

浙东南地区晚中生代“祝村组”的解体:相关火山岩形成时代及岩石成因*

刘磊^{1,2,3} 徐夕生³ 夏炎³ 梁琼丹^{1,2} 裴小利^{1,2}

LIU Lei^{1,2,3}, XU XiSheng³, XIA Yan³, LIANG QiongDan^{1,2} and PEI XiaoLi^{1,2}

1. 桂林理工大学地球科学学院,广西隐伏金属矿产勘查重点实验室,桂林 541004

2. 桂林理工大学广西有色金属隐伏矿床勘查及材料开发协同创新中心,桂林 541004

3. 南京大学地球科学与工程学院,内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室,南京 210023

1. Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

2. Collaborative Innovation Center for Exploration of Hidden Nonferrous Metal Deposits and Development of New Materials in Guangxi, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

3. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2016-04-20 收稿, 2016-08-17 改回.

Liu L, Xu XS, Xia Y, Liang QD and Pei XL. 2017. Disintegration of Late Mesozoic Zhucun Formation in southeastern Zhejiang: Geochronology and petrogenesis of the related volcanic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 33(1):115–126

Abstract The once designated Zhucun Formation in Xiaoxiong basin is investigated to be geochronologically earlier (128Ma) not only than the overlying upper volcanic series (110~88Ma), but also than the underlying Jiuliping Formation (122~120Ma), but coeval to the Xishantou Formation (130~128Ma). Zircon Hf isotopic compositions of the studied Zhucun Formation rhyolitic tuff show enriched characteristics with Paleoproterozoic crustal model ages ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -16.4 \sim -13.6$, $t_{\text{DM2}} = 2.01 \sim 2.09\text{Ga}$), also similar to the Lower Moshishan Group, such as the Xishantou Formation. Note these and the pyroclastic-rhyolitic volcanic rock assemblages and other regional geological features, the foundation basis of the Zhucun Formation is considered to be insufficient, and the Formation should be disintegrated. On the other hand, the enriched zircon Hf isotopic compositions of the studied Zhucun Formation rhyolitic tuff show that it was derived mainly from partial melting of the Paleoproterozoic crustal basement, further indicating that the Lower Moshishan Group volcanic rocks inland were derived with depleted-mantle derived material contribution, which was barely noticed in previous studies. The increased depleted-mantle derived material contribution in the volcanic petrogenesis and the pyroclastic-rhyolitic-bimodal volcanic assemblages both imply increased lithospheric extension, plausibly caused by rollback of the subducted paleo-Pacific slab.

Key words Zhucun Formation; Disintegration of stratigraphic unit; Geodynamic constraints; Late Mesozoic; SE China

摘 要 浙东南沿海小雄盆地中“祝村组”火山岩的年代学研究表明,其形成时代(128Ma)不仅老于其上覆的上火山岩系(110~88Ma),还老于本应在其下伏的九里坪组(122~120Ma)而与区域内西山头组时代相同(130~128Ma)。“祝村组”火山岩的锆石 Hf 同位素组成表现出富集的特征并具有古元古代的地壳模式年龄($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -16.4 \sim -13.6$, $t_{\text{DM2}} = 2.01 \sim 2.09\text{Ga}$),同样与磨石山群下部地层如西山头组相似。结合火山碎屑岩-流纹岩的岩石组合以及区域地质特征,本研究认为“祝村组”的建组理由不充分,建议将其解体。同时,“祝村组”火山岩富集的 Hf 同位素组成表明其源区为较为纯粹的古元古代地壳基底物质,进一步暗示相对内陆地区的下岩系早期火山岩形成过程中已有较明显的亏损幔源物质参与,这是以往研究中未明确识别出的。浙东南地区晚中生代火山岩岩石成因中底侵幔源物质贡献比例的升高和火山碎屑岩-流纹岩-双峰式火山岩岩石组合均暗示了逐渐增强的岩石圈伸展应力环境,这可能与古太平洋俯冲板片的后撤作用密切相关。

关键词 祝村组;地层单元解体;构造背景制约;晚中生代;中国东南部

* 本文受国家重点研发计划项目(2016YFC0600203)、国家自然科学基金项目(41430208)和桂林理工大学科研启动费资助项目联合资助。

第一作者简介:刘磊,男,1988年生,博士,讲师,E-mail: liulei@glut.edu.cn

中图法分类号 P588.141; P597.3

中国东南部最醒目的地质特征是大面积分布的火成岩,主要包括不同类型的花岗岩及相应的火山岩(Chen and Jahn, 1998; 周新民, 2003; Zhou *et al.*, 2006; Zheng *et al.*, 2013),与之伴随的还有大规模的钨-锡等多金属成矿(Hsü, 1943; 徐克勤等, 1984; Li *et al.*, 2013)。晚中生代是该地区大规模岩浆作用及成矿的关键时期,该时代的火山岩由于具备分布广泛、形成时代长而连续、各地区代表性剖面地层便于对比、与侵入岩具备“时空源”一致性等特点,为火成岩时空分布格局、岩石成因、壳幔相互作用形式及变化、构造动力学机制等研究提供了重要信息(Guo *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2012, 2014, 2016)。

近年来对中国东南部晚中生代火山岩的研究已厘定了其中大部分地层的形成时代和归属,并已识别出岩石成因中逐渐增强的亏损地幔来源岩浆的贡献,体现在不同地层单元火山岩分别具有特征的全岩 Nd 和锆石 Hf 同位素组成(Guo *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2012, 2014, 2016)。然而,浙东南地区晚中生代磨石山群顶部“祝村组”的时代归属至今并不明确,甚至关于该地层单元是否存在也有不同意见(浙江省地质矿产局, 1989; 俞云文和胡开明, 2001; 王加恩等, 2015)。该问题为彻底揭示区域内晚中生代火山作用过程、火成岩时空分布格局、区域地质演化等深层次地质问题造成了障碍。本研究选择小雄盆地中“祝村组”火山岩为主要研究对象,并以同地区小雄组火山岩以及浙东南地区最典型的

九里坪剖面中九里坪组、塘上组等相关火山岩作为对比,从年代学、同位素组成、岩石组合、区域地质特征等角度论证了“祝村组”建组理由的缺陷,建议将其解体,并进一步讨论了相关火山岩的成因及地质意义。

1 地质背景及样品采集

中国东南部以浙江省境内的江山-绍兴断裂为界,分属具有不同地壳基底演化历史的扬子板块和华夏地块(图 1a; Chen and Jahn, 1998)。出露于浙东南地区的古元古代八都群变质岩,以及同时代的花岗岩和闽西北的少量斜长角闪岩是华夏地块现已确定的最古老的前寒武纪岩石(胡雄健, 1994; Li, 1997; Xia *et al.*, 2012),河流砂碎屑锆石等的研究同样表明华夏地块东部的地壳主要形成于古元古代(Xu *et al.*, 2007)。中国东南部晚中生代火山活动频繁、喷发强烈,形成一套广泛分布的陆相火山-沉积岩地层,在浙东南、闽东和粤东成连续带状分布,而在江西、浙西北、闽西、桂东南主要以盆地形式散布(图 1a)。这些火山岩与同时期的花岗岩伴生并构成了一条北东向的火山-侵入岩带,其中火山岩的分布面积几乎是侵入岩的两倍,并以浙东南地区尤为发育。浙东南地区晚中生代最早的火山活动发生于早侏罗世,但出露零星,面积约 46 km²,岩性上为一套含火山碎屑岩的陆相含煤沉积地层,被命名为毛弄组(陈荣等, 2007)。浙东南地

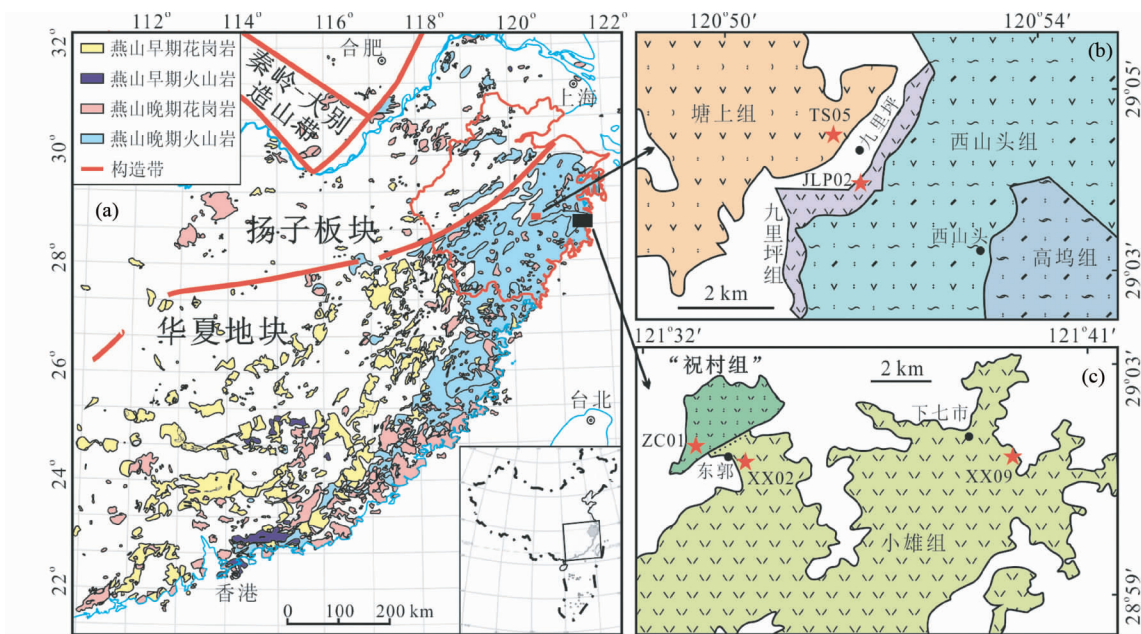


图 1 中国东南部晚中生代花岗岩-火山岩分布简图(a, 据 Zhou *et al.*, 2006 修改)和所研究浙东南地区火山岩地层分布及采样位置(b, c)

