



胶州湾基底新元古代变花岗岩的发现与地质意义

董 杰, 朱晓青, 窦衍光, 宋维宇, 薛碧颖, 邹 亮

Discovery and geological implications of Neoproterozoic metagranite in Jiaozhou Bay

DONG Jie, ZHU Xiaoqing, DOU Yanguang, SONG Weiyu, XUE Biying, and ZOU Liang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023031002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

风化壳型花岗岩潜山有效储层预测

Prediction of favorable reservoir in granite weathering-crust buried-hill type—A case study of the Baoyunting area on Pinghu slope
海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(2): 160–169

西北孟加拉湾中更新世早期的硅质生物生产力变化

Changes in siliceous paleoproductivity during the early Middle Pleistocene in the Northwest Bay of Bengal
海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(5): 83–93

中国海域前新生代地层分布及其油气勘查方向

Distribution of Pre-Cenozoic strata and petroleum prospecting directions in China Seas
海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(1): 1–25

莱州湾晚第四纪以来沉积物元素地球化学特征及来源

Geochemical characteristics and their geological implication in sediments from Laizhou Bay since late Quaternary
海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(3): 100–110

台湾甲仙地区早上新世冷泉白云岩的地质地球化学特征及沉积环境

Geochemical characteristics of the Early Pliocene cold seep dolomite at Chiah sien, Taiwan and their implications for fluid sources and sedimentary environment
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(3): 85–94

南薇西含油气盆地地层层序及生储盖组合特征

Characteristics of stratigraphic sequence and the source-reservoir-cap assemblages in the Nanweixi petroliferous basin
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 163–173



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

董杰, 朱晓青, 窦衍光, 等. 胶州湾基底新元古代变花岗岩的发现与地质意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(6): 163-174.
DONG Jie, ZHU Xiaoqing, DOU Yanguang, et al. Discovery and geological implications of Neoproterozoic metagranite in Jiaozhou Bay[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(6): 163-174.

胶州湾基底新元古代变花岗岩的发现与地质意义

董杰^{1,2}, 朱晓青^{1,3}, 窦衍光^{1,3}, 宋维宇³, 薛碧颖³, 邹亮^{1,3}

- 自然资源部滨海城市地下空间地质安全重点实验室, 青岛 266101
- 青岛地质工程勘察院, 青岛 266101
- 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

摘要: 胶州湾为青岛市的半封闭海湾, 对湾内基底岩石属性等的基础地质认识是青岛城市重大工程建设与未来城市规划的重要依据。本文借助锆石 U-Pb 测年的方法, 在胶州湾钻孔岩芯中首次发现新元古代变花岗岩质基底, 其形成时代为约 772 Ma, 与区域上苏鲁造山带内广泛分布的新元古代花岗岩同期。钻孔内新元古代变花岗岩下部为早白垩世花岗岩侵入, 花岗岩时代为约 120 Ma, 与毗邻的崂山花岗岩等岩体时代一致。钻孔岩芯中早白垩世花岗岩岩石与新元古代变花岗岩锆石的微量元素分布特征相似, 但其含量值范围更窄。胶州湾早白垩世花岗岩岩浆可能源自新元古代花岗质岩石的重熔。借助锆石 Ti 温度计计算获得胶州湾内新元古代变花岗岩与早白垩世花岗岩岩浆结晶温度均超过 750 °C, 表明锆石结晶的岩浆源区呈水不饱和状态, 暗示两期岩浆活动的动力学机制可能均与洋壳俯冲对应的“大地幔楔”模式无关。

关键词: 新元古代变花岗岩; 早白垩世花岗岩; 基底岩石; 胶州湾

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023031002

Discovery and geological implications of Neoproterozoic metagranite in Jiaozhou Bay

DONG Jie^{1,2}, ZHU Xiaoqing^{1,3}, DOU Yanguang^{1,3}, SONG Weiyu³, XUE Biying³, ZOU Liang^{1,3}

- Key Laboratory of Geological Safety of Coastal Urban Underground Space, Ministry of Natural Resources China, Qingdao 266101, China
- Qingdao Geo-Engineering Surveying Institute, Qingdao 266101, China
- Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China

Abstract: Jiaozhou Bay is a semi-enclosed bay in Qingdao City in Shandong Peninsula, East China. Understanding the main geological frame of the basement rocks in the bay is crucial for large engineering projects and future urban planning in Qingdao. In this study, Neoproterozoic metamorphic granites (ca. 772 Ma) was discovered for the first time from drilling cores in Jiaozhou Bay. The basement rock is contemporaneous with Neoproterozoic granites that widely distributed in the Sulu orogenic belt. The lower part of the Neoproterozoic metamorphic granites in drilling cores was intruded by Early Cretaceous granites in age of ca. 120 Ma, which is consistent with the ages of adjacent Laoshan granites. The trace element distribution patterns of zircons in the Early Cretaceous granites and Neoproterozoic metamorphic granites in the drilling cores of Jiaozhou Bay are similar but showing a narrower range. The Early Cretaceous granite magma in the Jiaozhou Bay area might be derived from the remelting of Neoproterozoic granitic rocks. The crystallization temperatures of the Neoproterozoic metamorphic granites and Early Cretaceous granites determined by using zircon-Ti thermometer are both higher than 750°C, indicating that the source magma were water-undersaturated. This results suggest that the dynamic mechanisms of the two magmatic events may not be related to the oceanic subduction-related "Big mantle wedge" model.

Key words: Neoproterozoic metagranite; early Cretaceous granite; basement rocks; Jiaozhou Bay

胶州湾为山东省青岛市的半封闭海湾, 鉴于其在城市工程建设中的重要地位, 研究胶州湾关键海

域的基础地质特征, 特别是与工程建设紧密相关的活动断裂特征、岩石地层结构等已成为青岛城市地

资助项目: 自然资源部滨海城市地下空间地质安全重点实验室开放课题 (BHKF2021Z06); 中国地质调查局青岛多要素城市地质调查项目 (DD20189230)

作者简介: 董杰 (1981—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事水工环地质研究, E-mail: 13853286966@163.com

通讯作者: 朱晓青 (1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事构造地质与海洋地质等研究, E-mail: xq_zhu0819@126.com

收稿日期: 2023-03-10; 改回日期: 2024-02-28. 张现荣编辑

下空间安全利用首需解决的基础地质问题。针对胶州湾及毗邻地区的基础地质与工程地质研究已有大量的工作,特别是依托青岛海湾大桥、海底隧道等工程的前期地球物理勘察以及城市活动断层海域地震勘探等项目,对胶州湾内基底岩系构成的研究获得了丰富的地质认识^[1-9]。支鹏遥等^[5]曾借助磁力资料,将胶州湾区划分为“三凸四凹”的构造格局,将湾内基底岩石地层单元划分为:古元古代胶南群片麻岩、崂山期花岗岩、白垩纪碎屑岩、部分火山岩(安山岩、玄武岩等)。李官保等^[6]根据国家海洋局第一海洋研究所测获的地球物理探测与钻孔资料提出:胶州湾海底以下基岩类型与相邻陆域一致,包括中早白垩世莱阳群粗碎屑岩、青山群火山岩和王氏群细碎屑岩,以及燕山晚期花岗岩(图 1)。韩宗珠等^[8]根据对胶州湾海底隧道沿线钻获样品的岩石学与地球化学分析,认为胶州湾海底以下基岩类型与相邻陆域基本一致,主要有晚中生代碎屑岩地层和侵入岩,并提出胶州湾内缺少存在新元古代变质岩基底的证据。然而,作为广泛出露于苏鲁造山带,特别是胶州湾毗邻陆区的新元古代变质岩系^[10],其是否存在于胶州湾底基底岩系中,已成为长期悬而未决的基础地质问题。

中国地质调查局青岛海洋地质研究所在实施“青岛城市多要素地质调查项目”过程中,在胶州湾区针对重大工程建设需求进行了多钻孔的钻探研究工作。其中,在 JZW1 与 QDQZ1 孔中钻遇了变花岗岩与花岗岩。根据岩相学、锆石 U-Pb 测年结果,证明该套变花岗岩形成时代为新元古代,这是在胶州湾基底岩系中首次发现新元古代变花岗岩,其分布范围尚待进一步工作圈定。与该套变花岗岩呈上下接触关系的花岗岩形成时代为早白垩世,区域上可与崂山花岗岩对比。在年代学测定的基础上,借助锆石 Ti 饱和温度计、锆石稀土元素特征等,对新元古代变花岗岩与早白垩世花岗岩的成生关系进行了初步探讨。

1 地质背景

胶州湾位于山东半岛东南侧,东西长约 23 km,南北长约 22 km,面积近 500 km²,东南侧有宽超过 3 km 的海峡与南黄海相连,平均水深 20 m 左右,最大深度约 64 m(图 1)。海湾内发育有数条深度 25~50 m 的水下谷地,是难得的天然良港^[2]。胶州湾在大地构造位置上处于苏鲁造山带东段——文登-胶南-威海造山带(隆起)的中部^[5,11],其北侧为胶

莱盆地,南侧以千里岩隆起与南黄海盆地相隔。但近年来众多研究者根据最新地球物理资料(如:航空重力、二维地震、重磁异常、OBS 等)的研判,提出胶莱盆地在海域有相当规模的延伸^[12-15]。因此,综合目前胶州湾及邻区的地质认识,可以推测该海域前新生代的基岩区可能为一受白垩纪早期岩浆活动强烈改造的“大胶莱盆地”的一部分。

随着城市经济发展,胶州湾已成为青岛城市建设众多重大工程项目,如海底隧道、跨海大桥等重大工程建设的必经区域。对胶州湾前第四纪基底岩石属性的准确认识已成为青岛相关城市建设规划的关键一环。中国地质调查局青岛海洋地质研究所“青岛城市多要素地质调查”项目为查明海域、基岩岩性等工程区地质条件,先后于 2018—2019 年委托青岛地质勘察院在胶州湾内实施了 JZW1 与 QDQZ1 等钻孔的钻探取芯工作。其中, QDQZ1 钻孔位置为 36°05′04.590″N、120°16′16.814″E,实际进尺 120.2 m,岩性结构如图 2 所示; JZW1 钻孔位置为 36°05′03.007″N、120°16′13.243″E,实际进尺 151.9 m,钻遇岩性结构如图 2 所示。

2 实验方法与取样

三件变花岗岩样品分别取自 JZW1 孔与 QDQZ1 孔,井下深度分别对应 49.2~49.4 m(JZW1 孔,样品 JZW-01)、80.0~80.4 m(JZW1 孔,样品 JZW-02)与 117.5~117.7 m(QDQZ1 孔,样品 JZW-04)。两件花岗岩样品均取自 JZW1 孔,分别对应井下深度为 95.8~96.2 m 的 JZW-03 样品与深度为 150.4~150.8 m 的 JZW-05 样品(图 2a)。所有样品的锆石挑选、制靶、透反射与阴极发光(CL)照片拍摄均在河北欣航测绘院岩矿实验测试中心进行。按照锆石挑选的标准流程,经过粉碎、重磁分选,在双目镜下挑选出用于定年的锆石。然后将所选锆石固定于环氧树脂靶上,研磨抛光至锆石颗粒的约 1/2,以揭示其内部结构。借助拍摄的锆石的透、反射与阴极发光照片,按照避开包裹体与裂隙的原则,确定进行测试的锆石点位置。

锆石 U-Pb 定年在同济大学海洋地质国家重点实验室利用 LA-ICP-MS 分析完成,所用激光剥蚀系统为 Resolution 193nm ArF 准分子激光剥蚀系统, ICP-MS 型号为 Thermo Elemental X-Series,详细的分析参数见 Yuan 等^[16]。激光剥蚀过程中采用氦气作为载气、氩气为补偿气以调节灵敏度。激光束斑大小和剥蚀频率分别采用 40 μm 和 10 Hz。每个样品

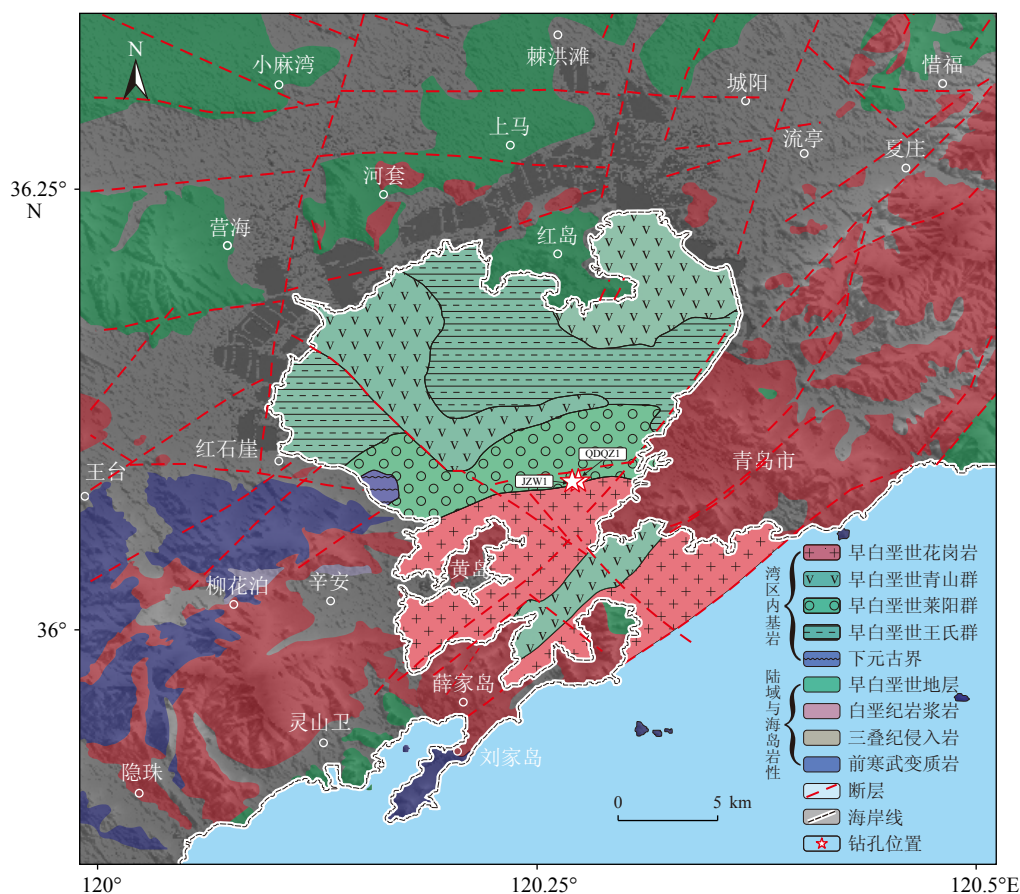


图 1 胶州湾及邻区基岩地质简图

陆区基岩岩性据山东省地质调查院^[10]修改; 胶州湾区基底岩性据李官保等^[6]修改。

Fig.1 Sketched geological map of the basement rocks in Jiaozhou Bay and adjacent areas

Modified after references [6,10].

