

doi: 10.12029/gc20160311

王敏,戴传固,陈建书,等.贵州省梵净山区新元古代岩浆活动的年代学格架及其大地构造意义[J].中国地质,2016,43(3):843-856.

Wang Min, Dai Chuangu, Chen Jianshu, et al. Neoproterozoic geochronologic framework of magmatism in Fanjingshan area and its tectonic implications[J]. *Geology in China*, 2016, 43(3): 843-856(in Chinese with English abstract).

贵州省梵净山区新元古代岩浆活动的年代学格架及其大地构造意义

王 敏 戴传固 陈建书 王雪华 马会珍

(贵州省地质调查院,贵州 贵阳 550005)

摘要:江南造山带位于华夏与扬子地块之间,发育大量新元古代火成岩,是研究地球早期壳幔相互作用、板块构造演化的理想对象。江南造山带东段新元古代板块演化研究已初具雏形,但对其西南段构造演化还争议不断,主要问题在于没有构建与区域地质特点吻合的岩浆活动年代学格架。本文以江南造山带西南段梵净山为研究区,基于详细的区域地质填图结果,针对侵入于梵净山群(沉积时代 850~830 Ma)中的基性-超基性岩样品开展原位锆石年代学研究。新的年代学数据表明,侵入于梵净山群的 3 个辉长岩体结晶年龄分别为 813 Ma、804 Ma、748 Ma。结合前人发表数据,提出梵净山地区岩浆活动可划分为两个阶段:晋宁 I 期(850~825 Ma)、晋宁 II 期(820~750 Ma),分别对应于梵净山期、下江期盆地演化。该岩浆岩年代学格架与区域地层年代格架吻合,形成了完整的新元古代沉积-岩浆活动记录。这套沉积-岩浆组合的大地构造背景尚不明确,需要通过大地构造相分析予以确定。

关键词:江南造山带西南段;基性-超基性侵入体;锆石年代学;晋宁 I 期;晋宁 II 期

中图分类号:P541 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2016)03-0843-14

Neoproterozoic geochronologic framework of magmatism in Fanjingshan area and its tectonic implications

WANG Min, DAI Chuan-gu, CHEN Jian-shu, WANG Xue-hua, MA Hui-zhen

(*Geological Survey of Guizhou Province, Guiyang 550005, Guizhou, China*)

Abstract: The Jiangnan orogen is located between the Cathaysian and Yangtze blocks, where numerous Neoproterozoic igneous rocks have been identified, which provide a chance to study the mantle-crust interaction and plate tectonics of the earth's earlier history. The tectonic evolution of the eastern segment of the Jiangnan orogen seems to be clear, but the tectonic evolution of its southwestern segment remains controversial mainly due to absence of field relationship-consistent geochronologic framework. The Fanjingshan area is located in the northern portion of the southwestern segment of the Jiangnan orogen. 1: 50000 geological

收稿日期:2015-07-06;改回日期:2015-12-20

基金项目:中国地质调查局项目(1212011120108、1212011121106)和国家自然科学基金重点项目(41030315)联合资助。

作者简介:王敏,女,1967年生,博士,研究员,长期从事区域地质调查及岩矿鉴定工作;E-mail: wangm108@126.com。

mapping of that area revealed detail field relationship between different geological units, thus it is an ideal area to construct a reasonable geochronologic framework. This paper reports four in-situ zircon U/Pb dating results of mafic to ultramafic plutons which intruded the Neoproterozoic Fanjingshan Group. (deposition time 850–830 Ma). The new data obtained by the authors demonstrate that the three gabbroic plutons crystallized at 813 Ma, 804 Ma, and 748 Ma, respectively. Combined with previously published geochronologic data, the authors hold that the magmatism that occurred in the southwestern segment of the Jiangnan orogen consisted of two stages: the Jinning-I stage (850 to 825 Ma) and the Jinning-II stage (820 to 750 Ma), which correspond to the sedimentation time of Fanjingshan and Xiajiang Groups, respectively. Between them is an angular unconformity. Such a magmatic geochronological framework is consistent with that of the sedimentary rocks. The tectonic setting of the Neoproterozoic tectonostratigraphy is not very clear due to the fact that regional tectonic setting remains unclear.

Key words: southwestern segment of Jiangnan orogen; mafic to ultramafic pluton; zircon geochronology; Jinning-I Stage; Jinning-II Stage

About the first author: WANG Min, female, born in 1967, doctor, senior researcher, engages in regional geological survey and thin-section study. E-mail: wangm108@126.com.

Fund support: Supported by China Geological survey program(No.12120111201018, No.1212011121106), and National Key Natural Science Foundation Project (No. 41030315).

1 引 言

华南板块(South China Plate)由扬子、华夏两地块拼贴而成,结合带沿杭州—南昌—长沙—贵阳一线分布,形成一条长达1500 km,最宽超过500 km的前南华系岩石剥露带。这些浅变质岩石以不同规模的孤立块体出现,其四周被南华纪—古生代地层围绕,内部常见南华纪—古生代地层残留。前南华纪岩石与上覆地层之间为角度不整合、局部平行不整合接触,因而这些前南华纪岩石出露区中的一部分被Grabau^[1]统称为“华夏古陆”。而其中的绝大部分被黄汲清^[2]归入到“江南古陆”之中(图1)。

“江南古陆”内的岩石组合复杂,其中的火成岩是研究地球早期壳幔相互作用的理想对象,也是了解地球早期板块活动特点的窗口;因而吸引了大量学者对其展开深入研究,并取得了丰硕的成果^[3](见图1)。20世纪80年代中后期,板块构造理论及相关的蛇绿岩概念逐渐被国内学者接受,人们开始运用板块理论及相关概念来解释江南古陆的构造演化,逐步形成“江南造山带”的概念。分布于浙、皖、赣地区的超基性—基性岩、硅质岩岩块组合被解释为蛇绿岩,并认为其代表板块缝合带^[4-7]。随后具有岛弧火山岩性质的流纹岩、安山岩、少量玄武岩组合被鉴别出来,导致郭令智等^[8]提出沟、弧、盆体系,并运用板块构造理论解释这些古老变质岩的形成,认为“江南古陆”是最早沿扬子板块东南缘增生的

(中)元古代岛弧褶皱带^[9]。随着锆石原位测年技术的广泛使用,大量高精度年代学数据打破了传统认识(图1),表明江南造山带内的火成岩主要形成于新元古代。

从现已发表的数据看,江南造山带东段(湘东北以东地区)岛弧型火山岩及其位置得到了绝大部分人的认可,重建大地构造演化的数据基础已经基本具备。相对而言,江南造山带西段(湘东北以西)则争议很大。主要存在两种看法:以李正祥、李献华为代表的裂谷派,以及以周美夫等为代表的俯冲带派。Li et al.^[10-13]认为,华南新元古代构造演化以大火山岩省及相关裂谷型岩浆活动为主要特征^[14-15];该大火山岩省与超级地幔柱活动有关,范围波及澳洲大陆^[16]。另一方面,Zhou et al.^[17]主要根据花岗岩岩石地球化学特点认为华南新元古代岩浆岩为弧岩岩浆^[18],与华南板块周缘大洋板块的俯冲相关。

从上述简要回顾可以看出,虽然针对江南造山带西南段的年代学、地球化学数据已有相当程度的积累,但与东段对比,其基本构造单元及空间配置关系尚不明确,尚未构建合理的构造演化模型。通过对现有文献的仔细阅读、分析,可以发现,绝大部分文献侧重于对年代学、地球化学数据的详细描述,而对所分析岩石的构造关系、野外产状描述不足。从我们在黔东南梵净山地区的工作情况看,不论是基性岩还是酸性岩均具有相当宽泛的年代范围,而且不同时代的同种岩石往往具有相当不同的

