

大别山造山带宿松岩群锆石 U-Pb 年龄和 Nd 同位素特征:宿松地体物源和属性

李俊辉,于洋,韦龙猛,胡昭平,陈福坤

(中国科学技术大学 地球和空间科学学院,安徽 合肥 230026)

摘要:大别超高压变质造山带南部的宿松地体主要由高压变质宿松岩群或杂岩组成,其岩性和物源构成复杂,历来的研究颇具争议。报道了宿松岩群的片麻岩、片岩和变质基性岩石等主要岩石类型的锆石 U-Pb 年龄和 Nd 同位素组成,限定了岩石地球化学特征,探讨了宿松地体的属性及地壳演化。两个片麻岩样品的锆石 U-Pb 同位素年龄为 750 Ma 至约 770 Ma,初始 ϵ_{Nd} 值为 $-7.3 \sim -1.6$,可以推测原岩为新元古代岩浆岩;两个片岩样品的碎屑锆石 U-Pb 年龄值分布范围较大,并主要集中于晚太古代(2 700 Ma 至约 2 800 Ma)、早元古代(2 000 Ma 至约 2 500 Ma)、中元古代(1 100 Ma 至约 1 500 Ma)和新元古代(700 Ma 至约 800 Ma),推测原岩为新元古代沉积岩。片岩的 Nd 同位素组成变化较大,初始 ϵ_{Nd} 值(回扣至 750 Ma)为 $-20.2 \sim -1.4$,暗示剥蚀区的物质组成复杂。相似的碎屑锆石 U-Pb 年龄分布特征也普遍地记录在扬子陆块的基底岩石或沉积盖层中。新元古代岩浆岩广泛分布于宿松岩群、大别—苏鲁造山带超高压变质地体乃至扬子陆块边缘,指示宿松高压变质地体具有扬子陆块属性和相似的地壳演化历史。

关键词:地壳演化;构造属性;前寒武纪;U-Pb 年龄;Nd 同位素;宿松岩群;扬子陆块;大别造山带
中图分类号:P597 **文献标志码:**A

Zircon U-Pb Ages and Nd Isotopic Characteristics of Susong Group in Dabie Orogenic Belt: Source and Provenance of Susong Terrane

LI Jun-hui, YU Yang, WEI Long-meng, HU Zhao-ping, CHEN Fu-kun

(School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

Abstract: Susong Group or Susong rock complex is the major rock unit of Susong terrane in the southern part of Dabie ultrahigh-pressure orogenic belt. Rocks of this group undergo high-pressure metamorphism and have complex origins or sources, and hence, the provenance and evolution history of Susong terrane are still debated. Zircon U-Pb ages and whole-rock Nd isotopic data for gneisses, schists and metabasic rocks of Susong Group were presented to place geochemical characteristics of Susong Group, and the evolution of the crust and provenance of Susong terrane were discussed. Zircons separated from two gneiss samples yield U-Pb ages of 750 to ~ 770 Ma, suggesting as evidence for a magmatic event in Neoproterozoic. Initial ϵ_{Nd} values of whole-rocks of the gneisses range from -7.3 to -1.6 . Detrital zircons from two schist samples give a wide range of U-Pb ages, clustering around Late Archean (2 700 Ma to $\sim 2 800$ Ma), Paleoproterozoic (2 000 Ma to $\sim 2 500$ Ma), Mesoproterozoic (1 100 Ma to $\sim 1 500$ Ma) and

收稿日期:2015-08-02

基金项目:国家自然科学基金项目(40973042,41090372)

作者简介:李俊辉(1990-),男,安徽宿州人,理学硕士研究生,E-mail:phila3lee@gmail.com。

通讯作者:陈福坤(1964-),男,福建龙海人,教授,博士研究生导师,理学博士,E-mail:fkchen@ustc.edu.cn。

Neoproterozoic (700 to ~800 Ma), implying Neoproterozoic sedimentary rocks as their protoliths. Initial ϵ_{Nd} values of whole-rocks of the schists vary from -20.2 to -1.4, when calculated back to 750 Ma, suggesting complex rock components in the source area. Similar distribution patterns of detrital zircon U-Pb ages are also commonly recorded in the basement or sedimentary cover rocks exposed in Yangtze Block. The Neoproterozoic magmatic rocks are widely distributed in Susong Group, ultrahigh-pressure metamorphic terranes of Dabie-Sulu orogenic belt and the continental margins of Yangtze Block, indicating that Susong high-pressure metamorphic terrane is of a Yangtze affinity and has had similar history of the crustal evolution.

Key words: crustal evolution; structure provenance; Precambrian; U-Pb age; Nd isotope; Susong Group; Yangtze Block; Dabie orogen belt

0 引言

造山带通常是由不同来源的板块或地体经过构造作用拼合而成,记录了造山作用过程,也可能保存造山作用之前的演化历史。因此,鉴别不同地体在拼合之前的岩石-地质-构造演化历史就是为了研究造山带的形成和演化以及地壳的演化历史。造山带内的地体或基底岩石普遍经历了强烈的变质变形,在研究造山带基底时代和演化问题中,同位素年代学和同位素地球化学手段具有明显的应用优势。大别—苏鲁造山带以地壳碰撞和俯冲作用在国际造山作用研究中具有显著的意义,从20世纪90年代以来,该造山带便成为国内外研究造山带的热点地区之一。在众多研究方向中,Zheng等针对超高压变质岩石取得了突出的研究成果^[1];而基底岩石形成时代和属性等问题的研究程度相对较低,研究主要集中在超高压变质地体^[2-3]。

大别超高压变质造山带由多个岩石-构造单元构成,不同单元的岩石类型和变质温压条件存在差异。南大别和北大别超高压变质地体受到广泛关注,因而研究程度高,而对北淮阳低级变质地体和宿松高压变质地体的形成和演化研究程度较低^[2,4-6]。汤加富等研究认为,出露于大别地区的宿松岩群、红安地区的红安岩群和苏鲁地区的海州岩群可以进行对比^[7-8]。本文报道了宿松高压变质地体的宿松岩群片岩、片麻岩和变质基性岩石的锆石 U-Pb 同位素年龄及全岩 Sm-Nd 同位素组成,探讨了宿松地体的物质组成特征及其形成时代,为理解大别—苏鲁造山带内基底性质和演化提供了基础数据资料。

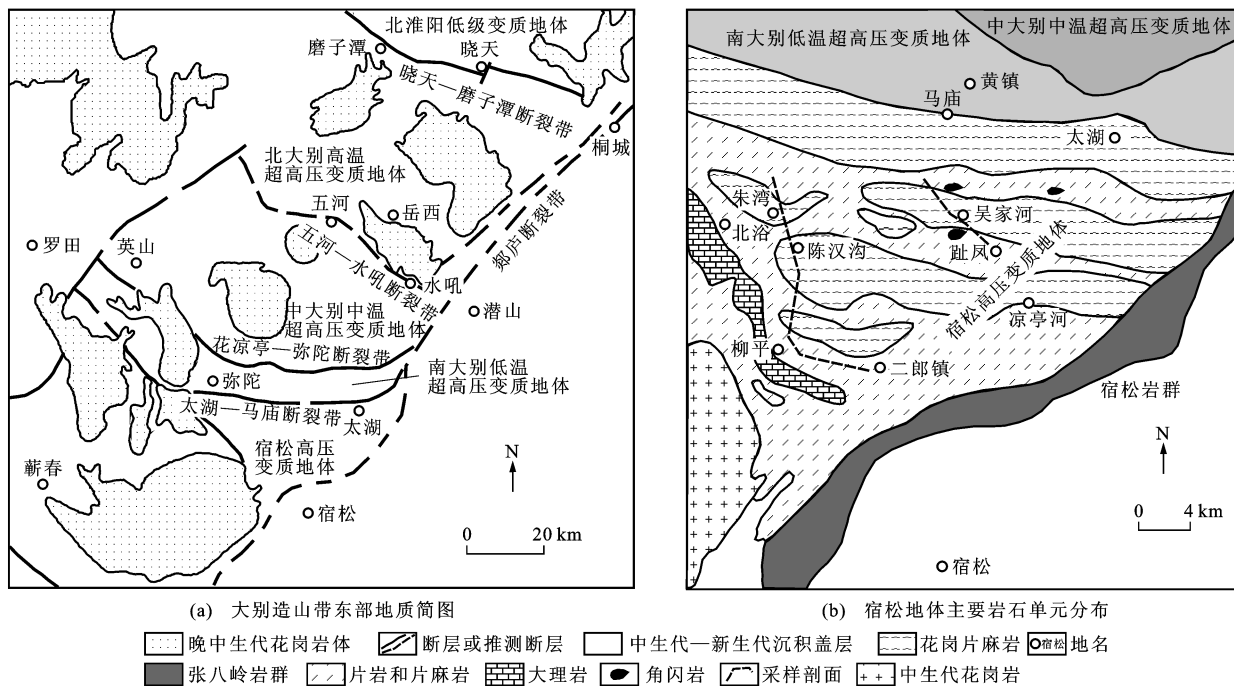
1 地质背景

大别—苏鲁造山带是华南陆块与华北陆块三叠纪陆-陆碰撞造山带^[9-10],出露大规模超高压变质

体。自北向南,东大别地区以晓天—磨子潭、五河—水吼、花凉亭—弥陀、太湖—马庙断裂带为界,可以划分为5个主要构造单元^[11]:北淮阳低级变质地体、北大别高温超高压变质地体、中大别中温超高压变质地体、南大别低温超高压变质地体和宿松高压变质地体[图1(a)]。