分析数据包括大约 25 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 (1065.4 ± 0.3 Ma) 作为外标进行同位素分馏校正, 每分析 6 个样品点, 分析 2 次 91500 标样。同时, 采用锆石标准 Plesovice (337.1 ± 0.4 Ma) 来监测分析结果的精确度。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用 ICPMSDataCal 软件^[17]。本文测定的所有样品点的年龄均 < 1000 Ma, 因此, 采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。锆石年龄协和度采用 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄与 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄比值乘以 100% 计算获得; 锆石的微量元素分析与 U-Pb 测试同步获取。

3 实验结果

3.1 岩相学特征

在 JZW-01、JZW-02、JZW-04 等的毗邻深度取

3 块样品用于薄片磨制与鉴定(图 2b), 3 块样品手标本均呈肉红色, 斑状结构, 块状构造。斑晶主要为碱性长石(土化、碳酸盐化), 基质为微—细粒结构。镜下显示岩石主要由碎斑和基质组成, 基质含量近 90%, 少量残留的钾长石碎斑构成旋斑(图 2b, σ 旋斑), 旋斑周围环境呈不同消光位的亚晶粒和重结晶的小颗粒长英质矿物, 部分石英被拉长呈丝带状, 形成条带状的石英集合体, 表明该套岩石遭受较强烈的动力变质作用(变花岗岩), 综合上述镜下特征将其命名为(花岗质)长英质糜棱岩。

在 JZW-03 与 JZW-05 等毗邻深度所取的两块样品(图 2b)均呈浅—肉红色, 肉眼观察矿物以碱性长石、石英为主, 呈半自形粒状结构(花岗结构)。镜下石英干涉色一级灰白—浅黄, 低正凸起。碱性长石斑晶多呈半自形板状, 一级灰白, 以发育格子双晶的微斜长石(Mc)与条纹长石(Pth)为主。主要矿物含量碱性长石约 60%~65%, 石英含量约 35%, 少量黑云母(Bt, 暗化)(图 2b)。综合上述镜下特征

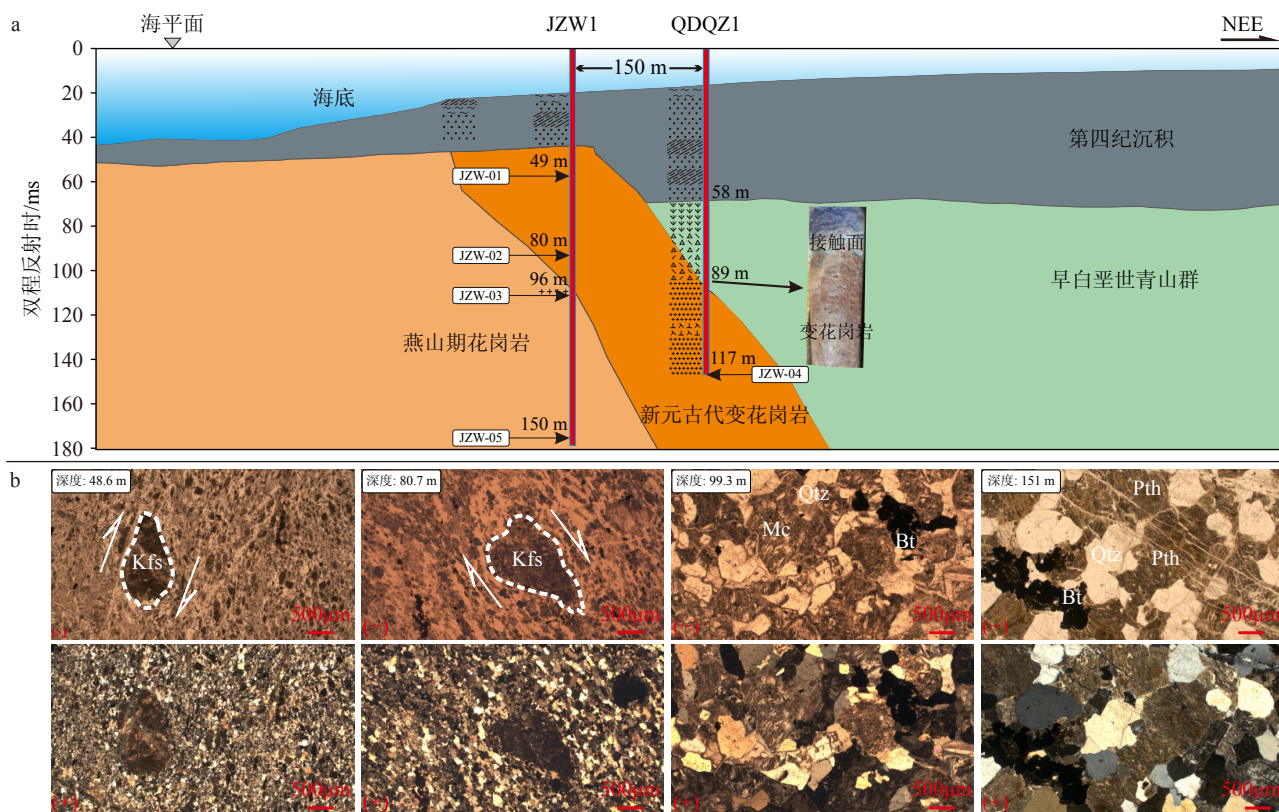


图 2 钻孔剖面构造与样品镜下特征

a: 胶州湾 JZW1 与 QDQZ1 钻孔剖面与取样位置示意图(据窦衍光等^[9]修改); b: JZW1 孔不同深度岩石镜下薄片特征, Kfs=钾长石, Mc=微斜长石, Pth=条纹长石, Bt=黑云母, Qtz=石英。

Fig.2 Sampling locations of borehole profile and photomicrographs of samples

a: Profile and sampling locations of JZW1 and QDQZ1 boreholes in Jiaozhou Bay (modified after reference [9]); b: photomicrographs of rocks at different depths of JZW1 borehole. Kfs: K-feldspar; Mc: microcline; Pth: perthite; Bt: biotite; Qtz: quartz.

将之命名为碱性花岗岩。

3.2 锆石 U-Pb 测年结果

对 5 件样品各选取 30 颗锆石进行 U-Pb 测试, 最终获得锆石 U-Pb 定年对应的锆石微量元素结果各 150 个(附表 1、附表 2)。锆石的透反射及阴极发光照片显示: 所测锆石多呈短柱状, 振荡环带发育(图 3)。Th/U 比值除 JZW-02-5 锆石小于 0.4 (Th/U=0.398)外, 其余所测锆石 Th/U 比值均大于 0.4(图 4), 显示典型的岩浆锆石特征。

JZW1 孔中的 JZW-01 样品锆石 U-Pb 测试 30 个点, 不协和度 > 5% 的点 2 个(附表 1), 加权平均值为 768 ± 14 Ma (MSWD=17, $n=28$, 图 3)。

JZW1 孔中的 JZW-02 样品锆石 U-Pb 测试 30 个点, 不协和度 > 5% 的点 2 个(附表 1), 加权平均值为 772.8 ± 7.8 Ma (MSWD=2.6, $n=28$, 图 3)。

JZW1 孔中的 JZW-03 样品锆石 U-Pb 测试 30 点, 不协和度 > 5% 的点 10 个(附表 1), 除去一个极端值, 加权平均值为 121.4 ± 2.0 Ma (MSWD=3.9,

$n=19$, 图 3)。

QDQZ1 孔中的 JZW-04 样品锆石 U-Pb 测试 30 个点, 不协和度 > 5% 的点 12 个(附表 1), 除去一个极端值, 加权平均值为 772.8 ± 8.7 Ma (MSWD=3.9, $n=17$, 图 3)。

JZW1 孔中的 JZW-05 样品锆石 U-Pb 测试 30 个点, 不协和度 > 5% 的点 13 个(附表 1), 除去一个极端值, 加权平均值为 119.5 ± 2.6 Ma (MSWD=0.18, $n=16$, 图 3)。

3.3 锆石微量元素特征

岩浆锆石生长过程受母岩岩浆成分和共生分离结晶相的制约, 因此, 锆石的微量元素可以提供锆石宿主岩石岩浆的源区性质、成分演化及可能的共生分离相^[18-19]。

本文所测胶州湾区的早白垩世与新元古代锆石的微量元素绝大部分呈现典型的未蚀变岩浆锆石的特征: 轻稀土元素亏损, 重稀土元素含量从 Sm 到 Lu 逐渐升高。锆石稀土元素标准化后^[20], 早

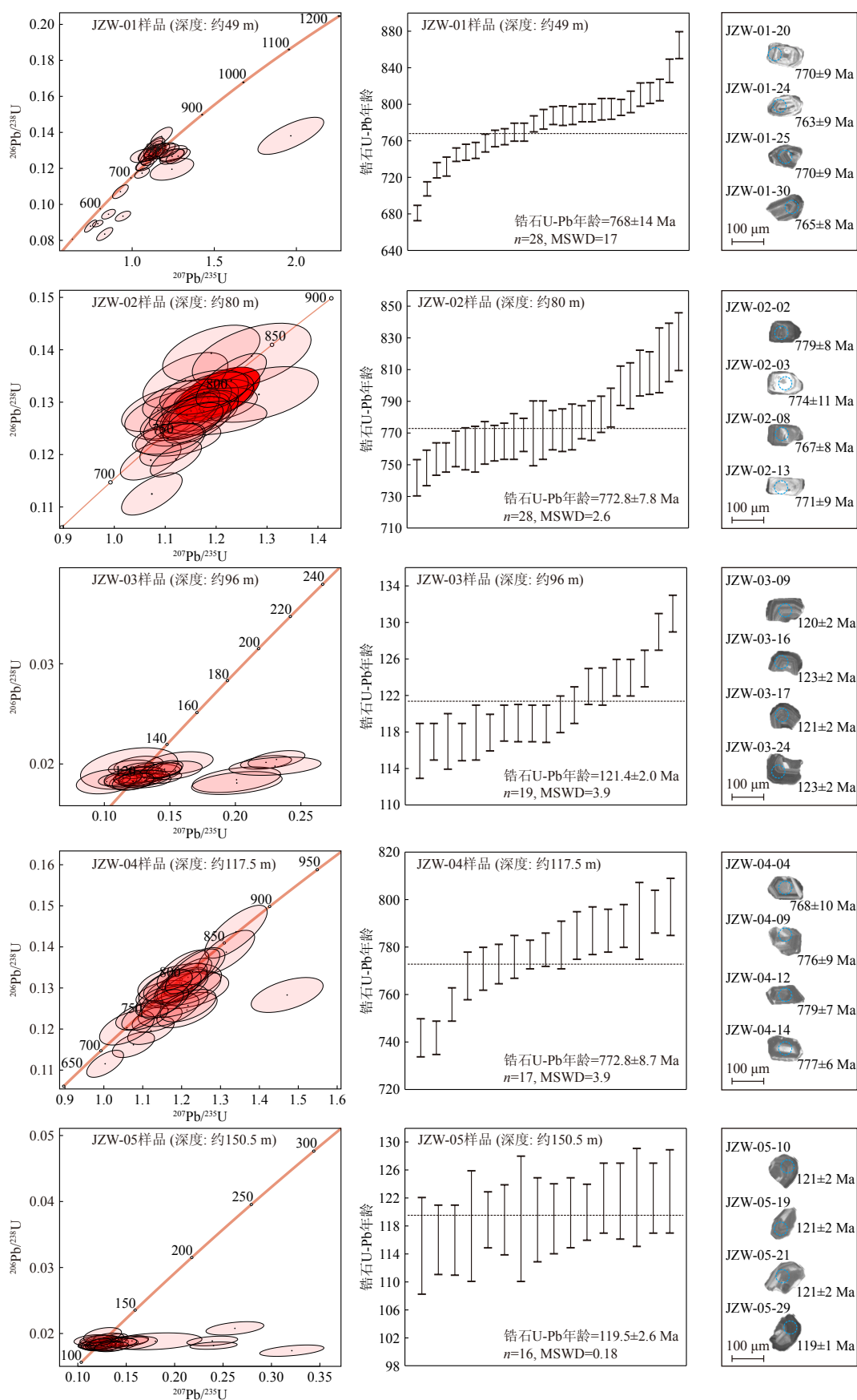


图 3 JZW1 与 QDQZ1 钻孔 5 件样品锆石 U-Pb 协和图、加权平均年龄及代表性锆石 CL 图

Fig.3 Concordia diagrams, weighted mean ages, and typical cathodoluminescence (CL) images of zircons from JZW1 core and QDQZ1 core in Jiaozhou Bay

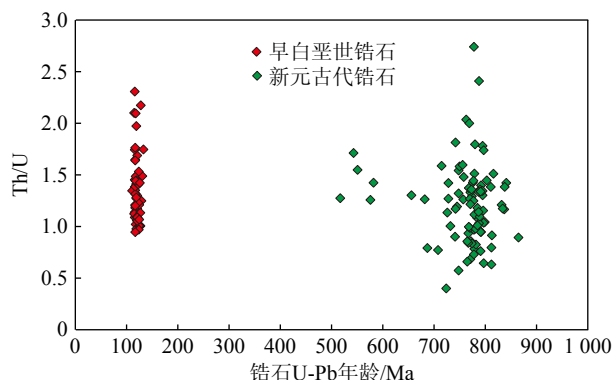


图4 胶州湾早白垩世花岗岩与新元古代变花岗岩中锆石的 Th/U 比值

Fig.4 Th/U ratios of zircons from the Early Cretaceous granite and Neoproterozoic metagranite in Jiaozhou Bay

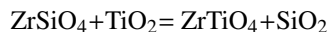
白垩世锆石 δEu 范围为 0.07~0.42, 新元古代锆石的 δEu 范围为 0.04~0.58, 均呈显著的负异常。此外, 早白垩世锆石 δCe =1.0~2.0 范围的颗粒仅 3 颗; 新元古代锆石 δCe 范围在 1.0~2.0 的锆石仅 5 颗, 大部分显示强烈的 Ce 正异常(图 5)。

从不同时代锆石同种稀土元素值的范围来看, 新元古代锆石稀土元素的分布范围要宽于早白垩世锆石, 但总体特征相似, 推测其来源岩浆地化特征可能具有相似性或成生联系。

3.4 锆石来源岩浆结晶温度的计算

锆石中的 Ti 含量与温度密切相关而对压力相对不敏感(约 50~100 °C/GPa)^[18,21], 且在固相条件下变质作用对锆石 Ti 温度影响不大^[22], 该特征使其成为实用性很强的单矿物温度计, 受到众多研究者的关注^[18,21-26]。

锆石 Ti 温度计基于锆石中与温度相关的反应(下式)并与所在岩石的 SiO_2 和 TiO_2 的活度密切相关:



Ferry 和 Watson(2007)^[23] 根据在压力为 1 GPa 条件下“锆石+金红石+硅酸盐熔体/热液”系统的相平衡, 给出了锆石中 Ti 含量与温度的数学表达:

$$\log(\text{Ti}_z) = 5.711 \pm 0.072 - \frac{4800(\pm 86)}{T(\text{K})} - \log(a_{\text{SiO}_2}) + \log(a_{\text{TiO}_2})$$

根据上式可得到锆石结晶温度 T 的计算公式如下:

$$T(\text{K}) = \frac{4800(\pm 86)}{5.711(\pm 0.072) - [\log(\text{Ti}_z) + \log(a_{\text{SiO}_2}) - \log(a_{\text{TiO}_2})]}$$

其中, Ti_z 指锆石中 Ti 的含量, a_{SiO_2} 与 a_{TiO_2} 分别代表岩石中 SiO_2 与 TiO_2 的活度。当岩浆岩中 SiO_2 饱和出现石英单矿物时, $a_{\text{SiO}_2}=1$ ^[23], 由于本文两期(变)花岗岩中石英单矿物均大量出现, 因此, $a_{\text{SiO}_2}=1$ 。Watson 和 Harrison^[21] 认为根据岩浆演化的一般规律, 岩浆中锆石饱和之前 a_{TiO_2} 较高, 建议 a_{TiO_2} 范围在约 0.6~1。需要注意的是, 越来越多的研究显示之前对 TiO_2 活度的高估, 如 Schiller 等^[26] 通过热力学模拟(借助 rhyolite-MELTS 与 Perple_X 软件), 系统研究了岩浆岩中 SiO_2 活度(a_{SiO_2})与 TiO_2 活度(a_{TiO_2})的变化, 发现之前的温度计算模型大多过高估算了 TiO_2 的活度。其进一步提出含钛铁矿的花岗岩(大部分 S 型与 I 型)的 a_{TiO_2} 约为 0.5, 而一些 A 型花岗岩的 a_{TiO_2} 可能更低(0.1~0.5)。

本文钻遇的两期花岗岩中均出现石英晶体, 故 a_{SiO_2} 为 1。由于上述 TiO_2 活度取值标准的差异, 将

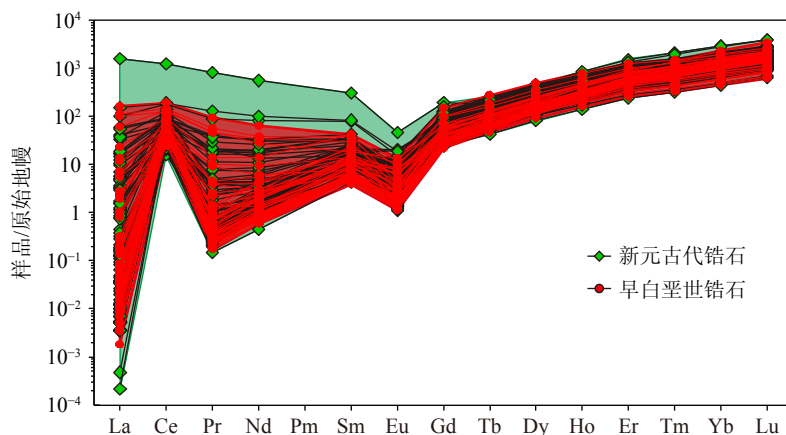


图5 胶州湾早白垩世花岗岩与新元古代变花岗岩中锆石的稀土元素特征
标准化数据为原始地幔值, 据文献[20]。

Fig.5 Rare earth element distribution pattern of zircons from Early Cretaceous granite and Neoproterozoic metagranite in Jiaozhou Bay

The primitive mantle values are from reference [20].

