

# 一种深水沉积标志 ——“瘤状结核”及其成因

金若谷

(中国地质科学院地质研究所)

**提要** “瘤状结核”是由富灰硅质结核和富粘土质“外壳”组成。从结构和成因可划分瘤状结核(不连续)、连续、瘤状结核和压扁瘤状结核(或压扁构造)。据研究“瘤状结核”是在海水较深的外陆棚至盆地环境中形成的。“瘤状结核”有三种不同的成因,即(1)瘤状结核是在底流和洋流作用下,促使沉积作用中断,于沉积物—水界面附近,由海底早期成岩胶结作用形成;(2)连续瘤状结核是在较长的沉积作用中断和成岩作用相结合,致使结核体发育和生长以及互相连结,由岩化作用形成和(3)压扁瘤状结核是一种次生沉淀成因,它是由晚期埋藏和溶解、压实联合作用下形成的。

**主题词** “瘤状结核” 深水沉积 成岩胶结作用 溶解作用 压实作用

**作者简介** 金若谷 男 49岁 副研究员 沉积学和沉积岩石学

“瘤状结核”是一种沉积构造,又是结核状岩石的总称,如结核状灰岩、瘤状灰岩和压扁结核状灰岩等。我国通常称为瘤状灰岩,国外通称为结核状灰岩“瘤状结核”。在我国南方古生代和中生代地层中分布较广,且明显受层位沉积环境所控制。川陕龙门山和大巴山地区晚二叠世大隆组包含两层“瘤状结核”,可称为下部“瘤状结核”层和上部“瘤状结核”层。本文将对“瘤状结核”的沉积特征及其成因作初步探讨。

## 一 沉积序列

“瘤状结核”的沉积序列因地而异。川陕地区基本上可分为两种类型,即川北型和陕南型(图1)。川北型主要分布于江油北部,广元及旺苍西部等地,它是一套深灰色至灰黑色薄层至中薄层微晶灰岩、硅质灰岩、放射虫硅质页岩、“瘤状灰岩”、硅质岩夹钙质页岩、黑色页岩、放射虫硅质页岩、蒙脱石—伊利石不规则混层粘土岩及蒙脱石化层凝灰岩组成。陕南型仅分布于西乡地区,主要由深灰—灰黑色薄至中薄层泥质灰岩、微晶灰岩、泥云质灰岩、含放射虫粉晶灰岩、“瘤状灰岩”和黑色页岩等组成。此两套沉积序列较为稳定,厚度薄,一般为30—40m,其特征显然属于远海沉积。

## 二 “瘤状灰岩”宏观和微观特征

根据结构和成因,“瘤状结核”可以划分为瘤状结核(不连续)、连续瘤状结核和压扁瘤状结核(即压扁构造)三种类型。现将其特征分述如下:

**1、瘤状结核** 主要见于陕南西乡大隆组上部“瘤状结核”层,它是由不连续的结核体和围绕它的富灰泥质“外壳”组成,风化后,结核体呈不规则状散布于灰泥基质中(图版I, 1)。结核体岩性为深灰色含硅微晶灰岩,呈不规则团块或扁豆体,大小悬殊,略呈带状分布。据化学分析(表1)和X射线衍射分析(图2)表明,化学成分主要由CaO和SiO<sub>2</sub>组成,矿物成分以微晶

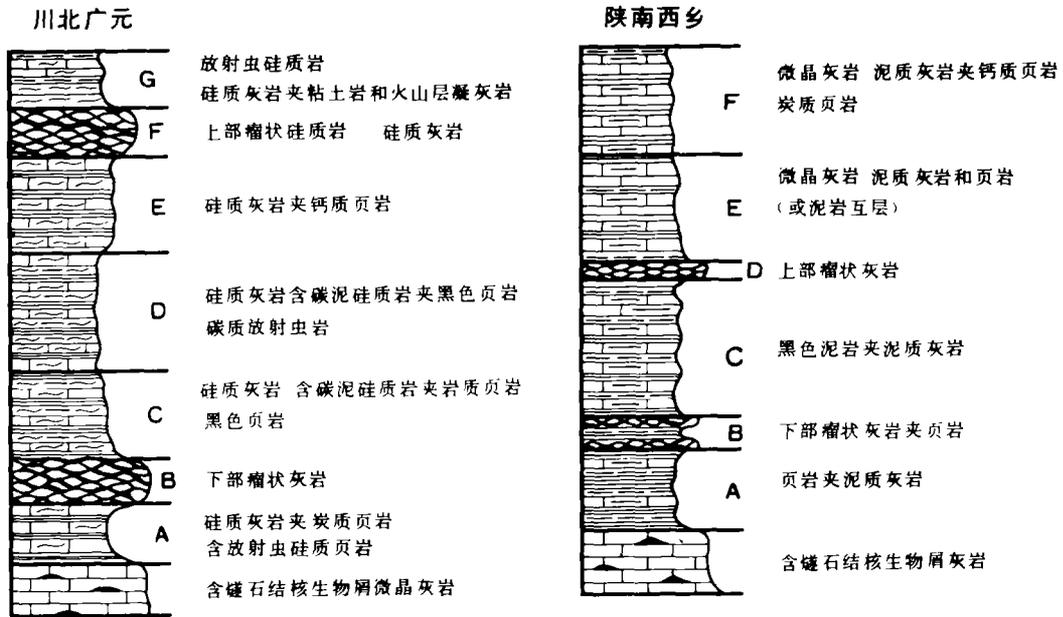


图1 川北陕南晚二叠世大隆组“瘤状结核”沉积序列

Fig.1 "Knotty nodular" sedimentary sequences of Dalong Formation of late Permian in northern Sichuan and southern Shaanxi Province

