

文章编号:1000-0550(2017)01-0035-11

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.01.004

欧龙布鲁克地块古生代风暴沉积特征及地质意义

马帅,陈世悦,汪峰,邵鹏程,王志金

中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266555

摘要 为进一步研究欧龙布鲁克地块古生界频繁发育的风暴沉积所暗含的地质信息,探讨风暴频发型古气候对柴北缘地区古生代沉积的影响,对研究区古生界各剖面进行了详细的野外勘察及室内实验等综合分析,以底面侵蚀构造、砾屑结构、化石滞留层、丘状交错层理以及同沉积涡流侵蚀构造等作为典型的沉积构造标志,识别出包括风暴高峰期、原地卸载期、回流期、涡流期以及停息期等风暴作用不同阶段产物。根据不同阶段风暴产物的组合形式,将出露的多套风暴沉积划分为代表不同沉积环境下的风暴序列类型,其中早古生代发育5种原地或近源型风暴沉积序列,晚古生代则发育对应原地搅动型、近源型以及深水缓坡型风暴沉积的风暴沉积序列。再综合研究区各古生界剖面的岩性等特征,印证了欧龙布鲁克地块早古生代为持续海侵的浅海环境,而晚古生代则整体处于陆表海环境下海陆过渡相沉积的环境变化特征。

关键词 欧龙布鲁克地块;古生代;风暴沉积;地质意义

第一作者简介 马帅,男,1990年出生,博士研究生,沉积学与层序地层学,E-mail:mas0302@163.com

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

0 引言

有关风暴沉积的研究始于19世纪末期,Gilbert^[1]首先报道了相关的沉积构造研究。自20世纪70年代开始,国外地质学家对风暴沉积开展了大量工作,Kelling *et al.*^[2]、Einsele *et al.*^[3]先后界定并完善了风暴岩、风暴沉积的概念,而Harms *et al.*^[4]、Hamblin *et al.*^[5]等对丘状交错层理的研究无疑是风暴沉积研究中的一大突破。20世纪80年代不同学者分别对碎屑岩与碳酸盐岩风暴沉积的标准序列进行了详细研究,并与浊流进行了相应的对比^[6-10],这一系列的工作使得风暴沉积理论成为“继浊流理论之后的又一次划时代性的突破”。国内学者在结合国外研究成果的基础上对风暴沉积的形成机制、沉积模式等进行了相关的介绍,目前国内各大板块比如扬子、塔里木、华北等地均有古生代风暴沉积作用的相关报道^[11-18],但位于柴达木盆地北缘地区的欧龙布鲁克地块却未见相关报道。笔者在研究区欧山、石灰沟、城墙沟以及旺尕秀等古生代剖面发现大量风暴沉积证据,而该区古生代风暴沉积的发现及研究对于深入了解该区古生代古海洋、古气候、构造—古地理格局有着独特且重要的意义。

1 区域地质背景

欧龙布鲁克地块作为柴北缘最早形成的微大陆,整体位于宗务隆构造带与柴北缘早古生代缝合带之间,由于造山作用的影响,靠近柴北缘构造带的大陆边缘在古生代初期已形成滩间山岛弧构造带^[19]。研究区下古生界稳定型沉积建造仅在欧龙布鲁克山—大煤沟一带出露,完整记录了寒武系—下奥陶统地层;而上古生界主要出露于石灰沟—城墙沟—旺尕秀一线(图1)。

早古生代欧龙布鲁克地块进入稳定克拉通盆地发育时期,沉积了一套被动大陆边缘环境下的碳酸盐岩—碎屑岩混合建造。本区寒武系欧龙布鲁克群主要为浅海台地相碳酸盐岩沉积建造,仅下部发育少量紫红色碎屑岩;而奥陶系仅发育下统,包括下部多泉山组及顶部石灰沟组,发育碳酸盐岩建造—笔石页岩沉积,中、上奥陶统及志留系均受加里东运动影响已被剥蚀。研究区上古生界地层系统包括泥盆系阿姆尼克组,下石炭统城墙沟组、怀头他拉组以及上石炭统克鲁克组、扎布萨尕秀组。晚古生代研究区受北部宗务隆裂陷槽开合演化控制,泥盆纪—早石炭世沉积环境受海侵作用影响由陆相转为浅海相;晚石炭

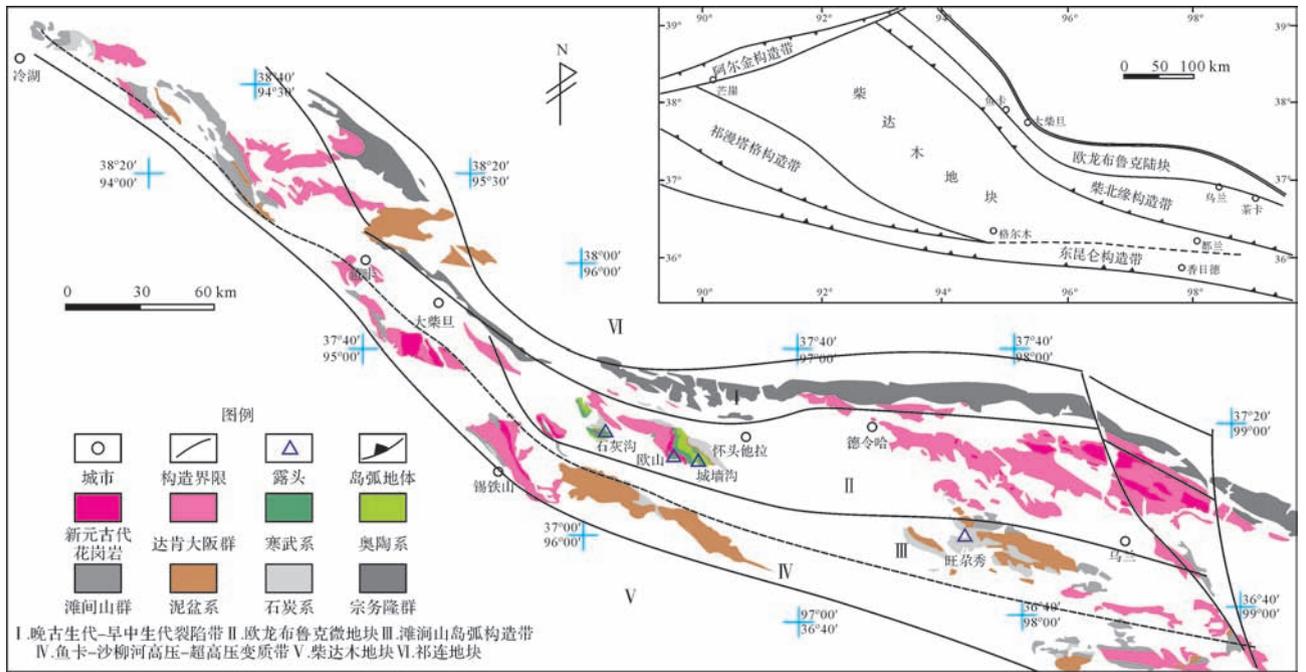


图1 欧龙布鲁克地块及邻区地质图(据文献[19]修改)

Fig.1 Geological map of Olongbluk block and adjacent region (modified from reference [19])

世海平面变化频繁,整体为一套陆表海沉积环境下的碎屑岩—碳酸盐岩混合建造^[20](图2)。

2 风暴岩沉积特征

欧龙布鲁克地块古生界地层内普遍存在风暴作用痕迹,岩石类型包括生物碎屑灰岩、颗粒灰岩、泥晶灰岩、角砾灰岩、砾屑云岩、泥岩等多种类型,由于受风暴岩形成的位置影响,不同层位风暴沉积序列不尽相同且沉积构造多样。通过对研究区古生界地层的野外地质调查,总结归纳了该区风暴岩沉积构造的类型,认为该区风暴序列底部发育风暴侵蚀作用形成的波状冲刷面、渠模等底面侵蚀构造;侵蚀面之上则发育不同类型的风暴滞留沉积层;滞留层之上为风暴衰弱期形成的具定向排列的竹叶状灰岩或发育平行层理的颗粒灰岩,同时发育丘状交错层理、波痕以及同沉积涡流侵蚀构造等,覆盖其之上的则是正常沉积。

