# 云南中三叠世罗平生物群产出地层的 地球化学特征和沉积环境

周长勇,张启跃,吕涛,胡世学,谢韬,文芝,黄金元 中国地质调查局成都地质调查中心,成都,610081

内容提要:为了研究安尼期罗平生物群产出地层的沉积环境,从云南罗平地区关岭组二段大凹子精测剖面采集 50件样品进行了主量、稀土、微量元素分析。分析结果表明,所有灰岩样品的K、Na含量较低,Mg/Ca比值也较低,反 映罗平地区在中三叠世安尼期为温暖潮湿的气候条件;Sr/Ba比值(1.22~68.96,平均值为24.35)较高,m值 (=100×MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)为27.22~27400,平均值达到1432,稀土元素较低的Y/Ho比值,表现出平缓或者微弱的 LREE 亏损,以及与近岸河口沉积物相似的稀土配分曲线特征,指示其属于近岸的碳酸盐台地内部盆地沉积。从剖 面底部到顶部,Al、K、V、Ti和P等元素含量以及Co/Ti、Ni/Ti比值具有多个变化旋回,反映海平面升降变化频繁,总 体发生了两次较大规模的海平面相对上升活动。所有样品的V/(V+Ni)、V/Cr、Ni/Co、U/Th等元素比值、&U、lg (Ce/Ce\*)等参数值都较高,反映沉积水体为相对低能、缺氧的环境。氧化还原敏感元素V、U、Co、Ni、Zn和Cr等呈 现出锯齿状曲线特征,表明水体并不完全处于缺氧环境,而是随着海平面周期性升降活动,底部水体表现为间歇性 缺氧。结合地球化学及地层学资料,认为中三叠世安尼期罗平地区处于温暖潮湿、还原、低能的离岸较近台内盆地, 这一时期海平面升降频繁,底部水体为间歇性缺氧环境。

关键词:沉积环境;地球化学;罗平生物群;中三叠统;云南

罗平生物群是新近发现的以海生鱼类化石为 主,共生有海生爬行类、棘皮动物、节肢动物、双壳和 腹足类等,生物门类多样化的古生物化石群落(张 启跃等,2008;Hu Shixue et al., 2011),该生物群主 要产自于云南省东部罗平地区的关岭组二段地层 中,牙形石研究成果显示其时代为中三叠世安尼期 Pelsonian 亚期(张启跃等,2009)。关于罗平生物群 产出地层的沉积环境,一种观点认为其产出于台间 盆地相钙屑浊流沉积环境(黄金元等,2009),另一 种观点认为它是形成于碳酸盐台地内部具远端变陡 坡折的浅海深水盆地(白建科等,2010)。

近年来,元素地球化学方法在判别沉积岩沉积 环境的研究中得到越来越广泛的应用。由于地层中 元素的分配及比值变化、组合都在一定程度上指示 古气候环境演化,因此沉积岩的元素地球化学特征 是判别沉积环境的重要标志之一(林治家等,2008; 彭海艳等,2006;陈永权和周新源,2009;常华进等, 2009;经雅丽等,2005)。沉积物中的主量元素、微量 元素及其比值对于分析沉积环境、探讨海平面变化 以及追索物源等方面都有重要意义。

本文是以罗平生物群化石大量产出的大凹子精 细剖面为研究对象,通过系统采集灰岩样品进行主 量元素、微量元素和稀土元素分析,从而讨论罗平生 物群产出地层的沉积地球化学特征,进而分析其沉 积环境。

## 1 剖面特征及样品采集

所研究的大凹子剖面位于云南省罗平县城南约 20km的大凹子村(图1),剖面起点坐标为东经104° 19′03.00″,北纬24°46′13.00″。剖面岩层近水平产 出,岩性主要为关岭组二段的深灰-灰黑色纹层状、 瘤状泥晶灰岩、泥灰岩,在碳酸盐岩夹层中发现有多 层粘土岩。岩层中平行层理、波状纹理、滑塌构造、 包卷层理、正粒序、虫迹等沉积构造发育,剖面描述 见文献(黄金元等,2009)。剖面总厚度为38.05m, 本次研究主要选择其下部化石出露较多的厚度为 17.64m(1~165 层)的岩层开展工作,这段地层自 下而上可分为5个岩性段:C1(0~1.51m,1~9

收稿日期:2013-08-26;改回日期:2013-12-02;责任编辑:章雨旭。

注:本文为中国地质调查局地质调查项目(编号 121201060211、1212011120621、1212011140051)的成果。

作者简介:周长勇,男,1979年生。硕士研究生,岩石地球化学专业。Email: zhcy79@163.com。

层):深灰-灰黑色中厚层-薄层状砂屑泥晶灰岩、 瘤状泥晶灰岩,具有波状、沙纹层理,有生物扰动现 象,含双壳化石;C2(1.51~4.95m,10~68 层):灰 黑色纹层状泥晶灰岩,夹有4层粘土岩,灰岩中含有 黄铁矿颗粒,硅质结核发育,化石十分丰富,主要为 鱼类、海生爬行类、节肢类以及棘皮类、植物等化石; C3(4.95~6.06m,69~73 层): 灰黑 - 深灰色中层 状含介壳瘤状灰岩,夹有一层泥岩,硅质结核发育, 含海生爬行动物化石;C4(6.06~14.52m,74~152 层):灰黑-深灰色纹层状泥晶灰岩,并夹有多层粘 土岩,中下部硅质结核发育,并见有包卷层理,鱼类、 海生爬行类、节肢类、棘皮类、植物等化石较丰富,并 发现大型海生爬行动物脚印化石,上部见波状层理 及双壳化石;C5(14.52~17.64m,153~165 层):深 灰-灰黑色中薄层-厚层状砂屑泥晶灰岩,见有脉 状、波状层理,含双壳化石。在这5个岩性段中共采 集了 50 件灰岩样品进行主量元素、微量元素和稀土 元素的分析,从下往上采样位置如表1所示。



图 1 云南罗平县大凹子剖面位置图 Fig. 1 Location of the Dawazi section in Luoping County, Yunnan Province

# 2 样品处理及分析方法

选择岩性均一的灰岩样品,去掉表面的风化物 后研磨至粉末(<200目)用于元素化学分析。岩石 的主量、稀土、微量元素分析均在中国科学院广州地 球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室 完成。主量元素采用 XRF 法在 Rigaku100e 型 X-荧 光光谱仪上分析,采用四硼酸锂熔融制样及粉末压 饼制样,分析精度一般优于 2%。稀土和微量元素 分析时先用 HF + HNO,密封溶解样品,然后再利用 PE Elan 6000型 ICP-MS 质谱仪测定,具体处理方法 和分析方法见文献(刘颖等,1996),分析精度优于 5%。

### 3 地球化学特征

主量元素、微量元素和稀土元素分析结果列在 表1、表2中,其中, $m = 100 \times MgO/Al_2O_3$ , Ce/Ce<sup>\*</sup> = Ce<sub>PAAS</sub>/[(La<sub>PAAS</sub> + Pr<sub>PAAS</sub>)/2], La/La<sup>\*</sup> = La<sub>N</sub>/ (3Pr<sub>N</sub> - 2Nd<sub>N</sub>),  $\delta U = 2U/(U + Th/3)$ , 下标 N 指后 太古宙澳大利亚平均页岩(post-Archean Australian shale, PAAS)标准化后的值(Taylor and McLennan, 1985)。

#### 3.1 主量元素特征

大凹子剖面上各灰岩样品的主量元素组成(表 1)相近,主要是以 CaO 和 MgO 为主,CaO 的含量为 4.44% ~ 53.77%,平均值为 46.58%,其中样品 PM27-23 的 CaO 含量仅为4.44%,而 SiO<sub>2</sub> 的含量达 到 33.8%,可能是由于岩石内部含有较多硅质结核 造成的。MgO 含量为 0.76% ~ 18.10%,平均值为 4.58%。SiO<sub>2</sub> 含量除两件样品高于 20% 外,其余样 品均低于 20%,最低仅为 0.93%,平均值为 4.70%。 样品中含有少量  $Al_2O_3(0.01\% ~ 11.50\%, 平均值$ 为 1.18%)、 $Fe_2O_3(0.08\% ~ 2.55\%, 平均值$ 为 0.52%)和  $K_2O(0.07\% ~ 2.60\%, 平均值$ 为 0.48%)、 $P_2O_5(0.02\% ~ 0.17\%, 平均值), 0.06\%)$ 、 NaO<sub>2</sub>(0.02% ~ 0.16%,平均值为 0.05%)、TiO<sub>2</sub> (0.01% ~ 0.29%,平均值为 0.04%)以及极少量的 MnO(0.003% ~ 0.018%,平均值为 0.008%)。

所有样品的 MgO/CaO 比值(0.014~0.705,平 均值为0.118)较低,而镁铝比值(m = 100 × MgO/ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)较高,为27.22~27400,平均值为1432。

从主量元素、微量元素间的相关性(表3)来看, CaO 与 SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>呈现明显的负相关, 说明沉积过程中碳酸盐矿物的沉淀和生成受陆源物 质的影响较大。

#### 3.2 稀土、微量元素特征

剖面上所有灰岩样品的稀土总量(表 2)较低, 为5.18×10<sup>-6</sup>~86.32×10<sup>-6</sup>,平均值为21.46× 10<sup>-6</sup>,不具有明显的La正异常(La/La\*=0.74~ 1.33,平均为0.94),具有微弱的Ce负异常(Ce/ Ce\*=0.81~1.03,平均为0.93),Y/Ho比值较低 (18.26~42.89,平均为27.67)。从稀土配分曲线 (图2)来看,所有样品的曲线基本一致,主要表现为

