

文章编号:1000-0550(2025)06-2028-11

塔里木盆地西北缘埃迪卡拉纪熔积岩特征、成因及地质意义

黄少英^{1,2,3}, 章凤奇^{4,5}, 罗彩明^{1,2,3}, 段云江^{1,2,3}, 亢茜^{1,2,3}

1. 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000
2. 中国石油天然气集团有限公司超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心, 新疆库尔勒 841000
3. 新疆维吾尔自治区超深层复杂油气藏勘探开发工程研究中心, 新疆库尔勒 841000
4. 浙江大学地球科学学院, 浙江省地学大数据与地球深部资源重点实验室, 杭州 310058
5. 教育部含油气盆地构造研究中心, 杭州 310058

摘要 【目的】熔积岩是一类由炽热的岩浆物质与湿冷的未固结沉积物发生同生混合而形成过渡型岩石,具有重要的古环境指示意义。【方法】通过野外露头地质调查和微观岩石学分析研究,在塔里木盆地西北缘埃迪卡拉系基性火山岩中识别出典型的熔积岩,主要包括块状熔积岩和流态熔积岩两种类型,其宿主为紫红色砂质沉积物。【结果】熔积岩主要通过岩浆顺层侵入富水未固结砂质沉积物或者在其表面流动形成,其中较薄层岩浆侵入和地表溢流玄武岩底部主要形成流态熔积岩,而较厚层岩浆侵入则发育块状熔积岩。【结论】塔里木克拉通北缘早埃迪卡拉世总体仍处于与罗迪尼亚超大陆裂解相关的板内裂谷背景,熔积岩的发育指示该地区玄武岩喷发时主要为滨岸水下沉积环境;伴随着火山喷发的结束,晚埃迪卡拉世向构造相对稳定的被动陆缘盆地或克拉通盆地转换。

关键词 塔里木盆地;埃迪卡拉纪;熔积岩;火山喷发;滨岸水下沉积环境

第一作者简介 黄少英,男,1977年出生,博士,高级工程师,盆地基础地质,E-mail: huangsy-tlm@petrochina.com

通信作者 章凤奇,男,教授,盆地构造与成盆动力学,E-mail: zhangfq78@zju.edu.cn

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2023.134

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2023.134

0 引言

熔积岩(peperite)是炽热的岩浆与富水的未固结沉积物相互混合而形成了一类特殊的过渡型岩石类型,其虽不多见且分布局限,但却有重要的沉积环境指示意义^[1]。该术语英文名最早由英国地质学家Scope提出^[2],当时是用来描述一种由灰岩和玄武岩构成的混合状岩石,玄武岩呈碎屑状宛如胡椒碎粒撒在白色的灰岩基质当中,因此英文名直译则可称为“胡椒岩”^[1]。白志达等^[3]首次将这一术语介绍到国内,并根据其成因将其中文名译为“熔积岩”,后被国内学者普遍接受和使用^[1,4-8]。从岩石物质组成角度,熔积岩组分具有明显的二元特征,即包括由岩浆冷

凝固结开裂形成的“新生浆屑”(juvenile clast,即浆源碎屑,简称浆屑)和与它混合的沉积物组分(host sediment,即宿主沉积物)。通过两者的混合,热的岩浆体冷凝、固化、形成浆屑和熔岩团块,或密集、或疏散地混入宿主沉积物中。由于熔积岩独特的产出与形成条件,因此具有重要的地质意义,主要表现在两个方面:其一,熔积岩是岩浆与松软未固结的沉积物相互混合而成,它的出现可以限定沉积作用与岩浆事件之间的等时性^[2,9-10];其二,根据参与混合沉积物的岩性和岩相,可以准确判定岩浆喷发时的沉积古环境^[1-2,4,7,9,11]。因此,熔积岩的识别与研究对认识火山喷发环境、限定岩浆作用时代具有重要的价值,并在大地构造学和沉积环境研究方面发挥关键作用^[1]。

收稿日期:2023-10-11;修回日期:2023-12-11;录用日期:2024-01-04;网络出版日期:2024-01-04

基金项目:国家自然科学基金项目(42077223, 51988101, 42372244) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42077223, 51988101, 42372244]

塔里木盆地所在的板块即塔里木克拉通^[12],是我国三个主要的克拉通陆块之一。新元古代晚期和二叠纪是塔里木火山作用最为显著的两个时期^[12-17]。前人已经在二叠纪火山岩中识别出丰富的熔积岩,深化了对塔里木二叠纪大火成岩省发育时古环境认识^[1,7]。

埃迪卡拉纪地层在塔里木西北缘阿克苏西南部地区出露广泛(图1)。笔者最近在该区埃迪卡拉系火山岩段也识别出了典型的熔积岩。本文通过野外露头地质调查和显微镜下微观岩石学研究相结合,详细地描述了熔积岩的类型与发育特征,进而分析了其成因模式,结合新元古代晚期盆地沉积充填特征和构造背景,探讨了其在认识塔里木北缘新元古代晚期古环境和盆地演化方面的重要启示意义。

1 研究区地质概况

1.1 区域构造背景

新元古代晚期是地球演化的关键阶段,全球大

陆岩石圈普遍发生构造伸展,表现为强烈的基性岩浆活动和发育广泛的裂谷盆地,指示了罗迪尼亚超大陆的裂解和分离漂移、洋盆扩张等一系列大地构造过程^[18-19]。已有研究表明,塔里木克拉通广泛记录了新元古代早期汇聚相关的变质作用与岩浆作用以及晚期伸展相关的裂陷作用与岩浆作用^[20-24],并很可能受控于罗迪尼亚超大陆聚散演化旋回^[21-23,25-29]。

前人通常将塔里木新元古代晚期裂谷盆地大致划分为成冰纪和埃迪卡拉纪两个发育阶段,与国内习惯使用的南华纪和震旦纪大致对应^[16,21]。学术界普遍认为,几乎遍及整个塔里木克拉通的成冰纪伸展裂陷作用,是罗迪尼亚超大陆裂解的重要标志和构造变形响应^[30-31],而埃迪卡拉纪盆地与成冰纪盆地存在明显的发育继承性,特别是在克拉通内部呈现出下部裂陷、上部拗陷的盆地叠合特征^[30]。值得注意的是,当前对塔里木北缘埃迪卡拉纪盆地属性仍存在裂谷盆地^[31]、裂谷—被动陆缘盆地^[32]、被动陆缘盆地^[33]等不同认识。

