塔里木盆地新元古代裂陷群结构构造及其形成动力学

何碧竹^{1*}, 焦存礼², 黄太柱³, 周新桂⁴, 蔡志慧¹, 曹自成³, 姜忠正³, 崔军文¹, 余卓颖¹, 陈威威¹, 刘若涵¹, 贡晓瑞¹, 郝光明¹

1. 大陆构造与动力学重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083;

3. 中国石化西北油田分公司勘探开发研究院, 乌鲁木齐 830011;

4. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083

* E-mail: hebizhu@cags.ac.cn; hebizhu@vip.sina.com

收稿日期: 2018-01-16; 收修改稿日期: 2018-09-20; 接受日期: 2018-10-18; 网络版发表日期: 2019-01-14

国家自然科学基金项目(批准号: 41872121、41630207)、中国地质科学院基本科研业务项目(编号: JYYWF20180903、JYYWF20182103)、中石化西北分公司科研项目(编号: KY2013-S-024)和中国地质调查局项目(编号: 12120115002101、DD20160022、DD20160169、12120115026901)资助

摘要 塔里木盆地新元古界的构造属性及结构构造长期以来存在争议, 也是深层研究的重点及难题. 通过区域探井和地震资料联合解释, 结合航磁资料综合研究发现, 塔里木盆地深层存在近20个大小不等的南华纪-晚震旦世裂陷. 裂陷发育在前寒武纪变质结晶基底上, 与上覆显生宙盖层构造格局迥异. 受正断层控制呈半地堑、不对称地堑及垒堑相间的构造样式, 从东北到西南可分为NWW、NEE、NW向展布的三个裂陷群, 地层最大厚度可达4100m. 从南华纪到震旦纪主要断裂继承性活动, 断陷沉降中心沿断裂向东迁移, 震旦纪末期至早寒武世断裂活动减弱至停止. 断裂走向及沉降中心展布表明, 新元古代塔里木陆块不同部位分别处于NNE-SSW、NNW-SSE向拉张古应力场(相对现今), 并伴有顺时针旋扭作用. 根据同沉积断裂的活动性差异、岩浆活动、裂陷充填沉积物及与航磁异常的协调性分析, 裂陷的构造属性多以大陆裂谷及陆内断陷为主. 裂陷的主要发育期在0.8~0.61Ga, 其形成与南阿尔金-西昆仑洋、南天山洋的初始打开为响应, 且是Rodinia超大陆主要裂解期的产物.

关键词 裂陷群, 正断层, 拉张及顺时针旋转, 大陆裂谷及板内断陷, 南华纪-晚震旦世, 塔里木盆地

1 引言

塔里木盆地是在前寒武变质基底上形成的大型海-陆相叠合盆地(肖序常等, 1990; 何登发和李德生,

1996; 贾承造, 2004; Xu Z Q等, 2013), 其地表被广袤的塔克拉玛干沙漠所覆盖, 周缘为天山-北山造山带、阿尔金造山带、昆仑造山带所围限, 是中国陆上面积最大($56 \times 10^4 \text{ km}^2$)的含油气盆地. 塔里木盆地及周缘造

中文引用格式: 何碧竹, 焦存礼, 黄太柱, 周新桂, 蔡志慧, 曹自成, 姜忠正, 崔军文, 余卓颖, 陈威威, 刘若涵, 贡晓瑞, 郝光明. 2019. 塔里木盆地新元古代裂陷群结构构造及其形成动力学. 中国科学: 地球科学, 49: 635–655, doi: [10.1360/N072018-00010](https://doi.org/10.1360/N072018-00010)

英文引用格式: He B, Jiao C, Huang T, Zhou X, Cai Z, Cao Z, Jiang Z, Cui J, Yu Z, Chen W, Liu R, Yun X, Hao G. 2019. Structural architecture of neoproterozoic rifting depression groups in the Tarim Basin and their formation dynamics. Science China Earth Sciences, 62: 529–549, <https://doi.org/10.1007/s11430-018-9286-6>

山带显生宙的构造演化研究及能源资源勘查都取得了重要的进展及成果(贾承造, 2009; 康玉柱, 2012)。

然而, 长期以来对于塔里木盆地初始演化阶段——新元古代的盆地性质、结构构造认识争议较大。先后有坳拉槽(贾承造, 1997, 2004)、大陆裂谷盆地(Xu等, 2005, 2009; Zhang等, 2016)、前陆盆地——被动大陆边缘(Zhu等, 2011; Zhang等, 2016)、陆内弧后沉积盆地(Zhang Y L等, 2013)等观点(图1)。对于盆地内新元古界的分布也有不同认识, 如主要分布于北部坳陷(贾承造, 2004), 或分布在北部坳陷及盆地西南部、中央隆起带缺失(周肖贝等, 2015; 吴林等, 2016)。在盆地周缘柯坪隆起、库鲁克塔格地区、阿尔金地区和西昆仑山北部存在不同类型的新元古代地层, 基底与初始沉积地层接触关系、沉积地层厚度和沉积类型、构造类型和改造程度等也都存在显著差异。塔里木盆地新元古代构造属性、时空展布、沉积发育及改造演化, 是目前研究的关键所在。

本文主要利用塔里木盆地周缘露头剖面、区域深探井、重新处理的贯穿盆地的区域二维地震测线及大量局部二维、三维地震资料, 结合航磁资料, 开展塔里木盆地深层新元古界沉积-构造系统识别, 建立新元古代构造格架, 解剖新元古界精细结构构造, 明确其空间展布及古构造性质, 探讨其形成动力学, 为塔里木盆地深层油气勘探提供科学依据, 也为揭秘全球克拉通盆地初始发育机制提供新的证据。

2 地质背景

2.1 盆地基底构成

塔里木陆块经历了太古宙初始大陆地壳演化阶段(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993; 陆松年等, 2006; Lu等, 2008; Long等, 2010, 2011; Zhang C L等, 2012)、古元古代末期及中元古代晚期-新元古代早期的造山事件(Zhang J X等, 2012; Zhu等, 2008), 形成了塔里木前寒武纪基底。塔里木陆块的发育演化与2.0~1.8Ga哥伦比亚超大陆汇聚(Rogers和Santosh, 2002; Zhao等, 2002, 2004; Zhao和Cawood, 2012; Zhai和Santosh, 2011; Santosh等, 2009)以及罗迪尼亚超大陆大约在1.0Ga汇聚(Li等, 2003, 2008, 2013; 李曰俊等, 2005; Li和Zhong, 2009)有密切关系。

塔里木陆块前寒武纪构造格架呈三分性特征(Xu

Z Q等, 2013): 北塔里木地块(包括盆地北部及其北缘南-西南天山造山带与敦煌地块)具有2.7~2.5Ga或更老年龄的晚太古代-早元古代陆核(Long等, 2010; Zhang C L等, 2012; Xu Z Q等, 2013), 经历了2.0~1.8Ga、1.0~0.8Ga与760~687Ma的多期岩浆变质事件(Xu B等, 2005, 2009, 2013; Zhu等, 2008, 2011; 朱文斌等, 2017); 中塔里木构造带(包括盆地中部和阿尔金造山带)主要为940~890Ma岛弧岩浆弧(李曰俊等, 2003; 吴根耀等, 2006), 其从东部阿尔金地体向盆地内延伸(郭召杰等, 1998; 张建新等, 2011; Xu Z Q等, 2013)仍缺少足够的证据; 南塔里木地块(包括盆地南部及西昆仑造山带)具有2.4~2.3Ga陆核, 经历了2.0~1.75和1.0~0.8Ga的变质岩浆事件(张传林等, 2007, 2012)。

塔里木盆地新元古界发育在不同时期的前寒武纪基底之上: 一是新太古界以TTG为主的岩浆杂岩(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993; Lu等, 2008; Long等, 2010; 张传林等, 2012), 二是古元古界的变质岩(张传林等, 2003; Long等, 2011; Zhang J X等, 2013), 三是中元古界及新元古界下部以绿片岩相为主的变质岩(Zhang J X等, 2005a; Shu等, 2011)。

2.2 塔里木盆地初始沉积充填

塔里木盆地周缘露头发育有巨厚的、沉积类型丰富的新元古代地层。周缘新元古界主要发育早期陆相沉积、冰川沉积过渡到海相沉积, 发育2~4套冰碛岩(高振家等, 1993; 贾承造, 2004; 何秀彬等, 2007; 高林志等, 2010, 2013), 夹有多套火成岩(Xu B等, 2005, 2013; 张传林等, 2007; 王飞等, 2010; Zhang等, 2012a, 2016)。新元古界下部主要与前寒武纪不同时期的变质岩、岩浆岩不整合接触, 其上部与寒武系呈平行-低角度不整合接触(钱一雄等, 2014; 康建威等, 2016), 而其内部沉积地层序列复杂。塔里木盆地内有18口深探井钻达新元古界或前寒武纪基底, 主要分布在盆地隆起之上, 多口深钻井缺失新元古代南华-震旦系(Xu Z Q等, 2013; 吴林等, 2016), 甚至还缺失了重要的下寒武统优质烃源岩段——玉尔吐斯组(贾承造, 2004; 张光亚等, 2015), 下寒武统肖尔布拉克组碳酸盐岩直接与古元古代基底不整合接触(Xu Z Q等, 2013)。

