

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

李怀坤, 陆松年, 李惠民, 孙立新, 相振群, 耿建珍, 周红英

LI Huai-kun, LU Song-nian, LI Hui-min, SUN Li-xin,

XIANG Zhen-qun, GENG Jian-zhen, ZHOU Hong-ying

天津地质矿产研究所, 天津 300170

Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China

摘要:华北克拉通马兰峪隆起北侧的下马岭组页岩中广泛发育辉绿岩床。分别利用高灵敏度、高精度的离子探针质谱法和同位素稀释热电离子质谱法,测定了辉绿岩中锆石和斜锆石的 U-Pb 同位素年龄,获得了辉绿岩的侵位年龄 $1320\text{Ma} \pm 6\text{Ma}$ 。该年龄数据的获得制约了下马岭组的上限年龄不老于 1320Ma 。将下马岭组置于 $1400\sim 1350\text{Ma}$ 的区间内。综合已有的测年成果,对华北克拉通燕辽裂陷槽内中元古界的划分方案进行了厘定,提出了一个新的中元古界划分方案。建议方案中长城系包括常州沟组、串岭沟组、团山子组和大红峪组,时限为 $1800\sim 1600\text{Ma}$;蓟县系包括高于庄组、杨庄组、雾迷山组、洪水庄组和铁岭组,时限为 $1600\sim 1400\text{Ma}$;蓟县系之上 $1400\sim 1000\text{Ma}$ 期间的地层为待建系,亟需进一步研究。

关键词:华北克拉通; 1320Ma 基性岩床; U-Pb 同位素定年

中图分类号: P597^{+.3}

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2009)10-1396-09

Li H K, Lu S N, Li H M, Sun L X, Xiang Z Q, Geng J Z, Zhou H Y. Zircon and baddeleyite U-Pb precision dating of basic rock sills intruding Xiamaling Formation, North China. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(10):1396-1404

Abstract: Diabase sills are wide-spread in the shales of the Xiamaling Formation to the north of the Malanyu uplift of the North China Craton. Time-dating minerals zircon and baddeleyite, separated from the diabase, have been dated by SHRIMP and ID-TIMS U-Pb isotopic methods. The emplacement age of the diabase 1320 ± 6 Ma has been obtained, which indicates that the upper boundary age of the Xiamaling Formation must be younger than 1320 Ma. Based on recent dating achievements the Xiamaling Formation can be rather precisely put in the time span of $1400\sim 1350$ Ma. The Mesoproterozoic stratigraphic sequence of the Yanliao aulacogen in the North China Craton is collated and a new subdivision is proposed in this paper. In the new proposal the Changcheng System includes the Changzhougou, Chuanlinggou, Tuanshanzi and Dahongyu formations in ascending order with time span of $1800\sim 1600$ Ma; the Jixian System includes the Gaoyuzhuang, Yangzhuang, Wumishan, Hongshuizhuang and Tieling formations with time span of $1600\sim 1400$ Ma; and the $1400\sim 1000$ Ma part of the Mesoproterozoic strata above the Jixian System is undefined and much further work is needed.

Key words: North China Craton; 1320 Ma basic rock sills; U-Pb dating

收稿日期: 2009-07-29; 修订日期: 2009-08-11

基金项目: 中国地质调查局国土资源大调查项目《中国与亚洲地区关键地层划分与对比研究》(编号: 1212010611802)和国家自然科学基金面上项目(批准号: 40573037)资助

作者简介: 李怀坤(1963-), 男, 研究员, 从事前寒武纪地质学和同位素地质年代学研究。E-mail: tjhuaikun@cgs.gov.cn

华北克拉通经历古元古代末期的吕梁运动后,在克拉通的内部及边缘形成了几个裂谷型盆地,其中以燕辽裂陷槽中的中—新元古代地层厚度较大,研究程度最详。盆地中蓟县一带发育了近 10km 厚的以碳酸盐岩为主的沉积层序^[1],为中国中元古界长城系、蓟县系和新元古界青白口系的标准剖面所在地。

吕梁运动是全球哥伦比亚超大陆汇聚事件在华北克拉通上的具体响应,而华北克拉通 1800Ma 之后发育的巨厚的中—新元古界盖层则是哥伦比亚超大陆裂解及进一步演化过程中的产物。在哥伦比亚超大陆裂解初期的 1800~1600Ma 期间,华北克拉通发育 3 期岩浆作用:1780Ma 前后的熊耳群双峰式火山岩和五台地区的基性岩墙群^[2-5],1720~1680Ma 的 ACMR 组合、环斑花岗岩和团山子组富钾火山岩等^[6-10],1625~1620Ma 的大红峪期富钾火山岩和泰山地区的基性岩墙群^[11-12]。但是,漫长的 1620Ma 以后的中—新元古代期间,华北克拉通上则少有岩浆事件发生。近年来,在下马岭组黑色页岩中发现了约 1370Ma 时期的火山凝灰岩^[13-14],但是其火山机构何在尚不清楚,其确切的地质含义值得深入研究。笔者近期在实施国土资源大调查综合研究项目《中国与亚洲地区关键地层划分与对比研究》的过程中,对华北克拉通北部冀东宽城县境内侵入于下马岭组页岩中的基性岩床进行了系统的锆石和斜锆石 U-Pb 同位素测年,确定其为 1320Ma 的基性岩床,本文报道该研究成果。

1 地质背景和测年样品的岩石学特征

研究区位于华北克拉通北缘燕山裂陷槽中段,该区自古元古代末的吕梁运动(约 1800Ma)导致结晶基底形成以后,中元古代至晚古生代期间未发生重大的构造变形事件,沉积了上万米厚的沉积盖层,除普遍缺失新元古界南华系、震旦系、古生界上奥陶统至下石炭统外,中—新元古界、古生界、中生界出露广泛,厚度巨大。

