

文章编号: 1000-0550(2017)02-0241-12

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.02.004

奥陶系宝塔灰岩网纹构造成因研究进展及新发现

廖纪佳^{1,2}, 马思豪^{1,2}, 廖明光^{1,2}, 肖雪薇^{1,2}, 林丹^{3,4}, 贺文亮⁵, 廖继昊⁵

1. 四川省天然气地质重点实验室 西南石油大学, 成都 610500

2. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500

3. 页岩气评价与开采四川省重点实验室, 成都 610091

4. 四川省煤田地质局, 成都 610072

5. 川庆钻探物探公司一分公司, 四川南充 637000

摘要 综述了扬子地区分布广泛的奥陶系宝塔灰岩网纹构造成因的研究进展,整合了多位学者的主要观点及认识,结合四川旺苍唐家河等地奥陶系剖面的考察与镜下薄片观察,对网纹构造及其成因进行了深入研究并提出未来研究方向的思考与建议。学界目前普遍认为这种网纹构造并非暴露干裂成因,生物遗迹、海底硬地、准同生变形构造等成因解释也缺乏足够的证据支持,但关于水下胶缩、成岩作用以及构造作用等解释仍在热烈讨论中;对四川广元旺苍唐家河剖面宝塔灰岩的野外考察过程中发现了一些新的现象,比如在灰色宝塔灰岩中观察到了非沥青充填的“黑色细纹”,网纹构造的形态、泥质含量等也随沉积旋回而呈现出规律性变化。进一步研究这些新的现象或许能为后期确定网纹构造的成因提供新的证据。

关键词 奥陶系;宝塔灰岩;网纹构造;成因解释

第一作者简介 廖纪佳,男,1983年出生,博士,讲师,沉积学和储层地质学,E-mail: liaojijia198433@163.com

通讯作者 廖明光,男,教授,E-mail: liaomg@swpu.edu.cn

中图分类号 P512.2 P534 **文献标识码** A

0 引言

我国著名地质学家李四光早在20世纪20年代就对长江三峡进行过地质调查,并在湖北省秭归县新滩龙马溪以东的雷家山建立了奥陶系宝塔组地层,因其中富产外形颇似宝塔、大型直壳的头足类中华震旦角石(*Sinoceras chinense*) (图1)而被命名为“宝塔灰岩”^[1]。丁文江在对川黔公路沿线进行地质调查时,发现奥陶系灰岩层面上广泛发育似龟裂纹构造或马蹄形的印痕,提出了“马蹄纹灰岩”一词^[2]。王钰^[3]根据其风化面裂纹构造常呈六方形,似乌龟背壳,将其称为“龟裂纹灰岩”。

受认识条件的限制,前期地质学家仅把宝塔灰岩的网纹看作一种特殊的构造而未曾深入思考其成因,直到20世纪80年代,其成因才引起了地质学家们热烈的讨论。目前,对这种网纹构造的成因及其环境解释有多种不同的意见:1)暴露干裂成因^[4-6];2)水下

胶缩成因^[7-10];3)水下收缩成因^[11];4)成岩作用成因^[12-14];5)成岩—构造作用成因^[15];6)准同生变形构造^[16];7)生物遗迹成因^[17-18];8)海底硬地收缩成因^[19]。但直至现在,对其成因仍无统一论。

对奥陶系宝塔灰岩特殊网纹构造成因的深入研究,一方面有助于重构晚奥陶世扬子台地的古地理环境;另一方面,作为地质历史中具有特殊网纹形态的“时髦相”^[17],确定其成因无异于解决了地质学研究领域中的一大争议,可以丰富现今的沉积学理论和岩石成因理论,对于奥陶纪(特别是晚奥陶世)的相关研究也具有重要的参考价值。

根据近30多年来国内外发表的相关文献,全面回顾了前人对宝塔灰岩及其特殊网纹构造成因的研究,对各方观点进行了一次系统归纳与总结,加深对宝塔灰岩岩石学特征及特殊网纹构造成因的认识,借鉴前人的研究经验以及笔者的野外调查,对未来研究方向提出建议。

收稿日期: 2016-12-08; 收修改稿日期: 2017-01-27

基金项目: 油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放课题(PLN1523);四川省教育厅重点项目(16ZA0078);西南石油大学青年教师“过学术关”项目(201231010014) [Foundation: Open Fund of State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, No. PLN1523; Major Project of Education Department in Sichuan Province, No. 16ZA0078; Young scholars development fund of Southwest Petroleum University No. 201231010014]



图1 宝塔灰岩层面上形似宝塔的鹦鹉螺壳体和网纹构造, 重庆万盛国家地质公园

Fig.1 Pagoda-like nautiloid shell and polygonal networks on the bedding surface of the Pagoda Limestone, Wansheng National Geological Park, Chongqing

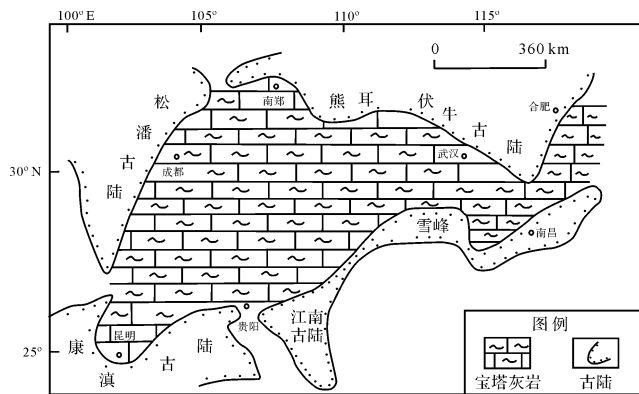


图2 扬子区宝塔灰岩分布图(据文献[10]修改)

Fig.2 The map showing the distribution of the Pagoda Limestone in Yangtze area

1 地质背景

中奥陶世末期由于加里东运动的发生,华南板块构造挤压作用不断加剧^[20-29],大部分地区因华夏板块的挤压作用而抬升隆起^[30],随着川中、黔中和江南—雪峰等边缘隆起不断抬升扩大,相对海平面持续上升,镶边型台地被淹没^[24,31-34],扬子地区由克拉通盆地逐渐变为被各隆起所围限的隆后盆地^[35-39]。扬子隆后盆地发育于克拉通基底和中上寒武统与下奥陶统碳酸盐岩台地基础之上,在隆后盆地表现为“掀斜效应”,从而造就了扬子地区晚奥陶世浅海深水的构造—沉积空间^[18,20,40]。

目前国内学者一致认为奥陶系宝塔组属于上奥陶统,即其地质年代为晚奥陶世,但更为精确的年代确定目前仍存在一定的分歧。以牙形石和笔石带生

物地层对比标志^[41-42]为基础的岩相古地理分析表明,年代地层桑比阶下限划在 *Nemagraptus gracilis* 笔石带之上,与宝塔组的下限基本一致^[30],而宝塔组和临湘组顶界大致对应凯迪阶中下部^[37],即宝塔组的年代近似对应桑比阶。不过也有学者结合牙形石生物地层学以及碳同位素地层学等证据,认为宝塔组的年代应为凯迪期早期^[43]。还有学者通过分析生物地层学数据认为宝塔组形成时期为中桑比期—早凯迪期^[14,44]。

宝塔组是扬子板块分布最广、岩性最稳定的碳酸盐岩地层之一(图2),在古陆边缘地区可超覆于不同时期的地层之上^[45]。宝塔组在上、中、下扬子区分布普遍,岩性单一^[14,46]。扬子板块上宝塔灰岩的覆盖面积近 1 500 000 km²,由东至西(上海北部至昆明)分布范围超过 2 000 km,由北向南(陕西南部至贵州东南部)分布约 800 km^[14]。

2 宝塔灰岩的岩石学特征

宝塔灰岩为具网纹构造的泥晶灰岩或生屑泥晶灰岩。颜色上可划分为紫红色层和灰色层两种端元类型,区域变化上表现为相对近岸地区岩石颜色以灰色为主,台地边缘地区完全呈紫红色,其它区域以两种颜色的互层为主,这种颜色的变化与 Fe³⁺ 离子含量及 Fe³⁺/Fe²⁺ 的值有关^[9,10,14,46]。受控于水深和沉积环境等因素,宝塔灰岩厚度通常在上扬子板块西部和南部等相对近岸地区更大,在相对近海地区(特别是靠近台地边缘处)更薄,而在扬子板块中部其厚度约为 20 m^[14]。

