

# 天镇-怀安地区新太古代末二长花岗岩的成因及动力背景

任云伟<sup>1,2,3</sup>, 张家辉<sup>1,2,3</sup>, 田辉<sup>1,2,3</sup>, 王惠初<sup>1,2,3</sup>, 施建荣<sup>1,2,3</sup>, 常青松<sup>1,2,3</sup>, 张阔<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 中国地质调查局前寒武纪地质研究中心, 天津 300170; 3. 中国地质调查局华北科技创新中心, 天津 300170)

**摘要:**通过详细的野外地质工作,本文在天镇-怀安地区怀安杂岩中识别出一套与TTG片麻岩共生的二长花岗岩。LA-ICP-MS与SHRIMP锆石U-Pb定年分别获得二长花岗岩形成年龄为 $2472 \pm 10$  Ma、 $2448 \pm 9$  Ma。二长花岗岩样品SiO<sub>2</sub>含量70.55%~74.29%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量13.78%~15.35%, K<sub>2</sub>O含量4.26%~5.74%, Na<sub>2</sub>O含量3.04%~4.58%, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O除一件样品为0.93外,其余均大于1,在1.39~1.89之间,属钾质花岗岩;另外,样品CaO含量1.02%~1.37%, MgO含量0.15%~0.47%, TFeO含量0.76%~1.9%, TiO<sub>2</sub>含量0.16%~0.32%,整体显示富Si、Na、K、Al, 贫Ca、Fe、Mg、Ti的特点。二长花岗岩轻稀土相对富集、重稀土亏损,微量元素富集Rb、Ba、K、Sr等大离子亲石元素,亏损U、Nb、Ta、P、Ti等高场强元素,同时Th含量较高而Cr、Ni含量低,显示与中、上部地壳非常相似的稀土、微量特征;而样品Sr含量相对较高,但Y、Yb含量很低,指示形成于中高压条件下。综合上述认识,怀安杂岩中的二长花岗岩应是加厚下地壳部分熔融的产物,标志着华北克拉通北缘新太古代末期陆壳趋于成熟,已完成克拉通化。

**关键词:**二长花岗岩;怀安杂岩;新太古代;华北克拉通

**中图分类号:** P588.121;P597

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2097-0188(2022)02-0076-11

地球早期大陆地壳的形成与演化一直是前寒武纪地质学研究的热点问题。在过去的20年中,地球早期演化历史研究主要集中在两个方面:(1)古大陆的增生与克拉通化过程;(2)板块构造起始过程<sup>[1]</sup>。华北克拉通作为地球早期陆壳的重要组成部分,与世界其他克拉通以~2.7 Ga的岩浆活动为主要活动期不同,华北克拉通~2.5 Ga的岩浆活动非常强烈<sup>[2,3]</sup>。对华北克拉通独特和复杂的演化过程,不同学者存在不同认识,但大致可归纳为以下两种主要观点:一种观点认为华北克拉通于~2.5 Ga完成克拉通化,以微陆块拼合的“五台运动”为标志<sup>[4-6]</sup>;另一种观点则认为华北克拉通基底在太古宙末尚未完全固结,后期在古元古代存在古陆块或弧陆碰撞<sup>[7-9]</sup>,~1.85 Ga东部陆块和西部陆块沿中部造山带碰撞拼合,最终完成克拉通化<sup>[10]</sup>。显然,有关华北克拉通基底拼合时间及方式仍是前寒武纪地质研究的焦点问题,而~2.5 Ga的岩浆事件性质的研究无疑会提供华北克拉通早前寒武纪地质演化的重要信息。

华北克拉通~2.5 Ga的岩浆事件的一个显著特点是TTG岩浆活动的末期普遍伴有钾质花岗岩的侵位,如鞍山地区齐大山钾质花岗岩、冀东地区山海关钾质花岗岩、鲁西地区四海山及鲁山钾质花岗岩、嵩山地区路家沟钾质花岗岩、怀安地区钾质花岗岩以及赞皇杂岩中的菅等钾质花岗岩等<sup>[11,12]</sup>。邓晋福等<sup>[4]</sup>认为华北克拉通新太古代末期花岗岩类为T<sub>1</sub>T<sub>2</sub>G<sub>1</sub>G<sub>2</sub>组合,代表半成熟陆壳的组成。晋冀蒙交界一带,沿山西繁峙县北东一直至河北宣化县分布一条钾质花岗岩带,北东东向断续延伸近200 km,被认为是桑干构造带的重要组成部分。以往一般认为该条岩浆岩带具有碰撞和后碰撞花岗岩的特征<sup>[13]</sup>,是怀安古陆和恒山古陆之间碰撞带中岩石部分熔融的产物,在古陆的拼合或大陆增长中起着某种作用<sup>[14]</sup>。但也有研究者认为,所谓怀安古陆和恒山古陆原来可能曾是一个古陆,目前的差异只是它们出露的深度不同,代表了不同的地壳水平,而桑干构造带以及其中的高压变质岩石和花岗岩带是大陆地壳基底逆掩和大规

**收稿日期:** 2020-04-13

**资助项目:**中国地质调查局项目“燕山-太行成矿带丰宁和天镇地区地质矿产调查(DD20160042)”、“河北怀安-内蒙古凉城地区区域地质调查(DD20190035)”、“华北地区区域基础地质调查(DD20221631)”

**作者简介:**任云伟(1984-),男,高级工程师,毕业于吉林大学地球科学学院,专业方向为构造地质学,现主要从事区域地质调查和前寒武纪地质研究,E-mail: renyunwei123@163.com。

模滑脱作用的产物,且岩浆活动可能从太古宙末( $\sim 2.5$  Ga)一直持续到古元古代中期( $\sim 2.15$  Ga)<sup>[15]</sup>。另外,张华锋<sup>[6]</sup>等则获得董家沟一带黑云母二长花岗岩与石榴正长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分别为  $\sim 2440$  Ma 和  $\sim 2000$  Ma,并认为这两期钾质花岗岩岩浆事件分别与新太古代末微陆块拼合和古元古代板内伸展或裂解有关。在怀安地区,近年来研究者们对  $\sim 2.5$  Ga 岩浆作用的研究更多的偏重于 TTG 方面<sup>[17-19]</sup>,而对与 TTG 片麻岩密切伴生的二长花岗岩的研究则相对薄弱。为此,本文对天镇-怀安地区二长花岗岩进行了岩相学、地球化学、锆石 U-Pb 定年工作,探讨其岩石成因、时代及构造环境,以期对晋冀蒙一带新太古代末期构造演化提供约束。

## 1 地质背景及岩石学特征

晋冀蒙交界地区是华北克拉通典型的高级变质岩区,早前寒武纪变质基底大致以大同-兴和一线为界划分为两套高级变质岩系,南东一侧为太古代怀安杂岩,北西一侧为古元古代孔兹岩系。研究区位于怀安杂岩中的天镇县一带,主体地质体为新太古代变质深成片麻岩,出露面积约占变质基底总面积的 80% 以上,主要由包括闪长质片麻岩、英云闪长质片麻岩、奥长花岗质片麻岩的 TTG 组合以及少量的二长花岗岩组成,原岩年龄介于 2.45 ~ 2.55 Ga,变质年龄为 1.82 ~ 1.85 Ga<sup>[16-18,20,21]</sup>。此外,区内出露少量新太古代硅铁建造、榴云片麻岩以及古元古代高压基性麻粒岩-大理岩、富铝片麻岩等表壳岩组合<sup>[22]</sup>。还见大量古元古代变质基性岩墙,侵入新太古代 TTG 片麻岩杂岩中(图 1)。

区内的二长花岗岩出露面积有限,但分布较为广泛,以天镇东南石厂沟-白家烟一带和怀安县南部赵家窑-太平沟一带出露规模相对较大,多呈不规则小岩株状、脉状或枝脉状侵入 TTG 片麻岩中,片麻状构造不明显(图 2a),内部见有基性麻粒岩呈“夹层”状产出(图 2b);在一些构造变形较强的区域,则见二长花岗岩与英云闪长质片麻岩彼此交互产出,二者接触界线平直,产状与英云闪长质片麻岩片麻理协调一致,表现出深熔混合岩化的特征。

二长花岗岩岩性整体均匀,片麻理不发育,岩石呈肉红色,中细粒花岗变晶结构,块状-弱片麻状构造(图 2c、d)。主要由斜长石、钾长石、石英及少量暗色矿物黑云母组成。斜长石呈它形粒状,粒度一般