Fig. 1 Simplified geological map of SE China showing the distribution of Late Mesozoic granitic-volcanic rocks (a, modified after Zhou *et al.*, 2006) and distribution of the studied volcanic strata in southeastern Zhejiang Province and sample locations (b, c)

区白垩纪火山岩由广泛发育的区域性不整合面分为上、下两个岩系。下火山岩系为磨石山群,出露面积达 40000 km² 以上,自下而上划分为大爽组、高坞组、西山头组、茶湾组、九里坪组和“祝村组”,其中大爽组、高坞组和西山头组的岩性以酸性火山碎屑岩为主,茶湾组主要由沉凝灰岩以及沉积岩组成,而九里坪组主要包含中、酸性熔岩如流纹岩。上火山岩系主要为永康群,零散分布于十余个火山盆地中,岩性除沉积岩外主要由大量流纹质火山碎屑岩、熔岩和少量玄武岩构成的双峰式火山岩,天台盆地等少数地区的上火山岩系又被称为天台群,自下而上包括塘上组、两头塘组和赤城山组(浙江省地质矿产局, 1989)。浙东南地区最晚期的火山岩出露于沿海的小雄盆地,被命名为小雄组,为一套中酸偏碱性的火山岩(翁祖山和俞方明, 1999),这也被认为是中国东南部晚中生代岩浆活动结束的标志(He and Xu, 2012)。

天台盆地九里坪剖面为磨石山群代表性剖面,长期以来在区域地层研究中具有重要的控制与对比作用。该剖面包含磨石山群的大部分地层,其中九里坪组岩性以酸性熔岩为主,与下伏茶湾组沉凝灰岩呈喷发不整合接触,与上覆馒头组酸性火山碎屑岩、砂岩和粉砂岩等呈不整合接触。本文有 2 件样品取自天台盆地(图 1b),分别为九里坪组流纹岩(JLP02: 29°03′55.4″N、120°51′46.4″E)和塘上组流纹质凝灰岩(TS05: 29°04′24.3″N、120°51′27.6″E)。小雄盆地是“祝村组”和小雄组广泛发育的区域,其中“祝村组”流纹质熔结凝灰岩与小雄组下段流纹质凝灰岩、碱长流纹岩和沉凝灰岩等呈不整合接触(翁祖山和俞方明, 1999)。本文有 3 件样品取自该盆地(图 1c),分别为“祝村组”下部流纹质凝灰岩(ZC01: 29°01′40.9″N、121°33′9.2″E)、小雄组晶屑凝灰岩(XX02: 29°01′24.5″N、121°34′10.3″E)和流纹岩(XX09: 29°01′29.5″N、121°39′36.6″E)。

2 分析方法

锆石分选采用传统的重砂方法完成,CL 图像分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室扫描电子显微镜和 Gatan MonoCL3 + 型阴极荧光光谱仪上完成,以分析锆石的内部结构特征以及为锆石 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素分析选取合适的点位。

锆石 U-Pb 年龄测定在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室搭载 New Wave UP213 固体激光剥蚀系统的 Agilent 7500a 型 ICP-MS 上完成,仪器设置及分析流程参照 Jackson *et al.* (2004)。具体的工作参数为:激光脉冲重复频率 5 Hz,脉冲能量为 10 ~ 20 J/cm²,熔蚀孔径为 25 μm。ICP-MS 的分析数据通过即时分析软件 GLITTER (van Achterbergh *et al.*, 2001) 计算获得同位素比值、年龄和误差,普通铅校正采用 Andersen (2002) 的方法进行。研究样品测定过程中,标样 Mud Tank 的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄结果为 730 ± 3 Ma (2σ; MSWD = 0.80),与其 TIMS 年龄在误差范围内一致

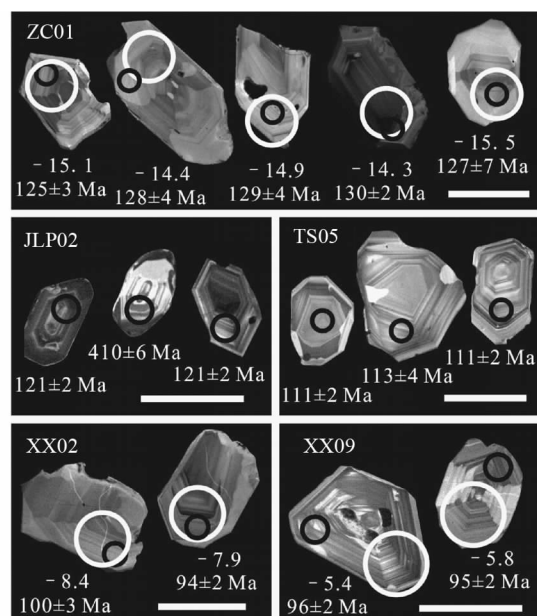


图 2 浙东南晚中生代火山岩代表性锆石 CL 图像及原位分析点位

各标尺均代表 100 μm

Fig. 2 CL images and analyses spots of representative zircons from Late Mesozoic volcanic rocks in southeastern Zhejiang Province

All scales bars represent 100 μm

(732 ± 5 Ma; Black and Gulson, 1978)。

锆石 Hf 同位素分析在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室进行,所用仪器为 New Wave UP213 激光取样系统和 Nu plasma MC-ICPMS,仪器运行条件及详细分析过程参见唐红峰等(2008)。具体的工作参数为:激光脉冲重复频率 10 Hz,脉冲能量为 4.40 ~ 5.27 J/cm²,熔蚀孔径为 60 μm。用锆石 91500 作外标,本次研究样品测定过程中,91500 的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 平均测定结果是 0.282303 ± 25 (2S. D., n = 58),与目前用溶液法所得结果在误差范围内一致(0.282306 ± 8; Woodhead *et al.*, 2004)。在计算 (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_i 和 ε_{Hf} 值时,¹⁷⁶Lu 的衰变常数采用 1.867 × 10⁻¹¹ a⁻¹ (Söderlund *et al.*, 2004),ε_{Hf} 的计算采用 Bouvier *et al.* (2008) 推荐的球粒陨石 Hf 同位素值,即 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.0336, ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282785。Hf 模式年龄计算中,亏损地幔 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 现在值采用 0.28325, ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 为 0.0384 (Griffin *et al.*, 2000),两阶段模式年龄采用平均地壳 (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_c = 0.015 (Griffin *et al.*, 2002) 进行计算。

3 分析结果

代表性锆石的 CL 图像见图 2,锆石 U-Pb 定年结果示于图 3 并列于表 1, Hf 同位素分析结果示于图 4 并列于表 2。

表 1 浙东南晚中生代火山岩 LA-ICP-MS 锆石定年结果
Table 1 LA-ICP-MS dating results of zircons from the volcanic rocks in southeastern Zhejiang Province

