

华北地块北缘上石炭统—中三叠统碎屑锆石研究及其地质意义

马收先^{1,2}, 孟庆任¹, 曲永强³

MA Shou-xian^{1,2}, MENG Qing-ren¹, QU Yong-qiang³

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

2. 中国科学院研究生院地球科学学院, 北京 100039;

3. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 甘肃 兰州 730020

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Northwest Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Lanzhou 730020, Gansu, China

摘要: 利用碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素对平泉地区晚石炭世—中三叠世地层进行物源分析, 重塑内蒙古隆起的隆升历史, 进而探讨古亚洲洋的闭合过程。5 个样品的 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 年龄由 5 个年龄峰组成: 峰 1 中晚二叠世(270~250Ma)、峰 2 晚石炭世—早二叠世(325~290Ma)、峰 3 泥盆纪(400~360Ma)、峰 4 古元古代(1900~1700Ma)和峰 5 新太古代—古元古代早期(2600~2400Ma)。其中, 本溪组碎屑锆石主要由峰 3、峰 4 和峰 5 组成, 山西组、孙家沟组和刘家沟组则主要由峰 2 和峰 4 组成, 下石盒子组由峰 1、峰 4 和峰 5 组成。5 个样品具有相同的 Hf 同位素特征, 显生宙锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(T)$ 在 -3.2~-25.5 之间, 与内蒙古隆起的晚古生代侵入岩体完全相同。碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征显示物源主要来自内蒙古隆起, 不同层位的物源变化表明内蒙古隆起曾存在 2 次重要的隆升事件: 第一期发生在 360~312Ma 之间, 第二期发生在 276~258Ma 期间。第一次隆升奠定了盆—山的基本构造格局, 第二次隆升之后古隆起进入稳定剥蚀期, 为盆地提供持续稳定的物源, 盆地内部发育了一套粗碎屑沉积物, 可以推断在 276Ma 左右古亚洲洋已经关闭。

关键词: 古亚洲洋; 华北地块北缘; 晚石炭世—中三叠世; LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 年龄

中图分类号: P597+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2011)10-1485-16

Ma S X, Meng Q R, Qu Y Q. A study of detrital zircons of Late Carboniferous–Middle Triassic strata in the northern margin of North China block and its geological implication. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(10):1485–1500

Abstract: In order to interpret the uplift history of Inner Mongolia Paleo-uplift and understand the tectonic evolution of Paleo-Asian Ocean, the authors conducted U-Pb dating and Hf isotope analysis of detrital zircons from distinct levels of Late Carboniferous–Middle Triassic strata in Pingquan. U-Pb ages of detrital zircons from five samples fall into five groups, i.e., Group 1 of Middle–Late Permian (270~250Ma), Group 2 of Late Carboniferous–Early Permian (325~290Ma), Group 3 of Devonian (400~360Ma), Group 4 of Paleoproterozoic (1900~1700Ma) and Group 5 of Neoproterozoic–Paleoproterozoic (2600~2400Ma). Among these five samples, age spectra of Benxi Formation are composed of Group 3, Group 4 and Group 5, age spectra of Shanxi Formation, Sunjiagou Formation and Liujiagou Formation mainly consist of Group 2 and Group 4, and age spectra of Lower Shihezi Formation are composed of Group 1, Group 4 and Group 5. In addition, zircons from the five samples have the same Hf isotope characteristics. $\varepsilon_{\text{Hf}}(T)$ values of Phanero-

收稿日期: 2011-07-20; 修订日期: 2011-08-30

资助项目: 国家自然科学基金面上项目《燕山构造带中部晚侏罗世火山沉积演化及构造意义》(批准号: 40972151)和中国科学院知识创新工程重要方向项目《外贝加尔—华北断面(南段): 地质构造格局及成矿背景》(编号: KZCX2-YW-Q04-04)

作者简介: 马收先(1982-), 男, 在读博士, 从事沉积大地构造研究。E-mail: msxpony2001@163.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

zoic zircons range from -3.2 to -25.5 , consistent with the values of Late Paleozoic plutons in Inner Mongolia Paleo-uplift. The zircon age constituents and Hf isotopes suggest a provenance from Inner Mongolia Paleo-uplift, and the zircon age variation through different levels implies two critical uplifting events, which occurred during 360~312Ma and 276~258Ma respectively. 360~312Ma uplift built up the tectonic framework of the North China basin and provided sediments for the basin. After 276~258Ma uplift event, Inner Mongolia Paleo-uplift was steadily denuded and thus supplied a great amount of coarse-grained sediments to the sedimentary basin which had unchanged U-Pb age spectra of detrital zircons, suggesting that the Paleo-Asian Ocean might have been closed before 276Ma.

Key words: Paleo-Asian Ocean; northern margin of North China block; Late Carboniferous–Middle Triassic; LA-ICP-MS detrital zircons dating

兴蒙造山带位于中亚造山带的东段, 自古生代以来经历了长期而复杂的多块体拼贴。许多学者从古生物^[1-7]、沉积盆地^[3,8-11]、变质作用^[12-15]、岩浆岩^[16-22]、构造演化^[23-28]等方面进行了广泛研究, 得出了不同的结论, 其中古亚洲洋在兴蒙地区最终闭合的地点和时间等基本问题尚存在很大争议。对于最终闭合的时间主要有 2 种观点, 一种认为泥盆纪—石炭纪期间关闭^[6,19,27,29-34], 另一种认为二叠纪期间关闭^[21,23-24,35-44]。基于不同的闭合时间之上的是不同构造模型之间的碰撞。华北地块位于索伦缝合线的南侧(图 1 右下角图), 其晚古生代期间的构造演化必然受古亚洲洋闭合过程的影响, 保存了闭合过程中的重要地质信息。华北地块北缘以内蒙古隆起与兴蒙造山带相接(图 1), 广泛出露前寒武纪的变质基底, 长期被认为是从元古宙以来一直存在的古陆^[45]。最新的研究表明, 内蒙古隆起可能是古生代以来隆升的, 属于古亚洲洋闭合过程中的产物^[46-47]。华北地块的古地理研究表明, 寒武纪—奥陶纪期间内蒙古隆起区是整个华北陆表海的一部分, 存在同期的沉积盖层^[48]。同时, 石炭纪—二叠纪期间盆地演化也说明内蒙古隆起是在中亚造山带的构造作用过程中形成的, 其主要的隆升时间可能在早二叠世末—早三叠世初^[47]。更重要的是, 内蒙古隆起许多过去被认为是前寒武纪的基底变质岩, 经同位素定年确认是晚古生代—早中生代的侵入岩体, 这些岩体的地球化学特征显示内蒙古隆起可能是一个安第斯型的陆缘弧^[16,49]。对于陆缘弧的存在时间也有不同的观点, 一种认为是 $(324 \pm 6) \sim (274 \pm 6)$ Ma 期间^[16,49], 另一种认为是 294~273Ma 期间^[50]。然而, 内蒙古隆起区至今没有发现晚古生代火山岩。也有学者认为二叠纪古亚洲洋已经闭合, 碰撞后的伸展环境导致软流圈物质的上涌, 在内蒙古隆起产生早二叠世的岩浆活动^[51-52]。内蒙古隆起的性质和隆升历史尚不

确定, 目前对于内蒙古隆起的认识主要基于该区岩浆岩体的地球化学特征^[16,49-52]。部分学者曾对华北晚古生代盆地进行物源分析, 探讨内蒙古隆起的构造演化^[47,53-55], 但由于研究目的、采样地点与层位的差别, 他们并没有很好地将盆地的物源变化与内蒙古隆起、古亚洲洋的闭合相联系。本文选择紧靠内蒙古隆起的平泉地区作为研究区, 对上石炭统—中三叠统不同层位的碎屑锆石年龄谱进行物源解译, 恢复内蒙古隆起的隆升历史, 并探讨内蒙古隆起与古亚洲洋闭合的关系。

1 区域地质概况

华北地块位于秦岭—大别造山带与中亚造山带南北两大造山带之间(图 1 右下角图), 受两大造山带闭合、碰撞和碰撞后板内造山运动的改造, 形成了现今隆起与盆地相间的构造格局^[56-59]。地块北缘可以划分为 4 个次级构造单元: 兴蒙造山带、内蒙古隆起(内蒙地轴)、燕山构造带和华北克拉通^[60], 其中兴蒙造山带与内蒙古隆起以围场—赤峰断裂为界, 内蒙古隆起与燕山构造带以古北口—平泉断裂为界(图 1)。

兴蒙造山带位于中亚造山带的东段, 是古亚洲洋俯冲、消减并最终闭合的产物。古亚洲洋闭合后兴蒙造山带经历了后碰撞与陆内造山作用的叠加, 发生强烈的壳幔相互作用, 内部出露了大量的古生代—中生代火山岩、花岗岩^[61-62]。内蒙古隆起广泛出露前寒武纪变质基底, 仅发育少量的长城纪沉积地层, 并被侏罗纪—白垩纪沉积岩与火山岩所不整合覆盖^[45]。燕山构造带位于内蒙古隆起与华北克拉通的过渡位置, 是中新生代陆内造山的产物, 在中三叠世以前是整个华北稳定克拉通盆地的一部分^[63], 发育了中新元古代碎屑岩与碳酸盐岩、寒武纪—奥陶纪碳酸盐岩和晚石炭世—中三叠世海陆交互相—陆相碎屑岩沉积。这些沉积盖

