

太平洋东部 W2001-2 柱样低成熟烃组成特征、成岩变化及其与某些元素的作用

张海生^{1,2}, 于培松^{1,2}, 倪建宇^{1,3}, 姚旭莹^{1,3}

(1. 国家海洋局第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 2. 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室, 浙江 杭州 310012; 3. 国家海洋局海底科学重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘要: 研究样品取自太平洋东部 W2001-2 站位(154°07'42"W, 10°30'34"N, 水深 5102m), 以无扰动多管采样方式采样。本文通过研究氯仿沥青“ A ”、有机质和有机分子与微量元素的关系, 探讨了有机质在柱样形成中的作用。结果表明, 大致以 21—33cm 和 33—48cm 为界线, 呈现出系统的变化规律: 正构烷烃呈单峰群分布, 主碳峰为 C₂₅, 碳优势指数(carbon preference index, CPI)为 0.90—1.26, 略显奇偶优势, 反映出正构烷烃的母质除了少部分来自海洋菌藻类, 主要来自洋底较深处软泥。低的姥鲛烷/植烷(Pr/Ph < 0.81), 反映了柱样的强还原环境性质。饱和烃/芳烃比值低, 存在大量不饱和烃(非烃 + 沥青质为 49.63%—59.66%), 富含有利于早期成烃的特殊组分, 并长期处于低演化阶段, 以上特征均显示出样品的低成熟特点。研究还表明元素 Ti 和 V 与有机碳、氯仿沥青“ A ”呈正相关性; 元素 P、Mg 和 Mn 与有机碳、氯仿沥青“ A ”呈明显负相关性, 与非烃也有一定的相关性, 这些提供了低成熟度条件下有机质的组成特点及其与化学元素作用的证据。

关键词: 太平洋东部; 低成熟烃; 生物标志物; 组成特征; 成岩变化

中图分类号: P736.4; P618.13 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2010)05-0049-07

Composition and diagenesis of low-mature hydrocarbon and its interaction with some elements from Core W2001-2 in the Eastern Pacific Ocean

ZHANG Hai-sheng^{1,2}, YU Pei-song^{1,2}, NI Jian-yu^{1,3}, YAO Xu-ying^{1,3}

(1. Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China; 2. Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, SOA, Hangzhou 310012, China; 3. Laboratory of Submarine Geosciences, SOA, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Core W2001-2 was obtained with a multi-tube sampler in the Eastern Pacific Ocean at water depth of 5102 m (154°07'42"W, 10°30'34"N). Chloroform bitumen “A,” organic matters and microelements were analyzed in order to investigate the effect of organic matters on sediment diagenesis. The results showed that the distribution of Core W2001-2 presented obvious changes, especially at the lines of 21—33 cm and 33—48 cm. The n-alkanes showed dominance in C₂₅ and distribution in unimodality. The CPI (carbon preference index) value was between 0.90 and 1.26 with a slight odd-even predominance, indicating that organic matters sourced mainly from deeper submarine ooze as well as a little from marine algae. The lower ratios of Pr/Ph (<0.81) suggested a strong reducing environments. The characteristics of low contents of saturated hydrocarbon and aromatic hydrocarbon, with high contents of non-hydrocarbon compounds including non-hydrocarbon and asphaltene that amount is in the range of 49.63% to 59.66%, indicated that the property of the sediment was at a low-mature stage. The results also showed that organic matters and chloroform bitumen “A” had a positive relativity to Ti and V, but an inverse relativity to P, Mg and Mn. These relations confirmed the interactions between organic matters and some elements under low-mature conditions.

Key words: the Eastern Pacific Ocean; low-mature hydrocarbon; biomarker; composition; diagenesis

收稿日期: 2009-04-14; 修订日期: 2010-01-05. 卢冰、马云开编辑

基金项目: 国家自然科学基金(40676061, 41076072)和大洋矿产资源勘探开发专项(DY105-02-01)联合资助

作者简介: 张海生(1953—), 男, 浙江省岱山县人, 研究员, 博导, 主要从事海洋地球化学和古海洋环境研究。E-mail: zhangsoa@163.com

远洋沉积物一般不同于近岸陆源碎屑沉积物,它有着一系列独特的成岩变化,且随着沉积物埋藏深度的增加以及成岩作用的逐渐加深而发生有规律的变化。对早期成岩作用的研究可以了解原始沉积环境,是成岩作用的重要研究领域。研究成岩作用,对寻找和生产石油是非常有用的^[1-2]。

