

## 西藏纳木错表层沉积物中正构烷烃的来源与空间分布特征\*

林 晓<sup>1,2</sup>, 朱立平<sup>2</sup>, 王君波<sup>2</sup>, 汪 勇<sup>2,3</sup>, 甄晓林<sup>2,3</sup>, 鞠建廷<sup>4</sup>, 谢曼平<sup>2,3</sup>, 彭 萍<sup>2,3</sup>

(1: 中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 武汉 430074)

(2: 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085)

(3: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(4: 《中国科学》杂志社, 北京 100717)

**摘 要:** 通过测定纳木错现代植物和表层沉积物样品中的正构烷烃, 结合主成分分析方法, 明确了表层沉积物中烷烃的主要来源, 并初步分析了它们在湖泊中的空间分布特征. 研究结果显示, 沉水植物所含烷烃以  $n\text{-C}_{21}\text{-C}_{25}$  为主, 具有  $n\text{-C}_{23}$  的峰值; 陆生植物主要含  $n\text{-C}_{27}\text{-C}_{33}$  烷烃, 具有  $n\text{-C}_{29}$  或  $n\text{-C}_{31}$  的峰值; 但垫状点地梅(*Androsace tapete*)和香柏(*Sabina pingii*)的主峰碳却是  $n\text{-C}_{33}$  烷烃, 这在以往研究中鲜有报道. 在纳木错表层沉积物中, 正构烷烃具有典型的  $n\text{-C}_{31}$  和  $n\text{-C}_{23}$  双峰分布形式, 来源于低等菌藻类、沉水植物以及陆生植物. 其中碳数小于  $\text{C}_{20}$  的短链烷烃主要来源于低等菌藻类, 其空间分布均一, 由低等菌藻类的浮游生活型所决定; 长链烷烃主要来源于高等植物, 含量从滨岸到湖中心逐渐减少, 这与其在运移和沉积过程中受微生物的持续降解作用有关. 此外, 来源于陆生植物的  $n\text{-C}_{27}\text{-C}_{33}$  烷烃因河流汇水面积和流量不同而存在空间差异, 这值得重视和进一步研究.

**关键词:** 表层沉积物; 正构烷烃; 空间分布; 纳木错; 青藏高原

## Sources and spatial distribution character of *n*-alkanes in surface sediments of Nam Co on the Tibetan Plateau

LIN Xiao<sup>1,2</sup>, ZHU Liping<sup>2</sup>, WANG Junbo<sup>2</sup>, WANG Yong<sup>2,3</sup>, ZHEN Xiaolin<sup>2,3</sup>, JU Jianting<sup>4</sup>, XIE Manping<sup>2,3</sup> & PENG Ping<sup>2,3</sup>

(1: Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, P.R.China)

(2: Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, P.R.China)

(3: Graduate University of CAS, Beijing 100049, P.R.China)

(4: Science in China Press, Beijing 100717, P.R.China)

**Abstract:** Aquatic and land plants as well as surface sediments from Nam Co in Tibetan Plateau were collected and *n*-alkanes analysis had been conducted to identify the sources and spatial distribution of these molecular. The results indicated that *n*-alkanes ranging from 21 to 25 were identified to be derived from submerged plants, while *n*-alkanes ranging from 27 to 33 with  $n\text{-C}_{29}$  or  $n\text{-C}_{31}$  peak were derived from land plants except *Androsace tapete* and *Sabina pingii*. These two species contain *n*-alkanes with  $n\text{-C}_{33}$  peak which were seldom reported before. Combined with information on plant sources and principal component analyses, three distinct groups of *n*-alkanes with different spatial distribution in surface sediments were defined. Short-chain *n*-alkanes derived from photosynthetic bacteria and algae were relatively uniform in whole lake. But concentration of long chain *n*-alkanes gradually reduce from lake shore to center coincided with transport distance increasing, indicating the main controlling mechanism of spatial distributions in surface sediments was connected with biodegradation.

\* 国家重点基础研究发展计划项目(2005CB422002)、国家自然科学基金项目(40701194)和中国地质大学(武汉)优秀青年教师计划(CUGQNL0927)联合资助. 2008-10-18 收稿; 2009-02-19 收修改稿. 林晓, 男, 1980 年生, 博士, 讲师; E-mail: linxiao.cug@gmail.com.

Keywords: Surface sediments; *n*-alkane; spatial distribution; Nam Co; Tibetan Plateau

正构烷烃是一种典型的生物标志物, 具有饱和稳定的分子结构和生物来源<sup>[1]</sup>. 它常被作为一种分子化石指标用于重建古植被被古气候变化的历史, 在全球变化研究中有着广泛的应用<sup>[1-5]</sup>. 近年来, 这一指标逐渐被引入到青藏高原, 在湖泊沉积、泥炭和冰芯研究中取得了一定成果<sup>[6-11]</sup>. 但这些研究更多关注的是该指标在时间序列上的变化, 有关正构烷烃的来源问题常以文献参考为主. 而气候条件和生物种群的差异往往使相同分子具有不同来源, 分子指标的环境指示意义也随之改变<sup>[4]</sup>. 因此确定高原环境条件下烷烃的生物来源具有十分重要的意义. 同时已经开展的研究对烷烃分子在湖泊沉积物中的空间分布特征仍然缺乏了解<sup>[7-8]</sup>. 而对于某一湖泊, 特别是较大的湖泊来说, 空间分布的差异性往往会影响到单根岩芯对全湖平均状况的代表性<sup>[12-13]</sup>. 因此, 尽快开展烷烃来源和空间分布状态的研究, 有利于深入探讨该指标的环境指示意义. 本文以纳木错作为研究区域, 通过提取现代植物与表层沉积物中所含的正构烷烃, 对其来源和空间分布特征进行了初步研究, 为进一步应用该分子指标提供参考.