为 0.5 ~ 3.0 mm,杂乱分布,含量 30% ~ 35%。钾长石呈它形粒状,主要为条纹长石,部分岩石含微斜长石,粒度一般为 1.0 ~ 3.0 mm,杂乱分布,少部分与石英呈文象结构,部分粒内嵌布少量斜长石、石英等颗粒,含量 35% ~ 40%。石英呈它形粒状,粒度一般为 1.0 ~ 2.0 mm,杂乱分布,部分与钾长石呈文象结构,粒内具轻微波状消光,含量 20% ~ 25%。暗色矿物多被绿泥石、次闪石等交代呈假像,局部残留为黑云母,星散分布,含量一般在 5% 以下,局部含量较高,可达 5% ~ 10%。

## 2 分析方法

测年样品锆石分选工作由廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成。样品按照常规粉碎淘洗,经磁选和重液分离,然后在双目镜下人工挑选纯度在 99% 以上的锆石。其中一件测年样品的锆石制靶和透射光、反射光、阴极发光照相及样品测年工作在中国地质调查局天津地质调查中心完成,采用 LA-MC-ICP-MS 进行锆石 U-Pb 同位素定年测试,ICP-MS 为 Agilent 7500a,分析中采用的激光束斑直径为 35  $\mu\text{m}$ ,频率为 8 Hz,能量为 5 mJ。分析时采用 GJ-1 作为年龄外标,NIST610 作为元素含量外标,分析流程见文献[23]。最终测试数据的离线处理采用软件 ICPMASDataCal<sup>[24]</sup>,U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用 ISOPLOT3.0 程序<sup>[25]</sup>;另外一件样品的锆石制靶和透射光、反射光、阴极发光照相在北京离子探针中心实验室完成,锆石 U-Pb 定年在北京离子探针中心 SHRIMP II 上完成,详细分析方法见文献[26]。测试时一次流  $\text{O}^2$  强度为 3 ~ 5 nA,束斑直径为 25  $\mu\text{m}$ 。标样 M257( $U=840 \times 10^{-6}$ )<sup>[27]</sup>和 TEM(年龄为 417 Ma)<sup>[28]</sup>分别用于锆石 U 含量和年龄校正。TEM 与未知样品测定比例为 1/3 ~ 1/4。对于样品和标准锆石数据点测定均由 5 组扫描给出。数据处理采用 SQUID 和 ISOPLOT 程序<sup>[25]</sup>。

样品主微量元素测试分析在中国地质调查局天津地质调查中心实验室完成。主量元素用 X 射线荧光光谱法(XRF)测试,FeO 应用氢氟酸-硫酸溶样、重铬酸钾滴定的容量法,分析精度优于 2%,微量元素使用 ICP-MS 测试,分析精度优于 5%。

## 3 分析结果

### 3.1 锆石 U-Pb 年代学

本次工作选择两件二长花岗岩样品进行了年代

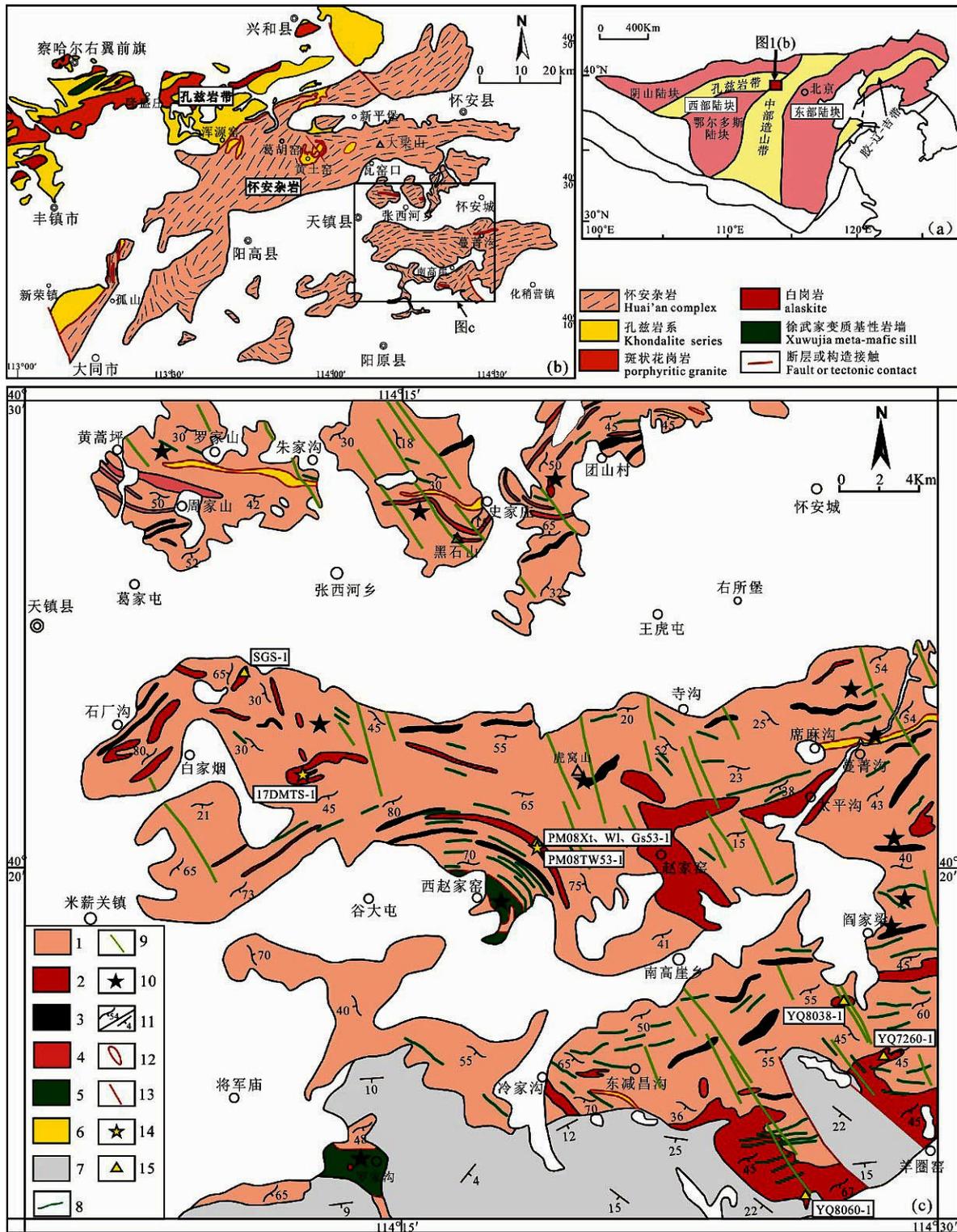


图1 晋冀蒙交界地区(b)和天镇-怀安地区(c)早前寒武纪地质简图及华北克拉通构造分区图(a)  
(图b、c据参考文献[22]修改,图a据参考文献[20]修改)

Fig.1 Precambrian geological sketch of the border area of Shanxi, Hebei and Inner Mongolia Provinces (b) and Tianzhen-Huai'an area (c) and tectonic subdivision of the North China Craton (a)

1. 新太古代TTG片麻岩; 2. 新太古代二长花岗岩; 3. 新太古代条带状硅铁建造; 4. 新太古代榴云片麻岩岩组; 5. 古元古代高压基性麻粒岩-大理岩组合; 6. 古元古代富铝片麻岩; 7. 中元古代盖层; 8. 古元古代二辉麻粒岩(变质基性岩墙); 9. 中元古代基性岩墙; 10. 岩墙型高压基性麻粒岩出露点; 11. 片麻理/地层产状; 12. 构造接触界线; 13. 断层; 14. 同位素测年及岩石化学分析样品采样点; 15. 岩石化学分析样品采样点

表1 二长花岗岩样品(17DMTS-1)LA-MC-ICPMS 锆石U-Pb 测年分析结果  
Table 1 LA-MC-ICPMS Zircon U-Pb dating results of the monzonitic granite(17DMTS-1)

