

四川盆地灯影组“葡萄花边”状白云岩成因及地质意义

郝毅^{1,2}, 周进高^{1,2}, 陈旭³, 潘立银^{1,2}, 胡圆圆^{1,2}, 胡安平^{1,2}

(1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室)

(3 中铁二院工程集团有限责任公司)

摘要 四川盆地震旦系灯影组“葡萄花边”状白云岩横向分布范围广,纵向发育层位局限,仅在灯影组二段中下部出现,可以作为野外露头以及井下岩心的地层识别标志。以钻井岩心与野外露头样品的宏观、微观特征为基础,阐明了“葡萄花边”状白云岩的命名依据,镜下微观视域内该类岩石包括围岩、“葡萄花边”纹层、亮晶白云石三种结构组分。结合对“葡萄花边”状白云岩不同结构组分微区取样的多参数实验分析,认为成因机制上,围岩沉积于正常海水环境,“葡萄花边”是在岩石已存在的缝-洞空间中生长的胶结物,灯影组二段沉积时期海平面经历了多次次的升降运动,当海平面下降时,刚固结不久的地层暴露受到溶蚀并形成规模不等的岩溶缝洞体以及岩溶角砾,当海平面再次上升时,在缝洞体中以及角砾周缘开始形成多次次的纤状白云石胶结物,当地层埋深到一定程度时,深部热液流体在残余缝洞系统中形成一些亮晶白云石。“葡萄花边”状白云岩不但可以成为灯影组一种重要的储集岩类型,而且可以作为灯影组沉积古地貌研究的一种辅助性标志。

关键词 四川盆地; 上震旦统; 灯影组; 白云岩; 胶结物

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

1 概况

四川盆地震旦系灯影组的勘探研究始于20世纪40年代,在近70年的艰辛勘探历程中,1964年威远气田的发现^[1]以及2011年高石梯构造高石1井的突破^[2],有力地推动了勘探研究的深化。

灯影组岩石类型复杂多样^[3],其中,“葡萄花边”状白云岩是最为特殊的一种。“葡萄花边”状白云岩具有两个发育特征:一是横向分布范围广(图1),几乎在整个中上扬子地区都有分布;二是纵向发育层位局限,目前具备典型“葡萄花边”构造特征的白云岩基本只在灯影组二段出现^[4](图2),在野外露头以及岩心的层位识别中可以作为重要的标志层。前人在20世纪80年代就开始关注这种特殊的地质现象^[5],并在随后的研究中对其特征与成因逐渐形成了一些认识^[6-10];以往多称这类白云岩为葡萄状白云岩或葡萄石^[7-10](从命名上并不能客观地反映这种特殊地质现象的本质,且容易与沉积学中经常提到的碳酸盐岩球粒状

沉积物——葡萄石相混淆);成因方面主要有混合水成因^[6]、潜流带中碳酸盐岩及有机质沉淀成因^[7]、正常沉积成因^[8]、暴露岩溶成因^[9-10]等,观点不尽相同。随着大量钻井及野外露头资料的补充,本文拟通过野外宏观、镜下微观、微区多参数实验分析等手段,对“葡萄花边”状白云岩的成因及其地质意义进行探讨。

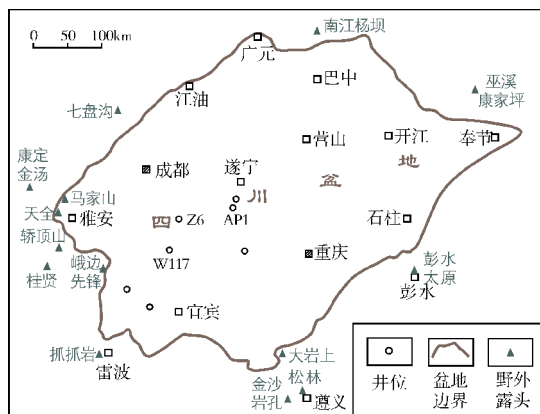


图1 四川盆地及周缘灯影组“葡萄花边”状白云岩分布位置

收稿日期: 2015-06-24; 改回日期: 2015-10-10

本文受国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(编号:2011ZX05004-002)及中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“深层油气勘探开发关键技术研究”(编号:2014E-32)联合资助