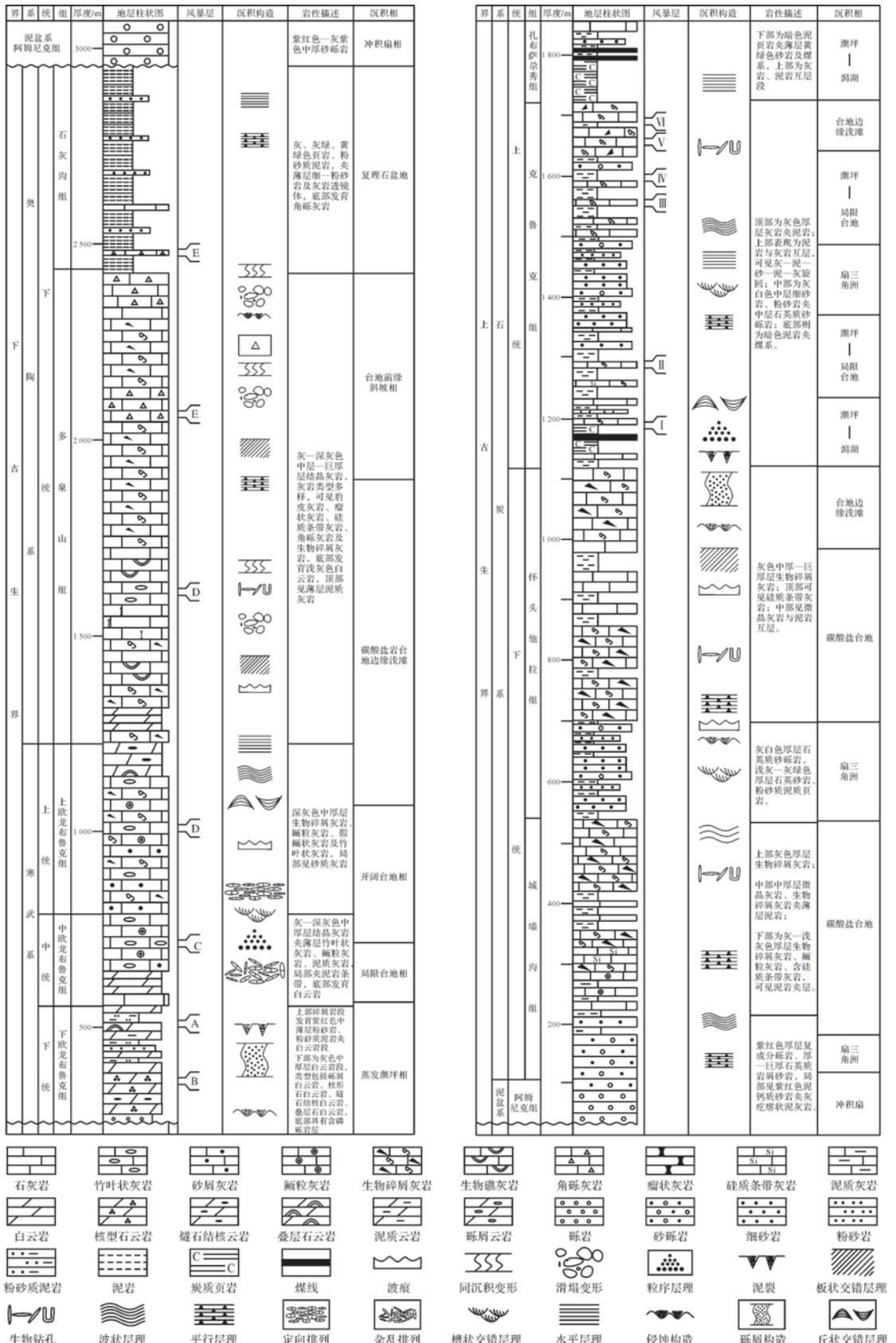
2.1 底面侵蚀构造

底面侵蚀构造是风暴高峰期时风暴浪对下伏沉积物侵蚀改造而形成的沉积构造,与上覆粗粒滞留沉积共同组成了风暴沉积的典型标志^[21]。在时间上涵盖了下伏被侵蚀地层的沉积、风暴起始期、风暴加强期以及高峰期四个地质事件的时间段。研究区所发现的典型底面侵蚀构造包括渠模及风暴冲刷面等,其中冲刷面多呈波状起伏状态,其上、下岩性大多差异

较大(图3a、图4a);而渠模则为高强度风暴涡流侵蚀的产物,侵蚀下伏地层较深,侵蚀面与层面夹角可达45°(图3b)。

2.2 风暴滞留沉积

风暴滞留沉积是指风暴高潮期—衰弱早期,从风暴浪中快速卸载的大颗粒的介壳、粗粒内碎屑或砾石等形成的沉积单元,研究区主要发育三种不同类型风暴滞留层,包括:砾屑灰岩层,杂乱堆积的竹叶状灰岩层以及珊瑚、海百合茎与泥岩撕裂屑组成的生物化石层。其中砾屑灰岩滞留层段主要发育杂基支撑的砾屑灰岩(图3c)以及受风暴撕裂作用形成的微晶灰岩或颗粒灰岩(图3d),其中灰岩砾石成分与下伏地层一致,砾屑粒度大者15 cm、小者1 cm,分选极差,磨圆度以次棱角状为主;杂基为灰泥、砂质颗粒。在杂乱堆积的竹叶状灰岩层中,灰岩砾屑排列混杂,呈“人”字形、倒“小”字形、菊花状、水平状堆积^[22-23],直立或高角度倾斜,部分颗粒表面存在氧化圈,颗粒间常见灰泥杂基支撑(图3e)。风暴滞留沉积中常见块状层理与粒序层理(图3f,g),部分竹叶状灰岩层形成下凹顶凸的透镜体。砾屑灰岩中的杂基支撑、块状与粒序层理以及竹叶状砾屑的杂乱堆积均反映了风暴高潮期—衰弱早期快速卸载、原地或近原地堆积的沉积过程,颗粒几乎未受风暴回流改造,因此部分层位保存了上凸的顶面。