#### 表1云南罗平县大凹子剖面主量元素分析结果(%)

Table 1 Major element concentrations (%) measured in whole-rock samples from the Dawazi section

in Luoping County, Yunnan Province

样具	位置	SiO.	TiO.	AL O.	Fe. O.	MnO	Man	C.0	Na. O	к.о	P. O.	1.01	台景	MgO	m	Al
作用	(m)	5102	1102	11203	10203	MIIO	MgO	CaU	11420	<b>R</b> <sub>2</sub> 0	1205	LUI	心里	CaO	m	(Al + Fe + Mn)
PM27-165	17.23	1.39	0.03	0.52	0.27	0.007	1.40	53.77	0.03	0.22	0.02	42.55	100.21	0.026	269	0.59
PM27-164	16.73	2.53	0.04	0.89	0.44	0.009	2.36	51.58	0.04	0.41	0.03	41.68	100.01	0.046	265	0.60
PM27-158	15.52	4.86	0.07	1.58	0.67	0.009	3.56	48.87	0.06	0.82	0.04	39.45	99.99	0.073	225	0.64
PM27-152	14.46	6.86	0.08	2.11	0.92	0.012	4.34	44.67	0.05	1.21	0.05	39.55	99.86	0.097	206	0.63
PM27-147	13.27	4.22	0.06	1.23	0.62	0.009	2.09	49.67	0.04	0.70	0.03	40.98	99.64	0.042	170	0.60
PM27-144	12.92	4.95	0.07	1.32	0.70	0.012	3.54	47.80	0.05	0.75	0.03	40.76	99.99	0.074	268	0.58
PM27-139	12.19	4.27	0.05	1.22	0.80	0.008	1.61	50.50	0.03	0.68	0.04	40.75	99.97	0.032	132	0.53
PM27-136	11.82	3.05	0.04	0.79	0.42	0.009	2.75	51.09	0.05	0.42	0.03	41.03	99.68	0.054	348	0.58
PM27-132	11.23	7.40	0.09	1.79	1.40	0.012	4.22	44.41	0.07	1.20	0.07	39.24	99.91	0.095	236	0.49
PM27-128	10.87	3.01	0.03	1.03	0.73	0.010	10.30	41.48	0.10	0.48	0.05	42.81	100.05	0.248	1000	0.51
PM27-125	10.46	4.35	0.05	1.32	0.61	0.009	1.74	50.21	0.08	0.71	0.06	40.96	100.1	0.035	132	0.62
PM27-122	10.09	2.59	0.02	0.84	0.46	0.012	6.01	47.14	0.07	0.37	0.06	42.63	100.21	0.127	715	0.57
PM27-118	9.68	3.42	0.04	1.08	0.47	0.007	1.92	50.93	0.04	0.55	0.06	41.51	100.03	0.038	178	0.63
PM27-115	9.41	1.93	0.02	0.44	0.60	0.008	11.00	41.45	0.08	0.27	0.06	44.01	99.84	0.265	2500	0.35
PM27-112	9.10	2.21	0.02	0.64	0.35	0.009	6.76	46.00	0.10	0.26	0.07	43.22	99.64	0.147	1056	0.57
PM27-109	8.79	4.42	0.06	1.26	0.56	0.008	4.01	47.84	0.05	0.56	0.13	41.13	100.02	0.084	318	0.63
PM27-101	8.00	3.54	0.03	0.92	0.40	0.007	5.66	46.63	0.06	0.38	0.07	41.99	99.69	0.121	615	0.63
PM27-96	7.67	3.56	0.03	1.07	0.48	0.009	5.58	46.50	0.05	0.49	0.06	41.86	99.7	0.120	521	0.62
PM27-90	7.24	4.62	0.05	0.63	0.62	0.011	6.65	44.88	0.07	0.62	0.08	41.53	99.77	0.148	1056	0.43
PM27-88	7.17	5.00	0.05	1.59	0.74	0.011	6.50	43.82	0.06	0.66	0.08	41.37	99.88	0.148	409	0.62
PM27-83	6.83	11.90	0.15	3.92	1.35	0.015	4.06	40.68	0.07	1.47	0.08	36.63	100.32	0.100	104	0.68
PM27-82	6.76	7.70	0.12	2.48	1.06	0.014	8.51	39.59	0.14	0.93	0.05	39.23	99.83	0.215	343	0.64
PM27-79	6.42	7.30	0.09	2.42	1.04	0.013	8.09	40.29	0.08	0.95	0.13	39.57	99.97	0.201	334	0.63
PM27-77	6.20	7.35	0.10	2.37	1.63	0.014	6.62	41.59	0.16	0.98	0.17	38.95	99.93	0.159	279	0.52
PM27-70	5.27	4.18	0.06	0.99	0.44	0.009	1.66	51.06	0.08	0.43	0.03	40.88	99.82	0.033	168	0.62
PM27-67	4.83	1.74	0.01	0.52	0.15	0.004	0.76	53.77	0.02	0.25	0.03	42.56	99.83	0.014	146	0.72
PM27-65	4.64	2.47	0.03	0.67	0.32	0.007	3.46	50.25	0.03	0.35	0.06	42.60	100.24	0.069	516	0.61
PM27-61	4.41	0.97	0.01	0.35	0.47	0.007	13.70	39.37	0.02	0.09	0.04	44.77	99.8	0.348	3914	0.36
PM27-56	4.23	1.91	0.01	0.43	0.18	0.005	3.08	50.89	0.03	0.15	0.05	43.02	99.77	0.061	716	0.64
PM27-52	4.07	3.14	0.03	0.74	0.33	0.005	1.72	50.79	0.03	0.46	0.09	42.04	99.38	0.034	232	0.63
PM27-50	4.05	1.26	0.01	0.15	0.17	0.005	4.44	49.98	0.05	0.12	0.04	43.36	99.58	0.089	2960	0.39
PM27-47	3.87	1.81	0.02	0.57	0.25	0.006	7.31	45.77	0.03	0.23	0.08	43.71	99.78	0.160	1282	0.63
PM27-46	3.83	1.30	0.01	0.34	0.15	0.005	1.07	53.59	0.03	0.17	0.05	43.06	99.78	0.020	315	0.62
PM27-45	3.78	3.86	0.01	0.27	0.08	0.003	1.71	51.35	0.03	0.18	0.04	41.98	99.52	0.033	633	0.71
PM27-44	3.74	2.28	0.01	0.08	0.12	0.006	4.28	49.55	0.04	0.07	0.06	43.19	99.68	0.086	5350	0.32
PM27-43	3.69	1.48	0.02	0.32	0.27	0.005	6.36	47.04	0.04	0.15	0.07	43.66	99.39	0.135	1988	0.47
PM27-42	3.65	1.39	0.01	0.06	0.10	0.003	2.76	51.79	0.04	0.07	0.04	43.22	99.48	0.053	4600	0.31
PM27-41	3.61	3.18	0.02	0.01	0.16	0.004	2.74	51.15	0.03	0.13	0.06	42.27	99.65	0.054	27400	0.04
PM27-37	3.49	0.93	0.01	0.39	0.19	0.006	5.14	49.07	0.03	0.10	0.09	43.61	99.57	0.105	1318	0.60
PM27-33	3.39	1.35	0.01	0.20	0.14	0.006	1.86	53.32	0.03	0.12	0.09	43.20	100.33	0.035	930	0.51
PM27-29	3.22	1.46	0.02	0.30	0.16	0.005	2.30	51.95	0.03	0.16	0.05	42.98	99.41	0.044	767	0.58
PM27-26	3.09	4.45	0.01	0.46	0.14	0.005	2.93	50.23	0.05	0.14	0.04	41.73	100.18	0.058	637	0.71
PM27-23	2.87	33.80	0.29	11.50	2.55	0.018	3.13	4.44	0.06	2.60	0.03	41.12	99.54	0.705	27	0.77
PM27-21	2.57	5.41	0.02	0.55	0.31	0.005	0.78	50.99	0.03	0.20	0.05	41.20	99.55	0.015	142	0.57
PM27-19	2.42	26.20	0.06	3.97	0.65	0.015	1.33	35.75	0.05	0.88	0.08	31.18	100.19	0.037	34	0.82
PM27-16	2.17	7.67	0.020	0.68	0.33	0.008	1.61	49.43	0.152	0.23	0.033	40.02	100.19	0.033	237	0.60
PM27-14	1.98	3.82	0.01	0.36	0.18	0.008	1.20	52.46	0.03	0.07	0.03	42.24	100.41	0.023	333	0.59
PM27-9	1.45	2.99	0.03	0.84	0.39	0.010	14.40	36.73	0.05	0.25	0.03	44.35	100.1	0.392	1714	0.61
PM27-2	0.50	1.40	0.01	0.31	0.13	0.005	2.08	53.42	0.02	0.08	0.09	42.53	100.08	0.039	671	0.63
PM27-1	0.18	2.25	0.02	0.63	0.30	0.010	18.10	33.53	0.04	0.18	0.02	45.05	100.14	0.540	2873	0.61

### 表 2 云南罗平县大凹子剖面稀土、微量元素分析结果(×10<sup>-6</sup>)

Table 2 Rare earth and trace element concentrations ( ×10<sup>-6</sup>) measured in whole-rock samples from the Dawazi section