郝毅: 1981年生,2008年毕业于成都理工大学,硕士,工程师,从事沉积储层方面的研究工作。通讯地址: 310023 浙江省杭州市西溪路920号; E-mail: haoy_hz@petrochina.com.cn

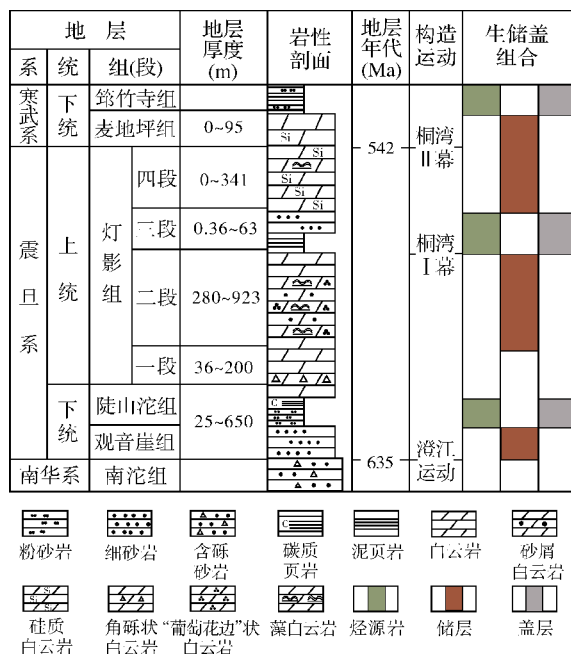


图2 四川盆地震旦系地层柱状图

2 “葡萄花边”状白云岩特征

2.1 “葡萄花边”状白云岩的定名

本文给此类岩石定名为“葡萄花边”状白云岩,主要是从其外观形态特征而得来。该类岩石从正面看像一颗颗的“葡萄”(图3a),从侧面看则像一层层的“花边”(图3b, 3c),因此“葡萄”与“花边”是一个有机整体,故命名为“葡萄花边”状白云岩(“grape-lace shaped” dolostone),这样命名,不但可以表现其正面与侧面的特殊形态,而且还可以将它与沉积学中的碳酸盐岩球粒状沉积物“葡萄石(grapestone)”区分开来。“花边”中单个纹层的颜色可以相同、相近或完全不同,这反映了不同时期的成岩流体有所不同。“花边”纹层的累计厚度可大可小,厚的可以达到16 cm以上(图3c),而薄的仅仅不到3 mm(图3d)。

2.2 “葡萄花边”状白云岩结构特征

2.2.1 结构组分

“葡萄花边”状白云岩从结构组分上可以分为围岩、“葡萄花边”纹层、亮晶胶结物三种(图3e, 3f)。

围岩 岩性复杂,可以是灯影组二段出现过的各类白云岩,如微生物白云岩、泥微晶白云岩、纹层状

白云岩、颗粒白云岩等正常海水环境下沉积的岩石类型,也就是说,“葡萄花边”构造可以发育在任何碳酸盐岩岩性背景之下。

“葡萄花边”纹层 单个纹层厚度约0.1~1 mm,颜色可以为灰色、浅灰色、深灰色、黑灰色,或者几种不同颜色的纹层以不规则的韵律出现,形成独特的玛瑙纹构造。显微镜下可以看到,无论何种颜色的纹层,都是一种纤状等厚环边胶结物(图3f, 3g),矿物成分为白云石。此外,暗色纹层在显微镜下的形态与前人研究的灯影组微生物群体(兰细菌)^[1]的形态差异明显。暗色纹层颜色之所以发暗,推断可能是由于同沉积时期海水中微生物发育,使得胶结物中富含有机质而造成的。

亮晶胶结物 一般在纤状等厚环边胶结物形成之后发育,粒度从靠近纤状胶结物向外逐渐变粗,一般都可以看到粉晶—细晶—中晶—粗晶(甚至巨晶)的变化过程(图3g),矿物成分多为白云石,偶见少量石英。