表1 “瘤状结核”化学成分

Table 1. Chemical composition of "Knotty nodular"

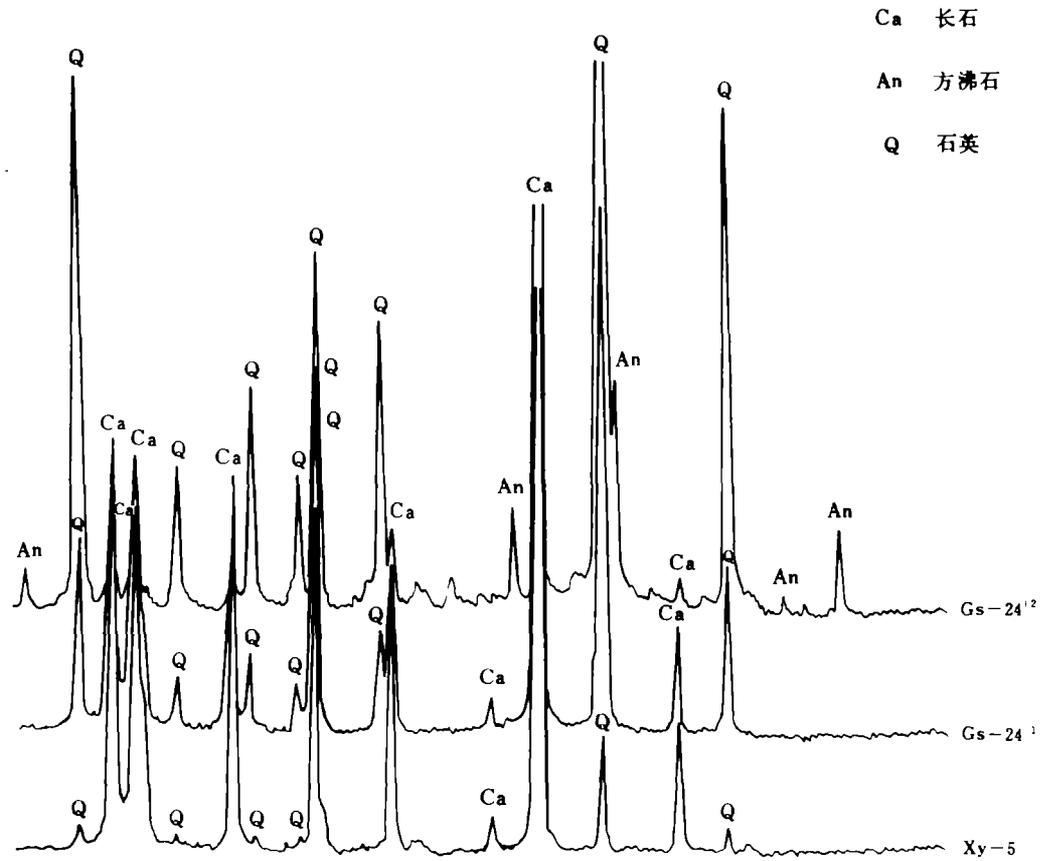
标本号	名称	化 学 成 分														
		SiO <sub>2</sub>	Ac <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fco	Cao	Mao	Mno	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Tio <sub>2</sub>	Sro	Bao	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	烧失量	总量
G <sub>3</sub> -22	1	73.58	3.92	0.76	0.93	8.91	0.99	0.03	0.62	0.54	0.18	0.06	/	0.11	9.09	99.72
G-24 <sup>(1)</sup>	2	66.92	3.10	0.66	0.44	13.88	0.57	0.04	0.48	0.36	0.13	0.11	/	0.07	12.83	99.59
G-24 <sup>(2)</sup>	3	80.60	5.51	0.55	0.40	4.46	0.52	0.01	0.71	1.15	0.14	0.05	0.09	0.07	5.36	99.62
Xy-5	4	16.03	4.97	1.55	/	40.48	1.15	0.70	1.05	0.14	0.18	0.04	0.01	0.06	33.86	100.22

\* 化学成分由中国地质科学院测试所分析

1. 灰色放射虫岩结核体, 四川广元
2. 灰色放射虫岩结核体, 四川广元
3. 黑色放射虫岩结核皮壳, 四川广元
4. 深灰色含硅灰岩结核体, 陕西西乡

方解石为主, 次为微晶石英和粘土矿物。岩石呈均匀粒状 (0.01—0.02mm)。除方解石外, 还有少量石英、粘土矿物、黄铁矿及胶磷矿等。含生物化石少量, 仅见有孔虫、钙球、放射虫和海绵骨针等。灰泥“外壳”一般很薄, 约为 1—2cm。但在结核体和灰泥“外壳”之间层面上, 则产有丰富的菊石。这种瘤状结核厚度薄, 一般为几厘米至十几厘米, 如在垂向上重复出现, 就可形成小型韵律层。

