

doi: 10.12029/gc20180512

许安涛, 李凤杰, 刘奎, 向鹏飞, 赵晨圆, 胡鹏. 2018. 北川甘溪下泥盆统风暴岩沉积特征及其沉积模式[J]. 中国地质, 45(5): 1049–1062.
Xu Antao, Li Fengjie, Liu Kui, Xiang Pengfei, Zhao Chenyuan, Hu Peng. 2018. SThe characteristics and sedimentary model of Storm deposits in the Lower Devonian strata of Beichuan[J]. Geology in China, 45(5): 1049–1062(in Chinese with English abstract).

北川甘溪下泥盆统风暴岩沉积特征及其沉积模式

许安涛^{1,2,3} 李凤杰⁴ 刘奎^{1,2,3} 向鹏飞⁵ 赵晨圆³ 胡鹏³

(1.中国科学院南海海洋研究所,中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室,广东 广州 510301;2.中国科学院大学,北京 100049;3.成都理工大学能源学院,四川 成都 610059;4.成都理工大学沉积地质研究院,四川 成都 610059;
5.中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249)

摘要:依据风暴沉积野外剖面实测资料,通过对北川下泥盆统甘溪组和谢家湾组风暴沉积野外剖面结构和沉积演化等的研究,建立了该区风暴沉积序列模式及分布模式。北川甘溪下泥盆统广泛发育侵蚀冲刷面、渠模构造、生物介壳滞留沉积、丘状交错层理和生物成因构造等风暴沉积构造,其中发育3类风暴沉积与7类风暴沉积序列。研究区广泛发育的风暴沉积具有良好的古气候和古地理意义,亦为前人提出的扬子板块北移和北川早泥盆世所处的温暖热带—亚热带气候环境提供了一定证据。

关键词:龙门山地区;甘溪剖面;下泥盆统;风暴沉积

中图分类号:P534.44;P588.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2018)05-1049-14

The characteristics and sedimentary model of Storm deposits in the Lower Devonian strata of Beichuan

XU Antao^{1,2,3}, LI Fengjie⁴, LIU Kui^{1,2,3}, XIANG Pengfei⁵, ZHAO Chenyuan³, HU Peng³

(1. Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 4. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 5. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Based on the actual measurement data of the storm depositional sections in the Lower Devonian strata of Beichuan and the study of section structures and sedimentary evolution of Ganxi Formation and Xiejiawan Formation, the authors established storm depositional sequences and depositional models of the study area. Storm deposits are widely developed in the Lower Devonian strata of Beichuan, and such geological phenomena as the erosion surface, gutter casts, shell lag deposits, parallel bedding, hummocky cross-stratification, biological genesis structures and other storm sedimentary structures are well developed. In the study area, 3 types of storm deposits and 7 types of storm depositional sequences are developed. The storm deposits in the Lower

收稿日期:2016-07-08;改回日期:2018-02-25

基金项目:国家自然科学基金(41172100)和四川省大学生创新创业训练计划项目(201510616099)联合资助。

作者简介:许安涛,男,1993年生,硕士生,海洋地质专业;E-mail: xuantao193@163.com。

通讯作者:李凤杰,男,1972年生,博士,教授,主要从事沉积学方面的教学与科研工作;E-mail: lifengjie72@163.com。

Devonian strata of Beichuan have good significance for the study of palaeolatitude, palaeoclimate and palaeogeography, because they provide proper evidence for the northward movement of Yangtze plate and tropical or subtropical climate environment of Beichuan area in the Early Devonian period.

Key words: Longmen Mountain area; Ganxi section; Lower Devonian; Storm deposit

About the first author: XU Antao, male, born in 1993, master candidate, majors in marine geology; E-mail: xuantao193@163.com.

About the corresponding author: LI Fengjie, male, born in 1972, doctor, professor, majors in sedimentary geology and sequence stratigraphy; E-mail: lifengjie72@163.com.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41172100) and Student's Platform for Innovation and Entrepreneurship Training Program in Sichuan Province (No. 201510616099).

1 引 言

20世纪60-70年代,国外开始关注赤道碳酸盐沉积区因大旋风、飓风等引起的风暴沉积,从此开启了风暴沉积的研究潮流(McKee,1959; Ball et al., 1967; High et al.,1969)。风暴岩(Tempestite)最早由Kelling(1975)提出,指代先期沉积物被风暴侵蚀、扰动后的再沉积,其具递变层理。20世纪80年代,国内学者开始对风暴沉积进行研究,吴崇筠等(1983)在国内石油勘探与开发刊物上开始介绍暴风浪形成的丘状交错层理与洼状交错层理,刘宝珺等(1986)将 Tempestite 一词译为“风暴岩”,指代由风暴流所产生的特殊沉积构造组合和其沉积物的风暴岩。北川甘溪下泥盆统甘溪组与谢家湾组广泛发育碎屑风暴流沉积和混积风暴流沉积,各种风暴沉积构造极为发育。本文以甘溪组和谢家湾组风暴沉积野外剖面实测资料为基础,通过对风暴沉

积构造的识别、风暴沉积序列和沉积模式的建立以及风暴岩地质意义的分析,以期对北川甘溪下泥盆统古地理、古沉积环境和风暴沉积的分析研究有所裨益。

2 地质概况

龙门山泥盆纪时期位于上扬子板块西缘,沉积盆地具有被动大陆边缘的拉张伸展型开阔海盆地性质(唐永忠等,2011)。北川甘溪剖面位于扬子地台西缘龙门山台缘凹陷东北段唐王寨向斜的西北翼,地理位置位于四川省北川县桂溪乡甘溪村(张立军和龚一鸣,2013)(图1),研究剖面是龙门山桂溪—沙窝子泥盆系国际标准剖面的重要组成部分(侯鸿飞和王士涛,1988)。

龙门山下泥盆统地层划分方案多样,其中广泛使用的分层标准有:陈源仁(1976),侯鸿飞等(1988),本文采用陈源仁(1976)的分类标准,龙门

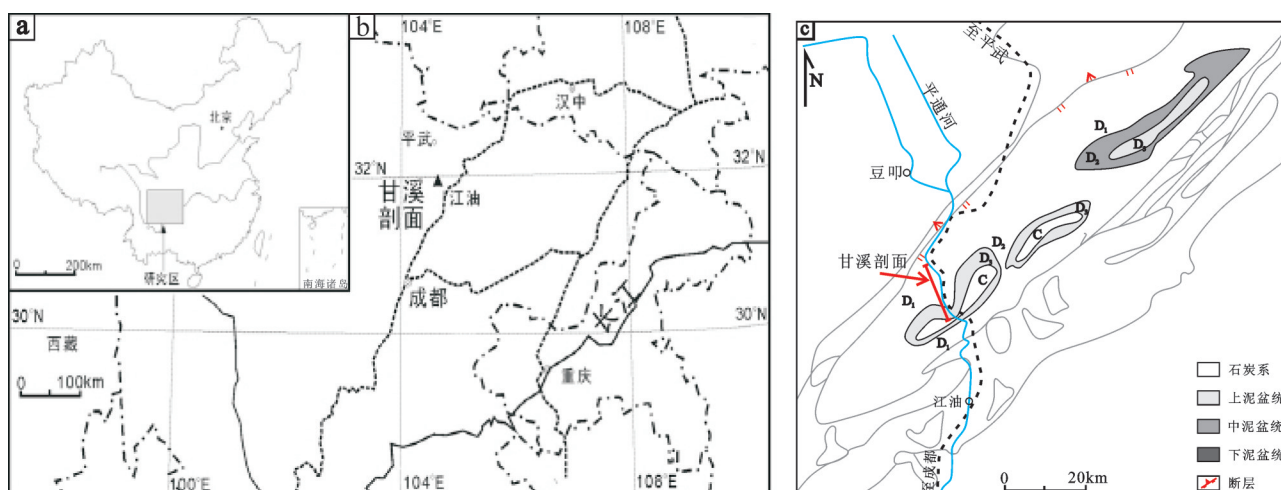


图1 甘溪剖面地理位置及地质简要图(据张立军和龚一鸣,2013修改)

