

太行山南段中生代杂岩体成因及其演化分析

尹明^{1,2}, 郭敏², 张海东¹

(1. 长安大学资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 河南省国土资源研究院, 河南 郑州 450002)

摘 要:平顺-符山-武安-洪山杂岩体主要由橄榄辉长辉绿岩、角闪闪长岩、经闪长岩、二长闪长岩、正长岩、花岗岩一系列岩石组成,其地球化学性质相似,CaO、FeO、MgO 和 TiO 与 SiO₂ 呈线性正相关,富集大离子亲石元素(如 Sr、Ba、K)和 LREE,亏损高场强元素(如 Nb、Ta、Ti)和 HREE,具有微弱的正 Eu 异常。符山杂岩体的 $\epsilon_{\text{Nd}} = -12.3 \sim -16.9$, $I_{\text{Sr}} = 0.7056 \sim 0.7071$,武安杂岩体 $\epsilon_{\text{Nd}} = -13.8 \sim -18$, $I_{\text{Sr}} = 0.7059 \sim 0.7076$,相比之下,洪山杂岩体具有比符山-武安杂岩体明显高但相对均一的 ϵ_{Nd} 值($-8.2 \sim -11$)和变化较大的 I_{Sr} ($0.7052 \sim 0.7102$)。平顺杂岩体 Pb 同位素比值较高, $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 17.859 \sim 18.474$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 15.429 \sim 15.612$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 37.374 \sim 38.641$ 。而符山杂岩体($16.92 \sim 17.3$, $15.32 \sim 15.42$, $37.16 \sim 37.63$)、武安岩体($16.63 \sim 17.4$, $15.28 \sim 15.44$, $36.78 \sim 37.3$)和洪山杂岩体($17.28 \sim 17.74$, $15.40 \sim 15.48$, $37.01 \sim 38.12$)变化连续。平顺-符山-武安杂岩体可能是同一期岩浆演化的产物,起源于 EMI 型富集地幔的部分熔融,但在上升过程中受到不同程度的下地壳物质混染。洪山岩体也来源于 EMI 型富集地幔的部分熔融,但属于不同岩浆热事件,仅受轻微下地壳混染。太行山南段中生代广泛的岩浆活动可能与邯邢地幔柱上涌有关。

关键词:杂岩体;EMI 型富集地幔;部分熔融;太行山南段

中图分类号:P588.12

文献标识码:A

文章编号:1009-6248(2014)03-0043-11

Petrogenesis and Evolution of Mesozoic Complexes from Southern Taihang Orogen

YIN Ming^{1,2}, GUO Min², ZHANG Hai-dong¹

(1. Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Henan Academy of Land and Resources, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Pingshun-FuShan-WuAn-HongShan complex mainly consists of olivine-gabbro-diabase, hornblende diorite, diorite, monzodiorite, syenite and granite, which have similar geochemical properties. The content of CaO, FeO, MgO, TiO and SiO₂ are in linear positive correlation. The composite pluton is enriched in lithophylic elements (such as Sr, Ba, K) and LREE, but is depleted in high field strength elements (such as Nb, Ta, Ti) and HREE, and there is a weak positive Eu anomaly. The value of epsilon Nd(t) varies from -12.3 to -16.9 in FuShan complex, with that of I_{Sr} ranges from 0.7056 to 0.7071 ; the value of epsilon Nd(t) varies from -13.8 to -18 in WuAn complex, and the value of I_{Sr} is between $0.7059 \sim 0.7076$. By contrast, the values of ϵ_{Nd} ($-8.2 \sim -11$) in HongShan complex is obviously higher and relatively more homogeneous than that in FuShan-WuAn complex, and the value of I_{Sr} ($0.7052 \sim 0.7102$) has a greater variety. Pb isotope ratio of PingShui complex is relatively higher, the values of $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$,

收稿日期: 2014-06-15; 修回日期: 2014-08-10

基金项目: 中国地质调查局“太行山地区中生代岩浆活动与成矿作用研究”(1212011121076)

作者简介: 尹明(1961-), 男, 高级工程师, 在读博士, 主要从事岩石学和地理信息系统研究工作。E-mail: yinmingxadcj@163.com

($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i and ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i are respectively 17.859~18.474, 15.429~15.612, 37.374~38.641, while those of FuShan complex (16.92~17.3, 15.32~15.42, 37.16~37.63), WuAn complex (16.63~17.4, 15.28~15.44, 36.78~37.3), and HongShan complex (17.28~17.74, 15.40~15.48, 37.01~38.12) change continuously. Pingshun-Fushan-Wuan complexes are probably the products of contemporaneous magma evolution, originated from the partial melting of EMI-enriched mantle, but experienced different degrees of hybridization of crust materials in the rising process. Hongshan complex also originated from the partial melting of EMI-enriched mantle, but belonged to different magmatic thermal event, and merely experienced slight hybridization of crust materials. The extensive Mesozoic Magmatic Activity of southern Taihang Mountain is probably related to the plume upwelling of Hanxing.

Key words: complex body; EMI-enriched mantle; partial melting; southern Taihang orogen

华北克拉通板块是地球上最古老的陆核之一,具有以太古代片麻岩为主的基底岩石(Jahn et al., 1987)。自中生代以来,岩石圈地幔由 150~220 km 减薄为 60~120 km(陈斌等,2005)。华北中生代的岩浆作用成因和地球动力学背景引起国内外学者广泛关注,形成许多研究成果(Zhai et al., 2004; Chen et al., 2003)。但对于这些中生代岩浆作用的成因和地球动力学环境任存在较大分歧,一部分学者(王强等,201;刘红涛等 2002)认为是由基性下地壳在加厚的环境下发生部分熔融形成的结果,属于埃达克质岩石;另一部分学者(Zhang et al., 2003; 彭头平等 2004)认为是由壳幔岩浆混合形成的结果。至于岩浆形成的地球动力学环境主要包括:古太平洋板块的俯冲作用(Wu et al., 2004),地幔分层部分熔融(Xu et al., 1991)和板内造山作用(Luo et al., 1999)等争议。笔者通过对太行山南段中生代代表型杂岩体(平顺-符山-武安-洪山杂岩体)进行详细野外调研和元素和同位素研究,结合现有研究成果,试图探讨该杂岩体成因和演化关系,以及形成的地球动力学背景。

1 区域地质及岩石学概况

太行山南段岩浆岩带规模较大,主要分布在山西平顺、河北邯(郸)邢(台)和河南安(阳)林(县)地区,并以平顺地区和邯邢地区岩体为代表,包括平顺岩体、符山岩体、武安岩体和洪山岩体,主要侵位于中奥陶统灰岩中(图 1)。平顺岩体和邯邢岩体在空间上分别呈南北向和东北向展布,其中北秋房是整个岩浆岩带发生转变的地带,由南北向变为北北东