未熟-低成熟油(烃)是近年来引起重视的一类非常规油气资源^[3-5],并且已经作为一种重要的油气资源被不断发现。未熟-低成熟油(烃)的形成是早期沉积岩过程中可溶有机质对油气生成的贡献以及一些特殊有机质在低温下的成烃作用。它的发现突破了干酪根晚期热降解成烃理论的模式,开辟了一个新的找油领域。随着气相色谱技术的发展,地质体中微量可溶有机质的研究得到快速发展,使人们可以从分子级水平系统研究沉积物中生物标志物的分布特征和成因,来了解未熟-低成熟油各自在成烃母质、演化特征、形成条件、成因机理及分布上的特点。近年来胡文瑄等人利用生物标志化合物在太平洋中部锰结核及洋底表层软泥中发现低成熟烃,其正构烷烃组成与现代生物(菌藻类及浮游生物等)有所不同,而与未熟烃或低熟烃源岩的生物标志特征相一致,有些指标甚至达到成熟油范围^[6],这意味着大洋底部环境中存在着生烃过程。

本文对太平洋东部 W2001-2 柱样中有机碳、可溶有机质(氯仿沥青“A”)及其族组成(饱和烃、芳烃、非烃、沥青质)进行了定量分析,研究了可溶有机质的组成特征、生源母质以及在大洋特殊环境下的生烃演化过程,尤其从有机分子的新视角探讨有机分子与成矿元素之间的关系等,提供了有机成矿作用的证据,这些对探索大洋油气资源有着重要意义。

1 样品采集与实验方法

1.1 样品采集

采样站位 W2001-2(图 1)位于太平洋中心开阔深海盆地(154°07'42"W, 10°30'34"N),水深 5102 m,处于深海丘陵区,是赤道东太平洋热带生物作用的沉积区,区内断裂十分发育,洋底火山作用和热液活动频繁。本研究通过无扰动多管取样器获得沉积物柱状样品,长度为 48cm。样品表层沉积物为硅质黏土,颗粒细而均匀,呈浅黄色,表层以下沉积物为灰色,沉积物组分主要为放射虫碎骨。在现场沉积物样品直接分割,于烘箱内干燥(60℃以下),封样保存、备用。

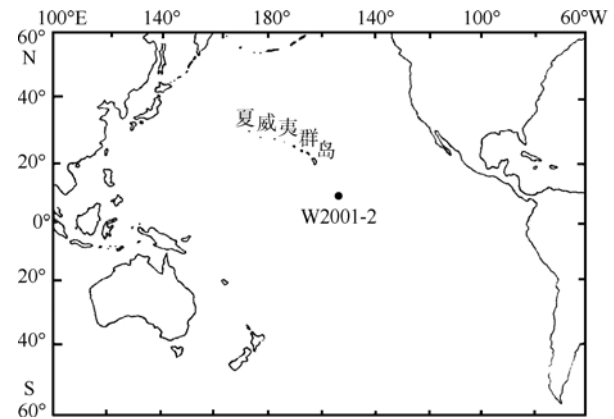


图 1 采样站位图

Fig. 1 Map of sampling station

1.2 实验方法和仪器分析

可溶有机质氯仿沥青“A”提取采用“柱层法”。将样品粉碎至 100 目,称取 10g 沉积物样由滤纸(抽提)包样,用二氯甲烷和甲醇(分析纯、全玻璃系统二次蒸馏、体积之比 3:1)提取 48h,抽提水浴温度控制在 60℃左右,回流速度为 4—5 次/h。过滤的抽提物经旋转蒸发干燥后,即得到样品中的可溶有机质,通常称氯仿沥青“A”。族组分离:上述浓缩液(氯仿沥青“A”)用正构烷烃沉淀脱去沥青质,再将可溶物经硅胶-氧化铝层析(净化柱为 10mm 内径,正己烷湿法装柱,硅胶为 80—100 目,氧化铝为 100—200 目,经抽提后的硅胶和氧化铝分别在 200 和 250℃下活化 8h),分别用正己烷、苯和甲醇淋洗分离出烷烃、芳烃和非烃类组分(沥青质和胶质)。对烷烃馏分浓缩至约 1cm³,由正己烷定量转移到 5cm³刻度量管中,用高纯氮气流吹干定容至 2cm³进行 GC 分析^[7-8]。

