



引文格式: 严文婷, 唐利, 杨谦牧, 等. 华北克拉通南缘熊耳山地区太华群 TTG 片麻岩成因及地质意义[J]. 西北地质, 2026, 59(3): 314–327. DOI: 10.12401/j.nwg.2025164

Citation: YAN Wenting, TANG Li, YANG Qianmu, et al. Petrogenesis and Geological Significance of the Taihua Group TTG Gneisses in the Xiong'ershan Area, Southern Margin of the North China Craton[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(3): 314–327. DOI: 10.12401/j.nwg.2025164

华北克拉通南缘熊耳山地区太华群 TTG 片麻岩成因及地质意义

严文婷¹, 唐利^{1,*}, 杨谦牧², 王亮³, 陈龙龙¹

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083;
3. 中国地质调查局金矿勘查技术创新中心/中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100)

摘要: 华北克拉通经历太古宙—古元古代漫长且复杂的地质演化历史, 形成该稳定克拉通的岩浆作用和变质作用过程一直是学者们关注的焦点。笔者以华北克拉通南缘熊耳山地区太华群 TTG(英云闪长岩—奥长花岗岩—花岗闪长岩)片麻岩为研究对象, 基于详细的野外地质调查、室内镜下研究、岩石地球化学、锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析, 揭示区内古元古代岩浆作用机制及其构造指示意义。熊耳山地区太华群 TTG 片麻岩的岩浆结晶年龄为 2 300 Ma, 而变质年龄为 1 984~1 940 Ma。太华群 TTG 片麻岩 SiO₂ 含量为 59.35%~70.78%, Al₂O₃ 含量为 12.41%~17.93%, CaO 含量为 1.40%~5.52%, MgO 含量为 0.95%~2.56%, 富集轻稀土元素亏损重稀土元素, 并表现出轻、重稀土元素强烈分异的特点, 成分上类似于高铝型 TTG 片麻岩。样品富集 Rb、Ba、Sr 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素, 与岛弧花岗岩的特征相似。此外, 岩浆锆石具有相对较高的 (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_i 值 (0.281 282~0.281 332), εHf(*t*) 值 (-2.98~0.20) 和二阶段模式年龄 (2 844~2 994 Ma), 指示其岩浆源区为中太古代古老地壳的熔融。综合研究认为, 熊耳山地区的 TTG 片麻岩形成于华北克拉通东、西部陆块之间的古元古代俯冲过程, 其 1 984~1 940 Ma 的变质年龄记录沿中部造山带的碰撞拼合过程, 进一步约束了东、西部陆块的碰撞时限。

关键词: 熊耳山地区; TTG 片麻岩; 太华群; 岩石成因; 华北克拉通

中图分类号: P581; P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)03-0314-14

Petrogenesis and Geological Significance of the Taihua Group TTG Gneisses in the Xiong'ershan Area, Southern Margin of the North China Craton

YAN Wenting¹, TANG Li^{1,*}, YANG Qianmu², WANG Liang³, CHEN Longlong¹

收稿日期: 2025-12-05; 修回日期: 2026-01-23; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 河南省优秀青年基金项目(252300421204), 陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目—青年项目(C类)(2024JC-YBQN-0259), 中国地质大学(北京)求真学人项目(590223001)联合资助。

作者简介: 严文婷(2004—), 女, 本科生, 资源勘查工程(固体矿产)专业。E-mail: 1632082796@qq.com。

* 通讯作者: 唐利(1990—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事钼—金—稀土等关键金属矿床成因和成矿规律的研究和教学工作。
E-mail: ltang@cugb.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

- (1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Energy Institute, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Technology Innovation Center for Gold Ore Exploration, Xi'an Mineral Resources Survey of China Geological Survey, Xi'an 710100, Shaanxi, China)

Abstract: The North China Craton underwent a prolonged and complex geological evolution during the Archean to Paleoproterozoic, with the magmatic and metamorphic processes remain as the research questions. This study focuses on the TTG (tonalite-trondhjemite-granodiorite) gneisses of the Taihua Group in the Xiong'ershan area along the southern margin of the North China Craton. The integrated field investigations, petrographic analysis under the microscope, geochemistry, zircon U-Pb dating and Hf isotopic studies are conducted to elucidate the Paleoproterozoic magmatic mechanisms and the tectonic evolution of this region. Zircon U-Pb dating constrains the magmatic crystallization age of the Taihua Group TTG gneisses in the Xiong'ershan area to approximately 2 300 Ma, while the metamorphic ages range from 1984 Ma to 1940 Ma. The Taihua Group TTG gneisses exhibit a wide compositional range, with SiO_2 (59.35%~70.78%), Al_2O_3 (12.41%~17.93%), and relatively high CaO (1.40%~5.52%) and MgO (0.95%~2.56%) contents. It is enriched in light rare earth elements (LREE) and depleted in heavy rare earth elements (HREE), displaying strong fractionation between LREE and HREE. In composition, it resembles high-Al TTG gneisses. The samples are enriched in large-ion lithophile elements (LILEs) such as Rb, Ba, and Sr, but depleted in high-field-strength elements (HFSEs) like Nb, Ta, and Ti, which are similar to the features of island arc granites. Additionally, magmatic zircons display relatively high ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$) ratios (0.281 282~0.281 332), $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values (-2.98~+0.20), and two-stage model ages (2 844~2 994 Ma), indicating that the magmatic source originated from the partial melting of Mesoarchean ancient crust. These findings suggest that the TTG gneisses in the Xiong'ershan area formed during the Paleoproterozoic subduction process between the eastern and western blocks of the North China Craton. The metamorphic age of 1984~1940 Ma records the collisional process along the Trans-North China Orogeny. This further constrains the timing of collision between the eastern and western continental blocks.

Keywords: Xiong'ershan area; TTG gneiss; Taihua Group; petrogenesis; North China Craton

华北克拉通在古太古代就已经开始形成陆核(3.8 Ga), 是中国最古老的地块(万渝生等, 2021; Liu et al., 2024), 其经历了多期构造-岩浆-变质作用以及不同程度的混合岩化和深熔作用(翟明国, 2019; 万渝生等, 2022), 具有漫长而复杂的演化历史(Zhai et al., 2011; Zeng et al., 2025)。目前, 大部分研究将华北克拉通划分为东部陆块、西部陆块和中部造山带(图 1a; Zhao et al., 2005, 2012, 2013), 其中的中部造山带作为重要的前寒武纪碰撞造山带, 是探讨华北克拉通早期寒武纪地质演化的一个关键区域(Zhao et al., 2008; Tang et al., 2023; 王晓青等, 2024)。前人关于该造山带新太古代至古元古代的构造演化历史还存在不同认识。一种观点认为, 中部造山带自~2.55 Ga 之后是一个漫长的安第斯型大陆弧或日本型岛弧(Zhao et al., 2012), 东、西部陆块间的古大洋向东部陆块俯冲, 形成了大陆边缘岩浆弧和弧后盆地, 最终在古元古代(1.95~1.85 Ga)发生碰撞拼合形成中部造山带。另一种观点认为, 华

北克拉通由多个不同微陆块在新太古代末期聚合形成统一基底后, 其中部地区在 2.35~1.85 Ga 先后经历了裂解、俯冲、增生和碰撞过程, 最终形成中部造山带(Zhai et al., 2011; 翟明国, 2012; Tang et al., 2018)。

太华群是华北克拉通中部造山带南缘的典型早前寒武纪变质杂岩, 总体呈 NW-SE 向展布, 自西向东从陇山、骊山, 经小秦岭地区华山、灵宝、崤山, 到洛宁县熊耳山地区、鲁山县背孜-马楼地区和叶县辛店-舞阳县铁山庙地区(第五春荣等, 2010; 刘佛刚等, 2024)。太华群自下而上可划分为耐庄组、荡泽河组、铁山岭组、水底沟组和雪花沟组, 其中前人又将耐庄组和荡泽河组划归为下太华群, 后三组划归为上太华群(时毓等, 2014)。下太华群形成于新太古代早期(2.7~2.9 Ga), 主要分布于鲁山地区, 少量分布于熊耳山和小秦岭等地区; 上太华群形成于新太古代晚期—古元古代早期, 主要分布于熊耳山和小秦岭地区(时毓等, 2014; 刘金波等, 2024)。目前, 前人研究认为鲁山地区

