

DOI: 10.12401/j.nwg.2022050

西大别大悟地区闪长玢岩岩石地球化学特征 及其构造意义

曹正琦^{1,2}, 蔡逸涛^{3,*}, 周向辉⁴, 戚文龙⁵, 丁文秀⁶

(1. 湖北文理学院, 湖北 襄阳 441053; 2. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430030; 3. 金陵科技学院, 江苏 南京 211169;
4. 湖北省地质调查院, 湖北 武汉 430034; 5. 武汉民政职业学院, 湖北 武汉 430062; 6. 湖北地震局, 湖北 武汉 430071)

摘要: 基性岩浆能反映地幔源区性质、成因环境和形成演化过程。通过野外地质调查, 结合岩石地球化学分析, 探讨区域岩浆源区性质、成因及构造环境。全岩地球化学分析结果显示, 闪长玢岩样品 SiO₂ 含量为 49.97%~55.01%, 属中-基性岩系列, MgO 含量为 4.63%~5.49%, Mg[#] 为 60.17~90.19, Nb/Ta 值为 13.06~18.47, Zr/Hf 值为 40.09~44.05, 暗示该岩浆源区可能源自于富集地幔。LREE/HREE 值为 9.45~13.97, 整体表现为较陡右倾型, 且亏损高场强元素(Nb、Ta、Hf、Ti) 亏损, 富集大离子亲石元素 Sr, 表明岩浆形成过程中可能受到俯冲板片流体交代作用的影响。闪长玢岩脉穿切花岗斑岩脉, 花岗斑岩结晶时代为(130.8±1.8)Ma, 闪长玢岩的侵位时间可能为早白垩世。在 Zr-Ti 构造环境判别图解中, 闪长玢岩样品落于板内玄武岩区, 结合区域构造背景, 笔者认为闪长玢岩应形成于造山后伸展-拉张环境。

关键词: 西大别; 大悟地区; 闪长玢岩; 基性岩; 伸展-拉张构造环境

中图分类号: P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)04-0318-11

Geochemical Characteristics of Diorite Porphyrite in Dawu Area, Western Dabie and Its Tectonic Significance

CAO Zhengqi^{1,2}, CAI Yitao^{3,*}, ZHOU Xianghui⁴, QI Wenlong⁵, DING Wenxiu⁶

(1. Hubei University of Arts and Sciences, Xiangyang 441053, Hubei, China; 2. China University of Geosciences, Wuhan 430030, Hubei, China; 3. Jinling Institute of Science and Technology, Nanjing 211169, Jiangsu, China; 4. Hubei Provincial Institute of Geological Survey, Wuhan 430034, Hubei, China; 5. Wuhan Civil Affairs Vocational College, Wuhan 430062, Hubei, China;
6. Hubei Seismological Bureau, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: Basic magmas can reflect the nature of mantle source region, genetic environment and formation and evolution process. Through the detailed field geological survey and rock geochemical analysis, we discuss the nature, genesis and tectonic environment of the magma source area of regional diorite porphyrite. The geochemical analysis of the whole rock shows that the SiO₂ content of the diorite porphyrite samples is 49.97%~55.01%, belonging to the medium-basic rock series, the MgO content is 4.63%~5.49%, and the Mg[#] content is 60.17~90.19, the Nb/Ta value of the sample is 13.06~18.47, and the Zr/Hf value is 40.09~44.05, indicating that the

收稿日期: 2021-06-20; 修回日期: 2022-10-16; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 湖北文理学院科研启动经费资助项目(kyqdf2021007), 江苏省科技计划项目(SBK2019022373), 湖北省教育厅科研计划项目(B2021208), 湖北省地质局科研项目(KJ2022-27)联合资助。

作者简介: 曹正琦(1980-)男, 博士, 副教授, 从事构造地质教学和科研工作。E-mail: caozq11797@hbuas.edu.cn。

* 通讯作者: 蔡逸涛(1982-)男, 博士, 副教授, 从事地球化学教学和科研工作。E-mail: caiyitao@jit.edu.cn。

magma source area of the diorite porphyrite may be from the enriched mantle. In addition, The LREE/HREE ratio is 9.45~13.97, and the diorite porphyrite samples show a steep-right diorite, and they are enriched in high field strength elements (Nb, Ta, Hf, Ti) and rich in large ion lithophile elements Sr. It is suggested that porphyrite may have been influenced by fluid metasomatism of subducted plates during the formation process. The field outcrops show that diorite porphyrite dikes intrude into granitic porphyry dikes (forming age is 130.8±1.8 Ma), so the emplacement time of dikes may be early Cretaceous. In the discrimination diagram of Zr-Ti tectonic environment, the diorite porphyrite samples fall in the intraplate basalt area. Combined with the regional tectonic background, we believe that the diorite porphyrite should be formed in the post-orogenic extension environment.

Keywords: Xidabie; Dawu area; diorite porphyrite; basite; extension-tension tectonic environment

大别造山带是中国研究程度较高的高压-超高压变质带之一,也是2个陆-陆碰撞造山后,中生代的岩浆活动之最强烈地区(Ma et al., 1998)。前人的研究表明,大别造山带在早白垩世发生了大规模岩浆活动(120~138 Ma)(李曙光等, 1999; Jahn et al., 1999; Xu et al., 2007; 穆可斌等, 2019; 张凯等, 2020),侵入的岩体主体为中酸性岩,镁铁-超镁铁质岩次之,大量与其年代相近的中酸性、基性脉岩穿切岩体(王世明等, 2010)。中基性岩脉的研究对于了解区域的壳幔相互作用及构造环境具有十分重要的意义。

基性岩浆能反映地幔源区性质,成因环境和形成演化过程,能为底侵以及壳幔岩浆相互作用提供可靠信息,对大别地区镁铁-超镁铁质岩石为碰撞后侵入岩的认识已逐渐统一(Hacker et al., 1995; Hacker et al., 1998; 葛宁洁等, 1999; 赵子福等, 2003),但对于大别基性岩岩浆来源存在较大分歧:①认为地幔和地壳混合形成(戚学祥等, 2002)。②由俯冲的扬子岩石圈地幔部分熔融产生(赵子福等, 2003; Zhao et al., 2005)。上述岩浆来源的地质构造背景,前人将之归纳成3种观点:①观点认为陆-陆碰撞造山后环境形成于三叠纪时期(Chen et al., 2002; Xu et al., 2007)。②认为不是三叠纪时期的陆-陆碰撞,可能与中国东部的岩石圈发生减薄构造事件有关,是由太平洋板块在晚中生代时期西向俯冲导致的(任志等, 2014; 刘清泉等, 2015)。③认为可能与岩石的部分熔融有关,该部分熔融是由地幔柱在早白垩世时期对岩石圈热扰动所引起的(赵子福等, 2004)。针对大别基性岩的岩浆源区性质及大地构造背景的认识还存在的差异,笔者以翔实的野外观察为基础,通过研究大悟地区出露的闪长玢岩脉地球化学特征,结合野外闪长玢岩脉穿切花岗斑岩脉的地质事实,分析闪长玢岩的岩浆源区性质及所处大