in	Luoping	County,	Yunnan	Province
----	---------	---------	--------	----------

样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	$\sum \text{REE}$	La/La*
PM27-165	2.91	5.31	0.61	2.29	0.42	0.10	0.46	0.08	0.40	0.08	0.20	0.03	0.16	0.03	1.58	13.08	1.06
PM27-164	4.08	8.10	0.94	3.58	0.65	0.16	0.71	0.11	0.56	0.11	0.30	0.04	0.28	0.04	2.01	19.66	0.99
PM27-158	5.65	11.40	1.36	5.10	0.91	0.21	0.93	0.15	0.73	0.15	0.41	0.06	0.39	0.06	2.90	27.51	0.92
PM27-152	8.77	14.30	1.63	5.79	1.05	0.24	1.08	0.16	0.84	0.17	0.44	0.07	0.43	0.07	3.13	35.04	1.08
PM27-147	8.44	15.40	1.92	6.89	1.15	0.28	1.20	0.17	0.78	0.15	0.38	0.05	0.35	0.05	2.79	37.21	0.90
PM27-144	13.70	28.50	3.81	14.00	2.55	0.54	2.37	0.31	1.56	0.28	0.68	0.09	0.56	0.09	5.99	69.04	0.77
PM27-139	5.91	11.20	1.32	4.86	0.83	0.20	0.83	0.12	0.61	0.13	0.32	0.05	0.30	0.04	2.83	26.72	0.96
PM27-136	4.50	8.82	1.05	3.81	0.71	0.18	0.70	0.10	0.52	0.11	0.27	0.04	0.25	0.04	2.37	21.10	0.89
PM27-132	7.55	15.30	1.81	6.51	1.16	0.26	1.14	0.17	0.83	0.16	0.49	0.07	0.43	0.06	3.70	35.94	0.86
PM27-128	4.10	7.85	0.96	3.47	0.65	0.15	0.66	0.09	0.53	0.10	0.26	0.04	0.23	0.03	2.21	19.12	0.88
PM27-125	3.71	6.90	0.82	2.98	0.54	0.13	0.54	0.08	0.41	0.08	0.21	0.03	0.18	0.03	1.87	16.64	0.94
PM27-122	3.67	7.07	0.84	3.02	0.57	0.13	0.57	0.08	0.43	0.09	0.24	0.03	0.21	0.03	2.23	16.98	0.90
PM27-118	3.43	6.89	0.79	2.90	0.52	0.12	0.52	0.08	0.43	0.08	0.23	0.03	0.21	0.03	2.12	16.26	0.92
PM27-115	2.06	4.10	0.48	1.72	0.32	0.07	0.32	0.05	0.29	0.05	0.15	0.02	0.13	0.02	1.53	9.78	0.88
PM27-112	2.99	6.42	0.79	3.15	0.69	0.20	0.73	0.12	0.76	0.16	0.43	0.06	0.40	0.07	3.65	16.97	0.95
PM27-109	4.91	9.74	1.11	4.18	0.75	0.19	0.78	0.12	0.67	0.14	0.38	0.05	0.32	0.05	3.79	23.39	0.98
PM27-101	2.71	5.43	0.62	2.31	0.42	0.13	0.41	0.06	0.34	0.07	0.20	0.03	0.19	0.03	1.79	12.95	0.95
PM27-96	3.89	7.93	0.92	3.36	0.59	0.14	0.58	0.08	0.45	0.09	0.26	0.04	0.23	0.04	2.44	18.60	0.89
PM27-90	4.99	9.49	1.07	3.89	0.69	0.16	0.68	0.10	0.54	0.11	0.28	0.04	0.27	0.05	2.92	22.36	0.97
PM27-88	5.73	10.70	1.24	4.41	0.79	0.19	0.78	0.12	0.62	0.12	0.35	0.05	0.32	0.05	3.41	25.47	0.93
PM27-83	10.50	19.80	2.28	8.32	1.49	0.31	1.41	0.20	1.08	0.22	0.62	0.09	0.58	0.09	5.79	46.99	0.97
PM27-82	7.57	15.60	1.82	6.46	1.17	0.27	1.15	0.17	0.96	0.19	0.54	0.07	0.52	0.08	5.05	36.57	0.84
PM27-79	7.46	14.90	1.72	6.22	1.11	0.24	1.04	0.15	0.80	0.16	0.45	0.07	0.41	0.07	4.03	34.80	0.90
PM27-77	7.34	14.50	1.67	6.08	1.08	0.25	1.02	0.16	0.85	0.17	0.47	0.07	0.46	0.07	4.26	34.19	0.92
PM27-70	3.65	7.57	0.91	3.26	0.62	0.15	0.63	0.10	0.52	0.10	0.30	0.04	0.27	0.04	2.70	18.16	0.82
PM27-67	1.45	3.02	0.37	1.36	0.28	0.07	0.28	0.05	0.27	0.05	0.16	0.02	0.15	0.02	1.32	7.55	0.83
PM27-65	2.07	4.16	0.51	1.83	0.34	0.08	0.34	0.05	0.29	0.06	0.18	0.02	0.17	0.03	1.55	10.13	0.83
PM27-61	1.69	3.14	0.36	1.33	0.24	0.05	0.23	0.04	0.19	0.04	0.11	0.02	0.10	0.01	1.19	7.55	1.01
PM27-56	1.51	2.91	0.33	1.19	0.21	0.05	0.22	0.04	0.20	0.04	0.11	0.02	0.10	0.01	1.27	6.94	0.94
PM27-52	3.48	6.74	0.78	2.75	0.48	0.09	0.49	0.08	0.41	0.09	0.24	0.03	0.22	0.04	2.73	15.92	0.89
PM27-50	1.26	2.25	0.25	0.90	0.17	0.04	0.19	0.03	0.17	0.03	0.09	0.01	0.08	0.01	1.18	5.48	1.04
PM27-47	3.02	6.20	0.69	2.58	0.48	0.09	0.52	0.09	0.47	0.10	0.27	0.04	0.23	0.04	2.89	14.82	0.96
PM27-46	5.58	10.50	1.24	4.72	0.93	0.13	0.91	0.14	0.84	0.16	0.43	0.07	0.43	0.07	4.10	26.15	1.02
PM27-45	2.45	4.86	0.60	2.23	0.44	0.07	0.42	0.07	0.38	0.08	0.22	0.03	0.20	0.03	2.08	12.08	0.89
PM27-44	1.55	2.98	0.33	1.27	0.22	0.05	0.27	0.05	0.24	0.05	0.14	0.02	0.12	0.02	1.75	7.31	1.09
PM27-43	1.92	3.67	0.42	1.55	0.28	0.06	0.30	0.05	0.27	0.06	0.16	0.02	0.14	0.02	1.91	8.92	0.98
PM27-42	1.06	2.06	0.24	0.90	0.17	0.05	0.20	0.03	0.18	0.04	0.11	0.02	0.10	0.02	1.28	5.18	0.98
PM27-41	1.44	2.81	0.34	1.35	0.28	0.07	0.29	0.05	0.30	0.06	0.18	0.03	0.16	0.03	1.92	7.39	1.05
PM27-37	1.49	2.78	0.34	1.28	0.25	0.06	0.28	0.05	0.28	0.06	0.16	0.03	0.15	0.02	1.96	7.23	0.98
PM27-33	1.29	2.48	0.31	1.19	0.26	0.07	0.29	0.05	0.29	0.06	0.17	0.03	0.18	0.03	1.84	6.70	0.96
PM27-29	1.58	3.31	0.40	1.38	0.26	0.06	0.28	0.04	0.24	0.05	0.15	0.02	0.12	0.02	1.75	7.91	0.76
PM27-26	2.76	4.47	0.45	1.67	0.29	0.05	0.34	0.05	0.30	0.07	0.20	0.03	0.16	0.03	2.40	10.87	1.33
PM27-23	10.50	24.90	2.96	11.10	2.14	0.31	1.98	0.32	1.87	0.37	1.09	0.16	1.11	0.18	9.70	58.99	0.78
PM27-21	2.99	4.80	0.62	2.27	0.41	0.08	0.40	0.07	0.37	0.08	0.22	0.03	0.21	0.03	2.47	12.58	1.02
PM27-19	18.40	33.20	4.09	15.10	3.02	0.37	3.15	0.52	3.20	0.66	1.92	0.31	2.05	0.33	19.4	86.32	0.97
PM27-16	5.48	10.79	1.42	5.01	0.97	0.11	0.99	0.16	0.98	0.20	0.58	0.09	0.55	0.09	5.82	27.40	0.77
PM27-14	5.44	8.60	0.86	3.09	0.57	0.06	0.76	0.11	0.75	0.16	0.48	0.07	0.41	0.07	6.86	21.43	1.30
PM27-9	4.20	8.59	1.02	3.87	0.72	0.16	0.71	0.10	0.59	0.11	0.32	0.04	0.25	0.04	3.64	20.72	0.93
PM27-2	2.24	4.19	0.55	1.83	0.36	0.12	0.41	0.08	0.38	0.08	0.22	0.03	0.21	0.03	2.94	10.73	0.74
PM27-1	2.37	4.87	0.59	2.14	0.42	0.09	0.43	0.07	0.38	0.08	0.24	0.03	0.23	0.04	2.43	11.98	0.84

