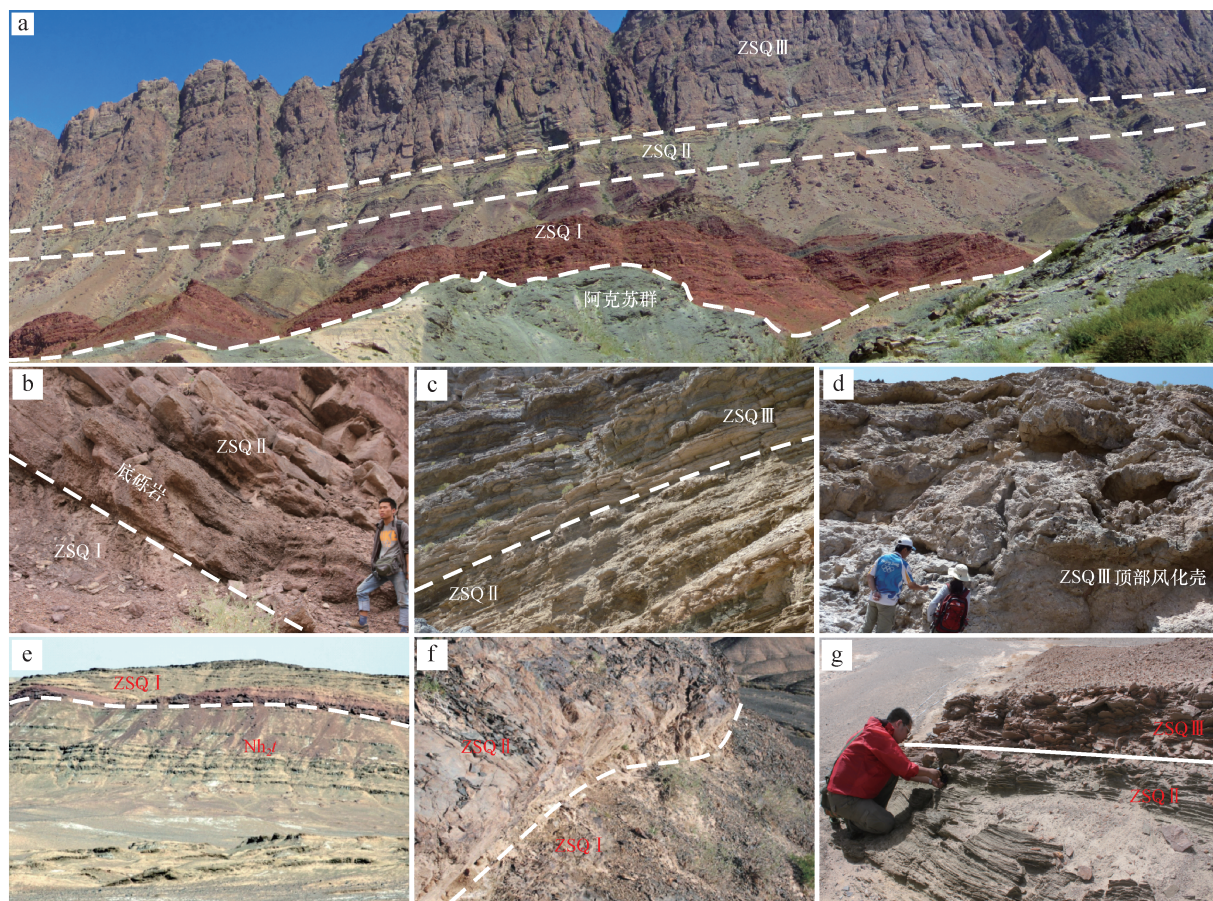


图4 塔里木盆地周缘露头震旦系层序界面特征

Fig. 4 Characteristics of sequence boundaries of the Sinian in outcrops in the periphery of Tarim Basin

a. 塔西北震旦系 ZSQ I, ZSQ II, ZSQ III 整体特征, 乌什剖面; b. 塔西北 ZSQ I 与 ZSQ II 之间平行不整合, 什艾日克剖面; c. 塔西北 ZSQ II 与 ZSQ III 之间平行不整合, 肖尔布拉克西沟剖面; d. 塔西北 ZSQ III 顶部风化壳, 肖尔布拉克西沟剖面; e. 塔东北震旦系 ZSQ I 与下伏南华系之间平行不整合, 雅尔当山剖面; f. 塔东北 ZSQ I 与 ZSQ II 之间平行不整合, 辛格尔剖面; g. 塔东北 ZSQ II 与 ZSQ III 之间整合接触, 雅尔当山剖面

岩,其年龄为 $1\,900 \sim 1\,800\text{ Ma}$ 左右^[37,47,49]。上述特征表明,塔北地区主要发育变质基底,与塔西北地区阿克苏群可对比,局部存在古元古代结晶基底。塔北地区的过井震剖面上可见(图5),从塔北隆起带向南,震旦系分布相对稳定,厚度变化不大,塔北隆起带往北,震旦系逐渐缺失,中生界/新生界不整合和覆盖于基底之上,主要是由于后期构造隆升剥蚀所致,塔北地区整体缺失南华系。

2.3.2 巴楚—塔中地区

在巴楚隆起带上,同1井钻遇南华系—震旦系(厚约200 m),下部岩性主要为安山岩夹紫色泥岩,之上为砂泥岩夹基性火山岩。杨鑫等对同1井寒武系底界之下约20 m的凝灰质砂岩进行碎屑锆石测年,获得新元古代的锆石年龄介于 $825 \sim 707\text{ Ma}$,最年轻的一组锆石年龄为 $723 \sim 707\text{ Ma}$,加权平均值为 $716.7\text{ Ma} \pm 9.3\text{ Ma}$,最年轻碎屑锆石年龄为 $707\text{ Ma} \pm 8\text{ Ma}$,底部安山岩年龄

为 $755\text{ Ma} \pm 3\text{ Ma}$ ^[47]。另有方1井、和4井、舒探1井等未钻遇南华纪—震旦纪沉积地层,直接钻遇一套基性火山岩(厚26~224 m),在方1井4 632.55 m深度玄武岩中获得锆石年龄为 $615\text{ Ma} \pm 19\text{ Ma}$,在4 749.1 m深度辉绿岩中获得两个锆石年龄为 $630\text{ Ma} \pm 22\text{ Ma}$, $617\text{ Ma} \pm 21\text{ Ma}$ ^[37],表明形成时间为晚震旦世。

巴楚隆起以北,未有钻遇南华系—震旦系钻井。地震资料解释表明,南华系受断裂控制,表现为断陷沉积,分布范围有限,震旦系覆盖于南华系断陷之上,分布相对稳定(图6a)。巴楚隆起以南,目前仅有巴探5、玛北1及玉龙6等3口钻穿寒武系钻井。玛北1井钻遇基底片麻岩,锆石年龄为 $1\,920\text{ Ma} \pm 14\text{ Ma}$ ^[50]。巴探5井井底为一套紫红色砾岩,砾石为玄武岩/辉绿岩,物源研究认为为一套近物源沉积。低航磁异常带上玉龙6井在中寒武统之下钻遇一套蛇纹石化大理岩,夹薄层白云岩及硅质岩^[50],与塔西南铁克里克地区博查特塔格组可对比。根据对博查特塔格组

