

中国东部全新世火山的镭-钍同位素年代学*

邹海波^{1,2} 郭紫佩² 樊祺诚³ 赵勇伟³

ZOU HaiBo^{1,2}, GUO ZiPei², FAN QiCheng³ and ZHAO YongWei³

1. Department of Geosciences, Auburn University, Auburn, AL 36830

2. 大陆动力学国家重点实验室,西北大学地质系,西安 710069

3. 中国地震局地质研究所,北京 100029

1. Department of Geosciences, Auburn University, Auburn, AL 36830, USA

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

3. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2020-04-07 收稿, 2020-05-30 改回.

Zou HB, Guo ZP, Fan QC and Zhao YW. 2020. Holocene volcanoes from eastern China: Constraints from Ra/Th isotope disequilibrium. *Acta Petrologica Sinica*, 36(7):1945–1952, doi:10.18654/1000-0569/2020.07.01

Abstract An active volcano is defined as a volcano that has had at least one eruption in the past 10,000 years during Holocene. Isotope dating of young volcanoes that lack historic eruption records is challenging but is important for volcanic hazard assessment and volcano classifications (active or not). Here we use high-temporal-resolution Ra/Th disequilibrium to evaluate possible Holocene eruptions for young volcanoes from eastern China. According to ²²⁶Ra/²³⁰Th and ²³⁰Th/²³⁸U disequilibrium data, Leihuling volcano and Maanling volcano from Hainan Island and Jingpohu from NE China are Holocene volcanoes; Longgang volcano has both Holocene eruptions and Late Pleistocene eruptions; Aershan volcano from Central Daxing'Anling and Nuominhe volcano from northern Daxing'Anling had Ra/Th secular equilibrium but significant ²³⁰Th/²³⁸U disequilibrium, indicating Late Pleistocene eruptions. Thus, Maanling and Leihuoling from Hainan Island, Longgang and Jingpohu from northeastern China are active volcanoes. Analyses of additional samples for Ra/Th isotopes are needed to evaluate whether or not Aershan and Nuominhe volcanoes are active. The Laoheishan and Huoshaoshan from Wudalianchi had historic eruption record, which is consistent with their significant Ra/Th disequilibrium. The magma residence times are <4.2ka for Laoheishan and <3.2ka for Huoshaoshan with a magma transport velocity of >18~23m/y.

Key words Active volcanoes; Holocene volcanoes; Late Pleistocene volcanoes; Uranium-series disequilibrium; ²²⁶Ra-²³⁰Th disequilibrium

摘要 活火山是指1万年来有过喷发历史的全新世火山。火山的高分辨年代学对火山灾害评估和火山分类具有重要意义。对于缺乏历史记载的全新世火山,直接对火山岩进行同位素定年很困难。本文利用具有高时间分辨率的镭-钍-铀非平衡确定中国东部年轻火山的年龄。根据镭-钍-铀同位素,海南岛的马鞍岭和雷虎岭是全新世火山(马鞍岭:4.3ka;雷虎岭:4.7ka);镜泊湖火山(4.9ka)也是全新世火山;龙岗火山存在晚更新世和全新世活动(7.0ka,15.0ka);大兴安岭阿尔山和诺敏河Ra/Th非平衡消失但²³⁰Th/²³⁸U非平衡显著,属于晚更新世喷发(阿尔山:63ka;诺敏河:71ka)。海南岛的马鞍岭火山、雷虎岭火山和东北地区的龙岗火山、镜泊湖火山,是4座活火山。至于东北地区的阿尔山和诺敏河火山是否是活火山,有待测试更多样品的Ra/Th同位素。五大连池老黑山和火烧山有历史喷发记录,这与它们都存在显著Ra/Th非平衡一致。五大连池老黑山和火烧山的岩浆滞留年龄分别小于4.2ka和3.2ka,岩浆上升速率>18~23m/y。

关键词 活火山;全新世火山;晚更新世火山;铀系非平衡;镭钍非平衡

中图法分类号 P317; P597.3

* 本文受国家自然科学基金项目(41973029)资助。

第一作者简介:邹海波,男,1966年生,教授,研究领域包括地球化学、岩石学、火山学,E-mail: haibo.zou@gmail.com

全新世(距今1万年,即10ka)以来有过喷发历史的火山称为活火山(刘若新, 2000; 郭正府等, 2010)。确定全新世活火山对于火山灾害评估和火山分类具有重要意义。中国东部五大连池和长白山作为全新世活火山已没有争议; 五大连池具有历史喷发记录(1719~1721)(Feng and Whitford-Stark, 1986), 长白山千年喷发已有数百个炭化木 ^{14}C 年龄数据支持(刘若新等, 1998; Horn and Schmincke, 2000; Wei *et al.*, 2013)。而对于没有历史喷发记录或缺乏大量炭化木的火山, 根据火山口保存形态和地貌特征来判断是否全新世喷发, 具不确定性。即使存在少量炭化木数据, 也最好有其它年代学方法验证。传统的 K-Ar 法和 Ar-Ar 法对全新世火山的测试相对误差大, 分辨率不够, 并易受到过剩氩的影响(刘嘉麒, 1987)。由于镭-钍(^{226}Ra - ^{230}Th)非平衡法(Ra/Th法)具有高的时间分辨率, 本文采用 Ra/Th 法测试中国东部年轻火山岩的年龄。测试对象包括东北地区五大连池、龙岗、镜泊湖、阿尔山、诺敏河(图1a)和东南地区海南岛(马鞍山、雷虎岭火山)(图1b)。五大连池老黑山和火烧山经历历史时期(1719~1721)喷发, 本研究将确认老黑山和火烧山保留镭-钍非平衡。本文主要目标是用 Ra/Th 法验证镜泊湖、龙岗、阿尔山、诺敏河和海南岛的马鞍山、雷虎岭火山是否是活火山。对于老于全新世的晚更新世样品, 超出 Ra/Th 法的测年方法的上限(10ka), 我们则用 Th/U 法估算年龄。

