

# 北极沉积物中正构烷烃的组合特征及古沉积环境的研究

卢 冰<sup>1,2</sup>, 潘建明<sup>1,2</sup>, 王自磐<sup>1</sup>, 陈荣华<sup>1</sup>, 陆斗定<sup>1</sup>, 叶新荣<sup>1,2</sup>

(1. 国家海洋局 海底科学重点实验室, 浙江 杭州 310012; 2. 国家海洋局 第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 报道了北极楚科奇海和白令海沉积物中正构烷烃的含量和分布类型, 并通过因子分析方法对正构烷烃的来源和古沉积环境加以初步探讨. 研究结果表明, 正构烷烃碳数分布范围多数在  $nC_{15} \sim nC_{33}$  之间, 分布类型有两种, 第 1 种高分子碳范围,  $MH$  为  $nC_{25} \sim nC_{27}$ ,  $CPI$  大于 1, 奇偶优势显著. 第 2 种低分子碳范围,  $MH$  为  $nC_{17} \sim nC_{20}$ , 奇偶优势不明显. 以上特征指示了正构烷烃来源于陆源高等植物和海洋内生两个部分, 并且以陆源贡献最大. 楚科奇海和白令海大部分测站的  $Pr/Ph$  小于 1, 指示了缺氧还原沉积环境. 因子分析结果与样品中正构烷烃不同分子组成特征相互对应.

**关键词:** 北极; 正构烷烃; 因子分析; 古沉积环境

中图分类号: P734.5 文献标识码: A 文章编号: 0253- 4193(2002) 06- 0034- 15

## 1 引言

北极区域在全球变化研究中具有特殊地位, 它虽与孤立陆地南极均属高纬高寒地区, 但它的边缘四周主要是爱斯基摩人生存的北极圈内陆地, 又是欧、亚、北美部分国家的领土, 因此与南极相比, 北极和亚北极区域生态自然环境现状与人类社会相互作用更为密切.

正构烷烃是石油的主要成分之一, 沉积物中的正构烷烃来源复杂, 包括人为的污染、生物成因和地质成因等. 国内外学者对陆地、海洋、大气、现代和古代海洋沉积物中的正构烷烃的分布来源、组合特征和时空变化均有文献报道<sup>[1~7]</sup>. 有机质的消长是气候变化的重要特征, 对沉积物中正构烷烃的研究可以给各种污染物来源增加附加信息. 本文拟通过正构烷烃分子组合特征指数和应用多元统计分析方法对北极考察区域的正构烷烃分布特征、物质来源以及

收稿日期: 2001- 01- 20; 修订日期: 2001- 06- 04.

基金项目: 国家重点基础研究专项基金资助项目(G2000078500); 中国首次北极科学考察和国家自然科学基金联合资助项目(40176015).

作者简介: 卢 冰(1950—), 女, 浙江省杭州市人, 研究员, 从事有机地球化学和古气候古环境的研究.

古沉积环境进行初步探讨, 对强化极区环境保护具有重要意义.

## 2 实验方法

### 2.1 样品采集位置、底质特征和类型

样品采于 1999 年(7~8 月)中国首次北极科学考察专项调查所采集大面积 29 个测站的表层沉积物样(0~5 cm)和 1 个柱状样(0~184 cm), 表层样由箱式取样器获得, 柱状样由重力活塞取样器获得. 采样位置见图 1.

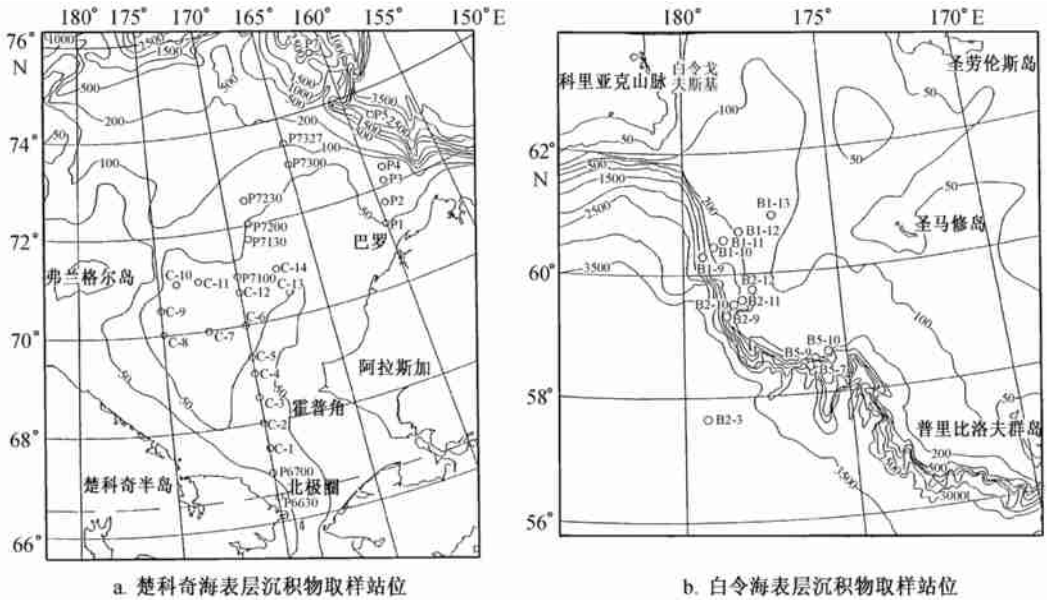


图 1 采样站位

### 2.2 样品前处理和仪器分析

将冷冻沉积物样品在室温下融化, 在烘箱内 45 °C 下烘干, 经研磨后取 20 g 样品由滤纸(抽提过)包样, 索氏提取 48 h, 溶剂为(分析纯、全玻璃系统二次蒸馏)二氯甲烷和甲醇混合溶剂 150 cm<sup>3</sup>(体积比为 3:1)抽提水浴温度控制在 62 °C 左右, 回流速度为 4~5 次/h. 提取液加入活化铜片脱硫, 放置过夜, 再在旋转蒸发仪上浓缩至约 2 cm<sup>3</sup>, 将浓缩液加入硅胶/氧化铝层析柱(净化柱为 10 mm 内径层析柱, 正己烷湿法装柱, 硅胶为 80~100 目; 氧化铝为 100~200 目; 经抽提后的硅胶及氧化铝分别在 200 和 250 °C 下活化 8 h), 用正己烷淋洗出烷烃组分, 淋出液浓缩至约 1 cm<sup>3</sup>, 正己烷定量转移至 5 cm<sup>3</sup> 刻度量管中, 用高纯氮气流吹干定容至 200 mm<sup>3</sup> 进行 GC 分析.

对气相色谱分析采用 HP5890 气相色谱仪, 弹性石英毛细管柱为 30 mm × 0.25 mm(内径) × 0.17 μm(涂层厚度). 进样温度为 280 °C, 初始温度为 80 °C, 升温速度为 5 °C/min, 终止温度为 280 °C, 并保持 30 min. 正构烷烃的定性以特征碎片离子, 相对保留指数进行.

