

五台地区滹沱群底界时代: 玄武安山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年

杜利林^{①②}, 杨崇辉^①, 郭敬辉^②, 王伟^{①③}, 任留东^①, 万渝生^{①③}, 耿元生^①

① 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

② 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

③ 北京离子探针中心, 北京 100037

E-mail: dulilin7310@cags.ac.cn

2009-05-19 收稿, 2009-08-10 接受

中国地质科学院地质研究所基本科研业务经费项目(编号: J0721, J0907)、全国地层委员会项目(编号: 1212010511702-01)和中国地质调查局项目(编号: 1212010611801)资助

摘要 五台地区古元古界滹沱群底部砾岩层中发育浅变质的玄武岩-玄武安山岩。详细的地质调查确认其与上下沉积岩层为整合关系。对该岩层中玄武安山岩的锆石进行了 SHRIMP U-Pb 年龄测定, 主要年龄结果分为两组。较老的一组锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄范围为 2433~2558 Ma, 与五台-阜平地区地壳形成时代一致, 推测为岩浆穿过地壳时捕获或火山岩沉积时陆源碎屑岩带入的锆石; 较年轻的一组锆石 13 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄非常集中, 其加权平均值为 (2140 ± 14) Ma。该组锆石 U 含量极低(多数 $< 50 \times 10^{-6}$), Th/U 比值高(0.49~1.11), 为基性岩浆成因锆石。因此, (2140 ± 14) Ma 就是玄武安山岩的岩浆锆石结晶年龄, 代表滹沱群的底界时代。这一结果进一步证实滹沱群形成于早元古代中期, 是不同于五台运动的另一次地质事件的记录, 很可能与华北中部 2.2~2.1 Ga 的裂谷活动有关。

关键词

滹沱群
玄武安山岩
SHRIMP 锆石
U-Pb 年龄
早元古代

华北克拉通中部的五台地区为中国早前寒武纪地质研究的经典地区之一, 滹沱群是该区早前寒武纪地层系列中最上部、变质最浅、层序最清楚的地层单位, 是中国古元古界典型地层单位^[1]。确定滹沱群的形成时代, 对中国古元古界典型地层的全球对比具有非常重要的科学意义, 同时有助于准确刻画华北克拉通早前寒武纪地质演化。

但是, 长期以来, 滹沱群的形成时代一直未能精确测定。伍家善等人^[2]最早在豆村亚群青石村组顶部玄武岩中得到同位素稀释法单颗粒锆石 U-Pb 年龄 $(2366+103/-94)$ Ma, 为滹沱群形成于早元古代提供了年龄依据。后来, 王汝锋^[3]也曾报道青石村组和河

边村组单颗粒锆石 U-Pb 年龄分别为 (2450 ± 10) 和 (2400 ± 20) Ma。Wilde 等人^[4]从该区英质凝灰岩中获得 2 个 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄, 分别为 (2180 ± 5) 和 (2087 ± 9) Ma, 并认为 (2087 ± 9) Ma 代表滹沱群火山岩的时代。最近, 伍家善等人^[5]从滹沱群底部四集庄组玄武岩中获得 (2517 ± 13) 和 (2162 ± 40) Ma 两组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄, 并认为滹沱群形成于早元古代早期 ~ 2.5 Ga, 而 2162 Ma 为变质作用时代。显然, 滹沱群形成时代问题仍未得到很好的解决。

本文通过详细野外调查, 确认滹沱群豆村亚群底部四集庄组发育浅变质玄武岩-玄武安山岩层, 其上下都是与之整合的砾(砂)岩层, 因此其在滹沱群中

英文版见: Du L L, Yang C H, Guo J H, et al. The age of the base of the Paleoproterozoic Hutuo Group in the Wutai Mountains area, North China Craton: SHRIMP zircon U-Pb dating of basaltic andesite. Chinese Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-009-0611-7

的层位清楚, 火山岩的形成年龄就是溇沱群底界的时代. 基于这种认识, 本文选取该层位中玄武安山岩, 进行 SHRIMP U-Pb 锆石年龄测试, 并结合锆石 CL 图像, 明确不同时代锆石年龄地质意义, 确定溇沱群的底界时代.

1 地质背景

溇沱群主要分布于五台山南坡台怀-土集(四集庄)一线以南, 石咀-定襄一线以北, 东起台山河上游, 西至原平奇村一带, 总面积约 1500 km². 在五台山北坡代县滩上到原平白石一带约有 200 km², 繁峙县中台等地也有零星分布^[1](图 1). 溇沱群明显不整合于新太古界五台群之上^[7], 其底部发育四集庄组厚层砾岩, 物源是五台群地层和五台地区新太古代花岗岩^[5,8,9]. 溇沱群以陆源碎屑岩和碳酸盐岩沉积为主, 自下而上划分为豆村亚群、东冶亚群和郭家寨亚群. 其中豆村、东冶亚群为连续沉积, 由碎屑岩为主逐渐过渡为碳酸盐岩建造, 层序清楚. 郭家寨亚群为反旋回的磨拉石建造, 不整合于东冶与豆村亚群之上^[5]. 另外, 在溇沱群豆村亚群青石村组上部和东冶亚群纹山组顶部有玄武岩层发育^[1](图 2).

苗培森等人^[10]在溇沱群底部四集庄组和南台组中, 识别出一层浅变质的玄武岩. 我们通过野外研究

证实, 在溇沱群底部四集庄组中确实存在一层变质火山岩. 其中下部以玄武岩为主, 上部出露一些玄武安山岩. 玄武岩-玄武安山岩与其上、下部砾(砂)岩层整合接触, 因此在溇沱群中的层位清楚, 其形成年龄可以代表溇沱群开始的年代.