Fig. 1 Geographical location and geological map of Ganxi section (modified after Zhang Lijun and Gong Yiming, 2013)

山下泥盆统自下而上划分为:平驿铺组、白柳坪组、甘溪组和谢家湾组。龙门山下泥盆统甘溪组和谢家湾组沉积属于浅海陆棚、混积陆棚和混合潮坪、滨岸等环境(侯鸿飞和王士涛,1988)。甘溪组岩性主要为:灰绿、黄绿、褐灰色泥质粉砂岩,谢家湾组下部岩性为:青灰色泥质粉砂岩,夹少许薄层灰岩、团块灰岩或砂质生屑灰岩,上部岩性为:灰色钙质泥质粉砂岩、粉砂岩与砂质生屑灰岩的不等厚层(侯鸿飞和王士涛,1988)。

3 风暴沉积野外剖面特征

3.1 甘溪组风暴沉积野外剖面特征

甘溪组野外剖面出露广泛,主要分布于唐王寨向斜中心部分,剖面平均总厚约190 m,东西两侧延伸较远,岩性主要为:灰绿、黄绿、褐灰色泥质粉砂岩,粉砂岩中夹多层灰色亮晶生屑灰岩,富含中小

型展翼型石燕(侯鸿飞和王士涛,1988)。其中,甘溪组风暴沉积剖面位于北川县永利村甘溪桥北东村庄公路旁,剖面出露清晰完整,呈一系列单向倾斜岩层产出(图2a)。剖面中侵蚀冲刷面与渠模构造、丘状交错层理等各类风暴沉积构造十分发育,风暴沉积剖面总厚1.76 m,共划分出7层风暴沉积,自下而上分别厚:0.20 m、0.17 m、0.23 m、0.24 m、0.18 m、0.35 m、0.39 m,大体呈现出越向上风暴沉积厚度、冲刷面与渠模构造规模及丘状交错层理段厚度、丘状波长与波高等亦明显增加,同时往上风暴沉积顶面的泥岩段越不发育(图3)。

3.2 谢家湾组风暴沉积野外剖面特征

谢家湾组野外剖面出露清晰完整,其与上覆的养马坝组及下伏的甘溪组均为连续沉积且顶底界限清晰,剖面平均总厚约160 m,谢家湾组下部岩性为:青灰色泥质粉砂岩,夹少许薄层灰岩、团块灰岩

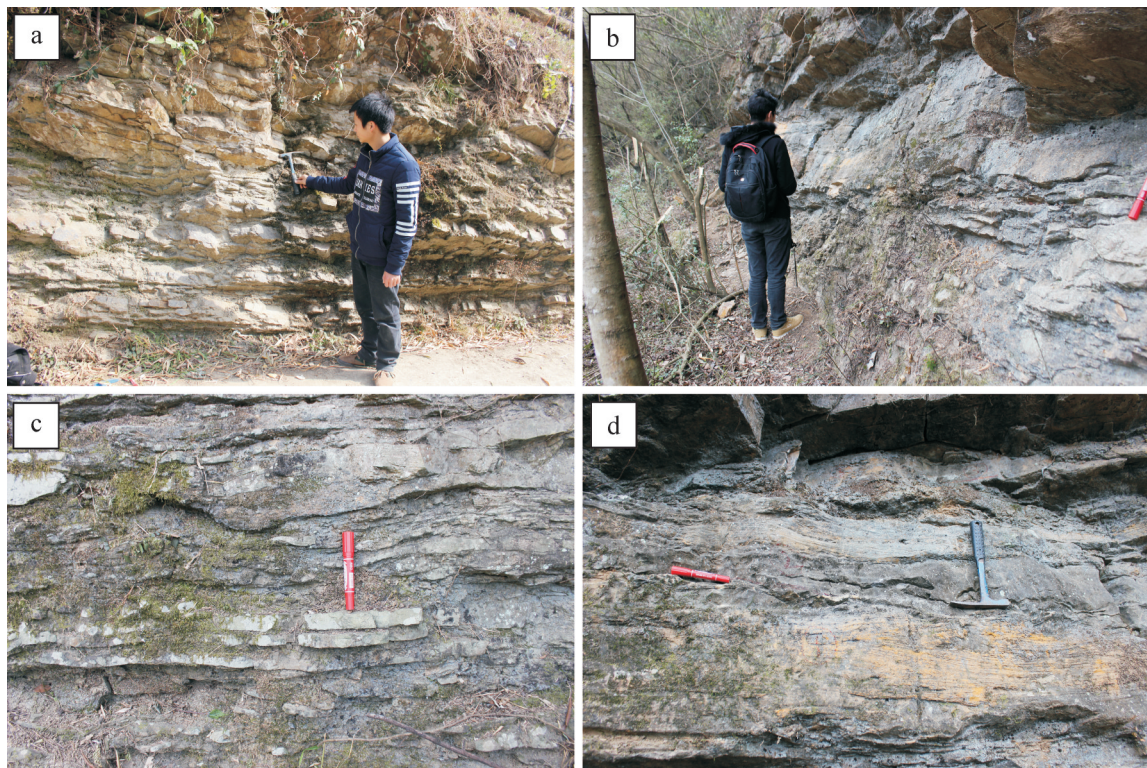


图2 甘溪组与谢家湾组风暴沉积剖面特征

a—甘溪组风暴沉积野外剖面特征;b—谢家湾组风暴沉积野外剖面特征;c—谢家湾组下部远源风暴沉积野外剖面特征;d—谢家湾组上部近源风暴沉积野外剖面特征

Fig.2 The characteristics of storm deposit sections of Ganxi Formation and Xiejiawan Formation

a— The characteristics of storm deposit field sections of Ganxi Formation; b— The characteristics of storm deposit field sections of Xiejiawan Formation; c— The characteristics of distal storm deposit field sections of the lower part in Xiejiawan Formation; d— The characteristics of proximal storm deposit field sections of the upper part in Xiejiawan Formation

