

吉林省石头口门地区早二叠世砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义

宋志刚^{1,2}, 丛文爽^{1,2}, 张天宇^{1,2}, 高丽华^{1,2}, 马启合³, 韩作振^{1,2}

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 山东省沉积成矿与沉积矿产重点实验室, 山东 青岛 266590;

3. 中国冶金地质总局青岛地质勘查院, 山东 青岛 266109)

摘要:通过对吉林省石头口门地区早二叠世砂岩进行野外地质考察、薄片镜下观察和碎屑锆石 U-Pb 年代学研究,探讨其形成时代、物源及构造环境。长石岩屑杂砂岩的碎屑颗粒具有分选和磨圆度差以及成分复杂的特征,表明为近源快速堆积的产物。获得 114 颗碎屑锆石 U-Pb 年龄介于 480~276 Ma,可划分出晚石炭世—早二叠世(322~276 Ma)和早石炭世(349~323 Ma) 2 个主要年龄组,另有 4 个早古生代和中泥盆世年龄。通过区域岩浆事件对比,推测石头口门地区早二叠世砂岩的物源主要来自华北板块北缘晚石炭世—早二叠世活动陆缘型岩浆岩,少量来自研究区附近的早石炭世岩浆岩、早古生代岩浆弧、晚志留世—中泥盆世弧-陆碰撞岩浆岩以及华北板块前寒武纪变质基底。综合碎屑锆石年龄频谱、沉积以及构造背景资料分析,认为石头口门早二叠世砂岩应是活动大陆边缘环境下海底扇沉积序列的组成部分,并在古亚洲洋闭合过程中作为基质与一系列成分、规模和时代复杂的构造岩块或岩片共同构成了蛇绿混杂岩。

关键词:碎屑锆石;砂岩;二叠纪;活动大陆边缘;石头口门地区

中图分类号:P597

文献标志码:A

Detrital zircon U-Pb ages from Early Permian sandstones in Shitoukoumen area, Jilin Province and their geological significance

SONG Zhigang^{1,2}, CONG Wenshuang^{1,2}, ZHANG Tianyu^{1,2},

GAO Lihua^{1,2}, MA Qihe³, HAN Zuozhen^{1,2}

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Mineral of Shandong Province,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. Qingdao Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Qingdao 266109, China)

Abstract: We present detailed field geological investigations, petrographic observations, and detrital zircon U-Pb data studies of Early Permian sandstones in the Shitoukoumen area, Jilin Province, to discuss their age, provenance and tectonic settings. The Shitoukoumen lithic graywacke is characterized by poor sorting and roundness, as well as complex composition, implying that it is the result of short distance transport and quick accumulation. The U-Pb ages of the 114 obtained detrital zircons range from 480 to 276 Ma, which can be divided into two main age groups: Late Carboniferous-Early Permian (322~276 Ma) and Early Carboniferous (349~323 Ma). There are four other

收稿日期:2023-10-23

基金项目:国家自然科学基金项目(42302244)

作者简介:宋志刚(1988—),男,山东滨州人,讲师,博士,主要从事岩石学和地球化学研究。

韩作振(1965—),男,河南新乡人,教授,博士生导师,主要从事沉积学和大地构造学研究,本文通信作者。

E-mail:hanzz@163.com

ages of Early Paleozoic and Middle Devonian. By comparing the regional magmatic events, we speculate that the clastic materials of Early Permian sandstones are mainly derived from the Late Carboniferous-Early Permian active continental margin magmatic rocks in the northern margin of the North China Block. Besides, the Early Carboniferous magmatic rocks, the Early Paleozoic magmatic arc, and the Devonian arc-continent collisional magmatic rocks near the study area, together with the Precambrian metamorphic basement of North China Craton, contribute a small number of debris. According to the comprehensive analysis of spectral characteristics of detrital zircon ages, sedimentary features, and tectonic background of the study area, we infer that the Early Permian sandstone should belong to a submarine fan that was formed in an active continental margin setting. As the base materials, the Early Permian sandstones in the Shitoukoumen area, together with a series of tectonic rocks and slices with complex components, scales and ages, constitute the ophiolitic mélangé during the closure of the Paleo-Asian Ocean.

Key words: detrital zircon; sandstone; Permian; active continental margin; Shitoukoumen area

研究区吉林省石头口门地区位于长春市以东 50 km 处,兴蒙造山带东南缘,古亚洲洋晚古生代对接带上。20 世纪 90 年代,该地区晚古生代地层中因识别出硅质岩以及锰结核而成为地质学家关注的焦点^[1]。然而,对其形成时代和构造背景具有不同的认识:①Zhu 等^[1]根据生物碎屑灰岩中识别出的晚石炭世威宁期蠕类化石以及岩石组合特征,认为该地层是一套形成于大陆边缘的晚石炭世裂陷槽沉积物;②蚀变中性火山岩的锆石 U-Pb 定年结果进一步显示,该地层剖面中还发育早石炭世构造岩片^[2];③Gehrels 等^[3]对该地层中新识别出的流纹质凝灰岩开展锆石 U-Pb 测年,获得的加权平均年龄为 276 ± 3 Ma,表明火山作用发生在早二叠世;④Cai 等^[4]新近报道的碎屑锆石 U-Pb 年龄表明上述地层的部分沉积岩形成时代不早于早二叠世。由此可见,有关石头口门地区地层的形成时代及其构造指示意义尚需进一步研究。

本研究在重新梳理前人资料基础上,对石头口门地区晚古生代地层开展了详细野外地质调查,采集其中两件砂岩样品开展碎屑锆石 U-Pb 年代学和锆石微量元素分析,为限定其形成时代、揭示沉积碎屑物质来源,探讨其沉积时的大地构造背景提供线索和依据。

1 地质背景与样品描述

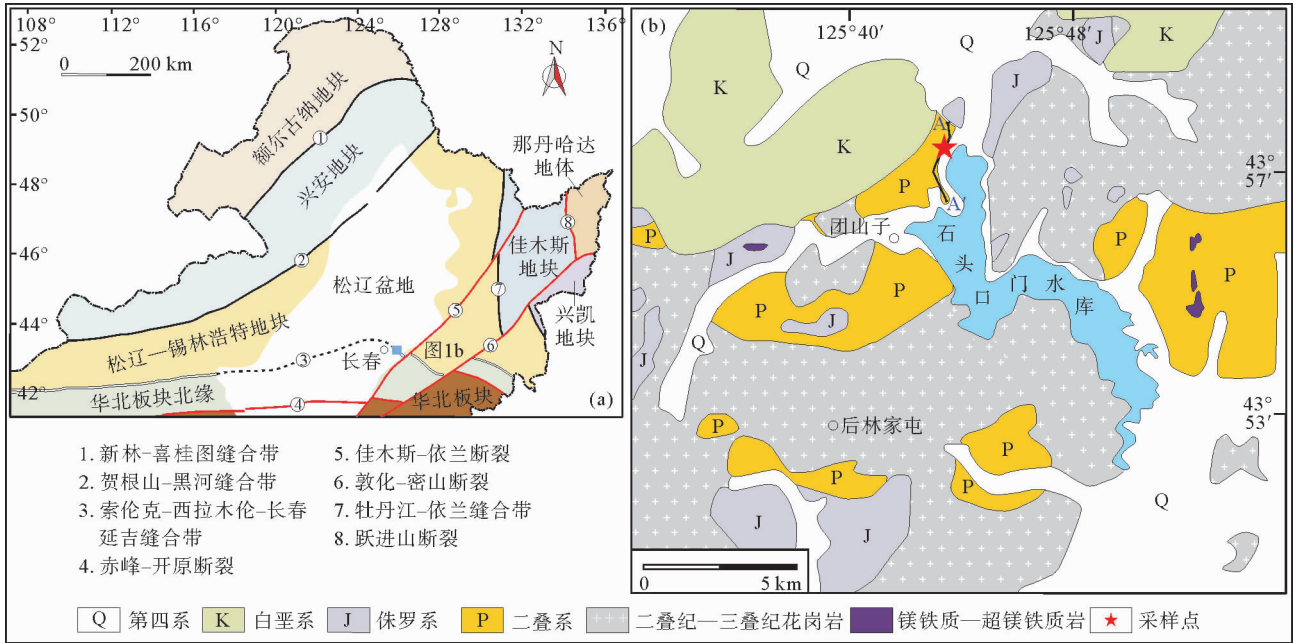
吉林省石头口门地区位于长春-延吉古亚洲洋晚古生代缝合带上(图 1),早古生代经历了古亚洲洋沟弧体系的演化,并于早古生代晚期发生了弧-陆碰撞。晚石炭世—二叠纪,在古亚洲洋板片南向俯冲作用的驱动下,华北板块北缘转变为活动大陆边缘^[3],俯冲作用持续至二叠纪末—三叠纪^[5]。

研究区古生代地层主要包括早石炭世地层、晚石炭世地层、早二叠世地层(图 2)。其中,早石炭世地层以岩块形式零星出露于石头口门水库西北岸,岩性以蚀变玄武安山岩和蚀变玄武粗安岩为主^[2];晚石炭世地层是前文所述位于石头口门水库西岸的含晚石炭世威宁期蠕类化石的生物碎屑灰岩^[1];早二叠世地层在研究区出露相对较多,在石头口门水库西岸、辛家窑和后刘家屯等均有出露,是一套夹少量钙碱性火山岩的海相沉积地层,岩性自下而上主要有结晶灰岩、粉砂岩、硅质泥岩、含砾杂砂岩、安山岩、复成分砾岩和含砾长石杂砂岩,另有部分结晶灰岩透镜体。

此外,石头口门-波泥河一带还被视为长春-延吉缝合带内蛇绿混杂岩出露的关键地区,该地区的一套杂岩组合主要为镁铁质-超镁铁质杂岩、基性熔岩、辉绿岩墙、深海相放射虫硅质岩和少量安山质-英安质海相火山岩岩块杂乱镶嵌在杂砂岩之中,保留了“岩块在基质中”的特征。刘永江等^[6]认为该混杂岩与开山屯、机房沟-水曲柳和小绥河-新华村共同构成一条蛇绿混杂岩带,代表二叠纪具有一定规模的古亚洲洋洋盆的残留。

研究样品为采自石头口门水库大坝西端附近的长石岩屑杂砂岩(SH-10 和 19STKM-1),岩石新鲜面呈灰色,块状构造,中粒碎屑结构,碎屑颗粒以岩屑和长石为主(图 3(a)~3(c)),其中岩屑颗粒约占碎屑颗粒的 60%,主要为中酸性火山岩碎屑,其次为硅质岩碎屑,长石约占碎屑颗粒的 40%,以斜长石为主,局部发生黏土化。岩石整体为颗粒支撑,局部可见杂基支撑,填隙物主要为泥质和少量铁质胶结物,在碎屑颗粒之间

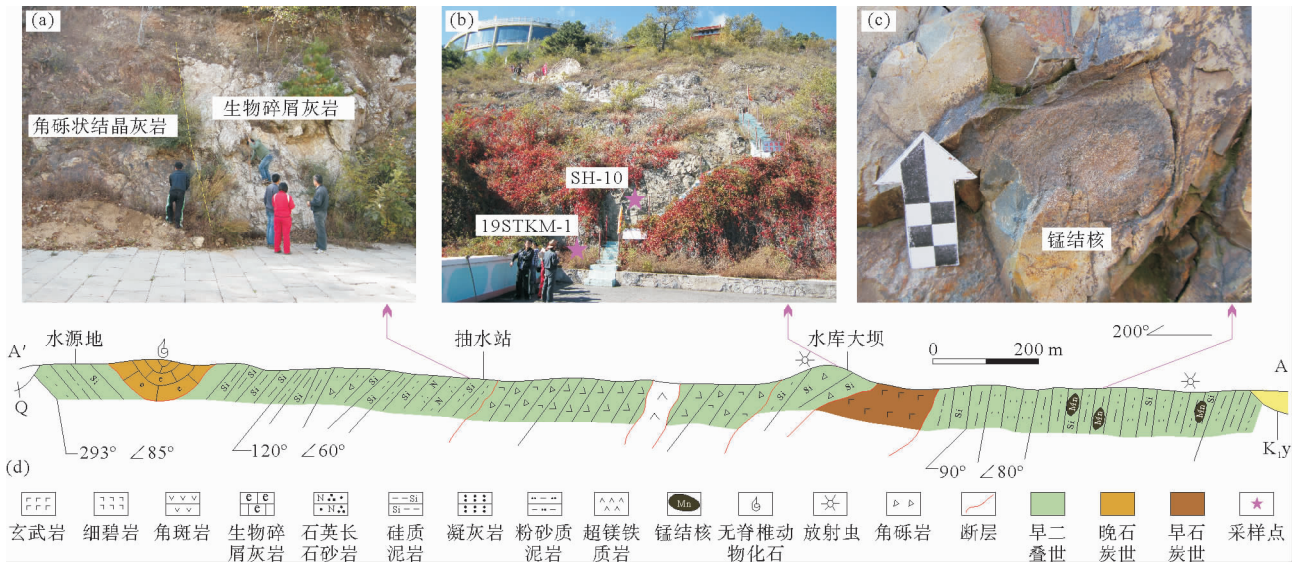
不均匀分布。碎屑颗粒的分选性和磨圆度均较差,结合岩屑和长石成分的复杂性,反映了物源多样性和近源快速堆积的特征。此外,在样品 SH-10 中还观察到重结晶的蠕化石(图 3(d))。