本文样品是该火山岩层位上部有代表性的浅变质玄武安山岩, 样品采自五台县阳白乡七图村东南(38°47.570'N; 113°01.114'E). 该玄武岩-玄武安山岩层出露厚度约 100 m(图 3), 野外呈深灰绿-浅灰绿色, 岩层走向近于东西, 与上下层位中砾(砂)岩产状一致, 为整合接触关系. 火山岩具有片状构造, 片理产状 0°∠68°. 常见玄武岩与砂岩呈互层状产出(图 4(a)) 并可见玄武岩中含有石英岩小砾石(图 4(b)), 局部还保存了杏仁构造(图 4(c)). 变质玄武安山岩显微镜下具有变余交织结构、变余斑状结构(图 4(d)), 主要组成矿物为斜长石(50%~55%)和绿泥石(35%~40%), 磁铁矿少量(~5%). 细小板条状斜长石具定向-半定向排列, 局部已发生绢云母化; 绿泥石为细小鳞片状, 局部定向排列; 磁铁矿呈他形粒状, 充填于斜长石矿物间隙中.

2 分析方法

锆石 U-Pb 年龄测定在北京离子探针中心的

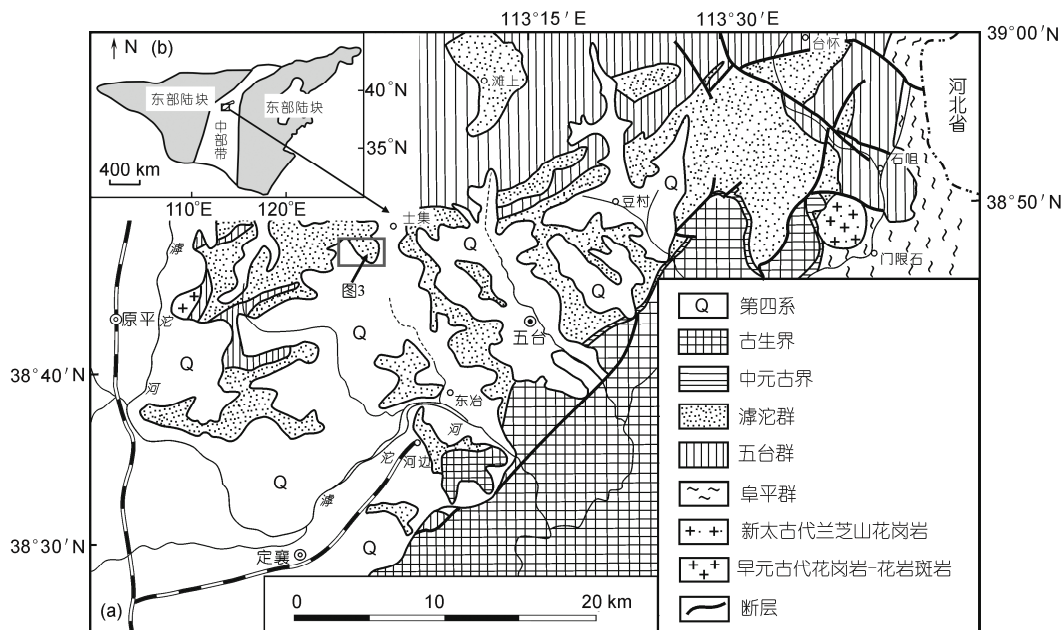


图 1 五台地区溇沱群分布简图
(a) 分布简图; (b) 位置图 (据文献[6]简化)

