

辽东半岛南部三叠纪辉绿岩中发现新元古代年龄锆石

杨进辉^① 吴福元^① 张艳斌^① 张旗^① S. A. Wilde^②(①中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; ②Department of Applied Geology, Curtin University of Technology, P.O. Box U1987, Perth, Western Australia 6845, Australia. E-mail: jinhui@mail.igcas.ac.cn)

摘要 辽东半岛南部的大连地区发育巨厚的新元古代地层, 对侵入于该地层中的辉绿岩进行锆石 SHRIMP 法 U-Pb 定年, 得到辉绿岩浆的结晶时间为晚三叠世(211 ± 2 Ma), 并且在该辉绿岩中发现大量年龄为 0.9~1.1 Ga 的锆石. 其中 1125 ± 38 Ma 的锆石年龄相当于 Grenvillian 碰撞拼合事件. 而大量年龄为 904 ± 15 Ma 锆石的 Th/U 比值较高(1.31~2.25), 且部分锆石具有岩浆韵律环带, 可能与新元古代早期 Rodinia 超大陆聚合过程中的岩浆活动有关.

关键词 Rodinia 超大陆 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 辉绿岩 辽东半岛

中国大陆不同块体岩石圈的壳幔演化及其与周边地体的相互关系涉及到全球多次超大陆的形成和裂解. 关于中元古代晚期格林威尔(Grenvillian)造山带和新元古代早期全球Rodinia超大陆重建的研究是近年来对于大陆增生和板块构造重建等的重要突破^[1,2]. 近年来的研究表明, 在华夏和扬子陆块都有全球Rodinia超大陆形成和裂解事件的地质记录^[3~9], 并根据 1.3~1.0 Ga 的变质作用、扬子陆块边缘的前陆沉积盆地等研究提出扬子陆块和华夏陆块在晋宁期碰撞形成华南陆块^[5], 这一新元古代大陆碰撞带是Rodinia超大陆中部的一条缝合带, 它将澳大利亚、扬子、华夏-劳亚陆块联合在一起^[5], 并得到皖南、赣东北和桂北地区蛇绿岩年龄资料(1.0~0.97 Ga)的支持^[10,11]. 尽管目前对该区新元古代晚期岩浆作用产生的构造背景还存在争议^[12,13], 但无疑, 华南地区元古宙的地质演化与Rodinia超大陆的聚合-裂解密切相关.

与上述华南地区明显不同的是, 华北陆块与Rodinia超大陆聚合-裂解的关系问题, 一直没有明确的答案. 由于华北地区缺乏确切的中元古代晚期-新元古代早期岩浆事件, 大部分古地理重建方案均将华北置于Rodinia超大陆之外^[4,6~8], 但仍有学者坚持, 华北地块参与了Rodinia超大陆的形成与演化^[14~23]. 仔细检查赞成者的证据发现, 目前所鉴定出的Grenvillian期碰撞事件和Rodinia裂解事件相关的地质体主要发育在华北地块周边的造山带地区, 而这些造山带与华北地块本身的关系并不明朗(例如地处阿拉善地块的金川超镁铁质侵入岩^[24]). 此外, 目前报道的中元古代晚期-新元古代早期的同位素年龄多不见原始数据, 并缺乏对测定方法的严格描述, 因而

未能得到学术界的认可. 本文报道华北陆块内部辽东半岛中生代辉绿岩锆石的 SHRIMP 法 U-Pb 年龄测定结果, 发现该样品中存在有 0.9~1.1 Ga 的年龄信息, 该资料为探讨华北与全球 Rodinia 超大陆形成的关系、以及华北与扬子等相邻陆块的形成与演化等重要基础问题提供了重要信息.