其中中—新元古代发育长城系、蓟县系、青白口系,岩石类型主要为河流相碎屑岩和滨海—浅海相碎屑岩、粘土岩、碳酸盐岩沉积,夹少量碱性玄武岩和粗安岩。叠层石、微体及微古植物化石十分丰富,厚度 6000~10000m。

测年样品采自河北省宽城县化皮溜子乡黄家

庄,位于北京东偏北 190km 处(图 1)。本区出露中元古代蓟县系雾迷山组白云岩、叠层石白云岩,洪水庄组页岩,铁岭组白云岩和灰岩;青白口系下马岭组页岩、长龙山组含海绿石砂岩和景儿峪组泥灰岩、灰岩;寒武系昌平组、馒头组和炒米店组灰岩、白云质灰岩、泥质白云岩和页岩;下奥陶统里组灰岩、白云质灰岩和页岩;侏罗系九龙山组红色细碎屑岩、髫髻山组中性火山岩及其火山碎屑岩;白垩系张家口组中酸性火山岩及其火山碎屑岩等(图 1)。

在化皮溜子乡黄家庄附近的下马岭组碎屑岩地层中见 3 个基本顺层侵入的基性岩床(图 2),自下而上 3 个岩床的厚度分别为 110m、22m 和 62m,辉绿岩遭受强烈风化破碎,球形风化特征明显。以下为黄家庄附近下马岭组实测剖面描述。

上覆地层:长龙山组灰白色—灰紫色厚层含砾海绿石长石石英粗砂岩与灰白色细粒长石石英岩组成韵律沉积,发育板状—楔状交错层理、鱼骨状交错层理等

—— 整合 ——

下马岭组	414.7m
13.灰绿色—黑色叶片状页岩	52.1m
12.黄绿色薄板层状泥质粉砂岩与灰黑色页岩互层	17.0m
11.黑绿色辉绿岩床	62.0m
10.灰黑色薄层钙质粉砂质页岩	35.3m
9.黑绿色辉绿岩床	22.0m
8.黄绿色薄板状叶片状含海绿石粉砂质页岩	28.2m
7.灰黑色叶片状含锰页岩夹粉砂岩	5.6m
6.黑绿色辉绿岩床	110.0m
5.灰色叶片状粉砂质页岩,发育水平纹层	21.1m
4.灰绿色—灰黑色厚层泥砂质泥晶白云岩	3.2m
3.黄绿色板层状钙质粉砂质页岩夹串珠状泥晶白云岩透镜体	4.8 m
2.灰色、深灰色中厚层中粗粒含赤铁矿石英砂岩	43.3m
1.灰色、浅紫红色厚层—中厚层含砾粗砂岩与灰黑色薄层细砂岩、泥质粉砂岩互层。含砾粗砂岩底部具有冲刷面、透镜状砾岩	10.1m

----- 平行不整合 -----

下伏地层:铁岭组二段灰紫色薄层泥灰岩与紫红色页岩互层

测年样品采自侵入下马岭组下部的第一个基性岩床,岩性为辉绿岩。岩石具辉绿结构、局部显微文象结构,块状构造。岩石主要由斜长石、含钛辉石和少量石英、钾长石组成。斜长石呈半自形长板状,具有较强的绢云母化、帘石化,有的边部见环带,板长 0.55~3.25mm。含钛辉石呈浅紫褐色他形—半自形柱粒状,充填于斜长石格架空隙间,有的被黑云母、