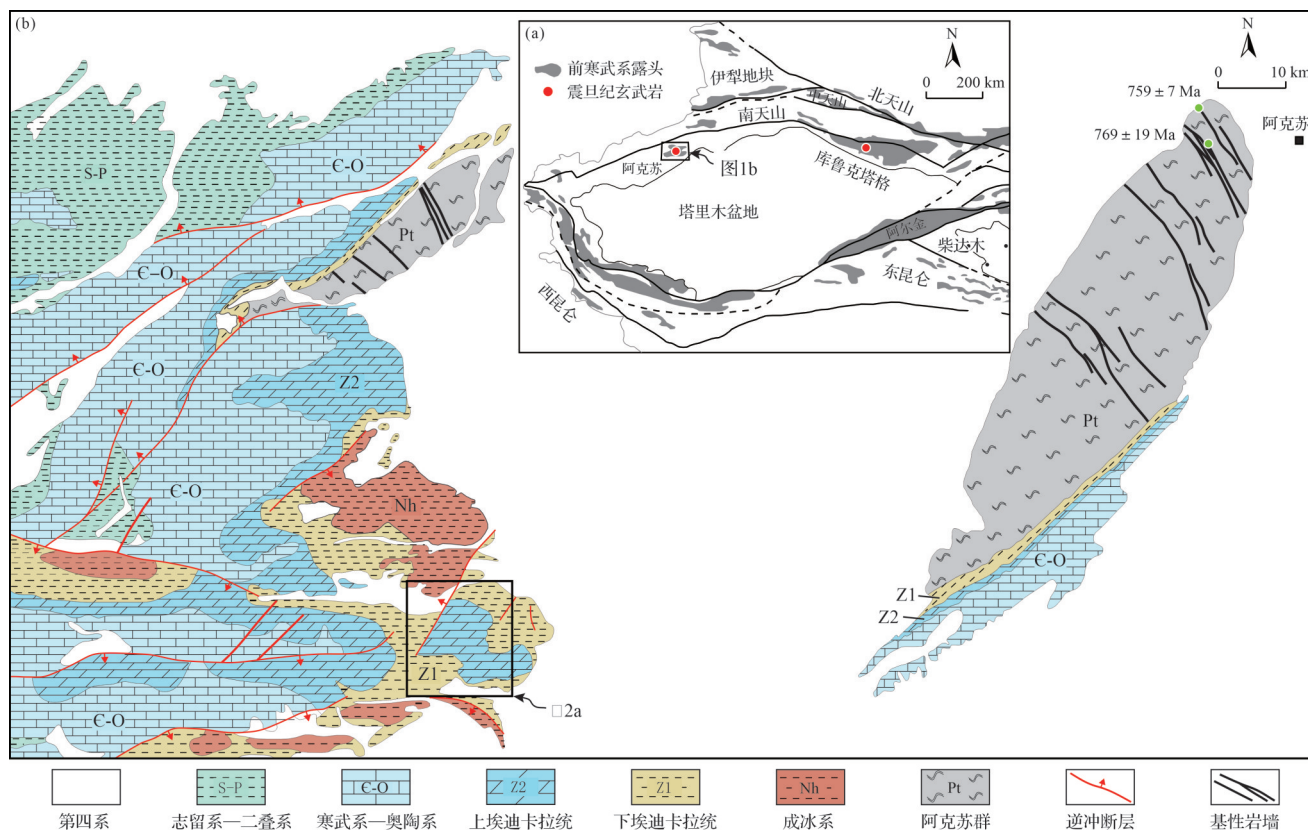


图1 塔里木盆地西北缘研究区地质简图及其区域大地构造位置(据文献[16]修改)

(a)塔里木盆地与邻区造山带构造划分简图;(b)阿克苏西侧地区地质简图

Fig.1 Geological sketch map of the study area in the northwestern margin of the Tarim Basin and its regional tectonic location (modified from reference [16])

(a) structural division of the Tarim Basin and adjacent orogenic belts; (b) geological sketch map of the western Aksu area

1.2 研究区地质构造与地层特征

阿克苏地区是塔里木前寒武纪地层四个主要的出露区之一^[22](图1a),自下而上主要发育新元古代基底变质岩阿克苏群、新元古代晚期的成冰系和埃迪卡拉系和下古生界(寒武系—奥陶系)等(图1b)。本次研究的尤尔美那克剖面位于阿克苏西南部,距阿克苏市区直线距离约70 km,尤尔美那克剖面自南西北向东北方向,主要发育一个背斜和向斜构造,在背斜和向斜两翼埃迪卡拉系上部层序出露良好,但是背斜核部被第四系所覆盖(图2a)。向斜北翼被一条近南北向的走滑断层分割成了东西两块,但两侧地层序列在空间上仍大致可对比(图2a)。

尤尔美那克地区较为连续地保存了成冰纪到寒武纪沉积地层(图2b)。成冰系自下而上主要包括巧恩布拉克群和尤尔美那克组,埃迪卡拉系自下而上包括苏盖特布拉克组和奇格布拉克组。巧恩布拉克

群整体是一套底部为灰绿色杂砂岩夹少量砂砾岩,向上先是变细,发育细砂岩与粉砂质泥岩交互沉积,然后又逐渐变粗,依次出现砂岩、砾岩、含砾砂岩等(图2b)。该群上部被尤尔美那克组冰碛砾岩角度不整合覆盖(图2b)。尤尔美那克组向上由冰碛砾岩整合过渡为灰绿色粉砂岩,地层厚度介于10~95 m。下埃迪卡拉统苏盖特布拉克组,其底部与尤尔美那克组平行不整合接触,本组岩性主要包括下段的砾岩、砂岩以及泥岩,向上逐渐变为石英砂岩、泥岩和页岩等(图2b)。苏盖特布拉克组上部两个玄武质熔岩夹层,锆石U-Pb测年结果显示玄武岩喷发时间约为615 Ma^[21](图2b,c)。苏盖特布拉克组上段紫红色石英砂岩层内常见潮汐交错层理和冲洗交错层理,并在局部层出现石英碎屑和白云岩构成的混积岩。上埃迪卡拉统奇格布拉克组,与苏盖特布拉克组顶部灰绿色泥岩段整合接触,岩性主要由中厚层一块状

