

doi: 10.12029/gc20210615

蔡逸涛, 施建斌, 周琦忠, 徐敏成, 张琪. 2021. 徐州白露山含金刚石橄榄玄武岩地球化学特征及其岩浆演化特征[J]. 中国地质, 48(6): 1850–1864.

Cai Yitao, Shi Jianbin, Zhou Qizhong, Xu Mincheng, Zhang Qi. 2021. Geochemistry of the diamondiferous olivine basalt and magmatic evolution in the Bailushan area, Xuzhou[J]. *Geology in China*, 48(6): 1850–1864(in Chinese with English abstract).

徐州白露山含金刚石橄榄玄武岩地球化学特征 及其岩浆演化特征

蔡逸涛^{1,2,3}, 施建斌⁴, 周琦忠⁴, 徐敏成², 张琪⁴

(1. 金陵科技学院材料工程学院, 江苏南京 211169; 2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏南京 210016; 3. 加拿大阿尔伯塔大学地球科学与大气环境系, 埃德蒙顿 T6G2E3; 4. 江苏省地质矿产局第五地质大队, 江苏徐州 221004)

摘要: 江苏徐州地区位于华北克拉通的东南部, 其区内及周边广泛发育碱性超基性岩–基性岩, 其中不乏含金刚石母岩, 但是主要为金伯利岩。笔者在苏北寻找金刚石原生矿的过程中, 在徐州白露山地区发现了含金刚石的橄榄玄武岩。本区橄榄玄武岩 SiO₂ 含量为 42.64%~51.13%, K₂O+Na₂O 为 2.57%~5.93%, Al₂O₃ 为 10.48%~13.53%, MgO 含量变化范围较大, 为 3.11%~19.34%。以主量元素做 TAS 图解可以看出本区基性岩的投影点基本都落于玄武岩范围, 属于高钾钙碱性。微量元素特征显示白露山的样品靠近 OIB 和火山弧区域。富集端元明显偏高的 Ba/Th 比值暗示玄武岩中含有大陆下地壳物质。而白露山橄榄玄武岩元素地球化学特征及组成变化范围大并不是主要由地壳混染引起的, 而是因为源区含有残留的再循环大陆下地壳。这些地球化学特征说明徐州白露山橄榄玄武岩与辽宁、山东地区金伯利岩具有一定的成因联系, 为该区金刚石找矿提供了有利线索。

关键词: 橄榄玄武岩; 含金刚石母岩; 岩浆演化特征; 矿产勘查工程; 徐州; 江苏

中图分类号: P618.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2021)06-1850-15

Geochemistry of the diamondiferous olivine basalt and magmatic evolution in the Bailushan area, Xuzhou

CAI Yitao^{1,2,3}, SHI Jianbin⁴, ZHOU Qizhong⁴, XU Mincheng², ZHANG Qi⁴

(1. *Jinling Institute of Technology, College of Material Engineering, Nanjing 211169, Jiangsu, China*; 2. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China*; 3. *Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta, Canada, Edmonton, T6G2E3, Canada*; 4. *NO. 5 Geological Team of Jiangsu Geology and Mineral Bureau, Xuzhou 221004, Jiangsu, China*)

Abstract: Xuzhou is located in the southeast of the north China craton. Alkaline ultrabasic rocks–basic rocks are widely developed

收稿日期: 2019-03-27; 改回日期: 2020-01-16

基金项目: 江苏省自然科学基金面上项目(BK20191132)、中国地质调查局项目(DD20191132)、江苏省地勘基金(苏地矿发[2017]96号)及国家自然科学基金项目(41402075)联合资助。

作者简介: 蔡逸涛, 男, 1982年生, 博士, 高级工程师, 矿床学专业, 主要从事金刚石找矿及研究工作; E-mail: cyitao@cgs.cn。

通讯作者: 施建斌, 男, 1965年生, 教授级高级工程师, 主要从事地质矿产勘查工作; E-mail: 490070228@qq.com。

in and around it, where there are some diamondiferous rocks, but mainly kimberlite. During the prospecting of primary diamond deposit, the diamondiferous rocks were discovered in Bailushan, north of Xuzhou. The SiO_2 content of olivine basalt ranges from 42.64% to 51.13%, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ from 2.57% to 5.93%, Al_2O_3 from 10.48% to 13.53%, and MgO content from 3.11% to 19.34%. On the TAS diagram, the points of basic rocks in this area all fall into the range of basalt, indicating high potassium calcium alkalinity. Trace element signatures indicate that samples from Bailushan are close to the OIB and volcanic arc regions. The higher Ba/Th ratio of enriched endmember suggests that the basalts contain lower continental crust materials. Therefore, the wide range of elements geochemistry and isotopic composition of olivine basalts is not mainly caused by crustal contamination, but because the source area contains residual recirculation subcontinental crust. These geochemical characteristics suggest that the Bailushan olivine basalt in Xuzhou is related to the kimberlite in Liaoning and Shandong, which provides a favorable clue for diamond prospecting in this area.

Key words: olivine basalt; the diamondiferous rock; magmatic evolution; mineral exploration engineering; Xuzhou; Jiangsu Province

About the first author: CAI Yitao, male, born in 1982, senior engineer, engaged in ore deposit, diamond exploration; E-mail: cyitao@cgs.cn.

About the corresponding author: SHI Jianbing, male, born in 1965, professor, engaged in ore deposit exploration; E-mail: 490070228@qq.com.

Fund support: Supported by Natural Science Foundation of Jiangsu Province(No.BK20191132), the project of China Geological survey(No.DD20191132), the Jiangsu Provincial Survey Program (No.201796) and National Natural Science Foundation of China (No.41402075).

1 区域地质背景

徐州地区位于江苏北部(图1b),构造上属于华北陆块东缘,系华北准地台的次级构造单元(潘桂棠,2009)。区域上看东部边界为双沟推覆断层带,南、北边界为蚌埠和丰沛太古宙地层的出露区(施建斌等,2012)。该区断裂构造较发育。根据地球物理资料、岩浆活动及地层的错断关系分析,有延伸至上地幔的超壳断裂,也有盖层内的断裂(舒良树等,1994;张贵山等,2009;赵正等,2010;王梦玺等,2012)。以其在空间的展布方向、组合形式和共生关系可划分为东西向、北东向、北北东向和北西向4组断裂(王陆超等,2011)。这些断裂构造除了控制暗色岩的时空分布外,在一定程度上还对沉积盖层的发育、岩相变化和展布方向具有重要的影响(潘国强等,2000;柳永清等,2005;相振群等,2012)。

郯庐断裂带是中国东部一条著名的深大断裂带(图1a),沿郯庐断裂带分布着大量的基性岩墙,与各种矿床关系十分密切。皖北—苏北地区新元古代地层保存比较完好,青白口系和震旦系的沉积特征反映出被动大陆边缘特征,岩性主要为灰岩和白云岩;震旦系为一套代表相对稳定的海相—浅海相沉积盖层组合(蔡逸涛等,2018)。研究区作为中国大陆古老的陆块之一,具有古老的结晶变质基底,并且经历了长期而复杂的构造、岩浆演化过程,尤

其是受燕山运动的影响比较突出(蔡逸涛等,2014;张洁等,2015)。

徐州地区岩浆岩活动不强烈,在各个地质时期具有不同表现。可以将其从太古宙到新生代划分为5个岩浆活动期。其中,太古宙至新元古代主要为五台期、武陵期及扬子期岩浆活动,海底富钠质岩浆喷发,形成了规模较大的细碧—石英角斑岩,并伴有基性—超基性岩浆岩侵入;中生代燕山期岩浆活动表现为多期次强烈的喷发和侵入,形成中酸性、偏碱性岩;而新生代主要为喜马拉雅期岩浆活动,形成多期喷发的玄武岩和基性侵入岩—辉绿岩。总体来说,新元古代震旦期和中生代燕山期活动较强烈,古生代次之,新生代活动很弱。岩浆活动与构造断裂密切相关,岩浆岩的分布受某一构造体系支配,构造断裂是岩浆上侵的通道,也是控岩容岩空间。区内各类岩石的分布具有一定的规律性,且具有成群成带分段集中的特点(张培元,1998;黄先觉,2012)。

2 白露山岩体特征

2.1 白露山岩体

白露山岩体出露于徐州四山子村北—白露山一带,受多组断裂构造控制而呈枝杈状分布,具有多次喷发特点,其出露的总体形态反映了裂隙—中心式喷发的隐爆火山岩岩管的特征。岩体由东、西

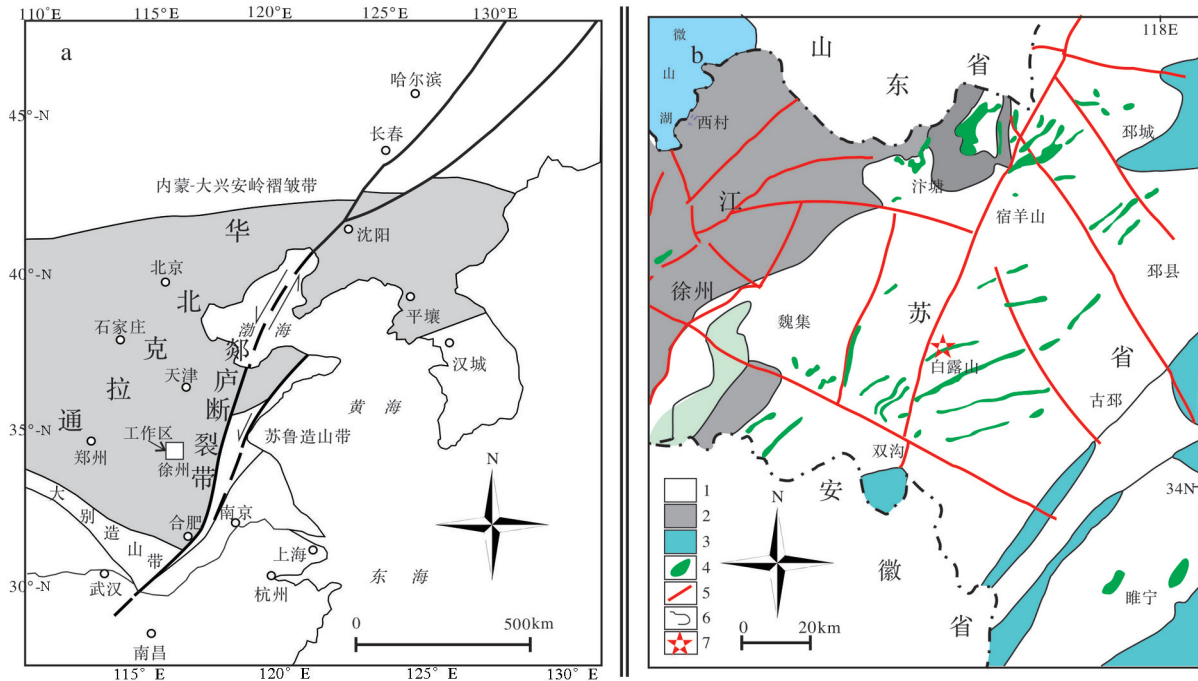


图1 郯庐断裂带构造(a)及徐州地区地质简图(b)

