

和龙地块的构造属性与华北地台北缘东段边界*

张艳斌 吴福元 翟明国 路孝平

(①中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; ②吉林大学地球科学学院, 长春 130061;
③吉林省区域地质调查所, 长春 130022)

摘要 应用锆石激光剥蚀等离子体分析技术(LA-ICP-MS), 对吉林省东南部原华北地台和龙地块上的百里坪岩体进行了侵位年代测定, 确定岩体形成于 285~116 Ma 之间的早二叠世~早白垩世, 是由至少 4 次岩浆活动形成的复式岩体. 这些年代学结果显示, 百里坪岩体并不是太古宙、元古宙或者早古生代形成的, 传统认识上的以百里坪岩体为主要组成部分的金城洞花岗绿岩带不能成立. 岩石的 Sr-Nd 同位素特征与兴蒙造山带的显生宙花岗岩相似, 反映其源岩为年轻的新生地壳物质. Sr-Nd 同位素地球化学模拟结果显示, 岩浆在上升或侵位过程中曾受到部分古老地壳物质的混染, 从而表明和龙地块的基底地壳物质与北侧的兴蒙造山带相似, 即和龙地块的深部并不存在大规模的前寒武纪结晶基底, 区内分布的金城洞太古宙杂岩可能仅是残存在地壳浅层次上的外来太古代岩片. 因此, 原定本区北部的富尔河-古洞河断裂不是华北地台与兴蒙造山带之间的界限, 其真实界限应南移 50 km 以上而位于长白山火山附近.

关键词 华北地台 和龙地块 百里坪岩体 锆石 U-Pb 年龄 Sr-Nd 同位素

位于吉林省东南部的和龙地块是我国华北地台北缘最东段的太古宙地质单元^[1,2]. 根据以前的区域地质调查成果, 该地块主要由两部分组成: 其一是位于金城洞一带的太古宙变质表壳岩系和侵入其中的太古宙TTG杂岩^[3-5]; 其二是位于十里坪-百里坪-广坪一带的百里坪花岗岩^[6,7]. 它们两者共同组成目前国内学术界认定的金城洞(或和龙)花岗绿岩带^[3,4,8-11]. 然而, 除目前对金城洞表壳岩及花岗岩有少量同位素年龄以外^[5,12], 对大面积分布的百里坪岩体的时代

一直存在争论. 如曾庆栋等^[3]及李俊建等^[9]认为其形成于太古代; 而后, 曾庆栋等^[7]又认为其形成于古元古代; 但吉林省地质矿产局^[12]则认为其应该形成于早古生代. 因此, 百里坪岩体的时代归属是确定金城洞花岗绿岩带是否成立的关键. 同时, 上述两大岩石单元北侧的富尔河-古洞河断裂被认为是华北北部赤峰-开原深断裂的东延部分, 是华北地台与其北侧兴蒙造山带在本区的分界所在^[1,12,13]. 但是, 如果和龙地块中占主体的百里坪花岗岩不是太古宙或至少

2003-12-29 收稿

* 国家自然科学基金(批准号: 40272045, 40234050)和中国地质调查局项目(批准号: 200113000052)资助

** E-mail: zhangyanbin@mail.igcas.ac.cn

不是早前寒武纪形成的话,那么,长期形成的将富尔河-古洞河断裂作为华北地台边界的认识就值得进一步商榷.在本文中,我们运用锆石激光剥蚀等离子体分析技术(LA-ICP-MS)对百里坪岩体中的花岗质岩石进行了锆石U-Pb年龄测定,并对部分定年岩石进行了Sr和Nd同位素研究.结果表明,和龙地块的构造属性应重新认识,而华北地台北缘的边界也应重新界定;这一基本地质框架认识的变化,将对毗邻的朝鲜北部大地构造单元的划分提出新认识.

1 百里坪岩体地质特征及样品选择

百里坪岩体位于吉林省和龙市百里坪至广坪一带,为一规模巨大的不规则状岩基,其在我国的出露面积达 1800 km²(图 1).该岩体南延在朝鲜境内被称为冠帽岩体(Kwanmosong),出露面积达 3000 km²[14].该岩体北侧侵入金城洞太古宙变质岩,西侧及西南

侧被大面积新生代玄武岩所覆盖,东侧部分被燕山期花岗岩侵入和中生代地层覆盖.

根据目前的区调结果和我们的野外调查,百里坪岩体的岩性较为复杂,除局部地区出现石英闪长岩和英云闪长岩外,其主体岩性为花岗闪长岩和似斑状二长花岗岩.由于严重的露头覆盖,各岩性之间的接触关系不清,但主体岩性多为块状构造,并含有较多的变质岩捕虏体.

在野外地质调查过程中,我们在岩体的不同部位共采集了 20 余块岩石样品,这些样品基本囊括了百里坪岩体的所有岩性.根据这些样品,可将百里坪岩体组成岩性划分为四大类型,即中粒石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩和似斑状二长花岗岩.其中石英闪长岩呈灰色,块状构造,中-细粒粒状结构,局部出现斜长石斑晶.主要矿物组成为斜长石(70%~75%)+钾长石(20%~30%)+石英(3%~5%)+角闪

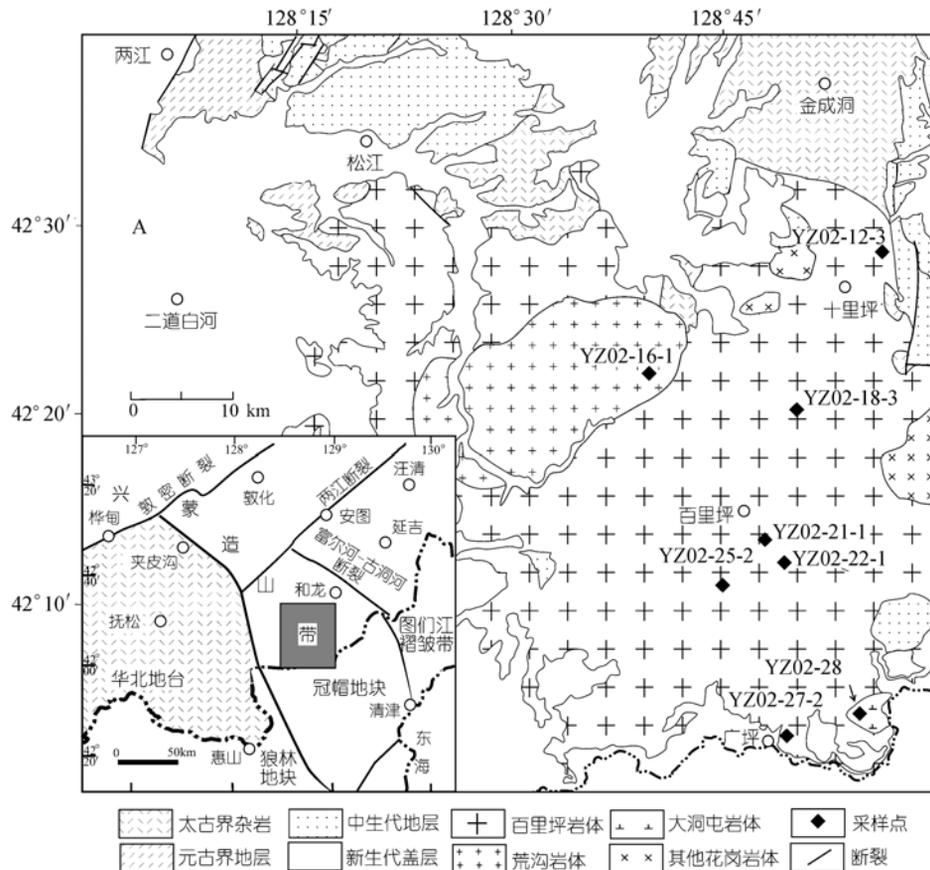


图 1 百里坪岩体地质略图(根据 1:20 万地质图修编)

