



深时高频古风暴沉积特征与成因机制研究——以龙门山地区泥盆系甘溪组为例

李凤杰, 王佳, 陈政安

引用本文:

李凤杰, 王佳, 陈政安. 深时高频古风暴沉积特征与成因机制研究——以龙门山地区泥盆系甘溪组为例[J]. 沉积学报, 2025, 43(5): 1665-1678.

LI FengJie, WANG Jia, CHEN ZhengAn. Study on Sedimentary Characteristics and Genesis Mechanism of Deep-Time High Frequency Palaeo-Storms: An example from the Devonian Ganxi Formation in the Longmenshan area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2025, 43(5): 1665-1678.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

峡东地区震旦纪最早期风暴沉积记录及其地质意义

Early Sinian Storm Deposits in the Eastern Yangtze Gorges Area and their Geological Significance

沉积学报. 2020, 38(1): 182-195 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.003>

辽中凹陷北洼古近系东二下亚段湖底扇沉积类型及时空演化机理分析

Sedimentary Types and Genetic Mechanism of the Space-time Evolution of Sublacustrine Fans of the Paleogene in Lower Ed2 Formation, Northern Sub-sag of the Liaozhong Sag

沉积学报. 2019, 37(6): 1280-1295 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.007>

强制海退体系域识别特征及其油气意义

Recognition Characteristics and Hydrocarbon Significance of a Falling Stage Systems Tract

沉积学报. 2019, 37(2): 345-355 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.128>

闽西仙云洞石笋记录的Heinrich2事件年龄及亚旋回特征

Timing and Structure of the Heinrich 2 Abrupt Event Inferred from a Speleothem Record from Xianyun Cave, Western Fujian Province

沉积学报. 2018, 36(6): 1139-1147 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.143>

西湖凹陷低渗储层“甜点”预测关键技术研究与应用——以黄岩A气田为例

The Key Technique Research and Application of “Sweet Spots” Prediction in the Xihu Depression of Low Permeability and Porosity Reservoir: A case study from the Huangyan-A Gas Field

沉积学报. 2018, 36(1): 188-197 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-0550.2018.020>

文章编号: 1000-0550(2025)05-1665-14

深时高频古风暴沉积特征与成因机制研究 ——以龙门山地区泥盆系甘溪组为例

李凤杰^{1,2,3}, 王佳^{1,2}, 陈政安⁴

1. 成都理工大学沉积地质研究院, 成都 610059

2. 自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室, 成都理工大学, 成都 610059

3. 成都理工大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 成都 610059

4. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要 【目的】龙门山地区泥盆系甘溪组发育丰富的风暴沉积记录, 是研究古风暴沉积特征的绝佳场所, 但是对高频风暴沉积强弱变化规律缺乏系统研究, 更未开展深时古风暴发育可能的成因机制研究。【方法】以龙门山地区北川桂溪镇甘溪村两侧的甘溪组出露良好的安乐村和鹰嘴岩一带2个野外剖面实测为基础, 详细识别与描述剖面内发育的高频风暴沉积, 建立反映风暴活动变化频率和强度的风暴丰度曲线, 进而分析风暴活动强弱变化规律。【结果】(1) 龙门山地区泥盆系甘溪组发育2类风暴沉积标志: 风暴沉积构造和生物介壳富集层, 前者包括风暴侵蚀构造和风暴浪构造2种类型, 而后者包括风暴浪冲刷搬运型、风暴和簸扬作用型、机会种暴增型3种类型; (2) 甘溪组发育5种类型的风暴沉积序列; (3) 风暴丰度曲线的频谱分析表明, 龙门山地区泥盆系甘溪组风暴沉积中发育100 kyr的偏心率周期。【结论】(1) 100 kyr的偏心率周期是引起泥盆系甘溪组气候变化和风暴频率、风暴强度变化的主要轨道周期; (2) 风暴活动受控于短偏心率100 kyr的影响, 高偏心率所带来的日照量推动热带辐合带(Intertropical Convergence Zone, ITCZ)的移动, 影响了季风环流和降水的改变, 地处华南板块的泥盆系龙门山地区正好处在热带辐合带的路径, 高偏心率时期升温所提供的热量、海水蒸发量也促进了热带气旋的形成, 进而促成了风暴的高频率发生。

关键词 高频风暴沉积; 天文轨道旋回; 成因机制; 泥盆系, 龙门山地区

第一作者简介 李凤杰, 男, 1972年出生, 教授, 沉积学和旋回地层学, E-mail: lifengjie72@163.com

中图分类号 P512.2 **文献标志码** A

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2025.055

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2025.055

0 引言

Ager^[1]指出, 风暴岩一词是由 Kelling 在研究石炭纪 Moroccan Meseta 沉积时首先提出, 用来特指浅海盆地环境下, 受风暴扰动搬运破坏, 再沉积的沉积岩^[2]。随后, Kumar *et al.*^[3]和 Aigner^[4]将其含义延伸为风暴沉积, 泛指异常极端天气风暴作用形成的一系列沉积, 亦即风暴岩, 是风暴影响下在海洋和湖泊中形成的沉积岩。20世纪80年代, 随着风暴沉积理论的不完善和深入, 前人建立了风暴沉积模式, Aigner^[5]亦提出了似鲍马序列的理想风暴岩垂向序列。我国学者对风暴沉积的研究最早由刘宝珺院士于四川宜宾兴文县四龙村地区下二叠统碳酸盐岩的

研究中提出, 并引入风暴岩的概念^[6]。国内外众多研究成果表明, 深时古风暴在海平面变化^[7-8]、盆地演化^[9]和古地理重建^[10-12]、判断沉积古环境、古气候和古生态等方面^[13-16]的研究中均具有重要的地质意义。

泥盆纪是地质历史时期重要的温室时期, 该时期发育的风暴沉积被广泛记录在龙门山地区北川桂溪—沙窝子泥盆系剖面中, 该剖面也是泥盆系国际标准剖面(简称甘溪剖面)的重要组成部分^[17]。下泥盆统甘溪组野外剖面出露完整, 发育丰富的、沉积特征保存良好的风暴沉积记录, 是开展风暴沉积研究的理想场所。该剖面不但发育大量的风暴沉积构造, 构成多样的风暴沉积序列组合类型^[14, 18-19], 而且保存了极为丰富的风暴成因的生物介壳富集层^[20-22], 形

收稿日期: 2025-05-06; 修回日期: 2025-09-22; 录用日期: 2025-10-10; 网络出版日期: 2025-10-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(42372142) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42372142]

成了甘溪组独特的风暴沉积序列。然而,前人的研究均以剖面上不连续的风暴沉积层作为研究对象,研究风暴沉积特征,建立风暴沉积序列和沉积模式^[18-19],缺乏对该剖面风暴沉积层的系统观察与描述,尤其对生物介壳富集层没有给予足够的重视。这导致对该剖面甘溪组发育的高频、高丰度风暴沉积的研究关注不够,更尚未开展高频风暴沉积强弱变化规律的研究。为此,本文以甘溪村两侧甘溪组出露良好的安乐村和鹰嘴岩一带2个野外剖面实测为基础,详细识别与描述剖面内发育的高频风暴沉积,分析风暴沉积强弱变化规律,进而探讨深时古风暴发育可能的成因机制。

1 区域地质背景

位于上扬子板块北西边缘的龙门山地区,北接秦岭褶皱带,西临巴颜喀拉褶皱带^[23]。加里东晚期为北东向裂隙槽,晚古生代沉积了一套从大陆边缘到深水盆地的不同类型沉积物。中生代以来,由于青藏高原隆升的影响,形成复杂的龙门山冲断带,前期地层遭受不同程度的破坏,但在江油—广元一带的唐王寨及仰天窝向斜中,泥盆系保存较好(图1a)。龙门山地区甘溪剖面位于四川省绵阳市北川羌族自治县桂溪乡甘溪村一带,交通位置便利(图1b)。按龙门山区泥盆系的分层标准,下泥盆统保存完整,自下而上可划分为平驿铺组、白柳坪组和甘溪组,各组间呈整合接触(表1)。甘溪组相当于侯鸿飞等^[17]实

测北川羌族自治县桂溪—沙窝子泥盆系剖面的B37—B65层,沉积于Emsian阶^[17],主要由灰绿、黄绿和褐灰色粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩和碳酸盐岩组成^[17],其中含大量由介壳组成的生物富集层^[20],间或出现生物礁^[18]。

龙门山地区泥盆系甘溪组以碎屑岩和碳酸盐岩混合沉积为主。按沉积特征,可以分为上下两段:下段主要发育碳酸盐岩混合陆棚沉积,以灰色泥岩夹丰富的生物富集层为特征,间或发育生物礁灰岩,在甘溪村北东向的安乐村一带出露良好(图2a);上段主要在甘溪村南西向的鹰嘴岩一带出露完整,下部的碳酸盐岩混合陆棚沉积,同样以灰色泥岩夹丰富的生物富集层为特征;上部的碎屑岩陆棚沉积以粉砂岩和细砂岩为主,夹少量的生物富集层(图2b)。