方向。

太行山南段岩石类型复杂,平顺岩体主要为闪长岩-二长闪长岩以及少量的橄榄辉长辉绿岩、角闪闪长岩和脉状石英二长岩;符山岩体主要为闪长岩-二长闪长岩以及少量辉长岩、辉长闪长岩、角闪闪长岩和脉状的角闪石英闪长岩;武安岩体主要为二长闪长岩、二长岩以及少量石英正长岩脉;洪山岩体主要为正长岩以及少量花岗岩脉。橄榄辉长辉绿岩和辉长岩主要由橄榄石(3%~13%)、辉石(10%~14%)、斜长石(28%~32%)、角闪石(15%~22%)等组成,含有铁钛氧化物和锆石等副矿物,含有大量橄榄石、辉石等捕虏晶,呈小岩体或包体赋存于闪长岩-二长闪长岩之中(刘建朝等 2009)。与辉长岩相比,闪长岩含有较少的辉石(5%~10%)和较多的斜长石(55%)与钾长石(15%),斜长石有明显的环带结构,含有纯橄岩、二辉橄岩和角闪二辉岩等地幔岩包体(陈斌等,2005)。二长岩主要由斜长石(45%)、钾长石(35%~40%)和少量辉石、角闪石、铁钛氧化物、锆石和褐帘石等组成。正长岩含有斜长石和钾长石斑晶,主要组成矿物是钾长石(60%~85%),其他矿物为斜长石(5%~15%)、石英(5%)、角闪石(5%~10%)、黑云母(5%)和辉石(3%~8%),以及磷灰石、锆石、褐帘石、磁铁矿等副矿物。

2 岩石地球化学特征

将太行山南段岩石的主量元素、微量元素以及稀土元素列于表 1,同位素列于表 2。样品均取自于太行山南段平顺、符山、武安和洪山地区,包括了所有的岩石类型,平顺地区主量元素、Pb 同位素和微

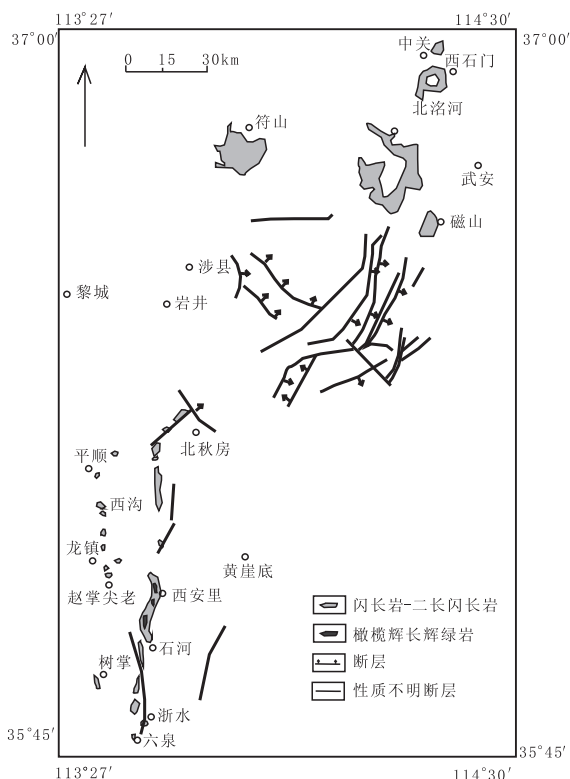


图 1 太行山南段地质简图

Fig. 1 Generalized geologic map of the southern Taihang orogen

量元素分别在中国科学院广州地球化学研究所和长安大学地质实验测试中心完成。其中,主量元素用 XRF 测试,微量元素用 ICP-MS 测试,Pb 同位素用 MAT262 TIMS 测试。其余数据均引自于文献。

在 TSA 分类图解上(图 2),大多数样品都落在

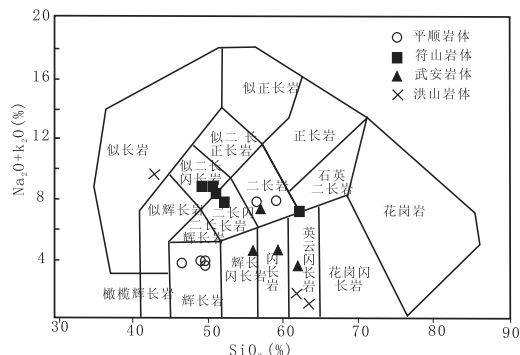


图 2 太行山南段侵入杂岩体 TAS 分类图解
(据 Cox et al., 2000 修改)

Fig. 2 TAS classification diagram of the intrusive complexes from the southern Taihang orogen
(Adapted from Cox et al., 1979)

了解长岩类和闪长岩类的范围内,反映杂岩体主要是由辉长岩和闪长岩组成。在主量元素哈克图解(图 3)中,平顺岩体($\text{SiO}_2 = 46.99\% \sim 59.17\%$, 平均为 51.95; $\text{Mg}^\# = 48.45 \sim 75.83$, 平均为 64.82)。符山岩体($\text{SiO}_2 = 51.70\% \sim 61.43\%$, 平均为 53.88; $\text{Mg}^\# = 53.84 \sim 62.22$, 平均为 57.56)。武安岩体($\text{SiO}_2 = 56.64\% \sim 59.69\%$, 平均为 58.89; $\text{Mg}^\# = 39.63 \sim 79.27$, 平均为 53.00)化学成分变化比较大,岩浆分异程度依次增大。相比之下,洪山岩体化学成分变化较小,具有高钾、钠、硅(SiO_2 平均为 62.82)和低镁($\text{Mg}^\#$ 平均为 23.08)的特征。各主量元素与 SiO_2 相关性较好, CaO 、 FeO 、 MgO 和 TiO_2 与 SiO_2 表现为线性负相关,说明岩浆演化过程中铁镁质矿物结晶分离作用明显; Na_2O 、 K_2O 和 Al_2O_3 表现线性正相关,但总的说来相关程度不是很高,离散性较明显,说明岩浆虽然经行了结晶分异过程,但结晶分异程度不高或发生了岩浆混染作用; P_2O_5 随 SiO_2 含量的增加表现为先增大后减小,可能与磷灰石在早、晚期结晶分异程度有关。值得注意的是,在主量元变异图解中,一些元素(MnO 、 Na_2O 、 Al_2O_3 、 P_2O_5)表现出不同的分布趋势,这种差异趋势可通过转折点($\text{SiO}_2 = 55\% \pm$)左右两侧不同斜率体现出来,可能暗示岩浆演化存在 2 个阶段,早期岩浆主要以铁镁质分离结晶作用为主,而长石分离结晶作用可以忽略,导致 Fe 、 Mg 、 Ti 减少,而 Al 增加;晚期岩浆主要发生斜长石、角闪石分离结晶作用,形成残余中酸性岩浆,导致 Al 随 Si 的增加而减少。

