

# 早三叠世下扬子古海洋地球化学环境的修复过程

左景勋<sup>1,3</sup>, 童金南<sup>2</sup>, 赵来时<sup>1\*</sup>, 常德峰<sup>4</sup>, 赵荣军<sup>3</sup>

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 河南省地质调查院, 河南郑州 450001

4. 山东水利职业学院, 山东日照 276826

**摘要:** 巢湖平顶山北坡剖面下三叠统岩石化学成分分析表明,  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  及微量元素 Ba、V、Be、Nb、Zn、Cu、Ni、Co、Pb 主要富集在下三叠统格里斯巴赫(Griesbachian)、迪纳(Dienerian)及斯密斯(Smithian)亚阶中, 形成了 8 次显著的正异常, 异常的强度、规模由下向上呈下降趋势; 微量元素 Sr 和常量元素 CaO 主要富集在下三叠统上部斯帕斯(Spathian)亚阶中, 其含量由下向上呈逐渐增加趋势。前者含量与碳酸盐岩的碳同位素组成( $\delta^{13}\text{C}$ )呈负相关关系, 后者含量与碳酸盐岩的碳同位素组成( $\delta^{13}\text{C}$ )呈正相关关系。海相碳酸盐岩碳同位素组成( $\delta^{13}\text{C}$ )指示初始生产力大小, 同时亦是海洋生态环境改善的指示标志; 负相关表明环境恶化、生物萧条, 正相关表明环境适宜、生物繁盛。据常量元素和微量元素分布异常特点在下三叠统地层中识别出 8 次地质事件, 其规模及影响强度由早到晚逐渐变小及减弱; 晚二叠世末期及早三叠世初期的火山喷发将各种有害元素大量输向海洋, 导致海水中粘土矿物、微量元素含量异常增高, 海洋生态环境恶化。随着时间推移, 火山活动逐渐平息, 海洋中各种有害组分逐渐排除, 海水得到净化, 生态环境渐渐恢复。

**关键词:** 化学成分; 古海洋; 早三叠世; 下扬子地区; 沉积物; 地球化学。

中图分类号: P67

文章编号: 1000-2383(2013)03-0441-13

收稿日期: 2012-07-17

## Geochemical Environment Restoration of the Lower Yangtze Paleocyan in the Early Triassic, Southeastern China

ZUO Jing-xun<sup>1,3</sup>, TONG Jin-nan<sup>2</sup>, ZHAO Lai-shi<sup>1\*</sup>, CHANG De-feng<sup>4</sup>, ZHAO Rong-jun<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou 450001, China

4. Shandong Water Polytechnic, Rizhao 276826, China

**Abstract:** Results of chemical analysis on rock samples collected from the north Pingdingshan Section, Chaohu, Anhui Province, Southeastern China, suggest that main elements of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  and trace elements of Ba, V, Be, Nb, Zn, Cu, Ni, Co, Pb are rich in the Griesbachian, the Dienerian, as well as in the Smithian Subseries in the Lower Triassic. Eight distinct positive anomalies have been identified in the Lower Triassic on the basis of results of main and trace elements mentioned above. In ascending order, strength, size of anomalies and content of these elements in the Lower Triassic decrease gradually. In contrast to these elements, Sr and CaO are relatively concentrated in the Spathian subseries in the uppermost part of the Lower Triassic. Furthermore, trace element of Sr and main element of CaO enrich gradually up the north Pingdingshan Section. Content of the former elements has negative correlation with  $\delta^{13}\text{C}$  values of carbonate, while the content of the later elements is positively related with  $\delta^{13}\text{C}$  values of carbonate. Commonly,  $\delta^{13}\text{C}$  value is used as an indicator of marine primary production and also used as an indicator to define restoration of marine ecological environment. Negative correlation between element contents and  $\delta^{13}\text{C}$  values indicates that the deteriorating marine environment is the tremendous disaster to the Early Triassic marine fauna in the Lower Yangtze region, while the

**基金项目:** 地质过程与矿产资源国家重点实验室开放课题 (Nos. GPMR200903, MSFGGPMR201310); 科技部基础性工作专项 (No. 2006FY120300-11); 国家自然科学基金项目 (Nos. 40672023, 41272025, 40972003).

**作者简介:** 左景勋 (1963-), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事沉积学及矿产勘查工作。E-mail: jxzuo@nigpas.ac.cn.

\* **通讯作者:** 赵来时, E-mail: lszhao@cug.edu.cn

positive correlation between element contents and  $\delta^{13}\text{C}$  values present that the feasible marine environment to the Early Triassic fauna. Eight marine geo-events have been identified in the Early Triassic based on the pronounced anomalies of trace elements and main elements. Strength of these events became weaker and weaker from the early Early Triassic to the late Early Triassic. A plenty of trace elements from the terrestrial volcano eruptions fluxed into the sea during the Late Permian and the Early Triassic, resulting in high content of argillaceous minerals and high grade of trace elements which led to paleocean environment deteriorating. Marine environment recovered as soon as the superfluous trace elements and argillaceous minerals deposited on the sea floor after volcano activities ceased.

**Key words:** chemical composition; paleocean; Early Triassic; Lower Yangtze region; sediments; geochemistry.

地史上发生了 5 次规模较大的生物灭绝事件,二叠纪/三叠纪之交的生物灭绝是地史上规模最大的一次(Erwin, 1994), 大约有 96% 的海洋生物和 70% 的陆地生物消失, 导致海洋生物绝灭的恶劣环境条件从二叠纪晚期开始一直持续到早三叠世初期(Erwin, 2000; Payne *et al.*, 2004; 杨浩等, 2006; Erwin, 2007). 研究表明, 生物绝灭表现为多幕次性(Yin *et al.*, 2007; Clapham *et al.*, 2009), 其原因可能与火山活动(殷鸿福等, 1989; Isozaki *et al.*, 2007; Reichow *et al.*, 2009; Saunders and Reichow, 2009)、海退(芮琳和江纳言, 1984)、陨石撞击(柴之芳等, 1986)、缺氧事件(殷鸿福, 1994; Wignall and Twitchett, 1996; 李玉成和周忠泽, 2002; Meyer *et al.*, 2011)、天然气水合物释放(Krull and Retallack, 2000; Li and Zhou, 2002; Haas *et al.*, 2006)等诸多因素有关. 生物大灭绝之后, 随着海洋环境的恢复与调整, 生物复苏与演化重新开始. 因此, 早三叠世初可能是显生宙生物界最萧条的时期, 生态环境的破坏导致早三叠世最初 9.5 Ma 内大多数海洋生物消失(Schubert and Bottjer, 1995; Bowring *et al.*, 1998), 严酷的环境条件对灭绝后生物复苏具有强烈的影响(Woods *et al.*, 1999). 本文以早三叠世海洋沉积物为研究对象, 采用岩石化学成分、微量元素组分测试分析手段, 探索早三叠世初期海洋生物复苏的过程中下扬子海生态环境逐渐修复的动态演变过程.

## 1 地质背景

早三叠世下扬子地区沉积相带呈北东—南西向展布, 东南部为浅水碳酸盐台地, 北西部为深水陆棚, 中部为碳酸盐缓坡(图 1), 由南东向北西海水深度呈加深趋势(冯增昭等, 1997). 安徽巢湖平顶山剖面代表深水陆棚区沉积组合. 该区三叠系研究一直倍受重视, 有关本区的生物地层(郭佩霞和徐家聪, 1980; 李金华和丁保良, 1981; 丁梅华, 1983; 赵来时

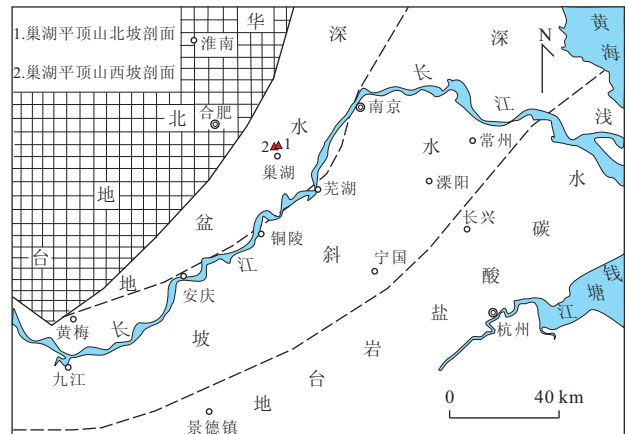


图 1 下扬子地区早三叠世岩相古地理(据冯增昭等, 1997 修编)

Fig. 1 Palaeogeography of the Lower Yangtze area in the Early Triassic

等, 2003, 2005; 童金南等, 2005a; Tong *et al.*, 2006; Zhao *et al.*, 2007, 2008a, 2008b)、岩石地层、层序地层(童金南, 1997; 童金南等, 2005b)、沉积特征(李尚武和吴胜和, 1998)、碳氧同位素组成演化(Tong *et al.*, 2002; 左景勋等, 2003, 2004; 童金南等, 2005a; Zuo *et al.*, 2006; Tong *et al.*, 2007b)、生物复苏(Tong *et al.*, 2007a; 赵来时等, 2009; 陈剑波, 2012)的研究都取得了重大进展. 平顶山西坡剖面曾被提议为早三叠世 Induan 阶与 Olenekian 阶国际界线层型(Tong *et al.*, 2003; 童金南等, 2005a; Zhao *et al.*, 2005, 2008b).