1 样品和方法

所有测试样品是未风化的新鲜基岩。样品位置见 Zou *et al.*

(2003)和 Zou and Fan (2010)。所有样品都是基性火山岩, SiO_2 变化范围 45.1%~53.5% (表1), 具体火山岩成分分类见 TAS 图(图2)。东北地区火山岩比海南岛(马鞍山和雷虎岭)火山岩含更高的($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) (图2)。其中五大连池老黑山和火烧山火山岩富 K_2O (4.5%~5.7%), 并且 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$ (表1)。

全岩 ^{226}Ra 在 ALS Global Scandinavia 用 ICP-SFMS 测试。 ^{226}Ra 测试方法见 Dalencourt *et al.* (2018)。本文的 ^{226}Ra 数据和已发表的钍同位素(Zou *et al.*, 2003, 2008; Zou and Fan, 2010)用来计算全岩的 ^{226}Ra 和 ^{230}Th 的放射性活度比值($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$)。放射性活度等于衰变常数乘以衰变核的数量, 用小括号表示, 例如(^{226}Ra)等于 ^{226}Ra 的衰变常数乘以 ^{226}Ra 的衰变核数量。重复测试给出($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$)测试误差大约3%。测试 BCR-2 标样给出的($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) = 1.01, 在误差范围内符合标样预期($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) = 1.00, 确认实验方法正确。

因为 ^{226}Ra 的半衰期是1600年(1.6ka)(Faure and Mensing, 2005), Ra/Th 同位素非平衡6个半衰期后只剩下 $2^{-6} = 1/64$, Ra/Th 非平衡基本消失, 低于仪器检测能力。因而 Ra/Th 非平衡的保存时间是10ka (= 1.6ka × 6)。如果未风化的新鲜火山岩目前仍保存 Ra/Th 非平衡, 即($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) ≠ 1.0, 则火山岩年龄小于1万年, 定性是全新世火山(图3), 定量 Ra/Th 年龄可根据($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$)值计算(图4a)(Zou *et al.*, 2020)。如果火山岩的 Ra/Th 非平衡消失(达到 Ra/Th 平衡), 即($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) = 1.0 (Ra/Th secular equilibrium), 那么岩石年龄大于1万年($t > 10\text{ka}$), 不是全新世火山(图3)。如果该样品仍存在 ^{230}Th - ^{238}U 非平衡, 可以

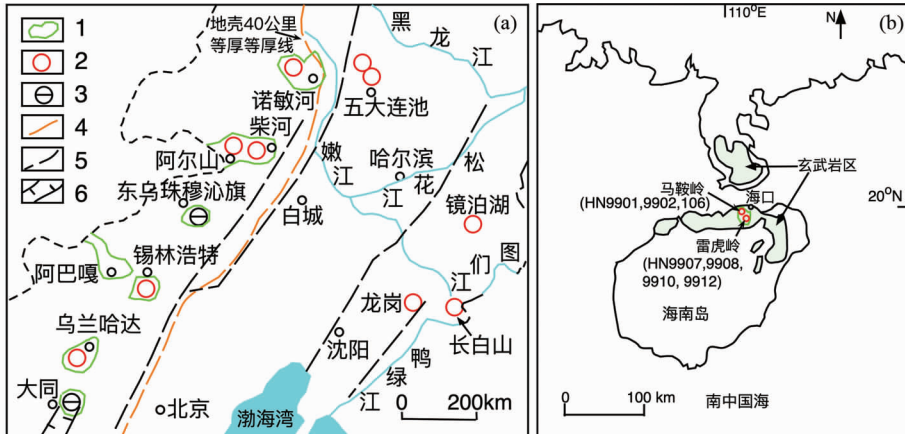


图1 中国东北年轻火山群分布示意图(a, 据白志达等, 2012)和中国东南海南岛年轻火山分布图(b, 据 Zou and Fan, 2010)

1-第四纪火山群大致位置; 2-晚更新世-全新世喷发区; 3-晚更新世喷发区; 4-主要区域断裂(据中国地质调查局, 2004); 5-地壳40km等厚线; 6-汾渭地堑; 本文样品来自东北地区的五大连池、镜泊湖、龙岗、阿尔山、诺敏河(图1a)和东南地区海南岛的马鞍山、雷虎岭(图1b)

Fig. 1 Distribution of young volcanic groups in NE China (a, after Bai *et al.*, 2012) and distribution of young volcanic fields in Hainan Island in SE China (b, after Zou and Fan, 2010)

1-locations of Quaternary volcanic group; 2-locations of Late Pleistocene to Holocene eruption area; 3-Late Pleistocene eruption area; 4-major faults (after CGS, 2014); 5-contour for 40km crustal thickness; 6-Fen-Wei graben

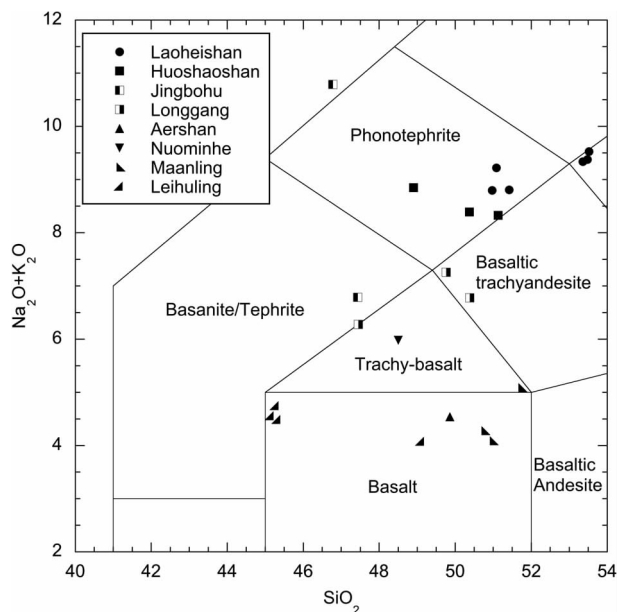


图2 全岩样品的硅-全碱投影图

数据来源：五大连池老黑山和火烧山据 Zou *et al.*, 2003; 镜泊湖和龙岗据 Zou *et al.*, 2008; 阿尔山据赵勇伟和樊琪诚, 2012; 诺敏河据樊琪诚等, 2012; 海南岛马鞍山和雷虎岭据 Zou and Fan, 2010

