文章编号:1000-0550(2015)06-1097-14 doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2015.06.004

上扬子区灯影组白云岩葡萄体特征及成因初探①
——以南江杨坝地区灯影组一段为例

牟传龙[1,2] 王秀平[2,3] 梁 薇[1,2] 王远翀[2,4] 门 欣[2,4]

(1.中国地质调查局成都地质调查中心 成都 610081;2.国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室 成都 610081;
3.山东科技大学 山东青岛 266590;4.成都理工大学 成都 610059)

摘 要 上扬子地区晚震旦世灯影组及其相应地层白云岩中广泛发育一种外形奇特的具有圈层结构的肾球状体、椭球体、葡萄体及不规则状的球体(以下统称为葡萄体),宏观上呈钙华状成片产出,沿层面或裂隙分布,大量学者认为其为受大气淡水影响形成的。在详细野外观察描述的基础上,应用偏光显微镜、阴极发光和扫描电镜等分析测试手段,对四川南江杨坝地区灯影组一段白云岩中的葡萄体进行了研究,结果表明:葡萄体为具核心和明暗相间皮壳层的半球体,矿物组分以白云石为主,局部含少量自生石英,为围岩固结成岩后的产物;核心及暗色皮壳层中发育藻黏结集合体,并见大量不规则的微生物丝状体,且矿物组分中含有较高的碳元素,发较亮的红色阴极光,结合海底硬底的存在,说明其为海水环境中的生物—化学沉积物;葡萄体的外层主要为亮色皮壳层,呈等厚亮晶纤状胶结物,多发暗红色阴极光,并造成葡萄体间呈多面体交汇,说明后期葡萄体的形成以胶结作用为主,为海水潜流带的产物;葡萄体的大小和形态与基底上不规则凸起的形态及生长空间特征密切相关,固定的生长质点和规则的结构指示葡萄体形成于稳定的水体中;葡萄状白云岩的原始组构应为文石或高镁方解石,扫描电镜下呈晶粒结构,为白云石化作用的产物;葡萄集合体的组分、阴极发光性与其围岩相似,按照其产状和形态特征,把这种具有固定生长质点且具等厚皮壳层的半球体称作葡萄状构造,应为生物—化学成因的沉积—成岩构造,形成于稳定的海水中。

关键词 葡萄体 白云岩 成因 灯影组 震旦系

第一作者简介 牟传龙 男 1965 年出生 研究员 博士生导师 沉积地质研究 E-mail:cdmchuanlong@ 163.com

中图分类号 P618.130.2 **文献标识码** A

0 引言

我国西南地区震旦系灯影组下部广泛发育一种外形奇特的具有圈层结构的肾球体、椭球体、葡萄体以及不规则状的球体(以下统称为葡萄体),宏观上呈钙华状成片产出,沿层面或裂隙分布。长期以来,对这种具有葡萄外形岩石的认识,存在很大的分歧。多数将葡萄体称为葡萄状构造[1-7];蒲心纯等[8]则称作波状叠层石藻云岩,认为“葡萄状”实质上是一种起伏很大的波状叠层石,由相互平行的波状暗色藻层与亮层交替组成;近些年来有的学者称其为葡萄石[6,9-10],并认为葡萄石是一种由泥晶文石胶结碳酸盐砂、泥构成的[9]。对其成因也有多种明显不同的认识,张荫本[1]、曹仁关[9]、黄志诚等[11]、王兴志等[12]、王士峰等[13]、赫云兰等[14]等认为葡萄体(葡萄石、葡萄状构造)为原生沉积形成的,而多数学者则认为其为次生成因[4-6,15-18],较多的与成岩期后大气淡水作用相联系[5-6,10,18-19],并认为葡萄体可作为明显的暴露标志[20-21]。牟传龙等②、余谦等[7]则认为上震旦统灯影组一段皮壳状构造(葡萄体)为围岩被淡水溶蚀后,在海水环境中胶结的产物。也有的认为葡萄花边状白云岩形成于成岩期的混合水环境,为准同生及表生混合水充填的产物[16]。少数学者认为葡萄体形成于埋藏成岩环境,王兴志等[22]通过对四川盆地西南部震旦系灯影组白云岩研究,认为葡萄花边纤状白云石是表生成岩环境至浅埋藏成岩环境中沉淀充填的产物,一种长期多变的成岩环境下的化学充填物;莫静等[23]通过对川中地区震旦系灯影组白云岩的研究,也认为葡萄花边纤状白云石形成于浅埋藏阶段。显然,对灯影组白云岩中葡萄体的认识,不仅存在定名上的分歧,在成因及其形成机制等方面更是众说纷纭,这将直接影响到灯影组沉积环境、成岩历史

①中国岩相古地理编图项目(编号:1212010916060)资助
②牟传龙,等. 川东北广元—镇巴地区二叠—三叠系储层展布特征研究. 2006. 内部资料.
收稿日期:2014-07-03;收修改稿日期:2014-09-10

及其对储层等方面的研究。

近年来,众学者对葡萄状白云岩成因的判断主要是借助地球化学的分析方法[10,19,22,24],而地化分析作为判断岩石成因的辅助手段,应根据详细的野外观察描述和室内镜下鉴定,以明确其成分、结构特征为基础。因此,对于震旦系灯影组白云岩中葡萄体的研究,明确其结构、组分特征,不仅是其成因分析的关键,亦是利用地化手段进行成因分析的前提。本文在详细的野外观察的基础上,借助偏光显微镜、阴极发光和扫描电镜等分析测试手段,对葡萄体的组成、结构特征进行了详细的研究,并对其成因进行初步分析,在此基础上对灯影组葡萄体给出合理的命名。

1 地质背景及样品制备

四川南江地区位于米仓山前缘,震旦纪时期属于扬子克拉通海相盆地的北部边缘。由于受海平面变化和上升洋流的影响,整个扬子地块形成了独具特色的白云岩和黑页岩沉积组合旋回的陡山沱组的沉积[7,25],至埃迪卡拉晚期,完成了由碎屑岩到碳酸盐岩沉积的转换,形成了整个扬子地区分布稳定的灯影组碳酸盐台地沉积。南江扬坝剖面位于四川省广元市南江县杨坝镇东南方向 200 m 处,灯影组以发育白云岩为主(图 1),并具一定的碎屑岩沉积,自下而上分为三段:灯一段主要为一套浅灰或深灰色中厚层块状白云岩、藻团块白云岩、纹层状白云岩、硅质白云岩以及少量的泥质粉砂岩等,该层富含藻,中、下部白云岩发育大量的葡萄体,厚约 500 m;灯二段主要为中厚层状含砾长石石英砂岩、泥质粉砂岩夹薄层状硅质岩,厚 34 m;灯三段以中厚层状白云岩和硅质白云岩为主,少量硅质岩,下部白云岩中富含藻,厚 233 m。从剖面上看出,葡萄状白云岩主要分布在灯影组一段中、下部,厚约 76 m,构成了一种特殊的岩石特征,也成为了作为进行地层区域对比的标志。

在详细的野外观察的基础上,样品均选择风化较弱、结构清晰的新鲜块样。在制样前,对样品进行整体拍照、记录,确保镜下观察与手标本可进行对比研究。对同一个样品进行多向制样,尤其是对葡萄体发育的部位,分别进行横向和纵向的连续切片制备。同时对葡萄体的围岩进行纵向制样,用于对比研究葡萄体的发育特征。制备的薄片类型包括:普通薄片、阴极发光薄片和电子探针片,以及用于扫描电镜分析的近四方体的块样(边<5 mm),力求对葡萄体的结构、成分特征进行全面分析。其中,阴极发光薄片的观测分别在成都理工大学沉积地质研究院显微实验室和成都地质调查中心国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室完成,均采用 CL8200 Mk5-2 阴极发光仪,实验温度为 18℃~25℃,湿度为 30%~50%RH;普通薄片和扫描电镜的观测均在成都地质调查中心国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室完成,普通薄片的观察描述利用蔡司偏反光显微镜进行,扫描电镜分析则采用日立 S-4800 扫描电子显微镜,在实验室温度为 20℃,湿度为 40%RH 的实验条件下完成。为了确定其岩性及矿物组分,在中国石油华北油田勘探开发研究院沉积实验室采用 D8 DISCOVER 型 X 射线衍射仪,在实验室温度为 22℃、湿度为 30%RH 的条件下对葡萄体及围岩进行了全岩 X 衍射分析。

2 葡萄体的特征

2.1 野外产出特征

葡萄体形态特殊,沿葡萄体发育的层面极易风化、破碎,易于识别。在野外露头上,葡萄体局部富集,在厚层状白云岩中不均匀产出,层面上表现为大小不一、紧密堆积的集合体;同一层面的垂向上为具有不同核心和明暗相间纹层的特征,纹层呈皮壳状。整体从层面上看,此类碳酸盐集合体的相态与紧密排列的葡萄相似,故以“葡萄”命名,但不具颗粒状,而是具有固定生长质点的半球体。宏观上,葡萄集合体主要有以下几种产出状态:①以顺岩层的层理面分布为主,但不与岩层面等效延伸,通常沿倾向延伸较远,而沿走向延伸有限,垂直倾向方向呈条带状。沿倾向方向,既有延伸长度达数米的大型葡萄状集合体(图 2A),厚度通常<0.5 m,葡萄体较大,直径多>1 cm;也有顺小型孔洞发育的葡萄状花边(图 2B),厚度通常为厘米级,发育毫米级葡萄体,呈密集分布。②可见葡萄体分布在顺节理面或构造裂缝形成的穿层溶蚀孔洞、缝中,有的为顺层分布的葡萄集合体局部延伸方向发生改变,造成切层分布(图 2C)。