下太华群的岩浆活动记录了华北克拉通南缘在新太古代早期新生地壳生长过程(韩长寿等, 2023; 张燕赞等, 2025)。相比而言, 熊耳山地区古元古代岩浆作用形成的太华群 TTG 片麻岩研究较薄弱。

笔者以熊耳山太华群 TTG 片麻岩为研究对象, 通过系统的岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素研究, 揭示熊耳山太华群 TTG 片麻岩的岩石成因、岩浆源区和构造背景, 并为华北克拉通中部带的构造演化过程提供依据。

1 区域地质背景

华北克拉通经历了两期克拉通化(Zhai et al., 2011; Tang et al., 2018)。第一期克拉通化及微陆块拼合发生在新太古代末期(~ 2.5 Ga), 此时华北克拉通沿绿岩带被分为阴山陆块、鄂尔多斯陆块、龙岗陆块和狼林陆块(Zhao et al., 2012; Zeng et al., 2025)。龙岗陆块和狼林陆块在太古宙末期发生碰撞拼合形成完整的东部陆块, 其间的胶辽造山带则形成于东部陆块古元古代(~ 2.1 Ga)的裂解-拼合作用。鄂尔多斯陆块在古元古代期间处于一个稳定被动型大陆边缘环境, 阴山陆块南缘则处于活动型大陆边缘环境, 二者在 $2.0\sim 1.9$ Ga 发生碰撞拼合, 形成统一的西部陆块及其内部的孔兹岩带(李三忠等, 2015)。第二期克拉通化发生在 $1.95\sim 1.82$ Ga 期间, 经历西部陆块和东部陆块的碰撞造山过程并最终形成统一的华北克拉通(Zhao et al., 2012; Tang et al., 2023)。

华北克拉通南缘新太古代—古元古代变质结晶基底之上不整合覆盖着巨厚的中—新元古代陆源碎屑岩—碳酸盐岩沉积盖层, 具有典型的基底和沉积盖层的二元结构特征(刘富乐等, 2025; 孟轲荆等, 2025)。基底主要包括太华群, 记录了华北克拉通南缘构造演化过程的岩浆作用和变质作用。下太华群的形成年龄记录了两期明显的地壳生长时间, 一期以鲁山地区 $2.85\sim 2.70$ Ga TTG 片麻岩和斜长角闪岩为代表(韩长寿等, 2023; 张燕赞等, 2025), 一期以小秦岭 ~ 2.50 Ga 各类花岗质岩石为代表(第五春荣等, 2018)。上太华群的主要岩性为 TTG 片麻岩、闪长质片麻岩、斜长角闪岩以及花岗岩, 记录了华北克拉通南缘古元古代早期的岩浆活动, 可能与西部地块和东部地块汇聚造山或与南部太古宙陆块和其他陆块汇聚-碰撞相关(第五春荣等, 2018)。此外, 小秦岭熊耳山地区和鲁山地区

的太华群均记录了 ~ 1.90 Ga 的变质事件, 暗示了华北克拉通中部带在该时期处于碰撞造山阶段, 并于 ~ 1.85 Ga 完成碰撞拼合(第五春荣等, 2018; 朱建江等, 2024)。熊耳群火山岩形成于古元古代($1.80\sim 1.75$ Ga), 不整合覆盖于太华群之上, 记录了华北克拉通基底结晶之后最大规模的火山活动, 为一套中基性—中酸性火山岩, 岩性主要为紫红色—灰黑色玄武安山岩、安山(玢)岩、英安岩、流纹(斑)岩(王俊等, 2025)。熊耳群火山—沉积岩形成于中元古代, 此时华北克拉通南缘进入了稳定的盖层发育阶段(胡国辉等, 2013)。

2 样品特征和分析方法

本次研究的 8 件太华群 TTG 片麻岩样品采自华北克拉通南缘熊耳山地区(图 1b), 样品整体呈灰白色, 中细粒结构, 片麻状构造(图 2a~图 2c)。太华群 TTG 片麻岩样品的主要矿物组合为斜长石($50\%\sim 60\%$)、石英($20\%\sim 30\%$)和少量角闪石(图 2d~图 2f)。其中, 斜长石、石英等粒状矿物与云母等片状矿物相间排列形成片麻状构造, 副矿物有锆石、磷灰石等。全岩主量元素、微量元素、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年以及 Hf 同位素分析均由武汉上谱分析科技有限责任公司完成。

全岩主微量元素测试仪器为波长色散 X 射线荧光光谱仪(ZSXPrimus II), 分析方法参照《硅酸盐岩石化学分析方法第 28 部分: 16 个主次成分量测定》(GB/T14506.28-2010)和《岩石矿物分析》, 采用中国国家岩石标准(GBW07103、GBW07105、GBW07111)对测量样品的元素浓度进行校准, 其检测结果与标准结果误差为 $1\%\sim 5\%$ 。样本的微量元素测定利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成, 用《硅酸盐岩石化学分析方法》中的测定方法作为评价标准, 测定结果的精度为 $1\%\sim 5\%$ 。

锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年的 GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPEXPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成, ICP-MS 型号为 Agilent 7900, 激光能量为 80 mJ, 频率为 5 Hz, 激光束斑直径为 $32\ \mu\text{m}$ (Liu et al., 2008)。使用锆石 91500 和玻璃物质 NIST610 作为标准进行同位素和微量元素分馏校正。锆石 Hf 同位素分析利用 LA-MC-ICP-MS 完成, 激光剥蚀系统为 Geolas HD (Coherent, 德国), MC-ICP-MS 为 Neptune Plus(Thermo Fisher Scientific, 德国), 用标

