

# 中国典型湖泊沉积物中脂肪烃的分布特征及来源

房吉敦<sup>1,3,4</sup>, 吴丰昌<sup>2\*</sup>, 熊永强<sup>3</sup>, 王丽芳<sup>1</sup>, 李 芸<sup>3</sup>

1. 中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002
2. 中国环境科学研究院, 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012
3. 中国科学院广州地球化学研究所, 有机地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640
4. 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要:** 以我国 13 个典型湖泊的表层沉积物为研究对象, 对沉积物的  $w(\text{TOC})$  和  $w(\text{TN})$  的分布特征进行了报道. 结果显示, 西南、华南地区湖泊沉积物的  $w(\text{TOC})$  和  $w(\text{TN})$  要高于西北地区, 华东地区湖泊沉积物最低. 结合多个脂肪烃来源参数, 初步探讨了 13 个典型湖泊表层沉积物中脂肪烃的分布特征及来源. 结果表明: 湛江玛珉湖、四海龙湾、洱海、红枫湖和程海受脂肪烃污染严重, 鄱阳湖和双塔水库受脂肪烃污染程度最轻; 受水体高矿化度的影响, 双塔水库沉积物中有机质的  $\delta^{13}\text{C}$  值明显偏正; 湛江玛珉湖中来自自身固氮藻类的脂肪烃含量明显高, 致使湛江玛珉湖沉积物的  $\delta^{15}\text{N}$  值明显低; 由于四海龙湾特殊的地理环境, 四海龙湾沉积物中来自陆源木本植物的  $w(\text{C}_{27} + \text{C}_{29})$  明显高.

**关键词:** 湖泊沉积物; 脂肪烃; 分布特征; 来源

**中图分类号:** X524      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6929(2010)10-1243-07

## Distribution Characteristics and Origins of Aliphatic Hydrocarbons in Sediments from Typical Lakes in China

FANG Ji-dun<sup>1,3,4</sup>, WU Feng-chang<sup>2</sup>, XIONG Yong-qiang<sup>3</sup>, WANG Li-fang<sup>1</sup>, LI Yun<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China
2. State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Research Center of Lake Eco-Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China
3. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China
4. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The surface sediments from thirteen typical lakes in China were investigated, and the distribution characteristics of the contents of TOC and TN are presented. The contents of TOC and TN in lake sediments from southwest and southern areas of China are higher than those from northwest areas. The lowest content values are in lake sediments from eastern areas. Combining a few hydrocarbon origin parameters, the distribution features and sources of hydrocarbons in surface sediments from the thirteen typical lakes are discussed. The results show that Zhanjiang Maar Lake, Sihailongwan Lake, Erhai Lake, Hongfeng Lake and Chenghai Lake have been heavily polluted by hydrocarbons. Poyang Lake and Shuangta Reservoir have the lightest polluted water. Because of the influence of high degree of mineralization, the  $\delta^{13}\text{C}$  value of organic matter in the surface sediment from Shuangta reservoir is evidently partial positive. The content of hydrocarbons from nitrogen-fixing algae is apparently higher, resulting in lower  $\delta^{15}\text{N}$  value in the sediment from Zhanjiang Maar Lake. Because of special geographical environment, the content of  $(\text{C}_{27} + \text{C}_{29})$  tree-derived is apparently higher in the Sihailongwan Lake sediment.

**Key words:** lake sediment; aliphatic hydrocarbons; distribution characters; sources

收稿日期: 2010-03-19      修订日期: 2010-05-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2008CB418200); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2007KYYW01)

作者简介: 房吉敦(1971-), 男, 山东东营人, fangjidun@126.com.

\* 责任作者: 吴丰昌(1964-), 浙江衢州人, 研究员, 博士, 博导, 从事湖泊污染机理与过程研究, wufengchang@163.com

湖泊沉积物有机质主要有 2 种来源: ①湖泊自身通过光合作用产生, 并以生物体、细菌等遗体形式, 埋藏保存的有机质; ②通过扰动来自积水处的有机质, 如通过沉降保存的叶子、草、土壤有机质, 或由流入湖泊的河流直接携带入的有机质<sup>[1]</sup>. 湖泊沉积

物的总有机碳 (TOC) 能反映湖泊的生产能力, 湖泊沉积物中有机物含碳量为有机物质量的 50% 以上, 所以沉积物中有机质含量约是 TOC 含量的 2 倍<sup>[2]</sup>. 因为有机物的碳同位素组成 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) 能反映光合作用过程中碳的同化作用及其来源<sup>[3-4]</sup>, 陆源  $\text{C}_4$  植物的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-10\text{‰} \sim -15\text{‰}$ ,  $\text{C}_3$  植物的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-24\text{‰} \sim -30\text{‰}$ , 内源有机物的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-19\text{‰} \sim -22\text{‰}$ <sup>[5-6]</sup>. 藻类来源的有机质  $\delta^{15}\text{N}$  平均值约为 8.5‰, 来自陆地高等植物有机质的  $\delta^{15}\text{N}$  平均值约为 3‰<sup>[7-8]</sup>. 藻类富含蛋白质, 纤维素含量较少, 来自藻类有机质的 C/N 值一般在 4~10 之间; 陆地脉管植物, 纤维素含量丰富, 蛋白质含量较低, 来自陆地植物有机质的 C/N 值一般高于 12<sup>[9-10]</sup>, 因此,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  和 C/N 值的综合分析能比较准确地判断有机质的来源.