Fig. 2 Silica-total alkali plot

根据($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$)估算年龄(图4b)。 Ra/Th 非平衡年龄和 $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 非平衡年龄的计算公式见 Zou (2007) 中公式 5.18 ~ 5.20。

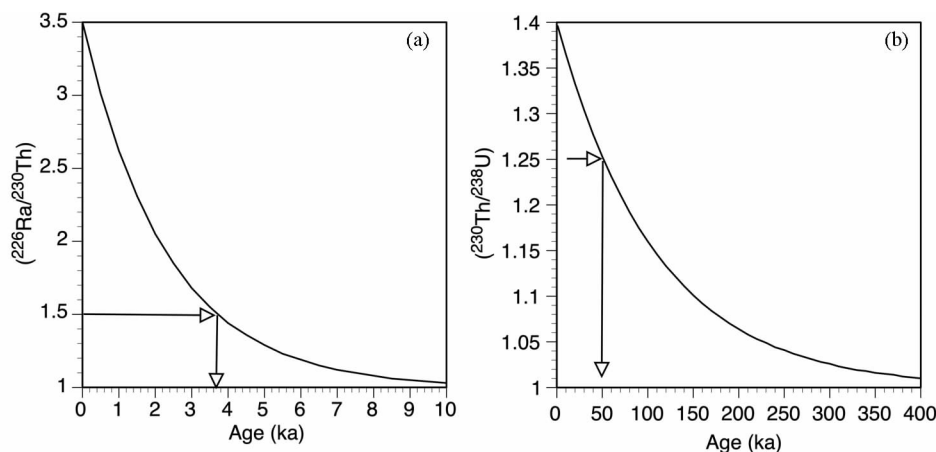


图4 利用($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) (a) 和利用($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$) (b) 计算火山岩年龄(据 Zou *et al.*, 2002)

(b) 初始值($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$)₀ = 3.5. $^{226}\text{Ra}-^{230}\text{Th}$ 体系适合 < 1 万年的样品. 例如 ($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) = 1.50 对应 3.7ka. 当 > 1 万年时, ($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) 趋于 1.0, Ra/Th 非平衡消失. (b) 初始值($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$)₀ = 1.4. $^{230}\text{Th}-^{238}\text{U}$ 体系适合 < 40 万年的样品. 例如 ($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$) = 1.25 对应 50ka. 当 > 40 万年时, ($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$) 趋于 1.0, Th/U 非平衡消失. 初始值 ($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$)₀ = 3.5 是接近具有 ($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$) > 1.0 样品的最大值. 本文的样品都具有 ($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$) > 1.0. 初始值 ($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$)₀ = 1.4 接近地球样品 ($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$) 的最大值 (Lundstrom, 2003). 用图 4a, b 给出的年龄, 接近最大 Ra/Th 或 Th/U 年龄值

Fig. 4 Calculation of ages of igneous rocks from ($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) (a) and from ($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$) (b) (after Zou *et al.*, 2002)

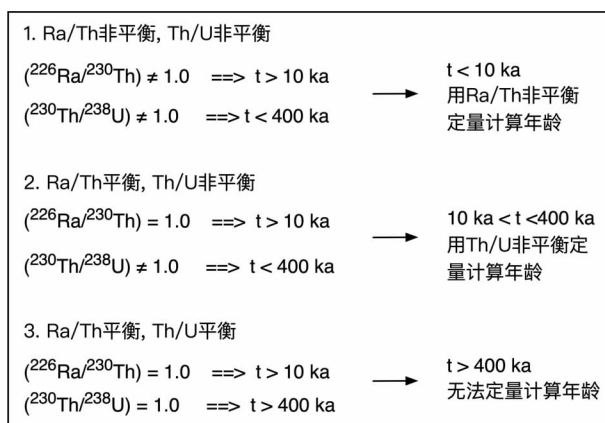


图3 利用 Ra/Th 非平衡和 Th/U 非平衡制约火山岩年龄的流程图

如果存在第 4 种情况, 即 Ra/Th 非平衡而 Th/U 平衡, 则 $t < 10\text{ka}$, 用 Ra/Th 非平衡定量计算年龄. 这种情况下, Th/U 平衡可能是由于岩浆初始 ($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$)₀ 就接近平衡, 是地幔尖晶石橄榄岩浅处部分熔融的产物 (Zou and Zindler, 2000). 作为辅助手段验证, 这种情况的岩石应该存在 $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ 非平衡. 中国东部的全新世火山岩都具有 Th/U 非平衡 (邹海波和樊琪诚, 2011)

Fig. 3 A flowchart to determine the ages of young volcanic rocks using Ra/Th disequilibrium and Th/U disequilibrium