地构造环境,探讨大别造山带的壳-幔相互作用。

1 区域地质背景

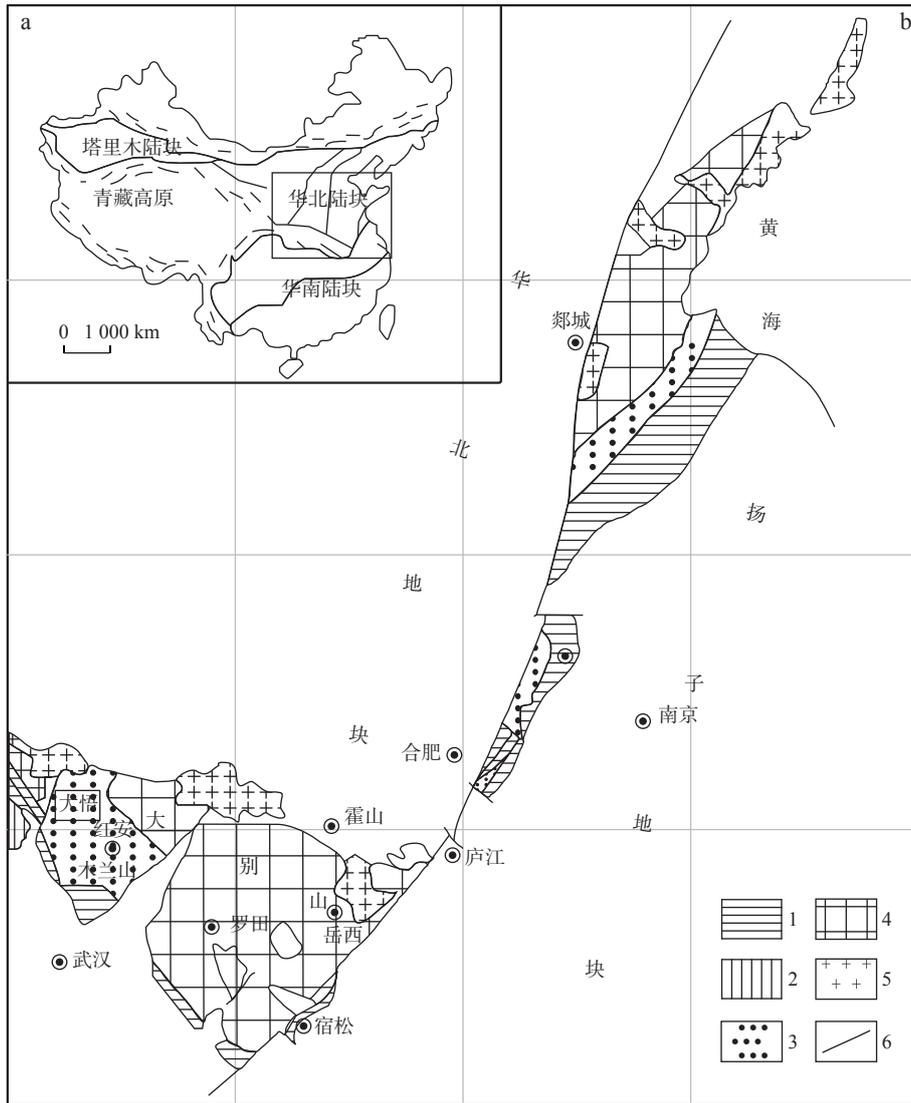
秦岭-大别造山带是扬子地块在三叠纪时期与华北地块发生俯冲-碰撞,而产生的高压-超高压变质带,东被郟城-庐江断裂所截,北连华北克拉通,南为扬子地块(图1)。在大悟地区早白垩世时期基性脉岩侵位分布广泛,种类较多,包括辉绿(玢)岩、煌斑岩、辉长岩、闪长玢岩等,有的基性脉岩切割或穿插晚中生代时期的中酸性岩体,基性岩脉的走向分布主要为北东东,北西向脉岩占据部分,岩脉倾角均较陡,与其围岩的接触界线清晰(王世明等, 2010)。

闪长玢岩脉分布规模小,出露宽度为10~25 cm,延伸长度一般为1~3 m,围岩岩性主要为马吼岭群白云钠长石英变粒岩(图2a),个别闪长玢岩脉交截花岗岩斑岩脉(图2b)。

2 岩相学和矿物学特征

闪长玢岩表现为黑色或黑褐色,具斑状结构,呈块状构造。斑晶成份几乎为暗色矿物,少量基性斜长石,斑晶总量约为20%,暗色矿物绝大多数被碳酸盐矿物、绿泥石交代为残余柱状、六边形假象(属角闪石),极少数被绿泥石、白云母交代为残余片状假象(属黑云母)。基性斜长石发生交代作用被碳酸盐矿物所取代,呈现出残余柱状构造的型式。

基质总量约为80%,成分主要由具碳酸盐化、钠黝帘化残余自形小板条状的基性斜长石组成,许多玻璃质充填三角形空隙格架内,无序分布(在单偏光下显浅褐色,外形呈隐晶集合体,在正交偏光下显黑色



1. 新元古代木兰山-张八岭蓝片岩带; 2. 中元古代随县千枚岩带; 3. 古元古代—中元古代大悟-宿松-连云港含磷岩带; 4. 新太古代桐柏-大别-胶南杂岩带; 5. 燕山期花岗岩; 6. 断裂

图1 大别山地区构造简图(据索书田等, 1993 修改)

Fig. 1 Structural sketch of Dabie Mountain area

兼具均质性全消光)、暗色矿物及少量的铁质矿物(种类有磁铁矿和钛铁矿)、微量的石英而组成变余间隐间粒结构的特征(图 2c)。岩石中还可见一颗外形呈不规则状的杏仁体, 沿其内充填着粗大粒状的石英晶体(图 2d)。