289

															(续表	麦2)
样品	$\frac{Ce}{Ce^{*}}$	lg(Ce/Ce*)	$\frac{Y}{Ho}$	$\frac{Pr_N}{Sm_N}$	$\frac{Pr_N}{Yb_N}$	Sc	Ti	V	Cr	Со	Ni	Zn	Ва	Sr	Zr	Hf
PM27-165	0.92	-0.04	19.7	0.91	1.22	0.43	162	21.4	6.43	1.49	19.6	1.79	67.1	2737	5.91	0.2
PM27-164	0.95	-0.02	18.3	0.91	1.07	0.88	323	21.9	10.4	1.94	22.2	2.66	75.6	3484	11.6	0.41
PM27-158	0.95	-0.02	19.3	0.94	1.11	2.02	523	36.1	14.5	2.89	21	6.21	39.0	890	17.7	0.61
PM27-152	0.87	-0.06	18.4	0.98	1.21	3.02	622	56.8	21.8	3.56	24.3	8.11	42.3	860	22.5	0.86
PM27-147	0.88	-0.05	18.6	1.05	1.75	1.81	375	24.6	11.3	1.97	18	6.48	42.7	805	12.1	0.45
PM27-144	0.91	-0.04	21.4	0.94	2.17	2.04	599	31.7	14.7	2.93	20.4	5.24	47.4	1045	21.0	0.64
PM27-139	0.93	-0.03	21.7	1.00	1.41	1.73	360	32.9	12.7	2.2	20.3	12.2	23.1	747	13.4	0.04
PM27-136	0.94	-0.03	21.6	0.93	1.34	1.11	316	29.9	11.1	2.15	19.6	2.78	423	14018	10.9	0.32
PM27-132	0.95	-0.02	23.1	0.98	1.34	3.27	606	47.7	16.6	2.77	20.1	4.73	46.6	804	21.2	0.68
PM27-128	0.91	-0.04	22.1	0.93	1.33	1.37	292	36.6	12.8	2.52	19.4	3.33	64.5	720	9.63	0.30
PM27-125	0.91	-0.04	23.4	0.95	1.45	1.2	230	27.2	13.5	2.32	24	3.97	45.4	1212	8.59	0.26
PM27-122	0.93	-0.03	24.7	0.93	1.28	0.94	207	26.7	18	2.19	20.5	10.9	45.0	1662	8.48	0.23
PM27-118	0.97	-0.02	26.5	0.95	1.20	1.56	311	48.1	13.9	2.68	23.1	9.01	59.1	1295	11.4	0.32
PM27-115	0.95	-0.02	30.7	0.94	1.18	0.53	196	55.1	9.99	2.02	20.1	4.24	17.2	739	6.8	0.18
PM27-112	0.96	-0.02	22.8	0.72	0.63	1.18	266	63.7	6.94	2.17	22.7	5.12	28.2	847	10. 2	0.24
PM27-109	0.96	-0.02	27	0.93	1.11	1.27	570	132	13.6	3.17	23.7	12.7	457	1526	18.7	0.47
PM27-101	0.97	-0.01	25.6	0.93	1.04	0.72	297	102	10.9	2.49	20.3	3.35	620	1664	10.6	0.29
PM27-96	0.97	-0.01	27.1	0.98	1.28	1.04	321	55.8	9.25	2.65	21.4	34.7	268	741	11.7	0.30
PM27-90	0.95	-0.02	26.5	0.97	1.27	1.2	423	61.7	12.8	3.06	20.4	7.3	263	637	14.9	0.37
PM27-88	0.93	-0.03	28.4	0.99	1.24	1.59	463	69	13.4	2.99	20	6.29	308	604	17.3	0.42
PM27-83	0.93	-0.03	26.3	0.96	1.26	4.25	1052	103	27.1	5.05	22.7	13.7	122	419	35.3	0.93
PM27-82	0.97	-0.01	26.6	0.98	1.12	2.82	864	54.7	23.3	4.03	20.6	16.1	285	531	28.1	0.74
PM27-79	0.96	-0.02	25.2	0.97	1.34	2.61	691	74.5	11.8	4.52	21.3	13.5	76.9	501	22.4	0.6
PM27-77	0.96	-0.02	25.1	0.97	1.16	2.68	721	64.1	17.2	5.08	21.7	2513	82.5	543	24.3	0.65
PM27-70	0.96	-0.02	27	0.92	1.08	0.63	432	24.5	13.8	1.89	18	4.82	25.1	648	14.7	0.37
PM27-67	0.95	-0.02	26.3	0.83	0.79	0.03	94	35.8	3.53	0.99	17.7	1.12	45.2	833	4.99	0.16
PM27-65	0.93	-0.03	25.9	0.94	0.96	0.02	182	60.4	5.82	1.38	14.8	2.02	19.4	590	9.00	0.21
PM27-61	0.93	-0.03	29.7	0.94	1.15	0.04	85	30.8	11.2	1.28	16.7	1.68	14.7	319	3.48	0.09
PM27-56	0.95	-0.02	31.8	0.99	1.05	0.02	131	53.8	4.94	1.43	18.6	2.3	63.3	1061	5.89	0.15
PM27-52	0.94	-0.03	30.3	1.02	1.13	0.58	338	93.5	10.4	2.22	21.2	3.27	22.2	792	14.7	0.37
PM27-50	0.92	-0.04	39.4	0.92	1.00	0.19	85	54.6	5.61	1.07	15.6	6.03	25.7	669	3.87	0.09
PM27-47	0.99	0.00	28.9	0.90	0.96	0.12	155	65.7	8.3	1.09	16.4	10.2	11.9	577	8.27	0.21
PM27-46	0.92	-0.04	25.6	0.84	0.92	0.16	108	52.6	7.99	1.19	27.3	7.08	14.4	993	9.36	0.20
PM27-45	0.92	-0.03	26	0.86	0.96	0.14	70	39.5	4.9	0.97	17.8	2.35	19.9	1173	7.93	0.14
PM27-44	0.96	-0.02	35	0.94	0.88	0.01	88	49.1	6.66	1.18	20	3.09	18.4	1044	4.15	0.09
PM27-43	0.94	-0.03	31.9	0.94	0.96	0.11	172	81.6	14.4	1.62	23.9	4.38	358	933	7.90	0.18
PM27-42	0.94	-0.03	32	0.89	0.77	0.05	76	47.5	4.87	1.32	17.9	1.97	86.3	1305	3.65	0.08
PM27-41	0.93	-0.03	31.9	0.76	0.68	0.26	147	74.9	15.2	1.41	20.6	17.1	85.6	1051	5.32	0.14
PM27-37	0.90	-0.05	32.7	0.85	0.72	0.44	121	75.1	8.62	1.54	23.3	33.2	23.1	884	4.35	0.10
PM27-33	0.90	-0.04	30.6	0.75	0.55	0.38	101	60.4	7.34	1.26	20.9	3.77	28.6	879	4.20	0.11
PM27-29	0.96	-0.02	35.1	0.97	1.06	0.52	164	75.2	7.9	1.42	22.4	3.12	21.8	768	5.03	0.14
PM27-26	0.91	-0.04	34.3	0.98	0.90	0.39	111	63.8	8.46	1.27	18.6	1.98	68.1	2300	4.90	0.13
PM27-23	1.03	0.01	26.2	0.87	0.85	1.34	311	124	10.9	2.24	21.7	5.17	20.3	566	16.10	0.33
PM27-21	0.81	-0.09	30.9	0.95	0.94	0.81	255	795	11.6	2.45	26.8	21.1	15.7	854	9.98	0.29
PM27-19	0.88	-0.05	29.5	0.85	0.64	2.15	516	592	12.4	1.99	14.5	20.3	44.0	787	68.7	2.25
PM27-16	0.89	-0.05	29.7	0.92	0.82	0.90	196	274	14.4	2.54	17.96	7.89	32.14	901	10.39	0.27
PM27-14	0.90	-0.05	42.9	0.95	0.67	0.46	118	95.5	7.28	3.52	19.8	2.32	66.7	960	4.65	0.12
PM27-9	0.96	-0.02	33.1	0.89	1.30	1.55	316	51.2	10.8	2.29	19.1	10.7	28.1	582	12.0	0.31
PM27-2	0.87	-0.06	36.7	0.96	0.84	0.62	123	25	11	1.05	17.6	2.5	1683	2049	5.11	0.14
PM27-1	0.95	-0.02	30.4	0.88	0.82	0.82	259	42.2	9.84	1.26	13.1	4.88	14.7	321	10.5	0.26

(	续	表	2)	
---	---	---	----	--

样品	Pb	Th	U	Rb	Nb	Cu	$\frac{Mn}{Sn}$	$\frac{\mathrm{Sr}}{\mathrm{Pa}}$	$\frac{100 \times \text{Rb}}{V}$	$\frac{100 \times Co}{T}$	Ni Ti	$\frac{V}{(V + N;)}$	$\frac{V}{Cr}$	$\frac{Ni}{Ca}$	$\frac{U}{Th}$	δU
PM27-165	3 39	0.48	4 20	2 97	0.59	4 71	5r	- Ба 40- 8	к 0.16	0.83	0.11	$(v + N_1)$ 0.52	3 33	13 15	8 75	1 93
PM27-164	5.95	0.89	4.20	6.71	1.21	10.4	0.020	46.1	0.20	0.81	0.09	0.50	2.11	11.44	4.72	1.87
PM27-158	7.46	1.48	4.86	14.1	1.86	14.0	0.078	22.8	0.21	0.69	0.05	0.63	2.49	7.27	3.28	1.82
PM27-152	10.4	1.76	4.50	20.8	2.18	18.5	0.108	20.3	0.21	0.74	0.05	0.70	2.61	6.83	2.56	1.77
PM27-147	5.94	0.99	3.23	9.37	1.28	10.7	0.087	18.9	0.16	0.55	0.05	0.58	2.18	9.14	3.26	1.81
PM27-144	4.96	1.33	3.55	10.7	2.2	10.2	0.089	22.0	0.17	0.70	0.05	0.61	2.16	6.96	2.67	1.78
PM27-139	5.06	0.90	2.91	9.58	1.31	9.93	0.083	32.3	0.17	0.73	0.07	0.62	2.59	9.23	3.23	1.81
PM27-136	3	0.80	2.33	6.47	1.14	6.50	0.005	33.1	0.19	0.90	0.08	0.60	2.69	9.12	2.91	1.79
PM27-132	10.5	1.69	4.08	24.8	2.25	10.8	0.116	17.3	0.25	0.51	0.04	0.70	2.87	7.26	2.41	1.76
PM27-128	5.42	0.71	2.11	10.6	1.01	8.45	0.108	11.2	0.27	1.40	0.11	0.65	2.86	7.70	2.97	1.80
PM27-125	6.54	0.58	2.47	6.89	0.81	9.31	0.058	26.7	0.12	0.77	0.08	0.53	2.01	10.34	4.26	1.85
PM27-122	4.2	0.60	1.98	7.02	0.76	11.9	0.056	36.9	0.23	1.83	0.17	0.57	1.48	9.36	3.30	1.82
PM27-118	5.2	0.91	3.68	11.1	1.06	14.2	0.042	21.9	0.24	1.12	0.10	0.68	3.46	8.62	4.04	1.85
PM27-115	3.29	0.47	2.2	6.08	0.68	13.3	0.084	43.0	0.27	1.69	0.17	0.73	5.52	9.95	4.68	1.87
PM27-112	4.88	0.52	2.83	5.59	0.81	18.5	0.082	30.0	0.26	1.81	0.19	0.74	9.18	10.46	5.44	1.88
PM27-109	6.06	1.37	7.59	13.8	2.02	27.3	0.041	3.34	0.30	0.88	0.07	0.85	9.71	7.48	5.54	1.89
PM27-101	2.13	0.81	6.02	8.62	1.01	25.6	0.033	2.68	0.27	1.38	0.11	0.83	9.36	8.15	7.43	1.91
PM27-96	2.83	1.14	5.57	12.2	1.18	18.5	0.094	2.76	0.30	1.47	0.12	0.72	6.03	8.08	4.89	1.87
PM27-90	2.76	1.41	5.46	16.8	1.57	22.4	0.134	2.42	0.33	1.02	0.07	0.75	4.82	6.67	3.87	1.84
PM27-88	2.80	1.61	6.48	18.0	1.78	18.8	0.141	1.96	0.33	1.00	0.07	0.78	5.15	6.69	4.02	1.85
PM27-83	5.38	3.65	6.78	59.2	3.86	24.3	0.277	3.43	0.49	0.56	0.03	0.82	3.80	4.50	1.86	1.70
PM27-82	4.61	2.66	3.43	38.2	3.28	17.8	0.204	1.86	0.49	0.56	0.03	0.73	2.35	5.11	1.29	1.59
PM27-79	2.88	2.13	7.95	31.1	2.46	21	0.201	6.51	0.39	0.84	0.04	0.78	6.31	4.71	3.73	1.84
PM27-77	3.85	2.12	10.3	31.1	2.63	29.7	0.200	6.58	0.38	0.85	0.04	0.75	3.73	4.27	4.86	1.87
PM27-70	2.15	0.95	3.63	9.27	1.56	10.2	0.108	25.8	0.26	0.53	0.05	0.58	1.78	9.52	3.82	1.84
PM27-67	2.32	0.23	2.34	2.71	0.29	8.69	0.037	18.4	0.13	1.65	0.30	0.67	10.1	17.88	10.17	1.94
PM27-65	5.70	0.54	3.00	5.03	0.74	9.48	0.092	30.4	0.17	0.77	0.08	0.80	10.4	10.72	5.56	1.89
PM27-61	3.14	0.26	1.49	2.39	0.35	7.02	0.170	21.7	0.32	2.14	0.28	0.65	2.75	13.05	5.73	1.89
PM27-56	3.25	0.36	2.40	3.61	0.54	10.8	0.036	16.8	0.29	2.39	0.31	0.74	10.9	13.01	6.67	1.90
PM27-52	10.2	1.02	5.81	8.31	1.28	21.6	0.049	35.7	0.22	1.23	0.12	0.82	8.99	9.55	5.70	1.89
PM27-50	2.40	0.24	1.83	2.28	0.37	6.96	0.058	26.0	0.23	1.79	0.26	0.78	9.73	14.6	7.63	1.92
PM27-47	4.86	0.47	2.54	3.85	0.88	7.50	0.081	48.5	0.20	0.91	0.14	0.80	7.92	15.0	5.40	1.88
PM27-46	8.29	0.35	2.28	2.46	1.55	16.4	0.039	69.0	0.17	1.99	0.46	0.66	6.58	22.9	6.51	1.90
PM27-45	4.40	0.28	1.79	2.36	2.09	4.87	0.020	58.9	0.16	1.62	0.30	0.69	8.06	18.4	6.39	1.90
PM27-44	2.23	0.26	1.99	1.67	0.4	6.09	0.045	56.7	0.29	1.97	0.33	0.71	7.37	16.9	7.65	1.92
PM27-43	3.14	0.41	3.63	3.40	0.73	13.8	0.042	2.61	0.27	1.35	0.20	0.77	5.67	14.8	8.85	1.93
PM27-42	1.72	0.19	2.24	1.55	0.31	6.54	0.018	15.1	0.27	2.20	0.30	0.73	9.75	13.6	11.79	1.95
PM27-41	2.81	0.36	3.03	2.73	0.53	36.3	0.029	12.3	0.25	1.18	0.17	0.78	4.93	14.6	8.42	1.92
PM27-37	9.25	0.35	2.64	2.57	0.39	13.6	0.053	38.3	0.31	2.57	0.39	0.76	8.71	15.1	7.54	1.92
PM27-33	2.20	0.29	2.95	2.36	0.37	5.74	0.053	30.7	0.24	2.10	0.35	0.74	8.23	16.6	10.17	1.94
PM27-29	3.46	0.51	5.34	3.38	0.53	14.2	0.050	35.2	0.25	1.18	0.19	0.77	9.52	15.8	10.47	1.94
PM27-26	2.41	0.45	2.79	3.97	0.42	7.09	0.017	33.8	0.34	2.12	0.31	0.77	7.54	14.6	6.20	1.90
PM27-23	8.44	1.03	5.48	8.80	1.58	22.3	0.246	27.9	0.04	0.13	0.01	0.85	11.4	9.69	5.32	1.88
PM27-21	5.76	0.91	6.68	7.36	1.09	43.9	0.045	54.4	0.44	2.04	0.22	0.97	68.5	10.9	7.34	1.91
PM27-19	15.3	10.6	7.04	31.1	10.2	26.1	0.148	17.9	0.43	0.55	0.04	0.98	47.7	7.29	0.66	1.33
PM27-16	5.44	0.94	4.57	9.87	1.35	20.3	0.069	28.0	0.52	2.12	0.15	0.94	19.1	7.08	4.87	1.87
PM27-14	11.8	0.34	3.17	2.99	0.47	19.8	0.065	14.4	0.51	5.87	0.33	0.83	13.1	5.63	9.32	1.93
PM27-9	11.6	0.99	2.87	8.88	1.09	12.3	0.133	20.7	0.43	1.27	0.11	0.73	4.74	8.34	2.90	1.79
PM27-2	2.10	0.49	4.19	1.43	0.48	9.40	0.019	1.22	0.22	1.75	0.29	0.59	2.27	16.8	8.55	1.92
PM27-1	3.39	0.81	3.60	5.35	0.95	7.67	0.241	21.8	0.36	1.05	0.11	0.76	4.29	10.4	4.44	1.86