A-E为下古生界风暴沉积序列类型,与图5中对应;I-VI为上古生界风暴沉积序列类型,与图6中对应。

图2 欧龙布鲁克地块古生代综合柱状图

Fig.2 Stratigraphic column of Paleozoic Olongbuk block

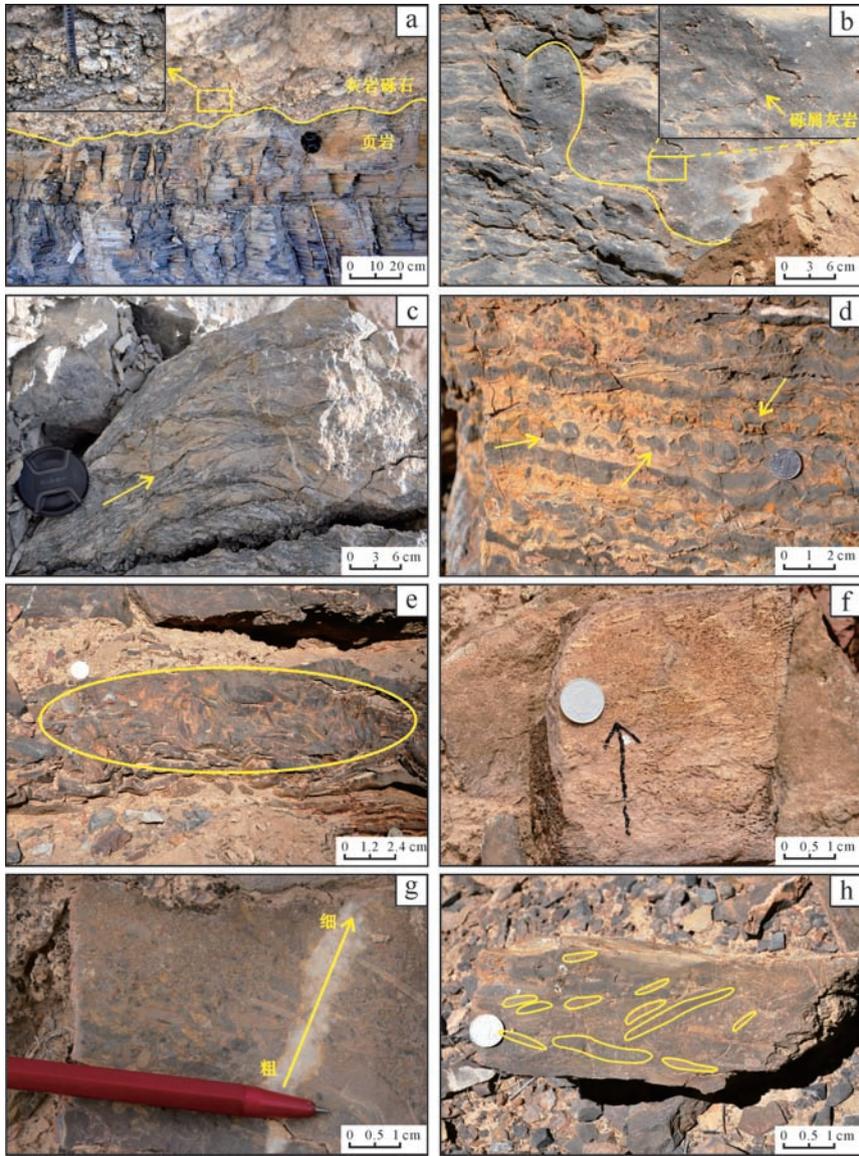


图3 欧龙布鲁克地块下古生界风暴沉积构造特征

a. 欧山剖面奥陶系石灰沟组风暴侵蚀面, 上覆灰岩侵蚀下伏暗色页岩, 箭头指示灰岩砾石; b. 欧山剖面寒武系中欧龙布鲁克组风暴作用形成的高角度渠模, 砾屑灰岩下侵泥质灰岩, 箭头指示砾屑灰岩; c. 欧山剖面寒武系上欧龙布鲁克组风暴成因的砾屑灰岩; d. 欧山剖面寒武系中欧龙布鲁克组受风暴撕扯作用形成的灰岩颗粒; e. 欧山剖面寒武系上欧龙布鲁克组风暴形成的杂乱堆积竹叶状砾屑灰岩; f. 欧山剖面寒武系下欧龙布鲁克组具粒序层理的砾屑云岩; g. 欧山剖面寒武系中欧龙布鲁克组具粒序层理的砾屑灰岩; h. 欧山剖面寒武系中欧龙布鲁克组弱定向排列的竹叶状砾屑灰岩。

Fig.3 Tempestite sedimentary structure characteristics of Early Paleozoic Olongbluk block

生物化石滞留层中见大量单体珊瑚与海百合茎(图4d, e, g), 各个生物体之间充填泥岩及灰岩碎屑(图4h)。珊瑚、海百合茎整体混杂堆积, 排列方向不定, 且大小各异, 大者可达 $10\text{ cm} \times 3\text{ cm}$, 一般 $4\text{ cm} \times 1.5\text{ cm}$, 化石保存完整, 断面多呈尖棱角状(图4i), 该层珊瑚化石与生物碎屑灰岩、泥岩碎屑及上覆结晶灰岩、泥岩构成一个完整的风暴前—风暴—风暴后的碳酸盐岩风暴沉积序列。下伏生物碎屑灰岩发育由

风暴前正常天气下生物扰动活动所产生的遗迹化石, 在该层之上的生物化石层可能是由于受较强风暴浪的破坏, 限制了生物的活动空间, 从而导致生物群体迅速死亡, 然后随水流搬运到异地沉积, 并非原地生长而沉积下来, 其沉积的环境应该在风暴浪基面附近。这种生物化石层在正常碳酸盐沉积中并不常见, 此处单一生物的密集活动并不能反映研究区当时的真实生态活动, 推测就是由于风暴这种事件性因素限

制了生态的复杂性^[24-25]。

2.3 具长轴定向排列的竹叶状灰岩、平行层理及丘状交错层理

在风暴回流的作用下,部分原地杂乱堆积的竹叶状灰岩最终呈优选方位堆积(图 3h),而在离岸较远、回流强度较大的位置,回流会携带砂质颗粒发生高流态运动,形成平行层理(图 5a)。丘状交错层理是指示风暴作用的最佳证据,当风暴衰退时,由于回流的速率降低,原来呈悬浮状态的细粒碎屑物质迅速沉降,经进一步减弱的风暴流产生的浪生震荡水流改造后形成的丘状交错层理。本区存在一种与风暴涡流有关的丘状交错层理,即当风暴浪触抵海床底部沉积物时,在风暴浪或风暴涡流强烈的剪切、摆动作用的

共同影响下,在砂质碳酸盐岩沉积物的表面形成丘状凸起及洼坑,在起伏表面上砂质碳酸盐岩颗粒逐渐堆积形成该层理(图 5b)。丘状交错层理丘高 3.5 cm、宽度约 5 cm,中心厚向两侧逐渐收敛,由砂质云岩颗粒组成。

2.4 对称波痕

风暴衰减期,原地卸载或经过搬运的颗粒碳酸盐岩被风暴浪衰减期形成的振荡水流改造后可形成类似对称波痕的构造(图 5c)。研究区发育的波痕规模较小,一般位于风暴岩之上,波长约为 10~12 cm,波高为 4~5 cm。

