

赞皇斜长角闪片麻岩 地球化学特征及其构造环境探讨

肖玲玲, 蒋宗胜

中国科学院 研究生院 地学院, 北京 100049

摘要: 赞皇变质杂岩位于华北克拉通中部造山带的中南段, 斜长角闪片麻岩是构成其前寒武纪基底的主要变质岩之一。通过野外地质调查、岩相学以及地球化学特征研究, 发现赞皇斜长角闪片麻岩的原岩为拉斑-钙碱玄武质岩石, 其稀土总量变化较大($41.38 \times 10^{-6} \sim 232.55 \times 10^{-6}$), 轻稀土轻微富集, 稀土配分模式近平坦, 几乎无 Eu 异常。原始地幔标准化微量元素蛛网图显示其富集大离子亲石元素 K、Rb、Ba, 高场强元素 Nb、Ta 存在明显负异常, Ti 弱亏损。地球化学特征和多种构造环境判别图解均表明, 形成环境类似于现代大陆边缘岛弧构造环境, 推测其形成与华北克拉通西部陆块与东部陆块间的俯冲碰撞有关。

关键词: 华北克拉通; 中部带; 赞皇变质杂岩; 斜长角闪片麻岩; 构造判别

中图分类号: P588.34+5 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2010)04-0339-09

Geochemistry and Tectonic Environment of Amphibolites of the Zanzhuang Metamorphic Complex

XIAO Ling-ling, JIANG Zong-sheng

The Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Amphibolites, one of the kinds of Precambrian basement rocks, are exposed in the south-middle Zanzhuang Metamorphic Complex, central-south segment of the Trans-North China Orogen. These metamorphic rocks were carefully studied through field investigations and petrographical and geochemical analyses. It was found that protoliths of the Zanzhuang amphibolites are calc-alkaline and tholeiitic rocks with a large range of ΣREE ($41.38 \times 10^{-6} \sim 232.55 \times 10^{-6}$) and weak LREE enrichment. The multi-element variation results showed that K, Rb and Ba were relatively concentrated, Nb and Ta were of evident depletion while Ti was of weak depletion. Geochemical characteristics and various relevant geochemical discrimination diagrams showed that the Zanzhuang amphibolites were formed in volcanic arcs of continental margin similar to the current continental margin, which was resulted from the subduction between the Western Block and the Eastern Block.

Key words: North China Craton; Trans-North China Orogen; Zanzhuang metamorphic complex; amphibolite; tectonic discrimination

赵国春等按照变质作用演化历史的不同, 将整个华北克拉通基底划分为三个部分, 即东部陆块、西部陆块、两陆块之间的华北中部构造(造山)带^[1, 2](图1)。目前, 华北中部造山带作为一条“焊接”东、西部陆块的碰撞造山带, 已被许多学者认可^[1~13]。在俯冲碰撞作用发生之前, 西部陆块和东部陆块之间存在着一个古大洋, 随着西部陆块向东部陆块的俯冲, 在东部陆块的西缘(活动大陆边缘)发生大量岩

浆的侵入和喷发, 导致大陆边缘岩浆弧、岛弧以及弧后盆地的形成, 构成了中部带的基底岩石框架^[14]。对中部带北段的一些变质杂岩(冀北、怀安、宣化、恒山、阜平、五台)的大量研究表明, 这些杂岩大多形成于由古大洋岩石圈向东部陆块下面俯冲所形成的大陆边缘弧、日本式岛弧或弧后盆地环境^[14, 15]。

相比之下, 中部带中南段的研究则显得较为薄弱, 地球化学和变质作用演化方面资料报导甚少。

收稿日期: 2009-07-30 收到, 2010-04-21 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40672129, 40730315); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(XMXX280734)

第一作者简介: 肖玲玲(1982—), 女, 博士研究生, 变质地质学专业。E-mail: xiaoling105@mails.gucas.ac.cn.

那么, 华北中部造山带中南段(赞皇、中条、登封、太华) 是否也像中部带北段杂岩一样, 卷入了东部陆块和西部陆块之间的俯冲碰撞? 如果发生了碰撞, 那么发生于什么时代? 这些问题制约着我们对中部带构造形态的了解, 也限制了对整个华北克拉通基底演化的全面认识。本文以赞皇变质杂岩为研究对象, 详细研究了基底的主要变质岩石类型——斜长角闪片麻岩的地球化学。通过主量元素、微量元素分析和相应的地球化学特征, 恢复原岩类型, 探讨其形成时的构造环境, 为揭示华北克拉通中部带的构造格局和演化历史提供新的证据。前人已在赞皇变质杂岩的构造演化及其年代学方面做过一些研究工作^[16~21], 为我们的工作提供了研究基础。

1 区域地质概况

赞皇变质杂岩主要出露于河北省境内, 位于华北克拉通中部造山带的中南段^{1,2)} (图1) 阜平杂岩

南部, 是研究华北克拉通东、西部陆块碰撞造山作用的重要窗口之一。赞皇变质杂岩出露面积达 3900 km², 总体呈一中部宽、两端收拢的“纺锤”形, 长轴北端近南北向, 南端呈 NNE- SSW 走向。赞皇变质杂岩可分为 3 个区块^[21]: 西部区块、中部区块和东部区块。西部区块主要由 TTG 片麻岩、混合岩、深熔花岗岩组成; 中部区块主要由石英片岩、火山沉积岩系、泥质片麻岩、正片麻岩-混合岩, 以及大理岩组成; 东部区块与西部区块类似, 主要由 TTG 片麻岩、泥质片麻岩、斜长角闪片麻岩和混合岩组成。其中, 斜长角闪片麻岩是该区前寒武纪结晶基底的主要组成部分, 其地球化学特征和成因对研究前寒武纪华北克拉通基底的形成和演化有重要意义。

