



移动阅读

王牧源, 牟传龙, 王秀平, 等, 2024. 川北旺苍地区奥陶系沉积特征与风暴沉积的发现[J]. 沉积与特提斯地质, 44(2): 311–325. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.04008

WANG M Y, MOU C L, WANG X P, et al., 2024. Characteristics of Ordovician sedimentation and the discovery of storm deposition in the Wangcang area, northern Sichuan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(2): 311–325. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.04008

川北旺苍地区奥陶系沉积特征与风暴沉积的发现

王牧源^{1,2}, 牟传龙^{1,2*}, 王秀平², 侯乾², 王启宇²

(1. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心(西南科技创新中心), 四川 成都 610218)

摘要: 为了厘清上扬子北缘奥陶系古地理格局与沉积环境, 在川北旺苍地区奥陶系沉积相研究基础上, 选择大两会剖面作为研究对象, 通过野外剖面实测与室内薄片的详细分析, 对旺苍地区奥陶系沉积相进行精细划分。结果表明, 大两会剖面奥陶系地层主要发育赵家坝组、西梁寺组、宝塔组、五峰组。赵家坝组与西梁寺组主要发育海岸相的潮坪亚相; 宝塔组主要发育浅海相的碳酸盐岩台地亚相; 五峰组主要发育浅海相的陆棚亚相, 并依次划分出多个次相。首次在西梁寺组潮坪亚相中发现风暴沉积, 风暴沉积构造主要包括底面侵蚀构造、砾屑层、粒序层理、平行层理、丘状交错层理等, 并识别出4种风暴沉积序列。因此, 上扬子北缘中奥陶纪处于海岸环境的低纬度飓风地带, 晚奥陶纪处于浅海环境。

关键词: 四川盆地; 奥陶系; 沉积特征; 沉积相; 风暴沉积

中图分类号: P534.42

文献标识码: A

Characteristics of Ordovician sedimentation and the discovery of storm deposition in the Wangcang area, northern Sichuan

WANG Muyuan^{1,2}, MOU Chuanlong^{1,2*}, WANG Xiuping², HOU Qian², WANG Qiyu²

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Chengdu Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 610218, China)

Abstract: To clarify the sedimentary pattern and environment of the Ordovician strata in the northern margin of the Upper Yangtze Block, the Dalianghui section was selected as the research profile. Combining the previous studies of the sedimentary facies of the Ordovician strata with detailed profile surveys and microscopic observations in the Wangcang area of the north Sichuan Basin, we conducted a fine division of these sedimentary facies of the Ordovician strata. Results show that the Dalianghui section can be divided into four formations, which are the Zhaojiaba, Xiliangsi, Baota, and Wufeng formations. The lithofacies of the Zhaojiaba and Xiliangsi formations feature tidal flat subfacies of coastal facies, while the Baota Formation is dominated by carbonate platform subfacies of neritic facies. The lithofacies of the Wufeng Formation feature shelf subfacies of neritic facies, which can be further divided into several suborder facies. In this study, storm sedimentary structures were first identified, which mainly consist of scouring-fill structures, storm-generated gravelstones, rip-up clasts, parallel bedding, graded bedding and hummocky cross-bedding. Four

收稿日期: 2022-09-12; 改回日期: 2023-03-10; 责任编辑: 黄春梅; 科学编辑: 杨平

作者简介: 王牧源(1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为沉积学与盆地分析。E-mail: 1305676751@qq.com

通讯作者: 牟传龙(1965—), 男, 研究员, 博士研究生导师, 主要从事沉积学(含古地理学)、油气地质研究。

E-mail: cdmchuanlong@163.com

资助项目: 川北地区震旦—下古生界标准剖面建立及沉积格局研究(XNS 勘研院 JS2021-076)

types of tempestite sequences were also identified. Therefore, it is suggested that the northern margin of the Upper Yangtze Block was located in the low-latitude hurricane zone of the coastal environment in the Early to Middle Ordovician, and changed into a shallow marine environment in the Late Ordovician.

Key words: Sichuan Basin; Ordovician; sedimentary features; sedimentary facies; storm deposits

0 引言

四川盆地下古生界油气勘探始于十九世纪六十年代中后期,奥陶系则是下古生界油气勘探的重要发展层位之一(Li et al., 2021; Dong et al., 2015)。油气埋深在 3 000 米以下,属于深层油气范畴(王世谦等, 2009)。前人在四川盆地川东南地区二叠系—三叠系,川中乐山—龙女寺古隆起地区震旦系—寒武系、川西和川西北地区二叠系—三叠系,已探明存在大型气田,表明四川盆地具有形成大型油气田的优越条件(徐世琦等, 2002; 李阳等, 2020; 徐世琦等, 2002; Yang et al., et al., 2021; Zhang et al., 2022)。前人对四川盆地及周缘地区奥陶纪古地理、储层、油气勘探等方面进行研究,认为川西北地区奥陶系油气勘探存在较大潜力(冯增昭等, 2001a, 2001b; 牟传龙等, 2016; 刘伟, 2017; 陈宗清等, 2010; 杨威等, 2012; Chen et al., 2019)。但盆地北缘奥陶系油气勘探至今无较大成果突破,因此,厘清盆地北缘沉积古地理格局基础工作将十分重要。

沉积相是油气勘探的重要基础(邓秀琴, 2011),前人对奥陶系的研究多数集中在晚奥陶五峰组“黑色页岩”沉积环境、构造格架(Xiao et al., 2021; 肖斌等, 2021)、油气勘探方向(Nie et al., 2022)及油气控制因素(Jin et al., 2018)等方面,但早—中奥陶世沉积相研究,对盆地北缘成果突破也有重要意义。晚奥陶世全球海平面上升,刘伟等(2017)认为扬子北缘宝塔组处于浅水陆棚环境,杨威等(2012)则认为晚奥陶世经历了从缓坡环境到深水盆地环境。通过野外剖面及钻井剖面考察,预测在川北旺苍—南江地区五峰组处于浅海环境,发育的碳质和硅质页岩具有很好的生烃潜力(牟传龙等, 2014; 孙小勇等, 2016)。早—中奥陶世受加里东构造运动影响,部分学者认为川北涪潭组(赵家坝组和西梁寺组)处于潮坪环境或滨岸环境(李皎等, 2015; 刘伟等, 2017),也有学者认为川北涪潭组处于浅水陆棚环境(胡华蕊等, 2019; 张殿伟等, 2020)。林良彪等(2017)运用野外剖面,通过应用沉积学及地球化学分析方法,认为川北地区赵家坝

组(涪潭组)为滨岸和局限台地交替出现的沉积环境。产生上述分歧的主要原因是针对不同沉积环境的岩石学特征、沉积相判识标志和剖面序列等的认识不足。鉴于此,作者对四川盆地北缘旺苍地区奥陶系沉积特征与沉积环境开展了研究工作,选择川北旺苍地区奥陶系出露良好的大两会剖面作为研究对象,通过野外剖面实测与室内薄片分析的手段,研究大两会剖面奥陶系沉积特征系统的沉积相划分,通过“点”的特征为上扬子北缘古地理恢复提供资料。

1 区域地质概况

四川盆地位于扬子板块西缘,在地理上地貌清晰可见,北界为米仓山、大巴山、南界为大凉山、大娄山,西界为龙门山、东界为齐岳山(董大忠等, 2014)。四川盆地经历多期构造运动,是一个典型的多期构造叠合盆地,具有“一盆多山”、多级多期盖山时空转换的特点(沈传波等, 2007; 邹才能等, 2014; 刘树根等, 2011)。四川盆地及周缘地区地壳运动比较活跃,(杨威等, 2012; 李伟等, 2014),先后经历了晋宁、加里东、海西、印支、燕山、喜山等构造旋回(张维宸, 2009; 朱传庆等, 2009)。加里东运动是古生代早期第一个构造旋回,覆盖了晚寒武纪—志留纪,主要分为郁南运动、都匀运动和广西运动三幕。(杜远生和徐亚军, 2012; 陈秀其等, 2018; 张宏光, 2015)。寒武纪末—奥陶纪初期的郁南运动是发生在广东省郁南县的一次构造运动,影响大部分华南地区,地层整体抬升,奥陶系大面积缺失(梅冥相等, 2005; 张浩然等, 2020)。区域上,扬子北缘大面积缺失早奥陶统地层,研究剖面主要发育涪潭组(赵家坝组与西梁寺组),岩性为一套混积岩,以灰岩、厚层白云岩、钙质粉砂岩为主。晚奥陶世,在四川盆地发生大面积海侵,地层与古隆起逐渐被海水淹没并接受沉积(宋文海, 1987)。研究剖面宝塔组岩性主要为含砂灰岩;五峰组岩性为碳质泥页岩。