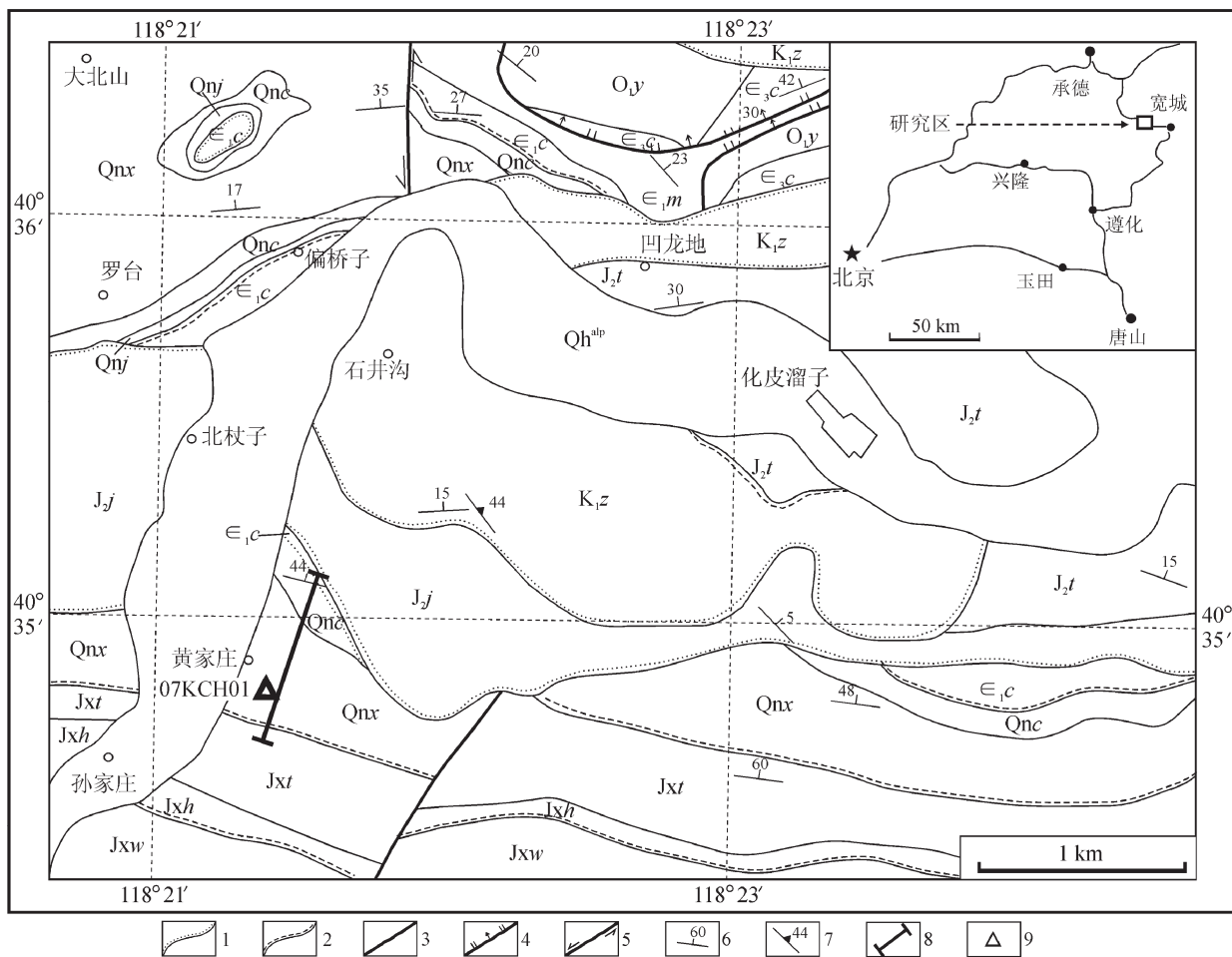


图1 河北省宽城县化皮溜子地区地质略图

Fig. 1 Geological sketch map of the Huapiuzi area in Kuancheng County, Hebei Province

Jxw—蓟县系雾迷山组; Jxh—蓟县系洪庄组; Jxt—蓟县系铁岭组; Qnx—青白口系下马岭组; Qnc—青白口系长龙山组; Qnj—青白口系景儿峪组; ϵ_{1c} —寒武系昌平组; ϵ_{1m} —寒武系馒头组; ϵ_{1x} —寒武系炒米店组; O_{1y}—奥陶系冶里组; J_{1j}—侏罗系九龙山组; J_{2t}—侏罗系髫髻山组; K_{1z}—白垩系张家口组; Qh^{ap}—全新世冲积物; 1—角度不整合面; 2—平行不整合面; 3—性质不明断层; 4—正断层; 5—平移断层; 6—地层产状; 7—流面产状; 8—剖面线; 9—取样点

绿泥石交代。石英呈他形粒状, 充填于上述矿物空隙间。钾长石常与石英构成显微文象交生体。各组成矿物含量: 斜长石 45%~50%, 含钛辉石 45%左右, 石英小于 5%, 钾长石少量; 副矿物有钛铁矿 (5%左右) 和少量磷灰石、黄铁矿。电子探针成分分析 (表 1) 表明, 该辉绿岩含有斜方辉石和单斜辉石, 它们的 TiO₂ 含量较高 (0.47%~1.05%); 斜长石为拉长石。从该辉绿岩中分选出了锆石和斜锆石 2 种适合进行 U-Pb 测年的矿物。锆石为细长柱状晶体, 晶体短轴 40~50 μm , 长轴/短轴比值在 2 以上。由于富含 U 和 Th 两种放射性元素, 锆石晶格发生严重破坏, 显微

镜下可见锆石透明度很差, 阴极荧光图像显示发光性很弱, 图像很暗 (图 3)。斜锆石为紫黑色半透明片状或柱状细小晶体, 晶体短轴 20~50 μm , 长轴方向可达 100 μm (图 3)。

2 实验方法和测年结果

野外采集新鲜的辉绿岩样品约 30kg, 首先用水清洗样品表面并晾干, 粉碎至 80 目, 用水粗淘、强磁分选、电磁分选和用酒精细淘之后, 在实体显微镜下手工挑选出锆石和斜锆石。锆石和斜锆石分选工作在河北省廊坊区域地质调查所实验室完成。

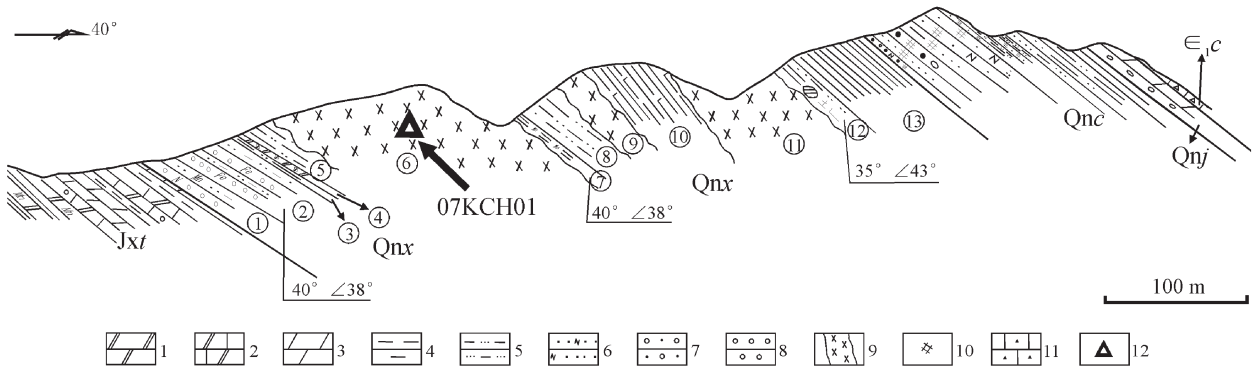


图 2 河北省宽城县化皮溜子乡黄家庄铁岭组-昌平组剖面图

Fig. 2 Tieling Formation to Changping Formation profile at Huangjiazhuang Village of Huapiliuzi Town, Kuancheng County, Hebei Province

