

文章编号: 0254-5357(2010)03-0201-06

不同抽提方法比较黄土-古土壤类脂物中正构烷烃的分布特征

张普^{1,2}, 刘卫国^{1,3*}

- (1. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪国家重点实验室, 陕西 西安 710075;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 通过对陕西洛南刘湾剖面黄土-古土壤类脂物正构烷烃组分进行超声波和加速溶剂萃取方法比较发现:在增加振荡频率(100 Hz)的条件下,对3个相同质量的同一表土样品分别超声提取1、2、3遍和采用有机溶剂浸泡过夜在较低振荡频率(60 Hz)条件下超声抽提3遍获取的正构烷烃组分分布相同,相对丰度差异较小;刘湾剖面7个古土壤样品超声波溶剂萃取获得的正构烷烃组分相对丰度较低,且随深度增加,呈现逐渐降低的趋势;超声波溶剂萃取的两个样品碳优势指数(CPI)分别为5.4和4.6,碳同位素值分别为-31.80‰和-30.52‰;加速溶剂萃取的同样样品CPI值分别为5.3和4.3,碳同位素值分别为-31.46‰和-30.56‰。两种方法萃取的土壤正构烷烃组分分布相同;但加速溶剂萃取的正构烷烃相对丰度是超声波溶剂萃取的0.9~1.5倍。结果表明超声波溶剂萃取的次数和强度不会对其抽提效率产生明显影响;对于年代较老、有机质含量较低的刘湾剖面古土壤样品,超声波溶剂萃取的效率较低;两种处理方法获得的类脂物正构烷烃组分分布和碳同位素值没有差别,但是超声波溶剂萃取的效率明显低于加速溶剂萃取的效率。因此,对于年代较老、含量较低的地质样品,采用加速溶剂萃取方法更有助于获得充分的样品量并进行可靠的气相色谱-燃烧-同位素比值分析;对于现代样品和含量较高的地质样品,采用设备相对便宜、操作简单、易于实现的超声波溶剂萃取方法即可。

关键词: 黄土-古土壤; 正构烷烃; 超声波溶剂萃取; 加速溶剂萃取

中图分类号: P642.131; O623.11; O652.62 **文献标识码:** A

Study on Distribution Characteristics of *n*-Alkanes in Loess-paleosol Lipids by Different Extraction Methods

ZHANG Pu^{1,2}, LIU Wei-guo^{1,3*}

- (1. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China;
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. School of Human Settlement and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Two extraction methods, ultrasonic-assisted solvent extraction (UASE) and accelerated solvent extraction (ASE), were used to study the distribution characteristics of *n*-alkanes in loess-paleosol lipids. A suite of loess-paleosol lipid samples were collected from Liuwan profile located in Luonan county, Shaanxi province. The results showed that no significant differences for the distribution pattern and relative abundance of

收稿日期: 2009-08-10; 修订日期: 2009-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助(40873011, 40673012); 中国科学院知识创新项目资助(KZCX2-YW-149); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金资助(SKLLQG0823)

作者简介: 张普(1982-), 女, 陕西长安人, 博士研究生, 第四纪地质专业, 主要方向为稳定同位素地球化学。
E-mail: zp@ieecas.cn.

通讯作者: 刘卫国(1958-), 男, 陕西长安人, 研究员, 从事同位素生物地球化学研究。E-mail: liuwg@loess.llqg.ac.cn.

n-alkanes were observed when using UASE either increasing the ultrasonic frequency to 100 Hz or tripling the extraction times under ultrasonic frequency of 60 Hz. The *n*-alkane abundance in 7 paleosol samples from Liuwan profile is rather low when UASE is used and increasing with depth of the profile. The carbon preference index (CPI) of *n*-alkanes for 2 paleosol samples extracted with UASE were 5.4 and 4.6 with isotopic composition (average value) of -31.80% and -30.52% . CPI of *n*-alkanes from the same samples extracted with ASE was 5.3 and 4.3 with isotopic composition of -31.46% and -30.56% . The results showed that there is no significant difference in selectivity between UASE and ASE, but ASE is more efficient in extracting *n*-alkanes from paleosols than UASE. For geologically older loess-paleosol samples with lower content of *n*-alkanes, ASE is obviously a preferable extraction method with better recovery of *n*-alkanes for further compositional and isotopic analysis. While for geologically younger samples with higher organic content, UASE seems a preferable extraction method with advantages of less expensive and easier-to-operation.

