

doi: 10.12097/gbc.2024.07.067

辽北清原大孤家韧性剪切带变形特征、变形时代及动力学背景

宋志伟¹, 赵佳奇¹, 梁琛岳^{1,2*}

SONG Zhiwei¹, ZHAO Jiaqi¹, LIANG Chenyue^{1,2*}

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林 长春 130061;

2. 吉林大学东北亚矿产资源评价自然资源部重点实验室, 吉林 长春 130061

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China;

2. Key Laboratory of Mineral Resources Evaluation in Northeast Asia, Ministry of Natural Resources, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China

摘要: 辽北清原地区位于华北克拉通北缘东段, 发育大规模强变形花岗质岩石, 是进一步研究中生代燕山运动和东北地区多构造体系叠加、转换过程的重要窗口。通过详细的宏微观构造解析、有限应变测量、石英 EBSD 组构分析和锆石 U-Pb 测年, 厘定了区域内大孤家韧性剪切带的变形特征、变形时代和动力学背景。结果显示, 大孤家韧性剪切带发育走向 NW—SE 的构造面理和倾伏向 SE 的矿物拉伸线理, 整体具有 NW 向左行走滑剪切特点。岩石变形温度较高, 介于 550~650°C 之间。剪切带内花岗质岩石主要形成于中生代多期次岩浆活动, 结合区域构造年代学资料, 限定剪切带变形时代为晚侏罗世末—早白垩世初, 为燕山运动 B 幕在辽北地区的局部响应。古太平洋板块俯冲导致的区域断裂带重新活化是大孤家韧性剪切带形成的主要原因。

关键词: 辽北地区; 构造解析; 锆石 U-Pb 年龄; 燕山运动; 古太平洋板块

中图分类号: P54; P597^{+.3} **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)12-2256-16

Song Z W, Zhao J Q, Liang C Y. Deformation characteristics, deformation age and dynamic background of Dagujia ductile shear zone in Qingyuan, northern Liaoning Province. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(12): 2256-2271

Abstract: The Qingyuan area in northern Liaoning Province is located in the eastern segment of the northern margin of the North China Craton, with large-scale strongly deformed granitic rocks. It is an important window to further study the Mesozoic Yanshanian movement and the superposition and transformation of multiple tectonic regimes of NE China. In this paper, the deformation characteristics, age and dynamical background of the regional Dagujia ductile shear zone are determined by detailed macro- and micro-structure analysis, finite strain measurements, quartz EBSD fabric and zircon U-Pb dating. The results show that the Dagujia ductile shear zone develops NW-SE-trending foliations and SE-plunging mineral stretching lineations, with a NW-trending sinistral strike-slip shear characteristics. The deformation temperatures of the rocks are relatively high, ranging between 550°C and 650°C. The granitic rocks in the shear zone primarily formed in Mesozoic multi-stage magmatism. Combined with the regional tectonic chronology data, the deformation age of the shear zone is the latest Late Jurassic to earliest Early Cretaceous, reflecting the local response of the Yanshanian Movement B-episode in the northern Liaoning Province. The Reactivation of regional fault zones caused by the subduction of the Paleo-Pacific Plate is the main reason for the formation of the Dagujia ductile shear zone.

Key words: Northern Liaoning; structural analysis; zircon U-Pb geochronology; Yanshanian Movement; Paleo-Pacific Plate

收稿日期: 2024-07-31; 修订日期: 2024-10-15

资助项目: 国家重点研发计划项目《东亚俯冲陆缘的构造变形响应与转换》(编号: 2022YFF0800401-2)和国家自然科学基金项目《东北地区山弯构造研究》(批准号: 42130305)

作者简介: 宋志伟(1998-), 男, 在读博士生, 从事构造地质学研究。E-mail: songzw19@mails.jlu.edu.cn

* 通信作者: 梁琛岳(1986-), 男, 博士, 教授, 从事构造地质学研究。E-mail: chenyueliang@jlu.edu.cn

华北克拉通是中国大陆的主要构造单元(图 1-a), 具有约 38 亿年的演化历史, 是世界上最古老的克拉通之一(Liu et al., 1992; Zhao et al., 2012)。自 18 亿年地壳增生克拉通化之后, 在绝大多数时间内一直保持相对稳定, 并发育巨厚的元古宙—古生代沉积岩(翟明国, 2012; 陈丽梅等, 2023; 王晓青等, 2024)。但与其他稳定克拉通不同的是, 华北克拉通中生代中晚期受燕山运动的强烈影响, 区域构造环境发生多次转变, 出现大规模的岩浆—构造—成盆—成矿活动及生物群更替事件(Dong et al., 2015, 2018; 赵越等, 2022; 宋志伟等, 2023)。燕山运动最初由中国著名地质学家翁文灏先生创名(Wong, 1926, 1927), 是指发生于华北燕山地区中—晚侏罗世时期的构造事件, 包括燕山运动 A 幕、B 幕和中间火山幕(Wong, 1929)。目前, 燕山运动的研究已有近百年历史, 被赋予更多的地质内涵, 代表中国全境乃至东亚大陆侏罗纪、白垩纪期间的重大构造变革事件(Dong et al., 2015, 2018; Wang et al., 2018; 赵越等, 2022)。不

同学者对燕山运动的起始时代、A、B 幕的活动时代和动力学背景展开了激烈讨论(Dong et al., 2015, 2018; Wang et al., 2018; Hao et al., 2019; Zhang et al., 2020; 赵越等, 2022), 但仍未达成共识, 尤其是后者。众多学者根据燕山、辽西地区的火山—沉积地层年龄将 A 幕的时代限定在 165~160 Ma(陈海燕等, 2014; 李海龙等, 2014; Hao et al., 2020), B 幕的时代限定在 135 Ma 之前(赵越等, 2004)、156~135 Ma(Fu et al., 2018)、137~136 Ma 等(苏楠等, 2022)。然而, 火山岩的形成和构造运动的停止是否同步, 仍存在很大的不确定性(陈印等, 2013)。因此, 进一步厘定燕山运动的性质是必要的。

辽北地区位于华北克拉通北缘东段(图 1-b), 其地质历史发展过程不仅记录了晚古生代以来古亚洲洋的闭合过程(Shi et al., 2022; 陈井胜等, 2022; 张诺等, 2022), 而且经历了晚期蒙古—鄂霍茨克洋和古太平洋的叠加和改造, 区域内发育大规模的中生代花岗质岩石, 是研究燕山运动和东北地区多构造体系

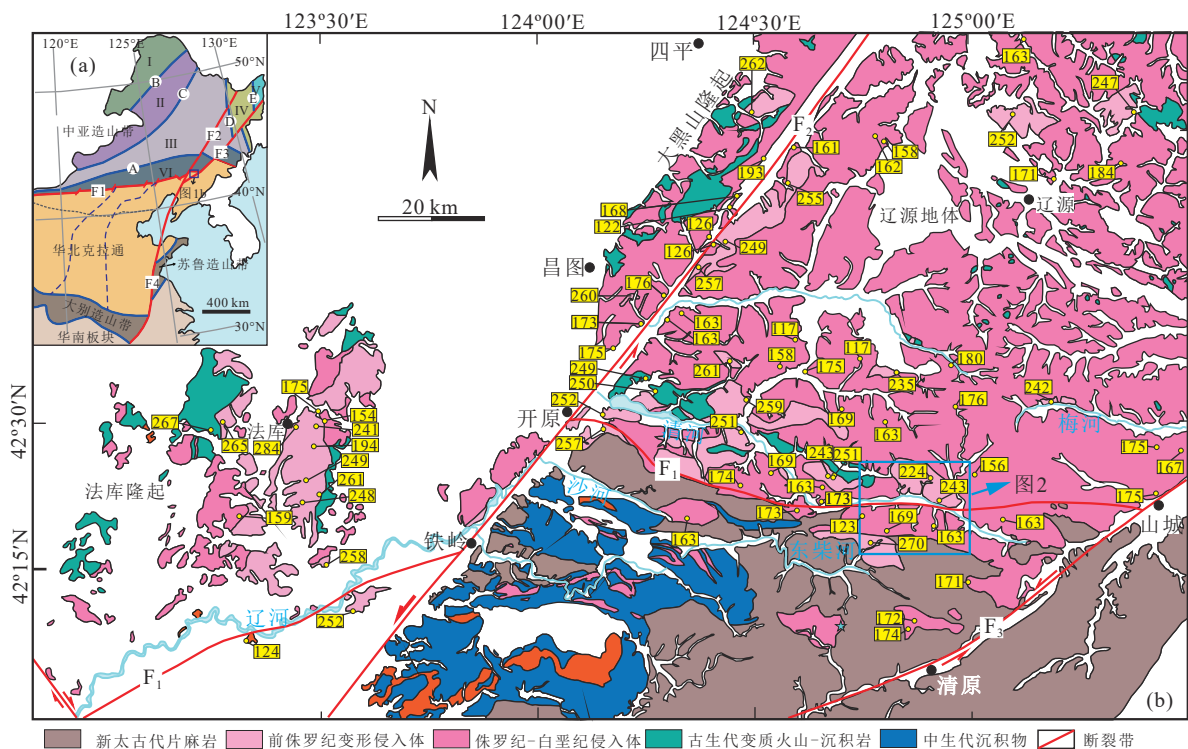


图 1 华北克拉通和中亚造山带大地构造分区图(a, 据 Wu et al., 2011 修改)及研究区地质简图
(b, 据 Gu et al., 2018; 段东等, 2024 修改; 黄色方框中数字代表区域内岩浆岩的形成年龄)

Fig. 1 Tectonic division of the North China Craton and the Central Asian Orogenic Belt (a), and geological map of the study area (b)
I—额尔古纳地块; II—兴安地体; III—松嫩-张广才岭地体; IV—佳木斯-兴凯地体; V—那丹哈达地体; VI—陆源活动带; A—索伦-西拉木伦-长春-延吉缝合带; B—新林-喜桂图缝合带; C—黑河-贺根山缝合带; D—嘉荫-牡丹江缝合带; E—跃进山缝合带; F1—赤峰-开原断裂; F2—依兰-伊通断裂; F3—敦化-密山断裂; F4—郯庐断裂

叠加、转换的典型地区之一。然而,现有的研究成果主要揭示了这些花岗岩类或火山岩类岩石的形成时代、成因、构造背景等相关问题(Shi et al., 2022; 陈井胜等, 2022; 张诺等, 2022; 段东等, 2024),忽略了区域变质变形作用对周缘构造体系的响应。已有的变质变形成果主要集中于华北克拉通北缘东段的吉林中部地区,例如发育于长春东南缘的 E—W 向太平镇韧性剪切带,其可能形成于晚三叠世古亚洲洋闭合后的多板块汇聚环境(Liang et al., 2019),以及至少经历 2 期变质变形事件的呼兰群,早期变形呈 NNE 向 SSW 逆冲的构造特点,晚期变形则受到 NE—SW 向伸展作用的影响,白云母⁴⁰Ar—³⁹Ar 年龄限定晚期变形发生于晚三叠世(约 220 Ma; 刘志宏等, 2016),呼兰群变质变形过程仍受控于古亚洲洋构造体系(孙德有等, 2004; Wu et al., 2007)。目前,华北克拉通北缘东段晚中生代构造变形事件鲜有报道。辽北清原地区中生代岩石普遍受强烈变质变形作用改造,最显著的特征是糜棱岩化,花岗质岩石中存在一致的糜棱面理和矿物拉伸线理,这意味着岩浆侵位之后,区域内的花岗质岩石受到了晚期变质变形作用的影响。因此,本文选择辽北清原大孤家韧性剪切带中发育的强变形花岗质岩石作为研究对象,通过详细的宏微观构造解析、有限应变分析、石英 C 轴 EBSD 组构分析和锆石 U—Pb 测年综合方法,厘定大孤家韧性剪切带的变形特征、变形时代和动力学背景,为进一步认识燕山运动和东北地区多板块汇聚体系提供可靠的地质依据。

1 地质背景

研究区位于辽北清原大孤家镇附近,大地构造位置处于华北克拉通北缘东段与兴蒙造山带南缘的交汇处。研究区前寒武纪基底岩石零星出露,主要为新太古代红透山岩组和 TTG 系列岩石(图 2)。晚古生代以来研究区岩浆-构造活动愈发强烈,岩浆岩种类繁多,但仍以花岗质岩石为主。二叠纪岩浆活动较弱,少量晚二叠世花岗质岩石发育在研究区南部。三叠纪岩浆活动则表现为大量岩浆岩侵入周边地层中,其中花岗质岩石主要出露于区域断裂带两侧和辽北法库地区。侏罗纪是区域岩浆活动的高峰期(Zhang et al., 2016; 段东等, 2024),该时期的花岗质岩石广泛分布在华北克拉通北缘,尤其是辽北辽源地体内(Gu et al., 2016, 2018)。近年的研究表明,

这些晚古生代—中生代岩浆岩的形成多与古亚洲洋构造体系、古太平洋构造体系(Wang et al., 2015; Yuan et al., 2016; 刘锦等, 2016; Liu et al., 2020),以及蒙古—鄂霍茨克洋构造体系的远程效应有关(Zhang et al., 2016; Song et al., 2021)。

研究区主要发育 2 条近平行的断裂系统,呈 WNW 向展布,分别为清河断裂和沙河断裂(图 2)。它们是赤峰-开原断裂的东延部分,主要由中部构造层次的大型韧性剪切带及浅部构造层次的断裂共同构成(刘锦等, 2016; 段东等, 2024)。其中,清河断裂被认为是华北克拉通北缘在辽东断裂以东的边界(李壮等, 2020),其北部是由火山岩、陆缘碎屑岩和大面积中生代侵入岩组成的华北克拉通北缘陆缘增生带,南部为华北克拉通区,出现大量新太古代 TTG 系列岩石(图 2)。沙河断裂位于清河断裂以南,性质与清河断裂相似。它们均具有多期活动特点,断裂性质表现出压扭性(邵会文等, 2007; 李忠宪, 2016),初始断裂可能形成于 N—S 向收缩环境,与晚二叠世—早—中三叠世古亚洲洋闭合导致的西伯利亚板块与华北克拉通碰撞拼合有关(刘锦等, 2016)。沿断裂带发育有大规模韧性剪切带,区域岩石普遍受变质变形作用影响。断裂带两侧的新太古代 TTG 系列岩石具有与晚期花岗质岩石相似的变形特征,发育一致的片麻理或糜棱面理。本文研究的大孤家韧性剪切带主要由花岗质糜棱岩和花岗质片麻岩组成,夹持于清河断裂和沙河断裂之间(图 2)。

