

长链正构烷烃主峰碳数作为判别草本和木本植物指标的讨论: 来自表土和现代植物的证据

饶志国^{①②}, 吴翼^{①③}, 朱照宇^{①*}, 贾国东^①, HENDERSON Andrew^④

① 中国科学院广州地球化学研究所边缘海地质重点实验室, 广州 510640;

② 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;

③ 中国科学院研究生院, 北京 100049;

④ Department of Geographical & Earth Sciences, University of Glasgow, Glasgow, G12 8QQ, UK

* 联系人, E-mail: zhuzy@gig.ac.cn

2010-11-10 收稿, 2011-01-20 接受

国家自然科学基金(40901055)、教育部科学技术研究重点项目(109151)、国家自然科学基金创新群体项目(41021091)、兰州大学交叉学科青年创新研究基金(LZUJC2007011)和国家重点基础研究发展计划(2010CB950202, 2010CB833405)资助

摘要 对我国范围内上百个表土的长链正构烷烃研究结果进行了总结(其中62个为本项研究所获得), 发现尽管上覆的现代植被类型具有很大差别, 但表土中高等植物来源的长链正构烷烃主要以 $n\text{-C}_{29}$ 和 $n\text{-C}_{31}$ 为主峰. 同时, 对文献中报道的超过300种现代植物长链正构烷烃研究结果的统计表明, 无论木本植物、草本植物还是灌木植物, 其长链正构烷烃同样主要以 $n\text{-C}_{29}$ 和 $n\text{-C}_{31}$ 为主峰. 综合对现代植物以及表土研究结果的分析, 认为表土中长链正构烷烃分子分布特征与来源植被之间的关系受多种因素的影响, 较为复杂, 两者之间的关系很难用一种简单的模式来确定.

关键词

表土
现代植物
长链正构烷烃
分子分布
主峰碳数

地质历史时期的陆地生态系统演化, 包括森林和草地植被类型的相互演替, 是过去全球变化研究的一个重要方面. 地质学家和古气候学家一直孜孜以求的通过各种途径来反演地质历史时期的植被演化历史, 过去的研究工作中经常使用的分析方法和手段有孢粉^[1,2]、植硅体^[3]等. 最近报道的一些黄土^[4-6]和南方红土^[7,8]研究, 对其中的正构烷烃进行抽提、分离后, 试图通过分析其长链部分正构烷烃分子分布特征, 来反演地质历史时期的植被类型或者其演化过程. 这些研究工作主要都依据长链正构烷烃的主峰碳数来确定历史时期的植被类型, 认为以 $n\text{-C}_{27}$ 或者 $n\text{-C}_{29}$ 为主峰的长链正构烷烃指示来源植被为森林植被, 以 $n\text{-C}_{31}$ 为主峰的长链正构烷烃指示来源植被为草原植被, 而 $n\text{-C}_{27}/n\text{-C}_{31}$ 比值(或 $n\text{-C}_{27}+n\text{-C}_{29}/n\text{-C}_{31}+n\text{-C}_{33}$)的变化则代表了木本植物和草本植物相

对输入比例的变化.

尽管高等植物叶片表皮叶蜡能产生大量具有明显奇偶优势的长链正构烷烃^[9,10], 然而, 20世纪60年代最初的现代植物长链正构烷烃研究结果就已表明其可以随着季节、研究地点以及植物的年龄发生变化, 并且在植物植株的不同部位也有不同的分子分布特征^[9]. 这必然将使具有多种植物混合来源的沉积物长链正构烷烃分子分布特征与来源植被之间的关系复杂化.

理论上讲, 即使木本植物产生的长链正构烷烃的确完全以 $n\text{-C}_{27}$ 和 $n\text{-C}_{29}$ 为主峰, 而草本植物产生的长链正构烷烃的确完全以 $n\text{-C}_{31}$ 为主峰, 多种植物混合来源的沉积物长链正构烷烃的主峰碳数是否能用来反演其来源植被类型似乎仍然是难于确定的. 一种可能的情况是, 以 $n\text{-C}_{27}$ 和 $n\text{-C}_{31}$ 为主峰的长链正构

英文版见: Rao Z G, Wu Y, Zhu Z Y, et al. Is the maximum carbon number of long-chain n -alkanes an indicator of grassland or forest?: Evidence from surface soils and modern plants. Chinese Sci Bull, 2011, 56, doi: 10.1007/s11434-011-4418-y

烷烃混合之后以 $n\text{-C}_{29}$ 为主峰, 因为 $n\text{-C}_{29}$ 在两者中都具有较高的含量. 比如, $n\text{-C}_{27}$, $n\text{-C}_{29}$ 和 $n\text{-C}_{31}$ 相对丰度关系为 10:7:3 的木本植物和 1:7:10 的草本植物同等生物量混合且其具有相同的长链正构烷烃产率, 混合物中抽提的长链正构烷烃将以 $n\text{-C}_{29}$ 为主峰 (11:14:13), 此时, 依据主峰碳数或者 $n\text{-C}_{27}/n\text{-C}_{31}$ 比值来反演来源植被类型或者木本和草本植物输入比例显然是不太可信的. 而考虑到长链正构烷烃产率的变化, 则情况将更为复杂.

迄今为止, 并无对相关现代植物长链正构烷烃研究结果的总结来证实来源于木本植物的长链正构烷烃主要以 $n\text{-C}_{27}$ 和 $n\text{-C}_{29}$ 为主峰, 而来源于草本植物的长链正构烷烃主峰则主要以 $n\text{-C}_{31}$ 为主峰; 相应的, 将高等植物来源长链正构烷烃主峰碳数和分子分布特征应用于沉积物分析, 来进行古植被类型的重建, 也缺乏坚实的现代过程研究基础. 本文在研究组获得的中国东部地区 62 个表土长链正构烷烃研究结果的基础上, 总结了我国范围内上百个表土长链正构烷烃研究结果; 同时为了更好地理解表土和沉积物长链正构烷烃研究结果, 对分布在世界范围内的超过 300 种现代植物长链正构烷烃研究结果进行了总结; 以期将这两个方面结合起来初步探查长链正构烷烃分子分布特征与来源植被类型之间的关系.

1 材料与方法

研究所用样品均来自中国东部地区, 62 个表土样品分布于中国东部从海南到黑龙江的 11 个省(图 1 和表 S1), 纬度跨度约为 $18^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$. 植被类型涵括了从海南南部的热带雨林到东北的温带针叶-落叶阔叶混交林类型. 研究区域的气候以雨热同季的季风气候为特征, 年平均温度分布在 $0\sim 26^{\circ}\text{C}$, 年平均降水分布在约 $500\sim 2500\text{ mm}$, 两者都具有明显的纬度地带性, 即由低纬向高纬递减. 绝大部分的样品采自玄武岩风化壳的最顶层, 其他样品采集自其他母岩风化壳的最顶层, 野外都可以直接观测到母岩, 从而尽可能避免了强烈的地下水活动和因沉积、堆积带来的外源有机质, 采样深度约为 $2\sim 4\text{ cm}$. 所有采样点都尽量避免强烈的人类活动, 分布于非耕种地和非人工林地的自然植被状态下. 为了得知同一地点相同植被类型下表土中的长链正构烷烃分子分布特征, 从河北万全县大麻坪(40.9°N , 114.5°E)相同草地植被类型下随机采集了 12 个表土样品; 同时, 在其他一些

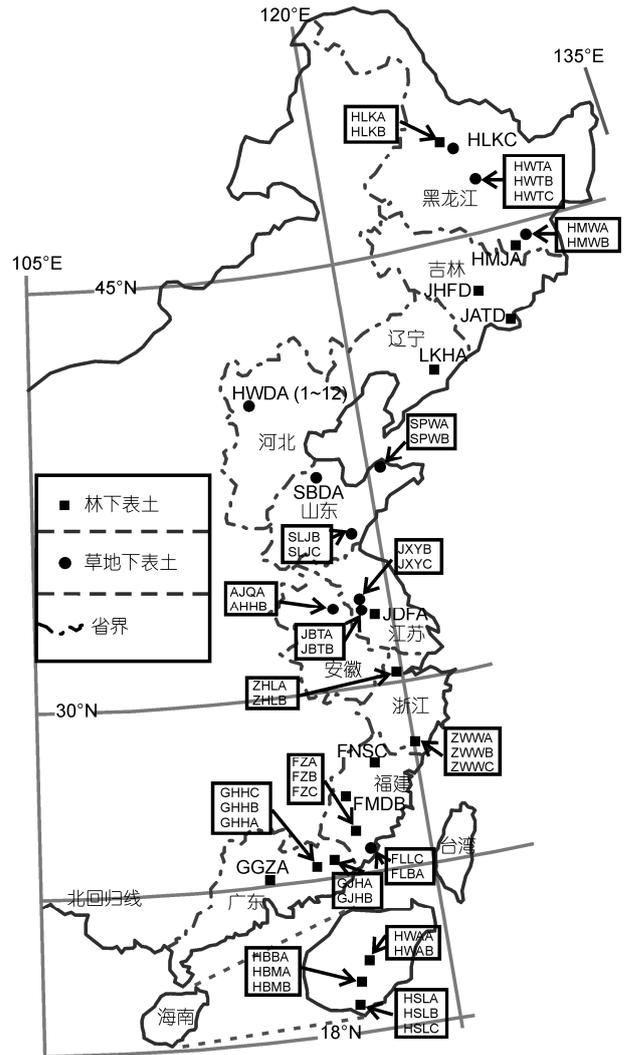


图 1 研究区和采样点分布示意图

采样点, 也在大致相同植被下的不同位置采集 2 到 3 个样品. 整个采样工作于 2005 年 9 月至 11 月间完成.