在微量元素蛛网图和稀土模式图(图 4)中,各杂岩体具有相同的变化曲线,微量元素方面表现为富集大离子亲石元素(如 Sr、Ba、K)、LREE,亏损高场强元素(如 Nb、Ta、Ti)、HREE;稀土元素方面表现为 LREE 富集, HREE ($\text{LREE}/\text{HREE}=4.90\sim 12.53$, $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}=4.33\sim 13.14$)和 Y 亏损,轻稀土和重稀土分异程度不明显 ($\text{La}_\text{N}/\text{Sm}_\text{N}:\text{Gd}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}=(1.51\sim 3.88):(1.52\sim 2.66)$),无 Eu 异常或只有微弱的正 Eu 异常 ($\delta\text{Eu}=0.88\sim 1.42$, 平均为 1.03)。相对而言,洪山岩体的重稀土偏高。

在图 5a 中,所有样品都分布在 EMI 和 LCC 之间。其中,符山杂岩体分布较集中, Sr 同位素组成为 $I_{\text{Sr}}=0.705\ 6\sim 0.707\ 1$, $\epsilon_{\text{Nd}}=-12.3\sim -16.9$; 武安杂岩体分布较分散,数据点呈水平分布, $I_{\text{Sr}}=0.705\ 9\sim 0.707\ 6$, $\epsilon_{\text{Nd}}=-13.8\sim -18$ 。相比之下,

表 1 太行山南段侵入杂岩体岩石样品主元素(%)、微量元素($\times 10^{-6}$)分析表
Tab. 1 Chemical compositions of the major (%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) of intrusive complexes from southern Taihang orogen

位置		平顺地区						符山地区				武安地区				洪山地区	
岩性	橄榄辉长辉绿岩	角闪闪长岩		闪长岩—二长闪长岩		辉长岩		闪长岩	石英闪长岩	石英二长岩	闪长岩—二长岩			正长岩			
编号	B015	B036	B008	B009	B018	B020	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Al ₂ O ₃	11.91	12.64	15.02	12.23	17.02	16.68	15.48	14.66	15.16	17.32	16.01	13.46	17.03	16.62	17.73	17.77	
CaO	7.45	7.86	9.15	7.88	5.65	4.90	7.98	8.87	7.57	7.16	3.72	7.46	4.54	4.42	1	1.63	
Fe ₂ O ₃	9.42	9.59	11.47	9.48	4.81	7.77	10.15	11.58	9.27	2.66	4.84	4.78	4.14	7.02	3.44	4.72	
K ₂ O	0.92	1.00	0.50	1.23	0.86	0.86	1.75	2.01	2.12	0.25	3.86	0.49	4.57	1.27	5.73	5.51	
MgO	14.57	12.89	8.85	12.24	3.29	3.60	6.6	6.58	6.21	2.16	1.66	9.01	1.34	3.76	0.78	0.4	
MnO	0.16	0.16	0.16	0.14	0.08	0.08	0.16	0.17	0.13	0.04	0.05	0.06	0.06	0.06	0.04	0.09	
Na ₂ O	2.62	2.68	3.16	2.59	7.03	6.86	3.6	3.16	3.8	6.78	4.71	5.68	5.71	7.02	6.38	6.42	
P ₂ O ₅	0.26	0.30	0.21	0.16	0.29	0.33	0.37	0.41	0.38	0.23	0.2	0.25	0.27	0.46	0.15	0.28	
SiO ₂	49.74	49.15	46.99	49.79	59.17	56.87	51.7	50.14	52.24	61.43	62.14	57.11	59.69	56.64	63.53	62.17	
TiO ₂	0.60	0.77	0.95	0.77	0.53	1.07	0.83	0.93	0.79	0.54	0.47	0.48	0.56	0.73	0.35	0.46	
LOI	2.26	2.49	3.08	3.01	1.55	1.31	1.79	1.46	2.45	1.05	1.68	1.58	1.63	2.24	0.46	0.16	
Mg [#]	0.76	0.73	0.61	0.72	0.58	0.48	0.57	0.54	0.58	0.62	0.41	0.79	0.40	0.52	0.32	0.15	
Rb	15.05	18.59	7.78	22.94	12.31	9.54	35.56	35.52	24.47	1.98	52	10	57	34	102	88.4	
Ba	413.7	439.8	192.2	592.6	133.9	318.7	602.5	907.2	685.3	339.9	1327	139	846	274	807	756	
Th	1.31	1.20	1.09	1.58	2.72	3.46	3.8	1.38	3.85	3.11	4.4	3.4	3.6	5.7	6.49	15	
U	0.35	0.30	0.16	0.19	0.49	0.73	0.99	0.26	0.89	0.84	1.4	0.3	0.9	0.9	1.22	2.14	
Ta	0.14	0.17	0.16	0.15	0.20	0.48	0.3	0.3	0.29	0.23	—	—	—	—	—	—	
Nb	2.94	3.77	3.01	2.99	4.22	8.24	7.73	3.85	6.46	6.79	7	6.2	6.2	7	6.2	7	
La	15.23	18.13	10.94	17.79	20.89	25.92	29.71	18.81	29.03	29.39	34.51	12.35	30.8	27.44	28.7	39.8	
Ce	33.63	41.08	27.13	39.11	46.34	56.73	64.18	43.04	60.85	60.13	64.43	28.49	60.63	58.69	48	67.6	
Sr	649.7	661.0	1336	380.8	435.3	643.3	602	655.7	791.4	840.6	538	588	395	453	700	920	
Nd	18.63	25.27	19.61	23.03	21.70	28.59	33.15	24.95	33.77	28.01	28.31	16.69	28.71	32.39	19.7	28.4	
Zr	64.44	67.77	58.03	62.14	115.4	126.1	162.6	80.1	115.1	152.7	240	120	162	167	183	305	

