

火山岩陆上与水下喷发环境的氧化系数判别方法

伍宏美¹, 陈亚军¹, 孟鹏飞², 马强³, 宋小勇¹, 何兴华^{4,5}, 于家义², 何伯斌²

1. 北京中科联华石油科学研究院, 北京 100101

2. 中国石油吐哈油田分公司勘探开发研究院, 新疆哈密 839009

3. 中国石油玉门油田分公司勘探开发研究院, 甘肃酒泉 735019

4. 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

5. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 火山喷发沉积期的古地理环境是控制火山岩油气储层发育的关键因素之一。目前对陆上喷发沉积火山岩与水下喷发沉积火山岩的判别研究主要集中在岩性组合特征、结构与构造特征、蚀变特征、产状、孔隙及裂缝发育特点等方面, 而利用火山岩地球化学特征来反映和记录火山喷发环境的研究尚未引起注意。研究使用 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})$ 作为火山岩氧化系数, 充分考虑岩石酸度、风化淋滤作用、溶蚀蚀变作用、构造背景等因素的影响, 改进了传统意义上基于火山岩氧化系数的火山喷发环境判别标准。在新疆三塘湖盆地马朗凹陷上石炭统实际应用结果表明, 卡拉岗组火山岩喷发沉积环境复杂, 以陆上氧化环境为主, 频繁水陆交替的复杂环境也存在, 哈尔加乌组火山岩喷发沉积环境相对单一, 主要沉积保存于水下还原环境; 与前人基于本区上石炭统火山岩共生岩石与化石组合、风化壳以及火山岩夹持的部分泥岩微量元素比值特征等有效判别依据得到的喷发环境结果是相符的, 且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喷发沉积古地理环境的判别研究中。

关键词 陆上沉积火山岩; 水下沉积火山岩; 氧化系数; 古地理环境; 马朗凹陷; 上石炭统

第一作者简介 伍宏美, 女, 1994年出生, 硕士, 工程师, 构造地质学, E-mail: wuhongmay@outlook.com

通信作者 陈亚军, 男, 工程师, E-mail: cjun0707@163.com

中图分类号 P595 **文献标志码** A

0 引言

近年来, 火山岩作为一类非常规油气储层及新的油气勘探领域, 在国内外取得了一系列较为重要的油气发现, 表明其中蕴藏着丰富的油气资源。对我国已发现和开发的火山岩油气田统计表明, 从基性的气孔、碎裂玄武岩^[1-5], 到中性的自碎、气孔—杏仁状安山岩^[1-4,6]和气孔或多孔熔渣(碱性)粗面岩^[1-4,7], 再到酸性的流纹岩^[1-4,8-9], 以及凝灰岩、火山角砾岩^[1-4,10-12]和沉凝灰岩^[13], 都能作为有效的储集岩类。诸多学者研究认为风化淋滤作用^[14-16]、火山岩岩相^[17-18]及成岩作用^[19-21]是控制储层发育形成的关键, 但这些认识多以陆上喷发沉积形成的火山岩储集层为研究对象, 却很少关注或重视过水下喷发水下沉积的火山岩储集体。陆上与水下两种不同沉积环境形成的火山岩储集体的储集空间类型、特征, 以及发育机理大相径庭^[19], 油气成

藏规律^[22]以及对优质烃源岩^[23]形成的影响亦差异巨大; 因此, 准确判别火山喷发沉积古地理环境是火山岩油气储层评价研究的一项重要依据。陆上与水下由于氧含量的原因^[24-25], 火山岩中变价元素铁的氧化物含量(Fe_2O_3 、 FeO)及其比值($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})$)不同; 陆上地表氧化环境使得低价态铁(Fe^{2+})易氧化为高价态铁(Fe^{3+}), 表现为 Fe_2O_3 较为富集的特征; 水下还原环境使得低价态铁(Fe^{2+})难以被氧化, 表现为 FeO 含量较高的特征^[24-27]。诚然, 影响火山岩 Fe_2O_3 、 FeO 含量的不只是火山喷发沉积古地理环境, 还有岩浆性质(酸度)^[28-29]、风化淋滤作用^[14-16]、成岩溶蚀蚀变作用^[30-31]、构造背景^[32-33]等因素。因此, 运用火山岩氧化系数来判别火山喷发沉积古环境时, 需要对这些干扰因素进行合理校正或规避, 这不仅是火山岩岩石化学特征方面研究的热点, 更是难点。

收稿日期: 2020-11-06; 收修改稿日期: 2021-04-28

基金项目: 中国石油天然气股份公司重大科技专项(2016E-0203)[Foundation: Major Science and Technology Project of PetroChina, No. 2016E-0203]

研究使用 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})$ 作为火山岩氧化系数,在充分考虑前述几项关键影响因素下,改进了传统意义上基于火山岩氧化系数的喷发环境判别图,并对判别结果的准确性做了检验与评估分析。以新疆东疆地区三塘湖盆地马朗凹陷上石炭统火山岩为应用实例,应用改进的图版对上石炭统卡拉岗组(C_2k)和哈尔加乌组(C_2h)火山岩喷发沉积环境进行了判别,并与前人基于该区火山岩共生岩石与化石组合、风化壳等有效判别依据得到的结果对比检验。研究丰富了含油气盆地火山岩储层评价地质理论,改进的方法和形成的图版,为火山岩喷发沉积古地理环境的判定提供了一种更为科学合理的方法。

1 火山岩氧化系数的计算方法及影响因素

1.1 火山岩氧化系数常见的几种计算方法

火山岩氧化系数常见的计算方法和表达方式众多:Rittmann^[34]在火山岩的稳定矿物组合研究中将氧化度用 $\text{OX}=\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+}+\text{Fe}^{2+}+\text{Mn})$ (原子数)来表示,Le Maitre^[28]在几种常见火山岩的化学变化研究中用 $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ (百分重量比值)表示氧化率,邱家骧^[24]在火山岩中 Fe_2O_3 、 FeO 的调整与方法研究中指出 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 比值是反应火山岩氧化程度的常用参数,可称为氧化系数、氧化度、氧化率等。黄剑霞^[35]在厦门港湾氧化—还原沉积环境的划分研究中,以 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值0.8、1.0和1.5为界,将0.8以下划为强还原环境区,1.5往上划为强氧化环境区,0.8~1.0和1.0~1.5之间为弱还原环境、弱氧化环境区;单玄龙等^[23]据此划分标准,计算分析松辽盆地徐家围子断陷营城组火山岩氧化比($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$)均低于0.8,推测该区火山岩成岩过程中可能受到水下强还原环境的影响。李明连等^[26]在岩浆的氧逸度与岩石的氧化系数研究中,指出岩石的氧化系数(K)是一个可用以反映岩石形成时氧化还原环境条件的参数,有2种计算方式:1) $K=\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{3+}+\text{Fe}^{2+})$;2) $K=\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})$;何衍鑫等^[36]据此表达式计算分析了准噶尔盆地西北缘下二叠统火山岩喷发沉积环境。

尽管火山岩氧化系数计算表达式多样,但都遵循化学平衡原理(与化学反应有关)。单玄龙等^[23]运用黄剑霞^[35]提出的传统判别方法,认为火山岩 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 比值在0.8以上为陆上沉积,其下为水下沉积;何

衍鑫等^[36]运用李明连等^[26]提出的 $K=\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})$ 参数,计算得出陆上、水下两种不同沉积环境下基性到酸性火山岩的氧化系数最大值;前者划分没有考虑岩浆性质(酸度)、风化淋滤作用、埋藏溶蚀蚀变作用、构造背景等影响因素,后者虽然考虑了部分影响因素,但图版建立时获取的数据较少,且对图版判别结果的准确性未做检验与评估分析,是否具有普遍适用意义有待商榷。为提高判别结果的科学性和准确性,研究使用Fe的不同价态氧化物质量分数之比来计算火山岩氧化系数;采用黄剑霞^[35]、李明连等^[26]的定义和计算方式,沿用Rittmann^[34]提出的代号,记作为OX,即 $\text{OX1}=\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$, $\text{OX2}=\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})$ 。

1.2 火山岩氧化系数的影响因素及校正思路

1.2.1 影响火山岩氧化系数的因素

火山喷发沉积环境介质(空气和水),岩浆性质(酸度),风化淋滤作用,埋藏溶蚀蚀变作用,构造环境等均可能对火山岩氧化系数造成影响。

喷发沉积环境介质(空气和水):海水(湖水)中含氧量远远低于陆上空气介质,因此,水下沉积保存的火山岩,通常以 $\text{FeO}>\text{Fe}_2\text{O}_3$ 为特征;且水体越深,还原性越强,岩石氧化系数 $[\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})]$ 值越低;Dyar *et al.*^[25]利用淬火方法对 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值的影响研究重融喷发实验结果即是证实。

岩浆性质(酸度):Le Maitre^[28]在对几种常见火山岩地球化学特征差异分析研究中指出,岩浆酸度与碱度不同,岩石中 Fe_2O_3 、 FeO 的含量及其比值有着明显差异(表1);具体表现为随岩石酸度的增大 Fe_2O_3 的含量增高,岩石氧化系数 $[\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 或 $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})]$ 也随之增大(表1)。

埋藏溶蚀蚀变作用:与油气相关的火山岩基本都遭受了较深的埋藏,一般情况下埋深愈小,喷发愈强者, Fe_2O_3 越高, FeO 越低少,岩石氧化系数 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})$ 值愈大^[24];岩石在埋藏成岩演化过程中遭受强烈的溶蚀蚀变作用后,一般也造成 Fe^{3+} 的富集, Fe^{2+} 减少, $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值增大。

构造环境:岩浆活动总是与区域构造环境的变动密切相关,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^[32];一般在相同碱度条件下,岛弧造山带比板块内部 Fe_2O_3 含量高,而 FeO 含量低。

表生风化淋滤作用:对于陆相地表火山喷发来说,在喷发间歇期或之后,火山岩暴露于表生环境,

表1 几种常见火山岩氧化系数变化统计结果(%) (据 Le Maitre^[28])Table 1 Oxidation index changes for several common volcanic rocks (%) (after Le Maitre^[28])

火山岩岩性	样品数/个	K ₂ O	Na ₂ O	全碱含量	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	OX1	OX2	σ	火山岩 岩石系列
玄武岩	3 504	1.10	2.91	4.01	49.20	3.79	7.13	0.53	0.35	2.59	σ<3.3, 钙碱性
拉斑玄武岩	202	0.43	2.37	2.80	49.58	3.38	8.03	0.42	0.30	1.19	
安山岩	2 578	1.62	3.48	5.10	57.96	3.27	4.04	0.81	0.45	1.74	
英安岩	639	2.17	3.79	5.96	65.01	2.43	2.30	1.06	0.51	1.61	
流纹英安岩	100	3.00	3.67	6.67	65.55	2.13	2.03	1.05	0.51	1.97	
流纹岩	667	4.30	3.55	7.85	72.82	1.47	1.16	1.27	0.56	2.07	
粗面玄武岩	161	2.55	3.96	6.51	49.21	3.69	6.18	0.60	0.37	6.82	σ=3.3-9, 碱性
橄榄粗安岩	70	2.46	4.73	7.19	50.52	4.88	5.86	0.83	0.45	6.87	
粗安岩	230	3.21	4.98	8.19	58.15	3.26	3.21	1.02	0.50	4.43	
粗面岩	530	4.98	5.47	10.45	61.23	2.99	2.29	1.31	0.57	5.99	
碧玄岩	160	1.96	3.55	5.51	44.30	3.94	7.50	0.53	0.34	23.35	σ>9, 过碱性
碱玄岩	85	4.49	3.69	8.18	47.80	4.12	5.22	0.79	0.44	13.94	
响岩	340	5.24	7.79	13.03	56.19	2.79	2.03	1.37	0.58	12.87	

