

doi:10.3799/dqkx.2016.517

浙江龙游地区基性及镁质变质岩的地球化学特征及其构造环境

董学发^{1,2}, 唐增才², 陈忠大², 余盛强², 赵旭东², 周宗尧², 吴小勇², 肖庆辉^{3*}

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 浙江省地质调查院, 浙江杭州 3112033

3. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

摘要: 位于扬子陆块东南缘与华夏地块之间的龙游地区出露一套中深变质岩系, 其对华南前泥盆纪地质构造格局问题的解释至关重要, 但目前人们对其形成时的大地构造背景了解不多. 通过对其中的基性及镁质变质岩进行系统的岩石地球化学研究, 可将这些岩石可以分为3种类型: “N-MORB”型、“T-MORB”型和“E-MORB”型. 其中“N-MORB”型岩石原岩可能主要形成于洋内弧环境, “T-MORB”型岩石原岩主要形成于过渡型大洋中脊及火山弧环境, 而“E-MORB”型岩石的原岩则主要形成于富集型大洋中脊、陆缘弧和板内环境. 岩石成岩环境的多样性表明龙游地区的变质岩实属一套构造混杂岩, 形成过程与古大洋地壳的俯冲、消减有关, 这也为龙游榴闪岩的产出、定位提供了合理的解释.

关键词: 基性变质岩; 镁质变质岩; 地球化学; 构造环境; 龙游; 浙江.

中图分类号: P595; P548

文章编号: 1000-2383(2016)08-1322-12

收稿日期: 2016-02-20

Geochemical Characteristics of the Basic and Magnesian Metamorphic Rocks in Longyou Area, Zhejiang Province and Their Tectonic Setting

Dong Xuefa^{1,2}, Tang Zengcai², Chen Zhongda², Yu Shengqiang², Zhao Xudong², Zhou Zongyao², Wu Xiaoyong², Xiao Qinghui^{3*}

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Zhejiang Institute of Geological Survey, Hangzhou 311203, China

3. Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China

Abstract: A medium and high grade metamorphic rock series is exposed in Longyou area located in the southeast margin of Yangtze block and Cathaysia block, which is important for the interpretation of South China Predevonian tectonic pattern. But the tectonic setting of its formation remains unknown presently. It is found out these rocks can be divided into three types: “N-MORB”, “T-MORB” and “E-MORB” type rock by a basic and magnesian metamorphic rock geochemical study in this paper. The protoliths of the “N-MORB” is mainly formed in the intra-oceanic arc, the “T-MORB” is mainly formed in the transition of mid-oceanic ridge and the volcanic arc, and the “E-MORB” type rock is formed in the enrichment of mid-oceanic ridge, epicontinental arc and intraplate environment. Rock diagenesis environment diversity shows that the metamorphic rock of Longyou area is a tectonic mélangé and its forming process is related with the ancient oceanic crust subduction, which also provides a reasonable explanation for the output, positioning of the pomegranate amphibolite in Longyou area.

Key words: basic metamorphic rocks; magnesia metamorphic rocks; geochemistry; tectonic setting; Longyou; Zhejiang Province.

基金项目: 中国地质调查局项目(No. 12120114068901); 浙江省国土资源厅项目(Nos. 2014004, 2010001).

作者简介: 董学发(1979-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事区域地质及矿产调查工作. E-mail: dongxuefa@qq.com

* **通讯作者:** 肖庆辉, E-mail: qinghuixiao@126.com

引用格式: 董学发, 唐增才, 陈忠大, 等, 2016. 浙江龙游地区基性及镁质变质岩的地球化学特征及其构造环境. 地球科学, 41(8): 1322-1333.

华南前泥盆纪地质构造格局问题长期以来困扰着国内外众多地质学家,自 20 世纪 50 年代以来,他们先后提出过多种构造模型,主要有加里东期地槽褶皱带(黄汲清,1954;谢家荣,1965;任纪舜,1984)、岛弧褶皱系(郭令智等,2001)、地体构造(郭令智等,1981)、印支期碰撞造山带(许靖华等,1987)、晋宁—加里东期对接碰撞带(水涛,1987;水涛等,1988)、早古生代陆内造山带(张国伟等,2013)等.随着华南一大批古元古代高精度锆石 U-Pb 同位素年龄的获取(胡雄健,1994;甘晓春等,1995;李春忠,1996;李曙光等,1996;汪相等,2008;向华等,2008;刘锐等,2009;Xia *et al.*, 2012;陈志洪等,2013; Zhao *et al.*, 2014),华夏地块的存在已经被普遍认同.然而围绕有关华夏地块的范围、演化及其与江南古岛弧之间发生碰撞的时限等重大地质科学问题仍然存在很大争议.特别是近年来,龙游榴闪岩的发现对上述构造模型均提出了挑战(邢光福等,2013).部分研究表明,龙游榴闪岩很可能是退变榴辉岩(陈相艳等,2015),可能与地壳深俯冲有关,其变质峰期年龄为

451 Ma(汪建国等,2014).姜杨等(2014)对江山—绍兴结合带北西缘部分 841~793 Ma 的 TTG 岩套进行了研究,结果表明古华南海的存在可能一直延续到新元古代晚期,甚至早古生代.华南前泥盆纪是否更可能为一个加里东期碰撞型造山带?由此可见,地处扬子陆块与华夏地块衔接部位的龙游地区,其变质岩构造背景的恢复对上述问题的解答至关重要.为此笔者试图以该区广泛发育的基性变质岩和镁质变质岩为研究对象,通过岩石地球化学手段恢复、探讨其形成时的大地构造背景.

1 区域地质背景

研究区地处武夷—云开造山系郴州—萍乡—江绍结合带(潘桂棠等,2009)的北东段,北边以江山—绍兴深大断裂带与扬子陆块相邻,南边为华夏地块.该区变质岩主要分布于龙游全旺、溪口、大街、金华塔石等地(图 1),出露面积约为 175 km².变质岩周围被大面积白垩纪火山岩覆盖,局部又被白垩纪和

