doi:10.3799/dqkx.2013.092

# 北祁连造山带晚奥陶世一泥盆纪构造演化: 碎屑锆石年代学证据

徐亚军1,2,杜远生1,2\*,杨江海1,2

1.中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室,湖北武汉 430074
2.中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074

摘要:北祁连造山带晚奥陶世一泥盆纪处于同造山的构造背景.上奥陶统一泥盆系沿造山带不对称分布.上奥陶统一泥盆系碎 屑锆石年代学特征显示,造山带东段武威一带上奥陶统底部沉积物主要来自北祁连岛弧,南部中祁连地块和北部华北板块的 沉积物在上奥陶统上部才出现,根据同沉积锆石年龄将中祁连地块和华北板块在东段初始碰撞的时间限定在470~450 Ma 之间;中祁连地块和华北板块的物质在造山带西段肃南一带被保存在下志留统,地层中也有大量来自早古生代北祁连岛弧和 同碰撞花岗岩的物质,暗示造山带西段的碰撞时间在早志留世.而造山带东段下志留统中却仅有来自中祁连地块和华北板块 的物质,缺乏代表北祁连岛弧的早古生代碎屑锆石年龄,对比上奥陶统一下志留统岩相分布和碎屑锆石年代学特征,北祁连 造山带的碰撞具有"东早西晚"的"斜向碰撞、不规则边缘碰撞"的特征,而这种碰撞方式导致中祁连地块在造山带东段仰冲到 北祁连岛弧之上,阻止北祁连岛弧为盆地提供沉积物;泥盆纪早期,北祁连岛弧年龄在东段下、中泥盆统中重新出现,结合志 留系和泥盆系在造山带东、西两段的分布和变形特征推断,泥盆纪早期北祁连造山带具有"东强西弱"的不均一隆升特征,这 种差异隆升特征是由"东早西晚"的"斜向碰撞、不规则边缘碰撞"引起的,它导致了北祁连岛弧在造山带东段被重新剥露出地 表,同时来自早期中、上志留统以及同碰撞花岗岩的物质也被汇入盆地.河西走廊盆地性质经历了弧后盆地一弧后残留洋盆一 前陆盆地的转换过程.

关键词:沉积物;碎屑锆石;年代学;晚奥陶世一泥盆纪;北祁连造山带;构造. 中图分类号: P51;P54 文章编号: 1000-2383(2013)05-0934-13 收稿日期: 2012-07-18

# Tectonic Evolution of the North Qilian Orogenic Belt from the Late Ordovician to Devonian: Evidence from Detrital Zircon Geochronology

XU Ya-jun<sup>1,2</sup>, DU Yuan-sheng<sup>1,2\*</sup>, YANG Jiang-hai<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China 2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract**: The Upper Ordovician-Devonian strata are distributed asymmetrically in the North Qilian orogenic belt (NQOB) and are record of the collision process between Central Qilian block and North China plate. Age spectra of detrital zircons from the Upper Ordovician strata in the eastern of belt suggest that sediments in the basement of Upper Ordovician originate from the North Qilian arc and detritus in the upper part of Ordovician come from Central Qilian block and the North Qilian arc to the South and North China plate to the north. This change of source, integrated with ages of synsedimentary zircons, implies that the time of initial collision between Central Qilian block and North China plate is between 470 and 450 Ma. The Lower Silurian strata in the western part of belt preserve a large number of grains from Central Qilian block and North China plate, with the infill of sediments from the North Qilian arc and synorogenic granites, which imply the time of collision in the western part of belt. Compared to Ordovician lithofacies and the time of collision in the eastern and western parts, the asynchronous collision between Central Qilian block and North China plate suggest a "diachronous, unequal margin collision" model. This collisional

基金项目:国家自然科学基金(Nos.41002030,40672080,40621002);"111"项目;中国地质大学(武汉)优秀青年教师基金(No.CUGQNL0832).

作者简介:徐亚军(1978-),男,副教授,主要从事造山带地质学研究.

\* 通讯作者:杜远生, E-mail : duyuansheng126@126.com

model resulted in the Central Qilian block thrust onto the North Qilian arc and missed from sediments in the Lower Silurian in the eastern part of belt. Sediments form the North Qilian arc re-appeared in the Lower-Mid Devonian. Combined the distribution and deformation of Silurian and Devonian in the whole belt, the orogeny of NQOB is diachronous in the trending direction due to the "diachronous, unequal margin collision". The eastern sector had stronger tectonic intensity compared to the western sector, which resulted in the re-exposure of the North Qilian arc covered by Central Qilian block during the Early Silurian, infilling of synorogenic granites and recycle of the Mid-Upper Silurian. The Hexi-Corridor basin completed the transition from retroarc basin to remnant retroarc basin, to foreland basin during the Late Ordovician-Devonian.

Key words: sediments; detrital zircon; geochronology; Late Ordovician-Devonian; North Qilian orogenic belt; tectonics.

## 0 引言

造山带与沉积盆地是大陆岩石圈表面发育的 2 个基本构造单元(刘少峰和张国伟,2005).沉积盆地 的形成受控于相邻造山带并能反映造山带的构造演 化,因此对同造山盆地内部碎屑物质来源及充填过 程的研究是反映造山带构造演化的重要手段,尤其 随着单颗粒碎屑重矿物(主要为锆石)原位微区测年 技术的进步,近年来受到广泛关注.这一方法的原理 主要是:基于具有明确时代意义的同造山期地层的 碎屑岩物源分析基础上,对该时期沉积物物质组成 及其垂向变化进行研究,示踪造山过程中源区物质 组成及其变化,再现造山作用进程.

北祁连造山带位于青藏高原东北缘,是中祁连 地块与华北板块西部之阿拉善地块于加里东期碰撞 形成的典型造山带.自20世纪70年代以来,随着板 块构造理论的推广,围绕基底构造属性、古构造体 制、奥陶纪洋盆性质及洋壳俯冲极向、变质变形作用 及大地构造演化等多个关键科学问题,展开了广泛 而深入的讨论(Wu et al., 1993;冯益民和何世平, 1996; 左国朝和吴汉泉, 1997; 葛肖虹和刘俊来, 1999;张旗等,2000;杜远生等,2002,2004;Xia et al., 2003; Zhang et al., 2007; Song et al., 2007, 2009).近年来,随着中国中央造山带早古生代巨型 高压一超高压变质带的构筑(杨经绥等,2003),更是 激起了地质学家们对中国西部陆块群(阿拉善、中祁 连、柴达木、阿尔金)早古生代拼贴过程的兴趣,极大 地促进了北祁连造山带早古生代的构造演化研究. 多数研究者认为北祁连造山带构造演化是在新元古 代 Rodinia 联合大陆裂解的基础上,在寒武纪一泥 盆纪经历了一个完整的威尔逊旋回.但是关于不同 阶段的构造演化,尤其是造山作用开始和结束的时 间,造山过程以及同造山盆地性质争议颇多,并由此 总结出了不同的造山模式(左国朝和吴汉泉,1997; 杜远生等, 2004; Xiao et al., 2008; Song et al.,

2009; Yang et al., 2009; Xu et al., 2010a).本文在汲 取以往研究成果的基础上,根据近年来从上奥陶 统一泥盆系获得的碎屑锆石年代学资料,详细归纳 总结了造山过程与同造山盆地转换的细节.

