

中国塔里木板块南华纪成冰事件及其地层对比

高林志¹⁾, 郭宪璞¹⁾, 丁孝忠¹⁾, 宗文明²⁾, 高振家³⁾, 张传恒⁴⁾, 王自强⁴⁾

1) 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2) 中国地质调查局沈阳地质矿产研究所, 辽宁沈阳 110032;

3) 中国地质科学院, 北京 100037;

4) 中国地质大学(北京), 北京 100083

摘 要:“雪球地球”假说为全球新元古代冰碛岩研究注入了新的活力。各国地质学家根据新元古代冰碛岩全球各大洲发育的特点,并依据同位素年龄、 $\delta^{13}\text{C}/\delta^{18}\text{O}$ 和 Sr 的比值和化学蚀变指数(CIA)为全球的新元古界划分出 4 个冰期,但国际上的 4 个冰期的限定,是各大洲不同剖面冰期的集合。新元古代冰期事件周期变化视为早期生物复苏和早期动物分异的起点。由于国际埃迪卡拉系底界(GSSP)年龄,即成冰系顶界年龄确定后,使成冰系底界年龄成为当前研究的重点。中国新疆塔里木板块库鲁克塔格地区新元古代冰碛岩是目前世界各大陆中发育有 4 套连续的新元古代冰碛岩和多期火成岩事件的唯一剖面,它的进一步深入研究,可以备考全球冰期的同步性,以期建立全球新元古代冰碛岩标准剖面。本文报道了来自塔里木西南缘南华系波龙组的碎屑锆石年龄,有助于我们对塔里木板块西南缘南华系时代的限定。

关键词: 成冰系; 南华系; 冰碛岩; 塔里木板块; 碎屑锆石

中图分类号: P534.3; P534.31; P512.4 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2013.01.05

Nanhuan Glaciation Event and Its Stratigraphic Correlation in Tarim Plate, China

GAO Lin-zhi¹⁾, GUO Xian-pu¹⁾, DING Xiao-zhong¹⁾, ZONG Wen-ming²⁾, GAO Zhen-jia³⁾, ZHANG Chuan-heng⁴⁾, WANG Zi-qiang⁴⁾

1) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Shenyang, Liaoning 110032;

3) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

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

Abstract: The hypothesis of the “Snow Earth” pours new vitality into the study of the global Neoproterozoic glaciations. According to the development of glaciations in different continents, isotopic dating, ratios of $\delta^{13}\text{C}/\delta^{18}\text{O}$ and CIA, four glaciations have been recognized in the whole globe along different sections in different continents. The change of the circle of Neoproterozoic glaciations is regarded as the start of the early biota or division. Because the top GSSP of the Crytersian has been defined, the bottom of GSSA has become a problem in the study of glaciations. Now, the Kuruk Tag section in Tarim Plate of Xinjiang is the only section with four Neoproterozoic glaciations and different volcanic rocks. The further study of the Nanhuan glaciations in Tarim is useful work for the stratigraphic correlation with the global Neoproterozoic glaciations. The authors put forward

本文由中国地质调查局地质调查项目“中国新元古代年代地层格架及其全球对比”(编号: 121201011120131)、中国石化股份有限公司海相前瞻性项目“塔里木盆地构造背景、盆地动力学及油气前景”(编号: YPH08110)和科技部基础性工作专项“中国地质志欧亚大陆大地构造图编制”(编号: 2011FY120100)联合资助。

收稿日期: 2012-08-30; 改回日期: 2012-12-20。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 高林志, 男, 1955 年生。研究员。主要从事生物地层、层序地层、灾变事件地层研究。E-mail: gaolzh@cags.net.cn。

for the first time the upper limit line of the deposition of the Bolong Formation based on the distributional pattern of debris zircon ages from the Bolong Formation, Nanhuan System. The main distributional pattern of debris zircon ages comprises 2.5 Ga, 2.2 Ga and 1.8 Ga, with the youngest age being 756 Ma, suggesting that the depositional age is younger than 756 Ma. According to the distributional pattern of debris zircon ages of the Bolong Formation, they must have had different rock sources in relation to Tarim Plate.

Key words: Cryogenian; Nanhuan; glaciation; Tarim Plate; debris zircon dating

新疆塔里木北缘库鲁克塔格地区是目前全球各大陆中确认为 4 套新元古代冰碛岩和多期火成岩事件的唯一剖面,其沉积特征、沉积环境以及冰碛岩年代地层学研究的进展始终引起地质学家的瞩目。含冰碛岩岩系的建立始见于瑞典学者 Norin E.(诺林)1928—1932 年考察报告(Norin, 1935),诺林在考察中首先发现和确定含冰碛层库鲁克塔格层系,并划分出四套岩系:贝义西岩系、阿勒通沟岩系、特瑞爱肯岩系和育肯沟岩系。20 世纪 50 至 70 年代,地质矿产部第十大队的地质学家在新疆开展系统的野外调查时,基本完善了含冰碛岩地层序列,并进行了系统的岩矿学研究和古地理分析(高振家等, 1980, 1984b)。曹仁关(1991)在库鲁克塔格地区考察中建议将阿勒通沟组上段划分出黄羊沟组,从此将四套冰期(冰碛岩)与间冰期清晰地反映在地层柱中(高林志等, 2010a)。如今国际地层年表新元古界已分出拉伸系、成冰系和埃迪卡拉系,并依据近年来的同位素年龄、氧碳同位素、化学地层研究成果和后生动物群演化规律等建立了系统全球地层对比序列(Bowing et al., 2003; Burns et al., 1993; Cakver et al., 2004; Carlos et al., 2004; Chu et al., 2004; Derry et al., 1994; Frimmel et al., 1996; Guerrot et al., 1990; Hoffman et al., 2004; Jiang et al., 2003; Kaufman et al., 1997; Kennedy et al., 2001; Stern et al., 2006)。

库鲁克塔格地区新元古代地层共发育了 4 套冰碛岩,其中南华系 3 套冰碛岩,即贝义西期、阿勒通沟期、特瑞爱肯期,震旦系 1 套冰碛岩,即汉格爾乔克期。高振家等(2003)曾建议对它的深入研究可成为全球新元古代冰期地层对比的典范剖面。而全球范围新元古界内通过年代学研究自下而上也列出 4 套冰期(全球冰期事件),即 Kaigas, Sturtian, Marinoan 和 Gaskiers 冰期(MacGabhann, 2005);其中成冰系(Cryogenian)的 3 套冰期(Cryogenian glaciations)基本上发育在 750—635 Ma 之间(Hoffman et al., 2009),与中国新元古代南华系时代(780—635 Ma, 尹崇玉等, 2007)大体相当。但是,两者的底界年龄有很大的差异,国际上趋向将成冰系底界的界线年龄(GSSP)限定在约 740 Ma 年龄与中国南华系底界年龄

(780 Ma)有约 30 Ma 的时间差异。Gaskiers 冰期与新元古界震旦世末次冰期大体相当,即塔里木板块的汉格爾乔克组冰期(580—570 Ma, Xiao et al., 2004)或大体对比华北块体上罗圈组,该冰期在国际年表上归入埃迪卡拉系和中国年表上归入震旦系。当前,埃迪卡拉系底界定论的 GSSP 即是成冰系的顶界年龄(635 Ma, Condon et al., 2005)。

目前成冰系的底界年龄 Global Boundary Stratotype Section and Point(GSSP)还在争议,分歧有三:①以最早冰川的出现为界;②以寒冷事件沉积为界;③以全球发育最广泛的冰碛岩为界。南非 Kaigas 冰期年代大体小于 770 Ma(Allsopp et al., 1979),但是被广大地质学家普遍认为其全球分布广泛性较差。目前,一派地质学家提出成冰系的底界应放在全球最广泛发育的冰川事件即澳大利亚 sturtian 冰期的底界(755 Ma),另一派地质学家考虑到构造旋回和沉积盖层等特征,建议将成冰系的底界(GSSP)定在出现寒冷事件沉积(780 Ma)时期。国际成冰系工作组建议成冰系底界的界线,尽量考虑以下 4 个基本特征的剖面:①冰碛岩(tillite 或 diamictite)存在;②氧/碳同位素的变化曲线($\delta^{13}\text{C}/\delta^{18}\text{O}$)(王自强等, 2002, 2009; 丁海峰等, 2009; 陈寿铭等, 2009);③化学蚀变指数(CIA)(冯连君等, 2003; 王自强等, 2006; 刘兵等, 2007; 丁海峰等, 2009);④可信的年代地层学数据(Yin et al., 2003, 2005; Zhou et al., 2004, 2007; 徐备等, 2008; Zhang et al., 2008; 邬光辉等, 2010)。国际地层年表新元古代成冰系(Cryogenian)时代为 850—635 Ma,其中的 3 套冰期(Cryogenian glaciations)基本上发育在 750—635 Ma 之间(Haverson et al., 2004; Hoffman et al., 1998, 2002; Kirschvink, 1992; Leather et al., 2002; MacGabhann, 2005; Stern et al., 2006),后者与中国新元古代南华系时代(780—635 Ma)大体相当(高林志等, 2010b, 2011)。

1 库鲁克塔格地区冰碛岩地层格架的确立

当前只有中国塔里木北缘库鲁克塔格地区的晚新元古界是唯一具备了发育 4 套新元古代冰碛岩和

多期火山岩的完整地层序列的剖面, 它的年代学研究成果直接影响着全球成冰系的划分和对比。中国地层委员会(2001)正式通过《中国地层指南及中国地层指南说明书》(修订版), 将原震旦系分解, 原下统正式建立南华系, 原上统保留震旦系。高振家等(2003)据此重新厘定了冰碛岩对比意义, 并突出强调了新疆南华系的 4 套冰碛岩地层序列的存在。同期, 在新疆塔里木板块, 特别是在库鲁克塔格地区出现了新一轮研究高潮, 特别是系统的氧/碳同位素(Xu et al., 2003; Xiao et al., 2004), 锆石 U-Pb 年龄(Xu et al., 2005, 2009; 尹崇玉等, 2007)和化学蚀变指数(刘兵等, 2007)等定量研究。目前全球成冰系的研究中, 中国塔里木板块的库鲁克塔格地区发育有 4 套冰碛层剖面也引起国际地学界的关注(Xiao et al., 2004; Hoffman et al., 2009)。

库鲁克塔格地区新元古代(南华系和震旦系)冰碛建造发育在同一剖面上, 它的年代地层学成果研究有两方面意义: 1)对发育在中国三块古陆上和对全球各大洲发育的不同时期的冰碛岩的时代序列提供有效的标定; 2)可以备考全球的“雪球”事件的冰期是否等时的问题。目前, 全球冰期事件依据同位素年龄(Hoffman, 2004; Yin et al., 2003, 2005; Zhang et al., 2005; Zhou et al., 2004), 氧碳同位素(Burns et al., 1993; Carlos et al., 2004; Derry et al., 1994; Jiang et al., 2003; Kaufman et al., 1997; Kennedy et al., 2001; Xiao et al., 2004; Xu et al., 2003), 化学地层(冯连君等, 2003; 王自强等, 2002, 2009)和后生动物群(瓮安生物群、庙河生物群、埃迪卡拉动物群)演化规律(Knoll, 2000; Chen et al., 2004; 尹崇玉等, 2007, 2009; Zhou et al., 2007; 唐烽等, 2009; 刘鹏举等, 2009, 2012)表明在新元古界全球各大陆范围内自下而上出现 4 套冰期, 即 Kaigas、Sturtian、Marinoan 和 Gaskiers。而 4 套冰碛岩发育在库鲁克塔格地区一条剖面上, 其研究意义重大。目前与全球新元古代冰碛岩的对比关系如下:

库鲁克塔格地区第一期冰期: 贝义西组冰碛岩时代在(768±10) Ma—(740±7) Ma 之间(Xu et al., 2005, 2009; 徐备等, 2008; 尹崇玉等, 2007)与扬子地台南华系长安组冰碛岩和 Namibia 南部 Kalahari 克拉通 Kaigas 冰碛岩时代在(780±10) Ma—(741±6) Ma 之间(Allsopp et al., 1979; Frimmel et al., 1996); 巴西 Sao Francisco 克拉通 Jequitai 和 Windemere 杂砾岩以及 Ethiopia 的 Negash 杂砾岩(750—613 Ma)相当。间冰期为照壁山组。

库鲁克塔格地区第二期冰期: 阿勒通沟组

(<(725±10) Ma, Xu et al., 2009)与扬子地台古城组冰碛岩和澳大利亚 Sturtian 冰碛岩以及阿曼的 Gubrah 冰碛岩相当。间冰期为黄羊沟组(寇晓威等, 2008)。

库鲁克塔格地区第三期冰期: 特瑞爱肯组冰碛岩与扬子地台南沱组冰碛岩和澳大利亚 Marinoan 冰碛岩和 Baltica(挪威)Varanger 冰碛岩相当。间冰期为扎摩克提组((615±6) Ma, Xu et al., 2009)、育肯沟组和水泉组。

库鲁克塔格地区第四期冰期: 汉格尔乔克组冰碛岩与华北地区广泛分布的罗圈组冰碛岩和 Baltica(加拿大)Gaskiers 冰碛岩(590 Ma)相当(Guerrot et al., 1990)。