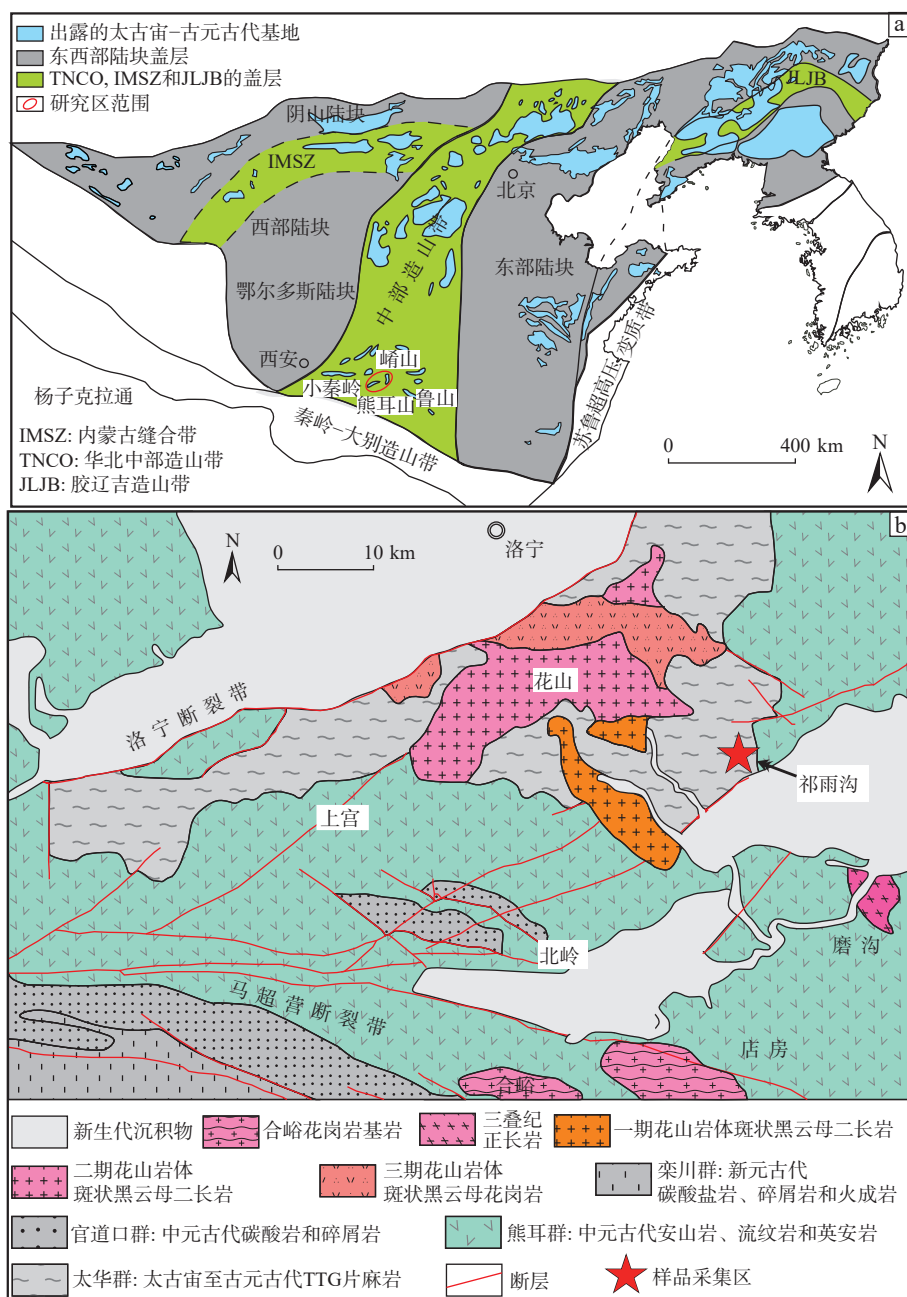


图1 华北克拉通构造框架图(a; 据 Zhao et al., 2005 修改)、华北克拉通南缘熊耳山地质简图(b; 据 Tang et al., 2021 修改)

Fig. 1 (a) Tectonic framework of the North China Craton, and (b) geological sketch map of the Xiong'er Mountain area in the southern margin of the North China Craton

样 TEM(0.282 683) 进行外标校正, 91500 和 GJ-1 作为第二标样监控数据校正质量。

3 分析结果

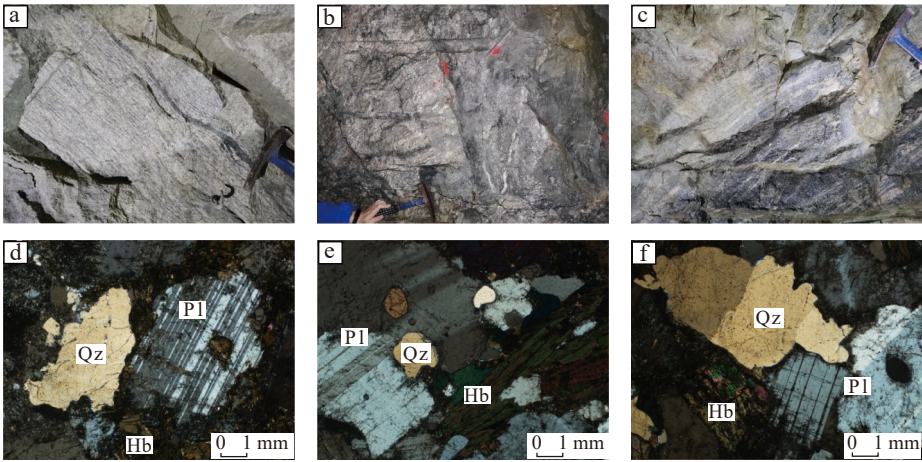
3.1 全岩主微量元素

太华群 TTG 片麻岩样品的主微量元素分析结果(表 1)显示, 样品整体表现为富 Na、高 Al、贫 K, 富轻

稀土、富 Rb、Ba 等大离子亲石元素, 贫重稀土及 Nb、Ta、Ti 等高场强元素的特征。在 TAS 图中, 大多数样品落在花岗闪长岩至闪长岩区域(图 3、图 4), 显示钙碱性到高钾钙碱性系列的特征, 与典型 TTG 组合的地球化学特征一致。

3.2 锆石 U-Pb 年龄

两件太华群 TTG 片麻岩样品(20TH-04、20TH-06)中的锆石粒径为 100~150 μm, 多呈自形-半自形的棱



Qz. 石英; Pl. 斜长石; Hb. 角闪石

图2 熊耳山地区太华群 TTG 片麻岩野外和镜下照片

Fig. 2 Field and microscopic photographs of TTG gneiss in the Xiong'ershan area

柱状(图 5a)。阴极发光图像显示,大部分锆石颗粒具有振荡环带,具有岩浆成因特征(图 5a)。部分锆石具有核-边结构,其中核部具有环带特征,边部在阴极发光图像中呈现亮白色且无环带结构,指示边部锆石为变质成因(图 5a、图 5b)。

样品 20TH-04 中 11 个点的²⁰⁶Pb/²³⁸U 和²⁰⁷Pb/²³⁵U 年龄误差范围内谐和度超过 90%,加权平均²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄为(2 324±16)Ma(MSWD=1.4),Th/U 值为0.32~0.74 (表 2),指示该年龄代表太华群 TTG 片麻岩样品的岩浆结晶年龄。此外,4 个边部锆石的分析点具有更加

表 1 熊耳山 TTG 片麻岩主量(%)和微量元素(10⁻⁶)分析结果统计表

Tab. 1 Major element (%) and trace element (10⁻⁶) analytical results of the Xiong'ershan TTG gneiss

样品编号	20TH-01	20TH-02	20TH-04	20TH-05	20TH-06	20TH-07	20TH-08
SiO ₂	66.19	61.79	70.78	63.96	70.46	68.91	59.35
TiO ₂	0.39	0.50	0.55	0.44	0.42	0.43	0.59
Al ₂ O ₃	15.93	16.18	13.38	12.41	13.25	14.10	17.93
Fe ₂ O ₃	3.66	5.18	3.52	6.67	4.12	3.99	5.60
MnO	0.05	0.07	0.06	0.14	0.04	0.05	0.11
MgO	1.73	2.56	0.96	1.26	0.95	0.99	2.18
CaO	4.48	4.53	2.83	2.87	1.40	3.16	5.53
Na ₂ O	3.99	3.89	4.07	2.09	2.52	3.68	4.25
K ₂ O	1.42	2.10	2.07	5.57	5.41	2.63	2.25
P ₂ O ₅	0.09	0.08	0.14	0.11	0.09	0.10	0.15
LOI	1.35	2.45	1.24	3.76	0.90	1.30	1.83
Total	99.28	99.33	99.58	99.28	99.56	99.33	99.76
Li	5.65	8.76	4.17	7.73	5.66	6.26	9.82
Co	11.0	20.1	6.14	20.1	3.73	6.75	10.5
Ni	17.6	27.9	3.63	10.8	1.55	3.09	17.2
Rb	40.2	60.3	38.6	137	144	68.0	84.7
Sr	499	603	256	360	146	356	784
Y	5.88	9.85	23.2	39.7	45.9	25.0	40.5
Zr	68.6	98.8	614	409	417	283	300
Nb	3.82	5.22	11.8	18.1	25.1	16.3	16.2
Ba	780	1 254	1 727	2 245	1 214	1 268	1 211

续表 1

样品编号	20TH-01	20TH-02	20TH-04	20TH-05	20TH-06	20TH-07	20TH-08
La	9.48	13.0	165	99.1	103	69.0	63.9
Ce	17.7	27.0	290	186	200	131	121
Pr	2.01	3.28	29.8	20.8	22.6	14.2	13.6
Nd	7.79	12.8	94.7	71.5	76.5	50.5	49.5
Sm	1.35	2.43	11.3	11.5	12.7	8.32	8.58
Eu	0.68	0.86	1.65	2.06	1.66	1.64	1.57
Gd	1.15	2.10	7.06	8.93	9.92	6.50	7.24
Tb	0.19	0.33	0.94	1.32	1.48	0.94	1.19
Dy	1.04	1.74	4.57	7.31	8.60	5.01	7.17
Ho	0.21	0.35	0.92	1.42	1.70	0.94	1.49
Er	0.59	1.02	2.39	4.28	4.95	2.32	4.41
Tm	0.079	0.14	0.31	0.58	0.66	0.30	0.59
Yb	0.59	0.96	2.07	3.92	4.37	1.83	4.00
Lu	0.090	0.15	0.31	0.57	0.64	0.27	0.59
Hf	1.72	2.49	15.7	10.5	11.1	7.45	7.59
Ta	0.21	0.30	0.34	0.83	1.01	0.76	0.74
Pb	10.9	16.4	15.4	74.6	21.0	18.3	21.5
Th	0.51	0.66	30.8	17.3	35.6	18.1	8.93
U	0.40	0.31	1.33	2.86	3.97	2.01	1.71

