

湖北清江现代植物叶片正构烷烃和烯烃的季节性变化

崔景伟^①, 黄俊华^{①②*}, 谢树成^②^① 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074;^② 中国地质大学生物过程与环境地质教育部重点实验室, 武汉 430074* 联系人, E-mail: jhhuang@cug.edu.cn

2007-09-29 收稿, 2008-02-27 接受

国家自然科学基金(批准号: 40572098, 40525008, 40621002, 40531004)和高等学校学科创新引智计划(批准号: B08030)资助项目

摘要 利用气相色谱和气相色谱-质谱联用仪分析了湖北清江岩溶地区 5 种植物叶片类脂物的季节性变化特征。随季节的变化, 同一植物叶片正构烷烃的碳数分布范围和主峰碳数不变, 但正构烷烃的碳优势指数(CPI)从 5 月到 11 月逐渐降低, 这种变化可能与植物叶片在枯萎过程中类脂物的变化有关, 活体叶片与相应植物落叶的比较也证实了这点。这反映了在第四纪沉积物中正构烷烃 CPI 可能与腐殖化过程有关而可以指示与之相关的气候环境条件。不同植物的正构烷烃含量差别较大, 对沉积物的输入贡献不一。正构烯烃含量和种类明显随季节变化, 可能与环境温度变化有关。8 月份温度最高, 正构烯烃的种类最少。

关键词

正构烷烃

正构烯烃

碳优势指数

平均碳链长度

环境变化

高等植物的叶表皮覆盖着一层由长链有机化合物组成的叶表皮蜡^[1]。表皮蜡具有多种功能, 它可以为植物提供物理化学保护屏障、减少非气孔水分的损失、控制叶片的温度、对叶片提供光保护、增强抗霜冻能力、渗透叶片所需的组分以及增强对有害物(包括害虫、真菌和细菌)攻击的抵抗力等^[2,3]。表皮蜡是一种复杂的混合物, 其成分是长链的脂肪族和环状化合物, 包括碳水化合物、初级和次级醇、醛、酮、酯、脂肪酸以及三萜系化合物等^[4]。叶片中正构烷烃主要来源于叶表皮蜡^[5]。

高等植物的表皮蜡在迁移、沉积、埋藏过程中较稳定, 不易降解, 能够长期保存在海洋、湖泊、黄土等沉积物中^[6]。表皮蜡中的正构烷烃在地质体中不但表现出与母质来源有很好的相似性, 而且还能指示沉积生态环境特征。因此, 正构烷烃分子组合特征已成为一个经典的有机地球化学指标^[7], 已在海洋^[8]、湖泊^[9]、泥炭^[10,11]、石笋^[12]、黄土^[13]和红土^[14]中得到较好的应用。

地质体中正构烷烃的研究主要集中于根据其分布特征判断有机质来源并探讨正构烷烃与其他类脂物(如脂肪酸、脂肪酮、脂肪醇)之间的地质转化过程

^[15]。沉积物中正构烷烃的平均碳链长度(ACL)和CPI可以作为气候的替代指标^[16], 但是对于植物活体叶片, 其正构烷烃、烯烃的含量和两种替代指标随季节变化的资料较少。本文通过对比湖北清江地区现代植物叶片正构烷烃、烯烃随植物种类和季节的变化特征来分析正构烷烃、烯烃对气候环境变化的响应。

1 采样地点和实验方法

实验中所有样品均采自湖北清江流域和尚洞顶, 该区地处亚热带, 属季风性的山地湿润气候, 温和多雨, 年平均气温为 13~16℃, 区内年平均降水为 1200~1700 mm, 主要集中在 4~9 月。洞顶植被茂盛, 植被类型为木本植物和山地灌草丛为主。在研究区域内, 植被分布相似, 没有明显的垂直分带变化。采样坐标为 30°26′44.4″N, 110°25′10.3″E^[17]。采集了 5 种优势种植物的活体叶片, 且每种植物叶片数目不少于 30, 具体的植物样品见表 1。采样时间分别为