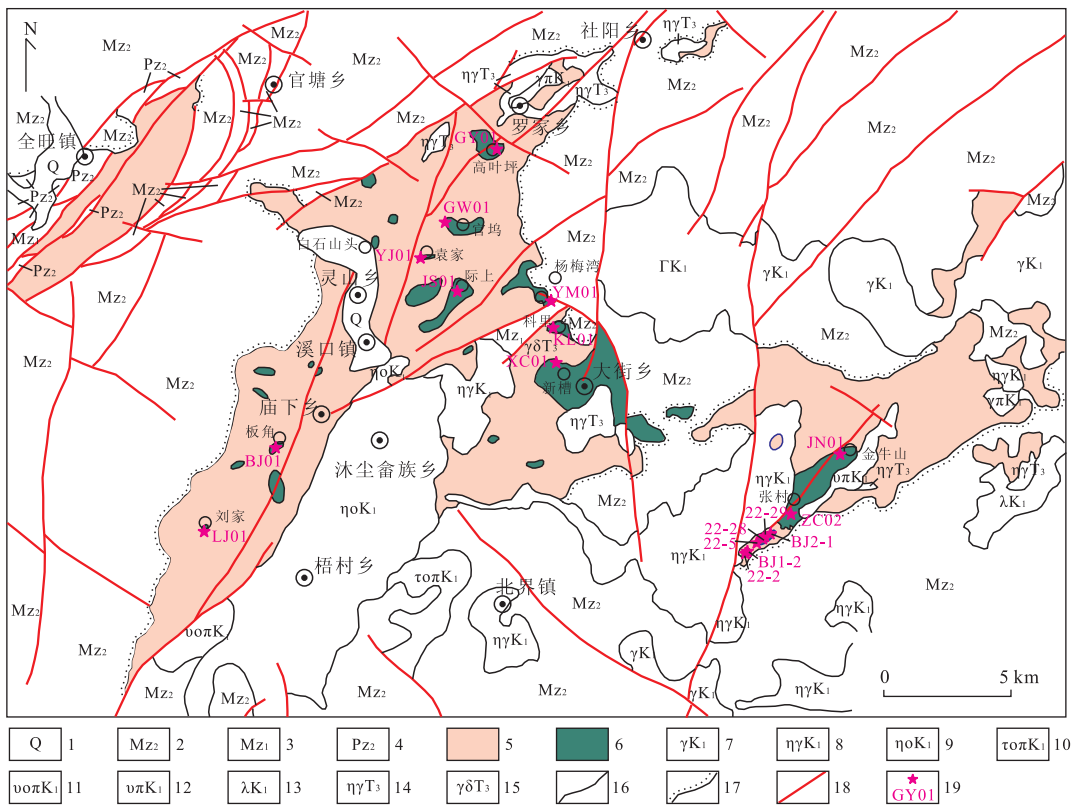


图 1 龙游地区区域地质

Fig. 1 Regional geological sketch in Longyou area

- 1. 第四系; 2. 晚中生界; 3. 早中生界; 4. 晚古生界; 5. 泥质—长英质变质岩; 6. 基性—镁质变质岩; 早白垩世侵入岩; 7. 花岗岩; 8. 二长花岗岩;
- 9. 石英二长岩; 10. 石英粗面斑岩; 11. 石英霏细斑岩; 12. 霏细斑岩; 13. 流纹岩; 晚三叠世侵入岩; 14. 二长花岗岩; 15. 花岗闪长岩; 16. 地质界线;
- 17. 不整合界线; 18. 断层; 19. 采样位置及样品编号

少量晚三叠世花岗岩侵入。该区变质岩曾先后被归为太古界(浙江省地质局, 1966, 1: 20 万金华幅区域地质矿产调查报告)、中元古界陈蔡群 d 段(浙江省地质矿产局, 1989)、龙游岩群(浙江省地质矿产厅, 1995, 1: 5 万衢州市、龙游县、灵山、沐尘、蕉川幅区域地质调查报告)、古元古界八都岩群(浙江省地质调查院, 2014, 浙江 1: 25 万衢州市幅区域地质调查(修测)成果报告)等, 主体为一套中深变质岩系, 由黑云斜长片麻岩、黑云斜长变粒岩、斜长角闪岩、斜长角闪片麻岩、石墨云母片岩、含矽线石榴黑云石英片岩等组成。岩石成层性不强, 总体呈现出“岩块+基质”的岩石分布面貌。其中的基质主要为变形强烈的含碳富铝片麻岩、变粒岩和片岩, 如含石墨矽线黑云斜长片麻岩、含石墨黑云斜长变粒岩、矽线云母片岩、云母石英片岩等, 原岩主要为长石砂岩和泥质沉积岩, 形成于不稳定的沉积环境(浙江省地质矿产厅, 1995, 1: 5 万衢州市、龙游县、灵山、沐尘、蕉川幅区域地质调查报告), 而岩块主要由蛇纹石化辉石橄榄岩、斜长角闪岩、斜长角闪片麻岩、阳起石岩、角闪石岩、角闪斜长辉石岩等组成, 它们在区域上大多以规模不等的透镜体或不规则团块状产出。上述基质岩石中普遍发育韧性剪切变形, 剪切面以 NNE 向为主, NE 及 NW 向次之, 而岩块本身由于能干性强, 变形微弱, 与基质围岩差异较大, 两者之间构造接触关系明显。浙江省地质调查院曾对该区片麻岩类及角闪质岩类进行了锆石同位素测年, 测年结果显示这些岩石锆石年龄主要集中于 390~450 Ma, 多数属于岩石变质年龄(浙江省地质调查院, 2014, 浙江 1: 25 万衢州市幅区域地质调查(修测)成果报告)。本文研究的基性及镁质变质岩(主要包括斜长角闪岩、斜长角闪片麻岩、角闪石岩等)广泛散布于糜棱岩化片岩及片麻岩中, 多呈不规则状岩块产出

(图 2), 其中规模较大的岩块见于际上、塘头、官坞、科里、大街、张村等地, 最大岩块出露面积约为 6 km²。据 1: 5 万衢州市、龙游县、灵山、沐尘、蕉川幅区域地质调查报告及本文研究, 这些岩块的原岩多为正变质岩, 相当于辉长岩、玄武岩或辉绿岩等。

本文研究的基性变质岩主要为斜长角闪岩和斜长角闪片麻岩, 岩石呈灰黑色, 芝麻点状或片麻状构造, 矿物成分主要为斜长石和角闪石, 有时可见少量石英和普通辉石, 副矿物主要为磁铁矿, 矿物粒度为 0.1~2.0 mm。镁质变质岩岩性主要为角闪石岩, 岩石呈深黑色, 块状构造, 矿物成分几乎全部由角闪石组成, 常呈粗大粒状, 粒径最大可达 1 cm, 局部含少量辉石或石榴子石。斜长角闪(片麻)岩与角闪石岩时常共生产出, 两者有时呈渐变过渡, 从而使岩石呈现出条纹状或条带状构造面貌。

2 采样与分析

本文对龙游地区(部分涉及金华地区)分布的主要基性变质岩和镁质变质岩进行了系统采样, 尽可能采集未风化及未蚀变的新鲜样品, 采样位置如图 1 所示。将所采样品破碎、加工成 200 目的粉末, 分成两份分别进行岩石主量元素和微量元素(包括稀土元素)分析。样品破碎加工在廊坊诚信地质服务有限公司完成, 主、微量元素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。主量元素含量采用日立 180-70 原子吸收光谱仪、UV-754 紫外可见分光光度计测试; 稀土、微量元素分析在 Agilent7500a 型电感耦合等离子体质谱仪上完成, 分析测定的标准物质为 AGV-2、BHVO-2、BCR-2、RGM-2, 每隔 8 个样品测定一次监控样。制样方法及实验详细流程参考 Liu *et al.* (2008)。分析数据见表 1。

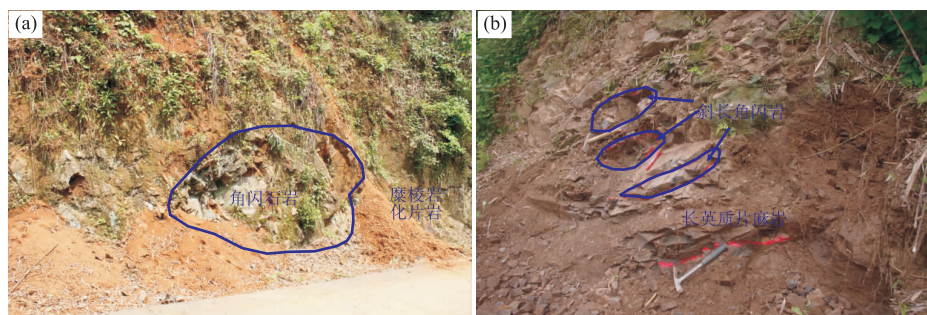


图 2 龙游地区基性及镁质变质岩野外露头

Fig. 2 The field outcrops of the basic and magnesian metamorphic rocks in Longyou area

a. 呈团块状产出糜棱岩化片岩中的角闪石岩; b. 呈透镜状产出长英质片麻岩中的斜长角闪岩

表 1 龙游地区基性及镁质变质岩的主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果

Table 1 Major elements (%) and trace elements (10^{-6}) analytic data of the basic and magnesian metamorphic rocks in Longyou area