气相色谱分析采用 HP5890 气相色谱仪,弹性石英毛细管柱(DB-5, 30m×0.25mm 内径, 0.17μm 涂层厚度)。升温程序:初始温度 80℃,升温速度 5℃/min,终止温度 280℃,保持 30min。用正构烷烃标样定性,相对含量用峰面积归一化法计算。

有机碳分析采用意大利 EA1110 元素分析仪(精度 0.3%)。化学元素分析:沉积物样品进行 X 衍射-荧光分析,以上使用仪器设备均符合国家标准相关要求。

2 结果与讨论

2.1 有机地球化学特征

2.1.1 可溶有机质的组成

太平洋东部 W2001-2 站位柱样可溶有机组分

(氯仿沥青“A”)由饱和烃、芳烃、非烃和沥青质组成。如表 1 所示, 氯仿沥青“A”含量为 0.254—0.657mg·g⁻¹; 饱和烃含量为 0.041—0.113mg·g⁻¹, 占族组成为 12.69%—18.40%, 饱和烃以 C—C 键相连, 热稳定性差, 易分解, 因此饱和烃的百分含量随深度增加而趋于减少; 芳烃含量为 0.053—0.154mg·g⁻¹, 占 12.44%—27.66%, 芳烃由芳环构成, 比饱和烃有更强的稳定性, 其百分含量在未成熟阶段既存在随深度增加而增大, 又有随深度增加而减少的变化特征, 主要取决于原始可溶有机质的演化; 非烃含量为 0.116—0.363mg·g⁻¹, 占 43.13%—55.19%; 沥青质含量为 0.027—0.100mg·g⁻¹, 占 8.70%—18.16%。总烃(饱和烃+芳烃含量)为 0.119—0.216mg·g⁻¹, 占族组成的 29.66%—44.92%; 饱和烃/芳烃比值为 0.34—1.40; 非烃+沥青质含量为 0.158—0.463mg·g⁻¹, 占 55.08%—70.34%, 优势较大。以上结果显示样品的饱和烃和芳烃含量较低,

非烃含量占优势, 反映了有机质演化程度较低^[7]。

非烃和沥青质是指含 S、N、O 等杂原子的烃类化合物, 这类化合物具有相对分子质量大、分子极性大、对成矿元素原子或离子吸附与配合力相对强的特点。有机质对金属元素的富集作用有多种形式, 包括吸附、配合和还原等。从图 2 可以看出, 在 21—33cm、33—48cm 为界线, 呈现出较为系统的变化规律。从表层沉积物开始的有机馏分的组成即发生了变化, 随着不同层位深度的增加, 氯仿沥青“A”、非烃和沥青质百分含量越向下越趋于减少, 标志着原始可溶有机质中非烃和沥青质开始大量降解, 芳烃和总烃的比例越向下越趋于增大。非烃、沥青质和烃类这三种性质不同的有机质始终是一个有机联系的整体, 处于动态平衡之中, 有机质的成岩作用是某些有机组分被氧化, 导致饱和烃中的 C—H 降低; 与此同时 C—H 的氧化导致 C=O、C—O—H 和 C—O—OH 结构增加^[9-11]。

表 1 太平洋东部 W2001-2 站位柱样的有机碳和氯仿沥青“A”族组成

Tab. 1 Organic carbon and component of chloroform bitumen “A” in Core W2001-2 from Eastern Pacific