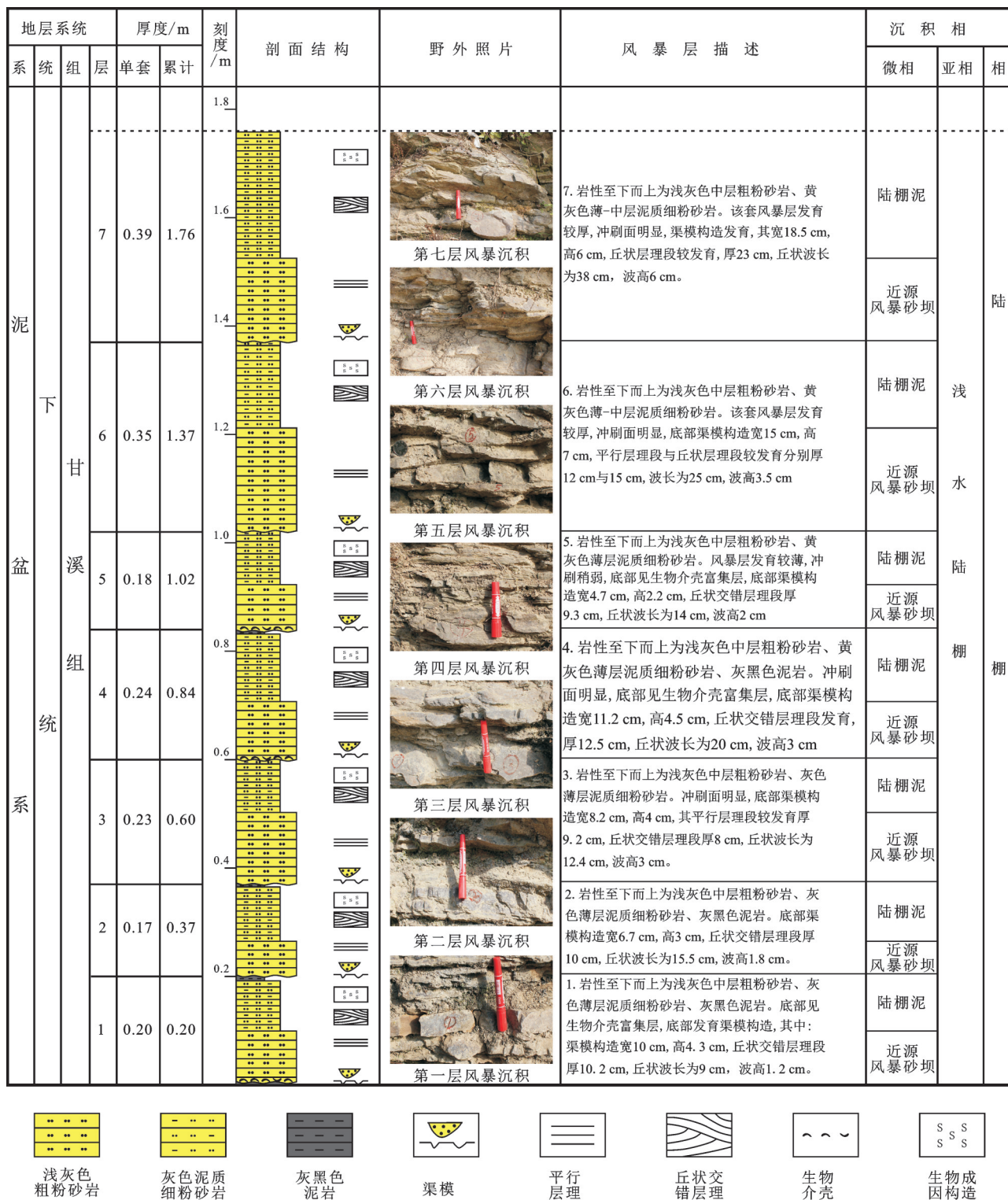


图3 甘溪组风暴沉积剖面综合柱状图
Fig.3 Comprehensive stratigraphic column of storm deposits of Ganxi Formation

或砂质生屑灰岩,上部岩性为:灰色钙质泥质粉砂岩、粉砂岩与砂质生屑灰岩的不等厚层(侯鸿飞和王士涛,1988)。其中,谢家湾组风暴沉积剖面位于北川县永利村甘溪桥北东村庄公路左拐弯右侧山坡处,此剖面处岩层呈近水平状出露,岩层单层厚度大(图2b)。因上部山体为垂直陡崖无法测量,目估风暴沉积剖面总厚近4 m,而实测厚度为2.34 m,共划分出6层风暴沉积,自下而上分别厚:0.41 m、0.36 m、0.32 m、0.45 m、0.42 m、0.38 m。其中,下部三层沉积为远源风暴沉积(图2c),上部三层沉积为近源风暴沉积(图2d),近源与远源风暴沉积均呈现出越往上单层风暴沉积厚度与顶面的泥岩厚度越薄(图4)。

4 风暴沉积特征

4.1 岩性特征

一般而言,风暴岩既有碳酸盐岩类型也有砂岩或粉砂岩类型,同时也有混积岩类型,这取决于风暴发生的环境。北川甘溪地区发育的风暴岩岩性主要有:浅水陆棚的粉砂岩和陆棚泥的泥质细粉砂岩和泥岩,混积陆棚的含生屑泥质粉砂岩、砂质生屑灰岩和混积陆棚泥的泥灰岩(图5a,b)。

4.2 风暴岩沉积构造特征

风暴岩沉积构造是沉积物受风暴流扰动、侵蚀和改造后再沉积形成的沉积构造以及后期受生物活动影响留下的一系列生物成因构造。研究区风暴沉积中发育的风暴沉积构造主要有:侵蚀冲刷面、渠模、生物介壳滞留沉积、平行层理、丘状交错层理和生物成因构造。

4.2.1 侵蚀冲刷面

侵蚀冲刷面是位于风暴层底部在风暴高峰期,受强烈的风暴涡流和风暴流席卷挟带的砂粒、介壳或生屑等在先期沉积物表面侵蚀冲刷或刻蚀形成的不平整起伏界面(刘宝珺等,1986)。侵蚀冲刷面的不平整起伏幅度,在一定程度上可反映该次风暴的强度,但同时也受沉积水体深度和沉积物粒度的影响(图5c)。

4.2.2 渠模构造

渠模(gutter casts)是Whitaker(1973)在研究挪威兰多维列岩时首次用来描述由侵蚀流形成的具向下凸出和孤立槽状的底部构造。刘宝珺等

(1986)认为渠模是风暴达到高峰期时,随着风速和海流速度不断增大,产生的多向涡流对风暴之前或上期风暴沉积顶面的沉积物进行冲刷和掏蚀改造,形成的底部侵蚀充填构造,所呈现出的渠模状,也有人称之为口袋状构造,是风暴沉积的良好指相标志。通过野外观察研究认为,渠模应该是在风暴高峰期或近高峰期风暴席卷海水,产生强烈的多向底流或风暴回流,在先期沉积物表面强烈冲刷侵蚀、下切形成的渠状构造,后期可能被涡流卷起、掏蚀的底栖生物壳体、细砂或粉砂质充填,渠模内可见似韵律结构或是由多层生屑细层显现的层理,指示渠模的多期次充填性(图5d)。

北川甘溪组的多层风暴沉积中均发育渠模构造(图5e),经测量其最大宽20 cm、高8 cm,最小宽4.5 cm、高2 cm,说明7层风暴沉积所遭受的风暴强度或沉积水深有较大差别。而谢家湾组的多层风暴沉积中见有渠模构造,但发育数量和规模都不如甘溪组,其平均宽5 cm、高3.5 cm。

一般而言,渠模构造发育规模越大,其沉积时遭受的风暴强度越强或沉积水深越浅。甘溪组风暴沉积剖面中,渠模构造近垂直岩层面出露,甘溪组下部风暴沉积中其切入下伏风暴沉积顶部的灰黑色泥岩中,而上部风暴沉积中其直接切入下伏风暴沉积丘状交错层理段的粉砂岩中(图5f),导致下伏风暴沉积顶部泥岩段的缺失,指示出甘溪组上部沉积时的风暴强度明显高于下部沉积或甘溪组上部沉积水深小于下部。

4.2.3 生物介壳滞留沉积

生物介壳滞留沉积发育于紧挨侵蚀冲刷面之上,且主要在渠模内发育(图5g),其是风暴高峰期风暴涡流对先期沉积物表面的底栖生物壳体进行掏蚀、掀起、搅动并沿沉积底层进行短距离搬运后再沉积而成,是风暴沉积的典型特征(吝文等,2008)。甘溪组和谢家湾组均见有生物介壳滞留沉积,但仅厚0.2~1.0 cm,其中甘溪组更发育,铸体薄片见生物介壳在渠模底部多为杂乱分布,未见明显的壳体凸面朝上,凹面朝下现象,说明风暴涡流对其进行杂乱搅动,然后以较快速率沉积并保存,其亦是风暴高峰期的沉积产物。

