第 55 卷 第 4 期
2022 年(总 226 期)

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 55 No. 4
2022(Sum226)

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2022.04.018

山西塔儿山-二峰山含矿闪长质岩石年代学和地球化学特征及对深部动力学过程约束

司东泽[1,2],张招崇[2,*],金子梁[2]

(1. 甘肃省地质调查院,甘肃 兰州 730000;2. 中国地质大学,北京 100083)

摘 要:塔儿山-二峰山矽卡岩型铁矿床位于山西省临汾市,构造上位于华北板块中部太行山陆块南部。笔者对与该矽卡岩型铁矿床相关的闪长岩体,即二峰山和塔儿山岩体进行锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年,结果表明,岩体侵位年龄为(128.7±3.0)~(131.2±2.2)Ma,这与华北地区其他矽卡岩型铁矿床中岩体年龄基本一致,指示它们可能与同一区域构造事件有关。岩石样品地球化学数据显示,塔儿山闪长质岩石属于钙碱性准铝质闪长岩,二峰山闪长质岩石属于碱性准铝质闪长岩;2 个岩体具有相似的地球化学特征,如较低的 SiO_2 含量(57.17%~65.51%),高碱含量(Na_2O = 5.07%~6.72%,K_2O= 7.92%~11.73%),较低的 $Mg^{\#}$,富集 LILEs(Sr、Ba)和 LREE,亏损 Ni、Ta、Ti 等高场强元素的特点。2 个岩体的地球化学特征表明,岩体的初始岩浆分别由同一源区不同程度的部分熔融产生。结合平顺西安里、河南安林及山东莱芜地区闪长岩类年代学、地球化学数据对比研究,笔者认为华北克拉通中部未发生类似其东部的拆沉作用,古老下地壳熔融的岩浆在矽卡岩型铁矿床形成过程中发挥了重要的作用。

关键词:塔儿山—二峰山;矽卡岩型铁矿床;闪长质岩石;岩石成因

中图分类号:P595;P597+3 **文献标志码**:A **文章编号**:1009-6248(2022)04-0204-17

Petrology, Geochemistry and Constraint for the Geodynamic Process of Ore-bearing Diorites in Ta' Ershan-Erfengshan, Shanxi

SI Dongze[1,2], ZHANG Zhaochong[2,*], JIN Ziliang[2]

(1. Geological Survey of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The Ta'ershan-Erfengshan iron skarn deposit, is located in the south Taihang mountains, central North China Craton(NCC). The diorites that hosted Ta'ershan-Erfengshan deposits, namely Ta'ershan and Erfengshan intrusions, yielded zircon U-Pb ages of(128.7±3.0)Ma~(131.2±2.2)Ma, which are in accordance with other Fe-skarn-related intrusions in eastern NCC, suggesting that they were related to same tectonic events. The geochemical data of ore-bearing diorites indicate that Ta'ershan diorite belongs to calc-alkalic aluminum diorite and

收稿日期:2022-01-19;**修回日期**:2022-05-12;**网络发表日期**:2022-11-15;**责任编辑**:姜寒冰

基金项目:国家 973 项目"我国富铁矿形成机制与预测研究"(2012CB416806)资助。

作者简介:司东泽(1985-),男,工程师,主要从事矿产地质调查和勘查工作。E-mail:345544256@qq.com。

* **通讯作者**:张招崇(1965-),男,博士,教授,岩浆岩岩石学和矿床学专业。E-mail:zczhang@cugb.edu.cn。

Erfengshan diorite belongs to alkaline aluminum diorite. The Harker diagram and Rb/Nd－Rb diagram of the Ta'ershan-Erfengshan diorites indicate they are derived from one common source by different degrees of partial melting. At the same time, they also have similar geochemical characteristics, such as low contents of SiO_2(57.17%～65.51%), high contents of alkaline(Na_2O = 5.07%～6.72%, K_2O= 7.92%～11.73%), low $Mg^{\#}$ values, enriched in LILEs(Sr、Ba) and LREEs and depleted in HFSEs(Ni、Ta、Ti). In comparison with the chronology and geochemistry data of Pingshun-Xi'anli、Anlin and Laiwu diorites, this paper suggests that the central part of the North China Craton has not undergone delamination similar to the eastern part, and that the melting magma of the ancient lower crust has played an important role in the formation of iron skarn deposits.

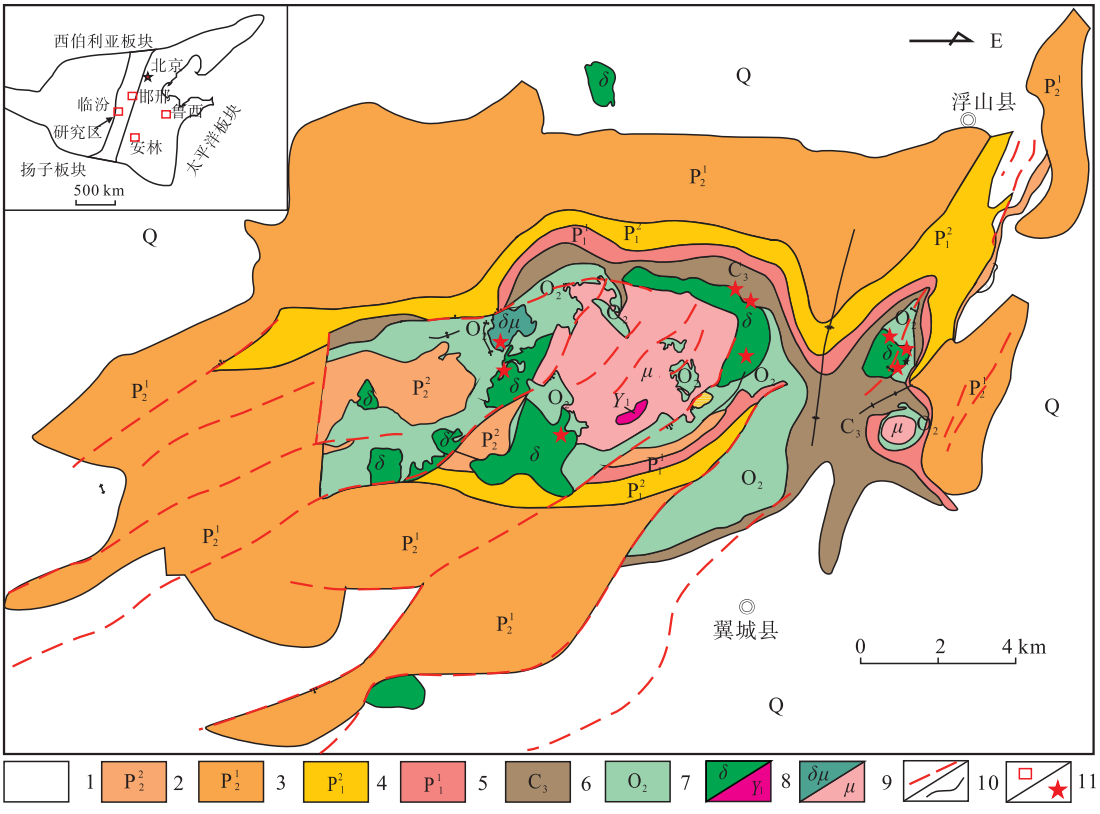
Keywords: Ta'ershan-Erfengshan; iron skarn deposits; diorites; petrogenesis

华北克拉通发育有若干矽卡岩型铁矿集区，如邯邢、鲁西、安林和临汾等矿集区(Zhang et al.,2014)。Meinert(2005)曾提出与矽卡岩有关的铁矿通常产出于岛弧环境。然而在中国，尤其是华北地区，矽卡岩型铁矿床主要形成于板内环境。这些铁矿的形成基本上都与中生代约 130 Ma 的岩浆活动密切相关，特别是发育在华北克拉通中东部的邯邢和鲁西矿集区中的矽卡岩型铁矿床，矿区内广泛发育高 MgO 的闪长质岩体(许文良等，1991；B. Chen et al.,2003；巫祥阳等，2003；高山等，2006；许文良等，2009b)。已有研究表明，这类高 MgO 岩体可能与华北克拉通东部岩石圈拆沉过程有关(巫祥阳等，2003；高山等，2006；许文良等，2009a)。值得注意的是，朱日祥等(2015)通过系统分析华北克拉通金矿床的时空分布规律、矿床成因和成矿机制等问题，认为华北克拉通早白垩世金矿床与华北克拉通破坏有关。因此，部分学者推断整个华北克拉通发育的该时期矽卡岩类型铁矿床也受华北克拉通的减薄过程控制(邓晋福，1999；吴福元，2003；张旗，2009)。然而，在华北克拉通中部发育的矽卡岩类型铁矿床并非均与高 MgO 闪长质岩体有关。因此，这些矿床的产生是否与华北克拉通的减薄有关仍然需要探讨。由于岩浆活动能够反映地球深部过程的信息，因此这些与矽卡岩铁矿床有关的低镁闪长岩可以为华北克拉通岩石圈减薄的范围和减薄机制提供重要约束。

塔儿山-二峰山铁矿是华北克拉通中部临汾矿集区中典型的矽卡岩型铁矿床。该矿床中发育的闪长质岩体岩石成因尚存在较大争议，争议焦点在于岩体的初始岩浆是壳源还是幔源。吴利仁(1964)及姚金炎(1985)等认为，岩体的原始岩浆是古生代花岗岩重熔形成的花岗闪长岩-二长岩岩浆经历去硅作用及同化碳酸盐岩的产物；而曾键年(1997)等认为岩体初始岩浆为熔融程度较低的幔源岩浆，后期经过地壳混染形成中酸性岩浆，并脉动侵位。解决上述问题的关键在于识别源区有无幔源组分。笔者通过对临汾塔儿山-二峰山矽卡岩型铁矿床中的闪长质岩体开展岩石学、地质年代学及地球化学研究，厘定闪长质岩体的侵入时限，揭示岩体源区特征，为华北克拉通减薄及其与矽卡岩型铁矿床的成因联系提供新的制约。

1　区域地质和岩体地质特征

本文所叙述的区域地质仅仅包括矿区 700 km^2 以内的地区(图 1)，地层自老到新依次有：奥陶系、石炭系、二叠系和第四系。中奥陶统主要分布在研究区东西部构造隆起带，围绕岩体产出，出露岩石主要为灰、灰黑色灰岩、大理岩等。石炭系太原统主要分布在本区构造隆起部位及其近翼，一般与岩体接触部位发生接触变质作用，多见不同程度的角岩化和石英岩化。上二叠统和下二叠统在本区广泛出露，岩性主要为陆相沉积的砂页岩和砂质页岩，由老到新，颜色亦有浅变深，即从黑色→黄绿色→紫色→砖红色。第四系覆盖研究区大部分，主要为全新统近代坡积和洪积物、上更新统马兰期黄土层等。中奥陶统马家沟组碳酸盐岩是本区接触交代矽卡岩型铁矿的主要围岩(图 2b、图 2c)，主要的含矿层为中奥陶统白云质灰岩和钙质白云岩，以较高 MgO 含量为特征。矿体及矿化体沿接触带展布，呈层状、囊状、串珠状等；矿石矿物为磁铁矿，矿石品位较高。