平顶山北坡、西坡剖面主要出露下三叠统下部殷坑组、和龙山组及南陵湖组下部地层. 殷坑组为泥岩夹泥灰岩、瘤状灰岩及少量微晶灰岩, 韵律清楚. 下部韵律由泥岩、泥灰岩组成, 上部韵律由泥岩、瘤状灰岩组成, 韵律厚度 80 cm 左右. 泥岩呈灰绿、灰黑色, 含黄铁矿结核, 产双壳类、菊石等化石, 水平层理发育, 反映较深水沉积之特点. 中部夹 3 层灰白色凝灰质粘土岩, 单层厚度 1~3 cm. 本组厚度 38 m 左右. 和龙山组主要为泥岩、瘤状灰岩、泥晶灰岩, 向上泥晶灰岩增多, 由泥岩→瘤状灰岩或泥岩→泥晶

灰岩构成韵律层。泥岩水平层理发育,呈黑色、灰绿色,产菊石。上部黑色泥岩中产较多灰岩透镜体,大小不同,长轴平行层面。中小透镜体内有鱼化石,保存完好。本组属潮下低能强还原环境,向上水深变浅,厚度 21 m 左右。南陵湖组下部为灰色块状泥晶灰岩夹灰绿色中厚层状瘤灰岩,由灰岩、瘤状灰岩构成韵律层,向上瘤状灰岩单层厚度逐渐变小,灰岩单层厚度增大。

## 2 早三叠世海洋沉积物的原岩信息保留程度

对巢湖地区平顶山北坡剖面下三叠统各组按岩性分层采取岩石化学全分析样品,对同一样品又进行了微量元素分析和碳、氧同位素组成测试分析。微量元素分析在湖北省岩矿测试中心完成,碳氧同位素组成测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。常量元素  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ ,烧失量(Lost)和微量元素 Sr、Ba、Ni、Co、Cr、V、Cu、Pb、Be、Nb、Zn 的分析结果见表 1、2。有关碳氧同位素组成分析及研究成果已开展过专题研究(左景勋等,2003,2004)。

### 2.1 常量元素记录的原始海水信息

海洋沉积物中  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MgO}$  等常量元素具有相近的物质来源(Kato *et al.*, 2002),一般来自陆源物质向海的输入,它们之间具有较好的相关性。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$  在大气淡水中的溶解度较低,沉积成岩之后  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  不易发生变化,因此, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  可作为评价海洋沉积物来源的良好标志(Sugisaki *et al.*, 1982)。海相碳酸盐岩中 Mg、K 等元素在成岩过程中受大气淡水作用易发生流失,如果岩石中 Mg、K 含量发生变化,势必影响到

$\text{MgO}/\text{TiO}_2$ 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$  值,而巢湖平顶山北坡剖面下三叠统中  $\text{TiO}_2$  与  $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  良好的线性关系(图 2),说明平顶山北坡剖面下三叠统基本保持原始海洋沉积的特点。

### 2.2 Sr/Mg 值记录的原始海水信息

现代海相灰岩中 Sr、Mg 含量呈良好的相关性(Mucci and Morse, 1983; Carpenter *et al.*, 1991; Carpenter and Lohmann, 1992; Cicero and Lohmann, 2001),并且这种相关性主要取决于碳酸盐岩沉积时海水中的 Sr/Mg 值,淡水中 Sr/Ca、Mg/Ca 低于海水,海相碳酸盐岩在经历淡水参与的成岩作用后,Sr/Ca、Mg/Ca 会显著降低(Whittaker *et al.*, 1994),而且随着成岩作用强度的加大,Sr、Mg 含量显著降低。因此,Sr/Mg 是判断原岩化学成分变化的良好标志。如果非生物成因海相灰岩中 Sr、Mg 之间呈线性关系,那么碳酸盐岩中 Sr/Ca、Mg/Ca 可以看作原始海水中的 Sr/Ca、Mg/Ca 值(Frank and Lohmann, 1996; Hardie, 1996; Stanley and Hardie, 1998)。碳酸盐岩中 Sr/Ca、Mg/Ca 变化反映了 Sr/Mg 值的变化。因此,根据 Sr/Ca、Mg/Ca 之间的关系可以确定 Sr/Mg 值。

图 3 为巢湖平顶山北坡剖面下三叠统 Sr/Ca 与 Mg/Ca 分布图。从图 3a 可以看出,下三叠统海相沉积岩 Sr/Ca、Mg/Ca 之间呈较好的相关性,相关系数为 0.976 8,且 Sr/Ca、Mg/Ca 之间关系可用  $\text{Sr}/\text{Ca} = 0.0078 \text{ Mg}/\text{Ca} + 0.0005$  表示,即  $\text{Sr} = 0.0078 \text{ Mg} + 0.0005 \text{ Ca}$ , $\text{Sr}/\text{Mg} \approx 0.0078$ 。Sr/Ca 与 Mg/Ca 分布明显地分为 2 个区,即碳酸盐岩类区和泥岩(粘土岩)区。碳酸盐岩类区的 Sr/Ca 与 Mg/Ca 分别分布在 0.0003~0.0014、0.0005~0.0806 范围内,相对稳定;泥岩(粘土岩)区 Sr/Ca 与 Mg/Ca 分别分布在 0.0012~0.0196、0.1298~2.3013 范围之内,变化较大。粘土岩中的 Sr/Ca 与 Mg/Ca

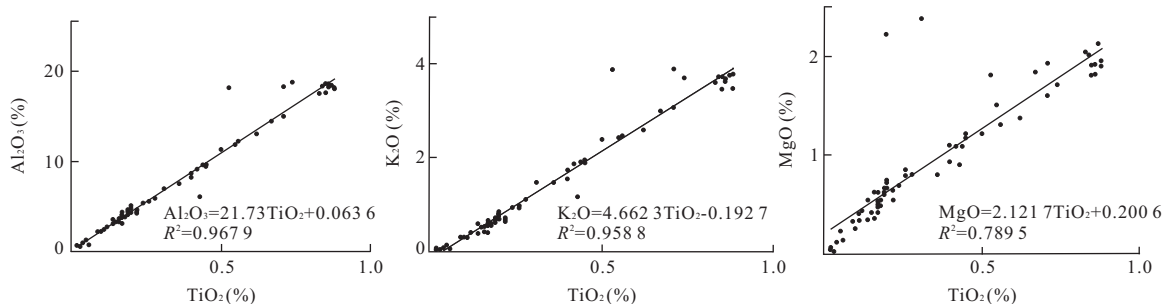


图 2 巢湖平顶山北坡剖面下三叠统常量元素之间的相关性

Fig. 2 Relationship between  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$  and  $\text{TiO}_2$  in the north Pingdingshan Section, Chaohu

表 1 巢湖平顶山北坡剖面下三叠统常量元素分析结果(%)

Table 1 Data of main elements of the Lower Triassic in the north Pingdingshan Section, Chaohu, Anhui Province (%)