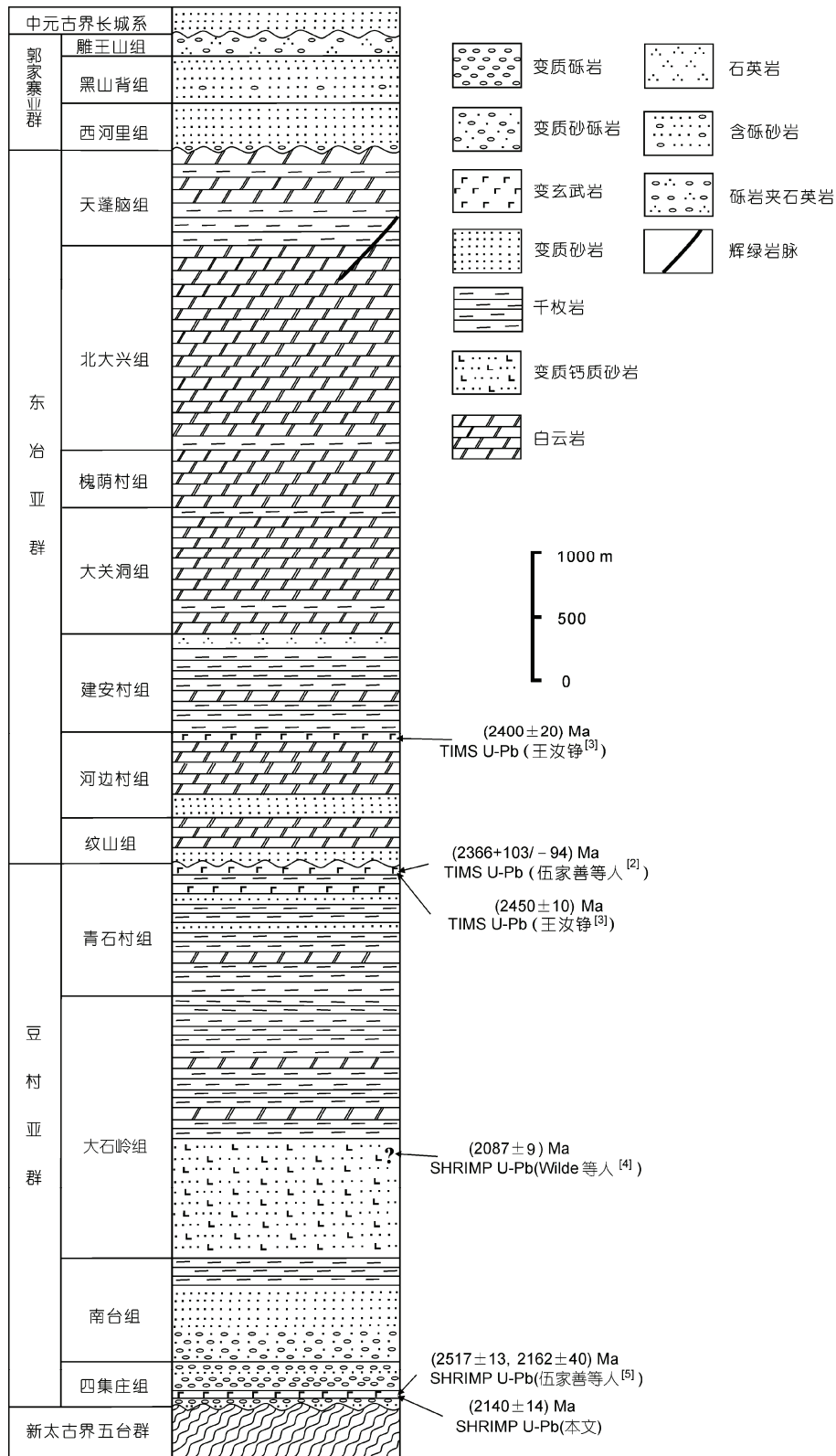


图2 五台地区溥沱群地层柱状简图
据文献[1]和[10]

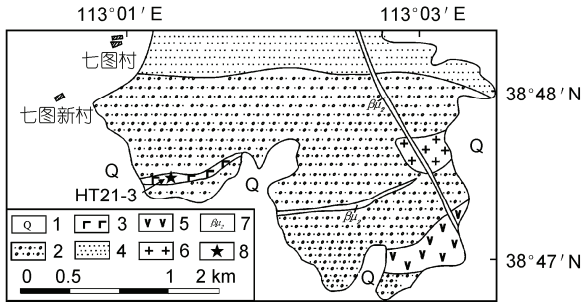


图3 溇沱群四集庄组变质火山岩位置简图

1, 第四系; 2, 四集庄组; 3, 四集庄组变质火山岩; 4, 南台组; 5, 辉长岩; 6, 花岗斑岩; 7, 辉绿岩; 8, 采样点

SHRIMP II 上完成, 分析原理与流程见文献^[11,12]. 应用锆石标样 M257(U 含量 840×10^{-6})^[13] 标定锆石的 U, Th, Pb 含量, 应用锆石标样 TEMORA 1(年龄 417 Ma)^[14] 进行年龄校正. 测试过程中仪器质量分辨率约为 4800~5700(1%峰高), 一次离子流 O^{2-} 的强度为 5~6 nA, 一次离子流束斑大小约为 25~30 μm . 每分析 4 个待测样品点进行一次 TEMORA 1 标样测定,

每个测点记录采用 5 组扫描. 数据处理采用 Ludwig SQUID1.02^[15] 及 ISPLIT^[16] 程序. 普通铅用实测的 ^{204}Pb 校正. 单个测定的数据点误差采用 1σ . 年龄结果采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均值, 误差为 95% 的置信度.

3 锆石特征与分析结果

浅变质玄武安山岩中锆石粒度多为 100~200 μm , 长宽比 1:1~1:2. 少量锆石表面具有浑圆特征(图 5(a)), 部分锆石可见较规则的晶面(图 5(c)). 在阴极发光(CL)图像中, 一些锆石具有振荡环带(图 5(d)), (f), 少量锆石具有宽缓的板状环带. 从锆石表面形态及内部结构特征分析, 这些锆石具有岩浆成因特征. 对 24 颗锆石进行了 24 个测点分析, 锆石 U 和 Th 含量分别为 $10 \times 10^{-6} \sim 406 \times 10^{-6}$ 和 $9 \times 10^{-6} \sim 311 \times 10^{-6}$, Th/U 比值为 0.24~1.11(表 1). 除去分析点 8.1, 20.1 和 13.1 具有较为强烈的 Pb 丢失外, 其余分析点多位于谐和线上或谐和线附近(图 6(a)). 从年龄结果看(表 1), 有一颗锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄结果为 (3540 ± 6) Ma, 明显为捕获的古老锆石. 其余锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$