单个葡萄体在垂向上向外呈相互平行的、波状起伏的纹层状生长,受层面凸起的影响,呈半球状,半球的外凸方向指示自由生长的方向。葡萄体的半球轴线趋于垂直孔洞、缝壁,同一生长空间中的集合体大致呈对生生长,表现为葡萄体依附孔洞、缝壁生长的特征(图 2A,B,C)。同一生长面上,沿近似同一方向生长的葡萄体最后贴面接触,而不同生长方向的葡萄体则形成具有弧状边界且封闭的孔隙、孔洞,常被亮晶白云石充填,并发育大量的晶洞(图2D)。层面

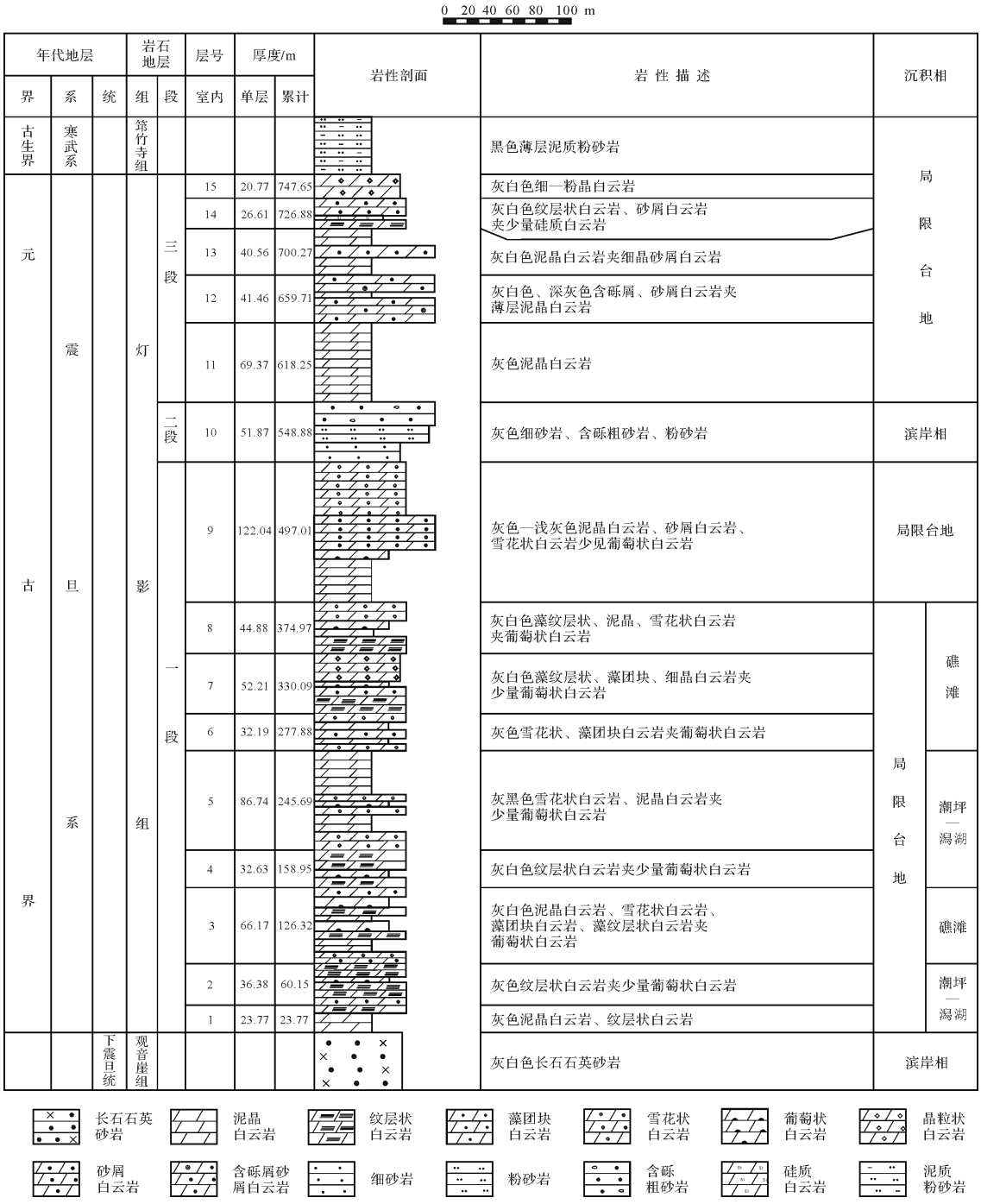

图 1　四川省南江杨坝剖面震旦系灯影组柱状剖面图(据牟传龙等,2006 修改)

Fig.1　Outcrop columnar section of Sinian Dengying Formation in Yangba, Nanjing, Sichuan province(modified from Mou, 2006)

上,葡萄体大小不一,直径多为 1~7 cm,其中介于 1~3 mm 较发育;一般发育数十层皮壳层,个体较大者可达几十层、甚至上百层以上,表现为皮壳层的层数和总厚度与葡萄体的大小正相关,说明葡萄体的大小与生长空间有密切的关系。在野外可见一侧边界完整的椭球状葡萄集合体滚石,较均一的黑灰色、灰白色皮壳层规律性的包裹在块状泥晶白云岩的外侧(图 2E),结合葡萄集合体的纵向和层面特征,推测其葡萄集合体实际上呈弯曲狭缝分布。在孔洞、缝壁上具有凸起的质点时,可作为葡萄体的生长基点,近似等厚的纹层覆盖在凸起质点的表面,并随着纹层的逐渐累积,最终形成似葡萄集合体的半球体;而缺少凸起

的生长质点时,则厚度均匀的纹层表现为明暗相间的纹层状构造,垂直层面上可见上下纹层对生生长的特征,中间形成的封闭孔隙多被亮晶白云石充填(图2F,G),受明显的藻或菌类作用的影响后,则表现为藻纹层状特征。葡萄体通常表面光滑,靠近核心的皮壳层面上,有的具有密集的毫米级疙瘩体(图2H),表现为与葡萄体的分布特征相似,应为皮壳层内发育的小葡萄体。

葡萄体的纵切面通常表现为典型的半圆弧形态,个体较大的葡萄体则呈不规则的半圆状或圆柱状(图2E,H),有的似"水滴"型、花边悬垂状,仅发育在孔洞、缝上壁(图2G),表现为受到了一定的重力作用的影响。横切面则为同心状,内部为暗色核心或均匀块状的泥晶白云岩(图2E,I),外侧为明暗相间的

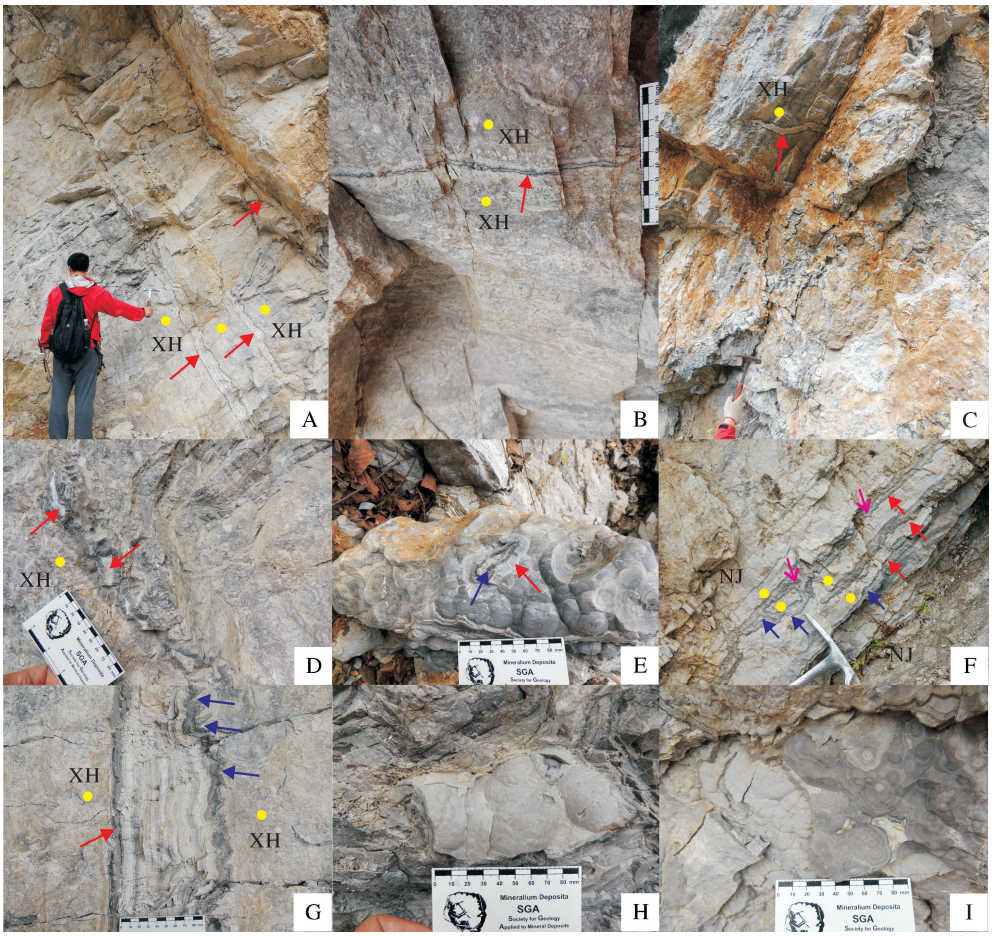

图2 南江杨坝剖面震旦系灯影组一段剖面葡萄体的野外特征

A.顺层展布的大型葡萄状集合体,围岩为雪花状白云岩(XH,黄点);B.小型葡萄花边集合体,围岩为雪花状白云岩(XH,黄点);C.穿层分布的葡萄状集合体,围岩为雪花状白云岩(XH,黄点);D.层面上对生分布的葡萄状集合体及其间所充填的亮晶白云石,围岩为雪花状白云岩(XH,黄点);E.呈椭球状的葡萄集合体(滚石),核心为灰白色泥晶白云石(蓝色箭头),皮壳层为灰黑色(红色箭头);F.灰黑色皮壳层似平直的条带状分布(红色箭头),局部底面不平整形成葡萄体(蓝色箭头),核心和围岩均为灰白色泥晶白云石(NJ,黄点);G.葡萄集合体特征,上覆地层层面上具"V"型悬垂状(蓝色箭头),下伏地层层面上皮壳层较平直分布(红色箭头),围岩为雪花状白云岩(XH,黄点);H.葡萄体的皮壳层面上发育密集的疙瘩体;I.葡萄体横截面特征,核心为灰白色泥晶白云岩,皮壳为灰黑色圈层,似鲕粒。