Key words: loess-paleosol; *n*-alkane; ultrasonic-assisted solvent extraction; accelerated solvent extraction

古土壤中的有机生物标志物是地质时期生物体的残体,其特征标记化合物分布和地球化学组合特征可以反映当时的生物生长环境信息。生物残体经历漫长地质环境改造后,大部分物质的组成和结构发生变化,但一些不易降解的生物标志物保留了生物原有的基本组合特征,记载着原始生物母质生长环境沉积信息,具有一定的生物学和环境变化研究意义^[1-2]。在全球变化研究中,涉及最多的生物标志化合物为类脂物分子,包括烷烃、脂肪醇、脂肪酸、直链酯类、甾酮、芳烃、三萜系化合物和类异戊二烯等^[3-11]。

黄土-古土壤中类脂物正构烷烃组分分布和碳同位素组成能被用于推断历史时期气候变化和植被覆盖状况^[2-3,6-7,10,12]。而且,以往对于黄土-古土壤类脂物正构烷烃组分的气相色谱和气相色谱/质谱分析结果均表明这些样品烷烃组成比较简单,支链环烷烃含量较低,高碳数正构烷烃部分基线平稳,化合物间分辨好,且以等间距顺序出峰,大部分样品都没有不能分离的复杂物质(UCM),即没有鼓包出现,这使得对于一般沉积物样品进行高等植物源正构烷烃的分布特征分析时,通常可在饱和烃气相色谱图上根据具有已知浓度的正构烷烃标准计算样品正构烷烃的参数,同时可满足直接进行正构烷烃单体同位素测定的要求^[13-15]。

目前地质样品生物标志化合物分析方法中,索氏提取、超声波提取和加速溶剂萃取是广泛使用的类脂化合物提取方法^[13-21]。索氏提取是一种经典高效的提取方法,但抽提时间长,样品需要量较大,使用溶剂量大,受热易分解或变色的物质以及高沸点溶剂不宜采用此方法。超声波溶剂萃取操作简单,易于实现,且超声提取设备便宜;但残渣与抽提物的分离操作费时较多,且对于有机质含量低的地质样品通过增加质量,多次提取,浪费有机溶剂。

加速溶剂萃取大大缩短操作时间,有机溶剂的使用量也减少,降低萃取成本和操作毒性,萃取效率不低于经典的索氏提取效率^[16-18];但是设备比较昂贵。目前,在古气候古环境的有机地球化学研究方面,经典的索氏提取、超声波溶剂提取和加速溶剂萃取类脂化合物方法共存,而对于研究载体中类脂物的不同抽提方法、抽提效率缺乏系统比较。

黄土高原黄土-古土壤序列为气候变化研究提供了良好的分析样品,其中有机分子化合物生物标志物研究应予以充分的重视^[3,7,10,14-15],然而黄土沉积中有机分子生物标志物保存量少,不易被分析出,导致生物标志化合物组分含量变化具有较多不确定性。尤其重要的是,在土壤有机分子碳、氢同位素样品分析过程,样品抽提的不完全对这些分子化合物稳定同位素组成可能会产生影响。因此,考察高效的前处理过程和准确的仪器分析方法是利用黄土高原土壤分析标记化合物组成及同位素组成研究植被历史及沉积环境状况的重要前提。

本文通过对陕西洛南地区刘湾黄土-古土壤类脂物正构烷烃组分进行超声波提取和加速溶剂萃取方法比较,以选出更适宜的抽提方法来分析类似条件下的地质样品。

1 实验方法

1.1 仪器和主要试剂

加速溶剂萃取采用 ASE 200 快速抽提萃取仪(美国 Dionex 公司)。所有实验所用试剂均为色谱级(GC 级,来自 CNW Technologies GmbH 公司),所用玻璃仪器经蒸馏水清洗后,500 °C 高温处理去除可能的有机污染。