### 3 海域概况

楚科奇海位于北极(北冰洋)东区(中心位置为  $70^{\circ}\text{N}$ ,  $170^{\circ}\text{E}$ ), 白令海位于亚北极区(太平洋)北端、阿留申群岛以北(中心位置为  $57^{\circ}\text{N}$ ,  $175^{\circ}\text{E}$ )。海冰是北冰洋表面的主要特征, 冬季海冰分布南界可达白令海的阿留申群岛, 夏季海冰北界退至楚科奇海  $74^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{N}$ 。楚科奇海基本上位于浅海陆架区, 考察中的测点水深大多小于 100 m。楚科奇海与北太平洋相连的惟一通道是白令海峡, 深度仅为 40~50 m, 宽度约为 85 km。白令海峡位于俄罗斯勘察加半岛与美国阿拉斯加州之间, 从大陆架到深海区, 调查测站的水深最浅为 120 m, 最深为 3 950 m, 平均水深为 3 000 m。

### 4 结果和讨论

正构烷烃是石油烃的主要成分之一, 它的碳数分布范围具有自然的连续性, 结构简单, 但这些分子中含有高键能的碳—碳键, 结构稳定, 在一定程度上能保留它原有的结构特征, 因此是一个经典的有机地球化学指标, 在地质体中它表现为与母质来源有很好的相似性, 如起源于高等植物蜡的长链正构烷烃碳数和来自海洋生物的低分子量烷烃, 沉积物中的正构烷烃来源复杂, 包括人为污染、生物成因和地质成因等。

#### 4.1 正构烷烃的分布特征

图2是北极楚科奇海和白令海大面积表层沉积样和柱状样 P7327 站位正构烷烃 4 种典型色谱图。由正构烷烃色谱指示图可更确切识别其组成、类型、状态以及石油烃污染。表 1 和表 2 为沉积物中正构烷烃的气相色谱分析结果和分子组成特征指数。在所测 29 个大面积表层沉积样和楚科奇海柱状样 8 个层位中的正构烷烃分布和组成特征各不相同, 可归纳为 4 种类型。

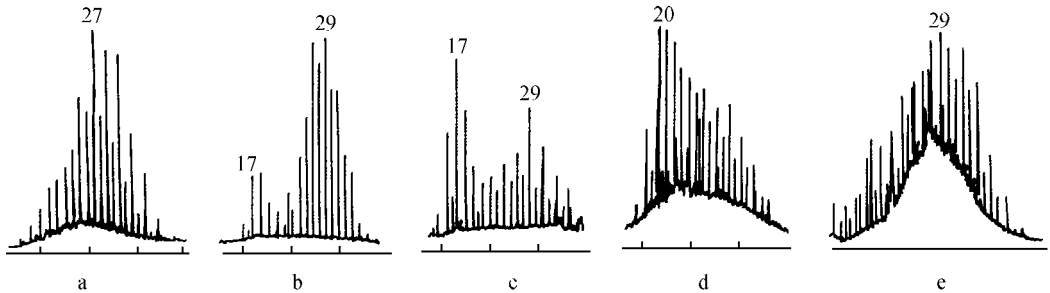


图2 正构烷烃典型气相色谱

##### 4.1.1 典型现代陆源沉积类型(单峰群, 图 2a)

表层沉积物代表站楚科奇海 P7100, C-4, C-5, C-11, C-13 和白令海 B1-9, B1-11, B2-9, B2-11 的正构烷烃分布偏向高碳数一边, 主峰碳为  $n\text{C}_{27}$ ,  $n\text{C}_{29}$  高分子质量正构烷烃占优势, 并且有显著奇偶优势。一般来说正构烷烃主峰碳为  $n\text{C}_{23}\sim n\text{C}_{31}$ , 高分子量奇数碳正构烷烃  $n\text{C}_{27}$ ,  $n\text{C}_{29}$  和  $n\text{C}_{31}$  具有陆源植物的特征物源标志, 如周边植被地表侵蚀程度强, 随地表径流入海, 当陆源组分大大增加, 往往含有较多  $n\text{C}_{24}$  以上石蜡烃组分, 而且显示出奇偶优势, 这些高等植物的角质蜡衍生的化合物在未成熟沉积物中富集, 说明北极和亚北极区以外源性陆源高等植物输入为主。

表1 楚科奇海、白令海沉积物中的正构烷烃归一化数据(%)

| 站位    | C <sub>15</sub> | C <sub>16</sub> | C <sub>17</sub> | Pr    | C <sub>18</sub> | Ph    | C <sub>19</sub> | C <sub>20</sub> | C <sub>21</sub> | C <sub>22</sub> | C <sub>23</sub> | C <sub>24</sub> | C <sub>25</sub> | C <sub>26</sub> | C <sub>27</sub> | C <sub>28</sub> | C <sub>29</sub> | C <sub>30</sub> | C <sub>31</sub> | C <sub>32</sub> | C <sub>33</sub> |  |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|-----------------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--|
| C-1   | 1.080           | 1.653           | 1.230           | 2.015 | 1.332           | 1.892 | 3.282           | 3.098           | 2.275           | 2.827           | 1.502           | 2.814           | 1.357           | 2.012           | 1.488           | 1.397           | 1.610           | 3.046           | 2.383           | 1.346           |                 |  |
| C-2   | 0.693           | 1.520           | 0.979           | 0.517 | 2.160           | 0.847 | 1.730           | 0.849           | 1.348           | 0.863           | 1.317           | 0.531           | 1.294           | 0.652           | 4.030           | 2.007           | 3.146           | 1.181           | 2.030           | 0.564           | 0.089           |  |
| C-4   | 0.212           | 0.565           | 0.480           | 0.291 | 1.410           | 0.877 | 1.717           | 1.498           | 2.284           | 1.882           | 3.323           | 2.445           | 4.540           | 2.206           | 4.606           | 1.631           | 2.600           | 0.892           | 1.454           |                 |                 |  |
| C-5   | 0.519           | 0.875           | 0.951           | 0.094 | 0.955           | 0.417 | 1.706           | 1.235           | 2.776           | 1.932           | 4.240           | 2.280           | 5.363           | 2.474           | 7.022           | 1.190           | 5.208           | 0.513           | 1.250           | 0.385           | 1.006           |  |
| C-6   | 0.284           | 0.707           | 1.227           | 1.000 | 1.686           | 1.321 | 1.103           | 1.388           | 1.507           | 1.541           | 2.205           | 1.282           | 2.773           | 1.828           | 3.143           | 1.326           | 1.915           | 0.573           | 1.059           | 1.303           | 0.380           |  |
| C-8   |                 | 2.901           | 4.945           | 5.282 | 3.436           | 1.513 | 2.500           | 1.411           | 2.394           | 1.916           | 3.348           | 1.987           | 4.812           | 2.279           | 5.643           | 1.89            | 5.387           | 1.799           | 4.915           | 1.762           | 2.443           |  |
| C-9   |                 | 1.446           | 2.012           | 1.366 | 2.498           | 1.707 | 2.691           | 2.035           | 1.255           | 1.445           | 2.364           | 1.247           | 2.389           | 1.202           | 2.964           | 0.895           | 1.619           | 0.354           | 0.859           |                 |                 |  |
| C-11  |                 | 1.119           | 0.490           | 1.727 | 0.922           | 2.106 | 2.141           | 2.672           | 3.101           | 3.940           | 3.063           | 5.727           | 3.202           | 7.291           | 2.038           | 6.014           | 1.122           | 5.383           | 1.004           | 2.806           |                 |  |
| C-12  | 0.026           | 0.346           | 0.604           | 0.157 | 0.467           | 0.602 | 1.581           | 0.985           | 2.838           | 8.895           | 0.460           | 1.701           | 1.450           | 2.078           | 0.917           | 6.590           | 0.294           | 0.142           | 0.048           | 0.034           |                 |  |
| C-13  |                 | 0.439           | 0.675           | 0.719 | 1.263           | 0.830 | 1.617           | 1.663           | 1.601           | 2.102           | 2.896           | 2.200           | 3.878           | 2.294           | 4.613           | 1.716           | 3.243           | 1.061           | 1.785           |                 |                 |  |
| C-14  |                 | 1.000           | 1.438           | 1.376 | 1.916           | 1.104 | 2.124           | 1.755           | 1.735           | 1.218           | 2.191           | 1.184           | 2.371           | 1.548           | 3.426           | 1.477           | 1.974           | 0.787           | 2.005           | 0.391           | 0.091           |  |
| P1    | 0.431           | 0.401           | 0.514           | 0.371 | 2.420           | 0.767 | 2.958           | 4.375           | 1.099           | 1.192           | 2.539           | 0.719           | 2.706           | 0.921           | 3.089           | 0.724           | 1.141           | 0.789           | 1.154           | 0.726           | 0.990           |  |
| P2    | 0.390           | 0.759           | 0.625           | 0.765 | 0.352           | 0.846 | 1.845           | 0.749           | 1.119           | 2.042           | 5.319           | 5.292           | 6.348           | 7.564           | 6.640           | 6.842           | 3.406           | 2.987           | 1.539           | 1.312           |                 |  |
| P3    |                 | 1.558           | 3.099           | 3.835 | 2.505           | 1.135 | 1.926           | 1.392           | 1.419           | 1.340           | 2.881           | 4.460           | 5.330           | 4.834           | 5.330           | 3.049           | 3.515           | 1.557           | 1.916           | 0.641           | 0.505           |  |
| P6630 |                 | 0.882           | 0.745           | 1.705 | 5.420           | 1.204 | 3.205           | 6.633           | 1.454           | 0.635           | 0.988           | 1.883           | 2.874           | 4.039           | 4.360           | 4.076           | 3.800           | 3.738           | 2.415           | 1.757           | 1.526           |  |
| P6700 |                 | 0.618           | 1.324           | 0.406 | 0.854           | 0.750 | 4.640           | 1.609           | 1.746           | 0.664           | 2.372           | 0.814           | 2.687           | 0.504           |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |  |
| P7100 |                 | 0.871           | 1.779           | 1.629 | 2.710           | 2.445 | 3.672           | 3.794           | 4.760           | 3.132           | 5.050           | 3.101           | 6.841           | 2.988           | 8.173           | 2.589           | 6.913           | 1.575           | 4.925           | 0.737           | 1.913           |  |
| P7200 |                 |                 | 0.858           | 0.637 | 1.321           | 1.103 | 1.303           | 1.315           | 1.504           | 1.118           | 2.391           | 1.346           | 4.972           | 4.313           | 7.855           | 4.817           | 8.878           | 4.468           | 7.801           | 2.513           | 3.653           |  |
| P7300 |                 | 2.166           | 3.125           | 3.114 | 3.559           | 3.203 | 1.085           | 4.274           | 2.827           | 3.523           | 3.896           | 2.174           | 4.359           | 1.159           | 2.581           | 2.378           | 2.378           | 1.511           |                 |                 |                 |  |
| P7327 |                 | 0.651           | 0.324           | 0.846 | 0.254           | 1.865 | 1.254           | 2.485           | 1.302           | 1.318           | 1.167           | 1.713           | 1.161           | 1.873           | 0.996           | 2.480           | 0.105           | 1.452           | 0.069           | 1.090           | 0.075           |  |