湖泊沉积物中的脂肪烃来源复杂, 一般来说, 石油包含沸点范围宽广且构成复杂的一系列烃类, 相反, 生物源的烃类组成却相对简单<sup>[11]</sup>. 为了区分环境中污染物的可能来源, 科研人员定义和发展了许多脂肪烃类的指数, 如 COLOMBO 等发展了主峰碳数 (MH)、低分子量烷烃总量/高分子量烷烃总量 ( $L/H: \sum_{21}^{-} / \sum_{21}^{+}$ )、正构烷烃总量/ $n\text{C}_{16}$  来判定脂肪烃的来源<sup>[12]</sup>. SERRAZANETTI 等发现, 被石油污染的浮游动物中烃类的 CPI 值接近于 1<sup>[13]</sup>.  $n\text{C}_{27}$  和  $n\text{C}_{29}$  代表了木本植物的输入, 而  $n\text{C}_{31}$  指示了草本植物的输入<sup>[2]</sup>,  $2n\text{C}_{31} / (n\text{C}_{27} + n\text{C}_{29})$  用于指示陆源有机物输入与中草本植物输入和木本植物输入之比<sup>[14]</sup>, 来自挺水植物的烷烃以  $n\text{C}_{21}$ ,  $n\text{C}_{23}$  和  $n\text{C}_{25}$  为主<sup>[15]</sup>, 多数水生藻类和光合细菌中  $n\text{C}_{17}$  烷烃是其主要的脂肪烃组成, 湖泊沉积物中  $n\text{C}_{17}$  烷烃的数量能反映湖泊的生产率和富营养化程度<sup>[16-18]</sup>. 笔者用  $2n\text{C}_{17} / (n\text{C}_{23} + n\text{C}_{25})$  来表示湖泊内源有机质中挺水植物和菌藻类的相对贡献<sup>[14]</sup>.

通过对我国 13 个典型湖泊的表层沉积物中有机质的研究, 能揭示试验湖泊沉积物中有机质的总体特征及脂肪烃的分布特征和主要来源, 评估我国典型湖泊的脂肪烃污染现状, 以期相关部门制订湖泊环境的治理政策提供理论依据.

## 1 试验

### 1.1 样品采集

2006—2007 年, 采用重力采样器在 13 个试验湖泊 (见表 1) 采集了沉积物柱样, 沉积物柱芯保持完好, 悬浮层未受扰动, 野外现场按照 1 cm 间隔进

行分样, 分好的样品迅速装入 100 mL 离心管, 封口胶密封, 带回实验室于  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下保存至分析.

表 1 样品采集湖泊空间分布

Table 1 The space distribution map of sampling lakes

湖泊	所属省份	地理位置
博斯腾湖	新疆	87°03'E, 41°58'N
苏干湖	青海	93°52'E, 38°52'N
双塔水库	甘肃	96°31'E, 40°33'N
青海湖	青海	100°11'E, 36°58'N
密云水库	北京	116°50'E, 41°23'N
鄱阳湖	江西	116°18'E, 29°05'N
洱海	云南	100°11'E, 25°47'N
太湖	江苏	120°15'E, 31°15'N
红枫湖	贵州	106°26'E, 26°32'N
巢湖	安徽	117°30'E, 31°34'N
四海龙湾	吉林	126°36'E, 42°17'N
程海	云南	100°40'E, 26°32'N
湛江玛珥湖	广东	110°17'E, 21°09'N

## 1.2 分析方法

样品经真空冷冻干燥器 (TechcompFD - 3 - 85 - MP) 冷冻干燥后, 研磨成小于 100  $\mu\text{m}$  的粉末, 采用 CHNS Vario E1 III 型元素分析仪对 13 个湖泊表层沉积物样品进行总有机碳 (TOC)、总氮 (TN) 指标的测定,  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  值用 CE EA 1112 C/N/S Analyzer 分析仪 - DELTApluxxL 质谱仪进行测定, 样品测定前用盐酸去除碳酸盐. 另外 18 个表层沉积物样品各取一部分进行可溶有机质分析, 用  $\text{CH}_2\text{Cl}_2 + \text{CH}_3\text{OH}$  混合溶剂 (体积比为 9:1) 进行索氏抽提 72 h, 底瓶加铜片脱硫, 抽提液浓缩后恒质量, 得游离态有机物总量. 采用硅胶柱色谱对游离态有机物进行组分分离, 用正己烷冲洗饱和烃组分; 剩余部分用不同的极性溶剂进行分离, 以备它用. 采用氘代正二十烷 ( $n$ -Eicosane - D42) 作内标对饱和烃中的正构烷烃进行定量分析. 色谱分析采用 Finnigan trace GC 气相色谱仪, 色谱柱为 DB - 1MS 硅熔融毛细管 (60 m  $\times$  0.32 mm  $\times$  0.25  $\mu\text{m}$ ). 柱温采用程序升温: 初温 80  $^{\circ}\text{C}$ , 保持 5 min 后, 以 3  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  速度升至 290  $^{\circ}\text{C}$ , 恒温 20 min, 载气为高纯氮气, 流速为 1.0 mL/min.