Fig.2 Outcrop characteristics of grape-like dolomite in the First section of Sinian Dengying Formation in Yangba, Nanjiang

A. bedding distribution of large grape-like aggregates (GA for short), snowflakes dolomite(XH) as surrounding rock (yellow dots); B. small GA, XH as surrounding rock (yellow dots); C.Cutting layers distribution of GA, XH as surrounding rock (yellow dots); D. opposite distribution of GA on the rock surface and the sparry dolomite, XH as surrounding rock (yellow dots); E. axiolitic shaped GA (rolling stone), grey micritic dolomite as the core (blue arrow), shells in grey black (red arrows); F. grey-black-shell in straight zonal distribution because lack of convex shaped growing point on internal surface of crack (red arrows), on the contrary, grape-like stone lying on the uneven surface(blue arrow); G. characteristics of grape-like aggregates, the grape-like stone in "V" type trailer on the surface of the overlying strata(blue arrow), and the shells on the surface of the underlying strata in flat distribution (red arrows), XH as surrounding rock (yellow dots); H. Intensive lumpish bodies on the shells of grape-like stone; I. Characteristics of grape-like stone's cross section, in oolitic with grey micritic dolomite cores and grey black shells.

较规则生长的圈层,由内向外圈层整体上颜色变浅。手标本中,葡萄体可以一层一层的剥离,表现为皮壳状,表明不同皮壳层具有不同的生长期次和组分,而同一皮壳层组分、厚度较均一;单层皮壳厚薄不一,多为 0.5~3 mm,最厚可达 1 cm。不同生长空间中的皮壳层不尽相同,有的葡萄体暗色皮壳层较发育,而生长空间较大的葡萄体则在暗色层的外侧发育较厚的灰白色皮壳层,因此皮壳的整体生长顺序应为早期主要形成暗色层,后期则以产生灰白色类型为主。核心较小且规则的葡萄体,其皮壳层逐渐趋于半球状,圆度较好,形成的边界较规则、圆滑,横切面上形态似巨大的鲕粒(图 2I)。

灯影组一段中葡萄集合体尽管分布广泛,在地层中却并不是连续产出的,通常呈夹层状分布于雪花状白云岩、颗粒白云岩和藻白云岩等围岩中,其厚度薄,延伸有限(图 2A,B,C)。葡萄状集合体的分布特征像灯影组厚层状白云岩中的“装饰品”,更像是其孔洞、裂缝的“填充物”,在空间上表现为由下往上呈弱发育—密集发育—交替发育—不发育分布[6]。

综上所述,葡萄体具核心和明暗相间的纹层结构,呈较规则的半球状;集合体多呈狭长的夹层状分布于雪花状、颗粒状和藻白云岩等围岩中,以顺岩层面分布为主。早期相对不规则的暗色皮壳层与后期较规则的灰白色类型的发育,指示其可能产生于不同的环境中,并/或由不同的成因机制形成。随着葡萄体的生长,造成生长空间逐渐减少、封闭,最后在封闭的环境中由孔隙水胶结形成,或在后期成岩过程中发生交代作用,充填亮晶晶粒白云石。葡萄体的形态与大小主要受控于核心(基底)的形态及生长空间的特征。

2.2　微观特征

2.2.1　镜下特征

(1) 常规镜下特征

显微镜下,葡萄体横切面多呈同心圆状、椭圆状,与鲕粒十分相似,见明显的核心与同心层(圈层)。核心通常呈灰黑色、灰褐色,是由微生物藻(菌)的作用产生的,藻黏结作用明显[12],多为隐藻类泥晶白云岩[9],其次为孔洞、缝壁上凸起的泥晶白云岩或颗粒白云岩[12]。与手标本上所观察的一样,核心的形状通常不规则,大小不一,具有单个和复合特征,直径一般<5 mm,其形状决定了葡萄体的形态;具有一定的生长结构,纤状晶体垂直生长在暗色质点的外侧,并逐渐填充质点间的空间,有的受多期微生物藻黏结作用的影响后,最终形成较规则的外形;横切面上,单个核心的葡萄体结构清晰(图 3A),具有多个核心的葡萄体往往只有在出现完整的褐色圈层时,才会真正开始皮壳层的生长,核心的藻黏结作用明显,葡萄体的形状稍不规则。切面上看,葡萄体表现为不均一的凸起基底和波状起伏的纹层,分别对应于横截面上的核心和同心层;生长空间的底层面为不平直的硬底,核心可见不连续的藻黏结集合体,形态似树状或丘状(图 3C),指示典型的海相环境中微生物作用的影响。

圈层由相互平行的亮色与暗色纹层相间组成,亮色纹层主要为纤状亮晶白云石,暗色层通常为褐色和黑色,与泥晶核心的特征相似,具有含蓝绿藻(菌)或受微生物影响的特征,呈泥晶或纤维状结构(图 3A)。纤状晶体呈垂直层面生长,不同圈层中的晶体表现为相同的消光性,受弯曲生长底面的影响,纤状白云石集合体呈向远端发散的放射状消光(图 3D)。不同圈层的厚度差别较大,暗色层通常较薄呈细线状;而纤状亮晶生长层则一般>0.1 mm,最厚可达 3 mm。单个圈层的厚度往往是均一的,纤状晶体的大小、长短一致,决定了单个皮壳层是近似等厚的。由内向外,圈层的厚度整体增加,最外侧的圈层往往最厚,晶体最大,也最明亮,其间为浅褐色沉积物分隔,显示出层状胶结物的特征(图 3A,D)。纤状晶体的生长似乎是连续的,褐色层虽切穿亮色纹层,然而其晶体的形态特征不受任何的影响(图 3D),这说明其生长环境相差不大。

葡萄体的圈层结构和组分大部分较均一,但也存在不均一的类型,表现为一侧为规律性的明暗相间的纹层,而另一侧受灰黑色泥(碳酸质泥)的影响,圈层厚度呈透镜状向另一侧逐渐尖灭,且层间呈现花边状弯曲接触(图 3A),切面上似叠层构造。这说明在皮壳层的生长过程中,受沉积环境的影响,泥质(碳酸盐泥)不均匀分布,造成葡萄体的圈层结构形变,但泥质(碳酸盐泥)的存在总体不破坏葡萄体的生长结构。

(2) 阴极发光特征

葡萄体在阴极光照射下,整体表现为暗红色的特征。灰黑色云泥多呈红色、暗红色,且单偏光下颜色越暗,其阴极光越亮,而纤状晶体则不发光或发很暗红色光(图 3B,F),这种差异明显的发光性,说明不同纤状晶体生长层不是同一个晶体,只是光性一样而已。核心与暗色纹层具有相同的发光性,呈均一的红光,说明二者的形成环境和组分相似,然而随着泥质

(云泥)的减少,由核心向皮壳层的发光性稍微减弱。受成岩作用的影响,纤状白云石晶体发生重结晶作用,形成叶片状结构(图 3E),其阴极光照射下仍表现为原皮壳状特征,且发光性与未发生重结晶的葡萄体相似,整体呈暗红色光,同时也表现为灰黑色核心与暗色纹层发光亮,亮色纹层发光暗或不发光的特征(图 3F),说明葡萄体的阴极发光性可以指示其原形成环境的特征。亮晶白云石晶粒多具环带状发光性,呈橙黄色的单环带和规则的明暗相间的多环带两种类型,指示其变化的成岩水体的特征,与葡萄体的形成环境不同。另外,葡萄体的围岩(雪花状、颗粒状和藻白云岩等)在阴极发光照射下,均呈现发红色光的特征,亦为暗色云泥发光亮,胶结物发光暗,并根据其富藻云泥含量的多少决定了其发光的明暗(图 3G, H)。由此可见,葡萄体与其围岩的发光性相似,其形成环境很可能相差不大。

(3) 葡萄体的生长过程

根据葡萄体的显微结构特征,其形成过程可以形象的简述为:同一个生长空间中的葡萄集合体,其核心与外侧皮壳层的产生均具有等时性。平面上,就像是浸泡在一定的容器中一样,首先分别围绕一个固定的生长质点,产生不规则状的灰黑色核心;然后以核