1—元古宙地层;2—古生代地层;3—中生代地层;4—基性岩;5—断层;6—地质界线;7—工作地点

Fig 1 Tanlu fault (a) and geological map of Xuzhou (b)

1-Proterozoic stratum;2-Palaeozoic stratum;3-Mesozoic stratum;4-Basic rocks;5-Fault;6-Geological Boundary;7-Study area

两条岩脉和四山子村岩管组成,其中东西两条岩脉在北段合并为一条,四山子村岩管可能在深部与东脉相连(图2)。

东脉($\sigma\beta 2-2$) 总体走向近SN,局部发生弯曲,总体倾向E,倾角陡立,地表出露长约300 m,宽度一般10 m左右,局部膨大处有30~40 m。岩相分带较明显,根据岩石类型及其分布特征,岩脉可分为中间相和外部相两相。中间相以橄榄玄武岩为主,角砾含量很少;外部相则以橄榄玄武质隐爆火山角砾岩为主,其次为含角砾橄榄玄武岩,所含角砾成分

复杂,以橄榄玄武岩和灰岩为主,含有少量煌斑岩、正长岩和片麻岩角砾;自中间相至外部相,角砾含量逐渐增多,至岩体边部,常出现10~30 cm宽的蚀变角砾岩。与围岩(九顶山组下段灰岩)接触界线清晰,围岩蚀变以大理岩化为主,但蚀变范围有限。ZK06显示,其厚度为71.65 m,底部接触围岩为九顶山组下段灰岩。

西脉($\sigma\beta 2-1$)受NNE向断裂的控制,呈岩墙状产出,总体走向5~25°,倾向SE,倾角陡立,一般大于85°,长约400 m,宽2~5 m。岩石类型比较单一,为橄榄玄武岩,角砾含量很少,与九顶山组下段灰岩接触界线清楚,围岩蚀变较弱。

四山子村岩管($\sigma\beta 2-3$) 出露范围有限,仅在靠近围岩处见少量露头,大部分被第四系覆盖,直径约120 m。地表出露部分岩性为橄榄玄武岩,风化强烈,呈黄绿—灰绿色,接触带处硅化、褐铁矿化现象明显。岩管东接触带为一规模不大的NW向断层,硅化和褐铁矿化现象明显。ZK08孔显示,岩管深部厚度为99.84 m,上覆第四系厚约2.4 m。岩石类型、岩相分带与东脉一致,主要为橄榄玄武岩、含角砾橄榄玄武岩和橄榄玄武质隐爆火山角砾岩。



图2 白露山岩体平面示意图及白露山岩体东脉和西脉
Fig.2 The sketch map of the Bailu Mountain pluton and veins in its east and west

岩体底部与倪园组泥质白云岩呈断层接触,见厚约13.6 m的构造角砾岩,角砾成分为白云岩。

本次工作样品均采自ZK06和ZK08孔的橄榄玄武岩。

2.2 橄榄玄武岩

经野外观察和镜下鉴定,白露岩体的岩石类型主要有橄榄玄武岩、含角砾橄榄玄武岩和橄榄玄武质隐爆火山角砾岩,三者区别主要体现在角砾含量上,角砾含量依次为<5%、5~50%、>50%,角砾成分一致。本次工作主要针对橄榄玄武岩进行研究。

橄榄玄武岩风化后呈灰绿色,新鲜者呈灰黑—黑绿色,具斑状结构—基质间粒结构、致密块状构造(图3a、b)。斑晶主要由橄榄石(10%±)、单斜辉石(5%~10%)以及少量斜长石、角闪石组成,大小一般0.1~1.2 mm。其中橄榄石(Ol)呈半自形—他形柱粒状,基本均被皂石或碳酸盐交代呈假像;辉石(Cpx)呈半自形—他形柱粒状,粒内裂隙较发育,可见熔蚀麻点结构;斜长石呈半自形板状,不均匀绢云母化或皂石化等;角闪石(Am)呈半自形柱状、柱粒状,零散

分布,多色性较明显,Ng'=褐色,Np'=黄色。

基质主要由斜长石(40%~50%)、单斜辉石(15%~20%)、橄榄石(3%~4%)以及少量不透明矿物、黑云母、角闪石组成,粒度一般<0.1 mm。其中斜长石呈细小板条状,格架状分布,具高岭土化、绢云母化等,可见聚片双晶,单斜辉石、橄榄石等矿物常充填于斜长石格架内构成间粒结构(图3c、d);单斜辉石呈近半自形—他形柱状、粒状,不显多色性;橄榄石呈半自形—近半自形柱状、粒状,具皂石化等呈假像;不透明矿物呈黑色粒状、板条状,零散分布,有的具黑云母构成的反应边结构。黑云母、角闪石呈鳞片状、微粒状,填隙状分布或呈不透明矿物、橄榄石的反应边存在,均显棕褐色。

3 主微量元素特征

橄榄玄武岩的主微量稀土元素含量见表1和表2。以主量元素做TAS图解可以看出本区基性岩的投影点基本都落于玄武岩范围。基性岩中一些样品烧失量含量较高,表明在岩浆就位以后岩石可能

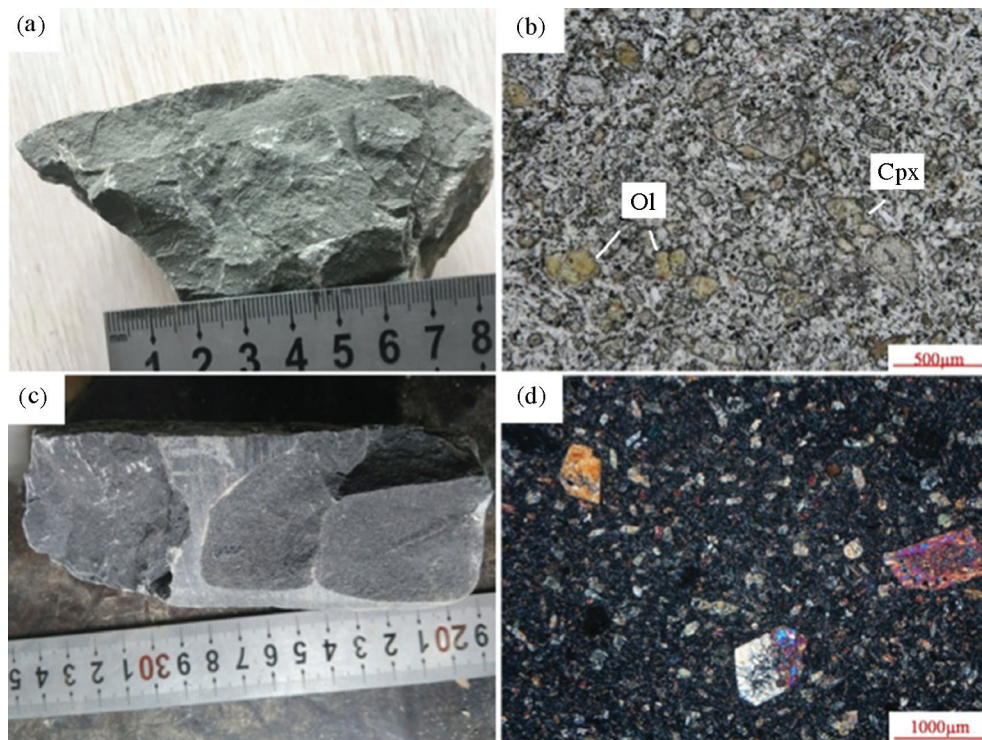


图3 橄榄玄武岩标本及镜下照片

a—橄榄玄武岩露头标本;b—斑状结构,见橄榄石斑晶;c—ZK06橄榄玄武岩岩芯标本;d—基质间粒结构

Fig.3 The olivine basalt and microscopic photographs

a—Olivine basalt sample; b—Porphyritic structure and olivine porphyritic crystal; c—Drill core sample; d—Intergranular texture

经历了后期的蚀变改造。低温蚀变的作用可能引起岩石中许多元素的含量变化,特别是一些低温情况下活动性较强的元素,如K、Ba、Rb等大离子亲石元素。因此在进行岩石分类时采用不活泼元素图解来开展岩石分类(图4)。在Nb/Y-Zr/TiO₂图上基性岩主要为亚碱性玄武岩(图5)。

该地区岩石化学主量分析结果表明,该区橄榄玄武岩中SiO₂含量为42.64%~51.13%,(K₂O+Na₂O)为2.57%~5.93%,Al₂O₃为10.48%~13.53%,

CaO为3.61%~12.76%,TFe₂O₃含量为5.50%~9.79%,变化较大,MgO含量变化范围较大,为3.11%~19.34%,Mg[#](Mg/(Mg+ΣFe)_{atomic})值较大,为0.56~1.00。亚碱性火山岩分类图(图6)显示,本区的玄武岩也在高钾钙碱性系列。

基性—超基性火山岩主量元素与MgO相关变化见图7。从图中可以看出各主量元素与MgO含量的变化关系不甚相同。随着岩浆的分异演化,MgO含量不断降低,而SiO₂含量不断升高,Al₂O₃含

表1 橄榄玄武岩主量元素数据(%)

Table 1 Data of major elements of olivine basalt(%)