样品号	Th U		Th/U (× 10 ⁻⁶)	同位素比值				年龄(Ma)											
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ		
ZC01-01	82	54	1.52	0.05070	0.00789	0.14088	0.02156	0.02015	0.00061	0.00732	0.00092	227	315	134	19	129	4	147	18
ZC01-02	134	92	1.46	0.04736	0.01358	0.12960	0.03646	0.01986	0.00117	0.00436	0.00086	67	476	124	33	127	7	88	17
ZC01-03	79	58	1.35	0.04950	0.00561	0.13451	0.01509	0.01971	0.00041	0.00543	0.00042	172	252	128	14	126	3	109	8
ZC01-04	53	42	1.29	0.04786	0.01325	0.13141	0.03588	0.01991	0.00096	0.00560	0.00117	92	460	125	32	127	6	113	24
ZC01-05	71	70	1.02	0.04985	0.00426	0.13853	0.01168	0.02016	0.00037	0.00635	0.00055	188	195	132	10	129	2	128	11
ZC01-06	159	86	1.85	0.04954	0.00571	0.13537	0.01536	0.01982	0.00049	0.00526	0.00052	173	256	129	14	127	3	106	10
ZC01-07	247	82	3.00	0.04926	0.00668	0.13608	0.01806	0.02004	0.00060	0.00682	0.00119	160	277	130	16	128	4	137	24
ZC01-08	131	85	1.54	0.04808	0.00519	0.13350	0.01415	0.02014	0.00047	0.00621	0.00087	103	235	127	13	129	3	125	17
ZC01-09	125	69	1.80	0.04910	0.00555	0.13447	0.01499	0.01987	0.00045	0.00575	0.00059	153	250	128	13	127	3	116	12
ZC01-10	77	53	1.43	0.04896	0.00647	0.13490	0.01763	0.01999	0.00047	0.00543	0.00071	146	269	128	16	128	3	109	14
ZC01-11	188	112	1.68	0.05210	0.00433	0.14104	0.01146	0.01964	0.00041	0.00547	0.00058	290	190	134	10	125	3	110	12
ZC01-13	131	71	1.84	0.04938	0.01109	0.13400	0.02953	0.01968	0.00090	0.00658	0.00137	166	401	128	26	126	6	133	28
ZC01-14	78	38	2.04	0.04822	0.01452	0.13256	0.03945	0.01995	0.00097	0.00711	0.00130	110	505	126	35	127	6	143	26
ZC01-15	169	96	1.75	0.05087	0.00634	0.13861	0.01694	0.01976	0.00056	0.00500	0.00055	235	278	132	15	126	4	101	11
ZC01-16	430	323	1.33	0.04953	0.00218	0.13633	0.00584	0.01997	0.00031	0.00646	0.00085	173	103	130	5	127	2	130	17
ZC01-17	122	79	1.55	0.04854	0.00891	0.13108	0.02361	0.01960	0.00074	0.00713	0.00180	126	337	125	21	125	5	144	36
ZC01-18	85	68	1.25	0.04921	0.00513	0.13563	0.01397	0.01999	0.00040	0.00546	0.00055	158	234	129	12	128	3	110	11
ZC01-19	1232	446	2.76	0.04763	0.00128	0.13337	0.00356	0.02031	0.00026	0.00564	0.00049	81	62	127	3	130	2	114	10
ZC01-20	120	83	1.45	0.04872	0.00489	0.13603	0.01346	0.02026	0.00043	0.00625	0.00086	134	224	130	12	129	3	126	17
ZC01-21	149	88	1.70	0.04816	0.00477	0.13108	0.01280	0.01974	0.00042	0.00630	0.00087	107	221	125	11	126	3	127	17
ZC01-22	123	96	1.28	0.04830	0.00716	0.13312	0.01937	0.01999	0.00065	0.00373	0.00053	114	286	127	17	128	4	75	11
JLP02-01	1387	824	1.68	0.04840	0.00238	0.12323	0.00594	0.01847	0.00036	0.00521	0.00084	119	111	118	5	118	2	105	17
JLP02-02	229	179	1.28	0.04854	0.00477	0.12356	0.01187	0.01846	0.00049	0.00574	0.00093	126	219	118	11	118	3	116	19
JLP02-03	1095	825	1.33	0.04837	0.00115	0.12088	0.00301	0.01813	0.00028	0.00517	0.00046	117	57	116	3	116	2	104	9
JLP02-04	468	223	2.10	0.04859	0.00275	0.13656	0.00762	0.02038	0.00039	0.00616	0.00077	128	128	130	7	130	2	124	15
JLP02-05	731	470	1.56	0.04847	0.00140	0.13361	0.00400	0.01999	0.00032	0.00541	0.00049	122	69	127	4	128	2	109	10
JLP02-06	722	589	1.23	0.04823	0.00377	0.12319	0.00934	0.01852	0.00048	0.00634	0.00207	111	176	118	8	118	3	128	42
JLP02-07	234	158	1.48	0.04849	0.00258	0.14265	0.00759	0.02133	0.00038	0.00598	0.00063	123	120	135	7	136	2	121	13
JLP02-08	712	269	2.65	0.04853	0.00241	0.12641	0.00624	0.01889	0.00035	0.00596	0.00089	125	113	121	6	121	2	120	18
JLP02-10	1218	732	1.66	0.04850	0.00125	0.12993	0.00351	0.01943	0.00031	0.00546	0.00067	124	62	124	3	124	2	110	13

Continued Table 1

样品号	Th			U			Th/U ($\times 10^{-6}$)			同位素比值				年龄(Ma)					
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1 σ
JLP02-12	335	135	2.48	0.04836	0.00473	0.12757	0.01229	0.01914	0.00046	0.00671	0.00115	117	218	122	11	122	3	135	23
JLP02-13	430	326	1.32	0.04857	0.00238	0.13584	0.00661	0.02029	0.00038	0.00665	0.00106	127	111	129	6	129	2	134	21
JLP02-14	1234	583	2.12	0.04850	0.00138	0.12738	0.00371	0.01905	0.00030	0.00640	0.00098	124	68	122	3	122	2	129	20
JLP02-15	144	108	1.34	0.05212	0.00647	0.15201	0.01848	0.02115	0.00065	0.00724	0.00160	291	281	144	16	135	4	146	32
JLP02-16	1876	614	3.05	0.04851	0.00133	0.12691	0.00362	0.01898	0.00031	0.00593	0.00052	124	66	121	3	121	2	120	10
JLP02-17	351	283	1.24	0.05521	0.00113	0.49918	0.01110	0.06559	0.00100	0.02050	0.00189	421	47	411	8	410	6	410	37
JLP02-18	918	869	1.06	0.04855	0.00122	0.12675	0.00335	0.01894	0.00030	0.00561	0.00055	126	61	121	3	121	2	113	11
JLP02-19	409	126	3.25	0.04925	0.00478	0.15696	0.01490	0.02313	0.00061	0.00705	0.00123	160	220	148	13	147	4	142	25
JLP02-20	545	210	2.59	0.04895	0.00227	0.14589	0.00679	0.02162	0.00038	0.00568	0.00059	145	106	138	6	138	2	114	12
JLP02-21	415	397	1.05	0.04912	0.00171	0.15440	0.00545	0.02280	0.00039	0.00609	0.00074	154	83	146	5	145	2	123	15
JLP02-22	643	379	1.70	0.04873	0.00299	0.14485	0.00870	0.02156	0.00049	0.00417	0.00060	135	139	137	8	138	3	84	12
TS05-01	1273	295	4.31	0.05028	0.00391	0.11881	0.00900	0.01714	0.00037	0.00518	0.00065	208	177	114	8	110	2	104	13
TS05-03	383	105	3.64	0.04939	0.00806	0.11768	0.01891	0.01728	0.00055	0.00593	0.00083	166	312	113	17	110	3	120	17
TS05-04	281	88	3.19	0.04911	0.00613	0.11798	0.01455	0.01742	0.00039	0.00644	0.00078	153	265	113	13	111	2	130	16
TS05-07	1498	679	2.21	0.04837	0.00115	0.11601	0.00277	0.01740	0.00022	0.00522	0.00044	117	57	111	3	111	1	105	9
TS05-08	174	73	2.37	0.04827	0.01104	0.11811	0.02667	0.01775	0.00069	0.00547	0.00105	113	398	113	24	113	4	110	21
TS05-09	149	57	2.59	0.04821	0.00844	0.12738	0.02208	0.01916	0.00052	0.00660	0.00104	110	323	122	20	122	3	133	21
TS05-12	455	206	2.21	0.05045	0.00482	0.11864	0.01108	0.01706	0.00041	0.00555	0.00073	216	218	114	10	109	3	112	15
TS05-13	1072	321	3.34	0.05128	0.00215	0.12339	0.00509	0.01745	0.00026	0.00617	0.00055	253	99	118	5	112	2	124	11
TS05-15	271	92	2.93	0.04639	0.00509	0.11190	0.01218	0.01750	0.00032	0.00606	0.00055	18	221	108	11	112	2	122	11
TS05-17	234	131	1.78	0.05359	0.00393	0.14110	0.01017	0.01910	0.00034	0.00695	0.00078	354	169	134	9	122	2	140	16
TS05-18	860	232	3.71	0.05092	0.00235	0.12203	0.00558	0.01738	0.00025	0.00588	0.00050	237	109	117	5	111	2	118	10
TS05-19	858	436	1.96	0.05157	0.00239	0.12218	0.00554	0.01719	0.00028	0.00574	0.00071	266	109	117	5	110	2	116	14
TS05-20	498	252	1.98	0.05269	0.00210	0.14054	0.00551	0.01935	0.00027	0.00686	0.00077	315	93	134	5	124	2	138	15
XX02-03	290	176	1.65	0.04993	0.00481	0.11104	0.01057	0.01613	0.00032	0.00467	0.00064	192	219	107	10	103	2	94	13
XX02-05	252	74	3.42	0.04981	0.00964	0.10727	0.02062	0.01562	0.00040	0.00431	0.00059	186	360	103	19	100	3	87	12
XX02-06	982	198	4.96	0.04814	0.00654	0.09974	0.01332	0.01503	0.00042	0.00542	0.00146	106	272	97	12	96	3	109	29
XX02-07	151	59	2.57	0.04571	0.01265	0.09764	0.02690	0.01549	0.00047	0.00547	0.00096	-17	447	95	25	99	3	110	19
XX02-08	2764	435	6.36	0.04738	0.00225	0.09385	0.00440	0.01437	0.00021	0.00487	0.00085	68	105	91	4	92	1	98	17
XX02-11	1038	258	4.02	0.05450	0.00413	0.11082	0.00825	0.01475	0.00029	0.00464	0.00097	392	175	107	8	94	2	94	20