尽管目前塔里木盆地内部分地区有钻孔揭示新元古界, 但是大部分地区由于研究程度、勘探程度较低, 而缺乏统一的层序地层对比方案, 与相邻的周缘造山

图1 塔里木盆地及周缘造山带主要构造单元及新元古代变质、岩浆事件

据新疆维吾尔自治区地质矿产局(1993)、许志琴等(2011)、张建新等(2011)、张传林等(2012)、Ge等(2012)、Xu Z Q等(2013)等修编。图中方框中为年龄数据,以Ma为单位。绿色框为钻井岩芯、岩屑获得数据,黑色虚线为露头与盆地内钻井的地层对比剖面,见图2和3。主要构造单元: I, 库车坳陷; II, 塔北隆起; III, 北部坳陷带; IV, 中央隆起带; V, 西南坳陷带; VI, 东南断隆; VII, 东南坳陷。新元古代地层年龄参考文献: 1, Shu等(2011); 2, 胡霁琴等(2010); 3, Long等(2011); 4, Zhang等(2007a); 5, 邓兴梁等(2008); 6, Zhang C L等(2012); 7, Zhang等(2006); 8, Zhang等(2007b); 9, 10, Xu等(2009); 11, Gao等(2010); 12, Xu等(2005); 13, Zhu等(2008); 14, 罗志文等(2016); 15, 何登发等(2011); 16, 魏永峰等(2010); 17, Zhang等(2009); 19, Zhu等(2011); 20, 李曰俊等(1999); 21, 李曰俊等(2005); 22, 郭光辉等(2009); 23, Guo等(2005); 24, 25, 张建新等(2011); 26, Gehrels等(2003a); 27, Zhang等(2007a); 28, 张传林等(2003); 29, Zhang等(2006); 30, Zhang等(2010); 31, Xu Z Q等(2013); 32, Zhang Z C等(2012); 33, Xu B等(2013); 34, He等(2014); 35, Zhang等(2016); 36, 本文

带可对比性急需深入研究。

3 新元古代地层发育特点

塔里木盆地东北缘库鲁克塔格地区第一套沉积盖层为新元古代库鲁克塔格群(南华系-震旦系), 是新元古界发育最为完整的地区, 可分为青白口系、南华系、震旦系等三个系和十个组(高振家等, 1993), 厚达6000m(图1和2), 主要为滨海相、海相沉积岩夹火山岩, 发育有4套冰碛岩及3期主要的岩浆事件(Xu等, 2005, 2009; 高林志等, 2010; Zhu等, 2011; He等,

2012)。变质基底主要是新太古代-古元古代或更老年龄的托格拉克布拉克杂岩及中元古代-新元古代早期兴地塔格群(新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993; 陆松年和袁桂邦, 2003; 胡霁琴和韦刚建, 2006; Lu等, 2008), 其经历了2.0~1.8Ga和1.1~1.0Ga变质事件(Long等, 2011; Shu等, 2011; Zhang C L等, 2012)。

塔里木盆地西北缘阿克苏地区第一套沉积盖层——新元古界, 不整合在阿克苏群之上, 包括南华系巧恩布拉克组、尤尔美那克组, 以及震旦系苏盖特布拉克组和奇格布拉克组(高振家和朱诚顺, 1984; 贾承造等, 2004), 由早期的陆相红色砂岩向上过渡为海相砂

图2 塔里木盆地及周缘东部-北部地层对比图

地层年龄主要参考: 1, Xu等(2009); 2, 高林志等(2010); 3, He等(2014); 4, Wu等(2012); 5, Guo等(2005); 6, 李曰俊等(2003); 7, Xu Z Q等(2013). 图中露头剖面厚度与盆内钻井揭示厚度比例不同, 图3同. 库鲁克塔格地区参考高林志等(2010)、Xu B等(2005, 2009, 2013)

岩、冰水浊积岩、白云岩(图3). 其中尤尔美克组(南华系)为紫红色冰碛岩, 与库鲁克塔格地区特瑞爱肯组冰期沉积相当(高振家和朱诚顺, 1984); 在苏盖特布拉克组中还存在大陆拉斑玄武岩(王飞等, 2010). 阿克苏群由含蓝闪石片岩、阳起石片岩、绿帘阳起片岩和钠长石英片岩组成(肖序常等, 1990; Nakajima等, 1990), 其原岩为火山岩和火山碎屑岩, 原岩年龄可能为古元古代晚期-新元古代早期(肖序常等, 1990; 高振家等, 1993; 郑碧海等, 2008), 其变质年龄在新元古代晚期760~730Ma(Zhu等, 2011; Zhang等, 2012; Yong等, 2013; 图1和3).

塔里木盆地东南缘的北阿尔金地区第一套未变质沉积岩为新元古代安南坝群, 不整合在米兰群之上, 主要由底部紫红色含砾砂岩和上部的厚层白云岩和白云质灰岩组成(Lu等, 2008, 张建新等, 2011). 紫红色含砾砂岩中含有大型斜层理和交错层理, 上部白云岩中含厚层叠层石白云岩. 太古代的米兰群杂岩(李惠民等, 2001; Lu等, 2008)主要由不同类型基性麻粒岩、斜长角闪岩和TTG花岗岩组成, 后期经历了2.8~2.6、2.45~2.35、2.0~1.8Ga的3期热事件(车自成和孙勇, 1996; 李惠民等, 2001; Gehrels等, 2003b; Lu等, 2008; 张建新等, 2011; Zhang J X等, 2012). 该区在新元古代

图3 塔里木盆地西部-南部地层对比图

地层年龄主要参考: 1, Zhu等(2011); 2, Zhang C L等(2012); 3, 王飞等(2010); 4, Xu B等(2013); 5, Xu Z Q等(2013); 6, Zhang等(2016); 7, He等(2014); 8, 本文。西昆仑地区参考王福同等(2006)、高林志等(2013)、Zhang等(2016); 阿克苏地区参考朱文斌等(2008)、王飞等(2010)、Xu B等(2013)

早期(900~940Ma; Gehrels等, 2003a; 陆松年等, 2006; 王超等, 2006)、新元古代晚期760Ma左右和早古生代(490~450Ma; Zhang等, 2005a; 张建新等, 2007; 罗金海等, 2009)发生过三期构造热事件。

塔里木盆地南缘西昆仑山北带第一套未变质的新元古界丝路群和恰克马克利克群。青白口系丝路群由博查特塔克组、苏玛兰组、苏库洛克组组成, 主要为碎屑岩及碳酸盐岩。南华系由牙拉古孜组、波龙组、克里亚组、雨塘组组成(宗文明等, 2010; Zhang等, 2016; 图3), 发育紫红色砾岩、砂砾岩, 灰绿色硅质

岩、紫红色-灰绿色混积岩、冰碛岩, 紫红色砂、砾岩、混积岩, 且在早期有大量岩墙群、双峰式火山岩、大规模的混合岩化及其派生的碱性花岗岩(张传林等, 2003; Zhang等, 2016)。恰克马克利克群波龙组、雨塘组两期冰期与库鲁克塔格地区的贝义西组、阿勒通沟组-特瑞艾肯组冰期可对比。震旦系由库尔卡克组灰黑色泥岩、灰绿色泥岩、粉砂质泥岩和克孜苏胡木组灰色含磷砂岩、紫灰色白云岩组成, 与南华系不整合接触。基底由古元古界的赫罗斯坦杂岩(2410Ma; Zhang等, 2007b)和卡拉喀什群花岗片麻岩组成(胡霭

琴和韦刚建, 2006).

塔里木盆地内多口深钻井缺失南华-震旦系(Xu Z Q等, 2013; 吴林等, 2016), 由下寒武统肖尔布拉克组直接与古元古代末期基底接触. 部分井钻揭震旦系、南华系, 与相邻的周缘造山带新元古界部分可对比(图2和图3). 盆地中北部上震旦统奇格布拉克组以泥晶白云岩、粉-细晶白云岩、微生物细晶白云岩、叠层石粉晶白云岩、凝块白云岩为主; 塔北隆起的XH1、塔东断隆的TD1与TD2等井揭示其与阿克苏地区岩性相似; 孔雀河斜坡的YL1井与库鲁克塔格地区的水泉组、汉格爾乔克组以及西昆仑北地区克孜苏胡木组相对应. 下震旦统苏盖特布拉克组仅孔雀河YL1井钻揭, 主要为紫红色与灰绿色砂岩与泥岩互层, 与西昆仑北缘的库尔卡克组、库鲁克塔格地区育肯沟组和扎摩克提组相对应, 但YL1井火成岩不发育. 盆地内南华系主要有褐红色粗砂岩、杂色砾岩(BT5、S57)等碎屑岩及安山岩、英安岩(T1)、玄武岩(BT5)、花岗岩(TC1、YD2)等火成岩组成, 分异性很强; YL1井揭示较多, 特瑞艾肯组主要由灰白色砂质白云岩、泥质白云岩、灰绿色石英砂岩及深、浅灰色泥灰岩、砂质灰岩组成; 阿勒通沟组主要由灰绿色、蓝灰色、深灰色厚层泥岩夹灰色粉砂质泥岩、泥质粉砂岩组成; 与库鲁克塔格地区可对比(图2). 冰碛岩仅在塔北隆起(S57)和巴楚隆起(BT5)岩芯中有显示, 冰碛岩在未取芯层段难以识别.