1—白云岩;2—白云质灰岩;3—泥灰岩;4—页岩;5—泥质粉砂岩;6—长石石英砂岩;7—含砾粗砂岩;8—细砾岩;9—辉绿岩床;10—海绿石;11—角砾状灰岩;12—取样点;ε₁c—昌平组;Qnj—景儿峪组;Qnc—长龙山组;Qnx—下马岭组;Jxt—铁岭组;圈码为剖面分层号,岩性说明见正文

表 1 辉绿岩中主要矿物的电子探针成分分析结果

Table 1 EPMA analytical results of the chemical compositions of the main component minerals of the diabase

矿物	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	MnO	FeO	NiO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	Total
Opx1	51.34	0.53	0.85	0.02	1.35	17.46	4.70	0.56	23.57	0.01	0.12	0.01		100.53
Opx2	50.62	0.54	0.76	0.01	1.31	15.57	4.85	0.58	25.90	0.02	0.11	0.00		100.28
Opx3	50.42	0.47	0.86	0.00	2.91	18.25	4.54	0.51	21.43	0.00	0.09	0.00		99.49
Cpx1	50.61	0.83	2.32	0.17	3.42	14.85	18.54	0.26	9.07	0.00	0.35	0.02		100.45
Cpx2	48.65	1.05	2.72	0.15	4.89	14.36	18.79	0.20	7.84	0.00	0.30	0.01		98.96
Cpx3	49.47	0.82	1.82	0.21	4.28	13.98	18.17	0.31	10.19	0.00	0.24	0.03		99.53
Cpx4	51.32	0.79	2.19	0.15	2.05	14.91	18.76	0.30	9.92	0.00	0.27	0.00		100.67
Pl1	52.06	0.13	29.82	0.01		0.12	12.90	0.05	0.83	0.00	4.34	0.27		100.51
Pl2	55.06	0.08	28.53	0.02		0.05	10.71	0.02	0.66	0.00	5.78	0.34		101.23
Pl3	52.02	0.15	29.38	0.00		0.08	11.91	0.03	0.68	0.02	4.84	0.26		99.37
Pl4	52.42	0.09	29.44	0.01		0.08	12.05	0.02	0.65	0.02	4.88	0.26		99.92
Ksp1	55.81	0.11	28.92	0.02		0.10	1.30	0.06	0.85	0.03	5.49	5.48		98.17
Ksp2	57.46	0.13	30.29	0.00		0.16	1.23	0.08	1.23	0.00	4.32	5.26		100.14
Ksp3	52.33	0.09	34.00	0.01		0.19	0.45	0.04	1.01	0.00	2.15	8.78		99.05
Ilm1	0.06	51.22	0.06	0.03	3.60	1.01	0.16	0.44	43.87	0.04	0.09	0.02		100.60
Ilm2	0.32	50.71	0.06	0.07	3.77	1.05	0.16	0.44	43.36	0.04	0.05	0.02		100.05
Ilm3	0.05	50.72	0.02	0.02	4.58	0.26	0.04	0.40	44.76	0.02	0.05	0.03		100.96
Chlo1	31.62	0.02	11.74	0.01		10.42	0.65	0.08	35.58	0.08	0.05	0.04	11.15	101.43
Chlo2	30.39	0.00	11.67	0.00		10.03	0.56	0.08	35.59	0.07	0.01	0.05	10.87	99.33
Chlo3	31.07	0.05	12.12	0.00		10.61	0.75	0.04	35.45	0.12	0.08	0.10	11.15	101.55
Chlo4	31.35	0.02	12.04	0.00		10.43	0.80	0.08	35.45	0.09	0.05	0.10	11.16	101.55

注: Opx—斜方辉石, Cpx—单斜辉石, Pl—斜长石, Ksp—钾长石, Ilm—钛铁矿, Chlo—绿泥石; 氧化物含量为%

锆石测年采用高灵敏度高分辨率的离子探针质谱(SHRIMP)法,斜锆石测年采用同位素稀释热电离质谱(ID-TIMS)法。

锆石的 SHRIMP 法 U-Pb 测年工作首先需要制作锆石环氧树脂靶。在实体显微镜下挑选裂隙相对少、表面尽量洁净、透明度相对较高的锆石约 100 粒制作环氧树脂样品靶,经过打磨和抛光后,拍摄锆石反射光、透射光和阴极荧光(CL)图像。锆石制靶和阴极荧光图像照相在北京离子探针中心完成。锆石微区原位 U-Th-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 Compston 等^[15-16]、Williams^[17]和宋彪等^[18]的文章。测试过程中采用标准锆石 TEMORA 1^[19](参考年龄为 417Ma)进行同位素分馏校正,使用标准锆石 SL13(参考年龄为 572Ma,U 含量为 238×10^{-6})标定所测锆石的 U、Th 和 Pb 的含量^[20]。应用 SQUID 和 Isoplot 程序进行数据处理^[21-22],采用锆石样品中实际测得的 ^{204}Pb 进行普通 Pb 校正。