### 1 区域地质概况和样品分布

北祁连造山带位于华北板块西南缘龙首山与中 祁连地块之间,北界为龙首山断裂,南缘与中祁连北 缘断裂相接,东端为同心一固原右行走滑断裂,西端 为左行走滑的阿尔金断裂所截切.根据冯益民和何 世平(1996)的划分方案,北祁连造山带自北向南可 以划分为河西走廊弧后盆地、北祁连岛弧、俯冲杂岩 和消减洋壳残片等不同的单元,并可归并为河西走 廊弧后盆地、北祁连岛弧、海沟俯冲杂岩 3 个构造分 区(图 1).

造山带北侧河西走廊同造山盆地内发育的上奥 陶统一泥盆系在造山带走向上存在不对称性.上奥 陶统在造山带东段主要为陆源碎屑岩,底部以砾岩 (天祝组/古浪组)与下伏中奥陶统角度不整合接触, 该不整合面在区域上称为古浪运动.而在造山带西 段上奥陶统,则主要为开阔台地相的妖魔山组巨厚 层灰岩和南石门子组火山岩和火山碎屑岩,与下伏 中奥陶统地层为平行不整合接触.志留系在造山带 东段仅发育褶皱了的下志留统,而在造山带西段,不 仅三统发育齐全,而且在志留系底部还有一套灰绿 色块状-巨厚层砾岩,且地层以单斜层出现,组与组 之间整合接触.下一中泥盆统老君山组是北祁连造 山带强烈隆升时期的陆相磨拉石沉积(冯益民和何 世平,1996; 左国朝和吴汉泉,1997; 杜远生等, 2002),与下伏地层角度不整合接触,区域上称为祁 连运动(甘肃省地质矿产局,1989),在全区均有分 布,但是其沉降中心位于东段,东段的厚度以及分布 范围远远大于西段(杜远生等,2002).上泥盆统沙流 水组主要分布在造山带东段,而西段仅在靠近东段



图 1 北祁连造山带构造分区与研究剖面分布(据冯益民和何世平,1996修改)

Fig.1 Tectonic framework of North Qilian orogenic belt and distribution of the studied sections 构造分区:A.河西走廊弧后盆地;B.岛弧;C.海沟俯冲杂岩.研究剖面位置:1.武威斜豪上奥陶统剖面;2.肃南志留系剖面;3.靖远下志留统和泥盆系剖面

的肃南一带零星分布(图 2).

研究样品取自上奧陶统一泥盆系,分别分布于武 威斜豪上奧陶统天祝组和斯家沟组,靖远水泉下志留 统肮脏沟组,肃南下志留统鹿角沟组,靖远沙流水下、 中泥盆统老君山组和上泥盆统沙流水组(图 2),共计 采样 12 件,分选出大量的碎屑锆石,在中国地质大学 (武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室,采用装 载有阴极发光设备的 JEOL JXA-8100 电子探针的仪 器上进行阴极发光成像,利用 LA-ICP-MS 技术对这 些碎屑锆石进行了年龄测定(Liu et al.,2008),为示 踪沉积物来源、造山过程提供依据.

2 上奥陶统一泥盆纪碎屑锆石形貌
学、年代学特征

#### 2.1 锆石形貌学特征

所分选出的锆石主要为无色或紫色自形、半自形 晶体或者碎片(图 3a~3f),也有少量浑圆状的他形晶 体(图 3g).岩石样品粒度与锆石外形存在一定的相关 性,通常来讲,砂岩粒度越大,样品中分选出的碎屑锆 石粒度越大.碎屑锆石晶体形态暗示,大多数锆石是 经历了近距离搬运的初次沉积,而也有少量是经历了 远距离搬运或者沉积再循环作用的锆石. 为了了解锆石内部结构,在测试过程中避免包 裹体、裂缝、混合区域和高普通铅的蜕晶质区域,为 了更加合理地解释锆石年龄所代表的地质意义,对 分选出的锆石进行阴极发光成像,结果显示锆石内 部结构可概括为4种类型:①具明显振荡环带的单 颗粒(图 3a);②内部结构均一的单颗粒(图 3c)以及 少量被均一部分切割的振荡环带(图 3e);③以上述 2种颗粒为核,外部被发亮光的增生边包裹的颗粒 (图 3b,3d);④具复杂的核一幔一边结构的颗粒(图 3f).这些锆石的内部结构表明它们具有不同成因.第 1种锆石为岩浆成因锆石;第 2种为变质成因以及 经历部分熔融的锆石;第 3种为上述岩浆锆石和变 质锆石经历了后期的生长;第 4种锆石具有复杂的 生长历史.

单从锆石的形貌学特征可以判断,这些锆石包 含了多种成因类型的锆石,暗示了其物源的复杂性.

#### 2.2 碎屑锆石年代学特征

对上奥陶统一泥盆系的12件样品中共计1274 颗锆石进行了 U-Pb 同位素年龄测定,共计获得 1293个年龄.年龄谱仅选取协和度高90%的分析. 对于<sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U 年龄小于1000 Ma 的颗粒采用 <sup>238</sup> U/<sup>206</sup> Pb年龄参与讨论,而对于<sup>238</sup> U/<sup>206</sup> Pb 年龄大 于1000 Ma 的颗粒则采用<sup>207</sup> Pb/<sup>206</sup> Pb 年龄.采用





图 2 北祁连造山带上奥陶统一泥盆系地层分布及样品分布 Fig.2 The Upper Ordovician-Devonian distribution and sampling in the North Qilian orogenic belt



图 3 北祁连造山带上奥陶统一泥盆系代表性碎屑锆石 阴极发光(CL)图(年龄:Ma)

Fig. 3 CL images of representative zircons from the Upper Ordovician-Devonian, the North Qilian orogenic belt

Isoplot 3 软件生成年龄谱(图 4).