北淮阳低级变质带位于大别造山带北麓,由角闪岩相为主的庐镇关杂岩和绿片岩相为主的古生代佛子岭复理石组成。北大别高温超高压杂岩带主要由条带状花岗质片麻岩、斜长角闪岩和少量变质橄榄岩、石榴辉石岩、角闪岩、麻粒岩、榴辉岩等组成。在早期研究中,未报道有榴辉岩等高压变质岩出露。新的同位素年代学研究表明,与中、南大别地体一样,北大别地体经历了三叠纪峰期超高压变质作用,并且榴辉岩和片麻岩的原岩形成时代集中在700~800 Ma^[2-3,12-13]。中、南大别超高压变质带主要由片麻岩组成,含有大量的榴辉岩透镜体以及少量的镁铁质—超镁铁岩、大理岩和硬玉石英岩。

宿松高压变质地体,位于太湖—马庙剪切带和襄阳—广济断裂之间,北面与南大别低温榴辉岩带毗邻,属于大别山碰撞造山带中扬子俯冲板块的后缘部分^[14]。其主要组成岩石有石榴云母片岩、石榴黑云母片麻岩、石榴斜长角闪岩、大理岩、变质磷块岩、角闪岩或变质基性岩等^[15]。被称为宿松杂岩或宿松岩群的为大别山南部一套绿帘角闪岩变质岩,处于超高压变质岩带和张八岭群蓝闪-绿片岩相变质带之间^[16]。关于宿松岩群的变质条件存在不同观点:Liou等认为宿松岩群主体的变质条件为绿帘角闪岩相^[15,17];荆延仁等认为其形成于高压变质环境^[18-20]。在宿松群的归属上也存在争议:Carswell等认为其属于南大别低温榴辉岩带的一部分^[21];Liou等认为其属于一个独立的变质杂岩带^[15]。近期研究结果表明,宿松带经历了早期绿帘角闪岩相变质→角闪石



图件引自文献[11],有所修改

图 1 大别造山带东部地质简图和宿松地体主要岩石单元分布

Fig. 1 Simplified Geological Map of the Eastern Part of Dabie Orogenic Belt and the Distribution of Major Rock Units in Susong Terrene

榴辉岩相变质→晚期绿片岩相退变质,峰期变质温度和压力条件为 580 °C 和 1.30 GPa^[11,22]。

2 分析方法

全岩粉末和锆石矿物由河北廊坊市科大岩石矿物分选技术服务有限公司加工获得,每个岩石样品约 5 kg。全岩主量元素含量由广州澳实分析检测有限公司分析获得。全岩微量元素分析在中国科技大学放射性成因同位素地球化学实验室和 LA-ICP-MS 实验室完成,准确称取 50 mg 的全岩粉末,用蒸馏纯化的 HF-HNO₃ 溶液,在聚四氟乙烯钢套内胆瓶中 180 °C 条件下加热 7 d 分解岩石样品,蒸干溶液后,再加入 50% HNO₃ 溶液加热溶解样品 1 d;在 ICP-MS 测试之前,溶解后的样品加入 1% HNO₃ 溶液稀释定容,并加入内标元素。相对标准偏差在 5% 之内。

在双目镜下挑选用于 U-Pb 定年的锆石颗粒,然后由环氧树脂粘合固定,打磨抛光。锆石 CL 图像在中国科技大学扫描电镜实验室获得。锆石 U-Pb 同位素组成和微量元素分析在中国科技大学 LA-ICP-MS 实验室完成。锆石 91500 作为测年标准样品。普通 Pb 校正由 EXCEL Program Com PbCorr[#] 3_151 获得,以确保 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 、

$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$ 和 $n(^{208}\text{Pb})/n(^{232}\text{Th})$ 值的可靠性,表面 U-Pb 年龄由 ISOPLOT 软件获得。NIST610 作为锆石微量元素测定外部标准样品,其数据最终由 EXCEL Program LaTEcalc 获得。

Sm-Nd 同位素分析在中国科学技术大学放射性成因同位素地球化学实验室完成。准确称取粉末样品 100 mg 放置于 15 mL 的特氟龙(Teflon)闷罐中,滴入纯化 HClO₄ 溶液 8~10 滴摇匀后,加入 2~3 mL 纯化 HF,密闭加热 7 d 左右以充分溶解样品。稀土元素分离纯化在装有 5 mL AG50W-X12 交换树脂(200~400 目)的石英交换柱中完成,Sm-Nd 同位素的分离纯化在装有 1.7 mL Teflon 粉末的石英交换柱中完成。同位素比值测试在 MAT-262 热电质谱计完成,Sm-Nd 同位素比值测定采用 Re 金属带。标准溶液 La Jolla 的重复测量结果为 $N(^{143}\text{Nd})/N(^{144}\text{Nd})=0.511\ 869\pm 0.000\ 006$,误差类型为 2σ。样本量为 25 个,测量得到的同位素比值采用 $N(^{146}\text{Nd})/N(^{144}\text{Nd})=0.721\ 9$ 进行质量分馏校正,Nd 同位素比值测量精度优于 0.003%,Nd 同位素分析的全流程本底低于 200 pg。详细同位素分析流程可以参见文献[23]~[25]。

3 样品描述和分析结果

沿着趾凤—吴家河—缺月岭剖面 and 二郎镇—柳

平—陈汉沟—朱湾剖面[图 1(b)],本文共采集了 15 个宿松岩群样品,包括片岩、斜长片麻岩、花岗片麻岩和变质基性岩,代表性岩石类型的野外和显微特征见图 2。片岩的主要矿物组成为石英、白云母和斜长石,云母矿物具有显著的定向排列;花岗片麻岩的主要矿物组成为石英、云母和斜长石,中细粒结

构、块状构造,片状矿物有一定的定向排列,斜长石具有聚片双晶现象;斜长片麻岩的主要矿物组成为石英、长石、黑云母、白云母和石榴石,片状矿物定向排列;变基性岩的主要矿物组成为斜长石、角闪石、单斜辉石、石榴石、石英,中细粒结构、块状构造,片状矿物定向排列。

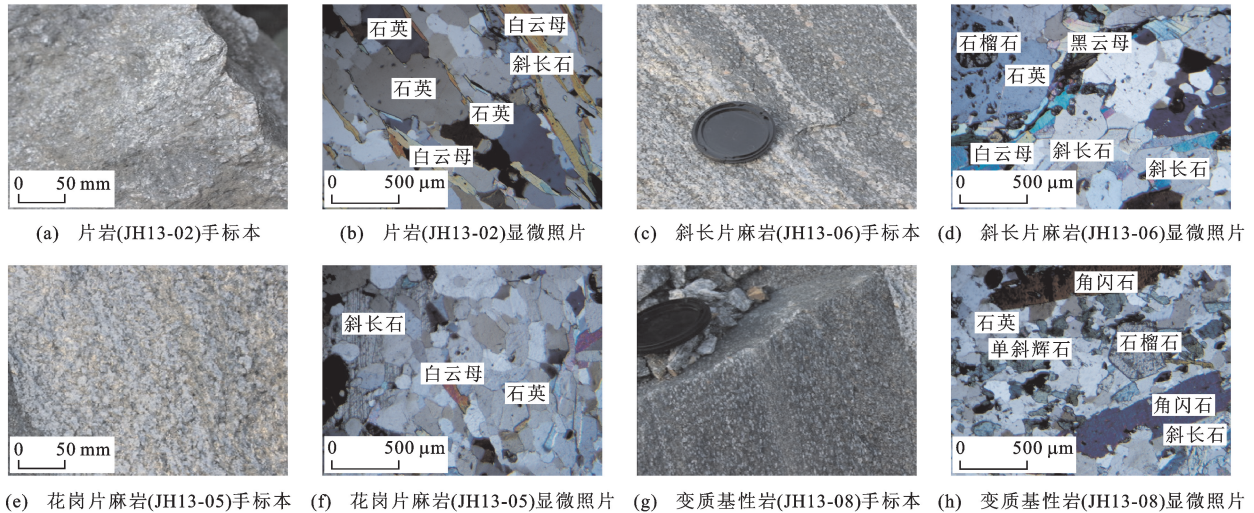


图 2 宿松岩群主要岩石类型的手标本和显微照片

Fig. 2 Photos of Macro- and Micro-structures of Major Rock Types of Susong Group

采用激光剥蚀等离子体质谱计技术分析宿松岩群或杂岩 2 个片岩样品(JH13-02 和 JH13-03)和 2 个片麻岩样品(JH13-05 和 JH13-06)的锆石 U-Pb 同位素组成和微量元素组成,计算获得的 U-Pb 表面年龄数据(表 1),微量元素组成未列图表。微量元素分析结果显示:4 个样品的大多数锆石颗粒具有相似的球粒陨石标准化稀土元素分布特征,富集重稀土元素(HREE),亏损轻稀土元素(LREE),大部分颗粒显示较强的 Eu 负异常(Eu/Eu^* 值为 0.01~0.40)。个别锆石分析点具有异常的球粒陨石标准化分布特征,可能是矿物包裹体叠加的缘故^[26]。