**2. 连续瘤状结核** 单个结核体在长时间的成岩作用下, 促使结核体进一步发育和生长, 就变成半连续或连续的瘤状结核或岩化结核层 (图版 I, 2), 又称初期硬地。连续瘤状结核有两种: 一种是呈群集出现, 即有数层或数十层连续结核体和灰泥“外壳”呈互层或小型韵律层出



Gs-24<sup>(2)</sup>压扁瘤状结核之溶解层    Gs-24<sup>(1)</sup>压扁瘤状结核之压扁结核    Xy-5 陕西西乡瘤状结核  
图2 “瘤状结核”X射线衍射图

Fig.2 X-ray diffraction map of "Knotty nodular"

现。主要见于川北广元大隆组上下两个“瘤状结核”层，厚度较大，达数米。连续结核体是由透镜体和不规则扁长团块连结而成，层面凹凸不平，呈似层状，结核体大部已模糊或消失。上部连续瘤状结核岩性主要为放射虫硅质岩、硅质微晶灰岩，其硅质(SiO<sub>2</sub>)含量与硅质生物的丰度呈消长关系。化学成分和矿物成分见表1和图2。结核体是由灰硅基质和放射虫颗粒组成，呈基底式组构(图版I, 5)。放射虫颗粒一般为圆形，大小相差悬殊，最大可达0.3—0.4mm，分布杂乱，无分选性。成分主要为石英和纤维状玉髓，部分被碳酸钙交代为方解石。放射虫保存不好，边缘被溶蚀，内部构造不清楚。两层连续瘤状结核之间，常被黑色硅质页岩分隔，页岩呈弯曲状，随结核体的变形而变化，厚度一般为1—2cm。这种连续瘤状结核，还产有丰富的牙形石、菊石及少量有孔虫等。下部连续瘤状结核岩性为硅微晶灰岩，主要成分为细粒方解石和石英，硅质成分已大量减少。生物群面貌也发生了很大的变化，其中以牙形石和腕足类较为丰富，有孔虫、介形虫和单体珊瑚等仅有少量出现。“外壳”为钙质页岩，呈薄片状弯曲，一般不含化石。上述两种群集连续瘤状结核，从其生物群特征，可能代表了两种不同的形成环境。另一种连续瘤状结核以单层出现，呈扁豆状或豆荚状，产于钙质泥岩或泥灰岩中，厚度为4—6cm。岩性为深灰色含硅微晶灰岩，矿物成分主要为方解石、微晶石英及少量粘土矿物、有机质和黄铁矿。含生物化石不丰富，仅见钙球、介形虫、牙形石、海绵骨针及海百合茎碎片等。结核体之顶底为一层很

薄的灰黄色灰泥薄层所分隔。分布于陕南西乡大隆组下部“瘤状结核”层。

**3、压扁瘤状结核** 压扁瘤状结核又称压扁构造。压扁瘤状结核是由压扁结核和富粘土质溶解层组成(图3),溶解层可分为简单溶解层和复合溶解层。本区压扁瘤状结核仅见于四川广元大隆组上部“瘤状结核”层。压扁结核为放射虫硅质岩,呈透镜体或长扁豆体,排列与层面基本一致。岩层中部压扁结核个体较大,延伸较长,向两侧逐渐变小,并伴有简单溶解层出现,再过渡到复合溶解层。结核中常有被石英充填的细脉和孔穴,细脉又常切割结核体和溶解层(图版I, 3、4)。化学成分和矿物成分见表1和图2。在显微镜下,压扁结核是由灰硅基质和大量放射虫颗粒组成,具基底式结构。放射虫颗粒特征与连续瘤状结核描述相似。溶解层呈灰至灰色,厚薄不均,伴有尖灭,一般在压扁结核顶底部,溶解层色深变薄,且界限清楚。压扁结核两端,溶解层色浅变厚,  $\text{SiO}_2$  含量达80%以上,次为  $\text{CaO}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (表1),矿物成分除石英和方解石外,还有少量沸石和粘土矿物等(图2)。在镜下,它是由泥硅基质和放射虫颗粒组成(图版I, 6),基质具纹层理,放射虫大多为椭圆形,大小均匀(0.1—0.2mm)。成分为蛋白石,部分为石英,有时被方解石和沸石所交代。放射虫一般保存较好,具清晰的骨骼同心圆构造(图版I, 6、7)。

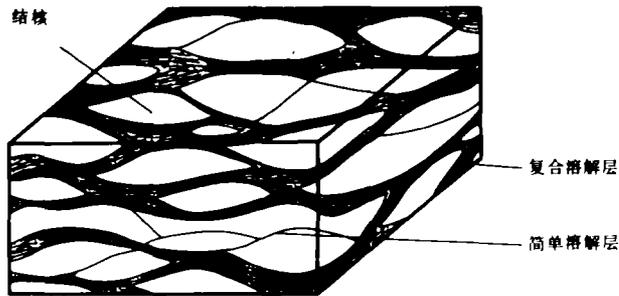


图3 压扁瘤状结核图解说明

Fig.3 Diagram to illustrate of flaser knotty nodular

### 三 “瘤状结核”的沉积环境

大隆组“瘤状结核”及其周围岩石是在扬子地台的西北边缘海水较深的外陆棚至盆地环境中形成的。

**1、沉积物** 由颗粒很细(0.01mm以下)的碳酸盐、硅泥质所组成。碳酸盐成分以方解石为主,白云石很少。方解石大部以岩石的基质出现,部分为岩石颗粒如生物碎屑等。岩石以灰泥岩(微晶灰岩)为主,颗粒岩和泥粒岩一般很少见到。硅质成分以微晶石英为主少量玉髓和蛋白石等,微晶石英常与方解石混合组成岩基质部分,玉髓和蛋白石为硅质生物的主要成分,它们构成的岩石包括硅质灰岩、放射虫硅质岩和含泥硅质岩等。泥质成分大部由蒙脱石—伊利石不规则混层矿物及少量自形高岭石、绿泥石等组成。泥质岩类型有钙质泥岩(或页岩)、黑色页岩、炭质页岩、蒙脱石—伊利石不规则混层矿物粘土岩,蒙脱石化凝灰质粘土岩等。此外,有机质和黄铁矿局部富集,反映了海水较深。沉积物主要来自周围的碳酸盐台地。