1 地质背景与样品描述

辽东半岛位于郯庐断裂的东部, 中朝陆块的东部(图 1(a)). 该区不仅是我国最古老的大于 38 亿年岩石的产出地区^[25~26], 而且记录着我国华北地台元古宙地质演化的丰富信息. 从岩石建造出发, 可划分为北部鞍山-抚顺太古宙杂岩(辽北-吉南地块)、南部金州地区太古宙杂岩(辽南地块)和位于其间的辽河群与辽吉花岗岩(古元古代造山带)^[27]. 辽南的太古宙花岗片麻岩主要分布在亮甲店一带, 为金州变质核杂岩的主要组成部分^[28], 其主要岩石为强变形的英云闪长岩和花岗闪长岩, 形成年龄为 2440~2500 Ma 之间^[27]. 在上述太古宙杂岩分布区南部的大连-旅顺地区, 发育有著名的辽南晚前寒武纪地层^[29], 该地层自下而上划分为多个不同的群组, 厚度可达 10 余公里(图 1(b)).

在上述晚前寒武纪地层分布区, 发育有大量的辉绿岩脉(图 1(b)). 该岩脉与周围地层一起, 均卷入了后期的构造变形^[30]. 从露头尺度上看, 这些辉绿岩脉宽几十米至 300 多米, 长上百米至几公里, 岩石具有典型的辉绿结构, 粒度为中细粒, 岩性为辉绿岩. 本文研究的辉绿岩脉位于金洲的大和尚山附近(图 1(c)), 其侵入的地层为新元古代青白口系桥头组灰岩; 宽几十至 200 多米, 长约几公里, 其岩性特征为中粒结构、辉绿结构, 主要造岩矿物为辉石和斜长石.