层位	样号	岩性	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Lost
斯帕斯亚阶	ACP-69	灰岩	2.49	0.59	0.05	0.17	0.05	53.80	0.09	0.02	0.03	0.02	0.01	42.53
	ACP-68	灰岩	2.62	0.74	0.01	0.27	0.13	53.59	0.12	0.04	0.02	0.06	0.01	42.35
	ACP-67	灰岩	2.08	0.60	0.01	0.23	0.03	54.07	0.06	0.03	0.01	0.02	0.01	42.80
	ACP-66	灰岩	1.56	0.55	0.01	0.07	0.01	54.70	0.07	0.01	0.01	0.03	0.01	42.85
	ACP-65	灰岩	4.15	0.94	0.10	0.15	0.11	52.31	0.12	0.05	0.02	0.04	0.02	41.83
	ACP-64	灰岩	7.15	2.14	0.48	0.25	0.25	49.50	0.08	0.28	0.05	0.10	0.02	39.55
	ACP-62-2	灰岩	4.64	1.26	0.24	0.20	0.22	51.77	0.15	0.12	0.02	0.02	0.05	0.02
ACP-61	灰岩	7.56	2.17	0.30	0.40	0.32	48.86	0.17	0.28	0.02	0.02	0.09	0.03	39.65
斯密斯亚阶	ACP-60	灰岩	12.24	3.29	1.14	0.32	0.41	44.89	0.17	0.49	0.05	0.15	0.05	36.68
	ACP-59	泥灰岩	18.77	6.07	2.66	0.45	0.89	37.40	0.19	1.14	0.07	0.43	0.07	31.73
	ACP-58	灰岩	11.27	3.21	0.50	0.57	0.35	45.85	0.23	0.41	0.08	0.16	0.04	37.20
	ACP-57	灰岩	14.76	3.82	0.92	0.50	0.53	42.79	0.34	0.57	0.10	0.18	0.06	35.28
	ACP-56-1	灰岩	15.29	3.83	1.25	0.45	0.48	42.36	0.46	0.58	0.13	0.17	0.07	34.78
	ACP-55-1	灰岩	14.46	3.05	1.20	0.38	0.34	43.57	0.40	0.37	0.26	0.14	0.09	35.60
	ACP-54-2	灰岩	12.61	2.75	0.69	0.67	0.42	45.00	0.34	0.39	0.13	0.12	0.04	36.70
	ACP-53-2	灰岩	10.31	2.46	1.19	0.45	0.40	46.32	0.31	0.28	0.09	0.11	0.05	37.88
	ACP-52-2	灰岩	48.84	14.43	4.21	0.98	1.83	11.58	0.67	2.98	0.04	0.67	0.12	13.50
	ACP-51-2	灰岩	12.55	3.07	0.50	0.43	0.41	45.26	0.42	0.39	0.07	0.17	0.06	36.53
	ACP-50-4	灰岩	9.86	2.39	0.34	0.42	0.33	47.22	0.39	0.26	0.06	0.11	0.06	38.43
	ACP-49-5	灰岩	21.30	5.51	3.19	0.45	0.84	35.77	0.41	0.92	0.15	0.26	0.08	30.98
	ACP-48-3	灰岩	12.58	3.53	0.42	0.45	0.53	44.89	0.44	0.57	0.08	0.14	0.06	36.18
	ACP-47-4	瘤灰岩	15.19	4.10	0.60	0.57	0.59	42.77	0.51	0.67	0.08	0.19	0.07	34.53
ACP-46-3	瘤灰岩	17.36	3.64	1.01	0.37	0.61	41.65	0.74	0.52	0.10	0.16	0.06	33.65	
迪纳亚阶	ACP-45-2	瘤灰岩	20.44	4.78	0.83	0.50	0.71	38.98	0.63	0.79	0.10	0.20	0.05	31.85
	ACP-44-4	瘤灰岩	20.00	5.08	0.97	0.48	0.73	38.76	0.71	0.83	0.10	0.20	0.06	31.95
	ACP-43-5	瘤灰岩	20.58	4.59	1.48	0.40	0.63	38.84	0.70	0.69	0.08	0.22	0.08	31.60
	ACP-42-4	灰岩	16.96	4.35	0.67	0.42	0.61	41.60	0.67	0.64	0.08	0.17	0.06	33.65
	ACP-41-2	瘤灰岩	17.17	4.45	1.63	0.33	0.65	40.78	0.68	0.69	0.12	0.19	0.08	33.10
	ACP-40-2	瘤灰岩	17.46	4.34	1.66	0.55	2.21	38.58	0.53	0.72	0.15	0.20	0.07	33.38
	ACP-39-2	瘤灰岩	30.63	8.19	3.66	0.35	1.09	28.27	0.63	1.54	0.11	0.40	0.08	24.88
	ACP-38-2	瘤灰岩	16.06	4.04	1.51	0.32	0.52	41.96	0.52	0.60	0.10	0.17	0.07	33.98
	ACP-37-2	瘤灰岩	16.38	4.09	1.41	0.42	0.61	42.78	0.59	0.60	0.12	0.19	0.08	32.60
	ACP-36-2	瘤灰岩	22.00	4.64	1.01	0.40	0.65	38.26	0.67	0.69	0.10	0.19	0.07	31.20
	ACP-35-2	瘤灰岩	16.96	4.26	1.61	0.38	0.53	41.10	0.51	0.65	0.10	0.22	0.07	33.50
	ACP-34	瘤灰岩	20.35	5.30	1.59	0.58	0.68	37.94	0.59	0.92	0.09	0.24	0.08	31.50
	ACP-32	泥岩	62.11	18.38	4.30	0.87	2.11	1.13	0.82	3.76	0.03	0.87	0.16	5.28
	ACP-31	泥岩	60.70	17.61	6.65	0.67	1.90	0.87	0.80	3.44	0.05	0.85	0.16	6.10
	ACP-30	泥岩	44.97	13.01	4.14	0.95	1.36	15.36	0.71	2.58	0.09	0.62	0.13	15.93
	ACP-29	灰岩	15.08	3.73	0.72	0.40	0.46	43.17	0.53	0.54	0.09	0.17	0.06	34.90
	ACP-28	灰岩	15.37	3.76	0.60	0.55	0.47	42.89	0.49	0.56	0.09	0.18	0.07	34.85
ACP-27	瘤灰岩	16.62	4.45	0.81	0.75	0.53	41.31	0.49	0.63	0.09	0.22	0.07	33.90	
格里斯巴赫亚阶	ACP-26	灰岩	15.18	3.72	0.95	0.48	0.51	42.76	0.51	0.55	0.10	0.17	0.06	34.88
	ACP-25	泥岩	61.98	18.06	4.66	0.67	1.89	0.92	0.60	3.46	0.03	0.88	0.13	6.55
	ACP-24	泥岩	61.20	18.25	4.67	0.95	1.91	0.80	0.61	3.68	0.02	0.86	0.13	6.75
	ACP-23	灰岩	18.48	4.28	1.24	0.67	0.65	39.92	0.44	0.68	0.09	0.20	0.06	33.15
	ACP-22	灰岩	22.99	5.64	1.47	0.70	0.78	36.03	0.53	0.96	0.10	0.26	0.06	30.35
	ACP-21	泥岩	61.50	18.32	4.49	1.57	2.00	0.85	0.78	3.72	0.06	0.84	0.12	5.58
	ACP-19	泥岩	61.80	18.12	4.35	1.50	1.94	0.78	0.83	3.77	0.04	0.88	0.14	5.68
	ACP-18	泥岩	50.97	14.98	3.98	1.05	1.59	10.34	0.83	3.06	0.08	0.71	0.11	12.13
	ACP-17	瘤灰岩	33.76	9.55	3.31	1.48	1.21	24.92	0.62	1.87	0.11	0.45	0.08	22.50
	ACP-16	泥岩	60.12	18.56	5.94	0.92	1.80	0.91	0.41	3.72	0.08	0.85	0.11	6.40
	ACP-15	泥岩	61.10	18.55	5.47	0.67	1.81	0.83	0.46	3.62	0.07	0.86	0.10	6.28
	ACP-14	泥灰岩	41.63	11.86	3.46	1.12	1.49	18.22	0.54	2.41	0.08	0.55	0.10	18.38
	ACP-13	泥岩	34.09	8.64	3.09	1.20	0.92	25.94	0.57	1.72	0.10	0.40	0.08	23.08
	ACP-12-2	泥灰岩	31.43	7.45	4.59	0.23	0.79	28.10	0.43	1.46	0.12	0.36	0.09	24.83
	ACP-11	泥灰岩	32.58	5.91	4.21	0.10	0.79	28.86	0.36	1.10	0.16	0.28	0.07	25.43
	ACP-10	泥灰岩	39.22	9.51	3.42	0.38	1.17	22.43	0.50	1.93	0.11	0.45	0.10	20.63
	ACP-09	泥灰岩	40.56	9.60	4.60	0.32	1.08	20.92	0.56	1.90	0.14	0.44	0.08	19.65
	ACP-08	泥灰岩	47.23	12.20	4.95	0.32	1.29	14.68	0.65	2.46	0.17	0.56	0.10	15.25
	ACP-07	泥灰岩	39.96	9.13	4.43	0.63	1.08	21.61	0.44	1.85	0.19	0.42	0.08	20.05
ACP-06	泥灰岩	44.79	11.25	4.49	0.50	1.21	17.13	0.58	2.37	0.10	0.50	0.09	16.85	
ACP-05	泥灰岩	35.22	6.93	4.16	0.23	2.37	24.81	0.33	1.46	0.23	0.31	0.06	23.70	
ACP-03	泥岩	63.38	18.25	3.55	0.83	1.92	0.83	0.63	3.89	0.02	0.71	0.09	5.70	
ACP-02	白色粘土	63.62	18.75	2.66	0.60	1.70	0.97	0.36	3.69	0.03	0.74	0.06	6.65	
ACP-01	硅质岩	63.07	18.14	3.60	0.83	1.80	0.66	0.41	3.87	0.02	0.53	0.13	6.75	

表 2 巢湖平顶山北坡剖面下三叠统各种元素含量(10<sup>-6</sup>)

Table 2 Data of trace elements of the Lower Triassic in the north Pingdingshan Section, Chaohu, Anhui Province (10<sup>-6</sup>)