宝塔灰岩普遍发育网纹构造,网纹在层面上呈不规则弯曲的似多角形^[16](图1)。由于差异风化,有时泥质充填物残留凸起形成埂状物,而有时泥质充填物受到剥蚀下凹形成瘤状凸起^[9]。岩层内则呈现垂直或弯曲的不完全网纹,贯穿地层顶底面但不穿透相邻的地层。裂缝 Y 形分叉或者合并交接处光滑,且层内有时发育平行层面的缝合线,宽约 2 mm 的锯齿状缝合线切穿早期形成的垂向网纹,网纹中有泥质充填^[10,16]。在垂直于层面的截面上,龟裂纹并不呈“V”字形,而是上下基本等宽。经薄片观察发现,较宽的龟裂纹内部通常有次一级的裂纹发育^[6],但在陕南地区的剖面中尚未发现有发育次级裂缝^[10]。显微镜下观察发现网纹被泥质充填,泥纹层的厚度亦随裂隙的宽度变化,在其两侧则充填了亮晶或微晶方解石^[6,9]。纵观宝塔组在扬子板块的分布,相对近岸区

域的网纹条带都较宽,而在板块边缘地区网纹条带则变得更窄。总体上来说,宝塔灰岩网纹所包围的瘤状凸起,其特别之处在于平均规模相对较大,且垂向上比横向上更为发育^[14]。不同地区网纹的形态及规模大小有所不同^[18],统计结果表明地层厚度与泥质含量对裂缝及其包围的灰岩的规模大小起控制作用。总体而言,单层厚度小于10 cm时,网纹不甚发育,地层具有瘤状灰岩特征;单层厚度不同,网纹的形态、规模大小也随之出现差异;而沉积物的原始含水率也取决于泥质含量,泥质含量高则沉积物含水量高,脱水收缩率大导致网纹相应变宽,网纹中的泥质含量也相应变高^[10,18]。

宝塔灰岩含有丰富的生物碎屑,生屑主要为薄壳生物^[46]。根据野外观察和室内薄片鉴定,笔者发现,广元旺苍唐家河地层剖面中常见三叶虫、棘皮、介形虫,可见海绵骨针、腕足类、腹足类、双壳类、有孔虫等(图3)。生物碎屑分布杂乱,没有规律,未见分选、磨圆现象,壳体保存相对完好。结合旺苍地区 and 前人^[5-6,10,13,16,46]所观察的不同地区宝塔灰岩古生物种类可以推测,宝塔灰岩形成于水体较深、浪基面以下的浅海低能环境。

3 宝塔灰岩网纹构造成因研究进展

有关扬子地区奥陶系宝塔灰岩特殊的网纹构造成因,前人主要提出了以下不同解释(表1)。

3.1 暴露干裂成因

吴劲薇等^[5]在湘西北地区进行野外考察时,在宝塔灰岩内发现了共生的鸟眼构造,且鸟眼构造下部充填了渗流粉砂,据此推测宝塔组当时曾被抬升至大陆潜水面之上,由于暴露而在灰岩中形成干裂。李协能^[6]在重庆万盛地区的宝塔组内还发现大部分网纹在层面上形成的交角约为120°,同现代多次“暴露干裂—水体浸没”的泥裂具有较大的相似性。通过对四川琪县—叙永以南—古蔺—桐梓红花园—凤岗以南—石汗本庄等地的考察发现,龟裂纹灰岩层之间也发现了典型的暴露环境下的泥裂构造,这也说明宝塔期沉积环境水体较浅,处于间歇性暴露环境之中。对于有关网纹成因的证据^[47-48]，“暴露干裂”成因的支持学者认为,之所以“龟裂纹”与断面呈“V”形或“U”形的典型泥裂有所差别,是因为活跃的板块构造运动及成岩期、后生期等诸多因素对其进行了改造所致^[5-6]。

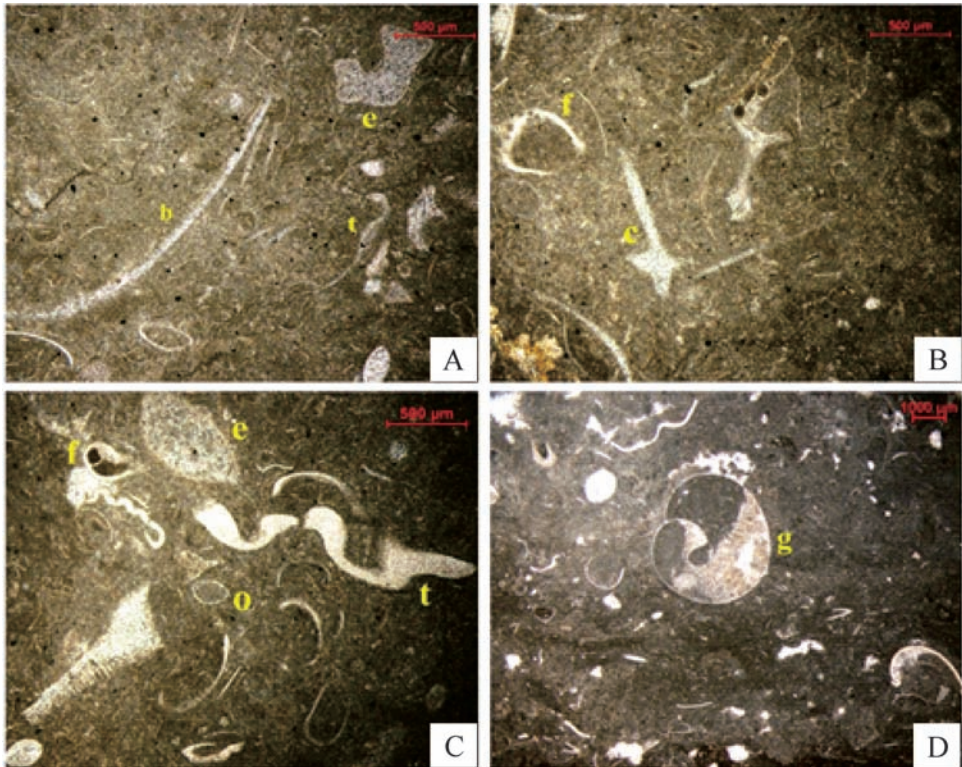


图3 宝塔灰岩中含有的生物碎屑,显微单偏光照片,广元旺苍唐家河剖面
b.双壳类;c.海绵骨针;e.棘皮;f.有孔虫;g.腹足;o.介形虫;t.三叶虫

Fig.3 Microphotograph showing bioclasts in Pagoda limestone, Tangjiahe section of Wangcang, Guangyuan, Sichuan

表 1 宝塔灰岩网纹构造有代表性的成因解释及主要证据

Table 1 Representative genetic explanations and main evidence of the network structure in Pagoda limestone

成因解释	代表学者	主要证据
暴露干裂成因	张文堂(1962) 吴劲薇等(1989) 李协能等(2000)	野外露头的岩性及构造特征;古生物组合;与龟裂纹共生的鸟眼构造;水体化学条件;类似于泥裂 120° 的层面交角
水下胶缩成因	刘特民等(1983) 姬再良(1985) 方少仙等(1994) 王安东等(2012)	岩性及古生物组合;裂缝特征与“干缩裂纹”特征的巨大差异;宝塔期古地理环境(海侵到海退);薄片泥纹元素分析指示出的海相沉积环境;原岩残留体;化学分异作用及脱水受力分析
水下收缩成因	陈旭等(1986)	难以确定早古生代碳酸盐成岩前是否呈胶体
成岩作用成因	周书欣等(1992) 沈建伟(1989) Zhan <i>et al.</i> (2016)	生物碎屑组分及古气候、古环境等;地球化学分析(包括碳氧同位素、主量及微量元素、稀土元素等)
成岩—构造作用成因	王尧(1995)	奥陶纪活跃的构造运动及压溶作用
准同生变形构造	周传明等(2000)	负载作用下的反密度碎屑沉积层;古生物组合;火焰构造和泄水构造
生物遗迹成因	陈均远等(1991) 许效松等(2001)	盆地迁移驱动机制造就了晚奥陶世角石生活所需的生态环境空间和特殊相
海底硬地收缩成因	王泽中(1996)	与海底硬地相似的特征

