

火山岩不同喷发环境识别标志及喷发模式： 以准噶尔盆地东部石炭系为例^{*}

周 勇^{1,2} 梁 涛^{1,2} 赵祥宇³ 纪友亮^{1,2} 王 剑⁴
卢轶伦⁵ 陈 俊⁴ 严可欣^{1,2}

- 1 中国石油大学（北京）油气资源与工程全国重点实验室，北京 102249
2 中国石油大学（北京）地球科学学院，北京 102249
3 中国海洋石油国际有限公司，北京 100020
4 中国石油新疆油田分公司实验检测研究院，新疆克拉玛依 834000
5 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司，河北涿州 072751

摘 要 喷发环境对于火山岩储集层的形成和发育具有重要的影响，不同喷发环境下形成的火山岩储集层在储集空间类型、物性特征等方面均有较大的差异，因此准确识别喷发环境、明确不同喷发环境的特征和岩相组合及建立火山喷发模式，对于准噶尔盆地火山岩成因分析、古环境恢复及有利储集层预测具有重要的理论意义和现实意义。文中以准噶尔盆地东部地区石炭系火山岩为研究对象，综合利用野外露头、岩心、测录井、镜下薄片、元素地球化学和有机地球化学等分析资料，确定喷发环境的识别标志，分析不同喷发环境下的岩相组合特征，最终建立不同喷发环境下火山岩的喷发模式。研究结果表明：（1）准噶尔盆地东部地区火山岩喷发环境分为水下喷发和陆上喷发 2 种，其中水下环境中的火山岩受水体环境影响，发育珍珠岩、细碧岩、石泡流纹岩等特殊岩性，常与沉积岩互层，并具有枕状构造、石泡构造、冻鱼层构造及晶形不完整、玻璃质含量高等结构构造特征，而陆上喷发环境中的火山岩通常具有气孔发育、晶形完整、氧化系数高等特征。（2）早石炭世准噶尔盆地东部地区以水下喷发环境为主，表现为自西向东水体逐渐加深，Sr/Ba 值由 0.22 增大至 1.77，指示其由淡水环境经半咸水环境过渡至咸水环境；晚石炭世以水上环境为主，表现为氧化系数多大于 0.5，在局部地区存在水下环境，且水体较浅。（3）准噶尔盆地东部地区的水上、水下 2 种喷发模式可分别划分为近火山口和远离火山口共 4 种岩相组合类型，水上喷发模式主要表现为爆发相和溢流相，水下喷发模式则主要表现为爆发相、侵入相、溢流相和火山沉积相。

关键词 准噶尔盆地 石炭系 火山岩 喷发环境 岩相组合 喷发模式

第一作者简介 周勇，男，1984 年生，中国石油大学（北京）副教授，博士生导师，主要从事层序地层学、沉积学及储层地质学方面的研究。E-mail: zhouyong@cup.edu.cn。

文献标志码：A

Identification marks and eruption patterns of volcanic rocks in different eruption environments: a case study of the Carboniferous in eastern Junggar Basin

^{*} 中国石油天然气集团有限公司-中国石油大学（北京）战略合作科技专项（编号：ZLZX2020-02）、国家自然科学基金项目（编号：42072115）共同资助。[Co-funded by the Strategic Cooperation Technology Projects of CNPC and CUPB (No. ZLZX2020-02) and the National Natural Science Foundation of China (No. 42072115)]

收稿日期：2023-09-28 改回日期：2024-05-15

ZHOU Yong^{1,2} LIANG Tao^{1,2} ZHAO Xiangyu³ JI Youliang^{1,2}

WANG Jian⁴ LU Yilun⁵ CHEN Jun⁴ YAN Kexin^{1,2}

¹ National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

² College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

³ CNOOC International Limited, Beijing 100020, China

⁴ Research Institute of Exploration and Detection of Xinjiang Oilfield Branch Company, Xinjiang Karamay 834000, China

⁵ Bureau of Geophysical Prospecting INC., China National Petroleum Corporation, Hebei Zhuozhou 072751, China

Abstract The eruption environment has an important impact on the formation and development of the volcanic rock reservoir. Therefore, accurately identify the eruption environment, and clarify the characteristics of different eruption environments and the combination of rock phase, which has far-reaching guiding significance for volcanic rock oil and gas exploration and development. This article uses the carboniferous volcanic rocks as the research object, and comprehensively uses analysis materials such as field display, core, well logging, rock slices, elements of geomechanically and organic global chemistry. First of all, the identification signs of different eruption environments are determined. Secondly, the characteristics of rock phase combination in different eruption environments are analyzed, and the eruption mode of volcanic rocks in different eruption environments is finally established. The results indicate: (1) The eastern Junggar Basin volcanic rock eruption environment is divided into two types: subaqueous eruption and subaerial eruption. Subaqueous eruption volcanic rocks often develop special lithology such as perlite, sprite and sepiolite rhyolite, and have structural characteristics such as pillow structure, sepiolite structure, frozen fish layer structure, incomplete crystal form and high glass content. Subaerial eruption environmental volcanic rocks usually have the characteristics of stomatal development and complete crystal shape and high oxidation coefficient. (2) The Early Carboniferous water bodies in the study area are widely distributed, mainly subaqueous, and have the characteristics of deepening water from west to east. The distribution of water body in Late Carboniferous is limited, mainly on land. Some areas have subaqueous environment. (3) There are two eruption modes, subaqueous eruption and subaerial eruption, which can be divided into four types of lithofacies association: lithofacies assemblage near crater in subaqueous environment; lithofacies assemblage away from crater in subaqueous environment; lithofacies assemblage near crater in subaerial environment; lithofacies assemblage away from crater in subaerial environment. The subaqueous eruption mode mainly consists of eruption phase and overflow phase, while the subaerial eruption mode mainly consists of eruption phase, invasion phase, overflow phase and volcanic sedimentary phase.

Key words Junggar Basin, Carboniferous, volcanic rock, eruptive environment, lithofacies association, eruption pattern

About the first author ZHOU Yong, born in 1984, Ph. D., is an associate professor and doctoral supervisor in China University of Petroleum (Beijing). His research interests are sequence stratigraphy, sedimentology and reservoir geology. E-mail: zhouyong@cup.edu.cn.

随着国内外油气资源需求的增加,火山岩油气藏已经成为全球油气勘探开发的重要领域,目前已在全球 50 多个国家和地区发现了火山岩油气藏或

者与火山作用有关的油气显示,其中 13 个国家的 40 个盆地火山岩中已获得工业性油气流和大规模的储量(唐华风, 2020)。喷发环境作为火山岩形

成的第一环境，对火山岩储集层储集空间的发育具有至关重要的影响。根据火山岩喷发所处的地理环境可将火山岩喷发环境分为陆上喷发和水下喷发2种环境（Le Maitre, 1976；张艳等，2007；王岚等，2010；王盛鹏等，2012；Shan *et al.*, 2013），其中陆上喷发环境主要是指岩浆在陆地上喷发并逐渐凝固结成岩，且该喷发产物能够长时间保存在水体之外的环境，而水下喷发环境主要是指在火山活动发生在湖、海及其周边，且喷发产物可快速进入、接触一定深度的水体并能够保存的环境。陆上、水下2种喷发环境在化学介质、外界压力、温度等方面均有很大差异，因此，其形成的火山岩通常具有不同的物理化学性质，并对储集层物性产生重要的影响。一些学者从岩石类型、岩性组合、结构构造、矿物成分、火山物质堆积类型、后期蚀变等方面对不同环境中的火山岩的识别标志进行了研究（Sruoga *et al.*, 2004, 2007；王静等，2008；朱卡等，2012）。有关火山岩油气储集层的研究多以陆上喷发沉积的火山岩为主，但地球上3/4的火山活动发生在海平面以下（Embley *et al.*, 2006），且由于水下喷发的火山活动一般无法直接观测，因此水下喷发沉积火山岩的研究难度较大。Büttner（1999）采用模拟实验的方式来研究岩浆与水反应之后形成的结构构造，国外一些学者对水下喷发火山的火山岩岩性、产状、形态等进行研究，并将水下喷发火山与陆上喷发火山进行对比（Lafrance *et al.*, 2000；Parfitt *et al.*, 2002；Embley *et al.*, 2006；Seghedi, 2011），进一步推动了火山岩喷发环境的研究。

近年来，准噶尔盆地东部地区石炭系火山岩油气勘探取得了巨大进展，其中克拉美丽千亿方大气田的发现凸显了火山岩油气藏的巨大潜力。准噶尔盆地构造运动复杂，火山岩形成环境尚不明确，既存在陆上喷发，也存在水下喷发，不同喷发环境形成的火山岩储集层特征具有较大差异。前人更多的研究集中在不同喷发环境形成的火山岩岩石学特征、储集空间类型和成岩作用等方面（余淳梅等，2004；张勇，2013；刘小洪等，2016；杨凯凯，2016；王林涛，2017），对于水下喷发究竟是深水喷发还是浅水喷发或者水体究竟是淡水还是咸水，并未进行相关研究。基于此，笔者选取准噶尔盆地东部克拉美丽地区石炭系火山岩为研究对象，综合

利用野外露头、岩心、测录井资料、镜下薄片、元素地球化学和有机地球化学分析等资料，在宏观和微观岩石学特征识别的基础上，结合与火山岩互层的沉积岩有机地球化学指标，准确和系统地判别研究区石炭系火山岩的喷发环境，并根据不同喷发环境下火山机构不同位置岩相组合类型，建立火山岩喷发模式。该研究结果对于准噶尔盆地火山岩成因分析、古环境恢复及有利储集层预测具有重要的理论意义和现实意义。

1 地质背景

准噶尔盆地位于新疆维吾尔自治区北部，是一个夹持于西伯利亚板块、哈萨克斯坦板块和塔里木板块之间的南宽北窄的三角形地体，平面上呈隆凹相间、南北分带、东西分块的构造格局（马超等，2019）。研究区位于准噶尔盆地东部克拉美丽山前的陆东—五彩湾地区，主要范围包括滴北凸起、滴水泉凹陷、滴南凸起、五彩湾凹陷、白家海凸起、沙帐褶皱带、石树沟凹陷等多个二级构造单元（图1）。

受板块俯冲运动的影响，准噶尔盆地东部（下文简称“准东地区”）部分地区在石炭纪发生海进、海退的交互，区域上整体表现为由海相向陆相转变的趋势（刘晓康等，2018；宁文涛，2019）。准东地区早石炭世火山岩主要形成于岛弧环境，整体为海相或海陆过渡相的环境（图2-a），而晚石炭世火山岩的形成环境逐渐过渡为大陆板块环境，整体为海陆过渡相和陆相环境（图2-b）（吴晓智等，2008；王绪龙等，2013；王启宇等，2014；李涤，2016；张顺存等，2018）。准东地区石炭系为一套火山岩、火山—沉积岩和沉积岩的组合，具有多期喷发改造的特征，自下而上发育下石炭统滴水泉组（ C_1d ）和松喀尔苏组（ C_1s ）、上石炭统巴塔玛依内山组（简称“巴山组”）（ C_2b ）和石钱滩组（ C_2sh ）。滴水泉组为一套海相及海陆交互地层，含有大量早石炭世腕足类、双壳类及腹足类化石。松喀尔苏组主要发育中酸性火山熔岩、流纹岩、安山岩，夹有凝灰岩、凝灰质角砾岩等火山碎屑岩。巴山组在整个准东地区广泛发育，主要为一套火山岩、火山碎屑岩夹沉积岩建造，整体表现为上、下2套火山岩夹中间1套碎屑岩沉积。石钱滩组为巴山组顶部不整合面之上的一套滨海—浅

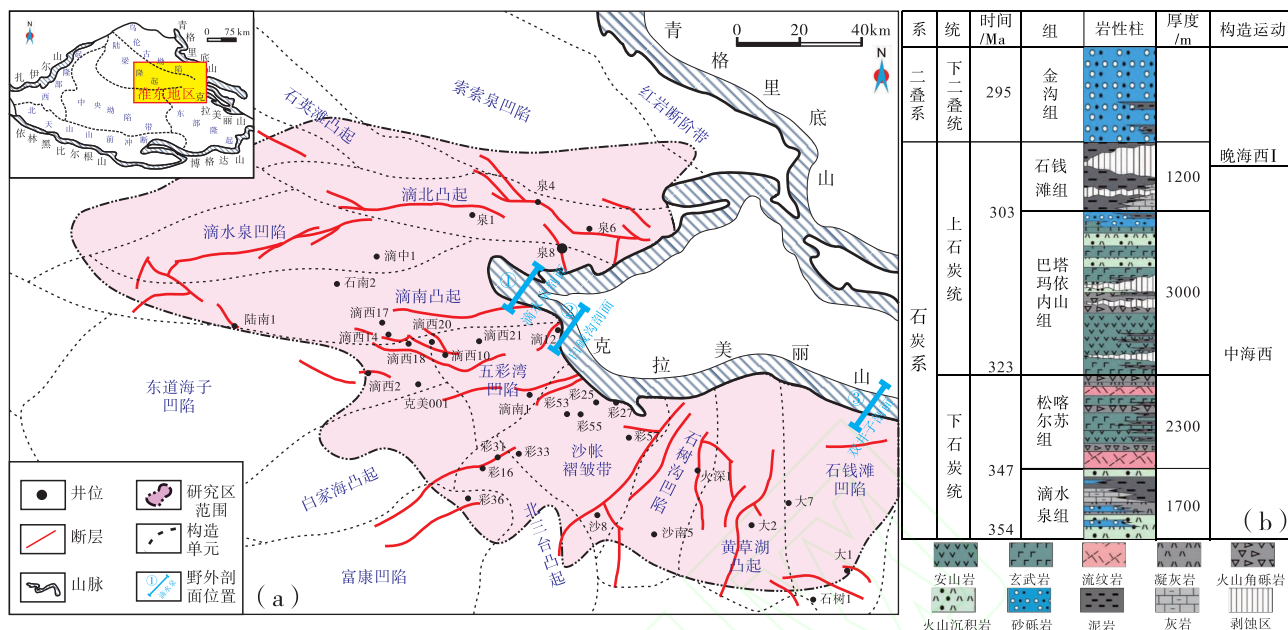


图 1 准东地区构造单元划分及石炭系地层柱状图
 Fig. 1 Structural unit division and the Carboniferous stratigraphic histogram in eastern Junggar Basin

