

皖南、赣北奥陶纪笔石立体标本形成 环境的初步研究*

方一亭 边立曾 冯洪真 俞剑华

(南京大学地球科学系, 南京 210008)

王海峰

(中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008)

内 容 提 要

皖南、赣东北和赣西北地区奥陶纪笔石地层发育良好, 笔石化石丰富。宁国组和胡乐组均为笔石相地层, 但笔石的保存特点并不相同。立体保存的黄铁矿化笔石标本主要见于宁国组, 而胡乐组的笔石几乎均为薄膜标本。在比较宁国组和胡乐组在岩性、颜色、化石、矿物和元素等方面的特点后发现, 两者有较明显的差异。这表明宁国组和胡乐组形成时的环境是不同的, 前者为弱还原环境, 后者为较强的还原环境, 而在研究区内影响笔石体立体保存的主要因素为还原环境和较高的铁含量。在还原环境下, 铁可呈 Fe^{2+} 存在, 笔石体内含有硫, 死亡后经降解作用可生成 H_2S ; H_2S 和 Fe^{2+} 相结合可使笔石体黄铁矿化, 从而使笔石体硬化而呈立体保存下来。宁国组的铁含量明显高于胡乐组, 这似可以解释宁国组产有较多笔石立体标本的原因。

关键词 奥陶系 笔石 还原环境 立体笔石标本

近年来, 我国笔石工作者对含笔石页岩中的笔石立体标本的研究取得了很大进展, 引起了国际同行的关注和重视。这些立体保存的笔石标本主要采自江南地层区的浙西、皖南、赣东北和赣西北的奥陶系。上述地区的奥陶纪含笔石地层发育良好, 笔石化石丰富。产出立体保存的笔石标本的层位主要是宁国组。这类立体笔石标本多为黄铁矿化的笔石体, 黄铁矿风化后呈褐铁矿。宁国组之上, 同为笔石相的胡乐组则很难发现保存良好的笔石立体标本, 笔石体几乎均为薄膜保存。为什么同为笔石相的宁国组和胡乐组, 在笔石保存的特点上有如此明显的差异呢? 笔者依据近年来对皖南、赣东北、赣西北一带奥陶系含笔石地层的观察和研究, 就此问题作一探讨。需要说明的是, 这里所说的宁国组限于原宁国组下部, 其间的界线在皖南、赣东北和赣西北一带, 大体在 *Glyptograptus austrodentatus* 带 (N_7) 和 *Amplexograptus confertus* 带 (N_8) 之间。

宁国组和胡乐组某些特点的比较

为了研究立体笔石标本的形成环境, 需要了解产较多立体笔石标本的宁国组和几乎全为笔石薄膜标本的胡乐组的各自特点及其相互间的比较。

* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目。

1. 岩性

宁国组的岩性主要为泥质页岩，而胡乐组的岩性以硅质页岩和硅质岩为主。在皖南、赣东北和赣西北一带，大体上自 *Amplexograptus confertus* 带 (N_8) 起，硅质成分逐渐增高，*Pterograptus elegans* 带 (N_9) 至 *Nemagraptus gracilis* 带 (Hu_2) 硅质成分高，硅质岩发育，胡乐组顶部 *Dicranograptus sinensis* 带 (Hu_3)，硅质含量又逐渐降低。

2. 颜色

颜色是反映沉积岩特征的一个重要标志，宁国组和胡乐组在颜色上也有明显不同。宁国组岩石的原生色以灰绿色为主，风化后的次生色呈黄绿色、灰黄色、紫红色等多种颜色。胡乐组岩石的原生色以黑色为主，风化后的次生色主要为灰白色，在野外颇为突出，其次为褐黄色、褐红色等。胡乐组实际上已是以黑色岩系为主的地层。从非黑色岩系的宁国组到黑色岩系的胡乐组是一个逐渐变化的过程。例如在赣东北玉山，在宁国组 *Cardiograptus amplus* 带 (N_6) 已开始有黑色页岩的夹层，但主要的转变时期是在 *Amplexograptus confertus* 带 (N_8) 初期，在皖南、赣东北和赣西北一带大体同时，各地略有差异。