2 宏微观构造特征

为探究辽北清原大孤家韧性剪切带的变形特征,本次研究选取典型变质变形区域,进行宏微观构造解析。

2.1 宏观构造特征

研究区中生代花岗质岩石受强烈变质变形作用改造,大多已转变为花岗质糜棱岩和花岗质片麻岩。这些岩石发育一致的糜棱面理和片麻理,应为同期变质变形作用的产物。岩石糜棱面理和片麻理主要由浅色长英质矿物和暗色黑云母构成,总体延伸稳定,以中高角度向 NE 倾斜(图版 I—a, b; 表 1)。在糜棱面理或片麻理表面可观察到清晰的矿物拉伸线理,其主要由定向拉长或定向排列的石英、长石和黑云母构成,方向与应变椭圆体最大主应变轴一致,以低角度向 SE 倾伏(图版 I—a)。矿物线理倾伏方

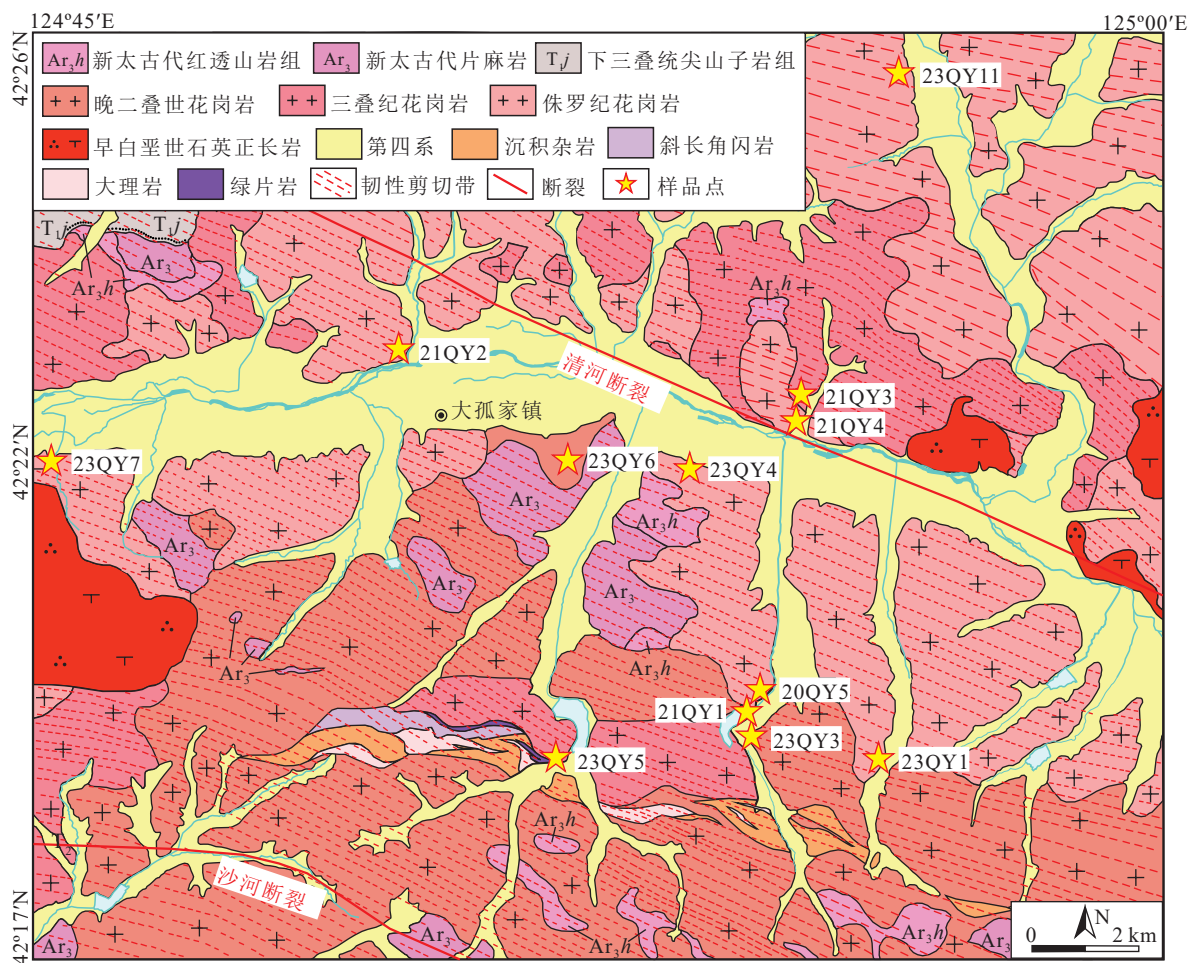


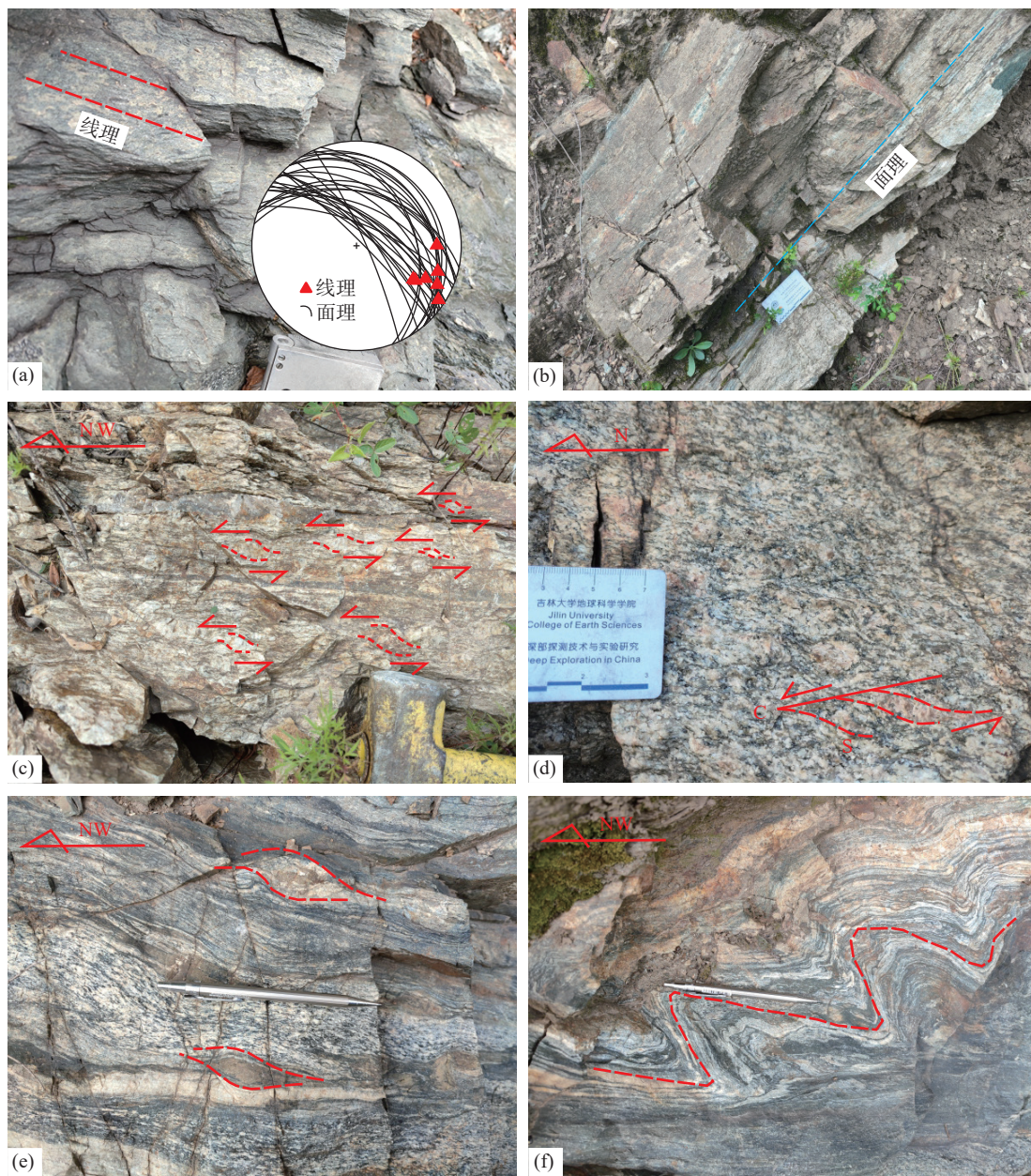
图 2 辽北清原大孤家镇地区地质简图(底图据 1:50000 大孤家幅、猴石幅地质图修改)

Fig. 2 Geological map of the Dagujia Town, Qingyuan, northern Liaoning Province

向与面理走向基本一致,指示这些花岗质岩石经历了一期明显的走滑变形事件。在花岗质糜棱岩中,沿矿物线理发育由石英集合体、长石单晶或长英质集合体构成的 σ 型旋转碎斑系(图版 I-c),指示 NW 向左行剪切变形。花岗质糜棱岩中 S-C 组构也较发育,定向拉长的石英/长石碎斑构成的 S 面理与云母等暗色矿物构成的 C 面理呈锐夹角指示 NW 向左行剪切变形(图版 I-d)。本次走滑剪切变形可能具有较高的变形温度,花岗质岩石处于半流动塑性状态,少量花岗质糜棱岩呈透镜状、条带状分布于黑云斜长片麻岩中(图版 I-e)。部分岩石条带强烈弯曲,形成不对称流动褶皱(图版 I-f),显示走滑剪切变形可能是在挤压环境下形成的。总体来说,辽北清原大孤家韧性剪切带形成于近 NW—SE 向压剪环境中,强变形花岗质岩石表现出上盘向 NW 向运动的左行走滑剪切变形特征。

2.2 微观构造特征

本次研究对大孤家韧性剪切带内的强变形岩石进行了详细的显微组构分析。岩石变质变形程度普遍达到糜棱岩—超糜棱岩级别。花岗质糜棱岩中存在大量中高温条件下形成的显微构造形迹。石英、长石、云母等矿物被强烈定向拉长,与宏观拉伸线理平行(图版 II-a, b)。石英颗粒具有典型的塑性变形特征,形成多晶条带,表现出明显的波状消光和动态重结晶现象。部分花岗质糜棱岩中石英母晶基本消失,已完全亚颗粒化,形成重结晶新晶集合体(图版 II-c, d),并且局部展示出颗粒边界迁移特征(图版 II-d)。少量石英颗粒已经转变为棋盘状亚颗粒或表现出无应变多边形粒状颗粒形态,颗粒间具有三边平衡结构(图版 II-e),指示高温静态恢复作用和颗粒边界迁移动态重结晶机制在变形过程中占主导。此外,部分强变形岩石中可见无应变石英条带,石英颗



a.花岗质糜棱岩(21QY4-a)的矿物拉伸线理及剪切带内变形岩石的构造要素投影;b.花岗质糜棱岩(23QY5-1)的糜棱面理;c.花岗质糜棱岩(21QY1-4)中发育 σ 型旋转碎斑与眼球状构造,指示左行剪切变形;d.花岗质糜棱岩(23QY11-1)中发育旋转碎斑,S-C组构,指示左行剪切变形;e.花岗质糜棱岩(20QY5-2)呈透镜状、条带状分布于黑云斜长片麻岩中;f.糜棱岩(20QY5-1)被强烈褶皱弯曲

粒具有矩形晶界,指示变形发生于较高的温度和较强的剪切作用条件下(图版 II -b)。相比于石英,变形过程中长石变形相对较弱,主要呈眼球状或透镜状,以残斑形式出现(图版 II -c~h)。部分长石颗粒被定向拉长,发育显微裂隙,并被细小的石英或长石颗粒充填(图版 II -f)。少量长石颗粒表现出波状消光,具有膨凸式重结晶特点(图版 II -e),指示变形温度相对较高。总体看,大孤家韧性剪切带中强变形岩石的显微组构特征指示变形发生于地壳中深部的角闪

岩相条件下,变形温度为 550~650℃。此外,这些显微组构中包含的运动学构造形迹,如透镜状石英集合体、云母鱼、书斜式构造等(图版 II -c, e~h),均指示 NW 向左行剪切变形,这与野外宏观构造特点一致。

3 石英 C 轴 EBSD 组构分析

电子背散射衍射(EBSD)技术是根据矿物的背散射衍射图像确定矿物的晶轴方位,确定矿物颗粒的排列取向(许志琴等, 2009)。通常矿物颗粒在不

表 1 辽北清原大孤家韧性剪切带典型露头产状

Table 1 Typical outcrop occurrences in the Dagujia ductile shear zone in Qingyuan, northern Liaoning Province

样品点	采样位置	主要岩石类型	面理(S)和线理(L)
21QY1	42°19'40.6"N、 124°54'37.9"E	花岗质糜棱岩	22°∠66°(S); 45°∠84°(S); 45°∠74°(S); 35°∠70°(S); 115°∠18°(L)
21QY2	42°23'08.4"N、 124°50'00.4"E	花岗质糜棱岩	40°∠24°(S); 50°∠19°(S); 60°∠14°(S); 115°∠9°(L); 50°∠12°(S); 123°∠4°(L); 70°∠31°(S); 65°∠32°(S)
21QY4	42°22'27.9"N、 124°54'59.4"E	钾长花岗质糜棱岩	37°∠59°(S); 120°∠26°(L); 43°∠62°(S); 120°∠24°(L)
23QY1	42°19'07.0"N、 124°56'18.8"E	黑云母钾长质花岗糜 棱岩	54°∠72°(S); 66°∠80°(S)
23QY3	42°19'23.3"N、 124°54'35.0"E	黑云母花岗质糜棱岩	45°∠71°(S); 38°∠75°(S); 32°∠63°(S)
23QY5	42°22'17.7"N、 124°52'55.2"E	花岗质糜棱岩	22°∠48°(S)
23QY7	42°22'08.6"N、 124°45'01.3"E	花岗质糜棱岩	34°∠56°(S); 32°∠58°(S)
23QY11	42°26'22.4"N、 124°55'23.8"E	花岗质糜棱岩	42°∠34°(S); 50°∠21°(S); 58°∠19°(S); 20°∠33°(S); 12°∠35°(S); 42°∠44°(S); 20°∠29°(S); 107°∠12°(L); 18°∠36°(S); 89°∠15°(L)

同温度和应力的作用下会激活不同的滑移系,从而表现出不同的变形样式。本次石英 C 轴 EBSD 组构分析在吉林大学自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室完成,具体实验流程及相关参数见梁琛岳等(2020)。