注: 全碱含量=K₂O+Na₂O, OX1=Fe₂O₃/FeO, OX2=Fe₂O₃/(Fe₂O₃+FeO), σ=[ω(K₂O+Na₂O)]/[ω(SiO₂-43)]。

受到大气、淡水及火山喷发间歇期饱和和CO₂气雨水的风化淋滤,形成多套风化淋滤作用面。在风化淋滤作用过程中,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Fe、Al等元素)与不迁移元素表现出累积的现象^[37-40];长期风化淋滤必然使得火山岩原生矿物中大部分铁元素被释放出来,Fe²⁺(低价态)被氧化为Fe³⁺(高价态),Fe³⁺很快水解氧化成氢氧化物Fe(OH)₃,脱水后形成Fe₂O₃,并因其自身的化学惰性残留下来^[37,41-42];因此,表生风化淋滤作用的结果必然造成火山岩中惰性Fe³⁺离子的富集,Fe²⁺减少,Fe³⁺/Fe²⁺比值增大。

1.2.2 影响因素校正或规避思路

埋藏作用对氧化系数的影响主要体现在埋藏深度上,若火山岩遭受过深埋藏,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,岩矿发生变化,可能引起岩石Fe₂O₃与FeO含量的改变。因此,受埋藏成岩作用影响较大的样品氧化系数对喷发环境的指示意义不大;在薄片资料充分的情况下,可选取蚀变相对较弱的样品做化学分析;另外,可根据烧失量值(LOI)来分析,一般认为高烧失量是由于熔岩受到强烈的蚀变作用所导致。

次生变化对氧化系数的影响主要体现在溶蚀、风化和充填胶结等作用上,遭受强烈溶蚀及充填胶结严重的火山岩,其氧化系数对喷发沉积环境的记录已不太确切。采样分析时要选择较为新鲜的样品,通过薄片鉴定筛选剔除溶蚀蚀变、充填矿化较强的样品;同时,考虑到有杏仁体发育的火山岩其杏仁

体充填或半充填物的影响,在采样时需敲击观察新鲜面气孔—杏仁体是否发育。

表生风化淋滤作用对氧化系数的影响主要体现在喷发间歇期或之后暴露于地表的火山岩,对于高强度、长时间遭受表生风化淋滤作用改造的火山岩,其氧化系数对喷发沉积环境的指示意义不大,不再是反映古地理环境演化的良好信息载体。有2种简要方法可以合理规避:其一是分析化验的岩石要选用新鲜岩石,新鲜岩石的岩石化学标准^[43]是ω(H₂O)<2%,ω(CO₂)<0.5%,风化破碎者不予取样;其二是地球化学参数分析法,常用的判断表生风化淋滤作用强弱的地球化学参数有淋溶系数、风化势能指数和化学蚀变指数等^[38-40,44],王盛鹏等^[19]在相关研究中对风化淋滤强度大小定量分析时应用了化学蚀变指数CIA(CIA=(Al₂O₃/(Al₂O₃+Na₂O+K₂O+CaO))×100%),CIA指数大于0.5,表示火山岩遭受过明显的表生风化淋滤作用,大于0.6时,表示火山岩岩石受风化淋滤作用十分强烈。此外,侯连华等^[14]在三塘湖盆地石炭系卡拉岗组(C₂k)火山岩风化体储层控制因素研究中得出,风化淋滤作用改造后的火山岩孔吼直径明显大于未遭风化淋滤火山岩的孔吼直径,未经风化淋滤火山岩孔吼直径只存在单峰特征,而风化淋滤后的火山岩孔吼直径具有双峰分布特征。

构造背景对火山岩演化系数的影响主要体现在板内环境和岛弧环境形成火山岩地球化学特征的差异上,中基性火山岩的构造环境可用Ti-Zr-Y图解、TiO₂-MnO-P₂O₅图解MgO-FeO-Al₂O₃图解和里特曼

一戈蒂里图解等来判定^[43,45],中酸性火山岩构造环境的判别可用化学性质相近的花岗岩 R_1 - R_2 图解来判定^[32](阳离子数: $R_1=[4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti)]$, $R_2=Al+2Mg+6Ca$),也可用岩石微量元素丰度、稀土元素配分形式并结合构造演化分析来判断。由于不同盆地相关资料收集及数据获取难度大,研究中该影响因素未作考虑。

岩浆性质表现在岩石地球化学特征上,即为酸度(SiO_2 含量)的连续变化。因此,岩浆性质对氧化系数的影响可通过酸度进行校正,以国际地科联(IUGS)火成岩分类学分会1986年推荐的火山岩化学成分分类方案中 SiO_2 含量 $<45\%$ 、 $45\% \sim 52\%$ 、 $52\% \sim 63\%$ 、 $>63\%$ 为域值,将图版横坐标定义为岩石酸度,纵坐标定义为岩石氧化系数,建立经岩浆酸度校正后的氧化系数分布特征的火山喷发环境判别图。

2 基于火山岩氧化系数的喷发环境判别图版的建立

2.1 国内外文献资料数据获取

研究参阅国内外不同盆地文献资料^[28,36,46-55],从中获取充分的样品数据,用于判别图版的建立和检验与评估。数据获取时遵循以下五项原则:1)目的性—根据研究的目的获取数据,力求多盆地少而精准;2)代表性—获取的数据资料应涵盖不同岩浆性质的火山岩,即从基性到酸性的熔岩以及火山碎屑岩(凝灰岩和火山角砾岩);3)真实性—获取的数据要能反映岩石的实际成分;4)数据规范性—样品主量地球化学成分测试结果至少包括 SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 FeO 、 MnO 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 、 LOI 等地球化学数据;5)确定性—必须有其他有效判别依据,如淬碎构造、红顶现象、风化壳、生物化石、冰川火山等能明确证实样品是水下沉积成因还是陆上沉积成因。

基于上述原则,调研共获取了世界范围不同盆地124件样品数据(表2),岩石类型包括基性玄武岩、中性安山岩、酸性流纹岩、英安岩、珍珠岩,以及角砾岩、凝灰岩;已知水下沉积成因火山岩样品68件,陆上沉积成因火山岩样品56件(表2)。

2.2 所获数据的试验方法及流程

综合文献筛选的不同盆地124件火山岩样品主量元素分析由不同测试单位和测试中心完成,其 Al_2O_3 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 MgO 、 MnO 、 Na_2O 、 P_2O_5 、 SiO_2 、 TiO_2 等11项氧化物多采用压片法-X射线荧光光谱法

(XRF)测定,检出限为 $0.05\% \sim 0.10\%$; TFe_2O_3 采用熔片法-X射线荧光光谱(XRF)法、等离子全谱分析测定,检出限为 0.10% ; FeO 含量采用重铬酸钾容量法测定,检出限一般 0.10% ; CO_2 采用电位法分析测试,检出限为 0.1% ; H_2O^+ 、 H_2O^- 采用重量法(GR)分析测试,检出限为 0.1% ;烧失量(LOI)又称灼烧减量,采用重量法(GR)测得。

2.3 判别图版的建立

基于文献获取的124件样品 Fe_2O_3 、 FeO 、 SiO_2 含量数据,建立及改进传统意义上基于氧化系数分布特征的火山喷发环境判别图,具体步骤如下。

(1)坐标建立:以岩石酸度即 SiO_2 重量(%)为横坐标,岩石氧化系数(Fe_2O_3/FeO 、 $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+FeO)$)为纵坐标,建立岩石酸度—氧化系数二维坐标系统。

(2)氧化—还原界线的厘定:将124件样品数据在岩石酸度—氧化系数坐标系统中投点,以68件已知水下沉积成因火山岩样品的氧化系数值和56件已知陆上沉积成因火山岩样品的氧化系数值为控制点,界定出陆上强氧化环境和水下强还原环境界线;纵向上取两界线之间样品氧化系数值加权平均,厘定出弱还原环境与弱氧化环境界线。

(3)氧化—还原沉积环境的分区:根据124件样品控制点确定的强氧化、弱氧化、弱还原和强还原界线的趋势形态,纵向上表征出强氧化环境区、弱氧化环境区、弱还原环境区、强还原环境区;横向上依据124件样品 SiO_2 含量的分布范围,以 SiO_2 含量 $<45\%$ 、 $45\% \sim 52\%$ 、 $52\% \sim 63\%$ 、 $>63\%$ 为域值,表征出超基性、基性、中性、酸性4类不同岩浆性质火山岩,完成图版纵向上沉积环境的分区和横向上岩石酸度的校正(图1a,b)。

(4)与前人划分标准的对比:黄剑霞^[35]提出的 Fe^{3+}/Fe^{2+} 之比1.5、1.0、0.8的划分标准界限(图1a),由于未考虑关键影响因素,不能对不同岩浆性质(酸度)火山岩的喷发沉积环境进行科学的判识;何衍鑫等^[36]在考虑了岩浆性质的影响因素下,应用 $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+FeO)$ 值建立了划分标准,得出陆上喷发的超基性岩氧化系数最小为0.35,基性岩最小为0.43,中性岩最小为0.47,酸性岩最小为0.53;水下喷发的超基性岩氧化系数最0.43,基性岩最0.47,中性岩最大0.53,酸性岩最大0.54(图1b);但该标准应用数据资料老旧,且未做准确性检验与评估分析,是否具有普遍适用性有待商榷。

表2 研究调研国内外不同盆地124件火山岩样品数据资料
Table 2 Data for 124 volcanic rock samples from different basins in China and globally