**2、沉积速率** 大隆组“瘤状灰岩”及其周围岩石沉积厚度薄,一般为30—40m,单层厚度为5—15cm。从大隆组沉积平均厚度和地质时间的关系来估算,其沉积速率约为  $5\text{—}20\text{mm} / 10^3$  年,这与特提斯地区侏罗纪瘤状灰岩相中的红色结核灰岩的沉积速率十分相似。

**3、生物群和含盐度** 生物群特征以四川广元地区研究较清楚。下部“瘤状结核”及其周围

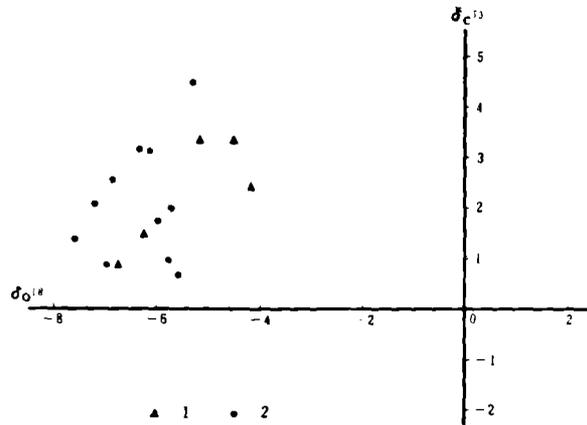
岩石中, 生物群以浮游和底栖生物混生为特点, 其种类包括有牙形石、放射虫、腕足类、有孔虫、介形虫、钙球、海绵骨针和单体珊瑚等, 其中以牙形石和腕足类最为丰富。牙形石主要为窄盐性齿台型分子如 *Neogondolella liagshanensis*, *N. guangyuanensis*, *N. deflecta*, *N. orientalis*, *N. paraleveni*, 少数为广盐性锯齿型分子如 *Xaniognathus* sp., *Prioniodella*, *decreasceens*, 等; 腕足类大多为体小壳薄的硅质岩相分子, 其代表分子有 *Cathaysia*, *Acosarina*, *Waagenites wongiana*, *Pargphella orbicularis*, 等, 少数为体大壳厚的灰岩相分子如 *Spinomarginifera* sp., 等; 放射虫分布于硅质岩和硅质页岩中, 保存不佳。其它如有孔虫、介形虫、单体珊瑚数量均很少。上述生物群反映当时海水较深, 氧气和光照不足, 局部海底水体滞流并处于弱还原环境, 不利于底栖生物的大量繁衍; 海水上层水体循环良好, 适宜于浮游生物的发展和繁殖。其生态环境应为外陆棚至斜坡环境。上部“瘤状结核”及其周围岩石中生物群面貌已发生了很大变化, 以浮游和漂浮生物大量繁衍和底栖生物贫乏为特点。其种类主要为菊石、牙形石、放射虫及少量有孔虫、薄壳腕足类、钙球和海绵骨针等。菊石大多为正常旋卷类型、壳壁薄、肋瘤纹饰为空心, 由隔壁密封起来的气室, 便于水中游泳的假提罗菊石科和肋瘤菊石科组成, 其代表分子有 *Pseudotirolites disconnectes*, *P. asiaticus* (JKL), *Chaotianceras demsistriatum*s, *Pachydiscoceras ellipticum*, *Pleuronodoceras cf. densiplicatum*, *Rotodiscoceras* sp., 等。牙形石种属与上部“瘤状结核”层很相似, 但其数量更为丰富; 放射虫都为圆形和椭圆形, 含量极其丰富, 达 20—30% 以上, 可形成放射虫硅质岩或放射虫硅质页岩。局部保存完好, 经初步鉴定为泡沫虫类, 其代表属种有 *Porodiscus* sp., *Sylothaeiridae* indet, *Cenellipsis* sp. 等。从生物群特点表明当时海水上层循环良好、光照好、氧气充足、养料丰富, 适宜于浮游和假漂浮生物的大量繁衍; 而海底由于光照弱、氧气不足, 底栖生物很难繁殖, 其生态环境应为海水较深的广海或槽盆环境。大量广海性生物群的存在, 表明含盐性应为正常盐度。

#### 5 海水深度

从沉积特征和生物群特征等表明, 大隆组“瘤状结核”及其周围岩石形成时的海水深度为 100—300m 或以下, 但不超过 1000m。下部“瘤状结核”层从所含牙形石、放射虫、薄壳腕足类及少量底栖生物如有孔虫、介形虫、单体珊瑚和棘屑等混生来看, 推测海水深度为 100—200m 或以下; 上部“瘤状结核”及其周围岩石从浮游和假漂浮生物如放射虫、菊石和牙形石等大量繁衍以及底栖生物贫乏和硅质 ( $\text{SiO}_2$ ) 含量的急剧增加等来判断, 推测海水深度可能达到 300—500m 或以下。