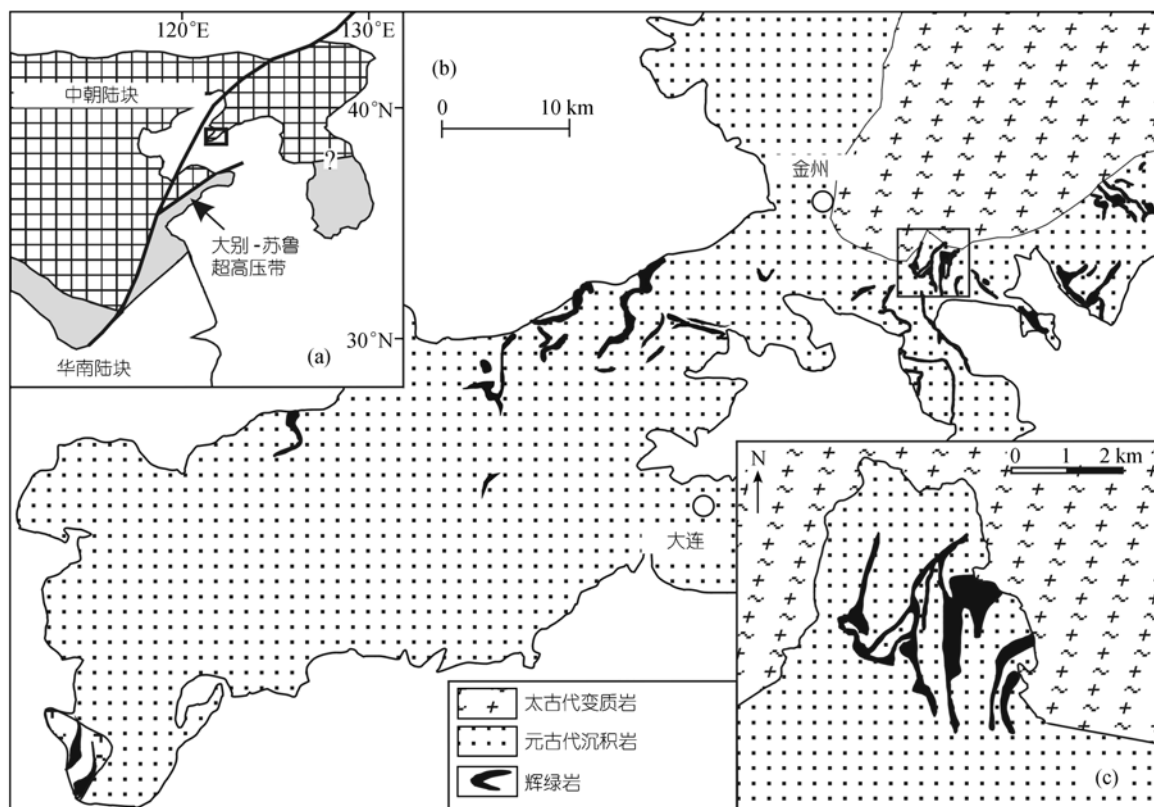


图 1 辽东半岛南部辉绿岩分布地质图
(a) 华北东部构造简图, (b) 大连地区地质图; (c) 研究区地质简图

2 分析方法与结果

锆石原位微区 U-Th-Pb 同位素组成分析在中国地质科学院北京离子探针中心的 SHRIMP II 上完成的. SHRIMP 的样品靶制备与分析方法见文献[31,32]. 阴极发光图像(图 2)在中国科学院地质与地球物理研究所完成.

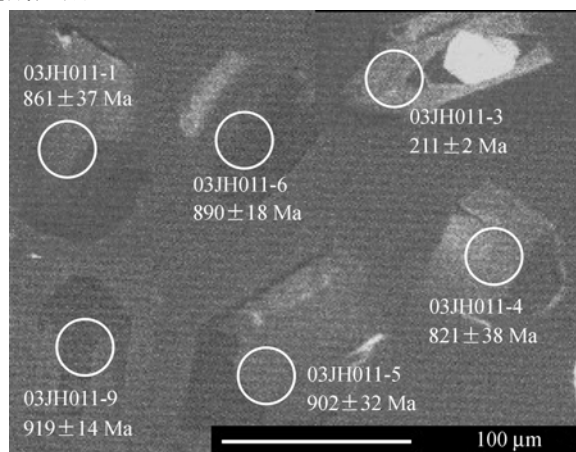


图 2 辽南辉绿岩中代表性锆石的 CL 图像
圆圈及其周围数字表示分析点的位置以及分析点号和测定年

SHRIMP 分析结果见图 3 和表 1. 11 粒锆石的 11 个分析点均位于 U-Pb 谐和线上或其附近. 其中一粒最年轻的锆石给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 211 ± 2 Ma. 该锆石具有短柱状晶形, 边部具有明显的韵律环带, 而核部则无明显的韵律环带(图 2). 另有一粒锆石给出了 1125 ± 38 Ma 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, 且该年龄点在图上位于谐和线上(图 3). 其余 9 粒锆石的 9 个分析点都大致位于谐和线附近, 其 $^{206}\text{Pb}/^{208}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平