2 野外产状及岩相学特征

斜长角闪片麻岩主要分布于赞皇变质杂岩的中南部, 多以透镜体或似层状方式产出, 形态大小不一,

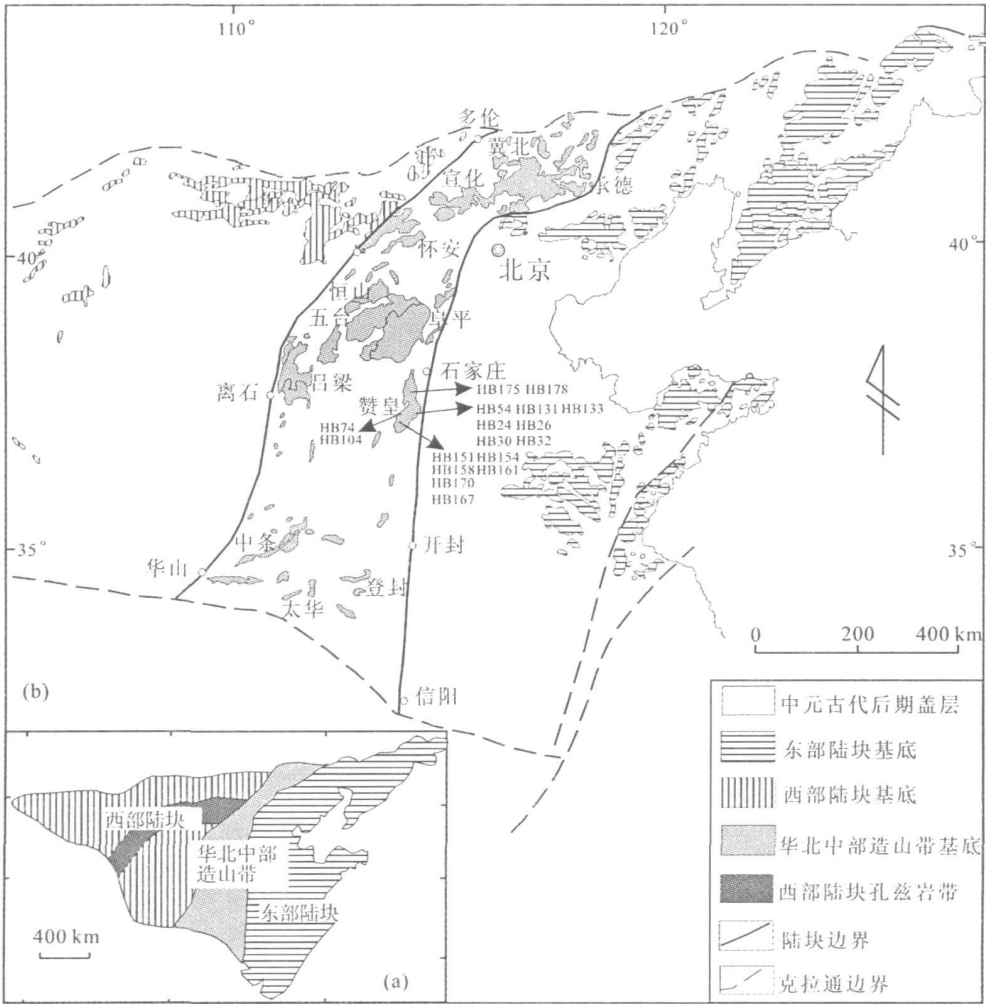


图1 华北克拉通前寒武纪地质简图(a)、赞皇变质杂岩构造位置图(b)^[3]及采样点位置
Fig. 1 Geological sketch map of the North China Craton (a), showing location of the Zanhuang metamorphic complex (b) including locations^[3]

宽约几十厘米至几米,长可达几米到上百米(图2)。斜长角闪片麻岩与围岩后期同时经历了高角闪岩相-麻粒岩相变质作用,具有协调一致的片麻理构造。



图2 斜长角闪片麻岩野外产状

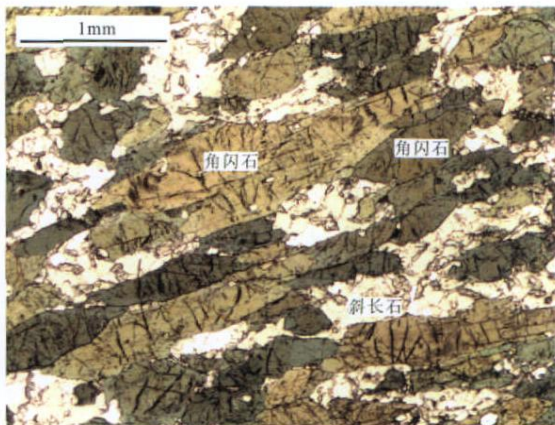
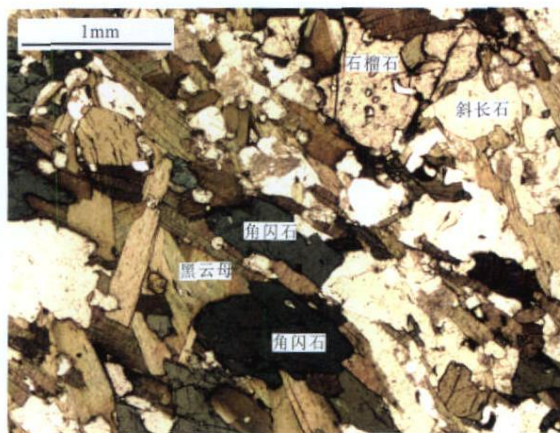
Fig. 2 The field occurrence of the Zanhuang amphibolites

斜长角闪片麻岩分含榴斜长角闪片麻岩和不含石榴子石的斜长角闪片麻岩两种。其中,含榴斜长

角闪片麻岩(图3, HB159)多呈斑状变晶结构,片麻状构造,石榴子石变斑晶常为筛状、港湾状或残块状。石榴子石内部含多种早期包裹体矿物(角闪石、斜长石、石英和钛铁矿等),部分包裹体矿物径迹与基质片麻岩方向呈大角度相交。石榴子石变斑晶外围,毫无例外地均具有明显的“白眼圈”状后成合晶(角闪石、斜长石和石英)。基质矿物定向排列构成明显的片麻理,主要有角闪石、斜长石、石英、榍石和钛铁矿等,偶见单斜辉石。

不含石榴子石的斜长角闪片麻岩(图3, HB178)多呈变晶结构,片麻状构造,组成矿物主要有角闪石、斜长石、石英、黑云母、钛铁矿、磷灰石、榍石和黄铁矿等,偶见单斜辉石。

变质地质学研究表明,赞皇斜长角闪片麻岩经历了前进变质、峰期高角闪岩相至麻粒岩相变质、峰期后的角闪岩相退变质过程^[22, 23],反映随着东、西部陆块间古洋盆的关闭、陆-弧-陆碰撞、造山及造山后快速抬升这一连续的地质过程。



左, HB159; 右, HB178

图3 代表性的斜长角闪片麻岩单偏光镜下的岩相特征

Fig. 3 Micropetrography photos of the Zanhuang amphibolites (left, HB54; right, HB178) under single polarized light