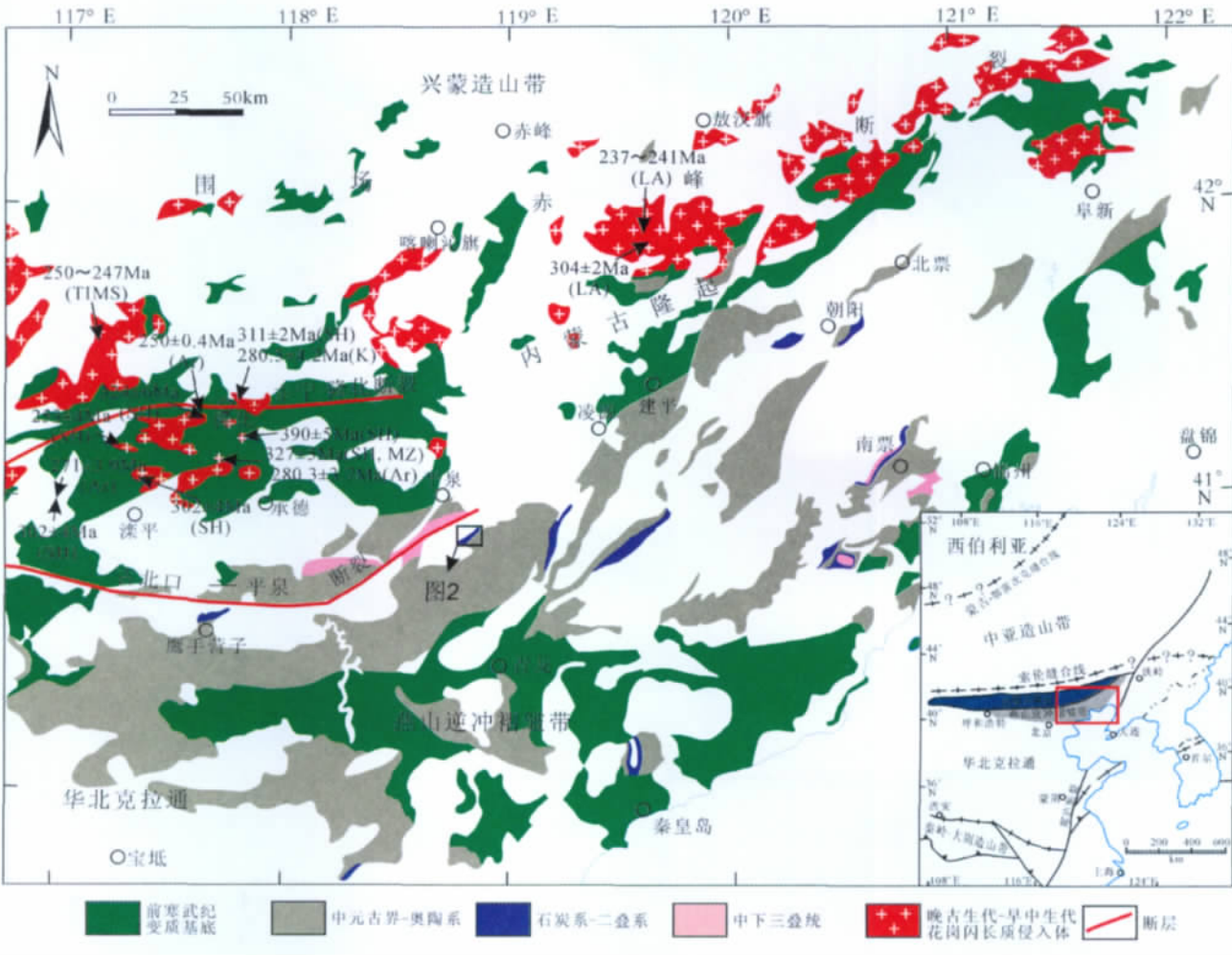


图 1 区域地质图(右下角图根据参考文献[60]修改)

Fig. 1 Regional geological map

侵入岩体年龄来自文献[16-17,49,64-69],年龄之后的缩写字母代表年龄所使用的测试方法(Ar:Ar-Ar 法; K: K-Ar 法;SH:SHRIMP 锆石 U-Pb 法;LA:LA-ICP-MS 法;TIMS:TIMS 法;MZ:变质锆石)

层经历了印支—燕山运动近南北向的逆冲推覆作用,发生了强烈的北东向和近东西向褶皱冲断^[10,57-58]。在局部断陷盆地内部尚保存了一些分散的晚石炭世—中三叠世地层,其中研究区——平泉地区保存得最为连续和完整(图2)。平泉地区紧靠内蒙古隆起,直接接受来自物源区的沉积物,发育了一套有别于华北中南部的地层,在地层底部发育有砾岩,石盒子组见大量火山碎屑岩,刘家沟组—二马营组则是一套砂砾岩粗碎屑沉积物,具有边缘相的特征。

2 采样层位

平泉地区的上石炭统—中三叠统共发育 9 个

组:本溪组、太原组、山西组、下石盒子组、上石盒子组、孙家沟组、刘家沟组、和尚沟组与二马营组(图3),从下到上是一套海陆交互相—陆相由细到粗的充填序列。底部本溪组—太原组为一套泥页岩、中薄层砂岩与砾岩组合,砂岩以石英、燧石为主,属潟湖—潮坪相与河口坝—河流相的交互沉积。山西组是一套河流相的石英砂岩。下石盒子组—上石盒子组发育河流相的火山碎屑岩,从上石盒子组上部开始出现紫红色泥岩(红层),含钙质结核,夹砂岩透镜体,一直到孙家沟组的中部,属于干旱期的洪泛沉积。孙家沟组上部—刘家沟组下部与和尚沟组均为一套中厚层钙质砂砾岩与紫红色泥岩互层组

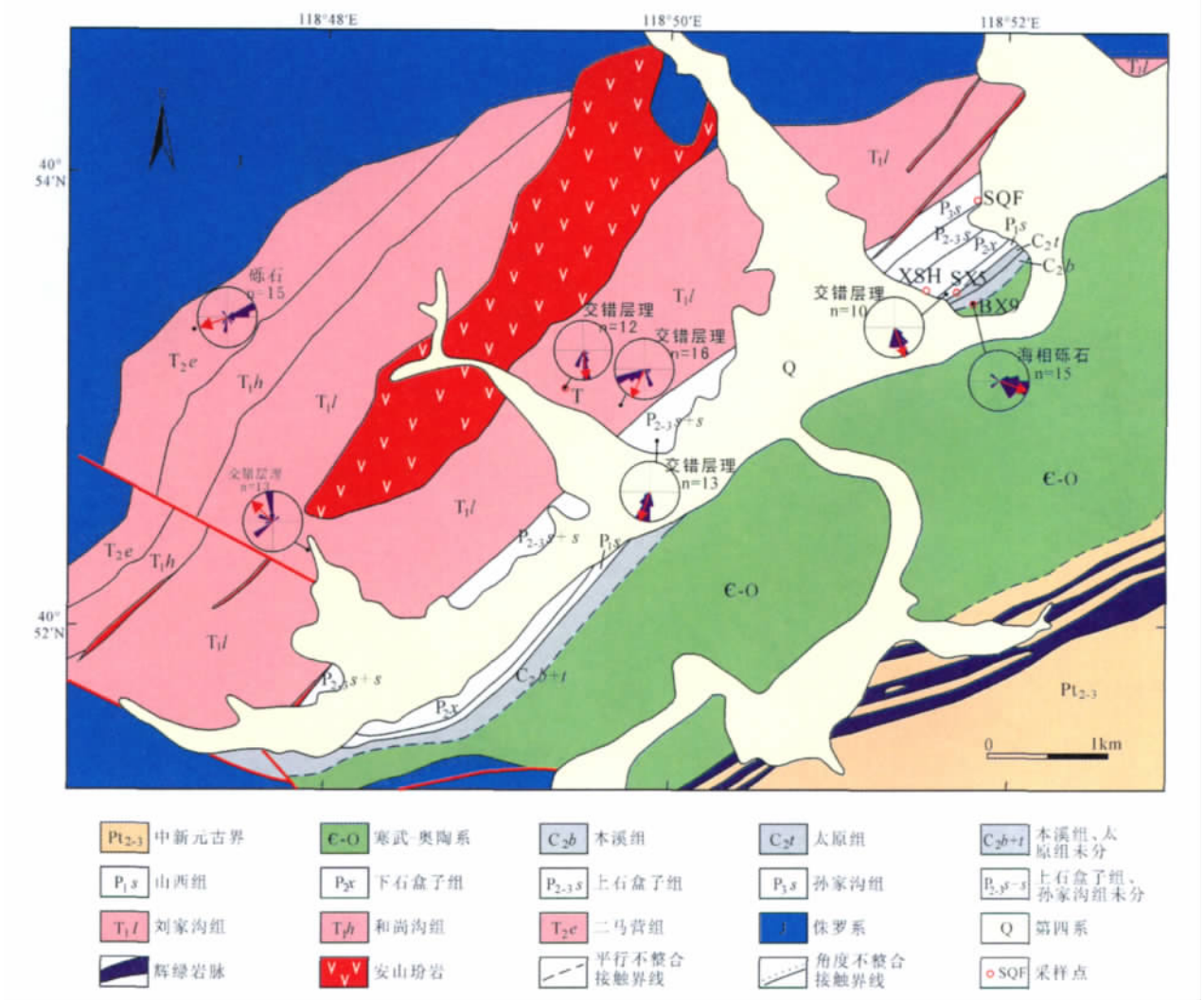


图 2 研究区地层分布和采样位置(古水流数据来自本文,地层根据参考文献①)
Fig. 2 Stratigraphic distribution and sampling spots

表 1 样品岩性描述
Table 1 Petrologic character description of samples

样品编号	样 品 描 述	经纬度
BX9	采自本溪组底部，平行不整合于奥陶系马家沟组之上，为中粒石英砂岩，含同沉积铁质泥砾	40° 53′ 30.8″ N
		118° 51′ 55.5″ E
SX5	采自山西组中部，含砾石英砂岩，粘土质胶结，砾石砾径为 2.5~3cm，为燧石和石英岩	40° 53′ 34.7″ N
		118° 51′ 44.9″ E
XSH	采自下石盒子组中部，中粒长石岩屑砂岩，灰绿色，岩屑主要为火山岩碎屑，磨圆、分选差，含安山岩、燧石和石英岩砾石	40° 53′ 30.9″ N
		118° 51′ 31.7″ E
SQF	采自孙家沟组底部的透镜体砂岩，灰白—灰黄色中粒岩屑长石砂岩，钙质胶结	40° 53′ 53.7″ N
		118° 51′ 52.7″ E
T	采自刘家沟组中部偏下，灰白色含砾中细粒钙质长石砂岩	40° 53′ 3.3″ N
		118° 49′ 22.7″ E