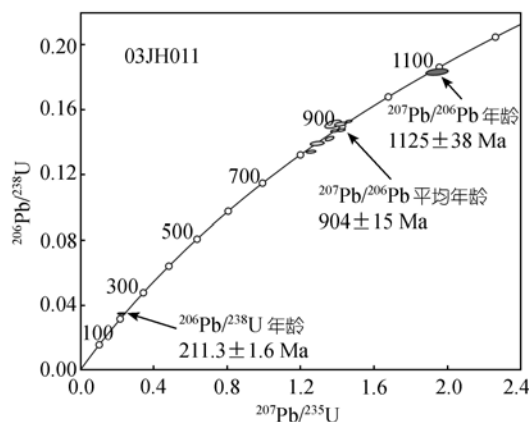


图 3 辽东半岛辉绿岩 SHRIMP 锆石分析结果

表1 03JH011 样品中锆石 SHRIMP 分析结果

样号及点号	U/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Th/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	$^{232}\text{Th}/$ ^{238}U	$^{206}\text{Pb}_c/\%$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	年龄/Ma		
								$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$
03JH011-1	722	988	1.41	0.36	0.0677 $\pm$ 0.0012	1.29 $\pm$ 0.02	0.1382 $\pm$ 0.0008	835 $\pm$ 5	861 $\pm$ 37	809 $\pm$ 8
03JH011-2	778	236	0.31	0.97	0.0493 $\pm$ 0.0029	0.23 $\pm$ 0.01	0.0333 $\pm$ 0.0003	211 $\pm$ 2	161 $\pm$ 138	205 $\pm$ 16
03JH011-3	903	1223	1.40	0.10	0.0696 $\pm$ 0.0007	1.36 $\pm$ 0.02	0.1414 $\pm$ 0.0009	852 $\pm$ 5	917 $\pm$ 20	838 $\pm$ 7
03JH011-4	546	691	1.31	0.46	0.0665 $\pm$ 0.0012	1.38 $\pm$ 0.03	0.1502 $\pm$ 0.0017	902 $\pm$ 9	821 $\pm$ 38	878 $\pm$ 13
03JH011-5	929	1510	1.68	0.32	0.0691 $\pm$ 0.0011	1.43 $\pm$ 0.02	0.1499 $\pm$ 0.0007	900 $\pm$ 4	902 $\pm$ 32	903 $\pm$ 7
03JH011-6	1637	3566	2.25	0.16	0.0687 $\pm$ 0.0006	1.38 $\pm$ 0.01	0.1461 $\pm$ 0.0005	879 $\pm$ 3	890 $\pm$ 18	862 $\pm$ 4
03JH011-7	650	831	1.32	0.17	0.0683 $\pm$ 0.0009	1.41 $\pm$ 0.02	0.1502 $\pm$ 0.0008	902 $\pm$ 4	878 $\pm$ 26	890 $\pm$ 8
03JH011-8	284	48	0.18	0.60	0.0772 $\pm$ 0.0015	1.94 $\pm$ 0.04	0.1825 $\pm$ 0.0013	1081 $\pm$ 7	1125 $\pm$ 38	931 $\pm$ 65
03JH011-9	1604	3274	2.11	0.09	0.0697 $\pm$ 0.0005	1.46 $\pm$ 0.01	0.1520 $\pm$ 0.0005	912 $\pm$ 3	919 $\pm$ 14	905 $\pm$ 4
03JH011-10	1071	1972	1.90	0.16	0.0684 $\pm$ 0.0009	1.26 $\pm$ 0.02	0.1332 $\pm$ 0.0006	806 $\pm$ 3	881 $\pm$ 26	778 $\pm$ 5
03JH011-11	992	1588	1.65	0.14	0.0703 $\pm$ 0.0006	1.42 $\pm$ 0.01	0.1467 $\pm$ 0.0006	883 $\pm$ 3	937 $\pm$ 19	908 $\pm$ 6

均年龄分别为 876 ± 29 和 904 ± 15 Ma. CL 图像显示, 该组锆石多呈柱状, 内部图像简单(图 2), 少数具有岩浆型韵律环带. 就这些前寒武纪年龄锆石的成因来说, 既可以是辉绿岩岩浆侵位过程中从围岩中捕获的, 也可以是从辉绿岩原岩的地壳组分中继承过来的.

3 讨论

3.1 辉绿岩中不同年龄锆石的涵义

锆石 SHRIMP 分析结果表明, 年龄为 211 ± 2 Ma 的锆石分析点位于谐和线上, 并且该锆石在 CL 图像明显显示岩浆成因特征, 即具有较明显的岩浆型韵律环带. 该年龄与用锆石 TIMS 法 U-Pb 法测定的该区另一地点辉绿岩的时代 (213.0 ± 1.5 Ma) [30] 在误差范围内相同. 因此, 该年龄 (211 ± 2 Ma) 应该代表了辉绿岩的岩浆侵位时代.

