

北京典型土壤剖面中饱和烃的组成及垂向分布特征

何奉朋, 张枝焕, 高丹丹

(中国石油大学资源与信息学院石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249)

摘要: 分析了北京地区不同环境功能区具有代表性的 10 个土壤剖面样品中饱和烃污染物的含量和组成特征. 结果表明, 不同剖面饱和烃的浓度差别明显, 其变化范围为 $1.5 \sim 54.1 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 其中城区(B7)、污灌农田(B9)和工业区(B10)浓度较高. 所有的剖面均检出了正构烷烃、类异戊间二烯烷烃、烷基环己烷和甾、萜类等饱和烃污染物, 大部分剖面中各类化合物的相对含量为正构烷烃 > 类异戊间二烯烷烃 > 甾萜类 > 烷基环己烷, 而且在表层土中正构烷烃的含量明显占优势. 不同剖面中饱和烃浓度随深度增加而降低, 在表层 30 cm 内饱和烃含量随深度增加而明显降低, 40 cm 以下含量基本保持恒定, 且与有机碳含量的变化趋势基本一致. 地球化学参数(如 CPI1、CPI2、甾萜类生物标志物参数等)分析表明, 城区表土(B7)主要受化石燃料污染, 而其它剖面表土正构烷烃主要来源于高等植物, 但也受不同程度的化石燃料及其燃烧产物的污染; 剖面深部土样中正构烷烃来源与表层土不同, 其来源与土壤本身或成土母岩中所含的有机质的地球化学演化有关, 而甾萜类化合物和烷基环己烷与表层土中的来源可能基本相同.

关键词: 土壤剖面; 饱和烃; 垂向分布; 北京

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)01-0170-09

Vertical Distribution Characteristics and Composition of Saturated Hydrocarbon in Soil Profiles of Beijing

HE Feng-peng, ZHANG Zhi-huan, GAO Dan-dan

(Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation, Ministry of Education, Faculty of Natural Resources and Information Technology, University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Soil samples were collected from ten soil profiles with different environmental conditions in Beijing for saturated hydrocarbons (SHs) analysis. The vertical distribution of the both concentration and composition of SHs in ten soil profiles were investigated. Concentration of SHs in different profiles is significantly different, ranged from $1.5 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ to $54.1 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$. The higher concentrations are found in the samples from B7, B9 and B10. A series of SHs including n-alkanes, isoprenoid alkanes, terpenoids and steranes, alkyl hexamethylene were detected in all samples. The order from higher content to lower in most profiles (except B7) is: n-alkanes, isoprenoid alkanes, terpenoids and steranes, alkyl hexamethylene, and the relative content of n-alkanes is obviously dominant in the upper horizons. Concentrations of SHs and content of soil organic carbon in each profile show similar trend with depth, declined rapidly down to 30 cm and trend consistent in the deep part (> 40 cm). CPI1, CPI2, $(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31}) / \sum \text{alkanes}$, terpenoids and steranes, and biomarker parameters suggest that pollutants are mainly from fossil fuel in B7, high plant-derived n-alkanes dominated in other profiles and fossil fuel contamination to different extent. The sources of n-alkanes in deep part of soil profiles are different from those in topsoil samples, which are related to the soil itself, such as soil parent material and process of soil formation, but the sources of alkyl hexamethylene, terpenoids and steranes between topsoil and deep part are constant.

Key words: soil profile; saturated hydrocarbon; vertical distribution; Beijing

饱和烃为环境中常见的有机化合物之一, 主要包括正构/异构烷烃、长链取代环烷烃及甾萜类化合物等, 它们来源于化石燃料及其燃烧产物、生物有机质输入等. 其组成和分布特征常用于烃类污染源的识别, 如根据正构烷烃碳数分布范围、主峰碳、碳优势指数等判断正构烷烃是天然源还是石油来源^[1~3, 7]. 目前有关土壤、河口和海洋沉积物中烃类的污染已有报道^[1~6], 但多数研究主要针对表层土壤和沉积物, 且重点研究多环芳烃来源及分布特征^[2~5]. 有关北京地区大气颗粒物中有机污染物的分布、来源及季节变化^[8~10], 土壤中多环芳烃^[11]及水体中的有毒有机污染物^[12, 13]分布特征等方面的研

究已有报道, 尚缺乏有关土壤剖面中饱和烃污染物的分布特征及成因方面的研究成果. 本研究选择了北京地区不同环境功能区(城区、郊区、污灌与非污灌农田、果园、山地及工业区)具有代表性的土壤剖面 10 个, 揭示了土壤剖面饱和烃的含量及组成的垂向变化特征, 并利用地球化学参数对污染源进行了初步分析.