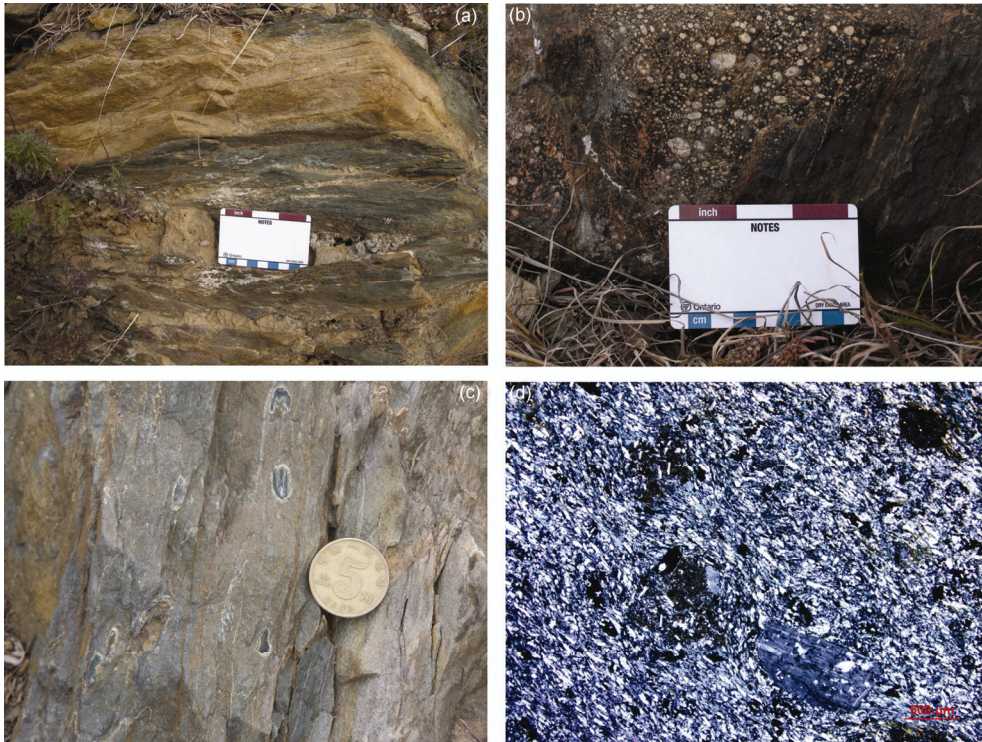


图4 溇沱群四集庄组火山岩野外与显微照片

(a) 玄武岩与砂岩呈互层状产出; (b) 玄武岩中含有小的石英岩砾石; (c) 玄武岩中保留有杏仁构造; (d) 玄武安山岩的变余交织结构和变余斑状结构

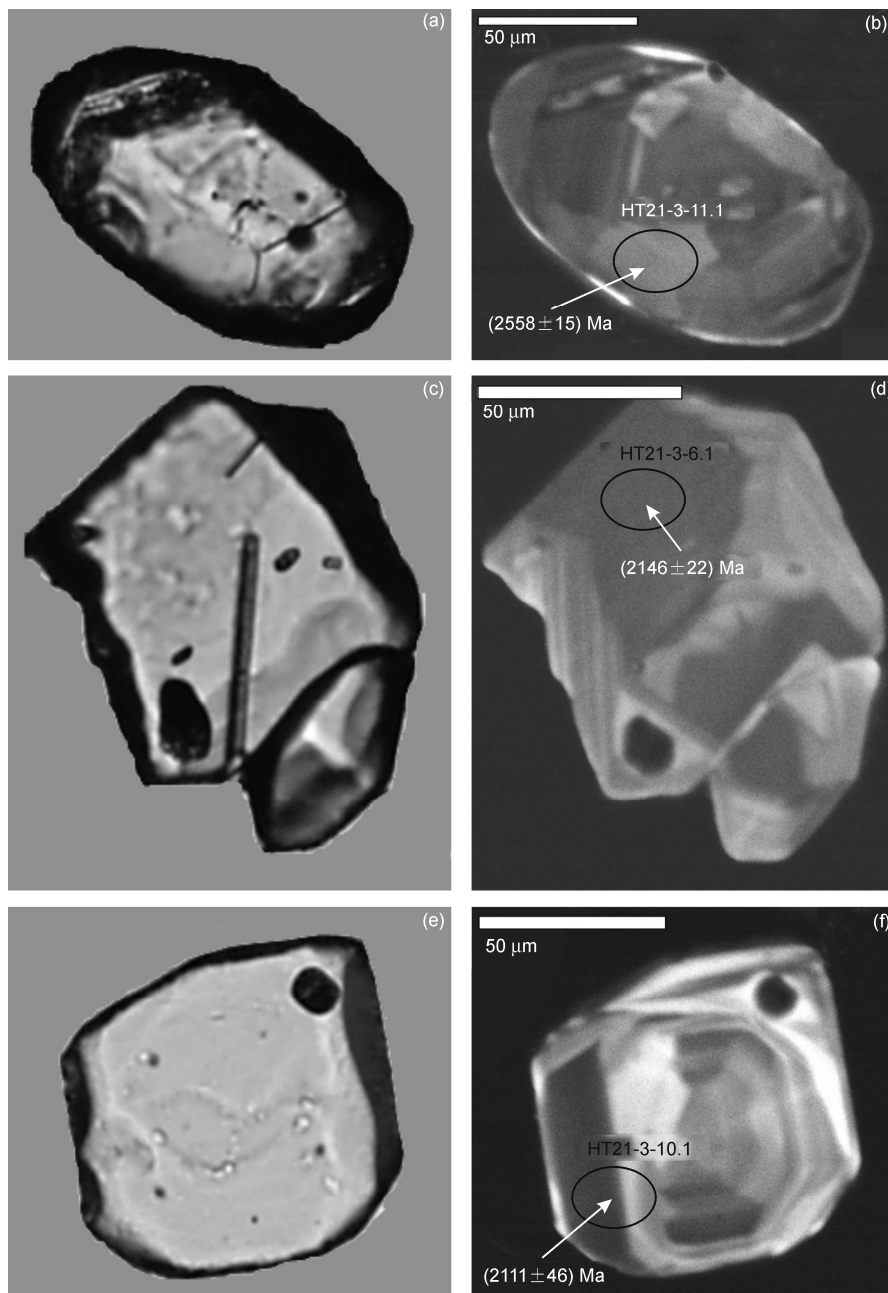


图5 四集庄组玄武安山岩锆石阴极发光图像

年龄值明显分为两组(表 1, 图 6(a)). 第一组年龄值的范围是 2433~2558 Ma, 第二组除去 2.1 点年龄稍大外, 其余年龄数据分布非常集中, 13 个点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄值为 (2140 ± 14) Ma(图 6(b)).

在锆石 U 含量与 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄相关图中(图 7), 2433~2558 Ma 年龄组的锆石 U 含量高, 基本上大于 100×10^{-6} ; (2140 ± 14) Ma 年龄组的锆石 U 含量显著低于前一组, 多数小于 50×10^{-6} . U 含量的显著差别可能

指示两组锆石的结晶环境及岩浆类型不同. 年轻的这组锆石粒度多大于 $100 \mu\text{m}$, 普遍发育环带, Th/U 比值高(0.49~1.11), 具有岩浆锆石特征^[17], 明显不同于低级变质作用过程中形成的变质锆石^[18,19]. 因此, 这组锆石是玄武安山岩岩浆结晶过程中形成的, 其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 (2140 ± 14) Ma 就是滹沱群四集庄组中火山岩的形成年龄, 可以代表滹沱群底界的时代.

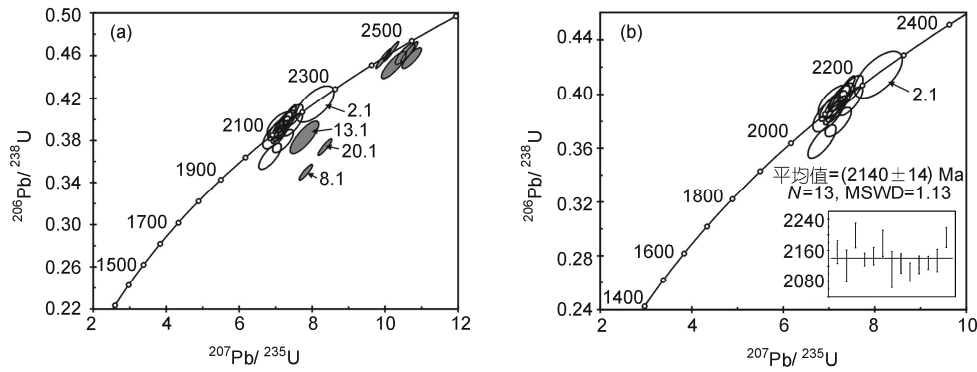