1.2 样品采集

本研究选取位于暖温带季风性半湿润气候区秦

岭南部陕西洛南地区刘湾黄土-古土壤序列^[22]。该区过去50年的年均温为12.9℃,年平均降水量为685 mm(中国气象科学数据共享服务网)。刘湾剖面位于洛南县城以北6 km处(34°08'37"N, 110°08'13"E),海拔高度948 m,剖面厚度13 m。本次研究随机选取刘湾剖面10.0 m以上的黄土-古土壤样品共7个,取样深度分别为0 cm(表土)、80 cm(黄土)、160 cm(古土壤)、360 cm(古土壤)、560 cm(古土壤)、680 cm(古土壤)、800 cm(古土壤)。由于这里的黄土堆积速率低,且全新世黄土堆积保存很差,从洛南盆地上白川和刘湾两黄土剖面进行土壤地层和磁性地层研究以及光释光年龄和磁化率的测定结果来看,整个马兰黄土堆积都被侵蚀掉,剖面上部即为末次间冰期的沉积^[22]。所选样品被装在高温烧过的铝箔袋子中以避免有机污染,并在实验室40℃下烘干,研磨至粒度小于0.147 mm使之充分均匀。

1.3 样品提取

在高温(100℃)和高压(10.3 MPa)下利用二氯甲烷-甲醇(体积比为9:1)进行加速溶剂萃取,循环萃取3次,萃取时间5 min,详细流程见文献[3]和文献[10]中的样品抽提和纯化描述;超声波溶剂萃取采用超声波振荡器在40℃下用二氯甲烷-甲醇(体积比为9:1)萃取3次,每次15 min,然后合并萃取溶剂离心获得上层清液。两份萃取的类脂物在氮气下吹干,然后采用正己烷提取样品并转入层析柱(0.074~0.147 μm 硅胶)洗脱出烷烃组分,进行气相色谱分析和气相色谱-燃烧-同位素比值(GC-C-IRMS)分析,详细流程见文献[18]。为保证实验流程的质量,实验过程中附加有一个空白试验,测试结果未发现文中所讨论的有机组分。因而本文认为分析所获得结果为样品中真实的有机成分。

1.4 仪器分析条件

气相色谱分析在HP-6890气相色谱仪(美国Agilent公司)上进行,柱头进样温度310℃。色谱柱为HP-1MS毛细管柱(60 m×0.32 mm×0.25 μm),氦气作为载气,火焰离子检测器(FID)检测。升温程序为:初始温度40℃下保留1 min,然后以10℃/min升温至150℃,再以6℃/min升温至315℃,恒温20 min。

GC-C-IRMS分析在HP-6890气相色谱仪串联Finnigan MAT Delta+质谱仪(Finnigan质谱公司)上进行,在每6次样品注射后均测量一套具有已知同位素值的正构烷烃标准来检测分析的准确性,分析误差在±0.6%。土壤类脂物正构烷烃组

分分布和同位素分析实验在中国科学院地球环境研究所同位素实验室完成。

2 结果与讨论

2.1 抽提次数和强度对超声波萃取效率的影响

为了判断超声波溶剂萃取方法的抽提次数和强度是否会影响其抽提效率,选取一个表土样品,分别取10 g样品,在增加振荡频率(100 Hz)的条件下,分别超声抽提1、2、3遍,再用相同有机溶剂浸泡过夜后在较低振荡频率(60 Hz)条件下超声抽提3遍共获取4个样品,进行气相色谱分析,结果表明4组样品的类脂物正构烷烃组分分布相同(图1),且不同条件下抽提的量变化较小(表1)。因此本文认为超声波溶剂萃取方法的抽提次数和强度不会对其抽提效率产生明显的影响。

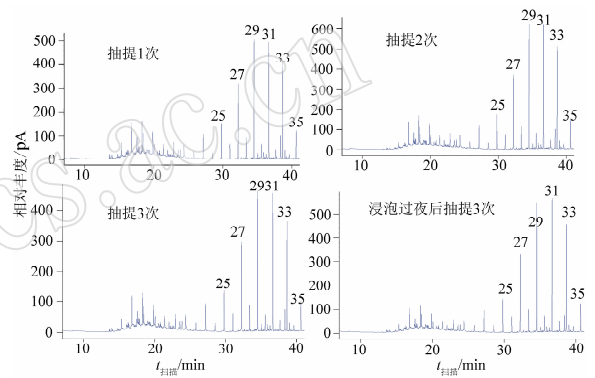


图1 抽提次数和强度对超声波溶剂萃取土壤正构烷烃的影响
Fig. 1 The effect extraction of frequency and ultrasonic intensity on the extraction of soil *n*-alkanes by UASE
峰上数字为碳数。

