论 文

柴达木盆地北缘侏罗纪沉积物源分析: 地层序列及LA-ICP-MS年代学信息

钱涛¹, 王宗秀^{1*}, 柳永清², 刘少峰³, 高万里¹, 李王鹏⁴, 胡俊杰¹, 李磊磊¹

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 中国地质科学院页岩油气评价重点实验室, 北京 100081;

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

4. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083

* 通讯作者, E-mail: wangzongxiu@sohu.com

收稿日期: 2017-04-12; 接受日期: 2017-10-18; 网络版发表日期: 2017-12-01

中国地质调查局项目(编号: 12120115003401)和国家自然科学基金项目(批准号: 41702238, 41602125)资助

摘要 柴达木盆地北缘(柴北缘)出露侏罗纪地层, 其中以大煤沟地区发育最为完整. 整个侏罗系发育具有辫状河河道、滨浅湖及辫状河三角洲沉积体系特征的地层序列, 厚度达到1100m. 利用地层序列、砂岩碎屑组分及LA-ICP-MS微区定年方法, 对柴北缘侏罗系沉积物源体系进行了研究. 砂岩Dickinson图解显示其主要来源于再旋回造山带、碰撞缝合带和褶皱-逆冲带物源区. 砂岩碎屑锆石U-Pb年代学同位素分析结果表明, 早侏罗世具有1764~2496Ma(峰值年龄1787、2077和2440Ma); 中晚侏罗世具有相同的年龄谱特征, 分别是197~291Ma(峰值年龄238Ma), 214~278Ma(峰值年龄238Ma); 358~484Ma(峰值年龄404Ma), 370~456Ma(峰值年龄418Ma); 645~920Ma(峰值年龄875Ma), 578~1160Ma(峰值年龄940Ma); 1390~1991Ma(峰值年龄1875Ma), 1550~1829Ma(峰值年龄1708Ma); 2048~2484Ma(峰值年龄2272Ma), 2161~2738Ma(峰值年龄2335Ma). 研究表明, 柴北缘侏罗纪沉积物源区由全吉地块(早侏罗世)扩大至柴北缘构造带、全吉地块、祁连山(中晚侏罗世). 沉积物源区的显著变化是早中侏罗世之交发生的强烈构造运动在柴达木盆地内部的沉积物质表现.

关键词 柴达木盆地, 侏罗纪, 沉积物源, LA-ICP-MS年代学

1 引言

沉积物是联系盆地与造山带的“纽带”, 是构造演化和盆地形成的直接证据和重要标志, 它包含了源区山脉在不同演化阶段的原始构造面貌、隆升剥露历史和盆地几何配置关系的诸多信息. 对盆地沉积地层

进行源区研究用到一系列分析方法, 如测量并恢复古水流方向(砾岩最大扁平面定向排列)(Qian等, 2015), 常规碎屑成分统计(刘云生等, 2006; Liu等, 2005)、重矿物组合(李林林等, 2015; 李俊武等, 2015a, 2015b)等, 然而由于盆地沉积物源的多样性、复杂性、不同源区贡献的差异性以及受碎屑物质在搬运过程中

中文引用格式: 钱涛, 王宗秀, 柳永清, 刘少峰, 高万里, 李王鹏, 胡俊杰, 李磊磊. 2018. 柴达木盆地北缘侏罗纪沉积物源分析: 地层序列及LA-ICP-MS年代学信息. 中国科学: 地球科学, 48: 224–242, doi: 10.1360/N072017-00119
英文引用格式: Qian T, Wang Z X, Liu Y Q, Liu S F, Gao W L, Li W P, Hu J J, Li L L. 2018. Provenance analysis of the Jurassic northern Qaidam Basin: Stratigraphic succession and LA-ICP-MS geochronology (in Chinese). Scientia Sinica Terrae, 48: 224–242, doi: 10.1360/N072017-00119

的分异作用影响, 仅单纯利用以上方法研究岩屑分散型式、分析源区性质和特征等(Tucker和 Slingerland, 1996; DeCelles等, 1998)是不够的. 国内外学者还将岩石学、同位素地球化学及同位素年代学方法应用于盆地沉积物研究中, U-Pb 锆石年龄谱研究成功地示踪了沉积物源区物质组成、构造面貌, 造山带核部高压变质岩初始剥露时间、剥露过程(Enkelmann等, 2007; Liu等, 2010). 由此可见, 盆地沉积物研究在沉积盆地分析方面已经成为一种系统的研究方法.

柴达木盆地含有丰富的油气和矿产资源, 吸引了大批学者从构造、沉积、地球化学和地球物理等方面开展了大量研究工作并取得了重要的成果. 长期以来, 特别是中生代以侏罗纪为代表的盆地研究积累了丰富的资料, 开展了侏罗纪盆地性质(曾联波等, 2002), 以及侏罗纪沉积相、地层发育迁移、展布规律、构造-沉积演化(汤良杰等, 2000; 杨永泰等, 2001; 李伟等, 2002; 曹国强等, 2005; 金振奎等, 2006; 蒋荣宝等, 2008; 邵龙义等, 2014)等方面的探讨. 现今更多的学者关注柴达木盆地新生代的沉积物源(付玲等, 2013; 李林林等, 2015; 李俊武等, 2015a, 2015b; Jian等, 2013). 然而, 除少数学者从地球化学角度进行了初步研究外(Cao等, 2012; Jian等, 2013), 到目前为止对侏罗纪盆地沉积物源研究仍然是一片空白, 从而制约了侏罗纪原型盆地复原、盆山耦合关系建立、油气资源勘探等问题的深入研究. 因此, 柴北缘侏罗纪沉积物源体

系是亟需解决的问题.

2 区域地质背景

柴达木盆地位于青藏高原东北缘(图1), 是一个典型的中新生代陆内盆地, 以沉积巨厚的新生代地层为显著特征. 柴达木盆地北缘与柴北缘构造带和祁连山构造带、西缘与阿尔金山构造带、南缘与东昆仑山构造带相连. 柴达木盆地的形成和演化, 始终与特提斯-喜马拉雅构造域的强烈活动有关(邵龙义等, 2014). 柴北缘构造带、祁连山构造带、阿尔金山构造带和东昆仑山构造带在是否为柴北缘提供侏罗纪沉积碎屑物质方面具有重要的意义.

2.1 柴北缘构造带

柴北缘构造带是加里东期重要的造山带, 记录了柴达木地块向北俯冲于祁连地块之下并发生陆陆碰撞的过程(Song等, 2012, 2014b). 柴北缘构造带岩性主要由高压-超高压变质岩、岛弧火山岩、古生代花岗岩和志留纪之后的沉积盖层组成(Mattinson等, 2006; Shi等, 2006; Song等, 2006, 2007; Xiong等, 2012). 高压-超高压变质岩带中榴辉岩、石榴石橄榄岩和石榴石辉石岩集合体呈透镜体状或块状出露于柴北缘构造带的赛什腾山、噶尔山、绿梁山和锡铁山等地区(Mattinson等, 2006; Song等, 2006, 2007; 图1). 晚二叠世到三叠纪, 柴北缘构造带经历了印支期构造变形作用, 与其伴

图1 柴达木盆地北缘区域地质简图(Song等, 2006, 2014a, 2014b)

图中五角星所示位置为大煤沟侏罗系实测剖面及碎屑锆石样品采样点

随产出的花岗岩、花岗岩类岩石及其他岩浆岩(吴才来等, 2008; 彭渊等, 2016)在赛什腾山及柴北缘东段地区有较好的出露(图1).

2.2 祁连山构造带

祁连山构造带由多条北西-南东走向的山脉组成, 其西端在当金山口与阿尔金山构造带相接. 祁连山造山带是一条典型的缝合带, 记录了新元古代到古生代期间发生的大陆裂解、洋盆形成、陆陆碰撞的过程(Song等, 2013), 从北向南由北祁连构造带、中祁连山和南祁连构造带组成. 其中, 南祁连构造带是柴达木盆地北缘的分界线.

2.3 阿尔金山构造带

阿尔金山构造带由一系列北东向断裂组成, 介于塔里木盆地和柴达木盆地之间. 前人大量的研究表明, 阿尔金断裂带经历了多期构造变形作用, 在形成和演化历史方面提出了多种假设. Sobel等(2001)指出, 阿尔金断裂系统在侏罗纪时期经历了构造抬升和冷却作用阶段, 这一作用与晚三叠世-早侏罗世青藏高原的地体拼合过程有关; Wang等(2005)指出阿尔金断裂带经历了三期构造事件: 大约在250~230Ma初步发生了左旋走滑剪切作用, 接下来的两期(165~160Ma和100~89Ma)构造作用只发生了左旋走滑变形并未发生挤压作用. 然而, 大量研究成果指示阿尔金构造带在中生代晚期、新生代早期甚至在中生代中期之后开始形成, 其形成原因归结为印度板块和欧亚板块的碰撞(Tapponnier等, 1986; Wang, 1997; Wang等, 2005).