3 样品采集及分析测试方法

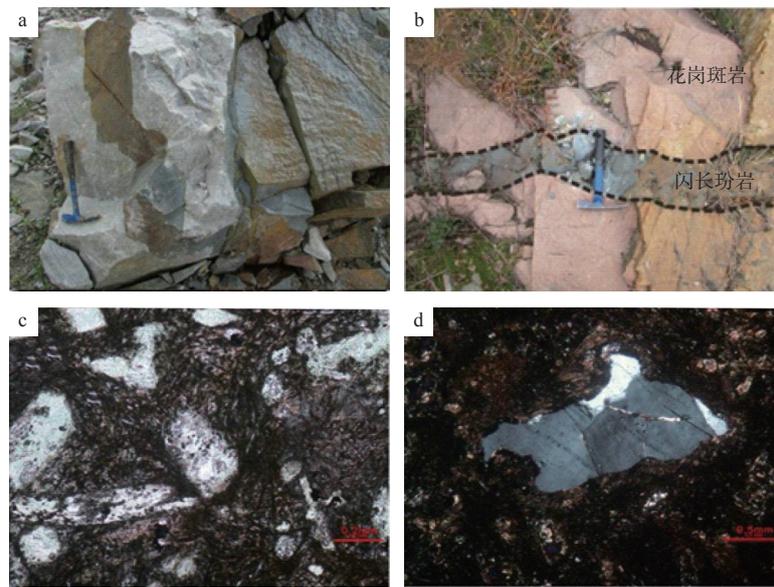
野外采集新鲜的闪长玢岩样品, 在自然资源部武汉矿产资源检测中心完成样品的主量元素、微量元素及稀土元素的测试, 利用 X 射线荧光光谱分析熔铸玻璃片法分析主量元素, 分析仪器的型号为 XRF-1500,

对于分析精度要求精于 1%, FinningMAT 公司生产的等离子质谱仪(ICP-MS)测定样品中的微量元素、稀土元素, 分析精度要求高于 5%。

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素特征

闪长玢岩(样品 D2073/1、D2073/2、D2073/3、D2073/4、D2073/5 和 D4078/4)的主量元素和微量元素分析结果显示, SiO₂ 含量为 49.97%~55.01%, 属于基性-中基性成分, 样品号为 D2073/2、D2073/3 的 SiO₂ 含量较高, 可能与脉岩侵位过程中与花岗斑岩发生交



a. 闪长玢岩侵入白云钠长石英变粒岩; b. 闪长玢岩脉穿切花岗斑岩脉;
c. 闪长玢岩斑状结构(单偏光); d. 不规则状斑晶(正交偏光)

图2 闪长玢岩野外地质和显微特征图

Fig. 2 Field geology and microscopic characteristics of diorite porphyrite

代作用有关。MgO 含量为 4.63%~5.49%, Al₂O₃ 含量为 14.01%~14.65%, P₂O₅ 含量为 0.52%~0.80%, CaO 含量为 4.70%~6.17%, K₂O 含量为 3.41%~4.39%, Na₂O 含量为 1.82%~3.86%, 岩石富碱, K₂O/Na₂O 值为 0.41~1.11(表 1)。样品中 MgO 含量与 SiO₂ 含量相反, 随之增高而降低, Al₂O₃, P₂O₅ 含量随 SiO₂ 含量增高而升高, 表现出岩浆分异演化的一般规律。

4.2 稀土元素特征

闪长玢岩稀土总量为 $219.04 \times 10^{-6} \sim 338.08 \times 10^{-6}$ 。其中, 轻重稀土比为 13.29~20.74, 平均值为 17.05。Zr 含量为 $218.8 \times 10^{-6} \sim 262.66 \times 10^{-6}$, Y 含量为 $17.3 \times 10^{-6} \sim 20.79 \times 10^{-6}$ (表 1), Nb 异常值 0.16~0.25, (La/Yb)_N 值为 21.21~43.34, 表明闪长玢岩轻稀土富集, 轻、重稀土分异程度较大, 整体表现为右倾型, 较陡(图 3a)。其中, 样品的 δ_{Eu} 值为 0.84~0.93, 负异常不明显, 说明斜长石结晶分异作用较弱(刘军等, 2022)。大悟地区的闪长玢岩样品脉稀土配分模式总体同安徽庐枞地区的闪长玢岩类似, 显示为右倾型特征, 稀土模式表明 LREE 富集、HREE 亏损, 但庐枞盆地的样品稀土配分更平缓。

4.3 微量元素特征

微量元素蛛网图显示闪长玢岩的微量元素分配型式整体变化趋势相近(图 3b), 亏损高场强元素 Nb、Ta、Hf、Ti, 富集元素 Gd、Nd、Sr、Th, 可能与俯冲板

片形成的熔体有关。庐枞盆地闪长玢岩的蛛网图也表现出亏损高场强元素 Nb、Ta、Hf、Ti, 大离子亲石元素 Th 等富集, Sr 元素不同程度亏损, 可能受到了地幔交代作用和斜长石的分离结晶作用的影响(汪晶等, 2014)。

5 讨论

5.1 成岩时代

野外出露特征显示闪长玢岩脉晚期侵入至花岗斑岩体中, 因此其形成时代应该略晚于或晚于该花岗斑岩结晶年代。曹正琦(2016)通过锆石 U-Pb 定年测试获得研究区花岗斑岩的侵位年龄为 $(130.8 \pm 1.8) \text{Ma}$, 本研究中的闪长玢岩岩浆结晶年龄应晚于花岗斑岩侵位年龄。范裕等(2010)在宁芜盆地中利用 LA-ICP-MS 同位素定年方法获得闪长玢岩中同位素锆石 U-Pb 年龄为 $(130.2 \pm 2.0) \text{Ma}$ 。黄丹峰等(2010)在大别山北缘利用 SHRIMP 同位素定年方法得到闪长玢岩中同位素锆石 U-Pb 年龄为 $(129.1 \pm 2.2) \text{Ma}$ 。综上所述, 西大别大悟地区闪长玢岩的形成很可能约为 130 Ma。

5.2 脉岩成因

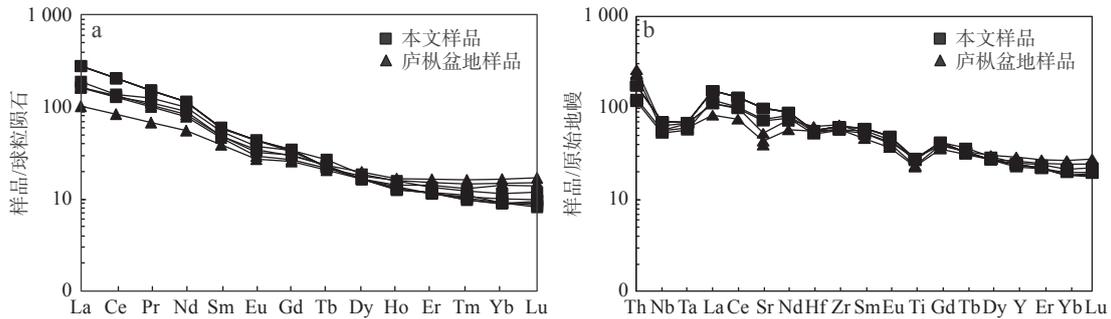
闪长玢岩的岩石地球化学烧失量为 3.62%~7.83%, 表明样品遭受一定程度蚀变。Nb、Ti、Zr 等不相容元素具有活动性小, 对岩石风化、交代和蚀变等

表1 闪长玢岩主量元素、微量元素、稀土元素分析结果表

Tab. 1 Analysis results of major elements, trace elements and rare earth elements of diorite porphyrite