同一锆石的 a_{TiO_2} 分别赋值为 0.9^[27]、0.5、0.3 后计算获得平均晶出温度。新元古代变花岗岩锆石晶出温度分别为: 696、749、799 °C; 早白垩世花岗岩锆石晶出温度分别为: 686、738、788 °C, 结果差异明显(附表 3, 图 6, 图中左上部分标示的数字为平均温度, 括号内数值为标准偏差)。

鉴于此次未对钻孔岩心中的样品进行同步微量元素的分析, 本文参考胶州湾邻区苏鲁造山带内及崂山花岗岩的 A 型或 I-A 复合型花岗岩的地区化学特征^[28-29], 采用 a_{TiO_2} 为 0.3(实际可能更低)时计算出的锆石晶出温度(新元古代花岗岩中锆石晶出温度为约 799 °C; 早白垩世花岗岩中锆石晶出温度为约 788 °C)进行讨论。

4 讨论

4.1 胶州湾新元古代变花岗岩及早白垩世花岗岩的区域对比

胶州湾地区大地构造位置上处于苏鲁造山带, 该带内广泛出露新元古代花岗岩^[10, 30-31]。与胶州湾新元古代变花岗岩同期的侵入岩主要包括月季山片麻岩套与铁山岩套。据 1:25 万青岛市幅区域

地质调查报告^[10], 月季山片麻岩套普遍经历绿片岩相变质作用, 部分地区形成韧性剪切带。该岩体侵入古元古代荆山群、中元古代侵入岩及荣成片麻岩套中, 又被铁山片麻岩套及中生代侵入岩所侵入, 时代约 755~804 Ma。最近, 王斌等^[31]根据山东省不同时期花岗岩的地球化学分析结果, 认为铁山片麻岩套(毗邻胶州湾地区的露头主要分布于胶南铁山)由早期的正长花岗质片麻岩与晚期的碱性花岗质片麻岩等两种类型花岗岩组成, 且以后者为主, 时代分别为约 783 Ma 与 623 Ma(据单锆石 Pb-Pb 同位素年龄)。此外, 铁山岩套以碱性长石含量高、含霓石等碱性矿物及榴辉岩包体等特征区别于月季山岩套。根据本文最新获得的胶州湾新元古代变花岗岩镜下薄片分析结果, 未发现相关暗色碱性矿物(图 2b)。因此, 无论从年代学还是岩相学特征分析, 胶州湾最新发现的新元古代变花岗岩与月季山片麻岩套特征更相似。该套岩石区域上普遍经历三叠纪(约 222~213 Ma 或 250~205 Ma)的变质事件, 其原岩应为源自于扬子板块北缘的变质基底, 并与 Rodinia 超大陆裂解存在密切成因关系^[30, 32]。

在胶州湾外毗邻陆区有大量的新元古代变花岗岩露头, 有确切测年结果报道的如青岛即墨拖车乔新元古代变花岗岩(约 770 Ma)^[33]、青岛连三岛的

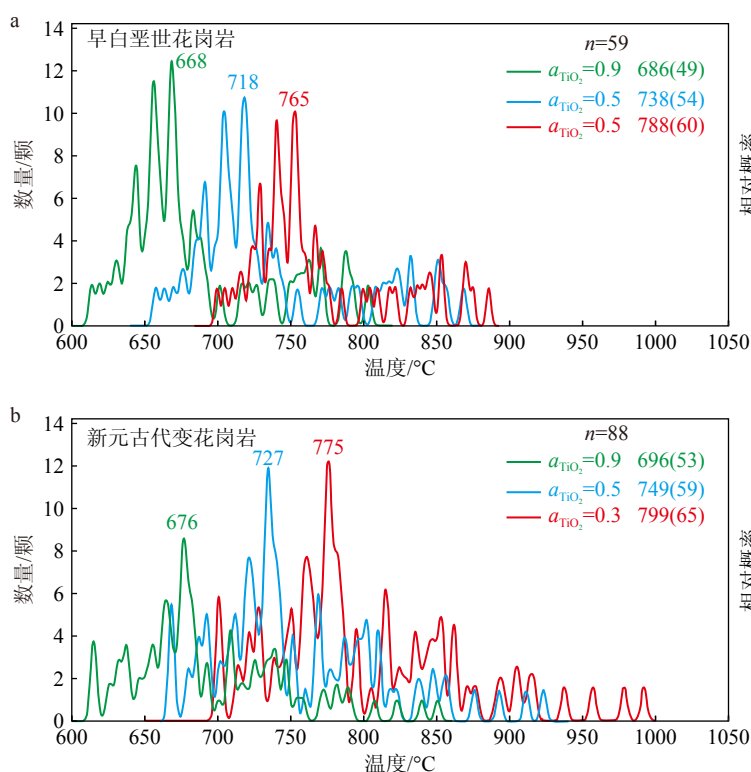


图 6 锆石 Ti 温度计计算获得的胶州湾早白垩世花岗岩 (a) 与新元古代变花岗岩 (b) 锆石晶出的温度分布图

Fig.6 Ti-in-zircon thermometer results for the Early Cretaceous granite and Neoproterozoic metagranite in Jiaozhou Bay

变火成岩(744~762 Ma)^[34]、即墨马连山地区的花岗片麻岩(770.2±2.4 Ma)^[35]等,其时代均与本文在胶州湾区新元古代变花岗岩所测结果在误差范围内一致。如引言中所述,前期由于在钻孔中未发现新元古代岩石露头,导致对湾内的基岩划分方案中未涉及该套岩石^[6,8]。根据本文 JZW1 孔与 QDQZ1 孔中新元古代变花岗岩的岩性分析,两孔间隔约 150 m,连线走向 NEE,视厚度超过 50 m(图 2)。据上述资料,笔者推测其在胶州湾海底“有根”并延伸至早白垩世青山群之下,很可能与古元古代变质岩系一并构成“大胶莱盆地”的基底(图 2)。而同时作为苏鲁带北段主体岩性之一的新元古代变花岗岩在早白垩世被崂山花岗岩大规模侵入。需要注意的是,侯建华等^[35]所指的该新元古代变花岗岩体是否是真正的“捕虏体”,还需要确定其是否“有根”。

早白垩世花岗岩广泛出露于胶州湾周缘陆区,崂山花岗岩是其典型代表。崂山花岗岩岩基出露面积约 600 km²^[29,36]。赵广涛等^[28]根据岩性与地球化学特征差异,将崂山花岗岩划分为两大岩套(钙碱性岩套与碱性岩套)、四个单元(石英二长岩、黑云二长花岗岩、正长花岗岩、碱性花岗岩),并借助锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 协和年龄确定其形成时间分别为 146.8、126.2、113 和 110.8 Ma。Goss^[37]等对崂山碱性花岗岩的测年获得年龄为 115±2 Ma。Gao 等^[34]对崂山碱长花岗岩进行全岩 Rb-Sr 等时线定年,测获年龄为约 126 Ma,锆石的测年结果为约 120 Ma,两者在误差范围内一致。王来明等^[38]按照形成时代相同、区域分布广泛、成因相关、岩性相同等原则将胶东地区中生代花岗岩划分为四期。根据其划分结果,胶州湾毗邻地区主要分布有早白垩世晚

期的伟德山期(110~123 Ma)和崂山期(108~120 Ma)两期花岗岩。最近,刘瑞杨等^[39]对同属崂山期花岗岩的大珠山花岗岩进行锆石 U-Pb 测年获得年龄为 113.1±0.36 Ma 等。

因此,本文在胶州湾所测 JZW-03(121.4±2.0Ma)与 JZW05(119.5±2.6Ma)等两块花岗岩样品的时代与岩性与毗邻陆区的崂山期花岗岩完全可以对比,应为同一岩基。

4.2 胶州湾新元古代变花岗岩与早白垩世花岗岩的来源

如 3.3 所述,胶州湾区新元古代变花岗岩与早白垩世花岗岩中锆石的稀土元素配分曲线均表现为典型的岩浆锆石特征。Grimes 等^[40]曾借助 U-Yb、U/Yb-Y 或 Hf 图解对来自于大西洋中部和印度洋西南部慢速扩张脊的辉长岩中的 300 多颗锆石与来自已知大陆地壳的 1 700 多颗锆石进行了有效区分。本文也尝试借助锆石的 U/Yb-Y 与 U/Yb-Hf 图解以区分胶州湾两期花岗岩中锆石的来源(图 7),结果显示:除少量新元古代锆石可能结晶于金伯利岩或碳酸岩源区外(同时表现为 Ce 弱正异常^[41]),两期锆石源区有相当比例位于洋壳与大陆壳重叠区域,不易区分。但与稀土元素配分曲线特征一样,新元古代锆石的分布范围较早白垩世锆石要显著宽泛,两者表现为明显的包含关系。

根据锆石的 Y-U、Yb/Sm-Y 判别图解^[42],胶州湾新元古代与早白垩世锆石所对应的原岩类型与岩相学鉴定结果(3.1)也基本一致,绝大部分落于富含钾长石的花岗岩区,两者投点的分布范围也高度重合(图 8)。

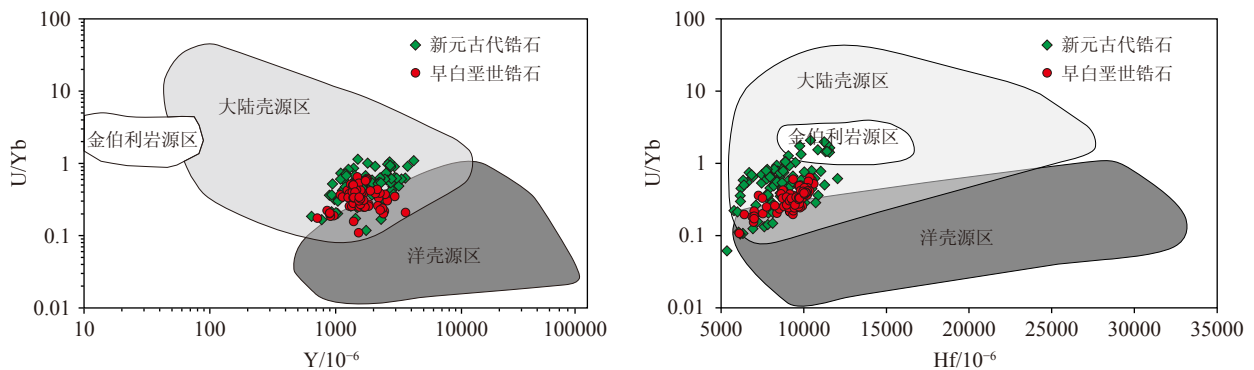


图 7 胶州湾早白垩世花岗岩与新元古代变花岗岩锆石来源岩浆属性判别
底图据文献 [40]。

Fig.7 Discriminant diagrams with continental and ocean crust zircon fields for zircons from Early Cretaceous granite and Neoproterozoic metagranite in Jiaozhou Bay
Modified after reference [40].

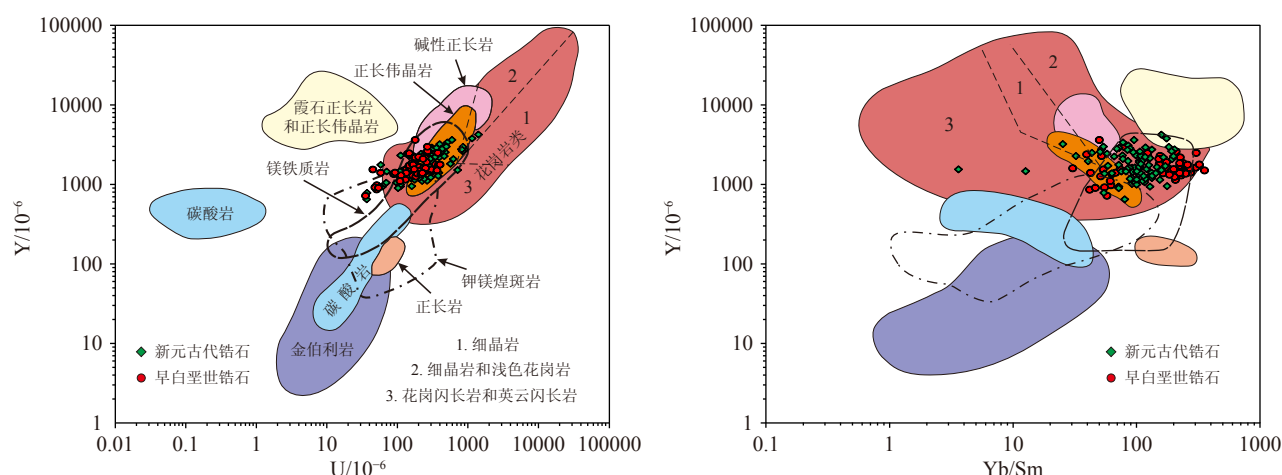


图 8 胶州湾早白垩世花岗岩与新元古代变花岗岩中锆石来源岩石类型判别图

底图据文献 [42]。

Fig.8 The fields of zircon compositions used as discriminants for different rocks types

Modified after reference [42].

Harrison 等 [24] 通过计算指出大多数温度在 $>750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下形成的火成岩, 据其锆石 Ti 温度计计算出的温度均落于花岗岩湿固相线之上。该结论也得到了西藏东南部达拉地区火成杂岩测试结果的验证; 若温度 $<680\text{ }^{\circ}\text{C}$, 则证明锆石来源岩浆岩区为水近饱和条件下发生的熔融。本文借助锆石 Ti 温度计计算获得的胶州湾新元古代(变)花岗岩与早白垩世碱性花岗岩中锆石结晶时岩浆温度均高于 $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这表明胶州湾新元古代变花岗岩与早白垩世花岗岩中锆石结晶时的岩浆环境为水欠饱和状态, 暗示两期岩浆活动的动力学机制可能均与大规模洋壳俯冲所对应的“大地幔楔”(富水熔融)模式无关。

Wei 等 [36] 对崂山花岗岩中的锆石进行了 O 同位素分析, 结果显示 17 颗测试锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值为 $5.05\text{ }^{\circ}\text{‰} \pm 0.28\text{ }^{\circ}\text{‰}$, 显著低于正常地幔值 ($5.3\text{ }^{\circ}\text{‰} \pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{‰}$)。所测锆石具有的相对均一的低 $\delta^{18}\text{O}$ 值、石英与锆石间高温氧同位素分馏特征等均证明, 崂山花岗岩的岩浆必定有具低 $\delta^{18}\text{O}$ 值的地壳组分的加入。Wei 等 [36] 进一步提出了低 $\delta^{18}\text{O}$ 值 A 型花岗岩岩浆形成的两阶段模式: ① ^{18}O 亏损的地壳火成岩在亚固态条件下经历地表水蚀变; ② ^{18}O 亏损的地壳物质经历深埋和脱水作用, 随后由于岩石圈伸展而形成低 $\delta^{18}\text{O}$ 的 A 型花岗岩岩浆。有意思的是, 在扬子北缘出露面积超过 $2\text{ } \text{km}^2$ 的新元古代中期具有低 $\delta^{18}\text{O}$ 值的岩浆岩带 [32]。Zheng 等 [32] 和郑永飞等 [43] 认为扬子板块北缘在新元古代中期卷入 Rodinia 超大陆裂解事件, 而时间恰与“雪球地球”事件准同时。该时期扬子北缘的古纬度在约 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}\text{N}$, 岩

浆作为热源导致冰川融水并加入裂谷带内部深循环和热液蚀变过程, 导致扬子北缘新元古代中期出现大面积双模式低 $\delta^{18}\text{O}$ 岩浆活动, 进而结晶出大量低 $\delta^{18}\text{O}$ 锆石。因此, 该区新元古代的花岗质岩浆源自于超大陆裂解背景下的裂谷作用, 与洋壳俯冲无关。早白垩世具低 $\delta^{18}\text{O}$ 值锆石的崂山花岗岩, 其岩浆来源则很可能为扬子板块北缘-苏鲁带广泛分布的新元古代中期(变)花岗岩。

赵涛等 [28-29] 根据野外调查结合主要矿物组成将崂山花岗岩划分为钙碱性岩套与碱性岩套 (I-A 复合型花岗岩), 其进一步根据同位素示踪及成岩机理研究结果提出: 早白垩世崂山花岗岩起源于下地壳基底变质岩的部分熔融。其中的钙碱性岩套形成于造山晚期的挤压(或由挤压向张扭转化)的背景, 而碱性岩套则位于张扭性构造环境(燕山晚期造山幕幕结束的标志)。韩宗珠等 [8] 依据胶州湾隧道区 8 件基性-中性-酸性岩浆岩样品的主微量元素特征, 认为胶州湾该期岩浆活动与俯冲引起的地幔熔融在上升过程中混染地壳物质有关。Gao 等 [34] 通过对崂山花岗岩的 Nd、Hf 与 Pb 同位素分析结果提出其来源岩浆明显有来自下地壳的贡献, 将其动力学机制解释为滞留在地幔过渡带的古太平洋板片脱水造成岩石圈减薄并产生基性岩浆, 基性岩浆底侵进而导致发生部分熔融产生花岗质岩浆。刘瑞杨等 [39] 根据同属崂山期的黄岛大珠山花岗岩的地球化学分析结果, 提出其为准过铝质钙碱性系列、高分异的 I-S 型花岗岩, 岩浆来源于地幔柱上涌引起的地壳物质的部分熔融, 属于硅质大火成岩的一部分。需要注意的是, 花岗岩的地球化学特征是