## 1 研究区概况

纳木错位于南羌塘高原内流湖区东缘, 是一个构造成因的深大湖泊, 地理范围 30°30′–30°56′N, 90°16′–91°03′E, 湖泊面积 1920km<sup>2</sup>, 海拔 4718m, 水质微咸偏碱<sup>[14]</sup>. 周边共有超过 60 条河流进入湖泊, 最大的几条为西南的波曲、昂曲、测曲和西北的雄曲等, 南岸多是由念青唐古拉山冰川融水补给的梳辮状短小径流; 北部为平均海拔 5000m 的藏北高原<sup>[14]</sup>. 通过近 3 年的湖泊调查, 研究小组已获取了该湖的水下地形图<sup>[15]</sup>. 以扎西岛和东部两个小岛连线为界, 纳木错水下可分为东西两个湖盆(图 1). 东部湖盆的沉积中心位于托仁诺布日半岛与小岛间; 西部为深大湖盆, 拥有一个水深超过 90m 的湖底平原, 其南界为水下陡坎, 北界为构造断裂.

湖区属高原寒带半湿润半干旱气候, 区域植被有高寒灌丛、高寒草甸、高寒草原等类型<sup>[16]</sup>. 水生植物区划属于南羌唐高原内流水系水生植物亚区, 广布寒温型种类, 漂浮生活型消失, 以沉水植物为主<sup>[17]</sup>.

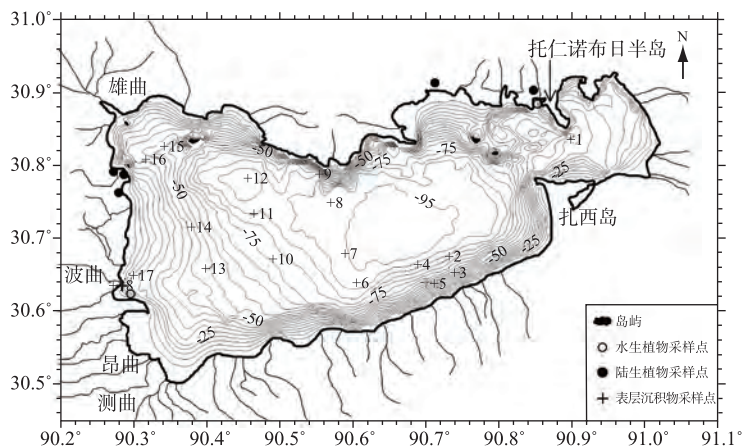


图 1 纳木错水下地形与植物、表层沉积物采样位置

Fig.1 Isobath and sampling sites of plants and surface sediments in Nam Co

## 2 样品采集与方法

### 2.1 样品采集

本次研究共采集了 18 个表层沉积物样品(图 1), 样品采集后迅速装入具特氟龙盖的洁净玻璃瓶中, 保持低温运输; 室内经冷冻干燥和研磨后备用. 同时还采集了植物 15 科 20 种, 包括藏嵩草、点地梅、蒲公英等陆生草本植物, 狐尾藻等水生草本植物和香柏等木本植物, 涵盖了区域植被类型的主要物种, 其

鉴定结果见表 1. 采集的植物样品经纯净水清洗后装入无菌的医用纱布袋中, 放置在阴凉通风处; 室内冷冻干燥后选取植物叶片进行索氏抽提.

## 2.2 样品前处理与测试

样品经索氏抽提和无水硫酸钠/硅胶层析柱分离得到正构烷烃(具体流程见文献[8]), 利用 GC/MS(Thermo Finnigan 生产的 Trace GC Ultra & Polaris Q MS, 毛细柱型号 Agilent DB-5MS)测定, 采用特征碎片离子和相对保留时间定性, 标准曲线法定量. 同时还利用岛津 TOC-V<sub>CPH</sub> 测定了沉积物样品的总有机碳(TOC), 利用美国 Microtrac S3500 激光粒度仪测量了沉积物的粒度. 以上测试均在中国科学院青藏高原研究所完成.

表 1 纳木错现代植物样品鉴定  
Tab.1 Identification and classification of plants of Nam Co

中文名(拉丁名)	科属	类别	烷烃总量 (mg/g)	主峰碳
藏嵩草( <i>Kobresia xchoenoides</i> )	莎草科 嵩草属	陆生草本	3.508	C <sub>31</sub>
嵩草( <i>Kobresia</i> sp.)	莎草科 嵩草属	陆生草本	7.396	C <sub>31</sub>
高原荨麻( <i>Urtica hyperborea</i> )	荨麻科 荨麻属	陆生草本	3.897	C <sub>29</sub>
短穗兔耳草( <i>Lagotis brachystachya</i> )	玄参科 兔儿草属	陆生草本	5.860	C <sub>29</sub>
蒲公英( <i>Taraxacum</i> sp.)	菊科 蒲公英属	陆生草本	2.036	C <sub>29</sub>
风毛菊( <i>Saussurea</i> sp.)	菊科 风毛菊属	陆生草本	14.742	C <sub>31</sub>
鸢尾( <i>Iris</i> sp.)	鸢尾科 鸢尾属	陆生草本	4.117	C <sub>29</sub>
细叶亚菊( <i>Ajania tenuifolia</i> )	菊科 亚菊属	陆生草本	15.763	C <sub>29</sub>
青海刺参( <i>Morina kokonorica</i> )	川续断科 刺续断属	陆生草本	3.463	C <sub>31</sub>
独一味( <i>Lamiophlomis rotata</i> )	唇型科 独一味属	陆生草本	3.846	C <sub>31</sub>
藏波罗花( <i>Incarvillea younghusbandii</i> )	紫葳科 角蒿属	陆生草本	5.830	C <sub>31</sub>
矮火绒草( <i>Leontopodium nanum</i> )	菊科 火绒草属	陆生草本	13.522	C <sub>31</sub>
大果大戟( <i>Euphorbia wallichii</i> )	大戟科 大戟属	陆生草本	7.587	C <sub>29</sub>
异叶青兰( <i>Dracocephalum heterophyllum</i> )	唇型科 青兰属	陆生草本	8.479	C <sub>31</sub>
狐尾藻( <i>Myriophyllum</i> sp.)	小二仙草科 狐尾藻属	沉水草本	1.367	C <sub>23</sub>
眼子菜( <i>Potamogeton</i> sp.)	眼子菜科 眼子菜属	沉水草本	3.033	C <sub>23</sub>
藨草( <i>Scirpus</i> sp.)	莎草科	湿生草本	2.423	C <sub>31</sub>
Plant-16 <sup>1)</sup>	—	湿生草本	2.068	C <sub>29</sub>
垫状点地梅( <i>Androsace tapete</i> )	报春花科 点地梅属	陆生草本	7.134	C <sub>33</sub> , C <sub>31</sub>
香柏( <i>Sabina pingii</i> )	柏科 圆柏属	木本	11.739	C <sub>33</sub>