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积物中有机质的总体特征

湖泊沉积物中的 TN 和 TOC 指标综合反映了湖泊的初级生产力, 指示了内源和陆源生物量的混合信息, 较高的 TOC 和 TN 指标反映了土壤有机质、植物残体的输入和湖泊初级生产力的提高. 研究 (见

图 1) 发现,东北地区的四海龙湾沉积物中  $w(\text{TOC})$  和  $w(\text{TN})$  都是最高的,西南地区和华南地区的红枫湖、程海、洱海和玛珥湖 4 个湖泊沉积物的  $w(\text{TOC})$  和  $w(\text{TN})$  与西北地区博斯腾湖、苏干湖、双塔水库

和青海湖 4 个湖泊沉积物的  $w(\text{TOC})$  和  $w(\text{TN})$  相比有增高的趋势,而华东地区的鄱阳湖、太湖和巢湖 3 个湖泊的沉积物中  $w(\text{TOC})$  和  $w(\text{TN})$  与其他地区湖泊相比明显偏低。

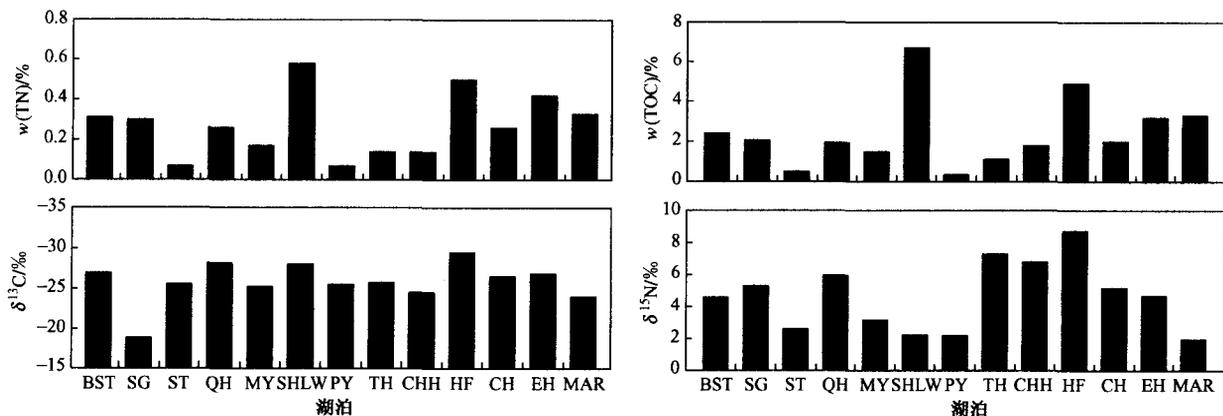


图 1 湖泊沉积物的  $w(\text{TN})$ ,  $w(\text{TOC})$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  值对比

Fig. 1 The comparison diagram of TN, TOC,  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values of lacustrine sediments

13 个湖泊沉积物有机质的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-29.41\text{‰} \sim -18.78\text{‰}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$  值为  $1.95\text{‰} \sim 8.73\text{‰}$ , C/N 值为  $6.18 \sim 15.07$ .  $\delta^{13}\text{C}$  值和 C/N 值散点图(见图 2)显示,苏干湖、湛江玛珥湖、巢湖、密云水库、四海龙湾和红枫湖是混合源有机质组成特征,鄱阳湖、青海湖、博斯腾湖、双塔水库、程海、洱海和太湖是湖泊内源为主的有机质组成特征。

### 2.2.1 总量及相关参数

表 2 中列出了样品中正构烷烃质量分数和多个正构烷烃参数值,沉积物中正构烷烃的质量分数为  $2.46 \sim 67.25 \mu\text{g/g}$  (干质量);以单位质量的总有机碳(TOC)质量分数计算沉积物中的正构烷烃质量分数,  $w(\text{TOC})$  为  $243 \sim 1482.48 \mu\text{g/g}$ . 这与文献[19-20]报道的现代沉积物中正烷烃的含量范围相一致. 从湖泊沉积物中烷烃质量分数和  $w(\text{TOC})$  的关

### 2.2 正构烷烃

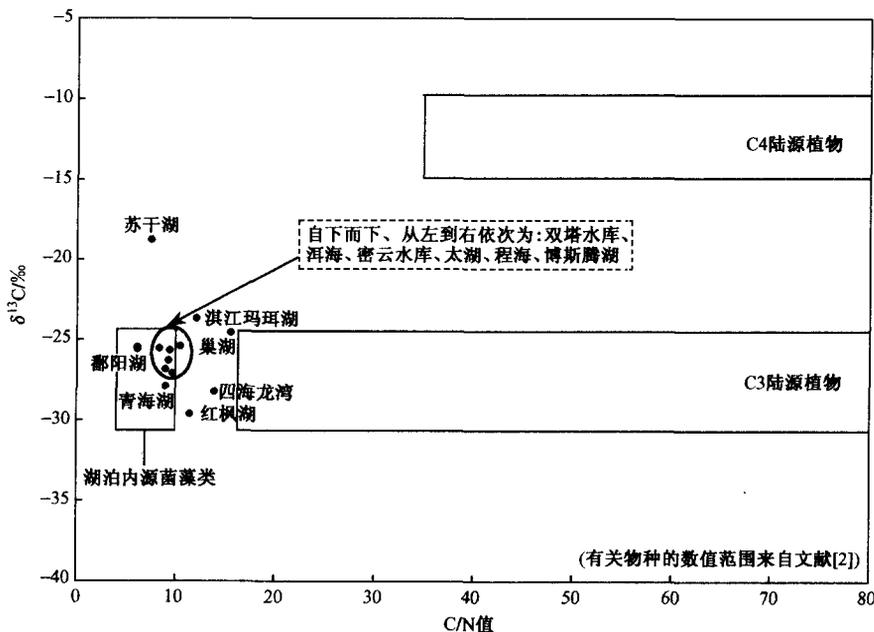


图 2 湖泊沉积物的  $\delta^{13}\text{C}$  和 C/N 值散点图

Fig. 2 The scatter diagram of  $\delta^{13}\text{C}$  and C/N values of lacustrine sediments

