



辽宁本溪牛毛岭马家沟组顶部剖面微相分析与沉积环境

孙宝亮, 梁俊红, 温守钦, 崔卫利

东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004

摘 要: 牛毛岭马家沟组顶部剖面位于本溪国家地质公园牛毛岭景区的东部。通过对碳酸盐岩的微相分析, 恢复了马家沟组顶部剖面沉积环境并总结了沉积环境变化规律。依据标本研究划分出 14 种微相类型, 包括 1 种风暴岩微相类型、9 种缓坡微相类型、3 种标准微相类型和 1 种自定义微相类型。此剖面自下而上划分为 3 个低能型向上变浅潮缘旋回。旋回一的沉积环境由内缓坡的潮缘或潟湖, 至沙滩和沙堤, 至潮汐水道的潮缘; 旋回二沉积环境由局限或开放的内缓坡, 至潮缘的浅潮下带和个别层位的潮间、潮上带; 旋回三最为典型, 沉积环境由灰色灰岩的中缓坡, 至潮缘, 再到黄色调碳酸盐岩的潮缘浅潮下带, 至潮间、潮上带的蒸发潟湖, 至于旱气候下潮间、潮上带的蒸发海岸。推断染色的 Fe^{3+} 和黏土矿物为陆源, 此剖面点处是碳酸盐岩孤岛(洲)的潮缘环境。

关键词: 碳酸盐岩; 沉积微相; 沉积环境; 马家沟组; 辽宁省

MICROFACIES ANALYSIS AND SEDIMENTARY ENVIRONMENT OF THE SECTION OF TOP MAJIAGOU FORMATION IN NIUMAOLING SCENIC AREA OF BENXI CITY, LIAONING PROVINCE

SUN Bao-liang, LIANG Jun-hong, WEN Shou-qin, CUI Wei-li

School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China

Abstract: The section of top Majiagou Formation is located in the east of Niumaoling Scenic Area of Benxi National Geopark. The sedimentary environment of the section is restored and its change rules are summarized through the microfacies analysis of carbonate rocks. According to the study of specimens, 14 microfacies types are classified, including 1 tempestite microfacies type, 9 gentle slope microfacies types, 3 standard microfacies types and 1 custom microfacies type. The section can be divided into 3 low-energy upward-shallowing tidal margin cycles from bottom to top: The sedimentary environment of Cycle I is tidal margin or lagoon of inner gentle slope—sandbeach and sand bank—tidal margin of tide gate; The sedimentary environment of Cycle II is from limited or open inner gentle slope to shallow subtidal zone of tidal margin and intertidal-supratidal zone of individual layer; The Cycle III is the most typical, with the sedimentary environment from the middle gentle slope of gray limestone, to tidal margin, then to the tidal margin shallow subtidal zone of yellow carbonate rocks, to the evaporative lagoons of intertidal-supratidal zones, and to the evaporative coast of intertidal-supratidal zones in arid climate. It is inferred that the stained Fe^{3+} and clay minerals are of terrigenous origin, and the section point is the tidal margin environment of carbonate rock island (bar).

Key words: carbonate rock; sedimentary microfacies; sedimentary environment; Majiagou Formation; Liaoning Province

收稿日期: 2020-12-22; 修回日期: 2021-01-09. 编辑: 黄欣、张哲.

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目“辽西早白垩世义县组碎屑岩的物源研究”(编号 N100401005).

作者简介: 孙宝亮 (1970—), 男, 硕士, 讲师, 从事沉积相和沉积环境研究工作, 通信地址 辽宁省沈阳市和平区文化路 东北大学 265 信箱, E-mail//sunbaoliang@mail.neu.edu.cn

0 引言

本溪国家地质公园牛毛岭景区(石炭纪公园)是华北地区晚石炭世本溪组的标准地层剖面所在地,位于本溪市溪湖区,本溪湖以西柳彩线上,北边为豆腐房沟村,南边为蚂蚁沟村,西边有新洞沟村^[1]。本溪组不整合覆盖于中奥陶统马家沟组灰岩之上。本次实测的马家沟组顶部剖面位于牛毛岭景区的东部(图1),由一套灰色—黄色调含黏土矿物碳酸盐岩组成。剖面野外实测厚达56.1 m,出露部分45.7 m,被掩盖10.4 m。对该剖面开展精细地层研究,恢复沉积环境,可为重建辽宁省奥陶纪沉积古地理提供基础地质资料。

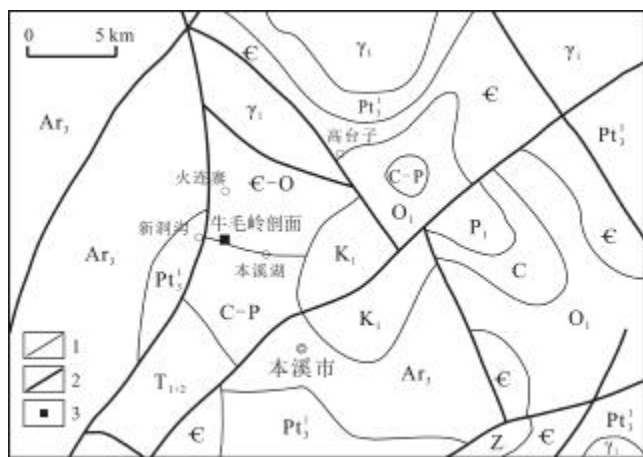


图1 本溪市地质简图及剖面位置

(引自文献[1])

Fig. 1 Geological sketch map of Benxi City with position of Niemaoling section

(From Reference [1])

Ar₃—新太古界(Neoarchean); Pt₃—新元古界(Neoproterozoic); Z—震旦系(Sinian); C—寒武系(Cambrian); C—O—寒武系和奥陶系并层(Cambrian and Ordovician); O—奥陶系(Ordovician); C—石炭系(Carboniferous); CP—石炭系和二叠系并层(Carboniferous and Permian); P₁—下二叠统(Lower Permian); T₁₊₂—中下三叠统(Lower-Middle Triassic); K₁—白垩系(Cretaceous); γ₁—片麻状花岗岩(gneissic granite); 1—地质界线(geological boundary); 2—断层(fault); 3—剖面位置(section position)

