

文章编号: 1009-3850(2007)03-0033-11

中太平洋第四纪沉积物地球化学特征及沉积环境

李国胜^{1,2}, 杨 锐^{1,3}, 张洪瑞⁴

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 2. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510075; 3. 广东工业大学, 广东 广州 510076; 4. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要: 本文采用多元统计分析的方法, 研究了中太平洋地区第四纪沉积物中元素含量的地球化学特征, 探讨了其物质来源及沉积环境。研究表明: 元素含量在垂向上有 3 次比较明显的变化, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 、 MnO 、 P_2O_5 的含量在早期沉积物中变化不明显, 中期含量明显增加, 晚期则减少。 CaCO_3 、 CaO 、 Sr 在晚期沉积物中含量较高, 并与前者常微量元素含量形成明显的互为消长关系。元素的相关性分析和 R 型因子分析揭示 SiO_2 与 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 MnO 、 TiO_2 、 Cu 、 Ni 、 Zr 等元素为正相关关系, 说明元素组合共生关系好, 在沉积物中所起的作用相近, 地球化学行为比较相似, 主要受陆源碎屑沉积及火山活动的影响; 与 CaCO_3 、 CaO 、 Sr 之间为负相关关系, 说明后者与前者元素氧化物之间内在关系较为疏远, 相关性差, 沉积物源不同, 主要与生物作用有关。中太平洋第四纪的沉积物主要为钙质硅质粘土和钙质软泥, 早期沉积物受火山活动的影响较大, 晚期与生物作用密切相关, 表明该时期沉积物主要形成于陆源、生物源、火山源物资供应比较充足的沉积环境。

关键词: 中太平洋; 第四系; 地球化学

中图分类号: P534.63; P595

文献标识码: A

国际上已对中太平洋地区的海洋地质调查研究取得了大量成果, 这些成果主要集中在古海洋学、沉积学、地质构造、火山活动、铁锰结核的形成与分布诸方面^[1~5], 但对该地区第四纪沉积物元素的地球化学特征研究相对较少。广州海洋地质调查局海洋四号科考船于 20 世纪 90 年代末在夏威夷群岛东南海域进行了大面积的调查, 其地理坐标大致为 $8^{\circ}52.5' \sim 11^{\circ}22.5' \text{N}$, $151^{\circ}7.5' \sim 153^{\circ}22.5' \text{W}$, 水深约 5100m。PC5356 孔、PC5362 孔、PC5417 孔沉积物样品就是由海洋四号科考船利用自返重力管采样器获取, 样品采取率为 100%, 长度在 5.5~88cm 之间, 取样位置见图 1。样品测试由广州海洋地质调查局实验测试中心完成。测试分析结果表明, 该区沉积类

型多样^[6], 岩性主要由硅质粘土、钙质粘土及钙质软泥组成。其中 PC5356 孔和 PC5417 孔的顶部分别为薄层含钙质硅质粘土和钙质软泥, 生物碎屑、虫管、斑块状生物扰动构造发育。据韩建修(1997)的研究^[6], 3 个柱状样的沉积时代为第四纪。

1 样品采集与测试方法

根据沉积物岩性变化情况每个钻孔取 5 个沉积物样品。分别对样品进行了岩性、古生物及化学成分的测试分析。样品在室内低温(60°C)烘干, 粉碎过 160 目筛经处理后进行化学分析。 Fe_2O_3 、 P_2O_5 、 TiO_2 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 等元素氧化物和 Cu 、 Co 、 Ni 、 Pb 、 Zn 、 Ba 、 Sr 、 Sc 采用王水-氢氟酸-高氯酸分解样

收稿日期: 2007-07-02

第一作者简介: 李国胜, 1958 年出生, 高级工程师, 博士生, 地球化学、沉积学、古生物学专业。

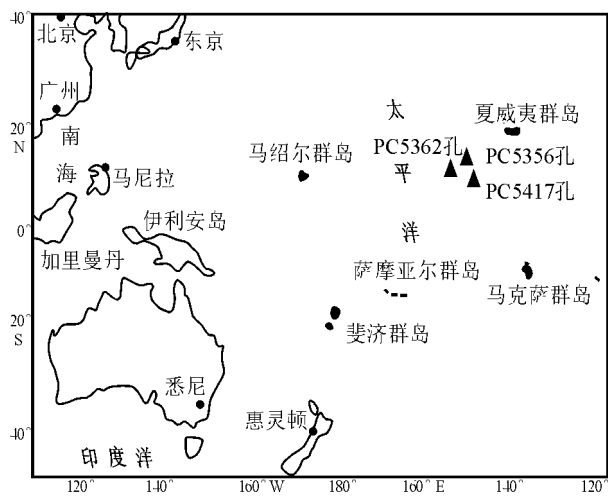


图1 中太平洋第四纪沉积物取样位置图

Fig.1 Sampling sites for the Quaternary sediments in the mid-Pacific Ocean

品,制成7%盐酸试样熔液,Al₂O₃、Cr、Zr采用过氧化钠和氢氧化钠熔融法分解样品,其水提取液制成7%盐酸溶液,采用ICP全谱直读光谱法进行分析测

定,SiO₂采用动物胶凝重量法进行测定。测试标准为GB/T14505,仪器测量精度由多次测量国家标准物质样品(CSD9、GSD10、GSS1和GSS8)控制,其中常量元素的测试精度低于1.6%,微量元素的测量精度低于2.96%。沉积物中CaCO₃含量使用体积法测量,多次重复测量的精度低于2%。同时采用GBW-07313,GBW-07314海洋沉积物标样作为样品分析的质量监控样。不同深度的常、微量元素含量测试结果如表1,表2。

2 地球化学特征

2.1 垂向变化

PC5356孔、PC5362孔和PC5417孔常、微量元素含量在垂向上有3个明显的变化(图2,图3):

0~28cm,沉积物岩性主要为薄层含钙质硅质粘土和钙质软泥,生物碎屑丰富,虫管、团块状生物扰动发育。在PC5417孔与PC5356孔沉积物中,SiO₂、Fe₂O₃、Al₂O₃、TiO₂、MgO、K₂O、Na₂O、P₂O₅、MnO、B、Mo、Ni、Co、V、Y、Ba、Pb、Zr、Cu、Zn、Li的含量随深度

表1 中太平洋 PC5356/5362/5417 孔沉积物常量元素含量表(w_B/%)
Table 1 Major element contents (w_B %) in the core samples from the PC5356, PC5362 and PC5417 drill holes in the mid-Pacific Ocean