海相地层建造, 含大量海百合茎、珊瑚、腕足类、双壳类等化石。准东地区石炭系火山岩主要分布在松喀尔苏组和巴山组(图 2), 是目前油气勘探开发的重点对象。

2 不同喷发环境识别标志

火山活动过程中的矿物熔融和岩浆冷凝作用是矿物形成的重要内生作用之一, 当处于不同喷发环境时, 空气、水等外生元素是否参与岩浆成矿的过程, 对于矿物的形成会有较大的影响, 进而使得不同喷发环境下形成的火山岩在一定程度上具有不同的岩石学特征。因此, 不同喷发环境下形成的火山岩在其岩性组合、宏观构造以及微观结构上会存在明显的区别。在准东地区, 主要表现为石炭系火山岩的岩石类型、颜色、结构构造等的不同以及相邻沉积岩的岩石学特征、所含化石类型及地球化学特征等方面的差异。

2.1 水下喷发环境识别标志

2.1.1 岩石类型及岩性组合

水下喷发环境形成的火山岩有熔岩类、火山碎屑岩和火山沉积岩 3 个大类, 其中珍珠岩、细碧岩、石泡流纹岩和枕状熔岩为水下喷发环境形成的

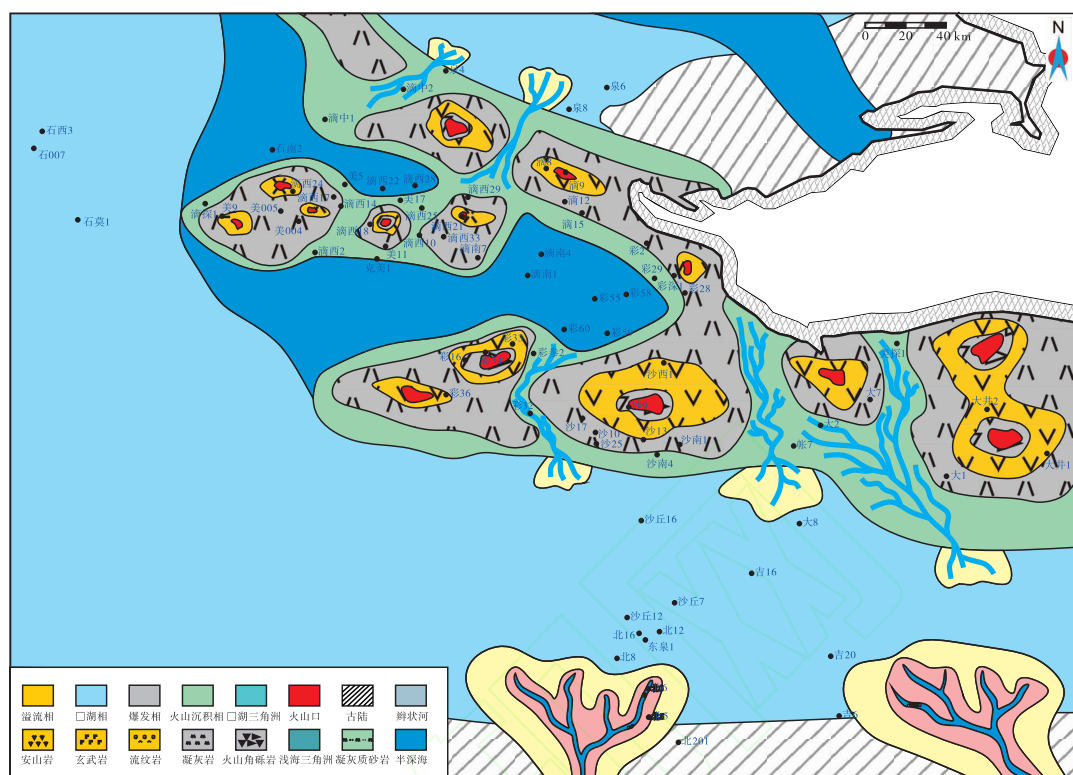
最典型的特征岩石类型。

水下喷发火山岩受水体搬运、沉积作用影响, 常出现与沉积岩互层现象。准东地区白碱沟西沟剖面松喀尔苏组出现大段火山熔岩与暗色泥岩互层段(图 3-a, 3-b), 滴水泉剖面北部出现火山沉积岩与沉积岩互层、大段暗色泥岩与碳质泥岩和灰岩互层(图 3-c, 3-d), 且在互层的沉积岩中发现海百合茎化石(图 3-e) 和海相腕足类德比贝化石(图 3-f)。德比贝属(Derbyia) 外壳为半圆形、两瓣凸起、壳上有许多纤细呈放射状的螺纹和突出的生长线, 主要生活于早石炭世至晚二叠世的海洋中(King, 2003), 进一步指示水下沉积环境。

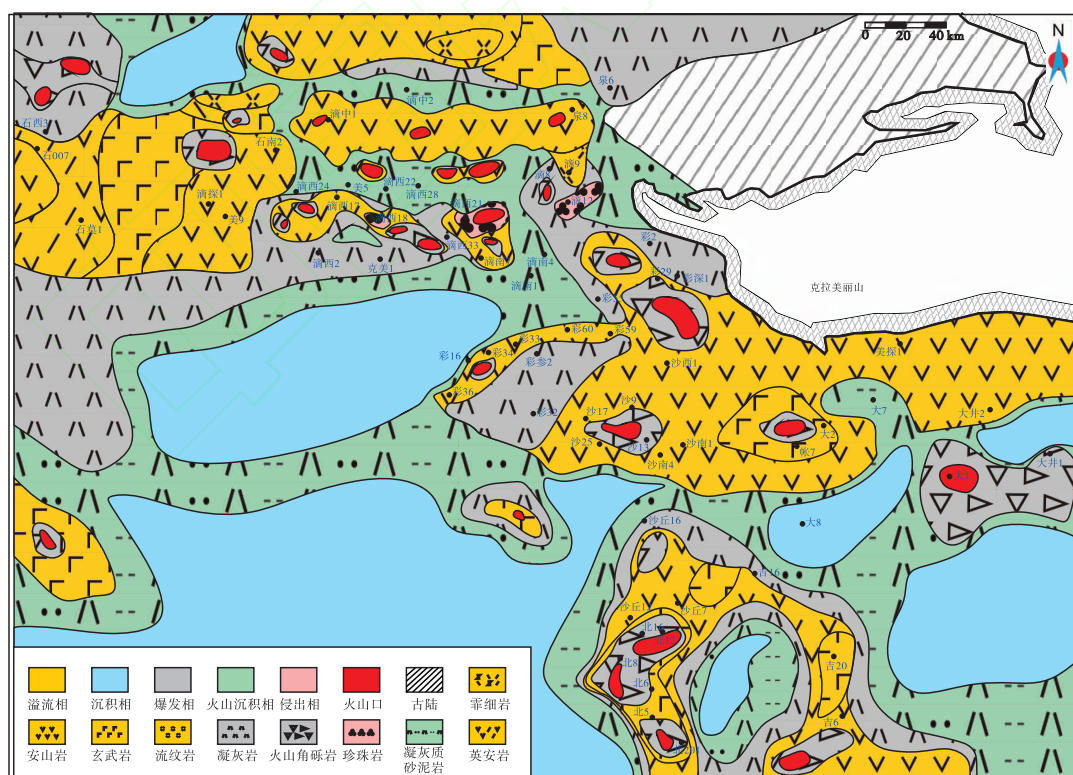
2.1.2 岩石结构、构造

火山在水下喷发时, 由于温度骤降, 熔岩遇水急剧淬火, 可形成一些特殊的岩石结构和构造特征。研究区常见的反映水下喷发环境形成的岩石结构和构造特征主要有珍珠结构、细碧结构、中空骸晶结构等。

1) 珍珠结构: 珍珠岩的特殊结构, 以具有同心圆的弧形裂纹为特征, 是一种水下环境形成的高含水的玻璃质岩石, 其球形裂纹是岩浆接触低温水体后来不及结晶而迅速收缩形成的(图 4-a)。研究区滴水泉井区滴 9 井、滴西 21 井、滴西 10 井、



(a)

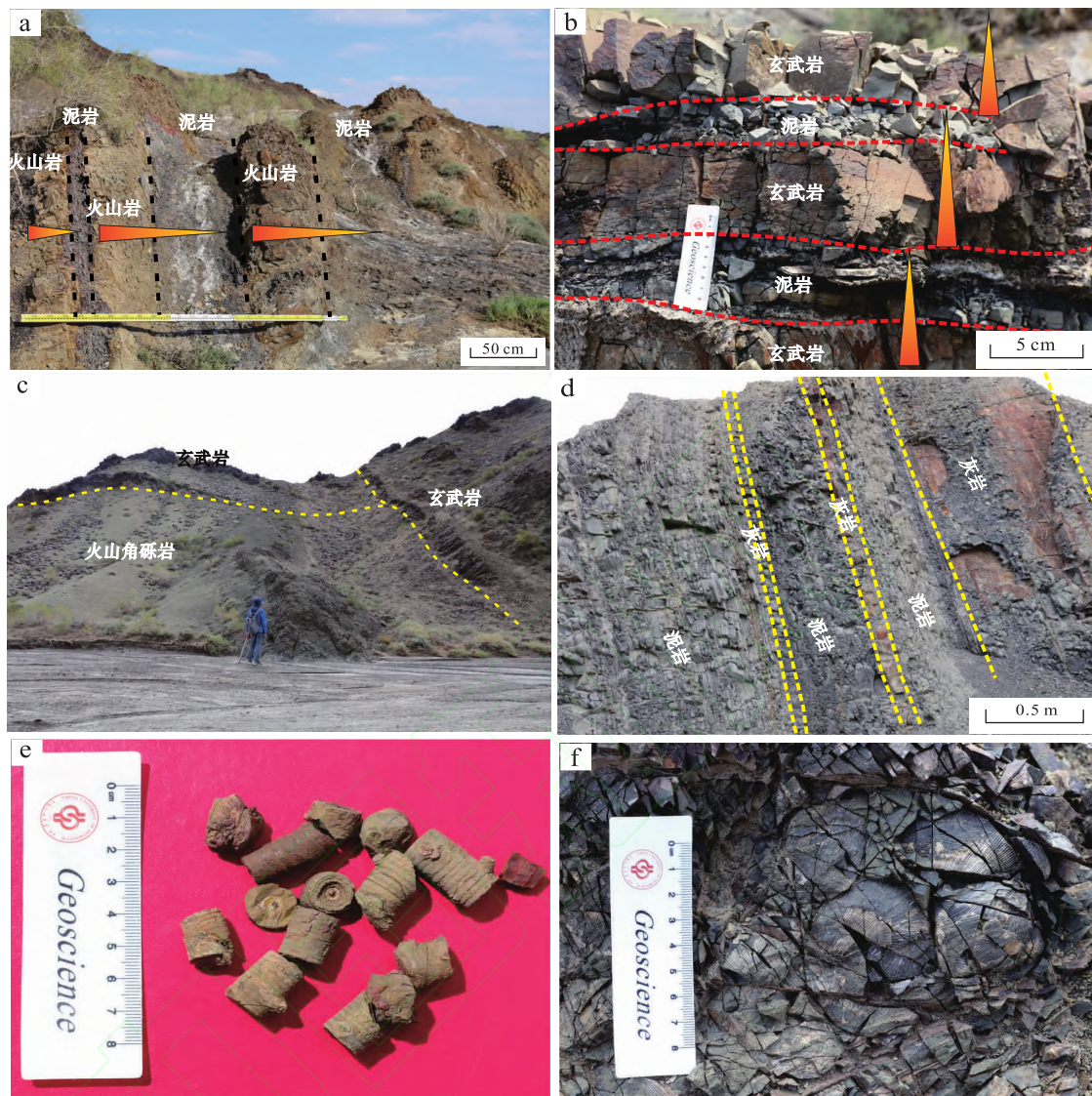


(b)

a—早石炭世火山岩岩相分布图；b—早石炭世火山岩岩相分布图

图 2 准东地区石炭系火山岩喷发环境—岩相分布图

Fig. 2 Volcanic eruption environment-lithofacies distribution map of the Carboniferous in eastern Junggar Basin



a/b—玄武岩与暗色泥岩互层，白碱沟东沟剖面， C_1s ；c—火山角砾岩与玄武岩，白碱沟东沟剖面， C_1s ；d—暗色泥岩与碳质泥岩和灰岩互层，滴水泉剖面， C_1d ；e—海百合茎化石，滴水泉剖面， C_1d ；f—腕足类海相化石（德比贝属-Derbyia），壳上有许多纤细呈放射状的螺线纹和突出的生长线，滴水泉剖面， C_1d

图 3 准东地区石炭系水下喷发火山岩岩石类型及岩性组合特征

Fig. 3 Rock types and lithologic assemblages of the Carboniferous volcanic rocks formed in subaqueous eruptive environment in eastern Junggar Basin