微相分析(或者称为微相分析与解释)有2层含义:其一对微相观察分析,确定有代表性的微相类型,总结该微相类型的基本特征和环境指示意义;其二是以微相类型的环境指示意义为主来恢复沉积环境。Flügel总结了标准微相类型和缓坡微相类型的特征及环境意义,并进一步归纳总结这2种微相类型标准和

碳酸盐岩相模式中相带之间的对应关系,用标本的微相类型确定其所处相带,即确定标本代表的地层的沉积环境^[2]。这样就将微相分析具体化、便捷化、可行化,为牛毛岭马家沟组顶部碳酸盐岩剖面沉积环境的恢复提供了理论依据。本研究以微相分析为主要手段恢复此剖面各层的沉积环境,再分析和总结此剖面沉积环境变化的规律,并进一步探讨此剖面的古地理条件。

1 地质背景

东北地区南部在前中生代处于华北古陆块区东段,本溪地区属于渤海东陆块太子河—浑江陆表海盆地构造单元^[3-4]。本溪市奥陶系属于华北地层区,辽东地层分区,太子河小区^[5],下奥陶统见冶里组、亮甲山组,中奥陶统仅发育马家沟组^[5-6],分为马家沟组一段、二段、三段^[6](图2)。华北板块中奥陶统马家沟组沉积后,大部分地区发生沉积间断,缺失部分中奥陶统和上奥陶统、志留系、泥盆系及下石炭统,华北板块东部马家沟组与上覆上石炭统本溪组为区域性平行不整合面接触。

牛毛岭马家沟组顶部碳酸盐岩剖面属于中奥陶统达瑞威尔阶马家沟组三段。本溪市牛心台地区马家沟组三段厚106.35 m,由海侵体系域、凝缩段和高水位体系域组成。其中高水位体系域厚约60 m,岩性为灰色中厚层状白云质砂屑灰岩,灰黄色薄层—中厚层状含灰质白云岩夹透镜状膏盐层,沉积环境为干旱蒸发条件下的潮间—潮上带封闭水体^[7]。牛毛岭剖面距牛心台的直线距离约20 km,与马家沟组三段顶部的高水位体系域岩性相似。据《辽宁省区域地质志》,上马家沟组代表性剖面位于本溪的太平沟,厚达558.6 m,豆腐沟剖面厚280.4 m^[8],牛毛岭马家沟组顶部剖面实际就是豆腐沟剖面的顶部。综合以上信息,认为此剖面属于马家沟组三段顶部的高水位体系域(图2)。

在寒武纪海洋中,钙化骨骼的分异度和丰度很低,特别是在早寒武世晚期古杯类的崩溃之后。直到中奥陶世达瑞威尔期(Darriwilian)—晚奥陶世桑比期(Sandbian)的奥陶纪大生物多样性事件,出现了新的骨骼类群,并且明显多样化,以生物骨骼为媒介形成的碳酸盐岩才有显著增长^[9-11]。因此相较于一般情况下的微相标准^[2-3],在达瑞威尔期的马家沟组顶部碳酸盐

年代地层			岩石地层							
系	统	阶	燕辽分区		辽东分区					
			唐山-北京	辽西	吉南	大连	太子河	牛心台	牛毛岭	
奥陶系	中统	达瑞威尔阶								
	大坪阶									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									
	下统									
奥陶系	中统									

内共存的或上下相近标本微相指示的环境,通过对标本 B6、B34、B39 的分析, MF1 指示的沉积环境近似于 RMF19 指示的沉积环境——内缓坡的潟湖或潮缘环境,或者更远岸略深的内缓坡环境。

2.2 标本微相分析

2.2.1 RMF22 微相特征

有多达 12 个标本确定为 RMF22, 其中 9 个为黄色调含黏土矿物的灰岩、含泥质灰岩或泥灰岩, 3 个为灰色灰岩。按顿哈姆(Dunham)灰岩分类方案, 其应命名为灰泥灰岩或黏结灰岩, 特征是基本不含生物碎屑, 无掘穴。该微相类型标本的纹层厚度存在差异, 镜下的明暗相间纹层呈如下 3 种形式。

(1)“异类岩性层理”纹层。为泥级、砂级的不规则互层的纹层, 具体表现为泥晶或球粒泥晶纹层和球粒亮晶纹层互层, 为水力携带和搬运沉积作用的结果。标本 B8、B24、B26、B30 具有这一沉积特征, 平行纹层略有起伏, 泥晶或球粒泥晶纹层厚 0.1~1.6 mm, 球粒亮晶纹层厚 0.1~1 mm (图 3a)。

(2)泥晶纹层与亮晶纹层相间纹层。由微生物席支撑、构建而成, 甚者形成纹层状黏结灰岩。该现象在标本 B21、B22、B29 存在, 为略起伏(或直)的平行纹层。泥晶纹层多, 偶见由球粒亮晶至泥晶渐变的逆递变层理纹层, 厚度在 0.03~0.1 mm 和 0.7~5 mm 两个范

围。亮晶纹层少, 表现为鸟眼构造, 大小 0.5~2 mm; 与纹层平行的鸟眼构造链; 亮晶点与泥晶斑驳状的纹层, 厚 1~4 mm; 薄亮晶线, 即层状小窗状孔, 厚度在 0.03~0.1 mm 和 1 mm 左右两个范围(图 3b)。

(3)黑线状泥晶勾勒微亮晶纹层。标本有 B4、B34、B38、B40、B41, 其中 B4、B34、B38 为灰色灰岩。黑线状泥晶纹层或直且平行, 或起伏弯曲, 厚 0.3~2 mm。微亮晶纹层厚度在 0.1~5 mm 和 1~10 mm 两个范围(图 3c)。B40 和 B41 分别为土黄色灰质白云岩和含白云质灰岩, 表面呈砂糖状, 镜下白云石晶粒呈菱形、方形, 自形程度高, 粒径 20~70 μm (图 3d)。

2.2.2 除 RMF22 外的微相类型及标本特征

此剖面中, 有 4 个标本确定为 RMF18, 3 个确定为 RMF19, 3 个确定为自定义 MF1, 以及各有 2 个标本确定为 RMF14、RMF23、SMF16—非纹层。以上的除 RMF22 外的微相类型和标本微相特征列于表 1。