2 地层特征

大两会剖面位于四川省广元市旺苍县大两

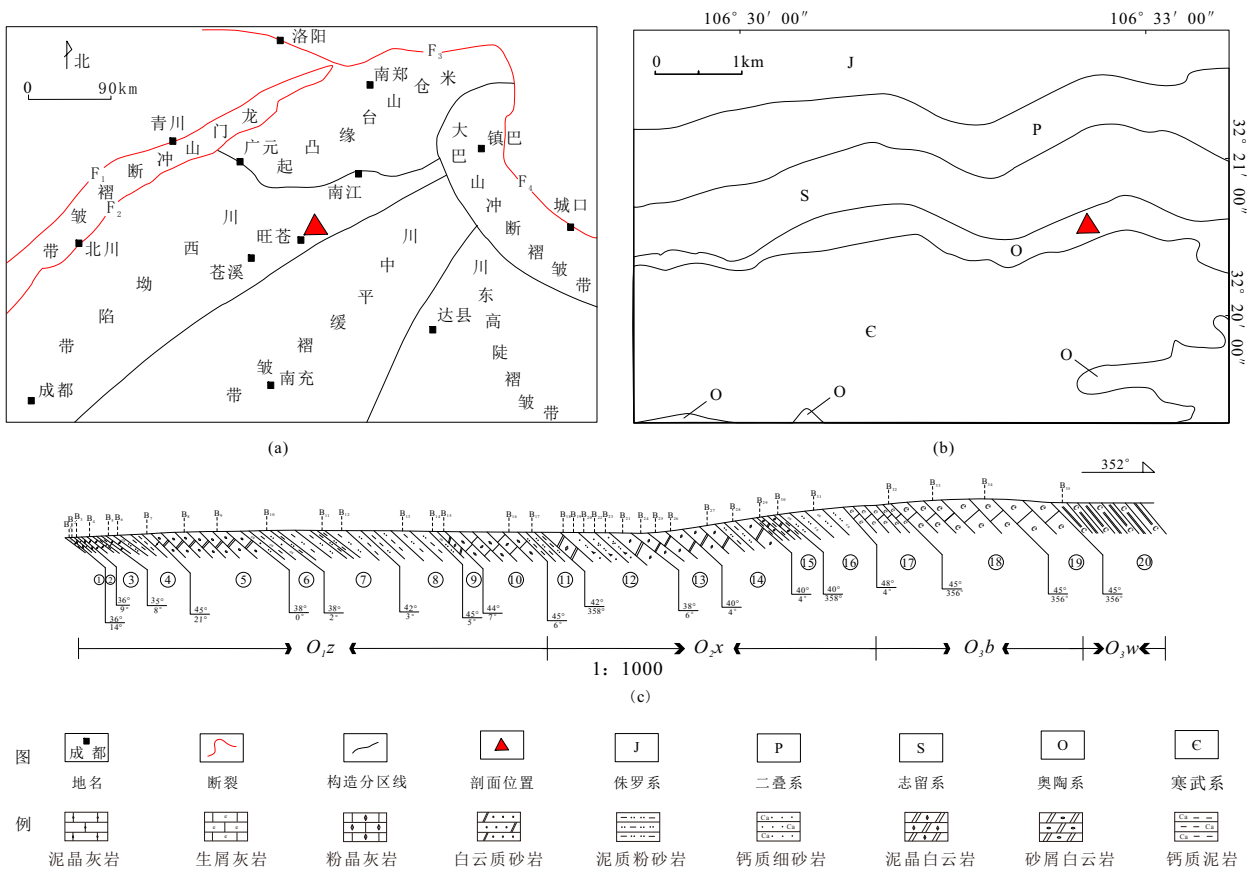
德村路旁(图 1), 地理坐标为(32°20'32"N, 106°32'55"E), 剖面位于以寒武系为核的背斜北翼, 总厚度 358 米。区域上, 下伏与寒武系陡坡寺组呈平行不整合接触, 上覆与志留系龙马溪组呈不整合接触(Zhang et al., 2020)。本文选用杨威等(2012)对四川盆地广元-南江地层小区奥陶系地层划分方案为基础, 将该区地层自下而上划分为赵家坝组、西梁寺组、宝塔组及五峰组。其中, 赵家坝组和西梁寺组与区域上湄潭组相对应。

前人研究奥陶系川北地层特征, 赵家坝组为砂岩与白云岩互层, 底部与寒武系陡坡寺组呈平行不整合接触, 西梁寺组主要发育灰岩, 宝塔组为龟裂纹灰岩(林良彪等, 2017); 五峰组为碳质和硅质页岩(牟传龙等; 2014; 孙小勇等, 2016)。在前人研究基础上, 本研究剖面地层划分如下。

赵家坝组(O_2z)地层, 整体分为六套。底部第一套为灰色钙质粉细砂岩, 厚 0.55 m, 与下伏地层

陡坡寺组呈平行不整合接触(图 2); 第二套厚 7.29 m, 灰色含砂粉晶白云岩夹灰色中-厚层状砂质泥晶灰岩; 第三套为灰色、深灰色含砂灰岩、薄-中层状泥晶灰岩、深灰色薄层状泥岩和钙质粉砂岩组合, 厚 21.53 m; 第四套厚 35.12 m, 灰色薄-中层状亮晶砂屑白云岩, 第五套主要为泥质粉砂岩与粉砂质泥岩不等厚互层, 厚 64.98 m; 顶部第六套为灰色钙质粉砂岩、泥粉晶白云岩与细粉晶灰岩组合, 厚 36.06 m, 顶部与中奥陶统西梁寺组之间存在风化壳。

西梁寺组(O_2x)地层整体分为四套, 底部第一套为紫红色中-厚层状粉砂质泥岩夹灰绿色泥质粉砂岩, 厚 10.75 m(图 2); 第二套为泥晶砂屑白云岩夹薄层状岩屑石英不等粒砂岩、灰色薄-中层状含砾岩屑杂砂岩, 厚 31.56 m; 第三套厚 45.86 m, 主要为灰色砂质含砂屑泥晶白云岩夹薄层状钙质粉砂岩; 第四套主要为泥岩夹细粉晶白云岩, 顶部为灰色中-厚层状钙质粉砂岩, 厚 24.06 m。



F₁—青川断带; F₂—北川断带; F₃—西水-金水河断带; F₄—巴山弧形断带

图 1 上扬子北缘区构造位置图 (a, 据余谦等, 2011 修改), 旺苍地区地质简图 (b) 和旺苍大两会地质剖面图 (c)
Fig. 1 Structural location map of the northern Upper-Yangtze plate (a, modified from Yu et al., 2011), geological sketch map of Wangcang area (b) and geological profile map of Dalianghui, Wangcang (c)

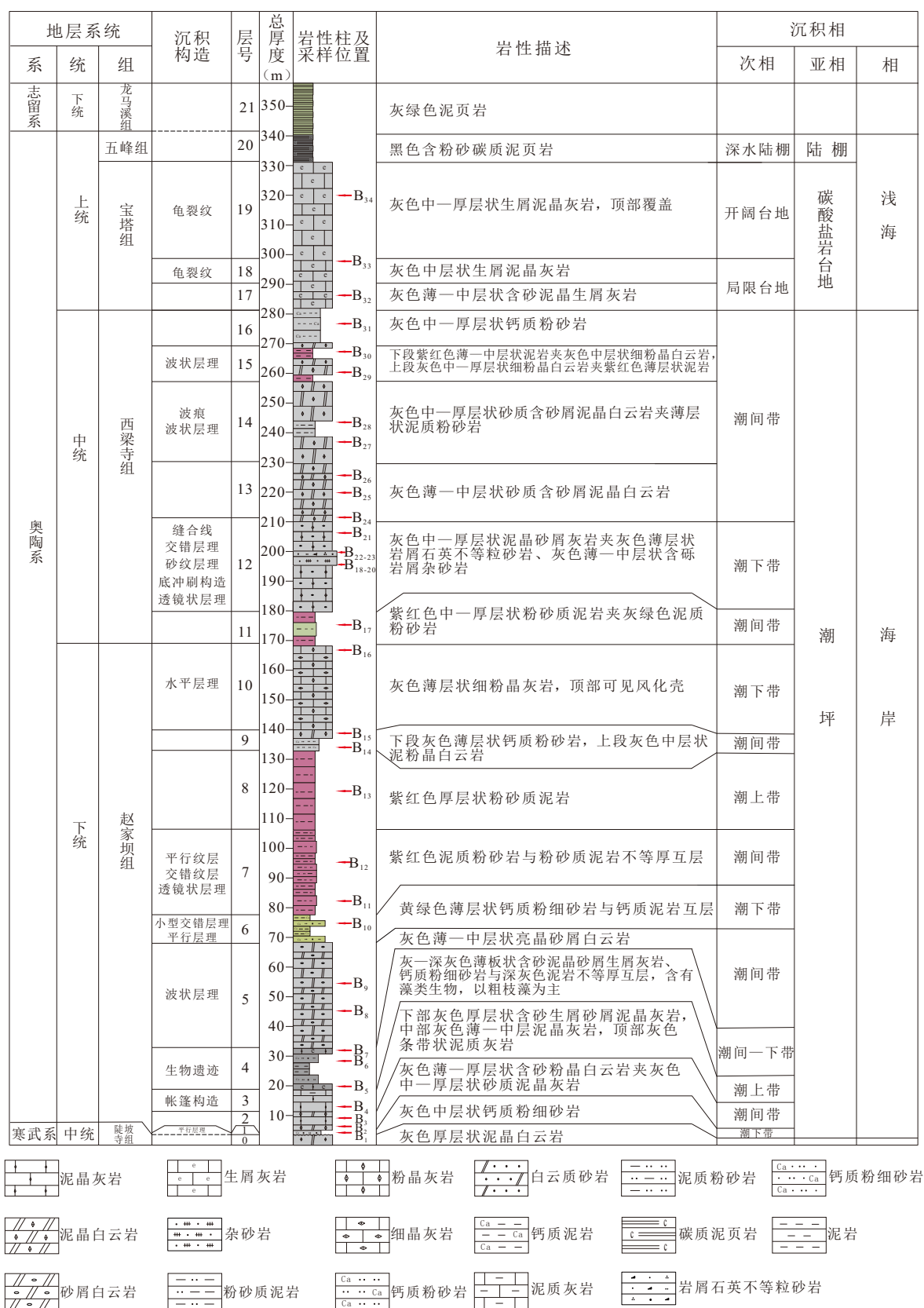


图2 大两会剖面奥陶系综合柱状图及采样位置

Fig. 2 Comprehensive column and sampling position of Ordovician in Dalianghui section

宝塔组(O_3b)地层整体厚 50.14 m(图 2)。底部为灰色薄-中层状含砂含砂屑泥晶生屑灰岩,顶部为生物泥晶灰岩,层厚较大,顶部与上奥陶统五峰组界限未见。五峰组(O_3w)为一套黑色薄层状含粉砂碳质泥页岩,厚 10.2 m。

3 岩石特征及类型

本研究样品采自旺苍大两会实测剖面,共计 35 件,磨制岩石薄片进行分析。赵家坝组样品计 16 件,岩石类型主要为碳酸盐岩、砂岩和泥质岩;西梁寺组样品计 15 件,岩石类型主要为碳酸盐岩和砂岩;宝塔组样品计 3 件,岩石类型均为碳酸盐岩;五峰组样品 1 件,岩石类型为泥质岩。

3.1 赵家坝组

赵家坝组主要划分出钙质粉细砂岩、钙质泥岩、粉砂质泥岩、含砂粉晶白云岩、亮晶砂屑白云岩、砂质泥晶灰岩、泥质灰岩、含砂泥晶砂屑生屑灰岩、含砂含生屑砂屑泥晶灰岩共十种岩石类型。其中,主要发育粉砂质泥岩、钙质粉细砂岩、亮晶砂屑白云岩、含砂泥晶砂屑生屑灰岩、含砂含生屑砂屑泥晶灰岩。