表 2 楚科奇海、白令海沉积样中正构烷烃分子组成特征指数

| 站位    | 北纬        | 东经         | 碳数范围                  | MH                              | C-18   | $nC_{31}/nC_{17}$ | $nC_{27}/nC_{17}$ | L/H    | CPI   | Pr/Ph | Pr/ $nC_{17}$ | Ph/ $nC_{18}$ |
|-------|-----------|------------|-----------------------|---------------------------------|--------|-------------------|-------------------|--------|-------|-------|---------------|---------------|
| C-1   | 67°29'45" | 170°01'00" | $nC_{16} \sim C_{33}$ | C <sub>20</sub>                 | 5.435  | 1.843             | 1.217             | 2.737  | 1.558 | 0.923 | 0.744         | 0.661         |
| C-2   | 68°00'10" | 170°00'14" | $nC_{16} \sim C_{33}$ | C <sub>18</sub> C <sub>27</sub> | 8.049  | 2.074             | 4.116             | 2.384  | 2.286 | 0.610 | 0.528         | 0.392         |
| C-4   | 69°00'33" | 169°59'19" | $nC_{15} \sim C_{33}$ | C <sub>25</sub>                 | 4.178  | 3.029             | 9.596             | 4.737  | 2.077 | 0.332 | 0.606         | 0.622         |
| C-5   | 69°20'51" | 169°59'01" | $nC_{15} \sim C_{31}$ | C <sub>27</sub>                 | 2.275  | 1.314             | 7.384             | 5.727  | 3.027 | 0.225 | 0.099         | 0.437         |
| C-6   | 69°59'59" | 170°00'38" | $nC_{15} \sim C_{33}$ | C <sub>18</sub> C <sub>27</sub> | 6.424  | 0.829             | 2.461             | 3.072  | 1.904 | 0.759 | 0.785         | 0.784         |
| C-8   | 70°00'34" | 174°59'02" | $nC_{16} \sim C_{33}$ | C <sub>17</sub> C <sub>27</sub> | 6.161  | 0.994             | 1.642             | 2.671  | 2.488 | 3.491 | 1.068         | 0.440         |
| C-9   | 70°29'53" | 175°01'42" | $nC_{16} \sim C_{31}$ | C <sub>19</sub> C <sub>27</sub> | 9.159  | 0.427             | 1.473             | 1.553  | 2.226 | 0.800 | 0.679         | 0.683         |
| C-11  | 71°00'15" | 172°29'17" | $nC_{17} \sim C_{33}$ | C <sub>27</sub>                 | 3.231  | 4.811             | 6.516             | 6.550  | 2.680 |       |               | 0.534         |
| C-12  | 70°39'58" | 170°02'17" | $nC_{16} \sim C_{31}$ | C <sub>19</sub> C <sub>27</sub> | 0.544  | 0.863             | 2.562             | 3.074  | 1.944 | 0.757 | 1.746         | 2.975         |
| C-13  | 70°28'49" | 167°01'13" | $nC_{16} \sim C_{31}$ | C <sub>27</sub>                 | 3.822  | 2.644             | 6.834             | 4.842  | 1.922 | 0.866 | 1.065         | 0.657         |
| C-14  | 71°00'00" | 167°30'35" | $nC_{16} \sim C_{33}$ | C <sub>19</sub> C <sub>27</sub> | 6.692  | 1.394             | 3.426             | 2.478  | 2.088 | 1.246 | 0.957         | 0.576         |
| P-1   | 70°15'15" | 160°00'32" | $nC_{15} \sim C_{33}$ | C <sub>20</sub> C <sub>27</sub> | 8.377  | 2.245             | 6.010             | 1.603  | 2.508 | 0.484 | 0.722         | 0.317         |
| P-2   | 71°40'34" | 159°34'17" | $nC_{16} \sim C_{33}$ | C <sub>20</sub> C <sub>27</sub> | 1.372  | 3.935             | 8.748             | 11.109 | 1.099 | 1.776 | 0.824         | 0.460         |
| P-3   | 72°06'23" | 159°09'02" | $nC_{16} \sim C_{33}$ | C <sub>16</sub> C <sub>33</sub> | 5.301  | 0.618             | 1.720             | 3.509  | 1.316 | 3.379 | 1.238         | 0.453         |
| P6630 | 66°30'09" | 169°52'55" | $nC_{16} \sim C_{33}$ | C <sub>20</sub> C <sub>27</sub> | 10.919 | 3.242             | 5.852             | 1.940  | 1.080 | 1.416 | 2.289         | 0.222         |
| P6700 | 67°00'17" | 169°58'38" | $nC_{16} \sim C_{33}$ | C <sub>19</sub> C <sub>25</sub> | 3.737  | 0.474             | 1.585             | 1.527  | 3.592 | 0.541 | 0.307         | 0.878         |
| P7100 | 70°59'17" | 169°59'28" | $nC_{16} \sim C_{33}$ | C <sub>27</sub>                 | 4.136  | 2.768             | 4.594             | 4.109  | 2.732 | 0.666 | 0.916         | 0.902         |
| P7200 | 70°00'14" | 168°40'16" | $nC_{17} \sim C_{33}$ | C <sub>18</sub> C <sub>29</sub> | 2.186  | 9.092             | 9.155             | 11.597 | 1.995 | 0.558 | 0.742         | 0.835         |
| P7300 | 73°00'21" | 165°03'01" | $nC_{16} \sim C_{29}$ | C <sub>20</sub> C <sub>25</sub> | 8.682  |                   | 0.826             | 1.885  | 1.493 | 0.972 | 0.997         | 0.900         |
| P7327 | 73°26'58" | 165°01'44" | $nC_{15} \sim C_{32}$ | C <sub>19</sub> C <sub>27</sub> | 8.893  | 1.288             | 2.931             | 1.806  | 2.778 | 0.203 | 0.300         | 0.672         |

