

文章编号:1000-0550(2017)04-0681-10

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.04.003

# 川北地区下寒武统筇竹寺组钙质结核特征及成因机制

庞谦<sup>1,2</sup>, 李凌<sup>1,2</sup>, 胡广<sup>1,2</sup>, 谭秀成<sup>1,2</sup>, 马腾<sup>1,2</sup>, 赵东方<sup>1,2</sup>, 芦飞凡<sup>1,2</sup>, 陈虹宇<sup>1,2</sup>, 熊鹰<sup>1,2</sup>

1.西南石油大学地球科学与技术学院,成都 610500

2.中石油碳酸盐岩储层重点实验室沉积与成藏分室 西南石油大学,成都 610500

**摘要** 不同成因的钙质结核在研究沉积水体、早期成岩环境及泥页岩的压实程度方面具有重要意义。通过对川北地区旺苍县下寒武统筇竹寺组钙质结核抛光,发现结核内部具有层理、暗色圈层和张裂缝构造。结核和围岩的层理关系和具有漂浮状的微观结构特征表明,该地区结核是形成于压实作用之前的成岩早期结核。对结核中 Al、Ti、Ca、K、Na 元素分析表明,结核的元素分布受到结核内部裂缝的影响。结核内部富含生物碎屑和其形成深度为数十米的特征,推测结核主要是在硫酸盐还原带生长。结核具有暗色圈层之间层理不弯曲和元素移动的特征,揭示了结核为透入性生长,在整个结核生长阶段就开始大量同时结晶。Mg/Ca 和 Sr/Ca 的比值说明,结核内部钙质成分为富镁方解石—生物成因方解石。结核中富含钙质成分的原因可能是围岩中的生物成因方解石大量向结核运移所致。裂缝的形态特征表明,裂缝为张裂缝。对结核上部地层的沉积特征研究表明,张裂缝的成因很可能与筇竹寺顶部的浊积岩和沧浪铺组底部的似瘤状灰岩快速搬运沉积有关。

**关键词** 钙质结核;裂缝;筇竹寺组;成因机制;川北地区

**第一作者简介** 庞谦,男,1993年出生,硕士研究生,储层地质学,E-mail: 709964864@qq.com

**通讯作者** 李凌,女,副教授,E-mail: lilingley73@163.com

**中图分类号** P534.41 **文献标识码** A

## 0 引言

结核是沉积岩中常见而又复杂的一类沉积构造。根据结核的形成阶段不同,可划分为同生(如鲕粒)、成岩(例如钙质结核)和后生结核(主要为菱铁矿结核)三个不同形成时期<sup>[1]</sup>。其中尤以处于成岩期钙质结核的研究最为广泛<sup>[2]</sup>,该类结核在揭示古生态学和古环境重建<sup>[3-4]</sup>、古生物地球化学演化过程<sup>[5]</sup>、记录地震发生<sup>[6]</sup>、反映上覆地层快速沉积<sup>[7]</sup>以及成岩带的识别<sup>[8-9]</sup>等方面极具重要的意义。

钙质结核形态多样,具有椭圆状、长柱状、透镜状、面包状和盘状等形状<sup>[6,10-11]</sup>,部分结核内部产生龟裂状裂纹或裂缝<sup>[7,12]</sup>。结核受到有机质沉积速率和氧化速率的影响,孔隙流体成分发生改变,使得钙质发生胶结,形成于沉积界面以下几米至几百米<sup>[13-16]</sup>。它们广泛的分布于冲积体系<sup>[17]</sup>、湖泊环境<sup>[18]</sup>和海相环境<sup>[19-21]</sup>中。

关于早期成岩钙质结核的形成机理,一般有以下几种:1)硫酸盐还原细菌在富含有机质的沉积物中消耗硫酸根而生成碳酸氢根导致钙质结核形成<sup>[9,22]</sup>;

2)甲烷渗漏作用也被认为是钙质结核产生的诱因<sup>[11,19]</sup>;3)干旱—半干旱环境下的蒸发作用<sup>[17]</sup>;4)海水较深的外陆棚至盆地环境下的底流和洋流作用促使沉积中断,沉积物早期胶结形成结核<sup>[23]</sup>。总体上结核生长模式通常有同心圈层状<sup>[24-25]</sup>和透入性<sup>[16,26-27]</sup>两种。

结核中存在的裂缝,其成因长期解释为富水凝胶脱水干缩<sup>[24,28]</sup>,形成的网状裂缝称为龟背石构造,但对本区结核中存在的裂缝的形态特征分析,结核中的裂缝有其他成因。对钙质结核中是否存在透入性生长的生长模式,一直是讨论的焦点<sup>[2,27]</sup>。虽然 Fisher *et al.*<sup>[26]</sup> 和 Feistner<sup>[29]</sup> 对菱铁矿结核和硅质结核中胶结物进行了分析,认为透入性生长模式的存在,但未有证据表明该类生长模式在钙质结核中存在<sup>[16,27]</sup>。另外,Goldberg *et al.*<sup>[30]</sup> 和张先进等<sup>[31]</sup> 分别对贵州地区、峡东地区的下寒武统结核进行了讨论。其中,贵州地区结核形成于黑色页岩之中,结核成分为重晶石—黄铁矿结核,与本区结核成分差异大。张先进等<sup>[31]</sup> 对峡东地区结核的形成环境和成因机制进行了探讨,但未对结核的具体成因和生长模式进行分析。

收稿日期:2016-07-11; 收修改稿日期:2016-10-24

基金项目: 中国石油科技创新基金项目计划(2016D-5007-0102); 国家科技重大专项(2016ZX05004002-001) [ **Foundation**: Science and Technology Innovation Foundation of CNPC, No.2016D-5007-0102; National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China, No.2016ZX05004002-001 ]

综上所述,本文有必要对川北地区下寒武统筇竹寺组结核的成因、生长模式和裂缝成因做进一步的分析和讨论。

本研究首先对川北地区旺苍县唐家河剖面下寒武统筇竹寺组中结核进行详实地野外观察后,选择该地区两类典型结构的结核,通过结核光面、普通薄片分析了结核的结构和构造,并在此基础上进行主微量元素分析,旨在解开旺苍地区下寒武统筇竹寺组钙质结核的形成机制和裂缝的成因。

## 1 地质背景

旺苍县位于上扬子地台北缘(图1),晚震旦世开始,该区处于被动大陆边缘,地壳升降运动频繁,但沉积环境总体较为稳定,震旦系与寒武系之间为平行不整合接触<sup>[32]</sup>。早寒武世,整个扬子台地受扬子海侵,沉积一套黑色页岩和泥岩,广泛超覆于震旦系之上<sup>[33-34]</sup>。下寒武统筇竹寺组是一套浅海相炭质页岩、钙质粉砂岩和粉砂质灰岩沉积物<sup>[35]</sup>。上覆地层为下寒武统沧浪铺组,在其底部沉积台缘斜坡相的似瘤状灰岩<sup>[36]</sup>。下伏地层为下寒武统宽川铺组,其岩性为微晶白云岩,与上覆筇竹寺组为平行不整合接触。