4.2.4 丘状交错层理

丘状交错层理是在由风暴浪形成的发育于正

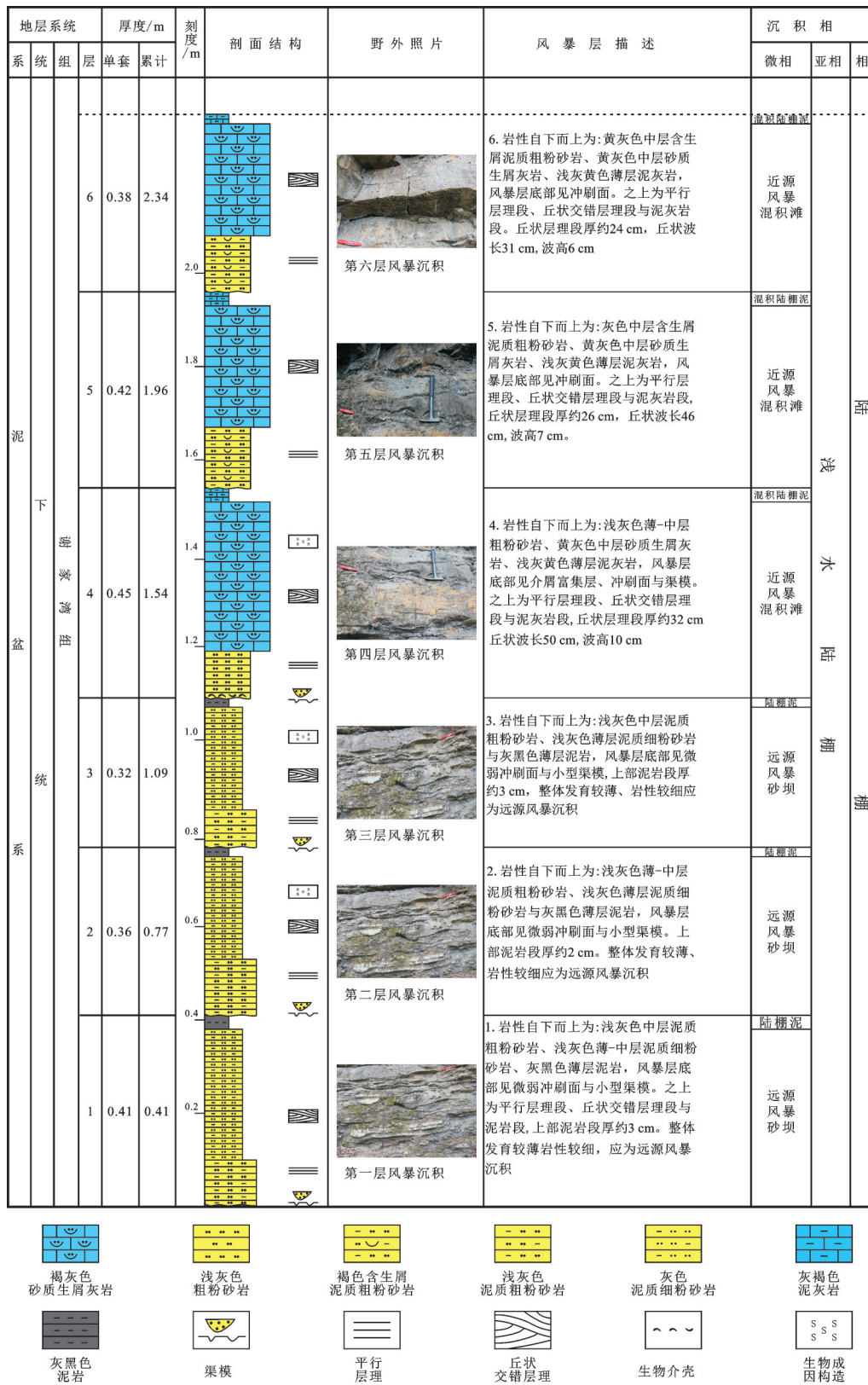


图4 谢家湾组风暴沉积剖面综合柱状图

Fig.4 Comprehensive stratigraphic column of storm deposits of Xiejiaowan Formation

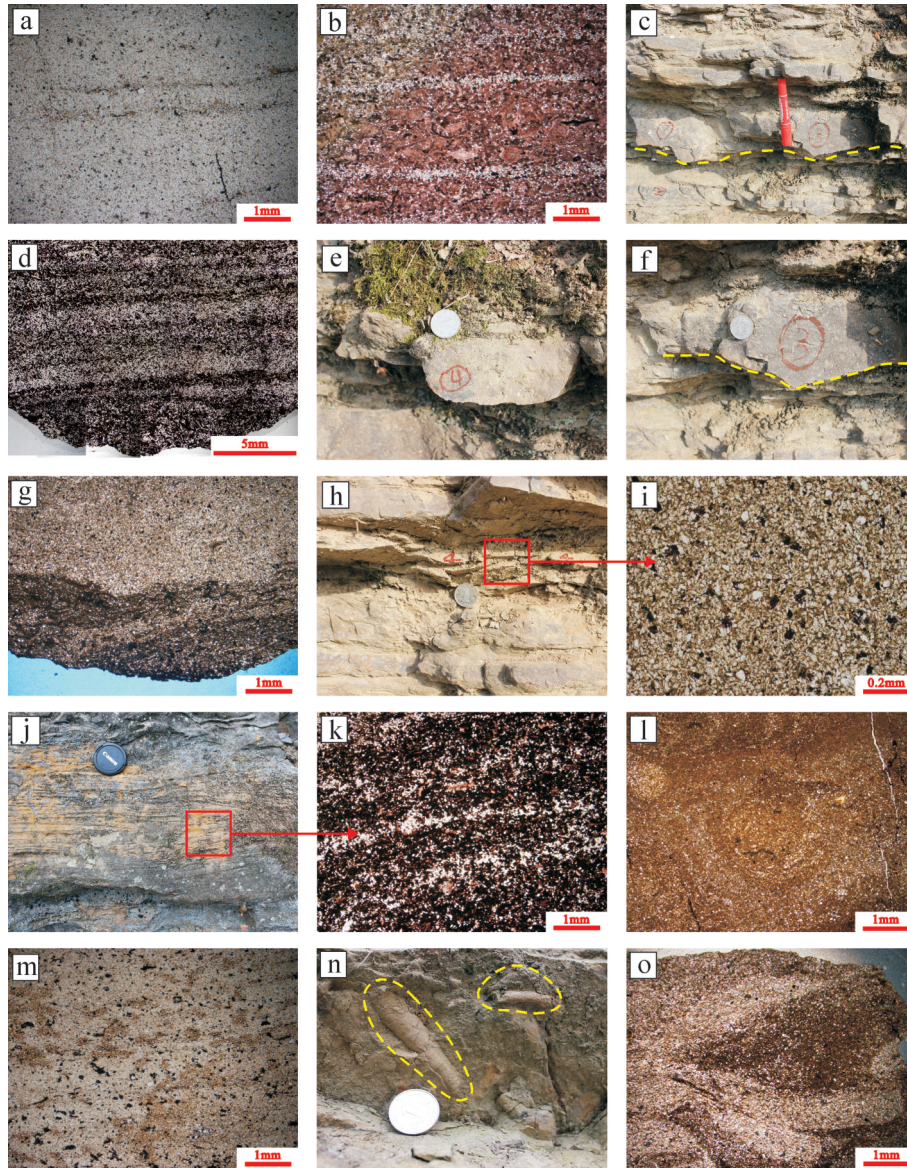


图5 风暴岩岩性及沉积构造特征

a—甘溪组风暴沉积平行层理段粗粉砂岩,单偏光;b—谢家湾组上部近源风暴沉积砂质生屑灰岩,单偏光;c—甘溪组风暴沉积底部侵蚀冲刷面;d—甘溪组风暴沉积渠模构造内见韵律结构,单偏光;e—甘溪组风暴沉积底部大型渠模构造;f—甘溪组风暴沉积渠模切入下伏丘状层理段;g—甘溪组风暴沉积底部生物介壳滞留层,单偏光;h—甘溪组风暴沉积丘状交错层理段;i—甘溪组风暴沉积丘状交错层理段泥质粉砂岩,单偏光;j—谢家湾组上部近源风暴沉积丘状交错层理;k—谢家湾组上部近源风暴沉积砂质生屑灰岩,单偏光;l—甘溪组风暴沉积泥质粉砂岩中见受生物扰动呈圈层结构,单偏光;m—谢家湾组风暴沉积粉砂岩中见受生物扰动泥质呈斑点状分布,单偏光;n—甘溪组风暴岩底面中见生物遗迹构造;o—甘溪组风暴沉积丘状交错层理段中见生物分支潜穴,单偏光