最老一粒锆石的年龄为 1125 ± 38 Ma, 与 Grenvillian 碰撞拼合事件时间相当. 这一年龄也与辽东地区南辽河群里尔峪组二云母片岩中黑云母的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄(杨进辉, 未发表资料)相一致. 由于该锆石位于谐和线上, 反映该区存在过这个时间的热事件. 但由于颗粒较少, 我们目前还难以明确该锆石的具体成因方式. 从该锆石较低的 Th/U 比值(约 0.18)来看, 它有可能是变质成因的, 但不能排除从小比例部分熔融的熔体中结晶的可能性.

其余 9 粒锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 904 ± 15 Ma. 这一年龄与 Rodinia 超大陆聚合过程中的最后一次岩浆活动时间基本相同 [4~6], 明显早于华南新元古代超级地幔柱开始活动时间(约 820 Ma) [6,9]. 从其 Th/U 比值较高(1.31~2.25)并且部分锆石具有岩浆韵律环带特点来看, 这期锆石可能是从较基性的岩浆中结晶形成的, 代表了一次岩浆事件.

3.2 Rodinia 超大陆事件对华北的响应

近年来的研究表明, 华北陆块与华南陆块之间在锆石 U-Pb 年龄上的区别主要在于: 华北陆块基底岩石的 3 个主要年龄是 2.8~2.9, 2.4~2.5 和 1.7~2.0 Ga, 其中 2.4~2.5 Ga 事件最为强烈, 并且缺乏新元古代年龄记录 [33~34]. 扬子陆块虽然存在太古宙~元古代的年龄, 但是以新元古代(0.70~0.82 Ga)岩浆岩的广泛发育为特征 [6,35]. 本文测定出大连地区辉绿岩中的锆石具有 1.1 Ga 和 0.90 Ga 的结晶年龄, 指示华北陆块内部可能存在中元古代末-新元古代初的岩浆-构造事件. 这个结果与前人的认识不一致, 对此目前可提出如下两种解释方案.

其一, 大连地区并不是华北地块的一部分. 针对该区发育巨厚的新元古代地层及其他地质特征, 中国有不少学者论及该区与华北地块内部存在明显的差别 [16,36]. 但考虑该区并不存在扬子地块所具有的其他特点 [37~39], 目前提出该区与胶东、徐淮等一同组成另一块体 [16,36], 地球化学填图也佐证了上述提法 [40]. 但由于目前对上述块体的具体组成范围及与华北地块的拼合关系存有疑问, 这一观点并没有被学术界所认可. 值得注意的是, 辽东辉绿岩的岩浆侵位年龄 211 ± 2 Ma 不仅与吉林通化印支期花岗岩的侵位时代 203~217 Ma [41] 一致, 而且与秦岭-大别-苏鲁造山带碰撞后折返花岗岩的形成时代晚三叠世 [42~44] 基本相同. 因此, 三者之间在岩浆成因上是否与扬子陆块与华北陆块之间碰撞后折返过程中的部分熔融 [45,46] 有关值得进一步研究.

其二, 该区是华北地块的组成部分. 辽南地区广泛发育太古代 TTG 岩系, 其锆石 U-Pb 年龄为 2.5 Ga 左右, 与华北陆块其他地区太古代 TTG 岩系岩性特征

及时代基本相同^[27]。同时, 辽北与辽南拼合的时代为 1.85 Ga 左右^[27], 与华北陆块克拉通化的时代基本相同^[33]。尽管 2.5 Ga 和 1.85 Ga 这两个年龄的岩浆活动在华南的锆石 U-Pb 定年记录中同样存在^[35], 但是如果审视一下华北陆块的各地区, 虽然东部的辽南群、金县群与西部的长城群、蓟县群从未在同一地区上、下叠置发育过, 但是青白口系的长龙山组、景儿峪组与辽南细河群的钓鱼台组、南芬组间层位对应、岩性相同, 是辽东地区与华北陆块连接与对比的纽带^[47,48]。因此, 总体上辽东地区有可能属于华北陆块的一部分, 至少在青白口纪的某些时间段具有类似的沉积环境。

