

探讨笔石反射率对奥陶系、志留系烃源岩成熟度的指示作用

曹长群 尚庆华

方一亭

(中国科学院南京地质古生物研究所 南京 210008)

(南京大学地球科学系 南京 210093)

提要 通过对塔里木盆地、鄂尔多斯、江苏等地区奥陶系、志留系笔石反射率的研究,以该地区有机地球化学等综合分析指标为中介,分析笔石反射率与等效镜质体反射率之间的对比关系,建立笔石反射率对奥陶系、志留系烃源岩成熟度的评价标准。认为笔石最大反射率、随机反射率对奥陶系、志留系烃源岩成熟度有良好的指示作用。发现笔石有机质在热演化过程中,由于笔石纺锤层等生物结构的存在,使温度成为影响笔石热演化程度的主要因素。笔石的热演化有其自身的特殊性:在 R_{\max}^0 约为 4% 以下时,笔石的热演化方式与煤岩镜质体相似,并且可能在很晚才进入石墨化作用阶段。

关键词 笔石反射率 烃源岩 成熟度

1 前言

自七十年代中期以来,下古生界烃源岩中的动物碎屑在烃源岩热演化的某些特性:如原生、易鉴定、光性特征对地热变化有直接的反映等,使石油地质学家们对动物碎屑的反射光特性产生了极大的兴趣。其中由于笔石与煤岩镜质体的反射都具有各向异性的光性特征 (Teichmüller, 1978; Goodarzi *et al.*, 1988)、且有类似的热演化方式而倍加引入注目 (Goodarzi *et al.*, 1977)。但是由于笔石与煤岩镜质体不能同时在相同的岩相共存,从而限制了两者的直接对比。为此,寻找合适的中介物,建立两者间的对比关系成为这一研究过程中的首要问题。在二十多年的探索过程中,曾利用深度、地热参数,以牙形刺、几丁虫、固体沥青反射率、红外光谱特征等作为中介物 (Goodarzi and Norfort, 1985; Bertrand and Heroux, 1987; Bertand, 1990; Goodarzi *et al.*, 1992; 汪啸风等, 1992) 进行了两者间相关关系的研究,但由于中介物的各种非合理因素的影响,都未能得到

可信、统一的结论。

本文通过选择我国塔里木盆地、鄂尔多斯、江苏地区奥陶系和志留系有机质成熟度研究程度较高、富有代表性的地区进行笔石反射率的研究,直接建立笔石反射率与该地区经多种有机地化指标 (包括干酪根最高热解峰温 T_{\max} 、红外光谱分析、H/C、O/C、甾萜类类型转化参数、磷灰石裂变径迹、流体包裹体测量分析) 以及部分有机碎屑成熟度指数 (包括牙形刺色变指数 CAI、固体沥青反射率分析) * 综合分析得到的等效镜质体反射率之间的对比关系,以探讨笔石反射率对奥陶系、志留系烃源岩成熟度的指示作用。

所有的反射率测量均在油浸镜下进行。

2 笔石最大反射率与等效镜质体反射率的相关分析

塔里木盆地、鄂尔多斯及江苏等地区奥陶系、志留系烃源岩中的笔石样品均采自页岩,其最大反射率 (GR_{\max}^0)、随机反射率 (GR_{ran}^0) 和相同层位的等效镜质体反射率 (VR_E^0) 及相关数据见表 I。

收稿日期: 1998-08-21

* 鄂尔多斯地区等效镜质体反射率数据采自长庆石油勘探局《鄂尔多斯地区下古生界碳酸盐岩油气富集条件》, 1989。塔里木盆地等效镜质体反射率数据采用黄第藩、梁狄刚等《塔里木盆地油气生成与演化》。《塔里木盆地油气资源》成果报告, 1995。