筇竹寺组在该区厚约100 m(图2),岩性从下到上依次可分为下中上三段<sup>[35,37]</sup>。下段为滞留浅海相的黑色的炭质页岩、砂质泥岩和泥质砂岩;中段为正常浅海相页岩、粉砂岩和粉砂质灰岩,偶夹灰岩透镜体;上部为正常浅海—潮下低能带薄层状泥砾岩与黄灰色钙质粉砂岩互层。

## 2 野外剖面及钙结核发育特征

唐家河剖面位于旺苍县鼓城乡米仓山风景区内,该剖面震旦系和寒武系地层出露良好,岩性变化大,相变迅速,出露埃迪卡拉系灯影组和寒武系的宽川铺组、筇竹寺组及沧浪铺组。筇竹寺组与沧浪铺组界限清晰,岩性从泥页岩突变为灰岩。筇竹寺组在该剖面中出露(图2e),下部为极薄层泥岩与钙质粉砂岩互层,向上渐变为极薄层的钙质粉砂岩夹少量泥质粉砂岩。在筇竹寺组顶部发育鲍马序列C段沉积(图2a)。

本文所研究的结核产自于该剖面筇竹寺组极薄层泥质粉砂岩地层中,结核呈平卧的长柱状和椭球状,均呈顺层分布。赋存结核的岩层,发育丘状交错层理和水平层理(图2c,d、图3)。结核继承发育围岩中的水平层理(图2d)和丘状交错层理(图2c、图3),且结核内部的层理无明显变形特征。结核CT2A内部清晰可见丘状交错层理,丘径约20 cm,丘高15 cm,发育十几个极细纹层,上部倾斜层系组与下部层系组相切割,且下部层系具有向上微凸的特征,其内部具有两个深灰色的暗色圈层(图3)。两块结核内部均具有裂缝(宽约0.5 cm),呈锯齿状,充填方解石,切割结核中的暗色圈层。裂缝宽度从中心至边缘逐渐变窄,但未穿过结核。结核与围岩的边界清晰,位于结核中部处的围岩层理被结核截断,向上围岩层理弯曲且层厚逐渐变薄,上部围岩层理向上微凸,下部围岩层理具有向下凹的特征(图2c,d,e)。

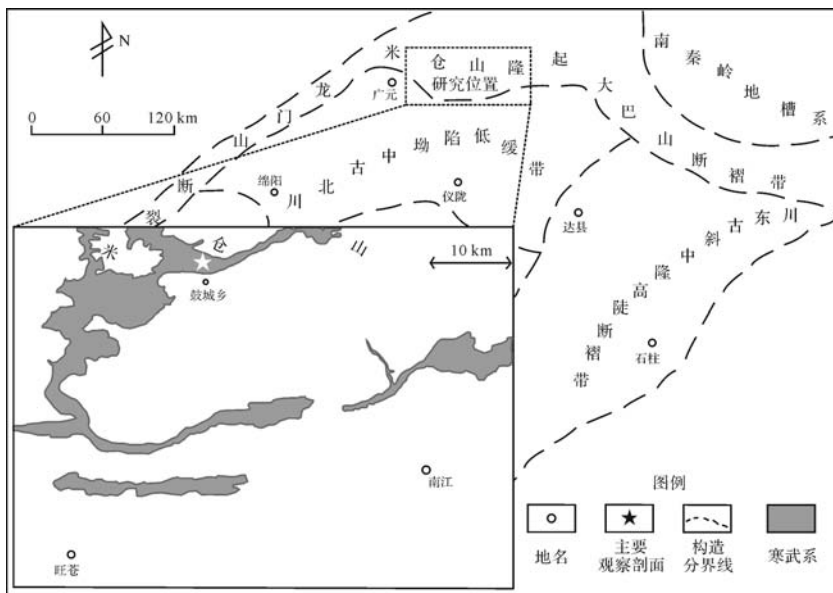


图1 四川盆地北部地区地质背景(据沈聘等<sup>[36]</sup>)

Fig.1 Geologic setting of the northern area in Sichuan basin (after Shen *et al.*<sup>[36]</sup>)

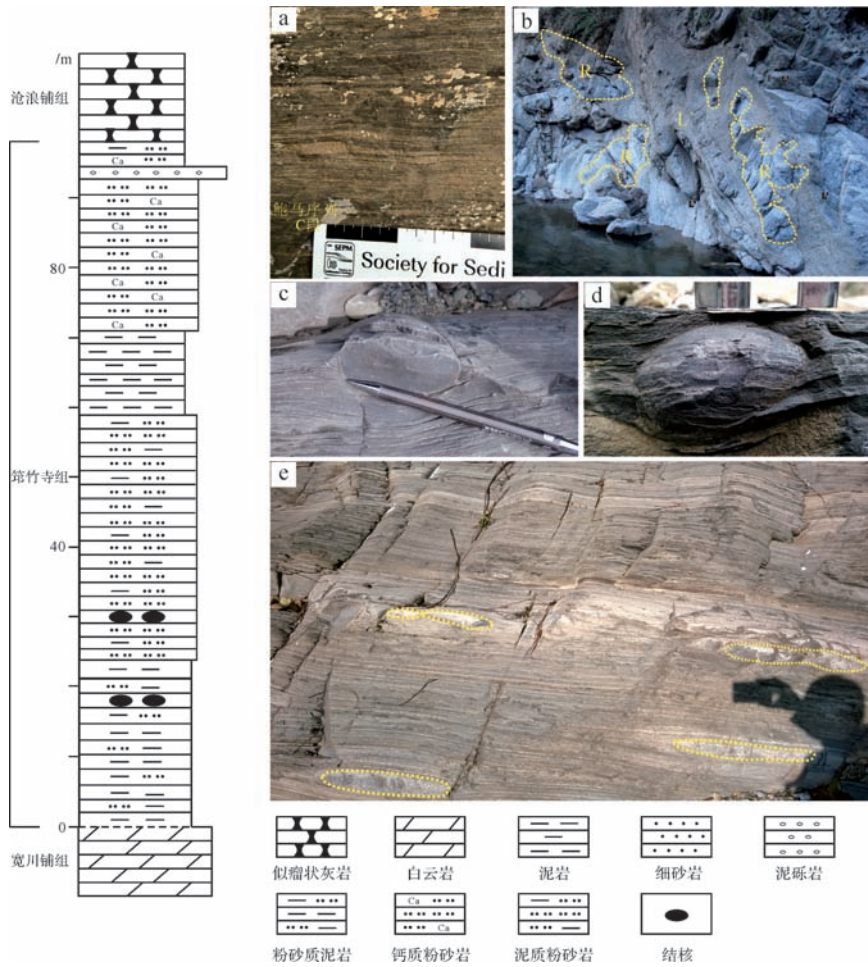


图 2 结核赋存层位图

a. 鲍马序列 c 段, 浊积岩; b. 似瘤状灰岩, L 似瘤状砾屑灰岩, R 为异地碳酸盐岩岩块; c. 结核 CT2A; d. 结核 CT3A; e. 结核宏观赋存层位状态