所有样品在实验室内先去除砂、砾和明显可见的根系、植物残体等, 并研磨至 80 目备用. 取研磨后的样品约 10 g 装入用洗液洗净的试管, 用二氯甲烷浸泡 2 h 以上再进行超声抽提, 每个样品超声抽提 3 次, 每次抽提时间约 10 min . 抽提液用旋转蒸发仪浓缩后, 用硅胶柱层析法分离出烷烃, 所用溶剂为正己烷. 前处理中所使用的玻璃器具都用洗液洗净, 所用溶液都事先进行过二次蒸馏纯化. 使用 HP6890 色谱仪对分离出来的烷烃进行分子分布特征的分析, 色谱条件为: HP-5 MS 石英毛细管柱($30\text{ m}\times 0.32\text{ mm}\times 0.25\text{ }\mu\text{m}$), 始温 80°C , 恒温 3 min , $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 200°C , 再以 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至终温 290°C , 终温恒温 30 min .

载气为氦气, 进样量 1~2 μL . 在完全相同的条件下对标准物质 Indiana STD(由已知的 $n\text{-C}_{12}$, $n\text{-C}_{14}$, $n\text{-C}_{16}$, $n\text{-C}_{18}$, $n\text{-C}_{20}$, $n\text{-C}_{22}$, $n\text{-C}_{25}$, $n\text{-C}_{28}$, $n\text{-C}_{30}$ 和 $n\text{-C}_{32}$ 共 10 个同族体分子构成)进行 GC 分析, 通过对样品和标准物质保留时间的对比来确定样品的烷烃碳数(图 2).

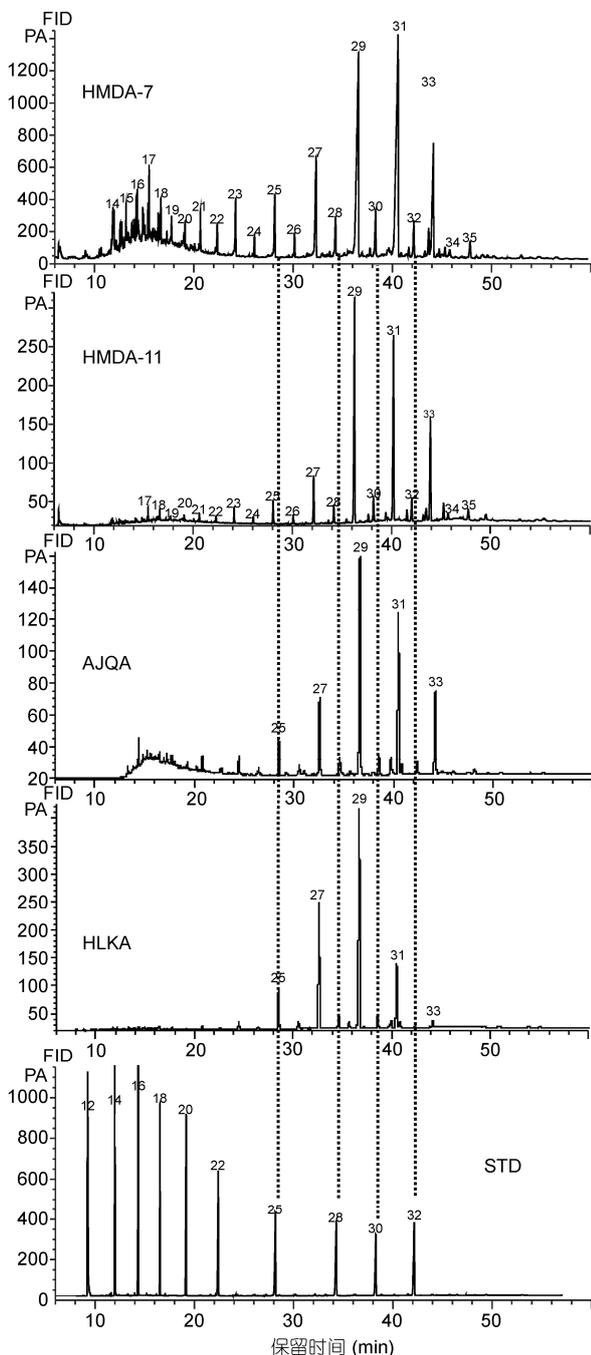


图 2 典型表土样品和标准物质 Indiana STD 的正构烷烃 GC 谱图对比
样品位置请参考图 1

然后对不同碳数峰进行手动面积积分来确定不同碳数正构烷烃的相对丰度.

以上分析测试在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完成.

2 结果与讨论

2.1 不同植被类型下表土中长链正构烷烃分子分布特征

如图 2 所示, 大部分样品的正构烷烃的碳数分布在 14~35 之间, 表现为以短链 $n\text{-C}_{17}$, $n\text{-C}_{19}$ 为主峰和以长链 $n\text{-C}_{27}$, $n\text{-C}_{29}$, $n\text{-C}_{31}$ 为主峰的双峰型分布, 但短链部分正构烷烃的相对丰度要显著低于长链部分, 表明样品中的烷烃主要以长链部分的为主. 短链部分的正构烷烃没有明显的奇偶优势, 而长链部分的正构烷烃具有明显的奇偶优势, 所有 62 个样品的长链正构烷烃碳优势指数 CPI 值(carbon preference index)分布在 3~12.8 之间, 均值为 6.3. 研究表明, 低等生物产生的正构烷烃碳数主要分布在 15~20 之间, 主要为以 $n\text{-C}_{17}$ 或者 $n\text{-C}_{19}$ 为主峰的单峰型分布, 且无明显的奇偶优势^[11]. 陆生高等植物产生大量的 $n\text{-C}_{27}$, $n\text{-C}_{29}$ 和 $n\text{-C}_{31}$ 等高碳数正构烷烃, 且具有明显的奇偶优势, 其碳优势指数 CPI 值一般大于 5^[9,12]. 我们的正构烷烃碳数分布特征表明样品中的正构烷烃来自于低等生物和陆生高等植物两部分组成, 且主要是来自于陆生高等植物.

对获得的 62 个表土样品的长链部分正构烷烃的主峰碳数和 3 个主要正构烷烃($n\text{-C}_{27}$, $n\text{-C}_{29}$ 和 $n\text{-C}_{31}$)的相对丰度关系进行了统计, 结果如图 3 和表 S1 所示. 对森林植被类型下表土而言, 其主峰可以是 $n\text{-C}_{29}$, $n\text{-C}_{27}$ 和 $n\text{-C}_{31}$. 在全部 31 个森林植被下表土样品中, 以 $n\text{-C}_{29}$ 为主峰的有 22 个, 其中 14 个样品的 3 个主要长链正构烷烃的相对丰度关系为 $n\text{-C}_{29} > n\text{-C}_{31} > n\text{-C}_{27}$, 另外 8 个以 $n\text{-C}_{29}$ 为主峰的森林植被下表土的 3 个主要长链正构烷烃的相对丰度关系为 $n\text{-C}_{29} > n\text{-C}_{27} > n\text{-C}_{31}$. 5 个以 $n\text{-C}_{27}$ 为主峰的来自森林植被下表土的 3 个主要长链正构烷烃的相对丰度关系都为 $n\text{-C}_{27} > n\text{-C}_{29} > n\text{-C}_{31}$. 而 4 个以 $n\text{-C}_{31}$ 为主峰的来自森林植被下表土的 3 个主要长链正构烷烃的相对丰度关系都为 $n\text{-C}_{31} > n\text{-C}_{29} > n\text{-C}_{27}$.

来自草地植被类型下的 31 个表土, 其长链正构烷烃的主峰为 $n\text{-C}_{29}$ 或者 $n\text{-C}_{31}$. 其中 14 个以 $n\text{-C}_{31}$ 为

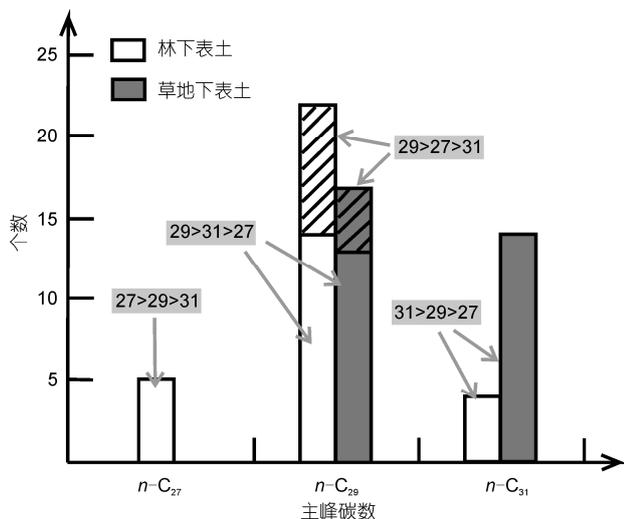


图3 中国东部地区 62 个表土样品中 3 个主要长链正构烷烃相对丰度和主峰碳数统计图

主峰的长链正构烷烃的 3 个主要长链正构烷烃的相对丰度关系都为 $n-C_{31} > n-C_{29} > n-C_{27}$. 以 $n-C_{29}$ 为主峰的长链正构烷烃的 3 个主要长链正构烷烃的相对丰度关系具有两种模式, 其中 $n-C_{29} > n-C_{31} > n-C_{27}$ 为 13 个; 而 $n-C_{29} > n-C_{27} > n-C_{31}$ 为 4 个.

