

加拿大纽芬兰岛 Indian Head Range 地块格林 威尔期二长花岗岩年龄、Nd-Hf 同位素特征

——块体属性与演化新证据

王朝阳, 王 涛, 张颖慧

(中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037)

摘要: 加拿大阿巴拉契亚造山带纽芬兰岛 Humber 带基底地块属性及地壳生长演化是近年来关注的科学问题, 尤其是岛内西南部的 Indian Head Range 地块, 其年龄组成与同位素特征研究对区域基底构造属性划分与对比至关重要。本文对 Indian Head Range 地块内的二长花岗岩岩体进行了锆石 U-Pb 定年, 得到其²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄值为 1 149±4 Ma, 代表该岩体的侵位年龄。这一定年结果表明该岩体具有中元古代晚期的年龄, 为该地块格林威尔期岩浆事件的存在提供了新的年龄证据。Nd-Hf 同位素分析结果显示, 该二长花岗岩岩体 εNd 值为 -2.3, εHf 值介于 +1.93~+3.65 之间, 两阶段 Hf 模式年龄介于 1.84~1.73 Ga 之间。结合前人研究, 我们认为 Humber 带内各地块发育约 1.5 Ga、1.15 Ga 和 1.0 Ga 的 3 期花岗质岩浆事件, 它们具有相似的 Hf 模式年龄值, 暗示它们均来源于古元古代新生地壳物质的再造。带内格林威尔基底地块均为原地基底, 且与劳伦大陆远端东部边缘具有一致的岩浆-构造演化史。以上研究对 Humber 带内格林威尔基底地块的亲缘性及地壳生长提供新的制约, 并为阿巴拉契亚造山带内古老微陆块的溯源对比提供依据。

关键词: Indian Head Range 地块; 阿巴拉契亚造山带; 格林威尔期; 纽芬兰岛; 二长花岗岩; 锆石 U-Pb 测年; Nd-Hf 同位素

中图分类号: P588.12⁺1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)04-0714-13

Age and Nd-Hf isotopic characteristics of the Greenville monzogranite in the Indian Head Range block, Newfoundland, Canada: New evidence for block attributes and evolution

WANG Chao-yang, WANG Tao and ZHANG Ying-hui

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The basement properties and crustal growth of the Humber belt of Newfoundland Island in the Appalachian orogenic belt, Canada, have been the focus in recent years. In particular, the age composition and isotopic characteristics of the Indian Head Range block in the southwestern part of Newfoundland are significant for dividing and comparing the tectonic attributes of the regional basement. In this paper, the zircon U-Pb dating of the monzogranite pluton in the Indian Head Range block shows that the pluton has a late Mesoproterozoic age (1 149 ± 4 Ma), which provides new age evidence for the existence of the Greenville magmatic events in the block. The

收稿日期: 2022-01-23; 接受日期: 2022-05-17; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(41830216, 42072224); 国家重点研发计划(2019YFA0708604); IGCP-662

作者简介: 王朝阳(1992-), 男, 博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: wangcags@126.com; 通讯作者: 王 涛(1959-), 男, 研究员, 博士生导师, 长期从事构造及花岗岩研究, E-mail: taowang@cags.ac.cn。

网络首发时间: 2022-05-30; 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20220527.1652.002.html>

results of the Nd-Hf isotope study show that the ϵNd value of the monzogranite is -2.3 , the ϵHf value varies from $+1.93$ to $+3.65$, and the t_{DM2} age ranges from 1.84 to 1.73 Ga. Combined with previous studies, the authors believe that three stages of granitic magmatic events of ~ 1.5 Ga, ~ 1.15 Ga, and ~ 1.0 Ga occurred in each block in the Humber belt, which have similar Hf model ages, suggesting that they all originated from the reconstruction of Paleoproterozoic juvenile crustal materials. The Greenville basement blocks in the Humber belt are all in-situ basements, and have the same magmatic-tectonic evolution history with the eastern margin of the far end of Laurentian continent. The results of this study provide new constraints on the affinity and crustal growth of the Greenwell basement in the Humber belt, and provide a basis for the traceability and comparison of ancient micro-continent in the Appalachian orogen.

Key words: Indian Head Range block; Appalachian orogenic belt; Grenvillian; Newfoundland Island; monzogranite; zircon U-Pb dating; Nd-Hf isotope

Fund support: National Natural Science Foundation of China(41830216, 42072224); National Key Research and Development Program of China(2019YFA0708604); IGCP-662

北美地盾是由不同年龄块体经多期造山事件汇聚拼贴而成的复杂嵌合体(Dickin, 2004; Whitmeyer and Karlstrom, 2007)。一系列中元古代基底岩石在北美阿巴拉契亚造山带西部呈带状不连续分布(图 1a; Rankin *et al.*, 1989; Tollo *et al.*, 2004)。这些基底岩石从最北端的加拿大纽芬兰岛向南延伸到美国的阿拉巴马州(图 1a), 出露在一系列以断层为边界的复背斜核部, 且大多记录了格林威尔期($1190 \sim 980$ Ma)的岩浆构造热事件, 以具有麻粒岩相的变质作用区别于阿巴拉契亚造山带内新元古代和古生代岩石单元。前人将其定义为出露于阿巴拉契亚造山带前缘的格林威尔基底残片(Rankin and Douglas, 1976)。

加拿大纽芬兰岛位于阿巴拉契亚造山带的东北部(图 1a), 与北美东部其他地区相比, 该区未遭受后期瑞亚克洋闭合导致的变形、变质和岩浆作用影响, 且早期增生相关的造山作用的证据保存得相对较好, 是研究古大西洋演化及阿巴拉契亚造山带早期拼合过程的绝佳场所(van Staal *et al.*, 1998, 2009; Hibbard *et al.*, 2006, 2007, 2010)。纽芬兰岛作为格林威尔基底残片出露的最北缘, 大量中元古代基底岩石零散地分布在阿巴拉契亚造山带西部 Humber 带一系列构造夹层中, 其中包括北部的 Long Range 基底(约 8500 km^2)和南部 Steel Mountain 基底(约 1200 km^2)及 Indian Head Range 基底(约 80 km^2)(图 1b、1c)。前人研究认为, 北部地块记录了 $1080 \sim 980$ Ma 及 1500 Ma 的造山历史, 而与之对应的南部地块, 记录了 Pinwarian(1.5 Ga)的造山历史, 缺乏格林威尔期岩浆或变质叠加, 并进

一步认为 Steel Mountain 基底北部的 Corner Block Lake 地块可能是沿 Humber 带边缘经大规模走滑产生的异地基底地块(Brem, 2007; Van Staal and Barr, 2012; Lin *et al.*, 2013)。近年来, 随着部分与格林威尔期有关的岩浆或变质事件在南部 Corner Block Lake 地块被陆续发现, 有人提出了不同的认识(Hodgin *et al.*, 2021)。而与之相邻的 Indian Head Range 地块年龄相对匮乏, 仅有少量变形花岗岩、侵入变形花岗岩的岩墙、英云闪长岩包体和泥质副片麻岩年龄报道(Allen, 2009; Hodgin *et al.*, 2021)。其中, Hodgin 等(2021)采用 LA-ICP-MS 和 TIMS 法分别在岩体内正长花岗岩及后期的花岗岩脉中获得 1143 ± 27 Ma 和 1136.30 ± 0.58 Ma 锆石 U-Pb 年龄。鉴于该地块地质复杂, 该地区精确的格林威尔期岩浆事件的厘定对区域基底构造属性划分至关重要, 详细的构造岩浆事件演化仍需更多的年龄加以限定, 有必要准确厘定该区主体的变形花岗岩侵位时代, 因此, 本文在前人研究基础上, 对纽芬兰岛西部 Humber 带内 Indian Head Range 地块内的元古宙二长花岗岩进行了锆石 U-Pb 及 Nd-Hf 同位素研究, 以期在年代学及地壳生长方面为深入了解纽芬兰岛西部格林威尔基底属性提出新的制约。

1 区域地质背景及岩体与样品特征

北美阿巴拉契亚造山带是全球最典型的增生造山带之一(Williams *et al.*, 1988)。该造山带记录了早古生代-晚古生代($515 \sim 275$ Ma)的多期造山事件, 一系列与古大西洋和瑞亚克洋打开-闭合相关的