否一定对应特定的构造背景及是否具有普适性等,长期以来存在争议。近年, Li 等^[44]针对青藏高原东南部的松潘-甘孜造山带同时期(约 213~198 Ma)且具同一构造背景(古特提斯闭合与后碰撞)下却发育几乎所有已知类型花岗岩(A 型、S 型、I 型及高 Ba-Sr 型)的问题,借助 O-Li-B-Mg 稳定同位素进行了研究,明确提出参与形成花岗岩岩浆的沉积物质特征影响甚至决定了花岗岩的类型,此种情况下借助类型学直接解释其成因非常困难。

东亚大陆边缘燕山期大规模岩浆活动的地球动力学机制长期以来存在争论,其中(古)太平洋板块的西向俯冲是否是主控因素为重要分歧之一。张旗^[45]根据我国东部中生代缺少岛弧花岗岩和岛弧玄武岩、太平洋板块俯冲时空特征与岩浆活动不匹配等,提出我国东部中生代岩浆活动与太平洋板块向西俯冲无关。现今地球物理探测观察到的俯冲于东亚大陆之下的西太平洋滞留板片是 20~30 Ma 才发生的,西太平洋板片开始俯冲到东亚大陆边缘的时间是新生代早期的始新世^[46]。本文根据胶州湾早白垩世碱性花岗岩中锆石 Ti 温度计的计算结果(3.4 部分),推测锆石结晶时的岩浆环境为水不饱和状态,与洋-陆大规模俯冲的富水的“大地幔楔”(Big Mantle Wedge)模式不符。胶州湾邻区在同时期出露有大量“C 型”埃达克岩,如即墨马山^[47]、文登长山南、胶东六度寺及泰薄顶等^[48],表明该时期为区域地壳增厚的构造背景。此外,根据胶州湾周缘同期岩浆岩中普遍出现扬子板块的组分^[47,49],我们认为胶州湾早白垩世花岗岩形成于燕山晚期的区域性挤压导致地壳增厚,进一步使原俯冲于华北板块之下的扬子板块部分熔融的构造背景。

综上所述,根据胶州湾新元古代变花岗岩锆石与早白垩世碱性花岗岩中锆石年龄学、微量元素,结合已发表的崂山花岗岩与苏鲁带新元古代花岗岩中锆石 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素特征,我们推测:①与扬子北缘广泛分布的新元古代花岗岩相似,胶州湾新元古代变花岗岩形成于与 Rodinia 超大陆裂解相关的构造背景下,后期随着扬子板块与华北板块的会聚碰撞卷入苏鲁造山带内并经历三叠纪的动力变质作用;②早白垩世,随着扬子板块与华北板块间燕山期的叠覆造山作用(扬子板块向华北板块下进一步俯冲-挤压-会聚),处于地壳深部的新元古代花岗岩升温熔融,成为胶州湾及邻区崂山期花岗岩的岩浆源区。

但需要注意的是,在本文钻孔内的早白垩世花岗岩以及崂山花岗岩中均未发现新元古代年龄的

继承性锆石。根据早白垩世锆石 Ti 饱和温度计计算获得的锆石结晶温度高于 750 °C ($a_{\text{TiO}_2}=0.3$),岩浆结晶的温度应更高,据此推测胶州湾钻孔内早白垩世花岗岩的来源岩浆的熔融温度可能已超过锆石 U-Pb 的封闭体系温度(超过 850 °C 乃至 900 °C)^[50-52],造成了封闭体系失效、计时重置。

5 结论

(1)JZW1 与 QDQZ1 钻孔变花岗岩中锆石的定年结果证明:胶州湾第四系之下存在经历动力变质作用的新元古代变花岗岩。这是关于胶州湾区存在新元古代变花岗岩基底的首次报道,其在湾内的展布范围尚需进一步工作的圈定。

(2)根据锆石稀土元素等特征,推测胶州湾内早白垩世花岗岩来源岩浆可能源自新元古代变花岗岩的高温熔融。

(3)胶州湾内新元古代变花岗岩与早白垩世花岗岩的锆石记录的晶出温度均超过 750 °C,表明来源岩浆均为水不饱和状态,推测两者形成的动力学机制均与大规模洋壳俯冲所对应的“大地幔楔”模式无关。胶州湾内新元古代变花岗岩可能与扬子北缘新元古代的 Rodinia 超大陆裂解事件有关,而早白垩世花岗岩岩浆则可能与燕山晚期苏鲁带叠覆造山深部基性岩浆上涌导致新元古代花岗岩经历高温熔融有关。

注:附表见 <http://jhydz.com.cn/article/doi/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023031002>

参考文献 (References)

- [1] 张金川. 南黄海海域构造单元的重新命名及其特征对比 [J]. 海洋地质动态, 1995(6): 3-5. [ZHANG Jinchuan. The renaming of the tectonic units in the south yellow sea and their characteristics comparison[J]. Marine Geology Letters, 1995(6): 3-5.]
- [2] 栾光忠, 刘红军, 范德江. 青岛胶州湾地质特征及其成因 [J]. 海洋湖沼通报, 1998(3): 18-23. [LUAN Guangzhong, LIU Hongjun, FAN Dejiang. The geological feature and origin of the Jiaozhou Bay in Qingdao[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1998(3): 18-23.]
- [3] 栾光忠, 张海平. 青岛沧口-温泉断裂的空间展布及现代活动性研究 [J]. 地震地质, 2001, 23(1): 63-68. [LUAN Guangzhong, ZHANG Haiping. Plane geometry and mordern activity of the Qingdao Cangkou-Wenquan fault[J]. Seismology and Geology, 2001, 23(1): 63-68.]
- [4] 郭玉贵, 邓志辉, 尤惠川, 等. 青岛沧口断裂的地质构造特征与第四

- 纪活动性研究[J]. *震灾防御技术*, 2007, 2(2): 102-115. [GUO Yugui, DENG Zhihui, YOU Huichuan, et al. Geological features and Quaternary activities of Cangkou fault in Qingdao, China[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2007, 2(2): 102-115.]
- [5] 支鹏遥, 刘保华, 李西双, 等. 胶州湾湾口区的地质特征[J]. *海洋地质动态*, 2008, 24(2): 11-14, 27. [ZHI Pengyao, LIU Baohua, LI Xishuang, et al. Geological characteristics of Baymouth area of Jiaozhou bay[J]. *Marine Geology Letters*, 2008, 24(2): 11-14, 27.]
- [6] 李官保, 刘保华, 韩国忠, 等. 胶州湾基岩类型与分布特征研究[J]. *海洋科学进展*, 2009, 27(1): 34-41. [LI Guanbao, LIU Baohua, HAN Guozhong et al. Types and distributions of bed rocks in the Jiaozhou Bay[J]. *Advances in Marine Science*, 2009, 27(1): 34-41.]
- [7] 栾光忠, 王红霞, 尹明泉, 等. 青岛城市主要断裂构造特征以及对城市地质环境的影响[J]. *地球学报*, 2010, 31(1): 102-108. [LUAN Guangzhong, WANG Hongxia, YIN Mingquan, et al. Characteristics of main faulted structures in Qingdao City and their influence on urban geological environment[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2010, 31(1): 102-108.]
- [8] 韩宗珠, 宋红瑛, 张贺, 等. 青岛胶州湾口海底隧道火成岩岩石地球化学及成因[J]. *海洋湖沼通报*, 2012(2): 11-21. [HAN Zongzhu, SONG Hongying, ZHANG He, et al. Study of Geochemistry and cause of formation of igneous rocks of cross-harbour tunnel in the mouth of Jiaozhou Bay of Qingdao[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2012(2): 11-21.]
- [9] 窦衍光, 印萍, 陈斌, 等. 滨海基岩城市地质调查成果应用探索与理论技术创新: 以青岛市为例[J]. *海洋地质前沿*, 2019, 37(9): 1-9. [DOU Yanguang, YIN Ping, CHEN Bin, et al. Application exploration, theoretical and technological innovation of geological survey results in coastal bedrock city: Taking Qingdao as an example[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2019, 37(9): 1-9.]
- [10] 山东省地质调查院. 1: 25万青岛市幅区域地质调查报告与地质图[R]. 2004: 1-420. [Shandong Institute of Geological Survey. 1: 250000 Qingdao regional geological survey report and geological map[R]. 2004: 1-420.]
- [11] 李桂群. 青岛区域构造特征及其与地震的关系[J]. *海洋湖沼通报*, 1994(3): 26-32. [LI Guiqun. The regional structure characteristics and their relation to earthquakes in Qingdao area[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 1994(3): 26-32.]
- [12] 侯方辉, 田振兴, 张训华, 等. 南黄海盆地两条地震剖面的重磁数据联合反演效果[J]. *石油地球物理勘探*, 2012, 47(5): 808-814. [HOU Fanghui, TIAN Zhenxing, ZHANG Xunhua, et al. Joint inversion of gravity, magnetic and seismic data of the South Yellow Sea Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2012, 47(5): 808-814.]
- [13] 张玄杰, 张婉, 范子梁, 等. 南黄湖北部航空重力场特征及主要地质认识[J]. *中国地质调查*, 2017, 4(1): 50-56. [ZHANG Xuanjie, ZHANG Wan, FAN Ziliang, et al. Characteristics of airborne gravity field and the main geological discovery in the northern South Yellow Sea[J]. *Geological Survey of China*, 2017, 4(1): 50-56.]
- [14] 孙中宇, 刘展, 杨博, 等. 海阳凹陷东、西边界以及胶莱盆地东部边界讨论[J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(5): 2166-2171. [SUN Zhongyu, LIU Zhan, YANG Bo, et al. Discussion on the eastern and western boundary of Haiyang depression and eastern boundary of Jiaolai Basin[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(5): 2166-2171.]
- [15] 祁江豪, 吴志强, 张训华, 等. 胶莱盆地在南黄海的延伸: 来自OBS深地震探测的新证据[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2019, 49(1): 106-114. [QI Jianghao, WU Zhiqiang, ZHANG Xunhua, et al. Extension of Jiaolai basin into Qianliyan uplift in south yellow sea: new evidence from OBS deep seismic detection[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2019, 49(1): 106-114.]
- [16] Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2004, 28(3): 353-370.
- [17] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15): 1535-1546.
- [18] 高晓英, 郑永飞. 金红石 Zr 和锆石 Ti 含量地质温度计[J]. *岩石学报*, 2011, 27(2): 417-432. [GAO Xiaoying, ZHENG Yongfei. On the Zr-in-rutile and Ti-in-zircon geothermometers[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(2): 417-432.]
- [19] 雷玮琰, 施光海, 刘迎新. 不同成因锆石的微量元素特征研究进展[J]. *地学前缘*, 2013, 20(4): 273-284. [LEI Weiyan, SHI Guanghai, LIU Yingxin. Research progress on trace element characteristics of zircons of different origins[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(4): 273-284.]
- [20] McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3-4): 223-253.
- [21] Watson E B, Wark D A, Thomas J B. Crystallization thermometers for zircon and rutile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 151(4): 413-433.
- [22] Fu B, Page F Z, Cavosie A J, et al. Ti-in-zircon thermometry: applications and limitations[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2008, 156(2): 197-215.
- [23] Ferry J M, Watson E B. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2007, 154(4): 429-437.
- [24] Harrison T M, Watson E B, Aikman A B. Temperature spectra of zircon crystallization in plutonic rocks[J]. *Geology*, 2007, 35(7): 635-638.
- [25] Hayden L A, Watson E B. Rutile saturation in hydrous siliceous melts and its bearing on Ti-thermometry of quartz and zircon[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 258(3-4): 561-568.
- [26] Schiller D, Finger F. Application of Ti-in-zircon thermometry to granite studies: problems and possible solutions[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2019, 174(6): 51.
- [27] Ghent E D, Stout M Z. TiO_2 activity in metamorphosed pelitic and basic rocks: principles and applications to metamorphism in southeastern Canadian Cordillera[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1984, 86(3): 248-255.
- [28] 赵广涛, 王德滋, 曹钦臣. 崂山花岗岩岩石地球化学与成因[J]. *高校地质学报*, 1997, 3(1): 1-15. [ZHAO Guangtao, WANG Dezi, CAO Qinchun. The Geochemistry and genesis of the Laoshan granitoids, Shandong Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 1997, 3(1): 1-15.]
- [29] 赵广涛, 王德滋, 曹钦臣, 等. I-A型复合花岗岩体的热演化及其意义: 以崂山花岗岩体为例[J]. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(4): 296-302.

- [ZHAO Guangtao, WANG Dezi, CAO Qinchun, et al. Thermal evolution and its significance of I-A type granitoid complex The Laoshan Granitoid as an example[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1998, 41(5): 529-536.]
- [30] 刘利双, 刘福来, 冀磊, 等. 北苏鲁超高压变质带内多成因类型的变花岗质岩石及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2018, 34(6): 1557-1580. [LIU Lishuang, LIU Fulai, JI Lei, et al. The polygenetic meta-granitic rocks and their geological significance, within the North Sulu ultrahigh-pressure belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(6): 1557-1580.]
- [31] 王斌, 宋明春, 周建波, 等. 山东省四期 A 型花岗岩类及其对大地构造演化的启示 [J]. *华北地质*, 2022, 45(2): 1-17. [WANG Bin, SONG Mingchun, ZHOU Jianbo, et al. Four stages A-type granitoids in Shandong Province and their implications for tectonic evolution[J]. *North China Geology*, 2022, 45(2): 1-17.]
- [32] Zheng Y F, Wu Y B, Chen F K, et al. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale ^{18}O depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(20): 4145-4165.
- [33] Zhu D C, Lü D W, Shen X L, et al. Discovery and geological significance of neoproterozoic metamorphic granite in Jimo, Shandong province, eastern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(6): 2080-2096.
- [34] Gao Y J, Niu Y L, Duan M, et al. The petrogenesis and tectonic significance of the Early Cretaceous intraplate granites in eastern China: The Laoshan granite as an example[J]. *Lithos*, 2019, 328-329: 200-211.
- [35] 侯建华, 任天龙, 杨仕鹏, 等. 山东即墨马连山地区新元古代花岗质片麻岩捕虏体的发现及其地质意义 [J]. *地质调查与研究*, 2016, 39(2): 81-88. [HOU Jianhua, REN Tianlong, YANG Shipeng, et al. The discovery of Neo proterozoic granitic gneiss xenolith in Malianshan of Jimo, Shandong province, and its geological significance[J]. *Geological Survey and Research*, 2016, 39(2): 81-88.]
- [36] Wei C S, Zhao Z F, Spicuzza M J. Zircon oxygen isotopic constraint on the sources of late Mesozoic A-type granites in eastern China[J]. *Chemical Geology*, 2008, 250(1-4): 1-15.
- [37] Goss S C, Wilde S A, Wu F Y, et al. The age, isotopic signature and significance of the youngest Mesozoic granitoids in the Jiaodong Terrane, Shandong Province, North China Craton[J]. *Lithos*, 2010, 120(3-4): 309-326.
- [38] 王来明, 任天龙, 刘汉栋, 等. 胶东地区中生代花岗岩划分 [J]. *山东国土资源*, 2021, 37(8): 1-14. [WANG Laiming, REN Tianlong, LIU Handong, et al. Division of Mesozoic granites in Jiaodong area[J]. *Shandong Land and Resources*, 2021, 37(8): 1-14.]
- [39] 刘瑞杨, 周瑶琪, 周腾飞, 等. 青岛大珠山高分异花岗岩地球化学特征与含矿性分析 [J]. *地质论评*, 2023, 69(1): 179-198. [LIU Ruiyang, ZHOU Yaoqi, ZHOU Tengfei, et al. Geochemical characteristics and mineralization analysis of Dazhushan highly differentiated granite[J]. *Geological Review*, 2023, 69(1): 179-198.]
- [40] Grimes C B, John B E, Kelemen P B, et al. Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance[J]. *Geology*, 2007, 35(7): 643-646.
- [41] Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 27-62.
- [42] Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143(5): 602-622.
- [43] 郑永飞, 陈福坤, 龚冰, 等. 大别-苏鲁造山带超高压变质岩原岩性质: 锆石氧同位素和 U-Pb 年龄证据 [J]. *科学通报*, 2003, 48(2): 110-119. [ZHENG Yongfei, CHEN Fukun, GONG Bing, et al. Protolith properties of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt: Evidence from zircon oxygen isotope and U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(2): 110-119.]
- [44] Li S, Miller C F, Tao W, et al. Role of sediment in generating contemporaneous, diverse “type” granitoid magmas[J]. *Geology*, 2021, 50(4): 427-431.
- [45] 张旗. 中国东部中生代岩浆活动与太平洋板块向西俯冲有关吗?[J]. *岩石矿物学杂志*, 2013, 32(1): 113-128. [ZHANG Qi. Is the Mesozoic magmatism in eastern China related to the westward subduction of the Pacific plate?[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2013, 32(1): 113-128.]
- [46] 郑永飞, 吴福元. 克拉通岩石圈的生长和再造 [J]. *科学通报*, 2009, 54(14): 1945-1949. [ZHENG Yongfei, WU Fuyuan. Growth and reworking of cratonic lithosphere[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(19): 3347-3353.]
- [47] 朱晓青, 侯方辉, 刘洪滨, 等. 山东即墨马山粗面英安岩年代学与地球化学特征及其地质意义 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(6): 138-150. [ZHU Xiaoqing, HOU Fanghui, LIU Hongbin, et al. Geochronology and geochemistry of Mashan trachydacite, JiMo District, Shandong Province and their geological implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(6): 138-150.]
- [48] 张旗, 王焰, 熊小林, 等. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2008: 1-344. [ZHANG Qi, WANG Yan, XIONG Xiaolin, et al. Adakite and Granite: Challenges and Opportunities[M]. Beijing: China Land Press, 2008: 1-344.]
- [49] 何登洋, 邱昆峰, 于皓丞, 等. 华北克拉通胶莱盆地马山地区早白垩世粗面英安岩岩石成因 [J]. *岩石学报*, 2020, 36(12): 3705-3720. [HE Dengyang, QIU Kunfeng, YU Haocheng, et al. Petrogenesis of the Early Cretaceous trachy-dacite from Mashan in the Jiaolai Basin, North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(12): 3705-3720.]
- [50] Cherniak D J, Watson E B. Pb diffusion in zircon[J]. *Chemical Geology*, 2001, 172(1-2): 5-24.
- [51] Lee J K W, Williams I S, Ellis D J. Pb, U and Th diffusion in natural zircon[J]. *Nature*, 1997, 390(6656): 159-162.
- [52] 章邦桐, 凌洪飞, 吴俊奇, 等. “花岗岩浆晶出锆石 U-Pb 体系的封闭温度 $\geq 850^\circ\text{C}$ ” 质疑: 基于元素扩散理论、锆石 U-Pb 年龄与全岩 Rb-Sr 年龄对比的证据 [J]. *地质论评*, 2013, 59(1): 63-70. [ZHANG Bangtong, LING Hongfei, WU Junqi, et al. Doubts about “the closure temperature of U-Pb isotopic system in the zircon crystallized from granitic Magma $\geq 850^\circ\text{C}$ ”: evidences of element diffusion theory and comparison between the zircon U-Pb ages and the whole-rock Rb-Sr ages of granite plutons[J]. *Geological Review*, 2013, 59(1): 63-70.]