对同一地点的相同植被下表土而言, 其长链正构烷烃的主峰碳数和 3 个主要长链正构烷烃的相对丰度关系也不是完全一致的. 河北万全县大麻坪采样点(图 1)的母岩为玄武岩, 风化壳的土壤层非常薄, 因而可能不利于乔木的发育, 采样区域未见有乔木, 很可能较长的历史时期至今, 当地都发育草地植被. 从该采样点随机采集的 12 个表土样品, 其中 10 个的长链正构烷烃以 $n-C_{31}$ 为主峰, 3 个主要长链正构烷烃的相对丰度关系为 $n-C_{31} > n-C_{29} > n-C_{27}$, 以图 2 中 HMDA-7 为代表; 而其余 2 个的长链正构烷烃以 $n-C_{29}$ 为主峰, 3 个主要长链正构烷烃的相对丰度关系为 $n-C_{29} > n-C_{31} > n-C_{27}$, 以图 2 中 HMDA-11 为代表. 同样的情况也存在于其他区域的不同采样点当中(图 1 和表 S1).

除了我们研究的中国东部表土长链正构烷烃主要以 $n-C_{29}$ 和 $n-C_{31}$ 为主峰外(62 个样品仅有 5 个主峰碳数为 $n-C_{27}$; 其余均为 $n-C_{29}$ 和 $n-C_{31}$); 王永莉等人^[13]报道的 26 个中国表土(实际上涵括部分外蒙古样品)除个别样品以 $n-C_{27}$ 为主峰外, 绝大多数同样以 $n-C_{29}$ 和 $n-C_{31}$ 为主峰, 尤其以 $n-C_{31}$ 作为主峰出现的频率最高; 王志远等人^[14]曾经报道了来自不同气候

和植被区 10 个现代土壤类脂物分子特征, 其中 4 个来自木本植物区的长链正构烷烃以 $n-C_{29}$ 为主峰, 而 6 个来自草本植物区的长链正构烷烃以 $n-C_{31}$ 为主峰. 在此项研究中, 4 个木本植物区有 3 个为人工林, 而作者认为木本植物区土壤中正构烷烃以 $n-C_{29}$ 为主峰可能是该区的草本植物和木本植物叠加的结果. 崔景伟等人^[15]报道的湖北清江和尚洞洞顶土壤正构烷烃以 $n-C_{31}$ 为主峰; 而最近钟艳霞等人^[16]报道的我国黄土高原西部地区 9 个不同类型的表土, 尽管部分表土样品长链正构烷烃以 $n-C_{27}$ 为主峰, 然而更多的样品似乎也同样以 $n-C_{29}$ 和 $n-C_{31}$ 为主峰. 尽管这些表土样品其上覆的植被类型多样, 上覆植被中植物种属的构成更是千差万别, 然而其一致性的表现出主要以 $n-C_{29}$ 和 $n-C_{31}$ 为主峰.

2.2 不同类型现代植物长链正构烷烃分子分布特征

为了更好地理解表土中高等植物来源长链正构烷烃分子分布特征与其上覆植被之间的关系, 对近来国内外报道的总共 334 种现代植物长链正构烷烃分子主峰碳数进行了统计^[2,5,17-41](包括 6 个人未发表的现代植物数据, 表 S2), 发现现代植物, 无论是木本、草本还是灌木, 其长链正构烷烃的主峰主要都是 $n-C_{29}$ 和 $n-C_{31}$. 如图 4 所示, 在统计的 207 种现代草本植物中, 长链正构烷烃以 $n-C_{31}$ 为主峰的占 124 种, 以 $n-C_{29}$ 为主峰的为 39 种; 在统计的 101 种木本植物中, 以 $n-C_{31}$ 和 $n-C_{29}$ 为主峰的分别为 35 和 31 种; 在统计的 26 种灌木中, 以 $n-C_{31}$ 和 $n-C_{29}$ 为主峰的分别为 6 和 15 种. 可见, 在这些统计的植物中, 约有 80% 的草本植物、65% 的木本植物以及 80% 的灌木植物, 其长链正构烷烃以 $n-C_{31}$ 和 $n-C_{29}$ 为主峰. 尽管统计的这些现代植物不能完全代表自然界中的现代植物, 但是考虑到这些研究结果是由不同研究者在世界不同研究地点获得的, 应该还是能够具有一定的

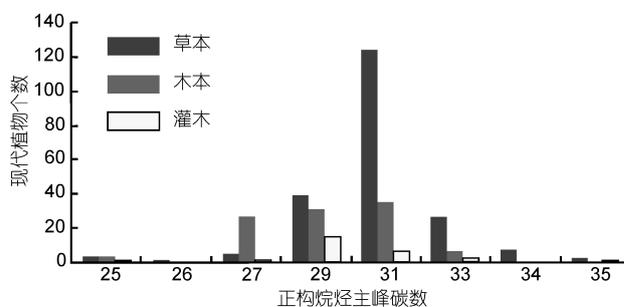


图4 基于表 S2 的现代植物长链正构烷烃主峰碳数统计图

代表性.

2.3 讨论

尽管的确有一些不确定性因素,可能对表土长链正构烷烃与上覆植被类型之间的关系造成影响.如真菌孢子、非光合作用的细菌、藻类也能产生长链正构烷烃;同时,部分草地植被下的表土来自森林植被中的草地,可能部分受到森林植被的影响;另外,大气气溶胶颗粒的沉降也可能向表层土壤中输入长链正构烷烃^[42,43].考虑到这些表土中长链正构烷烃和现代植物明显一致的奇偶优势以及正构烷烃分子分布特征,这种复杂的关系也很可能是由于植物本身的原因造成的.即很可能与前述的现代植物,无论木本、草本还是灌木,其长链正构烷烃都主要以 $n\text{-C}_{29}$ 和 $n\text{-C}_{31}$ 为主峰有直接关系.

已经报道的来自我国南方地区的长链正构烷烃数据,包括浙江长兴更新世红土的 12 件样品^[8]、安徽宣城更新世红土的 52 件样品^[7]、江西修水更新世网纹红土样品^[44],都以 $n\text{-C}_{29}$ 或者 $n\text{-C}_{31}$ 为主峰,以 $n\text{-C}_{27}$ 为主峰的未见报道.而来自我国黄土高原的临夏塬堡剖面^[45]、秦安大地湾剖面^[5]、曹砚剖面^[46]、西峰剖面^[47]、洛川剖面的数据^[4,6]表明,该区域黄土/古土壤序列中长链正构烷烃主峰大多数为 $n\text{-C}_{31}$,少部分为 $n\text{-C}_{29}$,同样的,以 $n\text{-C}_{27}$ 为主峰碳数的未见报道.这一现象与表土中和现代植物中长链正构烷烃同样主要以 $n\text{-C}_{29}$ 和 $n\text{-C}_{31}$ 为主峰是否存在成因上的联系,目前仍不得而知.不可否认的一点的是,无论表土还是沉积物中,具有多种植物种属混合来源属性的长链正构烷烃,其分子分布特征与来源植被的关系可能比我们想象的要复杂得多.

除了上述的现代植物中木本、草本和灌木的长链正构烷烃主峰主要都是 $n\text{-C}_{29}$ 和 $n\text{-C}_{31}$ 外,在分析沉积物或者表土长链正构烷烃分子分布特征与来源植被关系时,我们认为至少以下几点值得深入考虑:

(1) 植物正构烷烃的产率.这一因素潜在的影响是巨大的,很可能导致优势植被或者植被中的优势种不是主要的长链正构烷烃贡献源.国内已有现代植物长链正构烷烃产率差别较大的报道^[20]; Maffei^[18]对 93 个禾本科植物叶片的正构烷烃分析结果表明,其总的烷烃含量变化在 1860 $\mu\text{g/g}$ 至 6.9 $\mu\text{g/g}$ 之间,均值为 164.1 $\mu\text{g/g}$,可见在这 93 个禾本科植物中长链正构烷烃的产量可以具有数百倍的差异.如果植物

的长链正构烷烃产率具有极大而且普遍的变化幅度,可能造成的一个影响是沉积物长链正构烷烃分子分布特征反映的是长链正构烷烃产率大的植物的相对优势烷烃贡献量,而不是植被中优势种的生物贡献量,因为没有证据表明优势种必然会产生较多的长链正构烷烃.相反,来自加拿大的针叶林(黑松为优势种)中黑松新鲜松针的研究未能获得具有显著含量的正构烷烃^[19];同样,先前对欧洲斯堪的纳维亚的松科植物松针的研究表明,其正构烷烃含量非常低,甚至不足以进行同位素分析^[17].

(2) 混合效应.如同前文所述的,分别以 $n\text{-C}_{27}$ 和 $n\text{-C}_{31}$ 为主峰的两种植物混合之后,有可能以 $n\text{-C}_{29}$ 为主峰,这也可能是表土和沉积物中为什么 $n\text{-C}_{29}$ 为主峰的长链正构烷烃出现频率较高的原因之一;最近对北芬兰到南意大利的沿着气候梯度分布的现代植物样品和在采样点附近的湖泊表层沉积物样品的研究^[17],发现湖泊沉积物中陆源正构烷烃的分布并非湖泊周围占优势的植被所特有,两者不一致.

