

笔石复合标准序列与宏演化

——以浙赣边区下奥陶统宁国组上部的笔石研究为例

张元动 陈 旭

(中国科学院南京地质古生物研究所, 南京 210008)

内 容 提 要

根据浙赣交界的三山地区(江山、常山和玉山)奥陶纪6个剖面宁国组中、上部的笔石在地层中的垂向分布,建立了该地区该层段的笔石复合标准序列(GCSS)。在简要叙述建立复合标准序列的原理、方法及可行性的基础上,还介绍了该地区笔石复合序列的详细建立过程。研究结果表明,在这一地史时期,笔石的宏演化速率在纵向上是不均匀的,演化型式呈现为点断平衡型式。

关键词 三山地区 宁国组 笔石复合标准序列 宏演化速率 宏演化型式

定量地层学是藉计算机技术以解决地层学的精确划分和对比的一门学科,可以说是计算机技术和传统地层学相结合的产物,因此,在近年来受到了世界各国地层学家的高度重视。定量地层学的研究方法有很多种,其中使用较多的有“地质事件的顺序分析”及“地层时间的精确对比”两种。而近年来用于笔石和含笔石地层的有笔石种的标准时限图(Composite Standard Range Chart, Cooper and Lindholm, 1990)、复合标准序列(Composite Standard Sequence, Cooper, 1992)和用沉积速率分析来校正笔石带的时间跨度(Dating of Graptolite zones by Sedimentation Sequence, Carter *et al.*, 1980)等方法。都是关于跨大陆和跨大区对比的方法。这些方法一方面使笔石地层的划分对比更精确,另一方面对笔石的演化型式、演化过程的研究起到了极大的推动作用。在我国,定量地层学的研究至今开展得还不多(龚一鸣, 1987; 徐桂荣、肖义越, 1989; 张光前、李继英, 1991),而关于含笔石地层的定量地层学研究则尚未开展。由于笔石具有演化速率快、谱系发育清楚以及分布广等特点,因此含笔石地层在理论上最适合开展定量地层学研究,近年来在国际上也倍受定量地层工作者的推崇。其中最主要的方法就是建立一个沉积盆地笔石的复合标准序列。本文试根据在三山地区测制的6条奥陶纪宁国组剖面资料,用复合对比方法,建立其笔石的复合标准序列(GCSS),并进一步探讨其对笔石宏演化的意义。

一、复合对比的原理

复合对比法最早由哈佛大学的 Shaw(1964)提出。当时主要是出于井下石油勘探的目的,试图解决地层学研究中的时间精确对比问题。他在书中对这一方法的原理和过程做了比较系统的介绍和论述。由于 Shaw 提出的方法涉及到大量的数据计算,后来 Miller(1977)在

此基础上对复合对比方法又做了一些改进,把整个过程完全图解简化,使之更为直观和简便。Edwards(1984)对该方法的可靠性进行了检验,结果证明这一方法是可靠的,说明若干地层剖面中生物的复合序列比任何单个剖面都更为真实。随后该方法被广泛使用于含笔石地层中(Cooper and Lindholm,1990)。

这一方法的主要目的是为了解决不同剖面的时间对比误差问题。这些误差至少可由以下几方面的因素造成:(1)化石在地层中的不均匀分布。如离散分布,随机分布和簇状分布等。一个用作时间对比标准的物种的首次出现在不同剖面上可能被发现在不同的层位中,传统的地层对比方法则无法确定该种首次出现的真实时间,从而造成对比上的误差。(2)剖面间出露和发育程度的不同也影响了物种首次出现的真实时间的记录,而断层重复、地层缺失和褶皱倒转等都直接影响到对该剖面的时间识别。因此在两个发育程度差别较大的剖面间进行直接的生物地层对比往往就会带来较大的时间误差。(3)采集不足或遗漏。(4)岩相均一的剖面上难以直接识别的间断和重复。这些小间断和重复在一般地层对比中往往可以忽略不计,但在高精度对比中就不容忽视,尤其是在重要的界线附近。(5)标本鉴定的误差及同物异名和异物同名的出现(插图 1)。这种误差是指对有经验的专家也难免的误差,而不是指粗制滥造的鉴定,这种难以完全避免的误差一般所占的比例都不高,通过复合对比可以使之消除或淡化。至于如要消除同物异名或异物同名带来的误差,则最好是同一盆地中不同剖面上化石的鉴定者为同一个人或采用共同的标准,否则即使通过 GCSS 的研究,也难以消除。(6)异地埋藏、再搬运和再沉积。这种情况较多地出现在含浊流、风暴沉积的地层中,必须通过沉积相和岩相分析加以识别和剔除。在典型的笔石页岩中,此类沉积甚少,但在其他一些壳相沉积地层中则较常见。

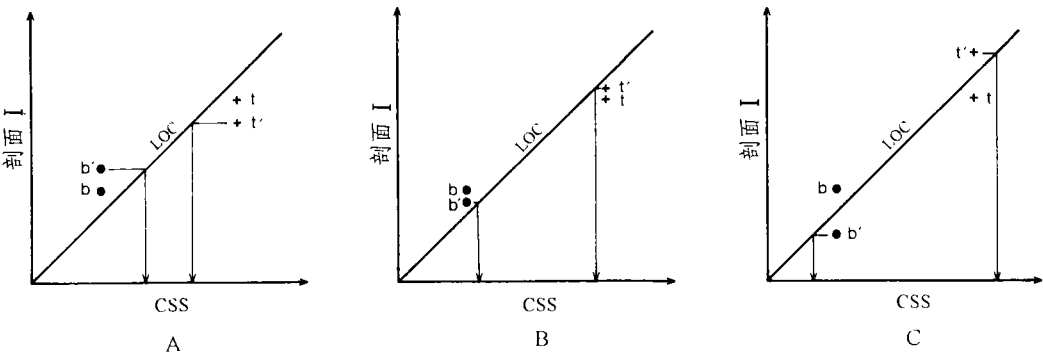


插图 1 标本误定对笔石复合标准序列(GCSS)的 3 种不同影响

The different effects of the misidentifications of the specimens in the section I on the CSS