2.4 东昆仑山构造带

东昆仑山构造带近东西走向位于青藏高原北部. 东昆仑山构造带基底主要由元古代和古生代变质岩组成, 上部被古生代和中生代地层所覆盖. 古生代至三叠纪, 东昆仑山构造带大面积发生岩浆作用, 后期被新生代陆相碎屑沉积物质覆盖(Yin等, 2007; Cheng等, 2016). 前人大量的研究成果指示了东昆仑山开始活动时间为30~20Ma(Yuan等, 2003; Zhang等, 2004; Cheng等, 2014)或始新世-渐新世到中新世, 甚至晚渐新世-中新世时期(Yuan等, 2003; Yin等, 2007; Mao等, 2014).

3 柴北缘侏罗系沉积序列特征

侏罗系主要在柴北缘和阿尔金山前地带较发育(图1). 下侏罗统发育湖西山组、小煤沟组地层, 中侏罗统发育大煤沟组地层, 上侏罗统发育采石岭组、红水沟组地层. 侏罗系底部呈角度不整合或平行不整合关系上覆于古元古界达肯大坂群、奥陶系或石炭系不同地层之上, 顶部与白垩系或新生界地层呈角度不整合或平行不整合接触.

侏罗系发育残缺不全、零星分布, 其中大煤沟地区为发育较完整的剖面(图1). 下文将以大煤沟剖面为例说明侏罗系地层序列特征.

3.1 下侏罗统地层序列特征

大煤沟剖面侏罗系(图2)出露较好, 较完整地记录了侏罗纪沉积充填作用, 厚度达1100m. 下侏罗统小煤沟组厚度约为100m, 角度不整合于古元古界达肯大坂群之上, 总体向上变细, 内部由约3个向上变细的小序列组成. 序列底部发育厚约2m的中砾岩, 红棕色, 块状构造(图3a). 砾岩以中砾石为主夹粗砾石, 分选较差, 棱角-次棱角状; 砾石岩性主要为石英岩状砂岩; 颗粒支撑, 少量砂质充填物. 该部分被解释为辫状河河床底部滞留沉积. 砾岩向上为含砾砂岩、中砂岩、粉砂岩及炭质泥岩组合; 砂体中发育水平层理、块状层理、平行层理(图3b)、板状交错层理(图3c)及槽状层理. 序列中常见菱铁矿结核. 序列顶部从薄层含砾砂岩到厚层中-粗砂岩, 从岩性组合、旋回特征、沉积构造及生物化石等特征表明序列发育的沉积环境从辫状河河道到滨浅湖, 具有典型的“下粗上细”特征.

3.2 中侏罗统地层序列特征

大煤沟组构成了中侏罗统, 厚度较之小煤沟组大幅增加到860m. 整个大煤沟组主要由数个向上变粗的反旋回序列组成, 局部发育向上变细的正旋回序列. 大煤沟组地层序列岩石色调主要从灰黑-黑色到上部的紫红色或紫红-灰绿色, 反映了从潮湿还原到干旱氧化环境的转变. 下部为厚层炭质泥岩-泥岩(图3d)、互层粉砂岩夹薄层细砂岩. 炭质泥岩-泥岩中频繁发育条带状或透镜体状砂岩, 并见菱铁矿结核(图3e)及大量植物碎片化石(图3f). 序列上部发育砾岩、含砾砂

图2 大煤沟地区侏罗系地层柱状图

剖面位置见图1. 图中黑色圆点标记碎屑薄片采样点, 五角星标记碎屑锆石采样点

岩、细砂岩及薄层泥岩, 砾岩及砂岩中发育平行层理、板状交错层理、槽状层理及块状层理并夹大量煤屑, 薄层泥岩具有与下部细粒碎屑物质相似的沉积特征. 大煤沟组上部序列中发育紫红色粉砂岩-粉砂质泥岩夹灰绿色条带状或透镜体状细砂岩, 有时两者

混成一片, 分不清层理面. 紫红色细粒碎屑物质中常见透镜状层理、脉状层理及波状复合层理, 灰绿色细砂岩中发育生物扰动构造(图3g). 整个大煤沟组地层序列发育于滨浅湖、辫状河三角洲沉积环境, 并且以频繁发育的煤层为显著特征.

图3 大煤沟剖面侏罗系地层序列野外照片

(a) 小煤沟组辫状河河道滞留砾岩; (b) 小煤沟组粗砂岩中平行层理; (c) 小煤沟组粗砂岩中板状交错层理; (d) 大煤沟组炭质泥岩-泥岩夹条带状细砂岩; (e) 大煤沟组炭质泥岩中菱铁矿结核; (f) 大煤沟组细砂岩中植物碎片化石; (g) 大煤沟组辫状河三角洲前缘砂岩中生物扰动构造; (h) 红水沟组紫红色粉砂质泥岩-泥岩与灰绿色粉砂岩互层夹薄层中砂岩

3.3 上侏罗统地层序列特征

大煤沟剖面上侏罗统由采石岭组和红水沟组组成, 厚度近150m. 总体以紫红色粉砂岩、粉砂质泥岩、

泥岩与灰绿色中-粗粒砂岩为主(图3h), 反映干旱氧化气候. 地层序列主体由多个向上变粗的反旋回组成. 每个小层序具有几乎相似的特征. 序列下部为紫红色粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩或三者互层, 发育脉状层

理、透镜状层理或波状层理,反映双向水流动力条件.互层中夹薄层细砂岩-粉砂岩,发育平行层理、水平层理,为三角洲前缘席状砂,形成于三角洲进入水体的环境.席状砂向上发育变粗的泥岩-粉砂岩-细砂岩韵律层,砂体中可见平行层理和小型交错层理,为河口坝沉积.粉砂岩和泥岩中常夹砂岩透镜体,横向延伸数米即变薄尖灭或渐变为砂岩条带,与泥岩的界线有时不易区分,为三角洲前缘分河道间沉积.河道间沉积体上部往往发育厚度不等的细砂岩、中砂岩,分布稳定,发育板状-小型槽状-楔状交错层理和平行层理,局部可见冲刷-充填构造,为水下分河道沉积.在小序列上部一般发育层厚不等的灰绿色中-粗砂岩,砂体内部发育平行层理、槽状层理、板状交错层理及楔状交错层理.综合分析,上侏罗统地层序列为一套辫状河三角洲前缘沉积物.

4 样品和测试方法

实测大煤沟剖面过程中,在重要层位采集了砂岩碎屑薄片和锆石测年样品.砂岩组分实验通过显微镜观察,采用Gazzi-Dickinson显微镜统计方法(Dickinson等, 1979),在单个薄片上完成500~600个颗粒的统计,再运用砂岩三角图解分析源区特征.碎屑锆石样品的粉碎、锆石挑选与制靶、透反光及阴极发光照片都在河北省廊坊市峰泽源岩矿检测技术有限公司完成.LA-ICP-MS锆石U-Pb测试工作在吉林大学东北亚矿产资源评价国土资源部重点实验室完成,每个样品随机选择120颗锆石进行测试.激光剥蚀束斑直径32 μm .首先采集30s的背景,随后进行30s的样品剥蚀.使用标准锆石91500作为外标进行同位素比值校正.元素含量以国际标样NIST610为外标, Si为内标元素进行计算.使用Glitter软件进行同位素比值及元素含量的计算.谐和年龄及图像使用Isoplot(3.0)给出(Ludwig, 2003).对于大于10Ga的年龄采用 $100 \times (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})/(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})$, 年龄小于10Ga的采用 $100 \times (^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb})/(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})$ 分别计算锆石测年结果的谐和度.将谐和度在90~110%之内的数据视为有效年龄,分析数据及锆石U-Pb谐和图给出误差为 1σ .

5 砂岩碎屑组分

总体而言,大煤沟组侏罗系砂岩碎屑组分通过

Qt-F-L、Qm-F-Lt和Qp-Lv-Ls三种方式投图指示了沉积物物源区落在再旋回造山、碰撞缝合带、褶皱-逆冲带及岩浆弧造山带区域(图4).因此,柴北缘侏罗系沉积物可能来自柴北缘构造带、祁连山.

6 锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄

碎屑锆石测年样品采自大煤沟剖面下侏罗统小煤沟组含砾粗砂岩(ZD-6)、中侏罗统大煤沟组粗砂岩(ZD-106)及上侏罗统采石岭组和红水沟组细砂岩(ZD-303)(采样位置见图2).

6.1 锆石形貌特征

三个样品中锆石形貌多样且显示了复杂的内部结构.样品ZD-6、ZD-106和ZD-303锆石粒径分别是87~283、57~137、109~304 μm .粒径不等,相差较大,其中样品ZD-106中锆石粒径总体较小.大多数锆石呈柱状,少数为等粒状或不规则状.部分锆石晶形完好,基本没有磨圆;阴极发光图像显示具有典型的岩浆韵律环带,且没有变质增生边(图5),分析可能属于构造岩浆活动的产物;部分锆石阴极发光显示呈灰白色或白色,可能是因为后期强烈的结晶作用几乎全部置换了锆石原始生长环带(图5);这些锆石往往具有大于1000Ma的年龄信息.锆石的形貌特征显示了其不同类型的成因,可能反映了较为复杂的物源信息.