(3) 高等植物来源长链正构烷烃在植物体死亡和埋藏后的变化,以及同一种植物其长链正构烷烃分子分布特征在不同环境条件下的变化.尽管有一些研究结果表明植物叶片在腐烂过程中^[16]以及不同的生长季节^[15],其主峰碳数和分子分布特征不发生显著变化,然而也存在更多的相反的研究结果和观点^[17,19,35,38,39].来自欧洲的研究结果表明,同一种植物的正构烷烃分子分布在不同的采样点是变化的,每年落叶的树木,其叶片正构烷烃的平均链长(ACL, average chain length)由北向南变长^[17].看来,陆生高等植物所产生的长链正构烷烃,不但是具有种间差异,并且完全可以随着气候条件的变化而发生分子分布特征上的改变.同样来自欧洲的研究结果表明,一些松科植物也产生以 $n\text{-C}_{31}$ 为主峰的长链正构烷烃分子^[2],而来自我国黄土高原六盘山现代落叶松、油松则以 $n\text{-C}_{29}$ 为主峰, $n\text{-C}_{31}$ 也具有较高的含量^[5].

综合考虑上述种种影响因素,使得沉积物当中长链正构烷烃分子分布特征与来源植被类型的关系显得异常复杂,利用长链正构烷烃分子分布特征来指示来源植被的类型可能存在一定的不确定性.

3 结论

对中国东部地区来自不同植被类型下的 62 个表土样品进行了正构烷烃的抽提、分离和 GC 分析,并

对长链正构烷烃的分子分布特征以及有关的参数进行了计算和统计分析。发现表土长链正构烷烃分子分布特征在不同地点的相同植被类型(森林或者草地)之下,具有多变性;在不同的植被类型之间(森林或者草地)则具有很大程度的相似性。总体而言,这些表土样品长链正构烷烃除少数几个(5个)主峰为 $n\text{-C}_{27}$ 外,其他绝大多数都以 $n\text{-C}_{29}$ 和 $n\text{-C}_{31}$ 为主峰,而且在森林植被下表土和草地植被下表土中都如此,这与其他表土的研究结果是一致的。对先前一些沉积物和现代植物研究结果的总结,发现无论沉积物,还是

现代的草本、木本和灌木植物,其长链正构烷烃同样主要以 $n\text{-C}_{29}$ 和 $n\text{-C}_{31}$ 为主峰。这样一个特征似乎可以用来说明这些被研究的表土和沉积物,其中的长链正构烷烃的确主要来自陆生高等植物。然而,这也不可避免地造成表土和沉积物中长链正构烷烃分子分布特征与来源植被类型关系复杂,很难用一种简单的模式来判别这两者之间的关系,亦即,对于一个给定的以 $n\text{-C}_{29}$ 和 $n\text{-C}_{31}$ 为主峰的长链正构烷烃,很难确定其来自木本植物或者草本植物,或者其代表了森林植被或者草原植被。

参考文献

- 1 Sun X J, Song C Q, Wang F Y, et al. Vegetation history of the Loess Plateau of China during the last 100000 years based on pollen data. *Quat Int*, 1997, 37: 25–36
- 2 Schwark L, Zink K, Lechterbeck L. 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: 463–466
- 3 吕厚远, 刘东生, 吴乃琴, 等. 末次间冰期以来黄土高原南部植被演替的植物硅酸体记录. *第四纪研究*, 1999, 4: 336–349
- 4 杨明生, 张虎才, 雷国良, 等. 洛川黄土剖面末次冰期间冰段弱古土壤(L₁SS₁)分子化石及其古植被与古环境. *第四纪研究*, 2006, 26: 976–984
- 5 钟艳霞, 陈发虎, 安成邦, 等. 陇西黄土高原秦安地区全新世植被的讨论. *科学通报*, 2007, 52: 318–323
- 6 张虎才, 杨明生, 张文翔, 等. 洛川黄土剖面 S4 古土壤及相邻黄土层分子化石与植被变化. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37: 1634–1642
- 7 梁斌, 谢树成, 顾延生, 等. 安徽宣城更新世红土正构烷烃分布特征及其古植被意义. *地球科学*, 2005, 30: 129–132
- 8 王志远, 喻建华, 顾延生, 等. 浙江长兴更新世红土中的分子化石及其古环境意义. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22: 97–102
- 9 Eglinton G, Hamilton R J. Leaf epicuticular waxes. *Science*, 1967, 156: 1322–1334
- 10 Freeman K H, Hayes J M, Trendel J M, et al. Evidence from carbon isotope measurements for diverse origins of sedimentary hydrocarbons. *Nature*, 1990, 343: 254–256
- 11 Cranwell P A. Lipid geochemistry of sediments from Upton Broad, a small productive lake. *Org Geochem*, 1984, 7: 25–37
- 12 Rieley G, Collier R J, Jones D M, et al. The biogeochemistry of Ellesmere Lake, U.K.—I: Source correlation of leaf wax inputs to the sedimentary lipid record. *Org Geochem*, 1991, 17: 901–912
- 13 王永莉, 方小敏, 白艳, 等. 中国气候(水热)连续变化区域现代土壤中类脂物分子分布特征及其气候意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37: 386–396
- 14 王志远, 刘占红, 易轶, 等. 不同气候和植被区现代土壤类脂物分子特征及其意义. *土壤学报*, 2003, 40: 967–970
- 15 崔景伟, 黄俊华, 蒲阳, 等. 湖北清江和尚洞洞顶植物叶片和土壤的类脂物对比及其意义. *第四纪研究*, 2007, 28: 35–42
- 16 钟艳霞, 薛骞, 陈发虎. 黄土高原西部地区现代植被及其表土正构烷烃分布模式研究. *第四纪研究*, 2009, 29: 767–773
- 17 Sachse D, Radke J, Gleixner G. δD values of individual n -alkanes from terrestrial plants along a climatic gradient—Implications for the sedimentary biomarker record. *Org Geochem*, 2006, 37: 469–483
- 18 Maffei M. Chemotaxonomic significance of leaf wax alkanes in the Gramineae. *Biochem Syst Ecol*, 1996, 24: 53–64
- 19 Otto A, Simpson M J. Degradation and preservation of vascular plant-derived biomarkers in grassland and forest soils from Western Canada. *Biogeochemistry*, 2005, 74: 377–409
- 20 崔景伟, 黄俊华, 谢树成. 湖北清江现代植物叶片正构烷烃和烯烃的季节性变化. *科学通报*, 2008, 53: 1318–1323
- 21 Bi X H, Sheng G Y, Liu X H, et al. Molecular and carbon and hydrogen isotopic composition of n -alkanes in plant leaf waxes. *Org Geochem*, 2005, 36: 1405–1417
- 22 Chikaraishi Y, Naraoka H. Compound-specific δD - $\delta^{13}\text{C}$ analyses of n -alkanes extracted from terrestrial and aquatic plants. *Phytochemistry*, 2003, 63: 361–371
- 23 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

- 24 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
- 25 Gormann R, Schreiber L, Kolodziej H. Cuticular wax profiles of leaves of some traditionally used African Bignoniaceae. *Z Naturforsch*, 2004, 59: 631–635
- 26 Huang Y, Eglinton G, Ineson P, et al. Absence of carbon isotope fractionation of individual *n*-alkanes in a 23-year field decomposition experiment with *Calluna vulgaris*. *Org Geochem*, 1997, 26: 497–501
- 27 Jansen B, Nierop K, Hageman J, et al. The straight-chain lipid biomarker composition of plant species responsible for the dominant biomass production along two altitudinal transects in the Ecuadorian Andes. *Org Geochem*, 2006, 37: 1514–1536
- 28 Kawamura K, Ishimura Y, Yamazaki K. Four years' observations of terrestrial lipid class compounds in marine aerosols from the western North Pacific. *Glob Biogeochem Cycle*, 2003, 17: 1003, doi:10.1029/2001GB001810
- 29 Krull E, Sachse D, Mügler I, et al. Compound-specific $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^2\text{H}$ analyses of plant and soil organic matter: A preliminary assessment of the effects of vegetation change on ecosystem hydrology. *Soil Biol Biochem*, 2006, 38: 3211–3221
- 30 李宝才, 董玉莲, 李超, 等. 秋茄和榕树叶片中正构烷烃分布和单体化合物 $\delta^{13}\text{C}$ 值及其光合作用. *热带海洋学报*, 2003, 22: 62–69
- 31 Liu W G, Huang Y S. Compound-specific D/H ratios and molecular distributions of higher plant leaf waxes as novel paleoenvironmental indicators in the Chinese Loess Plateau. *Org Geochem*, 2005, 36: 851–860
- 32 Lockheart M J, Van Bergen P F, Evershed R P. Variations in the stable carbon isotope compositions of individual lipids from the leaves of modern angiosperms: Implications for the study of higher land plant-derived sedimentary organic matter. *Org Geochem*, 1997, 26: 137–153
- 33 Lockheart M J, Van Bergen P F, Evershed R P. Chemotaxonomic classification of fossil leaves from the Miocene Clarkia lake deposit, Idaho, USA based on *n*-alkyl lipid distributions and principal component analyses. *Org Geochem*, 2000, 31: 1223–1246
- 34 Marseille F, Disnar J, Guillet B, et al. *n*-Alkanes and free fatty acids in humus and A1 horizons of soils under beech, spruce and grass in the Massif-Central (Mont-Lozère), France. *Eur J Soil Sci*, 1999, 50: 433–441
- 35 Mügler I, Sachse D, Werner M, et al. Effect of lake evaporation on δD values of lacustrine *n*-alkanes: A comparison of Nam Co (Tibetan Plateau) and Holzmaar (Germany). *Org Geochem*, 2008, 39: 711–729
- 36 Nichols J E, Booth R K, Jackson S T, et al. Paleohydrologic reconstruction based on *n*-alkane distributions in ombrotrophic peat. *Org Geochem*, 2006, 37: 1505–1513
- 37 Nott C J, Xie S C, Avsejs L A, et al. *n*-alkane distributions in ombrotrophic mires as indicators of vegetation change related to climatic variation. *Org Geochem*, 2000, 31: 231–235
- 38 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 C_4 grass waxes. *Org Geochem*, 2006, 37: 1303–1332
- 39 Sessions A L. Seasonal changes in D/H fractionation accompanying lipid biosynthesis in *Spartina alterniflora*. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70: 2153–2162
- 40 Wiesenberg G L B, Schmidt M W I, Schwark L. Plant and soil lipid modifications under elevated atmospheric CO_2 conditions: I. Lipid distribution patterns. *Org Geochem*, 2008, 39: 91–102
- 41 Xie S C, Nott C J, Avsejs L A, et al. Molecular and isotopic stratigraphy in ombrotrophic mire for paleoclimate reconstruction. *Geochim Cosmochim Acta*, 2004, 68: 2849–2862
- 42 郭方琴, 张成君, 张云, 等. 兰州市大气沉降尘中正构烷烃分布及环境意义. *环境科学与技术*, 2009, 32: 9–11
- 43 Xie M J, Wang G H, Hu S Y, et al. Aliphatic alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric PM_{10} aerosols from Baoji, China: Implications for coal burning. *Atmos Res*, 2009, 93: 840–848
- 44 谢树成, 易铁, 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: 分子化石记录. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33: 411–417
- 45 王志远, 谢树成, 陈发虎. 临夏源堡黄土地层 S1 古土壤中的正构烷烃及其古植被意义. *第四纪研究*, 2004, 24: 231–235
- 46 钟艳霞. 末次冰期以来黄土高原西部地区环境变化的黄土有机地球化学记录研究. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2008. 60–90
- 47 Liu W G, Huang Y S, An Z S, et al. Summer monsoon intensity controls C_4/C_3 plants abundance during the last 35 ka in the Chinese Loess Plateau: Carbon isotope evidence from bulk organic matter and individual leaf waxes. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2005, 220: 243–254