片岩样品 JH13-02 的锆石多数为自形晶,部分为半自形晶,且有一定的磨圆。阴极发光图像显示,锆石内部结构复杂多样,大部分锆石具有核-边结构,部分颗粒具有岩浆成因的振荡环带的核部,部分颗粒没有振荡环带现象,边部生长边具有高强度的阴极发光,无振荡环带[图 3(a)]。这些内部结构现象表明了锆石成因和后期演化的复杂性。26 颗锆石分析结果显示,其年龄值变化较大,其中 $N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$ 表面年龄值为 1 532~2 836 Ma (表 1)。在 U-Pb 谐和曲线图中,可见不少分析点具有显著不谐和的表面年龄值,说明样品经历强烈的后期叠加,与锆石内部结构显示的现象一致。 $N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$

表面年龄值集中在 2 500 Ma 左右,为晚太古代至古元古代,仅有 3 颗锆石的 $N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$ 年龄值落在 1 500~1 700 Ma 之间。在晶体外部和内部结构上,片岩样品 JH13-03 的锆石与样品 JH13-02 相似,自形至半自形晶,大部分颗粒有明显的核-边结构,部分核区具有振荡环带,而边部无生长环带[图 3(b)]。获得的 18 个锆石分析点的 $N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$ 表面年龄值在 1 069~2 424 Ma 之间,主要集中在 2 000 Ma 左右(图 4),与样品 JH13-02 存在明显的差异。5 个分析点 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 表面年龄值为新元古代(665~837 Ma)。尽管有些分析点落在无振荡环带的锆石晶区内,但两个样品所有分析点的 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值均大于 0.2,高于变质成因锆石的 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值(通常小于 0.1)。因此,其 U-Pb 年龄可能代表锆石变质重结晶时代。

两个片麻岩样品 JH13-05 和 JH13-06 的锆石自形程度较好,且具有明显的振荡环带内部结构,指示岩浆成因[图 3(c)、(d)]。部分颗粒具有核-边结构,但边部生长边较窄,个别颗粒重结晶现象明显。样品 JH13-05 的 25 个锆石分析点给出较集中的 U-Pb 年龄值(图 4), $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 表面年龄平均值为 $(754 \pm 15)\text{Ma}$,样本量为 25 个,平均标准权重

表 1 宿松岩群片岩和片麻岩的锆石 U-Pb 同位素组成分析结果

Tab. 1 Analysis Results of Zircon U-Pb Isotopes of Schist and Gneiss Samples from Susong Group

分析点	$w(\text{Th})/$ $w(\text{U})$	$N(^{207}\text{Pb})/$ $N(^{206}\text{Pb})$	$n(^{207}\text{Pb})/$ $n(^{235}\text{U})$	$n(^{206}\text{Pb})/$ $n(^{238}\text{U})$	$N(^{207}\text{Pb})/$ $N(^{206}\text{Pb})$ 年龄/Ma	$n(^{206}\text{Pb})/$ $n(^{238}\text{U})$ 年龄/Ma
JH13-02-01	0.62	0.156 8±0.001 9	8.283±0.176	0.378 5±0.004 3	2 421±21	2 069±20
JH13-02-02	0.48	0.142 1±0.001 9	7.166±0.148	0.363 2±0.003 2	2 253±23	1 997±15
JH13-02-03	0.68	0.096 5±0.001 9	3.605±0.106	0.273 8±0.003 2	1 558±37	1 560±16
JH13-02-04	0.42	0.158 9±0.002 1	10.413±0.214	0.480 4±0.004 3	2 444±22	2 529±19
JH13-02-05	0.52	0.143 3±0.002 1	8.293±0.193	0.429 0±0.004 4	2 267±25	2 301±20
JH13-02-06	0.62	0.164 0±0.002 3	11.023±0.251	0.488 4±0.005 2	2 497±24	2 564±22
JH13-02-07	0.49	0.161 5±0.002 0	10.218±0.202	0.463 6±0.004 2	2 472±21	2 456±18
JH13-02-08	0.71	0.095 2±0.002 0	3.467±0.104	0.267 1±0.002 9	1 532±39	1 526±15
JH13-02-09	0.66	0.194 5±0.002 2	14.645±0.275	0.544 8±0.004 8	2 781±19	2 803±20
JH13-02-10	0.93	0.160 3±0.002 1	10.589±0.216	0.474 2±0.004 0	2 459±23	2 502±18
JH13-02-11	0.86	0.175 8±0.002 1	12.707±0.230	0.521 9±0.004 1	2 614±19	2 707±17
JH13-02-12	0.68	0.163 2±0.002 1	9.861±0.191	0.437 7±0.003 5	2 489±22	2 340±16
JH13-02-13	0.57	0.172 2±0.002 1	10.972±0.215	0.462 2±0.004 0	2 579±21	2 449±18
JH13-02-14	2.94	0.181 1±0.003 8	12.106±0.393	0.496 5±0.007 0	2 663±35	2 599±30
JH13-02-15	0.63	0.167 5±0.002 0	9.666±0.179	0.413 4±0.003 1	2 533±20	2 230±14
JH13-02-16	0.57	0.165 9±0.002 1	10.410±0.211	0.448 5±0.004 2	2 516±21	2 389±18
JH13-02-17	0.83	0.201 2±0.002 6	14.587±0.290	0.516 7±0.004 3	2 836±21	2 685±18
JH13-02-18	0.26	0.190 6±0.002 5	13.395±0.272	0.502 4±0.004 5	2 747±21	2 624±19
JH13-02-19	0.56	0.169 5±0.002 1	11.762±0.230	0.495 7±0.004 2	2 553±21	2 595±18
JH13-02-20	0.35	0.164 9±0.002 1	10.579±0.204	0.460 4±0.003 8	2 507±20	2 441±17
JH13-02-21	0.30	0.155 9±0.002 3	9.882±0.233	0.455 9±0.004 9	2 411±24	2 422±22
JH13-02-22	0.57	0.165 3±0.002 7	10.530±0.259	0.452 2±0.004 5	2 511±27	2 405±20
JH13-02-23	0.63	0.103 9±0.002 8	3.830±0.144	0.263 8±0.003 3	1 695±48	1 509±17
JH13-02-24	0.66	0.134 2±0.002 0	7.174±0.165	0.382 5±0.003 5	2 154±26	2 088±17
JH13-02-25	0.36	0.153 1±0.002 1	5.853±0.123	0.274 2±0.002 3	2 381±23	1 562±12
JH13-02-26	0.92	0.124 1±0.001 8	6.321±0.134	0.367 3±0.003 1	2 016±25	2 017±15
JH13-03-01	1.06	0.110 3±0.002 3	5.334±0.162	0.352 3±0.004 1	1 804±37	1 946±19
JH13-03-02	1.41	0.126 3±0.002 0	6.509±0.143	0.371 4±0.002 9	2 048±26	2 036±13
JH13-03-03	0.66	0.126 7±0.002 4	4.025±0.116	0.231 2±0.002 7	2 052±00	1 341±14
JH13-03-04	1.14	0.082 5±0.001 9	1.445±0.047	0.127 9±0.001 4	1 257±44	776±8
JH13-03-05	0.89	0.121 5±0.001 6	3.481±0.080	0.204 8±0.002 6	1 978±23	1 201±14
JH13-03-06	0.59	0.124 5±0.002 0	6.340±0.152	0.365 5±0.003 6	2 021±27	2 008±17
JH13-03-07	0.65	0.123 2±0.001 6	6.061±0.125	0.354 1±0.003 3	2 004±22	1 954±16
JH13-03-08	1.11	0.125 8±0.001 7	4.417±0.108	0.252 2±0.003 5	2 040±23	1 450±18
JH13-03-09	1.33	0.075 0±0.001 6	1.411±0.043	0.135 6±0.001 3	1 069±43	820±8
JH13-03-10	0.83	0.126 7±0.001 8	5.903±0.122	0.329 9±0.002 5	2 052±24	1 838±12
JH13-03-11	0.85	0.080 5±0.002 1	1.500±0.053	0.137 1±0.001 5	1 208±50	828±8
JH13-03-12	0.74	0.075 4±0.001 3	1.151±0.031	0.108 6±0.001 3	1 079±33	665±7
JH13-03-13	1.37	0.128 4±0.002 3	6.835±0.178	0.384 8±0.003 9	2 076±30	2 098±18