钻孔号	深度/cm	岩性	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	CaCO ₃	C _{org}
PC5356 孔	5.8~8	钙质软泥	52.5	6.5	12.51	0.54	3.78	3.21	2.5	4.74	0.31	0.24	5.14	0.33
	25.5~28	硅质粘土	54.28	6.39	13.84	0.64	1.2	3.25	2.72	4.77	0.38	0.33	0.87	0.29
	45.5~48	硅质粘土	52.49	6.76	13.71	0.62	1.39	3.47	2.63	4.93	0.44	1.03	1.05	0.27
	65.5~68	硅质粘土	52.06	6.75	13.66	0.67	1.3	3.3	2.82	4.84	0.34	0.93	1.02	0.28
	85.5~88	硅质粘土	52.67	6.49	13.29	0.63	1.09	3.17	2.68	4.91	0.34	0.62	1.3	0.4
	平均值		52.8	6.58	13.4	0.62	1.75	3.28	2.67	4.84	0.36	0.63	1.88	0.31
PC5362 孔	5.5~7.5	钙质粘土	53.23	6.33	12.95	0.62	1.72	3.12	2.68	5.04	0.23	0.51	2	0.39
	25.5~28	硅质粘土	54.21	6.4	12.95	0.59	1.52	3.05	2.66	4.88	0.23	0.34	1.28	0.33
	45.5~48	硅质粘土	54.27	6.48	13.24	0.61	1	3.05	2.74	4.74	0.27	0.44	0.93	0.35
	65.5~68	硅质粘土	53.6	6.44	13.38	0.58	0.94	3.13	2.72	5	0.27	0.75	0.95	0.33
	83~84.5	硅质粘土	52.75	6.63	13.02	0.62	1.03	3.11	2.77	4.84	0.31	0.86	0.73	0.32
	平均值		53.61	6.46	13.11	0.6	1.24	3.09	2.71	4.9	0.26	0.58	1.18	0.34
PC5417 孔	6~8	钙质软泥	36.18	4.16	8.5	0.33	18.1	2.22	1.66	3.46	0.24	0.18	31.24	0.31
	26~28	硅质粘土	52.4	4.5	12.51	0.54	1.52	4.99	2.59	4.99	0.51	1.13	1.59	0.3
	46~48	硅质粘土	53.18	6.69	12.72	0.65	1.51	3.34	2.54	5.15	0.47	0.56	1.5	0.32
	66~68	硅质粘土	51.68	6.74	12.73	0.6	1.68	3.69	2.59	5.25	0.57	0.93	1.68	0.34
	86~88	硅质粘土	51.79	6.81	12.84	0.55	1.82	3.68	2.49	5.23	0.66	0.96	1.59	0.39
	平均值		49.05	5.78	11.86	0.53	4.93	3.58	2.73	4.82	0.49	0.75	7.56	0.33

表 2 中太平洋 PC5356/ 5362/ 5417 孔沉积物微量元素含量表

Table 2 Trace element contents in the core samples from the PC5356, PC5362 and PC5417 drill holes in the mid-Pacific Ocean

钻孔号	深度/ cm	B	Cr	Mo	Ni	Co	V	Y	Sc	Sr	Ba	Pb	Zr	Cu	Zn	Li	Rb
PC5356 孔	5. 5~8	80. 4	52. 9	2	84	70	77	90. 6	28. 4	233	2320	12. 7	182	270	150	30	100
	25. 5~28	101. 6	45. 9	1. 6	97	121	93	110. 9	29. 3	248	2591	15	182	350	170	60	80
	45. 5~48	106. 8	56. 9	17	235	126	97	88. 3	23. 4	174	2619	14. 5	237	510	330	60	90
	65. 5~68	64	53. 7	13. 9	273	101	98	103. 9	26. 6	221	4485	28. 6	215	440	230	70	90
	85. 5~88	97. 6	52. 8	8. 3	163	73	100	96. 6	26. 5	225	3043	18. 8	210	370	120	60	100
	平均值	89. 96	52. 4	8. 6	155. 2	93	93	98. 1	26. 8	220	3011	16. 9	205. 2	390	200	60	90
PC5362 孔	5. 5~7. 5	77	74. 7	1. 1	147	76	89	56	23. 6	274	3030	14. 9	150	310	120	60	90
	25. 5~28	81. 3	60. 8	1. 1	98	90	108	76. 5	26	305	1697	73. 5	154	340	110	60	80
	45. 5~48	92. 5	44. 6	3. 9	118	114	10	98. 6	27. 8	267	2606	20. 9	136	340	100	60	90
	65. 5~68	74	53. 8	11. 8	156	95	104	80	25. 5	165	3148	20. 5	213	380	110	50	100
	83~84. 5	102. 4	48. 9	13. 8	151	91	112	86	24. 5	194	2796	24. 6	204	420	110	60	90
	平均值	85. 44	56. 6	3. 3	133	93. 2	102. 6	79. 46	25. 5	241	2855	30. 9	171	360	110	60	90
PC5417 孔	6~8	53. 8	28	0. 5	63	33	68	71. 8	27. 4	515	1488	11. 6	86	200	110	30	60
	26~28	112. 7	48. 2	19. 7	500	127	111	90. 8	21. 3	297	5000	28. 6	247	690	230	50	120
	46~48	122. 6	39. 4	9. 4	186	84	98	136. 8	28. 9	356	5000	14. 9	207	390	190	50	100
	66~68	86. 5	40. 7	17. 3	307	120	95	141. 3	27. 4	290	5000	23. 7	237	580	240	70	80
	86~88	73. 9	49. 9	11. 7	325	114	100	117	25. 2	318	3784	28. 1	213	560	190	60	90
	平均值	89. 9	41. 24	11. 7	276. 2	95. 6	94. 4	115. 5	26	355. 2	4054	21. 38	198	480	610	50	90

单位: w(Cu, Zn, Li, Rb) / %; 其它 $w_B / 10^{-6}$.