2.2.2 产状

“葡萄花边”状白云岩的发育产状有三种:(1)顺岩层面生长(图3c),主要沿着岩层的层面发育,可以延伸数米,但一般会在远端呈现穿层或者分叉等生长特征;(2)垂直或斜交岩层面生长(图3h),生长方向无规律性,可能与岩层早期的节理面、断裂面或岩溶缝等因素有关;(3)沿角砾外缘包裹生长(图3h,照片左下方),角砾的尺寸可大可小。野外露头见到起伏较大、立体感较强的“葡萄花边”多与第(3)种产状有关,而前两种产状的“葡萄花边”规模较小,往往只有剥离花边纹层后才能看到略微起伏的凹凸面。

2.2.3 “葡萄花边”纹层生长特点

值得注意的是,在灯影组野外露头以及岩心的观察中,应避免将“葡萄花边”构造与大规模发育的纹层状构造相混淆,“葡萄花边”具有以下三点专属特性。

对称生长 大家所熟悉的叠层状、纹层状微生物岩石是沉积成因,其生长方向都是自下而上,符合生物生长的规律(图3i)。而在野外露头及岩心中见到的“葡萄花边”状白云岩,其纹层生长时具有明显的对称性(图3e—3g),即在已经存在的空间中同时由孔、洞、缝的边缘向中心生长,并不是只有单一的生长方向。

继续埋深后,海水胶结物逐渐停止发育,而相对晚期形成的亮晶胶结物会继续充填残留的缝-洞空间。

下面将通过对比同一样品不同组构(黑色纹层、白

色纹层、围岩、亮晶白云石)分别进行微区取样(图4),并用多种实验技术手段对不同组构进行分析,来进一步探讨“葡萄花边”状白云岩成因及发育模式。

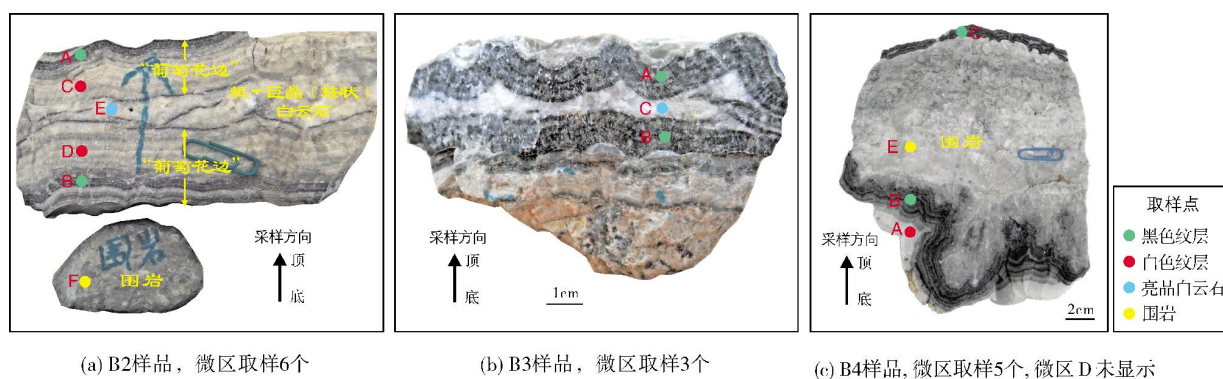


图4 南江杨坝剖面灯影组二段样品的微区取样品特征

3.1 全岩X衍射分析

从全岩X衍射实验结果(表1)可以看出,除B4样品整体含有少量的石英成分外,“葡萄花边”状白云岩三种结构组分的矿物成分都为较纯的白云石,差别并不明显。

3.2 碳、氧同位素分析

氧同位素主要受到成岩水体盐度以及埋藏过程中温度的影响,水体盐度越高, $\delta^{18}\text{O}$ 就越高,而随埋藏温度升高, $\delta^{18}\text{O}$ 会变低^[12]。相对氧同位素而言,碳

同位素能更好地反映原始沉积物的同位素成分,它受后期改造的影响较小, $\delta^{13}\text{C}$ 数值主要随着大气降水和陆源淡水的增加而变低^[10]。