表 1 植物样品的描述

样品号	zw-1	zw-3	zw-4	zw-6	zw-10
植物名	豆科白刺花	禾本科	马鞭草科	木兰科	荨麻科
类别	木本	草本	草本	木本	灌木

2006年5月、8月和11月,其中11月采集活体叶片的同时也采集了 zw-3 和 zw-6 植物相应的落叶。

采集到的植物叶片直接装入样品袋,取回后先用超纯水清洗,然后自然晾干,最后低温(40℃)烘干待用。为防止操作过程引入污染,实验之前手套和滤纸经氯仿抽提 72 h,剪子、镊子、筛子以及研钵均用氯仿清洗,玻璃器皿用超纯水清洗后再高温煅烧。将样品人工粉碎至 80 目(其中个别草本植物剪碎至 0.1 cm 左右)之后称取 1 g 左右放入锥形瓶进行超声抽提。每次加 20 mL 氯仿超声抽提 15 min,然后过滤得到提取液。反复抽提 3 次,再经旋转蒸发仪浓缩后转入细胞瓶晾干至衡重。最后过硅胶层析柱,先后用正己烷、苯和甲醇分别淋洗得到三组分。第一组分直接进行气相色谱(GC)和气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)的检测。

岛津 2010GC 气相色谱进行定量分析。色谱条件: Rtx-5 石英毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm), 始温 80℃, 升温速率 3℃/min, 终温 320℃, 终温恒温 10 min, 进样口温度 300℃, 进样量 1 μL, 氮气为载气, FID 检测器 320℃, 不分流模式, H₂ 流速: 40.0 mL/min, 空气流速: 100.0 mL/min, N₂/Air 补偿: 30.0 mL/min. 胆甾烷作内标。HP6890/HP5973 气相色谱-质谱联用仪的色谱条件: HP-5MS 石英毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm), 始温 70℃, 升温速率 3℃/min, 终温 280℃, 终温恒温 20 min, 进样口温度 300℃, 进样量 1 μL, 氦气为载气; 质谱条件: 电子轰击源, 电离能量 70 eV; GC, MS 接口温度 280℃。

2 同种植物正构烷烃和正构烯烃的季节变化

2.1 正构烷烃分布

结果表明,同种植物在不同的季节,其正构烷烃的碳数分布范围没有变化,均呈单峰型分布。主峰碳数也没有变化,且奇碳数C₂₉, C₃₁ 或C₃₃ 的含量具有绝对优势(图 1)。Inno^[18]通过研究杜鹃花属植物的烷烃分布,得出其烷烃的分布模式不会随着年龄的变化而变化。这与本文的结论相一致。

有意义的是,正构烷烃的 CPI 表现出明显的季节性变化规律(表 2)。从 5~11 月,即从植物叶子开始生长到最后接近枯萎,所有植物的 CPI 逐渐降低。这种变化可能与植物叶子在枯萎过程中类脂物的变化有关。植物中奇碳数正构烷烃和偶碳数正构烷烃的单体碳同位素存在较大差异,表明其合成机制不同。