6.2 锆石微量元素特征

样品ZD-6和ZD-106中锆石的稀土元素总量较高且变化范围大,ZD-303的稀土元素范围为32.96~3370.38ppm(表1).三个样品中绝大部分锆石的稀土元素球粒陨石标准化型式表现为重稀土元素(HREE)呈富集趋势($(\text{Lu}/\text{Gd})_{\text{N}}$)、轻稀土元素(LREE)亏损(表1,图6).重稀土元素(HREE)部分较陡($(\text{Yb}/\text{Sm})_{\text{N}}$)(表1,图6).具有较明显的Ce正异常(δCe)和Eu负异常(δEu)(表1,图6),显示岩浆成因锆石的特征(Vavra等, 1996; Miller等, 1998),少部分锆石不具有岩浆锆石稀土元素配分特征(图6).

总体而言,3个砂岩样品中大多数锆石的Th/U比值大于0.4.ZD-6样品中Th/U大于0.4的颗粒有57个,约占97%(图7).ZD-106样品中Th/U大于0.4的颗粒有69个,

图 4 大煤沟剖面砂岩 Dickinson 图解

Dickinson 图解据 Dickinson and Suczek, 1979. Qt, 石英; F, 长石; L, 碎屑(不包含多晶石英); Qm, 单晶石英; Lt, 碎屑(包含多晶石英); Qp, 多晶石英(包含燧石); Lv, 火山岩类碎屑; Ls, 沉积岩类碎屑(Liu等, 2005, 2010)

表 1 碎屑锆石微量元素一览表^{a)}

样品号	$\Sigma\text{REE}(\text{ppm})$	$(\text{Lu}/\text{Gd})_{\text{N}}$	$(\text{Yb}/\text{Sm})_{\text{N}}$	δCe	δEu
ZD-6	263.43~2161.83	10.59~64.92	8.72~124.55	1.39~78.96	0.03~1.39
ZD-106	308.67~4875.58	3.02~115.24	6.93~208.85	1.07~161.52	0.01~0.77
ZD-303	32.96~3370.38	2.76~89.08	10.56~232.82	1.10~341.16	0.01~0.73

a) 球粒陨石数据自 Sun 和 McDonough (1989)

约占78%; Th/U小于0.1的颗粒3个; 其余颗粒的Th/U介于0.1~0.4(图7). ZD-303样品中Th/U大于0.4的颗粒有68个, 约占62%; Th/U介于0.1~0.4的颗粒有22个, 约占20%(图7).

6.3 锆石年龄分布

砂岩锆石样品ZD-6、ZD-106和ZD-303分别测试了120个颗粒, 除掉少部分因Pb丢失造成年龄不和谐的颗粒后, 剩余U-Pb年龄和谐的锆石颗粒分别是

59(ZD-6), 98(ZD-106)和110(ZD-303). ZD-6、ZD-106和ZD-303最年轻的年龄分别是(1764±41)、(197±5)、(214±3)Ma. 早侏罗世ZD-6具有1764~2496Ma(峰值年龄1787、2077和2440Ma)(图8a); 中晚侏罗世ZD-106和ZD-303具有相同的年龄谱特征, 分别是197~291Ma(峰值年龄238Ma)、214~278Ma(峰值年龄238Ma), 358~484Ma(峰值年龄404Ma)、370~456Ma(峰值年龄418Ma), 645~920Ma(峰值年龄875Ma)、578~1160Ma(峰值年龄940Ma), 1390~1991Ma(峰值年

图5 大煤沟剖面砂岩样品ZD-6、ZD-106和ZD-303碎屑锆石代表性阴极发光图像及其年龄值

样品号后缀数字为测试点序号

龄1875Ma)、1550~1829Ma(峰值年龄1708Ma), 2048~2484Ma(峰值年龄2272Ma)、2161~2738Ma(峰值年龄2335Ma)(图8b, 8c)。

7 碎屑锆石物源分析

7.1 样品ZD-6

早侏罗世砂岩样品ZD-6中, 峰值年龄1787和2077Ma, 较之2440Ma不明显。样品中共有4颗锆石的U-Pb年龄小于2000Ma, 其余锆石年龄为2077~2496Ma。该段年龄范围内大部分碎屑锆石(93%)具有高的Th/U值0.34~2.22, 且阴极发光图像显示为较典型的岩浆韵律环带(图5), 部分锆石具有发亮的变质边。

全吉地块(欧龙布鲁克地块)是夹持在柴北缘构造带和祁连构造带之间的一个北西-南东向的狭长陆块残片(王勤燕等, 2008)。该地块由德令哈杂岩、达肯大阪群、万龙沟岩群及其上部未变质的沉积盖层全吉群组成。王勤燕等(2008)指出达肯大阪岩群的形成年龄在2.43~2.47Ga之间, 并在~2.43Ga发生岩浆作用及~1.92Ga区域变质作用; Chen等(2012)通过研究全吉地块中碎屑锆石年龄谱特征指出达肯大阪

岩群约在2.47Ga发生岩浆作用, 德令哈杂岩形成年龄为2.11~1.96Ga(表2); Wang等(2015)指出全吉地块结晶年龄为(2272±15)Ma, 并在(1928±11)Ma遭受了变质作用; 张海军等(2016)对全吉群红藻山组凝灰岩展开岩浆锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄测试指出其形成年龄为(1640±15)或(1640±20)Ma。柴北缘周缘地区只有全吉地块大面积出露具有古元古-中元古代年龄信息的地质体, 结合早侏罗世砂岩样品ZD-6年龄谱出现~1787、~2077和~2440Ma峰值, 指示早侏罗世沉积物主要来自于全吉地块基底德令哈杂岩、达肯大阪岩群及盖层全吉群。

7.2 样品ZD-106和ZD-303

砂岩样品ZD-106和ZD-303具有相似的年龄谱特征, 大致具有5段年龄范围信息。样品ZD-106: 197~291Ma(峰值年龄238Ma), 358~484Ma(峰值年龄404Ma), 645~920Ma(峰值年龄875Ma), 1390~1991Ma(峰值年龄1875Ma)和2048~2484Ma(峰值年龄2272Ma)(图8b, 8c); 样品ZD-303: 214~278Ma(峰值年龄238Ma), 370~456Ma(峰值年龄418Ma), 578~1160Ma(峰值年龄940Ma), 1550~1829Ma(峰值年龄1708Ma)和2161~

图6 大煤沟剖面砂岩碎屑锆石稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图
球粒陨石数据引自Sun和 McDonough(1989)

图7 大煤沟剖面砂岩样品Th/U比值

表 2 全吉地块锆石年龄一览表

岩性	层位	年龄(Ma)	方法	参考文献
花岗片麻岩 斜长角闪岩	德令哈杂岩	2366±10 2412±14		陆松年(2002)
混合岩	德令哈杂岩 达肯大阪群	2467+28/-26 2474+66/-52 2471+18/-16 1924+14/-15	LA-ICP-MS	王勤燕等(2008) Wang等(2008)
混合岩	全吉地块	2470±19 2202±26	LA-ICP-MS	Chen等(2009)
角闪斜长辉石岩	德令哈杂岩	1913±38	LA-ICP-MS	张璐等(2011)
碎屑岩	全吉地块	~2470 1960~2110	LA-ICP-MS	Chen等(2012)
花岗质片麻岩	全吉地块	2381±41 2392±25 2367±12 2372±22	LA-ICP-MS	Gong等(2012)
石英砂岩	达肯大阪群	1950~2450	LA-ICP-MS	张璐等(2012)
副片麻岩	全吉地块	2200~2450	LA-ICP-MS	Zhang等(2014)
闪长片麻岩	全吉地块	2272±15 1928±11	LA-ICP-MS	Wang等(2015)
凝灰岩	达肯大阪群	1640±15 1640±20	LA-ICP-MS	张海军等(2016)

2738Ma(峰值年龄2335和2730Ma). 中晚侏罗世与早侏罗世砂岩样品具有明显不同的年龄信息, 指示了沉积物物源发生了明显变化.

7.2.1 197~291和214~278Ma

砂岩样品ZD-106中197~291Ma年龄段范围内锆石共有21颗, 峰值年龄为238Ma; ZD-303中214~278Ma年龄段范围内锆石共有36颗, 峰值年龄为238Ma. 晚侏罗世样品在该年龄段内的锆石颗粒比中侏罗世明显增多. 样品ZD-106和ZD-303锆石具有高的Th/U值, 分别是0.38~0.78和0.37~1.85. 锆石晶形为长柱体且阴极发光照片具有典型的岩浆韵律环带(图5), 结合Th/U值判断该年龄段内碎屑锆石主要来自于物源区岩浆成因的锆石.

阿尔金山、柴北缘构造带及东昆仑山广泛分布印支期岩体(表3), 尤其是在阿尔金山及东昆仑山出露该时期的岩体面积范围更大. 吴才来等(2008)指出柴北缘西段三岔沟岩体由两期侵入岩组成, 其年龄

分别为~272和~260Ma; 董增产等(2015a, 2015b)在冷湖盐场北山地区指出二长花岗岩岩体的形成年龄为(252±3)和(254±4)Ma; 彭渊等(2016)指出柴北缘宗务隆造山带晒勒克郭来和察汗诺岩体年龄为(249.2±2.6)、(242.7±1.9)和(243.5±2.4)Ma. 东昆仑阿斯哈岩体年龄为(238.4±1.4)Ma(李金超等, 2014)、哈日扎岩体年龄(234.5±4.8)Ma(宋忠宝等, 2013)以及沟里地区年龄为(225±1.7)Ma(曹建辉等, 2015)(表3).