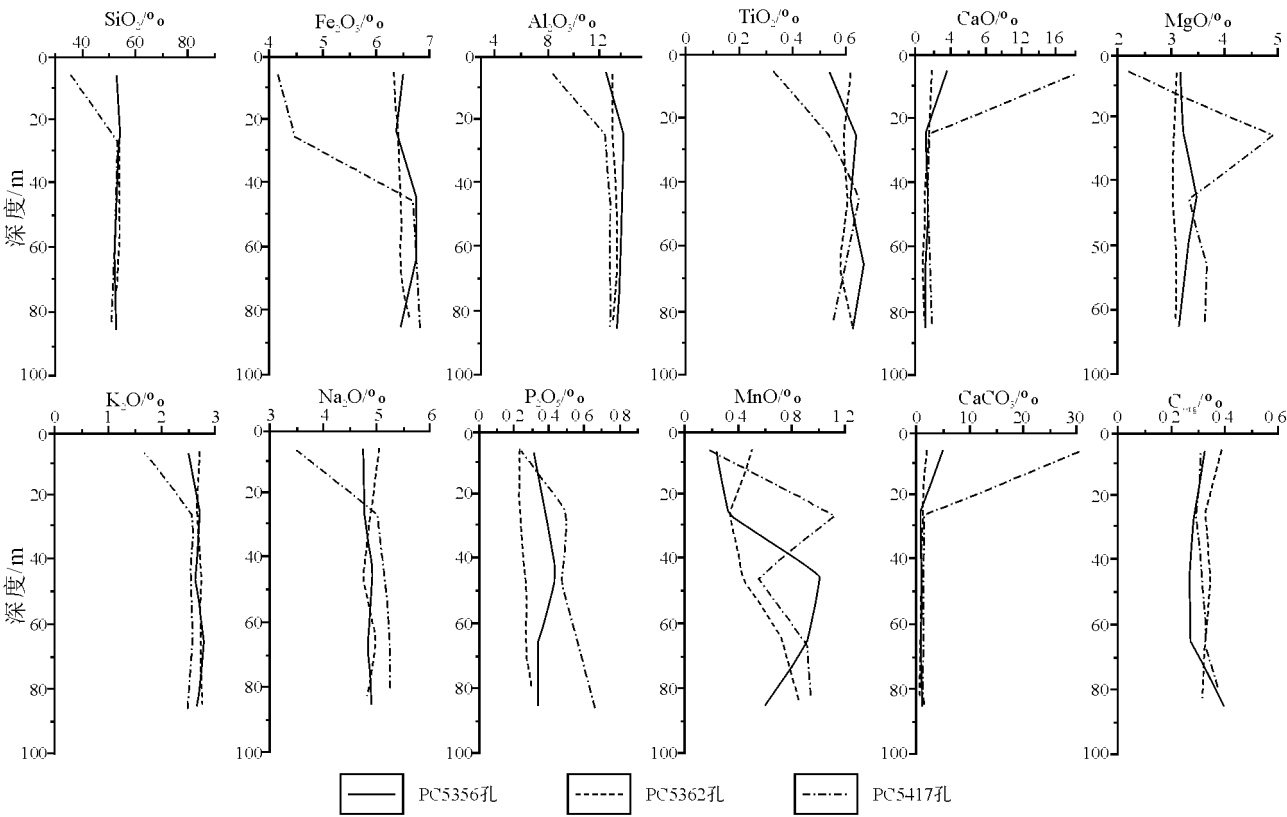


图 2 PC5356/ 5362/ 5417 孔沉积物常量元素含量垂向变化特征图

Fig. 2 Vertical variations of major element contents in the core samples from the PC5356, PC5362 and PC5417 drill holes in the mid-Pacific Ocean

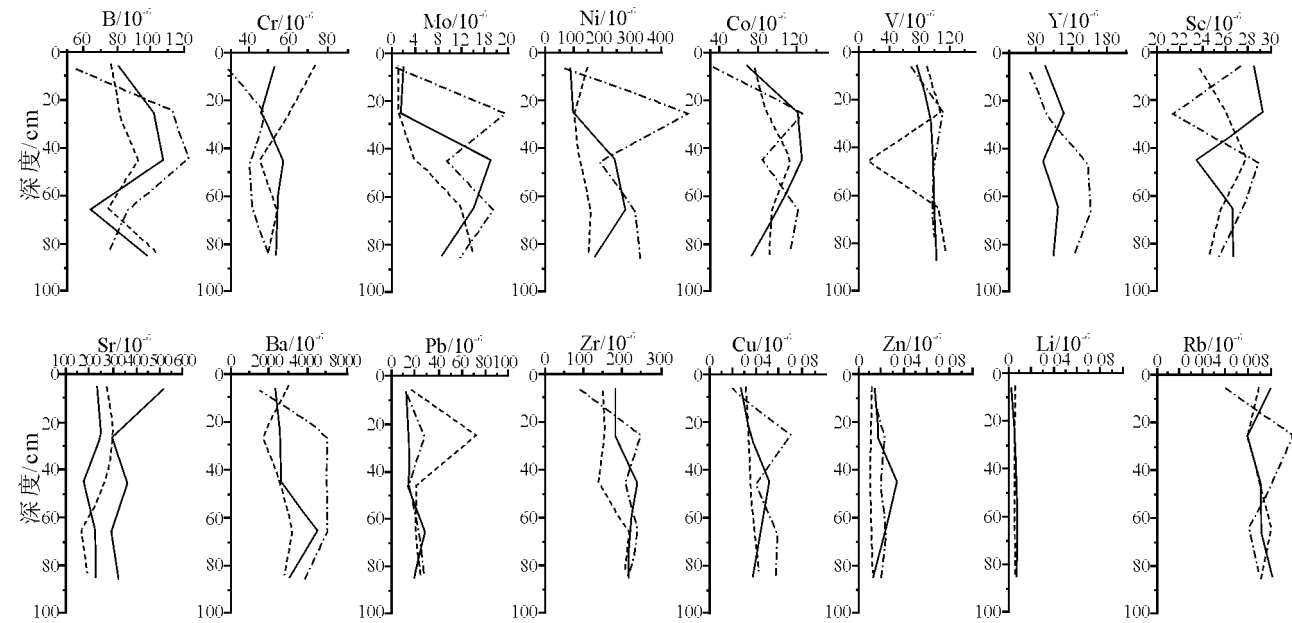


图3 PC5356/ 5362/ 5417 孔沉积物微量元素含量垂向变化特征图(图例见图2)

Fig. 3 Vertical variations of trace element contents in the core samples from the PC5356, PC5362 and PC5417 drill holes in the mid-Pacific Ocean (symbols as in Fig. 2)

的增加而增加,而 CaCO_3 、 CaO 、 Corg 、 Sr 、 Sc 的含量则随深度的增加而减少,二者呈互为消长关系。在PC5362孔,随着沉积物埋深的增加, B 、 Mo 、 Co 、 Y 、 Sc 、 Pb 、 Cu 含量增加,而 TiO_2 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、 MnO 、 Cr 、 Ni 、 Ba 、 Zn 、 Rb 的含量则减少。

28~48cm,以硅质粘土沉积为主。在PC5356孔及PC5417孔沉积物中, SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 MnO 、 Na_2O 、 TiO_2 含量随深度增加而减少, CaCO_3 、 CaO 含量则变化不大。在PC5417孔中, P_2O_5 含量随深度增加而增加。微量元素 B 、 Cr 、 Mo 、 Co 、 Sr 、 Zr 、 Cu 、 Zn 含量随深度增加明显降低, Ba 、 Pb 、 Li 、 Mo 、 V 含量则随深度增加而增加。在PC5362孔, Mo 、 Ni 、 Cu 、 Zr 、 Pb 、 Ba 的含量随深度增加而增加, Co 、 Sr 、 Li 含量则呈现明显的下降趋势。

48~88cm,以硅质粘土沉积为主, SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 、 P_2O_5 含量随深度增加而增加,其它微量元素变化不大。

由上可见,在第四纪沉积物的下部,PC5356孔与PC5417孔的 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 、 P_2O_5 含量变化不明显,中部含量大幅度增加,上部沉积物含量较低。微量元素 Ba 、 Pb 、 Zr 、 Cu 、 Zn 、 Co 、 Mo 、 Cr 在下部沉积物中含量逐渐增大,上部呈下降趋势。 CaO 、 CaCO_3 在下部沉积物中含量变化不大,上部沉积物中含量较高。PC5362孔 P_2O_5 、 Fe_2O_3 、 MnO 、 K_2O 、 Mo 、 Cu 、 Zr 、 Pb 的含量在上部沉积物中变化不大,中下部