围岩(本次样品为泥晶白云岩)是正常海水环境下的沉积产物,围岩样品的碳、氧同位素数值可作为一个基准,将其他组构的碳、氧同位素数值与基准进行对比,可对成岩环境进行判别。从“葡萄花边”状白云岩不同结构组分的碳、氧同位素数据图版(图5)可明显看到:围岩和“葡萄花边”的 $\delta^{18}\text{O}$ 值较为接近,反映了成岩流体的盐度、成岩温度较为相似;而粗晶白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 明显偏负,反映了其形成时的流体盐度较

表1 南江杨坝剖面灯影组二段白云岩样品全岩X衍射分析

样品编号* (样品-微区)	微区类型	石英 (%)	钾长石 (%)	钠长石 (%)	方解石 (%)	白云石 (%)	黄铁矿 (%)	硬石膏 (%)	菱铁矿 (%)	黏土矿物 (%)
B2-A	上部黑色纹层	—	—	—	—	100	—	—	—	—
B2-B	下部黑色纹层	—	—	—	—	100	—	—	—	—
B2-C	上部白色纹层	—	—	—	—	100	—	—	—	—
B2-D	下部白色纹层	—	—	—	—	100	—	—	—	—
B2-E	亮晶白云石	—	—	—	—	100	—	—	—	—
B2-F	围岩	—	—	—	—	100	—	—	—	—
B3-A	上部黑色纹层	—	—	—	—	100	—	—	—	—
B3-B	下部黑色纹层	—	—	—	—	100	—	—	—	—
B3-C	亮晶白云石	—	—	—	—	100	—	—	—	—
B4-A	下部白色纹层	0.92	—	—	—	99.08	—	—	—	—
B4-B	下部黑色纹层	0.79	—	—	—	99.21	—	—	—	—
B4-D	亮晶白云石	1.20	—	—	—	98.80	—	—	—	—
B4-E	围岩	1.23	—	—	—	98.77	—	—	—	—

* B4-C 样品未进行实验分析,故表中未列

低,或者成岩时温度较高,可能处于埋藏环境;三种组分的 $\delta^{13}\text{C}$ 比较接近,只是“葡萄花边”的数值相对较低,这表明成岩过程中可能有少量大气淡水参与其中。

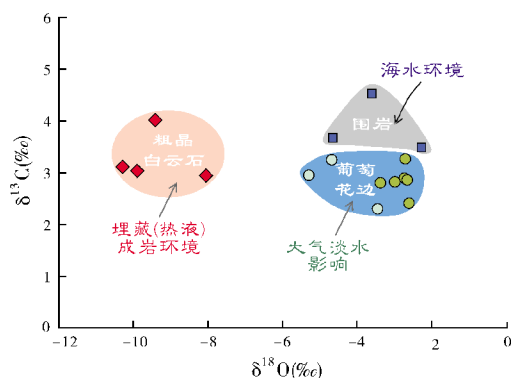


图5 “葡萄花边”状白云岩不同结构组分的碳、氧同位素

3.3 锶 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素分析

锶同位素在海水中存留的时间(一百万年)远大于不同地域海水混合的时间(一千年),因此,锶同位素在研究海相地层年代、环境、物质来源、流体分析等方面有着广泛的应用。锶同位素的一个重要特征是壳源锶的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 要大于幔源锶的数值^[13]。从实验分析数据(图6)来看,除一个围岩样品数据出现异常外,围岩和“葡萄花边”样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值较为接近(图6,红色方框内),粗晶白云石中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值则明显偏高(图6,蓝色方框内),这反映了围岩和“葡萄花边”应受到同沉积时期海水富幔源锶的影响而整体偏低,而亮晶白云石对应的成岩流体可能来自深部,受到了更为古老的壳源碎屑沉积物(研究区灯影组下部存在较厚的古老碎屑岩沉积层——南沱组及观音崖组^[14])影响而使 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值偏高。