合,属曲流河沉积。刘家沟组中上部发育了一套紫红—灰白色钙质砂岩,低角度交错层理—平行层理发育,形成于辫状河环境。二马营组是一套辫状河砂岩—砾岩组合。考虑到沉积环境、格架矿物组成的连续性,如本溪组与太原组、下石盒子组与上石盒子组的沉积环境与矿物组成基本一致,笔者只对存在明显变化的 5 个组段进行采样,详见表 1、图 2 和图 3。另外据目前的认识,和尚沟组—二马营组沉积期间可能已进入板内构造活动时期^[57,70],本文没有过多涉及。

3 分析方法

将采集的碎屑岩样品粉碎至 60 目以下,先用磁选和重液方法粗选,然后在双目镜下将干净的锆石颗粒逐一挑出。将挑好的锆石颗粒粘在双面胶上,固定于透明的环氧树脂中,和树脂一起打磨抛光,直至露出锆石的内部以适合 LA-ICP-MS 分析。抛光后的锆石分别进行透射光和反射光照相,以观察其抛光面和内部结构的情况。然后镀金拍摄 CL 图像(图 4),用来进一步反映锆石的内部结构特征。样品的分选是在河北廊坊市区调地质研究所实验测试中心完成的,制靶与透、反射光拍照是在中国科学院地质与地球物理研究所离子探针中心完成的,锆石的 CL 图像在中国科学院地质与地球物理研究所扫描电镜实验室使用装有 MiniCL 的 LEO1450VP 扫描电镜拍摄。

锆石 U-Pb 年龄在中国科学院地质与地球物理研究所多接收等离子质谱仪实验室 LA-MC-ICPMS 仪器上测试完成。每个样品随机测试 100 个点。测试过程采用激光束斑直径为 50μm,频率为 80 Hz,锆石 91500(年龄 1064Ma)作为标样来标定仪器,以硅酸盐玻璃 NIST610 为标准计算 U、Th、Pb 的含量。数据在 Glitter(ver.4.0)软件上处理,年龄计算和图谱制作运用 Isoplot 处理,详细的分析技术和参数见参考文献[71]。对于小于 1000Ma 的样品,由于可用于测量的放射性成因 Pb 含量低和普通 Pb 校正的不确定性,年龄数据采用更为可靠的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄,其它样品(大于 1000Ma)由于含有大量放射性成因 Pb,采用 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表面年龄。在锆石 U-Pb 年龄测试的同时进行原位 Hf 同位素测定,选用 Neptune MC-ICPMS 仪器,频率为 8Hz,能量 100mJ。详细的分析技术参照吴福元等^[72]的文献。测试过程中标准锆石(91500)的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 和 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf

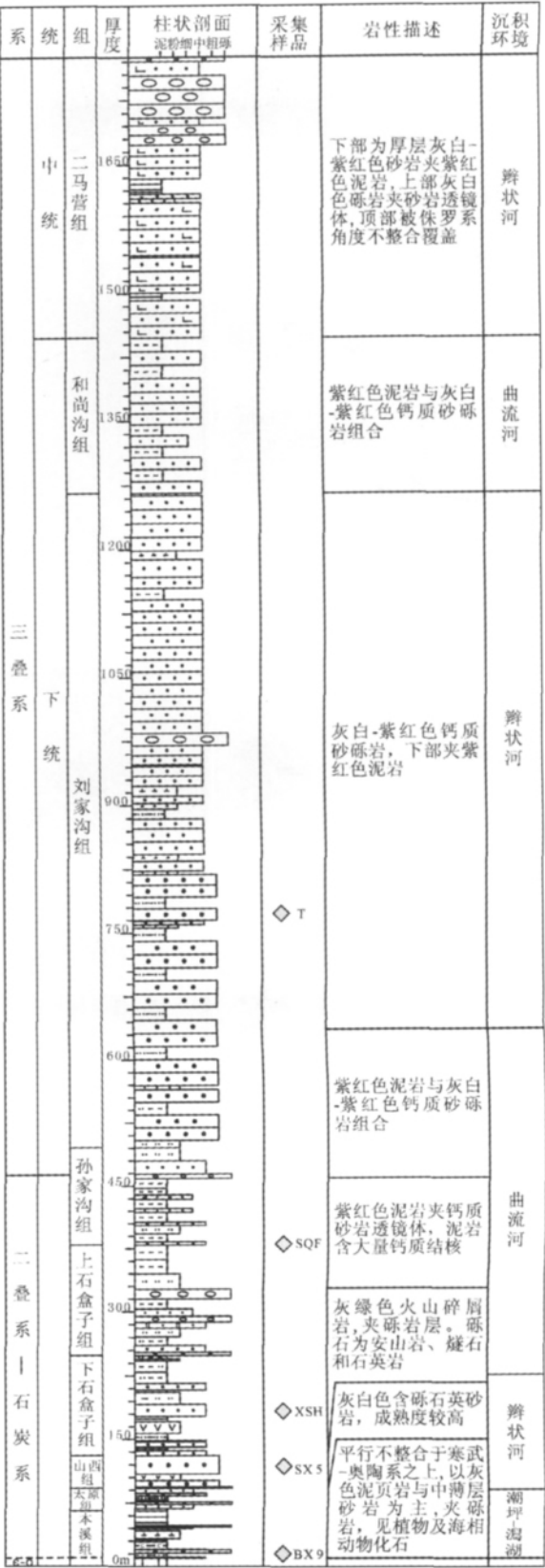


图 3 地层柱状图 Fig. 3 Stratigraphic column

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

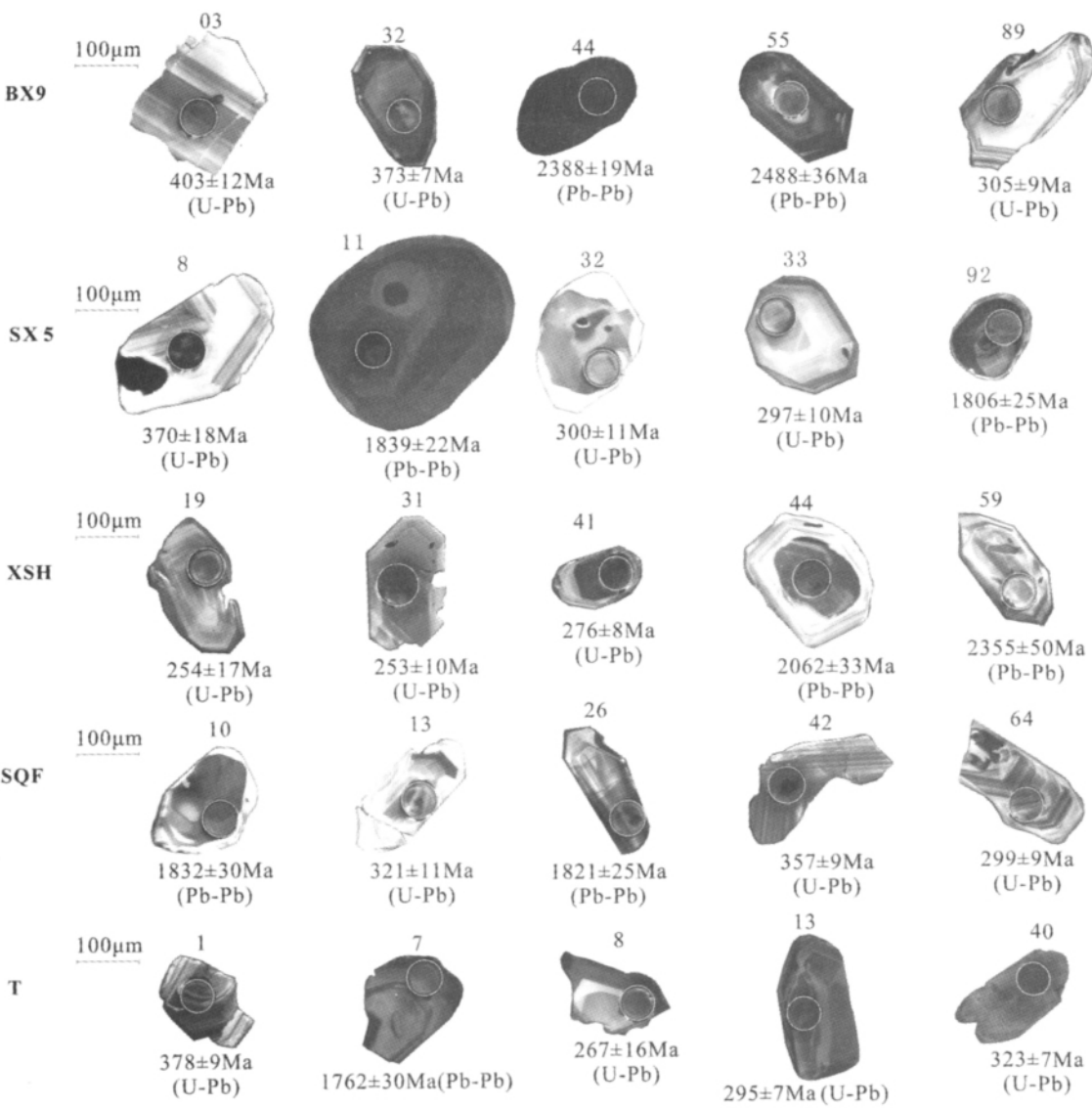


图 4 测试样品的代表性锆石阴极发光图像

Fig. 4 Representative CL images for analyzed detrital zircons
数字为测试点号, Pb-Pb 代表 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, U-Pb 代表 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄

比值为 $0.282289\pm4(2\sigma_n, n=42)$ 和 0.00029 。具体测试数据请见参考文献②。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

(1)BX9(本溪组)

样品 BX9 采自本溪组底部的石英砂岩，紧靠奥陶系马家沟组之上的不整合面。100 粒测试锆石中, 15 粒不谐和锆石不参与年龄谱统计(图 5-a)。与其它样品相比, 该样品具有较多的不谐和颗粒，

可能与长期的化学风化过程中蜕晶锆石的 Pb 丢失有关^[73]。85 粒锆石的谐和年龄可以分成 3 组(图 6-a): 42 粒泥盆纪锆石 (361~404Ma)，占 49%; 36 粒前寒武纪锆石 (1594~2680Ma)，占 42%; 第三组仅有 7 粒, 占 9%, 来自晚石炭世—早二叠世 (288~322Ma)。7 粒最年轻的锆石给出了 $298\text{Ma}\pm9\text{Ma}$ 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄。