A,B. 不影响;C. 使 CSS 上该种的延限不合理地加长。b,t. 分别代表正确鉴定的标本的首次出现和末次出现;b', t'. 分别代表误定标本的首次出现和末次出现;LOC. 对比线。

使用 GCSS 对比方法可消除含笔石地层对比中造成的大部分时间偏差。由于这种对比方法是基于一个沉积盆地或一个地区多个剖面上的化石分布来进行的,因此可以最大程度地消除上述种种误差(插图 2)。不但可以提高笔石生物地层对比的精确性,使地区的,甚至全球的笔石序列更趋真实,而且也可据此研究笔石演化过程、演化速率和演化型式。笔者在

本文中即运用这一方法,在 1990—1992 年期间对浙赣边境的常山、江山和玉山(即三山地区)宁国组上部的笔石地层 3 次进行无间断采集,并进行系统的古生物分类研究之后,进行笔石复合标准序列(GCSS)的研究,取得了比较满意的结果。

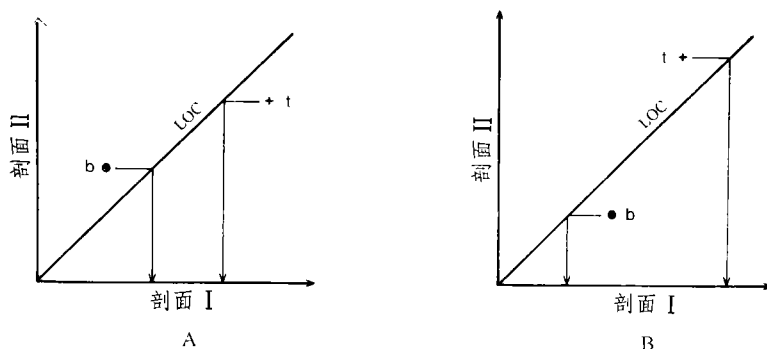


插图 2 复合对比的原理示意图

Showing the compounding principle of different sequences

A. 剖面 II 上物种的产出分布复合到剖面 I 上之后,落入剖面 I 上该种的延限范围内;B. 剖面 II 上另一物种的产出分布复合到剖面 I 上之后,使其延限扩展,从而弥补了剖面 I 上笔石序列的误差。

二、复合标准序列的建立过程

1. 原始资料的整理。分别列出已测制的各个地层剖面上笔石所有种的产出层位。以二维的图表形式排列,横坐标代表产出层位,纵坐标代表不同的种。通过该表就可以获得每个种的垂向分布特点及整个剖面上笔石的分异度。正常情况下(不穿越集群绝灭界线的剖面),笔石种的首次出现要比其末次出现更为重要;短限种比长限种更重要,因为短限种的演化速率较快,其首次出现和末次出现比长限种更容易确定,也更可靠;鉴别特征清楚、研究程度较高的种要比那些尚有争议、研究程度不够的种更重要。这些重要性的评估可以作为进行复合对比时选择物种或层位的依据。另外,还要有关于剖面的岩性、岩相变化方面的资料。通过原始数据表计算出笔石在各个剖面的种数、采集层数和物种层数等。种数用来比较不同剖面上笔石的分异度,采集层数用来表示对剖面上笔石采集的详细程度和连续程度,数值越大说明采集越系统、越详细。物种层数用来表示不同剖面的笔石发育程度和采集详细程度,从而据此确定不同剖面的发育优劣顺序,数值大说明剖面发育较好、化石较丰富、采集较齐全。为确定某一种在该地区是否具有代表性,而不是偶然产出或非正常产出(如再搬运等),可以采用该种产出的总层数乘以产出该种的剖面个数来衡量,数值越大说明越有代表性。在原始数据表的基础上,把每个种的首次和末次出现层位换算成该层位相对于该剖面底部的累积厚度。把各个剖面的这些数据组成一个复合对比过程必需的数据表(表 I)。其中 Co 代表物种在各个剖面的产出层数,供比较物种在该剖面上的丰富度和分布均匀程度用,Base 代表物种在各个剖面上首次出现层位的累积厚度值,Top 代表物种在各个剖面上末次出现层位累积厚度值。

2. 选择一个发育最好的剖面作为参照剖面。这个剖面将作为一个主要剖面,其余的剖面按发育程度的好坏顺序把生物地层数据依次进行复合叠加。这一主要剖面应尽可能具备以下条件:a. 剖面所代表的时间跨度最长,厚度最大。b. 剖面出露最完整,构造简单,断层、褶皱等要少,最好没有。c. 化石最丰富,物种分异度和丰度均较大,这可以用剖面上每个种出现的层数之和——种层数来衡量,数值越大表明化石越丰富,反之则较缺乏。d. 化石保存最好,鉴定最可靠。e. 采集最详细,这可以用采集层数来衡量。

3. 选择一个次佳的剖面,并确定其余剖面的优劣顺序。次佳的剖面将首先复合叠加到参照剖面上,这一剖面发育越好,在理论上造成 GCSS 分析误差的可能性就越小。选择该剖面及其余剖面的优劣顺序可依据选择参照剖面的几个因素来进行。