样品号	样品名称	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	SUM
ZK08Y10	橄榄玄武岩	49.57	1.13	12.36	4.41	4.24	0.12	10.83	8.53	2.35	1.55	0.32	4.21	100.04
ZK08Y07	橄榄玄武岩	42.64	1.01	10.85	4.31	3.63	0.11	19.00	5.69	0.60	2.12	0.34	9.63	100.29
ZK08Y11	橄榄玄武岩	48.97	1.12	13.00	3.33	4.96	0.13	11.26	7.66	2.70	1.57	0.38	4.19	99.76
ZK06Y16	含角砾橄榄玄武岩	47.99	1.00	12.00	2.36	5.25	0.11	10.95	10.50	2.50	1.44	0.34	4.33	99.28
ZK08Y25	橄榄玄武岩	43.79	0.97	11.43	3.28	4.02	0.12	19.34	5.79	1.56	1.72	0.30	7.21	99.93
ZK08Y05	橄榄玄武岩	46.64	1.06	12.15	3.88	4.38	0.22	13.90	6.74	2.03	1.69	0.36	6.25	99.74
ZK06Y10	含角砾橄榄玄武岩	48.38	1.11	11.86	4.38	3.92	0.12	11.87	5.84	1.92	2.14	0.36	7.53	99.81
ZK08Y02	橄榄玄武岩	50.56	1.12	12.90	3.82	4.60	0.12	9.98	8.19	2.85	1.69	0.37	2.98	99.62
ZK08Y13	橄榄玄武岩	46.19	1.09	12.15	3.69	4.38	0.23	14.94	7.04	2.07	1.32	0.34	5.67	99.54
ZK08Y04	橄榄玄武岩	49.81	1.15	13.00	4.70	3.77	0.11	9.47	8.16	2.82	1.81	0.38	3.78	99.33
ZK06Y19	橄榄玄武岩	51.13	1.09	13.18	3.77	4.28	0.10	9.05	7.50	3.21	1.65	0.37	3.53	99.27
ZK06Y2	橄榄玄武岩	50.18	1.14	13.14	4.77	3.88	0.14	9.64	8.24	2.81	1.59	0.36	3.27	99.55
ZK08Y08	橄榄玄武岩	47.44	1.09	12.34	4.78	3.84	0.14	12.60	7.44	2.35	1.52	0.36	5.68	99.98
ZK08Y21	橄榄玄武岩	42.83	0.90	10.48	4.49	3.59	0.12	16.50	6.67	1.16	1.83	0.30	10.80	100.02
BLS-02	橄榄玄武岩	46.16	0.98	11.80	4.23	3.23	0.14	10.91	10.71	2.34	1.60	0.33	6.81	99.56
BLS-01	橄榄玄武岩	50.55	1.12	13.22	4.14	3.99	0.12	9.64	8.00	2.93	1.54	0.37	3.40	99.42
ZK08Y01	橄榄玄武岩	48.87	1.07	12.26	6.03	2.48	0.12	9.21	8.62	2.37	1.62	0.35	6.43	99.68
ZK06Y13	火山角砾岩	47.52	0.97	11.84	3.55	3.81	0.09	13.12	3.61	0.40	5.53	0.33	8.78	99.92
ZK08Y03	橄榄玄武岩	50.48	1.12	12.90	3.68	4.74	0.13	10.12	8.09	2.84	1.70	0.37	3.00	99.62
ZK06Y5	橄榄玄武岩	49.75	1.16	13.22	5.02	3.66	0.12	9.97	7.73	2.82	1.59	0.38	4.14	99.93
ZK08Y22	橄榄玄武岩	50.01	1.14	13.02	4.50	3.74	0.10	9.95	7.73	2.84	1.68	0.37	4.23	99.67
ZK08Y24	橄榄玄武岩	44.51	0.99	11.51	3.05	4.53	0.13	18.78	5.71	1.40	1.85	0.32	6.67	99.89
ZK08Y23	橄榄玄武岩	45.46	1.00	11.86	3.01	4.38	0.18	17.32	5.32	1.91	1.71	0.33	6.76	99.66
ZK08Y18	橄榄玄武岩	46.32	1.01	11.51	5.13	3.20	0.12	9.22	11.07	2.30	1.44	0.31	7.82	99.77
ZK08Y26	橄榄玄武岩	46.74	1.02	11.82	3.70	3.31	0.10	6.28	12.76	2.73	1.58	0.34	8.31	99.02
ZK08Y09	橄榄玄武岩	49.64	1.13	13.29	4.85	3.66	0.09	10.50	7.36	2.39	1.76	0.33	4.64	100.01
ZK08Y15	橄榄玄武岩	49.16	1.08	12.54	4.20	4.06	0.10	10.17	9.07	2.55	1.64	0.33	4.58	99.86
ZK08Y27	橄榄玄武岩	43.47	1.17	13.53	4.35	1.04	0.03	3.11	10.36	0.55	2.02	0.38	19.38	99.49
ZK06Y11	火山角砾岩	48.32	0.98	12.16	3.72	4.20	0.12	11.34	6.89	2.75	1.84	0.32	6.59	99.64
ZK08Y14	橄榄玄武岩	47.04	0.96	11.50	4.05	3.31	0.11	11.66	10.15	1.96	1.86	0.29	6.73	99.93
ZK08Y17	橄榄玄武岩	47.10	1.01	11.79	3.75	3.92	0.12	9.45	12.06	2.51	1.50	0.30	6.00	99.90
ZK08Y16	橄榄玄武岩	48.59	1.01	12.18	4.29	3.56	0.12	9.01	11.02	2.58	1.67	0.29	5.03	99.70
ZK08Y19	橄榄玄武岩	47.64	0.94	11.35	3.87	2.77	0.15	5.72	12.71	2.29	1.66	0.27	10.22	99.86
ZK08Y20	橄榄玄武岩	48.20	1.09	12.85	6.15	3.31	0.10	9.05	7.74	2.41	1.72	0.32	6.49	99.75

表2 橄榄玄武岩微量元素数据(10^{-6})Table 2 Data of Trace elements of olivine basalt(10^{-6})

样品号	ZK08Y10	ZK08Y07	ZK08Y11	ZK06Y16	ZK08Y25	ZK08Y05	ZK06Y10	ZK08Y02	ZK08Y13	ZK08Y04	ZK06Y19	ZK06Y2
样品	橄榄	橄榄	橄榄	含角砾橄榄	橄榄	橄榄	含角砾橄	橄榄	橄榄	橄榄	橄榄	橄榄
名称	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	橄玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩
Li	28.71	138.87	41.74	54.06	259.20	78.31	75.54	30.26	69.72	33.19	23.83	33.01
Be	1.30	1.32	1.29	1.47	1.29	1.36	1.28	1.45	1.38	1.71	1.36	1.35
Sc	20.06	13.99	17.71	15.67	15.44	18.04	22.79	22.10	18.45	25.08	25.05	26.69
Ti	7655.45	6783.64	7493.90	6758.99	6342.93	7237.31	7582.60	7372.82	7372.63	7573.67	7371.30	7772.37
V	228.81	198.01	222.57	202.52	181.20	210.81	221.32	215.99	217.19	224.23	220.28	229.01
Cr	566.23	507.07	574.35	502.21	422.57	532.13	526.42	550.39	539.37	575.86	539.19	526.48
Mn	930.43	871.55	1022.76	901.78	949.42	1658.22	891.08	942.29	1749.54	847.72	753.56	1062.15
Co	86.17	56.96	68.75	67.41	46.25	63.35	78.14	94.41	62.36	80.29	87.02	88.14
Ni	321.48	281.07	308.72	269.51	247.80	299.06	305.46	335.01	293.08	305.71	311.76	272.79
Cu	92.24	70.97	82.27	76.12	71.17	79.01	78.34	85.76	86.18	80.99	78.46	90.03
Zn	95.35	86.89	93.60	86.63	82.18	89.07	85.20	89.95	93.92	86.29	86.97	102.65
Ga	17.49	12.83	18.48	17.12	15.81	17.50	17.37	18.06	17.32	18.36	18.55	18.67
Ge	1.11	0.88	1.06	1.14	0.83	0.99	1.09	1.07	1.08	1.07	1.04	1.23
As	0.63	0.81	0.52	1.47	0.28	0.75	0.64	1.18	1.23	0.87	1.25	0.99
Se	0.06	0.04	0.06	0.10	0.03	0.06	0.08	0.10	0.06	0.08	0.09	0.08
Rb	41.93	52.42	40.44	43.13	55.49	43.20	50.53	44.23	38.96	46.28	39.07	36.70
Sr	622.60	472.16	583.30	575.87	374.33	534.17	400.87	659.32	476.79	748.81	682.42	655.63
Y	20.52	15.58	17.72	17.48	15.43	17.03	18.07	18.52	20.08	18.27	17.21	18.58
Zr	147.01	136.04	150.08	138.55	127.10	144.00	148.21	153.93	149.72	152.19	149.08	146.98
Nb	11.04	10.04	11.13	10.42	9.57	10.65	11.39	11.42	10.93	11.38	11.40	11.11
Mo	0.70	0.31	1.02	0.86	0.61	0.64	0.91	1.12	0.86	0.88	1.41	1.10
Cd	0.24	0.21	0.23	0.30	0.18	0.28	0.30	0.26	0.26	0.27	0.23	0.27
Sn	0.98	0.82	0.96	0.96	0.88	0.89	0.94	1.02	1.01	1.02	0.98	1.01
Sb	0.92	1.16	0.63	1.48	1.12	1.74	1.07	0.03	1.42	0.03	0.91	0.94
Te	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Cs	6.23	1.37	2.56	22.23	51.78	1.70	19.20	1.83	4.08	2.51	1.16	1.86
Ba	530.38	1052.95	486.45	474.91	601.55	534.28	514.30	541.22	374.20	624.82	500.06	514.92
La	26.94	26.82	29.86	27.14	26.52	28.23	28.75	29.71	28.09	29.84	29.75	29.01
Ce	56.61	55.99	62.03	56.84	56.22	59.44	60.09	61.83	58.69	62.70	62.50	60.79
Pr	7.07	6.87	7.70	7.08	7.01	7.38	7.49	7.69	7.35	7.81	7.69	7.61
Nd	27.74	27.09	30.28	27.78	27.79	28.75	29.05	30.18	29.10	30.93	30.22	29.89
Sm	5.61	5.38	5.94	5.64	5.39	5.72	5.77	5.95	5.78	6.08	5.83	5.95
Eu	1.77	1.54	1.88	1.76	1.62	1.76	1.71	1.86	1.79	1.87	1.83	1.87
Gd	4.80	4.24	4.68	4.55	4.19	4.56	4.56	4.75	4.86	4.78	4.56	4.76
Tb	0.71	0.59	0.68	0.64	0.60	0.65	0.66	0.68	0.70	0.68	0.65	0.69
Dy	3.74	3.03	3.46	3.29	2.96	3.25	3.35	3.42	3.65	3.45	3.24	3.51
Ho	0.73	0.56	0.64	0.62	0.55	0.61	0.63	0.64	0.70	0.65	0.61	0.67
Er	1.97	1.43	1.64	1.56	1.41	1.57	1.67	1.65	1.78	1.65	1.55	1.74
Tm	0.27	0.20	0.23	0.22	0.20	0.21	0.23	0.23	0.25	0.22	0.21	0.24
Yb	1.68	1.20	1.34	1.36	1.18	1.28	1.43	1.41	1.50	1.36	1.28	1.44
Lu	0.25	0.17	0.20	0.19	0.18	0.19	0.22	0.20	0.23	0.20	0.19	0.21
Hf	3.56	3.32	3.60	3.35	3.09	3.50	3.64	3.76	3.63	3.70	3.64	3.61
Ta	0.63	0.52	0.59	0.57	0.48	0.55	0.62	0.65	0.59	0.63	0.63	0.62
W	100.51	33.59	63.86	73.68	18.88	49.50	74.80	130.51	49.21	100.40	113.84	108.31
Tl	0.24	0.28	0.22	0.27	0.62	0.23	0.28	0.26	0.26	0.25	0.43	0.19
Pb	5.45	6.91	7.03	7.26	7.09	6.58	4.40	6.20	8.91	6.39	5.83	7.99
Bi	0.06	0.05	0.07	0.06	0.05	0.04	0.08	0.06	0.07	0.08	0.06	0.10
Th	4.74	4.52	5.02	4.70	4.39	5.07	5.42	5.45	5.26	5.53	5.60	5.47
U	1.21	1.23	1.33	1.25	1.16	1.26	1.31	1.35	1.26	1.33	1.36	1.30
ΣREE	139.90	135.11	150.56	138.68	135.81	143.58	145.62	150.20	144.46	152.21	150.10	148.39
ΣLREE	125.75	123.69	137.70	126.24	124.55	131.27	132.86	137.21	130.80	139.22	137.83	135.12
ΣHREE	14.16	11.42	12.86	12.43	11.26	12.31	12.75	12.99	13.66	12.99	12.28	13.27
LREE/ HREE	8.88	10.83	10.71	10.15	11.06	10.66	10.42	10.56	9.58	10.72	11.23	10.19