4 新元古代裂陷群发育特征

塔里木盆地是多期叠合盆地, 新元古界由于受多期次构造作用改造、上覆巨厚的显生宙沉积地层和沙丘覆盖、前期深层地震资料品质较差而难以识别. 本次研究主要利用盆地内18口钻遇前寒武系的深探井, 结合27条由中国地质调查局油气中心重新处理(2014~2015年)的深层具有较高品质的盆地区域二维地震测线, 以及中国石化、中国石油集团有限公司在塔里木盆地采集处理的多条二维、三维地震剖面, 井震结合, 开展了系统的盆地内新元古界构造分析研究工作, 识别出南华-震旦纪发育的多个裂陷群(图4).

4.1 新元古代断裂发育特征

研究发现, 塔里木盆地新元古代的断裂明显不同

于显生宙的断裂. 新元古代主要断裂以正断层为主(图4和图5), 个别具有走滑断裂特征; 断层倾角变化大, 为 20° ~ 80° (图5); 断层多切割基底, 具有阶梯状、Y字型、地堑、地垒等组合样式; 断距一般为300~800m, 盆地东部英吉苏南断裂最大垂直断距可超4000m(图5, AA'). 断层走向以北西西、北东东、北东向为主(图4), 主要断层沿走向延伸约300~400km, 个别20~50km. 且断裂走向明显具有地域分布的优势性, 在盆地中北部以北西西为主, 中南部以北东东为主, 而西南部又为北西西向. 多组断裂具有斜列展布的特征, 其中控制各主要断陷发育的二级断裂有12条, 这些断裂可由多个次级断层组成, 呈雁列展布(图4).

新元古代主要断裂活动控制了南华-震旦纪地层发育, 其活动性在时空上有明显差异(图5~8). 由于新元古代的断裂系统识别尚是初次, 加之其特殊性, 为了体现其控制裂陷的位置, 本文采用地区名称来命名主要的二级断裂(图4). 除了个别断裂后期再活动为反转断裂, 如盆地中西部的吐木休克断裂、盆地东部英吉苏南断裂(图4), 在新元古代为正断层, 而早古生代表现为逆冲断层(如图5a, 英吉苏南断裂); 其他大多数断裂在震旦末期或早寒武世活动减弱至停止(如图7b, 塔中西断裂). 一些断裂在震旦纪末-寒武纪早期还表现出弱的逆冲活动. 主要断裂的活动时代、强度有差异, 如麦盖提东断裂、英吉苏南断裂在裂陷早期南华纪活动强, 而塔中西-顺北断裂、英买力-哈德逊断裂及满加尔南、北断裂(图4)则在裂陷晚期的震旦纪活动强烈.

从新元古代断裂切割及控制地层特征来看, 断裂主要活动于南华纪、震旦纪, 大部分停止于震旦纪末期, 部分在早寒武世有较弱的活动. 个别断层在奥陶纪(何碧竹等, 2011)、二叠纪具有正断层再活动的特点(图5~8).

4.2 新元古代裂陷空间展布特征

新元古代断裂活动控制了塔里木盆地新元古代断陷的发育, 形成了断陷、半地堑、地堑相间的裂陷构造样式(图4、图5~8), 同时控制着裂陷内的地层发育. 裂陷多发育在前寒武纪基底(古元古代-中新元古代)之上, 其顶部与下寒武统不整合接触(图5~8). 受断裂控制, 在盆地北部、中南部、西南部形成了3个裂陷群, 呈带状展布.

图 4 塔里木盆地南华纪、震旦纪裂陷群分布图

(a) 南华纪, (b) 震旦纪; 主要二级断裂: ① 英吉苏南断裂; ② 孔雀河南断裂; ③ 英买力-塔河断裂; ④ 满加尔北断裂; ⑤ 满加尔南断裂; ⑥ 顺托果勒南断裂; ⑦ 顺托果勒北断裂; ⑧ 塔中西断裂; ⑨ 吐木休克断裂; ⑩ 海米罗斯南; ⑪ 麦盖提东断裂; ⑫ 莎车北断裂; ⑬ 和田断裂

图5 过塔里木盆地东南、中部新元古代断陷地震地质解释剖面

(a) 满加尔断陷与英吉苏断陷结构特征剖面AA'; (b) 剖面AA'寒武系底反射层层拉剖面, 可见断裂呈正断层特征, 对下盘新元古代地层发育有明显控制; (c) 塔中西断陷, 剖面BB'; (d) 其上寒武系底反射层层拉剖面, 可见个别主断层对中亚寒武统发育有控制, 反映新元古代活动的断裂在寒武纪早中期有持续活动。断层(F): WTZ, 塔中西; NSN, 顺南北; SSN, 顺南南; ETZ, 塔中东; GCX, 古城墟; SYJS, 英吉苏南。标注下行实线为现今塔里木盆地构造单元, 上行虚线为南华-震旦纪裂陷及范围, 下图同。剖面位置见图4

图7 塔里木盆地中部南北向地震地质解释剖面(a)与其寒武系底反射层拉平剖面(b)

断层(F): CEC, 车尔臣; TN, 塘南; TangB2, 塘北2; STZ, 塔中南; TZ2, 塔中2号; TZ1, 塔中1号; WZ, 塔中西; NSTGL, 顺托果勒北; SMJE, 满加尔南; NMJE, 满加尔北; YML-HDX, 英买力-哈德逊; NTH, 塔河北; LTB, 轮台北

西西为主, 其东部、北部与中南断陷群相接. 和田断陷(图8E-E')、巴什托断陷均为南断北超的半地堑, 新元古界最大厚度约1200m.

从不同时期新元古界裂陷分布看(图4~6), 无论南华纪还是震旦纪断裂的控制作用都比较强(图4~6). 多数断裂活动至震旦纪末或寒武纪早中期(图5~7). 不同断陷的主要断裂在震旦纪、南华纪的活动强度有差异, 造成南华纪及震旦纪沉积地层有差异, 在麦盖提东及英吉苏断陷南华系较厚, 而在英买力-哈德逊断陷震旦系较为发育. 大多数断陷显示出, 震旦纪的沉降中心较南华纪沿断裂明显东移, 塔东区出现多个震旦纪小断陷可能与也此有关. 震旦系与寒武系呈角度不整合接触(图5~8)在半地堑的抬升部位表现明显, 可见震旦系被顶削, 寒武系超覆在震旦、南华系或更老的地层之上. 而南华系则表现为正断层控制的生长地层, 可见底超、上超于基底之上.

5 塔里木盆地新元古代裂陷群形成机制探讨

5.1 裂陷群识别的资料可靠性分析

塔里木盆地新元古界形成于盆地初始沉积阶段,

大部分地区被显生宙巨厚沉积层覆盖, 地表沙漠、二叠系的火成岩、寒武系的膏盐岩等对地震波能量的吸收, 以及多种类型的多次波干扰, 使得新元古界反射波能量较弱、信噪比较低; 加上长期以来对新元古界的地质认识较弱, 给覆盖区新元古界的识别带来很大困难. 我们在盆地与周缘地层格架对比的基础上, 开展井-震结合研究, 利用多口探井合成地震记录标定新元古界在地震剖面上的反射波组位置和反射特征, 同时利用确定的寒武系多个反射波组及基底反射作为辅助标志层(图9a), 开展新元古代沉积地层与断裂构造的系统识别. 在未有钻井的地区, 主要是依据贯穿盆地的、有井控制的骨干地震剖面解释方案构建网络, 结合局部速度分析(图9b), 识别、剔除多次波, 鉴别拾取寒武系之下的有效地震反射波, 从而进一步确认新元古界地震反射波. 对于新元古界南华系、震旦系的划分, 主要依据露头剖面地层发育特征、钻井、录井、测井资料及合成地震记录, 确定反射波波组特征, 进一步划分了构造层. 对其更为精确的划分及其充填物质组成分析, 仍需要更多的深探井控制.