表1 不同条件下抽提的表土中正构烷烃含量

Table 1 The concentration of *n*-alkanes in surface soil samples under different extraction conditions

样品质量 <i>m</i> /g	抽提 次数	超声频 率/Hz	总正构烷烃(C ₂₇ +C ₂₉ +C ₃₁ +C ₃₃)含量 <i>w</i> _B /(μg·g ⁻¹)
10	1	100	1.22
10	2	100	1.50
10	3	100	1.09
10	3	60	1.33

2.2 超声波萃取土壤中正构烷烃的分布特征

刘湾剖面古土壤类脂物正构烷烃碳数分布范围为 $nC_{16} \sim nC_{33}$,相对丰度整体较低,且随深度增加,呈现逐渐降低的趋势。高碳数C₂₅~C₃₃正构烷烃呈现明显的奇偶优势,均以奇数正构烷烃组分为主。碳数分布主要以C₃₁为主峰(图2)。

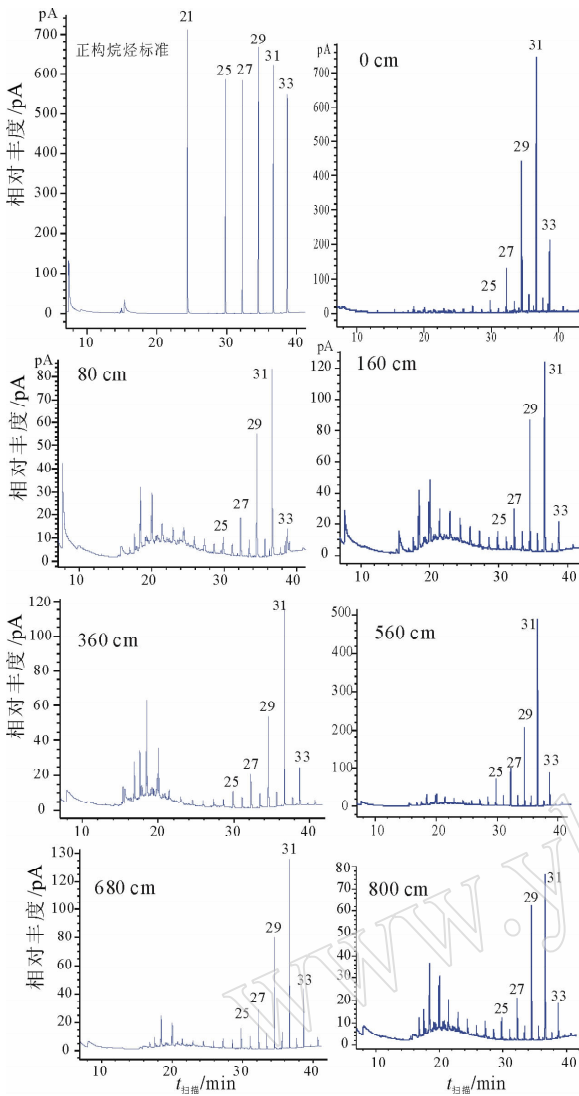


图2 超声波溶剂萃取土壤中正构烷烃的分布
Fig. 2 The distribution of *n*-alkanes in soils from different depth of the profile with UASE
峰上数字为碳数。

通常用碳优势指数 CPI ($CPI = \sum C_{23} \sim C_{33}$ (奇数碳) / $\sum C_{22} \sim C_{34}$ (偶数碳)) 的变化判断正构烷烃组分是否主要来自陆源植被^[10]。所测7个样品正构烷烃的碳优势指数 CPI 值变化为 4.6 ~ 10.7 (表2), 表明其正构烷烃组分主要来源于陆地高等植物^[23-24]。另外, 对其中两个样品 (80 cm 和 160 cm) 的高碳数 C_{27} 、 C_{29} 和 C_{31} 进行 GC - C - IRMS 分析获得同位素值, 每个样品重复测定一次, 其平均值作为每个样品的同位素结果 (表3), 进而分别对3个高碳数的同位素值进行简单平均计算, 最终获得两个样品的碳同位素值分别为 -31.80‰ (80 cm) 和 -30.52‰ (160 cm)。