3 样品测试

野外共采集了177块各种变质岩石样品。经过岩相学研究,挑选出矿物新鲜、变质阶段发育完全、石榴子石颗粒较大且核部和边部分界明显的样品,作为年代学实验对象。为保证与年代学实验结果的对应性,表1列出了用做年代学实验的15块斜长角闪片麻岩样品的主量元素与微量元素分析结果。样品包括采自河北省邢台市邢台县皇寺镇温暖河村的HB24和HB26、小河村的HB30和HB32、卫鲁村的HB131和HB133;将军墓镇峡底村HB74、白虎庄村的HB104;城计头乡花木村的HB151和

HB154、坡底村的HB158、柏垌村的HB161;路罗镇大戈寥村的HB170;沙河市蝉房乡良峪村的HB167以及石家庄市内邱县獐么乡的HB178。

实验之前,需对样品进行必要的前处理,包括:(1)切掉样品表面的风化面;(2)人工将样品粗碎成小碎块(考虑到样品的不均一性,所选样品越大越好,可取样品不同部位的小碎块进行下一步);(3)继续碎至200目;(4)用密封袋包装,每个样品需装两袋,每袋2~3g,用作分析主量元素和微量元素。主量元素采用日本岛津制作所的顺序式X射线荧光光谱仪(XRF-1500)测定,标样采用GSR-3。微量元素采用美国Finnian Mat公司生产的等离子源双聚

焦扇形磁式质谱仪(ICP-MS ELEMENT) 测定, 标
样采用 GSR1。XRF 分析精度为 2%, ICP-MS 的精
度优于 5%。所有 15 件样品的主量元素和 2 件样品
(HB32 和 HB133) 的微量元素含量测试在中国科学
院地质与地球物理研究所完成, 其余 13 件样品的微

量元素含量测试在中国科学院地球化学研究所完成。

4 结果及讨论

所有斜长角闪片麻岩样品的化学成分和元素比
值分析结果显示(表 1、表 2), $W_B(\text{SiO}_2)$ 为 44.73%

表 1 赞皇斜长角闪片麻岩岩石化学成分
Table 1 Chemical composition of amphibolites of the Zanhuan complex

岩石类型	含榴斜长角闪片麻岩														斜长角闪片麻岩	
样号	HB24	HB26	HB30	HB32	HB74	HB104	HB131	HB133	HB151	HB154	HB158	HB161	HB167	HB170	HB178	
位置	温暖河	温暖河	小河村	小河村	峡底村	白虎庄	卫鲁村	卫鲁村	花木村	花木村	坡底村	柏垌村	良峪村	大戈寥	獐么	
SiO ₂	54.33	49.22	48.82	47.77	51.37	46.48	45.61	44.73	49.53	48.09	48.95	49.64	50.08	53.49	48.24	
TiO ₂	0.56	0.65	1.01	1.01	1.01	1.87	1.44	1.87	0.91	1.37	0.72	1.49	1.05	0.96	1.10	
Al ₂ O ₃	14.37	14.58	16.07	15.68	13.82	13.90	15.16	14.49	13.68	16.12	13.06	13.16	14.17	14.63	14.10	
TF _{e2} O ₃	9.78	10.98	13.00	14.33	22.81	18.80	14.98	16.08	13.88	14.51	17.68	16.81	14.85	12.01	15.41	
FeO	7.56	8.55	10.40	8.59	18.56	11.86	9.38	9.84	8.95	8.39	12.50	11.42	10.24	6.13	9.95	
MnO	0.16	0.18	0.15	0.19	0.47	0.23	0.56	0.56	0.20	0.16	0.22	0.22	0.21	0.16	0.22	
MgO	7.87	8.49	7.60	7.70	3.31	5.98	5.69	6.61	6.83	6.88	5.91	5.62	6.37	5.83	6.39	
CaO	9.88	12.41	10.43	10.34	6.71	9.00	12.19	12.24	9.34	7.42	9.12	9.40	9.30	7.66	10.54	
Na ₂ O	2.36	2.33	2.12	1.87	0.19	1.91	1.19	1.28	2.80	4.14	2.13	2.31	2.41	2.79	2.72	
K ₂ O	0.38	0.66	0.41	0.42	0.19	0.98	1.31	0.69	1.66	0.67	1.19	1.05	0.81	1.32	0.72	
P ₂ O ₅	0.07	0.06	0.15	0.15	0.11	0.49	0.32	0.36	0.10	0.23	0.29	0.21	0.13	0.19	0.10	
LOI	0.24	0.56	0.40	0.54	0.08	0.36	1.02	0.46	0.96	0.60	0.36	0.26	0.52	1.10	0.54	
Total	100.00	100.13	100.17	100.00	100.07	100.01	99.48	99.36	99.88	100.19	99.63	100.16	99.90	100.14	100.08	
La	6.34	6.43	10.1	9.91	41.1	23.0	16.5	14.7	7.41	15.6	24.1	16.2	9.60	17.9	5.55	
Ce	13.7	14.1	22.7	22.4	96.5	50.8	35.5	33.7	16.3	36.3	57.9	34.9	22.0	38.3	13.3	
Pr	1.86	1.92	3.12	3.10	10.7	6.65	4.67	4.64	2.17	4.91	7.29	4.72	2.93	5.02	1.91	
Nd	8.00	8.42	14.1	12.9	44.5	29.8	20.9	19.5	10.0	21.7	29.3	21.0	13.2	21.6	9.35	
Sm	1.90	1.98	3.47	3.21	8.87	6.34	4.46	4.47	2.65	4.78	6.37	5.12	3.07	4.43	2.86	
Eu	0.68	0.74	1.36	1.16	2.76	2.71	1.82	1.41	0.97	1.68	1.35	1.57	1.09	1.42	1.03	
Gd	2.12	2.30	3.71	3.41	8.16	6.07	4.45	4.38	3.09	4.70	6.06	5.51	3.62	4.16	3.55	
Tb	0.37	0.35	0.55	0.58	1.15	0.89	0.68	0.73	0.51	0.68	0.91	0.84	0.55	0.59	0.55	
Dy	2.38	2.43	3.61	3.76	7.25	5.39	4.43	4.54	3.55	4.13	5.46	5.74	3.69	3.62	4.15	
Ho	0.56	0.61	0.82	0.78	1.66	1.19	1.04	0.94	0.90	0.90	1.17	1.33	0.87	0.82	0.99	
Er	1.53	1.53	2.17	2.24	4.46	3.00	2.98	2.69	2.34	2.37	3.16	3.55	2.38	2.19	2.71	
Tm	0.22	0.21	0.28	0.34	0.56	0.37	0.39	0.41	0.32	0.29	0.41	0.46	0.30	0.27	0.32	
Yb	1.47	1.48	1.97	2.26	4.25	2.71	3.15	2.70	2.26	2.09	2.95	3.34	2.25	2.00	2.63	
Lu	0.26	0.25	0.30	0.34	0.63	0.39	0.50	0.41	0.33	0.30	0.42	0.48	0.34	0.29	0.38	
ΣREE	41.38	42.75	68.25	66.39	232.55	139.32	101.46	95.19	52.81	100.42	146.85	104.76	65.89	102.60	49.28	
Ba	94.6	145	47.9	51.7	13.9	423	383	87.7	124	270	691	285	205	311	79.8	
Rb	8.40	13.9	4.67	4.20	2.98	17.5	25.8	7.02	39.9	7.24	34.1	27.6	32.9	29.2	10.8	
Th	0.95	0.94	0.84	0.77	5.95	1.87	0.50	0.42	0.75	0.85	1.52	2.15	1.41	0.81	0.49	
Nb	1.81	1.98	3.06	3.57	5.81	6.11	4.37	4.77	4.61	4.31	8.86	5.88	3.36	4.30	3.58	
Ta	0.20	0.19	0.24	0.19	0.54	0.45	0.31	0.24	0.45	0.29	0.50	0.44	0.25	0.24	0.27	
Sr	298	325	368	283	22.4	200	109	132	97.1	241	240	207	242	265	124	
Zr	30.7	31.5	29.7	58.3	145	39.4	43.2	84.4	29.5	45.7	90.9	96.3	52.1	27.3	50.4	
Hf	1.03	1.06	1.08	1.69	3.88	1.41	1.43	2.29	1.19	1.55	2.44	2.90	1.58	0.93	1.51	
Y	13.0	13.0	18.6	20.5	42.3	27.1	24.8	23.9	20.0	20.4	29.7	31.7	20.9	20.1	23.6	
Sc	29.2	35.8	29.7	35.7	21.3	36.6	33.5	40.0	40.0	26.9	34.5	39.3	38.4	29.6	37.9	
V	185	211	236	226	225	346	272	300	284	234	205	361	291	225	310	
Co	46.7	57.1	54.4	56.3	69.7	61.8	56.6	59.8	58.9	62.2	54.1	53.4	61.7	48.1	55.0	
Cs	0.19	0.19	0.11	6.38	0.11	0.09	0.25	0.66	0.10	0.17	0.35	0.23	0.28	0.14	0.08	
Pb	1.93	1.47	3.91	15.2	2.08	4.14	162	8.22	6.54	2.30	7.73	4.29	8.63	2.08	3.45	
U	0.28	0.24	0.19	0.13	1.27	0.29	0.83	0.08	0.26	0.19	0.72	0.77	0.35	0.11	0.20	