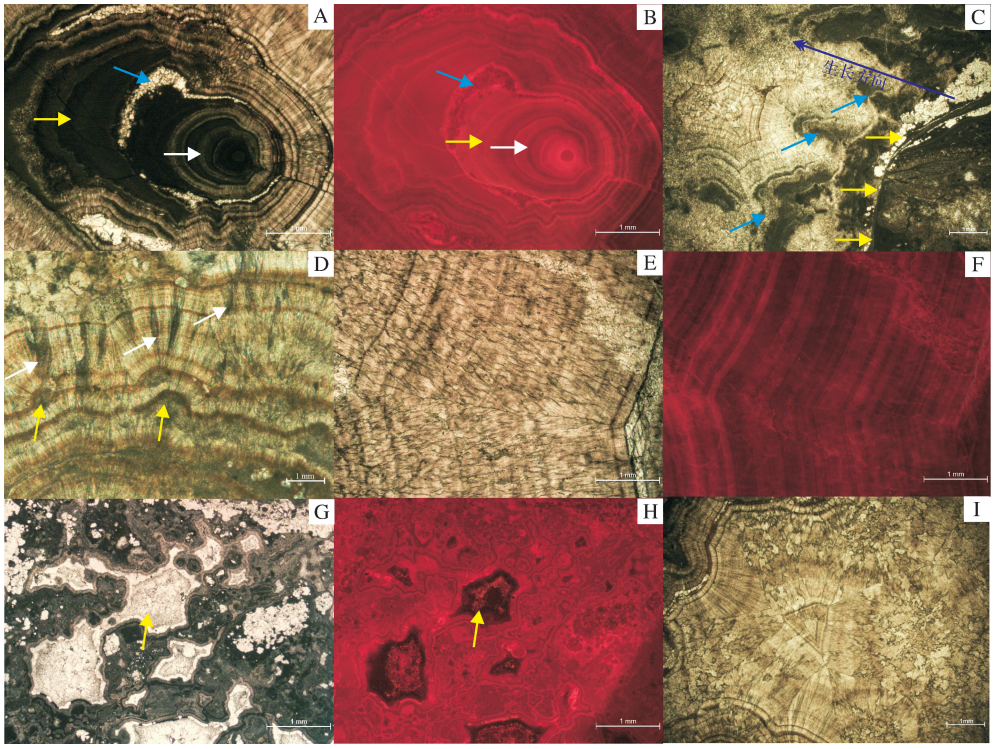

图 3 南江杨坝剖面震旦系灯影组一段剖面白云岩的微观特征

A.葡萄体横截面特征,皮壳层组分和结构受泥质(碳酸盐质泥)的影响,呈现不均匀特征,B1;B. 3A 的阴极光特征,暗色纹层发红色光(黄色箭头),亮色纹层发暗色光(白色箭头),晶粒白云岩不发光(天蓝色箭头),B1;C.葡萄体的切面特征,围岩为凝块状白云岩,二者之间的接触界面为硬底(黄色箭头),其上生长树形藻黏结核心(天蓝色箭头),B3;D.皮壳层内生长的未成形葡萄体(黄色箭头),说明凸起核心和生长空间对葡萄体的重要性,不同生长层中的纤状亮晶白云石呈远端发散的消光(白色箭头),B3;E.发育溶蚀—重结晶的皮壳层,B1;F. 3E 的阴极发光特征,皮壳层的结构明显,阴极发光仍保持为暗红色,B1;G.凝块状白云石(葡萄体的围岩)特征,B4;H. 3G 的阴极发光特征,暗色凝块发红色光,晶粒白云石不发光(黄色箭头);I.葡萄体间的胶结物呈多面体交汇,堵塞孔隙,B2。

Fig.3 Microscopic characteristics of dolomite in the First section of Sinian Dengying Formation in Yangba, Nanjiang

A. cross section characteristics of grape-like stone, composition and structure of shells in heterogeneous because of the existence of carbonate mud, B1; B. thecathode light characteristics of Fig.3A, with dark laminas in red color (yellow arrow), and bright ones in dark light (white arrow), grain dolostone in non-luminance (blue arrow), B1; C. vertical section features of grape-like stone, clot-like dolomite as the surrounding rock, and algae tree cores (blue arrow) were growing on the hard ground between the contact interfaces (yellow arrow), B3; D. unformed grape-like stone among shells (yellow arrow), showing that the importance of cores and growth space to the grape-like stone, and fiber shaped bright crystal dolomite at different layers with distal spread extinction (white arrow), B3; E. dissolution-recrystallization shells, B1; F. the cathode light characteristics of Fig.3E, with obvious shells and in dark red luminance, B1; G. characteristics of clot-like dolomite, B4; H. the cathode light characteristics of Fig.3G, with dark clot in red luminance and grain dolomite in in non-luminance (yellow arrow); I. cement is polyhedral intersection between grape body, as pore fillings, B2.

心为中心同步生长,逐渐形成同心圈层,单个圈层几乎是等厚的,组成皮壳层。由于这种同步生长行为,受控于核心形状以及生长空间的差别,葡萄体的外形和大小不同,但是每个葡萄体的组构几乎是完全相同的,同一生长空间中的葡萄体的核心和皮壳层都是一一对应的(图 3D)。皮壳层围绕核心呈垂直层面向外生长,使得葡萄体之间的空间逐步被相同规律性生长的圈层充填,最后呈规则的多面体交汇(图 3I)。通俗地来说,皮壳层在独立核心外侧,按相同的规律同时生长,接触不到时各自呈孤岛状生长,相遇后便呈席状生长。空间上,生长层就像是一片片的“布”,覆盖在固定的生长质点或已形成的葡萄体的表面,形态特征完全依据被覆盖体的形态产出。同一孔洞、裂缝壁中的葡萄体,由边缘向孔隙的中间同时生长填充,这种强规律性的生长过程,应是在稳定的水体中进行的,核心是保持固定的,安静的生长环境才能保证纹层均质生长,且水体饱和。

在葡萄体生长的过程中,稳定的环境和充足的组分使得核心成为影响其形成的主要因素,只要是在孔洞、缝壁有凸起的质点,就可以形成葡萄体,甚至在生长层中也可以产生葡萄体,但由于受生长空间的限制,使其形成受到了抑制(图 3D),而生长空间充足的情况下,就可以在葡萄体上产生新的葡萄体,形成复合葡萄体。葡萄体虽具有不同的核心,却最终总是能形成较规则的半球体,葡萄体的生长具有逐渐趋于规则的特征,进一步指示稳定的环境的存在。

2.2.2　晶体及成分特征

扫描电镜显示,葡萄体的纤状晶体结构实际上是由晶粒白云石规则、紧密排列形成,以具菱面体晶形为主,并可见正方面晶体及顶面呈五边形的晶体,大小较均一,通常为 50~100 μm,集合体分别呈链条状(图 4A)、片状(图 4B)和蜂窝状(图 4C)。向芳等[16]也认为葡萄体的纤状白云石实际是由沿 C 轴平行连生的超微白云石构成,且白云石具有良好的菱面体晶形(图 4D)。陈明等[5]、蒲心纯等[8]认为葡萄体中含有方头柱状文石假晶或蠕虫状构造及文石假晶,纤状亮晶生长层不含有碎屑结构,由柱—粒状亮晶白云石组成,并常与石膏假晶伴生。此次研究分别对 5 个不同葡萄体进行详细的电镜分析,并未观察到针状、柱状文石假晶,并对灯影组一段中 16 件白云岩样品的全岩 X 衍射分析,也并未检测到石膏成分(表 1)。见六方柱状的石英晶体,在阴极光照射下不发光,其共生白云石在阴极发光照射下呈明显的环带特征,说明其可能为热液成因,由此可见,灯影组一段在沉积过程中受陆源碎屑影响很小。在凝块状白云岩中见到局部富集的丝状体(图 4E),应为菌藻类遗体化石,而葡萄体的晶体间及晶体表面普遍也发育不规则的丝状体(图 4F),同其围岩中的丝状体相似,且多存在于不等粒及链条状、片状集合体间,在紧密排列的晶粒集合体中少见,说明葡萄体的形成受到微生物作用的影响,且微生物具有一定的选择性分布特征,造成葡萄体核心与靠近核心的皮壳层呈灰黑色、黑色及不均一葡萄体的发育。另外,灯影组白云岩的矿物组分中,碳元素含量普遍较高(表 2),结合镜下菌藻类丝状体特征,说明灯影组白云岩的形成受微生物作用影响较大,葡萄状白云岩同其围岩一样,均有微生物的参与。充填裂缝或局部分布的较大晶体,以规则的菱面体晶形为主,多>100 μm,为后期溶蚀—重结晶作用和交代作用形成的。

3　葡萄体成因初探

3.1　结构分析

由上可知,葡萄体具有以下几个识别性标志:①在围岩中多呈单个夹层状分布;②具有一个固定的、凸起的生长质点(核心);③围绕核心具有多个等厚生长层,在横切面上呈等厚圈层;④等厚圈层具层纤状结构;⑤层纤状结构中晶体均垂直颗粒表面生长,且光性方位一致;⑥纵切面上等厚生长层呈席状,为皮壳层;⑦分布于孔洞缝的边部或四周,葡萄体的凸向指向垂直于壁的自由空间方向(如顶部的葡萄体的凸向指向下,孔洞底部葡萄体的凸向指向上,而洞两侧的葡萄体凸向大致垂直于壁指向自由空间)。同一生长空间中的葡萄集合体形态并非是对称的,尽管所有的葡萄体具有相同数量的皮壳层,受核心和不均一暗色层的影响,往往表现出大小、形态不同的个体,通常附着在上壁生长的葡萄体比孔洞、缝隙中其他部位的个体,具更明显的凸起幅度。

葡萄集合体在纵切面上的产出状态与叠层石相似,而单个葡萄体在横切面上表现为同心圈层状,似鲕粒。鲕粒是具有核心与同心纹层的内碎屑,同心纹层不具有同等消光位的纤状晶体胶结特征,有菌藻类参与的状况下,通常呈后期的藻穿孔作用或形成具有花边状边缘的藻鲕,微生物由外向内对其作用;最大的区别是鲕粒的形成是一个在波动水体中的过程,而葡萄体是围绕一个固定的质点逐渐向外生长形成的,表现为静水沉积环境的特征。叠层石则是具叠层构