1. 第四系坡积物；2. 上二叠统石千峰组；3. 上二叠统上石盒子组；4. 下二叠统下石盒子组；5. 下二叠统山西组；6. 石炭系太原统；7. 奥陶系中奥陶统；8. 闪长岩类/花岗细晶岩；9. 闪长玢岩/石英二长岩；10. 断层/地层界线；11. 矽卡岩型铁矿床矿集区/采样位置

图 1 塔儿山—二峰山研究区地质构造略图(据陕西省二峰山铁矿半山矿区地质勘探总结报告修改)

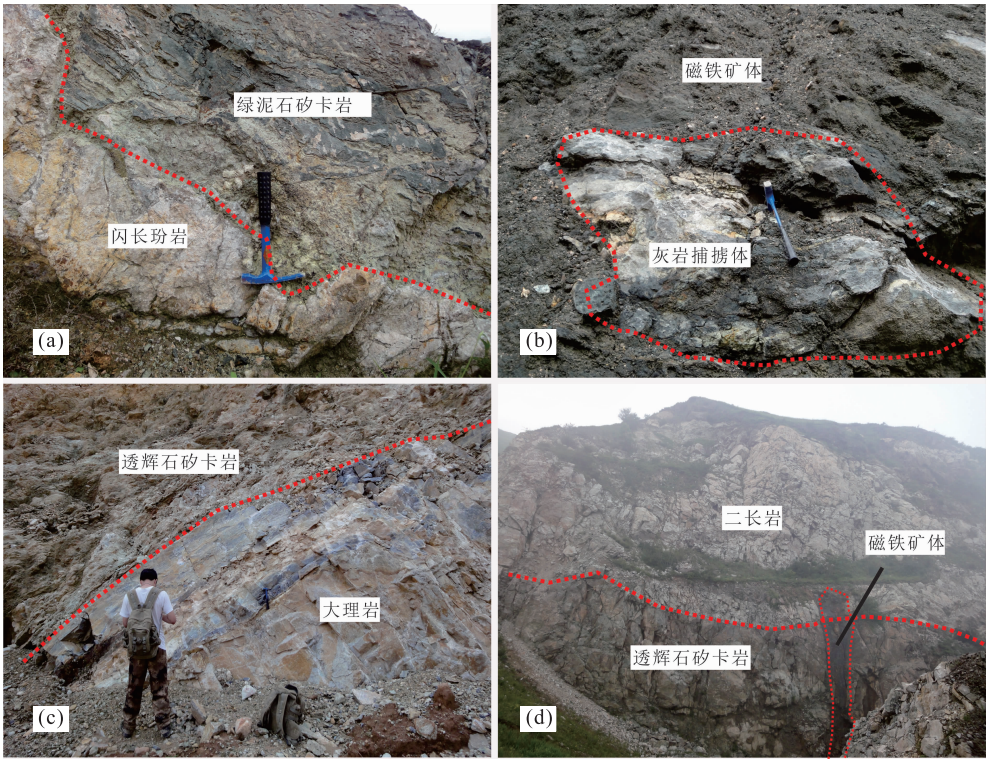
Fig. 1 The regional geological map of the Ta'ershan-Erfengshan area

塔儿山-二峰山杂岩体位于华北板块中部太行山陆块，临汾盆地南部，祁吕贺山山形构造前东翼，杂岩体近东西向展布，主要分布并出露于临汾、浮山、翼城和襄汾市交汇的卧虎山、鹿顶山、乔山、塔儿山、二峰山和司空山一带等。已有学者针对该研究区岩石类型和岩石分布及侵入顺序进行详细研究(吴利仁，1964；曾健年，1997)。根据岩体之间穿插关系及存在烘烤边现象，李慧峰等(2010)又将塔儿山-二峰山杂岩体侵入期次分为：闪长岩类、霓辉正长岩、石英二长岩、花岗岩、正长斑岩脉。与矽卡岩铁矿密切相关的闪长岩类(本文称作闪长质岩石)主要分布在塔儿山—二峰山一带，岩石类型有二长岩、二长闪长岩、闪长玢岩等(图 2a、图 2d)。本文中塔儿山闪长质岩石包括塔儿山、圣王山、山羊坡、都角坡、赤石峪闪长质岩石；二峰山闪长质岩石为二峰山地区闪长质岩石。塔儿山、二峰山闪长质岩体均侵位在中奥陶统峰峰组白云质灰岩、灰岩、大理岩地层中，矽卡岩型铁矿床主要赋存于岩体与围岩接触带矽卡岩中(图 2b、图 2d)。

2 岩石学特征

本次研究与矽卡岩型铁矿床相关的闪长质岩石包括二长岩、二长闪长岩和闪长玢岩等，其岩相学特征如下(图 3)。

二长岩：岩石主要矿物有斜长石(36%～42%，体积分数，下同)、钾长石(28%～34%)、角闪石(14%)、石英(5%～8%)和透辉石(4%)；副矿物有榍石、磁铁矿、钛铁矿和磷灰石等。其中，斜长石呈自形-半自形，大多发育聚片双晶，偶见斜长石表面绢云母化；钾长石呈半自形-自形晶，发育卡式双晶和格子双晶，部分钾长石中心见弱高岭土化；角闪石颗粒四周溶蚀强烈，周围可见星点状磁铁矿、钛铁矿，呈半自形-他形；透辉石含量约 4%，浅绿色，弱多色性，正高突起，偶见双晶。



(a). 二峰山半山矿区闪长玢岩和绿泥石矽卡岩接触带；(b). 二峰山半山矿区磁铁矿体和灰岩捕掳体；(c). 塔儿山东山羊坡矿区大理岩和透辉石矽卡岩接触带；(d). 塔儿山下院矿区二长岩、透辉石矽卡岩、磁铁矿体接触带

图 2　塔儿山-二峰山铁矿野外照片

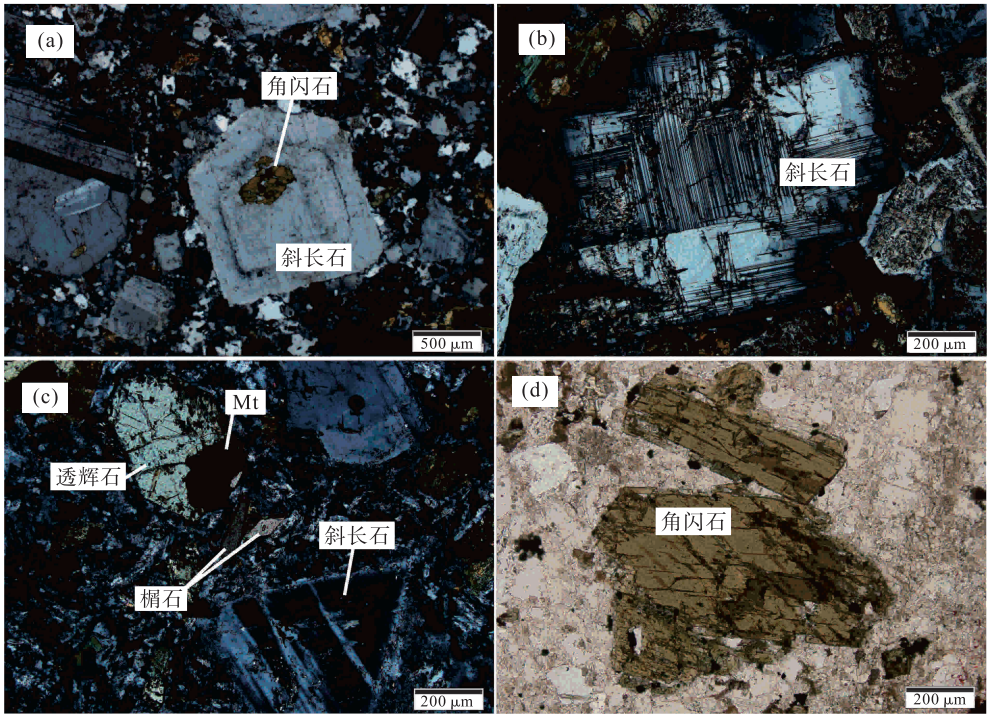
Fig. 2　Field photographs of Ta'ershan-Erfengshan deposits

二长闪长岩：呈斑状结构，斑晶矿物有斜长石、钾长石、角闪石、辉石等。斜长石含量为 25%～30%，发育聚片双晶和环带结构；钾长石含量为 10%～15%，颗粒边缘偶见高岭土化，发育格子双晶；角闪石含量为 12%，部分角闪石反应边明显，周围可见磁铁矿颗粒发育；透辉石含量为 8%，浅绿色，弱多色性，正高突起，消光角为 40°，正交镜下最高干涉色二级蓝绿（塔儿山多见）；基质为细粒状斜长石、钾长石和石英，含量分别为 20%～30%、15%～35%、5%～10%；副矿物有榍石、磁铁矿、钛铁矿、方解石及磷灰石等。

闪长玢岩：塔儿山、二峰山均有出露，笔者主要采自塔儿山。其呈斑状结构，斑晶矿物有斜长石、钾长石、角闪石等。其中，斜长石含量为 35%～40%，主要发育环带构造，颗粒外围普遍发生弱蚀变——绢云母化、高岭土化；钾长石含量约 5%，发育格子双晶，普遍高岭土化；角闪石含量为 5%～10%；基质矿物有斜长石、角闪石等，呈细粒结构，含量分别：40%～45%、10%～20%；副矿物有榍石、磁铁矿、磷灰石等。

3　分析方法

岩石样品的清洗、去皮、碎样及锆石的挑选均在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。锆石样品制靶和阴极发光在北京锆年领航科技有限公司完成。RFS-42、RFS-17、TRS-18 三件样品取自塔儿山环带状岩体，RFS-11 取自二峰山岩体。通过镜下观察，选取颗粒晶形完整、透明干净的锆石，优先置于环氧树脂浇铸的圆形靶台上，4 件样品置于一个靶上，然后通过磨蚀和抛光使得锆石内部出露。在 JXA-8100 电子探针配备的 MonoCL3 系统上进行阴极发光照相，制成 CL 图。在中国地质大学（北京）透反射光实验室对锆石靶拍摄透反射光，检验锆石内部结构，剔除有裂痕、蚀变的锆石，并结合 CL 图对锆石靶圈点。



a、b、c. 正交偏光；d. 单偏光；a、b. 二长岩；c. 二长闪长岩；d. 为闪长玢岩

图 3 塔儿山-二峰山闪长岩类镜下照片

Fig. 3 Photomicrographs of the representative rocks from diorites

LA－ICP－MS 锆石原位微区 U－Pb 定年及微量元素分析在国家地质测试中心完成(表 1)。分析所选用的仪器为 Finnigan Neptune 型 LA－ICP－MS 与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。详细分析流程和原理参考 Campston et al. (1984) 和 Williams(1992)。在 U－Pb 测年实验过程中，标样选择澳大利亚 MacQuarie 大学大陆地球化学与成矿作用研究中心标定的 GJ－1 锆石[$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄(610±1.7)Ma]和 Plesovice[$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为(337.13±0.37)Ma)]，每测定 10 个样品前后重复测定这 2 个标样依次。数据分析采用 ICPMS DataCal 程序(Liu et al.，2010)处理，测试样品锆石 U－Pb 年龄协和图用 Isoplot3.0 程序获得。详细的实验流程参见侯可军等(2009)。