附表 1 胶州湾 JZW1 孔与 QDQZ1 孔样品锆石测年结果

Table A1 Zircon U-Pb dating results of samples from JZW1 core and QDQZ1 core in Jiaozhou Bay

点 号	Th /10 ⁻⁶	U /10 ⁻⁶	Th/U	比 值						年 龄/Ma						谐和度* /%
				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	
JZW-01-01	669.7	229.7	2.7	1.4403	0.0361	0.12829	0.00169	0.08322	0.00179	778	10	906	15	1274	41	86
JZW-01-02	360.3	296.9	1.2	1.29226	0.02745	0.13871	0.00211	0.06878	0.00111	837	12	842	12	891	33	99
JZW-01-03	181.3	111.7	1.5	1.11424	0.0245	0.12849	0.00133	0.06523	0.0015	779	8	760	12	781	47	103
JZW-01-04	332.3	395.9	0.8	1.06176	0.01795	0.11616	0.00123	0.06722	0.00116	708	7	735	9	844	35	96
JZW-01-05	113.0	58.1	1.8	1.16269	0.03986	0.1312	0.00188	0.06609	0.0022	795	11	783	19	808	68	102
JZW-01-06	402.5	263.9	1.4	1.07708	0.01994	0.11961	0.00134	0.06801	0.00124	728	8	742	10	868	37	98
JZW-01-07	80.9	69.9	1.1	1.14929	0.03557	0.1294	0.00178	0.06811	0.00221	784	10	777	17	871	66	101
JZW-01-08	287.2	225.1	1.2	1.12284	0.02266	0.12253	0.0013	0.06733	0.00135	745	7	764	11	847	41	98
JZW-01-09	322.9	290.8	1.0	1.1426	0.01936	0.13163	0.00136	0.06661	0.0011	797	8	774	9	825	34	103
JZW-01-10	303.5	309.3	0.9	1.25712	0.02953	0.14369	0.00255	0.06766	0.00108	865	14	827	13	857	33	105
JZW-01-11	514.9	318.4	1.5	1.17837	0.02322	0.135	0.00191	0.06656	0.00126	816	11	791	11	823	39	103
JZW-01-12	320.2	239.9	1.3	1.24712	0.03392	0.12463	0.00171	0.07067	0.00153	757	10	822	15	947	44	92
JZW-01-13	626.9	402.6	1.4	1.17282	0.02055	0.13259	0.00185	0.06657	0.00096	803	11	788	10	824	30	102
JZW-01-14	114.4	110.8	1.0	1.17701	0.02845	0.12999	0.00165	0.06834	0.00148	788	9	790	13	878	44	100
JZW-01-15	236.7	207.2	1.0	1.14284	0.02036	0.13008	0.0018	0.06462	0.00125	788	10	774	10	761	40	102
JZW-01-16	248.0	158.1	1.5	1.10722	0.03494	0.12474	0.00164	0.06784	0.00159	758	9	757	17	863	48	100
JZW-01-17	544.4	389.4	1.3	1.17504	0.02037	0.13119	0.00193	0.06634	0.0011	795	11	789	10	816	34	101
JZW-01-18	201.0	195.8	0.9	1.21819	0.02411	0.13051	0.00164	0.06686	0.0012	791	9	809	11	832	37	98
JZW-01-19	202.1	185.9	1.0	1.04561	0.03018	0.12031	0.00167	0.06388	0.00145	732	10	727	15	737	47	101
JZW-01-20	174.2	129.6	1.3	1.17847	0.03521	0.12686	0.0016	0.06758	0.00179	770	9	791	16	855	54	97
JZW-01-21	731.5	293.6	2.4	1.16334	0.02313	0.13009	0.00162	0.06635	0.00108	788	9	784	11	817	34	101
JZW-01-22	391.5	243.5	1.5	1.05473	0.01869	0.12302	0.00133	0.06475	0.00143	748	8	731	9	765	46	102
JZW-01-23	941.0	567.3	1.6	1.10458	0.0197	0.12339	0.0014	0.06448	0.00094	750	8	756	10	757	31	99
JZW-01-24	375.6	172.4	2.0	1.20271	0.02918	0.12569	0.00157	0.07023	0.00141	763	9	802	13	934	41	95
JZW-01-25	220.1	212.9	1.0	1.15278	0.025	0.12685	0.00157	0.06575	0.00135	770	9	779	12	798	43	99
JZW-01-26	224.3	278.6	0.8	1.14376	0.02252	0.13061	0.00151	0.06471	0.00118	791	9	774	11	764	38	102
JZW-01-27	503.9	379.1	1.3	1.00595	0.02033	0.11154	0.00131	0.06527	0.00097	682	8	707	10	782	31	96
JZW-01-28	283.3	291.5	0.9	1.16308	0.02477	0.13435	0.00192	0.065	0.0011	813	11	783	12	773	35	104
JZW-01-29	266.5	181.5	1.4	1.19534	0.02468	0.13404	0.00216	0.06648	0.00107	811	12	798	11	821	33	102
JZW-01-30	211.1	232.8	0.9	1.13833	0.01842	0.12606	0.00142	0.06625	0.00099	765	8	772	9	813	31	99
JZW-02-01	143.0	204.9	0.6	1.19795	0.02529	0.13154	0.00204	0.06637	0.00151	797	12	800	12	817	47	100
JZW-02-02	176.1	206.8	0.8	1.07629	0.02166	0.1285	0.00163	0.06131	0.00142	779	9	742	11	649	49	105
JZW-02-03	52.9	36.8	1.3	1.13787	0.03702	0.12761	0.00195	0.06435	0.00234	774	11	772	18	752	75	100
JZW-02-04	120.8	140.7	0.8	1.13268	0.02611	0.13418	0.0021	0.06163	0.00153	812	12	769	12	660	52	106
JZW-02-05	103.4	236.8	0.4	1.08885	0.02295	0.11893	0.00151	0.06538	0.0012	724	9	748	11	786	38	97

续表 1

点 号	Th /10 ⁻⁶	U /10 ⁻⁶	Th/U	比 值						年 龄/Ma						谐和度* /%
				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	
JZW-02-06	106.5	70.5	1.4	1.23326	0.04417	0.13935	0.00212	0.06199	0.00176	841	12	816	20	673	60	103
JZW-02-07	176.4	197.4	0.8	1.11315	0.02228	0.12891	0.00169	0.06353	0.00107	782	10	760	11	725	35	103
JZW-02-08	187.0	184.8	0.9	1.12112	0.0261	0.12631	0.00134	0.06359	0.0011	767	8	764	13	727	36	100
JZW-02-09	145.8	97.3	1.4	1.21582	0.03101	0.13081	0.00142	0.06633	0.0016	792	8	808	14	816	50	98
JZW-02-10	155.1	109.6	1.3	1.11421	0.02713	0.12305	0.00133	0.06637	0.00185	748	8	760	13	817	57	98
JZW-02-11	151.5	118.2	1.2	1.21528	0.0277	0.12958	0.00128	0.06747	0.00158	785	7	808	13	852	48	97
JZW-02-12	53.4	37.2	1.4	1.24489	0.03938	0.13882	0.00247	0.06637	0.00214	838	14	821	18	817	66	102
JZW-02-13	174.3	236.7	0.7	1.13792	0.02494	0.12703	0.0016	0.0662	0.00123	771	9	772	12	812	38	100
JZW-02-14	231.9	120.5	1.8	1.15105	0.02571	0.12865	0.00215	0.06579	0.00135	780	12	778	12	799	42	100
JZW-02-15	76.6	61.9	1.2	1.25943	0.03937	0.13147	0.0021	0.07087	0.00232	796	12	828	18	953	65	96
JZW-02-16	147.1	146.6	0.9	1.19843	0.03005	0.13076	0.00198	0.06568	0.00175	792	11	800	14	795	55	99
JZW-02-17	98.2	66.3	1.4	1.14363	0.03052	0.13033	0.00162	0.06363	0.00179	790	9	774	14	728	59	102
JZW-02-18	246.0	311.2	0.7	1.14949	0.02042	0.12832	0.00171	0.06507	0.00094	778	10	777	10	776	30	100
JZW-02-19	244.6	264.8	0.9	1.1237	0.02198	0.1273	0.00178	0.06603	0.00126	772	10	765	11	806	39	101
JZW-02-20	116.3	111.2	1.0	1.1599	0.0233	0.12832	0.00155	0.06648	0.00132	778	9	782	11	821	41	99
JZW-02-21	264.1	292.1	0.8	1.10176	0.02056	0.12749	0.00171	0.06503	0.00115	774	10	754	10	774	37	103
JZW-02-22	124.1	111.3	1.0	1.13004	0.029	0.13189	0.00168	0.06471	0.00174	799	10	768	14	764	56	104
JZW-02-23	95.1	106.6	0.8	1.13791	0.02724	0.12635	0.00188	0.06567	0.00172	767	11	772	13	795	54	99
JZW-02-24	442.2	512.8	0.8	1.07005	0.02297	0.11248	0.0016	0.06927	0.00118	687	9	739	11	906	35	93
JZW-02-25	80.0	56.0	1.3	1.13451	0.04302	0.12697	0.00129	0.06809	0.00239	771	7	770	20	870	71	100
JZW-02-26	178.1	185.0	0.9	1.12234	0.02397	0.12189	0.00162	0.06634	0.00125	741	9	764	11	816	39	97
JZW-02-27	586.6	477.5	1.1	1.10374	0.01803	0.11915	0.00136	0.06827	0.00095	726	8	755	9	876	29	96
JZW-02-28	265.7	373.1	0.7	1.1319	0.02094	0.12604	0.00154	0.06648	0.00109	765	9	769	10	821	34	99
JZW-02-29	101.9	160.6	0.6	1.11472	0.02824	0.12306	0.0012	0.06517	0.00153	748	7	760	14	779	48	98
JZW-02-30	190.5	279.3	0.6	1.1677	0.02645	0.13415	0.00204	0.06651	0.0011	812	12	786	12	822	34	103
JZW-03-01	209.4	156.8	1.3	0.13707	0.00816	0.0191	0.00035	0.05218	0.003	122	2	130	7	292	126	94
JZW-03-02	404.7	216.9	1.8	0.13236	0.00634	0.01838	0.00027	0.05076	0.00233	117	2	126	6	229	103	93
JZW-03-03	175.2	147.5	1.1	0.12284	0.00721	0.01984	0.00037	0.04611	0.00262	127	2	118	7	2	131	108
JZW-03-04	325.1	236.8	1.3	0.11865	0.00672	0.01831	0.00036	0.04819	0.00266	117	2	114	6	107	125	103
JZW-03-05	257.4	195.6	1.2	0.23283	0.00754	0.02016	0.00027	0.08039	0.00261	129	2	213	6	1206	63	61
JZW-03-06	113.8	112.5	1.0	0.14019	0.00809	0.01943	0.0003	0.05198	0.00291	124	2	133	7	283	123	93
JZW-03-07	243.4	109.2	2.2	0.1479	0.00998	0.02008	0.00045	0.05666	0.00359	128	3	140	9	477	134	91
JZW-03-08	93.0	58.1	1.5	0.18842	0.01191	0.01843	0.0005	0.07909	0.00486	118	3	175	10	1174	117	67
JZW-03-09	290.6	250.8	1.1	0.12809	0.00597	0.01882	0.00036	0.04727	0.00215	120	2	122	5	62	105	98
JZW-03-10	183.0	161.3	1.1	0.11894	0.00682	0.01891	0.00032	0.04861	0.00269	121	2	114	6	128	125	106
JZW-03-11	180.5	88.6	2.0	0.14062	0.0085	0.01866	0.0003	0.04904	0.00291	119	2	134	8	149	133	89