2.3 加速溶剂萃取土壤中正构烷烃的分布特征

由于超声波溶剂萃取古土壤中类脂物正构烷烃组分相对丰度较低, 因此从上述超声抽提过的土壤残渣样品中任意选取两个样品 (80 cm 和 160 cm), 对其进行加速溶剂萃取, 将获得的抽提物分别进行气相色谱和 GC - C - IRMS 分析, 结果表明, 两个古土壤样品类脂物正构烷烃碳数分布范围为 $nC_{16} \sim nC_{33}$, 相对丰度较高, 高碳数 $C_{25} \sim C_{33}$ 正构烷烃呈现明显的奇偶优势, 均以奇数正构烷烃组分为主。碳数分布与超声抽提相同, 以 C_{31} 为主峰, C_{29} 和 C_{27} 次之 (图3)。CPI 值分别为 5.3 (80 cm) 和 4.3 (160 cm), 碳同位素值依次为 -31.46‰ 和 -30.56‰ (表2 和表3)。

2.4 两种萃取方法获得的正构烷烃特征讨论

对比两种萃取方法获得的土壤正构烷烃分布特征, 发现两种方法获得的正构烷烃碳数分布范围均为 $nC_{16} \sim nC_{33}$, 且高碳数 $C_{25} \sim C_{33}$ 正构烷烃呈现明显的奇偶优势, 均以奇数正构烷烃组分为主。

表2 土壤中正构烷烃相对丰度及碳优势指数 (CPI)

Table 2 Relative abundance and carbon preference index (CPI) of *n*-alkanes in soils

样品编号	抽提方法	称样量 <i>m</i> /g	深度 <i>d</i> /cm	峰面积													CPI	
				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}		
LW-0		9	0	60	24	67	28	128	39	373	102	1250	160	2456	130	598	10.7	
LW-80		40	80	42	33	34	25	41	24	77	30	213	30	349	16	74	5.4	
LW-160	超声波 溶剂萃取	40	160	122	68	58	41	58	39	107	48	308	44	448	22	100	4.6	
LW-360		40	360	18	18	22	21	45	27	77	31	187	29	386	17	99	5.7	
LW-560		40	560	49	37	51	70	203	84	287	86	567	74	1400	43	283	7.1	
LW-680		40	680	23	20	31	28	58	36	93	40	238	38	394	23	146	5.0	
LW-800		40	800	57	22	34	20	42	20	67	22	198	22	241	12	64	5.8	
LW-80		加速溶剂 萃取		0	72	60	51	40	66	46	123	51	352	52	640	30	161	5.3
LW-160				160	191	225	147	121	166	101	276	115	756	105	1109	52	246	4.3

表3 土壤中正构烷烃的碳同位素值

Table 3 The carbon isotope values ($\delta^{13}\text{C}$) of *n*-alkanes in soils

样品编号	抽提方法	深度 <i>d</i> /cm	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$			
			C_{27}	C_{29}	C_{31}	平均值
LW-80	超声波溶剂萃取	80	n. d ^①	-31.31	-32.29	-31.80
LW-160		160	-29.13	-30.79	-31.65	-30.52
LW-80	加速溶剂萃取	80	-30.44	-31.65	-32.29	-31.46
LW-160		160	-29.68	-30.80	-31.47	-30.65

① n. d 表示含量过低,未被检出。

碳数分布主要以 C_{31} 为主峰, C_{29} 和 C_{27} 次之,在 C_{27} 、 C_{29} 和 C_{31} 这3个有机分子中 C_{27} 的含量最低。碳优势指数 CPI 值和碳同位素结果均相似,表明超声波溶剂萃取和加速溶剂萃取方法对于古土壤样品类脂物正构烷烃组分分布和同位素结果没有影响,进而也表明在黄土-古土壤有机分子碳同位素样品分析过程中,样品抽提的不完全对这些分子化合物稳定同位素组成几乎没有影响。