逐渐增加。

2.2 元素的相关性

元素的相关性分析表明(表3—表5);PC5417孔的 SiO_2 与 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 MnO 、 MgO 、 Fe_2O_3 之间存在显著的正相关关系,说明这些元素之间的共生关系好,反映它们在沉积物中所起的作用相近,揭示的沉积环境相同,在成因上有很大的一致性。与 CaO 、 CaCO_3 为负相关关系,说明二者相关性较差,在成因上有很大不同。在PC5362孔, SiO_2 与 MnO 、 MgO 、 TiO_2 、 P_2O_5 为负相关关系,说明两者元素的相关性较差,共生关系不好,沉积环境不同。 Fe_2O_3 与 K_2O 、 P_2O_5 、 MnO 之间为正相关关系,与 CaO 、 CaCO_3 为负相关关系。在PC5356孔中的 SiO_2 与 Fe_2O_3 、 MnO 之间为负相关关系,说明 SiO_2 与 MnO 、 Fe_2O_3 元素之间的关系较为疏远,沉积物源不同。

2.3 元素的组合特征

影响元素变化的因素很多,单个元素的变化在地质成因上往往具有多解性,但将具有同一起来源的元素进行组合,就可以更加客观地探讨其物质来源,反映相同的成因属性。为了更真实客观地反映元素在地质作用中的亲疏关系,本文选择了20个有成因指示意义的元素进行了R型因子分析。根据特征值大于1的原则,经方差极大正交旋转后,PC5356孔、PC5362孔各选择4个因子其累计方差贡献为

表 3 中太平洋 PC5417 孔沉积物常量元素相关性

Table 3 Correlation of the major element oxides from the PC5417 drill hole in the mid Pacific Ocean												
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	CaCO ₃	C _{org}
SiO ₂	1.000											
Al ₂ O ₃	0.993	1.000										
Fe ₂ O ₃	0.669	0.723	1.000									
CaO	-0.998	-0.997	-0.674	1.000								
MgO	0.763	0.735	0.074	-0.774	1.000							
K ₂ O	0.991	0.988	0.636	-0.996	0.800	1.000						
Na ₂ O	0.982	0.997	0.767	-0.989	0.693	0.980	1.000					
MnO	0.806	0.822	0.322	-0.836	0.926	0.851	0.806	1.000				
P ₂ O ₅	0.856	0.907	0.734	-0.882	0.642	0.859	0.918	0.852	1.000			
TiO ₂	0.947	0.937	0.782	-0.936	0.552	0.930	0.941	0.600	0.740	1.000		
CaCO ₃	-0.997	-0.998	-0.681	1.000	-0.770	-0.994	-0.991	-0.837	-0.889	-0.934	1.000	
C _{org}	0.298	0.397	0.702	-0.330	-0.040	0.267	0.438	0.299	0.697	0.250	-0.344	1.000

表 4 中太平洋 PC5362 孔沉积物常量元素相关性

Table 4 Correlation of the major element oxides from the PC5362 drill hole in the mid Pacific Ocean												
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	CaCO ₃	C _{org}
SiO ₂	1.000											
Al ₂ O ₃	0.250	1.000										
Fe ₂ O ₃	-0.411	0.142	1.000									
CaO	0.012	-0.787	-0.718	1.000								
MgO	-0.786	0.180	0.019	-0.062	1.000							
K ₂ O	-0.438	0.409	0.882	-0.814	0.210	1.000						
Na ₂ O	-0.381	-0.081	-0.595	0.480	0.748	-0.490	1.000					
MnO	-0.802	0.310	0.666	-0.575	0.751	0.733	0.166	1.000				
P ₂ O ₅	-0.497	0.353	0.950	-0.818	0.245	0.967	-0.442	0.810	1.000			
TiO ₂	-0.511	-0.532	0.256	0.240	0.056	0.346	-0.204	0.114	0.230	1.000		
CaCO ₃	-0.021	-0.521	-0.847	0.912	0.159	-0.746	0.644	-0.486	-0.820	0.235	1.000	
C _{org}	-0.016	-0.276	-0.705	0.657	0.152	-0.418	0.427	-0.403	-0.599	0.453	0.874	1.000

表 5 中太平洋 PC5356 孔沉积物常量元素相关性

Table 5 Correlation of the major element oxides from the PC5356 drill hole in the mid Pacific Ocean												
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	CaCO ₃	C _{org}
SiO ₂	1.000											
Al ₂ O ₃	0.348	1.000										
Fe ₂ O ₃	-0.745	0.271	1.000									
CaO	-0.228	-0.898	-0.183	1.000								
MgO	-0.207	0.498	0.754	-0.245	1.000							
K ₂ O	0.062	0.782	0.273	-0.805	0.085	1.000						
Na ₂ O	-0.386	0.436	0.558	-0.639	0.475	0.269	1.000					
MnO	-0.558	0.553	0.904	-0.562	0.730	0.485	0.814	1.000				
P ₂ O ₅	0.216	0.694	0.388	-0.521	0.850	0.131	0.562	0.564	1.000			
TiO ₂	0.092	0.880	0.315	-0.917	0.217	0.971	0.451	0.590	0.329	1.000		
CaCO ₃	-0.239	-0.953	-0.255	0.988	-0.362	-0.818	-0.606	-0.604	-0.600	-0.929	1.000	
C _{org}	-0.070	-0.495	-0.510	0.083	-0.762	-0.255	0.120	-0.371	-0.547	-0.252	0.237	1.000

100%,表明因子分析结果较为真实。PC5417孔选取了2个因子,其累计方差贡献为94.93%,说明R型因子分析能够揭示元素的共生组合特点,较好地代表整个样品的数据变化。

在PC5362孔(表6),F1因子的方差贡献为32.25%,是影响该地区沉积物元素变化的主要地质因素。在F1因子中,正载荷的元素组合为Na₂O、CaO、CaCO₃、MgO、Zn、Cr,负载荷的元素为K₂O、Al₂O₃、Fe₂O₃、P₂O₅、Co。该因子中,CaO、CaCO₃的相关系数较大,据有关文献研究,沉积物中的钙主要来源于钙质生物碎屑,说明CaO、CaCO₃主要与生物作用有关^[8]。在F1因子元素组合中,Na₂O的相关系数为0.862,Cr的相关系数为0.904,说明二者之间的内在关系较为密切。Cr、Na₂O多与海底火山作用或深海物质组分有关,Zn可能主要是火山热液活动的产物^[9]。K₂O、Fe₂O₃、Al₂O₃等惰性组分在表生条件下地球化学性质比较稳定,这些元素主要赋存于陆源碎屑矿物及由碎屑矿物蚀变而来的粘土矿物中,而Co亦主要来源于陆源碎屑的沉积作用,说明它们主要为陆源成因^[10]。大量研究资料表明,海洋沉积物中的磷主要由有机质提供,海洋浮游生物在生命活动过程中从海水中吸收磷,当浮游生物死亡后,磷