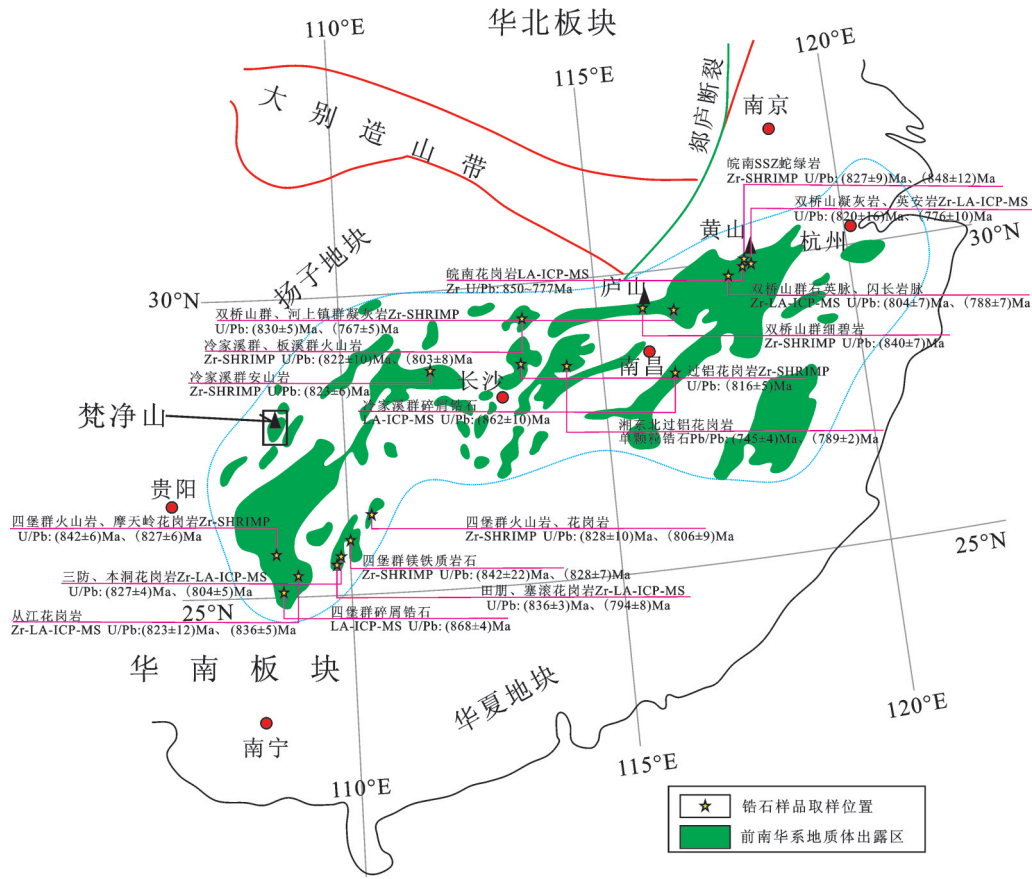


图1 “江南造山带”前南华系浅变质岩石及典型地质年代数据分布图(据文献[3]修改)

Fig.1 Simplified geological map showing the spatial distribution of Pre-Nanhua metamorphic rocks in the Jiangnan Orogen Belt. Some available high quality zircon U/Pb results are marked (modified after [3])

地球化学特点。显然,与野外关系吻合的火成岩年代学格架的构建是理解江南造山带西段构造演化历史的关键。

贵州梵净山区位于江南造山带西南段北西侧(图1),在20世纪70年代完成1:50000区域地质填图^[19]。该区地层出露完整,露头相对连续,地质体之间的野外关系相对清晰,原位年代学、地球化学数据也已有相当程度的积累,是构建江南造山带西段岩浆活动年代学格架的理想地区。本文选取梵净山区作为研究区,试图将野外填图结果与原位分析测试数据结合,构建江南造山带西段的年代学格架,为深入认识江南造山带构造演化过程提供基础制约。

2 区域地质及样品采集

梵净山地区核心部位为一长轴南北走向的椭圆形梵净山群浅变质地层出露区,四周被南华系、

下江群地层围限,两者之间为角度不整合(图2)。梵净山群中发育大量基性-超基性侵入岩,主要呈层状、似层状侵位于新元古界梵净山群白云寺下亚群变余砂岩、变余粉砂岩、变余凝灰质砂岩、板岩、千枚岩等副变质岩系中;偶见于核桃坪上亚群铜厂组。绝大部分侵入体的侵入界面与变质沉积界面基本平行,延长轴方向尖灭。部分超基性-基性岩体与围岩间显示明显侵入关系。单个岩体一般宽数十米,长数千米,个别长达20 km(图2)。

发育较好的岩体,由中心向两侧,依次呈现(含长)辉石橄榄岩、(含长)橄榄辉石岩、(含长)辉石岩等超基性岩,过渡为辉长岩、辉长辉绿岩、辉绿岩等基性岩,即呈现超基性岩-基性岩的就地结晶分异序列,所包括的岩石及特点如表1所列。

我们选取与梵净山群具有明确侵入接触关系的基性、超基性岩采集了3件辉长岩、1件橄榄辉石

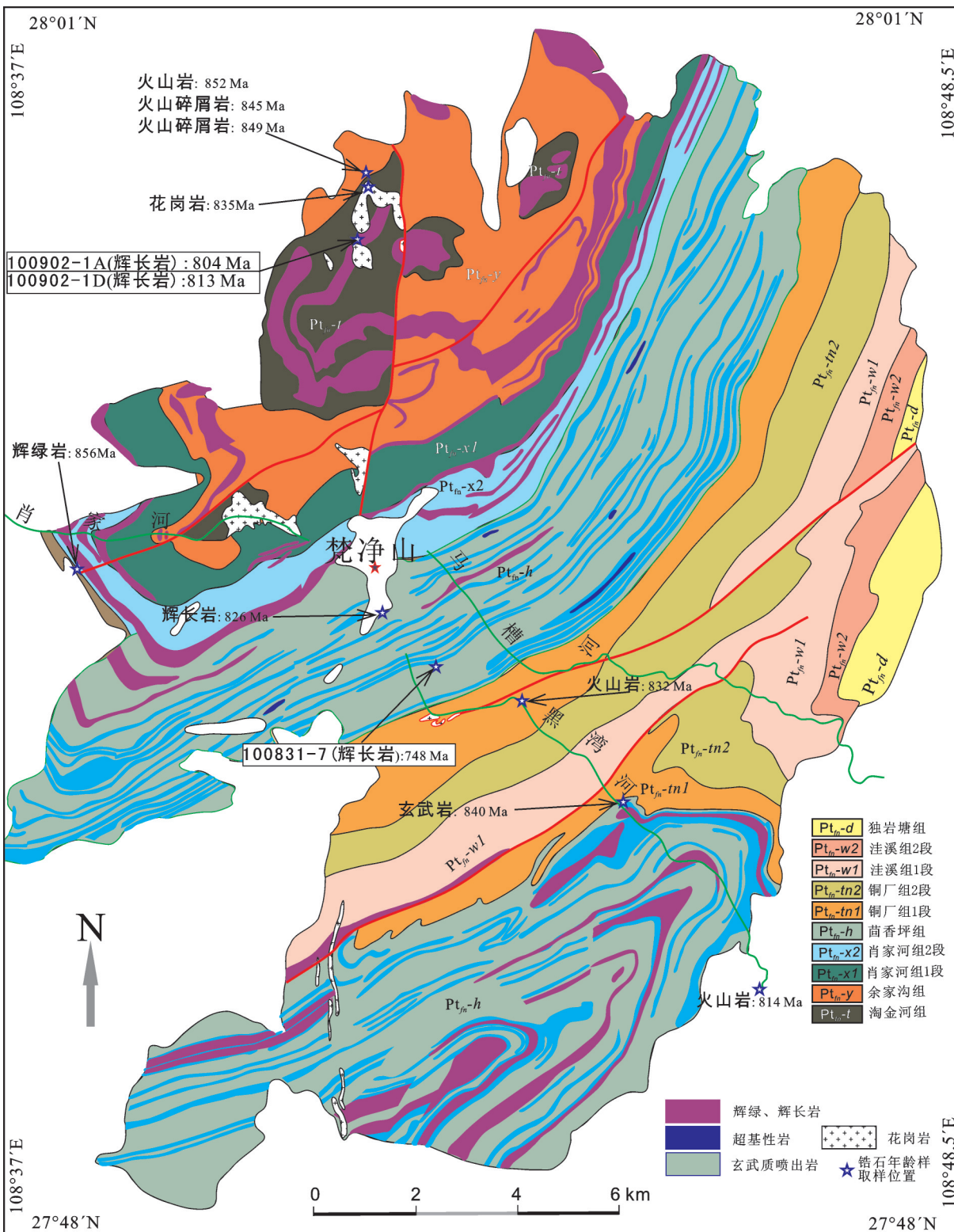


图2 梵净山地区超基性-基性岩平面分布图(方框内样品号为本文报道样品号及位置,其他为前人发表数据^[2])