1) 因标本保存状态较差, 未能得到鉴定.

## 3 结果与讨论

### 3.1 植物叶片的正构烷烃组成与含量

植物叶片只含碳数大于 C<sub>20</sub> 的长链烷烃, 烷烃总量达 mg/g 量级(表 1), 比表层沉积物高 3 个数量级(表 2). 其中茎叶上密布绒毛的矮火绒草、风毛菊和细叶亚菊的烷烃含量明显高于其它植物. 陆生植物叶片多以 *n*-C<sub>29</sub> 或 *n*-C<sub>31</sub> 烷烃为主峰碳, 个别样品如垫状点地梅和香柏的主峰碳为 *n*-C<sub>33</sub> 烷烃, 都具有明显的奇碳优势. 狐尾藻和眼子菜等沉水植物主要含 *n*-C<sub>21</sub>-C<sub>25</sub> 烷烃, 具有 *n*-C<sub>23</sub> 的主峰, 明显区别于陆生植物. 而湿生草本 Plant-16 和藨草的烷烃组分具有陆生和沉水植物间过渡的特点(图 2).

从本文数据来看, 沉水植物的烷烃碳链分布特征与前人研究结果较为一致<sup>[2,18]</sup>; 而陆生植物有所

差异. 一般来说, 陆生植物烷烃以  $n\text{-C}_{27}$ ,  $\text{C}_{29}$  和  $\text{C}_{31}$  为主<sup>[19-21]</sup>. 但纳木错陆生植物的  $n\text{-C}_{27}$  烷烃含量偏少, 多低于主峰碳含量的一半以上;  $n\text{-C}_{33}$  烷烃反而较多, 在许多样品中都超过  $n\text{-C}_{27}$  烷烃的含量, 尤以垫状点地梅和香柏最为突出. 这表明纳木错陆生植物烷烃的碳链长度发生了正向“迁移”. 根据植物生物学研究, 叶蜡能减轻低温、干旱、强辐射等环境胁迫作用的影响, 保护叶肉细胞的正常生理功能<sup>[22]</sup>; 反过来这些胁迫作用也促使植物产生生理适应, 叶蜡中的烷烃成分与含量发生相应的改变<sup>[23]</sup>. 在人工控制实验中, 处于灯下或低温环境中的植株, 其烷烃含量会增高, 烷烃主峰向链长增加的方向迁移. 例如在暗室中生长的大麦(*Hordeum vulgare*)具有  $n\text{-C}_{31}$  的主峰, 在灯光下生长时主峰碳变成  $n\text{-C}_{33}$  烷烃; 同在暗室中, 温度越低, 烷烃含量越高<sup>[24]</sup>. 由此推之, 高原强辐射和高寒条件促使纳木错的陆生植物合成了更多的  $n\text{-C}_{33}$  烷烃.