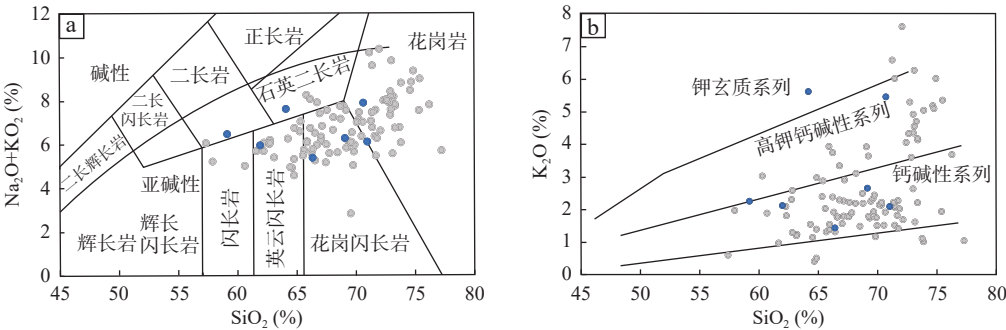


图3 熊耳山地区太华群 TTG 片麻岩的 TAS 岩石分类图解(a; 底图据 Middlemost, 1994)、
SiO₂-K₂O 岩石系列判别图解(b; 底图据 Peccerillo et al., 1976)

Fig. 3 (a) TAS classification diagram and, (b) SiO₂-K₂O discrimination diagram of
the Taihua Group TTG gneiss in the Xiong'ershan area

年轻的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄, 其加权平均年龄为(1 962±22) Ma(MSWD=0.41), Th/U 值为 0.06~0.09, 指示其代表 TTG 片麻岩的变质年龄(图 5)。样品 20TH-06 的 19 个分析点具有较为一致的年龄, 加权平均²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄为(2 307±34) Ma(MSWD=1.07), Th/U 值为 0.22~0.61, 指示其代表岩浆结晶年龄。

3.3 锆石 Lu-Hf 同位素

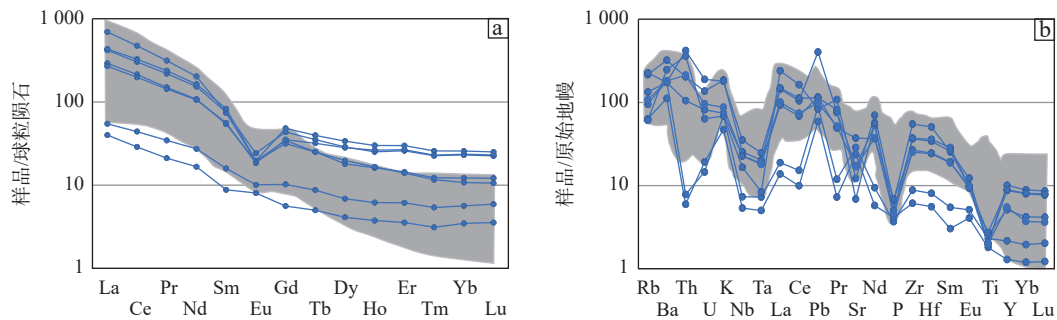
样品 20TH-04 分析的 8 颗锆石均为岩浆锆石, 具有相对较高的 (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_i 值(0.281 282~0.281 332) 及 εHf(*t*) 值(-1.2~0.4), 其亏损地幔一阶段 Hf 模式

年龄为 2 718~2 654 Ma, 二阶段模式年龄为 2 940~2 845 Ma, 总体变化范围均较小。样品 20TH-06 分析了 8 颗锆石的 Lu-Hf 同位素, 均具有较高的 (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_i 值(0.281 280~0.281 309) 及全部为负的 εHf(*t*) 值(-3.0~-1.6), 其二阶段模式年龄总体上略老(2 994~2 910 Ma)。

4 讨论

4.1 太华群 TTG 片麻岩岩浆和变质作用时代

华北克拉通南缘熊耳山地区太华群 TTG 片麻岩



球粒陨石和原始地幔均一化值来自 Sun et al. (1989)

图4 太华群 TTG 片麻岩球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(a)及原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig. 4 (a) Chondrite normalized REE and (b) primitive mantle-normalized trace elements diagrams of the Taihua Group TTG gneisses

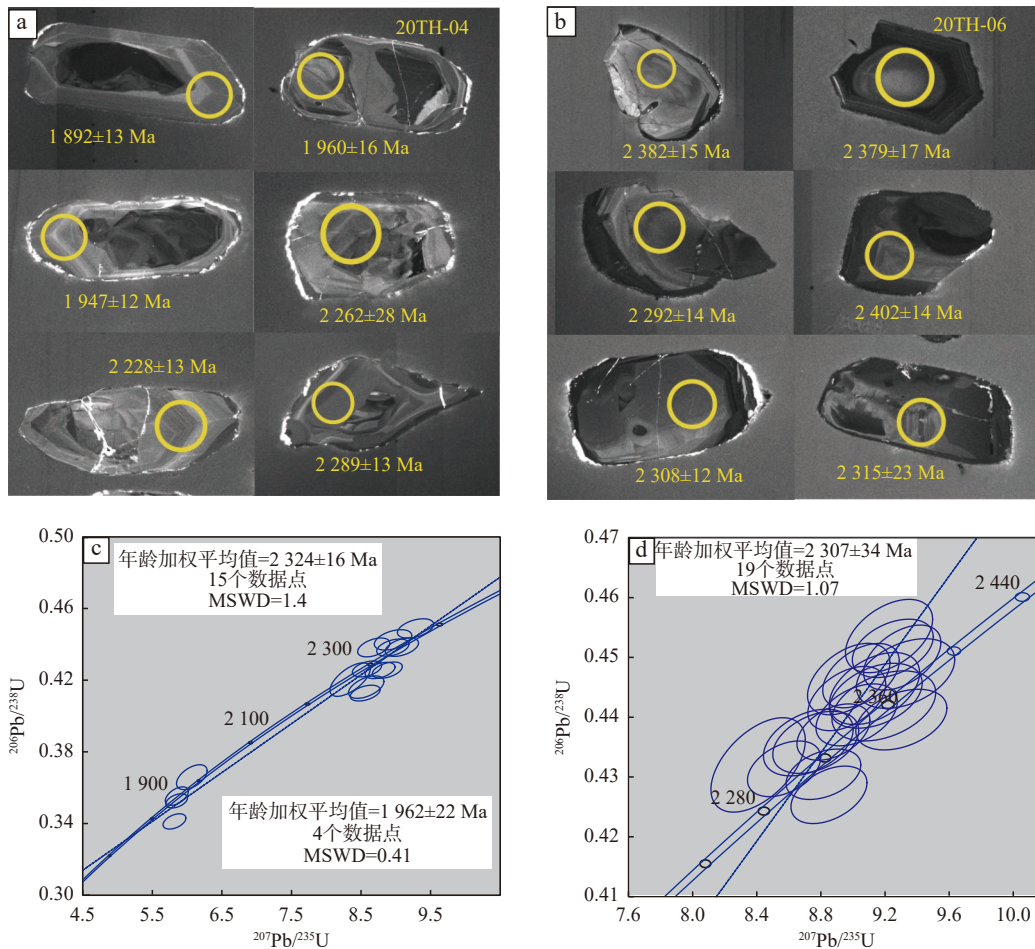


图5 熊耳山地区太华群 TTG 片麻岩锆石 CL 图像(a,b)和锆石谐和图(c,d)

Fig. 5 (a, b) Zircon CL images and (c, d) zircon concordia diagrams of the Taihua Group TTG gneisses in the Xiong'ershan area

中具有明显震荡环带的岩浆锆石和边部变质。锆石定年结果表明, 区域花岗质岩浆作用的时限为 $2\,324 \sim 2\,307$ Ma, 其侵位后经历 $(1\,962 \pm 22)$ Ma 变质作用事件。研究结果与华北克拉通中部带古元古代岩浆作用和变质作用年龄相一致(李三忠等, 2015; Tang et al., 2018; 卢成森等, 2025)。华北克拉通基底主要经历了~