滴西 22 井均发现大段珍珠岩。

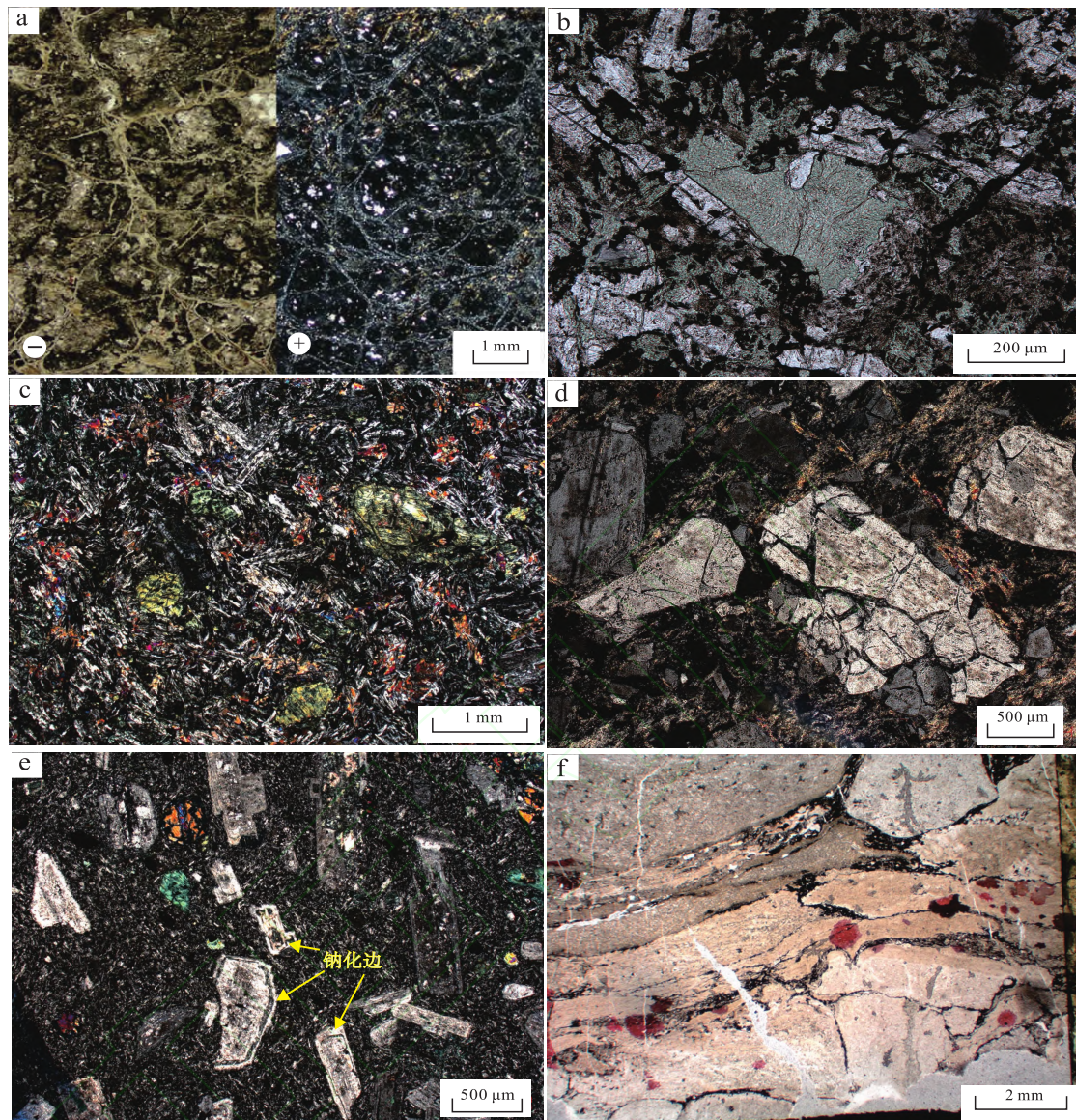
2) 细碧结构：水下喷发基性熔岩的典型结构，常见于细碧岩中，是岩浆中的矿物在水中冷却形成的一种微晶结构。由于冷凝淬火作用，使得长石结晶不完全，边缘参差不齐，搭成格架并充填团块状、絮状玻璃质(图 4-b)。泉 4 井可见典型细碧岩。

3) 中空骸晶结构：水下形成的中基性熔岩因急剧淬火而出现的特殊结构。镜下可观察到细长条的柱状钠长石骸晶，其内部中空，大多充填绿泥石

或玻璃质长石，边缘常参差不齐(图 4-c)，被认为是水下喷发的特征结构之一。

4) 斑晶自碎结构：是矿物形成后在低温条件下原地炸裂、未发生明显位移的一种特殊结构(图 4-d)。研究区滴西 14 井和滴西 22 井均发现斑晶自碎结构。

5) 钠化边结构：当水体盐度较高或水环境为高钠环境时，会发生钠长石化或形成钠化边结构(图 4-e)，还可形成具有高钠成分的角斑岩。



a—珍珠构造明显，冷凝收缩形成同心球面裂纹，滴 9 井，1411.3 m， C_2b ；b—细碧岩，发育细碧结构，泉 4 井，2527.27 m， C_2b ；c—中空骸晶结构，蚀变玄武岩，滴西 34 井，3960 m， C_2b ；d—长石斑晶具自碎斑结构，晶屑凝灰岩，滴西 14 井，3840.58 m， C_2b ；e—长石斑晶钠化边结构，后期被方解石、绿泥石交代，安山岩，彩 203 井，3079.5 m， C_2b ；f—水携型沉积构造，凝灰质角砾岩，滴西 14 井，3959.66 m， C_2b

图 4 准东地区石炭系水下喷发火山岩岩石微观结构特征

Fig. 4 Micro-petrological characteristics of the Carboniferous volcanic rocks formed in subaqueous eruptive environment in eastern Junggar Basin

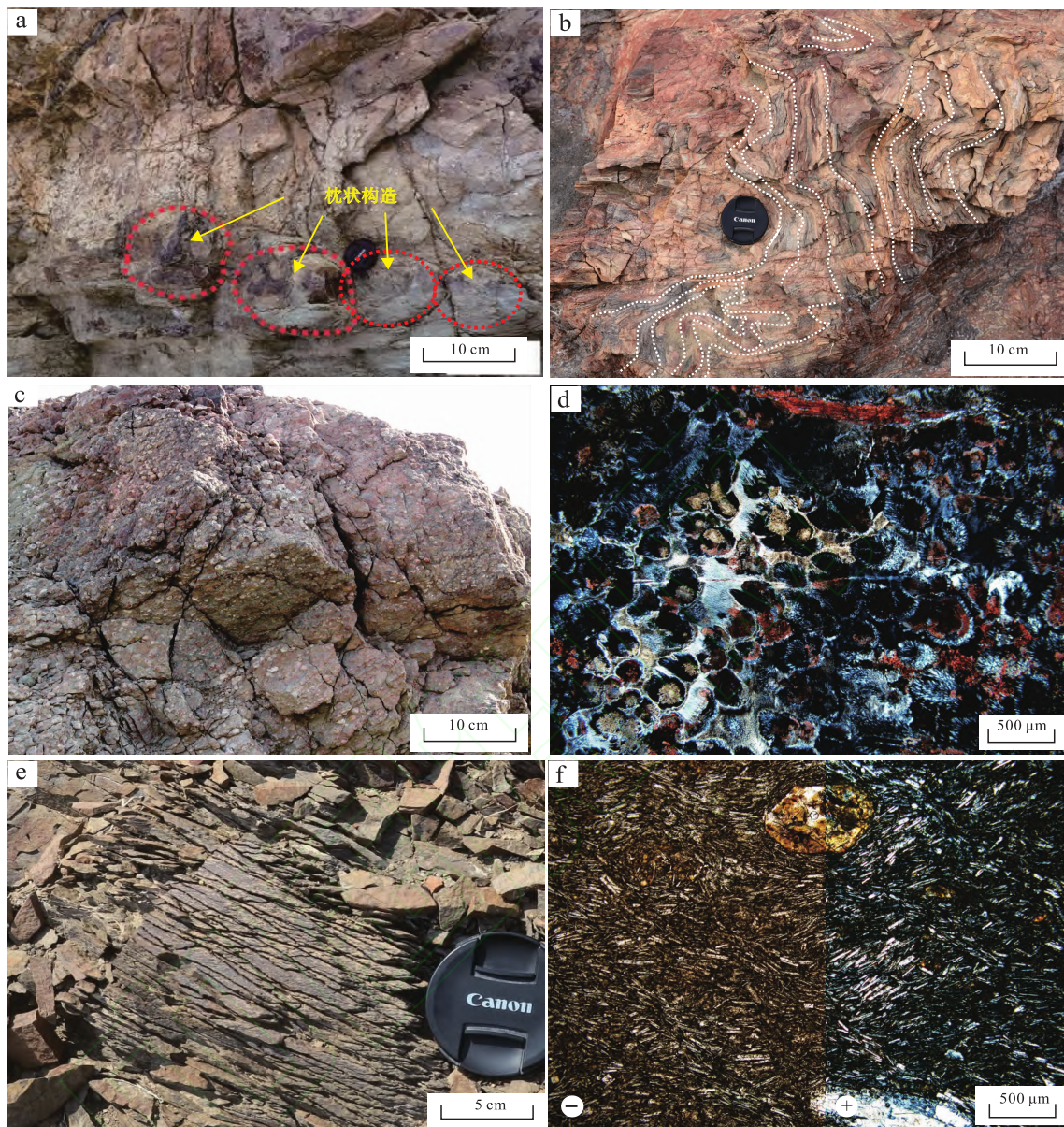
6) 水携沉积流动构造：常见于火山碎屑岩中。水下形成的火山角砾岩和粗粒火山沉积岩具有较大的孔缝空间，这些缝隙会快速地被细粒沉积物充填，可见水体流动进入孔缝时的流动特征（图 4-f）。

7) 枕状构造：水下喷发的典型特征，是基性熔岩在海底喷出后遇海水急剧冷却收缩成岩的结果

（图 5-a）。在白碱沟松喀尔苏组可见。

8) 变形流纹构造：流纹岩中的一种特殊构造，是典型的水下火山岩构造之一。为酸性岩浆喷出之后，在水体扰动作用下发生的变形（图 5-b），见于白碱沟剖面。

9) 石泡构造：在酸性岩浆中，当岩浆含量较少时，含有挥发分的岩浆和水体冷接触时和大量的



a—枕状玄武岩, 发育枕状构造, 白碱沟西沟剖面, C_1s ; b—变形流纹构造, 白碱沟西沟剖面, C_1s ; c—石泡流纹岩, 发育石泡构造, 白碱沟西沟剖面, C_1s ; d—为照片 c 的镜下微观照片, 石泡构造; e—“冻鱼层”构造, 层状凝灰质熔岩, 双井子剖面, C_2b ; f—为照片 g 的镜下微观照片, 受压结作用影响, 长条状斑晶定向排列, 双井子剖面, C_2b

图 5 准东石炭系水下喷发火山岩岩石宏观构造特征

Fig. 5 Macro-petrological characteristics of volcanic rocks formed in subaqueous eruptive environment in Eastern Junggar Basin

水发生反应, 由于岩浆粘度较大且球体表面张力最小, 从而会形成含有较多挥发分的酸性岩浆球, 进而冷却形成酸性火山岩中的特殊构造——石泡构造。研究区白碱沟剖面发育典型的石泡构造流纹岩(图 5-c, 5-d), 指示其形成于水下喷发环境。

10)“冻鱼层”构造: 塑性熔岩块平行排列并挤压成似“冻鱼”的构造, 常出现于水下环境。双井子剖面层状凝灰质熔岩中发育典型的冻鱼层构

造, “鱼体”头大尾小, 一般长 5~15 cm, 宽 2~10 cm (图 5-e), 既具有塑性又具有压结的特点。该类构造是岩浆迅速冷却经压结而成的, 受压结作用影响, 镜下见长条状斑晶定向排列(图 5-f)。

2.1.3 地球化学标志

地球化学元素可以准确地反映岩石的化学成分, 是判断火山岩形成环境的有力手段。笔者主要从 2 个方面来进行地球化学分析, 其中一方面是针

对火山岩，主要利用氧化系数来反映火山岩形成的氧化还原环境，而另一方面是针对与火山岩互层的沉积岩，利用有机地球化学和无机地球化学特征来判断沉积岩夹层所处水体的古盐度、古氧化度和所含的生物标志化合物。通过选取关键地球化学参数，总结准东地区沉积环境地球化学识别分级标准，判断火山岩喷发形成时的古环境(表 1)。

2. 1. 3. 1 火山岩地球化学标志

不同环境形成的火山岩在化学成分上具有显著差别，由于陆上和水下环境氧含量的差别，火山岩中的变价元素铁的氧化物 ($\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}$) 含量差别比较大，陆上氧化环境表现为高价态铁 (Fe_2O_3) 富集，而水下还原环境表现为低价态铁 (FeO) 富集。前人通常将火山岩氧化系数 ($\text{OX} = \text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO})$) 作为判断火山岩喷发环境的重要指数 (李明连和蓝恒春, 2014)。笔者选取研究区 75 块火山岩岩心样品进行主量元素测试，岩性包括玄武岩、安山岩、珍珠岩，样品测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心进行。通过计算氧化系数，投点于经过岩浆酸度校正的氧化系数识别环境图版 (何衍鑫等, 2017) (图 6)，结果表明研究区下石炭统火山岩 OX 值小于 0.5，为还原环境，上石炭统火山岩 OX 多大于 0.5，以氧化环境为主，整体表现为自早石炭世至晚石炭世由还原环境过渡

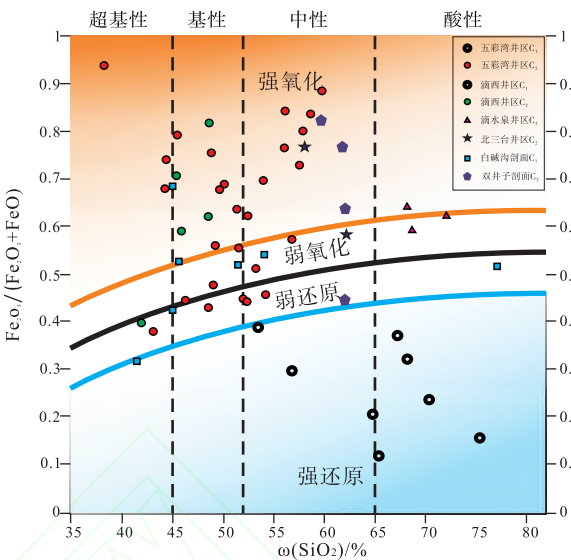


图 6 准东地区石炭系火山岩氧化系数散点图

(图版据何衍鑫修改, 2017)

Fig. 6 Scatter plot of oxidation coefficient of the Carboniferous volcanic rocks in eastern Junggar Basin (base map according to He, 2017)

至氧化环境。

2. 1. 3. 2 与火山岩互层的泥岩无机地球化学特征

研究区除火山岩之外，还发育大面积大量与火山岩呈互层的沉积岩（暗色泥岩和灰岩）。该类沉积岩通常形成于火山短暂的喷发间隙，或火山喷发过程中存在突发的小股海水侵入事件，形成沉积岩