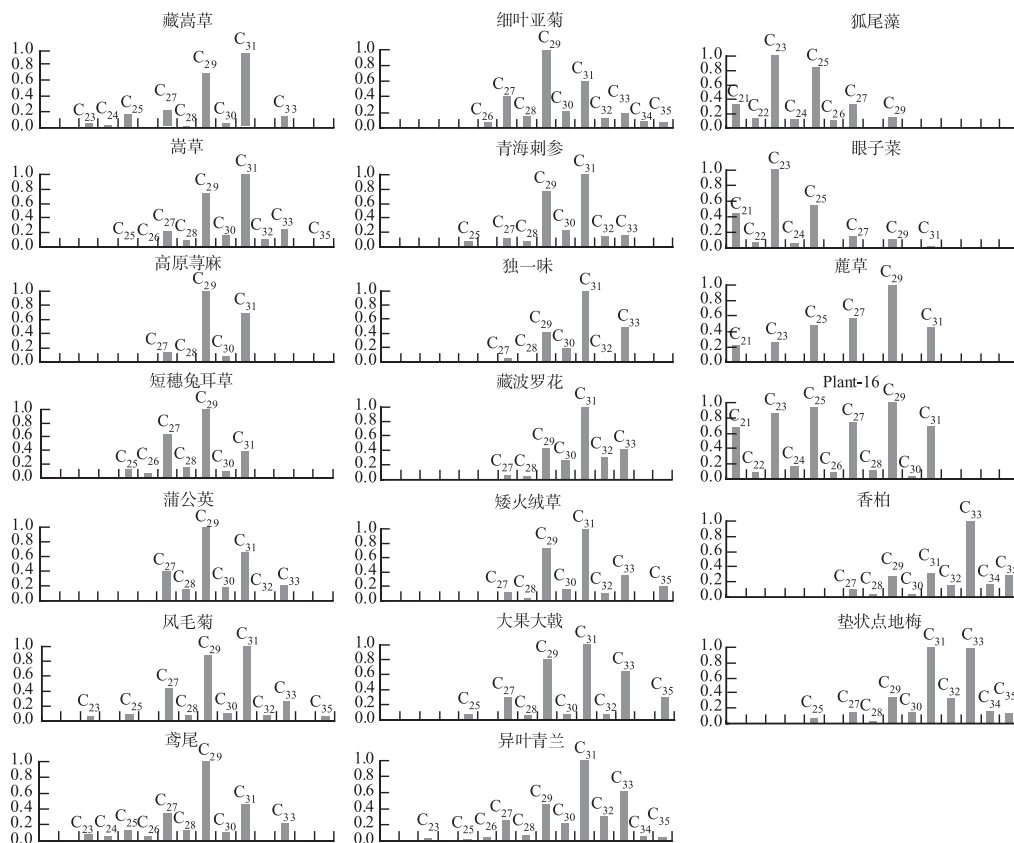


图 2 纳木错植物叶片所含烷烃的相对含量

Fig.2 The relative concentration of  $n$ -alkanes in leaf wax of plants around Nam Co

### 3.2 表层沉积物的正构烷烃组成及来源

表层沉积物的粒度分布较均匀, 以粉砂黏土为主, 其中 9、15、17 号样品的砂质成分较多, 平均粒径较大. TOC 含量为 1.215%–2.465%(表 2), 除 18 号样品以外, 其它点变化范围不大. 根据前人研究<sup>[25]</sup>和野外调查, 18 号点位于波曲入湖口, 沼泽比较发育, 湖滨浅滩腐殖质丰富, 沉水植物与附植藻类繁盛, 因此 TOC 含量较高.

沉积物中的烷烃总量为 4.9–9.4 $\mu\text{g/g}$ , 碳数分布范围在  $\text{C}_{12}$ – $\text{C}_{35}$  之间, 具有  $n\text{-C}_{23}$  和  $n\text{-C}_{31}$  的双峰特征(图 3). 根据短链与长链烷烃的比值 L/H 来衡量, 大部分样品的 L/H 值低于 20%, 表明在沉积物中碳数大于  $\text{C}_{20}$  的长链烷烃是主要组分(表 2). 碳优势指数 CPI 能反映烷烃碳链是否存在奇偶优势, 也包含一定的

物源指示意义. 通常植物烷烃具有明显的奇碳优势, CPI 值较高(>5), 石油等化石燃料来源的烷烃则缺乏奇偶优势, CPI 接近于 1<sup>[26]</sup>. 本文中, 长链烷烃的 CPI<sub>2</sub> 为 1.9–5.3, 均值 3.0, 植物来源特征明显. 短链烷烃的 CPI<sub>1</sub> 指数为 0.7–1.9, 均值 1.1, 但考虑到该湖受人类活动的影响很小, 缺乏污染源, 故认为这些短链烷烃仍然属于生物来源.

表 2 纳木错表层沉积物中的烷烃、平均粒径与总有机碳

Tab.2 The grain size, total organic carbon and *n*-alkanes of surface sediments in Nam Co

采样点	深度 (m)	经纬度	烷烃总量 (μg/g)	L/H <sup>1)</sup> (%)	CPI <sub>1</sub> <sup>2)</sup>	CPI <sub>2</sub> <sup>3)</sup>	P <sub>aq</sub> <sup>4)</sup>	平均粒径 (μm)	TOC (%)
1	59.5	30°50.488'N, 90°54.173'E	7.7	30.4	0.7	3.8	0.42	21.8	1.511
2	84	30°40.367'N, 90°43.700'E	5.5	4.1	1.9	5.3	0.36	–	–
3	70	30°39.533'N, 90°44.200'E	6.7	10.6	1.3	4.9	0.40	–	–
4	90	30°39.738'N, 90°41.062'E	7.5	7.3	1.9	5.3	0.37	–	–
5	60	30°38.498'N, 90°42.347'E	5.9	8.2	1.5	5.3	0.43	–	–
6	92	30°38.465'N, 90°35.985'E	5.8	16.9	1.2	2.0	0.39	11.2	1.439
7	93.5	30°40.788'N, 90°35.082'E	6.0	19.9	0.8	2.0	0.40	12.1	1.445
8	93	30°45.010'N, 90°33.873'E	8.9	14.8	0.9	3.2	0.34	9.2	1.442
9	45	30°48.180'N, 90°33.162'E	5.1	33.2	0.8	2.2	0.45	35.1	1.215
10	75	30°40.342'N, 90°29.357'E	6.1	17.2	0.9	2.2	0.36	15.5	1.227
11	84	30°44.007'N, 90°27.843'E	5.2	15.9	1.3	2.1	0.39	12.2	1.460
12	91	30°46.963'N, 90°27.299'E	6.2	21.0	0.9	1.9	0.40	12.7	1.475
13	54.5	30°39.574'N, 90°23.855'E	6.5	13.9	0.7	2.2	0.38	17.5	1.410
14	44	30°42.951'N, 90°22.565'E	5.5	21.5	0.7	2.1	0.41	18.4	1.380
15	47	30°49.642'N, 90°20.347'E	4.9	19.6	1.0	1.9	0.43	40.1	1.215
16	40	30°48.409'N, 90°18.868'E	7.6	20.6	0.8	2.3	0.38	16.6	1.852
17	20	30°38.821'N, 90°17.944'E	5.6	21.6	0.7	2.2	0.40	45.9	1.516
18	11	30°38.245'N, 90°17.340'E	9.4	18.7	1.0	3.0	0.52	20.9	2.465

1)  $L/H = \sum C_{12-20} / \sum C_{21-35}$ , 2)  $CPI_1 = (\sum C_{15-21 \text{ 奇}} / \sum C_{14-20 \text{ 偶}} + \sum C_{15-21 \text{ 奇}} / \sum C_{16-22 \text{ 偶}}) / 2$ , 3)  $CPI_2 = (\sum C_{23-33 \text{ 奇}} / \sum C_{22-32 \text{ 偶}} + \sum C_{23-33 \text{ 奇}} / \sum C_{24-34 \text{ 偶}}) / 2$ , 4)  $P_{aq} = (C_{23} + C_{25}) / (C_{23} + C_{25} + C_{29} + C_{31})$ .