续表 1

点 号	Th /10 ⁻⁶	U /10 ⁻⁶	Th/U	比 值						年 龄/Ma						谐和度* /%
				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				
JZW-03-12	589.2	375.6	1.5	0.22686	0.00804	0.02045	0.00035	0.0821	0.00275	131	2	208	7	1247	64	63
JZW-03-13	233.1	183.2	1.2	0.12703	0.00742	0.01964	0.0003	0.04454	0.00252	125	2	121	7	-1	52	103
JZW-03-14	292.4	199.7	1.4	0.11298	0.00548	0.01839	0.0003	0.04497	0.00211	117	2	109	5	-1	53	107
JZW-03-15	584.5	267.7	2.1	0.12041	0.00418	0.01854	0.0003	0.04807	0.00173	118	2	115	4	101	83	103
JZW-03-16	302.5	230.0	1.2	0.12295	0.00583	0.01933	0.00031	0.0473	0.00221	123	2	118	5	63	108	104
JZW-03-17	196.7	168.0	1.1	0.13463	0.0081	0.01889	0.00032	0.04908	0.00283	121	2	128	7	150	130	95
JZW-03-18	54.1	48.1	1.1	0.11902	0.01272	0.01955	0.0008	0.04414	0.00522	125	5	114	12	-1	165	110
JZW-03-19	108.5	44.9	2.3	0.21171	0.01382	0.0181	0.00045	0.08062	0.00519	116	3	195	12	1211	122	59
JZW-03-20	53.5	54.0	0.9	0.10579	0.00879	0.01824	0.00048	0.0405	0.00355	117	3	102	8	-1	108	115
JZW-03-21	245.9	193.0	1.2	0.13134	0.0081	0.01834	0.00029	0.05187	0.00306	117	2	125	7	278	130	94
JZW-03-22	335.2	216.3	1.4	0.14951	0.00538	0.01866	0.00024	0.05656	0.00199	119	2	141	5	474	76	84
JZW-03-23	395.9	260.0	1.4	0.14816	0.00757	0.01937	0.00036	0.05778	0.00288	124	2	140	7	521	106	89
JZW-03-24	607.2	403.9	1.4	0.13661	0.00619	0.01933	0.00031	0.05374	0.00224	123	2	130	6	359	92	95
JZW-03-25	224.4	147.7	1.5	0.12756	0.0078	0.01859	0.00031	0.05088	0.00297	119	2	122	7	235	129	98
JZW-03-26	593.3	365.9	1.5	0.14599	0.00583	0.01948	0.00034	0.05438	0.00186	124	2	138	5	386	75	90
JZW-03-27	348.8	226.7	1.4	0.1106	0.0049	0.01843	0.00024	0.04237	0.00185	118	2	107	4	-1	98	110
JZW-03-28	234.7	173.2	1.3	0.10853	0.00522	0.01859	0.00033	0.04466	0.00214	119	2	105	5	-1	39	113
JZW-03-29	401.6	231.2	1.6	0.12443	0.00626	0.01825	0.00034	0.04847	0.00237	117	2	119	6	121	111	98
JZW-03-30	139.2	92.7	1.4	0.22629	0.01376	0.01978	0.00036	0.08446	0.00495	126	2	207	11	1302	110	61
JZW-04-01	288.8	215.9	1.2	1.27024	0.0335	0.1281	0.00182	0.0708	0.00167	777	10	833	15	951	47	93
JZW-04-02	726.9	377.5	1.8	1.08527	0.01967	0.12201	0.00135	0.06416	0.00107	742	8	746	10	746	35	99
JZW-04-03	883.8	480.5	1.7	1.14052	0.02766	0.13159	0.00205	0.06256	0.00105	797	12	773	13	692	36	103
JZW-04-04	923.2	624.1	1.4	1.09263	0.02082	0.12658	0.0017	0.0634	0.00101	768	10	750	10	721	33	102
JZW-04-05	851.7	597.6	1.3	1.12713	0.01547	0.13124	0.00161	0.06269	0.00085	795	9	766	7	697	29	104
JZW-04-06	2572.6	1412.2	1.7	0.76492	0.01399	0.08792	0.00134	0.06162	0.00076	543	8	577	8	660	26	94
JZW-04-07	398.1	308.5	1.2	1.15906	0.02353	0.13774	0.00203	0.06211	0.00105	832	11	782	11	677	36	106
JZW-04-08	144.2	102.7	1.3	1.17651	0.04646	0.11953	0.00241	0.0754	0.00285	728	14	790	22	1078	74	92
JZW-04-09	477.7	321.9	1.4	1.08343	0.02055	0.12786	0.00163	0.06229	0.00116	776	9	745	10	683	39	104
JZW-04-10	184.0	176.6	1.0	1.15229	0.02225	0.12885	0.00183	0.06392	0.00113	781	10	778	11	738	37	100
JZW-04-11	236.4	222.8	1.0	1.13853	0.0245	0.12944	0.0017	0.06391	0.00123	785	10	772	12	738	40	102
JZW-04-12	559.8	464.0	1.1	1.12519	0.02579	0.12851	0.00115	0.06344	0.00102	779	7	765	12	722	34	102
JZW-04-13	1466.6	900.6	1.5	0.83189	0.01283	0.08931	0.00072	0.06424	0.0009	551	4	615	7	749	29	90
JZW-04-14	611.2	400.2	1.4	1.16212	0.02293	0.12807	0.00113	0.06553	0.00121	777	6	783	11	790	38	99
JZW-04-15	513.2	412.5	1.2	2.03348	0.07396	0.13809	0.00403	0.10331	0.00289	834	23	1127	25	1684	51	74
JZW-04-16	988.6	810.0	1.2	1.07833	0.01777	0.12206	0.0013	0.06346	0.0009	742	7	743	9	723	30	100
JZW-04-17	482.8	342.3	1.3	1.17701	0.02459	0.1298	0.00179	0.06674	0.00122	787	10	790	11	829	38	100

续表 1

点 号	Th /10 ⁻⁶	U /10 ⁻⁶	Th/U	比 值						年 龄/Ma						谐和度* /%
				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	
JZW-04-18	135.2	109.2	1.2	1.09585	0.04017	0.12707	0.00153	0.06101	0.00167	771	9	751	19	639	58	103
JZW-04-19	1159.2	854.2	1.3	0.93626	0.01841	0.10705	0.00151	0.06294	0.00095	656	9	671	10	705	32	98
JZW-04-20	1207.3	841.4	1.3	1.10951	0.02476	0.1305	0.00278	0.06191	0.00094	791	16	758	12	670	32	104
JZW-04-21	589.9	359.8	1.6	1.11879	0.02119	0.12444	0.00116	0.06445	0.00099	756	7	762	10	756	32	99
JZW-04-22	478.1	344.8	1.4	1.23183	0.02607	0.12742	0.00136	0.07067	0.00154	773	8	815	12	947	44	95
JZW-04-23	477.3	423.7	1.1	1.16814	0.0187	0.13019	0.00155	0.06504	0.00113	789	9	786	9	775	36	100
JZW-04-24	312.3	308.6	1.0	1.26999	0.02832	0.12659	0.0017	0.07127	0.00142	768	10	832	13	964	40	92
JZW-04-25	889.6	435.8	2.0	1.25961	0.02825	0.12675	0.00166	0.07326	0.00139	769	10	828	13	1020	38	93
JZW-04-26	1230.5	715.8	1.3	0.83103	0.01937	0.08349	0.00143	0.07239	0.00118	517	9	614	11	996	33	84
JZW-04-27	827.7	495.9	1.6	1.11584	0.02	0.11736	0.00112	0.06555	0.00093	715	6	761	10	791	29	94
JZW-04-28	1194.1	822.9	1.4	0.88285	0.01663	0.09454	0.00107	0.0657	0.00106	582	6	643	9	796	33	91
JZW-04-29	1481.5	1151.4	1.3	0.95564	0.01789	0.09343	0.00111	0.07331	0.00117	576	7	681	9	1022	32	85
JZW-04-30	297.9	251.5	1.1	1.18307	0.02795	0.12986	0.0015	0.06786	0.00139	787	9	793	13	863	42	99
JZW-05-01	73.3	51.0	1.3	0.12365	0.0092	0.01843	0.00042	0.0501	0.00378	118	3	118	8	199	167	100
JZW-05-02	145.4	135.1	1.0	0.14137	0.00577	0.01899	0.00039	0.05226	0.00205	121	2	134	5	296	87	90
JZW-05-03	381.3	269.1	1.3	0.14914	0.00563	0.01887	0.00032	0.05997	0.00244	121	2	141	5	602	86	86
JZW-05-04	259.5	163.9	1.5	0.12501	0.00582	0.0182	0.00027	0.04941	0.00238	116	2	120	5	166	109	97
JZW-05-05	230.3	175.6	1.2	0.12433	0.00461	0.01836	0.00025	0.05034	0.00297	117	2	119	4	210	131	98
JZW-05-06	203.7	172.7	1.1	0.12457	0.00579	0.01812	0.00028	0.04843	0.00232	116	2	119	5	119	109	97
JZW-05-07	200.9	173.7	1.1	0.12748	0.00545	0.01929	0.0003	0.0495	0.00229	123	2	122	5	170	105	101
JZW-05-08	428.9	241.1	1.6	0.12047	0.00566	0.01825	0.00023	0.04533	0.00215	117	1	116	5	-1	73	101
JZW-05-09	207.5	163.7	1.2	0.15246	0.0088	0.0189	0.00027	0.05746	0.00346	121	2	144	8	508	127	84
JZW-05-10	225.0	177.4	1.2	0.12733	0.00584	0.01897	0.0003	0.04729	0.0023	121	2	122	5	63	112	99
JZW-05-11	796.7	348.8	2.1	0.12137	0.00593	0.01807	0.0002	0.04818	0.00245	115	1	116	5	107	116	99
JZW-05-12	168.9	108.7	1.4	0.11255	0.00766	0.01861	0.00043	0.0481	0.00336	119	3	108	7	103	158	110
JZW-05-13	40.4	35.4	1.1	0.19981	0.01694	0.01882	0.0005	0.06945	0.00722	120	3	185	14	911	201	65
JZW-05-14	67.0	51.1	1.2	0.12462	0.01016	0.01838	0.00041	0.05326	0.00418	117	3	119	9	339	169	98
JZW-05-15	455.7	247.6	1.7	0.25707	0.01112	0.01887	0.00029	0.09185	0.00381	121	2	232	9	1463	77	52
JZW-05-16	459.5	305.1	1.4	0.23588	0.00908	0.01816	0.00022	0.09596	0.00375	116	1	215	7	1546	72	54
JZW-05-17	300.4	205.5	1.3	0.12443	0.0061	0.01832	0.00031	0.04721	0.00236	117	2	119	6	59	115	98
JZW-05-18	185.6	167.9	1.0	0.12405	0.0059	0.01855	0.00027	0.04886	0.00239	118	2	119	5	140	111	99
JZW-05-19	153.0	145.8	1.0	0.1203	0.00804	0.01898	0.00033	0.04433	0.00296	121	2	115	7	-1	64	105
JZW-05-20	169.5	158.1	1.0	0.15622	0.00774	0.01857	0.00038	0.06266	0.00317	119	2	147	7	696	104	81
JZW-05-21	228.2	139.2	1.5	0.12757	0.00807	0.01899	0.0003	0.04665	0.00297	121	2	122	7	30	146	99
JZW-05-22	148.4	133.4	1.0	0.1213	0.0068	0.01973	0.00046	0.04619	0.00268	126	3	116	6	7	134	109
JZW-05-23	330.6	228.0	1.3	0.30474	0.01123	0.0174	0.00034	0.13388	0.00489	111	2	270	9	2149	62	41

续表 1

点 号	Th / 10^{-6}	U / 10^{-6}	Th/U	比 值						年 龄/Ma						谐和度* /%
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	
JZW-05-24	226.6	179.5	1.1	0.13651	0.00658	0.01818	0.00028	0.052	0.00259	116	2	130	6	285	110	89
JZW-05-25	202.2	165.4	1.1	0.13994	0.00529	0.0181	0.0003	0.05257	0.00199	116	2	133	5	309	84	87
JZW-05-26	337.7	179.1	1.7	0.12719	0.00525	0.01819	0.00023	0.04974	0.00226	116	1	122	5	182	102	95
JZW-05-27	277.8	201.1	1.3	0.14816	0.00727	0.0186	0.00028	0.05553	0.00278	119	2	140	6	432	108	85
JZW-05-28	159.6	130.6	1.1	0.1291	0.00634	0.018	0.0003	0.05429	0.00275	115	2	123	6	382	110	93
JZW-05-29	581.6	381.2	1.4	0.12592	0.00403	0.01865	0.00024	0.04801	0.00164	119	1	120	4	99	79	99
JZW-05-30	274.3	147.2	1.7	0.26374	0.0108	0.02078	0.0004	0.09157	0.0038	133	3	238	9	1458	77	56

*谐和度 = (206Pb/ 238U age×100) / (207Pb/206Pb age)

附表 2 胶州湾 JZW1 孔与 QDQZ1 孔样品锆石微量元素测试结果
Table A2 Trace element compositions of zircons from JZW1 core and QDQZ1 core in Jiaozhou Bay

点 号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ti
JZW-01-01	1018.09	2075.51	209.84	700.39	123.60	7.21	106.09	17.29	148.03	48.66	230.11	47.25	446.87	96.28	8052.23	24.80
JZW-01-02	3.64	66.44	0.93	5.63	4.52	1.14	21.80	7.36	96.28	38.25	198.57	42.76	412.08	87.53	9254.33	3.41
JZW-01-03	4.53	87.43	1.06	7.26	8.63	3.12	45.14	15.05	191.01	74.22	368.59	74.11	665.69	137.95	7046.69	14.24
JZW-01-04	0.24	55.89	0.13	1.63	4.57	1.11	30.39	11.65	161.82	67.53	360.79	79.61	757.69	162.57	10077.28	48.92
JZW-01-05	0.02	73.03	0.25	4.05	6.89	2.98	36.12	11.38	147.00	57.44	276.73	55.21	494.19	104.33	6370.91	19.33
JZW-01-06	0.00	58.25	0.08	1.73	3.55	1.25	20.08	6.89	88.58	35.00	177.06	38.18	360.21	78.81	8838.92	3.16
JZW-01-07	0.00	37.76	0.09	1.47	3.56	1.07	19.99	6.74	86.21	34.30	173.22	36.87	346.69	74.27	8095.71	8.04
JZW-01-08	0.01	55.77	0.09	1.46	3.31	1.13	19.06	6.56	86.20	34.44	177.99	38.53	372.08	80.12	8737.96	2.91
JZW-01-09	0.02	71.61	0.08	1.71	4.07	0.78	25.13	9.00	119.12	47.61	245.09	52.46	491.79	102.57	9632.82	3.44
JZW-01-10	0.01	42.09	0.12	2.29	5.82	1.64	32.21	11.55	150.67	61.01	309.88	67.80	643.55	137.84	9143.00	1.85
JZW-01-11	0.01	75.99	0.14	2.13	4.69	1.54	26.76	8.72	112.62	44.97	230.28	48.87	468.99	100.49	8474.57	4.47
JZW-01-12	0.02	57.95	0.08	1.66	3.48	1.32	20.43	6.75	91.29	36.44	190.87	41.86	411.42	90.22	8605.37	5.45
JZW-01-13	0.00	82.33	0.08	1.76	4.73	1.63	29.24	10.17	136.52	54.45	286.03	61.66	594.76	128.63	9000.23	3.57
JZW-01-14	3.73	54.24	1.23	6.38	3.49	0.54	15.33	5.38	75.17	31.17	166.90	36.58	350.50	75.75	10111.06	4.10
JZW-01-15	0.02	50.48	0.09	1.47	3.27	1.21	20.24	6.70	88.56	36.79	195.86	44.65	436.12	98.56	8698.54	3.72
JZW-01-16	0.01	59.89	0.11	2.09	4.00	1.43	23.11	7.74	98.55	38.13	186.74	39.06	354.25	75.12	8340.87	7.31
JZW-01-17	0.00	62.88	0.08	1.30	3.43	1.23	24.48	8.60	111.23	43.86	222.51	47.91	454.96	95.76	9492.71	3.99
JZW-01-18	2.17	58.68	1.10	5.52	3.21	0.55	17.41	6.70	94.49	39.13	209.79	45.88	431.31	88.85	10484.49	3.68
JZW-01-19	9.33	81.49	4.22	20.28	8.71	1.83	26.68	8.05	104.69	41.82	221.93	49.04	479.65	106.59	8607.39	4.14
JZW-01-20	3.07	59.16	0.93	4.75	3.76	1.05	19.55	6.73	90.32	36.51	186.64	39.91	376.43	79.29	9124.39	6.07
JZW-01-21	0.03	117.63	0.24	4.12	8.02	3.09	43.17	13.51	169.87	65.16	320.43	66.85	622.62	131.89	7828.62	7.20
JZW-01-22	0.11	68.52	0.12	2.01	4.31	1.69	24.70	8.02	106.18	42.30	221.71	47.93	465.41	101.50	8230.45	4.99
JZW-01-23	0.00	85.87	0.10	1.74	5.18	1.61	31.95	11.21	146.16	57.07	284.68	60.24	562.62	118.09	9432.92	2.15
JZW-01-24	0.07	95.21	0.16	2.87	5.60	2.24	31.88	10.55	133.43	50.45	251.83	51.79	471.84	99.21	8692.12	9.84
JZW-01-25	0.00	64.60	0.07	1.56	3.49	1.27	21.26	7.45	101.75	42.06	228.92	50.94	500.73	111.57	8713.45	4.53