(a)东北地区大地构造略图及研究区位置,修改自 Song 等^[5]; (b)石头口门地区地质简图,修改自 Shi 等^[3]

图 1 石头口门地区构造位置及地质简图

Fig. 1 Tectonic location and simplified geological map of the Shitoukoumen area

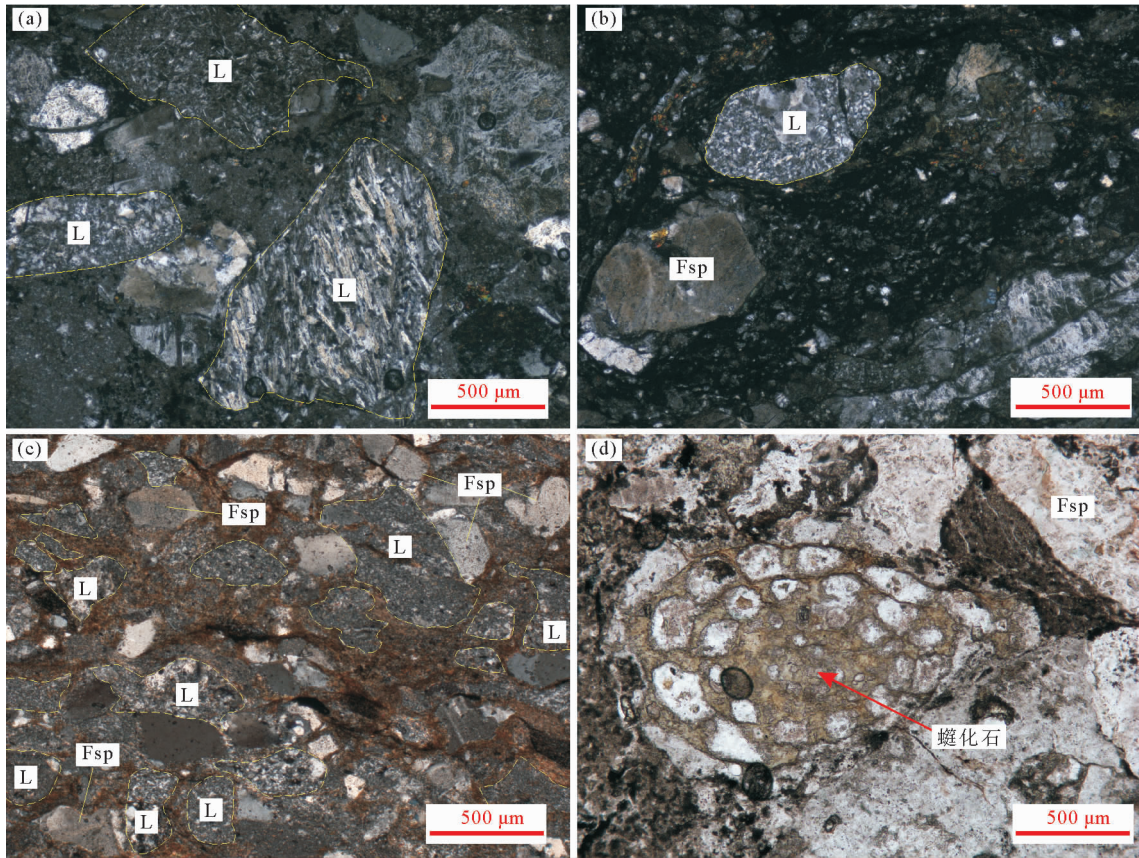


(a)九台泵站角砾状结晶灰岩及生物碎屑灰岩;(b)石头口门水库大坝地层露头及采样点;(c)石头口门水库大坝北侧砂岩中的锰结核;

(d)石头口门水库地层剖面图,修改自郑春子等^[1]和宋晨^[4]

图 2 吉林省石头口门水库西北岸地层剖面图及野外照片

Fig. 2 Geological section and field pictures of strata on northwest bank of the Shitoukoumen reservoir, Jilin Province



(a)~(c)岩屑杂砂岩中的岩屑及长石,正交偏光;(d)岩屑杂砂岩中的蠕化石,重结晶严重,单偏光;L-岩屑,Fsp-长石

图 3 石头口门地区岩屑杂砂岩镜下照片

Fig. 3 Photomicrographs of the lithic graywacke in the Shitoukoumen area

2 分析测试方法

样品 SH-10 的锆石分选工作由河北省廊坊市廊坊区域地质调查院完成,碎屑锆石的制靶和阴极发光(cathodoluminescence, CL)图像拍摄均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成;样品 19STKM-1 的锆石分选、制靶和 CL 图像拍摄均由廊坊市地岩矿物分选有限公司完成。样品 SH-10 和 19STKM-1 的碎屑锆石 U-Pb 测年和锆石微量元素测试工作分别在西北大学大陆动力学国家重点实验室和山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室完成,采用的方法均为激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法(laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry, LA-ICP-MS)。

西北大学大陆动力学国家重点实验室的实验仪器为搭载 GeoLas 200M 型激光剥蚀系统的 Agilent 7500a 型 ICP-MS,测试过程中采用单点剥蚀,激光剥蚀频率为 6 Hz,束斑直径 32 μm,剥蚀物质载气为 He,锆石标样采用 91500 和 GJ-1,成分标样采用人造硅酸盐玻璃 NIST SRM 610。利用 Glitter 4.0 软件对原始数据进行处理并计算同位素比值和元素含量。山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室的实验仪器为搭载 GeoLas HD 型激光剥蚀系统的 Agilent 7900 ICP-MS,原始数据的处理采用 ICPMSDataCal 10.9 软件。

3 碎屑锆石 U-Pb 年龄及稀土元素特征

3.1 碎屑锆石特征和 U-Pb 年龄

2 个样品的碎屑锆石特征一致,均为透明的黄粉色,呈自形至半自形的柱状或断柱状;锆石粒径一般在 50~150 μm,个别可达 250~350 μm,长宽比介于 1:1~3:1;CL 图像显示,2 个样品中的锆石普遍发育清

晰的岩浆振荡环带(图 4)。

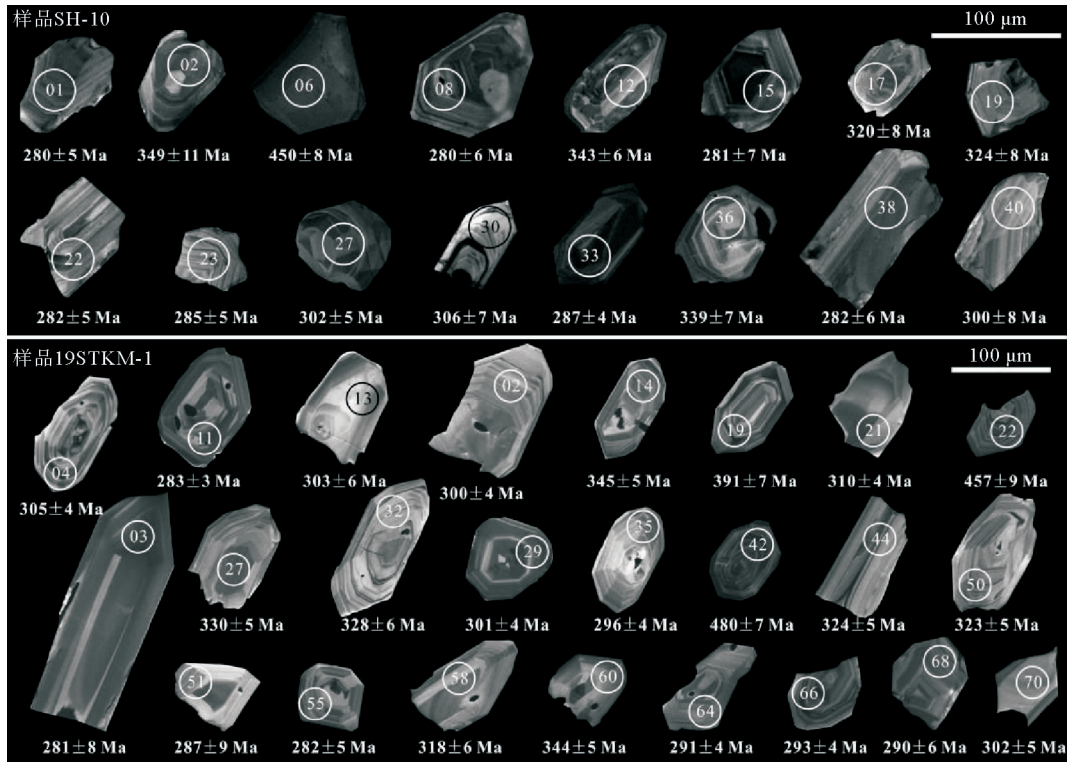


图 4 石头口门地区岩屑杂砂岩代表性锆石 CL 图像

Fig. 4 Representative CL images of zircons from the lithic graywacke in the Shitoukoumen area

对样品 SH-10 中的 42 颗锆石进行 U-Pb 年龄分析, 所获 42 个测点结果均为谐和年龄(图 5(a)), 其 Th、U 含量和 Th/U 比值分别为 $31 \times 10^{-6} \sim 492 \times 10^{-6}$ 、 $60 \times 10^{-6} \sim 649 \times 10^{-6}$ 和 0.13~0.97。42 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄跨度较小, 介于 450~279 Ma, 其中 35 颗锆石的年龄在 306~279 Ma 之间连续分布, 形成了 285 Ma 的主要年龄峰值, 6 颗锆石的年龄分布在 349~320 Ma, 形成 345 Ma 的次要年龄峰值, 另有 1 颗锆石的年龄为 450 Ma(图 5(b))。

对样品 19STKM-1 中的 72 颗锆石进行 U-Pb 分析, 所获 72 个测点结果均为谐和年龄(图 5(d)), 它们的 Th、U 含量和 Th/U 比值分别为 $19 \times 10^{-6} \sim 485 \times 10^{-6}$ 、 $47 \times 10^{-6} \sim 1\ 031 \times 10^{-6}$ 和 0.32~1.50。72 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 480~276 Ma, 其中 69 颗锆石的年龄在 306~279 Ma 连续分布, 形成了 302 Ma 的主要年龄峰值, 剩余 3 颗锆石的年龄分别为 480、457 和 391 Ma(图 5(e))。