(据贵州省地矿局108地质队梵净山地区1:5万地质图^[19]简化)

Fig.2 Geological map of the Fanjingshan area (modified after 1:50000 Geological Map of Fanjingshan^[19]), showing the distribution of mafic-ultramafic rocks

岩样品(每样超过20 kg)开展锆石年代学研究,采样位置:样品100831-7,辉长岩,采自梵净山中部茴香坪地区,顺层侵入茴香坪组;地理坐标N 27°54.057'; E 108°42.215'。样品100830-15,橄榄辉石岩;采自于梵净山中部黑湾河地区,顺层侵入铜厂组;地理坐标N 27°52.525'; E 108°44.423'。样品100902-1A,辉长岩,采自于梵净山西北部烂茶坪辉长岩岩体内部,侵位于淘金河组;地理坐标N 27°58.567'; E 108°41.223'。样品100902-1D,辉长岩,采自于梵净山西北部烂茶坪辉长岩岩体边部,侵位于淘金河组;地理坐标N 27°58.567'; E 108°41.223' 点340°方向约38 m处。

3 测试方法

锆石采用常规的重、磁选方法分选,在双目镜下手工挑纯。这些基性岩,特别是橄榄辉石岩锆石含量很低,仅能选出几十粒。因而,在制靶过程中往往将所有锆石黏贴在环氧树脂靶表面。随后将黏贴有锆石的样靶抛光至绝大部分锆石颗粒核部裸露。在测试前首先对待测锆石进行透射光、反射光以及阴极发光显微照相,以利于内部结构观察、选定分析点位。锆石的阴极发光图在北京离子探针中心、运用与HITACH S-3000N扫描电镜相连接的Gatan Chroma阴极发光仪完成。

锆石U、Pb含量及U/Pb比值的测定在中国地质科学院矿产资源研究所成矿过程国土资源部重点实验室完成。仪器型号Finnigan Neptune multiple collector-inductively coupled plasma-mass spectrometer(MC-

ICP-MS),用New Wave UP 213激光熔样器熔样。激光束直径25 μm,激发频率10Hz,平均激光能量2.5 J/cm²。控制标样为GJ-1以及M127。具体分析流程参照^[20]。分析信号的本底收集、信号积分、年龄时间偏移校正和标量校准使用ICPMS Data Cal软件^[21]完成,报告的U-Pb同位素分析误差为1σ。谐和图用Isoplot/Ex_ver3软件^[22]完成,用于年龄计算的U衰变常数为:²³⁸U = 1.55125×10⁻¹⁰a⁻¹和²³⁵U = 9.8454×10⁻¹⁰a⁻¹。

4 测试结果

4.1 锆石结构

绝大部分辉长岩、橄榄辉石岩中的锆石小于150 μm。虽然颗粒不甚完整,但锆石的晶形还可以看出。在阴极发光图片中(图3),绝大部分锆石具有楔形环带,显示典型基性岩锆石环带特点。部分锆石内部具有不发育环带的核。有些锆石重结晶现象普遍,强重结晶部位在阴极发光图像中显示不均匀浅色斑块。从下述U/Pb分析结果可以看出,无环带核部具有较老的年龄值,而重结晶部位则具有不正常的超低年龄值。

4.2 U/Pb同位素分析结果

部分分析点位置见图3。U/Pb同位素分析数据见表2。

从样品100831-7(辉长岩)中共选出了25粒锆石,对其中较完整的18粒锆石进行了U/Pb同位素分析,获得22个年代学数据。所有22个分析点均获取了谐和年龄(谐和度>95%),但表面年龄差别很

表1 贵州梵净山地区超基性-基性侵入岩岩石特征

Table 1 A brief list of petrologic features of the mafic-ultramafic plutons of the Fanjingshan area

岩石类型	岩石分类	主要矿物成分	结构特征
超基性侵入岩	辉石橄榄岩	橄榄石: 50%~65% 单斜辉石: 25%~30%	包含结构, 玻基斑状结构
	橄榄辉石岩	单斜辉石: 75% 橄榄石: 25%~5%	半自形-自形粒状结构, 包含结构
	辉石岩	单斜辉石: ≥95% 橄榄石: 5%	半自形-自形粒状结构
	含长辉石岩	单斜辉石: ≥95% 斜长石: 少量	半自形-自形粒状结构
基性侵入岩	辉长岩	斜长石、单斜辉石	辉长结构
	辉长辉绿岩	斜长石、单斜辉石	辉长辉绿结构
	辉绿岩	斜长石、单斜辉石	辉绿结构、嵌晶含长结构
	辉绿玢岩	斑晶基质均由斜长石、单斜辉石组成	斑状结构, 基质为显微辉绿结构

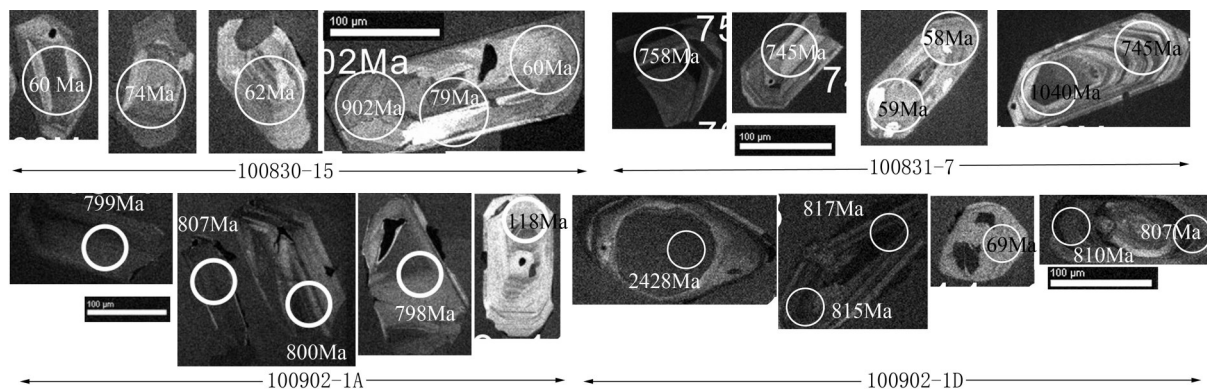


图3 四个样品锆石典型阴极发光图像

Fig.3 Type CL-images of zircons from the four analyzed mafic-ultramafic samples

大。其中有2个分析点位于环带不发育的锆石中及发育环带锆石颗粒的核部,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄大于1.0 Ga。9个分析点位于后期改造比较强的颗粒中,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄在43~115 Ma。其余10个分析点位于环带完整部位,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄在740~760 Ma,加权平均年龄为 (748 ± 2) Ma (MSWD=0.16)(图4-a),代表了其结晶年龄。

样品100830-15为橄榄辉石岩,从中仅选出了7粒锆石。在这7粒锆石中选了10个位置进行原位U/Pb同位素分析,获得8个有效数据(谐和度>95%)。除了一个分析点获得902 Ma的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄外,其他5个分析点获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄均在60 Ma左右,其加权平均年龄为 (61 ± 1) Ma (MSWD=0.085)(图4-b)。从阴极发光图像(图3)可以看出,这5个分析点位于受后期流体改造的锆石中,如此小的年龄值是后期流体活动致使锆石同位素体系重置的结果。

从样品100902-1A(辉长岩)中分选了近200粒锆石。选择其中25粒锆石开展原位U/Pb同位素分析,获得25个年代学数据。所有25个分析数据均位于谐和线上(图4-c),但表面年龄分布在56~830 Ma,具有最大表面年龄的14个分析点形成一簇,加权平均年龄 (804 ± 5) Ma (MSWD = 0.24)。这14个年龄值分布在一个比较小的范围内,在谐和图上组成密级数据群(图4-c),其平均年龄可以指示辉长岩侵位时间。其他较小年龄值的分析点位于受较强后期改造的锆石颗粒内或强改造部位。

样品100902-1D为辉长岩,仅挑出12粒锆石。15个分析点位于11粒锆石中。除了9、11、15号分

析点略微偏离谐和线之外,12个分析点位于谐和线之上(图3)。这些具有谐和年龄的分析点中有两个位于不发育环带的颗粒内,其表面年龄分别为1.6 Ga、2.4 Ga,3个分析点具有异常小的表面年龄。其他7个分析点位于4个锆石颗粒内,表面年龄在805~817 Ma,而且同一锆石内的两个分析点的表面年龄在误差范围内一致,其加权平均年龄为 (813 ± 8) Ma (MSWD = 0.19)(图4-d),该年龄可以代表辉长岩的侵位时间。