2.5 同沉积涡流侵蚀构造

同沉积涡流侵蚀构造被认为是陆表海背景下搅

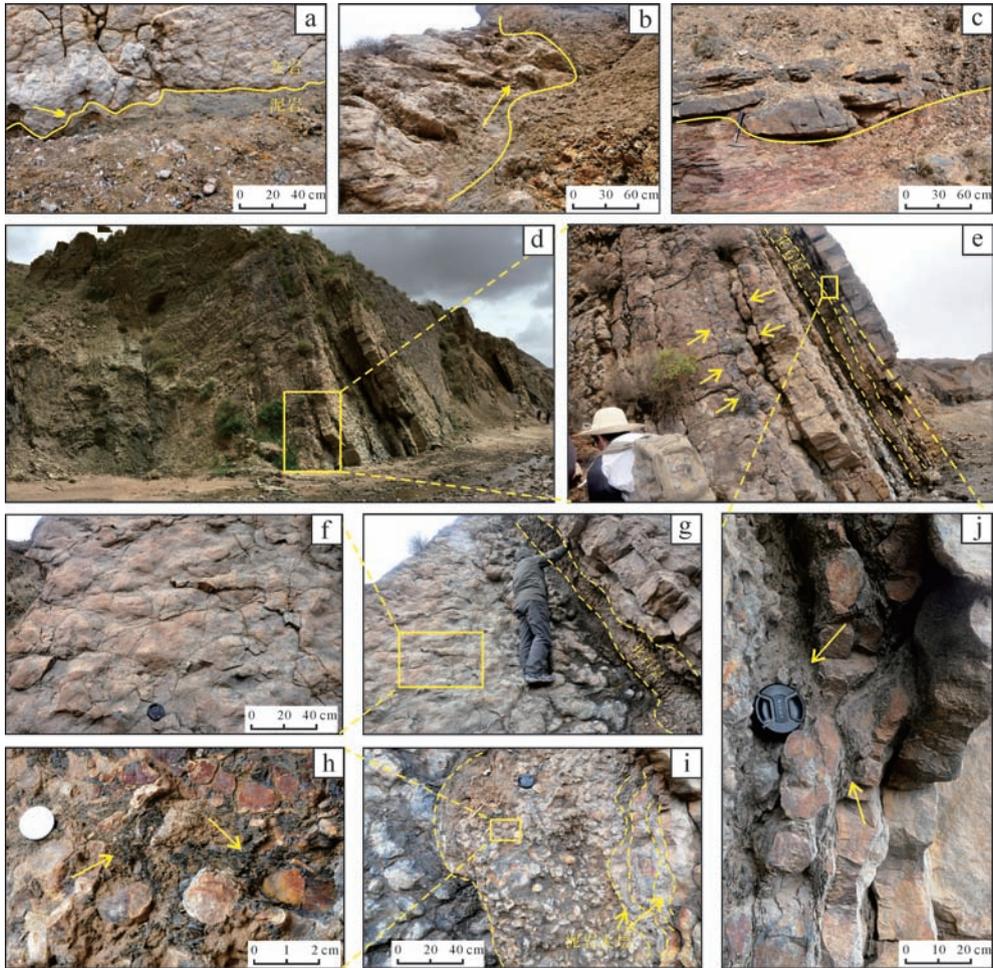


图 4 欧龙布鲁克地块石炭系风暴沉积特征

a. 旺尔秀剖面石炭系克鲁克组风暴形成的波状冲刷面,受风暴涡流影响的生物碎屑灰岩侵蚀下伏泥岩;b. 旺尔秀剖面石炭系克鲁克组风暴岩层面丘状凸起;c. 石灰沟剖面石炭系克鲁克组地层中块状生物碎屑灰岩侵蚀下部泥晶灰岩段;d. 旺尔秀剖面石炭系克鲁克组风暴沉积序列(远景);e. 旺尔秀剖面克鲁克组风暴沉积序列(近景),箭头指示灰岩层内涡流侵蚀构造(剖面);f. 旺尔秀剖面克鲁克组风暴沉积灰岩层内涡流侵蚀构造,呈凸—洼相间状(层面);g. 旺尔秀剖面石炭系克鲁克组风暴沉积序列生物化石层及涡流侵蚀构造层面;h. 旺尔秀剖面克鲁克组风暴沉积生物化石层,可见单体珊瑚断面,箭头指示充填于各化石之间的黑色泥岩碎屑;i. 旺尔秀剖面克鲁克组风暴沉积生物化石滞留层及泥岩夹层;j. 旺尔秀剖面克鲁克组风暴涡流改造形成的灰岩,箭头指示披覆于灰岩之上的薄层泥岩。

Fig.4 Tempestite characteristics of Carboniferous Olongbluk block

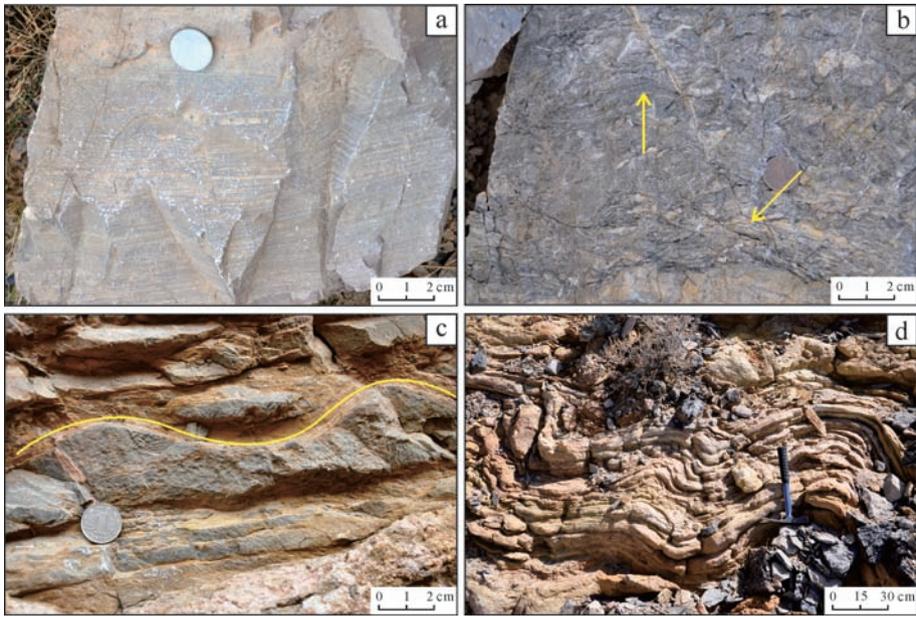


图5 欧龙布鲁克地块下古生界风暴沉积构造特征

a.欧山剖面寒武系上欧龙布鲁克组发育平行层理的颗粒灰岩;b.欧山剖面寒武系下欧龙布鲁克组发育小型丘状交错层理的砂质白云岩,箭头指示丘状凸起;c. 欧山剖面寒武系中欧龙布鲁克组泥晶灰岩中发育的对称波痕;d.石灰沟剖面奥陶系多泉山组灰岩中同沉积变形构造。

Fig.5 Tempestite sedimentary structure characteristics of Early Paleozoic Olongbluk block

动型风暴沉积的典型构造^[26],此后,黄操明等^[27]通过物理模拟证明其与风暴涡流密切相关,这种风暴浪具有上升漩涡的性质,可将底部沉积物卷扬起来再进行沉积。当风暴掀起的巨浪强烈冲刷海岸带,并在回流时将这些物质携带回海里,形成高密度回流。当这些密度流被带到风暴浪基面与正常浪基面之间的海底地带,将呈悬浮状态沉积下来。此时无固定方向的触及海底的巨浪的峰、谷经过沉积物表面时,便形成平缓的波状倾斜,由于灰岩粒度成分较碎屑岩细,且均一性好,因此一般不像碎屑岩丘状交错层理一样具有明显的内部层理,仅表现为层面上的丘凹状起伏^[27],研究区旺尕秀剖面石炭系风暴岩中所发育的同沉积涡流侵蚀构造顶、底层面均呈丘状—洼状起伏(图4b),断面上类似于“石香肠”构造(图4e),但层面上与石香肠构造截然不同,突起呈半球形,凸—洼相间出现(图4f,g),说明其为搅动型风暴浪对盆地底部的灰泥沉积冲刷破坏后在原地或短距离搬运后沉积的产物。该类构造有两种,一种由涡流侵蚀面及块状粒序生屑灰岩构成,不发育泥岩薄层;一种则在涡流侵蚀面之间发育泥岩薄层,该层泥岩向上弯曲,且厚度不稳定,披覆在涡流改造后的灰岩之上(图4i,j),属于风暴间歇期水体中的泥质悬浮组分卸载的产物。涡流侵蚀面之上发育生屑灰岩、泥晶灰岩