层位	样号	岩性	Sr	Ba	Ni	Co	Cr	V	Cu	Pb	Be	Nb	Zn
斯帕斯亚阶	ACP-69	灰岩	522.00	37.00	15.00	7.20	<5.00	10.90	6.70	21.30	0.30	5.20	6.00
	ACP-68	灰岩	333.00	37.00	14.00	6.70	<5.00	10.10	5.80	17.70	0.30	4.90	7.00
	ACP-67	灰岩	462.00	37.00	14.00	6.50	<5.00	9.40	4.70	23.80	0.30	4.50	6.00
	ACP-66	灰岩	529.00	26.00	15.00	7.80	<5.00	9.40	5.30	23.80	0.30	5.40	5.00
	ACP-65	灰岩	420.00	103.00	15.00	7.50	<5.00	12.30	8.10	24.40	0.40	5.90	9.00
	ACP-64	灰岩	247.00	196.00	17.00	8.10	<5.00	18.20	8.80	19.30	0.50	6.70	17.00
斯帕斯亚阶	ACP-62-2	灰岩	267.00	49.00	16.00	7.60	<5.00	14.10	7.10	20.80	0.40	6.80	10.00
	ACP-61	灰岩	395.00	88.00	17.00	7.30	<5.00	19.00	9.20	16.90	0.50	6.40	17.00
斯密斯亚阶	ACP-60	灰岩	243.00	97.00	20.00	9.50	5.00	26.30	9.70	22.50	0.70	7.90	23.00
	ACP-59	泥灰岩	186.00	146.00	27.00	12.10	20.60	54.20	20.00	23.70	1.20	12.40	45.00
	ACP-58	灰岩	244.00	140.00	18.00	7.60	<5.00	25.40	8.80	19.00	0.60	7.30	22.00
	ACP-57	灰岩	260.00	138.00	19.00	8.20	<5.00	32.10	10.90	28.10	0.90	7.50	33.00
	ACP-56-1	灰岩	237.00	129.00	19.00	7.70	7.00	30.20	16.00	25.50	0.80	8.50	23.00
	ACP-55-1	灰岩	330.00	109.00	24.00	11.60	7.00	30.40	17.40	21.90	0.70	7.60	33.00
	ACP-54-2	灰岩	266.00	88.00	18.00	7.00	<5.00	25.10	11.50	25.60	0.70	7.30	20.00
	ACP-53-2	灰岩	319.00	89.00	22.00	9.30	<5.00	35.90	12.70	24.50	0.70	6.30	34.00
	ACP-52-2	灰岩	103.00	344.00	35.00	11.00	58.10	99.90	27.80	22.00	2.30	17.80	88.00
	ACP-51-2	灰岩	244.00	83.00	18.00	7.80	6.40	25.70	9.50	21.60	0.60	8.40	20.00
	ACP-49-5	灰岩	199.00	152.00	31.00	11.80	18.90	43.90	18.50	26.90	1.20	10.10	38.00
	ACP-48-3	灰岩	161.00	75.00	17.00	8.20	6.20	24.90	9.80	20.50	0.70	7.10	19.00
ACP-47-4	瘤灰岩	200.00	92.00	18.00	8.00	9.20	31.40	15.90	18.00	0.80	9.00	23.00	
ACP-46-3	瘤灰岩	152.00	82.00	19.00	9.20	7.30	27.20	11.70	20.00	0.70	7.80	26.00	
迪纳亚阶	ACP-45-2	瘤灰岩	164.00	95.00	18.00	7.60	10.60	33.80	11.80	14.90	0.90	8.00	27.00
	ACP-44-4	瘤灰岩	151.00	105.00	20.00	8.30	14.50	34.90	14.50	21.10	1.00	9.10	38.00
	ACP-43-5	瘤灰岩	127.00	99.00	20.00	9.50	5.60	32.10	16.50	18.80	0.80	7.50	28.00
	ACP-42-4	灰岩	154.00	88.00	17.00	7.30	11.10	29.00	15.40	19.80	0.80	9.10	18.00
	ACP-41-2	瘤灰岩	153.00	101.00	20.00	9.50	15.00	34.90	21.30	25.30	0.90	7.20	29.00
	ACP-40-2	瘤灰岩	137.00	321.00	18.00	8.20	8.60	32.10	10.90	19.50	0.90	9.10	27.00
	ACP-39-2	瘤灰岩	106.00	235.00	28.00	11.40	23.90	57.20	27.50	45.70	1.50	13.10	71.00
	ACP-38-2	瘤灰岩	142.00	95.00	19.00	9.30	10.30	29.70	10.70	19.10	0.80	9.20	28.00
	ACP-37-2	瘤灰岩	149.00	115.00	19.00	8.80	7.90	30.80	17.30	22.00	0.80	8.70	27.00
	ACP-36-2	瘤灰岩	142.00	96.00	18.00	7.70	14.20	31.80	15.60	22.40	0.80	9.50	26.00
	ACP-34	瘤灰岩	130.00	142.00	19.00	8.50	18.40	38.70	15.40	22.00	1.00	9.50	31.00
	ACP-33	泥岩	88.00	381.00	34.00	9.70	80.70	135.80	61.40	15.10	3.00	19.80	81.00
	ACP-32	泥岩	92.00	415.00	43.00	16.60	91.00	160.60	47.80	18.30	3.40	21.00	89.00
	ACP-31	泥岩	83.00	387.00	55.00	23.90	85.50	146.10	60.40	33.60	2.80	21.20	119.00
	ACP-30	泥岩	89.00	314.00	43.00	22.20	48.20	110.70	49.50	28.00	2.00	17.90	89.00
	ACP-29	灰岩	183.00	89.00	16.00	7.10	10.10	27.60	10.80	18.90	0.70	8.60	23.00
	ACP-28	灰岩	183.00	102.00	16.00	7.50	7.80	28.00	11.70	17.60	0.70	7.40	23.00
	格里斯巴赫亚阶	ACP-26	灰岩	158.00	85.00	18.00	8.20	9.20	28.80	12.60	19.90	0.70	9.00
ACP-25		泥岩	90.00	423.00	35.00	10.70	85.30	122.60	31.60	17.30	3.20	20.90	78.00
ACP-24		泥岩	97.00	382.00	38.00	11.00	86.50	125.20	61.40	13.10	3.20	20.50	79.00
ACP-23		灰岩	160.00	96.00	18.00	8.40	17.10	31.20	20.60	28.10	0.80	8.90	34.00
ACP-22		灰岩	163.00	153.00	22.00	11.40	16.10	41.10	9.60	30.20	1.10	11.10	37.00
ACP-21		泥岩	102.00	389.00	45.00	18.70	82.70	117.00	14.60	17.40	3.20	21.50	96.00
ACP-20		泥岩	105.00	351.00	47.00	32.80	87.20	133.80	122.00	56.50	3.30	20.70	96.00
ACP-19		泥岩	101.00	335.00	41.00	16.70	80.10	120.50	18.70	21.40	3.10	21.70	95.00
ACP-18		泥岩	108.00	295.00	41.00	20.40	59.00	94.50	15.70	25.50	2.50	18.80	81.00
ACP-17		瘤灰岩	131.00	202.00	28.00	14.40	34.90	62.70	20.90	37.70	1.60	13.70	67.00
ACP-16		泥岩	95.00	378.00	45.00	16.30	84.40	114.50	24.10	23.30	3.20	21.50	102.00
ACP-15		泥岩	105.00	377.00	46.00	15.20	79.30	124.60	105.50	31.40	3.30	21.00	101.00
ACP-14		泥灰岩	85.00	242.00	28.00	11.60	45.50	74.80	16.60	26.10	2.00	16.10	74.00
ACP-13		泥岩	71.00	433.00	25.00	11.20	25.00	52.30	19.60	24.60	1.50	12.60	48.00
ACP-12-2		泥灰岩	55.00	203.00	22.00	10.60	25.20	52.10	23.40	26.60	1.50	12.70	45.00
ACP-11		泥灰岩	63.00	228.00	20.00	9.20	12.30	41.70	17.10	26.60	1.40	10.60	47.00
ACP-10		泥灰岩	80.00	328.00	28.00	10.90	32.40	60.20	19.90	27.10	2.00	12.30	66.00
ACP-09		泥灰岩	72.00	191.00	28.00	12.90	31.70	57.00	19.30	26.60	1.80	14.00	54.00
ACP-08	泥灰岩	83.00	254.00	32.00	14.30	47.10	73.00	23.90	25.80	2.20	16.50	62.00	
ACP-07	泥灰岩	75.00	234.00	30.00	13.50	33.90	57.80	33.30	23.10	1.80	13.40	52.00	
ACP-06	泥灰岩	77.00	232.00	31.00	16.90	38.20	67.90	38.10	29.00	2.10	15.10	83.00	
ACP-05	泥灰岩	106.00	350.00	31.00	8.60	22.40	104.70	34.20	21.40	3.70	11.20	137.00	
ACP-03	泥岩	73.00	293.00	78.00	14.60	80.80	148.30	70.10	30.00	3.50	25.00	150.00	
ACP-02	粘土层	100.00	347.00	23.00	9.10	70.40	106.10	24.30	34.80	3.20	23.50	70.00	
ACP-01	硅质岩	73.00	289.00	78.00	14.40	109.40	149.40	70.10	48.60	3.50	22.90	151.00	



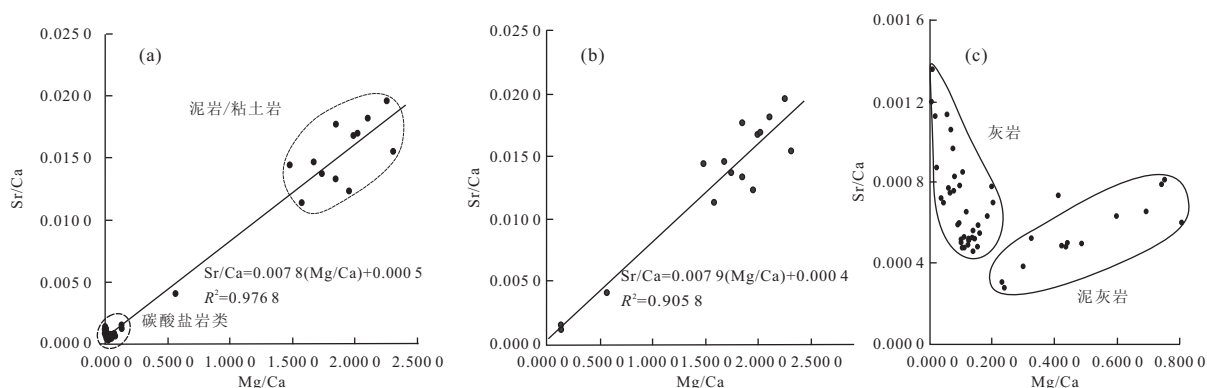


图 3 巢湖平顶山北坡剖面 Mg/Ca 和 Sr/Ca 分布

Fig. 3 Ratios of Mg/Ca vs Sr/Ca of the Lower Triassic in the north Pingdingshan Section, Chaohu

a. 下三叠统沉积岩; b. 下三叠统粘土岩、泥岩; c. 下三叠统灰岩、泥灰岩

主要取决于陆源碎屑或火山喷发物质;碳酸盐岩表现为化学成因,其 Sr/Ca 与 Mg/Ca 值则由原始海水中 Sr、Mg、Ca 浓度决定,较好地指示了原岩组份在后期成岩过程中变化不大。

### 3 下三叠统地球化学元素含量分布特征

#### 3.1 下三叠统常量元素分布特征

平顶山北坡剖面下三叠统全岩分析结果显示存在 2 组地球化学行为不同的元素(图 4)。常量元素  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  的含量具同步变化特征,它们之间的关系表现为正相关,与日本西南部远洋沉积二叠系/三叠系界线附近常量元素之间的关系(Kato *et al.*, 2002)相似; $\text{CaO}$  与烧失量(Lost)呈正相关关系,相关系数为 0.9982;但这 2 组元素含量变化趋势相反,呈负相关关系。 $\text{MnO}$  与  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、烧失量(Lost)之间具微弱负相关性,而与  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MgO}$  的负相关性较好。 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  主要分布在陆源碎屑中。海相碳酸盐岩沉积物中这几种元素与  $\delta^{13}\text{C}$  呈负相关关系, $\delta^{13}\text{C}$  是衡量海洋初始生产力的标志,大量陆源碎屑向海注入不利于海洋生物的生存,因此,本组元素对初始生产力起抑制作用。而  $\text{CaO}$ 、Lost 为海洋内生元素,与生物生命活动有关,与  $\delta^{13}\text{C}$  呈正相关关系。

各常量元素随时间的变化趋势表现为: $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  在晚二叠世末期、早三叠世格里斯巴赫初期和迪纳