表 2 湖泊表层沉积物中正构烷烃质量分数与组成参数

Table 2 The contents of *n*-alkanes in lake surface sediments and the composition indice

样号	Total	Total *	MH	L/H	RE <sub>1</sub>	RE <sub>2</sub>	C/N	RE <sub>3</sub>	CPI	矿化度/(g/L)
四海龙湾(1)	67.25	1 005	<i>n</i> C <sub>18</sub> , <i>n</i> C <sub>29</sub>	0.51	0.88	0.82	13.53	36.8	5.61	1.01
博斯腾湖(1)	8.34	395	<i>n</i> C <sub>17</sub> , <i>n</i> C <sub>23</sub>	0.61	0.60	1.09	9.59	22.9	5.75	1.87
双塔水库(1)	3.55	689	<i>n</i> C <sub>18</sub> , <i>n</i> C <sub>31</sub>	0.68	1.45	1.78	8.53	54.3	2.79	1.99
苏干湖(1)	5.32	255	<i>n</i> C <sub>27</sub> , <i>n</i> C <sub>29</sub>	0.21	0.72	0.61	8.18	128.0	3.82	31.83
青海湖(1)	9.72	498	<i>n</i> C <sub>18</sub> , <i>n</i> C <sub>31</sub>	0.81	1.81	3.15	9.19	36.1	5.07	15.5
密云水库(1)	10.15	677	<i>n</i> C <sub>29</sub>	0.17	1.06	0.67	10.59	210.0	4.50	0.25
巢湖(1)	6.32	351	<i>n</i> C <sub>17</sub> , <i>n</i> C <sub>31</sub>	1.08	1.38	4.59	15.07	15.7	2.32	0.17
太湖(1)	7.82	694	<i>n</i> C <sub>17</sub> , <i>n</i> C <sub>19</sub>	1.31	0.90	3.01	9.36	18.8	1.92	0.17
鄱阳湖(1)	2.46	685	<i>n</i> C <sub>19</sub> , <i>n</i> C <sub>20</sub>	0.95	1.21	0.80	6.18	138.0	1.92	0.05
程海(1)	16.06	796	<i>n</i> C <sub>21</sub> , <i>n</i> C <sub>23</sub>	0.95	0.43	0.89	9.20	45.7	3.47	1.04
红枫湖(1)	17.93	365	<i>n</i> C <sub>17</sub> , <i>n</i> C <sub>29</sub>	0.85	1.22	2.78	11.42	12.2	4.18	0.21
洱海(1)	13.28	415	<i>n</i> C <sub>18</sub> , <i>n</i> C <sub>19</sub>	2.75	0.84	4.37	8.79	16.8	3.65	0.27
玛珥湖(1)	49.43	1 482	<i>n</i> C <sub>17</sub>	1.52	1.50	7.00	11.86	22.4	1.46	0.16

注:①Total 和 Total\* 分别为样品中正构烷烃总量以沉积物(干质量)和 TOC 计时的值(μg/g)。

②MH 为主峰碳数;  $L/H = \sum C_{21}^- / \sum C_{22}^+$ ;  $RE_1 = 2nC_{31} / (nC_{27} + nC_{29})$ ;  $RE_2 = 2nC_{17} / (nC_{23} + nC_{25})$ ;  $RE_3 = \sum (nC_{15} - nC_{31}) / nC_{16}$ ;  $CPI = 2(nC_{27} + nC_{29}) / (nC_{26} + 2nC_{28} + nC_{30})$ 。

③样号列括号内数字为实验样品在沉积柱剖面中的深度(cm)。

系看,基本上呈现出随沉积物中  $w(\text{TOC})$  的升高,其中的正构烷烃污染物  $w(\text{TOC})$  也呈相应增大的趋势。

### 2.2.2 分布特征

色谱分析表明,所分析的湖泊沉积物样品中正构烷烃组分的碳数范围均为  $nC_{15} \sim nC_{31}$ ,正构烷烃的组成有较大的差别(见图 3)。苏干湖(1)、密云水库(1)和四海龙湾(1)等样品高碳数部分占有较大的优势,主碳峰为  $nC_{27}$ ,  $nC_{29}$  和  $nC_{31}$ ,短碳链(碳数  $\leq 21$ )组分与长碳链(碳数  $\geq 22$ )组分相对含量( $L/H$ :  $\sum C_{21}^- / \sum C_{22}^+$ )为 0.17 ~ 0.51;湛江玛珥湖(1)和洱海(1)等样品低碳数部分占有较大的优势,主碳峰为  $nC_{17}$ ,  $nC_{18}$  和  $nC_{19}$ ,  $L/H$  值为 1.31 ~ 2.75;青海湖(1)、巢湖(1)、鄱阳湖(1)、程海(1)和红枫湖(1)等样品低碳数或高碳数部分都没有明显优势,  $L/H$  值为 0.82 ~ 1.08,主峰分布多为低碳和高碳数各一的双峰型。