续表 1
Continued Table 1

样品号	Th		U	同位素比值						年龄(Ma)									
	$(\times 10^{-6})$		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$			
				1 σ		1 σ	1 σ		1 σ	1 σ	1 σ	1 σ		1 σ	1 σ	1 σ			
JLP02-12	335	135	2.48	0.04836	0.00473	0.12757	0.01229	0.01914	0.00046	0.00671	0.00115	117	218	122	11	122	3	135	23
XX02-12	2564	585	4.38	0.05482	0.00316	0.11198	0.00628	0.01482	0.00028	0.00442	0.00126	405	133	108	6	95	2	89	25
XX02-13	420	105	4.00	0.04721	0.00847	0.09891	0.01760	0.01520	0.00040	0.00448	0.00060	60	318	96	16	97	3	90	12
XX02-14	144	65	2.21	0.05353	0.01212	0.11481	0.02577	0.01556	0.00051	0.00493	0.00093	351	430	110	23	100	3	99	19
XX02-15	234	76	3.08	0.05452	0.00989	0.11257	0.02024	0.01498	0.00040	0.00517	0.00086	393	371	108	18	96	3	104	17
XX02-17	362	91	3.97	0.04331	0.00836	0.08589	0.01650	0.01439	0.00034	0.00451	0.00065	-107	297	84	15	92	2	91	13
XX02-19	1322	994	1.33	0.04775	0.00196	0.10081	0.00406	0.01532	0.00024	0.00404	0.00072	87	92	98	4	98	2	81	14
XX02-23	1443	359	4.02	0.05664	0.00323	0.12169	0.00680	0.01559	0.00028	0.00294	0.00033	478	130	117	6	100	2	59	7
XX02-24	377	283	1.33	0.04713	0.00275	0.10717	0.00619	0.01650	0.00025	0.00355	0.00041	56	128	103	6	105	2	72	8
XX02-25	419	124	3.39	0.04856	0.00733	0.10442	0.01558	0.01560	0.00041	0.00491	0.00120	127	291	101	14	100	3	99	24
XX02-27	2012	282	7.15	0.05100	0.00487	0.10397	0.00969	0.01479	0.00035	0.00558	0.00223	241	218	100	9	95	2	112	45
XX09-01	805	307	2.62	0.05415	0.00356	0.11187	0.00723	0.01499	0.00028	0.00494	0.00060	377	152	108	7	96	2	100	12
XX09-02	1471	553	2.66	0.04870	0.00297	0.09954	0.00594	0.01482	0.00028	0.00501	0.00090	133	138	96	5	95	2	101	18
XX09-04	328	141	2.32	0.04914	0.00577	0.14668	0.01696	0.02165	0.00052	0.00611	0.00130	155	254	139	15	138	3	123	26
XX09-05	834	234	3.57	0.04930	0.00347	0.10085	0.00702	0.01484	0.00024	0.00467	0.00063	162	160	98	6	95	2	94	13
XX09-06	846	551	1.53	0.05202	0.00510	0.11880	0.01131	0.01659	0.00046	0.00457	0.00088	286	225	114	10	106	3	92	18
XX09-07	284	163	1.75	0.05385	0.00443	0.16940	0.01364	0.02281	0.00047	0.00675	0.00172	365	189	159	12	145	3	136	35
XX09-08	2842	622	4.57	0.04813	0.00275	0.09066	0.00503	0.01367	0.00024	0.00533	0.00185	106	129	88	5	88	2	107	37
XX09-09	309	177	1.75	0.05588	0.00324	0.16896	0.00965	0.02194	0.00035	0.00694	0.00128	448	132	159	8	140	2	140	26
XX09-10	571	176	3.25	0.04901	0.00430	0.10419	0.00905	0.01543	0.00028	0.00445	0.00085	148	198	101	8	99	2	90	17
XX09-11	528	286	1.85	0.05001	0.00266	0.10386	0.00547	0.01506	0.00023	0.00371	0.00037	195	123	100	5	96	1	75	7
XX09-12	1037	385	2.69	0.04782	0.00207	0.10082	0.00431	0.01529	0.00022	0.00430	0.00050	90	97	98	4	98	1	87	10
XX09-13	1263	439	2.88	0.04729	0.00402	0.10045	0.00831	0.01541	0.00036	0.00464	0.00113	64	191	97	8	99	2	94	23
XX09-14	1113	374	2.98	0.05012	0.00222	0.10238	0.00448	0.01482	0.00022	0.00411	0.00052	201	104	99	4	95	1	83	10
XX09-15	477	228	2.09	0.05227	0.00501	0.10191	0.00956	0.01415	0.00033	0.00428	0.00094	297	219	99	9	91	2	86	19
XX09-16	389	305	1.28	0.04986	0.00209	0.14253	0.00591	0.02074	0.00030	0.00544	0.00068	188	99	135	5	132	2	110	14
XX09-19	4643	913	5.08	0.04960	0.00151	0.10141	0.00305	0.01483	0.00021	0.00401	0.00058	176	73	98	3	95	1	81	12
XX09-20	1580	525	3.01	0.05198	0.00219	0.10526	0.00437	0.01469	0.00023	0.00349	0.00051	285	99	102	4	94	1	70	10

表2 浙东南晚中生代火山岩锆石 Lu-Hf 同位素组成

Table 2 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of the Late Mesozoic volcanic rocks in southeastern Zhejiang Province

