

华北克拉通南缘太古—元古宙界线安沟群火山岩的年龄及地球化学

高山^{1,2}, 周炼², 凌文黎², 刘勇胜¹, 周鼎武¹

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 西北大学地质学系教育部大陆动力学重点实验室, 陕西西安 710069

摘要: 河南登封地区登封群和安沟群记录了华北克拉通南缘太古—元古宙界线两侧地层较完整的演化历史。Kröner *et al.* (1988) 曾获得登封群顶部老羊沟组变英安岩中锆石的 SHRIMP 年龄为 $(2\,512 \pm 12)$ Ma。本研究获得不整合覆盖在登封群之上的安沟群同源双峰式拉斑玄武岩和英安岩 7 个样品全岩 Sm-Nd 同位素等时线年龄为 $(2\,507 \pm 96)$ Ma, MSWD = 6.3, 初始 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.509\,560 \pm 0.000\,093$, $\epsilon_{\text{Nd}}(2.5\text{ Ga}) = 3.27 \pm 1.82$ 。上述年龄制约了登封群顶部长英质火山岩与安沟群底部的双峰火山岩之间的年龄相差最多应不超过 113 Ma。安沟群演化程度较低的拉斑玄武岩 La/Nb 比值为 0.66 ~ 1.14, 与软流圈地幔的比值接近, 而明显不同于岛弧玄武岩 ($\text{La}/\text{Nb} < 2.0$)。结合安沟群火山岩的双峰特征, 这些说明太古宙末或元古宙初期至少华北克拉通南缘已进入陆内裂谷伸展环境。

关键词: 华北克拉通; 太古宙; 双峰火山岩; Sm-Nd 同位素。

中图分类号: P59

文章编号: 1000-2383(2005)03-0259-05

收稿日期: 2005-01-16

Age and Geochemistry of Volcanic Rocks of Angou Group at the Archean-Proterozoic Boundary

GAO Shan^{1,2}, ZHOU Lian², LING Wen-li², LIU Yong-sheng¹, ZHOU Ding-wu¹

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

Abstract: The Dengfeng Group and Angou Group from the Dengfeng area, Henan Province preserve rocks at the Archean-Proterozoic boundary. Kröner *et al.* (1988) yielded an SHRIMP U-Pb zircon age of $(2\,512 \pm 12)$ Ma for a date from the upper Dengfeng Group. Here we report an Sm-Nd whole rock isochron age of $(2\,507 \pm 96)$ Ma (MSWD = 6.3) for 7 volcanic rocks from the Angou Group with initial $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.509\,560 \pm 0.000\,093$, which corresponds to $\epsilon_{\text{Nd}}(2.5\text{ Ga}) = 3.27 \pm 1.82$. This constrains an age difference of less than 113 Ma between the top of Dengfeng and the bottom of Angou volcanic rocks. The less evolved Angou metatholeiites are characterized by asthenospheric La/Nb ratios (< 2.0). Together with the bimodal character, it is inferred that the Angou Group formed in a continental rift setting.

Key words: North China craton; Archean; bimodal volcanic rocks; Sm-Nd isotope.

太古—元古宙(A-P)界线是地质演化历史上最重要的界线,在该界线上地球的热状态、岩浆作用和沉积作用的性质均发生明显改变;因此,对该界线的年龄和岩石组成及其所反映的地球内部、地球表层系统和构造机制变化的研究,倍受人们的关注

(Taylor and McLennan, 1985; Condie, 1997)。华北克拉通保留有较完整的太古和元古宙岩石,是我国研究 A-P 界线的最佳场所。我国华北克拉通 A-P 界线的地层主要发育山西五台、中条以及河南登封 3 个地区。现有研究主要集中于五台地区,涉及对晚