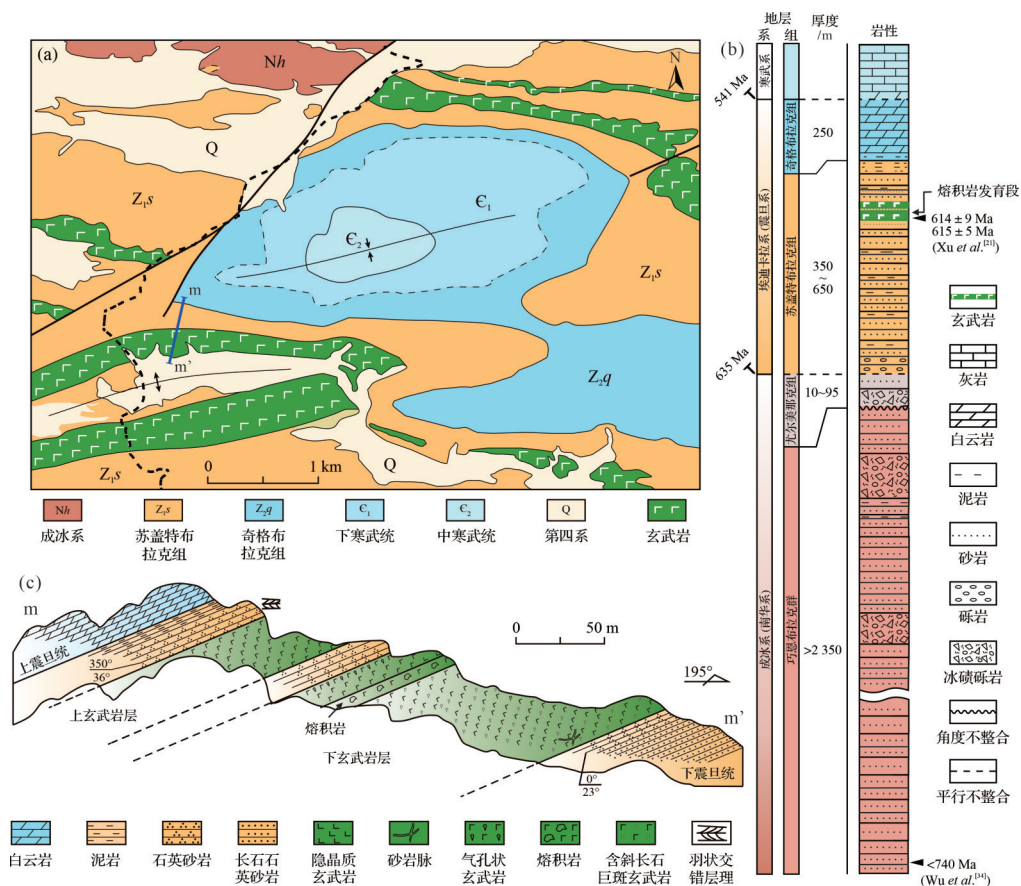


图2 尤尔美那克地区野外研究剖面位置与熔岩岩发育层位(据文献[16]修改)

(a) 尤尔美那克剖面附近地质简图,其位置见图1b;(b) 背斜北翼苏盖特布拉克组局部实测剖面和熔岩岩发育位置,剖面位置见图2a;(c) 区域成冰纪—埃迪卡拉纪地层柱状图

Fig.2 The position of the field study section and the development horizon of the peperite in the Youmeinaoke area (modified from reference [16])

(a) geological sketch near the Youmeinaoke section, the location shown in Fig.1b; (b) measured section and peperite development of the lower Ediacaran Sugaitubulake Formation on the northern wing of the anticline, location shown in Fig.2a; (c) regional stratigraphic column of the Cryogenian-Ediacaran

层白云岩组成,厚度较为稳定(~250 m),可见叠层石大量发育^[24]。寒武系平行不整合覆盖于奇格布拉克组之上,其底部为黑色硅质岩和含磷层,向上逐渐变为灰岩主导的碳酸盐岩沉积。

2 埃迪卡拉纪熔积岩特征与成因

2.1 熔积岩特征详细描述

研究区熔积岩主要发现于尤尔美那克地区一背斜构造的北翼(或另一向斜构造南翼),地层属于苏盖特布拉克组上部层序(图2a)。该处发育上、下两套玄武岩层,厚度分别为~30 m和~90 m^[16](图2b,c),其中下玄武岩层中一下部为含斜长石巨斑玄武岩,顶部为隐晶致密玄武岩,熔积岩集中发育在这两类玄武岩分界处(图2c);上玄武岩层主要为隐晶质玄武岩,斑晶少见。熔积岩的宿主主要是由石英等碎屑构成的紫红色砂质沉积物。在熔积岩发育段仍局部可见断续呈条带状且被熔岩裹挟的砂岩层,厚度介于25~120 cm,横向上逐渐向熔积岩逐步相变过渡(图3a,b),熔积岩厚度从80 cm至数米不等。熔积岩段的产状与玄武岩、沉积岩层基本一致,但其包裹的砂岩层局部呈现出扭曲变形特点,可能是受熔岩裹挟流动固结的原因。熔积岩中新生浆屑与宿主沉积物的相对占比变化较大,两者比例可从1:4变化至5:1。新生浆屑的颜色多呈灰紫色—深灰色,尺寸大小从厘米级到分米级,轮廓形态上有三角形楔状、四边形或多边形棱角状、不规则塑性、棱角状与塑性拖尾组合等多种类型。

按照前人对熔积岩新生浆屑的几何形貌特征进行类型划分^[1,9-10],研究区主要发育块状熔积岩(blocky peperite)和流态熔积岩(fluidal peperite)两种常见类型。

1) 块状熔积岩

块状熔积岩中新生浆屑的边界呈现出块状、板状、楔状等平直的多边形外观,浆屑比例可高达60%~90%,浆屑内部总体上为隐晶致密、斑状结构,有少量的白色的杏仁构造(图3c,d)。紫红色的石英砂岩多呈不规则细脉状包裹浆屑(图3c),局部浆屑密集分布,相互之间被细网格状砂岩细脉间隔,细脉两侧的浆屑边界呈现出相互嵌合或者锯齿状的特点(图3c,d),即锯齿嵌合结构(jigsaw-fit texture)。这类熔积岩又可称为紧凑型熔积岩(closed-packed peperite)。显微镜下观察发现,这类浆屑与玄武岩之

间边界总体平直清晰,但是在一些小浆屑轮廓细微局部还可以观察到具有半椭圆内凹或舌形外凸等塑性流动特征(图4a,b);玄武岩浆屑在显微镜下主要表现为以玻基结构或玻晶玄武结构为主(图4a,b)。

2) 流态熔积岩

流态熔积岩中的新生浆屑,大部分呈现为不规则的塑性外观和流动拖尾现象(图3e);这些浆屑通常间隔较大,多以孤立状散布于宿主砂质沉积物中,浆屑比例一般小于40%,呈现出被宿主砂质沉积物“基底式胶结”的特征(图3e,f);这类浆屑与块状熔积岩的浆屑除了轮廓形态不同外,还有一个显著的特征是其内部的气孔极为发育,且大部分气孔被白色矿物充填构成典型的杏仁构造。显微镜下进一步观察发现,这些宏观上的流态浆屑,其边部发育明显的淬冷边,即从边缘向内部依次发育典型玄武质玻璃结构和玻基结构或玻晶玄武结构(图4c,d),并且在淬冷边中包裹呈液化流动状的砂质脉(图4c,d)、砂质包裹体(图4e,f)以及多种成分的杏仁体(图4c~g)。有的砂质包裹体也呈圆形,与杏仁体外形上形似,但它们与杏仁体中的岩浆气沉淀物(沸石、方解石、玉髓等)成分和成因是完全不同的。砂质包裹体碎屑成分与外部宿主砂岩砂粒构成完全一致,它的出现指示了岩浆和沉积物的流动是同时发生的,并发生相互的对流和包卷,砂质沉积物被岩浆体包裹进去,之后冷却凝固形成。此外,显微镜下观察还可以明确,玄武岩中气孔的充填物主要是沸石和方解石,一部分气孔被单一的沸石完全充填(图4g,h),也有一些气孔则被两种矿物先后充填,即早期先被沸石部分充填,晚期则是方解石完全充填(图4e,f)。上述杏仁体矿物的充填序次也可以从一些贯穿玄武岩和砂岩包裹体的方解石细脉得到进一步的佐证(图4c,d)。

