

DOI:10.12017/dzcx.2022.047

# 火山岩陆上与水下喷发沉积环境的地球化学判识方法研究\*

刘德成<sup>1,2,3</sup> 陈亚军<sup>4</sup> 伍宏美<sup>4</sup>马强<sup>5</sup> 何兴华<sup>6,7</sup> 张桓<sup>8</sup>

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院 北京 100083; 2. 北京市地质矿产勘查开发集团有限公司 北京 100050; 3. 北京市地质灾害防治研究所 北京 100120; 4. 北京中科联华石油科学研究院 北京 100101; 5. 中国石油玉门油田分公司勘探开发研究院 甘肃酒泉 735019; 6. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室 贵阳 550081; 7. 中国科学院大学 北京 100049; 8. 华北地质调查局五一九大队地质环境工程院 河北保定 071051)

**摘要** 陆上、水下两种不同喷发沉积环境火山岩储层特征差异明显,准确判识火山喷发沉积环境是火山岩储层评价的重要依据。研究使用 $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})$ 作为火山岩氧化系数,并充分考虑火山喷发期的地理环境、岩浆性质(岩石酸度)、构造成因环境、流体活动、风化淋溶作用、成岩后表生作用等影响因素,针对不同影响因素提出校正方法和合理的规避思路;建立及改进了基于火山岩氧化系数的喷发沉积环境判别图,得出消减带火山岩(活动陆缘和岛弧火山岩)陆上与水下喷发沉积环境的氧化系数判别标准。运用改进的图版及标准,对新疆三塘湖盆地马朗凹陷上石炭统卡拉岗组( $\text{C}_2k$ )火山岩喷发沉积环境进行判识,结果表明,39件火山岩样品主要为陆上喷发沉积火山岩和水、陆过渡复杂环境沉积成因的火山岩。实际应用结果与前人基于卡拉岗组火山岩共生岩石与化石组合、风化壳、示底构造等典型标志得到的结果相符合;基于多因素分析法筛选样品,建立改进的判别图对喷发环境的指示意义具有普遍适用性,不受地质时代及区域地质条件的限制。

**关键词** 火山岩 喷发沉积环境 氧化系数 马朗凹陷 卡拉岗组

中图分类号: P581

文献标识码: A

文章编号: 0563-5020(2022)03-809-26

火山岩作为一大类非常规油气储层及新的油气勘探领域,近20年来广受人们的重视,目前已在全球13个国家(地区)40多个盆地中发现了大规模的工业油气流(唐华凤等,2020)。我国已在松辽盆地北部和南部(吴聿元等,2007;赵泽辉等,2014),内蒙古二连盆地(路占军等,2011)、渤海湾盆地辽河和济阳拗陷(初宝杰等,2004;陈昌,2017)、四川盆地南部和西部(文龙等,2019;何青林等,2020)、准噶尔盆地西北缘和中拐凸起(李军,2008;刘蕾等,2018)、三塘湖盆地马朗凹陷(陈建琪等,2010;李光

\* 中国地质调查局西安地质调查中心综合地质调查项目(编号:DD20190143)资助。

刘德成,男,1978年生,博士研究生,工程师,地质工程专业。E-mail: 9039462@qq.com

陈亚军,男,1990年生,工程师,地质工程专业。本文通讯作者。E-mail: cjun0707@163.com

2021-06-14收稿,2021-12-24改回。

云等, 2010)等发现和开发的与火山岩有关的油气田, 均以气孔玄武岩、碎裂玄武岩和安山岩、粗面岩、英安岩、流纹岩、凝灰岩、火山角砾岩(含集块岩)、沉凝灰岩等作为有效的储层。以往这些研究对象多为陆上表生环境堆积或保存的火山岩储层, 对水下堆积或保存的火山岩储层研究较少(Robert et al., 2006; 王岚等, 2010), 而对陆上、水下两种不同喷发沉积环境火山岩的判识研究, 也主要停留在岩性组合特征、结构与构造特征、矿物蚀变特征、岩相产状、与下伏地层接触关系及储层孔隙与裂缝发育特征等方面(张艳等, 2007; 朱卡等, 2012; 单玄龙等, 2014); 通过火山岩元素地球化学方法来判识火山喷发沉积古地理环境的研究, 则涉及甚少。陆上、水下两种喷发沉积环境由于氧含量的原因(Le Maitre, 1976; 邱家骧, 1985; Dyar et al., 1987; 张艳等, 2007; 朱卡等, 2012; 单玄龙等, 2014; 何衍鑫等, 2017), 火山岩中变价元素铁的氧化物 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{FeO}$ 的含量不同; 陆上火山岩(陆上喷发陆上沉积火山岩和水下喷发陆上沉积火山岩)多表现为 $\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{FeO}$ 的特征, 水下火山岩(陆上喷发水下沉积火山岩和水下喷发水下沉积火山岩)多表现为 $\text{FeO} > \text{Fe}_2\text{O}_3$ 的特征。因此, 利用火山岩 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 与 $\text{FeO}$ 质量百分数之比, 可以判识火山喷发期的沉积古环境。诚然, 火山岩中变价元素铁的氧化物含量( $\text{FeO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )不只是受喷发沉积期的地理环境(陆上氧化、水下还原环境)的影响, 还受岩浆性质(岩石酸度)(Le Maitre, 1976; 邱家骧, 1991)、构造成因环境(板内和消减带环境)(梁浩等, 2009; 吴小奇等, 2010)、风化淋滤作用(刘俊田, 2009; 王君等, 2010; 侯连华等, 2011)、流体活动(胡文婷等, 2011; 杨艳芳, 2011; 魏翔宇等, 2017)、风化作用(邱家骧, 1985; 梁浩等, 2009)等因素影响。因此, 运用火山岩氧化系数来判别喷发沉积期的古地理环境时, 对这些影响因素进行校正或合理规避, 这不仅是火山岩岩石化学研究的热点, 更是难点。

据黄剑霞(1987)厦门港湾海洋环境表层沉积物中196块样品 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 值的氧化还原环境分区的报道, 将 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+} > 1.5$ 划为强氧化环境区,  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+} < 0.8$ 划为还原环境区,  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 在1.0~1.5、0.8~1.0之间对应弱氧化环境区和弱还原环境区; 单玄龙等(2014)据此划分标准, 对松辽盆地徐家围子断陷营城组火山岩氧化比( $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ )计算分析其值普遍小于0.8, 部分样品氧化比低于0.1, 推测营城组火山岩在成岩过程受到水下还原环境的影响。显然, 该划分标准研究对象是港湾表层沉积物,  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值会随氧化还原电位(Eh)、酸碱度(pH)和有机质含量的不同而发生变化。因此, 直接应用该标准来判识火山岩喷发沉积环境, 显然失去了其指示的环境意义。何衍鑫等(2017)在考虑岩石酸度的影响因素下, 以 $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})$ 作为火山岩氧化系数, 建立了经岩石酸度校正后火山岩喷发环境的判识标准, 得出陆上超基性火山岩氧化系数最小值0.35, 基性火山岩最小值0.43, 中性火山岩最小值0.47, 酸性火山岩最小值0.53; 水下超基性火山岩氧化系数最大0.43, 基性火山岩最大0.47, 中性火山岩最大0.53, 酸性火山岩最大0.54; 但该判识标准建立时, 其一没有分析构造成因背景、成岩后表生作用以及流体活动等因素对样品氧化系数的影响, 这对判断火山岩的喷发沉积环境的判断带来较大误差; 其二是将弱氧化环境归为陆上喷发, 弱还原环境归为水下喷发, 而弱氧化—弱还原环境可能是频繁水、陆过渡相的一个复杂环境系统。本文以 $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})$ 作为火山岩氧化系数, 对前述各影响因素提出了校正或规避思路, 建立及改进了基于火山

岩氧化系数的喷发沉积环境判识图, 形成了新的判别标准。在新疆三塘湖盆地马朗凹陷上石炭统卡拉岗组火山岩喷发沉积环境实际判识应用中表明, 新建的判别标准判识的火山岩喷发沉积环境与前人基于该组火山岩共生岩石组合、风化壳、示底构造等典型标志判识的结果相一致。研究为火山岩储层岩石成因环境分析及岩相古地理研究提供了新思路与新方法。

## 1 陆上、水下两种不同喷发沉积成因火山岩的区别

按火山活动时的古地理环境, 可将火山岩分为陆上喷发火山岩和水下喷发火山岩(Le Maitre, 1976; 张艳等, 2007; 王岚等, 2010; 王盛鹏等, 2012; 单玄龙等, 2014), 进而根据火山喷发物(熔岩流、火山碎屑流)运移、堆积和保存时的介质环境, 可将陆上喷发火山岩分为陆上喷发陆上堆积保存火山岩和陆上喷发水下堆积保存火山岩; 水下喷发火山岩分为水下喷发水下堆积保存火山岩和水下喷发陆上堆积保存火山岩。陆上与水下两种不同喷发沉积环境熔岩流和火山碎屑流堆积和保存时的环境介质不同(陆上空气、水下水体), 是二者所形成的火山岩体存在明显特征差异的最主要原因。

本次将陆上喷发陆上保存与水下喷发陆上保存火山岩归为陆上沉积成因火山岩, 陆上喷发水下保存与水下喷发水下保存火山岩归为水下沉积成因火山岩, 并归纳总结二者在岩石类型、岩石颜色、岩性组合特征、结构与构造特征、共生岩石及化石组合、蚀变特征、脱玻化、充填及胶结物、储集空间类型、产状以及与下伏地层接触关系等方面的区别(表1)。

岩石类型上, 陆上发育熔结凝灰岩、火山泥流、火山弹等; 水下发育礁灰岩、珍珠岩、淬碎玻璃质碎屑岩。岩石颜色上, 陆上多见氧化色(肉红色、紫色、棕色、褐色等), 熔岩常见“红顶绿底”特征(一次喷发间歇期经常存在“红顶”沉积及风化壳); 水下多见还原色(灰色、灰黑色、灰绿色、灰黄色等)。岩石结构与构造特征上, 陆上熔岩原生气孔较发育, 常见气孔—杏仁构造、流纹构造、柱状节理构造, 有时可见绳状构造等; 水下熔岩原生气孔发育程度低, 常具特殊的枕状构造、淬碎炉渣状构造、致密块状构造。共生岩石及化石组合上, 陆相火山岩常与陆相沉积岩、陆相动物及淡水植物共生, 可见植物叶茎化石或植物碎片、淡水化石、硅化木、炭化木等; 海相(水下)火山岩常与海相沉积岩、咸水生物共生, 可见海相古生物化石及茎干化石。蚀变特征上, 陆上除区域变质、蚀变区外, 火山岩同生蚀变弱; 水下火山岩多见碳酸盐化、绿泥石化。在脱玻化方面, 陆上火山岩火山玻璃含量低, 脱玻化球粒多而大; 水下火山岩火山玻璃含量高, 脱玻化球粒少而小。在充填及胶结物上, 陆上火山岩主要为火山灰的次生分解物及水解和水化作用为主的化学风化沉淀物(碳酸盐、粘土等); 水下熔岩少许杏仁体和火山碎屑岩胶结物中绿泥石、沸石、方解石及黄铁矿等多见。储集空间特征上, 陆上火山岩主要是原生孔隙、冷凝收缩节理缝、构造裂缝、矿物解理缝, 见柱状节理; 水下主要为基质微孔、长石斑晶与火山灰溶蚀微孔、淬碎炸裂纹、后期构造缝、构造—溶蚀缝。产状方面, 陆上火山岩体常见低角度斜交、平行层状或似层状; 水下火山岩体多呈穹隆状、透镜状, 凝灰岩见纹层状。与下伏地层接触关系上, 陆上喷发火山岩受原始火山斜坡的影响, 常与下伏地层呈不整合接触; 水下喷发火山

表 1 陆上、水下喷发沉积火山岩的区别

Table 1 The characteristics of terrestrial and underwater sedimentary volcanic rocks are compared