(2)SX5(山西组)

样品 SX5 采自山西组中部的厚层石英砂岩。96 粒锆石的谐和年龄可分为 3 组(图 5-b 和图 6-b):

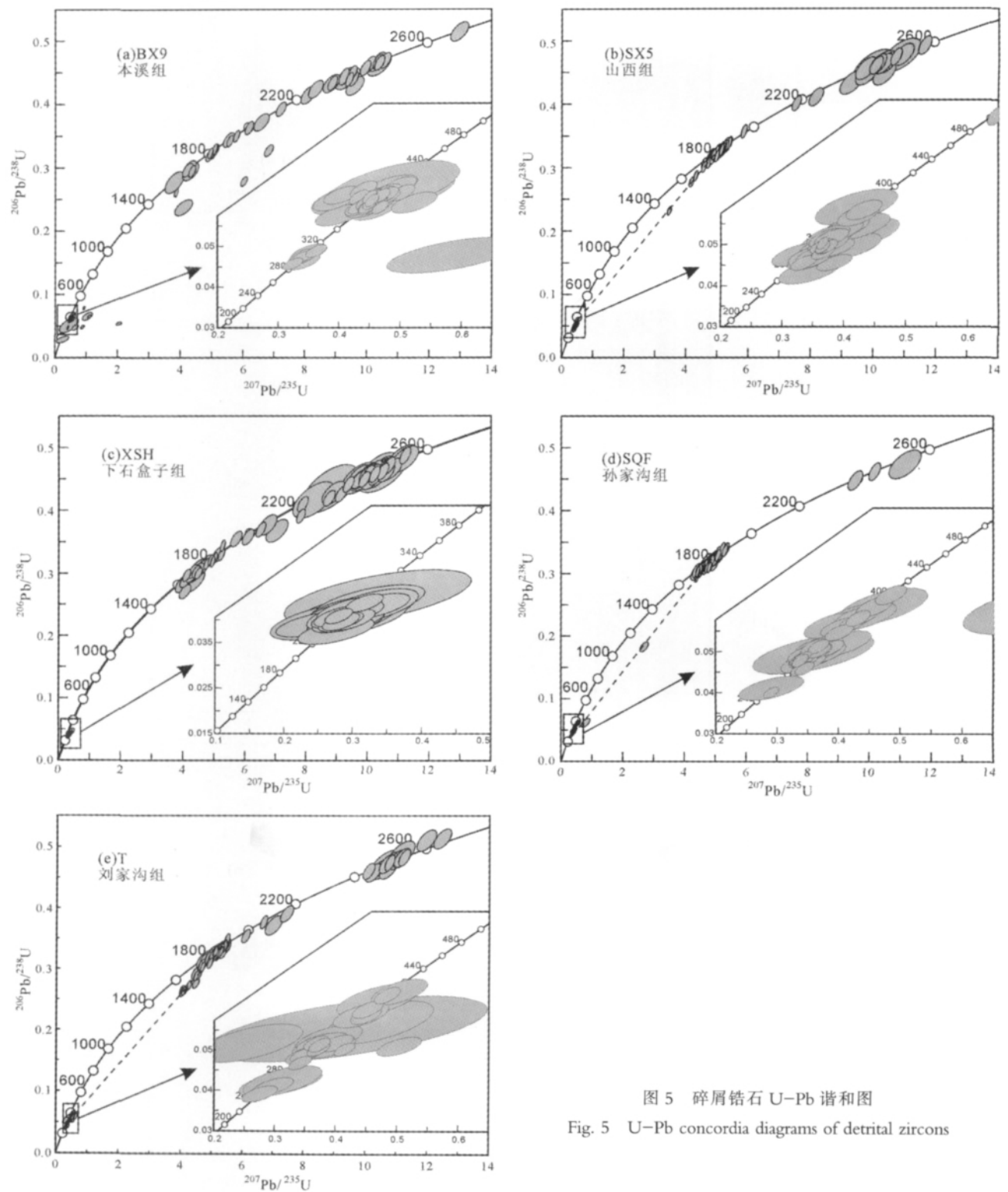


图 5 碎屑锆石 U-Pb 谐和图
Fig. 5 U-Pb concordia diagrams of detrital zircons

65 粒前寒武纪锆石(1750~2573Ma), 占 68%;29 粒晚泥盆世—早二叠世锆石(275~370Ma), 占 30%;有 2 粒异常锆石的年龄为 503Ma±9Ma 和 516Ma±

10Ma。寒武纪期间华北北缘属被动陆缘^[48], 目前为止没有发现这一时期的岩浆岩, 因此推测这 2 粒异常锆石属样品挑选或分离过程中造成的混染。

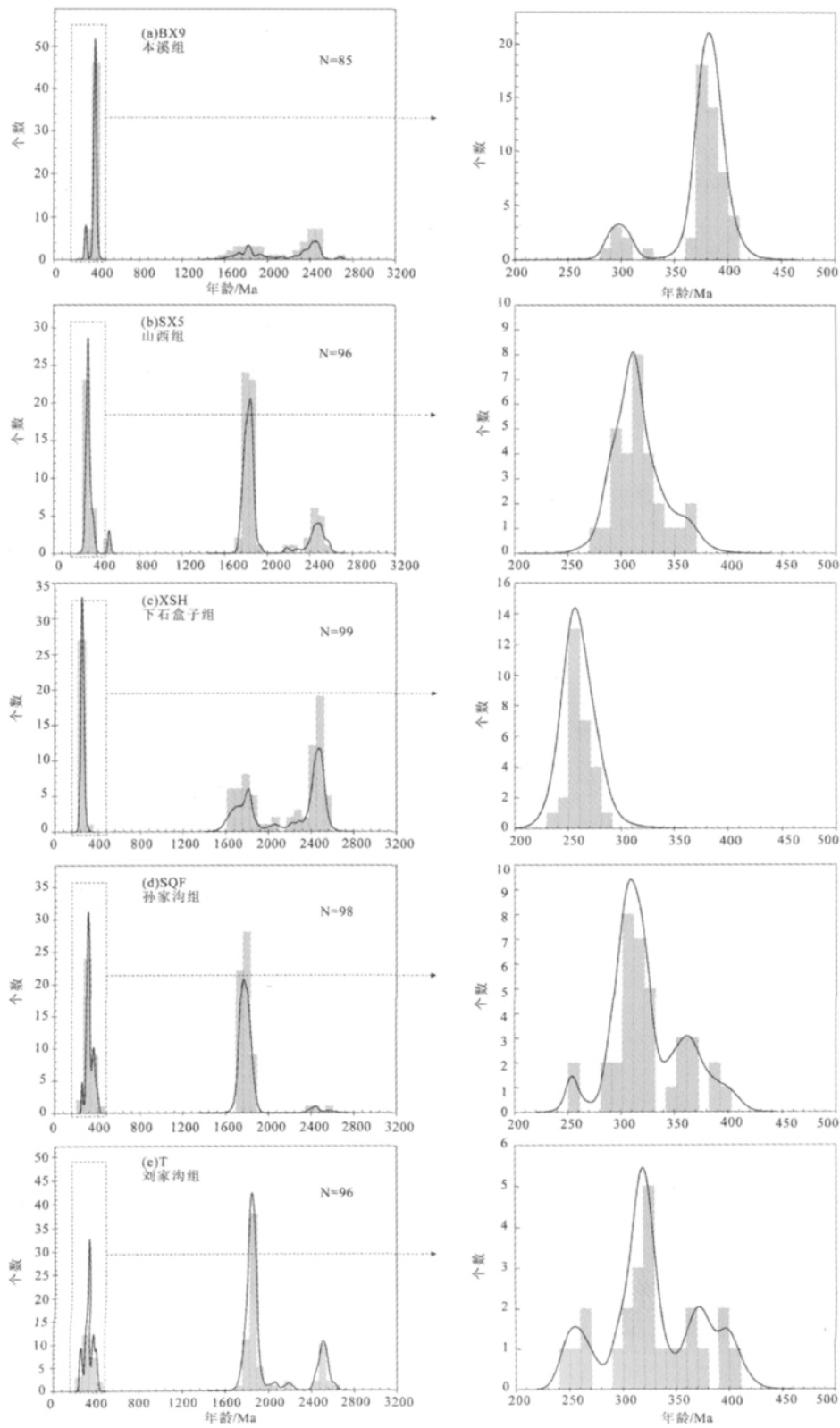


图 6 碎屑锆石年龄谱

Fig. 6 U-Pb age histograms of detrital zircons

右侧为左侧显生宙部分的放大

(3)XSH(下石盒子组)

样品 XSH 采自下石盒子组中部的火山碎屑岩,99 粒锆石和锆石由 2 组组成(图 5-c 和图 6-c):28 粒二叠纪锆石(238~284Ma),占 28%;72 粒前寒武纪锆石(1618~2541Ma),占 72%。其中 28 粒二叠纪锆石给出 $258\text{Ma} \pm 6\text{Ma}$ 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄。

(4)SQF(孙家沟组)

样品 SQF 采自孙家沟组底部的钙质砂岩。98 粒锆石和锆石可以分成 2 个年龄组(图 5-d 和图 6-d):36 粒晚古生代锆石(253~399Ma),占 37%;62 粒前寒武纪锆石,占 63%。其中 36 粒晚古生代锆石可以分成 3 个子峰(图 6-d):泥盆纪、晚石炭世—早二叠世和中晚二叠世,晚石炭世—早二叠世锆石占绝大多数。

(5)T(刘家沟组)

样品 T 采自刘家沟组中下部的钙质砂岩。96 粒锆石和锆石的年龄组成与孙家沟组样品 SQF 一致(图 5-e 和图 6-e),2 个年龄组:24 粒晚古生代锆石(247~405Ma),占 25%;72 粒前寒武纪锆石(1748~2618Ma),占 75%。

基于以上的年龄数据特征,可以总结为以下 3 点:①前寒武纪年龄所占比例较高,在后 4 个样品中高达 63%~75%,第一个样品中占 41%。②把所有的年龄数据放在一起,可见 5 个年龄峰(图 7):峰 1 为中晚二叠世(270~250Ma),峰 2 为晚石炭世—早二叠世(325~290Ma),峰 3 为泥盆纪(400~360Ma),峰