2 结果

Ra 同位素的测试结果见表 1。

表1 中国东部东北地区和海南岛玄武岩的镭-钍非平衡

Table 1 Ra-Th disequilibrium for basalts from NE China and Hainan Island

火山	Ra	Th	$\left(\frac{^{230}\text{Th}}{^{232}\text{Th}}\right)$	$\left(\frac{^{230}\text{Th}}{^{238}\text{U}}\right)$	$\left(\frac{^{226}\text{Ra}}{^{230}\text{Th}}\right)$	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Ra/Th 年龄	Ra/Th 年龄误差	U/Th 年龄	历史记载, ¹⁴ C 或 热释光年龄
	($\times 10^{-15}$)	($\times 10^{-6}$)				(%)			(ka)		(ka)	
五大连池-老黑山												0.3
LS-3-1	790	6.08	0.883	1.334	1.33	53.48	3.68	5.70				
LS-3-1, r2	820	6.08	0.883	1.334	1.38							
LE-6-4	800	6.77	0.879	1.326	1.21	50.97	3.90	4.90				
LHK-1	900	6.66	0.851	1.302	1.43	51.42	3.85	4.96				
LW5-2	780	6.77	0.873	1.280	1.19	51.08	3.83	5.39				
HL9720	890	6.66	0.887	1.298	1.36	53.36	3.81	5.53				
NDW2-2b	1080	6.86	0.858	1.297	1.65	53.52	4.00	5.53				
五大连池-火烧山												0.3
HK-2	1040	6.76	0.772	1.239	1.80	50.37	3.94	4.45				
HS2-2	1060	8.18	0.775	1.282	1.51	48.90	4.12	4.73				
HN6-1	770	6.08	0.830	1.265	1.38	51.13	3.82	4.51				
镜泊湖												4.4~5.5, 8.3
J99821-1	1030	7.21	0.855	1.150	1.51	47.43	4.47	2.32	3.7	0.6		
JB11-1	1070	9.81	0.825	1.090	1.19	46.78	6.20	4.59	6.0	0.9		
平均值									4.9	0.7		
龙岗												1.6, 15
LG9940	650	6.14	0.827	1.330	1.15	47.45	3.97	2.31	6.5	1.0		
99L11-1	760	8.61	0.809	1.350	0.98	50.38	3.72	3.06			15	
HJ970001A	550	5.65	0.796	1.330	1.10	49.76	4.25	3.01	7.5	1.1		
平均值									7.0	1.1		
大兴安岭中段-阿尔山												2, 25~123
07AES09	330	3.233	0.930	1.224	0.99	49.86	3.16	1.38			63	
大兴安岭北段-诺敏河												128
09NM01	310	5.28	0.525	1.208	1.01	48.50	3.83	2.15			71	
海南岛-马鞍岭												<9.9
HN9901	492	3.58	0.895	1.203	1.38	51.74	3.41	1.68	4.5	0.7		
HN9902	434	3.54	0.870	1.186	1.27	50.77	2.82	1.46	5.0	0.8		
HN106	569	3.77	0.863	1.181	1.58	50.99	2.71	1.38	3.4	0.5		
平均值									4.3	0.6		
海南岛-雷虎岭												9.9~10.3
HN9907	625	4.44	0.968	1.227	1.31	49.10	2.55	1.53	4.8	0.7		
HN9908	998	7.81	0.936	1.272	1.23	45.32	2.85	1.64	5.5	0.8		
HN9911	1020	7.07	0.961	1.299	1.35	45.14	2.95	1.61	4.5	0.7		
HN9912	1130	7.18	0.962	1.321	1.47	45.27	3.12	1.63	3.8	0.6		
平均值									4.7	0.7		
标样 BCR-2	580	5.91	0.879	1.00	1.01							

注: 初始值: ($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) = 3.5; ($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$) = 1.4. 测试误差: Ra < 3%; Th < 1%; ($^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$) < 1%; ($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$) < 1%; ($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) < 3%. 鉴于初始值存在不均一性, Ra/Th 年龄相对误差放大到 15%

历史喷发(1719~1721 AD)的东北地区五大连池老黑山和火烧山具明显 Ra/Th 非平衡(图5),其中老黑山($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$)变化范围是 1.19~1.65,火烧山的变化范围是 1.38~

1.80. 本文证实这2个全新世火山存在 Ra/Th 非平衡并给出变化范围,这与其历史喷发一致. 因为五大连池的火山岩强烈富钾且 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$, 成分跟其它火山明显不同(表1、图

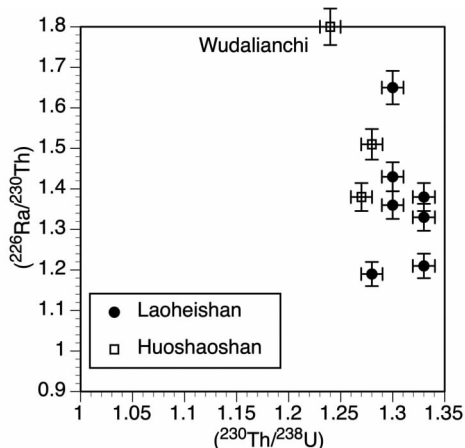


图5 五大连池老黑山火烧山的 Ra/Th 非平衡
所有样品显示 $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ 非平衡. $(^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}) > 1.2$
Fig. 5 Ra/Th disequilibrium for Laoheishan and Huoshaoshan

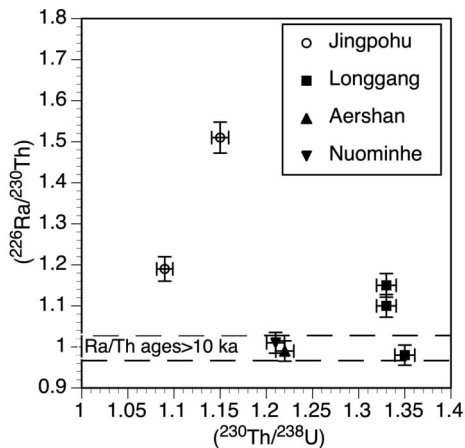


图6 东北地区镜泊湖、龙岗、阿尔山和诺敏河火山的 Ra/Th 非平衡
Fig. 6 Ra/Th disequilibrium for Jingpohu, Longgang, Aershan and Nuominhe volcanoes

2), 五大连池的 $(^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th})$ 不用作其它火山的初始值来进行年龄计算。

东北地区镜泊湖、龙岗、阿尔山、诺敏河的 Ra/Th 同位素见图6。镜泊湖火山 $(^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}) = 1.19 \sim 1.51$; 龙岗火山 $(^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}) = 0.98 \sim 1.15$; 阿尔山 $(^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}) = 0.99$; 诺敏河 $(^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}) = 1.01$ 。图5中二条虚线之上的4个样品(2个镜泊湖+2个龙岗), 显示 Ra/Th 非平衡, 它们是全全新世火山岩。其中镜泊湖的 Ra/Th 年龄是 $4.9 \pm 0.7\text{ka}$, 龙岗的 Ra/Th 年龄是 $7.0 \pm 1.1\text{ka}$ (表1)。