3. 矿物和氧化物

宁国组和胡乐组在矿物组合上的主要区别在于前者含较多粘土矿物、陆源石英和其他陆屑物质，而后者含较多自生硅质矿物，如石英和玉髓等，陆屑物质少，生物化学沉积物比例高。黄铁矿是重要的指相矿物，在宁国组和胡乐组均有细粒分散侵染状黄铁矿产出，但宁国组中的含量明显多于胡乐组。在宁国组还不难发现另一种黄铁矿产出形式：黄铁矿化的笔石体，即本文要讨论的对象立体保存的笔石标本，黄铁矿风化后呈褐铁矿，而胡乐组中则很难发现黄铁矿化的笔石标本。

在氧化物含量上，宁国组与胡乐组也有不同。从岩石化学分析结果来看，宁国组 SiO_2 含量较低而 Al_2O_3 含量较高，胡乐组则相反。宁国组样品 SiO_2 含量低于 60%，而胡乐组则高于 60%，最高可达 87.22%；宁国组样品 Al_2O_3 含量高于 20%，而胡乐组则低于 20%，最低仅为 2.55%。宁国组的 FeO 和 Fe_2O_3 含量明显高于胡乐组（表 I）。宁国组和胡乐组氧化物含量的差异与矿物组合的差异是相吻合的。

表 I 宁国组和胡乐组 FeO 和 Fe_2O_3 含量比较表
The comparing table of relative contents of FeO and Fe_2O_3 in Ningkuo and Hulo Formations from study area

地 区 和 层 位	$FeO(\%)$	$Fe_2O_3(\%)$	合计
胡乐地区宁国组顶部	1.32	5.73	7.05
胡乐地区胡乐组(3 个样品平均)	0.21	3.00	3.21
玉山地区胡乐组(5 个样品平均)	0.25	1.73	1.98
武宁地区胡乐组(3 个样品平均)	0.19	2.54	2.73

4. 沉积速率

笔石体死亡后沉积到海底，如不能被及时掩埋，或沉积速率过快都会影响笔石体的保存。从表 II 可以看出，宁国组的沉积速率高于胡乐组的沉积速率。

表 II 皖南、赣北宁国期和胡乐期沉积速率比较表
Sedimentation rate of Ningkuan Age and Huloan Age from study area

层 位		地层厚度 (m)			沉积速率 (m/Ma)			时限 (Ma)
		武宁	胡乐	玉山 (据肖承协等, 1989)	武宁	胡乐	玉山	
胡乐组	Hu ₁ —Hu ₃	10.31	28.38	6.61	0.94	2.58	0.60	11.0 (据 Carter, 1980)
	N ₉	13.81	21.53	7.93	3.37	5.25	1.93	4.1 (据 Harland, 1989)
	N ₈	19.05	57.08	9.84	5.60	16.79	5.60	3.4 (据 Harland, 1989)
宁国组	N ₄ —N ₇	106.8	146.29	47.95	12.56	17.2	5.64	8.5 (据 Harland, 1989; 取 Arenig 时限之半)

5. Eh 和 pH 值

沉积环境的氧化还原状态和酸碱度对矿物的形成及其组合特征、元素的聚集和生物遗体的保存等起着重要的控制作用。我们在研究皖赣地区奥陶系时,由王海峰测定了宁国县胡乐、武宁县李家垄和玉山县陈家坞宁国组和胡乐组的 Eh 值和 pH 值,从中可以获取一些有意义的信息(插图 1)。需要说明的是,现在测定的 Eh 值和 pH 值并非等同于当时岩石形成时的数值,因为沉积物在成岩过程中和成岩以后的漫长历史时期,多少会发生这样或那样的变化。如果岩石成岩以后没有遭受变质作用、岩浆活动和其他地质作用的强烈影响,所测定的 Eh 值和 pH 值可以大体上反映当初沉积环境的氧化还原状态和酸碱度的相对值。从插图 1 可以看出,上述 3 个地区宁国组的 Eh 值为正值,而胡乐组以负值为主。宁国组和胡乐组均为笔石相地层,缺乏底栖生物,且有黄铁矿存在,说明都为还原环境。这里测定的宁国组岩石形成时的 Eh 值正值并不说明是氧化环境,而是表明宁国组与胡乐组比较,前者形成于较弱的还原环境而后者形成于较强的还原环境。从插图 1 还可以看出, Eh 值显示的弱还原到较强还原环境的转折时期在上述 3 个地区大体上是在 *Glyptograptus austrodentatus* 带 (N₇) 和 *Amplexograptus confertus* 带 (N₈) 之间。