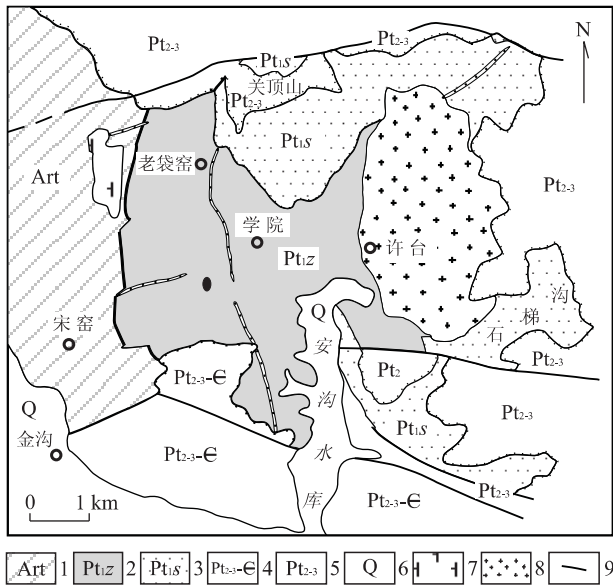


图 1 河南临汝县寨沟地区地质简图(据孙枢等(1985)简化)
Fig. 1 Geological sketch map of Zhaigou area in Lingrui county, Henan Province

1. 晚太古代太华群; 2. 早元古代安沟群寨沟组; 3. 早元古代安沟群石梯沟组; 4. 中上元古界—寒武系; 5. 中上元古界; 6. 第四系; 7. 闪长岩; 8. 花岗岩; 9. 断层

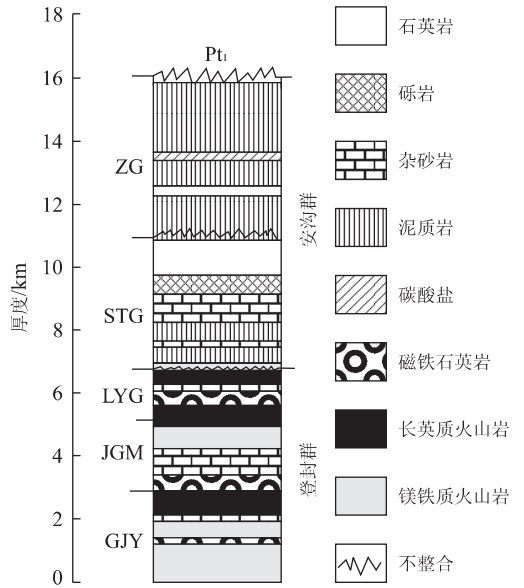


图 2 登封群和安沟群地层柱状图(不同岩性地层厚度资料参考孙枢等(1985))

Fig. 2 Stratigraphic column of the Dengfeng Group and Angou Group

GJY. 郭家窑组; JGM. 金家门组; LYG. 老羊沟组; STG. 石梯沟组; ZG. 寨沟组

太古代五台群和早元古代溱沱群的地层层序、同位素年代学及其构造关系的研究(白谨等, 1992; Zhao *et al.*, 2000, 2001; 李江海等, 2001; Liu *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2004). 孙大中和胡维兴(1993)对中条地区的晚太古代和早元古代岩石的年代学进行了深入研究. 孙枢等(1985)和 Zhang *et al.* (1985)对登封地区晚太古代登封群和其上覆可能为早元古代的安沟群地层层序、构造和岩石组成进行了深入研究. Kröner *et al.* (1988)等曾获得登封群顶部老羊沟组变英安岩中锆石的 SHRIMP 年龄为 $(2512 \pm 12) \text{Ma}$. 李曙光等(1987)曾获得登封群下部郭家窑组双峰火山岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 $(2509 \pm 16) \text{Ma}$, $\epsilon_{\text{Nd}}(2.5 \text{ Ga}) = 2.2 \pm 0.4$.

本文报道了同源的安沟群双峰火山岩的 Sm-Nd 等时线年龄和地球化学特征, 并对其形成的构造背景进行了讨论.

1 地质概况

孙枢等(1985)和 Zhang *et al.* (1985)的研究表明, 华北克拉通南缘河南登封—临汝地区前寒武纪岩石主要由晚太古代登封花岗—绿岩地体和可能

为元古代最早期的安沟群组成(图 1). 登封花岗—绿岩地体由登封群火山—沉积岩和基本为同时代的侵入其中的英云闪长岩—奥长花岗岩—花岗闪长岩(TTG)和花岗岩组成. 登封群下部为郭家窑组, 主要由双峰式镁铁质—超镁铁质和长英质火山岩组成, 夹少量磁铁石英岩和杂砂岩(图 2). 登封群中部为金家门组, 主要由杂砂岩、磁铁石英岩和镁铁质火山岩组成; 登封群上部为老羊沟组, 主要由英安流纹岩、杂砂岩、砾岩、变泥质岩和磁铁石英岩组成. 安沟群下部为石梯沟组, 其底部由互层状双峰式玄武岩和英安岩组成, 中上部为杂砂岩、泥岩、砾岩和石英岩. 安沟群上部为寨沟组, 主要由泥岩组成, 夹少量石英岩和碳酸盐岩. 安沟群上覆为早元古代的高山群石英岩. 登封群变质等级为低角闪岩相, 安沟群为绿片岩相. 孙枢等(1985)和 Zhang *et al.* (1985)的研究表明, 登封群与安沟群之间为角度不整合关系.