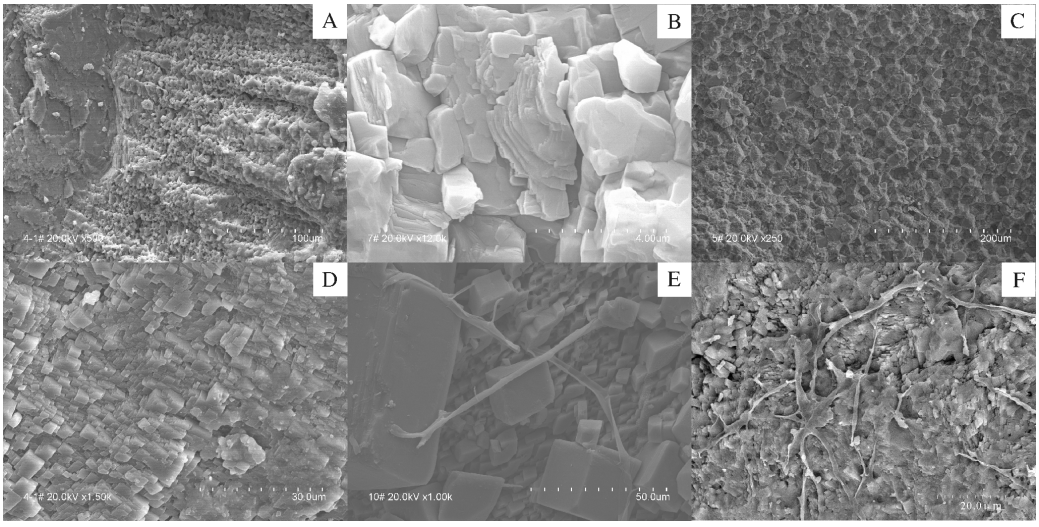

图 4 南江杨坝剖面震旦系灯影组一段葡萄体扫描电镜特征

A.葡萄状皮壳层晶体呈链状集合体特征,B26;B.葡萄状白云岩晶体呈片状集合体,B25;C.葡萄状白云岩晶体呈蜂窝状集合体,B20;D.葡萄状白云岩菱形晶体,B26;E.藻凝块白云岩中的丝状体,B27;F.葡萄体中的丝状体,B9。

Fig.4 The SEM characteristics of grape-like dolomite in the First section of Sinian Dengying Formation in Yangba, Nanjiang, Sichuan province

A. crystal aggregations of grape shell in chain structure, B26; B. crystal aggregations of grape shell in flake structure, B25; C. crystal aggregations of grape shell in cellular structure, B20; D. grape-like dolomite with rhombus crystals, B26; E. filaments in algal clot-like dolomite, B27; F. filaments in shape-like dolomite, B9.

表 1 南江杨坝剖面震旦系灯影组一段白云岩岩石特征

Table 1 Petrology feature of dolomite in the First section of Sinian Dengying Formation in Yangba, Nanjiang

序号	样品编号	岩性	全岩定量分析/%							
			黏土总量	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	石膏
1	YBP-B3	泥晶白云岩	<1	1	—	<1	<1	99	—	—
2	YBP-B4	泥晶白云岩	<1	1	—	<1	<1	99	—	—
3	YBP-B5	泥晶白云岩	<1	<1	—	<1	<1	100	—	—
4	YBP-B7	藻凝块白云岩	<1	<1	—	<1	<1	100	—	—
5	YBP-B8	藻凝块白云岩	<1	10	—	<1	2	88	—	—
6	YBP-B9	纹层状白云岩	<1	13	—	<1	<1	87	—	—
7	YBP-B20	葡萄状白云岩	<1	1	—	<1	<1	99	—	—
8	YBP-B21	葡萄状白云岩	<1	<1	—	<1	<1	100	—	—
9	YBP-B24	葡萄状白云岩	<1	<1	—	<1	<1	100	—	—
10	YBP-B25	葡萄状白云岩	<1	<1	—	<1	<1	100	—	—
11	YBP-B27	凝块白云岩	<1	<1	—	<1	<1	100	—	—
12	YBP-B28	凝块白云岩	<1	<1	—	<1	<1	100	—	—
13	YBP-C1	纹层状白云岩	<1	<1	—	<1	<1	100	—	—
14	YBP-S1	凝块白云岩	<1	<1	—	<1	<1	100	—	—
15	YBP-S2	葡萄状白云岩	<1	<1	—	<1	<1	100	—	—
16	YBP-S3	葡萄状白云岩	<1	<1	—	<1	<1	100	—	—

造的生物成因碳酸盐岩,富藻纹层与富屑纹层交替出现,纹层并不呈现等厚性,富屑纹层的组分亦不呈现均一性,且并非一定存在固定的生长质点;由此可见,葡萄体为异于内碎屑与叠层构造的特殊组构。受微生物作用影响较强的葡萄体,发育灰黑色、黑色泥质沉积物,与富藻纹层相似;从结构上分析,葡萄集合体应该是与叠层构造相似的沉积构造类型。

葡萄体的暗色皮壳层及核心多由微生物参与形成[5,8-9,12],蓝菌藻黏结组构极其发育[12],可见不规则微生物丝状体(图4F),以及矿物组分中含有很高的

表 2　南江杨坝剖面震旦系灯影组一段白云岩矿物组分特征

Table2　Mineralogical characteristics of dolomite in the First section of Sinian Dengying Formation in Yangba, Nanjiang

样品号	岩性	C (wt%)	O (wt%)	Mg (wt%)	Ca (wt%)	CaCO3 (mol%)	$MgCO_3$ (mol%)	多余 C (mol%)
B1-1	葡萄体核心	46.8	35.5	6.6	11.2	0.3	0.3	3.3
B1-2	葡萄体暗色皮壳	24.8	44.5	9.7	21.1	0.5	0.4	1.1
B1-2	葡萄体暗色皮壳	43.6	44.7	3.4	6.4	0.2	0.1	3.3
B1-2	葡萄体暗色皮壳	25.8	48.7	9.1	16.4	0.4	0.4	1.4
B1-2	葡萄体暗色皮壳	24.7	49.7	9.3	16.4	0.4	0.4	1.3
B1-3	葡萄体暗色皮壳	64.1	24.2	3.8	8.0	0.2	0.2	5.0
B1-4	葡萄体暗色皮壳	31.0	42.0	8.6	18.5	0.5	0.4	1.8
B2-1	葡萄体亮色皮壳	36.5	41.9	7.6	14.0	0.3	0.3	2.4
B3-1	雪花状白云岩片状晶粒	59.5	31.2	3.4	5.9	0.1	0.1	4.7
B4-1	雪花状白云岩丝状体	53.9	35.5	3.4	7.2	0.2	0.15	4.2
B4-1	雪花状白云岩圆状结构	49.4	39.3	3.5	7.8	0.2	0.1	3.8
B5	藻凝块白云岩晶粒	49.3	32.4	6.8	11.6	0.3	0.3	3.5
B41	葡萄体核心	61.6	25.6	5.2	7.6	0.2	0.2	4.7
B35-3	葡萄体皮壳层	33.4	45.8	8.3	12.5	0.3	0.4	2.1
B26	葡萄体皮壳层	52.5	32.3	5.3	9.9	0.2	0.2	3.9

碳元素(表 2),葡萄体的形态特征受奇怪的藻粒、藻体基底的影响[1]。根据对现代碳酸盐沉积物中蓝绿藻席的观察研究,得知这种藻席主要生活在潮间浅水地带,营光合作用而生长,分泌大量的黏液可以捕集碳酸盐颗粒和泥[26]。过去称为蓝绿藻的藻类,现今均称为蓝细菌或钙质微生物[27],而前寒武时期缺乏钙质蓝绿藻[27-28],可能为比蓝细菌更小的微生物(如:真细菌)占主导地位[29]。灯影组白云岩中含有较高的碳组分(表 2),而微生物化石相对较少,仅见形状不规则的丝状体(图 4E,F),这可能与白云岩化和重结晶作用破坏了其原始组构有一定的关系[30]。微生物的参与表明葡萄体的形成具有沉积特征,结合其与叠层构造相似的特征,可以将其定名为葡萄状构造。

葡萄集合体依附孔洞、缝壁呈对生生长,且个体大小与生长空间关系密切,在围岩中呈夹层状分布,并可见侧面封闭的边缘,说明葡萄体是在一定的生长空间(孔洞、裂缝等)形成之后,围绕生长空间的四周向中心生长而成。Lindholm[31]认为随着碳酸盐矿物的持续沉淀,生长空间中流体的离子含量逐渐减少,从胶结物的边部向内部,等轴状方解石晶体颗粒由小逐渐增大。随着葡萄体的生长,孔隙逐渐缩小、封闭,使得流体中离子含量减少和菌藻类的生存受限,造成外部皮壳层由较大的纤状晶粒胶结物组成,且多呈灰白色,由此说明葡萄体的形成为早期沉积和后期胶结作用共同影响造成的。地球化学特征也充分表明,葡萄体有不同于基岩的形成环境[6,10,12],是在岩石固结成岩和孔洞形成之后形成的[6,10],受生物—化学作用的影响,其形成环境较复杂。

3.2　形成环境分析

现今灯影组葡萄状白云岩普遍被认为是淡水成因的,是淡水淋滤的产物[5-6,10,18,21],而通过葡萄体的结构分析,与淡水成因的碳酸盐岩特征不相符。暗色核心及早期相对不规则的暗色皮壳层与后期较规则的灰白色类型的发育,指示其可能产生于不同的环境中,并/或由不同的成因机制形成。