图 6 四集庄组玄武安山岩锆石 U-Pb 年龄谱和图

4 地质意义

溇沱群底部砾岩分布广泛, 这些砾岩具有底砾岩特征, 能够证明溇沱群是明显不整合于五台群(五台杂岩)之上的地层^[1,7], 两者不是同一次地质事件的记录. 本文获取的溇沱群底部地层中玄武安山岩的年龄为(2140±14) Ma, 证实溇沱群的沉积时代始于早元古代中期, 比五台群地层时代晚大约 350 Ma. 因此, 溇沱群形成时代既非新太古代末^[20,21], 也不是早元古代早期^[5], 而是早元古代中期. 溇沱群底部玄武安山岩中 2433~2558 Ma 的锆石年龄, 与该区基底地壳形成时代一致, 推测是岩浆穿过地壳时捕获或火山岩沉积时陆源碎屑岩带入的锆石.

近年来, 在华北克拉通中部地区获得了许多 21~22 亿年的年龄数据. 在溇沱群分布区, 除玄武岩外, 还有侵入于溇沱群的黄金山花岗岩((2137± 9) Ma, 杜利林待刊资料). 在五台地区, 发育具有非造山性质的大洼梁花岗岩((2176±12) Ma)^[22]和王家会花岗岩((2117±18) Ma)^[23]. 在吕梁地区, 吕梁群中上部近周营组变质玄武岩和杜家沟组变质流纹岩的时代为 2.2~2.1 Ga^[24,25], 野鸡山群白龙山组火山岩的时代为(2124±38) Ma^[26], 同时还有 2.2~2.1 Ga 的花岗岩^[25~28]. 在中条地区, 绛县群铜矿峪组中变质火山岩时代为(2155±6) Ma^[29]. 在太行山东部赞皇地区, 甘陶河群中存在巨厚层的~2.1 Ga 基性火山岩(刘敦一等, 未发表资料). 除此之外, 在华北东部胶辽地区也存在 2.1~2.2 Ga 的岩浆活动^[30~33]. 上述资料表明, 华北克拉通在早元古代 2.1~2.2 Ga 存在一期广泛的岩浆热事件^[34]. 这也得到华北克拉通古元古代晚期广泛分布的孔兹岩系变泥砂质岩石碎屑锆石年龄谱研究的支持^[35].