续表 1

位置		平顺地区						符山地区				武安地区				洪山地区	
岩 性		橄榄辉长辉绿岩		角闪闪长岩		闪长岩—二长闪长岩		辉长岩		闪长岩	石英闪长岩	石英二长岩		闪长岩—二长岩		正长岩	
编号		B015	B036	B008	B009	B018	B020	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Hf		1.81	2.08	1.92	1.96	2.85	3.27	4.61	2.74	3.92	4.74	6.6	3.04	4.6	4.9	4.59	7.53
Sm		3.58	4.78	4.56	4.54	3.75	5.45	6.56	4.92	6.31	4.78	4.68	3.48	4.99	6.24	4.23	5.82
Y		11.79	15.58	16.70	14.69	12.56	15.88	19.84	18.17	20.42	16.9	14.2	11.8	14.5	19.1	13.9	18.8
La		15.23	18.13	10.94	17.79	20.89	25.92	29.71	18.81	29.03	29.39	34.51	12.35	30.8	27.44	28.7	39.8
Ce		33.63	41.08	27.13	39.11	46.34	56.73	64.18	43.04	60.85	60.13	64.43	28.49	60.63	58.69	48	67.6
Pr		4.30	5.58	4.04	5.13	5.41	6.77	7.38	5.03	7.15	6.28	6.97	3.64	6.8	7.02	5.56	7.74
Nd		18.63	25.27	19.61	23.03	21.70	28.59	33.15	24.95	33.77	28.01	28.31	16.69	28.71	32.39	19.7	28.4
Sm		3.58	4.78	4.56	4.54	3.75	5.45	6.56	4.92	6.31	4.78	4.68	3.48	4.99	6.24	4.23	5.82
Eu		1.13	1.48	1.51	1.52	1.19	1.79	1.96	1.96	2.22	1.83	1.57	1.1	1.48	1.71	1.47	2.11
Gd		3.69	4.91	4.68	4.66	3.71	5.35	5.22	4.45	5.26	3.92	3.65	3.04	4.22	5.31	4.43	6.16
Tb		0.42	0.56	0.62	0.55	0.44	0.62	0.73	0.62	0.72	0.55	0.49	0.41	0.58	0.75	0.63	0.85
Dy		2.49	3.34	3.63	3.20	2.60	3.43	3.8	3.58	3.94	3.2	2.6	2.31	2.98	3.88	3.03	3.62
Ho		0.45	0.61	0.69	0.59	0.47	0.61	0.8	0.69	0.74	0.62	0.54	0.45	0.58	0.79	0.66	0.83
Er		1.35	1.75	1.96	1.73	1.42	1.73	2.29	1.84	2.07	1.73	1.61	1.31	1.66	2.2	1.91	3.05
Tm		0.20	0.26	0.28	0.25	0.22	0.26	0.33	0.26	0.3	0.27	0.25	0.19	0.25	0.31	0.37	0.53
Yb		1.22	1.61	1.71	1.51	1.38	1.64	2.2	1.47	1.89	1.79	1.77	1.23	1.62	2.08	2.35	3.32
Lu		0.19	0.23	0.26	0.23	0.22	0.25	0.34	0.22	0.28	0.29	0.3	0.19	0.25	0.31	0.41	0.58
ΣLREE/ΣHREE		86.5	109.6	81.61	103.84	109.71	139.14	158.65	111.84	154.53	142.79	74.88	151.68	145.55	149.12	121.45	170.41
La _N /Y _{BN}		7.64	7.27	4.90	7.16	9.51	9.021	9.10	7.52	9.17	10.54	7.20	12.53	10.99	8.54	7.81	7.99
La _N /Sm _N		8.42	7.61	4.33	7.93	10.21	10.6361	9.11	8.63	10.36	11.07	6.77	13.14	12.82	8.89	8.23	8.08
Gd _N /Y _{BN}		2.68	2.39	1.51	2.46	3.50	2.99	2.85	2.40	2.89	3.87	2.23	4.64	3.88	2.77	4.27	4.30
δEu		2.44	2.49	2.24	2.51	2.19	2.66	1.94	2.47	2.27	1.79	2.01	1.69	2.13	2.09	1.54	1.52

注:样品 7~10 引自董建华,2003(董建华等,2003);样品 11~14 引自陈斌,2004(郑建民,2007);样品 15、1614 引自陈斌,2005(周凌等,2005)。