北祁连上奥陶统一泥盆系碎屑锆石年龄在时空 分布上有较大变化.造山带东段武威上奥陶统底部 碎屑锆石年龄绝大多数集中在 470~560 Ma 之间, 尤其在 467~500 Ma 之间占了所测锆石颗粒数的

64%,并形成478 Ma的年龄峰.而剩余锆石则零星 分布在 700~1 000 Ma, 1 000~1 200 Ma, 1 200~ 1400 Ma,1600 Ma 和 2500 Ma 范围内(图 4a).然 而该样品所在层位上部上奥陶统的碎屑锆石年龄则 发生了较大变化,除了在 450~500 Ma 之间形成峰 值以外,在740~880 Ma、880~1 000 Ma、1 000~ 1 200 Ma、1 200~1 800 Ma 和 2 400~2 600 Ma 之间 都形成优势峰值(图 4b).东段下志留统的碎屑锆石 与下伏上奥陶统的碎屑锆石又有较大差异.差异主 要在于下志留统中不存在早古生代碎屑锆石,均为 前寒武纪锆石,主要分布在 590~880 Ma、880~ 1 200 Ma、1 200~1 840 Ma 和 2 400~2 900 Ma 范围 内,另有少量大于 3 000 Ma 的锆石出现(图 4c).然 而造山带西段下志留统碎屑锆石的年龄谱又与东段 下志留统的年龄谱不同,主要还是表现在早古生代 碎屑锆石上.在西段肃南下志留统样品中不仅保存 了早古生代碎屑锆石(430~500 Ma),而且也保存 了与东段样品中相似的前寒武纪碎屑锆石(图 4d). 泥盆系样品来自东段靖远一带.地层中包含了早古 生代(420~500 Ma)碎屑锆石和与上奥陶统和下志







留统中相似的前寒武纪碎屑锆石(图 4e).

# 3 上奥陶统一泥盆纪北祁连造山带同 造山盆地的物源

利用碎屑锆石确定沉积盆地的物源区主要是在 区域构造演化研究的前提下,通过与区域上相关地 质单元的年代学特征进行对比来实现.北祁连造山 带是夹持于华北板块、塔里木板块和中祁连地块之 间的一个构造单元.然而古地理研究表明,北祁连造 山带是由华北板块与中祁连板块在早古生代碰撞形 成,而在碰撞时中祁连地块只是原特提斯洋北部的 一个小陆块,远离塔里木板块(Du et al.,2007),所 以塔里木板块不可能为河西走廊盆地提供沉积物. 因此本文收集了华北板块、中祁连地块和北祁连造 山带内谐和度在 90%以内的前泥盆纪岩浆事件年 龄,构筑北祁连造山带及其临区前泥盆纪岩浆及其 变质事件年龄谱(图 5).

#### 3.1 区域热事件

3.1.1 华北板块 华北板块经历了复杂的构造演 化.区域岩浆事件主要集中在4个时期:迁西期 (3000~2900 Ma)、阜平期(2600~2500 Ma)、五台 期(2400~2300 Ma)和吕梁期(1800~1700 Ma), 另外在东北地区还存在大量的3.0 Ga 以前的热事 件记录.在1600~600 Ma 之间基本上没有岩浆活 动的记录.近年来,He et al.(2009)在华北南缘熊耳 群中检测到1.7 Ga 和1.4 Ga 的与华北南缘洋壳俯 冲相关的火山岩,表明在华北南缘存在同期的岩浆 事件(图5a).

**3.1.2 中祁连地块** 中祁连地块基底岩浆事件主要集中在 1 800~1 600 Ma、1 600~1 200 Ma、 1 200~1 000 Ma、 1 000~680 Ma 之间, 尤其以



图 5 北祁连造山带及其临区前寒武岩浆及其变质事件年 龄谱

Fig. 5 Precambrian magmatic and metamorphic events in

the North Qilian orogenic belt and adjacent regions 华北克拉通数据引自 Guo *et al.*, 2005; Hou *et al.*, 2006; Wan *et al.*, 2006a, 2006b; Tung *et al.*, 2007a; 周红英等, 2007a, 2007b; Zhao *et al.*, 2007, 2008; He *et al.*, 2009; 中祁连地块数据引自 Gehrels *et al.*, 2003; Tseng *et al.*, 2006; Tung *et al.*, 2007b; Xu *et al.*, 2007;李怀坤等, 2007; 王洪亮等, 2007

1000~800 Ma之间的岩浆事件为主.显示中祁连地 块的基底主要形成于晋宁期(图 5b).

3.1.3 北祁连造山带 北祁连造山带是在早古生 代,由北祁连洋俯冲到华北板块西部阿拉善地块之 下,随后于阿拉善地块碰撞而形成的加里东期造山 带.其内部岩浆事件主要与北祁连洋消减产生的岛 弧岩浆作用(510~460 Ma)以及同碰撞/碰撞后花 岗岩(460~420 Ma)有关(吴才来等,2010).此外,北 祁连蛇绿岩和裂谷火山岩年龄主要集中在700~ 500 Ma之间(史仁灯等,2004;Tseng et al.,2007). 同时,与北祁连洋壳俯冲产生的高压变质年龄集中 在490~460 Ma(Song et al.,2004,2007; Zhang et al.,2007)之间.

综上所述,华北板块与中祁连地块分别具有各 自的岩浆事件特征.华北板块岩浆事件主要集中 1800 Ma之前,而中祁连地块则主要集中在 1800 Ma以后,尤其是中、新元古代,而中祁连地块 基底中老于1800 Ma的年龄很少.新元古代晚期一 早古生代(700~410 Ma)的岩浆活动则与北祁连洋 盆的开启和闭合以及北祁连造山带的形成有关.

#### 3.2 碎屑锆石的物源及其时空变化

**3.2.1 上奥陶统碎屑锆石的源区** 上奥陶统碎屑 锆石主要集中在 470~560 Ma、740~880 Ma、880~ 1000 Ma、1000~1200 Ma、1200~1800 Ma 和 2400~2600 Ma之间.与华北板块、中祁连地块以 及北祁连造山带岩浆特征对比发现,2400~ 2600 Ma之间的碎屑锆石最有可能来自北部的华北 板块,而占主要部分的 1800~740 Ma 之间的碎屑 锆石则源自南部的中祁连地块.470~500 Ma之间的锆石与北祁连岛弧岩浆活动时间一致,而500~ 560 Ma之间的碎屑锆石与北祁连蛇绿岩和裂谷火 山岩年龄一致.综合来看,上奥陶统底部(DG-1)的 沉积物主要来自北祁连岛弧,而来自两侧陆块的沉 积物较少.上奥陶统上部的沉积物除了北祁连岛弧 以外,还有大量的中祁连地块和华北板块基底的沉 积物.

3.2.2 下志留统碎屑锆石的源区 造山带东、西两段碎屑锆石年龄谱存在差异,说明东西两段的源区是不同的.东段与西段对比,东段没有早古生代碎屑锆石,最年轻锆石的谐和年龄是598±7 Ma,但是存在大量的前寒武纪碎屑锆石,主要分布在590~880 Ma、88~1 200 Ma、1 200~1 840 Ma和 2 400~2 900 Ma范围内,另有少量大于 3 000 Ma的锆石出现.结合区域热事件特征,590~1 800 Ma之间的锆石很可能来自中祁连地块,而老于 1 800 Ma的锆石很可能来自华北板块,没有来自北祁连岛弧的沉积物.

西段下志留统碎屑锆石除了存在与东段类似的 前寒武纪碎屑锆石外,还包含了大量早古生代 (430~510 Ma)碎屑锆石,因此西段下志留统的沉 积物既有来自两侧陆块的沉积物也有来自北祁连岛 弧(510~460 Ma)和同碰撞/碰撞后花岗岩(430~ 460 Ma)的沉积物.