2 风暴沉积特征

2.1 风暴沉积的识别标志

由风暴驱动形成的风暴流,具有波浪和流动性质,是振荡运动和水平运动组合的联合水流,对海底沉积物具有侵蚀、掏蚀、颠选和悬浮颗粒的作用^[6],受其改造的沉积物中发育一系列独特的沉积构造、沉积序列等特征^[5],是恢复风暴沉积的重要标志。

2.1.1 风暴沉积构造

风暴流在形成、发展、衰退过程中形成的沉积构造包括侵蚀构造、层理构造等。

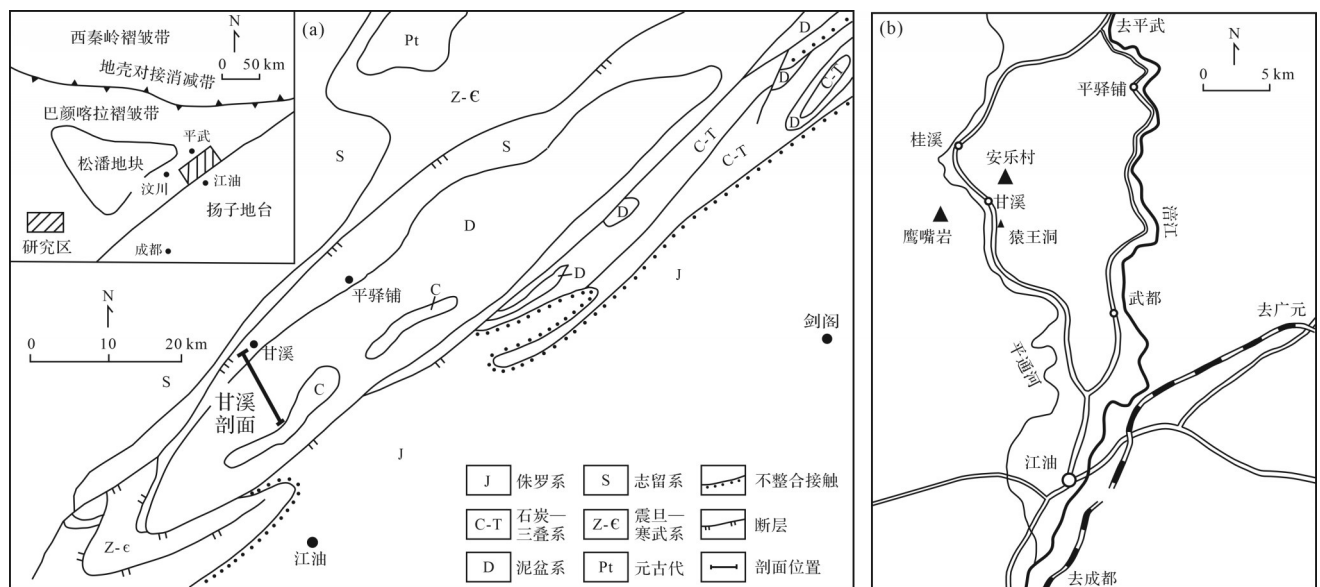


图1 龙门山地区泥盆系分区(a)与交通位置图(b)(据文献[23])

Fig.1 Geological structure (a) and transportation location maps (b) in the Longmenshan area (after reference [23])

表1 龙门山地区泥盆系地层简表(据文献[24])
Table 1 Devonian stratigraphy in the Longmenshan area (after reference [24])

系	统	阶	时代 /Ma	组
石炭系	下统	杜内阶	360.3	长滩子组
泥盆系	上统	法门阶	364.8	茅坝组
		弗拉斯阶		沙窝子组
		吉维特阶		土桥子组
		艾菲尔阶	369.2	观雾山组
	中统	埃姆斯阶	377.5	蓝宝石组
		布拉格阶—洛赫科夫阶	384.2	养马坝组
	下统	埃姆斯阶	399.5	甘溪组
		白柳坪组		
		平驿铺组		
	志留系			410.0

1) 风暴侵蚀构造

风暴侵蚀构造是由风暴流对海底沉积物进行冲刷、掏蚀和改造而形成突变的底界和底部侵蚀充填构造。甘溪剖面甘溪组中的风暴侵蚀构造包括冲刷面和渠模构造。渠模构造被认为是风暴沉积最特征和最重要的识别标志^[5],其构造形态常见有箱状(图3a)、沟状(图3b,c)和口袋状(图3d),其中箱状和沟状渠模规模为厘米级,宽5~15 cm、深4~8 cm,在横向上具有一定的延伸长度,形状变化较大,平直状或不规则状(图3c),渠模构造可单独出现(图3a~c),也可成排出现在同一风暴层的底部(图3e);而口袋状形如口袋(图3d),因此俗称为口袋构造,该类构造常单独出现于地层中,规模较箱状和沟状渠模大。箱状、沟状和口袋状渠模,在风暴层发育的地层中可以组合出现(图3f),显示多期风暴叠加的结果,渠模为风暴回流侵蚀所形成^[25]。

冲刷面构造同样发育于风暴沉积序列的底部,截切下伏岩层,波状起伏、形状不规则(图3g~i),冲刷面规模大小不等,较渠模要大得多,冲刷面构造和渠模可组合出现(图3g),相比较而言,甘溪组风暴冲

刷构造更为发育、常见。

2) 风暴浪构造

在甘溪剖面甘溪组中,风暴浪形成的构造类型主要包括粒序层理、丘状交错层理以及平行层理等类型的层理构造(图4)。(1)粒序层理:是由海百合和介壳等碎片组成的,具有向上变细的正粒序变化特征(图4a~c),粒序层理底部具冲刷面,多期叠加可形成较厚的生物碎屑富集层(图4c),表明了风暴多期沉积发育特征;(2)平行层理:位于粒序层理之上,具有平行纹层,由细粒的生物碎屑或砂质碎屑组成(图4b,d);(3)丘状交错层理:是在风暴浪的振荡作用下,在海底沉积物中形成纹层平缓、丘状起伏或洼状下凹的层理,纹层丘状隆起的为丘状交错层理,而纹层下凹的为洼状交错层理。丘状交错层理可单独发育于砂岩中,其波长5~20 cm、波高5~10 cm,规模呈分米级(图4e,f);也可与粒序层理和平行层理构造风暴序列组合,其波长10~50 cm、波高5~30 cm,规模呈分米—米级(图4d,g~i)。

2.1.2 生物介壳富集层

龙门山泥盆系生物介壳富集层以腕足动物介壳为主,赋存于泥质粉砂岩、钙质泥岩、粉砂质泥岩和页岩中(图5a~c),厚度小,一般小于10 cm(图5d),多介于1~5 cm,即1~2个扁平腕足壳体叠覆的厚度或双凸型腕足动物个体单瓣的厚度(图5e,f),而且多以凸面向上为主(图5g~i)。

生物介壳富集层的成因一般包括:(1)沉积成因;(2)生物成因;(3)成岩成因等3种类型^[26-27]。龙门山地区下泥盆统以腕足动物为主的生物介壳富集层成因模式包括风暴浪冲刷搬运型、风暴簸扬作用型、机会种暴增型和成岩压实型^[20,27],其中前3种类型与风暴作用有关,表明风暴活动控制了生物介壳富集层的形成。风暴浪冲刷搬运型生物介壳富集层是在风暴浪强烈冲刷和搬运下富集而成的厚度不等的介壳层,介壳的完整程度差别较大,保存较好的以单瓣为主(图5a~d)。风暴和簸扬作用型生物介壳富集层是在风暴振荡作用下,腕足动物的单瓣介壳凸面向上排列在层面上,主要为 *Acrospirifer*、*Howellella*、*Orientospirifer*、*Rostrospirifer* 等石燕类的单瓣介壳(图5e~g)。机会种暴增型生物富集层以壳小而薄、凸面向上且保存完整的 *Protochonetes* 富集为特征(图5h,i),其形成受最大风暴的影响、最佳埋藏条件很可能是最大风暴面的位置^[20]。