表 I 塔里木盆地、鄂尔多斯、江苏地区笔石样品综合测试数据表

The data of graptolite reflectance and samples in Tarim Basin, Jiangsu and Ordos areas									
序号	采样地点		深度(m)	地层	笔石反射率(%)				等效镜质体 反射率 VR_E^0 (%)
					GR_{max}^0	GR_{ran}^0	$G_{ran}R_E^0$	$G_{max}R_E^0$	
1	苏北	SA1 井	4578—4583	高家边组 S_{1g}	3.19	2.27	1.68	2.03	2.19
2			4620—4623		4.10	3.41	2.11	2.5	2.27
3			4692			3.50	2.14		2.33
4	苏南	SB10 井	25	高家边组 S_{1q}	9.20	8.43	3.29	3.36	3.29
5		SB11 井	15	高家边组 S_{1q}	8.79	8.31	3.22	3.20	3.26
6			35		8.43	7.66	3.17	3.05	3.00
7			42		9.21	8.47	3.27	3.37	3.54
8	鄂尔多斯	平凉	*	平凉组 O_{2p}	0.72	0.67	0.98	0.77	0.67
9		凉探 1 井	*	平凉组 O_{2p}	3.02	2.55	1.79	1.94	2.00
10		天 2 井	*	龙门洞组 O_{2l}	4.27	3.61	2.18	2.58	2.63
11	塔里木盆地	群克 1 井	2646	O_{2+3}		1.80	1.49		1.46
12			2728			1.90	1.53		1.45
13			2821.6			2.87	1.91		1.88
14			3102			2.27	1.68		1.65
15			3215		2.54	2.26	1.68	1.7	1.75
16			3351			2.47	1.76		1.76
17			3451		2.64	2.56	1.79	1.74	1.78
18			3510			2.53	1.78		1.72
19			3955		3.27	3.16	2.02	2.07	2.02
20			4038			3.29	2.07		2.14
21		珂坪	地表	萨尔干组 O_{1-2s}	1.70	1.39	1.00	1.27	1.30
22		塔中 1 井	4602—4619	萨尔干组 O_{1-2s}	5.0	3.25	2.06	1.62	1.75
23		塔东 1 井	3481	O_{2+3}	6.50	4.81	2.55	2.24	2.10
24			4186		7.49	6.06	2.87	2.66	2.57

* 深度数据不详;塔里木盆地群克 1 井笔石反射率数据采用秦勇(内部交流) GR_{max}^0 为笔石最大反射率; GR_{ran}^0 为笔石随机反射率; GR_E^0 为笔石等效随机镜质反射率; $G_{max}R_E^0$ 为笔石等效最大镜质体反射率; VR_E^0 为综合分析得到的等效镜质体反射率。

对笔石最大反射率和等效镜质体反射率进行相关分析,从其散点图中可以看出,散布点明显分成两个区段:一是 GR_{max}^0 约为 0.72%到 4.72%区段(A);一是 GR_{max}^0 约为 5%到9.21%区段(B)(插图 1)。

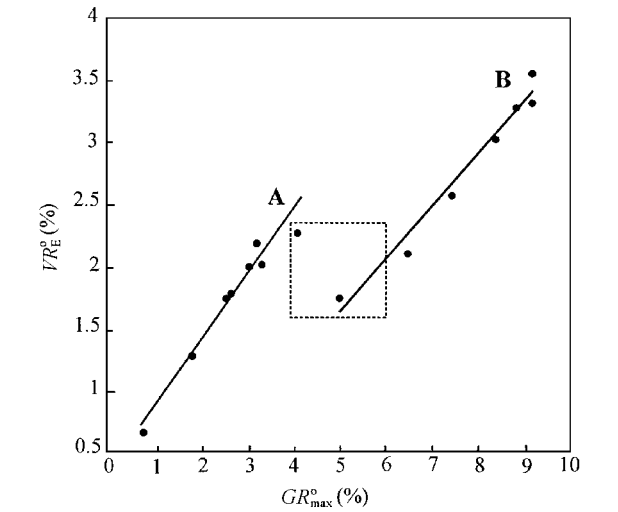


插图 1 笔石最大反射率 GR_{max}^0 与等效镜质体 VR_E^0 回归分析图
Correlation of GR_{max}^0 and VR_E^0

其回归方程为: $VR_E^0 = 0.5089 GR_{max}^0 + 0.4064$

$(0.72 \leq GR_{max}^0 \leq 4.27)$
相关系数为: $R^2 = 0.96$
 $VR_E^0 = 0.4168 GR_{max}^0 - 0.4655 \quad (5 \leq GR_{max}^0 \leq 9.21)$
相关系数为: $R^2 = 0.9681$