续表2

样品号	ZK08Y08	ZK08Y21	BLS-02	BLS-01	ZK08Y01	ZK06Y13	ZK08Y03	ZK06Y5	ZK08Y22	ZK08Y24	ZK08Y23	ZK08Y18
样品	橄榄	橄榄	橄榄	橄榄	橄榄	火山	橄榄	橄榄	橄榄	橄榄	橄榄	橄榄
名称	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	角砾岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩
Li	71.56	177.99	40.86	28.06	29.29	77.98	31.24	30.72	50.82	226.84	148.69	43.45
Be	1.40	1.22	1.27	1.50	1.33	1.07	1.46	1.47	1.37	1.22	1.17	1.40
Sc	22.73	15.86	19.28	23.42	24.61	20.79	24.29	25.22	22.14	17.30	18.14	23.56
Ti	7552.54	6008.37	6626.17	7666.75	7219.60	6442.01	7422.03	7960.57	7768.18	6581.37	6727.40	6810.56
V	222.70	176.11	195.69	228.32	209.15	197.86	217.24	227.37	228.39	192.33	197.21	202.40
Cr	563.65	439.52	482.84	544.91	538.97	463.65	556.81	568.06	568.38	475.07	479.94	502.65
Mn	1152.08	932.37	1124.70	987.17	918.46	656.43	975.99	957.05	826.03	1016.72	1366.93	963.38
Co	66.23	48.13	56.28	73.21	65.81	50.87	100.84	75.53	90.80	47.99	48.65	67.63
Ni	309.36	282.54	284.12	309.83	308.64	266.39	365.22	279.18	298.02	270.24	273.20	278.66
Cu	82.69	73.23	75.36	83.30	74.71	66.80	87.55	81.64	84.47	73.52	75.76	72.59
Zn	97.10	72.83	85.97	102.86	89.13	81.24	96.95	94.32	99.50	84.76	88.14	87.72
Ga	18.53	15.78	17.18	19.56	17.19	15.30	18.31	18.58	19.07	16.46	17.77	16.60
Ge	0.91	0.77	0.99	1.17	1.12	0.71	1.10	1.11	1.06	0.84	0.81	1.07
As	0.23	1.12	0.91	1.23	0.65	1.28	1.74	0.72	0.43	0.28	0.15	0.38
Se	0.06	0.04	0.01	0.01	0.12	0.09	0.10	0.12	0.04	0.02	0.03	0.04
Rb	40.09	49.54	45.88	36.82	42.04	109.47	45.17	39.00	45.74	52.82	52.26	37.41
Sr	577.94	520.61	538.61	617.81	590.72	451.75	678.56	634.11	777.52	391.26	1778.90	965.50
Y	18.12	15.69	17.03	18.47	17.55	13.42	18.72	17.89	18.57	16.76	15.68	18.01
Zr	149.99	119.44	137.93	164.97	149.25	130.80	152.81	154.34	153.17	134.06	140.75	135.65
Nb	11.03	8.84	10.13	11.58	10.97	9.78	11.43	11.50	11.36	9.80	9.95	10.10
Mo	0.51	0.40	0.51	1.08	0.43	0.39	1.26	1.02	0.85	0.43	0.60	1.05
Cd	0.23	0.19	0.22	0.22	0.23	0.21	0.24	0.26	0.23	0.20	0.20	0.24
Sn	0.90	0.64	0.94	1.00	0.92	0.72	1.05	1.03	1.01	0.88	0.85	0.93
Sb	0.90	0.84	0.69	0.71	0.73	1.28	1.09	1.20	0.46	1.16	1.03	0.71
Te	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01
Cs	1.73	2.17	12.29	1.82	5.97	0.81	2.20	1.13	2.02	12.72	20.98	0.65
Ba	494.30	377.11	472.06	475.95	548.14	687.57	546.77	511.67	488.10	530.38	812.16	435.11
La	29.35	25.25	27.00	30.66	28.20	28.99	30.16	31.19	30.67	27.01	28.45	26.70
Ce	61.73	53.00	57.21	63.87	59.55	57.57	63.13	64.67	64.99	56.78	58.79	55.28
Pr	7.68	6.53	7.10	7.93	7.31	7.00	7.81	7.97	8.11	7.05	7.28	6.83
Nd	30.32	25.44	28.28	31.23	28.59	27.03	30.46	30.78	31.88	27.62	28.18	26.87
Sm	6.05	5.10	5.64	6.36	5.62	5.11	6.01	6.14	6.43	5.54	5.53	5.37
Eu	1.86	1.50	1.74	1.98	1.68	1.37	1.87	1.91	2.01	1.70	1.66	1.67
Gd	4.83	4.06	4.43	4.95	4.51	3.85	4.88	4.69	5.02	4.36	4.35	4.33
Tb	0.68	0.58	0.65	0.72	0.64	0.53	0.68	0.69	0.73	0.63	0.62	0.64
Dy	3.42	2.96	3.27	3.60	3.30	2.58	3.50	3.42	3.66	3.25	3.16	3.29
Ho	0.65	0.56	0.60	0.66	0.62	0.47	0.65	0.64	0.67	0.60	0.58	0.62
Er	1.66	1.44	1.56	1.70	1.57	1.19	1.69	1.63	1.73	1.54	1.50	1.61
Tm	0.23	0.20	0.22	0.24	0.22	0.17	0.23	0.23	0.23	0.21	0.21	0.22
Yb	1.39	1.20	1.32	1.44	1.30	0.99	1.42	1.34	1.41	1.30	1.25	1.36
Lu	0.20	0.18	0.19	0.21	0.19	0.14	0.21	0.20	0.21	0.19	0.19	0.20
Hf	3.66	2.90	3.38	4.07	3.62	3.21	3.74	3.76	3.76	3.28	3.49	3.28
Ta	0.59	0.46	0.54	0.65	0.58	0.51	0.65	0.62	0.68	0.51	0.51	0.56
W	52.71	21.63	40.25	83.40	53.47	30.42	143.81	73.57	128.21	15.55	16.77	65.36
Tl	0.23	0.22	0.23	0.17	0.19	0.84	0.31	0.20	0.24	0.64	0.38	0.18
Pb	7.95	9.36	6.69	5.84	6.71	12.38	6.44	7.06	7.41	9.20	6.55	6.41
Bi	0.04	0.13	0.03	0.10	0.03	0.02	0.06	0.07	0.03	0.03	0.03	0.04
Th	5.45	4.38	5.04	5.76	5.48	4.88	5.72	5.75	5.70	4.92	5.08	5.17
U	1.32	1.07	1.28	1.40	1.11	1.19	1.37	1.39	1.38	1.19	1.19	1.17
ΣREE	150.05	127.98	139.20	155.55	143.31	136.99	152.70	155.50	157.74	137.80	141.74	134.98
ΣLREE	136.99	116.81	126.97	142.03	130.95	127.07	139.44	142.67	144.09	125.71	129.89	122.72
ΣHREE	13.06	11.17	12.23	13.52	12.36	9.92	13.25	12.83	13.66	12.09	11.85	12.26
LREE/ HREE	10.49	10.46	10.39	10.50	10.59	12.81	10.52	11.12	10.55	10.40	10.96	10.01