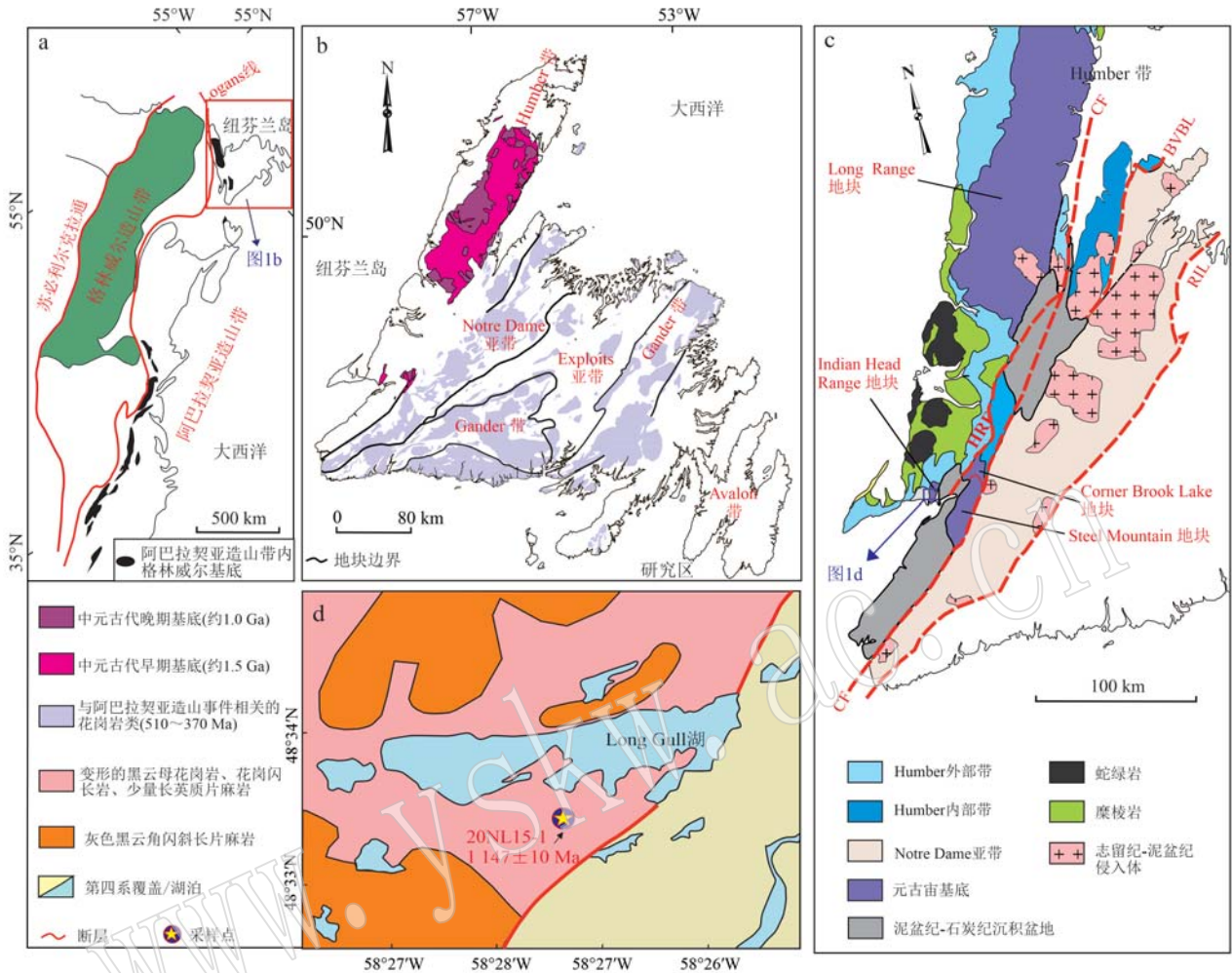


图1 北美大陆东部[a, 据 Rankin 和 Douglas(1976)、Gower 等(1990)、Bartholomew 和 Lewis(1992)修改]、纽芬兰阿巴拉契亚[b、c, 据 van Staal 和 Barr(2012)、Hodgin 等(2021)修改]构造单元划分及 Indian Head Range 地块区域地质图[d, 据 Brem 等(2006)修改]

Fig. 1 Tectonic subdivision of the eastern North America (a, modified after Rankin and Douglas, 1976; Gower *et al.*, 1990; Bartholomew and Lewis, 1992), Newfoundland Appalachian (b and c, modified after van Staal and Barr, 2012 and Hodgin *et al.*, 2021) and regional geological map of Indian Head Range block (d, modified after Brem *et al.*, 2006)

BVBL—Baie Verte Brompton 断裂带; CF—Cabot 断层; HRF—Humber River 断层; RIL—Red Indian 缝合线

BVBL—Baie Verte Brompton Line; CF—Cabot Fault; HRF—Humber River Fault; RIL—Red Indian Line

增生事件最终实现了北美劳伦大陆与冈瓦纳大陆的拼合,进而形成潘吉亚超大陆(Wilson, 1966; van Staal *et al.*, 1998, 2009; Nance *et al.*, 2008; Hibbard *et al.*, 2010)。前人将纽芬兰岛从西向东大致划分为亲劳伦大陆的 Humber 带和 Notre Dame 亚带以及亲冈瓦纳大陆的 Exploits 亚带、Gander 和 Avalon 带,其中 Notre Dame 亚带与 Exploits 亚带之间以 Red Indian 缝合线为界,代表了古大西洋的闭合(图 1b, van Staal *et al.*, 1996; Fortey and Cocks, 2003; Harper *et al.*, 2009)。

纽芬兰岛西部的 Humber 带主要由中元古代结

晶基底及其上覆变形的中元古代晚期-奥陶纪沉积岩和少量的火山岩组成(Heaman *et al.*, 2002)。前者具有劳伦大陆基底的构造属性,后者则与裂谷、被动大陆边缘以及前陆盆地的环境密切相关(Williams and Hiscott, 1987; Knight *et al.*, 1991; Waldron *et al.*, 1998; Lavoie *et al.*, 2003)。Humber 带西部沿 Logan 构造线与阿巴拉契亚构造前缘边界一致(图 1a, Hibbard *et al.*, 2006),东部边界则是由糜棱岩和许多不连续蛇绿岩破碎带组成的 Baie Verte Brompton 断裂带(BVBL)所限定(图 1c, van Staal *et al.*, 1998; van der Velden *et al.*, 2004)。基

于其与阿巴拉契亚变质核的位置, 带内与格林威尔造山带相关的基底残片大致可划分为强变形的内部带和弱变形的的外部带(图 1c, Hatcher, 1984; Bartholomew, 1984; Tollo *et al.*, 2004), 它们沿 Humber River 断层分布(Williams, 1979; Cawood *et al.*, 1994), 前者包含 Steel Mountain 基底, 以其北部的 Corner Brook Lake 地块为代表, 后者以 Indian Head Range 地块和 Long Range 地块为主(图 1c)。其中 Long Range 地块主要由长英质片麻岩、黑云母片岩及斜长岩组成, 长英质片麻岩局部被志留纪变质基性岩脉所切割(Williams, 1995; Heaman *et al.*, 2002), 而 Corner Brook Lake 地块及 Indian Head Range 地块的岩石组合与之相似, 主要由麻粒岩相和高角闪岩相片麻岩、变形的黑云母花岗岩、斜长岩及少量长英质片麻岩组成(图 1d, Williams and Cawood, 1989; Cawood and van Gool, 1998; Allen, 2009)。

本文研究的二长花岗岩体(图 2a)位于 Indian Head Range 基底西北部(图 1d), Long Gull 湖附近。岩体主要由发育不同程度面理构造的正长花岗岩和二长花岗岩组成, 两者未见直接的接触关系。前人

将其统称为变形的黑云母花岗岩单元, 出露面积大于 10 km²。岩体内还包含花岗岩脉、英云闪长岩包体及副片麻岩残留体。其中二长花岗岩野外可见由钾长石和石英组成的眼球状构造, 直径可达 3 cm(图 2b)。古生代沉积岩不整合覆盖在花岗质片麻岩基底之上, 岩体横切变质辉长岩、斜长岩及花岗质片麻岩单元, 且被发育面理构造的花岗闪长岩所切割, 暗示其年龄介于两者之间(Cawood and Williams, 1988; Sung, 1992)。本文二长花岗岩样品(20NL15-1)采自纽芬兰西南部 Humber 边缘外部带, Long Gull 湖南部(图 1c、1d), 与上述前人报道的正长花岗岩年龄的地点相距 1.2 km。岩石发育面理, 具眼球状构造。岩石样品新鲜面为灰黑色-肉红色, 具中细粒粒状结构(图 2b), 主要矿物组合为斜长石(30%~35%)、钾长石(15%~25%)、石英(30%~35%)、黑云母(10%), 副矿物有锆石、磷灰石、磁铁矿等。其中, 斜长石粒度在 2~4 mm, 发育聚片双晶; 钾长石粒度在 1~4 mm; 石英的粒度在 2~4 mm; 黑云母含量粒度较小, 呈细小的纤维状充填在长石矿物之间(图 2c、2d)。