经过岩相学和镜下观察，挑选出具有代表性的 15 件闪长质岩石，进行清洗、破碎、研磨至 200 目以上。主微量化学分析在国家地质测试中心完成(表 2)，经过碱熔处理之后，用 ICP-MS 分析方法，主量元素和含量小于 20×10^{-6} 的微量原色的分析误差为 1%～5%，大于 20×10^{-6} 的微量原色分析误差为 5%～10%。

4 分析结果

4.1 锆石 U－Pb 年龄

锆石均呈长柱形，长 100～200 μm，长宽比约为 2∶1，个别呈短柱状或浑圆状。绝大多数锆石均具有清晰的震荡环带(图 4)，呈现典型的岩浆锆石特征(Paul, et al.，2000)。样品 RFS－42 的锆石自形程度非常高，以长柱状为主，长 150～300 μm，长宽比为 1.5～2，很少有裂隙发育，震荡环带发育，多见继承锆石，阴极发光呈灰白色或浅白色，自形晶，与岩浆锆石界线清楚。RFS－17 号锆石样品，自形程度中等，呈长柱状、浑圆状，长 100～200 μm，长宽比为 1～1.5，震荡环带不发育，偶见继承锆石，个别自形程度高，灰白色，粒径较大，大多数呈他形，具蚀变边构造。TRS－18 号锆石样品，自形程度高，少数锆石表面发育裂隙，根据锆石形态可分为 2 组锆石：第一组，长柱状，长 150～300 μm，长宽比为 2～3，继承锆石发育，阴极发光呈灰色或浅灰色，呈他形居多；第二组：浑圆状锆石，长宽比为 1～1.5，偶见继承锆石，呈浑圆状，阴极发光呈浅灰色。RFS－11 号锆石

表 1　塔儿山-二峰山含矿闪长质岩石样品锆石 U-Pb 同位素数据及分析结果表

Tab. 1　Zircon U-Pb isotope data and analysis results of ore-bearing dioritic rock samples from Ta'ershan-Erfengshan

测点号	Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)					
		$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ
样品：RFS-42													
RFS-42_1	0.12	0.047 95	0.002 19	0.020 20	0.000 49	0.133 60	0.006 65	95.7	105.9	129.0	3.1	127.3	6.0
RFS-42_2	0.72	0.166 86	0.003 36	0.472 65	0.010 80	10.826 0	0.270 40	2 526.4	33.5	2 495.2	47.3	2 508.3	23.2
RFS-42_3	0.26	0.048 45	0.001 27	0.020 17	0.000 47	0.134 15	0.003 93	121.4	60.8	128.7	2.9	127.8	3.5
RFS-42_4	0.19	0.049 80	0.001 42	0.021 02	0.000 49	0.143 75	0.004 55	185.7	65.1	134.1	3.1	136.4	4.0
RFS-42_5	0.46	0.158 36	0.003 23	0.439 06	0.010 06	9.483 18	0.264 67	2 438.2	34.2	2 346.4	45.1	2 385.9	25.6
RFS-42_6	0.36	0.161 75	0.003 24	0.436 16	0.009 98	9.698 84	0.231 79	2 474	33.4	2 333.4	44.8	2 406.6	22.0
RFS-42_7	1.02	0.131 49	0.002 69	0.370 92	0.008 52	6.732 27	0.183 08	2 118	35.4	2 033.7	40.1	2 076.9	24.0
RFS-42_8	0.37	0.047 24	0.001 70	0.021 47	0.000 50	0.138 53	0.005 42	61.0	84.3	137.0	3.2	131.7	4.8
RFS-42_9	0.15	0.047 40	0.001 58	0.020 54	0.000 48	0.136 60	0.004 97	68.6	78.0	131.1	3.0	130.0	4.4
RFS-42_10	0.11	0.050 03	0.002 20	0.020 38	0.000 49	0.141 98	0.006 80	196.5	99.2	130.1	3.1	134.8	6.0
RFS-42_11	0.22	0.048 44	0.001 88	0.020 81	0.000 49	0.139 34	0.005 88	121	89.2	132.8	3.1	132.5	5.2
RFS-42_12	0.13	0.046 94	0.001 73	0.021 07	0.000 50	0.137 79	0.005 52	46.1	86.0	134.4	3.1	131.1	4.9
RFS-42_13	0.33	0.125 89	0.002 56	0.353 57	0.008 14	6.113 17	0.164 79	2 041.3	35.6	1 951.6	38.8	1 992.1	23.5
RFS-42_14	0.27	0.108 15	0.002 16	0.279 12	0.006 41	4.141 91	0.098 34	1 768.4	36.2	1 587.0	32.3	1 662.6	19.4
RFS-42_15	0.13	0.048 24	0.001 79	0.020 67	0.000 49	0.134 64	0.005 45	111.3	85.5	131.9	3.1	128.3	4.9
RFS-42_16	0.11	0.047 49	0.001 62	0.020 53	0.000 48	0.134 08	0.005 01	73.3	79.9	131.0	3.1	127.8	4.8
RFS-42_17	0.23	0.051 60	0.001 41	0.020 33	0.000 47	0.143 91	0.004 39	267.6	61.4	129.7	3.0	136.5	3.9
RFS-42_18	0.13	0.047 11	0.001 42	0.020 85	0.000 49	0.135 49	0.004 51	54.6	70.6	133.0	3.1	129.0	4.0
RFS-42_19	0.29	0.049 91	0.002 62	0.020 39	0.000 51	0.137 23	0.007 77	190.7	117.6	130.1	3.2	130.6	6.9
样品：TRS-17													
RFS-17_1	0.60	0.174 20	0.003 49	0.480 64	0.011 09	11.506 27	0.277 24	2 598.4	33.0	2 530	48.3	2 565.1	22.5
RFS-17_2	0.22	0.060 70	0.005 91	0.020 41	0.000 65	0.169 69	0.018 14	628.7	197.0	130.2	4.1	159.2	15.7
RFS-17_3	0.18	0.050 91	0.001 59	0.020 87	0.000 49	0.144 86	0.005 03	236.7	70.7	133.2	3.1	137.4	4.5
RFS-17_4	0.19	0.048 02	0.001 51	0.020 93	0.000 49	0.136 24	0.004 73	98.8	74.0	133.5	3.1	129.7	4.2
RFS-17_5	0.17	0.052 81	0.001 88	0.020 88	0.000 50	0.151 76	0.005 95	320.5	79.6	133.2	3.2	143.5	5.3
RFS-17_6	0.73	0.175 70	0.003 53	0.500 49	0.011 57	11.831 26	0.294 34	2 612.7	33.0	2 615.9	49.7	2 591.1	23.3
RFS-17_7	0.20	0.051 23	0.001 48	0.020 75	0.000 49	0.145 39	0.004 69	251.1	65.1	132.4	3.1	137.8	4.2
RFS-17_8	0.51	0.049 92	0.001 8	0.020 29	0.000 49	0.139 25	0.005 55	191.4	81.8	129.5	3.1	132.4	4.9

续表 1

测点号	Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)					
		$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ
RFS-17_9	0.31	0.049 11	0.001 26	0.020 33	0.000 47	0.136 32	0.003 95	153.3	59.0	129.7	3.0	129.8	3.5
RFS-17_10	1.16	0.114 96	0.002 61	5.016 06	0.198 03	0.317 77	0.007 47	1 879.2	40.4	1 778.8	36.6	1 822.0	33.4
RFS-17_11	0.33	0.145 10	0.003 06	0.160 25	0.003 73	3.172 13	0.089 93	2 289.0	35.9	958.1	20.7	1 450.4	21.9
RFS-17_12	0.26	0.050 90	0.001 35	0.020 31	0.000 48	0.140 69	0.004 22	236.5	60.3	129.6	3.0	133.7	3.8
样品:RFS-18													
TRS-18_1	0.40	0.050 94	0.001 41	0.020 34	0.000 47	0.141 85	0.004 38	238.2	62.6	129.8	3.0	134.7	3.9
TRS-18_2	0.43	0.051 88	0.001 78	0.020 28	0.000 48	0.143 84	0.005 42	280.0	76.4	129.4	3.0	136.5	4.8
TRS-18_3	0.44	0.048 21	0.001 33	0.020 64	0.000 48	0.137 73	0.004 25	109.6	64.1	131.7	3.0	131.0	3.8
TRS-18_4	0.45	0.051 97	0.004 61	0.020 27	0.000 60	0.142 06	0.013 64	284.2	190.4	129.4	3.8	134.9	12.1
TRS-18_5	0.21	0.054 44	0.002 10	0.020 12	0.000 48	0.148 56	0.006 31	389.2	83.7	128.4	3.1	140.6	5.6
TRS-18_6	0.52	0.047 23	0.001 27	0.020 99	0.000 49	0.136 50	0.004 10	60.5	63.4	133.9	3.1	129.9	3.7
TRS-18_7	0.07	0.107 23	0.002 24	0.091 67	0.002 12	1.275 16	0.032 44	1 752.9	37.8	565.4	12.5	834.7	14.5
TRS-18_8	0.23	0.056 05	0.003 73	0.020 65	0.000 55	0.148 93	0.010 72	453.9	141.0	131.7	3.5	141.0	9.5
TRS-18_9	0.45	0.049 98	0.001 52	0.020 95	0.000 49	0.142 61	0.004 80	194.0	69.2	133.7	3.1	135.4	4.3
TRS-18_10	0.51	0.049 46	0.001 58	0.021 26	0.000 50	0.142 50	0.005 04	169.5	73.1	135.6	3.2	135.3	4.5
TRS-18_11	0.25	0.051 88	0.001 28	0.020 12	0.000 47	0.143 64	0.004 00	280.2	55.3	128.4	3.0	136.3	3.6
TRS-18_12	0.48	0.053 96	0.003 92	0.020 66	0.000 57	0.141 40	0.011 16	369	155.9	131.8	3.6	134.3	10.0
TRS-18_13	0.31	0.159 68	0.003 23	0.455 85	0.010 53	10.010 07	0.271 56	2 452.3	33.9	2 421.2	46.6	2 435.7	25.0
TRS-18_14	0.44	0.045 04	0.002 57	0.020 50	0.000 51	0.129 25	0.007 93	0.1	79.4	130.8	3.3	123.4	7.1
TRS-18_15	0.82	0.110 56	0.002 23	0.325 76	0.007 51	4.898 25	0.121 54	1 808.6	36.2	1 817.8	36.5	1 802.0	20.9
样品:RFS-11													
RFS-11_1	0.41	0.179 14	0.003 62	0.455 78	0.010 59	11.252 88	0.301 18	2 644.9	33.2	2 420.9	46.9	2 544.3	25.0
RFS-11_5	0.92	0.086 73	0.002 02	0.019 90	0.000 47	0.240 06	0.006 48	1 354.5	44.2	127.0	3.0	218.5	5.3
RFS-11_6	1.14	0.051 34	0.001 23	0.019 79	0.000 46	0.142 32	0.003 91	256.2	54.3	126.3	2.9	135.1	3.5
RFS-11_10	0.41	0.063 03	0.001 3	0.026 89	0.000 62	0.222 75	0.005 37	709.1	43.3	171.1	3.9	204.2	4.5
RFS-11_13	1.09	0.049 32	0.001 33	0.020 08	0.000 47	0.135 90	0.004 14	163.0	62.1	128.2	3.0	129.4	3.7
RFS-11_14	0.48	0.051 32	0.002 55	0.020 40	0.000 51	0.145 02	0.007 78	255.3	110.1	130.2	3.2	137.5	6.9
RFS-11_16	0.75	0.049 58	0.001 52	0.020 43	0.000 48	0.139 63	0.004 77	175.4	70.0	130.4	3.1	132.7	4.3
RFS-11_24	0.17	0.110 86	0.002 47	0.201 33	0.004 74	3.042 69	0.100 34	1 813.5	40.0	1 182.4	25.4	1 418.4	25.2