5 讨论

5.1 梵净山新元古代岩浆活动的年代学格架

区域地质调查结果显示,梵净山地区新元古代岩浆活动形成了大量火山岩(玄武岩、细碧岩、石英角斑岩等)、基性-超基性侵入岩、以及酸性侵入岩。前人已经对这些火成岩开展了年代学研究,结合本文新数据,讨论该区的新元古代岩浆活动的时代格架。

Zhou et al.^[23]针对梵净山群中的砂岩开展了碎屑锆石的年代学研究,发现所有砂岩层均有一个明显的碎屑锆石年龄峰值:869 Ma。该值限定了梵净山群沉积时代的下限。王敏等^[24]直接测定了梵净山群中若干火山岩夹层的岩浆锆石年龄:2件梵净山群中部火山岩锆石LA-ICP-MS平均U/Pb年龄分别为832 Ma(铜厂组)、851 Ma(余家沟组);另外2件梵净山群下部余家沟组细碎屑岩中锆石原位U/Pb测年结果比较接近,平均年龄分别为845 Ma、847 Ma。茴香坪组6段凝灰岩锆石年龄840 Ma^[25]。这些数据比较好地限定了在梵净山群同沉积岩活动时代:832~856 Ma。现有数据表明,在梵净山

表2 辉绿岩、辉长岩、橄榄辉石岩锆石U-Pb 同位素分析结果

测点号	含量/ 10^{-6}		同位素比值				表面年龄/Ma							
	Pb	^{232}Th	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	1σ			
			样品 100830-15 橄榄辉石岩											
01	14.19473	54.96005	0.00168	0.03641	0.00301	0.02542	0.00501	1.4	909.26	48.92	902.24	15.20	902.24	16.85
02	2.79155	148.87923	0.00288	0.00344	0.00018	0.00280	0.00047	2.1	98.24	137.01	60.33	3.29	60.07	1.18
03	1.38445	52.42474	0.00323	0.00412	0.00956	0.00757	0.00163	0.8	105.65	151.83	61.76	3.94	61.31	1.39
04	2.13166	101.16830	0.00317	0.00568	0.01239	0.00335	0.00051	3.3	100.09	142.57	79.40	5.34	79.36	1.81
05	2.81503	215.65451	0.00196	0.00304	0.00278	0.00966	0.00031	2.1	77.87	87.03	62.07	2.66	61.96	1.05
06	3.40463	161.10007	0.00145	0.00144	0.00183	0.00936	0.00043	1.0	100.09	74.99	60.54	1.75	60.07	0.78
07	0.86725	138.21511	0.00975	0.07714	0.01537	0.00197	0.00142	3.6	127.87	414.77	75.45	14.49	74.39	1.87
08	2.98445	203.27888	0.00220	0.00279	0.00960	0.00199	0.00028	1.5	76.02	112.95	61.55	2.67	61.60	1.16
09	7.87528	251.36953	0.01489	0.01678	0.01191	0.00056	0.00279	1.6	2506.48	158.80	239.71	13.46	76.35	3.59
10	0.00327	0.00000	1.25129	1.40108	0.69535	0.16396	0.11600	2.6	error	error	889.39	302.72	978.74	644.59
			样品 100831-7 辉长岩											
01	32.25324	158.54730	0.00095	0.02230	0.09505	0.01063	0.00106	1.2	664.83	33.33	602.51	12.51	585.31	9.83
02	20.26796	33.60752	0.00030	0.00738	0.12168	0.00070	0.01272	4.8	742.60	9.26	740.17	3.61	740.21	4.02
03	2.42367	47.42821	0.00065	0.00066	0.00672	0.00006	0.00511	7.8	77.87	33.33	43.56	0.64	43.16	0.35
04	3.26564	203.12468	0.00131	0.00217	0.00912	0.00008	0.00184	0.6	72.32	97.21	59.34	2.08	58.56	0.50
05	23.27797	100.50212	0.00068	0.01262	0.01825	0.12562	0.00129	0.9	761.12	21.14	763.75	8.73	762.86	5.98
06	20.06691	44.89823	0.00052	0.02305	0.17321	0.00168	0.01481	1.5	1032.41	18.68	1040.84	8.40	1040.73	9.20
07	35.41962	152.43927	0.00024	0.08065	0.00701	0.12250	0.00069	0.9	742.60	2.78	743.95	3.42	744.92	3.94
08	53.26983	301.29654	0.00381	0.11323	0.02826	0.12485	0.00862	0.5	855.55	122.37	759.73	13.58	758.41	12.24
09	28.63073	123.00530	0.00080	0.11440	0.01521	0.12522	0.00904	1.0	764.82	25.92	760.29	7.31	760.56	6.78
10	54.40299	27.12732	0.00057	0.07197	0.33373	0.00375	0.02113	3.3	1905.25	7.87	1889.15	11.37	1874.01	18.10
11	26.95164	137.77047	0.00059	0.01812	0.12351	0.00134	0.00752	0.8	747.84	20.37	751.86	8.78	750.72	7.67
12	21.87744	101.72812	0.00061	0.11064	0.01518	0.12460	0.00108	0.7	750.01	18.52	756.27	7.32	757.01	6.19
13	54.55339	248.00407	0.00080	0.09832	0.01735	0.12283	0.00790	0.7	772.23	25.93	752.54	8.39	746.83	9.28
14	8.61421	41.20080	0.00103	0.03250	0.12245	0.00218	0.01727	0.9	733.03	35.18	745.22	15.84	744.65	12.50

续表2

测点号	含量/ 10^{-6}				同位素比值				表面年龄/Ma									
	Pb	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ					
15	1.58879	32.18711	418.35855	0.04799	0.00120	0.03601	0.00082	0.00549	0.00006	0.00600	0.00157	5.7	98.24	63.88	35.92	0.81	35.28	0.38
16	56.10588	310.88780	327.28779	0.06436	0.00024	1.08696	0.00758	0.12251	0.00075	0.00904	0.00178	0.5	753.71	7.41	747.02	3.69	744.98	4.30
17	3.42692	108.67014	161.39234	0.04851	0.00099	0.12013	0.00267	0.01796	0.00016	0.00266	0.00047	0.7	124.16	48.14	115.19	2.42	114.77	0.99
18	4.99904	175.14586	192.49252	0.04857	0.00091	0.12203	0.00302	0.01815	0.00019	0.00250	0.00040	0.5	127.87	44.44	116.91	2.73	115.94	1.23
19	4.31528	175.02900	191.01059	0.04807	0.00095	0.12060	0.00250	0.01826	0.00017	0.00201	0.00028	0.5	101.94	48.14	115.62	2.26	116.65	1.05
20	5.20525	49.76405	416.88991	0.04888	0.00086	0.16410	0.00385	0.02434	0.00034	0.00527	0.00072	4.2	142.68	40.74	154.28	3.36	155.03	2.15
21	1.47533	90.54222	133.79949	0.04760	0.00139	0.05933	0.00175	0.00911	0.00010	0.00332	0.00036	0.7	79.72	68.51	58.52	1.67	58.49	0.62
22	2.56664	170.42258	255.59221	0.04733	0.00096	0.05998	0.00147	0.00918	0.00011	0.00200	0.00033	0.8	64.91	52.77	59.14	1.41	58.89	0.69
								样品 100831-7 辉长岩										
								样品 100902-1A 辉长岩										
01	69.13669	402.27548	332.74017	0.06621	0.00070	1.21950	0.02523	0.13359	0.00261	0.00965	0.00094	2.2	812.96	22.22	809.55	11.54	808.32	14.85
02	70.74632	415.34351	372.25240	0.06593	0.00048	1.20147	0.02672	0.13206	0.00276	0.00851	0.00089	2.2	805.56	14.82	801.26	12.33	799.59	15.69
03	57.38819	345.02375	282.63105	0.06575	0.00070	1.20367	0.05194	0.13294	0.00602	0.00771	0.00090	2.7	798.15	22.22	802.28	23.94	804.62	34.27
04	181.62129	1235.35664	572.28353	0.06785	0.00125	1.24749	0.07693	0.13340	0.00796	0.00709	0.00099	5.3	864.81	34.26	822.27	34.77	807.22	45.26
05	42.56043	257.45240	208.31519	0.06584	0.00054	1.20237	0.02165	0.13245	0.00217	0.00613	0.00099	3.4	1200.00	17.44	801.68	9.98	801.84	12.37
06	43.92289	278.45914	213.71102	0.06595	0.00105	1.19833	0.03259	0.13210	0.00361	0.00509	0.00103	4.2	805.56	33.33	799.81	15.05	799.84	20.56
07	8.09127	369.41308	228.32618	0.04850	0.00076	0.12213	0.00234	0.01834	0.00023	0.00065	0.00017	5.8	124.16	39.81	117.00	2.12	117.18	1.45
08	28.08970	164.19654	150.63674	0.06588	0.00073	1.19860	0.01748	0.13207	0.00150	0.00374	0.00126	5.0	1200.00	18.36	799.94	8.07	799.65	8.54
09	3.32288	90.16005	107.25745	0.04931	0.00157	0.12040	0.00360	0.01802	0.00026	0.00081	0.00038	4.9	161.20	74.06	115.43	3.26	115.16	1.66
10	57.40281	382.70819	294.64015	0.06449	0.00058	1.07834	0.01207	0.12165	0.00169	0.00327	0.00111	7.9	766.67	18.52	742.82	5.90	740.04	9.69
11	1.23231	52.73989	26.49965	0.04825	0.01265	0.06951	0.01968	0.01064	0.00111	0.00337	0.00121	11.0	122.31	512.89	68.23	18.69	68.21	7.07
12	94.62766	565.48727	380.89793	0.06613	0.00071	1.21718	0.01616	0.13358	0.00152	0.00541	0.00112	7.5	809.26	22.22	808.49	7.40	808.25	8.64
13	0.48815	26.46868	27.11665	0.06189	0.01066	0.07744	0.00626	0.01171	0.00043	0.00422	0.00087	4.4	670.07	380.52	75.73	5.90	75.05	2.71
14	2.79694	259.36389	275.14780	0.04757	0.00104	0.05703	0.00116	0.00881	0.00011	0.00075	0.00013	4.0	79.72	47.22	56.32	1.12	56.57	0.68
15	30.62412	169.63125	152.86838	0.06554	0.00045	1.19096	0.00962	0.13201	0.00093	0.00748	0.00099	4.4	790.74	14.81	796.41	4.46	799.33	5.32
16	21.93800	178.62980	200.21774	0.05732	0.00046	0.65686	0.00709	0.08330	0.00088	0.00577	0.00072	3.3	505.60	16.67	512.69	4.35	515.77	5.24

