

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2019.01.002

贺兰山中段寒武系阿不切亥组风暴岩的发现与地质意义

柳坤峰¹, 王永和², 曾佐勋³

(1. 中陕核工业集团地质调查院有限公司, 陕西 西安 710100; 2. 西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;
3. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:首次报道了宁夏贺兰山地区上寒武统阿不切亥组发育的一套典型灰质风暴岩。在该风暴沉积中发现底面侵蚀构造、砾屑叠瓦状构造、放射状组构、生物扰动构造等, 为典型的浅水风暴岩。该组下段发育鲕粒灰岩、砾屑灰岩以及泥质条带灰岩等; 中段鲕粒明显减少, 变为含砾屑、藻屑灰岩, 泥质条带灰岩; 上段出现白云质灰岩, 表明为潮下浅滩沉积环境。该风暴岩的发现对重建宁夏贺兰山地区中晚寒武世岩相古地理及等时区域地层对比具有重要意义。

关键词:风暴岩; 贺兰山; 沉积构造; 寒武系; 地质意义

中图分类号: P512.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2019)01-0014-09

Geological Characteristics of Tempestite from Cambrian Abuqiehai Formation in Middle Helan Mountain and Its Geological Significance

LIU Kunfeng¹, WANG Yonghe², ZENG Zuoxun³

(1. Sino Shaanxi Nuclear Industry Group Geological Survey Co, Ltd, Xi'an 710100, Shaanxi, China;
2. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: A suite of typical storm deposition has been discovered for the first time in Helanshan area of Ningxia, which was developed in the middle and lower parts of upper Cambrian. Bottom-erosion texture, bio-disturbed texture, imbricate-boulder texture and radial fabric can be found in these storm sediments, indicating a typical shallow-water storm deposition. The lower part of this formation consists of oolitic limestone, bamboo-like limestone and argillaceous banded limestone. The oolite shows an evident decline in the middle part, which mainly consists of calcirudite, algal limestone and argillaceous banded limestone. Dolomite lime appears in the top part of this formation, indicating a shallow subtidal sedimentary environment. The discovery of storm rock has a great significance for the reconstruction of middle and late Cambrian paleogeography and the comparison of regional strata in Helanshan area of Ningxia.

Keywords: tempestite; Helan Mountain; sedimentary structures; Cambrian; geological significance

收稿日期: 2018-03-05; 修回日期: 2018-08-29

基金项目: 中国地质调查局项目“宁夏 1:5 万腰坝(J48E009015)、黄旗口(J48E009016)、木井子(J48E010015)、井子泉(J48E010016)幅区调”和“宁夏 1:5 万水磨沟(J48E007016)、崇岗(J48E007017)、苏峪口(J48E008016)、暖泉(J48E008017)、姚伏(J48E008018)幅区调”(1212011120552)

作者简介: 柳坤峰(1990-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事区域地质矿产调查工作。E-mail: 739885185@qq.com

风暴岩一词最早由 KELLING G 和 MULIN P R 对 Moroccan 石炭纪风暴沉积研究时提出的 (KELLING et al., 1975)。KUMAR N 和 SAND-EN J E (1978) 以及 ALGNER T (1979) 将其含义进一步扩充为风暴沉积 (storm deposits) (何镜宇等, 1987)。风暴沉积是由风暴作用影响海水进而影响海底沉积物引发的一种特殊的事件沉积, 主要发生在正常浪基面和风暴浪基面之间, 形成环境多为浅海陆棚, 影响水深可达 200 余米 (CROSS T F et al., 1988; BRENCHLEY P J et al., 1993; SAVRDA C E et al., 2003)。中国从 20 世纪 80 年代起陆续开展风暴沉积的研究, 刘宝珺、孟祥化、张继庆等诸多学者开辟了中国风暴岩研究的先河 (刘宝珺等, 1986; 孟祥化等, 1986; 张继庆等, 1986), 并在 20 世纪 90 年代掀起了风暴岩研究的高潮。

近年来, 风暴沉积受到国内很多学者的重视, 取得了一定的研究成果 (白万备等, 2011; 宋金民等, 2012; 白一鸣等, 2017; 王家豪等, 2017)。但在西部地区, 风暴岩的报道仅见于新疆 (孔庆莹等, 2006; 白建科等, 2014; 霍进杰等, 2014)、内蒙 (吝文等, 2008; 方少仙等, 2011; 周晓峰等, 2016)、青海 (陈锐明等, 2009; 冯乔等, 2017)、甘肃 (张瑞林等, 1988; 杜远生等, 2001) 等省区, 在宁夏贺兰山地区尚未见报道。笔者在宁夏贺兰山地区寒武系阿不切亥组发现了底面侵蚀构造、砾屑叠瓦状构造、倒“小”字构造、多向流水构造以及生物扰动构造, 均为典型的风暴成因。由于宁夏贺兰山地区的寒武系化石较稀少 (周志强等, 1976), 风暴沉积的发现, 对重建该区的古地理和区域地层对比具有重要意义。

1 地质概况

研究区位于中国西北地区东部, 行政区划分属内蒙古自治区和宁夏回族自治区管辖 (图 1)。在大体构造位置上位于阿拉善、鄂尔多斯与中祁连-柴达木地块之间的三角地带。跨华北、祁连两个地层区, 以土井子-青铜峡断裂为界, 北属华北区, 地层近南北走向; 南为祁连区, 地层走向多近东西。贺兰山中段地区位于华北陆块鄂尔多斯地块与阿拉善地块的接合部位。综合地层区划属华北地层大区华北西缘地层分区贺兰山地层小区。