样品号	含量/( $\times 10^{-6}$ )			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	U	Th		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$
17DMTS-1.1.1	27	225	387	0.58	0.459 8	0.010 7	10.179 8	0.255 0	0.160 6	0.000 4	2 439	57	2 451	61	2 462	21
17DMTS-1.1.2	10	286	220	0.06	0.281 8	0.002 9	5.063 0	0.070 7	0.130 3	0.001 1	1 600	17	1 830	26	2 102	22
17DMTS-1.2	32	169	487	0.14	0.462 2	0.004 7	10.150 8	0.138 3	0.159 3	0.000 4	2 449	25	2 449	33	2 448	21
17DMTS-1.3	10	130	136	0.47	0.446 8	0.004 7	9.401 6	0.130 3	0.152 6	0.000 9	2 381	25	2 378	33	2 375	21
17DMTS-1.4	41	45	493	0.50	0.364 2	0.003 9	7.469 6	0.102 2	0.148 7	0.000 3	2 002	22	2 169	30	2 332	21
17DMTS-1.5	11	124	137	0.38	0.452 0	0.008 0	9.470 1	0.197 6	0.152 0	0.001 2	2 404	43	2 385	50	2 368	21
17DMTS-1.6	11	23	69	0.58	0.451 3	0.005 4	9.641 3	0.144 3	0.154 9	0.000 9	2 401	29	2 401	36	2 401	21
17DMTS-1.7	22	440	524	0.12	0.447 9	0.004 7	9.939 6	0.135 6	0.161 0	0.000 5	2 386	25	2 429	33	2 466	21
17DMTS-1.8	22	6	236	0.04	0.309 4	0.003 1	4.780 8	0.064 2	0.112 1	0.000 6	1 738	18	1 782	24	1 833	23
17DMTS-1.9	17	339	401	0.19	0.460 8	0.004 9	10.362 1	0.142 9	0.163 1	0.000 7	2 443	26	2 468	34	2 488	21
17DMTS-1.10	20	334	212	0.91	0.459 2	0.004 9	10.199 8	0.142 3	0.161 1	0.000 6	2 436	26	2 453	34	2 467	21
17DMTS-1.11	35	78	102	0.68	0.420 1	0.004 1	9.026 3	0.117 0	0.155 8	0.000 5	2 261	22	2 341	30	2 411	21
17DMTS-1.12	9	56	155	0.04	0.332 6	0.004 0	5.196 1	0.078 2	0.113 3	0.001 1	1 851	22	1 852	28	1 853	22
17DMTS-1.13	30	564	298	0.37	0.471 3	0.005 8	10.625 8	0.158 2	0.163 5	0.000 7	2 489	30	2 491	37	2 492	21
17DMTS-1.14	9	40	64	0.05	0.284 1	0.003 5	5.012 8	0.077 3	0.128 0	0.001 1	1 612	20	1 821	28	2 070	22
17DMTS-1.15	16	88	205	0.03	0.282 4	0.003 0	4.507 0	0.062 2	0.115 7	0.000 6	1 604	17	1 732	24	1 891	22
17DMTS-1.16	29	8	323	0.14	0.358 9	0.004 0	7.754 0	0.110 7	0.156 7	0.000 4	1 977	22	2 203	31	2 420	21
17DMTS-1.17	18	152	243	0.15	0.367 5	0.005 8	6.330 3	0.141 6	0.124 9	0.000 6	2 017	32	2 023	45	2 028	24
17DMTS-1.18	37	123	229	0.32	0.482 5	0.004 9	10.832 0	0.144 9	0.162 8	0.000 3	2 538	26	2 509	34	2 485	21
17DMTS-1.19	21	373	343	0.55	0.467 4	0.005 1	10.696 6	0.149 9	0.166 0	0.001 1	2 472	27	2 497	35	2 517	21
17DMTS-1.20	12	169	284	0.62	0.467 6	0.004 7	10.486 4	0.137 7	0.162 6	0.000 8	2 473	25	2 479	33	2 483	21
17DMTS-1.21	9	78	126	0.62	0.350 7	0.003 6	7.152 7	0.099 9	0.147 9	0.001 7	1 938	20	2 131	30	2 322	22
17DMTS-1.22	3	44	54	0.35	0.455 6	0.004 6	9.949 6	0.134 7	0.158 4	0.003 6	2 420	24	2 430	33	2 439	21
17DMTS-1.23	50	247	619	0.46	0.445 4	0.004 7	9.439 4	0.131 4	0.153 7	0.000 2	2 375	25	2 382	33	2 387	21
17DMTS-1.24	32	9	358	0.07	0.329 3	0.003 6	5.236 8	0.079 3	0.115 3	0.000 3	1 835	20	1 859	28	1 885	23
17DMTS-1.25	86	525	1039	0.37	0.470 4	0.005 1	10.570 0	0.148 5	0.163 0	0.000 2	2 485	27	2 486	35	2 487	21
17DMTS-1.26	107	184	299	0.24	0.471 9	0.005 4	10.572 9	0.156 9	0.162 5	0.000 3	2 492	28	2 486	37	2 482	21
17DMTS-1.27	16	261	289	0.53	0.462 9	0.006 0	10.130 2	0.159 1	0.158 7	0.000 6	2 452	32	2 447	38	2 442	21
17DMTS-1.28	13	148	178	0.50	0.467 7	0.005 7	10.273 5	0.157 1	0.159 3	0.000 8	2 473	30	2 460	38	2 448	21
17DMTS-1.29	4	52	90	0.27	0.326 8	0.003 7	6.298 7	0.099 4	0.139 8	0.002 2	1 823	20	2 018	32	2 224	22
17DMTS-1.30	27	249	333	0.28	0.474 0	0.005 3	10.619 7	0.151 7	0.162 5	0.000 4	2 501	28	2 490	36	2 482	21
17DMTS-1.31	99	130	618	0.46	0.472 5	0.005 0	10.491 2	0.147 1	0.161 0	0.000 3	2 495	26	2 479	35	2 466	21
17DMTS-1.32	27	8	303	0.26	0.475 1	0.004 9	10.566 5	0.145 1	0.161 3	0.000 4	2 506	26	2 486	34	2 469	22

注:测试单位为中国地质调查局天津地质调查中心实验室

样品主要落在高钾钙碱性系列中。

### 3.2.2 稀土、微量元素特征

二长花岗岩的稀土总量变化较大,  $\Sigma\text{REE}$  在  $52.02 \times 10^{-6} \sim 243.23 \times 10^{-6}$  之间, 平均值为  $152.30 \times 10^{-6}$ , 含量整体偏低。LREE 为  $49.23 \times 10^{-6} \sim 238.37 \times 10^{-6}$ , 平均值  $148.06 \times 10^{-6}$ , HREE 为  $2.44 \times 10^{-6} \sim 7.09 \times 10^{-6}$ , 平均值  $4.24 \times 10^{-6}$ 。在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图中(图 7a), 稀土配分曲线整体呈轻稀土相对富集、重稀土亏损的右倾分布形式, LREE/HREE 为  $17.64 \times 10^{-6} \sim 49.03 \times 10^{-6}$ , (La/Yb) N 为  $44.20 \sim 237.39$ 。铕异常变化较大, 其中的 4 件样品具弱的负铕异常,  $\delta\text{Eu}$  介于  $0.63 \sim 0.85$  之间; 另外 3 件样品为正铕异常,  $\delta\text{Eu}$  介于  $1.19 \sim 1.65$  之间。在原始地幔标准化微量元素蛛网图中(图 7b), 样品整体显示富集 Rb、Ba、K、Sr 等大离子亲石元素, 亏损 U、Nb、Ta、P、Ti 等

高场强元素的特点。另外, 样品 Sr 含量变化较大, 在  $110 \times 10^{-6} \sim 382 \times 10^{-6}$  之间(平均值  $240.86 \times 10^{-6}$ ); Y、Yb 含量低, 其中 Y 含量在  $1.98 \times 10^{-6} \sim 7.36 \times 10^{-6}$  之间(平均值  $3.23 \times 10^{-6}$ ); Yb 含量在  $0.19 \times 10^{-6} \sim 0.8 \times 10^{-6}$  (平均值  $0.31 \times 10^{-6}$ )。过渡元素中 Cr、Ni 含量低, 分别为  $2.2 \times 10^{-6} \sim 7.3 \times 10^{-6}$  (平均值  $4.55 \times 10^{-6}$ )、 $1.79 \times 10^{-6} \sim 5.72 \times 10^{-6}$  (平均值  $3.45 \times 10^{-6}$ )。