层次/ cm	有机碳/ (mg·g ⁻¹)	沥青“A”/ (mg·g ⁻¹)	饱和烃/ (mg·g ⁻¹)	芳烃/ (mg·g ⁻¹)	非烃/ (mg·g ⁻¹)	沥青质/ (mg·g ⁻¹)	总烃/ (mg·g ⁻¹)	饱和烃 /芳烃	非烃+沥青 质/(mg·g ⁻¹)	总烃/有 机碳/%	沥青“A”/ 有机碳 /%
0—1	4.73	0.657	0.113	0.081	0.363	0.100	0.194	1.40	0.463	4.10	13.89
1—2	3.96	0.584	0.090	0.099	0.311	0.084	0.189	0.91	0.395	4.77	14.75
2—3	3.93	0.565	0.091	0.086	0.307	0.082	0.177	1.06	0.388	4.50	14.38
3—4	3.91	0.586	0.103	0.091	0.309	0.083	0.194	1.13	0.392	4.96	14.98
4—5	3.75	0.526	0.085	0.076	0.280	0.085	0.161	1.12	0.365	4.29	14.03
5—6	4.32	0.612	0.088	0.128	0.303	0.093	0.216	0.69	0.396	5.00	14.17
6—7	3.77	0.453	0.069	0.088	0.243	0.053	0.157	0.78	0.296	4.16	11.99
7—9	3.15	0.518	0.083	0.106	0.273	0.056	0.189	0.78	0.329	6.00	16.32
9—11	3.82	0.567	0.098	0.104	0.285	0.080	0.202	0.94	0.365	5.29	14.84
11—13	3.34	0.533	0.090	0.121	0.269	0.053	0.211	0.74	0.322	6.32	15.96
13—15	3.20	0.507	0.069	0.119	0.240	0.079	0.188	0.58	0.319	5.88	15.84
15—18	3.18	0.495	0.075	0.136	0.202	0.082	0.211	0.55	0.284	6.36	15.57
18—21	2.70	0.408	0.060	0.102	0.204	0.038	0.165	0.59	0.243	6.11	15.11
21—24	2.41	0.356	0.053	0.088	0.175	0.043	0.141	0.60	0.218	5.85	14.77
24—27	2.02	0.305	0.051	0.068	0.140	0.046	0.119	0.75	0.186	5.89	15.10
27—30	1.85	0.278	0.054	0.066	0.131	0.027	0.120	0.82	0.158	6.49	15.03
30—33	1.82	0.254	0.041	0.053	0.116	0.044	0.094	0.77	0.160	5.16	13.96
33—36	3.06	0.474	0.060	0.130	0.233	0.051	0.190	0.46	0.284	6.21	13.17
36—39	3.36	0.477	0.058	0.135	0.239	0.045	0.192	0.43	0.285	5.71	14.20
39—42	3.26	0.409	0.044	0.119	0.208	0.038	0.163	0.37	0.246	5.00	12.55
42—45	2.90	0.314	0.048	0.083	0.156	0.027	0.131	0.58	0.183	4.52	10.83
45—48	3.36	0.505	0.053	0.154	0.253	0.046	0.207	0.34	0.298	6.16	15.03
平均值	3.26	0.472	0.072	0.102	0.238	0.061	0.173	0.75	0.299	5.40	14.39

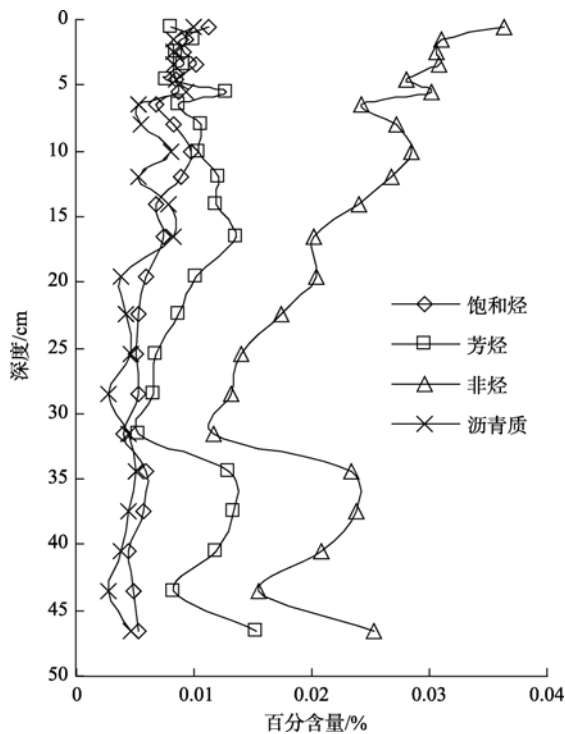


图2 W2001-2柱样氯仿沥青“A”的族组成百分含量垂直变化
Fig. 2 Vertical percentage composition of component of chloroform bitumen “A” in Core W2001-2

2.1.2 正构烷烃碳分子组合与母源类型

图3是太平洋东部W2001-2柱样代表性正构烷烃气相色谱图,正构烷烃碳分子分布范围大多为 nC_{14} — nC_{34} ,呈单峰群分布,并以中碳烃峰群占优势。饱和烃气相色谱的正构烷烃分布峰形特征和主峰碳是反映有机母源的参数^[12]。一般认为,碳数集中分布为 nC_{15} — nC_{21} ,表示有机质主要来源于海洋菌藻类等生物^[13],而陆源高等植物形成的烷烃碳数一般为 nC_{25} — nC_{35} 。从表2可以看出,W2001-2柱样主峰碳几乎均为 C_{25} ,代表陆源成因的正构烷烃高分子量的蜡含量不多,而轻重烃比值 nC_{23^-}/nC_{24^+} 也较低,为0.091—0.234显示正构烷烃的母质除了少部分来自菌藻类,主要是洋底较深处软泥中生成的低熟油,通过扩散和浸染被运移到沉积物较浅层次^[5]。