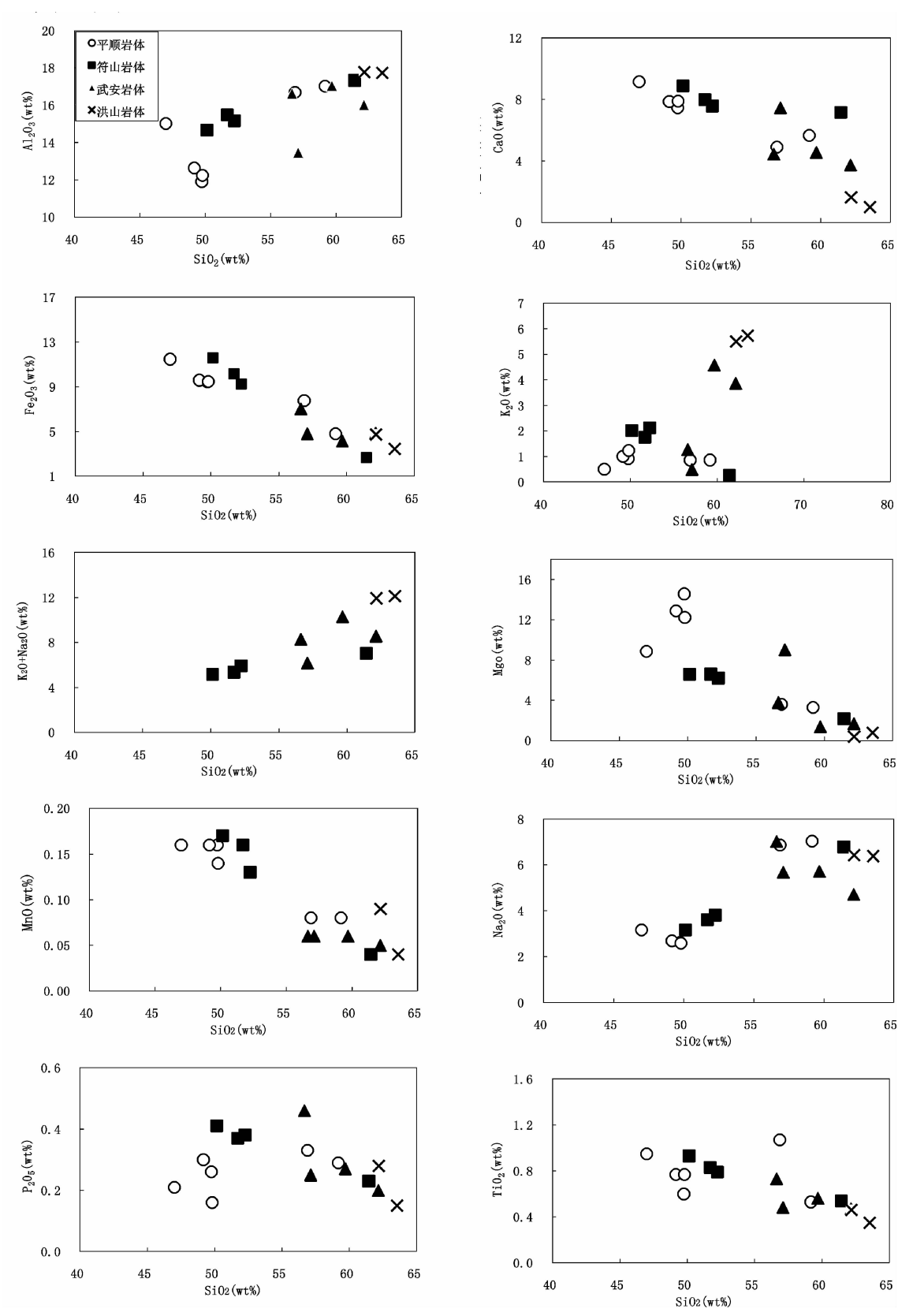


图 3 太行山南段侵入杂岩体主元素哈克图解

Fig. 3 Hake diagrams for major elements of the intrusive complexes from the southern Taihang orogen

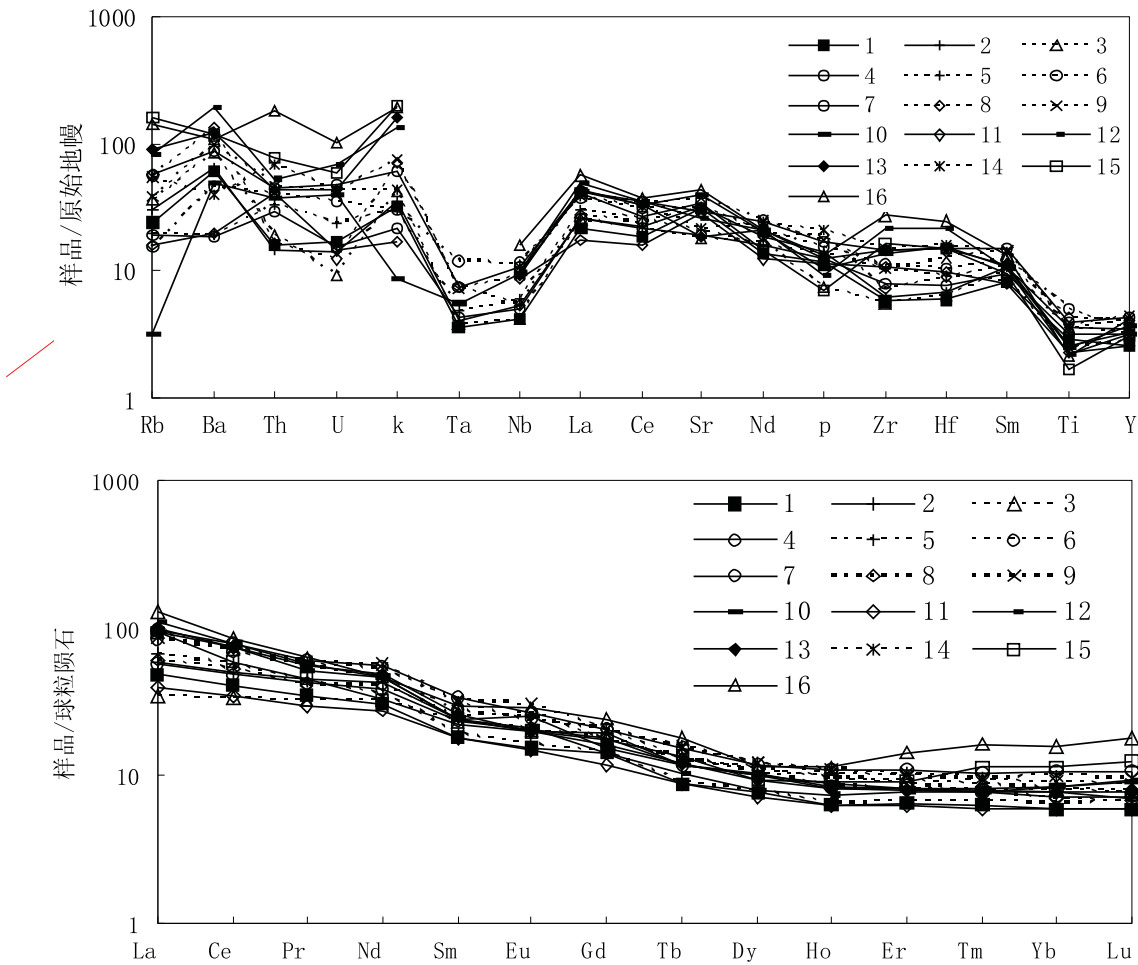


图 4 太行山南段杂岩体微量元素蛛网图和稀土模式图

Fig. 4 the rare element spider diagram and REE distribution pattern of intrusive complexes from the southern Taihang orogent

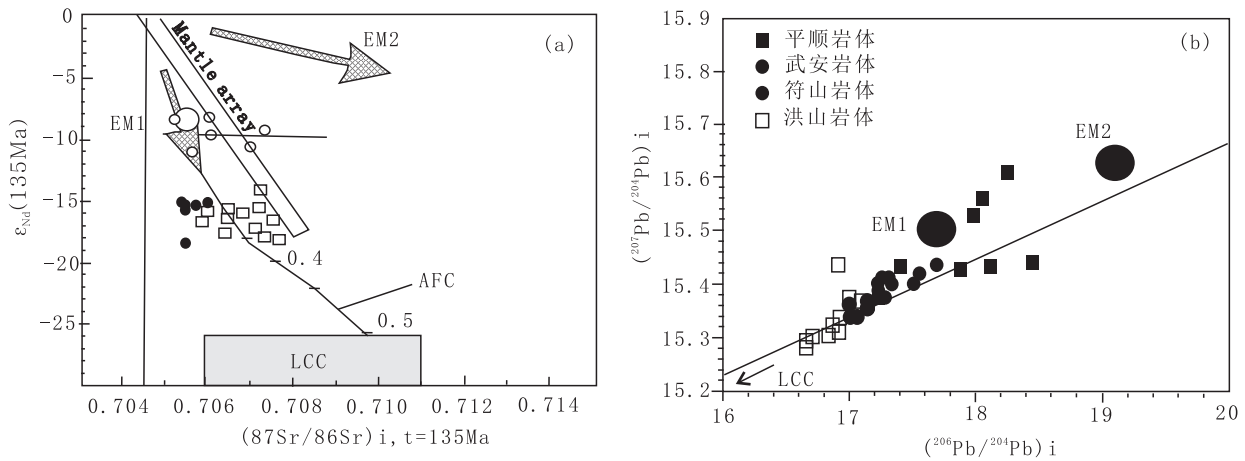


图 5 Nd - Sr - Pb 同位素图解(图 5a 据 DePaolo (1981), 图 5b 据 Zindler A (1986))