从锆石年龄谱特征看, 阿尔金山、柴北缘构造带及东昆仑山地区都有可能为中晚侏罗世盆地提供沉积物质. 该年龄段内锆石颗粒多呈棱角状, 似乎指示近距离的搬运过程. 大煤沟剖面中晚侏罗世地层序列中发育南东-北西和近乎由北向南的两类古水流方向, 似乎也指示这时期盆地沉积物源的多样性及其方向性. 阿尔金山剥蚀物质顺盆地走向搬运时通过冷湖凹陷沉积, 因此不易到达冷湖凹陷以东的大柴旦、德令哈等地区沉积. 大量学者通过构造年代学、沉积学等方面的研究指出阿尔金山在侏罗纪时期并未隆升

图8 大煤沟剖面砂岩碎屑锆石年龄谱及其U-Pb年龄谐和图

(Jolivet等, 2001; Sobel等, 2001); 柴北缘西段与塔里木盆地东南缘为统一的整体且侏罗系地层序列是可以划分对比的, 后期的挤压隆升及左行走滑作用分割了侏罗纪盆地并形成了现今的残余格局(Yuan等, 2003; Yin等, 2007; Cheng等, 2016); 也有学者指出阿尔金山地区侏罗纪的沉积格局与新生代不一样, 阿尔金山侏罗纪的沉积相展布格局是从柴达木盆地内部向北方

向展布延伸至塔里木盆地内部(段宏亮等, 2006, 2007). 埃姆尼克山南部零星发育中侏罗统上部到上侏罗统地层序列, 说明绿梁山、锡铁山、埃姆尼克山等地区可能在侏罗纪之后发生隆升作用. 再者, 位于绿梁山、锡铁山、埃姆尼克山一线南缘的柴南古隆起可能会阻挡通过横向水流搬运的东昆仑山剥蚀物质. 因此, 印支期的沉积物质可能主要来自柴北缘构造带.

表 3 柴北缘及其周缘印支期岩体年龄一览表

岩性	区域	年龄(Ma)	方法	参考文献
花岗岩	柴北缘西段三岔沟	271.2±1.5 260.4±2.3	SHRIMP	吴才来等(2008)
花岗闪长斑岩	东昆仑哈日扎	234.5±4.8	LA-ICP-MS	宋忠宝等(2013)
石英闪长岩	东昆仑阿斯哈岩体	238.4±1.4	LA-ICP-MS	李金超等(2014)
闪长岩 花岗闪长岩	西秦岭西段 刚察岩体	243.8~242 238~234 ~215	SHRIMP	张涛等(2014)
花岗闪长岩 二长花岗岩 花岗岩	东昆仑沟里地区	225±1.7	LA-ICP-MS	曹建辉等(2015)
二长花岗岩	冷湖盐场北山	252±3	LA-ICP-MS	董增产等(2015a)
黑云母二长花岗岩	冷湖盐场北山	254±4	LA-ICP-MS	董增产等(2015b)
花岗闪长岩	宗务隆构造带 晒勒克郭来 察汗诺岩体	249.2±2.6 242.7±1.9 243.5±2.4	SHRIMP	彭渊等(2016)
二长花岗岩	南祁连化石沟	252±2.1	LA-ICP-MS	胡万龙等(2016)

7.2.2 358~484和370~456Ma

砂岩样品ZD-106中358~484Ma年龄段范围内锆石共有33颗, 峰值年龄为404Ma; ZD-303中370~456Ma年龄段范围内锆石共有16颗, 峰值年龄为418Ma. 样品ZD-106和ZD-303锆石具有高的Th/U值, 分别是0.45~1.49和0.01~1.19. 阴极发光照片显示部分锆石具有变质成因的生长边(图5), 结合Th/U值判断该年龄段内碎屑锆石既有岩浆成因也有部分变质成因.

柴北缘构造带(高压-超高压变质带)位于祁连地块和柴达木地块结合部位, 经过都兰野马滩、沙柳河、德令哈、全吉山、锡铁山、达肯大阪山直至小赛什腾山, 是一条典型的早古生代造山带(Song等, 2006, 2007). 该变质带中段锡铁山地区峰期变质时间为488~486Ma (Zhang等, 2005)并约在430Ma形成花岗岩; 绿梁山地区峰期变质时间为435~414Ma(Song等, 2005). 吴才来等(2004, 2007, 2008, 2014)、卢欣祥等(2007)、孟繁聪和张建新(2008)、宋述光等(2011)、朱小辉等(2014)、孙娇鹏等(2015)、Martinson等(2006)、Song等(2006, 2014a, 2014b)、Wang等(2014)、Zhang等(2008, 2010, 2011)和Xu等(2016)在柴北缘赛什腾山、团鱼山、嗽唠山、绿梁山、锡铁山、大柴旦、宗务隆构造带、都兰及祁连山地区对早古生代榴辉岩、花岗岩、二长花岗岩、石英闪长岩、花岗闪长岩、片

麻岩及后期侵入的岩体进行LA-ICP-MS或者SHRIMP年代学测试, 得到了大量U-Pb年龄信息(表4). 同印支期的沉积物质来源分析一样的道理, 早古生代及海西期早期的沉积物质可能来自于柴北缘构造带、全吉地块及祁连地块.

7.2.3 645~920和578~1160Ma

砂岩样品ZD-106中645~920Ma年龄段范围内锆石共有8颗, 峰值年龄为875Ma; 其中6颗年龄为864~920Ma, 为形成于新元古代早期的锆石. ZD-303中578~1160Ma年龄段范围内锆石共有40颗, 峰值年龄为940Ma; 其中2颗锆石年龄为578和588Ma, 34颗锆石年龄为742~999Ma, 多数为新元古代时期的锆石. 样品ZD-106和ZD-303锆石的Th/U值分别是0.12~0.42和0.07~2.06. 阴极发光照片显示该年龄段内锆石可能主要为变质成因.

雍拥等(2008)运用LA-ICP-MS法在中祁连东段地区得出花岗岩锆石年龄为(853±2.3)、(888±2.5)和(846±2)Ma; 李猛等(2015)运用LA-ICP-MS法在祁连山西段吊大阪得出花岗质片麻岩年龄为(736±4.7)Ma等; 陆松年(2002)在大柴旦、绿梁山和锡铁山地区得出花岗岩和闪长岩年龄为(1020±41)、(803±7)和(744±28)Ma; Song等(2010, 2012)在鱼卡、锡铁山和

表4 柴达木盆地北缘早古生代岩体年龄一览表

岩性	区域	年龄(Ma)	方法	参考文献
石英二长闪长岩 花岗闪长岩	祁连山南缘	~473、~446、~397	SHRIMP	吴才来等(2004)
环斑花岗岩	塔塔楞河地区	440±14	SHRIMP	卢欣祥等(2007)
花岗岩	大柴旦地区	446.3±3.9、408.6±4.4 403.3±3.8、401.8±3 374.5±1.6、372.0±2.1	SHRIMP	吴才来等(2007)
花岗岩	绿梁山	430±8	SHRIMP	孟繁聪和张建新(2008)
花岗岩 石英闪长岩	赛什腾山、团鱼山 三岔沟、噉唠河	465.4±3.5、469.7±4.6 443.5±3.6、372.1±2.6 271.2±1.5、260.4±2.3	LA-ICP-MS	吴才来等(2008)
榴辉岩	锡铁山	433±3	SIMS	宋述光等(2011)
巴嘎德尔基岩	中祁连山西段	462.9±1.4	LA-ICP-MS	齐瑞荣(2012)
北大河岩群	中祁连西段	444±6.9	LA-ICP-MS	彭岩等(2014)
花岗岩	野马滩东 巴立给哈滩西 水文站北 察察公麻	406.6±3.5、407.3±4.3 397±6、404.5±4.0 397.0±3.7、380.5±5.0 380.5±3.6、372.5±2.8	SHRIMP	吴才来等(2014)
花岗岩	铁石观岩体	422.0±6.4	LA-ICP-MS	周宾等(2014)
变辉长岩	绿梁山大平沟	535±2、397±6、493±3	LA-ICP-MS	朱小辉等(2014)
野马山岩基	中祁连西段	469±1.3、450.0±1.0	LA-ICP-MS	黄增保等(2015)
变质岩	宗务隆构造带	437.8±2.7、440±3 433.2±3.6、497.1±3.5 464.1±4.2	SHRIMP	孙矫鹏等(2015)
榴辉岩 富含石榴石榴辉岩	都兰	448.9±2.2、422.0±4.3 432.5±4.7	SHRIMP	Mattinson 等(2006)
榴辉岩 副片麻岩	都兰、鱼卡	464±5.5、426±12 423±6、403±9	SHRIMP	Song 等(2006)
榴辉岩	都兰	445±7	SHRIMP	Zhang 等(2008)
榴辉岩	都兰	438±2	SHRIMP	Zhang 等(2010)
榴辉岩	锡铁山	439±8、461±4	SHRIMP	Zhang 等(2011)
石英闪长岩 英云闪长岩	都兰	423±4、427±3、431±3 410±4	SHRIMP LA-ICP-MS	Song 等(2014a)
榴辉岩 变泥质岩	都兰、鱼卡	425±8、450±11、462±13 426.5±2.4	SHRIMP LA-ICP-MS	Song 等(2014b)
二云花岗岩 石英闪长岩 花岗闪长岩 黑云母二长花岗岩	野马滩 沙柳河	397±5、404±4、392±5 423±6、391±4、386±2 386±2、380±3、380±5 367±3、360±4、374±2	ICP-MS	Wang 等(2014)
榴辉岩	噉唠山	433±18、439±4	LA-ICP-MS	Xu 等(2016)