就被释放到沉积物中,成为P₂O₅主要来源,说明PC5362孔沉积物元素还受到了生物作用的影响。CaO、CaCO₃、Cr等与K₂O、Al₂O₃呈互为消长的关系,说明二者沉积物源有差异。

在PC5356孔(表7),F1因子的方差贡献为32.42%,正载荷元素主要为Na₂O、MnO、Fe₂O₃、MgO、Cr、Zr、Ni、Cu、Zn,负载荷元素主要为SiO₂、Sr。由于Fe₂O₃、MnO、MgO、Cr、Ni是锰结核组成的主要元素成分,Zr属于比较稳定的元素,几乎全以碎屑的形式搬运至海洋,故Zr常视为陆源物质。Cu常表现为火山源成因,加上Na₂O的相关系数亦较大,说明该因子元素组合主要与火山热液活动密切相关。Sr是亲生物元素^[11],SiO₂含量主要受硅质放射虫生物碎屑的影响^[9]。显然后者主要与生物作用有关。由此说明前者为陆源、火山源成因组合,后者为生物成因组合。

在PC5417孔(表8),F1因子的方差贡献为49.18%,正载荷元素主要为Al₂O₃、MgO、MnO、K₂O、Na₂O、P₂O₅、SiO₂、Al₂O₃、Ni、Cu、Pb、Co、Cr、Zn、Ba,负载荷因子为CaO、CaCO₃、Sr。其元素组合特点及成因与PC5356孔较为相近。

表6 中太平洋PC5362孔沉积物元素因子分析
Table 6 R-mode factor analysis of the elements in the sediments from the PC5362 drill hole in the mid-Pacific Ocean

公因子	F1	F2	F3	F4
SiO ₂	-0.468	-0.652	-0.428	-0.416
Al ₂ O ₃	-0.564	0.083	0.523	-0.634
Fe ₂ O ₃	-0.502	0.807	-0.021	0.311P
CaO	0.750	-0.531	-0.293	0.263
CaCO ₃	0.727	-0.659	0.095	0.168
MgO	0.542	0.428	0.712	-0.124
K ₂ O	-0.586	0.623	0.420	0.304
Na ₂ O	0.862	-0.060	0.372	-0.340
MnO	0.036	0.856	0.516	0.016
P ₂ O ₅	-0.493	0.795	0.279	0.216
TiO ₂	0.051	-0.021	0.222	0.974
Cu	-0.244	0.968	0.046	-0.030
Co	-0.988	-0.070	-0.015	-0.137
Ni	0.278	0.479	0.832	0.010
Pb	0.107	-0.045	-0.965	-0.235
Cr	0.904	-0.422	0.026	0.061
Sr	0.100	-0.738	-0.585	0.319
Zn	0.979	-0.015	0.174	0.109
Zr	0.151	0.871	0.279	-0.374
Ba	0.094	0.185	0.978	0.011
特征值	6.45	6.43	4.80	2.32
特征值/%	32.25	32.15	24.01	11.60
累计特征值/%	32.25	64.39	88.40	100.00

表7 中太平洋PC5356孔沉积物元素因子分析
Table 7 R-mode factor analysis of the elements in the sediments from the PC5356 drill hole in the mid-Pacific Ocean

公因子	F1	F2	F3	F4
SiO ₂	-0.793	0.412	0.155	-0.421
Al ₂ O ₃	-0.029	0.828	0.512	0.226
Fe ₂ O ₃	0.753	-0.060	0.465	0.462
CaO	-0.129	-0.965	-0.112	-0.200
CaCO ₃	-0.112	-0.931	-0.261	-0.228
MgO	0.495	0.095	0.863	-0.032
K ₂ O	-0.084	0.685	0.098	0.717
Na ₂ O	0.821	0.566	0.015	-0.071
MnO	0.768	0.360	0.379	0.370
P ₂ O ₅	0.307	0.484	0.743	-0.346
TiO ₂	0.037	0.810	0.162	0.563
Cu	0.636	0.491	0.558	0.206
Co	-0.067	0.470	0.880	-0.013
Ni	0.680	0.297	0.299	0.601
Pb	0.175	0.266	-0.127	0.939
Cr	0.954	-0.274	0.102	0.071
Sr	-0.865	-0.054	-0.476	0.147
Zn	0.523	0.070	0.846	0.074
Zr	0.880	0.339	0.312	0.118
Ba	0.197	0.237	-0.068	0.949
特征值	6.48	5.35	4.31	3.86
特征值/%	32.42	26.75	21.53	19.30
累计特征值/%	32.42	59.17	80.70	100.00

表 8 中太平洋 PC5417 孔沉积物元素因子分析
Table 8 R-mode factor analysis of the elements in the sediments from the PC5417 drill hole in the mid-Pacific Ocean

公因子	F1	F2
SiO ₂	0.545	0.824
Al ₂ O ₃	0.543	0.836
Fe ₂ O ₃	-0.092	0.926
CaO	-0.575	-0.813
CaCO ₃	-0.574	-0.814
MgO	0.930	0.270
K ₂ O	0.603	0.790
Na ₂ O	0.507	0.860
MnO	0.911	0.396
P ₂ O ₅	0.590	0.694
TiO ₂	0.270	0.945
Cu	0.923	0.375
Co	0.834	0.537
Ni	0.977	0.198
Pb	0.922	0.229
Cr	0.806	0.461
Sr	-0.725	-0.679
Zn	0.715	0.614
Zr	0.725	0.676
Ba	0.526	0.772
特征值	9.84	9.15
特征值/ %	49.18	45.75
累计特征值/ %	49.18	94.93

由上可见, F1 因子正载荷常微量元素 Na₂O、MnO、Fe₂O₃、MgO、Cr、Zr、Ni、Cu、Zn 之间为显著的正相关关系, 负载荷主要为 CaO、CaCO₃、SiO₂、Sr。说明二者在成因方面差异较大。表明 F1 因子主要代表陆源碎屑及生物源的成因, 并受到了一定的火山活动影响。

在 PC5362 孔, F2 因子的组合元素方差贡献为 32.15%, 正载荷元素主要为 MnO、Fe₂O₃、P₂O₅、K₂O、Cu、Zr, 负载荷元素主要为 CaCO₃、SiO₂、CaO、Sr、Cr。由于 Fe₂O₃、K₂O、MnO、Zr 受陆源碎屑的影响较大, Sr 是主要亲生物元素, CaCO₃、CaO、Sr 主要与生物作用有关。Cu (0.968) 是火山源成因组合的重要物质, 说明 F2 元素组合主要反映受陆源碎屑、生物作用及火山热液作用的影响^[10]。