选取 6 件强变形花岗质岩石样品进行分析。所选扫描区域石英颗粒丰富,动态重结晶现象明显。为减少石英二次重结晶对 EBSD 组构分析结果的影响,本次研究利用扫描电镜对同一样品中不同区域的石英颗粒进行多次测量,以期提高结果的准确性。石英结晶学优选方位如图 3 所示。

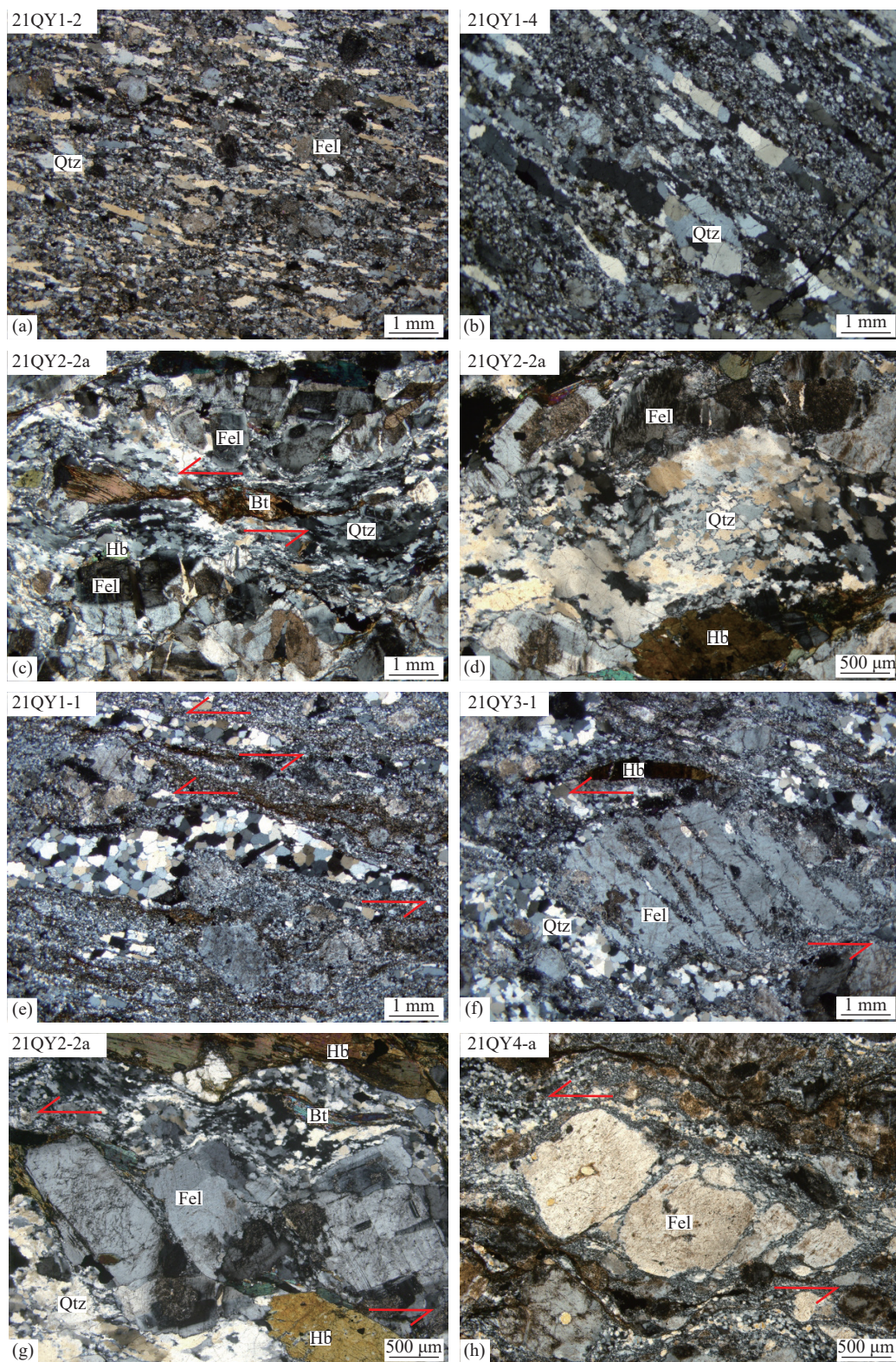
所有石英 C 轴 EBSD 组构图均表现出相似的特征(图 3; *m.u.d.*代表极点密度),一个石英极密靠近 X 轴,显示石英主要发生柱面<c>滑移,以高温柱面组构为主,指示变形温度为 550~650 °C(Okudaira et al., 1995; Bhattacharya et al., 2004),与显微构造观察结果基本一致。此外,在样品 23QY1-1、21QY1-2、21QY2-a、21QY2-2、21QY4-4 和 21QY11-1 的组构图(图 3)中,可清晰地观察到晶格优选区域的分布连线与中心轴呈向左倾斜的趋势,指示变形以左行剪切为主,与宏观观察结果一致。

4 有限应变分析

对变形岩石进行有限应变测量,可以解释岩石

变形的机理。岩石有限应变测量的方法众多,其中 Fry 法和长短轴法被广泛应用(Fry, 1979; 郑亚东等, 1985)。首先根据岩石矿物拉伸线理和面理 2 个主应变面(XZ 面和 YZ 面)制作定向薄片,然后在 2 个薄片上分别进行有限应变测量。在测量过程中,选择剪切带内强变形的花岗质岩石作为样本,重点关注内部变形均一的石英颗粒。根据长短轴法原理,在放大适当倍数的显微镜下,选择石英颗粒分布较均匀的区域采集显微照片,然后使用 CorelDRAW2017 软件统计石英颗粒的长轴和短轴,每个定向样品测量石英颗粒至少 50 个,使测量结果能够确定“全岩应变”的情况。对于 Fry 法,本文采用基于 CorelDRAW2017 平台的宏程序进行有限应变分析。详细介绍和操作见韩阳光等(2015)。分析结果见表 2(X/Y 值由换算获得)。

有限应变类型的常用判别方法是 Flinn 图解(图 4; Liang et al., 2019; Song et al., 2022),将岩石有限应变类型分为以下几种:①轴对称压缩, $K=0\sim0.15$; ②一般压缩, $K=0.15\sim0.67$; ③平面应变, $K=0.67\sim1.5$; ④一般拉伸, $K=1.5\sim6.67$; ⑤轴对称拉伸, $K=6.67\sim\infty$ 。对于辽北清原大孤家镇剪切带,长短轴法得出 K 值介于 0.22~0.60 之间, Fry 法得出 K 值介于 0.20~0.63 之间, 15 件变形岩石的测量结果均属于一般压缩应变范围,岩石类型主要为 SL 型构造岩,指



a~h. 辽北清原大孤家韧性剪切带强变形岩石的微观构造特征。a.石英和长石被定向拉长; b.石英多晶条带,具有矩形颗粒边界; c.石英亚颗粒旋转重结晶,云母鱼指示左行剪切; d.石英局部颗粒边界迁移重结晶,棋盘状石英亚颗粒,长石波状消光; e.高温恢复作用形成的内部无应变石英新晶粒,长石膨凸式重结晶; f.长石碎斑指示左行剪切变形; g.长石书斜式构造指示左行剪切变形; h.长石残斑指示左行剪切变形。Qtz—石英; Fel—长石; Bt—黑云母; Hb—角闪石

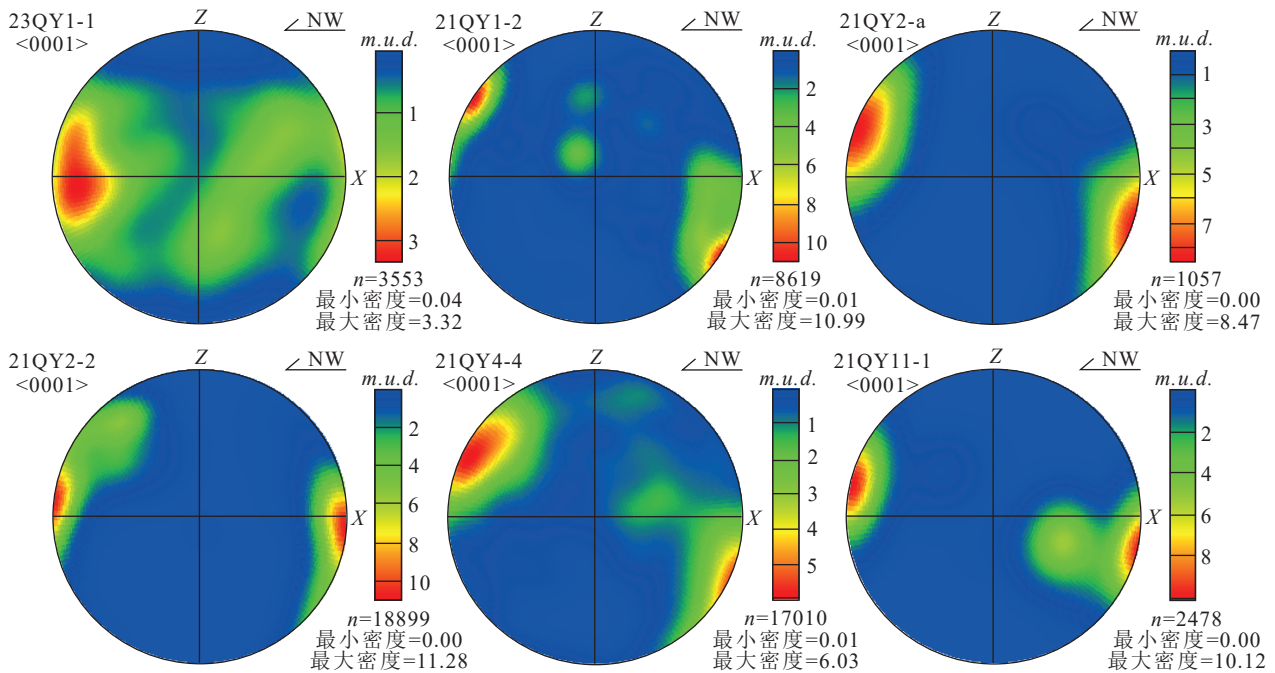


图 3 辽北清原大孤家镇典型变形岩石石英 C 轴组构图(m.u.d.代表极点密度)

Fig. 3 Quartz C-axis pole figures of typical deformed rocks in Dagujia Town, Qingyuan, northern Liaoning Province

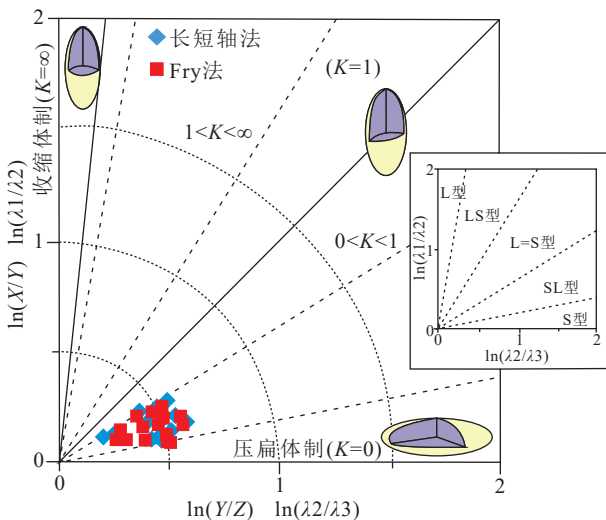


图 4 Flinn 有限应变判别图解(底图据郑亚东等, 1985)

Fig. 4 Flinn finite strain discrimination diagram

示变形发生于挤压环境。

5 锆石 U-Pb 测年

为确定辽北清原大孤家韧性剪切带强变形花岗岩的原岩形成时代, 并综合限定其变形时代, 本次研究共选取 12 件具有代表性的变形岩石和 1 件未变形的粗粒碱性花岗岩(23QY6-1)进行 LA-ICP-

MS 锆石 U-Pb 年龄分析。采样位置见图 2。锆石单矿物分选和样品靶制备由北京锆年领航科技有限公司完成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试在吉林大学东北亚矿产资源评价自然资源部重点实验室完成。激光剥蚀使用德国相干公司(Coherent) COMPEXPro 型 193nm ArF 准分子激光器, 质谱仪为美国安捷伦公司 7900A 型四极杆等离子质谱。具体操作流程见梁琛岳等(2020)。使用 Glitter 软件对原始数据进行处理, 年龄计算及图像绘制采用 Isoplot(Version 3.0)程序, 数据结果和锆石 U-Pb 谐和图给出误差为 2σ , 表示 95% 的置信度。详细数据结果请见电子附表 1。

本次测试的所有样品中, 大多数锆石颗粒呈自形一半自形短柱状, 少量锆石颗粒呈长柱状或板状, 颗粒粒度主要介于 80~200 μm 之间, 长宽比介于 1:1~3:1 之间(图 5)。锆石中裂隙和包裹体较为稀少, 发育典型的岩浆振荡环带, 结合其较高的 Th/U 值(附表 1), 暗示测试锆石均为岩浆成因。

对样品 21QY1-1(钾长花岗质糜棱岩)、21QY3-1(花岗质糜棱岩)和 21QY4-a(钾长花岗质糜棱岩)中的锆石颗粒分别进行了 20 个点的测试。这些测试点均位于谐和线上, 3 件样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值分别为 $238 \pm 3 \text{ Ma}$ (MSWD=0.093, $n=20$;