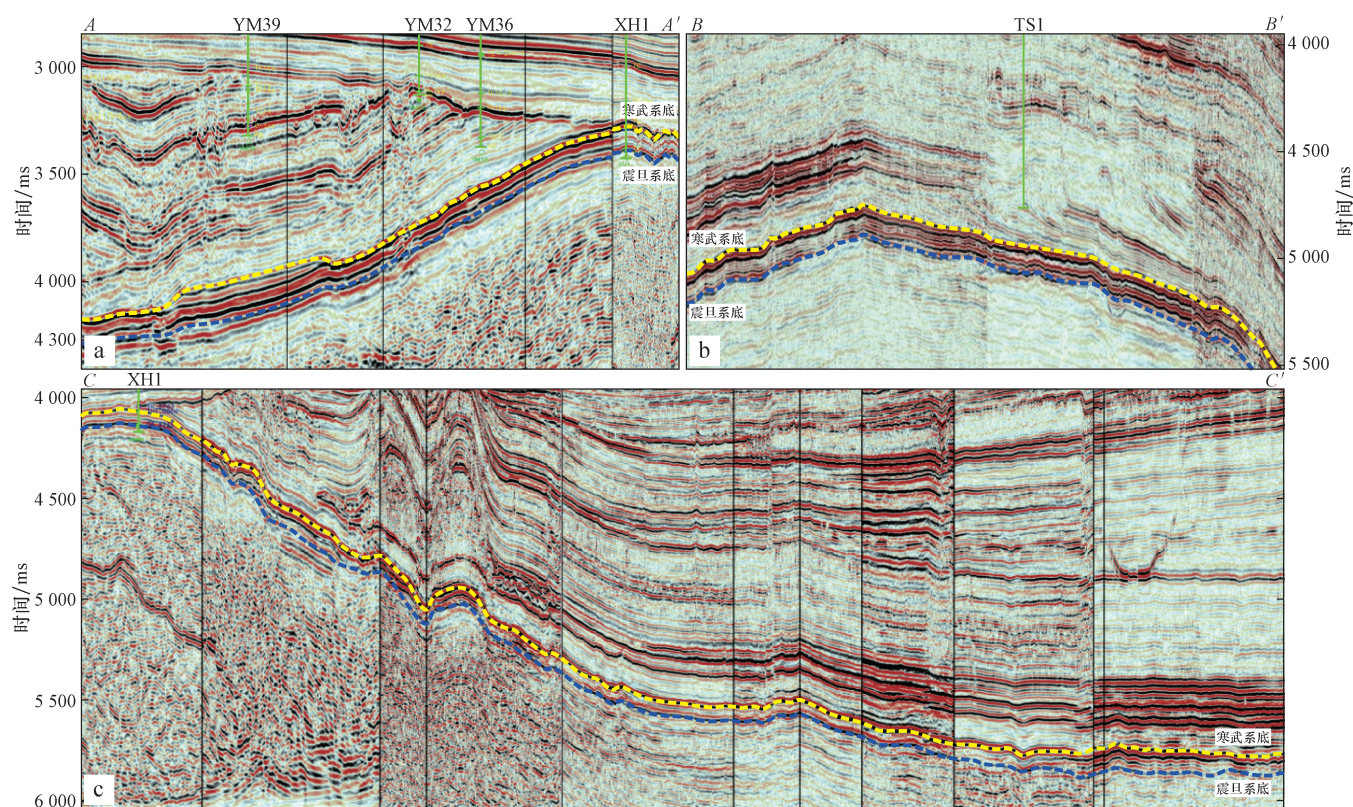


图5 塔里木盆地北部南华系—震旦系地震反射特征(剖面位置见图1)

Fig. 5 Seismic reflection characteristics of the Nanhua-Sinian in the northern Tarim Basin (see Fig. 1 for the profile location)

碳酸盐岩(大理岩化)中碎屑锆石测年,年龄主要分布在856~771 Ma^[12],表明时代应该为新元古代。

通过地震剖面解释发现,在巴探5井西南,南华系断陷发育,厚度较大,震旦系表现为拗陷期沉积,覆盖于南华系断陷之上(图6d—f)。三维电阻率反演研究显示^[51],麦盖提地区在6~15 km深度范围内为低阻区,但随着深度的增加,低阻区面积逐渐减小,这种特征可能也反映了南华系到震旦系分布范围逐渐增大,与地震剖面所表现的南华系断陷发育特征相符。塔西南地区航磁特征表现为一系列NE—SW向高、低相间航磁异常带,但根据高、低航磁异常带上玛北1和玉龙6井钻井结果表明,航磁异常差异反映基底组成差异,而并非为南华纪—震旦纪沉积地层是否发育的标志。

塔中地区未有钻遇南华系—震旦系钻井,中深1井钻遇1900~1800 Ma 橄榄石花岗岩^[37,47],表明为古元古代结晶基底;塔参1井钻遇757 Ma±6 Ma 闪长岩、花岗闪长岩^[52]。从地震剖面上可见(图6b,c),在塔中隆起带以南,未见南华系—震旦系反射特征,寒武系之下为前震旦系基底。在塔中隆起以北,地震剖面上可见明显的南华系—震旦系反射特征,同时断陷特征清楚。同时基于塔参1井757 Ma±6 Ma 的火成岩

研究表明^[52],在该区南华系断陷发育,北部为沉积区,发育南华纪—震旦纪沉积,南部为构造高部位,缺失南华纪—震旦纪沉积。

2.3.3 塔里木盆地东部

塔东地区未有钻遇南华系钻井,有多口井钻遇震旦系(塔东1井、塔东2井、东探1井、尉犁1井等)。在塔东低凸起带上,塔东1、塔东2及东探1井钻遇震旦系水泉组(厚28~800 m),岩性为白云岩,泥质白云岩。塔东2井震旦系下伏为花岗岩接触,花岗岩年龄为1908 Ma±9 Ma^[52],1916 Ma±11 Ma,1927 Ma±7 Ma^[37],表明为古元古代结晶基底;东探1井钻遇水泉组白云岩之下钻遇辉绿岩;英东2井寒武系之下直接钻遇花岗岩,年龄为750 Ma±7 Ma^[37]。北部满加尔凹陷尉犁1井钻遇震旦系(厚344 m),上部岩性主要为泥晶灰岩、泥质灰岩夹泥岩,下部以泥岩和粉砂岩为主。根据钻井岩心与库鲁克塔格地区野外露头对比发现,在塔东低凸起带塔东2—塔东1—东探1井一带,震旦系沉积特征与库鲁克塔格南区具有相似性,满加尔凹陷内震旦系沉积特征与库鲁克塔格北区具有相似性。通过地震剖面解释表明,南华纪塔里木盆地东部地区断陷发育(图7a,b),震旦纪为拗陷

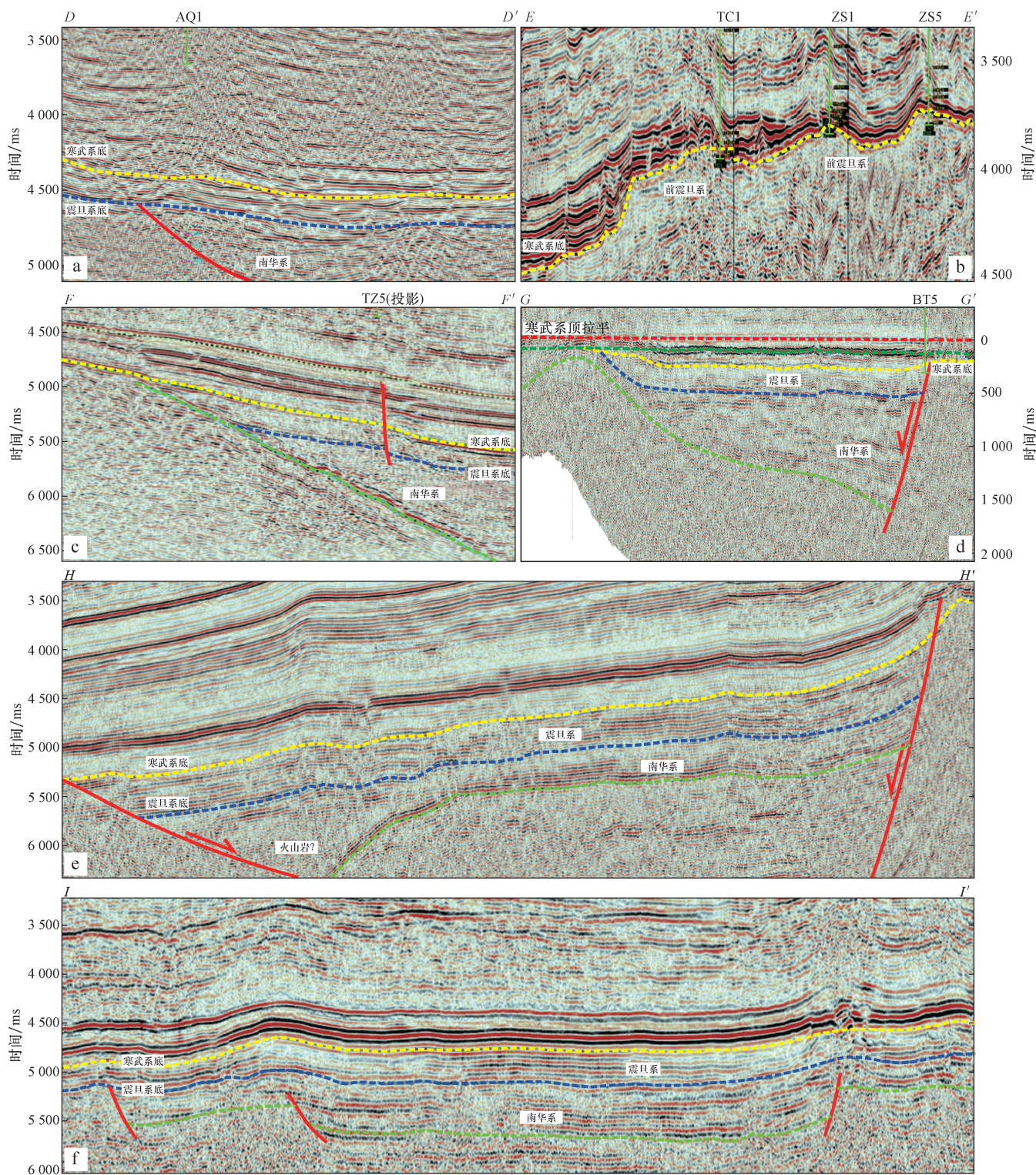


图 6 塔里木盆地西部南华系—震旦系地震反射特征(剖面位置见图 1)