就辉绿岩所含捕获锆石来源来说, 可以是华北陆块本身岩石, 或者是三叠纪俯冲推覆到华北地块之下的扬子陆块基底物质, 或者是新元古代期间剥蚀沉积到华北地块之上的与华北陆块相邻连接的另一大陆的岩石。如果捕获锆石来源于新元古代期间与华北地块相邻的另一大陆或者来源于三叠纪期间俯冲推覆或碰撞后剥蚀到华北之上的扬子地块基底物质的话, 则本文的研究可能对探讨新元古代期间华北地块及相邻地块之间的古地理位置、三叠纪期间扬子与华北之间的碰撞过程以及扬子地块向 N 或 NW 方向俯冲延伸距离等研究均有重要的意义。但如果来源于华北地块本身物质的话, 本文资料则可能表明华北陆块受到了 Rodinia 超大陆形成事件的影响。

根据古地磁数据, 目前大部分学者认为华北和华南陆块在新元古代期间位于 Rodinia 超大陆的不同位置^[38,49,50], 其中华北与 Rodinia 超大陆相距较远。Rodinia 超大陆的裂解是由于位于华南陆块的超级地幔柱作用所致^[6,7,9], 华北陆块与华南陆块之间相隔西伯利亚陆块, 该地幔柱对华北陆块的影响微乎其微。然而, 如果华北陆块存在一期与 Rodinia 超大陆聚合相当的岩浆事件, 那么它与华南陆块在 Rodinia 超大陆形成期间有可能并不是相距如此遥远。同时引起的另一个问题是, 新元古代岩浆作用是否是扬子地块区别于华北地块的重要标志, 或者华北以缺乏新元古代中期岩浆活动为特征^[35]。如果这一立论成立, 产有金川超镁铁质侵入岩(827±8 Ma)^[24]的阿拉善地块则有可能不属于华北陆块。显然, 对这些问题的研究还需要更多资料的制约。

4 结论

(i) 锆石的 SHRIMP 法 U-Pb 定年结果显示, 辽

东半岛南部大连地区的辉绿岩形成于晚三叠世(211 ± 2 Ma)。其岩浆成因是否与扬子陆块与华北陆块之间碰撞后的板块折返过程有关有待进一步研究。

(ii) 辉绿岩中存在大量年龄为 0.9~1.1 Ga 的老锆石, 其中 904 ± 15 Ma 的锆石 Th/U 比值较高(1.31~2.25), 且部分锆石具有岩浆韵律环带, 可能为岩浆成因。这些年龄与全球 Rodinia 超大陆的形成过程晚期的岩浆活动时间一致。该期岩浆事件的发现对研究新元古代期间华北及相邻大陆的古地理位置以及华北是否受到 Rodinia 超大陆形成事件的影响均有重要意义。

致谢 野外考察期间得到大连金州龙王庙地质队吕晶、关培彦的大力支持和帮助。在 SHRIMP 测试过程中得到北京离子探针中心简平、刘敦一、张玉海等的大力帮助。在成文和修改过程中得到郑永飞、李献华、高山等教授的指导, 在此表示感谢。本工作受国家自然科学基金(批准号: 40325006, 40132020)和中国科学院“百人计划”资助。