续表 2

| 站位         | 北纬        | 东经         | 碳数范围                     | MH                              | C-18  | $n_{C_{31}}/n_{C_{17}}$ | $n_{C_{27}}/n_{C_{17}}$ | L/H   | CPI    | Pr/Ph | Pr/ $n_{C_{17}}$ | Ph/ $n_{C_{18}}$ |
|------------|-----------|------------|--------------------------|---------------------------------|-------|-------------------------|-------------------------|-------|--------|-------|------------------|------------------|
| P7327      |           |            |                          |                                 |       |                         |                         |       |        |       |                  |                  |
| 1~2 cm     | 73°26'58" | 165°01'44" | $n_{C_{16}} \sim C_{33}$ | C <sub>18</sub> C <sub>29</sub> | 3.536 | 3.832                   | 1.584                   | 7.566 | 1.264  | 3.017 | 1.079            | 0.370            |
| 7~8 cm     |           |            | $n_{C_{15}} \sim C_{31}$ | C <sub>17</sub> C <sub>27</sub> | 5.768 | 1.628                   | 0.330                   | 2.045 | 1.664  | 1.183 | 0.930            | 0.821            |
| 40~41 cm   |           |            | $n_{C_{16}} \sim C_{31}$ | C <sub>19</sub> C <sub>27</sub> | 5.997 | 1.675                   | 0.274                   | 2.547 | 1.650  | 0.748 | 0.936            | 1.041            |
| 86~87 cm   |           |            | $n_{C_{16}} \sim C_{33}$ | C <sub>19</sub> C <sub>27</sub> | 3.747 | 3.405                   | 0.626                   | 3.368 | 1.651  | 1.243 | 0.730            | 0.465            |
| 107~108 cm |           |            | $n_{C_{15}} \sim C_{33}$ | C <sub>17</sub> C <sub>29</sub> | 5.185 | 2.877                   | 0.906                   | 4.128 | 1.341  | 1.866 | 0.914            | 0.409            |
| 120~121 cm |           |            | $n_{C_{16}} \sim C_{33}$ | C <sub>19</sub> C <sub>29</sub> | 4.942 | 4.438                   | 1.326                   | 4.353 | 1.331  | 0.687 | 0.942            | 0.796            |
| 182~184 cm |           |            | $n_{C_{15}} \sim C_{27}$ | C <sub>18</sub> C <sub>27</sub> | 9.821 | 0.079                   |                         | 0.774 | 1.208  | 1.174 | 0.445            | 1.030            |
| B1-9       | 60°15'42" | 179°25'44" | $n_{C_{15}} \sim C_{33}$ | C <sub>19</sub> C <sub>27</sub> | 2.522 | 1.398                   | 6.006                   | 2.444 | 1.792  | 0.497 | 0.478            | 1.101            |
| B1-11      | 61°31'40" | 178°44'09" | $n_{C_{17}} \sim C_{32}$ | C <sub>27</sub>                 | 2.821 | 4.782                   | 5.662                   | 3.192 | 1.817  | 0.635 | 0.623            | 0.813            |
| B1-12      | 60°39'51" | 178°13'34" | $n_{C_{15}} \sim C_{33}$ | C <sub>19</sub> C <sub>27</sub> | 4.156 | 1.284                   | 6.839                   | 2.607 | 2.240  | 0.468 | 0.461            | 0.438            |
| B2-9       | 59°17'32" | 178°41'50" | $n_{C_{16}} \sim C_{31}$ | C <sub>27</sub>                 | 3.145 | 1.592                   | 6.009                   | 4.932 | 2.392  | 2.013 | 1.008            | 0.382            |
| B2-10      | 59°29'00" | 178°27'00" | $n_{C_{16}} \sim C_{33}$ | C <sub>22</sub>                 | 1.478 | 0.268                   | 0.528                   | 0.941 | 1.340  | 0.931 | 0.107            | 0.071            |
| B2-11      | 59°33'08" | 178°10'50" | $n_{C_{16}} \sim C_{31}$ | C <sub>20</sub> C <sub>25</sub> | 5.685 | 0.688                   | 2.807                   | 2.604 | 2.224  | 0.630 | 0.893            | 1.044            |
| B2-12      | 59°42'57" | 177°50'45" | $n_{C_{14}} \sim C_{30}$ | C <sub>20</sub>                 | 7.586 |                         | 0.637                   | 1.418 | 1.346  | 0.587 | 0.688            | 0.973            |
| B2-3       | 57°38'01" | 179°21'22" | $n_{C_{16}} \sim C_{33}$ | C <sub>19</sub> C <sub>27</sub> | 3.660 | 2.798                   | 1.233                   | 3.952 | 2.5080 | 1.516 | 1.156            | 0.683            |
| B5-9       | 58°34'13" | 175°58'56" | $n_{C_{15}} \sim C_{33}$ | C <sub>17</sub> C <sub>25</sub> | 5.609 | 0.236                   | 0.705                   | 1.764 | 1.214  | 1.551 | 0.230            | 0.214            |

注:MH为主峰碳;L/H为低与高分子量的正烷烃比值[ $C_{21-39}/C_{15-20}$ ];奇偶优势[ $C_{21-33}$ ];Pr/Ph为姥鲛烷/植烷;C-18为 $C_{18}$ 烷烃占所有烷烃总量的值。

#### 4.1.2 陆源和海洋内生混合类型(双峰群,图 2b)

正构烷烃分布呈双峰型,表明原始有机质中水生生物和陆源物两者共存<sup>[8]</sup>。双峰群色谱图具有两个明显差异,一是居后高碳烃峰群占优势,主峰碳为  $nC_{25} \sim nC_{29}$ ,具有奇偶优势;二是在前低碳烃峰群占优势,主峰碳为  $nC_{18} \sim nC_{21}$ ,不具明显奇偶优势。居后高碳烃优势峰群型的楚科奇海代表站 P1, P2, P3, C- 2, C- 6, C- 8, C- 9, C- 14 和白令海代表站 B1- 9, B1- 12, B2- 3, 正构烷烃分布偏向高碳数一边,占优势的高碳烃主峰碳为  $nC_{25}$ ,  $nC_{27}$  和  $nC_{29}$ ; 低碳烃主峰碳为  $nC_{18}$ ,  $nC_{21}$ , 其中楚科奇海 C- 2, C- 9, P2 站位正构烷烃在  $nC_{17} \sim nC_{22}$  之间,呈现锯齿状奇偶优势分布,具有这种双峰群类型可认为是以陆源有机质输入为主体。前低碳烃优势型代表站位 P6630, P6700 和正构烷烃分布偏向低碳数一边,占优势的前低碳烃主峰碳为  $nC_{17}$ ,  $nC_{18}$  和  $nC_{19}$ ; 后高碳烃主峰碳为  $nC_{27}$ ,  $nC_{29}$ , 不具明显奇偶优势,并且以海洋来源占据优势地位。这些具有双峰群类型的站位充分显示了陆源和水生生物共存特征,其浓度主要是这两者来源的综合结果。这两种双峰型特征的站位尽管在浓度值上较接近,但其来源上有很大的差异,这种差异主要是由温度引起的,它们处于特殊地理位置,受到北太平洋暖流影响,致使这些在极圈内的测站温度比较高,其中 P6630 站实测水温接近  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。众所周知,海洋生物和陆地植物均能合成烃类化合物,海洋生物活动的释放物或者由于死亡分解形成烃类,外源性有机质则为流域湖泊输入,最后沉降进入沉积物中。另外,海洋生物虽也能生成奇碳烃类,但尚属于低分子量  $nC_{15}$ ,  $nC_{17}$  和  $nC_{19}$  烃。

#### 4.1.3 低等浮游生物(包括细菌和藻类)贡献类型(单峰型,见图 2c)

正构烷烃分布偏向前低碳烃一边,前低碳烃优势于后高碳烃,海区代表站 B2- 10, B2- 12 为前低碳烃占优势,主峰碳为  $nC_{20}$  和  $nC_{22}$ ,呈偶碳优势,是菌藻生物来源的可靠指标。Johnson 等<sup>[9]</sup>认为微生物降解对偶碳的形成有重要作用,它们这样的特征与海相某些低等浮游生物和藻类生物来源的正构烷烃分布特点是相一致的<sup>[10, 11]</sup>。