石(0%~5%)+黑云母(5%), 副矿物为锆石、榍石、磷灰石等. 英云闪长岩为灰白色, 片麻状构造, 半自形粒状结构, 主要矿物组成为石英(30%~35%)+斜长石(60%~70%)+钾长石(3%~5%)+角闪石(<2%)+黑云母(5%), 副矿物有锆石、磷灰石、磁铁矿等. 花岗闪长岩为灰白色, 中粒花岗结构为主, 局部出现钾长石斑晶, 块状构造, 矿物组成为石英(25%~30%)+钾长石(10%~20%)+斜长石(50%~60%)+角闪石(<2%)+黑云母(5%), 副矿物有锆石、榍石、磷灰石等. 似斑状二长花岗岩: 该岩石为百里坪岩体的主体岩性, 灰白色-浅肉红色, 中粒花岗结构为主, 并出现粗大的微斜条纹长石斑晶, 块状构造. 主要矿物组成为石英(25%~30%)+钾长石(30%~50%)+斜长石(20%~30%), 并有微量的角闪石、黑云母和副矿物锆石、榍石、磷灰石等.

除上述岩石外, 在百里坪岩体内部还出现其他若干类型的岩体. 其一是出露在百里坪岩体南部的大洞屯闪长岩岩体, 其出露面积约 10 km², 岩石呈深灰色, 半自形柱粒状结构, 块状构造. 主要由角闪石和斜长石组成, 其中角闪石含量约 40%~45%, 部分蚀变为黑云母或绿泥石; 斜长石的含量为 60%~65%, 部分斜长石颗粒由于强烈绢云母化而使卡钠复合双晶模糊. 副矿物有磷灰石、磁铁矿等, 其中磁铁矿含量可达 1%. 其二是侵入于百里坪岩体中部的荒沟正长花岗岩岩体, 其出露面积约 150 km², 岩石呈肉红色, 粗粒花岗结构, 块状构造. 主要组成矿物为石英(20%~30%)+斜长石(30%~40%)+微斜长石(50%~60%)+黑云母(<1%), 副矿物有锆石、磁铁矿等. 由于目前百里坪岩体的时代不清, 我们暂时将上述所有岩石都划为百里坪(复式)岩体.

在上述样品中, 我们选择新鲜无蚀变的 8 块代表性样品进行锆石 U-Pb 同位素年龄测定, 其中狭义百里坪岩体的石英闪长岩和英云闪长岩各 1 块(YZ02-21-1 和 YZ02-12-3), 似斑状花岗闪长岩-二长花岗岩 4 块(YZ02-18-3, YZ02-22-2, YZ02-25-2 和 YZ02-27-2), 大洞屯闪长岩和荒沟正长花岗岩各 1 块(YZ02-28 和 YZ02-16-1), 并选择百里坪岩体的 6 块样品进行全岩 Sr-Nd 同位素分析.

2 测试方法

本文采用近几年才发展起来的锆石激光剥蚀等离子体分析技术(LA-ICP-MS)对锆石进行微区原位单点U-Pb同位素定年. 目前的国内外研究表明, 该方法具有快速、高灵敏度和低成本的特点, 不仅适用于前寒武纪高级变质锆石年代学和成因的研究^[15], 而且也适合于年轻的锆石样品^[16-18], 甚至某些显生宙锆石可获得与SHRIMP数据相媲美的研究成果^[16,17,19]. 实验在西北大学地质学系大陆动力学教育部重点实验室进行, 采用ComPex102 ArF准分子激光器(波长 193 nm)和带有动态反应池的四极杆Elan6100 DRC型 ICP-MS进行锆石U和Pb测定(注本实验不需要动态反应池). 实验中采用He作为剥蚀物质的载气, 用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质NIST SRM610 进行仪器最佳化, 采用哈佛大学国际标准锆石 91500 作为外部校正. 样品的同位素比值计算采用GLITTER(ver4.0 Macquarie University)程序, 年龄计算采用国际标准程序 Isoplot(ver2.49). 样品的制备与SHRIMP方法基本相同^[20], 只是减少了表面镀金这一环节, 实验采用的激光束斑直径为 30 μm. 由后面的实验数据可知, 本文所研究的岩体为显生宙花岗岩, 因此我们采用²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄来限定岩石形成时代. 由于实验过程中²⁰⁴Pb信号较低, 且基本与背景值相当(10), 而²⁰⁶Pb信号比²⁰⁴Pb高出几个数量级(10⁴), 故本文未进行普通铅校正. 尽管这将会导致部分数据点偏离谐和线, 但其对²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄的影响极小, 可以不予考虑.

Sr和Nd同位素测试在中国科学院地质与地球物理研究所同位素测试中心进行, 采用质谱仪为MAT-261, 同位素的分馏与测试过程参见乔广生等^[21,22]. 其中Sr同位素采用⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.1194 进行标准化, Nd同位素用¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 标准化.

文中涉及的有关符号及其定义如下:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{Nd}}(t) &= [({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_s / ({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} - 1] \times 10000, \\ f_{\text{Sm}/\text{Nd}} &= [({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_s / ({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}] - 1, \\ T_{\text{DM}} &= 1/\lambda_{\text{Sm}} \ln \{ [({}^{143}\text{Nd}/{}^{144}\text{Nd})_s - 0.51315] / [({}^{147}\text{Sm}/{}^{144}\text{Nd})_s - 0.2137] \}, \end{aligned}$$

式中下角标s代表样品,下角标CHUR代表球粒陨石, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.512638$, $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}} = 0.1967$. 衰变常数 $\lambda_{\text{Sm}} = 0.654 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$.

3 实验测试结果

3.1 锆石 U-Pb 测定

所测 8 个样品的锆石U-Pb同位素数据如表 1 所示,其谐和图见图 2. 对英云闪长岩(YZ02-12-3, 采样地点: $128^{\circ}56'12''\text{E}$, $42^{\circ}28'46''\text{N}$)样品共进行了 20 个点的分析,除两个数据点显示不谐和以外,其余 18 个数据点基本上都位于谐和线附近,但明显分为两组,12~20 号数据点位于 2360~2500 Ma 之间,其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄加权平均值为 $2410 \pm 31 \text{ Ma}$, 与本区太古宙杂岩中获得的锆石U-Pb年龄 2444~2541 Ma 一致^[5,81]; 2~10 号数据点位于 280~300 Ma 之间,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $285 \pm 9 \text{ Ma}$. 由于该岩石未经历任何变质作用的影响而仅发育有片麻状构造,我们将 $285 \pm 9 \text{ Ma}$ 解释为岩体的侵位年龄. $2410 \pm 31 \text{ Ma}$ 年龄锆石的存在表明岩浆在上升侵位过程中捕获了围岩物质或代表了源区的残留.

对花岗闪长岩(YZ02-18-3, 采样地点: $128^{\circ}50'15''\text{E}$, $42^{\circ}20'20''\text{N}$)样品共进行了 20 个点的分析,除两个数据点偏离谐和线外,其余 18 个数据点都落在谐和线上,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $119 \pm 2 \text{ Ma}$, 代表了岩浆侵位结晶年龄.