图6中二条虚线之内的3个样品(1个龙岗, 1个阿尔山和1个诺敏河)的 $(^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}) = 1.00 \pm 0.03$, 即 $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ 平衡, Ra/Th 年龄老于1万年, 不是全新世样品。这3个样品, 没有 Ra/Th 非平衡, 但都有 $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 非平衡(图6), 即

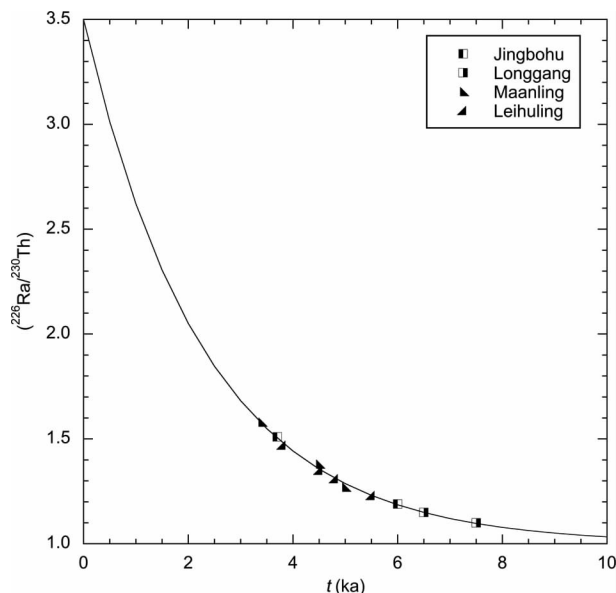


图7 利用 Ra/Th 非平衡估算镜泊湖、龙岗、马鞍山、雷虎岭的年龄
Fig. 7 Use of Ra/Th disequilibrium to estimate ages for volcanic rocks from eastern China

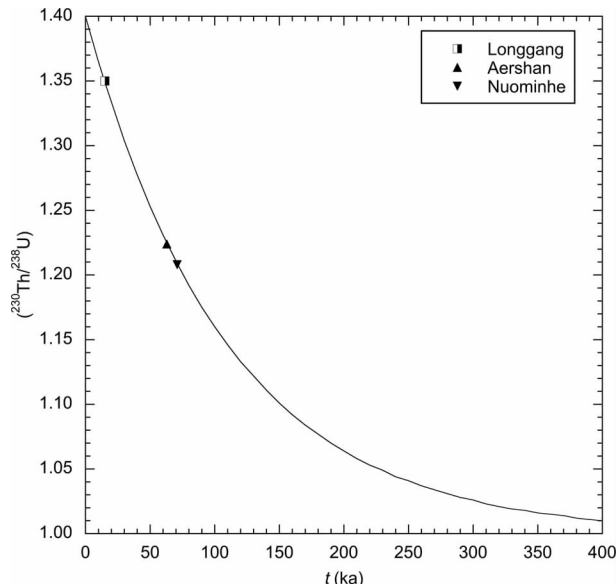


图8 利用 Th/U 非平衡估算龙岗、阿尔山、诺敏河的年龄
Fig. 8 Use of Th/U disequilibrium to estimate ages for volcanic rocks from eastern China

$(^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}) > 1.0$, 年龄 $< 400\text{ka}$ 。龙岗的 Th/U 年龄是 15ka , 阿尔山的 Th/U 年龄是 63ka , 诺敏河的 Th/U 年龄是 71ka , 都是晚更新世火山岩。故龙岗是晚更新世-全新世火山, 阿尔山和诺敏河是晚更新世火山。具体 Ra/Th 年龄和 Th/U 年龄投影分别见图7、图8。

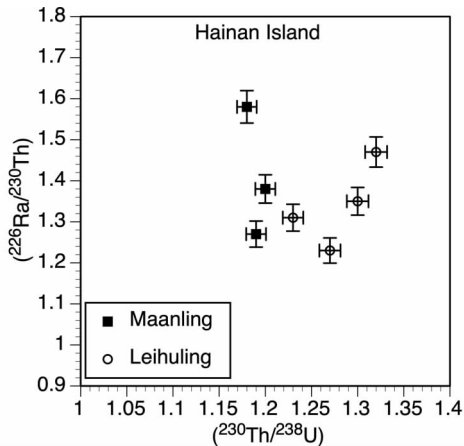


图9 海南岛的马鞍岭火山和雷虎岭火山的 Ra/Th 同位素

Fig. 9 Ra/Th disequilibrium for Maanling and Leihuling volcanos from Hainan Island

海南岛马鞍岭火山和雷虎岭火山的 Ra/Th 同位素见图9。海南岛样品都显示明显 Ra/Th 非平衡, ($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) = 1.23 ~ 1.58, 是全新世火山。马鞍岭火山的 Ra/Th 年龄是 $4.3 \pm 0.6\text{ka}$, 雷虎岭的 Ra/Th 年龄是 $4.7 \pm 0.7\text{ka}$ (表1、图7)。

3 讨论

镜泊湖样品的 Ra/Th 年龄 (4.9ka), 与碳化木的 ^{14}C 年龄 ($4.4 \sim 5.5\text{ka}$) (Zhang *et al.*, 2002; 樊祺诚等, 2003) 和热释光年龄 (8.3ka) (翟福君和刘桂香, 2010) 一致表明镜泊湖是全新世活火山。

龙岗样品的 Ra/Th 年龄 (7.0ka) 比 ^{14}C 年龄 (1.6ka) (樊祺诚等, 2002) 稍老。一种可能是因为龙岗岩浆在岩浆房滞留 5.4ka 。Ra/Th 年龄受岩浆滞留影响, 而碳化木 ^{14}C 年龄与岩浆滞留无关。另一种可能是因为龙岗样品的初始值 ($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$)₀ 明显低于 3.5。尽管如此, Ra/Th 年龄和 ^{14}C 年龄都证实龙岗火山的全新世喷发。本文还提供龙岗晚更新世的 Th/U 年龄 (15ka), 与龙岗金川东期火山渣中碳化木的 ^{14}C 年龄 (15.9ka) 误差范围内一致 (白志达等, 2006)。