3.1.1 钙质粉细砂岩

钙质粉细砂岩发育在赵家坝组底部和中上部,陆源碎屑以粉砂级、细砂级石英颗粒为主,含量为 70%~75%,粒径为 0.04~0.15 mm,分选中等,磨圆度差,呈棱角状;填隙物方解石含量为 25%~30%,呈不规则晶粒状分布(图 3a)。

3.1.2 含砂灰岩类

该类型主要包括含砂泥晶砂屑生屑灰岩和含砂含生屑砂屑泥晶灰岩,产出在赵家坝组中下部。含砂泥晶砂屑生屑灰岩中砂屑含量为 30%,粒径为 0.15~0.5 mm,分选较好,磨圆一般,成分主要为泥晶灰岩;生物碎屑以粗枝藻为主,含量为 30%~35%,颗粒排列存在一定方向性。颗粒间填隙物约占 25%,主要为泥晶方解石。岩石中混有陆源碎屑,含量为 10%~15%,以粉砂级到细砂级石英颗粒为主,磨圆度低,粒径为 0.05~0.1 mm(图 3b)。含砂含生屑砂屑泥晶灰岩中砂屑含量为 25%,粒径为 0.2~1.2 mm,分选中一差,磨圆差,为泥晶方解石碎屑,局部发生重结晶作用;生物碎屑含量少,约 10%,主要为介壳、腕足类化石。填隙物含量在 55%左右,主要为泥晶方解石,局部存在重结晶现象(图 3c)。陆源碎屑含量在 10%左右,以粉砂级

石英为主,磨圆差。

3.1.3 亮晶砂屑白云岩

亮晶砂屑白云岩发育在赵家坝组中部,岩石中砂屑含量为 75%~70%,粒径为 0.2~0.5 mm,分选中等,磨圆较好,呈圆状;填隙物以亮晶白云石为主,含量为 25%~30%,白云石呈自形或半自形状晶粒填充在砂屑颗粒之间(图 3d)。

3.1.4 粉砂质泥岩

粉砂质泥岩呈紫红色,主要发育在赵家坝组中上部。反映氧化-弱氧化环境,覆于紫红色钙质泥质粉砂岩与钙质泥岩互层之上。岩石中泥级矿物含量较高,含量为 75%~80%,主要为黏土矿物和碳酸盐矿物;陆源碎屑矿物以石英为主,含量为 20%~25%,粒径为 0.02~0.1 mm,分选较好,磨圆差,呈棱角状(图 3e)。

3.2 西梁寺组

西梁寺组主要划分出粉砂质泥岩、泥岩、泥质粉砂岩、钙质粉砂岩、细粉晶白云岩、砂质白云岩、风暴岩共 7 种岩石类型。其中,主要发育含砾岩屑杂砂岩、岩屑石英不等粒砂岩、砂质含砂屑泥晶白云岩、泥质粉砂岩。

3.2.1 含砾岩屑杂砂岩

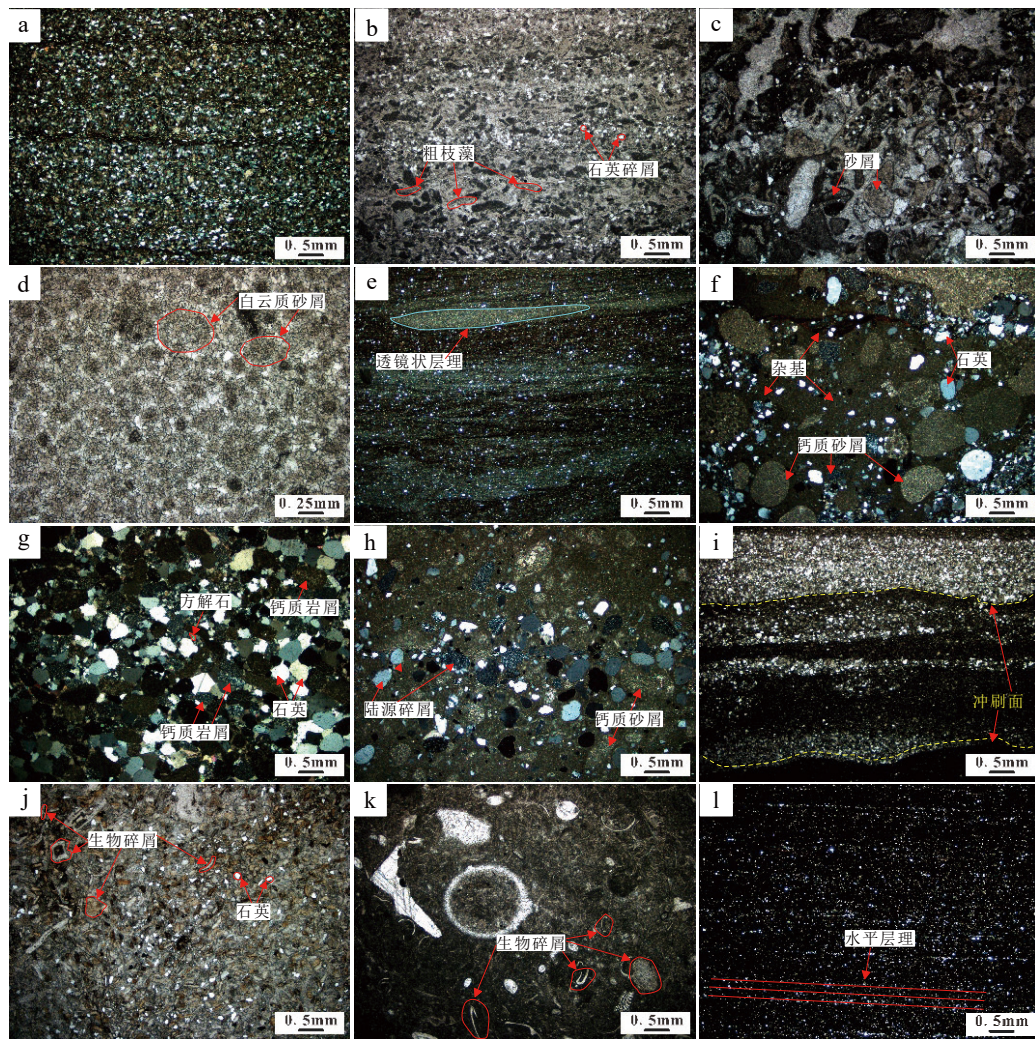
含砾岩屑杂砂岩主要发育在西梁寺组底部,岩石中碎屑主要为石英、岩屑等,石英含量占 25%,粒度不等,粒径为 0.07~0.5 mm,分选性差,磨圆较好,呈次圆状;岩屑(砂级)含量为 20%,以碳酸盐岩屑和硅质岩屑为主,磨圆较好;砾屑含量不超过 10%,分布杂乱,且分选与磨圆一般。碎屑颗粒主要呈悬浮状,局部偶见石英间呈线接触关系(图 3f)。杂基含量占 20%~25%,成分复杂,以黏土矿物、粉砂级石英、碳酸盐矿物为主,粉砂级碎屑存在方向性。该特征反映出受风暴作用影响,同粗碎屑同时沉积的环境特点。

3.2.2 岩屑石英不等粒砂岩

岩屑石英不等粒砂岩中碎屑以石英、岩屑为主,石英含量占 70%,粒径为 0.1~0.6 mm,分选差,磨圆一般;岩屑含量在 22%左右,以硅质岩屑和碳酸盐岩屑为主,粒径为 0.3~0.9 mm。碎屑颗粒之间以凹凸接触和线接触关系为主。填隙物以石英次生加大边和方解石为主,含量小于 10%(图 3g)。

3.2.3 砂质含砂屑泥晶白云岩

砂质含砂屑泥晶白云岩发育在西梁寺组中部,岩石中砂屑含量为 20%~25%,粒径为 0.3~1 mm,磨



a. 钙质粉细砂岩, 潮下带, 赵家坝组, 正交光, B1; b. 含砂泥晶砂屑生屑灰岩, 潮下带, 赵家坝组, 单偏光, B5; c. 含砂含生屑砂屑泥晶灰岩, 潮上带, 赵家坝组, 单偏光, B4; d. 亮晶砂屑白云岩, 潮间带, 赵家坝组, 单偏光, B8; e. 粉砂质泥岩中透镜状层理, 潮间带, 单偏光, B10; f. 含砾岩屑杂砂岩, 潮下带, 西梁寺组, 正交光, B19; g. 岩屑石英不等粒砂岩, 潮下带, 西梁寺组, 正交光, B20; h. 砂质含砂屑泥晶白云岩, 潮间带, 西梁寺组, 正交光, B27; i. 泥质粉砂岩中含钙含泥粉砂岩及含粉砂泥岩互层条带, 潮间带, 西梁寺组, 单偏光, B28; j. 含砂含砂屑泥晶生屑灰岩, 局限台地, 宝塔组, 单偏光, B32; k. 生物泥晶灰岩 (双壳类、介壳类、藻类), 开阔台地, 宝塔组, 单偏光, B33—B34; l. 含粉砂碳质泥页岩, 深水陆棚, 五峰组, 单偏光, B35

图3 大两会剖面镜下岩石特征

Fig. 3 Rock characteristics under the microscope of Dalianghui section

圆中等, 呈悬浮状, 杂乱分布。填隙物含量约 55%, 以泥晶白云石为主, 局部发生重结晶作用。陆源碎屑含量较高, 为 25%~30%, 以石英和硅质岩屑为主, 粒径为 0.2~0.5 mm, 分选差, 磨圆较好, 呈次圆状 (图 3h)。

3.2.4 泥质粉砂岩

泥质粉砂岩中泥质含量为 25%~30%, 以黏土矿物为主; 粉砂级陆源碎屑以石英为主, 含量为 70%~75% (图 3i)。岩石中存在含钙含泥粉砂岩及

含粉砂泥岩的互层条带, 含泥含钙粉砂岩中粉砂级碎屑 70%~85%, 以石英为主, 粒径为 0.03~0.08 mm, 磨圆一般, 呈次圆状; 填隙物含量为 25%~30%, 主要为黏土矿物和碳酸盐矿物。含粉砂泥岩中泥级黏土矿物含量为 85%~90%; 粉砂级矿物主要为石英, 含量为 10%~15%。推测其为在潮汐作用下, 高能量与低能量之间频繁变换下的沉积产物。