都兰地区出露的榴辉岩和片麻岩中运用SHRIMP和(907±18)、(932±18)、(951±24)、(942±16)、(976±19) LA-ICPMS方法得出U-Pb年龄为(847±10)、(847±44)、和(941±21)Ma; Yu等(2013)在都兰地区得到榴辉岩、

片岩和片麻岩 U-Pb 年龄为 (664±9.3)、(874±9.9)、(985±22) 和 (923±12) Ma; Xu 等 (2015, 2016) 在祁连山和柴北缘噶喇山地区得出玄武岩、火山碎屑岩和榴辉岩 U-Pb 年龄分别是 (600±7)、(583±3)、(845±8) 和 (851±5) Ma (表 5). 大量参考文献数据显示新元古代年龄主要分布在祁连山和柴北缘构造带两个地区. 万渝生等 (2003) 指出由壳源花岗质岩石和变质岩系组成的中祁连地体前寒武变质基底主要形成于晋宁期 800~1000 Ma; 柴北缘变质基底壳源花岗岩也形成于晋宁期, 表明祁连造山带和柴北缘属同一基底, 具有相同或类似的早期演化历史. Song 等 (2010) 在柴北缘超高压变质带中通过榴辉岩样品 U-Pb 年龄指出经历了 ~850 Ma 岩浆结晶作用和 ~433 Ma 变质作用. 柴达木地块可能是具有被动大陆边缘性质的 Rodinia 超大陆的一个碎块, 在早古生代时期由于大洋岩石圈的俯冲过程被拖拽至地幔深部. Song 等 (2012) 指出柴北缘构造带经历了新元古代格林威尔造山作用和早古生代加里东造山作用. 响应于 Rodinia 超大陆在新元古代发生的裂解作用, 祁连地块和柴北缘遭受了岩浆作用. 侏罗纪时期祁连山和柴北缘发生的构造活动使古老地

体出露到地表, 后期遭受风化剥蚀作用提供了沉积物质来源. 从区域演化史和锆石 U-Pb 年龄分布范围分析, 祁连山构造带和柴北缘构造带为侏罗纪柴达木盆地提供了新元古代碎屑物质.

7.2.4 1390~1991 和 1550~1829 Ma

样品 ZD-106 中 1390~1991 Ma 年龄段范围内锆石共有 15 颗, 约占总数的 19%, 峰值年龄为 1875 Ma. 其中 3 颗年龄为 1390、1531 和 1592 Ma, 约占总数的 3%, 为形成于中元古代的锆石. ZD-303 中 1550~1829 Ma 年龄段范围内锆石共有 5 颗, 约占总数的 4%, 峰值年龄为 1708 Ma. ZD-106 Th/U 值范围是 0.02~0.89, 仅 1 颗锆石 Th/U 值小于 0.1; ZD-303 Th/U 值为 0.32~1.23. 结合阴极发光图像具有岩浆韵律环带特征 (图 5), 推测该年龄段内主要为岩浆成因锆石, 并且后期遭受了一定程度的变质作用. 样品中出现极少数中元古代年龄信息锆石, 两个峰值年龄 ~1875 和 ~1708 Ma 均形成于古元古代早期. 表 2 显示了全吉地块大面积出露古元古-中元古代年龄地质体, 结合样品锆石 U-Pb 年龄信息和潜在源区地质体年龄分布特征分析指出全吉地块为侏罗纪柴

表 5 柴达木盆地北缘新元古代岩体年龄一览表

岩性	区域	年龄 (Ma)	方法	参考文献
花岗质片麻岩 糜棱岩化花岗质片麻岩	祁连山基底	930±8、918±14 790±12	SHRIMP	Tung 等 (2007)
花岗岩	中祁连东段	853±2.3、888±2.5 846±2、756±2.2	LA-ICP-MS	雍拥等 (2008)
花岗质片麻岩	祁连山西段	736±4.7	LA-ICP-MS	李猛等 (2015)
奥长花岗岩、花岗闪长岩 钾质花岗岩	大柴旦鱼卡河 绿梁山、锡铁山	1020±41、803±7 744±28		陆松年等 (2002)
黑云变粒岩-片麻岩 白云母花岗岩	祁连马衙山 柴北缘	940±30、1030±40、 1020±40	TIMS	万渝生等 (2003)
榴辉岩	鱼卡	847±10、847±44	SHRIMP	Song 等 (2010)
片麻岩、花岗质片麻岩 石榴石-蓝晶石片麻岩	都兰 锡铁山 鱼卡 锡铁山	907±18、932±18 951±24、942±16 976±19、941±21 916±7、928±12	LA-ICPMS	Song 等 (2012)
榴辉岩、云母片岩 正片麻岩	都兰	664±9.3、874±9.9 985±22、923±12	LA-ICPMS SHRIMP	Yu 等 (2013)
玄武岩、火山碎屑岩	祁连山	600±7、583±3	SIMS	Xu 等 (2015)
榴辉岩	噶喇山	845±8、851±5 846±6、803±38 832±9	LA-ICP-MS	Xu 等 (2016)

达木盆地提供了古元古-中元古代年龄碎屑物质。

7.2.5 2242~248和2161~2738Ma

样品ZD-106中2048~2484 Ma年龄段范围内锆石共有21颗, 峰值年龄为2272 Ma, 约占总数的21%。ZD-303中2161~2738Ma年龄段范围内锆石共有13颗, 峰值年龄为2335Ma, 约占总数的11%。样品ZD-106和ZD-303锆石Th/U值分别是: 0.05~0.90和0.20~1.28。

样品ZD-106和ZD-303年龄谱中出现的峰值~2272和~2335Ma, 与样品ZD-6年龄峰值~2077和~2440Ma一致, 均形成于古元古代晚期。与古元古代早期和中元古代的锆石U-Pb年龄信息分析道理一样, 指示了全吉地块基底德令哈杂岩和达肯大阪岩群为柴达木盆地提供了中晚侏罗世沉积物质。

8 讨论

柴达木盆地是一个典型的陆内盆地, 以沉积了巨厚的中生代地层为显著特征。侏罗纪地层沉积之后, 遭受了多次构造叠加改造作用, 现今呈现被改造后的残余面貌。柴北缘大煤沟剖面发育具有辫状河、滨浅湖、辫状河三角洲沉积特征的厚层地层序列。边缘相的缺乏似乎指示了大煤沟地区或者柴北缘构造带并不是柴达木盆地侏罗纪原型盆地的北部边界。砂岩体中发育的板状交错层理-槽状交错层理经古水流方向校正指示了盆地中发育两类古水流(纵向水流和横向水流), 暗示侏罗纪沉积物质可能来自于柴达木盆地北部及南部的地质体。通过砂岩碎屑组分投图发现, 沉积物质主要来自再旋回造山带及少部分来自于碰撞缝合带、褶皱-逆冲带、岩浆弧造山带和大陆地块, 指示侏罗纪沉积物质可能来源于柴北缘构造带(高压-超高压变质带)、全吉地块、祁连地块、阿尔金山和东昆仑山。从锆石U-Pb年龄谱特征匹配角度分析, 阿尔金山和东昆仑山可能为侏罗系地层序列提供沉积物质。然而, 从下面几种情况判断, 阿尔金山构造带和东昆仑山构造带可能不会为柴达木盆地提供侏罗纪碎屑物质: (1) 构造年代学研究成果表明, 阿尔金山在侏罗纪时期并未隆升(Jolivet等, 2001; Sobel等, 2001)。 (2) 现今被阿尔金山分隔开的柴达木盆地和塔里木盆地在侏罗纪时期是连通的统一整体(Yuan等, 2003; Yin等, 2007; Cheng等, 2016)且阿尔金山侏罗纪地层序列的沉积相展布格局是从柴达木盆地内部向北东方向展布延伸