3.2.3 泥盆系碎屑锆石的源区 泥盆系碎屑锆石 中包含了与上奥陶统和下志留统中相似的前寒武纪 碎屑锆石和显著的年龄在 420~510 Ma 之间的早 古生代碎屑锆石.单从年龄分布上来看,420~ 460 Ma之间的碎屑锆石年龄与北祁连同碰撞/碰撞 后花岗岩年龄一致,460~510 Ma 之间的碎屑锆石 与北祁连岛弧岩浆作用的时间一致,前寒武纪碎屑 锆石中小于1800 Ma的碎屑锆石与中祁连地块基 底年龄一致,而老于1800 Ma的碎屑锆石与华北板 块基底年龄相符.但是鉴于在造山带东段中、上志留 统缺失,泥盆系直接不整合覆盖在下志留统之上,所 以泥盆系沉积物有可能是卷入造山带的、保存有两 侧陆块基底沉积物的早期地层的再循环.由于在造 山带东段下志留统中没有早古生代的碎屑锆石,泥 盆纪的沉积物中有来自同碰撞/碰撞后花岗岩的沉 积物,因此推断在泥盆纪北祁连岛弧又为河西走廊 盆地提供了沉积物,同时同碰撞/碰撞后花岗岩也暴 露到了地表.所以东段泥盆系沉积物可能来自暴露 出地表的北祁连岛弧和同碰撞/碰撞后花岗岩以及 早期地层的再循环.

# 4 讨论

#### 4.1 中祁连地块与华北板块初始碰撞的时间

奥陶纪早期北祁连地区经历了多岛洋的构造演化,形成成熟的沟弧盆体系,然而关于北祁连洋盆关闭、碰撞的具体时间颇有争议,一般认为从晚奥陶世一泥盆纪(Wu et al.,1993;周志强等,1996;冯益民和何世平,1996;Wang et al.,2005;Liu et al.,2006;Xiao et al.,2008;吴才来等,2010).

北祁连造山带上奥陶统天祝组与中奥陶统车轮 沟组呈角度不整合接触.而这一不整合面普遍存在 于北祁连地区的上奥陶统与中奥陶统之间,被称之 为"古浪运动"(甘肃省地质矿产局,1989).但是,一 直以来对于该运动在北祁连地区的具体时间和意义 尚不清楚.

来自天祝组的碎屑锆石年代学研究显示,天祝 组底部(DG-1)的沉积物主要来自北祁连岛弧,而上 部地层(SJG-1-3, SJG-3-1和 SJG-13-1)的沉积物却 主要来自相邻的华北板块和中祁连地块,而来自北 祁连岛弧的物质却逐渐减少,直至消失于下志留统.

构造变动往往造成盆地沉积物源的变化.因此 北祁连上奥陶统物源由最初以北祁连岛弧物质为主 转向华北板块和中祁连地块物质的大量涌入,这个 转换过程暗示了中祁连地块与华北板块的初始碰 撞.而来自北祁连岛弧物质的逐渐减少直至消失,则 反映了来自两侧陆块的沉积物的大量涌入,北祁连 岛弧被逐渐覆盖(Yang et al.,2009).由此来看,上 奥陶统与中奥陶统之间的不整合面,即古浪运动,代 表了中祁连地块与华北板块之间的初始碰撞.

一般来讲,沉积物沉积的时间要晚于或接近于 最年轻的碎屑锆石的年龄.对于形成后不久就沉积 的同沉积锆石(如火山岩中的锆石),沉积时间与最 年轻碎屑锆石年龄接近,而对于其他碎屑锆石则明 显老于地层沉积时间.因而通过沉积物中碎屑锆石 不仅可以了解源区岩石时代,还可以利用最年轻的 同沉积锆石年龄限制地层时间的下限,尤其对缺乏 古生物资料的前寒武纪地层(Dickinson and Gehrel, 2009).

上奧陶统天祝组底部样品 DG-1 中获得的最小 锆石年龄为 467±3 Ma,谐和度为 97%.该锆石颗粒 具有明显的振荡环带(图 3a),Th/U 为 0.81,证明该 颗粒属于岩浆成因的锆石.同样,来自天祝组下部的 样品 SJG-1-3 的最年轻锆石年龄为 450±4 Ma,谐 和度为 97%,锆石的 Th/U 为 0.70,阴极发光显示 该颗粒也具有振荡环带,证明形成于岩浆结晶.这两颗锆石年龄分别接近于中奥陶统下部界限(467 Ma)和上奥陶统下部(453 Ma)的地层年龄(Walker et al.,2013),属于同沉积锆石.因此可以利用这2个年龄限定它们沉积的时间.这就意味着:在467 Ma前后,华北板块和中祁连地块的沉积物还没有大量进入同造山盆地,在450 Ma前后,来自华北板块和中祁连地块的碎屑物质已经大量涌入同造山盆地.显然,在467~450 Ma之间华北板块与中祁连地块已完成初始碰撞.这一结论也与下列研究成果一致.

岩石学研究证明,在岛弧环境中形成的酸性火 山岩和花岗岩的时间在 510~460 Ma 之间(张建新 等,1997;吴才来等,2004),与上述碰撞时间相协调. 北祁连地区反映加厚的下地壳成因的埃达克岩形成 时间在 450~430 Ma 之间(Tseng et al., 2009), 而 北祁连高压变质带中榴辉岩的变质时间集中在 489~463 Ma(Song et al., 2004, 2007; Zhang et al., 2007),说明在这个时间内,北祁连洋壳已经俯冲到 至少 60 km 的深度(Song et al., 2004). 而高压变质 带中退变质的蓝闪片岩的变质时间为 460~440 Ma (Liou et al., 1989; Wu et al., 1993; 张建新等, 1997;Liu et al., 2006).本文所获碰撞时间恰好位于 俯冲杂岩带中榴辉岩相变质(洋壳发生深俯冲)时间 之后和蓝闪岩相变质时间之间.可能预示着碰撞事 件造成了俯冲的洋壳物质在经历了榴辉岩相变质之 后又产生了退变质的蓝闪岩相变质作用.这个认识 与榴辉岩中叠加有明显的退变质的蓝闪岩相变质作 用相一致(Song et al., 2009).

古生物资料也显示(内部资料):早奧陶世的生物群可分为华北型和华南型两大区系;中奧陶世比较明显的分为华北型、兴安型及华南型;晚奧陶世的生物面貌趋于一致,但基本还能划分为华南型和华中型2个生物地理区系.因此间接说明,晚奧陶世北祁连洋盆已经闭合,不能成为阻隔2个区块生物演化的屏障.综上所述,中祁连地块与华北板块初始碰撞发生在470~450 Ma之间.