阿尔山的 1 个样品显示晚更新世 Th/U 年龄 (63ka)。白志达等 (2005) 报道阿尔山存在全新世火山。我们将来需要测试更多的 Ra/Th 样品以确认阿尔山全新世火山。诺敏河的 1 个样品 Th/U 年龄是 71ka , 落入热释光年龄范围 ($25 \sim 123\text{ka}$) (马保起等, 2006), 一致表明诺敏河的晚更新世喷发。另外 K-Ar 法也给出诺敏河四方山 1 个晚更新世年龄 ($128 \pm 10\text{ka}$) (樊祺诚等, 2011, 2012; Zhao *et al.*, 2014)。故诺敏河的全新世喷发也有待被同位素年龄证实。

海南岛马鞍岭火山的 Ra/Th 年龄 (4.3ka) 和 雷虎岭的 Ra/Th 年龄 (4.7ka) 证实它们是活火山。樊祺诚等 (2004) 获

得过 10ka 的 2 个砂岩烘烤热释光年龄。砂岩样品来自雷虎岭第 2 层玄武岩中。雷虎岭第 3 层玄武岩和马鞍岭玄武岩的年龄应该比雷虎岭第 2 层玄武岩年龄更新。本文马鞍岭和雷虎岭玄武岩的年龄 (分别是 $4.3 \pm 0.6\text{ka}$, $4.7 \pm 0.7\text{ka}$) 都比热释光年龄 (10ka) 年轻, 与地质关系一致。

300 年前 (0.3ka) 喷发的五大连池老黑山 ($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) 的变化范围是 1.19 ~ 1.65, 火烧山的变化范围是 1.38 ~ 1.80, 跟 1980 年喷发的美国圣海伦斯火山 (Mt. St Helens) 的变化范围 (1.19 ~ 1.58) 相似 (Bennett *et al.*, 1982)。老黑山的 ($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) 平均值是 1.36 ± 0.16 , 火烧山的平均值是 1.56 ± 0.22 , 显示 12% ~ 14% 的相对变化。使用初始值 ($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$)₀ = 3.5, 则老黑山和火烧山的 Ra/Th 年龄分别是 $4.5 \pm 0.9\text{ka}$ 和 $3.5 \pm 0.8\text{ka}$, 老于 0.3ka 喷发年龄 $4.2 \pm 0.9\text{ka}$ 和 $3.2 \pm 0.8\text{ka}$, 说明老黑山和火烧山岩浆房滞留年龄可能分别是 4.2ka 和 3.2ka 。如果五大连池初始值 ($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$)₀ < 3.5, 或者如果五大连池岩浆受到围岩 [$^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$] = 1.0 的混染, 那么老黑山和火烧山岩浆滞留年龄分别小于 4.2ka 和 3.2ka 。如果五大连池的斑晶矿物和岩浆形成时间差小于 ^{226}Ra 的半衰期 (1.6ka), 那么斑晶矿物-岩浆等式线有可能提供更精确的 Ra/Th 年龄。如果斑晶和岩浆的形成时间差大于 1.6ka , 斑晶-岩浆不满足 Ra-Th 等时线法对同时形成的要求, 测试结果不成线性分布。

本文所有样品, 包括大兴安岭中段阿尔山和大兴安岭北段诺敏河样品, 呈现显著 ^{230}Th 过剩, 即 ($^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$) > 1.1 (图 5、图 6、图 8), 反映玄武岩浆起源于深部石榴石橄榄岩源区 (Salters and Longhi, 1999; Zou and Zindler, 2000; 邹海波和樊祺诚, 2011), 岩浆产生深度大于 75km (Zou *et al.*, 2003)。这与东北地区 (如大兴安岭中部阿尔山) 火山岩中发现深成石榴子石橄榄岩捕虏体 (樊祺诚等, 2008) 一致。尽管源区固体物质有可能部分来自地幔过渡带 (Kuritani *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2017; Xu *et al.*, 2018; Choi *et al.*, 2020), 但减压部分熔融 (decompressional partial melting) 产生岩浆的深度发生在地幔过渡带之上 ($< 410\text{km}$)。使用五大连池火山的最大滞留年龄 $3.2 \sim 4.2\text{ka}$ 和最小形成深度 75km , 得到岩浆上升最小速率 $18 \sim 23\text{m/y}$ 。

4 结论

(1) 除了五大连池和长白山活火山, Ra/Th 非平衡证实中国东部海南岛的马鞍岭、雷虎岭和东北地区的镜泊湖、龙岗是全新世活火山。龙岗还有晚更新世火山活动。

(2) 大兴安岭中段的阿尔山和大兴安岭北段的诺敏河存在晚更新世火山活动。至于它们是否是全新世活火山, 有待将来更多 Ra/Th 同位素测试。

(3) 五大连池老黑山的 ($^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$) 变化范围是 1.19 ~ 1.65, 火烧山的变化范围是 1.38 ~ 1.80, 与 1980 年喷发的美国圣海伦斯火山 (Mt. St Helens) 变化范围相似 (1.19 ~