Fig. 6 Seismic reflection characteristics of the Nanhua-Sinian in the western Tarim Basin(see Fig. 1 for the profile location)

沉积,震旦系在北部地区稳定分布(图 7a,b,e)。塔东低凸起带位于构造高部位,可能为裂谷火山活动中心或裂谷肩部,导致南华纪—早震旦世沉积缺失,直接发育晚震旦世水泉组白云岩,同时震旦系向南逐渐尖灭(图 7c,d)。

3 南华纪—震旦纪构造—沉积格局

3.1 塔里木盆地基底特征

塔里木盆地基底组成与分布特征的研究对于认识

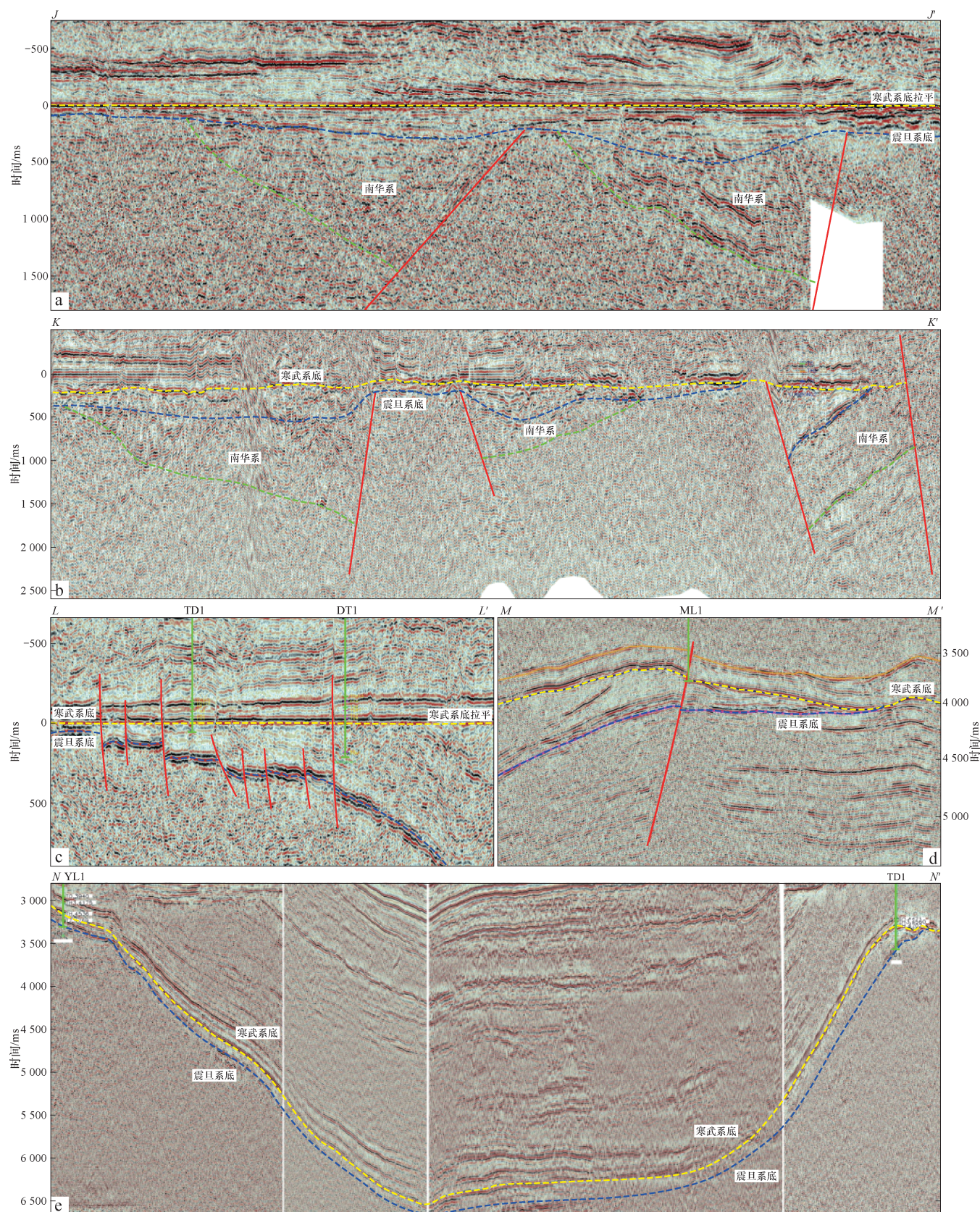


图7 塔里木盆地东部南华系-震旦系地震反射特征(剖面位置见图1)

Fig. 7 Seismic reflection characteristics of the Nanhua-Sinian in the eastern Tarim Basin(see Fig. 1 for the profile location)

南华纪—震旦纪的构造—沉积格局具有重要的意义^[52]。近年来,众多学者针对塔里木盆地周缘及盆地

内部开展了大量的前寒武系年代学及地球化学研究工作^[2-14,37-40,47,52-60],同时由于技术手段的改善,一批新

的地球物理资料成果如三维电阻率反演^[51]、新的航磁异常处理资料^[61]、深反射地震^[62]和多尺度重力反演^[63]等出现,使得对塔里木盆地基底特征的研究有了重要进展。

根据对盆地周缘前寒武系及盆内钻遇前寒武系基底地层年代学及地球化学工作,结合各种地球物理资料综合研究认为,塔里木盆地内部基底组成具有南北显著差异性。以中央高航磁异常带为界,北部主体为宽缓的低航磁异常区,钻井资料表明主要为绿片岩相变质岩。在阳霞煤矿出露前寒武系石英片岩,其碎屑锆石年龄主要分布在 800 Ma 左右^[47,64],表明期沉积年龄不早于 800 Ma。根据近年来对阿克苏群片岩大量的年代学研究,阿克苏群片岩中碎屑锆石年是主要分布于 780 Ma 及 825 Ma,同时侵入阿克苏群基性岩墙年龄为 759 Ma $\pm$ 7 Ma^[6]与 757.1 Ma $\pm$ 8.9 Ma^[35],限定形成时间晚于 780 Ma 并早于 760 Ma。钻井及野外资料均表明塔里木盆地北部广泛分布新元古代变质基底。但在塔北隆起上齐满 1、沙 53、桥古 1、桥古 2 等多口井钻遇 1 900 ~ 1 800 Ma 的花岗岩^[47,49],表明在塔里木盆地北部地区同样也发育古元古界变质结晶基底。

南部基底组成复杂,在盆地西南部,航磁异常上显示发育一系列 NE-SW 向的高、低相间航磁异常带,在高航磁异常带玛北 1 井钻遇一套黑云角闪二长片麻岩,锆石年龄 1 920 Ma $\pm$ 14 Ma^[50],表明盆地西南部这种高航磁异常带代表了古元古界角闪岩相变质岩。而在低航磁异常带上玉龙 6 井在中寒武统之下钻遇一套蛇纹石化大理岩,夹薄层白云岩及硅质岩^[50],与塔里木盆地西南缘铁克里克地区博查特塔格组可对比,根据对博查特塔格组碳酸盐岩(大理岩化)中碎屑锆石测年,年龄主要分布在 856 ~ 771 Ma^[12],表明时代应该为新元古代。铁克里克地区大面积分布的绿片岩相变质岩系埃连卡特群,早期认为时代为古-中元古代,根据近年来碎屑锆石测年发现,其碎屑锆石年龄主要为 800 Ma 左右^[12,40,56],其形成时代应该为新元古代。因此塔里木盆地西南部基底组成为古元古代角闪岩相变质结晶基底与新元古代绿片岩相变质基底。

对于盆地东南部,钻井及地球物理资料揭示在古生界之下发育一套浅变质岩系,民参 1 和民参 2 井均钻遇一套绿片岩相变质基底,对于该套地层形成时代存在不同的认识^[28]。根据对民参 1 井基底变质岩 K-Ar 测年显示,变质年龄为 425 Ma,表明可能形成于早古生代,但通过碎屑锆石测年分析表明其最年轻的碎屑锆石主要为 800 Ma 左右^[38,47],表明其形成时代可能为新元古代,与铁克里克地区埃连卡特群从年龄及

岩性上均可对比。罗北 1 井早古生代碳酸盐岩变质形成大理岩,若参 2 井井底钻遇一套斜长角闪岩,锆石 U-Pb 年龄 445.7 Ma $\pm$ 5.2 Ma^[37],表明塔东南基底受到后期构造热事件的强烈改造。因此塔东南地区可能发育新元古界绿片岩相变质基底,叠加后期古生代的构造热改造事件,使得变质程度可能进一步加强^[52]。