4. 求出参照剖面与第二剖面的生物地层对比线(line of correlation)。把在两个剖面上均产出的种的首次出现与末次出现的相应厚度值投到二维直角坐标上,以横轴代表参照剖面,纵轴代表第二剖面。然后根据其中的一些点来计算对比方程(correlation equation),通过方程把第二剖面的数据投影到参照剖面上。计算对比方程时应依据那些可靠和可用的点,剔除另外一些有疑问的点,以免给计算结果带入误差。这些有疑问的点是:a. 明显偏离主体分布趋势的点,这些点往往代表该种采集不全或标本鉴定有误,b. 位于未采集平面(failure-of-collection terrace)上的点,这些点极可能不代表该种真实的首次出现层位或末次出现层位,因此是不可靠的。c. 在两个剖面上均只产出于一个层位上的物种的数据点。这样的点表明该种的首次出现和末次出现是同时的,这从理论上说是不合理的,因此也不宜使用。数据点的选择应根据剖面的具体情况选择那些研究程度较好、特征明显(不易误定)、出现层数较多、延限较短的种。对比方程通过下列公式求出:

$$y = \bar{y} + \frac{\sum(y - \bar{y})(x - \bar{x})}{\sum(x - \bar{x})^2}(x - \bar{x})$$

(其中 x 代表第二剖面的坐标变量, y 代表参照剖面的坐标变量)

把选择的数据点的坐标值代入该公式即可求出这两个剖面的对比方程,然后根据方程画出对比线。在正常情况下该对比线应穿过大多数数据点的分布区。通过对比方程,就可以把第二剖面上的数据点投到参照剖面上,从而获得这二个剖面上化石的笔石复合标准序列(CSS1—2)。

应注意的是呈直线的对比线表明两个剖面的沉积速率(不考虑压实作用的差异)呈简单的直线关系,而事实上两个剖面间的对比并不一定都是直线关系,而可能是折线或对数曲线关系。因此就有必要通过线性相关系数来检验直线拟合的合理性。相关系数 r 可以通过下列方程求得:

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2} \sqrt{\sum(y - \bar{y})^2}}$$

求出相关系数后与其临界值相比较即可得出线性拟合的可行性。

5. 依次复合其余剖面。把第三个剖面按上述方法复合到 GCSS1—2 之上,即可获得 GCSS1—3,然后再复合第四个剖面,获得 GCSS1—4,如此类推,直到所有剖面全部被复合完毕,最终得到第一轮的笔石复合标准序列(GCSS1— n)。

6. 调整。GCSS1— n 获得后,已接近化石种的真实延限。但由于复合是按剖面的优劣顺

序进行的,先复合的剖面对 GCSS 有较大的影响,基本上起主导作用。从理论上说这不完全合理,包含了人为的控制因素在内。为此,在得出第一轮 GCSS 后有时还需要进行一次或多次的调整,以消除由此带来的偏差。

调整过程要比第一轮的综合对比简单。把 GCSS(1—n)作为参照剖面,然后把其余剖面逐一复合叠加即可,但应注意避免自身对比现象,如 GCSS(1—n)的某一值来源于一特定剖面,那么在调整阶段该剖面与 GCSS(1—n)对比时,该值便不能作为 GCSS(1—n)的数值,而必须从其他剖面的相应标准序列值中选一个与该值最接近的值来代替。调整过程可以进行多轮,要看调整的效果,如果调整后变化不大,说明已接近最佳值,所得结果既可作为该地区各剖面的笔石复合标准序列(GCSS)。

三、“三山”地区宁国组上部笔石的复合标准序列(GCSS)

浙赣交界的“三山”地区是我国奥陶纪含笔石地层发育最佳的地区之一。含笔石地层主要有宁国组和胡乐组,地层连续、出露良好,沉积序列稳定,宁国组主要岩性为黄绿色、黑色笔石页岩夹少数灰岩透镜层,胡乐组则为黑色硅质岩和硅质页岩,两个组均产有丰富的笔石。为结合奥陶纪“Arenig”/“Llanvirn”界线层型的研究,笔者对宁国组中上部地层进行了定量地层学的研究工作,在该地区共无间断采集并测制了 6 条宁国组剖面,运用上述的复合对比方法,建立了该地区“Arenig”/“Llanvirn”界线上、下笔石的复合标准序列(GCSS)。

目前国际上对“Arenig”/“Llanvirn”的分界认识不一。笔者主张以 *Undulograptus austrodentatus* 带的底界作为这一界线。由于“三山”地区这一界线上、下地层发育良好,具有多条笔石序列连续的剖面,而 GCSS 的研究可以大大提高这一界线与全球对比的精确度,并可以推动这一界线上、下相应的笔石宏演化的研究。

笔石相地层的沉积序列要比壳相沉积稳定,如不含或含有较少的浊流和风暴沉积等,且所测的剖面均位于同一沉积盆地——浙赣盆地之中。不同剖面其地层的沉积速率相对变化不大,加上在该地区剖面出露良好、构造简单,笔石产出层位连续,因此非常适合进行 GCSS 的分析研究。

本文进行复合对比的 6 条剖面包括江山的黄泥岗、丰足、横塘、拳头棚,常山的黄泥塘和玉山的陈家坞。各剖面进行复合对比所需的数据见表 1。

根据剖面发育程度的优劣顺序,选择常山的黄泥塘剖面(种层数=133)为参照剖面,江山横塘剖面(种层数=125)为第二剖面,其余 4 个剖面的顺序依次是陈家坞、黄泥岗、丰足和拳头棚剖面。黄泥塘剖面 and 横塘剖面首先进行对比(插图 3),对比方程通过计算后得出为 $N = 1.3433906T - 2.861158$,其中 N 代表黄泥塘剖面上的相应值, T 代表横塘剖面上与层位相应的累积厚度值。把横塘剖面各个数据点代入该方程后即得其在黄泥塘剖面的相应值,把这些相应值与黄泥塘剖面本身的数值相比,如某种的 Base 比黄泥塘的相应值低,则取横塘的相应值,如某种的 Top 比黄泥塘的相应的 Top 值高,则取横塘的相应值,以此类推,在经过逐一比较后即得出复合了横塘剖面之后的 GCSS1—2。

两剖面的线性相关系数经计算后得出 $r = 0.7099$,将该值与相关系数临界值 0.44(按 50 个样品计,取 99.9% 的置信率,查表可得)相比,要明显超出,说明二者线性相关显著,因此