特征差异	水下		陆上	
	陆上喷发水下沉积	水下喷发水下沉积	陆上喷发陆上沉积	水下喷发陆上沉积
岩性组合	火山碎屑岩占比例小, 发育礁灰岩、珍珠岩、淬碎玻璃质碎屑岩	火山碎屑岩占比例大, 发育熔结凝灰岩、火山泥流、火山弹等	火山碎屑岩占比例大, 发育熔结凝灰岩、火山泥流、火山弹等	火山碎屑岩占比例大, 发育熔结凝灰岩、火山泥流、火山弹等
岩石颜色	还原或强还原环境, 多为灰色、灰黑色、灰绿色、灰黄色等; 熔岩冷却单元无明显顶底分带现象	氧化或强氧化环境, 多为肉红色、紫色、棕色、褐色等, 熔岩冷却单元顶底分带明显, 常见“红顶绿底”特征	氧化或强氧化环境, 多为肉红色、紫色、棕色、褐色等, 熔岩冷却单元顶底分带明显, 常见“红顶绿底”特征	氧化或强氧化环境, 多为肉红色、紫色、棕色、褐色等, 熔岩冷却单元顶底分带明显, 常见“红顶绿底”特征
结构	碎屑粒度较细、分选好、多为等粒、斑状结构, 玻璃质结构	碎屑颗粒杂乱、分选差、不等粒	碎屑颗粒杂乱、分选差、不等粒	碎屑颗粒杂乱、分选差、不等粒
构造	气孔不太发育, 且气孔多被充填, 具有特殊的枕状构造、致密块状构造、淬碎熔渣状构造等	气孔较发育, 常见气孔、杏仁构造, 流纹构造、柱状节理构造、块状构造、有时可见绳状构造等	气孔较发育, 常见气孔、杏仁构造, 流纹构造、柱状节理构造、块状构造、有时可见绳状构造等	气孔较发育, 常见气孔、杏仁构造, 流纹构造、柱状节理构造、块状构造、有时可见绳状构造等
共生岩石及化石组合	常与海相(湖相)沉积岩、咸水生物共生, 共生沉积岩一般无水进、水退现象的规律显示, 可见海相化石及茎干化石	常与陆相沉积岩、陆相动物及淡水植物共生, 共生沉积岩具粒度由细变粗的返旋回韵律, 显示水退现象, 可见植物叶茎化石或植物碎片、淡水化石、硅化石、炭化木	常与陆相沉积岩、陆相动物及淡水植物共生, 共生沉积岩具粒度由细变粗的返旋回韵律, 显示水退现象, 可见植物叶茎化石或植物碎片、淡水化石、硅化石、炭化木	常与陆相沉积岩、陆相动物及淡水植物共生, 共生沉积岩具粒度由细变粗的返旋回韵律, 显示水退现象, 可见植物叶茎化石或植物碎片、淡水化石、硅化石、炭化木
蚀变	蚀变强烈, 多见钠长石化、绿泥石化, 野外可见海相特征的细碧岩—石英角闪岩等	同生蚀变弱, 钠长石化少见, 可见橄辉石氧化环境下的伊丁石化蚀变	同生蚀变弱, 钠长石化少见, 可见橄辉石氧化环境下的伊丁石化蚀变	同生蚀变弱, 钠长石化少见, 可见橄辉石氧化环境下的伊丁石化蚀变
脱玻化	火山玻璃含量高, 脱玻化球粒少而小	火山玻璃含量低, 脱玻化球粒大小不一, 多而大	火山玻璃含量低, 脱玻化球粒大小不一, 多而大	火山玻璃含量低, 脱玻化球粒大小不一, 多而大
充填及胶结物	熔岩杏仁体和火山碎屑岩胶结物中绿泥石、沸石、方解石及黄铁矿等相对发育, 凝灰质砂砾岩中多见钙质胶结物	常见橄辉石斑晶伊丁石、偶见绿帘石、沸石和黄铁矿等发育较少	常见橄辉石斑晶伊丁石、偶见绿帘石、沸石和黄铁矿等发育较少	常见橄辉石斑晶伊丁石、偶见绿帘石、沸石和黄铁矿等发育较少
孔隙、节理和裂缝	少许原生气孔(残余孔)、淬碎炸裂纹、岩球岩枕间孔和粒间孔、基质微孔、晶间孔、基质和斑晶溶蚀蚀变孔缝、后期构造缝, 节理不规则	原生孔隙、次生溶蚀孔、冷凝收缩节理缝、构造裂缝、矿物解理缝, 见柱状、板状节理	原生孔隙、次生溶蚀孔、冷凝收缩节理缝、构造裂缝、矿物解理缝, 见柱状、板状节理	原生孔隙、次生溶蚀孔、冷凝收缩节理缝、构造裂缝、矿物解理缝, 见柱状、板状节理
产状	熔岩呈穹窿状、透镜状或浑圆状, 凝灰岩见纹层状, 见膨润土层、伊利石岩、蒙脱石岩、沸石岩呈松散团窝状并夹有火山弹	熔岩多呈大面积熔岩流、熔岩被、或盾形火山锥, 常见低角度斜交、平行层状或似层状	熔岩多呈大面积熔岩流、熔岩被、或盾形火山锥, 常见低角度斜交、平行层状或似层状	熔岩多呈大面积熔岩流、熔岩被、或盾形火山锥, 常见低角度斜交、平行层状或似层状
与下伏地层接触关系	常与下伏地层呈整合、假整合或侵蚀接触, 风化壳不发育	常与下伏地层呈整合、假整合或侵蚀接触, 风化壳不发育	常与下伏地层呈整合、假整合或侵蚀接触, 风化壳不发育	常与下伏地层呈整合、假整合或侵蚀接触, 风化壳不发育

岩体受水动力条件的影响，常与下伏地层呈整合、假整合或侵蚀接触。

## 2 基于火山岩氧化系数的喷发沉积环境判别

### 2.1 火山岩氧化系数的常见表达式

火山岩氧化系数、氧化度或氧化率常见的表达方式众多，有  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 、 $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)$  或  $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ ，常见的代号有  $W$ 、 $OX$  和  $F$  等。国外学者 Rittmann (1973) 将岩石的氧化度用  $OX = \text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+}+\text{Fe}^{2+}+\text{Mn})$  (原子数) 来表示，Le Maitre (1976) 提议用  $\text{FeO}$  和  $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$  的百分重量比值作为岩石的氧化率；国内邱家骧(1985) 指出  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  与  $\text{FeO}$  的百分含量比值  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  是判别火山岩喷发氧化—还原环境的传统研究方法；黄剑霞(1987) 提出以  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  表示氧化系数，氧化比即为  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ ；李明连等 (2014) 提出岩石的氧化系数 ( $K$ ) 有两种计算方式： $K = \text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+}+\text{Fe}^{2+})$  或  $K = \text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})$ 。

尽管岩石氧化系数计算方式多样，但都与变价元素化学变化或化学反应有关，都遵循化学平衡原理；本次研究采用李明连等(2014) 提出的计算表达式，代号沿用 Rittmann (1973) 提出的  $OX$  记法，记作  $OX = \text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})$ 。

### 2.2 火山岩氧化系数的影响因素

火山喷发时的古地理环境介质(陆上空气、水下水体)：陆上火山岩即陆上喷发陆上沉积火山岩和水下喷发陆上沉积火山岩，其火山喷发期喷出物堆积或保存时接触介质为陆上地表空气，是强氧化环境，使得低价态+2铁易被氧化为高价态+3铁。因此，岩石中铁的氧化物多表现为  $\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{FeO}$  的特征(Le Maitre, 1976；邱家骧, 1985；Dyar et al., 1987；张艳等, 2007；朱卡等, 2012；单玄龙等, 2014；何衍鑫等, 2017)。水下火山岩即陆上喷发水下沉积火山岩和水下喷发水下沉积火山岩，其火山喷发期喷出物堆积或保存时接触的介质为水体(海水、湖水)，为还原环境或滨浅海弱氧化—弱还原复杂环境，使得低价态+2铁难以被氧化；岩石中铁的氧化物多表现为  $\text{FeO} > \text{Fe}_2\text{O}_3$  的特征(Le Maitre, 1976；邱家骧, 1985；Dyar et al., 1987；张艳等, 2007；朱卡等, 2012；单玄龙等, 2014；何衍鑫等, 2017)。Dyar et al.(1987) 利用淬火方法对美国标准玄武岩 BCR-1 的重融喷发实验结果即是证实。

岩浆性质(岩石酸度)：Le Maitre(1976) 在对几种常见火山岩地球化学特征差异分析研究中统计表明，岩石中  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$  的含量及其比值随岩浆酸度与碱度的不同而存在明显差异，岩石酸度愈大， $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量越高，氧化度愈高。根据统计，3 504 个玄武岩样品  $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3) = 0.65$ ，2 576 个安山岩样品  $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3) = 0.55$ ，639 个英安岩样品  $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3) = 0.49$ ，664 个流纹岩样品  $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3) = 0.41$  (表 2)。

构造环境：板内环境和岛弧环境形成的火山岩地球化学特征是不同的(Le Maitre, 1976；梁浩等, 2009；吴小奇等, 2010)；一般在相同碱度条件下，岛弧造山带比板内内部  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量高，而  $\text{FeO}$  含量低；因此，岛弧成因火山岩比板内成因火山岩  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量高，氧化系数大。

表 2 喷出岩与侵入岩氧化度平均值统计结果

Table 2 Statistical results of average oxidation degrees of extrusive and intrusive rocks

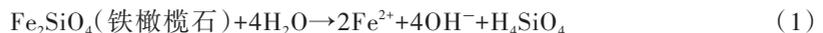
形成条件	不同酸度的岩石	统计样品数/个	氧化度 $OX = FeO/(FeO+Fe_2O_3)$	文献资料
岩浆喷发	玄武岩	3504	0.65	据 Le Maitre (1976) 统计
	拉斑玄武岩	202	0.70	
	安山岩	2576	0.55	
	英安岩	639	0.49	
	流纹英安岩	100	0.49	
	流纹岩	664	0.41	
		总计: 7865	平均: 0.55	

流体活动：水上喷发，在每次火山喷发晚期或喷发间隙期及之后，火山岩顶面处于风化剥蚀阶段，由于大气降水、地下水、火山(次火山)气液等流体的参与，流体沿原生孔缝或次生孔缝逐渐渗透并发生水解、溶蚀和热液充填等作用，使岩石原有矿物类型、成分及含量发生改变；其本质是因流体活动使原岩发生蚀变作用(成岩类型主要包括溶蚀作用和充填作用)，流体溶蚀作用主要体现在斑晶或基质遭受液态流体的水解和溶蚀形成新的矿物新的孔隙或使原有矿物变成无定形；热液充填作用可以对围岩造成烘烤，使岩石化学成分发生变化(魏翔宇等，2017)。与油气相关的火山岩基本都遭受了较深的埋藏，岩石普遍遭受明显的绿泥石化和碳酸盐化等后期蚀变作用，以及遭受干酪根成熟产生的有机脱羧酸水、蒙皂石向伊利石转化形成的酸性水溶蚀和含CO<sub>2</sub>酸性水的溶蚀作用后，造成Fe<sup>3+</sup>的富集，Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup>的比值增大(王璞珺等，2008；何衍鑫等，2017；张玉银，2018)。

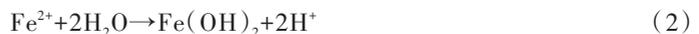
水下喷发，灼热的熔岩喷出进入水体温度骤减冷凝使其表面形成玻璃质外壳，阻碍了气水溶液或火山喷发热液或残留岩浆流出岩体，使后期火山岩(或次火山岩)热液只能进入前期已形成的气孔中，冷凝结晶或蚀变成气孔的充填物(魏翔宇等，2017)；同样，岩浆与水最初接触时，在岩浆与周围水体之间产生蒸气膜，火山碎屑流由于受到蒸气膜的保护，可保持长期高温环境(焦鑫等，2017)，外在流体很难渗入，使岩石原有矿物类型、成分及含量很少发生改变。

岩石遭受以水解作用和氧化作用为主的化学风化作用后，Fe<sup>2+</sup>水解成Fe(OH)<sub>2</sub>，接着被氧化为Fe(OH)<sub>3</sub>，Fe(OH)<sub>3</sub>脱水后形成Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，并因其化学惰性残留下来(梁浩等，2009)。

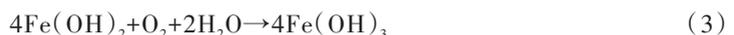
如铁橄榄石水解产生Fe<sup>2+</sup>：



Fe<sup>2+</sup>与水发生水解：



对于陆上氧化环境，Fe(OH)<sub>2</sub>进一步氧化为Fe(OH)<sub>3</sub>：



$\text{Fe}(\text{OH})_3$ 发生部分脱水后形成 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ :



水下喷发海水或湖水的直接参与, 其性质显著不同于陆地水(大气降水和地下水), 海水中一般含有大量的碱金属离子, 水解呈碱性, 但岩浆脱气产生 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 等气体与海水接触时被溶解吸收而偏弱酸性, 与大气淡水水体主要因为溶有 $\text{CO}_2$ 气体而呈弱酸性相似, 均含有 $\text{HCO}_3^-$ 阴离子。



类似的反应方程式不逐一做冗述。

由上述可知, 水解作用和氧化作用为主的化学风化作用结果必然造成岩石中 $\text{Fe}^{3+}$ 的富集, 而 $\text{Fe}^{2+}$ 减少, 岩石氧化系数增大。