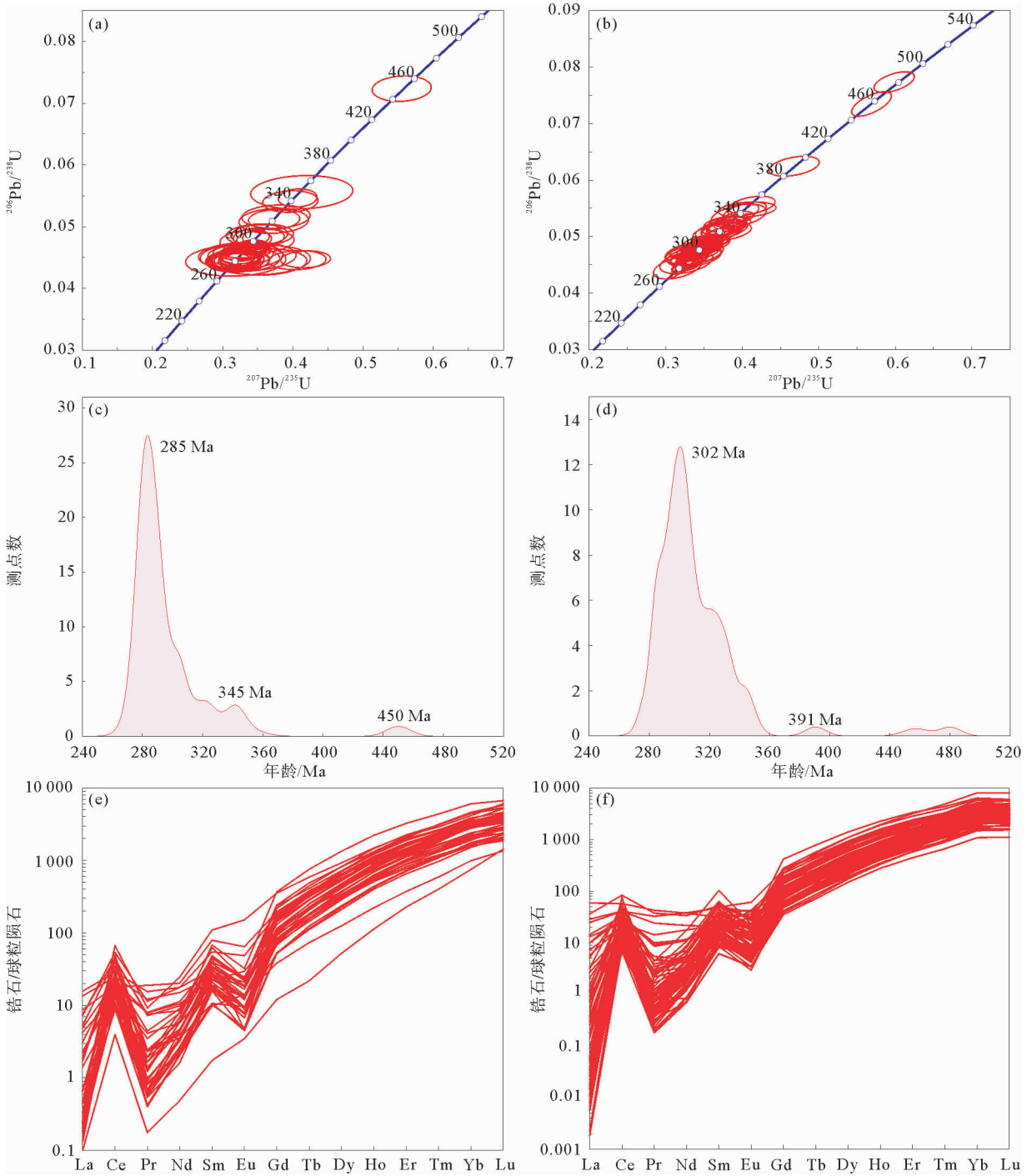
3.2 碎屑锆石稀土元素特征

测试结果显示, 样品 SH-10 和样品 19STKM-1 中的碎屑锆石具有相似的稀土元素特征, 具有较高的稀土元素(rare earth element, REE)总量($237 \times 10^{-6} \sim 2\ 724 \times 10^{-6}$)和相对较低的 Hf/Y 比值(2.04~36.13)。在球粒陨石标准化稀土元素模式配分图中, 所有碎屑锆石均表现出亏损轻稀土元素和富集重稀土元素的左倾型特征($(\text{Dy}/\text{Yb})_{\text{N}} = 0.07 \sim 0.29$), 并显示出明显的 Ce 正异常($\text{Ce}/\text{Ce}^* = 1.13 \sim 252.19$)和 Eu 负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.03 \sim 0.75$)(图 5(c)、图 5(f))。

4 讨论

4.1 沉积时限约束

1978 年, 吉林省地质局区调大队开展长春市幅 1:20 万区调工作时, 确认了研究区早二叠世地层的存



(a) 样品 SH-10 碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图; (b) 样品 19STKM-1 碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图; (c) 样品 SH-10 碎屑锆石 U-Pb 年龄概率密度图; (d) 样品 19STKM-1 碎屑锆石 U-Pb 年龄概率密度图; (e) 样品 SH-10 碎屑锆石球粒陨石标准化稀土元素配分模式图; (f) 样品 19STKM-1 碎屑锆石球粒陨石标准化稀土元素配分模式图; 球粒陨石数据引自文献[7]

图 5 石头口门地区岩屑杂砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图、概率密度图和球粒陨石标准化稀土元素配分模式图
 Fig. 5 Concordia diagrams of detrital zircon U-Pb ages, probability density plots and chondrite-normalized REE partition diagrams of detrital zircons from the lithic graywacke in the Shitoukoumen area

在。1992 年, 长春地质学校开展泉眼幅 1 : 5 万区调工作时, 在石头口门水库西北岸晚古生代地层中首次发现的硅质岩以及后续彭玉鲸发现的与细碧角斑岩组合共生的锰结核受到了地质学界的广泛关注^[1]。遗憾的是, 当时并未获得具有时代意义的古生物化石和同位素依据, 仅通过区域地层对比将硅质岩所属地层划归寒

家屯组,其精确形成时代仍是一个悬而未决的问题。后来,郑春子等^[1]报道了该套地层灰岩中鉴定出的晚石炭世威宁期昆虫化石,并主张将该地层新建为晚石炭世“石头口门组”,定义为一套海底火山喷发沉积岩系。2001年,吉林省地质调查院将该区域的地层划归为石炭纪余富屯组。

然而,近年来的同位素年代学数据表明,仅仅依靠有限的化石证据就将上述整套岩石地层单元视为某一时代的产物显然低估了该地区的构造复杂程度。例如,焦骥^[2]对石头口门水库西北岸的蚀变玄武安山岩-蚀变玄武粗安岩进行了二次离子质谱锆石 U-Pb 定年,结果表明火山岩的形成时代为早石炭世(359~351 Ma);Shi 等^[3]在该套地层的一件流纹质凝灰岩样品中获得了 276 ± 3 Ma 的火山作用年龄;宋晨^[4]则利用“石头口门组”沉积岩和流纹质凝灰岩样品中的最年轻锆石年龄(分别为 270 和 276 Ma)将沉积岩的沉积时代限定在早二叠世。这些新近报道的年龄数据说明石头口门水库西北岸这套火山沉积岩可能是一套不具有史密斯地层特征的构造混杂岩。

本研究碎屑锆石 U-Pb 年代学结果为进一步厘清石头口门地层单元的年代学特征提供了新的证据。截止目前,地质学家已提出了多种利用碎屑锆石数据限定地层最大沉积年龄的方法,如最年轻的单颗粒锆石年龄、最年轻的年龄峰值或加权平均年龄(至少 3 颗或 6 颗最年轻碎屑锆石年龄)等^[8]。就本次研究的 2 个样品而言,利用最年轻年龄峰值来限定最大沉积年龄的方法显然是不适用的,这是由于样品 19STKM 中石炭纪碎屑锆石的比例相对较高,导致其最年轻年龄峰值明显老于样品 SH-10(图 5)。因此,本研究选择利用最年轻单颗粒锆石年龄和 3 颗最年轻碎屑锆石的加权平均年龄两种方法对沉积年龄进行制约。样品 SH-10 和 19STKM-1 中最年轻的碎屑锆石年龄分别为 279 ± 9 Ma(测点 SH-10-3)和 276 ± 4 Ma(测点 19STKM-1-12),2 个样品中 3 颗最年轻碎屑锆石的加权平均年龄分别为 280 ± 7 Ma(MSWD=0.01)和 279 ± 6 Ma(MSWD=0.58)。采用上述两种方法获得的最大沉积年龄在误差范围内一致,表明本次研究的长石岩屑杂砂岩的沉积时限不早于早二叠世,至少不早于 276 Ma。这一结果与宋晨^[4]报道的 4 个碎屑锆石年龄以及 Shi 等^[3]报道的火山岩年龄一致,上述证据表明出露在石头口门水库西北岸的晚古生代火山沉积岩系的主体应形成于早二叠世。此外,该地区报道的早石炭世变质火山岩也是不可忽视的重要组成部分,结合早期研究报道的晚石炭世含昆虫类化石灰岩,本研究认为前人划分的“石头口门组”应是主体为早二叠世的火山沉积岩系和少量早石炭世以及晚石炭世等构造岩片或岩块以构造接触的方式混杂堆积而成。因此,该剖面不同位置地质体的时代归属仍值得进一步研究。

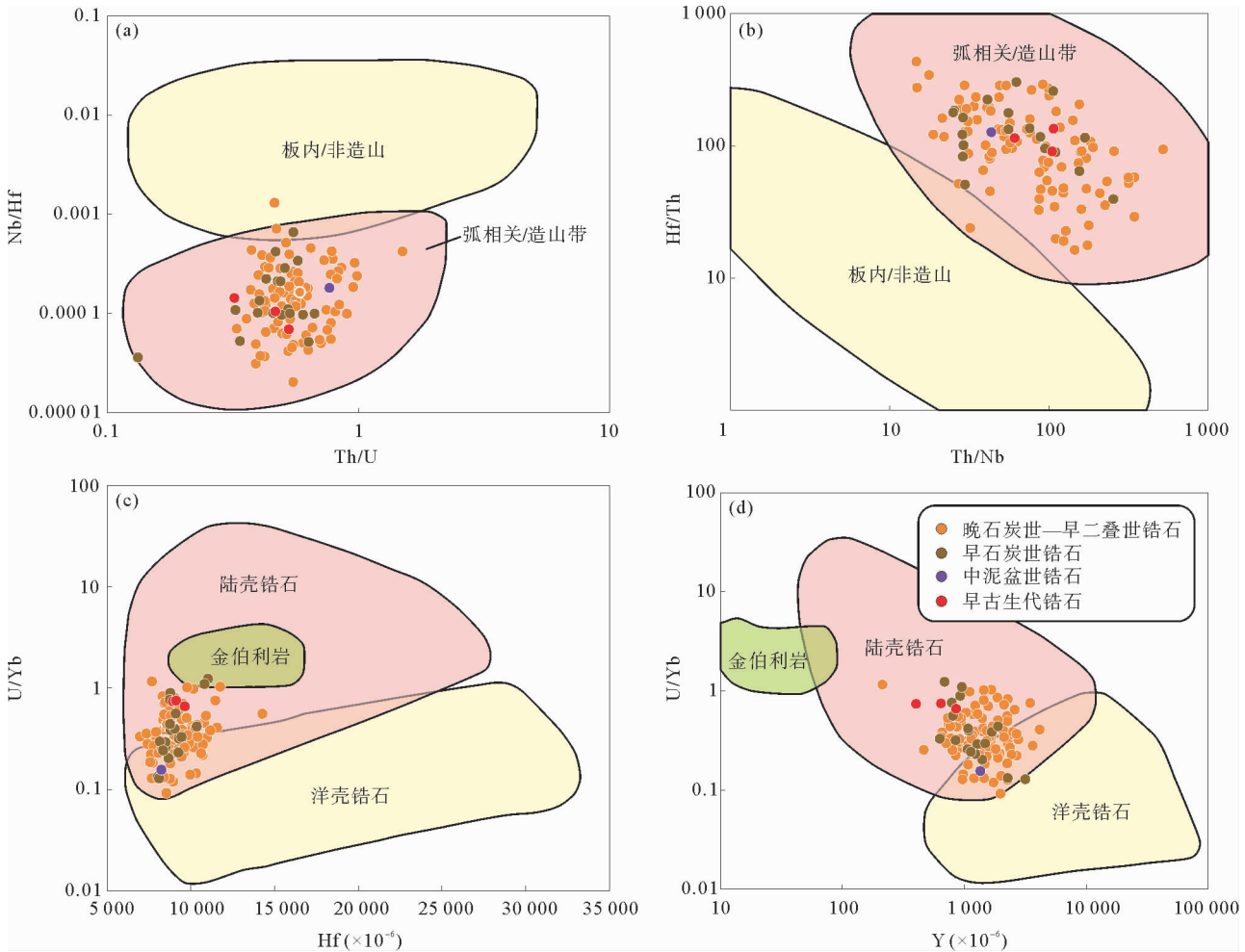
4.2 物源分析

锆石具有极强的耐磨和耐风化特性,是沉积岩中广泛分布且最稳定的矿物之一,利用碎屑锆石的外形特征、年龄谱系特征和微量元素特征可以有效推测沉积岩的碎屑物质来源^[9]。本研究 2 个岩屑杂砂岩样品中的碎屑锆石自形程度好且磨圆度较差,显示出近源沉积的特征,这一认识也与岩相学观察结果一致:岩屑杂砂岩中的碎屑颗粒多为不规则的棱角-次棱角状(图 3),磨圆度和分选性均较差;石头口门剖面局部见含砾或角砾的层状砂岩、粉砂岩或硅质岩,其中砾石的磨圆度和分选性极差,棱角明显^[1]。上述证据均指示了快速近源堆积的特征。在 CL 图像中,大多数碎屑锆石具有清晰的韵律环带结构,结合高的 Th/U 比值(除 1 颗锆石为 0.13,其余均为 0.32~1.50)以及具有明显 Ce 正异常和 Eu 负异常的稀土配分模型,表明样品中的碎屑锆石大多为岩浆成因^[10]。此外,在锆石成因判别图解中(图 6),本次研究的碎屑锆石均落入陆壳成因锆石和弧相关/造山带区域内,表明碎屑岩物源主要为与弧或造山背景相关的陆壳岩石^[11-12]。因此,石头口门早二叠世岩屑杂砂岩碎屑物质的可能来源以近源的与弧或造山作用相关的陆壳岩浆岩为主。

从碎屑锆石年龄组成来看,石头口门早二叠世岩屑杂砂岩的物源并不复杂,本研究 2 个样品 114 颗碎屑锆石的年龄全部为古生代:

1) 3 颗锆石的年龄为奥陶纪(480、457 和 450 Ma),1 颗锆石的年龄为中泥盆世(391 Ma)。前人研究表明,早古生代在华北板块北缘曾存在一条近东西向延伸的岩浆弧带,位于研究区附近的早古生代岩浆岩有晚寒武世—早志留世(486~444 Ma)张家屯变质火成杂岩(斜长角闪岩-角闪辉长岩-变辉绿岩-石英闪长岩-英云闪长岩)^[13-15]、晚寒武世—中奥陶世(492~460 Ma)头道沟变质火成杂岩(蛇纹石化橄榄岩-透闪石化辉石岩-变辉长岩-变辉绿岩-变辉绿玢岩-变闪长岩-斜长角闪岩-斜长阳起石岩-变玄武岩)^[15-16]、中奥陶世