3.2 水下胶缩(收缩)成因

有学者从古生物及其指示环境、网纹特征以及古地理环境等方面对宝塔灰岩网纹构造的“暴露干裂”成因观点提出了质疑。首先,黔北地区野外露头剖面的宝塔组以发育漂浮类型鸚鵡螺组合为特征,指示当时的沉积环境为浅海低能环境,并非潮汐带,这与干裂纹或泥裂所要求的潮上带环境显然完全不同;其次,宝塔灰岩的裂缝特征与多级发育、垂向呈 V 形或 U 形的“干缩裂纹”特征差别明显,其充填物也与上覆沉积物成分不同而与围岩基本一致^[7, 47-48];此外,区域地质调查结果也表明,华中、西南地区在晚奥陶世宝塔期经历了广泛海侵—海水平静—海退的演变过程,且由于与相邻浅海盆地彼此连通,因此同时具有开阔海洋台地相和浅海陆棚相的沉积特征^[46],川西北广元河深 1 井宝塔灰岩的薄片泥纹元素分析也指示海相沉积特征^[9]。综上所述,地质学家们提出了新的看法,即宝塔灰岩特殊的网纹构造是在广阔的宁静水体中,呈凝胶状态且缓慢堆积的泥质、碳酸钙组分以及生物碎屑沉积物在固结成岩之前胶体脱水收缩而成^[9, 46]。显微镜下观察发现,沿裂缝方向展布的密集泥纹充填了网纹裂缝,泥纹层厚度也与裂缝的宽度变化一致^[9],这些发现也为“胶体脱水收缩”成因提供了佐证。随着研究的深入,又有学者提出“化学分异作用”,对“脱水收缩”这一过程进行了模拟:胶态黏土矿物与灰质组分以缓慢的速率沉积,化学沉积分异作用使灰质组分聚集,上覆压力则造成胶

态黏土矿物脱水收缩,局部产生张力从而形成了裂缝(图 4),压实作用进一步加剧,裂缝开始互相连通并逐渐合并、加宽,最终便形成了如今所见的“网纹构造”^[10]。

但也有学者认为要确定古代岩石,特别是早古生代碳酸盐成岩前是否呈胶体状态十分困难,此前也有学者曾论证碳酸钙微粒不是胶体,因此用“水下收缩裂纹”的表述更为准确^[11]。

3.3 成岩作用成因

贵州及邻区的宝塔组中发现的核形石、叠层石、头足类、鸚鵡螺以及 Fe、Mn 元素相对含量均指示出该区为水深不超过 50 m 的浅水低能环境,由此沈建伟^[13]认为网纹构造是一种浅水环境下的成岩构造,而非同生沉积构造。周书欣^[12]结合宝塔组中发育的缝合线特点建立了岩溶成岩作用模式(图 5):浅埋压实环境中,灰泥成岩将水排入黏土层,随着埋深增加,压力、温度也随之增加,黏土层内孔隙水由于细菌分解产生 CO₂ 而呈现酸性。随埋深进一步增加,在高温、高压和酸性孔隙水的作用下,碳酸盐岩围岩发生溶解并形成水平缝合线。另外,川南及贵州北部、东北部地区宝塔灰岩样品中的地球化学分析结果显示瘤状凸起的 δ¹³C 值要比网纹中的 δ¹³C 值高出 0.5‰~1.0‰,主量与微量元素的含量也有明显的区别,而与此相反,网纹和瘤状凸起在 δ¹⁸O 值上的差异几乎可以忽略不计(图 6)。上述证据说明网纹形成于成岩作用早期,沉积物和海洋孔隙水成为一套沉积系统

(若网纹形成期间出现明显降水, $\delta^{18}\text{O}$ 值也会降低); 而网纹和瘤状凸起在 $\delta^{13}\text{C}$ 值、主量元素及微量元素上的差异很可能就是固结成岩所致^[14]。

3.4 成岩—构造作用成因

由于奥陶纪处于相当活跃的构造运动时期^[45],

故有学者认为扬子板块强烈运动使未固结的碳酸盐沉积物在剪切或拉张力作用下形成裂隙,此后成岩作用中晚期发生的压溶作用又对深埋的碳酸盐沉积物中的裂隙进行强烈改造,形成了如今我们看到的更为显著的网纹^[15](图7)。

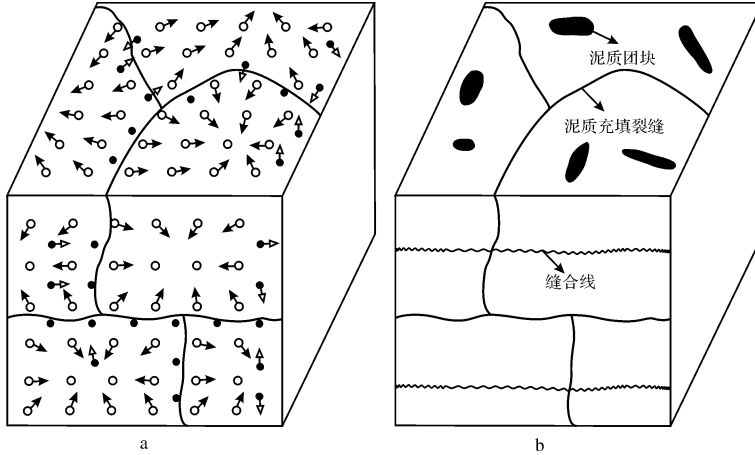


图4 裂缝形成过程示意图(据文献[10])

·代表泥质质点;○代表灰质质点;箭头代表运动方向

Fig.4 Sketch showing crack formation

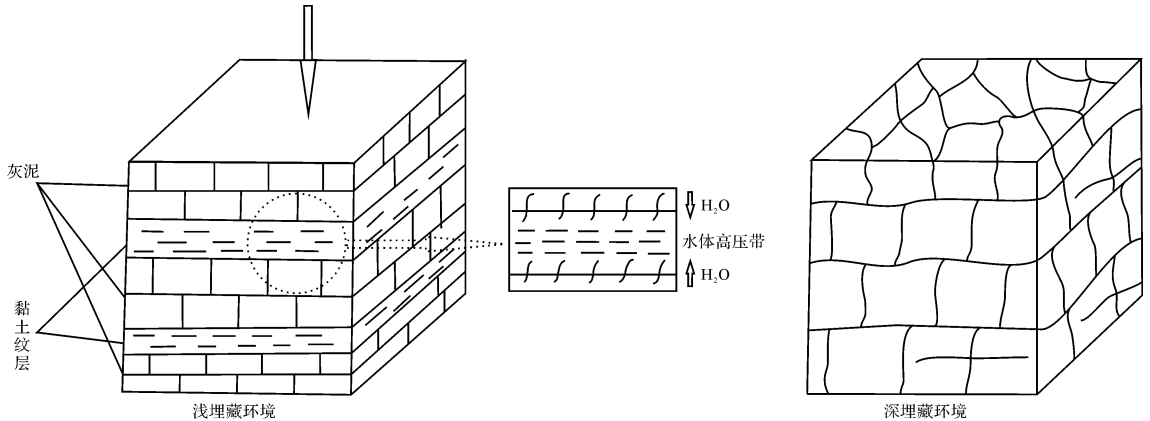


图5 宝塔灰岩压溶成岩模式(据文献[12]修改)

Fig.5 Diagenetic model related to pressure dissolution of Pogada limestone

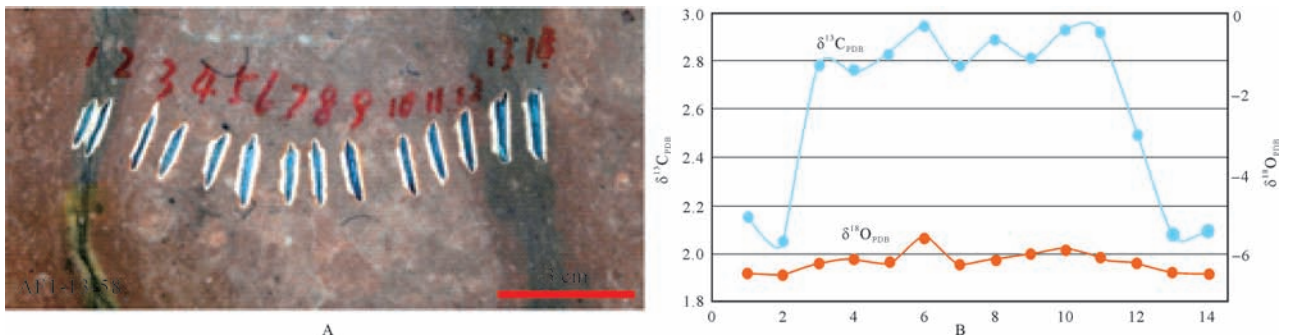


图6 A.在网状条带包围的碳酸盐结核上的同位素取样点,样本 AFI-13-58,湖南张家界温塘剖面;