表 I 建立三山地区宁国组中、上部笔石复合标准序列必需的生物地层分布数据表

The faunal and stratigraphical data of the six sections of the middle-upper part of Ningkuo Formation in JCY area

| Species | No | Huangnitang | | | Hengtang | | | Chenjiawu | | | Huangnigang | | | Fengzu | | | Quantoupeng | | |
|--------------------------|----|-------------|-------|-------|----------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------------|------|-------|--------|------|-----|-------------|------|------|
| | | Co | Base | Top | Co | Base | Top | Co | Base | Top | C | Base | Top | Co | Base | Top | C | Base | Top |
| <i>U. sinodentatus</i> | 1 | 4 | 31.38 | 36.48 | 1 | | 30.61 | 2 | 13.75 | 17.95 | 1 | 33.1 | 33.9 | 1 | 0.6 | | | | |
| <i>U. curvethecatus</i> | 2 | | | | | | | | | | | | | | 2 | 0.6 | 4.8 | | |
| <i>U. austrodentatus</i> | 3 | 29 | 31.78 | 52.59 | 12 | 26.79 | 32.98 | 12 | 14.35 | 22.55 | 2 | 33.9 | 37.1 | 11 | 0.6 | 9.7 | 3 | 1.56 | 3.68 |
| <i>U. reflexus</i> | 4 | 2 | 42.31 | 44.81 | 1 | | 31.84 | 1 | | 17.45 | | | | | | | 1 | | 1.56 |
| <i>U. formosus</i> | 5 | 10 | 33.85 | 52.59 | 6 | 29.77 | 36.99 | 5 | 15.95 | 17.95 | 1 | | 37.16 | 3 | 6.6 | 9.7 | 4 | 0.78 | 3.68 |
| <i>U. uniformis</i> | 6 | 5 | 42.31 | 52.59 | 4 | 29.77 | 32.98 | | | | | | | 8 | 0.6 | 10. | | | |
| <i>U. sinicus</i> | 7 | 5 | 33.85 | 49.11 | 2 | 30.61 | 32.25 | 2 | 17.45 | 17.95 | | | | 3 | 1.7 | 6.6 | 2 | 0.78 | 3.68 |
| <i>U. rigidus</i> | 8 | 6 | 35.98 | 40.58 | 4 | 29.77 | 32.98 | 1 | | 15.55 | | | | | | | 1 | | 2.12 |
| <i>U. nanus</i> | 9 | 4 | 33.85 | 44.14 | 4 | 30.61 | 32.98 | 6 | 16.95 | 20.77 | | | | 1 | | 2.8 | | | |
| <i>U. sp.A</i> | 10 | 5 | 35.98 | 52.59 | 5 | 27.16 | 32.98 | 3 | 15.95 | 16.95 | 1 | | 37.16 | 1 | | 7.9 | | | |
| <i>C. ampilus</i> | 11 | 8 | 31.38 | 35.08 | 12 | 26.79 | 32.98 | 11 | 13.75 | 18.75 | 2 | 33.9 | 36.2 | 5 | 0.6 | 3.7 | | | |
| <i>C. giganteus</i> | 12 | 4 | 32.25 | 35.58 | 6 | 26.79 | 32.69 | 5 | 15.15 | 16.95 | | | | 1 | | 0.6 | | | |
| <i>C. intermedius</i> | 13 | 2 | 32.25 | 35.98 | 4 | 27.48 | 32.69 | 4 | 15.15 | 18.75 | | | | 2 | 0.6 | 1.2 | | | |
| <i>C. ordovicicus</i> | 14 | 8 | 32.25 | 42.71 | 8 | 29.03 | 33.76 | 7 | 15.95 | 22.15 | 1 | | 33.9 | 1 | | 0.6 | | | |
| <i>C. orodus</i> | 15 | 1 | | 33.00 | 5 | 26.23 | 32.25 | | | | | | | | | | | | |
| <i>C. sp.A</i> | 16 | 1 | | 35.98 | 6 | 27.48 | 32.69 | 5 | 14.35 | 19.55 | | | | | | | | | |
| <i>G. fimbriatus</i> | 17 | 3 | 42.71 | 45.51 | | | | | | | | | | 1 | | 8.8 | 2 | 2.12 | 5.24 |
| <i>G. acanthus</i> | 18 | 4 | 18.00 | 42.71 | 3 | 30.61 | 32.25 | 1 | | 17.45 | | | | 2 | 2.8 | 6.6 | 2 | 2.12 | 3.68 |
| <i>Cr. antennarius</i> | 19 | | | | 3 | 29.77 | 32.25 | 2 | 15.95 | 17.95 | | | | 1 | | 3.7 | | | |
| <i>P. m. janus</i> | 20 | 1 | | 37.53 | 4 | 25.11 | 29.77 | 7 | 11.85 | 17.45 | 5 | 22.5 | 29.0 | 1 | | 1.7 | | | |
| <i>P. m. koi</i> | 21 | 2 | 32.25 | 35.98 | 2 | 25.11 | 26.23 | 5 | 10.70 | 14.35 | | | | | | | | | |
| <i>P. m. harrisi</i> | 22 | 1 | | 31.18 | 1 | | 26.23 | 1 | | 13.05 | 1 | | 24.9 | | | | | | |
| <i>A. jiangxiensis</i> | 23 | 7 | 33.85 | 43.94 | 6 | 26.79 | 32.25 | 1 | | 15.15 | 2 | 22.5 | 33.9 | 4 | 1.7 | 7.9 | 4 | 1.56 | 5.24 |
| <i>A. zhejiangensis</i> | 24 | 3 | 32.25 | 40.58 | 6 | 26.79 | 32.25 | 4 | 13.75 | 15.95 | 1 | | 33.9 | 4 | 0.6 | 6.6 | 1 | | 3.68 |
| <i>A. dumosus</i> | 25 | | | | 3 | 25.11 | 29.77 | 2 | 13.05 | 15.15 | 1 | | 23.7 | 4 | 0.6 | 6.6 | 1 | | 1.56 |
| <i>P. cf. bellulus</i> | 26 | 1 | | 43.94 | | | | | | | | | | | | | | | |
| <i>C. (P.) cor</i> | 27 | 1 | | 31.38 | 2 | 25.11 | 26.23 | 1 | | 11.85 | | | | | | | | | |
| <i>C. (P.) ovatus</i> | 28 | 1 | | 31.38 | 1 | | 26.23 | | | | | | | | | | | | |
| <i>C. (P.) obesus</i> | 29 | | | | 2 | 25.11 | 26.23 | | | | | | | | | | | | |
| <i>E. clavus</i> | 30 | 2 | 31.18 | 32.5 | 2 | 25.11 | 26.23 | 1 | | 10.7 | | | | | | | | | |
| <i>E. uniformis</i> | 31 | 2 | 31.18 | 31.78 | 3 | 25.11 | 26.79 | 4 | 11.20 | 13.75 | 1 | | 20.0 | | | | | | |
| <i>E. nanus</i> | 32 | 2 | 31.18 | 31.38 | 3 | 25.11 | 26.79 | 1 | | 10.70 | | | | | | | | | |
| <i>D. harundo</i> | 33 | 2 | 31.18 | 31.38 | 4 | 25.11 | 32.98 | 2 | 11.85 | 13.75 | 2 | 5.13 | 17.8 | 1 | | 0.6 | | | |
| Number of Species | | 29 | | | 30 | | | 26 | | | 20 | | | 13 | | | 10 | | |
| Num. of Collection | | 47 | | | 21 | | | 26 | | | 13 | | | 11 | | | 5 | | |
| Num. of Species Level | | 133 | | | 125 | | | 96 | | | 57 | | | 22 | | | 21 | | |