地点(样号) 岩性	张村(22-29★) 斜长角闪岩	溪口(LY12☆) 斜长角闪岩	科里(KL101) 斜长角闪片麻岩	杨梅湾(YM01) 斜长角闪岩	新槽(XC01) 斜长角闪岩	际上(JS01) 石榴角闪石岩	袁家(YJ01) 斜长角闪片麻岩	张村(ZC02) 斜长角闪片麻岩	官坞(GW01) 斜长角闪岩
SiO ₂	46.73	47.56	50.24	50.46	46.08	45.04	51.85	46.34	49.58
TiO ₂	0.91	0.51	0.22	1.54	2.35	3.29	2.06	1.08	0.96
Al ₂ O ₃	14.49	15.47	15.20	14.42	15.72	14.35	14.20	13.99	14.72
TF ₂ O ₃	12.87	10.44	8.26	11.61	14.14	18.89	13.15	13.91	11.97
MnO	0.19	0.16	0.16	0.17	0.22	0.61	0.22	0.21	0.22
MgO	9.34	9.06	9.90	6.43	6.07	5.01	5.27	9.07	8.03
CaO	10.30	13.00	12.30	9.19	9.92	8.19	7.36	9.60	9.30
Na ₂ O	2.99	1.60	1.59	2.68	2.62	0.82	3.74	2.41	0.82
K ₂ O	1.11	0.70	0.43	0.47	0.83	1.04	0.62	0.79	1.73
P ₂ O ₅	0.10	0.03	0.01	0.14	0.09	0.31	0.28	0.13	0.12
LOI	1.60	1.59	1.60	2.30	1.50	1.96	0.82	1.96	2.10
总量	100.63	100.12	99.91	99.41	99.52	99.51	99.49	99.55	99.55
Mg#	61.72	65.85	72.70	55.17	48.82	37.08	47.11	59.17	59.85
K ₂ O+Na ₂ O	4.10	2.30	2.02	3.15	3.43	1.86	4.36	3.20	2.55
Na ₂ O/K ₂ O	2.69	2.29	3.70	5.70	3.03	0.79	6.03	3.05	0.47
La	3.15	1.46	0.96	5.13	4.77	15.30	9.69	4.67	8.86
Ce	8.50	3.86	2.01	12.60	14.40	42.20	26.60	12.80	19.80
Pr	1.27	0.60	0.31	2.02	2.41	6.12	3.97	2.01	3.32
Nd	6.32	3.05	1.41	10.20	11.30	28.10	19.40	9.34	15.10
Sm	1.95	1.16	0.49	3.09	3.48	7.80	5.85	3.10	4.85
Eu	0.78	0.48	0.30	1.17	1.33	2.90	1.78	0.86	1.26
Gd	2.79	2.06	0.68	3.99	4.09	9.63	6.79	3.63	5.34
Tb	0.46	0.32	0.14	0.72	0.72	1.76	1.23	0.64	1.04
Dy	3.44	2.10	1.04	4.68	4.81	11.60	8.25	4.26	6.96
Ho	0.75	0.51	0.22	0.98	0.96	2.39	1.73	0.86	1.42
Er	2.37	1.65	0.65	2.76	2.78	6.93	5.13	2.49	3.95
Tm	0.340	0.200	0.096	0.420	0.430	1.060	0.760	0.370	0.590
Yb	2.40	1.41	0.66	2.64	2.76	6.67	4.98	2.37	3.70
Lu	0.360	0.240	0.092	0.390	0.440	1.000	0.740	0.360	0.560
ΣREE	34.88	19.10	9.06	50.84	54.67	143.47	96.88	47.75	76.66
LREE/HREE	1.70	1.25	1.53	2.06	2.22	2.50	2.27	2.19	2.25
L _{AN} /Y _{bn}	0.94	0.74	1.05	1.39	1.24	1.65	1.40	1.41	1.72
δEu	1.02	0.95	1.56	1.02	1.08	1.02	0.86	0.78	0.75
δCe	1.04	1.01	0.89	0.96	1.03	1.07	1.05	1.02	0.89
Rb	72.0	18.4	10.9	18.6	39.0	39.8	39.5	47.0	84.8
Ba	130.0	64.3	79.8	66.4	83.2	216	58.5	88.3	180.0
Th		0.29	0.10	0.36	0.31	0.56	0.70	1.33	0.56
U		0.240	0.065	0.210	0.300	0.810	0.240	0.800	0.800
Ta		0.890	0.034	0.300	0.390	1.350	0.430	0.200	0.270
Nb		1.19	0.43	5.03	5.68	17.50	7.72	4.29	4.62
Sr	2.85	481	159	211	257	118	309	223	137
Zr	37.00	19.90	4.44	44.80	69.60	160.00	105.00	41.90	55.30
Hf	1.01	0.84	0.18	1.42	1.78	4.26	2.75	1.44	1.60
Y	19.00	13.10	6.25	28.50	28.40	71.10	49.90	24.20	42.60
V	427	172	356	356	523	601	399	374	340
Cr	198.0	328.0	81.3	128.0	81.3	27.8	58.8	322.0	337.0
Co	55.0	50.6	44.4	48.2	45.4	41.1	39.1	55.5	46.9
Ni	102.0	87.4	153.0	81.9	47.3	40.9	59.4	127.0	138.0
Th/Nb		0.24	0.23	0.07	0.06	0.03	0.09	0.31	0.12
Ti/V	12.78	7.66	26.93	25.91	26.93	32.81	30.92	17.33	16.93

续表 1

地点(样号)	刘家(LJ01)	金牛山(JN01)	高叶坪(GY01)	张村(BJ2-1)	板角(BJ01)	张村(22-2★)	张村(22-5★)	张村(22-28★)	张村(BJ1-2)
岩性	角闪石岩	斜长角闪片麻岩	斜长角闪岩	斜长角闪片麻岩	斜长角闪岩	角闪石岩	斜长角闪岩	辉石角闪石岩	角闪石岩
SiO ₂	43.71	49.37	45.08	45.92	50.48	46.74	44.38	39.83	38.60
TiO ₂	2.37	1.04	1.55	0.91	0.46	0.91	2.41	1.58	1.61
Al ₂ O ₃	14.65	15.39	14.81	17.29	10.04	14.50	12.15	11.09	9.91
TFe ₂ O ₃	13.04	10.42	11.28	7.38	11.76	12.85	16.78	16.74	15.33
MnO	0.16	0.26	0.14	0.12	0.23	0.19	0.25	0.20	0.19
MgO	11.98	7.33	8.04	5.06	11.14	9.34	9.45	13.37	10.36
CaO	9.72	7.97	12.52	9.35	10.66	10.25	9.50	13.09	10.60
Na ₂ O	0.89	2.14	2.23	3.24	1.51	2.91	2.36	1.50	1.23
K ₂ O	1.30	2.98	0.91	1.13	1.09	1.11	1.45	0.90	0.86
P ₂ O ₅	0.04	0.50	0.28	0.11	0.06	0.10	0.39	0.51	0.03
LOI	1.68	2.04	2.56	9.81	2.00	1.61	1.71	2.10	10.99
总量	99.54	99.44	99.40	100.31	99.43	100.83	100.91	100.91	99.73
Mg#	67.12	60.99	67.13	60.39	67.79	61.75	55.59	63.96	60.04
K ₂ O+Na ₂ O	2.19	5.12	3.14	4.37	2.60	4.02	3.81	2.40	2.10
Na ₂ O/K ₂ O	0.68	0.72	2.45	2.88	1.39	2.62	1.63	1.67	1.42
La	10.3	34.2	14.8	9.4	40.0	39.9	25.8	27.5	16.8
Ce	40.7	82.0	33.6	22.0	86.0	88.3	61.3	58.7	41.6
Pr	7.23	10.50	4.22	2.93	10.00	12.00	8.44	8.59	6.72
Nd	37.80	41.90	18.10	12.47	40.80	53.00	37.40	39.30	31.00
Sm	10.60	9.16	4.24	2.93	9.92	11.60	8.89	7.99	6.74
Eu	1.80	2.22	1.46	1.02	2.12	2.69	2.38	2.47	2.05
Gd	9.94	8.26	4.47	3.12	10.20	8.96	8.27	7.38	5.66
Tb	1.51	1.27	0.71	0.54	1.95	1.08	0.95	0.95	0.77
Dy	8.93	7.65	4.61	3.31	12.90	6.01	6.71	4.90	4.03
Ho	1.69	1.48	0.90	0.70	2.47	1.09	1.34	0.83	0.75
Er	4.47	4.19	2.45	1.86	6.95	2.72	3.52	2.11	1.78
Tm	0.62	0.63	0.36	0.27	1.02	0.35	0.42	0.28	0.23
Yb	3.71	4.14	2.35	1.68	6.19	2.04	2.64	1.63	1.35
Lu	0.52	0.58	0.31	0.25	0.82	0.30	0.39	0.25	0.20
ΣREE	139.87	208.21	92.52	62.52	231.23	230.04	168.56	162.85	119.68
LREE/HREE	3.45	6.38	4.72	4.33	4.44	9.20	5.92	7.88	7.10
La _N /Yb _N	1.98	5.93	4.51	4.01	4.63	14.03	7.01	12.11	8.91
δEu	0.53	0.77	1.02	1.02	0.64	0.78	0.83	0.97	0.99
δCe	1.11	1.05	1.03	1.02	1.03	0.98	1.01	0.93	0.96
Rb	53.50	145.00	17.80	50.80	35.50	52.00	77.00	9.05	6.44
Ba	180	1553	188	197	318	218	717	337	205
Th	0.56	1.38	1.48	0.52	10.90	2.90	3.09	2.00	1.73
U	0.43	0.26	0.41	0.44	2.36	0.49	0.50	0.28	0.49
Ta	0.86	0.67	1.12	0.49	1.39	0.48	1.06	0.29	0.41
Nb	12.90	12.70	19.70	7.45	15.20	11.90	17.20	6.97	7.17
Sr	80.7	488.0	454.0	527.0	142.0	464.0	527.0	784.0	445.0
Zr	44.6	97.1	78.6	39.1	102.0	76.5	136.0	59.7	44.4
Hf	2.02	2.66	2.02	1.42	2.17	2.22	3.73	2.10	1.66
Y	45.8	43.7	25.3	16.7	73.5	25.7	29.9	20.2	16.9
V	622	260	174	213	223	462	407	506	527
Cr	111.0	233.0	485.0	268.0	1265.0	314.0	191.0	593.0	8.1
Co	36.9	29.2	52.2	31.3	47.5	50.7	63.5	84.4	68.7
Ni	23.9	57.5	267.0	64.6	313.0	80.9	136.0	221.0	77.0
Th/Nb	0.04	0.11	0.08	0.07	0.72	0.24	0.18	0.29	0.24
Ti/V	22.86	24.01	53.53	25.55	12.39	11.81	35.50	18.70	18.37