4 为古元古代(1900~1700Ma)和峰 5 为新太古代—古元古代早期(2600~2400Ma)。BX9 以峰 3、峰 4 和峰 5 为主,SX5 以峰 2 和峰 4 为主,XSH 以峰 1、峰 4 和峰 5 为主,SQF、T 均以峰 2 和峰 4 为主。③年龄谱存在 3 次重要的变化(图 6):第一次在 BX9 与 SX5 之间,第二次在 SX5 与 XSH 之间,第三次在 XSH 与 SQF 之间。

4.2 锆石结构与年龄关系

样品中的碎屑锆石通常无色或粉色透明,部分在反射光下显棕色,大小在 100~200 μm 之间。根据晶体形态和 CL 图像可将锆石分为 2 类:一类为自形—半自形,具明显的振荡环带,部分存在重结晶(图 4-SQF13 点)或继承核(图 4-XSH44 点)现象,常含长条形磷灰石矿物包裹体及少量椭圆形的熔体包裹体,Th/U>0.4,表明其来自岩浆岩。这类锆石主要来自峰 1、峰 2 和峰 3,有时可见前寒武纪自形锆石,推测可能来自石英或长石的包裹体,同时无法排除来自前寒武纪变质基底的可能;另一类为圆形—椭圆形,CL 图像呈均匀的暗色或不明显的振荡环带,部分存在变质边,Th/U 多数大于 0.4,峰 4 的 Th/U 约有一半在 0.05~0.4 之间。该类锆石主要来自前寒武纪的老锆石峰 4 和峰 5,部分来自峰 1、峰 2 和峰 3,存在变质边或侵蚀港湾(图 4-XSH19 点),可能与固态重结晶有关^[16]。

4.3 Hf 同位素

5 个样品的碎屑锆石具有相似的 Hf 同位素组

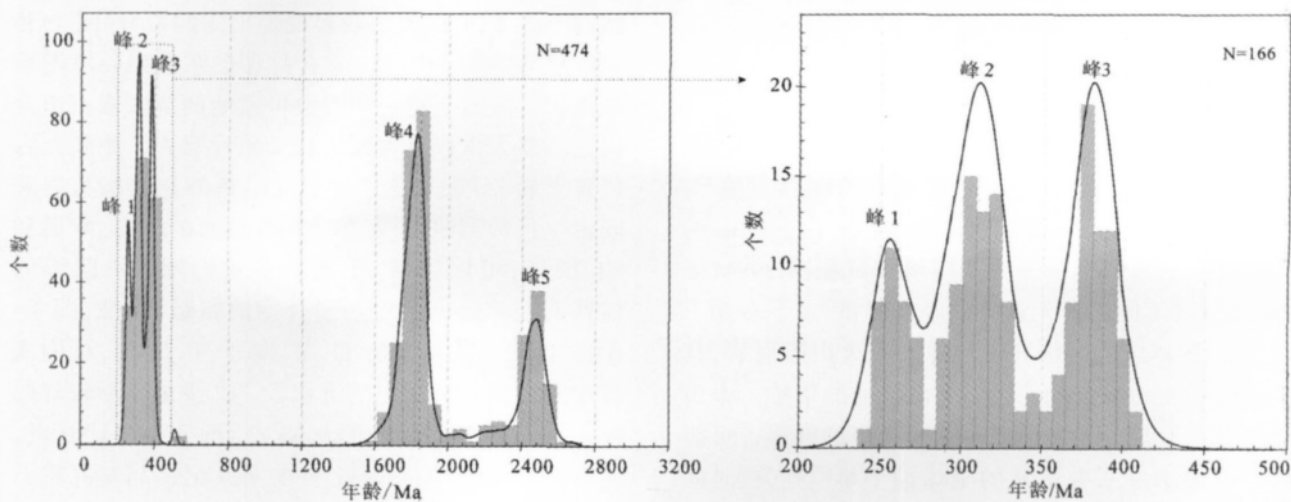


图 7 所有碎屑锆石的年龄谱

Fig. 7 U-Pb age histograms of all detrital zircons from five samples

右图为左图显生宙部分的放大

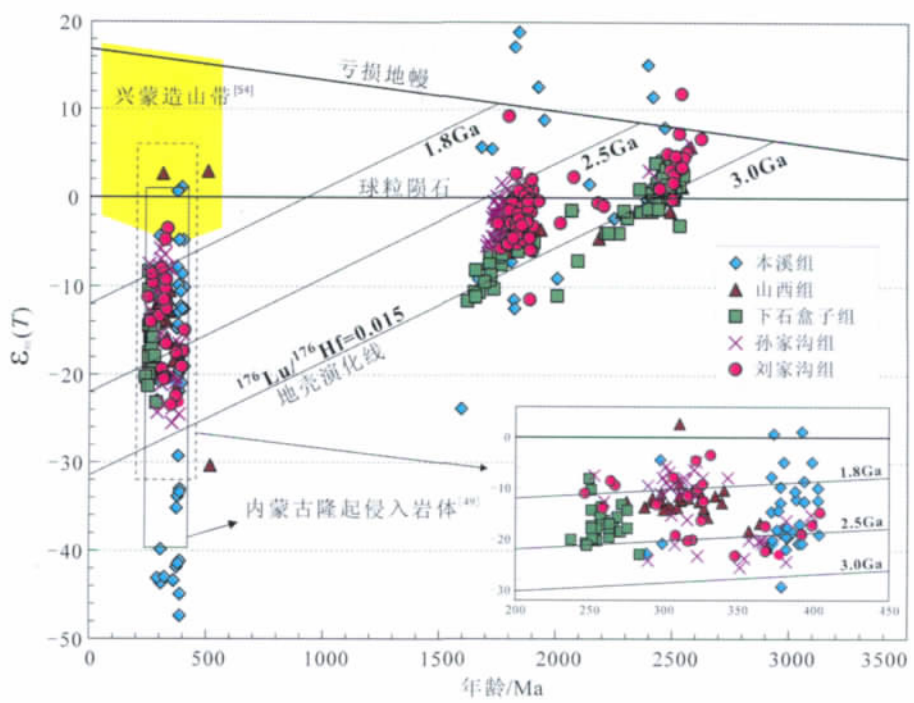


图 8 碎屑锆石 Hf 同位素特征

Fig. 8 Hf isotopic characteristics of detrital zircons

成(图 8)。根据锆石的 U-Pb 年龄与 $\epsilon_{\text{Hf}}(T)$, 锆石总体上可以分为 3 组: 2.55~2.0Ga 锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(T)$ 在 -2.0~+6 之间, 地壳模式年龄为 3.1~2.7Ga; 1.94~1.59Ga 锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(T)$ 在 -12~+4 之间, 地壳模式年龄为 3.0~2.5Ga; 绝大多数显生宙锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(T)$ 在 -3.2~-25.5 之间, 模式年龄在 2.8~1.7Ga 之间, 没有明显的新壳幔物质加入。

5 讨论

5.1 碎屑锆石解译

碎屑锆石年龄谱能够限定地层的底界年龄^[74], 本溪组 7 粒最年轻的碎屑锆石给出了 298Ma 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄, 表明本溪组应沉积于 298Ma±9Ma 之后, 不同于前人认为的晚石炭世^③。下石盒子组 238~284Ma 的最年轻年龄峰来自火山碎屑岩, 其平均值为 258Ma±6Ma, 代表火山活动的年龄。火山碎屑岩之上是上石盒子组—孙家沟组的红层, 可能与二叠纪末—三叠纪初的全球性干旱^[75]有关, 时间大约在 253Ma 左右。因此, 下石盒子组的年龄应在 258~253Ma 之间, 火山活动的时间与火山碎屑岩的沉积年龄近于同一时期, 不同于前人认为的早二叠

世晚期^④。

与兴蒙造山带(图 8 黄色区域)相比, 平泉地区晚古生代地层内的显生宙碎屑锆石年龄和 Hf 同位素组成完全不同, 但与内蒙古隆起的侵入岩体^[16]具有高度的一致性(图 8), 表明盆地的物源主要来自内蒙古隆起, 与古水流数据结果(图 2 古水流玫瑰花图)相符。根据内蒙古隆起现今出露的岩石(图 1)和孟祥化等^[48]关于内蒙古隆起曾存在寒武系—奥陶系的认识, 晚石炭世—中三叠世盆地的源区岩石组合应包括新太古代—古元古代变质片麻岩、中新元古代碎屑岩—碳酸盐岩、寒武纪—奥陶纪碳酸盐岩和晚古生代的岩浆岩(表 2)。结合锆石的形态、年龄和 CL 图像, 可以推断: ①绝大多数椭圆形—圆形的前寒武纪碎屑锆石经历过长期的搬运、磨蚀(图 4-BX9 44 点, 图 4-SX5 11 点, 图 4-T 7 点), 可能来自中元古代—奥陶纪的沉积岩。②少量自形较好的前寒武纪锆石(图 4-BX9 55 点, 图 4-XSH 59 点, 图 4-SQF 26 点), 可能来自前寒武纪结晶基底或石英、长石的包裹体。③少量椭圆形—圆形的前寒武纪锆石存在明显的变质边或溶蚀现象(图 4-SX5 92 点, 图 4-XSH 44 点, 图 4-SQF 10 点), 且年龄不谐

表 2 内蒙古隆起(源区)岩石组合

Table 2 Rock assemblage in Inner Mongolia Paleo-Uplift (source area)

地层单位	岩 石 组 合	锆石(或碎屑锆石)年龄组成	
前寒武纪 结晶基底	表壳岩、英云闪长岩、BIF、基性麻粒岩、 细粒云母片麻岩、富铝片麻岩、斜长角闪岩	>3.0Ga	[76]
		2.9~2.7 Ga	
		2.5Ga	
		2.3~1.9Ga	
		1.8Ga	
古-新元古代 沉积盖层	长城系: 石英砂岩、泥岩、白 云岩、石英岩、中基性火山岩 蓟县系: 含粉砂泥质白云岩、白云岩、燧石 条带白云岩、硅质岩、白云质灰岩、叠层石 白云岩及少量砂岩 青白口系: 页岩、粉砂岩、 砂岩、含泥白云质泥晶灰岩	2.5~2.3Ga	④
		2.1~1.9Ga	
		1.9~1.7Ga	
		Hf>-2.5	
寒武—奥陶纪 沉积盖层	寒武系: 灰岩、白云岩、页岩、粉砂岩 奥陶系: 灰岩、泥质条带灰岩、钙 质页岩、白云岩、燧石条带白云岩	2.97~1.72Ga	[77]
内蒙古隆起晚 古生代岩浆岩	闪长岩、石英闪长岩、花岗闪 长岩、二长闪长岩、二长岩	390~237Ma	[49]