(467 Ma)小绥河辉石安山岩^[13]、晚奥陶世—晚志留世(446~420 Ma)西蟒仗岩体(石英闪长岩-英云闪长岩)^[13,17]、早志留世庆丰火山岩(安山岩-流纹岩)^[18]、伊通县中—晚志留世(426~419 Ma)放牛沟火山岩和桃山组火山岩(变安山岩-流纹英安岩-流纹岩)^[13,19]以及法库地区晚奥陶世方家屯岩组火山岩和早志留世花岗闪长岩^[20]。此外,华北板块北缘加里东期岩浆岩与上覆西别河组之间存在区域上的角度不整合接触,结合早泥盆世磨拉石沉积建造的存在,认为上述早古生代岩浆弧与华北板块在晚志留世—中泥盆世发生碰撞,期间形成了一系列陆壳增厚型埃达克质岩浆岩^[21]。因此,推测石头口门岩屑杂砂岩中少量的早古生代和中泥盆世碎屑锆石来源于华北板块北缘早古生代岩浆弧以及与晚志留世—中泥盆世弧-陆碰撞相关的岩浆岩。



(a) Nb/Hf-Th/U 锆石成因判别图; (b) Hf/Th-Th/Nb 锆石成因判别图; (c) U/Yb-Hf 锆石成因判别图; (d) U/Yb-Y 锆石成因判别图; 底图引自文献[11-12]

图 6 石头口门地区岩屑杂砂岩锆石成因判别图

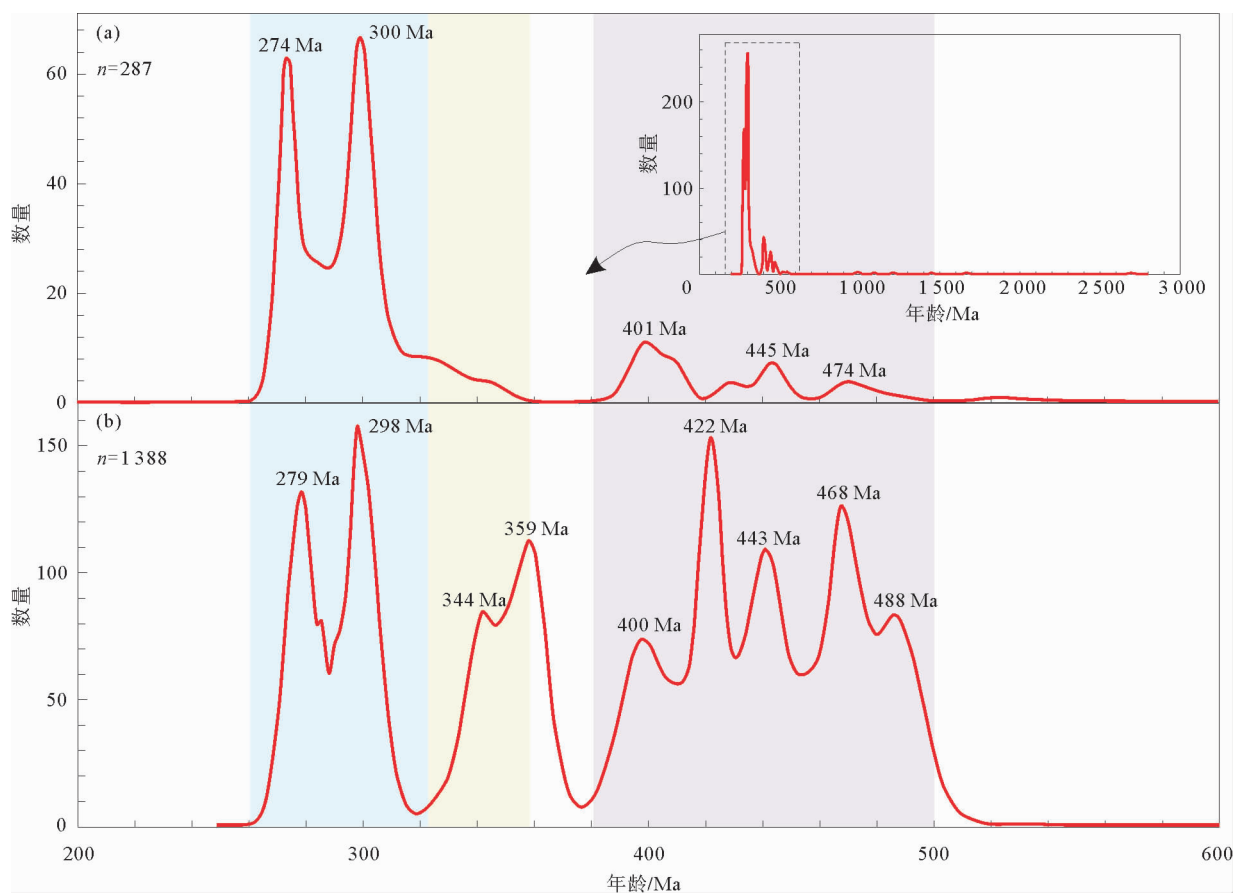
Fig. 6 Genetic discrimination diagrams for zircons from the lithic graywacke in the Shitoukoumen area

2) 19 颗锆石的年龄为早石炭世(349~323 Ma)。研究区及周边地区的早石炭世岩浆岩并不多见,目前仅在 4 个地区有零星的地质体出露:焦骥^[2]在研究区“石头口门组”地层中识别出早石炭世(359~355 Ma)变玄武质粗面安山岩和变粗面安山岩,同时在永吉县附近原“南楼山组”地层中识别出了早石炭世(357 Ma)流纹质凝灰岩和流纹岩;Wang 等^[22]在长春市九台区四楞山岩体中识别出了早石炭世碱性花岗岩;辽宁省北部昌图县下二台镇盘岭一带出露一套早石炭世变质火山岩,其岩性主要包括角闪变粒岩、变玄武安山岩、变英安岩和变流纹岩,原岩形成年龄介于 348~341 Ma^[23-24]。上述结果表明,吉林省长春市周边至辽宁省北部

昌图县存在较为广泛的早石炭世岩浆活动,该时期形成的岩浆岩是石头口门岩屑杂砂岩中早石炭世碎屑锆石的主要来源。

3) 91 颗锆石的年龄为晚石炭世—早二叠世(322~276 Ma)。近年来的研究表明,由于古亚洲洋板块南向俯冲作用,华北板块北缘在晚石炭世—早二叠世为活动大陆边缘^[5],并广泛存在与上述俯冲作用相关的岩浆事件:辽宁北部法库一带出露一系列早二叠世(283~274 Ma)岩浆岩,如原“盘岭组”火山岩、哈户硕岩体和何屯岩体等^[20,25];位于本研究区东侧和东南侧的桦甸至蛟河一带发育一套早二叠世地层——大河深组,该地层中广泛分布的火山岩具有石炭纪末—早二叠世(302~279 Ma)的形成年龄^[26];位于本研究区西南侧的伊通县放牛沟一带亦有早二叠世火山岩的相关报道^[27-28];如前所述,Shi 等^[3]在石头口门地区同样报道了早二叠世(276 Ma)流纹质凝灰岩的存在。因此,推测石头口门岩屑杂砂岩中 322~276 Ma 的碎屑锆石来源于上述与古亚洲洋板块南向俯冲相关的晚石炭世—早二叠世岩浆岩。

综合上述分析,本研究认为石头口门地区早二叠世沉积岩的碎屑物质主要来自研究区附近的晚石炭世—早二叠世活动陆缘型岩浆岩,少量碎屑物质来自近源的早石炭世岩浆岩,另有极少量碎屑物质来自华北板块北缘早古生代岩浆弧以及与晚志留世—中泥盆世弧-陆碰撞相关的岩浆岩(图 7)。需要注意的是,宋晨^[4]在石头口门早二叠世沉积岩中还发现 4 颗磨圆度相对较高的新太古代—中元古代锆石,表明有极少量来自华北板块前寒武纪变质基底的碎屑物质。



(a) 石头口门早二叠世碎屑岩, 锆石年龄数据来自文献^[4]和本研究数据;

(b) 辽北-吉中地区寒武纪—早二叠世岩浆岩, 锆石年龄数据来自文献^[2-3,13-20,22-24,25-28]

图 7 石头口门早二叠世碎屑岩和辽北-吉中地区寒武纪—早二叠世岩浆岩锆石年龄相对频率分布图

Fig. 7 Relative frequency plot of zircon data of Early Permian clastic rocks in the Shitoukoumen area and Cambrian-Early Permian magmatic rocks in the Northern Liaoning Province and central Jilin Province

4.3 沉积构造背景分析

前已述及,针对石头口门地区古生代地层的沉积构造背景,已有不少学者开展了研究工作,并提出了不同观点,主要包括大陆边缘裂陷槽、开阔洋盆和弧后盆地等^[29],但这些早期观点的提出缺乏系统年代学格架的支撑。前人提出的所谓“石头口门组”不具有典型意义上的地层属性,将其视为同一时期的地质产物进行沉积构造背景分析显然是不合适的。从现有研究成果来看,石头口门地区的早石炭世变质火山岩(早期认为的细碧角斑岩系)和晚石炭世含蠕类化石灰岩均是规模极小且延伸有限的构造岩块或岩片,石头口门剖面主要地质体的沉积时代为早二叠世,本研究仅对早二叠世沉积岩系进行沉积构造背景分析。

沉积盆地的构造属性主要受控于构造变动,区域上的构造演化必然导致沉积盆地的沉积作用变化。作为地质事件的良好记录载体,沉积岩中的碎屑锆石是揭示物源变化、火山活动和古地理格局变迁的重要工具。前人研究发现,不同构造背景下的沉积盆地具有明显不同的碎屑物质来源,进而表现出具有明显差异的碎屑锆石年龄谱系特征:形成于汇聚型板块边缘的沉积岩往往富含大量与沉积时代接近的碎屑物质,表现出单峰的碎屑锆石 U-Pb 年龄频谱特征;形成于伸展或碰撞构造背景下的沉积岩中往往含有更高比例的古老碎屑物质,表现出双峰乃至多峰的碎屑锆石 U-Pb 年龄频谱特征^[9]。而石头口门岩屑杂砂岩的沉积年龄为早二叠世,在本研究样品和前人研究的早二叠世碎屑沉积岩样品中均含有大量的早二叠世碎屑锆石以及与之时代相近的石炭纪碎屑锆石^[4],而相对古老的碎屑锆石极为稀少,这表明与沉积作用同时期的岩浆活动频繁,指示沉积构造背景可能为活动大陆边缘^[9]。

蠕类通常生活在相对温暖的海域,二叠纪早期西拉木伦-长春-延吉以北的海域因水温较低主要发育北方生物群(如厚壳腕足类和小型单体珊瑚等冷水动物群),以南则因海水温度适中主要发育特提斯型生物群(如特提斯型蠕和群体珊瑚等暖水动物群)^[20],石头口门早二叠世砂岩中蠕类化石的存在表明其沉积地点可能相对靠近华北板块而非东北地块群。少量新太古代—中元古代碎屑锆石的存在进一步验证了石头口门早二叠世碎屑岩应形成于华北板块北缘。大量岩浆岩的证据表明华北板块北缘在晚石炭世—二叠纪为活动大陆边缘,受控于古亚洲洋板块的南向俯冲^[5],前文提及的早二叠世辽北法库火山岩和吉林省中部大河深组火山岩均属于钙碱性安山岩-英安岩-流纹岩组合,与典型的活动大陆边缘火山弧岩浆岩组合一致^[25-26]。这些火山岩与伊通县放牛沟地区的早二叠世火山岩以及法库地区的同时代哈户硕和何屯花岗质岩体均表现出与俯冲作用相关岩浆岩类似的地球化学特征,进一步指示了活动大陆边缘的构造背景^[20,28]。此外,本次识别出的早二叠世沉积岩与前述大河深组以及伊通地区含早二叠世火山岩地层(原石缝组)为一套含中酸性火山岩的陆源碎屑岩-碳酸盐岩建造,亦符合活动大陆边缘沉积环境的特征^[28]。前人曾对研究区的硅质岩进行地球化学分析,结果亦表明硅质岩的形成环境与大陆边缘具有亲缘性^[29]。从沉积特征讲,石头口门地区早二叠世沉积岩中发育重力滑塌构造以及小型鲍马序列,与浊积扇沉积序列特征类似,局部出现的逆粒序层理、砂岩透镜体以及分选和磨圆较差的含砾砂岩同样反映了高能的水动力条件。此外,该地层中蠕类化石、硅质岩及锰结核的存在,可以确定其为海相沉积无疑。综上分析,认为石头口门早二叠世砂岩可能是华北板块北缘海底扇沉积序列的组成部分,研究区内蛇绿岩残片和不同时代构造岩片的存在表明,该砂岩所属的沉积岩系在古亚洲洋闭合过程中作为基质与一系列不同规模、成分和时代的岩块共同构成了蛇绿混杂岩。