### 四 碳氧同位素分析

根据广元上寺大隆组的碳氧同位素资料 (表 2), “瘤状结核”及其周围岩石的氧同位素  $\delta^{18}\text{O}$  均为负值 (-8—-3‰), 碳同位素  $\delta^{13}\text{C}$  均为正值 (0.66—4.47‰), 其  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  之比值, 分布集中于第 4 象限 (图 4)。这与 Schlage 和 James (1978) 对加勒比海 (深海钻井) 的白垩—第三纪和西北欧白垩纪结核硬地等测试的碳氧同位素数据十分接近。并指出这种结核硬地或岩石是在与周围较冷的底水处于平衡状态时, 由埋藏成岩作用形成的。从牙买加 Presien 湾全新世浅水石灰岩和巴哈马鲕石及葡萄石的碳氧同位素资料来看, 其数据显然与深水石灰岩、结核状灰岩有区别, 大多数  $\delta^{18}\text{O}$  值为 +1 和 -1‰ 之间,  $\delta^{13}\text{C}$  值则群集于 +3 和 +5‰ 之间, 反映了沉积物形成时与周围热水处于平衡状态, 碳酸盐是在温度较高的浅水环境中形成的。现代巴哈马斜坡较深水或深水结核状灰岩及其周围岩石的碳氧同位素数据都为正值 ( $\delta^{18}\text{O}$  值为 +2 至 +4‰,  $\delta^{13}\text{C}$  值为 +3 至 +4‰), 并认为这种结核状石灰岩也是在较冷的底水 (6—15℃) 处于平衡状态时, 由海底成岩胶结作用形成的。



1.“瘤状结核”2.“瘤状结核”的周围岩石

图4 广元大隆组“瘤状结核”及其周围岩石碳氧同位素比值变化

Fig. 4 Carbon and oxygen isotopes ratio variation in “Knotty nodular” and the surrounding rocks of Dalung Formation in Guangyuan, Sichuan

从上述资料对比表明，川陕地区大隆组“瘤状结核”及其周围岩石碳氧同位素数据与中新生的结核状石灰岩、深水石灰岩颇为相似。所不同的中生代和古生代氧同位素  $\delta^{18}\text{O}$  值为负值，而新生代  $\delta^{18}\text{O}$  为正值。其形成条件也是在较冷的底水中，与周围沉积物处于平衡状态时，由海底成岩胶结作用形成的。

## 五 “瘤状结核”成因讨论

“瘤状结核”状灰岩或硅质岩在较深水碳酸盐和硅泥质沉积中是较为普遍的。但其成因有各种不同的假说。根据沉积岩石学、地球化学和古生物学等特征表明，川陕地区晚二叠世大隆组“瘤状结核”在不同的发育阶段，是由多种因素决定的。主要包括物理的（底流和洋流作用）、生物的（潜穴作用）、化学的（溶解作用和海底成岩胶结作用）和远洋沉积作用等因素。其中底流和洋流作用在“瘤状结核”的形成过程中起了重要作用。本区大隆组“瘤状结核”的形成，主导因素即是底沉作用它使沉积速率很缓慢的钙质软泥和放射虫软泥沉积作用中断，使沉积物变为多孔隙开放结构，增进了间隙水的循环，在沉积物—水界面附近，由海底早期成岩胶结作用形成了结核。这时形成的结核大多为单体，互不连接，形状大小不同，散布于灰泥基质之中。溶解作用也是结核形成的原因之一。

连续瘤状结核是当早期成岩作用延长，促使单体结核相互连结起来，发生岩化作用，当埋藏后，就形成了波状起伏的、似层状的连续瘤状结核层。

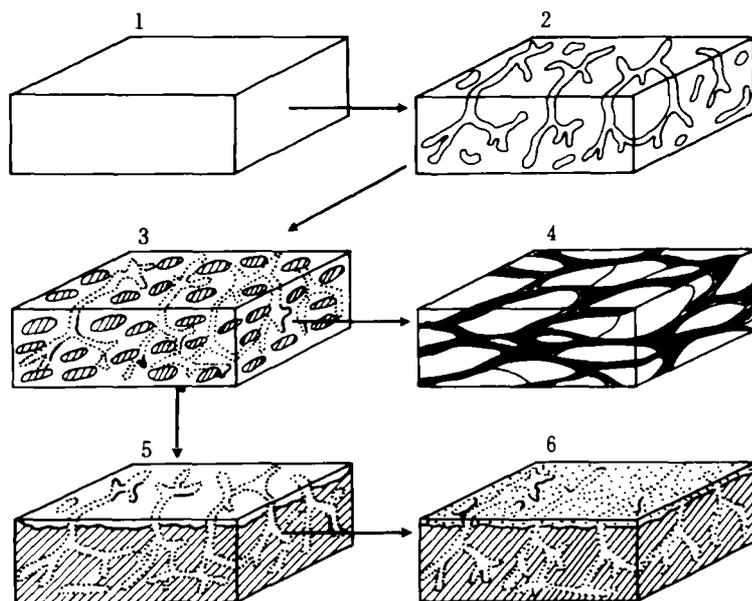
压扁瘤状结核的成因有如下根据：

1. 由压扁结核和溶解层组成的压扁瘤状结核是次生沉淀成因的；
2. 富含放射虫的压扁瘤状结核是晚期埋藏成岩作用形成的，常伴有早期成岩胶结作用的产物如瘤状结核和连续瘤状结核等；
3. 压扁结核和溶解层是由溶解和压实联合作用的，其证据有：
  - (1) 压扁结核大多为平缓的椭球体或扁豆体，很少见到粗糙的不规则状结核。
  - (2) 根据 Weyl (1959) 推测，富粘土层是层内溶液最富集的部分。他提出溶液的压力速率