自“雪球”事件提出后, 全球的冰碛岩期次和等时的问题一直困扰各国的地质学家, 库鲁克塔格地区晚新元古代(南华系和震旦系)冰碛岩建造发育在一个剖面中, 开启解决上述问题的窗口。近年来国际晚前寒武系研究中重大的研究进展主要有两点: 一是埃迪卡拉系底界 GSSP(635 Ma)的确立和埃迪卡拉系建系; 二是成冰系国际工作组正开展的全球范围内的成冰系底界(GSSP)和建系研究。其研究方法包括了已有的研究成果, 即生物地层、化学地层、同位素年代学、古地磁等(李永安等, 1984; Hoffman et al., 1998, 2002, 2009; Kirschvink, 1992; Leather et al., 2002; Haverson et al., 2004; Stern et al., 2006; Condon et al., 2005; MacGabhann, 2005; Cakver et al., 2004; Xiao et al., 2004)。

由于塔里木板块的北缘库鲁克塔格地区在同一条剖面上发育 4 套冰碛岩(高振家等, 1980, 1984b), 它在整个塔里木板块上的空间展布、稳定同位素的化学特征和地层剖面的建立及与全球地层对比和同位素年代学研究已成为当前中国地质学家最关心的问题。在塔里木板块周边广泛分布前寒武纪地层并发育了不同类型新元古代冰碛岩(图 1)。塔里木板块西南缘南华系冰碛岩的特征和沉积环境一直被地质学家极为关注, 目前, 该区地层研究程度较低, 其沉积背景与塔里木周边的南华系对比关系对解释塔里木板块西南缘构造演化有着重要的作用。

2 岩组特征

2.1 东天山库鲁克塔格

库鲁克塔格位于东天山, 属于天山山脉的南支, 南临塔里木盆地, 北以博斯腾湖为界, 东至罗布泊以北的玉勒袞布拉克。地域上以兴地为界分别称为东库鲁克塔格和西库鲁克塔格(图 2)。在库鲁克塔格地区新元古代南华系和震旦系发育完整, 分布广泛, 地层出露清晰, 是研究新元古代冰碛岩最佳剖面。

在库鲁克塔格地区,新元古代地层由青白口系、南华系和震旦系组成。南华系分3个统,下统为贝义西组和照壁山组,中统为阿勒通沟组和黄羊沟组,上统为特瑞爱肯组。震旦系为扎摩克提组、育肯沟组、水泉组和汉格尔桥克组,其上被寒武统的西山布拉克组覆盖。

2.1.1 南华系(780—635 Ma)自下而上为贝义西组、照壁山组、阿勒通沟组、黄羊沟组和特瑞爱肯组

贝义西组:诺林 1932 年命名(Norin, 1935)。正层型为新疆库鲁克塔格阿勒通沟支沟贝(拜)义西干谷剖面及阿勒通山南贝义西剖面($E87^{\circ}20'30''$, $N41^{\circ}28'15''$)。岩性特征为碎屑砂岩(砂板岩、细砂岩

等)及火山岩为主,其中常夹多层冰碛岩及少量大理岩(有些为冰碛岩顶部的碳酸盐帽),个别地段火山岩较发育。不整合在帕尔岗塔格群之上,整合于照壁山组之下。厚 640~1670 m。本组下部和上部火山岩中获得一系列 SHRIMP U-Pb 年龄(768~725 Ma)(Xu et al., 2005, 2009; 尹崇玉等, 2007; 高林志等, 2010a)。

照壁山组:朱诚顺等 1958 年命名。正层型为新疆尉犁县赛纳尔塔格山西端剖面($E88^{\circ}22'30''$, $N41^{\circ}28'30''$),高振家等 1977 年重测(高振家等, 1980)。岩性特征为上部为灰黑色粉砂质泥岩,砂板岩及灰色长石石英砂岩为主,夹砂砾岩凸镜体;下部主要为灰、灰白色层状石英砂岩,偶夹薄层砂砾岩

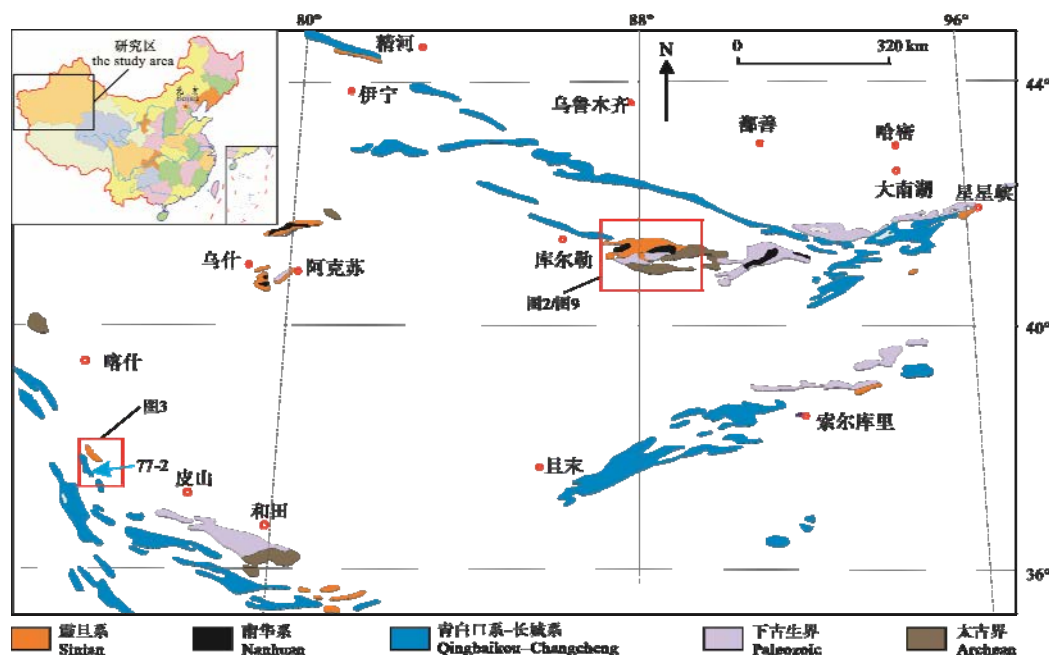


图 1 塔里木板块前寒武纪地层分布(据高振家等, 1983 修改)

Fig. 1 Distribution of the Precambrian strata in Tarim Plate (modified after GAO et al., 1983)

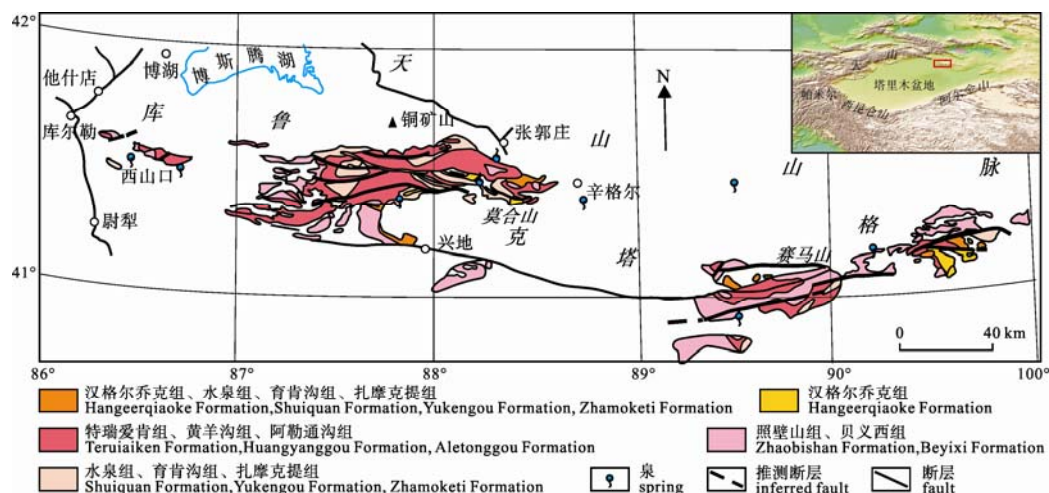


图 2 库鲁克塔格地区新元古代地层分布(据高振家等, 1984b)

Fig. 2 Distribution of Neoproterozoic strata in Kuruk Tag area (modified after GAO et al., 1984b)

或粉砂质泥岩。平行不整合于阿勒通沟组之下, 整合于贝义西组之上。厚 360~1407 m。

阿勒通沟组: 诺林 1937 年命名于新疆库鲁克塔格阿勒通沟岩系, 高振家等(1980)重新厘定其含义。选层型为新疆尉犁县中库鲁克塔格照壁山 X IV 号实测剖面(E88°18'00", N41°29'20"), 高振家等 1984 年重测。岩性特征以细碎屑岩为主, 夹泥灰岩、火山岩, 中部含海相冰碛岩。整合于特瑞爱肯组之下; 平行不整合于照壁山组之上。厚 8~32017 m。

黄羊沟组: 曹仁关 1991 年命名于新疆库鲁克塔格阿勒通沟。岩性特征为含针铁矿白云岩, 厚 21~350 m。平行不整合于阿勒通沟组之上, 整合于特瑞爱肯组之下。

特瑞爱肯组: 诺林 1932 年命名, 高振家等(1980)重测并重新厘定其含义。正层型为新疆库鲁克塔格尉犁县特瑞爱肯沟剖面(E87°23'00", N47°27'30")。岩性特征以深灰-灰色冰碛岩为主, 夹砂岩及少量碳酸盐岩, 该组顶部在一些地区有厚度不大(0~1.5 m)的碳酸盐帽。其下多以冰碛岩的出现, 上以冰碛岩的消失为界。整合或平行不整合于黄羊沟组之上和平行不整合于扎摩克提组之下。厚 440~1850 m。

2.1.2 震旦系(635—542 Ma)自下而上为扎摩克提组、育肯沟组、水泉组和汉格尔乔克组

扎摩克提组: 朱诚顺等 1958 年命名扎摩克提布拉克岩系, 高振家等 1977 年重测并修订其含义(高振家等, 1980)。正层型为新疆尉犁县克根库都克南 2378 高点北剖面(E88°02'30", N41°30'00")。岩性特征以杂色(灰绿色、紫红色)粉砂岩和细砂岩为主, 下部常呈不均匀互层, 其中常夹灰绿色砂岩、粉砂岩, 顶部常有火山岩发育。平行不整合或不整合在特瑞爱肯组之上, 整合于育肯沟组之下。厚 560~1299 m。

育肯沟组: 诺林 1937 年命名, 高振家等 1978 年修订和重测。正层型为新疆库鲁克塔格西端南测育肯沟剖面(E87°32'30", N41°26'09")。岩性特征以粉砂岩、粉砂质板岩、纹板岩等细碎屑沉积为主, 中夹泥灰岩及凸镜状砂岩。整合或局部不整合覆于扎摩克提组之上和整合或局部平行不整合伏于水泉组之下。厚 210~350 m。

水泉组: 朱诚顺等 1958 年命名。正层型为新疆尉犁县、库鲁克塔格克根库都克南 2328 高点北剖面(E88°02'30", N41°30'30"), 高振家等 1984 年重测。岩性特征为主要由碳酸盐岩和碎屑岩组成, 下部以碳酸盐岩为主; 上部以碎屑岩为主, 局部地段有火山岩。不整合或整合在汉格尔乔克组之下; 整合或

局部平行不整合在育肯沟组之上。厚 100~465 m。

汉格尔乔克组: 朱诚顺等 1957 年命名。选层型为新疆尉犁县中库鲁克塔格照壁山 X IV 号实测剖面(E88°18'00", N41°29'20"), 高振家等 1977 年重测(高振家等, 1980)。岩性特征以冰碛岩为主, 偶夹砂岩、灰岩凸镜体, 顶底部为白云质纹泥岩局部含小砾石(坠石)。上与西山布拉克组平行不整合接触; 下和水泉组不整合或平行不整合接触。厚 150~430 m。

2.2 塔里木板块西南缘(西昆仑山)

西昆仑南华系和震旦系发育在塔里木西南缘铁克里克地区, 从西北部的坎地里克到东南部的塔斯洪河均有出露, 以新藏公路—哈拉斯坦河一带出露较全, 研究详细。马世鹏等在 20 世纪 70 至 80 年代最先发现并详细测制了西昆仑山北坡恰克马力克组剖面, 随后, 他们根据野外实测剖面 and 地层划分, 将恰克马力克组升格为恰克马力克群, 并进一步细分为 3 个组(波龙组、克里西组和雨塘组)。关于塔里木板块西南缘冰川事件一经发现就引起人们的关注, 其成果强调了将该群底部红色类磨拉石建造(牙拉古孜组)与扬子陆块南华系底部莲沱组对比; 其他 3 组分为两个冰期和一个间冰期, 即下冰期波龙组、间冰期克里西组和上冰期雨塘组, 与扬子陆块南华系上统冰期和间冰期对比。其上的库尔卡克组和克孜苏胡木组与扬子陆块震旦系对比。

2.2.1 南华系自下而上为牙拉古孜组、波龙组、克里西组和雨塘组

牙拉古孜组: 马世鹏等 1989 年命名。正层型为新疆恰克马力克剖面(E77°07'00", N36°40'00")。主要岩性为一套红色底砾岩中夹砂岩、砂砾岩及粉砂质泥岩所组成的岩石序列。与下伏苏库洛克群呈不整合接触和上覆波龙组为平行不整合接触。厚 36~268 m。该组主要分布在新疆昆仑山前, 塔里木板块南缘。