注:测试单位为国家地质测试中心。

表 2　塔儿山-二峰山含矿闪长质岩石样品主量(*wt*%)、微量(*wt* 10^{-6})及稀土元素(*wt* 10^{-6})分析结果表

Tab. 2　Major element(*wt*%), trace element(*wt* 10^{-6})and REE element(*wt* 10^{-6})compositions of Ta'ershan-Erfengshan diorites(*wt*%)

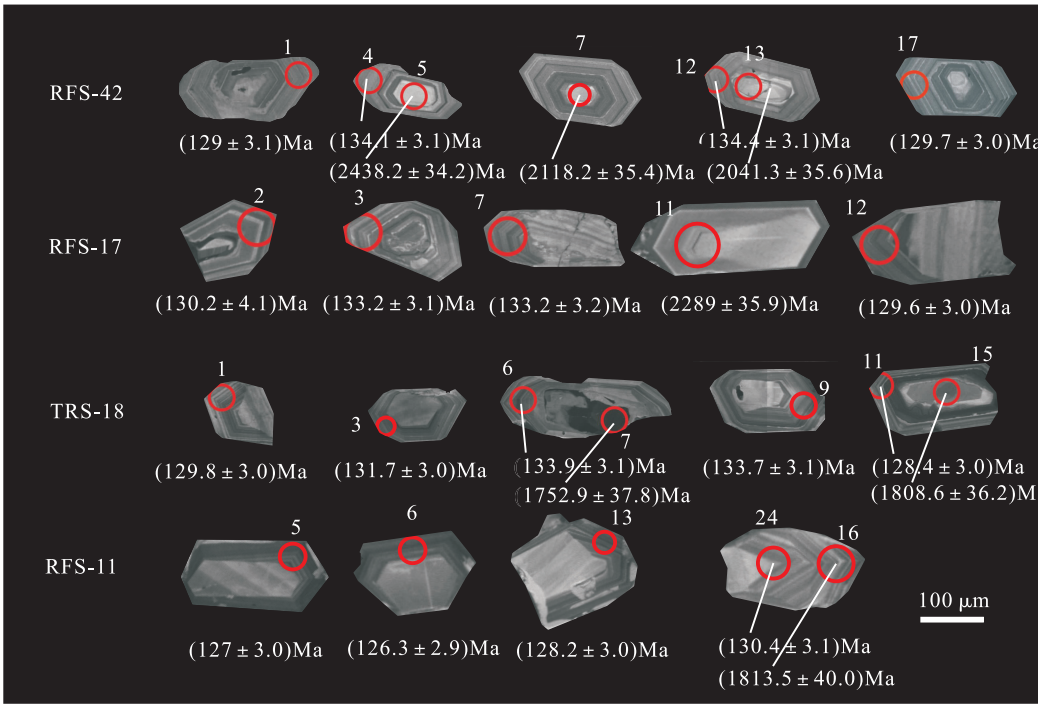
样品原号	RFS-7	RFS-12	RFS-20	RFS-21	RFS-22	RFS-24	RFS-27	RFS-36	RFS-37	RFS-38	RFS-41	RFS-45	TRS-7	TRS-9	TRS-18
岩石名称	二长斑岩							二长岩			二长闪长岩		闪长玢岩		闪长岩
SiO_2	57.19	61.62	64.25	64.49	63.31	57.39	57.17	62.79	63.94	64.44	63.97	62.30	63.29	62.92	61.75
Al_2O_3	18.87	17.98	18.01	17.45	17.63	18.53	18.64	18.25	18.37	16.92	17.51	17.71	18.02	17.49	17.19
CaO	5.11	3.52	4.79	4.31	4.54	5.36	5.93	3.75	2.81	2.90	4.51	4.78	3.51	3.83	4.59
TFeO	6.01	4.52	2.13	3.12	3.88	6.00	5.87	3.27	3.11	2.49	3.78	4.29	3.71	4.21	4.27
K_2O	4.38	4.54	2.27	2.69	2.72	4.26	4.21	4.88	4.38	6.77	2.83	2.85	3.73	3.11	2.36
MgO	0.97	0.63	0.63	0.77	1.08	1.12	1.16	0.58	0.41	0.48	1.10	1.34	0.90	1.21	1.09
MnO	0.19	0.11	0.04	0.05	0.08	0.17	0.18	0.11	0.08	0.11	0.08	0.08	0.05	0.04	0.05
Na_2O	5.24	5.50	6.00	5.31	5.25	5.29	5.25	5.97	6.01	4.96	5.14	5.07	5.51	5.52	5.68
P_2O_5	0.20	0.18	0.16	0.15	0.18	0.20	0.20	0.10	0.13	0.07	0.18	0.22	0.15	0.21	0.23
TiO_2	0.66	0.48	0.32	0.30	0.40	0.67	0.67	0.39	0.36	0.27	0.38	0.38	0.36	0.39	0.40
LOI	0.58	0.83	1.05	0.71	0.71	0.46	0.54	0.24	0.42	0.28	0.75	0.87	0.60	0.80	1.78
Total	99.40	99.91	99.65	99.35	99.78	99.45	99.82	100.33	100.02	99.69	100.23	99.89	99.83	99.73	99.39
Na_2O/K_2O	1.20	1.21	2.64	1.97	1.93	1.24	1.25	1.22	1.37	0.73	1.82	1.78	1.48	1.77	2.41
$Mg^{\#}$	22.35	19.91	34.57	30.56	33.17	24.96	26.04	24.00	19.02	25.59	34.15	35.74	30.18	33.89	31.26
La	52.80	38.70	23.90	19.00	28.90	53.70	50.30	28.30	31.40	19.10	27.60	27.90	32.50	31.30	34.30
Ce	105.00	73.70	45.60	34.70	55.30	109.00	102.00	60.20	63.00	42.20	51.90	52.70	59.20	55.80	62.30
Pr	13.30	9.05	5.59	4.48	6.78	13.10	12.80	8.05	7.78	5.52	6.44	6.25	7.28	6.70	7.38
Nd	53.80	35.80	21.80	17.20	26.00	53.30	52.00	31.50	30.30	22.20	26.10	24.30	28.40	26.50	28.60
Sm	9.78	5.65	3.50	3.13	4.43	9.37	8.69	5.77	5.00	3.62	4.34	4.08	4.89	4.45	4.93
Eu	2.95	1.89	1.39	1.14	1.59	2.75	2.73	1.78	1.71	1.23	1.52	1.52	1.67	1.55	1.73
Gd	8.27	4.99	3.34	2.76	4.09	7.91	7.80	4.99	4.49	3.62	4.00	4.00	4.57	4.01	4.38
Tb	1.19	0.76	0.47	0.42	0.60	1.19	1.18	0.70	0.64	0.49	0.59	0.49	0.62	0.53	0.55
Dy	6.12	3.57	2.28	2.29	3.09	6.09	5.78	3.73	3.31	2.48	2.95	2.59	3.20	2.81	2.78
Er	3.83	2.27	1.54	1.43	2.15	3.61	3.60	2.39	2.20	1.73	2.07	1.61	2.11	1.67	1.81
Ho	1.22	0.73	0.52	0.44	0.64	1.19	1.18	0.76	0.66	0.53	0.63	0.53	0.67	0.54	0.59
Tm	0.47	0.30	0.21	0.21	0.29	0.47	0.46	0.34	0.29	0.25	0.29	0.22	0.27	0.21	0.23

续表 2

样品原号	RFS－7	RFS－12	RFS－20	RFS－21	RFS－22	RFS－24	RFS－27	RFS－36	RFS－37	RFS－38	RFS－41	RFS－45	TRS－7	TRS－9	TRS－18
岩石名称	二长斑岩							二长岩			二长闪长岩		闪长玢岩		闪长岩
Yb	3.22	1.96	1.49	1.37	1.96	3.06	2.86	2.22	1.98	1.74	1.80	1.55	2.04	1.66	1.64
Lu	0.46	0.29	0.24	0.23	0.31	0.44	0.45	0.32	0.32	0.24	0.29	0.23	0.30	0.23	0.24
Y	37.20	22.80	15.50	14.70	21.10	36.50	36.40	24.40	21.70	17.00	20.50	16.50	21.30	16.70	18.30
Rb	106.	98.30	12.90	33.20	43.40	111.00	99.90	112.00	84.60	139.00	44.30	38.60	49.80	35.20	22.10
Sr	1295.	999	1 267	1 357	1 165	1 270	1 299	1 083	1 219	732	1 197	1 151	1 269	1 160	1 334
Ba	1 256	1 326	1 458	1 582	1 280	1 179	1 154	1 208	1 538	1 621	1 294	1 275	1 379	1 282	1 082
Th	5.99	5.03	2.74	2.07	2.77	6.46	5.76	4.69	4.48	7.01	2.74	3.40	4.70	4.02	4.26
U	0.86	0.75	0.64	0.68	0.66	0.93	0.97	0.76	0.72	0.79	0.65	0.66	1.00	0.83	0.76
P	873.24	785.92	698.59	654.93	785.92	873.24	873.24	436.62	567.61	305.63	785.92	960.56	654.93	916.90	1 004.23
K	363 448	3 767 234	1 883 617	2 232 128	225 701	3 534 894	3 493 404	404 932	3 634 468	5 617 660	2 348 298	2 364 894	3 095 106	2 580 638	1 958 298
Nb	10.30	7.75	5.62	5.73	7.05	9.90	9.73	8.23	8.15	6.70	6.83	5.72	6.91	5.79	5.79
Ta	0.49	0.33	0.28	0.26	0.34	0.47	0.50	0.36	0.37	0.24	0.35	0.28	0.35	0.26	0.27
Zr	221.00	240.00	142.00	133.00	168.00	232.00	212.00	187.00	219.00	200.00	166.00	140.00	181.00	169.00	169.00
Hf	5.51	5.24	3.86	3.41	4.14	5.51	5.45	4.74	5.05	5.51	4.13	3.35	4.34	4.06	4.07
Ti	3 960.00	2 880.00	1 920.00	1 800.00	2 400.00	4 020.00	4 020.00	2 340.00	2 160.00	1 620.00	2 280.00	2 280.00	2 160.00	2 340.00	2 400.00
Cr	11.80	12.80	7.27	10.10	9.75	9.32	8.49	2.25	4.82	51.40	9.78	8.31	11.90	9.91	7.45
Ni	9.16	7.11	2.88	5.44	5.55	4.28	6.48	1.75	0.97	25.00	3.86	3.20	3.60	3.31	2.22
Pb	18.40	13.20	5.37	7.62	6.73	12.70	15.30	10.40	12.90	15.30	7.11	5.13	5.02	6.08	6.71
Cu	15.40	10.60	4.84	5.14	6.45	15.60	16.50	6.90	7.26	13.30	9.30	7.28	6.53	7.03	7.50
V	76.60	61.50	50.80	52.10	63.70	79.60	79.30	47.10	47.00	30.90	61.50	77.30	56.00	76.00	76.40
Co	8.76	7.05	4.28	4.98	6.08	8.93	9.24	6.18	4.89	5.95	7.93	7.21	5.38	6.99	5.69
Sr/Y	34.81	43.82	81.74	92.31	55.21	34.79	35.69	44.39	56.18	43.06	58.39	69.76	59.58	69.46	72.90
ΣREE	299.61	202.46	127.37	103.50	157.23	301.68	288.23	175.45	174.78	121.95	151.02	144.47	169.02	154.66	169.76
$(La/Yb)_N$	11.76	14.16	11.51	9.95	10.58	12.59	12.62	9.14	11.38	7.87	11.00	12.91	11.43	13.53	15.00