2 样品来源和分析方法

用于本研究的 7 个样品来自安沟群底部的双峰式玄武岩和英安岩. 这些样品新鲜未风化. 其中, 样品 F01 和 A14 含少量顺层分布的碳酸盐. 在显微镜

表 1 安沟群火山岩的主量元素成分

Table 1 Major element compositions of volcanic rocks from the Angou Group

$w_B/\%$	玄武岩				英安岩		
	F01	A14	A17	A20	A16	A18	A23a
SiO ₂	44.69	49.20	47.60	48.35	68.84	68.14	63.13
TiO ₂	1.03	1.04	1.12	1.15	0.35	0.32	0.54
Al ₂ O ₃	13.66	15.80	13.61	14.35	14.23	14.90	15.74
Fe ₂ O ₃	12.46	11.90	14.19	12.03	3.51	0.98	4.79
MnO	0.17	0.15	0.20	0.17	0.04	0.05	0.07
MgO	5.43	6.65	6.94	8.30	2.26	1.21	2.11
CaO	8.72	8.48	9.60	9.20	1.69	3.04	4.16
Na ₂ O	2.65	2.76	2.05	2.22	5.44	4.95	4.59
K ₂ O	0.17	0.71	0.14	0.25	1.01	1.88	1.36
P ₂ O ₅	0.07	0.26	0.08	0.09	0.10	0.14	0.10
CO ₂	7.05		1.01	0.39	0.43		1.16
H ₂ O ⁺	4.13		4.30	4.56	2.00		2.45
LOI			2.65				
sum	100.23	99.60	100.84	101.06	99.90	95.61	100.20

LOI 为烧失量。

下未观察到明显风化和蚀变作用。样品用行星式玛瑙碎样机粉碎至 200 目以下。主量元素分析由湖北省地质测试研究所完成, 微量元素和稀土元素分析在西北大学教育部大陆动力学重点实验室用 Elan 6100 DRC (dynamic reaction cell) ICP-MS 完成。Sm-Nd 同位素测定在中国地质大学(武汉)地质过程和矿产资源国家重点实验室 Finnigan MAT261 同位素质谱仪上完成。对 BCR-2、AGV-1 和 BHVO-1 等玄武岩和安山岩国际标准参考物质的分析结果表明, 微量元素分析的精度和准确度优于 10%。Nd 同位素比值按 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 进行标准化, 对 La Jolla 标准的分析结果为 0.511845 ± 0.000012 , 同位素详细分析方法见 Gao *et al.* (1999)。

3 结果与讨论

所研究样品的主量、微量和稀土元素与 Sm-Nd 同位素分析结果见表 1 至表 3。由表 1 可见, F01、A14、A17 和 A20 为低钾拉斑玄武岩, 它们的 K₂O 含量为 0.14%~0.71%。A16、A18 和 A23 为英安岩。由于 F01 和 A14 含有少量碳酸盐, 因此, 有必要首先讨论碳酸盐对于微量元素和 Sm-Nd 同位素的可能影响。以下证据表明, 除 Sr 以外碳酸盐的影响可忽略不计: (1) 2 样品中碳酸盐呈顺层状分布, 表明碳酸盐主要为与沉积岩成岩过程中同时形成的; (2) 除 Sr 以外, REE 和微量元素在沉积碳酸盐中

表 2 安沟群火山岩的微量和稀土元素成分

Table 2 Trace and rare earth element compositions of volcanic rocks from the Angou Group