主成分分析可通过降维把多个变量简化为少数几个综合变量, 这些综合变量包含了原变量的大部分信息, 有助于理解数据的内在结构及本质规律<sup>[27]</sup>. 为进一步揭示沉积物中烷烃的分布规律, 本文利用统计软件 SPSS 12.0 进行了主成分分析, 以特征值大于 1 为标准抽取了三个主成分因子(特征值分别为 5.505、2.790 和 1.157, 方差贡献率分别为 50.0%、25.4% 和 10.5%, 它们的累计方差贡献率超过 85%). 根据各烷烃变量的载荷显示, C<sub>21</sub>–C<sub>33</sub> 变量在 F<sub>1</sub> 上有大的正负荷, 尤其是 C<sub>27</sub>、C<sub>29</sub> 和 C<sub>31</sub>; C<sub>15</sub>–C<sub>19</sub> 变量在 F<sub>2</sub> 上有较大的正负荷, C<sub>17</sub> 最显著; C<sub>35</sub> 在 F<sub>3</sub> 上载荷很大(表 3).

根据主成分分析和现代植物烷烃的测试结果, 显而易见, 归于第一主成分的 *n*-C<sub>21</sub>–C<sub>33</sub> 烷烃主要来源于陆生和水生高等植物, 并且植物和沉积物中烷烃的峰值碳也是一一对应的. 其中水生植物对沉积物中 *n*-C<sub>21</sub>–C<sub>25</sub> 烷烃的贡献较多, 陆生植物对 *n*-C<sub>27</sub>–C<sub>33</sub> 烷烃贡献较多, 这一结论与文献基本一致<sup>[18–21]</sup>. 而文献中少有提及的 *n*-C<sub>33</sub> 烷烃, 与香柏和垫状点地梅等植物存在对应关系, 其物源也是清晰的. 并且沉积物中该烷烃与 *n*-C<sub>27</sub> 烷烃的含量相当, 暗示了陆生植物为适应高原环境而出现的烷烃碳链增加的现象在整个

湖区都普遍存在. 对于水生植物输入的烷烃, Ficken 等认为当  $P_{aq}$  在 0.1–0.4 之间时以挺水植物来源为主, 在 0.4–1 之间时则以沉水/漂浮植物贡献为主<sup>[18]</sup>. 本文中, 表层沉积物的  $P_{aq}$  为 0.34–0.52(表 2), 倾向于非挺水植物的输入; 又因为纳木错不存在漂浮型植物, 所以沉水植物是  $n$ -C<sub>21</sub>–C<sub>25</sub> 烷烃的主要来源.