表2 瘤状结核及其周围岩石碳氧同位素  
Table 2 Carbon and oxygen isotopes in "Knotty nodular"  
and the surrounding rocks

样品号	岩石名称	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$
		(PDB)	
Gs-26	硅质灰岩	-5.60	0.66
Gs-24 <sup>-2</sup>	硅质放射虫岩	-5.73	0.95
Gs-24 <sup>-1</sup>	结核状硅质岩	-6.80	0.83
Gs-22 <sup>-3</sup>	连续结核状硅质岩	-6.26	1.38
Gs-22 <sup>-1,2</sup>	连续结核状硅质岩	-4.21	2.35
Gs-21	硅质灰岩	-7.2	2.07
Gs-20	硅质灰岩	-6.33	3.15
Gs-19 <sup>-2</sup>	硅质灰岩	-6.15	3.14
Gs-19 <sup>-1</sup>	硅质灰岩	-5.74	2.00
Gs-15 <sup>-2</sup>	硅质灰岩	-7.59	1.36
Gs-15 <sup>-1</sup>	硅质岩	-6.96	0.88
Gs-14	硅质灰岩	-5.96	1.72
Gs-13	结核状硅质灰岩	-5.22	3.25
Gs-12	结核状硅质灰岩	-4.56	3.30
Gs-11 <sup>-4</sup>	硅质灰岩	-6.84	2.58
Gs-11 <sup>-2</sup>	硅质灰岩	-5.31	4.47

\* 根据国家地震局严正等测试资料 (1984)



1.放射虫软泥沉积作用中止 2.由于底流作用使沉积物变为多孔隙开放结构或形成裂隙 3.海底早期成岩胶结作用,在沉积物-水界面附近凝成结核 4.结核如果被埋藏,在溶解和压实作用下形成压扁结核的溶解层,即压扁瘤状结核或压扁构造 5.如果早期成岩作用延长,导致结核相互联结而岩化作用,就形成连续瘤状结核 6.如果被埋藏就形成无矿化作用的早期硬地

图5 “瘤状结核”演化图解说明

Fig.5 Diagram to illustrate of "Knotty nodular" evolution

应是粘土颗粒间的薄膜为最大,这是由于粘土薄膜比轮廓清楚的矿物颗粒扩散速率要快的缘故。溶解层是富粘土层,它是层内溶液最为集中的部位;

(3) 某些简单溶解层和洞穴可以作为孔隙液体流通的管道,促使扩散速率的增大;

(4) 压扁结核之顶底部与溶解层界线明显,溶解层色暗而稠密,表明层内溶解作用最强,压力亦最强;结核尾端界线模糊,溶解层色浅而稀疏,说明层内溶液分散,压力较弱;

(5) 压扁结核和溶解层中的放射虫颗粒特征和排列程度明显不同。前者放射虫为圆形,大小相差悬殊,分布杂乱;而后者放射虫呈椭圆形,大小均匀,定向排列(与层理方向一致)。说明放射虫软泥沉积以后,在早期成岩胶结作用形成结核时,放射虫被原封不动地封闭起来,而周围的残余物质(包括粘土矿物、有机质和灰硅质)和部分原始沉积物仍处于未固结或半固结状态。当晚期埋藏和溶解、压实作用时,残余物质就变为可塑性围绕硬结核而流动。放射虫颗粒亦随之变形而具定向排列;