Zhao 等人^[6,36,37]提出将华北克拉通划分为东部陆块、西部陆块和连接两者的中部造山带. 西部陆块~2.5 Ga 开始向东部陆块俯冲^[38~40], 在 1.85~1.8 Ga 两者碰撞造山(吕梁运动), 华北最终克拉通化^[28]. 根据上述模式, 在 2.5~1.8 Ga 长达 7 亿年的时间内, 中部带内的火山岩和沉积岩很可能与俯冲或岛弧有关^[28,41,42], 甚至可能如有些作者认为的, 溇沱群形成于弧前盆地^[41]或大陆边缘浅水盆地环境^[4]. 但是, 野外研究表明溇沱群明显形成于陆相沉积环境. 地球化学上, 玄武岩为高 Ti 型, Nb 和 Ta 之间无分异, 具高的 Zr/Hf 比值, 明显不同于岛弧火山岩, 而具有板内裂谷性质火山岩的地球化学特征^[43]. 这些玄武岩与五台地区同时期壳源成因的花岗岩具有双峰式岩浆组合特征. 相邻的吕梁地区也有同时代的基性-酸性火山岩, 同样具有双峰式岩浆组合特征, 很可能形成于大陆边缘或板内裂谷环境^[25,44,45]. 更南部的中条山地区, 绛县群铜矿峪组中火山岩和赞皇地区甘陶河群中厚层玄武岩也具有裂谷火山岩特征^[29](刘敦

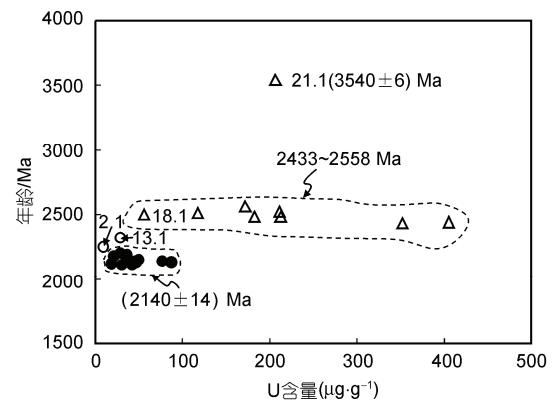


图 7 四集庄组玄武安山岩锆石 U 含量与年龄关系图

表1 四集庄组玄武安山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 分析结果^{a)}

样点号	²⁰⁶ Pb _c (%)	U /μg·g ⁻¹	Th /μg·g ⁻¹	Th/U	²⁰⁶ Pb* /μg·g ⁻¹	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U /Ma	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb /Ma	不谐 和性	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	±%	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U	±%	误差 相关性
HT21-3-1.1	0.10	36	35	1.02	12.4	2184±32	2156±29	-1	7.47	2.4	0.4033	1.8	0.721
HT21-3-2.1	—	10	9	0.97	3.43	2235±52	2244±57	0	8.08	4.3	0.414	2.7	0.640
HT21-3-3.1	0.37	18	13	0.77	5.91	2101±40	2120±41	1	6.99	3.3	0.3853	2.2	0.689
HT21-3-4.1	—	28	25	0.91	9.25	2073±33	2198±32	6	7.20	2.6	0.3794	1.9	0.720
HT21-3-5.1	—	77	83	1.11	25.5	2106±27	2137±17	1	7.08	1.8	0.3863	1.5	0.845
HT21-3-6.1	0.05	49	50	1.04	16.5	2119±30	2146±22	1	7.17	2.1	0.3891	1.7	0.794
HT21-3-7.1	0.11	21	16	0.79	6.74	2005±39	2178±34	8	6.85	3.0	0.3649	2.2	0.755
HT21-3-8.1	0.11	183	57	0.32	55.0	1934±23	2479±11	22	7.83	1.5	0.3500	1.4	0.905
HT21-3-9.1	0.00	406	311	0.79	162	2457±27	2444±7	-1	10.16	1.4	0.4638	1.3	0.959
HT21-3-10.1	0.29	31	25	0.85	10.4	2145±37	2111±46	-2	7.13	3.3	0.3947	2.0	0.607
HT21-3-11.1	0.01	171	94	0.57	67.4	2430±28	2558±15	5	10.73	1.6	0.4578	1.4	0.846
HT21-3-12.1	0.09	38	31	0.84	13.0	2133±32	2127±25	0	7.15	2.3	0.3922	1.8	0.774
HT21-3-13.1	0.33	28	25	0.93	9.22	2090±47	2317±34	10	7.79	3.3	0.383	2.6	0.801
HT21-3-14.1	0.02	118	40	0.35	46.8	2448±29	2514±15	3	10.55	1.7	0.4620	1.4	0.845
HT21-3-15.1	0.16	42	41	1.00	14.2	2124±31	2104±24	-1	7.02	2.2	0.3902	1.7	0.785
HT21-3-16.1	0.12	47	44	0.97	16.0	2156±31	2123±23	-2	7.22	2.1	0.3971	1.7	0.790
HT21-3-17.1	0.05	88	56	0.66	30.1	2171±40	2128±17	-2	7.30	2.4	0.4005	2.2	0.913
HT21-3-18.1	0.18	56	55	1.02	21.9	2401±37	2504±20	4	10.24	2.2	0.4513	1.9	0.845
HT21-3-19.1	0.33	45	21	0.49	15.4	2160±31	2134±29	-1	7.28	2.4	0.3981	1.7	0.723
HT21-3-20.1	0.12	212	50	0.24	68.2	2047±24	2478±10	17	8.35	1.5	0.3738	1.4	0.917
HT21-3-21.1	0.03	207	100	0.50	139	3732±39	3540±6	-5	33.94	1.4	0.784	1.4	0.966
HT21-3-22.1	0.09	36	35	1.01	12.2	2146±32	2193±26	2	7.48	2.3	0.3949	1.8	0.770
HT21-3-23.1	0.03	210	124	0.61	83.8	2455±28	2526±9	3	10.66	1.4	0.4635	1.4	0.936
HT21-3-24.1	0.04	352	111	0.33	138	2429±27	2433±7	0	9.96	1.4	0.4575	1.3	0.952