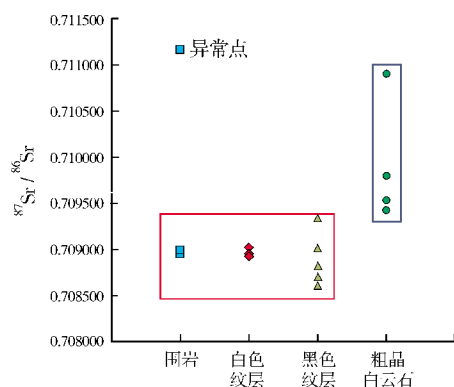


图6 “葡萄花边”状白云岩不同结构组分的锶同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

3.4 扫描电镜及能谱分析

从扫描电镜分析来看,“葡萄花边”纹层并没有想象中的那么明显,甚至几乎无法识别,这可能与做样品时需要在表面喷金有一定的关系,仅B2样品的白色纹层见到不太明显的纤状结构(图7a、7c)。此外亮晶白云石胶结物在扫描电镜下可见晶间孔发育,直径约 $130\text{ }\mu\text{m}$ (图7b)。

从能谱分析来看(图7a'—7c'),黑色纹层、白色纹层、亮晶胶结物的矿物成分都为白云石,与X衍射(表1)结果相吻合,只是白色纹层的 Mg/Ca 值略低(图7c'),可能反映了白色纹层生长时同期水体中的 Mg^{2+} 含量略低。

3.5 无机微量元素分析

众所周知,海相沉积物普遍富 Sr 、 Mg 而贫 Fe 、 Mn 、 Ba ,而陆相沉积物则恰好相反。以B2白云岩样品微量元素分析为例(表2),围岩组分中的 Sr 、 Mg 都为最大值,而 Fe 、 Mn 、 Ba 则表现为最小值;后期形成的白云石晶体则完全相反, Mg 为最小值,而 Fe 、 Mn 、 Ba 则表现为最大值,虽然 Sr 含量的数值并不是最小,但考虑到后期热液流体来源复杂,这样的实验分析结果已经足以说明成岩流体来自深层,与锶 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素分析结果相对一致。“葡萄花边”的黑色纹层、白色纹层样品的微量元素数值适中,这表明“葡萄花边”不是在较纯净封闭的海水环境形成,它在一定程度上可能受到了大气淡水的影响。

由上述实验分析可以得出结论:(1)围岩形成于正常海水环境;(2)“葡萄花边”形成环境与围岩相近,但略受大气淡水影响;(3)亮晶白云石晶体形成于相对封闭、流体温度相对高的埋藏环境,流体可能来源于深部,至少是经过了灯影组下伏的古老碎屑岩地层。

3.6 “葡萄花边”状白云岩发育模式

基于前述分析,可以还原“葡萄花边”状白云岩的形成过程(图8)。灯影组一段、二段沉积时期还未发生大规模的构造运动,可能受气候等因素的影响,海水频繁的大规模升降。当海平面下降时,已经固结的岩层在大气淡水岩溶作用下形成缝-洞空间;海平面上升时,“葡萄花边”状胶结物开始形成^[15],推断该时期海平面应该是频繁升降的过程,因为在“葡萄花边”状胶结物中仍然可以看到大气淡水参与的痕迹。