5 结论

- 1) 碎屑锆石 U-Pb 定年结果表明,长石岩屑杂砂岩的沉积时限至少不早于 276 Ma,即早二叠世。
- 2) 物源分析表明,石头口门长石岩屑杂砂岩的碎屑物质主体来自吉林省中部地区的晚石炭世—早二叠世活动陆缘型岩浆岩,少量碎屑物质来自研究区附近的早石炭世岩浆岩,另有极少量碎屑物质来自华北板块北缘早古生代岩浆弧、晚志留世—中泥盆世弧-陆碰撞相关的岩浆岩以及华北板块前寒武纪变质基底。
- 3) 石头口门早二叠世长石岩屑杂砂岩应是古亚洲洋板块俯冲作用下华北板块北缘海底扇沉积序列的组成部分,并在古亚洲洋闭合过程中成为蛇绿混杂岩的基质。

本研究区岩屑杂砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄及微量元素组成数据可通过出版平台下载获取。

参考文献:

- [1] 郑春子,王光奇,杨树源,等.吉林晚石炭世威宁期石头口门裂陷槽的发现及地质意义[J].地质论评,1999,45(6):632-639. ZHENG Chunzi,WANG Guangqi,YANG Shuyuan,et al. Discovery of Late Carboniferous Weining age fauna from Shitoukoumen faulted trough basin in Jilin and its implication[J]. Geological Review,1999,45(6):632-639.
- [2] 焦骥.吉中地区早石炭世火山岩年代学、地球化学及其构造意义[D].长春:吉林大学,2020. JIAO Ji. Geochronology,geochemistry and tectonic significance of early Carboniferous volcanic rocks of central Jilin Province[D]. Changchun:Jilin University,2020.
- [3] SHI C L,DING X Z,LIU Y X,et al. Zircon U-Pb geochronology and petrogenesis of Early-Middle Permian arc-related volcanic rocks in central Jilin:Implications for the tectonic evolution of the eastern segment of Central Asian Orogenic Belt[J]. Acta Geologica Sinica(English Edition),2020,94(4):1207-1222.
- [4] 宋晨.长春石头口门组沉积环境及物源:硅质岩和碎屑锆石证据[D].长春:吉林大学,2023. SONG Chen. Sedimentary environment and provenance of Shitoukoumen Formation,Changchun:Evidence from siliceous rocks and detrital zircons[D]. Changchun:Jilin University,2023.
- [5] SONG Z G,HAN Z Z,GAO L H,et al. Permo-Triassic evolution of the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt revisited:Insights from Late Permian igneous suite in the Daheishan Horst,NE China[J]. Gondwana Research,2018,56:23-50.
- [6] 刘永江,冯志强,蒋立伟,等.中国东北地区蛇绿岩[J].岩石学报,2019,35(10):3017-3047. LIU Yongjiang,FENG Zhiqiang,JIANG Liwei,et al. Ophiolite in the eastern Central Asian Orogenic Belt,NE China[J]. Acta Petrologica Sinica,2019,35(10):3017-3047.
- [7] SUN S S,MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts:Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society,London,Special Publications,1989,42:313-345.
- [8] TUCKER R T,ROBERTS E M,HU Y,et al. Detrital zircon age constraints for the Winton Formation,Queensland:Contextualizing Australia's Late Cretaceous dinosaur faunas[J]. Gondwana Research,2013,24:767-779.
- [9] CAWOOD P A,HAWKESWORTH C J,DHUIIME B. Detrital zircon record and tectonic setting[J]. Geology,2012,40(10):875-878.
- [10] HOSKIN P W O,SCHALTEGGER U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry,2003,53:27-62.
- [11] 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,2007,35:643-646.
- [12] YANG J H,CAWOOD P A,DU Y S,et al. Large Igneous Province and magmatic arc sourced Permian-Triassic volcanogenic sediments in China[J]. Sedimentary Geology,2012,261/262:120-131.
- [13] PEI F P,ZHANG Y,WANG Z W,et al. Early-Middle Paleozoic subduction-collision history of the south-eastern Central Asian Orogenic Belt:Evidence from igneous and metasedimentary rocks of central Jilin Province,NE China[J]. Lithos,2016,261:164-180.
- [14] MA H T,MA X,CHEN J F,et al. The Zhangjiatun igneous complex in the southeastern margin of the Central Asian Orogenic Belt,NE China:Evidence for an Early Paleozoic intra-oceanic arc[J/OL]. Journal of Asian Earth Sciences,2020,194. DOI:10.1016/j.jseaes.2019.104182
- [15] DING B Q,PEI F P,WEI J Y,et al. Supra-subduction zone ophiolite generated by the initial subduction of an Early Paleozoic island arc system abutting the northern North China Craton:Evidence from meta-igneous rocks[J]. Gondwana Research,2022,110:90-106.
- [16] SONG Z G,HAN C,LIU H,et al. Early-Middle Ordovician intermediate-mafic and ultramafic rocks in central Jilin Province,NE China:Geochronology,origin,and tectonic implications[J]. Mineralogy and Petrology,2019,113:393-415.
- [17] ZHANG S H,ZHAO Y,YE H,et al. Origin and evolution of the Bainaimiao arc belt:Implications for crustal growth in the southern Central Asian orogenic belt[J]. Geological Society of America Bulletin,2014,126(9/10):1275-1300.
- [18] 张学海,王永胜,臧兴运,等.早古生代古亚洲洋向北俯冲记录:来自吉中地区早志留世岛弧型火山岩的年代学、地球化学证据[J].世界地质,2021,40(4):759-771. ZHANG Xuehai,WANG Yongsheng,ZANG Xingyun,et al. Early Paleozoic northward subduction records of Paleo-Asian

- Ocean; Zircon U-Pb geochronological and geochemical evidence from Early Silurian island-arc volcanic rocks in central Jilin Province[J]. *Global Geology*, 2021, 40(4): 759-771.
- [19] HAN Z Z, SONG Z G, HAN C, et al. U-Pb ages and Hf isotopic composition of zircons and whole rock geochemistry of volcanic rocks from the Fangniugou area: Implications for early-middle Paleozoic tectonic evolution in Jilin Province, NE China[J]. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 2018, 113: 10-23.
- [20] 时溢. 华北板块北缘东段法库地区晚奥陶世-晚三叠世构造演化: 来自岩浆活动证据[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
SHI Yi. Late Ordovician-Late Triassic tectonic evolution of Faku area in the eastern segment of the northern margin of the North China Craton: Evidence from magmatic activity[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [21] 韩作振, 钟文建, 宋志刚, 等. 吉林中部地区小绥河组变质粉砂岩碎屑锆石 U-Pb 年代学研究及其地质意义[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 38(6): 11-22.
HAN Zuozhen, ZHONG Wenjian, SONG Zhigang, et al. U-Pb dating of detrital zircons of metamorphic siltstone from Xiaosuihe Formation in central Jilin Province and its geological significance[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2019, 38(6): 11-22.
- [22] WANG Z W, PEI F P, XU W L, et al. Geochronology and geochemistry of Late Devonian and early Carboniferous igneous rocks of central Jilin Province, NE China: Implications for the tectonic evolution of the eastern Central Asian Orogenic Belt [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 97: 260-278.
- [23] 韩作振, 郭志平, 高丽华, 等. 辽宁昌图地区下二台群盘岭组火山岩年代学及地球化学特征[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 35(5): 1-8.
HAN Zuozhen, GUO Zhiping, GAO Lihua, et al. Geochronology and geochemistry characteristics of volcanic rocks from Panling Formation of Xiaertai Group in Changtu area, Liaoning Province[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2016, 35(5): 1-8.
- [24] 张丽, 张超, 刘永江, 等. 辽北地区早石炭世变质火山岩年代学和地球化学特征: 对华北板块北缘东段构造演化的启示[J]. *岩石学报*, 2020, 36(8): 2394-2412.
ZHANG Li, ZHANG Chao, LIU Yongjiang, et al. Geochronology and geochemistry of the Early Carboniferous meta-volcanic rocks, northern Liaoning Province: Implications for the tectonic evolution of the eastern segment of the northern margin of the North China Block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(8): 2394-2412.
- [25] JING Y, GE W C, DONG Y, et al. Early-Middle Permian southward subduction of the eastern Paleo-Asian Ocean: Constraints from geochronology and geochemistry of intermediate-acidic volcanic rocks in the northern margin of the North China Craton[J/OL]. *Lithos*, 2020, 364/365. DOI: 10.1016/j.lithos.2020.105491.
- [26] 张旭, 肖永春. 吉中蛟河地区大河深组火山岩成因及其构造属性探讨[J]. *长春工程学院学报(自然科学版)*, 2023, 23(3): 52-58.
ZHANG Xu, XIAO Yongchun. Genesis and tectonic attribute of volcanic rocks of the Daheshen Formation in Jiaohe area, central Jilin Province[J]. *Journal of Changchun Institute of Technology(Natural Science Edition)*, 2023, 23(3): 52-58.
- [27] 周中彪, 裴福萍, 王志伟, 等. 吉林中部伊通地区放牛沟火山岩的形成时代及其地质意义[J]. *世界地质*, 2018, 37(1): 46-55.
ZHOU Zhongbiao, PEI Fuping, WANG Zhiwei, et al. Geochronology and geological implications of Fangniugou volcanic rocks in Yitong area, central Jilin Province[J]. *Global Geology*, 2018, 37(1): 46-55.
- [28] 牟芮霆, 裴福萍, 时玉芹, 等. 吉林省伊通地区早二叠世火山岩成因: 锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学证据[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(4): 1117-1131.
MU Ruiting, PEI Fuping, SHI Yuqin, et al. Genesis of Early Permian volcanic rocks in Yitong Area, central Jilin Province: Constraints from zircon U-Pb geochronology and whole-rock geochemistry[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2023, 53(4): 1117-1131.
- [29] 彭玉鲸. 吉林省石头口门硅岩之成因及构造环境[J]. *吉林地质*, 2000, 19(4): 1-10.
PENG Yujing. The origin of the Shitoukoumen silicalite, Jilin Province and its structural setting[J]. *Jilin Geology*, 2000, 19(4): 1-10.

(责任编辑: 齐敏华)

附录:

表 1 石头口门地区岩屑杂砂岩碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄数据

Table 1 LA-ICP-MS detrital zircon U-Pb dating of lithic graywackes in the Shitoukoumen area

测点号	Th/ 10 ⁻⁶	U/ 10 ⁻⁶	Th/ U	同位素比值						年龄/Ma			
				²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		
					1σ		1σ		1σ	1σ	1σ	1σ	
SH-10-1	117	275	0.43	0.051 78	0.002 90	0.317 26	0.015 27	0.044 44	0.000 79	276	123	280	5
SH-10-2	106	227	0.47	0.053 87	0.006 56	0.412 74	0.048 06	0.055 56	0.001 79	366	253	349	11
SH-10-3	98	164	0.60	0.058 73	0.006 97	0.358 59	0.040 55	0.044 28	0.001 41	557	240	279	9
SH-10-4	492	509	0.97	0.052 23	0.003 63	0.326 93	0.020 50	0.045 40	0.000 94	295	151	286	6
SH-10-5	195	204	0.95	0.051 76	0.004 33	0.316 98	0.024 66	0.044 42	0.001 02	275	181	280	6
SH-10-6	66	125	0.53	0.055 64	0.003 20	0.555 17	0.027 78	0.072 36	0.001 36	438	124	450	8
SH-10-7	53	108	0.49	0.052 00	0.005 17	0.325 51	0.030 62	0.045 40	0.001 16	285	212	286	7
SH-10-8	49	111	0.44	0.051 99	0.004 07	0.317 67	0.022 99	0.044 31	0.000 91	285	169	280	6
SH-10-9	102	218	0.47	0.052 17	0.003 44	0.323 47	0.019 11	0.044 96	0.000 89	293	144	284	5
SH-10-10	81	148	0.55	0.067 86	0.004 30	0.418 30	0.023 42	0.044 70	0.000 90	864	126	282	6
SH-10-11	38	95	0.40	0.057 76	0.007 82	0.355 23	0.046 14	0.044 60	0.001 58	521	273	281	10
SH-10-12	98	247	0.40	0.053 99	0.002 85	0.406 85	0.018 19	0.054 64	0.000 97	370	114	343	6
SH-10-13	41	67	0.61	0.054 07	0.007 50	0.336 57	0.045 01	0.045 14	0.001 52	374	285	285	9
SH-10-14	223	261	0.86	0.053 64	0.005 80	0.330 21	0.033 87	0.044 64	0.001 27	356	227	282	8
SH-10-15	247	348	0.71	0.052 38	0.005 21	0.321 41	0.030 20	0.044 50	0.001 18	302	212	281	7
SH-10-16	168	216	0.78	0.051 94	0.007 95	0.318 82	0.047 15	0.044 52	0.001 68	283	317	281	10
SH-10-17	52	99	0.52	0.053 10	0.004 95	0.372 81	0.032 65	0.050 91	0.001 32	333	198	320	8
SH-10-18	40	76	0.53	0.052 18	0.006 61	0.325 60	0.039 58	0.045 25	0.001 41	293	266	285	9
SH-10-19	63	104	0.60	0.052 83	0.004 81	0.376 05	0.032 14	0.051 62	0.001 24	321	194	324	8
SH-10-20	269	459	0.59	0.052 00	0.004 68	0.318 64	0.026 82	0.044 43	0.001 09	286	193	280	7
SH-10-21	39	93	0.42	0.052 02	0.003 45	0.329 76	0.021 38	0.045 95	0.000 68	286	122	290	4
SH-10-22	81	142	0.57	0.052 43	0.003 40	0.323 80	0.018 76	0.044 78	0.000 86	304	141	282	5
SH-10-23	79	144	0.55	0.051 78	0.003 10	0.322 42	0.016 97	0.045 15	0.000 83	276	132	285	5
SH-10-24	181	293	0.62	0.052 21	0.002 36	0.347 42	0.012 39	0.048 25	0.000 79	295	100	304	5
SH-10-25	130	398	0.33	0.052 02	0.003 45	0.329 76	0.021 38	0.045 95	0.000 68	286	122	290	4
SH-10-26	31	68	0.46	0.053 29	0.002 37	0.345 06	0.015 07	0.046 78	0.000 61	343	100	295	4
SH-10-27	92	185	0.50	0.052 18	0.002 89	0.345 01	0.016 37	0.047 94	0.000 85	293	121	302	5
SH-10-28	183	387	0.47	0.053 91	0.002 70	0.342 54	0.016 14	0.046 66	0.000 78	369	113	294	5
SH-10-29	50	104	0.48	0.051 97	0.004 44	0.320 39	0.025 51	0.044 69	0.001 03	284	184	282	6
SH-10-30	76	140	0.54	0.052 49	0.004 28	0.352 30	0.026 64	0.048 66	0.001 11	307	175	306	7
SH-10-31	105	166	0.63	0.052 93	0.003 76	0.373 46	0.024 10	0.051 15	0.001 06	326	153	322	6
SH-10-32	223	298	0.75	0.051 87	0.002 84	0.319 33	0.014 90	0.044 63	0.000 80	280	120	282	5
SH-10-33	210	407	0.52	0.052 46	0.002 65	0.326 24	0.015 03	0.045 46	0.000 70	306	115	287	4
SH-10-34	33	60	0.55	0.052 59	0.005 00	0.353 14	0.031 68	0.048 67	0.001 17	311	203	306	7
SH-10-35	228	288	0.79	0.052 39	0.005 13	0.321 05	0.029 66	0.044 42	0.001 17	302	209	280	7
SH-10-36	42	319	0.13	0.053 18	0.003 82	0.396 67	0.025 95	0.054 07	0.001 15	337	155	339	7