$w_B/10^{-6}$	玄武岩				英安岩		
	F01	A14	A17	A20	A16	A18	A23a
V	312	263	336	314	45	50	101
Cr	210	240	132	226	43	52	53
Co	49	51	48	47	7.8	16	13
Ni	117	97	75	131	27	19	26
Cu	37	82	121	204	18	23	14
Zn	114	103	107	85	34	32	69
Rb	1.58	15	1.56	5.7	20	40	32
Sr	100	418	116	141	159	48	501
Y	25	25	23	19	5.8	12	5.7
Zr	79	68	61	73	109	105	94
Nb	5.0	5.3	2.7	3.1	2.0	4.0	3.8
Ba	27	222	12	22	312	416	435
La	3.30	13.0	3.08	3.28	10.40		13.00
Ce	9.36	30.0	8.34	9.15	20.80		28.80
Pr	1.60	4.21	1.44	1.51	2.65		3.29
Nd	6.88	17.6	7.38	7.59	10.60		13.60
Sm	2.19	3.80	2.47	2.49	1.99		2.40
Eu	0.76	1.24	0.84	0.89	0.58		0.65
Gd	2.65	3.51	2.57	2.65	1.45		1.68
Tb	0.50	0.62	0.59	0.56	0.23		0.24
Dy	3.26	3.74	3.79	3.67	1.10		1.19
Ho	0.68	0.78	0.87	0.83	0.22		0.23
Er	1.92	2.15	2.40	2.26	0.56		0.56
Tm	0.29	0.34	0.38	0.35	0.09		0.08
Yb	1.81	2.26	2.72	2.57	0.53		0.45
Lu	0.26	0.36	0.42	0.39	0.08		0.07
Pb	11	11	5.43	3.0	3.5		4.9
Th		0.65	0.26	0.26	4.9		5.0
U		0.16	0.07	0.07	0.5		0.5
La/Nb	0.66	2.45	1.14	1.06	5.20		3.42
La _N /Yb _N	1.39	4.39	0.86	0.97	14.97		22.04
Eu/Eu*	0.96	1.04	1.02	1.06	1.04		0.99

的含量一般很低; (3) 碳酸盐含量最高的样品 F01 与不含碳酸盐的样品 A17 和 A20 具有十分相似的 REE 分配模式(图 3); (4) F01 和 A14 在 2.5 Ga 时的 ϵ_{Nd} (为 3.2 和 3.1) 与 A17 和 A20 (3.9 和 3.4) 一致。

图 4 为 7 个样品及 A14 和 A16 两个样品的重复样共 9 个分析点构成的 Sm-Nd 同位素等时线图。由图可见, 这些样品构成了一条良好的等时线。用 ISOPLOT (Ludwig, 1991) 计算获得的等时线年龄为 (2507 ± 96) Ma, MSWD = 6.3, 初始 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.509560 \pm 0.000093$, $\epsilon_{Nd}(2.5\text{ Ga}) = 3.27 \pm 1.82$, 该值在误差范围内与贫化地幔的 $\epsilon_{Nd}(2.5\text{ Ga})$ 值(4.6) 一致。由表 3 可见, 7 个样品无论是玄武岩还是英安岩均具有相似的 $\epsilon_{Nd}(2.5\text{ Ga})$

表 3 安沟群火山岩的 Sm-Nd 同位素组成

Table 3 Sm-Nd isotope compositions of volcanic rocks from the Angou Group

	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ	Sm	Nd	$\epsilon_{\text{Nd}}(2.5 \text{ Ga})$	T_{DM}/Ga
玄武岩	F01	0.194 2	±14	2.36	7.50	3.20	3.04
	A14	0.125 7	±15	3.71	17.8	3.13	2.63
	A14d	0.128 3	±15	3.73	17.6	2.29	2.71
	A17	0.197 0	±6	2.18	6.97	3.87	2.83
	A20	0.195 3	±6	2.57	7.96	3.44	2.98
英安岩	A16	0.106 6	±16	2.00	11.3	4.05	2.54
	A16d	0.107 0	±16	1.86	10.5	3.93	2.55
	A18	0.095 3	±9	2.47	15.7	2.76	2.62
	A23a	0.113 0	±8	2.61	14.0	3.82	2.56

d 为重复分析样品; 模式年龄 T_{DM} 计算中采用的 ^{147}Sm 衰变常数为 0.00654 Ga^{-1} ; $T_{\text{DM}} = 1/\lambda \times \ln\{1 + [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} - 0.51315] / [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} - 0.2137] \}$; Sm 和 Nd 的单位为 10^{-6} 。