从上述 3 个地区 pH 值的演变曲线可以看出,宁国组的 pH 值较高,一般在 6.5—8 之间,宁国组顶部稍低,在 6—6.5 之间,而胡乐组的 pH 值大多小于 6。这并不是说岩石形成时的 pH 值就是如此,但可以说明宁国组岩石形成时的 pH 值大于胡乐组,即两组相对而言,宁国组形成于偏碱性环境,而胡乐组则为偏酸性环境。pH 值变化的转折时期,大体上也在 N₇ 和 N₈ 之间,与 Eh 值的变化是同步的。

6. 化石

宁国组和胡乐组所产化石主要为漂浮生活的笔石,缺乏底栖生物,也缺乏其他门类的漂浮动物,表现了笔石相地层中动物门类的单一性。但是两者单一性程度不同,在宁国组有时还能发现少量底栖生物化石,如在皖南胡乐地区宁国组顶部 N₇ 带有时能发现少量腕足动物化石,我们在武宁宁国组 N₆ 带发现有两层底栖三叶虫化石及少量腕足动物化石。而胡乐组除个别地区在底部发现少量底栖生物化石外,至今尚未在其他层位发现。就笔石形态来说,宁国组和胡乐组相比,胡乐组的笔石更为纤细,如 *Pterograptus*, *Nemagraptus*, *Geitonograptus*,

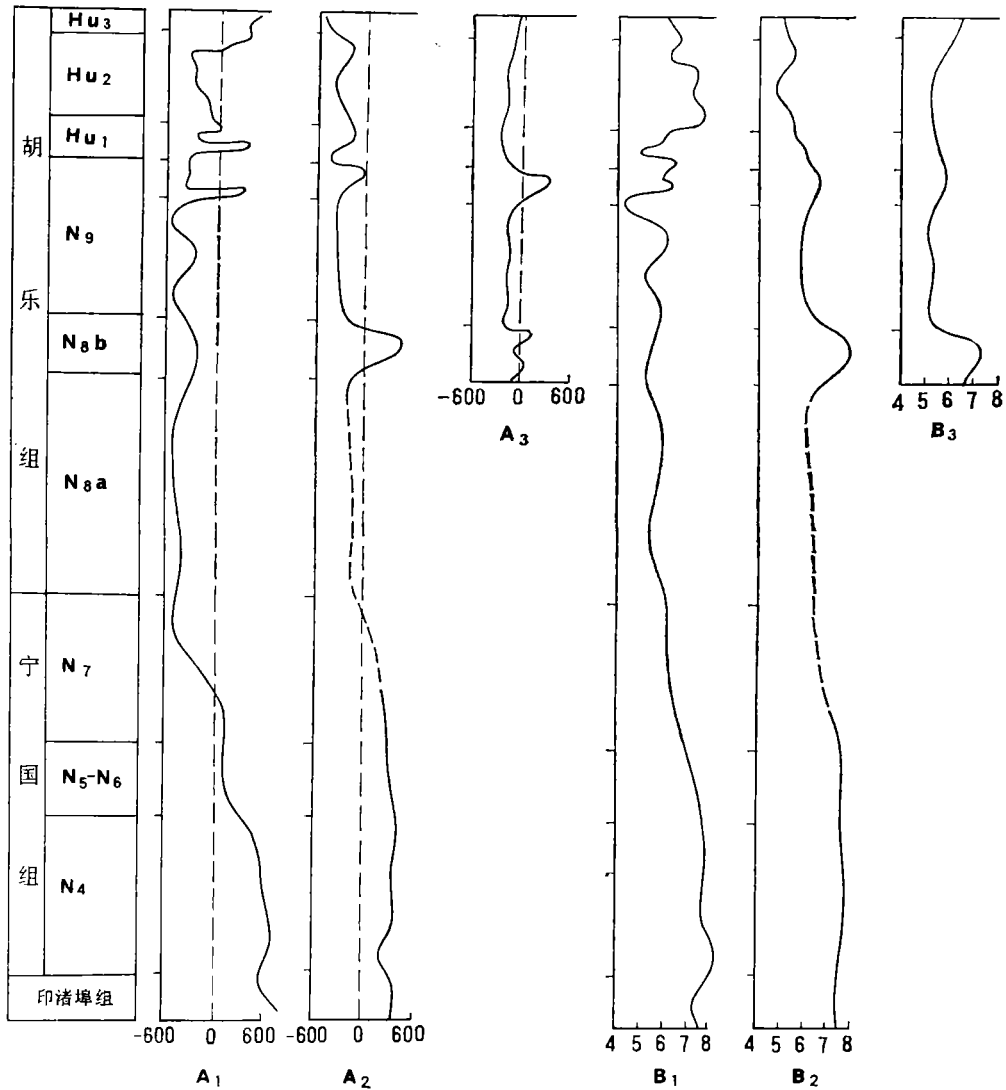


插图 1 宁国组和胡乐组的 Eh 值和 pH 值
Profile curves showing Eh and pH values of rocks in Ningkuo and Hulo Formations
from study area
A. Eh (mv); B. pH; 1. 胡乐地区; 2. 武宁地区; 3. 玉山地区。