续表 1

测点号	Th/ 10 ⁻⁶	U/ 10 ⁻⁶	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	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
SH-10-37	88	191	0.46	0.051 95	0.003 66	0.318 94	0.020 40	0.044 50	0.000 92	283	153	281	6
SH-10-38	116	177	0.66	0.051 71	0.004 12	0.318 99	0.023 47	0.044 71	0.000 99	273	173	282	6
SH-10-39	419	649	0.65	0.066 08	0.004 86	0.406 34	0.027 12	0.044 57	0.001 02	809	147	281	6
SH-10-40	71	142	0.50	0.053 06	0.005 59	0.349 00	0.034 88	0.047 67	0.001 30	331	223	300	8
SH-10-41	243	291	0.83	0.051 73	0.004 46	0.327 10	0.026 91	0.045 89	0.000 80	272	200	289	5
SH-10-42	52	134	0.39	0.052 82	0.003 93	0.351 58	0.023 92	0.048 24	0.001 03	321	160	304	6
19STKM-1-1	190	245	0.78	0.052 67	0.001 26	0.363 77	0.008 79	0.050 19	0.000 66	322	54	316	4
19STKM-1-2	55	127	0.43	0.052 65	0.001 98	0.342 64	0.012 24	0.047 62	0.000 60	322	82	300	4
19STKM-1-3	162	263	0.62	0.051 08	0.003 10	0.315 61	0.020 90	0.044 55	0.001 35	243	145	281	8
19STKM-1-4	214	216	0.99	0.052 96	0.001 42	0.352 18	0.009 28	0.048 52	0.000 69	328	61	305	4
19STKM-1-5	397	441	0.90	0.052 96	0.001 18	0.352 00	0.008 10	0.048 21	0.000 61	328	50	304	4
19STKM-1-6	92	168	0.55	0.053 30	0.001 64	0.336 11	0.010 24	0.046 08	0.000 74	343	38	290	5
19STKM-1-7	97	176	0.55	0.053 14	0.001 59	0.328 34	0.009 09	0.045 20	0.000 57	345	101	285	4
19STKM-1-8	135	283	0.48	0.052 87	0.001 45	0.329 73	0.009 65	0.045 09	0.000 61	324	61	284	4
19STKM-1-9	71	171	0.41	0.052 38	0.001 74	0.341 07	0.011 34	0.047 40	0.000 77	302	71	299	5
19STKM-1-10	87	112	0.78	0.052 82	0.004 21	0.337 22	0.025 19	0.047 11	0.001 37	320	186	297	8
19STKM-1-11	91	187	0.49	0.053 09	0.001 65	0.327 86	0.010 09	0.044 83	0.000 55	332	103	283	3
19STKM-1-12	478	1 031	0.46	0.052 38	0.000 91	0.314 41	0.005 72	0.043 70	0.000 64	302	41	276	4
19STKM-1-13	30	62	0.49	0.052 60	0.002 71	0.347 29	0.018 14	0.048 14	0.000 99	322	121	303	6
19STKM-1-14	47	98	0.48	0.054 93	0.002 45	0.405 74	0.017 20	0.054 95	0.000 79	409	100	345	5
19STKM-1-15	98	219	0.45	0.053 11	0.001 51	0.354 75	0.010 67	0.048 61	0.000 75	345	32	306	5
19STKM-1-16	91	158	0.57	0.052 71	0.003 79	0.327 05	0.022 98	0.045 48	0.001 33	317	165	287	8
19STKM-1-17	95	182	0.53	0.054 08	0.003 15	0.395 32	0.023 80	0.053 71	0.001 35	376	131	337	8
19STKM-1-18	79	98	0.81	0.053 11	0.002 66	0.329 74	0.015 59	0.045 94	0.000 89	345	113	290	5
19STKM-1-19	65	84	0.77	0.054 60	0.002 52	0.467 84	0.021 72	0.062 46	0.001 16	394	104	391	7
19STKM-1-20	50	80	0.63	0.052 66	0.002 23	0.349 36	0.015 80	0.048 13	0.000 75	322	96	303	5
19STKM-1-21	50	127	0.39	0.053 81	0.001 64	0.361 74	0.010 95	0.049 29	0.000 72	365	66	310	4
19STKM-1-22	100	215	0.47	0.056 41	0.001 66	0.568 94	0.017 17	0.073 49	0.001 43	478	32	457	9
19STKM-1-23	81	129	0.62	0.052 99	0.003 20	0.352 35	0.020 74	0.048 77	0.001 02	328	139	307	6
19STKM-1-24	445	568	0.78	0.052 63	0.001 43	0.353 57	0.010 97	0.048 75	0.000 94	322	61	307	6
19STKM-1-25	138	228	0.60	0.053 31	0.001 47	0.369 91	0.010 72	0.050 53	0.000 65	343	94	318	4
19STKM-1-26	40	93	0.43	0.052 51	0.002 17	0.356 76	0.015 81	0.049 13	0.000 69	309	94	309	4
19STKM-1-27	73	147	0.49	0.052 91	0.001 82	0.383 55	0.014 12	0.052 53	0.000 81	324	106	330	5
19STKM-1-28	108	200	0.54	0.051 81	0.001 70	0.333 94	0.011 25	0.046 85	0.000 67	276	69	295	4
19STKM-1-29	155	185	0.84	0.052 46	0.001 80	0.345 28	0.012 38	0.047 86	0.000 72	306	78	301	4
19STKM-1-30	73	175	0.42	0.053 03	0.001 82	0.347 31	0.012 18	0.047 85	0.000 73	332	78	301	5
19STKM-1-31	485	323	1.50	0.052 39	0.001 63	0.344 95	0.010 80	0.047 74	0.000 66	302	70	301	4
19STKM-1-32	52	114	0.46	0.053 12	0.002 80	0.380 50	0.020 23	0.052 24	0.000 91	345	120	328	6
19STKM-1-33	44	72	0.62	0.052 86	0.002 54	0.338 68	0.015 91	0.047 38	0.000 72	324	109	298	4

续表 1

测点号	Th/ 10 ⁻⁶	U/ 10 ⁻⁶	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	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
19STKM-1-34	286	484	0.59	0.053 11	0.001 51	0.360 01	0.010 23	0.049 27	0.000 93	345	32	310	6
19STKM-1-35	69	124	0.56	0.051 96	0.001 68	0.334 92	0.010 82	0.046 95	0.000 59	283	79	296	4
19STKM-1-36	98	140	0.70	0.052 38	0.001 64	0.349 72	0.010 99	0.048 69	0.000 82	302	72	306	5
19STKM-1-37	52	139	0.37	0.052 44	0.001 57	0.343 62	0.010 88	0.047 49	0.000 79	306	69	299	5
19STKM-1-38	150	282	0.53	0.052 13	0.001 36	0.324 80	0.008 37	0.045 29	0.000 58	300	59	286	4
19STKM-1-39	19	47	0.40	0.053 52	0.004 10	0.336 25	0.023 83	0.046 81	0.001 15	350	174	295	7
19STKM-1-40	429	588	0.73	0.051 80	0.001 26	0.341 12	0.008 27	0.047 77	0.000 69	276	56	301	4
19STKM-1-41	49	128	0.39	0.052 42	0.002 68	0.330 35	0.016 06	0.046 16	0.000 74	306	117	291	5
19STKM-1-42	84	262	0.32	0.056 04	0.001 46	0.598 62	0.017 45	0.077 35	0.001 21	454	57	480	7
19STKM-1-43	360	438	0.82	0.051 82	0.001 51	0.325 16	0.009 25	0.045 62	0.000 72	276	67	288	4
19STKM-1-44	31	92	0.34	0.053 47	0.002 87	0.375 99	0.018 80	0.051 62	0.000 89	350	116	324	5
19STKM-1-45	274	409	0.67	0.052 94	0.001 36	0.387 75	0.011 01	0.052 84	0.000 64	328	25	332	4
19STKM-1-46	81	140	0.57	0.053 44	0.002 57	0.379 04	0.016 84	0.052 23	0.000 87	346	109	328	5
19STKM-1-47	76	146	0.52	0.052 88	0.002 66	0.346 48	0.016 77	0.048 15	0.001 24	324	115	303	8
19STKM-1-48	66	122	0.54	0.052 37	0.001 94	0.367 66	0.014 08	0.051 19	0.000 90	302	85	322	6
19STKM-1-49	68	168	0.40	0.054 29	0.002 59	0.412 81	0.019 95	0.055 55	0.001 05	383	107	349	6
19STKM-1-50	57	115	0.49	0.052 58	0.002 29	0.372 56	0.016 52	0.051 46	0.000 79	309	98	323	5
19STKM-1-51	62	165	0.38	0.052 98	0.002 17	0.328 86	0.013 31	0.045 55	0.001 47	328	93	287	9
19STKM-1-52	45	104	0.43	0.052 91	0.002 44	0.376 60	0.020 05	0.051 38	0.001 12	324	108	323	7
19STKM-1-53	41	97	0.42	0.053 37	0.002 54	0.358 15	0.017 07	0.049 21	0.000 84	346	109	310	5
19STKM-1-54	37	115	0.32	0.053 52	0.001 98	0.373 97	0.013 91	0.051 37	0.000 90	350	83	323	6
19STKM-1-55	156	295	0.53	0.052 32	0.001 43	0.321 85	0.009 40	0.044 71	0.000 73	298	63	282	5
19STKM-1-56	39	108	0.36	0.052 90	0.003 53	0.337 02	0.023 28	0.046 47	0.001 17	324	156	293	7
19STKM-1-57	172	312	0.55	0.052 88	0.001 80	0.380 58	0.016 61	0.051 79	0.001 16	324	78	326	7
19STKM-1-58	31	72	0.43	0.053 46	0.003 02	0.365 19	0.019 57	0.050 61	0.000 98	350	128	318	6
19STKM-1-59	147	274	0.54	0.053 20	0.001 28	0.359 85	0.008 87	0.049 32	0.000 77	345	54	310	5
19STKM-1-60	90	142	0.63	0.054 02	0.003 29	0.406 33	0.025 02	0.054 80	0.000 88	372	137	344	5
19STKM-1-61	67	131	0.51	0.054 30	0.001 87	0.394 47	0.013 33	0.053 39	0.000 70	383	76	335	4
19STKM-1-62	116	206	0.56	0.053 00	0.001 96	0.341 24	0.012 38	0.046 99	0.000 84	328	83	296	5
19STKM-1-63	136	254	0.53	0.053 48	0.002 01	0.398 00	0.015 53	0.054 21	0.001 08	350	85	340	7
19STKM-1-64	64	152	0.42	0.052 76	0.002 14	0.335 19	0.013 51	0.046 17	0.000 71	317	88	291	4
19STKM-1-65	104	138	0.75	0.053 27	0.002 08	0.352 01	0.013 98	0.048 21	0.000 87	339	92	304	5
19STKM-1-66	190	328	0.58	0.051 09	0.001 26	0.328 22	0.008 91	0.046 53	0.000 67	256	57	293	4
19STKM-1-67	122	219	0.55	0.052 98	0.001 69	0.338 42	0.010 37	0.046 83	0.000 79	328	72	295	5
19STKM-1-68	78	185	0.42	0.053 25	0.002 15	0.334 55	0.013 99	0.046 06	0.000 99	339	86	290	6
19STKM-1-69	32	79	0.41	0.053 79	0.002 52	0.373 45	0.017 62	0.051 04	0.000 94	361	106	321	6
19STKM-1-70	74	159	0.46	0.052 17	0.002 04	0.345 68	0.014 82	0.047 91	0.000 83	300	89	302	5
19STKM-1-71	27	47	0.56	0.053 83	0.003 96	0.338 15	0.021 33	0.047 41	0.001 02	365	165	299	6
19STKM-1-72	38	64	0.58	0.052 99	0.003 10	0.375 43	0.024 10	0.050 96	0.001 11	328	133	320	7