注：二峰山样品：RFS－7、RFS－12、RFS－20、RFS－21、RFS－22、RFS－24、RFS－27；塔儿山样品：RFS－36、RFS－37、RFS－38、RFS－41、RFS－45、TRS－7、TRS－9、TRS－18；

测试单位：国家地质测试中心，误差：主量元素和含量小于 20×10^{-6} 的微量原色的分析误差为 1%～5%，大于 20×10^{-6} 的微量原色分析误差 5%～10%。



RFS－42. 二长闪长岩；RFS－17. 石英二长岩；TRS－18. 二长闪长岩；RFS－11. 闪长玢岩

图 4　塔儿山-二峰山闪长质岩石代表性锆石的 CL 图

Fig. 4　CL imaging of the representative analyzed zircons from the Ta'ershan-Erfengshan diorities

样品，自形程度一般，颗粒较小，长 50～150 μm，呈长柱状、他形等，震荡环带欠发育，继承锆石较发育，阴极发光呈灰白、浅灰色，自形晶，呈柱状，与岩浆锆石界线清晰。

在 U－Pb 谐和图中（图 5），测试点均落在谐和线附近，表明锆石结晶处于一个封闭的体系，没有 U、Pb 元素的迁移；4 件样品中均可见古元古代的继承锆石，表明岩浆的起源或运移与古元古宙的下地壳基底关系密切。

RFS－42 号样品中，4 个锆石核部测试点的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄分别为（2 526.4±33.5）Ma、（2 438.2±34.2）Ma、（2 041.3±35.6）Ma、（1 768.4±36.2）Ma；其余 14 个点的加权平均年龄为（131±1.6）Ma（1σ，*MSWD*＝0.53），该年龄代表岩浆结晶年龄。

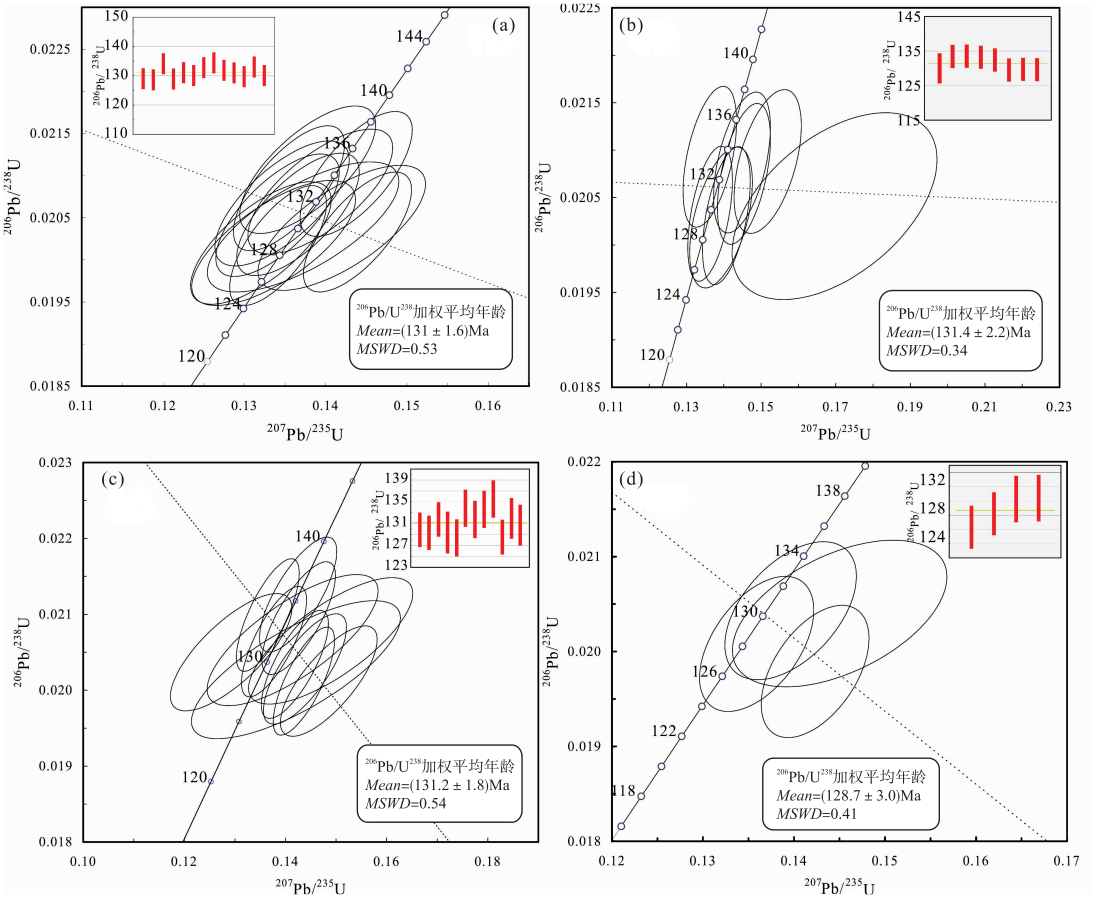
RFS－17 号样品中，4 个锆石核部测试点的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄分别为（2 598.4±33.0）Ma、（1 879.2±40.4）Ma、（2 298±35.9）Ma、（2 612.7±33.0）Ma；其余 8 个测点加权平均年龄为（131.4±2.2）Ma（1σ，*MSWD*＝0.34）。TRS－18 号样品中，3 个继承锆石测点的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄分别为（1752.9±37.8）Ma、（2 452.3±33.9）Ma、（1 808.6±36.2）Ma；其余 12 个测点加权平均年龄为（131.2±1.8）Ma（1σ，*MSWD*＝0.54）。

RFS－11 号样品中，锆石年龄较为分散，有 4 组相对集中的年龄段：（1 813.5±40.0）～（2 644.9±33.2）Ma、（1 076.5±57.3）～（1 354.5±44.2）Ma 和（213±4.9～（233.9±5. 6）Ma；仅有 4 个测点加权平均年龄为（128.7±3.0）Ma（1σ，*MSWD*＝0.41）。

4.2　全岩地球化学

塔儿山-二峰山闪长岩类岩石均属于中性岩石（SiO_2 为 57.17%～65.51%）。其中，二峰山的岩石 SiO_2 含量偏低；MgO、MnO 含量较低（MgO 为 0.41～1.34；MnO 为 0.04%～0.19%）。Mg 值［$Mg^{\#}=100\times Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})$］为 19.02～35.74，平均为 49.14；Al_2O_3 含量为 16.92%～18.87%；TFe_2O_3 含量为 2.13%～6.01%；碱质较高（Na_2O 为 5.07%～6.72%，K_2O 为 2.27%～6.77%，Na_2O/K_2O 值为 1.37～2.64），二峰山闪长岩类中 K_2O 含量（K_2O 为 4.21%～6.77%）普遍高于塔儿山 K_2O 含量（K_2O 为 2.27%～3.11%）。

在 SiO_2－AR 图解中（图 6a），二峰山闪长质岩石落在碱性岩区域，而塔儿山岩石落在钙碱性区域；



(a). RFS－42(塔儿山东二长闪长岩)；(b). RFS－17(塔儿山东南石英二长岩)；(c). TRS－18(塔儿山西二长闪长岩)；(d). RFS－11(二峰山闪长玢岩)

图 5 塔儿山-二峰山闪长质岩中锆石 LA－ICPMS U－Pb 年龄谐和图

Fig. 5 LA－ICPMS U－Pb zircons concordia diagrams from Ta'ershan-Erfengshan diorite samples

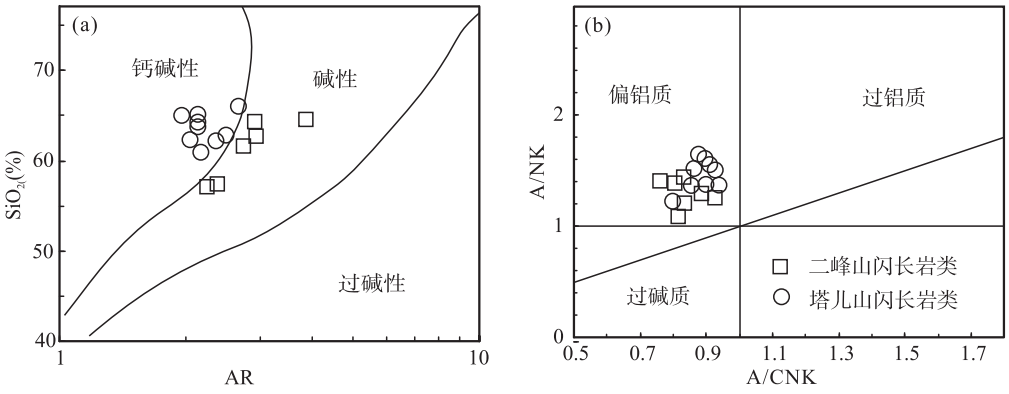
在 A/CNK－A/NK 图解中(图 6b)，全部岩石样品均落在准铝质区域。与东部闪长质岩体地球化学数据比较(杨承海等，2005；王永等，2013；陈艳等，2014)，2 个岩体均具有较低的 MgO 含量及 $Mg^{\#}$。由此，塔儿山闪长岩类属于钙碱性准铝质闪长岩，二峰山闪长质岩石属于碱性准铝质闪长岩。