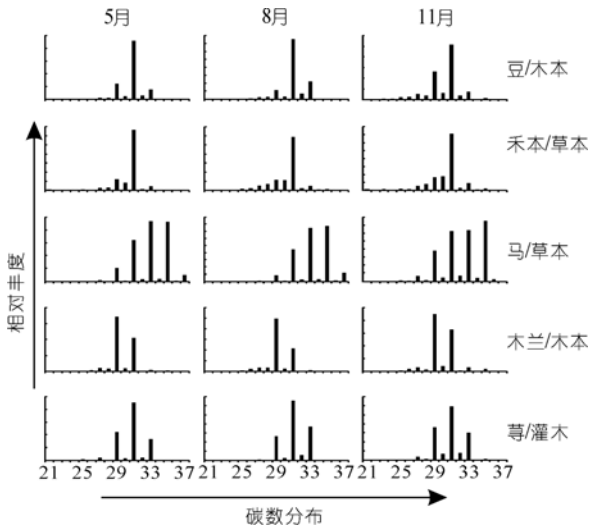


图 1 不同季节(5, 8, 11 月)植物活体叶片中正构烷烃碳数分布图

表 2 5 种植物活体叶片正构烷烃指标在不同季节(5, 8, 11 月)的变化

样号	采集时间	碳数分布范围	主峰碳数	碳优势指数 CPI ^{a)}	平均碳链长度 ACL ^{b)}
zw-1	2006-11	23~35	31	5.6	30.1
	2006-08	23~35	31	8.2	31.0
	2006-05	23~35	31	10.2	30.7
zw-3	2006-11	21~35	31	3.4	30.3
	2006-08	21~35	31	3.6	30.2
	2006-05	21~35	31	6.3	30.4
zw-4	2006-11	21~37	35	9.8	32.2
	2006-08	21~37	35	26.3	33.1
	2006-05	21~37	35	26.8	33.0
zw-6	2006-11	22~35	29	10.1	29.8
	2006-08	22~35	29	9.2	30.9
	2006-05	22~35	29	13.3	29.7
zw-10	2006-11	22~35	31	7.9	30.8
	2006-08	23~35	31	15.2	31.1
	2006-05	22~35	31	22.3	30.7

a) $CPI = [\sum(C_{25-33(odd)} / C_{24-32(even)}) + \sum(C_{25-33(odd)} / C_{26-34(even)})] / 2$;
b) $ACL = \sum(i \cdot C_i) / \sum C_i$; i 指正构烷烃的碳数, C_i 为 i 碳数的含量。
 $i=23\sim37$

奇、偶碳数正构烷烃的母体分别是偶、奇碳数n-alkyl acyl-ACP, 母体不同表明它们的合成途径也不同。因而在植物活体叶片中正构烷烃的CPI逐渐减小,可能是叶片生长直至枯萎的过程中,奇碳数和偶碳数正构烷烃的合成速度差异逐渐减小而引起的。在第四纪沉积物中,CPI与植物的腐殖化过程有关,而植物

的腐殖化又与气候环境条件紧密相连. 因此, CPI可以用来指示气候环境条件. 对同一季节活体叶片与植物落叶进行的比较也证实了这点. 在植物叶子腐殖化过程中, 偶碳数分子增加, CPI逐渐减低. Chikaraishi等人^[19]研究发现, 从植物活体树叶到土壤中的落叶, 正构烷烃的CPI有减小的趋势.

正构烷烃的ACL也表现出明显的季节性变化规律(表2). 多数植物在5月份时ACL较小, 在8月份时增大, 到11月又有所降低. 根据监测, 清江地区2006年5月、8月和11月的平均气温分别为24.3℃, 30.2℃和15.0℃. 植物叶片在8月份的时候温度最高, 合成的正构烷烃ACL较大. 这表明正构烷烃的ACL可能也受环境因子的影响. 已有文献表明, 在热带气候条件下合成碳链较长的正构烷烃, 在相对温和的气候条件下则合成较短的正构烷烃, 这是植物对环境因子的响应^[18]. 纯正构烷烃化合物的熔点为: $n\text{-C}_{27}$, 59.2℃; $n\text{-C}_{29}$, 63.7℃; $n\text{-C}_{31}$, 67.9℃; $n\text{-C}_{33}$, 71.2℃; $n\text{-C}_{35}$, 74.6℃, 平均链长增加2, 熔点增加约4℃. 叶蜡中的组分还含有其它的支链、环状和不饱和成分会对叶蜡的熔点有所影响^[20]. 因此, 在温度较高的热带地区, 为了维持叶片的硬度, 植物内部会合成高分子量即熔点较高的组分^[21], 同时叶蜡的微晶结构形状和大小以及叶蜡在不同的植物体叶片中的分布等都存在差异. 这都为不同植物正构烷烃的ACL存在差异提供了依据.

2.2 正构烷烃含量

为研究不同植物对沉积物的贡献量, 本次工作对所有的植物样品进行定量分析, 算出了不同季节每克干植物叶片中正构烷烃的含量(表3). 由表3可知, 正构烷烃的含量在5月和8月没有明显的变化, 但在11月增加幅度较大, 特别是碳链在 $\text{C}_{27}\sim\text{C}_{31}$ 之间的正构烷烃, 其含量普遍增加十几倍到几十倍, 而正构烷烃在 C_{26} 以下、 C_{32} 以上的含量变化较小.

每克植物叶片的可抽提正构烷烃含量(TOA), 在5月和8月较低, 且没有明显的变化. 这些较小的变化可能如同植物叶蜡中的脂肪醇和脂肪酸的同位素值变化一样, 是植物生长变化引起的, 而非环境因素引起的^[22]. 但在11月, TOA较5月和8月的有较大的增加, 这可能与环境因素有关. 原因是在11月时, 气温较低(月均温15.0℃), 植物为了适应较低的温度, 调节叶蜡的组成和含量. Schefuß等人^[23]提出, 植物

的烷烃组成在植物适应环境的过程中起了重要的作用. 另外, Rommerskirchen等人^[24]发现, 在叶片成熟的晚期(即11月份), 叶蜡正构烷烃的含量比脂肪醇还要高而成为叶蜡的第一大组分. 因此较高的烷烃含量可能有助于植物体抵抗寒冷.