斜锆石的 ID-TIMS 测年采用与 Krogh^[23]类似的方法,其要点如下:用化学方法(采用硝酸和氢氟酸混合溶剂)将斜锆石置于高压溶样罐中加热至 205℃进行溶解,加入 ^{208}Pb - ^{235}U 混合稀释剂。U 和 Pb 经过离子交换树脂分离和纯化后,在 VG 354 型质谱仪上进行 U 和 Pb 同位素测定,最后计算得到斜锆石的 U-Pb 同位素年龄。斜锆石的 U-Pb 同位素测年工作在天津地质矿产研究所同位素实验室完成。

锆石 U-Pb 同位素测定结果见表 2。从测定结果可以看出,该样品锆石的 U-Pb 同位素体系发生了严重的放射性成因 Pb 丢失,表现为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄严重不谐和,1~4 号点的谐和度分别为 12%、33%、31%和 40%。数据投影点在 U-Pb 谐和图中位于谐和线下方且靠近一致线与不一致线的下交点(图 4)。该锆石样品放射性成因 Pb 严重丢失的原因是其中含有异常高的 U 和 Th(从测定的 4 粒锆石的数据看,U 和 Th 的含量分别为 999~4433 $\mu\text{g}/\text{g}$ 、2438~14931 $\mu\text{g}/\text{g}$),U 和 Th 的放射性衰变导

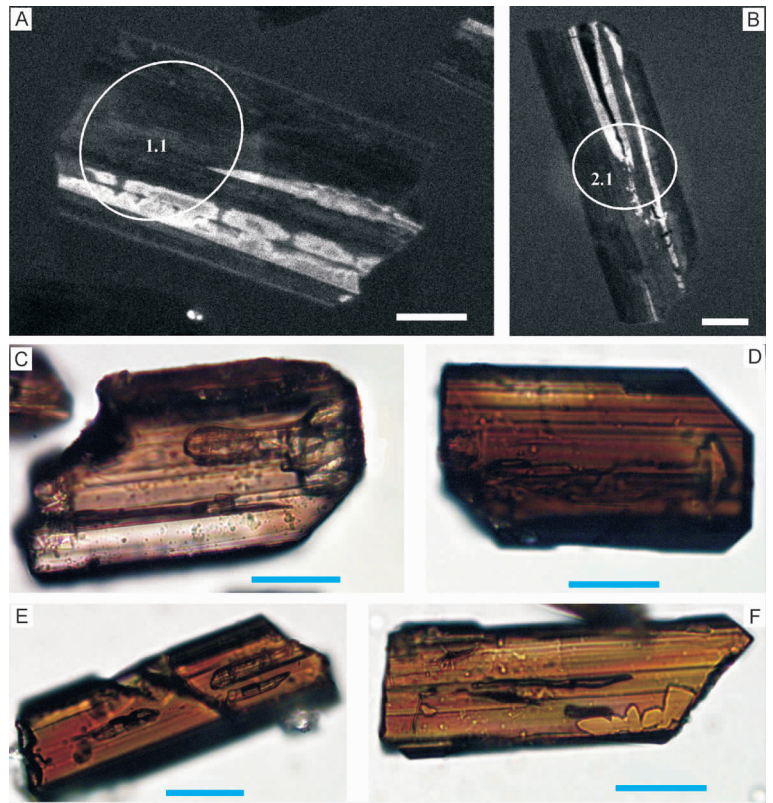


图 3 辉绿岩锆石阴极发光图像(A、B)和斜锆石显微照片(C—F)
(作为比例尺的线段长度为 20 μm)

Fig. 3 CL images of zircon (A and B) and photomicrographs of baddeleyite (C to F) from the studied diabase

致锆石的晶格发生严重损伤,使其容易发生放射性成因 Pb 丢失。该锆石样品在显微镜下透明度很差,阴极荧光图像很暗,就是锆石中 U、Th 含量高和 U、Th 放射性衰变导致锆石晶格严重损伤的直观表现。由于该锆石样品发生了严重的 Pb 丢失, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄严重不谐和,难以获得理想的测年结果,因此仅做了 4 个数据点的测定。由全部 4 个测点构成的不一致线的上交点年龄为 $1251\text{Ma} \pm 400\text{Ma}$,而由其中 3 个测点构成的不一致线的上交点年龄为 $1247\text{Ma} \pm 62\text{Ma}$,尽管误差偏大,但还是具有一定的参考价值,这为后来的斜锆石测年结果所证实(见下文)。

斜锆石 U-Pb 同位素年龄测定结果见表 3 和图 4。共测定了 4 个斜锆石 U-Pb 同位素数据点,由于斜锆石中含有适中的 U 含量(231~591 $\mu\text{g}/\text{g}$),比同一样品中选出的锆石的 U 含量低一个数量级,而 Th 的含量更低(表 3 中给出了斜锆石中 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$

表 2 辉绿岩中锆石的 U-Pb 同位素分析结果
Table 2 U-Pb isotopic data of the zircon from the diabase

点号	$^{206}\text{Pb}_c$ /%	$^{206}\text{Pb}^*$ $w_B/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	U $w_B/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	Th $w_B/\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	表面年龄 /Ma	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 谐和度/%	测值	相对误差/±%	同位素原子比 $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	测值	相对误差/±%	比率 $^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}^*$	误差 相关	
1	3.19	55.6	4433	14931	3.48	90.4±1.4	784±209	12	0.0653	10	0.13	10	0.0141	1.5	0.153
2	0.80	61.5	1419	4789	3.49	315.1±1.8	961±51	33	0.0711	2.5	0.49	2.6	0.0501	0.6	0.229
3	1.38	66.3	1335	4656	3.60	357.2±2.1	1151±68	31	0.0782	3.4	0.61	3.5	0.0570	0.6	0.174
4	1.50	68.1	999	2438	2.52	485.0±2.9	1211±68	40	0.0806	3.5	0.87	3.5	0.0781	0.6	0.175