表2 石头口门地区岩屑杂砂岩碎屑锆石微量元素组成

Table 2 Zircon trace element compositions of lithic graywackes in the Shitoukoumen area

样品号	Hf	Y	Nb	Ti	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	(Dy/ Yb) _N	Ce/ Ce*	Eu/ Eu*	Hf/ Y
SH-10-1	9 330	2 289	2.76	4.02	0.40	21.17	0.22	2.19	3.89	0.51	30.24	13.12	177	75	352	78	779	147	1 680	0.15	17.16	0.10	4.08
SH-10-2	8 807	1 678	3.70	4.20	0.08	17.09	0.09	1.49	4.04	1.22	26.99	10.53	134	55	261	58	585	111	1 266	0.15	42.29	0.27	5.25
SH-10-3	10 607	1 653	0.54	9.72	0.06	8.80	0.16	2.14	4.72	0.69	29.32	10.69	133	55	238	52	505	86	1 125	0.18	15.07	0.14	6.42
SH-10-4	8 726	1 868	2.83	9.77	1.72	32.86	1.08	8.25	8.36	2.81	37.59	13.61	157	58	265	59	593	105	1 343	0.18	5.77	0.41	4.67
SH-10-5	8 556	1 550	1.59	10.20	0.05	18.58	0.07	2.04	4.66	0.97	23.62	9.32	121	49	234	52	531	98	1 145	0.15	68.47	0.23	5.52
SH-10-6	8 927	401	0.62	6.82	0.03	11.96	0.05	1.13	1.49	0.82	7.84	2.75	32	13	62	15	168	34	350	0.13	56.92	0.59	22.24
SH-10-7	7 926	1 025	0.94	9.59	3.20	15.04	1.16	7.01	3.81	0.71	17.22	6.57	87	35	164	36	367	68	811	0.16	1.91	0.23	7.74
SH-10-8	7 905	985	2.29	9.79	2.07	11.17	0.75	4.90	3.48	0.73	15.68	6.04	81	33	159	35	354	67	774	0.15	2.19	0.25	8.03
SH-10-9	10 097	1 427	1.07	8.96	0.04	9.95	0.05	0.75	2.43	0.44	18.77	7.73	105	46	221	51	518	98	1 079	0.14	46.92	0.14	7.07
SH-10-10	7 679	213	0.16	5.58	0.02	2.42	0.02	0.23	0.27	0.20	2.48	0.81	13	6	38	10	127	36	237	0.07	28.71	0.50	36.13
SH-10-11	10 502	912	2.58	6.79	0.44	24.43	0.23	1.82	2.73	0.44	14.98	5.38	73	30	148	33	321	70	727	0.15	18.79	0.17	11.52
SH-10-12	8 780	922	0.90	3.10	0.33	5.83	0.18	2.12	3.87	0.72	19.98	6.79	83	32	146	30	276	58	665	0.20	5.73	0.20	9.52
SH-10-13	8 242	1 295	1.23	8.26	0.08	13.93	0.06	1.58	3.39	1.71	21.22	8.05	104	44	208	48	489	93	1 036	0.14	46.07	0.47	6.36
SH-10-14	8 825	2 091	2.57	6.45	1.25	26.03	0.72	3.93	5.79	1.09	34.44	13.65	178	69	311	67	653	117	1 480	0.18	6.62	0.18	4.22
SH-10-15	14 272	2 242	0.72	8.62	0.15	12.54	0.22	2.85	7.36	1.33	48.28	15.30	183	71	327	67	622	132	1 490	0.20	13.87	0.16	6.36
SH-10-16	9 039	1 180	0.73	12.62	3.71	17.62	1.47	8.21	4.77	0.80	21.23	8.26	94	39	184	39	372	73	867	0.17	1.85	0.21	7.66
SH-10-17	6 961	776	1.08	15.66	0.10	6.82	0.06	1.64	1.63	0.56	10.80	4.65	60	25	120	28	298	58	616	0.13	21.24	0.31	8.97
SH-10-18	9 546	893	0.40	15.73	0.04	6.43	0.05	1.15	2.70	0.39	16.70	6.01	78	30	136	29	286	50	643	0.18	27.87	0.14	10.69
SH-10-19	8 489	1 063	0.83	5.88	0.11	8.88	0.06	1.25	2.55	0.55	16.04	6.56	84	36	170	39	400	79	844	0.14	25.36	0.20	7.98
SH-10-20	8 931	2 587	1.69	9.17	0.11	40.73	0.87	11.43	16.73	8.74	72.91	21.92	235	84	365	74	705	154	1 790	0.22	13.84	0.65	3.45
SH-10-21	7 716	1 467	0.94	6.63	0.17	6.15	0.22	1.66	3.78	1.09	23.21	9.36	115	48	225	50	504	91	1 078	0.15	6.63	0.27	5.26
SH-10-22	8 687	1 939	1.28	5.85	0.74	14.76	0.42	4.21	6.92	1.41	36.66	13.63	165	64	285	62	592	106	1 353	0.19	6.38	0.22	4.48
SH-10-23	10 188	1 458	2.69	4.24	0.05	28.15	0.06	1.08	2.90	0.76	20.25	8.50	114	48	231	53	555	104	1 167	0.14	107.31	0.22	6.99
SH-10-24	9 474	2 504	0.58	4.06	0.06	9.96	0.12	2.72	6.83	1.27	44.54	16.59	208	83	370	79	754	133	1 709	0.18	21.92	0.17	3.78
SH-10-25	11 754	1 664	0.83	11.32	0.52	10.97	1.79	9.43	12.11	3.73	40.13	14.20	166	52	207	43	385	59	1 006	0.29	1.70	0.47	7.07
SH-10-26	8 947	1 734	0.64	3.87	1.16	13.12	0.76	5.24	6.09	1.37	34.55	12.34	160	60	264	57	565	99	1 279	0.19	3.33	0.23	5.16
SH-10-27	10 087	1 432	0.64	7.58	0.08	7.94	0.08	1.00	3.19	0.54	21.28	8.53	112	46	216	48	474	86	1 026	0.16	21.76	0.15	7.04
SH-10-28	9 450	2 259	6.78	4.94	0.05	26.97	0.13	2.70	5.30	1.05	31.91	13.53	179	73	341	79	780	134	1 667	0.15	56.71	0.19	4.18

续表 2

样品号	Hf	Y	Nb	Ti	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	(Dy/ Yb) _N	Ce/ Ce*	Eu/ Eu*	Hf/ Y
SH-10-29	7 959	916	0.66	10.01	1.01	8.30	0.39	2.69	2.87	0.53	14.00	5.75	77	31	148	33	339	61	725	0.15	3.24	0.21	8.69
SH-10-30	9 753	1 196	2.46	5.05	0.06	17.36	0.08	1.06	2.47	0.39	15.53	6.60	93	39	198	47	495	96	1 011	0.13	53.13	0.15	8.15
SH-10-31	9 543	1 659	0.41	8.20	0.55	8.93	0.33	3.65	5.29	1.09	33.44	11.77	144	55	243	51	478	84	1 120	0.20	5.03	0.19	5.75
SH-10-32	9 758	1 878	1.07	8.56	0.03	13.99	0.06	1.66	4.38	0.69	29.27	12.03	153	62	277	61	587	101	1 303	0.17	59.15	0.14	5.20
SH-10-33	9 526	1 566	4.94	3.85	1.79	27.15	0.69	4.61	3.99	0.55	22.16	9.40	121	50	242	56	578	106	1 224	0.14	6.01	0.14	6.08
SH-10-34	8 815	846	0.43	16.35	0.06	5.58	0.08	1.12	2.77	0.46	16.71	6.04	75	29	128	28	269	48	609	0.19	16.94	0.16	10.42
SH-10-35	7 421	3 630	2.64	7.42	0.16	17.75	0.16	3.22	10.43	1.87	75.80	28.19	339	126	537	111	1 023	170	2 443	0.22	25.03	0.15	2.04
SH-10-36	11 017	688	0.40	4.69	0.08	5.35	0.05	1.06	1.63	0.26	10.69	4.15	53	23	108	25	258	52	542	0.14	19.71	0.14	16.02
SH-10-37	8 400	1 219	1.50	3.94	0.06	10.01	0.04	0.98	2.42	0.26	17.24	6.86	95	39	195	46	489	91	993	0.13	49.45	0.09	6.89
SH-10-38	9 392	2 273	0.68	8.83	0.05	14.61	0.18	3.75	9.56	1.33	49.85	18.16	207	75	316	65	603	99	1 463	0.23	22.06	0.15	4.13
SH-10-39	8 319	2 267	3.82	15.51	0.11	29.98	0.23	2.75	6.80	0.26	36.09	12.90	181	72	338	80	781	136	1 676	0.16	34.21	0.04	3.67
SH-10-40	8 418	1 678	1.37	3.73	0.04	10.58	0.13	2.07	5.01	1.05	29.39	10.81	138	57	266	58	591	112	1 281	0.16	21.86	0.21	5.02
SH-10-41	8 407	1 224	2.25	3.67	0.08	15.39	0.09	1.64	4.15	0.76	21.97	8.52	106	42	190	42	408	73	913	0.17	39.99	0.20	6.87
SH-10-42	10 802	739	0.34	6.38	0.07	5.51	0.04	0.95	1.55	0.29	10.88	4.30	57	24	117	28	292	54	595	0.13	25.74	0.16	14.62
19STKM-1-1	10 957	2 767	0.61	11.61	0.01	11.08	0.28	5.00	9.71	0.99	52.56	18.34	231	85	381	78	756	114	1 743	0.20	12.01	0.11	3.96
19STKM-1-2	10 719	1 049	1.35	3.79	0.00	11.51	0.03	0.79	2.30	0.47	14.75	5.66	80	34	167	41	456	75	888	0.12	122.00	0.19	10.22
19STKM-1-3	7 785	2 353	1.32	9.66	0.29	13.36	0.12	1.97	5.87	2.47	33.37	13.60	175	67	345	83	977	147	1 865	0.12	17.72	0.42	3.31
19STKM-1-4	10 028	1 596	2.41	6.89	0.76	33.09	0.33	2.41	3.89	0.93	25.03	9.38	127	49	247	56	625	101	1 281	0.14	16.30	0.22	6.28
19STKM-1-5	11 578	4 135	1.16	8.62	0.04	23.20	0.42	8.14	15.68	1.33	85.62	29.20	354	128	555	112	1 080	152	2 544	0.22	16.54	0.09	2.80
19STKM-1-6	8 714	1 575	1.72	6.07	0.06	11.97	0.10	1.74	4.59	1.09	29.36	10.00	135	51	240	55	606	90	1 236	0.15	30.65	0.22	5.53
19STKM-1-7	10 268	1 071	1.71	3.57	0.00	11.58	0.04	0.58	1.88	0.26	15.01	5.82	82	34	168	40	444	73	876	0.12	86.78	0.11	9.59
19STKM-1-8	9 273	1 028	1.45	2.23	0.30	14.86	0.10	1.16	2.03	0.29	14.83	5.66	81	32	162	39	466	72	892	0.12	20.68	0.12	9.02
19STKM-1-9	8 335	1 939	3.25	4.46	0.03	14.15	0.10	2.23	5.56	1.01	34.69	13.07	170	66	300	69	725	107	1 508	0.16	39.18	0.17	4.30
19STKM-1-10	8 768	2 258	2.18	6.56	0.26	24.83	0.24	3.03	7.57	2.29	39.84	14.10	188	78	364	80	877	143	1 823	0.14	22.20	0.32	3.88
19STKM-1-11	7 615	2 675	2.18	5.82	0.18	16.25	0.22	4.06	8.85	1.67	54.16	18.61	235	90	397	83	840	125	1 874	0.19	17.60	0.18	2.85
19STKM-1-12	11 470	3 466	14.9	2.76	0.01	46.93	0.07	1.44	5.87	0.27	46.42	20.08	278	111	525	124	1 362	203	2 724	0.14	205.08	0.03	3.31
19STKM-1-13	10 322	978	1.71	3.55	0.00	17.13	0.02	0.34	1.48	0.42	11.48	4.99	74	31	157	37	428	69	831	0.12	252.19	0.22	10.55
19STKM-1-14	8 677	1 401	1.85	5.16	0.50	10.55	0.28	2.31	3.56	0.72	24.26	8.89	119	46	216	47	482	75	1 036	0.17	6.77	0.18	6.19
19STKM-1-15	8 542	1 428	3.14	3.08	0.04	7.15	0.07	1.76	4.27	0.63	24.91	9.12	122	46	216	48	519	77	1 077	0.16	25.12	0.15	5.98