补充材料:

表 S1 中国东部 62 个表土样品的相关信息以及正构烷烃分子分布研究结果

表 S2 现代植物长链正构烷烃主峰碳数研究结果及其参考文献

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

表 S1 中国东部 62 个表土样品的相关信息以及正构烷烃分子分布研究结果

样品 编号 ¹⁾	母岩 类型	植被 类型	经度 (°E)	纬度 (°N)	海拔 (m)	年均温 (°C)	年均降水 量(mm)	主峰 碳数	C ₂₇ /C ₃₁	CPI ²⁾ (23~34)	ACL ³⁾ (25~33)	相对丰度
HLKA	玄武岩	森林	125.79	49.22	371	-0.1	480.8	29	1.82	12.75	28.51	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₂₇ > <i>n</i> -C ₃₁
HLKB	玄武岩	森林	125.79	49.22	444	-0.1	480.8	27	4.12	12.34	27.86	<i>n</i> -C ₂₇ > <i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁
HLKC	玄武岩	草地	125.79	49.23	310	-0.1	480.8	29	0.84	9.16	28.90	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇
HWTA	玄武岩	草地	126.00	48.61	276	0.4	521.5	29	0.99	8.49	28.80	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇
HWTB	玄武岩	草地	126.00	48.61	275	0.4	521.5	29	1.17	8.47	28.68	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₂₇ > <i>n</i> -C ₃₁
HWTC	玄武岩	草地	126.00	48.61	273	0.4	521.5	29	1.42	6.02	28.28	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₂₇ > <i>n</i> -C ₃₁
HMWA	玄武岩	草地	129.58	44.48	357	3.8	531.0	29	1.99	4.12	28.17	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₂₇ > <i>n</i> -C ₃₁
HMWB	玄武岩	草地	129.58	44.48	336	3.8	531.0	29	1.06	8.62	28.88	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₂₇ > <i>n</i> -C ₃₁
HMJA	玄武岩	森林	128.53	44.19	868	3.8	531.0	29	3.12	7.38	28.09	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₂₇ > <i>n</i> -C ₃₁
JATD	玄武岩	森林	128.06	42.04	1960	2.2	657.2	29	1.18	9.54	28.61	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₂₇ > <i>n</i> -C ₃₁
JHFD	玄武岩	森林	126.44	42.38	746	2.9	737.9	29	1.73	8.34	28.50	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₂₇ > <i>n</i> -C ₃₁
LKHA	玄武岩	森林	124.75	40.73	518	6.7	1093.9	29	1.65	5.93	28.58	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₂₇ > <i>n</i> -C ₃₁
SBDA	玄武岩	草地	117.68	38.01	34	12.3	584.6	29	0.74	7.05	29.42	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇
SPWA	玄武岩	草地	120.72	37.78	129	12.6	687.6	33	0.46	4.91	30.21	<i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₂₇
SPWB	玄武岩	草地	120.72	37.78	118	12.6	687.6	31	0.32	6.39	29.96	<i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₂₇
SLJB	未知	草地	118.84	35.22	194	13.3	849.0	29	0.25	8.25	29.93	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇
SLJC	未知	草地	118.84	35.22	145	13.3	849.0	29	0.44	6.17	29.36	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇
JXYB	玄武岩	草地	118.34	32.90	138	14.6	994.0	29	0.63	5.08	29.29	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇
JXYC	玄武岩	草地	118.35	32.89	128	14.6	994.0	29	0.74	8.73	29.14	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇
AJQA	玄武岩	草地	118.26	32.81	130	15.2	904.0	29	0.45	8.04	29.70	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇
AHHB	玄武岩	草地	118.00	32.63	144	15.2	904.0	29	0.55	4.19	29.58	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇
JDFA	玄武岩	森林	118.98	32.31	102	15.3	1034.1	29	0.86	5.40	29.12	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇
JBTA	玄武岩	草地	118.95	32.41	78	15.3	1034.1	29	0.50	3.39	29.39	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇
JBTB	玄武岩	草地	118.96	32.41	73	15.3	1034.1	29	0.68	4.77	29.34	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇
ZHLA	未知	森林	120.01	30.35	57	16.2	1374.7	29	0.46	4.96	29.50	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇
ZHLB	未知	森林	120.01	30.35	29	16.2	1374.7	29	0.80	4.10	29.19	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇
ZWWA	未知	森林	120.64	27.96	175	17.9	1675.0	29	1.15	4.22	28.94	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₂₇ > <i>n</i> -C ₃₁
ZWWB	未知	森林	120.64	27.96	167	17.9	1675.0	29	0.65	4.44	29.34	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇
ZWWC	未知	森林	120.64	27.96	151	17.9	1675.0	29	0.66	4.65	29.21	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇
FNCS	未知	森林	118.77	27.53	56	18.1	1696.5	31	0.19	4.27	29.93	<i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₂₇
FMDB	玄武岩	森林	117.12	26.41	635	19.2	1567.6	29	0.88	4.65	29.25	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇
FZA	未知	森林	117.41	25.30	225	19.9	1724.7	27	1.29	4.08	29.13	<i>n</i> -C ₂₇ > <i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁
FZB	未知	森林	117.41	25.30	232	19.9	1724.7	29	0.63	3.61	29.61	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇
FZC	未知	森林	117.41	25.30	208	19.9	1724.7	29	1.69	4.28	28.65	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₂₇ > <i>n</i> -C ₃₁
FLLC	玄武岩	草地	118.14	24.27	63	20.1	1318.6	31	0.25	6.10	30.18	<i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₂₇
FLBA	玄武岩	草地	118.04	24.22	46	20.1	1318.6	31	0.23	5.67	30.04	<i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₂₇
GJHA	未知	森林	116.37	23.58	83	21.2	1531.2	27	4.89	4.64	27.90	<i>n</i> -C ₂₇ > <i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁
GJHB	未知	森林	116.37	23.58	75	21.2	1531.2	27	5.55	5.32	27.91	<i>n</i> -C ₂₇ > <i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁
GHHA	未知	森林	114.61	23.16	30	21.8	1716.6	31	0.52	3.04	29.64	<i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₂₇
GHHB	未知	森林	114.61	23.16	47	21.8	1716.6	31	0.49	3.41	29.88	<i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₂₇
GHHC	未知	森林	114.61	23.16	23	21.8	1716.6	31	0.74	3.95	29.33	<i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₂₇
GGZA	花岗岩	森林	113.50	23.11	28	21.8	1681.9	27	3.15	5.77	28.37	<i>n</i> -C ₂₇ > <i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁
HSLA	花岗岩	森林	109.55	18.33	39	25.6	1266.7	29	0.56	5.23	28.89	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇
HSLB	花岗岩	森林	109.54	18.32	36	25.6	1266.7	29	0.71	4.87	29.07	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇
HSLC	花岗岩	森林	109.54	18.31	14	25.6	1266.7	29	0.60	4.38	29.17	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇
HBBA	花岗岩	森林	109.67	18.41	165	25.6	1266.7	29	0.78	4.37	29.17	<i>n</i> -C ₂₉ > <i>n</i> -C ₃₁ > <i>n</i> -C ₂₇