在稀土元素配分曲线中(图 7a)，二峰山和塔儿山岩体具有相似的特征，均表现为轻稀土元素富集，重稀土元素亏损，轻、重稀土分馏明显[$(La/Yb)_N$＝7.87～12.91]；然而 2 个岩体稀土总量不同，前者高于后者(二峰山 ΣREE＝122×10^{-6}～300×10^{-6}；塔儿山 ΣREE＝104×10^{-6}～170×10^{-6})；2 个岩体均具有较高 Sr/Y 值(二峰山 Sr/Y＝34.81；塔儿山 Sr/Y＝55.21～92.31)；二峰山无明显 Eu 异常(δEu＝0.98～1.10)，塔儿山表现弱的正 Eu 异常(δEu＝1.08～1.24)；2 个岩体中 Ni(＜10×10^{-6})、Cu(＜16.5×10^{-6})、V(＜79.6×10^{-6})及 Co(＜9.24×10^{-6})含量均较低；2 个岩体均富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Sr、K 等，亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 等；与东部典型闪长质岩体地球化学数据比较(杨承海等，2005；王永等，2013；陈艳等，2014)，具有较高的 Y 和稀土元素含量(图 7b)。

5 讨论

5.1 塔儿山-二峰山闪长质岩体的侵入年龄探讨

以往研究中，已有学者对塔儿山-二峰山闪长质岩体的侵入年龄进行 K－Ar 同位素地质年代学研究(山西省地矿局)，其年龄为 125.98～139.66 Ma，然而其测试手段误差较大，可信度较低。本次研究利用 LA－ICP－MS 锆石原位微区 U－Pb 定年，对塔儿山-二峰山闪长质岩石 4 件样品分别测试。二



AR＝w(Al_2O_3)＋w(CaO)＋w(K_2O)＋w(Na_2O)/w(Al_2O_3)＋ w(CaO)－ w(K_2O)－ w(Na_2O)

图 6　(a)塔儿山-二峰山含矿闪长质岩石 SiO_2 - AR 图解、(b)A/CNK - A/NK 图解

Fig. 6　(a)SiO_2 - AR diagram and (b)A/CNK - A/NK diagrams of the Ta'ershan-Erfengshan diorites

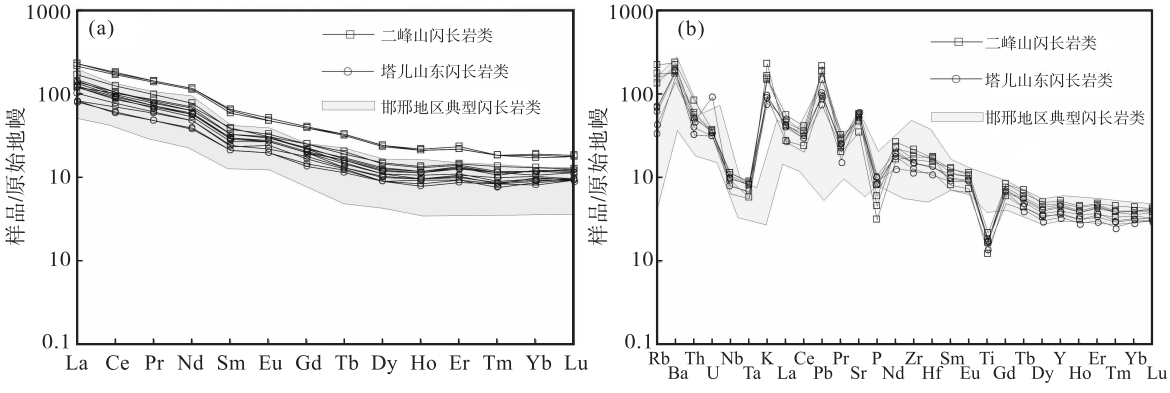


图 7　(a) 塔儿山-二峰山闪长质岩石稀土元素配分曲线图(据 Sun and McDonough,1989)和(b)塔儿山-二峰山闪长质岩石原始地幔标准化微量元素蛛网图(据 Sun and McDonough,1989)

Fig. 7　(a)Chondrite-normalized REE patterns(Normalization values after Sun and McDonough,1989)and (b)Primitive mantle-normalized spider grams(Normalization values after Sun and McDonough,1989) of Ta'ershan-Erfengshan diorites

长闪长岩的年龄集中在(131.1±1.6)～(131.2±2.2)Ma,闪长玢岩相对年轻,年龄为(128.7±3.0)Ma。该测试结果相对前人同位素测年结果更加集中,可信度更高。因此,塔儿山-二峰山闪长质岩体侵位年龄在(128.7±3.0)～(131.2±2.2)Ma。

对比华北地区其他矽卡岩型铁矿床中岩体年龄(阎国翰等,2000;彭头平等,2004;杨承海等,2005;郑建民等,2007;B. Chen et al.，2008;Ying et al.，2011;殷娜,2012;Shen et al.，2013;王永等,2013;Sun et al.，2014;陈艳等,2014;Jin et al,. 2015),塔儿山-二峰山岩体年龄与后者年龄保持一致,集中在 130Ma 左右(图 8)。由此笔者认为塔儿山-二峰山闪长质岩体的侵位年龄与东部其他卡林型铁矿床相关的岩体侵位年龄基本一致。

5.2　二峰山与塔儿山岩体的成因关系

如前所述,二峰山与塔儿山有相近的结晶年龄,且 2 个岩体出露位置相距较小。此外,2 个岩体所表现出相似的稀土元素及其他微量元素化学特征(图 6),因此,推断二峰山与塔儿山岩体有密切成因联系,即存在 2 种可能性:①相同的岩浆源区经历不同程度的部分熔融产生。②相同的母岩浆通过不同的结晶分异过程。

经过初始结晶分异产生的岩体会有地球化学特征变化的联系性,然而由哈克图解(图 9)可知,2 种岩体并没有主要氧化物的连续性,因此 2 个岩体不可能由同一岩浆连续结晶分异产生。此外,运用 2 种相容程度不同的相容元素比值可以较好的区分上述 2 种岩浆演化的过程。本次研究选取 Rb 和 Nd 2 种元素,从 Rb/Nd-Rb 图解中可以看出(图 10),2 个

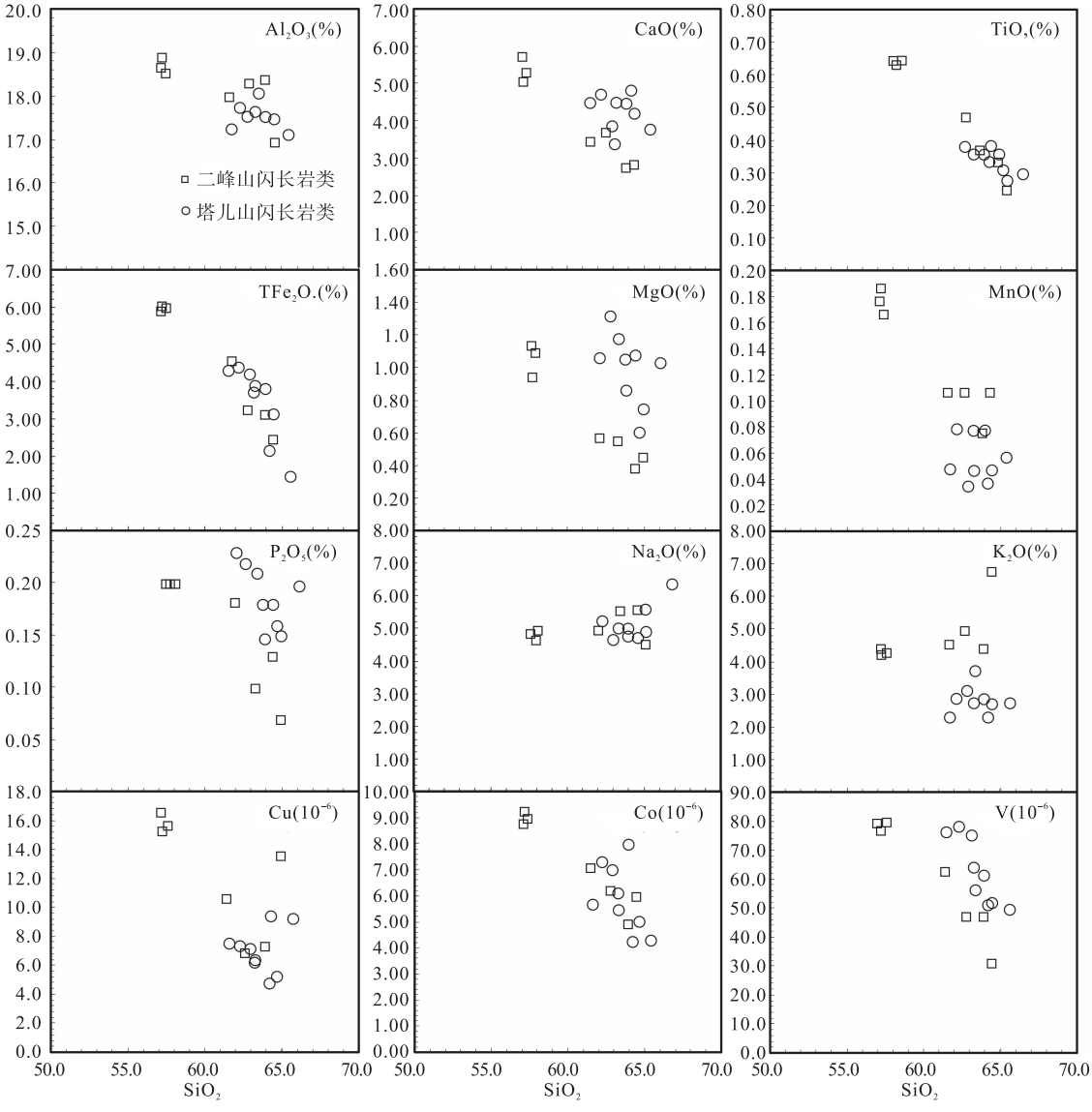


图 8 华北地区矽卡岩型铁矿床含矿岩体锆石年龄统计直方图

Fig. 8 Zircon age for diorites map of skarn iron deposits from North China

岩体更可能为同一源区经过不同程度的部分熔融产生。由于二峰山岩体具有略高的稀土元素总量(图7a),因此推测二峰山岩体的初始岩浆来自较低程度的源区熔融,而塔儿山岩体的初始岩浆来自略高程度的源区熔融。