## 4 讨论

### 4.1 成岩时代

前人对怀安杂岩中 TTG 片麻岩开展了大量同位素年代学工作, Zhao 等<sup>[20]</sup> 获得蔓菁沟一带英云闪长岩、奥长花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为  $2515 \pm 20 \text{ Ma}$ 、 $2499 \pm 19 \text{ Ma}$ ; 刘富等<sup>[17]</sup> 获得天镇瓦窑口一带英云闪长质片麻岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年

表2 二长花岗岩样品(PM08TW53-1)锆石 SHRIMP U-Pb 测年分析结果  
Table 2 SHRIMP Zircon U-Pb dating results of the monzonitic granite(PM08TW53-1)

样品号	<sup>206</sup> Pb <sub>c</sub> ×10 <sup>-6</sup>	U ×10 <sup>-6</sup>	Th	Th/U	同位素比值						误差 相关性	年龄/Ma		Disc /%		
					<sup>206</sup> Pb*/ <sup>238</sup> U %	<sup>207</sup> Pb*/ <sup>235</sup> U %	<sup>207</sup> Pb*/ <sup>206</sup> Pb* %	206Pb/238U	1σ	<sup>207</sup> Pb/206Pb		1σ				
PM08TW53-1-1.1	0.05	172	179	1.07	0.487 0	1.5	11.16	1.7	0.166 2	0.80	0.880	2 558	±31	2 520	±14	-2
PM08TW53-1-2.1	0.44	44	17	0.39	0.480 9	1.8	10.65	2.5	0.160 7	1.7	0.741	2 531	±38	2 463	±28	-3
PM08TW53-1-2.2	1.35	1 478	69	0.05	0.254 5	1.3	4.542	1.5	0.129 5	0.77	0.876	1 461	±17	2 091	±13	30
PM08TW53-1-3.1	0.20	321	106	0.34	0.467 6	1.5	10.36	1.7	0.160 6	0.71	0.907	2 473	±32	2 462	±12	0
PM08TW53-1-4.1	0.13	192	110	0.59	0.460 0	1.4	10.00	1.6	0.157 7	0.66	0.909	2 439	±29	2 431	±11	0
PM08TW53-1-4.2	0.17	1 185	89	0.08	0.268 7	1.3	4.641	1.5	0.125 28	0.60	0.912	1 534	±18	2 033	±11	25
PM08TW53-1-5.1	0.83	1 316	465	0.36	0.168 4	1.3	2.144	1.6	0.092 34	0.93	0.824	1 003	±12	1 474	±17	32
PM08TW53-1-6.1	0.24	529	49	0.10	0.454 5	1.4	9.79	1.4	0.156 17	0.45	0.948	2 415	±27	2 415	±8	0
PM08TW53-1-6.2	1.91	1 652	97	0.06	0.304 2	1.3	5.702	1.6	0.136 0	0.89	0.854	1 712	±20	2 176	±14	21
PM08TW53-1-7.1	0.61	1 318	649	0.51	0.367 8	1.4	7.49	1.4	0.147 83	0.42	0.959	2 019	±24	2 321	±7	13
PM08TW53-1-8.1	0.22	209	111	0.55	0.482 0	1.5	10.68	1.6	0.160 79	0.61	0.923	2 536	±31	2 464	±10	-3
PM08TW53-1-9.1	0.56	1 188	592	0.52	0.210 9	1.3	3.022	1.5	0.103 95	0.69	0.893	1 234	±15	1 696	±12	27
PM08TW53-1-8.2	0.68	1 361	105	0.08	0.358 6	1.3	7.157	1.4	0.144 80	0.44	0.952	1 975	±23	2 285	±7	14
PM08TW53-1-10.1	0.33	170	52	0.32	0.504 1	1.5	11.38	2.0	0.163 7	1.3	0.738	2 631	±31	2 494	±22	-6
PM08TW53-1-11.1	0.19	552	351	0.66	0.451 5	1.4	9.91	1.5	0.159 28	0.56	0.925	2 402	±27	2 448	±94	2
PM08TW53-1-10.2	0.07	286	60	0.22	0.510 3	1.4	11.60	1.5	0.164 87	0.50	0.943	2 658	±31	2 506	±9	-6
PM08TW53-1-12.1	0.06	598	64	0.11	0.466 8	1.4	10.20	1.4	0.158 44	0.47	0.945	2 470	±28	2 439	±8	-1
PM08TW53-1-13.1	0.32	171	118	0.71	0.348 9	1.5	5.362	1.8	0.111 5	1.1	0.811	1 929	±24	1 823	±19	-6
PM08TW53-1-14.1	0.26	191	174	0.94	0.348 5	1.5	5.215	1.8	0.108 6	1.1	0.791	1 927	±24	1 775	±21	-9

注:测试单位为北京离子探针中心实验室。



图3 二长花岗岩锆石阴极发光图像

Fig.3 CL images of selected zircons of the monzogranites

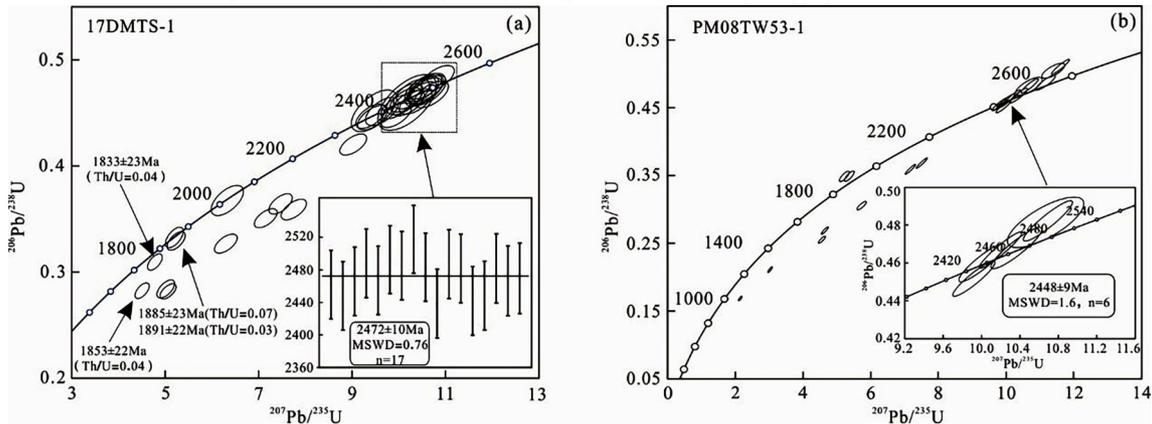


图4 二长花岗岩锆石U-Pb年龄谐和图

Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagrams of the monzogranites

龄为 2 502±11 Ma,怀安东洋河一带奥长花岗质片麻岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 2 506±13 Ma; Wang 等<sup>[21]</sup>获得蔓菁沟一带英云闪长质片麻岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 2 503±17 Ma。而有关怀安杂岩中新太古代末期钾质花岗岩锆石年龄的报道相

对要少,Zhang 等<sup>[16]</sup>获得董家沟黑云母二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 2 437±10 Ma,本次工作获得天镇大馒头山一带二长花岗岩 LA-ICP-MS 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分别为 2 472±10 Ma、2 448±9 Ma。由上述测年结果结合野外地质关系看,怀安

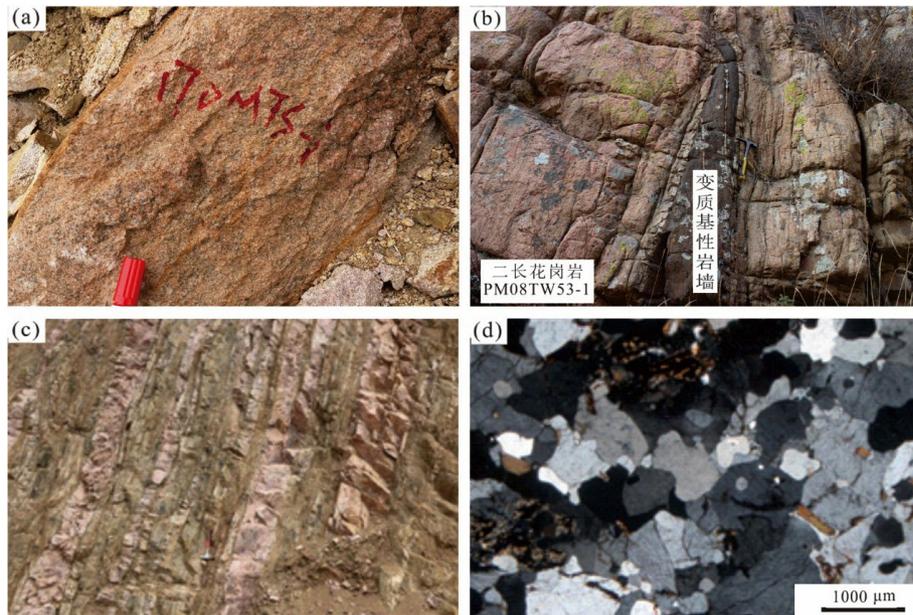


图2 天镇-怀安地区二长花岗岩野外露头及显微照片

Fig.2 Field outcrop and microphotographs of the monzogranites in the Tianzhen-Huai'an area

a. 二长花岗岩露头特征; b. “夹层”状产于二长花岗岩中的基性麻粒岩; c. 强变形带处二长花岗岩平行英云闪长质片麻岩片麻理并与之交互产出; d. 二长花岗岩显微照片