a) 误差为 1σ, Pb_c 和 Pb* 分别代表普通铅和放射成因铅; 标准校正的误差为 0.53%; 普通铅校正用 ²⁰⁴Pb 的实测值

一等, 未发表资料)。区域上这些广泛发育的同时代火山岩表明, 在华北克拉通中部地区, 早元古代中期 2.1~2.2 Ga 很可能不是俯冲带环境, 而是裂谷拉张环境。早元古代中期 2.1~2.2 Ga 是华北克拉通中部重要的裂谷形成时代。

5 结论

SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄证明, 溥沱群底部地层

中的玄武安山岩形成于(2140±14) Ma。因此, 溥沱群沉积始于早元古代中期, 而不是晚太古代末或早元古代早期。溥沱群底部地层的时代与下部五台群(五台杂岩)相差~350 Ma, 因而溥沱群是不同于五台运动的另一次地质事件记录。在华北克拉通中部地区广泛分布 2.1~2.2 Ga 裂谷性质的岩浆岩, 指示早元古代中期华北克拉通中部地区可能处于拉张环境。

致谢 刘敦一研究员、张玉海高级工程师、陶华工程师、周剑雄研究员、杨淳副研究员、陈振宇博士、叶青和周丽芹在锆石样品靶制备、阴极发光和年龄测定工作中提供支持; 文章初稿完成后, 沈其韩院士、Allen Nutman 教授和伍家善研究员审阅修改; 同时, 刘树文教授、周建波教授和赵国春教授对文稿提出宝贵的修改建议和意见; M257 标准锆石由 Nasdala 博士提供; 在此深表谢意。

参考文献

- 1 白瑾. 五台山早前寒武纪地质. 天津: 天津科技出版社, 1986. 1—475
- 2 伍家善, 刘敦一, 金龙国. 五台山区滹沱群变质基性熔岩中锆石 U-Pb 年龄. 地质论评, 1986, 32: 178—185
- 3 王汝铮. 古元古代滹沱群玄武岩 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素体系初论. 前寒武纪研究进展, 1997, 20: 35—42
- 4 Wilde S A, 赵国春, 王凯怡, 等. 五台山滹沱群 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄: 华北克拉通早元古代拼合新证据. 科学通报, 2003, 48: 2180—2186
- 5 伍家善, 刘敦一, 耿元生. 中国古元古界滹沱群建系综合研究报告——滹沱群地质年代格架和重大地质事件序列. 中国主要断代地层建阶研究报告(2001~2005). 北京: 地质出版社, 2008. 534—544
- 6 Zhao G C, Cawood P, Lu L Z. Petrology and P-T history of the Wutai amphibolites: Implications for tectonic evolution of the Wutai Complex, China. *Precambrian Res*, 1999, 93: 181—199
- 7 王惠初, 陆松年, 赵风清, 等. 华北克拉通古元古代地质记录及其构造意义. 地质调查与研究, 2005, 28: 129—143
- 8 Cawood P A, Wilde S A, Wang K, et al. Application of integrated field mapping and SHRIMP U/Pb geochronology to subdivision of the Precambrian in China: Constraints from the Wutaishan. Abstracts of ICOG-9, Beijing 1998. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43: 17
- 9 Zhang J, Zhao G C, Li S Z, et al. U-Pb zircon dating of the granitic conglomerates of the Hutuo group: Affinities to the Wutai granitoids and significance to the tectonic evolution of the Trans-North China orogen. *Acta Geol Sin*, 2006, 80: 886—898
- 10 苗培森, 张振福, 张建中, 等. 五台山早元古代地层层序探讨. 中国区域地质, 1999, 18: 405—413
- 11 Williams I S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: Mickibben M A, Shanks W C, Ridley W I. *Applications of Micro Analytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*. *Rev Economic Geol*, 1998, 7: 1—35
- 12 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(Supp): 26—30
- 13 Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, et al. Zircon M257—A homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon. *Geostandards Geoanal Res*, 2008, 32: 247—265
- 14 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
- 15 Ludwig K R. *Suqid 1.02: A User's Manual*. Berkeley Geochronology Center Special Publication No.2, 2001; 1—19
- 16 Ludwig K R. *User's manual for Isoplot/Ex version 2.2: A geochronological toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center Special Publication No.1a, 2000. 1—50
- 17 Keay S, Steele D, Comopston W. Identifying granite sources by SHRIMP U-Pb zircon geochronology: An application to the Lachlan foldbelt. *Contrib Mineral Petrol*, 1999, 137: 323—341
- 18 Dempster T J, Hay D C, Bluck B J. Zircon growth in slate. *Geology*, 2004, 32: 221—224
- 19 Rasmussen B. Zircon growth in very low grade metasedimentary rocks: Evidence for zirconium mobility at ~250°C. *Contrib Mineral Petrol*, 2005, 150: 146—155
- 20 李江海, 牛向龙, 钱祥麟, 等. 五台山区太古宙/元古宙界线划分及其地球演化意义. 大地构造与成矿学, 2006, 30: 409—418
- 21 Li J H, Kusky T. A Late Archean foreland fold and thrust belt in the North China Craton: Implications for early collisional tectonics. *Gondwana Res*, 2007, 12: 47—66
- 22 王凯怡, Wilde S. 山西五台地区大洼梁花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 精确年龄. 岩石矿物学杂志, 2002, 21: 407—411, 420
- 23 王凯怡, 郝杰, Wilde S, 等. 山西五台山-恒山地区晚太古代-早元古代若干关键地质问题的再认识: 单颗粒锆石离子探针质谱年龄提出的地质制约. 地质科学, 2000, 35: 175—184
- 24 于津海, 王德滋, 王赐银, 等. 山西吕梁群和其主变质作用的锆石 U-Pb 年龄. 地质论评, 1997, 43: 403—408
- 25 耿元生, 万渝生, 杨崇辉. 中国古元古界建系综合研究报告——吕梁地区古元古代主要地质事件的厘定和古元古代的初步划分. 中国主要断代地层建阶研究报告(2001~2005). 北京: 地质出版社, 2008. 515—533
- 26 耿元生, 万渝生, 沈其韩, 等. 吕梁地区早前寒武纪主要地质事件的年代框架. 地质学报, 2000, 74: 216—223
- 27 耿元生, 杨崇辉, 万渝生. 吕梁地区古元古代花岗岩浆作用——来自同位素年代学的证据. 岩石学报, 2006, 22: 305—314
- 28 Zhao G C, Wilde S A, Sun M, et al. SHRIMP U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the Luliang complex: Implications for the accretion and evolution of the Trans-North China orogen. *Precambrian Res*, 2008, 160: 213—226
- 29 孙大中, 李惠民, 林源贤, 等. 中条山前寒武纪年代学、年代构造格架和年代地壳结构模式的研究. 地质学报, 1991, 3: 216—231
- 30 Lu X P, Wu F Y, Guo J H, et al. Zircon U-Pb geochronological constraints on the Paleoproterozoic crustal evolution of the Eastern block in the North China Craton. *Precambrian Res*, 2006, 146: 138—164
- 31 Li S Z, Zhao G C. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Liaoji granitoids: Constraints on the evolution of the Paleoproterozoic Jiao-Liao-Ji belt in the Eastern Block of the North China Craton. *Precambrian Res*, 2007, 158: 1—16
- 32 Zhou J B, Wilde S A, Zhao G C, et al. Detrital zircon U-Pb dating of low-grade metamorphic rocks in the Sulu UHP belt: evidence for overthrusting of the North China Craton onto the South China Craton during continental subduction. *J Geol Soc, London*, 2008, 165: 423—433