注:表中样品编号带“★”引自浙江省地质调查院·2014·浙江1:25万衢州市衢区地质调查(修测)成果报告;样品编号带“☆”引自陈绍海等(1999)。

3 原岩类型及地球化学特征

3.1 原岩类型及岩石系列判别

龙游地区的基性变质岩与镁质变质岩在地质产状上,主要呈不规则岩块状产出,层状者极少;岩石组合上,主要是不同粒度的斜长角闪岩与角闪石岩相互伴生;岩石中局部可见变余枕状构造、变余辉绿结构等(浙江省地质矿产厅,1995,1:5万衢州市、龙游县、灵山、沐尘、蕉川幅区域地质调查报告)。在图 3 中,本文样点绝大多数落在基性火成岩区,据此笔者判定龙游地区的基性变质岩与镁质变质岩应主要为正变质岩,即由火成岩变质而成,这与 1:5 万衢州市、龙游县、灵山、沐尘、蕉川幅区域地质调查报告的认识基本一致。

在图 4a 中,样品投点大多数落入亚碱性玄武岩区,个别落入碱性玄武岩区和安山岩区,还有少数位

于安山岩与亚碱性玄武岩过渡区。在图 4b 上,绝大部分亚碱性玄武岩样点均具有拉斑系列富铁、富镁的演化趋势。由此可见,龙游地区的基性及镁质变质岩的原岩主要为拉斑系列的玄武岩、安山岩、安山玄武岩等,个别为碱性系列玄武岩(如 GY01)。

3.2 微量元素特征

由表 1 可见,龙游地区基性变质岩及镁质变质岩的 SiO_2 含量为 38.60%~50.48%,假定其变质过程属于等化学过程,且岩石未受后期蚀变作用的影响,那么上述 SiO_2 含量反映其原岩可能主要属基性—超基性岩。岩石 TiO_2 含量变化较大,为 0.22%~3.29%。 Al_2O_3 含量为 9.91%~17.29%。 TFe_2O_3 含量为 7.38%~18.89%。岩石 MgO 含量普遍较高,其中 SiO_2 含量低于 45% 的镁质变质岩 MgO 含量为 9.45%~13.37%,而 SiO_2 含量大于 45% 的基性变质岩 MgO 含量为 5.01%~11.14%,

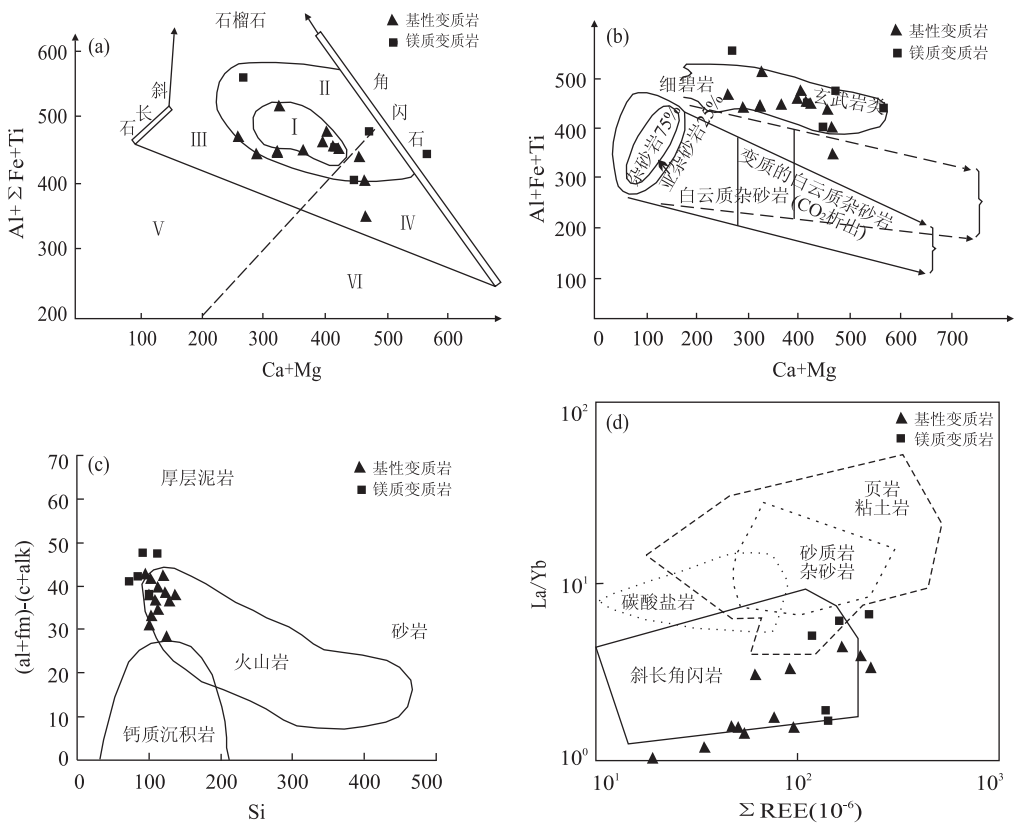


图 3 龙游地区基性及镁质变质岩原岩类型判别

Fig. 3 Discrimination of the protoliths of the basic and magnesian metamorphic rocks in Longyou area

a. $(\text{Al}+\Sigma\text{Fe}+\text{Ti})-(\text{Ca}+\text{Mg})$ 图解(据 Кремененки,1979),Al、Fe、Ti、Ca 和 Mg 均为原子数,ΣFe 包括了 Fe_2O_3 和 FeO 中的 Fe 原子数; I. 基性火成岩区; II. 基性火成岩及其变种区; III. 中性火成岩、基性火山杂砂岩和含有粘土质的沉凝灰岩和凝灰岩区; IV. 含有碳酸盐物质的沉凝灰岩和凝灰岩区; V. 粘土、泥岩、粉砂岩、长石砂岩和泥灰质砂岩区; VI. 粘土质、白云质和钙质泥灰岩区; b. $(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Ti})-(\text{Ca}+\text{Mg})$ 图解(据 Monie and Roche,1968),Al、Fe、Ti、Ca 和 Mg 均为原子数,Fe 包括了 Fe_2O_3 和 FeO 中的 Fe 原子数; c. $((\text{al}+\text{fm})-(\text{c}+\text{alk}))- \text{Si}$ 图解(据 Simonsen,1953),al、fm、c、alk、Si 均为尼里格值; d. $\text{La}/\text{Yb}-\Sigma\text{REE}$ 图解(据 Балащов *et al.*, 1972)