和比例高,可能来自晚古生代岩浆岩,属继承锆石。这得到不一致线(1.8Ga)与一致线下交点年龄(晚古生代)(图 5-b、d、e)数据的支持。④自形且振荡环带发育的显生宙锆石来自内蒙古隆起的晚古生代岩浆岩(图 4-BX9 03 点、32 点、89 点,图 4-SX5 33 点,图 4-XSH 19 点、31 点、41 点,图 4-SQF 42 点、64 点,图 4-T 1 点、8 点、40 点)。⑤少量发育变质边的显生宙锆石(图 4-SX5 8 点,图 4-SQF 13 点,图 4-T 13 点),来自晚古生代的岩浆岩,可能与岩浆形成过程中的动态重结晶有关。这 5 类锆石中,来自沉积岩的前寒武纪锆石含量最高。碎屑锆石中不同年龄组的相对含量并不等于源岩的相对贡献量,沉积岩中的锆石含量可能要高于火山岩,且沉积过程中的分选与矿物分离过程中造成的颗粒破碎都会导致结果偏离源岩贡献的比例^[74]。然而,高含量的椭圆形—圆形前寒武纪锆石依然说明源区存在大量的沉积岩,这也得到地层中高含量的燧石和砂岩砾石的支持^[47]。

5.2 内蒙古隆起的隆升

从不同阶段的碎屑锆石年龄组成变化看,5 个

样品中存在 3 次重要的物源改变。

对比样品 BX9(本溪组)与样品 SX5(山西组),前者显生宙锆石的时代以泥盆纪为主,含少量的晚石炭世—早二叠世锆石,后者显生宙锆石则以晚石炭世—早二叠世为主(图 6-a、b)。这种变化趋势在华北北缘具有普遍性,在北京西山^[54]和大青山^[53]具有同样的变化。本溪组—太原组期间的大量泥盆纪锆石说明泥盆纪岩浆岩在该时期已经出露地表,并为盆地提供物源。因此可以推测,在盆地形成以前(即本溪组开始沉积之前)内蒙古隆起已经存在,隆起的时间应该在泥盆纪岩浆活动以后且在盆地沉积开始之前(即 360~312Ma 之间)。这次隆升事件也得到内蒙古隆起水泉沟岩体隆升的证实,该岩体在 327Ma 前后开始快速隆升^[46]。

相对于本溪组—太原组,山西组的显生宙碎屑锆石年龄组成发生变化,以晚石炭世—早二叠世为主(图 6-a、b),同时沉积环境由海陆交互相变为河流相,碎屑粒度变粗,砂岩含量增高。在华北这种沉积环境的转变由北到南逐渐减弱,在华北中部由三角洲变为河流相,在华北南部则没有明显变化,保持了

相对稳定的三角洲环境,一直到孙家沟组才变为河流相^[78-79]。研究区沉积环境与物源的同步改变证明源区发生了重要的隆升作用,向盆地内部源区隆升作用的影响逐渐弱化,这次隆升可能代表内蒙古隆起的第二次隆升。

相对于山西组,下石盒子组碎屑锆石年龄代表物源的又一次改变(图 6-b、c),显生宙锆石的时代以中晚二叠世为主,其平均年龄 258Ma 代表火山碎屑的结晶年龄,物源的改变主要受火山活动的影响。该火山活动在华北北缘西侧的大青山^[47]和研究区以东的朝阳地区同样发育,火山活动的时代与赤峰地区的于家北沟组(火山碎屑岩夹火山岩,该组在内蒙古隆起以北广泛分布)^[80]和西拉木伦河以北的 A 型花岗岩^[19,62]的时代相一致。由于山西组一下石盒子组的沉积环境没有明显变化,笔者认为该期火山活动是山西组的源区隆升事件的延续。对于岩浆活动的成因与内蒙古隆起隆升的机制尚不清楚。Zhang 等^[49]根据内蒙古隆起侵入岩的地球化学特征,认为是岩石圈伸展和软流圈上涌导致岩石圈地幔的局部熔融,大量幔源基性岩浆引起下地壳物质的熔融,产生岩浆作用。火山活动之后,孙家沟组底部红层的碎屑锆石年龄谱(样品 SQF)又恢复到山西组的状态,显生宙碎屑锆石均以晚石炭世—早二叠世为主,稍有不同的是前者含有少量中晚二叠世锆石(图 6-c、d),属于下石盒子组火山物质的残留。此次物源的改变是物源的第三次变化,同时沉积环境也从下石盒子组的辫状河变为以红层为主的洪泛平原(图 3),但这次改变可能与华北在该时期普遍的气候干旱^[81]、火山活动的停止有关,没有构造指示意义。

刘家沟组与孙家沟组保持了物源的一致性(图 6-d、e),但从沉积序列上看,存在由红层向辫状河砂砾岩的转变(图 3)。由于无法排除气候因素对物源的影响,存在干旱气候缓和而导致源区快速剥蚀的可能,所以无法确定此时沉积环境的变化是否与源区构造活动有关。王新亮等^[82]在大青山以东的乌兰哈雅地区发现了二叠纪末—三叠纪初的推覆构造,研究区以北的内蒙古隆起是否同样存在构造活动,需要进一步的工作。

5.3 对古亚洲洋闭合的启示

330~290Ma 碎屑锆石年龄峰的普遍存在(华北北缘西侧大青山^[53]与北京西山^[54]也普遍存在)表明,内蒙古隆起在该时期存在重要的岩浆活动,同时张

拴宏^[46]在内蒙古隆起发现了许多同一时期的花岗闪长质侵入岩体,也证实了这一点。然而,一直没有发现火山岩,许多学者认为是受中生代以来的长期剥蚀而消耗殆尽^[46,53-54,83]。华北本溪组—太原组(312~276Ma)中的凝灰岩夹层^[47,53,84-88],说明该时期的确存在火山活动。但值得注意的是,火山活动可能并没有想象的那样强烈,至少无法与现代的活动大陆边缘陆缘弧——安第斯岩浆弧^[89]相比。首先本溪组—太原组(312~276Ma)中 330~290Ma 的碎屑锆石的含量低;其次 330~290Ma 的锆石大量出现在内蒙古隆起第二次隆升期间(276Ma~)的山西组,该组没有火山碎屑。之后从下石盒子组开始大量出现火山碎屑物质,火山碎屑锆石的年龄在 270~250Ma 之间,与大青山地区的火山岩砾石(255Ma±7Ma 和 278Ma±13Ma, K-Ar 法)^[47]的年龄一致。再者孙家沟组—刘家沟组中 330~290Ma 的碎屑锆石大量出现,但同时出现花岗质砾石,在大青山地区具有相似的现象^[47,53]。以上事实说明,这些 330~290Ma 的锆石有很大一部分来自侵入岩,源区的隆升使其露出地表,330~290Ma 期间火山物质供应有限。另外,周丽云^[65]通过对内蒙古隆起 320~290Ma 期间的花岗闪长岩体微观结构的对比,认为这些侵入岩体是在南北向挤压条件下古老变质基底在中下地壳重熔,并产生了岩浆流动,并不是岛弧性质的花岗岩。Zhang 等^[51]认为,华北北部早二叠世岩浆岩省的时空分布、岩石组合特征与世界各主要显生宙造山带发育的后碰撞/后造山岩浆岩省一致,确定二叠纪古亚洲洋已经闭合,碰撞后的岩石圈拆沉导致了早二叠世大规模的岩浆活动。同时,锆石 Hf 同位素组成与前寒武纪基底变质岩也具有明显的亲缘性(图 8),没有明显的新壳幔物质的加入,与安第斯岛弧总体偏正的 Hf 同位素组成^[90]明显不同。所以,以上的地质事实与陆缘弧模型^[16,49-50]不完全一致。从盆地演化的角度看,320~290Ma 期间本溪组—太原组以相对稳定的海陆交互相沉积为主,地层厚度小,砂岩成分成熟度高,表明源区相对稳定,不支持强烈挤压的构造环境。相反,可能是伸展环境下深大断裂的活化诱导了地壳的重熔,产生岩浆活动。这可以在一定程度上从岩浆岩的时空分布得到验证,从时间上内蒙古隆起的构造变形与岩浆活动具有很好的一致性^[46],从空间上岩浆活动也与断层的分布相吻合(图 1)。

通过碎屑锆石数据的物源分析发现,内蒙古隆起存在 2 次重要的隆升事件。

第一次发生在 360~312Ma 之间,此次隆升奠定了华北地块北缘盆—山体系的基本构造格局,在晚石炭世全球海平面上升^[91]的背景下开始了海陆交互的盆地充填过程。在内蒙古隆起区存在相同时代的变质事件,如大庙早泥盆世基性岩体 327Ma±5Ma 的变质事件^[46](见图 1 年龄数据)。研究区(图 7)、大青山^[53]和北京西山^[54]的碎屑锆石年龄谱均存在 360~330Ma 的波谷,说明该时期岩浆活动不发育。Yue 等^[92]认为是微陆块与华北北缘的碰撞导致了洋壳俯冲的停止。事实上,同样存在古亚洲洋闭合的可能。在东乌珠穆沁旗满都胡宝拉格地区发现了早—中二叠世华夏植物群,表明古亚洲洋的闭合应该在早二叠世之前^[6],至少在二叠纪之前已经局部碰撞。洋盆的闭合可能不是通过显著的俯冲消减方式,而是通过沉积和火山物质的堆叠而结束,不存在与强碰撞相关的剧烈造山过程,地壳没有迅速地加厚^[93]。