收稿日期: 2007-01-29; 修订日期: 2007-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(40473045, 40332015)

作者简介: 何奉朋(1982~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境有机地球化学, E-mail: hefengpeng612726@163.com

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据不同的土壤类型、地理条件和土地使用情况,分别在山区林地(B1、B2)、果园(B4、B5)、城区绿地(B7)、污灌耕地(B8、B9)、非污灌耕地(B3、B6)及工业区(B10)等选择 10 个土壤剖面进行采样(图 1),采样点的自然地理条件及土壤性状见表 1.采用梅花形布点法采样,每个剖面分 10 层,采样深度分别为:0~5、5~10、10~15、15~20、20~25、25~30、30~40、40~50、50~75、75~100 cm.采出样品后用锡箔纸包严并装袋运回实验室,经自然风干、研磨和过筛后混合好放入冰箱待用.

1.2 样品分析

1.2.1 样品预处理

取 100 g 混合样(5 个子样等量混合),用二氯甲烷和丙酮混合溶剂(1:1,体积比)抽提 36 h,抽提水浴和冷却水温分别控制在 80℃和 10℃,回流速度 5~6 次/h.提取液经旋转蒸发浓缩至约 1 mL,加入 10



图 1 采样点分布
Fig.1 Schematic diagram showing the locations of the sampling sites

表 1 采样点自然地理条件及土壤性状

Table 1 Character of soil samples and physical geography feature of sampling sites

剖面编号	样点位置	位置		土壤 质地	土地利 用情况	其它
		经度 E	纬度 N			
B1	延庆县永宁镇东南 5 km	116°12'	40°29'	褐土	耕地和杏树林	坡地无积水
B2	密云水库旁	116°57'	40°26'	砂壤	树林	自然保护区
B3	昌平区西三旗立汤路	116°24'	40°06'	粘壤土	玉米地	旱地
B4	昌平区崔村镇	116°20'	40°13'	粘壤土	柿子园	井水灌溉
B5	顺义区山里辛庄	116°54'	40°11'	潮土	李子园	井水灌溉
B6	大兴区李村	116°12'	39°29'	砂壤	农田	现为井水灌溉
B7	花乡镇城区绿地	116°19'	39°50'	砂壤	绿地	现为空地
B8	通州区	116°46'	39°48'	沙土	农田	曾有污灌
B9	昌平区沙河南一村	116°14'	40°06'	砂壤	水稻田	东南为污灌渠,3 a 前为污灌,近年井水灌溉
B10	房山区燕山石化	115°59'	39°43'	砂土	工业区	西有排污河

mL 的二氯甲烷,再次浓缩至 1~2 mL 以转换溶剂.转移后的抽提液中的溶剂在自然条件(<40℃)下完全挥发后恒重定量,并用正己烷沉淀沥青质.浓缩液经 3 次超声萃取、浓缩,放置 2~4 h 后加入硅胶/氧化铝分离柱分离.用 30 mL 的石油醚淋洗出饱和烃,然后经旋转蒸发浓缩至约 1 mL,定量转移至 5 mL 的刻度量管中,氮气吹定容至 200 μL 后待测.

1.2.2 GC-MS 检测与定量分析

分析仪器为 Thermo-Finnigan Trace-DSQGC-MS 联用仪.色谱条件:HP-5 弹性石英毛细柱 60 m×0.25 mm×0.25 μm,载气为氦气,柱前压为 0.03 MPa,进

样温度为 300℃,升温程序:初温为 50℃,以 20℃·min⁻¹升至 120℃,再以 4℃·min⁻¹升至 250℃,以 3℃·min⁻¹升至 310℃(30 min).无分流进样,接口温度 280℃,EI 电离源 70 eV,倍增器电压 1 200 eV,离子源温度 200℃,采用全扫描.

采用内外标相结合定量分析饱和烃类化合物.选氘代二十四烷作为内标物并将其配成 1 μg·μL⁻¹的标准溶液,每次加入 2 μL;样品中预加入 1.5 μg 回收率指示剂(氘代菲、氘代、氘代茛),平均回收率为 82.6%.各待测化合物的浓度=(待测化合物峰面积×氘代二十四烷浓度)/氘代二十四烷峰面积.

2 结果与讨论

2.1 饱和烃总量分布特征

所有样品中均检测到正构烷烃、烷基环己烷、类异戊间二烯烷烃和甾萜类等,与北京大气颗粒物中检测到的饱和烃类型一致^[8,9].不同剖面饱和烃占总抽提物的平均质量分数变化较大,为 3.62%(B1)~24.82%(B10),其中城区(13.9%)和燕山石化(24.82%)明显高于其它剖面.不同剖面中,表土(0~30 cm)中饱和烃平均浓度差别较大[图 2(a)],不同层位浓度差别明显,变化范围为 1.5~51.4 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,饱和烃浓度和有机碳含量均随深度增加而降低(图 3),表层(0~40 cm)变化幅度较大,30 cm 以下浓度趋于一致,除剖面 B10 外,40 cm 以下均小于 10 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$.剖面 B1、B2、B3、B4、B8 和 B9 没有明显的亚表层富集现象,表层浓度(0~15 cm)变化不明显,大于 15 cm 时明显降低(B9 变化最明显),剖面 B5、B6、B7 和 B10 存在亚层(10~20 cm)富集(B7 富集最为明显).