续表 1

分析点	$w(\text{Th})/$ $w(\text{U})$	$N(^{207}\text{Pb})/$ $N(^{206}\text{Pb})$	$n(^{207}\text{Pb})/$ $n(^{235}\text{U})$	$n(^{206}\text{Pb})/$ $n(^{238}\text{U})$	$N(^{207}\text{Pb})/$ $N(^{206}\text{Pb})$ 年龄/Ma	$n(^{206}\text{Pb})/$ $n(^{238}\text{U})$ 年龄/Ma
JH13-03-14	0.50	0.129 4±0.002 1	6.326±0.171	0.362 3±0.004 8	2 090±28	1 993±23
JH13-03-15	1.15	0.081 2±0.002 7	1.510±0.068	0.138 7±0.002 0	1 227±63	837±11
JH13-03-16	0.83	0.122 3±0.002 1	6.199±0.157	0.364 6±0.003 6	1 989±30	2 004±17
JH13-03-17	1.30	0.157 0±0.002 0	10.533±0.206	0.477 3±0.003 9	2 424±21	2 515±17
JH13-03-18	0.76	0.088 0±0.002 4	2.694±0.101	0.226 7±0.002 8	1 383±52	1 317±15
JH13-05-01	1.14	0.086 8±0.001 8	1.458±0.047	0.121 1±0.001 7	1 355±36	737±10
JH13-05-02	1.28	0.095 5±0.003 6	1.579±0.083	0.119 8±0.002 1	1 538±65	729±12
JH13-05-03	2.17	0.066 5±0.001 3	1.144±0.034	0.124 6±0.001 5	823±38	757±9
JH13-05-04	1.18	0.065 5±0.001 2	1.119±0.031	0.123 4±0.001 4	792±35	750±8
JH13-05-05	1.30	0.068 4±0.001 3	1.183±0.034	0.124 9±0.001 3	880±37	759±8
JH13-05-06	1.45	0.056 2±0.001 1	1.024±0.030	0.129 0±0.001 5	460±40	782±8
JH13-05-07	1.14	0.059 3±0.001 2	1.059±0.030	0.126 2±0.001 3	576±39	766±7
JH13-05-08	1.22	0.060 2±0.001 3	1.043±0.032	0.124 4±0.001 4	611±42	756±8
JH13-05-09	1.16	0.061 7±0.001 2	1.054±0.029	0.120 0±0.001 2	665±36	731±7
JH13-05-10	1.28	0.065 4±0.001 7	1.094±0.041	0.118 8±0.001 6	788±49	724±9
JH13-05-11	1.08	0.067 7±0.001 6	1.171±0.040	0.122 5±0.001 5	859±44	745±9
JH13-05-12	1.75	0.063 9±0.001 6	1.091±0.038	0.117 6±0.001 4	738±47	717±8
JH13-05-13	1.30	0.064 3±0.001 1	1.120±0.029	0.125 7±0.001 3	750±33	763±7
JH13-05-14	1.35	0.062 4±0.001 0	1.052±0.025	0.120 9±0.001 0	688±32	736±6
JH13-05-15	1.27	0.065 6±0.001 1	1.073±0.027	0.116 9±0.001 1	795±32	712±6
JH13-05-16	1.27	0.071 9±0.001 2	1.206±0.031	0.120 6±0.001 2	982±31	734±7
JH13-05-17	1.15	0.065 8±0.001 4	1.190±0.036	0.129 9±0.001 3	800±41	787±7
JH13-05-18	1.43	0.061 9±0.001 0	1.044±0.025	0.121 5±0.001 1	671±31	739±6
JH13-05-19	1.67	0.065 3±0.001 2	1.196±0.032	0.132 2±0.001 4	785±34	800±8
JH13-05-20	1.92	0.066 1±0.001 1	1.213±0.029	0.132 2±0.001 3	810±30	800±7
JH13-05-21	1.08	0.072 7±0.001 2	1.230±0.035	0.123 0±0.001 7	1 006±31	748±10
JH13-05-22	1.23	0.075 1±0.001 5	1.359±0.040	0.131 3±0.001 6	1 072±36	795±9
JH13-05-23	1.09	0.061 8±0.001 2	1.120±0.032	0.129 1±0.001 3	665±38	783±7
JH13-05-24	1.25	0.061 4±0.001 2	1.099±0.031	0.127 9±0.001 4	654±37	776±8
JH13-05-25	1.92	0.061 3±0.001 2	1.126±0.030	0.124 2±0.001 2	648±37	755±7
JH13-06-01	1.15	0.076 2±0.004 2	1.315±0.074	0.125 3±0.002 9	1 099±105	761±17
JH13-06-02	1.27	0.065 5±0.003 7	1.145±0.067	0.126 8±0.002 8	791±115	769±16
JH13-06-03	1.20	0.073 0±0.003 7	1.299±0.070	0.129 1±0.002 8	1 013±100	783±16
JH13-06-04	1.64	0.077 4±0.004 1	1.360±0.077	0.127 4±0.002 8	1 132±104	773±16
JH13-06-05	1.67	0.065 6±0.001 9	1.147±0.041	0.126 9±0.002 4	792±63	770±14
JH13-06-06	1.28	0.062 1±0.003 1	1.097±0.058	0.128 2±0.002 7	677±105	777±16
JH13-06-07	1.19	0.062 6±0.003 0	1.117±0.056	0.129 5±0.002 7	693±99	785±16
JH13-06-08	1.37	0.062 5±0.003 4	1.064±0.060	0.123 5±0.002 7	691±114	751±15
JH13-06-09	1.85	0.074 4±0.003 4	1.267±0.063	0.123 5±0.002 7	1 051±88	751±15
JH13-06-10	1.03	0.067 5±0.002 4	1.112±0.045	0.119 4±0.002 4	854±71	727±14
JH13-06-11	1.19	0.065 0±0.003 2	1.104±0.058	0.123 2±0.002 7	773±101	749±15
JH13-06-12	0.74	0.066 7±0.002 9	0.955±0.046	0.103 9±0.002 2	829±88	637±13
JH13-06-13	1.05	0.091 0±0.004 3	1.489±0.075	0.118 7±0.002 6	1 447±86	723±15
JH13-06-14	1.15	0.065 2±0.002 3	1.056±0.043	0.117 5±0.002 3	779±77	716±13

注:误差类型为 1s;分析点以 JH13-02 或 JH13-03 开头的为片岩,以 JH13-05 或 JH13-06 开头的为片麻岩; $w(\cdot)$ 为元素或化合物含量; $N(\cdot)/N(\cdot)$ 为同一元素同位素比值, $N(\cdot)$ 为该元素的原子丰度; $n(\cdot)/n(\cdot)$ 为不同元素同位素比值, $n(\cdot)$ 为元素的物质的量。

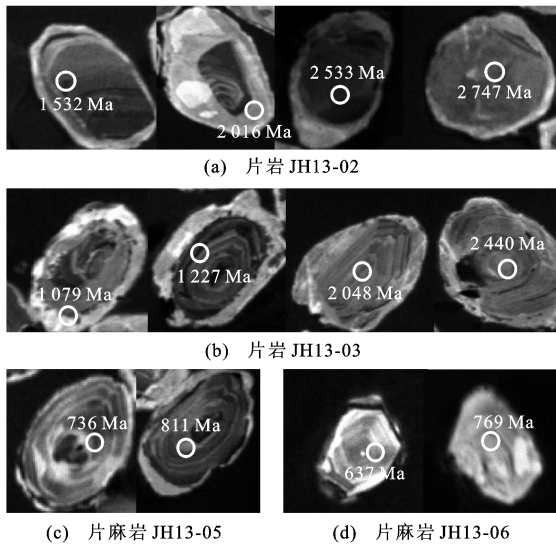


图 3 代表性锆石颗粒阴极发光图像

Fig. 3 CL Images of Representative Zircon Grains

偏差(MSWD)为 1.8。样品 JH-13-06 的 14 个锆石分析点给出谐和或近谐和 U-Pb 同位素年龄值,且集中于 760 Ma 左右(图 4), $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 表面年龄的平均值为 $(767 \pm 18)\text{Ma}$, 样本量为 10 个, MSWD 值为 0.78。两个片麻岩样品的锆石都具有高 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值(大于 0.7), 暗示锆石应为岩浆成因, 两个 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 平均年龄可以代表岩石

的形成年龄。

全岩样品的主量元素和微量元素含量(质量分数,下同)数据列于表 2。5 个变质基性岩样品(JH13-07、JH13-08、JH13-10、JH13-14 和 JH13-16) 具有较低的 SiO_2 含量(45.61%~50.83%), 较高的 MgO 含量(4.10%~6.03%), 同时还含有 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$ 、 CaO 和 TiO_2 。10 个片岩和片麻岩样品具有较高的 SiO_2 含量(57.24%~82.83%), 较低的 MgO 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$ 、 CaO 、 TiO_2 含量。在 $\log(w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)) - \log(w(\text{Na}_2\text{O})/w(\text{K}_2\text{O}))$ 判别图解(图 5)上, 大部分片岩样品落在硬砂岩和岩屑砂屑岩范围内^[27]。全岩稀土元素总含量为 $(87\sim 273) \times 10^{-6}$, 中等程度的轻、重稀土元素含量分馏(图 6), 富集轻稀土元素, 亏损重稀土元素, 轻、重稀土元素含量之比为 1.39~5.51, $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$ 值为 2.4~21.2。变质基性岩基本上没有 Eu 异常(Eu/Eu^* 值为 1.09~0.94), 部分片岩和片麻岩样品具有不同程度的 Eu 负异常。在微量元素含量组成上, 片岩和片麻岩样品富集大离子亲石元素, 明显呈 Nb 负异常和 Pb 正异常, 部分样品 Sr 亏损强烈, 变质基性岩样品也富集大离子亲石元素, 具有 Pb 正异常, 而 Nb 和 Sr 亏损不显著。