5.2 裂陷群分布与航磁异常的关系

塔里木盆地由横亘于中部近东西向的巨型航磁正

图 8 新元古代和田、麦盖提东断陷地震地质解释剖面及构造恢复剖面

(a) 巴楚隆起-西昆仑山前地震地质解释剖面E-E'; (b) E-E'剖面中E1-E'段寒武系底反射层层拉平剖面。断层(F.): HT, 和田; SHMLS, 海米罗斯南; HMLS, 海米罗斯; 紫红色充填区示意二叠系火成岩体

高异常带分隔为两个区域(图10); 北部为东西向延伸的、平缓的负磁异常区; 西南部为北东向正负相间磁异常带, 正负变化频率较低, 东南部为北东向变化剧烈的正负局部异常带(袁学诚, 1996)。对此航磁异常先后有多种不同解释, 尤其是对纬向航磁正异常及盆地南部北东向异常区的认识, 如代表前震旦纪裂谷(王宜

昌等, 1994)、基底岩相与深大断裂、(许炳如, 1997)、晋宁期古缝合线(贾承造, 1997; 郭召杰等, 2000, 吴根耀等, 2006), 有新元古代裂谷及奥陶纪大型火成岩体的贡献(何碧竹等, 2011), 代表二叠纪裂谷与结晶基底(杨文采等, 2012)等。

塔里木盆地周缘南华、震旦系露头剖面中夹有多

1) 何碧竹, 崔军文, 蔡志慧, 李广伟, 马绪宣, 陈威威, 余卓颖. 2016. 巴楚-塔中隆起构造演化对油气成藏的控制. 中石化西北油田分公司科研项目

图9 通过合成记录及速度分析识别新元古界有效反射波

(a) YL1井的合成地震记录; (b) 巴楚地区局部速度分析; 据中石化西北油田资料修改(2015)

套基性岩, 具有较强的磁性. 如盆地西北缘阿克苏-乌什一带, 下震旦统苏盖特布拉克组中的辉绿岩, 平均磁化率分别为 $3893.6 \times 10^{-5} \text{SI}$ 、 $4571.8 \times 10^{-5} \text{SI}$ 、 $4483.9 \times 10^{-5} \text{SI}$ (杨文采等, 2012); 盆地东南阿尔金山红柳沟元古代的橄榄岩及辉长岩体的最大磁化率可达 $23509.8 \times 10^{-5} \text{SI}$, 平均磁化率为 $1032.4 \times 10^{-5} \text{SI}$, 表明基性及超基性岩体均可以引起较强磁异常. 本次对多口探井岩芯的磁性分析(表1)以及前人分析(闫磊等, 2014)研究表明, 基性和超基性火成岩具有较高的磁化

率, 往往对局部磁异常有重要贡献; 而酸性火成岩、浅变质岩、沉积岩具有较低的磁化率, 所引起的磁异常较弱. TZ33、YD2、F1等井的岩性差异较大, 其磁化率差异明显(表1; 图10a).

本次研究识别出的新元古代断裂体系在中、北部呈北西西走向, 南部为北东-北东东走向, 与航磁化极异常的变化带、突变区及梯度带有较好的协调性(图10a). 裂陷区大部分处于相对低的航磁异常区及负异常区, 可能与沉积岩的弱磁性相关; 南、北裂陷群构

图 10 塔里木盆地航磁化极异常与新元古界裂陷分布叠置图(a)和显生宙断裂系统图(b)

(a) 底图据袁学城(1996)、李曰俊等(2008); (b) 改编自汤良杰和贾承造(2007)、杨树锋等(2009)、何碧竹(2009)、任建业等(2011)、黄太柱等(2014)、焦方正(2017); 何碧竹等(2016)^[1] 断裂带: 1, 库车断裂带; 2, 沙雅-轮台断裂带; 3, 孔雀河断裂带; 4, 塔中 I 号断裂带; 5, 塔中 II 号断裂带; 6, 塔中 III-塘北断裂带; 7, 玛东-玉北断裂带; 8, 车尔臣断裂带; 9, 民丰-且末断裂带; 10, 柯坪断裂带; 11, 吐木休克断裂带; 12, 卡拉萨依断裂带; 13, 玛扎塔格断裂带; 14, 海米罗斯断裂带; 15, 色力布亚断裂带; 16, 喀什断裂带; 17, 和田断裂带; 18, 塔中北东向断裂带; 19, 顺托北东向断裂带; 20, 塔中台缘断裂带; 21, 塘南断裂带; 22, 塘古-古城墟断裂带; 23, 草湖断裂带; 24, 英吉苏北西向断裂带; 25, 英吉苏东西向断裂带

造转换带则处于中部的纬向航磁正异常带。前人研究表明, 塔里木盆地存在 5 个磁性层, 包括前震旦结晶基

岩、震旦系、奥陶系基性和超基性岩、二叠系玄武岩、新近纪的砂岩均具有较强的磁性。而塔里木显生

表 1 塔里木盆地重点探井岩芯古地磁样品测试结果^{a)}

样品号	采样深度(m)	岩性	地层层位	质量(g)	磁化率(SI)	剩磁强度	单位质量磁化率 (SI/g)	单位质量剩磁 强度
F1-2	4750	辉长岩	Pt ₃	31.23	2.25×10 ⁻²	5.45×10 ⁻¹	7.19×10 ⁻⁴	1.75×10 ⁻²
F1-3	4665	辉绿岩	Pt ₃	31.02	1.92×10 ⁻²	4.62×10 ⁻¹	6.18×10 ⁻⁴	1.49×10 ⁻²
YD2-2	4930	花岗闪长岩	Pt ₃	28.2	9.37×10 ⁻⁵	5.46×10 ⁻³	3.32×10 ⁻⁶	1.94×10 ⁻⁴
TD1-4	2890	泥灰岩	Є	28.11	2.91×10 ⁻⁴	6.68×10 ⁻⁴	1.04×10 ⁻⁵	2.38×10 ⁻⁵
T1-1	2260	辉绿岩	O	7.22	4.22×10 ⁻³	2.28×10 ⁻¹	5.84×10 ⁻⁴	3.16×10 ⁻²
T1-2	2265	辉绿岩	O	7.31	5.32×10 ⁻³	1.55×10 ⁻¹	7.27×10 ⁻⁴	2.12×10 ⁻²
TZ33	5958	玄武岩	O	32.35	1.30×10 ⁻¹	2.17×10 ⁰	4.02×10 ⁻³	6.71×10 ⁻²

a) 本文全部样品的天然剩磁强度测试是在中国地质科学院地质力学研究所古地磁实验室美制立式2G-755R超导磁力仪上进行, 样品的磁化率测试是在捷克AGICO公司KLY-4磁化率仪上进行, 最终获得了单位质量(g)的天然剩磁强度和磁化率大小

宙不同时期的断裂体系则与航磁异常的梯度带关联较弱(图10b)。因此, 我们认为航磁化极异常是盆地基底的构成、盆地初始裂陷(南华-震旦纪)及后期多期的岩浆活动(晚奥陶世、二叠纪、新近纪)的综合效应, 其中保留了南华-震旦纪裂陷的记录。断裂与磁异常变化的协调性, 尤其是高磁异常与主断裂叠置区, 可能反映了岩浆活动及基性-超基性岩的存在(图10a中红色圈, 另文述)。因此, 根据盆地东、北部深井及露头剖面新元古界多发育沉积岩夹少量火成岩, 而西南部钻井揭示的新元古代基性、中酸性火成岩发育; 盆地南部及西南部断裂控制下的新元古代裂陷的地震地层学特征, 结合5~10km以及10~15km深度的磁异常源较强的特点(杨文采等, 2012), 南部应较北部火成岩更为发育。

5.3 裂陷群发育期的主要古应力场

南华纪, 塔里木盆地中北部裂陷群断层多呈NWW走向(平均走向120°~300°); 断陷的沉降中心处于断裂下盘, 且有右侧斜列特征, 中南裂陷群断层多为NE、NEE走向(平均走向72°~252°)(图4和11)。震旦纪, 主要断裂仍继承性活动, 北部裂陷群断层走向仍为NWW向(平均走向113°~293°), 中南裂陷群断层走向为NEE(平均走向70°~250°), 西南断陷群为NWW向(平均走向117°~297°); 但较南华纪略有差异, 震旦纪NEE向断裂较NWW向断裂更为活跃。无论北部裂陷群, 还是中南裂陷群, 大多数断陷的沉降中心在震旦纪沿主控断裂向东迁移。这表明, 在南华纪和震旦纪, 塔里木地块不同部位所受的构造应力场有差异, 南、北区分别受NNW-SSE向、NNE-SSW向的拉张作用, 同时伴有顺时针扭动构造活动; 并在晚期拉张作用有

东移的趋势, 三者综合作用形成了新元古代盆地构造格局。

5.4 裂陷群形成的构造背景及动力学模型

全球超大陆的聚散影响着主要的克拉通发育演化, 塔里木克拉通的初始发育也与其密切相关。Columbia超大陆形成于2.0~1.8Ga(Rogers和Santosh, 2002; Zhao等, 2002, 2004; Zhao和Cawood, 2012; Zhai和Santosh, 2011), 而发生在大约1.6~1.3Ga的Columbia超大陆裂解导致一些克拉通陆块分离(Zhao等, 2004; Li等, 2003, 2008)。大约在1.1~0.9Ga或略晚一些, 众多陆块与劳亚古陆再次汇聚形成了Rodinia超大陆, 它几乎包含了现在地球上所有的前寒武纪克拉通, 其中也包括塔里木克拉通。Rodinia超大陆经历了边缘增生、持续大陆裂谷及多期的裂解, 最终在580Ma完全裂解(Li等, 2008, 2013)。期间基性岩浆作用主要发生在3个年龄峰期830~790、780~755、745~725Ma(Li等, 2003, 2008; Zhu等, 2011; Wang等, 2012, 2013), 主要与地幔柱及Rodinia超大陆裂解、原特提斯洋打开相关(Li等, 1999; Zhu等, 2011, 2017; Zhang C L等, 2012, 2016; Li等, 2018), 还伴随着3~4期主要的冰期事件(Xu等, 2009; 高林志等, 2010, 2013; Li等, 2013)。