波龙组: 马世鹏等 1989 年命名。层型为新疆叶城县南, 新藏公路西侧波龙组剖面。主要岩性为海相冰成岩(杂砾岩), 以灰色块状冰碛、混碛岩为主, 夹有硅质泥岩、粉砂岩、页岩及浊积砂岩和碎屑流砾岩。与上覆克里西组为整合接触和下伏牙拉古孜组为平行不整合接触。厚 500~1216 m。

克里西组: 马世鹏等 1980 年命名(马世鹏等, 1989)。层型为新疆叶城恰克马力克克立西沟剖面(E77°07'00", N36°40'00")。主要岩性为下部灰绿色砂岩、砂砾岩; 上部为泥硅质岩。与下伏波龙组为整

合;上部与雨塘组为平行不整合接触。厚 347 m。

雨塘组:马世鹏等(1989)命名。层型为新疆叶城县恰克马立克沟剖面(E77°07'00", N36°40'00")。主要岩性为砂质块状混积岩及长石砂岩所组成的岩石序列,主要由灰绿、灰、灰紫色条带状砂岩粉砂岩及泥岩组成,夹有泥灰岩。含叠层石及微古植物等化石。与上覆库尔卡克组、下伏波龙组均为平行不整合接触。厚 741 m。

2.2.2 震旦系自下而上为库尔卡克组和克孜苏胡木组

库尔卡克组:马世鹏等 1979 年命名,方锡廉 1980 年介绍(马世鹏等, 1989)。层型为新疆克孜苏胡木沟剖面(E77°02'00", N36°40'00")。主要岩性为薄层砂岩、页岩互层为主,夹含砾细砂岩、长石砂岩等,上部偶见磷块岩条带,底部发育一层白云岩为分界标志。下与恰克马立克群不整合接触,上与克孜苏胡木组整合接触。厚 353.4~674 m。

克孜苏胡木组:马世鹏等 1980 年命名(马世鹏等, 1989)。层型为新疆叶城县新藏公路克孜苏胡木沟实测剖面(E77°02'00", N36°40'00")。主要岩性为:上部主要为白云岩,下部由深灰色、紫色、玫瑰色砂岩、粉砂岩不均匀互层夹白云岩所组成。下与库尔卡克组整合,上和奇自拉夫组不整合接触。厚 353~371 m。

2.3 塔里木板块西北缘(阿克苏—乌什地区)

阿克苏—乌什地区的南华系和震旦系地层主要分布在阿克苏—乌什县南山地区(E79°05'00", N40°47'00"),属天山山脉的南支。地层区划属塔里木地层区,柯坪分区。本区南华系称巧恩布拉克群(西方山组、东巧恩布拉克组、牧羊滩组和冬屋组)和尤尔美那克组;震旦系苏盖特布拉克组。

2.3.1 南华系自下而上为巧恩布拉克群和尤尔美那克组

巧恩布拉克群:张太荣 1973 年命名,新疆区域地层表编写组 1975 年介绍。层型剖面为新疆乌什县巧恩布拉克剖面(E79°15'10", N40°38'10"),张振华等 1957 年测(新疆区域地层表编写组 1975 年修测)。高振家等 1979 年又重新划分(高振家等, 1984b),改称为“群”级单位(巧恩布拉克群),并分为四个组,自下而上划分为:西方山组、东巧恩布拉克组(块状杂砾岩)、牧羊滩组和冬屋组。

西方山组:高振家等 1986 年命名,1993 年介绍(高振家等, 2003)。正层型为新疆阿克苏以北尤尔美那克牧村以南西方山西坡剖面,陆松年、高振家等 1990 年测。由灰绿色、深灰色长石石英砂岩、岩屑

长石砂岩等组成,夹不稳定的砂砾岩、粉砂岩夹层或凸镜体。沉积韵律发育。与下伏阿克苏群未见直接接触关系,与上覆东巧恩布拉克组平行不整合或超覆不整合接触。厚 1266~1715 m。

东巧恩布拉克组:高振家 1986 年命名(高振家等, 2003)。正层型为新疆乌什县以南巧恩布拉克以东的巧恩布拉克东山剖面,高振家等 1986 年测。隶属于巧恩布拉克群。主要为灰绿色块状杂砾岩夹含砾不等粒杂砂岩。产遗迹化石。与下伏西方山组呈平行不整合,和上覆牧羊滩组为整合接触。厚 61~311 m。

牧羊滩组:高振家等 1985 年命名(高振家等, 2003)。正层型为新疆乌什县尤尔美那克牧村西南 500 m 牧羊滩剖面,高振家等 1985 年测。为灰绿色,深灰色微层理发育的钙质粉砂岩与薄层细砂岩互层。整合覆于东巧恩布拉克组之上,与上覆冬屋组平行不整合接触,局部为超覆不整合接触。厚 107~448 m。

冬屋组:高振家等 1985 年命名(高振家等, 1985)。正层型为新疆乌什县南尤尔美那克牧村南冬屋剖面,高振家等 1985 年测。厚层状、块状含砾粗砂岩,砂砾岩,夹灰绿色薄层粉砂岩及细砂岩,递变层理发育,含遗迹及微古植物化石。与下伏牧羊滩组为平行不整合接触,与上覆尤尔美那克组(冰碛岩)为不整合接触。厚 175 m。

尤尔美那克组:高振家等 1981 年命名(高振家等, 1985)。层型剖面为新疆尤尔美那克西, X IV 号实测剖面(E79°27'40", N40°40'40")。主要岩性为一套紫红色冰碛岩、砂岩及绿色粉砂质板岩。不整合覆于巧恩布拉克组之上,平行不整合伏于苏盖特布拉克组之下。厚 10~80 m。

2.3.2 震旦系为苏盖特布拉克组

苏盖特布拉克组:张振华等 1957 年命名(高振家等, 1985)。层型剖面为新疆苏盖特布拉克之西约 15 km 实测剖面(E79°17'30", N40°50'00")。主要岩性为以绛红、砖红色为主的复矿砂岩、泥岩,中央火山岩及灰绿色、灰白色砂岩及石英砂岩夹层所组成,上部夹灰岩多层。整合或平行不整合于寒武系下统奇格布拉克组(产小壳化石)之下,平行不整合于巧恩布拉克组或尤尔美那克组之上。厚 61~894 m。

2.4 西天山(果子沟地区)

果子沟剖面隶属西天山分区,属于天山山脉的北支,南临伊犁盆地,北以赛里木湖为界,东延东天山,与库鲁克塔格地区相望(图 1)。三套冰碛岩出露在赛里木湖以南果子沟—科古琴山一带(高振家

等, 1983; 王景斌等, 1983)。王景斌等(1983)将其命名为凯拉克提群, 共分 6 个组, 自下而上为库鲁铁列克提组(下冰碛岩)、吐拉苏组、别西巴斯套(中冰碛岩)、喀英迪组、特尔恰特组、塔里萨依组(上冰碛岩)。下冰碛岩(库鲁铁列克提组)分布局限, 岩性复杂, 由冰碛砾岩和火山岩组成; 中冰碛岩(别西巴斯套)为厚度不大岩性单一的冰碛岩, 局部可见含坠石的纹泥岩; 上冰碛岩(塔里萨依组)有多套冰碛岩和海相碎屑岩互层。丁海峰等(2009)用化学蚀变指数(CIA)探讨了果子沟冰碛岩的沉积环境。依据冰碛岩中的 Si、K、Na 和 Al 氧化物及其比值特征, 确定了西天山逐渐从构造活动区域演变为较稳定的被动大陆边缘环境。塔里萨依组仅有年龄是来自塔里萨依组泥质粉砂岩 Rb-Sr 全岩等时限年龄为 (640 ± 33) Ma(高振家等, 1984b)。西天山东北段伊犁地区的果子沟—科古琴剖面发育了新元古代 3 套冰碛岩, 由于缺少冰碛岩年代地层学的可靠数据, 顶部的塔里萨依组冰碛岩一直与库鲁克塔格地区的汉格爾乔克组对比, 置于震旦系(埃迪卡拉系)的冰期, 但沉积环境、沉积类型和化学地层及古地理格局的解疑始终是一个谜。塔里萨依组侵入到顶部的花岗斑岩(642 ± 6) Ma SHRIMP 锆石 U-Pb 新年龄(高维等, 2011), 尽管该年龄为侵入岩年龄, 但为确定果子沟剖面塔里萨依组冰碛岩沉积上限的年代提供新的可靠证据。

南华系

自下而上为库鲁铁列克提组(下冰碛岩)、吐拉苏组、别西巴斯套(中冰碛岩)、喀英迪组、特尔恰特组、塔里萨依组(上冰碛岩)。

库鲁铁列克提组: 王景斌等 1982 年命名(王景斌等, 1983)。层型为新疆精河县科古琴河上游库鲁铁列克提剖面。主要岩性为基性火山岩层凝灰岩及杂砾岩, 上部以火山熔岩为主, 下部为层凝灰岩及少量砂岩粉砂岩。不整合于库松木切克群之上, 其上与吐拉苏组为整合接触。厚 115 m。

吐拉苏组: 王景斌等 1980 年命名(王景斌等, 1983)。正层型为新疆科古琴河上游剖面。主要岩性以深灰色、黑色泥质岩为主, 及粉砂岩、砂岩所组成。不整合于库鲁铁列克提组之上, 与上覆别西巴斯套组呈平行不整合接触。厚 104 m。

别西巴斯套组: 王景斌等 1982 年命名(王景斌等, 1983)。层型为新疆精河县大河沿镇以南科古琴山别西巴斯套地区剖面。主要岩性为灰色块状冰碛岩(杂砾岩)及灰白色含砾冰碛纹泥岩及含砾砂质白云岩, 后者沿走向常为块状冰碛岩所代替, 一些

地区其底部局部含砾砂质白云岩夹深灰色含砾粉砂质页岩及含砾泥质细砂岩, 微层理发育, 其中部分砾石具坠石特征。与下伏吐拉苏组平行不整合(局部整合), 与上覆喀英迪组为整合接触。厚 9.7~55 m。

喀英迪组: 王景斌等 1982 年命名。层型为新疆精河县四台科古琴山塔尔恰特剖面, 王景斌等 1982 年测。主要岩性为深灰色、黑色、灰绿色薄层粉砂岩、砂岩夹灰绿色页岩。上与塔尔恰特组、下与别西巴斯套组均呈整合接触。厚 67.2~140 m。

塔尔恰特组: 王景斌等 1980 年命名(王景斌等, 1983)。正层型为新疆二台果子沟磷矿沟剖面, 王景斌等 1982 年测。主要岩性以灰色、深灰色泥质粉砂岩, 夹具微细层理。整合覆于喀英迪组之上, 平行不整合伏于塔尔卡特组之下。厚 0~424 m。

塔里萨依组: 王景斌等 1980 年命名(王景斌等, 1983)。正层型为新疆二台果子沟磷矿沟剖面, 王景斌等, 1982 年测。主要岩性以灰色、深灰色冰碛岩为主, 夹具微细层理的泥质粉砂岩。整合覆于塔尔卡特组之上, 平行不整合伏于寒武系磷矿沟组之下。厚 0~424 m。

3 塔里木西南缘南华系碎屑锆石年龄的制约

样品(77-2)采自塔里木西南缘(新藏公路 100 km 处)恰克马克力克群波龙组(图 3), 采样坐标: $N37^{\circ}07.882'$, $E77^{\circ}00.674'$, 采样层位南华系波龙组中大套冰碛岩夹层, 即灰色泥岩。经过选矿分析, 发现晶型完好的锆石(图 3)。锆石 U-Pb 年龄测定在西澳大利亚科廷离子探针实验室 SHRIMP-II 上进行, 原始数据的处理和锆石 U-Pb 谐和图的绘制采用 Ludwig 博士(2001)编写的 Squid 和 Isoplot 程序。锆石的阴极发光图象(CL)特征: 锆石晶形完好, 为浅黄色-无色透明锥状晶体。锆石粒度多在 100~200 μm 之间, 柱状晶体长宽比为 2:1。所测试的锆石阴极发光图像如图 4 所示。图像显示出典型的岩浆生长振荡环带和韵律结构, 属于岩浆结晶的产物。

图 4 中南华系波龙组碎屑锆石分布模式中出现 4 个峰值, 分别在 2.6 Ga、2.2 Ga、1.8 Ga 和 756 Ma; 最年轻锆石 4 粒, 为 725~778 Ma, 平均加权年龄为 756 Ma(图 4, 表 1), 说明塔里木西南缘南华系波龙组的沉积时代要晚于 756 Ma 的沉积, 同时, 沉积岩碎屑锆石年龄分布模式说明与塔里木西南缘物源主要来自太古代—中元古代基底地层。由于 1.8—0.75 Ga 之间没有热事件(锆石)的记录, 除了考虑样品的测点不足外, 可能从侧面反映了塔里木西南缘

1.8—0.75 Ga 期间属于稳定时期,与塔里木东缘库鲁克塔格地区贝义西组中获得的碎屑锆石明显不同;贝义西组特别记录了 1014—1505 Ma 和 821—

861 Ma 时期的有大规模的岩浆活动(张英利等, 2011)。塔里木西南缘南华系波龙组沉积岩碎屑锆石年龄分布模式仅反映了 2.6 Ga、2.2 Ga、1.8 Ga 和 756 Ma 四组碎屑锆石年龄,其中 756 Ma 年龄对探究南华系波龙组沉积的上限是最有意义的。