目前,对于塔里木盆地中央高航磁异常带的认识还存在争议。部分学者基于塔参 1 井花岗岩、瓦基里塔格火山岩和阿尔金北缘杂岩体在年代学以及地球化学方面的相似性认为,中央高航磁异常带可能是塔里木南北地块拼合形成的古缝合带^[47,53,59];部分学者认为中央高航磁异常带可能是古元古代-新元古代裂陷期火山岩的产物^[65]。另外,中央高航磁异常带也可能是古老结晶基底或不同时期火山岩,如塔东 2 井底部 1 908 Ma $\pm$ 9 Ma 的古元古代花岗岩^[47]、英东 2 井 750 Ma $\pm$ 7 Ma 的新元古代花岗岩^[37]以及巴楚地区同 1、方 1、和 4 等井底大规模发育的新元古代安山岩、玄武岩。

3.2 前南华纪构造—沉积格局(880 ~ 800 Ma)

根据对塔里木盆地周缘及盆地基底大量的年代学研究认为,塔里木盆地在南华纪之前发育南、北两个块体(图 8),800 ~ 780 Ma 左右南塔里木与北塔里木块体拼合,才形成统一的塔里木板块^[40,47]。现今在塔里木盆地东南缘的大量新元古代早期(930 ~ 910 Ma)花岗片麻岩^[57,66-67],地球化学特征显示为同碰撞花岗岩,形成于碰撞造山构造背景^[57,67-68],为 Rodinia 超大陆的汇聚相关产物。上述特征表明,新元古代早期(930 ~ 910 Ma),南塔里木地块汇聚到澳大利亚并发生碰撞造山,形成大量的碰撞花岗岩^[66-67]。在塔西南地区发育 880 ~ 840 Ma 的塞拉加兹塔格群大陆双峰式火山岩^[13,40,69],表明南塔里木地块西南缘在 880 Ma 开始,为拉张构造背景,发育塔西南裂谷,同时西昆仑洋逐渐打开,在塔西南地区发育 NW-SE 向裂陷,沉积了新元古代早期地层。这种伸展构造背景可能一直持续到约 800 Ma 前后,表现为在坎地里克—许沟一带发育的 800 Ma 的玄武岩及基性岩墙群^[7,70]。该时期北塔里木地块哈萨克斯坦、伊犁、中天山等地块还未分离,由于北部持续的俯冲作用,在北塔里木发育弧后盆地,沉积了北部新元古代早期地层,相当于阿克苏群原岩沉积^[25]。约 800 ~ 780 Ma,塔里木南、北地块发生拼合,形成统一的塔里木板块^[40,47]。南、北地块的拼合导致早期沉积发生变质,形成了北部阿克苏超高压蓝片岩相变质岩及南部埃连卡特群绿片岩相变质岩。

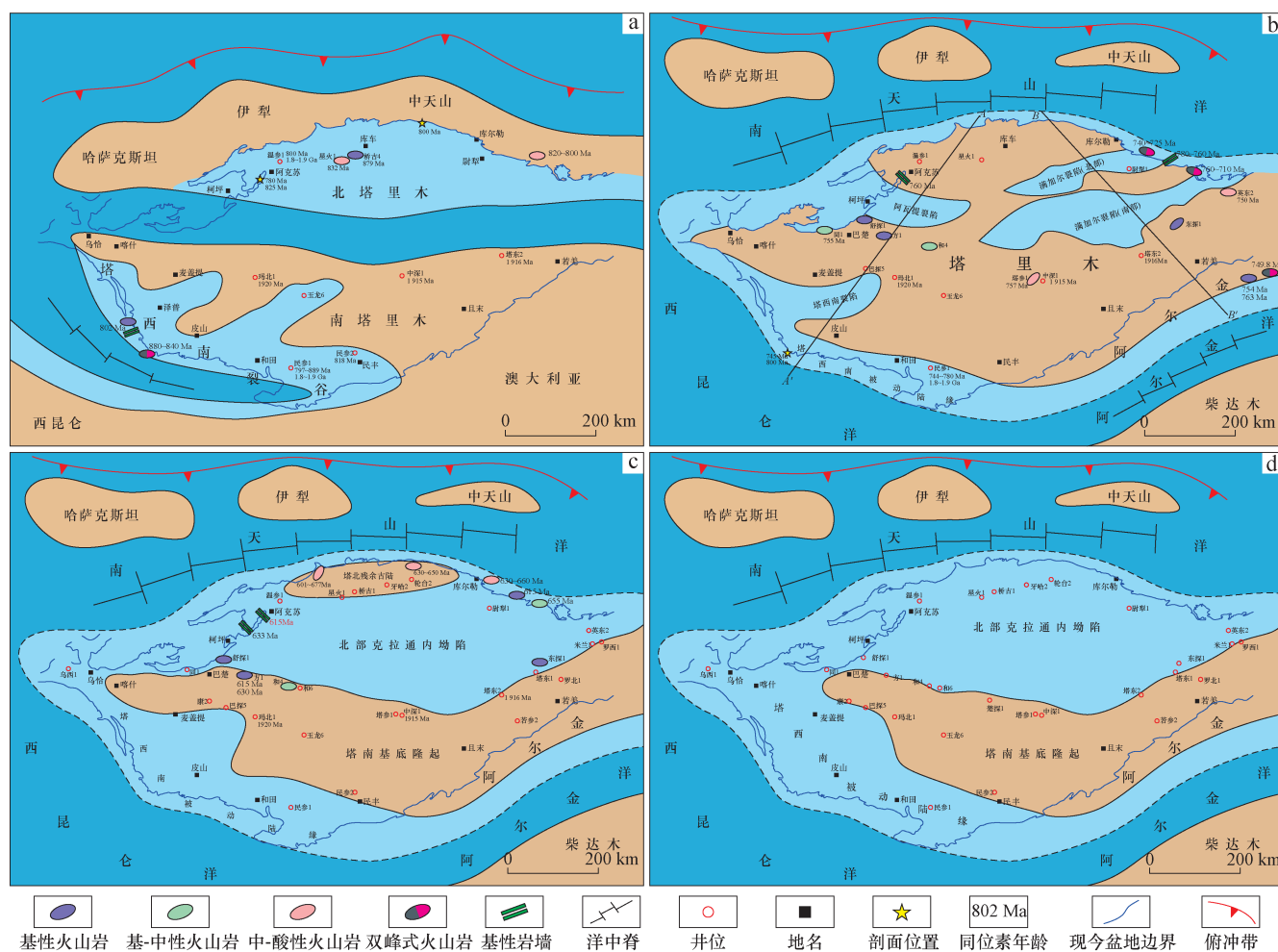


图8 塔里木盆地南华纪—震旦纪构造—沉积格局

Fig. 8 Tectono-sedimentary framework during the Nanhua-Sinian in the Tarim Basin

a. 880 ~ 800 Ma; b. 760 ~ 700 Ma; c. 660 ~ 600 Ma; d. 580 ~ 540 Ma

3.3 南华纪早期构造—沉积格局(760 ~ 700 Ma)

约760 Ma开始(图8),受超级地幔柱活动而导致Rodinia超大陆解体的影响,塔里木板块与澳大利亚板块逐渐分离,阿尔金洋打开,柴达木地块从塔里木板块东南缘分离,在现今塔里木盆地东南缘阿尔金地区发育760 ~ 750 Ma的双峰式火山岩^[57],但该期阿尔金地块并未与塔里木板块分离^[71]。在塔里木西南缘,由于800 ~ 780 Ma塔里木南、北地块拼合,导致前南华纪NW-SE相裂陷闭合,该期整体处于被动大陆边缘环境。北部由于持续的俯冲作用,导致南天山洋打开,哈萨克斯坦、伊犁和中天山等地块从塔里木板块北缘分离出去^[25],在现今塔里木盆地北缘位置形成强烈的拉张作用,在塔东北地区发育760 ~ 710 Ma的板内双峰式火山岩及基性岩墙^[2-5,37],在塔西北地区发育大量760 Ma的基性岩墙^[6,57](图8)。

该期在塔里木内部同样表现为强裂的拉张作用,

在巴楚地区多口井钻遇到南华系火山岩,如同1井755 Ma安山岩^[47]、方1井辉绿岩/玄武岩、和4井酸性火山岩以及舒探1井辉绿岩等,地球化学特征均显示为板内拉张环境形成。从分布上认为,巴楚地区为火山活动中心,强烈的火山活动形成火山岩高地,作为物源剥蚀区,因此整体缺失南华纪地层(图9)。在塔中地区,塔参1井底757 Ma的花岗岩^[52]、塔东地区英东2井750 Ma的花岗岩^[25]以及东探1井辉绿岩为火山岩地球化学特征表明存在较强的拉张作用^[26]。从地震剖面上可以清楚地看到在塔中以北—满加尔—库鲁克塔格地区南华纪裂陷,及阿瓦提—柯坪地区南华纪裂陷发育特征。南部整体为基底隆起,在麦盖提地区发育南华纪裂陷(图9,图10)。