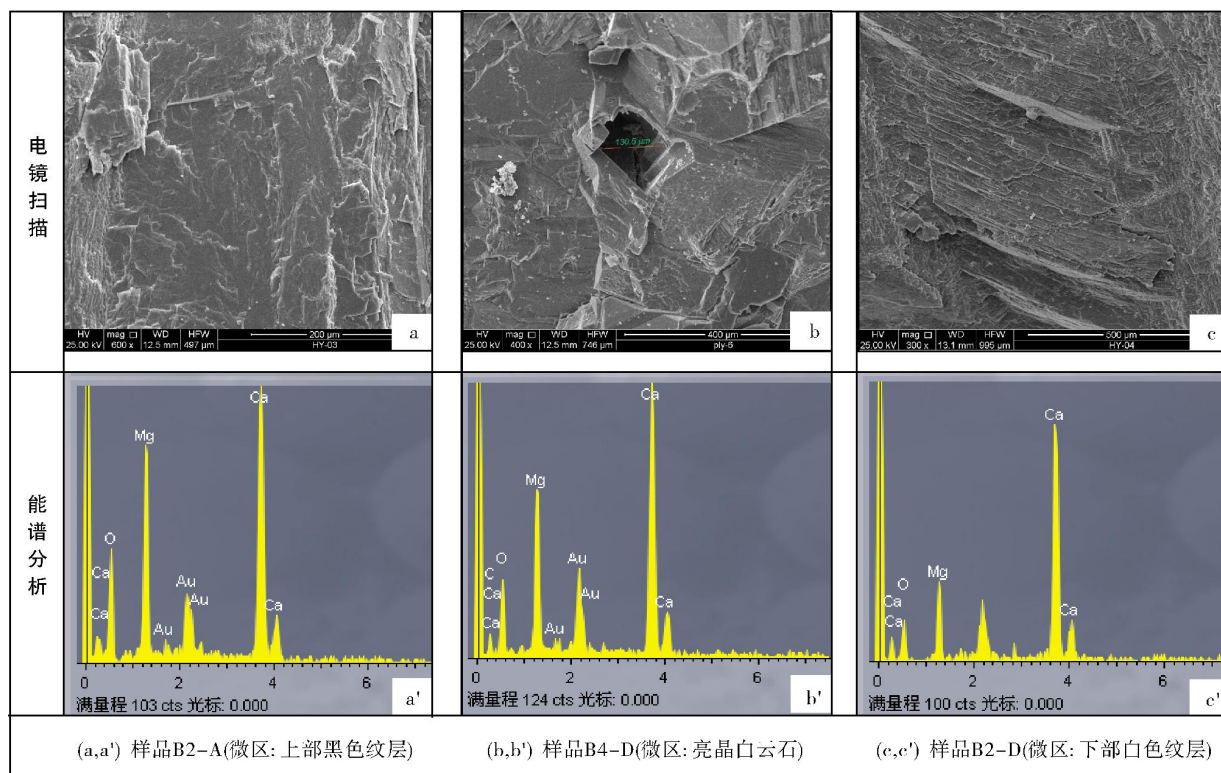
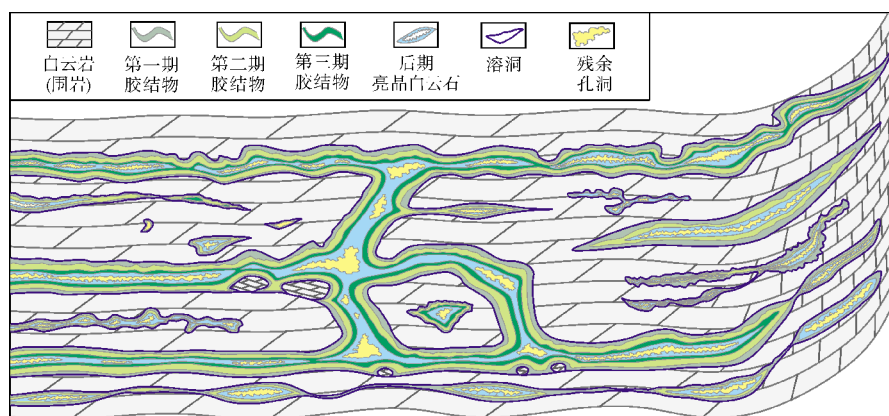


图7 南江杨坝剖面灯影组二段样品的扫描电镜及能谱分析

表2 南江杨坝剖面样品“葡萄花边”样品部分无机微量元素检测结果

样品编号 (样品-微区)	微区类型	SiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	Mn (×10 ⁻⁶)	Sr (×10 ⁻⁶)	Ba (×10 ⁻⁶)
B2-A	上部黑色纹层	0.38	29.68	21.60	0.12	0.19	0.012	0.0058	0.016	52.13	11.96
B2-B	下部黑色纹层	0.28	29.68	21.78	0.12	0.23	0.0088	0.0052	0.024	53.38	11.57
B2-C	上部白色纹层	0.30	29.68	21.60	0.11	0.19	0.013	0.0014	0.020	56.94	12.38
B2-D	下部白色纹层	0.20	29.81	21.60	0.067	0.18	0.0035	0.0013	0.024	54.31	11.38
B2-E	亮晶白云石	0.35	29.56	21.51	0.15	0.29	0.011	0.0061	0.039	57.42	12.95
B2-F	围岩	0.20	29.56	21.96	0.10	0.12	0.023	0.0064	0.012	70.23	7.109