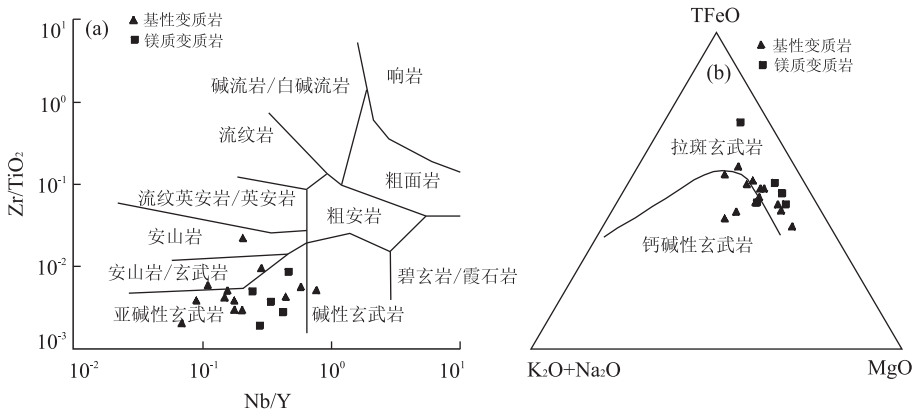


图 4 龙游地区基性及镁质变质岩原岩岩石系列判别

Fig. 4 Discrimination of the protoliths series of the basic and magnesian metamorphic rocks in Longyou area
a. Zr/TiO₂-Nb/Y 图解, 据 Winchester and Floyd(1977); b. FAM 图解, 据 Irvine and Barager(1971)

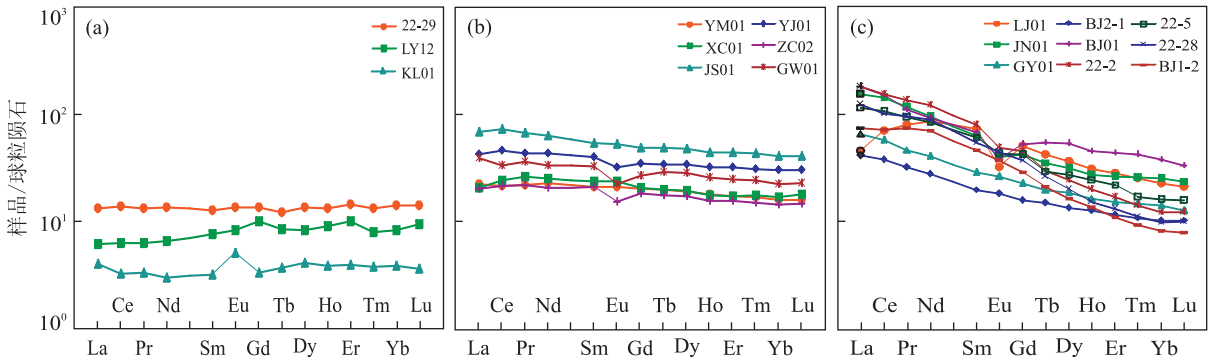


图 5 龙游地区基性及镁质变质岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of the basic and magnesian metamorphic rocks in Longyou area

a. “N-MORB”型岩石球粒陨石标准化稀土分布曲线; b. “T-MORB”型岩石球粒陨石标准化稀土分布曲线; c. “E-MORB”型岩石球粒陨石标准化稀土分布曲线; 标准化值据 Sun and McDonough(1989)

部分原岩已属高镁玄武岩. 但 $Mg^\#$ 普遍低于 68, 为 37.08~72.70, 表明部分岩石原岩岩浆经过了较低程度的演化, 其较低的 Ni、Cr 含量也说明了这一点. 岩石全碱 ($Na_2O + K_2O$) 含量为 2.02%~5.12%, 多数低于 4%, Na_2O/K_2O 多数大于 1.

3.3 稀土元素特征

如表 1 所示, 龙游地区基性变质岩及镁质变质岩稀土元素地球化学特征差异较大. 无论是稀土总量 ΣREE , 还是轻重稀土比值 LREE/HREE 及 La_N/Yb_N 均显示出较大的变化范围, 大致分为 3 种类型(图 5):

(1) “N-MORB”型, 稀土总量较低 ($\Sigma REE = 9.06 \times 10^{-6} \sim 34.88 \times 10^{-6}$), LREE/HREE 及 La_N/Yb_N 均较小 (其中 LREE/HREE = 1.25~1.70, $La_N/Yb_N = 0.74 \sim 1.05$), $\delta Eu = 0.95 \sim 1.56$, 该类样品球粒陨石标准化稀土分布曲线较为平坦或略微左倾(图 5a), 与 N-MORB 类似. 个别样品(如

KL01) 呈现明显的铕正异常, 其可能是玄武质岩浆中分离出来的堆晶岩.

(2) “T-MORB”型, 稀土总量具有较大的变化范围, ΣREE 为 $47.75 \times 10^{-6} \sim 143.47 \times 10^{-6}$, LREE/HREE = 2.06~2.50, $La_N/Yb_N = 1.24 \sim 1.72$, $\delta Eu = 0.75 \sim 1.08$, 该类样品球粒陨石标准化稀土分布曲线略微右倾(图 5b), 与 T-MORB 类似(李昌年, 1992). 部分样品具有较弱的负铕异常, 可能与岩浆演化经历较低程度的斜长石的分离结晶作用有关.

(3) “E-MORB”型, 稀土总量较高 ($\Sigma REE = 62.52 \times 10^{-6} \sim 231.23 \times 10^{-6}$), LREE/HREE 及 La_N/Yb_N 较大 (LREE/HREE = 3.45~9.20, $La_N/Yb_N = 1.98 \sim 14.03$), $\delta Eu = 0.53 \sim 1.02$, 该类样品球粒陨石标准化稀土分布曲线明显右倾(图 5c), 斜率较大, 与 E-MORB 类似. 部分样品具有弱负铕异常, 可能与原始岩浆经过轻微分离结晶有关.

以上稀土元素特征表明,龙游地区基性及镁质变质岩的稀土分布模式中既有与 N-MORB 类似的亏损型稀土配分型式,又有与 T-MORB 类似的过渡型稀土配分型式,还有与 E-MORB 类似的富集型稀土配分型式,说明该区基性及镁质变质岩的原岩在成岩过程方面具有一定的多样性和复杂性。

3.4 微量元素特征

在图 6 中,上述“N-MORB”型和“T-MORB”型样品除大离子亲石元素(LILE)出现一些波动外,高场强元素(HFSE)与稀土元素(REE)总体呈现亏损和平坦的曲线分布模式,其(Nb/Yb)_N 原始地幔标准化比值平均数分别为 0.62 和 1.29,这种分布模式可能与原岩岩浆源区为亏损或过渡型地幔有关。而“E-MORB”型样品曲线明显向右倾斜,(Nb/Yb)_N 原始地幔标准化比值平均数为 3.36,这种分布模式可能与原岩岩浆源区为富集型地幔或者源区地幔受到地壳流体或熔体交代有关。

LILE 之所以会出现波动变化,主要是由其本身的地球化学性质所决定。LILE 的富集有多种可能性,如源区为富集地幔,或者地幔源区被交代,抑或是大洋玄武岩受到海水的交代,也可能是岩石受到后期变质作用的改造等。所以通过 LILE 判断岩石成因具有不确定性,尤其是对已经发生角闪岩相变质作用的变质岩来说,更是如此。