### 2.3 讨论

相比其他类型的有机质,脂肪烃对微生物降解的易感性要低得多,脂肪烃一般能更准确地反映湖泊沉积物中有机质的来源。湖泊沉积物中 2 个主要的生物烃源是:①湖泊内源的藻类、细菌、脉管植物。②湖泊周围流域的脉管植物。因为这 2 个来源产生明显不同的脂肪烃类,所以这 2 个来源中特征性脂肪烃分子可以作为判断有机质来源的指标<sup>[14]</sup>。

从我国的北部湖泊到南部湖泊,来自内源菌藻类的脂肪烃和来自陆源高等植物的脂肪烃含量比

( $\sum C_{21}^- / \sum C_{22}^+$ ) 呈现增大的趋势(见图 4),洱海和湛江玛珥湖沉积物的  $\sum C_{21}^- / \sum C_{22}^+$  值最高,沉积物中来自内源菌藻类源的脂肪烃相对含量也最高,苏干湖和密云水库沉积物的  $\sum C_{21}^- / \sum C_{22}^+$  值最低,湖泊沉积物中来自陆源的脂肪烃相对含量最高。湖泊内源的脂肪烃中,来自菌藻类的脂肪烃和来自湖泊内源挺水、漂浮等大型植物的脂肪烃比  $2nC_{17} / (nC_{23} + nC_{25})$ ,从北部湖泊到南部湖泊也呈增大的趋势,来自陆源草本植物和木本植物的烷烃输入比  $2nC_{31} / (nC_{27} + nC_{29})$ ,没有随区域变化而发生规律性改变,青海湖和湛江玛珥湖的  $2nC_{31} / (nC_{27} + nC_{29})$  输入比最高,来自陆源草本植物的烷烃数量相对要多,程海沉积物的  $2nC_{31} / (nC_{27} + nC_{29})$  值最低,陆源来源的脂肪烃中,草本植物来源的数量相对最低。

湛江玛珥湖、四海龙湾和红枫湖等湖泊沉积物中,菌藻类来源的脂肪烃  $w(nC_{17})$  较高,内源挺水、漂浮植物来源的正构烷烃  $w(nC_{23} + nC_{25})$  较高的湖泊是四海龙湾、湛江玛珥湖、红枫湖、程海和博斯腾湖,陆源木本、草本植物来源的脂肪烃  $w(nC_{27} + nC_{29})$  和  $w(nC_{31})$  较高的湖泊是四海龙湾、密云水库、红枫湖和湛江玛珥湖,这几种来源的脂肪烃在双塔水库、鄱阳湖沉积物中含量都较低(见图 5)。

四海龙湾沉积物样品的  $w(\text{TOC})$  和  $w(\text{TN})$ ,草本和木本植物的烷烃含量都是最高的,且沉积物有机质的  $\delta^{15}\text{N}$  值非常低,四海龙湾是一个封闭的、近圆形的湖泊,湖的四周为火山碎屑岩,其上生长了大量针叶、落叶阔叶混交林植被,该地雨量充沛,来自