Fig. 5 Nd - Sr - Pb istopic data

洪山杂岩体具有比符山-武安杂岩体明显高但相对均一的 ϵ_{Nd} 值 ($-8.2 \sim -11$) 和变化较大的 I_{Sr} ($0.705\,2 \sim 0.710\,2$), 数据点呈水平分布。在图 5b 中, 大部分样品也分布在 EMI 和 LCC 之间, 个别样品分布在 EMI 和 EM2 之间, 其中, 平顺杂岩体 Pb 同位素组成成分偏高 [$(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 17.859 \sim 18.474$, $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 15.429 \sim 15.612$, $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i = 37.374 \sim 38.641$], 分布在 EMI 和 EM2 之间下地壳区域, 处于地球等时线的右侧, 靠近 EMI, 具有富集放射性成因 Pb 的特征; 符山杂岩体 ($16.92 \sim 17.3$, $15.32 \sim 15.42$, $37.16 \sim 37.63$)、武安岩体 ($16.63 \sim 17.4$, $15.28 \sim 15.44$, $36.78 \sim 37.3$) 和洪山杂岩体 ($16.92 \sim 17.3$, $15.32 \sim 15.42$, $37.16 \sim 37.63$)、武安岩体 ($17.28 \sim 17.74$, $15.40 \sim 15.48$, $37.01 \sim 38.12$) 的样品呈连续变化趋势, 但洪山岩体 Pb 同位素比值相对较高(陈斌等, 2005)。

表 2 太行山南段西安里侵入岩体 Pb 同位素分析数据
Tab. 2 Pb isotopic determination data of the intrusive rocks from Pingshun area, Sourthern Taihang Mountains

样品号	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	μ
SG105	17.959	15.531	38.279	9.38
SG106	18.223	15.612	38.641	9.51
SG308	18.125	15.434	38.289	9.17
SG309	18.044	15.566	38.402	9.44
SG201	18.474	15.431	37.374	9.13
SG204	17.859	15.429	37.509	9.19

3 讨论

3.1 太行山南段杂岩体成因

平顺、符山和武安杂岩体最大特征是低 Si (近 80% 的测试数据 $\text{SiO}_2 < 58\%$) 高 Mg (近 86% 的测试数据 $\text{Mg}^\# > 53$), 理论上它们不可能完全形成于基性下地壳的部分熔融, 应该有部分地幔源区岩浆的加入或本身就来源于地幔源区。而洪山岩体却具有高 Si ($\text{SiO}_2 > 62\%$) 低 Mg ($\text{Mg}^\# < 32$) 特征, 反映了它们在因上的差异。Fe₂O₃、MgO、CaO 和 TiO 与 SiO₂ 呈线性负相关, Na₂O、K₂O 和 Al₂O₃ 与 SiO₂ 呈正相关, 说明岩浆演化过程中铁镁矿物的分离为主要作用, 这与符山、平顺地区广泛产出橄榄石、角闪石和辉石的捕掳晶相吻合(刘建朝等, 2009; 张海

东等, 2009)。Ba、Sr、LREE 和大离子亲石元素相对富集, 并且高于这些元素在地壳中的平均含量, 说明有来自相当富集地幔源区部分熔融岩浆的加入; Nb、Ta、Ti 等高场强元素相对于其他元素发生明显的亏损, 说明岩浆在上升侵位过程中受到了地壳物质的混染。微弱的 Eu 正异常和 HREE 明显亏损, 说明岩浆起源较深 ($> 60\text{ km}$) (罗照华等, 1997, 1999), 斜长石处于不稳定区, 没有发生斜长石分离结晶作用, 即使发生也没有分离出去, 环带斜长石大量产出证明了这一点。在 La/Sm-La 判别图解(图 6)中, 太行山南段杂岩体的 La/Sm 值与 La 的丰度呈正相关, 随着 La 的增加而增加, 说明岩石成分的变化与岩浆混合作用有关, 结晶分异作用不具有重要意义, 与微量元素图解结果相吻合。

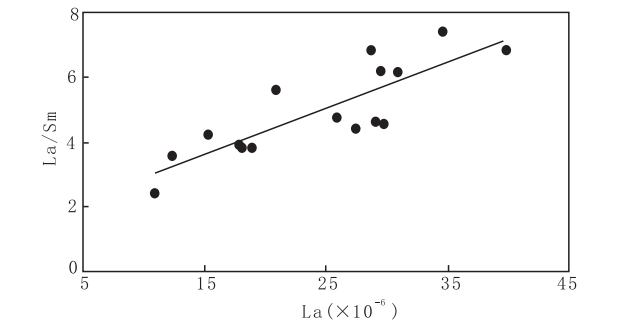


图 6 La/Sm-La 图解
Fig. 6 diagram of La/Sm-La

Sr-Nd 同位素数据显示, 符山-武安-洪山岩体 ($I_{Sr} = 0.705\,2 \sim 0.707\,1$, $\epsilon_{Nd} = -8.2 \sim -18$) 的形成应该有幔源物质贡献, 但与本区典型的 EMI 型富集地幔 ($I_{Sr} = 0.705\,4 \sim 0.705\,8$, $\epsilon_{Nd} = -8.2$) 又有所不同(Chen et al., 2002), 表明应该有相当多的下地壳组分混入该杂岩体。在图 5a 中, 符山-武安-洪山杂岩体样品分散在 EMI 和 LCC 之间, 说明这些杂岩体具有壳幔岩浆混合成因的特点。洪山岩体靠近 EMI 呈水平分布, 暗示其同位素组成接近 EM1 型富集地幔, 下地壳组分很少混入; 符山岩体分布范围和相对于武安岩体而言, 靠近 EMI, 远离 LCC, 且二者间连续性较好, 说明武安岩体要比符山岩体具有更多壳源组分。符山-武安杂岩体 Sr、Nd 同位素大致呈负相关关系, 再次说明具有下地壳组分的加入。在图 5b 中, 符山-武安-洪山杂岩体样品也落入 EMI 和 LCC 之间, 各地区杂岩体 Pb 同位素组成与 Sr、Nd 同位素组成相一致, 暗示太行山南段杂岩体