图8 四川盆地灯影组“葡萄花边”状白云岩发育模式
第一期、第二期、第三期胶结物组成了“葡萄花边”

当地层埋深到一定程度后,已经不能形成新的“葡萄花边”状胶结物,但随着埋藏深度的加大,深部流体经过灯影组下面的古老碎屑岩层,在未被“葡萄花边”充满的缝-洞空间又形成了新的亮晶白云石胶结物,当流体供应不足或者通道被胶结物填满后,仍会有一部分孔洞空间得以保存下来。

4 “葡萄花边”状白云岩的地质意义

(1)“葡萄花边”状白云岩中有许多残留孔洞,可以作为石油、天然气的优质储集空间(图9)。

(2)“葡萄花边”地质现象可以作为古地貌研究的一种辅助性标志。

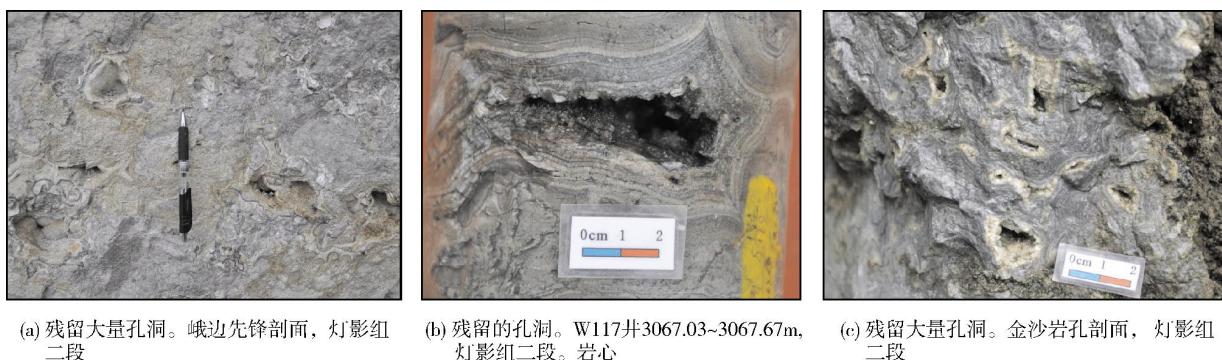


图9 灯影组“葡萄花边”状白云岩中存在的储集空间

大规模的“葡萄花边”状构造形成于灯影组二段中下部,此时海平面整体下降而导致岩溶作用发生,海平面上升后“葡萄花边”开始形成,而那些地势比较低的位置则可能不发育“葡萄花边”构造或者发育规模较小,也可能发育位置有所不同。下面以模拟剖面来说明,当在野外不同地区看到几条剖面不同程度地发育“葡萄花边”构造,且其发育的期次、范围、厚度都有所不同(图10a),这可能说明了剖面所处的古地貌高低位置不同,且随着时间的推移,平均海平面与古地貌高地位置也在发生着迁移(图10b)。

5 结论

(1)“葡萄花边”状白云岩在四川盆地及其周缘地区广泛发育,它是震旦系灯影组二段的重要标志层。

(2)“葡萄花边”状白云岩从结构组分上可以分为围岩、“葡萄花边”纹层、亮晶白云石三种。从成因机制上讲,围岩形成于正常海水环境;“葡萄花边”是在岩石已存在的缝-洞空间中生长的胶结物,由于海平面反复下降(可形成岩溶缝-洞)—上升(可形成“葡萄花边”状胶结物)而造成的;亮晶白云石则是在埋藏期的深部热液流体作用下所形成的。

