中国科学: 地球科学 2013 年 第 43 卷 第 6 期: 1047 ~ 1056
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

# 贵州安顺长兴阶放射虫动物群及其与 TOC 和古生产力的关系

向宇[①], 冯庆来[①*], 沈俊[②], 张宁[②]

① 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074;
② 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074
* 联系人, E-mail: qinglaifeng@cug.edu.cn

收稿日期: 2012-07-04; 接受日期: 2012-11-20; 网络版发表日期: 2013-05-29
国家自然科学基金项目(批准号: 40839903, 40921062)和地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费资助

**摘要** 贵州新民剖面大隆组的微化石丰富, 保存较好. 其中, 放射虫鉴定出 7 属 9 种, 全部为球形放射虫, 未发现阿尔拜虫类和十字多囊虫类分子, 反映该剖面为相对浅水环境条件下沉积形成; 海绵骨针鉴定出 9 种类型. 通过对放射虫壳体和海绵骨针个体的定量统计, 以及 TOC 和地球化学元素的分析发现: 该放射虫组合与 TOC 之间存在很好的对应关系, 表明 *Copicyntra* 和 *Paracopicyntra* 两属为代表的球形放射虫组合可以作为指示硅-泥质岩层序古生产力的一种替代指标. 但放射虫、海绵骨针丰度与生物硅之间相关性较差, 可能是生物硅溶解和沉积过程中受到海水循环的影响.

**关键词**
贵州
长兴阶
放射虫
TOC
生物硅
古生产力

从国内油气资源勘探来看, 近年来我国开始了油气资源的第二次创业, 把主战场锁定在古生代海相地层的油气勘探上[1,2]. 对于任一个勘探区段, 烃源岩的存在与否, 是能否找到油气的关键[3]. 我国许多海相烃源岩的特点之一, 就是放射虫、硅质岩与烃源岩密切共生, 例如华南四套海相区域主力烃源岩, 包括下寒武统牛蹄塘组及相当层位地层[4~6]、上奥陶统五峰组[7,8]、中二叠统孤峰组和上二叠统大隆组[9~11]都含有硅质岩. 塔里木盆地下寒武统玉尔吐斯组也是硅泥质岩系烃源岩[12]. 但是, 放射虫是不是古生代烃源岩有机质的主要母体生物之一? 放射虫能否作为古生产力研究的替代指标? 哪些放射虫是高古生产力的标志属种? 这都是含硅质岩系烃源岩和古海洋研究亟待解决的地球科学难题.

贵州省安顺市普定地区新民剖面以硅质泥岩、硅质灰岩、泥质岩、含泥硅质岩为主, 放射虫、牙形石和海绵骨针等微体生物化石丰富, 保存较好; 岩石颜色偏黑, 有机质含量偏高, 是研究放射虫动物群及其与古生产力关系的理想剖面. 为此, 在 2009 和 2010 年间, 笔者三次赴该剖面进行地层学、沉积学、古生物学和地球化学研究. 本文综合硅质生物(放射虫和海绵)的丰度、分异度和古生产力地球化学指标, 研究放射虫和海洋初级生产力的关系. 以期为硅-泥质岩系古生产力研究和烃源岩评价提供新的方法.

## 1 剖面概况

新民剖面位于贵州省安顺市西北部的猫洞乡新

中文引用格式: 向宇, 冯庆来, 沈俊, 等. 贵州安顺长兴阶放射虫动物群及其与 TOC 和古生产力的关系. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 1047–1056
英文引用格式: Xiang Y, Feng Q L, Shen J, et al. Changhsingian radiolarian fauna from Anshun, Guizhou, and its relationship to TOC and paleo-productivity. Science China: Earth Sciences, 2013, doi: 10.1007/s11430-013-4615-4

民村附近(图 1). 该剖面为一个露天采石场, 露头新鲜, 层序清晰, 剖面总厚度为 13 m, 可以划分为 9 个层. 其中, 从第 1 层到第 5 层, 地层以黑色和灰黑色硅质泥岩、硅质灰岩、钙质泥岩、泥质岩、含泥硅质岩为主, 与华南地区上二叠统大隆组的岩性特征相似, 而且发现的放射虫、有孔虫、菊石、牙形石等化石也相当于长兴阶大隆组($P_3d$), 所以把新民剖面的第 1 层到第 5 层划大隆组. 从第 6 层到第 9 层, 地层主要是灰绿色、黄绿色泥岩, 与下伏的大隆组整合接触, 被对比为罗楼组($T_1l$) (图 2).

该剖面含多门类生物化石. 大化石有古植物、菊石类、腕足类和双壳类等, 微体化石主要包括放射虫、硅质海绵骨针、有孔虫、牙形石、介形虫等. 牙形石是研究海相二叠系、三叠系地层的标准化石, 尤其是 *H. parvus* 的出现被认为是三叠纪的开始[13], 新民剖面牙形石自下而上为: *Clarkina zhangi* 带、*C. yini* 带、*C. meishanensis* 带和 *H. parvus* 带. *C. meishanensis* 带见于 5-3 层的下部, *H. parvus* 带见于 5-3 层的上部. 所以, 我们把二叠纪-三叠纪的界限定在 5 层的内部(图 2).