Fig. 5 Lithological and sedimentary structural characteristics of tempestite

a—Coarse silt in parallel bedding section of storm deposits of Ganxi Formation, plainlight; b—Sandy bioclastic limestone in proximal storm deposits of the upper part in Xiejiawan Formation, plainlight; c—Erosion surface on the bottom of storm deposits of Ganxi Formation; d—Rhythmicity in gutter casts of storm deposits of Ganxi Formation, plainlight; e—Large gutter casts in the bottom of storm deposits of Ganxi Formation; f—Gutter casts cutting in underlying hummocky cross-stratification section in storm deposits of Ganxi Formation; g—Shell lag deposits section on the bottom of storm deposits of Ganxi Formation, plainlight; h—Hummocky cross-stratification section in storm deposits of Ganxi Formation, plainlight; i—Muddy siltstone in hummocky cross-stratification section of storm deposits of Ganxi Formation, plainlight; j—Hummocky cross-stratification in proximal storm deposits of the upper part in Xiejiawan Formation; k—Sandy bioclastic limestone in proximal storm deposits of the upper part in Xiejiawan Formation, plainlight; l—Bioturbated ring structure in muddy siltstone of storm deposits of Ganxi Formation, plainlight; m—Porphyritic distribution of mud in muddy siltstone of storm deposits of Ganxi Formation, plainlight; n—Relic structures on the bottom of tempestite of Ganxi Formation; o—Branched burrow pores in hummocky cross-stratification section of storm deposits of Ganxi Formation, plainlight

常浪基面以下、最大风暴浪基面以上陆棚区的一种原生沉积构造。丘状交错层理的成因目前在地质界仍存在较大争议,多数人同意 Harms et al.(1975)的观点:风暴高峰期过后,随着风暴强度的降低,先期被风暴流卷起的细粒沉积物迅速沉降,受到多向底流的影响,细粒沉积物被掏蚀冲刷成无定向排列的丘形和凹形,尔后在此凹凸起伏面上,被底流携带的细粒纹层扫过并覆盖,他认为丘状交错层理的形成与多向底流和强烈的振荡作用有关。刘宝珺等(1987)认为:丘状交错层理是受风暴影响形成的巨大表面重力波在接近底部时产生的强烈摆动流和底流塑造底部床沙而形成。师庆民等(2013)认为:丘状交错层理是风暴浪的能量降低到某一阶段值时,其能量达到了形成驻波的条件而形成的,且其形成于沉积物源丰富、驻波稳定且持续的阶段。丘状交错层理是研究风暴沉积时重点观察描述的一种沉积构造(曾允孚和夏文杰,1986; Sherman and Greenwood,1989;胡明毅和贺萍,2002;Basilici et al.,2012; Colombié et al.,2012)。

研究区甘溪组的多层风暴沉积中均发育丘状交错层理,外形上表现为向上隆起的圆丘状和向下凹陷的洼状(图5h)。经测量甘溪组中丘状交错层理的丘状平均波长为20.3 cm、波高2.9 cm,岩性主要为泥质粗—细粉砂岩(图5i)。

谢家湾组中近源风暴沉积发育较大型丘状交错层理(图5j),而远源风暴沉积中的发育规模较小,经测量该组近源风暴沉积的丘状平均波长为:42.3 cm、波高:7.7 cm,发育于砂质生屑灰岩中(图5k),远源风暴沉积的丘状平均波长为14.5 cm、波高1.9 cm,发育于泥质细粉砂岩中。

丘状交错层理的规模与风暴振荡流的强度、沉积水体深度、沉积物粒度、地形坡度和水体密度等有关,风暴强度越大,沉积水体越近正常浪基面,沉积物粒度越接近粉砂或细砂丘状交错层理发育规模越大。

4.2.5 生物成因构造

风暴沉积中发育的主要生物成因构造有生物遗迹构造和生物扰动构造,其代表着快速沉积事件——风暴沉积的发生。风暴浪混合了富氧的表层水和停滞的底部水,从而为底栖生物群体的生存提供了有利条件(梁桂香,1994),因此风暴沉积中广泛

发育生物相关的沉积构造。研究区风暴沉积中于丘状交错层理段泥质粉砂岩中广泛发育生物潜穴和生物扰动构造,其中甘溪组尤为突出。

(1) 生物扰动构造

生物扰动是底栖生物的活动使沉积物遭受破坏,而形成不具有确定形态的生物扰动现象。甘溪组中生物扰动使粉砂质泥岩的砂粒分布不均,呈圈层状分布(图5l);谢家湾组中生物扰动使泥质粉砂岩中泥质呈斑点状分布(图5m)。

(2) 生物潜穴

生物潜穴是生物活动或居所建造的一种管状穴居构造,在浅海地区,环境因素变化较小,底栖生物潜穴较浅,大部分都是倾斜或水平潜穴(曾允孚和夏文杰,1986)。生物潜穴主要发育于甘溪组丘状交错层理段的泥质粉砂岩中,其中生物潜穴大多是倾斜或近水平的,潜穴内充填泥质粉砂或粉砂,其中见潜穴内泥质粉砂层一致向某一方向弯曲(图5n),且见有呈分支状的管状或锥状潜穴,是生物在层内强烈挖掘、活动的结果(图5o)。

5 风暴沉积序列类型

Allen(1982)将风暴沉积事件详细地划分为风暴前期、风暴加强期、风暴高峰期、风暴衰退期和风暴后期5个阶段,并建立起典型的风暴沉积序列:侵蚀接触底界面、粒序层理段、块状层理段、丘状交错层理段、平行层理段、弱沙纹交错层理段和泥岩段。

风暴沉积序列是沉积过程中由于在不同时期所受风暴作用的方式、强度和时间的不同而形成的一系列沉积单元有规律的垂向组合,其发育类型受物源供给、风暴强度、持续时间、沉积水深及位置和下次风暴强度或波浪改造强度等多种因素影响。完整的风暴沉积序列很难在实际情况中发现,大部分都是缺乏某一层段或多种层段的不完整风暴沉积序列。根据野外剖面实测资料和室内观察研究,对研究区风暴沉积划分出7类风暴沉积序列结构类型。其中,甘溪组发育4类风暴沉积序列类型,谢家湾组发育3类风暴沉积序列类型。

5.1 甘溪组风暴沉积序列

风暴序列结构类型 I :由侵蚀冲刷面和渠模(Sa)、生物介壳滞留层(Sb)、平行层理段(Sc)、丘状交错层理段(Sd)和泥岩段(Se)组成(图6)。该类型

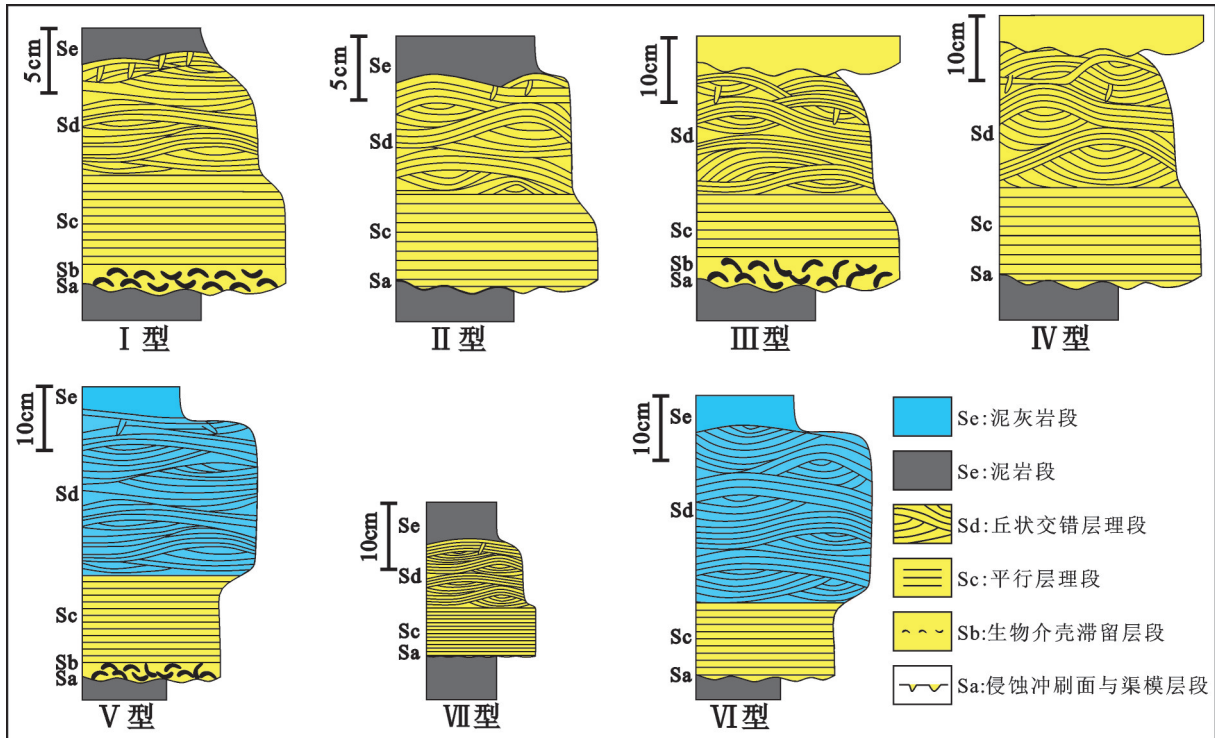


图6 甘溪组与谢家湾组风暴沉积序列类型

Fig.6 Types of storm deposit sequences of Ganxi Formation and Xiejiawan Formation