3.3 宝塔组

宝塔组主要划分出含砂含砂屑泥晶生屑灰岩

和生物泥晶灰岩两种岩石类型。底部含砂含砂屑泥晶生屑灰岩中砂屑含量约 20%, 粒径为 0.15~0.3 mm, 分选较好, 磨圆一般, 主要为泥晶方解石碎屑; 生物碎屑含量为 40%~45%, 主要为介壳、腕足和海百合茎碎片, 生物破碎严重, 完整生物个体少见, 颗粒排列沿长轴方向存在定向性。填隙物含量为 20%~25%, 以泥晶方解石为主。陆源碎屑混入主要为石英等, 含量在 15% 左右, 粒径为 0.1~0.23 mm, 分选中一差, 磨圆差(图 3j)。顶部灰色厚层状生物泥晶灰岩中泥晶方解石含量为 80%~85%。生物化石含量为 15%~20%, 个体保存完好, 包括双壳类、介壳类、腕足类、绿藻类, 广盐类及窄盐类均有, 且排列杂乱(图 3k)。该特征反映出从较局限、闭塞的沉积环境逐渐过渡到较开阔的沉积环境。

3.4 五峰组

刘树根(2013)提出, 四川盆地北缘, 五峰组岩性主要为黑色页岩, 碳质、钙质含量较高, 镜下可见放射虫。大两会剖面五峰组为黑色薄层状含粉砂碳质泥页岩, 岩石中泥级矿物含量为 80%~85%, 主要为黏土矿物; 有机质碳含量大于 2%; 粉砂级碎屑以石英为主, 含量为 13%~18%, 磨圆中一差, 颗粒沿一定方向定向性, 岩石中发育水平层理(图 3j)。在一定程度上表明, 水体能量较低, 沉积水体较深。

4 沉积相划分

本文根据牟传龙(2022)提出的相命名及其分类建议划分方案, 结合大两会剖面序列、生物化石类型、沉积构造特征进行整体分析, 划分出海岸、浅海 2 个相, 涪潭组主要发育海岸相, 以潮坪亚相为主, 划分出潮上带、潮间带、潮下带 3 个次相; 宝塔组发育浅海相, 以碳酸盐岩台地亚相为主, 划分出局限台地、开阔台地 2 个次相; 五峰组主要发育浅海相, 以陆棚亚相为主, 划分出深水陆棚次相。

4.1 浅海相

4.1.1 陆棚亚相

陆棚亚相中主要发育深水陆棚次相, 仅发育在奥陶系顶部五峰组, 岩石类型为黑色薄层状含粉砂碳质泥页岩。内部含有生物化石笔石, 包括直笔石、曲笔石形态各异(图 4a), 反映沉积水体较深, 能量较低, 水动力条件较弱, 具有牵引流水体特征。

4.1.2 碳酸盐岩台地亚相

碳酸盐岩台地亚相中主要发育局限台地次相

和开阔台地次相, 局限台地次相相带仅发育在宝塔组底部, 发育一套灰色薄-中层状含砂含砂屑泥晶生屑灰岩, 层面发育龟裂纹沉积构造(图 4b)。岩石中存在陆源碎屑混入, 反映距物源区较近, 水体较浅的沉积环境; 开阔台地次相发育在宝塔组上部, 岩石类型为灰色中-厚层状生物泥晶灰岩, 发育龟裂纹沉积构造(图 4b)。岩石中生物发育种类较多, 广盐类与窄盐类均有。反映出水循环条件较好、水体较开阔的沉积环境。

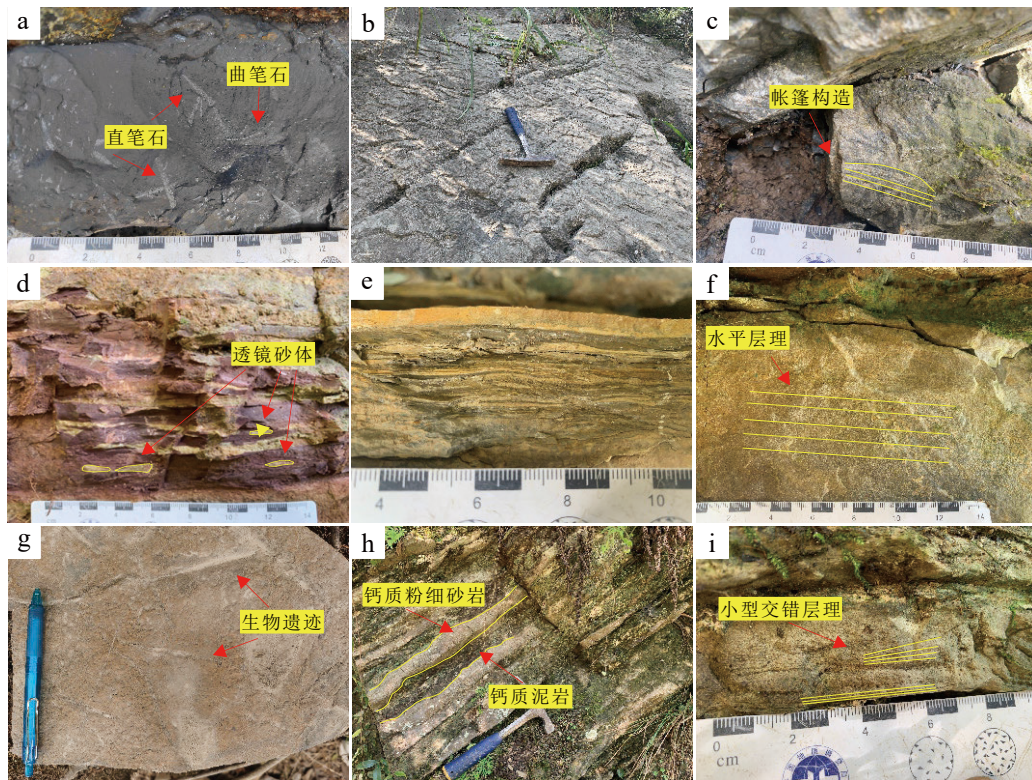
4.2 海岸相

4.2.1 潮坪亚相

潮上带次相主要发育在赵家坝组, 存在两种剖面序列。第一种底部为灰色厚层状含砂含生屑砂屑泥晶灰岩, 中部为灰色薄-中层状泥晶灰岩, 顶部为灰色条带状泥质灰岩。野外剖面发育帐篷构造(图 4c), 指示暴露的潮上带沉积环境; 第二种为一套紫红色厚层状粉砂质泥岩, 覆于紫红色泥质粉砂岩与粉砂质泥岩之上, 发育潮汐层理。根据瓦尔特相律, 该特征处于潮上带氧化-弱氧化沉积环境。

潮间带次相主要发育在赵家坝组与西梁寺组。赵家坝组存在 3 种潮间带序列。第一种类型发育在赵家坝组底部, 发育一套灰色薄-厚层状含砂粉晶白云岩夹灰色砂质泥晶灰岩, 砂质泥晶灰岩内部可见条带状钙质粉细砂岩与泥晶灰岩形成的明暗互层, 这是在潮汐作用的影响下, 活动期砂质沉积与间歇期泥质沉积交替出现的结果; 第二种类型为一套灰色薄-中层状亮晶砂屑白云岩, 沉积构造发育波状层理, 指示水体能量较高, 处于间歇性暴露的潮间带环境; 第三种发育在赵家坝组中部, 为一套紫红色粉砂质泥岩与泥质粉砂岩不等厚互层, 发育平行纹层、交错纹层、透镜状层理(图 4d), 粉砂质泥岩中可见透镜状层理(图 3e)。西梁寺组存在 2 种潮间带剖面序列。第一种类型为一套灰色中-厚层状砂质含砂屑泥晶白云岩夹泥质粉砂岩, 沉积构造发育潮汐层理(图 4e)与波痕, 泥质粉砂岩中可见含钙含泥粉砂岩、含粉砂泥岩条带状明暗互层特征, 发育冲刷面(图 3i), 该特征反映潮间带潮流的间歇性冲刷侵蚀作用; 第二种类型为紫红色薄-中层状泥岩夹灰色中层状细粉晶白云岩, 顶部为一套灰色中-厚层状钙质粉砂岩, 沉积构造发育波状层理。

潮下带次相在赵家坝组与西梁寺组均发育。赵家坝组存在 3 种潮下带剖面序列, 第一种类型为



a. 笔石, 深水陆棚, 五峰组; b. 龟裂纹, 局限台地, 宝塔组; c. 帐篷构造, 潮上带, 赵家坝组; d. 透镜状层理, 潮间带, 西梁寺组; e. 潮汐层理, 潮间带, 西梁寺组; f. 水平层理, 潮下带, 赵家坝组底部; g. 水平生物遗迹, 潮下带, 赵家坝组; h. 黄绿色钙质粉细砂岩与钙质泥岩互层, 潮间带, 赵家坝组; i. 平行层理与小型交错层理, 潮下带, 赵家坝组

图4 大两会剖面野外岩石特征

Fig. 4 Field rock characteristics of Dalianghui section

一套灰色中层状钙质粉细砂岩, 发育沉积构造平行层理(图4f), 指示水体高能急流的潮下带沉积环境; 第二种类型为一套灰色-深灰色薄板状含砂泥晶砂屑生屑灰岩、钙质粉砂岩与深灰色泥岩不等厚互层, 发育水平生物遗迹(图4g); 第三种岩石组合类型为黄绿色薄层状钙质粉细砂岩与钙质泥岩不等厚互层(图4h), 发育平行层理、小型交错层理(图4i); 西梁寺组潮下带剖面序列为一套事件沉积的风暴岩, 发育灰色中厚层状泥晶砂屑白云岩夹岩屑石英不等粒砂岩、含砾岩屑杂砂岩。该套风暴岩为风暴作用对高能潮下带沉积物进行改造的产物, 对川北地区沉积相划分具有重要意义。