石英闪长岩(YZ02-21-1, 采样地点: $128^{\circ}47'55''\text{E}$, $42^{\circ}13'34''\text{N}$)中的锆石也较为简单,所获得的 27 个分析数据基本都位于谐和线上,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $116 \pm 1 \text{ Ma}$, 该年龄应代表了岩浆的侵位时代.

似斑状二长花岗岩(YZ02-22-2, YZ02-25-2, YZ02-27-2, 采样地点分别为 $128^{\circ}49'21''\text{E}$, $42^{\circ}12'14''\text{N}$; $128^{\circ}44'58''\text{E}$, $42^{\circ}10'57''\text{N}$ 和 $128^{\circ}49'32''\text{E}$, $42^{\circ}03'10''\text{N}$)的测试数据中仅极个别的数据点由于 ^{207}Pb 测试精度较差而偏离谐和线,但绝大部分数据点都位于谐和线附近,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值分别为 245 ± 6 , 245 ± 3 和 $248 \pm 2 \text{ Ma}$, 在误差范围内完全一致,表明面积巨大的二长花岗岩同时形

成于早三叠世.

对大洞屯闪长岩(YZ02-28, 采样地点: $128^{\circ}54'16''\text{E}$, $42^{\circ}04'19''\text{N}$), 我们一共进行了 20 个点的U-Pb分析,所获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $178 \pm 2 \text{ Ma}$. 对荒沟正长花岗岩(YZ02-16-1, 采样地点: $128^{\circ}39'38''\text{E}$, $42^{\circ}21'58''\text{N}$), 我们进行了 15 个点的U-Pb分析,位于谐和线附近的 12 个数据点所获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $187 \pm 3 \text{ Ma}$, 两者约相差 10 Ma.

3.2 Sr-Nd 同位素特征

所测样品的Sr和Nd同位素数据如表 2 所示. 由该表可以看出,百里坪岩体岩石的Rb含量较低,而Sr的含量相对较高,从而导致其 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比值相对较低,其初始Sr同位素比值(I_{Sr})为 0.7051~0.7068,略高于东北花岗岩的 I_{Sr} 的平均值(0.705)^[23-26],但明显低于其北部佳木斯地块(0.7094~0.7183)和南部华北地台前寒武纪结晶基底或变质岩系的高 I_{Sr} 值(0.7070~0.7174)^[27],而与其低 I_{Sr} 值(0.7048~0.7070)相似^[27]. 岩体具有负的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,为 $-1.0 \sim -13.6$,且具有随时代变新,其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值逐渐升高的特点. 单阶段Nd模式年龄 T_{DM} 为 963~1929 Ma, 与兴蒙造山带绝大多数岩体具有正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和年轻的Nd模式年龄 T_{DM} (500~1300 Ma)略有不同^[28,29],但与造山带内的辽源地区花岗岩特征相似(图 3),反映百里坪岩体的物质组成既不是北部的造山带,也不是南部的华北地台,而应是两者混合的结果.

4 讨论与结论

4.1 百里坪岩体的侵位年龄

百里坪岩体由于在其花岗闪长岩获得 2293 Ma 的锆石U-Pb年龄而被认为是本区最老的花岗岩^[30],形成于太古宙末期^[3]或早元古宙^[7,31];另外,岩体中获得的斜长花岗岩(英云闪长岩)中黑云母的 329 Ma 的K-Ar年龄使部分学者认为它是加里东晚期^[12]岩浆活动的产物. 但由于以上数据测试年代较早,锆石U-Pb年龄的原始同位素数据从未曾报道,而黑云母K-Ar体系又具有较低的封闭温度,因此上述年龄是否反映了岩体的侵位年代无从考证.