研究地区	岩石类型	样品数(件)	火山喷发环境	有效判别依据或标志	资料来源
松辽盆地北部 营城组	英安岩、流纹岩、安山岩、粗安岩、玄武 安山岩、粗面玄武岩、粗面岩	12	4件陆上 8件水下	陆上:见有流纹构造,柱状节理发育, 可见到植物化石及硅化木, 薄片中有炭化木; 水下:层状凝灰岩,枕状珍珠岩岩球, 膨润土层	周翔 ^[46]
敦煌北山南部 二叠纪	玄武岩	10	海相	玄武岩呈灰绿色,普遍发育枕状构造	许伟等 ^[47]
黑龙江三矿沟—庄乎河地区	花岗闪长岩、花岗斑岩、 石英闪长岩、流纹岩	11	海相	岩石中可见黄铁矿、铜矿	黎心远等 ^[48]
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、玄武岩、凝灰岩、火山角砾岩、 火山角砾熔岩	13	陆上	无快速冷却特征,相邻沉积环境为 陆相凝灰质砂岩沉积,红色凝灰岩	何衍鑫等 ^[36]
		14	水下	湖相泥质粉砂岩沉积,富含大量黄铁矿, 可见淬碎结构及冷凝边;	
西藏措勤赤马地区古近纪	流纹质凝灰岩、英安质角砾岩、 流纹岩、流纹质角砾凝灰岩	10	5件陆上 5件水下	陆上:紫色、浅紫色凝灰岩、流纹岩; 水下:玻屑晶屑含量高,绿泥石化强烈	丁枫等 ^[49]
西祁连清水沟地区	玄武岩	3	陆上	紫灰色变安山质晶屑岩屑凝灰岩、 紫色安山质角砾	李国涛等 ^[50]
山西浑源中庄铺 中生代	粗安岩、粗面岩、流纹岩、 流纹质火山角砾岩	10	陆上	附近见紫红色凝灰质粉砂岩、 紫红色泥岩	陈鹏 ^[51]
内蒙古苏尼特左旗红格尔地区	黑云母二 长花岗岩、流纹岩、英安岩、 凝灰岩、安山岩	6	陆上	红色、紫红色流纹岩,灰紫色英安岩, 紫色凝灰岩	张鑫 ^[52]
廊固凹陷	玄武岩	2	水下	与湖相砂泥岩互层,地化特征	王盘喜等 ^[53]
霸县凹陷	玄武岩	9	2件水下 7件陆上	样品 Fe ₂ O ₃ 与 FeO 分布特征, 古近系沉积环境	王盘喜等 ^[53]
西天山塔尔德套地区乌郎组	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	5	陆上	见红顶现象 所有样品 Fe ₂ O ₃ >FeO	吴明仁等 ^[54]
新疆巴里坤县老爷庙地区	玄武岩、玄武安山岩、安山岩、英安岩、 流纹岩、霏细岩	6	3件水下 3件陆上	陆上:见红褐色氧化色,地化特征 水下:大量枕状熔岩发育, 含有丰富的海相化石	张超等 ^[55]
国外不同地区统计	玄武岩、拉斑玄武岩、安山岩、英安岩 流纹英安岩、流纹岩 粗面玄武岩、橄榄粗安岩、粗安岩、 粗面岩、碧玄岩、碱玄岩响岩	9 266 详见表1	水下	海底枕状熔岩,碧玄岩;湖水渗透进岩浆 内诱发的蒸汽岩浆爆发,历史记录	Le Maitre ^[28]

2.4 判别图的准确性检验与评估

调研获取四川雷波峨眉山^[56]已知海相玄武岩样品11组,辽河油田坨32井区^[57]已知陆上喷发沉积环境的玄武安山岩、安山岩、粗安岩、英安岩、流纹岩样品9组(表3),对改进的基于氧化系数判识图判别结果的准确性进行检验评估。结果表明,四川雷波峨

眉山11件海相玄武岩样品90.91%落在强还原环境区(水下沉积环境)(图1a,b),与刘建清等^[56]研究的结果一致;辽河油田坨32井区9件样品88.89%落在强氧化和弱氧化环境区域(陆上沉积环境及水、陆过渡复杂环境)(图1a,b),与赵海玲等^[57]研究的结果相符合。

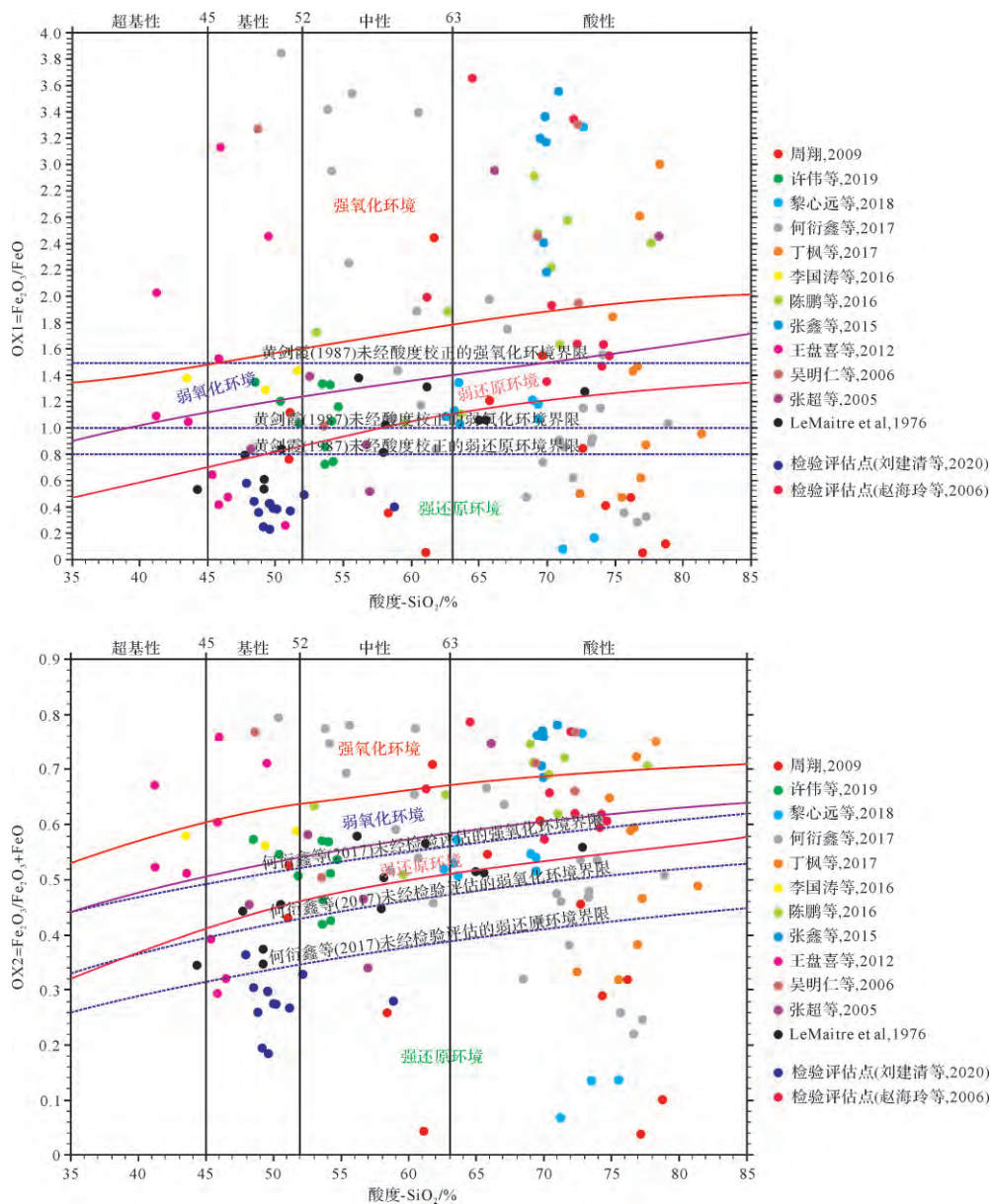


图1 基于火山岩氧化系数OX1(上)和OX2(下)的火山喷发沉积环境判别及检验评估图版

Fig.1 Discrimination and evaluation chart of volcanic eruption sedimentary environment based on oxidation index of volcanic rocks

需要说明的是,本次图版建立参阅不同盆地文献资料获取124块样品数据时,未能充分克服风化淋滤作用对所获样品氧化系数的影响,这给判断火山岩的喷发环境带来一定误差;但通过对图版判别标准的准确性检验与评估得出,改进的图版仍具有较好的普遍适用性。

3 应用实例

纵观现有资料,对新疆三塘湖盆地石炭统火山岩喷发沉积环境的研究主要集中在火山岩岩石组合特

征、构造结构与粒度、储集空间类型等方面^[14,16,19-20,43,58-64],仅个别学者利用古生物标志、自身矿物分布特征等来判定火山岩层系的沉积古地理环境^[43,59-60],而基于火山岩地球化学特征,利用火山岩氧化系数来探讨喷发沉积古地理环境的研究尚未见报道。以此为实际应用实例,应用改进的图版标准对上石炭统卡拉岗组(C₂k)和哈尔加乌组(C₂h)火山岩沉积古地理环境进行判别。研究丰富三塘湖盆地火山岩储层评价地质理论,为该区火山岩储层评价提供新思路和新方法,以期能为该区火山岩油气勘探新区或具有相似地质背景的地区提供技术参考和启示。

表3 检验评估点样品常量元素成分(%)
Table 3 Major element (%) composition of samples at inspection and evaluation points

原样品 编号	岩性	主量元素化学成分										氧化 系数 OX1	氧化 系数 OX2	判断结果	评估分析结果		
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	MnO	CaO					P ₂ O ₅	LOI
LB-1XH		58.85	3.63	13.31	3.51	9.10	3.00	1.88	3.94	0.17	7.18	0.41	1.82	0.39	0.28		
LB-2XH		51.17	3.67	13.55	3.17	8.70	2.15	1.69	3.91	0.16	8.78	0.41	1.52	0.36	0.27		
LB-3XH		49.71	3.65	13.29	3.96	9.48	1.98	1.62	4.27	0.17	8.61	0.39	1.68	0.42	0.29		
LB-4XH		47.94	4.02	14.11	4.93	8.63	4.81	0.93	4.16	0.17	6.00	0.45	2.79	0.57	0.36		
LB-5XH		50.18	4.04	12.72	3.66	9.70	1.87	1.18	4.26	0.18	8.96	0.40	1.57	0.38	0.27	数据点落在判别 图版强还原区 为水下喷发 沉积环境	
LB-7XH	玄武岩	49.94	4.03	12.66	3.61	9.54	2.39	1.45	4.38	0.18	8.37	0.40	1.87	0.38	0.27	数据点落在判别 图版强还原区 为水下喷发 沉积环境	与其他有效判别依据 识别的结果相符
LB-8XH		48.50	4.01	14.20	4.04	9.22	3.77	2.19	4.18	0.18	5.54	0.38	2.68	0.44	0.30		
LB-9XH		48.82	3.34	12.90	3.60	10.25	1.79	0.96	4.60	0.18	9.12	0.42	1.50	0.35	0.26		
LB-10XH		52.14	4.25	11.78	4.21	8.63	3.82	1.01	4.39	0.23	5.97	0.40	2.13	0.49	0.33		
LB-11XH		49.14	4.17	12.90	2.71	11.23	2.02	1.20	4.65	0.18	8.71	0.48	1.21	0.24	0.19		
LB-12XH		49.60	4.09	12.72	2.55	11.26	1.90	0.91	4.63	0.18	8.82	0.46	1.47	0.23	0.18		
T32-1		74.64	0.15	12.74	1.82	1.18	2.91	5.70	0.19	0.06	0.05	0.04	1.62	1.54	0.61		
T32-1R		74.22	0.15	12.70	1.82	1.12	2.90	5.68	0.20	0.06	0.04	0.04	1.76	1.63	0.62		
T32-6		72.29	0.40	11.86	4.08	2.50	1.37	3.48	1.91	0.05	1.58	0.02	3.38	1.63	0.62		
T32-7		70.39	0.45	14.26	3.46	1.80	1.64	4.81	1.77	0.02	0.31	0.03	2.40	1.92	0.66	数据点落在判别 图版强氧化和 若氧化环境区 为陆上地表喷发 沉积环境	与其他有效判别依据 识别的结果相符
T605-1	玄武安山岩粗安岩	61.21	0.82	15.35	6.45	3.25	4.29	3.16	3.55	0.08	2.37	0.22	2.74	1.98	0.66		
T3-3	英安岩流纹岩	64.53	0.70	17.02	4.02	1.10	4.02	3.11	0.93	0.03	2.31	0.25	3.52	3.65	0.79		
T3-5		70.01	0.54	13.27	4.42	3.28	2.71	1.43	1.87	0.10	2.10	0.15	3.80	1.35	0.57		
T32-4		74.11	0.41	12.26	2.36	1.61	2.89	4.28	0.88	0.06	0.57	0.03	1.99	1.47	0.59		
T2-6		72.02	0.32	11.84	4.11	1.23	1.68	3.55	1.67	0.05	1.45	0.02	3.08	3.34	0.77		