5 风暴沉积特征及序列

5.1 风暴沉积构造

5.1.1 底面侵蚀构造

底面侵蚀构造是风暴高峰期, 由风暴潮流、涡流以及重力流等对沉积物底面进行侵蚀、冲刷、改

造形成的再沉积充填构造, 是典型的风暴沉积标志之一(杜远生等, 2001; 刘宝珺等, 1987; 张哲等, 2008)。侵蚀冲刷面的凹凸程度可以反映风暴作用的强弱。在大两会剖面上, 侵蚀面起伏度介于2~8 cm, 且侵蚀面波峰与波谷都比较圆润, 侵蚀面数量较多, 总体上, 反映了当时风暴作用强度强弱不一, 但却频繁存在。

5.1.2 砾屑层

砾屑层是由风暴涡流、风暴浪作用将原地半固结沉积物打碎卷起, 将一部分砾屑或生屑搬运到其地区沉积, 或由于风暴能量降低快速原地沉积(黄程等, 2021; 郑斌嵩等, 2016)。大两会剖面砾屑层厚度介于7~40 cm。砾屑成分主要为碳酸盐岩砾屑, 磨圆度一般, 分选较差, 分布杂乱, 大小混杂, 砾屑长宽可达数毫米甚至数十毫米。砾屑形态各异, 呈直立状、横卧状、斜八状等。

5.1.3 粒序层理

粒序层理的形成是由于风暴作用进入衰退期,

风暴作用能量减弱,使得风暴带来的砾屑逐渐减少,进而在侵蚀冲刷面上覆形成正粒序。本剖面粒序层理有发育,颗粒保存相对完整,分选程度与磨圆程度较差,剖面上粒序层段厚度介于 10~15 cm,颗粒粒度逐渐减小,反映出当时风暴能量从高能到衰弱的过程。

5.1.4 平行层理

平行层理形成于风暴作用衰退过程中,在风暴流演变为低密度流体中的高能量沉积环境中形成。(赵灿等,2013)。发育在剖面 12 层顶部,厚度 5 cm,岩性为岩屑石英不等粒砂岩,颗粒分选程度差,磨圆度较高。该层层厚较薄,表明流体存在时间短,属于过渡性流体类型。

5.1.5 沙纹层理与丘状交错层理

丘状交错层理是风暴浪摆动所形成的强力摆动水流或多向水流对河床的作用表现(宋金民等,2016)。大两会剖面发育丘状交错层理,保存不完整,位于层 12 底部位置,波长 15~20 cm,波高 3~5 cm,呈丘状上隆形态,一般认为是风暴沉积典型沉积构造标志之一。岩性为岩屑石英不等粒砂岩,岩屑成分为碳酸盐岩岩屑,磨圆一般。但根据前人研究得出,丘状交错层理不一定完全代表风暴沉积,并不是风暴沉积唯一产物(牟传龙,1989)。例如,在潮下带形成的风暴沉积物受到后期潮汐作用的改造,使丘状交错层理不易保存,但会留下痕迹,常出现沙纹层理,并且上下层呈现一定截切关系(胡明毅和贺萍,2002;黄乐清和刘伟,2016)。大两会剖面层 12 底部发育沙纹层理和截切沙纹层理。这种沉积构造反映风暴作用正在减弱,向正常沉积过渡的沉积特点。

5.2 沉积序列

突发性风暴事件的发生改变了水动力条件,随着风暴作用从高峰期到衰退期,再到停息期,不同的风暴作用强度形成了不同的风暴沉积序列。一个理想的风暴沉积序列分为五个单元:具有底冲刷面的砾屑层或粒序层理段(a)、平行层理段(b)、沙纹层理及丘状交错层理段(c)、水平层理段(d)与背景沉积段(e)。但风暴沉积序列具有多样性,旺苍大两会剖面风暴层段根据野外与镜下薄片鉴定进行研究后,分析沉积构造,认为本研究区存在四种风暴序列(图 5)。

序列 I:主要由具有底冲刷面的砾屑层或粒序层理段(a)—平行层理段(b)—泥岩段(e₁)组成。序

列 I 发育在层 12 顶部,具有底冲刷面的砾屑层或粒序层理段(a)中砾屑分布杂乱,分选性与磨圆性较差,砾屑呈水平状、直立状、斜八状等。砾屑向上含量减少,形成正粒序,底部发育底侵蚀构造,岩石类型为含砾岩屑杂砂岩,厚度 35 cm。平行层理段(b)厚度 5 cm,岩石类型为岩屑石英不等粒砂岩。泥岩段(e₁)厚度 8 cm,顶部风化较严重。

序列 II:主要由具有底冲刷面的砾屑层或粒序层理段(a)组成。序列 II 发育在层 12 底部,砾屑底部底侵蚀构造面较平缓,砾屑粒径 0.1~0.5 cm;向上清晰可见发育砾序层理,厚度 10~15 cm,该序列未发育平行层理段(b)与沙纹层理和丘状交错层理段(c)。

序列 III:主要由具有底冲刷面的砾屑层或粒序层理段(a)—泥晶灰岩段(e₂)组成。序列 III 发育在层 12 底部。其中,具有底冲刷面的砾屑层或粒序层理段(a),岩性主要为含砾岩屑杂砂岩,反映了风暴沉积高能期后的快速堆积,层厚介于 5~7 cm,底部发育底面侵蚀冲刷构造。泥晶灰岩段(e₂),厚 4 cm。该序列在底部出现多套,表明风暴沉积在高能期、衰退期、平静期多次频繁交换。

序列 IV:主要由具有底冲刷面的砾屑层或粒序层理段(a)—沙纹层理及丘状交错层理段(c)—泥晶灰岩段(e₂)组成。序列 IV 发育在西梁寺组层 12 最底部。其中,具有底冲刷面的砾屑层或粒序层理段(a),岩性主要为含砾岩屑杂砂岩,冲刷面起伏 1~2 cm。沙纹层理及丘状交错层理段(c)岩性主要为岩屑石英不等粒砂岩,野外剖面上可见保存不完整的丘状交错层理,厚度 2.5~4 cm,该序列缺少平行层理段(b)和水平层理段(d),最顶部为泥晶灰岩段(e₂),厚度 3 cm。

6 讨论

6.1 沉积环境

上扬子北缘奥陶系沉积环境问题,一直是难以统一的问题。如引言所述,早奥陶世受加里东运动影响,川北隆起隆升出水面,上扬子北缘地区下奥陶统地层大部分缺失,研究剖面发育赵家坝组、西梁寺组、宝塔组、五峰组。一些学者认为,川北地区涪潭组处于潮坪环境或滨岸环境(李皎等,2015;刘伟等,2017),过渡到宝塔组,水体开始加深;也有学者认为,其处于浅水陆棚环境(胡华蕊等,2019;张殿伟等,2020),或滨岸与台地交互出现的沉积环

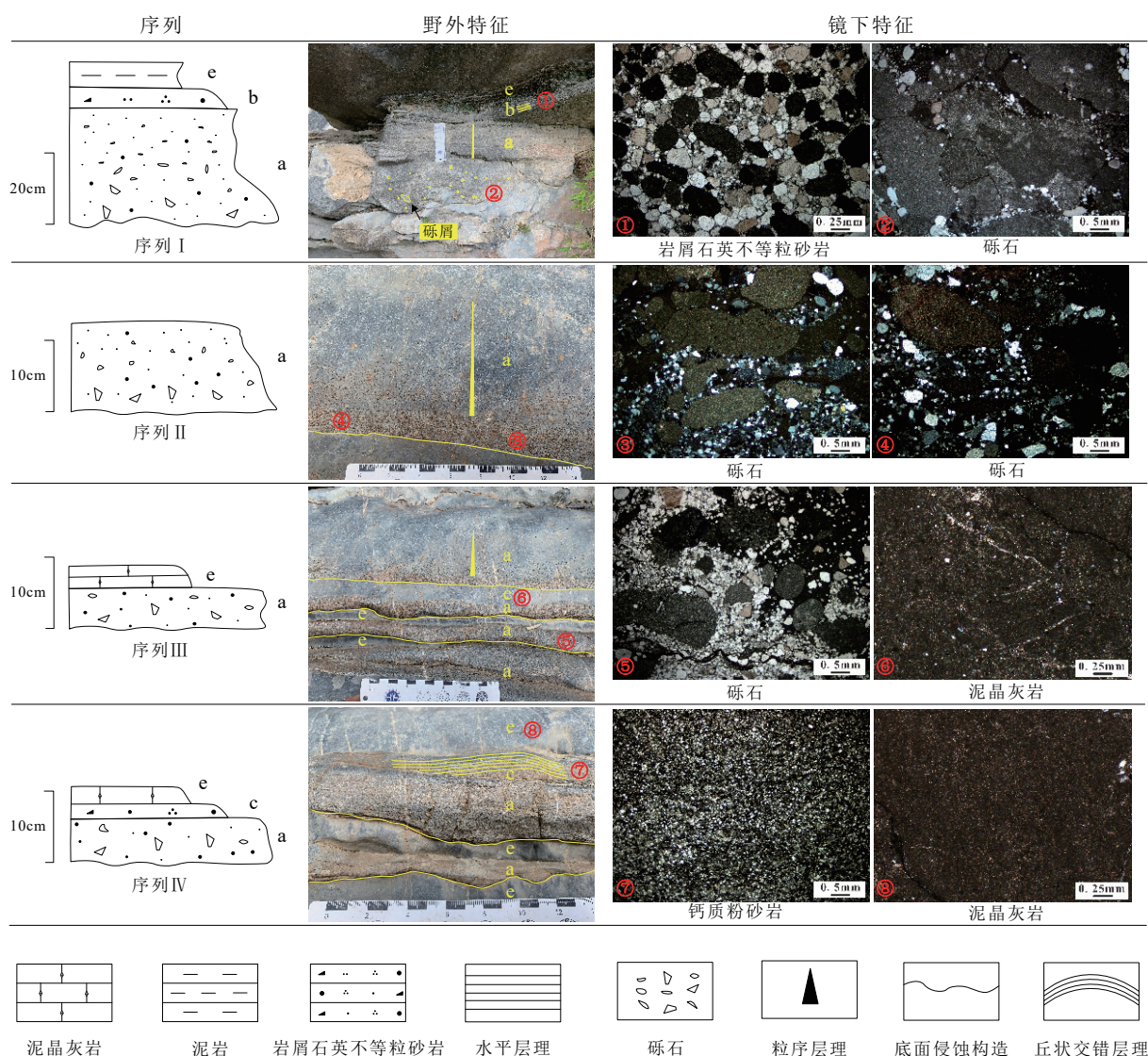


图5 大两会剖面西梁寺组风暴沉积序列特征

Fig. 5 Characteristics of tempestite sedimentary succession in the Xiliangsi Formation, Dalianghui section