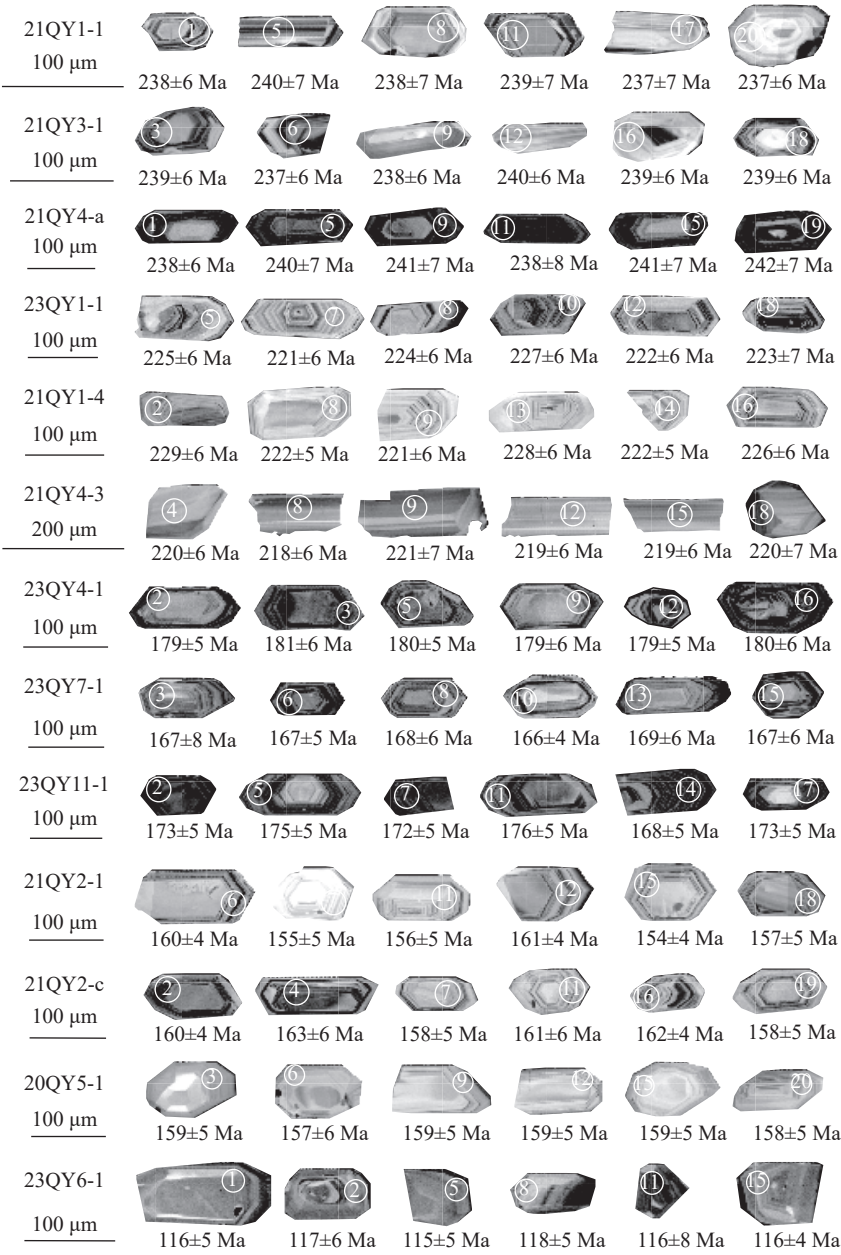


图 5 辽北清原大孤家镇强变形岩石中部分锆石的阴极发光图像

Fig. 5 Cathodoluminescence images of some zircons from strongly deformed rocks in Dagujia Town, Qingyuan, northern Liaoning Province

图 6-a)、 239 ± 3 Ma (MSWD=0.037, $n=20$; 图 6-b)和 240 ± 3 Ma (MSWD=0.25, $n=20$; 图 6-c), 指示糜棱岩的原岩形成于中三叠世。

对于 23QY1-1(黑云钾长花岗片麻岩)、21QY1-4(花岗质糜棱岩)和 21QY4-3(花岗质糜棱岩)3 件样品, 每个样品中 20 个测试点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值分别为 224 ± 3 Ma (MSWD=0.17, $n=20$; 图 6-d)、 226 ± 3 Ma (MSWD=0.31, $n=20$; 图 6-e)和 220 ± 3

Ma (MSWD=0.052, $n=20$; 图 6-f), 指示其原岩均形成于晚三叠世。

对于 23QY4-1、23QY7-1 和 23QY11-1 三件花岗质片麻岩样品, 剔除样品 23QY7-1 中 2 个不和谐点, 获得 3 件样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值分别为 180 ± 3 Ma (MSWD=0.113, $n=20$; 图 6-g)、 167 ± 3 Ma (MSWD=0.16, $n=18$; 图 6-h)和 172 ± 2 Ma (MSWD=0.41, $n=20$; 图 6-i), 指示这些花岗质片麻

表 2 辽北清原大孤家镇变形岩石的有限应变测量结果

Table 2 Finite strain results of typical deformed rock in Dagujia Town, Qingyuan, northern Liaoning Province

样品号	长短轴法				Fry法			
	X/Z	Y/Z	X/Y	Flinn参数(K)	X/Z	Y/Z	X/Y	Flinn参数(K)
20QY5-1	1.44	1.29	1.12	0.43	1.49	1.34	1.11	0.36
21QY1-1	1.81	1.61	1.12	0.25	1.83	1.63	1.12	0.24
21QY1-2	1.67	1.52	1.10	0.22	1.62	1.46	1.11	0.27
21QY1-4	1.74	1.57	1.11	0.23	1.81	1.64	1.10	0.20
21QY2-1	1.98	1.56	1.27	0.54	1.91	1.51	1.26	0.57
21QY2-2	1.88	1.58	1.19	0.38	1.85	1.55	1.19	0.40
21QY2-a	1.79	1.44	1.24	0.60	1.75	1.41	1.24	0.63
21QY2-2a	1.96	1.61	1.22	0.41	1.95	1.59	1.23	0.44
21QY3-1	2.12	1.78	1.19	0.30	2.08	1.74	1.20	0.32
21QY3-2	2.07	1.69	1.22	0.39	2.11	1.72	1.23	0.38
21QY4-4	1.35	1.22	1.11	0.51	1.43	1.28	1.12	0.45
21QY4-a	1.47	1.29	1.14	0.51	1.52	1.31	1.16	0.55
23QY1-1	1.77	1.49	1.19	0.43	1.72	1.45	1.19	0.46
23QY3-1	2.13	1.63	1.31	0.55	2.04	1.58	1.29	0.56
23QY11-1	1.89	1.66	1.14	0.26	1.82	1.61	1.13	0.26

岩的原岩形成于早—中侏罗世。

对样品 21QY2-1(花岗质片麻岩)、21QY2-c(钾长花岗质片麻岩)和 20QY5-1(花岗质片麻岩)中的锆石颗粒分别进行了 20 个点的分析测试,获得²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 155±1 Ma(MSWD=0.067, $n=20$; 图 6-j)、160±2 Ma(MSWD=0.24, $n=20$; 图 6-k)和 159±2 Ma(MSWD=0.035, $n=20$; 图 6-l),指示片麻岩的原岩形成于晚侏罗世。

对 1 件未变形的粗粒碱性花岗岩进行了锆石 U-Pb 定年,该样品采自清河断裂以南,呈块状构造(图 7-a)。显微镜下可见全晶质他形粒状结构,主要由石英、碱性长石和少量黑云母组成。各矿物组分均未发生明显变形(图 7-b)。对花岗岩中 20 个锆石颗粒进行分析,剔除 3 个不谐和数据,17 个分析点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 117±2 Ma(MSWD=0.03, $n=17$; 图 7-c),代表花岗岩的结晶年龄,即早白垩世。

6 讨 论

6.1 变形特征与变形温度

辽北清原地区中生代岩浆岩和断裂系统十分发育。区域内沙河断裂和清河断裂均呈 WNW 向展布,沿二者可见大规模的断裂和韧性剪切带。研究区夹持于清河断裂与沙河断裂之间,区域内出露大

量中生代花岗质岩石,这些岩石大多经历强烈的变质变形作用改造,已转变为花岗糜棱岩和花岗质片麻岩,野外露头中保存有丰富的变形样式。

通过对剪切带内变形岩石的宏观构造解析,识别出岩石中保存的糜棱面理、矿物线理、构造透镜体、σ 型旋转碎斑、S-C 组构等运动学形迹,指示岩石主要遭受 NW 向左行走滑剪切。显微镜下,花岗糜棱岩中的石英颗粒普遍发生动态重结晶,颗粒边界不规则,呈锯齿状、变形虫状或叶状,变形机制以颗粒边界迁移重结晶为主,亚颗粒旋转重结晶次之。长石颗粒以脆性变形为主。少量长石颗粒具有膨凸式重结晶中高温变形特点。总体看,石英和长石的显微变形行为指示了一期发生于地壳中深部角闪岩相条件下的高温变形。在石英 C 轴 EBSD 组构分析中也可得到相似结论,EBSD 组构图中普遍具有一个石英点极密,暗示一次变形事件。石英点极密靠近 X 轴,显示柱面<c>滑移被激活,变形温度为 550~650℃(Okudaira et al., 1995; Bhattacharya et al., 2004)。综上所述,辽北清原地区曾经历一期 NW 向左行走滑剪切变形事件,变形发生于角闪岩相条件,温度介于 550~650℃ 之间。

6.2 变形时代

中生代以来,华北克拉通受燕山运动的强烈影响,在辽北清原地区形成大面积的中生代岩浆岩,以

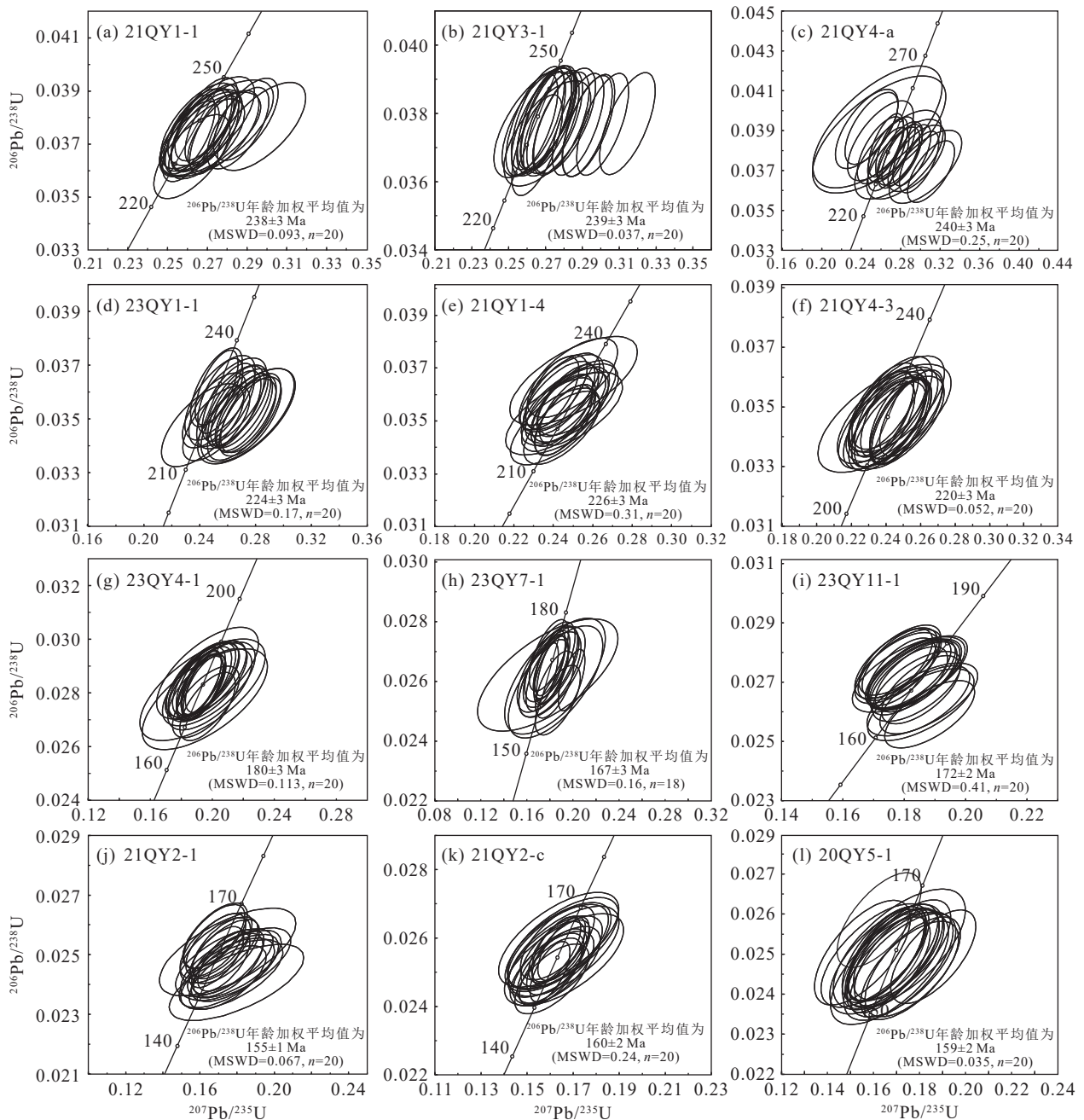


图6 辽北清原大孤家镇强变形岩石锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 Zircon U-Pb concordia diagrams of strongly deformed rocks from Dagujia Town, Qingyuan, northern Liaoning Province

花岗质岩石为主,表现出多期次岩浆-构造活动叠加的特点(Wu et al., 2011; Yuan et al., 2016; 刘锦等, 2016; 段东等, 2024)。本次研究通过详细的野外地质考察和锆石 U-Pb 年代学分析,发现辽北清原大孤家镇一带发育多期次的强变形岩石,主要由花岗质糜棱岩和花岗质片麻岩组成。对 12 件变形岩石样品进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年分析,样品中锆石颗粒呈自形—半自形长柱状或短柱状,颗粒粒

度均匀,磨圆度较差,发育典型的岩浆振荡环带(图 5), Th/U 值较高,结合显微镜下斜长石颗粒呈板柱状,具有聚片双晶、卡纳复合双晶、环带结构等岩浆岩中矿物的特点(图版 II),推断剪切带内变质变形岩石的原岩均为花岗岩。因此,经原位 U-Pb 同位素定年得到的年龄即为变形岩石的原岩结晶年龄,指示剪切带中片麻岩和糜棱岩的原岩形成于中三叠世(240~238 Ma)、晚三叠世(226~220 Ma)、早—中侏罗世

