铁岭组钾质斑脱岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究及其地质意义

苏文博^①, 李怀坤^②, HUFF W D^③, ETTENSOHN F R^④, 张世红^①, 周红英^②, 万渝生^⑤

① 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

② 中国地质调查局天津地质矿产研究所, 天津 300170;

③ Department of Geology, University of Cincinnati, Cincinnati, OH 45221-0013, USA;

④ Department of Earth and Environment Sciences, University of Kentucky, Lexington, KY 40506-0053, USA;

⑤ 北京离子探针中心, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

E-mail: suwenbo@cugb.edu.cn

2010-02-01 收稿, 2010-04-28 接受

国家自然科学基金(40372057, 40772076)、中国石油化工股份有限公司海相油气勘探前瞻性项目(G0800-06-ZS-319)和国土资源部大调查项目(1212010611802)资助

摘要 最近在冀北-辽西以碳酸盐岩为主的铁岭组内发现了钾质斑脱岩, 并获得其锆石 SHRIMP U-Pb 年龄——(1437±21) Ma, 这一进展将铁岭组的时代确定为中元古代早期盖层纪(Calymmian Period)末期. 与此同时, 还在同一剖面获得了铁岭组的上覆地层——下马岭组碳质页岩里钾质斑脱岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄——(1372±18) Ma, 这与稍早前在北京西北及其附近地区所获得的定年结果(~1380 Ma)是一致的. 这在肯定了该地区下马岭组应归入中元古代中期延展纪(Ectasian Period)早期的同时, 也表明以蓟县剖面为代表的燕山东部地区铁岭组-下马岭组等相关序列, 可与北京西山及燕山西部进行良好对比. 换言之, 华北北部从高于庄组到铁岭组的巨厚碳酸盐岩序列都应视为中元古界盖层系沉积, 而铁岭组与下马岭组之间的不整合面可作为中元古界盖层系与延展系之间的物理性分界标志; 早先以该不整合面命名的“芹峪上升”(或“芹峪运动”)应属于一个时限短暂的中元古代早期的区域抬升, 不能再视为华北克拉通对新元古代罗迪尼亚超大陆聚合事件(~1.0 Ga)的响应.

关键词

锆石 U-Pb 年龄
钾质斑脱岩
铁岭组
华北克拉通
盖层纪
中元古代

铁岭组是华北北部中元古界蓟县系顶部以白云岩及灰岩为主的岩石地层单位^[1,2]. 20世纪70年代以来, 依据其中的海绿石 K-Ar 测年数据(1205~1010 Ma)^[3~5], 该组的上限一直被认为不小于1000 Ma(接近1050 Ma), 归属于国际前寒武纪地质年代划分方案中的中元古代末期狭带纪(Stenian Period^[6]) (中文译名参见文献[7], 下同).

根据对铁岭组的上覆地层——下马岭组里所发现钾质斑脱岩^[8~10]的研究, 最近研究人员^[11~13]相继获得了1380 Ma左右的岩浆型锆石 SHRIMP U-Pb 年

龄, 从而将下马岭组的地质时代从早先的新元古代早期拉伸纪(Tonian Period^[6])厘定为中元古代中期的延展纪(Ectasian Period^[6]). 这一进展表明, 该组的下伏地层——铁岭组的形成时限应不小于1380 Ma. 考虑到获得这些年龄的斑脱岩位于下马岭组上部的第三段^[8~10], 下马岭组与下伏的铁岭组之间还存在着一个广泛分布的不整合^[1,2], 此前 Su 等人^[12]将铁岭组的上限推定为1400 Ma左右, 并将该组归属于中元古代早期的盖层纪(Calymmian Period^[7])晚期, 但仍缺乏确切的年龄数据直接给予约束. 最近, 我们在华北北

英文版见: Su W B, Li H K, Huff W D, et al. SHRIMP U-Pb dating for a K-bentonite bed in the Tieling Formation, North China. Chinese Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-4007-5

部的铁岭组内发现了钾质斑脱岩,并获得了比较理想的岩浆成因锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果,为进一步限定华北北部中元古代地层的时代框架等提供了年龄证据。

1 地质概况和斑脱岩特征

铁岭组来源于由高振西等人命名的“铁岭灰岩”^[14],命名地点位于蓟县城北的铁岭村附近。1959年第一次全国地层会议后改称“铁岭组”^[15]。1974年“华北地区地层古生物协作会议”以后,铁岭组在华北北部得到了广泛的确认^[16~18]。虽然1980年陈晋镛等人^[1]以蓟县剖面该组中部沉积间断面为界,将其再分为下部的“代庄子亚组”和上部的“老虎顶亚组”,但人们还是习惯于将其称为铁岭组一段和二段^[2,19,20]。

在铁岭组标准剖面——蓟县剖面上^[1,2,18],其一段(即代庄子亚组)厚度为153 m。其底部为中厚层砂岩,向上为页岩与含锰白云岩互层,并渐变为杂色页岩夹中薄层灰岩-白云质灰岩,顶部发育紫红-翠绿等杂色泥页岩。该段中下部发育小型叠层石礁丘。其二段(即老虎顶亚组)厚度为180 m。其下部为含砾屑含锰白云岩与白云质灰岩互层,上部为大型叠层石礁丘夹砾屑灰岩-白云岩,顶部为白云质灰岩。除海绿石外,该组还经常见有燧石团块或条带。该组其上与下马岭组底部的砾岩或含砾粗砂岩呈平行不整合接触,下与洪庄组杂色泥页岩逐渐过渡。