用线性方程进行对比是完全可行的。

其余的 4 个剖面照前文所述步骤按顺序依次进行复合,最后得出 6 个剖面第一轮 GCSS。随后再经过一轮的调整,发现数值已变动不大,因此未再进行第二轮的调整复合。三山地区宁国组上部调整后的 GCSS(1—6)见表 II。把这些数值人工投到图上即可获得 GCSS 的直观图(插图 4)。

四、“Arenig”/“Llanvirn”界线上下笔石宏演化研究

根据复合对比研究得出的三山地区宁国组中、上部笔石复合标准序列,一方面促进了该段地层笔石带的准确划分及该地区与其他地区的地层精确对比,另一方面极大地推动了对笔石化速率、演化过程及演化模式的研究。

三山地区 6 个剖面之间的相对沉积速率是稳定的。剖面之间的对比呈显著线性,表明虽然不同剖面处于盆地的不同部位,绝对沉积速率有差异,但相对沉积速率在地质历程中却是比较稳定的,不存在河流三角洲的差异沉积及浊流沉积和风暴沉积等,也不存在层间的间断和缺失。因此各个剖面上笔石的纵向分布基本上反映了笔石的正常埋藏过程和真实的发生顺序。这一 GCSS 基本上代表了三山地区“Arenig”/“Llanvirn”界线上下笔石的垂向分布顺序。由于这 6 个剖面在三山地区都是属于发育较好的、具有代表性的剖面,因此,由此而获得的 GCSS 应该反映了该地区当时的真实情况,今后如在浙赣盆地中有更多的其他无间断采

集的连续剖面,如在皖南宁国、江西武宁修水等地获得类似的剖面,并复合到这一序列之上,则可以使这一序列更趋于真实。

从上述三山地区的 GCSS 分析可以看出,三山地区宁国组“Arenig”/“Llanvirn”界线上下的笔石的分布有 3 个主要的时间界面:1. *Exigraptus* 的首次出现。同时出现的还有早期具有明显剑柄构造的 *Pseudisograptus manubriatus koi* 等。2. *Cardiograptus* 和 *Undulograptus* 的首次出现。3. *Glossograptus* 和 *Cryptograptus* 的首次出现。而笔石种的末次出现却没有明显的相应时间界面,表明在这段时间间隔内,笔石的成种作用在演化中占了主导地位。这些时间界面因此可以作为划分笔石带和亚带的依据。