4 新疆晚前寒武纪地层对比原则

将新疆晚前寒武纪地层对比问题纳入全球构造格架中,新疆南华纪—震旦纪地层沉积是对 Rodinia 超大陆的响应。1)构造格局,自塔里木运动或阿克苏运动之后,塔里木板块处于全球冰盖沉积环境之下的冰期再旋回之中;2)生物古地理格局,塔里木板块在全球 Rodinia 超大陆聚合后,塔里木板块与扬子板块和澳大利亚大陆接近,冰期特点与澳大利亚大陆冰期可比,震旦系的生物演化特点与扬子块体和澳大利亚大陆生物演化特点一致。在塔里木板块周缘发育了不同期次的新元古代冰碛岩。其中研究程度较高的是塔里木板块东北缘天山东段的库鲁克塔格地区,新元古代地层由南华系和震旦系组成。南华系(780—635 Ma)分 3 个统,下统为贝义西组和照壁山组,中统为阿勒通沟组和黄羊沟组,上统为特瑞爱肯组。震旦系(635—542 Ma)为扎摩克提组、育肯沟组、水泉组和汉格尔桥克组,其上被寒武统的西山布拉克组覆盖。

4.1 南华系地层对比

新疆塔里木周边南华系主要分四个沉积区(图 5),其中:1)西天山伊犁地区果子沟 3 套冰期与 2)东天山库鲁克塔格地区的 3 套冰期接近。不同的库鲁克塔格地区的 3 套冰期和间冰期中发育多套火山岩

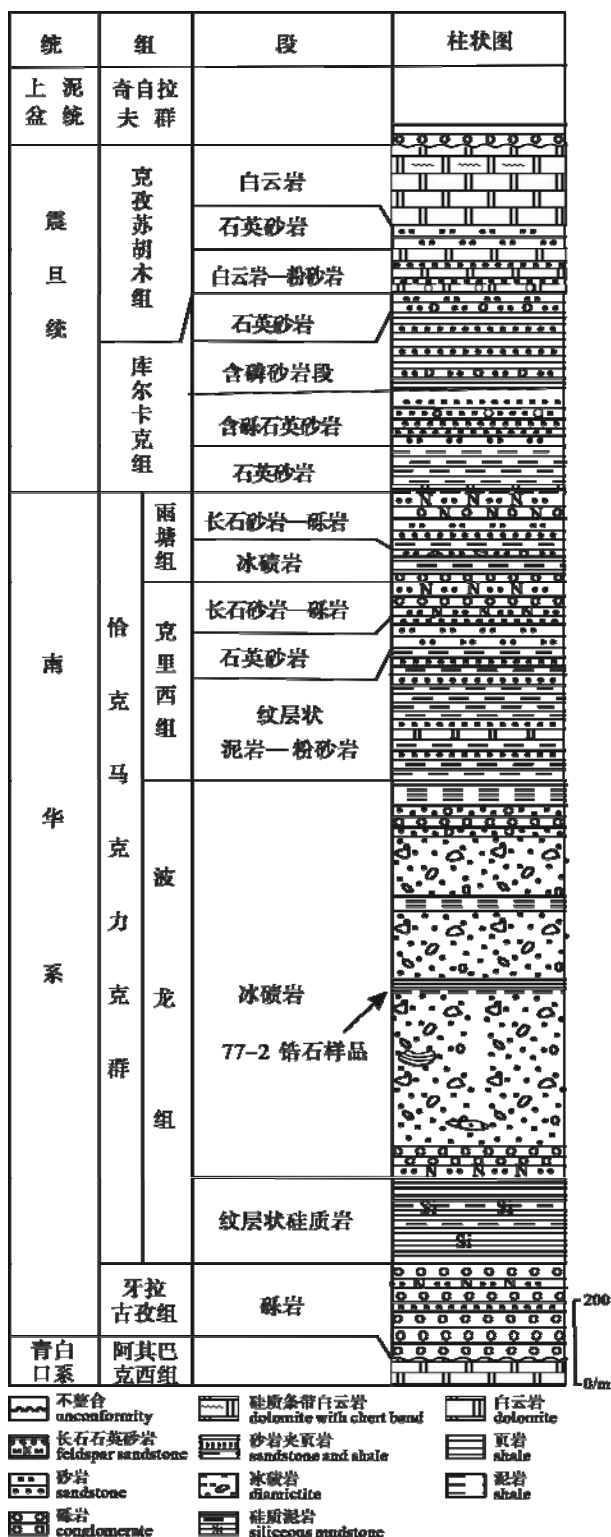


图 3 塔里木西南缘南华—震旦系综合地层柱及采样位置图

Fig. 3 Geological column of the Nanhuan and Sinian systems on the southwestern margin of the Tarim Plate, showing sampling localities

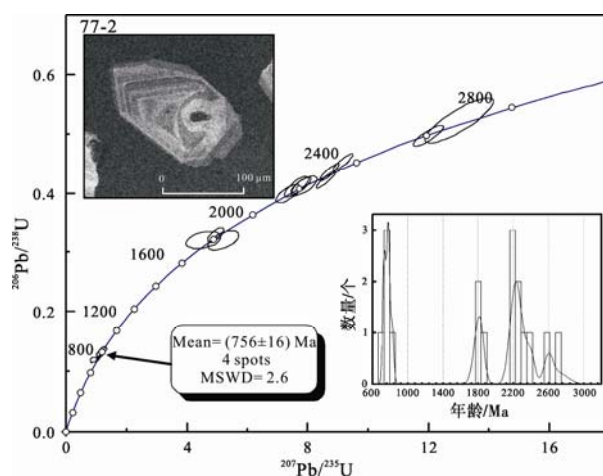


图 4 南华系波龙组碎屑锆石 U-Pb 协和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordant diagram of clastic rocks from the Nanhuan Bolong Formation

表 1 塔里木西南缘南华系克里西组碎屑锆石(77-2)SHRIMP 测年结果

Table 1 SHRIMP dating results for zircons (77-2) from the Nanhuan Kelixi Formation on the western margin of Tarim Plate

测点	$^{206}\text{Pb}_c$ /%	U / 10^{-6}	Th / 10^{-6}	^{232}Th / ^{238}U	$^{206}\text{Pb}^*$ / 10^{-6}	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ /Ma	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ /Ma	不谐 和性/%	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ 比值	$\pm 1\sigma$ /%	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ 比值	$\pm 1\sigma$ /%	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ 比值	$\pm 1\sigma$ /%	误差相 关系数
1.1	0.47	65	37	0.59	22.9	2218 $\pm$ 52	2162 $\pm$ 39	-3	2.435	2.8	0.1348	2.3	0.411	2.8	0.775
2.1	0.07	149	60	0.42	55.8	2328 $\pm$ 43	2292 $\pm$ 19	-2	2.299	2.2	0.1454	1.1	0.4350	2.2	0.896
3.1	1.17	60	40	0.69	21.6	2225 $\pm$ 50	2210 $\pm$ 46	-1	2.426	2.6	0.1386	2.7	0.412	2.6	0.706
4.1	1.68	145	404	2.88	15.1	725 $\pm$ 16	436 $\pm$ 170	-67	8.40	2.4	0.0556	7.5	0.119	2.4	0.299
5.1	0.95	131	93	0.73	14.6	778 $\pm$ 17	712 $\pm$ 130	-9	7.79	2.4	0.0631	6.0	0.1283	2.4	0.369
6.1	1.79	37	23	0.64	10.5	1792 $\pm$ 49	1672 $\pm$ 140	-7	3.120	3.1	0.1026	7.8	0.3205	3.1	0.372
7.1	0.13	200	98	0.50	77.8	2403 $\pm$ 42	2314 $\pm$ 18	-4	2.213	2.1	0.1473	1.0	0.4518	2.1	0.897
8.1	0.29	158	96	0.63	56.1	2227 $\pm$ 42	2187 $\pm$ 30	-2	2.423	2.2	0.1368	1.7	0.4127	2.2	0.791
9.1	0.49	21	40	2.04	9.25	2710 $\pm$ 110	2658 $\pm$ 51	-2	1.914	4.8	0.1806	3.1	0.523	4.8	0.841
10.1	1.45	26	1	0.04	7.26	1791 $\pm$ 54	1922 $\pm$ 97	7	3.12	3.5	0.1177	5.4	0.320	3.5	0.541
11.1	0.82	71	32	0.47	24.4	2165 $\pm$ 47	2144 $\pm$ 45	-1	2.506	2.6	0.1334	2.6	0.399	2.6	0.708
12.1	0.58	92	78	0.87	10.8	819 $\pm$ 20	776 $\pm$ 140	-6	7.38	2.7	0.0650	6.5	0.1355	2.7	0.380
13.1	0.20	190	111	0.60	20.0	742 $\pm$ 16	742 $\pm$ 56	0	8.20	2.3	0.0640	2.7	0.1220	2.3	0.655
14.1	0.31	152	105	0.71	65.1	2599 $\pm$ 49	2607 $\pm$ 24	0	2.013	2.3	0.1751	1.4	0.497	2.3	0.848
15.1	0.48	86	65	0.78	24.4	1837 $\pm$ 39	1780 $\pm$ 44	-3	3.033	2.5	0.1088	2.4	0.3297	2.5	0.713
16.1	0.20	581	479	0.85	64.0	776 $\pm$ 15	788 $\pm$ 39	2	7.82	2.0	0.0654	1.8	0.1279	2.0	0.739
17.1	0.09	172	85	0.51	62.5	2272 $\pm$ 41	2321 $\pm$ 18	2	2.367	2.2	0.1478	1.1	0.4226	2.2	0.898

注: Pb_c 为普通铅的 ^{206}Pb 占全部 ^{206}Pb 的百分比, Pb^* 代表放射成因铅, 用于校正待测样品的并与之同时测定的标准样品的误差在 0.43%(1 σ), 普通铅校正采用实测的 ^{204}Pb 。

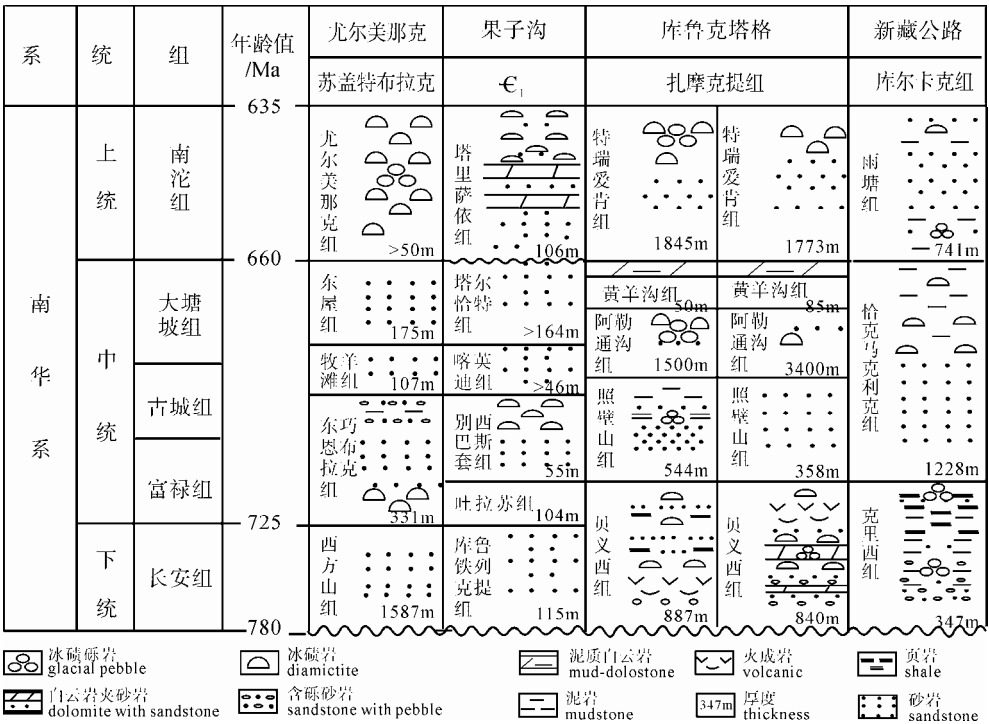


图 5 塔里木地区南华纪地层沉积对比(据王福同等, 2006 修改)

Fig. 5 Correlation of the Nanhuan System in Tarim area (modified after WANG et al., 2006)

沉积, 其火山活动周期与冰期交替发育, 多见深水沉积序列; 3)阿克苏地区的冰期表现为大陆冰盖型

沉积特征, 仅发育了两套冰期; 4)塔里木西南缘(西昆仑地区; 宗文明等, 2010)南华系从底部红色类磨

拉石建造(牙拉古孜组)开始,可与扬子陆块南华系底部莲沱组对比;其他 3 组分为两个冰期和一个间冰期,即下冰期波龙组,间冰期克里西组和上冰期雨塘组,与扬子陆块南华系上统冰期和间冰期对比。5)塔里木板块中仅在东天山盆地前隆带上有几口石油深测井(大约在 5 km 之下见到砾岩(冰碛砾岩?)),其盖层为古生代地层,砾岩地质意义不清。