在区域上,该组主要分布于燕辽地区,厚度一般为200~300 m,以冀东-辽西一带现存沉积厚度为最大,向四周则逐渐减薄,在保定-满城一线以南的华北腹地则完全缺失^[1,2,15~20]。在整个华北北部其岩相总体上变化并不是很大,尤其是该组的上下两段地层的这种两分性非常明显而稳定。只是在叠层石的发育程度上以及其间的杂色泥页岩的厚度和组成上,在不同地区有所增减^[1,2,15~20]。由于铁岭组与上覆下马岭组之间的不整合界面特征明显,区域分布广泛,很早便被一些学者^[21]命名为“芹峪上升”或“芹峪运动”,并被认为是华北地区中元古代-新元古代一次重要的构造抬升和成陆剥蚀作用^[1,2,19~22]。

经过详细观察和区域追索,我们相继在冀北-辽西一带的怀来赵家山、凌源老庄户、平泉双洞刘家沟(图1)等剖面铁岭组中部的碳酸盐序列里都发现了一种特殊的黏土岩夹层。除去层位相对稳定、空间分布广泛外,这些黏土岩还有如下特征:(1)在野外露头

图1 华北北部中元古界-新元古界露头分布示意图及所观察典型剖面位置图

阴影区为露头分布(据文献[1],略有修改); NCC, 华北克拉通(North China Craton, 据文献[23]); 剖面名称: 1, 怀来赵家山; 2, 怀来龙凤山; 3, 涞水紫石口; 4, 北京西山青白口; 5, 北京西山跃进村(芹峪北); 6, 北京西山下苇店; 7, 天津蓟县; 8, 兴隆北水泉; 9, 宽城崖门子; 10, 平泉双洞刘家沟; 11, 凌源老庄户; 在其中的剖面1, 10, 11的铁岭组内目前已确认有钾质斑脱岩(详见正文); 除蓟县剖面外的其余剖面上,在其下马岭组内我们均已发现有斑脱岩,其中高林志等人^[11]在剖面5、Su等人^[12]在剖面1和4、高林志等人^[13]在剖面1等该组斑脱岩中已获得~1380 Ma的SHRIMP U-Pb 锆石测年; 剖面10即为本文报道的主要研究剖面

的地层序列中呈夹层状,其厚度一般为数厘米,外观呈土黄色-灰白色,质地松软,比重相对很轻,其切面常呈蜡状光泽,吸水性较强并具滑腻的皂状结构。因不抗风化,这些黏土层在露头上常呈凹槽状等负地形,并因富含钾元素而更易滋生植被。(2)岩石矿物学分析表明,这些黏土岩含有较丰富的黏土矿物(多为伊利石-蒙脱石混层物及绿泥石-蒙脱石混层物,少量为高岭石等),并含有较多的钾长石(Max=6.7%)和方解石(Max=68%),同时还含有少量的岩浆型磷灰石、锆石及云母等矿物。(3)岩石地球化学分析表明,这些黏土岩含有较高的氧化硅(34%~52%)、氧化钾(4%~7%)等氧化物,同时含有较高的Th(15~33 μg/g), Hf(4~8 μg/g)等微量元素,并具有明显的轻稀土(LREE)富集和Eu的负异常。根据这些微量及稀土元素等进行的岩浆岩源岩恢复表明,它们落入中酸性-中性的岩浆岩(流纹岩-流纹英安岩)区域,并推测其可能来源于岛弧-同碰撞背景(VAG-synCOLG)的火山喷发活动。参照国内外相关研究^[8~10,12,24~28]可以确认,铁岭组内的这些黏土岩,应该是由偏碱性的中酸性火山喷发所产生的火山灰沉降到海盆之后,经水解、成岩而来的典型的钾质斑脱岩(K-bentonites)。

由于目前仅在上述3个剖面(地点)确认有斑脱岩,其详细空间分布特征还有待进一步查明,但相对而言,

以平泉-凌源一带其厚度稍大、纯度稍高于怀来一带。在确认这些斑脱岩的同时,我们首先在河北平泉双洞刘家沟剖面(118°44'E, 40°58'N; 参见图 1, 剖面 10)铁岭组二段近底部斑脱岩里获得了岩浆型锆石(样品号: 11-3-6)。剖面位于平泉东南约 10 km 的双洞背斜¹⁾南翼西端,主体在刘家沟村东走向大体为 SW210°的山梁上,自北向南依次出露有铁岭组、下马岭组及景儿峪组和寒武系辛集组底部等地层,露头良好。以下为我们实测的该剖面铁岭组分层简述(室内有合并)。