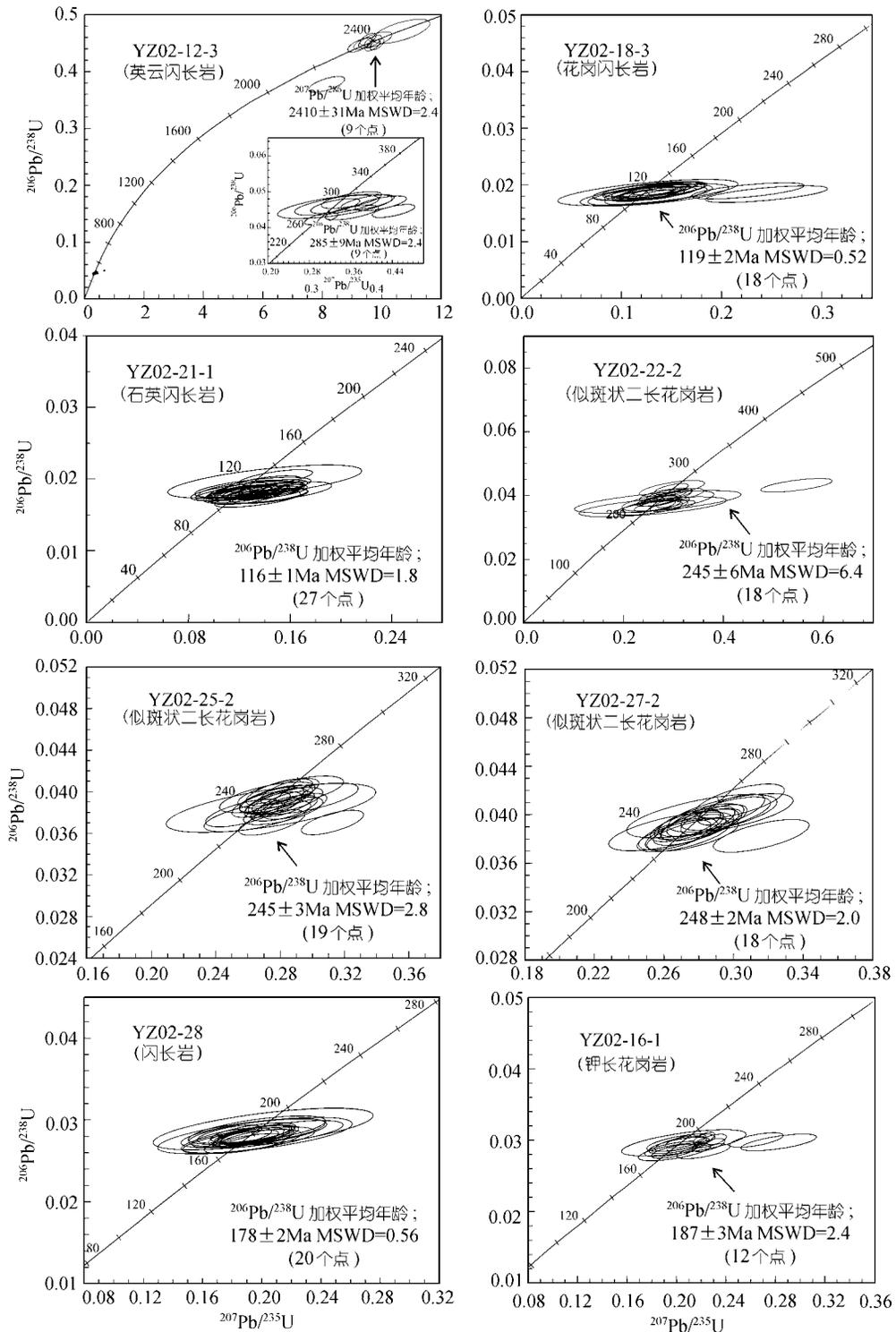


图 2 百里坪花岗岩体锆石 U-Pb 谱和图

表 1 百里坪花岗岩体锆石 LA-ICPMS 同位素比值分析结果

样品号	分析点号	同位素比值(1 σ)			年龄/Ma		
		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
YZ02-12-3	1	0.0423 \pm 7	0.303 \pm 13	0.0520 \pm 23	267 \pm 4	269 \pm 10	
	2	0.0445 \pm 8	0.442 \pm 17	0.0721 \pm 27	280 \pm 5	371 \pm 12	
	3	0.0457 \pm 14	0.329 \pm 45	0.0522 \pm 73	288 \pm 9	289 \pm 34	
	4	0.0459 \pm 9	0.330 \pm 19	0.0522 \pm 31	289 \pm 5	289 \pm 15	
	5	0.461 \pm 12	0.333 \pm 33	0.0524 \pm 53	290 \pm 7	292 \pm 25	
	6	0.0440 \pm 9	0.361 \pm 21	0.0596 \pm 35	278 \pm 5	313 \pm 16	
	7	0.0476 \pm 10	0.361 \pm 24	0.0511 \pm 37	299 \pm 6	313 \pm 18	
	8	0.0466 \pm 9	0.417 \pm 20	0.0650 \pm 32	294 \pm 5	354 \pm 14	
	9	0.0469 \pm 9	0.392 \pm 21	0.0607 \pm 33	295 \pm 5	336 \pm 15	
	10	0.0461 \pm 9	0.345 \pm 21	0.0542 \pm 33	291 \pm 5	301 \pm 16	
	11	0.0494 \pm 9	0.662 \pm 23	0.0972 \pm 34	311 \pm 5	516 \pm 14	1572 \pm 65
	12	0.449 \pm 7	9.36 \pm 20	0.1512 \pm 30	2392 \pm 31	2374 \pm 20	2360 \pm 34
	13	0.447 \pm 8	9.27 \pm 27	0.1507 \pm 44	2380 \pm 36	2365 \pm 27	2354 \pm 49
	14	0.446 \pm 7	9.70 \pm 17	0.1579 \pm 24	2387 \pm 29	2407 \pm 16	2433 \pm 26
	15	0.453 \pm 7	9.71 \pm 20	0.1554 \pm 29	2410 \pm 31	2407 \pm 19	2406 \pm 31
	16	0.457 \pm 7	9.54 \pm 19	0.1515 \pm 27	2427 \pm 30	2392 \pm 18	2363 \pm 30
	17	0.448 \pm 6	9.85 \pm 16	0.1595 \pm 22	2386 \pm 29	2420 \pm 15	2451 \pm 23
	18	0.377 \pm 9	8.15 \pm 41	0.1567 \pm 81	2063 \pm 43	2247 \pm 45	2420 \pm 85
	19	0.471 \pm 14	10.66 \pm 64	0.1643 \pm 102	2487 \pm 61	2494 \pm 55	2500 \pm 101
	20	0.456 \pm 9	9.79 \pm 37	0.1559 \pm 60	2420 \pm 42	2415 \pm 35	2412 \pm 64
YZ02-18-3	1	0.0184 \pm 6	0.245 \pm 25	0.0965 \pm 102	117 \pm 4	222 \pm 20	
	2	0.0186 \pm 4	0.134 \pm 11	0.0522 \pm 43	119 \pm 3	127 \pm 10	
	3	0.0182 \pm 8	0.130 \pm 25	0.0512 \pm 103	117 \pm 5	123 \pm 23	
	4	0.0192 \pm 5	0.127 \pm 19	0.0482 \pm 73	122 \pm 3	122 \pm 17	
	5	0.0186 \pm 4	0.125 \pm 11	0.0486 \pm 44	119 \pm 3	119 \pm 10	
	6	0.0188 \pm 4	0.128 \pm 12	0.0496 \pm 45	120 \pm 3	122 \pm 10	
	7	0.0190 \pm 6	0.226 \pm 32	0.0866 \pm 91	121 \pm 4	207 \pm 19	
	8	0.0190 \pm 5	0.128 \pm 15	0.0490 \pm 60	121 \pm 3	123 \pm 14	
	9	0.0194 \pm 5	0.143 \pm 14	0.0536 \pm 51	124 \pm 3	136 \pm 12	
	10	0.0188 \pm 4	0.128 \pm 11	0.0493 \pm 42	120 \pm 3	122 \pm 10	
	11	0.0181 \pm 7	0.135 \pm 21	0.0540 \pm 85	116 \pm 4	128 \pm 19	
	12	0.0187 \pm 9	0.127 \pm 37	0.0492 \pm 145	119 \pm 6	121 \pm 33	
	13	0.0183 \pm 4	0.138 \pm 10	0.0550 \pm 40	117 \pm 2	132 \pm 9	
	14	0.0185 \pm 5	0.135 \pm 16	0.0530 \pm 64	118 \pm 3	129 \pm 14	
	15	0.0185 \pm 5	0.123 \pm 16	0.0482 \pm 64	118 \pm 3	118 \pm 15	
	16	0.0183 \pm 8	0.133 \pm 30	0.0529 \pm 123	117 \pm 5	127 \pm 27	
	17	0.0190 \pm 7	0.128 \pm 23	0.0492 \pm 91	121 \pm 4	123 \pm 21	
	18	0.0189 \pm 7	0.127 \pm 23	0.0488 \pm 89	121 \pm 4	122 \pm 21	
	19	0.0181 \pm 4	0.122 \pm 13	0.0488 \pm 51	116 \pm 3	117 \pm 11	
	20	0.0188 \pm 5	0.126 \pm 18	0.0485 \pm 70	120 \pm 3	120 \pm 16	

表 1(续)