注: 常量元素单位为%, 微量元素和稀土元素单位为× 10^{- 6}

~ 54.33%, $W_B(Al_2O_3)$ 为 13.06%~16.12%, $W_B(TiO_2)$ 为 0.56%~1.87%, 表现高铝、低钛特征。全铁 $W_B(TFe_2O_3)$ 为 9.78%~22.81%, 全碱 $W_B[ALK(Na_2O + K_2O)]$ 为 0.38%~4.81%, 且多数

样品(HB131、HB74 除外) $K_2O/Na_2O < 0.6$, 总体富钠低钾, 与岛弧火山岩岩石化学特征相近^[24]。铝指数 A/CNK 为 0.85~1.32。

表 2 赞皇斜长角闪片麻岩元素比值

Table 2 Element ratios of amphibolites of the Zanzhuang complex

岩石类型	含榴斜长角闪片麻岩														斜长角闪片麻岩
样号	HB24	HB26	HB30	HB32	HB74	HB104	HB131	HB133	HB151	HB154	HB158	HB161	HB167	HB170	HB178
位置	温暖河	温暖河	小河村	小河村	峡底村	白虎庄	卫鲁村	卫鲁村	花木村	花木村	坡底村	柏垌村	良峪村	大戈寥	獐么
$Na_2O + K_2O$	2.74	2.99	2.53	2.29	0.38	2.89	2.50	1.97	4.46	4.81	3.32	3.36	3.22	4.11	3.44
K_2O/Na_2O	0.16	0.28	0.19	0.22	0.98	0.51	1.10	0.54	0.59	0.16	0.56	0.45	0.34	0.47	0.26
A/CNK	1.14	0.95	1.24	1.24	1.95	1.17	1.03	1.02	0.99	1.32	1.05	1.03	1.13	1.24	1.01
$Mg^\#$	47.20	46.21	39.39	37.41	13.90	26.12	29.70	31.35	35.35	34.51	27.09	27.09	32.28	35.04	31.55
Nb/Y	0.14	0.15	0.16	0.17	0.14	0.23	0.18	0.20	0.23	0.21	0.30	0.19	0.16	0.21	0.15
Zr/TiO_2	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Th/Yb	0.65	0.64	0.42	0.34	1.40	0.69	0.16	0.16	0.33	0.41	0.52	0.64	0.63	0.41	0.19
Ta/Yb	0.13	0.13	0.12	0.08	0.13	0.17	0.10	0.09	0.20	0.14	0.17	0.13	0.11	0.12	0.10
Ba/Nb	52.27	73.23	15.65	14.47	2.39	69.23	87.64	18.39	26.90	62.65	77.99	48.47	61.01	72.33	22.29
Nb/Th	1.91	2.10	3.66	4.66	0.98	3.27	8.78	11.33	6.13	5.06	5.83	2.73	2.38	5.28	7.28
La/Nb	3.50	3.25	3.30	2.77	7.07	3.76	3.78	3.07	1.61	3.62	2.72	2.76	2.86	4.16	1.55
Zr/Y	2.36	2.42	1.60	2.84	3.43	1.45	1.74	3.54	1.48	2.24	3.06	3.04	2.49	1.36	2.14
δEu	1.03	1.06	1.15	1.06	0.97	1.32	1.23	0.96	1.03	1.07	0.65	0.90	1.00	0.99	0.98
$(La/Sm)_N$	2.15	2.10	1.88	1.99	2.99	2.34	2.39	2.12	1.81	2.11	2.44	2.04	2.02	2.61	1.25
$(La/Yb)_N$	3.09	3.12	3.68	3.15	6.94	6.09	3.76	3.90	2.35	5.35	5.86	3.48	3.06	6.42	1.51

注: δEu 、 $(La/Sm)_N$ 、 $(La/Yb)_N$ 为球粒陨石标准化, 据 Sun and McDonough (1989)