上覆地层: 下马岭组底部灰绿色粉砂质泥岩夹砂砾岩
透镜体
~~~~~平行不整合~~~~~

铁岭组

15. 灰黑色-灰色中厚层状白云质灰岩, 横向上顶部因铁染可呈浅褐红色 15 m
14. 灰白色中厚层状白云质灰岩, 含藻纹层 8 m
13. 灰白色中厚层状白云质灰岩与土黄色中薄层状钙质泥岩互层 26.1 m
12. 灰白色薄层状白云质灰岩夹中层状白云质灰岩 16.6 m
11. 灰白色中厚层状白云质灰岩夹灰色薄层状钙质泥岩, 局部可呈互层 50.9 m
10. 浅紫红色白云岩-白云质灰岩夹泥岩。前者局部可呈团块状-结核状, 似叠层构造 8 m
9. 灰白色薄层状-中层状白云质灰岩夹浅黄绿色泥岩 18 m
8. 浅黄色薄层状泥质灰岩-白云岩, 夹土黄色含钙质泥岩, 局部含有燧石条带或团块。本层底部的含钙质泥岩夹层, 实为质地较纯之钾质斑脱岩(采集样品 1 件: 11-3-6) 9.1 m
7. 浅黄色中厚层状白云质灰岩夹薄层钙质泥岩, 下部夹燧石团块及砾屑灰岩 7.7 m
6. 灰紫色中厚层状含锰灰岩, 夹灰白色薄层状白云质灰岩及含锰泥灰岩, 含燧石团块及条带底部呈波状起伏 5 m
5. 紫红-翠绿等杂色泥页岩夹透镜状粉砂岩 24.2 m
4. 灰褐色中薄层-中厚层状含锰白云质灰岩夹泥岩。顶部与杂色泥岩接触处发育有波状起伏的铁锰质硬底, 下部灰岩当中的泥岩夹层增多增厚 43.6 m
3. 褐黑色含锰灰岩。本层在当前剖面及双洞一带为可采锰矿, 为良好的标志层 4.5 m

2. 灰褐色含锰灰岩-砂质灰岩, 夹薄层泥岩, 横向上可见槽状交错层理 14.5 m

1. 灰白色中厚层状灰岩-白云质灰岩, 夹灰色泥岩 >11 m

(以下因到背斜之核部, 地层开始重复并有掩盖而未再测)

上述剖面中的第 6~15 层属于铁岭组二段, 总厚度 175.4 m; 1~5 层属于铁岭组一段, 底部因剖面所在处露头限制未能测全, 可见厚度接近 100 m。根据相关资料^[18], 平泉双洞一带铁岭组总厚度为 367 m, 因此其一段总厚度应该在 190 m 左右。该组上与下马岭组平行不整合接触, 而根据横向追索及相关资料^{1)[18]}, 在本区该组其下与洪水庄组呈整合接触。

由上可知, 当前剖面的铁岭组在总体构成上与蓟县剖面^[1,2,18,19]等地点可以进行良好对比, 只是其叠层石发育程度远不如蓟县剖面和燕山西部, 而且这里其一段顶部的杂色泥页岩厚度稍厚, 并含有可采的锰矿层, 其二段近底部有保存较好的钾质斑脱岩(样品号: 11-3-6)。这些可能都反映出它与蓟县及燕山其他地点在沉积背景上存在一定的差异性。

与此同时, 为更好对比燕山东部和西部的这套地层, 我们还在该剖面铁岭组上覆的下马岭组第三段采集了钾质斑脱岩样品(样品号: 11-3-2 和 11-3-3)。根据我们观测, 这里的下马岭组虽然总厚度只有大约 220 m, 远小于河北怀来赵家山剖面^[19,29]等地所见, 但整体上仍可分为 3 段, 也有数层基性岩床侵入。其一段厚度约为 15 m, 为一套灰绿色-灰色含泥质粉砂岩, 底部含砾石, 与铁岭组呈明显的平行不整合接触, 其顶部发育有最大厚度可达 4 m 的浅褐红色中厚层状含砾砂岩透镜体, 可见交错层理; 其二段为黄绿色-灰绿色泥质粉砂岩, 夹灰色泥页岩, 该段地层实际厚度约为 90 m; 其三段主体为灰黑色-灰色硅质碳质泥页岩, 上部出现黄绿色-灰色泥岩, 含粉砂岩透镜体。本段实际出露厚度约为 120 m。其顶部在本剖面与景儿峪组之间因也有基性岩床侵入, 关系不明。但根据区域资料^{1)[18]}可知, 该组与景儿峪组呈平行不整合接触。需要说明的是, 我们所观测的刘家沟剖面, 距离河北地质局 1:20 万平泉幅报告¹⁾中的“赵家杖子南上震旦系实测剖面”(主要出露铁岭组顶部及下马岭组)不远, 其走向也基本平行, 两者之间几乎可以一一对应。

1) 河北省地质局. 1:20 万平泉幅区域地质调查报告, 1976

与河北怀来赵家山、天津蓟县等地相比,平泉双洞刘家沟剖面及附近的下马岭组各段厚度稍小(尤其是其一段),具体岩性组合也有一些差别,但总体上仍可与怀来赵家山剖面^[19,29]该组一段至三段地层逐一进行对比,而该组二段以上地层在蓟县剖面^[1,2,18,19]缺失.当前剖面的斑脱岩即产于该组第三段中下部.和北京西山以及河北怀来等地所见^[8~10,12]类似,这些灰白色的黏土岩常成束(bundle)产出于黑色碳硅质页岩中,单层厚度1~5 cm,彼此间隔10~30 cm.其岩石学及地球化学分析结果也与文献^[8~10,12]此前在其他地方下马岭组所见基本一致,与上文铁岭组所见黏土岩类似,因此也属于典型的钾质斑脱岩.当前样品(样品号:11-3-2和11-3-3)即采自这样的两个相邻单层,其上下间距约为20 cm.

2 分析方法

本研究主要是上述剖面铁岭组和下马岭组钾质斑脱岩(样品号:11-3-6,11-3-2和11-3-3)所含锆石的SHRIMP U-Pb定年,其先期的锆石分选和制靶详细流程可参见文献^[12,30].所采集样品的锆石分选工作由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,锆石制靶和阴极发光(CL)图像照相在北京离子探针中心完成.

由阴极发光图像(图2和3)可以看出,所有这些

锆石内部都呈现出比较规则的振荡环带或不规则状环带,具有典型的中酸性岩浆锆石的内部结构特征,同时其外部轮廓均保持了较好的原始晶形,未见明显的搬运磨蚀痕迹.但从铁岭组斑脱岩(样品号:11-3-6)中选出的锆石一般呈长柱状自形晶体,长轴方向最长100 μm 左右(图2);而从下马岭组斑脱岩样品(样品号:11-3-2和11-3-3)中选出的锆石总体呈不规则状或短柱状(图3),粒径一般在100~150 μm .另外,铁岭组和下马岭组斑脱岩锆石中的Th/U比值分别为0.57~0.79和0.30~1.02.这些特征在显示它们都具有典型的岩浆锆石特征的同时,亦显示其源岩岩浆组等方面具有一定的差异性.

锆石微区原位U-Pb同位素测定在北京离子探针中心利用高灵敏度高分辨率离子探针质谱(SHRIMP II)完成,详细分析流程及原理参见文献^[30~33].测试过程中采用标准锆石TEM^[34](参考年龄为417 Ma)进行同位素分馏校正,使用标准锆石M257^[35](参考年龄为561 Ma)标定所测锆石的U、Th和Pb的含量.应用SQUID^[36]和Isoplot^[37]程序进行数据处理,采用锆石样品中实际测得的²⁰⁴Pb进行普通Pb校正,数据表中所列单个数据点的误差为1 σ ,加权平均年龄为95%的置信度.在具体测试过程中,每测定两个样品点我们就测定一次或两次标准锆石TEM^[34],以充分检验仪器的稳定性及实现对测定数据有效的同位素分馏校正.