### 4.2 晚奥陶世一早志留世的"斜向碰撞、不规则边 缘碰撞"

一般来讲,在碰撞边缘平直和正向碰撞的情况 下,同造山盆地沿走向上的特征变化不大.但绝大部 分情况下,造山带的碰撞边缘是不规则的,碰撞不是 正向而是斜向的.斜向和不规则边缘碰撞势必造成 碰撞过程的不等时性.在碰撞边界上,不同地段碰撞

941

的时间是不同的,碰撞的性质也可能是变化的.这些 都可能导致同造山盆地内的沉积物性质和沉积体系 沿造山带走向明显不同.

北祁连造山带上奥陶统一泥盆系沉积体系及物 源沿造山带走向明显不同.造山带东段上奥陶统 (DG-1,SJG-1-3,SJG-3-1和 SJG-13-1)主要为来自 两侧陆块和北祁连岛弧的沉积物形成的碎屑岩,为 一套反映初始碰撞的陆源碎屑沉积.而造山带西段 上奥陶统则主要为开阔台地相的妖魔山组巨厚层灰 岩和南石门子组火山岩和火山碎屑岩,反映了残余 洋盆中的海台相沉积.因此从岩相学分析,北祁连造 山带的碰撞过程并不是平直和正向的碰撞,而是"东 早西晚"的"斜向碰撞、不规则边缘碰撞".

从下志留统碎屑锆石年代学特征来看,志留纪 初期,盆地西部出现巨厚层的砾岩沉积一鹿角沟组 (样品 Su10,Su11),沉积物主要为来自北祁连岛弧 和同碰撞/碰撞后花岗岩、中祁连地块和华北板块基 底,两侧陆块沉积物的出现表明中祁连地块与华北 板块在西部也已充分靠近,并在西部肃南一带碰撞 拼合(类似于晚奥陶世早期在武威斜壕一带的碰 撞),鹿角沟组的角砾岩即为西部碰撞的沉积记录, 其构造意义相似于东部的天祝组.但是这次碰撞较 东部武威一带的碰撞明显滞后,所以北祁连加里东 造山带的碰撞过程是"东早西晚"的"斜向碰撞、不规 则边缘碰撞".可能由于这种独特的碰撞方式,导致 处于碰撞前缘的北祁连岛弧东部部分被覆盖于中祁 连地块之下,不能为同造山盆地东部提供碎屑沉积 物,所以在碎屑锆石年龄谱中缺失早古生代年龄,只 有来自中祁连地块和华北板块基底的前寒武纪沉积 物(样品 Sq33、Sq34)(Yang et al., 2009).

值得指出的是,武威、肃南一带为2个不规则边 缘的突出点,较早发生碰撞.在武威一肃南之间的古 浪一带有一套下志留统南泥沟组火山岩,可能代表 了2个碰撞点之间残余洋壳继续消减的过程.

4.3 早、中泥盆世"东强西弱"的不均一隆升

北祁连造山带东段泥盆纪碎屑锆石年龄谱与志 留系碎屑锆石年龄谱之间最大的差异是北祁连岛弧 物质(460~490 Ma)的再次出现和同碰撞/碰撞后 花岗岩(420~460 Ma)沉积物的加入.这一物源变化 特点说明,奥陶纪晚期一志留纪造山带东段被覆盖 的北祁连岛弧物质以及在碰撞过程中形成的花岗岩 在泥盆纪早期被剥露出地表.下、中泥盆统老君山组 中最年轻的岩浆成因的碎屑锆石年龄在 430 Ma 左 右,与同碰撞花岗岩年龄一致,而泥盆系下限年龄为 416 Ma(Walker et al., 2013), 说明同碰撞产生的花 岗岩仅仅经过15 Ma 左右就被抬升暴露干地表,与 以往认为的早、中泥盆世北祁连造山带处于强烈降 升阶段的认识相一致.然而需要强调的是,北祁连造 山带在早、中泥盆世的隆升程度在走向上是不均一 的,表现为"东强西弱"(Xu et al., 2010b).证据主要 有两点:①志留系地层在造山带走向上的发育和变 形程度不均一.志留系在西部肃南一带以单斜层的 形式发育完全,下志留统肮脏沟组、中志留统泉脑沟 山组和上志留统旱峡组之间整合接触,而东部靖远 一带仅发育褶皱了的下志留统肮脏沟组,中上志留 统缺失;②下、中泥盆统老君山组在走向上分布以东 段为主,目沉降中心位于东段(杜远生等,2002).这 些地质事实均显示,早、中泥盆世东段的隆升程度远 大干西段,并造成东段同造山盆地内早期的沉积物 (中、上志留统)再次被旋回进入泥盆系,导致东段缺 失中、上志留统以及强烈褶皱的下志留统.这种"东 强西弱"的不均一隆升过程也是导致晚泥盆世造山 带出现"东早西晚"的伸展垮塌作用的主要原因(徐 亚军等,2011).

### 5 结论

以往的研究表明,新元古代末期-寒武纪 (495~560 Ma),华北板块与中祁连地块之间存在 着一个与原特提斯洋相连的古海洋——北祁连洋 (史仁灯等,2004; Tseng et al., 2007; 孟繁聪等, 2010).该洋盆在早奥陶世到中奥陶世之间开始向北 俯冲于华北板块之下,形成北祁连岛弧(510~ 460 Ma),在岛弧北侧形成弧后盆地(图 6a,7a).早 中奥陶世,研究区即处于弧后盆地的构造背景.晚奥 陶世,中祁连地块与华北板块在北祁连东部武威一 带已经发生初始碰撞,形成天祝组(古浪组)砾岩.北 祁连洋的东段开始关闭,弧后盆地洋壳开始向南俯 冲于岛弧之下,在岛弧北侧形成低级蓝片岩带(Wu et al., 1993). 与此同时, 突进的中祁连地块东部开 始仰冲,带来大量的沉积物将北祁连岛弧掩埋(图 6b,6c,7b),同造山盆地东段转化为复理石前陆盆 地.而盆地西部仍然处于残余洋盆的构造背景,形成 巨厚层的碳酸盐岩沉积(西部妖魔山组),志留纪初 期,中祁连地块与华北板块在北祁连西部肃南一带 碰撞拼合(类似于中奥陶世晚期在武威斜壕一带的 碰撞,图 6b,7c),形成鹿角沟组角砾岩.这次碰撞较 东部武威一带的碰撞明显滞后,反映了中祁连地块