期之交含量较高,表现为明显的正异常,在斯密斯中期出现轻度正异常,斯帕斯期含量最低。由格里斯巴赫亚阶→迪纳亚阶→斯密斯亚阶→斯帕斯亚阶, $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  的含量均表现出逐渐降低趋势。相反, $\text{CaO}$ 、Lost 则表现出逐渐增加趋势。

巢湖平顶山北坡剖面上, $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  主要分布于火山成因的粘土岩、泥岩、泥灰岩中,并且随着岩石中泥质含量的减少而降低,碳酸盐岩(如泥晶灰岩)中上述常量元素的含量最低。相反, $\text{CaO}$ 、Lost 则主要富集于碳酸盐岩中,岩层中随着碳酸盐岩的增多两元素含量也呈增加趋势。因此,早三叠世海洋沉积物中上述元素的含量过高与晚二叠世末、早三叠世初的火山喷发有关,也是导致海洋环境恶化、生物灭绝的直接原因之一。

#### 3.2 下三叠统微量元素分布特征

巢湖平顶山北坡剖面下三叠统微量元素分布特征如图 4 所示。依据元素之间相关性,可将 Sr、Ba、Ni、Co、Cr、V、Cu、Pb、Be、Nb、Zn 共 11 种元素划分为 4 组。

(1)微量元素 Ba、V、Be、Nb、Zn 为一组,这些元素之间呈正相关关系。其含量在格里斯巴赫亚阶、迪纳亚阶下部表现为显著正异常,在斯密斯亚阶中部表现为轻度正异常,其余层位含量均较低,各元素演化趋势相同,由下向上其含量呈降低趋势。与海相碳酸盐统计结果(Turekian and Wedepohl, 1961)相比,平顶山北坡剖面下三叠统中 Ba 的含量是海相碳酸盐岩的 7.3~27.7 倍,Nb 的含量是海相碳酸盐岩的 18.1~54.4 倍,V 的含量是海相碳酸盐岩的 0.59~4.22 倍,Zn 元素的含量是海相碳酸盐岩的

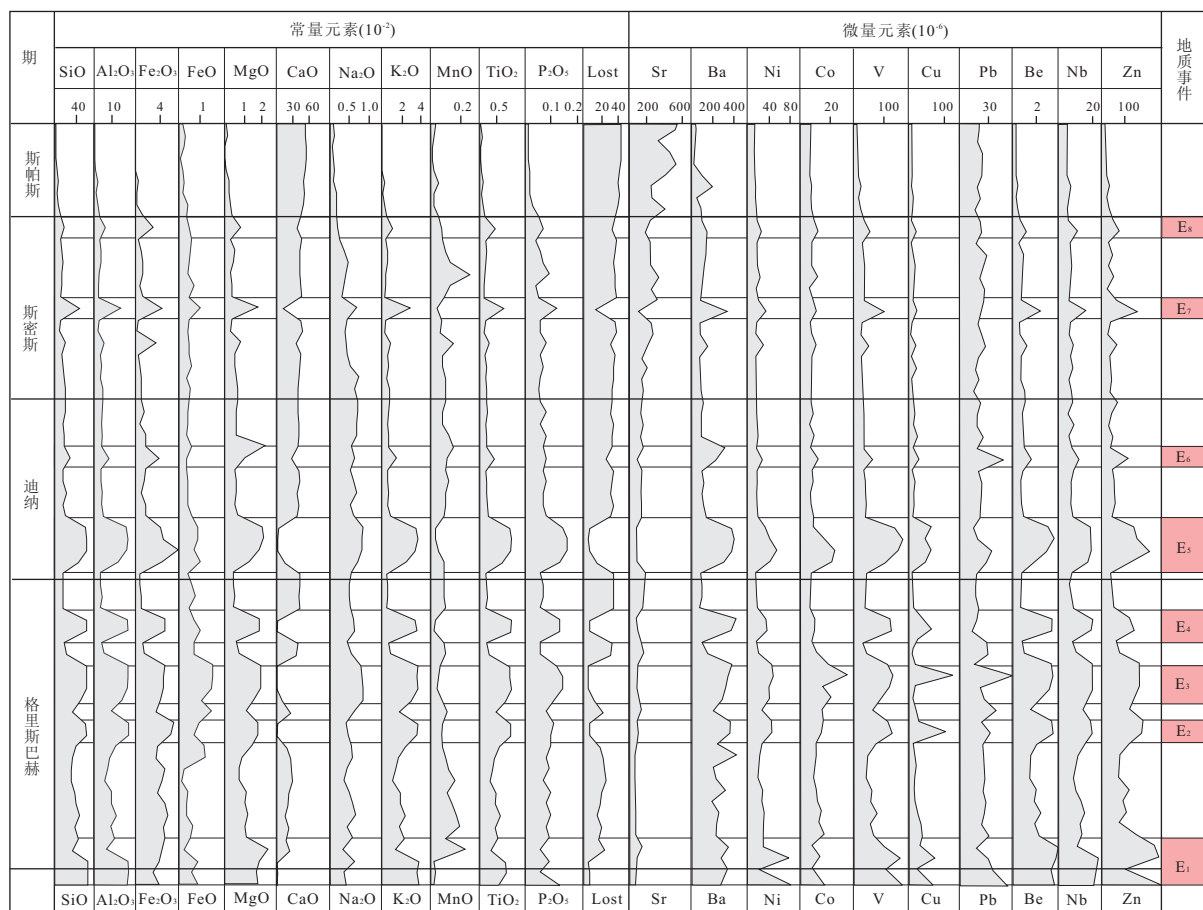


图 4 平顶山北坡剖面下三叠统常量元素、微量元素分布特征和早三叠世地质事件分布

Fig. 4 Distribution of main and trace elements in the Lower Triassic and geo-events identified in the north Pingdingshan Section, Chaohu, Anhui Province

0.42~2.08 倍,它们明显地富集于下三叠统下部岩层中,向上异常强度降低,且它们与  $\delta^{13}C$  均呈负相关关系,表明元素含量过高,对原始生产率的提高起着抑制作用。

(2)微量元素 Cu、Ni、Co、Pb 为一组,这 4 种微量元素之间呈正相关关系. 与前人进行的海相碳酸盐中统计结果(Turekian and Wedepohl, 1961)相比,平顶山北坡剖面下三叠统中 Cu 含量是海相碳酸盐岩的 1.64~8.46 倍, Ni 是海相碳酸盐岩的 0.75~1.72 倍, Co 是海相碳酸盐岩的 73.0~134.3 倍, Pb 是海相碳酸盐岩的 2.41~3.03 倍. Cu、Ni、Co 主要与基性岩浆活动有关,3 种元素主要富集在下三叠统中下部,自下而上其含量呈逐渐下降趋势. Cu、Ni 属表层耗竭—深海富集型元素,深海沉积物中 Cu、Ni 含量较高; Co、Pb 属表层富集—深海清除型元素,二者在表层海水中含量较高,在深层水中含量却较低,但是 Co 在下三叠统下部富集达到 134.3 倍, Pb 含量自始至终比较稳定,变化不大. 这说明在

海底存在 Co、Pb 的供给源,可能由海底断层中热液活动供给. 浮游植物对 Cu 需求量极少,浓度增大对浮游植物具有毒负作用. Ni 对生物酶具有激活特性,适量加入有利于藻类生长(张正斌等, 1999). Co、Zn 具有相同的植物生理作用,缺 Zn 时, Co 可代替其功能. 海水中维持适宜的 Co、Zn 浓度可以促进浮游植物生长. 平顶山北坡剖面下三叠统中  $\delta^{13}C$  与 Co、Ni、Pb、Cu 均呈负相关关系,表明这几种微量元素含量较高,对初始生产力发展起到负作用。

(3) Sr 和 CaO 呈显著的正相关关系,并且与上述微量元素、及与除 CaO 之外的其他常量元素均呈负相关关系. 格里斯巴赫亚阶 CaO、Sr 含量最低、斯帕斯亚阶含量最高,由格里斯巴赫期到斯密斯期则表现为渐增趋势. CaO、Sr 与  $\delta^{13}C$  的正相关特性表明生物的生命活动对海洋沉积物中 CaO、Sr 起着控制作用. 平顶山北坡剖面下三叠统中 CaO、Sr 含量的变化与柴之芳等对长兴煤山剖面二叠系—三叠系界线处研究的结果相同(柴之芳等, 1986; 芮琳和江

纳言,1984),上二叠统长兴阶顶部 CaO、Sr 的含量较高,下三叠统下部 CaO、Sr 则呈显著下降趋势。

## 4 古海洋地球化学环境的恶化及恢复

### 4.1 下扬子海洋地球化学环境的恶化

二叠系—三叠系界线附近火山喷发成因粘土层中微量元素 Ni、Co、Cr、V、Cu、Pb、Be、Nb、Zn 分别高达  $78.0 \times 10^{-6}$ 、 $14.4 \times 10^{-6}$ 、 $109.4 \times 10^{-6}$ 、 $149.4 \times 10^{-6}$ 、 $70.0 \times 10^{-6}$ 、 $48.6 \times 10^{-6}$ 、 $3.5 \times 10^{-6}$ 、 $23.5 \times 10^{-6}$ 、 $151.0 \times 10^{-6}$ 。印度阶—奥仑尼克阶界线处元素含量分别降低到  $30.0 \times 10^{-6}$ 、 $11.8 \times 10^{-6}$ 、 $18.9 \times 10^{-6}$ 、 $43.9 \times 10^{-6}$ 、 $18.5 \times 10^{-6}$ 、 $26.9 \times 10^{-6}$ 、 $1.2 \times 10^{-6}$ 、 $10.1 \times 10^{-6}$ 、 $38 \times 10^{-6}$ ,到斯帕斯亚阶下部这些元素含量再次降至  $17.0 \times 10^{-6}$ 、 $8.1 \times 10^{-6}$ 、 $<5.0 \times 10^{-6}$ 、 $18.2 \times 10^{-6}$ 、 $8.8 \times 10^{-6}$ 、 $19.3 \times 10^{-6}$ 、 $0.5 \times 10^{-6}$ 、 $6.7 \times 10^{-6}$ 、 $17.0 \times 10^{-6}$ 。与 Turekian and Wedepohl(1961)统计值相比,平顶山北坡剖面下三叠统中 Co 富集了 73.0~134.3 倍、Nb 富集了 18.1~54.4 倍、Ba 富集了 7.3~27.7 倍、Pb 富集了 2.41~3.03 倍、Cu 富集了 1.64~8.46 倍,而 V、Ni、Zn 在格里斯巴赫亚阶、迪纳亚阶及斯密斯亚阶分别富集了 1.72~4.22、1.50~2.08、1.08~1.72 倍;斯帕斯亚阶中 V、Ni、Zn 含量显著下降。与此相反,在上述元素含量较高的岩层中  $\delta^{13}\text{C}$  值较低,而在上述元素含量较低的岩层中  $\delta^{13}\text{C}$  值较高,因此, Ni、Co、Cr、V、Cu、Pb、Be、Nb、Zn 元素含量与  $\delta^{13}\text{C}$  呈负相关关系。