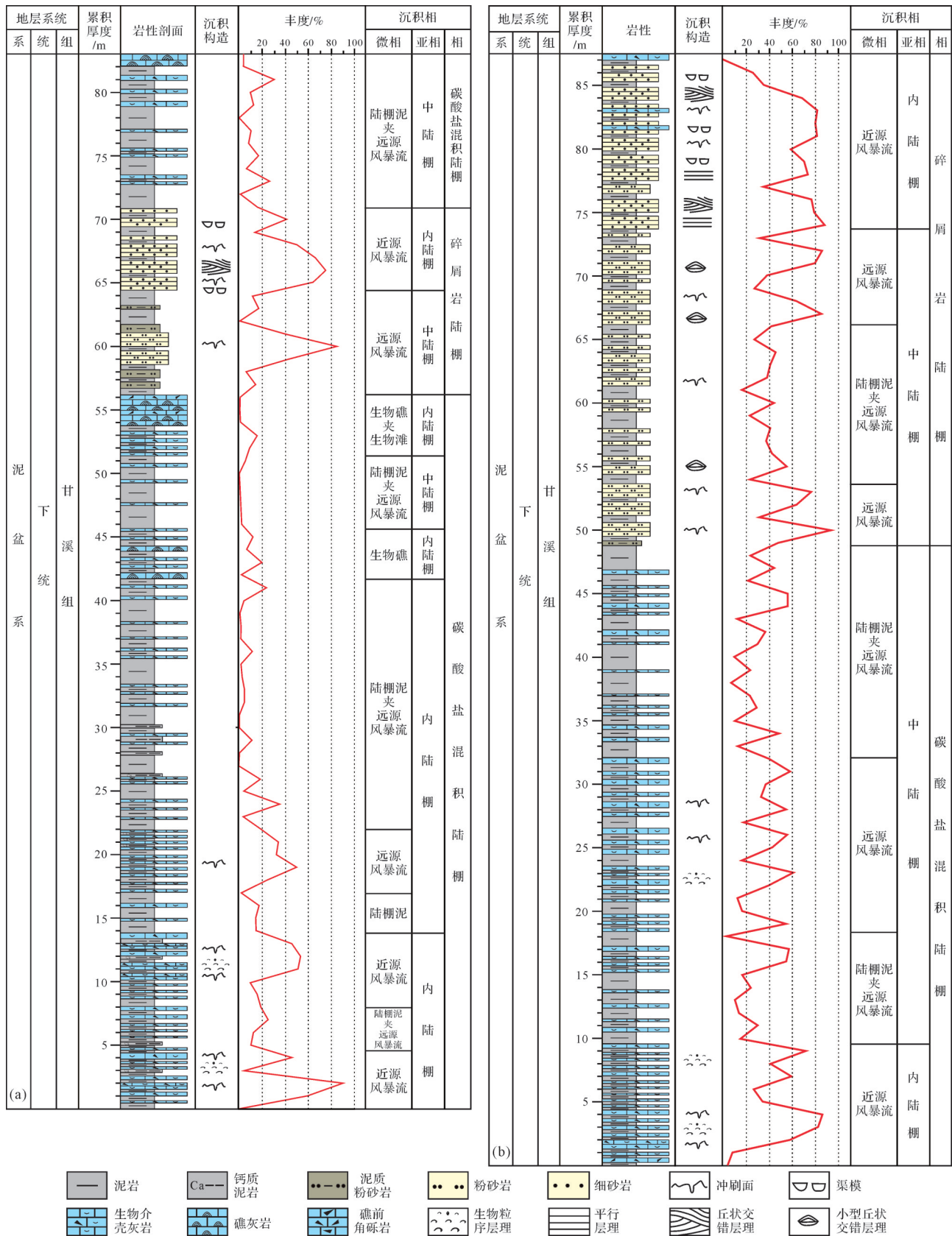


图2 龙门山地区泥盆系甘溪组沉积综合柱状图

(a)安乐村剖面;(b)鹰嘴岩剖面

Fig.2 Composite histogram of the deposition of the Devonian Ganxi Formation in the Longmenshan area

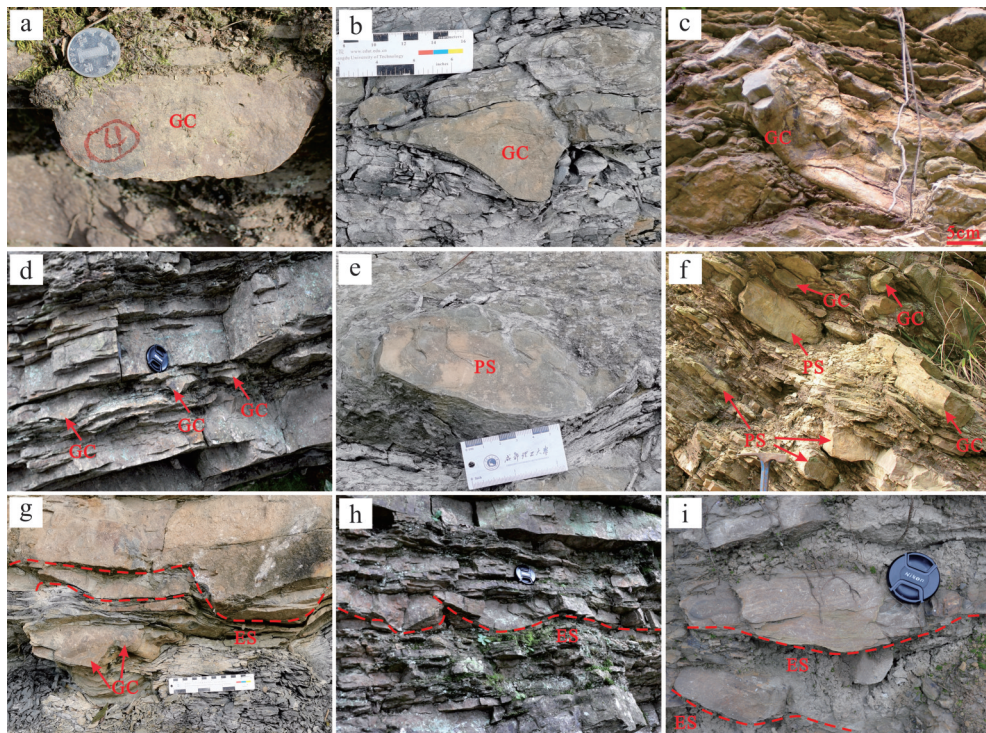


图3 龙门山地区北川泥盆系甘溪组风暴侵蚀构造野外照片

(a)箱状渠模,生物碎屑富集层,安乐村;(b)沟状渠模,由生物碎屑富集而成,鹰嘴岩;(c)沟状渠模,不规则延伸,石英细砂岩,安乐村;(d)口袋状渠模,生物碎屑富集层,夹于灰色泥岩中,鹰嘴岩;(e)沟状渠模,沿同一层面成排发育,石英细砂岩,安乐村;(f)箱状和口袋状渠模组合,多期风暴叠加,侵蚀构造发育,石英细砂岩,安乐村;(g)冲刷面构造,粒序层理,下部可见渠模构造,生物碎屑灰岩,鹰嘴岩;(h)冲刷面,石英细砂岩,安乐村;(i)冲刷面,砂岩侵蚀泥岩,两期冲刷叠加,安乐村;ES.冲刷面(erosion surface);GC.箱状渠模(gutter cast);PS.口袋构造(pocket structure)

Fig.3 Field photographs of storm erosion structures from the Devonian Ganxi Formation tempestite sediments in the Beichuan, Longmenshan area

2.2 风暴沉积序列类型与发育模式

2.2.1 风暴沉积序列类型划分

伴随着风暴演化,依次发育由冲刷底界面、粒序层理段(Sa)、平行层理段(Sb)、丘状交错层理段(Sc)、波状层理段(Sd)和泥岩段(Se)组成的完整风暴序列构成^[28]。事实上,由于风暴强度的影响以及后期风暴事件的改造,难以见到保存完好的风暴沉积序列。根据野外剖面的详细观察,在龙门山区甘溪组中识别出5种类型的风暴沉积序列。

(1) 序列类型 I:至少由两期底部具侵蚀冲刷构造的风暴沉积序列构成。序列最底部发育侵蚀面和渠模,向上依次发育由生物碎屑组成的粒序层理段和平行层理段,或者仅发育丘状交错层理段;上覆叠加后一期风暴侵蚀形成的冲刷面和粒序层理段(图6a)。该序列类型多以米级规模为主,主要沉积于甘溪组的上部。该风暴序列中的生物介壳富集层的成因为风暴浪冲刷搬运型。

(2) 序列类型 II:序列最底部也具有冲刷面,下

部是由海百合和腕足类化石碎片组成的粒序层理段,向上依次发育平行层理、丘状交错层理段和泥岩段(图6b)。序列上部的泥岩段,是风暴间歇期正常沉积的产物。序列规模属分米级别,主要发育于甘溪组的中下部和上部。该风暴序列中的生物介壳富集层的成因为风暴浪冲刷搬运型。

(3) 序列类型 III:最底部具有冲刷面和渠模,发育以生物碎屑为主的平行层理段和丘状交错层理段,最上部为泥岩段(图6c);也是仅由腕足介壳组成的富集层段,因腕足介壳保存相对完整,富集层段内纹层不显,但顶部常呈丘状形态(图6d)。序列规模中等,属分米级,主要发育于甘溪组的中部。该风暴序列中的生物介壳富集层的成因为风暴和簸扬作用型。

(4) 序列类型 IV:主要为厘米级的风暴沉积序列,可层状展布,底部具有冲刷面,而顶部常具丘状特征(图6e);也可断续层状展布,呈孤立的渠模或透镜状丘状交错层理段(图6e),主要发育于甘溪组的中部。