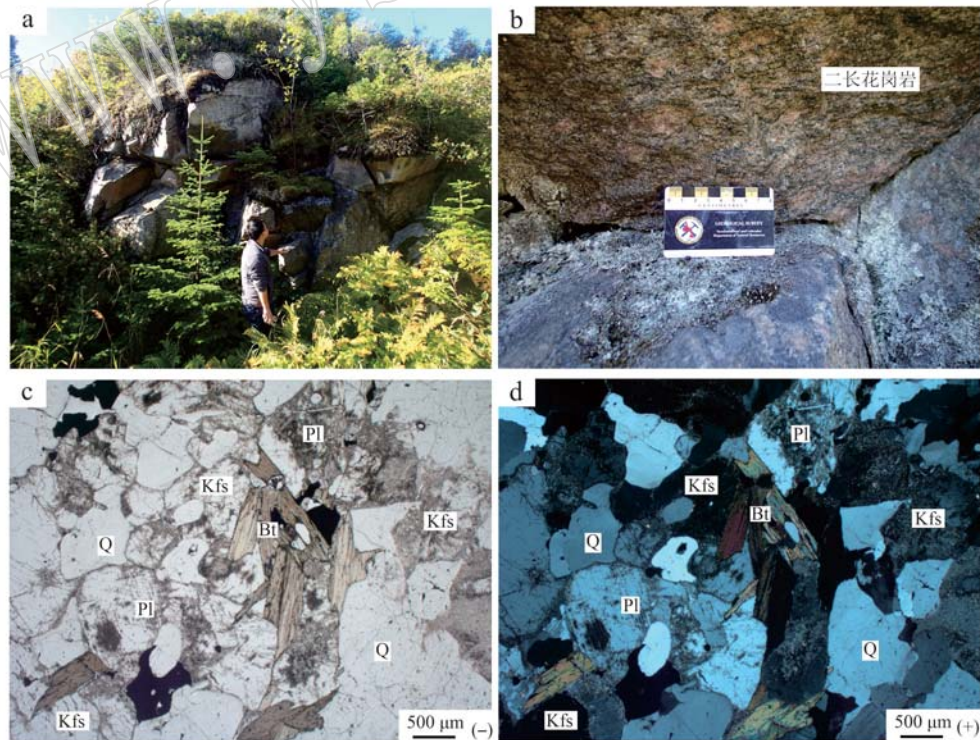


图 2 Indian Head Range 地块二长花岗岩野外产状(a,b)及镜下照片(c,d)

Fig. 2 Representative photographs from the field (a, b) and microphotographs (c, d) showing the petrographic features of the monzogranite in the Indian Head Range block
Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Bt—黑云母; Q—石英
Pl—plagioclase; Kfs—K-feldspar; Bt—biotite; Q—quartz

2 分析方法

2.1 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素

本文样品的锆石 U-Pb 定年在中国地质科学院地质研究所矿物/包裹体微区分析实验室使用激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICPMS)完成。测试仪器为 Agilent 7900 型电感耦合等离子体质谱仪。实验过程中氦气作为剥蚀物质载气,频率为 5 Hz,激光束斑直径为 30 μm ,能量密度 2 J/cm²。计算年龄时以国际标准锆石 91500 为外标进行同位素比值校正,以 GJ-1 为监控盲样,本次实验过程中测定的 91500(1 061.5 \pm 3.2 Ma, 2 σ)、GJ-1(604 \pm 3 Ma, 2 σ) 年龄在不肯定度范围内与推荐值一致。详细的实验分析步骤和数据处理方法见于超等(2019),所给定的同位素比值和年龄的误差均在 2 σ 水平。值得注意的是,实验过程中 91500 标样的²⁰⁷Pb 信号较低且部分锆石的 U 含量较低,导致²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 误差相对较大,在²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄与²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄基本相同的情况下,对于>1 000 Ma 的年龄同样可采用²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄指示岩体的形成时代(宋彪, 2015; 王彦斌等, 2022)。

锆石 Hf 同位素分析利用武汉上谱分析科技有限责任公司生产的激光剥蚀多接受等离子质谱(LA-MC-ICP-MS)完成测试,其中激光剥蚀型号为 Coherent 公司生产的 Geolas HD, MC-ICP-MS 型号为 Thermo Fisher 公司生产的 Neptune Plus。实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,将剥蚀物质从激光探测传送到 MC-ICP-MS 之前与 Ar 混合,形成混合气。剥蚀直径采用 44 μm 。详细仪器操作条件和分析方法可参照文献(Hu *et al.*, 2012)。分析点与 U-Pb 定年分析点为同一位置或其附近或在其完整晶形对应的另一侧。在本次测试中,为确保分析数据的可靠性, Plešovice、91500 和 GJ-1 这 3 个国际锆石标准与实际样品同时分析, Plešovice 用于进行外标校正以进一步优化分析测试结果, 91500 和 GJ-1 作为第 2 标样监控数据校正质量, Plešovice、91500 和 GJ-1 的外部精密密度(2SD)优于 0.000 020, 测试值与推荐值确保在误差范围内一致。采用国际常用的高 Yb/Hf 值标样 Temora 2 来监控高 Yb/Hf 值锆石的测试数据。以上标样推荐值请参考 Zhang 和 Hu(2019)。

2.2 全岩 Nd 同位素

全岩 Nd 同位素前处理和测试由武汉上谱分析

科技有限责任公司采用德国 Thermo Fisher Scientific 公司的 MC-ICP-MS 完成。¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd 被用于计算 Nd 的质量分馏因子(0.721 9, Lin *et al.*, 2016)。实验流程采用两个 Nd 同位素标样(GSB 04-3258-2015 和 AlfaNd)之间插入样品进行分析。分析数据采用专业同位素数据处理软件 Iso-Compass 进行数据处理(Zhang and Hu, 2019)。GSB 04-3258-2015 的¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 分析测试值为 0.512 440 \pm 6(2SD, $n=31$)与推荐值 0.512 438 \pm 6(2SD)在误差范围内一致,表明本仪器的稳定性和校正策略的可靠性满足高精度的 Nd 同位素分析。详细的实验分析步骤和数据处理方法见 Li 等(2017)。

3 分析结果

3.1 锆石年龄

本文选取 Indian Head Range 基底二长花岗岩样品进行了锆石 CL 图像采集和 U-Pb 年龄测试以及锆石原位 Lu-Hf 同位素分析测试。部分锆石样品的阴极发光(CL)图像(图 3a)显示,锆石多呈半自形-自形柱状或椭圆状,粒径介于 80~180 μm 之间,具有明显的核边结构。边部呈灰黑色,暗示其具变质成因特点,本次研究为获得变形花岗岩的侵位年龄,仅对锆石核部年龄进行测定;核部呈亮白色,发育明显的震荡生长环带(图 3a),结合其相对较高的 Th/U 值为 0.36~0.70,表明其具岩浆成因特点。锆石 U-Pb 定年结果(表 1、图 3b、3c)显示,22 个测点全部位于谐和线上或附近,²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值介于 1 158~1 140 Ma 之间,²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄值为 1 149 \pm 4 Ma(MSWD=0.61),表明该二长花岗岩的岩浆侵位可能发生于 1 149 \pm 4 Ma。

3.2 Nd-Hf 同位素

本文二长花岗岩样品 20NL15-1 的 Nd 同位素测试和计算结果为:¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd=0.156 33, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512 219, $\epsilon\text{Nd}(0) = -8.2$, $\epsilon\text{Nd}(t) = -2.3$, $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = -0.205 23$, $t_{\text{DM1}} = 2.46 \text{ Ga}$, $t_{\text{DM2}} = 1.94 \text{ Ga}$ (按 Indian Head Range 地块二长花岗岩结晶年龄 $t = 1 149 \text{ Ma}$ 计算)。另外,本文对前人在纽芬兰岛 Humber 带内中元古代基底中所获得的 Nd-Hf 同位素(Owen *et al.*, 1992; Dickin, 2004; Allen, 2009),使用相同的参数及公式进行了重新计算,以期在同一尺度上对带内基底的地壳形成及演化得到更加全面的认识,计算结果显示 Long Range 地块内约 1.5 Ga 的花岗质片麻