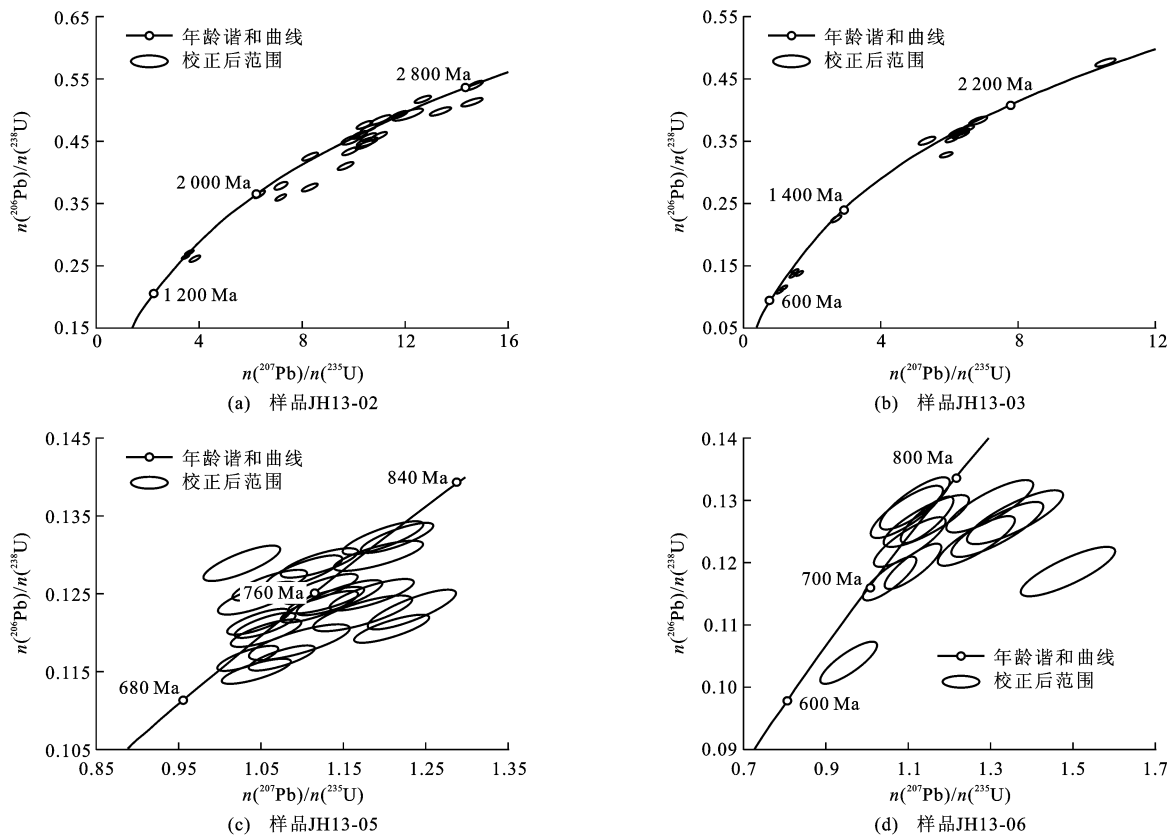


图 4 锆石 U-Pb 同位素谐和曲线

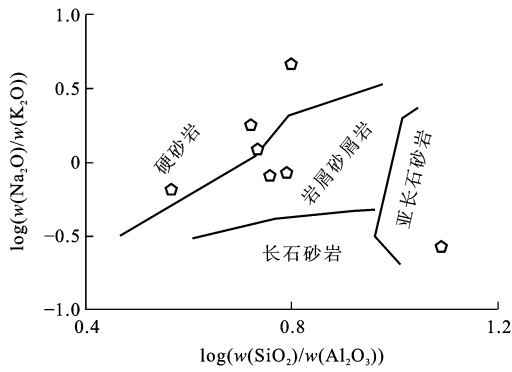
Fig. 4 Concordia Diagrams of Zircon U-Pb Isotopes

表2 全岩主量元素和微量元素分析结果

Tab. 2 Analysis Results of Major and Trace Elements of Whole-rocks

样品号	JH13-01	JH13-02	JH13-03	JH13-04	JH13-05	JH13-06	JH13-07	JH13-08	JH13-09	JH13-10	JH13-11	JH13-12	JH13-13	JH13-14	JH13-16
$w(\text{SiO}_2)/\%$	68.07	82.83	57.24	64.24	75.88	72.31	46.91	47.50	74.75	45.61	77.12	75.92	75.09	50.05	50.83
$w(\text{TiO}_2)/\%$	0.84	0.36	0.83	0.48	0.17	0.36	2.69	3.30	0.20	2.82	0.11	0.15	0.11	1.41	1.21
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	12.91	6.70	15.46	17.07	13.26	13.31	13.03	12.82	12.95	13.78	12.21	12.39	13.71	18.53	15.52
$w(\text{CaO})/\%$	3.25	1.24	4.89	2.26	0.76	1.67	9.12	7.99	1.23	10.03	0.80	0.11	0.09	6.75	7.26
$w(\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T})/\%$	5.40	2.80	6.75	3.94	1.07	2.14	13.91	16.37	1.19	16.04	1.35	1.78	1.68	9.71	9.50
$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	1.70	1.94	2.84	2.07	1.16	2.78	1.33	1.45	4.07	0.99	1.16	4.32	2.92	1.49	2.56
$w(\text{MgO})/\%$	3.20	1.04	3.24	0.67	0.27	0.59	5.51	4.12	0.27	6.03	0.11	0.12	0.50	4.10	4.42
$w(\text{MnO})/\%$	0.07	0.04	0.13	0.10	0.09	0.08	0.23	0.37	0.06	0.26	0.06	0.04	0.07	0.33	0.14
$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	3.04	0.52	1.85	6.29	5.70	4.11	2.59	3.02	3.34	2.25	5.38	3.64	3.59	4.96	3.83
$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	0.21	0.06	0.23	0.27	0.03	0.08	0.48	1.62	0.03	0.37	0.02	0.02	0.01	0.26	0.22
烧失量/ $\%$	0.88	1.67	5.97	2.03	0.90	1.80	3.68	1.10	0.91	1.58	0.64	0.72	1.50	1.69	4.03
$w_{\text{total}}/\%$	99.72	99.26	99.58	99.56	99.38	99.38	99.60	99.75	99.16	99.83	99.03	99.30	99.36	99.43	99.75
$w(\text{Ni})/10^{-6}$	61.2	59.6	89.2	50.0	49.3	50.7	92.2	21.2	49.0	207.0	49.5	49.4	47.5	101.0	49.4
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	43.3	60.7	67.4	28.2	25.9	59.2	83.0	44.6	116.0	26.2	27.5	110.0	81.0	29.7	58.9
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	363.0	64.9	328.0	327.0	116.0	265.0	658.0	265.0	192.0	201.0	109.0	36.1	36.3	596.0	1 054.0
$w(\text{Y})/10^{-6}$	13.2	11.4	27.7	13.3	15.4	15.9	45.3	82.1	12.9	44.7	23.6	30.4	27.8	24.5	23.0
$w(\text{Zr})/10^{-6}$	130	154	200	216	129	178	185	340	131	183	164	262	217	173	126
$w(\text{Nb})/10^{-6}$	8.47	7.32	13.50	13.20	9.99	9.81	9.20	12.10	10.60	7.57	13.40	18.70	13.20	8.44	6.53
$w(\text{Cs})/10^{-6}$	1.68	0.95	4.73	2.33	0.87	0.97	8.89	4.73	2.12	1.56	0.51	1.98	6.58	4.33	0.43
$w(\text{Ba})/10^{-6}$	888	516	849	950	763	1 061	134	491	1 304	246	647	865	879	634	909
$w(\text{La})/10^{-6}$	30.3	20.3	32.1	28.6	31.4	22.8	15.2	35.9	27.0	13.4	28.7	48.0	22.1	19.2	27.2
$w(\text{Ce})/10^{-6}$	55.7	36.5	64.4	51.1	52.8	39.8	36.5	83.1	42.8	33.3	61.7	92.6	56.4	40.1	54.1
$w(\text{Pr})/10^{-6}$	7.30	4.51	8.78	7.62	6.78	5.21	5.98	13.90	5.23	5.51	7.54	12.00	6.16	5.80	7.45
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	27.0	15.7	33.5	28.5	22.0	18.2	28.2	65.2	16.6	26.1	28.2	41.4	21.7	24.1	29.4
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	4.49	2.47	6.09	4.64	3.18	3.00	6.93	15.30	2.48	6.63	4.85	6.81	4.17	5.06	5.53
$w(\text{Eu})/10^{-6}$	1.34	0.67	1.51	1.44	0.59	0.71	2.37	5.55	0.51	2.25	0.86	0.63	0.60	1.52	1.62
$w(\text{Gd})/10^{-6}$	3.89	2.36	5.61	3.91	2.81	2.78	7.37	15.80	2.35	7.06	4.42	6.43	4.05	4.86	5.13
$w(\text{Tb})/10^{-6}$	0.47	0.30	0.76	0.47	0.36	0.38	1.21	2.47	0.30	1.17	0.62	0.90	0.64	0.74	0.71
$w(\text{Dy})/10^{-6}$	2.28	1.62	4.14	2.25	1.96	2.12	6.99	13.90	1.69	6.84	3.48	4.94	3.86	4.10	3.79
$w(\text{Ho})/10^{-6}$	0.45	0.35	0.90	0.43	0.44	0.47	1.58	3.14	0.38	1.57	0.79	1.06	0.90	0.91	0.80
$w(\text{Er})/10^{-6}$	1.20	1.02	2.57	1.12	1.38	1.39	4.33	8.42	1.16	4.31	2.28	2.91	2.64	2.46	2.19
$w(\text{Tm})/10^{-6}$	0.17	0.16	0.39	0.16	0.24	0.23	0.66	1.26	0.20	0.66	0.38	0.44	0.44	0.36	0.33
$w(\text{Yb})/10^{-6}$	1.07	1.01	2.50	0.97	1.61	1.53	4.00	7.51	1.32	4.00	2.38	2.66	2.82	2.12	2.00
$w(\text{Lu})/10^{-6}$	0.16	0.16	0.39	0.15	0.26	0.25	0.62	1.17	0.22	0.62	0.38	0.41	0.44	0.32	0.30
$w(\text{Hf})/10^{-6}$	2.93	3.48	4.61	4.61	3.32	3.87	4.09	7.62	3.18	4.20	4.09	6.62	5.77	3.99	2.87
$w(\text{Ta})/10^{-6}$	0.44	0.39	0.79	0.76	0.65	0.57	0.44	0.66	0.73	0.44	0.71	1.08	0.76	0.46	0.36
$w(\text{Pb})/10^{-6}$	9.08	4.82	14.90	12.70	6.22	16.60	26.70	6.44	22.30	8.54	11.60	11.70	9.17	33.30	20.40
$w(\text{Th})/10^{-6}$	4.28	8.55	9.42	4.33	16.30	8.65	0.85	1.72	13.80	1.01	8.57	11.50	8.53	2.76	5.14
$w(\text{U})/10^{-6}$	0.45	1.06	1.61	0.86	2.51	2.02	0.22	0.43	2.78	0.26	1.66	1.28	1.05	0.52	0.75
$w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N$	20.31	14.42	9.21	21.15	13.99	10.69	2.73	3.43	14.67	2.40	8.65	12.94	5.62	6.50	9.76
$w(\text{Gd})_N/w(\text{Yb})_N$	3.01	1.93	1.86	3.33	1.44	1.50	1.52	1.74	1.47	1.46	1.54	2.00	1.19	1.90	2.12
Eu/Eu* 值	0.98	0.85	0.79	1.03	0.60	0.75	1.01	1.09	0.65	1.01	0.57	0.29	0.45	0.94	0.93