## 2 实验方法及实验结果

从底部至顶部逐层采集了 74 件样品, 用于微体化石研究. 为了定量统计放射虫和海绵骨针数量, 每件样品称取 150 g, 先将其碎成直径 2 cm 大小岩块, 然后装入塑料网袋, 浸泡在 3%左右的氢氟酸溶液中, 在室温条件下每 8 h 换洗一次. 洗出的泥状物放入蒸馏水中, 岩石残渣继续浸泡溶蚀. 如此重复, 直至样品完全溶解. 泥状物用 300 目(筛孔直径为 0.054 mm)筛子轻轻淘洗, 洗净后装入小玻璃瓶, 再放入烘箱烘干. 将处理好的样品均匀的铺在玻璃板上, 然后在双目镜下逐行统计. 统计分为 4 类: 阿尔拜虫类、十字多囊虫类、球形放射虫和海绵骨针. 较大残破个体, 两个合为一个个体统计; 较小残破碎片, 三个合为一个个体统计. 据此, 可以获得每克岩石样品中放射虫和海绵骨针的个体数目(图 2). 统计同时, 将保存较好的个体挑出, 经扫描电镜照相后, 用于分类学研究.

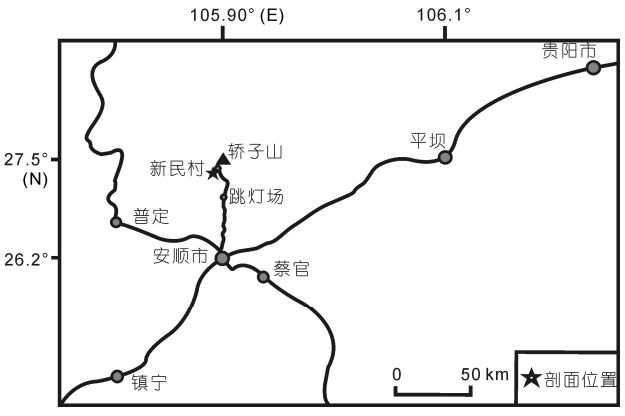


**图 1 新民剖面地理位置图**

化学分析样品为新鲜岩石样品, 用玛瑙钵碾碎到 200 目. 全岩主量元素氧化物的分析测试由中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室完成测试, 分析仪器为日本理学 3080E1 型波长色散 X-射线荧光光谱仪. 总有机碳(TOC)在美国辛辛那提大学地质系用仪器 CS-2000 分析测试(图 2).

## 3 放射虫及海绵骨针组合

与广西东攀剖面相比, 贵州新民剖面的放射虫数量偏少, 种属分异度低, 生态组合单一[14,15]. 没有发现阿尔拜虫类和十字多囊虫类, 全部为球形放射虫. 本次研究共鉴定出放射虫 7 属 9 种(含未定种), 包括 *Hegleria mammilla* (Sheng & Wang), *Copicyntra* sp., *Paracopicyntra longispina* Feng, *Tetraspongodiscus*? *inaequispinosus* (Kozur et Mostler), *Tetraspongodiscus stauracanthus* Feng, *Copicyntroides* sp. 1, *Archaeospongoprunum chiangdaoensis* (Sashida), *Tetrapaurinella* sp., *Copicyntroides* sp. 2 (图 3). 该放射虫组合以 Copicyntrids 的分子为主, 在 9 个种中, 有 8 个属于 Copicyntrids 类; 在丰度上, Copicyntrids 的分子占总个体数的 95%以上. 其中, *Copicyntra* 和 *Paracopicyntra* 两属最丰富, 占个体总数的 80%以上. 这两个属以同心壳层发育为特征, 一般有十多层同心壳(图 3, 4).

从地层分布来看, 放射虫化石仅限于上二叠统大隆组, 下三叠统没有发现放射虫化石. 其丰度变化规律清楚, 可以分为 3 个繁盛期 (图 2): 第 1 层顶部到第 2 层下部, 为小的繁盛期, 绝大多数样品每克岩样放射虫小于 100 个个体; 第 3 层下部, 为最大繁盛期, 最大丰度每克岩样大于 300 个放射虫化石壳体; 第 4 层也是一个重要繁盛期, 多数样品每克岩样放射