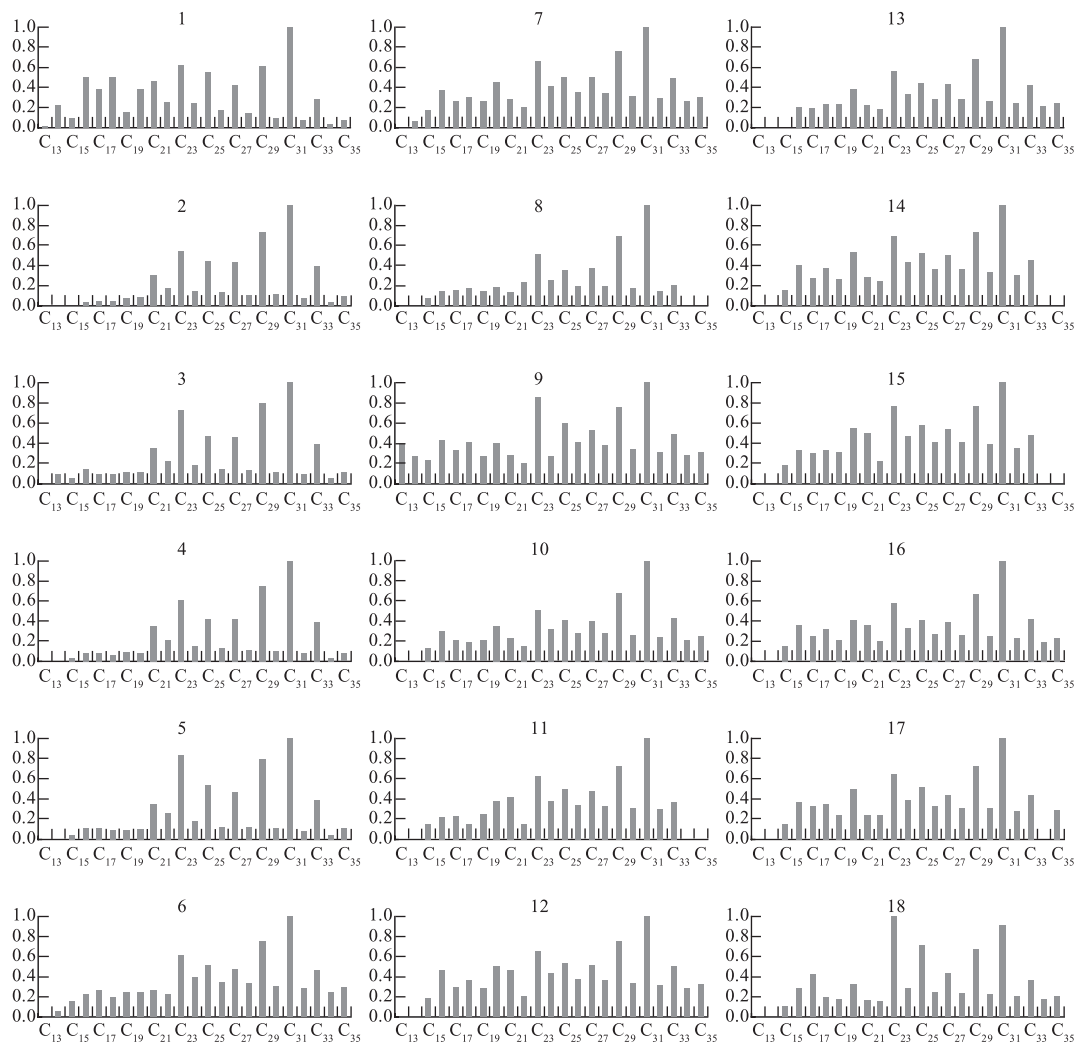


图 3 纳木错表层沉积物中正构烷烃的相对含量

Fig.3 Relative concentration of  $n$ -alkanes of surface sediments in Nam Co

表 3 主成分因子载荷

Tab.3 Principal component loading matrix

主成分 因子载荷	烷烃变量										
	C <sub>15</sub>	C <sub>17</sub>	C <sub>19</sub>	C <sub>21</sub>	C <sub>23</sub>	C <sub>25</sub>	C <sub>27</sub>	C <sub>29</sub>	C <sub>31</sub>	C <sub>33</sub>	C <sub>35</sub>
F <sub>1</sub>	-0.308	0.179	-0.088	0.607	0.891	0.872	0.977	0.953	0.924	0.855	-0.002
F <sub>2</sub>	0.729	0.95	0.828	-0.514	0.292	0.351	-0.011	-0.061	0.021	-0.089	0.432
F <sub>3</sub>	-0.263	0.018	-0.205	0.040	0	0.050	-0.153	-0.194	-0.212	0.423	0.87



第二主成分的  $n\text{-C}_{15}\text{-C}_{19}$  烷烃常被认为来自于低等藻类和光合细菌,  $n\text{-C}_{17}$  为主峰碳<sup>[28]</sup>, 具有奇碳优势<sup>[29]</sup>. 由于高原气候寒冷, 环境条件苛刻, 纳木错湖水中浮游藻类的数量只有约  $5 \times 10^4 \text{ cells/L}$ , 初级生产力低下<sup>[25]</sup>, 这可能是短链烷烃含量较少的主要原因. 9号样品中比较特殊,  $n\text{-C}_{13}$  烷烃含量较高, 根据本文数据尚不能解释其具体来源, 有可能是长链烷烃的降解产物. 在第三主成分上有较高载荷的  $n\text{-C}_{35}$  烷烃, 具有矮火绒草、香柏、大果大戟等植物来源; 但有些沉积物样品并不含有, 意味着该烷烃因含量过低缺乏实用意义.

### 3.3 表层沉积物中正构烷烃的空间分布特征

根据上述分析, 以  $\text{C}_{15}+\text{C}_{17}+\text{C}_{19}$ ,  $\text{C}_{21}+\text{C}_{23}+\text{C}_{25}$  和  $\text{C}_{27}+\text{C}_{29}+\text{C}_{31}+\text{C}_{33}$  的组合分别代表低等菌藻类、沉水植物和陆生植物的贡献, 得到各类烷烃的在湖泊中的空间分布特征. 短链烷烃分布比较均一(图 4b), 可能由低等菌藻类的浮游生活型所决定. 前已述及, 18号样品的 TOC 含量很高(图 4a), 沉水植物和与之附生的低等藻类比较繁盛. 1号点接受了扎仁诺不日半岛以东湖弯的大量沉积, 而这个湖弯的沉水植物和附植藻类同样非常发育. 因此这两点的短链烷烃含量明显大于其它区域. 但靠近南岸的 2-5号样品恰恰相反, 其可能的原因是念青唐古拉山冰川在夏季大量补给淡水改变了南岸的温盐环境, 由此导致局部的浮游藻类生产力降低, 短链烷烃随之减少.

沉水植物和陆生植物输入的烷烃具有相似的空间分布, 其含量从湖滨到湖中心明显减少(图 4c, 4d). 这种分布形式, 与非洲西海岸的烷烃含量随离岸距离增加而减少的模式一致<sup>[30]</sup>. 此类烷烃通常以溶解有机质和悬浮有机质吸附的形式向湖中心扩散, 最终沉降到沉积物-水界面和沉积中心<sup>[2]</sup>. 在这一过程中, 烷烃会被细菌微生物持续分解, 到达沉积物表层的只是很少一部分, 本文中植物与表层沉积物烷烃含量的数量级差异便可佐证. 北美密歇根湖的研究显示在每 100m 的沉降过程中, 60% 以上的烷烃被分解了<sup>[31]</sup>. 也就是说, 长链烷烃的分布特征与其运移距离和沉降速率有关, 运移距离越短, 沉积越迅速, 最后保存下来的烷烃越多. 另一方面, 大坡度的水下地形有利于近岸沉积物快速搬运再沉积, 也可以使长链烷烃得以较多保存, 位于水下山脊坡脚处的 8号样品以及南岸的 2-5号样品便是这种情况.