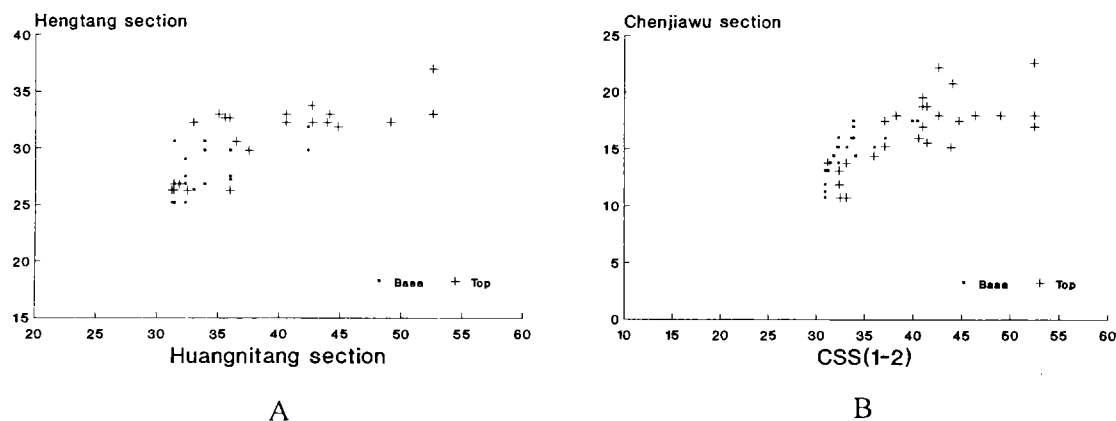


插图 3 三山地区黄泥塘、横塘及陈家坞三个剖面笔石延限的复合对比图

The correlation of the three sections by means of graptolite ranges

A. 横塘剖面与黄泥塘剖面(参照剖面)的复合对比; B. 陈家坞剖面与 GCSS(1—2)(即图 A 的结果)的复合对比。

奥陶纪笔石带的延限是很不均匀的。根据 GCSS 划分的 2 个跨越“Arenig”/“Llanvirn”界线的笔石带,即 *Cardiograptus* (*Procardiograptus*) *cor* 带(下)和 *Undulograptus austrodentatus* 带(上),带和带之间的厚度相差很明显,如果奥陶纪按 71Ma 计,通过在 GCSS 上每个带所占的厚度比则可以推算出各个带大致的时间跨度, *C. (P.) cor* 大约相当于 0.51Ma,而 *U. austrodentatus* 则有 3.57Ma。由此可见笔石带并不像以往我们认为的那样呈现大致均匀的分布。相反,不同带的延限相差很悬殊。这种现象并不仅仅在“Arenig”/“Llanvirn”界线上出现,整个奥陶纪地层的笔石带在延限上都表现出极大的差异,如 Cooper (1992)根据斯堪的纳维亚的 GCSS,计算出整个 Yapeenian 阶(只包括两个带)的时限是 0.6Ma,而更早一些的 Lancefieldian 阶的第二个带 La2 却占了 14.5Ma。由于奥陶纪的笔石带大都是根据某一特征种、属的出现而建立的,如果新种产生得快,那么相应的笔石带就密一些,相反,如果很长时间没有新的物种形成,那么这个带延限必然就长。延限相差的悬殊应该表明了在整个奥陶纪笔石的演化速率也是很不均匀的。

从三山地区的 GCSS 还可以看出,“Arenig”/“Llanvirn”界线上下的笔石演化是由短间隔内快速成种作用和长期的演化停滞交替为其演化模式。从 *Exigraptus* 的发生到

表 1 三山地区 6 条宁国组剖面笔石序列复合对比的数据结果 CSS1—6 代表首轮复合对比后的笔石复合标准序列 The standard equivalent ranges of all the species in the five compounded sections and the final GCSS(1—6)

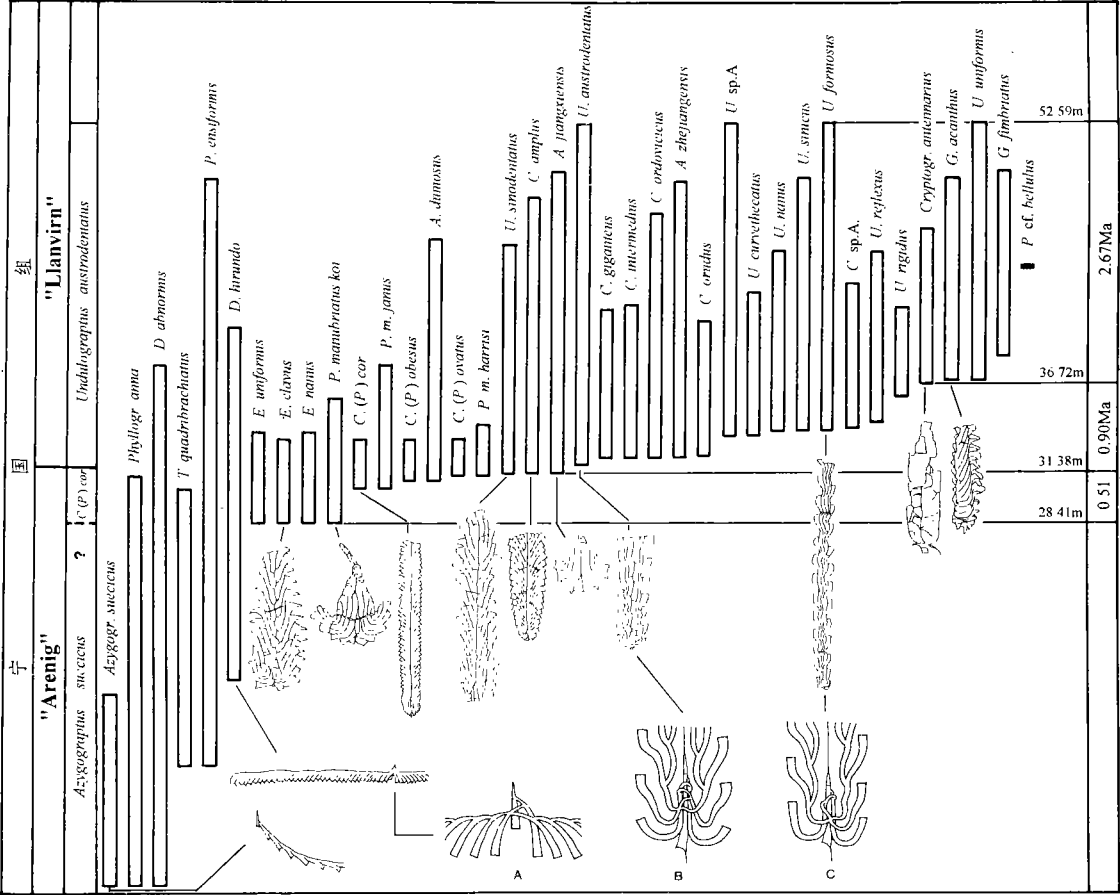


插图 4 三山地区宁国组中、上部笔石的复合标准序列(GCSS)

The Graptolite Composite Standard Sequence (GCSS) of the middle-upper Ningkuo Formation in JCY area

A. *Didymograptus hirundo* 的始端发育型式, th_1^2 为双芽胞管;

B. *Undulograptus austrodentatus* 的始端发育型式, th_2^2 为双芽胞管;

C. *Undulograptus formosus* 的始端发育型式, th_1^2 为双芽胞管。

Glossograptus 和 *Cryptograptus* 的发生,共经历了大约 1.41Ma,这期间共有 27 个新的笔石种产生,而从 *Glossograptus* 及 *Cryptograptus* 的出现到 *Undulograptus* 的消失经历了 2.67Ma,其间却只有 5 个新的笔石种产生。这表明,在这两个时期中,前者的成种速率明显高于后者。因此在“Arenig”/“Llanvirn”界线上下笔石呈现出明显的快速演化或快速成种作用,而随后却产生了明显的演化停滞。