境(林良彪等, 2017)。晚奥陶世全球海平面上升, 扬子北缘表现为海平面上升, 学者们提出, 宝塔组处于浅水陆棚环境(刘伟等, 2017), 或经历了由内缓坡环境到深水盆地的过程(杨威等, 2012), 过渡到五峰组, 上扬子北缘整体处于浅海环境(牟传龙等, 2014; Rong et al., 2010; 孙小勇等, 2016), 本文对广元旺苍地区大两会剖面奥陶系沉积特征及沉积相进行研究后, 认为湄潭组为海岸相的潮坪环境沉积物(图6); 宝塔组为浅海相的碳酸盐岩台地环境沉积物; 五峰组为一套浅海相的陆棚环境沉积物, 整体为向上变深的沉积环境。

6.2 风暴沉积古纬度、古地理

更值得注意的是, 大两会剖面西梁寺组潮坪环

境中发现了风暴沉积。风暴沉积是风暴作用对海底沉积物影响的一种特殊的事件沉积, 是由一种热带海洋气旋导致, 多形成于较温暖的地带, 南半球多在 1~3 月, 北半球多在 7~9 月, 常形成于纬度 5°~20°的区域(杜远生和韩欣, 2000; 张哲等, 2006)。因此, 证明中奥陶纪西梁寺组时期, 扬子北缘区应处于低纬度飓风带。

风暴沉积作为一种突发性、瞬时性的特殊沉积事件, 易发生在浅海、潮坪及深海环境中, 且不同环境的风暴沉积序列与沉积构造特征存在差异(刘鹏举和林小谷, 2004; 张斌等, 2009; 宋金民等, 2012)。学术界对浅海环境和潮坪环境风暴沉积的研究最为广泛, 浅海环境中, 浅水陆棚区风暴沉积

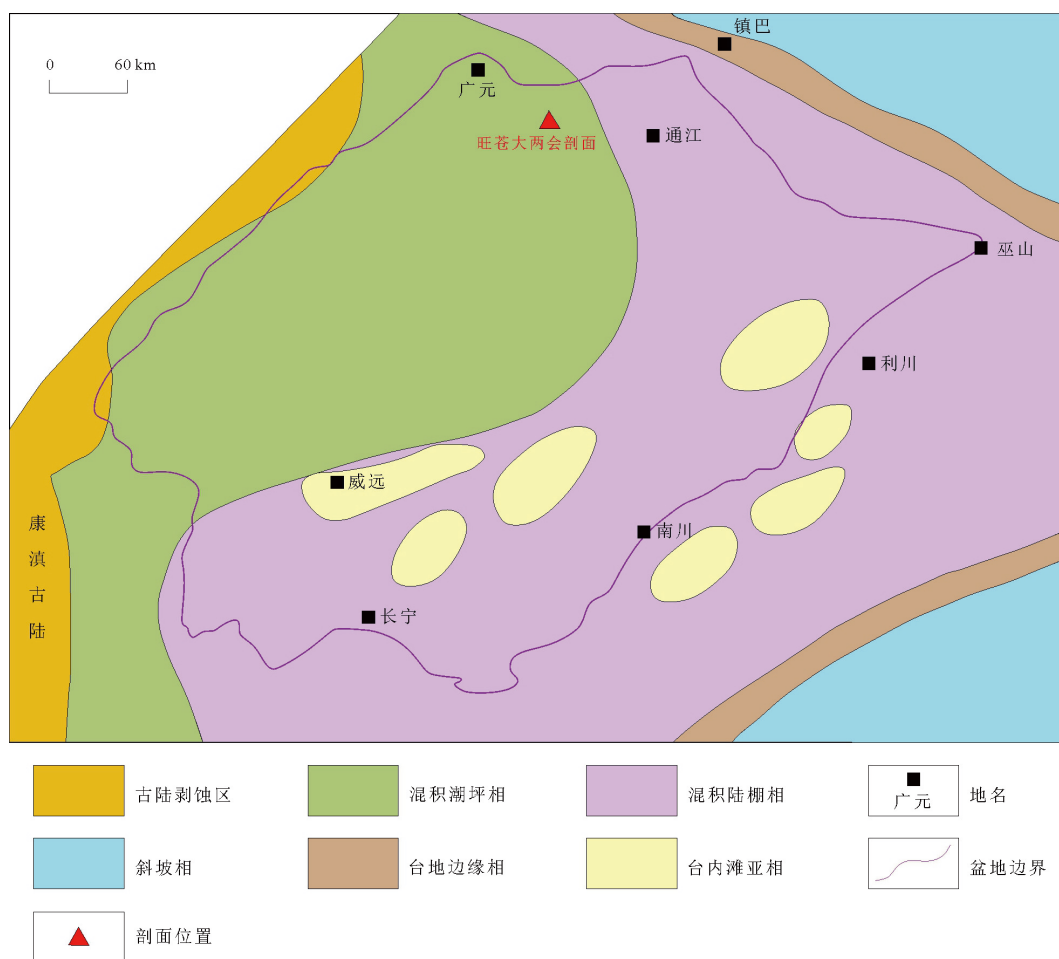


图6 四川盆地奥陶系湄潭组沉积时期层序古地理图(据杨威, 2012 修改)

Fig. 6 The sequence palaeogeography of the Ordovician Meitan Formation in Sichuan Basin (modified from Yang, 2012)

特征与深水陆棚区风暴沉积特征完全不同。浅水陆棚区主要受风暴涡流作用影响, 砾屑排列出现断续状, 砾屑呈谐调排列, 生物化石及生物扰动痕迹少见, 主要表现生物扰动痕迹, 浅水陆棚偶见发育长波长的丘状交错层理。深水陆棚则不发育丘状交错层理段, 且深水陆棚风暴序列具有层薄、层理小、岩性细的特点(梁桂香, 1994; 宋金民等, 2012)。潮坪环境中的潮下带涡流与风暴流为主要风暴作用营力, 风暴沉积结构特征为底部粒度变粗, 结构成熟度增加, 成分成熟度较低, 泥质含量减少。沉积构造方面, 底部具有明显冲刷面, 上覆含有砾级沉积物残留, 砾屑排列定向性不明显, 存在缓起伏的长波式丘状交错层理, 但后期潮汐作用改造丘状交错层理难以完整存留(宋金民, 2012; 许世远等, 1984; 胡明毅和贺萍, 2002)。大两会剖面仅在风暴沉积序列Ⅳ中出现不完整的丘状交错层理, 这与人提出潮坪上的风暴沉积特征吻合。序列Ⅱ、序

列Ⅲ与序列Ⅳ存在相似之处, 底面侵蚀作用相对较弱。从岩性来看, 风暴作用岩性主体为碎屑岩, 与序列Ⅰ对比, 缺乏原地或近原地堆积的大型角砾或砾屑层。综上所述, 以上三种序列与风暴中心有一定距离, 属于近原地型风暴沉积序列。序列Ⅰ与以上三个序列完全不同, 底面侵蚀构造起伏较大, 约 8 cm, 砾序层理底部含有大量碳酸盐岩角砾, 该序列表明, 风暴对该地区侵蚀程度较大, 为原地型风暴沉积序列。因此, 笔者研究大两会剖面独特的风暴岩序列, 认为风暴岩发生的水体深度比浅海陆棚环境要小得多, 更接近正常浪基面, 结合背景来看, 认为风暴作用发育在潮下带环境。

研究资料表明, 进入震旦纪时期, 上扬子地区碳酸盐岩台地的沉积面貌已初步形成, 直到寒武纪末区域性隆升, 扬子陆块西北缘或西缘缺失早奥陶纪—中奥陶纪地层(何登发等, 2011; 张允白等, 2002)。因此, 研究区剖面处于隆起边缘区, 发育潮

坪边缘相,正是易受风暴浪影响的沉积环境地带。从上文研究的沉积背景来看,川北旺苍地区奥陶系赵家坝组—西梁寺组—宝塔组—五峰组整体向上为变深的填充序列,从赵家坝组、西梁寺组发育的潮坪沉积,宝塔组发育的碳酸盐岩台地沉积,再到五峰组发育的陆棚沉积。尽管对沉积环境恢复主要依据于风暴停歇时的沉积背景划分,但风暴沉积的发现对古地理环境划分仍具有指示意义,通过沉积序列及沉积特征的差异性可限定和划分沉积相环境。

7 结论

(1)从下到上,川北旺苍地区整体上呈现由海岸相逐渐演化到浅海相的过程。其中,海岸相中主要发育潮坪亚相,主要发育在湄潭组,划分出潮上带、潮间带与潮下带三种次相;浅海相的碳酸盐岩台地亚相,主要发育在宝塔组,划分出局限台地、开阔台地两种次相;浅海相的陆棚亚相,主要发育在五峰组,划分出深水陆棚次相。

(2)在川北旺苍地区奥陶系大两会剖面西梁寺组潮坪亚相的潮下带环境中发现风暴沉积,发育底冲刷侵蚀构造、粒序层理、平行层理、丘状交错层理与沙纹层理等沉积构造。识别出四种序列,序列Ⅰ:具有底冲刷面的砾屑层或粒序层理段(a)—平行层理段(b)—泥岩段(e_1);序列Ⅱ:具有底冲刷面的砾屑层或粒序层理段(a);序列Ⅲ:具有底冲刷面的砾屑层或粒序层理段(a)—泥晶灰岩段(e_2);序列Ⅳ:具有底冲刷面的砾屑层或粒序层理段(a)—丘状交错层理段(c)—泥晶灰岩段(e_2)。这反映了整体风暴流能量的变化过程。