4.1 原岩类型

考虑到 K、Na 等元素较强的活动性, 在经历高角闪岩相-麻粒岩相变质作用过程中可能发生迁移, 因此采用不活泼的高场强元素(HFSE)恢复赞皇斜长角闪片麻岩的原岩。 $Nb/Y-Zr/TiO_2$ 图解^[25] (图 4) 是划分变质火山岩系列的有效图解, 并能有效识别变质火山岩的属性。图 4 所示, 赞皇地区所有斜长角闪片麻岩样品均落入亚碱性玄武岩区, 其中少数投在亚碱性玄武岩和安山岩的重叠区, HB74 和 HB158 位于上重叠线附近。结合野外产状, 推测其原岩为亚碱性玄武质火山岩层。多数样品的 $Mg^\#$ ($100 \times MgO/MgO + TFeO$) 较低, 为 13.90~47.20。反映岩浆经历了一定程度的结晶分异演化, 可能发生铁镁质矿物(如辉石、橄榄石等)的结晶分离。其中样品 HB26 的 MgO 含量较高(8.49%), $Mg^\#$ 为 46.21, 相对接近原始岩浆成分。

4.2 构造环境探讨

REE、Th、Nb 等弱活动或不活动元素在海水蚀变及变质过程中相对比较稳定, 是研究岩石形成时的大地构造背景和示踪源区的有效手段。

4.2.1 稀土元素 赞皇地区斜长角闪片麻岩稀土总量 ΣREE 变化较大($41.38 \times 10^{-6} \sim 232.55 \times$

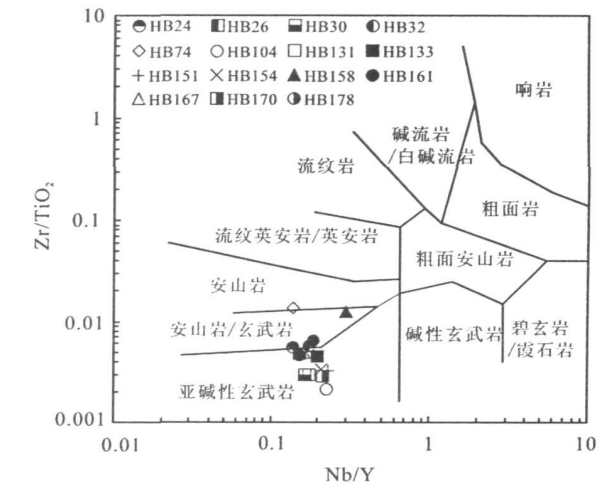


图 4 赞皇斜长角闪片麻岩的 Nb/Y-Zr/TiO₂ 图解^[25]

Fig. 4 Nb/Y-Zr/TiO₂ diagram of the Zanzhuang amphibolites^[25]

10^{-6}) (表 1, 表 2)。 $(La/Sm)_N = 1.25 \sim 2.99$, $(La/Yb)_N = 1.51 \sim 6.94$, La 约是球粒陨石的 23~173 倍, Lu 约是球粒陨石的 9~25 倍, 轻稀土(LREE)弱富集, 稀土配分模式近平坦(图 5a), 与岛弧火山岩稀土配分模式相似^[27~29]。多数样品的 δEu [$\delta Eu = 2Eu_N / (La_N + Sm_N)$] 为 0.90~1.07, 基本无异常, 样品 HB30、HB104 和 HB131 的 $\delta Eu = 1.15 \sim$

1. 32, 显示正异常, 表明源区可能有斜长石的堆晶作用, 样品 HB158 的 $\delta\text{Eu} = 0.65$ 具明显负异常, 推测与斜长石的结晶分异作用有关。所有样品平均 $\delta\text{Eu} = 1.02$ 。

4. 2. 2 微量元素 斜长角闪片麻岩微量元素原始地幔标准化的蛛网图中(图 5b), 大离子亲石元素(LILE) Ba、Rb、K 略富集, 高场强元素(HFSE) Th、Nb、Ta、P 明显亏损, Zr、Ti 弱亏损, 表明岩浆运移过程中有洋壳物质的参与^[24], 区别于大陆玄武岩。同时, 较低的 Zr 含量($< 145 \times 10^{-6}$) 和 Zr/Y 值(< 6.5) 显示岛弧火山岩特征, 尤其是 Nb、Ta 明显负异常和微弱 Ti 负异常是岛弧火山岩的显著标志, 反映了板块俯冲环境中岩浆岩的典型特征^[24, 28, 30]。

如前所述, 本区斜长角闪片麻岩的原岩为亚碱性玄武质岩石。根据 La/Nb-La 和 Nb/Th-Nb 构造环境判别图解^[31](图 6), 所有样品均落入岛弧玄武

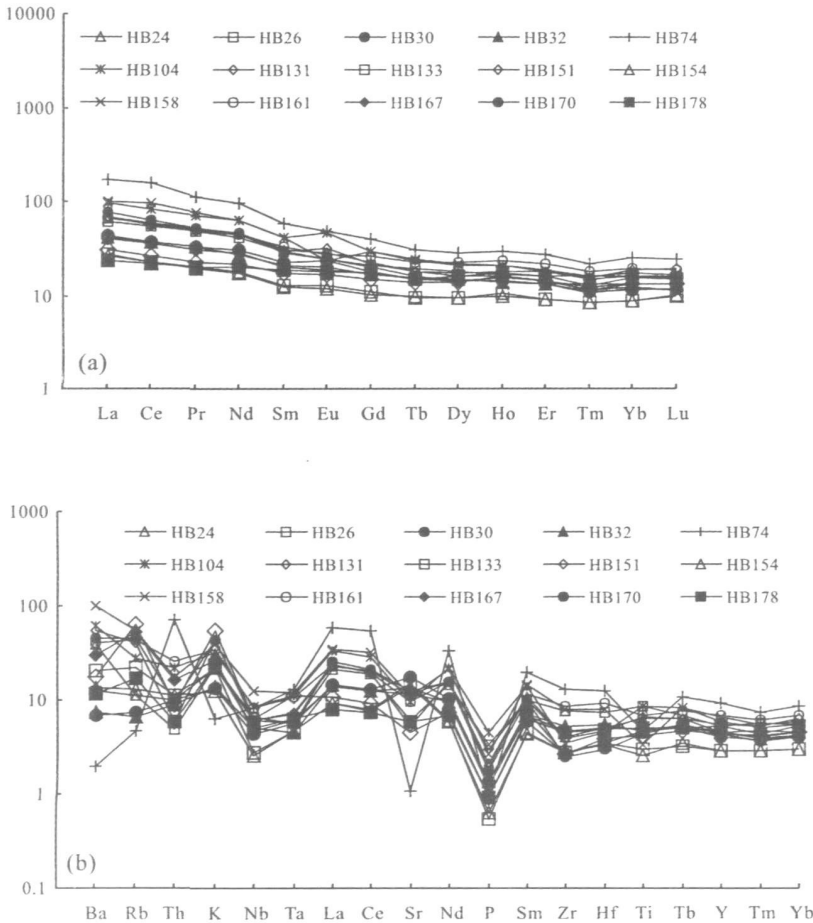
岩区(IAB), 明显不同于洋中脊玄武岩(MORB) 和洋岛玄武岩(OIB)。元素比值 Th/Yb-Ta/Yb 二元图解^[32](图 7) 上, 多数样品投入岛弧钙碱性玄武岩区(CA-VAB), 部分样品(HB131、HB133、HB178) 落在岛弧拉斑玄武岩区(TH-VAB), 反映不同样品间源区性质的差异。