注:样品 JH13-04、JH13-05、JH13-06 为片麻岩,样品 JH13-07、JH13-08、JH13-10、JH13-14、JH13-16 为变质基性岩,剩下的样品为片岩; w_{total} 为主量元素总含量; $w(\cdot)_N$ 为元素含量球粒陨石标准化后的值。



图件引自文献[27],有所修改

图 5 $\log(w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3))$ - $\log(w(\text{Na}_2\text{O})/w(\text{K}_2\text{O}))$ 判别图解

Fig. 5 Discrimination Diagram of

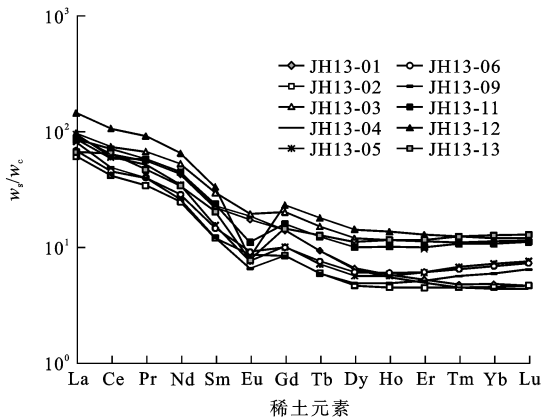
$\log(w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3))$ - $\log(w(\text{Na}_2\text{O})/w(\text{K}_2\text{O}))$

全岩粉末样品 Sm-Nd 同位素组成列于表 3 中。从分析结果可见,宿松杂岩的 Sm-Nd 同位素组成变化较大,初始 ϵ_{Nd} 值为 $-20.2 \sim 1.9$ (回扣到 $t = 750 \text{ Ma}$),对应的一阶段亏损地幔模式年龄值为 $1.37 \sim 2.66 \text{ Ga}$ 。片岩样品 JH13-01 和 JH13-02 具

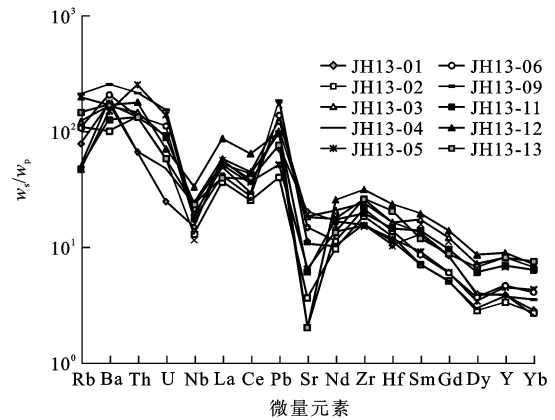
有最古老的模式年龄值(表 3),与古老的锆石 U-Pb 年龄值(样品 JH13-02)吻合。变质基性岩石具有较高的初始 ϵ_{Nd} 值($-9.3 \sim 1.9$),其中样品 JH-13-07 和 JH-13-10 的初始 ϵ_{Nd} 值大于 0。其他片岩和片麻岩样品的初始 ϵ_{Nd} 值为 $-12.0 \sim -2.8$ 。

4 讨论

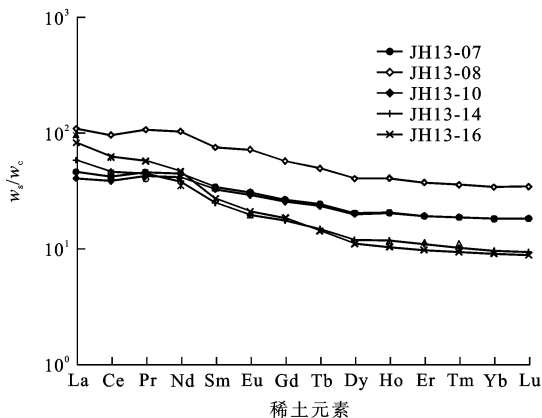
大别—苏鲁造山带是由两个具有不同地质演化历史的大陆板块,即早元古代克拉通化的华北陆块和中—晚元古代稳定化的扬子板块碰撞而形成的。南、北边界陆块演化历史明确,但造山带内不同地体构造拼合复杂,变质变形多样。不同变质程度的岩石-构造单元记录各自独特的演化历史,其形成时代和归属为研究造山过程、构造格局和地壳演化提供了有效信息。根据前人报道,对宿松岩群不同岩组形成时代的限定尚存在不确定性。安徽省地质矿产局报道大新屋组白云石英片岩锆石 U-Pb 年龄为 1850 Ma ^[28],根据与下伏的大别群不整合的构造关系,将其年龄限定为古元古



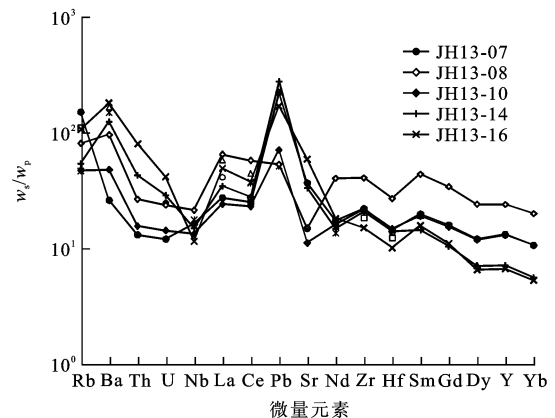
(a) 球粒陨石标准化稀土元素配分模式



(b) 原始地幔标准化微量元素蛛网图



(c) 球粒陨石标准化稀土元素配分模式



(d) 原始地幔标准化微量元素蛛网图

w_s 为样品含量; w_c 为球粒陨石含量; w_p 为原始地幔含量

图 6 全岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式和原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 6 Chondrite-normalized REE Patterns and Primitive Mantle-normalized Trace Element Spider Diagrams of Whole-rocks

表3 宿松岩群片岩、片麻岩和变质基性岩 Sm-Nd 同位素组成

Tab. 3 Sm-Nd Isotopic Compositions of Schist, Gneiss and Meta-basic Rock from Susong Group

样品号	岩性	$\omega(\text{Sm})/10^{-6}$	$\omega(\text{Nd})/10^{-6}$	$n(^{147}\text{Sm})/n(^{144}\text{Nd})$	$N(^{143}\text{Nd})/N(^{144}\text{Nd})$	$\epsilon_{\text{Nd}}(750 \text{ Ma})$	T_{DM1}/Ga	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$
JH13-01	片岩	4.49	27.0	0.100 5	0.511 163	-19.6	2.66	-0.49
JH13-02	片岩	2.47	15.7	0.095 1	0.511 104	-20.2	2.62	-0.52
JH13-03	片岩	6.09	33.5	0.109 9	0.511 824	-7.6	1.94	-0.44
JH13-09	片岩	2.48	16.6	0.090 3	0.512 042	-1.4	1.37	-0.54
JH13-11	片岩	4.85	28.2	0.104 0	0.511 865	-6.2	1.78	-0.47
JH13-12	片岩	6.81	41.4	0.099 4	0.511 795	-7.1	1.80	-0.49
JH13-13	片岩	4.17	21.7	0.116 2	0.511 630	-12.0	2.37	-0.41
JH13-04	片麻岩	4.64	28.5	0.098 4	0.511 780	-7.3	1.81	-0.50
JH13-05	片麻岩	3.18	22.0	0.087 4	0.511 960	-2.8	1.43	-0.56
JH13-06	片麻岩	3.00	18.2	0.099 6	0.512 078	-1.6	1.43	-0.49
JH13-07	变质基性岩	6.93	28.2	0.148 6	0.512 485	1.6	1.55	-0.24
JH13-08	变质基性岩	15.3	65.2	0.141 9	0.512 332	-0.7	1.73	-0.28
JH13-10	变质基性岩	6.63	26.1	0.153 6	0.512 522	1.9	1.59	-0.22
JH13-14	变质基性岩	5.06	24.1	0.126 9	0.511 942	-6.9	2.11	-0.35
JH13-16	变质基性岩	5.53	29.4	0.113 7	0.511 757	-9.3	2.12	-0.42