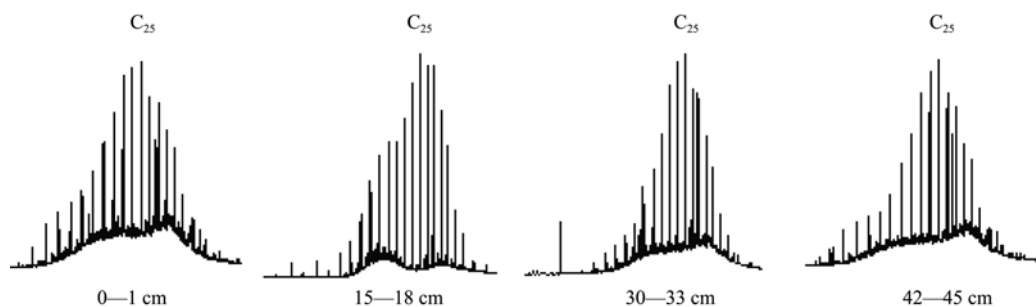


图3 W2001-2柱样代表性正构烷烃气相色谱图
Fig. 3 Representational gas chromatogram of n-alkanes in Core W2001-2

轻重烃比值 nC_{23^-}/nC_{24^+} 随深度增加而略有增大,表明在地质沉积过程中,随着埋藏深度的增加和成岩作用,重烃组分减少而轻烃组分含量相对增加。

W2001-2柱样各地层中正构烷烃奇偶优势CPI(碳优势指数, carbon preference index)值在0.90—1.26,略显奇偶优势。这种单峰型中碳烃峰群色谱图特征分布与近岸海域沉积物有所不同,陆源高等植物蜡形成的正构烷烃的碳数分布范围为 nC_{25} — nC_{35} ,具有显著奇偶优势(奇偶优势在5.1—9.2)。柱样中发现了浮游生物的残体,而烷烃生物标志物如姥鲛烷和植烷也显示强还原环境特征,该区域洋底环境具有比较丰富的生物生产量和较好的保存条件,可以为洋底生烃提供物质基础。此外该区域海底火山和热液活动频繁,地质构造活跃,而有机质在深部热液作用下的“瞬时”生烃是自然界中一种非常重要的生烃方式^[5]。因此,该柱样烷烃分布与陆源高等植物生源关系不大,而与热液成矿作用有关,具有典型的低成熟烃类特点^[14-15]。

2.1.3 类异戊二烯分子指数与沉积环境

类异戊二烯在异构烷烃中是一类特殊成分,它们在结构形态上相似,每隔3个或4个碳原子上有一个甲基取代基。一般认为,姥鲛烷与植烷比值(Pr/Ph)小于1.0时,指示缺氧还原沉积环境,而若Pr/Ph大于1.0时,则指示氧化环境。同时,这一比值也与物源、成熟度有一定的联系^[16]。W2001-2站位柱状样品所在的研究区为大洋环境,盐度和物源相对稳定,沉积物的成熟度较低,故Pr/Ph在一定程度上能反映出该海域沉积环境的氧化、还原程度。从表2可见,W2001-2柱样中姥鲛烷与植烷的组成上具有明显的植烷优势,Pr/Ph比值为0.352—0.814,Pr/ nC_{17} 为0.297—0.791,Ph/ nC_{18} 为0.175—1.298。大量不饱和化合物的存在显示了有机质演化的初始阶段;太平洋东部W2001-02柱样中的Pr/Ph比值很低,反映了很强的还原环境。

表 2 太平洋东部 W2001-2 站位柱样中有机碳、正构烷烃、类异戊二烯烃分布特征

Tab. 2 Distributions of organic matters, n-alkanes and isoprenoids in Core W2001-2 from the Eastern Pacific