3.2.1　海水沉积环境

葡萄体核心与暗色皮壳层中的亮色部分主要为纤状亮晶结构,其次为后期充填的晶粒结构。亮晶纤状晶体呈等厚状,并与微生物黏结作用交替或同期出现,而形成葡萄体的微生物与围岩(雪花状、藻凝块白云岩等)中的微生物特征相同,均表现为不规则的丝状体(图 4E,F),说明早期受菌藻类黏结作用影响而形成的葡萄体核心与暗色皮壳层,很可能为海水环境下的沉积产物。另外,葡萄体的阴极发光性也与富藻围岩相似,均呈现整体发红色光的特征,表现为暗色部分发光亮、亮晶发光暗,由此推测,葡萄体与雪花状、颗粒状和藻白云岩等围岩的形成环境相差不大,进一步说明其核心与暗色皮壳层为受原始海水沉积水体影响的结果。受微生物的影响,造成葡萄体中藻黏结作用不均匀分布(图 3A),但同一生长空间中的葡萄体总体表现为富藻特征分布于葡萄体的同一侧,说明微生物的分布具有选择性,这很可能是受沉积环境的影响,葡萄体的一侧适于其生存。

综上所述,葡萄体形成早期受海水沉积环境的影响,发生生物—化学作用,形成富藻的核心与暗色皮壳层;随着葡萄体的同步生长,逐渐围限、封闭生长空间,造成流体流动性逐渐减弱、还原性增强,微生物逐渐失去活性,最终转变为化学作用为主,形成碳酸盐胶结物。

3.2.2 海水成岩环境

葡萄体的等厚纤状亮晶集合体与藻格架孔中的等厚环边胶结物相似,而等厚环边纤状胶结物通常为海水潜流带的产物,也有一部分在海水渗流带环境中发育,淡水潜流带中则形成的是粒状等厚环边[28,32],说明葡萄体中的等厚纤状亮晶集合体很可能为海水成岩环境的产物。另外,等厚纤状胶结物是从海水中沉淀文石的常见组构之一,文石呈纤维状或针状,具有很大的长宽比;针状文石晶体生长方向具有较好的一致性,且是从不同球形颗粒的基底上向相反的方向生长并在粒间孔隙中相遇,因而会形成一种多边形的妥协边界[28,32]。葡萄体间表现为规则的多面体交汇(图 3I),其胶结物与海水中沉淀的文石质等厚纤状胶结物相似,进一步说明葡萄体间的胶结物可能为海水成岩环境的产物。另外,葡萄体中等厚纤状晶体总体表现为相似的结构和同等的消光性,以及相同的阴极发光性,也可说明后期胶结作用形成的纤状晶体与沉积过程中化学沉淀的亮晶纤状晶体,其形成水体相差不大,都应具有海水环境的特征。并且根据海水的 Mg/Ca 比,太古宙末和远古宙的海水在以下时间段 Mg/Ca 比>2,被称为文石海:2 750~2 630 Ma,2 375~2 125 Ma,2 025~1 875 Ma、1 675~1 425 Ma、1 310~1 105 Ma、925~55 Ma;其他时间段 Mg/Ca≦2,称为方解石海[33]。同时,油田水中形成的葡萄状构造成分为方解石[1],朱同兴等[15]在上扬子台地西南缘灯影组某些白云岩样品中,鉴定和识别出许多原始沉积的文石或高镁方解石颗粒及其组构。由此推测,灯影组白云岩的原始组构为文石或高镁方解石;沉积于文石海时期的震旦系灯影组,利于形成围绕质点呈放射状分布的文石质的等厚纤状或皮壳状胶结物。同时,姜在兴[26]指出高镁方解石和文石质的等厚纤状胶结物是海水潜流带的产物,淡水潜流带的等厚环边胶结物是低镁方解石。王兴志等[12]、施泽进等[19]通过地球化学分析,也认为等厚纤状环边白云石形成于海水的流动环境中,为海水潜流带成岩环境的产物。

综上所述,等厚亮晶纤状结构为主的亮色皮壳层为海水潜流带的原始化学产物,形成了葡萄体的外部皮壳层和葡萄间胶结物,并说明葡萄体在形成过程中,后期以发育海水潜流带胶结作用为主。

3.2.3 白云石化作用的影响

考虑到文石比方解石更容易发生白云石化,高镁方解石比低镁方解石更容易发生白云石化[34];同时,白云石化作用一旦开始就会进行到底,碳酸盐中的白云石含量要么在 10%以下,要么在 90%以上或全部由白云石组成[35],结合灯影组沉积于文石海时期,说明灯影组白云岩应为文石或高镁方解石发生白云石化作用的产物。结合 Amirux(1982)的分析,白云石阴极发光照射下发红光,说明 Mn^{2+} 在晶格中 Ca^{2+} 的位置上[36],指示白云石化作用的发生(Mg^{2+}、Mn^{2+} 等取代晶格中的 Ca^{2+})。由此可见,葡萄体的原始组构应为具葡萄状构造的文石或高镁方解石,后经白云石化作用形成葡萄状白云岩[32]。

白云石化作用作为一个溶解—再沉积的过程[34],使得葡萄体中白云石未能呈现文石原始的纤状和方头柱状的晶体特征,而主要呈等轴晶粒状,然而其原始沉积和胶结结构未发生改变,原始纤状亮晶结构表现为等轴白云石晶粒集合体(图 4A)。白云石化作用对原生沉积组构的几乎完美保存,恰好与 Sibley[37]提出的拟晶白云石化作用(Mimetic Dolomization)特征相符合,前寒武纪白云岩应为拟晶白云石化作用的产物[38-39]。现代文石质壳层中的文石针,既可呈放射状排列,也可呈切线、防线排列,一般认为,放射状排列代表缓慢的沉淀与弱搅动的环境,并指示文石形成于纯的同种矿物的乳浊液中[26]。灯影组葡萄状构造中的纤状亮晶晶粒集合体多呈垂直生长面生长,受核心形状的影响呈放射状,未见切线、防线排列,说明其形成环境稳定。

由上可知,葡萄体中的纤状晶体原岩应为文石或高镁方解石,形成于稳定的海水潜流带成岩环境中,后经白云石化作用形成白云石,其结构特征未发生破坏。由于白云石化作用为一个持续的交代过程[35],所以推测葡萄状白云岩,甚至灯影组白云岩的原岩均为海水环境中形成的文石或高镁方解石,在后期成岩过程中,发生拟晶白云石化作用形成,而非前人所认为的为原生沉淀的原白云石[1,5,11-14],这需要进一步利用地球化学手段进行分析。

3.2.4 非淡水成因特征

粒度在 0.03~0.2 μm 范围内的微体细菌出现在现代和古代碳酸盐中,在前寒武的生态系统中,微生物占绝对主导地位[28]。唐天福等[40]提出中国南方

上震旦统中灯影组以藻白云岩为主,张荫本[1]、牟传龙等①、余谦等[7]进一步认为上震旦统灯影组一段为富菌藻类的藻礁,李凌等[41]通过研究认为四川盆地震旦系灯影组白云岩为微生物参与的灰泥丘建造,主要建造者为蓝藻菌。张荫本[1]认为葡萄状构造是藻礁或造岩的一个组成部分,是藻礁灰岩的标志之一,近年来,结合灯影组灰泥丘的提出[41],及陈明等[5]指出上扬子区震旦系灯影组发育葡萄状白云岩的地区呈礁点状分布,说明葡萄状白云岩的形成可能与藻礁的存在相关。灯影组一段白云岩中的皮壳状构造(葡萄状构造)是溶蚀后再胶结形成的,生物礁生长发育过程中,海平面下降导致生物礁生长停止,当礁体暴露在大气淡水渗滤带时,发生大规模溶蚀作用,形成各种顺层溶缝、斜交溶缝、溶洞;当以后海平面上升时,岩石淹没于海底,处于海水潜流带,形成葡萄状构造[7]。葡萄体的矿物组分、阴极发光性均与围岩的特征相似,说明葡萄体的形成环境及所经历的后期白云石化作用与围岩相差不大。因此,虽然葡萄体的生长空间是受表生溶蚀作用形成的,但文石或高镁方解石质的葡萄体应形成于海水环境中,而非淡水环境。

另外,从阴极发光原理来说,碳酸盐矿物的阴极发光性主要受 Fe^{2+} 与 Mn^{2+} 含量的控制[32]。由于 Fe 和 Mn 作为类质同象离子置换白云石晶格中的钙、镁离子主要是低价离子(Fe^{2+} 与 Mn^{2+}),因此,只有在还原环境中生成的白云石,才可能具有较高的 Fe^{2+} 与 Mn^{2+} 含量[19]。大气淡水环境主要为氧化环境,不含有还原性的铁离子与锰离子,而高价态的铁、锰离子很难进入碳酸盐晶体的晶格中,因此大气淡水环境中的产物通常不具阴极光[27]。而葡萄体在阴极发光照射下整体呈暗红色,说明其晶格中含有一定的 Fe^{2+} 与 Mn^{2+},主要为还原环境的产物,结合晶体结构特征,进一步说明大气淡水环境成因的不成立。同时,淡水成岩环境包括淡水渗流带和淡水潜流带,前者沉积物的孔隙中充满空气和大气水,对碳酸盐矿物是不饱和的,靠近地表以发生溶蚀为主,形成大量的溶蚀孔,靠近潜流带则以毛细管和重力作用为主,形成特征明显的新月形和微型钟乳状胶结物。研究区灯影组白云岩中,不发育淡水渗流带的典型胶结物,同时也不具有广泛溶蚀的特征;而且在淡水氧化环境中,有机质难以保存,如果灯影组经历了早期淡水成岩环境,则不会具备现今的高碳元素的特征。陈明等[5]、王东等[6,18]、施泽进等[10,19]认为葡萄体的成因为大气淡水环境的产物,主要依据为碳、氧同位素的偏负特征,葡萄体的碳同位素值分布在-1.906‰~0.671‰,氧同位素值分布在-11.033‰~-6.684‰之间[16];而葡萄体的形成受有机质影响较强,有机碳的加入也会造成 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值偏负,所以,碳同位素的特征并不能准确说明其形成与淡水环境。葡萄体与基岩相比,其碳氧同位素明显偏负,只能表明葡萄石与基岩并非同时形成。