续表 S1

样品 编号 ¹⁾	母岩 类型	植被 类型	经度 (°E)	纬度 (°N)	海拔 (m)	年均温 (°C)	年均降水 量 (mm)	主峰 碳数	C_{27}/C_{31}	CPI ²⁾ (23~34)	ACL ³⁾ (25~33)	相对丰度
HBMA	花岗岩	森林	109.57	18.61	439	25.6	1266.7	29	0.68	4.90	29.19	$n-C_{29} > n-C_{31} > n-C_{27}$
HBMB	花岗岩	森林	109.56	18.61	500	25.6	1266.7	29	0.78	4.51	29.10	$n-C_{29} > n-C_{31} > n-C_{27}$
HWAA	花岗岩	森林	109.51	18.83	794	22.5	2458.5	29	1.67	5.32	28.40	$n-C_{29} > n-C_{27} > n-C_{31}$
HWAB	花岗岩	森林	109.51	18.83	794	22.5	2458.5	29	0.44	5.33	29.54	$n-C_{29} > n-C_{31} > n-C_{27}$
HZDA-1	玄武岩	草地	114.51	40.98	1750	8.3	398.5	31	0.17	9.43	30.21	$n-C_{31} > n-C_{29} > n-C_{27}$
HZDA-2	玄武岩	草地	114.51	40.98	1740	8.3	398.5	31	0.25	8.01	29.99	$n-C_{31} > n-C_{29} > n-C_{27}$
HZDA-3	玄武岩	草地	114.51	40.98	1730	8.3	398.5	31	0.17	8.52	30.27	$n-C_{31} > n-C_{29} > n-C_{27}$
HZDA-4	玄武岩	草地	114.51	40.98	1720	8.3	398.5	31	0.18	8.72	30.28	$n-C_{31} > n-C_{29} > n-C_{27}$
HZDA-5	玄武岩	草地	114.51	40.98	1715	8.3	398.5	31	0.21	5.50	30.15	$n-C_{31} > n-C_{29} > n-C_{27}$
HZDA-6	玄武岩	草地	114.51	40.98	1700	8.3	398.5	31	0.26	6.40	29.99	$n-C_{31} > n-C_{29} > n-C_{27}$
HZDA-7	玄武岩	草地	114.51	40.98	1680	8.3	398.5	31	0.25	7.90	29.95	$n-C_{31} > n-C_{29} > n-C_{27}$
HZDA-8	玄武岩	草地	114.51	40.98	1670	8.3	398.5	31	0.24	7.36	30.03	$n-C_{31} > n-C_{29} > n-C_{27}$
HZDA-9	玄武岩	草地	114.51	40.98	1650	8.3	398.5	31	0.14	10.10	30.16	$n-C_{31} > n-C_{29} > n-C_{27}$
HZDA-10	玄武岩	草地	114.51	40.98	1640	8.3	398.5	31	0.23	8.47	30.11	$n-C_{31} > n-C_{29} > n-C_{27}$
HZDA-11	玄武岩	草地	114.51	40.98	1590	8.3	398.5	29	0.22	7.40	30.08	$n-C_{29} > n-C_{31} > n-C_{27}$
HZDA-12	玄武岩	草地	114.51	40.98	1490	8.3	398.5	29	0.31	6.27	29.91	$n-C_{29} > n-C_{31} > n-C_{27}$

1) 样品编号与图 1 中一致; 2) CPI—碳优势指数 (carbon preference index); 3) ACL—平均链长 (average chain length)

表 S2 现代植物长链正构烷烃主峰碳数研究结果及其参考文献

植物名称或编号	植物类型	主峰碳数	采样点	参考文献
<i>Alternanthera bettzickiana</i>	草本	31	中国广州华南植物园	[21]
<i>Alternanthera dentata</i>	草本	29	中国广州华南植物园	[21]
<i>Alternanthera versicolor</i>	草本	31	中国广州华南植物园	[21]
<i>Amaranthus paniculatus</i>	草本	31	中国广州华南植物园	[21]
<i>Amaranthus tricolor</i>	草本	31	中国广州华南植物园	[21]
<i>Araucaria cunninghamii</i>	木本	31	中国广州华南植物园	[21]
<i>Bothriochloa ischaemum</i>	草本	31	中国广州华南植物园	[21]
<i>Caryota mitis</i>	木本	31	中国广州华南植物园	[21]
<i>Cinnamomum burmanni</i>	木本	31	中国广州华南植物园	[21]
<i>Codiaeum variegatum</i>	灌木	33	中国广州华南植物园	[21]
<i>Euphorbia pulcherrima</i>	灌木	29	中国广州华南植物园	[21]
<i>Ficus altissima</i>	木本	31	中国广州华南植物园	[21]
<i>Ficus microcarpa</i>	木本	31	中国广州华南植物园	[21]
<i>Holmskioldia sanguinea</i>	灌木	35	中国广州华南植物园	[21]
<i>Imperata cylindrica</i>	草本	31	中国广州华南植物园	[21]
<i>Kigelia africana (am.)</i>	木本	31	中国广州华南植物园	[21]
<i>Osmanthus fragrans</i>	木本	31	中国广州华南植物园	[21]
<i>Saccharum sinense</i>	草本	27	中国广州华南植物园	[21]
<i>Swietenia mahagoni</i>	木本	31	中国广州华南植物园	[21]
<i>Syzygium cumini</i>	木本	31	中国广州华南植物园	[21]
<i>Zea mays</i>	草本	29	中国广州华南植物园	[21]
<i>Zoysia japonica</i>	草本	33	中国广州华南植物园	[21]
<i>Acer argutum</i>	木本	31	日本群馬	[22]
<i>Acer argutum</i>	木本	31	日本群馬	[22]
<i>Acer carpinifolium</i>	木本	31	日本群馬	[22]

续表 S2

植物名称或编号	植物类型	主峰碳数	采样点	参考文献
<i>Acer carpinifolium</i>	木本	31	日本群马	[22]
<i>Acer palmatum</i>	木本	31	日本群马	[22]
<i>Albizia julibrissin</i>	木本	29	日本小笠原群岛	[22]
<i>Artemisia princeps</i>	草本	31	日本群马	[22]
<i>Benthامidia japonica</i>	灌木	29	日本群马	[22]
<i>Benthامidia japonica</i>	灌木	29	日本群马	[22]
<i>Camellia sasanqua</i>	灌木	29	日本东京	[22]
<i>Chamaecyparis obtusa</i>	木本	33	日本东京	[22]
<i>Cryptomeria japonica</i>	木本	33	日本群马	[22]
<i>Cryptomeria japonica</i>	木本	33	日本群马	[22]
<i>Manihot utilissima</i>	灌木	31	泰国	[22]
<i>Miscanthus sinensis</i>	草本	31	日本东京	[22]
<i>Miscanthus sinensis</i>	草本	29	日本群马	[22]
<i>Phragmites communis</i>	草本	29	日本群马	[22]
<i>Pinus thunbergii</i>	木本	29	日本东京	[22]
<i>Plantago asiatica</i>	草本	31	日本群马	[22]
<i>Prunus jamasakura</i>	灌木	29	日本群马	[22]
<i>Quercus acutissima</i>	木本	29	日本东京	[22]
<i>Quercus dentata</i>	木本	29	日本群马	[22]
<i>Quercus mongolica</i>	木本	29	日本群马	[22]
<i>Saccharum officinarum</i>	草本	31	日本冲绳岛	[22]
<i>Saccharum officinarum</i>	草本	33	泰国	[22]
<i>Sorghum bicolor</i>	草本	31	泰国	[22]
<i>Taraxacum officinale</i>	草本	29	日本群马	[22]
<i>Zea mays</i>	草本	33	日本东京	[22]
<i>Zoysia japonica</i>	草本	33	日本东京	[22]
<i>Acer argutum</i>	木本	31	日本群马	[22]
<i>Acer carpinifolium</i>	木本	31	日本群马	[22]
<i>Cryptomeria japonica</i>	木本	33	日本(春季和秋季)	[23]
<i>Agropyron smithii</i>	草本	31	加拿大亚伯达省	[24]
<i>Bouteloua gracilis</i>	草本	31	加拿大亚伯达省	[24]
<i>Brassica napus</i>	草本	29	加拿大亚伯达省	[24]
<i>Hordeum vulgare</i>	灌木	33	加拿大亚伯达省	[24]
<i>Medicago sativa</i>	草本	31	加拿大亚伯达省	[24]
<i>Stipa viridula</i>	草本	31	加拿大亚伯达省	[24]
<i>Tragopogon dubius</i>	草本	31	加拿大亚伯达省	[24]
<i>Triticum aestivum</i>	草本	29	加拿大亚伯达省	[24]
<i>Kigelia africana</i>	木本	31	德国柏林植物园	[25]
<i>Markhamia acuminata</i>	木本	33	德国柏林植物园	[25]
<i>Newbouldia laevis</i>	木本	31	比利时皇家植物园	[25]
<i>Spathodea campanulata</i>	木本	33	德国柏林植物园	[25]
<i>Culluna vulgaris</i>	灌木	31	英国 Bog Hill	[26]
<i>Calamagrostis effusa</i>	草本	31	厄瓜多尔安第斯山	[27]
<i>Rhynchospora ruiziana</i>	草本	31	厄瓜多尔安第斯山	[27]
<i>Espeletia pycnophylla</i>	灌木	29	厄瓜多尔安第斯山	[27]
<i>Oreobolus goeppingeri</i>	草本	29	厄瓜多尔安第斯山	[27]
<i>Gaiadendron punctatum</i>	灌木	29	厄瓜多尔安第斯山	[27]
<i>Blechnum schomburgkii</i>	木本	27	厄瓜多尔安第斯山	[27]