2.2 熔积岩成因模式

熔积岩主要是由炽热的岩浆在地表与富水的未固结沉积物机械混合(mingling)形成,这一过程称为熔积作用,其主要包括沉积物流体化作用和岩浆成屑作用^[1]。沉积物的流体化是熔积作用发生的必要条件,因为只有松软富水未固结的沉积物才能液化发生流动,进而与岩浆体混合。由此可知,已固结成岩的沉积岩与岩浆物质之间是不会发生熔积作用的。新生浆屑主要有块状浆屑和流态浆屑两种类型^[1]。块状浆屑外形轮廓棱角分明,且相互之间通常

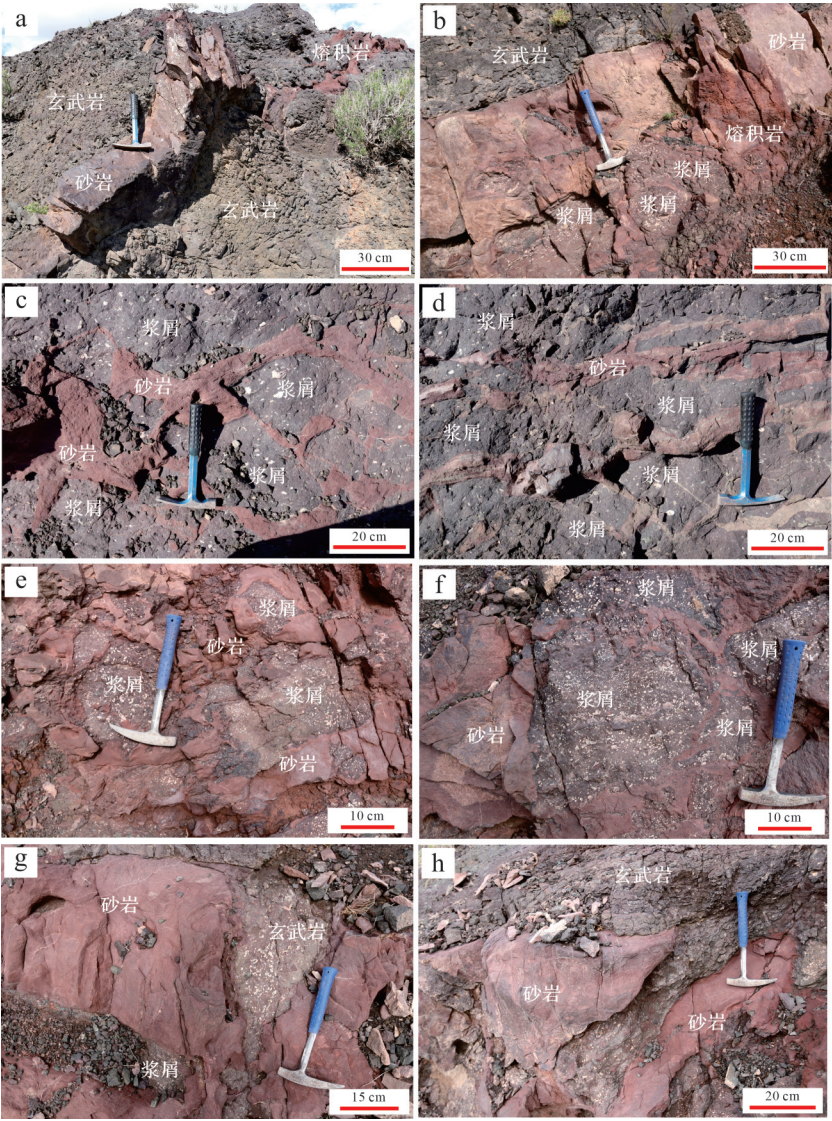


图3 埃迪卡拉纪熔积岩野外露头典型照片

(a)熔岩包裹的砂岩层与熔积岩段逐渐过渡;(b)块状砂岩中下部发育熔积岩;(c,d)块状熔积岩,浆屑密集分布且岩性比较致密,锯齿镶嵌结构,而气孔—杏仁构造发育不显著;(e,f)流态熔积岩,浆屑气孔—杏仁构造极为发育,且塑性变形形态普遍;(g,h)流态熔积岩,塑性浆屑从砂岩顶部灌入,气孔—杏仁构造也比较发育

Fig.3 Typical photographs of Ediacaran peperites in outcrop

(a) lava-encased sandstone layers and the gradual transition of sandstone to peperite; (b) peperite is well developed in the middle and lower part of the massive sandstone bed; (c, d) the blocky peperite is characterized by dense magmatic clasts, dense lithology, and serrated mosaic structure, while the development of stomatal and amygdaloidal structures are insignificant; (e, f) in the fluidal peperite, the vesicle-amygdaloidal structure of the magmatic clastic is well developed and the plastic deformation is common; (g, h) fluidal peperite, plastic slurry is injected from the top of the sandstone, and the stomatal and amygdaloidal structures are also well developed

表现为锯齿嵌合结构,这一特点指示脆性开裂机制主导了成屑过程,它们往往与原地淬冷、自碎、剧烈的水汽岩浆剧烈爆炸作用密切相关^[2];流态浆屑的外形表明它们是在塑性机制下缓慢凝固结成屑的,这可能与燃料—冷剂混合作用机制(fuel-coolant interaction)^[35]中在岩浆表面形成稳定的蒸汽膜,使岩浆与湿冷沉积物隔绝,从而维持了岩浆体处于较长时间的塑性状态,并在岩浆—沉积物密度异常对流、

蒸汽膜内震荡、表面张力扩展、流体剪切等多种机制下形成独立的岩浆滴,通过缓慢凝固形成流态浆屑^[1]。由上可知,虽然块状浆屑和流态浆屑的成屑机制不同,但它们均与沉积物液化流动过程有关。也就是说,在熔积作用过程中,岩浆体需要在宿主沉积物内占据一定的空间,而空间的腾挪主要通过沉积物的流动化来实现;伴随着岩浆的成屑与开裂过程又会释放新的空间,这些空间被沉积物充填需要沉