海底硬底是海水成岩作用最好的指示物[28],硬底的出现(图 3C)更有利的指出葡萄状构造为海水环境的产物。南江杨坝灯影组葡萄状白云岩的 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值为 1.520‰~2.845‰[18],滇东北地区灯影组白云岩 $\delta^{13}C_{PDB}$ 为 1.8‰~2.6‰[15],表明为明显的海水碳酸盐来源。葡萄体的暗色皮壳层分布在靠近核心的部位,由此可见,葡萄体的核心和早期暗色皮壳层是生物—化学作用的原生产物[1],后期发生胶结作用,形成亮色皮壳层及葡萄体间胶结物,最终形成葡萄集合体;其形成环境与 Longman[42] 提出的近地表环境碳酸盐成岩模式中的沉积和同生或准同生成岩阶段相当,属于海水潜流带,具有沉积和成岩的特征。

葡萄体中除纤状白云石外,见中粗晶的白云石和叶片状白云石发育,后二者均应是后期成岩作用造成的,应该是属于溶蚀后重结晶的产物。叶片状白云石分布呈一定的分带性,限制于一个葡萄体内或者某个生长层内,而不对周围的相同生长层产生影响,不规则晶粒边缘具有灰黑色聚集的云泥(图 3I)。阴极发光照射下,呈暗红褐色,发光较均一,并可见原圈层状结构,成岩环境应为较封闭的。由于活动性流体进入使白云石发生溶蚀,后由流体带出泥质,形成中粗粒亮晶白云石,此类白云石通常沿着褐色云泥质生长层分布,并对上下纤维状白云石晶体层产生切穿影响;流体活动较强烈的地方可以对核心进行溶蚀,并重结晶为粗晶白云石;横切面上可见此类白云石呈不连贯的条带状分布,而在垂向上却可见一般顺褐色云泥层分布(图 3A)。阴极发光照射下,粗晶白云石通常不发光,边缘具有明亮的橘黄色光,应为表生氧化环境中的产物。

综上所述,葡萄体形成早期受微生物作用的影响,表现为一定的沉积特征,按照福克(1962)、邓哈姆(1962)以及冯增昭等(1993)提出的碳酸盐岩的结

① 牟传龙,等. 川东北广元—镇巴地区二叠—三叠系储层展布特征研究. 2006. 内部资料.

构—成因分类[26,43],葡萄体的结构特征不能囊括进去,不能单独作为一种碳酸盐岩类型出现。按照其产状和形态特征,把具有这种固定生长质点且发育等厚皮壳层的半球体称作葡萄状构造,应为生物—化学成因的沉积—成岩构造,形成于稳定的海水沉积—成岩环境中。

4 结论

震旦系灯影组一段葡萄集合体有不同于基岩的形成环境,是在一定的生长空间(孔洞、裂缝等)形成之后,围绕生长空间的四周向中心生长而成,为围岩固结成岩后的产物;葡萄体通常表现为由核心和明暗相间的皮壳层组成的半球体,横截面结构似鲕粒,纵切面上可见与叠层构造类似特征,矿物组分以白云石为主;核心形状不规则,围绕核心早期发育相对不规则的暗色皮壳层,后期则以形成较规则的灰白色皮壳层为主。

核心及暗色皮壳层为海水环境中的生物—化学沉积物,后期葡萄体的形成以胶结作用为主,为海水潜流带的产物;葡萄体的大小和形态与基底上不规则凸起的形态及其生长空间特征密切相关,固定的生长质点和规则的结构指示其形成于稳定的水体中;原始组构应为文石或高镁方解石,扫描电镜下呈晶粒结构,说明葡萄状白云岩为白云石化作用的产物;葡萄集合体的组分与阴极发光性与其围岩相似,按照其产状和形态特征,把这种具有固定生长质点且发育等厚皮壳层的半球体称作葡萄状构造,应为生物—化学成因的沉积—成岩构造,形成于稳定的海水环境中。

参考文献(References)

1 张荫本. 震旦纪白云岩中的葡萄状构造成因初探[J]. 石油实验地质,1980,2(4):40-43. [Zhang Yinben. A preliminary discussion for the genesis of grape structure of dolomite in Sinian[J]. Petroleum Geology and Experiment, 1980, 2(4): 40-43.]

2 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1990:24-30. [Bureau of Geology and Mineral Resources of Yunnan Province. Regional Geology of Yunnan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990: 24-30.]

3 四川省地质矿产局. 四川省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1991:51-56. [Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province. Regional Geology of Sichuan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 51-56.]

4 刘怀仁,刘明星,胡登新,等. 川西南上震旦统灯影组沉积期的暴露标志及其意义[J]. 岩相古地理,1991(5):1-10. [Liu Renhuai, Liu Mingxing, Hu Dengxin, et al. The exposure indicators formed during the deposition of the Upper Sinian Dengying Formation in southwestern Sichuan and their significance[J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1991(5): 1-10.]

5 陈明,许效松,万方,等. 上扬子台地晚震旦世灯影组中葡萄状—雪花状白云岩的成因意义[J]. 矿物岩石,2002,22(4):33-37. [Chen Ming, Xu Xiaosong, Wan Fang, et al. Genesis and significance of grape-and snowflake-shaped dolomite from Dengying Formation of Upper Sinian in Upper Yangtze Platform region [J]. Journal of Mineralogy Petrology, 2002, 22(4): 33-37.]

6 王东,王国芝. 四川南江灯影组白云岩葡萄状构造成因分析[J]. 四川地质学报,2010,30(4):454-456. [Wang Dong, Wang Guozhi. On genesis of botryoidal structure of dolomitite of the Dengying Formation in Nanjiang, Sichuan[J]. Acta Geologica Sichuan , 2010, 30(4): 454-456.]

7 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.]

8 蒲心纯,张继庆,罗安屏,等. 上扬子区晚震旦世沉积岩沉积相及矿产[M]. 重庆:重庆出版社,1987:14. [Pu Xinchun, Zhang Jiqing, Luo Anping, et al. 1987. Sedimentary Rocks and Minerals and Sedimentary Facies of Lower Sinian in Middle Yangtze Area [M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1987: 14.]

9 曹仁关. 川滇震旦系灯影组葡萄石的沉积环境[J]. 云南地质,2002,21(2):208-213. [Cao Renguan. 2002. The sedimentary environment of grapestone in Dengying Formation of Sinian system in Sichuan and Yunnan[J]. Yunnan Geology, 2002, 21(2): 208-213.]

10 施泽进,梁平,王勇,等. 川东南地区灯影组葡萄石地球化学特征及成因分析[J]. 岩石学报,2011,27(8):2263-2271. [Shi Zejin, Liang Ping, Wang Yong, et al. 2011. Geochemical characteristics and genesis of grapestone in Sinian Dengying Formation in south-eastern Sichuan Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2263-2271.]

11 黄志诚,杨守业,陈智娜. 原生白云石与交代白云石的矿物学对比研究[J]. 中国科学(D 辑):地球科学,1996,26(6):544-550. [Huang Zhicheng, Yang Shouye, Chen Zhina. Comparative study on the mineralogy of native dolomite and replacement dolomite [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 1996, 26(6): 544-550.]

12 王兴志,方少仙,侯方浩,等. 四川盆地灯影组储层原生孔隙内胶结物研究[J]. 西南石油学院学报,1998,20(3):1-3,6. [Wang Xingzhi, Fang Shaoxian, Hou Fanghao, et al. 1998. A study of the cement in primary pores in carbonate reservoir of Dengying Formation, Sichuan Basin[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1998, 20(3): 1-3, 6.]

13 王士峰,向芳. 资阳地区震旦系灯影组白云岩成因研究[J]. 岩相古地理,1999,19(3):21-29.[Wang Shifeng, Xiang Fang. The origin of the dolostones from the Sinian Dengying Formation in the Ziyang district, Sichuan [J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 19(3): 21-29.]

14 赫云兰,刘波,秦善. 白云石化机理与白云岩成因问题研究[J].

北京大学学报:自然科学版,2010,46(6):1010-1020. [He Yunlan, Liu Bo, Qin Shan. Study on the dolomitization and dolostone genesis[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2010, 46(6): 1010-1020.]

15 朱同兴,黄志英. 地质记录中的海水白云岩化作用[J]. 岩相古地理,1993,13(5):16-26. [Zhu Tongxing, Huang Zhiying. Seawater Dolomitization in geologic records[J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1993, 13(5): 16-26.]

16 向芳,陈洪德,张锦泉. 资阳地区震旦系灯影组白云岩中葡萄花边的成因研究[J]. 矿物岩石,1998,18(增刊):136-138. [Xiang Fang, Chen Hongde, Zhang Jinquan. 1998. Studying on the origin of botryoidal lace in dolomitite of Dengying Formation, Sinian from Ziyang, Sichuan[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1998, 18(S): 136-138.]