样品号	分析点号	同位素比值(1 σ)			年龄/Ma		
		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
YZ02-21-1	1	0.0186 \pm 5	0.135 \pm 16	0.0526 \pm 62	119 \pm 3	129 \pm 14	
	2	0.0182 \pm 4	0.142 \pm 13	0.0568 \pm 52	116 \pm 3	135 \pm 11	
	3	0.0179 \pm 5	0.127 \pm 14	0.0514 \pm 56	115 \pm 3	121 \pm 12	
	4	0.0181 \pm 4	0.119 \pm 11	0.0479 \pm 43	116 \pm 3	115 \pm 10	
	5	0.0183 \pm 6	0.126 \pm 18	0.0499 \pm 73	117 \pm 4	121 \pm 16	
	6	0.0177 \pm 4	0.143 \pm 13	0.0587 \pm 52	113 \pm 3	136 \pm 11	
	7	0.0175 \pm 4	0.126 \pm 11	0.0523 \pm 47	112 \pm 3	121 \pm 10	
	8	0.0202 \pm 4	0.149 \pm 20	0.0534 \pm 43	129 \pm 3	141 \pm 10	
	9	0.0193 \pm 5	0.138 \pm 12	0.0520 \pm 47	123 \pm 3	132 \pm 11	
	10	0.0186 \pm 4	0.123 \pm 9	0.0478 \pm 35	119 \pm 2	117 \pm 8	
	11	0.0179 \pm 3	0.116 \pm 6	0.0472 \pm 24	114 \pm 2	112 \pm 5	
	12	0.0181 \pm 3	0.126 \pm 5	0.0503 \pm 20	116 \pm 2	120 \pm 5	
	13	0.0181 \pm 6	0.142 \pm 21	0.0571 \pm 85	116 \pm 4	135 \pm 18	
	14	0.0183 \pm 4	0.121 \pm 8	0.0478 \pm 33	117 \pm 2	116 \pm 7	
	15	0.0186 \pm 5	0.123 \pm 14	0.0481 \pm 57	119 \pm 3	118 \pm 13	
	16	0.0181 \pm 4	0.143 \pm 10	0.0573 \pm 43	116 \pm 2	135 \pm 9	
	17	0.0181 \pm 5	0.122 \pm 15	0.0489 \pm 60	115 \pm 3	117 \pm 13	
	18	0.0181 \pm 4	0.121 \pm 10	0.0487 \pm 41	115 \pm 2	116 \pm 9	
	19	0.0178 \pm 3	0.120 \pm 4	0.0487 \pm 18	114 \pm 2	115 \pm 4	
	20	0.0188 \pm 6	0.131 \pm 19	0.0503 \pm 73	120 \pm 4	125 \pm 17	
	21	0.0180 \pm 4	0.123 \pm 9	0.0494 \pm 38	115 \pm 2	118 \pm 8	
	22	0.0186 \pm 4	0.145 \pm 11	0.0564 \pm 44	119 \pm 3	137 \pm 10	
	23	0.0197 \pm 9	0.140 \pm 31	0.0517 \pm 118	125 \pm 6	133 \pm 28	
	24	0.0172 \pm 5	0.134 \pm 14	0.0566 \pm 60	110 \pm 3	128 \pm 12	
	25	0.0176 \pm 4	0.145 \pm 12	0.0595 \pm 51	113 \pm 3	137 \pm 11	
	26	0.0182 \pm 4	0.124 \pm 11	0.0496 \pm 48	116 \pm 3	119 \pm 11	
	27	0.0183 \pm 5	0.139 \pm 13	0.0551 \pm 54	117 \pm 3	132 \pm 12	
YZ02-22-2	1	0.0377 \pm 7	0.298 \pm 14	0.0574 \pm 27	239 \pm 4	265 \pm 11	
	2	0.0381 \pm 7	0.271 \pm 15	0.0517 \pm 30	241 \pm 4	244 \pm 12	
	3	0.0367 \pm 9	0.255 \pm 24	0.0505 \pm 49	232 \pm 6	231 \pm 19	
	4	0.0367 \pm 7	0.262 \pm 17	0.0519 \pm 34	232 \pm 4	236 \pm 4	
	5	0.0379 \pm 15	0.268 \pm 68	0.0513 \pm 132	240 \pm 9	241 \pm 55	
	6	0.0362 \pm 10	0.257 \pm 29	0.0516 \pm 60	229 \pm 6	232 \pm 24	
	7	0.0402 \pm 8	0.323 \pm 20	0.0565 \pm 36	254 \pm 5	277 \pm 15	
	8	0.0383 \pm 8	0.270 \pm 18	0.0512 \pm 35	242 \pm 5	243 \pm 15	
	9	0.0382 \pm 13	0.288 \pm 38	0.0547 \pm 74	242 \pm 8	257 \pm 30	
	10	0.0420 \pm 7	0.295 \pm 14	0.0510 \pm 24	265 \pm 4	263 \pm 11	
	11	0.0431 \pm 9	0.547 \pm 29	0.0921 \pm 51	272 \pm 6	443 \pm 19	
	12	0.0422 \pm 10	0.296 \pm 27	0.0510 \pm 47	267 \pm 6	264 \pm 21	
	13	0.0399 \pm 7	0.298 \pm 15	0.0542 \pm 28	252 \pm 4	265 \pm 12	
	14	0.0400 \pm 8	0.286 \pm 16	0.0518 \pm 30	253 \pm 5	255 \pm 13	
	15	0.0401 \pm 9	0.284 \pm 22	0.0514 \pm 40	254 \pm 5	254 \pm 17	
	16	0.0383 \pm 7	0.270 \pm 16	0.0542 \pm 30	242 \pm 4	243 \pm 13	
	17	0.0364 \pm 13	0.258 \pm 61	0.0515 \pm 122	230 \pm 8	233 \pm 49	
	18	0.0359 \pm 9	0.250 \pm 28	0.0506 \pm 57	227 \pm 6	227 \pm 23	
	19	0.0367 \pm 7	0.298 \pm 19	0.0589 \pm 37	232 \pm 4	265 \pm 15	

表 1(续)

样品号	分析点号	同位素比值(1 σ)			年龄/Ma		
		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
YZ02-25-2	1	0.0393 \pm 5	0.277 \pm 9	0.0512 \pm 17	249 \pm 3	249 \pm 7	
	2	0.0370 \pm 5	0.275 \pm 8	0.0538 \pm 17	235 \pm 3	247 \pm 7	
	3	0.0395 \pm 6	0.272 \pm 12	0.0500 \pm 23	249 \pm 4	244 \pm 10	
	4	0.0386 \pm 5	0.289 \pm 8	0.0543 \pm 15	244 \pm 3	258 \pm 6	
	5	0.0388 \pm 5	0.268 \pm 7	0.0502 \pm 14	245 \pm 3	241 \pm 6	
	6	0.0379 \pm 5	0.257 \pm 10	0.0492 \pm 19	240 \pm 3	233 \pm 8	
	7	0.0382 \pm 5	0.282 \pm 10	0.0536 \pm 19	241 \pm 3	252 \pm 8	
	8	0.0399 \pm 5	0.279 \pm 8	0.0508 \pm 15	252 \pm 3	250 \pm 7	
	9	0.0100 \pm 6	0.287 \pm 13	0.0520 \pm 25	253 \pm 4	256 \pm 11	
	10	0.0400 \pm 5	0.286 \pm 7	0.0518 \pm 13	253 \pm 3	255 \pm 6	
	11	0.0387 \pm 5	0.276 \pm 7	0.0516 \pm 14	245 \pm 3	247 \pm 6	
	12	0.0391 \pm 5	0.283 \pm 10	0.0524 \pm 18	247 \pm 3	253 \pm 8	
	13	0.0370 \pm 5	0.313 \pm 8	0.0612 \pm 16	234 \pm 3	276 \pm 6	
	14	0.0392 \pm 5	0.275 \pm 8	0.0509 \pm 15	248 \pm 3	247 \pm 7	
	15	0.0384 \pm 10	0.274 \pm 27	0.0518 \pm 51	243 \pm 6	246 \pm 21	
	16	0.0391 \pm 5	0.279 \pm 8	0.0517 \pm 14	247 \pm 3	250 \pm 6	
	17	0.0384 \pm 5	0.282 \pm 8	0.0533 \pm 16	243 \pm 3	253 \pm 7	
	18	0.0393 \pm 6	0.296 \pm 14	0.05450 \pm 25	249 \pm 4	263 \pm 11	
	19	0.0377 \pm 6	0.266 \pm 14	0.0512 \pm 27	238 \pm 4	239 \pm 11	
	20	0.0388 \pm 5	0.284 \pm 7	0.0530 \pm 13	246 \pm 3	254 \pm 6	
YZ02-27-2	1	0.0411 \pm 6	0.304 \pm 10	0.0535 \pm 19	260 \pm 4	269 \pm 8	
	2	0.0384 \pm 5	0.268 \pm 9	0.0506 \pm 18	243 \pm 3	241 \pm 7	
	3	0.0384 \pm 6	0.277 \pm 11	0.0523 \pm 21	243 \pm 3	248 \pm 9	
	4	0.0399 \pm 7	0.282 \pm 18	0.0513 \pm 33	252 \pm 5	252 \pm 14	
	5	0.0401 \pm 6	0.296 \pm 11	0.0535 \pm 19	253 \pm 3	263 \pm 8	
	6	0.0386 \pm 7	0.264 \pm 15	0.0496 \pm 28	244 \pm 4	238 \pm 12	
	7	0.0395 \pm 6	0.281 \pm 10	0.0516 \pm 19	250 \pm 3	252 \pm 8	
	8	0.0383 \pm 6	0.316 \pm 11	0.0599 \pm 22	242 \pm 3	279 \pm 9	
	9	0.0392 \pm 5	0.281 \pm 9	0.0520 \pm 17	248 \pm 3	251 \pm 7	
	10	0.0392 \pm 5	0.281 \pm 10	0.0521 \pm 18	248 \pm 3	252 \pm 8	
	11	0.0383 \pm 6	0.271 \pm 11	0.0513 \pm 21	242 \pm 3	244 \pm 9	
	12	0.0388 \pm 5	0.275 \pm 9	0.0514 \pm 16	245 \pm 3	247 \pm 7	
	13	0.0383 \pm 5	0.268 \pm 8	0.0507 \pm 15	243 \pm 3	241 \pm 6	
	14	0.0391 \pm 5	0.273 \pm 9	0.0507 \pm 16	247 \pm 3	245 \pm 7	
	15	0.0392 \pm 5	0.274 \pm 8	0.0506 \pm 14	248 \pm 3	246 \pm 6	
	16	0.0401 \pm 7	0.298 \pm 15	0.0539 \pm 27	254 \pm 4	265 \pm 11	
	17	0.0394 \pm 5	0.281 \pm 8	0.0517 \pm 15	249 \pm 3	252 \pm 6	
	18	0.0396 \pm 5	0.289 \pm 8	0.0529 \pm 14	250 \pm 3	258 \pm 6	
	19	0.0404 \pm 5	0.299 \pm 8	0.0536 \pm 14	255 \pm 3	265 \pm 6	