5.3 源区特征

塔儿山-二峰山闪长质岩石相较邯邢、安林及鲁西等地区闪长质岩石(巫祥阳等,2003;Qian Qing et al.,2010;王永等,2013;陈艳等,2014)具有较高的 SiO_2、Al_2O_3、Sr、Ba 和 Y 含量,而具较低的 MgO 含量。目前,对于此类高 Ba、Sr 的中酸性岩石的形成机制主要有 3 种:①俯冲洋壳熔融(Defant & Drummond,1990,1993)。②下地壳的部分熔融(Atherton & Petford,1993;Petford & Atherton,1996;刘红涛等,2002;张旗等,2006)。③富 Sr、Ba 的幔源岩石熔融(Flower et al.,1996)。

由于塔儿山-二峰山岩体具有相对较低的 V、Cr、Co 和 Ni 含量,且地球化学特征显示出相对较低的 $Mg^{\#}$ 值,表明 2 个岩体的初始岩浆由地幔源区发生岩浆熔融产生的概率较小。此外,2 个岩体的锆石具有明显的继承核锆石出现,且继承核锆石年龄主要集中于 1 800 Ma 和 2 600 Ma,该类锆石的产生表明,岩浆产生过程中有大量古老陆壳物质的参与,因此,2 个岩体的初始岩浆很难由俯冲洋壳熔融产

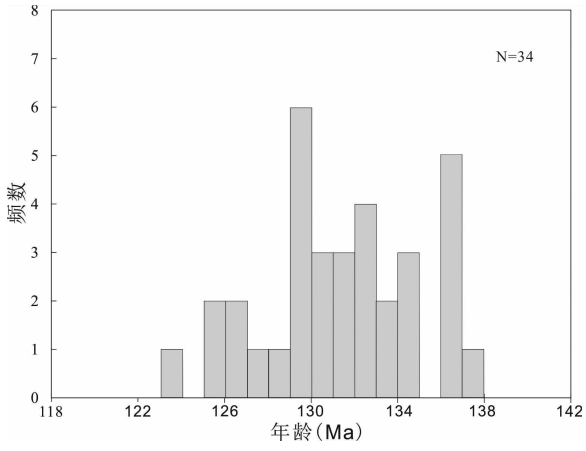


图 9　主量元素哈克图解

Fig. 9　Harker diagram of major element for the diorites

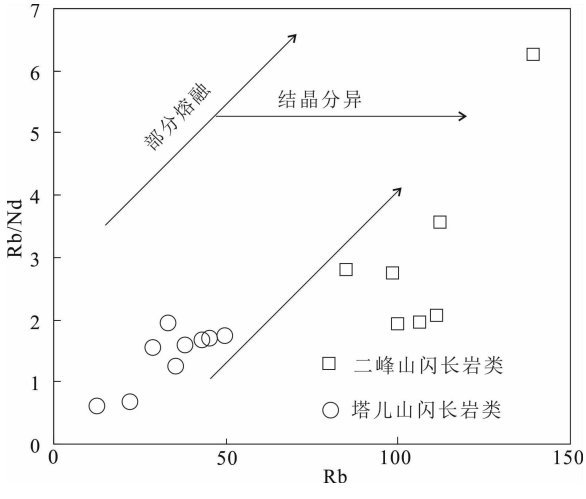


图 10　Rb/Nd－Rb 图解

Fig. 10　Rb/Nd－Rb diagram of the diorites

生。此外，岩石所表现出的微量元素地球化学特征与古老 TTG 岩石特征类似(图 7b)，说明 2 个岩体的初始岩浆很可能是由古老下地壳的部分熔融产生。

由于塔儿山-二峰山岩体主要暗色矿物为含水的角闪石，因此推测 2 个岩体的初始岩浆均为富水岩浆，因而源区岩石可能赋存大量富水矿物，如角闪石或者金云母。由于含金云母的源区熔融产生的初始岩浆相对富 K，而含角闪石的源区熔融产生岩浆相对富 Na，塔儿山-二峰山岩体均表现出了富 Na 的特点($Na_2O/K_2O=1.37\sim2.64$)。因此，岩体初始岩浆源区为含角闪石的古老下地壳。以往研究表明，东部与矽卡岩成矿有关岩体与华北克拉通含石榴石下地壳的熔融有关(巫祥阳，2003；高山等，2006；许文良，2009b)。然而本次研究的 2 个岩体相较华北克拉通东部出露的闪长岩体具有较高的 Y 含量和重稀土含量，因此岩体初始岩浆源区相较华北克拉通东部闪长质岩体熔融压力较低，深度相对较浅。

综上所述，本文针对二峰山-塔儿山提出如下岩石成因模型：幔源岩浆底侵至下地壳，其冷却结晶所传递的热量引发了含角闪石的古老下地壳在相对较低压力下的部分熔融，2 次不同的熔融程度熔出的岩浆发生侵位并形成塔儿山和二峰山岩体。

5.4　成矿指示

长久以来，华北克拉通中生代的构造减薄事件已经成为公认的事实(Fan et al.，1992；Menzies et al.，1993；邓晋福等，1994)，而构造减薄的机制一直是学术界关注的焦点且长时间存有争议(邓晋福，2006；吴福元等，2008；徐义刚等，2009；高山等，2009；许文良，2009a，2009b)。有关减薄机理的主流观点有：①岩石圈的拆沉引发软流圈上涌，从而导致岩石圈减薄(邓晋福等，1994；高山等，2009)。②软流圈主动上涌，对古老岩石圈进行主动侵蚀(Menzies et al.，1993；Xu，2001)。

近年来，有学者基于华北克拉通中东部高 MgO 闪长质岩体的研究(巫祥阳，2003；高山等，2006；许文良，2009b)，认为华北克拉通的减薄机制主要为榴辉岩相下地壳的拆沉。那么位于华北克拉通中部的塔儿山-二峰山闪长质岩体是否也受华北克拉通减薄机制的影响呢？

如前文所述，塔儿山-二峰山岩体与邯邢地区高 MgO 岩体虽然处于相同的次级构造单元(Zhao et al.，2006)，但是相较东部同时代的邯邢地区的岩体，塔儿山-二峰山岩体具有较低的 MgO 含量，临近区域并未有类似东部高 MgO 闪长质岩体的报道，微量元素特征也未表现出高压源区的特征，该区域虽然也发生了减薄，但是相较东部弱。因此，笔者判断华北克拉通中部未发生类似东部的拆沉作用。

对比东部邯邢与鲁西地区矽卡岩矿区岩体，塔儿山-二峰山岩体也与矽卡岩型铁矿床有关，考虑到其岩体与邯邢地区岩体具有相同的成岩年龄，且岩石中均普遍存在 2.5 Ga 继承锆石的情况，表明两者形成均有古老下地壳的参与，认为塔儿山-二峰山地区古老下地壳熔融的岩浆在矽卡岩型铁矿床形成过程中发挥了重要的作用。

6 结论

(1)塔儿山-二峰山岩体形成于中生代,侵位年龄集中在 128～131 Ma。

(2)塔儿山和二峰山岩体由同一岩浆源区发生不同程度熔融产生的岩浆发生侵位形成,岩浆源区为含角闪石的古老下地壳,其熔融由幔源岩浆底侵并冷却结晶所传递的热量引发。

(3)塔儿山-二峰山岩体位置并未发生类似华北克拉通东部的拆沉作用,古老下地壳熔融的岩浆在矽卡岩型铁矿床形成过程中发挥了重要的作用。

参考文献(References):

陈斌,翟明国,邵济安. 太行山北段中生代岩基的成因和意义:主要和微量元素地球化学证据[J]. 中国科学(D辑),2002,32(11):896-907.

CHEN Bin, ZHAI Mingguo, SHAO Ji'an. Origin and significance of the Mesozoic batholith in the northern Taihang Mountains: evidence from major and trace element geochemistry[J]. Science China(D),2002,32(11):896-907.

陈艳,张招崇,朱江. 河南省安林矽卡岩型铁矿的成岩时代和成矿物质来源探讨[J]. 岩石学报, 2014, 30(5):1307-1321.

CHEN Yan, ZHANG Zhaochong, ZHU Jiang. Geochronology of the Anlin iron skarn deposit, Henan Province and insight into the sources of iron[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014,30(5):1307-1321.

邓晋福,莫宣学,赵海玲,等. 中国东部岩石圈根、去根作用与大陆"活化"[J]. 现代地质,1994,8:349-356.

DENG Jinfu, MO Xuanxue, ZHAO Hailing, et al. Lithosphere Root/De-rooting and Activation of the East china continent[J]. Geoscience, 1994,8:349-356.

邓晋福,莫宣学,赵海玲,等. 中国东部燕山期岩石圈-软流圈系统大灾变与成矿环境[J]. 矿床地质,1999,19(4):309-315.

DENG Jinfu, MO Xuanxue, ZHAO Hailing, et al. The Yanshanian lithosphere-asthenosphere catastrophe and metallogenic environment in east china[J]. Mineral Deposits, 1999, 19(4):309-315.

邓晋福,苏尚国,刘翠,等. 关于华北克拉通燕山期岩石圈减薄的机制与过程的讨论:是拆沉,还是热侵蚀和化学交代? [J]. 地学前缘,2006,13(2):105-119.

DENG Jinfu, SU Shangguo, LIU Cui, et al. Discussion on the lithospheric thinning of the North China craton: delamination? or thermal erosion and chemical metasomatism? [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(2):105-119.

高山,R. L. Rundick, 许文良,等. 中生代高镁埃达克岩浆岩及其中的包体对华北克拉通岩石圈演化的制约[C]. 全国岩石学与地球动力学研讨会,2006,330.

GAO Shan, R. L. Rundick, XU Wenliang, et al. Mesozoic high-Mg adakite magmatic rocks and their xenoliths: constraints on the lithospheric evolution of the North China Craton[C]. National Symposium on Petrology and Geodynamics,2006, 330.

高山,章军锋,许文良,等. 拆沉作用和华北克拉通破坏[J]. 科学通报,2009,54:1962-1973.

GAO Shan, ZHANG Junfeng, XU Wenliang, et al. Delamination and destruction of the North China Craton[J]. Chinese Science Bulltin, 2009, 54:1962-1973.

侯可君,李延河,田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质,2009,28(4):481-492.

HOU Kejun, LI Yanhe, TIAN Yourong. In situ U-Pb ziron dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(4):481-492.

李慧峰,康健. 山西-塔儿山-二峰山碱性偏碱性杂岩体侵入其次及岩石化学特征[J]. 科技情报开发与经济,2010,20(15):150-152.

LI Huifeng, KANG Jian. The Intrusion Periods and Petrochemical Features of Alkalic and Alkalescent Complex in Ta'ershan Mountain of Shanxi Province[J]. Sci-Tech Information Development & Economy,2010, 20(15):150-152.

刘红涛,孙世华,刘建明,等. 华北克拉通北缘中生代高锶花岗岩类:地球化学与源区性质[J]. 岩石学报,2002,18(3):257-274.

LIU Hongtao, SUN Shihua, LIU Jianming, et al. The Mesozoic high-Sr granitoids in the northern marginal region of North China Craton: geochemistry and source region [J]. Acta Petrologica Sinica, 2002,18(3): 257- 274.