风化淋滤作用: 对于陆相地面火山喷发沉积来说, 在喷发间歇期或之后, 火山岩暴露于表生环境, 受到大气、淡水及火山喷发间歇期饱和 $\text{CO}_2$ 气雨水的的风化淋滤作用影响, 火山岩中易迁移元素和可迁移元素都会被淋失, 只有惰性元素(如 $\text{Fe}$ 、 $\text{Al}$ 等元素)与不迁移元素表现出累积的现象(Honnorez, 1981; Hekinian, 1982; 陈福等, 1987; Janney and Castillo, 1996, 1997; 郭靖, 2012; 马云涛等, 2015; 鄢全树等, 2017; 陈启南, 2020)。因此, 风化淋滤作用必然造成火山岩中惰性 $\text{Fe}^{3+}$ 离子的富集,  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 的比值增大。Matthewst(1971)利用 $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 比值投点表明, 玄武岩 $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 比值大于0.55就不能被视为新鲜的岩石, 而遭受风化的玄武岩常表现出 $\text{CaO}$ 和 $\text{MgO}$ 的丢失伴随着 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 含量和 $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 比值增大。

岩相产状: 据Le Maitre(1976)统计表明, 喷出相与侵入相氧化系数( $OX$ )不同, 12 961个喷出岩氧化系数平均为0.56, 9 604个侵入岩氧化系数为0.59(表2)。据邱家骧(1985), 不同火山岩相氧化度( $W$ )不同, 一般爆发相最高, 尤以熔结凝灰岩为甚, 溢流相(喷溢相)次之, 次火山岩相最低; 如熔结凝灰岩氧化度 $W = 0.73$ , 凝灰岩氧化度 $W = 0.69$ , 熔岩氧化度 $W = 0.60$ , 次火山岩氧化度 $W = 0.40$ (表3)。

表3 不同火山岩相氧化度平均值统计结果

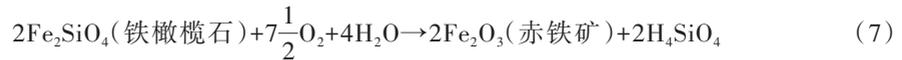
Table 3 Statistical results of average oxidation degrees of different volcanic facies

岩相产状	统计样品数/个	氧化度 $OX = \text{FeO}/(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 平均值	资料来源
喷出相	12 961	0.56	据 Le Maitre (1976)
侵入相	9 604	0.59	
火山岩相	统计样品个数/个	氧化度 $W = \text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)$	资料来源
爆发相/熔结凝灰岩	--	0.73	据邱家骧(1985)
爆发相/凝灰岩	--	0.69	
溢流相熔岩	--	0.60	
次火山岩相	--	0.40	

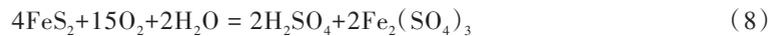
成岩后表生作用：主要体现在表生作用条件下的风化作用(化学风化作用和生物风化作用)。风化作用实质是一个脱硅富铝铁的过程，脱硅越多即 $\text{SiO}_2$ 减少的越多， $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 就越富集(梁浩等，2009)；因此，风化作用对火山岩氧化系数和酸度都会造成显著的影响，风化时间越长者氧化程度越高，如邱家骧(1985)发现黑龙江省科洛的白榴玄武岩第三纪 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 平均1.33，第四纪 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 平均0.85，较第三纪低；表生蚀变愈强者氧化程度越高，如邱家骧(1985)发现宁芜中生代相同成分安山岩，高岭土化及硅化岩石 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量8.82%~10.85%，新鲜岩石 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量4.45%~4.99%，明显低于遭受风化作用的安山岩。

化学风化作用主要有氧化、水解、水化、碳酸化和硫酸化等作用，其中氧化作用最具特色，对含铁基性矿物和硫化物及碳酸矿物来说：

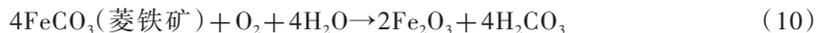
铁橄榄石水解和氧化形成表生条件下稳定的三价态铁氧化物( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )，其化学反应式为：



黄铁矿水解和氧化形成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体：



菱铁矿水解和氧化形成表生条件下稳定的三价态铁氧化物( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )，其化学反应式为：



生物新陈代谢产生有机质，如释放大量有机酸及 $\text{CO}_2$ ，加强孔缝水的溶解能力。因此，成岩后表生作用的结果会造成岩石中 $\text{Fe}^{3+}$ 的富集，岩石氧化系数增大。

### 2.3 火山岩氧化系数影响因素的校正或规避思路

火山喷发沉积时的地理环境：本文研究的核心所在，基于多因素分析法，调研筛选样品数据，建立基于火山岩氧化系数分布特征的火山喷发沉积环境判识图。

岩浆性质(岩石酸度)：岩石酸度表现在岩石地球化学特征上，即为酸度( $\text{SiO}_2$ 重量)的连续变化；建立图时将横坐标定义为岩石酸度，纵坐标定义为氧化系数，校正岩石酸度对氧化系数的影响。

构造环境：在未测试微量元素、稀土元素时，可采用主量元素测试中的Ti、P、Mn、Al等惰性组分对火山岩构造成因环境进行判别。中基性火山岩，可采用在 $\text{TiO}_2\text{-MnO-P}_2\text{O}_5$ 图解、 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 图解以及里特曼—戈蒂里指数图解来判断构造环境(梁浩等，2009；吴小奇等，2010)；闭合边缘的火山岩常见的是活动陆缘与岛弧火山岩，活动陆缘和火山岛弧火山岩在化学成分上的区别(梁浩等，2009)是在岛弧陆缘 $\text{SiO}_2 =$

56% ~ 75%， $\text{FeO}/\text{MgO} > 2$ ， $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 0.6$ ；在岛弧  $\text{SiO}_2 = 50\% \sim 66\%$ ， $\text{FeO}/\text{MgO} < 2$ ， $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 0.6$ 。低钾火山岩( $\text{K}_2\text{O}$ 质量分数平均1.60%)是岛弧火山岩明显的特征，活动陆缘以高钾( $\text{K}_2\text{O}$ 质量分数平均3.25%)火山岩为特征。酸性流纹岩与花岗岩的成分相当，英安岩与花岗闪长岩相当，可采用花岗岩  $R_1$ - $R_2$  因子判别图解来判断(Batchelor and Bowden, 1985)；其中， $R_1$ 、 $R_2$  因子分别为： $R_1 = [4\text{Si}-11(\text{Na}+\text{K})-2(\text{Fe}+\text{Ti})]$ ， $R_2 = \text{Al}+2\text{Mg}+6\text{Ca}$ 。

流体活动：基于前述分析，流体活动主要对陆上喷发沉积火山岩的氧化系数影响显著。体现在火山岩喷发间隙或之后，火山岩暴露于地表，受大气降水、地表水、地下水和火山(次火山)热液等流体活动的影响，流体沿岩石原生孔缝或次生孔缝渗透发生水解、溶蚀等作用，一些矿物水解后进一步氧化，引起 $\text{Fe}^{3+}$ 的富集，而 $\text{Fe}^{2+}$ 减少。其本质是因流体活动使原岩发生蚀变(成岩类型主要包括溶蚀作用和充填作用)(魏翔宇等, 2017)，因此规避这一因素，主要通过手标本及镜下鉴定区分样品蚀变程度；其次，烧失量(LOI值)具有岩石学意义，一般认为高烧失量(LOI)是由于熔岩受到强烈的蚀变交代作用所导致(Gurenko et al., 2006)，烧失量(LOI值)过高的样品对喷发环境的指示意义不大，在数据资料充分时应剔除。另外，可基于火山岩全岩CIA指数(化学蚀变指数)(魏翔宇等, 2017)来间接判定， $\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})] \times 100$ ， $\text{CIA} < 50$  (弱蚀变)， $50 < \text{CIA} < 60$  (中等蚀变)， $\text{CIA} > 60$  (强蚀变)。

风化淋滤作用：该因素对火山岩氧化系数的影响主要体现在陆上火山岩，对水下火山岩基本无影响。暴露于地表的火山岩，遭受长时间、高强度风化淋滤作用后，其氧化系数不再是反映古环境演化的良好信息载体。这一影响因素可通过地球化学参数分析法来间接判断，Irfan(1996, 1999)研究表明LOI(烧失量)、PI、WPI、SA这些地化参数能较好反映火山岩和花岗岩风化淋溶程度变化的参数，如硅铝系数( $\text{SA} = \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ )，其值越小，反映风化淋溶程度越强。

岩相产状：本次分析时该影响因素未作考虑。

成岩后表生作用：主要是风化作用对岩石氧化系数的影响，长时间、高强度的表生作用条件下的风化作用对火山岩氧化系数影响明显(邱家骧, 1985；梁浩等, 2009；何衍鑫等, 2017)，其氧化系数不再具有指示喷发沉积期的地理环境意义；而表生条件下的风化作用是一系列如水解、溶解、水合、氧化及碳酸化等化学作用和生物风化等综合作用的结果，因此，这一因素目前尚无有效方法进行科学可靠的校正或规避，只能通过手标本和镜下鉴定，将遭受严重风化的样品剔除；分析化验选取的岩石样品要新鲜，同时去掉表层风化物质，新鲜岩石的岩石化学标准是 $\text{H}_2\text{O} < 2\%$ ， $\text{CO}_2 < 0.5\%$ (梁浩等, 2009)。

### 3 基于火山岩氧化系数的喷发环境判别

#### 3.1 数据资料的获取

样品资料获取时应遵循以下5项基本原则：1) 目的性，根据研究的目的，从不同区域不同盆地中获取数据资料；2) 代表性，获取的样品数据应能代表或涵盖超基性到

酸性的火山岩岩石类型；3) 真实性，获取的数据资料要能代表岩石的真正成分，即测试分析的样品基本新鲜，未遭受强烈风化破碎或者强烈蚀变；4) 数据规范性，地球化学成分测试结果，至少包括SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、CaO、MnO、MgO、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>等11项常量元素以及LOI(烧失量)等数据；5) 确定性，获取的火山岩样品必须有如淬碎构造、枕状构造、“红顶绿底”示底现象、风化壳、生物化石、冰川火山等有效判别标志，能明确证实是陆上还是水下喷发沉积环境。

基于上述原则，研究调研从21篇文献(梁洪天, 1992; Gasparon et al., 1993; 夏国礼, 1993; 崔学军等, 1999; 丁天府等, 1999; 莫江平, 1999; Trua et al., 1999; 刘红涛, 2001; Peccerillo et al., 2003; 马雪等, 2005; 吴明仁等, 2006; Peccerillo et al., 2007; 梁浩等, 2009; 赵军等, 2013; 张渝金等, 2016; 何衍鑫等, 2017; 庞仁俊, 2017; 贺亲志等, 2018; 刘建清等, 2020)中获取了世界范围不同盆地202件火山岩样品地球化学数据(表4); 岩性包含玄武岩、安山岩、玄武安山岩、安山玄武岩、英安岩、流纹岩、霏细岩、珍珠岩、细碧岩、火山角砾岩、熔结凝灰岩、凝灰岩和沉凝灰岩等(表4, 图1); 已知水下火山岩样品74件, 陆上火山岩样品128件(表4)。基性火山岩SiO<sub>2</sub>含量介于45.01%~51.84%, 中性火山岩SiO<sub>2</sub>含量介于52.03%~63.00%, 酸性火山岩SiO<sub>2</sub>含量介于63.58%~80.32%(图1), 从基性到中酸性岩石样品数据丰富, 具有广泛研究意义。

### 3.2 喷发环境判别图的建立

基于获取的202件样品数据，充分考虑岩浆性质(岩石酸度)、流体活动(蚀变和充

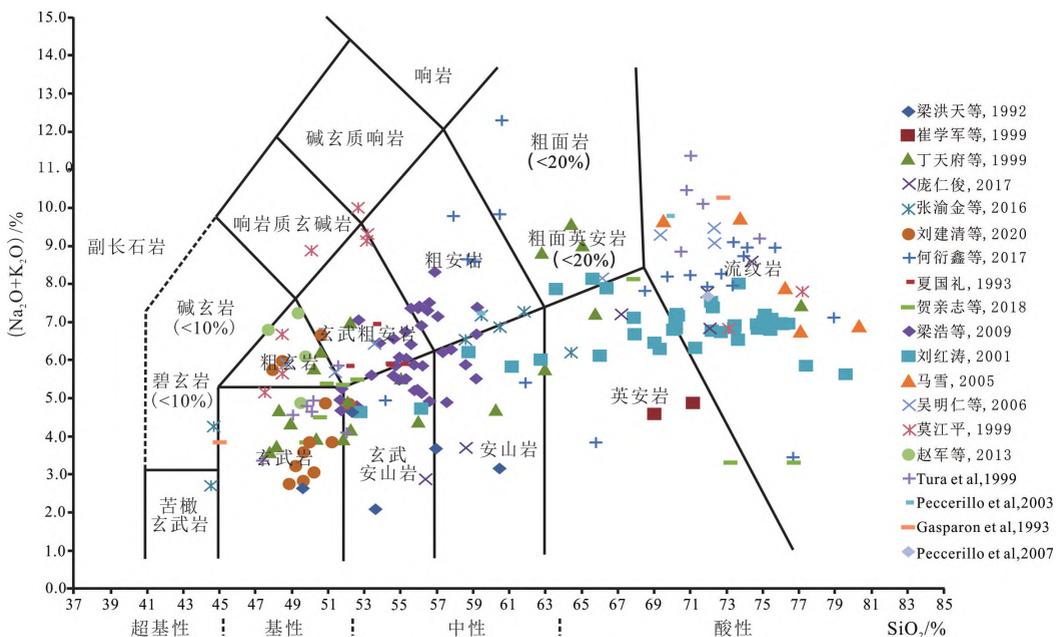


图1 调研获取的202件火山岩样品TAS分类图解

Fig. 1 The TAS classification diagram of obtained 202 pieces of volcanic samples

表4 研究调研不同地区202件火山岩样品数据资料

Table 4 Investigating information origins from 202 different volcanic sample datas