通过本次野外剖面测制工作, 对贺兰山中段地

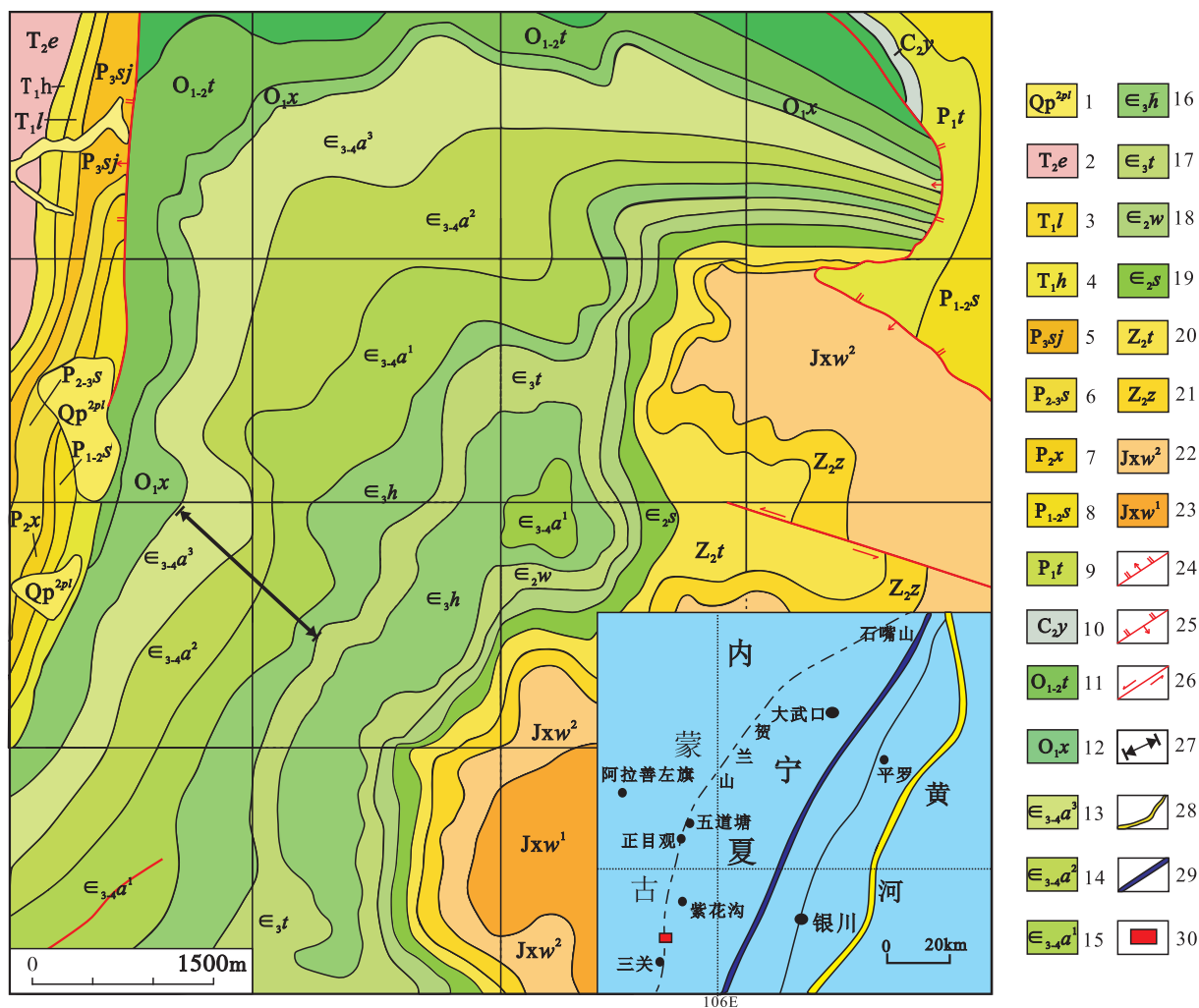
区寒武系阿不切亥组的岩石学特征、沉积构造及序列进行了详细研究。通过调查, 发现研究区阿不切亥组为一套碳酸盐岩台地沉积, 以局限台地之潮坪相为优势相沉积。由下至上分为 3 段, 风暴成因砾屑灰岩多集中在该组地层的中下段 (图 2)。阿不切亥组下段以大量鲕粒灰岩出现为特征, 以泥质条带灰岩夹鲕粒灰岩或含砾屑鲕粒灰岩、砾屑灰岩互层; 中段以大量中厚层含砾屑灰岩与泥质条带灰岩、灰色厚-中厚层细晶灰质白云岩出现为特征, 鲕粒灰岩大为减少。代而为之以砾屑灰岩、藻屑灰岩出现为特征; 上段为深灰色厚层白云岩、泥灰岩夹中厚层白云质灰岩藻团粒-藻斑点灰岩等。

2 研究区风暴岩沉积特征

通过野外岩性的观察和室内镜下鉴定, 研究区阿不切亥组中下段与风暴沉积有关的岩石类型主要有灰色鲕粒灰岩、深灰色砾屑灰岩、竹叶状灰岩、泥质条带灰岩、生物碎屑灰岩及微晶灰岩。由风暴引起的风暴流是一种高能量的流体, 其作用于海底会重新改造海底的沉积物, 从而形成一些独特的沉积构造, 通过这些沉积构造也可以较好的识别风暴沉积。本区的风暴沉积构造比较丰富, 主要有侵蚀构造、放射状组构、砾屑叠瓦状构造及生物扰动构造等。