塔里木板块西北缘阿克苏—乌什地区的南华系—震旦系不同于库鲁克塔格地区和西天山地区的地层类型,仅南华系发育了两套冰碛岩。其中,下部巧恩布拉克群中的杂砾岩段(diamictite),具有块状冰碛岩外貌,滑塌构造发育,曾推测为冰筏-海洋沉积物;上部尤尔美那克组具有大陆型冰川特征,突出的特征西天山东北段伊犁地区应纳入大塔里木的范畴,而果子沟—科古琴剖面发育了新元古代 3 套冰碛岩,由于缺少冰碛岩年代地层学的可靠数据,顶部的塔里萨依组冰碛岩一直与库鲁克塔格地区的汉格尔乔克组对比,置于震旦系(埃迪卡拉系)的冰期,但与沉积环境、沉积类型和化学地层及古地理格局的解释不符。根据侵入到塔里萨依组顶部的花岗斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄(642 ± 6) Ma(高维等,

2011),为确定果子沟剖面塔里萨依组冰碛岩沉积上限的年代提供新的年代学证据。伊犁地区的果子沟—科古琴山地区塔里萨依组冰碛岩可与库鲁克塔格地区第三套冰期特瑞爱肯组对比,基本符合大塔里木板块格局(沉积类型和古地理格局)是保留大陆冰席或山岳冰川的基岩冰溜面。尤尔美那克组的沉积相序为块状杂砾岩-薄层状含砾-砂-粉砂杂砾岩相,该相序反映出两次冰进和一次冰退过程。尤尔美那克组区域上可与库鲁克塔格地区第三套冰期特瑞爱肯组对比,成为塔里木地区发育最广泛的冰期。

4.2 震旦系地层对比

新疆塔里木周边震旦系主要分三个不同沉积区(图 6),其中:1)东天山库鲁克塔格地区的震旦系由扎摩克提组,育肯沟组,水泉组和汉格尔乔克组组成。多套火山岩和顶部 1 套冰碛岩沉积组成。2)阿克苏地区的震旦系苏盖特布拉克组和奇格布拉克组组成。3)塔里木西南缘(西昆仑地区)的震旦系由库拉克组和克孜苏胡木组组成。4)塔里木板块中仅在东天山盆地前隆带上有几口石油深测井(大约在 5 km 以上)仅见到砾岩,其上未见沉积取样记录,其盖层为古生代地层。但是,库鲁克塔格地区的震旦

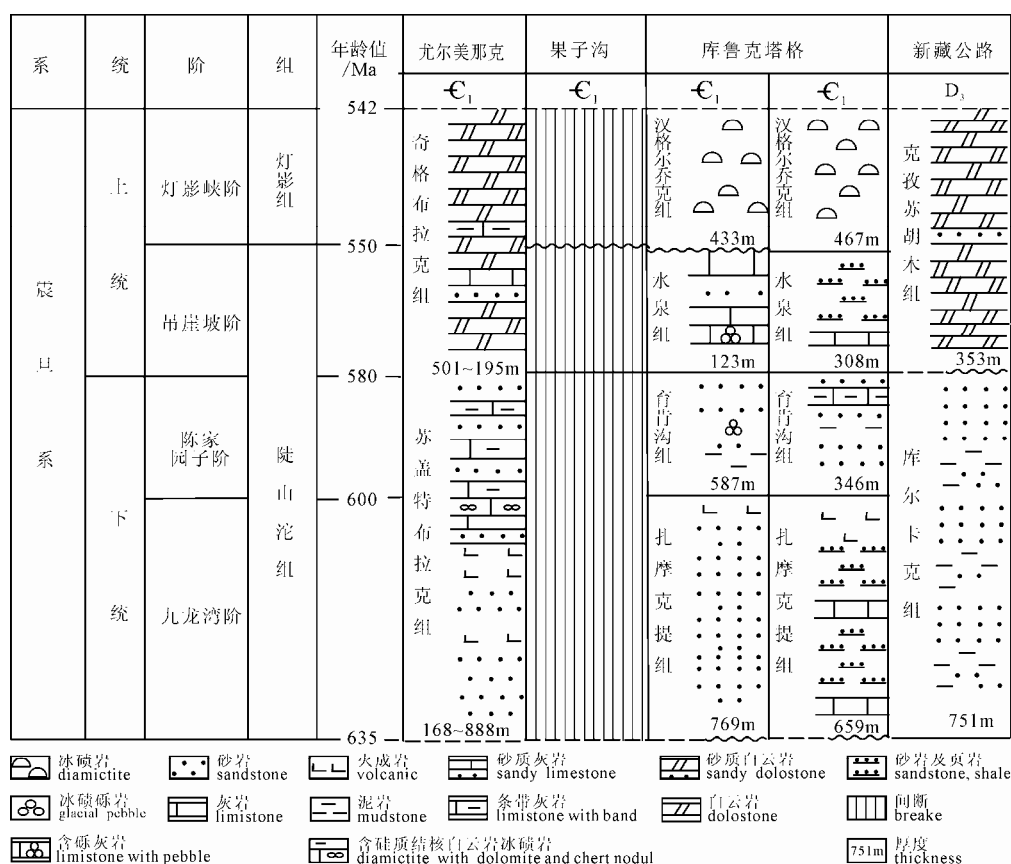


图 6 塔里木地区震旦系地层沉积对比(据王福同等, 2006 修改)
Fig. 6 Correlation of the Sinian System in Tarim area (modified after WANG et al., 2006)

系各组的碳氧同位素分布图反映出扎摩克提组、育肯沟组、水泉组和汉格尔夫乔克的沉积环境与淡水和冰期有关环境的再沉积(图 7)。

5 塔里木板块邻区南华纪—震旦纪古生物地理区系

依据 2001 年全国地层委员会第三届全国地层会议通过的《中国地层指南及中国地层指南说明书》(修订版), 震旦系的含义统一为“南沱冰碛岩组之上, 早寒武世梅树村阶(含小壳化石的灯影组天柱山段)之下的一段末元古界地层”, 该系包括下统和上统, 并将原“震旦系”下统地层定义为南华系。这一修订与国际地层表中的新元古界划分逐渐吻合, 即南华系大体相当于国际地层表成冰系范畴; 震旦系相当于国际地层表的埃迪卡拉系。上述的变更是本文南华系—震旦系进一步对比的重要依据。

南华系和震旦系隶属于新元古界的上段, 是当前国际地学界研究的热点, 它是地史中由隐生宙向显生宙过渡的重要阶段, 也是生命演化最关键的时期。近年来各国科学家越来越重视新元古代在地球演化阶段的重要意义, 特别是国际 IGCP 组织下设了若干专题组对几个全球范围的重大地质事件与生物演化关系的深入探讨(高林志, 1999), 即: ①Rodina 超大陆离散前出现的“雪球地球”事件, 这意味着生物又会发生一次绝灭和突变, 并会在地层中留下证据, 寻找生物化石证据一直是各国科学家

所追求的目标; ②中国的资料反映出冰川之后出现了两次后生动物重大演化辐射: 陡山沱期具刺疑源类的发育(<635~590 Ma), 灯影期西陵峡动物群的演化(埃迪卡拉动物群 550~542 Ma)(图 8)。以上这些研究热点促使中国的古生物地层学家重新探讨我国新元古代生物群落, 以及它们在生物演化系列和地层对比中的作用。

90 年代起, 国际地学界开展了新一轮的末元古界 III(埃迪卡拉系或震旦系)的全球对比研究, 通过全球冰川事件, 生物演化序列, 碳氧同位素和锶同位素的对比, 已取得了重大突破。而以上几个方面的进展还缺少中国境内的更为系统的研究资料, 尤其在扬子块体和华北块体的新元古代地层中发现了保存完好的原始多细胞动物和藻类的繁殖阶段化石, 其特殊保存的细胞构造, 已成为开展早期生命繁殖方式的研究新课题。它们将成为使前寒武纪多细胞生物起源、发育研究成为举世瞩目的科学研究新热点。各国科学家赞叹保存在末元古代地层中的埃迪卡拉动物群(欧洲、非洲、澳洲和北美洲等地)形态特征高度分化的同时, 注意到该动物群仅是保存于砂岩和页岩中的印痕和痕迹, 无法探究生物体自身演化轨迹。埃迪卡拉动物群伴随着 635 Ma 的冰川融化而出现的第一个大型后生动物组合, 而早期动物起源和分化在中国似乎始于陡山沱组时期的沉积, 这个时期包括了两个“阶”的生物化石带。

5.1 南华纪生物群

在中国震旦系标准剖面(峡东地区)是研究最系统、最详细的地区, 也是本文生物对比和生物区划分的标准。目前, 湖北三峡地区已发现微古植物 7 属 10 种, 即 *Trachysphaeridium* cf. *laminarites*, *L. cf. antiquissimus*, *Trematosphaeridium holitedahlii*, *T. minutum*, *Leiopsophosphaera densa*, *L. sp.*, *Lignum sp.*, *taeniatum* cf. *crassum*, *T. crassum*。阿克苏—乌什地区南华系分析出 21 属, 55 种; 库鲁克塔格地区南华系共发现有 15 属 26 种(彭昌文等, 1984; 高振家等, 1985, 1987)。西昆仑南华系也有个别报道。西天山果子沟剖面南华系发现 5 属, 6 种。尽管南华系发育生物, 但其微古植物形态总体为单一属、种, 演化特征不明显。

5.2 震旦纪生物群

大量古生物资料表明, 南沱冰期之后, 生物界发生了极其显著的变化。其主要特征是后生动物和具多次二分叉的高级藻类的大量出现。另外, 个体较大、具刺突的微古植物广泛分布也是该时期生物群的特色之一, 标志生物圈演化进入一个新阶段,

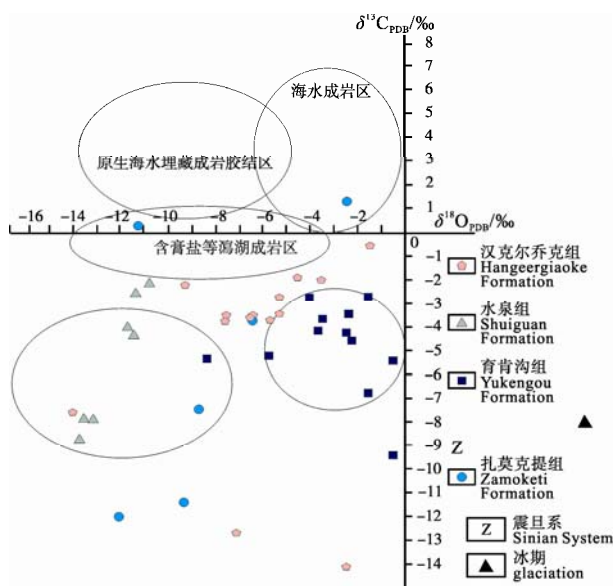


图 7 塔里木板块震旦系碳酸盐岩碳-氧同位素分布图
(同位素数据据 Xiao et al., 2004)

Fig. 7 $\delta^{13}\text{C}/\delta^{18}\text{O}$ isotopic dating of the Sinian carbonate rocks in Tarim Plate (isotopic data after Xiao et al., 2004)

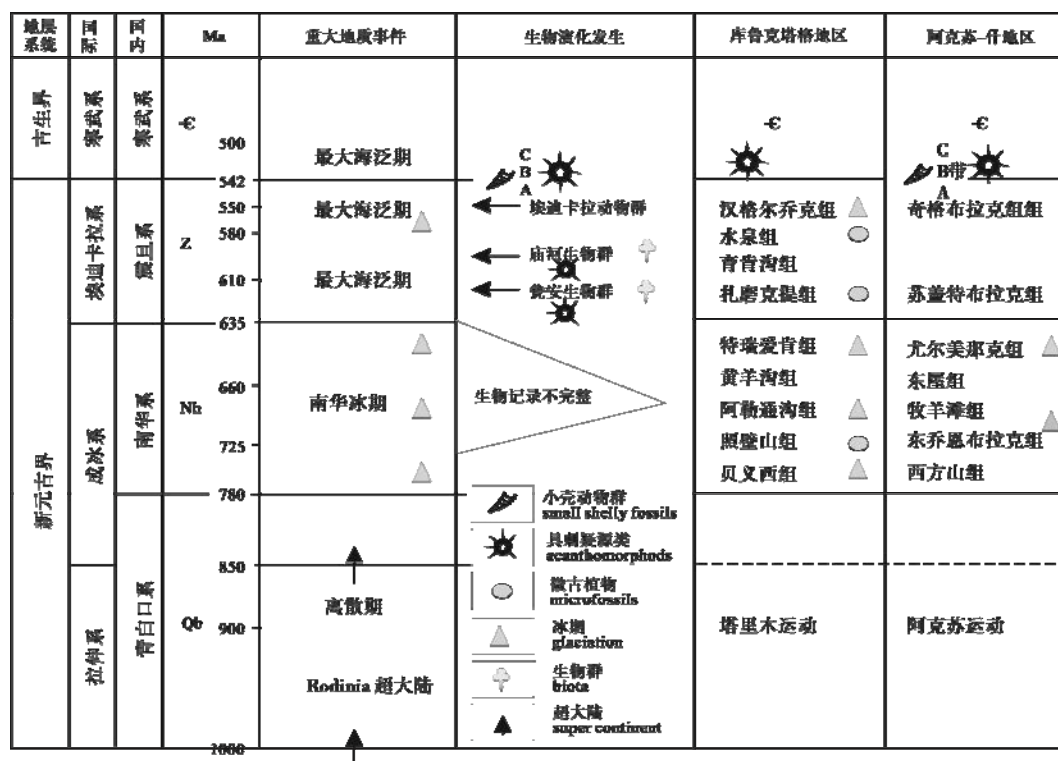


图 8 新元古界生物发生与重大地质事件的关系(据高维等, 2011 修改)