巢湖平顶山北坡剖面下三叠统中常量、微量元素含量变化的特点与晚二叠世、早三叠世初期的火山活动有密切关系。二叠纪—三叠纪之交存在着广泛的火山活动(殷鸿福等,1989),在西伯利亚东部、西部地区广泛分布着二叠纪—三叠纪之交喷发形成的火山岩(Kamo *et al.*, 2006)。我国的峨眉山玄武岩、下扬子地区上二叠统顶部及下三叠统中广泛存在的酸性火山凝灰岩夹层,都表明二叠纪/三叠纪之交火山活动频繁(何锦文等,1987;侯生秀,1987;李双应,1996)。近几年来,在安徽巢湖平顶山西坡剖面斯密斯亚阶的中部发现火山凝灰质粘土岩。二叠纪/三叠纪之交的生物大灭绝与大规模火山喷发有关,频繁的火山爆发导致环境恶化加剧了生物灭绝(Clerk *et al.*, 1986)。另外,对氧化—还原敏感的元素如 V、Ni、Cu、Zn、Pb、Ba 一般来源于热液成因,在静海缺氧的环境中沉淀下来,富存于黑色页岩中,下

三叠统下部上述元素的富集表明早三叠世初期的下扬子海洋盆底部可能出现热液喷流现象。

### 4.2 下扬子海生态环境的修复

巢湖平顶山北坡剖面下三叠统中常量元素和微量元素分布的显著异常代表地质事件的发生,据深海碳酸盐岩中元素含量的统计值(Turekian and Wedepohl, 1961)来划分海洋地质事件,巢湖平顶山北坡剖面由下向上可识别出 8 次地质事件(图 4)。其中,早三叠世格里斯巴赫期 4 次( $E_1$ — $E_4$ ),迪纳期 2 次( $E_5$ 、 $E_6$ ),斯密斯期 2 次( $E_7$ 、 $E_8$ )。规模较大的地质事件发生在早三叠世格里斯巴赫早期( $E_1$ )和迪纳早期( $E_5$ ),并且由早到晚,事件规模呈逐渐变小趋势,至斯帕斯期,海洋地质事件基本消失,生态环境基本恢复。

地质事件  $E_1$  发生于二叠世末期,一直持续到早三叠世初期,造成的结果是海洋沉积物中常量元素 CaO、MnO 含量较低,表现为显著负异常,相反 SiO、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、MgO、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、FeO、 $\text{K}_2\text{O}$  等常量元素及 Ni、Co、Cr、V、Cu、Pb、Be、Nb、Zn 等微量元素含量较高,表现出显著的正异常。此地质事件还导致二叠世末期的全球性生物绝灭事件及早三叠世初期的  $\delta^{13}\text{C}$  负漂移(Tong *et al.*, 2005, 2007a; Zuo *et al.*, 2006),并见于世界各大陆早三叠世初期(Baud *et al.*, 1989; Cao *et al.*, 2002; Haas *et al.*, 2006; Xie *et al.*, 2007; Mu *et al.*, 2009; Meyer *et al.*, 2011)。格里斯巴赫晚期,由于地质事件  $E_2$ 、 $E_3$ 、 $E_4$  的频繁发生,幕次性导致地层中部分常量元素和微量元素含量异常,随着地质事件  $E_1$  影响强度的减弱,事件的幕次性渐趋明显,造成局部地层间隔内元素含量异常,如  $E_4$ 。

地质事件  $E_5$  发生于早三叠世迪纳早期,其规模较以前发生的  $E_2$ 、 $E_3$ 、 $E_4$  大,造成地层中常量元素和微量元素含量正异常明显。 $E_6$ 、 $E_7$ 、 $E_8$  地质事件强度逐渐减弱,间隔时间较长,沉积地层中记录微弱。 $E_7$  事件层对应于斯密斯亚阶中的凝灰质粘土岩夹层,其中部分常量元素和微量元素的含量表现为暂时的高异常,持续时间不长。另外,地层中各类元素含量变化特征,可反映海洋环境的稳定性,早三叠世格里斯巴赫期,各类元素含量变化较大,代表海洋环境的不稳定性较大,至斯帕斯期,各类元素含量渐趋稳定,代表海洋环境逐渐恢复。综上所述,早三叠世初期是地质事件频发的阶段,海洋环境极不稳定,随着地质事件规模逐渐减小,海洋环境逐渐改善,生态环境逐渐恢复。



## 5 结论

(1) 常量元素分为 2 组。SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO、MgO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、TiO<sub>2</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 分布与凝灰质粘土岩、泥岩分布有关,在晚二叠世末期、早三叠世格里斯巴赫初期、迪纳期及斯密斯中期呈正异常,由格里斯巴赫期→迪纳期→斯密斯期→斯帕斯期,上述元素含量呈逐渐降低趋势。海洋沉积物中上述元素的含量过高促使生态环境恶化,不利于早三叠世生物复苏。CaO、Lost 之间及其与 δ<sup>13</sup>C 之间均呈正相关。

(2) 微量元素分为 3 组。Ba、V、Be、Nb、Zn 为 1 组,Cu、Ni、Co、Pb 为 1 组。组内各元素之间呈正相关关系,其含量在格里斯巴赫亚阶、迪纳亚阶下部、斯密斯亚阶中部含量较高,其余层位含量较低,且早三叠世由早到晚元素含量逐渐降低。上述 9 种微量元素与 δ<sup>13</sup>C 均呈负相关关系,表明元素含量过高,对原始生产率的提高起着抑制作用。相反,Sr 和 CaO 相同,在格里斯巴赫亚阶下部含量最低,在斯帕斯亚阶含量最高,由格里斯巴赫期到斯帕斯期则表现为渐增趋势。Sr、CaO 与 δ<sup>13</sup>C 的相关特性表明它们是海洋生态环境改善的标志。

(3) 早三叠世初期发生了 8 次规模不等的海洋地质事件,由早到晚,事件规模逐渐变小、影响强度逐渐减弱,导致海洋环境恶化的原因可能是二叠纪末、三叠纪初火山活动。各种有害物质大量向海输入,造成海洋中粘土矿物、微量元素含量异常加大,生态环境恶化。随着时间推移,海洋中各种有害组分被沉积物带走,海水得到净化,生态环境渐渐恢复,原始生产率逐步提高。

致谢:感谢中国科学院南京地质古生物研究所彭善池研究员的热心指导,感谢湖北地质矿产勘查开发局岩矿测试中心的热心帮助!

## References

Baud, A., Magaritz, M., Holser, W. T., 1989. Permian-Triassic of the Tethys: Carbon Isotope Studies. *Geologische Rundschau*, 78 (2): 649—677. doi:10.1007/BF01776196

Bowring, S. A., Erwin, D. H., Jin, Y. G., et al., 1998. U/Pb Zircon Geochronology and Tempo of the End-Permian Mass Extinction. *Science*, 280 (5366): 1039—1045. doi:10.1126/science.280.5366.1039

Cao, C. Q., Wang, W., Jin, Y. G., 2002. Carbon Isotope Ex-

cursions across the Permian-Triassic Boundary in the Meishan Section, Zhejiang Province, China. *Chinese Science Bulletin*, 47 (13): 1125—1129.

Carpenter, S. J., Lohmann, K. C., 1992. Sr/Mg Ratios of Modern Marine Calcite: Empirical Indicators of Ocean Chemistry and Precipitation Rate. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56 (5): 1837—1849. doi:10.1016/0016-7037(92)90314-9

Carpenter, S. J., Lohmann, K. C., Holden, P., et al., 1991. δ<sup>18</sup>O Values, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr and Sr/Mg Ratios of Late Devonian Abiotic Marine Calcite: Implications for the Composition of Ancient Seawater. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55 (7): 1991—2010. doi:10.1016/0016-7037(91)90038-7

Chai, Z. F., Ma, S. L., Mao, X. Y., et al., 1986. Elemental Geochemical Characters at the Permian-Triassic Boundary Section in Changxing, Zhejiang, China. *Acta Geologica Sinica*, (2): 139—149 (in Chinese with English abstract).

Chen, J. B., Zhao, L. S., Zhong, Q. C., et al., 2012. In Situ Rare Earth Element in Conodont from Meishan Section in Zhejiang Province and Implications for Paleoenvironmental Evolution. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37 (1): 25—34.