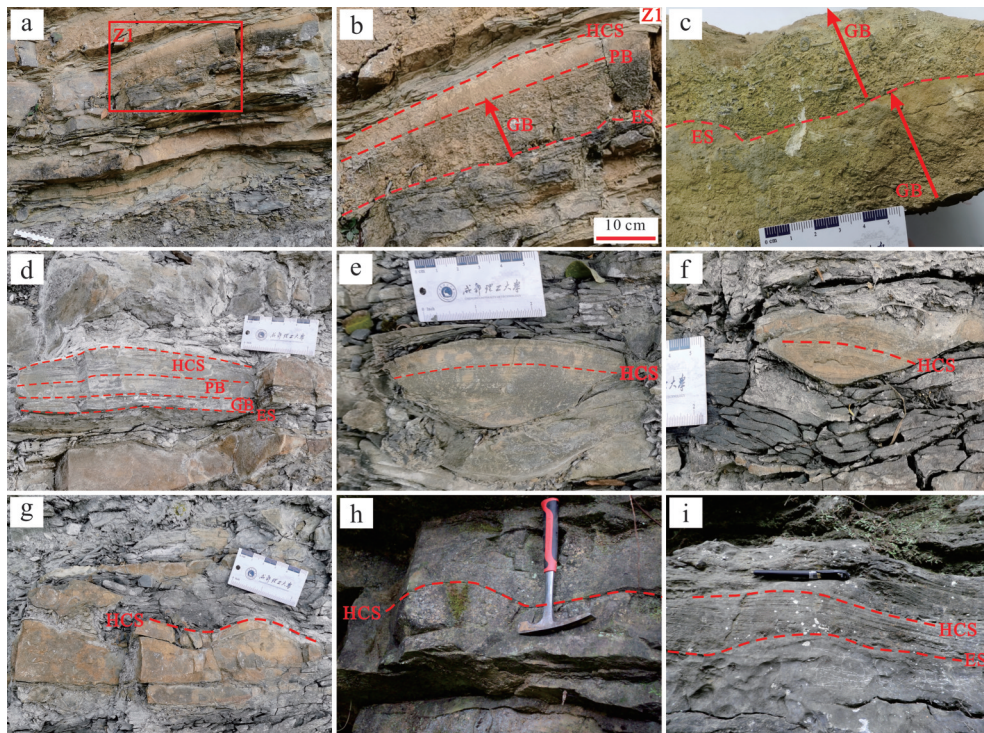


图4 龙门山地区北川泥盆系甘溪组风暴浪构造野外照片

(a)粒序层理,红色箭头指示其为正粒序,由海百合和介壳碎片组成,鹰嘴岩;(b)粒序层理,图(a)中Z1图框的放大;(c)小型风暴序列层,由海百合茎碎片和腕足类化石组成粒序层(红色箭头处),粒序层底部为冲刷面构造,粒序层理之上依次为平行层理和丘状交错层理,鹰嘴岩;(d)小型丘状交错层理,丘状交错层理纹层清晰可见,粉砂岩,鹰嘴岩;(e)小型风暴序列层,由底冲刷面、平行层理和丘状交错层理组成,鹰嘴岩;(f)小型丘状交错层理,丘状交错层理纹层清晰可见,底部具冲刷构造,鹰嘴岩;(g)小型丘状交错层理和洼状交错层理,生物碎屑灰岩,鹰嘴岩;(h)小型丘状交错层理和洼状交错层理,砂质生物碎屑灰岩,安乐村;(i)中型丘状交错层理和洼状交错层理,砂质生物碎屑灰岩,安乐村;ES.冲刷面(erosion surface);GB.粒序层理(graded bedding);HCS.丘状交错层理(hummocky cross-stratification);PB.平行层理(parallel bedding)

Fig.4 Field photographs of storm wave structures from the Devonian Ganxi Formation tempestitute sediments in the Beichuan, Longmenshan area

(5) 序列类型 V: 主要为厘米级的完整介壳富集层,在风暴振荡作用下,腕足动物的单瓣介壳凸面向上排列在层面上(图 6f)。机会种暴增的 *Protochonetes* 富集层,则是最大风暴浪基面的指示^[20],主要发育于甘溪组的中部。

2.2.2 风暴沉积序列发育模式

基于风暴沉积序列类型的分析,建立了龙门山地区北川泥盆系甘溪组不同风暴沉积序列类型的展布模式(图 7)。甘溪组中风暴沉积序列类型 I,由多期风暴侵蚀叠加沉积组成,缺乏风暴减弱期的波状层理或平静期的泥岩段沉积,反映风暴能量强且频繁发育的特点,形成于风暴较强、靠近滨岸带的内陆棚最上部的环境。保存完整风暴沉积序列的类型 II,风暴侵蚀构造发育,粒序层理段中生物碎屑的粒度较粗,这些特征均表明其形成于内陆棚中部的环境,反映风暴较为频繁但存在一段时间的间歇,能量较强但没有对早期的风暴沉积序列造成侵蚀。序列

类型 III: 发育小型的冲刷面和渠模,丘状交错层理规模较小,起伏幅度也较小,腕足介壳保存相对完整,反映其形成于风暴能量较弱的内陆棚下部的环境。序列类型 IV: 厘米级的风暴沉积序列,断续的展布特征和孤立的渠模或透镜状丘状交错层理段,应该是水体较深的中陆棚环境中微弱风暴作用的结果。序列类型 V: 单瓣腕足动物的介壳层,是中陆棚风暴振荡作用的结果;壳小而薄、凸面向上且保存完整的 *Protochonetes* 富集层则是水体较深的最大风暴浪基面附近的外陆棚沉积环境的指示。

3 古风暴活动频率曲线的建立

古风暴沉积特征是古风暴的忠实记录,是古风暴识别、变化曲线恢复的首选^[29]。每米地层中风暴沉积层数、风暴沉积丰度和权重丰度(岩性权重)3种风暴近似性参数风暴频率变化曲线,是地层中风暴活

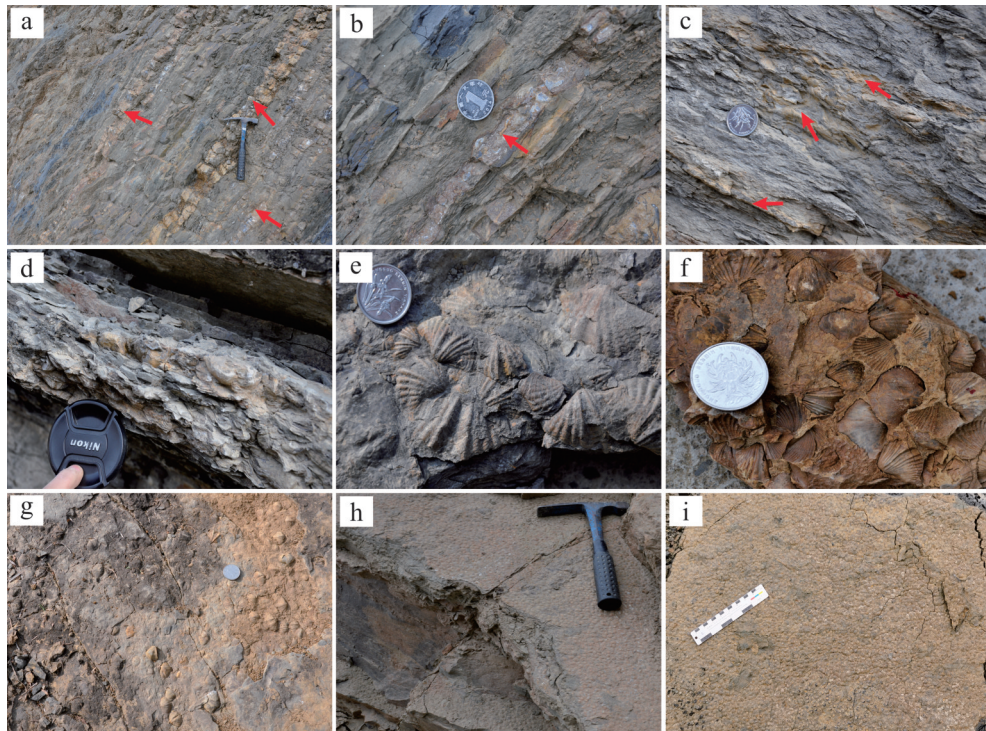


图5 龙门山地区北川泥盆系甘溪组生物富集层野外照片

(a)生物介壳富集层,红色箭头处,安乐村;(b)生物介壳富集层,底部具冲刷面,上部具丘状交错层理,红色箭头处,安乐村;(c)生物介壳富集层,红色箭头处,以腕足动物个体的单瓣为主,鹰嘴岩;(d)生物介壳富集层,红色箭头处,以腕足动物个体的单瓣为主,鹰嘴岩;(e)*Howellella*个体的单瓣,凸面向上,鹰嘴岩;(f)*Orientalospirifer*个体的单瓣,凸面向上,安乐村;(g)*Rostrospirifer*个体的单瓣,凸面向上,鹰嘴岩;(h)*Protochonetes*个体的单瓣,凸面向上,安乐村;(i)*Protochonetes*个体的单瓣,凸面向上,鹰嘴岩

Fig.5 Field photographs of skeletal concentrations from the Devonian Ganxi Formation tempestite sediments in the Beichuan, Longmenshan area