#### 4.1.4 油类污染类型(单峰型,不具奇偶优势,见图 2d)

代表站 B5- 9 正构烷烃以主组分为主,呈序列排列,样品气相色谱图有“色谱不能分辨”(UCM)组分,呈现典型的原油污染特征。Mazurek<sup>[12]</sup>采用不可分离  $U$  / 完全分离  $R$  比值评估油污染程度,以  $U/R < 4$  表示轻度污染,如  $U/R > 4$  表示严重污染。因此,根据正构烷烃气相色谱图分布曲线形状和奇偶优势指数  $CPI (C_{21} \sim C_{33})$  接近 1,间接表明了沉积物已在一定程度上受到石油烃沾污。

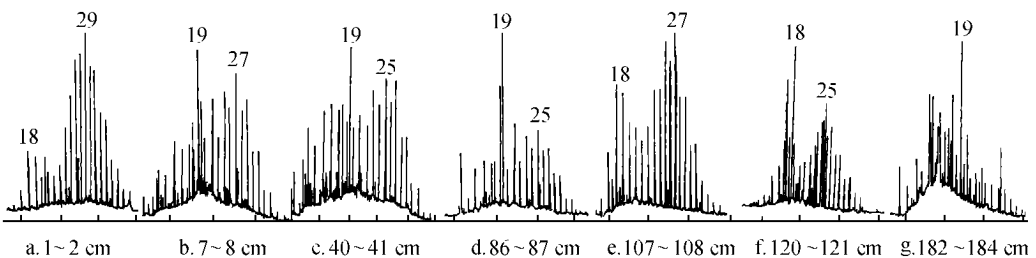


图 3 柱状样 P7327 各层位正构烷烃气相色谱

楚科奇海 P7327 站位柱状样的正构烷烃分布在各层序上呈现出双峰型(图 3),柱状样顶



端(0~1 cm)碳数大都集中分布在  $nC_{23} \sim nC_{29}$  之间, 后高碳烃主峰碳为  $nC_{27}$ ,  $nC_{29}$ , 前低碳烃主峰碳为  $nC_{17}$ ,  $nC_{18}$ , 后者含量明显比前者的低, 高碳烃主要来源于陆源高等植物, 而低碳烃一般来自海洋内生、海洋藻类和不同类型的微生物. 随着深度增大烷烃分子组成明显起了变化, 现代沉积物和古代沉积物的烃类在种类和结构上均有明显差别, 由谱图可以直观看出, 柱状样(0~1 cm)属现代沉积物中以重质正构烷烃分布, 奇数碳原子的分子占优势, 反映了以陆源高等植物为主. 随着埋藏深度增加, 沉积过程中沉积物成熟度亦增加, 双峰型正构烷烃的分布特征由重质烷烃占优势逐渐转向轻质碳一边, 重、轻烃比值为  $H/L$  ( $C_{21-23}/C_{15-20}$ ) 由 7.566 降低到 0.774, 奇数碳原子的分子含量大大减少, 在柱状样年代最早期层位(184~188 cm),  $CPI$  值已接近 1 (为 1.110), 并由双峰型转化为单峰型,  $nC_{17} \sim nC_{19}$  的丰度大大增加, 峰型偏向低碳烃一边, 主峰碳为  $nC_{19}$ , 从  $nC_{28}$  以上的重质碳则完全消失, 可以推测低碳数生物有机质在最初期演化阶段发生了剧烈的变化. P7237 站位柱状样中正构烷烃在地质体内由重烃到轻烃的变化, 经历了一个复杂而漫长的过程. 本研究仅仅探讨了有机质在地质沉积最初阶段(184~188 cm)的变化. 以上烷烃组分中除了正构烷烃外, 异戊二烯类化合物姥鲛烷(Pr)和植烷(Ph)均检出.

#### 4.2 分子组成的某些特征指数

楚科奇海和白令海 4 种类型样品的正构烷烃用分子组成指数见表 2. Clark 和 Tran<sup>[13, 14]</sup> 应用  $MH$  (主峰碳)、 $CPI$  奇偶碳优势指数 ( $C_{21-33}$ )、 $H/L$  比值 (高碳数烃/低碳数烃  $C_{21-33}/C_{15-20}$ )、Pr/Ph 等 8 个分子组成特征参数来研究有机质来源及分辨生物源和陆地源, 以及石油烃污染成因的烃类, 本文也试图用这些参数对楚科奇海和白令海表层沉积物和柱状样加以讨论. 在标志物参数中包括的  $MH$ ,  $CPI$ ,  $H/L$  比值,  $C_{18}$  比值 (正构烷烃总量与  $nC_{18}$  正烷烃的比值), 各组成特征指数见表 3.

表 3 全球不同海域沉积物的 Pr/Ph 值比较

| 地 区                  | Pr/Ph     | Pr/ $nC_{17}$ | Pr/ $nC_{18}$ |
|----------------------|-----------|---------------|---------------|
| 北极楚科奇海(极圈内)          | 1.09      | 0.81          | 0.61          |
| 亚北极白令海(亚极圈内)         | 0.89      | 0.77          | 0.99          |
| 南极半岛西北部海域            |           |               |               |
| 第 1 类: 海沟、洋盆、极圈内     | 1.03      | 0.50          | 0.55          |
| 第 2 类: 水体较浅陆架沉积物     | 0.35~0.70 | 0.30~0.40     | 0.46~0.53     |
| 南海                   |           |               |               |
| SO-50-29K(22~50 cm)  | 1.56      | 0.76          | 0.62          |
| SO-50-37KL(0~22 cm)  | 2.36      | 0.61          | 0.34          |
| SO-50-91KL(0~100 cm) | 1.13      | 0.87          | 0.62          |
| 东海                   |           |               |               |
| 8103 站               | 0.66      | 0.92          | 1.10          |
| 8134 站               | 0.21      | 0.65          | 0.95          |
| 8135 站               | 0.34      | 0.58          | 0.78          |
| 8138 站               | 0.42      | 0.62          | 0.85          |

(1)  $MH$  主峰碳是以正构烷烃系列中含量最高的正烷烃碳数来代表的. 研究表明, 不同类型的微生物产生的主要烷烃类型不同, 其中具有第 1 类型谱图的样品(单峰型)由于以

$nC_{25}$ ,  $nC_{27}$ 和  $nC_{29}$ 为主峰碳, 奇偶优势显著, 该类样品以外源性的陆地高等植物为其正烷烃的主要输入源; 具有第2类谱图(双峰型)特征是以海洋藻类和陆源物为主来源的正构烷烃, 前主峰碳为  $nC_{17} \sim nC_{20}$ , 后主峰碳为  $nC_{25} \sim nC_{27}$ , 如前主峰碳占优势, 则以海洋内生为主, 反之, 后主峰碳占优势, 则以陆源为主, 但是谱图中前主峰碳优势在石油轻烃主峰碳中也有出现( $nC_{17} \sim nC_{19}$ )<sup>[10]</sup>, 所以不能完全排除石油烃如燃料油的贡献, 从而降低陆源高等植物的贡献; 具有第3类谱图特征的样品由于主峰碳在  $nC_{18}$ ,  $nC_{20}$ , 偶碳优势, 应以低等生物菌藻为主要物源。

(2) *CPI* 奇偶碳优势指数表示奇碳分子与偶数碳分子含量的比值, 楚科奇海 P6630 站位和白令海 B5-9 站位的 *CPI* 值虽然均接近 1, 但前者以海洋内生为主, 不具有奇偶优势, 而后者谱图形状呈现明显“色谱不能分辨”组分, 为外源性油类污染, 其他考察站的 *CPI* 值大都在 2~3 左右, 高 *CPI* 值反映了陆源有机质的贡献, 高等植物成为类脂物的重要来源, 正构烷烃是由许多有生命的有机质综合而成的, 与天然蜡有很大的相似性<sup>[15]</sup>。