综合以上微量元素特征和构造环境判别图解, 推测赞皇斜长角闪片麻岩形成于类似于现代活动大陆边缘的岛弧构造环境, 原岩性质类似于岛弧亚碱性玄武岩, 是岛弧岩浆分异结晶作用的产物。

5 讨 论

华北中部带是一条古元古代陆-陆碰撞带, 近南北向, 长约 1200 km, 宽约 100~ 300 km, 以信阳-开封-石家庄-建平断裂带和华山-离石-大同-多伦断裂带分别与东、西陆块为界, 沿此碰撞带东部陆块与西部陆块拼合形成统一的华北克拉通前寒武纪基底。在碰撞作用发生之前, 西部陆块和东部陆块之间有一个古大洋, 华北中部带是在古大洋岩石圈向东部陆块下面俯冲所形成的大陆边缘弧或日本式岛弧基础上发展而成的^[33], 主要由登封、太华、中条、赞皇、吕梁、阜平、五台、恒山、怀安、宣化和冀北等杂岩构成。中部带北段基底岩石主要为晚太古代至早元古代片麻岩、表壳岩、铁镁质岩墙和同构造或构造后花岗岩, 构造、岩相学、地球化学和同位素研究显示, 这些岩石主要形成于大陆边缘弧、岛弧和弧后盆地环境^[34~ 39], 是东部陆块和西部陆块碰撞作用的产物。

赞皇地区斜长角闪片麻岩原岩为亚碱性玄武质火山岩层, 也有一部分为拉斑系列, 部分为钙碱系列。总体富钠、低钾, 高铝、低钛, 稀土总量为 $41.38 \times 10^{-6} \sim 232.55 \times 10^{-6}$, 轻稀土略富集, 为近平坦型配分模式, 平均 $\delta\text{Eu} = 1.02$, 几乎无异常, 大离子亲石元素 K、Rb、Ba 富集, 高场强元素 Nb、Ta 显示明显负异常和 Ti 弱亏损等特征, 形成于类似现代活动大陆边缘的岛弧构造环境。同时, 与华北中

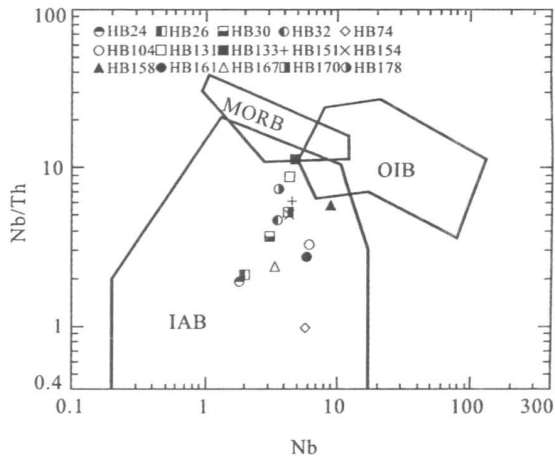
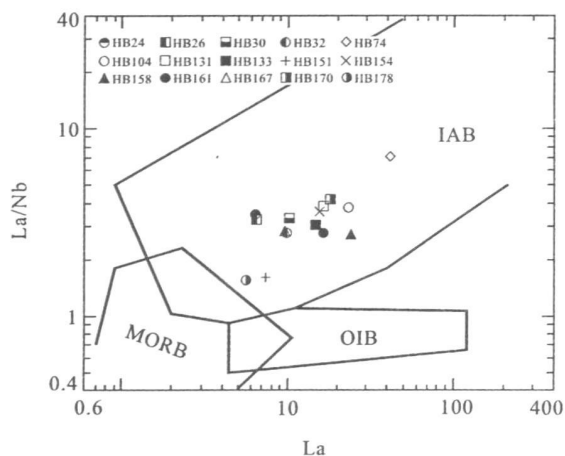


用于标准化的球粒陨石、原始地幔组成据文献[26]

Chondrite, primitive mantle normalized data are from ref. [26]

图 5 赞皇斜长角闪片麻岩稀土元素配分模式图(a)和微量元素蛛网图(b)

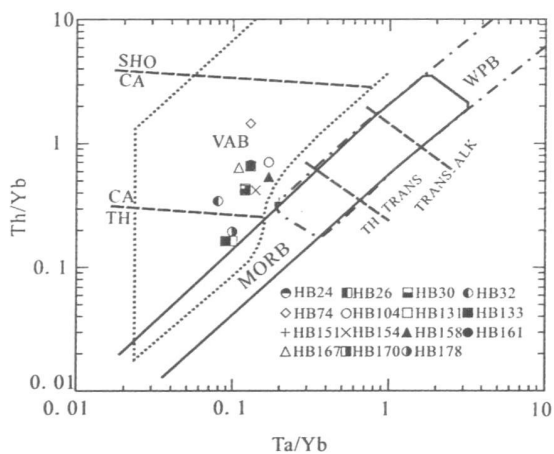
Fig. 5 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a), primitive mantle-normalized patterns (b) spidergrams of trace elements of the Zhanhuang amphibolites



MORB——洋中脊玄武岩; OIB——洋岛玄武岩; IAB——岛弧玄武岩
MORB——Mid ocean ridge basalt; OIB——Oceanic island basalt; IAB——Island arc basalt

图6 赞皇斜长角闪片麻岩的 La/Nb La (a), Nb/Th Nb (b) 图解^[31]

Fig.6 La/Nb La (a) and Nb/Th Nb (b) diagrams of the Zanzhuang amphibolites^[31]



CA. 钙碱性玄武岩; SHO. 钾玄岩; TH. 拉斑玄武岩;
ALK. 碱性玄武岩; TRANS. 过渡性玄武岩; VAB. 火山弧玄武岩;
MORB. 大洋中脊玄武岩; WPB. 板内玄武岩; 据文献 [32]
CA. Calc alkaline; SHO Shoshonitic; TH Tholeiite; ALK. Alkaline;
TRANS Transitional; VAB Volcanic arc basalt, MORB
Mid ocean ridge basalts, WPB Within plate basalts; from ref. [32]