References

- Chen X Q, Zhou T F, Hou M J, 2018. Unconformity characteristics of Caledonian structure in northeast segment of southeastern margin of Yangtze Block[J]. Journal of He fei University of Technology (Natural Science), 41 (5): 689 – 697 (in Chinese with English abstract).
- Chen Z, LI W, WANG L, et al., 2019. Structural geology and favorable exploration prospect belts in northwestern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 46 (2): 413 – 425.
- Chen Z Q, 2010. A discussion on gas exploration in the Ordovician of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 30 (1): 23 – 30 (in Chinese with English abstract).
- Deng X Q, Fu J H, Yao J L, et al., 2011. Sedimentary facies of the Middle - Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin and breakthrough in petroleum exploration[J]. Journal of Palaeogeography, 13 (04): 443 – 455 (in Chinese with English abstract).
- Dong D Z, Gao S K, Huang J L, et al., 2015. Discussion on the exploration & development prospect of shale gas in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry B, 2 (1): 9 – 23.
- Dong D Z, Gao S K, Huang J L, et al., 2014. A discussion on the shale gas exploration & development prospect in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 34 (12): 1 – 15 (in Chinese with English abstract).
- Du Y S, Han X, 2000. Clastic tempestite and its significance in Yinmin Formation, Kunyang Group (Mesoproterozoic) in central Yunnan Province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 18 (2): 259–262.
- Du Y S, Xu Y J, 2012. A preliminary study on Caledonian Event in South China[J]. Geological Science and Technology Information, 31 (5): 43 – 49 (in Chinese with English abstract).
- Du Y S, Zhou D H, Gong S Y, et al., 2001. Tempestite and its palaeogeographical significance of Devonian in Jingyuan and Jingtai counties, Gansu Province[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 21 (3): 69–73.
- Feng Z Z, Peng Y M, Jin Z K, et al., 2001. Lithofacies palaeogeography of the early Ordovician in South China[J]. Journal of Palaeogeography, 3 (2): 11–22.
- Feng Z Z, Peng Y M, Jin Z K, et al., 2001. Lithofacies palaeogeography of the Middle and Late Ordovician in South China[J]. Journal of Palaeogeography, 3 (4): 10–24.
- He D F, Li D S, Zhang G W, et al., 2011. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China[J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 46 (3): 589 – 606 (in Chinese with English abstract).
- Hu H R, Xing F C, Hou M C, et al., 2019. Ordovician sequence and lithofacies paleogeography reconstruction in Upper Yangtze region and its implications for oil and gas exploration[J]. Scientific Journal of Earth Science, 44 (3): 798 – 809 (in Chinese with English abstract).
- Hu M Y, He P, 2002. The study of tidal storm deposits and its research significance[J]. Advances in Earth Science, 17 (03): 391–395.
- Huang C, Shen Y W, Wen X, 2021. Sedimentary characteristics and its palaeoenvironmental significance of the Upper Devonian storm deposits at Qingfengxia section in Guangyuan City, Sichuan Province[J]. Journal of Palaeogeography, 23 (6): 1094 – 1109 (in Chinese with English abstract).
- Huang L Q, Liu W, 2016. Characteristics of tempestite of Lower Ordovician Tongzi Formation, in the Longshan area, northwestern Hunan and its geological significance[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 34 (5): 830 – 841 (in Chinese with English abstract).
- Jin Z J, Nie H K, Liu Q Y, et al., 2018. Source and seal coupling mechanism for shale gas enrichment in upper ordovician wufeng formation - lower silurian longmaxi formation in sichuan basin and its

- periphery[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 97: 78–93.
- Li J, He D F, Mei Q H, 2015. Tectonic-depositional environment and proto-type basins evolution of the Ordovician in Sichuan Basin and adjacent areas[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 36 (4): 427–445 (in Chinese with English abstract).
- Li J, Tao X, Bai B, et al., 2021. Geological conditions, reservoir evolution and favorable exploration directions of marine ultra-deep oil and gas in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 48 (1): 60–79.
- Li W, Yi H Y, Hu W S, et al., 2014. Tectonic evolution of Caledonian paleohigh in the Sichuan Basin and its relationship with hydrocarbon accumulation[J]. *Natural Gas Industry*, 34 (3): 8–15 (in Chinese with English abstract).
- Li Y, Xue Z J, Cheng Z, et al., 2020. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China[J]. *China Petroleum Exploration*, 25 (01): 45–57 (in Chinese with English abstract).
- Liang G X, 1994. The Storm deposition and its tectonic background[J]. *Global Geology*, (03): 131–143.
- Lin L B, Yu Y, Huang Q Q, et al., 2017. The geochemical characteristics and sedimentary environment analysis of Ordovician in Wangcang region, northern Sichuan Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33 (4): 1272–1284 (in Chinese with English abstract).
- Liu B J, Xu X S, Luo A P, et al., 1987. Storm events and phosphate deposits in Cambrian on the western margin of the Yangtze Platform, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, (3): 28–39.
- Liu P J, Lin X G, 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.
- Liu S G, Deng B, Li Z W, et al., 2011. The texture of sedimentary basin-orogenic belt system and its influence on oil/gas distribution: A case study from Sichuan basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (3): 621–635 (in Chinese with English abstract).
- Liu S G, Wang S Y, Sun W, et al., 2013. Characteristics of black shale in Wufeng formation and Longmaxi formation in Sichuan Basin and its peripheral areas[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 40 (6): 621–639 (in Chinese with English abstract).
- Liu W, Hong H T, Xu A N, et al., 2017. Lithofacies paleogeography and exploration potential of Ordovician in Sichuan Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 22 (4): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Mei M X, Ma Y S, Deng J, et al., 2005. Tectonic palaeogeographic changes resulting from the Caledonian movement and the formation of the Dianqiangui Basin: Discussion on the deep exploration potential of oil and gas in the Dianqiangui Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 12 (3): 227–236.
- Mou C L, 1989. Talk about mound bedding and storm deposition[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 9 (6): 40–44.
- Mou C L, Ge X Y, Xu X S, et al., 2014. Lithofacies palaeogeography of the Late Ordovician and its petroleum geological significance in Middle-Upper Yangtze Region[J]. *Journal of Palaeogeography*, 16 (4): 427–440 (in Chinese with English abstract).
- Mou C L, Zhou K K, Chen X W, et al., 2016. Lithofacies Palaeogeography Atlas of China: Ediacaran–Silurian[M]. Beijing: Geological Publishing House, 55–64.
- Mou C L, 2022. Suggested naming and classification of the word facies[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 42 (3): 331–339 (in Chinese with English abstract).
- Nie H K, Li P, DANG W, et al., 2022. Enrichment characteristics and exploration directions of deep shale gas of Ordovician-Silurian in the Sichuan Basin and its surrounding areas, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 49 (4): 744–757.
- Rong J, Zhan R, Xu H, et al., 2010. Expansion of the Cathaysian Oldland through the Ordovician-Silurian transition: Emerging evidence and possible dynamics[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 53 (1): 1–17.
- Shen C B, Mei L F, Xu Z P, et al., 2007. Architecture and tectonic evolution of composite basin–mountain system in Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 31 (3): 288–299.
- Song J M, Liu S G, Zhao Y H, et al., 2016. Characteristics and sedimentary geological significances of Lower-Middle Cambrian tempestites in central Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 37 (1): 30–42 (in Chinese with English abstract).
- Song J M, Yang D, Li P W, et al., 2012. Development characteristics and geological significance of carbonate tempestites in China[J]. *Geoscience*, 26 (3): 589–600 (in Chinese with English abstract).
- Song W H, 1987. Some new knowledge of Caledonian paleo-uplift in Sichuan[J]. *Natural Gas Industry*, (3): 6–11.
- Sun X Y, Mou C L, Ge X Y, et al., 2016. Geochemistry and sedimentary environments of the Upper Ordovician Wufeng Formation in Guangyuan, northern Sichuan and Zhenba, southern Shaanxi[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 36 (01): 46–54 (in Chinese with English abstract).
- Wang S Q, Chen G S, Dong D Z, et al., 2009. Accumulation conditions and exploitation prospect of shale gas in the Lower Paleozoic Sichuan basin[J]. *Natural Gas Industry*, 29 (5): 51–58 (in Chinese with English abstract).
- Xiao B, Liu S, Li Z, et al., 2021. Geochemical characteristics of marine shale in the Wufeng Formation–Longmaxi Formation in the northern Sichuan Basin, South China and its implications for depositional controls on organic matter[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 203: 108618.
- Xiao B, Liu S G, Ran B, et al., 2021. Study on sedimentary tectonic pattern of Wufeng Formation and Longmaxi Formation in the northern margin of Sichuan Basin, South China[J]. *Scientific Journal of Earth Science*, 46 (7): 2449–2465 (in Chinese with English abstract).
- Xu S Q, Hong H T, Shi X R, 2002. The relationship between Leshan–Longnusi Paleo-uplift and Lower Paleozoic oil and gas