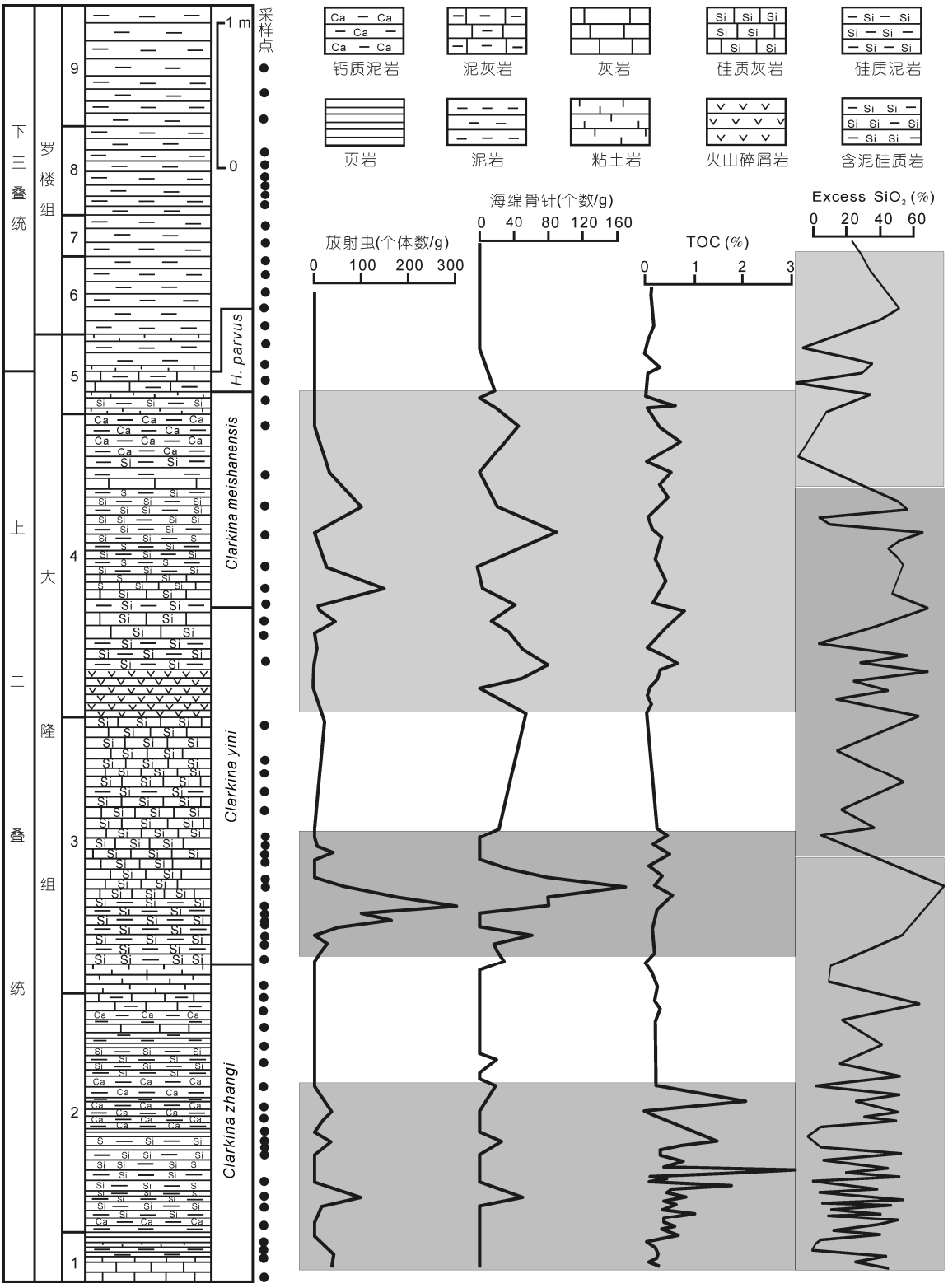


**图 2　新民剖面放射虫、海绵骨针、生物硅与 TOC 的对比关系图**

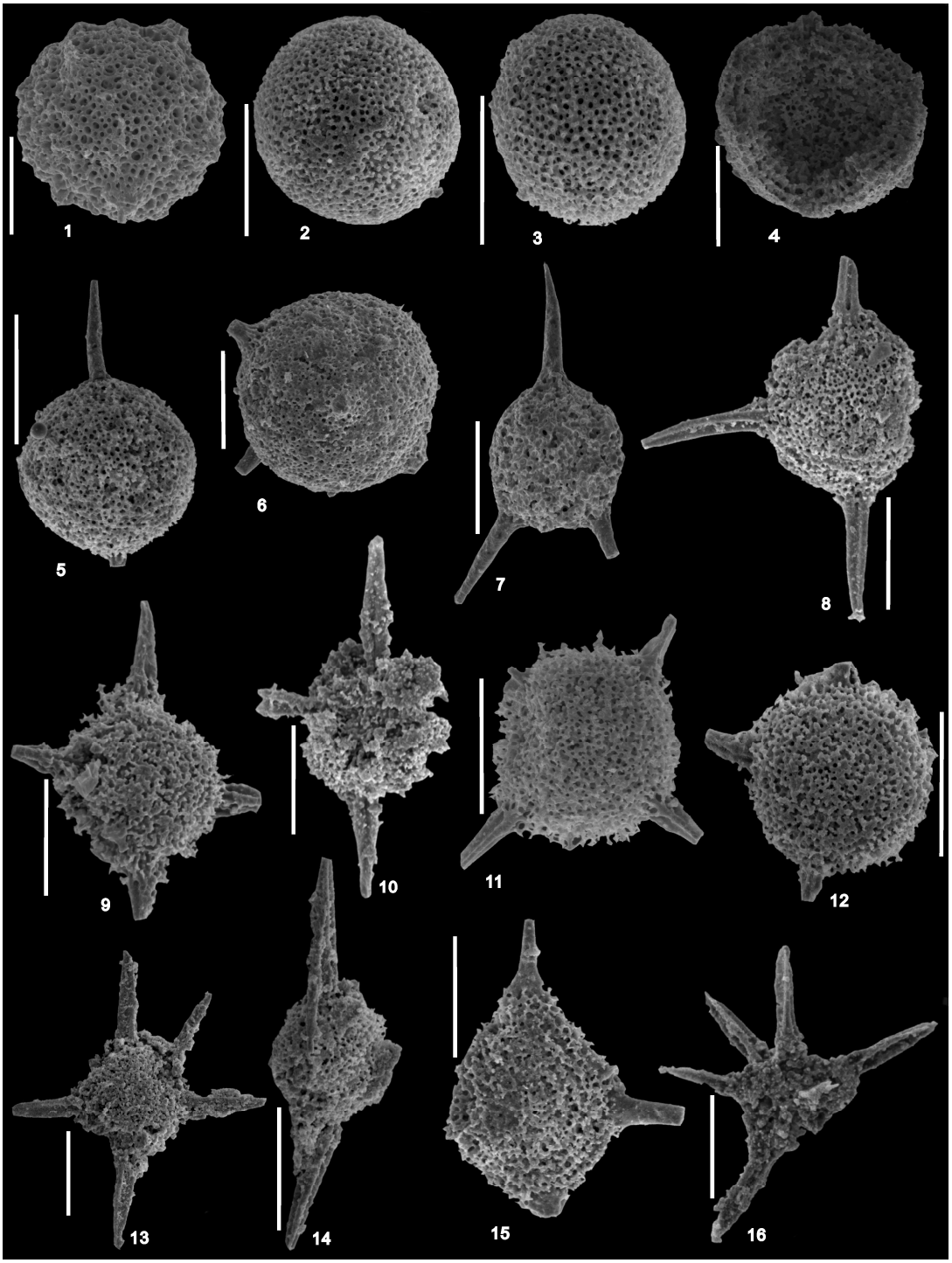


**图 3　新民剖面的放射虫**

1. *Hegleria mammilla* (Sheng & Wang); 2~4. *Copicyntra* sp; 5~7. *Paracopicyntra longispina* Feng; 8. *Tetraspongodiscus*? *inaequispinosus* (Kozur et Mostler); 9~12. *Tetraspongodiscus stauracanthus* Feng; 13. *Copicyntroides* sp. 1; 14. *Archaeospongoprunum chiangdaoensis* (Sashida); 15. *Tetrapaurinella* sp.; 16. *Copicyntroides* sp. 2. 图中比例尺为 100 μm




**图 4　新民剖面的海绵骨针**

1. *Tylostyles*; 2. *Anatertraenes*; 3~12. *Oxy-orthohexactines*; 13~15. *Anatriaenes*; 16. *Calthrops*; 17. *Protriaenes*; 18, 19. *Oxeacalthrops*; 20~22. *Echin-orthohexactines*; 23. *Amphidiscs*. 图中比例尺为 100 μm

虫壳体数目在 50~150 个之间.

新民剖面的海绵骨针主要是单轴(Monaxons)、三轴(Triaxons)、四轴(Tetraxons)和多轴(Polyaxons)类型. 共鉴定出 9 种类型, 包括 *Tylostyles*, *Anatertraenes*, *Oxy-orthohexactines*, *Anatriaenes*, *Calthrops*, *Protriaenes*, *Oxeacalthrops*, *Echinorthohexactines*, *Amphidiscs* (图 4). 其地层分布规律与放射虫化石相类似: 第一个繁盛期位于第 1 层顶部到第 2 层下部, 绝大多