3.1 三塘湖盆地马朗凹陷地质概况

三塘湖盆地属晚泥盆—早石炭世褶皱基底上发育的多旋回复杂叠加型残留盆地,经过海西、印支、燕山、喜山等多期构造运动的复合作用,呈现今南北分带、东西分块的构造格局。盆地中部的马朗凹陷(图2a)为一个向北东隆升的前陆凹陷,上石炭统火山岩大面积分布(图2b),已发现的牛东油田和牛圈湖含油气构造,具上亿吨储量规模。前人^[43,61-64]通过对新疆石炭系火山岩年代学、岩石化学成分、主微量元素分布特征和稀土元素配分形式等研究,并结合区域大地构造背景和火山活动事件分析,认为三塘湖盆地受西伯利亚板块和塔里木板块挤压应力的作用,在晚石炭世—早二叠世洋壳闭合,受洋壳俯冲消减作用的影响,位于克拉美丽北侧的三塘湖地区以大陆边缘的岛弧火山活动最为发育,但火山成分仍具有部分洋壳熔融的洋岛碱性玄武岩的特点;综合运用多种方法分析得出^[43,61-62]石炭系火山岩总体形成于大陆边缘构造环境,上石炭统卡拉岗组(C_2k)火山岩形成于火山岛弧建造环境,哈尔加乌组(C_2h)火山岩以板内环境为主。

钻井揭露马朗凹陷牛圈湖—牛东构造带地层自

下而上依次为上石炭统巴塔玛依内山组(C_2b)、哈尔加乌组(C_2h)和卡拉岗组(C_2k)、上二叠统芦苇沟组(P_2l)和条湖组(P_2t)、中上三叠统小泉沟群($T_{2,3xq}$)、西山窑组(J_2x)、中侏罗统头屯河组(J_2t)、上侏罗统齐古组(J_3q)、下白垩统(K_1)和第三系(R),各层组间大都以不整合接触(图2b)。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、海陆交互相及陆相的熔岩、火山碎屑岩与沉火山碎屑岩沉积,岩性极为复杂,非均质性极强;在各喷发间歇期沉积有薄层沉积岩(泥岩、碳质泥岩、泥质砂岩等)。

3.2 上石炭统火山岩氧化系数分布特征

研究系统采集马朗凹陷牛圈湖—牛东构造带上12口井40块火山岩样品,岩石主量元素测定分析由新疆有色地质勘查局测试中心完成,采用压片法-X射线荧光光谱法(XRF)测定了 Al_2O_3 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 MgO 、 MnO 、 Na_2O 、 P_2O_5 、 SiO_2 、 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含量;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%。主量元素氧化物、烧失量(LOI)及氧系数(OX1、OX2)分析结果如表4、5所示。

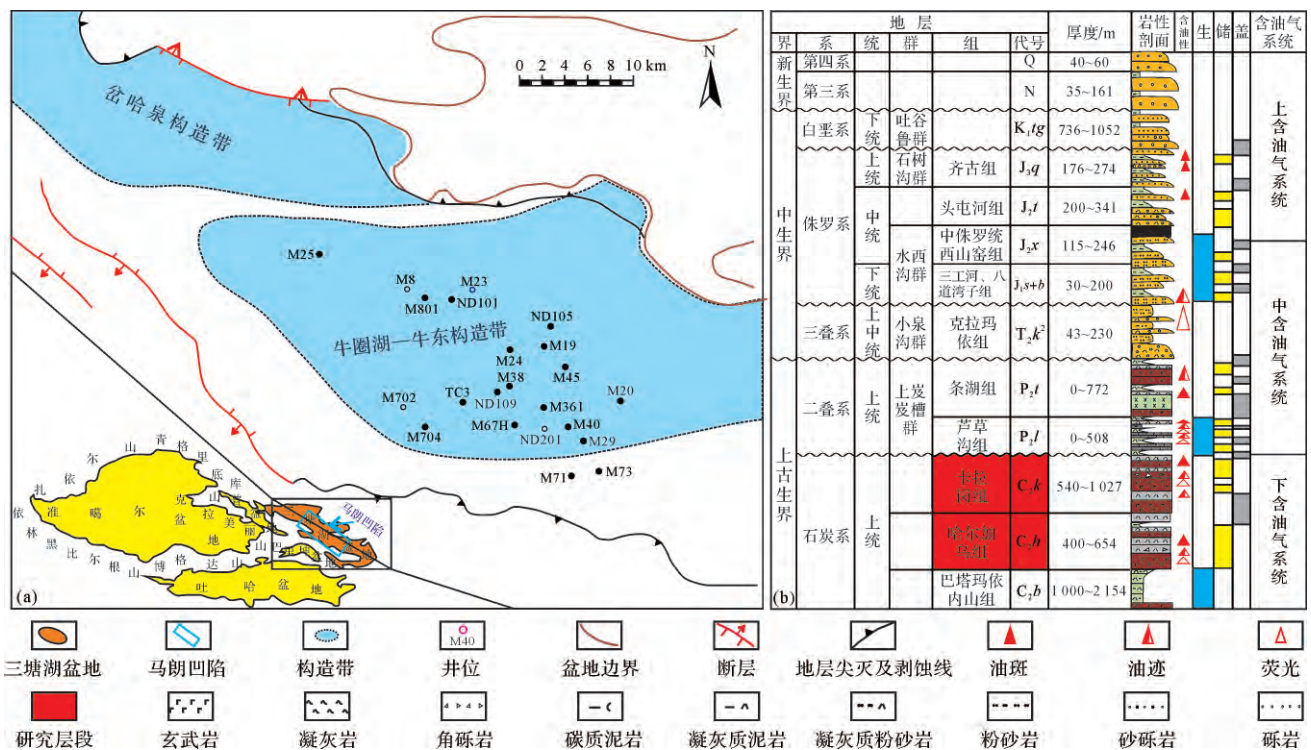


图2 三塘湖盆地马朗凹陷构造位置及牛圈湖—牛东构造带井位分布与地层综合柱状图

(a)马朗凹陷牛圈湖—牛东构造带位置及井位分布;(b)地层综合柱状图

Fig.2 Structural location of Malang Sag, Santanghu Basin and well location in the Niuquanhu-Niudong structural belt, and comprehensive stratigraphic column

表4 三塘湖盆地马朗凹陷上石炭统卡拉岗组(C₂k)火山岩主量元素分析结果(%)及氧化系数

Table 4 Major elements (%) and oxidation coefficient of volcanic rocks from Kalagang Formation (C₂k) in Malang Sag, Santanghu Basin

井名	井段/m	层位	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	FeO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	TOTAL	OX1	OX2
M801	2 101.90~2 102.20	C ₂ k	49.78	2.16	16.51	0.140	5.66	8.93	3.73	5.76	0.86	3.8	0.71	1.82	99.84	1.54	0.61
M801	2 108.00~2 108.40	C ₂ k	61.49	0.56	16.70	0.060	2.25	4.85	1.42	3.25	1.50	4.75	0.20	2.44	99.47	2.29	0.70
M25	2 081.97~2 082.18	C ₂ k	50.05	1.54	16.35	0.130	6.27	8.28	1.80	6.68	1.39	3.45	0.35	4.28	100.57	3.71	0.79
M25	2 221.39~2 221.53	C ₂ k	58.52	0.74	16.92	0.110	3.14	6.40	2.32	3.91	2.15	3.82	0.34	2.49	100.86	1.69	0.63
TC3	2 079.10~2 079.50	C ₂ k	62.51	0.57	16.97	0.050	2.19	4.47	1.65	2.95	1.62	5.04	0.20	2.49	100.73	2.20	0.64
TC3	2 078.10~2 078.10	C ₂ k	60.29	0.67	16.62	0.070	2.51	4.74	1.61	3.54	1.53	4.92	0.23	2.75	99.46	1.79	0.69
ND101	1 746.08~1 746.25	C ₂ k	52.39	1.06	16.68	0.120	5.42	7.21	2.80	4.51	1.73	4.30	0.42	3.04	99.68	1.61	0.62
ND101	1 750.53~1 750.68	C ₂ k	53.08	1.05	16.86	0.140	5.16	8.08	2.01	5.44	1.74	4.07	0.42	2.02	100.07	2.71	0.73
ND105	1 496.12~1 496.26	C ₂ k	56.85	0.82	16.33	0.079	3.52	4.76	2.74	3.56	1.92	4.63	0.39	4.41	100.01	1.30	0.57
ND105	1 538.99~1 539.08	C ₂ k	55.89	0.81	16.66	0.120	3.43	6.56	2.75	3.23	0.96	4.09	0.36	4.37	99.23	1.17	0.54
M24	1 571.10~1 571.80	C ₂ k	57.78	0.71	15.49	0.100	4.90	4.37	2.09	3.81	4.57	1.70	0.47	3.79	99.78	1.82	0.65
M24	1 574.50~1 574.58	C ₂ k	54.59	0.82	18.01	0.110	4.41	7.04	2.19	4.29	4.17	1.40	0.40	2.66	100.09	1.96	0.66
M24	1 588.58~1 589.26	C ₂ k	59.17	1.40	14.94	0.100	2.98	5.22	2.12	2.37	4.92	1.73	0.22	4.77	99.94	1.12	0.53
M23	1 831.00~1 831.30	C ₂ k	56.61	0.77	16.64	0.100	4.04	6.74	1.80	4.19	3.35	1.56	0.25	3.45	99.50	2.33	0.70
M23	2 362.70~2 363.10	C ₂ k	51.74	1.15	16.93	0.150	5.50	8.45	3.54	4.52	3.52	1.13	0.52	2.39	99.54	1.28	0.56
M19	1 680.30~1 680.50	C ₂ k	52.61	1.42	14.12	0.210	6.98	7.15	3.19	6.42	4.02	0.76	0.41	3.35	100.64	2.01	0.67
M19	2 332.90~2 333.10	C ₂ k	57.57	0.76	17.26	0.160	3.86	7.10	2.19	3.69	4.04	0.83	0.26	2.42	100.14	1.68	0.63
M19	2 334.32~2 334.52	C ₂ k	56.16	0.77	17.36	0.120	4.27	7.20	2.19	4.34	4.09	1.02	0.27	2.32	100.11	1.98	0.66
M19	2 415.50~2 415.70	C ₂ k	51.69	0.89	18.42	0.080	5.53	6.70	1.74	5.73	2.19	2.75	0.23	3.89	99.84	3.29	0.77
M19	2 431.57~2 431.77	C ₂ k	52.67	1.90	14.80	0.110	4.70	5.84	3.15	5.30	5.90	1.12	0.77	3.90	100.16	1.68	0.63