地区	火山岩岩性	样品/件	喷发环境	有效判别依据	文献
湘东南汝城拉张盆地	玄武岩、玄武质沉火山角砾岩、凝灰质角砾岩、玄武岩角砾、沉凝灰岩	5	水下	湖泊相沉积环境	梁洪天(1992)
赣北乐平地区	细碧岩、流纹质凝灰岩、角砾质沉凝灰岩	2	水下	细碧-辉绿结构、似层状产出的基性-酸性熔岩	崔学军等(1999)
东准噶尔纸房地区晚古生代	辉绿岩、玄武岩、安山玄武岩、玄武安山岩、安山岩、橄榄玄武岩、安山质英安岩、流纹质熔凝灰岩、霏细岩、英安岩	20	水下	层状凝灰岩、生物礁灰岩、火山碎屑质风暴岩	丁天府等(1999)
青海省治多县多彩一当江一带	流纹质晶屑凝灰岩、流纹岩、片理化流纹岩、英安岩、片理化英安岩	6	水下	似层状产出, 附近安山岩见枕状构造	庞仁俊(2017)
大兴安岭北段扎兰屯地区	玄武岩、玄武安山岩、安山岩、英安岩	7	水下	丰富的腕足类、珊瑚、苔藓虫及海百合茎等化石	张渝金等(2016)
四川雷波峨眉山	玄武岩	12	陆上	主要为灰绿-铁灰色致密块, 杏仁体为绿泥石	刘建清等(2020)
准噶尔盆地西北缘下二叠统	熔结凝灰岩、流纹岩、熔结角砾凝灰岩、珍珠岩、火山角砾熔岩、凝灰岩	13	水下	下伏湖相泥质粉砂岩沉积、富含大量黄铁矿、珍珠岩和熔积岩、可见淬碎结构及冷凝边	何衍鑫等(2017)
	凝灰岩、玄武岩、安山玄武岩、火山角砾岩	7	陆上	相邻沉积环境为陆相凝灰质砂岩沉积; 见红色凝灰岩	
冀北地区	橄榄玄武质淬碎碎屑岩	3	水下	淬碎结构、碳酸盐等胶结物	夏国礼(1993)
	橄榄拉斑玄武岩	2	陆上	“红顶”现象、并未淬碎	
白松-奔都地区晚三叠世	玄武岩、流纹岩、玄武安山岩、粗安岩、玄武质粗面安山岩	8	水下	滨岸至陆棚的环境、地化特征: 所有样品 $FeO > Fe_2O_3$	贺亲志等(2018)
三塘湖盆地卡拉岗组	玄武岩、安山岩、角砾玄武岩	37	陆上	风化壳、岩心常见沿裂缝或岩石颗粒周围红色的氧化边	梁浩等(2009)
塔里木祁漫塔格	英安岩、流纹岩、玄武安山岩、粗面英安岩、安山岩	38	陆上	生物化石和植物碎片、成层性差	刘红涛(2001)
新疆巴里坤县三塘湖北卡拉岗组	霏细岩、球泡流纹岩、流纹岩、斜长流纹岩	5	陆上	生物化石和植物碎片、常见红顶绿底特征、喷发间隙常见风化壳	马雪等(2005)
西天山塔尔得套地区乌郎组	橄榄玄武岩、玄武粗安岩、钠长粗面岩、石英粗面岩、碱性流纹岩	7	陆上	陆上火山岩、地化特征: 所有样品 $Fe_2O_3 > FeO$	吴明仁等(2006)
新疆阿吾拉勒陆相火山岩	玄武岩、安山玄武岩、流纹岩	9	陆上	陆相火山岩一碎屑岩沉积建造	莫江平(1999)
新疆阿吾拉勒山西段下二叠统	玄武岩	4	陆上	见磁铁矿、气孔-杏仁构造及其发育	赵军等(2013)
埃塞俄比亚裂谷	玄武岩、橄榄粗安岩、流纹质熔结凝灰岩、流纹质响岩、碱流岩、玄武岩	12	陆上	历史记录	Trua et al.(1999)
埃塞俄比亚裂谷	粗安岩、流纹岩	3	陆上	历史记录	Peccerillo et al.(2003, 2007)
埃塞俄比亚裂谷	流纹岩、玄武岩	2	陆上	历史记录	Gasparon et al.(1993)

填作用)、构造成因环境、风化淋滤作用、成岩后表生作用等对氧化系数的影响，建立及改进判识图与判识标准，具体步骤如下：

(1) 风化淋溶程度定量分析。风化淋滤作用对陆上火山岩氧化系数有着明显的影响，建立判别图时，对128件陆上火山岩样品风化淋溶程度需进行定量分析。研究应用Irfan (1996, 1999)提出的能很好反映火山岩风化淋溶程度变化元素淋溶聚集参数硅铝系数  $SA = SiO_2/Al_2O_3$  来定量分析128件陆上样品风化淋溶强度的大小；投点表明，SA值大都在3以上(图2)，表示岩石样品新鲜或微风化淋溶，具有喷发环境指示意义。

(2) 流体活动(蚀变和充填作用)的影响程度分析。全岩分析烧失量(LOI)高的样品一般认为是由于熔岩受到强烈的蚀变交代作用所导致(Gurenko et al., 2006)，通常来说烧失量(LOI) > 6.0% 就算比较高了。对选取的陆上和水下202件火山岩样品烧失量进行分本，投点表明，LOI值最大5.94，未超过6(图3)，表示岩石样品未遭受强烈的蚀变交代作用，能客观反映火山喷发沉积环境。

(3) 成岩后表生作用的影响。成岩后表生作用主要是风化作用对岩石氧化系数的影响，而表生条件下的风化作用是一系列如水解、溶解、酸化等共同作用的结果，样品选取时依据新鲜岩石的岩石化学标准  $H_2O < 2\%$ ， $CO_2 < 0.5\%$ (梁浩等, 2009)，将遭受严重风化的样品剔除。

(4) 构造成因环境区分。调研获取的202件火山岩样品中基性火山岩122件，酸性火山岩80件。受资料的限制，未收集到微量元素和稀土元素分析测试数据，仅获取了主量元素测试数据；因此，122件中基性火山岩构造环境采用里特曼—戈蒂里指数 ( $\log\sigma - \log\tau$ )图解， $\sigma$  值为里特曼的组合指数， $\sigma = (K_2O + Na_2O)^2 / (SiO_2 - 43)$ ； $\tau$  为戈蒂里指数， $\tau = (Al_2O_3 - Na_2O) / TiO_2$ 。投点结果表明，27件落在了A区，为非构造带成因环境火山岩(板块内部稳定构造区)；71件落在了B区，为造山带成因环境火山岩(岛弧及活动大陆边缘区)；24件落在了C区(图4)，为A、B区火山岩演化派生的碱性岩。80件

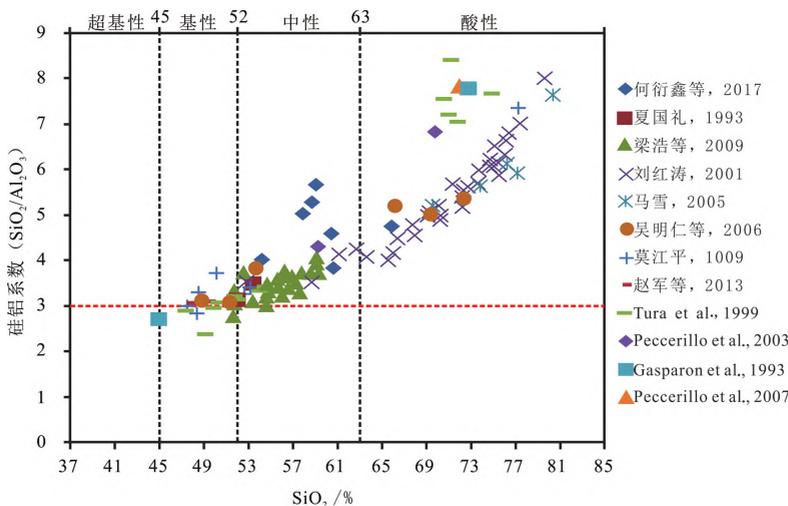


图2 128件陆上火山岩样品硅铝系数SA值分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of SA value of silicon aluminum coefficient of 128 volcanic rocks on land

酸性火山岩采用  $R_1$ 、 $R_2$ (阳离子数,  $R_1 = [4Si - 11(Na+K) - 2(Fe+Ti)]$ ,  $R_2 = Al + 2Mg + 6Ca$ ) 在  $R_1$ - $R_2$ 图解上投点, 主要落在地幔分异花岗岩区(图5), 指示为地幔分异的产物。完成构造成因环境的区分与识别。

(5) 岩浆性质(岩石酸度)的校正。由图4可知, 由于落在A、C区数据点太少, 不

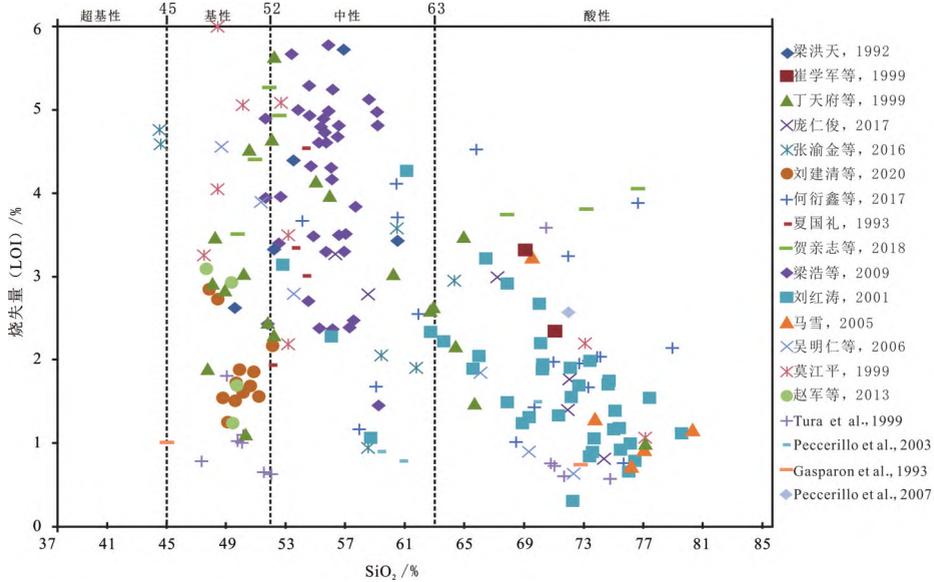


图3 202件火山岩样品烧失量LOI值分布特征

Fig. 3 LOI distribution characteristics of 202 volcanic samples

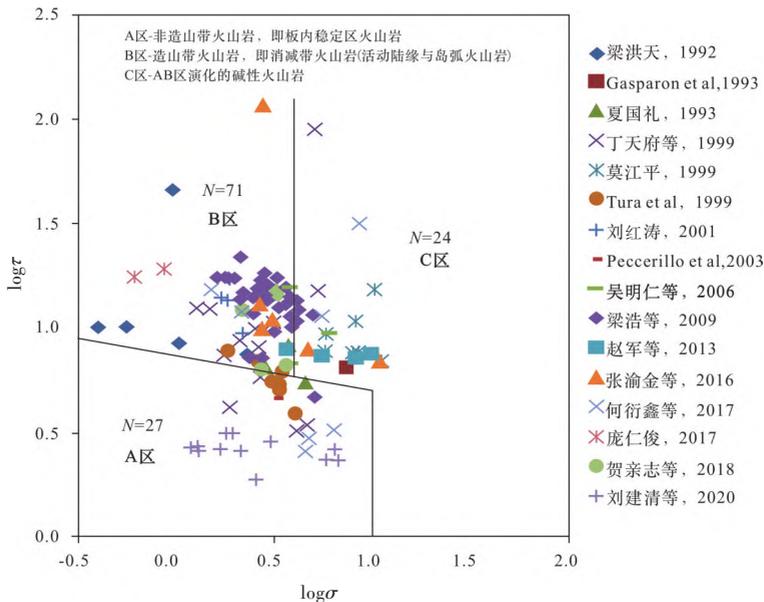


图4 122件中基性火山岩样品里特曼—戈蒂里图解

Fig. 4 Rittman-Gotiri diagram of 122 volcanic samples

具有广泛研究意义；因此，仅对数据较丰富B区71件中基性火山岩样品和80件酸性火山岩样品酸度进行校正，建立喷发沉积环境判识图。以1989年国际地科联(IUGS)火成岩分类学分委会推荐的火成岩分类方案SiO<sub>2</sub>含量<45%、45%~52%、52%~63%、>63%为阈值，表征出基性岩到酸性岩，如图6a横坐标岩石酸度即SiO<sub>2</sub>含量介于44.54%~62.81%，表征基性、中性2类岩浆性质的火山岩，图6b横坐标岩石酸度介于63%~80.32%，表征酸性岩岩浆性质的火山岩，完成酸度的校正。