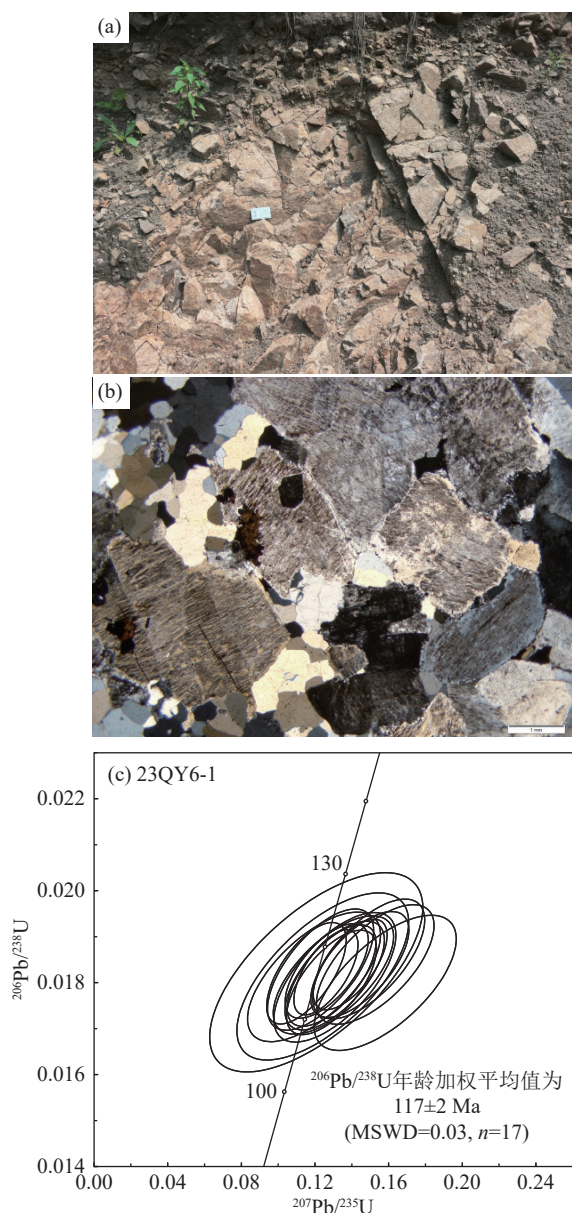


图 7 早白垩世粗粒碱性花岗岩宏观结构特征及锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 7 Field and microstructural characteristics of Early Cretaceous coarse-grained alkaline granite and zircon U-Pb concordia diagram

(180~167 Ma)、晚侏罗世(160~155 Ma)等多个时期。

对于辽北清原大孤家韧性剪切带的变形时代,本次研究确定剪切带中最年轻的变形岩石形成于晚侏罗世(约 155 Ma),1 件未变形的粗粒碱性花岗岩形成于早白垩世晚期(约 117 Ma),指示走滑剪切变形发生于晚侏罗世—早白垩世晚期,与燕山运动 B 幕的活动时代叠合。该时期在华北克拉通东部,乃

至整个中国东部地区形成了大量褶皱-逆冲构造,例如北京西山地区的太平山褶皱(147~136 Ma; 舒坦等, 2019)、云蒙山地区的四合堂逆冲型韧性剪切带(143~138 Ma; 陈印等, 2013),冀北地区的承德逆冲构造(139~136 Ma; 张长厚等, 2012),以及中国东北地区科洛杂岩中记录的晚侏罗世左行走滑挤压变形(152~149 Ma; Song et al., 2022)。此外,华北克拉通东部著名的郯庐断裂也在此时期(约 143 Ma)发生了强烈的左行平移,走滑构造在渤海湾以南的中南段被广泛发现(Zhu et al., 2018)。本次研究厘定辽北清原大孤家韧性剪切带形成于压剪环境(图 4),与华北克拉通东部大量褶皱-逆冲构造相似,结合上述区域构造年龄资料,进一步限定剪切带走滑剪切变形发生于晚侏罗世末—早白垩世初,为燕山运动 B 幕在辽北地区的局部响应。

6.3 动力学背景

华北克拉通北缘晚古生代以来的岩浆-构造活动与古亚洲洋构造体系和古太平洋构造体系存在较强的相关性(Wang et al., 2015; Yuan et al., 2016; 刘锦等, 2016; Liu et al., 2020),期间也可能受到蒙古-鄂霍茨克洋远程效应的影响(Zhang et al., 2016; Song et al., 2021)。刘永江等(2019)基于对中国东北蛇绿岩的深入研究,结合古地磁学、岩相古地理分布、古生物化石、岩浆活动等证据,认为古亚洲洋是沿索伦-西拉木伦-长春-延吉缝合带完成了东北陆块群与华北克拉通的拼接。在华北克拉通北缘东段,三叠纪的岩浆活动主要表现出 E—W 向带状分布特点,与索伦-西拉木伦-长春-延吉缝合带近乎平行(Tang et al., 2018)。早—中三叠世岩浆岩大多具有与俯冲作用相关的地球化学特征(Yuan et al., 2016; 张诺等, 2022),部分花岗岩属于埃达克质岩石或同碰撞型花岗岩,起源于加厚基性下地壳的部分熔融,形成于陆-陆碰撞过程(孙德有等, 2004; Wang et al., 2015; Liu et al., 2020)。吉林中部发育的呼兰群具有顺时针的 P - T - t 轨迹,变质作用发生于早三叠世(约 250 Ma),为挤压碰撞造山过程的产物(Wu et al., 2007),该期挤压作用可能一致持续至中三叠世(周建波等, 2013)。早—中三叠世强烈的挤压造山作用亦导致辽北清原地区清河断裂和沙河断裂的形成(刘锦等, 2016)。然而,夹持于两断裂带之间的大孤家韧性剪切带变质变形时代为晚侏罗世末—早白垩世初,明显不是该期挤压造山作用的产物,其形成应与古亚

洲洋闭合无关。

晚中生代, 华北克拉通北缘主要受燕山运动的强烈影响, 岩浆-构造-成盆-成矿活动强烈(张长厚等, 2012; Dong et al., 2015; Song et al., 2021)。目前, 对于区域内燕山运动的动力学背景仍存在诸多争议。燕山运动 B 幕作为华北克拉通东北部晚中生代最强的一次挤压变形事件(Zhu et al., 2018), 一些学者根据华北克拉通北缘燕山褶皱逆冲带内广泛存在的 E—W 向构造, 认为区域受蒙古-鄂霍茨克洋俯冲的远程效应影响(舒坦等, 2019)。而更多的研究支持古太平洋构造体系对燕山运动起着至关重要的作用(Wang et al., 2018; Zhang et al., 2020; Zeng et al., 2021)。最近的古地磁数据显示晚侏罗世(约 155 Ma)西伯利亚距华北克拉通 1600 km(Ren et al., 2016)。在华北克拉通北缘未见大规模 E—W 向岩浆活动。晚侏罗世—早白垩世初的岩浆岩主要呈 NE—NNE 向展布(Tang et al., 2018), 与古太平洋俯冲带展布方向基本一致。这些岩浆岩大多属于中钾—高钾钙碱性系列, 具有典型弧岩浆岩特点, 明显形成于活动大陆边缘环境, 被认为与古太平洋俯冲有关(Hu et al., 2019; 宋志伟等, 2023)。部分花岗质岩石表现出 I 型花岗岩或埃达克质岩石特征, 起源于(加厚)基性下地壳的部分熔融(彭游博等, 2022), 亦指示区域处于板片俯冲、挤压背景。本次研究厘定的辽北清原大孤家韧性剪切带明显形成于 NW—SE 向压剪环境, 不同于蒙古-鄂霍茨克洋俯冲、闭合产生的 N—S 向挤压作用, 可能与古太平洋板片 NW 向俯冲有关。然而, 大孤家韧性剪切带主要呈 WNW 向展布, 与古太平洋板片俯冲方向近乎平行, 这与典型的逆冲推覆挤压变形不同, 剪切带展布方向并未与俯冲方向垂直或大角度相交。因此, 笔者认为, 大孤家韧性剪切带不是古太平洋板片俯冲的直接产物, 而是古太平洋板片俯冲导致区域清河、沙河断裂晚中生代重新活化, 引发断裂带两侧岩石发生强烈的构造变形, 形成大孤家韧性剪切带。

7 结 论

基于对辽北清原大孤家韧性剪切带变形岩石的宏微观构造特征、石英 C 轴 EBSD 组构、有限应变和锆石 U—Pb 年龄的研究, 得出如下主要结论。

(1) 大孤家镇地区主要遭受一期压剪变形事件, 变形岩石表现出 NW 向左行走滑剪切特点。变形温

度较高, 介于 550~650℃ 之间, 发育于地壳中深部角闪岩相条件。

(2) 大孤家韧性剪切带内变形岩石原岩形成于中生代多期次岩浆活动, 于晚侏罗世末—早白垩世初发生走滑剪切变形, 可能为燕山运动 B 幕在辽北地区的局部响应。

(3) 大孤家韧性剪切带形成于 NW—SE 向压剪环境, 是沙河、清河断裂晚中生代重新活化的产物, 与古太平洋板片俯冲有关。

致谢: 李春昱院士是中国板块构造的早期倡导人之一, 也是中国北方造山带系统研究的主要推动者之一, 为目前中亚造山带的研究奠定了坚实的基础, 谨以此文纪念李春昱院士诞辰 120 周年。衷心感谢张进研究员、黄始琪副研究员和审稿专家对本文提出的宝贵而细致的修改意见。

References

- Bhattacharya A R, Weber K. 2004. Fabric development during shear deformation in the Main Central Thrust Zone, NW-Himalaya, India[J]. *Tectonophysics*, 387(1): 23–46.
- Chen H Y, Zhang Y Q, Zhang J D, et al. 2014. LA-ICP-MS zircon U—Pb age and geochemical characteristics of tuff of Jiulongshan Formation from Chengde basin, northern Hebei[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(7): 966–973 (in Chinese with English abstract).
- Chen J S, Li W W, Shi Y, et al. 2022. Evolution of the eastern segment of the northern margin of the North China Craton in the Triassic: Evidence from the geochronology and geochemistry of magmatic rocks in Kaiyuan area, North Liaoning[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(8): 2216–2248 (in Chinese with English abstract).
- Chen Y, Zhu G, Jiang D Z, et al. 2013. Timing Determination of Phase B of the Yanshanian Movement in the Eastern North China Craton: Evidence from Dating of A Ductile Shear Zone in Sihetang, Northeastern Beijing[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(3): 295–310 (in Chinese with English abstract).
- Chen L M, Liu P H, Du L L, et al. 2023. Depositional age and provenance of the Anshan Group in the Gongchangling area, Liaoning Province: Constraints from detrital zircon U—Pb—Hf isotopic and rare earth element composition in the garnet-staurolite-mica-quartz schist[J]. *Geological Bulletin of China*, 42(12): 2037–2059 (in Chinese with English abstract).
- Dong S W, Zhang Y Q, Zhang F Q, et al. 2015. Late Jurassic—Early Cretaceous Continental Convergence and Intracontinental Orogenesis in East Asia: A synthesis of the Yanshan Revolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 114: 750–770.
- Dong S W, Zhang Y Q, Li H L, et al. 2018. The Yanshan orogeny and late Mesozoic multi-plate convergence in East Asia—Commemorating 90th years of the “Yanshan Orogeny” [J]. *Science China Earth*

- Sciences, 61: 1888–1909.
- Duan D, Zheng C Q, Liang C Y, et al. 2024. Petrogeochemical characteristics and tectonic significance of Middle Jurassic intrusive pluton in Xiajiabao area, Qingyuan, northern Liaoning[J]. *Earth Science*, 49(3): 868–892 (in Chinese with English abstract).
- Fry N. 1979. Random point distributions and strain measurements in rocks[J]. *Tectonophysics*, 60(1/2): 89–105.
- Fu Z B, Zhao Y, Liu J L, et al. 2018. Revisiting of the Yanshanian basins in western and northern Beijing, North China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 163: 90–107.
- Gu C C, Zhu G, Zhai M J, et al. 2016. Features and origin time of Mesozoic strike-slip structures in the Yilan–Yitong Fault Zone[J]. *Science China Earth Sciences*, 59: 2389–2410.
- Gu C C, Zhu G, Li Y J, et al. 2018. Timing of deformation and location of the eastern Liaoyuan Terrane, NE China: Constraints on the final closure time of the Paleo–Asian Ocean[J]. *Gondwana Research*, 60: 194–212.
- Han Y G, Yan D P, Li Z L. 2015. A new solution for finite strain measurement by Fry method in the CoreDRAW platform[J]. *Geoscience*, 29(3): 494–500 (in Chinese with English abstract).
- Hao W X, Zhu G, Zhu R X. 2019. Timing of the Yanshan Movement: Evidence from the Jingxi Basin in the Yanshan fold-and-thrust belt, eastern China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 108: 1961–1978.
- Hao W X, Zhu R X, Zhu G. 2020. Jurassic tectonics of the eastern North China Craton: Response to initial subduction of the Paleo–Pacific Plate[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 133(1/2): 19–36.
- Hu P Y, Liang C Y, Zheng C Q, et al. 2019. Tectonic transformation and metallogenesis of the Yanshan Movement during the Late Jurassic Period: Evidence from geochemistry and zircon U–Pb geochronology of the adamellites in Xingcheng, western Liaoning, China[J]. *Minerals*, 9(9): 518.
- Li H L, Zhang H R, Qu H J, et al. 2014. Initiation, the first stage of the Yanshan (Yenshan) Movement in Western Hills. Constraints from zircon U–Pb dating[J]. *Geological Review*, 60(5): 1026–1042 (in Chinese).
- Li Z X. 2016. Study on the prospecting method of Shahe fault zone in northern Liaoning[J]. *Non-Ferrous Mining and Metallurgy*, 32(2): 5–9 (in Chinese with English abstract).
- Li Z, Zhang W, Yang F, et al. 2020. Petrogenesis of the Mesoarchean granodioritic–tonalitic gneisses in the Kaiyuan area, northern Liaoning: Elemental and zircon U–Pb–Hf isotopic geochemical constraints[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 39(6): 1292–1311 (in Chinese with English abstract).
- Liang C Y, Liu Y J, Zheng C Q, et al. 2019. Macro–and microstructural, textural fabrics and deformation mechanism of calcite mylonites from Xar Moron–Changchun dextral shear zone, Northeast China[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 93(5): 1477–1499.
- Liang C Y, Liu Y J, Song Z W, et al. 2020. Deformation pattern and age of Hulin complex in Heilongjiang Province: Implications for subduction of the Palaeo–pacific plate during the Early Cretaceous, eastern NE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(3): 685–702 (in Chinese with English abstract).
- Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. 1992. Remnants of ≥ 3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino–Korean craton[J]. *Geology*, 20(4): 339–342.
- Liu J, Liu Z H, Li S C, et al. 2016. Geochronology and geochemistry of Triassic intrusive rocks in Kaiyuan area of the eastern section of the northern margin of North China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(9): 2739–2756 (in Chinese with English abstract).
- Liu J, Zhang J, Liu Z H, et al. 2020. Petrogenesis of Permo–Triassic intrusive rocks in Northern Liaoning Province, NE China: implications for the closure of the eastern Paleo–Asian Ocean[J]. *International Geology Review*, 62(6): 754–780.
- Liu Y J, Feng Z Q, Jiang L W, et al. 2019. Ophiolite in the eastern Central Asian Orogenic Belt, NE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(10): 3017–3047 (in Chinese with English abstract).
- Liu Z H, Wang C, Song J, et al. 2016. ^{40}Ar – ^{39}Ar dating and its tectonic significance of the Hulan Group at the northern margin of the North China Plate[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(9): 2757–2764 (in Chinese with English abstract).
- Okudaira T, Takeshita T, Hara I, et al. 1995. A new estimate of the conditions for transition from basal $\langle a \rangle$ to prism $\langle c \rangle$ slip in naturally deformed quartz[J]. *Tectonophysics*, 250(1): 31–46.
- Peng Y B, Liu W B, Zhao J, et al. 2022. LA–ICS–MS zircon U–Pb dating and geochemical characteristics of Yingchang pluton in Xifeng area of the North Liaoning province[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 37(3): 344–353 (in Chinese with English abstract).
- Ren Q, Zhang S, Wu H, et al. 2016. Further paleomagnetic results from the similar to 155 Ma Tiaojiashan Formation, Yanshan Belt, North China, and their implications for the tectonic evolution of the Mongol–Okhotsk suture[J]. *Gondwana Research*, 35: 180–191.
- Shao H W, Li J J, Liu H G, et al. 2007. Shahe ductile shear zone in northern Liaoning Province and its ore–searching importance[J]. *Geology and Resources*, 16(1): 23–28 (in Chinese with English abstract).
- Shi S S, Shi Y, Zhang C, et al. 2022. Geochronology and geochemistry of the Triassic intrusive rocks in the Faku area, northern Liaoning, China: Constraints on the evolution of the Palaeo–Asian Ocean[J]. *Geological Journal*, 57(4): 1658–1681.
- Shu T, Xu H J, Zhang J F, et al. 2019. Deformation characteristics and time of Taipingshan folds in Fangshan area, Beijing: Implications for Early Cretaceous compressional tectonics of North China Craton[J]. *Earth Science*, 44(5): 1734–1748 (in Chinese with English abstract).
- Song Z W, Zheng C Q, Liang C Y, et al. 2021. Identification and geological significance of Early Jurassic adakitic volcanic rocks in Xintaimen area, western Liaoning[J]. *Minerals*, 11(3): 331.
- Song Z W, Liang C Y, Neubauer F, et al. 2022. Multistage evolution of the Keluo complex in the northern Da Hinggan Mountains: Implications for the Mesozoic tectonic history of the eastern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 107: 339–369.