注： $\epsilon_{\text{Nd}} = [(N(^{143}\text{Nd})/N(^{144}\text{Nd}))_i / (N(^{143}\text{Nd})/N(^{144}\text{Nd}))_{\text{CHUR}} - 1] \times 10^4$ ，下标 i 表示初始比值，下标 CHUR 表示球粒陨石均一源与样品同时的比值； $\epsilon_{\text{Nd}}(750 \text{ Ma})$ 为年龄 750 Ma 对应的 ϵ_{Nd} 值； T_{DM1} 为一阶段 Nd 模式年龄； $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 为 Nd 富集系数。

代；汤加富等获得蒲河组变质火山岩的全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 448~470 Ma，推测到宿松群部分岩石单元为中—新元古代^[8]；Xie 等报道宿松岩群片麻岩的锆石 U-Pb 年龄为 (579±49) Ma，认为其原岩侵位于新元古代^[13]。

片麻岩样品的锆石 Th/U 比值较高，具有岩浆成因的振荡环带内部结构，U-Pb 年龄集中在 750~770 Ma，结合全岩的主量元素组成和 Sm-Nd 同位素组成特征（初始 ϵ_{Nd} 值为 -7.3~-1.6），推测其原岩为新元古代地壳物质。同时期的岩浆岩在大别造山带的其他岩石-构造单元也广泛出露，包括北淮阳低级变质地体、大别超高压地体^[2-3]。已有研究表明扬子板块广泛发育晚元古代岩浆作用（700~850 Ma），并备受国内外学者的重视，但其成因和地质意义也备受争议^[2-3, 29-35]。新元古代岩浆作用在古大陆大地构造位置的恢复和全球对比研究中起到主要作用，同时，在研究地体属性和演化问题上，通常被视为扬子板块特征的指标^[2]。在秦岭造山带的南秦岭地体，也经历了相似的岩浆-热事件^[36-38]。尽管存在成因争议，但多数研究者认为，在扬子陆块及边缘地区广泛分布的新元古代岩浆作用与 Rodinia 超大陆的形成及随后的裂解有密切的成因联系^[30-31]。

片岩样品的锆石 U-Pb 年龄值分布较广，集中

在晚太古代—古元古代，小部分为中元古代—新元古代，结合 Nd 同位素组成特征，推测片岩的原岩为沉积岩，锆石为沉积碎屑来源，晶体外形有磨圆现象，经历了一定距离的搬运作用。在 JH13-03 样品中，5 个锆石颗粒具有新元古代 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄，暗示其沉积物源有新元古代地壳物质的贡献，也限定了其沉积时代不早于年轻锆石的结晶时间。根据阴极发光显示的内部结构和 $\omega(\text{Th})/\omega(\text{U})$ 值，多数分析点的 U-Pb 年龄可以代表锆石结晶时代，反映剥蚀物源区多期的地壳生长和/或再造作用。石永红等报道过宿松岩群的石榴石云母片岩锆石 U-Pb 年龄，年龄值分布广，集中于 2 380~2 560、1 970~2 190、780~900 Ma 等 3 组年龄^[11]。因此，可以推断宿松岩群的碎屑锆石记录了扬子陆块前寒武纪四期岩浆作用，即中—晚太古代、古元古代、中元古代和新元古代。相似记录也可以在扬子陆块其他地区的基底岩石或沉积盖层观察到。在扬子陆块中部广泛出露新元古代板溪群的低级变质沉积岩，其碎屑锆石记录了 2 300~2 600、1 900~2 100、750~1 000 Ma 等 3 组 U-Pb 年龄^[39-40]。在扬子板块西南缘，新元古代沉积岩的碎屑锆石也主要记录了太古代（2 660~3 570 Ma）、古元古代（1 730~2 140 Ma）和新元古代 U-Pb 年龄信息，部分记录了中元古代的 U-Pb 年龄信息（1 200~1 500 Ma）^[41]。

由于稀土元素化学性质相似,在变质作用中,尤其在中—低级变质条件下,岩石 Sm-Nd 同位素体系能够保持相对封闭。因此,Nd 同位素组成也是示踪岩石成因或沉积物质来源的有效手段^[24]。宿松岩群片岩和片麻岩的全岩单阶段 Nd 模式年龄值(T_{DM1})变化范围较大,主要集中在晚太古代—古元古代晚期,与扬子陆块基底和沉积盖层岩石相似^[39-40,42]。与片岩和片麻岩相比,宿松岩群的变质基性岩石具有相对亏损的 Nd 同位素组成,变化范围较小。因缺乏锆石矿物,其形成时代有待进一步准确限定。当回扣至 750 Ma 时,5 个变质基性岩的初始 ϵ_{Nd} 值为 $-9.3 \sim -1.9$,对应的 T_{DM1} 值为 $1.55 \sim 2.12$ Ga,落在大别造山带超高压榴辉岩的 Nd 模式年龄值范围^[43]。

5 结 语

大别山造山带宿松岩群的岩石类型复杂多样,主量元素、微量元素和 Nd 同位素地球化学组成变化较大。片岩主体由沉积岩变质形成,沉积时代可能为新元古代,剥蚀区地壳物质主要记录了晚太古代、早元古代、新元古代多期的地壳生长和/或再造作用,类似于扬子陆块其他地区新元古代沉积岩。片麻岩主体由新元古代岩浆岩变质形成,后者与大别—苏鲁造山带其他岩石—构造单元乃至扬子陆块新元古代岩浆热事件同期,指示了宿松超高压变质地体具有扬子陆块属性。

中国科学技术大学侯振辉、贺剑峰和肖平在分析测试中提供了帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献:

References:

- [1] ZHENG Y F, WU Y B, CHEN F K, et al. Zircon U-Pb and Oxygen Isotope Evidence for a Large-scale ^{18}O Depletion Event in Igneous Rocks During the Neoproterozoic[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(20): 4145-4165.
- [2] CHEN F K, GUO J H, JIANG L L, et al. Provenance of the Beihuaiyang Lower-grade Metamorphic Zone of the Dabie Ultrahigh-pressure Collisional Orogen, China: Evidence from Zircon Ages[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 22(4): 343-352.
- [3] CHEN F K, SIEBEL W, GUO J H, et al. Late Proterozoic Magmatism and Metamorphism Recorded in Gneisses from the Dabie High-pressure Metamorphic Zone, Eastern China: Evidence from Zircon U-Pb Geochronology[J]. *Precambrian Research*, 2003, 120(1/2): 131-148.
- [4] 江来利, 吴维平, 刘贻灿, 等. 大别山南部宿松杂岩的 U-Pb 锆石和 Ar-Ar 角闪石年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2003, 19(3): 497-505.
JIANG Lai-li, WU Wei-ping, LIU Yi-can, et al. U-Pb Zircon and Ar-Ar Hornblende Ages of the Susong Complex of the Southern Orogen and Their Geological Implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(3): 497-505.
- [5] 江来利, SIEBEL W, 陈福坤, 等. 大别造山带北部卢镇关杂岩的 U-Pb 锆石年龄[J]. *中国科学: D 辑, 地球科学*, 2005, 35(5): 411-419.
JIANG Lai-li, SIEBEL W, CHEN Fu-kun, et al. U-Pb Zircon Ages for the Luzhenguan Complex in Northern Part of the Eastern Dabie Orogen[J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 2005, 35(5): 411-419.
- [6] 桑宝梁, 陈跃志, 邵桂清. 大别山东南麓宿松群铷-锶年龄及其构造意义的探讨[J]. *中国区域地质*, 1987(4): 364-370.
SANG Bao-liang, CHEN Yue-zhi, SHAO Gui-qing. The Rb-Sr Ages of Metamorphic Series of the Susong Group at the Southeastern Foot of the Dabie Mountains, Anhui Province, and Their Tectonic Significance[J]. *Regional Geology of China*, 1987(4): 364-370.
- [7] 汤加富, 姚 穗. 对安徽及邻区若干重要基础地质问题的认识[J]. *安徽地质*, 2000, 10(2): 103-110.
TANG Jia-fu, YAO Sui. On Several Significant Fundamental Geological Issues Concerned with Anhui and Its Neighboring Area[J]. *Geology of Anhui*, 2000, 10(2): 103-110.
- [8] 汤加富, 侯明金, 高天山, 等. 宿松群、红安群、海州群的时代归属与讨论[J]. *地质通报*, 2002, 21(3): 166-171.
TANG Jia-fu, HOU Ming-jin, GAO Tian-shan, et al. Age Assignment of the Susong Group, Hong'an Group, and Haizhou Group: A Discussion[J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(3): 166-171.
- [9] LI S G, XIAO Y L, LIU D L, et al. Collision of the North China and Yangtze Blocks and Formation of Coesite-bearing Eclogites: Timing and Processes[J]. *Chemical Geology*, 1993, 109(1/2/3/4): 89-111.
- [10] LI S G, JAGOUTZ E, CHEN Y Z, et al. Sm-Nd and Rb-Sr Isotopic Chronology and Cooling History of Ultrahigh Pressure Metamorphic Rocks and Their Country Rocks at Shuanghe in the Dabie Mountains, Central China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(6): 1077-1093.
- [11] 石永红, 王次松, 康 涛, 等. 安徽省宿松变质杂岩岩