B.左图中取样点的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值(据文献[14]修改)

Fig.6 A.Stable C and O isotope sample spots across a carbonate nodule bounded by network bands, sample AFI-13-58,

Wentang section, Zhangjiajie, Hunan province; B. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of the sample spots in the left picture

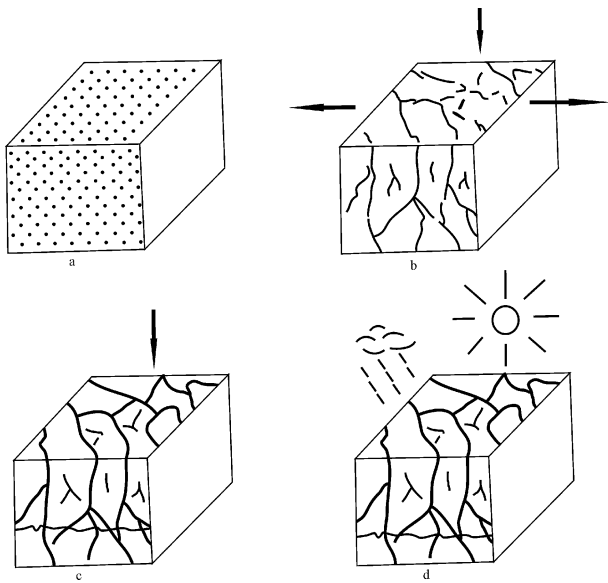


图7 “龟裂纹”灰岩的成因示意图(据文献[15]修改)

a. 沉积阶段; b. 受构造应力和成岩作用的浅埋藏阶段; c. 受压溶作用的深埋藏阶段; d. 表生风化作用阶段

Fig.7 Sketch showing the origin of cracked limestone

3.5 其它成因

除上述成因解释外,在过去几十年的研究中,还有不少地质学家结合宝塔组呈现出的其它一些岩石学或地层学特征等证据给出了特殊的解释。有学者通过将宝塔组网纹构造与前人提出的“反密度碎屑沉积层在负载作用下形成的准同生变形构造”^[49]进行对比后发现,两者不管是外部形态还是内部构造均十分相似,再结合古生物组合,部分富泥网纹中显示出火焰状构造或泄水构造等证据,认为宝塔组网纹构造是一种成岩早期形成的准同生变形构造^[16]。也有学者认为宝塔灰岩特殊的网纹构造是形成于水深140~450 m之间,与叠层石生长相伴生的生物遗迹构造^[17];或者是在盆地迁移驱动机制造就的特殊生态环境空间下,与角石相抗衡的大型软体生物在软底上爬行、觅食、刷行和拖尾等留下的生活行迹或其它未知造迹生物留下的痕迹形成了宝塔组的特殊网纹^[18]。还有学者将宝塔灰岩同密集层段(又称海底硬地)^[50-51]进行对比后发现,二者均具有沉积时水深最大、沉降幅度大、沉积速率低及分布广泛且岩性稳定等特征,因此认为宝塔灰岩在成岩早期可能是一种碳酸盐海底硬地,而网纹则是海底硬地水下收缩的结果^[19]。

4 讨论

近年来,随着新证据的发现和地球化学分析方法

的引入,对于部分成因解释的判断目前已有定论。越来越多的学者发现鸟眼构造并不仅仅保存于极浅水或间断暴露的潮上沉积物中,而且可以形成于潮下至潮上各种低能条件的沉积环境中^[52-54]。松散砂样静置模拟实验结果也表明,鸟眼孔中的“渗流”粉砂不一定是暴露条件下渗流水作用的结果^[54]。因此,仅凭与宝塔灰岩共生的鸟眼构造及其下部充填了渗流粉砂两个现象并不能支持“暴露干裂成因”的解释。显微镜下观察结果显示,网纹中有沿裂隙方向分布的原岩残留体^[9],网纹中的泥质^[10]和生屑种类^[14]与其包围的灰岩基本一致,由网纹与“围岩”的关系可以说明,宝塔组的特殊网纹构造并非先暴露干裂,再充填而形成(吴劲薇等^[55]提出的“一般干裂状态下充填”模式,见其1989年发表的文献图2)。地化分析的结果也表明,晚奥陶世宝塔期处于较深水环境^[12,56-58],与暴露干裂成因所要求的潮坪浅水环境截然不同。而且宝塔组网纹裂缝与“干缩裂纹”的特征也并不一致^[47-48]。因此网纹构造并非潮上带干裂成因已在学界取得共识。

众所周知,宝塔组得名于其层中盛产的中华震旦角石(*Sinoceras chinense*),但最新的研究成果显示,*Sinoceras chinense*仅产于我国华南(除珠江盆地)、云南西部、新疆和西藏等地,华北地区和国外并没有确切的化石记录^[59]。缅甸和泰国也有几乎一样的同期地层,其中的三叶虫和腕足动物群基本一致;北欧(瑞典)奥陶系也发育了类似的地层(紫红色,具有类似的网纹沉积构造)。由此,笔者认为许效松^[18]提出的“生物遗迹成因”证据有待商榷,因为具有网纹构造的北欧奥陶系并没有角石的记录,这说明网纹并非“抗衡角石”的遗迹。况且,扬子地区的宝塔组覆盖面积高达1 500 000 km²,很难想象在如此大的范围内,处于生物大辐射的晚奥陶世,多种生物会留下近乎一致的“生活行迹”。至于陈均远等^[17]提到的“与叠层石生长相伴生的生物遗迹构造”一说,首先需要明确的是叠层石主要生活在潮间浅水地带,营光合作用而生长。但泥晶灰岩一般指示潮下较深、较静水的沉积,此时海水深度可能已超过了透光带^[11],故这种说法至少在沉积环境的判断上出现了矛盾。而且笔者在旺苍地区野外考察的过程中并未见到叠层石,这一点也有学者曾经证实^[16]。由此可见,生物成因的解释也不具说服力。

有学者^[10,60]对四川广元向北至川陕交界处和乌当地区的黄花冲组地层进行横向对比后发现,在这些

构造和埋藏环境大致相同的地区并未发育网状裂缝。另外,笔者在重庆万盛国家地质公园的考察中发现,宝塔组中的中华震旦角石通常跨越多个网状条带,但没有被裂缝切割,在与裂缝相交的地方也未见壳面偏移或破坏,相反,裂缝条带总是沿其周围弯曲并沿壳体表面外部继续发育(图1)。这也表明宝塔组的沉积物在成岩作用期间没有经历过构造破坏。而且笔者在对广元旺苍进行野外地质考察的过程中尚未在宝塔组发现其它构造成因的现象,因此本文认为构造作用不应是研究宝塔灰岩网纹构造形成机理的重要考量因素。

最后,关于海底硬地及准同生变形构造等说法,笔者认为其解释也未令人信服。王泽中^[19]仅根据宝塔组与海底硬地某些特征相似便将网纹当作海底硬地收缩的结果,显然证据并不充分。除了以上相似的性质外,我们还应注意到海底硬地具有厚度极薄、富含有机质及缺乏陆源物质等重要特点^[10],但这些宝塔组均不具备。此外,Christ Nicolas *et al.*^[61]的最新研究成果也显示,扬子地区尚未发现有海底硬地的证据。因此将宝塔组等同于海底硬地的观点也不够完善。至于用“反密度碎屑沉积层”机理去解释网纹构造的成因,并无其他学者观察到周传明所见到的火焰构造或泄水构造,笔者在旺苍唐家河剖面也未发现。宝塔灰岩的岩性单一(生屑泥晶灰岩),与相邻岩层间也不存在明显的密度差异^[14],故“准同生变形构造”一说也无法令人信服。

至于“水下收缩(胶缩)成因”一说,后来也有学者提出了诸如无法确定碳酸钙微粒是否呈胶体状态^[11]、缺乏水下产生收缩裂纹的物理学条件^[16]、鸚鵡螺壳体未发生壳壁破损^[14]等质疑。另一方面,宝塔组生物门类发育情况显示为窄盐度生物如头足类、三叶虫等,并与陆源碎屑的出现互为消长,这说明水化学条件具有多变性,并不利于“胶体”的形成,因此宝塔灰岩的网纹构造为“胶缩成因”的观点也有待商榷。