数样品每克岩样海绵骨针数目小于 50 个; 第二个繁盛期最大, 对应第 3 层下部, 最大丰度每克岩样大于 160 个海绵骨针; 第三个繁盛期出现于第 4 层, 多数样品每克岩样海绵骨针数目大于 70 个(图 2).

## 4 讨论

### 4.1 放射虫生态组合

二叠纪放射虫在研究古生态、古地理方面具有重要意义, 因为它是古生代为数不多的浮游动物之一[16]. 根据二叠纪放射虫组合与共生化石生态特征、沉积环境的对比研究, 放射虫古生物学者发现, 放射虫随水深具有分带分布现象, 并归纳了特定深度下的放射虫组合特征[16~19]. 现代放射虫研究同样支持这一说法[20~22]. 由此可见, 特定的放射虫种群生活在特定的水深范围内. 反过来, 根据某一完整的放射虫组合, 我们亦可大致推断其生存海域的海水深度.

Kozur[17]认为, 在 50 m 以上的浅水区域, 以 Copicyntrinae 为主体的放射虫组合为特征; 在 50~500 m 的水深区域, 以内射球虫为主体, 伴生有浅水区域的 Copicyntrinae 分子; 200 m 以下, 开始出现少量的阿尔拜虫目; 而深度大于 500 m 的深水区域, 阿尔拜虫目占主导地位. 对于新民剖面的放射虫组合而言, Copicyntrids 的分子占绝对优势, 可以与 Kozur[17]的浅水区放射虫组合对比, 所以新民剖面沉积时的水深应该在 50 m 左右.

### 4.2 硅质岩成因

常见的硅质岩有热液型硅质岩[23]和生物型硅质岩[24]. 而利用 Al-Fe-Mn 图解, 能够很好地判别出硅质岩的成因[25,26]. 笔者将新民剖面的硅质泥岩、含泥硅质岩样品中的 $Al_2O_3$, $Fe_2O_3$ 以及 MnO, 换算成 Al, Fe 和 Mn 的含量, 投出 Al-Fe-Mn 三角图(图 5).

由图 5 可知, 大部分样品处于非热液成因的区域, 只有少数样品处于热液成因和非热液成因过渡区段, 这和邻近区域东攀剖面硅质岩的投图区域相似[26]. 新民剖面硅质泥岩、含泥硅质岩样品中多数含有大量的放射虫和海绵骨针, 支持非热液成因的结论. 所以, 新民剖面硅质泥岩、含泥硅质岩以生物作用为主, 少量样品受热液作用的影响, 但没有典型的热液成因的硅质岩.