2.50 Ga 和 1.95~1.80 Ga 的两次变质作用, ~2.50 Ga 的变质作用主要记录了沿绿岩带的微陆块碰撞拼合。此后, 中部造山带经历古元古代裂解-俯冲-碰撞过程(Zeng et al., 2025), 样品的岩浆结晶年龄记录了中部带的 $2\,324 \sim 2\,307$ Ma 岩浆事件。此外, 文中的变质锆石边部的定年结果指示西部陆块和东部陆块的碰撞

表 2 熊耳山地区太华群 TTG 片麻岩 U-Pb 测年结果

Tab. 2 U-Pb dating results of the Taihua Group TTG gneisses in the Xiong'er shan area

样品 编号	Pb		Th	U	238 普通Pb	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		rho	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	
	总	232					1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄 (Ma)		1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)	1σ	年龄 (Ma)
20TH-04-01	728.0	460	1432	0.32			0.1429	0.0026	8.3434	0.1907	0.4203	0.0062	0.6419	2.265	31.33	2.269	20.79	2.262	28.02	2.189	45.79
20TH-04-02	252.1	45.8	633	0.07			0.1187	0.0020	5.8524	0.1096	0.3553	0.0034	0.5108	1939	30.71	1954	16.30	1960	16.20	2049	44.12
20TH-04-03	248.8	244	456	0.54			0.1488	0.0023	8.7743	0.1418	0.4254	0.0030	0.4371	2.332	26.85	2315	14.81	2.285	13.65	2.271	32.08
20TH-04-04	221.1	283	383	0.74			0.1506	0.0024	8.8788	0.1425	0.4256	0.0030	0.4386	2.354	27.16	2326	14.73	2.286	13.61	2.275	31.25
20TH-04-05	296.6	44.8	756	0.06			0.1229	0.0021	5.8183	0.1085	0.3412	0.0028	0.4411	1998	29.78	1949	16.21	1892	13.53	2.167	47.72
20TH-04-06	686.0	728	1284	0.57			0.1486	0.0027	8.5749	0.1683	0.4161	0.0041	0.5067	2.331	31.17	2294	17.92	2.243	18.88	2.064	53.45
20TH-04-07	108.0	128	198	0.65			0.1498	0.0025	8.5596	0.1412	0.4128	0.0029	0.4289	2.343	28.86	2292	15.08	2.228	13.38	2.246	32.31
20TH-04-08	198.0	147	357	0.41			0.1489	0.0028	9.2826	0.1718	0.4489	0.0036	0.4283	2.344	31.80	2366	17.04	2.391	15.88	2.383	42.14
20TH-04-09	230.8	181	426	0.42			0.1493	0.0026	9.0871	0.1576	0.4385	0.0034	0.4480	2.339	29.48	2347	15.94	2.344	15.32	2.320	37.50
20TH-04-10	214.5	198	389	0.51			0.1473	0.0025	8.9572	0.1529	0.4382	0.0032	0.4224	2.315	27.94	2334	15.67	2.343	14.22	2.341	35.30
20TH-04-11	189.8	39.4	477	0.08			0.1198	0.0021	5.8505	0.1027	0.3527	0.0026	0.4199	1954	30.87	1954	15.29	1.947	12.44	2.249	61.34
20TH-04-12	113.5	23.2	273	0.09			0.1192	0.0022	6.0672	0.1457	0.3659	0.0046	0.5204	1.946	27.62	1986	20.97	2.010	21.60	1.991	38.27
20TH-04-13	108.1	100	194	0.52			0.1462	0.0028	8.9593	0.1773	0.4425	0.0038	0.4288	2.302	37.81	2334	18.15	2.362	16.83	2.406	43.90
20TH-04-14	158.9	134	293	0.46			0.1430	0.0025	8.6830	0.1528	0.4383	0.0035	0.4503	2.265	29.63	2305	16.10	2.343	15.61	2.076	150.7
20TH-04-15	246.7	185	467	0.40			0.1454	0.0023	8.5853	0.1390	0.4263	0.0029	0.4230	2.292	27.93	2295	14.81	2.289	13.26	1927	221.2
20TH-06-01	246.0	204	464	0.44			0.1433	0.0025	8.5708	0.1506	0.4314	0.0031	0.4055	2.333	30.71	2293	16.06	2.312	13.90	1.609	360.4
20TH-06-02	92.7	66.8	172	0.39			0.1453	0.0030	8.7682	0.1770	0.4358	0.0034	0.3888	2.291	35.19	2314	18.46	2.332	15.41	1.709	500.7

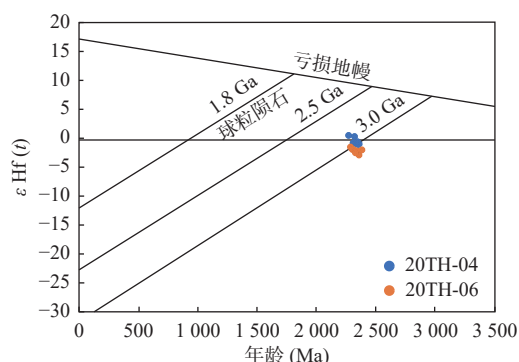


图6 华北克拉通南缘熊耳山地区 TTG 片麻岩的锆石

Lu-Hf 同位素特征

Fig. 6 Zircon Lu-Hf isotopic characteristics of TTG gneisses in the Xiong'ershan area, southern margin of the North China Craton

造山和变质作用发生于(1 962±22)Ma, 指示东、西部陆块开始碰撞的时限不晚于 1.96 Ga。

4.2 岩石成因和岩浆源区

样品具高 SiO₂ (59.35%~70.78%)、Al₂O₃ (12.41%~17.93%), 高 Na 贫 K (Na₂O/K₂O>1, Na₂O=2.09%~4.25%, K₂O=1.42%~5.57%) 特征, 稀土元素配分显示轻稀土元素富集 ((La/Yb)_N=9.72%~57.20%) 和重稀土元素亏损 (Yb=0.852×10⁻⁶), 并表现出轻、重稀土元素强烈

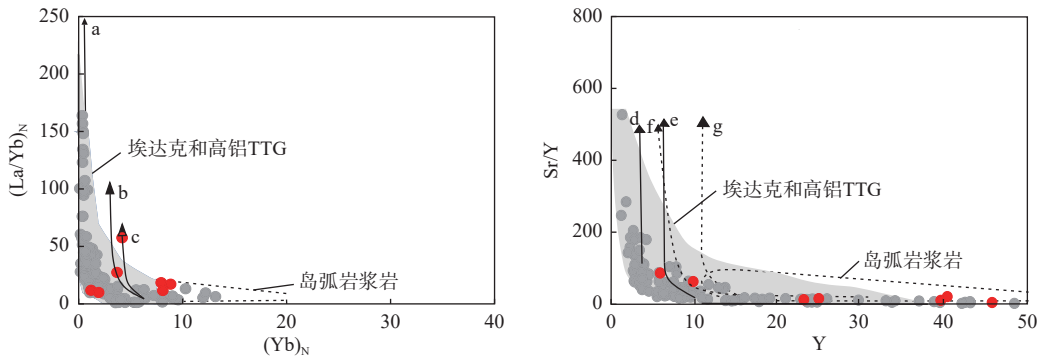
分异的特点, 具典型高铝 TTG 的特征。岛弧花岗岩在形成过程中, 由于俯冲板片脱水作用而释放出富含大离子亲石元素和轻稀土元素的流体和熔体, 高场强元素由于不易在岛弧岩浆中富集而呈现亏损的特点(王楠等, 2017; 王慧等, 2021)。样品的 Rb 元素含量较低 (<150×10⁻⁶), 球粒陨石标准化图解显示出 Ti、Nb、Ta 负异常及 Pb 正异常(图 4a), 原始地幔标准化蛛网图显示样品富集大离子亲石元素(Rb、Ba、Th、U), 亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti), 与俯冲板片含水熔体混入下地壳镁铁质岩石的特征一致(Kamber et al., 2000)。此外, Sr/Y-Y 与 (La/Yb)_N-(Yb)_N 判别图显示样品主要落入岛弧岩浆岩及埃达克质 TTG 区域(图 7); Nb-Y 和 Rb-(Y+Nb)图解显示样品落入后碰撞火山弧花岗岩区域(图 8), 指示熊耳山地区的古元古代太华群 TTG 片麻岩形成于华北克拉通中部带俯冲的构造背景。