Fig.6 Orogenic model and basin transition of the North Qilian orogenic belt

以"斜向、不规则边缘碰撞"形式拼合到华北板块南 缘的过程,因此武威、肃南一带为2个不规则边缘的 突出点,较早发生碰撞.而由于这种独特的拼合方 式,导致北祁连岛弧东部部分被覆盖于中祁连板块 之下.到了志留纪晚期和泥盆纪早期,中祁连板块与 华北板块全面碰撞,山脉隆起,但是,由于中祁连地 块东部向华北板块突进明显早于西部,因而隆升程 度"东强西弱",使东部前陆盆地内中、上志留统被移 出盆地缺失,并导致志留纪时期覆盖于中祁连地块 之下的北祁连岛弧和造山过程中形成的花岗岩被剥 露出地表(图 6d).晚泥盆世,由于造山带东段隆起 高于西段,因而伸展垮塌作用开始于东段,在造山带 东段形成沙流水组,以角度不整合覆盖于前期形成 的地层之上,而西段可能由于隆起幅度较小,因而伸 展垮塌作用较弱,仅在靠近东段的局部地区形成上 泥盆统碎屑沉积(徐亚军等,2011).自晚奥陶世开始 的加里东期碰撞造山活动结束,中祁连地块与华北

#### 板块缝合在一起.

与造山过程相对应,早一中奥陶世,整个走廊带 属干弧后盆地性质(图 6a,7a).晚奥陶世,中祁连地 块与北祁连岛弧发生初始碰撞,走廊带东部(尤其武 威一带)盆地性质转化为复理石前陆盆地(图 6b, 6c,7b),而走廊带西部为弧后残留洋盆性质(图 7b, 剖面类似于图 6a), 直到早志留世, 中祁连地块与北 祁连岛弧在西部肃南一带发生碰撞,盆地性质才由 弧后残留洋盆转换为复理石前陆盆地性质(图 6c, 7c).此外,尽管在早志留世中祁连地块与北祁连岛 弧在武威一肃南已经发生碰撞,但在北祁连一走廊 带内仍然有个别凹进部位(如武威南泥沟)没有与华 北板块发生拼接,仍然处于残余洋盆阶段,洋壳仍在 消减,产生火山岩及火山碎屑岩沉积组合,直到晚志 留世洋盆完全闭合,整个北祁连一走廊带才进入磨 拉石前陆盆地阶段(图 6d).因此,总的来讲,北祁 连一走廊带奥陶纪一泥盆纪盆地转换经历了弧后盆



- 图 7 中祁连地块与华北板块"斜向碰撞、不规则边缘碰 撞"示意图(据 Xu et al., 2010a)
- Fig.7 Collision between the Central Qilian block and North China Craton during the Ordovician-Silurian, showing diachronous collision from east to west

地一弧后残留洋盆一前陆盆地的转换过程,甚至在 晚奧陶世一早志留世出现西部弧后残余洋盆与东部 前陆盆地共存的构造格局.

#### References

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province,1989.Regional Geology of Gansu Province.Geological Publishing House,Beijing (in Chinese).
- Dickinson, W.R., Gehrels, G. E., 2009. Use of U-Pb Ages of Detrital Zircons to Infer Maximum Depositional Ages of Strata: A Test Against a Colorado Plateau Mesozoic Database. *Earth and Planetary Science Letters*, 288 (1-2):115-125.doi:10.1016/j.epsl.2009.09.013

- Du, Y.S., Zhang, Z., Zhou, D.H., et al., 2002. Silurian and Devonian Paleogeography of Northern Qilian-Hexi Corridor and Its Sedimentary Response to Synorogenesis of North Qilian Orogenic Belt. *Journal of Palaeogeography*, 4(4):1-8(in Chinese with English abstract).
- Du, Y. S., Zhu, J., Gu, S. Z., et al., 2007. Sedimentary Geochemistry of the Cambrian-Ordovician Cherts: Implication on Archipelagic Ocean of North Qilian Orogenic Belt. Science in China (Series D), 50(11):1628-1644. doi:10.1007/s11430-007-0111-z
- Du, Y. S., Zhu, J., Han, X., et al., 2004. From the Back-Arc Basin to Foreland Basin-Ordovician-Devonian Sedimentary Basin and Tectonic Evolution in the North Qilian Orogenic Belt. *Geological Bulletin of China*, 23 (9 – 10),911–917(in Chinese with English abstract).
- Feng, Y.M., He, S.P., 1996. Geotectonics and Orogeny of the Qilian Mountains, China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Ge, X. H., Liu, J. L., 1999. Formation and tectonic background of the North Qilian Orogenic Belt. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 223 - 230 (in Chinese with English abstract).
- Gehrels, G.E., Yin, A., Wang, X.F., 2003. Detrital-Zircon Geochronology of the Northeastern Tibetan Plateau. GSA Bulletin, 115(7): 881-896. doi: 10.1130/0016-7606 (2003)115<0881: DGOTNT>2.0.CO; 2
- Guo, J. H., Sun, M., Chen, F. K., et al., 2005. Sm-Nd and SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of High-pressure Granulite in the Sanggan Area, North China Craton: Timing of Paleoproterozoic Continental Collision. Journal of Asian Earth Science, 24(5): 629-642. doi: 10. 1016/j.jseaes.2004.01.017
- He, Y. H., Zhao, G. C., Sun, M., et al., 2009. SHRIMP and LA-ICP-MS Zircon Geochronology of the Xiong'er Volcanic Rocks: Implications for the Paleo-Mesoproterozoic Evolution of the Southern Margin of the North China Craton. *Precambrian Research*, 168 (3-4): 213-222. doi:10.1016/j.precamres.2008.09.011
- Hou, G. T., Liu, Y., Li, J., 2006. Evidence for ~1.8 Extension of the Eastern Block of the North China Craton from SHRIMP U-Pb Dating of Mafic Dyke Swarms in Shandong Province. *Journal of Asian Earth Science*, 27(4): 392-401. doi:10.1016/j.jseaes.2005.05.001
- Li, H.K., Lu, S.N., Xiang, Z.Q., et al., 2007. SHRIMP U-Pb Geochronological Research on Detrital Zircons from the Beidahe Complex Group in the Western Segment of the North Qilian Mountains, Northwest China. *Geological Review*, 53 (1):132-140(in Chinese with English abstract).