- Song Z W, Zheng C Q, Lin B, et al. 2023. Geological characteristics of Late Jurassic volcanic rocks in Sierbao-Baita Basin, West Liaoning province and its response to Yanshan Movement[J]. *Earth Science*, 48(10): 3689–3706 (in Chinese with English abstract).
- Su N, Zhu G. 2022. Stratigraphical sequences and chronological framework of Cretaceous in the western Liaoning region[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 46(5): 993–1021 (in Chinese with English abstract).
- Sun D Y, Wu F Y, Zhang Y B, et al. 2004. The final closing time of the west Lamulun River–Changchun–Yanji plate suture zone Evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34(2): 174–181 (in Chinese with English abstract).
- Tang J, Xu W L, Wang F, et al. 2018. Subduction history of the Paleo-Pacific slab beneath Eurasian continent: Mesozoic–Paleogene magmatic records in Northeast Asia[J]. *Science China Earth Sciences*, 61: 527–559.
- Wang X Q, Liu M, Mao J W. 2024. The Paleoproterozoic basin evolution of the Zhongtiao Mountain region in the Trans-North China Orogen, North China Craton[J]. *Geological Bulletin of China*, 43(4): 546–560 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Sun L X, Zhou L Y, et al. 2018. Discussion on the relationship between the Yanshanian Movement and cratonic destruction in North China[J]. *Science China Earth Sciences*, 61: 499–514.
- Wang Z J, Xu W L, Pei F P, et al. 2015. Geochronology and geochemistry of middle Permian–Middle Triassic intrusive rocks from central–eastern Jilin Province, NE China: Constraints on the tectonic evolution of the eastern segment of the Paleo-Asian Ocean[J]. *Lithos*, 238: 13–25.
- Wong W H. 1926. Crustal Movement in Eastern China[C]//Proceeding of the 3th Pan-Pacific Scientific Congress, Tokyo, 1: 265–285.
- Wong W H. 1927. Crustal movements and igneous activities in Eastern China since Mesozoic time[J]. *Bulletin of the Geological Society of China*, 6: 9–37.
- Wong W H. 1929. The Mesozoic orogenic movement in Eastern China[J]. *Bulletin of the Geological Society of China*, 8: 33–44.
- Wu F Y, Zhao G C, Sun D Y, et al. 2007. The Hulan Group: Its role in the evolution of the Central Asian Orogenic Belt of NE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(3): 542–556.
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1–30.
- Xu Z Q, Wang Q, Liang F H, et al. 2009. Electron backscatter diffraction (EBSD) technique and its application to study of continental dynamics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(7): 1721–1736 (in Chinese with English abstract).
- Yuan L L, Zhang X H, Xue F H, et al. 2016. Late Permian high-Mg andesite and basalt association from northern Liaoning, North China: Insights into the final closure of the Paleo-Asian ocean and the orogen–craton boundary[J]. *Lithos*, 258/259: 58–76.
- Zeng J, Wei W, Lin W, et al. 2021. The Late Jurassic extensional event in the Yanshan fold and thrust belt (North China): New insights from an integrated study of structural geology, geophysics, and geochemistry of the Siganding granitic pluton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 211: 104708.
- Zhai M G. 2012. Evolution of the North China Craton and Early Plate Tectonics[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1335–1349 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C H, Deng H L, Li C M, et al. 2012. An out-of-syncline thrust model for the "Chengde Thrust Sheet" in central intraplate Yanshan Orogenic Belt, northern North China Craton[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(5): 27–40 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H H, Wang F, Xu W L, et al. 2016. Petrogenesis of Early–Middle Jurassic intrusive rocks in Northern Liaoning and Central Jilin provinces, Northeast China: Implications for the extent of spatial–temporal overprinting of the Mongol–Okhotsk and Paleo-Pacific tectonic regimes[J]. *Lithos*, 256/257: 132–147.
- Zhang N, Wang C B, Liu Z H, et al. 2022. Tectonic evolution of the Late Paleozoic–Early Mesozoic orogenic belt in the eastern segment of the northern margin of the North China Block: Evidence from meta-volcanic rocks of Jianshanzi, northern Liaoning Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(8): 2323–2344 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z K, Ling M X, Lin W, et al. 2020. "Yanshanian Movement" induced by the westward subduction of the Paleo-Pacific plate[J]. *Solid Earth Sciences*, 5(2): 103–114.
- Zhao G C, Cawood P A, Li S, et al. 2012. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion[J]. *Precambrian Research*, 222: 55–76.
- Zhao Y, Xu G, Zhang S H, et al. 2004. Yanshanian movement and conversion of tectonic regimes in East Asia[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 319–328 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y, Gao H L, Zhang S H, et al. 2022. A brief century review of the "Yanshan Movement" and its founder[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(5): 1510–1523 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y D, Chang Z Z. 1985. Finite strain measurement and ductile shear zones[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zhou J B, Han J, Simon A W, et al. 2013. A primary study of the Jilin–Heilongjiang high-pressure metamorphic belt: Evidence and tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 386–398 (in Chinese with English abstract).
- Zhu G, Liu C, Gu C C, et al. 2018. Oceanic plate subduction history in the western Pacific Ocean: Constraint from late Mesozoic evolution of the Tan–Lu Fault Zone[J]. *Science China Earth Sciences*, 61: 386–405.

附中文参考文献

- 陈海燕, 张运强, 张计东, 等. 2014. 冀北承德盆地侏罗系九龙山组凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征[J]. *地质通报*, 33(7): 966–973.
- 陈井胜, 李崴崴, 时溢, 等. 2022. 华北板块北缘东段三叠纪构造演化

- 化——来自辽北开原岩浆岩年代学、地球化学的证据[J]. [岩石学报](#), 38(8): 2216–2248.
- 陈丽梅, 刘平华, 杜利林, 等. 2023. 辽宁弓长岭鞍山群时代与物源——来自石榴十字字母片岩碎屑锆石 U–Pb–Hf 同位素特征与稀土元素组成的约束[J]. [地质通报](#), 42(12): 2037–2059.
- 陈印, 朱光, 姜大志, 等. 2013. 四合堂剪切带活动时代及其对燕山运动 B 幕时间的限定[J]. [地质学报](#), 87(3): 295–310.
- 翟明国. 2012. 华北克拉通的形成以及早期板块构造[J]. [地质学报](#), 86(9): 1335–1349.
- 段东, 郑常青, 梁琛岳, 等. 2024. 辽北清原夏家堡中侏罗世侵入体岩石地球化学特征及构造意义[J]. [地球科学](#), 49(3): 868–892.
- 韩阳光, 颜丹平, 李政林. 2015. 在 CorelDRAW 平台上进行 Fry 法有限应变测量的新技术[J]. [现代地质](#), 29(3): 494–500.
- 李海龙, 张宏仁, 渠洪杰, 等. 2014. 燕山运动“绪动/A 幕”的本意及其锆石 U–Pb 年代学制约[J]. [地质论评](#), 60(5): 1026–1042.
- 李忠宪. 2016. 辽北沙河断裂带找矿方法研究[J]. [有色矿冶](#), 32(2): 5–9.
- 李壮, 张伟, 杨帆, 等. 2020. 辽北开原中太古代花岗闪长质–英云闪长质片麻岩成因: 元素和锆石 U–Pb–Hf 同位素地球化学制约[J]. [矿物岩石地球化学通报](#), 39(6): 1292–1311.
- 梁琛岳, 刘永江, 宋志伟, 等. 2020. 黑龙江虎林杂岩变形样式与时代: 对中国东北部早白垩世古太平洋板块俯冲的启示[J]. [岩石学报](#), 36(3): 685–702.
- 刘锦, 刘正宏, 李世超, 等. 2016. 华北北缘东段开原地区三叠纪侵入岩年代学及岩石地球化学研究[J]. [岩石学报](#), 32(9): 2739–2756.
- 刘永江, 冯志强, 蒋立伟, 等. 2019. 中国东北地区蛇绿岩[J]. [岩石学报](#), 35(10): 3017–3047.
- 刘志宏, 王超, 宋健, 等. 2016. 华北板块北缘呼兰群⁴⁰Ar–³⁹Ar 定年及其构造意义[J]. [岩石学报](#), 32(9): 2757–2764.
- 彭游博, 刘文彬, 赵军, 等. 2022. 辽北西丰地区晚侏罗世营厂岩体 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄及岩石地球化学特征[J]. [地质找矿论丛](#), 37(3): 344–353.
- 邵会文, 李俊杰, 刘洪光, 等. 2007. 辽北沙河韧性剪切构造带及其找矿意义[J]. [地质与资源](#), 16(1): 23–28.
- 舒坦, 续海金, 章军锋, 等. 2019. 北京房山地区太平山褶皱的变形特征和形成时代: 华北克拉通早白垩世挤压构造的意义[J]. [地球科学](#), 44(5): 1734–1748.
- 宋志伟, 郑常青, 林波, 等. 2023. 辽西寺儿堡–白塔盆地晚侏罗世火山岩地质特征及其对燕山运动的响应[J]. [地球科学](#), 48(10): 3689–3706.
- 苏楠, 朱光. 2022. 辽西地区白垩纪地层序列与年代学框架[J]. [大地构造与成矿学](#), 46(5): 993–1021.
- 孙德有, 吴福元, 张艳斌, 等. 2004. 西拉木伦河–长春–延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据[J]. [吉林大学学报 \(地球科学版\)](#), 34(2): 174–181.
- 王晓青, 刘敏, 毛景文. 2024. 华北克拉通中部造山带中条山地区古元古代盆地演化[J]. [地质通报](#), 43(4): 546–560.
- 许志琴, 王勤, 梁凤华, 等. 2009. 电子背散射衍射 (EBSD) 技术在大陆动力学研究中的应用[J]. [岩石学报](#), 25(7): 1721–1736.
- 张诺, 王长兵, 刘正宏, 等. 2022. 华北板块北缘东段晚古生代–早中生代造山带构造演化: 来自辽北开原地区尖山子变质火山岩的证据[J]. [岩石学报](#), 38(8): 2323–2344.
- 张长厚, 邓洪菱, 李程明, 等. 2012. 燕山板内造山带中部“承德逆冲构造”的褶皱相关断裂构造模型[J]. [地学前缘](#), 19(5): 27–40.
- 赵越, 高海龙, 张拴宏, 等. 2022. 回眸燕山运动——致敬“燕山运动”的创建者和中国地质学会的奠基人翁文灏[J]. [地质学报](#), 96(5): 1510–1523.
- 赵越, 徐刚, 张拴宏, 等. 2004. 燕山运动与东亚构造体制的转变[J]. [地学前缘](#), 11(3): 319–328.
- 郑亚东, 常志忠. 1985. 岩石有限应变测量及韧性剪切带[M]. 北京: 地质出版社.
- 周建波, 韩杰, Simon A W, 等. 2013. 吉林–黑龙江高压变质带的初步厘定: 证据和意义[J]. [岩石学报](#), 29(2): 386–398.