- 33 Zhou J B, Wilde S A, Zhao G C, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Neoproterozoic Penglai Group and Archean gneisses from the Jiaobei Terrane, North China, and tectonic implications. *Precambrian Res*, 2008, 160: 323—340
- 34 万渝生, 张巧大, 宋天锐. 北京十三陵长城系常州沟组碎屑锆石 SHRIMP 年龄: 华北克拉通盖层物源区及最大沉积年龄的限定. *科学通报*, 2003, 48: 1970—1975
- 35 Wan Y S, Song B, Liu D Y, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Paleoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major Late Paleoproterozoic tectonothermal event. *Precambrian Res*, 2006, 149: 249—271
- 36 Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, et al. Thermal evolution of archaean basement rocks from the eastern part of the North China Craton and its bearing on tectonic setting. *Int Geol Rev*, 1998, 40: 706—721
- 37 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. *Precambrian Res*, 2000, 103: 55—88
- 38 Liu S W, Pan Y M, Li J H, et al. Geological and isotopic geochemical constraints on the evolution of the Fuping Complex, North China Craton. *Precambrian Res*, 2002, 117: 41—56
- 39 Liu S W, Pan Y M, Xie Q L, et al. Archean geodynamics in the Central Zone, North China Craton: Constraints from geochemistry of two contrasting series of granitoids in the Fuping and Wutai complexes. *Precambrian Res*, 2004, 130: 229—249
- 40 Liu S W, Pan Y M, Xie Q L, et al. Geochemistry of the Paleoproterozoic Nanying granitic gneisses in the Fuping Complex: Implications for the tectonic evolution of the Central Zone, North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 2005, 24: 643—658
- 41 Kröner A, Wilde S A, O'Brien P J, et al. Field relationships, geochemistry, zircon ages and evolution of a Late Archaean to palaeoproterozoic lower crustal section in the Hengshan Terrain of northern China. *Acta Geol Sin*, 2005, 79: 605—629
- 42 Zhao G C, Liu S W, Sun M, et al. What happened in the trans-North China orogen in the period 2560—1850 Ma? *Acta Geol Sin*, 2006, 80: 790—806
- 43 杜利林, 杨崇辉, 任留东, 等. 山西五台山区滹沱群变质玄武岩岩石学、地球化学特征及其成因意义. *地质通报*, 2009, 28: 867—876
- 44 于津海, 王德滋, 王赐银. 山西吕梁群早元古代双峰式火山岩地球化学特征及成因. *岩石学报*, 1997, 13: 59—70
- 45 耿元生, 万渝生, 杨崇辉. 吕梁地区元古代的裂陷型火山作用及其地质意义. *地球学报*, 2003, 24: 97—104