续表2

测点号	含量/10 ⁻⁶				同位素比值				表面年龄/Ma								
	Pb	²³² Th	²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ	²³⁸ U/ ²³² Th	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ		
样品 100902-1A 辉长岩																	
17	14.74490	69.32086	78.67538	0.06604	0.00094	1.19909	0.02433	0.13242	0.00341	0.01055	0.00135	809.26	29.63	800.17	11.24	801.64	19.42
18	2.79954	22.75740	58.15205	0.05192	0.00163	0.27126	0.00830	0.03837	0.00073	0.01052	0.00195	283.40	70.36	243.70	6.63	242.72	4.53
19	31.78446	158.95823	231.29275	0.06329	0.00036	1.02526	0.00936	0.11757	0.00096	0.01069	0.00105	716.68	12.96	716.55	4.69	716.59	5.52
20	71.00088	399.54325	309.11314	0.06613	0.00031	1.21556	0.01030	0.13341	0.00106	0.01153	0.00102	809.26	-189.82	807.74	4.72	807.27	6.01
21	32.38764	174.83898	158.56110	0.06611	0.00112	1.20172	0.03409	0.13210	0.00359	0.01154	0.00101	809.26	39.81	801.38	15.72	799.81	20.46
22	33.80727	186.36639	164.74174	0.06644	0.00099	1.20695	0.01620	0.13181	0.00204	0.01131	0.00113	820.37	29.63	803.79	7.45	798.16	11.59
23	2.00281	82.30532	103.38987	0.04887	0.00112	1.12359	0.00312	0.01850	0.00024	0.00293	0.00032	142.68	53.70	118.32	2.82	118.18	1.50
24	59.95867	324.51164	272.38636	0.06612	0.00031	1.21822	0.00859	0.13371	0.00090	0.01175	0.00102	809.26	-189.82	808.96	3.93	809.01	5.12
25	11.08799	41.08856	56.65884	0.06763	0.00117	1.27635	0.02187	0.13745	0.00144	0.01416	0.00154	857.40	37.04	835.23	9.76	830.23	8.18
样品 100902-1D 辉长岩																	
01	1.81392	29.50642	149.61711	0.04946	0.00132	0.13758	0.00492	0.02035	0.00058	0.02245	0.01341	168.60	62.95	130.89	4.39	129.85	3.67
02	2.31193	20.80339	38.37529	0.05183	0.00174	0.27592	0.00911	0.03886	0.00061	0.02430	0.01071	279.69	77.77	247.42	7.25	245.77	3.77
03	3.81421	8.99920	41.90653	0.06654	0.00203	1.50760	0.13032	0.15500	0.00536	0.04392	0.01593	833.33	60.18	933.47	52.82	928.92	29.89
04	10.94315	27.02566	125.27451	0.06626	0.00252	1.22785	0.07093	0.13412	0.00348	0.01176	0.00358	814.50	79.63	813.36	32.34	811.35	19.76
05	26.00690	69.87552	278.80927	0.06613	0.00106	1.22055	0.02283	0.13388	0.00139	0.01336	0.00149	809.26	33.33	810.03	10.44	809.96	7.90
06	21.01086	43.43810	262.53883	0.06636	0.00072	1.21965	0.02176	0.13335	0.00204	0.01200	0.00196	816.67	22.22	809.62	9.96	806.94	11.58
07	17.04108	101.35095	111.11836	0.06456	0.00152	1.21270	0.05513	0.13308	0.00336	0.01317	0.00126	761.12	50.00	806.43	25.30	805.40	19.11
08	9.06955	49.79902	69.77510	0.06721	0.00242	1.22872	0.07056	0.13445	0.00507	0.01663	0.00343	844.13	74.07	813.76	32.16	813.22	28.82
09	0.23247	0.00000	0.00000	0.68586	0.28204	3.18604	1.85901	0.28717	0.27241	0.11698	0.04175	4701.54	778.13	1453.78	484.67	1627.39	1385.21
10	1.76062	62.83097	72.47851	0.04818	0.00134	0.08662	0.00242	0.01313	0.00014	0.00435	0.00062	109.35	64.81	84.35	2.26	84.08	0.86
11	0.77226	9.40815	136.49842	0.05371	0.00480	0.08079	0.00915	0.01085	0.00032	0.02614	0.01323	366.72	203.68	78.89	8.59	69.55	2.06
12	55.93285	58.83991	100.73694	0.15730	0.00091	9.82066	0.14936	0.45380	0.00781	0.02852	0.00614	2427.78	9.88	2418.09	14.02	2412.13	34.65
13	17.61208	31.25978	232.18950	0.06670	0.00055	1.23948	0.02289	0.13481	0.00162	0.00667	0.00344	827.78	21.30	818.65	10.38	815.25	9.22
14	49.51952	183.94990	425.03556	0.06736	0.00085	1.25711	0.02135	0.13542	0.00142	0.00773	0.00279	850.00	21.30	826.61	9.61	818.69	8.08
15	13.70495	62.21947	99.33320	0.08352	0.00085	1.88474	0.03163	0.16366	0.00198	0.00514	0.00246	1281.17	20.37	1075.73	11.13	977.07	10.96