起源于EMI型富集地幔,并受到下地壳的混染,其中武安岩体含有地壳组分最多,其次是符山和洪山岩体;而平顺杂岩体样品落在EMI和EMII之间下地壳区域内,地球等时线的右侧,富集放射性成因Pb,说明源区应富集大离子亲石元素U、Th,来源于富集地幔,根据平顺岩体与其他岩体具有相似的主量元素、微量元素和稀土元素变化趋势,可认为它也起源于EMI型富集地幔。

3.2 岩浆演化

在 SiO_2 -ALK图解中,由平顺杂岩体,经符山、武安,到洪山杂岩体, SiO_2 逐渐升高,ALK则表现为先升高后降低的趋势,这种变化可能是由原始岩浆演化而形成。平顺-符山-武安杂岩体主量元素与 SiO_2 基本呈线性关系,微量元素、稀土元素变化曲线一致,且稀土总量逐渐升高,这可能反映平顺-符山-武安岩体来源于同一期岩浆活动,岩浆最先在平顺地区侵位,随后在符山、武安等地区发生侵位,三者岩性和地球化学组分的变化可能是原始岩浆经铁镁质矿物结晶分异和下地壳混染等作用造成,该结论也得到了各岩体Sr-Nd-Pb同位素的支持。洪山杂岩体一直以来被认为是符山-武安杂岩体分离结晶的结果(黄福生等1990),然而本次研究却不支持这种结论,因为洪山正长岩的 ϵ_{Nd} 和Pb同位素组成比符山-武安杂体都高,这说明其不可能由符山-武安杂岩体演化而来。另外,太行山南段各岩体精确的同位素侧年数据(平顺地区橄榄辉长辉绿岩、闪长岩Rb-Sr同位素等时线年龄分别为238.45 Ma和123 Ma(李凯明,2000),符山地区二长辉长岩、角闪闪长岩锆石U-Pb年龄分别为138 Ma(陈斌等,2005)和126 Ma(彭头平等,2004),武安地区石英二长岩的锆石U-Pb年龄为127~133 Ma(陈斌等,2005),洪山地区正长岩的锆石U-Pb年龄为135 Ma(周琳等,2005))。表明:平顺-符山-武安岩体形成年代逐渐变新,这与上面分析一致;洪山岩体不可能由平顺-符山-武安岩体演化而来,因为其形成年代要比其他地区闪长岩形成年龄要早。

3.3 地球动力学分析

太行山南段岩浆活动主要发生在123~135 Ma,相当于早白垩世,当时区域地质背景是:伊佐奈歧板块向西俯冲、挤压,特提斯洋板块的向北俯冲,二者造成华北陆块逆时针旋转,伴随有强烈的构造变动事件。主要表现为近东西向挤压作用下冲断推

覆、差异抬升和热力构造事件,包括燕山期岩浆侵入或火山喷发活动。

伊佐奈歧板块和特提斯洋板块共同作用,引发华北地块软流圈上涌,形成吕梁地幔柱、邯邢地幔柱、断垄带翘倾等地质现象(Rae, 2004; Yang et al., 2009; 刑集善等,2007)。其中,邯邢地幔柱的活动是造成太行山南段中生代大规模岩浆活动的主要原因。邯邢软流圈上涌柱柱身与岩石圈(下地壳)呈陡接触时,上涌伴随的热浮物质聚集在此处(点),由于热力集中,易使岩石圈破裂,热浮物质(幔源岩浆)沿此破裂处上涌并底侵下地壳(Yang et al., 2009),其所带的高热流引起古老下地壳(TTG等)部分熔融,形成花岗质岩浆,当幔源岩浆由于某种原因诱发上侵与壳源岩浆混合,形成混浆。平顺地区位于邯邢地幔柱边缘,与其成陡接触,这可能是岩浆活动最早发生在此地的主要原因,随后,由于热浮物质在柱头不断聚集,当达到一定程度时,相继在符山-武安地区也发生了岩浆侵入。至于洪山岩体可能是更早期岩浆派生的产物,只是其母岩没有出露地表。

4 结论

(1)平顺-符山-武安-洪山杂岩体具有相似的地球化学性质,主量元素基本与 SiO_2 呈线性相关,富集大离子亲石元素(如Sr、Ba、K)和LREE,亏损高场强元素(如Nb、Ta、Ti)和HREE,无Eu异常或只有微弱的正Eu异常,高度富集同位素成分,暗示它们起源于EMI型富集地幔的部分熔融,在上升侵位的过程中受到不同程度的下地壳物质混染。

(2)平顺-符山-武安杂岩体可能是同一期岩浆演化的产物,最早在与幔柱呈陡接触地带(平顺地区)发生岩浆侵位,后经铁镁质矿物结晶分离和下地壳物质混染,又相继在符山地区、武安地区发生岩浆侵位活动,形成复杂岩体。与平顺-符山-武安岩体相比,洪山岩体具有较高 ϵ_{Nd} 值和Pb同位素比值,且成岩年代较早,与平顺-符山-武安岩体分属不同岩浆热事件或不同的岩浆房,在侵位地壳过程中受到微弱下地壳混染。

(3)太行山南段中生代岩浆活动可能与邯邢地幔柱上涌有关。

参考文献(References):