2.1 侵蚀构造

底面侵蚀构造发育在风暴沉积层的底面或内部, 构成与下伏岩层之间的突变底界, 是风暴起始阶段和高峰阶段, 高流态的风暴涡流对沉积底面侵蚀、冲刷、淘蚀、撕裂和再沉积充填而形成的沉积构造, 明显的与风暴间歇期形成的沉积层分开, 并截切下伏地层的层理构造 (张继庆等, 1986; 马瑞申等, 2011)。在阿不切亥组见到的是冲刷面构造。被认为是由强烈的风暴流冲刷沉积基底而形成, 其凹凸程度反映了风暴作用的大小。若砂岩冲刷泥岩则其内充填泥砾, 但泥砾不具方向性, 可与河流的冲刷面相区分, 可见倒“小”字型泥砾, 构造反映水流具有旋转、向上的力, 只有风暴涡流才能提供这种水动力, 因此, 通常认为它是风暴作用典型的识别标志。若为冲刷砂质沉积, 则当风暴平息后, 湖底深色泥岩便由悬浮状态沉积在剪切面之上, 正常浪基面以下暗色泥岩的异地沉积, 说明了风暴的存在 (图 3a)。



营组;3. 刘家沟组;4. 和尚沟组;5. 孙家沟组;6. 上石盒子组;7. 下石盒子组;8. 山西组;9. 太原组;
组;12. 下岭南沟组;13. 阿不切亥组上段;14. 阿不切亥组中段;15. 阿不切亥组下段;16. 呼鲁斯台组;
组;19. 苏峪口组;20. 兔儿坑组;21. 正木观组;22. 五全口组上段;23. 五全口组下段;24. 正断层;25. 逆
断层;26. 平移断层;27. 剖面位置;28. 黄河;29. 公路;30. 研究区

图 1 研究区地质简图及剖面位置图

Fig. 1 The geological sketch and section location map of study area

2.2 放射状组构

放射状构造是风暴涡流形成的特有的沉积构造,表现为竹叶状砾屑呈菊花状、倒小字型排列(曾雄伟等,2007;白万备等,2011)。本区主要有放射状、指状、类菊花状、倒“小”字型构造等,发育于阿不切亥组下段的竹叶状砾屑灰岩中,由竹叶状砾屑排列而成,其下部常见到撕扯构造,顶面多具上凸形态。在阿不切亥组下段常常以夹层的形式出现,单层厚5~50cm,“竹叶状”砾屑大小5~8cm(图3b)。

2.3 砾屑叠瓦状构造

叠瓦状排列的砾屑多为泥质条带灰岩,形态多

呈长条状,一般长 0.5~1.2cm,大者可超过 3cm,局部呈叠瓦状排列,与下伏鲕粒灰岩呈冲刷接触,为风暴衰减后形成的底流回流冲刷而成(曾雄伟等, 2007;白万备等,2011)(图 3c)。

2.4 生物扰动构造

生物扰动构造是一种生物成因沉积构造,反映了生物活动对生物成因的和物理成因的层理特征或沉积组构的破坏。这些生物活动主要包括:足迹、潜穴及其他类似的构造。广义的生物扰动即遗迹化石(杨宝忠等,2007),在阿不切亥组见到的是生物足迹(图3d)。