在具体微量元素分布特征上,上述 3 类样品仍存在一些区别。其中,在图 6a 上,大离子亲石元素 Rb、Ba、K、Sr 为强富集,Th、U 显示为亏损,高场强元素 Nb、Ta 具有弱-中等亏损,样品 KL01 还显示 Zr 的亏损,其可能与堆晶岩的早期分异结晶有关。在图 6b 上,大离子亲石元素 Rb、K 为强富集,Ba、U 为弱富集,Th 为强烈亏损,Sr 为弱富集-弱亏损,

Sr 含量的变化可能与岩石受蚀变或变质程度存在差异有关,高场强元素 Nb、Ta 为弱亏损。在图 6c 上,多数样品表现为富集大离子亲石元素 Rb、Ba、K 和稀土元素 La、Ce、Nd、Sm,而亏损高场强元素 Nb、Ta、P、Ti 和大离子亲石元素 Th、U 的特征,个别样品呈现 Th、U 强富集(如 BJ01),Nb、Ta 为弱富集(如 LJ01、GY01),表明这些岩石有不同的成因。

4 构造环境讨论

基性正变质岩岩石地球化学特征对于探讨变质原岩的成岩构造环境具有十分重要的意义。以上主量元素、稀土元素及微量元素分布特征分析结果表明,龙游地区的基性及镁质变质岩原岩成因十分复杂,绝非某一单一构造背景下形成的产物。由于主量元素及大离子亲石元素具有相对较强的活动性,它们在岩石成岩后期易受交代、变质作用的影响,因此利用它们判别岩石形成构造环境的局限性较大。因此本文主要根据 Nb、Zr、Y、Yb、Th、Hf 等相对稳定的微量元素对上述 3 种类型的岩石原岩成岩构造环境进行讨论,构造环境判别图解见图 7。

4.1 “N-MORB”型岩石成岩构造环境判别

如表 1 所示,该类岩石 Th/Nb 比值较大(>0.2),Ti/V 比值较小(7.66~12.78),总体与俯冲有关的火山弧的地球化学特征相似。在图 7c 上,样品 22-29 及 LY12 均投入到 N-MORB 区;而 KL01 由于早期发生堆晶分异,导致堆晶岩石中的 Zr 含量偏低,在图解中该样点投到了区外,无法判断。但在图 7b 上,KL01 及 LY12 都落入到与俯冲有关的岛弧区,在图 7a 上,进一步指示为大洋岛弧(洋

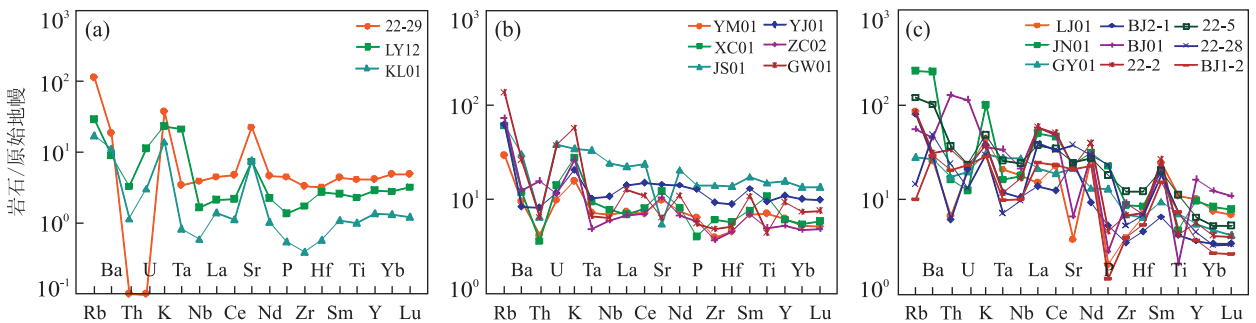


图 6 龙游地区基性及镁质变质岩原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 6 Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams of the basic and magnesian metamorphic rocks in Longyou area a. “N-MORB”型岩石微量元素蛛网图; b. “T-MORB”型岩石微量元素蛛网图; c. “E-MORB”型岩石微量元素蛛网图; 标准化值据 Sun and McDonough(1989)

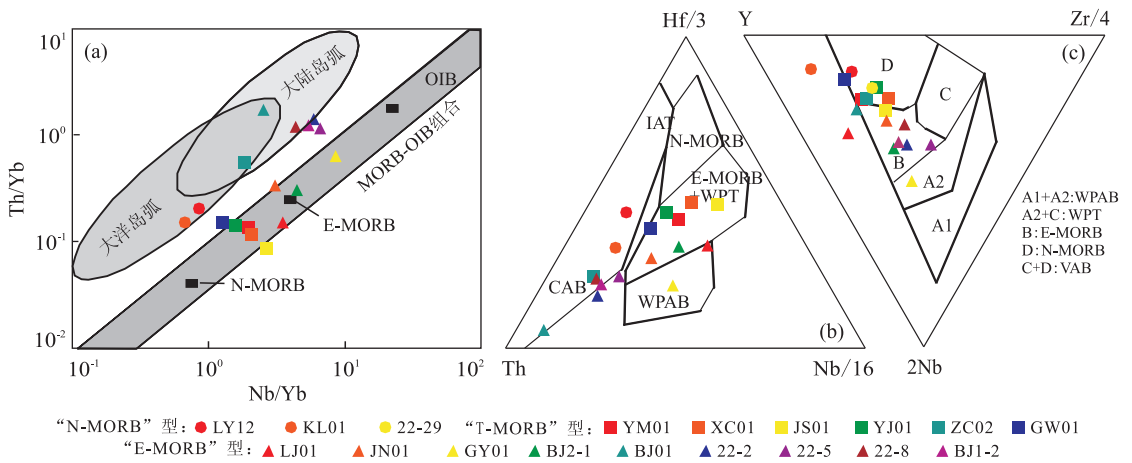


图 7 龙游地区基性及镁质变质岩岩石构造环境判别图解

Fig. 7 Tectonic setting discrimination diagrams of the basic and magnesian metamorphic rocks in Longyou area

a. Th/Yb-Nb/Yb 图解, 据 Pearce(2014); b. Hf/3-Th-Nb/16 图解, 据 Wood(1980); c. 2Nb-Zr/4-Y 图解, 据 Meschede(1986). CAB, 岛弧钙碱性玄武岩; IAT, 岛弧拉斑玄武岩; WPT, 板内拉斑玄武岩; WPAB, 板内碱性玄武岩; VAB, 火山弧玄武岩; E-MORB, 富集洋中脊玄武岩; N-MORB, 亏损洋中脊玄武岩; OIB, 洋岛玄武岩

内弧), 这与洋内弧玄武岩既具有 N-MORB 又具有火山弧的地球化学特征十分吻合. 由此可见, 这类岩石原岩可能主要属洋内弧玄武岩, 其在大洋板块内部俯冲的构造背景下形成.

4.2 “T-MORB”型岩石成岩构造环境判别

在图 7a 中, 该类岩石绝大部分落入到非俯冲的 N-MORB 与 E-MORB 之间, 显示出过渡型洋中脊玄武岩的特点, 个别样品(如 ZC02)投入到陆缘弧与洋内弧的重叠区. 在图 7b 上, 除 ZC02 落入火山弧区外, 其余均落在 E-MORB+WPT 区内, 且靠近 N-MORB 区. 而在图 7c 上, 样品主要落入 N-MORB 与 E-MORB 之间, 也显示了过渡型的特点. 在微量元素比值特征上, ZC02 的 Th/Nb 比值高达 0.31, 明显高于其他样品(多数小于 0.1), Ti/V 比值(为 17.33)又明显低于其他样品(普遍高于 25), 表明 ZC02 成岩环境与其他样品明显不同. 上述图解基本表明, 该类岩石原岩主要为过渡型洋中脊玄武岩, 个别可能形成于与俯冲环境相关的火山弧的构造背景. 微量元素图解判别结果与其稀土元素呈现的特征是一致的.