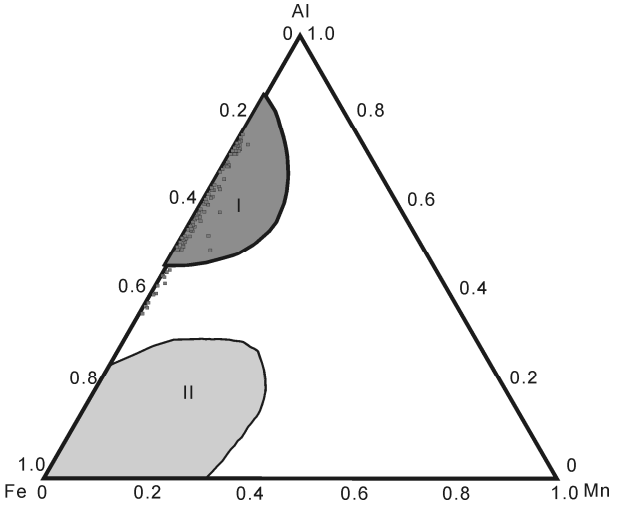


**图 5 新民剖面硅质岩 Al-Fe-Mn 三角图**

Ⅰ. 非热液成因硅质岩; Ⅱ. 热液成因硅质岩

### 4.3 生物硅的演变

现在海洋生物硅(excess silica)是指化学方法测定的无定形硅的含量, 亦称为生物蛋白石或蛋白石, 它主是由硅藻、放射虫等硅质浮游生物通过光合作用在表层海水中形成的, 这些浮游植物通过光合作用将海水中的可溶性硅转化为无定形硅而构成各自的骨骼. 生物硅的积累反映了生产力的时间和空间的变化[27,28]. 古代海洋沉积物中的硅主要有 3 个来源: 热液来源, 生物来源, 陆源来源[23,24,29~31]. 由上节的分析可知, 新民剖面的硅质岩的硅主要是生物成因的, 受热液影响不大, 所以沉积物中的生物硅可以用总硅减去陆源成分的硅来定量计算. 计算公式为

$$\text{Excess } SiO_2(\%)=SiO_{2\,(样品)}-Al_{样品}\times(SiO_2/Al)_{PAAS},$$

其中, Excess $SiO_2$ 表示生物硅, $SiO_{2\,(样品)}$和 $Al_{样品}$为样品测试的总二氧化硅和铝, $(SiO_2/Al)_{PAAS}$ 是晚太古代澳大利亚页岩[32]中二氧化硅和铝的比值.

新民剖面生物硅总体较低, 其平均值仅为 30.5%. 总的来看(图 2), 生物硅的变化与硅质微体生物的丰度变化, 相关性不明显; 其演化趋势可以分为三个阶段: 第 1 层到第 3 层下部为第一阶段, 生物硅含量强烈波动, 并缓慢上升期, 第 3 层下部达到本剖面最大值. 第 3 层中部至第 4 层中部为第二演化阶段, 第 3 层中部发生一次明显的下降, 然后再次缓慢上升, 一直延续到了第 4 层中, 其最高值与第一个顶峰的相当, 约为 65%. 第 4 层上部和第 5 层生物硅急剧下降, 一

直持续到三叠纪早期, 为第三演化阶段. 该演化趋势与华南地区大隆组放射虫丰度、分异度演化趋势具有较好的一致性[14].

### 4.4　总有机碳(TOC)与硅质生物的关系

根据现代海洋放射虫的研究发现, 在现在海洋的球形放射虫体内, 含有大量藻类, 放射虫和藻类形成良好的共生关系, 放射虫为藻类提供生活场所和营养物质, 藻类可以为放射虫母体提供食物[33,34]. 放射虫体内的藻类最后可以随着放射虫的沉降而保存在沉积物中, 在有的海域放射虫体内藻类的生产力可以占整个海洋表层生产力的很大部分[34].

在新民剖面, 大隆组沉积环境以还原环境为主, 有机质保存良好, 可以用 TOC 来指示生产力的演化. 图 6 以定量的形式列出了新民微体硅质生物与 TOC 的相互关系及相关性系数的平方(以 $R^2$ 表示, 数值越大, 则相关性越好). 由此可以得出: (1) 通过计算, 放射虫与海绵骨针具有很高的相关性($R^2$ 达到了 0.73), 说明在放射虫动物群繁盛时, 骨针也较繁盛; 放射虫丰度下降时, 骨针丰度也降低. 显然, 这两种硅质微生物有着极为密切的共生关系. (2) 放射虫和 TOC 的相关性, $R^2$=0.62(图 6(a)). 大于海绵骨针与 TOC 的相关性($R^2$=0.21) (图 6(b)), 说明放射虫对生产力的贡献远大于海绵骨针的贡献, 这可能是由于两个原因造成的: 其一, 在新民剖面硅质岩中放射虫丰度远大于硅质海绵骨针丰度; 其二, 放射虫体内含有大量的藻类, 放射虫和藻类对生产力的贡献很大[34]. (3) 硅质生物(放射虫和骨针总和)和 TOC 存在高的相关性, $R^2$=0.60(图 6(c)), 说明在硅质岩中,硅质生物和生产力有很好的对应关系. 但 TOC 与放射虫-骨针总和的相关性小于 TOC 和放射虫的相关性, 也说明放射虫对生产力的贡献要大于硅质海绵的贡献.

近年来, 国内外许多学者发现海洋的硅质生物(放射虫和硅藻)和海洋初级生产力有很好的相关性. Anderson 等[35]和 Caron 等[33]在不同的海域均发现放射虫体内的藻类可以占海洋表层初级生产力的很大