表 1(续)

样品号	分析点号	同位素比值(1σ)			年龄/Ma		
		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb
YZ02-28	1	0.0281±5	0.196±10	0.0504±27	179±3	181±9	
	2	0.0284±7	0.195±20	0.0498±53	180±5	181±17	
	3	0.0277±5	0.197±10	0.0514±27	176±3	182±9	
	4	0.0283±5	0.196±10	0.0502±26	180±3	182±8	
	5	0.0284±5	0.195±11	0.0503±29	179±3	181±9	
	6	0.0282±5	0.194±10	0.0500±26	179±3	180±8	
	7	0.0287±7	0.197±19	0.0497±49	183±4	183±16	
	8	0.0276±7	0.191±18	0.0502±50	175±4	177±16	
	9	0.0280±4	0.194±9	0.0502±23	178±3	180±7	
	10	0.0274±6	0.187±16	0.0495±44	174±4	174±14	
	11	0.0271±5	0.189±11	0.0506±31	173±3	176±10	
	12	0.0281±9	0.196±27	0.0505±71	179±6	181±23	
	13	0.0289±10	0.201±30	0.0505±78	184±7	186±26	
	14	0.0284±5	0.194±12	0.0496±31	181±3	180±10	
	15	0.0283±5	0.178±9	0.0458±23	180±3	167±8	
	16	0.0281±5	0.194±12	0.0502±33	179±3	180±11	
	17	0.0278±5	0.180±11	0.0468±29	177±3	168±9	
	18	0.0285±7	0.197±19	0.0501±49	181±4	182±16	
	19	0.0277±4	0.189±9	0.0495±25	176±3	176±8	
	20	0.0284±6	0.214±17	0.0546±44	181±4	197±14	
YZ02-16-1	1	0.0297±5	0.283±12	0.0691±31	189±3	253±10	
	2	0.0299±4	0.208±7	0.0504±16	190±3	192±6	
	3	0.0300±4	0.265±9	0.0640±22	191±3	239±7	
	4	0.0302±4	0.222±4	0.0533±8	192±2	204±3	
	5	0.0299±4	0.227±5	0.0552±13	190±2	208±4	
	6	0.0293±5	0.202±10	0.0501±25	186±3	187±9	
	7	0.0284±4	0.222±9	0.0566±23	181±3	203±7	
	8	0.0296±8	0.206±21	0.0504±52	188±5	190±17	
	9	0.0305±4	0.270±8	0.0643±19	194±3	243±6	
	10	0.0293±4	0.226±5	0.0559±13	186±2	207±5	
	11	0.0288±4	0.198±10	0.0498±24	183±3	183±8	
	12	0.0295±4	0.203±9	0.0500±21	187±3	188±7	
	13	0.0284±4	0.198±8	0.0506±20	181±3	184±6	
	14	0.0284±5	0.198±12	0.0507±31	180±3	184±10	
	15	0.0297±5	0.204±11	0.0498±28	188±3	188±10	

表 2 百里坪岩体 Sr-Nd 同位素测试数据

样品号	岩性	t/Ma	Rb/μg·g ⁻¹	Sr/μg·g ⁻¹	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2s _m	I _{Sr}
YZ02-12-3	英云闪长岩	285	31.9	1240.91	0.074	0.706161	20	0.7059
YZ02-18-3	花岗闪长岩	119	56.6	697.14	0.235	0.70553	17	0.7051
YZ02-21-2	闪长岩	116	69.9	788.22	0.257	0.705969	15	0.7055
YZ02-22-1	二长花岗岩	243	85.2	1089.41	0.226	0.707184	19	0.7064
YZ02-25-2	二长花岗岩	245	78.5	741.64	0.306	0.707791	18	0.7067
YZ01-27-2	二长花岗岩	248	63.8	973.55	0.190	0.707458	18	0.7068

样品号	Sm/μg·g ⁻¹	Nd/μg·g ⁻¹	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2s _m	T _{DM} /Ma	ε _{Nd} /t	f _{Sm/Nd}
YZ02-12-3	4.04	23.22	0.1052	0.511772	11	1929	-13.57	-0.47
YZ02-18-3	3.2	16.93	0.1143	0.512522	10	963	-1.01	-0.42
YZ02-21-1	5.36	29.05	0.1115	0.512412	10	1101	-3.15	-0.43
YZ02-22-2	5.85	36.78	0.0961	0.512051	9	1423	-8.34	-0.51
YZ02-25-2	3.79	22.39	0.1023	0.512064	12	1484	-8.25	-0.48
YZ01-27-2	5.68	35.78	0.0960	0.512016	11	1466	-8.95	-0.51