目前这些争议也有待进一步研究加以判断、证实。目前笔者调研文献的情况来看,用成岩作用机理解释宝塔灰岩网纹构造的成因,证据相对充分,既有详尽的成岩模式假设^[10,12],也有地化分析数据支持^[14]。实际上,水下收缩裂纹(胶体或非胶体脱水收缩)的成因解释也包含了成岩作用的过程(泥质胶体在上覆水体和沉积物的压实作用下脱水收缩),只是其机理如前文所述,尚存争议。

目前,奥陶系宝塔灰岩网纹构造的成因研究还存在许多问题需要解决,比如:宝塔灰岩广布扬子板块1 500 000 km²的面积,不同地区宝塔灰岩的特征差异是否有可能由于古地理环境的不同而造成的?又或者,单一的成因解释能否解释分布如此之广而层位如此局限的网纹构造?另外,Zhan *et al.*^[14]提出宝塔组的网纹构造是成岩作用下碳酸盐岩巨型瘤状凸起,笔者在旺苍唐家河剖面考察时发现,该区宝塔组底部有厚约2~3 m的地层发育似瘤状构造而非网纹构造(图8),为何同属宝塔组的相邻层段却没有发育相同的网纹构造?前人仅给出了网纹和似瘤状构造发育的统计学规律^[10,18],但尚未给出合理解释,这也将是笔者下一步研究的方向之一。最后,扬子区的宝塔组沉积出现在华南奥陶纪生物大辐射期间,宝塔组产出的丰富动物群的变化与这种特殊沉积构造的发育是否存在联系?

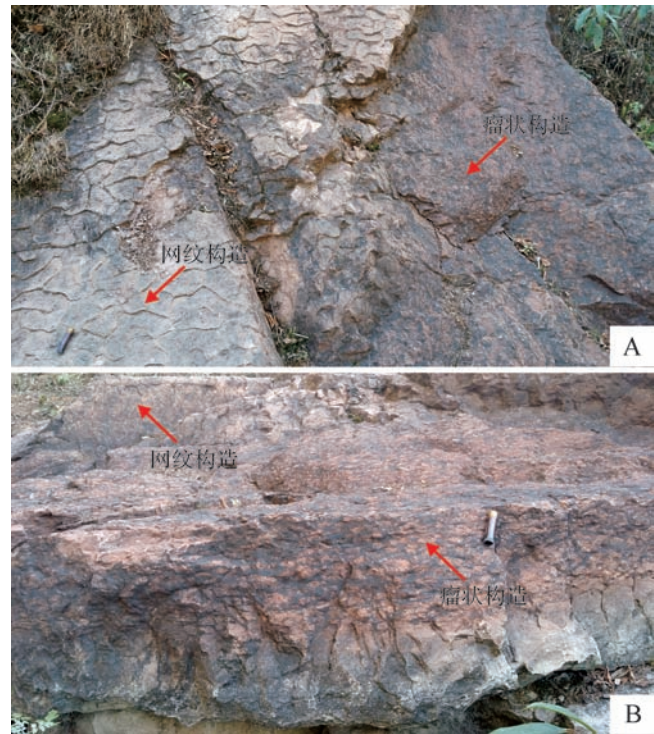


图8 与网纹构造相邻发育的瘤状构造,四川广元旺苍唐家河剖面宝塔组

图A为主视图,图B为图A右方的侧视图

Fig.8 Nodular structure adjacent to network structure formation in Pagoda Formation, Tangjiahe section of Wangcang, Guangyuan, Sichuan

5 四川旺苍地区宝塔灰岩的新发现

对四川广元旺苍唐家河剖面的野外考察过程中,

笔者发现了一些尚未在前人的成果中提及的特殊现象,比如,在垂直于灰色宝塔灰岩的层面上发现了一些“黑色细纹”。细纹的长度从几毫米到几厘米不等,宽度仅1~2 mm,层面上可见部分细纹相互切割或者数条细纹汇聚的现象。细纹在平行层面方向上的分布差异较大,部分层面少见细纹(图9A),而部分层面多见,呈多角度杂乱分布,无定向性(图9B);在垂直层面方向上,细纹呈现出定向排列的特征,大部分均与地层平行,但也有部分与地层垂直,切穿平行的细纹(图9C)。但“黑色细纹”的现象仅在灰色宝塔灰岩中可见,目前在红色宝塔灰岩中尚未发现该现象。镜下观察发现,细纹切穿层中的生物碎屑(图10A),薄片内可见呈脉状的黑色固态物质附着在晶体表面(图10B,C),疑似固体沥青。荧光显微镜下观察后发现,在与细纹相交的缝合线中发现有部分沥青充填(图10D缝合线中发荧光的部分)和疑似含铁矿物,但细纹无荧光(图10E,F)。据此,可以推测黑色细纹可能是在同生成岩作用阶段,半固结的沉积物在上覆压力作用下产生微裂缝,而灰岩中的泥质也在压力作用下充填到裂缝中,形成了现在层面上见到的“黑色细纹”。至于缝合线中出现的固体沥青,笔者认为可能是油气运移时的残留物,因为确有前人曾在宝塔组中进行过油气勘探,由此证实宝塔组中发育的缝合线很可能是裂缝性油气藏的运移通道。

另外,笔者还发现部分宝塔灰岩网纹构造的形态、泥质含量随沉积旋回而呈现规律性的变化(图11),网纹灰岩和瘤状灰岩之间似乎也存在着某种旋回性(图8),这又是否说明网纹构造的成因还受控于沉积旋回?网纹造成因的争议尚待进一步系统研究,这些新发现也还有待更为深入的分析,或许能为后期网纹构造的成因解释提供新的证据。

6 结论

(1) 奥陶系宝塔灰岩为泥晶灰岩或生屑泥晶灰岩,以发育特殊的网纹构造为特征,广泛分布于扬子板块。

(2) 宝塔灰岩网纹构造的成因有多种不同的解释:暴露干裂成因、水下胶缩成因、水下收缩成因、成岩作用成因、成岩—构造作用成因、准同生变形构造、生物遗迹成因、海底硬地收缩等,至今尚无统一定论。目前学界已基本取得共识的是,这种网纹构造并非干裂成因;生物遗迹、海底硬地、准同生变形构造等成因解释缺乏足够的证据支持;水下胶缩、成岩作用以及构造作用等成因解释仍在热烈讨论中。

(3) 在四川旺苍唐家河剖面宝塔灰岩中新发现了一些特殊现象:灰色宝塔灰岩中发育非沥青充填的“黑色细纹”,具体组分有待进一步研究;网纹构造的形态、泥质含量等在垂向上表现出旋回性。这些新