风暴序列主要发育于甘溪组下部,其中侵蚀冲刷面较明显,冲刷面发育渠模构造。冲刷面之上见生物介壳滞留层,向上为平行层理段与丘状交错层理段,顶部泥岩段厚约0.5 cm,指示沉积后期风暴浪和波浪作用或下次风暴流对顶部的细粒沉积物改造作用较弱。

风暴序列结构类型 II :由侵蚀冲刷面和渠模(Sa)、平行层理段(Sc)、丘状交错层理段(Sd)和泥岩段(Se)组成(图6)。该类型风暴序列主要发育于甘溪组中下部,该序列类型缺乏生物介壳滞留层,渠模规模较大。顶部泥岩段厚约0.3 cm,较类型 I 更薄,指示后期风暴浪和波浪作用或下次风暴流对顶部的细粒沉积物改造作用较类型 I 更强。

风暴序列结构类型 III :由侵蚀冲刷面和渠模(Sa)、生物介壳滞留层(Sb)、平行层理段(Sc)、丘状交错层理段(Sd)组成(图6)。该类型风暴序列主要发育于甘溪组中部,较类型 I 该序列缺乏顶部泥岩段且底部渠模发育规模更大,下次风暴沉积的冲刷面和渠模直接切入该序列的丘状交错层理段中,说明该次风暴沉积后期风暴浪和波浪作用对顶部的细粒沉积物改造作用很强,又或是下次风暴强度很

大,直接侵蚀冲刷下伏沉积物,导致泥岩段缺失。综上所述表明该类型风暴序列沉积环境可能更靠近晴天浪基面的浅水陆棚,为近源砂质风暴沉积。

风暴序列结构类型 IV :由侵蚀冲刷面和渠模(Sa)、平行层理段(Sc)、丘状交错层理段(Sd)组成(图6)。该类型风暴序列主要发育于甘溪组上部,冲刷面明显,渠模与丘状交错层理发育规模大。较类型 I 该序列缺乏底部生物介壳滞留层和顶部泥岩段,下次风暴沉积的冲刷面和渠模直接切入该序列的丘状交错层理段中,且渠模发育规模很大,说明下次风暴强度很大,直接侵蚀冲刷下伏沉积物,导致泥岩段缺失,综上所述表明该类型风暴序列沉积环境可能更靠近晴天浪基面的浅水陆棚,为近源砂质风暴沉积。

5.2 谢家湾组风暴沉积序列

风暴序列结构类型 V :由侵蚀冲刷面和渠模(Sa)、生物介壳滞留层(Sb)、平行层理段(Sc)、丘状交错层理段(Sd)、泥灰岩段(Se)组成(图6)。该类型风暴序列主要发育于谢家湾组近源风暴沉积的下部,底部发育冲刷面和渠模构造,冲刷面之上为生物介壳滞留层,之上为泥质粗砂岩的平行层理

段与砂质生屑灰岩的丘状交错层理段,丘状交错层理发育规模大,指示为近源混积风暴沉积。

风暴序列结构类型Ⅵ:由侵蚀冲刷面(Sa)、平行层理段(Sc)、丘状交错层理段(Sd)、泥灰岩段(Se)组成(图6)。该类型风暴序列主要发育于谢家湾组近源风暴沉积的中部与上部,底部见冲刷面,但未见渠模构造,这很可能与砂质生屑灰岩混积沉积环境有关,之上为含生屑泥质粗粉砂岩的平行层理段与砂质生屑灰岩的丘状交错层理段,丘状交错层理发育规模大,指示为近源混积风暴沉积。

风暴序列结构类型Ⅶ:由侵蚀冲刷面和渠模(Sa)、平行层理段(Sc)、丘状交错层理段(Sd)、泥岩段(Se)组成(图6)。该类型风暴序列主要发育于谢家湾组远源风暴沉积中,底部冲刷面较近源风暴沉积微弱,但见小型渠模构造,这与该处的粉砂质沉积环境有密切联系,向上为泥质粗粉砂岩的平行层理段与泥质细粉砂岩的丘状交错层理段,丘状交错层理起伏幅度较近源更小,顶部泥岩段较近源更发育,厚3~5 cm,而整体发育也较薄,岩性偏细,为远源砂质风暴沉积。

6 风暴沉积类型及沉积模式

6.1 风暴沉积类型

关于风暴岩的分类,前人均作过论述,风暴岩主要分为:原地风暴岩相、异地风暴岩相和风暴浊流相,异地风暴岩相基于距物源距离又可以分为两种亚相:近源亚相和远源亚相(孟祥化等,1986;金瞰,1997;刘鹏举和林小谷,2004;Liu et al.,2012)。

(1)近源风暴沉积

近源风暴沉积以沉积构造规模较大或沉积物粒度较粗为特征,位于正常浪基面和风暴浪基面之间,但通常离正常浪基面更近。一般在浅水地带形成,风暴浪和风暴流作用强度较大。底界有较明显的冲刷,反映风暴流强烈、活动频繁和高能的性质(Liu et al.,2012)。

研究区风暴沉积中,甘溪组和谢家湾组上部发育近源风暴沉积。甘溪组近源风暴沉积中广泛发育生物介壳滞留沉积、侵蚀冲刷面、渠模构造与丘状交错层理,且发育规模大,其中生物成因构造也很发育;谢家湾组上部近源风暴沉积中缺乏渠模构造。

(2)远源风暴沉积

远源风暴沉积形成于正常浪基面和风暴浪基面之间,但更接近风暴浪基面的较深水体中形成,粒序层和块状层及顶部水平纹层所组成,丘状交错层理不常见,但也可发育,底界也有冲刷面但一般侵蚀冲刷不明显,反映风暴流弱、活动时间短和低能的性质(Liu et al.,2012)。

研究区谢家湾组下部发育远源风暴沉积,风暴沉积下部见冲刷面与渠模构造,但冲刷较微弱,渠模构造规模较小,而上部丘状交错层理起伏幅度小发育薄,风暴沉积整体厚度较薄,岩性较细,为远源砂质风暴沉积。

6.2 风暴沉积模式

北川甘溪下泥盆统甘溪组和谢家湾组上部发育近源风暴沉积,而谢家湾组下部发育远源风暴沉积。甘溪组中风暴序列结构类型Ⅲ和Ⅳ,发育强烈冲刷面与大型渠模,丘状交错层理发育规模大,且顶部缺乏泥岩段,因此推断其沉积于更靠近正常浪基面的内陆棚,而甘溪组中风暴序列结构类型Ⅰ和Ⅱ与谢家湾组风暴序列结构类型Ⅴ与Ⅵ,发育明显侵蚀冲刷面,且丘状交错层理发育规模也较大,风暴沉积顶部见泥岩或泥灰岩,因此推断其沉积于正常浪基面与风暴浪基面较中间的中陆棚。最后,谢家湾组下部的风暴序列结构类型Ⅶ,发育微弱冲刷,见小型渠模,丘状交错层理规模较小,丘状起伏幅度较小,风暴沉积顶部发育泥岩,整体发育较薄,岩性较细,推断其沉积于风暴浪基面附近的外陆棚,属于远源风暴沉积。