植物名称或编号	植物类型	主峰碳数	采样点	参考文献
<i>Miconia tinifolia</i>	木本	29	厄瓜多尔安第斯山	[27]
<i>Weinmannia cochensis</i>	木本	29	厄瓜多尔安第斯山	[27]
<i>Neurolepis aristata</i>	草本	29	厄瓜多尔安第斯山	[27]
<i>Gynoxys buxifolia</i>	木本	29	厄瓜多尔安第斯山	[27]
<i>Clusia flaviflora</i>	木本	29	厄瓜多尔安第斯山	[27]
<i>Tillandsia sp.2</i>	木本	29	厄瓜多尔安第斯山	[27]
<i>Hedyosmum cumbalense</i>	灌木	25	厄瓜多尔安第斯山	[27]
<i>Vallea stipularis</i>	木本	27	厄瓜多尔安第斯山	[27]
<i>Macleania rupestris</i>	灌木	29	厄瓜多尔安第斯山	[27]
<i>Juncus balticus ssp. Andicola</i>	草本	31	厄瓜多尔安第斯山	[27]
<i>Plantago australis</i>	草本	33	厄瓜多尔安第斯山	[27]
<i>Lachemilla andina</i>	草本	33	厄瓜多尔安第斯山	[27]
<i>Oreobolus obtusangulus</i>	草本	31	厄瓜多尔安第斯山	[27]
<i>Birch</i>	木本	29	日本北海道	[28]
<i>Theaceae</i>	木本	29	日本父岛	[28]
<i>unknown species</i>	木本	31	印度尼西亚 Bidadari 岛	[28]
<i>Acacia cambagei</i>	木本	29	澳大利亚昆士兰州	[29]
<i>Astrebla pectinata</i>	草本	31	澳大利亚昆士兰州	[29]
<i>Atalaya hemiglauca</i>	木本	31	澳大利亚昆士兰州	[29]
<i>Iseilema spp.</i>	草本	31	澳大利亚昆士兰州	[29]
<i>Ficus microcarpa</i>	木本	27	中国海南海口	[30]
<i>Kadelia candel</i>	木本	27	中国广东深圳	[30]
<i>Kadelia candel</i>	木本	27	中国海南新竹	[30]
<i>Kadelia candel</i>	木本	25	中国广东阳江	[30]
<i>Artemisia scoparia</i>	灌木	29	中国黄土高原	[31]
<i>Heteropappus Less</i>	草本	31	中国黄土高原	[31]
<i>Stipa krylovii</i>	草本	31	中国黄土高原	[31]
<i>Cleistogenes Keng</i>	草本	29	中国黄土高原	[31]
<i>Haloxylon ammodendron</i>	灌木	27	中国黄土高原	[31]
<i>Pennisetum flaccidum</i>	草本	31	中国黄土高原	[31]
<i>Salsola collina</i>	灌木	29	中国黄土高原	[31]
<i>Stipa bungeana</i>	草本	31	中国黄土高原	[31]
<i>Fagus sylvatica</i>	木本	27	英国格洛斯特郡	[32]
<i>Fagus grandifolia</i>	木本	29	未知	[33]
<i>Metasequoia glyptostroboides</i>	木本	25	英国格洛斯特郡	[33]
<i>Quercus marilandica</i>	木本	29	未知	[33]
<i>Achnatherum calamagrostis</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Agropyron pungens</i>	草本	34	意大利都灵	[18]
<i>Agropyron repens</i>	草本	34	意大利都灵	[18]
<i>Agrostis alba</i>	草本	29	意大利都灵	[18]
<i>Agrostis alba</i>	草本	33	意大利都灵	[18]
<i>Agrostis alpina</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Agrostis stolonifera</i>	草本	34	意大利都灵	[18]
<i>Alopecurus gerardi</i>	草本	25	意大利都灵	[18]
<i>Ampelodesmos tenax</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Anthoxantum odoratum</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Arrhenaterum elatius</i>	草本	29	意大利都灵	[18]
<i>Arundo donax</i>	草本	29	意大利都灵	[18]
<i>Avena fatua</i>	草本	29	意大利都灵	[18]

植物名称或编号	植物类型	主峰碳数	采样点	参考文献
<i>Avena parlatoresi</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Avena versicolor</i>	草本	33	意大利都灵	[18]
<i>Brachypodium pinnatum</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Brachypodium stylvaticum</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Briza media</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Bromus catharticus</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Bromus erectus</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Bromus hordeaceus</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Bromus sterilis</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Calamagrostis arundinacea</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Calamagrostis epigejon</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Calamagrostis villosa</i>	草本	29	意大利都灵	[18]
<i>Coix lacryma-Jobi</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Cortaderia selloana</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Cymbopogon citratus</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Cynodon dactylon</i>	草本	33	意大利都灵	[18]
<i>Cynosurus echinatus</i>	草本	29	意大利都灵	[18]
<i>Dactylis glomerata</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Dactyloctenium aegyptium</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Digitaria sanguinalis</i>	草本	35	意大利都灵	[18]
<i>Echinochloa colonum</i>	草本	33	意大利都灵	[18]
<i>Echinochloa crus-galli</i>	草本	27	意大利都灵	[18]
<i>Echinochloa phyllopogon</i>	草本	27	意大利都灵	[18]
<i>Eleusine indica</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Elymus giganteus</i>	草本	34	意大利都灵	[18]
<i>Elymus pungens</i>	草本	34	意大利都灵	[18]
<i>Elymus virginicus</i>	草本	29	意大利都灵	[18]
<i>Festuca arundinacea</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Festuca cinerea</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Festuca ovina</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Festuca ovina var duriuscola</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Festuca pratensis</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Festuca rubra</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Festuca spadicea</i>	草本	29	意大利都灵	[18]
<i>Festuca varia</i>	草本	29	意大利都灵	[18]
<i>Festuca violacea</i>	草本	29	意大利都灵	[18]
<i>Holcus lanatus</i>	草本	27	意大利都灵	[18]
<i>Holcus mollis</i>	草本	25	意大利都灵	[18]
<i>Hordeum murinum</i>	草本	34	意大利都灵	[18]
<i>Koeleria valesiaca</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>L.multiflorum</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Lagurus ovatus</i>	草本	26	意大利都灵	[18]
<i>Lolium italicum</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Melica ciliata</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Melica picta</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Miscanthus sinensis</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Nardus stricta</i>	草本	29	意大利都灵	[18]
<i>Oryza sativa</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Pennisetum americanum</i>	草本	31	意大利都灵	[18]

植物名称或编号	植物类型	主峰碳数	采样点	参考文献
<i>Phalaris arundinacea</i>	草本	29	意大利都灵	[18]
<i>Phalaris canariensis</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Phleum alpinum</i>	草本	29	意大利都灵	[18]
<i>Phleum bertolonii</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Phleum pratense</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Phragmites australis</i>	草本	29	意大利都灵	[18]
<i>Phyllostachys bambusoides</i>	草本	29	意大利都灵	[18]
<i>Poa annua</i>	草本	25	意大利都灵	[18]
<i>Poa festucaeformis</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Poa nemoralis</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Poa pratensis</i>	草本	31	西意大利阿尔卑斯山	[18]
<i>Poa pratensis</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Poa vivipara</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Saccharum officinarum</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Saccharum spontaeum</i>	草本	29	意大利都灵	[18]
<i>Secale cereale</i>	草本	34	意大利都灵	[18]
<i>Secale montanum</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Setaria glauca</i>	草本	33	意大利都灵	[18]
<i>Setaria italica</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Sorghum halepense</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Sorghum vulgare</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Stipa calamagrostis</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Stipa calamagrostis</i>	草本	31	西意大利阿尔卑斯山	[18]
<i>Stipa capillata</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Stipa tenacissima</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Stipa thessala</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Trisetum flavescens</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Triticum durum</i>	草本	29	意大利都灵	[18]
<i>Triticum vulgare</i>	草本	29	意大利都灵	[18]
<i>Vetiveria zizanioides</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Zea mays</i>	草本	31	意大利都灵	[18]
<i>Fagus sylvatica</i>	木本	27	法国 Massif-Central	[34]
<i>Picea abies</i>	木本	27	法国 Massif-Central	[34]
<i>Kobresia schoenoides</i>	草本	29	中国西藏	[35]
<i>Kobresia schoenoides</i>	草本	29	中国西藏	[35]
<i>Kobresia schoenoides</i>	草本	31	中国西藏	[35]
<i>Kobresia schoenoides</i>	草本	31	中国西藏	[35]
<i>Morina sp.</i>	草本	31	中国西藏	[35]
<i>Morina sp.</i>	草本	31	中国西藏	[35]
<i>Oxytropis sp.</i>	草本	29	中国西藏	[35]
<i>Stipa</i>	草本	31	中国西藏	[35]
<i>Stipa sp.</i>	草本	31	中国西藏	[35]
<i>Chamydaphne calyculata</i>	灌木	29	美国纽约	[36]
<i>Kalmia polifolia</i>	灌木	29	美国纽约	[36]
<i>Rhododendron groenlandicum</i>	灌木	31	美国纽约	[36]
<i>Andromeda polifolia</i>	灌木	31	英国坎布里亚郡	[37]
<i>Calluna vulgaris</i>	木本	31	英国坎布里亚郡	[37]
<i>Empetrum nigrum</i>	灌木	31	英国坎布里亚郡	[37]
<i>Erica tetralix</i>	木本	31	英国坎布里亚郡	[37]