在 PC5356 孔, F2 因子的组合元素方差贡献为 26.75%, 正载荷元素组合主要为 TiO₂、Na₂O、Al₂O₃、K₂O 及 Cu、Co、Zr, 负载荷元素为 CaO、CaCO₃ 等, 其沉积属性与 PC5362 孔相近。

在 PC5417 孔, F2 的方差贡献为 45.75%, 其正载荷元素主要为 TiO₂、Fe₂O₃、Al₂O₃、SiO₂、K₂O、Na₂O、P₂O₅、Ba、Zr、Zn、Co、Cr, 负载荷元素为 CaO、CaCO₃、

Sr。F2 正载荷中的元素组合之间为明显的正相关关系, 其组合特点主要表现为表生环境下地球化学性质比较稳定的陆源物质成分。而 CaO、CaCO₃、Sr 是生物沉积碳酸盐的重要组分, 二者之间在 F2 因子组合中呈明显的互为消长关系, 揭示共生关系不好, 元素的地球化学行为差异较大, 沉积环境不同。

由上分析可知, F2 因子的组合元素主要来源于陆源、生物源及火山源。

在 PC5362 孔, F3 因子元素的方差贡献为 24.01%, 其正载荷为 MgO、Al₂O₃、MnO、K₂O、Na₂O、Ba、Ni, 负载荷为 Pb、Sr。Ba 主要用作有效的古海洋生产力指标, 多为生物成因, 而 Al 主要存在于铝硅酸盐碎屑矿物中, 不参与生物介壳。在深海沉积中铝硅酸盐以陆源供应为主, 是典型的亲陆源碎屑元素。因此, F3 因子元素组合主要反映陆源、生物源的沉积特点。

在 PC5356 孔, F3 因子沉积物元素的方差贡献为 21.53%, 其正载荷主要为 MgO、P₂O₅、Al₂O₃、Fe₂O₃、Co、Zn、Cu, 负载荷主要为 Sr、CaO、CaCO₃。研究表明, P₂O₅ 在沉积物中多以磷酸盐的形式存在, 明显受生物作用的制约。MgO、Al₂O₃、Fe₂O₃ 主要与陆源碎屑沉积作用有关, Zn、Cu 元素主要来源于火山活动的产物。以上事实说明, F3 因子元素组合主要代表陆源及生物源成因, 并明显受到了火山活动的影响。

在 PC5356 孔, F4 因子沉积物元素的方差贡献为 19.30%, 正载荷元素主要为 K₂O、TiO₂、Fe₂O₃、Ba、Pb、Ni, 负载荷元素主要为 P₂O₅、SiO₂、CaO、CaCO₃。该沉积元素组合与 PC5362 孔较为相近, 反映的沉积环境相同。该元素组合中, Ba (0.949)、Pb (0.939) 的相关系数较大, 并与 Ni、K₂O 为显著的正相关关系。由于 Ba 多用作生物成因的古海洋生产力指标^[14], Pb 的来源比较复杂, 因此该元素组合仍主要反映陆源生物成因的特点。

在 PC5362 孔中, 正载荷元素以 TiO₂ 为代表, 负载荷为 Al₂O₃、SiO₂。由于 TiO₂ 主要来自陆源碎屑, SiO₂ 是沉积物中含量最大的元素氧化物。深海沉积中的硅主要有溶解硅、硅酸盐和石英。溶解硅主要来源于河流输入和冰川融化, 其从海水中移出, 通过生物作用形成硅质软泥, 硅酸盐和石英也是深海沉积物中硅元素的重要来源, 但它们主要为外源, 很少有内源。因此 F4 因子以陆源沉积为主。

由上述 R 型因子分析表明:

(1) F1 因子中, Fe₂O₃、MgO、MnO、SiO₂、Cu、Ni、

Cr、Zr 为正载荷元素组合,说明这些元素之间内在关系密切,主要受陆源碎屑及火山活动的影响;CaCO₃、CaO、Sr、P₂O₅ 为负载荷元素组合,揭示主要受生物作用的影响,且前后两者元素随深度的增加呈互为消长的关系。

(2) F2 因子正载荷元素组合为 Fe₂O₃、K₂O、MnO、MgO、Cu、Zr,负载荷元素组合为 CaO、CaCO₃、Sr、Cr,其沉积组合特点与 F1 相近,揭示沉积物来源亦较为一致;不同的是,该因子元素组合中的 Cu 相关系数大,说明该组合元素还受到了火山热液作用的影响。

(3) F3 因子的元素组合与 F1、F2 较为相近,但正载荷元素中Zn(0.846)、Co(0.88)、MgO(0.863)、Cu(0.558)的正相关关系非常显著。由于 Zn、Cu 常视为火山作用的物质组分^[9],Co、MgO 主要受陆源碎屑的影响^[10]。因此, F3 因子亦反映了陆源和火山源的物质成分。

(4) F4 因子主要代表了陆源沉积的特点。

3 讨 论

3.1 沉积物源

据 Bischoff(1979)的研究^[13], Al₂O₃ 在大洋沉积

物中对其它元素起着“稀释”作用,因此,其它元素氧化物值与 Al₂O₃ 的比值可以有效地反映沉积物的组成和物源特征。若以 PPC 代表陆源性质的太平洋深海粘土,以 Engel(1965)的 APT 比值代表火山碎屑特征的太平洋玄武岩,以 BNL(Baker, 1979)代表生物或生物吸收物质的太平洋底栖浮浊层,则PC5362孔、PC5356孔、PC5417孔主要沉积物元素氧化物与 Al₂O₃ 的比值如表 9。

以 SiO₂/Al₂O₃ = 3.3 代表太平洋深海粘土^[9], 2.97代表火山源, 7.63代表生物源,与 PC5362 孔、PC5356孔、PC5417孔的 SiO₂/Al₂O₃ 比值比较,不难看出它们的比值都大于 3.81,且多数值在 4.01 ~ 4.26 之间变化,说明第四纪沉积物源主要为深海粘土并稍受生物作用的影响,这与该区当时的沉积岩性与古生物化石的研究结果正好吻合^[9]。以 Fe₂O₃/Al₂O₃ = 0.46代表深海粘土^[13], 0.55代表火山碎屑岩, 1.18代表胶体或生物的吸附成分。PC5362 孔、PC5356孔、PC5417孔比值的最小值为 0.36,最大值为 0.53,多数值在 0.46 ~ 0.53 之间变化,说明沉积物源仍以深海粘土为主,并稍受火山活动的影响,其中 PC5417孔的比值多在 0.49 ~ 0.53 变化,说明沉积物受火山活动的影响更为明显。

表 9 PC5362/ 5356/ 5417 孔主要元素氧化物与 Al₂O₃ 及 Ba/ Sr 比值表

Table 9 The ratios of major element oxides and Al₂O₃ and Ba/ Sr ratios for the PC5362, PC5356 and PC5417 drill holes in the mid-Pacific Ocean