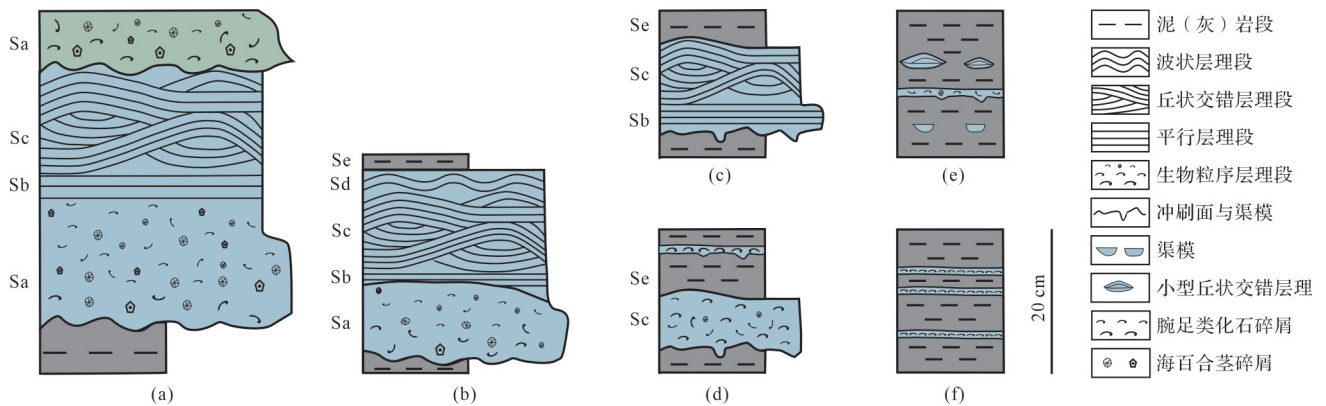


图6 龙门山地区北川泥盆系甘溪组风暴沉积序列类型

Fig.6 Types of storm deposit sequences of the Devonian Ganxi Formation in the Beichuan, Longmenshan area

动频率和强度变化的客观反映,也是进行风暴沉积强弱变化规律分析、成因机制探讨行之有效的指标^[29-30]。

本文以系统观察和描述下泥盆统甘溪组风暴沉积类型为基础,在野外露头中重点对反映风暴强弱变化的风暴沉积参数进行详细描述,据此建立风暴

活动频率曲线:(1)风暴序列类型与序列厚度的确定:以建立的风暴序列类型为基础,详细描述与测量风暴沉积序列的厚度、序列构成类型、序列岩性、沉积构造和古生物等特征变化;(2)风暴沉积丰度的测量:依次按照单位地层(每米为单位)风暴沉积层数(风暴频率、风暴沉积厚度比例、风暴沉积比重)等参

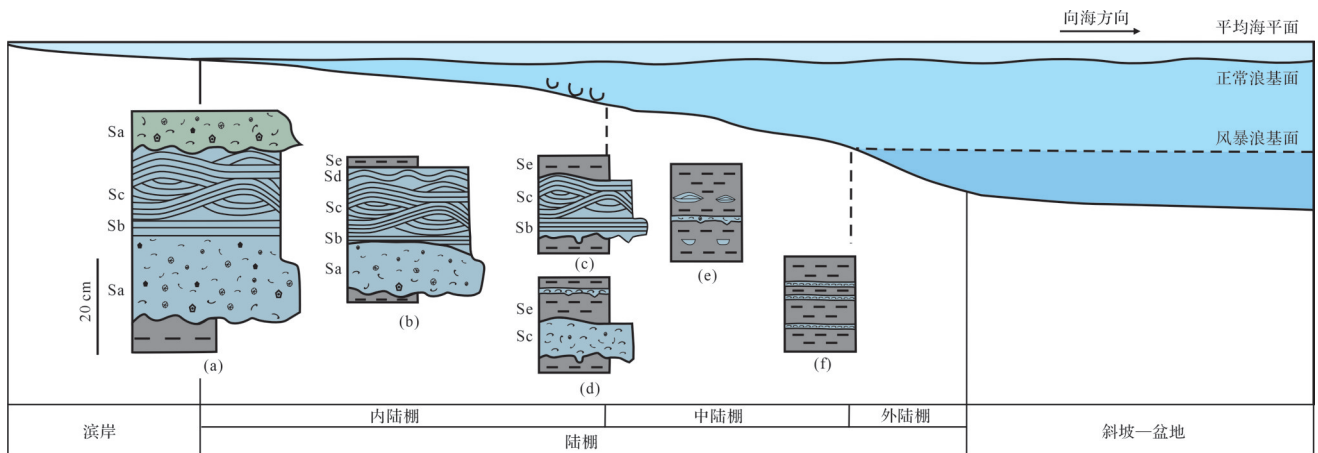


图7 龙门山地区北川泥盆系甘溪组风暴沉积序列类型分布模式(图例见图6)

Fig.7 Distribution models of storm deposit sequences type of the Devonian Ganxi Formation in the Beichuan, Longmenshan area

数,进行系统测量。具体做法如图8:图中1 m为单位的泥岩地层中夹9层中层状的粉砂岩,层间夹厚度不等的泥岩层,砂岩底部具冲刷面构造,延伸较短,为泥质陆棚中的风暴沉积砂岩,据此分析其为9期风暴事件,进而对该地层单元中的9期风暴序列类型进行描述,并测量序列厚度,则风暴丰度=(风暴序列累积厚度/1 m地层间隔)×100%,求取的数据即为风暴丰度。

根据上述统计和处理方法,建立了甘溪组风暴沉积发育地层的风暴丰度曲线(图9)。从图中可以看出,风暴丰度大的位置,风暴的发育较强;反之,风暴丰度小的位置,风暴的发育相对较弱。

4 高频风暴沉积驱动机制

4.1 天文轨道旋回的识别

研究中对风暴丰度曲线进行插值重新采样后,利用Matlab软件开发的Acycle程序^[31]进行了35% Lowess(局部加权回归散点平滑法)去趋势处理,目的是去除长期趋势,使得数据在零平均值左右震荡,避免低频信号突变到高频信号。将处理后的数据进行多窗口频率MTM(Multi-Taper Method)和演化图谱分析,生成频谱曲线图(图10),纵坐标表示频谱的功率大小,功率越大代表该频率在旋回中越重要,信号强烈,置信度越高。其高点与曲线的主

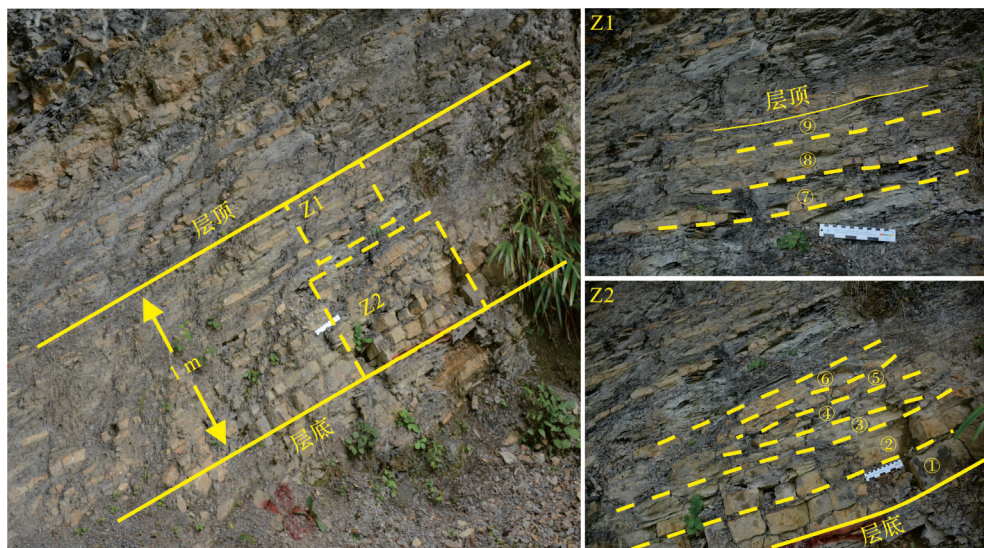


图8 龙门山地区北川泥盆系甘溪组风暴事件频率与丰度识别

Fig.8 Field photographs of frequency of storm events and storm abundance from the Ganxi Formation tempestite sediments in the Beichuan, Longmenshan area

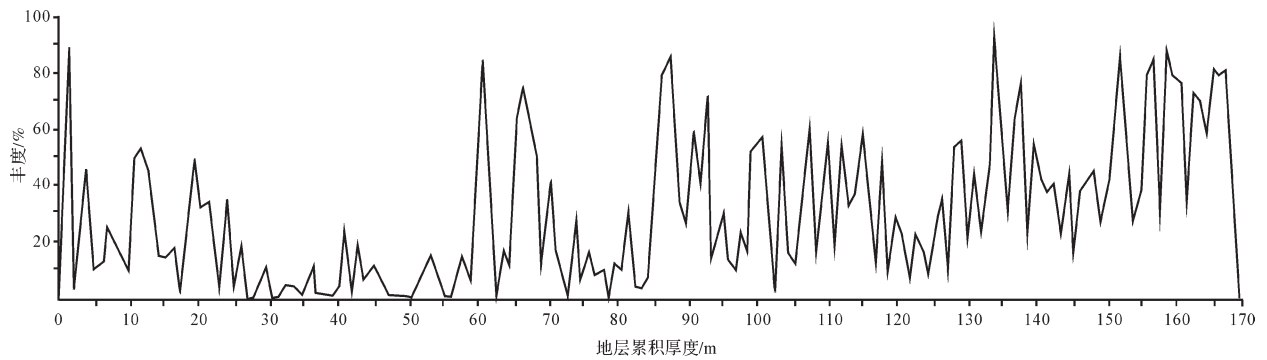


图9 龙门山地区北川泥盆系甘溪组风暴丰度曲线图

Fig.9 Storm abundance curve from the Devonian Ganxi Formation tempestite sediments in the Beichuan, Longmenshan area