塔里木盆地南、北缘的新元古界露头剖面揭示了不同的大地构造背景。在塔里木盆地北缘库鲁克塔格一带, 库尔勒地区的高级变质岩变质时代为830~790Ma(He等, 2012; Ge等, 2012, 2013), 反映在新元古代早中期该区处于增生造山环境, 而非大陆裂解环境(朱文斌等, 2017)。该区贝义西组底部玄武岩(740Ma)及英安岩、流纹岩组成双峰式火山岩(Xu等,

图 11 塔里木盆地南华、震旦纪主要断裂走向玫瑰花图 (相对塔里木陆块的现今位置)

2005; 徐备等, 2008), 在大气堡沟贝义西组顶部冰碛岩之上的玄武岩(732Ma, 徐备等, 2008), 阿勒通沟组顶部碎屑岩夹有火山岩(655Ma, He等, 2014), 特瑞艾肯组发育枕状玄武岩(705Ma, 高林志等, 2010), 扎摩克提组发育基性、中性火山岩(614Ma, 徐备等, 2008)和凝灰岩(616Ma, He等, 2014)。另外, 库尔勒地区还出露大量的基性岩墙群(634Ma, Zhu等, 2011); 库车坳陷东部吐格爾明背斜核部存在典型的过铝质花岗岩(626~643Ma, 何登发等, 2011); 在库鲁克塔格6000m的裂谷盆地沉积记录(740~615Ma)中发育全球可对比的4套冰碛岩(Xu等, 2005, 2009; 高林志等, 2010; 2013; 图2)。上述岩浆作用及沉积充填表明, 新元古代中晚期(740~615Ma)塔里木盆地北缘处于大陆裂谷、板内伸展环境。

盆地西北缘阿克苏地区的肖尔布拉克剖面上, 在阿克苏群蓝片岩之上的新元古界底部砂砾岩中夹着两层玄武岩, 其属性为大陆拉斑玄武岩系列, 玄武岩的形成年龄为755Ma(王飞等, 2010)。在苏盖特布拉克西北苏盖特布拉克组砂岩层中夹的玄武岩(614~615Ma), 不同于大体积的大陆拉斑玄武岩, 显示了陆内裂谷环境及7~12%的部分熔融(Xu B等, 2013)。该区沉积记录也反映了由大陆裂谷到被动陆缘的沉积环境, 新元古代地层厚度可达3300m(图3)。因此, 西北缘新元古代

中、晚期(755~614Ma)为大陆裂谷环境, 且在后期火山作用有衰退现象。值得一提的是, 在苏盖特布拉克西南, 苏盖特布拉克组(应为巧恩布拉克组?)细砂岩中夹的玄武岩结晶年龄为(783±2.3)Ma, 岩浆源来自橄榄岩石榴石-尖晶石过渡相部分熔融(Zhang Z C等, 2012), 与地幔柱活动及Rodinia超大陆裂解相关。

在盆地东南缘阿尔金北缘红柳沟-拉配泉蛇绿岩带东部半鄂博地区辉长岩的Sm-Nd同位素测定其等时线年龄为(829±60)Ma(2σ)(郭召杰等, 2000)。柴北缘-南阿尔金早古生代大陆俯冲型UHP变质带, 其榴辉岩原岩主要为新元古代(850~750Ma)大陆裂谷环境的基性岩, 而其围岩主要为新元古代早期的花岗岩和中元古代或更老的沉积岩(Zhang等, 2005b; Liu等, 2012; Song等, 2010; 张建新等, 2011, 2015; Wang等, 2013)。可见, 阿尔金地区新元古代的造山作用比库鲁克塔格、阿克苏地区早, 其大陆裂谷拉张环境出现的850~750Ma也要比上述两地区早。

在盆地西南缘西昆仑北许许沟的新元古代基性岩墙(新疆地质矿产局, 1993)侵位约在820~800Ma, 丝路群的玄武岩与贝义西组可对比, 发育在740Ma, 岩浆主要来自拉张环境的大陆板内过渡性地幔或富集地幔源区, 形成于板内伸展环境, 与沉积的碳酸盐岩-碎屑岩-冰碛岩系列共同发育在被动陆缘或裂谷盆地(Zhang等, 2007b, 2016), 西南缘新元古代地层厚度可达3300m(图3)。因此, 西昆仑地区新元古代的大陆裂谷及板内伸展发生时间与阿尔金地区基本上可对比, 塔里木盆地南缘新元古代裂解启动时间早于北缘。

塔里木盆地内钻遇新元古界深井分布在现今的隆起和斜坡区。中央隆起带中部TC1井寒武系之下的花岗岩、花岗闪长岩属于壳幔混源的I型花岗岩(李曰俊等, 2005), 锆石SHRIMP年龄为(757.4±6.2)Ma(郭光辉等, 2009), 形成于构造活动带或板内伸展环境(李曰俊等, 2005; Ge等, 2012)。中央隆起带西端的T1井钻遇安山岩(755Ma, Xu等, 2013)、流纹岩、夹红褐色砂岩; BT5钻遇红褐色的砾岩与玄武岩(727Ma)(本文), 东部的YD2井钻遇722Ma花岗岩(Xu Z Q等, 2013); 中北部及东部XH1、TD1、TD2井钻遇震旦纪晚期碳酸盐岩台地相的厚层白云岩, YL1井新元古代则是碎屑岩及碳酸盐岩组合; 主要反映了伸展环境下的岩浆活动及沉积地层, 由地震资料解释得到新元古界最大厚度可达4100m(图4)。

总之, 塔里木克拉通的沉积起始为新元古代的裂陷, 裂陷受伸展断裂控制呈带状分布(图4). 其中有巨厚的多种类型陆相-海相沉积物充填; 发育基性岩墙群、A型花岗岩、双峰式火山岩等多期的火山活动, 主要可分为4期: 830~800、780~760、750~725及650~615Ma(Xu B等, 2005, 2009, 2013; 张传林等, 2003, 2012; Zhu等, 2008; Zhang等, 2009, 2016; Xu Z Q等, 2013; 朱文斌等, 2017). 根据同沉积断裂的活动性, 构造热事件以及充填的沉积物, 裂陷群形成于大陆板内的拉张环境, 裂陷的主要发育生长期在0.8~0.61Ga; 火山活动丰富, 且西部更强(图10). 这表明塔里木盆地新元古代的裂解是一个长期、持续、脉动的过程, 与全球Rodinia超大陆的裂解既有准同时性, 又有其独特的特征. 裂陷群的出现是新元古代Rodinia超级地幔柱及裂谷作用、冰期作用的综合产物, 且与澳大利亚及扬子克拉通有相似性(Powell等, 1994; Li等, 2008; 朱文斌等, 2017). 尽管塔里木陆块与周缘多个微陆块的完全分离时间不能确定(Safonova等, 2008; Safonova和Santosh, 2014; Wang等, 2014; 张建新等, 2015; Zhang C L等, 2016; 朱文斌等, 2017), 但塔里木盆地的裂陷群发育也与西昆仑-阿尔金洋、古亚洲洋的初始裂解、洋壳出现相关(图12). 塔里木盆地南缘的西昆仑-阿尔金洋与北缘的古亚洲洋打开的先后性, 可能是造成盆地内部发生裂陷并伴有顺时针旋扭的原因.

塔里木克拉通盆地初始与全球多个克拉通盆地初始具有相似的地球动力学背景, 多起源于板块尺度的伸展应力(Allen和Armitage, 2012; Guiraud等, 2005; Persaud等, 2017). 塔里木盆地内部莫霍面深度一般为37~44km, 康氏面深度为15~38km; 而外部向天山、西昆仑、阿尔金山前莫霍面迅速下降变深至42~54km,

康氏面深度为32~44km; 这表明塔里木盆地内部地幔上隆, 地壳厚度相对减薄. 重、磁力反演表明中-上地壳厚度、速度变化大, 下部地壳相对稳定; 下地壳厚度一般为16~22km(殷秀华等, 1998). 根据地震资料综合解释现今塔里木盆地中上地壳厚度主要为4~14km(He等, 2016), 而新元古界最大厚度约4km, 结合塔里木盆地地壳与上地幔结构研究结果(殷秀华等, 1998; 赵俊猛等, 2008; 侯遵泽和杨文采, 2011), 塔里木盆地新元古代陆内裂谷和伸展裂陷是在地幔上隆、多期拉张应力场的动力学背景下发育形成, 伴随着局部部分熔融发育了火成岩, 尤其是南部; 但与下地壳及地幔的深部驱动机制、动力学模型有待进一步探讨.

6 结论

(1) 研究发现塔里木盆地存在近20个大小不一的南华纪-晚震旦世裂陷. 它们发育在前寒武系变质-结晶基底上, 顶部与下寒武统碳酸盐岩台地及盆地相沉积岩不整合接触.

(2) 裂陷受正断层控制呈半地堑、地堑及垒堑相间的构造样式, 可分为北部、中南、西南三个裂陷群, 分别以NWW、NEE、NWW等三个方向展布为特征. 从南华纪到震旦纪主要断裂继承性活动, 且早期活动强度大, 晚期明显减弱, 震旦纪末期至早寒武世断裂活动减弱至停止, 断陷的沉降中心普遍出现沿断裂向东迁移的特征. 断裂活动特征揭示了新元古代塔里木地块处于NNW-SSE、NNE-SSW的拉张古应力场下, 并伴有顺时针旋扭.