续表 2

点 号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ti
JZW-01-26	0.00	62.96	0.05	1.33	3.70	1.18	23.70	8.68	119.98	51.82	284.44	64.26	633.78	141.76	9036.02	3.37
JZW-01-27	0.03	61.97	0.09	1.71	4.02	1.28	22.04	7.45	99.01	39.34	206.82	46.56	459.51	102.76	8961.60	3.52
JZW-01-28	0.00	67.75	0.06	1.50	4.05	1.26	24.60	8.84	121.21	50.59	272.18	60.42	592.67	131.61	8922.28	4.10
JZW-01-29	0.14	78.17	0.17	2.48	4.85	1.74	26.54	8.75	112.95	45.67	234.12	51.00	487.63	107.25	8098.04	7.91
JZW-01-30	0.00	62.79	0.08	1.48	3.62	1.23	22.85	7.66	105.86	45.45	249.06	57.14	563.07	126.76	8709.09	4.13
JZW-02-01	0.12	49.71	0.08	1.16	4.18	0.21	29.04	10.74	143.35	55.56	265.62	51.69	450.04	90.98	7097.15	2.46
JZW-02-02	0.00	54.57	0.06	1.46	4.48	0.21	29.53	11.22	144.10	54.76	257.86	49.28	412.54	81.35	7062.30	1.82
JZW-02-03	0.01	29.60	0.08	1.47	2.48	0.99	13.88	4.32	55.05	21.00	105.16	21.79	198.94	43.30	7472.35	8.20
JZW-02-04	0.08	56.37	0.10	1.64	4.47	0.24	31.18	11.15	144.26	54.62	261.13	50.51	433.52	87.24	6949.59	3.17
JZW-02-05	0.10	26.40	0.15	1.19	2.83	0.17	19.18	7.66	102.23	40.07	197.63	41.64	349.63	70.43	7251.57	2.46
JZW-02-06	0.04	80.86	0.19	2.99	5.39	1.89	31.13	9.96	125.22	48.56	230.43	46.23	407.81	86.21	6861.10	7.14
JZW-02-07	0.01	53.26	0.08	1.56	4.67	0.19	30.05	10.95	141.34	53.34	255.35	48.55	412.08	81.10	7234.16	2.49
JZW-02-08	3.24	70.54	1.93	9.19	7.42	0.29	34.90	12.14	152.99	56.94	266.36	51.28	436.50	87.27	6963.91	3.83
JZW-02-09	0.02	53.49	0.09	1.86	3.54	1.20	19.86	6.51	85.12	33.43	167.60	34.80	324.84	69.19	8312.15	5.89
JZW-02-10	0.01	59.63	0.09	2.08	4.08	1.24	23.45	7.84	105.58	42.95	218.20	46.16	425.48	91.52	8312.61	6.59
JZW-02-11	0.02	45.00	0.14	2.16	4.73	2.02	25.27	8.65	114.73	46.81	242.34	52.62	486.04	108.19	7576.30	9.18
JZW-02-12	0.73	45.27	0.46	3.62	4.11	1.29	19.95	5.83	69.88	25.79	123.87	24.76	223.84	48.14	6937.23	11.70
JZW-02-13	0.00	50.18	0.06	1.21	4.04	0.21	29.51	11.26	146.37	55.15	261.19	50.40	423.45	83.00	7406.24	1.82
JZW-02-14	6.35	81.64	1.98	10.65	6.38	2.11	29.91	9.41	118.18	44.94	219.71	45.28	402.97	83.96	7588.86	7.56
JZW-02-15	3.21	43.47	0.99	5.55	4.07	1.38	19.20	6.04	77.30	30.12	151.52	31.66	289.98	63.64	7662.10	8.45
JZW-02-16	26.42	119.13	9.71	41.41	17.34	0.50	55.60	17.41	208.93	76.12	353.16	67.01	560.25	113.03	6822.89	4.33
JZW-02-17	0.02	40.62	0.11	1.72	3.48	0.88	20.23	6.56	84.62	32.75	165.76	34.95	319.99	69.05	8300.78	8.53
JZW-02-18	0.08	59.59	0.07	1.48	5.85	0.24	41.48	15.94	208.23	77.29	365.65	69.62	580.41	112.75	8186.50	3.06
JZW-02-19	0.01	61.01	0.08	1.55	5.77	0.25	36.08	13.43	172.19	65.43	304.10	58.78	492.83	96.28	7474.52	1.80
JZW-02-20	0.65	42.00	0.28	1.72	2.36	0.38	13.99	5.16	70.93	29.28	155.00	32.71	303.13	63.37	10215.00	4.03
JZW-02-21	0.00	63.14	0.05	1.38	4.74	0.22	35.23	13.32	173.73	64.99	306.88	59.05	498.67	95.97	7313.24	3.18
JZW-02-22	1.03	50.82	0.37	2.32	3.02	0.68	16.83	5.89	80.94	33.30	173.22	37.84	351.89	74.92	9649.28	4.31
JZW-02-23	0.00	51.93	0.06	1.36	4.26	0.26	26.27	9.67	124.41	47.61	229.59	45.07	396.13	81.49	6668.52	3.00
JZW-02-24	0.80	89.10	0.56	4.90	10.86	0.48	68.15	24.09	302.13	112.23	522.04	99.72	843.87	164.92	8024.29	6.83
JZW-02-25	0.01	35.16	0.10	1.65	4.04	0.96	19.71	6.28	78.92	30.46	151.88	31.68	290.90	62.72	7941.94	12.87
JZW-02-26	38.50	155.69	10.22	37.82	12.50	0.46	42.86	14.29	173.41	65.56	308.35	59.79	508.39	100.30	6934.72	22.54
JZW-02-27	0.29	127.12	0.31	3.27	8.96	0.45	60.46	22.17	280.88	102.53	481.57	91.50	766.31	149.40	8067.98	7.76
JZW-02-28	0.21	64.97	0.12	1.53	5.48	0.23	39.60	15.56	201.38	77.04	365.15	70.63	591.81	113.93	8365.11	2.09
JZW-02-29	0.01	35.88	0.04	0.57	1.75	0.29	13.29	5.15	72.82	30.17	158.35	33.62	310.18	64.92	11029.09	2.31
JZW-02-30	0.00	56.16	0.07	1.33	4.82	0.19	34.43	13.18	172.56	64.93	307.48	59.72	508.34	99.33	8141.57	2.34
JZW-03-01	104.58	321.33	23.95	80.32	15.96	0.64	28.99	8.61	109.18	44.77	239.64	52.30	484.92	100.55	9688.99	4.36
JZW-03-02	0.17	92.80	0.09	1.12	2.07	0.19	14.47	5.62	85.95	37.98	214.24	48.46	461.03	97.27	10035.95	6.53

续表 2

点 号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ti
JZW-03-03	0.13	70.98	0.10	1.24	2.64	0.26	17.30	6.96	104.17	47.07	268.41	61.68	593.90	127.52	9774.50	2.58
JZW-03-04	0.01	98.59	0.04	1.01	1.98	0.21	14.27	6.03	92.90	43.36	256.37	60.48	597.67	130.00	10018.27	3.09
JZW-03-05	0.09	89.84	0.06	1.13	2.29	0.26	14.72	6.07	88.06	39.73	222.29	50.09	487.60	103.91	10119.18	4.46
JZW-03-06	0.05	45.01	0.06	0.87	1.91	0.18	13.79	5.50	79.98	36.08	201.29	45.99	438.94	93.56	9703.64	2.70
JZW-03-07	0.02	80.63	0.18	3.09	4.85	0.99	24.50	8.08	95.26	35.42	169.66	33.79	297.43	60.20	7259.57	11.75
JZW-03-08	0.04	78.62	0.37	5.57	8.73	1.62	37.99	10.92	127.69	47.43	216.18	41.99	370.15	76.53	6966.70	14.47
JZW-03-09	0.09	104.75	0.07	0.97	2.19	0.25	14.56	6.05	92.44	42.85	252.27	59.73	592.20	129.95	10222.49	2.08
JZW-03-10	0.01	92.08	0.06	0.96	2.81	0.30	18.74	7.65	112.83	50.91	288.99	65.43	629.40	134.46	9641.73	3.19
JZW-03-11	0.01	83.68	0.13	2.59	5.52	1.02	30.14	9.80	122.45	44.35	208.63	40.60	348.34	69.62	7749.77	8.00
JZW-03-12	0.04	136.71	0.12	1.75	3.31	0.68	21.72	8.60	127.95	61.84	383.17	95.65	1008.50	233.21	10210.68	5.50
JZW-03-13	0.00	75.65	0.06	0.82	2.13	0.26	13.70	5.34	79.10	34.98	195.56	44.43	431.49	94.01	10363.22	3.19
JZW-03-14	0.02	89.77	0.06	1.18	2.43	0.28	17.18	6.76	97.48	41.92	227.04	49.90	466.21	98.12	9815.08	4.03
JZW-03-15	0.06	190.42	0.26	3.77	9.70	0.84	54.86	18.67	236.86	91.56	440.76	87.61	767.10	150.77	8964.54	4.95
JZW-03-16	1.43	90.49	0.34	1.70	2.14	0.22	13.44	5.59	82.34	37.45	216.11	50.14	488.85	106.98	10220.57	3.40
JZW-03-17	4.80	98.48	1.01	3.56	2.47	0.27	16.52	6.73	102.95	48.27	282.36	65.59	640.51	139.90	9911.09	3.61
JZW-03-18	0.01	42.55	0.14	2.43	4.70	1.20	21.86	6.59	79.73	29.83	143.74	28.81	259.07	55.50	6884.80	13.66
JZW-03-19	0.03	108.27	0.33	5.10	7.63	2.09	34.67	10.94	134.54	50.07	239.05	46.97	409.98	87.56	6104.11	16.06
JZW-03-20	7.60	64.65	2.61	11.79	5.66	0.98	21.66	6.59	78.88	29.77	143.38	29.30	262.64	55.86	7529.97	9.35
JZW-03-21	0.01	85.44	0.06	0.98	1.91	0.19	12.82	5.21	80.42	36.89	212.57	49.44	479.75	103.86	10154.03	3.37
JZW-03-22	0.00	83.09	0.07	0.98	2.29	0.18	13.57	5.75	82.83	36.79	203.28	45.00	422.53	89.92	9802.70	3.11
JZW-03-23	0.04	108.79	0.09	1.43	3.57	0.47	22.77	8.81	123.24	53.67	293.87	65.27	623.74	131.52	9961.44	4.68
JZW-03-24	0.01	128.19	0.09	0.87	2.12	0.29	14.70	6.02	91.49	44.93	274.41	67.41	681.80	153.00	10502.97	3.76
JZW-03-25	0.01	82.09	0.17	2.68	5.51	0.38	33.71	12.65	176.33	71.31	367.87	76.47	677.36	136.72	9158.01	3.31
JZW-03-26	0.01	108.55	0.07	0.84	1.59	0.23	12.04	5.03	78.54	37.91	232.18	55.86	564.77	126.53	10370.33	2.68
JZW-03-27	0.01	90.35	0.06	0.86	2.02	0.19	13.97	5.58	83.02	37.64	212.50	47.88	453.09	96.84	9747.43	3.12
JZW-03-28	0.11	84.86	0.08	1.17	2.54	0.29	15.95	6.77	99.04	43.56	240.53	54.01	509.62	108.80	9936.16	3.82
JZW-03-29	0.01	124.13	0.10	1.60	3.97	0.29	25.34	10.03	142.58	60.07	316.10	67.22	602.16	123.45	9159.22	4.12
JZW-03-30	0.00	69.24	0.13	2.30	5.18	0.72	28.86	10.07	125.74	47.12	216.98	42.22	350.25	68.20	8256.95	6.90
JZW-04-01	10.98	133.28	4.70	21.88	11.75	1.25	49.49	16.43	206.46	80.27	385.05	77.39	679.07	139.45	8267.47	3.90
JZW-04-02	11.37	156.57	5.38	24.31	14.34	1.21	57.07	18.21	223.35	82.16	383.42	73.46	624.56	123.17	8519.84	4.16
JZW-04-03	0.02	124.92	0.13	2.52	6.96	0.97	49.70	17.37	220.00	82.82	388.07	75.80	654.74	129.38	8831.18	3.57
JZW-04-04	0.05	107.17	0.07	1.29	3.54	0.43	25.77	9.86	141.61	60.62	328.48	72.77	687.68	147.77	10592.43	4.56
JZW-04-05	0.01	175.29	0.16	3.31	9.97	1.26	70.30	24.51	310.94	118.32	558.88	109.82	954.95	190.59	8696.51	3.47
JZW-04-06	2.31	233.28	0.74	4.43	8.15	0.76	57.73	22.02	301.46	125.68	655.73	141.12	1296.06	267.82	10471.40	16.71
JZW-04-07	0.01	79.72	0.07	1.84	6.97	0.87	47.42	17.71	234.54	93.87	460.06	93.58	824.40	166.35	8049.02	2.74
JZW-04-08	0.12	54.22	0.11	2.01	3.96	1.24	19.43	6.08	74.45	28.85	143.82	30.37	283.96	61.46	8116.11	6.03
JZW-04-09	0.06	118.87	0.15	2.85	8.53	1.12	53.97	19.01	243.26	91.73	440.27	87.45	756.82	152.46	8183.57	6.42

续表 2

点 号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ti
JZW-04-10	1.10	50.78	0.35	2.35	2.71	0.63	15.56	5.80	81.66	34.90	192.04	45.68	419.89	91.51	9954.15	2.27
JZW-04-11	0.08	60.23	0.10	1.51	4.82	0.74	34.50	12.91	174.05	69.66	339.41	68.72	618.52	125.46	8616.76	2.80
JZW-04-12	0.10	66.99	0.11	1.22	3.82	0.43	27.46	10.98	154.77	65.89	358.34	79.94	762.57	163.27	9936.60	2.55
JZW-04-13	11.97	171.56	5.26	23.34	10.17	0.63	39.98	13.89	189.94	79.71	419.94	91.83	859.67	181.63	10578.09	10.30
JZW-04-14	65.37	298.78	22.37	101.52	32.55	2.35	85.02	24.36	286.94	105.04	491.43	95.66	824.79	162.26	8480.97	6.04
JZW-04-15	6.79	115.23	4.49	25.02	14.77	1.17	56.54	18.63	235.21	89.19	432.63	87.74	770.86	155.70	8253.51	13.14
JZW-04-16	0.08	143.10	0.10	1.57	4.49	0.43	33.03	13.20	188.02	78.72	430.31	96.19	912.88	196.97	10688.80	4.02
JZW-04-17	8.13	125.60	2.89	13.83	9.52	1.78	42.63	14.84	186.48	71.21	349.84	70.31	627.67	124.93	9154.39	4.07
JZW-04-18	99.95	319.33	32.92	124.85	33.94	2.91	52.05	11.97	128.29	46.46	220.98	46.51	429.63	93.21	8121.98	5.88
JZW-04-19	0.52	145.07	0.34	2.67	5.21	0.45	37.68	14.74	205.22	86.48	461.45	101.44	951.29	198.27	10518.91	9.08
JZW-04-20	0.08	137.48	0.09	1.44	4.50	0.42	31.88	12.67	176.65	75.00	408.63	90.49	865.90	183.19	10703.89	4.38
JZW-04-21	2.05	133.21	1.26	7.90	10.48	1.22	59.34	20.30	252.37	94.63	444.29	87.25	758.64	150.01	8540.00	4.23
JZW-04-22	0.49	84.70	0.25	2.64	5.50	1.06	39.35	14.09	184.25	71.05	350.12	73.39	647.51	131.99	8587.79	4.98
JZW-04-23	0.11	118.60	0.13	2.18	6.76	0.82	47.01	16.70	220.64	84.53	405.59	81.20	721.80	143.89	8768.51	8.39
JZW-04-24	21.44	105.25	5.66	16.59	6.26	0.54	21.75	7.68	104.51	42.90	232.29	51.84	514.12	112.00	10329.94	2808.17
JZW-04-25	0.56	145.56	0.65	5.15	10.22	1.37	62.03	21.59	257.28	92.67	428.98	81.97	708.60	138.17	8311.77	4.35
JZW-04-26	0.18	96.88	0.16	2.06	3.95	1.21	24.04	7.91	103.66	43.35	241.27	58.56	628.70	153.42	9891.64	4.89
JZW-04-27	24.08	210.60	7.57	32.58	14.39	1.56	65.71	21.62	266.03	98.20	458.92	89.47	777.46	154.23	8691.08	13.87
JZW-04-28	1.01	138.07	0.57	4.21	6.61	0.57	39.70	14.90	205.15	83.56	438.19	94.46	881.23	184.71	10204.75	9.06
JZW-04-29	1.93	193.99	0.95	5.27	7.22	0.55	45.36	17.91	252.49	109.41	595.09	132.24	1264.24	265.59	10649.64	12.07
JZW-04-30	35.37	147.57	9.43	39.58	14.17	1.24	51.10	16.83	216.77	83.30	400.43	80.64	720.52	145.29	8072.14	3.62
JZW-05-01	3.52	55.70	1.18	6.79	5.49	1.33	23.57	6.84	78.72	28.61	132.49	25.70	228.90	47.07	6998.19	13.91
JZW-05-02	66.05	207.46	12.01	34.53	7.40	0.48	19.65	6.61	95.47	43.51	247.95	56.03	544.28	115.60	9100.90	3.61
JZW-05-03	0.12	150.49	0.20	2.47	4.23	0.56	25.80	10.69	160.62	71.80	407.86	92.42	885.37	184.43	9345.31	4.44
JZW-05-04	0.53	76.69	0.22	2.64	4.68	0.42	27.21	10.53	149.22	64.82	356.12	77.68	726.64	150.37	9370.79	2.46
JZW-05-05	0.02	103.62	0.07	1.02	2.44	0.20	16.99	7.08	105.03	46.81	264.79	58.50	568.26	117.87	9142.27	3.73
JZW-05-06	0.09	103.82	0.10	1.07	2.66	0.21	18.49	7.74	115.67	51.66	292.12	65.65	636.98	133.88	8976.60	2.95
JZW-05-07	0.03	81.17	0.05	0.96	1.88	0.21	13.53	5.65	84.91	38.64	226.75	51.86	516.92	110.68	9750.69	2.30
JZW-05-08	39.16	225.79	11.62	42.28	11.94	0.49	38.63	13.31	171.08	67.81	345.69	69.54	623.04	121.26	8627.30	3.71
JZW-05-09	0.21	84.22	0.09	1.01	2.00	0.20	13.73	5.60	85.17	38.13	219.47	49.95	487.72	104.37	9242.52	7.32
JZW-05-10	0.69	89.47	0.19	1.51	2.25	0.29	15.84	6.26	93.02	41.90	230.95	51.44	510.79	105.55	9545.73	3.16
JZW-05-11	0.02	130.31	0.11	1.58	3.71	0.41	20.98	7.99	112.68	49.38	269.79	59.22	565.94	118.07	9352.64	3.25
JZW-05-12	0.04	76.73	0.18	3.36	6.28	1.17	30.87	9.68	115.40	41.82	194.90	36.86	321.93	63.52	7503.40	8.37
JZW-05-13	1.79	40.57	0.66	3.93	3.52	1.07	17.39	5.33	64.40	23.70	112.27	22.47	202.84	42.93	6998.19	10.62
JZW-05-14	0.66	48.84	0.33	3.03	4.37	1.26	23.31	7.33	87.03	32.30	153.62	30.04	271.22	56.70	7003.49	10.91
JZW-05-15	0.05	130.81	0.12	1.70	4.54	0.38	31.69	12.24	163.89	64.75	323.48	63.61	568.70	110.20	8744.06	96.47
JZW-05-16	1.55	114.35	0.58	3.30	2.65	0.40	14.91	6.35	90.90	41.05	240.62	56.82	574.96	124.76	10613.62	11.62