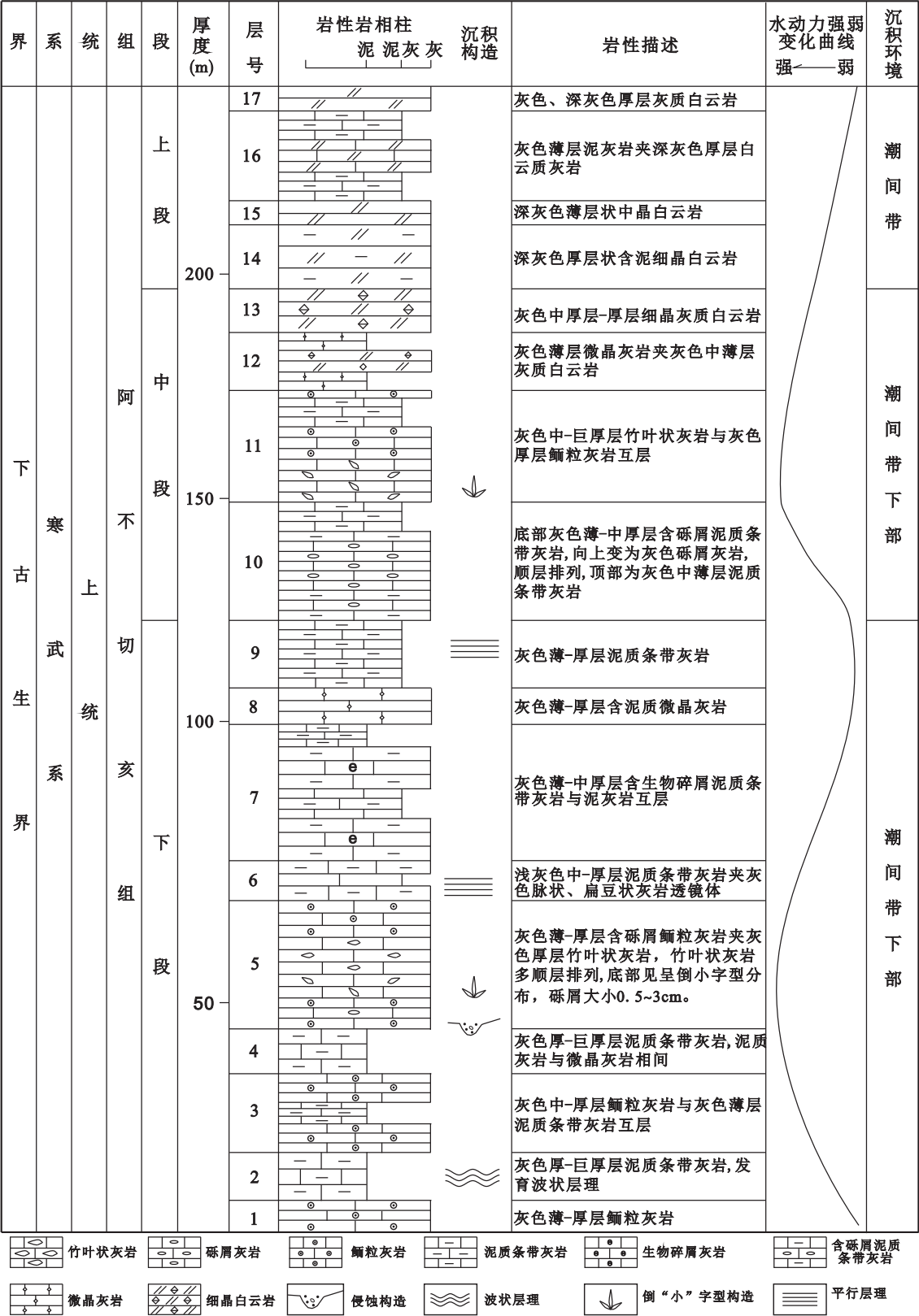
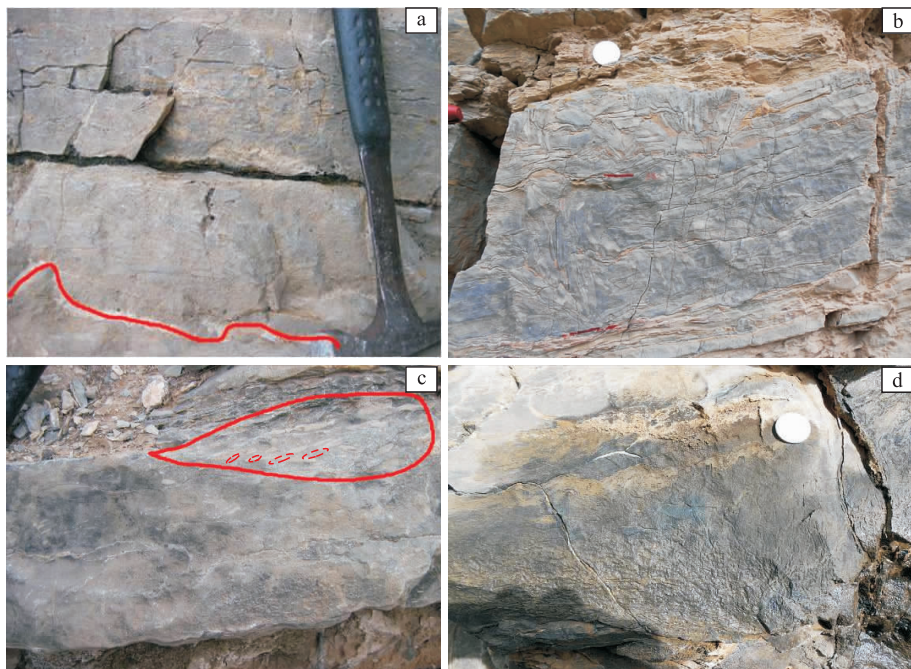


图 2 阿不切亥组沉积演化综合柱状图

Fig. 2 Column of the sedimentary evolution of Abuqiehai formation



a. 底面侵蚀构造; b. 放射状结构; c. 砾屑叠瓦状排列; d. 生物扰动构造

图 3 典型沉积构造照片

Fig. 3 Typical sedimentary structure photos

生物扰动主要是由于生物活动所产生,发育生物扰动构造的环境最显著的特点是:足够的阳光、有机物质和氧含量供生物生存。通过对阿不切亥组发育的生物扰动构造的研究,对恢复古环境有重要意义。

2.5 其他沉积构造

风暴作用期间,常常会把砾屑打碎,形成碎屑构造。显微镜下也有独特特征(图 4a),一些半塑性状态下的砾屑被撕扯、拉裂,发生变形(图 4b、图 4c)。风暴作用还常常破坏正常潮下形成的各种颗粒(鲕粒、核形石、球粒及生物屑等),使这些颗粒形成异常的破碎形态,从而保存风暴破坏的痕迹。常见的有尖锥状、半圆状、缺口状、碎片状、弯月状和花瓣状等(图 4d)。