样号	D2073/1	D2073/2	D2073/3	D2073/4	D2073/5	D4078/4	BZK21-02	BZK21-03	BZK21-04
岩性	闪长玢岩								
Na ₂ O	1.82	3.78	3.86	2.12	3.57	1.92	4.41	4.6	3.21
MgO	5.38	4.81	4.63	5.16	4.78	5.49	2.24	2.7	3.39
Al ₂ O ₃	14.04	14.47	14.65	14.11	14.52	14.01	15.18	15.23	17.05
SiO ₂	49.97	54.64	55.01	52.23	52.06	50.04	52.12	53.24	56.12
P ₂ O ₅	0.52	0.79	0.8	0.58	0.61	0.54	0.35	0.59	0.51
K ₂ O	4.39	3.41	3.69	3.49	3.52	4.26	3.1	2.93	4.73
CaO	5.93	4.7	5.06	4.65	4.91	6.17	3.33	4.72	1.86
TiO ₂	1.23	1.15	1.14	1.09	1.12	1.22	0.82	0.84	0.87
MnO	0.15	0.1	0.1	0.11	0.13	0.16	0.32	0.38	0.17
Fe ₂ O ₃	2.28	0.93	0.93	0.91	0.96	2.37	9.31	6.64	7.45
FeO	5.4	0.79	0.79	0.81	0.8	5.25	4.22	3.9	5.24
H ₂ O ⁺	3.14	0.28	0.16	0.19	0.25	3.28			
CO ₂	5.25					4.28			
LOST	7.83	4.68	3.62	4.57	3.91	7.55	8.27	7.56	4.53
Th	6.72	12.1	12.09	12.05	12.11	5.98	21	19.96	25
Nb	13.94	20.73	20.12	20.69	20.41	12.25	14.6	13.63	17.1
Ta	1.07	1.14	1.14	1.12	1.15	0.81	0.92	0.89	1.1
Sr	625.32	1 102.02	1 112.55	1 107.05	1 109.42	670.4	213	254.17	363
Zr	218.8	262.66	258.98	259.13	260.32	223.3	241	229.39	280
Hf	5.09	5.96	5.93	5.95	5.91	5.57	6	5.81	7.17
Eu	1.96	2.53	2.52	2.55	2.57	2.15	1.65	1.52	1.83
Yb	1.46	1.32	1.27	1.31	1.29	1.69	2.23	2.12	2.5
La	45.68	81.43	81.61	81.47	81.58	53.09	44.9	27.19	45.4
Ce	91.52	151.97	153.01	152.03	152.86	97.71	90.9	56.98	95.2
Pr	11.72	16.39	16.31	16.47	16.53	13.37	10.5	6.85	11
Nd	45.71	59.27	59.76	59.35	59.61	51.32	39.6	27.05	42.2
Sm	7.57	9.54	9.31	9.42	9.51	8.57	7.2	5.98	7.6
Eu	1.96	2.53	2.52	2.55	2.53	2.15	1.65	1.52	1.83
Gd	5.89	6.6	6.92	6.83	6.97	6.81	5.28	5.03	5.98
Tb	0.82	0.79	0.78	0.79	0.77	0.96	0.76	0.72	0.82
Dy	3.87	3.88	3.87	3.86	3.89	4.4	4.21	3.86	4.69
Ho	0.7	0.65	0.66	0.64	0.66	0.82	0.83	0.73	0.87
Er	1.69	1.71	1.71	1.75	1.73	2.01	2.29	2.13	2.51
Tm	0.24	0.23	0.22	0.25	0.22	0.28	0.34	0.3	0.38
Yb	1.46	1.32	1.27	1.31	1.29	1.69	2.23	2.12	2.5
Lu	0.22	0.19	0.2	0.18	0.21	0.27	0.35	0.32	0.4
Y	17.3	19.48	19.02	19.43	19.29	20.79	24.7	22.45	26.9
总和	236.35	355.98	357.17	356.33	357.65	264.24	235.74	163.23	248.28
LREE/HREE	9.45	13.62	13.97	13.64	13.79	8.75	6.34	4.48	6.06
(La/Yb) _N	21.09	21.18	41.59	43.32	41.93	42.64	13.57	8.65	12.24
δEu	0.87	0.84	0.91	0.93	0.92	0.93	0.81	0.87	0.89

注：主量元素含量%，稀土与微量元素含量10⁻⁶。



庐枞盆地样品转引自汪晶等(2014); 球粒陨石和原始地幔标准化值据 Mcdonough 等(1995)

图 3 闪长玢岩球粒陨石标准化稀土配分模式(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig. 3 (a) Normalized REE distribution pattern of diorite porphyrite chondrite and (b) primitive mantle normalized trace element spider web

作用过程反应不灵敏, 利用与其他元素的图解, 讨论相关元素的活动特点(Gibson et al., 1982), 可以为岩石源区地幔性质和成分提供信息。

脉岩是母岩浆的代表, 能有效反映源区物质组成(Westerman et al., 2003), 闪长玢岩脉具有较低 SiO₂ 含量(49.97%~55.01%)、MgO 含量(4.63%~5.49%), 较高 Al₂O₃ 含量(14.01%~14.65%)、FeO 含量(1.63%~7.45%), 壳源混染会使岩浆中 SiO₂ 含量明显增高、降低 MgO 值, 但脉岩的 SiO₂-MgO 不相关, 说明壳源混染对脉岩影响不大。其次脉岩中微量元素、稀土元素含量变化不大, 表明脉岩的岩浆在上升时没有受到壳源混染作用的干扰。轻稀土富集, 轻、重稀土分异的程度较大, 整体表现为较陡右倾型, (La/Yb)_N 值为 21.21~43.34, δEu 值为 0.84~0.93, 负异常不明显, 表明在岩浆源区没有残留斜长石, 而存在石榴子石和金红石残留, 说明脉岩的岩浆来自深度较大(俞胜等, 2022)。Mg[#] 值为 60.17~90.19, 大于下地壳的熔融产物 Mg[#] 值 < 40(Rapp et al., 1995); Nb/Ta 值为 13.06~18.47, 大于地壳平均值(11.4)(Rudnik et al., 2003), 接近于地幔值(17.5±2)(Hofmann, 1988; Green, 1995); Zr/Hf 值为 40.09~44.05, 接近于地幔值(36.7), 样品投点均接近于 Zr-Y 图解的富集地幔区域(图 4), 表明脉岩的岩浆源区可能来自于富集地幔, 与安徽庐枞盆地闪长玢岩的 Sr-Nd-Pb 同位素特征反映富集地幔岩浆源区的认识较为一致(汪晶等, 2014)。