表5 三塘湖盆地马朗凹陷上石炭统哈尔加乌组(C₂h)火山岩主量元素分析结果(%)及氧化系数

Table 5 Major elements (%) and oxidation coefficient of volcanic rocks of Upper Carboniferous Haerjiawu Formation (C₂h) in Malang Sag, Santanghu Basin

井号	井段/m	层位	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	FeO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	TOTAL	OX1	OX2
M361	3 160.45~3 160.61	C ₂ h	50.09	1.690	16.67	0.14	4.29	4.78	6.56	2.02	2.13	3.39	1.13	6.33	99.22	0.31	0.24
M361	3 161.00~3 161.14	C ₂ h	52.27	1.570	16.18	0.15	4.87	4.37	6.75	1.99	1.92	3.23	0.85	5.79	99.94	0.29	0.23
M361	3 161.54~3 161.79	C ₂ h	49.17	1.510	17.07	0.16	4.76	5.50	6.30	1.81	2.18	3.70	0.93	6.97	100.06	0.29	0.22
M361	3 162.82~3 163.02	C ₂ h	49.60	1.480	16.80	0.16	5.68	4.46	6.81	2.37	1.54	3.63	0.85	6.39	99.77	0.35	0.26
M361	3 164.39~3 164.49	C ₂ h	53.25	1.400	15.68	0.13	4.75	4.15	6.11	1.97	0.61	4.46	0.78	6.29	99.58	0.32	0.24
M361	3 166.19~3 166.32	C ₂ h	57.18	1.180	14.65	0.13	4.77	4.06	5.21	2.12	1.87	2.78	0.62	4.54	99.11	0.41	0.29
M361	3 167.18~3 167.36	C ₂ h	51.50	1.430	17.12	0.12	4.14	5.44	4.95	1.93	0.53	5.22	0.82	6.44	99.64	0.39	0.28
M361	3 169.03~3 169.21	C ₂ h	48.10	1.400	17.00	0.18	5.62	5.99	6.56	2.55	1.51	3.52	1.00	6.69	100.12	0.39	0.28
M361	3 170.28~3 170.44	C ₂ h	50.73	1.260	15.89	0.14	4.81	6.78	6.30	1.63	0.74	3.84	0.75	7.33	100.20	0.26	0.21
M361	3 171.59~3 171.72	C ₂ h	52.16	1.350	16.79	0.14	5.18	4.49	6.24	2.20	0.45	4.47	0.59	6.10	100.16	0.35	0.26
M361	3 173.14~3 173.36	C ₂ h	52.55	1.430	16.59	0.13	4.58	4.52	6.05	1.86	1.44	4.16	0.79	6.09	100.19	0.31	0.24
M361	3 174.68~3 174.81	C ₂ h	57.69	1.310	15.61	0.10	3.63	3.98	5.08	1.40	1.20	3.98	0.62	5.06	99.66	0.28	0.22
M704	3 430.67~3 430.97	C ₂ h	73.85	0.310	8.92	0.04	1.88	5.06	1.49	0.51	1.24	1.32	0.15	6.13	100.90	0.34	0.26
M704	3 433.91~3 434.07	C ₂ h	72.83	0.190	7.29	0.04	1.09	7.62	0.82	0.41	0.97	1.09	0.14	7.93	100.42	0.50	0.33
M704	3 442.33~3 442.53	C ₂ h	60.15	0.550	12.61	0.09	2.96	7.56	2.47	0.99	3.26	1.66	0.83	7.55	100.68	0.40	0.29
M704	3 467.40~3 467.57	C ₂ h	65.37	0.610	16.15	0.06	1.62	2.04	2.47	1.29	1.66	6.57	0.15	2.51	100.50	0.52	0.34
M704	3 467.96~3 468.07	C ₂ h	63.60	0.630	16.95	0.07	2.06	2.20	3.40	1.34	1.22	6.23	0.14	3.10	100.94	0.39	0.28
M38	3 037.59~3 037.78	C ₂ h	52.89	0.880	16.45	0.22	2.53	9.04	3.47	3.26	0.61	4.60	0.38	5.40	99.73	0.94	0.48
M26	3 603.10~3 603.60	C ₂ h	53.93	1.073	16.62	0.15	5.19	4.19	4.17	3.20	3.51	4.26	0.60	2.94	99.83	0.77	0.43
M26	3 809.60~3 811.90	C ₂ h	54.34	1.037	16.64	0.11	4.50	3.67	4.40	3.22	3.40	4.75	0.60	3.23	99.90	0.73	0.42

数理统计表明,上石炭统卡拉岗组(C_2k)20块火山岩样品OX1(Fe_2O_3/FeO)介于1.12~3.71,85%集中在1.0~2.5之间,OX2($Fe_2O_3/(Fe_2O_3+FeO)$)介于0.54~0.79,65%集中在0.60~0.70之间(图3a);初步推断该组火山岩喷发沉积期的古地理环境复杂,陆上地表强氧化环境与频繁水、陆过渡复杂环境都存在;上石炭统哈尔加乌组(C_2h)20块火山岩样品OX1(Fe_2O_3/FeO)介于0.26~0.94,70%分布在0.20~0.40之间,OX2($Fe_2O_3/(Fe_2O_3+FeO)$)介于0.21~0.48,75%分布在0.25~0.30之间(图3b);初步推测该组火山岩喷发沉积期的古地理环境相对单一,以水下喷发水下还原环境为主。

从垂向分布来看,上石炭统卡拉岗组(C_2k)部分单井火山岩氧化系数随埋深变化跳跃性较大,而上石炭统哈尔加乌组(C_2h)部分单井火山岩氧化系数随埋深变化甚微,分布较为集中。以马19井卡拉岗组(C_2k)和马361井哈尔加乌组(C_2h)岩心段为例(图4a,b),马19井卡拉岗组(C_2k)非连续取心段揭露的岩性有灰褐色玄武岩和安山岩、灰绿色和紫色玄武岩、灰黑色碳质泥岩和灰色泥质粉砂岩,岩石中 Fe_2O_3 含量高,氧化系数受埋深影响较大(图4a);紫色玄武岩及高的氧化系数揭示了陆上强氧化沉

积环境的特征。马361井哈尔加乌组(C_2h)连续取心段岩心揭露的岩性有深灰色凝灰岩和灰黑色碳质泥岩,岩石 FeO 含量高,氧化系数均低于0.5(图4b),受埋深影响较小,揭示了水下还原环境沉积的特征。

3.3 上石炭统火山岩喷发沉积古地理环境的判别与检验

将40件分析样品数据在改进的判别图中投点,结果显示卡拉岗组(C_2k)20块样品60%落在强氧化环境区,25%落在弱氧化环境区,仅15%落在弱还原环境区(图5a,b);揭示该组火山岩主要沉积成因于陆上氧化环境介质中,频繁水、陆交互复杂环境也存在。哈尔加乌(C_2h)20块样品95%落在强还原环境区,5%落在弱还原环境区(图5a,b);指示该组火山岩主要沉积成因于水下还原环境介质中,局部具有一定水体深度。

卡拉岗组(C_2k)火山岩 Fe_2O_3 和 FeO 的这种变化关系与梁浩等^[43]基于该组火山岩岩心观察裂缝周围见红色氧化边,以及王盛鹏等^[19]应用化学风化指数 $CIA=Al_2O_3/(Al_2O_3+Na_2O+K_2O+CaO)\times 100\%$ 定量分析判别的喷发沉积环境结果相符合。哈尔加乌组(C_2h)火山岩 Fe_2O_3 和 FeO 的这种变化关系与王岚

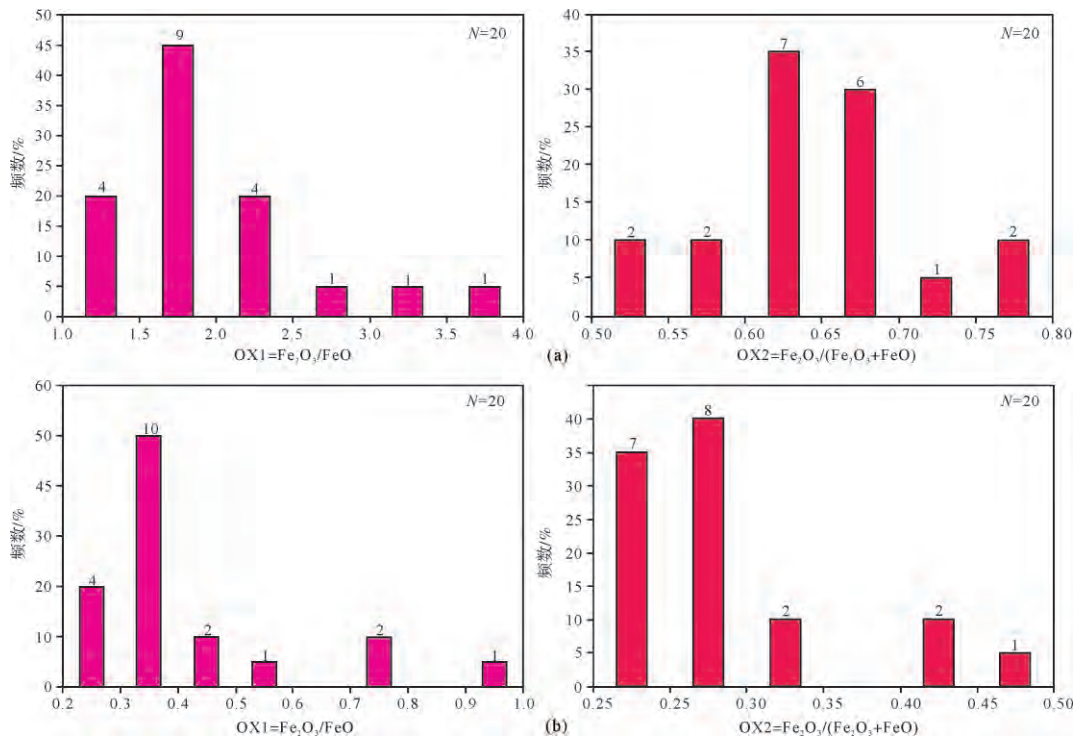


图3 三塘湖盆地马朗凹陷上石炭统火山岩氧化系数分布直方图

(a)上石炭统卡拉岗组火山岩氧化系数分布直方图;(b)上石炭统哈尔加乌组火山岩氧化系数分布直方图

Fig.3 Oxidation indices of Upper Carboniferous volcanic rocks in Malang Sag, Santanghu Basin