2.3 正构烯烃分布和含量

在植物活体叶片中检测到一系列正构烯烃(图2). 同一季节不同植物的正构烯烃具有不同碳数分布特征. 而同种植物的正构烯烃在不同的季节也具有不同的分布特征. 该系列正构烯烃具有明显的偶碳数优势. 随季节的变化, 其含量、碳数分布范围和主峰碳数均发生变化. 在11月气温最低时, 合成的烯烃种类和含量都较高; 5月气温较11月高, 较8月低, 其烯烃含量和碳数分布也正好介于8月和11月之间. 8月温度最高, 烯烃的含量和碳数分布都是最少的. 尤其是马鞭草科的植物, 在8月份的样品中, 仅检测到微量的 C_{26} 和 C_{36} 正构烯烃, 但在11月份时却检测到 $\text{C}_{21}\sim\text{C}_{35}$ 之间所有的正构烯烃. 据文献报道, 植物体为了适应环境, 其表皮蜡的成分和含量会发生一些变化^[25]. 在环境温度较低时, 植物体会合成一些不饱和物质来保持细胞膜的流动性^[26]. 因此, 植物烯烃含量和种类随季节的变化, 符合分子生物学和生态学原理, 是植物对环境温度变化的一种响应. 正构烷烃的ACL与正构烷烃的ACL并不具很好的相关性, 可能是两者来源和合成途径不同导致.