表鲕是指皮质厚度明显小于整个鲕粒直径一半的鲕粒。在搅动水能量大的情况下, 鲕粒为沉积物中最大颗粒时, 表鲕可以与正常鲕粒一样用于判断沉积环境的能量, 具有环境指示意义。偏心鲕粒是由表鲕组成的球形和卵形复合颗粒^[2]。B10 含有表鲕和少量偏心鲕粒。表鲕通常只显示 1 或 2 个纹层, 1 层鲕层(亮晶环)和泥晶包膜为 1 个纹层。

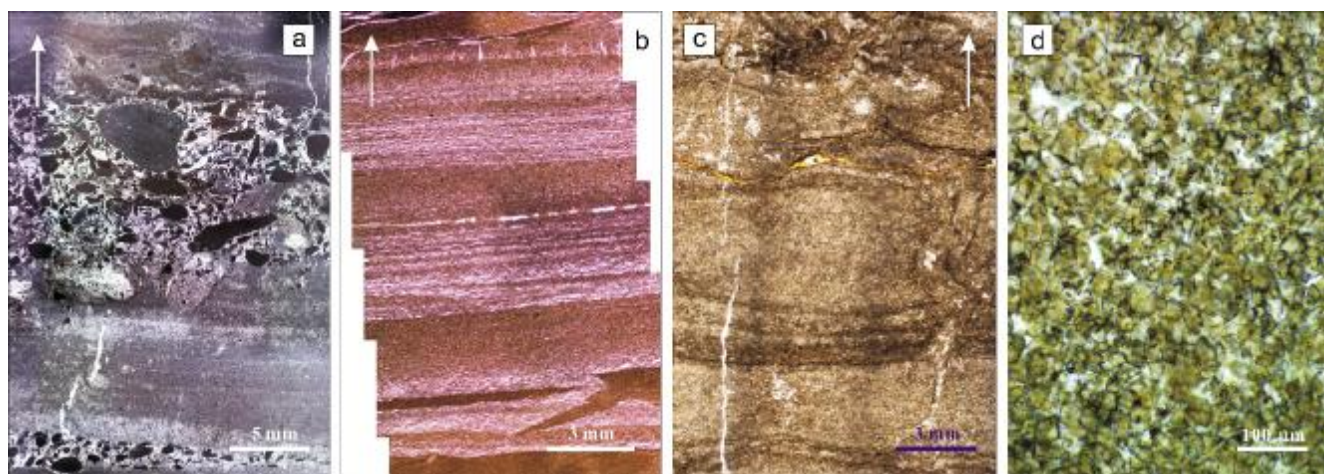


图 3 微相类型 RMF 22 显微照片

Fig. 3 Microphotographs of microfacies type RMF 22

a—标本 B8, 中间内碎屑层(Storm-SMF4)斜切下伏纹层(RMF 22)(middle intraclast layer/ Storm-SMF4 obliquely cutting underlying lamina/ RMF 22, specimen B8); b—标本 B29, 球粒泥晶与亮晶相间细纹层(pelmicritic lamina alternating with sparry lamina, specimen B29); c—标本 B41, 泥晶和微亮晶相间纹层(micritic lamina alternating with microsparry lamina, specimen B41); d—标本 B41 局部放大(partial enlargement of sucrosic dolomite texture, specimen B41); 单偏光, 箭头指向上(plane-polarized light)

表 1 微相类型和对应标本的微相特征

Table 1 Microfacies types and microfacies characteristics of corresponding specimens

微相标准	标本号	与微相标准吻合度	颜色	成分分类名称 (顿哈姆分类)	标本微相特征
Storm-SMF4	B8	很好	灰黑色	漂浮灰岩和颗粒灰岩	内碎屑颜色浅灰、灰白、棕色等,灰泥灰岩成分,多数 0.4 mm,大者可达 1~5 mm,次棱角—次圆状,紧密堆积;个别含介形虫;与 RMF22 共存(图 3a)
RMF2	B35	好	灰色	灰泥灰岩	厚层,约 1/3 面积为通道状、枝状掘穴,宽为 2~13 mm;掘穴内生物碎屑含量较高;海百合、三叶虫、介形虫,亮晶充填;沉积物中生物碎屑含量低(图 4a)
RMF3 (SMF8)	B37	很好	灰色	生物碎屑粒泥灰岩	厚层,约 1/2 面积为圆点和通道状掘穴,宽 10~30 mm,亮晶充填;沉积物中生物碎屑含量最高,包括介形虫、三叶虫、海百合、鸚鵡螺、有孔虫、Girvanella problematica、红藻(图 4b)
RMF14	B15	好	灰色	生物碎屑粒泥灰岩-灰泥灰岩	有掘穴,含生物碎屑和颗粒;海百合、介形虫、椭圆内碎屑(1~2 mm)、腕足动物、三叶虫(图 4c)
	B17	好	深灰色	球粒粒泥灰岩	灰泥球粒,粒径 0.08~0.3 mm,多数 0.1 mm,个别砾屑可达 5 mm;含生物碎屑;海百合、介形虫、三叶虫
RMF18	B12	好	灰色	球粒泥粒灰岩	掘穴,宽 2~5 mm;灰泥球粒,多数 60 μm ;含生物碎屑;厚壳和薄壳介形虫、海百合、三叶虫、角石、腹足
	B16、B20	很好、很好	灰色	灰泥灰岩	有掘穴,含生物碎屑:薄壳介形虫、小三叶虫等;B20 层厚 1 cm,与 SMF16 互层
RMF19	B18、B19	很好、很好	灰色	生物碎屑粒泥灰岩-灰泥灰岩	有掘穴,含生物碎屑:介形虫、三叶虫、海百合,生物完整,三叶虫细小,B19 中有一个 4 mm 大介形虫(图 4d)
	B1、B4、B14	好、很好、好	灰色	灰泥灰岩	中层,层厚 10~30 cm
RMF23 (SMF21)	B27	好	黄色	泥灰岩(黏结灰岩)	球粒泥晶纹层含有许多小亮点和弯曲短亮线状蓝藻或藻丝,中间夹一层状小窗状孔(长 2~3 mm,宽 0.6 mm)
	B42	很好	土黄色	白云岩(黏结灰岩)	皱的、模糊的球粒亮晶和球粒泥晶相间纹层,达到海绵状孔层构造的程度(图 4e);菱形、方形白云石,半自形,5~20 μm
RMF24	B33	一般	黄灰色	含泥质灰岩(漂浮灰岩和粒泥灰岩)	由砂、砾级内碎屑和微亮晶基质组成;内碎屑为黄、棕、灰色,次棱角状—次圆状,大小 0.2~3.5 mm(图 4f)
RMF29	B10	很好	黄红色	表鲕泥粒灰岩	颗粒以切向同心表鲕为主,还有少量放射状表鲕、偏心鲕粒、复合鲕粒;表鲕一般是由泥晶核心和一个纹层组成,直径 0.2~1 mm,大部分 0.4~0.5 mm(图 5a)
SMF16 -非纹层	B19、B20	很好、很好	灰色	球粒颗粒灰岩	有掘穴,灰泥球粒,次圆—圆状,多数椭圆形,粒径 0.1~0.3 mm;个别含厚壳介形虫、海百合,点—线接触,紧密堆积(图 5b);与 RMF18 互层
SMF23	B44	很好	土黄色	含泥质白云岩(灰泥灰岩)	含星散状硬石膏假晶,板条形,一般有直边和直角,0.1~0.4 mm,约 1 个假晶/mm ² ;砂糖状白云石结构,个体为方形、菱形,自形程度较高,40 μm (图 5c、d)
SMF24	B10	很好	黄红色	砾屑灰岩和颗粒灰岩	由表鲕泥粒灰岩内碎屑和亮晶组成,无基质;内碎屑约 2/3 砾屑,1/3 砂屑,0.2~5 mm,磨圆好,点—线接触,较紧密堆积(图 5e)
自定义 MF1	B6	一般	浅奶黄色	灰泥灰岩	有“人”字形内碎屑条,宽约 6 mm,有掘穴;内碎屑砂、砾级,0.3~3 mm,黄白、土黄、土色
	B34、B39	好、很好	灰色	灰泥灰岩	相较泥晶区,微亮晶区为掘穴,呈现叉子状、椭圆状、通道状等,宽 3~7 mm;B39 掘穴集合起来葡萄状,占薄片面积的 80%(图 5f);B34 与 RMF22 共存