层,该层主要发育块状层理,部分层段向上生物碎屑颗粒减少且粒度下降,略具正粒序性,认为是风暴高峰期涡流搅动侵蚀后再沉积而成。

3 风暴沉积序列

3.1 早古生代风暴沉积序列类型及沉积环境

研究区早古生代风暴沉积层数多,风暴层厚度变化较大且序列保存程度不一,整体以原地或近源型风暴沉积为主,回流发育较少,可见搅动型风暴作用痕迹,反映研究区早古生代沉积水体均位于风暴浪基面之上,大多处于正常浪基面附近,且古海底坡脚较缓。随着风暴活动由开始到高潮,后逐渐转入衰退直至结束,不同风暴作用阶段即表现出不同的沉积特征,研究区早古生代由于风暴作用强度不同可分为高峰期(Ta、Tb)、衰减期(Tc、Td)以及停息期(Te)下的5个沉积单元。Ta、Tb单元反映了风暴开始至高峰期时的沉积产物,发育明显的底面侵蚀构造以及块状砾屑灰岩、杂乱排列的竹叶状灰岩等不同类型的滞留沉积。Tc、Td单元代表风暴衰退期时沉积产物,发育平行层理、丘状交错层理、波痕等沉积构造,同时可见具弱定向排列的砾屑灰岩。Te单元则代表研究区早古生代风暴沉积过后停息期的正常沉积,岩石类型包括生物碎屑灰岩、泥晶灰岩、泥岩等(图6)。

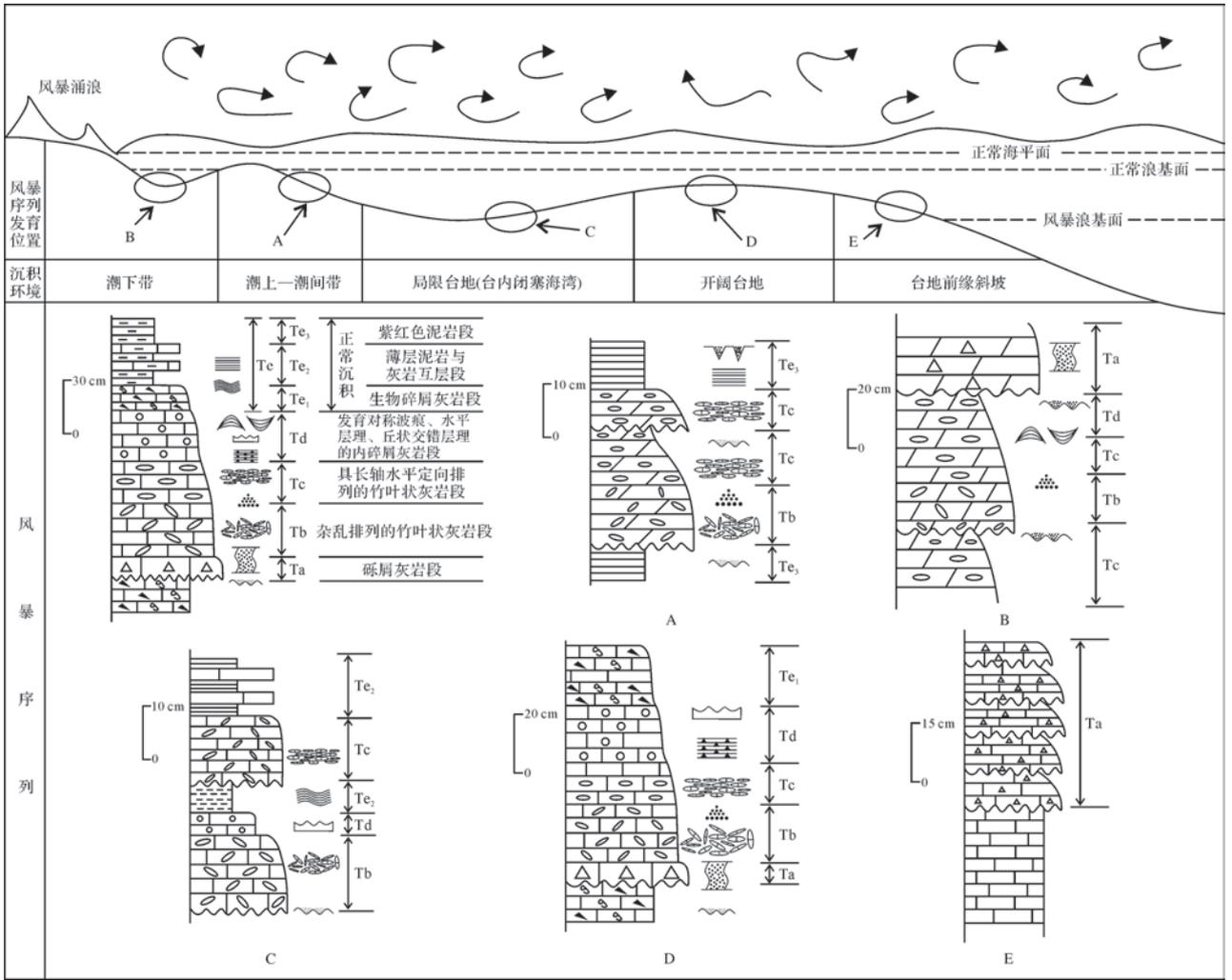


图 6 欧龙布鲁克地区早古生代风暴沉积序列及分布图

Fig.6 Tempestite sedimentary sequence and its distribution of Early Paleozoic Olongbluk block

寒武纪初期,研究区整体处于潮坪环境,水动力条件较弱。此时形成的风暴序列 B 发育 Ta、Tb、Tc、Td 四个沉积单元,岩石类型包括竹叶状白云岩、砾屑白云岩,颗粒间充填物亦为白云岩颗粒。该序列中最显著的特点是砂屑白云岩中发育丘状交错层理(图 5b),但该层理丘体规模较小,反映风暴衰减期,当风暴触及海底后,由于海水较浅,能量很弱,所掀起的波浪规模较小,对沉积物表面造成影响不大,综合推断该序列发育于正常浪基面与风暴浪基面之间的潮下带环境(图 6B)。此后海平面急剧下降导致海底长期暴露出水面,发育盐岩假晶、鸟眼构造、泥裂等沉积构造,该时期研究区整体处于潮上—潮间带,水动力条件极弱,岩性以粉晶白云岩、砾屑白云岩、砂屑白云岩、紫红色泥岩为特点。该时期风暴作用下形成的序列 A 发育 Tb、Tc、Te₃ 三个单元,底部冲刷面较为平

缓,未见块状砾屑碳酸盐岩段,下部竹叶状白云岩杂乱堆积。当风暴浪经过时,受海底影响,能量大幅减弱,绝大多数粗粒碳酸盐岩颗粒已经卸载,之后风暴能量继续减弱,此时风暴浪所携带的碎屑颗粒已经大幅减少且粒度较细,加之此时风暴对海床侵蚀能力较弱,因此该类风暴序列粒度及厚度均较小。且该环境下坡度较小,风暴回流流速不大,因此序列中部发育弱定向排列的竹叶状灰岩,粒度略具正序性(图 3f)。结合其背景沉积,推断该套序列 A 应发育在浪基面附近潮上—潮间带洼池中,属原地—近源型风暴沉积(图 6A)。

寒武纪早—中期,研究区海平面上升,且变化频繁,沉积物受陆源碎屑供给中悬浮组分影响较大,岩性主要为泥晶灰岩、颗粒灰岩夹薄层泥岩条带。此时研究区受风暴作用影响形成的序列 C 发育 Tb、Tc、

Td、Te₂四个沉积单元,序列底部具明显侵蚀面,说明其处于风暴浪基面之上。由于该时期风速及风暴浪的能量不是很大,大颗粒的物质无法携带,向上仅发育杂乱堆积的竹叶状砾屑灰岩(图3e),缺少Ta段砾屑灰岩,综合判断该套风暴沉积序列发育于正常浪基面之下的局限台地或台内闭塞海湾环境(图6C)。