直线 A 和直线 B 在 4.27%到 5%之间的不连续,意味着笔石最大反射光性与等效镜质体反射光性在热演化过程中并不一致,笔石反射率的光性变化有自己的特殊性。Goodarzi 和 Norford (1985) 以及 Malinconio (1993) 在研究笔石与煤岩镜质体反射率各向异性光性变化时,亦发现笔石与煤岩镜质体的热演化过程在 4%—6%时开始出现差异,但未进行笔石的最大反射率与煤岩镜质体最大反射率的对比分析。在插图 1 的散点图中,笔石最大反射率相对等效镜质体的反射率在 4.27%—5%的这种跃变的产生,可能是笔石生物结构和化学成分的特殊性决定的,即笔石有机质可能在 4.27%—5%这一阶段时发生跃变。

煤岩镜质体在温度和压力的作用下逐渐高度芳构化和有序化,最终形成石墨。对笔石而言,在反射光下可观察到笔石内部保存着良好的生物微观结

构,甚至高反射率值的笔石仍保存有完好的、有序的纺锤层结构和环形纹等特征。笔石纺锤层有序排列的特征在一定程度上限定了压力对笔石有机质在热演化过程中的有序化活动范围,在宏观上,使得笔石有机质不能整体地进行高度芳构化和有序化。由于纺锤层在整体上的有序化排列,使压力作用对笔石光性变化的影响并不十分明显,而温度却可能是促使纺锤层内部有机质变化(高度芳构化)的主要因素(当然这一点也可能显示了笔石的纺锤层与其内部的有机质成分存在差异)。因此,由于笔石的纺锤层等有序的生物微观结构的存在,不仅提高了有机质整体上的有序度,使笔石在低热演化阶段(GR_{\max}^0 约为 0.7%)时就具有光性的各向异性特征(Goodarzi and Norford, 1995),并且降低了后期热演化过程中压力对笔石有机质的影响,即笔石反射率光性的各向异性变化速率比煤岩镜质体低。因此笔石反射光性的变化主要取决于温度对有机质成分高度芳构化

的影响上。在热演化过程中,压力对笔石和煤岩镜质体影响程度的差异,以及笔石生物体微观结构的有序化决定了各自反射光性变化途径的不同,造成了笔石最大反射率与等效镜质体反射率对比中跃变现象的产生。可见,从这一区间开始,笔石与煤岩镜质体的热演化途径确实存在差异。在 GR_{\max}^0 大约 4% 以下时,笔石与镜质体有着相同的热演化方式,但在此之后,煤岩镜质体进入石墨化作用阶段,而笔石仍延续其早期的热演化方式,可能在很晚(在 10% 左右)才进入石墨化作用阶段。

3 笔石随机反射率与等效镜质体反射率的相关分析

通过塔里木盆地、鄂尔多斯及江苏等地区奥陶系、志留系烃源岩中 24 组笔石样品的随机反射率测量,进行笔石随机反射率与相同层位的等效镜质体反射率的相关分析,结果如插图 2 所示:

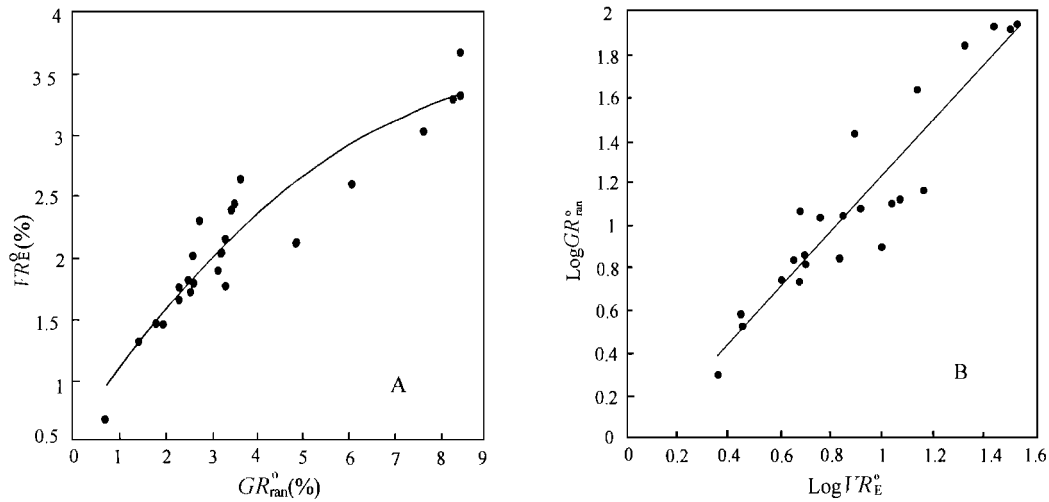


插图 2 笔石随机反射率 GR_{\max}^0 与等效镜质体反射率 VR_E^1 相关分析图

Correlation of GR_{\max}^0 and VR_E^0

A: GR_{ran}^0 与 VR_E^0 的直线相关分析图

The linear dependent figure of GR_{ran}^0 and VR_E^0

其相关方程为: $VR_E^0 = -0.026 (GR_{ran}^0)^2 + 0.524 GR_{ran}^0 + 0.5925$

相关系数为: $R^2 = 0.825$

其对数相关方程为: $\text{Log } VR_E^0 = 0.572 (\text{Log } GR_{ran}^0) + 0.021$

相关系数为: $R^2 = 0.874$

可见笔石的随机反射率亦能作为烃源岩成熟度的良好指标。但是笔石随机反射率在测量中有极大的随机性,其精度随测量点的多少而改变。并且在反射光下,由于磨片技术的影响,笔石体并不是单一

B: GR_{ran}^0 与 VR_E^0 的对数相关分析图

The logarithmic dependent figure of GR_{ran}^0 and VR_E^0

的平面,而是存在生物的立体结构。同一样品中不同的测量面的测量值都可能相差很大,在精度上不如笔石最大反射率。

4 笔石有机质反射率对奥陶系、志留系烃源岩成熟度的评价尺度

根据笔石最大反射率和笔石随机反射率与等效镜质体反射率的相关方程,分别得到笔石的等效镜质体反射率 $G_{\max}^0 R_E^0$ 和 $G_{ran}^0 R_E^0$ (见表 I)。依据 Tissot (1978) 建立的镜质体反射率对烃源岩成熟度的

评价标准,可以建立笔石反射率对奥陶系、志留系烃源岩成熟度的评价标准(插图 3):

1. $GR_{\text{ran}}^0 < 0.5\%$ 、 $GR_{\text{max}}^0 < 0.6\%$, 成岩作用阶段, 烃源岩未成熟, 主要生成生物甲烷干气。
2. $0.5\% < GR_{\text{ran}}^0 < 1.45\%$ 、 $0.6 < GR_{\text{max}}^0 < 1.77\%$, 早期深成热解作用阶段, 烃源岩由低成熟到成熟阶段, 为主要的生油带, 也称生油窗。
3. $1.45\% < GR_{\text{ran}}^0 < 3.08\%$ 、 $1.77\% < GR_{\text{max}}^0 < 3.13\%$, 晚期深成热解作用阶段, 烃源岩高成熟, 生成湿气和凝析油。

$4.3.08\% < GR_{\text{ran}}^0 < 10.37\%$ 、 $3.13\% < GR_{\text{max}}^0 < 10.71\%$, 浅变质作用阶段, 烃源岩过成熟, 生成裂解甲烷干气。

$GR_{\text{ran}}^0 > 10.37\%$ 、 $GR_{\text{max}}^0 > 10.71\%$, 变质作用阶段, 形成绿片岩, 不形成油气。

根据以上笔石对下古生界烃源岩成熟度的评价标准,对苏南 N 和 J 两口井志留系的笔石最大反射率进行了测量,并根据笔石最大反射率与等效镜质体反射率的回归方程得到笔石最大等效镜质体反射率(见表 II)。