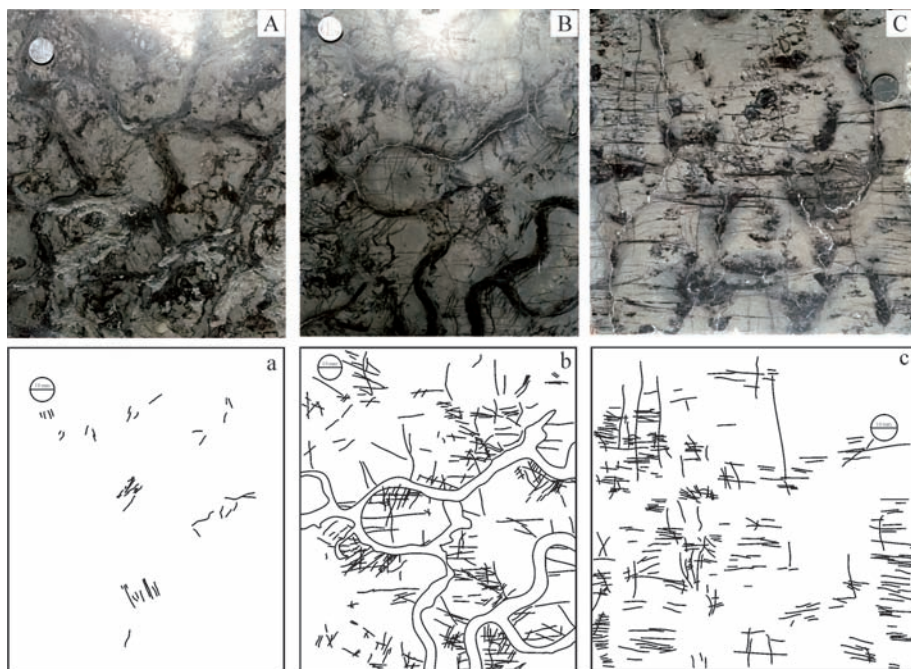


图9 宝塔灰岩层面上的“黑色细纹”特征,四川广元旺苍唐家河剖面

A,B均为平行层面方向,C为垂直层面方向;a,b,c为A,B,C(抛光面)对应的层面清绘图

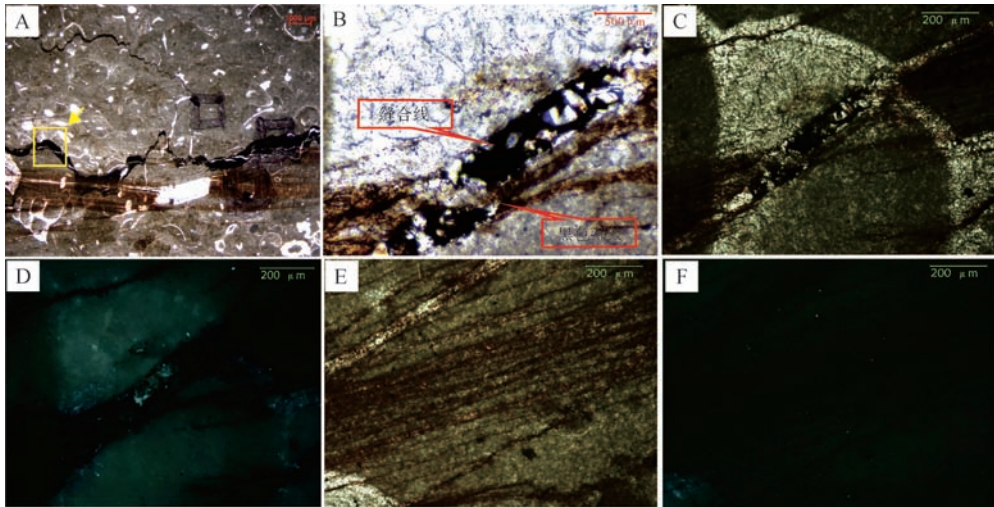


图 10 单偏光(A、B、C、E)和荧光(D、F)显微镜下的微缝合线和黑色细纹
B、C、D为图A黄框中的局部放大,黑色细纹和缝合线的位置如图所示

Fig.10 Microstylolite and black fine lines under polarization and fluorescence microscope

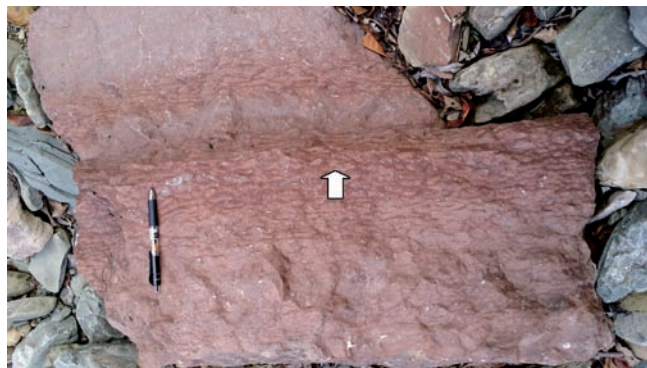


图 11 野外露头剖面上网纹构造随沉积旋回呈现出的规律性变化,四川广元旺苍唐家河剖面宝塔组

Fig.11 Regular change of network structure along with the sedimentary cycle on field outcrops, Pagoda Formation, Tangjiahe section of Wangcang, Guangyuan, Sichuan

发现或许能为后期网纹构造的成因解释提供新的证据。

致谢 感谢中国科学院南京地质古生物研究所詹仁斌研究员提供有关资料并进行多次有益交流探讨,论文在修改过程中得到了西南石油大学地科院陈景山教授、董兆雄教授、张廷山教授和曾伟副教授的宝贵意见和建议,西南石油大学地科院赵敬松副教授为论文提供了镜下薄片鉴定支持,高级实验师林峰为论文提供了荧光实验支持,张星宇先生为本文提供了重庆万盛地区中华震旦角石的野外照片,在此一并表示感谢!最后,感谢审稿人及编辑部提出的宝贵意见。

参考文献 (References)

- [1] 李四光. 峡东地质及长江之历史[J]. 中国地质学会志, 1924 (4): 351-391. [Li Siguang. The history of geological condition of East Three Gorges and Yangtze River[J]. Bulletin of the Geological Society of China, 1924(4): 351-391.]
- [2] 黄汲清,潘云唐,谢广连. 丁文江选集[M]. 北京:北京大学出版社, 1993:145. [Huang Jiqing, Pan Yuntang, Xie Guanglian, et al. Anthology of Ding Wenjiang[M]. Beijing: Peking University Press, 1993: 145.]
- [3] 王钰. 三峡式下部古生代地层之分层[J]. 地质论评, 1945, 10 (增刊1):9-14. [Wang Yu. Three Gorges Lower Paleozoic strata of layered[J]. Geological Review, 10(Suppl.1): 9-14.]
- [4] 全国地层委员会. 全国地层会议学术报告汇编: 中国的奥陶系[M]. 北京:科学出版社, 1962:1-161. [Zhang Wengtang. The Ordovician System of China[M]. Beijing: Science Press, 1962: 1-161.]
- [5] 吴劭薇,夏树芳. 关于“龟裂纹灰岩”成因的探讨[J]. 南京大学学报:自然科学, 1989, 25(1):136-141. [Wu Jinwei, Xia Shufang. Notes on the origin of “Polygonal Marking” Limestone [J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences Edition, 1989, 25 (1): 136-141.]
- [6] 李协能,廖云平,邓涛,等. 重庆万盛区的龟裂纹灰岩及其成因见解[J]. 西部探矿工程, 2012, 24(2): 113-117. [Li Xieneng, Liao Yunping, Deng Tao, et al. The origin of "turtle-shell cracks" limestone in Wansheng district, Chongqing[J]. West-China Exploration Engineering, 2012, 24(2): 113-117.]
- [7] 刘特民,陈学时. 黔北宝塔灰岩“马蹄纹”的研究及成因探讨 [C]//贵州地层古生物论文集. 1983,1:169-174. [Liu Teming, Chen Xueshi. Horseshoe like cracks” in the Pagoda Limestone in northern Guizhou and discussions on their origin [C]//Professional