Fig.1 Stratigraphical setting of the conservation of concretions

### 3 钙质结核岩石学特征

对结核和围岩分别磨制普通薄片, 具有以下特征: 结核中胶结物为方解石, 含量近 60%, 由晶形较好的亮晶方解石和泥晶方解石组成; 碎屑成分为次棱角—棱角状石英、黏土矿物和以黏土矿物构成的次圆状砂屑, 石英和砂屑均呈漂浮状分布 (图 4b, e); 其次, 含有球形藻和暗色有机质团块 (图 4a, e, f)。围岩中主要含棱角状—次棱角状石英和黏土矿物, 方解石胶结物含量少, 约 5% (图 4c, d)。围岩富石英和黏土矿物而贫方解石胶结物, 岩性为粉砂质泥岩和粉砂岩, 结核富含方解石胶结物, 含较少的石英和黏土矿物。

### 4 钙质结核地球化学特征

为获得钙结核的成因, 对围岩和结核等间距地进行微钻取样 (图 5), 共获得 10 件粉末样。采用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES) 和电感耦合等

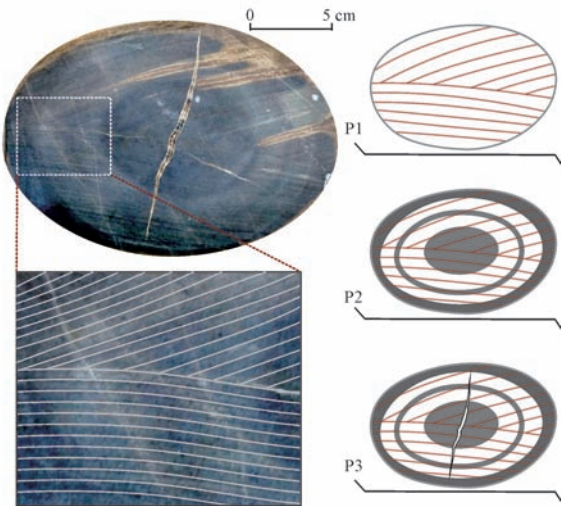


图 3 结核 CT2A 光面及内部结构演化图

P1 表示结核形成之前的丘状交错层理; P2 代表在原始沉积的基础上结核形成的暗色圈层结构; P3 表示结核形成之后产生的裂缝。

Fig.3 Cross section of concretion CT2A and evolution of internal structure



离子体质谱仪(ICP-MS)对结核主微量元素进行分析,结果见表1。

结核 CT2A 中  $Al_2O_3$  含量在 35 812.20~42 268.80  $\mu\text{g/g}$  之间。其中, CaO 含量最为丰富, 介于 316 433.00~345 117.00  $\mu\text{g/g}$  之间,  $K_2O$  和  $Na_2O$  含量分别在 5 811.54~6 943.75  $\mu\text{g/g}$  和 11 381.50~13 101.60  $\mu\text{g/g}$  之间; 微量元素 Ti 含量介于 1 297.80~1 549.80  $\mu\text{g/g}$  之间; Sr/Ca 质量比分布在 0.001 5~0.003 2 之间, Mg/Ca 质量比介于 0.021 3~0.022 8 之间。CaO 含量从结核的中心至边缘逐渐减少, 在围岩处减少到 36 529.50  $\mu\text{g/g}$ ,  $K_2O$  和  $Na_2O$  的百分含量变化具有从结核中心至边缘逐渐增加的规律,  $Al_2O_3$  含量从结核的中心到边缘逐渐增高, 在结核的围岩处达到最高。结核中的高 CaO 含量, 与其富含亮晶钙质胶结具有明显的对应关系(图 5)。

结核 CT3A 的  $Al_2O_3$  含量在 45 759.60~63 363.60  $\mu\text{g/g}$  之间; CaO 含量最高, 介于 283 395.00~

311 640.00  $\mu\text{g/g}$  之间;  $K_2O$  和  $Na_2O$  的含量分别在 8 359.05~12 978.00  $\mu\text{g/g}$  和 12 881.00~16 445.00  $\mu\text{g/g}$  之间。微量元素 Ti 含量介于 1 768.80~2 719.20  $\mu\text{g/g}$  之间。Sr/Ca 比和 Mg/Ca 比分别在 0.001 8~0.002 9 和 0.028 5~0.040 9 之间。与结核 CT2A 相比, 结核 CT3A 从中心至边缘, CaO、 $Al_2O_3$ 、 $K_2O$ 、 $Na_2O$  和 Ti 含量在裂缝处呈“V”字形特征(图 5)。

## 5 讨论

### 5.1 结核形成的相对时间

识别结核形成的相对时间, 不仅对直观认识泥页岩的压实程度具有重要意义<sup>[38]</sup>, 而且对结核的成因机制认识具有重要作用<sup>[39]</sup>。成岩早期形成的结核能够保存很多原始沉积时的微观特征, 这些特征能够间接说明结核的形成相对时间<sup>[40-42]</sup>。并且, 结核和围岩中层理间的关系也能表明结核形成的相对时间, Sellés-Martínez<sup>[39]</sup>对结核与围岩中均存在层理的情

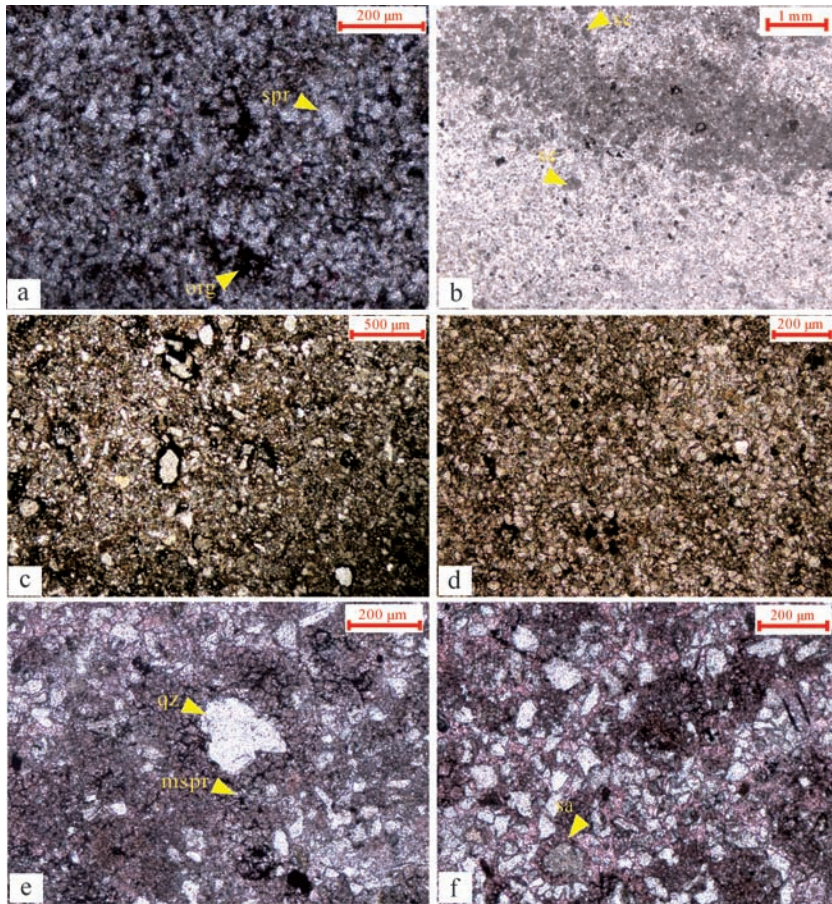


图4 结核和围岩的显微镜下特征

a, b. 结核 CT2A 和 CT3A 内部的普通显微镜下照片(单偏光); c, d. 分别为结核 CT3A 和 CT2A 的围岩显微镜下照片(单偏光); e, f. 分别为结核内部微观结构图(结核 CT2A); spr. 亮晶方解石胶结物, org. 有机质, st. 砂屑, qz. 石英碎屑, mspr. 微亮晶方解石胶结物, sa. 球形藻。