3.4 晚南华世—震旦纪早期构造—沉积格局(660 ~ 600 Ma)

中南华世末期,存在一次构造抬升作用,在塔西北地区表现为巧恩布拉克组与上覆地层之间的角度不整

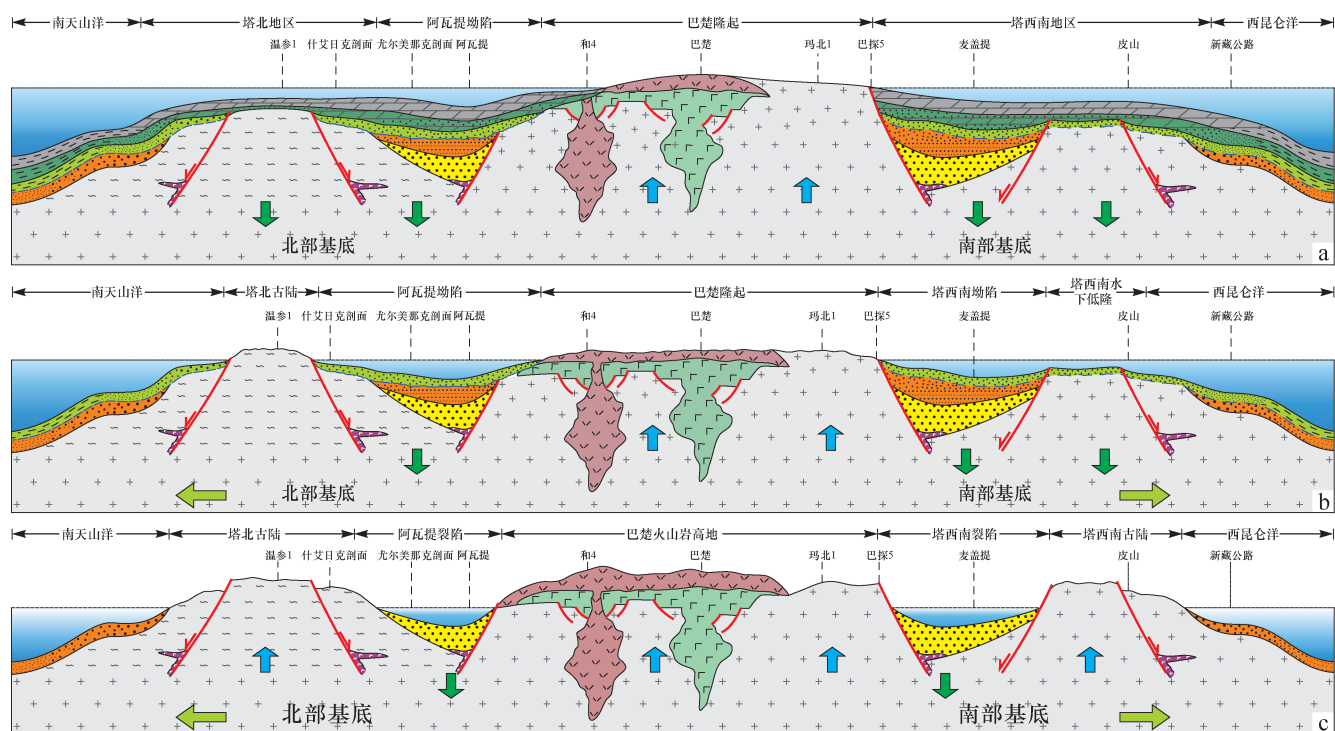


图9 塔里木盆地西部南华纪—震旦纪构造—沉积演化剖面(图8中A-A'剖面)

Fig. 9 Tectono-sedimentary evolution profile of the Nanhua-Sinian in the western Tarim Basin(see Fig. 8 for the location of profile A-A')

a. 拗陷发育阶段(580~540 Ma); b. 裂—拗转变阶段(660~600 Ma); c. 裂陷发育阶段(760~700 Ma)

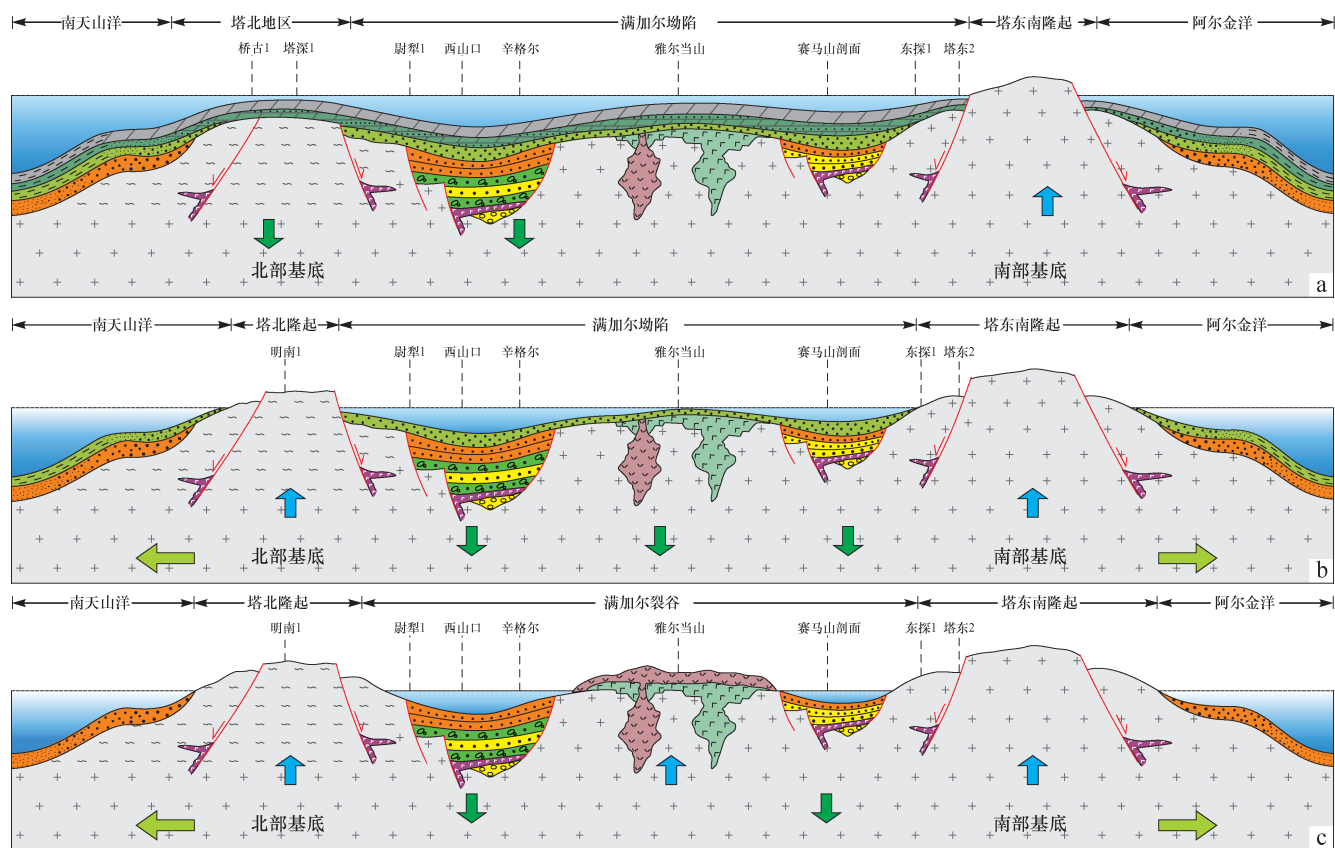


图10 塔里木盆地东部南华纪—震旦纪构造—沉积演化剖面(图8中B-B'剖面)

Fig. 10 Tectono-sedimentary evolution profile of the Nanhua-Sinian in the eastern Tarim Basin(see Fig. 8 for the location of profile B-B')

a. 拗陷发育阶段(580~540 Ma); b. 裂—拗转变阶段(660~600 Ma); c. 裂陷发育阶段(760~700 Ma)