续表 2

样品号	Hf	Y	Nb	Ti	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	(Dy/ Yb) _N	Ce/ Ce*	Eu/ Eu*	Hf/ Y
19STKM-1-16	8 066	2 435	2.07	2.65	0.01	9.68	0.44	2.05	6.56	0.98	45.19	16.14	213	79	361	73	689	117	1 614	0.21	6.86	0.13	3.31
19STKM-1-17	9 103	805	1.01	15.31	0.19	9.05	0.09	0.38	1.70	0.24	9.69	4.17	57	24	125	30	323	63	648	0.12	17.27	0.14	11.31
19STKM-1-18	9 971	1 995	1.05	3.64	0.02	25.02	0.10	2.00	5.54	1.88	35.49	13.29	170	65	303	67	700	106	1 495	0.16	72.12	0.31	5.00
19STKM-1-19	8 237	1 349	1.50	10.51	0.01	15.03	0.07	1.24	3.95	1.28	21.93	7.94	109	43	212	48	541	83	1 088	0.14	65.69	0.33	6.10
19STKM-1-20	7 930	1 450	1.43	11.13	0.01	15.78	0.06	1.51	3.49	1.76	21.68	8.32	111	46	228	55	605	94	1 193	0.12	83.86	0.47	5.47
19STKM-1-21	9 068	1 227	0.96	4.05	0.01	5.74	0.03	0.63	1.30	0.32	7.97	2.90	103	40	182	40	413	63	880	0.17	26.13	0.17	7.39
19STKM-1-22	9 110	642	0.45	5.87	0.01	3.97	0.04	1.23	3.28	0.63	21.62	7.88	44	19	98	24	285	50	539	0.10	58.33	0.24	14.19
19STKM-1-23	10 693	1 526	1.62	3.62	0.35	25.81	0.21	1.41	3.62	0.90	23.65	9.14	122	49	240	53	593	96	1 219	0.14	23.13	0.22	7.01
19STKM-1-24	8 477	2 114	3.61	295.54	1.21	28.29	0.43	3.27	4.54	0.48	30.73	11.64	152	62	310	72	781	126	1 584	0.13	9.62	0.09	4.01
19STKM-1-25	8 733	1 517	1.60	6.74	0.14	13.11	0.09	1.32	2.88	0.40	22.85	8.24	110	46	221	51	572	99	1 149	0.13	27.54	0.11	5.76
19STKM-1-26	9 304	799	1.15	3.03	0.00	8.13	0.02	0.41	1.23	0.36	10.10	3.95	56	24	128	31	367	64	693	0.10	125.64	0.22	11.65
19STKM-1-27	8 489	1 274	0.82	3.82	0.63	8.56	0.26	2.12	3.66	0.52	18.78	7.03	96	39	194	44	502	87	1 004	0.13	5.19	0.15	6.66
19STKM-1-28	8 355	935	1.17	5.81	1.37	12.71	0.37	2.52	1.98	0.42	12.73	4.93	71	29	146	35	410	67	795	0.12	4.32	0.19	8.93
19STKM-1-29	7 354	1 167	0.91	9.98	0.00	13.87	0.05	1.38	3.27	2.39	18.16	6.45	87	36	179	44	517	81	990	0.11	78.64	0.75	6.30
19STKM-1-30	9 768	1 515	1.01	9.65	0.00	8.13	0.07	1.39	4.06	0.53	25.53	9.15	119	47	227	51	557	83	1 132	0.14	34.20	0.12	6.45
19STKM-1-31	7 926	2 669	3.36	10.28	0.11	43.93	0.17	3.18	7.50	3.54	51.92	17.45	216	84	390	83	874	148	1 923	0.17	62.52	0.40	2.97
19STKM-1-32	9 301	847	0.94	4.62	5.81	24.80	2.28	10.09	3.13	0.50	11.94	4.27	60	25	131	32	359	65	735	0.11	1.67	0.22	10.97
19STKM-1-33	8 548	1 972	1.57	7.94	0.00	18.44	0.09	1.57	4.59	2.08	29.73	11.16	151	62	300	70	777	128	1 556	0.13	64.44	0.41	4.33
19STKM-1-34	10 164	1 101	1.28	4.01	0.19	10.57	0.08	1.05	2.15	0.39	14.23	5.95	77	35	175	42	491	78	932	0.10	21.69	0.16	9.24
19STKM-1-35	10 612	1 326	2.24	3.34	0.00	25.01	0.04	0.89	2.66	0.82	20.19	7.60	105	43	212	49	545	88	1 100	0.13	188.35	0.24	8.00
19STKM-1-36	9 556	1 858	0.52	12.99	0.01	11.67	0.22	3.77	8.17	1.16	40.09	13.13	163	60	270	59	617	88	1 335	0.18	15.82	0.16	5.14
19STKM-1-37	9 897	1 074	1.72	4.05	0.09	11.92	0.05	0.92	1.94	0.36	14.41	5.81	82	34	170	41	484	77	925	0.11	42.49	0.15	9.21
19STKM-1-38	9 810	2 109	3.90	3.49	8.51	50.73	3.56	15.78	7.95	0.78	32.91	12.16	167	67	316	74	822	127	1 705	0.14	2.26	0.13	4.65
19STKM-1-39	8 268	463	1.30	1.61	0.01	5.46	0.03	0.33	0.94	0.20	7.20	2.66	37	16	73	17	185	28	373	0.14	49.47	0.17	17.84
19STKM-1-40	9 784	1 438	3.37	1.95	0.22	25.24	0.12	1.41	2.52	0.41	19.95	7.81	110	44	220	51	576	98	1 157	0.13	37.51	0.12	6.80
19STKM-1-41	9 092	912	1.15	3.45	0.00	7.82	0.02	0.41	1.30	0.17	10.65	4.53	63	27	136	34	390	70	744	0.11	128.76	0.10	9.97
19STKM-1-42	9 643	854	1.39	3.06	0.00	5.07	0.03	0.56	1.34	0.45	10.16	3.93	57	25	133	34	396	73	739	0.10	45.28	0.27	11.29
19STKM-1-43	9 031	1 438	2.04	3.44	0.00	18.33	0.04	0.84	3.53	0.48	20.61	7.91	108	43	208	50	542	95	1 098	0.13	125.93	0.13	6.28
19STKM-1-44	9 444	628	0.50	2.36	0.00	4.18	0.02	0.33	0.94	0.20	8.60	3.20	45	19	97	24	279	51	531	0.11	71.69	0.14	15.05

续表 2

样品号	Hf	Y	Nb	Ti	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	(Dy/ Yb) _N	Ce/ Ce*	Eu/ Eu*	Hf/ Y
19STKM-1-45	10 809	953	1.08	4.50	0.09	10.86	0.06	0.89	2.09	0.32	12.61	4.75	67	28	142	34	372	67	742	0.12	36.91	0.15	11.34
19STKM-1-46	8 154	1 478	2.78	4.21	0.01	14.27	0.05	1.28	3.31	0.65	25.50	9.11	120	47	220	47	473	82	1 043	0.17	84.00	0.15	5.52
19STKM-1-47	10 405	1 137	0.65	9.32	0.00	12.13	0.04	0.99	2.91	0.31	19.61	7.21	96	36	169	39	441	57	881	0.15	102.07	0.09	9.15
19STKM-1-48	10 381	866	0.47	8.29	6.74	24.90	3.08	17.77	7.14	0.63	20.90	6.32	79	28	122	27	281	41	666	0.19	1.34	0.15	11.99
19STKM-1-49	9 032	1 083	1.22	3.65	13.90	34.95	4.04	17.52	4.76	0.28	16.85	5.53	77	32	160	38	422	75	902	0.12	1.13	0.09	8.34
19STKM-1-50	9 261	1 229	1.97	3.69	0.00	12.16	0.04	0.59	1.88	0.34	15.48	6.10	88	37	189	45	499	93	987	0.12	101.43	0.13	7.53
19STKM-1-51	7 570	2 245	3.32	2.14	0.01	21.21	0.05	1.68	5.61	0.74	37.58	14.68	204	74	347	78	887	115	1 786	0.15	111.13	0.12	3.37
19STKM-1-52	8 019	2 264	1.79	3.94	0.08	8.04	0.08	1.77	5.56	1.17	38.11	14.69	194	73	323	73	784	105	1 622	0.17	21.85	0.18	3.54
19STKM-1-53	11 171	657	0.41	6.62	0.00	6.30	0.02	0.40	1.53	0.20	9.70	3.77	49	20	96	23	252	39	501	0.13	102.03	0.12	17.02
19STKM-1-54	8 351	1 129	0.91	4.58	0.00	4.90	0.03	0.66	2.31	0.47	15.80	6.31	89	36	174	42	472	73	916	0.13	55.45	0.17	7.40
19STKM-1-55	8 557	1 706	1.61	3.56	3.39	19.85	0.94	5.30	5.06	0.42	25.12	9.69	128	52	249	60	669	104	1 331	0.13	2.68	0.09	5.02
19STKM-1-56	9 008	644	0.80	4.08	3.12	14.36	1.34	8.22	3.39	0.78	10.84	3.74	48	19	97	25	312	46	593	0.10	1.72	0.36	13.98
19STKM-1-57	8 760	1 884	5.80	6.08	0.01	24.51	0.06	1.23	3.68	1.11	28.03	11.49	148	58	276	63	706	101	1 422	0.14	126.60	0.24	4.65
19STKM-1-58	8 778	1 069	0.57	3.60	0.22	6.54	0.16	1.61	2.73	0.83	17.81	6.74	88	35	159	37	396	64	815	0.15	8.28	0.27	8.21
19STKM-1-59	10 909	1 401	0.96	6.35	0.07	13.23	0.07	0.98	2.93	0.38	19.68	7.56	105	42	204	46	514	78	1 034	0.14	40.68	0.11	7.79
19STKM-1-60	10 360	1 072	0.54	11.19	0.00	8.15	0.04	1.17	2.30	0.27	16.15	6.25	80	32	150	33	339	58	727	0.16	66.11	0.10	9.66
19STKM-1-61	8 104	3 156	2.34	3.75	0.17	10.26	0.21	3.14	8.20	1.57	57.15	21.31	279	107	469	100	1 013	148	2 219	0.18	11.39	0.16	2.57
19STKM-1-62	8 681	936	1.17	4.90	0.01	10.59	0.04	0.64	1.83	0.28	12.98	5.12	68	29	143	34	387	62	754	0.12	73.32	0.13	9.28
19STKM-1-63	8 756	787	0.88	1.64	0.78	9.45	0.26	1.55	1.69	0.30	9.70	3.91	58	23	118	28	331	57	643	0.12	5.18	0.18	11.13
19STKM-1-64	8 593	767	1.16	4.28	0.01	8.42	0.02	0.63	1.47	0.27	10.47	3.88	57	24	115	28	344	54	647	0.11	111.04	0.16	11.21
19STKM-1-65	9 447	1 881	0.65	8.19	0.00	10.62	0.14	2.73	6.53	1.33	36.11	12.24	155	59	266	60	653	94	1 356	0.16	23.97	0.21	5.02
19STKM-1-66	8 714	1 285	1.82	4.12	0.27	15.98	0.11	1.31	2.56	0.36	15.97	6.83	93	39	190	47	557	87	1 056	0.11	22.47	0.13	6.78
19STKM-1-67	8 405	885	1.02	4.36	0.00	9.78	0.03	0.56	1.85	0.38	12.69	4.73	65	27	134	32	398	60	746	0.11	114.85	0.18	9.50
19STKM-1-68	8 811	730	0.94	3.32	1.72	12.96	0.52	2.24	2.23	0.27	10.43	3.96	53	23	113	28	345	53	649	0.10	3.35	0.14	12.07
19STKM-1-69	9 413	710	0.35	8.69	0.01	5.05	0.04	0.70	1.72	0.31	11.80	4.21	57	23	105	24	266	41	539	0.14	40.34	0.15	13.25
19STKM-1-70	9 630	1 806	1.38	2.33	0.01	10.43	0.05	1.33	4.02	0.64	31.88	12.00	158	61	275	58	611	95	1 319	0.17	64.65	0.12	5.33
19STKM-1-71	7 667	963	0.91	8.75	2.33	17.62	0.87	5.45	4.39	1.16	18.19	6.86	83	32	145	32	368	56	774	0.15	3.03	0.34	7.96
19STKM-1-72	8 392	1 201	1.38	5.97	2.35	21.68	0.81	5.15	3.97	1.06	19.82	7.31	97	37	184	44	486	80	991	0.13	3.84	0.30	6.99