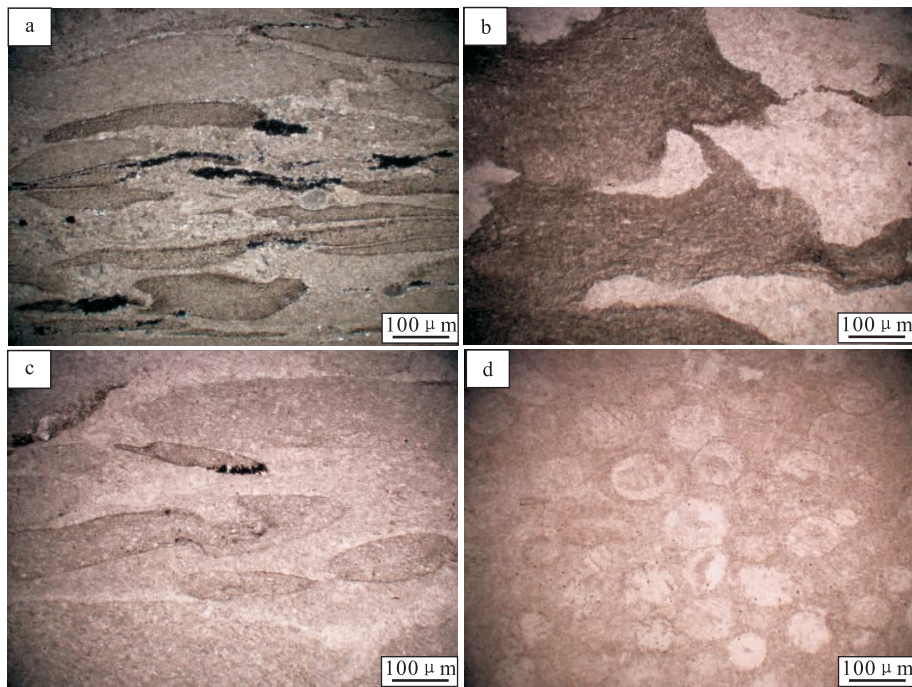
3 风暴岩沉积序列

阿不切亥组全为碳酸盐岩,但沉积类型丰富。包含有不同能量及不同水深的碳酸盐岩沉积类型,总体表现为浅水碳酸盐岩台地的沉积。通过野外剖面观察,对贺兰山中段寒武系风暴岩进行了详细的研究,根据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,岩石类型包括鲕粒灰岩(Te₁)、泥质条带灰岩(Te₂)等(图 5)。经过野外实地观察,认为研究区可以识别出 3 种风暴沉积序列组合(图 5)。

3.1 沉积序列 I

紫花沟剖面阿不切亥组下段观察到风暴沉积序列 I。出露较为完整,包括含砾屑鲕粒灰岩段(Ta)、杂乱排列的竹叶状灰岩段(Tb)、具长轴水平定向的竹叶状灰岩段(Tc)以及正常沉积的鲕粒灰岩段(Te₁)和泥质条带灰岩段(Te₂)。阿不切亥组下段以大量鲕粒灰岩出现为特征,底部含砾屑鲕粒灰岩段(Ta),鲕粒灰岩中的砾屑含量为 5%~10%,大小 0.3~4cm,呈竹叶状,成分为单一的灰质,砾屑为顺层排列。中部杂乱排列的竹叶状灰岩段(Tb),为风暴成因的砾屑灰岩(竹叶状灰岩),砾屑含量为



a. 碎裂构造(PM024 第 26 层);b. 砾屑在半塑性状态下发生的变形(PM024 第 30 层);c. 砾屑在半塑性状态下发生的变形(PM024 第 24 层);d. 镜下鲕粒(PM024 第 12 层)

图 4 风暴岩镜下照片

Fig. 4 The photo of storm deposition under microscope

30%~40%,砾屑大小 5~8 cm,排列几乎呈放射状、菊花状,呈倒“小”字型,具潮间风暴岩的特征。上部具长轴水平定向的竹叶状灰岩段(Tc),为风暴衰减期产物,定向排列的竹叶状灰岩多夹于灰色中厚层鲕粒灰岩层之间。顶部为正常沉积的鲕粒灰岩段(Te₁)和泥质条带灰岩段(Te₂)。

从上述风暴沉积序列可以看出,该套风暴岩是潮间带下部高能带的鲕粒灰岩、泥质条带灰岩等沉积物遭受强大风暴袭击形成大量竹叶状砾屑灰岩,经风暴潮流短距离搬运后,由于重力作用,快速卸载,形成粗粒滞留沉积(Tb)及具长轴水平定向的竹叶状灰岩段(Tc)。因此,该套风暴岩的沉积位置在水体较浅的潮间带下部高能带附近。

3.2 沉积序列 II

紫花沟剖面阿不切亥组中段下部观察到沉积序列 II。包括含砾屑泥质条带灰岩段(Ta)、具长轴水平定向的竹叶状灰岩段(Tc)以及正常沉积的泥质条带灰岩段(Te₂)。阿不切亥组中段以大量砾屑灰岩出现为特征,底部含砾屑泥质条带灰岩段(Ta),泥质条带灰岩中的砾屑含量为 10%~15%,大小 0.3~4cm,呈竹叶状,成分为单一的灰质,砾屑为顺

层排列。中部为具长轴水平定向的竹叶状灰岩段(Tc),为风暴衰减期产物,定向排列的竹叶状灰岩多夹于浅灰色中薄层泥质条带灰岩层之间。顶部为正常沉积的泥质条带灰岩段(Te₂)。