注:微相分析中生物碎屑类型按含量由高到低排序。

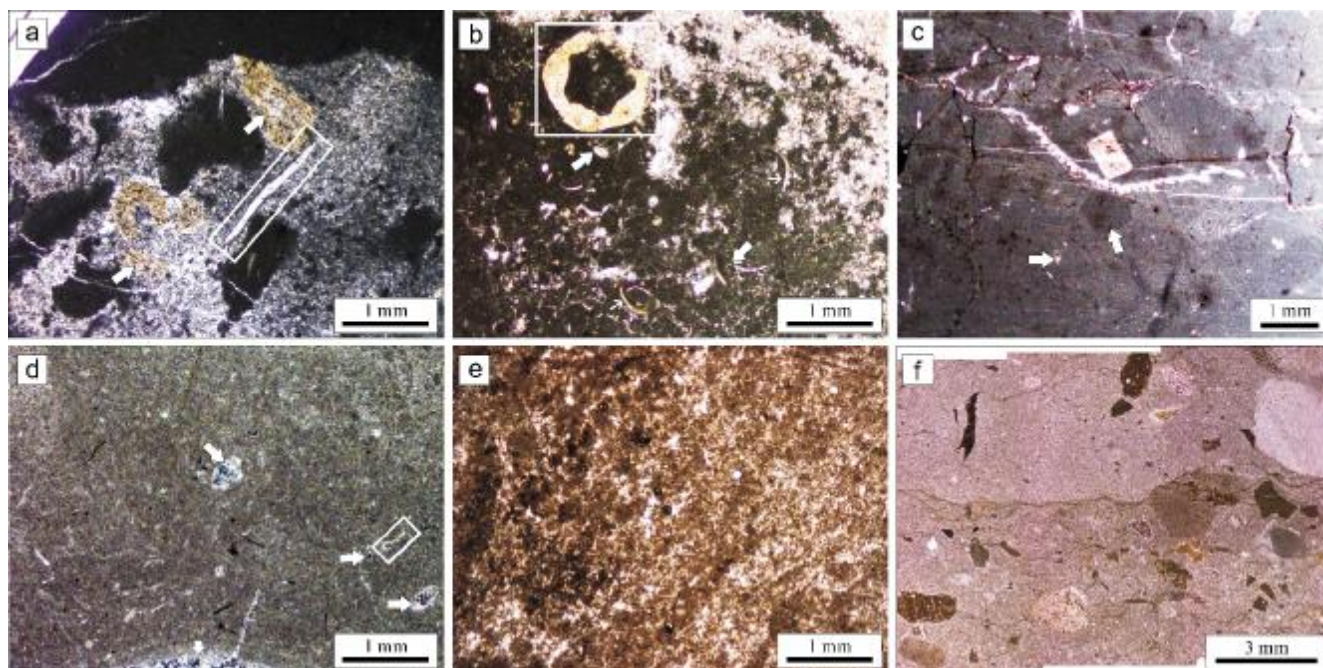


图4 各微相类型显微照片

Fig. 4 Microphotographs of microfacies types

a—RMF2, 掘穴内生物碎屑含量较高, 标本 B35, 单偏光(RMF2, high bioclast content in burrows, specimen B35, plane-polarized light); b—RMF3, 标本 B37, 单偏光(RMF3, specimen B37, plane-polarized light); c—RMF14, 标本 B15, 单偏光(RMF14, specimen B15, plane-polarized light); d—RMF18, 标本 B19, 正交偏光(RMF18, specimen B19, cross-polarized light); e—RMF23, 标本 B42, 单偏光(RMF23, specimen B42, plane-polarized light); f—RMF24, 标本 B33, 单偏光(RMF24, specimen B33, plane-polarized light); 箭头、方框指示生物碎屑和内碎屑(arrow and box indicating bioclast and intraclast)

3 沉积环境恢复

微相分析的第二层含义是以微相类型的环境指示意义来恢复沉积环境。Flügel 归纳总结了切实可行的方法, 总结出标准微相类型和缓坡微相类型与碳酸盐岩缓坡相模式中相带之间的对应关系, 用标本的微相类型确定其所处相带, 并辅助以未列入微相标准中的颜色、结构、构造等个别特征, 进一步确定标本所在地层的沉积环境^[2]。下面由下至上逐层叙述牛毛岭马家沟组顶部剖面沉积环境(图6)。