图2 铁岭组斑脱岩锆石(11-3-6)CL图像及分析点位
椭圆处为SHRIMP测年的束斑位置,数字分别为年龄值和样点号

图3 下马岭组斑脱岩锆石(11-3-2 和 11-3-3)CL 图像及分析点位
椭圆处为 SHRIMP 测年的束斑位置, 数字分别为年龄值和样点号

3 分析结果

按照上述方法, 我们对铁岭组斑脱岩锆石(样品号: 11-3-6)共测定了 14 个 U-Pb 同位素数据点(表 1)。其中 2 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄偏小的数据点(图 4 中的 11-3-6-13.1, 11-3-6-14.1)在谐和图上投影位置偏下, 显示出一定程度的 Pb 丢失, 因此未包含在其他 12 个点的加权平均年龄的计算中。12 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 (1437 ± 21) Ma(图 4), 我们认为该年龄值代表了铁岭组二段近底部这层钾质斑脱岩形成的年龄。

需要补充的是, 当剔除掉 11-3-6-8.1, 11-3-6-9.1, 11-3-6-11.1 及 11-3-6-13.1 这 4 个严重不谐和的数据点(表 1)之后, 其余 10 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄加权平均值为 (1433 ± 20) Ma, 与上述 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值在误差范围内是一致的; 而该样品稍后在天津地质矿产研究所同位素实验室利用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)也测得了 (1443 ± 21) Ma ($n=12$) 的年龄, 与上述离子探针测定结果在误差范围内也是一致的。

两件下马岭组斑脱岩样品(样品号: 11-3-2 和 11-3-3)因采自上下相邻层位(相隔约 20 cm), 年龄应该相近, 测年结果也证明了这一点(表 2)。两个样品共测定了 21 个锆石 U-Pb 同位素数据点, 其中 17 个

点具有基本一致的年龄, 构成一个群, 另外 4 个点(11-3-3-9.1, 11-3-2-10.1, 11-3-2-11.1 和 11-3-2-12.1)具有较小的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄, 明显偏于上述 17 个点构成的数据点群的下方, 显示不同程度的放射成因 Pb 丢失(图 5), 计算时予以剔除, 其余 17 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 (1372 ± 18) Ma。这与早在河北怀来赵家山以及北京西山青白口所获得的下马岭组斑脱岩的年龄(~ 1380 Ma)^[11-13]在误差范围内一致。这一定年结果表明, 平泉刘家沟剖面及其所在的燕山东部地区(蓟县剖面为代表)的下马岭组(及相邻的长龙山组及铁岭组等地层序列), 并不像此前一些学者^[11]所怀疑的那样“是否与北京西山原命名地点的下马岭组相当”或“西山的下马岭组应与蓟县剖面上的洪水庄组对比”, 而是可以和北京西山等燕山西部地区进行良好对比。

4 讨论

4.1 铁岭组时限的厘定

1977 年, 钟富道^[3]最早报道了蓟县剖面该组海绿石的 K-Ar 年龄 1205~1132 Ma, 稍晚天津地质矿产研究所^[4]又获得了 1010~1128 Ma 的数据, 接着一些学者^[5]又在同一层位的海绿石中获得了 1070~1175 Ma 的年龄。由此并参考其他地区相关资料, 华北北部铁

表 1 铁岭组钾质斑脱岩锆石(样品号: 11-3-6)SHRIMP U-Th-Pb 同位素分析结果^{a)}

分析 点号	²⁰⁶ Pb _c (%)	U /μg·g ⁻¹	Th /μg·g ⁻¹	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb* /μg·g ⁻¹	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb*	±%	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U	±%	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U	±%	误差相 关度	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄/Ma	不谐 和度
11-3-6-1.1	0.71	111	62	0.57	24.3	0.0892	2.5	3.10	3.8	0.2522	2.9	0.758	1450 ±37	1407 ± 48	-3
11-3-6-2.1	1.10	137	104	0.79	29.5	0.0912	3.1	3.11	4.2	0.2473	2.8	0.678	1424 ±36	1450 ± 58	2
11-3-6-3.1	0.17	150	107	0.74	32.2	0.0900	1.3	3.107	3.1	0.2503	2.8	0.913	1440 ±36	1426 ± 24	-1
11-3-6-4.1	0.55	210	116	0.57	45.3	0.0900	1.7	3.091	3.2	0.2491	2.8	0.859	1434 ±36	1425 ± 32	-1
11-3-6-5.1	0.67	162	119	0.76	35.2	0.0895	2.2	3.10	3.6	0.2514	2.8	0.783	1446 ±36	1414 ± 42	-2
11-3-6-6.1	1.02	195	118	0.62	41.2	0.0882	2.1	2.96	3.5	0.2432	2.8	0.799	1403 ±35	1386 ± 40	-1
11-3-6-7.1	0.64	174	113	0.67	38.0	0.0887	1.7	3.08	3.3	0.2520	2.8	0.851	1449 ±36	1399 ± 33	-4