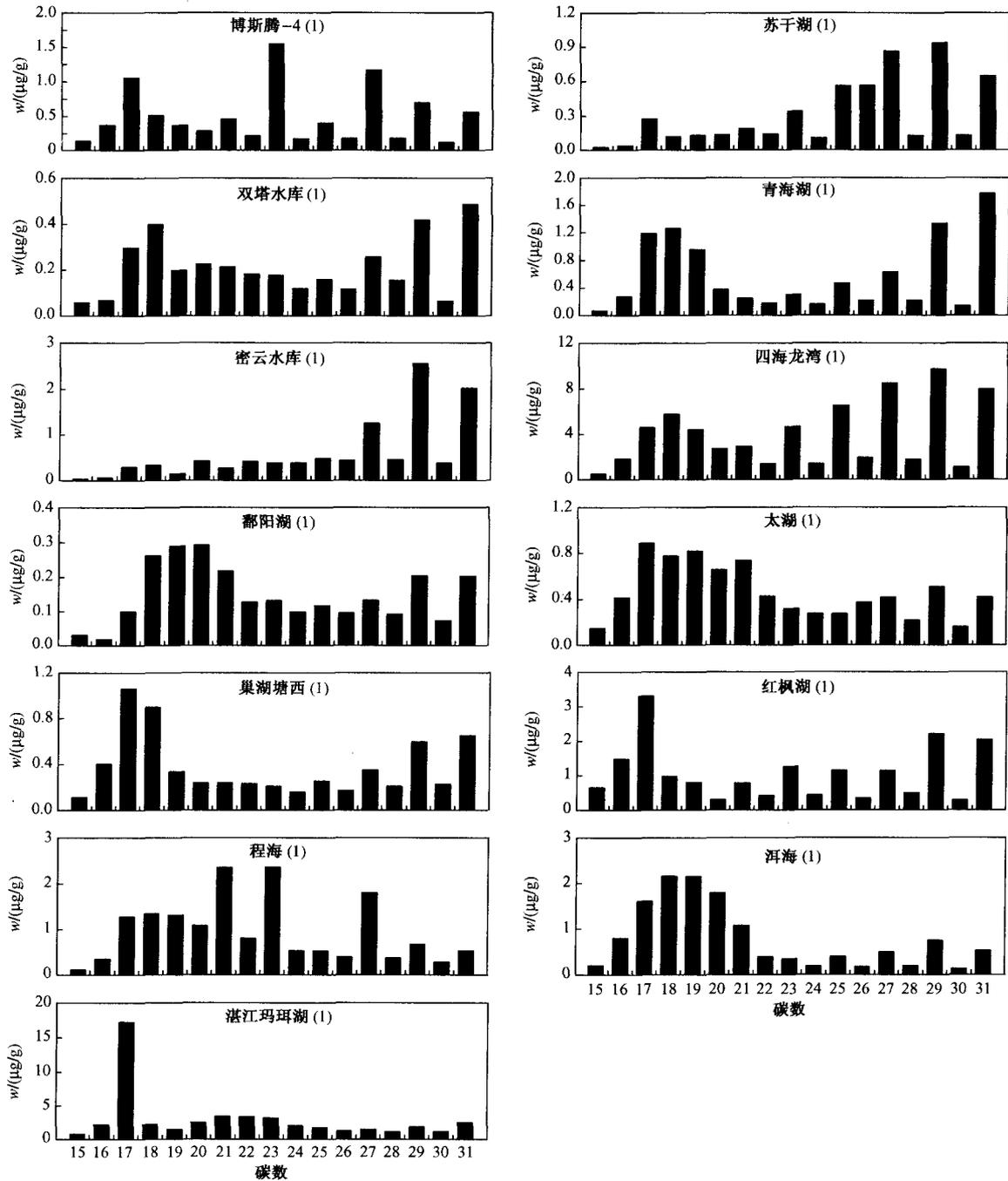


图 3 湖泊表层沉积物中正构烷烃质量分数分布

Fig. 3 Distribution patterns of content of *n*-alkanes in lake surface sediments

湖边土壤和植被的有机质大量地进入四海龙湾,来自陆源  $C_3$  植物有机质在总有机质中所占比例较大,使四海龙湾沉积物的  $\delta^{15}N$  值相比其他湖泊沉积物的  $\delta^{15}N$  值明显偏低 ( $C_3$  植物的  $\delta^{15}N$  值约为  $0.5\text{‰}$ )<sup>[8]</sup>.

苏干湖、密云水库的  $w(\text{TOC})$  和  $w(\text{TN})$  较低,来自陆源的高等植物输入的脂肪烃所占比例较大,

苏干湖沉积物的  $\delta^{13}C$  值明显比其他湖泊沉积物的  $\delta^{13}C$  值偏正,陆源高等植物有机质所占比例较高是原因之一;另外,苏干湖具有明显高于其他湖泊的矿化度,苏干湖水体中富含  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$ ,大量  $\text{HCO}_3^-$  的存在破坏了  $\text{CO}_2$  的溶解平衡  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+$ ,使水体中溶解性  $\text{CO}_2$  含量明显低于其他湖泊,这样就致使苏干湖内的菌

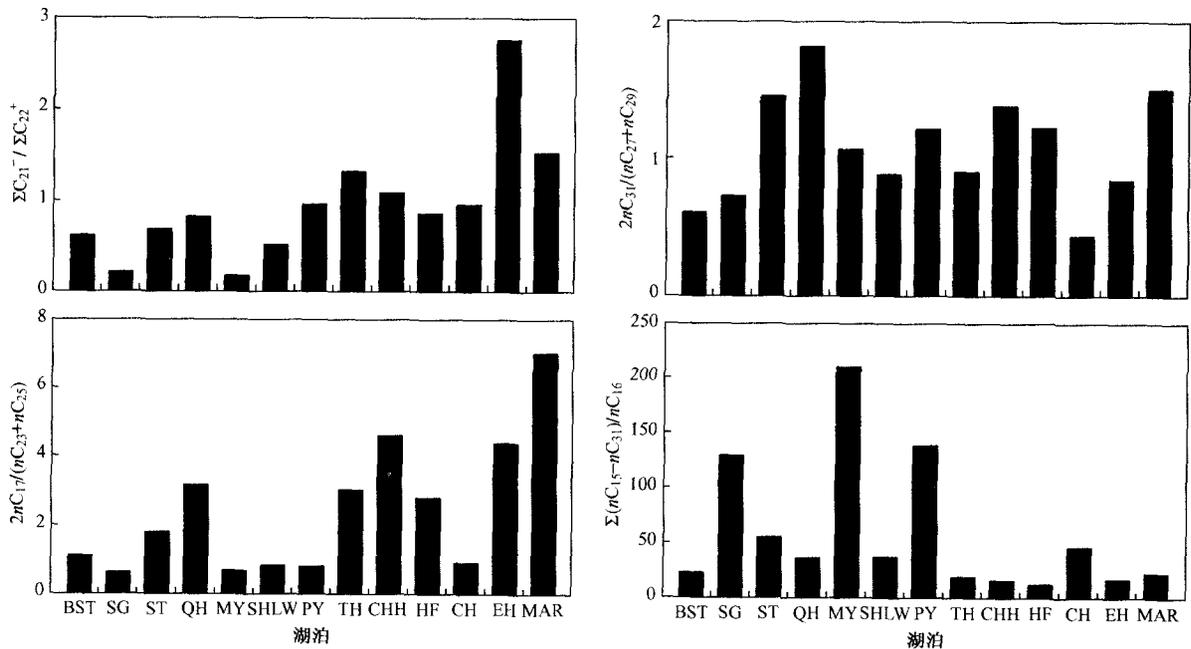
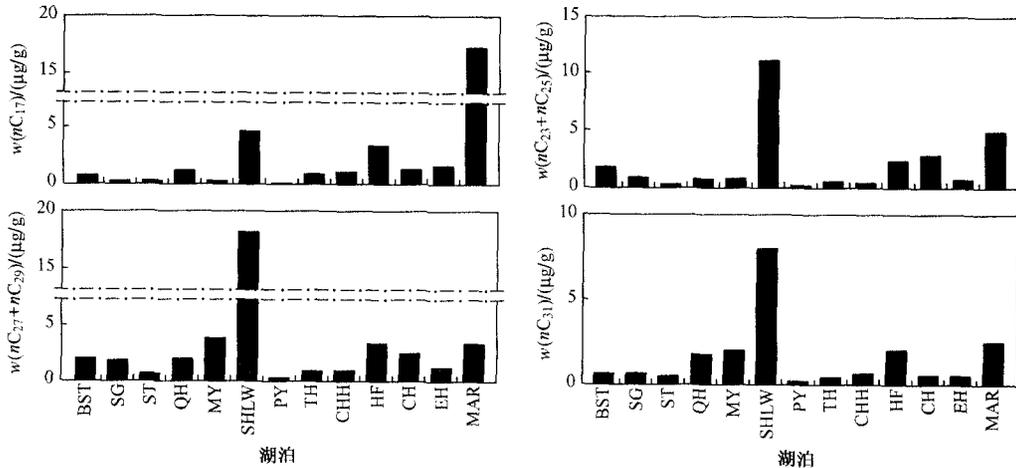