学测定, 样品岩性特征见图 2a、b。其中, 样品 17DMTS-1 采用 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 测年; 样品 PM08TW53-1 采用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年, 测试分析结果见表 1、表 2。

样品 17DMTS-1 分选锆石自形程度相对较高, 多呈长柱状, 长宽比一般在 2/1 ~ 3/1 之间。锆石 CL 影像多具核边结构, 核部结晶环带保留较好, 为岩浆成因, 变质边相对较窄, 颜色较为均匀(图 3a)。样品共分析 32 个数据点, 其中, 核部结晶环带较好的锆石  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表面年龄多在 2 400 ~ 2 500 Ma 之间 (Th/U 比值均 > 0.1), 部分数据点可能受变质作用影响, 测试数据为混合年龄, 结果偏小; 还有部分数据点存在 Pb 丢失, 落在谐和线下方(图 4a)。选择在谐和线上方相对集中的 17 个数据点进行加权平均, 获得的成岩年龄为  $2\,472 \pm 10$  Ma。另外, 样品中 4 个锆石变质边分析点的 Th/U 小于 0.07,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表面年龄在 1 891 ~ 1 833 Ma 之间, 代表古元古代变质事件的年龄。

样品 PM08TW53-1 分选锆石多呈长柱状, 其长宽比一般在 2/1 ~ 3/1 之间, 在 CL 图像上, 锆石具有窄的变质边, 但核部保留较好的环带构造, 显示岩浆成因(图 3b)。样品通过 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年, 共分析 19 个数据点, 其中的 10 个数据点相对集中的落在谐和线同一位置附近(图 4b), 锆石  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表面年

龄多在 2 414 ~ 2 520 Ma 之间 (Th/U 比值均 > 0.1), 选择其中 6 个谐和度较高的数据点的加权平均年龄为  $2\,448 \pm 9$  Ma, 代表岩石形成时代。

### 3.2 岩石地球化学特征

对所采集的岩石样品进行了主量元素、稀土及微量元素的测试, 详细分析结果及各类参数见表 3。

#### 3.2.1 主量元素特征

二长花岗岩样品  $\text{SiO}_2$  含量在 70.55% ~ 74.29% 之间, 平均为 73.18%。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量在 13.78% ~ 15.35% 之间, 平均为 14.23%。 $\text{Na}_2\text{O}$  含量在 3.04% ~ 4.58% 之间, 平均为 3.54%。 $\text{K}_2\text{O}$  含量在 4.26% ~ 5.74% 之间, 平均为 5.18%。除一个样品  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  小于 1 外 (0.93), 其余样品  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  在 1.39 ~ 1.89 之间, 平均为 1.60, 属钾质岩石系列。 $\text{CaO}$  含量在 1.02% ~ 1.37% 之间, 平均为 1.24%。 $\text{MgO}$  含量低, 介于 0.15% ~ 0.47% 之间, 平均为 0.33%,  $\text{Mg}^\#$  值介于 26 ~ 37 之间, 平均值为 31。 $\text{TiO}_2$  含量在 0.16% ~ 0.32% 之间, 平均为 0.20%。岩石整体相对富 Si、Na、K、Al, 贫 Ca、Ti、Mg。样品的 A/NCK 在 1.01 ~ 1.09 之间, 平均为 1.04, 属过铝质岩石; 分异指数 (DI) 为 88.19 ~ 92.35, 分异程度高; 里特曼指数 ( $\sigma_{43}$ ) 为 2.27 ~ 2.8, 为钙碱性岩。

在侵入岩 TAS 图解中(图 5), 样品投点均落于花岗岩区内, 属亚碱性系列; 在  $\text{SiO}_2$ - $\text{K}_2\text{O}$  图解中(图 6),

表3 二长花岗岩主量元素(%)、微量元素( $\times 10^{-6}$ )分析结果  
Table 3 Major(%) and trace ( $\times 10^{-6}$ ) elements result of the monzonitic granite

样品 编号	PM08Tw53 -1	PM08Xt. Wl.Gs53-1	TW8038 -1	17DMTS -1	SGS-1	TW8060 -1	YQ7260 -1
SiO <sub>2</sub>	73.31	73.06	73.91	74.29	73.71	73.46	70.55
TiO <sub>2</sub>	0.2	0.19	0.16	0.16	0.16	0.23	0.32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.78	13.89	13.99	14.09	14.51	14.02	15.35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.8	0.44	0.98	0.3	0.7	1.23	1.69
FeO	0.8	1.13	0.18	0.54	0.13	0.38	0.38
MnO	0.021	0.02	0.014	0.008	0.011	0.03	0.02
MgO	0.42	0.46	0.34	0.18	0.15	0.31	0.47
CaO	1.32	1.33	1.02	1.15	1.23	1.23	1.37
Na <sub>2</sub> O	3.04	3.12	3.46	3.43	4.58	3.45	3.68
K <sub>2</sub> O	5.74	5.72	5.31	5	4.26	5.12	5.11
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.066	0.061	0.036	0.033	0.031	0.06	0.10
LOI	0.41	0.47	0.57	0.78	0.52	0.42	0.93
Total	99.50	99.42	99.40	99.18	99.47	99.51	99.03
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1.89	1.83	1.53	1.46	0.93	1.48	1.39
A/CNK	1.01	1.01	1.05	1.07	1.01	1.04	1.09
$\sigma$	2.54	2.60	2.49	2.27	2.54	2.41	2.80
Mg <sup>#</sup>	0.33	0.35	0.37	0.29	0.26	0.27	0.31
DI	90.2	89.73	91.91	91.74	92.35	90.49	88.19
Pb	18.8	19	17.5	22.8	23.7	23.8	17.6
Cr	5.88	5.91	3.57	2.2	3.7	3.28	7.3
Ni	5.28	5.72	2.52	1.92	1.79	2.14	4.8
Co	3.03	2.77	1.93	0.8	0.77	2.37	4.1
Rb	184	166	173	210	143	213	139
Sr	289	294	223	178	110	210	382
Ba	1200	1120	857	704	212	958	1200
Sc	2.85	3	8.95	9.95	9.22	9.9	10.7
Nb	1.84	2.36	1.54	3.37	11.3	8.7	3
Ta	0.034	0.034	0.032	0.031	0.46	0.48	0.11
Zr	214	176	122	128	70.6	174	242
Hf	6.42	5.33	4.27	4.53	2.82	5.49	6.76
Ga	16.3	15.1	17.2	12.6	20.6	17.5	18.4
U	0.46	0.44	0.7	2.82	2.24	1.88	0.51
Th	20.5	19.3	11.8	25.9	13.8	22	24
La	53	44.4	26	39.3	12.7	49.3	69.5
Ce	90.1	76.4	41	69.3	22.2	86.4	116
Pr	8.96	7.66	4.17	7.13	2.73	8.82	11.8
Nd	29	25.2	13.2	22.6	9.62	27.6	36.2
Sm	3.5	3.21	1.6	2.88	1.66	3.66	3.87
Eu	1.2	1.12	0.81	0.54	0.32	0.74	1
Gd	2.7	2.5	1.4	2.42	1.37	3.24	3.35
Tb	0.24	0.23	0.12	0.22	0.15	0.34	0.24
Dy	0.65	0.7	0.42	0.74	0.64	1.48	0.66
Ho	0.095	0.1	0.068	0.12	0.11	0.26	0.096
Er	0.25	0.25	0.18	0.31	0.26	0.74	0.24
Tm	0.034	0.035	0.026	0.042	0.033	0.11	0.03
Yb	0.22	0.24	0.19	0.29	0.2	0.8	0.21
Lu	0.04	0.039	0.033	0.051	0.028	0.12	0.036
Y	2.3	2.55	1.98	3.08	2.7	7.36	2.63
$\Sigma$ REE	189.99	162.08	89.22	145.94	52.02	183.61	243.232
LREE	185.76	157.99	86.78	141.75	49.23	176.52	238.37
HREE	4.23	4.09	2.44	4.19	2.79	7.09	4.86
LREE/ HREE	43.93	38.59	35.61	33.81	17.64	24.90	49.03
La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	172.80	132.70	98.16	97.21	45.55	44.20	237.39