钻孔号	深度/ cm	SiO ₂ / Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ / Al ₂ O ₃	TiO ₂ / Al ₂ O ₃	Ba/ Sr
PC5362	5.5	4.11	0.49	0.05	0.07
	25.5	4.19	0.49	0.05	0.05
	45.5	4.10	0.49	0.05	0.10
	65.5	4.01	0.48	0.04	0.18
	83	4.05	0.51	0.05	0.09
	平均值	4.092	0.492	0.048	0.098
PC5356	5.80	4.20	0.52	0.04	0.07
	25.50	3.92	0.46	0.05	0.05
	45.50	3.83	0.49	0.05	0.07
	65.50	3.81	0.49	0.05	0.10
	85.50	3.96	0.49	0.05	0.10
	平均值	3.944	0.49	0.048	0.078
PC5417	6.00	4.26	0.49	0.04	11.90
	26.00	4.19	0.36	0.04	17.24
	46.00	4.18	0.53	0.05	14.04
	66.00	4.06	0.53	0.05	16.84
	86.00	4.03	0.53	0.04	2.89
	平均值	4.144	0.488	0.044	12.582
太平洋深海粘土标准值(PPC)		3.3	0.46	0.05	
太平洋拉斑玄武岩(APT)		2.97	0.55	0.09	
太平洋底栖浮浊层(BNL)		7.63	1.18	0.11	

以 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=0.05$ 代表太平洋深海粘土, 0.09 代表火山源, 0.11 代表生物源。PC5356 孔、PC5362 孔、PC5417 孔中 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的比值最小为 0.04, 最大值为 0.05, 多数值为 0.05, 说明主要为深海粘土沉积, 未受火山及生物作用的影响。

在 Ba/Sr 比值中, 由于 Ba 主要来源于深海粘土、火山热液、自生源和生物源, 但一般自生源和生物源中 Ba 的含量较高^[14]。因此, Ba/Sr 的高低可以从一个侧面来反映沉积物的物源。PC5356 孔、PC5362 孔 Ba/Sr 最小为 0.05, 最大值为 0.18, 表明主要为深海粘土沉积, PC5417 孔中 Ba/Sr 比最小值为 2.89, 最大值为 17.24, 比值主要在 11.90~17.24 之间变化, 说明 Ba 的含量较高, 受生物作用影响较大。

上述 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 与 Al_2O_3 的比值及 Ba/Sr 值与标准值对比显见(图 4), 中太平洋在第四纪的沉积物源主要以深海硅质钙质粘土为主, 沉积早期受到火山活动的影响, 后期受生物作用的影响较大, 这与笔者对该地区沉积物岩性及古生物化石方面的研究结果完全一致。由表 10 分析可知, 各钻孔中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 K_2O 、 Na_2O 、 TiO_2 、 P_2O_5 的平均含量多明显高于大洋平均值及南海、东海和中国大陆, 亦说明该区沉积物主要受陆源沉积物的影响较大。

3.2 沉积环境

研究表明, 研究区第四纪主要为硅质粘土、钙质粘土和钙质软泥沉积相, 沉积物类型比较单一, 生物

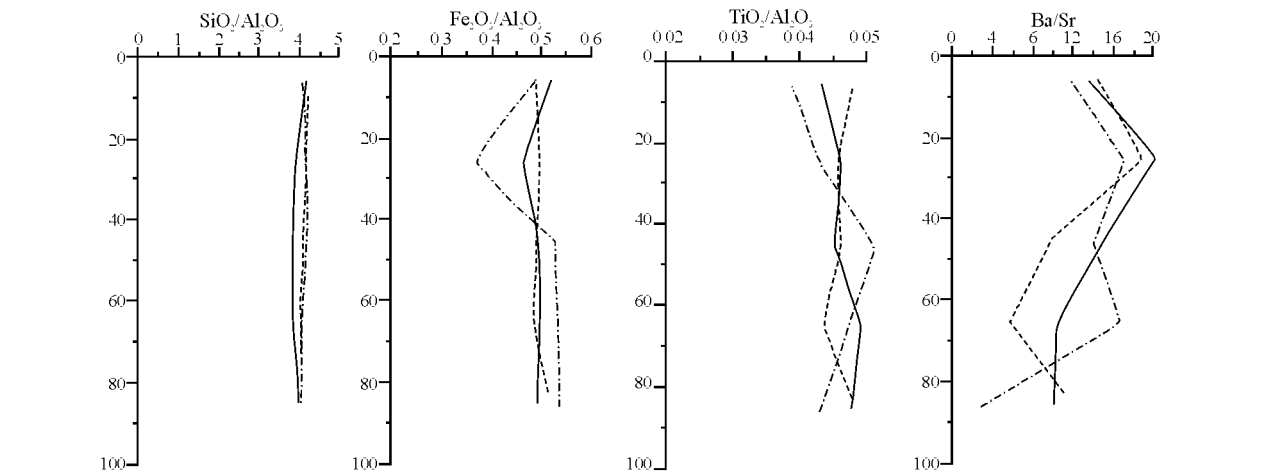


图 4 PC5356/ 5362/ 5417 孔主要元素氧化物与 Al_2O_3 及 Ba/Sr 垂向变化图(图例见图 2)

Fig. 4 Vertical variations of the ratios of major element oxides and Al_2O_3 and Ba/Sr ratios for the PC5356, PC5362 and PC5417 drill holes in the mid-Pacific Ocean (symbols as in Fig. 2)

表 10 PC5356/ PC5362/ PC5417 孔沉积物常量元素含量($w_B/\%$) 与其它地区比较

Table 10 Comparison of the major element contents ($w_B/\%$) in the sediments from the PC5362, PC5356 and PC5417 drill holes in the mid-Pacific Ocean and other parts of the world

地 点	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂
PC5356 孔	52.8	13.4	6.58	1.75	3.28	2.67	4.84	0.63	0.36	0.62
PC5362 孔	53.61	13.11	6.46	1.24	3.09	2.71	4.90	0.58	0.26	0.60
PC5417 孔	49.05	11.86	5.78	4.93	3.58	2.73	4.82	0.75	0.49	0.53
大洋平均	47.72	12.29	5.83	0.60	2.18	2.10	1.10	0.41	0.16	0.59
中国浅海	62.51	11.09	4.43	5.08	1.82	2.32	2.00	0.068	—	0.58
中国大陆	64.18	11.00	4.50	3.11	2.01	2.17	1.70	0.084	—	0.70
南海	47.40	9.54	3.93	12.31	2.04	1.81	—	0.37	—	0.53
东海	54.43	12.03	4.59	10.5	1.84	1.98	2.24	0.12	0.12	0.57
南海中部	43.53	13.13	4.73	9.71	1.14	2.54	3.23	1.14	0.17	0.44
南海南部	42.25	7.29	3.37	18.35	2.17	1.82	—	0.26	0.13	0.37
南海北部	—	10.91	2.61	4.20	1.97	2.27	—	0.07	0.11	0.62