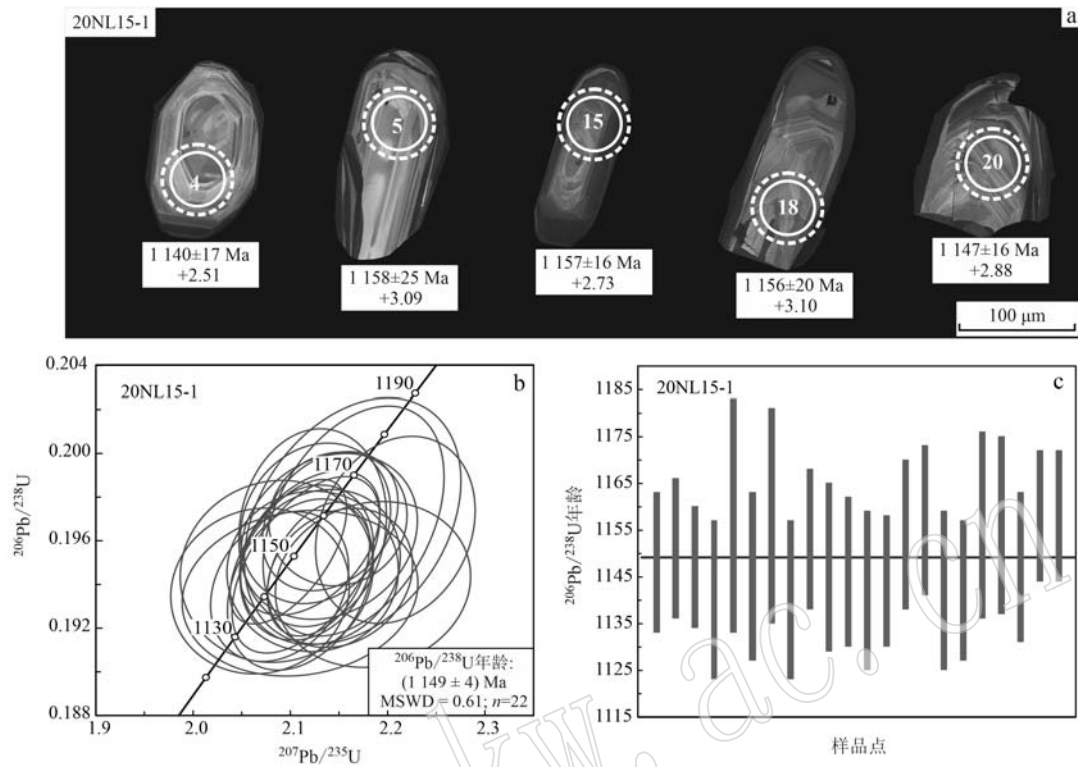


图 3 Indian Head Range 地块二长花岗岩中锆石 CL 图像 (a)、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和图 (b) 及其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄图 (c)

Fig. 3 CL images (a), LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagram (b) and the weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages (c) for zircons in the monzogranite of the Indian Head Range block

表 1 Indian Head Range 地块二长花岗岩 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data of the monzogranite in the Indian Head Range block

样品编号	Th	U	Th/U	同位素比值						年龄/Ma						不谐和度/%
				$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2 σ	
20NL15-1-01	70.9	141.9	0.50	0.195 0	0.002 9	2.117 0	0.056 0	0.078 6	0.002 4	1 148	15	1 150	18	1 134	62	-1
20NL15-1-02	118.8	265.8	0.45	0.195 5	0.002 7	2.098 0	0.049 0	0.077 9	0.001 9	1 151	15	1 155	16	1 126	50	-2
20NL15-1-03	130.4	298.5	0.44	0.194 7	0.002 5	2.129 0	0.043 0	0.078 9	0.001 7	1 147	13	1 155	15	1 156	45	1
20NL15-1-04	57.7	84.6	0.68	0.193 6	0.003 1	2.110 0	0.099 0	0.081 1	0.004 0	1 140	17	1 143	33	1 140	100	0
20NL15-1-05	43.1	67.6	0.64	0.196 9	0.004 6	2.164 0	0.091 0	0.078 5	0.003 3	1 158	25	1 163	29	1 123	86	-3
20NL15-1-06	42.0	60.0	0.70	0.194 6	0.003 4	2.086 0	0.081 0	0.078 2	0.003 5	1 145	18	1 138	28	1 093	94	-5
20NL15-1-07	38.6	105.6	0.37	0.196 9	0.004 3	2.165 0	0.076 0	0.078 7	0.002 9	1 158	23	1 164	25	1 152	79	-1
20NL15-1-08	25.2	52.3	0.48	0.193 7	0.003 1	2.069 0	0.075 0	0.077 9	0.003 0	1 140	17	1 129	25	1 095	80	-4
20NL15-1-09	122.7	257.7	0.48	0.195 9	0.002 7	2.120 0	0.059 0	0.077 9	0.002 2	1 153	15	1 151	19	1 126	56	-2
20NL15-1-10	47.1	114.1	0.41	0.194 9	0.003 3	2.116 0	0.062 0	0.079 0	0.002 6	1 147	18	1 154	20	1 156	65	1
20NL15-1-11	38.5	73.4	0.52	0.194 6	0.003 0	2.123 0	0.072 0	0.078 7	0.003 0	1 146	16	1 149	24	1 132	76	-1
20NL15-1-12	23.6	58.4	0.40	0.194 0	0.003 1	2.185 0	0.082 0	0.082 1	0.003 3	1 142	17	1 165	28	1 190	82	4
20NL15-1-13	43.5	99.8	0.44	0.194 3	0.002 6	2.151 0	0.061 0	0.079 4	0.002 4	1 144	14	1 162	19	1 167	59	2
20NL15-1-14	49.8	102.3	0.49	0.196 2	0.003 1	2.140 0	0.074 0	0.079 2	0.003 0	1 154	16	1 158	23	1 136	76	-2
20NL15-1-15	59.6	110.1	0.54	0.196 8	0.003 0	2.126 0	0.063 0	0.077 2	0.002 4	1 157	16	1 155	20	1 114	62	-4
20NL15-1-16	58.4	161.8	0.36	0.194 0	0.003 2	2.110 0	0.061 0	0.078 2	0.002 4	1 142	17	1 147	20	1 140	62	0
20NL15-1-17	59.4	113.1	0.53	0.193 9	0.002 8	2.089 0	0.058 0	0.078 2	0.002 3	1 142	15	1 139	19	1 113	59	-3
20NL15-1-18	65.0	123.5	0.53	0.196 6	0.003 7	2.123 0	0.062 0	0.077 6	0.002 6	1 156	20	1 152	20	1 121	65	-3
20NL15-1-19	73.5	165.0	0.45	0.196 5	0.003 5	2.208 0	0.067 0	0.081 0	0.002 6	1 156	19	1 179	20	1 195	70	3
20NL15-1-20	38.7	92.6	0.42	0.194 8	0.002 9	2.131 0	0.067 0	0.079 4	0.002 7	1 147	16	1 153	21	1 144	69	0
20NL15-1-21	78.8	136.3	0.58	0.196 9	0.002 6	2.141 0	0.057 0	0.078 1	0.002 2	1 158	14	1 157	18	1 129	57	-3
20NL15-1-22	60.1	113.2	0.53	0.197 0	0.002 5	2.149 0	0.058 0	0.078 6	0.002 4	1 158	14	1 159	19	1 132	62	-2

岩类 εNd 值大致可以划分为两组, 分别介于 $-2.5 \sim +2.3$ 和 $+3.2 \sim +5.0$ 之间, 其 t_{DM2} 分别为 $2.24 \sim 1.85$ Ga 和 $1.78 \sim 1.63$ Ga; 而约 1.0 Ga 的花岗质岩体的 εNd 值介于 $-1.6 \sim 1.2$ 之间, t_{DM2} 在 $1.78 \sim 1.55$ Ga 之间。

在锆石的 U-Pb 定年的基础上, 对测试结果中

所有不谐和度小于 5% 的测点都进行了原位 Lu-Hf 同位素分析。分析结果(表 2) 显示样品中锆石 εHf 值为 $+1.93 \sim +3.65$, 介于亏损地幔与球粒陨石演化线之间, 相应的模式年龄 t_{DM1} 和 t_{DM2} 值分别为 $1.58 \sim 1.52$ Ga 和 $1.84 \sim 1.73$ Ga。