Amphigraptus 等。这些纤细的笔石能完整地保存在地层中,表明笔石生活、死后沉积和埋藏环境的水动力条件都很微弱。胡乐组形成时的环境比宁国组更为宁静。

关于皖赣地区立体笔石标本的形成环境

从上所述可以看出,宁国组和胡乐组笔石化石保存的差异决不是偶然的,是由当时的环境所制约。

浙皖赣海盆在奥陶纪新厂期是一个氧化的沉积环境,陆源碎屑物质较多,形成了厚度较大的富产三叶虫等底栖生物的印渚埠组的沉积。当进入到宁国期,首先在赣东北,继之在皖南和赣西北等地转变为弱还原环境,底栖生物已不能适应此等环境而消失,代之以笔石为主的营漂

浮生活的动物群。当时,陆源碎屑物质供应尚未明显减少,随之而带来一定量的铁质。在还原条件下,这些铁可呈 Fe^{2+} 存在,另一方面,笔石体死亡后沉积到海底也被厌氧细菌降解而形成 H_2S , 因而笔石体黄铁矿化的机率高。笔石体因黄铁矿化而硬化,易呈立体状保存下来。大约自 *Amplexograptus confertus* 带开始,海底还原程度逐渐增强,环境更加宁静,陆源碎屑物供应明显减少,沉积物中生物化学沉积比例增大,沉积速率逐渐降低。由于陆源碎屑物质少,带来的铁质也少,又缺乏其他渠道的铁的来源,因而当时海水和海底沉积物中铁的含量少,使胡乐组的笔石在沉积和沉积物成岩初期难于黄铁矿化,笔石体不易呈立体而多以薄膜标本保存下来。

影响笔石立体保存的主要因素和形成机制的探讨

目前发现的笔石立体标本多为黄铁矿化的标本。影响笔石体黄铁矿化的因素是多方面的,我们认为主要的控制因素有两个:一是还原环境,二是铁的含量。

黄铁矿由 Fe^{2+} 和 $[\text{S}_2]^{2-}$ 组成。在还原条件下,铁可呈 Fe^{2+} 存在。硫的来源主要有二个方面,一是海底沉积物中的硫酸盐类,在有足够的有机质时,硫酸盐中的硫可在细菌的作用下被还原成 H_2S ; H_2S 与 Fe^{2+} 结合可形成黄铁矿。此类黄铁矿在宁国组和胡乐组常呈细粒分散侵染状产出。硫的另一主要来源是生物遗体,硫在生物体中广泛存在,生物死亡后,有机体中的硫在贫氧和缺氧的还原环境中由于厌氧细菌的作用可生成 H_2S , 当沉积物或海水中有一定量的 Fe^{2+} 存在,就会使生物体逐步黄铁矿化。所以生物遗骸在此种还原环境中易于黄铁矿化。笔石体一旦被黄铁矿化,也可以说是一种“硬化”,笔石体被硬化后不易被压扁而呈立体保存下来。前已述及宁国组中铁的含量明显高于胡乐组,笔石体黄铁矿化的机率大大高于胡乐组,这也许是宁国组富产立体保存的笔石标本而胡乐组却难以发现这类标本的重要原因。

所谓“黄铁矿化”,笔者认为主要包括两个方面。一是吸附作用,笔石体因降解作用而生成的 H_2S , 吸附周围环境中的 Fe^{2+} 而生成黄铁矿,这些黄铁矿首先沉淀在笔石体的表面,犹如电镀一般,有时能使笔石体表面的构造生长线等也能完好地保存下来。二是充填,笔石体内原有许多空隙,笔石体降解时也会增加不少空隙,微细的 FeS_2 分子除附在笔石体表面之外,还由表及里,充填到笔石体内部空隙中,从而使笔石体能呈立体形状保存下来。