层次/cm	有机质/%	总烃含量/ 10^{-6}	碳数范围	MH	C_{23}^-/C_{24}^+	CPI	Pr/Ph	Pr/nC ₁₇	Ph/nC ₁₈
0—1	0.557	31.467	nC14—C34	C25	0.129	1.154	0.536	0.734	1.096
1—2	0.483	26.787	nC14—C34	C25	0.096	1.155	0.431	0.472	0.990
2—3	0.479	25.559	nC14—C34	C25	0.120	1.175	0.690	0.752	0.912
3—4	0.477	27.622	nC14—C34	C25	0.141	1.155	0.730	0.743	0.896
4—5	0.458	22.146	nC14—C34	C25	0.129	1.179	0.621	0.678	0.952
5—6	0.527	30.610	nC14—C34	C25	0.091	1.126	0.433	0.516	0.953
6—7	0.460	26.048	nC14—C34	C25	0.115	1.260	0.367	0.481	0.745
7—9	0.384	22.578	nC14—C34	C25	0.166	1.141	0.570	0.572	0.788
9—11	0.466	24.034	nC14—C34	C25	0.156	1.021	0.352	0.791	1.298
11—13	0.407	23.852	nC14—C34	C25	0.149	1.126	0.701	0.625	0.883
13—15	0.390	21.739	nC14—C34	C25	0.163	1.210	0.577	0.574	0.901
15—18	0.388	21.018	nC14—C34	C25	0.142	1.176	0.525	0.305	0.983
18—21	0.329	15.586	nC14—C34	C25	0.123	1.174	0.488	0.344	0.617
21—24	0.294	17.315	nC14—C34	C25	0.180	1.256	0.597	0.406	0.906
24—27	0.246	16.041	nC14—C34	C23	0.170	0.900	0.641	0.578	0.175
27—30	0.226	13.615	nC14—C34	C25	0.156	1.200	0.545	0.509	0.803
30—33	0.222	15.361	nC14—C34	C25	0.145	1.217	0.471	0.297	0.785
33—36	0.373	24.241	nC14—C34	C25	0.234	1.210	0.591	0.466	0.966
36—39	0.410	20.251	nC14—C34	C25	0.208	1.171	0.694	0.565	0.790
39—42	0.398	19.277	nC14—C34	C25	0.194	1.243	0.640	0.479	0.779
42—45	0.354	17.240	nC14—C34	C25	0.216	1.158	0.814	0.506	0.953
45—48	0.410	20.891	nC14—C34	C25	0.188	1.194	0.744	0.439	0.935
平均值	0.397	21.967	—	—	0.155	1.164	0.580	0.538	0.868

注: 有机质=有机碳 $\times 1.22$; MH: 主峰碳; $[C_{23}^-/C_{24}^+]$: 轻重烃比值; CPI: 碳优势指数; $\sum C_{23}-C_{33}$ (奇碳)/ $\sum C_{22}-C_{34}$ (偶碳); Pr: 姥姣烷; Ph: 植烷。

2.2 有机碳垂向生烃转化

W2001-2 柱样中有机碳(TOC)百分含量垂向波动范围是 1.82—4.73 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (表 1)。在地球历史过程中, 原始有机质总量在沉积和成岩过程中是不断变化的, 当母质类型相同时, 随着埋深增加、时代变老及演化加深, 有机碳数量由上而下递减(0—33cm), 在 24—33cm 处含量为最低, 而后又增加。这是由于有机质成矿的化学反应消耗了有机碳和氯仿沥青“A”造成的。有机质分解作用是沉积物早期成岩作用的主要驱动力, 达到某一深度后, 有机质分解减慢。

总烃/有机碳为 4.10%—6.49%, 氯仿抽提物及其转化率(氯仿沥青“A”/有机碳)为 6.03%—16.32%, 显示烃的转化率较高, 具有明显的运移烃类特征。对 TOC 与氯仿沥青“A”进行相关性研究, 发现它们具有较好的相关性, $R=0.928$, 表明 W2001-2 柱地层的演化程度差异不大, 因而有机质的类型和含量起决定性的作用, 氯仿沥青“A”含量明显受有机质丰度和成岩变化作用(演化程度)的控制。