续表 2

点 号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ti
JZW-05-17	0.13	105.48	0.11	1.25	2.43	0.20	16.52	6.89	101.80	46.14	259.45	57.74	559.63	116.49	9370.74	2.92
JZW-05-18	0.00	82.78	0.05	0.75	2.08	0.30	14.98	6.27	93.53	42.84	247.67	55.98	555.67	120.49	9649.52	3.92
JZW-05-19	0.01	80.57	0.06	0.96	2.62	0.33	18.22	7.30	107.43	47.87	270.70	60.27	589.80	126.89	9435.65	2.74
JZW-05-20	8.71	104.45	2.31	7.61	3.21	0.33	15.11	6.12	92.77	43.24	253.77	59.23	583.61	127.17	9470.15	3.59
JZW-05-21	0.01	77.44	0.18	2.57	5.66	0.49	33.74	12.07	166.50	69.42	366.97	76.42	693.62	140.40	9343.39	2.52
JZW-05-22	0.00	75.07	0.06	0.87	2.38	0.26	14.64	6.07	87.75	39.06	219.58	49.56	476.16	100.63	9733.09	2.22
JZW-05-23	1.26	86.98	0.34	1.98	2.80	0.31	15.16	6.18	89.07	38.68	213.55	47.83	459.09	96.91	9677.14	10.20
JZW-05-24	0.01	126.17	0.08	1.40	3.07	0.23	22.62	9.35	137.96	61.41	339.00	74.70	694.82	144.57	8805.60	3.66
JZW-05-25	0.00	74.81	0.06	0.95	2.10	0.29	14.64	5.88	84.45	36.56	202.35	45.24	433.01	92.05	10068.98	1.79
JZW-05-26	15.22	157.07	3.59	17.78	17.15	1.83	82.79	27.13	328.20	118.13	539.31	102.02	857.80	165.30	8373.90	4.73
JZW-05-27	3.88	140.22	1.02	5.08	4.97	0.31	30.43	11.90	161.00	65.97	333.79	68.31	602.43	120.86	8710.49	3.78
JZW-05-28	0.03	69.00	0.04	0.76	1.85	0.18	12.35	4.78	72.68	31.85	178.35	39.74	382.00	80.10	9697.32	2.73
JZW-05-29	0.02	126.55	0.08	1.08	2.05	0.24	13.69	5.81	92.59	44.53	273.11	65.87	664.95	147.45	10278.35	1.93
JZW-05-30	72.90	243.84	14.56	48.56	15.56	1.42	52.46	16.10	199.04	74.98	360.71	71.52	614.60	122.51	8529.27	9.80

附表 3 锆石 Ti 含量与锆石晶出温度计算结果

Table A3 Ti content in zircon and calculation results of zircon crystallization temperature

点号	Ti/10 ⁻⁶	1a _{SiO₂}	2a _{TiO₂}	3a _{TiO₂}	a _{TiO₂}	1T/°C	2T/°C	3T/°C
JZW-01-01	24.80	1	0.9	0.5	0.3	851	922	992
JZW-01-02	3.41	1	0.9	0.5	0.3	662	711	758
JZW-01-03	14.24	1	0.9	0.5	0.3	791	855	917
JZW-01-04	48.92	1	0.9	0.5	0.3	934	1017	1099
JZW-01-05	19.33	1	0.9	0.5	0.3	823	891	957
JZW-01-06	3.16	1	0.9	0.5	0.3	656	704	751
JZW-01-07	8.04	1	0.9	0.5	0.3	735	792	848
JZW-01-08	2.91	1	0.9	0.5	0.3	650	697	743
JZW-01-09	3.44	1	0.9	0.5	0.3	663	712	759
JZW-01-10	1.85	1	0.9	0.5	0.3	616	660	702
JZW-01-11	4.47	1	0.9	0.5	0.3	684	735	785
JZW-01-12	5.45	1	0.9	0.5	0.3	701	754	805
JZW-01-13	3.57	1	0.9	0.5	0.3	666	715	762
JZW-01-14	4.10	1	0.9	0.5	0.3	677	727	776
JZW-01-15	3.72	1	0.9	0.5	0.3	669	719	766
JZW-01-16	7.31	1	0.9	0.5	0.3	727	783	837
JZW-01-17	3.99	1	0.9	0.5	0.3	675	725	773
JZW-01-18	3.68	1	0.9	0.5	0.3	668	718	765
JZW-01-19	4.14	1	0.9	0.5	0.3	678	728	777
JZW-01-20	6.07	1	0.9	0.5	0.3	710	764	817

续表 3

点号	Ti/10 ⁻⁶	1aSiO ₂	2aTiO ₂	3aTiO ₂	aTiO ₂	1T/°C	2T/°C	3T/°C
JZW-01-21	7.20	1	0.9	0.5	0.3	725	781	835
JZW-01-22	4.99	1	0.9	0.5	0.3	693	746	796
JZW-01-23	2.15	1	0.9	0.5	0.3	627	672	715
JZW-01-24	9.84	1	0.9	0.5	0.3	754	814	871
JZW-01-25	4.53	1	0.9	0.5	0.3	685	737	786
JZW-01-26	3.37	1	0.9	0.5	0.3	661	710	757
JZW-01-27	3.52	1	0.9	0.5	0.3	665	714	761
JZW-01-28	4.10	1	0.9	0.5	0.3	677	727	776
JZW-01-29	7.91	1	0.9	0.5	0.3	734	791	846
JZW-01-30	4.13	1	0.9	0.5	0.3	677	728	777
JZW-02-01	2.46	1	0.9	0.5	0.3	637	683	727
JZW-02-02	1.82	1	0.9	0.5	0.3	615	659	701
JZW-02-03	8.20	1	0.9	0.5	0.3	737	794	850
JZW-02-04	3.17	1	0.9	0.5	0.3	656	705	751
JZW-02-05	2.46	1	0.9	0.5	0.3	637	683	727
JZW-02-06	7.14	1	0.9	0.5	0.3	724	780	834
JZW-02-07	2.49	1	0.9	0.5	0.3	638	684	729
JZW-02-08	3.83	1	0.9	0.5	0.3	671	721	769
JZW-02-09	5.89	1	0.9	0.5	0.3	707	761	813
JZW-02-10	6.59	1	0.9	0.5	0.3	717	772	825
JZW-02-11	9.18	1	0.9	0.5	0.3	748	806	863
JZW-02-12	11.70	1	0.9	0.5	0.3	771	832	892
JZW-02-13	1.82	1	0.9	0.5	0.3	615	659	701
JZW-02-14	7.56	1	0.9	0.5	0.3	730	786	841
JZW-02-15	8.45	1	0.9	0.5	0.3	740	798	853
JZW-02-16	4.33	1	0.9	0.5	0.3	681	732	781
JZW-02-17	8.53	1	0.9	0.5	0.3	741	799	854
JZW-02-18	3.06	1	0.9	0.5	0.3	654	702	748
JZW-02-19	1.80	1	0.9	0.5	0.3	614	658	700
JZW-02-20	4.03					675	726	774
JZW-02-21	3.18					657	705	751
JZW-02-22	4.31	1	0.9	0.5	0.3	681	732	781
JZW-02-23	3.00	1	0.9	0.5	0.3	652	700	746
JZW-02-24	6.83	1	0.9	0.5	0.3	720	776	829
JZW-02-25	12.87	1	0.9	0.5	0.3	780	843	904
JZW-02-26	22.54	1	0.9	0.5	0.3	840	910	978
JZW-02-27	7.76	1	0.9	0.5	0.3	732	789	844

续表 3

点号	Ti/10 ⁻⁶	1aSiO ₂	2aTiO ₂	3aTiO ₂	aTiO ₂	1T/°C	2T/°C	3T/°C
JZW-02-28	2.09	1	0.9	0.5	0.3	625	670	713
JZW-02-29	2.31	1	0.9	0.5	0.3	632	678	722
JZW-02-30	2.34	1	0.9	0.5	0.3	633	679	723
JZW-03-01	4.36	1	0.9	0.5	0.3	682	733	782
JZW-03-02	6.53	1	0.9	0.5	0.3	716	771	824
JZW-03-03	2.58	1	0.9	0.5	0.3	641	687	732
JZW-03-04	3.09	1	0.9	0.5	0.3	654	702	749
JZW-03-05	4.46	1	0.9	0.5	0.3	684	735	784
JZW-03-06	2.70	1	0.9	0.5	0.3	644	691	736
JZW-03-07	11.75	1	0.9	0.5	0.3	771	833	892
JZW-03-08	14.47	1	0.9	0.5	0.3	792	856	919
JZW-03-09	2.08	1	0.9	0.5	0.3	625	670	712
JZW-03-10	3.19	1	0.9	0.5	0.3	657	705	752
JZW-03-11	8.00	1	0.9	0.5	0.3	735	792	847
JZW-03-12	5.50	1	0.9	0.5	0.3	701	755	806
JZW-03-13	3.19	1	0.9	0.5	0.3	657	705	752
JZW-03-14	4.03	1	0.9	0.5	0.3	675	726	774
JZW-03-15	4.95	1	0.9	0.5	0.3	693	745	795
JZW-03-16	3.40	1	0.9	0.5	0.3	662	711	758
JZW-03-17	3.61	1	0.9	0.5	0.3	667	716	763
JZW-03-18	13.66	1	0.9	0.5	0.3	787	850	911
JZW-03-19	16.06	1	0.9	0.5	0.3	803	869	932
JZW-03-20	9.35	1	0.9	0.5	0.3	749	808	865
JZW-03-21	3.37	1	0.9	0.5	0.3	661	710	757
JZW-03-22	3.11	1	0.9	0.5	0.3	655	703	749
JZW-03-23	4.68	1	0.9	0.5	0.3	688	740	789
JZW-03-24	3.76	1	0.9	0.5	0.3	670	720	767
JZW-03-25	3.31	1	0.9	0.5	0.3	660	708	755
JZW-03-26	2.68	1	0.9	0.5	0.3	643	690	735
JZW-03-27	3.12	1	0.9	0.5	0.3	655	703	749
JZW-03-28	3.82	1	0.9	0.5	0.3	671	721	769
JZW-03-29	4.12	1	0.9	0.5	0.3	677	728	776
JZW-03-30	6.90	1	0.9	0.5	0.3	721	777	830
JZW-04-01	3.90	1	0.9	0.5	0.3	673	723	771
JZW-04-02	4.16	1	0.9	0.5	0.3	678	729	777
JZW-04-03	3.57	1	0.9	0.5	0.3	666	715	762
JZW-04-04	4.56	1	0.9	0.5	0.3	686	737	787

续表 3

点号	Ti/10 ⁻⁶	1aSiO ₂	2aTiO ₂	3aTiO ₂	aTiO ₂	1T/°C	2T/°C	3T/°C
JZW-04-05	3.47	1	0.9	0.5	0.3	663	713	760
JZW-04-06	16.71	1	0.9	0.5	0.3	807	873	937
JZW-04-07	2.74	1	0.9	0.5	0.3	645	692	737
JZW-04-08	6.03	1	0.9	0.5	0.3	709	764	816
JZW-04-09	6.42	1	0.9	0.5	0.3	715	770	823
JZW-04-10	2.27	1	0.9	0.5	0.3	631	677	720
JZW-04-11	2.80	1	0.9	0.5	0.3	647	694	739
JZW-04-12	2.55	1	0.9	0.5	0.3	640	686	731
JZW-04-13	10.30	1	0.9	0.5	0.3	759	818	876
JZW-04-14	6.04	1	0.9	0.5	0.3	710	764	816
JZW-04-15	13.14	1	0.9	0.5	0.3	783	845	906
JZW-04-16	4.02	1	0.9	0.5	0.3	675	726	774
JZW-04-17	4.07	1	0.9	0.5	0.3	676	727	775
JZW-04-18	5.88	1	0.9	0.5	0.3	707	761	813
JZW-04-19	9.08	1	0.9	0.5	0.3	747	805	862
JZW-04-20	4.38	1	0.9	0.5	0.3	682	733	783
JZW-04-21	4.23	1	0.9	0.5	0.3	679	730	779
JZW-04-22	4.98	1	0.9	0.5	0.3	693	745	796
JZW-04-23	8.39	1	0.9	0.5	0.3	739	797	852
JZW-04-24	2808.17	1	0.9	0.5	0.3	1892	2174	2486
JZW-04-25	4.35	1	0.9	0.5	0.3	682	733	782
JZW-04-26	4.89	1	0.9	0.5	0.3	691	744	794
JZW-04-27	13.87	1	0.9	0.5	0.3	788	852	913
JZW-04-28	9.06	1	0.9	0.5	0.3	746	805	861
JZW-04-29	12.07	1	0.9	0.5	0.3	774	836	896
JZW-04-30	3.62	1	0.9	0.5	0.3	667	716	764
JZW-05-01	13.91	1	0.9	0.5	0.3	788	852	914
JZW-05-02	3.61	1	0.9	0.5	0.3	667	716	763
JZW-05-03	4.44	1	0.9	0.5	0.3	683	735	784
JZW-05-04	2.46	1	0.9	0.5	0.3	637	683	727
JZW-05-05	3.73	1	0.9	0.5	0.3	669	719	767
JZW-05-06	2.95	1	0.9	0.5	0.3	651	698	744
JZW-05-07	2.30	1	0.9	0.5	0.3	632	678	721
JZW-05-08	3.71	1	0.9	0.5	0.3	669	718	766
JZW-05-09	7.32	1	0.9	0.5	0.3	727	783	837
JZW-05-10	3.16	1	0.9	0.5	0.3	656	704	751
JZW-05-11	3.25	1	0.9	0.5	0.3	658	707	753

续表 3

点号	Ti/10 ⁻⁶	1a _{SiO₂}	2a _{TiO₂}	3a _{TiO₂}	a _{TiO₂}	1T/°C	2T/°C	3T/°C
JZW-05-12	8.37	1	0.9	0.5	0.3	739	797	852
JZW-05-13	10.62	1	0.9	0.5	0.3	762	822	880
JZW-05-14	10.91	1	0.9	0.5	0.3	764	825	883
JZW-05-15	96.47	1	0.9	0.5	0.3	1031	1128	1225
JZW-05-16	11.62	1	0.9	0.5	0.3	770	832	891
JZW-05-17	2.92	1	0.9	0.5	0.3	650	698	743
JZW-05-18	3.92	1	0.9	0.5	0.3	673	723	772
JZW-05-19	2.74	1	0.9	0.5	0.3	645	692	737
JZW-05-20	3.59	1	0.9	0.5	0.3	666	716	763
JZW-05-21	2.52	1	0.9	0.5	0.3	639	685	730
JZW-05-22	2.22	1	0.9	0.5	0.3	629	675	718
JZW-05-23	10.20	1	0.9	0.5	0.3	758	817	875
JZW-05-24	3.66	1	0.9	0.5	0.3	668	717	765
JZW-05-25	1.79	1	0.9	0.5	0.3	614	658	699
JZW-05-26	4.73	1	0.9	0.5	0.3	689	741	790
JZW-05-27	3.78	1	0.9	0.5	0.3	670	720	768
JZW-05-28	2.73	1	0.9	0.5	0.3	645	692	737
JZW-05-29	1.93	1	0.9	0.5	0.3	619	664	706
JZW-05-30	9.80	1	0.9	0.5	0.3	754	813	871

*锆石Ti饱和温度计算公式据Ferry and Watson（2007）

$$T(K)=\frac{5.711(\pm0.072)}{4800(\pm86)}-\frac{[\log(ppm_{Ti-in-zircon})+\log(a_{SiO_2})-\log(a_{TiO_2})]}{4800(\pm86)}$$

*1T， 2T， 3T分别为1a_{SiO₂}， 2a_{SiO₂}， 3a_{SiO₂}活度对应的锆石晶出温度