11-3-6-8.1	2.21	97	64	0.68	21.2	0.0712	8.4	2.44	9.0	0.2489	3.2	0.357	1433 ±41	960 ±170	-49
11-3-6-9.1	2.26	54	32	0.61	11.7	0.0747	7.3	2.55	8.0	0.2476	3.2	0.400	1426 ±41	1058 ±150	-35
11-3-6-10.1	0.19	133	96	0.74	28.5	0.0930	1.4	3.200	3.1	0.2496	2.8	0.897	1437 ±36	1487 ± 26	3
11-3-6-11.1	—	162	113	0.72	35.2	0.09386	0.84	3.274	2.9	0.2530	2.8	0.958	1454 ±36	1505 ± 16	3
11-3-6-12.1	0.30	117	70	0.62	25.1	0.0916	1.7	3.15	3.3	0.2492	2.8	0.855	1434 ±36	1459 ± 32	2
11-3-6-13.1	0.70	108	81	0.77	22.4	0.1001	2.0	3.29	3.4	0.2385	2.8	0.820	1379 ±35	1626 ± 36	15
11-3-6-14.1	0.25	173	126	0.75	35.9	0.0902	1.1	2.99	4.4	0.240	4.2	0.965	1388 ±53	1431 ± 22	3

a) Pb_c 和 Pb* 分别为普通铅和放射成因铅含量

图 4 铁岭组斑脱岩(样品号: 11-3-6)锆石 U-Pb 年龄谐和图
不包括 11-3-6-13.1 和 14.1

岭组的年龄被认为不小于 1050 Ma, 归属“蓟县系”, 并对应于国际地层委员会所命名的中元古代最晚期的狭带纪(Stenian Period^[6]^[2,7]). 然而, 随着近来在铁岭组上覆地层——下马岭组第三段钾质斑脱岩里相继获得~1380 Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄^[11-13], 铁岭组的时限被厘定为不小于 1400 Ma, 并划归盖层纪^[12]. 只是这一厘定由于铁岭组本身缺乏确切的定年数据而存在着相当的不确定性.

本文的分析表明, 位于铁岭组二段下部的钾质斑脱岩(样品号: 11-3-6)的锆石 SHRIMP ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为(1437±21) Ma(图 4), 代表了该层斑脱岩的

形成时间, 也大体代表着铁岭组的形成时间. 考虑到该层斑脱岩位于铁岭组二段近底部, 而上覆的下马岭组第三段已有 1380 Ma 左右年龄数据(参见图 5 和文献[11-13]), 因此铁岭组的顶界现在可以比较准确地被限定在 1400 Ma 附近. 按照国际地层委员会现行方案^[6], 华北北部的铁岭组应属于中元古代早期盖层纪(Calymmanian Period, 1600~1400 Ma)最晚期的沉积(图 6).

4.2 华北北部中元古界巨厚碳酸盐岩沉积时代的进一步约束

根据前述以海绿石等为测年对象在铁岭组等层位获得的较为年轻的 K-Ar 测年数据^[3-5]以及在团山子组和大红峪组火山岩夹层中所获得的锆石 U-Pb 年龄^[38,39], 人们^[2,7,22,44]曾长期将华北北部自高于庄组到铁岭组顶部近 6000 m 沉积的时限推定为 1600~1000 Ma, 归属“长城纪”晚期及“蓟县纪”, 并与国际通行方案里的中元古代中晚期相当.

由当前分析可知, 铁岭组二段下部发育有大约 1440 Ma 的钾质斑脱岩, 而上覆的下马岭组第三段有 1380 Ma 左右的同类沉积, 它们共同限定了两组分界, 即铁岭组的顶界, 应该非常接近 1400 Ma. 而根据大红峪组中上部火山岩锆石 U-Pb 年龄(1625~1622 Ma), 该组与高于庄组的分界被推定为 1600 Ma^[2,38,40]. 因此, 当前华北北部自高于庄组开始到铁岭组为止、以碳酸盐岩为主的巨厚沉积序列, 应沉积于 1600~1400 Ma

表 2 下马岭组钾质斑脱岩锆石(样品号: 11-3-2 和 11-3-3)SHRIMP U-Th-Pb 同位素分析结果^{a)}

分析 点号	²⁰⁶ Pb _c (%)	U /μg·g ⁻¹	Th /μg·g ⁻¹	²³² Th / ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb* /μg·g ⁻¹	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb*	±%	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U	±%	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U	±%	误差相 关度	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄/Ma	不谐 和度
11-3-2-1.1	2.32	61	25	0.42	12.2	0.0811	5.9	2.55	6.6	0.2277	3.1	0.462	1,322 ±37	1,224 ±120	-8
11-3-2-2.1	0.80	116	62	0.55	24.3	0.0888	2.3	2.96	3.7	0.2419	2.8	0.772	1,397 ±36	1,401 ±45	0
11-3-2-3.1	0.61	96	81	0.88	20.7	0.0877	2.7	3.01	3.9	0.2489	2.9	0.731	1,433 ±37	1,375 ±51	-4
11-3-2-4.1	0.58	104	66	0.66	21.9	0.0875	2.5	2.94	3.8	0.2435	2.8	0.753	1,405 ±36	1,372 ±48	-2
11-3-2-5.1	0.61	96	28	0.30	20.3	0.0867	2.7	2.92	3.9	0.2444	2.8	0.725	1,410 ±36	1,353 ±52	-4
11-3-2-6.1	0.17	116	49	0.43	22.9	0.0883	1.3	2.778	3.1	0.2283	2.8	0.912	1,326 ±34	1,388 ±24	4