- content[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 25 (3): 10–15.
- Xu S Y, Shao X S, Hong X Q, et al., 1984. Storm deposition on the coastal zone of the northern Hangzhou Bay[J]. *Science in China (Series B)*, (12): 1136–1145.
- Yang Y, Yang Y, Wen L, et al., 2021. New progress and prospect of Middle Permian natural gas exploration in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry B*, 8 (1): 35–47.
- Yu Q, Mou C L, Zhang H Q, et al., 2011. Sedimentary evolution and reservoir distribution of northern Upper Yangtze plate in Sinian-Early Paleozoic[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (3): 672–680 (in Chinese with English abstract).
- Yang W, Xie W R, Wei G Q, et al., 2012. Sequence lithofacies paleogeography, favorable reservoir distribution and exploration zones of the Cambrian and Ordovician in Sichuan Basin, China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 33 (S2): 21–34 (in Chinese with English abstract).
- Zhang B, Deng M L, Shi W, et al., 2009. A review of the study of tempestite with special reference to significance of tempestite in Xingwen County[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 29 (Z1): 35–38 (in Chinese with English abstract).
- Zhang D, 2022. Development prospect of natural gas industry in the Sichuan Basin in the next decade[J]. *Natural Gas Industry B*, 9 (2): 119–131.
- Zhang D W, He Z L, Li G L, 2020. Geochemistry and accumulation model of the Ordovician hydrocarbon in the Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Natural Gas Geoscience*, 5 (4): 199–206.
- Zhang D W, Hao Y Q, Zhang R Q, et al., 2020. Hydrocarbon Potential Analysis and Exploration Significance of the Meitan Formation, Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38 (3): 635–647 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H R, Jiang H, Chen Z Y, et al., 2020. A review of the research status of Caledonian movement stages in Sichuan Basin and surrounding areas[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 39 (5): 118–126 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H G, 2015. Influence of paleo-uplift evolution on hydrocarbon accumulation of lower assemblages in Sichuan Basin and its surrounding areas[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 41 (8): 126–129 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W C, 2009. Tectonic Framework and Tectonic Evolution of the Sichuan Basin in the Mesozoic and Cenozoic[D]. Beijing: China University of Geosciences.
- Zhang Y B, Zhou Z Y, Zhang J N, 2002. Sedimentary differentiation during the latest Early Ordovician—earliest Darriwilian in the Yangtze Block[J]. *Journal of Stratigraphy*, 26 (4): 302–314.
- Zhang Z, Du Y S, Mao Z C, et al., 2008. The Upper Devonian tempestites from Liantang, Guiyang, southeastern Hunan Province and its palaeogeographic and palaeoclimatic significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26 (3): 369–375.
- Zhang Z, Du Y S, Shu X S, et al., 2006. Sedimentary successions of the Early Triassic tempestite in southeastern Hubei Province and their environment significance[J]. *Geological Science and Technology Information*, 25 (2): 29–34.
- Zhao C, Chen X H, Li X B, et al., 2013. Characteristics of tempestite of Ediacaran Dengying Formation, in the eastern Yangtze Gorges area and its geological significance[J]. *Acta Geological Sinica*, 87 (12): 1901–1912 (in Chinese with English abstract).
- Zhang B S, Mou C L, Liang W, et al., 2016. Discovery and significance of the storm deposit within the Lower Cambrian Qingxudong Formation in the Dingtai area, northwestern Guizhou[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34 (3): 478–486 (in Chinese with English abstract).
- Zhu C Q, Xu M, Shan J N, et al., 2009. Quantifying the denudations of major tectonic events in Sichuan basin: Constrained by the paleothermal records[J]. *Geology in China*, 36 (6): 1268–1277 (in Chinese with English abstract).
- Zou C N, Du J H, Xu C C, et al., 2014. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian–Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 41 (03): 278–293 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈秀其, 周涛发, 侯明金, 2018. 扬子东南缘北东段加里东期构造不整合特征[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 41 (5): 689–697.
- 陈宗清, 2010. 论四川盆地奥陶系天然气勘探[J]. *天然气工业*, 30 (1): 23–30.
- 邓秀芹, 付金华, 姚泾利, 等, 2011. 鄂尔多斯盆地中及上三叠统延长组沉积相与油气勘探的突破[J]. *古地理学报*, 13 (04): 443–455.
- 董大忠, 高世葵, 黄金亮, 等, 2014. 论四川盆地页岩气资源勘探开发前景[J]. *天然气工业*, 34 (12): 1–15.
- 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* (02): 259–262.
- 杜远生, 徐亚军, 2012. 华南加里东运动初探[J]. *地质科技情报*, 31 (5): 43–49.
- 杜远生, 周道华, 龚淑云, 等, 2001. 甘肃靖远—景泰泥盆系湖相风暴岩及其古地理意义[J], 20 (3): 69–73.
- 冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 等, 2001a. 中国南方早奥陶世岩相古地理[J]. *古地理学报* (02): 11–22.
- 冯增昭, 彭勇民, 金振奎, 等, 2001b. 中国南方中及晚奥陶世岩相古地理[J]. *古地理学报* (04): 10–24.
- 何登发, 李德生, 张国伟, 等, 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. *地质科学*, 46 (3): 589–606.
- 胡华蕊, 邢凤存, 侯明才, 等, 2019. 上扬子奥陶纪层序岩相古地理重建及油气勘探启示[J]. *地球科学*, 44 (3): 798–809.
- 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* (03): 391–395.
- 黄程, 沈宇葳, 文馨, 2021. 四川广元清风峡剖面上泥盆统风暴沉积特征及其古环境意义[J]. *古地理学报*, 23 (6): 1094–1109.

- 黄乐清, 刘伟, 2016. 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, 34(5): 830–841.
- 李皎, 何登发, 梅庆华, 2015. 四川盆地及邻区奥陶纪构造-沉积环境与原型盆地演化[J]. 石油学报, 36(4): 427–445.
- 李伟, 易海永, 胡望水, 等, 2014. 四川盆地加里东古隆起构造演化与油气聚集的关系[J]. 天然气工业, 34(3): 8–15.
- 李阳, 薛兆杰, 程喆, 等, 2020. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J]. 中国石油勘探, 25(01): 45–57.
- 梁桂香, 1994. 风暴沉积及其构造背景[J]. 世界地质(03): 131–143.
- 林良彪, 余瑜, 黄棋琴, 等, 2017. 川北旺苍地区奥陶系地球化学特征及沉积环境分析[J]. 岩石学报, 33(4): 1272–1284.
- 刘宝珺, 许效松, 罗安屏, 等, 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(03): 28–39.
- 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)(01): 1–4.
- 刘树根, 邓宾, 李智武, 等, 2011. 盆山结构与油气分布——以四川盆地为例[J]. 岩石学报, 27(3): 621–635.
- 刘树根, 王世玉, 孙玮, 等, 2013. 四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组黑色页岩特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 40(6): 621–639.
- 刘伟, 洪海涛, 徐安娜, 等, 2017. 四川盆地奥陶系岩相古地理与勘探潜力[J]. 海相油气地质, 22(4): 1–10.
- 梅冥相, 马永生, 邓军, 等, 2005. 加里东运动构造古地理及滇黔桂盆地的形成——兼论滇黔桂盆地深层油气勘探潜力[J]. 地学前缘(03): 227–236.
- 牟传龙, 1989. 谈谈丘状层理与风暴沉积[J]. 岩相古地理(06): 40–44.
- 牟传龙, 葛祥英, 许效松, 等, 2014. 中上扬子地区晚奥陶世岩相古地理及其油气地质意义[J]. 古地理学报, 16(4): 427–440.
- 牟传龙, 周恩恩, 陈小炜, 2016. 中国岩相古地理图集埃迪卡拉纪—志留纪[M]. 北京: 地质出版社, PP: 55–64.
- 牟传龙, 2022. 关于相的命名及其分类的建议[J]. 沉积与特提斯地质, 42(3): 331–339.
- 沈传波, 梅廉夫, 徐振平, 等, 2007. 四川盆地复合盆山体系的构造构造和演化[J]. 大地构造与成矿学(03): 288–299.
- 宋金民, 刘树根, 赵异华, 等, 2016. 川中地区中下寒武统风暴岩特征及沉积地质意义[J]. 石油学报, 37(1): 30–42.
- 宋金民, 杨迪, 李朋威, 等, 2012. 中国碳酸盐风暴岩发育特征及其地质意义[J]. 现代地质, 26(3): 589–600.
- 宋文海, 1987. 对四川盆地加里东期古隆起的新认识[J]. 天然气工业(03): 6–11.
- 孙小勇, 牟传龙, 葛祥英, 等, 2016. 四川广元-陕西镇巴地区上奥陶统五峰组地球化学特征及沉积环境意义[J]. 沉积与特提斯地质, 36(01): 46–54.
- 王世谦, 陈更生, 董大忠, 等, 2009. 四川盆地地下古生界页岩气藏形成条件与勘探前景[J]. 天然气工业, 29(5): 51–58.
- 肖斌, 刘树根, 冉波, 等, 2021. 四川盆地北缘五峰组和龙马溪组沉积构造格局研究[J]. 地球科学, 46(7): 2449–2465.
- 徐世琦, 洪海涛, 师晓蓉, 2002. 乐山—龙女寺古隆起与下古生界含油气性的关系探讨[J]. 天然气勘探与开发(03): 10–15.
- 许世远, 邵虚生, 洪雪晴, 等, 1984. 杭州湾北部滨岸的风暴沉积[J]. 中国科学(B辑)(12): 1136–1145.
- 余谦, 牟传龙, 张海全, 等, 2011. 上扬子北缘震旦纪-早古生代沉积演化与储层分布特征[J]. 岩石学报, 27(3): 672–680.
- 杨威, 谢武仁, 魏国齐, 等, 2012. 四川盆地寒武纪—奥陶纪层序岩相古地理、有利储层展布与勘探区带[J]. 石油学报, 33(S2): 21–34.
- 张斌, 邓茂林, 税伟, 等, 2009. 风暴岩研究述评兼论文风暴岩研究的意义[J]. 四川地质学报, 29(Z1): 35–38.
- 张殿伟, 郝运轻, 张荣强, 等, 2020. 四川盆地龙潭组生烃潜力分析及勘探意义[J]. 沉积学报, 38(3): 635–647.
- 张浩然, 姜华, 陈志勇, 等, 2020. 四川盆地及周缘地区加里东运动幕次研究现状综述[J]. 地质科技通报, 39(5): 118–126.
- 张宏光, 2015. 四川盆地及周缘古隆起演化对下组合油气成藏的影响[J]. 内蒙古石油化工, 41(8): 126–129.
- 张维宸, 2009. 四川盆地中生代区域构造格架与构造演化过程研究[D]. 中国地质大学(北京).
- 张允白, 周志毅, 张俊明, 2002. 扬子陆块早奥陶世末期—中奥陶世 darriwilian 初期沉积分异[J]. 地层学杂志(04): 302–314.
- 张哲, 杜远生, 毛治超, 等, 2008. 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(03): 369–375.
- 张哲, 杜远生, 舒雪松, 等, 2006. 鄂东南地区早三叠世风暴沉积序列及其环境意义[J]. 地质科技情报(02): 29–34.
- 赵灿, 陈孝红, 李旭兵, 等, 2013. 峡东地区埃迪卡拉系灯影组风暴岩的发现及其环境意义[J]. 地质学报, 87(12): 1901–1912.
- 郑斌嵩, 牟传龙, 梁薇, 等, 2016. 黔西北丁台地区下寒武统清虚洞组风暴沉积的发现及其意义[J]. 沉积学报, 34(3): 478–486.
- 朱传庆, 徐明, 单竞男, 等, 2009. 利用古温标恢复四川盆地主要构造运动时期的剥蚀量[J]. 中国地质, 36(6): 1268–1277.
- 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等, 2014. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. 石油勘探与开发, 41(03): 278–293.