注:误差为 1σ ; Pb_c 和 Pb^* 分别指示普通铅和放射成因铅;所有同位素比率已对测得的 ^{204}Pb 进行了校正;表面年龄
谐和度的计算公式为: $(T_{306/238}/T_{207/206}) \times 100$; 表中左边第 1 列的点号与图 4 中的点号相互对应

表 3 辉绿岩中斜锆石的 U-Pb 同位素分析结果
Table 3 U-Pb isotopic data of the baddeleyite from the diabase

点号	样品 斜锆石的特征	情况	重量 / μg	U / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	浓度 Pb / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	样品中普通铅 含量/ng	同位素原子比率			表面年龄 /Ma				
							$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$
5	紫黑色半透明片状小晶体		5	311	102	0.085	142	0.04894	0.2275 (15)	2.684 (191)	0.0856 (57)	1321 (9)	1324 (94)	1328 (130)
6	紫黑色半透明片状小晶体		10	231	113	0.350	67	0.03896	0.2263 (17)	2.666 (156)	0.0854 (46)	1315 (10)	1319 (77)	1325 (100)
7	紫黑色半透明短柱状小晶体		10	553	154	0.180	235	0.03014	0.2265 (24)	2.667 (59)	0.0854 (16)	1316 (14)	1319 (29)	1325 (35)
8	紫黑色半透明短柱状小晶体		10	591	324	0.950	59	0.05896	0.2292 (25)	2.692 (215)	0.0852 (63)	1330 (15)	1326 (106)	1320 (140)

5-8 号点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值: 1320 Ma ± 6 Ma

注: $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 已对实验空白 ($\text{Pb}=0.050\text{ng}$, $\text{U}=0.002\text{ng}$) 及稀释剂作了校正, 其他比率中的铅同位素均为放射成因同位素; 括号内的数字为 2σ 绝对误差, 例如: 0.2275 (15) 表示 0.2275±0.0015(2σ); 表中左边第 1 列的点号与图 4 中的点号相互对应

的比值,它的3倍基本是Th/U比值,因此该斜锆石样品的Th/U比值为0.1左右,其Th的含量较同一样品中选出的锆石的Th含量低2~3个数量级),因此U和Th的放射性衰变作用对斜锆石晶格的破坏相对轻微,斜锆石很好地保持了其U-Pb同位素体系的封闭性,表现为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄基本一致,数据点落在谐和线上。所测定的4个数据点的年龄在误差范围内是一致的,它们的谐和年龄($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值)为 $1320\text{Ma}\pm 6\text{Ma}$,而由全部锆石和斜锆石U-Pb同位素测定数据点拟合的不一致线与谐和线的上交点年龄为 $1323\text{Ma}\pm 21\text{Ma}$,这与4个斜锆石数据点的谐和年龄在误差范围内完全一致。因此,笔者选择 $1320\text{Ma}\pm 6\text{Ma}$ 作为所研究的辉绿岩的侵位年龄。

3 讨论和结论

3.1 下马岭组年代地层位置的厘定

长期以来,华北蓟县中—新元古界剖面一直作为中国中—新元古界的标准剖面,认为该剖面中—新元古界为基本连续的1800~800Ma的地层系统,下马岭组被置于新元古界青白口系的第一个组,其时代大致为1000~900Ma。近年来对下马岭组时代的研究取得了突破性进展,在北京西山和河北怀来赵家山剖面下马岭组第三段黑色页岩中发现了凝灰岩层,相继获得了精确可靠的1380~1370Ma锆石U-Pb同位素年龄^[13-14],因此必须将下马岭组下拉至中元古界的中部。而本文报道的侵入于下马岭组的辉绿岩床的形成年龄 $1320\text{Ma}\pm 6\text{Ma}$,对下马岭组的上限年龄提供了有效的制约。新近中国地质大学(北京)苏文博博士又获得了铁岭组中部火山凝灰岩的锆石U-Pb年龄约1440Ma(个人通讯)。根据上述年代学研究新资料,下马岭组的下限年龄接近1400Ma,而上限时代应老于 $1320\text{Ma}\pm 6\text{Ma}$,笔者倾向于将下马岭组的时代置于1400~1350Ma之间(表4)。

燕山裂陷槽下马岭组中的1320Ma时期的基性岩床广泛发育于马兰峪隆起以北地区,东部的平泉松树台地区见有3层辉绿岩床,往西在宽城化皮溜子乡黄家庄、兴隆北水泉乡扁担沟分别见有3层辉

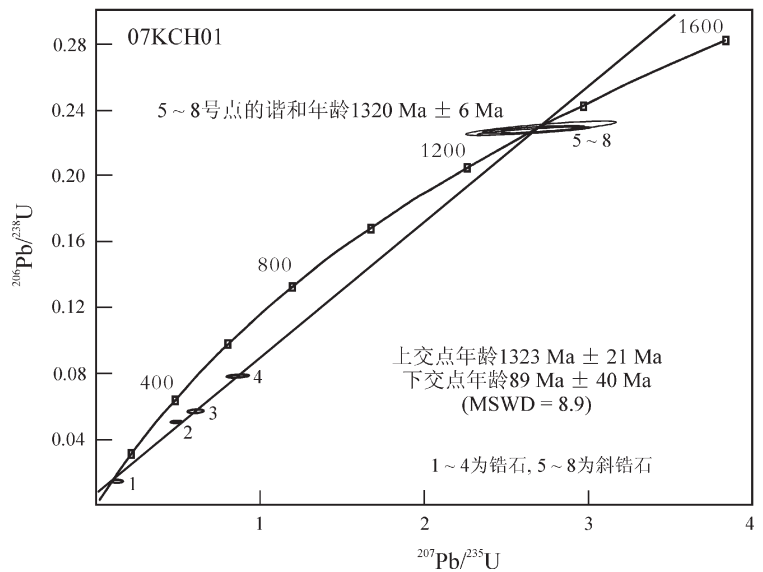


图4 辉绿岩中锆石和斜锆石的U-Pb同位素年龄谐和图
Fig. 4 U-Pb concordia diagram of the zircon and baddeleyite from the diabase