测点号	年龄 (Ma)	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	(¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf) _i	ε _{Hf} (t)	1σ	t _{DM} (Ga)	t _{DM2} (Ga)
ZC01-01	128	0.282300	0.000016	0.000978	0.046844	0.282298	-14.4	0.6	1.34	2.06
ZC01-02		0.282301	0.000016	0.001222	0.056926	0.282298	-14.4	0.6	1.35	2.06
ZC01-03		0.282290	0.000016	0.001136	0.052958	0.282287	-14.8	0.6	1.36	2.09
ZC01-04		0.282314	0.000013	0.000864	0.041789	0.282312	-13.9	0.5	1.32	2.03
ZC01-05		0.282310	0.000015	0.003503	0.178768	0.282302	-14.3	0.5	1.42	2.05
ZC01-06		0.282294	0.000015	0.001551	0.075643	0.282290	-14.7	0.5	1.37	2.08
ZC01-07		0.282316	0.000018	0.002080	0.103099	0.282311	-13.9	0.6	1.36	2.03
ZC01-08		0.282323	0.000011	0.001333	0.062312	0.282320	-13.6	0.4	1.32	2.01
ZC01-09		0.282259	0.000015	0.001568	0.063345	0.282255	-15.9	0.5	1.42	2.16
ZC01-10		0.282304	0.000010	0.001175	0.057836	0.282301	-14.3	0.4	1.34	2.05
ZC01-11		0.282281	0.000012	0.001494	0.071308	0.282277	-15.1	0.4	1.39	2.11
ZC01-12		0.282280	0.000014	0.001141	0.051146	0.282277	-15.1	0.5	1.38	2.11
ZC01-13		0.282244	0.000014	0.001701	0.082636	0.282240	-16.4	0.5	1.45	2.19
ZC01-14		0.282277	0.000013	0.001600	0.079043	0.282273	-15.3	0.5	1.40	2.12
ZC01-15		0.282287	0.000017	0.001584	0.077756	0.282283	-14.9	0.6	1.38	2.09
ZC01-16		0.282312	0.000015	0.001659	0.080608	0.282308	-14.0	0.5	1.35	2.04
ZC01-17		0.282253	0.000014	0.001228	0.057892	0.282250	-16.1	0.5	1.42	2.17
ZC01-18		0.282278	0.000013	0.000761	0.034753	0.282276	-15.2	0.5	1.37	2.11
ZC01-19		0.282271	0.000016	0.001867	0.086595	0.282267	-15.5	0.6	1.42	2.13
ZC01-20		0.282254	0.000011	0.000776	0.037468	0.282252	-16.0	0.4	1.40	2.16
ZC01-21		0.282285	0.000018	0.001000	0.048972	0.282283	-14.9	0.6	1.36	2.10
XX02-01	96	0.282514	0.000018	0.001122	0.045413	0.282512	-7.5	0.6	1.05	1.61
XX02-02		0.282505	0.000016	0.001093	0.041744	0.282503	-7.8	0.6	1.06	1.63
XX02-03		0.282489	0.000015	0.000847	0.032364	0.282487	-8.4	0.5	1.07	1.66
XX02-04		0.282487	0.000015	0.002186	0.087530	0.282483	-8.5	0.5	1.12	1.67
XX02-05		0.282492	0.000015	0.002396	0.093749	0.282488	-8.4	0.5	1.12	1.66
XX02-06		0.282473	0.000017	0.003426	0.146942	0.282467	-9.1	0.6	1.18	1.71
XX02-07		0.282524	0.000013	0.001348	0.051169	0.282522	-7.2	0.5	1.04	1.58
XX02-08		0.282497	0.000017	0.004292	0.162146	0.282489	-8.3	0.6	1.17	1.66
XX02-09		0.282460	0.000016	0.003958	0.163910	0.282453	-9.6	0.6	1.21	1.74
XX02-10		0.282493	0.000018	0.001548	0.061362	0.282490	-8.3	0.6	1.09	1.65
XX02-11		0.282504	0.000018	0.001613	0.064352	0.282501	-7.9	0.6	1.08	1.63
XX02-12		0.282480	0.000017	0.002773	0.120045	0.282475	-8.8	0.6	1.15	1.69
XX02-13		0.282481	0.000016	0.001428	0.055570	0.282478	-8.7	0.6	1.10	1.68
XX02-14		0.282450	0.000010	0.005927	0.254744	0.282439	-10.1	0.4	1.30	1.77
XX02-15		0.282522	0.000017	0.002665	0.109486	0.282517	-7.3	0.6	1.08	1.59
XX02-16		0.282481	0.000015	0.002192	0.086823	0.282477	-8.8	0.5	1.13	1.68
XX02-17		0.282485	0.000018	0.001571	0.068486	0.282482	-8.6	0.6	1.10	1.67
XX02-18		0.282420	0.000008	0.006128	0.283576	0.282409	-11.2	0.3	1.36	1.83
XX02-19		0.282465	0.000013	0.002137	0.081454	0.282461	-9.3	0.5	1.15	1.72
XX02-20		0.282461	0.000016	0.002772	0.111915	0.282456	-9.5	0.6	1.17	1.73
XX02-21		0.282467	0.000017	0.003432	0.148523	0.282461	-9.3	0.6	1.19	1.72
XX02-22		0.282507	0.000016	0.003146	0.135265	0.282501	-7.9	0.6	1.12	1.63
XX02-23		0.282505	0.000014	0.005169	0.214776	0.282496	-8.1	0.5	1.19	1.64
XX02-24		0.282501	0.000014	0.001734	0.076126	0.282498	-8.0	0.5	1.08	1.64
XX02-25		0.282469	0.000021	0.003152	0.123254	0.282463	-9.2	0.7	1.17	1.71
XX02-26		0.282499	0.000012	0.002230	0.090726	0.282495	-8.1	0.4	1.10	1.64
XX02-27		0.282501	0.000022	0.004239	0.163652	0.282493	-8.2	0.8	1.16	1.65

续表 2

Continued Table 2

测点号	年龄 (Ma)	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	1σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	(¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf) _i	ε _{Hf} (<i>t</i>)	1σ	<i>t</i> _{DM} (Ga)	<i>t</i> _{DM2} (Ga)
XX09-01	95	0.282578	0.000012	0.003178	0.108505	0.282572	-5.4	0.4	1.01	1.47
XX09-02	95	0.282564	0.000015	0.001528	0.060498	0.282561	-5.8	0.5	0.99	1.50
XX09-03	138	0.282346	0.000019	0.003115	0.135649	0.282338	-12.7	0.7	1.35	1.97
XX09-04	95	0.282535	0.000011	0.003429	0.123815	0.282529	-6.9	0.4	1.08	1.57
XX09-05	95	0.282526	0.000018	0.005592	0.232809	0.282516	-7.4	0.6	1.17	1.60
XX09-06	106	0.282473	0.000010	0.001541	0.048896	0.282470	-8.8	0.4	1.12	1.69
XX09-08	95	0.282570	0.000020	0.006886	0.378160	0.282558	-5.9	0.7	1.14	1.50
XX09-10	95	0.282582	0.000017	0.001342	0.052231	0.282580	-5.2	0.6	0.96	1.46
XX09-11	95	0.282586	0.000018	0.001109	0.042205	0.282584	-5.0	0.6	0.95	1.45
XX09-12	95	0.282620	0.000017	0.002227	0.095954	0.282616	-3.9	0.6	0.92	1.37
XX09-13	95	0.282609	0.000024	0.005585	0.224297	0.282599	-4.5	0.8	1.04	1.41
XX09-14	95	0.282628	0.000017	0.002290	0.095637	0.282624	-3.6	0.6	0.91	1.36
XX09-15	95	0.282576	0.000022	0.004819	0.207062	0.282567	-5.6	0.8	1.06	1.48
XX09-18	95	0.282575	0.000018	0.001854	0.079039	0.282572	-5.4	0.6	0.98	1.47
XX09-19	95	0.282607	0.000016	0.005171	0.189029	0.282598	-4.5	0.6	1.03	1.42
XX09-20	95	0.282572	0.000018	0.002817	0.096816	0.282567	-5.6	0.6	1.01	1.48

所分析锆石均呈自形-半自形,长度为100μm左右或更大,长宽比为1:1~2:1,具有清晰的震荡环带,并且具有高的Th/U比值,表现出典型的岩浆结晶特征(Wu and Zheng, 2004)。

所有样品中锆石颗粒均得出了谐和的定年结果(图3),部分样品的结果分布范围较大,其中明显较老的数据可以分别对应于研究区下岩系下部火山岩的形成时代(Liu *et al.*, 2012)。除这些来自围岩的捕获锆石之外,天台盆地九里坪组流纹岩中年龄最小且集中的10颗锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为120±2Ma(2σ),塘上组凝灰岩的定年结果则为111±1Ma(2σ)。小雄盆地小雄组中晶屑凝灰岩和流纹岩样品的定年结果较为接近,分别为96±2Ma(2σ)和95±1Ma(2σ)。相反,“祝村组”流纹质凝灰岩中未见明显的捕获锆石,所分析21颗锆石的结果谐和且集中,²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均为128±1Ma(2σ),明显老于其它4个样品,而与浙东南地区西山头组(130~128Ma)的形成时代一致(Liu *et al.*, 2012)。

“祝村组”流纹质凝灰岩中锆石的Hf同位素组成同样较为集中,其初始¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf比值为0.282240~0.282320,对应的ε_{Hf}(*t*)值为-16.4~-13.6,表现出古元古代的两阶段模式年龄(2.01~2.19Ga),相比浙东南地区最具代表性的九里坪剖面中相应时代的火山岩,该锆石Hf同位素组成更为富集(Liu *et al.*, 2012)。另一方面,尽管小雄组中晶屑凝灰岩和流纹岩的锆石Hf同位素组成也呈现单峰钟形,它们的跨度更大,除捕获锆石之外的ε_{Hf}(*t*)值分别变化于-11.2~-7.2和-7.4~-3.6,对应的两阶段模式年龄则分别为1.58~1.83Ga和1.36~1.60Ga。因此,小雄组火山岩的锆石Hf同位素组成总体较“祝村组”更为亏损。小雄组流纹岩中138Ma的捕获锆石反而具有-12.7的ε_{Hf}(*t*)值和

1.97Ga的两阶段模式年龄,与“祝村组”流纹质凝灰岩相似但仍比标准剖面中相应时代大爽组火山岩(135~140Ma; Liu *et al.*, 2012)的Hf同位素组成更为富集。

4 讨论

4.1 “祝村组”的解体

“祝村组”由浙江省区域地质调查大队于1989年创建,层型为丽水余庄至祝村剖面,被认为是浙东南地区磨石山群最高的层位,位于九里坪组之上,其岩性下部为中酸性火山碎屑岩,夹少量沉积岩和基性岩,上部为流纹岩(浙江省地质矿产局, 1989)。该套地层的时代最早被归为晚侏罗世(浙江省地质矿产局, 1989),之后将其时代改为早白垩世,与浙西北地区横山组对应(浙江省地质矿产局, 1996)。但是,“祝村组”从其建立起就存在分歧和争议,其赖以建组的基础之一是存在下伏九里坪组流纹斑岩,然而俞云文和胡开明(2001)重新认定该流纹斑岩实际为一英安玢岩侵出体,不属九里坪组。