平坦型,具有微弱的 LREE 亏损( $Pr_N/Sm_N = 0.72 ~ 1.05$ ,平均值为 0.93;  $Pr_N/Yb_N = 0.55 ~ 2.17$ ,平均 值为 1.08),与近岸河口沉积物平均值配分曲线特 征相近,而与深海粘土配分曲线所表现出的轻稀土 元素明显亏损特征不同。多数曲线显示出较弱的正 铕异常,仅有少数样品表现出明显的负铕异常。



图 2 云南罗平县大凹子剖面稀土元素配分曲线(深海粘 土值据沈华悌,1990;近岸河口沉积物平均值据马荣林 等,2010)

Fig. 2 PAAS-normalized REE patterns of the samples from the Dawazi section in Luoping County, Yunnan Province (REE concentrations of deep-sea clay after Shen Huati, 1990; the average of REE concentrations in coastal and estuarial deposits after Ma Ronglin et al., 2010)

大凹子剖面样品的微量元素含量(表2)与后太 古宙澳大利亚页岩值(PAAS)相比,除V、Ba、Sr、U 等元素略富集外,Sc、Cr、Co、Ni、Zr、Hf、Th、Rb等元 素明显亏损。V、U、Co、Ni、Zn和Cr等氧化还原敏 感元素的含量沿层序发生了明显的变化,主要表现 出两期明显的富集(图 3a ~ 3f)。第一期是在 2.42 m附近,从底部开始到2.42m,V、Zr、Th元素在 2.42 ~ 2.87m附近有一个显著的转折点。之后,又 回落到较低值。另一期富集是在 6.20m附近,从 2.87m开始它们的含量总体上较低,到6.20m附近 达到峰值,Zn、Cr元素在 6.20~6.83m附近有一个 显著的转折点。

一些不相容和高场强元素,如 Ti、Zr、Sc 和 Th 的含量在剖面上变化情况如图 3g~3j 所示,元素 Ti、Sc 在 6.20~6.83m 附近有一个显著的转折点, 元素 Zr、Th 在 2.42~2.87m 附近有一个显著的转折 点,之后,又回落到较低值。

#### 4.1 测试样品判别沉积环境的可靠性

由于碳酸盐岩中的微量元素及稀土元素分布特 征能够代表沉积时水体的微量元素及稀土元素分布 特征,因此可用它们示踪碳酸盐岩形成的环境(黄 晶等,2009)。我们在判断海相灰岩能否作为古海 洋环境研究对象的标准首先是评价其成岩作用程 度,一般来说, Mn/Sr 比值低于 2.0, δ<sup>18</sup>O<sub>PDB</sub> 值高于 -10‰的灰岩样品可认为成岩作用可以忽略(陈永 权和周新源, 2009; Kaufman et al., 1993; Kaufman and Knoll, 1995)。从剖面上 50 件灰岩样品的分析 结果来看,其 Mn/Sr 比值为 0.005~0.277,平均值 为 0.086, 远远低于 2, 其中分析 28 件样品的δ<sup>18</sup> O<sub>PDB</sub> 值均高于-10‰(孙媛媛等,2009),因此我们认为 这些灰岩样品的成岩作用基本可以忽略,可以反映 古海水的成分特征。另外表3中显示,微量元素与 碳酸盐岩中主要成分 CaO 和 MgO 的相关性都比较 差(相关系数|r|均小于0.4,n=50),表明微量元素 受碳酸盐岩成岩作用影响较小。

由于陆源碎屑是沉积物或沉积岩中常见的组分,因此在进行沉积环境判别前还必须评估碎屑物质的影响。研究表明,Al/(Al + Fe + Mn)比值可以用来反映富含铝硅酸盐、Fe、Mn以及Al氢氧化合物等的陆源沉积物输入到海洋环境中的程度(Fio et al., 2010)。剖面上50件样品中,除了3.61m处样品PM27-41呈现出极低的Al/(Al + Fe + Mn)比值(=0.04)外,其余样品的比值为0.31~0.82左右,在Fe/Ti—Al/(Al + Fe + Mn)图解(图5)中,投点主要集中于陆源物质端元附近,说明沉积过程中有较多的陆源碎屑物质输入。

这些陆源碎屑物质的输入对沉积环境判别是否 存在较大影响呢?研究认为,如果微量元素含量对 Al、Ti或Th呈现出良好的线性关系,并且Al、Ti以 及Th的含量与平均页岩相近,说明沉积物或沉积岩 所含的微量元素主要由陆源碎屑提供,不宜作环境 分析(Calvert and Pedersen, 1993; Tribovillard et al.,1994; Hild and Brumsack,1998; Böning et al., 2004)。我们注意到大凹子剖面所有样品的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、 TiO<sub>2</sub>和Th的含量明显低于平均页岩(PAAS)值(见 表1,表2),表3中显示,绝大多数微量元素含量与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>或Ti的相关系数都较小(|r| < 0.5, n =50),说明微量元素含量与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>或Th等元素 都不具有良好的线性关系,因此认为尽管这些灰岩 在沉积过程中有较多陆源物质输入,但沉积物中微 量元素受陆源碎屑的影响较小。

4 讨论

#### 表3云南罗平县大凹子剖面主量元素、微量元素相关系数表

Table 3 Correlation matrix for major, trace element concentrations measured in whole - rock samples from the Dawazi section in Luoping County, Yunnan Province