从三叠纪开始, 扬子板块俯冲碰撞华北板块后, 区域岩石圈地幔成分变化较大, 早白垩世时期, 中国东部岩石圈拉张构造事件对大别造山带产生影响, 大量镁铁-超镁铁质岩体侵位至西大别地区, 其同位素显示出富集特征(εNd_t < -12), Zr-Y 判别图解显示闪长玢岩样品均靠近富集地幔(图 4)。以上特征表明区

域岩浆源区为富集地幔(王世明等, 2010)。

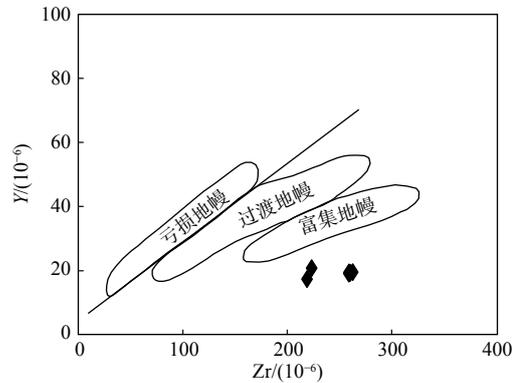


图 4 闪长玢岩 Zr-Y 判别图解(据 Maitre et al., 1989)

Fig. 4 Zr-Y discrimination diagram of diorite porphyrite

微量元素蛛网图分配型式的变化趋势表现为整体相近, 亏损不相容元素 Nb、Ta、Hf、Ti; 富集亲石元素 Sr, 其中不相容元素 Nb、Ta 的亏损是由板块俯冲时岩浆喷发造成(Gill, 1981), 脉岩 Nb 异常值范围 0.16~0.25, Nb 的负异常特征通常被认为是俯冲带上火山岩或者陆壳岩石的明显特征(Jahn et al., 1999), 微量元素特征可能是与俯冲板片作用相关的岩石圈地幔部分熔融有关(Pearce et al., 1995; 彭松柏等, 2016), 与庐枞盆地中受古板块俯冲交代作用影响而形成的火山岩类似(袁峰等, 2008), 岩石中 Sr 含量为 625.32×10⁻⁶~1 112.55×10⁻⁶, 明显高于地幔值(17.8×10⁻⁶)(Taylor et al., 1985), 暗示脉岩的岩浆源区受到了俯冲板片流体交代作用的影响, 使 Sr 含量增高(McCulloch et al., 1991), 深俯冲大陆岩石圈可能在上地幔顶部滞留几十甚至上百个百万年之后, 才形成熔融岩浆(赵子福等, 2004)。从闪长玢岩的野外空间分布形态(图 2a、图 2b), 间接反映了地区断裂构造结构面力学

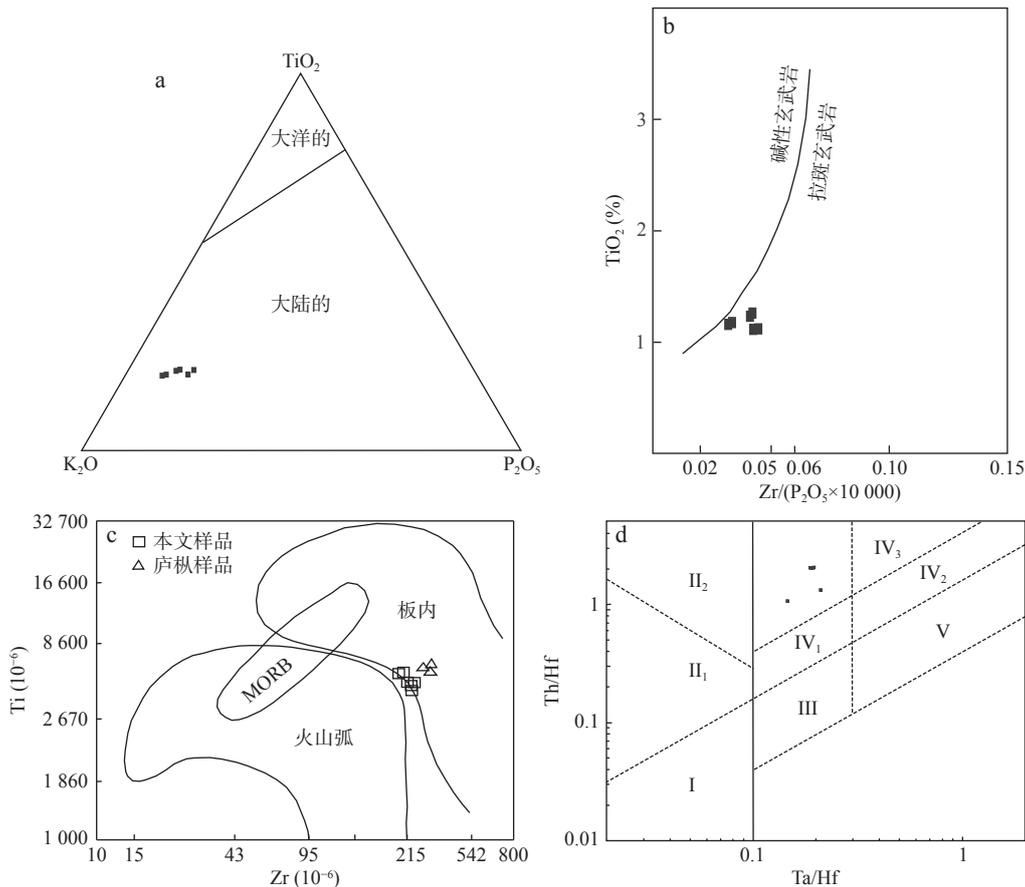
性质和断裂结构特征,大致可以辨别该脉岩充填的裂隙具剪张性,符合镁铁质岩浆贯入长英质岩浆结晶度及流变学特征的4个阶段混合模式,第一阶段为长英质岩浆结晶;第二阶段为花岗质岩浆近处于固态,在应力作用下产生岩石裂隙;第三阶段为具流变特征的基性岩浆注入到已经形成的花岗岩石裂隙,并在局部与其发生化学反应,形成具两者特性的复合岩墙,闪长玢岩呈角砾或锯齿状斑块产出;第四阶段为花岗质岩石已经固结,同时较为连续的基性岩墙(Fernandez et al., 1991)。区域深部的岩浆源区可能存在镁铁质和花岗质2种类型岩浆,前者可能稍晚侵位至后者,两者进一步进行混合作用。

综上所述,闪长玢岩脉的地球化学特征综合显示其岩浆来源于富集地幔,但俯冲而来的板片流体与其

发生交代作用,使基性脉岩兼具俯冲作用的地球化学特征,该脉岩的岩浆源区可能受到了富集地幔与俯冲板片流体交代作用的影响,花岗斑岩、闪长玢岩为造山后伸展-拉张环境下形成的脉岩组合。