此外,“祝村组”的岩石组合实际上也与磨石山群的其它地层组成高度相似。丽水余庄-祝村剖面被划分了37层,其中1~5层主要为集块角砾英安岩,6~9层为英安质熔结凝灰岩与含集块角砾英安岩互层,10~21层为英安质熔结凝灰岩,22~35层为凝灰质砂岩、粉砂岩、泥岩夹沉凝灰岩、凝灰岩,36~37层主要为流纹岩,其上为紫红色砂砾岩不整合覆盖。实际上,其中的1~21层与磨石山群下部尤其是西山头组岩石组合相仿,22~35层类似于茶湾组的沉凝灰岩和沉积岩,36~37层则与九里坪组的流纹岩相吻合(图5)。俞云文和胡开明(2001)据此认为“祝村组”应解体为西山头组、茶

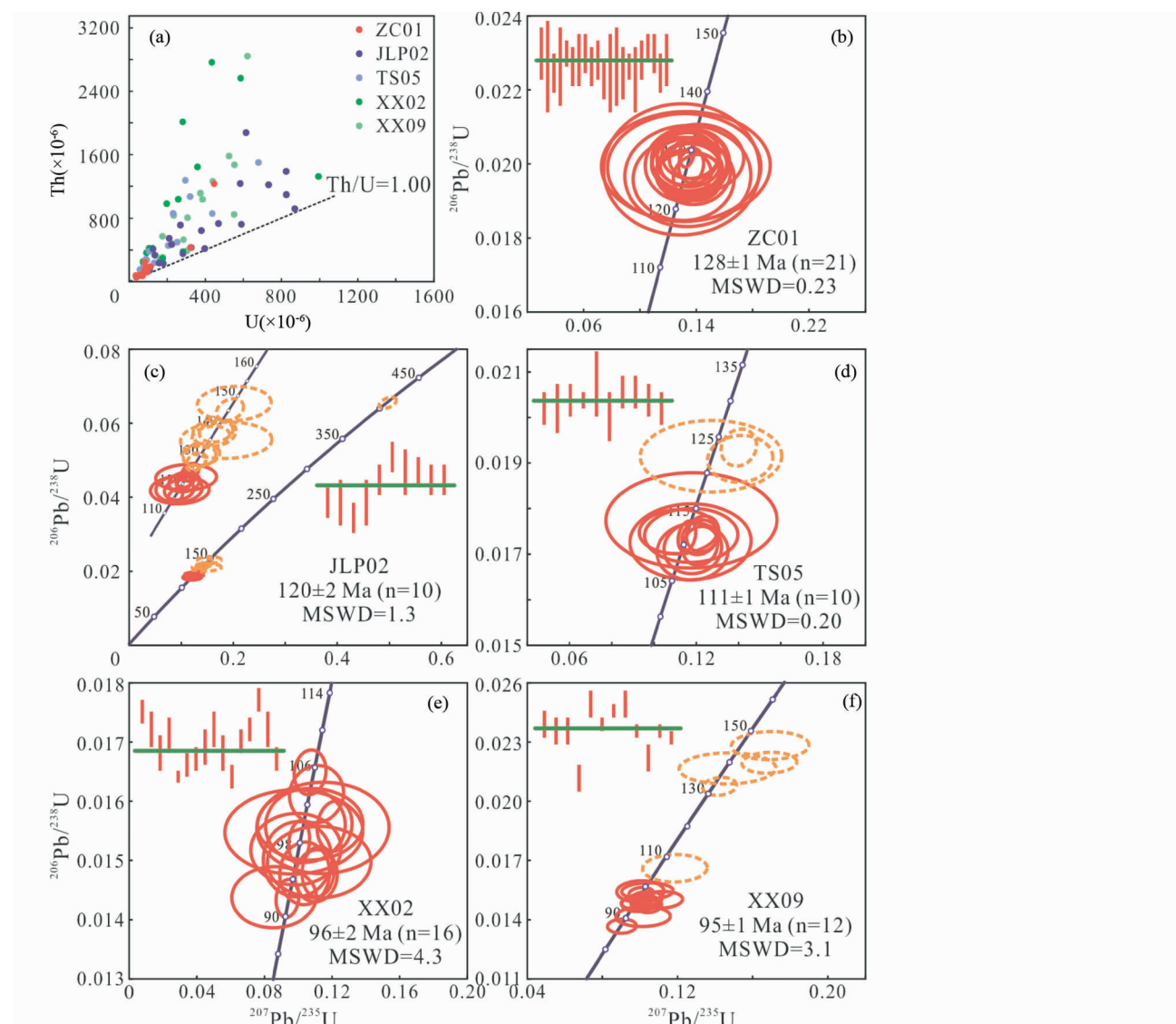


图3 浙东南晚中生代火山岩锆石定年结果

Fig. 3 Zircon dating results of Late Mesozoic volcanic rocks in southeastern Zhejiang Province

湾组和九里坪组。

近年来,有关中国东南部晚中生代火山岩地层的层序划分、形成时代及时空分布的研究取得了较大进展,其中大部分地层的形成时代已得以厘清(Guo *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2012, 2014, 2016)。这也使得从年代学角度分析“祝村组”的存在与否成为可能。本文得到小雄盆地中所属“祝村组”的流纹质凝灰岩年龄为 128Ma,不仅明显老于其上覆的上火山岩系(88 ~ 110Ma)和本应为其下伏的九里坪组(120 ~ 122Ma),也老于浙西北地区横山组(118 ~ 123Ma),而与同样主要由火山碎屑岩构成的西山头组同时(128 ~ 130Ma)。考虑到丽水祝村地区“祝村组”层型剖面中火山岩的锆石 SHRIMP 年龄同样为 125 ~ 129Ma(王加恩等, 2015),基本可以认定“祝村组”下部的火山碎屑岩实际应归属西山头组。

另一方面,中国东南部晚中生代各地层单元的火山岩已

被鉴定出具特征的同位素组成(俞云文和胡开明, 2001; Liu *et al.*, 2012),具体表现为晚侏罗世以来的火山岩随时间由早到晚其 Nd 和锆石 Hf 同位素组成由富集逐渐趋于亏损,这不仅反映出岩石成因中亏损地幔来源组分贡献比例的升高,而且还可以用作地层划分和对比的依据。浙东南地区晚中生代火山岩同位素组成明显趋于亏损的现象始于 ~ 122Ma,九里坪组和上岩系火山岩的锆石 Hf 同位素组成较为亏损,特点是同位素组成跨度大且主要表现出中元古代的两阶段模式年龄,如本文所得小雄组数据(图 4),而磨石山群下部(大爽组、高坞组、西山头组)的锆石 Hf 同位素组成明显富集,特点是具有古元古代的两阶段模式年龄(Liu *et al.*, 2012)。“祝村组”流纹质凝灰岩具有明显富集的锆石 Hf 同位素组成和特征的古元古代两阶段模式年龄,明显不同于磨石山群上部地层的特征(图 6)。从这个角度来说,该流纹质

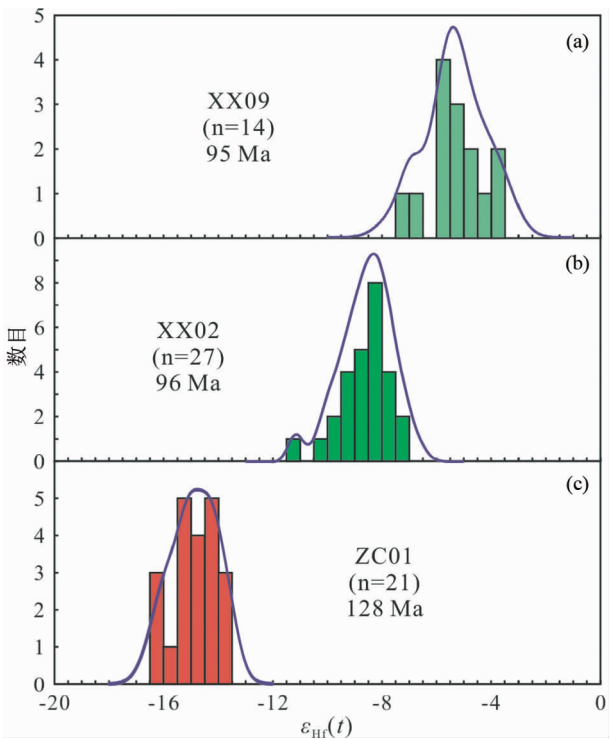


图4 浙东南晚中生代火山岩锆石 Hf 同位素分析结果
Fig.4 Zircon Hf isotopic compositions of Late Mesozoic volcanic rocks in southeastern Zhejiang Province