附表 1 辽北清原大孤家韧性剪切带典型变形岩石 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 定年测试结果
Appendix Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb dating of typical deformed rocks in Dagujia ductile shear zone, Qingyuan, Northern Liaoning Province

序号	Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
21QY1-1													
1	0.21	0.0511	0.00199	0.26454	0.01076	0.03758	0.00101	245	48	238	9	238	6
2	0.4	0.05278	0.00358	0.27246	0.01692	0.03744	0.00102	319	157	245	14	237	6
3	0.1	0.05388	0.00272	0.27898	0.01201	0.03755	0.00099	366	117	250	10	238	6
4	0.56	0.05221	0.00278	0.27269	0.01462	0.03791	0.00109	295	71	245	12	240	7
5	0.21	0.05549	0.00198	0.29043	0.01095	0.03798	0.00101	432	41	259	9	240	6
6	0.19	0.05224	0.00267	0.27031	0.01192	0.03753	0.00097	296	120	243	10	237	6
7	0.33	0.0516	0.00191	0.27011	0.01055	0.03798	0.00102	268	44	243	8	240	6
8	0.35	0.05309	0.00376	0.2754	0.01928	0.03764	0.00119	333	102	247	15	238	7
9	0.42	0.05248	0.00163	0.27328	0.00922	0.03778	0.00099	306	36	245	7	239	6
10	0.4	0.05077	0.00148	0.26186	0.00844	0.03742	0.00097	230	34	236	7	237	6
11	0.18	0.05121	0.00243	0.2663	0.01288	0.03773	0.00105	250	62	240	10	239	7
12	0.05	0.05211	0.00251	0.2628	0.01288	0.03659	0.00103	290	62	237	10	232	6
13	0.19	0.05164	0.0019	0.26769	0.01036	0.03761	0.00101	270	44	241	8	238	6
14	0.26	0.05745	0.00283	0.29857	0.0149	0.03771	0.00108	509	61	265	12	239	7
15	0.21	0.05263	0.00286	0.27034	0.01283	0.03725	0.00098	313	127	243	10	236	6
16	0.31	0.05118	0.00175	0.26221	0.00958	0.03716	0.00099	249	40	236	8	235	6
17	0.72	0.05179	0.00268	0.26738	0.01398	0.03746	0.00107	276	69	241	11	237	7
18	0.11	0.05181	0.00197	0.2682	0.01067	0.03755	0.00101	277	46	241	9	238	6
19	0.41	0.05519	0.00189	0.28643	0.01046	0.03765	0.001	420	39	256	8	238	6
20	0.04	0.05318	0.00143	0.27422	0.00829	0.03741	0.00097	336	31	246	7	237	6
21QY3-1													
1	0.59	0.05204	0.00164	0.2662	0.00923	0.03711	0.00096	287	37	240	7	235	6
2	1.03	0.05399	0.00204	0.28135	0.01128	0.03781	0.001	371	46	252	9	239	6
3	0.82	0.0513	0.0025	0.26703	0.01338	0.03777	0.00103	254	66	240	11	239	6
4	1.44	0.05818	0.0016	0.30238	0.00942	0.03771	0.00097	537	31	268	7	239	6
5	0.84	0.05223	0.0018	0.2728	0.01014	0.03789	0.00099	295	42	245	8	240	6
6	0.34	0.05264	0.00337	0.27182	0.01581	0.03745	0.001	313	149	244	13	237	6
7	0.53	0.05187	0.00184	0.27094	0.0103	0.0379	0.00099	280	43	243	8	240	6
8	1.01	0.05557	0.00161	0.28882	0.00936	0.03771	0.00097	435	33	258	7	239	6
9	0.92	0.0566	0.00155	0.29384	0.00911	0.03766	0.00096	476	31	262	7	238	6
10	1.23	0.06077	0.00174	0.31605	0.01013	0.03773	0.00097	631	32	279	8	239	6
11	0.55	0.05672	0.00164	0.29463	0.00952	0.03768	0.00097	481	33	262	7	238	6
12	1.33	0.05194	0.00164	0.27117	0.0094	0.03787	0.00098	283	37	244	8	240	6
13	1.59	0.0537	0.00183	0.27928	0.01028	0.03773	0.00098	358	41	250	8	239	6
14	0.44	0.05096	0.00286	0.26522	0.01511	0.03775	0.00104	239	81	239	12	239	6
15	0.79	0.0527	0.00181	0.27395	0.01016	0.0377	0.00098	316	41	246	8	239	6
16	0.48	0.05064	0.00167	0.26329	0.00942	0.03771	0.00097	224	40	237	8	239	6
17	0.77	0.05295	0.00181	0.2758	0.01016	0.03778	0.00098	327	41	247	8	239	6
18	0.91	0.05153	0.00155	0.2684	0.0089	0.03778	0.00097	265	35	241	7	239	6
19	0.65	0.05102	0.00171	0.26658	0.00965	0.03789	0.00098	242	40	240	8	240	6

续表 1-1

序号	Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
20	0.92	0.05165	0.00198	0.26864	0.0109	0.03772	0.00099	270	48	242	9	239	6
21QY4-a													
1	0.79	0.0544	0.0027	0.27805	0.01407	0.03765	0.00101	388	66	249	11	238	6
2	0.44	0.05795	0.00376	0.29626	0.01915	0.03762	0.0011	528	91	263	15	238	7
3	0.94	0.06183	0.0031	0.31094	0.01575	0.03695	0.00102	668	62	275	12	234	6
4	0.6	0.06023	0.00488	0.30516	0.02431	0.03719	0.00121	612	116	270	19	235	8
5	0.58	0.05397	0.00292	0.27923	0.01526	0.03786	0.00105	370	74	250	12	240	7
6	0.63	0.05447	0.00256	0.28145	0.01351	0.03777	0.00102	391	61	252	11	239	6
7	0.56	0.04859	0.00862	0.25821	0.04464	0.03881	0.00194	128	264	233	36	245	12
8	0.28	0.05617	0.00239	0.29133	0.01278	0.03777	0.00101	459	52	260	10	239	6
9	0.41	0.05176	0.00303	0.2707	0.01593	0.03806	0.00108	275	83	243	13	241	7
10	0.74	0.04758	0.00826	0.25645	0.0433	0.03919	0.00202	78	253	232	35	248	13
11	0.56	0.05499	0.00505	0.28432	0.02554	0.03757	0.00132	412	138	254	20	238	8
12	0.44	0.04647	0.00331	0.25032	0.01771	0.03912	0.00119	22	97	227	14	247	7
13	0.65	0.05162	0.00263	0.26765	0.01378	0.03758	0.00105	269	68	241	11	238	7
14	0.48	0.0578	0.00249	0.29869	0.01323	0.03743	0.00102	522	52	265	10	237	6
15	2.17	0.04944	0.00298	0.25966	0.01564	0.03802	0.00111	169	86	234	13	241	7
16	1.14	0.05142	0.00193	0.27089	0.01067	0.03811	0.00101	260	46	243	9	241	6
17	0.38	0.04541	0.00395	0.24567	0.02103	0.03909	0.00131	-33	125	223	17	247	8
18	1.03	0.05296	0.00566	0.27721	0.02885	0.0378	0.00147	327	164	248	23	239	9
19	0.56	0.05002	0.00215	0.26515	0.01172	0.03827	0.00105	196	54	239	9	242	7
20	0.46	0.04864	0.00421	0.25957	0.02204	0.0385	0.00132	131	127	234	18	244	8
23QY1-1													
1	0.79	0.05641	0.0029	0.27353	0.01412	0.03519	0.00095	469	67	246	11	223	6
2	0.44	0.05051	0.00432	0.24213	0.01947	0.03477	0.00102	218	195	220	16	220	6
3	0.94	0.05605	0.00339	0.27019	0.01623	0.03498	0.001	454	83	243	13	222	6
4	0.6	0.05592	0.00277	0.27166	0.01357	0.03525	0.00095	449	64	244	11	223	6
5	0.58	0.05394	0.00349	0.26348	0.01693	0.03545	0.00103	369	93	237	14	225	6
6	0.63	0.05156	0.00209	0.25482	0.01065	0.03586	0.00092	266	51	230	9	227	6
7	0.56	0.05244	0.00358	0.25189	0.01586	0.03484	0.00092	304	158	228	13	221	6
8	0.28	0.05144	0.00337	0.25049	0.01508	0.03532	0.00092	261	151	227	12	224	6
9	0.41	0.05057	0.00196	0.25213	0.01017	0.03617	0.00092	221	49	228	8	229	6
10	0.74	0.05161	0.0034	0.25461	0.01664	0.03579	0.00104	268	97	230	13	227	6
11	0.56	0.05522	0.00288	0.26943	0.01418	0.0354	0.00097	421	70	242	11	224	6
12	0.44	0.05713	0.00302	0.2763	0.01468	0.03509	0.00097	497	69	248	12	222	6
13	0.65	0.05434	0.00253	0.2649	0.01259	0.03536	0.00095	385	60	239	10	224	6
14	0.48	0.05655	0.00486	0.27361	0.02309	0.0351	0.00117	474	128	246	18	222	7
15	2.17	0.05052	0.0024	0.25201	0.01223	0.03618	0.00097	219	64	228	10	229	6
16	1.14	0.05308	0.00249	0.26068	0.01249	0.03562	0.00096	332	61	235	10	226	6
17	0.38	0.05297	0.00378	0.26016	0.0184	0.03562	0.00109	328	105	235	15	226	7
18	1.03	0.05661	0.00462	0.27437	0.02202	0.03514	0.00115	476	120	246	18	223	7
19	0.56	0.05695	0.00289	0.27658	0.01423	0.03522	0.00097	490	66	248	11	223	6
20	0.46	0.05421	0.00277	0.26534	0.01378	0.03549	0.00098	380	68	239	11	225	6

续表 1-2

序号	Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
21QY1-4													
1	0.42	0.04811	0.00174	0.23939	0.00896	0.03609	0.0009	105	45	218	7	229	6
2	0.26	0.04817	0.00226	0.23974	0.01137	0.0361	0.00093	108	63	218	9	229	6
3	0.13	0.05066	0.00319	0.2492	0.01561	0.03568	0.00099	225	94	226	13	226	6
4	0.2	0.04966	0.0043	0.25012	0.02138	0.03654	0.00111	179	136	227	17	231	7
5	0.36	0.04907	0.00249	0.24451	0.01252	0.03614	0.00095	151	71	222	10	229	6
6	0.25	0.04911	0.00242	0.24279	0.01208	0.03586	0.00093	153	69	221	10	227	6
7	0.31	0.04998	0.00291	0.24505	0.01425	0.03556	0.00096	194	85	223	12	225	6
8	0.54	0.05069	0.0019	0.24495	0.00951	0.03505	0.00088	227	46	222	8	222	5
9	0.35	0.05016	0.00315	0.24069	0.01505	0.03481	0.00096	202	94	219	12	221	6
10	0.52	0.05007	0.00206	0.24712	0.01042	0.0358	0.0009	198	53	224	8	227	6
11	0.44	0.05086	0.00262	0.25164	0.01308	0.03589	0.00094	234	72	228	11	227	6
12	0.24	0.05094	0.00265	0.24409	0.01278	0.03476	0.00091	238	73	222	10	220	6
13	0.38	0.04912	0.00281	0.24424	0.01402	0.03607	0.00097	154	83	222	11	228	6
14	0.55	0.05087	0.00206	0.24588	0.01025	0.03506	0.00088	235	52	223	8	222	5
15	0.29	0.04992	0.00252	0.24259	0.01238	0.03525	0.00092	191	71	221	10	223	6
16	0.46	0.05061	0.00264	0.24856	0.01307	0.03563	0.00094	223	74	225	11	226	6
17	0.35	0.05001	0.00207	0.24427	0.0104	0.03543	0.0009	195	54	222	8	224	6
18	0.44	0.05119	0.0023	0.25034	0.01147	0.03548	0.00091	249	60	227	9	225	6
19	0.28	0.05039	0.00405	0.24525	0.01958	0.0353	0.00104	213	127	223	16	224	6
20	0.23	0.04939	0.00299	0.24965	0.01518	0.03666	0.00099	166	90	226	12	232	6
21QY4-3													
1	0.82	0.05024	0.00313	0.24179	0.01524	0.03491	0.00098	206	94	220	12	221	6
2	0.7	0.05248	0.00232	0.25001	0.01148	0.03455	0.00092	306	58	227	9	219	6
3	1	0.04989	0.00362	0.23867	0.01741	0.03469	0.001	190	113	217	14	220	6
4	1.34	0.05184	0.00221	0.24816	0.01104	0.03472	0.00092	278	55	225	9	220	6
5	1.01	0.05097	0.00302	0.24272	0.01455	0.03454	0.00097	239	87	221	12	219	6
6	1.03	0.05107	0.00381	0.24741	0.01846	0.03514	0.00105	244	116	224	15	223	7
7	0.68	0.05102	0.00424	0.24359	0.02016	0.03463	0.00108	242	131	221	16	219	7
8	0.94	0.05094	0.00311	0.24168	0.01494	0.03441	0.00097	238	91	220	12	218	6
9	0.79	0.0533	0.00248	0.25596	0.01231	0.03484	0.00094	342	62	231	10	221	6
10	0.87	0.05041	0.00318	0.24453	0.01558	0.03518	0.00101	214	94	222	13	223	6
11	0.89	0.0504	0.00203	0.2417	0.01026	0.03479	0.00092	213	52	220	8	220	6
12	0.97	0.05225	0.00231	0.24901	0.01143	0.03457	0.00093	296	58	226	9	219	6
13	0.59	0.0496	0.00277	0.2395	0.01362	0.03503	0.00097	176	81	218	11	222	6
14	1	0.05228	0.00365	0.24884	0.01744	0.03453	0.00101	298	107	226	14	219	6
15	0.57	0.05036	0.00252	0.23937	0.01228	0.03448	0.00094	212	69	218	10	219	6
16	0.82	0.0524	0.00244	0.24962	0.01201	0.03456	0.00094	303	62	226	10	219	6
17	0.6	0.05098	0.00371	0.24453	0.0178	0.0348	0.00103	240	113	222	15	221	6
18	0.57	0.05025	0.00547	0.24013	0.02586	0.03467	0.00118	207	179	219	21	220	7
19	0.99	0.05056	0.0034	0.24052	0.01624	0.03452	0.00101	221	102	219	13	219	6
20	0.86	0.05001	0.00231	0.23991	0.01148	0.03481	0.00094	195	63	218	9	221	6