1.58)。老黑山和火烧山的岩浆滞留年龄分别小于 4.2 ± 0.9 ka 和 3.2 ± 0.8 ka, 岩浆上升速率 $> 18 \sim 23$ m/y。

致谢 感谢郭正府研究员邀请本文和刘永顺教授提供五大连池样品;感谢五位审稿人对本文的建设性评审。

References

- Bai ZD, Tian MZ, Wu FD, Xu DB and Li TJ. 2005. Yanshan, Gaoshan-two active volcanos of the volcanic cluster in Arshan, Inner Mongolia. *Earthquake Research in China*, 21(1): 113 – 117 (in Chinese with English abstract)
- Bai ZD, Xu DB, Zhang BL, Zhang T and Bu J. 2006. Study on type and phase of Quaternary explosive volcanism in Longgang volcanic cluster. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1473 – 1480 (in Chinese with English abstract)
- Bai ZD, Tan QW, Xu GL, Xu DB and Wang Y. 2012. Late Quaternary volcanic activity and neotectonics in the eastern Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1099 – 1107 (in Chinese with English abstract)
- Bennett JT, Krishnaswami S, Turekian KK, Melson WG and Hopson CA. 1982. The uranium and thorium decay series nuclides in Mt. St. Helens effusives. *Earth and Planetary Science Letters*, 60(1): 61 – 69
- China Geological Survey (CGS). 2004. *Manual of Geological Maps of China*. Beijing: SinoMaps Press, 226 – 230 (in Chinese)
- Choi HO, Choi, SH, Lee YS, Ryu JS, Lee DC, Lee SG, Sohn YK and Liu JQ. 2020. Petrogenesis and mantle source characteristics of the Late Cenozoic Baekdusan (Changbaishan) basalts, North China Craton. *Gondwana Research* 78: 156 – 171
- Dalencourt C, Michaud A, Habibi A, Leblanc A and Lariviere D. 2018. Rapid, versatile and sensitive method for the quantification of radium in environmental samples through cationic extraction and inductively coupled plasma mass spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 33(6): 1031 – 1040
- Fan QC, Sui JL, Liu RX, Wei HQ, Li DM, Sun Q and Li N. 2002. Periods of Quaternary volcanic activity in Longgang area, Jilin Province. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 495 – 500 (in Chinese with English abstract)
- Fan QC, Sun Q, Li N, Yi JH, Chen HZ, Gao F and Zhang XJ. 2003. The section of Airfall clastic rock of Holocene volcano in Jingpohu region and its eruptive history. *Seismology and Geology*, 25(Suppl. 1): 3 – 11 (in Chinese with English abstract)
- Fan QC, Sun Q, Li N and Sui JL. 2004. Periods of volcanic activity and magma evolution of Holocene in North Hainan Island. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 533 – 544 (in Chinese with English abstract)
- Fan QC, Sui JL, Zhao YW, Sun Q, Li N and Du XX. 2008. Preliminary study on garnet peridotite xenolith of Quaternary volcanic rocks in middle Daxing'an Mountain Range. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2563 – 2568 (in Chinese with English abstract)
- Fan QC, Zhao YW, Li DM, Wu Y, Sui JL and Zheng DW. 2011. Studies on Quaternary volcanism stages of Halaha River and Chaoyer River area in the Great Xing'an Range: Evidence from K-Ar dating and volcanic geology features. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 2827 – 2832 (in Chinese with English abstract)
- Fan QC, Zhao YW, Sui JL, Li DM and Wu Y. 2012. Studies on Quaternary volcanism stages of Nuomin river area in the Great Xing'an Range: Evidence from petrology, K-Ar dating and volcanic geology features. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1092 – 1098 (in Chinese with English abstract)
- Faure G and Mensing TM. 2005. *Isotopes: Principles and Applications*. Hoboken: Wiley, 1 – 897
- Feng MS and Whitford-Stark JL. 1986. The 1719 ~ 1721 eruptions of potassium-rich lavas at Wudalianchi, China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 30(1–2): 131 – 148
- Guo ZF, Li XH and Zhang ML. 2010. Volcanic activities and deep carbon cycle. *Quaternary Sciences*, 30(3): 497 – 505 (in Chinese with English abstract)
- Horn S and Schmincke HU. 2000. Volatile emission during the eruption of Baitoushan Volcano (China/North Korea) ca. 969 AD. *Bulletin of Volcanology*, 61(8): 537 – 555
- Kuritani T, Kimura JI, Ohtani E, Miyamoto H and Furuyama K. 2013. Transition zone origin of potassic basalts from Wudalianchi volcano, Northeast China. *Lithos* 156 – 159: 1 – 12
- Liu JQ. 1987. Study on geochronology of the Cenozoic volcanic rocks in Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 3(4): 21 – 31 (in Chinese with English abstract)
- Liu RX, Wei HQ and Li JT. 1998. Recent Eruptions of the Changbaishan Tianchi Volcano. Beijing: Science Press, 1 – 159 (in Chinese)
- Liu RX. 2000. *Active Volcanoes in China*. Beijing: Seismological Press, 1 – 105 (in Chinese)
- Lundstrom CC. 2003. Uranium-series disequilibria in Mid-ocean ridge basalts: Observations and models of basalt genesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 52(1): 175 – 214
- Ma BQ, Lu HF, Wang XD and Guo WS. 2006. Preliminary chronological constraint of the eruption of the Nuomin volcanoes group in the Daxing'anling Mountains. *Quaternary Sciences*, 26(2): 295 – 296 (in Chinese with English abstract)
- Salters VJM and Longhi J. 1999. Trace element partitioning during the initial stages of melting beneath mid-ocean ridges. *Earth and Planetary Science Letters* 166: 15 – 30
- Wang XJ, Chen LH, Hofmann AW, Mao FG, Liu JQ, Zhong Y, Xie LW and Yang JH. 2017. Mantle transition zone-derived EMI component beneath NE China: Geochemical evidence from Cenozoic potassic basalts. *Earth and Planetary Science Letters* 465: 16 – 28
- Wei HQ, Liu GM and Gill J. 2013. Review of eruptive activity at Tianchi volcano, Changbaishan, Northeast China: Implications for possible future eruptions. *Bulletin of Volcanology* 75: 706
- Xu YG, Li HY, Dong LB, Ma L, Ma Q and Sun MD. 2018. Generation of Cenozoic intraplate basalts in the big mantle wedge under eastern Asia. *Science China (Earth Sciences)* 61: 869 – 886
- Zhang ZC, Feng CY, Li ZN, Li SC, Xin Y, Li ZM and Wang XZ. 2002. Petrochemical study of the Jingpohu Holocene alkali basaltic rocks, northeastern China. *Geochemical Journal*, 36(2): 133 – 153
- Zhai FJ and Liu GX. 2010. The Jingpohu Geopark: Quaternary volcanic activities and tourism resources. *Geology and Resources*, 19(1): 53 – 57 (in Chinese with English abstract)
- Zhao YW and Fan QC. 2012. Mantle sources and magma genesis of Quaternary volcanic rocks in the Halaha River and Chaoyer River area, Great Xing'an Range. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1119 – 1129 (in Chinese with English abstract)
- Zhao YW, Fan QC, Zou HB and Li N. 2014. Geochemistry of Quaternary basaltic lavas from the Nuomin volcanic field, Inner Mongolia: Implications for the origin of potassic volcanic rocks in northeastern China. *Lithos*, 196 – 197: 169 – 180
- Zou HB and Zindler A. 2000. Theoretical studies of ^{238}U - ^{230}Th - ^{226}Ra and ^{235}U - ^{231}Pa disequilibria in young lavas produced by mantle melting. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(10): 1809 – 1817
- Zou HB, Zindler A and Niu YL. 2002. Constraints on melt movement beneath the East Pacific Rise from ^{230}Th - ^{238}U disequilibrium. *Science*, 295(5552): 107 – 110
- Zou HB, Reid MR, Liu YS, Yao YP, Xu XS and Fan QC. 2003. Constraints on the origin of historic potassic basalts from Northeast China by U-Th disequilibrium data. *Chemical Geology*, 200(1–2): 189 – 201
- Zou HB. 2007. *Quantitative Geochemistry*. London: Imperial College Press, 1 – 287
- Zou HB, Fan QC and Yao YP. 2008. U-Th systematics of dispersed young volcanoes in NE China: Asthenosphere upwelling caused by piling up and upward thickening of stagnant Pacific slab. *Chemical*