寒武纪中—晚期,气候温暖湿润,海平面持续上升,研究区此时水流循环条件良好,受陆源碎屑物质影响极弱,岩性在广阔海域内极为稳定,属于开阔台地—台地边缘环境。此时风暴作用形成的序列D所发育的沉积单元较为完整,底部侵蚀面之上发育块状砾屑灰岩(图3c),碳酸盐岩颗粒粒径较大,序列厚度大,不发育波痕、层理等风暴回流构造。正常沉积层段则发育平行层理等高流态构造及生屑灰岩等颗粒碳酸盐岩。该类风暴序列发育在正常浪基面附近,属于原地搅动型风暴沉积(图6D)。

奥陶纪时期,研究区海水循环良好,氧气充足,盐度正常,沉积物类型主要受到先前地貌、风暴、潮汐、海平面变化等影响,整体处于台地边缘浅滩—前缘斜坡环境。该时期研究区发生风暴作用时,序列E仅发育Ta单元。底部发育风暴涡流对灰岩底面改造形成的同沉积涡流侵蚀构造,而由于研究区此时的特殊环境,该类风暴序列的另一个特点是其上、下地层中泥晶灰岩普遍发育同沉积变形、角砾碳酸盐岩等斜坡滑动成因构造(图5d)。该套地层中风暴作用与滑动变形交互出现,且该处坡脚较缓,回流作用不明显,综合推断序列E应发育于台缘斜坡的顶部且在正常浪基面之下的位置(图6E)。

3.2 晚古生代风暴沉积序列类型及沉积环境

研究区晚古生代风暴沉积多集中发育在石炭纪中—晚期,从岩性组合看,该时期整体为一套陆表海沉积环境下的碳酸盐岩—碎屑岩混合沉积建造,海平面变化频繁,海床广阔且地形平坦,海底一般位于风暴浪基面之上,正常浪基面附近,发育原地搅动型、近源型以及深水缓坡型风暴岩,极缓的古坡角导致风暴作用难以形成风暴回流,主要体现为风暴涡流反复的挖蚀、改造、悬浮、近距离搬运沉积物^[26]。按照研究区晚古生代风暴作用阶段的差异性可将其完整序列分为Sa~Se五类沉积单元,对应着风暴高峰期(Sa)、风暴减弱早期沉积物原地卸载(Sb)、风暴回流期(Sc)、风暴涡流期(Sd)、风暴后正常沉积(Se)。

研究区石炭纪克鲁克组发育早期,整体为清水与浑水的混合沉积,海平面变化极为频繁,海水每次进

退,在碳酸盐台地、障壁岛和潟湖的潮坪上均不同程度的发育泥炭坪环境,造成区域性薄煤层赋存。因此该时期风暴序列I中,可见夹有灰岩砾石的泥岩层直接覆盖于灰岩顶部侵蚀面之上,并且灰岩层下部与煤线伴生。含灰岩砾石的泥岩层内发育向上凸起的底层面,而上部层内则发育水平层理,反应风暴过后极弱的水动力条件(图7-I)。而序列II为研究区石炭系克鲁克组一个典型风暴沉积序列,为多期风暴叠加结果,发育Sa、Sb、Sd₂、Se₁、Se₂等沉积单元。先期风暴在衰退期形成具有正粒序结构的生物碎屑灰岩层,并伴有风暴涡流侵蚀痕迹。后期能量较强的风暴又对先期沉积物强烈冲刷,形成侵蚀面;在此之上滞留层为经风暴浪近距离搬运后迅速卸载的单体珊瑚化石层,上覆灰岩层中发育风暴衰退期时形成的同沉积涡流侵蚀构造,再向上过渡到正常天气下沉积的生屑灰岩段及泥岩段(图7-II)。

此后研究区受陆源碎屑影响加强,发育扇三角洲等海陆过渡相沉积,直至克鲁克组中晚期,以陆表海环境为特点的性质更为显著,形成潮坪—局限台地的混合沉积。此时在研究区广阔浅海环境中形成的风暴序列III、IV、V均属于典型的原地或近原地搅动型风暴沉积,序列底部发育涡流侵蚀面,层面之上发育生物碎屑灰岩,并向上逐渐递变为颗粒灰岩及泥晶灰岩,具有明显粒序性,上覆正常环境下沉积的泥岩中几乎不含化石,海床广阔且地形平坦。序列IV中发育极薄层泥披覆,是由于风暴浪将潮坪或者潟湖中的泥质搅起并以悬浮状态搬运至碳酸盐岩沉积地后沉积而成(图7-IV)。序列V发育于大套生物碎屑灰岩中,受风暴涡流与回流共同作用,该风暴序列中发育小型丘状交错层理,由于生物碎屑颗粒供应充分,可能为台缘斜坡顶部生物碎屑滩环境下的风暴沉积(图7-V)。

石炭纪克鲁克组发育末期,受古地形影响,风暴序列VI主要发育Sc、Se₂两个沉积单元(图4c)。其中Sc为发育块状层理的生物碎屑灰岩段,可见介壳类等生物碎屑颗粒,向上未见有明显的递变现象,反应一次高流态快速堆积过程,在形成过程中侵蚀掉较还原环境的深水沉积物而形成的风暴重力流层型;而Se₂单元中泥晶灰岩的泥钙质含量高,生物含量较少,发育水平层理。推测该序列为能量较低的深水环境受风暴回流作用的影响,诱导远端发生重力流沉积,主要发育在浪基面附近台地边缘斜坡环境,属于深水缓坡型风暴沉积。