(6) 图坐标系统的建立。以岩石酸度即SiO<sub>2</sub>重量为横坐标，以氧化系数Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+FeO)值为纵坐标，建立经岩浆酸度及构造成因环境校正的氧化系数分布特征的火山喷发环境判别图。

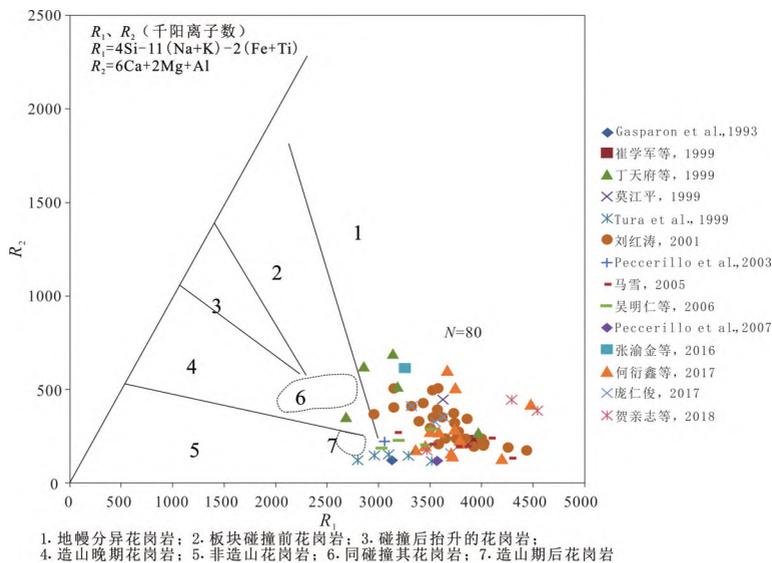


图5 80件酸性火山岩样品R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub>图解

Fig. 5 R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub> diagram of 80 acidic volcanic rock samples

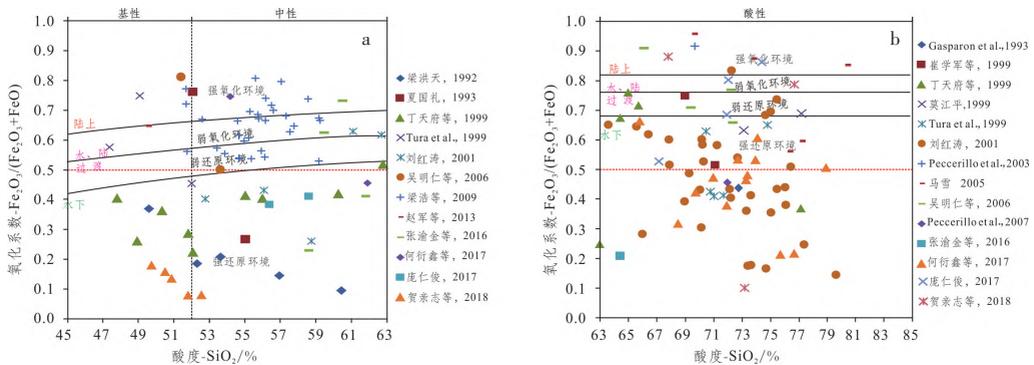


图6 基于氧化系数的B区俯冲带火山岩喷发环境判别图

a. 基于中基性火山岩氧化系数的喷发沉积环境判识; b. 基于酸性火山岩氧化系数的喷发沉积环境判识

Fig. 6 Discrimination map of volcanic eruption environment in subduction zone of block B based on oxidation coefficient

(7) 图氧化—还原环境区划分。依据B区71件火山岩样品数据, 已知水下火山岩样品40件, 已知陆上火山岩样品31件。在酸度—氧化系数坐标系统中投点, 可看出纵坐标氧化系数均介于0~1, 以已知40件水下火山岩样品氧化系数值的最大值和已知31件陆上火山岩样品氧化系数的最小值为控制点, 界定出中基性陆上强氧化环境区与水下强还原环境区界线, 两界线形态之间为弱还原—弱氧化复杂环境系统(可能是频繁水、陆交替环境), 取其中间值界定出弱还原和弱氧化环境区, 完成纵向上氧化—还原环境的分区(图6a); 同理, 完成80件酸性火山岩的喷发环境判识图的氧化—还原环境分区(图6b)。

(8) 图喷发环境判别标准。陆上喷发陆上沉积以及水下喷发陆上沉积环境多表现为强氧化特征, 水下喷发水下沉积及陆上喷发水下沉积环境多表现为强还原特征, 弱氧化—弱还原环境为频繁水、陆交替区(图6a、图6b)。本次形成的活动陆缘与岛弧环境中基性火山岩与地幔分异酸性火山岩喷发环境判识的氧化系数最值见表5。

表5 消减带中基性岩火山岩与地幔分异酸性火山岩氧化系数最值

Table 5 The maximum oxidation coefficient of basic volcanic rocks and mantle differentiated acidic volcanic rocks in subduction zone

构造成因环境		B区消减带环境(图6a)				地幔分异(图6b)		喷发沉积环境
		基性火山岩		中性火山岩		酸性火山岩		
岩石酸度 (岩浆性质)		氧化系数 最大	氧化系数 最小	氧化系数 最大	氧化系数 最小	氧化系数 最大	氧化系数 最小	
氧化还原 环境分区	强氧化环境	1.0	0.62	1.0	0.70	1.0	0.82	陆上
	弱氧化环境	0.62	0.53	0.70	0.62	0.82	0.76	水、陆 过渡相
	弱还原环境	0.53	0.42	0.62	0.53	0.76	0.68	
	强还原环境	0.42	0	0.53	0	0.68	0	水下

$$\text{氧化系数 } OX = \text{Fe}_2\text{O}_3 / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$$

## 4 应用实例

三塘湖盆地中部马朗凹陷石炭系火山大面积分布, 火山岩喷发成因环境复杂, 既有陆上喷发成因, 又有水下喷发成因和频繁水、陆过渡复杂成因。目前对其研究主要集中在岩石共生矿物特征、结构构造特征、蚀变特征、风化壳、示底构造及储层孔隙与裂缝发育特征等方面(刘俊田, 2009; 梁浩等, 2009, 2011; 王盛鹏等, 2012; 朱卡等, 2012; 陈薇等, 2013), 而利用元素地球化学方法来判识喷发沉积环境的研究, 尚未有报道。本文运用建立及改进的基于氧化系数分布特征的火山喷发环境判别图标准, 对上石炭统卡拉岗组(C<sub>3k</sub>)火山岩喷发沉积环境进行判别, 并与前人基于该区火山岩其他有效判别标志得到的结果对比检验。

### 4.1 三塘湖盆地马朗凹陷地质概况

三塘湖盆地中部的马朗凹陷(图7a)是一个向北东隆升的前陆凹陷, 晚石炭世为多

火山活动的滨浅海环境。目前，已发现和探明的油气藏主要位于上石炭统卡拉岗组和哈尔加乌组火山岩体中。以往基于火山岩岩石学、年代学和地球化学研究，结合区域内的地质记录及地层岩性组合(梁浩等，2009；王岚等，2010；邹才能等，2011；侯连华等，2012；李玮等，2012)，认为三塘湖盆地石炭系火山岩总体形成于大陆边缘构造环境，其卡拉岗组( $C_2k$ )火山岩形成于火山岛弧建造环境。

马朗凹陷地区由老至新依次出露上石炭统巴塔玛依内山组( $C_2b$ )、哈尔加乌组( $C_2h$ )、卡拉岗组( $C_2k$ )，上二叠统芦苇沟组( $P_2l$ )和条湖组( $P_2t$ )，中-上三叠统克拉玛依组( $T_2k$ )，下侏罗统八道湾子组( $J_1b$ )和三工河组( $J_1s$ )、中侏罗统西山窑组( $J_2x$ )和头屯河组( $J_2t$ )、上侏罗统齐古组( $J_3q$ )，下白垩统( $K_1$ )和第三系( $N$ )等，各层组间大都以不整合接触(图7b)。上石炭统哈尔加乌组( $C_2h$ )至卡拉岗组( $C_2k$ )发育了一套海相、陆相以及海陆交互的熔岩、火山碎屑岩与沉火山碎屑岩沉积，岩性组合复杂多变(图7b)。

### 4.2 样品采集与测试

研究共采集三塘湖盆地马朗凹陷牛圈湖—牛东构造带钻遇上石炭统卡拉岗组( $C_2k$ ) M19、M23、M24 (井位位置见图7)共39件火山岩样品；采用压片法—X射线荧光光谱法(XRF)测定了 $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 、 $CaO$ 、 $Na_2O$ 、 $K_2O$ 、 $MgO$ 、 $MnO$ 、 $P_2O_5$ 、 $TiO_2$ 等11项氧化物及烧失量(LOI)，采用重铬酸钾容量法测定了FeO，测定分析结果见表6；相对标准样品的偏差，高含量氧化物低于2%，低含量氧化物低于10%。

### 4.3 火山岩构造成因环境与喷发沉积环境判别

采集的39件火山岩样品岩性为中基性的玄武岩和安山岩，在里特曼—戈蒂里指数

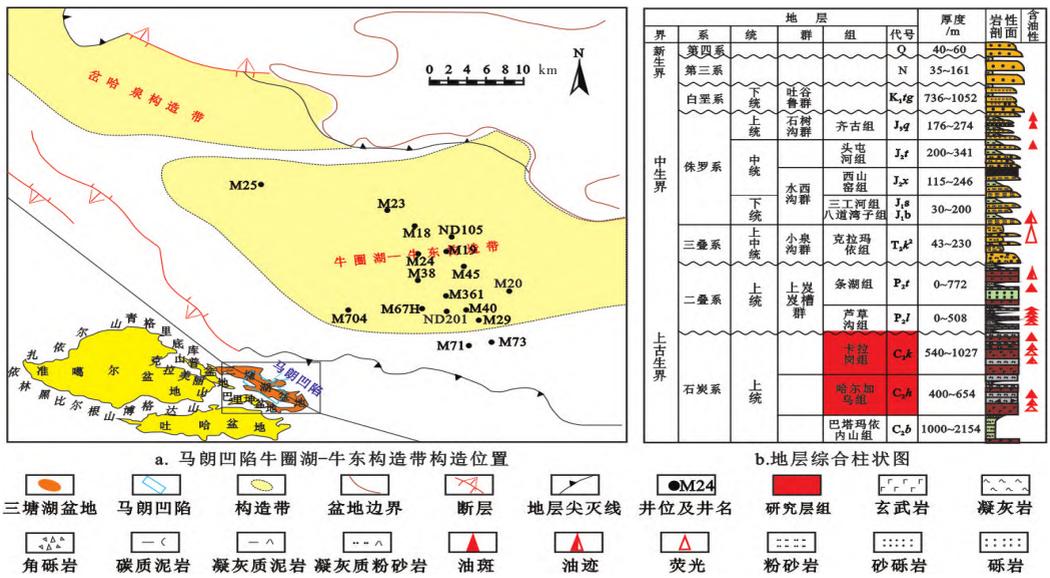


图7 马朗凹陷牛圈湖—牛东构造带构造位置与地层综合柱状图

Fig. 7 Structural position of Niuquanhu-Niudong structural belt in Malang Sag and comprehensive stratigraphic histogram

表 6 卡拉岗组 39 件火山岩样品主量元素/%测试结果及氧化系数(OX)统计

Table 6 Statistics of test results and oxidation coefficient of major elements/% in 39 volcanic samples in Kalagang Formation