至塔里木盆地内部(段宏亮等, 2006, 2007)。 (3) 阿尔金山和柴北缘构造带交截部位冷湖凹陷会阻挡碎屑物质通过, 从而不能达到柴北缘东段地区沉积。 (4) 研究成果指示了东昆仑山开始活动时间为30~20Ma(Zhang等, 2004; Duvall等, 2013; Cheng等, 2014)或始新世-渐新世到中新世, 甚至晚渐新世-中新世时期(Yuan等, 2003; Yin等, 2007; Duvall等, 2013; Mao等, 2014)。 (5) 东昆仑山前乌图美仁地区零星出露侏罗纪地层, 初步判断为一套具有滨浅湖特征的沉积地层序列(未发表资料)。因此, 东昆仑山可能在侏罗纪时期处于接受沉积物质的状态, 不能为柴达木盆地提供碎屑物质。 (6) 位于绿梁山、锡铁山一带南缘的柴南古隆起可能会阻挡东昆仑山的剥蚀物质, 从而不能通过盆地横向水流搬运至盆地北缘沉积。

三个侏罗系砂岩样品LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄显示: 早侏罗世样品年龄谱具有古元古代单一峰值特征; 中晚侏罗世样品年龄谱具有多峰分段式特征, 包括三叠纪、志留纪-泥盆纪、新元古代、古元古代早期和古元古代晚期峰值年龄。于早侏罗世相比, 中晚侏罗世物源区扩大至祁连山、柴北缘地区, 同时全吉地块也在持续遭受剥蚀。早侏罗世全吉地块强烈抬升遭受剥蚀作用, 为盆地提供了大量的碎屑物质; 中晚侏罗世柴北缘构造带、祁连山发生隆升构造作用, 与全吉地块一起为盆地提供沉积物质。碎屑锆石年龄谱从古元古代单一峰值到后期多峰值的变化表明, 早中侏罗世之交柴北缘地区经历的强烈构造作用导致沉积物源区发生了明显变化。虽然没有在侏罗系的野外露头找到这一强烈运动所产生的角度不整合接触关系, 但早中侏罗世沉积物源区的明显变化正是这一运动的“沉积物质表现”。正如Ritts和Biffi(2001)推测, 中侏罗世地层序列之间呈现由于挤压构造运动而产生的角度不整合接触关系。侏罗纪全吉地块的抬升、柴北缘高压-超高压变质带的折返剥露、祁连山的活化及柴达木盆地的沉降沉积, 这一早中侏罗世之交发生的导致沉积物源区明显变化的强烈陆内变形构造作用可能是燕山运动在柴达木盆地地区的表现。

9 结论

(1) 柴北缘以大煤沟地区出露侏罗系地层最为完整。整个侏罗系发育具有辫状河、滨浅湖和辫状河三角洲沉积体系特征的地层序列。

(2) 研究区碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果显示, 早侏罗世小煤沟组具有古元古代单峰年龄谱特征: ~1787、~2077 和 ~2440 Ma; 中晚侏罗世具有相同的年龄谱特征, 分别可划分为 5 个年龄区间: 197~291、214~278 Ma, 358~484、370~456 Ma, 645~920、578~1160 Ma, 1390~1991、1550~1829 Ma, 2048~2484、2161~2738 Ma.

(3) 碎屑组分、古水流及碎屑锆石物源综合分析结果表明, 柴北缘侏罗纪沉积物质来自柴北缘构造带(高压-超高压变质带)、全吉地块、祁连山. 中晚侏罗世相比于早侏罗世沉积物源区发生了明显的变化, 由早期的全吉地块扩大至柴北缘构造带和祁连山地区.

(4) 早中侏罗世之交发生的强烈陆内变形作用导致了沉积物源区的显著变化, 而这一显著变化可能是侏罗纪时期构造运动(燕山运动)在柴达木盆地的沉积物质表现.

致谢 东华理工大学许欢, 昆明理工大学江小均、严清高, 兰州大学盘法侦参加了部分野外工作; 中国石油大学(北京)刘艳姣参加了碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测试实验; 西北大学董云鹏教授和匿名专家提出了重要的修改意见; 在此向他们表示衷心的感谢.

参考文献

- 曹国强, 陈世悦, 徐凤银, 彭德华, 袁文芳. 2005. 柴达木盆地西部中-新生代沉积构造演化. 中国地质, 32: 33-40
- 曹建辉, 袁万明, 郝娜娜, 冯云磊, 陈小宁, 段宏伟, 程学芹. 2015. 东昆仑沟里地区花岗岩年代学、岩石地球化学及其地球动力学意义. 地质科技情报, 34: 42-51
- 曾联波, 金之钧, 张明利, 汤良杰, 由福报, 雷兵足. 2002. 柴达木盆地侏罗纪盆地性质及其演化特征. 沉积学报, 20: 288-292
- 董增产, 辜平阳, 陈锐明, 查显锋, 张海迪. 2015a. 柴北缘西端盐场北山二长花岗岩年代学、地球化学及其 Hf 同位素特征. 地球科学——中国地质大学学报, 40: 130-144
- 董增产, 杨成, 辜平阳, 王红, 查显锋, 陈锐明, 张海迪. 2015b. 青海冷湖盐城北山黑云母二长花岗岩年代学、地球化学及其地质意义. 大地构造与成矿学, 39: 167-178
- 段宏亮, 钟建华, 马锋, 张跃中, 李勇, 温志峰. 2007. 柴达木盆地西部中生界原型盆地及其演化. 地球学报, 28: 356-368
- 段宏亮, 钟建华, 马锋, 张跃中, 李勇. 2006. 柴西阿尔金山前中、下侏罗统展布及油气勘探方向. 中国石油大学学报(自然科学版), 30: 13-18
- 付玲, 关平, 赵为永, 王牧, 张英, 卢静文. 2013. 柴达木盆地古近系

- 路乐河组重矿物特征与物源分析. 岩石学报, 29: 2867-2875
- 胡万龙, 贾志强, 王金荣, 侯克选, 王淑华. 2016. 南祁连化石沟花岗岩年代学、地球化学特征及其构造意义. 高校地质学报, 22: 242-253
- 黄增保, 郑建平, 李葆华, 魏志军, 漆玮, 陈旭. 2015. 中祁连西段野马山岩基年代学、地球化学特征及地质意义. 中国地质, 42: 406-420
- 蒋荣宝, 陈宣华, 党玉琪, 尹安, 汪立群, 蒋武明, 万景林, 李丽, 王小凤. 2008. 柴达木盆地东部新生代两期逆冲断层作用的 FT 定年. 地球物理学报, 51: 116-124
- 金振奎, 齐聪伟, 薛建勤, 王春生, 范小娜. 2006. 柴达木盆地北缘侏罗系沉积相. 古地理学报, 8: 199-210
- 李金超, 贾群子, 杜玮, 栗亚芝, 孔会磊, 南卡俄吾, 杨宝荣. 2014. 东昆仑东段阿斯哈矿床石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及岩石地球化学特征. 吉林大学学报(地球科学版), 44: 1188-1199
- 李俊武, 代廷勇, 李凤杰, 杨承锦, 杨豫川. 2015a. 柴达木盆地鄂博梁地区古近系沉积物源方向分析. 沉积学报, 33: 649-658
- 李俊武, 杨承锦, 李凤杰, 吴永良, 代廷勇. 2015b. 柴达木盆地鄂博梁地区新近系沉积物源分析. 古地理学报, 17: 186-197
- 李林林, 郭召杰, 管树巍, 周苏平, 王明振, 房亚男, 张晨晨. 2015. 柴达木盆地西南缘新生代碎屑重矿物组合特征及其古地理演化. 中国科学: 地球科学, 45: 780-798
- 李猛, 王超, 李荣社, 彭岩. 2015. 祁连山西段新元古代晚期花岗质片麻岩成因及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年. 地质通报, 34: 1438-1446
- 李伟, 刘宝珺, 白淑艳. 2002. 柴达木盆地侏罗系地层沉积大迁移及成因分析. 石油学报, 23: 16-19
- 刘云生, 郭战峰, 梁西文, 杨振武. 2006. 中上扬子地区晚三叠世-侏罗纪砂岩构造意义及盆地耦合关系. 石油实验地质, 28: 201-205
- 卢欣祥, 孙延贵, 张雪亭, 肖庆辉, 王晓霞, 尉向东, 谷德敏. 2007. 柴达木盆地北缘塔塔楞环斑花岗岩的 SHRIMP 年龄. 地质学报, 81: 626-634
- 陆松年. 2002. 青藏高原北部寒武纪地质初探. 北京: 地质出版社. 1-125
- 孟繁聪, 张建新. 2008. 柴北缘绿梁山早古生代花岗岩浆作用与高温变质作用的同步性. 岩石学报, 24: 1585-1594
- 彭岩, 李荣社, 计文化, 王超, 李猛, 张辉善, 吴中楠. 2014. 中祁连西段北大河岩群中早古生代火山碎屑岩的识别——来自锆石 U-Pb 年代学的证据. 西北地质, 47: 178-186
- 彭渊, 马寅生, 刘成林, 李宗星, 孙娇鹏, 邵鹏程. 2016. 柴北缘宗务隆构造带印支期花岗岩闪长岩地质特征及其构造意义. 地学前缘, 23: 206-221
- 齐瑞荣. 2012. 中祁连西段巴嘎德基岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 沉积与特提斯地质, 32: 86-93
- 邵龙义, 李猛, 李永红, 张云鹏, 鲁静, 张文龙, 田政, 文怀军. 2014. 柴达木盆地北缘侏罗系页岩气地质特征及控制因素. 地学前缘, 21: 311-322