																-												
	$\mathrm{SiO}_2$	TiO <sub>2</sub>	$Al_2O_3$	$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	$P_2O_5$	Y	Sc	Ti	V	Cr	Со	Ni	Zn	Ba	Sr	Zr	Hf	Pb	Th	U	Rb	Nb	Cu
SiO <sub>2</sub>	1.00																											
TiO <sub>2</sub>	0.80	1.00																										
$Al_2O_3$	0.92	0.94	1.00																									
$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	0.73	0.94	0.86	1.00																								
MnO	0.70	0.79	0.74	0.84	1.00																							
MgO	-0.13	-0.01	-0.03	0.12	0.26	1.00																						
CaO	-0.77	-0.76	-0.85	-0.76	-0.71	-0.47	1.00																					
$Na_2O$	0.23	0.35	0.23	0.48	0.55	0.21	-0.26	1.00																				
$K_2O$	0.80	0.96	0.91	0.95	0.82	-0.04	-0.72	0.35	1.00																			
$P_2O_5$	0.07	0.12	0.06	0.25	0.21	0.07	-0.05	0.31	0.16	1.00																		
Y	0.82	0.46	0.60	0.42	0.60	-0.14	-0.49	0.21	0.49	0.12	1.00																	
Sc	0.44	0.64	0.47	0.72	0.79	0.10	-0.36	0.51	0.73	0.30	0.41	1.00																
Ti	0.40	0.65	0.44	0.68	0.76	0.12	-0.33	0.53	0.69	0.39	0.38	0.93	1.00															
V	0.41	0.03	0.16	0.01	0.07	-0.22	-0.11	0.01	0.05	0.10	0.51	0.07	0.07	1.00														
Cr	0.30	0.52	0.33	0.57	0.64	0.14	-0.27	0.52	0.56	0.25	0.25	0.80	0.80	0.06	1.00													
Co	0.31	0.55	0.37	0.64	0.70	0.11	-0.27	0.62	0.59	0.46	0.29	0.83	0.86	0.08	0.72	1.00												
Ni	-0.02	0.19	0.10	0.19	0.05	-0.27	0.10	0.08	0.21	0.23	-0.12	0.23	0.22	0.13	0.32	0.37	1.00											
Zn	0.07	0.17	0.10	0.35	0.24	0.08	-0.09	0.49	0.16	0.55	0.06	0.24	0.27	-0.02	0.18	0.41	0.08	1.00										
Ba	-0.09	-0.06	-0.07	-0.09	-0.09	-0.05	0.12	-0.07	-0.09	0.27	-0.04	-0.01	0.02	-0.08	0.09	-0.01	-0.03	-0.03	1.00									
Sr	-0.10	-0.08	-0.09	-0.12	-0.06	-0.18	0.20	-0.08	-0.09	-0.18	-0.10	-0.07	-0.07	-0.09	-0.06	-0.08	0.01	-0.06	0.24	1.00								
Zr	0.67	0.49	0.50	0.50	0.70	-0.03	-0.39	0.34	0.57	0.32	0.83	0.71	0.73	0.43	0.54	0.53	-0.04	0.16	-0.04	-0.09	1.00							
Hf	0.63	0.42	0.43	0.42	0.65	-0.05	-0.33	0.30	0.51	0.27	0.81	0.67	0.67	0.44	0.50	0.47	-0.06	0.13	-0.04	-0.06	0.97	1.00						
Pb	0.46	0.25	0.34	0.26	0.36	-0.10	-0.27	-0.01	0.34	-0.01	0.62	0.35	0.23	0.34	0.19	0.22	0.15	-0.06	-0.26	-0.14	0.51	0.54	1.00					
Th	0.65	0.33	0.40	0.34	0.57	-0.05	-0.32	0.23	0.41	0.27	0.86	0.54	0.55	0.52	0.38	0.36	-0.15	0.10	-0.02	-0.08	0.96	0.96	0.50	1.00				
U	0.43	0.46	0.40	0.50	0.48	-0.07	-0.27	0.34	0.47	0.63	0.40	0.53	0.63	0.40	0.39	0.67	0.27	0.49	0.17	-0.14	0.57	0.52	0.15	0.49	1.00			
Rb	0.46	0.59	0.45	0.64	0.73	0.11	-0.34	0.53	0.64	0.42	0.46	0.89	0.93	0.17	0.76	0.82	0.14	0.27	-0.01	-0.14	0.78	0.71	0.24	0.66	0.61	1.00		
Nb	0.66	0.38	0.43	0.38	0.59	-0.08	-0.33	0.27	0.46	0.27	0.86	0.57	0.59	0.48	0.41	0.39	-0.10	0.13	-0.05	-0.08	0.97	0.96	0.51	0.98	0.49	0.68	1.00	
Cu	0.38	0.30	0.28	0.31	0.26	-0.11	-0.21	0.25	0.29	0.44	0.36	0.32	0.39	0.63	0.40	0.52	0.45	0.26	0.04	-0.19	0.39	0.36	0.25	0.35	0.70	0.41	0.35	1.00

由于稀土元素在风化、搬运、沉积和成岩过程中 具有很强的稳定性(Murray et al., 1992),且它们在 海水中的溶解度非常低,故沉积岩较高的稀土总量 很可能是碎屑矿物继承的结果。如果分析的沉积物 或沉积岩总稀土含量大大低于常用作标准化的平均 页岩(PAAS)的 ΣREE 值(184.8×10<sup>-6</sup>),说明受陆 源物质影响小。大凹子剖面 50 件样品的稀土总量 为5.16×10<sup>-6</sup>~86.32×10<sup>-6</sup>,平均值为 21.46× 10<sup>-6</sup>,远远小于 PAAS 的稀土总量,说明沉积物中稀 土元素受陆源物质影响也很小。

由此可见,大凹子剖面上所选泥晶灰岩样品受 成岩作用改造程度低,尽管其在沉积过程中有较多 陆源物质输入,但稀土元素及微量元素受陆源物质 的影响都较小,因此根据其元素地球化学特征来判 别沉积环境是比较可靠的。

#### 4.2 古气候

MgO/CaO值是气候变化的良好指示剂,当钠盐、钾盐等易溶性盐类不参与沉淀时,在干旱气候条件下,MgO/CaO值高,斜率陡,而在潮湿气候条件下,所生成灰岩的CaO高,MgO较小,故MgO/CaO值高指示干热气候,低值指示潮湿气候;而当钠盐、钾盐等易溶性盐类参与沉淀时,其MgO/CaO低值和K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>的相对高值共同指示干热气候(汪凯明和罗顺社,2009b)。大凹子剖面灰岩中K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O平均含量分别为0.48%、0.05%,可见K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>含量很低,说明易溶性盐类几乎不参与沉淀。灰岩的MgO/CaO值较低,为0.014~0.705,平均值为0.118,指示中三叠世安尼期罗平地区处于比较潮湿气候。

对大凹子剖面进行氧同位素研究后发现,罗平 地区古海水温度大致在 27~32℃之间,平均为 29℃ 左右(孙媛媛等,2009),说明当时气候比较温暖。 总体来说,罗平地区中三叠世安尼期为温暖潮湿的 气候环境,适合海洋生物的大量繁殖栖息,这也是该 地区灰岩中得以发现大量古生物化石的原因。

#### 4.3 古水深及相对海平面变化

Sr/Ba 值是反映古沉积环境的一个重要参数, 一般认为海相沉积 Sr/Ba > 1,而陆相沉积 Sr/Ba < 1 (经雅丽等,2005;赵一阳和鄢明才,1994)。大凹子 剖面上灰岩样品的 Sr/Ba 值为 1.22~68.96,平均值 为 24.35,表明它们都是在海相环境中沉积而成。

镁铝比值  $m = 100 \times MgO/Al_2O_3$  是根据沉积 岩层中 MgO 的亲海性,  $Al_2O_3$  的亲陆性特征而建立 的比值关系。在不同类型的沉积环境中 m 值的变 化范围是:①淡水沉积环境 m < 1; ②陆海过渡性 沉积环境 m 为1~10; ③海水沉积环境(水体盐度 > 30. 63%) m 为10~500; ④陆表海环境(或潟湖 碳酸盐岩沉积环境) m > 500。在某些内陆湖泊, 随着湖水的逐渐咸化,湖积物的 m 值也逐渐增大。 因此可以确认,m 值可以作为判别沉积环境的标志 之一。从现有情况看,m 值可作为从寒武纪至现代 各地史时期的沉积物形成环境的判断标志(经雅丽 等,2005)。所分析灰岩样品的 m 值为 27.22 ~ 27400,平均值达到 1432,表明沉积环境为水体较 浅、底部水体停滞的陆表海或碳酸盐台地内部小盆 地环境。

剖面灰岩样品基本无明显的 La 的正异常,平缓 或者微弱的 LREE 亏损,以及较低的 Y/Ho 比值,这 些特征更接近河流/河口相的 REE 特征 (Lawrence and Kamber, 2006; Bolhar and Van Kranendonk, 2007),其配分曲线明显不同于深海沉积物曲线特 征,而与近岸河口沉积物曲线特征相似。另外研究 发现, Rb/K 比值随盐度而变(Campbell and Williams, 1965), 一般正常的海相页岩中该比值大 于 0.006, 微咸水页岩的该比值大于 0.004, 河流沉 积的该比值为 0.0028 (李进龙和陈东敬, 2003), 剖 面上灰岩样品的 Rb/K 比值为 0.0004~0.0052,平 均值为0.0027,也与河流沉积物比值相近。在大凹 子剖面的灰岩中,发现有保存完好的植物以及陆生 节肢动物化石(Hu Shixue et al., 2011),另外于大 凹子地区新发现的等足类化石,研究认为它主要栖 息于淡水环境(Fu Wanlu et al., 2010)。这些地球 化学特征及化石证据均表明该地区在沉积过程中有 淡水注入,这说明了其古地理位置离岸较近,来自陆 地的植物、陆生节肢动物化石以及来自淡水环境的 等足类化石未经过远距离的搬运,得以完整保存。

岩性特征可以反映水体的相对深浅,从所研究的5个岩性段的岩性特征来看,C1、C3、C5反映出水体相对较浅,C2、C4反映水体相对较深。而从元素特征来看,A1、K、V、Ti和P的含量从浅水到深水总体呈增加趋势,故可用于指示古水深及海平面的变化(汪凯明和罗顺社,2009a)。另外Co、Ni、Mo、Cu等元素向远洋方向增加,Co/Ti和Ni/Ti值可作为距陆地距离的标志,其值常距陆地距离的增加而增大(刘鹏举等,2005)。在大凹子剖面上,C1到C2、C3到C4这两个岩性转换面附近,V、Ti、A1、K和P等元素的含量总体呈现出两个变化趋势,在2.42m和6.83m有两次明显的含量增加的峰值,表



图 3 云南罗平县大凹子剖面元素含量及比值曲线图 Fig. 3 Stratigraphic profiles of element concentrations and element concentration ratios of the samples from the Dawazi section in Luoping County, Yunnan Province