Cicero, A. D., Lohmann, K. C., 2001. Sr/Mg Variation during Rock-Water Interaction: Implication for Secular Changes in the Elemental Chemistry of Ancient Seawater. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 65 (5): 741—761. doi:10.1016/S0016-7037(00)00594-9

Clapham, M. E., Shen, S. Z., Bottjer, D. J., 2009. The Double Mass Extinction Revisited: Reassessing the Severity, Selectivity, and Causes of the End-Guadalupian Biotic Crisis (Late Permian). *Paleobiology*, 35 (1): 32—50. doi:10.1666/08033.1

Clerk, D. L., Wang, C. Y., Orth, C. J., et al., 1986. Conodont Survival and Low Iridium Abundances across the Permian-Triassic Boundary in South China. *Science*, 233 (4767): 984—986. doi:10.1126/science.233.4767.984

Ding, M. H., 1983. Lower Triassic Conodonts from Mount Majiashan in Anhui Province and Their Stratigraphic Significance. *Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology*, (2): 37—48 (in Chinese with English abstract).

Erwin, D. H., 1994. The Permo-Triassic Extinction. *Nature*, 367: 231—236. doi:10.1038/367231a0

Erwin, D. H., 2000. Life's Downs and Ups. *Nature*, 404: 129—130. doi:10.1038/35004679

Erwin, D. H., 2007. Disparity: Morphological Pattern and

- Developmental Context. *Palaeontology*, 50 (1): 57—73. doi: 10.1111/j.1475—4983.2006.00614.x
- Feng, Z. Z., Bao, Z. D., Li, S. W., 1997. Lithofacies Palaeogeography of Early and Middle Triassic of South China. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Frank, T. D., Lohman, K. C., 1996. Diagenesis of Fibrous Magnesian Calcite Marine Cement: Implications for the Interpretation of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  Values of Ancient Equivalents. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60 (13): 2427—2436. doi:10.1016/0016—7037(96)00097—X
- Guo, P. X., Xu, J. C., 1980. Cognition to Era of Qinglong Formation in Chaohu Area. *Journal of Stratigraphy*, 4 (4): 310—315 (in Chinese).
- Haas, J., Demeny, A., Hips, K., et al., 2006. Carbon Isotope Excursions and Microfacies Changes in Marine Permian-Triassic Boundary Sections in Hungary. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 237 (2—4): 160—181. doi:10.1016/j.palaeo.2005.11.017
- Hardie, L. A., 1996. Secular Variation in Seawater Chemistry: An Explanation for the Coupled Secular Variation in the Mineralogies of Marine Limestones and Potash Evaporates over the Past 600 m. y. *Geology*, 24(3): 279—283. doi:10.1130/0091—7613(1996)024<0279:SVISCA>2.3.CO;2
- He, J. W., Rui, L., Chai, Z. F., et al., 1987. Volcanic Activities during Late Permian to Early Triassic in Meishan Area, Changxing, Zhejiang Province. *Journal of Stratigraphy*, 11(3): 194—199 (in Chinese).
- Hou, S. X., 1987. Discovery of Volcanoclastics in Tongling Area, Anhui Province. *Journal of Stratigraphy*, 11 (1): 75 (in Chinese).
- Isozaki, Y., Shimizu, N., Yao, J. X., et al., 2007. End-Permian Extinction and Volcanism-Induced Environmental Stress: The Permian-Triassic Boundary Interval of Lower-Slope Facies at Chaotian, South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 252 (1—2): 218—238. doi: 10.1016/j.palaeo.2006.11.051
- Kamo, S. L., Crowley, J., Bowring, S. A., 2006. The Permian-Triassic Boundary Event and Eruption of the Siberian Flood Basalts: An Inter-Laboratory U-Pb Dating Study. *Geochim. Cosmochim. Acta (Suppl. 1)*, 70(18): A303. doi:10.1016/j.gea.2006.06.616
- Kato, Y., Nakao, K., Isozaki, Y., 2002. Geochemistry of Late Permian to Early Triassic Pelagic Cherts from Southwest Japan: Implications for an Oceanic Redox Change. *Chemical Geology*, 182 (1): 15—34. doi:10.1016/S0009—2541(01)00273—X
- Krull, E. S., Retallack, G. J., 2000.  $\delta^{13}\text{C}$  Depth Profiles from Paleosols across the Permian-Triassic Boundary: Evidence for Methane Release. *Geological Society of America Bulletin*, 112 (9): 1459—1472. doi:10.1130/0016—7606(2000)112 <1459:CDPFA>2.0.CO;2
- Li, J. H., Ding, B. L., 1981. The Middle-Lower Triassic Boundary in the Lower Yangtze Area. *Journal of Stratigraphy*, 5 (1): 70—75 (in Chinese).
- Li, S. W., Wu, S. H., 1998. Sedimentary Environment and Lithology of the Middle-Lower Triassic Qinglong Formation, Chaoxian, Anhui Province. In: Feng, Z. Z., et al., eds., Research on Palaeogeography and Lithofacies of the Middle-Lower Triassic Qinglong Formation in the Lower Yangtze Area. Yunan Technology Press, Kungming, 82—91 (in Chinese).
- Li, S. Y., 1996. Discovery of Volcanic-Clastic Flow Deposits in the Lower Triassic Nanlinghu Formation in the Chaohu Area, Anhui. *Journal of Stratigraphy*, 20 (4): 277—279 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. C., Zhou, Z. Z., 2002. Massive Dissociation of Gas Hydrated during Oceanic Anoxia as a Cause of Mass Extinction at the End of Permian. *Geology Geochemistry*, 30(1): 57—63 (in Chinese with English abstract).
- Meyer, K. M., Yu, M., Jost, A. B., et al., 2011.  $\delta^{13}\text{C}$  Evidence that High Primary Productivity Delayed Recovery from End-Permian Mass Extinction. *Earth and Planetary Science Letters*, 302 (3—4): 378—384. doi:10.1016/j.epsl.2010.12.033
- Mu, X., Kershaw, S., Li, Y., et al., 2009. High-Resolution Carbon Isotope Changes in the Permian-Triassic Boundary Interval, Chongqing, South China: Implications for Control and Growth of Earliest Triassic Microbialites. *Journal of Asian Earth Sciences*, 36 (6): 434—441. doi:10.1016/j.jseaes.2007.08.004
- Mucci, A., Morse, J. W., 1983. The Incorporation of  $\text{Mg}^{2+}$  and  $\text{Sr}^{2+}$  into Calcite Overgrowths: Influences of Growth Rate and Solution Composition. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47 (2): 217—233. doi:10.1016/0016—7037(83)90135—7
- Payne, J. L., Lehrmann, D. J., Wei, J. Y., et al., 2004. Large Perturbations of the Carbon Cycle during Recovery from the End-Permian Extinction. *Science*, 305 (5683): 506—509. doi:10.1126/science.1097023
- Reichow, M. K., Pringle, M. S., ArMukhamedov, A. I., et al., 2009. The Timing and Extent of the Eruption of the Siberian Traps Large Igneous Province: Implications for the End-Permian Environmental Crisis. *Earth and Planetary Science Letters*, 277 (1—2): 9—20. doi:10.1016/j.epsl.2008.09.030

- Rui, L., Jiang, N. Y., 1984. Lithofacies and Biofacies of Latest Permian and Earliest Triassic at the Bordering Region of Jiangsu, Zhejiang and Anhui Provinces. *Acta Palaeontologica Sinica*, 23 (3): 286—299 (in Chinese with English abstract).
- Saunders, A., Reichow, M., 2009. The Siberian Traps and the End-Permian Mass Extinction: A Critical Review. *Chinese Science Bulletin*, 54 (1): 20—37.
- Schubert, J. K., Bottjer, D. J., 1995. Aftermath of the Permian-Triassic Mass Extinction Event: Paleoecology of Lower Triassic Carbonates in the Western USA. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 116 (1—2): 1—39. doi:10.1016/0031-0182(94)00093-N
- Stanley, S. M., Hardie, L. A., 1998. Secular Oscillation in the Carbonate Mineralogy of Reef-Building and Sediment-Producing Organisms Driven by Tectonically Forced Shifts in Seawater Chemistry. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 144 (1—2): 3—19. doi:10.1016/S0031-0182(98)00109-6
- Sugisaki, R., Yamamoto, K., Adachi, M., 1982. Triassic Bedded Cherts in Central Japan are not Pelagic. *Nature*, 298: 644—645. doi:10.1038/298644a0
- Tong, J. N., 1997. Lower Triassic Sequence Stratigraphy of Chaoxian, Anhui. *Acta Geoscientia Sinica*, 18 (2): 215—219 (in Chinese with English abstract).
- Tong, J. N., Erwin, D. H., Zuo, J. X., et al., 2005. Lower Triassic Carbon Isotope Stratigraphy in Chaochu, Anhui; Implication to Biotic and Ecological Recovery. *Albertina*, 33: 75—76.
- Tong, J. N., Hansen, J. H., Zhao, L. S., et al., 2005a. A GSSP Candidate of the Induan-Olenekian Boundary Stratigraphic Sequence of the West Pingdingshan Section in Chaochu, Anhui Province. *Journal of Stratigraphy*, 29 (2): 205—214 (in Chinese with English abstract).
- Tong, J. N., Zhao, L. S., Zuo, J. X., et al., 2005b. An Integrated Lower Triassic Sequence in Chaochu, Anhui Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30 (1): 40—46 (in Chinese with English abstract).
- Tong, J. N., Qiu, H. O., Zhao, L. S., et al., 2002. Lower Triassic Inorganic Carbon Isotope Excursion in Chaochu, Anhui Province, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 13 (2): 98—105.
- Tong, J. N., Zakharov, Y. D., Orchard, M. J., et al., 2003. A Candidate of the Induan-Olenekian Boundary Stratotype in the Tethyan Region. *Science in China (Series D)*, 46 (11): 1182—1200.
- Tong, J. N., Zhou, X. G., Erwin, D. H., et al., 2006. Fossil Fishes from the Lower Triassic of Majiashan Chaochu, Anhui Province, China. *Journal of Paleontology*, 80 (1): 146—161. doi:10.1666/0022-3360(2006)080[0146:FFFTL.T]2.0.CO;2
- Tong, J. N., Zhang, S. X., Zuo, J. X., et al., 2007a. Events during Early Recovery from the End-Permian Extinction. *Global and Planetary Change*, 55(1—3): 66—80. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.06.015
- Tong, J. N., Zuo, J. N., Chen, Z. Q., 2007b. Early Triassic Carbon Isotope Excursions from South China: Proxies for Devastation and Restoration of Marine Ecosystems Following the End-Permian Mass Extinction. *Geological Journal*, 42 (3—4): 371—389. doi:10.1002/gj.1084
- Turekian, K., Wedepohl, K. H., 1961. Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 72 (2): 175—192. doi:10.1130/0016-7606(1961)72[175:DOTEIS]2.0.CO;2
- Whittaker, S. G., James, N. P., Kyser, T. K., 1994. Geochemistry of Synsedimentary Cements in Early Cambrian Reefs. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58 (24): 5567—5577. doi:10.1016/0016-7037(94)90250-X
- Wignall, P. B., Twitchett, R. J., 1996. Oceanic Anoxia and the End-Permian Mass Extinction. *Science*, 272 (5265): 1155. doi:10.1126/science.272.5265.1155
- Woods, A. D., Bottjer, D. J., Mutti, M., et al., 1999. Lower Triassic Large Sea-Floor Carbonate Cements: Their Origin and a Mechanism for the Prolonged Biotic Recovery from the End-Permian Mass Extinction. *Geology*, 27 (7): 645—648. doi:10.1130/0091-7613(1999)027<0645:LTLSCFC>2.3.CO;2
- Xie, S. C., Pancost, R. D., Huang, J. H., et al., 2007. Changes in the Global Carbon Cycle Occurred as Two Episodes during the Permian-Triassic Crisis. *Geology*, 35 (12): 1083—1086. doi:10.1130/G24224A.1
- Yang, H., Zhang, S. X., Jiang, H. S., et al., 2006. Age and General Characteristics of Calcimicrobialite near the Permian-Triassic Boundary in Chongyang, Hubei Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31 (2): 165—170 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H. F., 1994. Advancements of Permian and Triassic Research. *Advance in Earth Science*, 9 (2): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H. F., Feng, Q. L., Lai, X. L., et al., 2007. The Protracted Permo-Triassic Crisis and Multi-Episode Extinction around the Permian-Triassic Boundary. *Global*