分层①灰色薄层灰岩(厚 6.26 m)。标本 B1 和 B4 的微相类型是 RMF19, B4 也有小部分定为 RMF22。总体沉积环境是内缓坡的潟湖或潮缘。

分层②黄色调为主的中薄层灰岩(厚 1.91 m)。标本 B8 的灰黑色内碎屑层(微相类型是 Storm-SMF4)斜切了下边的土黄色纹层(RMF22), 有的地方形成槽形底痕, 宽 4 mm, 深 4 mm, 内碎屑层是此剖面仅见的一处风暴沉积。B6 是自定义 MF1, 借鉴其上 B8 的 RMF22, 二者为潮缘环境, 记录了短暂的或者规模小的风暴作用。B10 是由下部的表鲕泥粒灰岩(RMF29), 和

上部的内碎屑灰岩(SMF24)组成, 上部灰岩内碎屑是由表鲕泥粒沉积破碎而成的。B10 含有少数偏心鲕粒, 指示低能浅海潟湖的周期性无搅动环境。B10 反映了在沉积时是内缓坡的沙滩和沙堤这样的较高能环境, 但也有周期性无搅动低能时候; 在破碎后形成的是潮汐水道和潮坪滞留沉积物的潮缘。分层②的总体沉积环境是内缓坡的潮缘或潟湖、沙滩和沙堤。

分层③灰色厚层灰岩(厚 11 m)和分层④灰黑色薄层灰岩(厚 0.38 m)。标本 B12 的微相类型是 RMF18, 为局限的内缓坡。B14 是 RMF19, 为潟湖或潮缘。B15 是 RMF14, 是此剖面中生物碎屑种类最多之一, 为开放的内缓坡。B16 是 RMF18, 为局限的内缓坡。B17 是 RMF14, 为开放的内缓坡。B18 是 RMF18, 为局限的内缓坡。B19 大部分是 RMF18, 小部分是 SMF16—非纹层, 而 B20 的大部分是 SMF16—非纹层, 小部分是 RMF18, 二者是两种微相类型共存, 为局限的内缓坡。除了 B14 外, 分层③④的总体沉积环境是较远岸的、局限或开放的内缓坡。

分层⑤黄色薄层含泥质灰岩、泥灰岩(厚 3.64 m)。

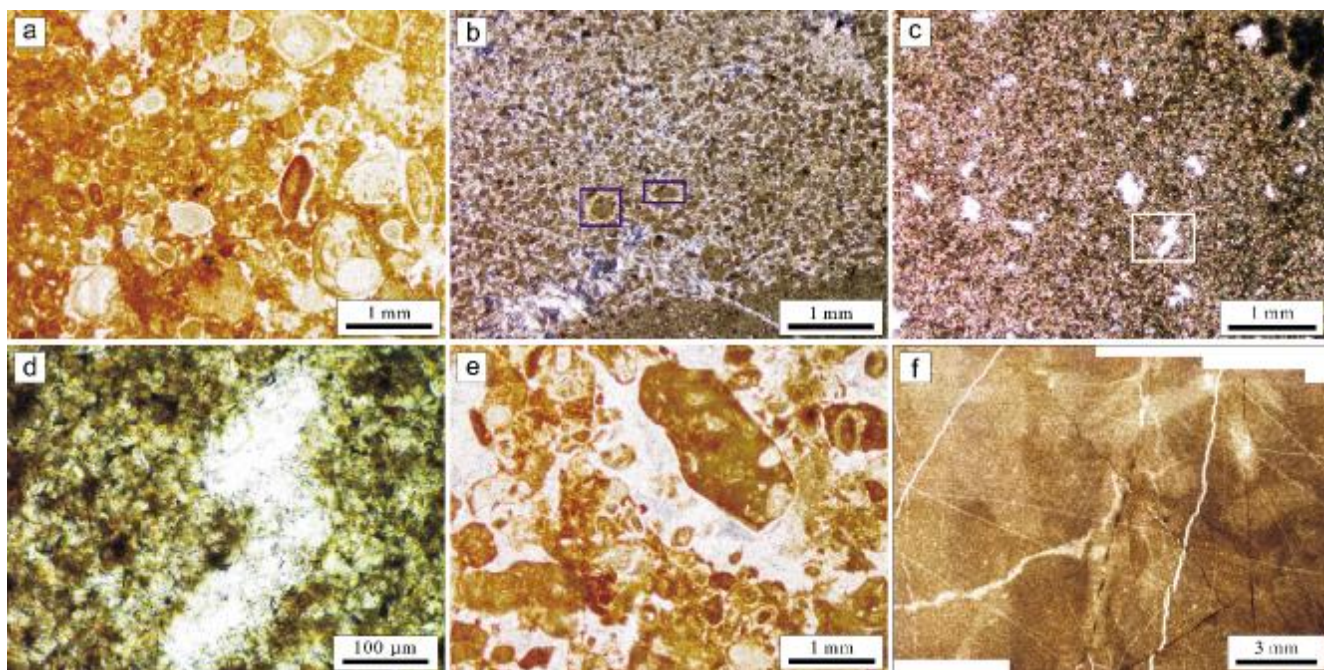


图 5 各微相类型和硬石膏假晶显微照片

Fig. 5 Microphotographs of microfacies types and anhydrite pseudomorphs

a—RMF29, 表鲕, 标本 B10, 单偏光(RMF29, superficial oolith, specimen B10, plane-polarized light); b—SMF16—非纹层, 含介形虫, 标本 B20, 正交偏光 (SMF16-non-laminated, containing ostracoda, specimen B20, cross-polarized light); c—SMF23, 白云岩含星散状硬石膏假晶, 标本 B44, 单偏光 (SMF23, dolomite containing scattered anhydrite pseudomorphs, specimen B44, plane-polarized light); d—长方形硬石膏假晶, 标本 B44, c 中方框的放大, 单偏光(enlargement of the box in Fig. 5c, rectangular anhydrite pseudomorphs, specimen B44, plane-polarized light); e—SMF24, 标本 B10, 单偏光 (SMF24, specimen B10, plane-polarized light); f—自定义 MF1, 掘穴, 标本 B39, 单偏光(MF1 defined by the paper, burrow, specimen B39)