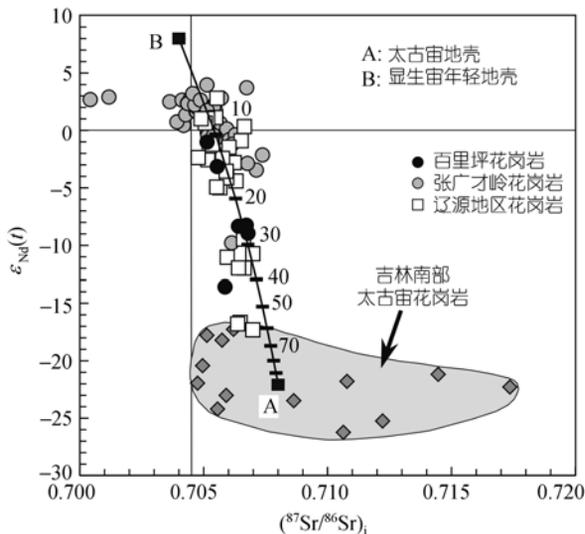


图 3 百里坪岩体岩石的 Sr-Nd 同位素特征

张广才岭花岗岩引自文献[25,26,29], 辽源花岗岩为作者未刊资料. 模拟计算中的年轻地壳端元(B)引自文献[25], 参数为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.704$, $\text{Sr} = 150 \text{ ppm}$, $\epsilon_{\text{Nd}} = +8$, $\text{Nd} = 15 \text{ ppm}$; 太古宙地壳端元(A)为文献[27]实测值之平均值, 参数为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.708$, $\text{Sr} = 800 \text{ ppm}$, $\epsilon_{\text{Nd}} = -22$, $\text{Nd} = 52 \text{ ppm}$

本文对百里坪岩体 8 个样品中自形晶锆石进行的 U-Pb 同位素测定表明, 获得的数据点均位于 U-Pb 谐和线上, 表明这些年龄具有确切的地质含义, 应代表岩浆侵位结晶年龄. 而由不同岩性样品获得的年龄值相差很大, 表明百里坪岩体应为一规模巨大的复式岩体, 形成于 285~116 Ma 的晚二叠世~早白垩世, 其中英云闪长岩形成最早, 为晚二叠世, 之后是形成于早三叠世的二长花岗岩和中侏罗世的闪长岩、钾长花岗岩, 而花岗闪长岩和闪长岩形成最晚, 为早白垩世. 由此可见, 百里坪岩体既不是早期所认为的晚太古代、早元古代花岗岩, 也不是加里东晚期花岗岩, 它是晚二叠世~早白垩世岩浆活动的产物, 但其主体岩性形成于中生代初期. 因此, 本文的年代学研究结果不支持所谓的的金城洞花岗绿岩带, 金城洞一带的太古宙变质岩只是显生宙花岗岩“海洋”中的一丝残片而已.

4.2 和龙地块的基底性质

早期研究认为百里坪岩体是绿岩中变质镁铁质火山岩深部部分熔融的产物^[5,8], 但从新获得的Nd同

位素数据来看, 百里坪岩体的 T_{DM} 值较小, 为 963~1929 Ma(表 2; 图 4), 而吉林省南部地区隶属于华北地台的太古代 TTG 片麻岩及前寒武纪斜长角闪岩的 T_{DM1} 值为 2100~3800 Ma(图 4)^[27], 明显不同于百里坪岩体的 T_{DM} . 这表明百里坪花岗岩的源岩物质既不是太古代的 TTG 片麻岩, 也不是早前寒武纪的斜长角闪岩. 相反, 百里坪岩体具有与兴蒙造山带南段辽源地区花岗岩相同的 Nd 同位素特征(图 4). 近几年的研究表明^[25~27], 包括辽源地区在内的整个张广才岭地区花岗岩的源岩物质为年轻的地壳, 且整个中亚造山带花岗岩都显示与其相似的特征^[28]. 因此我们有理由推测, 百里坪岩体的源岩也应是非常年轻的地壳物质. 这种地壳来源的花岗岩浆在早期上升过程中由于受到太古宙岩石的混染作用而使其 Nd 同位素模式年龄发生部分降低, 英云闪长岩(YZ02-12-3)中太古代锆石的出现是这一推论的最佳例证.

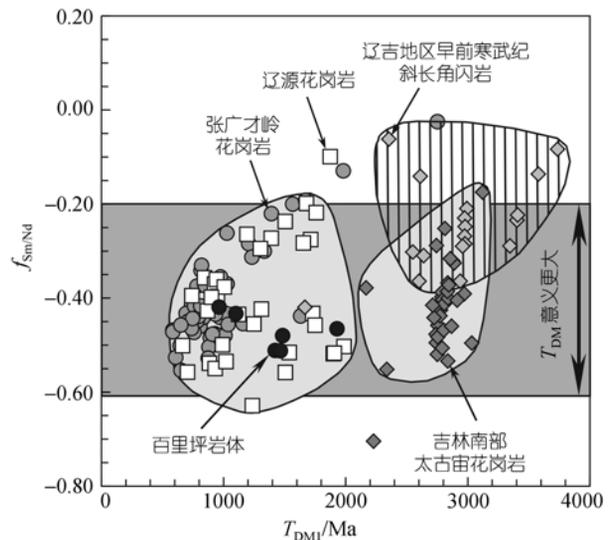


图 4 百里坪岩体岩石 Nd 模式年龄及与相关地区岩石的对比

辽吉地区早前寒武纪斜长角闪岩成分引自本页脚注 1)

为进一步确定上述地壳物质的混入比例, 本文以年轻地壳及华北地台太古代 TTG 作为端元组分, 对源岩进行了简单的混合计算. 从 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - I_{Sr} 图(图 3)可以看出, 二叠纪花岗岩中太古宙地壳混入的比例大约在 40% 左右, 百里坪岩体主体的早三叠世花岗岩中太古

1) Wu F Y, Zhao G C, Wilde S A, et al. Nd isotopic constraints on the crustal formation of the North China Craton. J Asian Earth Sci, in press

宙地壳(按 240 Ma 计算)的混入比例小于 30%，而早白垩世花岗岩中太古宙地壳的混入比例不到 15%，很显然，百里坪岩体的源岩以年轻地壳为主。另外，从这一模拟中还可以看出，从早二叠世的英云闪长岩、早三叠世的似斑状二长花岗岩到早白垩世花岗岩闪长岩和闪长岩，太古代地壳物质混入的比例逐渐降低。

由于花岗质岩浆来源于深部地壳的部分熔融，其 Sr-Nd 同位素特点势必反映了其较大范围内地壳深部岩石的状况。因此，以百里坪岩体为主要组成部分的和龙地块的基底应为年轻的地壳增生物质，而不是与金城洞一带太古宙岩石相当的古老地壳物质。结合后文将要讨论的与本区毗邻的朝鲜冠帽地块内出现造山带型的古生代地层，我们有理由认为和龙地块可能并不是华北地台的组成部分，它充其量只是卷入北部显生宙造山带中的一个古老岩石残片。

4.3 富尔河-古洞河断裂作为华北地台北缘边界的可能性

传统上华北地台的北界为赤峰-开原断裂，该断裂带向东经吉林省海龙、桦甸、夹皮沟而进入本研究区。目前国内学术界基本上都将位于和龙县卧龙至龙井县白金段的富尔河-古洞河断裂当作上述断裂的东延所在，并被认为是华北地台与北侧兴蒙造山带的分界。其主要依据是断裂带南北两侧的地质发展历史截然不同^[12]，其中金城洞太古宙花岗绿岩带的厘定是对上述立论的重要阐述。然而，这一划分存在一个明显的问题，那就是在夹皮沟以西，华北地台与兴蒙造山带具有明确的构造边界，其南部基本缺失或不发育显生宙花岗岩，而本区显生宙花岗岩却极为发育。而且，富尔河-古洞河断裂南侧的百里坪岩体具有与北侧兴蒙造山带中显生宙花岗岩相似的 Sr-Nd 同位素地球化学特征，从而表明该断裂两侧在基底属性上是类似的，且以年轻地壳为主，不应作为华北地台与兴蒙造山带的边界断裂处理，真正的地台北界应南移至百里坪岩体出露区以南，即此界线至少南移 50 km 以上而位于长白山火山以东或其附近。目前所见到的金城洞一带的太古代物质可能是从华北地台推覆至此的太古代岩片或卷入兴蒙造山带造山作用的古老块体。