Fig.4 Microscopic characteristics of the concretions and the surrounding rock

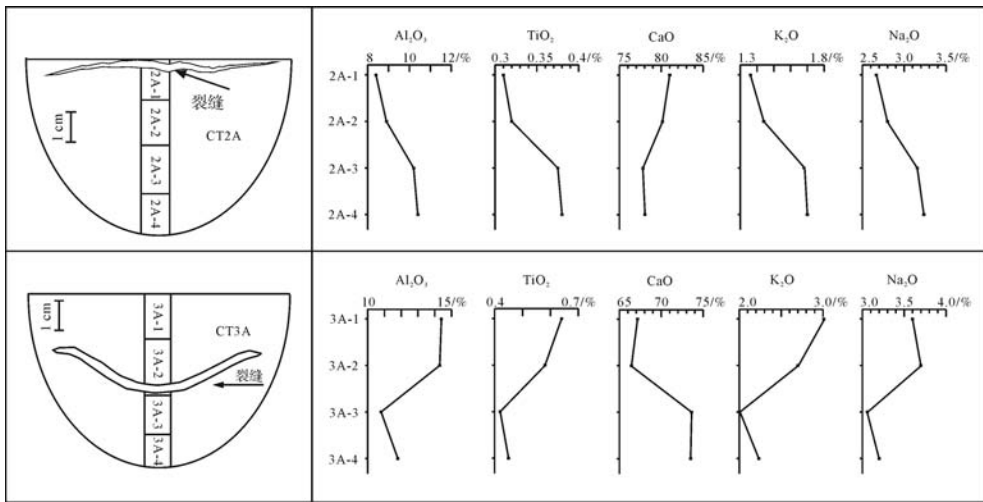


图5 两块结核的常量元素从中心至边缘变化特征

Fig.5 The variation of two concretions of major and trace element from center to edge

表1 结核和围岩的元素含量(μg/g)及比值(wt.%)

Table 1 Element content (μg/g) and the ratio (wt.%) of concretions and surrounding rock

类别	编号	2A-1	2A-2	2A-3	2A-4	2B	3A-1	3A-2	3A-3	3A-4	3C
主量元素	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35 812.20	37 434.00	42 268.80	42 217.80	135 648.00	60 965.40	63 363.60	45 759.60	50 036.40	1 371 600
	CaO	345 117.00	338 956.00	321 685.00	316 433.00	36 529.50	283 395.00	294 420.00	310 905.00	311 640.00	27 048.00
	MgO	8 380.05	8 148.00	9 300.90	8 931.30	20 271.60	12 474.00	11 631.60	9 644.40	10 330.20	22 971.60
	K <sub>2</sub> O	5 811.54	6 096.36	6 943.75	6 900.32	29 631.00	12 978.00	11 970.00	8 359.05	9 447.90	32 329.50
	Na <sub>2</sub> O	11 381.50	11 793.50	13 060.40	13 101.60	26 664.00	15 158.00	16 445.00	12 881.00	13 530.00	22 198.00
微量元素	Ti	1 297.80	1 345.05	1 549.80	1 538.25	5 120.50	2 719.20	2 572.90	1 768.80	1 919.50	4 929.10
	Sr	695.84	667.49	502.95	385.88	154.66	334.40	433.95	583.99	454.19	149.27
元素比值	Sr/Ca	0.003 2	0.003 1	0.002	0.001 5	0.005 9	0.001 8	0.002 3	0.002 9	0.002 2	0.007 7
	Mg/Ca	0.022 8	0.022 6	0.021 8	0.021 3	0.466 1	0.040 9	0.036 5	0.028 5	0.030 5	0.713 4

况,总结出以下三种关系:结核内部层理和围岩层理均发生弯曲(图 6a),这表明在结核外部边缘,围岩的压实作用与结核生长同时发生;结核内部层理平直不弯曲,围岩层理弯曲且层厚发生改变(图 6b),说明结核生长时间早,形成于围岩压实作用之前;结核中的层理与围岩中的层理均不弯曲(图 6c),反映结核形成于围岩完全压实之后。

在该区,结核中清晰可见未发生明显变形和位移的水平层理和丘状交错层理,但围岩上下的层理均发生弯曲变形(图 2c,d),这与图 6b 的模式相一致。同

时,在显微镜下可见漂浮状的粉泥屑、石英碎屑和生物碎片(图 4a,b),而在围岩中未见这些结构特征。另外,结核中的 Al/Ca 比值在 0.09~0.1 之间,围岩中的 Al/Ca 比值在 2.5~3.4 之间。其中 Al 元素主要赋存于黏土矿物中,Ca 元素主要存在于碳酸盐岩之中,这两种元素含量的比值进一步表明,结核与围岩的物质成分差异大,这种差异是由于结核中钙质胶结物含量多,结核未经历压实作用而导致的。综上,低 Al/Ca 比值、保存完好的微细结构和结核层理平直而围岩弯曲的特点均表明结核形成于成岩早期。

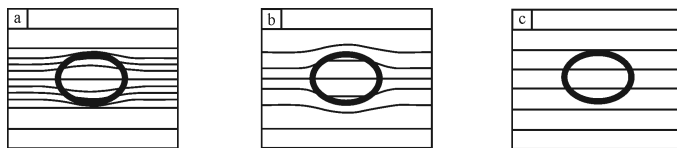


图6 结核形成的相对时间与层理之间的关系(据 Sellés-Martínez<sup>[39]</sup>修改)

a.结核形成与压实作用同时发生;b.结核形成于压实作用之前;c.结核形成于围岩完全压实之后

Fig.6 The relationship of the concretions of forming relative time and bedding(from Sellés-Martínez<sup>[39]</sup>)



由于不同的成岩阶段具有与之大致对应的埋藏深度,例如早成岩期的埋藏深度一般较浅<sup>[15]</sup>,因此结核的形成深度同样可以定性阐明结核的形成相对时间。关于结核的形成深度,前人也做了大量的研究,Baldwin *et al.*<sup>[43]</sup>建立起孔隙度与页岩的压实模型: $D$  (km) =  $6.02(1-\phi)^{6.35}$ ;其中  $D$  是结核形成的深度, $\phi$  是地层的孔隙度。一般在结核形成深度实际估算时,可用结核中的胶结物含量来代替孔隙度值<sup>[13,38]</sup>。从镜下观察,发现该区结核中钙质胶结物的含量约为55%,代入上述公式,可知推断该区结核其形成深度约为38 m。

## 5.2 结核的成因

对结核成因分析,有助于认识泥页岩的成岩环境<sup>[15]</sup>。总体而言,早期成岩结核的成因包括硫酸盐还原细菌降解有机质成因、甲烷泄露成因、蒸发作用和海洋底流作用。其不同成因的结核,在形态、结构构造和地球化学特征上具有明显的差异。