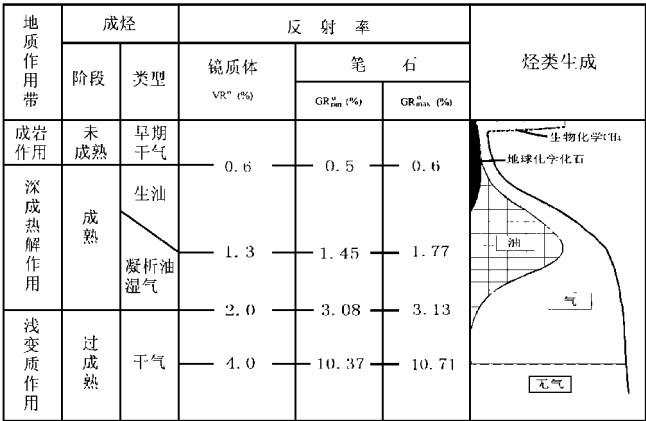


插图 3 笔石反射率与镜质体反射率对烃源岩成熟度评价对比图
Comparison of source-rock maturation of graptolite reflectance with vitrinite reflectance
据 Tissot, 1978

表 II 苏南 N 井和 J 井笔石最大反射率及相关数据表

Correlation of graptolite reflectance and other data, N and J wells in southern Jiangsu Province

序号	井号	地层	深度(m)	笔石最大反射率 GR_{max}^0 (%)	笔石等效镜质体 反射率 $G_{\text{max}}R_{\text{E}}^0$ (%)
1	N	S _{2m}	2501.11—2504.60	1.242	1.038
2		S _{2m}	2541.80	1.289	1.062
3		S _{2m}	2547.80	1.30	1.068
4		S _{1—2f}	2731.00	1.849	1.347
5		S _{1q}	2820.15	1.925	1.386
6		S _{1q}	3039.50	1.982	1.415
7		S _{1q}	3108.50	2.044	1.447
8		S _{1q}	3224.36	2.252	1.552
9		S _{1q}	3325.69	2.350	1.602
10	J	S _{1q}	187.0	1.851	1.348
11		S _{1q}	431.9	2.307	1.580
12		S _{1q}	480.0	2.240	1.546
13		S _{1q}	580.0	2.283	1.568
14		S _{1q}	640.0	2.282	1.568
15		S _{1q}	887.0	2.237	1.545
16		S _{1q}	932.5	2.370	1.612
17		S _{1q}	1033.0	2.591	1.725
18		S _{1q}	1076.0	2.625	1.756

N 井井深 2 501—3 325m 为志留系 S_{1q}—S_{2m} 的地层, 笔石的最大反射率 GR_{max}^0 值为 1.242%—2.350%, 相当于 GR_{E}^0 的 1.038%—1.602%, 表示烃源岩正处于深层热解作用阶段的生油高峰期。其

中井深 2 501—2 547m 的 S_{2m} 地层, GR_E^0 的值小于 1.3%, 烃源岩处于生油主峰带。井深 2 731—3 325 m 的 S_{1g} 和 S_{1-2f} 地层中笔石的最大反射率为 1.849%—2.35%, 相当 GR_E^0 的 1.347%—1.602%, 烃源岩处于凝析油和湿气阶段。

J 井相对 N 井井深较浅, 为 187—1 076m 的志留系高家边组(S_{1g}), 笔石最大反射率为 1.851%—2.625%, 相当于 GR_E^0 的 1.348%—1.756%, 烃源岩处于凝析油和湿气阶段。

苏南 N 井和 J 井, 处于同一地质构造带, 从上面笔石的最大反射率来看, 虽然两口井志留系高家边组(S_{1g})的井深并不相同, 但其笔石最大反射率却十分接近, 反映这两口井处于相同的地热环境。这一结论和江苏油田经过 H/C、O/C、A/C、干酪根、沥青反射率、 T_{max} 和包裹体测温等手段的分析结论一致。

由于笔石的热演化过程具有不可逆性, 其反射率值代表着该层位所经历的最大古地温, 所以笔石的反射率并不受区域的限制, 但是奥陶系、志留系以外地层中的笔石反射率对烃源岩成熟度的指示是否具有和上述相同的标准, 还需进一步研究证实。