(3)“葡萄花边”状白云岩中有许多残留孔洞,可以作为石油、天然气的储集空间。此外,这种特殊的地质现象可以作为古地貌研究的一种辅助性标志。

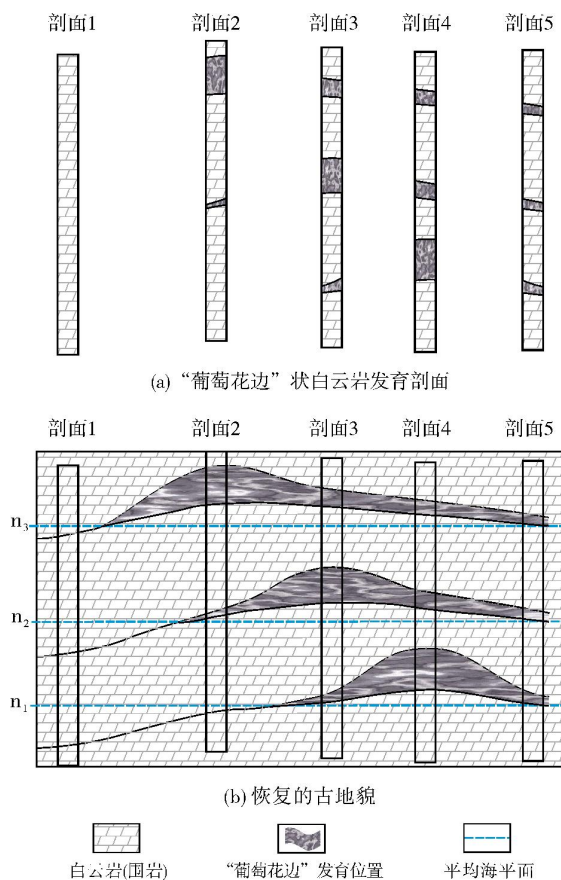


图10 灯影组“葡萄花边”状白云岩发育位置与古地貌的关系模式
 n_1 、 n_2 、 n_3 代表不同时期的平均海平面

参考文献

- [1] 陈宗清. 四川盆地震旦系灯影组天然气勘探[J]. 中国石油勘探, 2010, (4): 1-14.
- [2] 洪海涛, 谢继容, 吴国平, 等. 四川盆地震旦系天然气勘探潜力分析[J]. 天然气工业, 2011, 31(11): 37-41.
- [3] 姚根顺, 郝毅, 周进高, 等. 四川盆地震旦系灯影组储层储集空间的形成与演化[J]. 天然气工业, 2014, 34(3): 31-37.
- [4] 斯春松, 郝毅, 周进高, 等. 四川盆地灯影组储层特征及主控因素[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2014, 41(3): 266-273.
- [5] 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, (4): 40-43.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [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.
- [11] 方少仙, 侯方浩, 董兆雄. 上震旦统灯影组中非叠层石生态系兰细菌白云岩[J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 96-105.
- [12] 曾允孚. 沉积岩实验室研究方法[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [13] 黄思静, 石和, 刘洁, 等. 铍同位素地层学研究进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 194-200.
- [14] 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.
- [15] 王兴志, 陈科贵, 黄继祥, 等. 四川盆地震旦系储集层次生储集空间内化学充填物研究[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(4): 41-43.

编辑: 董 庸

Genesis and Geological Significance of Upper Sinian Dengying Dolostone with Grape-lace Shaped Cement, Sichuan Basin

Hao Yi, Zhou Jin'gao, Chen Xu, Pan Liyin, Hu Yuanyuan, Hu Anping

Abstract: A kind of dolostone with "grape-lace shaped" cement is present in Upper Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin. Because it is widely distributed in lateral but limited only in the middle-lower part of Member 2 in longitudinal, it can be deemed as an identification mark for outcrops and rock cores. Based on macroscopic and microscopic characteristics in lithologic samples, this kind of rock, which is defined as "grape-lace shaped" dolostone, is comprised of three textures in microphotograph, i.e. surrounding rock, "grape-lace shaped" lamina and dolosparite. The origin of cement in this dolostone is analyzed and described.

Key words: Upper Sinian; Dengying Fm.; Dolostone; Cement; Sichuan Basin

Hao Yi: MSc., Geological Engineer. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang, 310023, China