如果说,在奥陶纪时期全球的笔石演化是同步的话,那么基于本文 GCSS 之上的宏演化研究极可能揭示了与传统观点明显不同的另一种笔石演化型式。以往大都认为笔石的演化基本上是匀速的(除奥陶纪末的集群绝灭外),考虑和研究得更多的是笔石的演化途径问题,而很少涉及到演化过程和演化型式,三山地区的 GCSS 恰好提供了这一领域研究的良好实例。

笔石的宏演化史有三大事件,第一是漂浮笔石的发生,第二是双列攀合笔石的发生,第

三是单笔石类的发生(Bulman, 1963)。其中双列笔石的起源至今仍众说纷纭,究其主要原因是长期以来不了解这类笔石的始端发育型式。后来, Mitchell (1987)研究了双列攀合笔石的始端发育型式,陈旭和韩乃仁(1988)根据采自江山立体黄铁矿化的早期双列笔石的标本——*Undulograptus austrodentatus* 标本的研究,表明这些早期双列笔石的始端发育型式非常复杂,以 th_2^2 为双芽胞管,始端的 2—3 对胞管具有向下生长的初始阶段。笔者当前的许多有关标本也显示了与此完全一致的特征。

笔石的宏演化在以前一直被认为是体现在笔石体始端发育型式从简单到复杂的演化过程中的,如双芽胞管逐渐向后推移。三山地区的双列笔石出现之前的笔石的确具有较原始的特征,如以 th_1^1 或 th_1^2 为双芽胞管,但在其后出现的、与之有密切亲缘关系的一些笔石,如 *Eoglyptograptus dentatus*, 却也具有较原始的始端发育型式,以 th_2^2 为双芽胞管。这与传统的观点正好相反,说明在笔石的演化过程中并不都是从始端发育简单到复杂,也不乏反向的例证。随之而来的另一个问题是早期双列笔石与其之前的笔石之间,在始端发育型式的演变上是否存在间断的问题。双列笔石发生之前,最高级的始端发育型式是 isograptid 式,即以 th_2^2 为双芽胞管,因此无论是双列笔石来自 *Isograptus* 的观点(Thomas, 1960),还是来自 *Tetragraptus* 的观点(Bulman, 1936),或者是源于 *Meandrograptus* 的看法(Jenkins, 1980),都无法解释二者之间找不到中间类型的事实。根据对三山地区诸多剖面的系统采集,发现略早于 *Undulograptus* 出现的 *Exigraptus* 也具有高级复杂的始端发育型式,以 th_2^2 乃至 th_3^3 为双芽胞管。

早期双列笔石的突然出现,或者说点断平衡的演化型式,极可能是由于这一时期笔石的快速成种作用造成的。由于正笔石类都是营漂浮生活的,要研究它们的成种方式和成种路线,如是否属于边域成种或异域成种却很困难,但笔石的成种和演化速率要远比在这一时期之前和之后的演化速率高,表明这可能是一个快速的分支成种时期。相应地,这一时期笔石种的延限较短,说明绝灭率也相对较高。由于快速的分支成种作用,导致了演化中间类型的缺失或极少保存,从而造成了我们在地层中看到的双列笔石的“突然”出现。由此可见,奥陶纪“Arenig”—“Llanvirn”时期笔石的演化速率是很不均匀的,这种演化速率的不均匀进一步导致了奥陶纪笔石宏演化的点断平衡格局。

笔石宏演化速率的变化主要与海平面升降有关。以 *Undulograptus austrodentatus* 为代表的早期双列笔石,个体狭小而数量奇多,应该生活在海水的表层。Arenig 晚期是一个全球海侵时期(Fortey, 1984; 陈旭、丘金玉, 1986; 陈旭、杨达铨, 1988),当海平面上升时,这类笔石便高速演化、高度繁殖,并占领了由于海平面上升而造成的海水表层生态空间,这就是“Arenig”/“Llanvirn”界线上下快速的分支成种时期。随后由于居群结构逐渐稳定下来,物种基本保持不变,成种率低,笔石演化进入了相对稳定的停滞时期。

五、结 论

综上所述,可以得出以下几条主要结论:

1. 三山地区的 GCSS 基本上代表浙赣盆地在这一时期笔石的真实演化序列,据此进行的地层划分和对比比在任何一条单独剖面上进行更为精确。这一序列可以和扬子区及其他

地区进行精确对比或复合。

2. 三山地区宁国组中、上部 GCSS 的研究表明,在早期双列笔石所处的“Arenig”—“Llanvirn”层段中,地层记录是完整和连续的,双列笔石与其之前的笔石之间缺失中间类型是由这段时期笔石的快速分支成种作用造成的。

3. 通过三山地区“Arenig”/“Llanvirn”界线上下笔石宏演化的研究表明,笔石的演化速率很不均匀,通常是短暂快速的分支成种与漫长的演化停滞互相交替,从而使笔石的宏演化表现为点断平衡型式。

4. 笔石宏演化速率的变化可能主要与海平面的升降有关。

参 考 文 献

刘季辰、赵亚曾,1927: 浙江西南部地质。地质汇报,第9号。

朱庭祐、孙海寰,1924: 浙江地质调查所简报。1—3号。

朱庭祐、徐瑞麟、王镇屏,1930: 浙江西北部地质。两广地质调查所年报,第三卷,上册,1—30页。

陈旭、丘金玉,1986: 宜昌奥陶纪的古环境演变。地质学杂志,10(1):1—15。

陈旭、杨达铨,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。

陈旭、韩乃仁,1988: 利用扫描电镜对 *Pseudoclimacograptus* (*Undulograptus*) *formosus* Mu and Lee 的研究。古生物学报,27(2):142—149。

张光前、李继英,1991: 定量岩石地层学。161页。中国地质大学出版社。

徐桂荣、肖义越,1989: 定量地层学。王瑞荣、张守信等编著:现代地层学,104—129页。中国地质大学出版社。

龚一鸣,1987: 岩相剖面的定量历史沉积学分析。地球科学,12:613—620。

Bulman, O. M. B., 1936: On the Graptolites prepared by Holm. Part VI. The Graptolite Fauna of the Lower *Orthoceras* Limestone of Hälluden, Öland, and its bearing on the Evolution of the Lower Ordovician Graptolites. Arkiv för Zoologi, 28A(17):1—107.