2.3 有机质与某些元素相关性及其作用

从表 3 和图 4 可见, 柱样中某些元素与有机质丰度、氯仿沥青“A”呈一定的相关性。Ti、V 与有机质呈正相关, 系数各为 $R=0.662$ 、 $R=0.520$; Ti、V 与氯仿沥青“A”的正相关系数各为 $R=0.621$ 、 $R=0.512$ 。元素 P、Mg、Mn 随深度的变化均表现由低到高的变化趋势, 且在 24—33cm 处含量最为聚集, 而这一层段恰是有机质丰度最低, 反映了成岩成矿作用的一些特点, 以及提供了低成熟度条件下有机作用的证据。可溶有机质中低分子组成的正构烷烃的相对增加是发生矿化作用的重要标志^[17]。本文研究的有机分子参数轻重烃 nC_{23}^-/nC_{24}^+ 比值随深度增加而增大, 表明轻组分含量的相对增加。这种变化正是由于矿化作用造成, 由于矿化作用, 长链化合物断链, 环状化合物开环断裂形成低分子量的有机分子, 导致轻组分的相对增加^[18]。同时赋存于有机质中的金属成矿元素被卸载释放, 致使有机质中的成矿元素的含量下降, 从而产生金属成矿元素 P、Mg、Mn 与有机质呈现比较明显的负相关性。

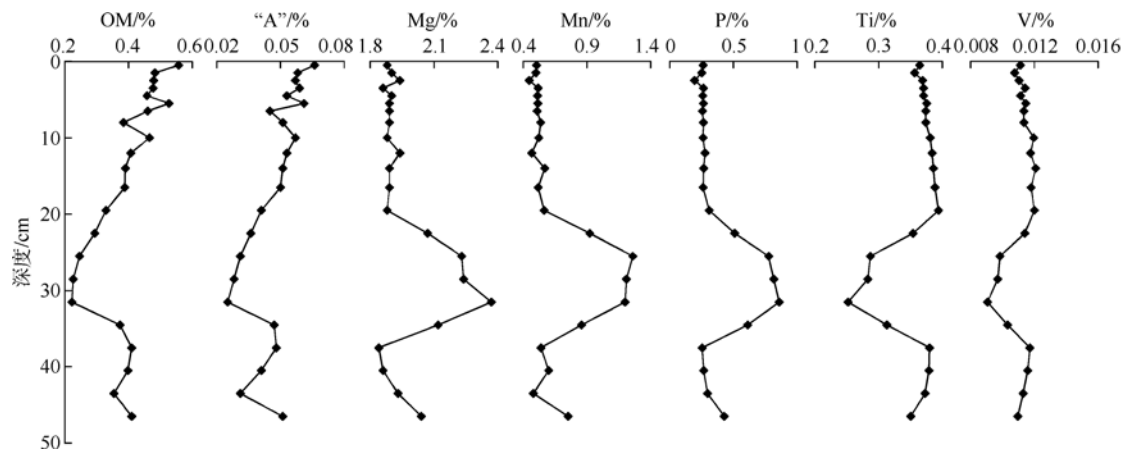


图 4 有机质、氯仿沥青“ A ”与化学元素垂向分布图

Fig. 4 Vertical distribution of organic matters, chloroform bitumen “A” and chemical elements

表 3 W2001-2 柱样沉积物中有机质、氯仿沥青“ A ”和化学元素的相关性 R

Tab. 3 Correlation coefficient among organic matters, chloroform bitumen “A,” and chemical elements in Core W2001-2

	Mg	Mn	P	Ti	V	有机质	氯仿沥青“ A ”
Mg	1.000						
Mn	0.941	1.000					
P	0.906	0.975	1.000				
Ti	-0.958	-0.916	-0.933	1.000			
V	-0.647	-0.695	-0.792	0.717	1.000		
有机质	-0.775	-0.821	-0.814	0.662	0.520	1.000	
氯仿沥青“ A ”	-0.707	-0.740	-0.743	0.621	0.512	0.928	1.000

与有机质分解密切相关的元素 P、Mg、Mn 与有机质呈较强负相关性，相关系数各为 $R=-0.814$ ， $R=-0.775$ ， $R=-0.821$ ；而与氯仿沥青“ A ”相关系数各为 $R=-0.743$ ， $R=-0.707$ ， $R=-0.740$ 。P 与有机质呈显著负相关显然与 P 在沉积物存在的形式有关，有机质的分解过程与无机系统不同，是一种非平衡的不可逆反应过程。在成岩过程中，柱样中可能存在有机磷向无机磷酸盐的成岩转化，并使沉积物中的全磷中无机磷因数量增加而居于优势地位，最后造成 P 与有机质含量间呈现负相关关系^[19]。