表 1 地球化学方法识别环境分级标准

Table 1 Environmental Classification Standard for Geochemical Identification

判断指标		指标分级			适用范围	资料来源
古盐度	Sr/Ba	淡水 (<0.5)	半咸水 (0.5~1)	咸水 (>1)	与火山互层泥岩	王益友等, 1979
	(MgO/Al ₂ O ₃) × 100	淡水 (<1)	半咸水 (1~10)	咸水 (>10)	与火山互层泥岩	田洋等, 2014
	B	低盐 (<200)	半咸水—正常 (200~400)	超咸 (>400)	与火山互层泥岩	Couch, 1971
	B/Ga	淡水 (<3)	过渡 (3~4.5)	咸水 (>4.5)	与火山互层泥岩	孙立广等, 2000
氧化还原性	U/Th	氧化 (<0.75)	贫氧 (0.75~1.25)	厌氧 (>1.25)	与火山互层泥岩	Jones and Mammig, 1994
	V/(V+Ni)	氧化 (<0.46)	贫氧 (0.46~0.6)	厌氧 (>0.6)	与火山互层泥岩	Lewan and Maynard, 1982
	V/Cr	氧化 (<2)	贫氧 (2~4.25)	厌氧 (>4.25)	与火山互层泥岩	Ernst, 1970
	Ce/La	氧化 (<1.5)	贫氧 (1.5~1.8)	厌氧 (>2.0)	与火山互层泥岩	吴明清等, 1992
	OX (火山岩)	氧化 (>0.5)		还原 (<0.5)	火山岩	李明连和蓝恒春, 2014
	Ce _{anom}	氧化 (<-0.1)		缺氧 (>-0.1)	与火山互层泥岩	吴明清等, 1992
有机地化	甾烷	4-甲基甾烷和甲萜甾烷具有海相或湖相指示意义			与火山互层泥岩	侯读杰和王铁冠, 1995
	正构烷烃	奇偶优势高碳数 (>C ₂₃) (陆源有机质)	奇偶优势不明显中等相对分子量 (nC ₁₅ ~nC ₁₇)		与火山互层泥岩	付修根等, 2007
	Pr/Ph	强还原 (0.2~0.8)	还原 (0.8~2.8)	弱氧化—弱还原 (2.8~4.0)	与火山互层泥岩	Hughes et al., 1995
	三环菇烷	陆相相对含量低		海相或湖相相对含量高	与火山互层泥岩	付修根等, 2007

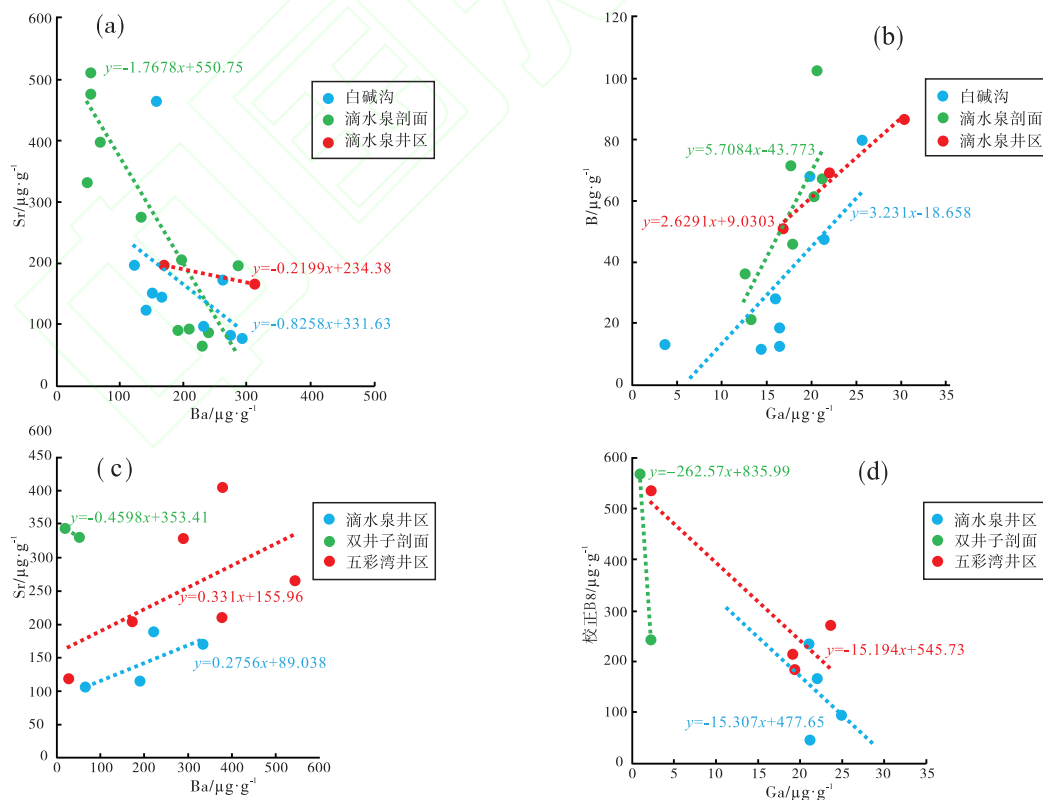
夹层。文中选取 30 块泥岩夹层样品进行主、微量元素测定,泥岩样品主要取自白碱沟西沟剖面、双井子剖面、滴水泉剖面,主、微量元素测定在核工业北京地质研究院分析测试研究中心进行。通过元素地球化学分析可判定泥岩沉积时水体的古盐度和古氧化度,一定程度上反映了相邻火山喷发时的水体性质。水体古盐度可以根据 Sr/Ba 值和 B/Ga 值大小来判定(表 1)。早石炭世,滴水泉井区 $Sr/Ba = 0.22$ 、 $B/Ga = 2.63$,为淡水环境;白碱沟剖面 $Sr/Ba = 0.83$ 、 $B/Ga = 3.2$,为半咸水/咸水环境;滴水泉剖面 $Sr/Ba = 1.77$ 、 $B/Ga = 5.71$,为咸水环境(图 7-a, 7-b)。晚石炭世,滴水泉井区 $Sr/Ba = 0.28$,五彩湾井区 $Sr/Ba = 0.33$,表现为淡水环境;双井子剖面 $Sr/Ba = 0.46$,较前 2 个地区盐度更高。滴水泉井区、五彩湾井区、双井子剖面 $B_{校正}/Ga = 15.31$ 、 $B_{校正}/Ga = 15.2$ 、 $B_{校正}/Ga = 262.57$,盐度也呈现出逐渐升高的趋势(图 7-c, 7-d)。由于五彩湾井区和双井子剖面所取部分样品为灰岩,因此采用 $Z = 2.048 (\delta^{13}C + 50) + 0.498 (\delta^{18}O + 50)$ 来判断碳酸盐岩形成环境(斯尚华, 2019),其中 $Z_{五彩湾}$

$= 97.81$,为淡水灰岩, $Z_{双井子} = 122.87$,为咸水灰岩,与泥岩微量元素反映的结果一致。总体而言,晚石炭世水体盐度整体低于早石炭世,呈现自西向东水体盐度升高的趋势。

水体古氧化度可以利用 V/Cr 、 $V/(V + Ni)$ 、 Ce/La 、 δU ($\delta U = U/[0.5 \times (Th/3 + U)]$)、 Ce_{anom} ($Ce_{anom} = \lg(3Cen/(2Lan + Ndn))$) 这 5 种参数进行判定(表 1)。结果表明(图 8), V/Cr 值基本上大于 2, Ce/La 值大于 1.5, δU 值大于 1, Ce_{anom} 值大于 -0.1, 均表明准东地区大部分沉积岩夹层古氧化度介于贫氧至缺氧之间,早石炭世整体处于贫氧到缺氧环境(还原环境),其中滴水泉及白碱沟剖面样品还原性较强,反映水体较深;晚石炭世整体处于贫氧—富氧环境(弱氧化),五彩湾井区和滴西井区相对较弱,反映水体较浅。

2.1.3.3 与火山岩互层的泥岩有机地球化学特征

研究区火山岩之间的泥岩夹层中含有大量的沉积有机质,其中某些沉积有机质和有机化合物在热演化过程中可以继承原始有机质的结构特征,可作为生物标志化合物,能够间接反映其形成环境。文



a—下石炭统泥岩 Sr 、 Ba 交会图; b—下石炭统泥岩 B 、 Ga 交会图; c—上石炭统泥岩 Sr 、 Ba 交会图; d—上石炭统泥岩 B 、 Ga 交会图

图 7 准东地区石炭统泥岩盐度指标交会图

Fig. 7 Intersection diagram of salinity indicators of the Carboniferous mudstone in eastern Junggar Basin

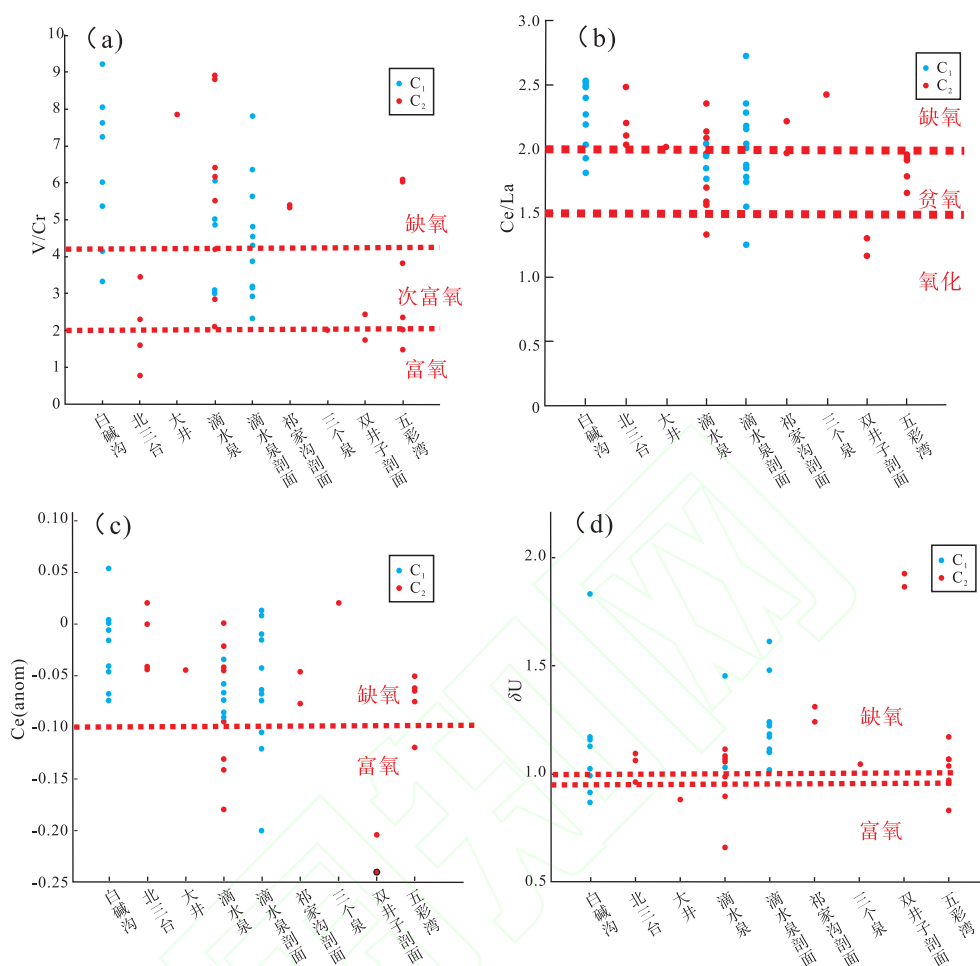


图 8 准东地区石炭系泥岩古氧化度指标散点图

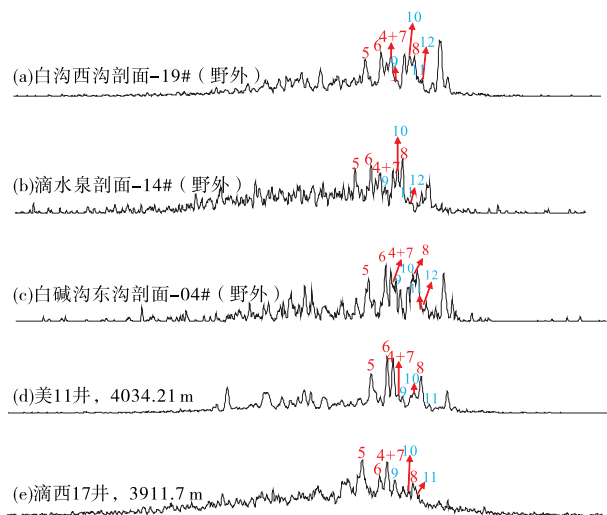
Fig. 8 Scatter plot of paleo-oxidation index of the Carboniferous mudstone in eastern Junggar Basin

中重点选取 15 个泥岩样品进行双色质谱分析，泥岩样品主要取自白碱沟西沟剖面、滴水泉剖面以及美 11 井和滴西 17 井岩心，双色质谱分析在长江大学地球化学实验室进行。其中，甾烷、姥鲛烷/植烷比值 (Pr/Ph)、三环萜烷和正构烷烃用来分析泥岩形成环境效果较好。

甾烷化合物是重要的生物标志物，其中 4-甲基甾烷和甲藻甾烷可用来指示沉积环境。4-甲基甾烷主要来源于海洋生物沟鞭藻，但在湖相环境中也可存在，在中国主要是在湖相生油岩中检出，因此高含量的 4-甲基甾烷可作为古代淡水湖相和半咸水湖相标志，具有一定指示意义（侯读杰和王铁冠，1995）。甲藻甾烷来源于甲藻中的甲藻甾醇，是一种典型海相标志物，在陆相环境中可指示海侵作用，对于环境判断具有重要意义（侯读杰和王铁冠，1995）。甲藻甾烷双质谱图显示，15 块

样品中有 3 块样品具有明显的指示海侵的生物标志化合物甲藻甾烷(图 9-a, 9-b, 9-c)，表明可能存在海侵事件。另外有 6 块样品含有较典型的甲基甾烷，如美 11 井 4034.27 m 样品(图 9-d)；个别样品仅含有少量甲基甾烷和微量甲藻甾烷，如滴西 17 井 3911.7 m 样品(图 9-e)，指示海侵较弱，以淡水、半咸水环境为主。

姥鲛烷/植烷 (Pr/Ph) 常用来指示原始沉积环境氧化还原条件。一般认为高 Pr/Ph 值 (>3.0) 指示有机质形成于氧化环境，低 Pr/Ph 值 (<0.8) 指示还原环境 (Hughes *et al.*, 1995)。研究区 15 块样品 Pr/Ph 大多集中在 1.0~3.0 之间，指示弱还原—偏氧化的沉积环境(图 10)，个别样品 Pr/Ph 值小于 0.8，表现为典型还原环境。通常指示水体分层（咸化环境）的标志物——伽马蜡烷几乎没有，暗示并非典型的咸化环境。



注：1—4 为 3 β -甲基-24-乙基胆甾烷，因本批次样品中含量不高或共注严重，未判别具体异构体；5—8 为 4 α -甲基-24-乙基胆甾烷；9—12 为 4 α ，23，24-三甲基胆甾烷（C₃₀ 甲基甾烷）。