(6) 溶解层的细纹层一般不切割生物化石如放射虫,而是绕着放射虫颗粒通过,说明溶解层是稍晚于压扁结核形成的(图版 I, 8)。

4 压扁瘤状结核形成的埋藏深度,据深海钻井发现白垩纪的压扁白垩结核的埋藏深度为 300—2000 米。推断,古生代的压扁瘤状结核的埋藏深度可能与此相近。

“瘤状结核”在远海沉积中的形成过程可用(图 5)图解说明之。

收稿日期: 1986 年 12 月 12 日

### 参 考 文 献

- (1) 李子舜等 1986, 中生代—古生代之交的生物绝灭和地质事件—四川广元上寺二叠系—三叠系界线和事件的初步研究, 地质学报, 第 60 卷, 第 1 期。
- (2) Kennedy, W.J., and Garrison, R.E., 1975, *Sedimentology*, V.22, p.311—386.
- (3) Garrison, R.E., and Kennedy, W.J., 1977, *Sedimentary Geology*, V.19, p.107—137.
- (4) Jenkyns, H.C., 1974, Origin of red nodular limestones (Ammonitico Rosso, Knollenkalke) in the Mediterranean Jurassic: a diagenetic model, in Hsu, K.J., and Jenkyns, H.C., eds., *Pelagic sediments on land and under the sea*. Int. Assoc. Sedimentologists Spec. Pub. N. 1, p.249—267.
- (5) Tucker, M.E., 1974, *Sedimentology of Palaeozoic pelagic limestones: the Devonian Griotte (southern France) and Cephalopodenkalk (Germany)*, in Hsu, K.J., and Jenkyns, H.C., eds., *Pelagic sediments on land and under the sea*. Int. Assoc. Sedimentologists Spec. Pub. N.1, p.71—90.
- (6) Mullins, H.T., et al., 1980, *Jour. Sed. Petrology*, V.50, N.1, p.117—132.
- (7) Muller, J., and Fabricius, F., 1974, Magnesian—Calcite nodular in the Ionian deepsea: An actualistic model for the formation of some nodular limestones, in Hsu, K.J., and Jenkyns, H.C., eds., *Pelagic sediments on land and under the sea*; Int. Assoc. Sedimentologists Spec. Pub. N.1, p.235—247.
- (8) Schlager, W., and James, N.P., 1978, *Sedimentology*, V.25, p.675—702.
- (9) Millman, J.D., and Mueller, J., 1977, Characteristics and genesis of shallow—water and deep—sea limestones, in Anderson, N.R., and Malahoff, A., eds., *The fate of fossil fuel CO in the oceans*: New York, Plenum Press.
- (10) Kukal, Z., 1975, *California Mineralogists Geologists*, V.20, p.359—368.
- (11) Hopkins, J.C., 1977, Production of foreslope breccia by differential submarine cementation and downslope displacement of carbonate sands, Miette and Ancient wall buildups, Devonian, Canada: Soc. Econ. Paleontologists Mineralogists Spec. Pub. N.25, p.155—170.
- (12) Weyl, P.K., 1959, *J. Geophys. Res.*, 64: p.2001—2025.

## A DEEP WATER SEDIMENTARY CRITERIA ——“KNOTTY NODULE” AND ORIGIN

Jin Rougu

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing)

### Abstract

The “knotty nodule” of Dalong Formation of Late Permian in Northern Sichuan and Southern Shaanxi Province are composed of siliceous-rich nodules and clay-rich matrix. They may have two different sedimentary sequence: One is type of Northern Sichuan, which is mainly distributed to Northern Jiangyou, Guangyuan, and Western Wangcang region in Northern Sichuan; The other is type of Southern Shaanxi, which is distributed to Xixiang region in Southern Shaanxi (Fig.1).

The “knotty nodule” and the surrounding rocks are dark colored thin to medium-thin bedding micritic limestone, siliceous micritic limestone, radiolaria siliceous rock, siliceous rock, argillaceous limestone and shale (or mudstone) etc. with horizontal and rhythmic bedding, part rich in organic materials and pyrites (or nodule). In the “knotty nodule,” the biota is characterized as abundant planktonic faunas such as radiolaria, ammonoids, condonts and thin-shelled brachiopods and a few foraminifers, ostracods, calcispheres and sponge-spiculite etc. According to sedimentary characteristics and faunal studies, the “knotty nodule” and the surrounding rocks may suggest deposition in outer shelf to basin environment, with water depth in the 100 to 200m or 300 to 500m range and under normal salinities.

In accordance with origin and texture, the “knotty nodule” may be divided into three types, e.g. knotty nodule (discontinuous), continuous knotty nodule and flaser knotty nodule (or flaser structures).

The knotty nodule is mainly distributed to upper part of Dalong Formation in Xixiang, Shaanxi Province. It is composed of dispersion nodules and rich in lime-muddy matrix. These nodules are dark grey siliceous-bearing micritic limestone, and usually are irregular and lenticular nodules. The continuous knotty nodule is distributed to upper and lower part of Dalong Formation in Guangyuan, Sichuan Province. They are silica-rich siliceous micritic limestone, radiolaria siliceous rock, in which the nodules preceded to the interlocking coalescence to nodules layer of semi-continuous or continuous. In general, the continuous knotty nodules interleaved with more distortion siliceous shale layers and exhibit a certain rhythmic structure. The flaser knotty nodule consist of small lime-siliceous ellipsoidal bodies or lenses (or flaser nodule) surrounded by siliceous-rich solution seams. The most flaser nodules are the comparatively high degree of preferred orientation, and nearly parallel to bedding. In many cases, both flaser nodules and the adjacent solution seams have abundant radiolaria. Within these nodules, the radiolaria are random bioturbated fabric, that it was locked in place by early cementation, whereas in the surrounding solution seams of nodules have the preferred alignment of radiolaria elongate grains. These are formed by the surrounding matrix remained unlithification during burial and may even have flowed plastically around the hardened nodule during compaction. The solution seams may cut across primary depositional features such as bedding planes and omission surface, and they cut and truncate burrows. In many flaser knotty nodules, the solution seams form a secondary matrix to nodules, and seams are distorted around or cemented nodules.