由下至上的 7 个标本, 基本是灰泥灰岩和黏结灰岩, 有或多或少的微生物席。标本 B21、B22、B24、B26、B29、B30 的微相类型是 RMF22, 为潮缘。其中 B29 有微生物席, 有层状小窗状孔隙, 有垂直纹层和平行纹层的干燥裂缝, 因此定 B29 为潮间、潮上带。B27 是 RMF23, 为潮缘。顶部的 B33 是 RMF24, 含有 2 个砂屑属于黑卵石, 能指示潮间或浅潮下带^[2], 还含有 1 个由 Rothpletzella 组成的砾屑, 为潮缘。总体沉积环境为潮缘的浅潮下带, 只有 B29 为潮上、潮间带。

分层⑥厚层灰色灰岩(厚 5.12 m)。标本 B34 的微相类型既有 RMF22 又有自定义的 MF1, 为潮缘。B35 是 RMF2, 是此剖面中掘穴形态最好的。B37 是 RMF3, 沉积物中生物碎屑含量和生物碎屑种类是此剖面中最高(多)的, 二者为中缓坡。总体沉积环境是中缓坡。

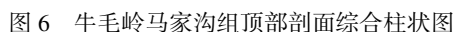
分层⑦中薄层灰色灰岩(厚 0.88 m)。标本 B38 的微相类型是 RMF22。标本 B39 是自定义的 MF1, 掘穴密度较大, 借鉴相邻上、下标本的微相类型 RMF22。沉

积环境为潮缘的浅潮下带。

分层⑧中薄层黄色调含白云质灰岩或灰质白云岩(厚 5.47 m)。标本 B40 和 B41 的微相类型是 RMF22。沉积环境为潮缘的浅潮下带。

分层⑨中薄层黄色白云岩(厚 9.57 m)。标本 B42 和 B43 都是蒸发岩溶塌角砾岩, 有树枝状裂纹, 基本没有破裂成完全的碎块, 未破裂部分起连接作用, 紧密吻合, 棱角状—次棱角状, 大小为 5~20 mm。发育明显的裂隙, 宽为 1~10 mm, 含 0.2~5 mm 黄色小碎块, 胶结物土色。蒸发岩溶塌角砾岩指示了海平面下降, 也可能指示阶段性暴露。综合标本 B42 的纹层黏结灰岩、RMF23 微相类型、白云岩和蒸发岩溶塌角砾岩信息, 认为分层⑨沉积环境为潮缘, 潮间、潮上带的蒸发潟湖。

分层⑩厚层土黄色白云岩(厚 4.56 m)。标本 B44 的微相类型是 SMF23, 砂糖状白云岩, 含星散状的硬石膏假晶。沉积环境为潮缘, 干旱气候的潮间、潮上带



1—灰岩(limestone); 2—含泥质灰岩(argillaceous limestone); 3—泥灰岩(marl); 4—含白云质灰岩(dolomitic limestone); 5—灰质白云岩(calcareous dolomite); 6—含泥质白云岩(argillaceous dolomite); 7—白云岩(dolomite); 8—地层掩盖(covered strata); 9—介形虫(ostracoda); 10—海百合(crinoid); 11—三叶虫(trilobite); 12—腕足(brachiopod); 13—球粒(spherulite); 14—鲕粒(ooid); 15—掘穴(burrow); 16—起伏纹层(undulatory lamina); 17—平面、平行纹层(planar and parallel lamina); 18—蒸发岩溶塌角砾(evaporite solution breccia); 19—硬石膏假晶(anhydrite pseudomorph)

的蒸发海岸(萨布哈)。

4 剖面沉积环境恢复

牛毛岭马家沟组顶部剖面的碳酸盐岩基本呈 2 类颜色:灰色和黄色调。黄色调较为丰富,变化范围包括黄色、黄白色、黄红色、略微黄色的灰色、黄灰色。在此剖面中,相较于灰色灰岩,黄色调灰岩的黏土含量高,且黏土矿物含量和黄色调间是正相关关系。

此剖面出露地层厚度 45.7 m,由下至上灰色灰岩和黄色调含黏土矿物碳酸盐岩 3 次交替出现。这 3 次灰色灰岩向黄色调含黏土矿物碳酸盐岩变化,实质为 3 个向上变浅的潮缘旋回,每个潮缘旋回都是低能型向上变浅序列,反映的沉积环境变化情况如下(图 6)。

旋回一,由分层①②组成,厚度为 8.17 m,占出露地层厚度的 18%。虽然分层②与分层①为连续沉积,但在颜色和黏土矿物含量上为突变关系,分层②内部在颜色上也具突变特征。沉积环境变化为:内缓坡的潮缘或潟湖—沙滩和沙堤—潮汐水道的潮缘。

旋回二,由分层③—⑤组成,厚度为 13.74 m,占出露地层厚度的 30%。分层③—⑤为连续沉积,颜色和黏土矿物含量上为连续渐变,黏土矿物含量在泥灰岩 B30 和 B31 处达到最高,是整个剖面中最高者;颜色在 B28 和 B29 处达到黄红色。沉积环境由局限或开放的内缓坡,至潮缘的浅潮下带和个别层位的潮间、潮上带。

旋回三,由分层⑥—⑩组成,厚度为 23.79 m,占出露地层厚度的 52%。本旋回内在颜色和黏土矿物含量上为连续渐变,黏土矿物含量和颜色在顶部土黄色含泥质白云岩 B44 处达到最高。沉积环境由灰色灰岩的中缓坡到潮缘,再到黄色调碳酸盐岩的潮缘的浅潮下带,至潮间、潮上带的蒸发潟湖,至干旱气候下的潮间、潮上带的蒸发海岸。旋回三最为典型,其向上变浅序列完整、详细,变化缓慢。

5 剖面古地理分析

从牛毛岭马家沟组顶部剖面的第三个潮缘旋回来看,向上越浅黏土矿物含量越高,颜色越黄,说明染色 Fe^{3+} 和黏土矿物为陆源;海平面下降,海退后,此剖面点离陆更近,而接受更多陆源的含 Fe^{3+} 黏土矿物。在旋回三中,同样是潮缘沉积环境的灰色和黄色调碳酸盐岩,

根据生物相分析,都为无氧—贫氧的沉积环境,说明不是富氧气底层水在沉积物表层氧化而成的染色 Fe^{3+} 。如果是硫酸盐还原菌的缺乏、或其他条件导致的浅埋藏而成的染色 Fe^{3+} ,那么颜色很可能会突变,说明也不是上述原因而成的染色 Fe^{3+} 。总之推断染色的 Fe^{3+} 和黏土矿物为陆源。