图7 赞皇斜长角闪片麻岩的 Th/Yb Ta/Yb 图解

Fig.7 Th/Yb Ta/Yb diagram of the Zanzhuang amphibolites

部带其他杂岩类似, 赞皇变质杂岩为早元古代末期(约 1850 Ma)东、西部陆块碰撞造山作用的产物。研究表明, 赞皇地区四期变形作用的单矿物⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年方法年龄分别为 1870 Ma(D₁)、1870~1826 Ma(D₂)和 1826~1793 Ma(D₃); 据此推断与阜平杂岩一样, 影响赞皇变质杂岩的主要构造事件发生在 1870~1793 Ma^[19]。赞皇地区泥质变质岩、角闪岩和正片麻岩的 EMPA 独居石 Th-U-Pb 和角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年表明, 变质泥质岩中的独居石年龄约为 1824 Ma, 角闪岩和正片麻岩中的角闪石⁴⁰Ar/

³⁹Ar 年龄大约为 1800 Ma^[21]。所有年代学数据均与东、西部陆块沿华北中部带约 1850 Ma 的碰撞模型相符, 且沿此碰撞带, 造山作用后期广泛发育大约 1770 Ma 的基性岩墙^[20, 40]。

据此可推断, 与华北中部带北部的太行山-恒山-五台山变质杂岩构成的统一岛弧岩浆带类似, 赞皇变质杂岩同样形成于由古大洋岩石圈向陆壳俯冲所形成的大陆边缘弧或日本式岛弧环境, 卷入了早元古代末期华北克拉通东、西部陆块之间的碰撞造山运动, 经历了高角闪岩相-麻粒岩相的峰期变质作用。

6 结 论

(1) 斜长角闪片麻岩原岩为亚碱性玄武质火山岩层, 多数为钙碱系列, 部分属于拉斑系列, 体现了源区成分的不均一性。

(2) 赞皇变质杂岩中的斜长角闪片麻岩与中部带北段杂岩类似, 同样形成于类似于现代活动大陆边缘的岛弧构造环境。

(3) 赞皇变质杂岩卷入了华北克拉通东、西部陆块之间的碰撞造山运动。斜长角闪片麻岩是构成华北中部带赞皇变质杂岩基底建造的重要组成部分, 发生陆-弧-陆碰撞作用期间, 斜长角闪片麻岩与围岩一起共同经历了高角闪岩相-麻粒岩相变质作用。

致 谢: 感谢朱维光老师、中国科学院地质与地球物理研究所、中国科学院地球化学研究所微量元素分析实验室在实验与测试过程中给予的大力协助。

参考文献 (References):

- [1] Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, Lu L Z. Thermal evolution of the Archean basement rocks from the eastern part of the North China Craton and its bearing on tectonic setting [J]. *International Geology Review*, 1998, 40: 706– 721.
- [2] Zhao G C, Sun M, Wilde S A, Li S Z. Neoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited [J]. *Precambrian Research*, 2005, 136: 177– 202.
- [3] Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, Sun M. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution [J]. *Precambrian Research*, 2001, 107: 45– 73.
- [4] Guo J H, O'Brien P J, Zhai M G. High pressure granulites in the Sanggan area, North China Craton: metamorphic evolution, *p-T* paths and geotectonic significance [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2002, 20: 741– 756.
- [5] Wilde S A, Zhao G C, Sun M. Development of the North China Craton during the Late Archean and its final amalgamation at 1.8 Ga; some speculations on its position within a global Palaeoproterozoic Supercontinent [J]. *Gondwana Research*, 2002, 5: 85– 94.
- [6] Guo J H, Sun M, Zhai M G. Sm-Nd and SHRIMP U-Pb zircon geochronology of high pressure granulites in the Sanggan area, North China Craton: timing of Paleoproterozoic continental collision [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24: 629– 642.
- [7] Kröner A, Wilde S A, Li J H, Wang K Y. Age and evolution of a late Archean to early Palaeoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24: 577– 596.
- [8] Polat A, Kusky T M, Li J H, Fryer B, Kerrich R, Patrick K. Geochemistry of Neoproterozoic (ca. 2.55– 2.50 Ga) volcanic and ophiolitic rocks in the Wutaishan greenstone belt, central orogenic belt, North China Craton: implications for geodynamic setting and continental growth [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2005, 117: 1387– 1399.
- [9] Wilde S A, Zhao G C. Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24: 519– 522.
- [10] Wu F Y, Zhao G C, Wilde S A, Sun D Y. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24: 524– 546.
- [11] Kröner A, Wilde S A, Zhao G C, O'Brien P J, Sun M, Liu D Y, Wan Y S, Liu S W, Guo J H. Zircon geochronology of mafic dykes in the Hengshan Complex of northern China: evidence for late Palaeoproterozoic rifting and subsequent high pressure event in the North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2006, 146: 45– 67.
- [12] Liu S W, Zhao G C, Wilde S A, Shu G, Sun M, Li Q, Tian W, Zhang J. Th-U-Pb monazite geochronology of the Lüliang and Wutai complexes: Constraints on the tectonothermal evolution of the Trans North China orogen [J]. *Precambrian Research*, 2006, 148: 205– 224.
- [13] Kusky T M, Li J H, Santosh M. The Paleoproterozoic North Hebei Orogen: North China Craton's Collisional Suture with the Columbia Supercontinent [J]. *Gondwana Research*, 2007, 12: 4– 28.
- [14] Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, Sun M. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping Complex: implications for late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton [J]. *American Journal of Sciences*, 2002, 302: 191– 226.
- [15] Sun M, Armstrong R L, Lambert R St J. Petrochemistry and Sr, Pb and Nd isotopic geochemistry of Early Precambrian rocks, Wutaishan and Taihangshan areas, China [J]. *Precambrian Research*, 1992, 56: 1– 31.
- [16] 牛树银, 许传国, 国连杰, 陈路. 太行山变质核杂岩的特征及其成因探讨 [J]. *河北地质学院学报*, 1994, 17(1): 43– 53.
Niu Shuyin, Xu Chuanshi, Guo Lianjie, Chen Lu. The study of Origin and Characteristics of the Taihangshan Metamorphic Core Complexes [J]. *Hebei College of Geology*, 1994, 17(1): 43– 52. (in Chinese with English abstract)
- [17] 牛树银. 太行山阜平, 赞皇隆起是中新生代变质核杂岩 [J]. *地质科技情报*, 1994, 13(2): 15– 16.
Niu Shuyin. Fuping and Zhanhuang uplifts of Taihangshan are the Mesozoic Metamorphic Core Complexes [J]. *Geological Science and Technology Information*, 1994, 13(2): 15– 16. (in Chinese)
- [18] 王岳军, 范蔚茗, 郭锋, 彭头平, 李超文. 赞皇变质穹窿黑云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学研究及其对构造热事件的约束 [J]. *岩石学报*, 2003, 19(1): 131– 140.
Wang Yuejun, Fan Weiming, Guo Feng, Peng Toupeng, Li Chaowen. Biotite ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of the deformational rocks from Zhanhuang metamorphic domain in southern Taihang mountains and their tectonothermal overprinting [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(1): 131– 140. (in Chinese with English abstract)
- [19] Wang Y J, Fan W M, Zhang Y, Guo F. Structural evolution and ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of the Zhanhuang metamorphic domain in the North China Craton: constraints on Paleoproterozoic tectonothermal overprinting [J]. *Precambrian Research*, 2003, 122: 159– 182.
- [20] Wang Y J, Fan W M, Zhang Y H. Geochemical, ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronological and Sm-Nd isotopic constraints on the origin of Paleoproterozoic mafic dikes from the southern Taihang Mountains and implications for the 1 800 Ma event of the North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2004, 135 (1– 2): 55– 79.
- [21] Trap P, Faure M, Lin W, Monié P, Meffre S, Melletton J. The Zhanhuang Massif, the second and eastern suture zone of the Paleoproterozoic Trans North China Orogen [J]. *Precambrian Research*, 2009, 172: 80– 98.
- [22] 于振清, 李艳霞, 肖玲玲. 多期变质作用、多相变质作用与变