(3) *H/L* 表示高分子烃与低分子烃之比, 也是一项物源指标, 低的分子量化合物来自海洋生物, 而高的分子量来源于维管植物等陆生物质。本文沉积样中正构烷烃的高分子量烷烃绝对优势于低分子量烷烃。

上述地球化学要素指标表明楚科奇海和白令海正构烷烃来源于陆源有机质和海洋内生两个部分, 但以陆源贡献为大, 与事实相吻合。北极四周被陆地所围, 与南极相比, 离人类社会较近, 易受到陆源物质和人类活动的影响, 同时北极的高纬高寒限制了海洋生物的生长和发育。

#### 4.3 古沉积环境

$Ph/Pr$ (姥鲛烷/植烷) 比值, 它们与相邻正烷烃的比值  $Pr/nC_{17}$ ,  $Ph/nC_{18}$ , 可作为对比指标及化合物的微生物降解标志<sup>[16,17]</sup>, 也可用于古沉积环境的研究, 而  $Pr/nC_{17}$ 和  $Ph/nC_{18}$ 还可以用于判别沉积母质, 因此它们是重要的化合物指纹标志值。

姥鲛烷(2, 6, 10, 14-四甲基十五烷)和植烷(2, 6, 10, 14-四甲基十六烷)来源于一些特殊的生物体, 作为姥鲛烷和植烷的先驱者叶绿素的植醇普遍存在于自然界中, 由植醇侧链衍生而来, 而且比较稳定, 抵抗微生物侵蚀能力强于正烷烃, 故而  $Pr/Ph$  比值被广泛用作古环境指标。在还原条件下植醇会发生还原, 加氢后经脱水而转化成植烷, 在氧化条件下, 植醇氧化脱羧基转化成姥鲛烷<sup>[21]</sup>。在还原环境中植烷占优势, 而在氧化或弱氧化的环境中则以姥鲛烷为主, 因此  $Pr/Ph$  高, 反映了偏氧化的古环境, 而低值则表现为还原环境, 并且环境的酸碱度也会影响植醇的转化, 在酸性环境中有利于姥鲛烷的生成, 而在偏碱性环境下则易形成植烷, 所以沉积有机质中  $Pr/Ph$  相对含量可标志原始有机质成岩转化环境。一般认为  $Pr/Ph < 1.000$  是指示缺氧还原沉积环境, 而  $Pr/Ph < 1.000$  则是氧化条件<sup>[18]</sup>, 无疑楚科奇海 C-8, P3, P6630 站位和白令海 B2-9, B5-9 站位的  $Pr/Ph$  比值在 1.416~3.379 之间, 均指示了沉积物具有较强的氧化性, 而 C-14 站位的沉积阶段处于弱氧化或弱还原环境, 楚科奇海和白令海域大部分站位的  $Pr/Ph$  比值均  $< 1.000$ , 还原性较强的是楚科奇海 P7230 和 C-5 站位,  $Pr/Ph < 0.25$ , 指示了缺氧还原沉积环境, 其中楚科奇海 C-1, C-11, P7300, C-13, C-9 站位的  $Pr/Ph$  值虽依次增大, 但可以说以上站位仍属弱还原或弱氧化沉积阶段。

柱状样 P7327 站位各层位的  $Pr/Ph$  比值, 在顶端(0~1 cm)为 3.017, 远大于 1.00, 表明沉积物处于强氧化沉积环境, 烷烃分子组成结构变化幅度较大, 说明了柱状样中有机质经历了演化的过程, 随着深度的增加,  $Pr/Ph$  比值呈减小趋势。在较早年代层位(184~188 cm),  $Pr/Ph$

比值下降为 1.174, 接近 1.000, 表明沉积样处于还原条件下, 植醇或植烷大多保持原状, 地质体中没有有利于氧化或脱羧的条件, 极少形成姥鲛烷。尽管这种解释有待进一步探讨, 但是有一点十分明确, 即在有机质演化初期, 植烷出现在姥鲛烷之前, 随着深度增加长链烃向短链转化, 其中微生物细菌降解起到主导作用。

表 4 是全球不同海域沉积物的 Pr/Ph 值比较, 北极圈内的平均 Pr/Ph 比值比亚极圈内稍高一些。北极楚科奇海和白令海表层沉积样 Pr/Ph 比值与南极、我国南海、东海沉积物中比较, 南极样中第 1 类为海沟、洋盆和极圈以内样品, 以姥鲛烷占优势, 另一类是水体较浅的陆架沉积物, 以植烷为主, 具有相对较强的还原性。东海沉积物属于还原环境, 而南海沉积物受南海深层水团的氧化特性的影响, 海域内沉积物具有较强的氧化性<sup>[19]</sup>。

表 4 正构烷烃主因子分析因子载荷矩阵

| 组分              | 主 因 子  |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                 | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      |
| C <sub>16</sub> | -0.058 | 0.318  | 0.020  | 0.000  | -0.116 | -0.036 | 0.021  | -0.140 |
| C <sub>17</sub> | -0.057 | 0.352  | 0.058  | -0.023 | -0.277 | -0.004 | -0.050 | 0.016  |
| PR              | -0.051 | 0.302  | 0.034  | 0.078  | -0.119 | -0.117 | -0.027 | 0.074  |
| C <sub>18</sub> | -0.003 | 0.105  | 0.013  | 0.042  | 0.330  | -0.160 | 0.065  | -0.125 |
| C <sub>19</sub> | 0.025  | -0.069 | -0.010 | -0.006 | -0.056 | -0.077 | 0.969  | 0.045  |
| C <sub>20</sub> | 0.005  | -0.158 | -0.024 | 0.067  | 0.699  | -0.066 | -0.011 | -0.039 |
| C <sub>21</sub> | 0.016  | -0.061 | 0.016  | -0.125 | -0.056 | 0.705  | -0.017 | -0.040 |
| C <sub>22</sub> | -0.044 | 0.012  | -0.010 | 0.393  | 0.093  | 0.069  | -0.108 | -0.056 |
| C <sub>23</sub> | -0.050 | -0.032 | 0.023  | 0.680  | 0.022  | -0.319 | 0.027  | -0.080 |
| C <sub>24</sub> | 0.331  | -0.022 | -0.260 | -0.081 | -0.028 | 0.125  | 0.058  | 0.002  |
| C <sub>25</sub> | 0.239  | -0.035 | -0.116 | -0.058 | -0.107 | 0.228  | 0.117  | 0.042  |
| C <sub>26</sub> | 0.258  | -0.038 | -0.128 | -0.038 | 0.036  | -0.057 | 0.007  | 0.018  |
| C <sub>27</sub> | 0.154  | -0.054 | 0.027  | 0.026  | -0.095 | 0.096  | 0.149  | -0.055 |
| C <sub>28</sub> | 0.216  | -0.021 | -0.072 | -0.078 | 0.130  | -0.060 | -0.123 | -0.011 |
| C <sub>29</sub> | -0.013 | -0.020 | 0.205  | 0.258  | -0.020 | -0.149 | -0.049 | -0.105 |
| C <sub>30</sub> | 0.106  | -0.008 | 0.070  | -0.071 | 0.197  | -0.118 | -0.140 | -0.041 |
| C <sub>31</sub> | -0.102 | 0.030  | 0.324  | -0.027 | -0.143 | 0.080  | 0.054  | 0.020  |
| C <sub>32</sub> | -0.088 | 0.029  | 0.304  | -0.060 | 0.095  | -0.106 | -0.111 | -0.041 |
| C <sub>33</sub> | -0.178 | 0.008  | 0.406  | 0.007  | -0.054 | 0.055  | 0.055  | -0.068 |

Pr/nC<sub>17</sub>和 Ph/nC<sub>18</sub>值可判别沉积母质, 在腐泥型沉积母质中 Pr/nC<sub>17</sub>较低, 而 Ph/nC<sub>18</sub>相对较高, 考察调查站 B2-10 和 B1-9 正好符合这种情况, 可以推断它们属泥型沉积物。在腐泥型或泥炭-沼泽的沉积环境中, 环境的 pH 值 < 5, 呈酸性, 有腐植酸和酚等有毒物质存在, 使环境中大量亲氧细菌的活动受到限制, 而厌氧细菌活跃起来, 大部分植醇经微生物作用变为植烷酸, 植烷酸在热成岩作用下脱羧变成姥鲛烷, 致使 Pr/nC<sub>17</sub> > 1.000。