17 张丽丽,左文,赫云兰. 川西南汉源地区白云岩的碳、氧同位素特征及成因初探[J]. 内蒙古石油化工,2010,36(14):20-22. [Zhang Lili, Zuo Wen, He Yunlan. Carbon, oxygen isotope compositions and origin of Hanyuan dolomite, in southwest Sichuan Basin[J]. Inner Mongulia Petrochemical Industry, 2010, 36(14): 20-22.]

18 王东,王国芝,陈园园. 南江地区灯影组白云岩稳定同位素特征及意义[J]. 矿物学报,2011(S1):217-218. [Wang Dong, Wang Guozhi, Chen Yuanyuan. Characteristics and significance of stable isotope of dolomite in Dengying Formation in Nanjiang county[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2011(S1): 217-218.]

19 施泽进,王勇,田亚铭,等. 四川盆地东南部震旦系灯影组藻云岩胶结作用及其成岩流体分析[J]. 中国科学:地球科学(D 辑),2013,43(2):317-328. [Shi Zejin, Wang Yong, Tian Yaming, et al. Cementation and diagenetic fluid of algal dolomites in the Sinian Dengying Formation in southeastern Sichuan Basin[J]. Science China (Seri.D): Earth Sciences, 2013, 56(2): 192-202.]

20 刘护军,樊双虎,胡健民,等. 南化塘地区灯影组的暴露标志及其意义[J]. 长安大学学报:地球科学版,1993,15(增刊 1):67-70. [Liu Hujun, Fan Shuanghu, Hu Jianmin, et al. The exposed signs and its significance of the Dengying Formation in Nanhuatang area, northwest Hubei province[J]. Journal of Chang'an University: Earth Science Edition, 1993, 15(Suppl.1): 67-70.]

21 尹安,李建明. 渝东彭水廖家槽灯影组葡萄状白云岩特征及其成因[J]. 内蒙古石油化工,2011(11):126-127. [Yin An, Li Jianming. Characteristics and genesis of grape shaped dolomite of Dengying Formation in Liaojiacao, Pengshui, Chongqing[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2011(11): 126-127.]

22 王兴志,穆曙光,方少仙,等. 四川盆地西南部震旦系白云岩成岩过程中的孔隙演化[J]. 沉积学报,2000,18(4):549-554. [Wang Xingzhi, Mu Shuguang, Fang Shaoxian, et al. Evolution of porosity in the process of Sinian dolostone diagenesis in Southwest Sichuan [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(4): 549-554.]

23 莫静,王兴志,谢林,等. 川中震旦系灯影组碳酸盐岩成岩作用及储层孔隙演化[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报),2013,35(8):32-38. [Mo Jing, Wang Xingzhi, Xie Lin, et al. Diagenesis and pore evolution of carbonate in Sinian Dengying Formation in central Sichuan province[J]. Journal of Oil and Gas Technology(J.JPI), 2013, 35(8): 32-38.]

24 王东,王国芝. 南江地区灯影组储集层次生孔洞充填矿物[J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2012,39(5):480-485. [Wang Dong, Wang Guozhi. Minerals filled in secondary pores of Sinian Dengying Formation in reservoir Nanjiang, Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2012, 39(5): 480-485.]

25 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.]

26 姜在兴. 沉积学[M]. 北京:石油工业出版社,2003:192-195. [Jiang Zaixing. Sedimentology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 192-195.]

27 沈安江,寿建峰,周进高,等. 中国含油气盆地海相碳酸盐岩储层图集[M]. 北京:石油工业出版社,2012:14,441. [Shen Anjiang, Shou Jianfeng, Zhou Jingao, et al. Atlas of Marine Carbonate Reservoir in China's Oil and Gas Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012: 14, 441.]

28 Flügel E. Microfacies of Carbonate Rocks[M]. Berlin Heidelberg: Spinger-Verlag, 2004: 192, 258-260.

29 Riding R. Stromatolite decline: A brief reassessment[C]// Neuweiler F, Reitner J, Monty C. Biosedimentology of Microbial Buildups, IGCP Project No. 380, Proceedings of 2nd Meeting. Gottingen, Germany: Facies, 1997, 36: 227-230.

30 Ahr W M, Ross S L. Chappel (Mississippian) biohermal reservoirs in Hardeman Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 1982, 66(9): 1423.

31 Lindholm R C. Fabric and chemistry of pore filling calcite in septarian veins: Models for limestone cementation[J]. Journal of Sedimentary Research, 1974, 44(2): 428-440.

32 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京:地质出版社,2010:117-122. [Huang Sijing. Carbonate Diagenesis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010: 117-122.]

33 Hardie L A. Secular variations in Precambrian seawater chemistry and the timing of Precambrian aragonite seas and calcite seas[J]. Geology, 2003, 31: 785-788.

34 Gaines A M. Dolomitization kinetics: recent experimental studies[J]. SEPM Special Publication, 1980, 28: 81-86.

35 Blatt H. Sedimentary Petrology[M]. 2nd ed. New York: W. H. Freeman, 1992: 514.

36 田洪均. 阴极发光技术在沉积学中的应用[J]. 岩相古地理,1989,43(5):56-64. [Tian Hongjun. The application of cathodoluminescence technique in sedimentology[J]. Journal of Palaeogeography, 1989,43(5): 56-64.]

37 Sibly D F. Secular changes in the amount and texture of dolomite[J]. Geology, 1991, 19(2): 151-154.

38 王勇. "白云岩问题"与"前寒武纪之谜"研究进展[J]. 地球科学进展,2006,21(8):857-862. [Wang Yong. Dolomite problem and Precambrian enigma[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(8): 857-862.]

39 梅冥相. 从 3 个科学问题理念简论沉积学中的“白云岩问题”[J]. 古地理学报,2012,14(1):1-12. [Mei Mingxiang. Brief introduction of “dolostone problem” in sedimentology according to three scientific ideas[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(1): 1-12.]

40 唐天福,薛耀松,俞从流. 中国南方震旦纪藻碳酸盐岩的特征及环境意义[J]. 科学通报,1980(18):853-855. [Tang Tianfu, Xue Yaosong, Yu Congliu. Characteristics and environmental significance of algae carbonate rocks of Sinian in southern China[J]. Chinese Science Bulletin, 1980(18): 853-855.]

41 李凌,谭秀成,曾伟,等. 四川盆地震旦系灯影组灰泥丘发育特征及储集意义[J]. 石油勘探与开发,2013,40(6):666-673. [Li Ling, Tan Xiucheng, Zeng Wei, et al. Development and reservoir significance of mud mounds in Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 666-673.]

42 Longman M W. Carbonate diagenetic textures from nearsurface diagenetic environments[J]. AAPG, 1980, 64(4): 461-487.

43 赵澄林,朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 3 版. 北京:石油工业出版社,2001:185-187. [Zhao Chenglin, Zhu Xiaomin. Sedimentary Petrology [M]. 3rd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001: 185-187.]

Characteristics and Genesis of Grape-like Stone of Dolomite in Sinian Dengying Formation in Yangtze Region: A case from the First section of Dengying Formation in Yangba, Nanjiang, Sichuan Province

MOU ChuanLong[1,2] WANG XiuPing[2,3] LIANG Wei[1,2] WANG YuanChong[2,4] MEN Xin[2,4]

(1. **Chengdu Institute of China Geology and Mineral Resources**, **Chengdu** 610081;
2. **Key Laboratory Sedimentary Basins Oil and Gas Resources**, **Ministry of Land and Resources**, **Chengdu** 610081;
3. **Shandong University of Science and Technology**, **Qingdao**, **Shandong** 266590;
4. **Chengdu University of Technology**, **Chengdu** 610059)

Abstract: There is a special and extensively developed type of dolomite in Dengying Formation and its corresponding formations of Upper Sinian in Yangtze region, which is with an odd-looking like renal globule, ellipsoid, grape-like body and sphere in irregular shape (hereinafter referred to as the “grapes”). Many scholars in China believed that this kind of dolomite was affected by atmospheric fresh water during formation. “Grapes” are like pieces of tufa on the macro, distributed along interfaces of rock strata and fractures. On the basis of the detailed observation and description of outcrops, and using polarized light microscope, cathodoluminescence and scanning electron microscopy (SEM), the characteristics and genesis of grape-like dolomite in the First section of Sinian Dengying Formation in Yangba Town of Nanjiang County, were studied. The results show that the grapes were as the fillings in surrounding rocks through diagenetic ways into rocks. The grapes are usually like hemispheroids with cores and alternated dark and bright shells, and composed mostly of dolomite and a little of authigenic quartz. The cores and dark shells were formed from biological and chemical processes in sea water, according to the algal binding aggregates with irregular microbial filaments, high carbon elements in the mineral components, and in combination with the existence of the seabed hard ground. The bright shells were composed by fiber cements, which in the same thickness and formed the outer layers of grapes. Grapes are with polyhedral intersection and filled with fiber cements in the residual space, so the outer of grapes are forming in marine phreatic water and mainly due to cementation. Cores were the irregular bumps on the wall of dissolution holes and seams, the characteristics of grapes were closely related to the size and shape of bumps and the features of growth space. The fixed point and regular structure indicate that grapes were formed in stable water. Aragonite or high-magnesian calcite was the original component, because of the dolomitization, the grape-like dolomite was formed and with crystalline-granular texture. The characteristics cathode luminescence of grapes are similar to surrounding rocks, and according to the occurrence and the morphological characteristics of the grapes, the hemispheroids with cores and alternated dark and bright shells are identified as an sedimentary structure and named grape-like structure. The sedimentary structure is a deposition-diagenetic structure and due to biological and chemical effect, and formed in the stable sea environment.

Key words: grape-like structure; grape-like stone; dolomite; genesis; Dengying Formation; Sinian