第二次隆升发生在 276~258Ma 之间,276Ma 左右是华北晚古生代盆地的转折点,即物源供应量的大幅增加、源区发生火山活动和随后花岗质砾石^[47]的出现。该期构造活动具有普遍性,在华北北缘西侧大青山地区存在同样的物源转变^[47]。在内蒙古隆起发育同一时期的构造变形,如虎什哈片麻岩和大庙断裂带角闪岩相糜棱岩^[46]。西拉木伦河缝合线以北的双井片岩^[13,94-95]、与俯冲相关的宝力道岩浆岩带和弧前沉积物锡林浩特杂岩的年代学,均表明南蒙微地块与华北地块的碰撞时间在 296~234Ma 之间^[96-97]。内蒙古隆起的 2 次隆升事件均可能与古亚洲洋的闭合有关,本文尚不能确定内蒙古隆起与古亚洲洋闭合的关系。但考虑到内蒙古隆起第二次隆升之后,内蒙古隆起与以北地区普遍的伸展型岩浆活动^[51],孙家沟组—刘家沟组相似的碎屑锆石组成,刘家沟组—二马营组粗碎屑物质的出现,说明内蒙古隆起进入隆升剥蚀期,古亚洲洋可能已经闭合。因此,可以推测至少在 276Ma 古亚洲洋已经关闭。

6 结 论

(1)碎屑锆石年龄数据限定了平泉地区本溪组的底界年龄约为 298Ma,下石盒子组约为 258Ma。

(2)显生宙碎屑锆石年龄和 Hf 同位素组成与内蒙古隆起晚古生代岩体完全一致,表明盆地的物源主要来自内蒙古隆起。大部分碎屑锆石是再旋回的前寒武纪锆石,证明古元古代—奥陶纪沉积岩是盆地的重要物源。内蒙古隆起在 330~290Ma 期间存在重要的岩浆活动,可能与伸展环境下深大断裂的活化有关。

(3)来自不同层位的碎屑锆石年龄谱的变化表明源区至少存在 2 期重要的隆升活动:第一期发生在 360~312Ma 之间,第二期发生在 276~258Ma 期间。第二期之后源区进入稳定的隆升剥蚀期,表明古亚洲洋至少在 276Ma 已经关闭,进入碰撞期。

致谢:数据测试得到中国科学院地质与地球物理研究所 Neptune MC-ICPMS 实验室谢烈文、张艳斌和杨岳衡老师的帮助,在数据处理过程中段亮同志给予支持,与张拴宏、李承东、张晓晖老师进行了有益的探讨,在此一并致以衷心的感谢。

参考文献

- [1] 邓胜徽, 万传彪, 杨建国. 黑龙江阿城晚二叠世安加拉—华夏混生植物群——兼述古亚洲洋的关闭问题[J]. 中国科学(D 辑), 2009, 39(12): 1744-1752.
- [2] 黄本宏. 天山—兴安褶皱区东部古生代末植物地理区系及其地质意义[C]//唐克东, 张良臣. 中国北方板块构造文集(第一集). 沈阳: 中国地质科学院沈阳地质矿产研究所, 1983: 138-155.
- [3] 王成文, 孙跃武, 李宁, 等. 中国东北及邻区晚古生代地层分布规律的大地构造意义[J]. 中国科学(D 辑), 2009, 39(10): 1429-1437.
- [4] 王惠, 王玉净, 陈志勇, 等. 内蒙古巴彦敖包二叠纪放射虫化石的发现[J]. 地层学杂志, 2005, 29(4): 368-372.
- [5] 王玉净, 樊志勇. 内蒙古西拉木伦河北部蛇绿岩带中二叠纪放射虫的发现及其地质意义[J]. 古生物学报, 1997, 36(1): 58-69.
- [6] 周志广, 谷永昌, 柳长峰, 等. 内蒙古东乌珠穆沁旗满都胡宝拉格地区早—中二叠世华夏植物群的发现及地质意义[J]. 地质通报, 2010, 29(1): 21-25.
- [7] 王成文, 张松梅. 哲斯腕足动物群[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 1-210.
- [8] Mueller J F, Rogers J J W, Jin Y G, et al. Late Carboniferous to Permian sedimentation in Inner Mongolia, China, and tectonic relationships between North China and Siberia[J]. Journal of Geology, 1991, 99(2): 251-263.
- [9] 和政军, 刘淑文, 任纪舜, 等. 内蒙古林西地区晚二叠世—早三叠世沉积演化及构造背景[J]. 中国区域地质, 1997, 16(4): 403-410.
- [10] 王瑜. 中国东部内蒙古—燕山造山带晚古生代晚期—中生代的造山作用过程[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 142.
- [11] 吴琳娜. 内蒙古克什克腾旗地区二叠纪沉积砂岩物源分析[D]. 长春: 吉林大学硕士学位论文, 2008.
- [12] 陈斌, 马星华, 刘安坤, 等. 锡林浩特杂岩和蓝片岩的锆石 U-Pb

- 年代学及其对索伦缝合带演化的意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(12): 3123–3129.
- [13]李益龙, 周汉文, 葛梦春, 等. 内蒙古林西县双井片岩北缘混合岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄[J]. 矿物岩石, 2008, (2): 10–16.
- [14]徐备, Chorvet J, 张福勤. 内蒙古北部苏尼特左旗蓝片岩岩石学和年代学研究[J]. 地质科学, 2001, 36(4): 424–434.
- [15]薛怀民, 郭利军, 侯增谦, 等. 中亚-蒙古造山带东段锡林浩特杂岩: 早华力西期造山作用的产物而非古老陆块? [J]. 岩石学报, 2009, 25(8): 2001–2010.
- [16]Zhang S H, Zhao Y, Kröner A, et al. Early Permian plutons from the northern North China Block: constraints on continental arc evolution and convergent margin magmatism related to the Central Asian Orogenic Belt[J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98(6): 1441–1467.
- [17]Zhang X, Zhang H, Tang Y, et al. Geochemistry of Permian bimodal volcanic rocks from central Inner Mongolia, North China: Implication for tectonic setting and Phanerozoic continental growth in Central Asian Orogenic Belt[J]. Chemical Geology, 2008, 249(3/4): 262–281.
- [18]刘建峰. 内蒙古林西—东乌旗地区晚古生代岩浆作用及其对区域构造演化的制约[D]. 长春. 吉林大学博士学位论文, 2009.
- [19]施光海, 苗来成, 张福勤. 内蒙古锡林浩特 A 型花岗岩的时代及区域构造意义[J]. 科学通报, 2004, 49(4): 384–389.
- [20]石玉若. 内蒙古苏左旗地区花岗岩类地球化学及 SHRIMP 年代学研究[D]. 北京. 中国地质科学院博士学位论文, 2005.
- [21]孙德有, 吴福元, 张艳斌. 西拉木伦河—长春—延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据[J]. 吉林大学学报, 2004, 34(2): 174–181.
- [22]陶继雄, 苏茂荣, 白立兵, 等. 内蒙古达尔罕茂明安联合旗满都拉地区索伦山蛇绿混杂岩的特征及构造意义[J]. 地质通报, 2004, 23(12): 1238–1242.
- [23]Windley B F, Alexeev D, Xiao W J, et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Journal of the Geological Society, 2007, 164: 31–47.
- [24]Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. Tectonics, 2003, 22(6): 8–20.
- [25]李述靖, 张维杰, 耿明山, 等. 蒙古弧地质构造特征及形成演化概论[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 145.
- [26]李双林, 欧阳自远. 兴蒙造山带及邻区的构造格局与构造演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(3): 45–54.
- [27]邵济安. 中朝板块北缘中段地壳演化[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 136.
- [28]唐克东. 中朝板块北侧褶皱带构造演化及成矿规律[M]. 北京: 北京大学出版社, 1992: 305.
- [29]Tang K D. Tectonic development of Paleozoic fold belts at the north margin of the Sino-Korea craton[J]. Tectonics, 1990, (9): 249–260.
- [30]任纪舜, 陈延愚, 牛宝贵, 等. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 205.
- [31]洪大卫, 黄怀曾, 肖宜君. 内蒙古中部三叠纪碱性花岗岩及其地球动力学意义[J]. 地质学报, 1994, 68(3): 219–230.
- [32]Khain E V, Bibikova E V, Kroer A, et al. The most ancient ophiolite of the Central Asian fold belt: U-Pb and Pb-Pb zircon ages for the Dunzhugur Complex, Eastern Sayan, Siberia, and geodynamic implications[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 199(3/4): 311–325.
- [33]任收麦, 黄宝春. 晚古生代以来古亚洲洋构造域主要块体运动学特征初探[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(1): 113–120.
- [34]Dobretsov N, Berzin N, Buslov M. Opening and Tectonic Evolution of the Paleo-Asian Ocean[J]. International Geology Review, 1995, 37(4): 335–360.
- [35]Hsu K J, Wang Q C, Li L. Geological evolution of the Neimonomides; a working hypothesis[J]. Eclogae Geologicae Helveticae, 1991, 84(1): 1–31.
- [36]Sengör A C, Natalin B A. Paleotectonics of Asia: fragments of a synthesis[C]//Yin A, Harrison T M. The Tectonic Evolution of Asia. Cambridge: Cambridge University Press, 1996: 486–641.
- [37]Chen B, Jahn B M, Wilde S, et al. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: petrogenesis and tectonic implications[J]. Tectonophysics, 2000, 328: 157–182.
- [38]李春昱, 王荃, 张之孟, 等. 中国板块构造的轮廓[J]. 中国地质科学院院报, 1980, 2(1): 11–20.
- [39]牛树银, 胡晓, 孙爱群. 华北地台北侧的古板块构造演化[J]. 地质科技情报, 1993, 12(1): 17–21.
- [40]Li J Y. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 26: 207–224.
- [41]王永争, 覃功炯, 欧强. 内蒙古林西大井铜锡多金属矿区上二叠统林西组之研究[J]. 矿产与地质, 2001, 15(3): 205–211.
- [42]李朋武, 高锐, 管焯, 等. 内蒙古中部索伦林西缝合带封闭时代的古地磁分析[J]. 吉林大学学报, 2006, 36(5): 744–758.
- [43]王成文, 金巍, 张兴洲, 等. 东北及邻区晚古生代大地构造属性新认识[J]. 地层学杂志, 2008, 27(2): 119–136.
- [44]Miao L, Zhang F, Fan W M, et al. Phanerozoic evolution of the Inner Mongolia-Daxing'anling orogenic belt in North China: constraint from geochronology of ophiolites and associated formations [C]//Zhai M G, Windley B F, Kusky T M, et al. Mesozoic subcontinental lithospheric thinning under Eastern Asia. London: Geological Society Special Publication, 2007: 223–237.
- [45]河北省地质矿产局. 河北省、北京市、天津市区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 741.
- [46]张拴宏. 燕山构造带内蒙古隆起东段晚古生代—早中生代构造岩浆活动及其地质意义[D]. 北京. 中国地质科学院地质力学研究所博士学位论文, 2004.
- [47]周安朝. 华北地台北缘晚古生代盆地演化及盆山耦合关系[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002: 157.
- [48]孟祥化, 葛铭. 中朝板块层序、事件、演化[M]. 北京: 科学出版社,