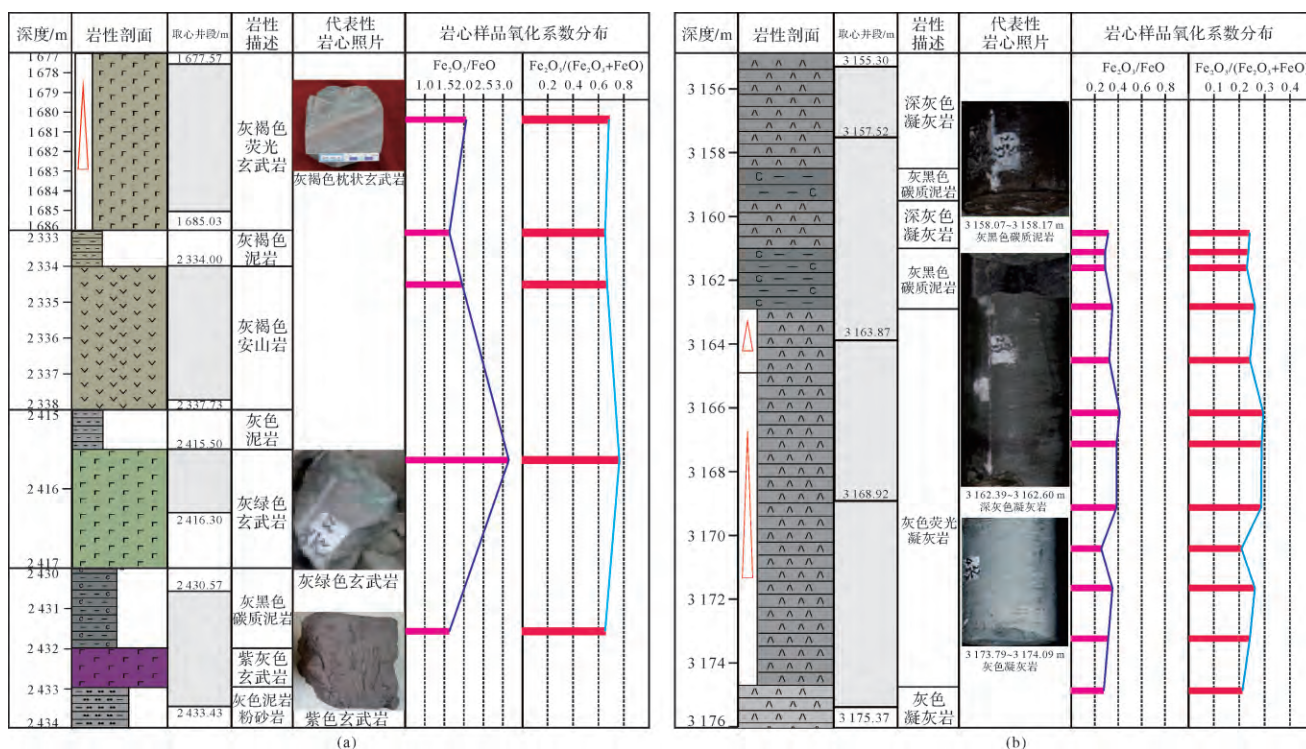


图4 三塘湖盆地马朗凹陷单井上石炭统火山岩氧化系数垂向分布特征

(a) 马19井上石炭统卡拉岗组岩心样品氧化系数垂向分布特征;(b) 马361井上石炭统哈尔加乌组岩心样品氧化系数垂向分布特征

Fig.4 Vertical distribution characteristics of oxidation index of Upper Carboniferous volcanic rocks at a well in Malang Sag, Santanghu Basin

等^[58]镜下观察凝灰岩成分中玻屑的含量较高,岩屑、晶屑以及玻屑组成的凝灰岩、碳质凝灰岩发育明显的层理构造特征,可见到玻屑条带与暗色泥岩交替互层的现象等标志判别的结果相一致。

此外,王盛鹏等^[19]通过对上石炭统火山岩夹持的部分泥岩微量元素对比分析显示,马24井(井位位置见图2)卡拉岗组(C_{2k})灰色砂砾岩及棕色细砂岩 ω(Sr)/ω(Ba)值小于0.5,显示出陆相氧化环境特征,马38井(井位位置见图2)哈尔加乌组(C_{2h})泥岩 ω(Sr)/ω(Ba)值大于1,显示出海相水体环境特征(图6)。朱卡等^[59]在三塘湖盆地石炭系火山岩喷发环境及储层特征研究中指出,反映卡拉岗组(C_{2k})陆上喷发环境的典型标志有共生岩石即化石、不整合及风化壳、柱状节理,如马19井(井位位置见图2)在卡拉岗组(C_{2k})揭露风化壳,安山岩见示底构造(图6);反映哈尔加乌组(C_{2h})水下喷发沉积环境的典型标志有共生岩石即化石、充填及胶结物,如马36井(井位位置见图2)在哈尔加乌组(C_{2h})见亮晶方解石胶结的沉火山(角)砾岩(图6)。

4 结论

(1) 研究使用Fe的不同价态氧化物质量分数之比Fe₂O₃/FeO, Fe₂O₃/(Fe₂O₃+FeO)作为火山岩氧化系数,并充分考虑岩浆性质(酸度)、风化淋滤作用、成岩溶蚀蚀变作用、构造背景等因素,改进了传统意义上基于火山岩氧化系数的喷发环境判别图;该地球化学方法具有普适性,改进的判识图,可应用于不同盆地、不同地质年代火山岩的喷发沉积古环境的判别研究中。

(2) 对新疆三塘湖盆地马朗凹陷上石炭统火山岩喷发沉积环境判别实际应用结果表明,上石炭统卡拉岗组(C_{2k})火山岩主要喷发沉积和保存于陆上地表强氧化环境,频繁水、陆交替的弱氧化—弱还原复杂环境也存在,上石炭统哈尔加乌组(C_{2h})火山岩主要喷发沉积和保存于水下还原环境。

(3) 实际应用结果与前人基于本区上石炭统火山岩共生岩石与化石组合、不整合及风化壳以及火山岩夹持的部分泥岩微量元素比值特征等有效判别依据得到的喷发环境结果相符合,表明改进的判别图识别标准具有较好的适用性。

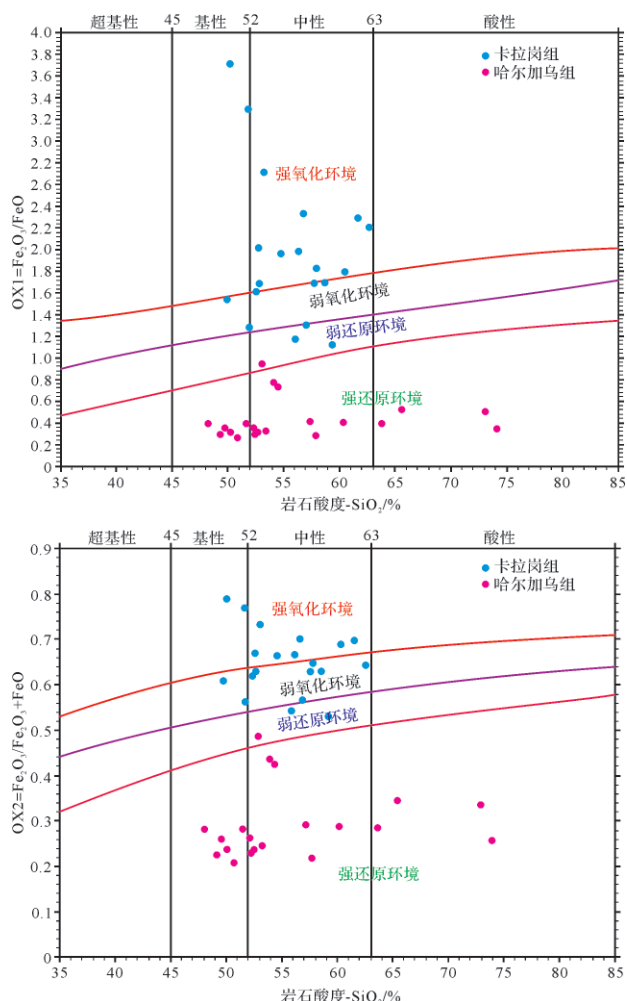


图5 三塘湖盆地马朗凹陷上石炭统火山岩喷发沉积环境判别图

Fig.5 Discrimination map of eruption sedimentary environment of Upper Carboniferous volcanic rocks in Malang Sag, Santanghu Basin

王胜鹏等 ^[17] :两种不同沉积环境下火山岩储层成岩作用研究						
井名	深度/m	层组	岩性	$\omega(V)/\omega(V+Ni)$	$\omega(Sr)/\omega(Ba)$	成因环境
马24井	1483	卡拉岗组 (C _{1k})	灰色砂砾岩	0.08	0.15	陆相
	1533		棕色细砂岩	0.78	0.20	
马38井	3037	哈尔加乌组 (C _{1h})	灰色油迹凝灰岩	0.90	1.52	海相
	3039		灰黑色凝灰质泥岩	0.86	1.50	
	3040		灰黑色凝灰质泥岩	0.79	1.21	
	3041		灰黑色碳质泥岩	0.91	2.09	
朱卡等(2012) ^[18] :三塘湖盆地石炭系火山岩喷发环境及储层特征研究						
层组	典型标志	典型照片		沉积环境		
卡拉岗组 (C _{1k})	不整合及风化壳			陆上		
	柱状节理	马19井, 1546.94~1547.13 m C _{1k} 风化壳发育风化裂隙	马19井, 1548.77 m C _{1k} 半圆构造火山岩位于风化壳之上			
哈尔加乌组 (C _{1h})	海相化石			水下		
	充填及胶结物	三塘湖多阿克提坎剖面C _{1h} 底部发育的凝灰质粉砂岩中含有丰富的海相化石	马36井C _{1h} 砾晶方解石胶结的灰火山(角)砾岩			

图6 三塘湖盆地马朗凹陷上石炭统火山岩喷发环境其他有效判别依据图版

Fig.6 Identification of a selection from the volcanic eruption environment of the Upper Carboniferous in Malang Sag, Santanghu Basin

参考文献(References)