图 4 湖泊沉积物的  $\Sigma C_{21}^- / \Sigma C_{21}^+$ ,  $2nC_{31} / (nC_{27} + nC_{29})$ ,  $2nC_{17} / (nC_{23} + nC_{25})$  和  $\Sigma (nC_{15} - nC_{31}) / nC_{16}$  值对比  
 Fig. 4 The comparison chart of  $\Sigma C_{21}^- / \Sigma C_{21}^+$ ,  $2nC_{31} / (nC_{27} + nC_{29})$ ,  $2nC_{17} / (nC_{23} + nC_{25})$  and  $\Sigma (nC_{15} - nC_{31}) / nC_{16}$  values in lake sediments



湖泊: BST—博斯腾湖; SG—苏干湖; ST—双塔水库; QH—青海湖; MY—密云水库; SHLW—四海龙湾;  
 PY—鄱阳湖; TH—太湖; CHH—巢湖; HF—红枫湖; CH—程海; EH—洱海; MAR—玛珥湖

图 5 湖泊沉积物(干质量)中正构烷烃主要组分  $nC_{17}$ ,  $(nC_{23} + nC_{25})$ ,  $(nC_{27} + nC_{29})$  和  $nC_{31}$  的质量分数对比

Fig. 5 The comparison chart of content of  $nC_{17}$ ,  $(nC_{23} + nC_{25})$ ,  $(nC_{27} + nC_{29})$  and  $nC_{31}$  in lacustrine sediments studied (Dry weight)

藻类利用了更多的溶解性  $HCO_3^-$  合成了有机质, 这是苏干湖沉积物的  $\delta^{13}C$  值明显偏正的另一个原因。

用分子组成指数(如 CPI)来研究有机物的来源已有报道<sup>[13]</sup>, 太湖(1)、湛江玛珥湖(1)、鄱阳湖(1)和巢湖(1)等样品的 CPI 值接近于 1, 呈明显的外源

性石油污染, 其余样品的 CPI 值在 2~6 之间, 与文献[11]报道的 2~5 相一致。  $nC_{16}$  在生物脂中含量稀少<sup>[21]</sup>, 生物源有机物中, 正构烷烃的  $\Sigma (nC_{15} \sim nC_{31}) / nC_{16}$  明显要高(如碳数  $\geq 50$ ), 而在被石油污染的样品中该比值明显要低(如碳数  $\leq 15$ )<sup>[12]</sup>。 试

验样品中,红枫湖(1)、巢湖(1)、太湖(1)、洱海(1)和湛江玛珥湖(1)等样品的 $\Sigma(nC_{15} \sim nC_{31})/nC_{16}$ 值明显要低,结合 CPI 参数特点,可以推测巢湖(1)、太湖(1)和湛江玛珥湖(1)等沉积物样品可能受到了外源性石油污染。