5.3 构造环境

脉岩是研究深部岩石圈动力演化过程的重要“探针”(Poland et al., 2004),脉岩一般认为是岩浆在区域性地壳在拉张作用下而形成,对研究区域构造演化具有十分重要的意义(Halls, 1982),闪长玢岩脉岩地球化学特征为中基性岩, $\text{TiO}_2\text{-K}_2\text{O-P}_2\text{O}_5$ 判别图解显示样品均落于大陆玄武岩区(图 5a), $\text{TiO}_2\text{-Zr}(\text{P}_2\text{O}_5 \times 10\ 000)$ 图解显示脉岩样品属于拉斑玄武岩系列(图 5b),与庐枞盆地的样品均为板内玄武岩(图 5c), Th/Nb 值为 $0.48 \sim 0.60$, Nb/Zr 值为 $0.05 \sim 0.08$,符合大陆拉张带



I. 板块发散边缘区(N-MORB); II1.大洋岛弧玄武岩; II2.陆缘岛弧及陆缘火山弧玄武岩; III.大洋板内洋岛、海山玄武岩区及 T-MORB、E-MORB 区; IV1.陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区; IV2.陆内裂谷碱性玄武岩区; IV3.大陆拉张带(或初始裂谷)玄武岩区; V.地幔热柱玄武岩区

图 5 $\text{TiO}_2\text{-K}_2\text{O-P}_2\text{O}_5$ 判别图解(a)(Pearce, 1975); $\text{TiO}_2\text{-Zr}(\text{P}_2\text{O}_5 \times 10\ 000)$ 判别图解(b)(Winchester et al., 1976); Ti-Zr 判别图解(c)(Pearce et al., 1973); Th/Hf-Ta/Hf 判别图解(d)(据汪云亮等, 2001)

Fig. 5 (a) Discriminant diagram of $\text{TiO}_2\text{-K}_2\text{O-P}_2\text{O}_5$, (b) Discriminant diagram of $\text{TiO}_2\text{-Zr}(\text{P}_2\text{O}_5 \times 10\ 000)$, (c) Ti-Zr discriminant diagram, and (d) Th/Hf-Ta/Hf discrimination diagram

玄武岩特征($0.27 < \text{Th}/\text{Nb} < 0.67$, $\text{Nb}/\text{Zr} > 0.04$) (孙书勤等, 2003); 且脉岩样品均落于 Th/Hf-Ta/Hf 图解的大陆拉张带玄武岩区(图 5d)。

大别地区位于华北板块与扬子板块之间, 是苏鲁-大别超高压变质带的重要组成部分, 经历了洋-陆碰撞、陆-陆碰撞等构造演化过程。前人研究显示, 大别地区的高压与超高压榴辉岩相反映了扬子地块陆壳向北俯冲至华北陆块之下, 240~220 Ma 是其变质作用发生的重要时期, 即大别造山带形成时间 (Li et al., 1993; Hacker et al., 1998; 李曙光等, 2005; 刘福来等, 2006); 碰撞造山导致地壳增厚 (Leech et al., 2001), 随后出现应力松弛, 区域应力状态从挤压转换到伸展, 由伸展作用所引起的花岗岩侵位, 通常会稍晚于区域地壳部分熔融, 所以加厚地壳部分熔融作用发生时间通常被当作区域构造体制开始转换时间的最低值 (David et al., 2001; Whitney et al., 2003)。马昌前等 (2003) 通过研究大别地区镁铁质岩石侵位年代学和花岗岩侵位年代学以及分别分析其岩石地化综合特征, 认为 135 Ma 是区域地壳构造体制的转换时间。吴元保等 (2001) 以北大别地区岩石发生混合岩化时的年代学证据为依据, 分析认为 (137 ± 4) Ma 是大别地区从挤压向伸展发生转换的时间; 并提出早白垩世大别造山带发生伸展垮塌, 发生大量中酸性花岗岩侵位。吴开彬等 (2013) 通过对比西大别石鼓尖岩体、天堂寨岩体、薄刀峰岩体的 Sr 同位素比值及结晶年龄, 将其分为三期, 第一期石鼓尖岩体具同构造侵位变形特征, 反映了挤压环境; 第二期天堂寨岩体, 变形发育在接触带和剪切带内, 暗示着大别造山带的伸展垮塌; 第三期薄刀尖岩体无变质变形, 被认为是形成于大别造山带垮塌之后, 反映了伸展环境。根据笔者对岩石地球化学特征研究及野外地质特征, 认为大悟地区闪长玢岩为板内拉斑玄武岩系列, 反映了大陆拉张构造环境, 结合闪长玢岩脉侵位时代为早白垩世。因此, 大悟地区早白垩世闪长玢岩形成于造山后大陆拉张环境, 与前人认为大别造山带伸展时期较为一致 (吴开彬等, 2013)。

6 结论

(1) 岩石地球化学特征显示, 闪长玢岩属于中基性岩, 为大陆拉斑玄武岩系列; 稀土元素有较高的总量, 稀土配分模式显示强烈富集轻稀土的右倾型, 亏损不相容元素 Nb、Ta、Hf、Ti; 大离子亲石元素 Sr 富集。

(2) 研究区闪长玢岩脉的岩浆源区可能受到了俯冲板片流体交代作用的影响, 地球化学特征综合显示其可能来源于富集地幔;

(3) 脉岩野外地质特征及前人研究资料表明, 闪长玢岩侵位于早白垩世, 为大别造山后伸展-拉张环境下形成的脉岩。

致谢: 衷心感谢中国地质调查局西安地质调查中心陈隽璐正高级工程师对论文写作的指导!

参考文献(References):

- 曹正琦. 湖北大悟地区晚中生代脉岩及控矿构造研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2016, 1-147.
- CAO Zhengqi. Study on Late Mesozoic dike rocks and ore-controlling structures in Dawu area, Hubei Province [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016, 1-147.
- 范裕, 周涛发, 袁峰, 等. 宁芜盆地闪长玢岩的形成时代及对成矿的指示意义 [J]. 岩石学报, 2010, 26(9): 2715-2728.
- FAN Yu, ZHOU Taofa, YUAN Feng, et al. Geochronology of the diorite porphyrites in Ning-Wu basin and their metallogenic significances [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(9): 2715-2728.
- 葛宁洁, 侯振辉, 李惠民, 等. 大别造山带岳西沙村镁铁超镁铁岩体的锆石 U-Pb 年龄 [J]. 科学通报, 1999, 44(19): 2110-2114.
- GE Ningjie, HOU Zhenghui, LI Huiming, et al. Zircon U-Pb age of mafic ultramafic granites in Yuexisha village, Dabie orogenic belt [J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(19): 2110-2114.
- 黄丹峰, 罗照华, 卢欣祥. 大别山北缘金刚台火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及构造意 [J]. 地学前缘, 2010, 17(1): 1-9.
- HUANG Danfeng, LUO Zhaohua, LU Xinxiang. Zircon U-Pb Dating of the Linglong Volcanic Deposit in the Northern Dabie Mountains [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(1): 1-9.
- 刘清泉, 邵拥军, 张智慧, 等. 大别山姚冲花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素及地质意义 [J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 479-491.
- LIU Qingquan, SHAO Yongjun, ZHANG Zhihui, et al. Zircon U-Pb Age, Hf Isotope and Geochronology Significance of the Yaochong Granite in the Dazhuangzi Gold Deposit, Shandong Province [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(2): 479-491.
- 刘福来, 薛怀民, 许志琴, 等. 大别超高压变质带的进变质, 超高压和退变质时代的准确限定: 以双河大理岩中榴辉岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年为例 [J]. 岩石学报, 2006, 22(7): 1761-1778.
- LIU Fulai, XUE Huaiming, XU Zhiqing, et al. Precise restriction of