续表2

样品号	ZK08Y26	ZK08Y09	ZK08Y15	ZK08Y27	ZK06Y11	ZK08Y14	ZK08Y17	ZK08Y16	ZK08Y19	ZK08Y20
样品名称	橄榄玄武岩	橄榄玄武岩	橄榄玄武岩	橄榄玄武岩	火山角砾岩	橄榄玄武岩	橄榄玄武岩	橄榄玄武岩	橄榄玄武岩	橄榄玄武岩
Li	20.09	25.91	33.72	48.70	61.56	51.00	39.98	40.50	10.60	20.50
Be	1.20	1.48	1.38	1.59	1.57	1.66	1.51	1.52	1.52	1.53
Sc	24.03	20.64	22.60	25.53	21.78	19.17	22.43	21.46	23.04	25.79
Ti	7109.02	7469.48	7301.28	7920.97	6656.63	6473.10	6819.37	6825.23	6529.50	7463.23
V	205.35	217.55	213.69	235.31	192.54	187.85	198.68	196.28	186.45	213.56
Cr	510.60	518.58	520.21	542.41	472.61	460.68	473.06	471.85	428.13	511.30
Mn	835.09	735.05	813.25	265.36	902.96	893.02	1011.11	985.41	1265.17	827.11
Co	79.95	65.53	68.95	21.41	59.93	63.03	61.04	76.61	68.69	64.66
Ni	339.31	300.83	284.69	311.95	277.46	250.30	272.36	279.61	243.41	305.08
Cu	77.09	94.02	90.98	1139.47	73.88	76.33	80.34	87.91	82.95	92.92
Zn	80.64	98.92	96.13	69.82	81.32	110.13	84.93	89.08	64.13	101.50
Ga	17.53	17.66	17.52	19.69	16.03	16.74	16.61	17.11	16.29	18.57
Ge	0.91	1.02	1.15	1.34	1.14	1.21	1.24	1.29	1.10	0.93
As	1.33	0.37	0.85	235.12	0.53	3.20	1.27	1.05	1.09	0.66
Se	0.06	0.09	0.07	1.46	0.11	0.05	0.02	0.06	0.03	0.05
Rb	42.86	53.57	48.58	51.79	62.53	57.65	44.45	50.96	48.70	52.48
Sr	804.77	665.94	758.67	193.12	464.75	716.38	1216.49	684.56	711.65	786.25
Y	17.47	19.82	19.48	18.97	18.25	19.08	19.27	21.09	19.17	18.98
Zr	141.08	152.82	144.88	161.95	139.31	132.92	138.01	141.62	131.57	149.50
Nb	10.37	11.67	11.02	11.90	10.34	10.17	10.39	10.88	10.09	11.43
Mo	0.70	0.84	0.68	0.86	0.58	0.67	1.19	0.98	0.67	0.85
Cd	0.21	0.26	0.24	0.18	0.23	0.20	0.23	0.23	0.19	0.22
Sn	0.86	1.21	1.06	1.16	1.00	1.07	1.06	1.18	1.28	1.15
Sb	0.65	1.14	0.74	0.69	1.23	1.25	0.81	0.97	0.57	0.39
Te	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Cs	1.27	1.86	2.30	3.96	95.06	2.85	2.62	13.41	1.07	0.91
Ba	484.24	496.99	462.80	108.95	523.45	505.43	492.04	470.16	406.31	436.39
La	28.96	30.00	29.05	30.43	27.83	27.28	28.32	30.59	28.04	31.71
Ce	60.23	61.83	60.01	65.17	58.63	56.23	58.73	63.09	57.52	64.24
Pr	7.42	7.63	7.36	8.07	7.32	6.87	7.23	7.70	7.04	7.76
Nd	29.13	29.75	28.59	31.66	28.51	26.62	28.07	29.70	27.12	29.48
Sm	5.80	5.95	5.74	6.25	5.77	5.38	5.62	6.06	5.44	5.80
Eu	1.79	1.76	1.73	1.74	1.68	1.51	1.68	1.74	1.62	1.73
Gd	4.44	4.84	4.72	4.86	4.65	4.39	4.63	4.87	4.35	4.55
Tb	0.65	0.72	0.69	0.72	0.66	0.66	0.68	0.73	0.67	0.68
Dy	3.26	3.71	3.60	3.61	3.38	3.52	3.50	3.80	3.43	3.53
Ho	0.61	0.73	0.68	0.67	0.65	0.68	0.67	0.73	0.66	0.68
Er	1.55	1.91	1.81	1.80	1.66	1.80	1.77	1.95	1.75	1.76
Tm	0.21	0.27	0.25	0.25	0.24	0.26	0.25	0.28	0.25	0.25
Yb	1.31	1.67	1.54	1.53	1.44	1.65	1.58	1.72	1.51	1.52
Lu	0.19	0.25	0.23	0.22	0.21	0.25	0.23	0.25	0.22	0.22
Hf	3.35	3.79	3.51	3.96	3.44	3.25	3.43	3.49	3.19	3.71
Ta	0.58	0.66	0.60	0.63	0.56	0.58	0.58	0.64	0.58	0.64
W	111.12	57.39	52.69	22.29	53.43	67.32	56.46	102.89	82.49	65.72
Tl	3.48	0.28	0.22	0.57	0.45	0.35	0.21	0.27	0.25	0.22
Pb	8.07	8.55	8.03	18.68	7.99	7.25	6.88	8.30	8.85	7.77
Bi	0.03	0.05	0.09	0.07	0.05	0.06	0.07	0.10	0.11	0.03
Th	5.35	6.19	5.86	6.38	5.57	5.49	5.66	6.25	5.81	6.75
U	1.28	1.34	1.33	18.56	1.27	1.29	1.29	1.34	1.22	1.38
ΣREE	145.56	151.01	146.00	156.99	142.64	137.09	142.95	153.22	139.62	153.90
ΣLREE	133.34	136.91	132.49	143.33	129.75	123.89	129.64	138.88	126.79	140.72
ΣHREE	12.22	14.10	13.51	13.66	12.89	13.20	13.32	14.34	12.83	13.18
LREE/ HREE	10.91	9.71	9.80	10.49	10.06	9.38	9.74	9.69	9.88	10.68

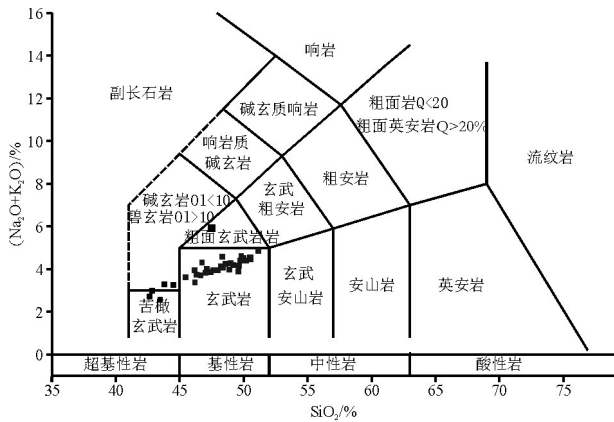


图4 橄榄玄武岩TAS图解
Fig.4 TAS diagram of olivine basalt

量变化不大,反映出岩浆上升过程中分离结晶作用不强。K₂O含量随着MgO变化,趋势不明显,但是K₂O+NaO与MgO含量呈弱的负相关性。CaO与MgO也有负相关趋势。显示了岩浆早期分离结晶相可能为辉石、橄榄石和少量的长石。

该区铁镁质岩TiO₂含量范围在0.94%~1.17%,相比于苏北和皖北的基性岩来讲不算高。地壳中K含量较地幔中要高出数十倍甚至上百倍,而P、Ti则在地壳和地幔中含量相近,因此通过K₂O/TiO₂、K₂O/P₂O₅比值可以判断岩浆在上升过程中是否受地壳物质混染过程或岩浆熔融源区是否有大陆地壳物质加入。由图7可以看出K₂O/TiO₂、K₂O/P₂O₅比值随MgO含量的变化很小。这表明基性岩的岩浆演化主要受到分离结晶作用的影响。全铁与P₂O₅的含量与MgO含量变化关系不明显,未见明显的负相关性。

在Cr、Ni元素与MgO的含量趋势图(图8)中,显示了Cr、Ni两种微量元素随着MgO的减少而逐渐增加的负相关性,显示了原始岩浆后期并不含有大量的橄榄岩与富Cr尖晶石等富Cr幔源矿物。

该地区基性岩的稀土元素总量ΣREE为127.98×10⁻⁶~157.74×10⁻⁶,其中轻稀土含量范围为116.81×10⁻⁶~144.01×10⁻⁶,重稀土含量为9.92×10⁻⁶~14.34×10⁻⁶,LREE/HREE比值在8.89~12.81。在球粒陨石标准化稀土配分图(图9)显示LREE富集的右倾配分模式,(La/Yb)_N=10.81~19.81, Eu总体显示出弱的负异常,δEu=0.91~1.06,显示了一定程度的斜长石分离结晶作用。(La/Sm)_N值为3.0~3.57,轻稀土内部的分异程度较低,(Gd/

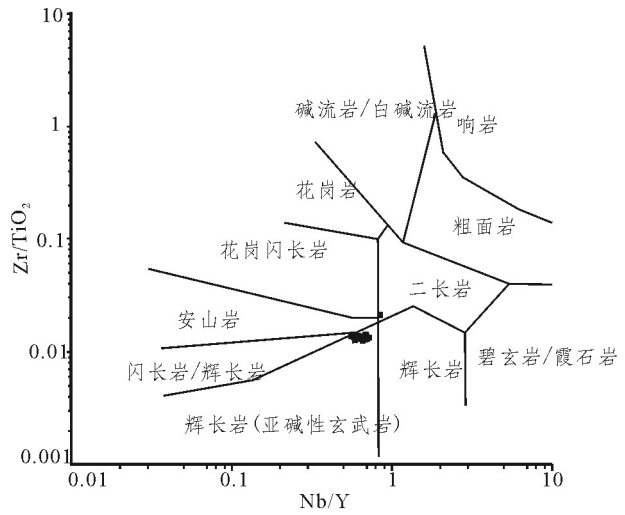


图5 橄榄玄武岩Nb/Y-Zr/TiO₂图解
Fig.5 Nb/Y vs. Zr/TiO₂ diagram of olivine basalt

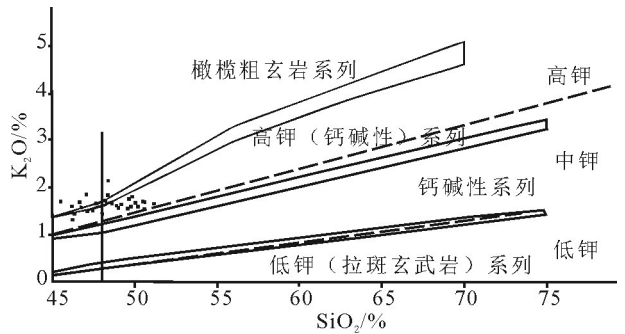


图6 亚碱性火山岩SiO₂-K₂O分类(根据Le Maitre,1989; Rickwood,1989修改)
Fig.6 SiO₂-K₂O diagram of sub-alkaline volcanic rock (after Le Maitre,1989; Rickwood,1989)

Yb)_N值变化于2.15~3.15,显示了重稀土的分馏程度也较低。

对比玄武岩一些不相容元素比值特征,Ba/La比值范围在13.32~28.54,Zr/Nb比值范围在13.01~14.25,La/Nb的范围为2.44~2.96(表3)。其中Ba/La比值高于所有洋岛玄武岩的Ba/La值,可能反映其岩浆源区相对LREE更为富集LILE。Zr/Nb和La/Nb比值与PM相似,显示了可能具有N-MORB地幔储库或者是岩石圈地幔的贡献,同时也可能具有地壳的混染作用。在Fe/Ti-Zr图解上也显示了这样的特征。