地区新太古代末钾质花岗岩成岩年龄略晚于TTG片麻岩,二者应是同一地质事件不同阶段岩浆作用的产物。

#### 4.2 岩石成因

研究区二长花岗岩富Si、高K,且样品K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O基本都大于1,属钾质岩石,A/NCK介于1.01~1.09之间,属过铝质岩石。样品富集LREE且多数Th含量高,并具有与中、上部地壳非常相似的微量元素蛛网图曲线,显示出明显的地壳重熔特征。另外,样品低Mg(MgO含量介于0.15%~0.47%之间,平均为0.33%,Mg<sup>#</sup>值介于26~37之间,平均值为31),Cr、Ni含量低(分别为 $2.2 \times 10^{-6}$ ~ $7.3 \times 10^{-6}$ 、 $1.79 \times 10^{-6}$ ~ $5.72 \times 10^{-6}$ ),样品的Rb/Sr比值 $\geq 0.36$ ,接近或高于地壳平均值(0.35)<sup>[32]</sup>,而样品强烈亏损Nb、Ta,且Nb/Ta比值高,在18.13~108.71之间,平均为50.05,高于地幔平均值(约17.5)<sup>[31]</sup>,说明岩浆源区以壳源物质为主,无明显地幔物质混入。同时,样品Sr含量变化大,在 $110 \times 10^{-6}$ ~ $382 \times 10^{-6}$ ,平均为 $240.86 \times 10^{-6}$ ,但Y、Yb含量很低,分别在 $1.98 \times 10^{-6}$ ~ $7.36 \times 10^{-6}$ 、 $0.19 \times 10^{-6}$ ~ $0.8 \times 10^{-6}$ 之间,在Sr-Yb判别图解中(图8),样品落在II区(低Sr低Yb型)内,指示形成于中高压条件下,相应的地壳深度大致在40~50 km。综合上述认识,区内二长花岗岩应是加厚下地壳部分熔融的产物,而无明显幔源组分的加入。

区内二长花岗岩产出形态主要呈两种样式:一种产出形态是呈小型侵入体侵入于TTG片麻岩中,岩石一般具很弱的片麻理;另一种产出形态是在强变形带处呈顺层脉状与TTG片麻岩交互产出,这些顺层脉体宽度从几厘米到几米不等,或者在TTG片麻岩中呈几毫米的红色细窄脉体与暗色基体相间分布,使TTG片麻岩表现出明显深熔混合岩化的特征。对比混合岩化TTG片麻岩中脉体与二长花岗岩矿物组成,基本可以确定区内二长花岗岩主要是由TTG岩石重熔形成。另外,大量高温高压实验成果表明TTG的局部熔融产生钾质花岗岩的上地壳<sup>[34]</sup>,多数研究者也认为华北克拉通2.5~2.45 Ga的钾质花岗岩可能是由先期侵入下地壳的TTG发生重熔形成<sup>[16,35-38]</sup>。在怀

续表3

样品 编号	PM08Tw53 -1	PM08Xt. Wl.Gs53-1	TW8038 -1	17DMTS -1	SGS-1	TW8060 -1	YQ7260 -1
$\delta\text{Eu}$	1.19	1.21	1.65	0.63	0.65	0.66	0.85
$\delta\text{Ce}$	1.01	1.02	0.97	1.02	0.92	1.02	0.99
Rb/Sr	0.64	0.56	0.78	1.18	1.30	1.01	0.36
Nd/Ta	54.12	69.41	48.13	108.71	24.57	18.13	27.27

注:测试单位为中国地质调查局天津地质调查中心实验室。  
 $\text{Mg}^\# = \text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$ ; 里特曼指数  $\sigma = [\omega(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})]^2 / [\omega(\text{SiO}_2 - 43)]$

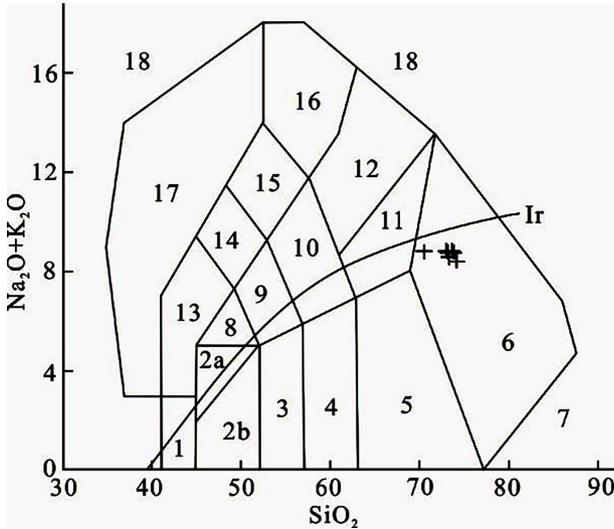


图5 二长花岗岩TAS图解(底图据参考文献[29])

Fig.5 TAS diagram of the monzogranites

Ir. 分界线,上方为碱性,下方为亚碱性;1. 橄榄辉长岩;2a. 碱性辉长岩;2b. 亚碱性辉长岩;3. 辉长闪长岩;4. 闪长岩;5. 花岗闪长岩;6. 花岗岩;7. 石英岩;8. 二长辉长岩;9. 二长闪长岩;10. 二长岩;11. 石英二长岩;12. 正长岩;13. 副长石辉长岩;14. 副长石二长闪长岩;15. 副长石二长正长岩;16. 副长正长岩;17. 副长深成岩;18. 霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩

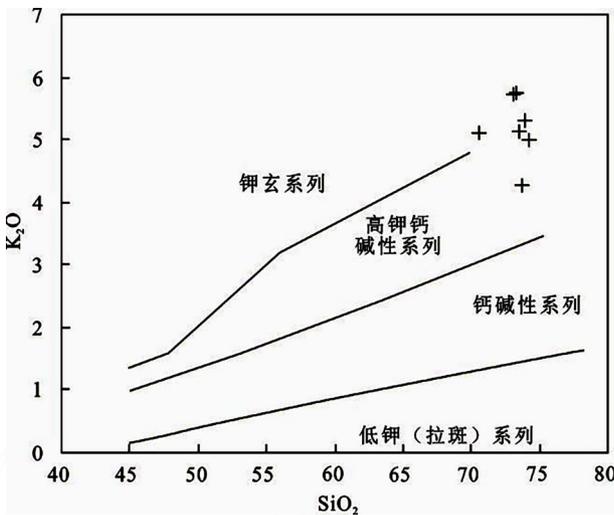


图6 二长花岗岩SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O图解(底图据参考文献[30])

Fig.6 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O diagram of the monzogranites

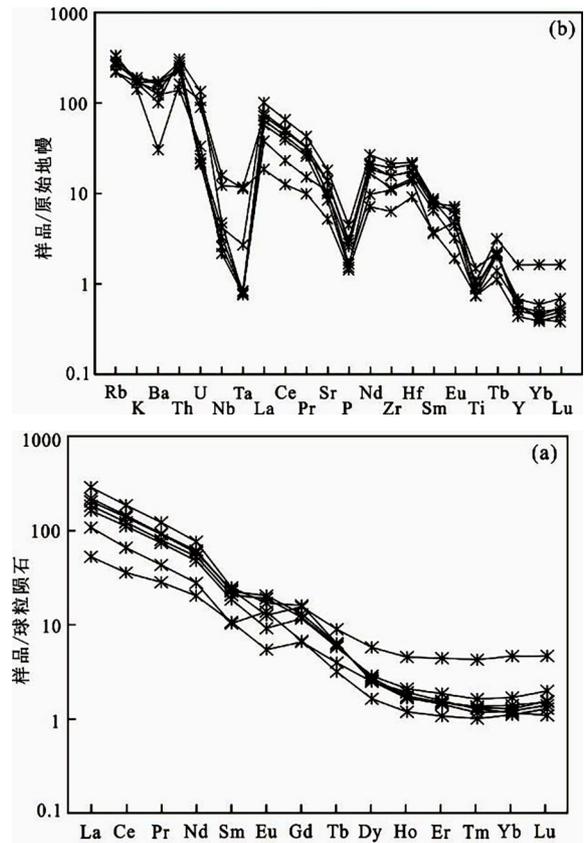


图7 二长花岗岩球粒陨石标准化稀土配分模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

(标准化值据参考文献[31])