- and Planetary Change, 55 (1-3): 1-20. doi: 10.1016/j. gloplacha. 2006. 06. 005
- Yin, H. F., Huang, S. J., Zhang, K. X., et al., 1989. Volcanism at the Permian-Triassic Boundary in South China and Its Effects on Mass Extinction. *Acta Geologica Sinica*, 63 (2): 168-181 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. B., Chen, Z. D., Liu, L. S., et al., 1999. Theory and Applications of Oceanographical Chemistry. Ocean Press, Beijing (in Chinese).
- Zhao, L. S., Orchard, M. J., Tong, J. N., et al., 2007. Lower Triassic Conodont Sequence in Chaohu, Anhui Province, China and Its Global Correlation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 252(1-2): 24-38. doi: 10.1016/j. palaeo. 2006. 11. 032
- Zhao, L. S., Tong, J. N., Orchard, M. J., et al., 2005. Lower Triassic Conodont Zonations of Chaohu Area, Anhui Province and Their Global Correlation. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30 (5): 623-634 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, L. S., Tong, J. N., Orchard, M., 2005. Study on the Lower Triassic Conodont Sequence and the Induan-Olenekian Boundary in Chaohu, Anhui Province, China University of Geosciences Press, Wuhan.
- Zhao, L. S., Tong, J. N., Sun, Z. M., et al., 2008a. Detailed Lower Triassic Conodont Biostratigraphy and Its Implications at the GSSP Candidate of the Induan-Olenekian Boundary in Chaohu, Anhui Provinces. *Progress in Natural Science*, 18(1): 79-90. doi: 10.1016/j. pnsc. 2007. 07. 001
- Zhao, L. S., Tong, J. N., Zhang, S. X., et al., 2008b. An Update of Conodonts in the Induan-Olenekian Boundary Strata at West Pingdingshan Section, Chaohu, Anhui Province. *Journal of China University of Geosciences*, 19 (3): 207-216.
- Zhao, L. S., Tong, J. N., Zuo, J. X., 2003. Lower Triassic Conodonts Biostratigraphical Sequence at West Pingdingshan Section, Chaohu, Anhui Province, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28 (4): 414-418 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, L. S., Wu, Y. B., Hu, Z. C., et al., 2009. Trace Element Compositions in Conodont Phosphates Responses to Biotic Extinction Event; A Case Study for Main Act of Global Boundary Stratotype Section and Point of the Permian-Triassic. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34 (5): 725-732 (in Chinese with English abstract).
- Zuo, J. X., Tong, J. N., Qiu, H. O., et al., 2003. Carbon and Oxygen Isotope Stratigraphic Correlation and Its Palaeoenvironment Significance during the Lower Triassic, Chauhu, Anhui Province, China. *Geology Geochemistry*, 31(3): 26-33 (in Chinese with English abstract).
- Zuo, J. X., Tong, J. N., Qiu, H. O., et al., 2004. Carbon and Oxygen Isotope Stratigraphy of the Lower Triassic at the North Pingdingshan Section in Chaohu, Anhui Province, China. *Journal of Stratigraphy*, 28 (1): 26-34 (in Chinese with English abstract).
- Zuo, J. X., Tong, J. N., Qiu, H. O., et al., 2006. Evolutional Characteristics of Carbon Isotope Compositions from the Lower Triassic Marine Carbonates, Lower Yangtze Region, South China. *Sciences in China (Series D)*, 49 (3): 225-241.

### 附中文参考文献

- 柴之芳, 马淑兰, 毛雪英, 等, 1986. 浙江长兴二叠系/三叠系界线剖面的元素地球化学特征. *地质学报*, (2): 139-149.
- 陈剑波, 赵来时, 陈中强, 等, 2012. 浙江煤山牙形石微区原位 REE 组成及古环境意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 37(1): 25-34.
- 丁梅华, 1983. 安徽巢县马家山早三叠世牙形石及其地层意义. *地球科学——武汉地质学院学报*, (2): 37-48.
- 冯增昭, 鲍志东, 李尚武, 等, 1997. 中国南方早中三叠世岩相古地理. 北京: 石油工业出版社.
- 郭佩霞, 徐家聪, 1980. 对安徽巢县青龙群时代的认识. *地层学杂志*, 4(4): 310-315.
- 何锦文, 芮琳, 柴之芳, 等, 1987. 浙江长兴煤山地区晚二叠世末、早三叠世初的火山活动. *地层学杂志*, 11(3): 194-199.
- 侯生秀, 1987. 安徽铜陵发现火山碎屑岩. *地层学杂志*, 11(1): 75.
- 李金华, 丁保良, 1981. 下扬子地区中下三叠统的分界. *地层学杂志*, 5(1): 70-75.
- 李尚武, 吴胜和, 1998. 安徽巢县中下三叠统青龙群岩石特征及沉积环境分析. 见: 冯增昭等, 下扬子地区中下三叠统青龙群岩相古地理研究. 昆明: 云南科技出版社, 82-91.
- 李双应, 1996. 安徽巢县南陵湖组火山碎屑流沉积物的发现. *地层学杂志*, 20(4): 277-279.
- 李玉成, 周忠泽, 2002. 华南二叠纪末缺氧海水中的有毒气体与生物集群绝灭. *地质地球化学*, 30(1): 57-63.
- 芮琳, 江纳言, 1984. 苏浙皖地区二叠纪末、三叠纪初的岩相和生物相. *古生物学报*, 23(3): 286-299.
- 童金南, 1997. 安徽巢县下三叠统层序地层研究. *地球学报*, 18(2): 215-219.
- 童金南, Hansen, H. J., 赵来时, 等, 2005a. 印度阶—奥伦尼

- 克阶界线层型候选剖面——安徽巢湖平顶山西坡剖面地层序列. 地层学杂志, 29(2): 205—214.
- 童金南, 赵来时, 左景勋, 等, 2005b. 安徽巢湖地区下三叠统综合层序. 地球科学——中国地质大学学报, 30(1): 40—46.
- 杨浩, 张素新, 江海水, 等, 2006. 湖北崇阳二叠纪—三叠纪之交钙质微生物岩的时代及基本特征. 地球科学——中国地质大学学报, 31(2): 165—170.
- 殷鸿福, 1994. 二叠系—三叠系研究进展. 地球科学进展, 9(2): 1—9.
- 殷鸿福, 黄思骥, 张克信, 等, 1989. 华南二叠纪—三叠纪之交的火山活动及其对生物绝灭的影响. 地质学报, 63(2): 168—181.
- 张正斌, 陈镇东, 刘莲生, 等, 1999. 海洋化学原理和应用. 北京: 海洋出版社.
- 赵来时, 童金南, Orchard, M. J., 等, 2005. 安徽巢湖地区下三叠统牙形石生物地层分带及其全球对比. 地球科学——中国地质大学学报, 30(5): 623—634.
- 赵来时, 童金南, 左景勋, 2003. 安徽巢湖平顶山下三叠统牙形石生物地层序列. 地球科学——中国地质大学学报, 28(4): 414—418.
- 赵来时, 吴元保, 胡兆初, 等, 2009. 牙形石微量元素对生物绝灭事件的响应: 以二叠—三叠系全球层型剖面第一幕绝灭事件为例. 地球科学——中国地质大学学报, 34(5): 725—732.
- 左景勋, 童金南, 邱海鸥, 等, 2003. 巢湖地区碳氧同位素地层对比及其生态环境意义. 地质地球化学, 31(3): 26—34.
- 左景勋, 童金南, 邱海鸥, 等, 2004. 巢湖平顶北坡剖面下三叠统碳氧同位素地层学. 地层学杂志, 28(1): 35—40.