在La/Sm-La图解上(图10a),随着La的变化,该地区基性岩的La/Sm比值呈现出明显的变化,

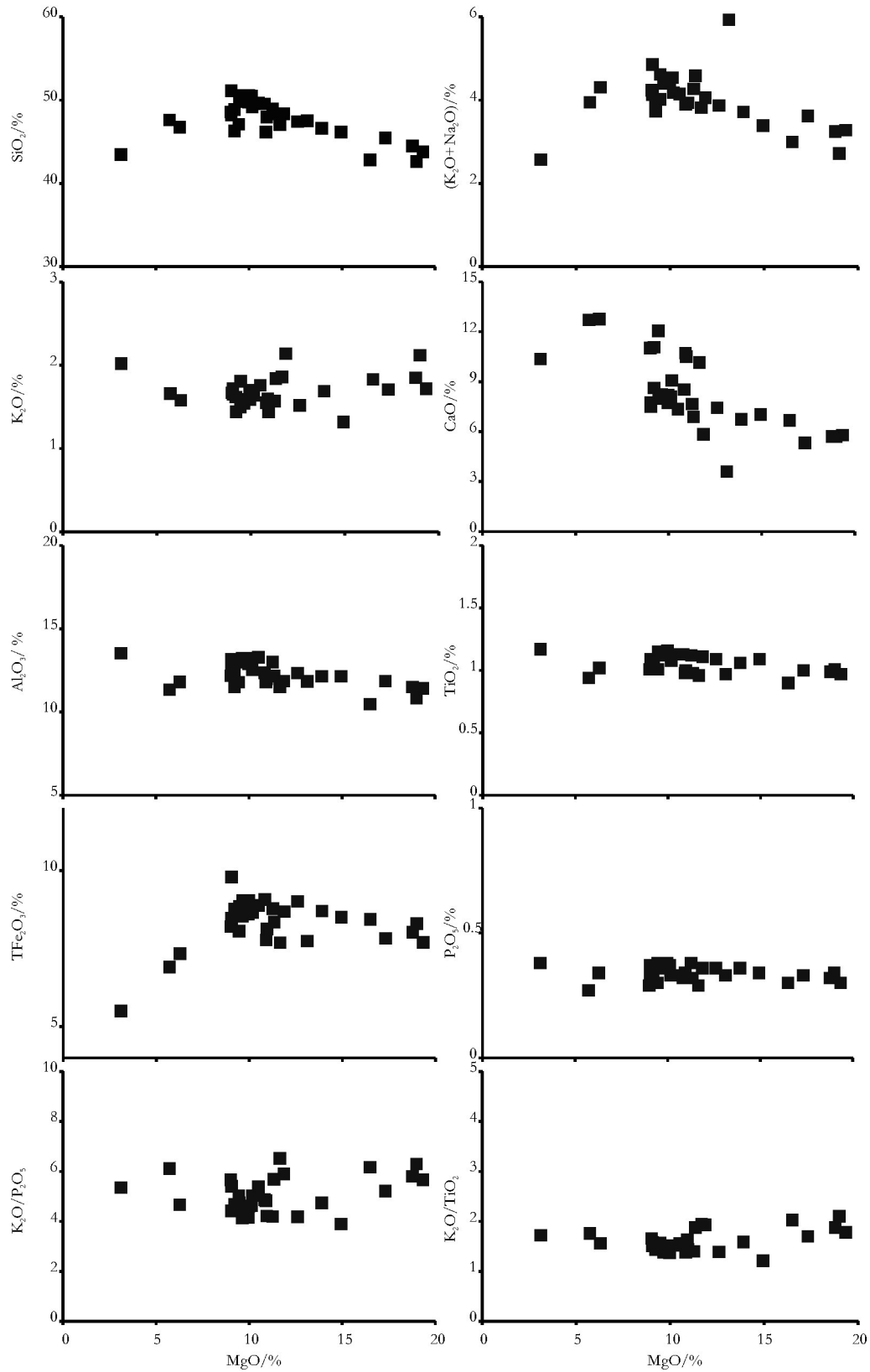


图7 橄玄武岩主量元素与MgO图解

Fig.7 Major elements vs. MgO diagram of olivine basalt

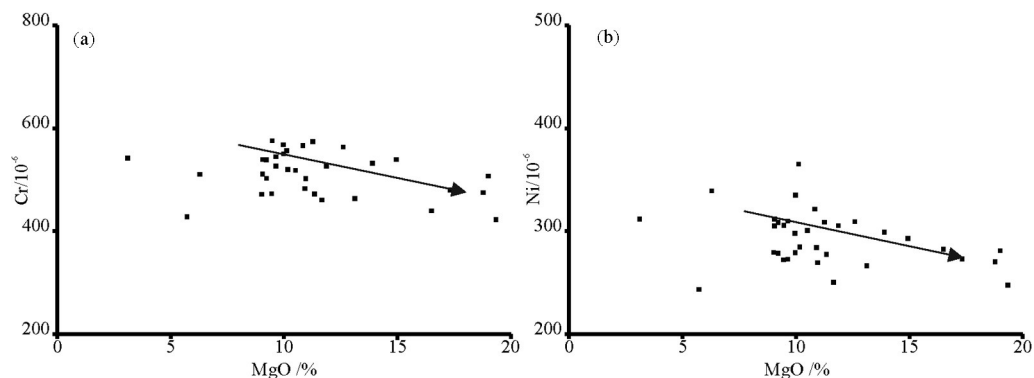


图8 橄榄玄武岩MgO-Cr(a)和MgO-Ni(b)图解
Fig.8 MgO-Cr(a) and MgO-Ni (b) diagram of olivine basalt

暗示了岩浆演化过程中受到了分离结晶作用的影响。在Ba/Nb-La/Nb图解(图10b)中,白露山基性岩的样品靠近OIB和火山弧区域。

相对于Ti、P、Zr在地幔橄榄岩熔融过程中表现出更不相容的特征,由于这些元素含量在岩浆演化过程中主要受到副矿物的影响,而来自主、微量元素的变化特征说明三类岩石并不存在分异关系,在各类岩石的内部也没有明显的副矿物如钛铁矿、磷灰石的分离结晶作用,因此Ti/P、Ti/Zr比值在一定程度上反映地幔源区富集不相容元素的程度。从图11中可以看出该区基性岩元素比值特点与OIB相似,源区相对富集不相容元素。

4 讨论

4.1 陆壳再循环与地壳混染

大陆玄武岩浆相对大洋玄武岩(如MOBR)更为富集的不相容元素微量元素特征,而且在岩浆上

升侵位过程中需要通过相对厚的大陆地壳,因此有必要对岩浆演化过程中地壳混染作用的影响进行评价。对于白露山地区的玄武岩,其不相容元素蛛网图上显示出轻微的Nb和Ta负异常,而且具有较高的Zr/Nb(13.01~14.25)、Ba/Nb(34.2~81.6)、Th/Nb(0.49~0.59)和La/Nb(2.44~2.96)比值,反映岩浆侵位过程中可能受到了自地壳混染的影响(Taylor et al.,1985)。在另一方面,由于地壳岩石尤其是上地壳岩石相对高K、低Ti、P,因此具有高的 K_2O/TiO_2 和 K_2O/P_2O_5 比值;如果地壳混染作用发生,势必引起混染岩浆中 K_2O/TiO_2 和 K_2O/P_2O_5 比值增高,但白露山地区基性岩都具有较高且明显变化的 K_2O/TiO_2 和 K_2O/P_2O_5 比值。所有这些观察事实都反映岩浆在上升过程中通过了古老地壳,其特征并不能只用地壳混染来解释。

从微量元素原始地幔标准化蛛网图(图9)上可以看出该区K的异常比较明显,岩浆过程无法导致

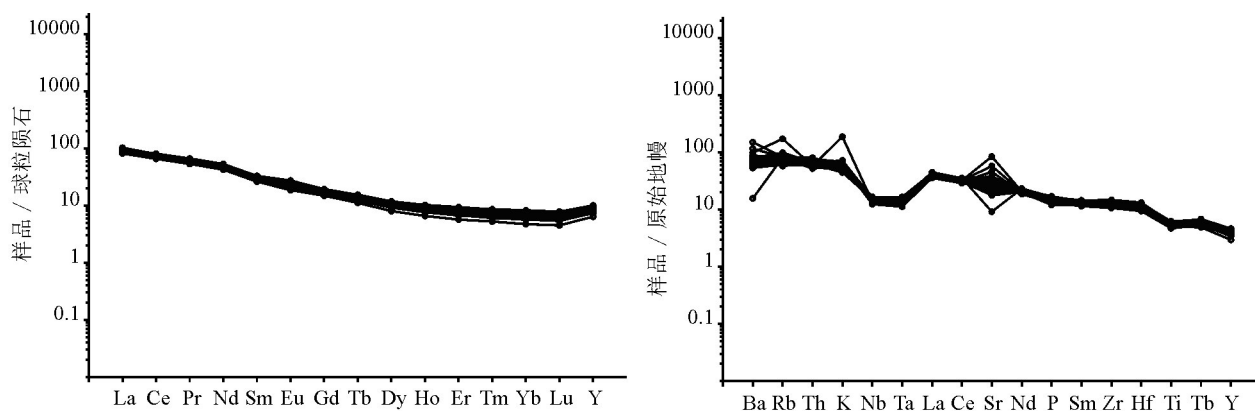


图9 橄榄玄武岩REE配分图(a)及微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)
Fig.9 REE distribution diagram(a)and trace element spider diagram(b) of olivinebasalt

表3 白露山橄榄玄武岩与原始地幔、MORB和OIB的元素比值对比

Table 3 Comparison of olivine basalts from Bailushan with elemental ratios of primitive mantle, MORB and OIB

岩类	La/Nb	Ba/La	Zr/Nb	Ba/Nb	Th/Nb
PM	1.04	9.6	14.8	9	0.117
N-MORB	0.93	4	30	1.7~8.0	0.025~0.071
E-MORB	1.32			4.9~8.5	0.06~0.08
HIMU		6.8~8.7	3.2~5.0	4.9~6.9	0.078~0.101
EMI-OIB		13.2~16.9	4.2~11.5	11.4~17.8	0.105~0.122
EMII-OIB		8.3~11.3	4.5~7.3	7.3~13.3	0.111~0.157
白露山	2.44~2.96	13.32~28.54	13.01~14.25	34.2~81.6	0.49~0.59

注:PM为原始地幔;N-MORB为正常的洋脊玄武岩;E-MORB为富集型洋脊玄武岩;OIB为大洋岛玄武岩。

K与其他地球化学性质相近的元素发生分馏,因此其异常变化应该是反映两种物质的混合。从表也可以看出Pb的含量偏高,其Ce/Pb比明显低于正常地幔值,暗示其中含有陆壳物质(陈立辉等,2012)。在Ce对Ce/Pb相关图上,它们刚好落在幔源岩浆和大陆下地壳的混合线上(图12)。与Ce/Pb比一样,Ba/Th比也是玄武岩的有效示踪剂,可以反映源区的组成。白露山玄武岩富集端元具有偏高的Ba/Th比值(64~232)。在陆壳的上、中、下三层结构中,只有下地壳具有高于原始地幔的Ba/Th比值(Rudnick et al.,2003; Rudnick et al.,2004)。因此,白露山玄武岩中富集端元明显偏高的Ba/Th比值暗示玄武岩中含有大陆下地壳物质。

对于大陆玄武岩,富集组分来自地壳混染还是再循环地壳是一个没有解决的难题。无论是上升过程中被下地壳混染,还是源区含有再循环的大陆下地壳,都可以使玄武岩的地球化学特征(例如Ce/Pb和Th/Ba比)发生如上图中的变化趋势(陈立辉等,2012)。因此,绝大多数地球化学指标无法区分这两种源区。前人对常用不相容元素比值(部分熔融过程中分配系数接近的不相容元素之间的比值)

进行海选后发现,Th/La比值可以有效区别这两种源区(陈立辉等,2012)。白露山Th/La比值(0.09~0.13)明显低于地壳值,说明玄武岩中的富集物质并不是完全来自地壳混染,而是有很大一部分来自地幔中的再循环地壳。