井号	岩性	层组	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	烧失量(LOI)/%	OX
M19	玄武岩	C <sub>2</sub> k	54.94	3.94	2.66	17.21	4.29	1.77	5.65	4.44	0.90	0.12	0.45	3.43	0.60
	玄武岩		55.75	4.41	2.05	16.93	4.10	1.09	6.81	4.31	0.95	0.09	0.44	3.24	0.68
	玄武岩		55.29	4.71	2.06	17.07	4.11	1.39	7.03	3.82	0.93	0.15	0.45	2.33	0.70
	玄武岩		59.24	4.21	2.12	15.79	4.36	3.01	4.83	2.73	0.92	0.12	0.45	1.41	0.67
	玄武岩		57.33	4.36	2.06	16.32	4.23	1.97	6.13	3.65	0.94	0.09	0.43	2.35	0.68
	安山岩		56.14	3.34	2.83	16.08	5.11	1.79	4.69	3.45	0.85	0.09	0.52	4.12	0.54
	安山岩		55.77	4.19	2.06	16.31	4.28	1.58	5.46	3.64	0.83	0.08	0.32	4.56	0.67
	安山岩		53.87	3.43	2.77	15.64	5.31	1.11	5.40	3.91	0.91	0.09	0.88	4.96	0.55
	安山岩		54.68	4.44	2.77	16.39	4.72	0.83	5.93	4.78	0.88	0.15	0.37	4.28	0.62
	安山岩	54.70	3.29	2.83	16.84	4.66	1.18	5.89	3.58	0.89	0.15	0.36	4.89	0.54	
	安山岩	55.63	3.53	3.18	15.52	5.64	1.69	4.06	3.75	0.82	0.07	0.46	4.68	0.53	
	安山岩	55.92	3.31	2.57	16.60	4.45	0.77	6.35	3.07	0.89	0.13	0.38	5.74	0.56	
	安山岩	53.42	3.87	2.89	17.11	4.86	0.73	6.48	3.70	0.85	0.15	0.35	5.63	0.57	
	安山岩	55.94	3.00	2.77	16.05	5.69	1.64	4.64	2.91	0.85	0.07	0.58	4.94	0.52	
	安山岩	55.25	3.95	2.57	16.41	4.67	2.05	5.52	3.24	0.82	0.10	0.49	4.57	0.61	
	安山岩	55.37	3.34	2.89	16.28	4.97	1.05	5.29	3.99	0.71	0.13	0.33	4.75	0.54	
	安山岩	56.62	3.51	1.80	15.57	5.71	1.76	5.37	2.81	0.74	0.08	0.34	4.78	0.66	
	安山岩	55.59	7.25	1.74	15.51	4.75	1.66	4.68	3.62	0.62	0.08	0.28	4.85	0.81	
	安山岩	56.08	4.42	2.19	15.27	5.62	1.74	4.26	3.63	0.90	0.10	0.60	4.26	0.67	
安山岩	56.19	5.06	1.80	15.09	4.40	1.43	5.21	3.70	0.70	0.09	0.39	5.20	0.74		

续表 6

井号	岩性	层组	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	烧失量(LOI)/%	OX
M19	安山岩	C <sub>2</sub> k	57.05	5.27	1.35	15.74	4.85	2.28	4.44	3.50	0.70	0.09	0.27	3.46	0.80
	安山岩		56.51	4.04	1.61	15.57	5.97	1.31	4.60	3.43	0.95	0.09	0.32	4.63	0.72
	玄武岩		51.71	6.00	2.32	15.49	3.35	1.89	7.54	6.04	1.26	0.16	0.35	4.85	0.72
	玄武岩		52.61	6.42	3.19	14.12	4.02	0.76	7.15	6.98	1.42	0.21	0.41	3.35	0.67
	安山岩		57.57	3.69	2.19	17.26	4.04	0.83	7.10	3.86	0.76	0.16	0.26	2.42	0.63
	安山岩		56.16	4.34	2.19	17.36	4.09	1.02	7.20	4.27	0.77	0.12	0.27	2.32	0.66
	角砾玄武岩		51.69	5.73	1.71	18.42	2.19	2.75	6.70	5.53	0.89	0.08	0.23	3.89	0.77
	玄武岩		56.89	4.73	1.80	15.89	6.14	2.16	3.24	3.79	0.85	0.08	0.24	3.25	0.72
	玄武岩		52.67	5.30	3.15	14.80	5.90	1.12	5.84	4.70	1.90	0.11	0.77	3.90	0.63
	玄武岩		58.58	3.98	1.42	15.64	3.76	2.10	4.94	2.85	0.81	0.09	0.43	5.09	0.74
M23	玄武岩		56.61	4.19	1.80	16.64	3.35	1.56	6.74	4.04	0.77	0.10	0.25	3.45	0.70
	玄武岩		51.74	4.52	3.54	16.93	3.52	1.13	8.45	5.50	1.15	0.15	0.52	2.39	0.56
	杏仁状玄武岩		50.84	5.11	2.57	15.95	2.65	0.84	8.90	5.10	1.05	0.14	0.47	6.65	0.67
	杏仁状玄武岩		50.99	4.67	2.57	15.65	2.42	0.57	9.25	5.37	1.07	0.14	0.46	6.92	0.65
	杏仁状玄武岩		57.78	3.81	2.09	15.49	4.57	1.70	4.37	4.90	0.71	0.10	0.47	3.79	0.65
	杏仁状玄武岩		59.17	3.84	1.87	14.59	4.00	1.47	4.52	4.44	0.61	0.09	0.22	4.93	0.67
M24	玄武岩		54.59	4.29	2.19	18.01	4.17	1.40	7.04	4.41	0.82	0.11	0.40	2.66	0.66
	杏仁状玄武岩		54.65	3.11	2.70	15.75	5.35	1.18	6.19	3.87	0.74	0.13	0.35	5.24	0.54
	杏仁状玄武岩		59.17	2.37	2.12	14.94	4.92	1.73	5.22	2.98	1.40	0.10	0.22	4.77	0.53
	玄武岩														

图解上(图8)，39件火山岩分析样品点基本都落入B区，即消减带区，这与前人对三塘湖盆地形成的构造背景分析结果是一致的(梁浩等，2009；王岚等，2010；邹才能等，2011；侯连华等，2012；李玮等，2012)。从测试数据来看，SiO<sub>2</sub>含量为50.84%~59.24%，FeO/MgO = 0.31~0.95 < 2.0，K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O = 0.15~0.69 (绝大部分 < 0.6)，K<sub>2</sub>O质量分数主要在0.57%~3.01%间，平均为1.46%，属于低钾火山岩，而低钾(K<sub>2</sub>O质量分数平均为1.60%)为岛弧火山岩的典型特征。

统计计算表明，39件火山岩样品氧化系数  $OX = Fe_2O_3 / (Fe_2O_3 + FeO) = 0.52 \sim 0.81 > 0.5$  (表6)；在经构造成因环境及酸度校正的氧化系数判别图解上，55.26%的样品落在了强弱氧化—弱氧化复杂环境区，44.74%的样品落在了强氧化环境区(图9)，揭示该组火山岩以陆上喷发陆上沉积和频繁水、陆过渡复杂环境沉积成因为主。

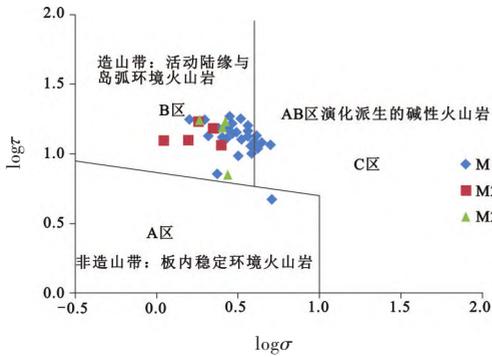


图8 马朗凹陷卡拉岗组39件火山岩样品里特曼—戈蒂里图解

Fig. 8 Ritman-Gotiri diagram of 39 volcanic rock samples from Kalagang Formation in Malang sag

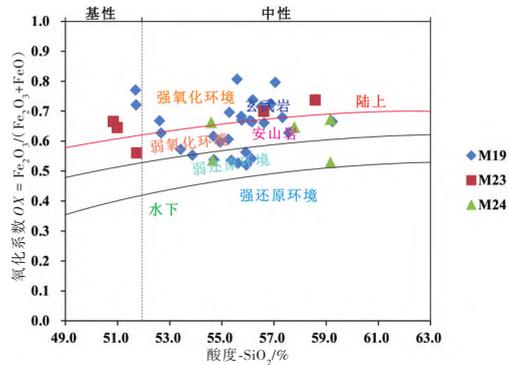


图9 马朗凹陷卡拉岗组火山岩氧化系数分布特征及喷发环境判别

Fig. 9 Distribution characteristics of oxidation coefficient and identification of eruption environment of volcanic rocks in Kalagang Formation of Malang sag

#### 4.4 火山岩喷发沉积环境判别结果的检验

基于火山岩氧化系数判识的卡拉岗组火山喷发沉积环境结果是否准确可信，需要与其他有效地质判别依据得出的结果对比检验。朱卡等(2012)相关研究指出，反映卡拉岗组(C<sub>2</sub>k)喷发环境的典型标志有共生岩石(化石)、不整合及风化壳、柱状节理，如马19井(井位位置见图7)在卡拉岗组(C<sub>2</sub>k)揭露风化壳，安山岩见示底构造(图10)；此外，M19井周边井揭露的沉凝灰岩中就见到了植物叶茎化石，柱状解理的发育均为陆上喷发堆积火山岩的典型标志。

对比结果表明，本次运用建立及改进的基于氧化系数分布特征的判别图判识的卡拉岗组火山岩喷发沉积环境，与朱卡等(2012)基于其他有效判别依据得出的喷发环境结果相符合。该地球化学方法具有普适性，不受地质时代及区域地质条件的限制，可应用于不同盆地不同地质时代火山岩的喷发环境的判别研究中。



图 10 反映卡拉岗组喷发环境的典型标志(据朱卡, 2012)

a. 安山质火山角砾岩, 非熔结结构, 发育自碎缝, M19井, 1 566.3 ~ 1 566.4 m; b. 风化壳, 风化裂缝发育, M19井, 1 546.94 ~ 1 547.13 m; c. 示底构造, 安山岩, 位于风化壳之上, M19井, 1 548.77 m

Fig. 10 Typical symbols of eruption environment of Kalagang Formation (after Zhu, 2012)

## 5 结 论

(1) 陆上沉积火山岩(包括陆上喷发陆上沉积和水下喷发陆上沉积)和下水沉积火山岩(陆上喷发水下沉积和下水喷发水下沉积)在岩石类型、岩石颜色、岩性组合特征、结构与构造特征、共生岩石及化石组合、蚀变特征、脱玻化、充填及胶结物、储集空间类型、产状以及与下伏地层接触关系等方面有着显著区别。

(2) 研究采用变价元素铁的氧化物质量分数之比, 即  $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+FeO)$  作为火山岩氧化系数, 并充分考虑岩浆性质(岩石酸度)、构造成因环境、风化淋滤作用、流体活动(蚀变和充填作用)、成岩后表生作用等影响因素, 提出了各因素合理校正或规避思路, 建立及改进了传统意义上基于氧化系数分布特征的火山喷发沉积环境判别图。

(3) 运用改进的判别图版标准, 对新疆三塘湖盆地马朗凹陷地区上石炭统卡拉岗组火山岩喷发环境进行判别, 结果表明卡拉岗组火山岩以陆上喷发陆上沉积和频繁水、陆过渡相复杂环境沉积成因为主。

(4) 基于改进的火山岩氧化系数分布特征的喷发沉积环境判识标准, 识别的马朗凹陷地区上石炭统卡拉岗组火山岩喷发环境, 与前人基于卡拉岗组火山岩中共生岩石组合及化石、不整合及风化壳、柱状节理、示底构造等有效判别标志得出的结果相符合。该地球化学方法具有普适性, 可应用于不同盆地不同地质时代火山岩的喷发环境判识研究中。

## 参 考 文 献

- 陈 昌. 2017. 辽河拗陷大洼地区火山岩特征及储层识别. 石油地质与工程, 31(4): 35-39.  
Chen Chang. 2017. Volcanic rock characteristics and reservoir identification in Dawa area of Liaohe Depression. *Petroleum Geology and Engineering*, 31(4): 35-39.
- 陈 福, 朱笑青. 1987. 表生风化淋滤作用的演化和为沉积矿床提供矿质能力的研究. 地球化学, 16(4): 341-350.  
Chen Fu and Zhu Xiaqing. 1987. The evolution of supergene weathering and its ability of supplying ore-forming elements. *Geochimica*, 16(4): 341-350.
- 陈建琪, 纪艳红. 2010. 三塘湖盆地马朗凹陷火山岩油藏特征. 新疆石油地质, 31(5): 471-474.  
Chen Jianqi and Ji Yanhong. 2010. Characteristic of volcanic reservoir in Malang Sag in Santanghu Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 31(5): 471-474.