(3) 主要断裂——裂陷群的展布与航磁异常变化带有一定的匹配性. 南、北裂陷群构造转换带处于盆地中部巨型纬向航磁正异常带. 沿新元古代的主要断

图 12 塔里木盆地南华纪-晚震旦世裂陷形成动力学模型示意图

参考殷秀华等(1998)、刘和甫等(2005)、Ingersoll(2012). 为了突出显示新元古界结构, 剖面垂向未按比例

裂有多个航磁异常高值带, 可能反映主断裂活动时伴有较强的岩浆活动, 且盆地南部及西南部新元古界火成岩较北部、东北部更为发育.

(4) 塔里木盆地南华-震旦纪裂陷多以大陆裂谷及陆内断陷为主. 裂陷群的主要活动期在0.8~0.61Ga, 且早期南部裂陷作用较强; 其形成与南阿尔金-西昆仑洋、南天洋的初始裂解互为响应, 且塔里木陆块与周缘整体处于伸展环境之中, 是Rodinia超大陆裂解的产物.

致谢 感谢许志琴院士、赵文津院士、杨经绥院士的支持和启发, 感谢漆立新、王招明、漆家福、王宗起、杨海军、邱海峻、云露、何登发、何治亮、尹成明、李宗杰、包书景、孙知明、张建新等教授级高级工程师/研究员给予的帮助; 感谢评阅人对本文建设性的意见; 感谢张淼工程师对图件的清绘.

参考文献

车自成, 孙勇. 1996. 阿尔金麻粒岩相杂岩的时代及塔里木盆地的基底. 中国区域地质, 15: 51-57

邓兴梁, 舒良树, 朱文斌, 马东升, 王博. 2008. 新疆兴地断裂带前寒武纪构造-岩浆-变形作用特征及其年龄. 岩石学报, 24: 2800-2808

高林志, 郭宪璞, 丁孝忠, 宗文明, 高振家, 张传恒, 王自强. 2013. 中国塔里木板块南华纪成冰事件及其地层对比. 地球学报, 34: 39-57

高林志, 王宗起, 许志琴, 杨经绥, 张维. 2010. 塔里木盆地库鲁克塔格地区新元古代冰碛岩锆石SHRIMP U-Pb年龄新证据. 地质通报, 29: 205-213

高振家, 陈晋镛, 陆松年. 1993. 新疆北部前寒武系, 前寒武纪地质第6号. 北京: 地质出版社. 1-171

高振家, 朱诚顺. 1984. 新疆前寒武纪地质. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社. 45

郭召杰, 张志诚, 贾承造. 2000. 塔里木克拉通前寒武基底格架. 中国科学D辑: 地球科学, 30: 568-575

郭召杰, 张志诚, 王建君. 1998. 阿尔金山北缘蛇绿岩带的Sm-Nd等时线年龄及其大地构造意义. 科学通报, 43: 1981-1984

何碧竹. 2009. 塔里木盆地构造作用与油气聚集. 博士后研究报告. 北京: 中国地质科学院. 185

何碧竹, 焦存礼, 蔡志慧, 张淼, 高爱荣. 2011. 塔里木盆地中部航磁异常带新解译. 中国地质, 38: 961-965

何登发, 李德生. 1996. 塔里木盆地构造演化与油气聚集. 北京: 地质出版社. 56

何登发, 袁航, 李淦, 雷刚林, 樊春, 常秋生, 叶茂林. 2011. 吐格尔蒙背斜核部花岗岩的年代学、地球化学与构造环境及其对塔里木地块北缘古生代伸展聚敛旋回的揭示. 岩石学报, 27: 133-146

何秀彬, 徐备, 袁志云. 2007. 新疆柯坪地区新元古代晚期地层碳同位素组成及其对比. 科学通报, 52: 107-113

侯遵泽, 杨文采. 2011. 塔里木盆地多尺度重力场反演与密度结构. 中国科学D辑: 地球科学, 41: 29-39

胡霏琴, 韦刚建. 2006. 塔里木盆地北缘新太古代辛格尔灰色片麻岩形成时代问题. 地质学报, 80: 126-133

胡霏琴, 韦刚建, 江博明, 张积斌, 邓文峰, 陈林丽. 2010. 天山0.9Ga新元古代花岗岩SHRIMP锆石U-Pb年龄及其构造意义. 地球化学, 39: 197-212

贾承造. 2004. 塔里木盆地石油地质与勘探丛书——塔里木盆地板块构造与大陆动力学. 北京: 石油工业出版社. 202

贾承造. 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京: 石油工业出版社. 165

贾承造. 2009. 环青藏高原巨型盆地体系构造与塔里木盆地油气分布规律. 大地构造与成矿学, 33: 1-9

贾承造, 张师本, 吴绍祖. 2004. 塔里木盆地及周边地层. 北京: 科学出版社. 516

康建威, 牟传龙, 周恩恩, 王启宇, 陈小炜, 梁薇, 葛祥英. 2016. 塔里木盆地北缘阿克苏地区震旦系露头层序地层研究. 沉积与特提斯地质, 36: 47-54

康玉柱. 2012. 中国三大类型盆地油气分布规律. 新疆石油地质, 33: 635-636

李惠民, 陆松年, 郑建康, 于海峰, 赵凤清, 李怀坤, 左义成. 2001. 阿尔金东段花岗岩片麻岩中3.6Ga锆石的地质意义. 岩石矿物地球化学通讯, 20: 259-262

李曰俊, 贾承造, 胡世玲, 黄智斌, 曾强, 谭泽金. 1999. 塔里木盆地瓦基里塔格辉长岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其意义. 岩石学报, 15: 594-599

李曰俊, 宋文杰, 吴根耀, 王艺芬, 李宇平, 郑多明. 2005. 塔里木盆地中部隐伏的晋宁期花岗岩闪长岩和闪长岩. 中国科学D辑, 35: 97-104

李曰俊, 孙龙德, 胡世玲, 宋文杰, 王国林, 谭泽金. 2003. 塔里木盆地塔参1井底部花岗岩闪长岩的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学研究. 岩石学报, 19: 530-536

李曰俊, 吴根耀, 孟庆龙, 杨海军, 韩剑发, 李新生, 董立胜. 2008. 塔里木盆地中央地区的断裂系统: 几何学、运动学和动力学背景. 地质科学, 43: 82-118