合接触、塔东北部分地区阿勒通沟组与上覆特瑞艾肯组之间平行不整合接触以及塔西南地区克里西组与上覆雨塘组之间平行不整合接触。可能正是由于此次构造抬升作用导致了之后的“裂-拗”体系的转变。晚南华世开始(660 Ma),塔里木北缘开始进入裂陷向拗陷转变阶段,整体仍然处于拉张构造背景,但拉张作用逐渐减弱。在塔东北地区发育 660 ~ 630 Ma 花岗岩^[14]、阿勒通沟组顶部 655 Ma 火山岩^[9]及扎摩克提期 615 Ma 火山岩^[3,9],在塔西北地区发育侵入到巧恩布拉克组中 633 Ma 的辉绿岩体,及侵入到苏盖特布拉克组下段中 615 Ma 的辉绿岩体^[4]。巴楚地区的火山活动可能仍在持续,表现为方 1 井 630 Ma 及 615 Ma 的辉绿岩/玄武岩^[37]。持续的拉张作用及海侵过程,使得早-中南华世发育的相互孤立的裂陷逐渐相互连通^[4],沉积范围逐渐扩大,塔北地区逐渐连片,仅在北部存在残余古陆(图 8)。塔西南地区整体构造活动较弱,沉降及海侵作用使得皮山古陆位于海平面之下接受沉积,同时早-中南华世发育的塔西南裂陷与整个塔西南连通,形成统一的被动大陆边缘沉积背景。

3.5 晚震旦世构造-沉积格局(580 ~ 540 Ma)

晚震旦世,塔里木盆地处于稳定的构造背景之下,塔北地区为克拉通内拗陷演化阶段,以热沉降为主,持续的海侵使得塔北残余古陆逐渐消失,塔北地区整体接受沉积,稳定的构造背景以及陆源碎屑的减少,开始发育碳酸盐岩沉积体系(图 9,图 10)。塔西南地区继承早期被动大陆边缘沉积背景,同样以碳酸盐岩沉积为主(图 8)。震旦纪末期,整个塔里木盆地经历了一次构造抬升及海退过程,震旦系遭受长期风化剥蚀作用,形成了塔西北地区震旦系顶部风化壳岩溶,以及麦盖提-塔西南地区震旦系在大部分地区缺失。

4 结论

1) 基底研究表明,前南华纪,塔里木发育南、北两个地块,北部包括现今哈萨克斯坦、伊犁、中天山等地块,发育弧后盆地沉积,南部处于拉张构造背景,发育 NW-SE 向裂陷沉积。约 800 ~ 780 Ma 期间,南、北地块发生拼合,形成了统一的塔里木板块。

2) 南华纪-震旦纪,伴随着 Rodinia 超大陆的解体,塔里木盆地处于拉张构造背景,为大陆裂谷发育时期,并经历了 3 个演化阶段:南华纪早期裂陷发育阶

段,在盆地西部形成阿瓦提裂陷,东部形成满加尔南、北两支裂陷,南部在麦盖提地区形成 NW-SE 向裂陷;南华纪晚期-震旦纪早期“裂-拗”体系的转变阶段;震旦纪晚期拗陷演化阶段。

3) 盆地构造格局控制了古地理特征及沉积组合,南华纪以裂陷沉积为主,在强烈拉张作用下形成了碎屑岩-火山岩沉积组合。震旦纪以拗陷沉积为主,塔里木盆地具有“南隆北拗”的古地理特征,形成了碎屑岩沉积、碎屑岩-碳酸盐岩混合沉积、碳酸盐岩沉积 3 种类型沉积体系。

参考文献

- [1] 贾承造. 塔里木盆地构造特征与油气聚集规律[J]. 新疆石油地质, 1999, 20(3): 177-183.
Jia Chengzao. Structural characteristics and oil/gas accumulative regularity in Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1999, 20(3): 177-183.
- [2] Xu Bei, Jian Qing, Zheng Haifei, et al. U-Pb zircon geochronology and geochemistry of Neoproterozoic volcanic rocks in the Tarim Block of northwest China: Implications for the breakup of Rodinia supercontinent and Neoproterozoic glaciations [J]. Precambrian Research, 2005, 136(2): 107-123.
- [3] Xu Bei, Xiao Shuhai, Zou Haibo, et al. SHRIMP zircon U-Pb age constraints on Neoproterozoic Qurqutagh diamictites in NW China [J]. Precambrian Research, 2009, 168(3-4): 247-258.
- [4] Xu Bei, Zou Haibo, Chen Yan, et al. The Sugetbrak basalts from northwestern Tarim Block of northwest China: Geochronology, geochemistry and implications for Rodinia breakup and ice age in the Late Neoproterozoic [J]. Precambrian Research, 2013, 236(5): 214-226.
- [5] Zhang Chuanlin, Li Zhengxiang, Li Xianhua, et al. Neoproterozoic ultramafic-mafic-carbonatite complex and granitoids in Qurqutagh of northeastern Tarim Block, western China: Geochronology, geochemistry and tectonic implications [J]. Precambrian Research, 2007, 152(3-4): 149-169.
- [6] Zhang Chuanlin, Li Zhengxiang, Li Xianhua, et al. Neoproterozoic mafic dyke swarms at the northern margin of the Tarim Block, NW China: Age, geochemistry, petrogenesis and tectonic implications [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 35(2): 167-179.
- [7] Zhang Chuanlin, Yang Dongsheng, Wang Hongyan, et al. Neoproterozoic Mafic Dykes and Basalts in the Southern Margin of Tarim, Northwest China: Age, Geochemistry and Geodynamic Implications [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(3): 549-562.
- [8] Zhang Chuanlin, Yang Dongsheng, Wang Hongyan, et al. Neoproterozoic mafic-ultramafic layered intrusion in Qurqutagh of northeastern Tarim Block, NW China: Two phases of mafic igneous activity with different mantle sources [J]. Gondwana Research, 2011, 19(1): 177-190.
- [9] He Jingwen, Zhu Wenbin, Ge Rongfeng. New age constraints on Neoproterozoic diamictites in Kuruktag, NW China and Precambrian crus-