- 陈斌,翟明国,田伟,等.太行山南段中生代杂岩体的岩石成因:元素和 Nd-Sr-Pb 同位素地球化学证据[J]. 矿物岩石地球化学通报,2005,24(2):93-103.
- Chen, B., Zhai, M. G., Tian, W., et al. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive complexes from the southern Taihang orogen, north China craton: elemental and Sr-Nd-Pb isotopic constraints[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2005, 24(2): 93-103 (in Chinese with English abstract).
- 董建华,陈斌,关周凌.太行山南段符山岩体的成因:岩石学和地球化学证据[J]. 自然科学进展,2003,13(7):767-773.
- Dong, J. H., Chen, B., Guan, Z. L. Petrogenesis of the intrusive complexes in Fushan from the southern Taihang orogen: petrological and geochemical[J]. Progress in Natural Science, 2003, 13(7): 767-773 (in Chinese with English abstract).
- 黄福生,薛绥洲.邯邢侵入体中幔源超铁镁质岩包体的发现及其矿物地球化学特征[J]. 岩石学报,1990,6(3):40-45.
- Huang, F. S., Xue, S. Z. The discovery of the mantle-derived ultramafic xenoliths in Handan-Xingtai intrusive complex and their mineralogical-geochemical characteristics[J]. Acta Petrologica Sinica, 1990, 6(4): 40-45 (in Chinese with English abstract).
- 李凯明.山西平顺-济南中生代岩浆岩与深部过程[C]. 2000, 中国地质大学(北京), 1-29.
- Li, K. M. Magmatic activities and orogenic process of Ping-shun area in Shanxi province and Jinan area in Shandong province[C]. China University of Geosciences, 2000, 1-29 (in Chinese with English abstract).
- 刘红涛,孙世华,刘建明,等.华北克拉通北缘中生代高 Sr 花岗岩类:地球化学与源区性质[J]. 岩石学报,2002,18(3):257-274.
- Liu, H. T., Sun, S. H., Liu, J. M., 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 (in Chinese with English abstract).
- 刘建朝,张海东,刘淑文,等.太行山南段平顺地区杂岩体成因研究[J]. 地质论评,2009,55(3):318-328.
- Liu, J. C., Zhang, H. D., Liu, S. W., et al. Study on genesis of the intrusive complex in Pingshun area, southern Taihang mountains[J]. Geological Review, 2009, 55(3): 318-328 (in Chinese with English abstract).
- 罗照华,邓晋福,赵国春,等.太行山造山带岩浆活动特征及其造山过程反演[J]. 中国地质大学学报——地球科学,1997,22(3):27-254.
- Luo, Z. H., Deng, J. F., Zhao, G. C., et al. Characteristics of magmatic activities and orogenic process of Taihang intraplate orogen[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1997, 22(3): 27-254 (in Chinese with English abstract).
- 罗照华,邓晋福,韩秀卿.太行山造山带岩浆活动及其造山过程反演[M]. 北京:地质出版社,1999.
- Luo, Z. H., Deng, J. F., Han, X. Q. Characteristics of magmatic activities and orogenic process of Taihang intraplate orogen[M]. The Geological Publishing House, Beijing, 1999 (in Chinese).
- 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,2004,20:1253-1262.
- Peng, T. P., Wang, Y. J., Fan, W. M., et al. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of the diorites for southern Taihang Mountains in the North China Interior and its petrogenesis[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20: 1253-1262 (in Chinese with English abstract).
- 王强,许继锋,赵振华,等.大别山燕山期亏损重稀土元素花岗岩类的成因及其动力学意义[J]. 岩石学报,2001,17:551-564.
- Wang, Q., Xu, J. F., Zhao, Z. H., et al. The petrogenesis and geodynamic significances of HREE depleted granitoids during Yanshan period in the Dabie Mountains[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17: 551-564 (in Chinese with English abstract).
- 邢集善,杨巍然,邢作云,等.中国东部深部构造特征及其与矿集区关系[J]. 地学前缘,2007,14(3):115-128.
- Xing, J. S., Yang, W. R., Xing, Z. Y., et al. Deep-seated structure characteristics of eastern China and its relation with metal mineralization-concentrated region[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(3): 115-128 (in Chinese with English abstract).
- 张海东,刘建朝,刘淑文,等.太行山南段平顺地区矽卡岩铁矿地质特征及成矿模式探讨[J]. 矿物岩石,2009,29(3):53-59.
- Zhang, H. D., Liu, J. C., Liu, S. W., et al. Geological characteristics and metallogenic model of skarn oron in Pingshun area, southern Taihang mountains[J]. Jour-

- nal of Mineralogy and Petrology, 2009, 29(3):53-59 (in Chinese with English abstract).
- 郑建民. 冀南邯邢地区矽卡岩铁矿成矿流体及成矿机制[C]. 中国地质大学(北京), 2007, 45-120.
- Zheng, J. M. The ore-forming fluid and mineralization of sharn Fe deposits in Handan-Xingtai area, south Hebei[C]. China University of Geosciences (Beijing), 2007, 45-120(in Chinese with English abstract).
- 周凌, 陈斌. 南太行洪山正长岩体的成因和意义: 锆石 SHRIMP 年代学、化学成分和 Sr-Nd 同位素特征[J]. 自然科学进展, 2005, 15(11):1357-1364.
- Zhou, L., Chen, B. Petrogenesis of Hongshan syenite from the southern Taihang orogen: SHRIMP zircon U-Pb geochronology, constraints and Sr, Nd isotopic[J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(11):1357-1364 (in Chinese with English abstract).
- Chen, B., Zhai, M. G. Geochemistry of late Mesozoic lamprophyre dykes from the Taihang Mountains, north China, and implications for the sub-continental lithospheric mantle[J]. Geol Mag, 2003, 140:87-93.
- Chen, B., Zhai, M. G., Shao J. Petrogenests and significance of the Mesozoic north Taihang complex: major and trace element evidengce[J]. Sci. in China (D), 2002, 46:941-953.
- DePaolo, D. J. Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1981, 53:189-202.
- Jahn, B. M., Auvray, B., Cornichet, J., et al. 3.5Ga old amphibolites from eastern Hebei province, China: field occurrence, petrology, Sm-Nd isochron age and REE geochemistry[J]. Precamb. Res., 1987, 34:311-346.
- Luo, Z. H., Deng, J. F., Cao, Y. Q., et al. Magmatic activities and orogenic process of Taihang shan intra-plate orogeny [J]. Journal of China University of Geosciences, 1999, 10(1):76-79.
- Rae, A. J., Cooke, D. R., Phillips, D., et al. The nature of magmatism at Palinpinon geothermal field, Negros Island, Philippines: Implications for geothermal activity and regional tectonics [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2004, 129(4): 321-342.
- Rapp, R. P., Watson, E. B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: implications for continental growth and crust mantle recycling [J]. Petrol. 1995, 36: 91-931.
- Yang, X. K., Chao, H. X., N. Ivolkova., et al. Geochemistry and SHRIMP geochronology of alkaline rocks of the Zijinshan massif in the eastern Ordos basin China [J]. Russian Geology and Geophysics, 2009, 50(9): 751-762.
- Wu, F. Y., Wilde, S., zhang, G. L., et al. Geochronology and petrogenesis of the post-orogenic Cu-Ni sulfide-bearing mafic-cultramafic complexes in Jilin Province, NE China [J]. Asian Earth Sci, 2004, 23: 781-797.
- Zhai, M. G., Zhu, R. X., Lui, J. M. Time-range of Mesozoic tectonic regime mversion in eastern North China Block [J]. Science in China, 2004, 47: 151-159.
- Zhang, H. F., Zheng, J. P. Geochemical characteristics and petrogenesis of Mesozoic basalts from the North China Craton: a case study in Fuxin, Liaoning province [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(9): 924-930.
- Zindler, A., Hart, S. R. Chemical geodynamics [J]. Ann. Rev. Earth Planet Sci., 1986, 14:493-570.