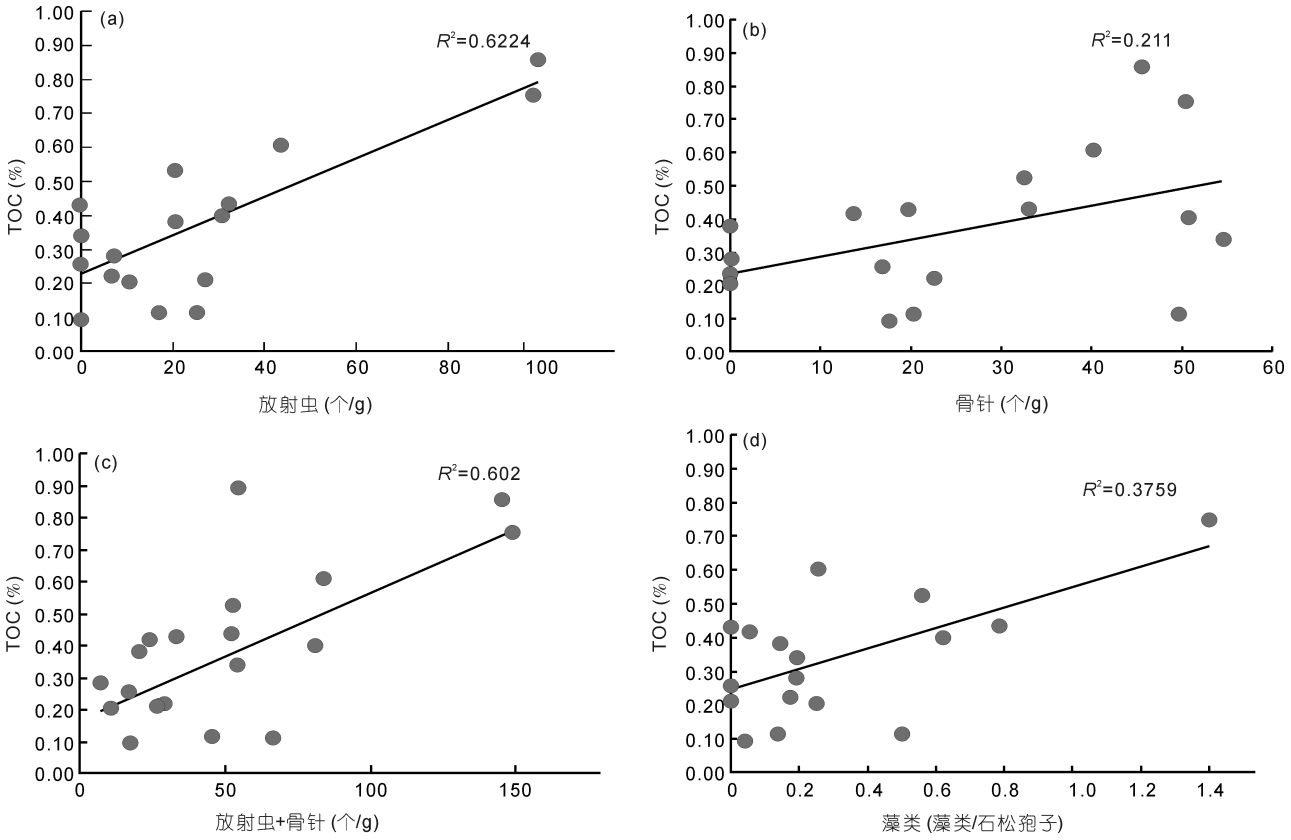


**图 6　放射虫、海绵骨针与 TOC 关系图**

的比例. Chen 等[36]通过对南海的放射虫和其他生产力指标进行研究对比, 建立了一个定量的由放射虫来计算初级生产力的公式. Dennett 等[34]通过观察现在海洋放射虫的生态习性, 发现放射虫体内含有很多藻类, 这些寄生在放射虫体内的藻类和放射虫构成互利的共生关系. Lazarus 等[37,38]通过新近纪以来沉积物的研究, 发现不同的地球化学生产力指标(包括 TOC)和硅质生物(放射虫)的相关性很高($R$=0.78), 得出硅质生物(放射虫)不仅可以指示现在海洋的生产力的变化, 还可以用来指示古生产力的变化. 上二叠统新民剖面放射虫丰度和总有机碳 (TOC)之间很高的相关性表明, 二叠纪放射虫也可以用来研究海洋初级生产力的变化.

### 4.5 生物硅与硅质生物的关系

现代海洋学研究发现, 海水中的硅含量很低, 一般不能直接从正常海水中形成硅质物沉积[39]. 硅质沉积物通常通过生物地球化学过程来完成[40,41]: 即放射虫、硅藻等生物将海水中的无定性硅转化为生物硅, 形成生物骨骼或壳体, 生物死亡后其骨骼或壳体沉积下来, 部分溶解, 部分形成沉积地层. 因此, 理论上讲, 生物硅与硅质生物之间应该具有密切的关系. 然而, 从新民剖面的统计、计算结果来看, 两者之间关系并不密切: 海绵骨针丰度与生物硅含量之间的相关性不明显(图 7(b)), 放射虫、藻类与生物硅含量之间的相关性较低(图 7(a), (d)).

产生上述结果的最大可能性, 是生物硅含量受到了扬子南缘盆地海洋地球化学循环的影响, 也就是说, 新民剖面放射虫和海绵骨针的丰度代表了长兴阶当地盆地生物群的繁盛状况和演化过程, 而放射虫壳体和海绵骨针在沉降过程中及暴露在沉积物表面过程中发生部分溶解. 溶解出来的生物硅不同程度地参与了扬子南缘盆地(甚至更广泛)海水的循环中, 并打破了放射虫和海绵骨针与生物硅之间线