参 考 文 献

- Hoffman P F. Did the breakout of Laurentia and turn Gondwanaland inside-out? *Science*, 1991, 252: 1409~1412
- Piper J D A. The Neoproterozoic supercontinent: Rodinia or Palaeopangaea? *Earth Planet Sci Lett*, 2000, 176: 131~146[DOI]
- Li Z X, Zhang L, Powell C M. South China in Rodinia: Part of the missing link between Australia-East Antarctic and Laurentia? *Geology*, 1995, 23: 407~410[DOI]
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. The breakup of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China? *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 173: 171~181[DOI]
- Li Z X, Li X H, Zhou H, et al. Grenvillian continental collision in South China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia. *Geology*, 2002, 30: 163~166[DOI]
- 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. *Precam Res*, 2003, 122: 85~109[DOI]
- Li Z X, Evans D A D, Zhang S. A 90° spin on Rodinia: possible causal links between the Neoproterozoic supercontinent, superplume, true polar wander and low-latitude glaciation. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 220: 409~421[DOI]
- Li X H. U-Pb zircon age of granites from the southern margin of Yangtze Block and the timing of Neoproterozoic Jinning Orogeny in SE China: Termination of Rodinia assembly? *Precam Res*, 1999, 97: 43~57[DOI]
- Li X H, Li Z X, Zhou H, et al. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China: Implications for the initial rifting of Rodinia. *Precam Res*, 2002, 113: 135~154[DOI]
- Li X H. Geochemistry of Longsheng Ophiolite from the southern margin of Yangtze Craton, SE China. *Geochem J*, 1997, 31: 323~337