续表 S2

植物名称或编号	植物类型	主峰碳数	采样点	参考文献
<i>Eriophorum angustifolium</i>	草本	31	英国坎布里亚郡	[37]
<i>Eriophorum vaginatum</i>	草本	31	英国坎布里亚郡	[37]
<i>Rhynchospora alba</i>	草本	31	英国坎布里亚郡	[37]
<i>Trichophorum cespitosum</i>	草本	31	英国坎布里亚郡	[37]
<i>Vaccinium oxycoccus</i>	灌木	29	英国坎布里亚郡	[37]
<i>Agropyron smithii</i>	草本	31	加拿大阿尔伯特新鲜草本	[19]
<i>Agropyron smithii</i>	草本	29	加拿大阿尔伯特腐烂草本	[19]
<i>Agropyron smithii</i>	草本	29	加拿大阿尔伯特新鲜草本	[19]
<i>Populus tremula</i>	木本	25	加拿大亚伯达省	[19]
<i>Pinus contorta</i>	木本	29	加拿大阿尔伯特叶片致残	[19]
<i>Cinnamomum camphora</i>	木本	31	中国湖南长沙	饶志国个人未发表数据
<i>Corylus heterophylla</i>	木本	29	中国湖南长沙	饶志国个人未发表数据
<i>Liquidambar formosana</i>	木本	31	中国湖南长沙	饶志国个人未发表数据
<i>Oryza Sativa</i>	草本	29	中国湖南长沙	饶志国个人未发表数据
<i>Paulownia tomentosa</i>	木本	31	中国湖南长沙	饶志国个人未发表数据
<i>Zea mays</i>	草本	31	中国湖南长沙	饶志国个人未发表数据
<i>Aristida adscensionis</i>	草本	31	纳米比亚	[38]
<i>Aristida barbicolis</i>	草本	31	津巴布韦	[38]
<i>Aristida congesta</i>	草本	31	纳米比亚	[38]
<i>Aristida graciliflora</i>	草本	31	津巴布韦	[38]
<i>Aristida meridionalis</i>	草本	31	津巴布韦	[38]
<i>Aristida meridionalis</i>	草本	31	纳米比亚	[38]
<i>Bothriochloa insculpta</i>	草本	31	津巴布韦	[38]
<i>Brachiaria erucitormis</i>	草本	33	津巴布韦	[38]
<i>Brachiaria sp.</i>	草本	33	坦桑尼亚	[38]
<i>Bromus sp.</i>	草本	31	澳大利亚	[38]
<i>Chloris gayana</i>	草本	33	津巴布韦	[38]
<i>Chloris virgata</i>	草本	33	津巴布韦	[38]
<i>Chloris virgata</i>	草本	31	纳米比亚	[38]
<i>Digitaria milaniana</i>	草本	33	津巴布韦	[38]
<i>Enneapogon cenchroides</i>	草本	31	津巴布韦	[38]
<i>Enneapogon cenchroides</i>	草本	31	纳米比亚	[38]
<i>Enneapogon sp.</i>	草本	33	纳米比亚	[38]
<i>Eragrostis nindensis</i>	草本	31	纳米比亚	[38]
<i>Eragrostis superba</i>	草本	27	津巴布韦	[38]
<i>Eragrostis tremula</i>	草本	31	苏丹	[38]
<i>Eragrostis violacea de winter</i>	草本	31	津巴布韦	[38]
<i>Eragrostis viscosa</i>	草本	29	津巴布韦	[38]
<i>Festuca orthophylla</i>	草本	29	秘鲁	[38]
<i>Festuca orthophylla</i>	草本	29	秘鲁	[38]
<i>Hyparrhenia filipendula</i>	草本	33	津巴布韦	[38]
<i>Loudetia simplex</i>	草本	31	津巴布韦	[38]
<i>Panicum arbusculum</i>	草本	33	纳米比亚	[38]
<i>Panicum maximum</i>	草本	31	津巴布韦	[38]
<i>Panicum maximum</i>	草本	31	纳米比亚	[38]
<i>Panicum sp.</i>	草本	33	纳米比亚	[38]
<i>Schmidtia kalahariensis</i>	草本	33	纳米比亚	[38]
<i>Sporobolus ioclados</i>	草本	33	津巴布韦	[38]
<i>Sporobolus pyramidalis</i>	草本	33	津巴布韦	[38]

植物名称或编号	植物类型	主峰碳数	采样点	参考文献
<i>Sporobolus sp.</i>	草本	33	坦桑尼亚	[38]
<i>Stipagrostis ciliata</i>	草本	31	纳米比亚	[38]
<i>Stipagrostis hirtigluma</i>	草本	31	纳米比亚	[38]
<i>Stipagrostis uniplumis</i>	草本	31	纳米比亚	[38]
<i>Themeda triandra</i>	草本	31	津巴布韦	[38]
<i>Alnus incana</i>	木本	29	意大利 MAS	[17]
<i>Betula pendula</i>	木本	27	芬兰 NAI	[17]
<i>Betula pendula</i>	木本	27	芬兰 SOD007	[17]
<i>Betula pendula</i>	木本	27	芬兰 SOD004	[17]
<i>Betula pendula</i>	木本	27	芬兰 HYI	[17]
<i>Betula pendula</i>	木本	27	芬兰 SYR	[17]
<i>Betula pendula</i>	木本	31	芬兰 LAM	[17]
<i>Betula pendula</i>	木本	31	德国 HZM	[17]
<i>Betula pubescens</i>	木本	27	芬兰 FIN002	[17]
<i>Betula pubescens</i>	木本	27	KEI	[17]
<i>Betula pubescens</i>	木本	27	芬兰 SOD003	[17]
<i>Carpinus betulus</i>	木本	31	意大利 MEZ	[17]
<i>Fagus sylvatica</i>	木本	27	芬兰 SOD003	[17]
<i>Fagus sylvatica</i>	木本	27	德国 HZM	[17]
<i>Fagus sylvatica</i>	木本	27	意大利 LGM	[17]
<i>Myrtus</i>	木本	31	芬兰 SYR	[17]
<i>Quercus cerris</i>	木本	29	意大利 MAS	[17]
<i>Quercus petraea</i>	木本	29	意大利 MEZ	[17]
<i>Quercus robur</i>	木本	29	意大利 ITA001	[17]
<i>Quercus variabilis</i>	木本	31	意大利 MAS	[17]
<i>Artemisia vulgaris</i>	草本	31	德国西南部	[2]
<i>Artemisia absinthum</i>	草本	31	德国西南部	[2]
<i>Betula nana, alpine</i>	木本	27	德国西南部	[2]
<i>Betula nana, arctic</i>	木本	27	德国西南部	[2]
<i>Betula pendula (alba)</i>	木本	31	德国西南部	[2]
<i>Betula pubescens</i>	木本	27	德国西南部	[2]
<i>Juniperus comm.</i>	木本	31	德国西南部	[2]
<i>Pinus cerbra</i>	木本	31	德国西南部	[2]
<i>Pinus mugo</i>	木本	29	德国西南部	[2]
<i>Pinus nigra</i>	木本	31	德国西南部	[2]
<i>Pinus sylvestris</i>	木本	29	德国西南部	[2]
<i>Spartina alterniflora</i>	草本	29	美国马萨诸塞 (死叶)	[39]
<i>Spartina alterniflora</i>	草本	31	美国马萨诸塞 (新叶)	[39]
<i>Lolium perenne</i>	草本	31	瑞士	[40]
<i>Trifolium repens</i>	草本	29	瑞士	[40]
<i>Eriophorum angustifolium</i>	草本	31	英格兰坎布里亚郡	[41]
<i>Eriophorum vaginatum</i>	草本	31	英格兰坎布里亚郡	[41]
<i>Trichophorum cespitosum</i>	草本	31	英格兰坎布里亚郡	[41]
<i>Larix spp.</i>	木本	29	中国黄土高原	[5]
<i>Pinus tabulaeformis</i>	木本	29	中国黄土高原	[5]
XL-BH	木本	27	中国黄土高原	[16]
XL-QQ	木本	29	中国黄土高原	[16]
XL-LDL	木本	27	中国黄土高原	[16]
XL-SY	木本	27	中国黄土高原	[16]

续表 S2

植物名称或编号	植物类型	主峰碳数	采样点	参考文献
<i>SFG-HQ</i>	灌木	29	中国黄土高原	[16]
<i>SFG-HH</i>	木本	27	中国黄土高原	[16]
<i>SFG-QY</i>	木本	29	中国黄土高原	[16]
<i>LPS-LYS</i>	木本	29	中国黄土高原	[16]
<i>LPS-YS</i>	木本	29	中国黄土高原	[16]
<i>LD-QQ</i>	木本	29	中国黄土高原	[16]
<i>XL-JJR</i>	灌木	29	中国黄土高原	[16]
<i>XL-WSLMFJ</i>	草本	31	中国黄土高原	[16]
<i>XL-TC</i>	草本	31	中国黄土高原	[16]
<i>XL-MYWLC</i>	草本	33	中国黄土高原	[16]
<i>SFG_TC</i>	草本	33	中国黄土高原	[16]
<i>ZW-1</i>	木本	31	湖北清江	[20]
<i>ZW-3</i>	草本	31	湖北清江	[20]
<i>ZW-4</i>	草本	35	湖北清江	[20]
<i>ZW-6</i>	木本	29	湖北清江	[20]
<i>ZW-10</i>	灌木	31	湖北清江	[20]