从上述风暴沉积序列可以看出,阿不切亥组中段早期是正常高能水动力条件形成的产物。由含砾屑灰岩与泥质条带灰岩组成旋回,沉积环境由潮下高能向潮下低能变化。

3.3 沉积序列 III

紫花沟剖面阿不切亥组中段中上部观察到沉积序列 III。包括杂乱排列的竹叶状灰岩段(Tb)、正常沉积的鲕粒灰岩段(Te₁)和泥质条带灰岩段(Te₂)。阿不切亥组中段杂乱排列的竹叶状灰岩段(Tb),为风暴成因的砾屑灰岩(竹叶状灰岩),砾屑含量为 35%~40%,砾屑大小 6~8cm,排列几乎呈放射状、菊花状,呈倒“小”字型,具潮间风暴岩的特征。上部为正常沉积的鲕粒灰岩段(Te₁)和泥质条带灰岩段(Te₂)。呈多个方向的放射状的砾屑是沉积事件的产物。中、上部以砾屑灰岩与鲕状灰岩组成基本沉积序列,砾屑呈放射状,反映其沉积环境处于潮间带下部。

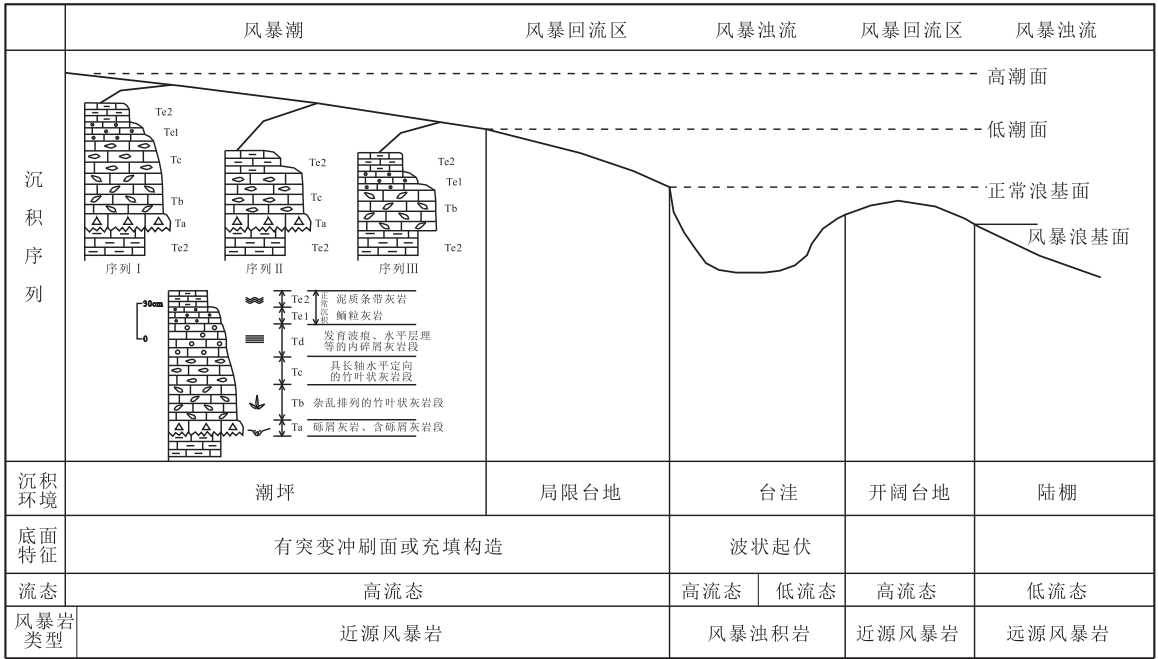


图 5 贺兰山中段地区风暴岩的产出环境、水动力条件及沉积模式图

Fig. 5 Sedimentary environment, hydrodynamic condition and mode in Helan mountain

另外,阿不切亥组上段总体以白云岩、泥灰岩夹中厚层白云质灰岩藻团粒-藻斑点灰岩为主,沉积环境为半封闭的、水体不深的潮间环境(图 2)。

4 阿不切亥组沉积环境及研究意义

风暴沉积的形成,与其所处的古地理环境有密切的关系(杜远生等,2000;白志强等,2015;黄乐清等,2016)。从本区下古生界寒武系阿不切亥组出现的几种碳酸盐岩沉积类型看,全区基本上处于水体不深、比较动荡的潮下浅滩沉积环境。出现厚-中厚层生物碎屑灰岩、中-薄层泥质条带灰岩、中-薄层宽条带状灰岩、中-薄层生物碎屑灰岩、厚-中厚层灰质白云岩、薄-厚层鲕粒灰岩等岩性组合。其中中-薄层竹叶状角砾灰岩、灰白色厚层块状灰质白云岩等都是特定的环境相标志。

风暴沉积是指特定环境下发生的事件沉积,对其识别可以很好的重建古沉积环境。阿不切亥组分为上中下三段,整体构成一个风暴沉积序列。下段沉积了一套代表正常天气条件下稳定水体环境的鲕粒灰岩、中厚层状生物碎屑灰岩及条带状泥质灰岩等;中段出现了空间上广泛分布的非正常沉积的风暴成因的呈倒“小”字形竹叶状角砾灰岩;上段发育

深灰色厚层白云岩、泥灰岩夹中厚层白云质灰岩藻团粒-藻斑点灰岩等。风暴岩多发生于低纬度热带地区,主要形成于赤道附近 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 的区域(宋金民等,2012),影响范围多在 $5^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。风暴岩的出现往往是低纬度热带气候条件的标志。其次,风暴岩特征与水深关系密切,风暴沉积主要发生于正常浪基面与风暴浪基面之间,该区未见泥裂和鸟眼等暴露标志,水体具有浅而动荡的特点,但无明显暴露于水面特征。因此可推断,宁夏贺兰山中段地区寒武系风暴岩的形成环境为潮下浅滩环境。