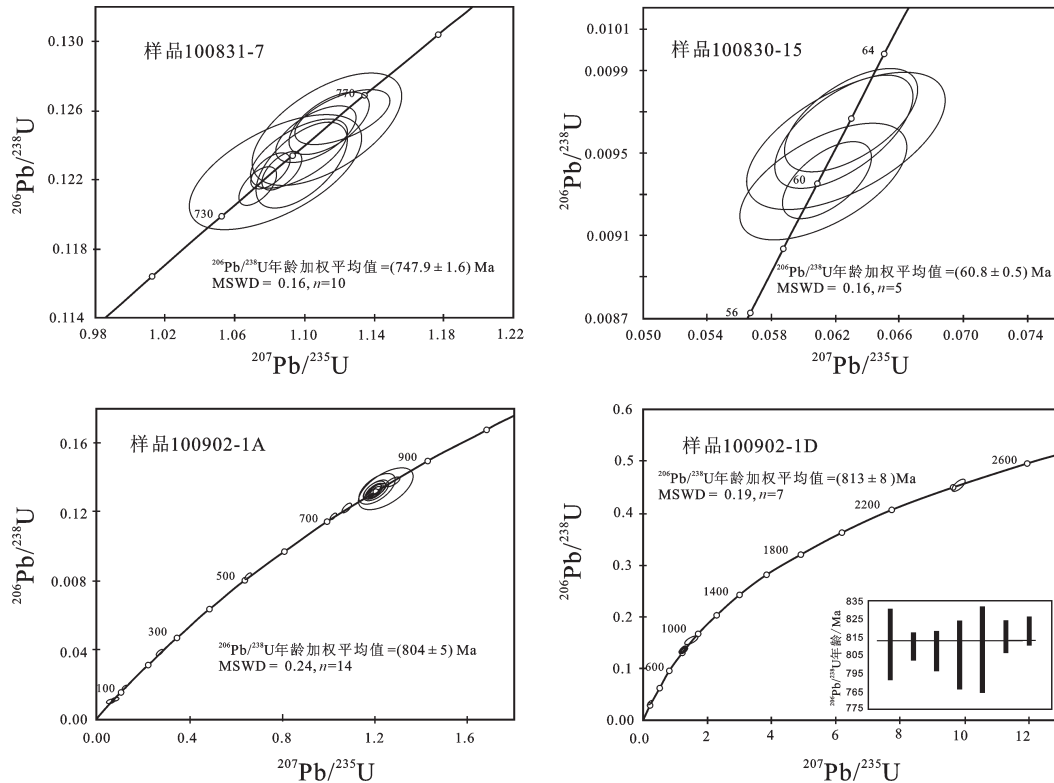


图4 梵净山基性-超基性侵入岩锆石U/Pb谐和图

Fig.4 Concordia diagram of LA-ICP-MS zircon U/Pb analyses of the mafic-ultramafic plutons of the Fanjingshan area

群地层沉积过程(或晚期)伴随着酸性岩浆活动,形成花岗岩(854~839 Ma)^[26]。本文报道的数据,结合前人数据^[3, 27]表明,侵位于梵净山群地层之中的基性-超基性岩具有较大时间跨度:748~856 Ma。

梵净山群与下江群地层间为角度不整合界面,下江群底部火山岩锆石U/Pb年龄为814 Ma^[28]、820 Ma^[25];下江群不同层位均发育火山岩,其锆石年龄在780~725 Ma^[29]。表明下江群沉积期间除了发育多期火山活动外,还形成了相应的多期基性-超基性侵入岩。

综合上述数据,结合研究区地层、构造特点,梵净山地区的岩浆活动历史可以划分为2个阶段:(1)早期从856 Ma开始,持续到832 Ma,主要形成夹持于梵净山群沉积地层中的火山岩以及少量辉绿岩、辉长岩、花岗岩侵入体。我们定义其为晋宁I期,对应于梵净山群沉积。(2)晚期从820 Ma开始,持续到725 Ma,为晋宁II期;形成侵入于梵净山群中的基性、超基性岩体,以及下江群地层中的火山岩夹层。上述岩浆岩年代学格架与近期建立的江南古

陆新元古界地层格架^[30]高度吻合,

5.2 构造意义

在南中国板块的构造演化过程中,晋宁运动具有举足轻重的意义。晋宁运动原指云南晋宁地区“澄江砂岩”与“昆阳变质岩系”之间角度不整合所代表的一次构造运动;随后该运动被视为发生在中元古代末-新元古代早期的、南中国板块变质基底与盖层之间的构造运动^[31]。近年发表的大量锆石原位测年数据表明,晋宁运动发生在新元古代中期(860~700 Ma左右)。如果仅从年代学数据分析,晋宁I期(梵净山期)、晋宁II期(下江期)岩浆活动看似是连续的。但815~820 Ma的角度不整合(其地质含义尚需通过详细构造解剖加以研究)将岩浆活动及相关的沉积作用划分成了两个阶段。对于晋宁II期构造-岩浆事件的解释不存在争议,大部分学者认为与地幔柱活动造成的大火成岩省有关^[6, 10-15, 32]。主要争议在于对晋宁I期构造岩浆事件的理解。

前人资料显示,江南造山带不同区段具有如下共性:(1)组成江南造山带前震旦纪地层主体之一

的双溪坞群、双桥山群、冷家溪群、梵净山群、四堡群具有一样的年代学特点:所有火山岩夹层的锆石年龄集中在860~820 Ma。(2)分布于双溪坞群、双桥山群、冷家溪群、梵净山群、四堡群中的超基性-基性岩与围岩具有相近的锆石年龄。(3)侵入于上述五个岩群中的花岗岩、花岗闪长岩的时代跨度与超基性-基性岩相类似。

但是,前人资料同样显示,江南造山带不同部位存在重要的差异:

(1)地层格架:在江南造山带东段(浙赣皖地区),新元古界内部角度不整合位于南华系(原震旦系)底部^[33],湘西北地区,代表性的不整合为位于南华系与板溪群之间的平行不整合^[31],而在贵州和广西,重要的角度不整合为位于下江群/丹洲群与梵净山群/四堡群之间的角度不整合^[34]。这些资料表明,沿着江南造山带从南西往北东,晋宁I期与晋宁II期之间的角度不整合逐渐变弱而趋于消失。

(2)火山岩组合:在浙赣皖地区,登山群/双溪坞群安山岩、流纹岩、少量玄武岩形成了典型的弧火山岩组合^[8-9],并以此为基础提出了沟-弧-盆体系。但从湘西北往南西,还未见报道有安山质火山岩发育。

(3)花岗质侵入岩:在浙赣皖地区,两个阶段的花岗岩具有明显不同的大地构造属性,早阶段(814 Ma之前)为同造山-晚造山花岗岩,而晚阶段(814 Ma之后)为后造山花岗岩^[35];这种特点在湘西北也有显现^[32]。但在梵净山地区,仅见早阶段的花岗岩,为高硅、过铝质花岗岩,具有A2型的地球化学特点^[24]。

(4)基性岩地球化学:在浙赣皖地区,同时代的超镁铁-镁铁岩具有不同的地球化学性质^[36];湘东北、湘西北不同时代的超镁铁-镁铁岩也具有明显不同的地球化学特点^[37];但在梵净山地区,两阶段的镁铁岩-超镁铁岩具有相似的元素地球化学特点^[3]。

从上述差别看,江南造山带北东、南西段显然记录了不同的大地构造演化特点。江南造山带北东段(湘东北以东地区)蛇绿岩组合、弧火山岩组合及其空间关系基本得到认可,据此建立了沟-弧-盆体系^[8-9]。但江南造山带南西段(湘东北以西)并不发育与之对应的体系:除了具有构造多解性的花岗质侵入岩,没有确切的弧火山岩组合;报道的蛇绿岩^[38]争议不断^[39-40]。综合前人资料,代表晋宁I期构

造事件的湖南冷家溪群、贵州梵净山群、广西四堡群分布在一个长宽各达数百千米的区域之内,并没有形成明显的线状产出。如果考虑到褶皱变形造成的地壳缩短,其分布范围可能更大。

基性-超基性Sm/Nd岩同位素结果^[27,41]显示,黔东南地区新元古代地幔岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值总体为正值,但具有明显时空变化:不同地区同一时代基性-超基性岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值很变化较大(对比梵净山区^[27]与宰便地区^[41]),而同一地区从早到晚 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值逐渐变大^[27]。这种特点表明,这些岩石源自亏损地幔,但遭到地壳物质不同程度的混染。对于地幔岩规模较大的地区(如梵净山),随着时间推移,幔源岩浆数量增多,地壳混染程度则相对降低。混染程度降低还表现在高场强元素与Nb、Ta元素亏损程度随时间下降^[27]。结合基性侵入岩中发现的大量古老俘获锆石,表明这些幔源岩浆岩形成于大陆环境。

黔东南地区新元古代幔源岩浆岩形成于大陆环境已基本成为共识,争议的焦点在于究竟是弧后拉张还是陆内裂谷造成幔源岩浆的形成。仅从年代学及地球化学角度无法回答上述问题,而详细的区域性大地构造相分析是解决上述争议的唯一有效途径。