根据风暴沉积发育的岩性、沉积构造、风暴沉积序列、水动力条件与古地理环境,总结出北川甘溪下泥盆统甘溪组和谢家湾组的风暴沉积模式(图7)。

7 讨论

本次研究对北川甘溪下泥盆统甘溪组和谢家湾组广泛发育的风暴沉积进行了较为详细的观察描述,建立起该地区风暴沉积的典型识别标志,并建立了适合该地区的风暴沉积序列类型与风暴沉积分布模式,为进一步分析北川早泥盆世古地理环境和古气候环境提供了一定线索。

风暴沉积是周期性的、瞬时的事件性沉积,但它又具有一定的区域性,故显示出地质上的等时性,可作为一个盆地一定范围内等时对比标志,这

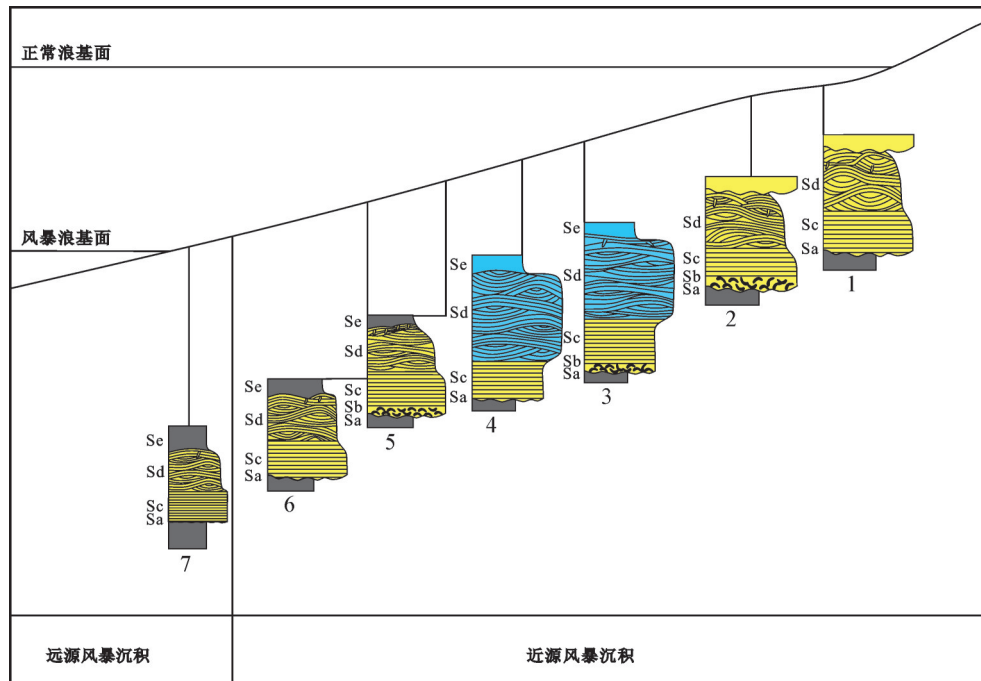


图7 甘溪组与谢家湾组风暴沉积模式

Fig. 7 Storm deposit models of Ganxi Formation and Xiejiawan Formation

给盆地地层对比乃至大区域地层的等时对比提供了重要手段(魏钦廉等,2011)。风暴沉积发生时间迅速,沉积速率快,持续时间短,横向影响延伸远,是良好的等时对比标志。

风暴沉积主要发育于滨岸、潮坪、浅水陆棚和较深水等环境,结合古地磁资料和其他指相标志,可进一步明确研究区的古地理环境。同时,风暴沉积变化规律与沉积序列的变化方式具有良好的对应性,其在垂向上的变化规律可反映出沉积环境的演变,进而准确判断出准层序的叠置类型,这可以很好地应用到露头层序地层学研究中,研究发现,风暴沉积对于海进体系域和高水位体系域的识别具有重要的指示作用(刘鹏举和林小谷,2004)。

现代风暴作用主要形成于赤道附近 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 的热带、亚热带区域,影响范围多在纬度 $5^{\circ}\sim 30^{\circ}$,少数达纬度 40° (杜远生和韩欣,2000)。将今论古,地质时期风暴发生的纬度范围与现代风暴发生的范围应该类似,研究区多期次风暴沉积垂向叠置,这种经常性的风暴反映出研究区早泥盆世处于风暴频繁发生的热带亚热带的低纬度地区,且近源与远源风暴沉积垂向叠置,反映出多期次风暴的能量大小和沉积水深有一定差别。据此,对于扬子板块的北移和早泥盆世北川所

处的温暖热带—亚热带的气候环境,研究区广泛发育的风暴沉积提供了一定证据。

同时,风暴岩还具有一定油气储集能力。彭靖淞等(2009)研究认为天井山组风暴岩以粒屑结构为主,风暴岩的面孔率高于平均面孔率,其储集性能较好,可以作为较好的储层。Liu et al.(2012)研究松辽盆地北部上白垩统风暴岩时发现大庆油田葡萄花油层广泛发育风暴沉积特征,其中的风暴岩具有低成分成熟度和高结构成熟度的特点,并进一步论证了风暴岩是大庆油田又一良好储集岩,具有良好的勘探开发前景。

8 结 论

(1)北川甘溪下泥盆统甘溪组和谢家湾组风暴沉积特征明显,广泛发育侵蚀冲刷面、渠模构造、生物介壳滞留沉积、平行层理、丘状交错层理和生物扰动构造等风暴沉积构造。

(2)北川甘溪下泥盆统甘溪组与谢家湾组沉积环境为浅水陆棚,其中,甘溪组发育近源砂质风暴沉积,谢家湾组上部发育近源混积风暴沉积,而谢家湾组下部发育远源砂质风暴沉积。