Fig.7 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b) of the monzogranites

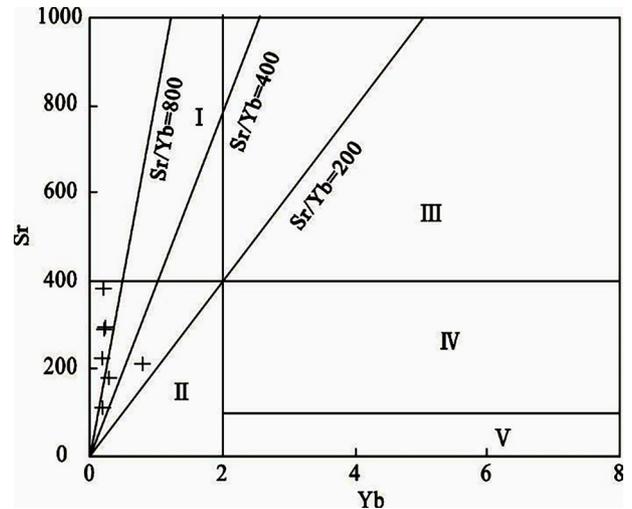


图8 二长花岗岩Sr-Yb分类图解(底图据参考文献[33])

Fig.8 Sr-Yb diagram of the monzogranites

I. 高Sr低Yb型(埃达克型花岗岩); II. 低Sr低Yb型(喜马拉雅型花岗岩); III. 高Sr高Yb型(广西型花岗岩); IV. 低Sr高Yb型(浙闽型花岗岩); V. 非常低Sr高Yb型(南岭型花岗岩)

安杂岩中获得钾质花岗岩的Nd同位素单阶段模式年龄为2 587~2 596 Ma<sup>[16]</sup>,与怀安杂岩中TTG片麻岩中获得的Nd同位素2.5~2.6 Ga的单阶段模式年龄一致<sup>[17]</sup>,这也反映二者Nd同位素方面的继承性。因此,可以推测怀安地区新太古代末钾质二长花岗岩也是由TTG岩石重熔而成。

#### 4.3 构造环境及形成机制

TTG片麻岩与二长花岗岩共同构成了怀安杂岩的主体,二者相近的形成时代以及成因上的密切联系也就限定了需要在同一构造模式下讨论新太古代末期的这期岩浆事件。虽然目前对TTG的成因尚存争议,但多数研究者认为华北克拉通新太古代末期TTG岩石是与板块俯冲有关的岩浆活动的产物<sup>[20,37,39,40]</sup>。目前,一些研究也认为怀安地区的TTG岩石系可能来自新太古代俯冲板块的熔融<sup>[16-19]</sup>,但对于区内的钾质花岗岩,则认为其形成机制是由俯冲板片断裂引起软流圈物质上涌,导致先期侵入下地壳的TTG发生重熔而成<sup>[16,19]</sup>。但研究区的二长花岗岩相对较高的Sr含量与极低的Yb、Y含量指示形成压力条件较高,属低Sr、低Yb的喜马拉雅型花岗岩<sup>[33]</sup>,不太可能形成于与底侵有关的伸展背景下,而更可能是地壳加厚阶段下地壳TTG岩石熔融的产物。同时,在Rb/10-Hf-Ta×3图解中,样品投点落在碰撞大地背景上的花岗岩区域内(图9a),在Rb-(Y+Nb)图解中,样品投点基本都落在同碰撞花岗岩(Syn-COLG)区域内(图9b)。

综合上述分析,区内新太古代TTG片麻岩形成与俯冲板片的熔融有关,而二长花岗岩形成则可能与碰撞导致的地壳加厚引发的下地壳TTG岩石重熔有关。由此本文认为,天镇-怀安地区新太古代末期经历了由洋壳俯冲到陆块碰撞的构造演化过程,也标志着华北克拉通新太古代末期(约2.5~2.45 Ga)克拉通化的完成。

## 5 结论

(1)天镇-怀安地区二长花岗岩LA-ICP-MS 锆石U-Pb年龄为2 472±10 Ma,SHRIMP 锆石U-Pb年龄为2 448±9 Ma,是新太古代末期岩浆活动结束的标志。

(2)二长花岗岩具有富Si、高K、贫Fe、Mg等常量元素特征,属钾质花岗岩,微量元素上富集Rb、Ba、K、Sr等大离子亲石元素,亏损U、Nb、Ta、P、Ti等高场强

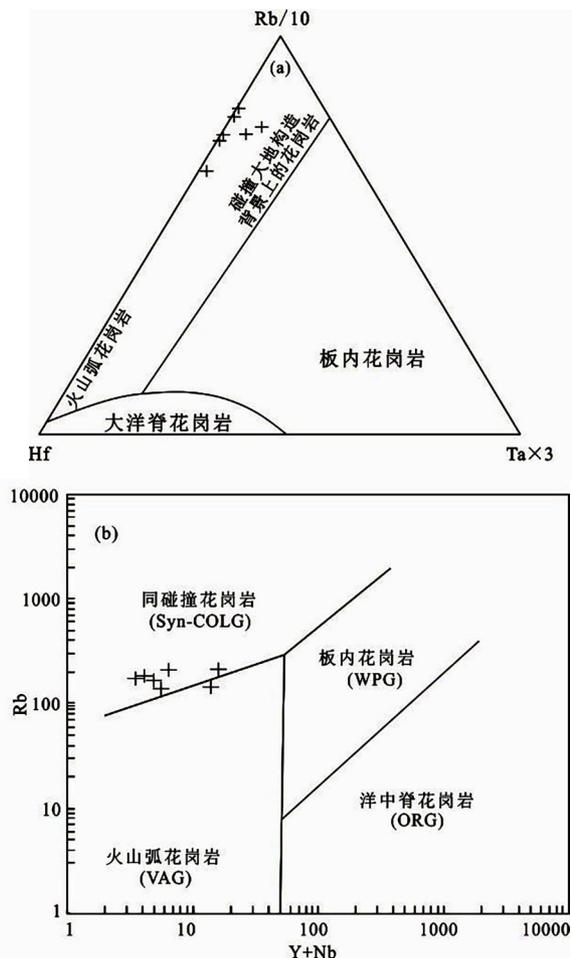


图9 二长花岗岩Rb-Hf-Ta图解(底图据参考文献[41])与Rb-Y+Nb图解(底图据参考文献[42])

Fig.9 Rb-Hf-Ta(a)and Rb-Y+Nb(b)diagram of the monzogranites

元素,同时Cr、Ni含量低,具有明显的地壳重熔特征。

(3)天镇-怀安地区TTG片麻岩和二长花岗岩是新太古代末期板块俯冲-碰撞不同阶段的产物,代表华北克拉通一次重要的陆壳水平增生事件。

#### 参考文献:

- [1] 王惠初,于海峰,苗培森,等.前寒武纪地质学研究进展与前景[J].地质调查与研究,2011,34(04):241-252.
- [2] 耿元生,沈其韩,任留东,等.华北克拉通晚太古代末-古元古代初的岩浆事件及构造热体制[J].岩石学报,2010,26(7):1945-1966.
- [3] Yang C H, Du L L, Ren L D, et al. Delineation of the ca. 2.7Ga TTG gneisses in the Zhanhuang Complex, North China Craton and its geological implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 72 (10):178-189.
- [4] 伍家善,耿元生,沈其韩,等.中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化[M].北京:地质出版社,1998:1-104.
- [5] 邓晋福,吴宗絮,赵国春,等.华北地台前寒武花岗岩类、陆