对于甲烷泄露成因的结核通常具有明显的形态差异,大多呈土堆状、结节状、板状、烟囱状及管状<sup>[11,44-46]</sup>。在天然气泄露的过程中,甲烷氧化细菌和硫酸盐还原细菌对泄露的天然气进行降解,产生  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{HCO}_3^-$  结合,产生钙质沉淀。天然气泄露最终导致了结核生长形态的多样化<sup>[11]</sup>。而川北地区结核呈椭球状或长柱状顺层分布于围岩之中,未发现烟囱状、管状等甲烷泄露成因特有的形态特征,显然该地区结核不是甲烷泄露作用产生的。对于海洋底流作用导致的沉积中断,沉积物于水—岩界面发生早期胶结而成的结核,前文分析表明,在该区结核形成于数十米之下的沉积物之中,发育水平层理,未见有底流的冲刷等海洋底流特征。对于蒸发作用而言,本区结核形成于海相沉积物之内,该区在沉积期间未有地表暴露的特征,故这两类成因在该区也不成立。

成岩早期结核通常形成于沉积界面以下几米—几百米内<sup>[15,47]</sup>。对现代沉积物研究表明<sup>[48-49]</sup>,在沉积物内存在以下几个成岩带:有氧带、Fe、Mn 和硝酸盐还原带、硫酸盐细菌还原带和甲烷气生成带(图7)。其中,硫酸盐还原带和甲烷气生成带均具有还原有机质生成碳酸氢根的能力,硫酸盐还原带被认为是结核的主要生成区带<sup>[16]</sup>。川北地区筇竹寺组广泛发育水平层理,位于浪基面之下,该环境下有利于有机质的产生和保存,并且前人对该区开展烃源岩评价研究<sup>[37,50]</sup>,有机碳含量在0.21%~4.78%之间,这些都

说明沉积物中有充足的有机质,具有硫酸盐细菌还原有机质的物质基础。另外,在结核中可见保存较好的硅质生物碎屑(图4f),埋藏于此的生物具有提供丰富的有机质的优势,从而促使硫酸盐还原阶段降解更多的有机质而产生碳酸氢根,这也很有可能是结核能够形成和随机分布的主要控制因素。

通过薄片观察和主量元素分析,结核内部具有比围岩高很多的钙质含量,认识和区分结核和围岩中的钙质来源有利于认识结核的成因。Sr/Ca 和 Mg/Ca 质量比能够用来区分自生文石、高镁方解石、生物成因方解石和陆源成分<sup>[4,51]</sup>。Mg/Ca 和 Sr/Ca 比表明,结核中钙质成分为高镁质和生物成因方解石,而围岩是陆源碎屑和高镁方解石的混合(图8)。结核和围岩在成分上的差异可能是围岩中生物成因的碳酸盐岩组分差异性溶解和运移所致。硫酸盐还原细菌氧化沉积物中的有机质和还原硫酸根离子,并且导致碱性环境和碳酸氢根的产生<sup>[16]</sup>,这可能是生物成因方解石在结核中沉淀的原因。同时,在围岩中未发现任何生物碎屑(图4c,d),这可能也从侧面说明结核中的生物成因方解石来源于围岩中钙质生屑的溶解。

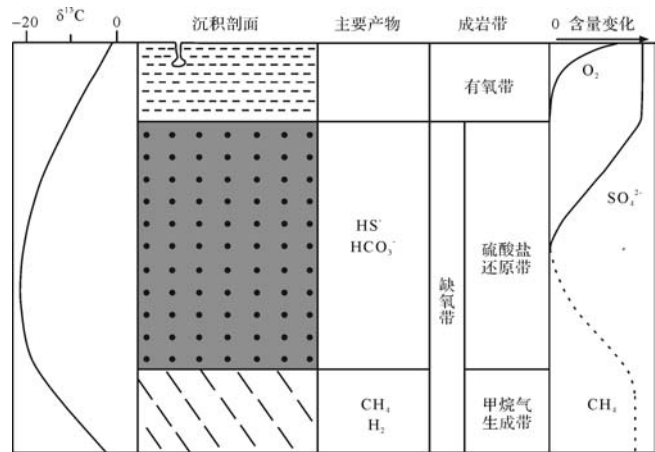


图7 开阔海富有机质沉积物理想演化剖面(据 Mozley 等<sup>[15]</sup>, Claypool<sup>[48]</sup>;Roberts 等<sup>[49]</sup>;修改)

Fig.7 Ideal evolution profiles of organic-rich open sea(modified from Mozley *et al.*<sup>[15]</sup>;Claypool<sup>[48]</sup>;Roberts *et al.*<sup>[49]</sup>)

## 5.3 结核生长模式

成岩结核的生长模式总结起来具有两种,即同心圈层生长和透入性生长<sup>[27]</sup>。结核内部常具有同心圈层结构和因压实作用从中心至边缘  $\text{Ca}^{2+}$  逐渐减少、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  逐渐增加的趋势,这些特征通常用同心圈层生长模式解释<sup>[13,24]</sup>。但 Mozley<sup>[2]</sup>认为,这些特征也可以用更加复杂的生长模式来解释。菱铁矿结核和硅

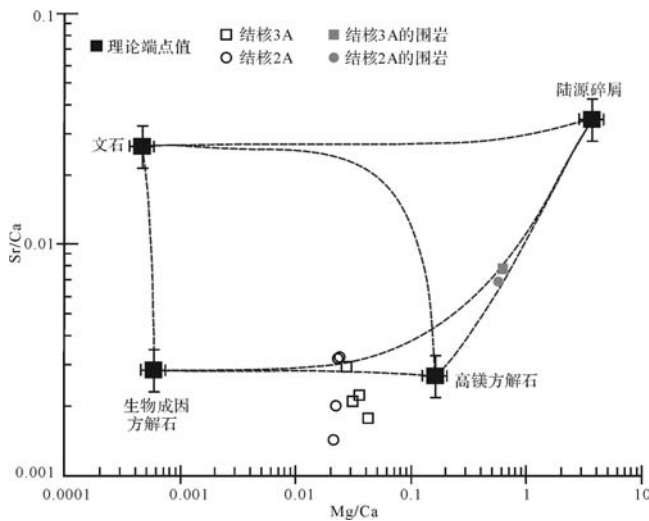


图8 两块结核及其围岩的 Mg/Ca 和 Sr/Ca 比关系图  
(据 Bayon 等<sup>[51]</sup>;修改)

Fig.8 cross-plot of Mg/Ca and Sr/Ca of two concretions and the surrounding rocks(modified from Bayon *et al.*<sup>[51]</sup>)

质结核中的胶结物有规律的变化特征能够直接证明结核以透入性生长模式生长<sup>[26,29]</sup>。但在方解石结核中没有证据反应该类模式<sup>[27]</sup>。