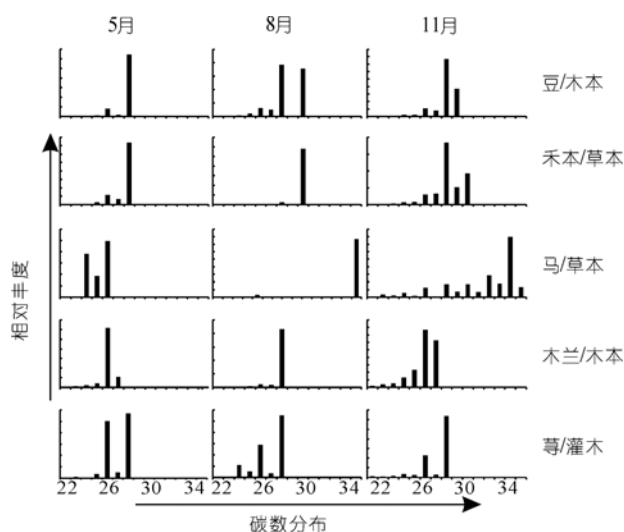


图2 不同季节(5, 8, 11月)植物活体叶片中正构烯烃的分布图

表 3 5 种植物叶片每克中正构烷烃的含量

采样时间	样品号	正构烷烃含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$															TOA ^{a)} $/\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$
		C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₂₄	C ₂₅	C ₂₆	C ₂₇	C ₂₈	C ₂₉	C ₃₀	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₃₄	C ₃₅	
5 月树叶	zw-1	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.03	0.16	0.19	2.09	0.59	10.05	0.77	1.98	0.02	0.03	15.95
	zw-3	0.01	0.00	0.02	0.01	0.05	0.04	0.18	0.25	0.92	1.15	5.18	0.19	0.53	0.03	0.11	8.67
	zw-4	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.10	0.02	1.25	0.18	5.69	0.46	9.80	0.36	12.30	30.19
	zw-6	0.00	0.00	0.01	0.02	0.04	0.15	0.55	0.87	14.08	0.81	7.29	0.12	0.35	0.02	0.22	24.52
	zw-10	0.00	0.00	0.02	0.00	0.04	0.00	0.17	0.04	3.98	0.26	14.56	0.45	3.93	0.01	0.02	23.48
8 月树叶	zw-1	0.07	0.10	0.15	0.20	0.24	0.24	0.25	0.25	0.57	0.29	3.85	0.44	1.48	0.01	0.01	8.17
	zw-3	0.01	0.01	0.02	0.02	0.08	0.14	0.34	0.54	1.04	1.34	5.43	0.28	0.56	0.06	0.22	10.09
	zw-4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.06	0.02	0.61	0.07	3.47	0.28	7.04	0.24	9.39	21.19
	zw-6	0.06	0.06	0.06	0.06	0.22	0.36	0.52	0.98	5.84	0.54	3.01	0.10	0.11	0.13	2.42	14.47
	zw-10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.15	0.08	7.22	0.78	24.63	1.31	10.28	0.02	0.02	44.54
11 月树叶	zw-1	0.04	0.05	0.25	0.26	1.04	1.51	3.10	4.41	17.00	4.98	40.59	2.57	5.32	0.02	0.13	81.26
	zw-3	0.40	0.10	0.47	0.18	0.84	0.81	2.97	4.93	11.06	18.15	67.04	3.12	7.88	0.63	2.60	121.20
	zw-4	0.08	0.10	0.56	0.36	1.64	1.30	11.21	4.66	94.70	12.62	86.92	0.06	149.99	7.13	199.62	570.96
	zw-6	0.05	0.05	0.16	0.25	0.81	2.77	4.56	9.72	87.08	6.29	54.59	0.97	3.60	0.17	2.13	173.21
	zw-10	0.01	0.04	0.19	0.09	0.63	0.46	5.90	3.68	113.43	15.60	376.73	0.29	49.81	0.08	2.76	569.71
11 月落叶	zw-3	0.06	0.04	0.06	0.06	0.48	0.78	10.68	15.42	156.68	82.98	638.35	20.03	72.00	2.69	17.35	1017.67
	zw-6	0.05	0.07	0.30	0.74	2.78	6.69	11.45	14.18	114.51	8.55	53.35	1.14	4.79	0.22	3.84	222.65

a) TOA= $\sum(C_i)$, $i=21\sim35$, 表示正构烷烃的碳数, C_i 表示每克样品中碳数为 i 的正构烷烃含量

3 同一季节不同植物正构烷烃的差异

3.1 正构烷烃分布

同一季节,不同植物正构烷烃的碳数分布存在明显差异 [16]。虽然所分析的植物叶片正构烷烃的碳数大致分布范围为 $C_{21} \sim C_{35}$,呈单峰型分布,但不同植物的主峰碳数明显发生变化,以29,31或35为主(图1)。不同植物的CPI也有很大不同,但规律性不强,其CPI一般都大于5,这与前人研究陆源高等植物中正构烷烃的结果是一致的 [8]。在该岩溶地区马鞭草科植物以 C_{35} 正构烷烃为主峰,而在其他的几种植物中含量较低。能否将 C_{35} 正构烷烃的大量出现作为该植物存在的标志还值得进一步深入研究。

3.2 正构烷烃含量

在11月份,5种植物叶片之间的TOA差值最大,相差可达5倍(zw-1与zw-4)。这说明,在相同的环境下,不同植物正构烷烃的含量存在较大的差异,这种差异导致不同植物对沉积物的输入贡献不同。因此,研究岩溶地区土壤或石笋中的有机质来源和贡献时,不仅要考虑植物的优势种,还要考虑单位质量植物叶片贡献的类脂物的量。

3.3 活体叶片和落叶正构烷烃的分布特征

对11月份两种植物活体叶片和相应落叶的正构烷烃进行了对比分析,结果显示,正构烷烃在分布特征上基本没有变化(图3);在含量上,落叶较活体植物叶片具有更高的TOA(表3)。在对该土壤剖面的研究中,发现存在强烈的微生物作用 [17]。落叶中TOA偏高,可能是在土壤微生物对植物落叶进行降解和腐殖化的过程中,将落叶中抗降解能力弱的脂肪酸和脂肪醇转化为相应碳数正构烷烃而引起的。Romerskirchen等人 [24]研究发现,在植物的花冠中,奇碳数长链正构烷烃的总量($TOA_{(odd)}$)最高;在树叶中,其含量次之;在树干中含量最低。落叶中TOA偏高也可能是其他TOA较高的落叶或花冠中的正构烷烃吸附在落叶上引起的。