- 11 Li X H, Zhao J X, McCulloch M T, et al. Geochemical and Sm-Nd isotopic study of Neoproterozoic ophiolites from southeastern China: Petrogenesis and tectonic implications. *Precam Res*, 1997, 81: 129~144[DOI]
- 12 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. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 196: 51~67[DOI]
- 13 Zhou M F, Kennedy A K, Sun M, et al. Neoproterozoic Arc-Related Mafic Intrusions along the Northern Margin of South China: Implications for the Accretion of Rodinia. *J Geol*, 2002, 110: 611~618[DOI]
- 14 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦陆造山带及其大陆动力学. 北京: 科学出版社, 2001. 655~682
- 15 张臣. 内蒙古苏左旗南部温都尔庙研究的新进展. *地质前缘*, 1999, 6: 112
- 16 唐克东. 中朝板块北缘褶皱带构造演化和成矿规律. 北京: 北京大学出版社, 1992. 60~65
- 17 Piper J D R, Zhang Q R. Palaeomagnetism of Neoproterozoic glacial rocks of the Huabei Shield: The North China Block in Gondwana. *Tectonophy*, 1997, 283: 145~171[DOI]
- 18 刘正宏, 刘雅琴, 冯本智. 华北板块北缘中元古代造山带的确立及其构造演化. *长春科技大学学报*, 2000, 30: 110~114
- 19 彭澎, 刘文军, 翟明国. 华北陆块对 Rodinia 超大陆的响应及其特征. *岩石矿物学杂志*, 2002, 421: 343~355
- 20 陈跃军, 彭玉鲸, 路孝平, 等. 华北板块北缘活动带元古宙构造岩片. *长春科技大学学报*, 2002, 32: 134~139
- 21 裴士俊, 赵光慧, 陈树良, 等. 辽北华北陆块北缘晚前寒武纪造山带标志. *辽宁地质*, 1998, (1): 45~48
- 22 裴士俊, 赵光慧, 陈树良, 等. 初论辽北晚前寒武纪高压变质带. *辽宁地质*, 1998, (2): 97~103
- 23 郭进京, 张国伟, 陆松年, 等. 中国新元古代大陆拼合与 Rodinia 超大陆. *高校地质学报*, 1999, 5: 148~156
- 24 李献华, 苏犁, 宋彪, 等. 金川超镁铁质侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义. *科学通报*, 2004, 49(4): 401~402
- 25 Liu D Y, Nutman A P, Compston W, et al. Remnants of >3800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean Craton. *Geology*, 1992, 20: 339~342[DOI]
- 26 Song B, Nutman A P, Liu D Y, et al. 3800-2500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China. *Precam Res*, 1996, 78: 79~94[DOI]
- 27 路孝平, 吴福元, 林景仟, 等. 辽东半岛南部早前寒武纪花岗岩质岩浆作用的年代学格架. *地质科学*, 2004, 39: 123~138
- 28 杨中柱, 孟庆成, 江江, 等. 辽南变质核杂岩构造. *辽宁地质*, 1996, 13: 241~250
- 29 辽宁省地质矿产局. 辽宁省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1989. 1~856
- 30 王宗秀, 唐哲民, 杨中柱, 等. 大连地区的中生代韧性构造变形. *地震地质*, 2000, 22: 379~386
- 31 Williams I S. U-Th-Pb geochronology by ion probe. In: McKeibben M A, Shanks III W C, Ridley W I, eds. *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*. *Reviews in Economic Geology*, 1998, 7: 1~35
- 32 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质论评*, 2002, 48(增刊): 26~30
- 33 Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precam Res*, 2000, 103: 55~88[DOI]
- 34 Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. SHRIMP U-Pb zircon ages of the Fuping complex: Implications for late Archean to Paleoproterozoic accretion and assembly of the North China Craton. *American J Sci*, 2002, 302: 191~226
- 35 郑永飞. 新元古代岩浆活动与全球变化. *科学通报*, 2003, 48: 1705~1720[摘要] [PDF]
- 36 唐克东, 王莹, 何国琦, 等. 中国东北及邻区大陆边缘构造. *地质学报*, 1995, 69: 16~23
- 37 白瑾, 黄学光, 戴凤岩, 等. 中国前寒武纪地壳演化. 北京: 地质出版社, 1993. 150~163
- 38 Zhang Q R, Piper J D R. Paleomagnetic study of Neoproterozoic glacial rocks of the Yangtze block, Palaeolatitudes and configuration of South China in late Proterozoic supercontinent. *Precambr Res*, 1997, 85: 173~199[DOI]
- 39 刘鸿允, 郝杰, 李日俊. 华北东部晚元古代地层和演化. 北京: 科学出版社, 1999. 170~194
- 40 朱炳泉. 地球化学省与地球化学急变带. 北京: 科学出版社, 2001. 1~118
- 41 路孝平, 吴福元, 赵成弼, 等. 通化地区印支期花岗岩锆石 U-Pb 年龄及其与大别-苏鲁超高压带碰撞造山作用之间的关系. *科学通报*, 2003, 48(8): 843~849[摘要] [PDF]
- 42 张宏飞, 钟增球, 高山, 等. 大别山西部面理化含榴花岗岩锆石 U-Pb 年龄. *科学通报*, 2001, 46: 843~846[摘要] [PDF]
- 43 Sun W D, Li S G, Chen Y D, et al. Timing of synorogenic granitoids in the South Qinling, Central China: Constraints on the evolution of the Qinling-Dabie orogenic belt. *J Geol*, 2002, 110: 457~468[DOI]
- 44 Chen J F, Xie Z, Li H M, et al. U-Pb zircon ages for a collision-related K-rich complex at Shidao in the Sulu ultrahigh pressure terrane, China. *Geochem J*, 2003, 37: 35~46
- 45 Zheng Y F, Fu B, Gong B, et al. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime. *Earth Sci Rev*, 2003, 62: 105~161[DOI]
- 46 郑永飞. 深俯冲大陆板块折返过程中的流体活动. *科学通报*, 2004, 49(10): 917~929[摘要] [PDF]
- 47 中国地质科学院天津地质矿产研究所. 中国震旦亚界. 天津: 天津科学技术出版社, 1980
- 48 段吉业, 刘鹏举, 夏德馨. 浅析华北板块中元古代-古生代构造格局及其演化. *现代地质*, 2002, 16: 331~338
- 49 Li Z X, Zhang L, Powell C M. Positions of the East Asian cratons in the Neoproterozoic supercontinent Rodinia. *Aust J Earth Sci*, 1996, 43: 593~604
- 50 张世红, 李正祥, 吴怀春, 等. 华北地台新元古代古地磁研究新成果及其古地理意义. *中国科学, D 辑*, 2000, 30(增刊): 138~147

(2004-05-24 收稿, 2004-07-27 收修改稿)