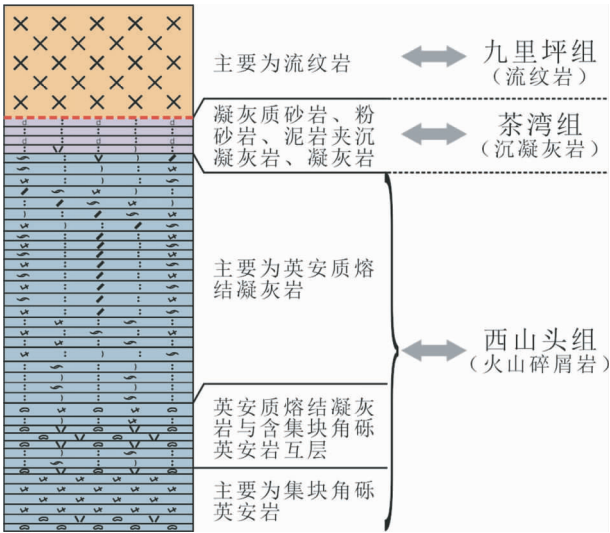


图5 “祝村组”代表性火山岩岩石序列及与区域火山岩地层的对比
Fig.5 The representative volcanic sequences of the Zhucun Formation with comparison to the regional volcanic strata

凝灰岩所代表的地层也应归属于磨石山群下部,而非所谓的“祝村组”。

此外,中国东南部上、下火山岩系之间存在明显的区域不整合,导致该结果的构造事件被称为“闽浙运动”(顾知

微, 2005)。受挤压应力影响,该事件导致的另一结果是上、下火山岩系形成时代之间的岩浆活动沉寂期,表现为该时间段区域内岩浆活动规模极小,尤其是缺乏主要在伸展应力状态下形成的岩石,比如区域内正长岩-辉长岩等深源岩石主要形成于 141 ~ 118Ma 和 98 ~ 86Ma 两个阶段(He and Xu, 2012)。考虑到中国东南部晚中生代火山岩-侵入岩之间通常表现的“时、空、源”一致性,浙东南地区岩浆活动沉寂期的时代约为 120 ~ 110Ma(Liu *et al.*, 2012),那么在 120Ma 九里坪组之后形成“祝村组”也与地质事实不符。

综上所述,结合建组依据破除、岩石组成、年代学、同位素特征和区域地质特征等多种证据,本研究结果表明“祝村组”火山岩应分属于西山头组、九里坪组等不同的地层单元。因此,本文认为“祝村组”不应作为单独存在的地层单元,宜予解体,“祝村组”一名不宜再用。

4.2 相关火山岩成因机制

与本研究分析结果相似,中国东南部晚中生代尤其是白垩纪火山岩的全岩 Nd 和锆石 Hf 同位素组成随时间由早到晚表现出特征性的由富集趋于亏损的特征(陈江峰等, 1992; Xue *et al.*, 1996; 俞云文等, 2001; Guo *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2012, 2014, 2016),该现象在同时期侵入岩中也很明显(沈渭洲等, 1999; He and Xu, 2012),这实际上反映了岩石成因中亏损地幔来源组分贡献比例的升高。早期的火山岩具有集中的同位素组成和古元古代的地壳模式年龄,与区域内大规模地壳增长时代相吻合(图7),被认为主要来源于地壳基底物质的重熔而没有明显的亏损物质贡献(Liu *et al.*, 2012)。然而,本研究中小雄盆地原划为“祝村组”而实际应为西山头组的流纹质凝灰岩具有更为富集的锆石 Hf 同位素组成(图6),代表了更为纯粹的地壳端元成分,进一步暗示了以往所研究的下岩系早期火山岩形成过程中已有一定比例的亏损物质贡献,这是以往未被明确识别的。

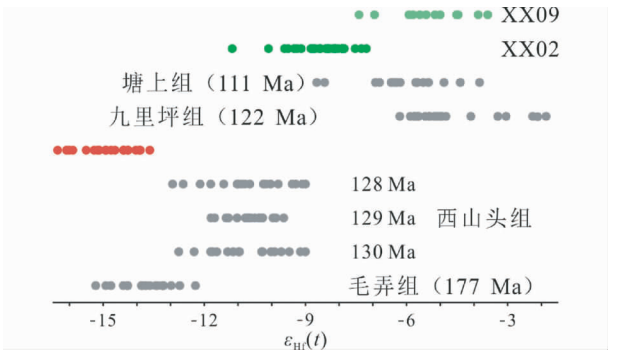


图6 浙东南晚中生代各地层火山岩锆石 Hf 同位素成分对比(已有数据引自 Liu *et al.*, 2012)
Fig.6 Comparisons of zircon Hf isotopic compositions between different Late Mesozoic volcanic strata in southeastern Zhejiang Province (previous data are after Liu *et al.*, 2012)

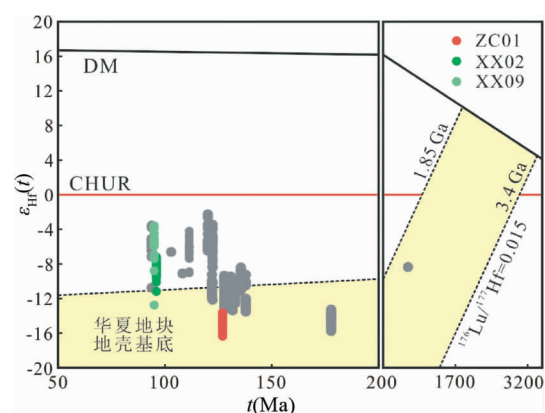


图7 浙东南晚中生代火山岩锆石 Hf 同位素组成与地壳基底成分对比

Fig. 7 Zircon Hf isotopic compositions of Late Mesozoic volcanic rocks and basement materials in southeastern Zhejiang Province

以往对下岩系早期火山岩的研究主要集中于更为内陆的地区,包括义乌地区的大爽组和高坞组底部,以及天台盆地的高坞组上部 and 西山头组。然而同为西山头组,沿海地区小雄盆地中的火山岩在成岩过程中受亏损地幔来源组分的影响明显更少,反映出壳-幔岩浆混合程度不仅有时间上的变化,还有空间性的差异。Liu *et al.* (2014) 识别出浙江地区这种岩浆混合作用是由内陆(浙西北地区)向沿海(浙东南地区)逐渐发生的,本研究则表明在浙东南地区内部同样存在这种岩浆混合作用的南东向(向洋)迁移。

岩石成因中逐渐增强的幔源岩浆成分贡献暗示了底侵在地下壳底部的玄武质岩浆更容易上升到地壳中,暗示了逐渐增强的岩石圈伸展应力环境。此外,原属“祝村组”的火山碎屑岩-流纹岩以及其上覆上岩系双峰式火山岩的岩石组合形成也很可能与岩石圈伸展应力的逐渐增强关系密切。这是因为,这些火山碎屑岩和流纹岩具有相似的地球化学组成和岩浆温度(Guo *et al.*, 2012),岩相学分析也表明它们总体表现出相似的斑晶(晶屑)含量和粒径,表明岩浆结晶状态相差不大(Liu *et al.*, 2014),但早期的火山碎屑岩形成于爆发式喷发过程而流纹岩形成于溢流式喷发,喷发方式的不同说明早期岩浆房中包含更多的挥发组分无法逸出。而最晚期双峰式火山岩中直接的玄武质岩浆喷出则无疑表明较之前流纹岩形成于更为伸展的应力环境。这种岩石圈伸展应力环境的增强已被认为受控于古太平洋俯冲板片的南东向(向洋)后撤作用(Liu *et al.*, 2014, 2016),本研究进一步印证了该观点。

5 主要认识

(1) 结合年代学、同位素组成、岩石组合以及区域地质特

征等证据,本研究认为浙东南地区晚中生代“祝村组”的建组理由不充分,建议将其解体,“祝村组”一名不宜再用。

(2) 被认定为西山头组的沿海地区小雄盆地原“祝村组”流纹质凝灰岩源区为更为纯粹的古元古代地壳基底物质,而相对内陆地区下岩系早期火山岩形成过程中已有较明显的亏损幔源物质参与。