彭头平,王岳军,范蔚茗,等. 南太行山闪长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及岩石成因研究[J]. 岩石学报,2004,20(5): 1253-1262.

PENG Touping, WANG Yuejun, FAN Weiming, et al. SHRIMP ziron U-Pb geochronology of the diorites for southern Taihang Mountains in the North China Interior and its petrogenesis[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(5):1253-1262.

王银喜,杨杰东,陶仙聪,等. 化石、矿物和岩石样品的 Sm-Nd 同位素实验方法研究及其应用[J]. 南京大学学报,1988, 24(2):297-308.

WANG Yinxi, YANG Jiedong, TAO Xiancong, et al. A Study of the Sm-Nd method for fossil mineral rock and its

application[J]. Joural of Nanjing University, 1988, 24(2):297-308.

王永,陈正乐,陈柏林,等. 山西平顺西安里铁矿区中生代闪长岩年代学及其地球化学特征[J]. 岩矿测试,2013,32(1):131-144.

WANG Yong,CHEN Zhengle,CHEN Polin,et al. Chronology and Geochemistry on Mesozoic Diorite from the Xi'anli Iron Ore Area in Pingshun,Shanxi Province[J]. Rock and Mineral Analysis,2013,32(1):131-144.

吴福元,葛文春,孙德有,等. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题[J]. 地学前缘,2003,10(3):51-61.

WU Fuyuan,GE Wenchun,SUN Deyou,et al. Discussions on the Lithospheric thinning in eastern china[J]. Earth Science Frontiers,2003,10(3):51-61.

吴利仁,张兆忠,张玉学,等. 论山西台背斜碱性岩将的成因及演化[J]. 地质科学, 1964, 2:125-142.

WU Liren, ZHANG Zhaozhong,ZHANG Yuxue,et al. Discussion on the origin and evolution of the alkaline rocks in the Shanxi platform anticline[J]. Chinese Journal of Geology,1964,2:125-142.

巫祥阳,徐义刚,马金龙,等. 鲁西中生代高镁闪长岩的地球化学特征及其成因探讨[J]. 大地构造与成矿学,2003,27(3):228-236.

WU Xiangyang,XU Yigang,MA Jinlong,et al. Geochemistry and Petrogenesis of the Mesozoic high-Mg diorites from western Shandong[J]. Geotectonica et Metallogenia,2003,27(3):228-236.

许文良,林景仟. 河北邯邢地区角闪闪长岩中地幔纯橄岩包体的发现和研究[J]. 地质学报,1991,65(1):33-42.

XU Wenliang, LIN Jingqian. The discovery and study of mantle-derived dunite inclusions in hornblende-diorite in the Handan-Xintai area,Herbei[J]. Acta Geologica Sinica,1991,65(1):33-42.

许文良,杨德彬,裴福萍,等. 华北克拉通中生代拆沉陆壳物质对岩石圈地幔的改造:s 来自橄榄岩捕掳体中角闪石的成分制约[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2009a,39(4):606-617.

XU Wenliang, YANG Debin, PEI Fuping, et al. Mesozoic Lithospheric Mantle Modified by Delaminated Lower Continental Crust in the North China Craton: Constraints from Compositions of Amphiboles from Peridiotite Xenoliths[J]. Journal of Jinlin University(Earth Science Edition),2009a,39(4):606-617.

许文良,杨德彬,裴福萍,等. 2009b. 太行山南段符山高镁闪长岩的成因——拆沉陆壳物质熔融的熔体与地幔橄榄岩反应的结果[J]. 岩石学报,25(8):1947-1961.

XU Wenliang,YANG Debin,PEI Fuping,et al. Petrogenesis of Fushan high-Mg'diorites from the southern Taihang Mts. in the central North China Craton: Resulting from interaction of peridotite-melt derived from partial melting of delaminated lower continental crust[J]. Acta Petrologica Sinica,25(8):1947-1961.

徐义刚,李洪颜,庞崇进,等. 论华北克拉通破坏时限[J]. 科学通报,2009,54(14):1974-1989.

XU Yigang,LI Hongyan,PANG Chongjin,et al. On the timing and duration of the destruction of the North China Craton[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(14):1974-1989.

阎国翰,许保良,牟保磊,等. 太行山—大兴安岭东麓碱性侵入岩年代学和锶,钕,铅同位素特征及其意义[J]. 地质学报,2000,4:378.

YAN Guohan,XU Baoliang,MOU Baolei,et al. Geochronology and Sr, Nd, Pb Isotopic Characteristics of Alkaline Intrusive Rocks in the Eastern Piedmont of the Taihangshan-Daxinganling Mountains and Their Significance[J]. Acta Geologica Sinica,2000,4:378.

杨承海,许文良,杨德彬,等. 鲁西济南辉长岩的形成时代:锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年证据[J]. 地球学报,2005,26(4):321-325.

YANG Chenghai,XU Wenliang,YANG Debin,et al. Chronology of the Jinan Gabbro in Western Shandong: Evidence from LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating[J]. Acta Geoscientica Sinica,2005,26(4):321-325.

杨承海,许文良,杨德彬,等. 鲁西中生代高 Mg 闪长岩成因:年代学与岩石地球化学证据[J]. 地球科学—中国地质大学学报,2006,31(1):81-92.

YANG Chenghai,XU Wenliang,YANG Debin,et al. Petrogenesis of the Mesozoic High-Mg Diorites in West Shandong: Evidence from Chronology and Petro-geochemistry[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences,2006,31(1):81-92

姚金炎,吴明超,张光耀. 华北地台中生代岩浆岩成因系列与内生金属矿床组合[J]. 地质与勘探,1985,21(4):1-6.

YAO Jinyan,WU Mingchao,ZHANG Guangyao. Genetic Series of Mesozoic Magmatic Rocks and Assemblages of Endogenous Metallic Deposits in North China Platform[J]. Geology and Exploration,1985,21(4):1-6.

殷娜. 河北邯郸北洺河铁矿成因矿物学及矿床成因研究[A]. 北京:硕士学位论文,中国地质大学(北京), 2012.

YIN Na. Genetic Mineralogy and Genesis of Beiminghe Skarn Iron Deposit in Handan,Hebei Province[A]. Beijing: A Dissertation Submitted to China University of Geosciences for Master Degree, 2012.

曾键年,左大华,马宪. 山西塔儿山地区燕山期岩浆岩演化及其对金属成矿的控制作用[J]. 华北地质矿产杂志,1997,1(1):33-43.

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.

ZHANG Qi,WANG Yan,LI Chengdong,et al. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its im-

plications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(9): 2249-2269.

张旗,金惟俊,李承东,等. 中国东部燕山期大规模岩浆活动与岩石圈减薄:与大火成岩省的关系[J]. 地学前缘, 2009,16(2):21-51.

ZHANG Qi, JIN Weijun, LI Chengdong, et al. Yanshanian large-scale magmatism and lithosphere thinning in Eastern China: Re-lation to large igneous province[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(2): 021-051.

郑建民,谢桂青,刘珺,等. 河北省南部邯郸-邢台地区西石门矽卡岩型铁矿床金云母$^{40}Ar-^{39}Ar$定年及意义[J]. 岩石学报, 2007, 13(10): 2513-2518.

ZHENG Jianmin, XIE Guiqing, LIU Jun, et al. $^{40}Ar-^{39}Ar$ dating of phologopite from the Xishimen skarn iron deposit in the Handan-Xingtai area, southern Hebei, and its implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 13(10): 2513-2518.

Atherton M P, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. Nature, 1993, 362: 144-146.

Campston W, Williams IS, Meyer C. U-Pb geochronology of zircons from lunar braccia 73217 using a sensitive high massresolution in microprobe[J]. J. Geophys. Res., 1984, 89(S02): B525-B534.

Defant M J and Drummond M S. Derivaton of some modern arcmagmas by melting of young subducted lithosphere [J]. Nature, 1990, 347(18): 62-665.

Defant M J and Drummond M. Monut St. Helens: Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc[J]. Geology, 1993, 21: 547-550.

Jin Ziliang, Zhang Zhaochong, M. Santosh, et al. Genetic relationship of high-Mg dioritic pluton to iron mineralization: A case study from the Jinling skarn-type iron deposit in the North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 113: 957-979.

M. B. FOWLER, P. J. HENNEY, D. P. Fiona Darbyshire, et al. Petrogenesis of high Ba-Sr granites: the Rogart pluton, Stherland[J]. Journal of the Geological Society, 2001, 158(3): 521-534.

Menzies M A, Fan W M, Zhang M. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China[J]. Geological Society of London, Special Publications, 1993, 76(1): 71-81.

Paul W. O., Hoskin. Patterns of chaos: Fractal statistics and the oscillatory chemistry of zircon[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(11): 1905-1923.

Petford N, Atherton M. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca Batholith, Peru[J]. Journal of Petrology, 1996, 37: 1497-1521.

Rapp RP. Heterogeneous source regions for Archean granitoids. Oxford: Oxford University Press, 1997.

Rapp RP, Watson EB. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar. Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. Journal of Petrology, 1995, 36(4): 891-931.

Shen Junfeng, M. Santosh, LI Shengrong, et al. The Beminghe skarn iron deposit, eastern China: Geochronology, isotope geochemistry and implications for the destruction of the North China Craton[J]. Lithos, 2013, 156-159: 218-229.

Sun Yi, Xiao Long, ZHU Dan, et al. Geochemical, geochronological, and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the petrogenesis of the Qicun intrusive complex from the Handan-Xingtai district: implications for the mechanism of lithospheric thinning of the North China Craton [J]. Ore Geology Review, 2014, 57: 363-374.

Wilson M. Igneous Petrogenesis[M]. Uniwin Hyman, London,: 1989, 1-466.

Williams, S lan. Some observations on the use of zircon U-Pb geochronology in the study of granitic rocks[J]. Trans. R. Soc. Edinb. Earth Sci., 1992, 83(1-2): 447-458.

WANG Fan, Menzies Martin. Destruction of aged lower litho-sphere and accretion of asthenosphere mantle beneath eastern China[J]. Geotectionic Metall, 1992, 16(3-4): 171-180.

Xu Yigang. Thermal tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath the Sino Korean Craton in China: evidence, timing and mechanism[J]. Phys Chem Earth(A), 2001, 26: 747-757.

Ying Jifeng, Zhang Hongfu, Tang YanJie. Crust-mantle interaction in the central North China Craton during the Mesozoic: syenitic-monzonitic intrusions from Shanxi province[J]. Lithos, 2011, 125: 449-462.

Zhang Zhaochong, Hou Tong, M. Santosh, et al. Spatio-temporal distribution and tectonic settings of the major iron deposits in China: an overview[J]. Ore Geology Review, 2014, 57: 247-263.

Zhao Guochun Sun Min, Simon Wilde, et al. Composite nature of the North China Granulite-Facies Belt: Tectonothermal and Geochronological constraints[J]. Gondwana Research, 2006, 9: 337-348.