11-3-2-7.1	2.63	119	50	0.44	24.7	0.0940	4.6	3.05	5.4	0.2353	2.9	0.527	1,362 ±35	1,507 ±87	10
11-3-2-8.1	0.52	107	44	0.42	21.7	0.0885	2.5	2.86	3.8	0.2344	2.9	0.758	1,358 ±35	1,394 ±47	3
11-3-2-9.1	0.17	147	69	0.49	30.0	0.08827	1.0	2.893	3.0	0.2377	2.8	0.938	1,375 ±34	1,388 ±20	1
11-3-2-10.1	1.08	237	109	0.47	42.8	0.0905	2.0	2.588	3.4	0.2075	2.8	0.815	1,216 ±31	1,435 ±37	15
11-3-2-11.1	1.25	147	67	0.47	24.1	0.0876	2.7	2.276	4.0	0.1885	2.9	0.723	1,113 ±29	1,373 ±52	19
11-3-2-12.1	0.42	100	39	0.41	19.0	0.0864	2.2	2.635	3.6	0.2213	2.8	0.786	1,289 ±33	1,346 ±43	4
11-3-3-1.1	0.39	137	62	0.47	27.0	0.0861	1.7	2.72	3.8	0.2291	3.4	0.894	1330 ±41	1341 ±3	1
11-3-3-2.1	1.29	80	43	0.56	15.8	0.0861	3.4	2.70	4.9	0.2272	3.5	0.717	1320 ±42	1340 ±66	1
11-3-3-3.1	0.36	151	80	0.55	30.4	0.0869	2.0	2.79	4.0	0.2331	3.4	0.862	1351 ±42	1359 ±39	1
11-3-3-4.1	0.55	173	74	0.44	34.5	0.0848	1.8	2.70	3.8	0.2309	3.4	0.885	1339 ±41	1312 ±35	-2
11-3-3-5.1	0.65	71	70	1.02	14.7	0.0853	2.6	2.82	4.4	0.2396	3.5	0.801	1384 ±44	1321 ±51	-5
11-3-3-6.1	0.50	119	49	0.43	24.1	0.0865	3.0	2.80	4.5	0.2344	3.4	0.754	1357 ±42	1350 ±57	-1
11-3-3-7.1	0.29	111	45	0.42	21.3	0.0865	1.6	2.644	3.7	0.2217	3.4	0.910	1291 ±40	1349 ±30	4
11-3-3-8.1	1.02	73	43	0.61	15.5	0.0920	3.2	3.09	4.7	0.2437	3.5	0.736	1406 ±44	1467 ±60	4
11-3-3-9.1	0.59	143	67	0.48	31.1	0.0848	1.7	2.94	3.8	0.2513	3.4	0.895	1445 ±44	1311 ±33	-10

a) Pb_c 和 Pb* 分别为普通铅和放射成因铅含量

图 5 下马岭组斑脱岩(样品号: 11-3-2 和 11-3-3)锆石 U-Pb 年龄谐和图

不包括 11-3-3-6.1, 11-3-2-10.1, 11-3-2-11 和 11-3-2-12.1

期间, 与现行的中元古代早期盖层纪(Calymmian Period, 1600~1400 Ma^[6])的时限一致(图 6), 可谓其名符其实的“盖层沉积”。鉴于此, 本文建议将我国习用的“蓟县系”与“长城系”界线置于高于庄组与大红峪组之间, 即新的“蓟县系”应与国际通用的盖层系相

当(图 6)。

值得注意的是, 最近李怀坤等人^[41]在侵入于下马岭组的基性岩床里获得了(1320±6) Ma 的锆石及斜锆石 U-Pb 年龄; 而几乎同时, Zhang 等人^[42]也在辽西-冀东一带相关地层的同样岩床中获得了(1345±12) Ma 的锆石 U-Pb 年龄和(1353±14) Ma 斜锆石 U-Pb 年龄。这进一步表明下马岭组上限年龄不会小于 1320 Ma, 即不小于侵入到下马岭组及其他地质体的这些基性岩床的最小年龄。方便起见, 暂取该上限为~1320 Ma (图 6)。结合此前^[11-13]及当前定年(图 5)可知, 下马岭组应沉积于 1400~1320 Ma 期间, 对应于中元古代延展纪(Ectasian Period^[6])早期, 只是其相应的中国地质年代单位名称还有待今后确定(图 6)。

4.3 关于“芹峪上升”的实质

华北北部下马岭组和铁岭组之间的界面, 此前曾被认为是一个地层和时间缺失相当大的规模巨大的构造不整合, 并被命名为“芹峪上升”^[21]。因其上下地层根据海绿石等获得的 K-Ar 测年数据^[1-5,29]显示

图6 华北北部中元古界-新元古界年代地层划分厘定方案

岩石地层划分主要据文献[1,29], 生物群主要据文献[2,43,44], 国际地层划分据文献[6], 其中文译名及相关中国地层划分参见文献[2,7,44], 文献[2,7,44]中高于庄组被划归长城系, 下马岭组划归青白口系

该不整合大约形成于 1000 Ma, 在 20 世纪 90 年代中期以来的研究中, 曾被一些学者认为这可能是格林维尔造山运动(Grenville Orogeny)在华北克拉通的表現, 从而将其与新元古代罗迪尼亚超大陆的聚合联系起来^[10,45,46].

在当前重新厘定的地层框架下可以确认, 铁岭组和下马岭组之间的平行不整合、即“芹峪上升”(或“芹峪运动”)^[21], 虽然在华北北部区域上分布非常广泛, 但是正如另外一些学者^[47]早先推测的那样, 现在看来, 它很可能“不属造山作用形成的构造不整合”, 而只是一个发生在中元古代盖层纪与延展纪之交(~1400 Ma)、延续时间短暂的区域性抬升和剥蚀(图 6). 显然, 这使得我们一方面不能再将该不整合及“芹峪上升”视为罗迪尼亚超大陆的形成在华北克拉通的响应^[10,45,46], 而在另一方面却促使我们要重新审读这一不整合真正的动力学实质. 深入分析铁岭组-下马岭组及其上下地层序列的大地构造背景, 将有助于进一步认识 1440~1320 Ma 期间华北克拉通周缘可能存在的板块构造运动以及华北与其他古大陆之间关系^[42,48].

5 结论