大多数学者认为太古宙 TTG 质岩石是在下地壳贫 Mg、Cr、Ni 区域部分熔融形成, 或由下地壳中富 Mg、Cr、Ni 的俯冲洋壳部分熔融形成(Nédélec et al., 2012)。Hf 同位素可以为岩浆源区和壳幔相互作用提供关键证据, 样品 Hf 模式年龄(2 845~2 994 Ma; 表 3)显著老于成岩年龄(2 324±16 Ma), 且 εHf(t)多呈负值 (-2.98~0.40), 表明岩浆源区混入再循环古老地壳物质

表3 熊耳山太华群 TTG 片麻岩的锆石 Hf 同位素分析结果

Tab. 3 Zircon Hf isotope analysis results of TTG gneisses from the Taihua Group in the Xiong'ershan

样品号	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	εHf(0)	εHf(t)	T _{DM1}	T _{DM2}	f _{Lu} /Hf
20TH-04-03	0.281 302	0.000 013	0.000 956	0.000 022	0.033 340	0.000 802	-52.0	-1.1	2 716	2 934	-0.999 60
20TH-04-04	0.281 312	0.000 014	0.001 168	0.000 034	0.040 088	0.001 159	-51.6	-1.1	2 718	2 934	-0.999 56
20TH-04-06	0.281 283	0.000 012	0.000 471	0.000 014	0.015 643	0.000 469	-52.7	-1.0	2 708	2 929	-0.999 64
20TH-04-08	0.281 282	0.000 014	0.000 559	0.000 006	0.019 087	0.000 206	-52.7	-1.2	2 716	2 940	-0.999 57
20TH-04-09	0.281 312	0.000 014	0.000 936	0.000 013	0.032 611	0.000 537	-51.6	-0.7	2 701	2 911	-0.999 57
20TH-04-10	0.281 332	0.000 014	0.000 822	0.000 009	0.026 649	0.000 317	-50.9	0.2	2 667	2 857	-0.999 57
20TH-04-13	0.281 298	0.000 016	0.000 771	0.000 011	0.025 389	0.000 404	-52.1	-0.9	2 708	2 924	-0.999 53
20TH-04-14	0.281 310	0.000 013	0.000 219	0.000 011	0.006 957	0.000 278	-51.7	0.4	2 654	2 845	-0.999 59
20TH-06-03	0.281 309	0.000 013	0.000 859	0.000 016	0.027 366	0.000 604	-51.7	-1.6	2 700	2 910	-0.999 60
20TH-06-07	0.281 289	0.000 014	0.000 682	0.000 002	0.021 677	0.000 072	-52.4	-2.0	2 714	2 935	-0.999 59
20TH-06-11	0.281 288	0.000 013	0.000 692	0.000 003	0.022 618	0.000 137	-52.5	-2.1	2 717	2 940	-0.999 60
20TH-06-12	0.281 297	0.000 016	0.001 464	0.000 048	0.045 705	0.001 526	-52.2	-3.0	2 760	2 994	-0.999 53
20TH-06-13	0.281 283	0.000 013	0.000 734	0.000 004	0.023 494	0.000 136	-52.7	-2.3	2 727	2 955	-0.999 61
20TH-06-14	0.281 289	0.000 013	0.000 833	0.000 002	0.026 436	0.000 112	-52.5	-2.3	2 726	2 952	-0.999 59
20TH-06-15	0.281 288	0.000 015	0.000 692	0.000 012	0.021 251	0.000 394	-52.5	-2.1	2 717	2 940	-0.999 56
20TH-06-16	0.281 280	0.000 014	0.000 822	0.000 001	0.025 596	0.000 089	-52.8	-2.6	2 737	2 970	-0.999 57



a. 源区为太古代镁铁质组分且残留相为榴辉岩; b. 源区为太古代镁铁质组分且残留相为 10% 石榴角闪岩; c. 源区为太平洋中脊玄武岩且残留相为榴辉岩; d. 源区为太平洋中脊玄武岩且残留相为 10% 石榴角闪岩; e. 榴辉岩的部分熔融; f. 石榴斜长角闪岩的部分熔融; g. 斜长角闪岩的部分熔融

图7 熊耳山地区 TTG 片麻岩 $(La/Yb)_N-(Yb)_N$ (a) 和 $Sr/Y-Y$ 判别图解 (b; 底图据万建军, 2016)

Fig. 7 (a) Discrimination diagrams of $(La/Yb)_N-(Yb)_N$ and (b) $Sr/Y-Y$ for TTG gneisses in the Xiong'ershan area

(图 8, 表 3)。Nb/Ta 值 (17.48~34.37) 也与受俯冲板片含水熔体影响的镁铁质岩石比值相似 (Kamber et al., 2000; 陈龙龙等, 2024), 反映研究区内 TTG 质岩石的岩浆源区很可能是来自俯冲洋壳部分熔融的产物 (周艳艳等, 2009)。熊耳山太华群 TTG 片麻岩具有较高的 La/Yb 值 (13.5~79.7; 表 1)。在 $(La/Yb)_N-(Yb)_N$ 和 $Sr/Y-Y$ 图解中 (图 7), 大部分样品落入典型的埃达克岩或高铝 TTG 的成分范围, 小部分落入岛弧岩浆岩的成分范围中, 指示其原岩可能为太古宙 TTG 片麻岩, 其中还包含其他大陆地壳物质的参与。此外, $(La/Yb)_N-(Yb)_N$ 和 $Sr/Y-Y$ 图解 (图 7) 表明, 太华群母岩浆在熔融过程中存在金红石、石榴石或角闪石残留, 导致 Nb/Ta 值与 Zr/Sm 值 (分别为 $17.48 \times 10^{-6} \sim 34.37 \times 10^{-6}$ 、 $32.89 \times 10^{-6} \sim 54.23 \times 10^{-6}$) 值变化较大, 并具有低 Y 含量 ($5.88 \times 10^{-6} \sim 45.90 \times 10^{-6}$) 与高 Sr/Y 值 (3.17~84.87)。球粒陨石标准化稀土元素配分曲线显示出显著的 Eu 负异常 ($Eu/Eu^* = 0.30 \sim 0.45$), 指示太华群 TTG 片麻岩形

成过程中伴随大量的斜长石结晶分异。

4.3 构造指示意义

华北克拉通经历了多阶段构造演化过程。2.58~2.48 Ga, 鄂尔多斯、迁怀与许昌等微陆块沿五台花岗岩-绿岩带及其赞皇分支发生碰撞拼合, 与此同时其他主要微陆块也沿一系列 ~2.50 Ga 的花岗岩-绿岩带汇聚, 导致华北克拉通的初始克拉通化 (Zhai et al., 2011; Tang et al., 2018)。2.50~2.45 Ga, 发育以未变形基性岩墙群和花岗质岩墙为标志的后碰撞伸展作用, 进而引发沿恒山及怀安-宣化杂岩带分布的洋盆扩张 (葛松胜等, 2016)。~2.45~2.12 Ga, 恒山、怀安-宣化及吕梁杂岩带普遍经历了俯冲作用, 而阜平、五台与赞皇杂岩带则在同时期经历裂谷作用 (Tang et al., 2018)。2.12~1.98 Ga, 五台-阜平地区发生双向俯冲, 导致在阜平、五台和吕梁杂岩带发生了广泛的弧岩浆活动, 同一时期恒山和怀安-宣化-赞皇杂岩记录裂解过程。1.96~1.80 Ga, 在东、西部陆块拼合作用