刘和甫, 李晓清, 刘立群, 侯高文, 边海军. 2005. 伸展构造与裂谷盆地成藏区带. 石油与天然气地质, 26: 537-552

陆松年, 于海峰, 李怀坤, 等. 2006. 中国前寒武纪重大地质问题研究——中国西部前寒武纪重点地质事件群及全球构造意义. 北京: 地质出版社. 197

陆松年, 袁桂邦. 2003. 阿尔金山阿克塔什塔格早前寒武纪岩浆活动的年代学证据. 地质学报, 77: 61-68

- 罗金海, 雷刚林, 刘良, 肖中尧, 魏红兴, 车自成. 2009. 阿尔金构造带对塔东南油气地质条件的制约. 大地构造与成矿学, 33: 76-85
- 罗志文, 徐备, 何金有. 2016. 新疆库鲁克塔格地区特瑞艾肯冰期时代的碎屑锆石年代学制约. 北京大学学报(自然科学版), 52: 467-474
- 焦方正. 2017. 塔里木盆地顺托果勒地区北东向走滑断裂带的油气勘探意义. 石油天然气地质, 38: 831-839
- 钱一雄, 杜永明, 陈代钊, 尤东华, 张军涛, 陈跃, 刘忠宝. 2014. 塔里木盆地肖尔布拉克剖面奇格布拉克组层序界面与沉积相研究. 石油实验地质, 36: 1-8
- 任建业, 胡德胜, 阳怀忠, 尹新义, 李朋. 2011. 塔中隆起带断裂系统及其对碳酸盐岩台地的控制. 中国地质, 38: 935-944
- 汤良杰, 贾承造. 2007. 塔里木叠合盆地构造解析和应力场分析/中国典型叠合盆地油气形成富集与分布预测丛书. 科学出版社. 1-149
- 王超, 刘良, 车自成, 陈丹玲, 张安达, 罗金海. 2006. 阿尔金南缘榴辉岩带中花岗片麻岩的时代及构造环境探讨. 高校地质学报, 12: 74-82
- 王飞, 王博, 舒良树. 2010. 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. 岩石学报, 26: 547-558
- 王福同, 宋志齐, 吴绍祖. 2006. 新疆维吾尔自治区古地理及地质生态图集. 北京: 地质出版社: 80
- 王宜昌, 杨辉, 王小牧, 郑彬卿. 1994. 塔克拉玛干前震旦纪裂谷及其含油气远景. 新疆石油地质, 15: 191-200
- 魏永峰, 李建兵, 杜红星, 邓泽锦, 康江伟. 2010. 西南天山南缘震旦纪后碰撞过铝花岗岩的地质意义. 新疆地质, 28: 242-246
- 郭光辉, 张承泽, 汪海, 刘玉魁, 李建军. 2009. 塔里木盆地中部塔参1井花岗岩闪长岩的锆石SHRIMP U-Pb年龄. 地质通报, 28: 568-571
- 吴根耀, 李曰俊, 王国林, 郑威, 罗俊成, 孟庆龙. 2006. 新疆西部巴楚地区晋宁期的洋岛火山岩. 现代地质, 20: 361-369
- 吴林, 管树巍, 任荣, 王晓波, 杨海军, 靳久强, 朱光有. 2016. 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. 石油勘探与开发, 43: 905-915
- 肖序常, 汤耀庆, 李锦轶, 冯益民, 朱宝清. 1990. 试论新疆北部大地构造演化. 新疆地质科学, 第一辑: 47-68
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社. 562
- 徐备, 寇晓威, 宋彪, 卫巍, 王宇. 2008. 塔里木板块上元古界火山岩SHRIMP定年及其对新元古代冰期时代的制约. 岩石学报, 24: 2857-2865
- 许炳如. 1997. 根据航磁解释的塔里木盆地基岩分布. 西安石油学院学报, 12: 8-11
- 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. 岩石学报, 27: 1-22
- 闫磊, 李明, 潘文庆. 2014. 塔里木盆地二叠纪火成岩分布特征——基于高精度航磁资料. 地球物理学进展, 29: 1843-1848
- 杨文采, 王家林, 钟慧智, 陈冰. 2012. 塔里木盆地航磁场分析与磁源体结构. 地球物理学报, 55: 1278-1287
- 杨树锋, 陈立峰, 肖中尧, 罗俊成, 陈汉林, 王步清, 程晓敢, 廖林. 2009. 塔里木盆地东南缘新生代断裂系统. 大地构造与成矿学, 33: 33-37
- 殷秀华, 黎益仕, 刘占坡. 1998. 塔里木盆地重力场与地壳上地幔结构. 地震地质, 20: 370-378
- 袁学诚. 1996. 中国地球物理图集. 北京: 地质出版社. 200
- 张传林, 李怀坤, 王洪燕. 2012. 塔里木地块前寒武纪地质研究进展评述. 地质论评, 58: 923-936
- 张传林, 陆松年, 于海峰, 叶海敏. 2007. 青藏高原北缘西昆仑造山带构造演化: 来自锆石SHRIMP及LA-ICP-MS测年的证据. 中国科学D辑: 地球科学, 37: 145-154
- 张传林, 赵宇, 郭坤一, 董永观, 王爱国. 2003. 塔里木西南中元古带变质基性火山岩地球化学特征——古塔里木板块中元古带裂解的证据. 地球科学, 28: 47-53
- 张光亚, 刘伟, 张磊, 于炳松, 李洪辉, 张宝民, 王黎栋. 2015. 塔里木盆地克拉通寒武-奥陶纪原型盆地、岩相古地理与油气. 地学前缘, 22: 243-250
- 张建新, 李怀坤, 孟繁聪, 相振群, 于胜尧, 李金平. 2011. 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. 岩石学报, 27: 23-46
- 张建新, 孟繁聪, 于胜尧, 陈文, 陈松永. 2007. 北阿尔金HP/LT蓝片岩和榴辉岩的Ar-Ar年代学及其区域构造意义. 中国地质, 34: 558-564
- 张建新, 于胜尧, 李云帅, 喻星星, 林宜慧, 毛小红. 2015. 原特提斯洋的俯冲、增生及闭合: 阿尔金-祁连-柴北缘造山系早古生代增生/碰撞造山作用. 岩石学报, 31: 3531-3554
- 赵俊猛, 程宏岗, 裴顺平, 刘宏兵, 张健狮, 刘宝锋. 2008. 塔里木盆地北缘的深部结构. 科学通报, 53: 946-955
- 郑碧海, 朱文斌, 舒良树, 张志勇, 于俊杰, 黄文涛. 2008. 阿克苏前寒武纪蓝片岩原岩产出的大地构造背景. 岩石学报, 24: 2839-2848
- 周肖贝, 李江海, 王洪浩, 李文山, 程雅琳. 2015. 塔里木盆地南华震旦纪盆地背景及早期成盆构造背景. 地学前缘, 22: 263-272
- 朱文斌, 葛荣峰, 舒良树, 郑碧海. 2017. 塔里木克拉通北缘前寒武纪构造岩浆事件与地壳演化/大陆动力. 北京: 科学出版社. 437
- 宗文明, 高林志, 丁孝忠, 庞维华. 2010. 塔里木盆地西南缘南华纪冰碛岩特征与地层对比. 中国地质, 37: 1183-1190
- Allen P A, Armitage J J. 2012. Cratonic basins. In: Busby C, Azor A, eds. Chapter 30 of Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances. London: Blackwell Publishing Ltd. 602-620
- Ge R F, Zhu W B, Zheng B H, Wu H L, He J W, Zhu X Q. 2012. Early Pan-African magmatism in the Tarim Craton: Insights from zircon U-Pb-Lu-Hf isotope and geochemistry of granitoids in the Korla area, NW China. Precambrian Res, 212-213: 117-138

- Ge R F, Zhu W B, Wu L, Zheng B H, He J W. 2013. Timing and mechanisms of multiple episodes of migmatization in the Korla complex, northern Tarim Craton, NW China: Constraints from zircon U-Pb-Lu-Hf isotopes and implications for crustal growth. *Precambrian Res*, 231: 136–156
- Gehrels G E, Yin A, Wang X F. 2003a. Magmatic history of the northeastern Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, 108: 2423
- Gehrels G E, Yin A, Wang X F. 2003b. Detrital-zircon geochronology of the northeastern Tibetan plateau. *Geol Soc Am Bull*, 115: 881–896
- Guiraud R, Bosworth W, Thierry J, Delplanque A. 2005. Phanerozoic geological evolution of Northern and Central Africa: An overview. *J African Earth Sci*, 43: 83–143
- Guo Z J, Yin A, Robinson A, Jia C Z. 2005. Geochronology and geochemistry of deep-drill-core samples from the basement of the central Tarim basin. *J Asian Earth Sci*, 25: 45–56
- He B Z, Jiao C L, Xu Z Q, Cai Z H, Zhang J X, Liu S L, Li H B, Chen W W, Yu Z Y. 2016. The paleotectonic and paleogeography reconstructions of the Tarim Basin and its adjacent areas (NW China) during the late Early and Middle Paleozoic. *Gondwana Res*, 30: 191–206
- He Z Y, Zhang Z M, Zong K Q, Wang W, Santosh M. 2012. Neoproterozoic granulites from the northeastern margin of the Tarim Craton: Petrology, zircon U-Pb ages and implications for the Rodinia assembly. *Precambrian Res*, 212–213: 21–33
- He J W, Zhu W B, Ge R F, Zheng B H, Wu H L. 2014. 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. *Precambrian Res*, 254: 194–209
- Ingersoll R V. 2012. Tectonics of sedimentary basins, with revised nomenclature. In: Cathy B, Antonio Azor, eds. *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances*. Blackwell Publishing Ltd. 3–43
- Li S Z, Zhao S J, Liu X, Cao H H, Yu S, Li X Y, Somerville I, Yu S Y, Suo Y H. 2018. Closure of the Proto-Tethys Ocean and Early Paleozoic amalgamation of microcontinental blocks in East Asia. *Earth-Sci Rev*, 186: 37–75
- Li Z X, Evans D A D, Halverson G P. 2013. Neoproterozoic glaciations in a revised global palaeogeography from the breakup of Rodinia to the assembly of Gondwanaland. *Sediment Geol*, 294: 219–232
- Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, Davidson A, De Waele B, Ernst R E, Fitzsimons I C W, Fuck R A, Gladkochub D P, Jacobs J, Karlstrom K E, Lu S, Natapov L M, Pease V, Pisarevsky S A, Thrane K, Vernikovsky V. 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis. *Precambrian Res*, 160: 179–210
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, Wang J, Zhang S, Zhou H. 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. *Precambrian Res*, 122: 85–109
- Li Z X, Zhong S. 2009. Supercontinent-superplume coupling, true polar wander and plume mobility: Plate dominance in whole-mantle tectonics. *Phys Earth Planet Inter*, 176: 143–156
- Liu L, Wang C, Cao Y T, Chen D L, Kang L, Yang W Q, Zhu X H. 2012. Geochronology of multi-stage metamorphic events: Constraints on episodic zircon growth from the UHP eclogite in the South Altyn, NW China. *Lithos*, 136–139: 10–26
- Long X P, Yuan C, Sun M, Kroner A, Zhao G C, Wilde S, Hu A Q. 2011. Reworking of the Tarim Craton by underplating of mantle plume-derived magmas: Evidence from Neoproterozoic granitoids in the Kuluketage area, NW China. *Precambrian Res*, 187: 1–14
- Long X P, Yuan C, Sun M, Zhao G C, Xiao W J, Wang Y J, Yang Y H, Hu A Q. 2010. Archean crustal evolution of the northern Tarim craton, NW China: Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints. *Precambrian Res*, 180: 272–284
- Lu S N, Li H K, Zhang C L, Niu G H. 2008. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim craton and surrounding continental fragments. *Precambrian Res*, 160: 94–107
- Nakajima T, Maruyama S, Uchiumi S, Liou J G, Wang X, Xiao X, Graham S A. 1990. Evidence for late Proterozoic subduction from 700-Myr-old blueschists in China. *Nature*, 346: 263–265
- Persaud P, Tan E, Contreras J, Lavie L. 2017. A bottom-driven mechanism for distributed faulting in the Gulf of California rift. *Tectonophysics*, 719–720: 51–65
- Powell C M A, Preiss W V, Gatehouse C G, Krapez B, Li Z X. 1994. South Australian record of a Rodinian epicontinental basin and its mid-neoproterozoic breakup (~700 Ma) to form the Palaeo-Pacific Ocean. *Tectonophysics*, 237: 113–140
- Rogers J J W, Santosh M. 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent. *Gondwana Res*, 5: 5–22
- Safonova I Y, Simonov V A, Buslov M M, Ota T, Maruyama S. 2008. Neoproterozoic basalts of the Paleo-Asian Ocean (Kurai accretionary zone, Gorny Altai, Russia): Geochemistry, petrogenesis, and geodynamics. *Rus Geol Geophys*, 49: 254–271
- Safonova I Y, Santosh M. 2014. Accretionary complexes in the Asia-Pacific region: Tracing archives of ocean plate stratigraphy and tracking mantle plumes. *Gondwana Res*, 25: 126–158
- Santosh M, Maruyama S, Yamamoto S. 2009. The making and breaking of supercontinents: Some speculations based on superplumes, super