有一点看似可以确定,江南古陆中的新元古代岩浆岩是扬子地块内后新元古代地层中碎屑锆石的主要来源之一。大量后新元古代地层碎屑锆石年代学数据^[41-43]已经发表,在几乎所有年龄谱中,860~720 Ma年龄峰值最为明显。表明从南华纪开始,江南古陆的核心区一直处于剥露状态,为周缘盆地提供物源。

6 结 论

(1)梵净山地区的新元古界梵净山群被较多基性-超基性岩侵位,原位锆石年代学证据指示其结晶时间为725~850 Ma。

(2)结合前人资料,梵净山地区岩浆活动可划分为两期:晋宁I期(850~825 Ma)、晋宁II期(820~725 Ma),分别对应梵净山群、下江群沉积事件。其间被角度不整合分隔。

(3)黔东南梵净山区新元古代岩浆岩形成于陆内环境,仅从地球化学、年代学数据无法判定其形成于大陆裂谷或弧后盆地。详细的区域性大地构造相分析是解决该问题的唯一有效途径。

致谢: 研究工作在莫宣学教授指导下完成, 审稿人及责任编辑提供了宝贵的修改意见, 在此深表感谢。

参考文献(References):

- [1] Grabau A W. Migration of the Geosynclines [M]. Peiking: The National Geological Survey of China, 1924.
- [2] 黄汲清. 中国主要大地构造单元[M]. 北京: 地质出版社, 1954.
Huang T K. Major Tectonic Units of China [M]. Beijing: Geological Publishing House. 1954(in Chinese).
- [3] 王敏. 黔东南梵净山地区晚元古代岩浆活动及其大地构造意义[D]. 中国地质大学(北京), 2012.
Wang Min. Neoproterozoic Magmatism of the Fanjingshan Region and Tectonic Implications[D]. Chinese University of Geological Sciences (Beijing), 2012(in Chinese with English abstract).
- [4] 汪新, 马瑞士. 怀玉山蛇绿混杂岩及古碰撞缝合线的确定[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1989, 1/2: 72-81.
Wang Xin, Ma Ruishi. Identification of the Huaiyushan ophiolite melange and associated paaleosuture [J]. Journal of Nanjing University(Natural Sciences), 1989, 1/2: 72- 81(in Chinese with English abstract).
- [5] 徐备, 乔广生. 赣东北晚元古代蛇绿岩套的Sm-Nd 同位素年龄及原始构造环境[J]. 南京大学学报(地球科学版), 1989, (3): 108-114.
Xu Bei, Qiao Guansheng. Sm-Nd isotopic age and the primary tectonic settings of the Neoproterozoic NE Jiangxi ophiolite suite [J]. Journal of Nanjing University(Natural Sciences), 1989, (3): 108-114(in Chinese with English abstract).
- [6] 李献华, 周国庆, 赵建新, 等. 赣东北蛇绿岩的离子探针锆石U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地球化学, 1994, 23(2): 125-131.
Li Xianhua, Zhou Guoqing, Zhao Jianxin, et al. SHRIMP Ion Microprobe zircon U-Pb age of the NE Jiangxi ophiolite and its tectonic implications[J]. Geochemica, 1994, 23(2): 125- 131(in Chinese with English abstract).
- [7] 丁炳华, 史仁灯, 支霞臣, 等. 江南造山带存在新元古代(~ 850Ma)俯冲作用: 来自皖南SSZ型蛇绿岩锆石SHRIMP U-Pb 年龄证据[J]. 岩石矿物学杂志, 2008, 27(5): 375-388.
Ding Binghua, Shi Rendeng, Zhi Xiachen, et al. Neoproterozoic (~850 Ma) subduction in the Jiangnan orogen: Evidence from the SHRIMP U- Pb dating of the SSZ - type ophiolite in southern Anhui Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2008, 27(5): 375-388(in Chinese with English abstract).
- [8] 郭令智, 卢华复, 施央申, 等. 江南中、新元古代岛弧的运动学和动力学[J]. 高校地质学报, 1996, 1(1): 1-13.
Guo Lingzhi, Lu Huafu, Shi Yangshen, et al. On the Meso-Neoproterozoic Jiannan island arc: its kinematics and dynamics [J]. Geological Journal of Universities, 1996, 1(1): 1- 13(in Chinese with English abstract).
- [9] 郭令智, 卢华复, 施央申, 等. 华南板块构造[M]. 北京: 地质出版社. 2001
Guo Lingzhi, Lu Huafu, Shi Yangshen et al. Plate tectonics of the south China [M]. Beijing: Geological Publish House, 2001(in Chinese).
- [10] Li Z X, Li X H, Kinny P D. The breakup of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China?[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1999, 173: 171-181.
- [11] Li Z X, Li X H, Kinny P D. Geochronology of Neoproterozoic syn- rift magmatism in the Yangtze Graton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia [J]. Precambrian Research, 2003, 122(1-4): 85-109.
- [12] 李献华, 王选策, 李武显, 等. 华南新元古代玄武质岩石成因与构造意义: 从造山运动到陆内裂谷[J]. 地球化学, 2008, 37(4): 382-398.
LI Xianhua, Wang Xuance, Li Wuxian, et al. Petrogenesis and tectonic significance of Neoproterozoic basaltic rocks in South China: from orogenesis to intracontinental rifting [J]. Geochimica, 2008, 37(4): 382-398(in Chinese with English abstract).
- [13] Li X H, Li Z X, Ge W C. Neoproterozoic granitoids in South China: crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma? [J]. Precambrian Research, 2003, 122: 45-83.
- [14] Wang J, Li Z X. History of Neoproterozoic rift basins in South China: implications for Rodinia break- up [J]. Precambrian Research, 2003, 122: 141-158.
- [15] 夏林圻, 夏祖春, 李向民, 等. 华南新元古代中期裂谷火山岩系: Rodinia 超大陆裂谷化-裂解的地质纪录[J]. 西北地质, 2009, 42(1): 1-33.
Xia Linqi, Xia Zuchun, Li Xiangmin, et al. Mid-Neoproterozoic Rift- related Volcanic Rocks in South China: Geological Records of Rifting and Break- up of the Supercontinent Rodinia [J]. Northwestern Geology, 2009, 42 (1): 1-33(in Chinese with English abstract).
- [16] Wang X C, Li X H, Li Z X, . The Willouran basic province of South Australia: Its relation to the Guibei large igneous province in South China and the breakup of Rodinia [J]. Lithos, 2010, 119: 569-584.
- [17] Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K. SHRIMP U- Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic, arc- magmatism along the western margin of the Yangtze block, south China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, .196: 51-67.
- [18] 周金城, 王孝磊, 邱检生. 江南造山带西段岩浆作用特性[J]. 高校地质学报, 2005, 11(4): 527-533.
Zhou JinCheng, Wang XiaoLei, Qiu Jiansheng. The Characters of magmatism in the western section of the Jiangnan Orogenic belt[J]. Geological Journal of Universities, 2005, 11(4): 527- 533(in Chinese with English abstract).