4 结论

通过对岩溶地区和尚洞洞顶不同季节植物叶片

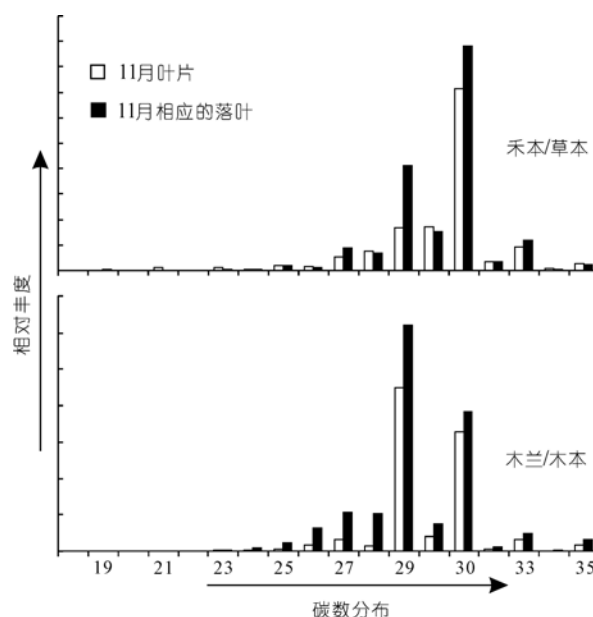


图3 11月植物叶片与相应落叶的正构烷烃分布图

中正构烷烃和烯烃的研究得出如下结论:

在不同季节,同种植物叶片的正构烷烃分布特征如主峰碳数,碳数分布范围等基本没有变化,但CPI和ACL具有明显的差异。从5~11月,绝大多数植物的正构烷烃CPI呈现降低趋势。这可能与植物的腐殖化过程相关。ACL值在5月份较小,在8月份增大,到11月又有所降低。ACL这种变化可能是植物对环境因子响应的结果。另外,正构烷烃的含量随季节存在较大差异,在5月和8月正构烷烃较低,且没有明显的变化,而到11月份却有明显增大的趋势。

在不同季节,同种植物叶片的正构烯烃具有不同的分布特征。植物的烯烃含量和种类随季节的变化也非常地明显。环境温度高时,烯烃含量低、种类少;环境温度低时,烯烃含量高、种类多。正构烯烃的这种变化是植物对环境温度响应的结果。

在同一季节,不同植物的正构烷烃分布特征存在明显差异,但没有一定的规律性。同时,不同植物的正构烷烃含量也存在较大的差异,这种差异导致不同植物对沉积物的输入贡献不同。另外,在同一季节,植物落叶的正构烷烃含量与相应的活体叶片相比有显著的增加,这可能是地表微生物作用的结果。

致谢 两位审稿专家提出了建设性意见,特约编辑对文章的排版等提出了建议。在野外采样过程中得到了中国地质大学(武汉)地球科学学院黄咸雨博士和中国科学院南京地理与湖泊研究所蒲阳博士的帮助,在论文修改过程中

国地质大学(武汉)地球科学学院胡超涌教授提供一些数据, 英国伦敦帝国理工大学焦丹博士提供部分参考文献, 陈林博士负责 GC, GC-MS 的正常运转, 在此一并表示感谢。