(i) 通过对最近在河北平泉双洞铁岭组二段下部发现的钾质斑脱岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究, 获得了(1437±21) Ma 的形成年龄. 这一进展标定了铁岭组应属于中元古代盖层纪末期, 华北北部地区的中元古界盖层系(Calymmian System)自下而上由高于庄组、杨庄组、雾迷山组、洪水庄组及铁岭组构成.

(ii) 通过同一剖面下马岭组第三段内钾质斑脱岩的测年研究, 获得了(1372±18) Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄, 与先前在燕山西部获得的下马岭组年龄数据一致. 这表明整个燕山地区及华北北部的下马岭组-铁岭组及其上下地层序列可以进行良好对比.

(iii) 根据上述进展, 可将华北北部铁岭组和下马岭组之间的不整合时限限定为 1400 Ma, 即华北北部中元古代盖层纪和延展纪地层的分界, 可以这个天然的物理界面作为其识别标志. 同时这也表明, 多年来以铁岭组与下马岭组之间平行不整合命名的“芹峪上升”或“芹峪运动”, 只是中元古代 1400 Ma 左右一个延续时间有限的区域抬升.

致谢 本研究始终得到王鸿祯教授的关注, 并得益于与他的多次讨论; 文章付梓之时, 惊悉哲人蒞谢, 令人不胜敬歎, 谨以此文深表敬谢与追思. 陆松年研究员审读了初稿并提出了宝贵意见. 在测试分析各环节中, 先后得到了河北省区域地质矿产调查研究所实验室、中国地质科学院廊坊物化探研究所、中国石油勘探研究院测试中心、天津地质矿产研究所同位素实验室、特别是北京离子探针中心等相关单位和个人的大力支持与帮助. 研究生王巍、马超、李录、赵慧静、秦松等分别参与了野外和测试过程, 在此一并表示衷心感谢.

参考文献

- 1 陈晋镛, 张惠民, 朱士兴, 等. 蓟县震旦亚界的研究. 见: 天津地质矿产研究所, 编. 中国震旦亚界. 天津: 天津科学技术出版社, 1980. 56—114
- 2 陈晋镛, 张鹏远, 高振家, 等. 中国地层典——中元古界. 北京: 地质出版社, 1996. 1—89
- 3 钟富道. 从燕山地区震旦纪地层同位素年龄论中国震旦地质年表. 中国科学, 1977, 2: 151—161
- 4 王曰伦, 陆宗斌, 邢裕盛, 等. 中国上前寒武系的划分和对比. 见: 天津地质矿产研究所, 编. 中国震旦亚界. 天津: 天津科学技术出版社, 1980. 1—30
- 5 李明荣, 王松山, 裘冀. 京津地区铁岭组、景儿峪海绿石 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄. 岩石学报, 1996, 12: 416—423
- 6 Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G. A new geologic time scale, with special reference to Precambrian and Neogene. Episodes, 2004, 27: 83—100
- 7 全国地层委员会. 中国地层指南及中国地层指南说明书(修订版). 北京: 地质出版社, 2001. 1—59
- 8 陈晓雨. 北京西山新元古代下马岭组中上部斑脱岩初步研究. 学士学位论文. 北京: 中国地质大学, 2005. 1—28
- 9 杨红梅. 华北北部新元古界下马岭组黑色岩系沉积环境及构造古地理意义. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学, 2006. 1—62
- 10 苏文博, 李志明, 史晓颖, 等. 华南五峰组-龙马溪组与华北下马岭组的钾质斑脱岩及黑色岩系——两个地史转折期板块构造运动的沉积响应. 地学前缘, 2006, 13: 82—95
- 11 高林志, 张传恒, 史晓颖, 等. 华北青白口系下马岭组凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 地质通报, 2007, 26: 249—255
- 12 Su W B, Zhang S H, Huff W D, et al. SHRIMP U-Pb ages of K-bentonite beds in the Xiamaling Formation: Implications for revised sub-

- division of the Meso- to Neoproterozoic history of the North China Craton. *Gondwana Res*, 2008, 14: 543—553
- 13 高林志, 张传恒, 史晓颖, 等. 华北古陆下马岭组归属中元古界的 SHRIMP 锆石新证据. *科学通报*, 2008, 53: 2617—2623
- 14 Kao C S, Hsiung Y H, Kao P. Preliminary notes on Sinian stratigraphy of North China. *Bull Geol Soc China*, 1934, 13: 243—276
- 15 全国地层委员会. 中国的前寒武系. 北京: 科学出版社, 1962. 1—80
- 16 北京市区域地层表编写组. 华北地区区域地层表——北京市分册. 北京: 地质出版社, 1977. 1—157
- 17 辽宁省区域地层表编写组. 东北地区区域地层表——辽宁省分册. 北京: 地质出版社, 1978. 1—296
- 18 河北省天津市区域地层表编写组. 华北地区区域地层表——河北省天津市分册(一). 北京: 地质出版社, 1979. 1—312
- 19 河北省地质矿产局. 河北省北京市天津市区域地质志. 北京: 地质出版社, 1989. 1—741
- 20 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
- 21 乔秀夫. 青白口系地层学研究. *地质科学*, 1976, 11: 246—265
- 22 刘本培, 全秋琦. 地史学教程. 北京: 地质出版社, 1993. 1—275
- 23 Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. Thermal evolution of two textural types of mafic granulites in the North China Craton: Evidence for both mantle plume and collisional tectonics. *Geol Mag*, 1999, 136: 223—240