图 9 准东地区石炭系典型泥岩夹层样品甲藻甾烷双质谱峰值
Fig. 9 Peak value of double mass spectrometry of phytosterol in typical mudstone interlayer samples of the Carboniferous in eastern Junggar Basin

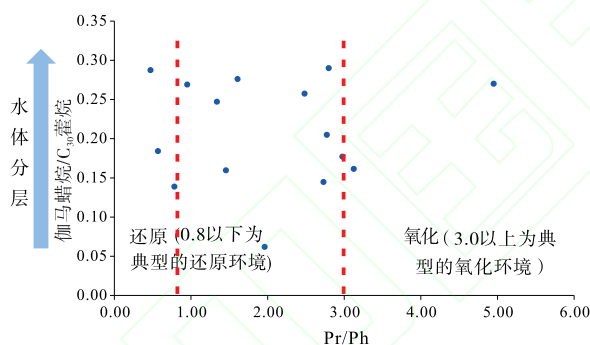


图 10 准东地区石炭系典型泥岩夹层样品
姥植比—伽马蜡烷/C₃₀ 藿烷散点图

Fig. 10 Scatter plot of Pr/Ph-gammacerane/C₃₀ hopane for typical mudstone interlayer samples of the Carboniferous in eastern Junggar Basin

三环萜烷作为生物标志化合物的一种，同样对环境具有指示作用，在海相及湖相环境中的相对含量明显高于陆相环境，通常作为指示海相及湖相的生标（付修根等，2007）。研究区常规三环萜烷丰度整体偏高，其中大部分样品的 C₂₃ 三环萜烷高于 C₂₁ 三环萜烷，呈 C₂₃ 占优势的正态分布，指示为海相或咸水湖盆相沉积，母质来源以藻类为主；C₂₈—C₃₀ 三环萜烷丰度较高，也暗指沉积环境为海相或咸水湖盆（图 11）。

正构烷烃碳原子优势可指示生物来源，进而反映其所处环境。通常认为具有奇偶优势的高碳数（大于 C₂₃）正构烷烃的分布可能指示陆源有机质的输入；奇偶优势不明显的中等相对分子量（nC₁₅—nC₁₇）的正构烷烃可能指示藻类等水生生物的来源（付修根等，2007）。研究区所取沉积岩夹层样品正构烷烃整体分布面貌以单峰—前峰型为主，最高碳数 C₁₅—C₁₈，系海相母质或湖相母质生源特征（图 12）。

2.2 陆上喷发环境识别标志

2.2.1 岩石类型

相比于水下喷发环境形成的火山岩，陆上喷发环境火山岩没有特殊的特征岩性及岩性组合，主要以广泛发育的火山熔岩和火山碎屑岩为特征。

火山口附近的火山颈亚相是陆上喷发火山岩的重要特征之一，与空气直接接触的岩浆不会受到强静水压力和水下低温的影响，因此能够形成大套的火山集块熔岩或角砾熔岩（图 13-a）和气孔状熔岩（图 13-b）。

2.2.2 岩石结构、构造

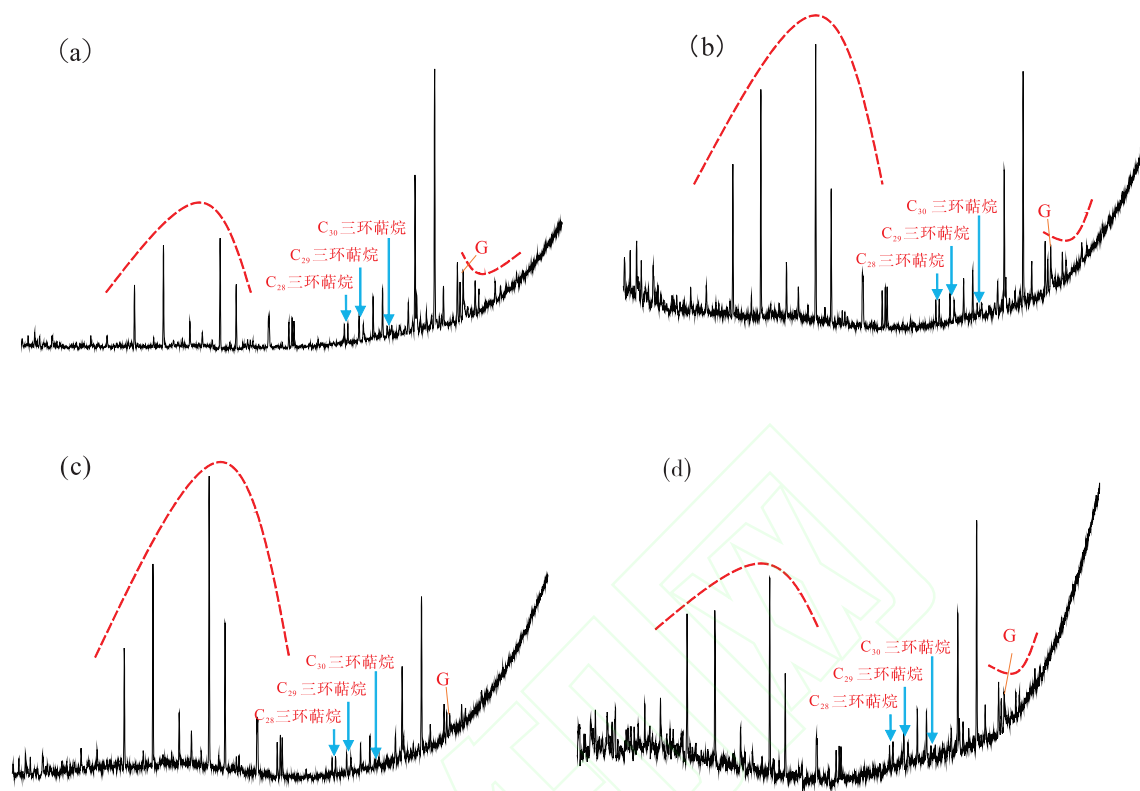
与水下喷发火山岩相比，陆上环境形成的火山岩及火山碎屑岩的宏观构造和微观结构特征也相对简单。

1) 柱状节理：为火山通道相的次火山岩亚相较为特殊的一种构造。该构造的形成需要有很高的均一程度和厚度，还需要足够长的时间进行冷凝，因此柱状节理熔岩被认为是陆上喷发环境的典型标志，在双井子地区可见（图 13-c）。

2) 气孔杏仁构造：陆上喷发火山岩不受水体高压影响，岩浆内的气体可及时逸出，相对于水下喷发熔岩更容易发育气孔构造（图 13-b，13-d）。在后期的蚀变中，气孔常被绿泥石、方解石等充填形成杏仁构造（图 13-e）。

3) 斑状结构：陆上喷发环境相对稳定，形成的晶体自形程度通常较高，晶型完整，以斑状结构为特征（图 13-f），有时还可以形成聚斑。由于陆上环境形成的火山岩接触水体少，缺乏复杂的水体环境，因此蚀变程度通常较低。

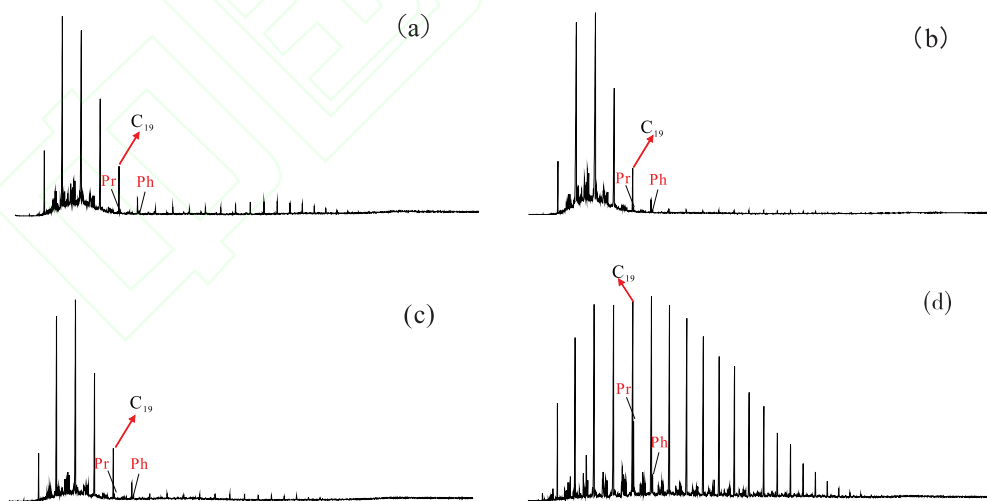
4) 间粒结构：间粒结构形成于冷却速度缓慢的环境中。由于矿物有足够的时间结晶，因此其具有自形程度高的斜长石微晶，矿物颗粒则充填于斜



a—白碱沟西沟剖面, 06#样品; a—白碱沟西沟剖面, 24#样品; a—白碱沟西沟剖面, 26#样品; a—滴水泉剖面, 09#样品

图 11 准东地区下石炭统典型泥岩夹层样品饱和烃气相色谱—质谱图

Fig. 11 Saturated hydrocarbon gas chromatography-mass spectra of typical mudstone interlayer samples of the Lower Carboniferous in eastern Junggar Basin



a—白碱沟西沟剖面, 06#样品; a—白碱沟西沟剖面, 24#样品; a—白碱沟西沟剖面, 26#样品; a—滴水泉剖面, 09#样品

图 12 准东地区石炭系典型泥岩夹层样品总离子流图

Fig. 12 Total ion current diagram of typical mudstone interlayer samples of the Carboniferous in eastern Junggar Basin

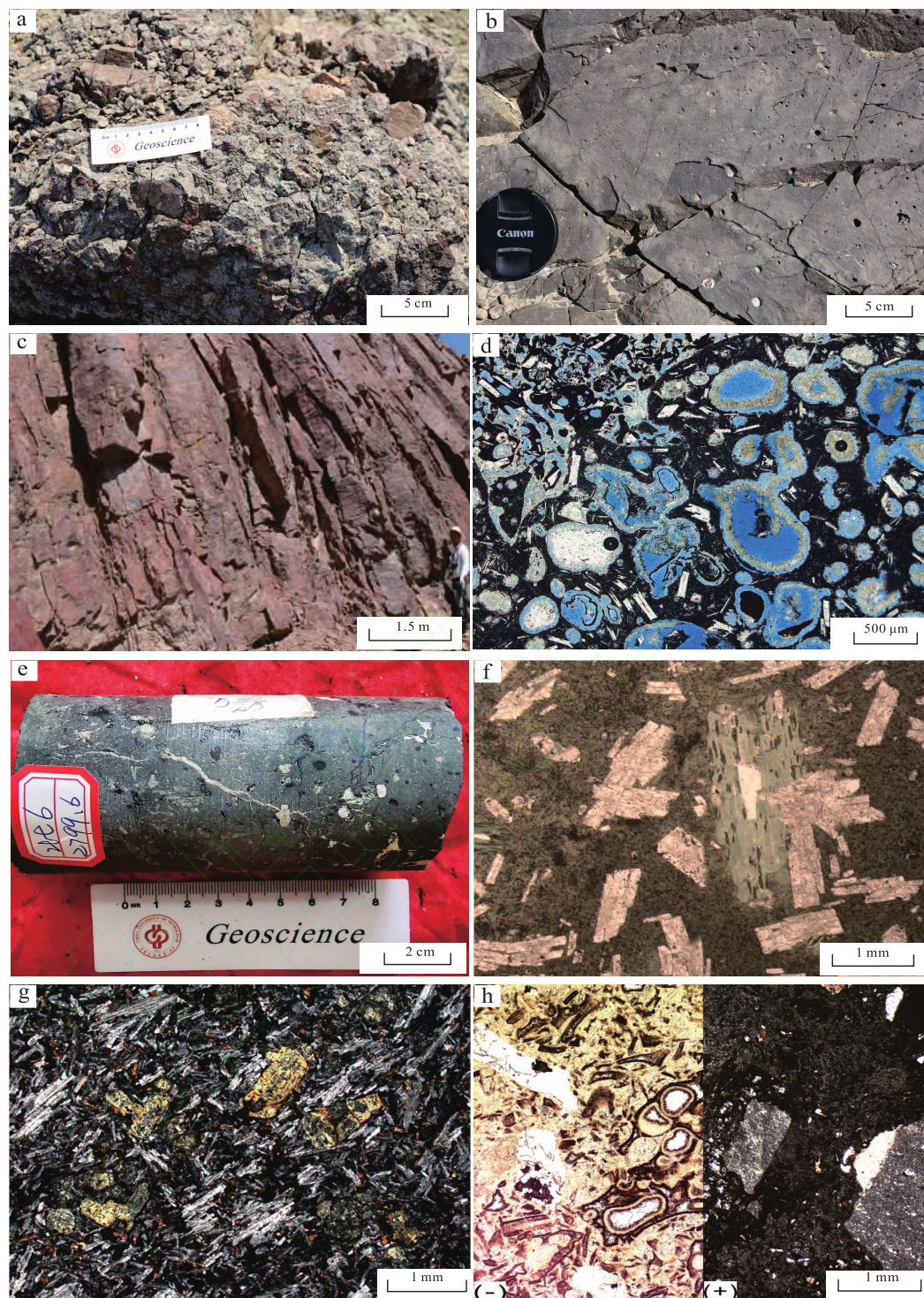
长石微晶所搭建的格架中。准东地区上石炭统玄武岩广泛发育该结构(图 13-g)。

5) 玻屑结构: 陆上喷发形成的凝灰岩, 不受高压限制, 通常形成鸡骨状、弧面棱角状玻屑(图

13-h, 13-i)。

2.2.3 地球化学标志

每次陆上火山喷发晚期或喷发间隙期及之后, 火山岩顶面一般处于风化剥蚀阶段(刘德成等,



a—火山角砾熔岩, 白碱沟西沟剖面, C_1s ; b—气孔玄武岩, 部分气孔被充填发育杏仁构造, 白碱沟剖面, C_2b ; c—柱状节理缝, 安山岩, 双井子剖面, C_2b ; d—气孔、杏仁体内溶孔, 安山岩, 彩 28 井, 1052.5 m, C_2b ; e—玄武岩, 杏仁发育, 杏仁体为绿泥石, 北 6 井, 2799.6 m, C_2b ; f—斑状结构, 安山岩, 彩 6 井, 1848.26 m, C_2b ; g—间粒结构玄武岩, 滴西 21 井, 2871.32 m, C_2b ; h—玻屑凝灰岩, 滴西 14 井, 3602.59 m, C_2b