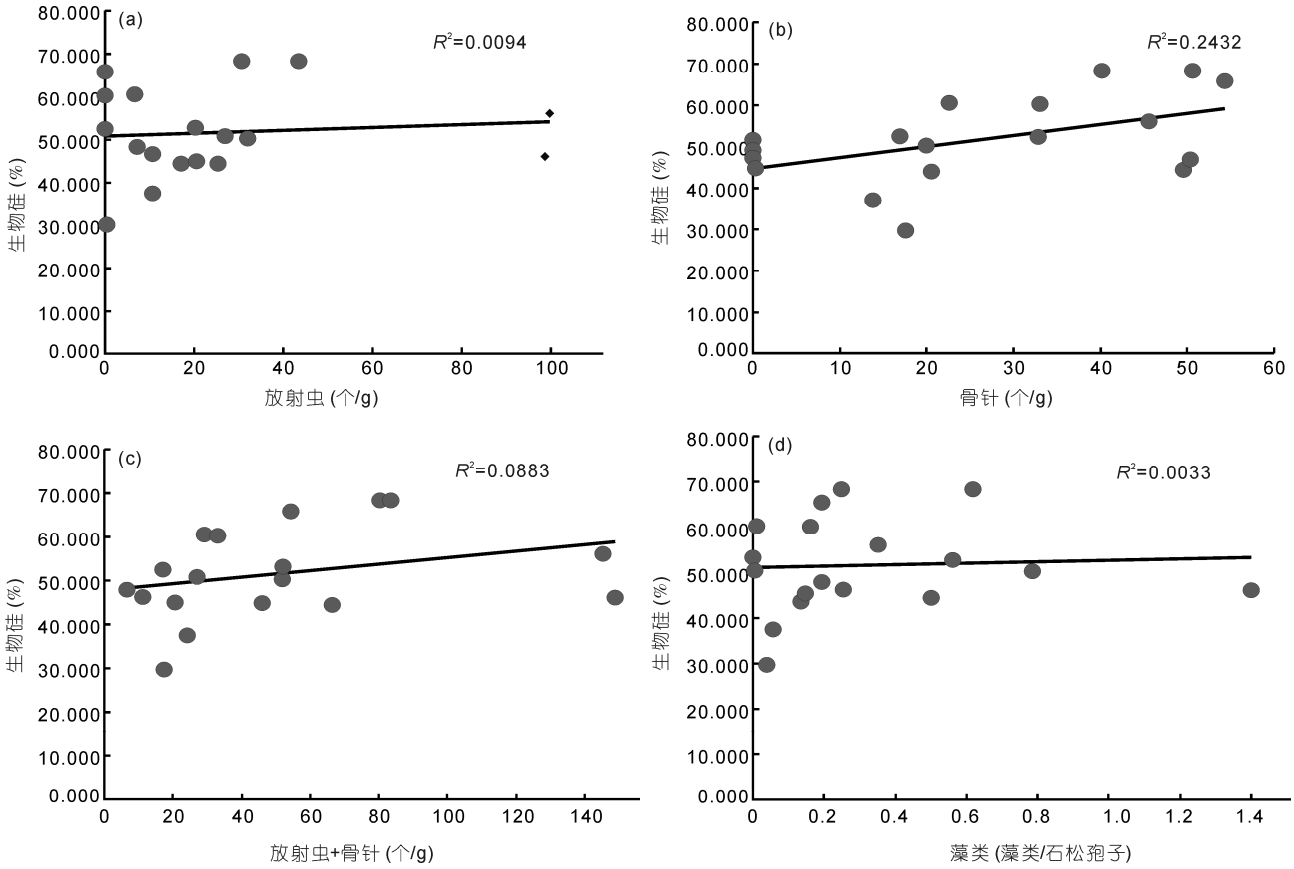


**图 7　放射虫、海绵骨针与生物硅关系图**

性相关联系. 所以, 在利用生物硅探讨古生产力及其演化历史时, 一定要考虑海水循环对其造成的影响.

## 5 结论

(1) 贵州新民剖面的硅质微体生物化石包括放射虫和海绵骨针. 放射虫以 Copicyntrids 的分子为主, 优势属为 *Copicyntra* 和 *Paracopicyntra*. 该放射虫组合丰度与 TOC 之间有密切的关系, 可以作为古生产力评价的一个替代指标. *Copicyntra* 和 *Paracopicyntra* 可能是二叠纪高生产力的标志属, 这一点值得在更多剖面验证.

(2) 新民剖面的硅质岩为生物成因硅质岩, 受热液和陆源的影响较小. 生物硅含量的变化与硅质微体生物的丰度变化相关性不明显, 可能受到了长兴期扬子南缘盆地(甚至更广泛)海水循环的影响.