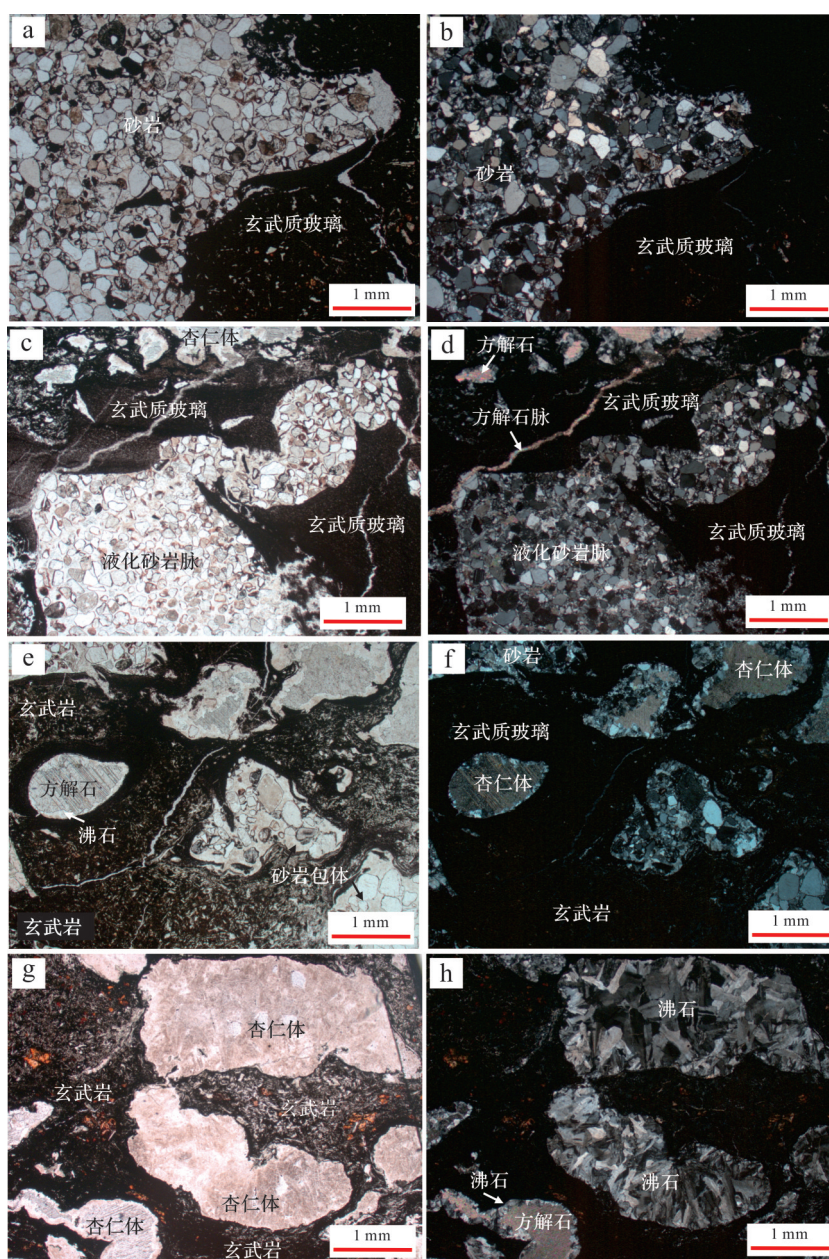


图4 埃迪卡拉纪熔积岩显微镜下的岩石结构与构造特征

(a, b)块状玄武岩屑淬冷边与局部的流动型特征; (c, d)流态玄武岩屑边部包裹的流动型砂岩脉与气孔—杏仁构造; (e, f)流态玄武岩屑边部气孔—杏仁构造与砂质包裹体; (g, h)流态玄武岩屑中的气孔—杏仁构造; 其中, (a, c, e, g)为单偏光镜; (b, d, f, h)为正交偏光镜

Fig.4 Photomicrographs of textural and structural characteristics of Ediacaran peperites

(a, b) quenching edge and local flow pattern of massive basaltic magma debris; (c, d) flow sand dike, and stomatal and amygdaloidal structures wrapped in the edge of fluid basaltic magma; (e, f) stomatal and amygdaloidal structures and sandy inclusions at the edge of fluidal basaltic magma; (g, h) stomatal and amygdaloidal structures in fluidal basaltic magmatic debris; (a, c, e, g) plane-polarized light (PPL); (b, d, f, h) cross-polarized light (XPL)

积物液化流动起来,只有这样才能形成岩浆体与沉积物交互混杂的现象^[36]。因此,沉积物流动化和岩浆的成屑作用是密切相关的^[1]。

按照与宿主沉积的空间产出与配置关系,熔积岩成因主要有两类,一类是岩浆体以岩墙或者岩床的形式侵入浅表富水未固结的沉积物形成,另一类

则是地表熔岩流或者炽热的火山碎屑流经过含水沉积物表面,在其底部形成,即所谓的 lava-foot 型熔积岩^[1,7]。尤尔美那克剖面埃迪卡拉纪熔积岩主要与基性的玄武岩喷发有关且大量发育在同一层段,结合野外宏观调查和岩石微观结构研究,提出本区熔积岩可能存在三种成因模式。

(1) 较厚层玄武质岩浆侵入富水的砂质沉积物主要形成块状熔积岩(图5)。当厚度较大的炽热玄武质岩浆在浅层、顺层情况下侵入富水的砂质沉积物,两者相遇,岩浆体淬冷收缩,产生机械应力,发生脆性破裂,从而形成棱角分明、低气孔或隐晶致密的新生浆屑(图3c,d);同时,砂质沉积物受热,在蒸汽和机械力的驱动下发生流动化,灌入浆屑间隙,从而形成具有典型锯齿镶嵌结构的块状熔积岩。

(2) 较薄层玄武质熔岩侵入富水的砂质沉积物主要形成流态熔积岩(图5)。当较薄层的玄武质岩浆在浅层顺层侵入富水砂质沉积物时,颗粒间的孔隙水受岩浆热快速汽化,形成的蒸汽膜在沉积物孔隙性不佳的条件下会维持在岩浆体的表面,从而使岩浆体与湿冷沉积物产生隔绝效应,能在较长时间使岩浆体保持热的塑性状态,可以缓慢冷却凝固,最终导致塑性浆屑外观的形成^[7,10]。这种受蒸汽膜保护的岩浆体会伴随蒸汽膜扩展而进一步发生流动,就能够将部分流态化的砂质沉积物包裹进岩浆体内,貌似杏仁构造,实为一种包裹结构。流态熔积岩中浆屑的一个重要特点是气孔—杏仁构造十分发育(图3e,f、图4e~h)。

(3) 地表溢流的玄武质岩浆在富水砂质沉积物表面流动形成熔岩底部型(即 lava-foot 型)流态熔积岩(图5)。这种熔积岩主要是炽热的熔岩在富水未固结的沉积物表面流动过程中形成。图3g中显示,砂岩层顶部出现一个“V”型的熔岩灌入结构,熔岩显示富含气孔—杏仁构造并在其下方的砂岩内部则出现了与其似连非连、似断非断的不同形态和大小的