续表 1-3

序号	Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
23QY4-1													
1	0.56	0.05198	0.0031	0.19703	0.01183	0.0275	0.00084	285	82	183	10	175	5
2	0.72	0.04976	0.00217	0.1936	0.00882	0.02823	0.0008	184	56	180	8	179	5
3	0.59	0.04912	0.00261	0.19261	0.01043	0.02844	0.00084	154	73	179	9	181	5
4	0.68	0.04988	0.00444	0.19585	0.01724	0.02848	0.00097	189	136	182	15	181	6
5	0.62	0.04939	0.00204	0.19316	0.00843	0.02836	0.00079	166	53	179	7	180	5
6	0.58	0.04951	0.00262	0.19263	0.01041	0.02822	0.00083	172	73	179	9	179	5
7	0.42	0.04955	0.00344	0.19479	0.01349	0.02851	0.0009	174	101	181	11	181	6
8	0.74	0.0497	0.00559	0.197	0.02169	0.02874	0.00113	181	175	183	18	183	7
9	0.96	0.05115	0.0047	0.19846	0.01794	0.02814	0.001	248	140	184	15	179	6
10	1.09	0.05034	0.00434	0.19713	0.0168	0.0284	0.00097	211	131	183	14	181	6
11	0.74	0.04925	0.0021	0.1929	0.00865	0.0284	0.00079	160	56	179	7	181	5
12	0.67	0.04998	0.0021	0.19431	0.0086	0.02819	0.00078	194	54	180	7	179	5
13	0.61	0.04997	0.00705	0.19379	0.02669	0.02812	0.00125	194	227	180	23	179	8
14	0.69	0.04968	0.00258	0.19331	0.01031	0.02822	0.00081	180	72	179	9	179	5
15	0.68	0.05099	0.00714	0.19526	0.02666	0.02777	0.00124	240	225	181	23	177	8
16	0.76	0.05062	0.00514	0.19782	0.01976	0.02834	0.00103	224	158	183	17	180	6
17	0.58	0.05029	0.00243	0.19761	0.00987	0.0285	0.00081	208	65	183	8	181	5
18	0.76	0.05135	0.00374	0.19592	0.01423	0.02767	0.00088	257	108	182	12	176	6
19	0.63	0.04929	0.00395	0.19374	0.01541	0.02851	0.00093	162	119	180	13	181	6
20	0.59	0.04959	0.00389	0.1946	0.01517	0.02847	0.00092	176	118	181	13	181	6
23QY7-1													
1	0.51	0.04693	0.0023	0.17855	0.00896	0.02758	0.00079	46	60	167	8	175	5
2	1.11	0.04906	0.00228	0.1839	0.00879	0.02718	0.00078	151	61	171	8	173	5
3	0.54	0.04662	0.00189	0.17775	0.00759	0.02764	0.00077	30	46	166	7	176	5
4	0.63	0.05026	0.00221	0.18543	0.00846	0.02675	0.00076	207	56	173	7	170	5
5	0.73	0.04688	0.00234	0.17763	0.00907	0.02748	0.00079	43	61	166	8	175	5
6	1.1	0.04747	0.00184	0.17912	0.00733	0.02736	0.00075	73	48	167	6	174	5
7	0.67	0.04867	0.00216	0.18154	0.00833	0.02705	0.00076	132	58	169	7	172	5
8	1.03	0.05268	0.00266	0.1883	0.00968	0.02592	0.00075	315	66	175	8	165	5
9	0.9	0.04973	0.00254	0.18413	0.00957	0.02686	0.00078	182	69	172	8	171	5
10	0.71	0.0513	0.00261	0.18671	0.00967	0.02641	0.00076	254	68	174	8	168	5
11	1.09	0.04656	0.00228	0.17735	0.00889	0.02764	0.00079	27	58	166	8	176	5
12	0.76	0.04849	0.00248	0.18229	0.00949	0.02728	0.00078	123	70	170	8	174	5
13	0.71	0.0483	0.00324	0.18146	0.01214	0.02726	0.00084	114	94	169	10	173	5
14	0.81	0.05107	0.00328	0.18591	0.01192	0.02642	0.00081	244	92	173	10	168	5
15	0.55	0.04671	0.00225	0.1786	0.0088	0.02775	0.00078	34	58	167	8	176	5
16	0.98	0.0513	0.00317	0.18544	0.01144	0.02624	0.0008	254	87	173	10	167	5
17	0.64	0.04891	0.00255	0.18345	0.0097	0.02723	0.00078	144	71	171	8	173	5
18	0.58	0.04835	0.0023	0.18179	0.00887	0.0273	0.00077	116	63	170	8	174	5
23QY11-1													
1	0.57	0.04693	0.0023	0.17855	0.00896	0.02758	0.00079	46	60	167	8	175	5
2	0.5	0.04906	0.00228	0.1839	0.00879	0.02718	0.00078	151	61	171	8	173	5

续表 1-4

序号	Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
3	0.94	0.04662	0.00189	0.17775	0.00759	0.02764	0.00077	30	46	166	7	176	5
4	0.5	0.05026	0.00221	0.18543	0.00846	0.02675	0.00076	207	56	173	7	170	5
5	0.44	0.04688	0.00234	0.17763	0.00907	0.02748	0.00079	43	61	166	8	175	5
6	0.53	0.04747	0.00184	0.17912	0.00733	0.02736	0.00075	73	48	167	6	174	5
7	0.56	0.04867	0.00216	0.18154	0.00833	0.02705	0.00076	132	58	169	7	172	5
8	0.68	0.05268	0.00266	0.1883	0.00968	0.02592	0.00075	315	66	175	8	165	5
9	0.44	0.04973	0.00254	0.18413	0.00957	0.02686	0.00078	182	69	172	8	171	5
10	1.16	0.0513	0.00261	0.18671	0.00967	0.02641	0.00076	254	68	174	8	168	5
11	0.61	0.04656	0.00228	0.17735	0.00889	0.02764	0.00079	27	58	166	8	176	5
12	0.55	0.04849	0.00248	0.18229	0.00949	0.02728	0.00078	123	70	170	8	174	5
13	0.43	0.0483	0.00324	0.18146	0.01214	0.02726	0.00084	114	94	169	10	173	5
14	0.85	0.05107	0.00328	0.18591	0.01192	0.02642	0.00081	244	92	173	10	168	5
15	0.59	0.04671	0.00225	0.1786	0.0088	0.02775	0.00078	34	58	167	8	176	5
16	0.34	0.0513	0.00317	0.18544	0.01144	0.02624	0.0008	254	87	173	10	167	5
17	0.78	0.04891	0.00255	0.18345	0.0097	0.02723	0.00078	144	71	171	8	173	5
18	0.58	0.04835	0.0023	0.18179	0.00887	0.0273	0.00077	116	63	170	8	174	5
19	0.63	0.04884	0.00268	0.18333	0.01015	0.02726	0.00079	140	76	171	9	173	5
20	0.68	0.04887	0.00291	0.18396	0.01098	0.02734	0.00081	142	83	171	9	174	5
22QY2-1													
1	0.56	0.04827	0.00308	0.1684	0.01075	0.02535	0.0007	113	93	158	9	161	4
2	0.52	0.04757	0.00329	0.16796	0.01157	0.02565	0.00072	78	101	158	10	163	5
3	0.8	0.04834	0.00371	0.1685	0.01286	0.02531	0.00073	116	117	158	11	161	5
4	0.62	0.05061	0.00269	0.17279	0.00928	0.02479	0.00066	223	76	162	8	158	4
5	0.44	0.04912	0.0028	0.16868	0.00967	0.02493	0.00067	154	83	158	8	159	4
6	0.56	0.05008	0.00354	0.17334	0.01222	0.02512	0.00071	199	109	162	11	160	4
7	0.75	0.05181	0.00511	0.17424	0.017	0.0244	0.00077	277	163	163	15	155	5
8	0.74	0.05117	0.00381	0.17481	0.01293	0.02478	0.00072	248	116	164	11	158	5
9	0.58	0.04743	0.00306	0.16764	0.01082	0.02564	0.0007	71	93	157	9	163	4
10	0.49	0.05152	0.00364	0.17527	0.01234	0.02467	0.0007	264	109	164	11	157	4
11	0.62	0.05274	0.00464	0.1787	0.01558	0.02457	0.00074	318	143	167	13	156	5
12	0.63	0.04927	0.00293	0.17145	0.01028	0.02523	0.00067	161	89	161	9	161	4
13	0.86	0.05043	0.00713	0.17467	0.02427	0.02511	0.00097	215	237	163	21	160	6
14	1.04	0.04895	0.00401	0.17006	0.01384	0.02518	0.00073	145	129	159	12	160	5
15	0.61	0.05219	0.00413	0.17463	0.01374	0.02425	0.0007	294	127	163	12	154	4
16	0.55	0.05062	0.00511	0.17286	0.01735	0.02475	0.00075	224	170	162	15	158	5
17	0.66	0.05266	0.00548	0.17693	0.01822	0.02435	0.00077	314	175	165	16	155	5
18	0.53	0.05256	0.00579	0.17911	0.01951	0.0247	0.0008	310	187	167	17	157	5
19	0.64	0.05236	0.00495	0.17839	0.01671	0.0247	0.00075	301	156	167	14	157	5
20	0.56	0.05403	0.00728	0.17953	0.02391	0.02409	0.00084	372	235	168	21	153	5
21QY2-c													
1	0.61	0.04922	0.00189	0.16697	0.00658	0.02468	0.00063	158	48	157	6	157	4
2	0.55	0.04871	0.0023	0.17002	0.00809	0.02539	0.00068	134	63	159	7	162	4
3	0.95	0.04887	0.00483	0.17107	0.01651	0.02546	0.00089	142	151	160	14	162	6

续表 1-5

序号	Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
4	0.34	0.04928	0.00533	0.17343	0.01828	0.02559	0.00095	161	167	162	16	163	6
5	0.51	0.04928	0.00306	0.16729	0.01028	0.02467	0.00071	161	88	157	9	157	4
6	1.08	0.04847	0.0035	0.17067	0.01215	0.02559	0.00077	122	105	160	11	163	5
7	1.75	0.04904	0.00326	0.16731	0.01098	0.02479	0.00073	150	96	157	10	158	5
8	1.37	0.04879	0.0051	0.17103	0.01744	0.02546	0.00093	138	160	160	15	162	6
9	0.6	0.04878	0.00267	0.17054	0.00933	0.02538	0.0007	137	76	160	8	162	4
10	0.96	0.04841	0.00573	0.17132	0.01978	0.02569	0.00099	119	186	161	17	164	6
11	0.77	0.04983	0.00534	0.1739	0.01815	0.02533	0.00094	187	166	163	16	161	6
12	1.05	0.04965	0.00429	0.17025	0.0144	0.02488	0.00081	179	131	160	12	158	5
13	0.63	0.04887	0.00458	0.16956	0.01554	0.02516	0.00085	142	143	159	13	160	5
14	0.79	0.04978	0.00366	0.16784	0.01218	0.02445	0.00073	185	110	158	11	156	5
15	0.63	0.04948	0.00273	0.17252	0.00952	0.02527	0.00069	171	78	162	8	161	4
16	0.78	0.04953	0.00238	0.17369	0.00843	0.02541	0.00067	173	65	163	7	162	4
17	1.05	0.04939	0.00288	0.17034	0.00991	0.02499	0.00069	166	84	160	9	159	4
18	1.49	0.05029	0.00582	0.17396	0.01961	0.02506	0.00096	208	182	163	17	160	6
19	0.76	0.04909	0.0041	0.16798	0.01378	0.02478	0.00078	152	126	158	12	158	5
20	0.93	0.0483	0.00302	0.16832	0.01053	0.02524	0.00068	114	91	158	9	161	4
20QY5-1													
1	0.7	0.05222	0.00419	0.17793	0.01393	0.02472	0.00081	295	119	166	12	157	5
2	0.77	0.05034	0.00482	0.17161	0.01598	0.02474	0.00088	211	145	161	14	158	6
3	1.6	0.04817	0.00337	0.16624	0.01145	0.02505	0.00076	108	99	156	10	159	5
4	0.54	0.04506	0.00415	0.15568	0.01401	0.02507	0.00085	-16	134	147	12	160	5
5	1.02	0.04899	0.00385	0.16924	0.01306	0.02507	0.00079	147	116	159	11	160	5
6	0.85	0.0493	0.00519	0.16768	0.01722	0.02468	0.00091	162	162	157	15	157	6
7	0.66	0.04901	0.00363	0.16724	0.01216	0.02477	0.00078	148	107	157	11	158	5
8	0.78	0.04926	0.00401	0.16922	0.01351	0.02493	0.0008	160	121	159	12	159	5
9	0.84	0.04909	0.00407	0.16883	0.01375	0.02496	0.0008	152	124	158	12	159	5
10	0.7	0.05203	0.0043	0.17657	0.01431	0.02463	0.0008	287	126	165	12	157	5
11	0.73	0.04964	0.00573	0.172	0.01931	0.02515	0.00098	178	180	161	17	160	6
12	0.9	0.04798	0.00364	0.16538	0.01233	0.02502	0.00078	98	109	155	11	159	5
13	0.57	0.05436	0.00368	0.18701	0.01244	0.02497	0.00076	386	95	174	11	159	5
14	0.53	0.05007	0.00388	0.172	0.01311	0.02493	0.00079	198	115	161	11	159	5
15	0.61	0.04821	0.0033	0.16605	0.01122	0.025	0.00075	110	97	156	10	159	5
16	0.83	0.04844	0.00492	0.16621	0.01649	0.02491	0.00089	121	155	156	14	159	6
17	0.88	0.05089	0.00463	0.17359	0.01544	0.02476	0.00084	236	139	163	13	158	5
18	0.71	0.04681	0.00466	0.16126	0.01578	0.025	0.00084	40	153	152	14	159	5
19	0.56	0.05002	0.00418	0.17321	0.01421	0.02514	0.00081	196	127	162	12	160	5
20	0.77	0.04827	0.00364	0.1653	0.01229	0.02486	0.00077	113	109	155	11	158	5
23QY6-1													
1	0.88	0.04605	0.00598	0.11558	0.01428	0.01821	0.00073		243	111	13	116	5
2	1.06	0.04904	0.00779	0.12325	0.01906	0.01829	0.00087	150	249	118	17	117	6
3	1.28	0.04825	0.01565	0.12092	0.03826	0.01823	0.00143	112	422	116	35	116	9
4	0.71	0.06404	0.01069	0.15844	0.02548	0.018	0.00097	743	254	149	22	115	6

续表 1-6

序号	Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
5	1.52	0.05216	0.0067	0.12924	0.01614	0.01801	0.00075	292	204	123	15	115	5
6	0.78	0.04796	0.00977	0.11972	0.02386	0.01813	0.00093	97	289	115	22	116	6
7	1.02	0.05203	0.00884	0.13022	0.0216	0.01817	0.00085	287	284	124	19	116	5
8	1.12	0.05704	0.00716	0.14459	0.0176	0.0184	0.00076	493	197	137	16	118	5
9	0.71	0.05248	0.00904	0.13105	0.02187	0.01812	0.00093	306	277	125	20	116	6
10	0.9	0.0523	0.00732	0.13092	0.01782	0.01816	0.00078	299	227	125	16	116	5
11	1.41	0.04975	0.01267	0.12445	0.03081	0.01814	0.0012	183	353	119	28	116	8
12	1.82	0.05848	0.00817	0.1494	0.02013	0.01852	0.00086	548	216	141	18	118	5
13	1.89	0.05489	0.00538	0.13933	0.01327	0.0184	0.00065	408	150	132	12	118	4
14	0.97	0.05152	0.00655	0.12919	0.01594	0.01816	0.00073	264	203	123	14	116	5
15	2.63	0.05011	0.00469	0.12618	0.0115	0.01823	0.00061	200	144	121	10	116	4
16	0.9	0.06015	0.0086	0.15295	0.02109	0.0184	0.00086	609	220	145	19	118	5
17	1.89	0.05016	0.00606	0.12659	0.01491	0.01826	0.00068	202	196	121	13	117	4