绿岩床,再往西至北京西山青白口地区见2~3层、怀来赵家山地区见3~4层辉绿岩床,所有上述地区的下马岭组中的基性岩床均基本顺层产出。1320Ma时期的基性岩床自东往西厚度变大,在赵家山地区被后期(可能是印支期)碱性(煌斑岩质)岩脉切割。岩床的发育是大陆地壳的伸展标志之一,燕山裂陷槽中如此大范围分布的辉绿岩岩床一定是华北克拉通演化过程中的关键地质事件之一,其确切的地质含义值得进一步深入研究,应引起高度重视!

3.2 中元古界地层划分建议

依据迄今为止已经获得的比较可靠的有关燕山裂陷槽内中元古界地层的锆石U-Pb同位素年龄资料^[6,11,13-14,24],笔者建议对燕山裂陷槽中元古界年代地层系统进行重新划分(表4)。国际地层表中的中元古界系指1600Ma至1000Ma之间的地层系统,包括盖层系(1600~1400Ma)、延展系(1400~1200Ma)和狭带系(1200~1000Ma),而中国区域年代地层表^[26]中则将中元古界的底界下延至1800Ma,因此包括了国际地层表中古元古界的固结系(180~1600Ma)。2001年中国地层委员会根据第三届全国地层大会决议和多年来的传统习惯,以中国北方天津蓟县城北中元古界剖面为标准,将中元古界划分为长城系和蓟县系,时限分别为1800~1400Ma和1400~1000Ma。标

准剖面中的长城系自下而上包括常州沟组、串岭沟组、团山子组、大红峪组和高于庄组;蓟县系则包括杨庄组、雾迷山组、洪水庄组和铁岭组。蓟县系之上为新元古界青白口系,青白口系底部地层下马岭组平行不整合覆于蓟县系之上。

由于上述年代学研究的进展,作为燕山裂陷槽中一新元古界代表的蓟县剖面原划中元古界的时代归属产生了新问题:第一,从长城系常州沟组至蓟县系铁岭组 9 个组的时限被限制在 1800~1400Ma 之间的 400Ma 时段内,而不是原先认为的从 1800~1000Ma 之间的 800Ma 的连续沉积地层;第二,下马岭组不应划为新元古界,而属中元古界;第三,按传统认识,下马岭组之上原属青白口系的长龙山组和景儿峪组的沉积时限在 900~800Ma 之间,则蓟县剖面缺失 1350~900Ma 之间长达 450Ma 的地层系统(当然,迄今长龙山组和景儿峪组的地层时限还缺乏准确可靠的同位素年龄依据)。因而,根据蓟县剖面所确定的中国中元古界年代地层单位不得不重新划分和界定。本文建议新的划分方案中(表 4),长城系包括常州沟组、串岭沟组、团山子组和大红峪组,时限为 1800~1600Ma;蓟县系包括高于庄组、杨庄组、雾迷山组、洪水庄组和铁岭组,时限为 1600~1400Ma;蓟县系之上 1400~1000Ma 时段为待建系(可能再分为 2 个系级年代地层单位),下马岭组置于该待建系的底部 1400~1350Ma 时段内。随着研究工作的不断深入,待建系将予以正式界定和命名。

3.3 U-Pb 同位素测年方法学启示

U-Pb 同位素测年的最常用测年矿物是锆石,但是近年来 U-Pb 同位素测年对象被不断拓展,很多高铀矿物被选作测年对象,例如斜锆石、钙钛锆石、金红石、榍石、独居石、磷灰石、锡石等。斜锆石作为基性、超基性岩浆中结晶的高铀矿物,对于研究基性、超基性岩浆事件的年龄具有独特的作用,国内外已有很多成功的研究实例^[27-30]。本文研究对象辉绿岩床中的锆石由于含有超高的 U 和 Th,二者的放射性衰变导致锆石晶格发生严重损伤而发生强烈的放射性成因 Pb 丢失,因而使得对锆石的 U-Pb 同位素测定难以获得理想的年龄数据;而该辉绿岩中

表 4 燕辽裂陷槽内中元古界划分新建议

Table 4 A new proposal of the subdivision of the Mesoproterozoic sequence in the Yanliao aulacogen of the North China Craton

国际地层表 ^[25]		1000Ma	中国地层表 ^[26]		1000Ma	本文建议方案	
中元古界	狭带系	1000Ma	蓟县系	铁岭组	待建系	—1350Ma?— 下马岭组	
	延展系	1200Ma		洪水庄组 雾迷山组 杨庄组			
		1400Ma	盖层系	高于庄组 大红峪组			
古元古界	固结系	1600Ma	长城系	团山子组 串岭沟组 常州沟组	1600Ma	蓟县系	铁岭组 洪水庄组 雾迷山组 杨庄组 高于庄组
		1800Ma		1800Ma	长城系	大红峪组 团山子组 串岭沟组 常州沟组	