流态浆屑;图4h则显示上覆熔岩部分呈倾斜状楔入砂岩层顶部,局部包裹砂岩块。这种熔积岩与上面的流态熔积岩特点相似,浆屑中也富含气孔—杏仁构造并出现典型的包裹结构。

3 熔积岩发育的古环境与盆地构造演化指示意义

由于熔积岩可以用来表征与熔岩同期的等时沉积作用,因此准确识别熔积岩对提高火山喷发期次以及火山活动期内沉积演化的分辨率具有重要意义^[1]。尤其是火山喷发作用比较频繁的时候,经常会导致上下两套熔岩之间缺乏原生沉积层序,而仅仅保留熔积岩。此时如果不能正确识别熔积岩,就会得出“两套熔岩之间没有沉积层”的错误认识^[7]。本文根据尤尔美那克剖面的熔积岩证据,可以进一步明确塔里木盆地北缘埃迪卡拉纪至少存在三期较为连续的玄武岩喷发作用,而不是原来的上下两期^[21]。实际上,这与通过下玄武岩层的岩性结构特点的观察判断^[16]也是一致的,即熔积岩之下多是含有斜长石巨斑的玄武岩,而熔积岩之上则是几乎不含斜长石斑晶的隐晶致密玄武岩。两期虽然都是玄武质火山喷发,但喷发作用不仅存在间歇,而且在岩石结构特点上有明显的差别和变化。

熔积岩是炽热的岩浆物质与湿冷未固结的沉积物发生同生混合而形成的一类特殊的过渡型岩石,其形成与水体密切相关,因此可作为水下火山喷发的关键性岩石证据^[7]。塔里木盆地西北缘阿克苏地

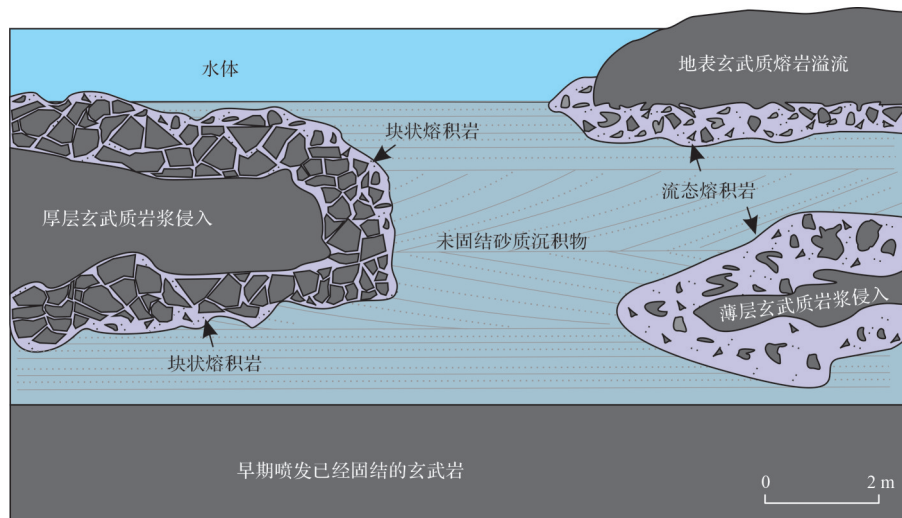


图5 塔里木盆地西北缘埃迪卡拉纪熔积岩成因示意图

Fig.5 Schematic diagram of the genesis of Ediacaran peperites in the northwestern Tarim Basin

区出露的埃迪卡拉系岩性及其发育序列比较相似(图2c)。苏盖特布拉克组下部主要为一套块状—厚层状紫红色砾岩、紫红色砂砾岩、砂岩沉积,上部主要为中—厚层状紫红色、灰绿色砂岩夹粉砂岩、泥页岩交互沉积,粒度向上总体变细,至奇格布拉克组则主要发育白云岩等碳酸盐岩,总体上显示出从陆相冲积扇—河流沉积环境向滨岸、浅海碎屑陆棚—碳酸盐岩台地沉积环境的演变和水体逐渐加深的过程^[16]。尤尔美那克地区埃迪卡拉系苏盖特布拉克组上部发育上、下两套玄武岩,并且玄武岩底部均与砂岩整合接触,而且上玄武岩层顶部出现较为典型的枕状熔岩^[16,21],指示其喷发时处于水下环境,但对下玄武岩层的喷发环境是陆上还是水下仍不明确。与下玄武岩层顶底整合接触的沉积岩均为碎屑分选好、磨圆好、硅质胶结的中厚层—块状石英砂岩,结构成熟度和成分成熟度都很高,并且常发育典型的羽状交错层理和冲洗交错层理^[16]等沉积构造,分析认为下玄武岩层喷发时总体可能处于滨岸沉积环境。值得注意的是,在下玄武岩层底部观察到少量的紫红色砂岩细脉^[16],砂岩细脉的出现通常也与富水沉积物液化或者流动化有关,虽然没有直接观察到熔积现象,但推测同时期玄武质岩浆喷发时可能与富水沉积物接触并局部发生液化流动。因此,基于下玄武岩层顶部识别的熔积岩和底部的砂岩细脉,以及上玄武岩层枕状熔岩等关键岩石证据,结合上下地层岩性岩相组合与沉积特点,认为塔里木盆地西北缘苏盖特布拉克组玄武岩喷发时总体为滨岸水下沉积环境。

熔积岩的识别和研究在认识盆地充填演化和区域大地构造过程方面也具有一定的启示意义。研究表明,塔里木盆地所在的塔里木克拉通新元古代参与了罗迪尼亚超大陆的聚合—裂解旋回^[21-23,25-29]。其中一个普遍接受的观点是,新元古代成冰纪时期广泛发育的裂陷盆地及其相伴的火山喷发、基性岩墙、双峰式岩浆活动和A型花岗质岩浆侵入等事件是岩石圈构造伸展的重要标志^[24,30-31]。埃迪卡拉纪开始,塔里木克拉通内陆地区裂陷成盆作用快速减弱,进入更大范围的拗陷盆地发育阶段^[17,30],因此一部分学者认为塔里木板块此时可能已经从罗迪尼亚超大陆中裂离出来,即塔里木北缘已经进入被动陆缘演化^[33]。然而,另一些学者注意到塔里木西北缘埃迪卡拉纪盆地的岩性发育序列和

沉积充填特点与大陆裂谷盆地比较接近^[32];同时,通过塔里西北缘多个埃迪卡拉系玄武岩露头的研究^[16-17,21],发现这些基性岩与典型的洋岛型玄武岩(OIB)地球化学特征也比较相似,认为塔里木北缘在埃迪卡拉纪早期处于大陆裂谷背景。也就是说,塔里木埃迪卡拉纪盆地属性和演化可能存在时空演化的差异性,即早埃迪卡拉世克拉通内部主要发育拗陷盆地,而同时期北缘地区仍发育裂谷盆地^[16-17]。熔积岩的发育表明,裂陷盆地晚期同沉积阶段火山喷发是发生在滨岸浅水或水下环境。伴随着火山喷发的结束,该地区快速沉降,水体很可能进一步加深,陆源碎屑迅速减少并消失,继而进入以碳酸盐岩沉积主导的浅海沉积环境(图2b)。这一沉积充填的转变,可能反映了塔里木北缘从埃迪卡拉纪早期的裂陷盆地向埃迪卡拉纪晚期的被动陆缘盆地或克拉通拗陷盆地转换^[17]。上述新元古代晚期成盆过程时空分异和叠加转换以及区域上长周期的海侵过程,可能受控于塔里木克拉通北缘与相邻的伊犁—中天山地块之间从成冰纪至埃迪卡拉纪早期两阶段张裂作用到埃迪卡拉纪晚期洋盆再次开启、板块分离漂移的大地构造过程^[16-17,37]。