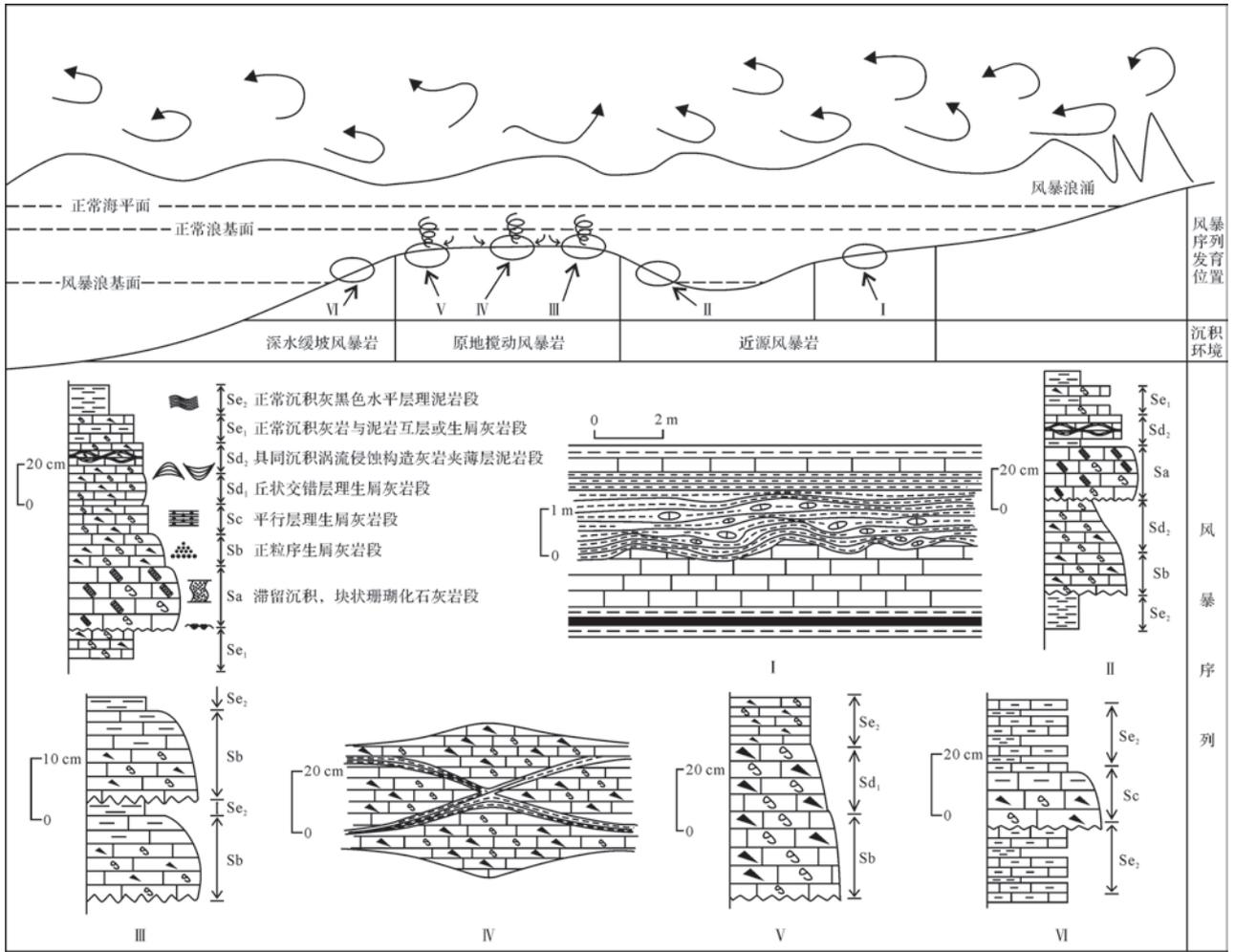


图7 欧龙布鲁克地区晚古生代风暴沉积序列及分布图

Fig.7 Tempestite sedimentary sequence and its distribution of Late Paleozoic Olongbluk block

4 地质意义及讨论

风暴沉积作为地质历史时期中一种重要的事件沉积,其形成的风暴岩、风暴序列不仅能够解释风暴作用机制本身,同时在地层划分与对比、沉积古环境、海盆演化等多方面具有重要意义^[28]。研究区古生代风暴作用频发,仅欧龙布鲁克山剖面就见数层风暴岩,并且整体古生代风暴滞留沉积中的碳酸盐岩砾石粒径较大,说明风暴强度较大。这种强烈、高频性的风暴改造暗示在古生代欧龙布鲁克地区应位于赤道两侧低纬度风暴作用带,这与该地区古地磁的研究结论一致^[29-31]。

本文所建立的研究区古生代风暴沉积模式,印证了欧龙布鲁克地块古生代沉积演化的过程,认为欧龙布鲁克地块在早古生代为持续海侵的浅海环境,而晚古生代整体处于陆表海环境下海陆过渡相沉积,对研

究区古环境、古地貌的恢复具有重要的参考价值。此外通过研究区早古生代与晚古生代风暴沉积模式的建立,区分了研究区不同时期风暴岩形成的动力差异,为欧龙布鲁克地块的古生代演化提供沉积地质学证据。

5 结论

(1) 欧龙布鲁克地块古生界普遍发育风暴沉积,典型风暴沉积标志包括底面侵蚀构造、多种类型的风暴滞留层、定向排列的竹叶状砾屑灰岩、平行层理、丘状交错层理、波痕以及同沉积涡流侵蚀构造等。

(2) 研究区早古生代风暴沉积整体以原地或近源型为主,回流发育较少,可见搅动型风暴作用痕迹。而晚古生代风暴沉积多集中发育在石炭纪中—晚期,发育原地搅动型、近源型以及深水缓坡型风暴岩,极缓的古坡角导致风暴作用难以形成风暴回流,主要体

现为风暴涡流反复的挖蚀、改造、悬浮、近距离搬运等沉积作用。

(3) 研究区古生界风暴岩的发现说明该区古生代整体处于低纬度风暴高发区域。其中早古生代时持续海侵,沉积水体均位于风暴浪基面之上,大多处于正常浪基面附近,且古海底坡脚较缓。而研究区晚古生代多受原地搅动型风暴影响,反映水体深度应在正常浪基面附近,整体水深不大,海平面变化频繁,经历由浅海台地到陆表海的环境变化。

参考文献 (References)

- [1] Gilbert G K. Ripple-marks and cross-bedding[J]. Geological Society of America Bulletin, 1899, 10(1): 135-140.
- [2] Kelling G, Mullin P R. Graded limestones and limestone quartzite couplets; possible storm-sediments from the Pleistocene of Massachusetts[J]. Petrology, 1975, 38: 971-984.
- [3] Einsele G, Seilacher A. Cyclic and Event Stratification[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1982: 103-130.
- [4] Harms J C, Southard J B, Spearing D R, et al. Depositional Environments as Interpreted from Primary Sedimentary Structures and Stratification Sequences[M]. Dallas: SEPM, 1975, 2: 5-43.
- [5] Hamblin A P, Duke W L, Walker R G. Hummocky cross-stratification; indicator of storm-dominated shallow-marine environments[J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(3): 460-461.
- [6] Kreisa R D, Bambach R K. The role of storm processes in generating shell beds in Paleozoic shelf environments[M]//Einsele G, Seilacher A. Cyclic and Event Stratification. Berlin Heidelberg: Springer, 1982: 200-207.
- [7] Greenwood B. Hummocky cross-stratification; shelf or surf[M]//Knight R J, McLean J R. Shelf Sands and Sandstones. Calgary, Alberta, Canadian: Canadian Society of Petroleum Geologists, 1986: 340.
- [8] Dott R H, Jr, Bourgeois J. Hummocky stratification; significance of its variable bedding sequences[J]. Geological Society of America Bulletin, 1982, 93(8): 663-680.
- [9] 孟祥化, 乔秀夫, 葛铭. 华北古浅海碳酸盐风暴沉积和丁家滩相序模式[J]. 沉积学报, 1986, 4(2): 1-18. [Meng Xianghua, Qiao Xiufu, Ge Ming. Study on ancient shallow sea carbonate storm deposits (tempestitute) in North China and Dingjiantan model of facies sequences[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1986, 4(2): 1-18.]
- [10] 刘宝珺, 张继庆, 许效松. 四川兴文四龙下二叠统碳酸盐风暴岩[J]. 地质学报, 1986(1): 55-67. [Liu Baojun, Zhang Jiqing, Xu Xiaosong. On the calcareous tempestites in the Lower Permian of Silong, Xingwen, Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 1986(1): 55-67.]
- [11] 白志强, 刘树根, 宋金民, 等. 米仓山南缘中志留统罗惹坪组风暴岩沉积特征及其意义[J]. 沉积学报, 2015, 33(2): 226-231. [Bai Zhiqiang, Liu Shugen, Song Jinmin, et al. Sedimentary characteristics and geological implications of tempestitute, Luoreping Formation, Middle Silurian in southern Micangshan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(2): 226-231.]
- [12] 陈世悦, 张鹏飞, 杨怀宇. 湘西北江坪地区志留系风暴沉积特征及意义[J]. 古地理学报, 2009, 11(1): 51-57. [Chen Shiyue, Zhang Pengfei, Yang Huaiyu. Silurian storm deposits in Jiangping area, northwestern Hunan province: characteristics and geological significances[J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(1): 51-57.]
- [13] 孔庆莹, 程日辉, 王璞珺, 等. 新疆库鲁克塔格地区寒武系莫合尔山组风暴岩特征及其对海平面变化的响应[J]. 新疆地质, 2006, 24(4): 377-380. [Kong Qingying, Cheng Rihui, Wang Pujun, et al. Characteristics of tempestitute in the Moheershan Formation and sea-level changes in Kuruktag, Xingjiang[J]. Xinjiang Geology, 2006, 24(4): 377-380.]
- [14] 林彤, 刘树根, 宋金民, 等. 川北南江地区下三叠统飞一段风暴沉积特征及地质意义[J]. 沉积学报, 2015, 33(5): 899-908. [Lin Tong, Liu Shugen, Song Jinmin, et al. The sedimentary characteristics and geological significances of carbonate tempestites near the boundary of Late Permian to Early Triassic at Nanjiang Section, north of Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(5): 899-908.]
- [15] 张哲, 杜远生, 毛治超, 等. 湘东南桂阳莲塘上泥盆系风暴岩特征及其古地理、古气候意义[J]. 沉积学报, 2008, 26(3): 369-375. [Zhang Zhe, Du Yuansheng, Mao Zhichao, et al. The Upper Devonian tempestites from Liantang, Guiyang, southeastern Hunan province and its palaeogeographic and palaeoclimatic significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(3): 369-375.]
- [16] 陆鹿, 李壮福, 叶嗣暄, 等. 徐州地区新元古界赵圩组风暴沉积特征分析[J]. 高校地质学报, 2013, 19(3): 520-528. [Lu Lu, Li Zhuangfu, Ye Sixuan, et al. Characterization of tempestitute sediments of the Neoproterozoic Zhaowei Formation in Xuzhou area, Jiangsu province[J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(3): 520-528.]
- [17] 方国庆, 刘德良. 塔里木盆地西北缘中奥陶统其浪组风暴岩中遗迹化石及其环境意义[J]. 沉积学报, 2000, 18(1): 68-72. [Fang Guoqing, Liu Deliang. Paleoenvironmental significance of trace fossils in tempestitute of Qilang Fm. (Middle Ordovician) of northwestern Tarim Basin in China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(1): 68-72.]
- [18] 马宝林. 塔里木盆地西北缘震旦纪风暴岩成因探讨[J]. 沉积学报, 1991, 9(3): 59-64. [Ma Baolin. Discussion on the origin of the Sinian tempestites in the northwestern margin of Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1991, 9(3): 59-64.]
- [19] 王惠初, 陆松年, 莫宣学, 等. 柴达木盆地北缘早古生代碰撞造山系统[J]. 地质通报, 2005, 24(7): 603-612. [Wang Huichu, Lu Songnian, Mo Xuanxue, et al. An Early Paleozoic collisional orogen on the northern margin of the Qaidam Basin, northwestern China[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(7): 603-612.]
- [20] 青海地质矿产局. 青海省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 1-300. [Bureau of Geology and Mineral Resources in Qing-