5 总结

有机地球化学指标一直是评判下古生代烃源岩成熟度的主要手段。选择塔里木盆地、鄂尔多斯及江苏等研究程度较高的地区奥陶系、志留系笔石样品的反射率进行研究, 主要是利用现有的有机地化数据和其他烃源岩成熟度分析, 寻找笔石反射率与现有成熟度分析标准之间的关系, 建立笔石反射率对下古生界烃源岩成熟度的评价标准。在研究中发现, 笔石的随机反射率和最大反射率都能很好地反映烃源岩的成熟度变化。由于笔石纺锤层或层纹状

结构的存在, 使温度成为影响笔石热演化的主要因素。笔石热演化规律与煤岩镜质体热演化方式并不相同, 笔石有其自身热演化的特殊性: 在 GR_E^0 小于 4% 时, 笔石有机质的热演化方式与煤岩镜质体相似, 并且在很晚才可能石墨化作用阶段。

本文在研究的过程中得到江苏油田陈安定高级工程师、尹玲和祝幼华工程师的大力帮助, 在此谨致以衷心感谢。

参考文献

- 李佩珍, 1988. 干酪根镜质体反射率测量中有关问题的讨论. 中国科学院地球化学研究所开放实验室年报(1989), 北京: 科学出版社, 317—322.
- 汪啸风等, 1992. 笔石、几丁虫、虫牙反射率在热成熟度上的应用. 地质学报, **66**(3), 256—279.
- 肖贤明等, 1991. 沥青反射率作为烃源岩成熟度指标的意义. 沉积学报, (增刊), 138—146.
- 肖贤明, 傅家谟, 刘德汉, 1991. 无定形体(微粒体)反射率能作为生油岩成熟度指标. 自然科学进展, (4), 38—44.
- Bertrand R, Heroux Y, 1987. Chitinozoan, graptolite and scolecodont reflectance as an alternative to vitrinite and pyrobitumen reflectance Ordovician and Silurian strata. Anticosti Island, Quebec, Canada. Am. Assoc. Pet. Geol., **71**, 951—957.
- Bertant R, 1990. Correlation among the reflectance of vitrinite, chitinozoans, graptolites and scolecodonts. Org. Geochem., **15**, 565—574.
- Bustin R M, Link C, Goodarzi F, 1989. Optical properties and chemistry of graptolite periderm following laboratory simulated maturation. Org. Geochem., **14**, 355—364.
- Goodarzi F, 1985. Organic petrography of graptolite fragments from Turkey. Mar. Pet. Geol., **1**, 202—210.
- Goodarzi F, Norford B S, 1985. Graptolites as indicators of the temperature histories of rocks. J. Geol. Soc. London, **142**, 1089—1099.
- Goodarzi F, Gentzis T, Harrison C, Thorsteinsson R, 1992. The significance of graptolite reflectance in regional thermal maturity studies, Queen Elizabeth Island, Arctic Canada. Org. Geochem., **18**(3), 347—357.

THE STUDY OF GRAPTOLITE REFLECTANCE AS THE INDICATOR OF SOURCE-ROCK MATURATION IN ORDOVICIAN AND SILURIAN OF TARIM BASIN, ORDOS, JIANGSU AREAS

CAO Chang-Qun¹⁾, SHANG Qing-Hua¹⁾ and FANG Yi-Ting²⁾

1) Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008

2) The Earth Science Department of Nanjing University, Nanjing 210093

Key words: Graptolite Reflectance, Source-rock, Maturation

Abstract

Based on the studies of the graptolite reflectance of Ordovician and Silurian in Tarim Basin, Ordos, Jiangsu, and together with the synthesis of the organic geochemistry indicators, the authors establish correlation equation of graptolite maximum, random reflectance and the equivalent vitrinite reflectance of the same strata which obtained from results of organic geochemistry analysis.

The maximum reflectance of graptolite was a better index than the random reflectance to indicate the source-rock maturation in Ordovician and Silurian.

The reflectance of graptolite has a rapidly increasing rate at 4.27%—5% of GR_{\max}^0 compared to the reflectance of equivalent vitrinite. This feature shows that the process of the thermal maturation of graptolite organism has its own unique features; the thermal process of graptolite organism is similar to that of vitrinite just before 4% of its reflectance.

Because the graptolite fuseller tissue is a regular structure, which decreases the effects of the pressure on the graptolite organism, the temperature becomes the major factor to control the graptolite organic maturation.