- Papers of Stratigraphy and Palaeontology, Guizhou. 1983, 1: 169-174.]
- [8] 姬再良. 华中、西南地区上奥陶统宝塔组的沉积环境初探[C]//地层古生物论文集(第十二辑). 北京:地质出版社,1985:91-100. [Ji Zailiang. On the depositional environment of the Pagoda Formation in central and southwestern China[C]//Professional Papers of Stratigraphy and Palaeontology. Beijing: Geological Publishing House, 1985: 91-100.]
- [9] 方少仙,侯方浩,兰贵,等. 川黔地区中奥陶统宝塔组灰岩中"马蹄纹"构造的成因及含油气性[J]. 南方油气地质,1994(1):36-40. [Fang Shaoxian, Hou Fanghao, Lan Gui, et al. Genesis of 'Horseheely Crack' texture and its hydrocarbon potential in middle Ordovician Baota Limestones in Sichuan and Guizhou[J]. South China Petroleum Geology, 1994(1): 36-40.]
- [10] 王安东,周瑶琪,仲岩磊,等. 陕南奥陶系宝塔组灰岩网状裂缝成因[J]. 地球科学—中国地质大学学报,2012,37(4):843-850. [Wang Andong, Zhou Yaoqi, Zhong Yanlei, et al. Causes of reticular cracks in Ordovician Baota Formation limestone in southern Shaanxi[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(4): 843-850.]
- [11] 陈旭,丘金玉. 宜昌奥陶纪的古环境演变[J]. 地层学杂志,1986,10(1):1-15. [Chen Xu, Qiu Jingyu. Ordovician palaeoenvironmental reconstruction of Yichang area, west Hubei[J]. Journal of Stratigraphy, 1986, 10(1): 1-15.]
- [12] 周书欣,王建国. 贵州石阡地区宝塔灰岩的成因[J]. 石油实验地质,1992,14(3):291-295. [Zhou Shuxin, Wang Jianguo. On the origin of Pagoda stones in the Shiqian region, Guizhou province[J]. Experimental Petroleum Geology, 1992, 14(3): 291-295.]
- [13] 沈建伟. 贵州及邻区宝塔组灰岩成因的新观察[J]. 贵州地质,1989,6(1):35-38. [Shen Jianwei. New observations of the origin of Baota Limestone in Guizhou and its adjacent regions[J]. Guizhou Geology, 1989, 6(1): 35-38.]
- [14] Zhan Renbin, Jin Jisuo, Liu Jianbo, et al. Meganodular limestone of the Pagoda Formation: A time-specific carbonate facies in the Upper Ordovician of South China[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2016, 448: 349-362.
- [15] 王尧. 上扬子地台中奥陶统"龟裂纹"灰岩成因的新解释[J]. 地质科学,1995,30(3):268-274. [Wang Yao. Middle Ordovician cracked limestones of polygonal structure in the Upper Yangtze River area, South China—a new interpretation of their origin[J]. Scientia Geologica Sinica, 1995, 30(3): 268-274.]
- [16] 周传明,薛耀松. 湘鄂西奥陶纪宝塔组灰岩网纹构造成因及沉积环境探讨[J]. 地层学杂志,2000,24(4):307-309. [Zhou Chuanming, Xue Yaosong. On polygonal reticulate structure of the Ordovician Pagoda Formation of the western Hunan Hubei area[J]. Journal of Stratigraphy, 2000, 24(4): 307-309.]
- [17] 陈均远,Lindström,张俊明. 宝塔相—"时尚"于奥陶纪的一种生物沉积作用类型[J]. Palaeoworld,1991(1):28-29. [Chen Junyuan, Lindström M, Zhang Junming. The Pagoda facies—a fashionable biological sedimentation of Ordovician[J]. Palaeoworld, 1991(1): 28-29.]
- [18] 许效松,万方,尹福光,等. 奥陶系宝塔组灰岩的环境相、生态相与成岩相[J]. 矿物岩石,2001,21(3):64-68. [Xu Xiaosong, Wan Fang, Yin Fuguang, et al. Environment facies, ecological facies and diagenetic facies of Baota formation of Late ordovician[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2001, 21(3): 64-68.]
- [19] 王泽中. 宝塔灰岩—中奥陶统密集段[J]. 岩相古地理,1996,16(5):18-21. [Wang Zezhong. Baota Formation: a Middle Ordovician condensed section[J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1996, 16(5): 18-21.]
- [20] 刘宝珺,许效松,潘香南,等. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿[M]. 北京:科学出版社,1993:30-35. [Liu Baojun, Xu Xiaosong, Pan Xingnan, et al. Crustal evolution and mineralization of the ancient continental deposits in South China[M]. Beijing: Science Press, 1993: 30-35.]
- [21] 刘宝珺,许效松. 中国南方岩相古地理图集[M]. 北京:科学出版社,1994:1-188. [Liu Baojun, Xu Xiaosong. Atlas of the Palaeogeography of South China[M]. Beijing: Science Press, 1994: 1-188.]
- [22] 许效松,徐强,潘桂棠,等. 中国南方大陆演化与全球古地理对比[M]. 北京:地质出版社,1996:42-63. [Xu Xiaosong, Xu Qiang, Pan Guitang, et al. The Evolution of the South China Continent and Contrast of the Global Ancient Geography[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 42-63.]
- [23] 许效松,刘宝珺,楼雄英,等. 中国中西部海相沉积盆地分析与油气资源[M]. 北京:地质出版社,2004:1-19. [Xu Xiaosong, Liu Baojun, Lou Xiongying, et al. Analysis of Marine Sedimentary Basins and Oil and Gas Resources in Central and Western China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 1-19.]
- [24] 周名魁,王汝植,李志明,等. 中国南方奥陶—志留纪岩相古地理与成矿作用[M]. 北京:地质出版社,1993:1-96. [Zhou Mingkui, Wang Ruzhi, Li Zhiming, et al. Ordovician and Silurian Lithofacies, Paleogeography and Mineralization in South China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 1-96.]
- [25] 舒良树,于津海,贾东,等. 华南东段早古生代造山带研究[J]. 地质通报,2008,27(10):1581-1593. [Shu Liangshu, Yu Jinhai, Jia Dong, et al. Early Paleozoic orogenic belt in the eastern segment of South China[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(10): 1581-1593.]
- [26] Faure M, Shu Liangshu, Wang Bo, et al. Intracontinental subduction: a possible mechanism for the early paleozoic orogen of SE China[J]. Terra Nova, 2009, 21(5): 360-368.
- [27] Charvet J, Shu Liangshu, Faure M, et al. Structural development of the Lower Paleozoic belt of South China: Genesis of an intracontinental orogen[J]. Journal of Asian Earth Science, 2010, 39(4): 309-330.
- [28] Yan D T, Chen D Z, Wang Q C, et al. Large-scale climatic fluctuations in the latest Ordovician on the Yangtze block, south China[J]. Geology, 2010, 38(7): 599-602.
- [29] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报,2012,31(7):1035-1053. [Shu Liangshu. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. Geological Bulletin