### 3 结论

13 个典型湖泊的表层沉积物样品的  $w(\text{TOC})$  和  $w(\text{TN})$  分布具有区域性特点,西南、华南地区的湖泊沉积物中  $w(\text{TOC})$  和  $w(\text{TN})$  要高于西北地区湖泊沉积物,华东地区湖泊沉积物的  $w(\text{TOC})$  和  $w(\text{TN})$  最低。湖泊沉积物中正构烷烃含量差别很大,低值只有  $2.46 \mu\text{g/g}$  (干质量),而高值达到  $67.25 \mu\text{g/g}$ ,这与湖泊的外源、内源有机物输入总量密切相关,正构烷烃的含量在一定程度上能反映出湖泊受外源污染及自身富营养化的程度。玛珥湖和四海龙湾受脂肪烃污染严重,鄱阳湖受脂肪烃污染程度最轻,湛江玛珥湖沉积物中来自菌藻类的烷烃  $nC_{17}$  含量明显高于其他湖泊沉积物,湛江玛珥湖中生存了比例较大的能自身固氮的菌藻类。四海龙湾沉积物中来自木本植物的 ( $nC_{27} + nC_{29}$ ) 和来自草本植物的  $nC_{31}$  含量明显高,巢湖、太湖、湛江玛珥湖等明显地受到了外源性石油污染。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] HERCZEG A L, SMITH A K, DISHTON J C. A 120 year record of changes in nitrogen and carbon cycling in Lake Alexandrina South Australia: C/N,  $\delta^{15}\text{N}$ , and  $\delta^{13}\text{C}$  in sediments [ J ]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16: 73-84.
- [ 2 ] MEYERS P A. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes [ J ]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34 ( 2 ): 261-289.
- [ 3 ] MEYERS P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes [ J ]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27 ( 5/6 ): 213-250.
- [ 4 ] FREUDENTHAL T, NEUER S, MEGGERS H. Influence of lateral particle advection and organic matter degradation on sediment accumulation and stable nitrogen isotope ratios along a productivity gradient in the Canary Islands region [ J ]. *Marine Geology*, 2001, 177 ( 1/2 ): 93-109.
- [ 5 ] EMERSON S, HEDGES J I. Processes controlling the organic carbon content of open ocean sediments [ J ]. *Paleoceanography*, 1988, 3: 621-634.
- [ 6 ] FONTUGNE M R, JOUANNEAU J M. Modulation of the particulate organic carbon flux to the ocean by a macrotidal estuary: evidence from measurements of carbon isotopes in organic matter from the Gironde system [ J ]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1987, 24 ( 3 ): 377-387.
- [ 7 ] PETERSON B J, HOWARTH R W. Sulfur, carbon, and nitrogen isotopes used to trace organic matter flow in the salt-marsh estuaries of Sapelo Island, Georgia [ J ]. *Limnology and Oceanography*, 1987, 32: 1195-1213.
- [ 8 ] SCHOENINGER M J, DENIRO M J. Nitrogen and carbon isotope composition of bone collagen from marine and terrestrial animals [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48: 625-639.
- [ 9 ] MEYERS P A. Preservation of source identification of sedimentary organic matter during and after deposition [ J ]. *Chemical Geology*, 1994, 144: 289-302.
- [ 10 ] PRAHL F G, BENNETT J T, CARPENTER R. The early diagenesis of aliphatic hydrocarbons and organic matter in sedimentary particulates from Dabob Bay, Washington [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44 ( 12 ): 1967-1976.
- [ 11 ] KENNISH M J. Ecology of estuaries: anthropogenic effects [ M ]. CRC Press: Boca Raton, FL, 1992: 494.
- [ 12 ] COLOMBO J C, PELETTIER E, BROCHU C, *et al.* Determination of hydrocarbon sources using *n*-alkanes and polyaromatic hydrocarbon distribution indexes. Case study: Rio de La Plata Estuary, Argentina [ J ]. *Environ Sci Technol*, 1989, 23: 888-894.
- [ 13 ] SERRAZANETTI G P, PAGNUCCO C, CONTE L S, *et al.* Aliphatic hydrocarbons and linear alkylbenzenes in zooplankton from the Gulf of Trieste [ J ]. *Chemosphere*, 1994, 28: 1119-1126.
- [ 14 ] 房吉敦, 吴丰昌, 熊永强, 等. 滇池湖泊沉积物中游离类脂物的有机地球化学特征 [ J ]. *地球化学*, 2009, 38 ( 1 ): 96-104.
- [ 15 ] FICHEN K J, LI B, SWAIN D L, EGLINTON G. An *n*-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes [ J ]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31 ( 7/8 ): 745-749.
- [ 16 ] BLUMER M, GUILLARD R R L, CHASE T. Hydrocarbons of marine plankton [ J ]. *Marine Biology*, 1971, 8: 183-189.
- [ 17 ] GIGER W, SCHAFFNER C, WAKEHAM S G. Aliphatic and olefinic hydrocarbons in recent sediments of Greifensee, Switzerland [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44: 119-129.
- [ 18 ] CRANWELL P A, EGLINTON G, ROBINSON N. Lipids of aquatic organisms as potential contributors to lacustrine sediments- II [ J ]. *Organic Geochemistry*, 1987, 11: 513-527.
- [ 19 ] TRAN K, YU C C, ZENG E Y. Petrogenic and biogenic sources of *n*-alkanes off San Diego, California [ R ] // SCCWRP Annual Report. California: SCCWRP, 1994: 95.
- [ 20 ] 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.
- [ 21 ] THOMPSON S, EGLINTON G. Composition and sources of pollutant hydrocarbons in the Severn Estuary [ J ]. *Marine Pollution Bulletin*, 1978, 9: 133-136.

(责任编辑:潘风云)