表 2 Indian Head Range 地块二长花岗岩的锆石 Lu-Hf 测试结果

Table 2 Zircon Lu-Hf data for the monzogranite in the Indian Head Range block

样品点	t/Ma	$\pm 2\sigma$	不谐和度/%	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	Hf_i	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	$\pm 1\sigma$	t_{DM1}/Ga	$\pm 1\sigma$	t_{DM2}/Ga	$\pm 1\sigma$
20NL15-1-01	1 148	15	-1	0.019 682	0.000 761	0.282 130	0.000 008	0.282 11	+2.13	0.29	1.57	0.01	1.83	0.01
20NL15-1-02	1 151	15	-2	0.018 700	0.000 761	0.282 171	0.000 010	0.282 15	+3.65	0.35	1.52	0.01	1.73	0.01
20NL15-1-03	1 147	13	1	0.022 677	0.000 876	0.282 148	0.000 009	0.282 13	+2.67	0.31	1.55	0.01	1.79	0.01
20NL15-1-04	1 140	17	0	0.030 012	0.001 132	0.282 154	0.000 009	0.282 13	+2.51	0.33	1.55	0.01	1.80	0.01
20NL15-1-05	1 158	25	-3	0.020 592	0.000 808	0.282 152	0.000 008	0.282 13	+3.09	0.28	1.54	0.01	1.77	0.01
20NL15-1-06	1 145	18	-5	0.023 503	0.000 867	0.282 132	0.000 009	0.282 11	+2.05	0.31	1.57	0.01	1.83	0.01
20NL15-1-07	1 158	23	-1	0.021 422	0.000 792	0.282 144	0.000 009	0.282 13	+2.84	0.32	1.55	0.01	1.79	0.01
20NL15-1-08	1 140	17	-4	0.013 184	0.000 493	0.282 125	0.000 009	0.282 11	+1.98	0.32	1.57	0.01	1.83	0.01
20NL15-1-09	1 153	15	-2	0.023 778	0.000 882	0.282 162	0.000 011	0.282 14	+3.28	0.37	1.53	0.01	1.76	0.01
20NL15-1-10	1 147	18	1	0.018 801	0.000 690	0.282 124	0.000 009	0.282 11	+1.93	0.32	1.58	0.01	1.84	0.01
20NL15-1-11	1 146	16	-1	0.020 709	0.000 738	0.282 166	0.000 010	0.282 15	+3.39	0.34	1.52	0.01	1.75	0.01
20NL15-1-12	1 142	17	4	0.016 897	0.000 612	0.282 143	0.000 009	0.282 13	+2.59	0.32	1.55	0.01	1.79	0.01
20NL15-1-13	1 144	14	2	0.018 404	0.000 694	0.282 149	0.000 009	0.282 13	+2.75	0.30	1.54	0.01	1.79	0.01
20NL15-1-14	1 154	16	-2	0.018 114	0.000 681	0.282 143	0.000 009	0.282 13	+2.78	0.30	1.55	0.01	1.79	0.01
20NL15-1-15	1 157	16	-4	0.026 134	0.000 949	0.282 145	0.000 009	0.282 13	+2.73	0.32	1.56	0.01	1.80	0.01
20NL15-1-16	1 142	17	0	0.017 973	0.000 655	0.282 132	0.000 009	0.282 12	+2.15	0.32	1.56	0.01	1.82	0.01
20NL15-1-17	1 142	15	-3	0.022 187	0.000 788	0.282 135	0.000 009	0.282 12	+2.15	0.31	1.57	0.01	1.82	0.01
20NL15-1-18	1 156	20	-3	0.028 511	0.001 006	0.282 158	0.000 010	0.282 14	+3.10	0.33	1.54	0.01	1.77	0.01
20NL15-1-19	1 156	19	3	0.021 071	0.000 777	0.282 147	0.000 009	0.282 13	+2.90	0.32	1.55	0.01	1.79	0.01
20NL15-1-20	1 147	16	0	0.016 417	0.000 603	0.282 148	0.000 009	0.282 14	+2.88	0.31	1.54	0.01	1.78	0.01
20NL15-1-21	1 158	14	-3	0.027 761	0.000 982	0.282 169	0.000 010	0.282 15	+3.57	0.34	1.53	0.01	1.74	0.01
20NL15-1-22	1 158	14	-2	0.025 319	0.000 894	0.282 146	0.000 009	0.282 13	+2.81	0.31	1.56	0.01	1.79	0.01

4 讨论

4.1 纽芬兰岛 Humber 地块岩浆事件年代学格架

研究区纽芬兰岛西部 Humber 带基底花岗岩质岩石主要分布在外部带的 Long Range、Indian Head Lange 地块以及内部带的 Corner Brook Lake 地块。尽管该区域具有悠久的历史, 但受早期测试手段和方法的影响, 其年代学研究相比于纽芬兰岛内古生代造山带的研究相对滞后 (van Staal *et al.*, 2007, 2009; Van Staal and Barr, 2012)。前人通过对北部 Long Range 内花岗质片麻岩类进行的详细年代学研究, 认为纽芬兰岛西部 Humber 带基底的岩浆事件整体上可以划分为 $1 530 \sim 1 466$ Ma 和 $1 032 \sim 985$ Ma 两期, 前者片麻岩类可以与邻区拉布拉多和魁北克的 Pinwarian 岩浆事件 ($1 510 \sim 1 450$ Ma) 相关联 (Tucker and Gower, 1994; Wasteneys *et al.*,

1997; Heaman *et al.*, 2004); 后者以花岗质侵入体为主, 受到格林威尔造山事件的影响 (Heaman *et al.*, 2002)。而南部的 Corner Brook Lake 地块被认为形成于 $1 549 \sim 1 510$ Ma (Currie *et al.*, 1992; Ca-wood *et al.*, 1996; Lin *et al.*, 2013), 同样相似的年龄也发现在临近的 Indian Head Range 地块北部的巨斑状片麻岩中 (Allen, 2009)。值得注意的是, 在 Indian Head Range 地块上呈不整合覆盖的拉布拉多组砂岩碎屑锆石的年龄峰值以约 1.15 Ga 为主, 缺乏约 1.50 Ga 的峰值, 有学者认为基底风化的碎屑矿物可能经沉积物分散作用被带走, 并被更遥远来源的碎屑所取代 (Allen, 2009)。近年来, 随着越来越多高精度锆石 U-Pb 同位素年代学数据的积累, 区域内基底的研究取得了一定的进展, 例如, Hodgins 等 (2021) 在 Indian Head Range 地块和 Corner Brook Lake 地块内花岗岩脉和正片麻岩中分别获得了 $1 136.30 \pm 0.58$ Ma 和 $1 138.39 \pm 0.98$ Ma 的锆石

TIMS 年龄, 明显打破了前人有关南部地块不存在格林威尔期岩浆事件的认识 (Brem, 2007; Van Staal and Barr, 2012; Lin *et al.*, 2013)。但该地块主体岩石单元的年代学特征仍需要更多的年龄资料确定, 尤其是 Indian Head Range 地块。前人对黑云母花岗岩单元中的正长花岗岩样品 (B1752) 分析发现, 样品中锆石测点大致可以划分为约 1.0 Ga 的变质锆石和 1.55~1.07 Ma 的岩浆锆石两组 (Hodgin *et al.*, 2021)。前者变质锆石被认为是岩体遭受格林威尔变质事件影响的产物, 这可能与本文样品中的变质边所反映的变质事件相一致; 后者锆石 CL 图像中普遍缺乏震荡生长环带且年龄误差较大, 因此, 作为该地块主体的花岗岩类仍缺乏精确的年龄约束。

本文选取的 Indian Head Range 地块二长花岗质岩石锆石多发育核边结构, 核部发育明显的震荡生长环带, 结合其相对较高的 Th/U 值 (0.36~0.70),

暗示其具典型的岩浆成因特点, 与前人研究相比, 其锆石特征对限制岩体形成年代具有更好的指示作用。本文定年结果显示, 二长花岗岩岩体侵位于 1149 ± 4 Ma, 证明了区域约 1.15 Ga 的岩浆事件的存在, 即研究区 Indian Head Range 地块主体花岗岩类形成于中元古代晚期 (约 1.15 Ga), 该期基底岩石为上覆不整合覆盖的拉布拉多组砂岩提供了物源。

综合区域年代学研究成果 (图 4), 可以看出, Humber 带内基底至少存在峰期为约 1.50 Ga、1.15 Ga 和约 1.0 Ga 的 3 期岩浆事件。此外, 内部带的 Corner Brook Lake 地块和外部带的 Indian Head Range 地块年龄非常相似, 它们以具有 Pinvarian 岩浆事件及格林威尔期的岩浆-构造热事件为特征, 可以大致与北部的 Long Range 地块及邻区拉布拉多省的 Pinware 地块相类比。

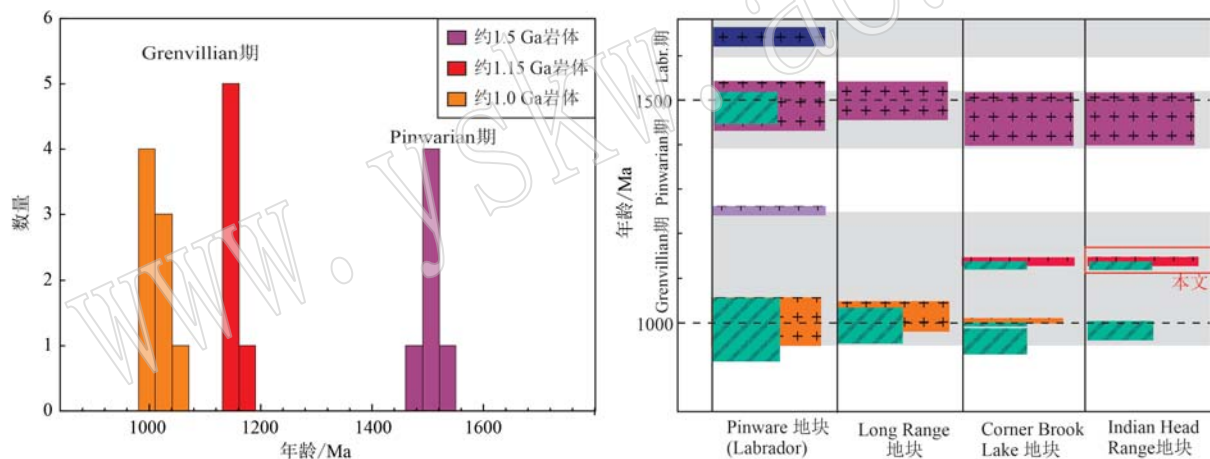


图 4 Humber 带基底地块样品年龄分布直方图 (a) 和劳伦大陆东部边缘地块年龄对比图 [b, 据 Heaman 等 (2004) 和 Lin 等 (2013) 修改; 十字代表花岗质岩浆事件, 斜线代表变质事件]