频相对应,据此可以求出该段地层相应的旋回厚度。

选取风暴丰度曲线频谱分析得到的主频能量置信度在95%以上的点分别有:0.070 6、0.095 7、0.287 1、0.371 4、0.515 0、0.692 7(图10a),转换为旋回厚度依次为:14.16 m、10.45 m、3.48 m、2.69 m、1.94 m和1.44 m,该组旋回厚度比值依次为1:0.737 9:0.246 0:0.190 1:0.137 1:0.102 0,其比值与泥盆系偏心率短

周期130 ka和100 ka、斜率短周期31.6 ka、岁差周期21.1 ka和17.4 ka之间的比值为1:0.769 2:0.243 1:0.162 3:0.133 8^[32]均在一定的误差范围内(<10%)^[33],说明二者之间存在很好的对应关系。尤其是130 ka和100 ka偏心率短周期能量最强,而且在谱分析图中,其自下而上均连续发育(图10b),因此,气候轨道旋回的周期变化可能是甘溪组高频风暴沉积发育的主要控制因素。

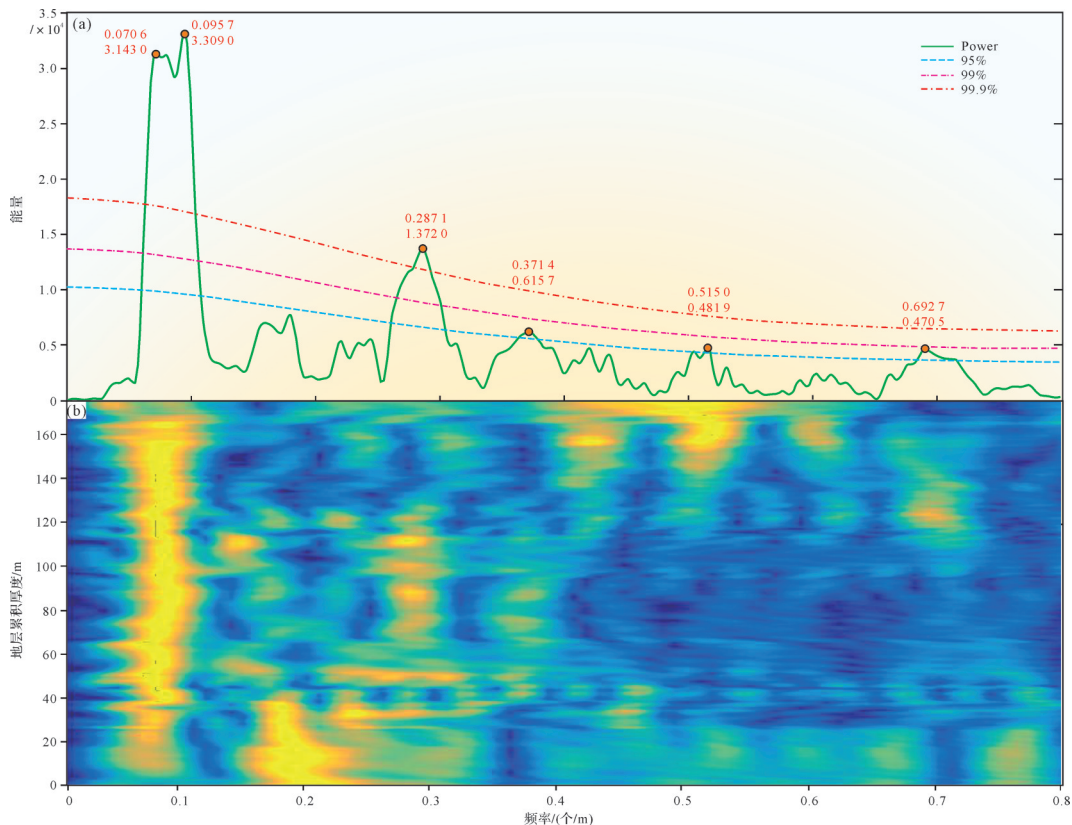


图10 龙门山区北川泥盆系甘溪组风暴丰度频谱分析图

(a)MTM分析图;(b)演化谱分析图

Fig.10 Spectrum analysis diagram of the storm abundance curve from the Devonian Ganxi Formation tempestite sediments in the Beichuan, Longmenshan area

事实上,风暴成因受到地球轨道驱动力的影响^[30],在地质历史时期有众多实例。例如:加拿大 Anticosti 晚奥陶—早志留世碳酸盐岩的高频风暴沉积受 400 kyr 和 100 kyr 的天文轨道旋回的偏心率控制^[29,34];西班牙西北部 Iberian 盆地晚侏罗世风暴主导的碳酸盐岩缓坡米级序列受控于 20 kyr、100 kyr 和 400 kyr 米兰科维奇旋回^[35]。尽管还需要更加深入地探究天文轨道驱动的气候变化与风暴沉积之间的耦合关系,但是 100 ka 的偏心率周期应该是引起泥盆系甘溪组气候变化和风暴频率、风暴强度变化的主要轨道周期。

4.2 天文轨道旋回与风暴耦合关系

天文轨道旋回是解释第四纪气候变迁的重要理论依据,依据米兰科维奇旋回理论,地球轨道三要素(偏心率、地轴倾角和岁差)自然变动引起太阳辐射量的变化,天文辐射总量增加,温度升高,导致高纬度(北纬 65°)全球冰川消融,反之,冰川增长^[36]。天文辐射总量增加,气温升高;气候变暖促使风暴活动

进一步增强、风暴活动增强会促进气候变暖^[37-38]。米氏旋回理论为解释地球轨道三要素与风暴活动强弱变化提供了重要的理论依据。

龙门山地区泥盆系甘溪组~100 kyr 短偏心率信号在风暴地层中稳定存在,而且从整体上来看,风暴频率较高或者发生风暴次数较多的时期,正好对应了高偏心率的滤波信号,其预示着天文轨道旋回与风暴之间存在成因上的耦合关系。

风暴是热带气旋活动的直接结果,在诸多热带气旋的物理影响因素中,热带辐合带(Intertropical Convergence Zone, ITCZ)通过提供热带气旋生成所需的涡度和湿度等有利环境来影响热带气旋活动^[39-40]。ITCZ 季节性移动跟随日照量的最大值,冬至和夏至日到达南半球或者北半球~10°位置,春分和秋分两次穿过赤道^[41-42]。基于现代季风环流模拟的泥盆纪 ITCZ 位置图(图 11a, b),在南半球的夏季 ITCZ 带位于南半球且穿过南美大陆、华南板块和冈瓦纳大陆北部,冬天回到北半球^[43]。泥盆系热带区域的降水也