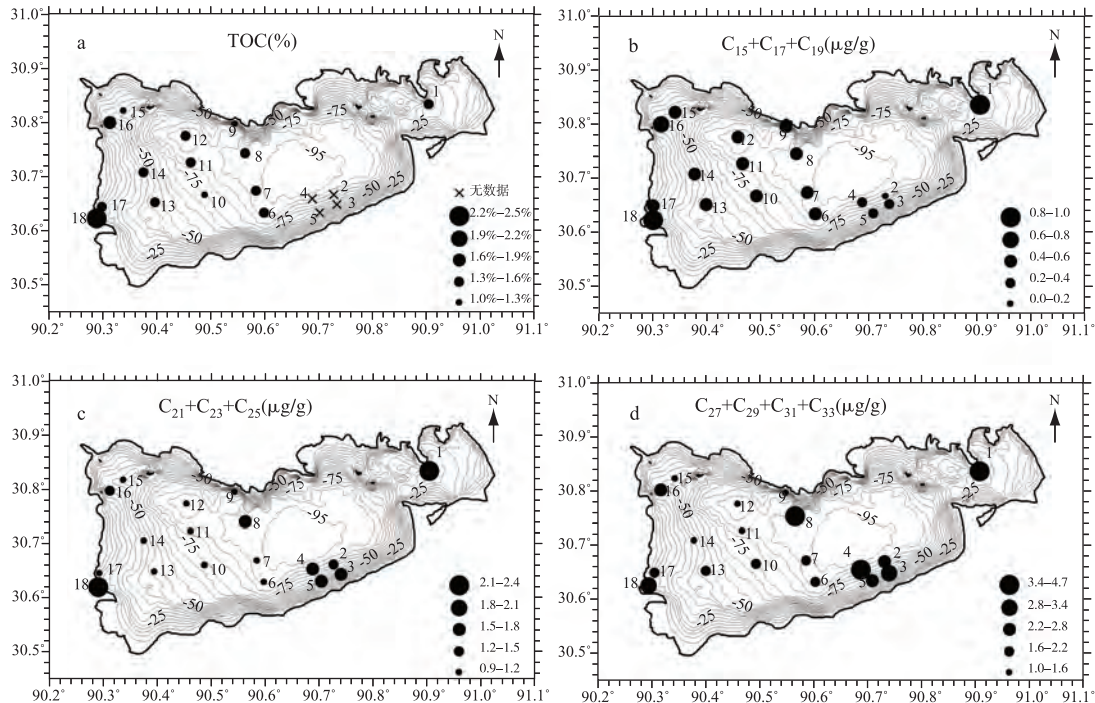


图 4 纳木错表层沉积物中正构烷烃和 TOC 的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of TOC and  $n$ -alkanes of surface sediments in Nam Co

但是, 作为湖滨原地生长的沉水植物, 它们输入的烷烃一直在湖水中运移, 与陆源输入的植物烷烃在空间分布上仍存在一定差别. 图 4c 显示在离岸较远的阔水区域, 沉水植物输入的烷烃含量均匀, 说明烷烃离开生物源并在水体中运移一段距离后已经充分“扩散”. 但陆生植物烷烃在阔水区域仍存在差异, 6、7、10、13 号样品的含量高于 11、12、14 号样品, 显示了入湖河流对烷烃分布的影响. 由于西南部测曲、昂曲和波曲是主要入湖河流, 汇水区域宽广<sup>[32]</sup>, 聚集了大量陆源碎屑, 因而原始输入的植物烷烃较多, 最终导致沉积物中的烷烃含量较高. 相对的, 西北的雄曲流量较小, 汇水范围不及西南, 沉积物中保存的烷烃含量较小. 当然, 对于各类烷烃的空间分布特征还只是初步认识, 尚需在西南部和中部获取更多样品, 并对湖泊不同区域的营养状况、水化学特征和生物分布进行综合研究, 才能深入理解这种空间差异性的影响因素.

## 4 结论

本文通过提取纳木错现代植物与表层沉积物中的正构烷烃, 开展了有关于其来源和空间分布特征的研究, 得到以下初步结论:

(1) 纳木错沉水植物所含烷烃以  $n\text{-C}_{21}\text{-C}_{25}$  为主, 具有  $n\text{-C}_{23}$  的峰值; 陆生植物则以碳数大于  $\text{C}_{27}$  的长链烷烃为主, 具有  $n\text{-C}_{29}$  或  $n\text{-C}_{31}$  的峰值. 个别物种, 如垫状点地梅和香柏的所含的  $n\text{-C}_{33}$  烷烃含量很高, 这在以往研究中鲜有报道.

(2) 纳木错表层沉积物中主要以碳数大于  $\text{C}_{20}$  的长链烷烃为主, 具有  $n\text{-C}_{31}$  和  $n\text{-C}_{23}$  的双峰分布形式, 奇碳优势明显, 主要来源于陆生植物以及沉水植物. 短链烷烃主要来源于低等菌藻类, 其生物量较小是短链烷烃含量少的主要原因.

(3) 在空间分布上, 短链烷烃比较均一, 但附植藻类繁盛的湖滨区域往往含量较高. 长链烷烃从湖滨到湖中心含量逐渐降低, 与运移距离和沉积过程有关. 初步分析认为, 陆生植物来源的烷烃在沉积物中的空间分布状态受西南入湖河流的影响较大, 但具体影响因素还需进一步深入研究.

致谢: 感谢中国科学院青藏高原研究所的吕新苗副研究员和西北高原生物研究所的黄荣福研究员在植物鉴定中的指导, 以及青藏高原环境变化与地表过程实验室的高少鹏工程师在实验测试中给予的帮助.