## 5 主因子分析

Show 和 Hvosleff 等<sup>[20, 21]</sup>将因子分析应用于生物标志化合物的数据处理中, 以确定化合

物的生源、母质和区别陆源和海洋组成。

本项目研究对纷繁的原始数据采用了 R 型和 Q 型因子分析, Q 型是从相似系数矩阵出发, 而 R 型则是从相关系数矩阵出发, 尽管两者出发点不同, 运算过程则是一样的, 都是在寻找一些起支配作用的独立因子, 用以表达可观察的原始数据. 对 29 个站位的表层沉积样中正构烷烃的 21 种组分和 8 种分子组成特征参数, 分别进行了 Q 型和 R 型的因子分析, 结果见表 4 正构烷烃主因子分析载荷矩阵, 表中列出了 8 个主要因子的载荷矩阵. 选择了 Varimax 方法即方差最大正交旋转. 指定正交旋转, 显示旋转后的因子矩阵模式图(图 4), 可看出, 前 4 个主要因子分别对一部分组分起着主要的作用. 正构烷烃各组分经旋转后因子得分信息见表 5. R 型前 4 个因子占有所有变量可能提供 69.649%, 其中第 1 因子( $F_1$ ) 占 25.222%,  $F_2=18.161%$ ,  $F_3=17.164%$ ,  $F_4=9.103%$ . 所给出的主因子载荷散点图(图 4 a), 明显地将正构烷烃分为高碳数、中等碳数和低碳数. 高碳烃正构烷烃来源于陆源高等植物的输入. 中等碳烃可能与细菌输入有关, 而低碳烃则来自低等生物藻类, 显然主因子所代表的机地球化学意义是物源的输入. 图 4 b 表现出正构烷烃各组分在旋转载荷散点立体图上, 偶数碳与奇数碳分开, 显然这一主因子表征正构烷烃分布的奇偶优势, 它反映了样品的沉积环境, 并提出了整个变量可供信息的百分比.

表 5 正构烷烃因子贡献(得分信息)

| 主因子 | 正交载荷的提取总数 |        |         | 正交载荷的旋转总数 |        |        |
|-----|-----------|--------|---------|-----------|--------|--------|
|     | 总计        | 变化(%)  | 累积(%)   | 总计        | 变化(%)  | 累积(%)  |
| 1   | 8.139     | 38.756 | 38.456  | 5.297     | 25.222 | 25.222 |
| 2   | 4.362     | 20.773 | 59.529  | 3.814     | 18.161 | 43.382 |
| 3   | 2.209     | 10.520 | 70.049  | 3.604     | 17.164 | 60.547 |
| 4   | 1.742     | 8.296  | 778.345 | 1.912     | 9.103  | 69.649 |
| 5   | 1.014     | 4.827  | 83.172  | 1.640     | 7.810  | 77.459 |
| 6   | 1.000     | 4.760  | 87.931  | 1.507     | 7.175  | 84.634 |
| 7   | 0.763     | 3.634  | 91.565  | 1.050     | 4.998  | 89.632 |
| 8   | 0.618     | 2.942  | 94.506  | 1.024     | 4.874  | 94.506 |

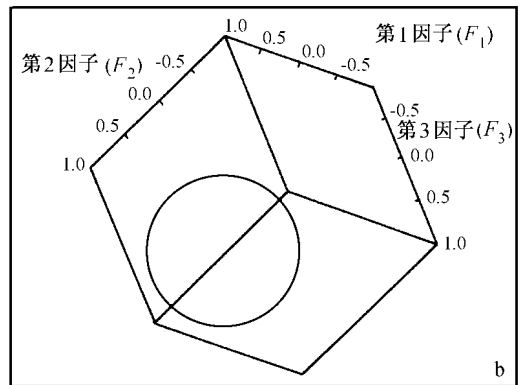
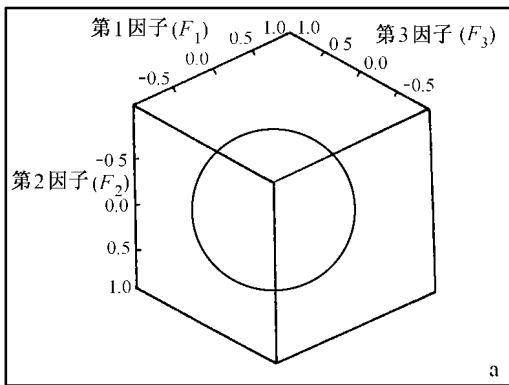


图 4 主因子旋转载荷矩阵

为了更清楚地观察变量(分子组合特征指数)间的关系,对表2进行R型因子分析,其因子载荷矩阵如表6,前4个主因子占全部信息的76.294%,其中 $F_1 = 27.485%$ ,  $F_2 = 17.667%$ ,  $F_3 = 15.857%$ ;  $F_4 = 15.284%$ (表7).

表6 分子组合特征参数主因子分析因子载荷矩阵

| 分子组成<br>特征参数      | 主因子    |        |        |        |        |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                   | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      |
| $C_{18}$          | 0.093  | -0.041 | -0.091 | 0.791  | -0.003 |
| $nC_{31}/nC_{17}$ | 0.436  | -0.135 | 0.012  | 0.102  | -0.258 |
| $nC_{27}/nC_{17}$ | 0.414  | -0.045 | -0.038 | 0.228  | 0.340  |
| $H/L$             | 0.302  | 0.120  | -0.057 | -0.226 | -0.019 |
| $CPI$             | -0.031 | 0.219  | 0.024  | 0.012  | 0.907  |
| $Pr/Ph$           | -0.142 | 0.725  | -0.197 | -0.197 | 0.153  |
| $Pr/nC_{17}$      | 0.197  | 0.491  | 0.436  | 0.392  | 0.131  |
| $Ph/nC_{18}$      | -0.090 | -0.099 | 0.740  | -0.160 | -0.019 |

表7 分子组合特征参数主因子得分信息

| 主因子 | 正交载荷的提取总数 |        |        | 正交载荷的旋转总数 |        |        |
|-----|-----------|--------|--------|-----------|--------|--------|
|     | 总计        | 变化(%)  | 累积(%)  | 总计        | 变化(%)  | 累积(%)  |
| 1   | 2.494     | 31.172 | 31.172 | 2.199     | 27.485 | 27.482 |
| 2   | 1.858     | 23.228 | 54.400 | 1.413     | 17.667 | 45.152 |
| 3   | 1.271     | 15.890 | 70.291 | 1.269     | 15.857 | 61.010 |
| 4   | 0.917     | 11.464 | 81.755 | 1.223     | 15.284 | 76.294 |
| 5   | 0.732     | 9.146  | 90.901 | 1.169     | 14.608 | 90.901 |

由分子组成特征参数载荷矩阵三维立体散点图看,用 $nC_{31}/nC_{17}$ ,  $nC_{27}/nC_{17}$ ,  $H/L$ ,  $Pr/Ph$ ,  $C_{18}$ 表征(图5a). 一般认为 $nC_{31}/nC_{17}$ ,  $nC_{27}/nC_{17}$ ,  $H/L$ 反映了高等植物的输入,而 $Pr/Ph$ ,  $C_{18}$ 则反映来自海洋细菌,因此以 $nC_{31}/nC_{17}$ ,  $nC_{27}/nC_{17}$ ,  $Pr/Ph$ ,  $C_{18}$ 表征来解释为物质输入是合理的, $C_{18}$ 某种程度上可反映海洋自生,但在这里则贡献不大.