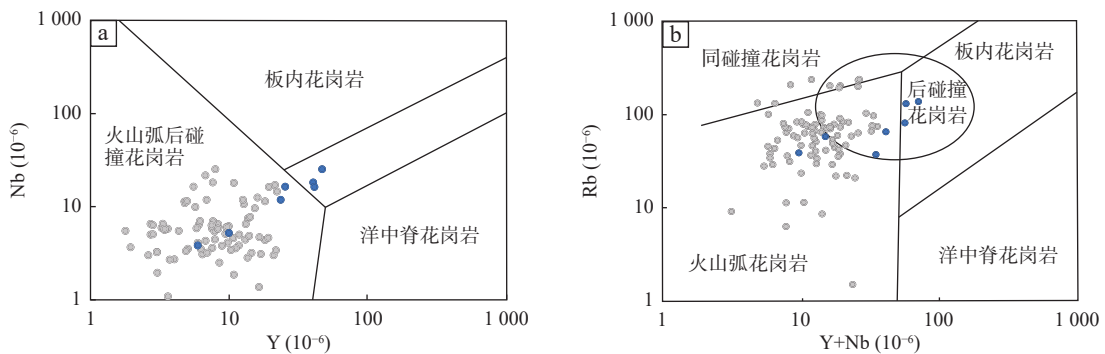


图8 熊耳山地区太华群 TTG 片麻岩 Y-Nb (a) 和 $(Y+Nb)-Rb$ (b) 构造环境判别图解 (底图据 Pearce et al., 1984)

Fig. 8 (a) Y-Nb and (b) $(Y+Nb)-Rb$ tectonic discrimination diagrams of the Taihua Group TTG gneiss in the Xiong'ershan area

的驱动下, 先前分离的陆块最终发生聚合(Tang et al., 2018; Wang et al., 2024)。因此, 华北克拉通中部带完整记录了一个始于新太古代克拉通化之后的威尔逊旋回, 该旋回涉及新太古代克拉通化、古元古代多次裂谷、俯冲与碰撞过程, 最终形成统一的华北克拉通并入 Columbia 超大陆(Tang et al., 2018)。

研究结果显示, 华北克拉通南缘熊耳山地区的太华群 TTG 片麻岩的岩浆年龄为 ~ 2.30 Ga, 形成于俯冲背景并具有岛弧特征, 其 Hf 同位素数据显示岩浆源区混有古老地壳物质, 记录了华北克拉通中部带南缘的太古宙陆块在 ~ 2.3 Ga 与其他陆块俯冲碰撞过程并产生了广泛的弧岩浆作用。样品的变质年龄为 ~ 1.96 Ga, 指示东、西部陆块碰撞拼合的时限不晚于 1.96 Ga, 东、西部陆块沿中部造山带主碰撞造山事件发生于 $1.96\sim 1.90$ Ga。

5 结论

(1) 华北克拉通南缘熊耳山地区太华群 TTG 片麻岩的岩浆结晶年龄时限为 $2\,324\sim 2\,307$ Ma, 变质年龄为 $(1\,962\pm 22)$ Ma。

(2) 熊耳山地区太华群 TTG 片麻岩属高铝型 TTG, 具有俯冲背景下的岛弧岩浆岩特征, 岩浆源区混入太古宙古老地壳物质并具有富钙贫铝的特征。

(3) 熊耳山地区太华群 TTG 片麻岩形成于古元古代东、西部陆块俯冲相关的弧岩浆作用, 其变质年龄进一步约束东、西部陆块的碰撞时限应为 $1.96\sim 1.90$ Ga。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

陈龙龙, 唐利, 沈彦谋, 等. 秦岭造山带栾川 Mo-W 矿集区和柞水-山阳 Cu-Mo 矿集区斑岩型矿床成矿差异性对比[J]. 西北地质, 2024, 57(2): 67-89.

CHEN Longlong, TANG Li, SHEN Yanmou, et al. Comparison on Metallogenic Differences of Porphyry Deposits between Luan-chuan Mo-W and Zhashui-Shanyang Cu-Mo Ore-clusters in

Qinling Orogenic Belt: Constraints of Magmatic Source and Metallogenic Conditions[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(2): 67-89.

第五春荣, 刘祥, 孙勇. 华北克拉通南缘太华杂岩组成及演化[J]. 岩石学报, 2018, 34(4): 999-1018.

DIWU Chunrong, LIU Xiang, SUN Yong. The composition and evolution of the Taihua Complex in the southern North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(4): 999-1018.

第五春荣, 孙勇, 林慈奎, 等. 华北克拉通南缘河南鲁山地区太华杂岩 LA-(MC)-ICPMS 锆石 U-Pb-Hf 同位素组成及其地质意义[A]. 2010 年全国岩石学与地球动力学研讨会[C], 2010.

葛松胜, 翟明国, 李铁胜, 等. 冀北中低级变质表壳岩的年代学特征及其对华北克拉通构造演化的约束[J]. 岩石学报, 2016, 32(2): 571-589.

GE Songsheng, ZHAI Mingguo, LI Tiesheng, et al. Geochronology of the medium-and low-grade metamorphosed supracrustal rocks from northern Hebei: Constraint on the Late Neoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(2): 571-589.

韩长寿, 张燕赞, 朱林杰, 等. 河南省鲁山—舞钢地区含石墨岩系岩石地球化学特征及其地质意义[J]. 矿产与地质, 2023, 37(3): 562-570.

HAN Changshou, ZHANG Yanzan, ZHU Linjie, et al. Rock Geochemical Characteristics of Graphite-hosted Strata in Lushan-Wugang Area, Henan and its Geological Significance[J]. *Mineral Resources and Geology*, 2023, 37(3): 562-570.

胡国辉, 赵太平, 周艳艳, 等. 华北克拉通南缘中-新元古代沉积地层对比研究及其地质意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(7): 2491-2507.

HU Guohui, ZHAO Taiping, ZHOU Yanyan, et al. Meso-Neoproterozoic sedimentary formation in the southern margin of the North China Craton and its geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(7): 2491-2507.

李三忠, 李玺瑶, 戴黎明, 等. 前寒武纪地球动力学(VI): 华北克拉通形成[J]. 地学前缘, 2015, 22(6): 77-96.

LI Sanzhong, LI Xiyao, DAI Liming, et al. Precambrian geodynamics(VI): Formation of North China Craton[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(6): 77-96.

刘佛刚, 常宇飞, 田凯, 等. 洋县铁河一带金矿与小秦岭金矿地质特征对比研究[J]. 中国金属通报, 2024, (8): 71-73.

LIU Fogang, CHANG Yufei, TIAN Kai, et al. Comparative Study on the Geological Characteristics of Gold Deposits in the Tiehe Area of Yang County and the Xiaoqinling Gold Deposit[J]. *China Metal Bulletin*, 2024, (8): 71-73.