Bulman, O. M. B., 1963: The evolution and classification of the Graptoloidea. Quart. Jour. Geol. Soc. London, 119:401—418.

Carter, C. and Taileur, I. L., 1984: Ordovician graptolites from the Baird Mountains, Western Brooks Range, Alaska. Jour. Paleontol. 58(1):40—57.

Cooper, R. A., 1992: A relative timescale for the Early Ordovician derived from depositional rates of graptolite shales. In Webby, B. D. and Laurie, J. R. (eds.): Global perspectives on Ordovician Geology, p. 1—22.

Cooper, R. A. and Lindholm, K., 1990: A precise worldwide correlation of early Ordovician graptolite sequences. Geol. Mag., 127(6):497—525.

Edwards, L. E., 1984: Insight on why Graphic Correlation (Shaw's Method) works. J. Geol., 92(5):583—597.

Fortey, R. A., 1984: Global earlier Ordovician transgressions and regressions and their biological implications. In Bruton, D. L. (eds.): Aspects of the Ordovician System. P. 37—50. Palaeontological Contributions from the University of Oslo.

Jenkins, C. J., 1980: *Meandrograptus schmalenseeii* and its bearing on the origin of the diplograptids. Lethaia, 13:289—302.

Miller, F. X., 1977: The Graphic Correlation Method in Biostratigraphy. In Kauffman, E. G. and Hazel, J. E. (eds.): Concepts and Methods of Biostratigraphy. Dowden, Hutchinson and Ross, Inc.

Mitchell, C. E., 1987: Evolution and Phylogenetic Classification of the Diplograptacea. Palaeontology, 30(2):353—405.

Shaw, A. B., 1964: Time in Stratigraphy. 365pp. McGraw-Hill Book Company.

Thomas, D. E., 1960: The Zonal Distribution of Australian Graptolites. Jour. and Proc. Roy. Soc. New South Wales, 74(1):1—58.

Vandenberg, A. H. M. and Cooper, R. A., 1992: The Ordovician graptolite sequence of Australasia. *Alcheringa*, **16**: 33—85.

[1994年7月20日收到]

GRAPTOLITE COMPOSITE STANDARD SEQUENCE AND MACROEVOLUTION

——WITH GRAPTOLITES FROM NINGKUO FORMATION OF
ZHEJIANG-JIANGXI BORDER AREA AS AN EXAMPLE

Zhang Yuan-dong and Chen Xu

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

Key words: Arenig/Llanvirn boundary, graptolites, Composite Standard Sequence, duration of graptolite zones, evolution rate

Summary

The method of establishing a Graptolite Composite Standard Sequence (GCSS) has been considerably applied to quantitative biostratigraphy researches. In order to obtain the relatively precise range of the Ordovician graptolite species, Cooper and Lindholm (1990), and Cooper (1992) have tried to set up the GCSS for the most important Ordovician species, following the methods of Shaw (1964) and Miller (1977). Unfortunately, the GCSS study has not been carried out in China over the past years. The present GCSS study is based on the systematic and continuous collection of the early Ordovician graptolites from 6 “Arenig” to “Llanvirn” sections in Jiangshan and Changshan of Zhejiang and Yushan of Jiangxi (JCY area). The results turn out to be quite significant for the precise biostratigraphical divisions and correlations, together with an important bearing on the macroevolution of graptolites within this interval. The Huangnitang Section (Changshan) is considered as the reference section, while the other five are Hengtang (Jiangshan), Chenjiawu (Yushan), Fengzu (Jiangshan), Huangnigang (Jiangshan), and Quantoupeng (Jiangshan) in order of superiority. The present GCSS study is limited to the strata across the base of the *Undulograptus austrodentatus* Zone which is proposed by the authors as a candidate boundary stratotype for Ordovician subdivisions, with the results as shown in the text-figures of the Chinese text. This study comes to the following conclusions:

1. The evolutionary rate of the Ordovician graptolites is not uniform, with a large number of genera and species occurring in the zones across the “Arenig”-“Llanvirn” boundary, but only a few species occurring within the long interval above. A rapid specia-

tion of graptoloids took place just before and at the beginning of the *Undulograptus austrodentatus* Zone.

2. The Ordovician graptolite zones through major bioevents are obviously uneven with the *Cardiograptus* (*Procardiograptus*) *cor* Zone lasting only 0.51Ma, while the *Undulograptus austrodentatus* Zone as long as 3.57Ma. This calculation agrees approximately with that of Cooper (1992). The preciseness of the calculation depends on the number of appropriate sections on which the GCSS analysis is based, the more, the better.

3. The absence of the intermediate link between the biserial graptoloids and its possible ancestors is indicated by results of the GCSS analysis. The early biserial graptoloids usually bear the advanced proximal development type with th_2^2 or even th_3^1 as their dicalycal theca, whereas their possible ancestors, such as tetragraptids and isograptids, take th_1^1 or th_1^2 as the dicalycal theca. The intermediate development type has not yet been found from the horizons in between. This differs from the traditional gradual evolutionary trend which is described as the gradual delaying of the dicalycal theca. The sudden appearance of the diplograptids might be involved in punctuated equilibrium rather than phyletic gradualism.