图 13 准东地区石炭系陆上喷发火山岩岩石结构和构造特征

Fig. 13 Texture and structure characteristics of the Carboniferous volcanic rocks formed in subaerial eruption environment in eastern Junggar Basin

2022), 火山岩地层中很少有沉积岩夹层的出现, 因此主要通过火山岩的元素地球化学参数进行环境分析。根据火山岩氧化系数图版(图 6), 准东地区上石炭统氧化系数多大于 0.5, 为氧化环境, 主要分布在滴西井区、五彩湾井区和东部北三台井区、双井子剖面。

3 不同喷发环境岩相组合

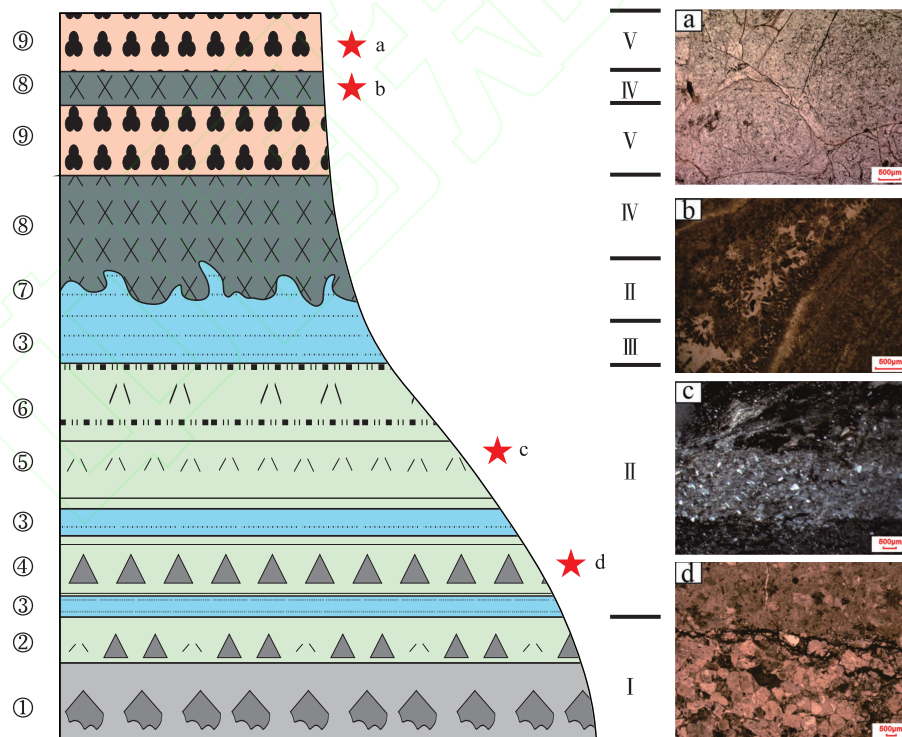
由于陆上与水下 2 种不同喷发沉积环境火山喷出物(熔岩流、火山碎屑流)堆积和保存时的环境介质的差异, 因此在距离火山口不同的位置, 形成的火山—沉积建造、岩性—岩相组合变化较大, 且具有一定的规律性。根据不同喷发环境火山机构不同位置处火山—沉积建造的差异, 划分出 4 种岩相组合类型: 水下环境近火山口岩相组合、水下环境远火山口岩相组合、陆上环境近火山口岩相组合、陆上环境远火山口岩相组合。

3.1 水下环境近火山口岩相组合

形成于水下环境的中心式喷发由于有水体的参与与常具有火山作用与沉积作用同时进行的特征, 以火山通道相—爆发相—侵入相—溢流相—碎屑沉积相交替出现为标志(图 14)。该套组合的火山岩建造为爆发相粗火山碎屑岩和火山通道相的隐爆角砾岩、次火山岩等与侵入相枕状珍珠岩、溢流相细碧岩、熔岩相组合。由于有水体参与, 该套火山沉积岩建造除了发育水下环境形成的各种特殊的结构构造如珍珠构造、枕状构造等, 还常见粗碎屑成分的火山沉积岩, 而这是由于近火山口爆发相形成的粗火山碎屑成分在下落后经水体作用和沉积物混合并成岩而成。这种现象在双井子地区、美 004 井、彩 30 井、彩 57 井、滴西 24 井均有出现。

3.2 水下环境远火山口岩相组合

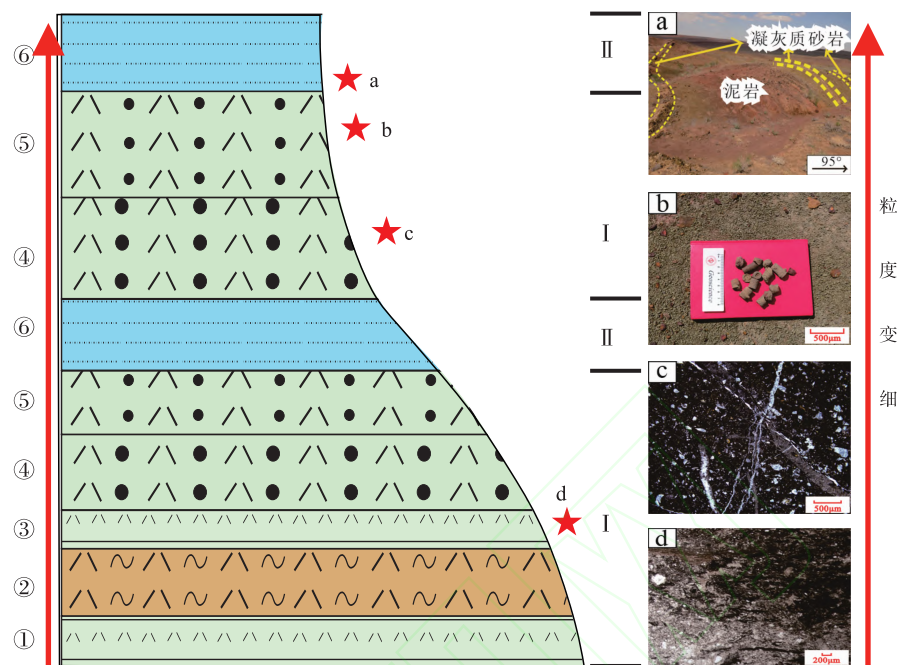
该岩相组合为火山沉积相—爆发相—沉积相交替出现(图 15)。与陆上喷发远火山口岩性建造相



a—滴西 22 井, 3638.95 m, 珍珠岩; b—球粒流纹岩, 白碱沟西沟剖面, C_{1s}; c—美 004 井, 4621.8 m, 沉凝灰岩, 具有递变层理; d—美 004 井, 4621.21 m, 沉火山。①: 爆发相集块岩; ②: 爆发相凝灰质角砾岩, 具有一定层理; ③: 沉积岩夹层; ④: 火山沉积相沉火山角砾岩, 具有一定层理; ⑤: 火山沉积相沉凝灰岩, 具有一定层理; ⑥: 火山沉积相凝灰质粉砂岩和泥岩, 沉积组分增多, 具有一定层理; ⑦: 火山沉积相熔岩; ⑧: 溢流相熔岩, 常含有较多玻璃质; ⑨: 侵入相珍珠岩, 玻璃质岩石, 具有弧形裂纹。I: 爆发相; II: 火山沉积相; III: 沉积相; IV: 溢流相; V: 侵入相; 角砾岩, 磨圆较好

图 14 水下环境近火山口岩相组合模式

Fig. 14 Lithofacies assemblage model near crater in subaqueous environment



a—泥岩与火山沉积岩互层，滴水泉剖面， C_1d ；b—火山沉积岩中的海百合茎化石，滴水泉剖面， C_1d ；c—凝灰质泥岩，滴水泉剖面， C_1d ；d—美 004 井，4622.29 m，沉凝灰岩，具有递变层理。①：火山沉积相沉凝灰岩；②：爆发相热碎屑流亚相熔结凝灰岩；③：火山沉积相沉凝灰岩；④：火山沉积相凝灰质粗砂岩；⑤：火山沉积相凝灰质细砂岩；⑥：沉积岩。I：火山沉积相；II：沉积相

图 15 水下环境远火山口岩相组合模式

Fig. 15 Lithofacies assemblage model away from crater in subaqueous environment

比，水下环境的远火山口岩性建造具有更强的沉积作用参与，经过长距离的搬运沉积，通常表现为具有明显韵律的沉火山碎屑岩或火山碎屑沉积岩与沉积岩频繁互层(图 16)。沉火山碎屑岩与火山碎屑沉积岩通常为细碎屑组分，具有一定的分选与磨圆，有时沉积岩中可见海相化石，在浅水环境下还常常出现爆发相凝灰岩。该套岩相组合主要分布在白碱沟剖面松喀尔苏组下段、滴水泉剖面、滴西井区和五彩湾地区。

3.3 陆上环境近火山口岩相组合

该套岩相组合为火山通道相—爆发相—溢流相—爆发相组合(图 17)，在研究区白碱沟剖面巴山组地层、双井子剖面巴山组最为典型。陆上喷发环境近火山口岩性组合以近火山口火山通道相和爆发相为主要特征，因为不存在水体影响，因此常见的火山岩建造为火山通道相的隐爆角砾岩、角砾熔岩、凝灰熔岩、熔结凝灰岩、熔结角砾岩、次火山岩等与爆发相火山角砾岩、凝灰岩，溢流相玄武岩、安山岩、流纹岩、英安岩等岩相组合(图 18)。

该套组合具备陆上喷发环境的典型特征，柱状节理、气孔构造、杏仁构造、隐爆角砾结构、熔结结构、斑状结构、间粒结构等陆上喷发结构构造广泛发育。此外，由于缺少水体的搬运沉积作用，分选磨圆较差的粗火山碎屑物质的堆积也是陆上喷发环境近火山口岩性建造的普遍特征。

3.4 陆上环境远火山口岩相组合

该套岩相组合多为溢流相—爆发相—火山沉积相—沉积相组合(图 19)，大多位于火山斜坡远端，在研究区白碱沟西沟剖面松喀尔苏组上段、滴 15 井区最为典型。火山—沉积岩建造表现为溢流相熔岩—爆发相凝灰岩—火山沉积岩与沉积岩互层(图 20)。在远火山口的一端，熔岩层越来越薄，细火山碎屑物质占比逐渐升高，随后降低，逐渐向沉积岩过渡，火山沉积相作为过渡相占比逐渐升高。由于缺乏水体影响，火山喷发物质与沉积岩的成层性较差，且火山喷发物质依旧发育水上环境形成的各种结构构造，与常规火山岩差异不大。

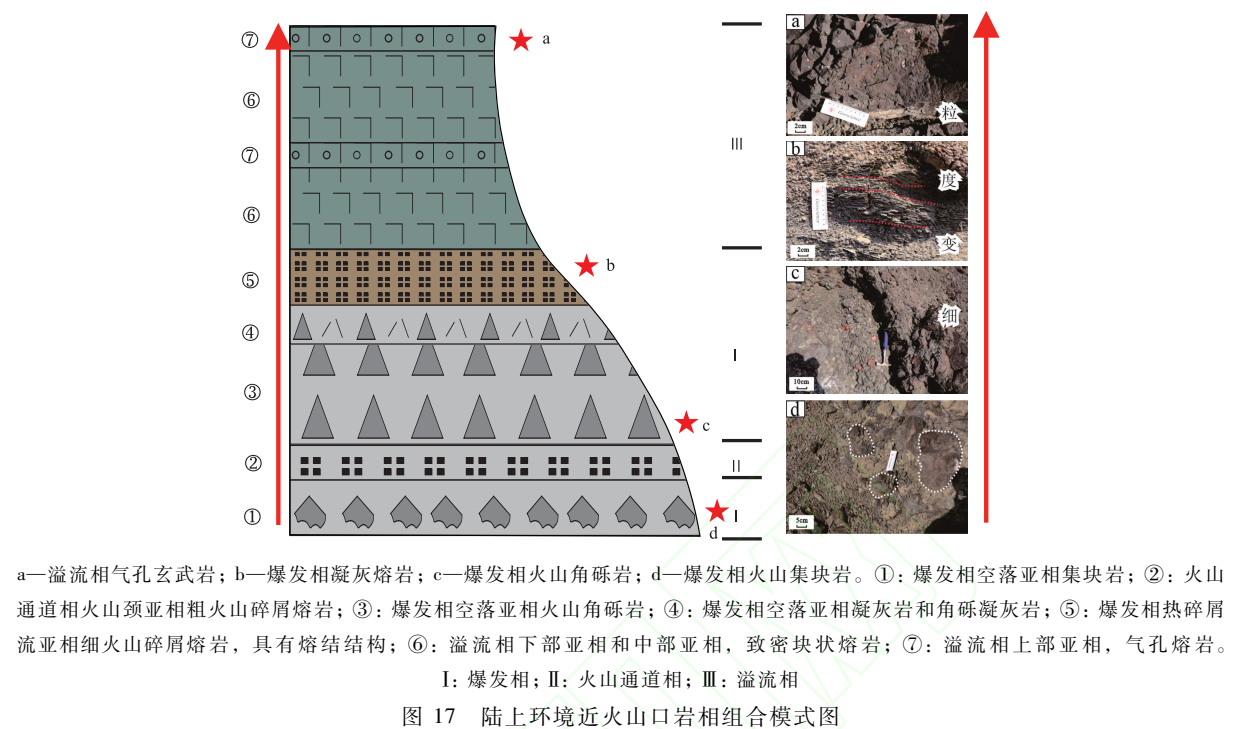
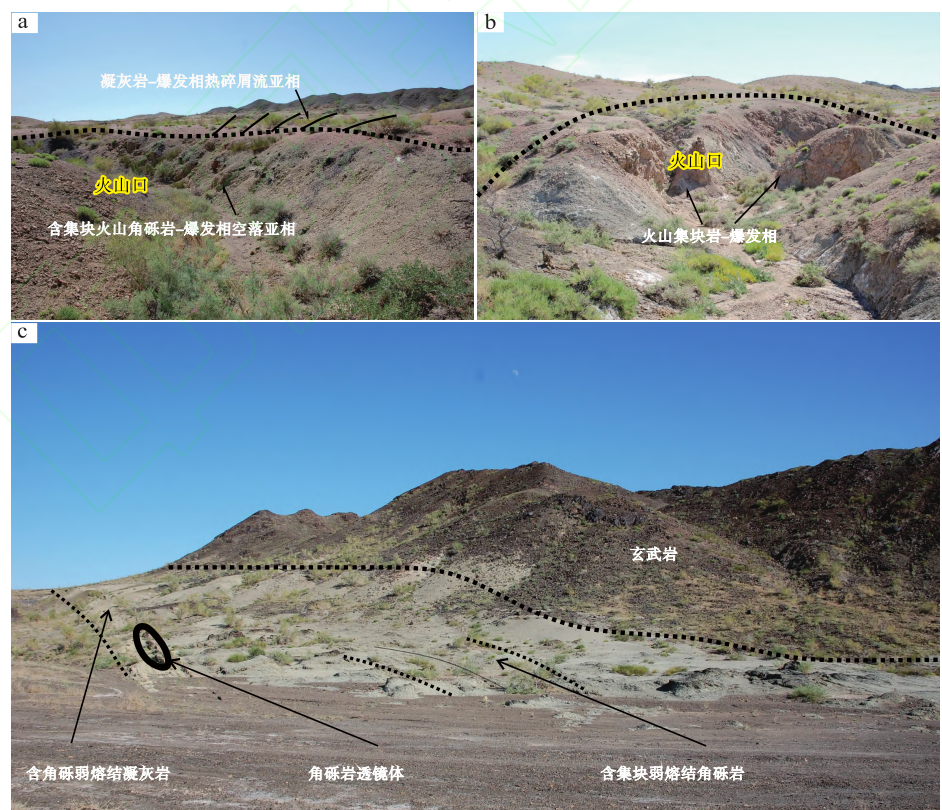