- downwelling and the role of tectosphere. *Gondwana Res*, 15: 324–341
- Shu L S, Deng X L, Zhu W B, Ma D S, Xiao W J. 2011. Precambrian tectonic evolution of the Tarim Block, NW China: New geochronological insights from the Quruqtagh domain. *J Asian Earth Sci*, 42: 774–790
- Song S G, Su L, Li X H, Zhang G B, Niu Y L, Zhang L F. 2010. Tracing the 850-Ma continental flood basalts from a piece of subducted continental crust in the North Qaidam UHPM belt, NW China. *Precambrian Res*, 183: 805–816
- Wang B, Shu L S, Liu H S, Gong H J, Ma Y Z, Mu L X, Zhong L L. 2014. First evidence for ca. 780 Ma intra-plate magmatism and its implications for Neoproterozoic rifting of the North Yili Block and tectonic origin of the continental blocks in SW of Central Asia. *Precambrian Res*, 254: 258–272
- Wang C, Liu L, Yang W Q, Zhu X H, Cao Y T, Kang L, Chen S F, Li R S, He S P. 2013. Provenance and ages of the Altyn Complex in Altyn Tagh: Implications for the early Neoproterozoic evolution of northwestern China. *Precambrian Res*, 230: 193–208
- Xu B, Jiang P, Zheng H F, Zou H B, Zhang L F, Liu D Y. 2005. 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. *Precambrian Res*, 136: 107–123
- Xu B, Xiao S H, Zou H B, Chen Y, Li Z X, Song B, Liu D Y, Zhou C M, Yuan X L. 2009. SHRIMP zircon U-Pb age constraints on Neoproterozoic Quruqtagh diamictites in NW China. *Precambrian Res*, 168: 247–258
- Xu B, Zou H B, Chen Y, He J, Wang Y. 2013. The Sugetbrak basalts from northwestern Tarim Block of northwest China: Geochronology, geochemistry and implications for Rodinia breakup and ice age in the Late Neoproterozoic. *Precambrian Res*, 236: 214–226
- Wu G H, Chen Z Y, Qu T L, Xu Y L, Zhang C Z. 2012. SHRIMP zircon age of the high aeromagnetic anomaly zone in central Tarim Basin and its geological implications. *Natur Sci*, 4: 1–4
- Xu Z Q, He B Z, Zhang C L, Zhang J X, Wang Z M, Cai Z H. 2013. Tectonic framework and crustal evolution of the Precambrian basement of the Tarim Block in NW China: New geochronological evidence from deep drilling samples. *Precambrian Res*, 235: 150–162
- Yong W J, Zhang L F, Hall C M, Mukasa S B, Essene E J. 2013. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Rb-Sr chronology of the Precambrian Aksu blueschists in western China. *J Asian Earth Sci*, 63: 197–205
- Zhai M G, Santosh M. 2011. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview. *Gondwana Res*, 20: 6–25
- Zhang C L, Li Z X, Li X H, Ye H M. 2009. Neoproterozoic mafic dyke swarms at the northern margin of the Tarim Block, NW China: Age, geochemistry, petrogenesis and tectonic implications. *J Asian Earth Sci*, 35: 167–179
- Zhang C L, Li Z X, Li X H, Ye H, Wang A, Guo K Y. 2006. Neoproterozoic bimodal intrusive complex in the Southwestern Tarim Block, Northwest China: Age, geochemistry, and implications for the rifting of Rodinia. *Int Geol Rev*, 48: 112–128
- Zhang C L, Li X H, Li Z X, Lu S N, Ye H M, Li H M. 2007a. Neoproterozoic ultramafic-mafic-carbonatite complex and granitoids in Quruqtagh of northeastern Tarim Block, western China: Geochronology, geochemistry and tectonic implications. *Precambrian Res*, 152: 149–169
- Zhang C L, Li Z X, Li X H, Yu H F, Ye H M. 2007b. An early Paleoproterozoic high-K intrusive complex in southwestern Tarim Block, NW China: Age, geochemistry, and tectonic implications. *Gondwana Res*, 12: 101–112
- Zhang C L, Yang D S, Wang H Y, Dong Y G, Ye H M. 2010. Neoproterozoic mafic dykes and basalts in the southern margin of Tarim, Northwest China: Age, geochemistry and geodynamic implications. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 84: 549–562
- Zhang C L, Ye X T, Zou H B, Chen X Y. 2016. Neoproterozoic sedimentary basin evolution in southwestern Tarim, NW China: New evidence from field observations, detrital zircon U-Pb ages and Hf isotope compositions. *Precambrian Res*, 280: 31–45
- Zhang C L, Zou H B, Wang H Y, Li H K, Ye H M. 2012. Multiple phases of the Neoproterozoic igneous activity in Quruqtagh of the northeastern Tarim Block, NW China: Interaction between plate subduction and mantle plume? *Precambrian Res*, 222–223: 488–502
- Zhang J X, Gong J H, Yu S Y. 2012. c. 1.85 Ga HP granulite-facies metamorphism in the Dunhuang block of the Tarim Craton, NW China: Evidence from U-Pb zircon dating of mafic granulites. *J Geol Soc*, 169: 511–514
- Zhang J X, Mattinson C G, Meng F C, Wan Y S. 2005a. An Early Palaeozoic HP/HT granulite-garnet peridotite association in the south Altyn Tagh, NW China: *P-T* history and U-Pb geochronology. *J Metamorph Geol*, 23: 491–510
- Zhang J X, Yang J S, Mattinson C G, Xu Z Q, Meng F C, Shi R D. 2005b. Two contrasting eclogite cooling histories, North Qaidam HP/UHP terrane, western China: Petrological and isotopic constraints. *Lithos*, 84: 51–76
- Zhang J X, Yu S Y, Gong J H, Li H K, Hou K J. 2013. The latest Neoproterozoic-Paleoproterozoic evolution of the Dunhuang block, eastern Tarim craton, northwestern China: Evidence from zircon U-Pb dating and Hf isotopic analyses. *Precambrian Res*, 226: 21–42
- Zhang Y L, Wang Z Q, Yan Z, Wang T. 2013. Neoproterozoic volcanic rocks in the Southern Quruqtagh of Northwest China: Geochemistry,

- zircon geochronology and tectonic implications. *Acta Geol Sin-Engl Ed*, 87: 118–130
- Zhang Z C, Kang J L, Kusky T, Santosh M, Huang H, Zhang D Y, Zhu J. 2012. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of Neoproterozoic basalts from Sugetbrak, northwest Tarim block, China: Implications for the onset of Rodinia supercontinent breakup. *Precambrian Res*, 220–221: 158–176
- Zhao G C, Cawood P A. 2012. Precambrian geology of China. *Precambrian Res*, 222–223: 13–54
- Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, Sun M. 2002. Review of global 2.1–1.8 Ga orogens: Implications for a pre-Rodinia supercontinent. *Earth-Sci Rev*, 59: 125–162
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, Li S Z. 2004. A Paleo-Mesoproterozoic supercontinent: Assembly, growth and breakup. *Earth-Sci Rev*, 67: 91–123
- Zhu W B, Zhang Z Z, Shu L S, Lu H F, Sun J B, Yang W. 2008. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Neoproterozoic Korla mafic dykes in the northern Tarim Block, NW China: Implications for the long-lasting breakup process of Rodinia. *J Geol Soc*, 165: 887–890
- Zhu W B, Zheng B, Shu L, Ma D, Wu H, Li Y, Huang W, Yu J. 2011. Neoproterozoic tectonic evolution of the Precambrian Aksu blueschist terrane, northwestern Tarim, China: Insights from LA-ICP-MS zircon U-Pb ages and geochemical data. *Precambrian Res*, 185: 215–230

(责任编辑: 刘少峰)