参考文献

- Conte M H, Weber J C. Plant biomarker in aerosols record isotopic discrimination of terrestrial photosynthesis. *Nature*, 2002, 417: 639—641[[doi](#)]
- Shepherd T, Robertson G W, Griffiths D W, et al. Effects of environment on the composition of epicuticular wax esters from kale and swede. *Phytochemistry*, 1997, 46: 83—96[[doi](#)]
- Riederer M, Schreiber L. Protecting against water loss: Analysis of the barrier properties of plant cuticles. *J Exp Bot*, 2001, 52(363): 2023—2032[[doi](#)]
- Jetter R, Schäffer S. Chemical composition of the *Prunus laurocerasus* leaf surface. Dynamic changes of the epicuticular wax film during leaf development. *Plant Physiol*, 2001, 126: 1725—1737[[doi](#)]
- Bakker M I, Bass W J, Sijm D T H M, et al. Leaf wax of *lactuca sativa* and *plantago major*. *Phytochemistry*, 1998, 47(8): 1489—1493[[doi](#)]
- Pancost R D, Boot C S. The palaeoclimatic utility of terrestrial biomarkers in marine sediments. *Mar Chem*, 2004, 92: 239—261[[doi](#)]
- 卢冰, 周怀阳, 陈荣华, 等. 北极现代沉积物中正构烷烃的分子组合特征及其与不同纬度的海域对比. *极地研究*, 2004, 16(4): 281—294
- Eglinton T I, Boon J J, Minor E C, et al. Microscale characterization of algal and related particulate organic matter by direct temperature-resolved mass spectrometry. *Mar Chem*, 1996, 52: 27—54[[doi](#)]
- Cranwell P A. Chain-length distribution of *n*-alkanes from lake sediments in relation to post-glacial environmental change. *Freshwat Biol*, 1973, 3: 259—265[[doi](#)]
- Xie S, Nott C J, Avsejs L A, et al. Palaeoclimate records in compound-specific δD values of a lipid biomarker in ombrotrophic peat. *Org Geochem*, 2000, 31: 1053—1057[[doi](#)]
- Pancost R D, Baas M, Geel B. Biomarkers as proxies for plant inputs to peats: An example from a sub-boreal ombrotrophic bog. *Org Geochem*, 2002, 33: 675—690[[doi](#)]
- Xie S C, Yi Y, Huang J H, et al. Lipid distribution in a subtropical southern China stalagmite as a record of soil ecosystem response to paleoclimate change. *Quat Res*, 2003, 60: 340—347 [[doi](#)]
- Zhang Z H, Zhao M X, Eglinton G, et al. Leaf wax lipids as paleovegetational and paleoenvironmental proxies for the Chinese Loess Plateau over the last 170 kyr. *Quat Sci Rev*, 2006, 25: 575—594[[doi](#)]
- 谢树成, 易轶, 刘育燕, 等. 中国南方更新世网纹红土对全球气候变化的响应: 分子化石纪录. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33(5): 411—417
- Jeng W L. Higher plant *n*-alkane average chain length as an indicator of petrogenic hydrocarbon contamination in marine sediments. *Mar Chem*, 2006, 102: 242—251[[doi](#)]
- 郑艳红, 程鹏, 周卫健. 正构烷烃及单体碳同位素的古植被与古气候意义. *海洋地质与第四纪地质*. 2005, 25(1): 99—104
- Pu Y, Huang J H, Huang X Y, et al. Acyclic alkanes in the soil over Heshang cave in Qingjiang, Hubei province. *J Chin U Geosci*, 2006, 17: 115—120[[doi](#)]
- Inno S. Effect of leaf age on epicuticular wax alkanes in *Rhododendron*. *Phytochemistry*, 1983, 22(2): 461—463[[doi](#)]
- Chikaraishi Y, Naraoka H, Poulson S R. Carbon and hydrogen isotopic fractionation during lipid biosynthesis in a higher plant (*Cryptomeria japonica*). *Phytochemistry*, 2004, 65: 323—330[[doi](#)]
- Lide D R. *CRC-Handbook of Chemistry and Physics*. London: CRC-Press, 2004
- Kawamura K, Ishimura Y, Yamazaki K. Four years' observation of terrestrial lipid class compounds on marine aerosols from the western North Pacific. *Glob Biogeochem Cycles*, 2003, 17: 1—19
- Conte M H, Weber J C, Carlson P J, et al. Molecular and carbon isotopic composition of leaf wax in vegetation and aerosols in a northern prairie ecosystem. *Oecologia*, 2003, 135: 67—77
- Schefuß E, Ratmeyer V, Stuut J W, et al. Carbon isotope analyses of *n*-alkanes in dust from the lower atmosphere over the central eastern Atlantic. *Geochim Cosmochim Acta*, 2003, 67(10): 1757—1767[[doi](#)]
- Rommerskirchen F, Plader A, Eglinton G, et al. Chemotaxonomic significance of distribution and stable carbon isotopic composition of long-chain alkanes and alkan-1-ols in C4 grass waxes. *Org Geochem*, 2006, 37: 1303—1332[[doi](#)]
- Mohammadian M A, Watling J R, Hill R S. The impact of epicuticular wax on gas-exchange and photoinhibition in *Leucadendron lanigerum* (Proteaceae). *Acta Oecolog*, 2007, 31: 93—101[[doi](#)]
- 谢树成, 黄俊华, 王红梅, 等. 湖北清江和尚洞石笋脂肪酸的古气候意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(1): 246—251