Fig. 17 Lithofacies assemblage model near crater in subaerial environment



a—巴山组, 爆发相集块岩; b—巴山组, 近火山口爆发相组合; c—巴山组, 近火山口岩相组合

图 18 准东地区白碱沟东沟石炭系水上环境近火山口岩相组合

Fig. 18 Lithofacies assemblages of the Carboniferous near craters in a subaerial environment at Baijiangou Donggou section in eastern Junggar Basin

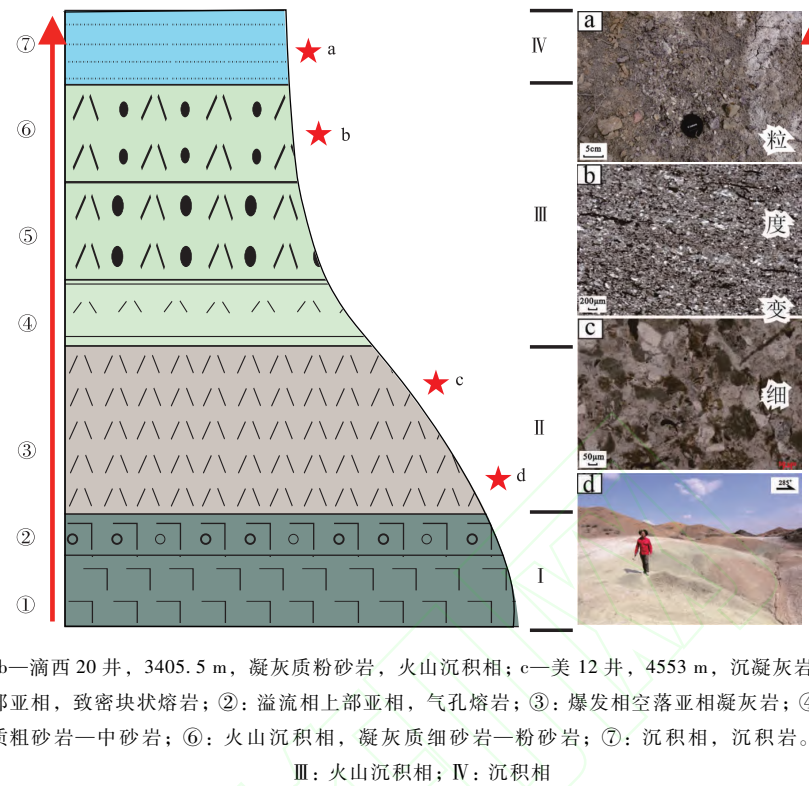


图 19 陆上环境远火山口岩相组合模式图

Fig. 19 Lithofacies assemblage model away from crater in subaerial environment

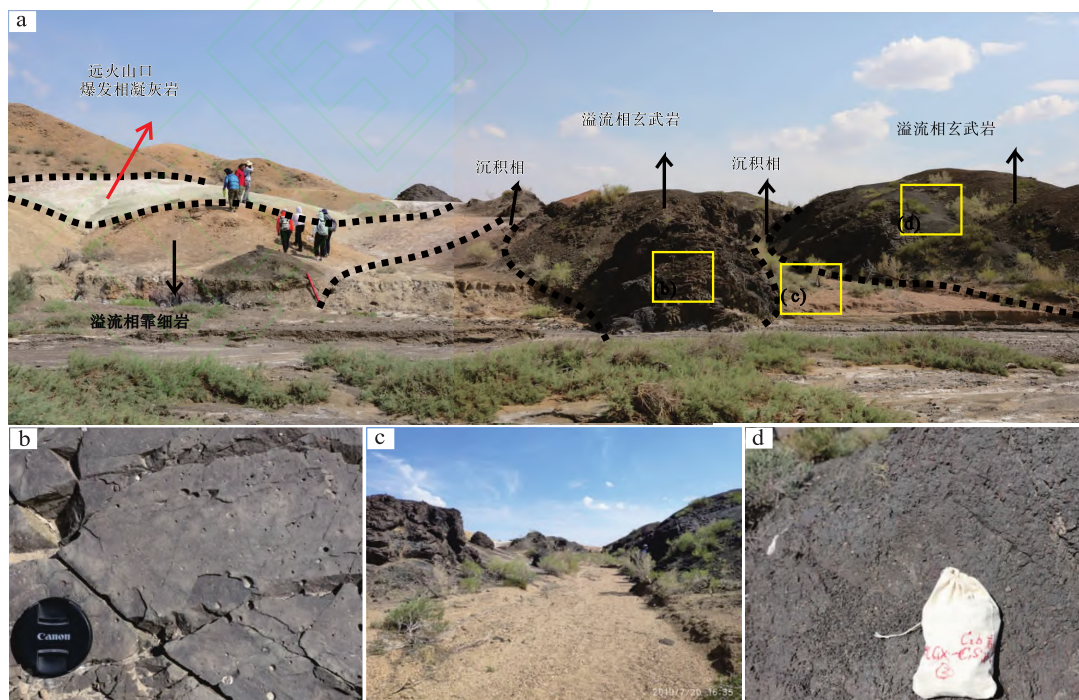


图 20 准东地区白碱沟西沟下石炭统松喀尔苏组水上环境远火山口岩相组合

Fig. 20 Lithofacies assemblages of the Lower Carboniferous Songkalsu Formation away from craters in a subaerial environment at Baijiangou Xigou section in eastern Junggar Basin

4 不同喷发环境火山岩喷发模式

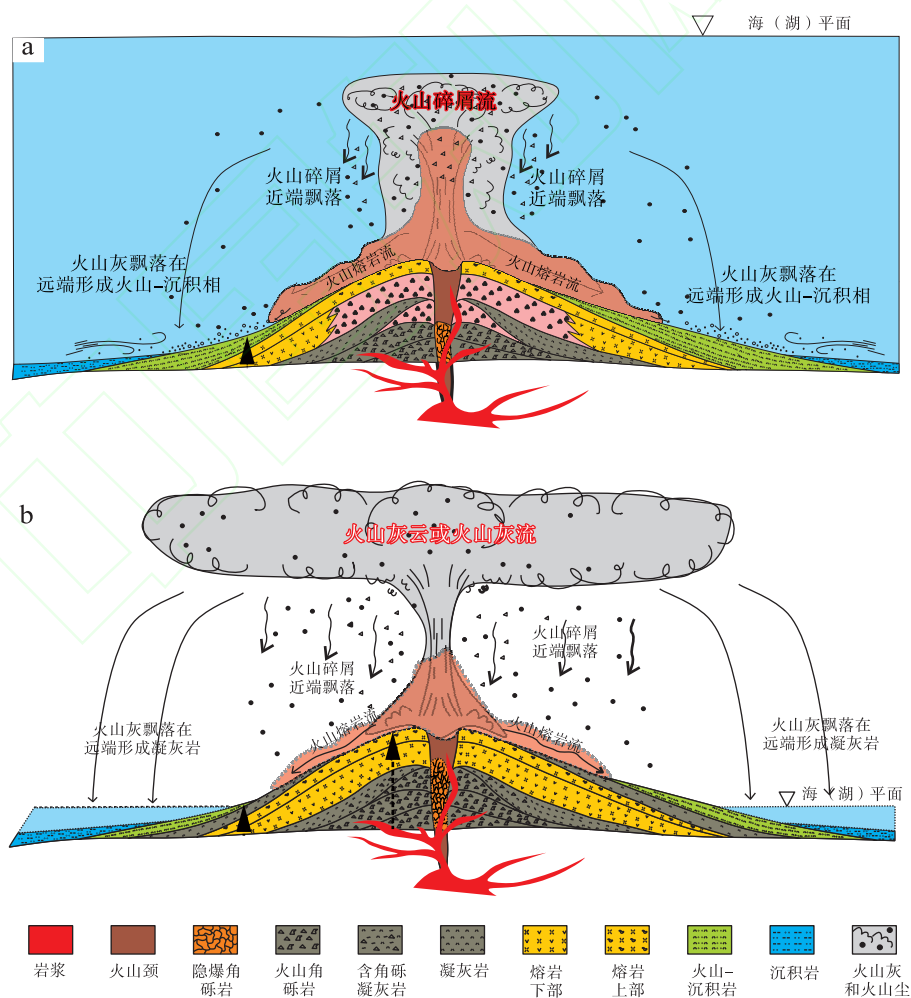
根据火山喷出物（熔岩流、火山碎屑流）运移、堆积和保存时的介质环境，可将水下喷发火山岩分为水下喷发水下堆积保存火山岩和水下喷发陆上堆积保存火山岩，陆上喷发火山岩分为陆上喷发陆上堆积保存火山岩和陆上喷发水下堆积保存火山岩。

4.1 水下火山喷发模式

水下喷发模式在研究区下石炭统发育，根据火山喷出物最终的保存状态可细分为水下喷发水下沉积与水下喷发陆上沉积 2 类。通常情况下火山机构在水下喷发后直接在水体中保存成岩，但在浅水环境下，具有较大能量的火山机构喷发后，一部分火山喷出物质会在高能量下喷出水面，悬浮在空中，

当悬浮在空中的轻火山喷出物飘至陆地时便形成了水下喷发水上沉积。研究区水下喷发模式以水下喷发水下沉积为主，基本未见水下喷发陆上沉积。

位于水下的火山机构在火山喷发早期具有和陆上火山喷发机构类似的喷发过程，也会在火山口附近形成火山弹、火山集块和火山角砾，这是因为质量大的粗火山碎屑物在水动力作用下依旧难以远距离运移，因此同样具有近火山口爆发相。但是由于水体的参与以及火山喷发柱的垮塌，在火山口附近还会形成具有层理构造的沉火山碎屑岩，之后岩浆涌出。当岩浆涌出时，溢流相下部的岩浆最先接触水下沉积物，受温差、重力、水分的影响常会形成熔积岩，之后形成中部的熔岩，水下喷发形成的熔岩通常玻璃质含量较高，易形成珍珠岩等特殊岩性。因此水下环境近火山口喷发模式主要发育水下



a—水下喷发模式；b—陆上喷发模式

图 21 准东地区石炭系火山岩喷发模式

Fig. 21 Eruption diagram of the Carboniferous volcanic rocks in eastern Junggar Basin

喷发水下沉积。水下喷发水下沉积是水下喷发模式最主要也是最常见的情况,表示整个喷发过程均在水下进行。该模式岩相组合包含水下环境近火山口岩相组合与水下环境远火山口岩相组合,通常表现为火山通道相—近口爆发相—侵出相—溢流相—火山沉积相—沉积相组合,发育水下喷发环境宏观构造和微观结构,由于受水体影响,其岩性建造中常见沉积岩夹层,所夹沉积岩夹层通常具有和水体相似的地球化学特征。在火山喷发晚期,由于水下火山机构受水体影响大,因此在火山斜坡远端会出现火山沉积岩与沉积岩互层现象,且距离越远,沉积岩含量越高(图 21-a)。

4.2 陆上火山喷发模式

陆上喷发模式主要在研究区上石炭统发育,根据火山物质的保存环境和距离火山口的远近及保存状态,陆上喷发火山岩又细分为陆上喷发陆上沉积与陆上喷发水下沉积2种类型。通常情况下陆上喷发的火山机构在近火山口一端,即逐渐向沉积岩过渡的一端会发育陆上喷发水下沉积,这是因为距离火山口越远,岩浆流速越慢,熔岩层越薄,并最终固结成岩,而质量较轻的火山喷出物如火山灰、火山尘则可以飘落至更远端,最终可落入水中,参与沉积作用形成火山沉积相,而靠近火山口的一端通常为陆上喷发陆上沉积,其岩相组合也符合陆上环境近火山口岩相组合。由于火山活动是多期进行,因此经过多期火山活动,火山喷发能量逐渐减弱,陆上喷发模式纵向上呈现出火山通道相—近口爆发相—溢流相—远口爆发相—火山沉积相—沉积相交替出现的特征(图 21-b)。

5 结论

1) 准东地区火山岩喷发环境分为陆上喷发和水下喷发2种:水下喷发的火山岩以珍珠岩、细碧岩、石泡流纹岩和枕状熔岩为典型特征,常出现与沉积岩互层现象,典型结构构造包括冻鱼层构造、枕状构造、珍珠构造、水携型沉积构造、中空骸晶结构、自碎斑状结构、细碧结构、钠化边结构、放射性球粒结构等;陆上喷发火山岩并无特殊岩性和岩相组合,但一般会出现气孔杏仁构造和柱状节理发育的特征,长石晶形也更加完整,常见的结构构造包括间粒结构、间隐结构、填间结构、熔结结构

等。

2) 准东地区火山岩喷发环境早石炭世以水下喷发环境为主,自西向东水体逐渐加深,由淡水环境经半咸水环境过渡至咸水环境;晚石炭世以水上环境为主,在局部地区存在水下环境,且水体较浅。

3) 准东地区共发育水上、水下2种喷发模式,可划分出4种岩相组合类型:水下环境近火山口岩相组合、水下环境远火山口岩相组合、陆上环境近火山口岩相组合、陆上环境远火山口岩相组合。水上喷发模式主要为爆发相和溢流相,水下喷发模式则主要为爆发相、侵出相、溢流相和火山沉积相。