4.3 “E-MORB”型岩石成岩构造环境判别

稀土富集型玄武岩更多可能是受到大陆地壳的混染, 或者其地幔源区本身富集不相容元素, 因此其成岩环境可能会更多样化. 在图 7a 中, 该类样品主要集中在两个区间, 其一位于 E-MORB 附近, 其二靠近陆缘弧区, 还有个个别样品(如 GY01)投点位于 E-MORB 与 OIB 之间, 该样品在图 7b、7c 上均位于

WPAB 区, 在前述岩石系列判别中, 该样品也正好属于碱性玄武岩系列, 表明该样品属于板内环境的可能性比较大. 位于 E-MORB 附近的 3 个样品 Th/Nb 比值较低(<0.11), 而 Ti/V 比值较高(22.86~53.53), 它们也主要位于 E-MORB+WPT 区(图 7b); 而位于陆缘弧区的 5 个样品 Th/Nb 比值较高(0.18~0.72), Ti/V 比值较低(普遍低于 20), 投点主要沿着 CAB 区分布, 这与图 7a 的投点结果具有较好的一致性. 在图 7c 中, 除样品 GY01 外, 其余样品均位于 E-MORB 区, 不能加以区分. 综合所述, 龙游地区“E-MORB”型基性及镁质变质岩的原岩可能主要形成于 3 类构造环境: 板内、富集型大洋中脊以及陆缘弧.

根据以上讨论, 龙游地区基性及镁质变质岩的原岩大地构造背景既有与俯冲无关的洋中脊(包括过渡型和富集型两类)和板内环境, 又有与俯冲相关的大洋弧和陆缘弧环境. 这表明龙游变质岩成岩构造环境极其复杂, 绝不是在单一构造背景下形成的产物. 结合该套变质岩的地质分布、产状、相互之间的接触关系及其同位素年龄信息, 笔者认为龙游变质岩实属一套构造混杂岩, 其中相当一部分属于古大洋地壳残片, 这些不同构造部位下的产物主要通过俯冲消减作用集聚在一起, 这与同属江山-绍兴结合带中的陈蔡俯冲增生杂岩的形成过程是类似的. 古大洋地壳消减到一定深度发生脱水、变质形成榴辉岩, 然后在一定的机制下折返, 并发生退变质形成榴闪岩, 这可能正是龙游榴闪岩的形成机制之一.

5 结论

(1)龙游地区的基性及镁质变质岩原岩主要为基性—超基性火成岩,岩石系列上主要属于拉斑玄武岩系列,个别属碱性玄武岩系列。

(2)笔者根据稀土元素分布特征,可将龙游地区的基性及镁质变质岩分为“N-MORB”型、“T-MORB”型和“E-MORB”型3种类型。其中“N-MORB”型岩石原岩成岩构造环境主要为洋内弧,“T-MORB”型岩石成岩构造环境主要为过渡型大洋中脊和火山弧,而“E-MORB”型岩石成岩构造环境主要为富集型大洋中脊和陆缘弧,少数为板内环境。

(3)龙游地区的基性及镁质变质岩的原岩成岩构造环境的多样性说明龙游变质岩实属构造混杂岩,其中相当一部分为古大洋地壳残片,这一构造背景为龙游榴闪岩的产出、定位提供了合理的解释。

致谢:在野外工作过程中得到了成都地质矿产研究所潘桂棠研究员、天津地质矿产研究所陆松年研究员、南京地质矿产研究所邢光福研究员的悉心指导,中国地质大学(北京)叶珂同学参与了部分野外工作,此外,多位匿名审稿人对本文提出了诸多宝贵意见,在此一并深感谢忱!

References

Bureau of Geology and Mineral of Zhejiang Province, 1989. Regional Geology of Zhejiang Province. Geological Publishing House, Beijing, 19—22 (in Chinese).

Chen, S. H., Zhou, X. H., Li, J. L., 1999. Geochemistry of the Amphibolites from Chencai Group, Zhejiang Province: Implications for the Tectonic Settings. *Scientia Geologica Sinica*, 34(2): 154—165 (in Chinese with English abstract).

Chen, X. Y., Tong, L. X., Zhang, C. L., et al., 2015. Retrograde Garnet Amphibolite from Eclogite of the Zhejiang Longyou Area: New Evidence of the Caledonian Orogenic Event in the Cathaysia Block. *Chinese Science Bulletin*, 60(13): 1207—1217 (in Chinese with English abstract).

Chen, Z. H., Xing, G. F., Jiang, Y., et al., 2013. Discovery of the Paleoproterozoic A-Type Rhyolite Porphyries in the Cathaysia Block and Its Geological Significance. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(3): 499—510 (in Chinese with English abstract).

Gan, X. C., Li, H. M., Sun, D. Z., et al., 1995. A Geochronological Study on Early Proterozoic Granitic Rocks,

Southwestern Zhejiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 14(1): 1—8 (in Chinese with English abstract).

Guo, L. Z., Shi, Y. S., Ma, R. S., 2001. The Geotectonic Framework and Crustal Evolution of South China. In: Guo, L. Z., et al., eds., *Plate Tectonics in South China*. Geological Publishing House, Beijing, 1—7 (in Chinese).

Guo, L. Z., Shi, Y. S., Ma, R. S., et al., 1981. Tectonostratigraphic Terranes of Southeast China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition)*, 20(4): 732—739 (in Chinese with English abstract).

Hu, X. J., 1994. Geochronology of Lower Proterozoic Badu Group, Southwestern Zhejiang Province. *Geochimica*, 23 (Suppl.): 18—24 (in Chinese with English abstract).

Huang, J. Q., 1954. On Major Tectonic Forms of China. Geological Publishing House, Beijing, 35—39 (in Chinese).

Irvine, T. N., Barager, W. R. A., 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523—548. doi: 10.1139/e71-055

Jiang, Y., Zhao, X. L., Lin, S. F., et al., 2014. Identification and Tectonic Implication of Neoproterozoic Continental Margin-Arc TTG Assemblage in Southeastern Margin of the Yangtze Craton. *Acta Geologica Sinica*, 88(8): 1462—1474 (in Chinese with English abstract).

Li, C. N., 1992. Petrology on Trace Elements in Igneous. China University of Geosciences Press, Wuhan, 79—91 (in Chinese).

Li, C. Z., 1996. Division and Chronocorrelation of the Metamorphic Rocks in Jingning County. *Geology of Zhejiang*, 12(2): 10—18 (in Chinese with English abstract).

Li, S. G., Chen, Y. Z., Ge, N. J., et al., 1996. Isotopic Ages of Metavolcanic Rocks and Metacryst Mylonite in the Badu Group in Southwestern Zhejiang Province and Their Implications for Tectonics. *Acta Petrologica Sinica*, 12(1): 79—87 (in Chinese with English abstract).

Liu, R., Zhou, H. W., Zhang, L., et al., 2009. Paleoproterozoic Reworking of Ancient Crust in the Cathaysia Block, South China: Evidence from Zircon Trace Elements, U-Pb and Lu-Hf Isotopes. *Chinese Science Bulletin*, 54(7): 906—917 (in Chinese).

Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1—2): 34—43. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.08.004

Meschede, M., 1986. A Method of Discriminating between

- Different Types of Mid-Ocean Ridge Basalts and Continental Tholeiites with the Nb-Zr-Y Diagram, *Chemical Geology*, 56 (3-4): 207-218. doi: 10.1016/0009-2541(86)90004-5
- Monie, B., Roche, H., 1968. Nouvelle Approche du Problème de l'Origine des Amphibolites à Parir de Levit Composition Chimique, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 267: 2084-2087.
- Pan, G. T., Xiao, Q. H., Lu, S. N., et al., 2009. Subdivision of Tectonic Units in China, *Geology in China*, 36 (1): 1-28 (in Chinese with English abstract).
- Pearce, J. A., 2014. Immobile Element Fingerprinting of Ophiolites, *Elements*, 10 (2): 101-108. doi: 10.2113/gselements.10.2.101
- Ren, J. S., 1984. Some Problems on the Division of Tectonic Units in Eastern China, *Geological Review*, 30 (4): 382-385 (in Chinese with English abstract).
- Shui, T., 1987. Tectonic Evolution of the Ancient Basement in the Edge of the Mainland in Southeast China, *Bulletin of Science and Technology*, 3 (5): 32-34 (in Chinese).
- Shui, T., Xu, B. T., Liang, R. H., et al., 1988. The Metamorphic Basement Geology in Zhejiang and Fujian Province, China, Science Press, Beijing, 85 (in Chinese).
- Simonen, A., 1953. Stratigraphy and Sedimentation of the Svecofennidic, Early Archean Supracrustal Rocks in Southwestern Finland, *Bulletin de la Commission Géologique de Finlande*, 160: 1-64.
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunders, A. D., Nonrry, M. J., eds., Magmatism in the Oceanic Basins, *Geology Society Special Publication*, 42 (1): 313-345. doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Wang, J. G., Yu, S. Q., Hu, Y. H., et al., 2014. The Discovery, Petrology and Geochronology of the Retrograde Eclogite in Jiangshan-Shaoxing Suture Zone, *Geology in China*, 41 (4): 1356-1363 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X., Chen, J., Luo, D., 2008. Study on Petrogenesis of Zircons from the Danzhu Granodiorite and Its Geological Implications, *Geological Review*, 54 (3): 387-398 (in Chinese with English abstract).
- Winchester, J., Floyd, P., 1977. Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements, *Chemical Geology*, 20: 325-343. doi: 10.1016/0009-2541(77)90057-2
- Wood, D. A., 1980. The Application of a Th-Hf-Nb Diagram to Problems of Tectonomagmatic Classification and to Establishing the Nature of Crustal Contamination of the British Tertiary Volcanic Province, *Earth and Planetary Science Letters*, 50 (1): 11-30. doi: 10.1016/0012-821X(80)90116-8
- Xia, Y., Xu, X. S., Zhu, K. Y., 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. doi: 10.1016/j.precamres.2012.07.001
- Xiang, H., Zhang, L., Zhou, H. W., et al., 2008. Study on Zircon U-Pb Age and Hf Isotope of the Basic-Ultrabasic Metamorphic Rocks of the Metamorphic Basement in Southwest Zhejiang: The Metamorphic Basement of Cathaysia Block Response to the Orogenesis of South China in Indo-Chinese Epoch, *Science in China (Series D)*, 38 (4): 401-413 (in Chinese).
- Xie, J. R., 1965. Regional Tectonic Features of Southeast China, In: Chen, G. D., Guo, L. Z., Zhang, B. S., et al., eds., China Tectonic Problems, Science Press, Beijing, 151-164 (in Chinese).
- Xing, G. F., Jiang, Y., Chen, Z. H., et al., 2013. The Pomegranate Amphibolite in Caledonian Period Was Found in Qin-Hang Suture Zone for First Time, *Resources Survey & Environment*, 34 (4): the second cover (in Chinese).
- Xu, J. H., Sun, S., Li, J. L., 1987. Is South China Orogenic Belt Rather than South China Platform, *Science in China (Series B)*, (10): 1107-1115 (in Chinese).
- Zhang, G. W., Guo, A. L., Wang, Y. J., et al., 2013. Tectonics of South China Continent and Its Implications, *Science in China (Series D)*, 43 (10): 1553-1582 (in Chinese).
- Zhao, L., Zhou, X. W., Zhai, M. G., et al., 2014. Paleoproterozoic Tectonic Transition from Collision to Extension in the Eastern Cathaysia Block, South China: Evidence from Geochemistry, Zircon U-Pb Geochronology and Nd-Hf Isotopes of a Granite-Charnockite Suite in Southwestern Zhejiang, *Lithos*, 184-187: 259-280. doi: 10.1016/j.lithos.2013.11.005
- Бапашов, Ю. А., Кременепкий, А. А., Цгвеп, В. М., 1972. Геохимические Критерии Природы Докмбрийских Амфиболитов, *Геохимика*, 11: 1358-1371 (in Russian).
- Кременепкий, А. А., 1979. Метаморфизм Основных Поруд Докембрия. Наука, Москва (in Russian).

附中文参考文献

浙江省地质矿产局, 1989. 浙江省区域地质志. 北京: 地质出版社

- 版社,19—22.
- 陈绍海,周新华,李继亮,等,1999. 浙江陈蔡群斜长角闪岩的地球化学特征及其大地构造背景探讨. 地质科学, 34(2): 154—165.
- 陈相艳,全来喜,张传林,等,2015. 浙江龙游石榴石角闪岩(退变榴辉岩):华夏加里东期碰撞造山事件的新证据. 科学通报,60(13): 1207—1217.
- 陈志洪,邢光福,姜杨,等,2013. 华夏陆块古元古代 A 型流纹斑岩的发现及其地质意义. 大地构造与成矿学, 37(3): 499—510.
- 甘晓春,李惠民,孙大中,等,1995. 浙西南早元古代花岗岩质岩石的年代. 岩石矿物学杂志,14(1): 1—8.
- 郭令智,施央申,马瑞士,等,1981. 中国东南部地体构造的研究. 南京大学学报(自然科学版),20(4): 732—739.
- 郭令智,施央申,马瑞士,2001. 华南大地构造格架和地壳演化. 见:郭令智等编,华南板块构造. 北京:地质出版社, 1—7.
- 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.
- 黄汲清,1954. 中国主要地质构造单位. 北京:地质出版社, 35—39.
- 姜杨,赵希林,林寿发,等,2014. 扬子克拉通东南缘新元古代陆缘弧型 TTG 的厘定及其构造意义. 地质学报, 88(8): 1462—1474.
- 李昌年,1992. 火山岩微量元素岩石学. 武汉:中国地质大学出版社,79—91.
- 李春忠,1996. 景宁地区变质岩划分及时代归属. 浙江地质, 12(2): 10—18.
- 李曙光,陈移之,葛宁洁,等,1996. 浙西南八都群变火山岩系及变晶糜棱岩的同位素年龄及其构造意义. 岩石学报, 12(1): 79—87.
- 刘锐,周汉文,张利,等,2009. 华夏地块古元古代陆壳再造: 锆石微量元素与 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素证据. 科学通报,54(7): 906—917.
- 潘桂棠,肖庆辉,陆松年,等,2009. 中国大地构造单元划分. 中国地质,36(1): 1—28.
- 任纪舜,1984. 中国东部构造单元划分的几个问题. 地质论评,30(4): 382—385.
- 水涛,1987. 中国东南边缘大陆古基底构造演化. 科技通报, 3(5): 32—34.
- 水涛,徐步台,梁如华,等,1988. 中国浙闽变质基底地质. 北京:科学出版社,85.
- 汪建国,余盛强,胡艳华,等,2014. 江山—绍兴结合带榴辉岩的发现及岩石学、年代学特征. 中国地质, 41(4): 1356—1363.
- 汪相,陈洁,罗丹,2008. 浙西南淡竹花岗闪长岩中锆石的成因研究及其地质意义. 地质论评,54(3): 387—398.
- 向华,张利,周汉文,等,2008. 浙西南变质基底基性—超基性变质岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素研究:华夏地块变质基底对华南印支期造山的响应. 中国科学(D辑):地球科学,38(4): 401—413.
- 谢家荣,1965. 中国东南地区大地构造主要特征. 见:陈国达,郭令智,张伯生,等编,中国大地构造问题. 北京:科学出版社,151—164.
- 邢光福,姜杨,陈志洪,等,2013. 钦杭结合带首次发现加里东期榴辉岩. 资源调查与环境,34(4):封 2.
- 许靖华,孙枢,李继亮,1987. 是华南造山带而不是华南地台. 中国科学(B辑), (10): 1107—1115.
- 张国伟,郭安林,王岳军,等,2013. 中国华南大陆构造与问题. 中国科学(D辑),43(10): 1553—1582.