Fig. 4 Histogram showing age patterns of basement samples in the Humber zone (a) and geochronological summary and comparison to adjacent margin of eastern Laurentia (b, modified after Heaman *et al.*, 2004 and Lin *et al.*, 2013; the cross represents granitic magmatic event, and the slash represents metamorphic event)

4.2 纽芬兰岛格林威尔基底的地壳演化

格林威尔造山带内岩体年龄主要由太古宙-中元古代年龄组成, 并具有向东南方向逐渐变年轻的趋势, 反映了古元古代到中元古代东南劳伦大陆的地壳增生 (Hoffman, 1989; Rivers, 1997; Karlstrom *et al.*, 2001)。前人通过对纽芬兰岛西部 Humber 带内 Long Range 地块内花岗质岩石的 Nd 同位素研究, 认为 Long Range 地块可以分为北部的古元古代和中元古代新生地壳, 分别与陆内格林威尔省前人识别

的古元古代拉布拉多和中元古代魁北克地块相对应, 代表了元古宙期间增生到劳伦大陆的年轻弧地体。地块边界横截 Long Range 地块, 并与魁北克省七岛港西部边界相对应, 代表增生洋弧地体的碰撞缝合带 (Dickin, 2004)。如前所述, 本文还对前人的 Nd 同位素数据进行了重新计算, 结果显示, 研究区 Humber 带内基底地块花岗质岩石的地壳生长期主要为古元古代, 中元古代的地壳以再造为主, 地壳生长可能十分有限 (图 5a)。

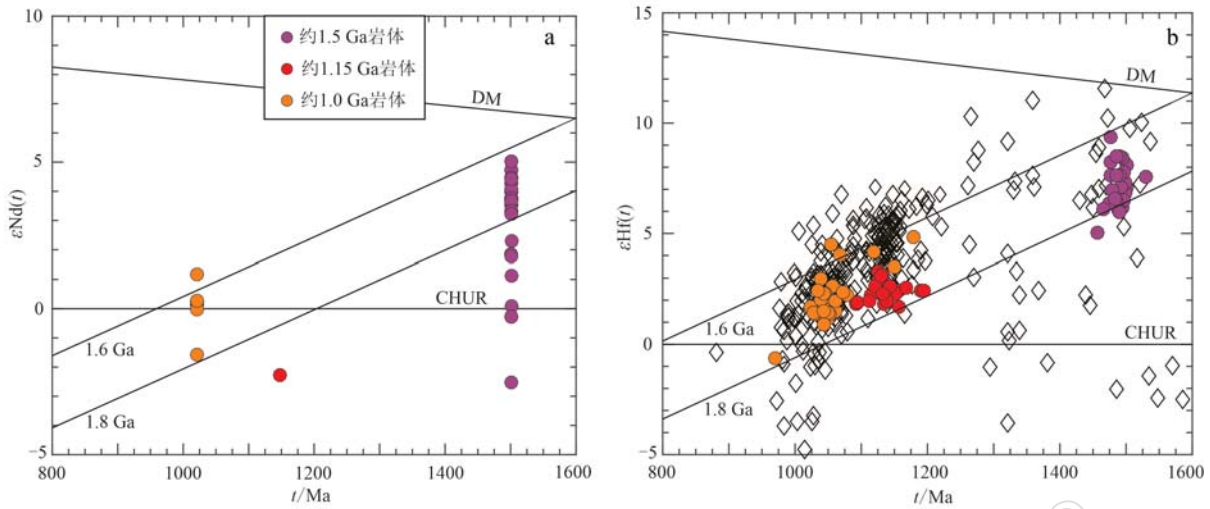


图5 Humber带内全岩 $\epsilon\text{Nd}(t)-t$ 图(a)及锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)-t$ 图(b)

Fig. 5 Whole rock $\epsilon\text{Nd}(t)-t$ (a) and zircon $\epsilon\text{Hf}(t)-t$ (b) diagrams for the basement samples in the Humber zone

前人对锆石的研究表明, Lu-Hf 同位素具有较高的封闭温度, 且与Nd同位素相比, 受后期岩浆热事件以及变质作用的影响较小。考虑到 Humber 带内基底岩石普遍经历了麻粒岩相-角闪岩相的区域变质作用 (Williams and Cawood, 1989; Cawood *et al.*, 1996), 锆石 Lu-Hf 同位素对于经历过研究区具有复杂地质历史的岩石具有更好的指示作用。Indian Head Range 基底约 1 500 Ma 和约 1 150 Ma 的岩体和区域 Long Range 基底内约 1 000 Ma 的岩体这 3 期岩浆事件的 ϵHf 值分别为 +5.00 ~ +9.36、+1.93 ~ +3.65 和 -0.63 ~ +4.83 (图 5b, 本文及 Allen, 2009), 主体均介于亏损地幔与球粒陨石演化线之间, 相应的模式年龄 t_{DM2} 值分别为 1.90 ~ 1.64 Ga (平均值为 1.79 Ga)、1.84 ~ 1.73 Ga (平均值为 1.81 Ga) 和 1.81 ~ 1.74 Ga (平均值为 1.77 Ga) [根据本文及 Allen (2009) 自行计算]。其 ϵHf 值与 Humber 边缘碎屑沉积岩中获得的 Hf 同位素值的演化趋势相一致 (图 5b, Allen, 2009)。结合其相似的年龄组成特征以及密切的野外接触关系, 我们认为纽芬兰岛 Humber 带内 3 期花岗质岩浆事件均来自于古元古代新生地壳物质, 分别经过 Pinwarian 造山事件以及 Grenvillian 造山事件中的 Shawinigan 期 (1 190 ~ 1 140) 和 Ottanwan 期 (1 090 ~ 1 020 Ma) 的地壳再造事件。

4.3 大地构造意义

元古宙是板块构造体制下全球构造格局首次发生重大变革的重要时期 (Torsvik, 1996; Scotese, 2009)。古元古代-中元古代晚期, 北美劳伦大陆东

部处于活动大陆边缘的构造环境, 在先后经历了 Labradorian (1 680 ~ 1 660 Ma)、Pinwarian (1 500 ~ 1 450 Ma) 和 Elzevirian (1 240 ~ 1 220 Ma) 的 3 期造山事件后, 与俯冲相关的钙碱性弧花岗岩、岛弧和弧后沉积岩增生到劳伦边缘, 并促成了劳伦大陆的实际性生长 (Rivers, 1997; Whitmeyer and Karlstrom, 2007; Hynes and Rivers, 2010), 相关的增生事件从劳伦大陆西南部一直延伸到了波罗的古陆 (Condie, 2013; Roberts *et al.*, 2013)。随后的格林威尔造山作用 (1 085 ~ 985 Ma) 结束了这段与俯冲相关的地壳生长的漫长地质时期, 并在与罗迪尼亚超大陆拼合的过程中, 通过劳伦古陆东南缘与亚马逊大陆北缘的“陆-陆碰撞”拼合到一起, 碰撞伴随着格林威尔省内地壳岩石发生 3 期构造逆冲、地壳缩短和高级变质作用 (1 190 ~ 1 140 Ma 的 Shawinigan 期、1 090 ~ 1 020 Ma 的 Ottawan 期和 1 010 ~ 980 Ma 的 Rigolet 期; Rivers, 1997; Gower and Krogh, 2002; Keppie *et al.*, 2003; 周金城等, 2008; Loewy *et al.*, 2015)。随后, 伸展垮塌和裂谷作用导致了罗迪尼亚超大陆的解体, 该过程在北阿巴拉契亚山脉伴随着古大西洋的穿时性打开, 并以发育板内岩浆事件为特征 (van Staal and Barr, 2012)。

加拿大纽芬兰岛阿巴拉契亚造山带 Humber 带内完整发育了中元古代格林威尔远端基底碎片及其上覆新元古代晚期-奥陶纪劳伦大陆的裂谷-被动边缘沉积层序, 其基底地块的年龄组成及同位素特征是研究格林威尔基底及重建后续构造史的关键。前人认为, 基底残片大致可划分为内部带和外部

带,前者被认为是原地基底,可以与西部邻近的格林威尔构造省相关联(Gower and Krogh, 2002),后者则被认为是在罗迪尼亚大陆裂解后、古大西洋打开期间或之后从劳伦大陆侧向平移过来的(Bond *et al.*, 1984; Cawood *et al.*, 2001),并在随后在增生到劳伦大陆期间经历了横向平移(Hatcher, 2002; Hatcher *et al.*, 2007; Brem, 2007; Lin *et al.*, 2013)。本文有关纽芬兰岛 Humber 带内 Indian Head Range 地块二长花岗岩的锆石 U-Pb 年代学研究结果表明,其岩体形成于 $1\ 149\pm 4$ Ma,为带内存在格林威尔期造山事件提供了新的证据。结合前人研究成果,说明在 Humber 带南部基底地块内部带和外部带广泛存在 Shawinigan 期岩浆活动,这也与劳伦东部边缘远端广泛存在的 Shawinigan 晚期岩浆活动相一致(Karabinos *et al.*, 2008),该期岩浆事件被认为是弧后盆地闭合和弧增生的产物(Gower and Krogh, 2002; Cawood and Pisarevsky, 2017)。Nd-Hf 同位素结果显示,岛内基底地块约 1.5 Ga、约 1.15 Ga、约 1.0 Ga 的 3 期岩浆事件具有相似的同位素演化趋势,表明它们均来源于古元古代新生地壳物质,是经后期造山事件改造的结果。本文在年代学和同位素方面均显示了内部带和外部带特征的一致性,进一步证实了前人关于 Humber 带内格林威尔基底横跨 Humber River 断层具有连续性分布的特征、均为原地基底的认识,它们与劳伦大陆远端东部边缘具有一致的构造-岩浆历史,区内不存在侧向平移的外来基底。Humber 带内基底新的年代学格架的建立及同位素资料也为阿巴拉契亚造山带内古老微陆块的溯源对比提供了依据。