明海水相对变深。Co/Ti 和 Ni/Ti 比值也显示出两次比值增大,表明离岸距离的增加,海平面相对上升(图 3a, 3g, 31~3o)。这与岩性特征反映出的水体相对变化特征是一致的。在 C2、C4 这两个岩性段内部,Al、K、V、Ti、P 等元素含量以及 Co/Ti、Ni/Ti 比值也呈现出多个变化旋回,变化曲线呈锯齿状,反映在此期间海平面周期性升降变化频繁。

从图 3p 中可以看出,随着海水的上涨,Al/(Al +Fe+Mn)比值增大,表明海水中输入陆源碎屑物 质增加。Rb/K 比值可来指示古盐度变化特征 (Campbell and Williams, 1965),Rb/K 有两次比值 增大(图 3q),表明盐度增加,这与陆源碎屑物质增 加是一致的(图 4)。

综上所述,罗平地区在中三叠世安尼期海平面 周期性升降,但总体表现出两次较大规模的海平面 相对上升的活动,伴随着海平面的上升,陆源碎屑物 质输入增加,海水盐度增大。

#### 4.4 氧化还原环境

U、V和Mo具有多种化学价态,沉积时受氧化还原状态影响显著,在沉积物或沉积岩中它们多数为自生组分,成岩作用中几乎不发生迁移,保持了沉积时的原始记录。因此,U、V和Mo是恢复古海洋氧化还原的理想指标。如果沉积物或沉积岩中U、V、Mo与Ni、Cu的含量较高且具有较好的正相关关系,可以认为它们沉积时的环境很可能是缺氧的(常华进等,2009)。剖面上所有灰岩样品的U、V与Ni、Cu的含量较高,U与Ni、Cu表现出较好的正相关关系(r = 0.27, n = 50; r = 0.70, n = 50),V与Ni、Cu也表现出正相关性(r = 0.13, n = 50; r = 0.63, n = 50),反映当时的沉积环境为相对缺氧环境。

由于某些微量元素在特定的氧化还原状态下性



图 4 云南省罗平县大凹子剖面样品的 Fe/Ti- Al/(Al + Fe + Mn)图解(据 Ito 等,2005)

Fig. 4 Fe/Ti vs. Al/(Al + Fe + Mn) plots for the samples from the Dawazi section in Luoping County, Yunnan Province (after Ito et al. , 2005)

质相似,但在其他氧化还原状态下它们性质迥异,造成了它们在不同的氧化还原环境中的组成和富集程度的差别,因此可以利用这些元素的比值来进行环境重建(常华进等,2009)。研究发现沉积岩中的V/(V + Ni)比值(Rimmer, 2004; Hatch and Leventhal, 1992)、V/Cr 比值(Jones and Manning, 1994)、Ni/Co 比值(Jones and Manning, 1994)、Ni/Co 比值(Jones and Manning, 1994)等均可作为判别古海洋氧化还原环境的重要参数,并提出了相应的判别指标(表4),吴

表 4 云南罗平县大凹子剖面元素比值特征对比表 Table 4 Characteristics of element concentration ratios of the samples from the

Dawazi section in Luoping County, Yunnan Province

ਆ ਅਹੁ ਹੋ ਆ	与工业	环境	缺氧	<b>士</b> 六 八 七 祥 日 教 招	如田会粉
	乳虾児	贫氧	厌氧	—————————————————————————————————————	判别奓剱
Rimmer, 2004; Hatch and Leventhal, 1992	< 0.45	0.45~0.60	>0.50	0.50~0.98,平均值为0.72	V/(V + Ni)
Jones and Manning, 1994	< 2.00	$2.00 \sim 4.25$	>4.25	1.48~68.53,平均值为8.18	V/Cr
Jones and Manning, 1994; Scheffler et al., 2006	< 5.00	5.00 ~ 7.00	>7.00	4.27~22.94,平均值为10.70	Ni/Co
Jones and Manning, 1994	< 0.75	0.75~1.25	>1.25	0.66~11.79,平均值为5.48	U/Th
吴朝东等, 1999	< 1	•1	>	1.33~1.95,平均值1.85	$\frac{\delta U = 2U}{(U + Th/3)}$
Wright et al., 1987	< -0.1	0.1	> -	-0.09~0.01,平均值-0.03	$lg(Ce/Ce^*)$

朝东等(1999)利用铀总量和自生铀量关系建立了  $\delta U(\delta U = 2U/(U + Th/3))来判别缺氧环境。海水$ 中 Ce 异常与氧化还原环境有很好的对应关系(German and Elderfield, 1990),这是因为 Ce 为变价元素,在氧化环境下很容易从 Ce<sup>3+</sup>氧化为 Ce<sup>4+</sup>,形成难溶解的 CeO<sub>3</sub> 沉淀,造成海水中 Ce 亏损,因此Wright 等(1987)提出采用参数 lg(Ce/Ce<sup>\*</sup>)来判别海水的氧化还原环境(表4)。

从表4中可以看出,剖面灰岩样品的 V/(V + Ni)、V/Cr、Ni/Co、U/Th 等元素比值均比较高,δU、lg (Ce/Ce\*)参数值也较高,指示出沉积环境为相对缺 氧环境,反映水体能量较低,由于表层混合水体较 薄,水体垂向混合作用弱,同时,罗平地区处于碳酸 盐台地内部小盆地的古地理位置也在一定程度上限 制了横向水体的广泛交换,造成底部水体供氧不足, 从而形成半封闭型的停滞缺氧环境。

在 V/Cr 随剖面厚度变化曲线图上(图 3r)我们 发现,随着海平面的相对上升,V/Cr比值增大,说明 底部水体的含氧量减少,处于更缺氧的环境。氧化 还原敏感元素 V、U、Co、Ni、Zn 和 Cr 的变化也可以 指示水体的氧化还原环境变化(Tribovillarda et al., 2006; Morford and Emerson, 1999),在C1到C2、C3 到 C4 这两个岩性转换面附近,随着这两次较大规 模海平面相对上升,这些元素相对富集,反映出水体 相对缺氧。在C2、C4 这两个岩性段内部,V、U、Co、 Ni、Zn 和 Cr 等呈现出锯齿状曲线特征,表明随着海 平面周期升降活动,底部水体表现为间歇性缺氧,这 与野外观察剖面沉积构造反映出的证据是一致的 (白建科等,2010)。正是这种间歇性缺氧的环境, 使得中三叠世安尼期罗平地区大量栖息繁殖的海洋 生物死亡后遗体得以完好保存,包括一些从岸边短 距离搬运过来的植物、陆生节肢动物以及随淡水注 入而漂浮过来的等足类化石都得以完好保存下来, 而未发生氧化分解,最终形成罗平生物群保存精美 的古生物化石。

#### 5 结论

(1)罗平生物群化石产出地层灰岩样品的 Mn/ Sr 比值为 0.005 ~ 0.277,平均值为 0.086,远远低于 2,反映其成岩作用较弱,可以反映古海水成分。微 量元素含量与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub> 或 Th 不具有很好的线性 关系,ΣREE 为 5.18 × 10<sup>-6</sup> ~ 86.32 × 10<sup>-6</sup>,平均值 为 21.46 × 10<sup>-6</sup>,远远低于 PAAS 的 ΣREE 值(184.8 × 10<sup>-6</sup>),反映沉积物或沉积岩中微量元素、稀土元 素受陆源碎屑影响小,可以用于判断沉积环境。

(2) 剖面上灰岩样品的 K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O 含量低, MgO/CaO 值(为0.014~0.705,平均值为0.118)较低,反映罗平地区在中三叠世安尼期为温暖潮湿的 气候条件。

(3) 灰岩样品的 Sr/Ba 为 1.22~68.96, 平均值 为 24.35, m 值为 27.22~27400, 平均值达到 1432, 稀土元素表现出平缓或者微弱的 LREE 亏损, 以及 较低的 Y/Ho 比值, 稀土配分曲线与近岸河口沉积 物曲线特征相似,结合化石组合特征, 判断罗平生物 群产出地层属于近岸的碳酸盐台地内部盆地沉积, 水体不太深, 有较多的陆源碎屑物质供应。根据 Al、K、V、Ti 和 P 等元素含量以及 Co/Ti 和 Ni/Ti 比 值特征判断, 罗平地区海平面升降变化频繁, 发生了 两次较大规模的海平面相对上升的活动。

(4) 灰岩样品的 U、V 与 Ni、Cu 的含量较高且具 有较好的正相关关系, V/(V + Ni)、V/Cr、Ni/Co、U/ Th 等元素比值、δU、lg(Ce/Ce\*)等参数值都较高, 反映沉积水体为相对缺氧的环境。在 C2、C4 这两 个岩性段内部,氧化还原敏感元素 V、U、Co、Ni、Zn 和 Cr 等呈现出锯齿状曲线特征,表明水体并不完全 是缺氧环境,而是随着海平面周期升降活动,底部水 体表现为间歇性缺氧,这是中三叠世安尼期罗平地 区大量繁殖栖息的生物死亡后得以完整保存形成化 石的重要原因。

(5)结合地球化学及地层学资料,初步判断中 三叠世安尼期罗平地区处于温暖潮湿的离岸较近的 碳酸盐台地内部盆地,海洋生物大量繁殖,这一时期 海平面升降较为频繁,并有两次较大规模的海平面 相对上升事件,随着海平面的上升,底部水体垂向混 合作用变弱,台内盆地的地形又在一定程度上限制 了水体的横向交换,从而形成低能、缺氧的沉积环 境,防止了死亡生物遗体的腐烂分解,得以完好保存 并最终形成化石。

**致谢:**主量、微量、稀土元素分析由中国科学院 广州地球化学研究所完成,成文过程中与中国地质 大学(武汉)陈中强教授进行了有益的探讨,中国科 学技术大学沈延安教授阅读了本文初稿,并提出了 宝贵意见,在此一并表示感谢。

#### 参考文献 / References

白建科,张启跃,尹福光,谢韬,周长勇,吕涛,冯静.2010.云南 罗平生物群埋藏环境初步研究:来自沉积构造的证据.沉积学 报,28(4):762~767.

常华进,储雪蕾,冯连君,黄晶,张启锐. 2009. 氧化还原敏感微量

元素对古海洋沉积环境的指示意义.地质论评,55(1):91~99.