- progressive metamorphic, ultra-high pressure and retrograde metamorphic ages in the Dabie UHP metamorphic belt: A case study of SHRIMP zircon U-Pb dating of eclogites in Shuanghe marble[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(7): 1761-1778.
- 刘军, 息朝庄, 黄波, 等. 柴达木西北缘大通沟南山北闪长岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *西北地质*, 2022, 55(2): 93-105.
- LIU Jun, XI Chaozhuang, HUANG Bo, et al. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of Thediorite in Datonggou Nanshanbei, Northwestern Qaidam Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(2): 93-105.
- 李曙光, 洪吉安, 李惠民, 等. 大别山辉石岩—辉长岩体的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *高校地质学报*, 1999, (3): 351-355.
- LI Shuguang, HONG Jian, LI Huiming, et al. Zircon U-Pb age of pyroxenite-gabbro pluton in Dabie mountain and its geological significance[J]. *Geological Journal of China Universities*, 1999, (3): 351-355.
- 李曙光, 李秋立, 侯振辉, 等. 大别山超高压变质岩的冷却史及折返机制[J]. *岩石学报*, 2005, 21(04): 91-98.
- LI Shuguang, LI Qiuli, HOU Zhenghui, et al. Cooling-history and reentrant mechanism of ultra-high pressure metamorphic rocks in Dabie Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(04): 91-98.
- 马昌前, 杨坤光, 明厚利, 等. 大别山中生代地壳从挤压转向伸展的时间: 花岗岩的证据[J]. *中国科学: 地球科学*, 2003, 33(9): 811-827.
- 穆可斌, 裴先治, 李瑞保, 等. 南秦岭白龙江群中花岗岩脉群年代学、地球化学特征及地质意义[J]. *西北地质*, 2019, 52(3): 111-135.
- MU Kebin, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of the Granite Veins in the Bailongjiang Group, South Qinling[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(3): 111-135.
- 彭松柏, 刘松峰, 林木森, 等. 华夏早古生代俯冲作用(II): 大别山高镁-镁质安山岩新证据[J]. *地球科学*, 2016, 41(6): 931-947.
- PENG Songbo, LIU Songfeng, LIN Mushen, et al. Early Paleozoic subduction in the Cathaysia (II): New evidence for Dabie high magnesium and magnesian andesite[J]. *Earth Science*, 2016, 41(6): 931-947.
- 戚学祥, 旷宏伟, 陈培良, 等. 长江中下游燕山期侵入岩地球化学特征及其地质意义[J]. *资源调查与环境*, 2002, 23(1): 8.
- QI Xuexiang, KUANG Hongwei, CHEN Peiliang, et al. Geochemical characteristics and geological significance of Yanshanian intrusive rocks in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Resources Survey and Environment*, 2002, 23(1): 8.
- 任志, 周涛发, 袁峰, 等. 安徽沙坪沟铜矿区中酸性侵入岩期次研究—年代学及岩石化学约束[J]. *岩石学报*, 2014, 30(4): 1097-1116.
- REN Zhi, ZHOU Taofa, YUAN Feng, et al. Geochronology and Geochemical Constraints of the Xilaokou Gold Deposit, Shandong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(4): 1097-1116.
- 索书田, 桑隆康, 韩郁箐, 等. 大别山前寒武纪变质地体岩石学与构造学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993.
- SUO Shutian, SANG Longkang, HAN Yuqing, et al. Petrology and Tectonics of Precambrian Metamorphic Terrane in Dabie Mountains[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993.
- 孙书勤, 汪云亮, 张成江. 玄武岩类岩石大地构造环境的 Th、Nb、Zr 判别[J]. *地质论评*, 2003, 19(01): 40-47.
- SUN Shuqing, WANG Yunliang, ZHANG Chengjiang. Discrimination of Th, Nb, Zr in tectonic setting of basaltic rocks[J]. *Geological Review*, 2003, 19(01): 40-47.
- 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[J]. *岩石学报*, 2001, 17(3): 413-421.
- WANG Yunliang, ZHANG Chengjiang, XIU Shuzi. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(3): 413-421.
- 王世明, 马昌前, 王琳燕, 等. 大别山早白垩世基性脉岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及成因[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2010, (04): 572-584.
- WANG Shiming, MA Changqian, WANG Lingyan, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of the Early Cretaceous basic dike rocks in the Dabie Mountains, Shandong Province[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 2010, (04): 572-584.
- 汪晶, 吴明安, 李小东, 等. 庐枞盆地早白垩世闪长岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其成矿指示意义[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(4): 547-561.
- WANG Jing, WU Mingan, LI Xiaodong, et al. Zircon U-Pb Dating, Geochemical Characteristics of Early-Cretaceous Diorite-Porphyrates in Luzhong Basin and Their Implications for Mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(4): 547-561.
- 吴开彬, 邓新, 杨坤光. 北大别白垩纪花岗岩多期侵位与造山带演化的关系[J]. *地球科学*, 2013, (S1): 43-52.
- WU Kaining, DENG Xin, YANG Kunguang. Relationship between multi-stage emplacement of Cretaceous granites and evolution of orogenic belt in Beibei[J]. *Earth Science*, 2013, (S1): 43-52.
- 吴元保, 陈道公, Deloué E, 等. 北大别片麻岩的锆石 U-Pb 年龄离子探针测定及其地质意义[J]. *地质论评*, 2001, 47(3):