Fig. 8 Relationship between Neoproterozoic biostratigraphy and important geological events (modified after GAO et al., 2011)

说明了生物圈重大变化, 必然是地球内部、岩石圈、大气圈和水圈变化的综合效应。

震旦系下统沉积时期分两个阶, 九龙岗阶和陈家园子阶, 为陡山沱组 1 至 3 段, 动物界有两大门类出现, 即蠕形动物和海绵动物。蠕形动物分布广, 数量多, 占优势地位。目前在华南陡山沱组及华北相应时代的地层中均已大量发现, 如 *Sabellidites*, *Pa-leolina*, *Niuganmafeia*, *Huaiyuanelia*, *Anhuiella*, *Pararenicola*, *Protorenicola*, *Jiuqunaoella*, *Xilinxi-aella* 等。植物界以出现双歧分叉的高级宏观藻类为主, 有些藻类可见明显的钙化现象, 其细胞或原叶体为钙质膜包围, 应属于红藻、绿藻和褐藻门的高级藻类。主要类型有 *Palaeoscinaia*, *Miaohenella*, *Glacilogia*, *Huizhouella*, *Cyathophyton*, *Xiuningia*, *Enteromorpha*, *Lantania* 等。陡山沱组 2 至 3 段大型具刺疑源类极度繁盛, 分异度高; 该阶段的具刺疑源类分两个组合, 下部为 *Tianzhushania spinosa* 组合, 上部为 *Tanarium anozos-Tanarium conoideum* 组合。其中上部组合与澳大利亚埃迪卡拉纪复杂具刺疑源类中的主要分子一致, 但是澳大利亚埃迪卡拉纪复杂具刺疑源类组合明显缺少中国峡东地区 *Tianzhushania spinosa* 组合(刘鹏举等, 2012)。

震旦系上统沉积时期: 吊岩坡阶(刘鹏举等,

2012)主要为陡山沱组 4 段。生物群的另一特点是个体较大, 形态复杂, 常具突起的微体古植物大量出现(*Tianzhushania*, *Papillomembrana*), 膜壳直径一般为 100~400 μm , 少数可达 500 μm 。生物研究的重大突破是在陡山沱组上部碳质-泥质碳酸盐岩夹层中发现了埃迪卡拉生物群的分子美丽八臂仙母虫(*Eoandromeda octobrachiata*, Tang et al., 2008; 唐烽等, 2011)。

灯影峡阶在灯影峡出现了后生动物海鳃类, 如: *Paracharnia*。蠕形动物个体明显较陡山沱期的大, 而且常以矿化的管状保存。如: 宜昌白马沱、石板滩等地的灯影组中部产出的 *Sinotubulites* 和陕西宁强高家山灯影组中部(高家山段)产出的 *Gaojiashania*, *Conotubulus* 等。有的蠕虫有明显的器官分化现象, 如: 湖北秭归庙河灯影组发现的 *Micronemaites formosus* 可见虫体上有许多疣足和头部。类水母动物的出现和以 *Vendotaenides* 为代表的大量褐藻类的广泛分布, 也是该时期生物群的特点之一。这个动物群可能是“埃迪卡拉动物群”的早期生物组合。而灯影组沉积时期生物群不仅有大量蠕虫化石, 而且有 *Clodina* 和海鳃类 *Charnia*(*Paracharnia*), 以及地理分布很广的藻类植

物 *Vendotaenides*。

新疆东天山库鲁克塔格地区水泉组中发现震旦系生物群种 *Vendotaenides* 和蠕虫动物 *Sabellitidae*, 在阿克苏—乌什地区奇格布拉克组中也见有类似的蠕虫痕迹。因此, 其面貌可能更较接近澳大利亚“伊迪卡拉”动物群或欧洲白海动物群。

埃迪卡拉生物群是生活在 570—542 Ma 地球上的一类形态和结构都非常特殊的生物。首先, 它们是没有矿化外壳和骨骼的软躯体生物, 但是, 却通常发现在不易化石保存的石英砂岩中, 并且多呈三维立体形态, 这在以后 5 亿多年的地球历史中是罕见的。其次, 已知的埃迪卡拉型生物个体均较大, 且形态多样。但是, 它们却通常缺少动物所特有的运动、取食与消化等器官。长期以来, 古生物学家对埃迪卡拉型生物的属性和生活方式等问题进行了截然不同的解释。有些人甚至认为它们属于与现生生物界没有亲缘关系的独立生物界, 代表着地球动物大量出现之前的一次失败的演化尝试。扬子地台上发现的八臂仙母虫的发现(唐烽等, 2008; Tang et al., 2008)为同属一个生物区系新疆震旦系地层开辟了新的生物地层学研究的途径, 不仅为相关地层的对比提供重要证据, 同时也为破解埃迪卡拉化石之谜提供了一个新窗口、新思路。

6 塔里木板块周缘造山带南华纪—震旦纪地层对比依据

新疆塔里木板块周缘的南华系—震旦系与国内对比的依据, 主要为地层层序、沉积岩相、构造、古生物、冰期、同位素、古地磁和火山活动等资料。

6.1 冰期的期次

首先确认了新疆东天山库鲁克塔格地区是世界古陆上唯一发育有 4 期冰碛岩的剖面, 即南华系贝义西组(I)、阿勒通沟组(II)、特瑞爱肯组(III)和震旦系汉格尔乔克组(IV)冰碛岩。同时确定了 4 套冰期后都伴随着间冰期沉积。

库鲁塔格地区第一期冰期: 南华系贝义西组冰碛岩时代在(768±10) Ma—(740±7) Ma 之间与扬子地台长安组冰碛岩(780±10) Ma 和 Namibia 南部 Kalahari 克拉通 Kaigas 时代在(780±10) Ma—(741±6) Ma 之间; 巴西 Sao Francisco 克拉通 Jequitai 和 Windemere 杂积岩以及 Ethiopia 的 Negash 冰碛杂积岩(750—613 Ma)相当。

库鲁塔格地区第二期冰期: 南华系阿勒通沟组与扬子地台古城组冰碛岩和澳大利亚 Sturtian 冰碛

岩以及阿曼的 Gubrah 冰碛岩。

库鲁塔格地区第三期冰期: 南华系特瑞爱肯组冰碛岩(高林志等, 2010a)与扬子地台南沱组冰碛岩和澳大利亚 Marinoan 冰碛岩和 Baltica(挪威)、Varanger 冰碛岩大体相当。

库鲁塔格地区第四期冰期: 震旦系汉格尔乔克组冰碛岩与华北地区广泛分布的罗圈组冰碛岩和 Baltica(加拿大)Gaskiers 冰碛岩相当。

6.2 同位素年龄

1)库鲁克塔格地区莫合山剖面特瑞爱肯组枕状玄武岩锆石 SHRIMP U-Pb $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (705±10) Ma 和西山口剖面的贝义西组中基性火山岩锆石 SHRIMP U-Pb $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (739±6) Ma(图 9)。

2)侵入塔里萨依组顶部的花岗斑岩锆石 SHRIMP U-Pb $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为(642±5) Ma(高维等, 2011)。该年龄为果子沟—科古琴地区南华系的冰碛岩的时代序列提供对比标定和重新标定果子沟剖面塔里萨依组年代。

3)塔里木西南缘南华系恰克马克力克群波龙组冰碛岩夹层碎屑锆石年龄, 最年轻碎屑锆石 SHRIMP U-Pb $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄约 756 Ma, 说明塔里木西南缘南华系波龙组的沉积时代要晚于 756 Ma。

6.3 氧、碳同位素化学地层

通过氧、碳同位素的研究, 确定了塔里木板块周缘造山带南华系—震旦系化学地层的分布模式。对比新疆塔里木板块的新元古代地层碳酸盐岩碳-氧同位素分布特征, 南华系贝义西组年代地层 SHRIMP U-Pb 年龄为(725±10) Ma—(768±13) Ma(尹崇玉等, 2007; Xu et al., 2009; 徐备等, 2008; 高林志等, 2010a), 贝义西组的化学指数标在了原生海水埋藏成岩胶结区, 阿勒通沟组为膏盐相潟湖成岩区。但是, 特瑞爱肯组之后的几个组都反映出与淡水注入有关的沉积环境, 而明显具冰碛砾石沉积只有特瑞爱肯组, 该组可以与扬子块体的南沱冰碛岩对比。库鲁克塔格地区震旦系汉格尔乔克组可以与华北块体上罗圈组(正目观组)对比。关于扎莫克提组、育肯沟组和水泉组碳-氧同位素反映的沉积环境值得进一步探讨。

6.4 前南华纪地层的归属

塔里木板块周缘造山带南华纪沉积起点明显不同, 东西天山的果子沟—库鲁克塔格地区和西昆仑的铁克力克地区为碳酸盐岩地层, 但根据高振家等(1983, 1984a)对碳酸盐岩地层中叠层石的研究, 其叠层石组合明显不同, 反映出华北蓟县系叠层石组合有相似之处。而塔里木北缘的阿克苏—乌什—

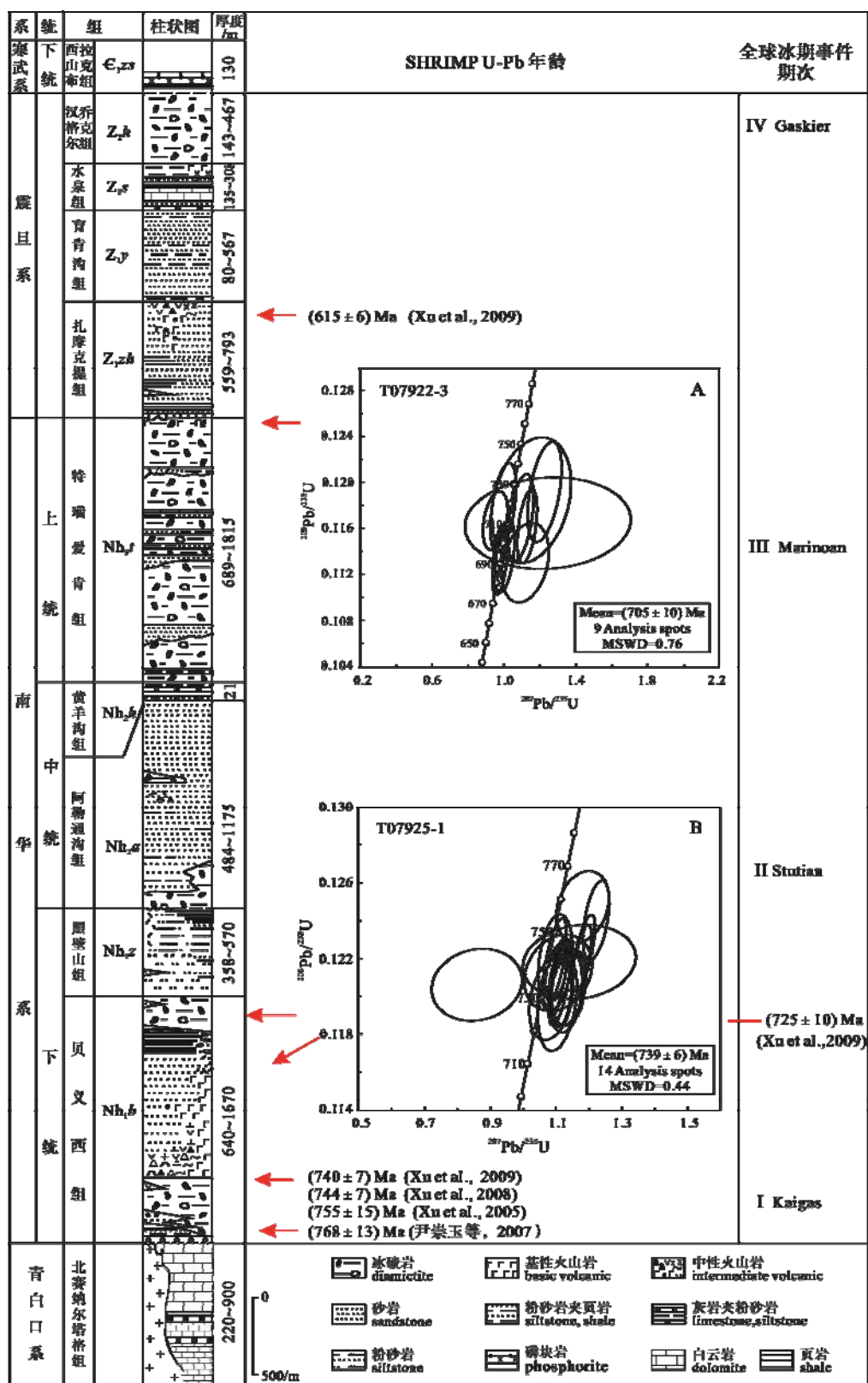


图 9 库鲁克塔格地区南华-震旦系综合地层柱及锆石年龄(据高振家等, 1980)

Fig. 9 Column of the Nanhuan and Sinian strata in Kuruk Tag area and zircon dating (modified after GAO et al., 1980)