- 质作用 $P-T-t$ 轨迹 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28(2): 189–194.
- Yu Zhenqing, Li Yanxia, Xiao Lingling. Polymetamorphism, polyphase metamorphism and metamorphic $P-T-t$ paths [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2009, 28(2): 189–194. (in Chinese with English abstract)
- [23] Xiao L L, Wu C M, Zhao G C, Guo J H, Ren L D. Metamorphic $P-T$ paths of the Zanzhuang amphibolites and metapelites: constraints on the tectonic evolution of the Paleoproterozoic Trans-North China Orogen [J]. International Journal of Earth Sciences. (in press)
- [24] 李伍平, 路凤香. 钙碱性火山岩构造背景的研究进展 [J]. 地质科技情报, 1999, 18(2): 15–18.
- Li Wuping, Lu Fengxiang. New progress of the study of geologic setting for calc-alkaline volcanic rocks [J]. Geological Science and Technology Information, 1999, 18(2): 15–18. (in Chinese with English abstract)
- [25] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements [J]. Chemical Geology, 1977, 20: 325–343.
- [26] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and process [A]. In: Saunders A D, Norry M J (eds.), Magmatism in the Ocean Basin [C]. Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313–354.
- [27] Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry [M]. New York: Elsevier Science Publications B. V., 1984.
- [28] Wilson M. Igneous Petrogenesis: a global tectonic approach [M]. London: Unwin Hyman, 1989: 1–466.
- [29] 翟明国. 太古代变质玄武岩的地球化学特征及大地构造意义 [J]. 地质科学, 1991, (3): 222–230.
- Zhai Mingguo. Two types of Archaean mafic basalts and their geotectonic significance [J]. Scientia Geologica Sinica, 1991, (3): 222–230. (in Chinese with English abstract)
- [30] Condie K C. Mantle Plume and Their Record in Earth History [M]. London: Cambridge University Press, 2001.
- [31] 李曙光. 蛇绿岩生成构造环境的 Ba/Th/Nb/La 判别图 [J]. 岩石学报, 1993, 9(2): 146–157.
- Li Shuguang. Ba/Th/Nb/La diagrams used to identify tectonic environments of ophiolite [J]. Acta Petrologica Sinica, 1993, 9(2): 146–157. (in Chinese with English abstract)
- [32] Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [A]. In: Thorpe R S. Andesites [C]. New York: John Wiley & Sons, 1982: 525–548.
- [33] Zhao Guochun, Liu Shuwen, Sun Min, Li Sanzhong, Wilde S A, Xia Xiaoping, Zhang Jian, He Yanhong. What Happened in the Trans-North China Orogen in the Period 2560–1850 Ma [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(6): 790–806.
- [34] Cawood P A, Wilde S A, Wang K Y, Nemchin A A. Integrated geochronology and field constraints on subdivision of the Precambrian in China: Data from the Wutaishan, Abstracts of ICOG–9. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(supplement): 17.
- [35] 刘树文, 李江海, 潘元明, 张健, 李秋根, 黄雄南. 太行山–恒山太古代古老陆块年代学和地球化学制约 [J]. 自然科学进展, 2002, 12(8): 826–833.
- Liu Shuwen, Li Jianghai, Pan Yuanming, Zhang Jian, Li Qiugen, Huang Xiongnan. An Archean continental block in the Taihangshan and Hengshan regions: Constraints from geochronology and geochemistry [J]. Progress in Natural Science, 2002, 12(8): 568–576. (in Chinese with English abstract)
- [36] Wilde S A, Cawood P A, Wang K Y, Nemchin A A. SHRIMP U–Pb zircon dating of granites and gneisses in the Taihangshan–Wutaishan area: Implications for the timing of crustal growth in the North China Craton, abstracts of ICOG–9 [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(suppl.): 144.
- [37] Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, Min S, Lu L Z. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton: implications for Paleoproterozoic tectonic evolution [J]. Precamb Res, 2000, 103(1–2): 55–88.
- [38] Zhao G C. Paleoproterozoic assembly of the North China Craton [J]. Geological Magazine, 2001, 138(1): 87–91.
- [39] 赵国春, 孙敏, Wilde S A. 华北克拉通基底构造单元特征及早元古代拼合 [J]. 中国科学 (D 辑), 2002, 32(7): 538–549.
- Zhao Guochun, Sun Min, Wilde S A. Major tectonic units of the North China Craton and their Paleoproterozoic assembly [J]. Science in China (series D), 2003, 46: 23–38. (in Chinese)
- [40] Wang Y J, Zhao G C, Cawood P A, Fan W M, Peng T P, Sun L H. Geochemistry of Paleoproterozoic (1770 Ma) mafic dikes from the Trans-North China Orogen and tectonic implications [J]. J. Asian Earth Sciences, 2008, 33: 61–77.