注: 据文献^[14], 略有修改。

碎屑含量极为丰富,虫管斑块状生物扰动构造极为发育。硅质粘土中,粘土矿物含量高达90%以上;钙质软泥中,钙质生物含量为98%,粘土为2%。早期沉积物 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 、 MnO 的含量变化不明显,中期沉积物中含量明显增加,晚期则减少。 CaO 、 CaCO_3 、 Sr 在晚期沉积物中含量高,表明该时期沉积物主要形成于陆源、生物源、火山源物资供应比较充足的沉积环境。

4 结 论

(1) 研究区第四纪早期主要为深海硅质粘土沉积并受到了火山活动的影响,晚期以薄层钙质硅质粘土和钙质软泥为主,生物碎屑含量丰富,虫管、团块状生物扰动构造发育。

(2) 常、微量元素在垂向上有3次较明显的变化:早期沉积物中 Fe_2O_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、 P_2O_5 、 MnO 的含量变化不明显,中期含量升高,晚期沉积物中含量减少, CaCO_3 、 CaO 、 Sr 在晚期沉积物中含量最高并与 Fe_2O_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 K_2O 呈显著的互为消长关系。

(3) 沉积物元素的相关性分析表明, SiO_2 与 Al_2O_3 、 K_2O 、 MgO 、 Fe_2O_3 、 Na_2O 、 TiO_2 、 MnO 之间为正相关关系,与 CaO 、 CaCO_3 、 Sr 之间为负相关关系,表明二者相关性较差,沉积物源不同。由于 SiO_2 、 MnO 、 Mg 、 Ni 是组成锰结核的主要元素,而 CaO 、 CaCO_3 、 Sr 与生物作用密切相关,说明在海底生物发育的地区,不利于锰结核的形成。

(4) R型因子分析说明 Fe_2O_3 、 MnO 、 MgO 、 SiO_2 、 Ni 等常微量元素为载荷,说明这些元素组合在成因上有一定的专属性,即主要为陆源碎屑沉积的产物。 CaO 、 CaCO_3 、 Sr 为负载荷,说明该组合元素共生关系好,沉积环境相同,主要受生物的影响所致。二者呈互为消长的关系。

(5) 由 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 与 Al_2O_3 的比值及 Ba/Sr 比值对比显见,中太平洋第四纪沉积物源主要为深

海粘土,并受到一定的火山及生物活动的影响。说明该时期沉积物主要形成于陆源、生物源、火山源物资供应比较充足的沉积环境。

参考文献:

- [1] OGAWAY L et al. Sedimentological study of piston core off Kyushu-Paku Ridge KT94-10, P-01 [J]. Geological Sciences, 1996, 17(1): 25-38.
- [2] UJIE Y, UJIE H, TAIRA A et al. Spatial and temporal variability of surface water in the Kuroshio source region, Pacific Ocean, over the past 21,000 years: evidence from planktonic foraminifera [J]. Marine Micropaleontology 2003, 49(4): 335-364.
- [3] SENO T, MARUYAMA S. Paleogeographic reconstruction and origin of the Philippine Sea [J]. Tectonophysics, 1984, 102(1-4): 53-84.
- [4] HIROSHI M. Quaternary widespread tephra catalog in and around Japan: Recent progress [J]. The Quaternary Research, 1999, 38(3): P194-201.
- [5] 何高文,薛婷,等.西太平洋富钴结壳元素组合特征及地质意义[J].矿物岩石地球化学通报,2005,24(2): 125-129.
- [6] 韩建修,等.古海洋环境与多金属结核形成的关系[M].武汉:中国地质大学出版社,1997.
- [7] 陈守余,张海生,赵鹏大.中太平洋和中国南海富钴结壳稀土元素地球化学[J].海洋地质与第四纪地质,2006,26(4): 45-50.
- [8] 赵振华.微量元素地球化学原理[M].北京:科学出版社,1995.
- [9] 方习生,石学法,王昆山,等.琉球群岛以东海域表层沉积物元素地球化学特征[J].海洋科学进展,2006,24(1): 9-16.
- [10] 熊应乾,刘振夏,等.东海陆架 EA01 孔沉积物常量微量元素变化及其意义[J].沉积学报,2006,24(3): 356-364.
- [11] 陈道华,蒋少涌,刘坚.西沙海槽表层沉积物地球化学特征及其地质意义[J].海洋地质与第四纪地质,2005,25(2): 37-43.
- [12] 李军.冲绳海槽中部 A7 孔沉积物地球化学记录及其对古环境变化的响应[J].海洋地质与第四纪地质,2007,27(1): 37-45.
- [13] BISCHOFF J L, HEATH G R, LEINEN M. Geochemistry of deep-sea sediments from the Pacific manganese nodule province, DOMES sites A. B. C. [A]. Bischoff J L, Piper D Z. Marine Geology and Oceanography of the Pacific Manganese Nodule Province [C]. New York: Plenum Press, 1979. 397-436.
- [14] 李国胜,杨锐.对硼作为相标志的异议[J].岩相古地理,1992, (4): 41-45.

Geochemistry and sedimentary environments of the Quaternary sediments in the mid-Pacific Ocean

LI Guo-sheng^{1, 2}, YANG Rui^{1, 3}, ZHANG Hong-rui⁴

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; 2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, Guangdong, China; 3. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510076, Guangdong, China; 4. China Aerogeophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: The geochemistry, sediment sources and sedimentary environments are examined on the basis of analyses of the major and trace element contents in the sediments from the PC5356, PC5362 and PC5417 drill holes in the mid-Pacific Ocean, in integration of the multivariable statistical analysis. Vertically, there are three phases of marked changes in element contents in different burial depths of sediments. The contents of Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , MnO and P_2O_5 remain unchangeable in the early sediments, and show a marked increase in the middle sediments and a decrease in the late sediments in which CaCO_3 , CaO and Sr contents are relatively higher and there is a negative correlation with the trace element contents. The element correlation analysis and R-mode factor analysis show that there is a positive correlation between SiO_2 contents and Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , MnO , TiO_2 , Cu , Ni and Zr contents indicating the same terrigenous origin, while a negative correlation between SiO_2 contents and CaCO_3 , CaO and Sr contents indicating a distinct biogenetic origin. The Quaternary sediments in the mid-Pacific Ocean consist mainly of calcareous-siliceous clay and calcareous ooze. They may owe their origin to the volcanism in the early stages, and biological action in the late stages.

Key words: mid-Pacific Ocean; Quaternary; geochemistry

《沉积与特提斯地质》 2007 年征订启事

《沉积与特提斯地质》(原《岩相古地理》)系国土资源部主管、成都地质矿产研究所主办的地学学术期刊。

《沉积与特提斯地质》办刊 20 余年来,已形成了沉积学的专业特色和青藏高原的地域特色,集中反映最新的沉积学、区域地质调查、石油地质,以及其他基础地质、矿床地质、能源地质、环境地质等方面的研究成果和信息。

本刊为大 16 开本,112 页,彩色印刷,逢季末出版,国内外公开发行,定价 10 元,全年 40 元。

《沉积与特提斯地质》编辑部