(3) 岩石成因中逐渐增强的底侵幔源物质贡献以及区域内火山碎屑岩-流纹岩-双峰式火山岩岩石组合暗示了逐渐增强的岩石圈伸展应力环境,很可能受控于古太平洋俯冲板片的后撤作用。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1–2): 59–79
- Black LP and Gulson BL. 1978. The age of the Mud Tank carbonatite, strangways Range, Northern Territory. *BMR Journal of Australian Geology and Geophysics*, 3: 227–232
- Bouvier A, Vervoort JD and Patchett PJ. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1–2): 48–57
- Bureau of Geology and Mineral Resource of Zhejiang Province. 1989. *Regional Geology of Zhejiang Province*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Bureau of Geology and Mineral Resource of Zhejiang Province. 1996. *Lithostratigraphy of Zhejiang Province*. Wuhan: China University of Geosciences Press (in Chinese)
- Chen JF, Zhou TX, Li XM *et al.* 1992. Sr and Nd isotopic compositions of Mesozoic magmatic rocks from the southeastern China and its tectonic significance. In: Li JL (ed.). *Studies of Structure and Evolution of the Continental and Oceanic Lithosphere of SE China*. Beijing: Science and Technology of China Press, 119–130 (in Chinese)
- Chen JF and Jahn BM. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284(1–2): 101–133
- Chen R, Xing GF, Yang ZL, Zhou YZ, Yu MG and Li LM. 2007. Early Jurassic zircon SHRIMP U-Pb age of the dacitic volcanic rocks in the southeastern Zhejiang Province, determined firstly and its geological significances. *Geological Review*, 53(1): 31–35 (in Chinese with English abstract)
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, van Acherbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf-isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133–147
- Griffin WL, Wang X, Jackson SE, Pearson NJ, O'Reilly SY, Xu XS and Zhou XM. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61(3–4): 237–269
- Gu ZW. 2005. On the Mincheian Movement. *Journal of Stratigraphy*, 29(1): 1–6 (in Chinese with English abstract)
- Guo F, Fan WM, Li CW, Zhao L, Li HX and Yang JH. 2012. Multi-stage crust-mantle interaction in SE China: Temporal, thermal and compositional constraints from the Mesozoic felsic volcanic rocks in eastern Guangdong-Fujian provinces. *Lithos*, 150: 62–84
- He ZY and Xu XS. 2012. Petrogenesis of the Late Yanshanian mantle-derived intrusions in southeastern China: Response to the geodynamics of paleo-Pacific plate subduction. *Chemical Geology*, 328: 208–221
- Hsü KC. 1943. Tungsten deposits of Southern Kiangsi, China. *Economic Geology*, 38(6): 431–474
- Hu XJ. 1994. *Geochronology of Lower Proterozoic Badu Group*,

- southwestern Zhejiang Province. *Geochimica*, 23(Suppl.): 18–24 (in Chinese with English abstract)
- Jackson SE, Pearson NJ, Griffin WL and Belousova EA. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211(1–2): 47–69
- Li XH. 1997. Timing of the Cathaysia block formation: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon geochronology. *Episodes*, 20(3): 188–192
- Li ZX, Wang RC and Jahn BM. 2013. Tectonic evolution, magmatism and metallogeny of the South China Craton: An introduction. *Journal of Asian Earth Sciences*, 74: 195–197
- Liu L, Xu XS and Zou HB. 2012. Episodic eruptions of the Late Mesozoic volcanic sequences in southeastern Zhejiang, SE China: Petrogenesis and implications for the geodynamics of paleo-Pacific subduction. *Lithos*, 154: 166–180
- Liu L, Xu XS and Xia Y. 2014. Cretaceous Pacific plate movement beneath SE China: Evidence from episodic volcanism and related intrusions. *Tectonophysics*, 614: 170–184
- Liu L, Xu XS and Xia Y. 2016. Asynchronizing paleo-Pacific slab rollback beneath SE China: Insights from the episodic Late Mesozoic volcanism. *Gondwana Research*, 37: 397–407
- Shen WZ, Ling HF, Wang DZ, Xu BT and Yu YW. 1999. Study on Nd-Sr isotopes of Mesozoic igneous rocks in Zhejiang, China. *Scientia Geologica Sinica*, 34(2): 223–232 (in Chinese with English abstract)
- Söderlund U, Patchett PJ, Vervoort JD and Isachsen CE. 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3–4): 311–324
- Tang HF, Zhao ZQ, Huang RS, Han YJ and Su YP. 2008. Primary Hf isotopic study on zircons from the A-type granites in eastern Junggar of Xinjiang, Northwest China. *Acta Mineralogica Sinica*, 28(4): 335–342 (in Chinese with English abstract)
- van Acherterbergh E, Ryan CG, Jackson SE and Griffin WL. 2001. Data reduction software for LA-ICP-MS: Appendix. In: Sylvester PJ (ed.). *Laser Ablation-ICP-Mass Spectrometry in the Earth Sciences: Principles and Applications*. Ottawa: Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, 29: 239–243
- Wang JE, Liu YD, Wang Z, Tao L and Li Y. 2015. SHRIMP zircon U-Pb ages of the Zhucun Formation of the Moshishan Group in Zhejiang. *Journal of Stratigraphy*, 39(3): 267–273 (in Chinese with English abstract)
- Weng ZS and Yu FM. 1999. Establishment of Upper Cretaceous Xiaoxiong Formation in coast of East Zhejiang. *Volcanology & Mineral Resources*, 20(3): 197–204 (in Chinese)
- Woodhead J, Hergt J, Shelley M, Eggins S and Kemp R. 2004. Zircon Hf-isotope analysis with an excimer laser, depth profiling, ablation of complex geometries, and concomitant age estimation. *Chemical Geology*, 209(1–2): 121–135
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554–1569
- Xia Y, Xu XS and Zhu KY. 2012. Paleoproterozoic S- and A-type granites in southwestern Zhejiang: Magmatism, metamorphism and implications for the crustal evolution of the Cathaysia basement. *Precambrian Research*, 216–219: 177–207
- Xu KQ, Hu SX, Sun MZ, Zhang JR, Ye J and Li HP. 1984. Regional factors controlling the formation of tungsten deposits in South China. In: Yu HZ (ed.). *Symposium of Proceeding on Tungsten Geology*. Beijing: Geological Publishing House, 243–258 (in Chinese)
- Xu XS, O'Reilly SY, Griffin WL, Wang XL, Pearson NJ and He ZY. 2007. The crust of Cathaysia: Age, assembly and reworking of two terranes. *Precambrian Research*, 158(1–2): 51–78
- Xue HM, Tao KY and Shen JL. 1996. Sr and Nd isotopic characteristics and magma genesis of Mesozoic volcanic rocks along the coastal region of southeastern China. *Acta Geologica Sinica*, 9(3): 260–273
- Yu YW and Hu KM. 2001. On disintegration of Zhucun Formation, Moshishan Group in Southeast Zhejiang Province. *Volcanology & Mineral Resources*, 22(3): 170–176 (in Chinese with English abstract)
- Yu YW, Xu BT, Chen JF and Dong CW. 2001. Nd isotopic systematics of the Late Mesozoic volcanic rocks from southeastern Zhejiang Province, China: Implications for stratigraphic study. *Geological Journal of China Universities*, 7(1): 62–69 (in Chinese with English abstract)
- Zheng YF, Xiao WJ and Zhao GC. 2013. Introduction to tectonics of China. *Gondwana Research*, 23(4): 1189–1206
- Zhou XM. 2003. My thinking about granite geneses of South China. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 556–565 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XM, Sun T, Shen WZ, Shu LS and Niu YL. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 29(1): 26–33

附中文参考文献

- 陈江峰, 周泰禧, 李学明等. 1992. 中国东南地区中生代岩浆岩的 Sr、Nd 同位素组成及其大地构造意义. 见: 李继亮编. 中国东南海陆岩石圈结构与演化研究. 北京: 中国科学技术出版社, 119–130
- 陈荣, 邢光福, 杨祝良, 周宇章, 余明刚, 李龙明. 2007. 浙东南英安质火山岩早侏罗世锆石 SHRIMP 年龄的首获及其地质意义. *地质论评*, 53(1): 31–35
- 顾知微. 2005. 论闽浙运动. *地层学杂志*, 29(1): 1–6
- 胡雄健. 1994. 浙西南下元古界八都群的地质年代学. *地球化学*, 23(增刊): 18–24
- 沈渭洲, 凌洪王, 王德滋, 徐步台, 俞云文. 1999. 浙江省中生代火成岩的 Nd-Sr 同位素研究. *地质科学*, 34(2): 223–232
- 唐红峰, 赵志琦, 黄荣生, 韩宇捷, 苏玉平. 2008. 新疆东准噶尔 A 型花岗岩的锆石 Hf 同位素初步研究. *矿物学报*, 28(4): 335–342
- 王加恩, 刘远栋, 王振, 陶丽, 李燕. 2015. 浙江磨石山群祝村组岩石 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年. *地层学杂志*, 39(3): 267–273
- 翁祖山, 余方明. 1999. 浙东沿海上白垩统小雄组的建立. *火山地质与矿床*, 20(3): 197–204
- 徐克勤, 胡受奚, 孙明志, 张景荣, 叶俊, 李惠平. 1984. 华南钨矿床的区域成矿条件分析. 见: 余鸿彰编. 钨矿地质讨论会论文集. 北京: 地质出版社, 243–258
- 俞云文, 胡开明. 2001. 论浙东南磨石山群祝村组的解体. *火山地质与矿产*, 22(3): 170–176
- 俞云文, 徐步台, 陈江峰, 董传万. 2001. 浙东南中生代晚期火山岩 Nd 同位素组成及其地层学意义. *高校地质学报*, 7(1): 62–69
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考. *高校地质学报*, 9(4): 556–565
- 浙江省地质矿产局. 1989. 浙江省区域地质志. 北京: 地质出版社
- 浙江省地质矿产局. 1996. 浙江省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社