相较于旋回三,旋回二的灰岩颜色近红色,黏土矿物含量为此剖面中最高,推断这些物质为陆地来源,且叠加有某种特别地质作用,如物源区强烈的风化作用、长时间的洪泛作用等,使得更多黏土矿物和 Fe^{3+} 进入海洋。

如果缓坡环境连接到大片陆地,那么内缓坡潮缘环境的潮间、潮上带会沉积有黏土矿物和石英砂。牛毛岭马家沟组顶部剖面的灰岩只含有黏土矿物,即使旋回二的黄色调灰岩黏土矿物含量为此剖面中最高,也不含石英砂,判断此剖面点处不是大片陆地的潮缘环境,而是碳酸盐岩孤岛(洲)的潮缘环境。

牛毛岭马家沟组顶部剖面的旋回三与王一刚等^[20]和洪海涛等^[21]恢复的四川盆地下三叠统飞仙关期古地理中的碳酸盐岩蒸发台地类似。环开江—梁平海槽的碳酸盐岩蒸发台地发育在川东北地区 and 川西北地区,飞仙关组鲕粒灰岩出现在中、下部,其上覆蒸发潮坪的膏岩、含膏泥晶灰岩发育,飞仙关组上部由多个潮坪旋回组成^[20]。而环开江—梁平海槽的碳酸盐岩蒸发台地远离康滇古陆,之间隔着冲击平原、半局限海、开阔台地相带^[20-21]。牛毛岭马家沟组顶部剖面点处是碳酸盐岩孤岛(洲)的潮缘环境这一推断与四川盆地下三叠统飞仙关期的碳酸盐岩蒸发台地远离古陆的结论相近。

6 结论

(1)依据标本研究,牛毛岭马家沟组顶部剖面可划分出 14 种微相类型,包括 Storm-SMF4 风暴岩微相类型 1 种,RMF2、3、14、18、19、22、23、24、29 缓坡微相类型 9 种,SMF16、23、24 标准微相类型 3 种,1 种自定义的微相类型 MF1。

(2)牛毛岭马家沟组顶部剖面自下而上为 3 个低能型向上变浅潮缘旋回,由灰色—黄色调含黏土矿物碳酸盐岩组成。旋回一的沉积环境由内缓坡的潮缘或潟湖,至沙滩和沙堤,至潮汐水道的潮缘。旋回二沉积

环境为由局限或开放的内缓坡,至潮缘的浅潮下带和个别层位的潮间、潮上带。旋回三最为典型,其序列完整、详细,变化缓慢。其沉积环境由灰色灰岩的中缓坡,至潮缘,再到黄色调碳酸盐岩的潮缘浅潮下带,至潮间、潮上带的蒸发潟湖,至于旱气候下的潮间、潮上带的蒸发海岸。

(3)牛毛岭马家沟组顶部剖面中染色 Fe^{3+} 和黏土矿物具有陆源性,古地理为不是大片陆地的潮缘环境,而是碳酸盐孤岛(洲)的潮缘环境。

致谢:审稿专家和编辑老师认真、细致审阅本文并给予指正和建设性意见,使本文更为完善;王恒、孙野平、李阳、刘林和罗明鑫同学参与野外实测剖面工作,并在微相分析中给予启发和帮助,在此一并衷心感谢!

参考文献(References):

- [1]曲跃,曹成润,张武,等.辽宁东部晚古生代本溪组煤系地层鳞木的发现及其意义[J].地质通报,2015,34(2/3):419-424.
Qu Y, Cao C R, Zhang W, et al. Lepidodendroid fossils discovered from the coal bed of the Upper Paleozoic Benxi Formation in eastern Liaoning[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(2/3): 419-424.
- [2]Flügel E. Microfacies of carbonate rocks: Analysis, interpretation and application[M]. 2nd ed. New York: Springer, 2010:1-976.
- [3]刘英才,付俊彧,赵春荆,等.《东北地区1:150万大地构造相图》的编制[J].地质与资源,2020,29(1):1-6.
Liu Y C, Fu J Y, Zhao C J, et al. Compilation of the 1:1 500 000 Tectonic Facies Map of Northeast China[J]. Geology and Resources, 2020, 29(1): 1-6.
- [4]左沼滔,胡忠贵,张春林,等.克拉通盆地差异性构造活动对碳酸盐岩储集体的控制——以鄂尔多斯盆地马家沟组盐下储层为例[J].中国地质,2021,48(3):794-806.
Zuo M T, Hu Z G, Zhang C L, et al. Control of differential tectonic activities on carbonate reservoirs in craton basin: A case study of the subsalt reservoir of Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. Geology in China, 2021, 48(3): 794-806.
- [5]林玉祥,赵承锦,朱传真,等.华北地台东部早奥陶世岩相古地理特征[J].地球科学与环境学报,2015,37(6):1-9.
Lin Y X, Zhao C J, Zhu C Z, et al. Lithofacies paleogeography characteristics of Early Ordovician in the eastern part of North China platform[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, 37(6): 1-9.
- [6]郭胜哲,张立东,张长捷,等.辽宁太子河盆地元古宙—古生代层序地层[J].地质与资源,2001,10(1):1-10.
Guo S Z, Zhang L D, Zhang C J, et al. Proterozoic-Paleozoic sequence stratigraphy in the Taizi River basin of Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2001, 10(1): 1-10.
- [7]辽宁省地质矿产局.辽宁省区域地质志[M].北京:地质出版社,1989:161-165.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Liaoning Province. Regional geological records of Liaoning Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989:161-165. (in Chinese)
- [8]梅冥相,刘丽,胡媛.北京西郊寒武系凤山组叠层石生物层[J].地质学报,2015,89(2):440-460.
Mei M X, Liu L, Hu Y. Stromatolitic biostrome of the Cambrian Fengshan Formation at the Xiaweidian section in the western suburb of Beijing, North China[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(2): 440-460.
- [9]Pruss S B, Finnegan S, Fischer W W, et al. Carbonates in skeleton-poor seas: New insights from Cambrian and Ordovician strata of Laurentia[J]. Palaios, 2010, 25(2): 73-84.
- [10]Stigall A L, Edwards C T, Freeman R L, et al. Coordinated biotic and abiotic change during the Great Ordovician Biodiversification Event: Darriwilian assembly of Early Paleozoic building blocks[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2019, 530: 249-270.
- [11]Edwards C T. Links between Early Paleozoic oxygenation and the Great Ordovician Biodiversification Event (GOBE): A review [J]. Palaeoworld, 2019, 28(1/2): 37-50.
- [12]马永生.华北北部晚寒武世碳酸盐岩岩石学沉积学及沉积作用等时性研究[D].北京:中国地质科学院,1990.
Ma Y S. Study on carbonate petrology, sedimentology and sedimentational synchrony of Late Cambrian in the north part of North China platform [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1990.
- [13]李君文.环渤海湾地区下古生界层序岩相古地理特征及演化[D].成都:成都理工大学,2007.
Li J W. The characteristic and evolution of sequence-lithofacies palaeogeography of Lower Paleozoic around Bohai Gulf area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.
- [14]单学东,刘文海,潘明臣,等.辽宁省寒武—奥陶系沉积环境与层序地层划分[J].辽宁地质,2000,17(2):81-87.
Shan X D, Liu W H, Pan M C, et al. Sedimentary environment and sequence subdivision of Cambrian and Ordovician systems in Liaoning Province[J]. Liaoning Geology, 2000, 17(2): 81-87.
- [15]陶洪兴,张荫本,唐泽尧.中国油气储层研究图集(卷二)——碳酸盐岩[M].北京:石油工业出版社,1994:1-201.
Tao H X, Zhang Y B, Tang Z Y. China petroleum reservoir study atlas (v. 2): Carbonate rocks [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994:1-201. (in Chinese)