**致谢** 喻建新教授鉴定疑源藻类, 张素新教授为微体化石进行电镜扫描, 两位审稿人为本文提出了宝贵意见, 谨致感谢.

## 参考文献


1 康玉柱. 中国古生代大型油气田成藏条件及勘探方向. 天然气工业, 2007, 27: 1–5
2 康玉柱. 自主创新与古生代油气田的发现. 中国工程科学, 2006, 8: 19–23
3 谢树成, 殷鸿福, 解习农, 等. 地球生物学方法与海相优质烃源岩形成过程的正演和评价. 地球科学——中国地质大学学报, 2007, 32: 727–740
4 坛俊颖, 王文龙, 王延斌, 等. 中上扬子下寒武统牛蹄塘组海相烃源岩评价. 海洋地质前沿, 2011, 27: 23–27
5 杨光龙, 崔登伟. 黔北牛蹄塘组黑色岩系中的矿产特征及找矿远景分析. 贵州地质, 2010, 27: 208–212
6 张伦尉, 杭家华, 梁琼, 等. 贵州陡山沱组和牛蹄塘组中黑层的地质特征与找矿前景. 矿物学报, 2007, 27: 456–460
7 刘峰, 蔡进功, 吕炳全, 等. 下扬子五峰组上升流相烃源岩沉积特征. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39: 440–444
8 张海全, 许效松, 余谦, 等. 扬子板块西北缘晚奥陶-早志留世岩相古地理演化与烃源岩的关系. 石油天然气学报, 2010, 32: 43–47
9 付小东, 秦建中, 腾格尔, 等. 四川盆地北缘上二叠统大隆组烃源岩评价. 石油实验地质, 2010, 32: 566–571
10 夏茂龙, 文龙, 王一刚, 等. 四川盆地上二叠统海槽相大隆组优质烃源岩. 石油勘探与开发, 2010, 37: 654–662
11 李敬红, 解习农, 林正良, 等. 四川盆地广元地区大隆组有机质富集规律. 地质科技情报, 2009, 28: 98–103
12 孙省利, 陈践发, 刘文汇, 等. 塔里木盆地下寒武统硅质岩地球化学特征及其形成环境. 石油勘探与开发, 2004, 31: 45–48
13 Yin H F, Zhang K X, Tong J N, et al. The global stratotype section and point (GSSP) of the Permian-Triassic boundary. Episodes, 2001, 24: 102–114
14 Feng Q L, He W H, Gu S Z, et al. Radiolarian evolution during the latest Permian in South China. Globa Planet Change, 2007, 55: 177–192
15 吴俊, 冯庆来. 广西晚长兴期放射虫生物地层学及其与牙形石带的对比. 中国科学: 地球科学, 2008, 38: 1543–1552
16 Noble P J, Naraoka H, Poulson S R, et al. Paleohydrographic influences on Permian radiolarians in the Lamar limestone, Guadalupe Mountains, West Texas, elucidated by organic biomarker and stable isotope geochemistry. Palaios, 2011, 26: 180–186
17 Kozur H W. Upper Permian radiolarians from the Sosio Valley Area, Western Sicily (Italy) and from the uppermost Lamar Limestone of West Texas. Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt Wien, 1993, 136: 99–123
18 Fang N Q, Feng Q L. Devonian to Triassic Tethys in Western Yunnan. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996. 1–135
19 何卫红. 煤山 D 剖面的放射虫动物群与海平面变化. 地球科学——中国地质大学学报, 2006, 31: 159–164
20 Renz G W. The distribution and ecology of radiolaria in the central Pacific: Plankton and surface sediments. Bull Scripps Ins Oceanogr, 1976, 22: 267–280
21 谭智源, 陈木宏. 中国近海的放射虫. 北京: 科学出版社, 1999. 12–404
22 王汝建, 陈荣华. 白令海表层沉积物中硅质生物的变化及其环境控制因素. 地球科学——中国地质大学学报, 2004, 29: 685–690
23 Yamamoto K. Geochemical characteristics and depositional environment of cherts and associated rocks in the Franciscan and Shiman to terranes. Sediment Geol, 1987, 52: 65–78
24 韩发, Hutchinson R W. 大厂锡多金属矿床热液喷气沉积的证据——含矿建造及热液沉积岩. 矿床地质, 1989, 8: 672–677
25 Adachi M, Yamamoto K, Sugisaki R. Hydrotherrnal chert and associated siliceous rocks from the northern Pacific their geological significance as indication of ocean ridge activity. Sediment Geol, 1986, 47: 125–148
26 田云涛, 冯庆来, 李琴. 桂西南柳桥地区上二叠统大隆组层状硅质岩成因和沉积环境. 沉积学报, 2007, 25: 671–677

27 Banahan S, Goering J J. The production of biogenic silica and accumulation on the southeastern Bering Sea shelf. Cont Shelf Res, 1986, 5: 199–213
28 Lyle M, Murray D W, Finney B P, et al. The record of late Pleistocene sedimentation in the eastern tropical Pacific Ocean. Paleoceanography, 1988, 3: 39–59
29 Dapples E C. Diagenesis of sandstones. In: Larsen G, Chillingar C V, eds. Diagcnesis in Sediments. Amsterdam: Elsevier, 1967. 91–125
30 Rona P A. Hvdmthermal mineralization of oceanic ridges, Canadian. Minemlogy, 1988, 26: 447–465
31 毛晓冬, 刘云华. 广东省长坑金银矿床硅质岩石成因分析. 岩石矿物学杂志, 2004, 23: 158–166
32 Tayor S R, Mclennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution Blackwell. Oxford: Oxford University Press, 1985. 10–125
33 Caron D A, Michaels A F, Swanberg N R, et al. Primary productivity by symbiont-bearing planktonic sarcodines (Acantharia, Radiolaria, Foraminifera) in surface waters near Bermuda. J Plankton Res, 1995, 17: 103–129
34 Dennett M R, Caron D A, Michaels A F, et al. Video plankton recorder reveals high abundances of colonial Radiolaria in surface waters of the central North Pacific. J Plankton Res, 2002, 24: 797–805
35 Anderson O R, Bennett P, Angel D, et al. Experimental and observational studies of radiolarian physiological ecology: 2. Trophic activity and symbiont primary productivity of Spongaster tetras with comparative data on predatory activity of some Nassellarida. Mar Micropaleontol, 1989, 14: 267–273
36 Chen M H, Huang L M, Tu X, et al. Radiolarian transfer function for paleo-primary productivity in the South China Sea. Chin Sci Bull, 1999, 44: 1232–1237
37 Lazarus D, Bittniok B, Diester-Haass L, et al. Comparison of radiolarian and sedimentologic paleoproductivity proxies in the latest Miocene-Recent Benguela Upwelling System. Mar Micropaleontol, 2006, 60: 269–294
38 Lazarus D, Bittniok B, Diester-Haass L, et al. Radiolarian and sedimentologic paleoproductivity proxies in late Pleistocene sediments of the Benguela Upwelling System, ODP Site 1084. Mar Micropaleontol, 2008, 68: 223–235
39 Paul T, David M, Nelson A, Van B, et al. The Silica Balance in the world ocean: A reestimate. Science, 1995, 286: 375–379
40 DeMaster D J. The supply and accumulation of silica in the marine environment. Geochim Cosmochim Acta, 1981, 45: 1715–1732
41 Heinze C, Hupe A, Maier-Reimer E, et al. Sensitivity of the marine biospheric Si cycle for biogeochemical parameter variations. Glob Biogeochem Cycles, 2003, 17: 12–18