## 5 参考文献

- [1] Meyers PA, Ishiwatari R. Lacustrine organic geochemistry—an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Org Geochem*, 1993, **20**(7): 867-900.
- [2] Meyers PA. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes. *Org Geochem*, 2003, **34**(2): 261-289.
- [3] Ratnayake NP, Suzuki N, Okada M *et al.* The variations of stable carbon isotope ratio of land plant-derived  $n$ -alkanes in deep-sea sediments from the Bering Sea and the North Pacific Ocean during the last 250,000 years. *Chem Geol*, 2006, **228**(4): 197-208.
- [4] Xie SC, Evershed RP. Peat molecular fossils recording paleoclimatic change and organism replacement. *Chin Sci Bull*, 2001, **46**(20): 1749-1752.
- [5] Zhou WJ, Xie SC, Meyers PA *et al.* Reconstruction of late glacial and Holocene climate evolution in southern China from geolipids and pollen in the Dingnan peat sequence. *Org Geochem*, 2005, **36**(9): 1272-1284.
- [6] Xie SC, Yao TD, Kang SC *et al.* Geochemical analyses of a Himalayan snowpit profile: implications for atmospheric pollution and climate. *Org Geochem*, 2000, **31**: 15-23.
- [7] 朱立平, 鞠建廷, 王君波等. 湖芯沉积物揭示的莫次冰消开始时期普莫雍错湖区环境变化. *第四纪研究*, 2006, **26**(5): 772-780.
- [8] Lin X, Zhu LP, Wang Y *et al.* Environmental changes reflected by  $n$ -alkanes of lake core in Nam Co on the Tibetan Plateau since 8.4 kaB.P. *Chin Sci Bull*, 2008, **53**(19): 3051-3057.
- [9] Mügler I, Sachse D, Werner M *et al.* Effect of lake evaporation on  $\delta\text{D}$  values of lacustrine  $n$ -alkanes: a comparison of Nam Co



- (Tibetan Plateau) and Holzmaar (Germany). *Org Geochem*, 2008, **39**: 711-729.
- [10] 郑艳红, 周卫建, 谢树成. 若尔盖高原全新世气候序列的类脂分子化石记录. 第四纪研究, 2007, **27**(1): 108-113.
- [11] 夏忠欢, 徐柏青, Mügler I 等. 青藏高原湖泊表层沉积物中陆源正构烷烃氢同位素比值的气候意义. 湖泊科学, 2008, **20**(6): 695-704.
- [12] Lamoureux S. Spatial and interannual variations in sedimentation patterns recorded in nonglacial varved sediments from the Canadian High Arctic. *J Paleolimn*, 1999, **21**: 73-84.
- [13] Gilbert R. Spatially irregular sedimentation in a small, morphologically complex lake: implications for paleoenvironmental studies. *J Paleolimn*, 2003, **29**: 209-220.
- [14] 关志华, 陈传友, 区裕雄等. 西藏河流与湖泊. 北京: 科学出版社, 1984: 115-215.
- [15] 王君波, 朱立平, Daut G 等. 西藏纳木错水深分布及现代湖沼学特征初步分析. 湖泊科学, 2009, **21**(1): 128-134.
- [16] 宗浩, 王成善, 黄川友等. 纳木错流域自然生态特征与生物资源保护研究. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, **31**(5): 551-557.
- [17] 王东. 青藏高原水生植物地理研究[博士学位论文]. 武汉: 武汉大学研究生院, 2003.
- [18] Ficken KJ, Li B, Swain DL *et al.* An *n*-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes. *Org Geochem*, 2000, **31**(7-8): 745-749.
- [19] Cranwell PA. Chain-length distribution of *n*-alkanes from lake sediments in relation to post-glacial environmental change. *Freshw Biol*, 1973, **3**: 259-265.
- [20] Yamamoto K, Kurata Y, Takayanagi Y *et al.* Latitudinal change of normal paraffin composition in the northwest Pacific sediments. *Marine Geol*, 2003, **196**: 157-170.
- [21] Schwark L, Zink K, Lechterbeck J. Reconstruction of postglacial to early Holocene vegetation history in terrestrial Central Europe via cuticular lipid biomarkers and pollen records from lake sediments. *Geology*, 2002, **30**(5): 463-466.
- [22] Shepherd T, Robertson GW, Griffiths DW *et al.* Effects of environment on the composition of epicuticular wax from kale and swede. *Phytochem*, 1995, **40**: 407-417.
- [23] Shepherd T, Griffiths DW. The effects of stress on plant cuticular waxes. *N Phytol*, 2006, **171**: 469-499.
- [24] Giese BN. Effects of light and temperature on the composition of epicuticular wax of barley leaves. *Phytochem*, 1975, **14**: 921-929.
- [25] 袁军, 高吉喜, 吕宪国等. 纳木错湿地资源评价及保护与合理利用对策. 资源科学, 2002, **24**(2): 29-34.
- [26] Schefuß E, Ratmeyer V, Stuut JBW *et al.* Carbon isotope analysis of *n*-alkanes in dust from the lower atmosphere over the central eastern Atlantic. *Geochim Cosmochim Acta*, 2003, **67**(10): 1757-1767.
- [27] 吴聿明. 环境统计学. 北京: 中国环境科学出版社, 1991: 217-315.
- [28] Cranwell PA, Eglinton G, Robinson N. Lipids of aquatic organisms as potential contributors to lacustrine sediments- II. *Org Geochem*, 1987, **11**(6): 513-527.
- [29] Youngblood WW, Blumer M, Guillard RL *et al.* Saturated and unsaturated hydrocarbons in marine benthic algae. *Marine Geol*, 1971, **8**: 190-201.
- [30] Schefuß E, Versteegh GJM, Jansen JHF *et al.* Lipid biomarkers as major source and preservation indicators in SE Atlantic surface sediments. *Deep-sea I*, 2004, **51**: 1199-1228.
- [31] Meyers PA, Eadie BJ. Source, degradation, and resynthesis of the organic matter on sinking particles in Lake Michigan. *Org Geochem*, 1993, **20**(1): 47-56.
- [32] 吴艳红, 朱立平, 叶庆华等. 纳木错流域近 30 年来湖泊—冰川变化对气候的响应. 地理学报, 2007, **62**(3): 301-311.