4.2 再循环地壳的特征、来源

如果再循环下地壳在榴辉岩相状态下经历高程度熔融,残留的榴辉岩的Th/La比值将显著降低。在中国东部,大陆下地壳可以通过大陆深俯冲(Zhang et al.,2002)和拆沉作用(Gao et al.,2004)两种方式进入软流圈地幔,从而改变软流圈地幔的组成,并导致中生代大规模地幔岩浆事件的发生。大陆下地壳通过深俯冲作用或者拆沉作用回到软流圈地幔后,会相变为榴辉岩(或者是榴辉岩相的石榴辉石岩),这种榴辉岩如果长期存留在地幔中,由于熔点比周围的橄榄岩低,非常容易发生部分熔融,导致残留的再循环大陆下地壳具有低Th/La比的特征。这种源区来源的熔体具有非常低的Th/La比值,它们的混入将显著降低幔源岩浆的Th/La比值(陈立辉等,2012)。

因此,残留的榴辉岩质再循环大陆下地壳是白

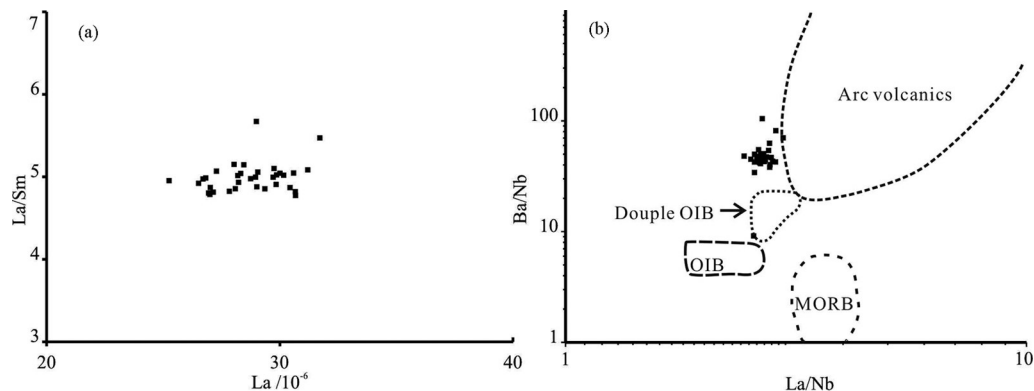


图10 橄榄玄武岩La/Sm-La (a)及Ba/Nb-La/Nb (b)图解

Fig.10 La/Sm-La (a) and Ba/Nb-La/Nb (b) diagram of olivine basalt

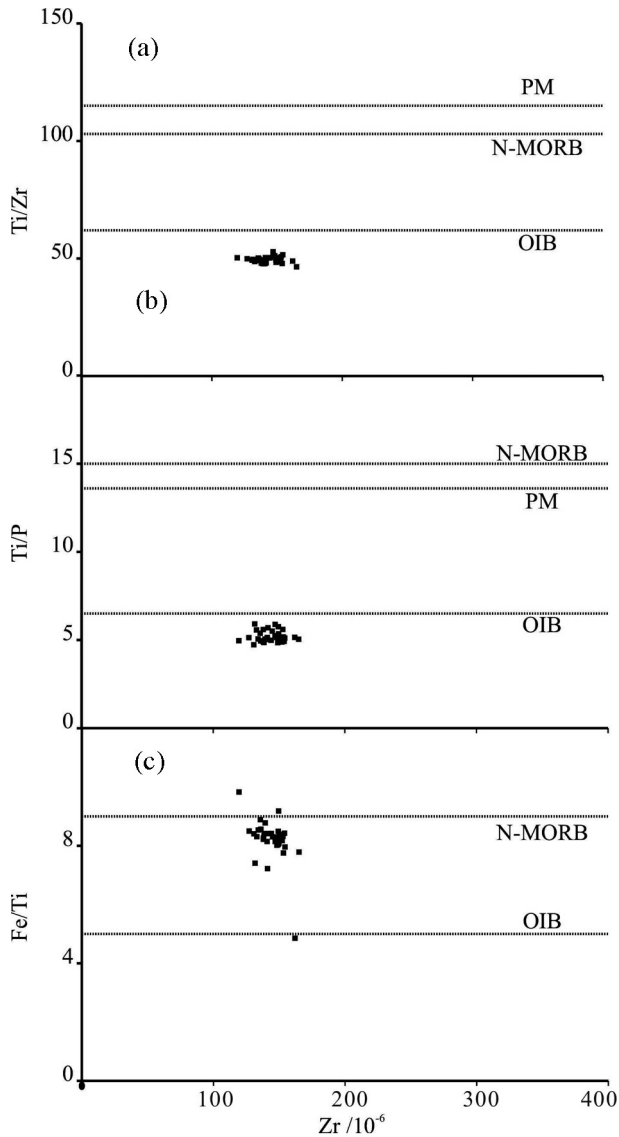


图 11 橄榄玄武岩 Ti/Zr-Zr (a)、Ti/P-Zr (b)、Fe/Ti-Zr (c) 图
Fig.11 Ti/Zr-Zr (a), Ti/P-Zr (b) and Fe/Ti-Zr (c) diagram of olivine basalt

露山玄武岩富集物质的主要源区。白露山玄武岩 MgO 在 10% ~ 15%，具有原始岩浆的特征，CaO 含量在 10% 左右 (图 13)，绝大多数低于橄榄岩来源的岩浆。玄武岩偏低的 CaO 含量支持地幔中主要富集物质为榴辉岩 (或石榴辉石岩) 这一岩性推测。因为榴辉岩 (或石榴辉石岩) 熔融过程中，富钙矿物单斜辉石为其主要残留相，这导致榴辉岩来源的熔体相对橄榄岩来源的熔体具有偏低的 CaO 含量。图 (13) 中，少部分点 CaO 含量 > 12%，这可能是因为在再循环的洋壳导致的碳酸盐化的碳酸岩熔体。

邻近的徐淮地区的中生代侵入岩中的石榴辉

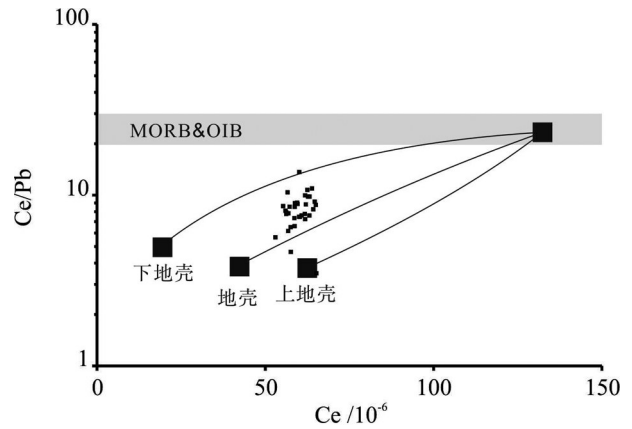


图 12 橄榄玄武岩 Ce-Ce/Pb 图解
(大陆下地壳、上地壳、地壳平均值据 Rudnick and Gao, 2003)
Fig.12 Ce-Ce/Pb diagram of olivine basalt
(The average values for lower, upper and whole crust for the continent are after Rudnick and Gao, 2003)

石岩捕虏体就具有异常高的 Lu/Hf 比 (Xu et al., 2009) 和 Nd-Hf 同位素解耦的现象，支持该区软流圈地幔中的再循环大陆下地壳经历过早期的高程度熔融。

总而言之，白露山橄榄玄武岩元素地球化学特征变化范围大并不是主要由地壳混染引起的，而是因为源区含有残留的再循环大陆下地壳 (Zeng et al., 2011)。值得重视的是，Zhang et al. (2009) 和 Wang et al. (2011) 发现苏皖地区新生代玄武岩的全岩和单斜辉石斑晶都常出现较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值，因此在中国东部新生代玄武岩的源区，再循环地壳物质可能分布比较广泛。

5 结论

(1) 徐州白露山含金刚石母岩为橄榄玄武岩， SiO_2 含量为 42.64%~51.13%， $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 为 2.57%~5.93%， Al_2O_3 为 10.48%~13.53%，MgO 含量变化范围较大，为 3.11%~19.34%， $\text{Mg}^\#$ 值较大，为 0.56~1.00。全铁与 P_2O_5 的含量与 MgO 含量变化关系不明显，未见明显的负相关性。该地区基性岩的稀土元素含量 ΣREE 为 $127.98 \times 10^{-6} \sim 157.74 \times 10^{-6}$ ，其中轻稀土含量为 $116.81 \times 10^{-6} \sim 144.01 \times 10^{-6}$ ，重稀土含量为 $9.92 \times 10^{-6} \sim 14.34 \times 10^{-6}$ ，LREE/HREE 值在 8.89~12.81。在球粒陨石标准化稀土配分图上显示 LREE 富集的右倾配分模式，Eu 总体显示出弱的负异常， $\delta\text{Eu}=0.91 \sim 1.06$ ，显示了一定程度的斜长石分离结晶作用。 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 比值变化于 3.0~3.57，轻

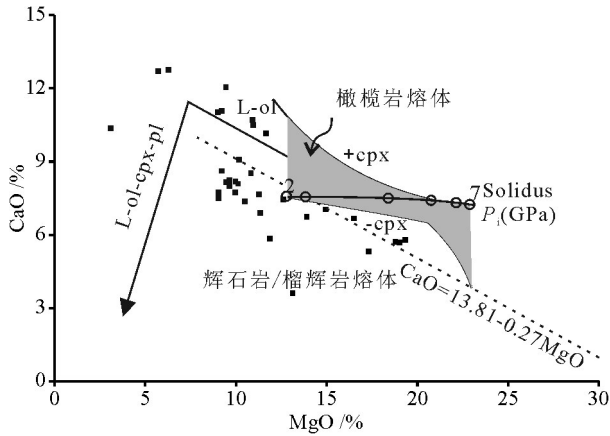


图13 橄榄玄武岩 MgO-CaO 相关图
(橄榄岩、辉石岩/榴辉岩熔体区域据 Herzberg and Asimow, 2008)
Fig.13 MgO-CaO diagram of olivine basalt
(The division for melts from peridotite and pyroxenite/eclogite is after Herzberg and Asimow, 2008)

稀土内部的分异程度较低, $(Gd/Yb)_N$ 比值变化在 2.15~3.15, 显示了重稀土的分馏程度也较低。在 Ba/Nb-La/Nb 图解中, 白露山基性岩的样品靠近 OIB 和火山弧区域。

(2) 白露山的橄榄玄武岩富集端元具有偏高的 Ba/Th 比值(64~232), 其中富集端元明显偏高的 Ba/Th 比值暗示玄武岩中含有大陆下地壳物质。白露山 Th/La 比值(0.09~0.13)明显低于地壳值, 说明玄武岩中的富集物质并不是完全来自地壳混染, 而是有很大一部分来自地幔中的再循环地壳。

致谢: 样品挑选和鉴定工作得到南京宏创地质勘查技术服务公司袁秋云高级工程师的指导, 样品测试过程得到中国海洋局第二海洋研究所刘吉强研究员和朱继浩研究员的指导, 论文写作过程得到中国地质调查局南京中心毛晓长研究员、徐敏成教授级高级工程师的悉心指正, 论文修改过程中得到中国地质调查局发展研究中心王学明教授级高级工程师的指导, 谨在此表示诚挚感谢。

References

Cai Yitao, Chen Guoguang, Zhang Jie, Dong Zhongdou, Zhou Shiwen. 2014. Geochemical features of the olivine-gabbros and its relationship with diamond-forming in the Langan area, Anhui Province[J]. Resources Survey and Environment, 35(4): 245-253 (in Chinese with English abstract).
Cai Yitao, Zhang Jie, Dong Zhongdou, Cao Zhengqi, Xiao Shuyue, Li Shuai, Li Chengkai, Chen Lezhu, Fan Feipeng. 2018. Neoproterozoic basic magmatism in the north of Anhui Province:

Evidence from whole-rock geochemistry and U-Pb geochronology of Diabase in Langan area[J]. Geology in China, 45(2): 351-366 (in Chinese with English abstract).