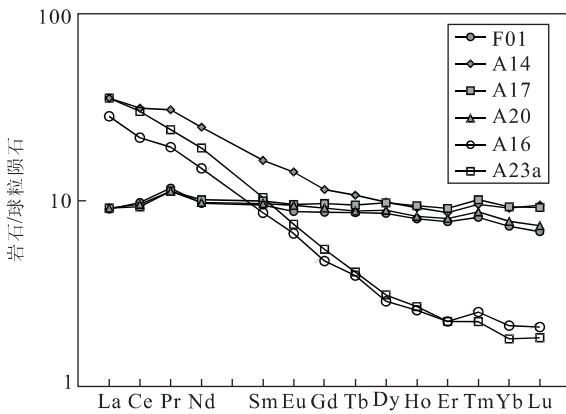


图 3 安沟群双峰火山岩的稀土元素分配模式

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of volcanic rocks from the Angou Group

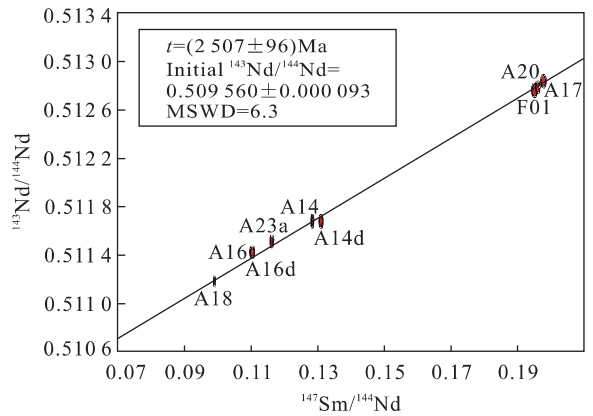


图 4 安沟群双峰火山岩 Sm-Nd 等时线图

Fig. 4 Sm-Nd isochron age for volcanic rocks from the Angou Group

值, 为 2.3~4.1, 表明它们应来自同一源区。因此, 呈互层状产出的安沟群玄武岩和英安岩应为同源岩浆演化的产物。

前已述及, Kröner *et al.* (1988) 获得登封群顶部老羊沟组变英安岩中锆石的 SHRIMP 年龄为 $(2512 \pm 12) \text{ Ma}$ 。李曙光等 (1987) 获得登封群双峰火山岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 $(2509 \pm 16) \text{ Ma}$ 。这些年龄均被解释为代表了登封群火山岩的形成年龄。本研究获得的安沟群底部双峰火山岩的年龄 $(2507 \pm 96) \text{ Ma}$, 虽然略年轻于上述年龄, 但在误差范围内, 这些年龄没有明显差异。详细野外地质研究和按比例尺填图表明 (孙枢等, 1985; Zhang *et al.*, 1985), 安沟群角度不整合在登封群之上, 因此, 前者应年轻于后者。如果将 $(2512 \pm 12) \text{ Ma}$ 的上限 2524 Ma 和 $(2507 \pm 96) \text{ Ma}$ 的下限 2411 Ma 分别作为登封群的上限年龄和安沟群的下限年龄, 则登封群顶部长英质火山岩与安沟群底部双峰火山岩之间

的年龄相差最多不超过 113 Ma。

登封群和安沟群与山西五台地区的五台群和滹沱群在年龄和组合上具有相似之处。五台群及侵入其中的 TTG 岩浆岩亦构成了花岗—绿岩地体, 其年龄集中在 $2513 \sim 2566 \text{ Ma}$ 之间 (Wang *et al.*, 2004)。滹沱群是一套以碳酸盐岩—碎屑岩为主, 中部夹玄武岩的火山沉积建造, 中部河边村组玄武岩的 SHRIMP 锆石年龄为 2358 Ma (白谨等, 1992); 但滹沱群底部缺乏双峰式火山岩。因此, 登封群和安沟群与五台群和滹沱群一样, 为研究华北克拉通太古—元古宙界线提供了理想场所。由于滹沱群底部缺乏可供年龄测定的火山岩, 对安沟群底部双峰火山岩进一步精细的颗粒锆石 U-Pb 定年有可能为华北克拉通 A-P 界线的时间提供更精确制约。