4 结论

(1) 塔里木盆地西北缘埃迪卡拉纪玄武岩中发育典型的块状熔积岩和流态熔积岩,其宿主是由石英砂等碎屑构成的紫红色砂质沉积物。

(2) 熔积岩主要通过玄武质岩浆侵入富水砂质沉积物或者在其表层溢流形成,其中较薄层岩浆侵入和地表溢流熔岩底部主要形成流态熔积岩,而较厚层岩浆侵入则发育块状熔积岩。熔积岩的发育指示埃迪卡拉纪玄武岩喷发时总体处于滨岸水下沉积环境。

(3) 塔里木盆地北缘早埃迪卡拉世总体处于裂谷盆地发育阶段,伴随着裂谷晚期玄武岩的水下喷发结束,晚埃迪卡拉世快速进入构造相对稳定的被动陆缘盆地或克拉通盆地演化阶段。

致谢 浙江大学地球科学学院博士研究生吴鸿翔、王彩云、李磐、杨少梅、严佳凯以及硕士研究生程小鑫、黄伟康等在野外地质调查工作期间提供了帮助,三位审稿专家对本文提出了建设性修改建议和意见,在此对他们表示衷心的感谢!

参考文献 (References)

- [1] 郭召杰, 朱贝, 陈石. 熔积岩及其对中国几处关键构造事件的限定[J]. 地学前缘, 2015, 22(2): 174-186. [Guo Zhaojie, Zhu Bei, Chen Shi. Peperite: Constraints to a few key tectonic events in China[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(2): 174-186.]
- [2] Skilling I P, White J D L, McPhie J. Peperite: A review of magma-sediment mingling[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2002, 114(1/2): 1-17.
- [3] 白志达, 孙善平, 徐德斌, 等. 火山碎屑岩的一种重要类型: 熔积岩[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 134. [Bai Zhida, Sun Shanping, Xu Debin, et al. An important type of pyroclastic rock: Peperite [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3): 134.]
- [4] 白志达, 徐德斌, 孙善平. 河北西北部熔积岩特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2006, 25(6): 487-492. [Bai Zhida, Xu Debin, Sun Shanping. Characteristics and geological significance of peperite in northwestern Hebei province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2006, 25(6): 487-492.]
- [5] 张英利, 孟庆任, 渠洪杰. 滦平盆地上白垩统九佛堂组中的熔积岩及地质意义[J]. 沉积学报, 2008, 26(1): 105-110. [Zhang Yingli, Meng Qingren, Qu Hongjie. Peperite in the Jiufotang Formation of the Luanping Basin and its geological implications[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(1): 105-110.]
- [6] 杨志明, 侯增谦, White N C, 等. 青海南部熔积岩的发现: 对寻找 VMS 型矿床的重要启示[J]. 矿床地质, 2008, 27(3): 336-344. [Yang Zhiming, Hou Zengqian, White N C, et al. Discovery of peperite in south Qinghai and its inspiration to exploration of volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits[J]. Mineral Deposits, 2008, 27(3): 336-344.]
- [7] 朱贝, 郭召杰, 张子亚, 等. 塔里木二叠纪熔积岩的发现及其对大火成岩省火山喷发环境的限定[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(10): 2182-2192. [Zhu Bei, Guo Zhaojie, Zhang Ziya, et al. Peperites in the Permian Tarim large igneous province in Northwest China and their constraints on the local eruption environments[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 44(10): 2182-2192.]
- [8] 何衍鑫, 鲜本忠, 牛花朋, 等. 古地理环境对火山喷发样式的影响: 以准噶尔盆地玛湖凹陷东部下二叠统风城组为例[J]. 古地理学报, 2018, 20(2): 245-262. [He Yanxin, Xian Benzhong, Niu Huapeng, et al. Effects of palaeogeographic environment on volcano eruption style: Example from the Lower Permian Fengcheng Formation in eastern Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2018, 20(2): 245-262.]
- [9] White J D L, McPhie J, Skilling I. Peperite: A useful genetic term [J]. Bulletin of Volcanology, 2000, 62(1): 65-66.
- [10] Busby-Spera C J, White J D L. Variation in peperite textures associated with differing host-sediment properties[J]. Bulletin of Volcanology, 1987, 49(6): 765-776.
- [11] Rawlings D J. Mafic peperite from the gold creek volcanics in the Middle Proterozoic McArthur Basin, northern Territory[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1993, 40(2): 109-113.
- [12] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 1-295. [Jia Chengzao. Structural characteristics and oil and gas in the Tarim Basin, China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 1-295.]
- [13] 贾承造, 张师本, 吴绍祖. 塔里木盆地及周边地层(下册)[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-516. [Jia Chengzao, Zhang Shibei, Wu Shaozu. Stratigraphy of the Tarim Basin and adjacent areas (volume II)[M]. Beijing: Science Press, 2004: 1-516.]
- [14] 杨树锋, 陈汉林, 董传万, 等. 塔里木盆地西北缘晚震旦世玄武岩地球化学特征及大地构造背景[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1998, 32(6): 753-760. [Yang Shufeng, Chen Hanlin, Dong Chuanwan, et al. Geochemical properties of Late Sinian basalt in the northwestern boundary of Tarim Basin and its tectonic setting[J]. Journal of Zhejiang University (Natural Science), 1998, 32(6): 753-760.]
- [15] 杨树锋, 陈汉林, 厉子龙, 等. 塔里木早二叠世大火成岩省[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(2): 187-199. [Yang Shufeng, Chen Hanlin, Li Zilong, et al. Early Permian Tarim large igneous province in Northwest China[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 44(2): 187-199.]
- [16] Wu H X, Dilek Y, Zhang F Q, et al. Ediacaran magmatism and rifting along the northern margin of the Tarim Craton: Implications for the Late Neoproterozoic Rodinia configuration and breakup[J]. GSA Bulletin, 2023, 135(1/2): 367-388.
- [17] Wang C Y, Wu H X, Dilek Y, et al. Basin filling and magmatic response to the migration of two-stage rifts: New insights into the Late Neoproterozoic tectonics of the northern Tarim Craton [J]. Precambrian Research, 2023, 397: 107175.
- [18] Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis[J]. Precambrian Research, 2008, 160(1/2): 179-210.
- [19] Li Z X, Liu Y B, Ernst R. A dynamic 2000-540 Ma Earth history: From cratonic amalgamation to the age of supercontinent cycle[J]. Earth-Science Reviews, 2023, 238: 104336.
- [20] Lu S N, Li H K, Zhang C L, et al. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments[J]. Precambrian Research, 2008, 160(1/2): 94-107.
- [21] Xu B, Zou H B, Chen Y, et al. The Sugetbrak basalts from northwestern Tarim Block of Northwest China: Geochronology, geochemistry and implications for Rodinia breakup and ice age in the Late Neoproterozoic[J]. Precambrian Research, 2013, 236: 214-226.
- [22] Ge R F, Zhu W B, Wilde S A, et al. Neoproterozoic to Paleozoic long-lived accretionary orogeny in the northern Tarim Craton[J]. Tectonics, 2014, 33(3): 302-329.
- [23] Ge R F, Zhu W B, Wilde S A. Mid-Neoproterozoic (ca. 830-800 Ma) metamorphic *P-T* paths link Tarim to the circum-Rodinia subduction-accretion system[J]. Tectonics, 2016, 35(6): 1465-