- of China, 2012, 31(7): 1035-1053.]
- [30] 谢尚克,汪正江,王剑. 黔东北地区晚奥陶世岩相古地理[J]. 古地理学报, 2011, 13(5): 539-549. [Xie Shangke, Wang Zhengjiang, Wang Jian. Lithofacies palaeogeography of the Late Ordovician in northeastern Guizhou province[J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(5): 539-549.]
- [31] 李志明,陈建强,龚淑云,等. 湘西北奥陶纪碳酸盐台缘的变迁与海平面升降[J]. 地球科学, 1997, 22(5): 479-483. [Li Zhiming, Chen Jianqiang, Gong Shuyun, et al. Sequence stratigraphy and sea level changes of Cambrian in the southern margin of Ordos Basin[J]. Earth Science, 1997, 22(5): 479-483.]
- [32] 黄福喜,陈洪德,侯明才,等. 中上扬子克拉通加里东期(寒武—志留纪)沉积层序充填过程与演化模式[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2299-2317. [Huang Fuxi, Chen Hongde, Hou Caiming, et al. Filling process and evolutionary model of sedimentary sequence of Middle-Upper Yangtze craton in Caledonian (Cambrian-Silurian) [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2299-2317.]
- [33] 余谦,牟传龙,张海全,等. 上扬子北缘震旦纪—早古生代沉积演化与储集层分布特征[J]. 岩石学报, 2011, 27(3): 672-680. [Yu Qian, Mou Chuanlong, Zhang Haiquan, et al. Sedimentary evolution and reservoir distribution of northern Upper Yangtze plate in Sinian-Early Paleozoic [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(3): 672-680.]
- [34] 葛祥英,牟传龙,周恩恩,等. 湖南地区晚奥陶世桑比期—凯迪早期沉积特征及沉积模式[J]. 古地理学报, 2013, 15(1): 59-68. [Ge Xiangying, Mou Chuanlong, Zhou Kenken, et al. Sedimentary characteristics and depositional model in the Sandbian-Early Katian Ages of Late Ordovician in Hunan area [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(1): 59-68.]
- [35] 牟传龙,许效松. 华南地区早古生代沉积演化与油气地质条件[J]. 沉积与特提斯地质, 2010, 30(3): 24-29. [Mou Chuanlong, Xu Xiaosong. Sedimentary evolution and petroleum geology in South China during the Early Palaeozoic [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2010, 30(3): 24-29.]
- [36] 牟传龙,周恩恩,梁薇,等. 中上扬子地区早古生代烃源岩沉积环境与油气勘探[J]. 地质学报, 2011, 85(4): 526-532. [Mou Chuanlong, Zhou Kenken, Liang Wei, et al. Early Paleozoic sedimentary environment of hydrocarbon source rocks in the Middle-Upper Yangtze Region and petroleum and gas exploration [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(4): 526-532.]
- [37] 牟传龙,葛祥英,许效松,等. 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, 2014, 16(4): 427-440. [Mou Chuanlong, Ge Xiangying, Xu Xiaosong, et al. Lithofacies palaeogeography of the Late Ordovician and its petroleum geological significance in Middle-Upper Yangtze Region [J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(4): 427-440.]
- [38] 刘伟,许效松,余谦,等. 中上扬子晚奥陶世赫南特期岩相古地理[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2012, 39(1): 32-39. [Liu Wei, Xu Xiaosong, Yu Qian, et al. Lithofacies palaeogeography of the Late Ordovician Hirnantian in the middle-upper Yangtze region of China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2012, 39(1): 32-39.]
- [39] Wang Jianpo, Deng Xiaojie, Wang Guan, et al. Types and biotic successions of Ordovician reefs in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(10): 1160-1168.
- [40] 陈洪德,庞林,倪新锋,等. 中上扬子地区海相油气勘探前景[J]. 石油实验地质, 2007, 29(1): 13-18. [Chen Hongde, Pang Lin, Ni Xinfeng, et al. New brief remarks on hydrocarbon prospecting of marine strata in the middle and upper Yangtze region [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(1): 13-18.]
- [41] 安太庠. 中国南部早古生代牙形石 [M]. 北京:北京大学出版社, 1987. [An Taixiang. Early Palaeozoic Conodonts From South China [M]. Beijing: Peking University Press, 1987.]
- [42] Chen Xu, Rong Jiayu, Mitchell C E, et al. Late Ordovician to earliest Silurian graptolite and brachiopod biozonation from the Yangtze region, South China, with a global correlation [J]. Geological Magazine, 2000, 137(6): 623-650.
- [43] 樊茹,卢远征,张学磊,等. 四川盆地奥陶系十字铺组与宝塔组接触关系新认识[J]. 地质学报, 2013, 87(3): 321-329. [Fan Ru, Lu Yuanzheng, Zhang Xuelei, et al. New understanding of the contact relationship between Shihztupu Formation and Pagoda Formation in Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(3): 321-329.]
- [44] Zhan Renbin, Jin Jisuo. Ordovician-Early Silurian (Llandovery) Stratigraphy and Palaeontology of the Upper Yangtze Platform, South China [M]. Beijing: Science Press, 2007: 1-169.
- [45] 戎嘉余,陈旭. 华南晚奥陶世的动物群分异及生物相、岩相分布模式[J]. 古生物学报, 1987, 26(5): 507-535. [Rong Jiayu, Chen Xu. Faunal differentiation, biofacies and lithofacies pattern of Late Ordovician (Ashgillian) in South China [J]. Acta Palaeontol Sinica, 1987, 26(5): 507-535.]
- [46] 盛莘夫,姬再良. 论宝塔组的时代 [C]//地层古生物论文集(第十六辑). 北京:地质出版社, 1986: 1-36. [Sheng Xinfu, Ji Zailiang. On the age of the Pagoda Formation [C]//Professional Papers of Stratigraphy and Palaeontology. Beijing: Geological Publishing House, 1986: 1-36.]
- [47] 盛莘夫,姬再良. 地史时期“泥裂”构造的成因初探[J]. 中国区域地质, 1985, 14(4): 119-124. [Sheng Xinfu, Ji Zailiang. Origin of “mud crack” in the geologic past [J]. Regional Geology of China, 1985, 14(4): 119-124.]
- [48] Goehring L, Conroy R, Akhter A, et al. Evolution of mud-crack patterns during repeated drying cycles [J]. Soft Matter, 2010, 6(15): 3562-3567.
- [49] Reineck H E, Singh I B. Depositional Sedimentary Environments [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1980: 84-86.
- [50] Linstör M. Sedimentary folds and the development of limestone in an early Ordovician sea [J]. Sedimentology, 1963, 2(3): 243-292.
- [51] Shinn E A. Submarine lithification of Holocene carbonate sediments in the Persian Gulf [J]. Sedimentology, 1969, 12(1/2): 109-104.

- [52] Shinn E A. Birdseyes, fenestrae, shrinkage pores and loferites; a reevaluation[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1983, 53(2): 619-628.
- [53] 薛耀松,唐天福,俞从流. 鸟眼构造的成因及其环境意义[J]. *沉积学报*, 1984, 2(1): 85-95. [Xue Yaosong, Tang Tianfu, Yu Gongliu. The origin and environmental significance of birdseye structures[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1984, 2(1): 85-95.]
- [54] 叶德胜,王恕一. 碳酸盐岩中的鸟眼构造及其环境意义[J]. *岩相古地理*, 1989, 9(4): 36-43. [Ye Desheng, Wang Shuyi. Bird's-Eye Structures in carbonate rocks and their environmental significance[J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 1989, 9(4): 36-43.]
- [55] 吴劲薇,夏树芳.关于“龟裂纹灰岩”成因的探讨[J].*南京大学学报:自然科学版*, 1989, 25(1): 136-141, 149. [Wu Jinwei, Xia Shufang. Notes on the origin of the "Polygonal marking" limestones [J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences Edition*, 1989, 25(1): 136-141, 149.]
- [56] 江茂生. 湘黔地区中奥陶世海平面上升的沉积响应[J]. *地质科学*, 1998, 33(1): 94-101. [Jiang Maosheng. Sedimentary response to sea level rise during middle Ordovician in the Guizhou and Hunan regions[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1998, 33(1): 94-101.]
- [57] 江茂生. 湘黔地区奥陶纪红花园期及宝塔期碳酸盐岩碳氧同位素与古环境[J]. *岩相古地理*, 1994, 14(6): 44-48. [Jiang Maosheng. Honghuayuanian and Baotaian (Ordovician) carbonate rocks in the Hunan-Guizhou region: carbon and oxygen isotopes and palaeoenvironments[J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 1994, 14(6): 44-48.]
- [58] 谢尚克,汪正江,王剑,等. 秦江观音桥中上奥陶统微量元素地球化学特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 2010, 30(4): 61-65. [Xie Shangke, Wang Zhengjiang, Wang Jian. Trace element geochemistry of the Middle and Upper Ordovician strata in the Guanyinqiao section, Qijiang, Chongqing[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2010, 30(4): 61-65.]
- [59] 方翔,张允白,陈挺恩,等. 论中华震旦角石(Sinoceras chinense)的鉴别特征[J]. *古生物学报*, 2015, 54(1): 84-92. [Fang Xiang, Zhang Baiyun, Chen Ting'en. Morphological variation of Cephalopods Sinoceras Chinense (Foord)[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2015, 54(1): 84-92.]
- [60] 张志斌,刘建波. 贵阳乌当地区中、上奥陶统沉积学研究[J]. *地质与资源*, 2005, 14(4): 251-255. [Zhang Zhibin, Liu Jianbo. Sedimentary study of the Middle and Late Ordovician in Wudang, Guiyang[J]. *Journal of Precious Metallic Geology*, 2005, 14(4): 251-255.]
- [61] Christ N, Immenhauser A, Wood R A, et al. Petrography and environmental controls on the formation of Phanerozoic marine carbonate hardgrounds[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 151: 176-226.

Research of the Origin of Network Structure in the Ordovician Pagoda Limestone: Advances and New Discovery

LIAO JiJia^{1,2}, MA SiHao^{1,2}, LIAO MingGuang^{1,2}, XIAO XueWei^{1,2}, LIN Dan^{3,4}, HE WenLiang⁵, LIAO JiHao⁵

1. Natural Gas Geology Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

3. Sichuan Key Laboratory of Shale Gas Evaluation and Exploitation, Chengdu 610091, China

4. Sichuan Coalfield Geology Bureau, Chengdu 610072, China

5. CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company, Nanchong 637000, China

Abstract: Pagoda limestone, which is widely distributed in Yangtze area, refers to a set of micritic limestone or bioclastic micritic limestone in Ordovician Pagoda Formation. The unique network structure is developed pervasively throughout the entire Pagoda Formation in bedding-plan view, and these networks are similar to turtle shell or horseshoe, so it is also known as "turtle-shell cracks" or "horseshoe cracks". In this study, combining with the field survey in Tangjiahe section of Wangcang in Sichuan province, we systematically reviewed the literature on the issue of the unique network structure, and summarized the main views about the explanations. Up to now, agreements have been achieved that the cracks should not be considered as an evidence of desiccation during surface exposure; bioglyph, hardground and other origins are lack of evidence; while syneresis, diagenesis and other causes are still in heated discussion. In addition, some new phenomena were observed on Tangjiahe section, for example, we found the black fine lines on the bedding surface of gray Pagoda limestone. Both the existing problems and the new findings may boost the study on the origin of the special network structure in Pagoda Formation. They can also help improve our understanding of the mechanisms of the special networks.

Key words: Ordovician; Pagoda limestone; network structure; the explanation of origin; new discovery