- 陈永权,周新源.2009. 塔里木盆地中寒武统一下奥陶统泥晶灰岩 地球化学与古海洋学.海洋地质与第四纪地质,29(1):47~ 52.
- 黄金元,张克信,张启跃,吕涛,周长勇,白建科. 2009. 云南罗平 中三叠世大凹子剖面牙形石生物地层及其沉积环境研究. 微体 古生物学报,26(3):211~224.
- 黄晶,储雪蕾,常华进,冯连君.2009. 三峡地区埃迪卡拉系陡山沱 组帽碳酸盐岩的微量元素和稀土元素研究.科学通报,54 (22):3498~3506.
- 经雅丽,张克信,林启祥,朱云海,王治平.2005.浙江长兴煤山下 三叠统和龙山组、南陵湖组沉积地球化学特征与古环境意义. 地质科技情报,24(1):35~40.
- 李进龙, 陈东敬. 2003. 古盐度定量研究方法综述. 油气地质与采 收率, 10(5): 1~3.
- 林治家,陈多福,刘芊.2008. 海相沉积氧化还原环境的地球化学 识别指标.矿物岩石地球化学通报,27(1):72~80.
- 刘鹏举, 王成文, 孙跃武, 张宝福, 王连和, 岳书范. 2005. 河北平 泉中元古代高于庄组和杨庄组地球化学特征. 吉林大学学报 (地球科学版), 35(1): 1~6.
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. 地球化学, 25(6): 552 ~ 558.
- 马荣林,杨奕,何玉生.2010.海南岛南渡江近岸河口沉积物稀土 元素地球化学.中国稀土学报,28(1):110~114.
- 彭海艳,陈洪德,向芳,叶黎明,李国新. 2006. 微量元素分析在沉 积环境识别中的应用——以鄂尔多斯盆地东部二叠系山西组为 例. 新疆地质,24(2):202~205.
- 沈华悌. 1990. 深海沉积物中的稀土元素. 地球化学, 19(4): 340~348.
- 孙媛媛,刘俊,吕涛,许效松,张启跃,楼雄英,江新胜.2009.罗 平生物群产出层位氧碳稳定同位素的初步研究.地质学报,83 (8):1110~1117.
- 汪凯明,罗顺社. 2009a. 碳酸盐岩地球化学特征与沉积环境判别意义——以冀北坳陷长城系高于庄组为例. 石油与天然气地质, 30(3):343~349.
- 汪凯明, 罗顺社. 2009b. 燕山地区中元古界高于庄组和杨庄组地球 化学特征及环境意义. 矿物岩石地球化学通报, 28(4): 356 ~ 364.
- 吴朝东,杨承运,陈其英. 1999. 湘西黑色岩系地球化学特征和成 因意义. 岩石矿物学杂志, 18(1): 26~39.
- 张启跃,周长勇,吕涛,谢韬,楼雄英,刘伟,孙媛媛,江新胜. 2008. 云南罗平中三叠世安尼期生物群的发现及意义.地质论 评,54(4):1~5.
- 张启跃,周长勇,吕涛,谢韬,楼雄英,刘伟,孙媛媛,黄金元,赵 来时. 2009. 云南中三叠世罗平生物群地层时代的厘定:来自牙 形石的证据. 中国科学(D辑:地球科学),39(3):300~305.
- 赵一阳, 鄢明才. 1994. 中国浅海沉积物地球化学. 北京: 科学出版 社, 40~49.
- Bolhar R, Van Kranendonk M J. 2007. A non-marine depositional setting for the northern Fortescue Group, Pilbara Craton, inferred from trace element geochemistry of stromatolitic carbonates. Precambrian Res, 155(3~4): 229~250.
- Böning P, Brumsack H, Böttcher M E, Schnetger B, Kriete C, Kallmeyer J, Borchers S L. 2004. Geochemistry of Peruvian nearsurface sediments. Geochim Cosmochim Acta, 68 (21): 4429 ~ 4451.
- Calvert S E, Pedersen T F. 1993. Geochemistry of Recent oxic and

anoxic marine sediments: Implications for the geological record. Mar Geol,  $113(1 \sim 2) : 67 \sim 88$ .

- Campbell F A, Williams G D. 1965. Chemical Composition of Shales of Mannville Group (Lower Cretaceous) of Central Alberta, Canada. AAPG Bull, 49: 81~87.
- Fio K, Spangenberg J E, Vlahovic, I, Sremac J, Velic I, Mrinjek E. 2010. Stable isotope and trace element stratigraphy across the Permian—Triassic transition: A redefinition of the boundary in the Velebit Mountain, Croatia. Chem Geol, 278(1~2): 38~57.
- Fu Wanlu, Wilson G D F, Jiang Dayong, Sun Yuanlin, Hao Weicheng, Sun Zuoyu. 2010. A New Species of Protamphisopus Nicholls (Crustacea, Isopoda, Phreatoicidea) from Middle Triassic Luoping Fauna of Yunnan Province, China. J Paleontol, 84(5): 1003 ~ 1013.
- German C R, Elderfield H. 1990. Application of the Ce anomaly as a paleoredox indicator: the ground rules. Paleoceanography, 5(5): 823 ~ 833.
- Hatch J R, Leventhal J S. 1992. Relationship between inferredredoxpotential of the depositionalenvironment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U. S. A. Chem Geol, 99(1~3): 65~82.
- Hild E, Brumsack H J. 1998. Major and minor element geochemistry of Lower Aptian sediments from the NW German Basin (core Hohenegglesen KB 40). Cretaceous Res 19(5): 615~633.
- Hu Shixue, Zhang Qiyue, Chen Zhongqiang, Zhou Changyong, Lü Tao, Xie Tao, Wen Wen, Huang Jinyuan, Benton M J. 2011. The Luoping Biota: exceptional preservation, and new evidence on the Triassic recovery from end-Permian mass extinction. Proc R Soc London, Ser B, 2274 ~ 2282.
- Ito T, Komuro K, Hatsuya K, Nishi H. 2005. Chemical Compositions of Ferromanganese Micronodules in Sediments at Site 1216, ODP Leg 199, Paleogene Equatorial Transect. In: Wilson P A, Lyle M, Firth J V, eds. Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 199, 1 ~ 20.
- Jones B, Manning D A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. Chem Geol, 111(1~4): 111~129.
- Kaufman A J, Jacobsen S B, Knoll A H. 1993. The Vendian record of Sr and C isotopic variations in seawater: Implications for tectonics and paleoclimate. Earth Planet Sci Lett, 120(3~4): 409~430.
- Kaufman A J, Knoll A H. 1995. Neoproterozoic variations in the Cisotopic composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications. Precambrian Res, 73(1~4): 27~49.
- Lawrence M G, Kamber B S. 2006. The behaviour of the rare earth elements during estuarine mixing—revisited. Mar Chem,  $100(1 \sim 2): 147 \sim 161$ .
- Morford J L, Emerson S. 1999. The geochemistry of redox sensitive trace metals in sediments. Geochim Cosmochim Acta, 63 (11 ~ 12): 1735 ~ 1750.
- Murray R W, Buchholtz Ten Brink M R, Gerlach D C, Russ III G P, Jones D L. 1992. Rare earth, major, and trace element composition of Monterey and DSDP chert and associated host sediment: Assessing the influence of chemical fractionation during diagenesis. Geochim Cosmochim Acta, 56(7): 2657 ~2671.
- Rimmer S M. 2004. Geochemical paleoredox indicators in Devonian— Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA). Chem Geol, 206(3~4): 373~391.

- Scheffler K, Buehmann D, Schwark L. 2006. Analysis of late Palaeozoic glacial to postglacial sedimentary successions in South Africa by geochemical proxies——Response to climate evolution and sedimentary environment. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 240(1~2): 184~203.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution. London: Blackwell Scientific Publications, 143 ~ 230.
- Tribovillard N P, Desprairies A, Lallier-Vergés E, Bertrand P, Moureau N, Ramdani A, Ramanampisoa L. 1994. Geochemical study of

organic-matter rich cycles from the Kimmeridge Clay Formation of Yorkshire (UK): productivity versus anoxia. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol,  $108(1 \sim 2): 165 \sim 181$ .

- Tribovillard N, Algeo T J, Lyons T, Riboulleau A. 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update. Chem Geol, 232(1~2): 12~32.
- Wright J, Schrader H, Holser W T. 1987. Paleoredox variation in anciento ceans recorded by rare earth elements in fossil apatite. Geochim Cosmochim Acta, 51(3): 631 ~ 644.

# Geochemical Characteristics and Sedimentary Environments of the Fossiliferous Layers of Middle Triassic Luoping Biota, Yunnan Province

ZHOU Changyong, ZHANG Qiyue, LÜ Tao, HU Shixue, XIE Tao, WEN Wen, HUANG Jinyuan Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu, 610081

Abstract: In order to study the geochemical and sedimentological record of environmental changes in the the Anisian Luoping Biota, 50 fresh samples were collected from the Member II of the Middle Triassic Guanling Formation, Dawazi section. and analyzed for major and trace elements. The low K Na concentration and Mg/Ca ratio, indicating a warm and humid paleoclimate. The high Sr/Ba ratio (1. 22 ~ 68. 96, averaged 24. 35) and magnesium/aluminium ratio ( $m = 100 \times MgO/Al_2O_3$ , 27. 22 ~ 27400, averaged 1432), moderate or weak LREE depletion, and low Y/Ho ratio, similar to the characteristics of REE patterns of coastal and estuarial deposits, indicating that the Luoping area is located in a intraplatform basin nearby the land. From bottom to top of the section, Al, K, V, Ti and P concentrations and Co/Ti, Ni/Ti ratios, show repeated fluctuations, reflecting frequent change of the sea-level. It is confirmed that two large-scale sea-level rise events occurred during the deposit time of the Luoping area. The high V/(V + Ni), V/Cr, Ni/Co, and U/Th ratios, and  $\delta U$ ,  $\lg(Ce/Ce^*)$  values, reflect low-energy, anoxia conditions in this area. Redox sensitive elements such as V, U, Co, Ni, Zn and Cr change in multiple cycles in the section, indicating overall anoxia of the bottom water with intermittent reoxgenation related to the sea-level change. Based on the stratigraphical and geochemical data, it is concluded that the Luoping area is located in an intraplatform basin during the Anisian, Middle Triassic. The climate was warm and humid. The bottom water was anoxic in general with periodical reoxgenation associated with sea-level change.

Key words: sedimentary environment; geochemistry; Luoping Biota; Middle Triassic; Yunnan Province