参考文献 (References)

- 付修根,王剑,汪正江,陈文西. 2007. 藏北羌塘盆地晚侏罗世海相油页岩生物标志物特征、沉积环境分析及意义. 地球化学,36(5): 486-496. [Fu X G, Wang J, Wang Z J, Chen W X. 2007. Biomarkers and sedimentary environment of Late Jurassic marine oil shale in Qiangtang Basin, northern Xizang and its geological significance. Geochimica, 36(5): 486-496]
- 侯读杰,王铁冠. 1995. 陆相湖盆沉积物和原油中的甲藻甾烷. 科学通报,40(4): 333-335. [Hou D J, Wang T G. 1995. Dinosteranes in sediments and crude oil of continental lake basin. Chinese Science Bulletin, 40(4): 333-335]
- 李涤. 2016. 准噶尔盆地及邻区石炭纪构造格架与沉积充填演化. 中国地质大学(北京)博士学位论文. [Li D. 2016. Carboniferous tectonic framework and sedimentary filling evolution in the Junggar Basin and adjacent area, NW China. Doctoral dissertation of China University of Geosciences (Beijing)].
- 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, 186. [Li M L, Lan H C. 2014. The oxygen fugacity of magma in condensed diagenesis and the hydrothermal uranium mineralization type in South China. Uranium Geology, 30(3): 168-171, 186]
- 何衍鑫,鲜本忠,牛花朋,张鑫璐,沈佳男. 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 Y X, Xian B Z, Niu H P, Zhang X L, Shen J N. 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): 737-749]
- 刘德成,陈亚军,伍宏美,马强,何兴华,张恒. 2022. 火山岩陆上与水水下喷发沉积环境的地球化学判别方法研究. 地质科学,57(3): 809-834. [Liu D C, Chen Y J, Wu H M, Ma Q, He X H, Zhang H. 2022. Geochemistry discriminance study of subaerial and underwater eruptive depositional environment of volcanic rocks. Chinese Journal

- of Geology, 57(3): 809-834]
- 刘小洪, 冯明友, 郝爱华, 鄯晓荣, 吴宇, 刘畅. 2016. 克拉美丽气田滴西地区石炭系火山岩储层成岩作用及孔隙演化. 岩性油气藏, 28(1): 38-48. [Liu X H, Feng M Y, Xi A H, Yan X R, Wu Y, Liu C. 2016. Diagenesis and pore evolution of Carboniferous volcanic reservoirs in Dixi area, Kelameili Gas Field. Lithologic Reservoirs, 28(1): 38-48]
- 刘晓康, 边伟华, 孙相灿, 杨凯凯, 缴洋洋. 2018. 火山活动影响的局限水体生烃潜力分析: 以准噶尔盆地东部石炭系巴塔玛依内山组为例. 世界地质, 37(2): 518-526. [Liu X K, Bian W H, Sun X C, Yang K K, Jiao Y Y. 2018. Hydrocarbon generating potential in restricted waters influenced by volcanic activities: a case study of Carboniferous Batamayineishan Formation in eastern Junggar Basin. Global Geology, 37(2): 518-526]
- 马超, 吴孔友, 裴仰文, 李天然. 2019. 准噶尔盆地东部构造特征及演化定量分析. 地质力学学报, 25(3): 313-323. [Ma C, Wu K Y, Pei Y W, Li T R. 2019. Quantitative analysis of tectonic characteristics and evolution in the eastern Junggar Basin. Journal of Geomechanics, 25(3): 313-323]
- 宁文涛. 2019. 新疆东、西准噶尔下石炭统典型剖面对比研究. 长安大学硕士学位论文. [Ning W T. 2019. The comparative study of standard stratotype-section in Lower Carboniferous at east and west of Junggar, Xinjiang. Masteral dissertation of Chang'an University]
- 斯尚华, 李建明, 李旭, 吴鹏涛. 2019. 渝东板凳沟下寒武统石龙洞组缓坡相沉积特征. 资源环境与工程, 33(3): 337-340, 357. [Si S H, Li J M, Li X, Wu P T. 2019. Sedimentary characteristics of ramp facies of Lower Cambrian Shilongdong Formation in Bandenggou, eastern Chongqing. Resources Environment & Engineering, 33(3): 337-340, 357]
- 孙立广, 谢周清, 赵俊琳. 2000. 南极阿德雷岛湖泊沉积物 Sr/Ba 与 B/Ga 比值特征. 海洋地质与第四纪地质, 20(4): 43-46. [Sun L G, Xie Z Q, Zhao J L. 2000. The characteristics of Sr/Ba and B/Ga ratios in lake sediments on the Ardley Peninsula, Maritime Antarctic. Marine Geology & Quaternary Geology, 20(4): 43-46]
- 唐华凤, 王璞珺, 边伟华, 黄玉龙, 高有峰, 代晓娟. 2020. 火山岩储层地质研究回顾. 石油学报, 41(12): 1744-1773. [Tang H F, Wang P J, Bian W H, Huang Y L, Gao Y F, Dai X J. 2020. Review of volcanic reservoir geology. Acta Petrolei Sinica, 41(12): 1744-1773]
- 田洋, 赵小明, 王令占, 涂兵, 谢国刚, 曾波夫. 2014. 重庆石柱二叠纪栖霞组地球化学特征及其环境意义. 沉积学报, 32(6): 1035-1045. [Tian Y, Zhao X M, Wang L Z, Tu B, Xie G G, Zeng B F. 2014. Geochemical characteristics and its paleoenvironmental implication of Permian Qixia Formation in Shizhu, Chongqing. Acta Sedimentologica Sinica, 32(6): 1035-1045]
- 王静, 国景星, 盛世锋, 王希平. 2008. 商河油田水下喷发火山岩储层特征. 断块油气田, 15(2): 40-42. [Wang J, Guo J X, Sheng S F, Wang X P. 2008. Reservoir characteristics of igneous rock erupted under water in Shanghe Oilfield. Fault-block Oil & Gas Field, 15(2): 40-42]
- 王岚, 李文厚, 林潼, 梁浩, 苟红光. 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 L, Li W H, Lin T, Liang H, Gou H G. 2010. A comparative analysis of submarine eruptive and subaerial eruptive volcanoclastic reservoir on characteristics of reservoir and reservoir forming dominated factors: taking Carboniferous volcanoclastic reservoir in Santanghu Basin as example. Chinese Journal of Geology, 45(4): 1088-1097]
- 王林涛. 2017. 准噶尔盆地晚古生代火山岩喷发就位环境及储层意义. 吉林大学硕士学位论文. [Wang L T. 2017. Volcanic eruption environment and reservoir significance of Late Paleozoic in the Junggar Basin, NW China. Masteral dissertation of Jilin University]
- 王启宇, 牟传龙, 陈小炜, 康建威. 2014. 准噶尔盆地及周缘地区石炭系岩相古地理特征及油气基本地质条件. 古地理学报, 16(5): 655-671. [Wang Q Y, Mou C L, Chen X W, Kang J W. 2014. Palaeogeographic characteristics and basic geological conditions of petroleum of the Carboniferous in Junggar Basin and its adjacent areas. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 16(5): 655-671]
- 王盛鹏, 林潼, 孙平, 梁浩, 王东良, 苟红光. 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): 145-152. [Wang S P, Lin T, Sun P, Liang H, Wang D L, Gou H G. 2012. Influences of diagenetic effects on volcanic rock reservoirs under two different sedimentary environments. Petroleum Geology & Experiment, 34(2): 145-152]
- 王绪龙, 唐勇, 陈中红, 查明, 黄芸, 董雪梅. 2013. 新疆北部石炭纪岩相古地理. 沉积学报, 31(4): 571-579. [Wang X L, Tang Y, Chen Z H, Zha M, Huang Y, Dong X M. 2013. Carboniferous lithofacies paleogeography in the north of Xinjiang. Acta Sedimentologica Sinica, 31(4): 571-579]
- 王益友, 郭文莹, 张国栋. 1979. 几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用. 同济大学学报, 7(2): 51-60. [Wang Y Y, Guo W Y, Zhang G D. 1979. Application of some geochemical indicators in determining of sedimentary environment of the Funing Group (Paleogene), Jin-hu Depression, Kiangsu Province. Journal of Tongji University, 7(2): 51-60]
- 吴晓智, 齐雪峰, 唐勇, 卫延召, 侯连华. 2008. 新疆北部石炭纪地层、岩相古地理与烃源岩. 现代地质, 22(4): 549-557. [Wu X Z, Qi X F, Tang Y, Wei Y Z, Hou L H. 2008. Carboniferous strata and lithofacies paleogeography & source rock in northern Xinjiang. Geoscience, 22(4): 549-557]
- 吴明清, 欧阳自远, 宋云华, 蓝琇, 杨学长, 毛雪瑛, 柴之芳. 1992. 塔里木盆地西缘古海洋氧化还原条件的变化: 介壳化石的稀土元素铈异常证据. 中国科学(B辑), 22(2): 206-215. [Wu M Q, Ouyang Z Y, Song Y H, Lan X, Yang X C, Mao X Y, Chai Z F. 1992. Changes of redox conditions in the paleomarine of the western margin of Tarim Basin: evidence from rare earth element cerium anomaly in shell fossils. Science in China (Series B), 22(2): 206-215]
- 杨凯凯. 2016. 准噶尔盆地东部巴塔玛依内山组火山岩储层特征及

- 其与岩性的关系. 吉林大学硕士学位论文. [Yang K K. 2016. Volcanic rock reservoir features with emphasizing on the lithology of the Upper Carboniferous Batamayneishan Formation in the eastern Junggar Basin. Masteral dissertation of Jilin University]
- 余淳梅, 郑建平, 唐勇, 杨召, 齐雪峰. 2004. 准噶尔盆地五彩湾凹陷基底火山岩储集性能及影响因素. 地球科学, 29(3): 303-308. [Yu C M, Zheng J P, Tang Y, Yang Z, Qi X F. 2004. Reservoir properties and effect factors on volcanic rocks of basement beneath Wucaiwan Depression, Junggar Basin. Earth Science, 29(3): 303-308]
- 张艳, 舒萍, 王璞珺, 郑常青, 单玄龙. 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 Y, Shu P, Wang P J, Zheng C Q, Shan X L. 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]
- 张顺存, 史基安, 杜社宽, 张生根, 孙国强, 鲁新川, 张兆辉. 2018. 准噶尔盆地陆东地区石炭系火山岩气藏成藏条件. 北京: 科学出版社. [Zhang S C, Shi J A, Du S K, Zhang S G, Sun G Q, Lu X C, Zhang Z H. 2018. Accumulation Conditions of Carboniferous Volcanic Gas Reservoirs in Ludong Area, Junggar Basin. Beijing: Science Press]
- 张勇. 2013. 准噶尔盆地滴西地区石炭系火山岩储层特征及油气分布. 中国石油大学(华东) 博士论文. [Zhang Y. 2013. Reservoir characteristics and the oil and gas distribution of Carboniferous volcanic in Dixi area of Junggar Basin. Doctoral dissertation of China University of Petroleum (East China)]
- 朱卡, 李兰斌, 梁浩, 廖群安, 夏晓燕. 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 K, Li L B, Liang H, Liao Q A, Xia X Y. 2012. The eruption environment and reservoir characteristics of carboniferous volcanic rocks in Sangtanghu Basin. Journal of Oil and Gas Technology, 34(3): 49-54]
- Büttner R, Dellino P, Zimanowski B. 1999. Identifying magma-water interaction from the surface features of ash particles. Nature, 401(6754): 688-690.
- Couch E L. 1971. Calculation of paleosalinities from boron and clay mineral data. AAPG Bulletin, 55(10): 1829-1837.
- Embley R W, Chadwick W W Jr, Baker E T, Butterfield D A, Resing J A, de Ronde C E J, Tunncliffe V, Lupton J E, Juniper S K, Rubin K H, Stern R J, Lebon G T, Nakamura K I, Merle S G, Hein J R, Wiens D A, Tamura Y. 2006. Long-term eruptive activity at a submarine arc volcano. Nature, 441(7092): 494-497.
- Ernst W. 1970. Geochemical Facies Analysis. Amsterdam: Elsevier, 152.
- Hughes W B, Holba A G, Dzou L I P. 1995. The ratios of dibenzothiophene to phenanthrene and pristane to phytane as indicators of depositional environment and lithology of petroleum source rocks. Geochimica et Cosmochimica Acta, 59(17): 3581-3598.
- Jones B, Manning D. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. Chemical Geology, 111: 111-129.
- King S. 2015. Identification of two species of the brachiopod *Derbyia* (*D. filosa* and *D. Profunda*) from an outcrop of Winfield Limestone (Early Permian) in Butler County, Kansas. Transactions of the Kansas Academy of Science, 118: 211-218.
- Lafrance B, Mueller W U, Daigneault R, Dupras N. 2000. Evolution of a submerged composite arc volcano: volcanology and geochemistry of the Normétal volcanic complex, Abitibi greenstone belt, Québec, Canada. Precambrian Research, 101(2): 277-311.
- Le Maitre R W. 1976. The chemical variability of some common igneous rocks. Journal of Petrology, 17(4): 589-598.
- Lewan M D, Maynard J B. 1982. Factors controlling enrichment of vanadium and nickel in the Bitumen of organic sedimentary rocks. Geochimica et Cosmochimica Acta, 46(12): 2547-2560.
- Parfitt E A, Gregg T K P, Smith D K. 2002. A comparison between subaerial and submarine eruptions at Kilauea Volcano, Hawaii: implications for the thermal viability of lateral feeder dikes. Journal of Volcanology & Geothermal Research, 113(1-2): 213-242.
- Seghedi I. 2011. Permian rhyolitic volcanism, changing from subaqueous to subaerial in post-Variscan intra-continental Sîrbia Basin (SW Romania-eastern Europe). Journal of Volcanology & Geothermal Research, 201(1): 312-324.
- Sruoga P, Rubinstein N, Hinterwimmer G. 2004. Porosity and permeability in volcanic rocks: a case study on the Serie Tobifera, South Patagonia, Argentina. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 132(1): 31-43.
- Sruoga P, Rubinstein N. 2007. Processes controlling porosity and permeability in volcanic reservoirs from the Austral and Neuquén Basins, Argentina. AAPG Bulletin, 91(1): 115-129.
- Shan X L, Li J Y, Chen S M, Ran Q C, Chen G B, Liu C. 2013. Subaqueatic 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.

(责任编辑 张西娟)