(3)北川甘溪下泥盆统甘溪组和谢家湾组发育7

类风暴沉积序列,其中较为典型的沉积序列由侵蚀冲刷面和渠模(Sa)、生物介壳滞留层(Sb)、平行层理段(Sc)、丘状交错层理段(Sd)与泥岩段(Se)组成。

(4)北川甘溪广泛发育的风暴岩沉积,为进一步研究古扬子板块的北移和早泥盆世北川所处的古地理与古气候环境提供了一定资料。

致谢:衷心感谢周洪瑞教授等专家和责任编辑提供的宝贵修改意见和建议。

References

- Allen J. 1982. Sedimentary structures: their character and physical basis[J]. *Earth Science Reviews*, 19(4): 362–363.
- Ball M M, Shinn E A, Stockman K W. 1967. The geologic effect of hurricane Donna in South Florida[J]. *Journal of Geology*, 75(5): 583–597.
- Basilici G, de Luca P H V, Oliveira E P. 2012. A depositional model for a wave-dominated open-coast tidal flat, based on analyses of the Cambrian-Ordovician Lagarto and Palmares formation, north-eastern Brazil[J]. *Sedimentology*, 59(5): 1613–1639.
- Chen Yuanren. 1976. Several stratigraphic problems of Devonian in Longmenshan area of Sichuan Province[J]. *Chengdu College of Geology*, 87–119(in Chinese).
- Colombié C, Schnyder J, Carcel D. 2012. Shallow-water marl-limestone alternations in the Late Jurassic of western France: Cycles, storm event deposits or both?[J]. *Sedimentary Geology*, s271–272: 28–43.
- Du Yuansheng, Han Xin. 2000. Clastic tempestite and its significance in Yinmin Formation, Kunyang Group(Mesoproterozoic) in Central Yunnan Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(2): 259–262 (in Chinese with English abstract).
- Harms M O, Southard J B, Spearing D R. 1975. Depositional environments as interpreted from Primary sedimentary structure and stratification sequences, Soc. Econ. Paleontologists Mineralogists, Short Course 2, 161.
- High L R. 1969. Storms and sedimentary processes along the northern British Honduras coast[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 39: 235–245.
- Hou Hongfei, Wan Zhengquan, Xian Siyuan. 1988. The stratigraphic paleontology and sedimentary facie of Devonian in Longmenshan area, Sichuan[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–100(in Chinese).
- Hou Hongfei, Wang Shitao. 1988. Stratigraphy of China 7-Devonian of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–384(in Chinese).
- Hu Mingyi, He Ping. 2002. The study of tidal storm deposits and its research significance[J]. *Advances in Earth Science*, 17(3): 391–395(in Chinese with English abstract).
- Jin Kankun. 1997. Tempestites in the Cambrian strata in Dabeiwang, Xuzhou[J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, (1): 34–38 (in Chinese with English abstract).
- Kelling G, Mullin P R. 1975. Graded limestones and limestone quartzite couplets: Possible storm deposits from the Moroccan Carboniferous[J]. *Sedimentary Geology*, 13(3): 161–190.
- Liang Guixiang. 1994. The storm deposits and their tectonic setting [J]. *Global Geology*, 13(3): 131–143(in Chinese).
- Lin Wen, Jiang Zaixing, Xiang Shu'an, You Guoqing, Tian Jijun. 2008. Researches on tempestites of the Member 2 and Member 3 of Lower Permian Xiashihezi Formation in Daniudi gasfield, Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 10(2): 167–174(in Chinese with English abstract).
- Liu Baojun, Xu Xiaosong, Luo Anping, Kang Chenglin. 1987. Storm events and phosphate deposition in Cambrian on the western margin of the Yangtze Platform, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 5(3): 28–39(in Chinese with English abstract).
- Liu Baojun, Zhang Jiqing, Xu Xiaosong. 1986. On the calcareous tempestites in the Lower Permian of Silong, Xingwen, Sichuan[J]. *Acta Geological Sinica*, 65(1): 55–67(in Chinese with English abstract).
- Liu Pengju, Lin Xiaogu. 2004. The carbonate storm deposit of Early Ordovician Yeli Formation in Pingquan area, Hebei Province[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 34(1): 1–4(in Chinese with English abstract).
- Liu X, Zhong J, Grapes R, Bian Shuhua, Liang Chen. 2012. Late Cretaceous tempestite in northern Songliao Basin, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 56(3): 33–41.
- Mckee E D. 1959. Storm sediments on a Pacific atoll[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 29: 354–364.
- Meng Xianghua, Qiao Xiufu, Ge Ming. 1986. Study on ancient shallow sea Carbonate storm deposits in north China and Dingjiantan model of facies sequences[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 4(2): 1–18(in Chinese with English abstract).
- Peng Jingsong, Liu Shugen, Zhao Xiafei, Wu Xichun, Yang Rongjun, Sun Wei, Gu Yanwu. 2009. Discovery of tempestite in Middle Triassic Tianjingshan Formation in western Sichuan and its paleogeographic significance[J]. *Lithologic Reservoirs*, (1): 83–88 (in Chinese with English abstract).
- Sherman D J, Greenwood B. 1989. Hummocky cross-stratification and post-vortex ripples: Length scales and hydraulic analysis[J]. *Sedimentology*, 36(6): 981–986.
- Shi Qingmin, Feng Le, Dou Luxing, Liu Shaoli, Jiang Yubo, Sun Xiaoqian. 2013. Explaining hummocky cross-stratification standing wave: A case from Jiayuan Formation based on the theory of storm deposits in Xuzhou[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(6): 1008–1013(in Chinese with English abstract).
- Tang Yongzhong, Shi Zunying, Gao Ronghu, Zhu Zengwu, Liu Limin, Ma Lin. 2011. The response of Mayuan, Nanzheng-

- Yangpingguan, Ningqiang sedimentary basin on the northern edge of the Yangtze platform to tectonic events and sea level changes[J]. *Geology in China*, 38(1): 52–64(in Chinese with English abstract).
- Wei Qinlian, Zhen Rongcai, Zhou Gang, Xiao Ling. 2011. Clastic tempestite in Xiejawan Member of Ganxi Formation within Longmenshan area and its significance[J]. *Geology in China*, 38(5): 1282–1288(in Chinese with English abstract).
- Whitaker J H McD. 1973. 'Gutter casts', a new name for scour-and-fill structures: with examples from the Llandoveryan of Ringerike and Malmoya, Southern Norway[J]. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 53: 403–417.
- Wu Chongjun, Qiu Yanan, Zhu Guohua. 1983. Hummocky cross stratification and swaley cross stratification causing by storm wave[J]. *Petroleum Exploration and Development*, (4): 77–80(in Chinese).
- Zeng Yunfu, Xia Wenjie. 1986. *Sedimentary Petrology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 70–82(in Chinese).
- Zhang Lijun, Gong Yiming. 2013. Ichnocoenosis of the Lower Devonian Pingyipu Longmenshan, Sichuan[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 52(1): 86–95(in Chinese with English abstract).
- 陈源仁. 1976. 四川龙门山区泥盆系的几个地层问题[J]. *成都地质学院学报*, 87–119.
- 杜远生, 韩欣. 2000. 滇中中元古代昆阳群因民组碎屑风暴岩及其意义[J]. *沉积学报*, 18(2): 259–262.
- 侯鸿飞, 万正权, 鲜思远. 1988. 四川龙门山地区泥盆纪地层古生物及沉积相[M]. 北京: 地质出版社, 1–100.
- 侯鸿飞, 王士涛. 1988. 中国地层7——中国的泥盆系[M]. 北京: 地质出版社, 1–384.
- 胡明毅, 贺萍. 2002. 潮坪风暴沉积特征及其研究意义[J]. *地球科学进展*, 17(3): 391–395.
- 金瞰崑. 1997. 徐州大北望寒武系地层中的风暴岩及其特征[J]. *岩相古地理*, (1): 34–38.
- 梁桂香. 1994. 风暴沉积及其构造背景[J]. *世界地质*, 13(3): 131–143.
- 吝文, 姜在兴, 向树安, 游国庆, 田继军. 2008. 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*, 10(2): 167–174.
- 刘宝珺, 许效松, 罗安屏, 康承林. 1987. 中国扬子地台西缘寒武纪风暴事件与磷矿沉积[J]. *沉积学报*, 5(3): 28–39.
- 刘宝珺, 张继庆, 许效松. 1986. 四川兴文四龙下二叠统碳酸盐风暴岩[J]. *地质学报*, 65(1): 55–67.
- 刘鹏举, 林小谷. 2004. 河北省平泉早奥陶世冶里组碳酸盐风暴沉积[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 34(1): 1–4.
- 孟祥化, 乔秀夫, 葛铭. 1986. 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*, 4(2): 1–18.
- 彭靖淞, 刘树根, 赵霞飞, 吴熙纯, 杨荣军, 孙玮, 顾炎午. 2009. 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*, (1): 83–88.
- 师庆民, 冯乐, 窦鲁星, 刘绍莉, 江煜波, 孙晓倩. 2013. 基于驻波理论解释丘状交错层理——以徐州地区贾园组风暴沉积为例[J]. *沉积学报*, 31(6): 1008–1013.
- 唐永忠, 石尊应, 高荣虎, 朱增伍, 刘利民, 马林. 2011. 扬子地台北缘南郑马元—宁强阳平关沉积盆地沉积构造事件与海平面变化响应[J]. *中国地质*, 38(1): 52–64.
- 魏钦廉, 郑荣才, 周刚, 肖玲. 2011. 龙门山甘溪组谢家湾段风暴岩沉积特征及其意义[J]. *中国地质*, 38(5): 1282–1288.
- 吴崇筠, 裘亦楠, 朱国华. 1983. 暴风浪形成的丘状交错层理和洼状交错层理[J]. *石油勘探与开发*, (4): 77–80.
- 张立军, 龚一鸣. 2013. 龙门山地区下泥盆统平驿铺组的遗迹化石[J]. *古生物学报*, 52(1): 86–95.
- 曾允孚, 夏文杰. 1986. *沉积岩石学*[M]. 北京: 地质出版社, 70–82.

附中文参考文献