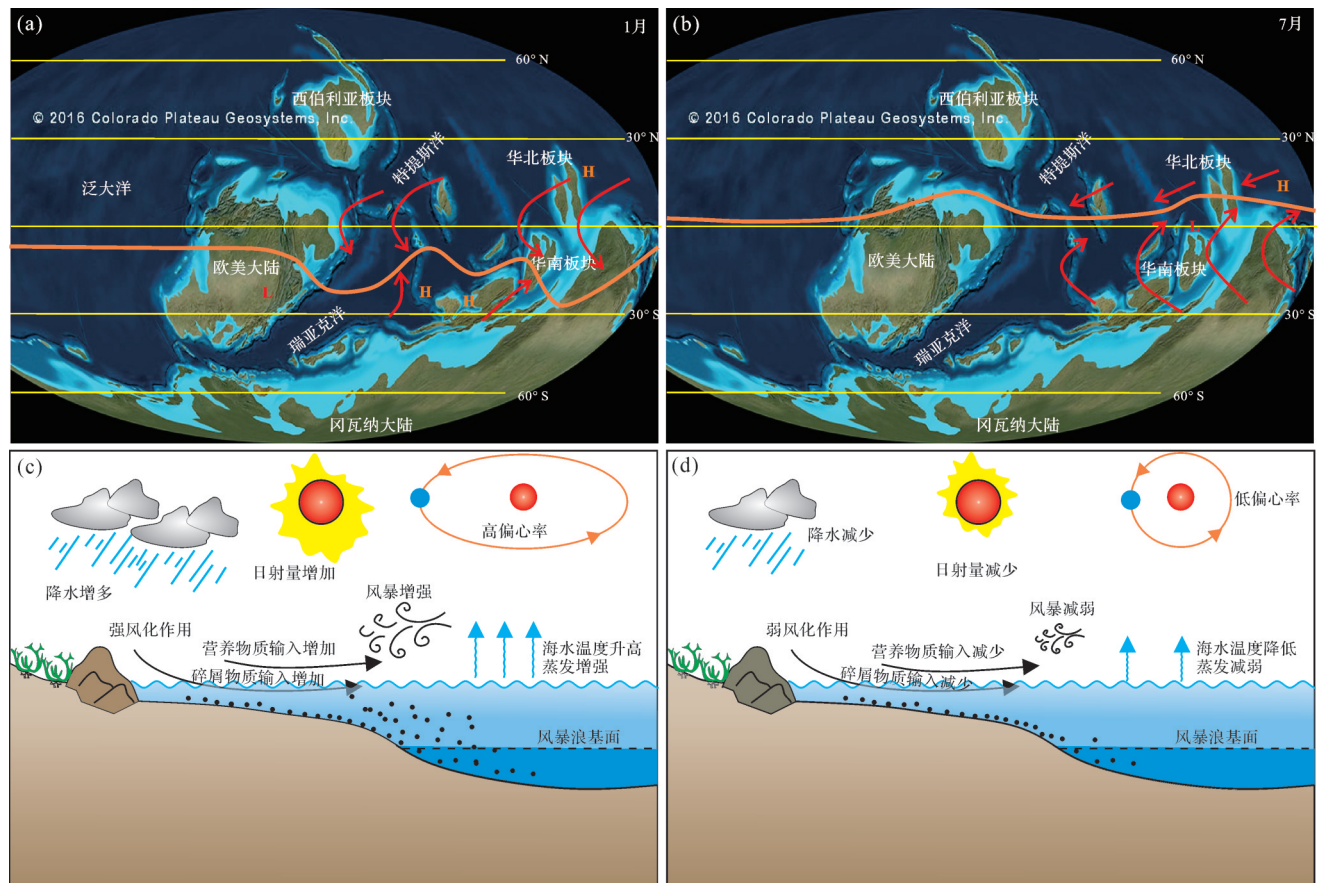


图 11 泥盆系偏心率与风暴耦合关系示意图

(a) 冬季热带辐合带(ITCZ)位置与信季风方向^[43]; (b) 夏季热带辐合带(ITCZ)与信风方向^[43]; (c) 高偏心率气候变化示意图; (d) 低偏心率气候变化示意图; 橙色线为 ITCZ; 红色箭头为信风; L. 低压带; H. 高压带

Fig.11 Schematic diagram of the coupling relationship between the Devonian eccentricity and storms

体现出了季节性变化,跟随ITCZ季节性变化的降水强度也随偏心率的增大而增大^[42]。

在高偏心率时期,地球接受的太阳辐射量增大^[44],赤道附近日照量增加,太阳直射地表升温,导致陆地表面暖空气流的上升流向两极,形成低压单元推动ITCZ移动,低压带与高压带之间的作用力导致了季风环流的增强^[43],大量水汽被输送到大陆造成了降水量的增多,更多的降水导致了地表径流增加,进而导致大陆向海洋输送的碎屑物质增加(图11c,d)。同时,海表和地表的温度升高,为热带气旋的形成提供了热量,海水的蒸发量增加,有助于热带气旋发展,更加频繁且更加强烈的风暴也会在陆棚环境下保留更多的风暴记录^[45]。

5 结论

(1) 龙门山地区泥盆系甘溪组发育两类风暴沉积标志:风暴沉积构造和生物富集层,前者包括风暴侵蚀构造和风暴浪构造两种类型,而后者包括风暴浪冲刷搬运型、风暴和簸扬作用型、机会种暴增型3种类型。据此建立了能够客观反映风暴活动变化频率和强度的风暴丰度曲线作为反映风暴活动强弱的替代指标。

(2) 龙门山地区泥盆系甘溪组中发育100 kyr的偏心率周期,是引起泥盆系甘溪组气候变化和风暴频率、风暴强度变化的主要轨道周期。

(3) 风暴活动受短偏心率100 kyr周期的影响,高偏心率所带来的日照量推动热带辐合带(ITCZ)的移动,进而引起了季风环流和降水的改变,地处华南板块的泥盆系龙门山地区正好处在热带辐合带(ITCZ)的路径,高偏心率时期升温所提供的热量、海水蒸发量也促进了热带气旋的形成,进而促成了风暴的高频率发生。

参考文献(References)

- [1] Ager D V. Storm deposits in the Jurassic of the Moroccan High Atlas[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1974, 15(2): 83-93.
- [2] Kelling G, Mullin P R. Graded limestones and limestone-quartzite couplets: Possible storm-deposits from the Moroccan Carboniferous[J]. *Sedimentary Geology*, 1975, 13(3): 161-190.
- [3] Kumar N, Sanders J E. Characteristics of shoreface storm deposits: Modern and ancient examples[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1976, 46(1): 145-162.
- [4] Aigner T. Schill-tempestite im Oberen Muschelkalk (Trias, SW-Deutschland)[J]. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen*, 1979, 157(3): 326-343.
- [5] Aigner T. Calcareous tempestites: Storm-dominated stratification in Upper Muschelkalk limestones (Middle Trias, SW-Germany) [M]//Einsele G, Seilacher A. *Cyclic and event stratification*. Berlin Heidelberg: Springer, 1982: 180-198.
- [6] 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, 60(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, 60(1): 55-67.]
- [7] 孟祥化,葛铭. 中朝板块层序·事件·演化:天文周期的沉积响应和意义[M]. 北京:科学出版社,2004:274-282. [Meng Xianghua, Ge Ming. *Sequences, events and evolution of the Sino-Korean plate*[M]. Beijing: Science Press, 2004: 274-282.]
- [8] 景宇轩,刘建波,闫振,等. 利用风暴沉积类型恢复海平面变化:以北京西山下苇甸剖面寒武纪中晚期风暴沉积为例[J]. *古地理学报*, 2015, 17(5): 653-668. [Jing Yuxuan, Liu Jianbo, Yan Zhen, et al. Reconstructing sea-level changes from types of storm deposits: An example of the Middle and Late Cambrian at Xiaweidian section of western Hills, Beijing[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 17(5): 653-668.]
- [9] Simon L, Goddérís Y, Buggisch W, et al. Modeling the carbon and sulfur isotope compositions of marine sediments: Climate evolution during the Devonian[J]. *Chemical Geology*, 2007, 246(1/2): 19-38.
- [10] 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(3): 589-600. [Song Jinmin, Yang Di, Li Pengwei, et al. Development characteristics and geological significance of carbonate tempestites in China[J]. *Geoscience*, 2012, 26(3): 589-600.]
- [11] 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(3): 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(3): 69-73.]
- [12] 钟建华,倪良田,孙宁亮,等. 鄂尔多斯盆地东胜东三叠系—侏罗系湖泊风暴沉积的发现及其意义[J]. *沉积学报*, 2021, 39(2): 353-373. [Zhong Jianhua, Ni Liangtian, Sun Ningliang, et al. Discovery and significance of lake storm deposits in the Triassic-Jurassic of eastern Dongsheng, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(2): 353-373.]
- [13] 李磊,李凤杰,申玉山,等. 柴达木盆地新近纪湖相风暴岩的发现及其对青藏高原隆升的地质意义[J]. *地层学杂志*, 2013, 37(1): 48-53. [Li Lei, Li Fengjie, Shen Yushan, et al. The discovery of Neogene lacustrine tempestites in the Qaidam Basin and its geological significance for the uplift of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2013, 37(1): 48-53.]