- 1488.
- [24] Wu H X, Zhang F Q, Dilek Y, et al. Mid-Neoproterozoic collision of the Tarim Craton with the Yili-central Tianshan Block towards the final assembly of Supercontinent Rodinia: A new model[J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 228: 103989.
- [25] 陆松年,李怀坤,陈志宏,等. 新元古时期中国古大陆与罗迪尼亚超大陆的关系[J]. *地学前缘*, 2004, 11(2): 515-523. [Lu Songnian, Li Huaikun, Chen Zhihong, et al. Relationship between Neoproterozoic cratons of China and the Rodinia[J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(2): 515-523.]
- [26] Xu Z Q, He B Z, Zhang C L, et al. Tectonic framework and crustal evolution of the Precambrian basement of the Tarim Block in NW China: New geochronological evidence from deep drilling samples[J]. *Precambrian Research*, 2013, 235: 150-162.
- [27] Zhang C L, Zou H B, Li H K, et al. Tectonic framework and evolution of the Tarim Block in NW China[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1306-1315.
- [28] Wen B, Evans D A D, Li Y X. Neoproterozoic paleogeography of the Tarim Block: An extended or alternative “missing-link” model for Rodinia? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 458: 92-106.
- [29] Wen B, Evans D A D, Wang C, et al. A positive test for the greater Tarim Block at the heart of Rodinia: Mega-dextral suturing of supercontinent assembly[J]. *Geology*, 2018, 46(8): 687-690.
- [30] 陈永权,严威,韩长伟,等. 塔里木盆地寒武纪/前寒武纪构造: 沉积转换及其勘探意义[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(1): 39-50. [Chen Yongquan, Yan Wei, Han Changwei, et al. Structural and sedimentary basin transformation at the Cambrian/Neoproterozoic interval in Tarim Basin: Implication to subsalt dolostone exploration[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(1): 39-50.]
- [31] 何碧竹,焦存礼,黄太柱,等. 塔里木盆地新元古代裂陷群结构构造及其形成动力学[J]. *中国科学:地球科学*, 2019, 49(4): 635-655. [He Bizhu, Jiao Cunli, Huang Taizhu, et al. Structural architecture of Neoproterozoic rifted depression groups in the Tarim Basin and their formation dynamics[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 49(4): 635-655.]
- [32] Turner S A. Sedimentary record of Late Neoproterozoic rifting in the NW Tarim Basin, China[J]. *Precambrian Research*, 2010, 181(1/2/3/4): 85-96.
- [33] Zhu W B, Zheng B H, Shu L S, et al. Neoproterozoic tectonic evolution of the Precambrian Aksu blueschist terrane, northwestern Tarim, China: Insights from LA-ICP-MS zircon U-Pb ages and geochemical data[J]. *Precambrian Research*, 2011, 185(3/4): 215-230.
- [34] Wu L, Guan S, Ren R, et al. Neoproterozoic glaciations and rift evolution in the northwest Tarim craton, China: New constraints from geochronological, geochemical, and geophysical data[J]. *International Geology Review*, 2019, 63(1): 1-20.
- [35] White J D L. Impure coolants and interaction dynamics of phreatomagmatic eruptions[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1996, 74(3/4): 155-170.
- [36] Kokelaar B P. Fluidization of wet sediments during the emplacement and cooling of various igneous bodies[J]. *Journal of the Geological Society*, 1982, 139(1): 21-33.
- [37] Yi Z Y, Guo Z J, Wei G Q. A two-stage plume-induced rifting in the Neoproterozoic north Tarim: Evidence from detrital zircon study and seismic interpretation[J]. *Tectonophysics*, 2022, 838: 229503.

Characteristics and Origin of Ediacaran Peperites in Northwestern Tarim Basin, and Their Geological Implications

HUANG ShaoYing^{1,2,3}, ZHANG FengQi^{4,5}, LUO CaiMing^{1,2,3}, DUAN YunJiang^{1,2,3}, KANG Qian^{1,2,3}

1. Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, China National Petroleum Corporation, Korla, Xinjiang 841000, China

2. Exploration and Development Center of Ultra-Deep Complex Oil and Gas Reservoirs, China National Petroleum Corporation, Korla, Xinjiang 841000, China

3. Exploration and Development Engineering Research Center of Ultra-Deep Complex Oil and Gas Reservoirs, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Korla, Xinjiang 841000, China

4. Key Laboratory of Geoscience Big Data and Deep Resource of Zhejiang Province, School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

5. Structural Research Center of Oil & Gas Bearing Basin of Ministry of Education, Hangzhou 310058, China

Abstract: [Objective] Peperite is a transitional rock type formed by the syngenetic mixing of hot magmatic materials with wet and cold unconsolidated sediments, which has important paleoenvironmental implications. [Methods] Based on outcrop geological survey and microscopic petrological analysis, typical peperites are recognized in Ediacaran basic volcanic rocks in the northwestern Tarim Basin. These are mainly blocky peperites and fluidal peperites hosted by purplish-red sandy sediments. [Results] The peperites were mainly formed by the intrusion of magma into water-rich unconsolidated sandy sediments or by the flow of magma on the surface of water-rich unconsolidated sandy sediments. Of these, the thinner magmatic intrusion and the lower surface of the flood basalt mainly formed the fluidal peperites, and the thicker magmatic intrusion developed the blocky peperites. [Conclusions] The northern margin of the Tarim Craton was still in an intraplate rift setting related to the breakup of the Rodinia supercontinent during the early Ediacaran, and the development of peperite indicates that the basalt eruption in this area took place in a mainly littoral subaqueous sedimentary environment. With the end of volcanic eruption, the northern Tarim Craton transformed into a relatively stable passive continental margin basin or a cratonic basin during the late Ediacaran.

Key words: Tarim Basin; Ediacaran Period; peperite; volcanic eruption; littoral subaqueous sedimentary environment