从结核 CT2A 中的元素分布规律和具有暗色圈层状结构来看,似乎符合同心圈层状生长模式,但结核中裂缝的存在,使得结核中的元素分布规律变得复杂。该区结核中裂缝与暗色圈层之间的切割关系表明,裂缝形成于暗色圈层之后,即在结核的形态形成之后(图3)。裂缝被方解石充填和未穿出结核的特征,说明裂缝中胶结物成分的来源只可能来自结核内部。结核 CT2A 中的裂缝位于结核中部,其元素变化特征可能是由逐步压实作用而导致,但从结核 CT3A 裂缝两边的 Al、Ti、Na、K、Ca 元素含量分布呈“V 字形”特点可以看出,裂缝的存在对结核内部的元素分布存在影响,这说明结核 CT2A 从中心至边缘渐变的分布规律很有可能不是受地层逐渐压实而产生的,而是在裂缝形成之后,结核内形成低压区域,使得结核内部的元素发生运移分配。同时,对结核 CT3A 中的裂缝两侧 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 CaO 含量分析发现(图5),靠近结核中心两个采样点的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量明显比边缘高,而 CaO 则相反,这同样说明两块结核内的元素从中心至边缘没有明显的分布规律。另外,宏观上原始沉积的纹层,在结核中的暗色圈层与暗色圈层之间的层理没有发生变形,这也能从侧面说明结核未经历逐渐压实过程,间接地表明暗色圈层不是从内到外逐步形成。因此,同心圈层生长模式不成立,而是在结核内大量

钙质同时胶结,并逐步充填孔隙的透入性生长过程。

#### 5.4 裂缝成因

结核内部通常发育一期或多期的裂缝,形状常为同心状、放射状、网状、近垂直的透镜状<sup>[4,6,24,52-53]</sup>,通常分布于结核中部,裂缝内常充填方解石和重晶石。裂缝通常能反映地层的流体压力<sup>[7]</sup>,其胶结物用于分析成岩时的流体特征、温度及上覆地层沉积速率<sup>[4]</sup>。

对于结核中出现裂缝,目前有以下四种解释:结核内部脱水产生裂缝<sup>[24]</sup>;压实作用和孔隙水的异常高压产生构造张裂缝<sup>[7]</sup>;细菌降解有机物产生的气体聚集导致<sup>[14]</sup>;结核胶结过程同时地震所致<sup>[6]</sup>。

一些非裂缝型结核(如峡东地区结核)和裂缝型结核具有相似的形态和地化特征,但不是所有的结核都具有裂缝,这说明裂缝需要在特定的条件下才能形成。Astin<sup>[7]</sup>和 Scotchman<sup>[54]</sup>认为张裂缝形成于高上覆应力而低水平方向应力条件下,并且在快速埋藏阶段易形成裂缝,所需要的沉积物埋深十米至几百米不等。Houslow<sup>[53]</sup>进一步研究认为当结核内部的孔隙流压大于围岩时结核才能形成裂缝,同时认为在小于 10 m 的埋深下就能形成裂缝。

该区裂缝呈单个近垂直透镜状(图3),裂缝宽度从中心至边缘逐渐变窄至结核外缘消失,这与超孔隙压力梯度从中心至边缘依次减弱相对应,并且呈现明显的锯齿状,为典型的张裂缝特征。边缘三个方向的主应力值大小关系为  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ (图9),使得结核呈椭球状。该地区在早寒武世期间没有发生构造抬升运动,说明结核只可能受到来自上覆地层的持续压力和孔隙流体压力。

在结核形成时期,结核中富含钙质胶结物,而围岩中钙质含量少,导致围岩渗透率高而结核渗透率小,结核在受到上覆快速埋藏沉积条件下,易在各向形成超压。通过对结核上覆地层沉积特征分析,发现两次事件具有快速沉积的特点,能使结核中孔隙流压和结核上部压力增加:一处是位于筇竹寺组顶部,快速沉积厚度达 8 m 的浊积岩;另一处是位于沧浪铺组底部的似瘤状灰岩沉积,该处在沉积时位于台地边缘斜坡,沉积后的灰岩受到重力驱动产生大规模的搬运和再沉积作用<sup>[36]</sup>。这两次快速沉积使得该地层局部区域在垂向上形成超压,从而形成近垂直的裂缝。

## 6 结论

(1) 结合围岩与结核的层理关系、微观特征和

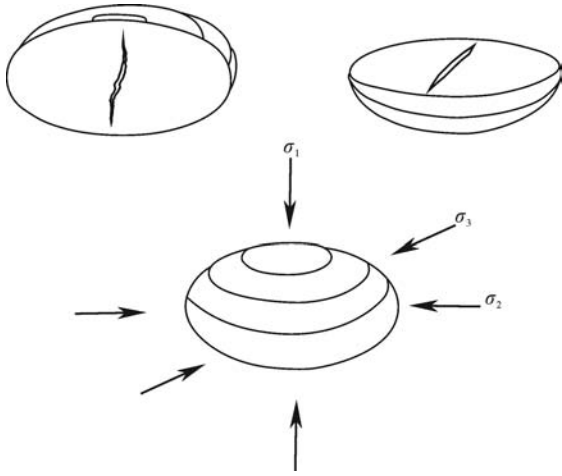


图9 结核中裂缝在横剖面和纵剖面中的特征及裂缝形成时的应力特征

Fig.9 The fracture and stress characteristics in cross-section and longitudinal section

Al/Ca 比表明,川北地区筇竹寺组地层中的结核形成于压实作用之前,为成岩早期结核。

(2) 通过对结核成因探讨表明,结核的生长过程最主要是在硫酸盐细菌还原带,即沉积物中的有机质和硫酸根在硫酸盐还原细菌的作用下,使得钙质大量沉淀,结核开始生长。同时,结核中暗色圈层之间的层理没有发生弯曲变形,结核形成之后内部元素具有移动的特点,说明该地区结核不是以同心圈层模式生长,而是以透入性的方式生长。

(3) 对结核形态和力学特征认识,表明裂缝为张裂缝,其成因可能是受到上覆地两期快速事件性沉积作用而导致的。

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见;感谢沈骋博士在野外工作中给予的指导;感谢杨义豪、林园洪和赵旭在野外工作中的帮助。

### 参考文献 (References)

[1] Pantin H M. Rate of formation of a diagenetic calcareous concretion [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1958, 28(3): 366-371.

[2] Mozley P S. The internal structure of carbonate concretions in mudrocks; a critical evaluation of the conventional concentric model of concretion growth [J]. *Sedimentary Geology*, 1996, 103(1/2): 85-91.

[3] 梁斌,王全伟,阚泽忠. 四川盆地中侏罗统沙溪庙组钙质结核的碳、氧同位素特征 [J]. *矿物岩石*, 2007, 27(2): 54-58. [Liang Bin, Wang Quanwei, Kan Zezhong. Carbon and oxygen isotopic compositions of carbonate nodule in the Shaximiao Formation of the Middle Jurassic, Sichuan Basin [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2007, 27(2): 54-58.]

[4] Alessandretti L, Warren L V, Machado R, et al. Septarian carbonate concretions in the Permian Rio do Rasto Formation: birth, growth and implications for the early diagenetic history of southwestern Gondwana succession [J]. *Sedimentary Geology*, 2015, 326: 1-15.

[5] Gaines R R, Vorhies J S. Growth mechanisms and geochemistry of carbonate concretions from the Cambrian Wheeler Formation (Utah, USA) [J]. *Sedimentology*, 2016, 63(3): 662-698.