刘富乐, 李阳, 刘园园, 等. 华北克拉通南缘蓝田地区中元古代岩浆事件: 对 Columbia 超大陆裂解的响应[J]. 地质科学,

- 2025, 60(3): 646–666.
- LIU Fule, LI Yang, LIU Yuanyuan, et al. The Mesoproterozoic magmatic events in the Lantian area, southern margin of the North China Craton: Response to the breakup of the Columbia supercontinent[J]. Chinese Journal of Geology, 2025, 60(3): 646–666.
- 刘金波, 张德贤, 胡子奇, 等. 豫西熊耳山蒿坪沟 Ag-Au-Pb-Zn 多金属矿床闪锌矿矿物学和微量元素组成特征及其成矿启示[J]. 现代地质, 2024, 38(1): 198–213.
- LIU Jinbo, ZHANG Dexian, HU Ziqi, et al. Mineralogy, Trace Element Chemistry, and Their Metallogenic Implications of Sphalerites from the Haopinggou Ag-Au-Pb-Zn Polymetallic Deposit, Xiong'ershan Area, Western Henan[J]. Geoscience, 2024, 38(1): 198–213.
- 卢成森, 钱加慧, 尹常青, 等. 华北克拉通中部造山带吕梁群的形成时代与构造环境[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2025, 52(3): 523–541.
- LU Chengsen, QIAN Jiahui, YIN Changqing, et al. Formation age and tectonic setting of the Luliang Group in the Trans-North China Orogen, North China Craton[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2025, 52(3): 523–541.
- 孟轲荆, 李伦, 梁兵, 等. 嵩山地区铁里沟花岗岩成因分析及构造意义[J]. 矿产勘查, 2025, 16(4): 715–724.
- MENG Kejing, LI Lun, LIANG Bing, et al. The Petrogenesis and Tectonic Implication of the Tieligou Granites in Songshan Area[J]. Mineral Exploration, 2025, 16(4): 715–724.
- 时毓, 于津海, 杨启军, 等. 小秦岭地区太华群锆石 U-Pb 年龄及华北克拉通南缘地壳演化[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(1): 223–234.
- SHI Yu, YU Jinhai, YANG Qijun, et al. Zircon U-Pb Ages from Taihua Group in Xiaolinling Area and Crustal Evolution of the Southern North China Craton[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(1): 223–234.
- 万建军. 华北克拉通东南缘蚌埠地区 TTG 片麻岩年代学、地球化学特征及其地质意义[D]. 南昌: 东华理工大学, 2016.
- WAN Jianjun. Geochronology and Geochemistry Characteristics of TTG Gneiss in the Bengbu Area along the Southeast Margin of North China Craton and Their Implications[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2016.
- 万渝生, 董春艳, 颜炳强, 等. 华北克拉通新太古代早期—中太古代晚期 (2.6–3.0 Ga) 巨量陆壳增生: 综述[J]. 地质力学学报, 2022, 28(5): 866–906.
- WAN Yusheng, DONG Chunyan, XIE Hangqiang, et al. Huge growth of the late Mesoproterozoic–early Neoproterozoic (2.6–3.0 Ga) continental crust in the North China Craton: A review[J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(5): 866–906.
- 万渝生, 颜炳强, 王惠初, 等. 冀东地区 3.8 Ga TTG 岩石发现[J]. 地质学报, 2021, 95(5): 1321–1332.
- WAN Yusheng, XIE Hangqiang, WANG Huichu, et al. Discovery of ~3.8 Ga TTG rocks in eastern Hebei, North China Craton[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(5): 1321–1332.
- 王慧, 张欢, 潘志龙, 等. 内蒙古北山地区哈日阿玛岛弧花岗岩地球化学、年代学特征及其地质意义[J]. 地质与资源, 2021, 30(2): 103–117.
- WANG Hui, ZHANG Huan, PAN Zhilong, et al. Geochemistry and geochronology of harima island arc granitoids in Beishan area of inner mongolia: Geological Implication[J]. Geology and Resources, 2021, 30(2): 103–117.
- 王俊, 江武龙, 余雅兰, 等. 华北克拉通南缘中元古界熊耳群大古组沉积环境——来自地球化学的证据[J]. 沉积学报, 2025, 43(2): 423–438.
- WANG Jun, JIANG Wulong, YU Yalan, et al. Depositional Environment of the Dagushi Formation, Mesoproterozoic Xiong'er Group, Southern North China Block: Evidence from geochemical analysis[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2025, 43(2): 423–438.
- 王楠, 吴才来, 秦海鹏. 川西义敦岛弧中生代典型花岗岩体矿物学、地球化学特征及岩浆来源探讨[J]. 地质论评, 2017, 63(4): 981–1000.
- WANG Nan, WU Cailai, QIN Haipen. Mineralogical, Geochemical Features of Typical Mesozoic Granites in the Yidun Arc, Western Sichuan and a Discussion on the Magma Origin[J]. Geological Review, 2017, 63(4): 981–1000.
- 王晓青, 刘敏, 毛景文. 华北克拉通中部造山带中条山地区古元古代盆地演化[J]. 地质通报, 2024, 43(4): 546–560.
- WANG Xiaoqing, LIU Min, MAO Jingwen. The Paleoproterozoic basin evolution of the Zhongtiao Mountain region in the Trans-North China Orogen, North China Craton[J]. Geological Bulletin of China, 2024, 43(4): 546–560.
- 张燕赞, 宋君, 张阳. 河南鲁山—舞钢地区石墨矿成矿规律与找矿潜力[J]. 矿产与地质, 2025, 39(3): 461–470.
- ZHANG Yanzan, SONG Jun, ZHANG Yang. Study on ore-forming regularity and prospecting potential of crystal graphite deposit in Lushan-Wugang area, Henan[J]. Mineral Resources and Geology, 2025, 39(3): 461–470.
- 翟明国. 华北克拉通的形成以及早期板块构造[J]. 地质学报, 2012, 86(9): 1335–1349.
- ZHAI Mingguo. Evolution of the North China Craton and Early Plate Tectonics[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(9): 1335–1349.
- 翟明国. 华北克拉通构造演化[J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 722–745.
- ZHAI Mingguo. Tectonic evolution of the North China Craton[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(5): 722–745.

- 周艳艳, 赵太平, 薛良伟, 等. 河南嵩山地区新太古代 TTG 质片麻岩的成因及其地质意义: 来自岩石学、地球化学及同位素年代学的制约[J]. 岩石学报, 2009, 25(2): 331–347.
- ZHOU Yanyan, ZHAO Taiping, XUE Liangwei, et al. Petrological, geochemical and chronological constraints for the origin and geological significance of Neoproterozoic TTG gneiss in the Songshan area, North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(2): 331–347.
- 朱建江, 张璐, 杨焰海, 等. 华北克拉通元古代石墨矿成因研究进展与问题[J]. 岩石学报, 2024, 40(10): 3257–3280.
- ZHU Jianjiang, ZHANG Lu, YANG Yanhai, et al. A review of study on genesis of Paleoproterozoic graphite deposits in the North China Craton: Progresses and Questions[J]. Acta Petrologica Sinica, 2024, 40(10): 3257–3280.
- Kamber B S, Collerson K D. Role of “hidden” deeply subducted slabs in mantle depletion[J]. Chemical Geology, 2000, 166: 241–254.
- Liu D Y, Wilde Simon A, Wan Y S, et al. Combined U–Pb, hafnium and oxygen isotope analysis of zircons from meta-igneous rocks in the southern North China Craton reveal multiple events in the Late Mesoproterozoic–Early Neoproterozoic[J]. Chemical Geology, 2008, 261(1–2): 140–154.
- Liu J, Palin R M, Mitchell R M, et al. Archean multi-stage magmatic underplating drove formation of continental nuclei in the North China craton[J]. Nature Communications, 2024, 15: 6231.
- Middlemost E A. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth-Science Reviews, 1994, 37: 215–224.
- Nédélec A, Chevrel M, Moyen J, et al. TTGs in the making: Natural evidence from Inyoni shear zone (Barberton, South Africa)[J]. Lithos, 2012, 153: 25–38.
- Pearce J A, Harris N B, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25: 956–983.
- Peccerillo A, Taylor S. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58: 63–81.
- 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.
- Tang L, Santosh M. Neoproterozoic terrane assembly and Wilson cycle in the North China Craton: an overview from the central segment of the Trans-North China Orogen. Earth-Science Reviews, 2018, 182, 1–27.
- Tang L, Santosh M, Palin R M, et al. Long-lived (> 100 my) postcollisional exhumation and cooling in the Paleoproterozoic Trans-North China orogen: Evidence from phase equilibria modeling and monazite petrochronology of granulite-facies metapelites in the Fuping Complex[J]. GSA Bulletin, 2023, 135(9–10): 2331–2347.
- Tang L, Wagner T, Fusswinkel T, et al. Magmatic-hydrothermal evolution of an unusual Mo-rich carbonatite: a case study using LA-ICP-MS fluid inclusion microanalysis and He–Ar isotopes from the Huangshui’an deposit, Qinling, China[J]. Mineralium Deposita, 2021, 56: 1133–1150.
- Wang H H, Tang L, Santosh M, et al. Metamorphic evolution of garnet amphibolites from the Fuping Complex: Implications for the Paleoproterozoic subduction–collision history of the Trans-North China Orogen[J]. Geological Journal, 2024, 59(2): 366–380.
- Zeng T, Tang L, Santosh M, et al. Neoproterozoic metallogenesis associated with plate tectonics in early Earth: Insights from the North China Craton[J]. Geoscience Frontiers, 2025, 16(2): 101990.
- Zhai M G, Santosh M. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview[J]. Gondwana Research, 2011, 20: 6–25.
- Zhao G C, Cawood P A, Li S, et al. Amalgamation of the North China Craton: Key issues and discussion[J]. Precambrian Research, 2012, 222–223: 55–76.
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited[J]. Precambrian Research, 2005, 136(3–4): 177–202.
- Zhao G C, Wilde S A, Sun M, et al. SHRIMP U–Pb zircon ages of granulite rocks in the Luliang Complex: Implications for the accretion and evolution of the Trans-North China Orogen[J]. Precambrian Research, 2008, 160(3): 213–226.
- Zhao G, Zhai M. Lithotectonic elements of Precambrian basement in the North China Craton: Review and tectonic implications[J]. Gondwana Research, 2013, 23(4): 1207–1240.