带, 南华纪沉积直接沉积在阿克苏绿片岩之上, 反映出下伏地层发生明显构造运动。因此, 塔里木板

块边缘造山带的前南华纪地层中是否存在格林威尔造山带的沉积记录依然是个谜。

7 结论

1)通过塔里木周缘新元古代岩石地层对比,特别是对南华系冰碛岩的对比,详细描述了塔里木地区发育有四套冰期,为全球的几套冰期对比提供标准剖面 and 对比标志;

2)首次报道的塔里木西南缘南华系波龙组碎屑锆石年龄 756 Ma SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄,该年龄应代表了塔里木西南缘南华系沉积地层的最大年龄;波龙组新年龄的确定,为塔里木西南缘南华纪的沉积年龄提供了同位素时代学证据;

3)本文论述了塔里木板块周缘造山带南华纪—震旦纪地层与其他大陆或地区的地层对比的依据和生物组合。

参考文献:

- 曹仁关. 1991. 新疆南雅尔当山震旦系的新观察[J]. 中国区域地质, 1: 30-34.
- 陈寿铭, 尹崇玉, 刘鹏举, 高林志, 唐烽, 王自强. 2009. 峡东地区埃迪卡拉系陡山沱组碳同位素特征与地质意义研究[J]. 地球学报, 30(4): 475-486.
- 丁海峰, 马东升, 姚春彦, 舒良树. 2009. 新疆果子沟埃迪卡拉纪冰碛岩沉积环境[J]. 科学通报, 54(23): 3726-3737.
- 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 张同钢. 2003. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J]. 地学前缘, 10(4): 539-544.
- 高林志. 1999. 中国新元古代—古生代早期生物爆发与地球演化节律[J]. 现代地质, 13(2): 234-235.
- 高林志, 丁孝忠, 庞维华, 张传恒. 2011. 中国中—新元古代地层年表的修正——锆石 U-Pb 年龄对地层的制约[J]. 地层学杂志, 35(1): 1-7.
- 高林志, 王宗起, 许志琴, 杨经绥, 张维. 2010a. 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[J]. 地质通报, 29(2-3): 33-41.
- 高林志, 丁孝忠, 曹茜, 张传恒. 2010b. 中国晚前寒武纪年表和年代地层序列[J]. 中国地质, 37(4): 1014-1020.
- 高维, 张传恒, 李永安. 2011. 伊犁地区果子沟南华系塔里萨依组冰碛岩顶部花岗斑岩年龄及其意义[J]. 地质论评, 57(4): 495-504.
- 高振家, 陈克强. 2003. 新疆的南华系及我国南华系的几个地质问题——纪念恩师王日伦先生诞辰一百周年[J]. 地质调查与研究, 26(1): 8-13.
- 高振家, 成守德. 1984a. 塔里木地台区早古生代及古老碳酸盐岩层中含油气的可能性[J]. 新疆地质, 2(1): 1-10.
- 高振家, 朱诚顺. 1984b. 新疆前寒武纪地质[M]. 新疆: 新疆人民出版社.
- 高振家, 李永安. 1985. 新疆震旦纪冰川沉积[J]. 前寒武纪地质, 1: 87-104.
- 高振家, 彭昌文, 李永安, 钱建新, 朱诚顺. 1980. 新疆库鲁克塔格震旦纪冰川沉积[C]//中国震旦亚界. 天津: 天津科学出版社: 186-213.
- 高振家, 王务严, 彭昌文, 李永安, 肖兵. 1987. 新疆震旦系[M]. 新疆: 新疆人民出版社.
- 高振家, 吴绍祖. 1983. 前寒武纪及古生代塔里木地台的构造发展[J]. 科学通报, 28(23): 1448-1450.
- 寇晓威, 王宇, 卫魏, 何金有, 徐备. 2008. 塔里木板块上元古界阿勒通沟组和黄羊沟组: 新识别的冰期和间冰期? [J]. 岩石学报, 24(12): 2863-2868.
- 李永安, 高振家, 王景河. 1984. 古塔里木地块晚前寒武纪古地磁特征的初步探讨[J]. 新疆地质, 2(2): 81-93.
- 刘兵, 徐备, 孟祥英, 寇晓威, 何金有, 卫魏, 米合. 2007. 塔里木板块新元古代化学蚀变指数研究及其意义[J]. 岩石学报, 23(7): 1664-1667.
- 刘鹏举, 尹崇玉, 陈寿铭, 李猛, 高林志, 唐烽. 2012. 华南峡东地区埃迪卡拉(震旦)纪年底爱地层划分初探[J]. 地质学报, 83(6): 849-866.
- 刘鹏举, 尹崇玉, 陈寿铭, 唐烽, 高林志. 2009. 埃迪卡拉纪陡山沱期瓮安生物群中磷酸盐球状化石新材料及其问题讨论[J]. 地球学报, 30(4): 457-464.
- 马世鹏, 汪玉珍, 方锡廉. 1989. 西昆仑山北坡的震旦系[J]. 新疆地质, 7(4): 68-79.
- 彭昌文, 高振家. 1984. 西昆仑山北坡铁克里克一带晚前寒武纪的微古植物和叠层石及其地层意义[J]. 新疆地质, 2(1): 17-28.
- 唐烽, STEFAN B, 尹崇玉, 高林志. 2011. 八臂仙母虫(Eoandromeda Octobrachiata)新材料及其意义[J]. 地球学报, 36(6): 641-651.
- 唐烽, 尹崇玉, STEFAN B, 刘鹏举, 王自强, 陈寿铭, 高林志. 2009. 最早的栉水母动物化石——华南埃迪卡拉纪的“八臂仙母虫”[J]. 地球学报, 30(4): 543-553.
- 唐烽, 尹崇玉, 刘鹏举, 段德麟, 高林志. 2008. 华南伊迪卡拉纪“庙河生物群”的属性分析[J]. 地质学报, 82(5): 601-611.
- 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[M]. 北京: 地质出版社: 34.
- 王景斌, 成守德, 白文贤. 1983. 北天山西段震旦系中的冰成岩层[J]. 前寒武纪地质, 1: 105-118.
- 王自强, 尹崇玉, 高林志, 柳永清, 唐烽, 张传恒. 2006. 用化学

- 地层学研究新元古代地层划分和对比[J]. 地学前缘, 13(6): 268-279.
- 王自强, 尹崇玉, 高林志, 唐烽, 柳永清, 刘鹏举. 2002. 湖北宜昌地区震旦系层型剖面化学地层特征及其国际对比[J]. 地质论评, 48(4): 408-415.
- 王自强, 尹崇玉, 高林志, 唐烽. 2009. 黔南—桂北地区南华系化学地层特征[J]. 地球学报, 30(4): 465-474.
- 邬光辉, 孙建华, 郭群英, 唐涛, 陈志勇, 冯晓军. 2010. 塔里木盆地碎屑锆石年龄分布对前寒武纪基底的指示[J]. 地球学报, 31(1): 65-72.
- 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[J]. 岩石学报, 24(12): 2857-2862.
- 尹崇玉, 柳永清, 高林志, 王自强, 唐烽, 刘鹏举. 2007. 震旦(埃迪卡拉)纪早期磷酸盐化生动物群——瓮安生物群特征及其环境演化[M]. 北京: 地质出版社.
- 尹崇玉, 唐烽, 刘鹏举, 陈寿铭. 2009. 华南埃迪卡拉(震旦)系陡山沱组生物地层学研究的新进展[J]. 地球学报, 30(4): 421-532.
- 张英利, 王宗起, 闫臻, 王涛, 郭现轻. 2011. 库鲁克塔格地区新元古代沉积物源分析: 来自碎屑锆石年代学的证据[J]. 岩石学报, 7(1): 121-132.
- 中国地层委员会. 2001. 中国地层指南及中国地层指南说明书(修订版)[M]. 北京: 地质出版社.
- 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[J]. 中国地质, 37(4): 1183-1190.
- CAO Ren-guan. 1991. New observations of the sinian system in the southern yardang mountains, Xinjiang[J]. Regional Geology of China, 1: 30-34(in Chinese with English abstract).
- CARLOS J S, ALVARENGA D, SANTOS R V, DANTAS E L. 2004. C-O-Sr isotopic stratigraphy of cap carbonates overlain by Chongyug Marinoan-age glacial diamictites in the Paraguay Belt, Brazil[J]. Precambrian Research, 131: 1-21.
- CHEN Duo-fu, DONG Wei-quan, ZHU Bin-quan, CHEN Xian-pei. 2004. Pb-Pb ages of Neoproterozoic Doushantuo phosphorites in South China: constraints on early metazoan evolution and glaciation events[J]. Precambrian Research, 132: 123-132.
- CHEN Shou-ming, YIN Chong-yu, LIU Peng-ju, GAO Lin-zhi, TANG Feng, WANG Zi-qiang. 2009. Research Advances and Correlations of Carbon Isotopic Compositions in the Ediacaran Doushantuo Formation, East Yangtze Gorges, South China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 30(4): 475-486(in Chinese with English abstract).
- CHU Xue-lei, ZHANG Tong-gang, ZHANG Qi-rui, FENG Lian-jun, ZHANG Fu-song. 2004. Carbon isotopic variations of Proterozoic carbonates in Jixian, Tianjin, China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 47(2): 160-170.
- CONDON D, ZHU Mao-yan, BOWRING S, WANG Wei. 2005. U-Pb ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China[J]. Science, 308: 95-98.
- DERRY L A, BRASIER M D, CORFIELD R M, ROZAOV A Y, ZURAVLEV A Y. 1994. Sr and C isotopes in Lower Cambrian carbonates from the Siberian craton. A paleoenvironmental record during the "Cambrian explosion"[J]. Earth and Planetary Science Letters, 128: 671-681.
- DING Hai-feng, MA Dong-sheng, YAO Chun-yan, SHU Liang-shu. 2009. Sedimentary environment of Ediacaran glacial diamictite in Guozigou of Xinjiang[J]. China Science Bulletin, 54(18): 3283-3294(in Chinese).
- FENG Lian-jun, CHU Xue-lei, ZHANG Qi-rui, ZHANG Tong-gang. 2003. CIA (Chemical Index of Alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks[J]. Earth Science Frontiers, 10(4): 539-544(in Chinese with English abstract).
- FRIMMEL H E, KLOTZLI U S, SIEGFRIED P R. 1996. New Pb-Pb single zircon age constraints on the timing of Neoproterozoic glaciation and continental break-up in Namibia[J]. Journal of Geology, 104(4): 459-469.
- GAO Lin-zhi, DING Xiao-zhong, PANG Wei-hua, ZHANG Chuan-heng. 2011. New geologic time scale of Meso- and

References:

- ALLSOPP H, KOSTLIN E O, WELKE H J, BURGER A J. 1979. Rb-Sr and U-Pb geochronology of Late Precambrian-Early Palaeozoic igneous activity in the Richtersveld (south Africa) and southern south West Africa[J]. Transactions of the Geological Society of South Africa, 82: 185-204.
- BOWING S A, MYROW P, LANDING E, GROTZINGER J. 2003. Geochronological constraints on terminal Neoproterozoic events and the rise of metazoans[J]. Geophysical Research Abstracts, 5(13): 219.
- BURNS S J, MATTER A. 1993. Carbon isotopic record of latest Proterozoic from Oman[J]. Earth and Planetary Science Letters, 118: 595-607.
- CAKVER C R, BLACK L P, EVERAND J L, SEYMOUR D B. 2004. U-Pb zircon age constraints on late Neoproterozoic glaciation in Tasmania[J]. Geology, 32 (10): 893-896.