5 结论

本文通过对加拿大纽芬兰岛 Humber 带西南部 Indian Head Range 块体中的二长花岗岩的锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Hf 同位素研究,初步得出如下几点结论:

(1) 二长花岗岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 $1\ 149\pm 4$ Ma,代表该岩体的侵位年龄,为块体中存在格林威尔期岩浆事件提供了新的证据。结合区域年代学研究,认为 Humber 带发育约 1.5 Ga、约 1.15 Ga 和约 1.0 Ga 的 3 期花岗质岩浆事件。

(2) 该二长花岗岩全岩 $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 值(-2.3)和锆石 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值(+1.93~+3.65)显示, Humber 带内地

壳来源于古元古代新生地壳物质,分别经过 Pinwanian 造山事件以及格林威尔造山事件中的 Shawinigan 期和 Ottanwan 期的地壳再造事件。

(3) Humber 带内格林威尔基底地块均为原地基底,支持前人认识,即 Humber River 断层两侧具有相似的基底。带内基底地块与劳伦大陆远端东部边缘具有一致的构造-岩浆历史。

致谢 在加拿大纽芬兰岛开展野外工作中得到了滑铁卢大学地球科学系的大力支持以及中国地质调查局沈阳中心赵岩博士的帮助,同时两位审稿专家给出了许多建设性意见,使本文更加完善,在此对他们表示诚挚的感谢!

References

- Allen J S. 2009. Paleogeographic Reconstruction of the St. Lawrence Promontory, Western Newfoundland[D]. University of Kentucky.
- Bartholomew M J. 1984. The Grenville Event in the Appalachians and related topics[M]. Colorado: Boulder, 1~287.
- Bartholomew M and Lewis S. 1992. Appalachian Grenville massifs: Pre-Appalachian translational tectonics[A]. International Basement Tectonics Association Publication[C], 7: 363~374.
- Bond G C, Nickerson P A and Kominz M A. 1984. Breakup of a supercontinent between 625 Ma and 555 Ma: New evidence and implications for continental histories[J]. Earth and Planetary Science Letters, 70: 325~345.
- Brem A G. 2007. The Late Neoproterozoic to Early Paleozoic Evolution of the Long Range Mountains, Southwestern Newfoundland[D]. Waterloo, Ontario, Canada, University of Waterloo.
- Brem A G, Lin S F and van staal C R. 2006. Geology, Harrys River, Newfoundland and Labrador[A]. Geological Survey of Canada, Open File 4921, scale 1:50 000[C].
- Cawood P A, Dunning G R, Lux D, *et al.* 1994. Timing of peak metamorphism and deformation along the Appalachian margin of Laurentia in Newfoundland: Silurian, not Ordovician[J]. Geology, 22(5): 399~402.
- Cawood P A, McCausland P J A and Dunning G R. 2001. Opening Iapetus: Constraints from the Laurentian margin in Newfoundland[J]. Geological Society of America Bulletin, 113: 443~453.
- Cawood P A and Pisarevsky S A. 2017. Laurentia-Baltica-Azononia relations during Rodinia assembly[J]. Precambrian Research, 292: 386

- ~397.
- Cawood P A and van Gool J A M. 1998. Geology of the Corner Brook-Glover Island region, Newfoundland [J]. Geological Survey of Canada, Bulletin 47: 107.
- Cawood P A, van Gool J A M and Dunning G R. 1996. Geological development of eastern Humber and western Dunnage zones; Corner Brook-Glover Island region, Newfoundland [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 33(2): 182~198.
- Cawood P A and Williams H. 1988. Acadian basement thrusting, crustal delamination, and structural styles in and around the Humber Arm allochthon, western Newfoundland [J]. Geology, 16(4): 370~373.
- Condie K C. 2013. Preservation and recycling of crust during accretionary and collisional phases of proterozoic orogens: A Bumpy Road from Nuna to Rodinia [J]. Geosciences, 3: 240~261.
- Currie K L, van Breemen O, Hunt P A, *et al.* 1992. Age of high-grade gneisses south of Grand Lake, Newfoundland [J]. Atlantic Geology, 28(2): 414~415.
- Dickin A P. 2004. Mesoproterozoic and Paleoproterozoic crustal growth in the eastern Grenville Province: Nd isotope evidence from the Long Range inlier of the Appalachian orogen [A]. Memoir of the Geological Society of America [C]. 495~503.
- Fortey R A and Cocks L R. 2003. Palaeontological evidence bearing on global Ordovician-Silurian continental reconstructions [J]. Earth Science Reviews, 61: 245~307.
- Gower C F and Krogh T E. 2002. A U-Pb geochronological review of the Proterozoic history of the eastern Grenville Province [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 39: 795~829.
- Gower C F, Ryan A B and Rivers T. 1990. Mid-Proterozoic Laurentia-Baltica: An overview of its geological evolution and a summary of the contributions made by this volume [J]. Geological Association of Canada, Special Paper, 38: 1~20.
- Harper D A T, Owen A W and Bruton D L. 2009. Ordovician life around the Celtic fringes: Diversifications, extinctions and migrations of brachiopod and trilobite faunas at middle latitudes [J]. Geological Society London Special Publication, 325: 157~170.
- Hatcher Jr R D. 1984. Southern and central Appalachian basement massifs [J]. Geological Society of America Special Paper, 194: 149~153.
- Hatcher Jr R D. 2002. Alleghanian (Appalachian) orogeny, a product of zipper tectonics: Rotational transpressive continent-continent collision and closing of ancient oceans along irregular margins [J]. Geological Society of America Special Paper, 364: 199~208.
- Hatcher Jr R D, Bream B R and Merschat A J. 2007. Tectonic map of the southern and central Appalachian area [J/OL]. Geological Society of America, Memoir, 200. DOI: <https://doi.org/10.1130/MEM200>.
- Heaman L M, Erdmer P and Owen J V. 2002. U-Pb geochronologic constraints on the crustal evolution of the Long Range Inlier, Newfoundland [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 39(5): 845~865.
- Heaman L M, Gower C F and Perreault S. 2004. The timing of Proterozoic magmatism in the Pinware terrane of southeast Labrador, easternmost Quebec and northwest Newfoundland [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 41(2): 127~150.
- Hibbard J P, van Staal C and Rankin D W. 2007. A comparative analysis of pre-Silurian building blocks of the northern and southern Appalachians [J]. American Journal of Science, 307: 23~45.
- Hibbard J P, van Staal C R and Rankin D W. 2010. Comparative analysis of the geological evolution of the northern and southern Appalachian orogen: Late Ordovician-Permian [J]. Geological Society of America, 206: 51~70.
- Hibbard J, van Staal C R, Rankin D, *et al.* 2006. Lithotectonic map of the Appalachian Orogen, Canada-United States of America [A]. Geological Survey of Canada, Map 2096A, scale 1:1 500 000 [C].
- Hodgin E B, Macdonald F A, Crowley J L, *et al.* 2021. A Laurentian cratonic reference from the distal Proterozoic basement of Western Newfoundland using tandem in situ and isotope dilution U-Pb zircon and titanite geochronology [J]. American Journal of Science September, 321 (7): 1 045~1 079.
- Hoffman P. 1989. Precambrian geology and tectonic history of North America [J]. The Geology of North America, A: 447~512.
- Hu Z C, Liu Y S, Gao S, *et al.* 2012. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and Jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 27: 1 391~1 399.
- Hynes A and Rivers T. 2010. Protracted continental collision evidence from the Grenville Orogen [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 47: 591~620.
- Karabinos P, Morris D, Hamilton M, *et al.* 2008. Age, origin, and tectonic significance of Mesoproterozoic and Silurian felsic sills in the Berkshire massif, Massachusetts [J]. American Journal of Science, 308(6): 787~812.
- Karlstrom K E, Ahall K I, Harlan S S, *et al.* 2001. Long-lived (1.8~1.0 Ga) convergent orogen in southern Laurentia, its extensions to Australia and Baltica, and implications for refining Rodinia [J]. Precambrian Research, 111: 5~30.
- Keppie J D, Dostal J, Cameron K L, *et al.* 2003. Geochronology and ge-