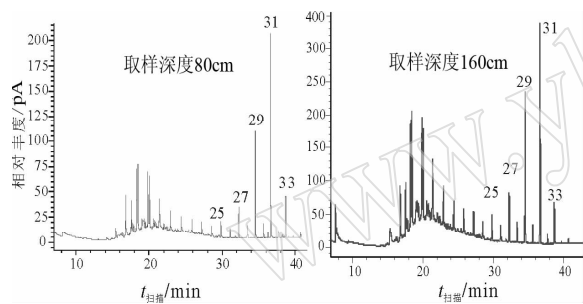


图3 加速溶剂萃取土壤中正构烷烃的分布

Fig. 3 The distribution of *n*-alkanes in soils from different depth of the profile with ASE

峰上数字为碳数。

尽管存在相似的结果,然而其差异也是非常明显的。从表4可以看出,加速溶剂萃取(ASE)的正构烷烃相对丰度是超声波溶剂萃取(UASE)的0.9~1.5倍,即加速溶剂萃取方法抽提效率明显高于超声波溶剂萃取方法。因此,对于年代较老的地质样品或含量较低的样品采用抽提效率高的加速溶剂萃取方法,更能有效地提取足够的量以进行同位素分析,并且节省抽提溶剂,达到省时省力的目的。而对于现代沉积物(如表土)或含量较高的样品而言,可采用设备相对便宜、操作简单、易于实现的超声波溶剂萃取方法。

表4 超声波和加速溶剂萃取土壤中正构烷烃的效率对比
Table 4 Comparison of the extraction efficiency of *n*-alkanes from loess and paleosol samples with UASE and ASE

样品编号	称样量 <i>m</i> /g	$w_B/(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$		增加的 倍数 (B-A) 差值
		UASE 总正构烷烃 $\text{C}_{27}+\text{C}_{29}+\text{C}_{31}+\text{C}_{33}$ (A)	ASE 总正构烷烃 $\text{C}_{27}+\text{C}_{29}+\text{C}_{31}+\text{C}_{33}$ (B)	
LW-80	40	0.04	0.08	0.04
LW-160	40	0.06	0.15	0.09

3 结语

通过对陕西西南地区刘湾剖面黄土-古土壤序列随机挑选的7个样品和1个表土样品的类脂物正构烷烃组分抽提方法(超声波溶剂萃取和加速溶剂萃取)比较分析,结果表明,超声波溶剂萃取的次数和强度不会对其抽提效率产生明显影响;对于年代较老、有机质含量较低的刘湾剖面古土壤样品,两种处理方法获得的类脂物正构烷烃组分的分布和碳同位素值没有差别,但是超声波溶剂萃取的效率明显低于加速溶剂萃取的效率。因此作者认为,对于年代较老、含量较低的地质样品,采用加速溶剂萃取方法更有助于获得充分的样品量并进行可靠的GC-C-IRMS分析;对于现代样品和含量较高的地质样品,可采用超声波溶剂萃取方法。

致谢:感谢中国科学院地球环境研究所王政助理研究员在实验过程中给予的帮助和何亚怀先生在野外工作提供的帮助,以及评审专家给予的建设性建议和意见。

4 参考文献

- [1] 彼得斯 K E, 莫尔多万 J M. 生物标记化合物指南——古代沉积物和石油分子化石的解释[M]. 姜乃煌, 张永昌, 林水汉, 张大江, 宋孚庆, 译. 北京: 石油工业出版社, 1998.
- [2] 傅家谟, 盛国英. 分子有机地球化学与古气候、古环境研究[J]. 第四纪研究, 1992, 12(4): 306-320.
- [3] Liu W G, Huang Y S, AN Z S, Clemens S C, Li L, Prell W L, Ning Youfeng. Summer monsoon intensity controls C_4/C_3 plant abundance during the last 35 ka in the Chinese loess plateau: Carbon isotope evidence from bulk organic matter and individual leaf waxes [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 220(3-4): 243-254.
- [4] Ballentine D C, Macko S A, Turekian V C. Variability