- 壳演化与克拉通形成[J]. 岩石学报, 1999, 15(2):190-198.
- [6] Zhai M G, Xiao W J, Kusky T M, et al. Tectonic evolution of China and adjacent crustal fragments[J]. *Gondwana Research*, 2007, 12 (1-2):1-3.
- [7] 马杏垣, 白瑾, 索书田, 等. 中国前寒武纪构造格架及研究方法[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- [8] 孙大中, 李惠民, 林源贤, 等. 中条山前寒武纪年代学、年代构造格架和年代地壳结构模式的研究[J]. 地质学报, 1991, 65(3):216-231.
- [9] 吴昌华. 华北克拉通的变质沉积岩及其克拉通的构造划分[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3):442-457.
- [10] Zhao G C, Cawood P A, Wilde S, et al. Review of global 2.1-1.8 Ga orogens: Implications for a pre-Rodinia supercontinent[J]. *Earth Science Reviews*, 2002, 59(1):125-162.
- [11] 杨崇辉, 杜利林, 任留东, 等. 赞皇杂岩中太古宙末期晋等钾质花岗岩的成因及动力学背景[J]. 地学前缘, 2011, 18(2):62-78.
- [12] Wan Y S, Dong C Y, Liu D Y, et al. Zircon ages and geochemistry of late Neoproterozoic syenogranites in the North China Craton: A review[J]. *Precambrian Research*, 2012, 222-223:265-289.
- [13] 李永刚, 郭敬辉, 翟明国. 天镇-怀安地区早前寒武纪钾质花岗岩地球化学特征及构造环境[J]. 华北地质矿产杂志, 1995, 10(2):223-235.
- [14] 翟明国, 李永刚, 郭敬辉, 等. 晋冀内蒙交界地区麻粒岩地体中两条花岗岩带及其对早前寒武纪地壳生长的意义[J]. 岩石学报, 1996, 12(2):299-314.
- [15] 郭敬辉, 翟明国, 李江海, 等. 华北克拉通早前寒武纪桑干构造带的岩石组合特征和构造性质[J]. 岩石学报, 1996, 012(002):193-207.
- [16] Zhang H F, Zhai M G, Santosh M, et al. Geochronology and petrogenesis of Neoproterozoic potassic meta-granites from Huai'an Complex: Implications for the evolution of the North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 2011, 20(1): 82-105.
- [17] 刘富, 郭敬辉, 路孝平, 等. 华北克拉通 2.5 Ga 地壳生长事件的 Nd-Hf 同位素证据: 以怀安片麻岩地体为例[J]. 科学通报, 2009, (17):2517-2526.
- [18] Liu F, Guo J H, Peng P, et al. Zircon U-Pb ages and geochemistry of the Huai'an TTG gneisses terrane: Petrogenesis and implications for ~2.5 Ga crustal growth in the North China Craton[J]. *precambrian research*, 2012, 212-213(225-244).
- [19] 张华锋, 王浩铮, 豆敬兆, 等. 华北克拉通怀安陆块新太古代低铝和高铝 TTG 片麻岩的地球化学特征与成因[J]. 岩石学报, 2015, 31(6):1518-1534.
- [20] Zhao G C, Wilde S A, Sun M, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Huai'an Complex: Constraints on Late Archean to Paleoproterozoic magmatic and metamorphic events in the Trans-North China Orogen[J]. *American Journal of Science*, 2008, 308(3):270-303.
- [21] Wang J, Wu Y B, Gao S, et al. Zircon U-Pb and trace element data from rocks of the Huai'an Complex: New insights into the Late Paleoproterozoic collision between the eastern and western blocks of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2010, 178(1-4):59-71.
- [22] 张家辉, 王惠初, 田辉, 等. 华北克拉通怀安杂岩中“MORB”型高压基性麻粒岩的成因及其构造意义[J]. 岩石学报, 2018, 35(11):3506-3528.
- [23] Yuan, H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2004, 28(3):353-370.
- [24] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and Oceanic Crust Recycling-induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1-2):537-571.
- [25] Ludwig K R. User's Manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 2003, 4:1-70.
- [26] Williams I S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe [C]. In: McKibben M A, Shanks W C III, Ridley W I, eds. *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*. Reviews of Economic Geology: Society of Economic Geologists, 1998, 7: 1-35.
- [27] Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, et al. Zircon M257: A homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2008, 32(3):247-265.
- [28] Black L P, Kamo S L, Allen C M, et al. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 2003, 200(1):155-170.
- [29] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Science Reviews*, 1994, 37(3-4):215-224.
- [30] Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1976, 58(1):63-81.
- [31] 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(1):313-345.
- [32] Taylor S R, McLennan S M. The Geochemical Evolution of the Continental Crust[J]. *Review of Geophysics*, 1995, 33(2): 241-265.

- [33] 张旗,王焰,李承东,等. 花岗岩的Sr-Yb分类及其地质意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(9):2249-2269.
- [34] Johannes W, Holtz F. Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks[M]. Berlin: Springer-verlag, 1996:1-335.
- [35] 赵宗溥. 中朝准地台前寒武纪地壳演化[M]. 北京: 科学出版社, 1993:284-330.
- [36] 伍家善, 耿元生, 沈其韩. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化[M]. 北京: 地质出版社, 1998:192-211.
- [37] Zhai M G, Liu W J. Palaeoproterozoic tectonic history of the North China craton: a review[J]. precambrian research, 2003, 122(1-4):183-199.
- [38] 刘树文, 吕勇军, 王伟, 等. 冀北太古代花岗质片麻岩的成因[J]. 岩石学报, 2011, 27(4):909-921.
- [39] 李江海, 牛向龙, 程素华, 等. 大陆克拉通早期构造演化历史探讨:以华北为例[J]. 地球科学, 2006, (03):5-13.
- [40] 万渝生, 刘敦一, 王世炎, 等. 登封地区早前寒武纪地壳演化—地球化学和锆石 SHRIMP U-Pb 年代学制约[J]. 地质学报, 2009, 83(7):982-999.
- [41] Harris N B W, Marzouki F M H, Ali S. The Jabel Sayd complex, Arabian shield: Geochemistry constrains on the origin of peralkaline and related granites[J]. Journal of the geological society, 1986, 143(2):287-295.
- [42] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of petrology, 1984, 25(4): 956-983.

## Petrogenesis and geodynamic settings of monzonitic granite at the end of the Neoproterozoic in Tianzhen-Huai'an area

REN Yun-wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Jia-hui<sup>1,2</sup>, TIAN Hui<sup>1,2</sup>, WANG Hui-chu<sup>1,2</sup>, SHI Jian-rong<sup>1,2</sup>,

CHANG Qing-song<sup>1,2</sup>, ZHANG Kuo<sup>1,2</sup>

(1. Tianjian Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

2. Precambrian Geological Research Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

3. North China Center for Geoscience Innovation, Tianjin 300170, China)

**Abstract:** Through detailed field geological work around Huaian-Tianzhen area, a suite of monzogranites has been distinguished from the TTG gneiss in the Huai'an complex. The zircon U-Pb ages of one monzogranite sample are  $2472 \pm 10$  Ma and  $2448 \pm 9$  Ma respectively obtained through LA-ICP-MS and SHRIMP methods. The contents of SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O and K<sub>2</sub>O are 70.55% ~ 74.29%, 13.78% ~ 15.35%, 4.26% ~ 5.74% and 3.04% ~ 4.58% respectively. The samples are attributed to potash granite with K<sub>2</sub>O / Na<sub>2</sub>O = 1.29 ~ 1.89, except for only one with K<sub>2</sub>O / Na<sub>2</sub>O = 0.93. The contents of CaO, MgO, TFeO and TiO<sub>2</sub> of the monzogranite are 1.02% ~ 1.37%, 0.15% ~ 0.47%, 0.76% ~ 1.9% and 0.16% ~ 0.32% respectively, indicating enrichment in elements of Si, Na, K, Al, and depletion in elements of Ca, Fe, Mg, Ti. In addition, the monzogranite show relative enrichment in LREE (Rb, Ba, K and Sr) and depletion in HREE (U, Nb, Ta, P and Ti), with higher content of Th and lower content of Cr and Ni, indicating similar REE and trace elements characteristics with the middle-upper crust. The samples with higher content of Sr and lower content of Y and Yb are supposed to be formed in condition with middle to high pressure. Based on the above, the monzogranite in Huai'an complex should be product of partial melting of thickened lower crust, indicating the continental crust of the northern margin of North China Craton was mature and had already accomplished its cratonization in late Neoproterozoic.

**Key words:** monzonitic granite; Huai'an complex; Neoproterozoic; North China Craton