- [19] 贵州省革命委员会地质局. 中华人民共和国贵州省梵净山区1:5万区域地质调查报告及地质图[M]. 贵州地质矿产局, 1974. Geological Bureau of Revolutionary Committee of Guozhou Province, Geological Map of Fanjingshan region (scale 1:50000) [M]. Bureau of Geology and Mineral Resource, Guiyang, 1974(in Chinese).
- [20] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位U-Pb定年技术[J]. 矿床地质, 2009, 28: 481-492. Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS [J]. Mineral Deposits, 2009, 28(4): 481-492(in Chinese with English abstract).
- [21] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. Chemical Geology, 2008, 257: 34-43.
- [22] Ludwig K R, Isoplot/EX, rev. 3.00, A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 4: 71.
- [23] Zhou Jincheng, Wang Xiaolei, Qiu Jiansheng. Geochronology of Neoproterozoic mafic rocks and sandstones from northeastern Guizhou, South China: Coeval arc magmatism and sedimentation [J]. Precambrian Research, 2009, 170: 27-42.
- [24] 王敏, 戴传固, 王雪华, 等. 贵州梵净山白云母花岗岩锆石年代、铀同位素及对华南地壳生长的制约[J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 213-223. Wang Min, Mo Xuanxue, Dai Chuangu, et al. In-situ zircon geochronology and Hf isotope of muscovite-bearing leucogranites from Fanjingshan, Guizhou Province, and constraints on continental growth of the Southern China block[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(5): 213-223(in Chinese with English abstract).
- [25] 高林志, 陈建书, 戴传固, 等. 黔东南梵净山群与下江群凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 2014, 33(7): 949-959. Gao Linzhi, Chen Jianshu; Dai Chuangu, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating of tuff in Fanjingshan Group and Xiajiang Group from Guizhou and Hunan Provinces and its stratigraphic implications[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(7): 949-959(in Chinese with English abstract).
- [26] 王敏, 戴传固, 王雪华, 等. 贵州梵净山群沉积时代——来自原位锆石 U-Pb 测年证据[J]. 岩石矿物学杂志, 2012, 31(6): 843-857. Wang Min, Dai Chuangu, Wang Xuehua, et al. Sedimentation age of the Fanjingshan Group in East Guizhou Province: Evidence from in-situ zircon LA-ICP-MS U-Pb dating[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2012, 31(6): 843-857 (in Chinese with English abstract).
- [27] 薛怀民, 马芳, 宋永勤. 江南造山带西南段梵净山地区镁铁质-超镁铁质岩: 形成时代、地球化学与构造环境[J]. 岩石学报, 2012, 28(9): 3015-3030. Xue Huaimin, Ma Fan, Song Yongqing. Mafic-ultramafic rocks from the Fanjingshan region, southwestern margin of the Jiangnan orogenic belt: Ages, geochemical characteristics and tectonic setting[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(9): 3015-3030 (in Chinese with English abstract).
- [28] 高林志, 戴传固, 刘燕学, 等. 黔东南地区下江群凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地层意义[J]. 中国地质, 2010, 37(4): 1070-1080. Gao Linzi, Dai Chuangu, Liu Yanxue, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the tuffaceous bed of Xiajiang Group in Guizhou Province and its stratigraphic implication[J], 2010, 37(4): 1070-1080(in Chinese with English abstract).
- [29] 覃永军, 杜远生, 牟军, 等. 黔东南地区新元古代下江群地层时代及地质意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2015, 40(7): 1107-1120. Qin Yonjun, Du Yuansheng, Mo Jun, et al. Geochronology of Neoproterozoic Xiajiang Group in Southeast Guizhou, South China, and its geological implications [J]. Earth Sciences——Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(7): 1107-1120 (in Chinese with English abstract).
- [30] 丁孝忠, 高林志, 刘燕学, 等. 江南古陆新元古代地层格架及年代学制约[C]. 地层学杂志(第四届全国地层学会议论文集), 2014, 37(4): 626. Ding Xiaozhong, Gao Linzi, Liu Yanxue et al. Neoproterozoic Stratigraphic framework and geochronological constraints of the Jiangnan orogenic belt[C]. Journal of Stratigraphy (Papers of the 4th Conference of Stratigraphy of China), 2014, 37(4): 626 (in Chinese).
- [31] 郝杰, 李曰俊, 胡文虎. 晋宁运动和震旦系有关问题. 中国区域地质[J]. 1992, 2: 131-140. Hao Ji, Li Yuejun, Hu Wenhui. Problems related to the Jinning movement and the Sinian system [J]. Regional Geology of China, 1992, 2: 131-140 (in Chinese with English abstract).
- [32] 柏道远, 贾保华, 刘伟, 等. 湖南城步火成岩锆石 SHRIMP U/Pb 年龄及其对江南造山带新元古代构造演化的约束[J]. 地质学报, 2010, 84(12): 1715-1726. Bai Daoyuan, Jia Baohua, Liu Wei, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the igneous rocks from Chengbu, Hunan: Constraint on the Neoproterozoic tectonic evolution of the Jiangnan Orogenic belt[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(12): 1715-1726 (in Chinese with English abstract).
- [33] 董树文, 薛怀民, 项新葵, 等. 赣北庐山地区新元古代细碧岩-角斑岩系枕状熔岩的发现及地质意义[J]. 中国地质, 2010, 37: 1021-1033. Dong Shuwen, Xue Huaimin, Xiang Xinkui, et al. The discovery of Neoproterozoic pillow lava in spilite-ceratophyre of Lushan area, northern Jiangxi Province, and its geological significance[J]. Geology in China, 37(4): 1021-1033 (in Chinese with English abstract).

- [34] 戴传固, 张慧, 王敏, 等. 江南造山带西南段地质构造特征及其演化[M]. 北京: 地质出版社, 2010.
Dai Chuangu, Zhang Hui, Wang Min, et al. Tectonic Features and Evolution of the Southwestern Segment of the Jiangnan Orogenic Belt [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010 (in Chinese).
- [35] 薛怀民, 马芳, 宋永勤, 等. 江南造山带东段新元古代花岗岩组合的年代学和地球化学: 对扬子与华夏地块拼合时间与过程的约束[J]. 岩石学报, 2010, 26: 3215–3244.
Xue Huaimin, Ma Fan, Song Yongqin, et al. Geochronology and Geochemistry of the Neoproterozoic granitoid association from eastern segment of the Jiangnan Orogen, China: constraints on the timing and process of amalgamation between the Yangtze and Cathaysian blocks[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(11): 3215–3244 (in Chinese with English abstract).
- [36] 陆慧娟, 华仁民, 毛光周, 等. 德兴地区新元古代镁铁-超镁铁岩的地球化学特征及其地质意义[J]. 矿物学报, 2007, 27(2): 153–160.
Lu Huijuan, Hua Renmin, Mao Guangzhou, et al. Geochemistry and geochemical implications of mafic-ultramafic rocks as old as ~838 Ma in the Dexing area, NE Jiangxi[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2007, 27(2): 153–160 (in Chinese with English abstract).
- [37] 王孝磊, 周金城, 邱检生, 等. 湖南中-新元古代火山-侵入岩地球化学及成因意义[J]. 岩石学报, 2003, 19(1): 49–60.
Wang Xiaolei, Zhou Jincheng, Qiu Jiansheng, et al. Geochemistry of the Neoproterozoic volcanic-intrusive rocks from the Hunan Province and its petrogenic significances [J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(1): 49–60 (in Chinese with English abstract).
- [38] 夏斌. 广西龙胜元古代二种不同成因蛇绿岩岩石地球化学及侵位方式研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1984, (3): 554–566.
Xia Bin, A study on geochemical characteristic and emplacement style of two different ophiolites of Later Proterozoic Xuefeng stage in the Longsheng regions, Guangxi, southeast China[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 1984, (3): 554–566 (in Chinese with English abstract).
- [39] 张桂林, 梁金城. 桂北龙胜地区基性-超基性岩的变形分解构造及其大地构造意义[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1993, 13(4): 357–365.
Zhang Guilin Liang Jincheng, The deformation partitioning structure of basic-ultrabasic rocks in Longsheng area of north Guangxi and its geotectonic significance[J]. Journal of Guilin College of Geology, 1993, 13(4): 357–365(in Chinese with English abstract).
- [40] 葛文春, 李献华, 李正祥, 等. 桂北“龙胜蛇绿岩”质疑[J]. 岩石学报, 2000, 16(1): 111–118.
Ge Wenchun, Li Xianhua, Li Zhengxiang, et al. “Longsheng ophiolite” in North Guangxi revisited[J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(1): 111–118 (in Chinese with English abstract).
- [41] 王劲松, 周家喜, 杨德智. 黔东南宰便辉绿岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究[J]. 地质学报, 2012, 86(3): 460–468.
Wang Jingsong, Zhou Jiayi, Yang Dezhi, Geochemistry and zircon U-Pb age of the Zaibian diabase, SE Guizhou Province, SW China[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(3): 460–468 (in Chinese with English abstract).
- [42] 王鹏鸣, 于津海, 孙涛, 等. 湘东新元古代沉积岩的地球化学和碎屑锆石年代学特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(12): 3841–3857.
Wang Pengmin, Yu Jinhai, Sun Tao, et al. Geochemistry and detrital zircon geochronology of Neoproterozoic sedimentary rocks in eastern Hunan Province and their tectonic significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(12): 3841–3857 (in Chinese with English abstract).
- [43] Wang L J, W L Griffin, Jin Haiyu, et al. Precambrian crustal evolution of the Yangtze Block tracked by detrital zircons from Neoproterozoic sedimentary rocks [J]. Precambrian Research, 2010, 177: 131–144.