- 239–244.
- WU Yuanbao, CHEN Ddaogong, Deloule E, et al. Zircon U-Pb Dating and Ion Probe Determination of Gneiss in Dazhuangzi Gold Deposit, Shandong Province and Its Geological Significance[J]. *Geological Review*, 2001, 47(3): 239–244.
- 袁峰, 周涛发, 范裕, 等. 庐枞盆地中生代火山岩的起源、演化及形成背景[J]. *岩石学报*, 2008, 24(8): 1691–1702.
- YUAN Feng, ZHOU Taofa, FAN Yu, et al. Source, Evolution and Tectonic Setting of Mesozoic Volcanic Rocks in Luzong Basin, Anhui Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(8): 1691–1702.
- 赵子福, 郑永飞, 魏春生, 等. 大别山沙村和椒子岩基性-超基性岩锆石 U-Pb 定年、元素和碳氧同位素地球化学研究北大别片麻岩的锆石 U-Pb 年龄离子探针测定及其地质意义[J]. *高校地质学报*, 2003, 9: 139–162.
- ZHAO Zifu, ZHENG Yongfei, WEI Chunsheng, et al. Zircon U-Pb dating, element and carbon and oxygen isotopic geochemistry of shacun hejiaozhi basic-ultrabasic rocks in Dabie Mountains and its geological significance[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2003, 9: 139–162.
- 赵子福, 郑永飞, 魏春生, 等. 大别山中生代中酸性岩浆岩锆石 U-Pb 定年、元素和氧同位素地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2004, 20(5): 1151–1174.
- ZHAO Zifu, ZHENG Yongfei, WEI Chunsheng, et al. Zircon U-Pb dating and oxygen isotopic geochemistry of the Mesozoic magmatic rocks in the Dabie Mountains, Shandong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(5): 1151–1174.
- 俞胜, 赵斌斌, 贾轩, 等. 北山造山带南缘一条山北闪长岩地球化学、年代学特征及其构造意义[J]. *西北地质*, 2022, 55(4): 267–279.
- YU Sheng, ZHAO Binbin, JIA Xuan, et al. Geochemistry, Geochronology Characteristics and Tectonic Significance of Yitiaoshan Diorite in the Southern Margin of Beishan Orogenic Belt[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(4): 267–279.
- 张凯, 王居里, 汪佩佩, 等. 南秦岭太平沟铜(金)矿相关花岗岩体锆石 U-Pb 年代学及岩石成因[J]. *西北地质*, 2020, 53(4): 73–85.
- ZHANG Kai, WANG Juli, WANG Peipei, et al. Zircon U-Pb Geochronology and Petrogenesis of Taipinggou Copper (Gold)-related Granites, South Qinling[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(4): 73–85.
- Chen B, Jahn B M, Wei C J. Petrogenesis of Mesozoic granitoids in the Dabie UHP complex, Central China: trace element and Nd-Sr iso-tope evidence[J]. *Lithos*, 2002, 60: 67–88.
- David A F, Carl S, Mark F, et al. Relationships between crustal partial melting, plutonism, orogeny, and exhumation: Idaho-Bitterroot batholith - ScienceDirect[J]. *Tectonophysics*, 2001, 342(3–4): 313–350.
- Fernandez A N and Barbarin B. Relative rheology of coeval mafic and felsic magmas: Nature of resulting interaction processes. Shape and mineral fabrics of mafic microgranular enclaves. In: Didier J, Barbarin B (eds.) [J]. *Enclaves and Granite Petrology*, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo: Elsevier. 1991, 263–275.
- Gibson I L, Kirkpatrick R J, Emmerman R, et al. The trace element composition of the lavas and dikes from a 3-km vertical section through the lava pile of eastern Iceland[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, 87: 6532–6546.
- Gill J. Orogenic andesites and plate tectonics[M]. Springer-Verlag, 1981.
- Green T H. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3–4): 347–359.
- Halls H C. The importance and potential of mafic dyke swarms in studies of geodynamic processes[J]. *Geoscience Canada*, 1982, 9(3): 145–154.
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, et al. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1998, 161(1–4): 215–230.
- Hacker B R, Wang Q C. Ar/Ar geochronology of ultrahigh-pressure metamorphism in central China[J]. *Tectonics*, 1995, 14: 994–1006.
- Hofmann P F. United Plates of America, the birth of a craton: Early Proterozoic assembly and growth of Laurentia[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1988, 16(1): 543–603.
- Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, et al. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-Ultramafic intrusion of the northern Dabie complex, central china[J]. *Chemical Geology*, 1999, 157(1–2): 119–146. doi:10.1016/s0009-2541(98)00197-1.
- Leech M L. Arrested orogenic development: eclogitization, delamination, and tectonic collapse[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2001, 185(1–2): 149–159.
- Maitre RW L, Bateman P, Dudek A, et al. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms[M]. Oxford: Blackwell, 1989, 1–193.
- Mcculloch M T, Gamble J A. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1991, 102(3–4): 358–374.
- Mcdonough W F, Sun S S. The composition of the Earth[M]. Chem-

- ical Geology, 1995, 120(3-4): 223-253.
- Ma C Q, Li Z C, Ehlers C, et al. A post-collisional magmatic plumbing system; Mesozoic granitoid plutons from the Dabieshan high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic zone, east-central China[J]. *Lithos*, 1998, 45: 431-456.
- Pearce J A, Peate D W. Tectonic Implication of the composition of volcanic ARC magmas[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1995, 23(1): 251-285.
- Pearce T H. The TiO_2 - K_2O - P diagram : A method of discriminating between oceanic and nonoceanic basalt[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1975, 24(3): 419-426.
- Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1973, 19(2): 290-300.
- Poland M P, Fink J H, Tauxe L. Patterns of magma flow in segmented silicic dikes at summer con volcano, Colorado: AMS and Thin Section Analysis[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2004, 219(1-2): 155-169.
- Li S, Xiao Y, Liou D, et al. Collision of the North China and Yangtze Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes[J]. *Chemical Geology*, 1993, 109(1-4): 89-111.
- Rapp RP, Watson E B. Dehydration melting of meta-basalt at 8-32kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36(4): 891-931.
- Rudnik R, Gao S. Composition of the continental crust. In: rudnik, R., ed. , *The crust Treatise on geochemistry*[J]. *Elsevier, Amsterdam*, 2003: 3-164.
- Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution[J]. *The Journal of Geology*, 1985, 94(4): 57-72.
- Whitney D L, Teyssier C, Fayon A K, et al. Tectonic controls on metamorphism, partial melting, and intrusion: timing and duration of regional metamorphism and magmatism in the Nide Massif, Turkey[J]. *Tectonophysics*, 2003, 376(1-2): 37-60.
- Westerman D S, Dini A, Innocenti F, et al. When and where did hybridization occur ?the case of the monte capanne pluton, italy[J]. *Atlantic Geology*, 2003, 39(2): 147-162.
- Winchester J A, Floyd P A. Geochemical magma type discrimination: application to altered and metamorphosed basic igneous rocks[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1976, 28(3): 459-469.
- Xu haijin, Ma Chanqian, Ye Kai. Early Cretaceous granitoid and their implications for Collapse of the Dabie orogen, eastern China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemistry[J]. *Chemical Geology*, 2007, 240(3-4): 238-272.
- Zhao Z F, Zheng Y F, Wei C S, et al. Zircon U- Pb Age, Element and C-O isotope geochemistry of Post-collisional Mafic-Ultramafic Rocks from the Dabie Orogen in East-central China[J]. *Lithos*, 2005, 83(1-2): 1-28.