[6] Pratt B R. Septarian concretions; internal cracking caused by synsedimentary earthquakes [J]. *Sedimentology*, 2001, 48(1): 189-213.

[7] Astin T R. Septarian crack formation in carbonate concretions from shales and mudstones [J]. *Clay Minerals*, 1986, 21(4): 617-631.

[8] Raiswell R. The microbiological formation of carbonate concretions in the Upper Lias of NE England [J]. *Chemical Geology*, 1976, 18(3): 227-244.

[9] Gautier D L, Claypool G E. Interpretation of methanic diagenesis in ancient sediments by analogy with processes in modern diagenetic environments: Part 1. Concepts and principles [M]//McDonald D A, Surdam R C. *Clastic Diagenesis*. Tulsa, Okla: AAPG, 1984, 37: 111-123.

[10] Seilacher A. Concretion morphologies reflecting diagenetic and epigenetic pathways [J]. *Sedimentary Geology*, 2001, 143(1/2): 41-57.

[11] Liang Huimin, Chen Xi, Wang Chengshan, et al. Methane-derived authigenic carbonates of mid-Cretaceous age in southern Tibet: types of carbonate concretions, carbon sources, and formation processes [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 115: 153-169.

[12] De Craen M, Swennen R, Keppens E. Petrography and geochemistry of septarian carbonate concretions from the Boom Clay Formation (Oligocene, Belgium) [J]. *Geologie en Mijnbouw*, 1998, 77(1): 63-76.

[13] Curtis C D, Coleman M L, Love L G. Pore water evolution during sediment burial from isotopic and mineral chemistry of calcite, dolomite and siderite concretions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50(10): 2321-2334.

[14] Irwin H, Curtis C, Coleman M. Isotopic evidence for source of diagenetic carbonates formed during burial of organic-rich sediments [J]. *Nature*, 1977, 269(5625): 209-213.

[15] Mozley P S, Burns S J. Oxygen and carbon isotopic composition of marine carbonate concretions: an overview [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1993, 63(1): 73-83.

[16] Dong Jin, Zhang Shihong, Jiang Ganqing, et al. Early diagenetic growth of carbonate concretions in the upper Doushantuo Formation in South China and their significance for the assessment of hydrocarbon source rock [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(9): 1330-1339.

[17] 楼章华,赵霞飞. 仓房沟群冲积体系中钙质结核的成因 [J]. *石油实验地质*, 1993, 15(1): 81-85. [Lou Zhanghua, Zhao Xiafei. The origin of calcareous cores in the alluvial system of the Cang-



- fanggou Group [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1993, 15(1): 81-85.]
- [18] 刘万洙,王璞珺. 松辽盆地嫩江组白云岩结核的成因及其环境意义[J]. *岩相古地理*, 1997, 17(1): 22-26. [Liu Wanzhu, Wang Pujun. Genesis and environmental significance of the dolomite concretions from the Nenjiang Formation in the Songliao Basin, north-eastern China [J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 1997, 17(1): 22-26.]
- [19] 欧莉华,伊海生,夏国清,等. 内蒙古东北部林西组碳酸盐岩结核的成因及油气地质意义[J]. *成都理工大学学报:自然科学版*, 2013, 40(4): 438-444. [Ou Lihua, Yi Haisheng, Xia Guoqing, et al. Origin and petroleum geological significance of carbonate rock concretes in Linxi Formation, northeast of Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2013, 40(4): 438-444.]
- [20] 孙庆峰. 新疆柯坪中奥陶统结核状灰岩的沉积环境及成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 2006, 25(2): 137-147. [Sun Qingfeng. The sedimentary environment and genesis of Middle Ordovician nodular limestones in Keping, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2006, 25(2): 137-147.]
- [21] Hendry J P, Pearson M J, Trewin N H, et al. Jurassic septarian concretions from NW Scotland record interdependent bacterial, physical and chemical processes of marine mudrock diagenesis[J]. *Sedimentology*, 2006, 53(3): 537-565.
- [22] Dong Jin, Zhang Shihong, Jiang Ganqing, et al. Greigite from carbonate concretions of the Ediacaran Doushantuo Formation in South China and its environmental implications [J]. *Precambrian Research*, 2013, 225: 77-85.
- [23] 金若谷. 一种深水沉积标志——“瘤状结核”及其成因[J]. *沉积学报*, 1989, 7(2): 51-61. [Jin Ruogu. A deep water sedimentary criteria——“Knotty Nodule” and origin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1989, 7(2): 51-61.]
- [24] Raiswell R. The growth of Cambrian and Liassic concretions[J]. *Sedimentology*, 1971, 17(3/4): 147-171.
- [25] Savrda C E, Bottjer D J. Limestone concretion growth documented by trace-fossil relations[J]. *Geology*, 1988, 16(10): 908-911.
- [26] Fisher Q J, Raiswell R, Marshall J D. Siderite concretions from nonmarine shales (Westphalian A) of the Pennines, England; controls on their growth and composition[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1998, 68(5): 1034-1045.
- [27] Raiswell R, Fisher Q J. Mudrock-hosted carbonate concretions: a review of growth mechanisms and their influence on chemical and isotopic composition[J]. *Journal of the Geological Society*, 2000, 157(1): 239-251.
- [28] 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京:石油工业出版社, 2008: 97-98. [Zhu Xiaomin. *Sedimentary petrology*[M]. 4th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 97-98.]
- [29] Feistner K W A. Petrographic examination and re-interpretation of concretionary carbonate horizons from the Kimmeridge Clay, Dorset [J]. *Journal of the Geological Society*, 1989, 146(2): 345-350.
- [30] Goldberg T, Mazumdar A, Strauss H, et al. Insights from stable S and O isotopes into biogeochemical processes and genesis of Lower Cambrian barite - pyrite concretions of South China[J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(10): 1278-1288.
- [31] 张先进,彭松柏,李华亮,等. 峡东地区的“三峡奇石”——沉积结核[J]. *地质论评*, 2013, 59(4): 627-636. [Zhang Xianjin, Peng Songbai, Li Hualiang, et al. “Three Gorges Landscape Stone”: the sedimentary concretion in eastern Three Gorges area [J]. *Geological Review*, 2013, 59(4): 627-636.]
- [32] 魏显贵,杜思清,何政伟,等. 米仓山地区构造演化[J]. *矿物岩石*, 1997, 17(S): 107-113. [Wei Xiangui, Du Siqing, He Zhengwei, et al. The tectonic evolution of Micangshan area[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1997, 17(S): 107-113.]
- [33] Steiner M. The facies development and fossil distribution of the Yangtze Platform (South China) in the Neoproterozoic/earliest Cambrian[J]. *Freiberger Forschungshefte C*, 2001, 492: 1-26.
- [34] 袁庆东,李本亮,刘海涛,等. 川西北地区构造演化阶段及岩相古地理[J]. *大庆石油学院学报*, 2010, 34(6): 42-52. [Yuan Qingdong, Li Benliang, Liu Haitao, et al. The tectonics evolution and lithofacies palaeogeography in the northwest of the Sichuan Basin[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2010, 34(6): 42-52.]
- [35] 刘仿韩,苏春乾,杨友运,等. 米仓山南坡寒武系沉积相分析[J]. *长安大学学报:地球科学版*, 1987, 9(4): 1-12. [Liu Fanghan, Su Chunqian, Yang Youyun, et al. Sedimentary facies analysis of Cambrian in the south of Micang Mountain [J]. *Journal of Chang'an University: Earth Science Edition*, 1987, 9(4): 1-12.]
- [36] 沈骋,谭秀成,李凌,等. 川北早寒武世碳酸盐岩台缘斜坡沉积特征及变形构造形成机制探讨[J]. *古地理学报*, 2015, 17(3): 321-334. [Shen Cheng, Tan Xiucheng, Li Ling, et al. Sedimentary characters of carbonate platform marginal slope of the Early Cambrian in northern Sichuan Basin and perspective of deformation structures [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 17(3): 321-334.]
- [37] 黄耀宗. 米仓山隆起下古生界烃源岩特征[D]. 成都:成都理工大学, 2010. [Huang Yaozong. Characteristics of Lower Paleozoic source rocks in Micangshan uplift area, Sichuan Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.]
- [38] Oertel G, D CURTIS C. Clay-ironstone concretion preserving fabrics due to progressive compaction[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1972, 83(9): 2597-2606.
- [39] Sellés-Martínez J. Concretion morphology, classification and genesis[J]. *Earth-Science Reviews*, 1996, 41(3/4): 177-210.
- [40] Duck R W. S.E.M. Study of elastic fabrics preserved in calcareous concretions from the late-Devensian Errol Beds, Tayside[J]. *Scottish Journal of Geology*, 1990, 26(1): 33-39.
- [41] Maples C G. Enhanced paleoecological and paleoenvironmental interpretations result from analysis of early diagenetic concretions in Pennsylvanian shales[J]. *Palaios*, 1986, 1(5): 512-516.
- [42] Orr P J, Briggs D E G, Siveter D J, et al. Three-dimensional preservation of a non-biomineralized arthropod in concretions in Silurian volcaniclastic rocks from Herefordshire, England[J]. *Journal of the*