- 陈启南. 2020. 齐家潜山北段中生界火山岩风化壳特征及分布预测. *录井工程*, 31(2): 113-117.
- Chen Qi'nan. 2020. Characteristics and distribution prediction of Mesozoic volcanic weathering crust in the northern section of Qijia buried hill. *Logging Engineering*, 31(2): 113-117.
- 陈薇, 司学强, 智凤琴等. 2013. 三塘湖盆地卡拉岗组火山岩储层成岩作用. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 35(4): 35-42.
- Chen Wei, Si Xueqiang, Zhi Fengqin et al. Diagenesis of volcanic rock reservoir in Kalagang Formation of Carboniferous, Santanghu Basin. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 35(4): 35-42.
- 初宝杰, 向才富, 姜在兴等. 2004. 济阳拗陷西部惠民凹陷第三纪火山岩型油藏成藏机理研究. *大地构造与成矿学*, 28(2): 201-208.
- Chu Baojie, Xiang Caifu, Jiang Zaixing et al. 2004. Study on forming mechanism of the tertiary igneous rock type oil reservoir in Huiming Depression in the east part of Jiyang Sag. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(2): 201-208.
- 崔学军, 钟发芽, 陈鲁根. 1999. 乐平地区中元古代海相火山岩的特征及火山活动特点. *江西地质*, 13(1): 23-28.
- Cui Xuejun, Zhong Faya and Chen Lugen. 1999. Marine volcanic rocks in Middle Proterozoic and characteristics of volcanism in the Leping area. *Jiangxi Geology*, 13(1): 23-28.
- 丁天府, 吴玉门, 唐智. 1999. 纸房地区晚古生代海相火山岩组合特征及构造环境. *新疆地质*, 17(1): 73-82.
- Ding Tianfu, Wu Yumen and Tang Zhi. 1999. Combine characteristics and tectonic setting of the marine volcanic rocks of East Junggar orogenic belt. *Xinjiang Geology*, 17(1): 73-82.
- 郭靖. 2012. 黔西玄武岩地区滑坡易发性评价及玄武岩风化程度判别研究(硕士学位论文). 长沙: 中南大学. 1-82.
- Guo Jing. 2012. Landslide Susceptibility Assessment and Evaluation of Weathering Intensity of Basalt in Western Guizhou (Master's Thesis). Changsha: Central South University. 1-82.
- 贺亲志, 贾志泉, 骆志红. 2018. 白松—奔都地区晚三叠世义敦岛弧带火山岩岩石地球化学特征及成因. *四川地质学报*, 38(2): 194-201.
- He Qinzi, Jia Zhiquan and Luo Zhihong. 2018. Petrogeochemistry and genesis of Late Triassic volcanic rock in the Baisong-Bendu region, Yidun Island Arc. *Acta Geologica Sichuan*, 38(2): 194-201.
- 何青林, 陈康, 冉崎等. 2020. 基于低频重构的强非均质性火山岩储层预测——以简阳地区二叠系火山岩储层为例. *天然气勘探与开发*, 43(2): 16-22.
- He Qinglin, Chen Kang, Ran Qi et al. 2020. Predicting strongly heterogeneous volcanic reservoirs based on low-frequency reconstruction: An example from Permian volcanic reservoirs, Jianyang area, Sichuan Basin. *Natural Gas Exploration and Development*, 43(2): 16-22.
- 何衍鑫, 鲜本忠, 牛花朋等. 2017. 基于氧化系数的火山喷发环境判别: 以准噶尔盆地西北缘下二叠统为例. *高校地质学报*, 23(4): 737-749.
- He Yanxin, Xian Benzong, Niu Huapeng et al. 2017. Discrimination of volcanic eruption environment using oxidation index: A case study of Lower Permian volcanic rocks in northwestern margin of Junggar Basin. *Geological Journal of China Universities*, 23(4): 37-749.
- 侯连华, 王京红, 邹才能等. 2011. 火山岩风化体储层控制因素研究——以三塘湖盆地石炭系卡拉岗组为例. *地质学报*, 85(4): 557-568.
- Hou Lianhua, Wang Jinghong, Zou Caineng et al. 2011. Controlling factors of weathering volcanic reservoir: An example from the Carboniferous Kalagang Formation in Santanghu Basin. *Acta Geologica Sinica*, 85(4): 557-568.
- 侯连华, 邹才能, 刘磊等. 2012. 新疆北部石炭系火山岩风化壳油气地质条件. *石油学报*, 33(4): 533-540.
- Hou Lianhua, Zou Caineng, Liu Lei et al. Geological essential elements for hydrocarbon accumulation within Carboniferous volcanic weathered crusts in northern Xinjiang, China. *Acta Petroli Sinica*, 33(4): 533-540.
- 胡文婷, 柳成志, 赵辉等. 2011. 松辽盆地徐家围子断陷火山岩成岩作用及其对储层质量的影响. *科学技术与工程*, 11(6): 1176-1181.
- Hu Wenting, Liu Chengzhi, Zhao Hui et al. The diagenesis of volcanic rocks and its effects on the reservoir quality in Xujiaweizi fault depression, Soliao Basin. *Science Technology and Engineering*, 11(6): 1176-1181.
- 黄剑霞. 1987. 厦门港湾氧化—还原沉积环境的划分. *台湾海峡*, 6(1): 27-32.
- Huang Jianxia. 1987. Differentiation of oxidation-reduction sedimentary environment of the Xiamen Harbour. *Taiwan Strait*,

- 6(1): 27-32.
- 焦 鑫, 柳益群, 杨 晚等. 2017. 水下火山喷发沉积特征研究进展. *地球科学进展*, 32(9): 926-936.
- Jiao Xin, Liu Yiqun, Yang Wan et al. 2017. Progress on sedimentation of subaqueous volcanic eruption. *Advances in Earth Science*, 32(9): 926-936.
- 李光云, 毛世权, 陈凤来等. 2010. 三塘湖盆地马朗凹陷卡拉岗组火山岩油藏主控因素及勘探方向. *中国石油勘探*, 15(1): 11-15.
- Li Guangyun, Mao Shiquan, Chen Fenglai et al. 2010. Key controlling factors and exploration direction of volcanic reservoir in Kalangang Formation of Malang Sag in Santanghu Basin. *China Petroleum Exploration*, 15(1): 11-15.
- 李 军. 2008. 准噶尔盆地西北缘石炭系火山岩油藏储层分布规律及控制因素研究(博士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京). 1-150.
- Li Jun. 2008. The Study on Distribution Characteristics and Controlling Factors of Carboniferous Volcanic Reservoir of the Northwestern Margin, Junggar Basin (PhD Thesis). Beijing: China University of Geosciences (Beijing). 1-150.
- 李明连, 蓝恒春. 2014. 岩浆冷凝成岩阶段的氧逸度与华南热液型铀矿的成矿类型. *铀矿地质*, 30(3): 168-171.
- Li Minglian and Lan Hengchun. 2014. Discussion on the best acquisition season of AMT and man-made signals function in the field. *Uranium Geology*, 30(3): 168-171.
- 李 玮, 柳益群, 董云鹏等. 2012. 新疆三塘湖地区石炭纪火山岩年代学、地球化学及其大地构造意义. *中国科学: 地球科学*, 42(11): 1716-1731.
- Li Wei, Liu Yiqun, Dong Yunpeng et al. 2012. The geochemical characteristics, geochronology and tectonic significance of the Carboniferous volcanic rocks of the Santanghu area in northeastern Xinjiang, China. *Science China Earth Sciences*, 56: 1318-1333.
- 梁 浩, 苟红光. 2009. 三塘湖盆地卡拉岗组火山岩岩石化学特征及构造环境. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 24(5): 23-28+35.
- Liang Hao and Gou Hongguang. 2009. Petrochemical characteristics and structural environment of the volcanic rock of Kalangang Formation in Santanghu Basin. *Journal of Xi'an University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 24(5): 23-28.
- 梁 浩, 苟红光, 王志矿等. 2011. 三塘湖盆地马朗凹陷卡拉岗组火山岩岩性及岩相特征研究. *沉积学报*, 29(6): 1156-1163.
- Liang Hao, Gou Hongguang, Wang Zhikuang et al. 2011. Characteristics of lithology and lithofacies of Kalangang volcanic rocks in Malang Depression, Santanghu Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(6): 1156-1163.
- 梁洪天. 1992. 汝城拉张盆地基性火山碎屑岩建造. *湖南地质*, 11(3): 209-215.
- Liang Hongtian. 1992. The basic pyroclastic rock formation in Rucheng tensional basin. *Hunan Geology*, 11(3): 209-215.
- 刘红涛. 2001. 祁漫塔格陆相火山岩: 塔里木陆块南缘印支期活动大陆边缘的岩石学证据. *岩石学报*, 17(3): 337-351.
- Liu Hongtao. 2001. Qimantage terrestrial volcanics: Petrologic evidence of active continental margin of Tarim Plate during Late Indo-China Epoch. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 337-351.
- 刘建清, 何 利, 胡宇瀚等. 2020. 四川雷波峨眉山玄武岩岩石学及地球化学特征. *地球学报*, 41(3): 325-336.
- Liu Jianqing, He Li, Hu Yuhang et al. 2020. The petrological and geochemical characteristics of Emei Shan basalt in Leibo County, Sichuan Province. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(3): 325-336.
- 刘俊田. 2009. 三塘湖盆地牛东地区石炭系卡拉岗组火山岩风化壳模式与识别. *天然气地球科学*, 20(1): 57-62.
- Liu Juntian. 2009. Weathering crust model and recognition of carboniferous Kalangang Formation (C<sub>2</sub>k) volcanic rocks in Niudong Block, Santanghu Basin. *Natural Gas Geoscience*, 20(1): 57-62.
- 刘 蕾, 陈中红. 2018. 准噶尔盆地中拐凸起石炭系火山岩油气成藏特征. *河南科技*, 36(3): 64-70.
- Liu Lei and Chen Zhonghong. 2018. Hydrocarbon accumulation characteristics of Carboniferous volcanic rocks in Zhongguai Uplift, Junggar Basin. *Henan Science*, 36(3): 64-70.
- 路占军, 娜 仁, 崔俊峰等. 2011. 内蒙古二连盆地洪浩尔舒特凹陷白垩系火山岩储集层. *古地理学报*, 13(2): 201-208.
- Lu Zhanjun, Na Ren, Cui Junfeng et al. 2011. Volcanic rock reservoir of the Cretaceous in Homghaoershute Sag in Erlian

- Basin. *Journal of Palaeogeography*, 13(2): 201-208.
- 马雪, 冯成贵, 虞卫东. 2005. 新疆巴里坤县三塘湖北卡拉岗组火山岩特征. *新疆地质*, 23(3): 234-238.
- Ma Xue, Feng Chenggui and Yu Weidong. 2005. Kalagang lava formation North Santanghu Lake, Balikun, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 23(3): 234-238.
- 马云涛, 龚庆杰, 韩东昱等. 2015. 安山岩风化过程中元素行为——以豫西熊耳山地区为例. *地质与勘探*, 51(3): 545-554.
- Ma Yuntao, Gong Qingjie, Han Dongyu et al. 2015. Behavior of major trace elements during weathering of andesite: A case study of the Xiongershan region western Henan Province. *Geology and Exploration*, 51(3): 545-554.
- 莫江平. 1999. 新疆阿吾拉勒陆相火山岩地质地球化学特征. *地质论评*, 45(增刊): 1111-1115.
- Mo Jiangping. 1999. Geological and geochemical characteristics of continental volcanic rocks in Awulale area, Xinjiang. *Geological Review*, 45(suppl.): 1111-1115.
- 邱家骧. 1985. 火山岩中 $Fe_2O_3$ 、 $FeO$ 的调整与方法. *地质科技情报*, 4(2): 32-39.
- Qiu Jiaxiang. 1985. The adjustment and method of  $Fe_2O_3$ 、 $FeO$  in volcanic rocks. *Geological Science and Technology Information*, 4(2): 32-39.
- 邱家骧. 1991. 应用岩浆岩岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社. 1-4.
- Qiu Jiaxiang. 1991. Applied Volcanic Rocks. Wuhan: Chinese University of Geoscience Publishing House. 1-4.
- 庞仁俊. 2017. 青海省治多县多彩—当江一带海相火山岩特征及其与铜多金属矿化的关系(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学. 1-65.
- Pang Renjun. 2017. Geological Characteristics and Copper-Polymetallic-Mineralization Studies of Marine Volcanic in Duocai-Dangjiang Ziduo Qianghai Province (Master's Thesis). Chengdu: Chengdu University of Technology. 1-65.
- 单玄龙, 李吉焱, 陈树民等. 2014. 陆相水下火山喷发作用及其对优质烃源岩形成的影响: 以松辽盆地徐家围子断陷营城组为例. *中国科学: 地球科学*, 44(12): 2637-2644.
- Shan Xuanlong, Li Jiyang, Chen Shumin et al. 2013. Subaqueous volcanic eruptions in continental facies and their influence on high quality source rocks shown by the volcanic rocks of a faulted depression in Northeast China. *Science China Earth Sciences*, 56(11): 1926-1933.
- 唐华风, 王璞珺, 边伟华等. 2020. 火山岩储层地质研究回顾. *石油学报*, 41(12): 1744-1773.
- Tang Huafeng, Wang Pujun, Bian Weihua et al. 2020. Review of volcanic reservoir geology. *Acta Petrolei Sinica*, 41(12): 1744-1773.
- 王君, 朱如凯, 郭宏莉等. 2010. 火山岩风化壳储层发育模式——以三塘湖盆地马朗凹陷石炭系火山岩为例. *岩石学报*, 26(1): 217-226.
- Wang Jun, Zhu Rukai, Guo Hongli et al. 2010. Weathered crust volcanic reservoir: A case study on Malang Depression, Carboniferous, Santanghu Basin, NW, China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1): 217-226.
- 王岚, 李文厚, 林潼等. 2010. 陆上、水下喷发成因火山岩储层发育特征和成藏控制因素对比分析——以三塘湖盆地石炭系火山岩油藏为例. *地质科学*, 45(4): 1088-1097.
- Wang Lan, Li Wenhui, Lin Tong et al. 2010. A comparative analysis of submarine eruptive and subaerial eruptive volcaniclastic reservoir on characteristics of reservoir and reservoir forming dominated factor: Taking Carboniferous volcaniclastic reservoir in Santanghu Basin as an example. *Chinese Journal of Geology*, 45(4): 1088-1097.
- 王盛鹏, 林潼, 孙平等. 2012. 两种不同沉积环境下火山岩储层成岩作用研究. *石油实验地质*, 34(2): 145-142.
- Wang Shengpeng, Lin Tong, Sun Ping et al. 2012. Influences of diagenetic effects on volcanic rock reservoirs under two different sedimentary environments. *Petroleum Geology & Experiment*, 34(2): 145-142.
- 王璞珺, 冯志强. 2008. 盆地火山岩: 岩性·岩相·储层·气藏·勘探. 北京: 科学出版社. 99-102.
- Wang Pujun and Feng Zhiqiang. 2008. Basin Volcanic Rocks: Lithology, Lithofacies, Reservoir, Gas Reservoir and Exploration. Beijing: Science Press. 99-102.
- 魏翔宇, 高有峰, 魏琴等. 2017. 蚀变对中基性火山岩储层的控制作用: 以松辽盆地徐家围子断陷下白垩统营城组为例. *世界地质*, 36(2): 541-551.
- Wei Xiangyu, Gao Youfeng, Wei Qin et al. 2017. Controlling of alteration on intermediate and basic volcanic reservoirs:

- A case study of Lower Cretaceous Yingcheng Formation of Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin. *Global Geology*, 36(2): 541-551.
- 文 龙, 李 亚, 易海永等. 2019. 四川盆地二叠系火山岩岩相与储层特征. 天然气工业, 39(2): 17-27.
- Wen Long, Li Ya, Yi Haiyong et al. 2019. Lithofacies and reservoir characteristics of Permian volcanic rocks in the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 39(2): 17-27.
- 吴明仁, 楼法生, 宋志瑞等. 2006. 西天山塔尔得套地区乌郎组地球化学特征和构造环境. 东华理工学院学报, 29(3): 217-224.
- Wu Mingren, Lou Fasheng, Song Zhirui et al. 2006. Tectonic setting and geochemistry of the Wulang Formation in Taerdetao, West Tianshan. *Journal of East China Institute of Technology*, 29(3): 217-224.
- 吴小奇, 刘德良, 李振生. 2010. 卡拉麦里缝合带后碰撞背景与火山岩油气藏关系探讨. 地质科学, 45(4): 1098-1110.
- Wu Xiaoqi, Liu Deliang and Li Zhensheng. 2010. Preliminary discussion on the relationship between post-collisional setting and volcanic reservoirs for oil and gas around Kalamaili suture zone. *Chinese Journal of Geology*, 45(4): 1098-1110.
- 吴聿元, 周荔青. 2007. 松辽盆地主要断陷大中型油气田形成分布特征. 石油实验地质, 29(3): 231-237.
- Wu Yuyuan and Zhou Liqing. 2007. Formation and distribution features of large-medium oil-and-gas fields in main fault depressions in the Songliao Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 29(3): 231-237.
- 夏国礼. 1993. 冀北地区陆相玄武质碎屑岩的特征及成因. 中国区域地质, (3): 223-228.
- Xia Guoli. 1993. Features and genesis of terrestrial basaltic vitroclastic rocks in northern Hebei. *Regional Geology of China*, (3): 223-228.
- 鄢全树, 张平阳, 石学法等. 2017. 海底熔岩风化作用及其地质意义. 海洋科学进展, 35(3): 369-381.
- Yan Quanshu, Zhang Pingyang, Shi Xuefa et al. 2017. Weathering of seafloor lavas and its geological significance. *Advances in Marine Science*, 35(3): 369-381.
- 杨艳芳. 2011. 火山岩储层储集空间演化、成岩作用及成岩相研究——宋辽盆地徐家围子下白垩统营城组火山岩(硕士学位论文). 西安: 西北大学. 1-96.
- Yang Yanfang. 2011. Research on Volcanic Reservoir Space Evolution, Diagenesis and Diagenetic Facies: The Lower Cretaceous Volcanic Rocks of Yingcheng Formation, Xujiaweizi, Songliao Basin (Master's Thesis). Xi'an: Northwest University. 1-96.
- 张 艳, 舒 萍, 王璞珺等. 2007. 陆上与水下喷发火山岩的区别及其对储层的影响——以松辽盆地营城组为例. 吉林大学学报(地球科学版), 37(6): 1259-1265.
- Zhang Yan, Shu Ping, Wang Pujun et al. 2007. Comparison between subaerial and subaqueous volcanic rocks and the reservoir significance: Taking Yingcheng Formation in Songliao Basin as example. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 37(6): 1259-1265.
- 张渝金, 张 超, 吴新伟等. 2016. 大兴安岭北段扎兰屯地区晚古生代海相火山岩年代学和地球化学特征及其构造意义. 地质学报, 90(10): 2706-2720.
- Zhang Yujin, Zhang Chao, Wu Xinwei et al. 2016. Geochronology and geochemistry of Late Paleozoic marine volcanic from the Zhalantun area in northern Dahinggan Mountains and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 90(10): 2706-2720.
- 张玉银. 2018. 溶蚀作用对火山岩有效储层形成的控制作用——以松辽盆地徐家围子断陷营城组为例. 石油与天然气地质, 39(3): 587-593.
- Zhang Yuyin. 2018. Controlling effect of dissolution on valid volcanic reservoir formation: A case study of the Yingcheng Formation in the Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin. *Oil & Gas Geology*, 39(3): 587-593.
- 赵 军, 张作衡, 张 贺等. 2013. 新疆阿吾拉勒山西段下二叠统陆相火山岩岩石地球化学特征、成因及构造背景. 地质学报, 87(4): 525-541.
- Zhao Jun, Zhang Zuoheng, Zhang He et al. 2013. Geochemistry, petrogenesis and tectonic settings of the Lower Permian series volcanic rocks from western Awulale Mountain, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 87(4): 525-541.
- 赵泽辉, 孙 平, 罗 霞等. 2014. 松辽断陷盆地火山岩大气田形成条件与勘探实践. 现代地质, 28(3): 592-603.

- Zhao Zehui, Sun Ping, Luo Xia et al. 2014. Conditions of giant volcanic gas field in the deep fault depressions of Songliao Basin and its exploration practice. *Geoscience*, 28(3): 592-603.
- 朱卡, 李兰斌, 梁浩等. 2012. 三塘湖盆地石炭系火山岩喷发环境及储层特征研究. *石油天然气学报*, 34(3): 49-54.
- Zhu Ka, Li Lanbin, Liang Hao et al. 2012. The eruption environment and reservoir characteristics of carboniferous volcanic rocks in Sangtangu Basin. *Journal of Oil and Gas Technology*, 34(3): 49-54.
- 邹才能, 侯连华, 陶士振等. 2011. 新疆北部石炭系大型火山岩风化体结构与地层油气成藏机制. *中国科学: 地球科学*, 41(11): 1613-1626.
- Zou Caineng, Hou Lianhua, Tao Shizhen et al. 2011. Hydrocarbon accumulation mechanism and structure of large-scale volcanic weathering crust of the Carboniferous in northern Xinjiang, China. *Science China Earth Science*, 55: 221-235.
- Batchelor R A and Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology*, 48(1-4): 43-55.
- Dyar M D, Naney M T and Swanson S E. 1987. Effects of quench methods on  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  ratios: A Mössbauer and wet-chemical study. *American Mineralogist*, 72(7-8): 792-800.
- Gasparon M, Innocenti F, Manetti P et al. 1993. Genesis of the Pliocene to recent bimodal mafic-felsic volcanological and geochemical constraints. *Journal of African Earth Sciences*, 17(2): 145-165.
- Gurenko A A, Hoerni E K A, Hauff F et al. 2006. Major, trace element and Nd-Sr-Pb-O-He-Ar isotope signatures of shield stogelavas from the central and western Canary Islands: Insights into mantle and crustal processes. *Chemical Geology*, 233(1): 75-112.
- Hekinian R. 1982. Petrology of the Ocean Floor. Amsterdam: Elsevier B.V. 1-393.
- Honnorez J. 1981. The aging of the oceanic crust at low temperature. *The Sea*, 7: 525-587.
- Irfan T Y. 1996. Mineralogy, fabric properties and classification of weathered granites in Hong Kong. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 29: 5-35.
- Irfan T Y. 1999. Characterization of weathered volcanic rocks in Hong Kong. *Journal of Engineering Geology*, 32: 317-348.
- Janney P and Castillo P. 1996. Basalts from the Central Pacific Basin: Evidence for the origin of Cretaceous igneous complexes in the Jurassic western Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 101: 2875-2893.
- Janney P and Castillo P. 1997. Geochemistry of Mesozoic Pacific mid-ocean ridge basalt: Constraints on melt generation and the evolution of the Pacific upper mantle. *Journal of Geophysical Research*, 102(B3): 5207-5229.
- Le Maitre R W. 1976. The chemical variability of some common igneous rocks. *Journal of Petrology*, 17(4): 589-598.
- Matthews D H. 1971. III. Weathered and Metamorphosed Basalts. Altered basalts from Swallow Bank, an abyssal hill in the NE Atlantic, and from a nearby seamount. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 268(1192): 551-571.
- Peccerillo A, Barberio M R, Yirgu G et al. 2003. Relationships between mafic and peralkaline acidmagmatism in continental rift settings: A petrological, geochemical and isotopic study of the Gedemsa volcano, central Ethiopian rift. *Journal of Petrology*, 44(11): 2003-2032.
- Peccerillo A, Donati C, Santo A P et al. 2007. Petrogenesis of silicic peralkaline rocks in the Ethiopian rift: Geochemical evidence and volcanological implications. *Journal of African Earth Sciences*, 48(2-3): 161-173.
- Rittmann A. 1973. Stable Mineral Assemblages of Igneous Rocks: A Method of Calculation. Berlin: Springer Berlin Heidelberg. 1-264.
- Robert W E, Chadwick W W Jr, Baker E T et al. 2006. Long-term eruptive activity at a submarine arc volcano. *Nature*, 441(7092): 494-497.
- Trua T, Deniel C and Mazzuoli R. 1999. Crustal control in the genesis of Plio-Quaternary bimodal magmatism of the Main Ethiopian Rift (MER): Geochemical and isotopic Ar, Nd, Pb evidence. *Chemical Geology*, 155(3-4): 201-231.

## Geochemistry discriminance study of subaerial and underwater eruptive depositional environment of volcanic rocks

Liu Decheng<sup>1,2,3</sup> Chen Yajun<sup>4</sup> Wu Hongmei<sup>4</sup> Ma Qiang<sup>5</sup> He Xinghua<sup>6,7</sup> Zhang Huan<sup>8</sup>

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083; 2. Beijing Geology and Mineral Exploration and Developing Group Co., Ltd, Beijing 100050; 3. Beijing Institute of Geological Hazard Prevention, Beijing 100120; 4. China United Academy of Petroleum Sciences, Beijing 100101; 5. Research Institute of Exploration and Development, Yumen Oilfield Company, PetroChina, Jiuquan, Gansu 735019; 6. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081; 7. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 8. Academy of Geological Environment Engineering, 519 Team of North China Geological Exploration Bureau, Baoding, Hebei 071051)

### Abstract

There are obvious differences in volcanic reservoir characteristics between onshore and underwater eruptive sedimentary environments. Accurate identification of volcanic eruptive sedimentary environment is an important basis for volcanic reservoir evaluation. In this study,  $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+FeO)$  ratio is used as the oxidation coefficient of volcanic rocks, and the influence factors such as rock acidity, tectonic genetic environment, weathering and leaching, alteration and metasomatism are fully considered. This paper establishes and improves the discrimination chart of eruptive sedimentary environment based on the oxidation coefficient of volcanic rocks, and obtains the discrimination standard of oxidation coefficient of volcanic rocks (active continental margin and island arc volcanic rocks) on land and underwater eruptive sedimentary environment in the subduction zone of block B. Based on the improved chart and standard, the volcanic eruption environment of the upper Carboniferous karang formation ( $C_2k$ ) in Malang Sag, Santanghu Basin, Xinjiang was identified. The results show that 39 volcanic samples are mainly continental eruptive sedimentary volcanic rocks and volcanic rocks originated from the complex environment of water land transition. The practical application results are consistent with those obtained by Zhuka et al. Based on typical indicators such as paragenetic rocks and fossil assemblages, weathering crust and bottom showing structure of karang Formation volcanic rocks. The improved discriminant map based on factor analysis method has universal significance in indicating eruption environment, and is not limited by geological age and regional geological conditions.

**Keywords** Volcanic rocks, Eruptive depositional environment, Oxidation coefficient, Malang Sag, Karang Formation