- Liou, J.G., Wang, X.M., Coleman, R.G., et al., 1989. Blueschists in Major Suture Zones China. *Tectonics*, 8(3):609-619. doi:10.1029/TC008i003p00609
- Liu, S. F., Zhang, G. W., 2005. Fundamental Ideas, Contents and Methods in Study of Basin and Mountain Relationships. *Earth Science Frontiers*, 12(3):101-111(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. J., Neubauer, F., Genser, J., et al., 2006.<sup>40</sup> Ar/<sup>39</sup> Ar Ages of Blueschist Facies Pelitic Schists from Qingshuigou in the Northern Qilian Mountains, Western China. *Island Arc*, 15 (1): 187 – 198. doi: 10.1111/j.1440 – 1738.2006.00508.x
- Liu, Y.S., Hu, Z.C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257 (1): 34 - 43. doi: 10.1016/j. chemgeo.2008.08.004
- Meng, F.C., Zhang, J.X., Guo, C.M., et al., 2010. Constraints on the Evolution of the North Qilian Ocean Basin: MOR-Type and SSZ-Type Ophiolites from Dachadaban. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(5):453-466(in Chinese with English abstract).
- Shi, R. D., Yang, J. S., Wu, C. L., et al., 2004. First SHRIMP Dating for the Formation of the Late Sinian Yushigou Ophiolite, North Qilian Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 78 (5): 649 - 657 (in Chinese with English abstract).
- Song, S. G., Niu, Y., Zhang, L. F., et al., 2009. Tectonic Evolution of Early Paleozoic HP Metamorphic Rocks in the North Qilian Mountains, NW China: New Perspectives. Journal of Asian Earth Sciences, 35 (3-4): 334-353.doi:10.1016/j.jseaes.2008.11.005
- Song, S.G., Zhang, L.F., Niu, Y.L., et al., 2004. Zircon U-Pb SHRIMP Ages of Eclogites from the North Qilian Mountains in NW China and Their Tectonic Implication. *Chinese Science Bulletin*, 49(8):848-852. doi:10. 1007/BF02889759
- Song, S.G., Zhang, L. F., Niu, Y. L., et al., 2007. Eclogite and Carpholite-Bearing Metasedimentary Rocks in the North Qilian Suture Zone, NW China: Implications for Early Palaeozoic Cold Oceanic Subduction and Water Transport into Mantle, *Journal of Metamorphic Geolo*gy, 25(5): 547-563. doi: 10.1111/j.1525-1314.2007. 00713.x
- Tseng, C. Y., Hong, Y. Y., Wan, Y. S., et al., 2006. Finding of Neoproterozoic (~775 Ma) Magmatism Recorded in Metamorphic Complexes from the North Qilian Orogen; Evidence from Shrimp Zircon U-Pb Dating. Chinese

*Science Bulletin*, 51(8): 963-970. doi: 10.1007/s1143 4-006-0963-1

- Tseng, C. Y., Yang, H. J., Yang, H. Y., et al., 2007. The Dongcaohe Ophiolite from the North Qilian Mountains: A Fossil Oceanic Crust of the Paleo-Qilian Ocean. *Chinese Science Bulletin*, 52 (17): 2390 – 2401. doi: 10.1007/ s11434-007-0300-3
- Tseng, C.Y., Yang, H.J., Yang, H.Y., et al., 2009. Continuity of the North Qilian and North Qinling Orogenic Belts, Central Orogenic System of China: Evidence from Newly Discovered Paleozoic Adakitic Rocks. *Gondwana Research*, 16(2): 285–293. doi:10.1016/j.gr.2009.04.003
- Tung, K. A., Yang, H. Y., Liu, D. Y., et al., 2007a. SHRIMP U-Pb Geochronology of the Detrital Zircons from the Longshoushan Group and Its Tectonic Significance.*Chinese Science Bulletin*, 52 (10): 1414 – 1425. doi: 10. 1007/s11434-007-0189-x
- Tung, K.A., Yang, H.J., Yang, H.Y., et al., 2007b. SHRIMP U-Pb Geochronology of the Zircons from the Precambrian Basement of the Qilian Block and Its Geological Significances. *Chinese Science Bulletin*, 52(19):2687-2701.doi:10.1007/s11434-007-0356-0
- Walker, J.D., Geissman, J.W., Bowring, S.A., et al., 2013. The Geological Society of America Geologic Time Scale. Geological Society of America Bulletin, 125 (3 – 4): 259–272. doi:10.1130/B30712.1
- Wan, Y.S., Song, B., Liu, D.Y., et al., 2006a. SHEIMP U-Pb Zircon Geochronology of Palaeoproterozoic Metasedimentary Rocks in the North China Craton, Evidence for a Major Late Palaeoproterozoic Tectonothermal Event. *Precambrian Research*, 149 (3-4): 249-271. doi: 10. 1016/j.precamres.2006.06.006
- Wan, Y.S., Wilde, S.A., Liu, D.Y., et al., 2006b. Further Evidence for ~1.85 Ga Metamorphism in the Central Zone of the North China Craton: SHRIMP U-Pb Dating of Zircon from Metamorphic Rocks in the Lushan Area, Henan Province. Gondwana Research, 9(1-2):189-197.doi:10.1016/j.gr.2005.06.010
- Wang, C. Y., Zhang, Q., Qian, Q., et al., 2005. Geochemistry of the Early Paleozoic Baiyin Volcanic Rocks (NW China): Implications for the Tectonic Evolution of the North Qilian Orogenic Belt. *The Journal of Geology*, 113(1):83-94.doi:0022-1376/2005/11301-0005
- Wang, H. L., He, S. P., Chen, J. L., et al., 2007. LA-ICP-MS Dating of Zircon U-Pb and Its Tectonic Significance of Maxianshan Granitoid Intrusive Complex, Gansu Province. Acta Geologica Sinica, 81(1):72-78(in Chinese with English abstract).

- Wu, C. L., Xu, X. Y., Gao, Q. M., et al., 2010. Early Paleozoic Granitoid Magmatism and Tectonic Evolution in North Qilian, NW China. Acta Petrologica Sinica, 26 (4): 1027-1044(in Chinese with English abstract).
- Wu,C.L., Yang, J.S., Yang, H.Y., et al., 2004. Dating of Two Types of Granite from North Qilian, China. Acta Petrologica Sinica, 20(3): 425-432 (in Chinese with English abstract).
- Wu, H.Q., Feng, Y.M., Song, S.G., 1993. Metamorphism and Deformation of Blueschist Belts and Their Tectonic Implications, North Qilian Mountains, China. Journal of Metamorphic Geology, 11(4):523-536. doi:10.1111/j. 1525-1314.1993.tb00169.x
- Xia, L.Q., Xia, Z.C., Xu, X., 2003. Magmagenesis in the Ordovician Backarc Basins of the North Qilian Mountains, China. GSA Bulletin, 115 (12): 1510 - 1522. doi: 10. 1130/B25269.1
- Xiao, W.J., Brian, F.W., Yong, Y., et al., 2008. Early Paleozoic to Devonian Multiple-Accretionary Model for the Qilian Shan, NW China. Journal of Asian Earth Sciences, 35(3-4):323-333.doi:10.1016 /j.jseaes.2008.10.001
- Xu, W.C., Zhang, H.F., Liu, X.M., 2007. U-Pb Zircon Dating Constraints on Formation Time of Qilian High-Grade Metamorphic Rock and Its Tectonic Implications. *Chinese Science Bulletin*, 52 (4): 531-538. doi: 10.1007/ s11434-007-0082-7
- Xu, Y.J., Du, Y.S., Cawood, P.A., et al., 2010a. Detrital Zircon Record of Continental Collision: Assembly of the Qilian Orogen, China. Sedimentary Geology, 230 (1-2):35-45.doi:10.1016/j.sedgeo.2010.06.020
- Xu, Y.J., Du, Y.S., Yang, J.H., et al., 2010b. Sedimentary Geochemistry and Provenance of the Lower and Middle Devonian Laojunshan Formation, the North Qilian Orogenic Belt. Science China Earth Sciences, 53(3): 356–367. doi:10.1007/s11430-010-0009-z
- Xu, Y.J., Du, Y.S., Yang, J.H., et al., 2011. Geochemistry and Provenance of the Upper Devonian Shaliushui Formation in Jingyuan County, Gansu Province. Acta Sedimentologica Sinica, 29(1):41-54(in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., Du, Y.S., Cawood, P.A., et al., 2009. Silurian Collisional Suturing onto the Southern Margin of the North China Craton: Detrital Zircon Geochronology Constraints from the Qilian Orogen. Sedimentary Geology, 220(1-2):95-104. doi:10.1016/j.sedgeo.2009.07.001
- Yang, J.S., Liu, F.L., Wu, C.L., et al., 2003. Two Ultrahigh Pressure Metamorphic Events Recognized in the Central Orogenic Belt of China: Evidence from the U-Pb Dating

of Coesite-Bearing Zircons. *Acta Geologica Sinica*, 77 (4):463-477(in Chinese with English abstract).