- hai. Regional Geology Records in Qinghai Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 1-300.]
- [21] 马瑞申, 张良, 杜远生, 等. 豫北地区寒武系风暴岩沉积特征及其地质意义[J]. 地质科技情报, 2011, 30(4): 15-20. [Ma Ruishen, Zhang Liang, Du Yuansheng, et al. Sedimentary characteristics and its geological implications of Cambrian tempestite in northern Henan province[J]. Geological Science and Technology Information, 2011, 30(4): 15-20.]
- [22] 彭靖淞, 刘树根, 赵霞飞, 等. 川西中三叠统天井山组风暴沉积的发现及古地理意义[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(1): 83-88, 111. [Peng Jingsong, Liu Shugen, Zhao Xiafei, et al. Discovery of tempestite in Middle Triassic Tianjingshan Formation in western Sichuan and its paleogeographic significance[J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(1): 84-88, 111.]
- [23] 何镜宇, 孟祥化. 沉积岩和沉积相模式及建造[M]. 北京: 地质出版社, 1987. [He Jingyu, Meng Xianghua. Sediments and Sedimentary Facies Model and Construction[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.]
- [24] Pemberton S G, 周志澄, Eacher J M. 风暴沉积的遗迹学研究[J]. 沉积学报, 2000, 18(4): 489-494. [Pemberton S G, Zhou Zhicheng, Eacher J M. Ichnological studies on tempestites[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(4): 489-494.]
- [25] 宋慧波, 王芳, 胡斌. 晋中南地区上石炭统—下二叠统太原组碳酸盐岩中遗迹组构及其沉积环境[J]. 沉积学报, 2015, 33(6): 1126-1139. [Song Huibo, Wang Fang, Hu Bin. Ichnofabrics and their sedimentary environments in carbonate rocks of the Upper Carboniferous-Lower Permian Taiyuan Formation in middle south Shanxi province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(6): 1126-1139.]
- [26] 刘焕杰, 贾玉如, 龙耀珍, 等. 华北石炭纪含煤建造的陆表海堡岛体系特点及其事件沉积[J]. 沉积学报, 1987, 5(3): 73-80. [Liu Huanjie, Jia Yuru, Long Yaozhen, et al. The features of the barrier island systems of the Epeiric sea and their event deposits of coal-bearing formations in Carboniferous of North China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1987, 5(3): 73-80.]
- [27] 黄操明, 周安朝. 灰岩及白云岩中的风暴作用新标志[J]. 山西矿业学院学报, 1994, 12(4): 308-315. [Huang Caoming, Zhou Anchao. New characteristics for storm processes identification in limestones and dolomites[J]. Shanxi Mining College Learned Journal, 1994, 12(4): 308-315.]
- [28] 张继淹, 蒋廷操, 李孝全. 桂西三叠纪风暴岩沉积特征[J]. 中国区域地质, 1992(4): 304-310. [Zhang Jiyan, Jiang Tingcao, Li Xiaquan. Features of Triassic tempestites in western Guangxi[J]. Regional Geology of China, 1992(4): 304-310.]
- [29] 杨惠心, 禹惠民, 李鹏武. 柴达木地块古地磁研究及其演化[J]. 长春地质学院学报, 1992, 22(4): 420-426. [Yang Huixin, Yu Huimin, Li Pengwu. Palaeomagnetic study of Qaidam plate and its evolution[J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 1992, 22(4): 420-426.]
- [30] 吴汉宁, 刘池阳, 张小会, 等. 用古地磁资料探讨柴达木地块构造演化[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 1997, 27(1): 9-14. [Wu Hanning, Liu Chiyang, Zhang Xiaohui, et al. Discuss tectonic evolution with paleomagnetism in Qaidam massif[J]. Science in China, 1997, 27(1): 9-14.]
- [31] 吴功建. 格尔木—额济纳旗地质断面综合研究[J]. 地质学报, 1998, 72(4): 289-300. [Wu Gongjian. Integrated study of the Golmud-Ejin geoscience transect[J]. Acta Geologica Sinica, 1998, 72(4): 289-300.]

Sedimentary Characteristics and Geological Significance of Storm Deposite of Paleozoic in the Olongbluk Block

MA Shuai, CHEN ShiYue, WANG Feng, SHAO PengCheng, WANG ZhiJin

College of Earth Science and Technology, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266555, China

Abstract: To further explore the geological significance of the tempestites of Paleozoic that exposed in the Olongbluk block, and investigate the effect of frequently storm climate on the sedimentary characteristic of Paleozoic in northern Qaidam basin, a comprehensive field geology survey and laboratory analysis have been carried out in the study area, and several typical sedimentary structures have been distinguished in the area, e.g. scour, ripple mark, hummocky cross-stratification, and syngenetic deformation structure. According to the differernt lithology and other characteristics, each set of tempestite can be divided into different sections: activity period, off-load period, returning period, whirling period and rest period. Depending on the combination of the sections, tempestites can be divided into different kinds of storm sequences to represent different sedimentary environment. The early Paleozoic developed five storm sequences which represent in-situ-type sequence or near source sequence, and the late Paleozoic developed near source sequence, in-situ-agitational sequence and deep-slope sequence. Under the research of the lithological characteristics of Paleozoic, the Olongbluk area was in a shallow sea environment which was always effected by transgression in early Paleozoic, and changed into epicontinental sea environment in the late.

Key words: Olongbluk block; Paleozoic; tempestite; geological significance