的斜锆石具有适当的 U 含量和极低的 Th 含量,斜锆石很好地保持了其 U-Pb 同位素体系的封闭性,测得了准确可靠的辉绿岩浆事件的发生时代。因此,本项研究的另一个重要启示是,对于基性、超基性岩应该尽量利用斜锆石的 U-Pb 年龄测定来解决其时代问题。

致谢:刘敦一研究员、宋彪研究员、张玉海高级工程师、陶华、周慧女士等对锆石 SHRIMP 测年工作给予了大力支持,毛骞博士和马玉光工程师帮助完成了矿物电子探针成分分析,许雅雯女士帮助鉴定了岩石薄片;在工作过程中,曾与王泽九研究员、耿元生研究员、尹崇玉研究员、朱士兴研究员和王自强教授等就中一新元古界的划分进行过讨论。在此一并致以诚挚的谢意。

参考文献

- [1]陈晋德,张惠民,朱士兴,等. 蓟县震旦亚界的研究[M]//中国震旦亚界. 天津:天津科学技术出版社,1980:56-114.
- [2]Lu S N, Yang C L, Li H K, et al. A group of rifting events in the terminal Paleoproterozoic in the North China Craton[J]. Gondwana Research, 2002, 5: 123-131.
- [3]赵太平,翟明国,夏斌,等. 熊耳群火山岩锆石 SHRIMP 年代学研

- 究:对华北克拉通盖层发育初始时间的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(22): 2342-2349.
- [4] Peng P, Zhai M G, Guo J H, et al. Nature of mantle source contributions and crystal differentiation in the petrogenesis of the 1.78 Ga mafic dikes in the central North China craton[J]. *Gondwana Research*, 2007, 12: 29-46.
- [5] Peng P, Zhai M G, Ernst R, et al. A 1.78 Ga large igneous province in the North China craton: The Xiong'er volcanic province and the North China dike swarm[J]. *Lithos*, 2008, 101(3/4): 260-280.
- [6] 李怀坤, 李惠民, 陆松年. 长城系团山子组火山岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地球化学, 1995, 24: 43-48.
- [7] 郁建华, 付会芹, I. 哈巴拉, 等. 华北克拉通北部 1.70Ga 非造山环斑花岗岩岩套[J]. 华北地质矿产杂志, 1996, 11(3): 341-350.
- [8] 赵太平, 陈福坤, 翟明国, 等. 河北大庙斜长岩杂岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 685-690.
- [9] 杨进辉, 吴福元, 柳小明, 等. 北京密云环斑花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及其地质意义[J]. 岩石学报, 2005, 21(6): 1633-1644.
- [10] 高维, 张传恒, 高林志, 等. 北京密云环斑花岗岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地质通报, 2008, 27(6): 793-798.
- [11] 陆松年, 李惠民. 蓟县长城系大红峪组火山岩锆石 U-Pb 准确定年[J]. 中国地质科学院院报, 1991, 22: 139-143.
- [12] 陆松年, 陈志宏, 相振群. 泰山世界地质公园古老侵入岩系年代格架[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- [13] 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[J]. 地质通报, 2007, 26(3): 249-255.
- [14] Su W B, Zhang S H, Huff Warren D, et al. SHRIMP U-Pb ages of K-bentonite beds in the Xiamaling Formation: Implications for revised subdivision of the Meso- to Neoproterozoic history of the North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 2008, 14: 543-553.
- [15] 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]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89: B525-B534.
- [16] Compston W, Williams I S, Kriskvink J L, et al. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale[J]. *J. Geol. Soc. Lond.*, 1992, 149: 171-184.
- [17] Williams I S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe[C]// McKibben M A, Shanks III W C, Ridley W I. Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing process. *Reviews in Economic Geology*, 1998, 7: 1-35.
- [18] 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[J]. 地质论评, 2002, 48(增刊): 26-30.
- [19] Black L P, Kamo S L, Allen C M, et al. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology[J]. *Chem. Geol.*, 2003, 200: 155-170.
- [20] Black L P, Kamo S L, Williams I S, et al. The application of SHRIMP to Phanerozoic geochronology: a critical appraisal of four zircon standards[J]. *Chemical Geology*, 2003, 200: 171-188.
- [21] Ludwig K R. SQUID ver. 1.02. A User's Manual[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2001, (2): 1-19.
- [22] Ludwig K R. User's manual for Isoplot/Ex, version 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, (4): 1-70.
- [23] Krogh T E. A low contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determinations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1973, 37: 485-494.
- [24] Lu S N, Zhao G C, Wang H C, et al. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 2008, 160: 77-93.
- [25] Plumb K A. New Precambrian time scale[J]. *Episodes*, 1991, 14(2): 139-140.
- [26] 全国地层委员会. 中国区域年代地层(地质年代)表说明书[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [27] Davidson A, Ven Breemen O. Baddeleyite-zircon relationship in coronitic metagabbro, Grenville Province, Ontario: implications for geochronology[J]. *Contrib. Mineral. Petro.*, 1998, 100: 291-299.
- [28] Kamo S L, Gower C F, Krogh T E. Birthdate for the Iapetus Ocean? A precise U-Pb zircon and baddeleyite age for the Long dikes, Southeast Labrador[J]. *Geology*, 1989, 17: 602-605.
- [29] 李惠民, 陈志宏, 相振群, 等. 秦岭造山带商南-西峡地区富水杂岩的变辉长岩中斜锆石与锆石 U-Pb 同位素年龄的差异[J]. 地质通报, 2006, 25(6): 653-659.
- [30] 李惠民, 李怀坤, 陈志宏, 等. 基性岩斜锆石 U-Pb 同位素定年 3 种方法之比较[J]. 地质通报, 2007, 26(2): 128-135.