第 8 届国际化石刺丝胞与多孔类学术会议在日本仙台举行

第 8 届国际化石刺丝胞与多孔类学术会议 (8th International Symposium on Fossil Cnidaria and Porifera) 于 1999 年 9 月 12—16 日在日本仙台举行。参加会议的除东道主日本之外, 还有来自澳大利亚、印度、印尼、俄罗斯、爱沙尼亚、挪威、瑞典、波兰、捷克、英国、比利时、奥地利、德国、西班牙、意大利、加拿大、美国、巴西和中国等 20 多个国家和地区的 101 位学者。这是国际刺丝胞及多孔类化石学会成立以来, 首次在东亚举行的学术讨论会。东道国日本有着 109 年研究珊瑚化石的历史, 先后有 60 余位学者从事过珊瑚化石的研究工作。大会在东北大学地质古生物博物馆设立报到处, 在仙台市国际会议中心设立 1 个主会场和 2 个分会场, 分别进行 80 篇论文的宣读和讨论; 此外, 还举行 4 个专题讨论会和 29 个专题的图片和资料展示。我国学者参加会议的有南京地质古生物所的俞昌民、廖卫华和湘潭工学院的柳祖汉以及目前正在日本福岡大学做博士后研究的王向东。本届会议讨论的主要议题有:

1. 21 世纪研究工作的方向 and 任务;
2. 刺丝胞和多孔类的古动物学 (包括功能形态、个体发育、分类、种内变异等);
3. 刺丝胞和多孔类的沉积和古生态作用过程;
4. 刺丝胞和多孔类的古生物地理;
5. 刺丝胞和多孔类的生物成矿作用和成岩作用过程;
6. 礁的演化及其与全球生物化学旋回之间的关系。

宣读的论文中, 以各断代地层中珊瑚化石的研究报道为数最多, 反映了与会学者的共识: 即化石分类和描述工作必须继续和坚持; 珊瑚及其它刺丝胞和多孔类自前寒武纪延存至今, 在现今赤道两侧的海洋中继续繁育, 分布广、种类多、历史久, 如不认清研究对象, 不从基础性分类描述着手, 仅凭资料分析, 研究无法深入。其次, 古生态学的研究不可忽视;

将今论古, 古今对比, 包括生物礁与刺丝胞及多孔类骨骼的地球化学性质的研究及与古气候、生物古地理的关系, 是实证古生物学研究的重要内容。再者, 新技术与新方法的应用必须重视, 包括电子技术的应用与信息的交流等。

与会学者多数是研究化石的古生物学家, 也有研究现代珊瑚的生物学家参加, 他们提交的论文, 不乏新颖的论点, 如网状生物进化概念。根据这一概念, 生物的进化既是分枝的, 也是合并的, 种在时间和空间中是不断变化的, 多数情况下其分布是不能界定的, 大部分种没有发源和最早产生的时间, 绝大多数种是人为的单位, 是人类为了沟通信息而建立的。分子分类与形态分类之间不存在明显的交叉联系, 网状进化, 根本上是环境作用于基因所致, 不是生物学的反应作用于形态的结果。上述观点似乎忽略了生物在地球发展历史进程中进化的事实, 但是, 对古生物学进化理论提出的挑战 and 质疑, 有其参考和借鉴的价值。

会前安排有 3 条野外地质考察路线, 其中有 2 条安排在中国的贵州和广西, 由俞昌民教授负责野外地质考察路线的指导和组织工作, 1 条安排在日本琉球群岛; 会后 2 条路线均安排在日本境内, 分别在秋吉地体 (Akiyoshi) 和北神地体 (Kitakami)。

会议选举了新一届国际刺丝胞和多孔类化石学会的领导班子, 主席由日本的森启教授 (Prof. Kei Mori) 担任, 还有 5 位副主席和 22 位理事; 中国的廖卫华和王向东当选为新一届理事。经过投票表决, 下一届的国际化石刺丝胞与多孔类会议于 2003 年在奥地利的格拉茨市 (Graz) 举行。会议通讯录改出电子版, 由德国的 Schroeder, S. 和 Oekentorp, K. 编辑。

俞昌民、廖卫华