贺兰山早古生界寒武系阿不切亥组风暴岩的发现具有重要地质意义。

(1)风暴岩特征与水深关系密切,风暴沉积主要发生于正常浪基面与风暴浪基面之间,因此,风暴岩的形成环境多为陆表海环境。通过风暴岩,可以分析阿不切亥组的古沉积环境,即为一套潮下浅滩碳酸盐台地沉积。

(2)风暴岩多发生于低纬度热带地区,主要形成于赤道附近 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 的区域,影响范围多在 $5^{\circ}\sim 30^{\circ}$,阿不切亥组风暴岩的发现,说明贺兰山地区在早古生代处于炎热而干燥的低纬度热带气候环境。

(3)贺兰山寒武系阿不切亥组风暴岩的发现对区域地层对比具有重要意义。可以把贺兰山地区和

华北,甚至是扬子地区进行比较。贺兰山、华北、扬子地区中寒武世都处于低纬度、陆表海环境,均可见风暴沉积,不是偶然,而是当时构造背景、古地理、古气候的共同特征所决定。

致谢:中国地质大学张克信教授对本文的修改提出了建设性意见,蔡雄飞教授以及研究生杨捷、金巍、莫浩然、何文键参加了研究剖面的野外工作,在此谨表谢意!

参考文献(References):