双峰式火山岩是大陆裂谷环境的典型产物。安沟群中上部为泥质岩—石英岩—碳酸盐岩组合 (图 2), 该组合亦是元古宙裂谷环境的典型组合

(Condie, 1997). 除演化程度较高、具轻稀土元素富集(图3)的样品 A14($La=13.0 \times 10^{-6}$)外,安沟群其余3个演化程度较低、具平坦稀土元素分配模式的拉斑玄武岩样品($La \approx 3.0 \times 10^{-6}$),其 La/Nb 比值为 $0.66 \sim 1.14$,与软流圈地幔的比值接近,而明显不同于岛弧玄武岩($La/Nb > 1.4$)(Condie, 2000). 相反,五台群玄武岩 La/Nb 比值 > 1.4 (Wang *et al.*, 2004),它们被解释为岛弧环境的产物(Liu *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2004). 因此,地质和地球化学资料一致表明,安沟群形成于陆内裂谷环境,说明太古宙末或元古宙初期至少华北克拉通南缘已进入陆内伸展阶段.

致谢:刘庆生和徐启东参加了野外工作,在此表示感谢.

References

- Bai, J., Wang, L. Z., Guo, J. J., 1992. Important Precambrian events and their geochronology. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Condie, K. C., 1997. Plate tectonics and crustal evolution. Fourth Edition. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Condie, K. C., 2000. Episodic continental growth models: Afterthoughts and extensions. *Tectonophysics*, 322: 153—162.
- Gao, S., Ling, W. L., Qiu, Y., et al., 1999. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton; Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 1959—1975.
- Kröner, A., Compton, W., Zhang, G. W., et al., 1988. Age and tectonic setting of Late Archean greenstone-gneiss terrain in Henan Province, China, as revealed by single-grain zircon dating. *Geology*, 16: 211—215.
- Li, J. H., Huang, X. N., Qian, X. L., et al., 2001. State-of-art of research on Archean-Proterozoic boundary. *Geological Journal of Chinese Universities*, 7(1): 43—49 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. G., Hart, S. R., Guo, A. L., et al., 1987. Whole-rock Sm-Nd isotopic age and its tectonic significance of the Dengfeng Group, central Henan. *Chinese Science Bulletin*, 22: 1728—1731 (in Chinese).
- Liu, S., Pan, Y., Xie, Q., et al., 2004. Archean geodynamics in the central zone, North China craton; Constraints from geochemistry of two contrasting series of granitoids in the Fuping and Wutai complexes. *Precambrian Research*, 130: 229—249.
- Ludwig, K. R., 1991. ISOPLOT: A plotting and regression program for radiogenic-isotope data. U. S. Geological Survey Open-File Report, 39.
- Sun, D. Z., Hu, W. X., 1993. Precambrian geochronological and tectonic framework of Zhongtiao mountains. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Sun, S., Zhang, G. W., Chen, Z. M., 1985. Precambrian evolution of southern North China block. Metallurgical Industry Press, Beijing, 215 (in Chinese).
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The continental crust: Its composition and evolution. Blackwell, Oxford.
- Wang, Z., Wilde, W. A., Wang, K., et al., 2004. A MORB-arc basalt-adakite association in the 2.5 Ga Wutai greenstone belt: Late Archean magmatism and crustal growth in the North China craton. *Precambrian Research*, 131: 323—343.
- Zhang, G. W., Bai, Y. B., Sun, Y., et al., 1985. Composition and evolution of the Archean crust in central Henan, China. *Precambrian Research*, 27: 7—35.
- Zhao, G. C., Cawood, P. A., Wilde, S. A., et al., 2000. Metamorphism of basement rocks in the central zone of the North China craton; Implications for paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Research*, 103: 55—88.
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Cawood, P. A., et al., 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China craton; Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107: 45—73.

附中文参考文献

- 白谨, 王汝铮, 郭进京, 1992. 五台山早前寒武纪重大地质历史事件及其年代. 北京: 地质出版社.
- 李江海, 黄雄南, 钱祥麟, 等, 2001. 太古宙—元古宙界线的研究现状. 高校地质学报, 7(1): 43—49.
- 李曙光, Hart, S. R., 郭安林, 等, 1987. 河南中部登封群全岩 Sm-Nd 同位素年龄及其构造意义. 科学通报, 22: 1728—1731.
- 孙大中, 胡维兴, 1993. 中条山前寒武纪年代构造格架和年代地壳结构. 北京: 地质出版社.
- 孙枢, 张国伟, 陈志明, 1985. 华北断块区南部前寒武纪地质演化. 北京: 冶金工业出版社.