- Neoproterozoic of China and geochronologic constraint by SHRIMP zircon U-Pb dating[J]. *Journal of Stratigraphy*, 35(1): 1-7(in Chinese with English abstract).
- GAO Lin-zhi, WANG Zong-qi, XU Zhi-qin, YANG Jing-sui, ZHANG Wei. 2010a. A new zircon SHRIMP dating of the Neoproterozoic glaciation event in Quruqtagh area in Talimu basin, Xinjiang[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(2-3): 33-41(in Chinese with English abstract).
- GAO Lin-zhi, DING Xiao-zhong, CAO Qian, ZHANG Chuan-heng. 2010b. New geologic time scale of Late Precambrian of China and geochronology[J]. *Geology in China*, 37(4): 1014-1020(in Chinese with English abstract).
- GAO Lin-zhi. 1999. Neoproterozoic and Early Palaeozoic biological exploration and earth's evolutionary rhythms[J]. *Geoscience*, 13(2): 234-235(in Chinese).
- GAO Wei, ZHANG Chuan-heng, LI Yong-an. 2011. A SHRIMP zircon dating Constraints on the Nanhua Glaciogenic diamictite in Guozigou, Ili area, Xinjiang, China[J]. *Geological Review*, 57(4): 405-504(in Chinese with English abstract).
- GAO Zhen-jia, CHEN Ke-qiang. 2003. The Nanhua System of Xinjiang and some Geological Issues of Nanhua System in China[J]. *Geological Survey and Research*, 26(1): 8-13(in Chinese with English abstract).
- GAO Zhen-jia, LI Yong-an. 1985. Sinian glacial deposition in Xinjiang[J]. *Precambrian Geology*, 1: 87-104(in Chinese with English abstract).
- GAO Zhen-jia, PENG Chang-wen, LI Yong-an, QIAN Jian-xin, ZHU Cheng-shun. 1980. The Sinian System and its glacial deposits in Quruqtagh, Xinjiang[J]. *Sinian Subearth in China*. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press: 186-213(in Chinese with English abstract).
- GAO Zhen-jia, WANG Wu-yan, PENG Chuang-wen, LI Yong-an, XIAO Bing. 1987. Sinian System in Xinjiang[M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House(in Chinese).
- GAO Zhen-jia, WU Shao-zu. 1983. Tectonical development of precambrianpalaeozoic tarim massif[J]. *Chinese Science Bulletin*, 28(23): 1448-1450(in Chinese).
- GAO Zhen-jia, CHENG Shou-de. 1984a. Possible Oil-Gas-Bearing Formations in the Early Paleozoic and Old-age Carbonatites of the Tarim Platform[J]. *Xinjiang Geology*, 2(1): 1-10(in Chinese with English abstract).
- GAO Zhen-jia, ZHU Cheng-shun. 1984b. Precambrian Geology in Xinjiang, China[M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House(in Chinese).
- GUERROT C, PEUCAT J J. 1990. U-Pb geochronology of the Upper Proterozoic Cadomian Orogeny in the northern Armorican Massif, France[C]. *LEMOSSET R S. The Cadomian Orogeny*, 13-26.
- HAVERSON G P, MALOOF A C, HOFFMAN P F. 2004. The Marinoan glaciation (Neoproterozoic) in northern Svalbard[J]. *Basin Research*, 16: 297-324.
- HOFFMAN K H, CONDON D J, BOWRING S A, HOFFMAN P F. 2004. U-Pb zircon date from the Neoproterozoic Ghaub Formation, Zambia: constraints on Marinoan glaciation[J]. *Geology*, 32: 817-820.
- HOFFMAN P F, KAUFMANN A J, HALVERSON G P, SCHRAG D P. 1998. A Neoproterozoic snowball Earth[J]. *Science*, 281: 1342-1346.
- HOFFMAN P F, LI Zheng-xiang. 2009. A palaeogeographic context for Neoproterozoic glaciation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 277: 158-172.
- HOFFMAN P F, SCHRAG D P. 2002. The snowball Earth hypothesis: Testing the limit of global change[J]. *Terra Nova*, 4: 129-155.
- JIANG G, KENNEDY M J, CHRISTIE-BLICK N. 2003. Stable isotopic evidence for methane seeps in Neoproterozoic post-glacial cap carbonate[J]. *Nature*, 426: 822-825.
- KAUFMAN A J, KNOLL A H, NABORN G M. 1997. Isotopes, ice ages and terminal Proterozoic earth history[J]. *Geology*, 94: 6600-6605.
- KENNEDY M J, CHRISTIE-BLIECK N, PRAVE A R. 2001. Carbon isotopic composition of Neoproterozoic glacial carbonates as a test of paleoceanographic models for snowball earth phenomena[J]. *Geology*, 29: 1135-1138.
- KIRSCHVINK J L. 1992. Late Proterozoic low-latitude global glaciation: the Snowball Earth[C]. *SCHPF J W, KLEIN C. The Proterozoic Biosphere*. Cambridge: University Press: 51-52.
- KNOLL A H. 2000. Learning to tell Neoproterozoic time[J]. *Precambrian Research*, 100: 3-20.
- KOU Xiao-wei, WANG Yu, WEI Wei, HE Jin-you, XU Bei. 2008. The Neoproterozoic Altungol and Huangyanggou formations in Tarim Plate: Recognized newly glaciation and interglaciation?[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2863-2868.
- LEATHER J, ALLEN P A, BRASIER M D, COZZI A. 2002. Neoproterozoic snowball Earth under scrutiny: Evidence from the

- Fiq glaciation of Oman[J]. *Geology*, 30(10): 891-894.
- LI Yong-an, GAO Zhen-jia, WANG Jing-he. 1984. Paleomagnetic Properties of Late Precambrian in Palaeo-Tarim Block[J]. *Xinjiang Geology*, 2(2): 81-93(in Chinese).
- LIU Bing, XU Bei, MENG Xiang-ying, KOU Xiao-wei, HE Jin-you, WEI Wei, MI He. 2007. Study on the chemical index of alteration of Neoproterozoic strata in the Tarim plate and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 1664-1667(in Chinese with English abstract).
- LIU Pen-ju, YIN Chong-yu, CHEN Shou-ming, TANG Feng, GAO Lin-zhi. 2009. New data of phosphatized globular fossils from Weng'an biota in the Ediacaran Doushantuo Formation and the problem concerning their affinity[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(4): 457-464(in Chinese with English abstract).
- LIU Pen-ju, YIN Chong-yu, CHEN Shou-ming, TANG Feng, GAO Lin-zhi. 2012. Discussion on the chronostratigraphic subdivision of the Ediacaran (Sinian) in the Yangtze Geogesis area, south China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(8): 849-866(in Chinese with English abstract).
- LUDWIG K R. 2001. SQUID Version 1.02. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication.
- MA Shi-peng, WANG Yu-zhen, FANG Xi-lian. 1989. The Sinian at north slope western Kunlun Mountains[J]. *Xinjiang Geology*, 7(4): 68-79(in Chinese).
- MACGABHANN B A. 2005. Age constraints on Precambrian glaciations and the subdivision of Neoproterozoic time[Z]. Galway, Ireland: IUGS Ediacaran Subcommittee Circular: 1-13.
- National Commission on Stratigraphy of China (NCSC). 2001. Stratigraphic guide of China and its explanatory note[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- NORIN E. 1935. Tertiary of the Tarim Basin[J]. *Bull. Geol. Soc. China*. 1493: 337-347.
- PENG Chang-wen, GAO Zhen-jia. 1984. Microflora and stromatolites from the late precambrian on the northern slope of W. Kunlun Mountains and their stratigraphic significance[J]. *Xinjiang Geology*, 2(1): 17-28(in Chinese).
- STERN R J, AVIGAD D, MILLER N, BEYTH M. 2006. Evidence for the Snowball Earth hypothesis in the Arabian-Nubian Shield and the East African Orogen[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 44: 1-20.
- TANG Feng, STEFAN B, YIN Chong-yu, GAO Lin-zhi. 2011. New Data of *Eoandromeda Octobrachiata* and Their Indications[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(4): 641-651(in Chinese with English abstract).
- TANG Feng, YIN Chong-yu, BENGTON S, LIU Yong-qing, WANG Zi-qiang, GAO Lin-zhi, LIU Peng-ju. 2006. New discovery of macroscopic fossils from the Doushantuo Formation, Sinian System in the Yangtze Gorges area[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(11): 1487-1493.
- TANG Feng, YIN Chong-yu, LIU Peng-ju, DUAN De-lin, GAO Lin-zhi. 2008. Morphological Comparison of the Ediacaran Miaohu Biota from South China: Implications for Their Affinities and Ecology[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(5): 601-611(in Chinese with English abstract).
- TANG Feng, YIN Chong-yu, STEFAN B, LIU Peng-ju, WANG Zi-qiang, GAO Lin-zhi. 2008. Octoradiate spiral organisms in the Ediacaran of South China[J]. *Acta Geologica Sinica*(English Edition), 82(1): 27-34.
- TANG Feng, YIN Chong-yu, STEFAN B, LIU Peng-ju, WANG Zi-qiang, CHEN Shou-ming, GAO Lin-zhi. 2011. The Ediacaran ctenophore (*Eoandromeda octobrachiata*) from South China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(4): 543-553(in Chinese with English abstract).
- WANG Fu-tong, SONG Zhi-qi, WU Shao-zu. 2006. Alta palaeogeography and geological ecology of Xinjiang[M]. Beijing: Geological Publishing House: 34(in Chinese).
- WANG Jing-bin, CHEN Shou-de, BAI Wen-xian. 1983. Glacial sequences of Sinian System in the western part of North Tianshan[J]. *Precambrian Geology*, 1: 105-118(in Chinese).
- WANG Zi-qiang, YIN Chong-yu, GAO Lin-zhi, LIU Yong-qing, TANG Feng, ZHANG Chuan-heng. 2006. Chemostratigraphic studies to explain Neoproterozoic stratigraphic division and correlation[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 268-279(in Chinese with English abstract).
- WANG Zi-qiang, YIN Chong-yu, GAO Lin-zhi, LIU Yong-qing, TANG Feng. 2009. Chemostratigraphic Characteristics of the Nanhua System in Southern Guizhou-Northern Guangxi Area[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(4): 465-474(in Chinese with English abstract).
- WANG Zi-qiang, YIN Chong-yu, GAO Lin-zhi, TANG Feng, LIU Yong-qing, LIU Peng-ju. 2002. Chemostratigraphic Characteristics and Correlation of the Sinian Stratotype in the Eastern Yangtze Gorges Area, Yichang, Hubei Province[J]. *Geological Review*, 48(4): 408-415(in Chinese with English abstract).
- WU Guang-hui, SUN Jian-hua, GUO Qun-ying, TANG Tao, CHEN

- Zhi-yong, FENG Xiao-jun. 2010. The Distribution of Detrital Zircon U-Pb Ages and Its Significance to Precambrian Basement in Tarim Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(1): 65-72(in Chinese with English abstract).
- XIAO Shu-hai, BAO H, WANG Hai-feng, KAUFMAN A J, ZHOU Chuan-ming, LI Guo-xiang, YUAN Xun-lei, LING Hong-fei. 2004. The Neoproterozoic Quruqtagh Group in Eastern Chinese Tianshan: evidence for a post-Marinoan glaciation[J]. *Precambrian Research*, 130(4): 1-26.
- XU Bei, JIAN Ping, ZHANG Hai-feng, ZOU Hai-bo, ZHANG Li-fei, LIU Dun-yi. 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[J]. *Precambrian Research*, 136(2): 107-123.
- XU Bei, KOU Xiao-wei, SONG Biao, WEI Wei, WANG Yu. 2008. SHRIMP dating of the upper Proterozoic volcanic rocks in the Tarim plate and constraints on the Neoproterozoic glaciation[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2857-2862(in Chinese with English abstract).
- XU Bei, XIAO Shu-hai, ZOU Hai-bo, CHEN Yan, LI Zheng-xiang, SONG Biao, LIU Dun-yi, ZHOU Chun-ming, YUAN Xu-lai. 2009. SHRIMP zircon U-Pb age constraints on Neoproterozoic Quruqtagh diamictites in NW China[J]. *Precambrian Research*, 168: 247-258.
- XU Bei, ZHANG Hai-feng, YAO Hai-tao, LI Youg-an. 2003. C-isotope composition and significance of the Sinian on the Tarim plate[J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 48(4): 385-389.
- YIN Chong-yu, LIU Dun-yi, GAO Lin-zhi, WANG Zi-qiang, XING Yu-sheng, JIAN Ping, SHI Yu-ruo. 2003. Lower boundary age of the Nanhua System and the Gucheng glacial stage: evidence from SHRIMP II dating[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(16): 1657-1662.
- YIN Chong-yu, LIU Yong-qing, GAO Lin-zhi, WANG Zi-qiang, TANG Feng, LIU Peng-ju. 2007. Phosphatized Biota in early Sinian (Ediacaran)[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- YIN Chong-yu, TANG Feng, LIU Yong-qing, GAO Lin-zhi, LIU Peng-ju, XING Yu-sheng, YANG Zhi-qing, WAN Yu-sheng, WANG Zi-qing. 2005. U-Pb zircon age from the base of the Ediacaran Doushantuo Formation in the Yangtze Gorges, South China, constraint on the age of Marinoan glaciation[J]. *Episodes*, 28 (1): 48-49.
- YIN Chong-yu, TANG Feng, LIU Peng-ju, CHEN Shou-ming. 2009. New Advances in the Study of Biostratigraphy of the Sinian (Ediacaran) Doushantuo Formation in South China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(4): 421-532(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Shi-hong, JIANG Gan-qing, HAN Yi-gui. 2008. The age of the Nantuo Formation and Nantuo glaciation in South China[J]. *Terra Nova*, 20(4): 289-294.
- ZHANG Shi-hong, JIANG Gan-qing, SONG Biao, KENNEDY M, CHRISITE-BLICK N. 2005. U-Pb sensitive highe-resolution iron microprobe ages from the Doushantuo formation in South China: constraints on late Neoproterozoic glaciation[J]. *Geology*, 33(6): 473-376.
- ZHANG Ying-li, WANG Zong-qi, YAN Zhen, WANG Tao, GUO Xian-qing. 2011. Provenance of Neoproterozoic rocks in Quruqtagh area, Xinjiang: Evidence from detrital zircon geochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 7(1): 121-132(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Chuan-ming, TUCKER R, XIAO Shu-hai, PENG Zhan-xiao, YUAN Xun-lai, CHEN Zhe. 2004. New constraints on the ages of Neoproterozoic glaciation in South China[J]. *Geology*, 32(5): 437-440.
- ZHOU Chuan-ming, XIE Ge-wai, KATHLEEN M, XIAO Shu-hai, YUAN Xun-lai. 2007. The diversification and extinction of Doushantuo- Pertatataka acritarchs in South China: causes and biostratigraphic significance[J]. *Geological Journal*, 42: 229-262.
- ZONG Wen-ming, GAO Lin-zhi, DING Xiao-zhong, PANG Wei-hua. 2010. Characteristics of Nanhua diamictite (tillite) and stratigraphic correlation in the southwestern margin of Tarim Basin[J]. *Geology in China*, 37(4): 1183-1190(in Chinese with English abstract).