Geology, 255(1-2): 134-142

- Zou HB and Fan QC. 2010. U-Th isotopes in Hainan basalts: Implications for sub-asthenospheric origin of EM2 mantle endmember and the dynamics of melting beneath Hainan Island. *Lithos*, 116(1-2): 145-152
- Zou HB and Fan QC. 2011. Uranium-thorium isotope disequilibrium in young volcanic rocks from China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 2821-2826 (in Chinese with English abstract)
- Zou HB, Guo ZP, Peng Y, Schmitt AK, Fan QC, Zhao YW and Ma MJ. 2020. U-series ages of young volcanoes from the Southeastern Tibetan Plateau: Holocene eruptions and magma evolution timescales. *Lithos* 370-371: 105643

附中文参考文献

- 白志达, 田明中, 武法东, 徐德兵, 李团结. 2005. 焰山、高山-内蒙古阿尔山火山群中的两座活火山. *中国地震*, 21(1): 113-117
- 白志达, 徐德斌, 张秉良, 张焘, 卜景. 2006. 龙岗火山群第四纪爆破式火山作用类型与期次研究. *岩石学报*, 22(6): 1473-1480
- 白志达, 谭庆伟, 许桂玲, 徐德斌, 王妍. 2012. 内蒙东部晚第四纪火山活动与新构造. *岩石学报*, 28(4): 1099-1107
- 樊祺诚, 隋建立, 刘若新, 魏海泉, 李大明, 孙谦, 李霓. 2002. 吉林龙岗第四纪火山活动分期. *岩石学报*, 18(4): 495-500
- 樊祺诚, 孙谦, 李霓, 尹金辉, 陈洪洲, 高峰, 张锡杰. 2003. 镜泊湖全新世火山空降落屑剖面和喷发历史. *地震地质*, 25(增1): 3-11
- 樊祺诚, 孙谦, 李霓, 隋建立. 2004. 琼北火山活动分期与全新世岩浆演化. *岩石学报*, 20(3): 533-544
- 樊祺诚, 隋建立, 赵勇伟, 孙谦, 李霓, 杜星星. 2008. 大兴安岭中

- 部第四纪火山岩中石榴石橄榄岩捕虏体的初步研究. *岩石学报*, 24(11): 2563-2568
- 樊祺诚, 赵勇伟, 李大明, 武颖, 隋建立, 郑德文. 2011. 大兴安岭哈拉哈河-绰尔河第四纪火山分期: K-Ar年代学与火山地质特征. *岩石学报*, 27(10): 2827-2832
- 樊祺诚, 赵勇伟, 隋建立, 李大明, 武颖. 2012. 大兴安岭诺敏河第四纪火山岩分期: 岩石学、年代学与火山地质特征. *岩石学报*, 28(4): 1092-1098
- 郭正府, 李晓惠, 张茂亮. 2010. 火山活动与深部碳循环的关系. 第四纪研究, 30(3): 497-505
- 刘嘉麒. 1987. 中国东北地区新生代火山岩的年代学研究. *岩石学报*, 3(4): 21-31
- 刘若新, 魏海泉, 李继泰. 1998. 长白山天池火山近代喷发. 北京: 科学出版社, 1-159
- 刘若新. 2000. 中国的活火山. 北京: 地震出版社, 1-105
- 马保起, 卢海峰, 旺小东, 郭文生. 2006. 大兴安岭诺敏河火山喷发时代的初步研究. 第四纪研究, 26(2): 295-296
- 翟福君, 刘桂香. 2010. 第四纪镜泊火山活动与镜泊湖世界地质公园. *地质与资源*, 19(1): 53-57
- 赵勇伟, 樊祺诚. 2012. 大兴安岭哈拉哈河-绰尔河第四纪火山岩地幔源区与岩浆成因. *岩石学报*, 28(4): 1119-1129
- 中国地质调查局. 2004. 中华人民共和国地质图说明书. 北京: 中国地图出版社, 226-230
- 邹海波, 樊祺诚. 2011. 中国年轻火山岩铀钍(U-Th)非平衡研究进展. *岩石学报*, 27(10): 2821-2826