3 结论与认识

1) 对太平洋东部深海 W2001-2 站位柱样地层中的可溶有机质(氯仿沥青“ A ”)及其族组成(饱和烃、芳烃、非烃和沥青质)进行了定量分析，结果表明存

在大量不饱和烃(非烃 + 沥青质)，饱和烃、芳烃和饱和烃/芳烃比值均较低，显示了沉积物中富含有利于早期成烃的特殊组分，并长期处于低演化阶段。该柱样烷烃分布与陆源高等植物生源关系不大，而与热液成矿作用有关，具有典型的低成熟烃类特点。

2) 通过对柱样沉积物中可溶有机质组成的研究以及对部分生物标志物的丰度和特征的分析，发现大致以 21—33cm 和 33—48cm 为界线，呈现出系统的变化规律和特点。研究还表明沉积物中元素也呈现同样变化，Ti、V 与有机碳、氯仿沥青“ A ”呈一定正相关性，而与有机质分解密切相关的元素 P、Mg 和 Mn 则与有机质呈明显的负相关性，与非烃也有一定的负相关性，由此提供了低成熟度条件下有机物与元素作用的证据。

参考文献

[1] BARTON P B. The many roles of organic matter in genesis of mineral deposits [G]. Geological Society of America, Abstracts With Programs. 1982.

[2] SAXBY J D. The significance of organic matter in genesis[M]/WOLF K H. Handbook of Strata-bound and Stratiform Ore Deposits 2, Geochemical Studies. Amsterdam:

- Elsevier, 1976: 111-133.
- [3] BASKIN K D, PETERS E K. Early Generation Characteristics of a Sulfur-Rich Monterey Kerogen[J]. AAPG, 1992, 76(1): 1-13.
- [4] TEN HAVEN H L, DELEEUW J W, WAXWELL J R. Anomalies in steoid and hopanoid maturity indices[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50: 853-855.
- [5] 胡文瑄, 金之钧, 姚素平, 等. 太平洋中部锰结核及洋底软泥中发现低成熟烃类[J]. *科学通报*, 2002, 47(1): 68-73.
- [6] KUCHA H. Noble metals associated with organic matter, Kupferschiefer, Poland[G]//PARNELL J, KUCHA H, LANDAIS P. Bitumens in Ore Deposits, Special Publication of the Society For Geology Applied to Mineral Deposits 9. 1993, 153-170.
- [7] 张海生, 于培松, 倪建宇, 等. 太平洋东部 ES0103 柱状样品中可溶有机质的组成变化及其早期成岩作用[J]. *海洋学研究*, 2008, 26(3): 1-8.
- [8] 张海生, 于培松, 倪建宇, 等. 赤道太平洋沉积有机质物性、源性的地球化学及其沉积环境对比研究[J]. *海洋学研究*, 2008, 30(6): 60-68.
- [9] SAWLOWICZ Z. Organic matter in Zechstein Kupferschiefer from Fore-Sudetic Monocline (Poland) I, Bitumens[J]. *Mineralogia Polonica*, 1989, 20: 69-89.
- [10] SUN Y Z, PÜTTMANN W. Relationship between metal enrichment and organic composition in Kupferschiefer of structure-controlled mineralization from Oberkatz Schwelle[J]. *Applied Geochemistry*, 1996, 11: 567-581.
- [11] SUN Y Z, PÜTTMANN W. The role of organic matter during metal accumulation in Permian Kupferschiefer from the Sangerhausen Basin, Germany[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(11): 1143-1161.
- [12] 许怀先, 陈丽华, 万玉金, 等. 石油地质实验测试技术与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- [13] 张美, 孙晓明, 薛婷, 等. 太平洋海底富钴结壳中的烃类有机质及其成因意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 3026-3036.
- [14] 张林晔, 张春荣. 低熟油形成机理及成油体系: 以济阳凹陷牛庄洼陷南部斜坡为例[M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [15] BLOKKER P, SCHOUTEN S, DE LEEUW J W, et al. A comparative study of fossil and extant algaenan using ruthenium tetroxide degradation[J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 2000, 64: 2055-2065.
- [16] 罗建育, 陈镇东. 台湾高山湖泊沉积记录指示的近 4000 年气候与环境变化[J]. *中国科学: D 辑*, 1997, 27(4): 366-372.
- [17] SEIFERT W K, MOLDOWA J M. Paleoreconstruction by biological markers[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45: 783-794.
- [18] MÜLLER P, SUESS E. Productivity, sedimentation rate and sedimentary organic carbon preservation[J]. *Deep Sea Res*, 1979, 26: 1347-1362.
- [19] 王成厚. 东海海底沉积地球化学[M]. 北京: 海洋出版社, 1995, 84-86.