(下转第665页/Continued on Page 665)

- Etna (Italy)[J]. *Lithos*, 2008, 105(3/4): 272-288.
- [20]Helo C, Hegner E, Kröner A, et al. Geochemical signature of Paleozoic accretionary complexes of the Central Asian Orogenic Belt in South Mongolia: Constraints on arc environments and crustal growth[J]. *Chemical Geology*, 2006, 227(3/4): 236-257.
- [21]韩兆诣. 甘孜-理塘结合带南段玄武岩特征及构造意义[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2015.
- Han Z Y. Basalt characteristics and tectonic significance in the Southern of Garze-Litang Suture Zone [D]. Minyang: Southwest University of Science and Technology, 2015.
- [22]鄢圣武, 白宪洲, 秦宇龙, 等. 四川昭觉-美姑地区峨眉山玄武岩古火山机构的发现及其喷发旋回的确定[J]. *中国地质*, 2021, 48(2): 536-548.
- Yan S W, Bai X Z, Qin Y L, et al. Discovery of paleo-volcanic edifice and determination of its eruptive circles of Emeishan basalt in Zhaojue-Meigu area, Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 2021, 48(2): 536-548.
- [23]谢纪海, 胡正祥, 毛新武, 等. 鄂北大洪山晋宁期 MORB-like 玄武岩的识别与洋内俯冲作用[J]. *中国地质*, 2019, 46(6): 1496-1511.
- Xie J H, Hu Z X, Mao X W, et al. The discrimination of Jinningian MORB-like basalt and intra-oceanic subduction in the Dahongshan area, northern Hubei[J]. *Geology in China*, 2019, 46(6): 1496-1511.
- [24]Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, 69(1): 33-47.
- [25]Mullen E D. MnO/TiO₂/P₂O₅: A minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 62(1): 53-62.
- [26]Vermeesch P. Tectonic discrimination diagrams revisited [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2006, 7(6): Q06017.
- [27]潘桂棠, 陈智梁, 李兴振, 等. 东特提斯地质构造形成演化[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 69-107.
- Pan G T, Chen Z L, Li X Z, et al. Geological-Tectonic evolution in the Eastern Tethys[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 69-107. (in Chinese)
- [28]张世涛, 冯庆来, 王义昭. 甘孜-理塘构造带泥盆系的深水沉积[J]. *地质科技情报*, 2000, 19(3): 17-20.
- Zhang S T, Feng Q L, Wang Y Z. Devonian deep-water sediments in Garze-Litang tectonic belt [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2000, 19(3): 17-20.
- [29]杨文强, 冯庆来, 刘桂春. 滇西北甘孜-理塘构造带放射虫地层、硅质岩地球化学及其构造古地理意义[J]. *地质学报*, 2010, 84(1): 78-89.
- Yang W Q, Feng Q L, Liu G C. Radiolarian fauna and geochemical characters of the cherts from Garze-Litang tectonic belt and its tectono-paleogeographic significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(1): 78-89.

(上接第 655 页/Continued from Page 655)

- [16]Cariou E, Olivier N, Pittet B, et al. Dinosaur track record on a shallow carbonate-dominated ramp (Loulle section, Late Jurassic, French Jura)[J]. *Facies*, 2014, 60(1): 229-253.
- [17]Vachard D, Clausen S, Palafox J J, et al. Lower Ordovician microfossils and microfossils from Cerro San Pedro (San Pedro de la Cueva, Sonora, Mexico), as a westernmost outcrop of the newly defined NuiaProvince[J]. *Facies*, 2017, 63(3): 18.
- [18]Luan X C, Brett C E, Zhan R B, et al. Microfacies analysis of the Lower-Middle Ordovician succession at Xiangshuidong, southwestern Hubei Province, and the drowning and shelf-ramp transition of a carbonate platform in the Yangtze region [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 485: 68-83.
- [19]Park J, Lee J H, Hong J, et al. An upper Ordovician sponge-bearing micritic limestone and implication for Early Palaeozoic carbonate successions[J]. *Sedimentary Geology*, 2015, 319: 124-133.
- [20]王一刚, 文应初, 洪海涛, 等. 四川盆地北部晚二叠世—早三叠世碳酸盐岩斜坡相带沉积特征[J]. *古地理学报*, 2009, 11(2): 143-156.
- Wang Y G, Wen Y C, Hong H T, et al. Carbonate slope facies sedimentary characteristics of the Late Permian to Early Triassic in northern Sichuan Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(2): 143-156.
- [21]洪海涛, 田兴旺, 孙奕婷, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩天然气富集规律[J]. *中国地质*, 2020, 47(1): 99-110.
- Hong H T, Tian X W, Sun Y T, et al. Hydrocarbon enrichment regularity of marine carbonate in Sichuan Basin [J]. *Geology in China*, 2020, 47(1): 99-110.