- [14] 荆锡贵,陈政安,李凤杰,等. 龙门山地区中泥盆统养马坝组风暴沉积中的遗迹化石及其环境意义[J]. 沉积学报, 2019, 37(4): 749-757. [Jing Xigui, Chen Zheng'an, Li Fengjie, et al. Ichnofossils and their environmental significance in storm deposit from the Middle Devonian Yangmaba Formation in Longmenshan area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(4): 749-757.]
- [15] 倪子尧,徐绪东,陈政安,等. 龙门山地区北川石沟里泥盆系养马坝组铁质鲕粒沉积及其环境分析[J]. 沉积学报, 2019, 37(4): 702-712. [Ni Ziyao, Xu Xudong, Chen Zheng'an, et al. The oolitic iron deposits and environmental analysis of the Devonian Yangmaba Formation in the Shigouli profile, Beichuan county, Longmenshan area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(4): 702-712.]
- [16] 胡斌,王瑜,宋慧波,等. 豫西北及晋东南地区下二叠统太原组风暴沉积及伴生遗迹化石特征[J]. 中国煤炭地质, 2014, 26(1): 1-9. [Hu Bin, Wang Yu, Song Huibo, et al. Lower Permian Taiyuan Formation storm deposit and associated ichnofossils characteristics in northwestern Henan and southeastern Shanxi area[J]. *Coal Geology of China*, 2014, 26(1): 1-9.]
- [17] 中国地质科学院成都地质矿产研究所,中国地质科学院地质研究所. 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, 1988: 1-100. [Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, The Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences. Devonian stratigraphy, paleontology and sedimentary facies of Longmenshan, Sichuan[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 1-100.]
- [18] 郑荣才,周刚,董霞,等. 龙门山甘溪组谢家湾段混积相和混积层序地层学特征[J]. 沉积学报, 2010, 28(1): 33-41. [Zheng Rongcai, Zhou Gang, Dong Xia, et al. The characteristics of hybrid facies and hybrid sequence of Xiejiawan member of Ganxi Formation in the Longmenshan area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(1): 33-41.]
- [19] 许安涛,李凤杰,刘奎,等. 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, 2018, 45(5): 1049-1061. [Xu Antao, Li Fengjie, Liu Kui, et al. The characteristics and sedimentary model of storm deposits in the Lower Devonian strata of Beichuan[J]. *Geology in China*, 2018, 45(5): 1049-1061.]
- [20] 陈源仁. 四川龙门山地区下泥盆统以腕足动物为主的介壳毯之成因模式[M]//刘文均,陈源仁,郑荣才,等. 层序地层. 成都:成都科技大学出版社, 1996: 117-127. [Chen Yuanren. Genetic models of brachiopod pavement Lower Devonian, Longmenshan, Sichuan, China[M]//Liu Wenjun, Chen Yuanren, Zheng Rongcai. Sequence stratification. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1996: 117-127.]
- [21] 李凤杰,荆锡贵,张昊,等. 龙门山甘溪泥盆系生物骨架富集层成因机制[J]. 地学前缘, 2017, 24(6): 322-332. [Li Fengjie, Jing Xigui, Zhang Hao, et al. Genetic mechanism of Devonian skeletal concentrations in Longmenshan area, Sichuan, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(6): 322-332.]
- [22] Li F J, Qu X L, Du L C, et al. Genetic processes and environmental significance of Lower Devonian brachiopod shell concentrations in Longmenshan area, Sichuan, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 115: 393-403.
- [23] 刘文均,陈源仁,郑荣才,等. 龙门山地区泥盆纪层序地层划分、对比和海平面相对变化[M]//刘文均,陈源仁,郑荣才,等. 层序地层. 成都:成都科技大学出版社, 1996: 1-11. [Liu Wenjun, Chen Yuanren, Zheng Rongcai, et al. Devonian sequence stratigraphy and relative sea-level changes in Longmenshan area, Sichuan[M]//Liu Wenjun, Chen Yuanren, Zheng Rongcai, et al. Sequence stratigraphy. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1996: 1-11.]
- [24] 陈源仁,王洪峰. 四川龙门山地区泥盆纪综合地层格架[M]//刘文均,陈源仁,郑荣才,等. 层序地层. 成都:成都科技大学出版社, 1996: 12-29. [Chen Yuanren, Wang Hongfeng. The comprehensive stratigraphic framework of Devonian in Longmenshan area, Sichuan, China[M]//Liu Wenjun, Chen Yuanren, Zheng Rongcai, et al. Sequence stratigraphy. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1996: 12-29.]
- [25] Myrow P M. Pot and gutter casts from the Chapel Island Formation, Southeast Newfoundland[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1992, 62(6): 992-1007.
- [26] Kidwell S M, Fuersich F T, Aigner T. Conceptual framework for the analysis and classification of fossil concentrations[J]. *Palaios*, 1986, 1(3): 228-238.
- [27] Fuersich F T, Pandey D K. Genesis and environmental significance of Upper Cretaceous shell concentrations from the Cauvery Basin, southern India[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 145(1/2/3): 119-139.
- [28] Duke W L, Arnott R W C, Cheel R J. Shelf sandstones and hummocky cross-stratification: New insights on a stormy debate[J]. *Geology*, 1991, 19(6): 625-628.
- [29] Long D G F. Tempestite frequency curves: A key to Late Ordovician and Early Silurian subsidence, sea-level change, and orbital forcing in the Anticosti foreland basin, Quebec, Canada[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2007, 44(3): 413-431.
- [30] Li F J, Chen Z A, Ogg J G, et al. Orbital forcing of late Early Devonian storm events on a mixed carbonate-siliciclastic shelf, Longmenshan area, Sichuan province, China[J]. *GSA Bulletin*, 2022, 134(11/12): 2891-2908.
- [31] Li M S, Hinnov L, Kump L. *Acycle*: Time-series analysis software for paleoclimate research and education[J]. *Computers & Geosciences*, 2019, 127: 12-22.
- [32] Berger A, Loutre M F, Laskar J. Stability of the astronomical frequencies over the Earth's history for paleoclimate studies[J]. *Science*, 1992, 255(5044): 560-566.
- [33] 金之钧,范国章,刘国臣. 一种地层精细定年的新方法[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 1999, 24(4): 379-382. [Jin Zhi-jun, Fan Guozhang, Liu Guochen. A new method for accurate

- dating of strata[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 1999, 24(4): 379-382.]
- [34] Sami T, Desrochers A. Episodic sedimentation on an early Silurian, storm-dominated carbonate ramp, Becscie and Merrimack Formations, Anticosti Island, Canada[J]. *Sedimentology*, 1992, 39(3): 355-381.
- [35] Colombié C, Bádenas B, Aurell M, et al. Feature and duration of metre-scale sequences in a storm-dominated carbonate ramp setting (Kimmeridgian, northeastern Spain)[J]. *Sedimentary Geology*, 2014, 312: 94-108.
- [36] 吴智勇. 米兰柯维奇韵律层及其年代地层意义[J]. *地层学杂志*, 1995, 19(2): 156-160. [Wu Zhiyong. Rhythmites with Milankovitch periods and their chronostratigraphic implications [J]. *Journal of Stratigraphy*, 1995, 19(2): 156-160.]
- [37] Emanuel K A. The dependence of hurricane intensity on climate [J]. *Nature*, 1987, 326(6112): 483-485.
- [38] 廖淦标, 范代读. 全球变暖是否导致台风增强: 古风暴学研究进展与启示 [J]. *科学通报*, 2008, 53(13): 1489-1502. [Liao Ganbiao, Fan Daidu. Does global warming lead to the intensification of typhoons: Research progress and implications of paleoclimatology[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(13): 1489-1502.]
- [39] Elrick M, Witzke B. Orbital-scale glacio-eustasy in the Middle Devonian detected using oxygen isotopes of conodont apatite: Implications for long-term greenhouse-icehouse climatic transitions[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 445: 50-59.
- [40] 韩岩松, 姜伟, 肖玉雯, 等. 全球变化背景下热带气旋主要变化特征及影响因素[J]. *地球科学进展*, 2023, 38(5): 515-532. [Han Yansong, Jiang Wei, Xiao Yuwen, et al. Main change characteristics and influencing factors of tropical cyclones under the background of global change[J]. *Advances in Earth Science*, 2023, 38(5): 515-532.]
- [41] Waliser D E, Gautier C. A satellite-derived climatology of the ITCZ[J]. *Journal of Climate*, 1993, 6(11): 2162-2174.
- [42] Horton D E, Poulsen C J, Montañez I P, et al. Eccentricity-paced Late Paleozoic climate change[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 331-332: 150-161.
- [43] De Vleeschouwer D, Crucifix M, Bounceur N, et al. The impact of astronomical forcing on the Late Devonian greenhouse climate [J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 120: 65-80.
- [44] 吴怀春, 张世红, 冯庆来, 等. 旋回地层学理论基础、研究进展和展望[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2011, 36(3): 409-428. [Wu Huaichun, Zhang Shihong, Feng Qinglai, et al. Theoretical basis, research advancement and prospects of cyclostratigraphy[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2011, 36(3): 409-428.]
- [45] Kossin J P, Emanuel K A, Camargo S J. Past and projected changes in western North Pacific tropical cyclone exposure[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(16): 5725-5739.

Study on Sedimentary Characteristics and Genesis Mechanism of Deep-Time High Frequency Palaeo-Storms: An example from the Devonian Ganxi Formation in the Longmenshan area

LI FengJie^{1,2,3}, WANG Jia^{1,2}, CHEN ZhengAn⁴

1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. Key Laboratory of Deep-Time Geography and Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

4. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China

Abstract: [Objective] The Devonian Ganxi Formation in the Longmenshan area developed abundant storm deposition records, making it is an excellent location for studying the characteristics of paleo-storm deposition, but there is a lack of systematic research on the changing trend of high-frequency storm deposition, particularly on the possible genesis mechanism of deep-time paleo-storm development. [Methods] In this study, two field profiles, Anlecun and Yingzuiyan, in Ganxi village, Guixi town, Beichuan Qiang Autonomous County, Longmenshan area, which are well exposed in the Ganxi Formation, were selected for identifying and describing in detail the characteristics of high-frequency storm deposition developed within the sections. Storm frequency and abundance curves reflecting the frequency and intensity of changes in storm activities were established to analyze the changing pattern of storm deposition intensity. [Results] (1) Two types of storm depositional signatures were developed in the Devonian Ganxi Formation in the Longmenshan area: storm depositional structures and biological shell enrichment layers, with the former including storm erosion structures and wave structures, and the latter including three types: storm-wave scouring and transporting, storm and bumping, and opportunistic species explosion. (2) Spectral analysis of storm abundance curves suggests that the 100-kyr eccentricity cycle was developed in the storm deposits of the Devonian Ganxi Formation in the Longmenshan area. [Conclusions] (1) The 100-kyr eccentricity cycle is the main orbital cycle that caused climate variations and changes in storm frequency and intensity in the Devonian Ganxi Formation. (2) Storm activities were controlled by a short eccentricity cycle of 100 kyr, and the amount of sunshine brought by the high eccentricity promoted the movement of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ), affecting the monsoon circulation and precipitation changes. The Longmenshan area, which was located on the South China Plate, was in the path of the ITCZ during the Devonian, and the heat and evaporation of seawater provided by warming during the period of high eccentricity also promoted the formation of tropical cyclones, which in turn contributed to the occurrence of storms at a high frequency.

Key words: high frequency storm deposition; astronomical orbital cycle; genesis mechanism; Devonian; Longmenshan area