- tal evolution of the Tarim Craton [J]. *Precambrian Research*, 2014, 241(1): 44–60.
- [10] He Jingwen, Zhu Wenbin, Ge Rongfeng, et al. Detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopes of Neoproterozoic strata in the Aksu area, northwestern Tarim Craton: Implications for supercontinent reconstruction and crustal evolution [J]. *Precambrian Research*, 2014, 254: 194–209.
- [11] Wang Chao, Wang Yonghe, Liu Liang, et al. The Paleoproterozoic magmatic-metamorphic events and cover sediments of the Tiekelik Belt and their tectonic implications for the southern margin of the Tarim Craton, northwestern China [J]. *Precambrian Research*, 2014, 254: 210–225.
- [12] Wang Chao, Liu Liang, Wang Yonghe, et al. Recognition and tectonic implications of an extensive Neoproterozoic volcano-sedimentary rift basin along the southwestern margin of the Tarim Craton, northwestern China [J]. *Precambrian Research*, 2015, 257: 65–82.
- [13] Wang Chao, Zhang Jiheng, Li Meng, et al. Generation of ca. 900–870 Ma bimodal rifting volcanism along the southwestern margin of the Tarim Craton and its implications for the Tarim-North China connection in the early Neoproterozoic [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 113: 610–625.
- [14] Ge Rongfeng, Zhu Wenbin, Wilde S A, et al. Neoproterozoic to Paleozoic long-lived accretionary orogeny in the northern Tarim Craton [J]. *Tectonics*, 2014, 33(3): 302–329.
- [15] Huang Baochun, Xu Bei, Zhang Chunxia, et al. Paleomagnetism of the Baiyisi volcanic rocks (ca. 740 Ma) of Tarim, Northwest China: A continental fragment of Neoproterozoic Western Australia? [J]. *Precambrian Research*, 2005, 142(3–4): 83–92.
- [16] Li Zhenxiang, Bogdanova S V, Collins A S, et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis [J]. *Precambrian Research*, 2008, 160(1–2): 179–210.
- [17] Li Zhenxiang, Evans D A, Halverson G P. Neoproterozoic glaciations in a revised global palaeogeography from the breakup of Rodinia to the assembly of Gondwanaland [J]. *Sedimentary Geology*, 2013, 294: 219–232.
- [18] Zhao Pan, Chen Yan, Zhan Sheng, et al. The Apparent Polar Wander Path of the Tarim block (NW China) since the Neoproterozoic and its implications for a long-term Tarim-Australia connection [J]. *Precambrian Research*, 2014, 242(1): 39–57.
- [19] Wen Bin David A. D. Evans, Yong-Xiang Li. Neoproterozoic paleogeography of the Tarim Block: An extended or alternative “missing-link” model for Rodinia? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 1: 1–15.
- [20] Turner S A. Sedimentary record of Late Neoproterozoic rifting in the NW Tarim Basin, China [J]. *Precambrian Research*, 2010, 181(1–4): 85–96.
- [21] 杨云坤, 石开波, 刘波, 等. 塔里木盆地西北缘震旦纪构造—沉积演化特征 [J]. *地质科学*, 2014, 49(1): 19–29.
- Yang Yunkun, Shi Kaibo, Liu Bo, et al. Tectono-sedimentary evolution of the Sinian in the Northwest Tarim Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2015, 49(1): 19–29.
- [22] 冯许魁, 刘永彬, 韩长伟, 等. 塔里木盆地震旦系裂谷发育特征及其对油气勘探的指导意义 [J]. *石油地质与工程*, 2015, 29(2): 5–10.
- Feng Xukui, Liu Yongbin, Han Changwei, et al. Sinian rift valley development characteristics in Tarim Basin and its guidance on hydrocarbon exploration [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2015, 29(2): 5–10.
- [23] 崔海峰, 田雷, 张年春, 等. 塔西南坳陷南华纪—震旦裂谷分布及其与下寒武统烃源岩的关系 [J]. *石油学报*, 2016, 37(4): 430–438.
- Cui Haifeng, Tian Lei, Zhang Nianchun, et al. Nanhua-Sinian rift distribution and its relationship with the development of Lower Cambrian source rocks in the southwest depression of Tarim Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 37(04): 430–438.
- [24] 吴林, 管树巍, 任荣, 等. 前寒武纪沉积盆地发育特征与深层烃源岩分布——以塔里木新元古代盆地与下寒武统烃源岩为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2016, (06): 905–915.
- Wu Lin, Guan Shuwei, Ren Rong, et al. The characteristics of Precambrian sedimentary basin and the distribution of deep source rock: A case study of Tarim Basin in Neoproterozoic and source rocks in Early Cambrian, Western China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(6): 988–999.
- [25] 管树巍, 吴林, 任荣, 等. 中国主要克拉通前寒武纪裂谷分布与油气勘探前景 [J]. *石油学报*, 2017, (01): 9–22.
- Guan Shuwei, Wu Lin, Ren Rong, et al. Distribution and petroleum prospect of Precambrian rifts in the main cratons, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 38(1): 9–22.
- [26] 石开波, 刘波, 刘红光, 等. 塔里木盆地东北缘库鲁克塔格地区新元古代构造—沉积演化 [J]. *地学前缘*, 2017, (01): 297–307.
- Shi Kaibo, Liu Bo, Liu Hongguang, et al. Neoproterozoic tectono-sedimentary evolution in Quruqtagh area NE Tarim Basin, Xinjiang, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 24(1): 297–307.
- [27] 高振家, 王务严, 彭文昌. 新疆震旦系 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985.
- Gao Zhenjia, Wang Wuyan and Peng Wenchang. The Sinian system of Xinjiang [M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 1985.
- [28] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- Jia Chengzao. Tectonic characteristics and petroleum Tarim Basin China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press.
- [29] 张增耀, 杨松岭, 赵秀岐. 塔里木盆地盆内震旦系特征 [J]. *海相油气地质*, 2007, 12(2): 51–56.
- Zhang Zengyao, Yang Songling and Zhao Xiuqi. Characteristics of intrabasinal Sinian sedimentary system in Tarim Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2007, 12(2): 51–56.
- [30] 王宇, 何金有, 卫巍, 等. 新疆阿克苏地区新元古代晚期地层沉积相及层序地层研究 [J]. *岩石学报*, 2010, 26(8): 2519–2528.
- Wang Yu, He Jinyou, Wei Wei, et al. Study on the late Proterozoic sedimentary facies and sequence stratigraphy in Aksu area, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(8): 2519–2528.
- [31] 周肖贝, 李江海, 王洪浩, 等. 塔里木盆地南华纪—震旦纪盆地类型及早期成盆构造背景 [J]. *地学前缘*, 2015, 22(3): 290–298.
- Zhou Xiaobei, Li Jianghai, Wang Honghao, et al. The type of prototypic basin and tectonic setting of Tarim Basin formation from Nanhua to

- Sinian[J]. *EarthScience Frontiers*, 2015, 22(3): 290–298.
- [32] 马世鹏, 汪玉珍, 方锡廉. 西昆仑山北坡的震旦系[J]. *新疆地质*, 1989, (04): 68–79.
- Ma Shipeng, Wang Yuzhen, Fang Xilian. The Sinian at north slope western Kunlun Mountains[J]. *Xinjiang Geology*, 1989(4): 68–79.
- [33] 丁海峰. 新疆北部新元古代冰期沉积的岩石地球化学和碎屑锆石年代学研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- Ding Haifeng. The research of geochemistry and U-Pb detrital zircon of geochronology of Neoproterozoic glaciogenic sediments in northern Xinjiang, NW China[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.
- [34] 高林志, 郭宪璞, 丁孝忠, 等. 中国塔里木板块南华纪成冰事件及其地层对比[J]. *地球学报*, 2013, 34(1): 39–57.
- Gao Linzhi, Guo Xianpu, Ding Xiaozhong, et al. Nanhuan Glaciation Event and its stratigraphic correlation in Tarim Plate, China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2013, 34(1): 39–57.
- [35] 张健, 张传林, 李怀坤, 等. 再论塔里木北缘阿克苏蓝片岩的时代和成因环境: 来自锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素的新证据[J]. *岩石学报*, 2014, 30(11): 3357–3365.
- Zhang Jian, Zhang Chunlin, Li Huaishen, et al. Revisit to time and tectonic environment of the Aksu blueschist terrane in northern Tarim, NW China: New evidence from zircon U-Pb age and Hf isotope[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(11): 3357–3365.
- [36] 何景文. 塔里木克拉通北缘与伊犁块体新元古代冰碛岩层对比研究[D]. 南京大学, 2015.
- He Jingwen. The comparison study of Neoproterozoic diamictites-bearing strata in the northern Tarim Craton and the Yili Block[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [37] 周肖贝. 塔里木盆地深层结构特征及其早期构造古地理格局重建[D]. 北京: 北京大学, 2015, 15–27.
- Zhou Xiaobei. Deep level structures and paleogeography reconstruction of Tarim Basin, NW China[D]. Beijing: Peking University, 2015, 15–27.
- [38] 叶现韬. 塔里木西南前寒武纪构造演化与地壳增生[D]. 北京: 中国地质科学院, 2016.
- Ye Xiaotao. Precambrian tectonic evolution and crust growth of southern Tarim Terrane, Xinjiang, NW China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2016.
- [39] Zhu Wenbin, Zheng Bihai, Shu Liangshu, et al. Neoproterozoic tectonic evolution of the Precambrian Aksu blueschist terrane, northwestern Tarim, China: Insights from LA-ICP-MS zircon U-Pb ages and geochemical data[J]. *Precambrian Research*, 2011, 185(3–4): 215–230.
- [40] Zhang Chuanlin, Ye Xiantao, Zou Haibo, et al. Neoproterozoic sedimentary basin evolution in southwestern Tarim, NW China: New evidence from field observations, detrital zircon U-Pb ages and Hf isotope compositions[J]. *Precambrian Research*, 2016, 280: 31–45.
- [41] 徐备, 郑海飞, 姚海涛, 等. 塔里木板块震旦系碳同位素组成及其意义[J]. *科学通报*, 2002, 47(22): 1740–1744.
- Xu Bei, Zheng Haifei, Yao Haitao, et al. C-isotope composition and significance of the Sinian on the Tarim plate[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(22): 1740–1744.
- [42] 丁海峰, 马东升, 姚春彦, 等. 新疆阿克苏地区新元古代冰成沉积地球化学研究[J]. *地球化学*, 2014, 43(3): 224–237.
- Ding Haifeng, Ma Dongsheng, Yao Chunyan, et al. A geochemistry study on Neoproterozoic glaciogenic sediments in Aksu area, Xinjiang[J]. *Geochimica*, 2014, 43(3): 224–237.
- [43] Xiao Shuhai, Bao Huiming, Wang Haifeng, et al. The Neoproterozoic Quruqtagh Group in eastern Chinese Tianshan: Evidence for a post-Marinoan glaciation[J]. *Precambrian Research*, 2004, 130: 1–26.
- [44] Tong Qinlong, Wei Wei, Bei Xu, et al. Neoproterozoic sedimentary facies and glacial periods in the southwest of Tarim Block[J]. *Science China: Earth Science*, 2013, 56(6): 901–912.
- [45] Ding Haifeng, Ma Dongsheng, Yao Chunyan, et al. Implication of the chemical index of alteration as a paleoclimatic perturbation indicator: an example from the lower Neoproterozoic strata of Aksu, Xinjiang, NW China[J]. *Geosciences Journal*, 2016(1): 1–14.
- [46] 石开波, 刘波, 田景春, 等. 塔里木盆地震旦纪沉积特征及岩相古地理[J]. *石油学报*, 2016, (11): 1343–1360.
- Shi Kaibo, Liu Bo, Tian Jingchun, et al. Sedimentary characteristics and lithofacies paleogeography of Sinian in Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, (11): 1343–1360.
- [47] Xu Zhiqin, He Bizhu, Zhang Chuanlin, et al. Tectonic framework and crustal evolution of the Precambrian basement of the Tarim Block in NW China: New geochronological evidence from deep drilling samples[J]. *Precambrian Research*, 2013, 235: 150–162.
- [48] 马玉杰, 罗金海, 唐雁刚, 等. 塔里木盆地库车坳陷东部基底地层的时代及其地质意义[J]. *地质科学*, 2011, 46(2): 475–482.
- Ma Yujie, Luo Jinghai, Tang Yangang, et al. Geological age of the basement of the eastern segment of the Kuche depression and its geological significances[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2011, 46(2): 475–482.
- [49] 韩强, 朱允辉, 朱传玲, 等. 塔里木盆地沙雅隆起北部三道桥地区前震旦纪基底岩体特征与锆石 U-Pb 年龄研究[J]. *岩石学报*, 2016, 32(5): 1493–1504.
- Han Qiang, Zhu Yunhui, Zhu Chuanling, et al. Petrological characteristics and zircon U-Pb age for magmatic rocks from Pre-Sinian basement of the SDQ area of Shaya Rise in Tarim Basin, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(5): 1493–1504.
- [50] 杨鑫, 徐旭辉, 陈强路, 等. 塔里木盆地前寒武纪古构造格局及其对下寒武统烃源岩发育的控制作用[J]. *天然气地球科学*, 2017, 25(8): 1164–1171.
- Yang Xin, Xu Xuhui, Chen Qianglu, et al. Palaeotectonics pattern in Pre-Cambrian and its control on the deposition of the Lower Cambrian source rocks in Tarim Basin, NW China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 25(8): 1164–1171.
- [51] 杨文采, 张罗磊, 徐义贤, 等. 塔里木盆地的三维电阻率结构[J]. *地质学报*, 2015, 89(12): 2203–2212.
- Yang Wencai, Zhang Luolei, Xu Yixian, et al. Three dimensional electrical resistivity structure of the Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(12): 2203–2212.
- [52] 邬光辉, 李浩武, 徐彦龙, 等. 塔里木克拉通基底古隆起构造—热事件及其结构与演化[J]. *岩石学报*, 2012, 28(8): 2435–2452.
- Wu Guanghui, Li Haowu, Xu Yanlong, et al. The tectonothermal events, architecture and evolution of Tarim craton basement palaeo-up-