- ochemistry of Grenvillian igneous suites in the northern Oaxacan Complex, southern Mexico: tectonic implications [J]. *Precambrian Research*, 120(3): 365~389.
- Knight I, James N P and Lane T E. 1991. The Ordovician St. George Unconformity, northern Appalachians; The relationship of plate convergence at the St. Lawrence promontory to the Sauk/Tipppecanoe sequence boundary [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 103: 1 200~1 225.
- Lavoie D, Burden E and Lebel D. 2003. Stratigraphic framework for the Cambrian-Ordovician rift and passive margin successions from southern Quebec to western Newfoundland [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 40: 177~205.
- Li Jin, Tang Suohan Tang, Zhu Xiangkun, *et al.* 2017. Production and certification of the reference material GSB 04-3258-2015 as a $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ isotope ratio reference [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 41(2): 255~262.
- Lin Jie, Liu Yongsheng, Yang Yueheng, *et al.* 2016. Calibration and correction of LA-ICP-MS and LA-MC-ICP-MS analyses for element contents and isotopic ratios [J]. *Solid Earth Sciences*, (1): 5~27.
- Lin S F, Brem A G, van Staal C R, *et al.* 2013. The Corner Brook Lake block in the Newfoundland Appalachians; A suspect terrane along the Laurentian margin and evidence for large-scale orogen-parallel motion [J]. *GSA Bulletin*, 125(9~10): 1 618~1 632.
- Loewy S L, Connelly J N, Dalziel I, *et al.* 2015. Eastern Laurentia in Rodinia: Constraints from whole-rock Pb and U/Pb geochronology [J]. *Tectonophysics*, 375(1): 169~197.
- Nance R D, Murphy J B, Strachan R A, *et al.* 2008. Neoproterozoic-Early Palaeozoic tectonostratigraphy and palaeogeography of the peri-Gondwanan terranes; Amazonian West African connections In *The Boundaries of the West African Craton* [J]. *Geological Society of London*, 297: 345~383.
- Owen J V, Greenough J D, Fryer B J, *et al.* 1992. Petrogenesis of the Potato Hill pluton, Newfoundland; Transpression during the Grenvillian orogenic cycle? [J]. *Journal of the Geological Society of London*, 149: 923~935.
- Rankin D W, Drake A A, Glover L, *et al.* 1989. Pre-orogenic terranes [J]. *Geological Society of America*, F-2: 7~100.
- Rankin D W and Douglas W. 1976. Appalachian salients and recesses: Late Precambrian continental breakup and the opening of the Iapetus Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research*, 81(32): 5 605~5 619.
- Rivers T. 1997. Lithotectonic elements of the Grenville Province: Review and tectonic implications [J]. *Precambrian Research*, 86(3~4): 117~154.
- Roberts N M W, Slagstad T, Parrish R R, *et al.* 2013. Sedimentary recycling in arc magmas: Geochemical and U-Pb-Hf-O constraints on the Mesoproterozoic Suldal Arc, SW Norway [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 165: 507~523.
- Scotese C R. 2009. Late Proterozoic plate tectonics and palaeogeography: A tale of two supercontinents, Rodinia and Pannotia [J]. *Geological Society London Special Publications*, 326(1): 67~83.
- Song Biao. 2015. SHRIMP zircon U-Pb age measurement: Sample preparation, measurement, data processing and explanation [J]. *Geological Review*, 48: 26~30 (in Chinese with English abstract).
- Sung G W. 1992. *Geology and Metamorphic Evolution of the Indian Head Range, A Grenvillian Inlier in West Newfoundland* [M]. Memorial University of Newfoundland.
- Tollo R, Aleinikoff J, Borduas E, *et al.* 2004. Petrologic and geochronologic evolution of the Grenville orogen, northern Blue Ridge Province, Virginia. 2004, Proterozoic tectonic evolution of the Grenville Orogen in North America [J]. *Geological Society of America Memoir*, 197: 647~677.
- Torsvik T H. 1996. Continental break-up and collision in the Neoproterozoic and Palaeozoic—A tale of Baltica and Laurentia [J]. *Earth-Science Reviews*, 40: 229~258.
- Tucker R D and Gower C F. 1994. A U-Pb geochronological framework for the Pinware terrane, Grenville Province, southeast Labrador [J]. *The Journal of Geology*, 102(1): 67~78.
- van der Velden A J, van Staal C R and Cook F A. 2004. Crustal structure, fossil subduction and the tectonic evolution of the Newfoundland Appalachians; Evidence from a reprocessed seismic reflection survey [J]. *Geological Society America Bulletin*, 116: 1 485~1 498.
- van Staal C R and Barr S M. 2012. Lithospheric architecture and tectonic evolution of the Canadian Appalachians and associated Atlantic margin [J]. *Geological Association of Canada-Special Paper*, 49: 41~95.
- van Staal C R, Dewey J F, MacNiocail C, *et al.* 1998. The Cambrian-Silurian tectonic evolution of the northern Appalachians; History of a complex, southwest Pacific-type segment of Iapetus [J]. *Geological Society Special Publication*, 143: 199~242.
- van Staal C R, Sullivan R W and Whalen J B. 1996. Provenance and tectonic history of the Gander Margin in the Caledonian/Appalachian Orogen; Implications for the origin and assembly of Avalonia [J]. *Geological Society of America Special Paper*, 304: 347~367.
- van Staal C R, Whalen J B, McNicoll V J, *et al.* 2007. The Notre Dame arc and the Taconic Orogeny in Newfoundland [J]. *Geological Society of America*, *Memoir*, 200: 511~552.

- van Staal C R, Whalen J B, Valverde-Vaquero P, *et al.* 2009. Pre-Carboniferous, episodic accretion-related, orogenesis along the Laurentian margin of the northern Appalachian [J]. Geological Society London, Special Publication, 327: 271~316.
- Waldron J W F, Anderson S D, Cawood P A, *et al.* 1998. Evolution of the Appalachian Laurentian margin [J]. Lithoprobe results in western Newfoundland [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 35: 1 271~1 287.
- Wang Yanbin, Song Biao, Wang Hao, *et al.* 2022. Timing of the Hangaoshan Group and Xiaoliangling Formation in the Lüliang area, North China: Constraints from zircon U-Pb ages of volcanic rocks [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 41(2): 195~213 (in Chinese with English abstract).
- Wasteneys H A, Kamo S L, Moser D, *et al.* 1997. U-Pb geochronological constraints on the geological evolution of the Pinware terrane and adjacent areas, Grenville Province, southeast Labrador, Canada [J]. Precambrian Research, 81: 101~128.
- Whitmeyer S J and Karlstrom K E. 2007. Tectonic model for the Proterozoic growth of North America [J]. Geosphere, 3(4): 220~259.
- Williams H and Cawood P A. 1989. Geology of the Humber Arm allochthon, Newfoundland [M]. Geological Survey of Canada, Ottawa, Ontario, Map 1678A.
- Williams H, Colman-Sadd S P and Swinden H S. 1988. Tectonic stratigraphic subdivisions of central Newfoundland [J]. In Current Research, Geological Survey of Canada: 91~98.
- Williams H. 1979. Appalachian orogen in Canada [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 16(3): 792~807.
- Williams H. 1995. Geology of the Appalachian-Caledonian Orogen in Canada and Greenland [M]. Boulder, Colorado, Geological Society of America, Geology of North America.
- Williams H and Hiscott R N. 1987. Definition of the Impetus rift-drift transition in western Newfoundland [J]. Geology, 15: 1 044~1 047.
- Wilson J T. 1966. Did the Atlantic close and then re-open? [J]. Nature, 211(5050): 676~681.
- Yu Chao, Yang Zhiming, Zhou Limin, *et al.* 2019. Impact of laser focus on accuracy of U-Pb dating of zircons by LA-ICPMS [J]. Mineral Deposits, 38(1): 21~28 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wen and Hu Zhaochu. 2019. Estimation of isotopic reference values for pure materials and geological reference materials [J]. Atomic Spectroscopy, 41(3): 93~102.
- Zhou Jincheng, Wang Xiaolei and Qiu Jiansheng. 2008. Is the Jiangnan orogenic belt a Grenvillian orogenic belt: Some problems about the Precambrian geology of South China [J]. Geological Journal of China Universities, 14(1): 64~72 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 宋 彪. 2015. 用 SHRIMP 测得锆石 U-Pb 年龄的工作方法 [J]. 地质通报, 34(10): 1 777~1 788.
- 王彦斌, 宋 彪, 王 浩, 等. 2022. 华北吕梁地区汉高山群和小两岭组的地层时代——火山岩锆石 U-Pb 年龄的约束 [J]. 岩石矿物学杂志, 41(2): 195~213.
- 于 超, 杨志明, 周利敏, 等. 2019. 激光焦平面变化对 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年准确度的影响 [J]. 矿床地质, 38(1): 21~28.
- 周金城, 王孝磊, 邱检生. 2008. 江南造山带是否格林威尔期造山带? ——关于华南前寒武纪地质的几个问题 [J]. 高校地质学报, 14(1): 64~72.