- 白建科,陈隽璐,徐学义,等. 东准噶尔兔子泉地区中泥盆统火山湖相风暴岩及沉积构造背景[J]. 新疆地质, 2014, 32(04):445-450.
- BAI Jianke, CHEN Junlu, XU Xueyi, et al. Volcanic Lacustrine Tempestite and Its Sedimentary Tectonic Setting of the Middle Devonian in Tuziquan Area, East Junggar the Middle Devonian in Tuziquan Area, East Junggar [J]. Xinjiang Geology, 2014, 32(04):445-450.
- 白万备,李建厚,孙长彦,等. 碳酸盐风暴沉积研究现状与进展[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2011, 30(04):426-432.
- BAI Wanbei, LI Jianhou, SUN Changyan, et al. The Present Situation and Advance in Carbonate Storm Deposits Study [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2011, 30(04):426-432.
- 白一鸣,张元福,胡晨林,等. 鄂尔多斯盆地徐庄组碳酸盐岩风暴沉积发育特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2017, 31(06):1233-1240.
- BAI Yiming, ZHANG Yuanfu, HU Chenlin, et al. Characteristics and Geological Significances of Xuzhuang Formation Carbonate Tempestites in Ordos Basin [J]. Geoscience, 2017, 31(06):1233-1240.
- 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(02):226-231.
- BAI Zhiqiang, LIU Shugen, SONG Jinmin, et al. Sedimentary Characteristics and Geological Implications of Tempestite, Luoreping Formation, Middle Silurian in Southern Micangshan [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(02):226-231.
- 陈锐明,罗根明,张克信,等. 青海同仁地区早三叠世晚期风暴岩的发现及其意义[J]. 地质通报, 2009, 28(01):63-71.
- CHEN Ruiming, LUO Genming, ZHANG Kexin, et al. Discovery of Late Early Triassic Tempestite in Tongren Area, Qinghai, China and Its Significance [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(01):63-71.
- 杜远生,韩欣. 滇中元古代昆阳群因民组碎屑风暴岩及其意义[J]. 沉积学报, 2000, 18(02):259-262.
- DU Yuansheng, HAN Xin. Clastic Tempestite and Its Significance in Yinmin Formation, Kunyang Group (Meso-proterozoic) in Central Yunnan Province [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(02):259-262.
- 杜远生,周道华,龚淑云,等. 甘肃靖远-景泰泥盆系湖相风暴岩及其古地理意义[J]. 矿物岩石, 2001, 21(03):69-73.
- DU Yuansheng, ZHOU Daohua, GONG Shuyun, et al. Tempestite and Its Palaeogeographical Significance of Devonian in JingYuan and JingTai Counties, Gansu Province [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2001, 21(03):69-73.
- 方少仙,侯方浩,杨西燕,等. 鄂尔多斯盆地内部中二叠统石盒子组盒8下亚段砂岩中的风暴岩[J]. 沉积学报, 2011, 29(01):23-30.
- FANG Shaoxian, HOU Fanghao, YANG Xiyan, et al. Tempestites in Lower Submember of Member 8 of Shihezi Formation (Middle Permian) in Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(01):23-30.
- 冯乔,田方正,邹开真,等. 柴达木盆地大煤沟地区多泉山组风暴沉积及其意义[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(06):701-706.
- FENG Qiao, TIAN Fangzheng, ZOU Kaizhen, et al. Storm Deposit and Its Significance of Duoquanshan Formation in Dameigou Area, Qaidam Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(06):701-706.
- 黄乐清,刘伟. 湘西北龙山地区下奥陶统桐梓组潮坪风暴岩的发现及其意义[J]. 沉积学报, 2016, 34(05):830-841.
- HUANG Leqing, LIU Wei. Characteristics of Tempestite of Lower Ordovician Tongzi Formation, in the Longshan Area, Northwestern Hunan and Its Geological Significance [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(05):830-841.
- 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. Sedimentary Rocks and Sedimentary Facies Model and Buildup [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- 霍进杰,祁明霞,任军民,等. 准噶尔盆地石西凸起白垩系呼图壁河组一段风暴岩[J]. 新疆地质, 2014, 32(02):168-171.
- HUO Jinjie, QI Mingxia, REN Junmin, et al. Tempestite in No. 1 Section of Cretaceous Hutubi River Formation from Shixi Bulge in Junggar Basin [J]. Xinjiang Geology, 2014, 32(02):168-171.
- 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(04): 377-380+480.
- KONG Qingying, CHENG Rihui, WANG Pujun, et al. Characteristics of Tempestite in the Moheershan Formation and Sea-level Changes in Kuruktag, Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2006, 24(04): 377-380+480.
- 吝文, 姜在兴, 向树安, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田下二叠统下石盒子组盒2及盒3段风暴岩研究[J]. 古地理学报, 2008, 10(02): 167-174.
- LIN Wen, JIANG Zaixing, XIANG Shu'an, et al. Researches on Tempestites of the Member 2 and Member 3 of Lower Permian Xiashihezi Formation in Daniudi Gas Field, Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2008, 10(02): 167-174.
- 刘宝珩, 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(01): 55-67+121-122.
- LIU Baojun, ZHANG Jiqing, XU Xiaosong. On the Calcareous Tempestites in the Lower Permian of Silong, Xingwen, Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 1986(01): 55-67+121-122.
- 孟祥化, 肖秀夫, 葛铭, 等. 华北古浅海碳酸盐风暴沉积和丁家滩模式[J]. 沉积学报, 1986(02): 1-18+130-133+142.
- MENG Xianghua, QIAO Xiufu, GE Ming, et al. Study on Ancient Shallow Sea Carbonate Storm Deposits (Tempestite) in North China and Dingjiatan Model of Facies and Sequence[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1986(02): 1-18+130-133+142.
- 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(04): 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(04): 15-20.
- 宋金民, 杨迪, 李朋威, 等. 中国碳酸盐风暴岩发育特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2012, 26(03): 589-600.
- SONG Jinmin, YANG Di, LI Pengwei, et al. Development Characteristics and Geological Significance of Carbonate Tempestites in China[J]. Geoscience, 2012, 26(03): 589-600.
- 王家豪, 王华, 曾劲彪, 等. 山东省中部上寒武统碳酸盐风暴沉积的综合模式[J]. 地球科学, 2017, 42(01): 68-77.
- WANG Jiahao, WANG Hua, ZENG Jinbiao, et al. Integrative Depositional Model for Carbonate Tempestites in Upper Cambrian, Central Shandong Province[J]. Earth Science, 2017, 42(01): 68-77.
- 杨宝忠, 杨坤光, 夏文臣. 鄂东黄石地区中上寒武统风暴岩的发现及意义[J]. 地质科技情报, 2007, 26(03): 33-36.
- YANG Baozhong, YANG Kunguang, XIA Wenchen. Discovery of Middle-Upper Cambrian Tempestites and Its Significance in Huangshi, Eastern Hubei Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26(03): 33-36.
- 张瑞林, 申少宁, 武征. 甘肃迭部当多沟擦阔合组的风暴沉积[J]. 西北地质科学, 1988(01): 65-73.
- ZHANG Ruilin, SHEN Shaoning, WU Zheng. First Finding on Storm Sedimentation at the Profile of Dangduogou, Gansu Province[J]. Northwest Geoscience, 1988(01): 65-73.
- 张继庆, 冯纯江, 杜德勋, 等. 四川盆地早二叠世碳酸盐沉积作用及风暴沉积作用[M]. 重庆: 重庆出版社, 1986: 11-74.
- ZHANG Jiqing, FENG Chunjiang, DU Dexun, et al. Carbonate Deposition And Storm Deposition in Early Permian in Sichuan Basin[M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1986: 11-74.
- 周志强, 郑昭昌. 贺兰山的寒武系[J]. 西北地质, 1976, 13(01): 6-20.
- ZHOU Zhiqiang, ZHENG Shaochang. The Cambrian System of Helan Mountain[J]. Northwestern Geology, 1976, 13(01): 6-20.
- 曾雄伟, 杜远生, 张哲, 等. 广西桂林地区中、上泥盆统风暴岩沉积特征及其地质意义[J]. 地质科技情报, 2007, 26(06): 42-46+65.
- ZENG Xiongwei, DU Yuansheng, ZHANG Zhe, et al. The Sedimentary Characteristics of the Middle-Upper Devonian Tempestite in Guilin, Guangxi and Its Geological Implications[J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26(06): 42-46+65.
- 周晓峰, 刘丽丽, 王建国, 等. 鄂尔多斯盆地延长组开阔浅水湖泊风暴沉积[J]. 科技导报, 2016, 34(18): 203-208.
- ZHOU Xiaofeng, LIU Lili, WANG Jianguo, et al. Storm Deposits in Wide and Shallow Lacustrine Environment in Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(18): 203-208.
- BRENCHLEY P J, PICKERILL R K, STROMBERG S G. The role of wave reworking on the architecture of storm sandstone facies, Bell Island Group (Lower Ordovician), eastern Newfoundland[J]. Sedimentology, 1993, 40(3): 359-383.
- CROSS T F, NORWELL A R M. A deep-sea sediment transport storm[J]. Nature, 1988, 331: 518-521.
- KELLING G, MULLIN P R. Graded limestone and limestone quartzite couplets, possible storm deposits from the Moroccan Carboniferous[J]. Sedimentary Geology, 1975, 13: 161-190.
- SAVRDA C E, NANSON L L. Ichnology of fair weather and storm deposits in an Upper Cretaceous estuary (Eutaw Formation, western Georgia, SA)[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2003, 202(1/2): 67-84.