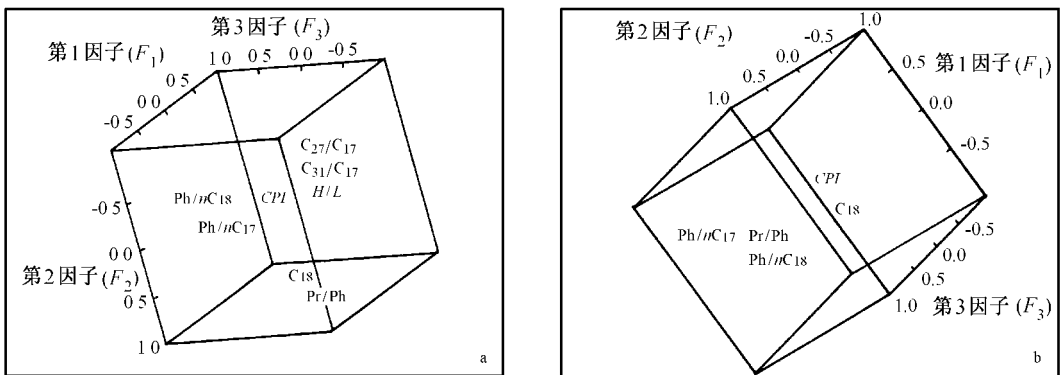


图5 分子组成特征参数主因子旋转载荷矩阵

图 5b 为分子组成特征参数主因子旋转载荷散点图, 组合表征了 Pr/Ph, Pr/ $nC_{17}$ , Ph/ $nC_{18}$ , Pr/Ph 能较好表明沉积物的氧化还原环境, 在氧化条件下植醇氧化脱羟基生成姥鲛烷, 而在还原条件下植醇还原成植烷, 因此可以用 Ph/ $nC_{18}$  值, Pr/ $nC_{17}$ , Pr/Ph 表征来解释氧化还原程度。

## 6 结论

(1) 北极楚科奇海和亚北极地区白令海沉积物中正构烷烃碳数分布范围大多在  $C_{15} \sim C_{33}$  之间。气相色谱图呈现单峰型和双峰型, 居后高碳烃主峰碳为  $nC_{25} \sim nC_{27}$ , 前低碳烃主峰碳为  $nC_{17} \sim nC_{20}$ ,  $CPI > 1.000$ , 具奇偶优势,  $H/L$  轻、重烃比值  $> 1.000$ , 指示了正构烷烃来源于陆源有机质和海洋内生两个部分, 而前者的贡献远大于后者。

(2) 楚科奇海和白令海绝大多数沉积物中 Pr/Ph  $< 1.000$ , 指示了考察区大部分测站为缺氧还原沉积环境。

(3) 运用多元统计分析结果与样品正构烷烃不同分子组成特征参数研究结果相互对应。

承蒙中国首次北极全体考察队员和专家所提供采集的沉积样品以及提供的温盐数据, 在此深表感谢。

## 参考文献:

- [1] WAKEHAM S G, GARPENTER R. Aliphatic hydrocarbons in sediments of Lake Washington[J]. *Limnol Oceanogr*, 1976, 21(5): 711—723.
- [2] TRAN K, YU C C, ZENG E Y. Petrogenic and biogenic sources of *n*-alkanes off San Diego[B]. California SCCWRP Annual Report[R], 1994. 95.
- [3] 成玉, 盛国英, 闵育顺, 等. 香港气溶胶烃类物质组成分布及来源初探[J]. *地球化学*, 1997, 26(3): 45—53.
- [4] LU Bing, ZHU Guohai, ZHENG Shilong. Geochemical characteristic of hydrocarbon compounds in the Hangzhou Bay. *Acta Oceanologica Sinica*[J], 1993, 12(1): 115—133.
- [5] LU Bing, TANG Yunqian, YE Xinrong. Distribution features of dissolved hydrocarbons in water mass of the Changjiang Estuary[A]. *Biogeochemical Study of the Changjiang Estuary*[M]. Beijing: China Ocean Press, 1988. 759—772.
- [6] WANG Z, FINGAS M, SERGY G. Chemical characterization of crude oil residues from an Arctic Beach by GC/MS and GC/FID[J]. *Environ Sci Technol*, 1995, 29(10): 2622—2631.
- [7] SALAU J S I, TAULER R, BAYONA T M, et al. Characterization of sedimentary organic contaminants and molecular marker in the northwestern Mediterranean Sea by exploratory data analysis[J]. *Environ Sci Technol*, 1997, 31(12): 3482—3490.
- [8] 丁雅秋. 关于我国东部某些现代沉积物正构烷烃与物质来源的讨论[J]. *石油与天然地质*, 1985, 6(1): 96—102.
- [9] JOHNSON R W, CALDER J A. Early diagenesis of fatty acids and hydrocarbons in a salt marsh environment[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1973, 37: 1943—1956.
- [10] LIJMHACH G W M. On the Origin of Petroleum[A]. *Proc 9th WPC Special Paper II*[C]. London: Applied Science Publishers, 1975. 357—369.
- [11] 吴庆余, 章冰, 宋一清, 等. 水解和细菌降解作用对小球藻热模拟烷烃生物标志物的影响[J]. *科学通报*, 1998, 43(1): 76—80.
- [12] MAZUREK M A, SIMONEIT B R T. Characterization of biologic and petroleum-derived organic matter in aerosols over remote rural and urban areas in identification and analysis of organic pollutants in air[A]. Keith L H. *Ann Arbor Science* [M] Boston: Butterworth Publisher, 1984. 353—370.
- [13] CLARK R C, BLUMER M. Distribution of *n*-paraffins in marine organisms and sediment[J]. *Limnol Oceanogr*, 1967,

12: 79—87.

- [14] 吴莹, 张经, 唐运千. 南海表层沉积物中有机物分布研究[J]. 热带海洋, 1998, 17(3): 43—51.
- [15] 黄弟藩. 陆相有机质演化和成烃机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984.
- [16] 王启军, 陈建渝. 油气地球化学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988. 99—108, 283.
- [17] 阿特拉斯 B A. 石油微生物学[M]. 黄弟藩, 谭实, 杨文宽等译. 北京: 石油工业出版社, 1991. 1—37.
- [18] VOLKMAN J K, MAXWELL J R. Acyclic isoprenoids as biological markers[A]. Jonts R B. Biological Markers in the Sedimentary Record[M]. New York: Elsevier Publishers, 1986. 1—42.
- [19] TANG Yuan-qian, LIU Ke-nen. Identification of biomarkers of cores from the South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1995, 14: 23—37.
- [20] SHAW P M, JOHNS R B. The identification of organic input sources of sediments from the Santa Catalina Basin using factor analysis[J]. Org Geochem, 1986, 10: 951—958.
- [21] RADKE M, RULKÖTTER J, WRIEND S P. Distribution of naphthalenes in crude oils from the Java Sea: source and maturation effects[J]. Geochim Cosmochim Acta, 1994, 58: 3 675—3 689.

## The composition indexes of *n*-alkanes in sediments and study on paleoenvironment in the Arctic

LU Bing<sup>1,2</sup>, PAN Jian-ming<sup>1,2</sup>, WANG Zi-pan<sup>1</sup>, CHEN Rong-hua<sup>1</sup>, LU Dou-ding<sup>1</sup>, YE Xi-rong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Submarine Geoscience of State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China; 2. Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** Concentrations and different distribution patterns of *n*-alkanes in sediments from the Chukchi Sea and Bering Sea in the Arctic are reported. Factor statistical analysis method is used to study the contaminated source of *n*-alkanes and paleoenvironment. The result shows that *n*-alkanes is in the range of  $nC_{15} \sim nC_{33}$ , *n*-alkane distribution patterns are characterized by two modes. The first mode with high molecular range for  $nC_{25} \sim nC_{27}$  being *MH* and *CPI* > 1 indicates the abundances of terrigenous plant origin. The second mode with low carbon range for  $nC_{17} \sim nC_{20}$  being *MH* and *CPI* > 1 shows that it had more marine biological inputs. The contribution of terrigenous origin is the larger one, with *Pr/Ph* > 1 of the depositional environment, which has strong reducing action. The result of factor analysis is in correspondence with composition indexes of *n*-alkanes in the sediment.

**Key words:** the Arctic; *n*-alkanes; factor analysis; paleoenvironment