- 2004: 516.
- [49] Zhang S H, Zhao Y, Song B, et al. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian—Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: Geochronology, petrogenesis, and tectonic implications[J]. Geological Society of America Bulletin, 2009, 121(1/2): 181–200.
- [50] Jian P, Liu D, Kroner A, et al. Evolution of a Permian intraoceanic arc–trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia[J]. Lithos, 2010, 118(1/2): 169–190.
- [51] Zhang X, Mao Q, Zhang H, et al. Mafic and felsic magma interaction during the construction of high-K calc-alkaline plutons within a metacratonic passive margin: the Early Permian Guyang batholith from the northern North China Craton[J]. Lithos, 2011, in press.
- [52] 罗红玲, 吴泰然, 赵磊. 华北板块北苑乌梁斯太 A 型花岗岩体锆石 SHRIMP U–Pb 定年及构造意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(3): 515–526.
- [53] Cope T D. Sedimentary evolution of the Yanshan fold–thrust belt, Northeast China[D]. Stanford. Stanford University, 2003.
- [54] Yang J H, Wu F Y, Shao J A, et al. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 246: 336–352.
- [55] Li H Y, He B, Xu Y G, et al. U–Pb and Hf isotope analyses of detrital zircons from Late Paleozoic sediments: Insights into interactions of the North China Craton with surrounding plates [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2010, 39(5): 335–346.
- [56] 葛肖虹. 华北板内造山带的形成史[J]. 地质论评, 1989, 35(3): 254–261.
- [57] 赵越. 燕山地区中生代造山运动及构造演化[J]. 地质论评, 1990, 36(1): 1–13.
- [58] 郑亚东, Davis G A, 王琮, 等. 燕山带中生代主要构造事件与板块构造背景问题[J]. 地质学报, 2000, 74(4): 289–302.
- [59] 宋鸿林. 燕山式板内造山带基本特征与动力学探讨[J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 309–316.
- [60] Davis G A, Zheng Y D, Wang C, et al. Mesozoic tectonic evolution of the Yanshan fold and thrust belt, with emphasis on Hebei and Liaoning Provinces, Northern China[J]. Geological Society of America Memoirs, 2001, 194: 171–197.
- [61] Wu F Y, Jahn B M, Wilde S, et al. Phanerozoic crustal growth: U–Pb and Sr–Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China[J]. Tectonophysics, 2000, 328(1/2): 89–113.
- [62] Wu F Y, Sun D Y, Li H, et al. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis [J]. Chemical Geology, 2002, 187(1/2): 143–173.
- [63] 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 等. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 217.
- [64] 毛德宝, 陈志宏, 钟长汀, 等. 冀北北岔沟地区中生代侵入岩地质年代学和地球化学特征研究[J]. 岩石学报, 2003, 19(4): 661–674.
- [65] 周丽云. 冀北花岗闪长岩的岩浆流动特征及其地质意义[D]. 北京: 中国地质大学硕士学位论文, 2009.
- [66] Zhang S H, Zhao Y, Liu X C, et al. Late Paleozoic to Early Mesozoic mafic–ultramafic complexes from the northern North China Block: Constraints on the composition and evolution of the lithospheric mantle[J]. Lithos, 2009, 110(1/4): 229–246.
- [67] Zhang S H, Zhao Y, Song B. Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China block: implications for a late Palaeozoic active continental margin[J]. Journal of the Geological Society, 2007, 164: 451–463.
- [68] 倪志耀. 冀北退变榴辉岩、易剥钙榴岩和变质橄榄岩及其地质意义[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所博士后出站报告, 2002.
- [69] 崔盛芹. 华北陆块北缘构造运动序列及区域构造格局[M]. 北京: 地质出版社, 2000: 326.
- [70] 胡健民, 赵越, 刘晓文, 等. 辽西凌源地区水泉沟组辉石安山岩锆石 SHRIMP U–Pb 定年及其意义[J]. 地质通报, 2005, 24(2): 104–109.
- [71] Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U–Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation–inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Geostandards Newsletter, 2004, 28: 353–370.
- [72] 吴福元, 李献华, 郑永飞. Lu–Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 185–222.
- [73] Delattre S, Utsunomiya S, Ewing R C, et al. Dissolution of radiation–damaged zircon in lateritic soils[J]. American Mineralogist, 2007, 92(11/12): 1978–1989.
- [74] Fedo C M, Sircombe K N, Rainbird R H. Detrital Zircon Analysis of the Sedimentary Record[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53: 277–303.
- [75] Schneider J W, Koner F, Roscher M, et al. Permian climate development in the northern peri–Tethys area—The Lodeve basin, French Massif Central, compared in a European and global context [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 240(1/2): 161–183.
- [76] 翟明国. 华北克拉通的形成演化与成矿作用[J]. 矿床地质, 2010, 29(1): 24–36.
- [77] Darby B J, Gehrels G. Detrital zircon reference for the North China block[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 26(6): 637–648.
- [78] 陈世悦, 徐凤银, 刘焕杰. 华北晚古生代层序地层与聚煤规律[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000: 18–48.
- [79] 陈钟惠. 华北晚古生代含煤岩系的沉积环境和聚煤规律[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993: 56–132.
- [80] 李文国. 内蒙古自治区岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 344.
- [81] 张泓, 沈光隆, 何宗莲. 华北板块晚古生代古气候变化对聚煤作用的控制[J]. 地质学报, 1999, 73(2): 131–139.
- [82] 王新亮, 胡凤翔, 李玉玺, 等. 华北地台北缘乌兰哈雅地区二叠纪末—三叠纪初推覆构造[J]. 中国地质, 2002, 29(2): 135–138.
- [83] 李洪颜, 徐义刚, 黄小龙, 等. 华北克拉通北缘晚古生代活化: 山西宁武—静乐盆地上石炭统太原组碎屑锆石 U–Pb 测年及 Hf 同位素证据[J]. 科学通报, 2009, 54(5): 632–340.
- [84] 贾炳文, 谷东起. 晋中冀西太原组中段火山事件层岩矿地化特征

及其意义[J]. 沉积学报, 1998, 16(3): 85-91.

[85]贾炳文, 张俊计. 冀北辽西晚古生代煤系地层中火山碎屑岩层的发现与研究[J]. 沉积学报, 1996, 14(2): 163-171.

[86]贾炳文, 周安朝, 谷东起. 辽西地区晚古生代火山事件沉积地球化学特征及物源分析[J]. 沉积学报, 1999, 17(3): 473-477.

[87]Cope T, Ritts B D, Darby B J, et al. Late Paleozoic Sedimentation on the Northern Margin of the North China Block: Implications for Regional Tectonics and Climate Change [J]. International Geology Review, 2005, 47: 270-296.

[88]钟蓉, 孙善平, 傅泽明. 山东及邻区晚石炭世—早二叠世火山事件沉积及地层对比[J]. 地质学报, 1996, 70(2): 142-153.

[89]Trumbull R B, Riller U, Oncken O, et al. The time-space distribution of Cenozoic volcanism in the South-Central Andes: a new data compilation and some tectonic implications[C]//Oncken O, Chong G, Franz G. The Andes: active subduction orogeny. Berlin: Springer, 2006: 29-43.

[90]Polliand M, Schaltegger U, Frank M, et al. Formation of intra-arc volcanosedimentary basins in the western flank of the central Peruvian Andes during Late Cretaceous oblique subduction: field evidence and constraints from U-Pb ages and Hf isotopes[J]. International Journal of Earth Sciences, 2005, 94(2): 231-242.

[91]Rygel M C, Fielding C R, Frank T D, et al. The Magnitude of Late Paleozoic Glacioeustatic Fluctuations: A Synthesis[J]. Journal of Sedimentary Research, 2008, 78(8): 500-511.

[92]Yue Y, Liu J G, Graham S A. Tectonic correlation of Beishan and Inner Mongolia orogens and its implications for the palinspastic reconstruction of north China [J]. Geological Society of America Memoirs, 2001, 194: 101-116.

[93]邵济安, 减绍先, 牟保磊, 等. 造山带的伸展构造与软流圈隆起——以兴蒙造山带为例[J]. 科学通报, 1994, 39(6): 533-537.

[94]李益龙, 周汉文, 钟增球, 等. 华北与西伯利亚板块的对接过程: 来自西拉木伦缝合带变形花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄证据[J]. 地球科学, 2009, 34(6): 931-938.

[95]李锦轶, 高立明, 孙贵华, 等. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束[J]. 岩石学报, 2007, 23(3): 565-582.

[96]施光海, 刘敦一, 张福勤, 等. 中国内蒙古锡林郭勒杂岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及意义[J]. 科学通报, 2003, 48(20): 2197-2192.

[97]Chen B, Jahn B M, Tian W. Evolution of the Solonker suture zone: Constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotope compositions of subduction- and collision-related magmas and forearc sediments[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 34(3): 245-257.

① 长春科技大学地球科学学院. 1:5 杨树岭幅区域地质图. 2000.

② 马收先. 华北地块北缘晚古生代构造-沉积演化. 中国科学院地质与地球物理研究所博士学位论文, 2011: 137.

③ 长春科技大学地球科学学院. 1:5 杨树岭幅区域地质调查报告. 2000.

④ 周新华, 英基丰, 苏本勋, 等. 大陆地壳生长的多元同位素制约: 以华北北缘元古宙沉积体系为例. 全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要, 2009: 408.