- Zhang, J.X., Meng, F.C., Wan, Y.S., 2007. A Cold Early Palaeozoic Subduction Zone in the North Qilian Mountains, NW China: Petrological and U-Pb Geochronological Constraints. *Journal Metamorphic Geolo*gy, 25(3): 285-304. doi: 10.1111/j.1525-1314.2006. 00689. x
- Zhang, J. X., Xu, Z. Q., Chen, W., et al., 1997. A Tentative Discussion on the Ages of the Subduction-Accretionary Complex/Volcanic Arcs in the Middle Sector of North Qilian Mountain. Acta Petrologica et Mineralogica, 16 (2):112-119(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Wang, Y., Qian, Q., 2000. The North Qilian Oceanic Basin of the Early Paleozoic Age: An Aulacogen or a Large Oceanic Basin; a Discussion with Ge Xiaohong. Scientia Geologica Sinica, 35(1):121-128 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G.C., Kroner, A., Wilde, S.A., et al., 2007. Lithotectonic Elements and Geological Events in the Hengshan-Wutai-Fuping Belt: A Synthesis and Implications for the Evolution of the Trans-North China Orogen. *Geological Magazine*, 144 (5): 753 - 775. doi: 10. 1017/ S0016756807003561
- Zhao, G.C., Wilde, S.A., Sun, M., et al., 2008. SHRIMP U-Pb Zircon Ages of Granitoid Rocks in the Lüliang Complex: Implication for the Accrection and Evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 160(3-4): 213-226. doi: 10.1016/j. precamres. 2007. 07.004
- Zhou, H. Y., Liu, D. Y., Nemchim, A., et al., 2007a. 3. 0 Ga Thermo-Tectonic Events Suffered by the 3.8 Ga Meta-Quartz-Diorite in the Anshan Area: Constraints from Apatite SHRIMP U-Th-Pb Dating. *Geological Review*, 53(1):120-125(in Chinese with English abstract).
- Zhou, H. Y., Liu, D. Y., Wan, Y.S., et al., 2007b.3.3 Ga Magmatic Events in the Anshan Area: New SHRIMP Age and Geochemical Constraints, Acta Petrologic et Mineralogic, 26 (2):123-129 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z.Q., Cao, X.D., Zhao, J.T., et al., 1996. Early Paleozoic Stratigraphy and Sedimentary-Tectonic Evolution in Eastern Qilian Mountains, China. Northwest Geoscience, 17(1):1-58 (in Chinese with English abstract).
- Zuo, G.C., Wu, H.Q., 1997. A Bisubduction-Collision Orogenic Model of Early-Paleozoic in the Middle Part of North Qilian Area. Advance in Earth Sciences, 12(4): 315-323(in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 甘肃省地质矿产局,1989.甘肃省区域地质志.北京:地质出版社.
- 杜远生,张哲,周道华,等,2002.北祁连一河西走廊志留纪和 泥盆纪古地理及其同造山过程的沉积响应.古地理学 报,4(4):1-8.
- 杜远生,朱杰,韩欣,等,2004.从弧后盆地到前陆盆地一北祁 连造山带奥陶纪一泥盆纪的沉积盆地和构造演化.地 质通报,23(9-10):911-917.
- 冯益民,何世平,1996.祁连山大地构造与造山作用.北京:地 质出版社.
- 葛肖虹,刘俊来,1999.北祁连造山带的形成与背景.地学前 缘,6(4):223-230.
- 李怀坤,陆松年,相振群,等,2007.北祁连山西段北大河岩群 碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究.地质论评,53 (1):132-140.
- 刘少峰,张国伟,2005.盆山关系研究的基本思路、内容和方法.地学前缘,12(3):101-111.
- 孟繁聪,张建新,郭春满,等,2010.大岔大坂 MOR 型和 SSZ 型蛇绿岩对北祁连洋演化的制约.岩石矿物学杂志,29 (5):453-466.
- 史仁灯,杨经绥,吴才来,等,2004.北祁连玉石沟蛇绿岩形成 于晚震旦世 SHRIMP 年龄证据.地质学报,78(5): 649-657.
- 王洪亮,何世平,陈隽璐,等,2007.甘肃马衔山花岗岩杂岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测年及其构造意义.地质学报,

81(1):72-78.

- 吴才来,徐学义,高前明,等,2010.北祁连早古生代花岗质岩 浆作用及构造演化.岩石学报,26(4):1027-1044.
- 吴才来,杨经绥,杨宏仪,等,2004.北祁连东部两类 I 型花岗 岩定年及其地质意义.岩石学报,20(3):425-432.
- 徐亚军,杜远生,杨江海,等,2011.甘肃靖远上泥盆统沙流水 组沉积地球化学特征及其物源分析.沉积学报,29(1): 41-54.
- 杨经绥,刘福来,吴才来,等,2003.中央碰撞造山带中两期超 高压变质作用:来自含柯石英锆石的定年证据.地质学 报,77(4):463-477.
- 张建新,许志琴,陈文,等,1997.北祁连中段俯冲一增生杂 岩/火山弧的时代探讨.岩石矿物杂志,16(2): 112-119.
- 张旗,王焰,钱青,2000.北祁连早古生代洋盆是裂陷槽还是 大洋盆——与葛肖虹讨论.地质科学,35(1):121-128.
- 周红英,刘敦一,Nemchm,A.,等,2007a.鞍山地区 3.8 Ga 变 质石英闪长岩遭受 3.0 Ga 构造热事件叠加.地质论评, 53(1):120-125.
- 周红英,刘敦一,万渝生,等,2007b.鞍山地区 3.3 Ga 岩浆热 事件——SHRIMP 年代学和地球化学新证据.岩石矿 物学杂志,26(2):123-129.
- 周志强,曹宣铎,赵江天,等,1996.祁连山东部早古生代地层和沉积一构造演化.西北地质科学,17(1):1-58.
- 左国朝,吴汉泉,1997.北祁连中段早古生代双向俯冲一碰撞 造山模式剖析.地球科学进展,12(4):315-323.