上述认识对南部与本区毗邻的朝鲜北部的大地构造单元划分提出新的问题。传统上，朝鲜北部的构造单元由西向东依此划分为狼林(Rangnim)地块、冠帽(Kwanmo)地块和图们江(Tumangang)褶皱带^[4]，其中冠帽地块和图们江褶皱带之间的界限(在朝鲜称 Susongchon 断裂)为上述富尔河-古洞河断裂在朝鲜北部的延伸。但前几年，朝鲜学术界对这一地区的构造问题存在激烈争论^[4]。第一，冠帽地块和图们江褶皱带之间的 Susongchon 断裂并不具有构造块体边界的特点，它只是表现为逆冲推覆性质；其二，在冠帽地块中出现大量与图们江褶皱带相同的古生代地层(图们系)与古生代-早中生代岩浆岩组合，即两者在地层建造和岩浆作用方面并不存在明显差别。因此，不少学者认为冠帽地块和图们江褶皱带是一个统一的整体，均为蒙古-鄂霍茨克褶皱带(实际为中亚造山带)的组成部分，而这一认识与本文的研究结果完全一致。因此，传统的华北地台北缘边界问题应重新考虑。同时，如果本文的结论成立的话，中亚造山带或本区的兴蒙造山带在经过吉林省以后并不是一直向东延伸，而是转向南部延伸，其中日本的飞驒(Hida)地体可能就是上述南延所在^[28,32,33]，这有可能表明，亚洲东部的大地构造格局应根据新的资料重新审视。

致谢 感谢西北大学地质系大陆动力学教育部重点实验室柳小明和袁洪林老师在实验过程中给予的极大帮助。

参 考 文 献

- 徐公榆. 关于吉林省的若干基础地质问题. 中国区域地质, 1995, 1: 6-14
- 毕守业, 王德荣, 贾大成, 等. 吉林省地体构造的基本特征. 吉林地质, 1995, 14(1): 1-14
- 曾庆栋, 沈远超, 刘世臣. 吉林省金成洞绿岩带构造变形序列. 吉林地质, 1994, 13(1): 60-68
- 李俊建, 沈保丰, 李双保, 等. 辽北-吉南地区太古宙花岗岩-绿岩带地质地球化学. 地球化学, 1996, 25(5): 458-467
- 刘洪文, 邢树文. 和龙地区太古宙变质深成侵入体的地质地球化学特征. 吉林地质, 2001, 20(2): 10-17
- 沈保丰, 李俊建, 毛德宝. 华北地台绿岩带地质特征类型和演化. 前寒武纪研究进展, 1997, 20(1): 2-11
- 曾庆栋, 沈远超, 戴新义, 等. 吉林省金成洞地区元古宙花岗岩地质地球化学特征. 地质与勘探, 2001, 37(1): 79-81
- 张景枝, 张永焕. 吉林省早前寒武纪地质研究. 吉林地质, 1998, 17(3): 22-31
- 李俊建, 沈保丰, 李双保, 等. 辽北-吉南早前寒武纪大陆壳的

- 地质特征和演化. 中国区域地质, 1998, 17: 30~38
- 10 李俊建, 沈保丰, 李双保, 等. 辽北-吉南地区太古宙绿岩带. 华北地质矿产杂志, 1999, 14: 27~34
- 11 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 等. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京: 地质出版社, 1998. 1~212
- 12 吉林省地质矿产局. 吉林省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1988. 1~698
- 13 赵春荆, 彭玉鲸, 党增欣, 等. 吉黑东部构造格架及地壳演化. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1996. 1~186
- 14 Institute of Geology, State Academy of Sciences, DPR of Korea. Geology of Korea. Pyongyang: Foreign Languages Books Publishing House, 1996. 1~631
- 15 关 鸿, 孙 敏, 徐 平. 阜平杂岩中几种类型片麻岩的锆石激光探针等离子体质谱年代学研究. 岩石学报, 1998, 14(4): 460~470
- 16 Li X H, Liang X R, Sun M, et al. Precise $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age determination on zircon by Laser ablation microprobe-inductively coupled Plasma-mass spectrometry using continuous linear ablation, Chem Geol, 2001, 175: 209~219[DOI]
- 17 Ballard J R, Plain J M, Williams I S, et al. Two ages of porphyry intrusion resolved for the super-giant Chuquibambilla copper deposit of northern Chile by ELA-ICP-MS and SHRIMP. Geology, 2001, 29: 383~386[DOI]
- 18 梁细荣, 李献华, 刘勇康, 等. 激光探针等离子体质谱法(LA-ICPMS)用于年轻锆石 U-Pb 定年. 地球化学, 2000, 29(1): 1~5
- 19 Yuan H L, Wu F Y, Gao S, et al. Determination of U-Pb age and rare earth element concentrations of zircons from Cenozoic intrusions in northeastern China by laser ablation ICP-MS. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(22): 2411~2421
- 20 宋 彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. 地质论评, 2002(增刊), 5: 26-30
- 21 乔广生, 王凯怡, 郭起凤, 等. 冀东早太古宙岩石 Sm-Nd 同位素年龄测定. 地质科学, 1987, (1): 86~92
- 22 乔广生, 翟明国, 阎月华. 鞍山地区太古代岩石同位素地质年代学研究. 地质科学, 1990, (2): 158~165
- 23 吴福元, 江博明, 林 强. 中国北方造山带造山后花岗岩的同位素特点与地壳生长意义. 科学通报, 1997, 42: 2188~2192
- 24 吴福元, 孙德有, 林 强. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生. 岩石学报, 1999, 15(2): 181~189
- 25 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. Tectonophysics, 2000, 328: 89~113[DOI]
- 26 Wu F Y, Sun D Y, Li H M, et al. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis. Chem Geol, 2002, 187: 143~173 [DOI]
- 27 吴福元, 葛文春, 孙德有, 等. 吉林南部太古代花岗岩 Sm-Nd, Rb-Sr 同位素年龄测定. 岩石学报, 1997, 13: 499~506
- 28 Jahn B M, Wu F Y, Chen B. Massive granitoid generation in central Asia: Nd isotopic evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. Episodes, 2000, 23: 82~92
- 29 Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, et al. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic. Lithos, 2003, 67: 191~204[DOI]
- 30 李之彤, 赵春荆, 朱 群. 吉黑东部花岗岩类的形成和演化. 见: 中国地质学会编“七五”科学技术重要成果学术交流会议论文集. 北京: 北京科学技术出版社, 1992. 237~240
- 31 方文昌. 吉林省花岗岩类及成矿作用. 长春: 吉林科学技术出版社, 1992. 1~271
- 32 Tazawa J I. Middle Permian brachiopod faunas in East Asia and their zoogeographic significance. J Geol Soc Japan, 1992, 98: 483~496
- 33 Tazawa J I. Occurrence of the Boreal-type brachiopod Yakovlevia from the middle Permian of the Hida Gaien and south Kitakami belts, Japan and its tectonic implications. J Geol Soc Japan, 1999, 105: 227~230