- lifts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(8): 2435–2452.
- [53] 郭召杰, 张志诚, 刘树文, 等. 塔里木克拉通早前寒武纪基底层序与组合: 颗粒锆石 U-Pb 年龄新证据[J]. *岩石学报*, 2003, 19(3): 537–542.
- Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng, Liu Shuwen, et al. U-Pb geochronological evidence for the early Precambrian complex of the Tarim Craton, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(3): 537–542.
- [54] 郑碧海, 朱文斌, 舒良树, 等. 阿克苏前寒武纪蓝片岩原岩产出的大地构造背景[J]. *岩石学报*, 2008, 24(12): 2839–2848.
- Zheng Bihai, Zhu Wenbin, Shu Liangshu, et al. The protolith of the Aksu Precambrian blueschist and its tectonic setting. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(12): 2839–2848.
- [55] 王飞, 王博, 舒良树. 塔里木西北缘阿克苏地区大陆拉斑玄武岩对新元古代裂解事件的制约[J]. *岩石学报*, 2010, 26(2): 547–558.
- Wang Fei, Wang Bo, Shu Liangshu. Continental tholeiitic basalt of the Akesu area (NW China) and its implication for the Neoproterozoic rifting in the northern Tarim[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(2): 547–558.
- [56] 王超. 塔里木盆地南缘前寒武纪地质演化[D]. 西安: 西北大学, 2011.
- Wang Chao. Precambrian tectonic of south margin of Tarim Basin, NW China[D]. Xian: Northwest University, 2011.
- [57] 张建新, 李怀坤, 孟繁聪, 等. 塔里木盆地东南缘(阿尔金山)“变质基底”记录的多期构造热事件: 锆石 U-Pb 年代学的制约[J]. *岩石学报*, 2011, 27(1): 23–46.
- Zhang Jianxin, Li Huaikun, Meng Fancong, et al. Polyphase tectono-thermal events recorded in metamorphic basement from the Altyn Tagh, the southeastern margin of the Tarim basin, western China: Constraint from U-Pb zircon geochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 23–46.
- [58] 葛荣峰. 塔里木克拉通北缘库鲁克塔格地块前寒武纪构造—热事件与地壳演化[D]. 南京: 南京大学, 2014.
- Ge Rongfeng. Precambrian tectono-thermal events and crustal evolution in the Kuruktag Block, Northern Tarim Craton [D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.
- [59] Zhang Chuanlin, Zou Haibo, Santosh M, et al. Is the Precambrian basement of the Tarim Craton in NW China composed of discrete terranes? [J]. *Precambrian Research*, 2014, 254: 226–244.
- [60] Zhang Zhaochong, Kang Jianli, Kusky T, et al. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of Neoproterozoic basalts from Sugetbrak, northwest Tarim block, China: Implications for the onset of Rodinia supercontinent breakup [J]. *Precambrian Research*, 2012, s 220–221(8): 158–176.
- [61] 杨文采, 王家林, 钟慧智, 等. 塔里木盆地航磁场分析与磁源体结构[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(4): 1278–1287.
- Yang Wencai, Wang Jialin, Zhong Huizhi, et al. Analysis of regional magnetic field and source structure in Tarim Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(4): 1278–1287.
- [62] 于常青, 赵殿栋, 杨文采. 塔里木盆地结晶基底的反射地震调查[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(9): 2925–2938.
- Yu Changqing, Zhao Diandong, Yang Wencai. Seismic reflection investigations of Basement in Tarim Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(9): 2925–2938.
- [63] 侯遵泽, 杨文采. 塔里木盆地多尺度重力场反演与密度结构[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(1): 29–39.
- Hou Zunze, Yang Wencai. Multi-scale inversion of density structure from gravity anomalies in Tarim Basin[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2011, 41(1): 29–39.
- [64] 何登发, 樊春, 雷刚林, 等. 吐格明背斜核部片岩的年代学与构造意义[J]. *中国地质*, 2011, 38(4): 809–819.
- He Dengfa, Fan Chun, Lei Ganglin, et al. Chronology of Proterozoic schist at the core of Tugerming anticline in northern Tarim basin and its tectonic significance [J]. *Geology China*, 2011, 38(4): 809–819.
- [65] 李文山, 李江海, 周肖贝, 等. 塔里木盆地中央高磁异常带成因: 来自地震反射剖面的新证据[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2014, 50(2): 281–287.
- Li Wenshan, Li Jianghai, Zhou Xiaobei, et al. Genesis of high aeromagnetic anomaly zone in central Tarim Basin: New Evidence from Seismic Profiles [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, 50(2): 281–287.
- [66] Gehrels G E, Yin An, Wang Xiao F. Detrital-zircon geochronology of the northeastern Tibetan plateau [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2003, 115(7): 881–896.
- [67] Wang Chao, Liu Liang, Yang Wenqiang, et al. Provenance and ages of the Altyn Complex in Altyn Tagh: Implications for the early Neoproterozoic evolution of northwestern China [J]. *Precambrian Research*, 2013, 230: 193–208.
- [68] 王立社, 张巍, 段星星, 等. 阿尔金环形山花岗岩片麻岩同位素年龄及成因研究[J]. *岩石学报*, 2015, 31(1): 119–132.
- Wang Lishi, Zhang Wei, Duan Xingxing, et al. Isotopic age and genesis of the mozogranitic gneiss at the Huanxingshan in middle Altyn Tagh [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(1): 119–132.
- [69] 尹得功, 郑玉壮, 吴海霞. 西昆仑塞拉加兹塔格群地质特征及构造环境分析[J]. *新疆地质*, 2014, 32(3): 295–300.
- Yin Degong, Zheng Yuzhuang, Wu Haixia. Study on the tectonic setting and geologic feature of Sailajiazitage Group in western Kunlun [J]. *Xinjiang Geology*, 2014, 32(3): 295–300.
- [70] 张传林, 杨淳, 沈加林, 等. 西昆仑北缘新元古代片麻状花岗岩锆石 SHRIMP 年龄及其意义[J]. *地质论评*, 2003, 49(3): 239–244.
- Zhang Chuanlin, Yang Chun, Shen Jialin, et al. Zircon SHRIMP age of Neoproterozoic gneissoid granites in the west Kunlun and its significance [J]. *Geological Review*, 2003, 49(3): 239–244.
- [71] 杨子江. 新疆阿尔金红柳沟一带早古生代地质构造演化研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2012.
- Yang Zijiang. Early palaeozoic tectonic evolution in Hong Liu Gou, Altyn, Xinjiang [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2012.