- 石学特征和锆石 U-Pb 年龄研究[J]. 岩石学报, 2012, 28(10): 3389-3402.
- SHI Yong-hong, WANG Ci-song, KANG Tao, et al. Petrological Characteristics and Zircon U-Pb Age for Susong Metamorphic Complex Rocks in Anhui Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(10): 3389-3402.
- [12] ZHENG Y F, ZHAO Z F, WU Y B, et al. Zircon U-Pb Age, Hf and O Isotope Constraints on Protolith Origin of Ultrahigh-pressure Eclogite and Gneiss in the Dabie Orogen[J]. *Chemical Geology*, 2006, 231(1/2): 135-158.
- [13] XIE Z, CHEN J F, ZHENG Y F, et al. Zircon U-Pb Dating of the Metamorphic Rocks of Different Grades from the Southern Part of the Dabie Terrain in China [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A*, 2001, 26(9/10): 685-693.
- [14] 徐树桐, 江来利, 刘贻灿, 等. 大别山区(安徽部分)的构造格局和演化过程[J]. *地质学报*, 1992, 66(1): 1-14.
- XU Shu-tong, JIANG Lai-li, LIU Yi-can, et al. Tectonic Framework and Evolution of the Dabie Mountains in Anhui, Eastern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1992, 66(1): 1-14.
- [15] LIOU J G, WANG Q C, ZHAI M G, et al. Ultrahigh-P Metamorphic Rocks and Their Associated Lithologies from the Dabie Terrain, Central China: A Field Trip Guide to the Third International Eclogite Field Symposium [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(S): 1-40.
- [16] 高道明, 吴维平. 大别山南部宿松群的组成及形成时代[J]. *安徽地质*, 2008, 18(2): 85-91, 100.
- GAO Dao-ming, WU Wei-ping. Composition and Formation Time of the Susong Group in Southern Dabie Mt[J]. *Geology of Anhui*, 2008, 18(2): 85-91, 100.
- [17] 翟明国, 从柏林, 陈晶, 等. 大别山区变质岩中蓝晶石的几种退变质反应及其所指示的动力学过程[J]. *岩石学报*, 1995, 11(3): 257-272.
- ZHAI Ming-guo, CONG Bo-lin, CHEN Jing, et al. Some Retrograde Metamorphic Reactions in Metamorphic Rocks in Dabie Mountains, Central China and Their Implication for Metamorphic Kinetics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1995, 11(3): 257-272.
- [18] 荆延仁, 张良田, 毕治国, 等. 安徽太湖、宿松一带白片岩的发现及其地质意义[J]. *中国区域地质*, 1991(2): 131-134.
- JING Yan-ren, ZHANG Liang-tian, BI Zhi-guo, et al. The Discovery of Whiteschist in the Taihu-Susong Area, Anhui, and Its Geological Significance[J]. *Regional Geology of China*, 1991(2): 131-134.
- [19] XU S T, SU W, LIU Y C, et al. Diamond from the Dabie Shan Metamorphic Rocks and Its Implication for Tectonic Setting[J]. *Science*, 1992, 256(1): 80-82.
- [20] 魏春景, 单振刚. 安徽省大别山南部宿松杂岩变质作用研究[J]. *岩石学报*, 1997, 13(3): 356-368.
- WEI Chun-jing, SHAN Zhen-gang. Metamorphism of the Susong Complex from the Southern Dabie Mountains, Anhui Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1997, 13(3): 356-368.
- [21] CARSWELL D A, O'BRIEN P J, WILSON R N, et al. Thermobarometry of Phengite-bearing Eclogites in the Dabie Mountains of Central China[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1997, 15(2): 239-252.
- [22] 石永红, 林伟, 王清晨. 大别山太湖地区宿松变质杂岩中石榴斜长角闪岩的 P-T 轨迹及反映的俯冲过程[J]. *地质科学*, 2007, 42(3): 518-531.
- SHI Yong-hong, LIN Wei, WANG Qing-chen. P-T Path of Garnet Amphibolites from the Susong Metamorphic Complex Across Taihu Area in the Dabie Mountains, and Its Implications for Subduction[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2007, 42(3): 518-531.
- [23] CHEN F K, HEGNER E, TODT W. Zircon Ages, Nd Isotopic and Chemical Compositions of Orthogneisses from the Black Forest, Germany: Evidence for a Cambrian Magmatic Arc [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2000, 88(4): 791-802.
- [24] CHEN F K, SIEBEL W, SATIR M, et al. Geochronology of the Karadere Basement (NW Turkey) and Implications for the Geological Evolution of the Istanbul Zone [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2002, 91(3): 469-481.
- [25] CHEN F K, LI X H, WANG X L, et al. Zircon Age and Nd-Hf Isotopic Composition of the Yunnan Tethyan Belt, Southwestern China [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2007, 96(6): 1179-1194.
- [26] CAVOSIE A J, VALLEY J W, WILDE S A, et al. Correlated Microanalysis of Zircon: Trace Element, $\delta^{18}\text{O}$, and U-Th-Pb Isotopic Constraints on the Igneous Origin of Complex $> 3\ 900$ Ma Detrital Grains [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(22): 5601-5616.
- [27] PETTIJOHN F J, POTTER P E, SIEVER R. Sand and Sandstone [M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1987.
- [28] 安徽省地质矿产局. 安徽省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Anhui

- Province. Regional Geology of Anhui Province[M]. Beijing:Geological Publishing House,1987.
- [29] LI Z X,ZHANG L H,POWELL M. South China in Rodinia:Part of the Missing Link Between Australia-East Antarctica and Laurentia? [J]. *Geology*,1995,23(5):407-410.
- [30] LI X H,LI Z X,GE W C, et al. Neoproterozoic Granitoids in South China:Crustal Melting Above a Mantle Plume at Ca. 825 Ma? [J]. *Precambrian Research*,2003,122(1/2/3/4):45-83.
- [31] LI Z X,LI X H,KINNY P D, et al. Geochronology of Neoproterozoic Syn-rift Magmatism in the Yangtze Craton, South China and Correlations with Other Continents:Evidence for a Mantle Superplume That Broke up Rodinia [J]. *Precambrian Research*,2003,122(1/2/3/4):85-109.
- [32] LI X H. U-Pb Zircon Ages of Granites from the Southern Margin of the Yangtze Block:Timing of Neoproterozoic Jinning:Orogeny in SE China and Implications for Rodinia Assembly [J]. *Precambrian Research*,1999,97(1/2):43-57.
- [33] ZHOU M F,YAN D P,KENNEDY A K, et al. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronological and Geochemical Evidence for Neoproterozoic Arc-magmatism Along the Western Margin of the Yangtze Block, South China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*,2002,196(1/2):51-67.
- [34] ZHOU M F,MA Y X,YAN D P, et al. The Yanbian Terrane(Southern Sichuan Province, SW China): A Neoproterozoic Arc Assemblage in the Western Margin of the Yangtze Block[J]. *Precambrian Research*,2006,144(1/2):19-38.
- [35] LING W L,GAO S,ZHANG B R, et al. Neoproterozoic Tectonic Evolution of the Northwestern Yangtze Craton, South China:Implications for Amalgamation and Break-up of the Rodinia Supercontinent[J]. *Precambrian Research*,2003,122(1/2/3/4):111-140.
- [36] 凌文黎,任邦方,段瑞春,等. 南秦岭武当山群、耀岭河群及基性侵入岩群锆石 U-Pb 同位素年代学及其地质意义[J]. *科学通报*,2007,52(12):1445-1456.
- LING Wen-li,REN Bang-fang,DUAN Rui-chun, et al. Timing of the Wudangshan, Yaolinghe Volcanic Sequences and Mafic Sills in South Qinling:U-Pb Zircon Geochronology and Tectonic Implication[J]. *Chinese Science Bulletin*,2007,52(12):1445-1456.
- [37] ZHU X Y,CHEN F K,NIE H, et al. Neoproterozoic Tectonic Evolution of South Qinling, China:Evidence from Zircon Ages and Geochemistry of the Yaolinghe Volcanic Rocks[J]. *Precambrian Research*,2014,245(1):115-130.
- [38] ZHU X Y,CHEN F,LIU B X, et al. Geochemistry and Zircon Ages of Mafic Dikes in the South Qinling, Central China:Evidence for Late Neoproterozoic Continental Rifting in the Northern Yangtze Block[J]. *International Journal of Earth Sciences*,2015,104(1):27-44.
- [39] WANG W,WANG F K,CHEN F K, et al. Detrital Zircon Ages and Hf-Nd Isotopic Composition of Neoproterozoic Sedimentary Rocks in the Yangtze Block: Constraints on the Deposition Age and Provenance [J]. *The Journal of Geology*,2010,118(1):79-94.
- [40] WANG W,CHEN F K,HU R, et al. Provenance and Tectonic Setting of Neoproterozoic Sedimentary Sequences in the South China Block:Evidence from Detrital Zircon Ages and Hf-Nd Isotopes[J]. *International Journal of Earth Sciences*,2012,101(7):1723-1744.
- [41] GREENTREE M R,LI Z X,LI X H, et al. Late Mesoproterozoic to Earliest Neoproterozoic Basin Record of the Sibao Orogenesis in Western South China and Relationship to the Assembly of Rodinia[J]. *Precambrian Research*,2006,151(1/2):79-100.
- [42] CHEN J F,JAHN B M. Crustal Evolution of Southeastern China:Nd and Sr Isotopic Evidence[J]. *Tectonophysics*,1998,284(1/2):101-133.
- [43] MA C Q,EHLERS C,XU C H, et al. The Roots of the Dabieshan Ultrahigh-pressure Metamorphic Terrane:Constraints from Geochemistry and Nd-Sr Isotope Systematics[J]. *Precambrian Research*,2000,102(3/4):279-301.