- of stable carbon isotopic compositions in individual fatty acids from combustion of C₄ and C₃ plants: Implications for biomass burning [J]. *Chemical Geology*, 1998, 152(1-2):151-161.
- [5] Collister J W, Rieley G, Stern B, Eglinton G, Fry B. Compound-specific $\delta^{13}\text{C}$ analyses of leaf lipids from plants with differing carbon dioxide metabolisms [J]. *Organic Geochemistry*, 1994, 21(6-7):619-627.
- [6] Huang Y S, Clemens S C, Liu W G, Wang Y, Prell W L. Large-scale hydrological change drove the late miocene C₄ plant expansion in the himalayan foreland and arabian peninsula [J]. *Geology*, 2007, 35(6):531-534.
- [7] Xie S C, Chen F H, Wang Z Y, Wang H M, Gu Y S, Huang Y S. Lipid distributions in loess-paleosol sequences from Northwest China [J]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34(8):1071-1079.
- [8] Duan Y, Wen Q B, Zheng G D, Luo B J, Ma L H. Isotopic composition and probable origin of individual fatty acids in modern sediments from Ruoergai Marsh and Nansha Sea, China [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27(7-8):583-589.
- [9] Rieley G, Collier R J, Jones D M, Eglinton G, Eakin P A, Fallick A E. Sources of sedimentary lipids deduced from stable carbon-isotope analyses of individual compounds [J]. *Nature*, 1991, 352(6334):425-427.
- [10] 刘卫国, 张普, 孙有斌, 黄永松, 郭正堂, 安芷生. 黄土高原中部 7~2Ma 期间古植被变化的分子化石证据——以赵家川剖面为例 [J]. 第四纪研究, 2008, 28(5):806-811.
- [11] Liu W G, Huang Y S. Reconstructing *in-situ* vegetation dynamics using carbon isotopic composition of biopolymeric residues in the central Chinese loess plateau [J]. *Chemical Geology*, 2008, 249(3-4):348-356.
- [12] Eglinton G, Hamilton R J. The distribution of alkanes [M]. New York: Academic Press, 1963:187-217.
- [13] 梁斌, 谢树成, 顾延生, 郭建秋, 阮小燕, 易轶, 黄俊华. 安徽宣城更新世红土正构烷烃分布特征及其古植被意义 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2005, 30(2):129-132.
- [14] Zhang H C, Yang M S, Zhang W X, Lei G L, Chang F Q, Pu Y, Fan H F. Molecular fossil and paleovegetation records of paleosol S₁ and adjacent loess layers in the luochuan loess section, NW China [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(3):321-330.
- [15] 杨明生, 张虎才, 雷国良, 张文翔, 樊红芳, 常凤琴, 牛洁, 陈钥. 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 [J]. 第四纪研究, 2006, 26(6):976-984.
- [16] 魏彩云, 王汇彤, 王慧, 孟建华. 快速溶剂抽提萃取岩石中氯仿沥青“A”方法探索 [J]. 现代科学仪器, 2009(2):96-98.
- [17] 王大娟, 李顺义, 舒月红, 张丽, 贾晓珊. 土壤和沉积物中 1,2,4-三氯苯的超声波提取 [J]. 中山大学学报:自然科学版, 2005, 44(3):102-104.
- [18] 任松, 陈卫卫, 卜建平, 张丽旭. 超声波提取在近海沉积物油类测定中的应用 [J]. 海洋环境科学, 2005, 24(1):35-37.
- [19] Kornilova O, Rosell-Mel A. Application of microwave-assisted extraction to the analysis of biomarker climate proxies in marine sediments [J]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34(11):1517-1523.
- [20] 牟世芬, 刘克纳, 阎炎, 侯小平, 宋强, 沈冬青. 加速溶剂萃取技术及其在环境分析中的应用 [J]. 环境化学, 1997, 16(4):387-391.
- [21] 王晓华, 石丽明, 刘美美, 孙青, 储国强. 古气候古环境研究中类脂化合物单体同位素分析 [J]. 岩矿测试, 2008, 27(6):435-440.
- [22] 鹿化煜, 张红艳, 王社江, Cosgrove R, 赵存法, Stevens T, 赵军. 东秦岭南洛河上游黄土地层年代的初步研究及其在旧石器考古中的意义 [J]. 第四纪研究, 2007, 27(4):559-567.
- [23] Huang Y S, Street-Perrott F A, Perrott R A, Metzger P, Eglinton G. Glacial-interglacial environmental changes inferred from molecular and compound-specific $\delta^{13}\text{C}$ analyses of sediments from Sacred Lake, Mt. Kenya [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(9):1383-1404.
- [24] Freeman K H, Freeman L A. Molecular and isotopic records of C₄ grassland expansion in the late miocene [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(9):1439-1454.