Chen Lihui, Ceng Gang, Hu Senlin, Yu Xun, Chen Xiayu. 2012. Crustal recycling and genesis of continental alkaline basalts: Case study of the Cenozoic alkaline basalts from Shandong Province, Eastern China[J]. Geological Journal of China Universities, 18(1): 16-27(in Chinese with English abstract).

Gao Shan, Rudnick Roberta L, Yuan Hongling, Liu Xiaoming, Liu Yongsheng, Xu Wenliang, Ling Wenli, Ayers John, Wang Xuanche, Wang Qinghai. 2004. Recycling lower continental crust in the North China Craton[J]. Nature, 432: 892-897.

Herzberg C, Asimow P D. 2008. Petrology of some oceanic island basalts: PRIMELT2.XLS software for primary magma calculation[J]. Geochim. Geophys. Geosist., 9(9): 1-25.

Hoernle Kaj, Tilton George Bas, Mike J Le, Duggen, Svend, Garbe-Schönberg, Dieter. 2002. Geochemistry of oceanic carbonatites compared with continental carbonatites: Mantle recycling of oceanic crustal carbonate[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 142: 520-542.

Huang Xianjue. 2012. Study on primary diamond deposit types and analysis of the prospect of exploration of diamond resources in Anhui Province[J]. Geology of Anhui, 22(2): 103-105(in Chinese with English abstract).

Liu Yongqing, Gao Linzhi, Liu Yanxue, Song Biao, Wang Zongxiu. 2005. Zircon U-Pb dating in the event of Neoproterozoic mafic magma, Xuhuai area[J]. Chinese Science Bulletin, 50(22): 2514-2521(in Chinese).

Pan Guitang. 2009. Subdivision of Tectonic Units in China[J]. Geology in China, 36(1): 1-28(in Chinese with English abstract).

Pan Guoqiang, Kong Qingyou, Wu Junqi, Liu Jiarun, Zhang Qinglong, Ceng Jiahu, Liu Daozhong. 2000. Geochemical features of Neoproterozoic diabase sills in Xuzhou-Suzhou Area[J]. Geological Journal of China Universities, 6(1): 53-63(in Chinese with English abstract).

Rudnick, Roberta L, Gao, Shan, Ling, Wen Li, Liu, Yong Shen, McDonough, William F. 2004. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China Craton[J]. Lithos, 77: 609-637.

Rudnick Roberta L, Gao Shan. 2003. Composition of the Continental Crust[M]. Oxford: Elsevier Pergamon, 1-64.

Shi Jianbin, Lu Aidong, Qian Jing, Zhou Dan, Wang Yubo. 2012. Synthetic geo-environment evaluation for the mountains in Tongshan district, Xuzhou[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 23(2): 36-39(in Chinese with English abstract).

Shu Liangshu, Wu Junqi, Liu Daozhong. 1994. Thrust tectonics of Xuzhou-Suzhou Region, Eastern China[J]. Journal of Nanjing University, 30(4): 638-647(in Chinese with English abstract).

Taylor, Stuart Ross, McLennan, Scott M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution, an examination of the geochemical

- record preserved in sedimentary rocks[J]. *Journal of Geology*, 94: 632–633.
- Wang Luchao, Wang Jilin, Li Lei. 2011. Tectonic characteristics and their evolution in Xu–Su area[J]. *Journal of Geology*, 35(3): 247–250(in Chinese with English abstract).
- Wang Mengxi, Wang Yan. 2012. Mineral chemistry of Zhouan ultramafic intrusion on northern margin of the Yangtze Block: Implications for origin of intrusion and Ni–Cu–(PGE) sulfide mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 31(2): 179–194(in Chinese with English abstract).
- Wang, Yan, Zhao, Zi Fu, Zheng, Yong Fei, Zhang, Jun Jun. 2011. Geochemical constraints on the nature of mantle source for Cenozoic continental basalts in East–Central China[J]. *Lithos*, 125: 940–955.
- Xiang Zhenqun, Li Huaikun, Lu Songnian, Zhou Hongying, Li Huimin, Wang Huichu, Chen Zhihong, Niu Jian. 2012. Emplacement age of the gabbrodiabase dike in the Hongmen scenic region of Mount Tai, Shandong Province, North China: Baddeleyite U–Pb precise dating [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(9):2831–2842(in Chinese with English abstract).
- Xu Wenliang, Gao Shan, Yang Debin, Pei, Fu Ping, Wang, Qinghai. 2009. Geochemistry of eclogite xenoliths in Mesozoic adakitic rocks from Xuzhou– Suzhou Area in Central China and their tectonic implications[J]. *Lithos*, 107: 269–280.
- Zeng G, Chen L H, Hofmann A W. 2011. Crust recycling in the sources of two parallel volcanic chains in Shandong, North China[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 302: 359–368.
- Zeng, Gang, Chen, Li Hui, Xu, Xi Sheng, Jiang, Shao Yong, Hofmann, Albrecht W. 2010. Carbonated mantle sources for Cenozoic intra-plate alkaline basalts in Shandong, North China[J]. *Chemical Geology*, 273: 35–45.
- Zhang Guishan, Wen Hanjie, Hu Ruizhong, Qiu Yuzhuo. 2009. Geochemical features of the Cenozoic alkaline ultramafic volcanic rock in Fujian and their tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(2): 284–294(in Chinese with English abstract).
- Zhang Jie, Cai Yitao, Dong Zhongdou, Ma Yuguang, Fan Feipeng, Chen Lezhu, Li Chengkai, Yang Diwei. 2015. Investigation on mineral characteristic of diamond and geochemical characteristic of its host in the Langan Area, Anhui Province[J]. *Journal of Gems. & Gemmology*, 17(5): 1–11(in Chinese with English abstract).
- Zhang Peiyuan. 1998. New knowledge of some important questions about diamond deposit genesis[J]. *Hunan Geology*, 17(3): 204–210 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfu, Sun Min, Zhou Xinhua, Fan Weiming, Zhai Mingguo, Yin, Jifeng. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China Craton: Evidence from major-, trace- element and Sr–Nd–Pb isotope studies of Fangcheng Basalts[C]//Abstract of Academic Papers of Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 241–254.
- Zhang, Jun Jun, Zheng, Yong Fei, Zhao, Zi Fu. 2009. Geochemical evidence for interaction between oceanic crust and lithospheric mantle in the origin of Cenozoic continental basalts in East–Central China[J]. *Lithos*, 110: 305–326.
- Zhao Zheng, Qi Liang, Huang Zhilong, Yan Zaifei, Xu Cheng. 2010. A study of mineralogy and petrochemistry of Jijie alkaline–ultramafic rocks, southern part of Panxi rift[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 320–335(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡逸涛, 陈国光, 张洁, 董钟斗, 周世文. 2014. 安徽栏杆地区橄辉岩地球化学特征及其与金刚石成矿的关系[J]. *资源调查与环境*, 35(4): 245–253.
- 蔡逸涛, 张洁, 董钟斗, 曹正琦, 肖书阅, 李帅, 李成凯, 陈乐柱, 范飞鹏. 2018. 皖北栏杆地区新元古代岩浆活动: 含金刚石母岩 U–Pb 年代学及地球化学制约[J]. *中国地质*, 45(2): 351–366.
- 陈立辉, 曾罡, 胡森林, 俞恂, 陈霞玉. 2012. 地壳再循环与大陆碱性玄武岩的成因: 以山东新生代碱性玄武岩为例[J]. *高校地质学报*, 18(1):16–27.
- 黄先觉. 2012. 金刚石原生矿床类型及安徽省金刚石找矿前景分析[J]. *安徽地质*, 22(2): 103–105.
- 柳永清, 高林志, 刘燕学, 宋彪, 王宗秀. 2005. 徐淮地区新元古代初期镁铁质岩浆事件的锆石 U–Pb 定年[J]. *科学通报*, 50(22): 2514–2521.
- 潘桂棠. 2009. 中国大地构造单元划分[J]. *中国地质*, 36(1): 1–28.
- 潘国强, 孔庆友, 吴俊奇, 刘家润, 张庆龙, 曾家湖, 刘道忠. 2000. 徐宿地区新元古代辉绿岩床的地球化学特征[J]. *高校地质学报*, 6(1): 53–63.
- 施建斌, 卢爱冬, 钱静, 周丹, 王宇波. 2012. 徐州市铜山区山体地质环境综合评价[J]. *地质灾害与环境保护*, 23(2): 36–39.
- 舒良树, 吴俊奇, 刘道忠. 1994. 徐宿地区推覆构造[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 30(4): 638–647.
- 王陆超, 汪吉林, 李磊. 2011. 徐宿地区构造特征及其演化[J]. *地质学刊*, 35(3): 247–250.
- 王梦玺, 王焰. 2012. 扬子地块北缘周庵超镁铁质岩体矿物学特征及其对铜镍矿化的启示[J]. *矿床地质*, 31(2): 179–194.
- 相振群, 李怀坤, 陆松年, 周红英, 李惠民, 王惠初, 陈志宏, 牛健. 2012. 泰山地区古元古代末期基性岩墙形成时代厘定——斜锆石 U–Pb 精确定年[J]. *岩石学报*, 28(9): 2831–2842.
- 张贵山, 温汉捷, 胡瑞忠, 裘愉卓. 2009. 福建新生代碱性超基性火山岩地球化学特征及构造意义[J]. *地质学报*, 83(2): 284–294.
- 张洁, 蔡逸涛, 董钟斗, 马玉广, 范飞鹏, 陈乐柱, 李成凯, 杨迪威. 2015. 安徽栏杆金刚石矿物特征及其寄主母岩地球化学特征研究[J]. *宝石和宝石学杂志*, 17(5): 1–11.
- 张培元. 1998. 有关金刚石成因等若干重大问题的新认识[J]. *湖南地质*, 17(3): 204–210.
- 赵正, 漆亮, 黄智龙, 严再飞, 许成. 2010. 攀西裂谷南段鸡街碱性超基性岩矿物学与岩石化学[J]. *地学前缘*, 17(2): 320–335.