- [1] 侯连华,朱如凯,赵霞,等. 中国火山岩油气藏控制因素及分布规律[J]. 中国工程科学, 2012, 14(6): 77-86. [Hou Lianhua, Zhu Rukai, Zhao Xia, et al. The control factors and distribution laws of volcanic oil and gas reservoir in China [J]. Engineering Sciences, 2012, 14(6): 77-86.]
- [2] 邹才能,赵文智,贾承造,等. 中国沉积盆地火山岩油气藏形成与分布[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(3): 257-271. [Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Jia Chengzao, et al. Formation and distribution of volcanic hydrocarbon reservoirs in sedimentary basins of China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(3): 257-271.]
- [3] 毛治国,朱如凯,王京红,等. 中国沉积盆地火山岩储层特征与油气聚集[J]. 特种油气藏, 2015, 22(5): 1-8. [Mao Zhiguo, Zhu Rukai, Wang Jinghong, et al. Reservoir characteristics and hydrocarbon accumulations of volcanic rocks in sedimentary basins of China [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(5): 1-8.]
- [4] Mao Z G, Zhu R K, Luo J L, et al. Reservoir characteristics, formation mechanisms and petroleum exploration potential of volcanic rocks in China [J]. Petroleum Science, 2015, 12(1): 54-66.
- [5] 李军. 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[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008. [Li Jun. The study on distribution characteristics and controlling factors of Carboniferous volcanic reservoir of the northwestern margin, Junggar Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008.]
- [6] 路占军,娜仁,崔俊峰,等. 内蒙古二连盆地洪浩尔舒特凹陷白垩系火山岩储集层[J]. 古地理学报, 2011, 13(2): 201-208. [Lu Zhanjun, Na Ren, Cui Junfeng, et al. Volcanic rock reservoir of the Cretaceous in Honghao'er shute Sag in Erlian Basin, Inner Mongolia [J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(2): 201-208.]
- [7] 黄玉龙,单俊峰,刘海波,等. 辽河盆地古近系水下喷发粗面岩相模式及其储层意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(1): 1-11. [Huang Yulong, Shan Junfeng, Liu Haibo, et al. Facies architecture of Paleogene subaqueous trachytes and its implications for hydrocarbon reservoirs in Liaohe Basin [J]. Journal of China University of Petroleum, 2019, 43(1): 1-11.]
- [8] 赵文智,邹才能,冯志强,等. 松辽盆地深层火山岩气藏地质特征及评价技术[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(2): 129-142. [Zhao Wenzhi, Zou Caineng, Feng Zhiqiang, et al. Geological features and evaluation techniques of deep-seated volcanic gas reservoirs, Songliao Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(2): 129-142.]
- [9] 侯启军. 松辽盆地南部火山岩储层主控因素[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 749-756. [Hou Qijun. Main controlling factors of volcanic reservoirs in the southern Songliao Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2011, 32(5): 749-756.]
- [10] 黄玉龙,王璞珺,邵锐. 火山碎屑岩的储层物性: 以松辽盆地营城组为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(2): 227-236. [Huang Yulong, Wang Pujun, Shao Rui. Porosity and permeability of pyroclastic rocks of the Yingcheng Formation in Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(2): 227-236.]
- [11] 王岩泉,石好果,张曰静,等. 准噶尔盆地车排子地区石炭系火山碎屑岩储层特征研究[J]. 地质论评, 2019, 65(增刊1): 181-182. [Wang Yanquan, Shi Haoguo, Zhang Yuejing, et al. Reservoir characteristics of Carboniferous volcanic rocks in Chepaizi area, Junggar Basin [J]. Geological Review, 2019, 65(Suppl. 1): 181-182.]
- [12] 修昊,唐华风,黄露玫. 松辽盆地英台断陷沉火山碎屑岩储层特征及控制因素[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(3): 33-39. [Xiu Hao, Tang Huafeng, Huang Lumei. Characteristics and influential factors of sedimentary pyroclastic rocks in Yingtai faulted depression, Songliao Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(3): 33-39.]
- [13] 焦立新,刘俊田,张宏,等. 三塘湖盆地沉凝灰岩致密储集层特征及其形成条件[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(11): 1697-1705. [Jiao Lixin, Liu Juntian, Zhang Hong, et al. Tight reservoir characteristics and formation conditions of tuff in Santanghu Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(11): 1697-1705.]
- [14] 侯连华,王京红,邹才能,等. 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[J]. 地质学报, 2011, 85(4): 557-568. [Hou Lianhua, Wang Jinghong, Zou Caineng, et al. Controlling factors of weathering volcanic reservoir: An example from the Carboniferous Kalagang Formation in Santanghu Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(4): 557-568.]
- [15] 王君,朱如凯,郭宏莉,等. 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[J]. 岩石学报, 2010, 26(1): 217-226. [Wang Jun, Zhu Rukai, Guo Hongli, et al. Weathered crust volcanic reservoir: A case study on Malang Depression, Carboniferous, Santanghu Basin, NW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 217-226.]
- [16] 刘俊田. 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[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(1): 57-62. [Liu Juntian. Weathering crust model and recognition of Carboniferous Kalagang Formation (C₂k) volcanic rocks in Niudong block, Santanghu Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(1): 57-62.]
- [17] 罗静兰,林潼,杨知盛,等. 松辽盆地升平气田营城组火山岩岩相及其储集性能控制因素分析[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(6): 748-757. [Luo Jinglan, Lin Tong, Yang Zhisheng, et al. Lithofacies and reservoir quality control factors of volcanics in the Yingcheng Formation in the Shengping

- gas field in the Songliao Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(6): 748-757.]
- [18] 孙中春, 蒋宜勤, 查明, 等. 准噶尔盆地石炭系火山岩储层岩性岩相模式[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(5): 782-789. [Sun Zhongchun, Jiang Yiqin, Zha Ming, et al. Lithology-lithofacies model of Carboniferous volcanic reservoirs in the Junggar Basin, NW China[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, 42(5): 782-789.]
- [19] 王盛鹏, 林潼, 孙平, 等. 两种不同沉积环境下火山岩储层成岩作用研究[J]. *石油实验地质*, 2012, 34(2): 145-152. [Wang Shengpeng, Lin Tong, Sun Ping, et al. Influences of diagenetic effects on volcanic rock reservoirs under two different sedimentary environments [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2012, 34(2): 145-152.]
- [20] 陈薇, 司学强, 智凤琴, 等. 三塘湖盆地卡拉岗组火山岩储层成岩作用[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 35(4): 35-42. [Chen Wei, Si Xueqiang, Zhi Fengqin, et al. Diagenesis of volcanic rock reservoir in Kalagang Formation of Carboniferous, Santanghu Basin[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2013, 35(4): 35-42.]
- [21] 齐东岩, 邢贝贝, 张惠瑜. 三塘湖盆地马朗凹陷火山岩储层成岩作用及成岩演化特征[J]. *科学技术与工程*, 2012, 12(12): 2959-2963. [Qi Dongyan, Xing Beibei, Zhang Huiyu. Diagenesis and diagenetic evolution of volcanic rocks in Malang Sag of Santanghu Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 2012, 12(12): 2959-2963.]
- [22] 孙玉善, 白新民, 桑洪, 等. 沉积盆地火山岩油气生储系统分析: 以新疆准噶尔盆地乌夏地区早二叠世风城组为例[J]. *地学前缘*, 2011, 18(4): 212-218. [Sun Yushan, Bai Xinmin, Sang Hong, et al. The source and reservoir system analysis of volcanic rock in depositional basin: Taking Fengcheng Formation of Lower Permian in Wuxia Zhungeer, Xingjiang as an example [J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(4): 212-218.]
- [23] 单玄龙, 李吉焱, 陈树民, 等. 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[J]. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2014, 44(12): 2637-2644. [Shan Xuanlong, Li Jiyang, Chen Shumin, et al. Subaquatic 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 [J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 2014, 44(12): 2637-2644.]
- [24] 邱家骧. 火山岩中 Fe_2O_3 、 FeO 的调整与方法[J]. *地质科技情报*, 1985, 4(2): 32-39. [Qiu Jiexiang. Adjustment and method of Fe_2O_3 and FeO in volcanic rocks [J]. *Geological Science and Technology Information*, 1985, 4(2): 32-39.]
- [25] Dyar M D, Naney M T, Swanson S E. Effects of quench methods on Fe^{3+}/Fe^{2+} ratios: A Mössbauer and wet-chemical study [J]. *American Mineralogist*, 1987, 72: 792-800.
- [26] 李明连, 蓝恒春. 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[J]. *铀矿地质*, 2014, 30(3): 168-171, 186. [Li Minglian, Lan Hengchun. Discussion on the best acquisition season of AMT and Man-made signals function in the field [J]. *Uranium Geology*, 2014, 30(3): 168-171, 186.]
- [27] 张艳, 舒萍, 王璞珺, 等. 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[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, 37(6): 1259-1265. [Zhang Yan, Shu Ping, Wang Pujun, et al. Comparison between subaerial and subaqueous volcanic rocks and the reservoir significance-taking Yingcheng Formation in Songliao Basin as example [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007, 37(6): 1259-1265.]
- [28] Le Maitre R W. The chemical variability of some common igneous rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1976, 17(4): 589-598.
- [29] 邱家骧. 应用岩浆岩岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991: 1-4. [Qiu Jiexiang. Applied magmatic rock petrology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991: 1-4.]
- [30] 杨艳芳. 火山岩储层储集空间演化、成岩作用及成岩相研究: 松辽盆地徐家围子下白垩统营城组火山岩[D]. 西安: 西北大学, 2011. [Yang Yanfang. Research on volcanic reservoir space evolution, diagenesis and diagenetic facies: The Lower Cretaceous volcanic rocks of Yingcheng Formation, Xujiaweizi, Songliao Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2011.]
- [31] 胡文婷, 柳成志, 赵辉, 等. 徐家围子断陷火山岩成岩作用与储层质量[J]. *科学技术与工程*, 2011, 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 [J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, 11(6): 1176-1181.]
- [32] 吴小奇, 刘德良, 李振生. 卡拉麦里缝合带后碰撞背景与火山岩油气藏关系探讨[J]. *地质科学*, 2010, 45(4): 1098-1110. [Wu Xiaoqi, Liu Deliang, Li Zhensheng. Preliminary discussion on the relationship between post-collisional setting and volcanic reservoirs for oil and gas around Kalamaili suture zone [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2010, 45(4): 1098-1110.]
- [33] 李伍平, 路凤香, 孙善平, 等. 北京西北东岭台组(J_3d)火山岩的成因及其构造环境探讨[J]. *岩石学报*, 2000, 16(3): 345-352. [Li Wuping, Lu Fengxiang, Sun Shanping, et al. Discussion on the origin of volcanic rocks of Donglingtai Formation in Beijing Xishan Mountain and its geological setting [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16(3): 345-352.]
- [34] Rittmann A. Stable mineral assemblages of igneous rocks: A method of calculation [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1973.