- 24 Huff W D, Bergström S M, Kolata D R. Gigantic Ordovician volcanic ash fall in North America and Europe: Biological, tectonomagmatic and event-stratigraphic significance. *Geology*, 1992, 20: 875—878
- 25 Kolata D R, Huff W D, Bergström S M. Ordovician K-bentonites of eastern North America. *Geol Soc Amer Spec Pap*, 1996, 313: 1—84
- 26 Marker P G, Huff W D. What is a K-bentonite? *Geol Soc Amer Abs Progr*, 2005, 37: 143
- 27 冯宝华, 董茹丽. 火-沉黏土岩微量元素地球化学和物源岩浆类型及化学分异机制探讨. *中国区域地质*, 1993, 4: 348—355
- 28 周明忠, 罗泰义, 黄智龙, 等. 钾质斑脱岩的研究进展. *矿物学报*, 2007, 27: 351—359
- 29 杜汝霖, 李培菊. 燕山西段震旦亚界. 见: 天津地质矿产研究所, 编. 中国震旦亚界. 天津: 天津科学技术出版社, 1980. 341—355
- 30 宋彪, 张玉海, 万渝生. 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
- 31 Compston W, Williams I S, Meyer C. U-Pb geochronology of zircons from lunar breccia 73217 using a sensitive high mass-resolution ion microprobe. *J Geophys Res*, 1984, 89: 525—534
- 32 Compston W, Williams I S, Kröner K, et al. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale. *J Geol Soc Lond*, 1992, 149: 171—184
- 33 Williams I S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. *Rev Eco Geol*, 1998, 7: 1—35
- 34 Black L P, Kamo S L, Allen C M, et al. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chem Geol*, 2003, 200: 155—170
- 35 Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, et al. Zircon M257—A homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon. *Geostand Geoanal Res*, 2008, 32: 247—265
- 36 Ludwig K R. SQUID Version 1.02. A User's Manual, 2001
- 37 Ludwig K R. User's manual for Isoplot/Excel Version 3.00, 2003
- 38 陆松年, 李惠民. 蓟县长城系大红峪组火山岩的单颗粒锆石 U-Pb 法准确定年. *中国地质科学院院报*, 1991, 22: 137—145
- 39 李怀坤, 李惠民, 陆松年. 长城系团山子组火山岩颗粒锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地球化学*, 1995, 24: 43—47
- 40 Lu S N, Zhao G C, Wang H C, et al. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton. *Precambrian Res*, 2008, 160: 77—93
- 41 李怀坤, 陆松年, 李惠民, 等. 侵入下马岭组的基性岩床的锆石和斜锆石 U-Pb 精确定年——对华北中元古界地层划分方案的制约. *地质通报*, 2009, 28: 1396—1404
- 42 Zhang S H, Zhao Y, Yang Z Y, et al. The 1.35 Ga diabase sills from the northern North China Craton: Implications for breakup of the Columbia (Nuna) supercontinent. *Earth Planet Sci Lett*, 2009, 288: 588—600
- 43 Du R L, Wang Q Z, Tian L F. Catalogue of algal megafossils from the Proterozoic of China. *Precambrian Res*, 1995, 73: 291—298
- 44 邢裕盛, 高振家, 王自强, 等. 中国地层典-新元古界. 北京: 地质出版社, 1996. 1—117
- 45 乔秀夫, 高林志. 华北中新元古代及早古生代地震灾变事件及与 Rodinia 的关系. *科学通报*, 1999, 44: 1753—1758
- 46 乔秀夫, 高林志, 彭阳. 古郑庐带新元古界——灾变、层序、生物. 北京: 地质出版社, 2001. 1—128
- 47 陆松年, 李怀坤, 陈宏, 等. 新元古时期中国古大陆拼合与罗迪尼亚超大陆的关系. *地学前缘*, 2004, 11: 515—523
- 48 吴怀春, 张世红, 李正祥, 等. 华北地台蓟县系杨庄组古地磁新结果及其大地构造意义. *科学通报*, 2005, 50: 1370—1376