- 宋述光, 张聪, 李献华, 张立飞. 2011. 柴北缘超高压带中锡铁山榴辉岩的变质时代. *岩石学报*, 27: 1191–1197
- 宋忠宝, 张雨莲, 陈向阳, 江磊, 李东生, 舒晓峰, 栗亚芝, 李金超, 孔会磊. 2013. 东昆仑哈拉扎含矿花岗岩闪长斑岩LA-ICP-MS 锆石U-Pb定年及地质意义. *矿床地质*, 32: 157–168
- 孙娇鹏, 陈世悦, 彭渊, 邵鹏程, 马师, 刘金. 2015. 柴达木盆地北缘宗务隆构造带早古生代锆石SHRIMP年龄的测定及其地质意义. *地质论评*, 61: 743–751
- 汤良杰, 金之钧, 张明利, 刘池阳, 吴汉宁, 由福报, 张兵山. 2000. 柴达木盆地构造古地理分析. *地学前缘*, 7: 421–429
- 万渝生, 许志琴, 杨经绥, 张建新. 2003. 祁连造山带及其邻区前寒武纪深变质基底的时代及组成. *地球学报*, 2: 319–324
- 王勤燕, 陈能松, 李晓彦, 郝爽, 陈海红. 2008. 全吉地块基底达肯大坂岩群和热事件的LA-ICPMS锆石U-Pb定年. *科学通报*, 53: 1693–1701
- 吴才来, 郜源红, 李兆丽, 雷敏, 秦海鹏, 李名则, 刘春花, Frost R B, Robinson P T, Wooden J L. 2014. 都兰花岗岩锆石SHRIMP 定年及柴北缘超高压带花岗岩年代学格架. *中国科学: 地球科学*, 44: 2142–2159
- 吴才来, 郜源红, 吴锁平, 陈其龙, Wooden J L, Mazadab F K, Mattinson C. 2008. 柴北缘西段花岗岩锆石SHRIMP U-Pb定年及其岩石地球化学特征. *中国科学: 地球科学*, 38: 930–949
- 吴才来, 郜源红, 吴锁平, 陈其龙, Wooden J L, Mazadab F K, Mattinson C. 2007. 柴达木盆地北缘柴旦地区古生代花岗岩锆石SHRIMP 定年. *岩石学报*, 23: 1861–1875
- 吴才来, 杨经绥, 许志琴, Wooden J L, Ireland T, 李海兵, 史仁灯, 孟繁聪, 陈松永, Persng H, Mebom A. 2004. 柴达木盆地北缘古生代超高压带中花岗岩岩浆作用. *地质学报*, 78: 658–674
- 杨永泰, 张宝民, 席萍, 余辉龙, 吴光大, 刘东. 2001. 柴达木盆地北缘侏罗系展布规律新认识. *地层学杂志*, 25: 154–159
- 雍拥, 肖文交, 袁超, 李继亮, 闫臻, 毛启贵. 2008. 中祁连东段花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及地质意义. *新疆地质*, 26: 62–70
- 张海军, 王训练, 王勋, 周洪瑞. 2016. 柴达木盆地北缘全吉群红藻山组凝灰岩锆石U-Pb年龄及其地质意义. *地学前缘*, 23: 202–218
- 张璐, 巴金, 陈能松, 王勤燕, 廖梵汐, 李晓彦. 2012. 全吉群碎屑锆石的U-Pb年龄谱和微量元素: 基底热事件信息和早期演化启示. *地球科学——中国地质大学学报*, 37: 28–42
- 张璐, 廖梵汐, 巴金, 徐利盼, 王勤燕, 陈能松. 2011. 全吉地块花岗岩片麻岩中镁铁质岩包体的矿物演化和锆石定年与古元古代区域变质作用. *地学前缘*, 18: 79–84
- 张涛, 张德会, 杨兵. 2014. 青海岗察岩体SHRIMP 锆石U-Pb年龄及其地质意义. *岩石学报*, 30: 2739–2748
- 周宾, 郑有业, 童海奎, 许荣科, 聂晓亮, 马超, 刘茜. 2014. 柴北缘早古生代埃达克质花岗岩锆石定年及其地质意义. *现代地质*, 28: 875–883
- 朱小辉, 陈丹玲, 刘良, 赵姣, 张乐. 2014. 柴北缘绿梁山地区早古生代弧后盆地型蛇绿岩的年代学、地球化学及大地构造意义. *岩石学报*, 30: 822–834
- Cao J, Wu M, Chen Y, Hu K, Bian L, Wang L, Zhang Y. 2012. Trace and rare earth element geochemistry of Jurassic mudstones in the northern Qaidam Basin, northwest China. *Chem der Erde-Geo Chem*, 72: 245–252
- Chen N, Gong S, Sun M, Li X, Xia X, Wang Q, Wu F, Xu P. 2009. Precambrian evolution of the Quanji Block, northeastern margin of Tibet: Insights from zircon U-Pb and Lu-Hf isotope compositions. *J Asian Earth Sci*, 35: 367–376
- Chen N, Zhang L, Sun M, Wang Q, Kusky T M. 2012. U-Pb and Hf isotopic compositions of detrital zircons from the paragneisses of the Quanji Massif, NW China: Implications for its early tectonic evolutionary history. *J Asian Earth Sci*, 54–55: 110–130
- Cheng F, Fu S, Jolivet M, Zhang C, Guo Z. 2016. Source to sink relation between the Eastern Kunlun Range and the Qaidam Basin, northern Tibetan Plateau, during the Cenozoic. *Geol Soc Am Bull*, 128: 258–283
- Cheng F, Jolivet M, Fu S, Zhang Q, Guan S, Yu X, Guo Z. 2014. Northward growth of the Qimen Tagh Range: A new model accounting for the Late Neogene strike-slip deformation of the SW Qaidam Basin. *Tectonophysics*, 632: 32–47
- DeCelles P G, Gehrels G E, Quade J, Ojha T P, Kapp P A, Upreti B N. 1998. Neogene foreland basin deposits, erosional unroofing, and the kinematic history of the Himalayan fold-thrust belt, western Nepal. *Geological Soc Am Bull*, 110: 2–21
- Dickinson W R, Suczek C A. 1979. Plate tectonics and sandstone compositions. *Assoc Petrol Geol Bull*, 63: 2164–2182
- Duvall A R, Clark M K, Kirby E, Farley K A, Craddock W H, Li C, Yuan D Y. 2013. Low-temperature thermochronometry along the Kunlun and Haiyuan Faults, NE Tibetan Plateau: Evidence for kinematic change during late-stage orogenesis. *Tectonics*, 32: 1190–1211
- Enkelmann E, Ratschbacher L, Jonckheere R, Nestler R, Fleischer M, Gloaguen R, Hacker B R, Zhang Y Q, Ma Y S. 2007. Cenozoic exhumation and deformation of northeastern Tibet and the Qinling: Is Tibetan lower crustal flow diverging around the Sichuan Basin? *Geol Soc Am Bull*, 118: 651–671
- Gong S, Chen N, Wang Q, Kusky T M, Wang L, Zhang L, Ba J, Liao F. 2012. Early Paleoproterozoic magmatism in the Quanji Massif, northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau and its tectonic significance: LA-ICPMS U-Pb zircon geochronology and geochemistry. *Gondwana Res*, 21: 152–166
- Jian X, Guan P, Zhang D W, Zhang W, Feng F, Liu R J, Lin S D. 2013. Provenance of Tertiary sandstone in the northern Qaidam basin, northeastern Tibetan Plateau: Integration of framework petrography, heavy mineral analysis and mineral chemistry. *Sediment Geol*, 290:

109–125

- Jolivet M, Brunel M, Seward D, Xu Z, Yang J, Roger F, Tapponnier P, Malavieille J, Arnaud N, Wu C. 2001. Mesozoic and Cenozoic tectonics of the northern edge of the Tibetan plateau: Fission-track constraints. *Tectonophysics*, 343: 111–134
- Liu S, Steel R, Zhang G. 2005. Mesozoic sedimentary basin development and tectonic implication, northern Yangtze Block, eastern China: record of continent-continent collision. *J Asian Earth Sci*, 25: 9–27
- Liu S, Zhang G, Ritts B D, Zhang H, Gao M, Qian C. 2010. Tracing exhumation of the Dabie Shan ultrahigh-pressure metamorphic complex using the sedimentary record in the Hefei Basin, China. *Geol Soc Am Bull*, 122: 198–218
- Ludwig K R. 2003. Mathematical-Statistical treatment of data and errors for $^{230}\text{Th}/\text{U}$ geochronology. *Rev Mineral Geochem*, 52: 631–656
- Mao L G, Xiao A C, Wu L, Li B L, Wang L Q, Lou Q Q, Dong Y P, Qin S H. 2014. Cenozoic tectonic and sedimentary evolution of southern Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau and its implication for the rejuvenation of Eastern Kunlun Mountains. *Sci China Earth Sci*, 57: 2726–2739
- Mattinson C G, Wooden J L, Liou J G, Bird D K, Wu C L. 2006. Geochronology and tectonic significance of Middle Proterozoic granitic orthogneiss, North Qaidam HP/UHP terrane, Western China. *Mineral Petrol*, 88: 227–241
- Miller C F, Hatcher R D, Mark Harrison T, Coath C D, Gorisch E B. 1998. Cryptic crustal events elucidated through zone imaging and ion microprobe studies of zircon, southern Appalachian Blue Ridge, North Carolina–Georgia. *Geology*, 26: 419–422
- Qian T, Liu S, Li W, Gao T, Chen X. 2015. Early–Middle Jurassic evolution of the northern Yangtze foreland basin: a record of uplift following Triassic continent-continent collision to form the Qinling–Dabieshan orogenic belt. *Int Geol Rev*, 57: 327–341
- Ritts B D, Biffi U. 2001. Mesozoic northeast Qaidam basin: Response to contractional reactivation of the Qilian Shan, and implications for the extent of Mesozoic intracontinental deformation in central Asia. In: Hendrix M S, Davis G A, eds. *Paleozoic and Mesozoic Tectonic Evolution of Central Asia: From Continental Assembly to Intracontinental Deformation*. Boulder, Colorado. *Geol Soc Am Bull*, 194: 293–316
- Shi R D, Yang J S, Wu C L, Iizuka T, Hirata T, Tsuyoshi I, Takafumi H. 2006. Island arc volcanic rocks in the north Qaidam UHP belt, northern Tibet plateau: Evidence for ocean-continent subduction preceding continent-continent subduction. *J Asian Earth Sci*, 28: 151–159
- Sobel E R, Arnaud N, Jolivet M, Ritts B D, Brunei M. 2001. Jurassic to Cenozoic exhumation history of the Altyn Tagh Range, northwest China, constrained by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and apatite fission track thermochronology. In: Hendrix M S, Davis G A, eds. *Paleozoic and Mesozoic Tectonic Evolution of Central Asia: From Continental Assembly to Intracontinental Deformation*. *Geol Soc Am Bull*, 194: 247
- Song S, Niu Y, Su L, Wei C, Zhang L. 2014a. Adakitic (tonalitic-trondhjemitic) magmas resulting from eclogite decompression and dehydration melting during exhumation in response to continental collision. *Geochim Cosmochim Acta*, 130: 42–62
- Song S, Niu Y, Su L, Xia X. 2013. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China. *Gondwana Res*, 23: 1378–1401
- Song S, Niu Y, Su L, Zhang C, Zhang L. 2014b. Continental orogenesis from ocean subduction, continent collision/subduction, to orogen collapse, and orogen recycling: The example of the North Qaidam UHPM belt, NW China. *Earth-Sci Rev*, 129: 59–84
- Song S, Su L, Li X, Niu Y, Zhang L. 2012. Grenville-age orogenesis in the Qaidam-Qilian block: The link between South China and Tarim. *Precambrian Res*, 220–221: 9–22
- Song S, Su L, Li X, Zhang G, Niu Y, Zhang L. 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
- Song S, Su L, Niu Y, Zhang L, Zhang G. 2007. Petrological and geochemical constraints on the origin of garnet peridotite in the North Qaidam ultrahigh-pressure metamorphic belt, northwestern China. *Lithos*, 96: 243–265
- Song S, Zhang L, Niu Y, Su L, Jian P, Liu D. 2005. Geochronology of diamond-bearing zircons from garnet peridotite in the North Qaidam UHPM belt, Northern Tibetan Plateau: A record of complex histories from oceanic lithosphere subduction to continental collision. *Earth Planet Sci Lett*, 234: 99–118
- Song S, Zhang L, Niu Y, Su L, Song B, Liu D. 2006. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study from the Northern Tibetan Plateau based on geochemical and geochronological data. *J Petrol*, 47: 435–455
- Sun S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geol Soc London Spec Public*, 42: 313–345
- Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia. *Geol Soc London Spec Publ*, 19: 115–157
- Tucker G E, Slingerland R. 1996. Predicting sediment flux from fold and thrust belts. *Basin Res*, 8: 329–349
- Tung K, Yang H J, Yang H Y, Liu D Y, Zhang J X, Wan Y S, Tseng C Y. 2007. SHRIMP U-Pb geochronology of the zircons from the Precambrian basement of the Qilian Block and its geological significances. *Chin Sci Bull*, 52: 2687–2701
- Vavra G, Gebauer D, Schmid R, Compston W. 1996. Multiple zircon

- growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): An ion microprobe (SHRIMP) study. *Contrib Mineral Petrol*, 122: 337–358
- Wang C, Li R, Li M, Meert J G, Peng Y. 2015. Palaeoproterozoic magmatic-metamorphic history of the Quanjia Massif, Northwest China: Implications for a single North China-Quanjia-Tarim craton within the Columbia supercontinent? *Int Geol Rev*, 57: 1772–1790
- Wang E. 1997. Displacement and timing along the northern strand of the Altyn Tagh fault zone, Northern Tibet. *Earth Planet Sci Lett*, 150: 55–64
- Wang M, Song S, Niu Y L, Su L. 2014. Post-collisional magmatism: Consequences of UHPM terrane exhumation and orogen collapse, N. Qaidam UHPM belt, NW China. *Lithos*, 210–211: 181–198
- Wang Q Y, Chen N S, Li X Y, Hao S, Chen H L. 2008. LA-ICPMS zircon U-Pb geochronological constraints on the tectonothermal evolution of the Early Paleoproterozoic Dakendaban Group in the Quanjia Block, NW China. *Chin Sci Bull*, 53: 2849–2858
- Wang Y, Zhang X, Wang E, Zhang J, Li Q, Sun G. 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronological evidence for formation and Mesozoic evolution of the northern-central segment of the Altyn Tagh fault system in the northern Tibetan Plateau. *Geol Soc Am Bull*, 117: 1336–1346
- Xiong Q, Zheng J, Griffin W L, O'Reilly S Y, Pearson N J. 2012. Decoupling of U-Pb and Lu-Hf isotopes and trace elements in zircon from the UHP North Qaidam orogen, NE Tibet (China): Tracing the deep subduction of continental blocks. *Lithos*, 155: 125–145
- Xu X, Song S, Su L, Li Z, Niu Y, Allen M B. 2015. The 600–580Ma continental rift basalts in North Qilian Shan, northwest China: Links between the Qilian-Qaidam block and SE Australia, and the reconstruction of East Gondwana. *Precambrian Res*, 257: 47–64
- Xu X, Song S, Allen M B, Ernst R E, Niu Y, Su L. 2016. An 850–820Ma LIP dismembered during breakup of the Rodinia supercontinent and destroyed by Early Paleozoic continental subduction in the northern Tibetan Plateau, NW China. *Precambrian Res*, 282: 52–73
- Yin A, Dang Y, Zhang M, McRivette M W, Burgess W P, Chen X. 2007. Cenozoic tectonic evolution of Qaidam Basin and its surrounding regions (Part 2): Wedge tectonics in southern Qaidam Basin and the Eastern Kunlun Range. In: Sears J W, Harms T A, Evenchick C A, eds. *Whence the Mountain? Inquiries into the Evolution of Orogenic Systems: A Volume in Honor of Raymond A. Price*. *Geol Soc Am Bull Spec Paper*, 433: 369–390
- Yu S, Zhang J, Li H, Hou K, Mattinson C G, Gong J. 2013. Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopic composition of eclogites and their host gneisses in the Dulan area, North Qaidam UHP terrane: New evidence for deep continental subduction. *Gondwana Res*, 23: 901–919
- Yuan W M, Zhang X T, Dong J Q, Tang Y H, Yu F S, Wang S C. 2003. A new vision of the intracontinental evolution of the eastern Kunlun Mountains, Northern Qinghai-Tibet plateau, China. *Radiat Measurements*, 36: 357–362
- Zhang C, Zhang L, Roermund H V, Song S, Zhang G. 2011. Petrology and SHRIMP U-Pb dating of Xitieshan eclogite, North Qaidam UHP metamorphic belt, NW China. *J Asian Earth Sci*, 42: 752–767
- Zhang G, Song S, Zhang L, Niu Y. 2008. The subducted oceanic crust within continental-type UHP metamorphic belt in the North Qaidam, NW China: Evidence from petrology, geochemistry and geochronology. *Lithos*, 104: 99–118
- Zhang J X, Mattinson C G, Yu S Y, Li J P, Meng F C. 2010. U-Pb zircon geochronology of coesite-bearing eclogites from the southern Dulan area of the North Qaidam UHP terrane, northwestern China: Spatially and temporally extensive UHP metamorphism during continental subduction. *J Metamorph Geol*, 28: 955–978
- Zhang L, Wang Q, Chen N, Sun M, Santosh M, Ba J. 2014. Geochemistry and detrital zircon U-Pb and Hf isotopes of the paragneiss suite from the Quanjia massif, SE Tarim Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonics in NW China. *J Asian Earth Sci*, 95: 33–50
- Zhang P Z, Shen Z, Wang M, Gan W, Bürgmann R, Molnar P, Wang Q, Niu Z, Sun J, Wu J, Hanrong S, Xinzhaoy. 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. *Geology*, 32: 809–812