- Geological Society, 2000, 157(1): 173-186.
- [43] Baldwin B, Butler C O. Compaction curves[J]. AAPG Bulletin, 1985, 69(4): 622-626.
- [44] 陈忠, 颜文, 陈木宏, 等. 南海北部大陆坡冷泉碳酸盐结核的发现: 海底天然气渗漏活动的新证据[J]. 科学通报, 2006, 51(9): 1065-1072. [Chen Zhong, Yan Wen, Chen Muhong, et al. Discovery of seep carbonate nodules as new evidence for gas venting on the northern continental slope of South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(9): 1065-1072.]
- [45] Nyman S L, Nelson C S, Campbell K A. Miocene tubular concretions in East Coast Basin, New Zealand; analogue for the subsurface plumbing of cold seeps[J]. Marine Geology, 2010, 272(1/2/3/4): 319-336.
- [46] Peckmann J, Reimer A, Luth U, et al. Methane-derived carbonates and authigenic pyrite from the northwestern Black Sea[J]. Marine Geology, 2001, 177(1/2): 129-150.
- [47] Bojanowski M J, Barczuk A, Wetzel A. Deep-burial alteration of early-diagenetic carbonate concretions formed in Palaeozoic deep-marine greywackes and mudstones (Bardo Unit, Sudetes Mountains, Poland) [J]. Sedimentology, 2014, 61(5): 1211-1239.
- [48] Claypool G E, Kaplan I R. The origin and distribution of methane in marine sediments[C]//Kaplan I R. Natural Gases in Marine Sediments. New York: Plenum Press, 1974: 99-139.
- [49] Roberts A P, Weaver R. Multiple mechanisms of remagnetization involving sedimentary greigite ( $Fe_3S_4$ ) [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 231(3/4): 263-277.
- [50] 王顺玉, 戴鸿鸣, 王海清, 等. 大巴山、米仓山南缘烃源岩特征研究[J]. 天然气地球科学, 2000, 11(4/5): 4-16. [Wang Shunyu, Dai Hongming, Wang Haiqing, et al. Source rock feature of the south of the Dabashan and Mi-cangshan[J]. Natural Gas Geoscience, 2000, 11(4/5): 4-16.]
- [51] Bayon G, Pierre C, Etoubleau J, et al. Sr/Ca and Mg/Ca ratios in Niger Delta sediments; implications for authigenic carbonate genesis in cold seep environments[J]. Marine Geology, 2007, 241(1/2/3/4): 93-109.
- [52] Duck R W. Subaqueous shrinkage cracks and early sediment fabrics preserved in Pleistocene calcareous concretions[J]. Journal of the Geological Society, 1995, 152(1): 151-156.
- [53] Hounslow M W. Significance of localized pore pressures to the genesis of sepiarian concretions[J]. Sedimentology, 1997, 44(6): 1133-1147.
- [54] Scotchman I C. The geochemistry of concretions from the Kimmeridge Clay Formation of southern and eastern England[J]. Sedimentology, 1991, 38(1): 79-106.

## Characteristics and Genetic Mechanism of Calcareous Concretions in the Early Cambrian Qiongzhusi Formation of Northern Sichuan Basin

PANG Qian<sup>1,2</sup>, LI Ling<sup>1,2</sup>, HU Guang<sup>1,2</sup>, TAN XiuCheng<sup>1,2</sup>, MA Teng<sup>1,2</sup>, ZHAO DongFang<sup>1,2</sup>, LU FeiFan<sup>1,2</sup>, CHEN HongYu<sup>1,2</sup>, XIONG Ying<sup>1,2</sup>

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

2. The Sedimentary and Accumulation Department of Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, PetroChina, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

**Abstract:** Calcareous concretions of different genesis have a great significance in the study of early diagenetic environment, the sedimentary water body and shale of compacted degree. By polishing, the calcareous concretion shows the interior textures including bedding, dark circles structure and tension cracks during the lower Cambrian Qiongzhusi stage in Wangcang, north of Sichuan Basin. The relationship of concretions and surrounding rock of bedding and the preservation of sedimentological micro-features in the concretion matrix point to an early diagenetic concretions and forming before compaction. Not obvious systematic geochemical variations including Al, Ti, Ca, K, Na from concretion center to edge suggests that the element distribution of concretions are affected by cracks. The rich bioclastic and forming about tens meters under the sediment-water interface suggest the concretions may primarily grow during sulfate-reduction. The two characteristics which the beddings are not deformed among the concentric circles and the move of elements reveal that the concretions are pervasive growth which the calcium crystallites of the concretions nucleated at virtually the same time across the entire concretion. The ratios of Mg/Ca and Sr/Ca indicate that the internal calcium components of concretions is magnesium-rich calcite and biogenic calcite. The large migration of calcium in the biogenic calcite of the surrounding rock lead to the rich calcium component in the concretions. Fracture morphology shows the crack is tension cracks. The rapid transportation and deposition of turbidite at the top of Qiongzhusi Formation and analogous-nodular limestone at the bottom of Canglangpu Formation may be the cause of tension cracks.

**Key words:** calcareous concretions; crack; Qiongzhusi Formation; genetic mechanism; northern Sichuan Basin