- [35] 黄剑霞. 厦门港湾氧化-还原沉积环境的划分[J]. 台湾海峡, 1987, 6(1): 27-32. [Huang Jianxia. Differentiation of oxidation-reduction sedimentary environment of the Xiamen Harbour [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1987, 6(1): 27-32.]
- [36] 何衍鑫, 鲜本忠, 牛花朋, 等. 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[J]. 高校地质学报, 2017, 23(4): 737-749. [He Yanxin, Xian Benzong, Niu Huapeng, et al. Discrimination of volcanic eruption environment using oxidation index: A case study of Lower Permian volcanic rocks in northwestern margin of Junggar Basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2017, 23(4): 737-749.]
- [37] 陈福, 朱笑青. 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[J]. 地球化学, 1987(4): 341-350. [Chen Fu, Zhu Xiaoqing. The evolution of supergene weathering and its ability of supplying ore-forming elements [J]. Geochimica, 1987(4): 341-350.]
- [38] 刘成禹, 何满潮. 对岩石风化程度敏感的化学风化指数研究[J]. 地球与环境, 2011, 39(3): 349-354. [Liu Chengyu, He Manchao. Research on the sensitive chemical weathering indices to rock weathering [J]. Earth and Environment, 2011, 39(3): 349-354.]
- [39] 宋照亮, 彭渤. 关于岩石风化过程中化学组分迁移的定量研究方法[J]. 大地构造与成矿学, 2002, 26(3): 300-305. [Song Zhaoliang, Peng Bo. A discussion on quantitatively determining chemical element mobility of rock-weathering process [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2002, 26(3): 300-305.]
- [40] 徐芳芳. 七顶山红色风化壳化学元素特征分析[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2017. [Xu Fangfang. Qidingshan red weathering crust analysis of characteristics of chemical elements [D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2017.]
- [41] 邓景, 胡火炎, 李浩鸣. 我国南方风化淋滤型铁矿地质特征与成矿条件[J]. 大地构造与成矿学, 1979(2): 13-34. [Deng Jing, Hu Huoyan, Li Haowu. Geological characteristics and metallogenic conditions of weathering leaching type iron deposits in South China [J]. Geotectonica et Metallogenia, 1979(2): 13-34.]
- [42] 董有进, 杨立辉, 张硕. 风化壳中主要铁氧化物矿物的研究进展[J]. 安庆师范大学学报(自然科学版), 2018, 24(2): 85-89, 99. [Dong Youjin, Yang Lihui, Zhang Shuo. Research advances of main iron oxide minerals in weathering crust [J]. Journal of Anqing Normal University (Natural Science Edition), 2018, 24(2): 85-89, 99.]
- [43] 梁浩, 苟红光. 三塘湖盆地卡拉岗组火山岩岩石化学特征及构造环境[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2009, 24(5): 23-28, 35. [Liang Hao, Gou Hongguang. Petrochemical characteristics and structural environment of the volcanic rock of Kalagang Formation in Santanghu Basin [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2009, 24(5): 23-28, 35.]
- [44] 林潼, 焦贵浩, 孙平, 等. 三塘湖盆地石炭系火山岩储层特征及其影响因素分析[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(4): 513-517. [Lin Tong, Jiao Guihao, Sun Ping, et al. Characteristic and influencing factors of Carboniferous volcanic reservoirs in Santanghu Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(4): 513-517.]
- [45] 韩帅, 李明超, 任秋兵, 等. 基于大数据方法的玄武岩大地构造环境智能挖掘判别与分析[J]. 岩石学报, 2018, 34(11): 3207-3216. [Han Shuai, Li Mingchao, Ren Qiubing, et al. Intelligent determination and data mining for tectonic settings of basalts based on big data methods [J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(11): 3207-3216.]
- [46] 周翔. 松辽盆地北部营城组火山岩地球化学特征及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(4): 1001-1014. [Zhou Xiang. Geochemistry and tectonic implication of volcanic rocks of Yingcheng Formation in northern Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(4): 1001-1014.]
- [47] 许伟, 徐学义, 牛亚卓, 等. 北山南部二叠纪海相玄武岩地球化学特征及其构造意义[J]. 地质学报, 2019, 93(8): 1928-1953. [Xu Wei, Xu Xueyi, Niu Yazhuo, et al. Geochronology and petrogenesis of the Permian marine basalt in the southern Beishan region and their tectonic implications [J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(8): 1928-1953.]
- [48] 黎心远, 赵元艺. 黑龙江三矿沟—庄乎河地区岩浆岩年代学、地球化学研究及其俯冲构造与成矿意义[J]. 地质学报, 2018, 92(2): 244-262. [Li Xinyuan, Zhao Yuanyi. Geochronology and geochemical characteristics of igneous rocks in the Sankuanggou-Zhuanghuhe area in Heilongjiang and its implications for subduction structure and metallogeny [J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(2): 244-262.]
- [49] 丁枫, 徐忠彪, 刘寿航, 等. 西藏措勤赤马地区古近系年波组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其成因[J]. 地质论评, 2017, 63(4): 1102-1116. [Ding Feng, Xu Zhongbiao, Liu Shouhang, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages, petrochemical characteristics and petrogenesis of the Volcanic rocks from the Palaeocene-Eocene Nianbo Formation in Chima area, Coqen county, Xizang (Tibet) [J]. Geological Review, 2017, 63(4): 1102-1116.]
- [50] 李国涛, 孙丽莎, 翟孝志, 等. 西祁连清水沟地区火山岩岩石学特征及旋回研究[J]. 山东国土资源, 2016, 32(10): 25-30. [Li Guotao, Sun Lisha, Zhai Xiaozhi, et al. Study on petrological characteristics and cycle of volcano rocks in Qingshuigou area of western Qilian Mountain [J]. Shandong Land Resources, 2016, 32(10): 25-30.]
- [51] 陈鹏. 山西浑源中庄铺中生代火山岩岩石学特征及其构造意义[D]. 太原: 太原理工大学, 2016. [Chen Peng. The petrological characteristics and tectonic significance of the Meso-

- zoic volcanic rocks in Zhongzhuangpu, Hunyuan, Shanxi province [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.]
- [52] 张鑫. 内蒙古苏尼特左旗红格尔地区中生代火山岩岩石学特征[D]. 石家庄: 石家庄经济学院, 2015. [Zhang Xin. The petrological characteristics of Mesozoic volcanic rocks in Sonidzuoqi, Inner Mongolia [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang University of Economics, 2015.]
- [53] 王盘喜, 杨霄, 卞孝东. 冀中坳陷火成岩岩石学及地球化学特征[J]. 地质科技情报, 2012, 31(4): 1-10. [Wang Panxi, Yang Xiao, Bian Xiaodong. Petrologic and geochemical characteristics of igneous rock in Jizhong Depression[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(4): 1-10.]
- [54] 吴明仁, 楼法生, 宋志瑞, 等. 西天山塔尔得套地区乌郎组地球化学特征和构造环境[J]. 东华理工学院学报, 2006, 29(3): 217-224. [Wu Mingren, Lou Fasheng, Song Zhirui, et al. Tectonic setting and geochemistry of the Wulang Formation in taerdetao, West Tianshan[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2006, 29(3): 217-224.]
- [55] 张超, 董丽霞, 徐达, 等. 新疆巴里坤县老爷庙、额仁山一带晚古生代火山岩[J]. 新疆地质, 2005, 23(3): 225-229. [Zhang Chao, Dong Lixia, Xu Da, et al. Late palaeozoic volcanic rocks in Lao-Ye Miao (Temple) and Er-ren Shan (Mountain), Balikun county, Xinjiang [J]. Xinjiang Geology, 2005, 23(3): 225-229.]
- [56] 刘建清, 何利, 胡宇瀚, 等. 四川雷波峨眉山玄武岩岩石学及地球化学特征[J]. 地球学报, 2020, 41(3): 325-336. [Liu Jianqing, He Li, Hu Yuhan, et al. The petrological and geochemical characteristics of Emei Shan Basalt in Leibo county, Sichuan province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2020, 41(3): 325-336.]
- [57] 赵海玲, 李小光, 陈振岩, 等. 辽河油田坨32井区中生界火山岩岩石学特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(4): 549-556. [Zhao Hailing, Li Xiaoguang, Chen Zhenyan, et al. Petrology and genesis of Mesozoic volcanic rocks in Tuo32 well block of Liaohe oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(4): 549-556.]
- [58] 王岚, 李文厚, 林潼, 等. 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[J]. 地质科学, 2010, 45(4): 1088-1097. [Wang Lan, Li Wenhou, Lin Tong, et al. A comparative analysis of submarine eruptive and subaerial eruptive volcanics reservoir on characteristics of reservoir and reservoir forming dominated factor: Taking Carboniferous volcanics reservoir in Santanghu Basin as example [J]. Chinese Journal of Geology, 2010, 45(4): 1088-1097.]
- [59] 朱卡, 李兰斌, 梁浩, 等. 三塘湖盆地石炭系火山岩喷发环境及储层特征研究[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(3): 49-54. [Zhu Ka, Li Lanbin, Liang Hao, et al. The eruption environment and reservoir characteristics of Carboniferous volcanic rocks in Santanghu Basin [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(3): 49-54.]
- [60] 马雪, 冯成贵, 虞卫东. 新疆巴里坤县三塘湖北卡拉岗组火山岩特征[J]. 新疆地质, 2005, 23(3): 234-238. [Ma Xue, Feng Chenggui, Yu Weidong. Kalagang lava Formation, north Santanghu Lake, Balikun, Xinjiang [J]. Xinjiang Geology, 2005, 23(3): 234-238.]
- [61] 闫玉魁. 三塘湖盆地石炭系火山岩构造背景与油气成藏[J]. 中国矿业, 2009, 18(6): 46-49, 52. [Yan Yukui. Tectonic background and hydrocarbon accumulation of Carboniferous volcanic in Santanghu Basin [J]. China Mining Magazine, 2009, 18(6): 46-49, 52.]
- [62] 李玮, 柳益群, 董云鹏, 等. 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[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2012, 42(11): 1716-1728. [Li Wei, Liu Yiqun, Dong Yunpeng, et al. The geochemical characteristics, geochronology and tectonic significance of the Carboniferous volcanic rocks of the Santanghu area in northeastern Xinjiang, China [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2012, 42(11): 1716-1728.]
- [63] 侯连华, 邹才能, 刘磊, 等. 新疆北部石炭系火山岩风化壳油气地质条件[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 533-540. [Hou Lianhua, Zou Caineng, Liu Lei, et al. Geologic essential elements for hydrocarbon accumulation within Carboniferous volcanic weathered crusts in northern Xinjiang, China [J]. Acta Petroli Sinica, 2012, 33(4): 533-540.]
- [64] 邹才能, 侯连华, 陶士振, 等. 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[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2011, 41(11): 1613-1626. [Zou Caineng, Hou Lianhua, Tao Shizhen, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism and structure of large-scale volcanic weathering crust of the Carboniferous in northern Xinjiang, China [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2011, 41(11): 1613-1626.]

Discrimination Method of Oxidation Index of Volcanic Rock in Land and Underwater Eruption Environments

WU HongMei¹, CHEN YaJun¹, MENG PengFei², MA Qiang³, SONG XiaoYong¹, HE XingHua^{4,5},
YU JiaYi², HE BoBin²

1. China United Academy of Petroleum Sciences, Beijing 100101, China

2. Research Institute of Exploration and Development, Turpan Hami Oilfield Company, PetroChina, Hami, Xinjiang 839009, China

3. Research Institute of Exploration and Development, Yumen Oilfield Company, PetroChina, Jiuquan, Gansu 735019, China

4. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Paleogeographic environment is one of the key factors controlling the development of volcanic oil and gas reservoirs. At present, the research on the discrimination between terrestrial and underwater eruptive sedimentary volcanic rocks mainly focuses on the characteristics of lithologic association, structural structure, alteration, occurrence, pore and fracture development, however, the study of using geochemical characteristics of volcanic rocks to reflect and record volcanic eruption environment has not been paid attention to. In this study, Fe_2O_3/FeO and $Fe_2O_3/(Fe_2O_3+FeO)$ are used as the oxidation coefficients of volcanic rocks, and the influence of rock acidity, weathering leaching, dissolution and alteration, tectonic background and other factors are fully considered, which improves the traditional discrimination standard of volcanic eruption environment based on the oxidation coefficient of volcanic rocks. The results of practical application in Malang Sag of Santanghu Basin, Xinjiang show that, the sedimentary environment of volcanic eruption in Kalang Formation is complex, which is mainly land oxidation environment, and the complex environment of frequent water land alternation also exists, and the eruptive deposits of the volcanic rocks in the Haerjiawu Formation are relatively single, and they are mainly deposited in an underwater reducing environment; the results are consistent with those obtained by predecessors on the basis of the combination of volcanic paragenetic rocks and fossils, weathering crust and trace element ratio characteristics of some mudstones sandwiched by volcanic rocks, also this geochemical method is universal, the Identification map can be used to distinguish the paleogeographic environment of volcanic eruption deposits in different basins and geological ages.

Key words: subaerial volcanic sedimentary rocks; subaqueous volcanic sedimentary rocks; oxidation index; paleogeographic environment; Malang Sag; Upper Carboniferous