作者在研究过程中得到冯祖钧教授,薛纪越、张景荣副教授诸多帮助,插图由徐富林同志清绘,在此深表谢意。

参 考 文 献

- 方一亭、冯洪真、俞剑华,1989: 安徽省宁国县胡乐地区的胡乐组。地层学杂志,13(4): 275—284。
——、——、——,1989: 安徽省宁国县胡乐组中奥陶世胡乐组的笔石。古生物学报,28(6): 693—903。
方邨森、任磊夫主编,1987: 沉积岩石学教程。地质出版社。
许 杰,1934: 长江下游之笔石化石。前中央研究院地质研究所专刊,甲种 4 号。
刘英俊等编著,1984: 元素地球化学。科学出版社。
安徽省地质局区域地质调查队,1982: 安徽笔石化石。安徽省科技出版社。
陈 旭、韩乃仁,1964: 江西玉山早奥陶世笔石地层。地质论评,22(2): 81—90。
——、杨达铨、韩乃仁、李罗照,1983: 江西玉山早奥陶统宁国组底部工字笔石带的笔石。古生物学报,22(3): 324—330。
——、——,1988: 江西玉山早奥陶世笔石动物群的分带及分异。地层学杂志,12(2): 112—124。
杨达铨等,1983: 笔石纲。华东地区古生物图册(一),早古生代分册,353—507。地质出版社。
张文堂等,1982: 中国奥陶系的划分及对比——中国奥陶纪地层对比表及说明书。中国各纪地层对比表及说明书, 55—72 页。科学出版社。

- 倪寓南、肖承协、陈洪治,1991: 中国东南假等称笔石。古生物学报,30(1): 57—73。
- 俞剑华、方一亭,1981: 华南下奥陶统宁国组内的一个新笔石属——香蕉笔石 *Arienigraptus*。古生物学报,20(1): 27—31。
- 、——、刘怀宝,1986: 安徽省宁国县胡乐地区含笔石地层研究新进展。中国地质科学院院报,12号,25—34。
- 韩乃仁,1986: 论香蕉笔石。桂林冶金地质学院学报,6(4): 313—317。
- 穆恩之,1980: 中国笔石的研究。古生物学报 19(2): 143—151。
- ,1983: 中国奥陶系生态地层的类型与生物地理区系。中国古生物地理区系,16—31 页。科学出版社。
- Carter, C., Trexler, J. H. and Churkin, M., 1980: Dating of graptolite zones by sedimentation rates: Implications for rates of evolution. *Lethaia*, 13: 279—287.
- Leggett, J. K., 1978: British Lower Palaeozoic black shales and their Palaeo-oceanographic significance. *Jour. Geo. Soc.*, 137(2).
- Vine, J. D., 1984: History of investigations of geochemistry of “Black Shales”, *Proceedings of the 27th International Geological Congress*, 21:85—98.

(1991 年 3 月 1 日收到)

ON FORMING CONDITION OF RELIEVED GRAPTOLITES FROM ORDOVICIAN IN SOUTHERN ANHUI, NORTHEASTERN AND NORTHWESTERN JIANGXI

Fang Yi-ting, Bian Li-zeng, Feng Hong-zhen and Yu Jian-hua

(Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210008)

Wang Hai-feng

(Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Academia Sinica, Nanjing 210008)

Key words Ordovician graptolite, reducing environment, relieved graptolites

Summary

The Ordovician System is well developed in southern Anhui, northeastern and northwestern Jiangxi, where the Ningkuo Formation (Lower Ordovician) and the Hulo Formation (Middle Ordovician) belong to the graptolite facies, in which are discovered two preserved types of graptolites. The relieved type (pyritized specimen) is mainly discovered in the Ningkuo Formation and the flattened type in the Hulo Formation. There are obvious differences between both formations in many aspects such as rock features, colour, composition of minerals and elements, and fossil assemblages, indicating that both formations were formed in different environments: the former in a weakly reducing environment, while the latter in a strongly reducing environment.

The present authors deduce that the reducing environments with a higher amount of Fe may be beneficial to the preservation of relieved graptolite fossils. In reducing environments, Fe is in the form of Fe^{2+} and under the reducing effects of bacteria, the body of graptolites can be degraded into H_2S , which can combine with Fe^{2+} to form pyrite. The higher contents of Fe in the Ningkuo Formation than those in the Hulo Formation perhaps can explain why the relieved specimens of graptolites are richer in the Ningkuo Formation than those in the Hulo Formation.