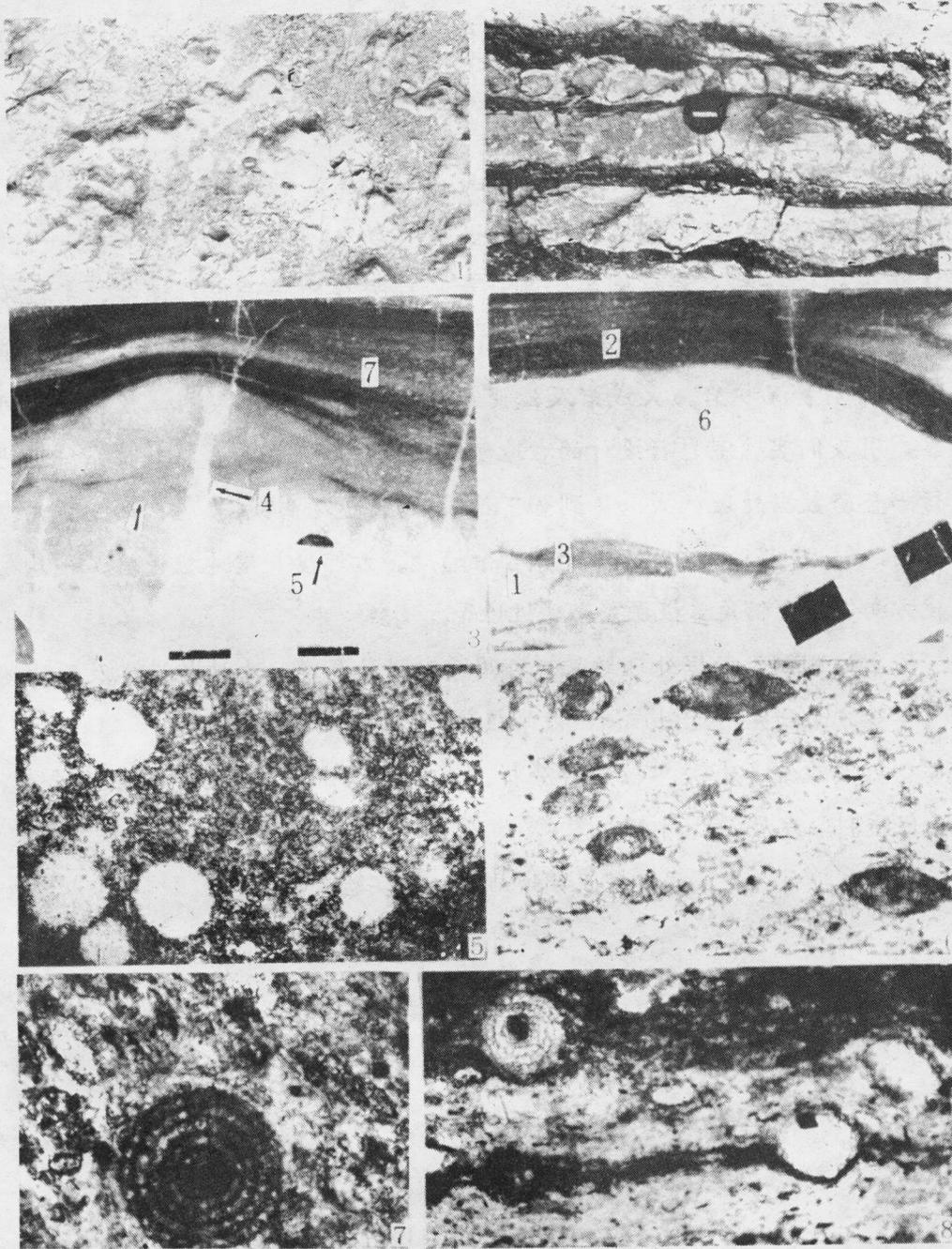
Carbon and oxygen isotope data (table 2, Fig. 4) indicated that the “knotty nodule” and the surrounding rocks were formed by submarine diagenetic cementation, which were in the direction of equilibrium with ambient colder bottom water than the surrounding sediment. This data is very similar to carbon and oxygen isotopes of the nodule, chalk nodule and hardground by the Cretaceous-Tertiary of the Caribbean (Deep Sea Drilling Project) and by the Cretaceous of the Northwest-European (Fig. 5)

As noted above, from the characters of sedimentary, carbon and oxygen isotopes in the "knotty nodule" lead to the following conclusions about their origin:

1. The knotty nodule produced by sea floor early diagenetic cementation, in which the pause in pelagic sedimentation and closer to the sediment-water interface.

2. The continuous knotty nodule is formed by diagenesis associated with a longer pause in deposition, leads to development and growth of nodule in soft sediment as well as a link up of nodules and further lithification.

3. The flaser knotty nodule are clearly of post-depositional origin, that is formed during late burial diagenesis in response to a combination of dissolutional and compactional processes.



金若谷 一种深水沉积标志“瘤状结核”及其成因 图版 I

Jin Ruogu A DEEP WATER SEDIMENTARY CRITERIA

1、瘤状结核，不规则哇在结核散布于灰质泥基中，陕西大隆组上部，镜盖直径为45mm；2、连续瘤状结核，具韵律层理，箭头所示为岩化作用残余结核，文元大隆组上部（下同）；3、4、压偏瘤状结核，由压偏结核和溶解层组成，1）、压偏结核（白色），2）、复合溶解层，3）、简单溶解层，4）、次生岩脉，5）、洞穴，6）、压偏结核与溶解层界线清楚，7）、压偏结核和溶解层界线模糊；5、压偏结核中放射虫，圆形，内部构造已破坏，排列无方向性，单偏×69；6、溶解层中放射虫，椭圆形，内部具同心圆，分布具方向性，单偏×240；8、溶解层（黑色条带）不切割放射虫颗粒（圆形），单偏×100