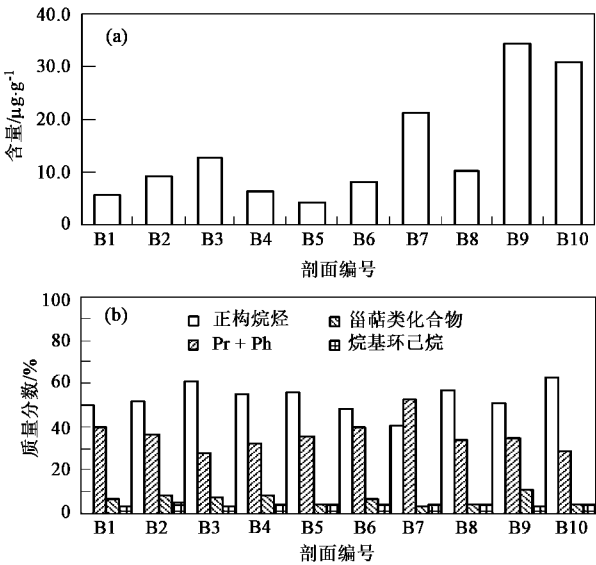


图 2 不同剖面表层(0~30 cm)土壤中饱和平均浓度及各类化合物质量分数

Fig.2 Average concentration of saturated hydrocarbons and percent of different compounds in topsoil (0~30 cm)

在不同剖面及不同层位,正构烷烃、甾萜类、类异戊间二烯烷烃和烷基环己烷 4 个系列化合物的含量分布规律基本一致[图 2(b)].在城区,这 4 个系列化合物含量相对大小为:类异戊间二烯烷烃>正构烷烃>烷基环己烷>甾萜类,其余剖面一般为正构烷烃>类异戊间二烯烷烃>甾萜类>烷基环己

烷.不同剖面表层(0~30 cm)正构烷烃含量明显占优势[图 2(b)],平均占检出饱和烃总量的 40%以上.

2.2 正构烷烃分布特征

样品中检测到的正构烷烃包括 $n\text{C}_{15} \sim n\text{C}_{35}$,大部分剖面中(除 B7 外) $n\text{C}_{25} \sim n\text{C}_{31}$ 相对含量较高(图 4b),且有明显的奇偶优势.正构烷烃参数[CPI1、CPI2、 $n\text{C}_{21}^-/n\text{C}_{22}^+$ 和 $(n\text{C}_{25} + n\text{C}_{27} + n\text{C}_{29} + n\text{C}_{31})/\Sigma$ 正构烷烃]可以反映污染源的性质.CPI1(除 B2 外)及表层土中 CPI2(除 B2、B7)的分布范围分别为 0.9~1.54、3.54~12.34(图 5),均值分别为 1.13、6.92,说明低碳数正构烷烃可能来源于石油或其它化石燃料而高碳数正构烷烃来源于高等植物的降解产物.除剖面 B7 外,CPI1 和 CPI2 均随深度增加而降低(图 5),大于 40cm 后变化较小,这与 Hostettler 等^[14]研究 2 个沉积物剖面得出 CPI 的变化特征相似,可能是由于各种来源的正构烷烃对表层贡献量大而对深部则较少,而深部正构烷烃则可能有不同的来源.

土壤和沉积物中的正构烷烃主要来源于矿物油、化石燃料及天然有机质的不完全燃烧、细菌和藻类合成、高等植物蜡质的降解产物等,不同来源使得其组成存在明显的差别,张枝焕等^[1]将不同来源的正构烷烃谱图的叠合方式分为 7 种.大部分剖面表土中正构烷烃色谱峰以双峰态后峰型为主[图 6(a)],主峰碳分别为 C_{29} 和 C_{31} (B1、B3、B4、B5、B8), C_{25} (B2),[图 6(d)],奇偶优势明显.随着深度的增加,低碳数正构烷烃含量增加[图 6(a)~6(c)],变为双峰态或双峰态前峰型,且 B2 后峰主峰碳数降为 C_{23} [图 6(e)];部分剖面(B2、B3、B5、B6、B7)深部也存在单峰态前峰型[图 6(f)],这可能与土壤本身或成土母岩的性质有关.B6 总体为双峰态[图 6(g)],主峰碳为 C_{16} 和 C_{29} .水稻田(B9)表层(0~25 cm)和燕山石化(B10)表层(0~15 cm)均为双峰态后峰型[图 6(i)],前峰态呈近似正态分布,后峰主峰碳为 C_{29} ,随着深度的增加低碳数正构烷烃含量增加而前峰态的正态分布特征消失.在城区,色谱峰均为单峰态前峰型[图 6(h)],主峰碳为 C_{15} 或 C_{17} ,无奇偶优势.正构烷烃谱图特征及参数表明,在城区表土其主要来自化石燃料污染,而其它剖面(除 B2)表土中其主要来自高等植物的贡献;B2 表层主峰碳(C_{25})偏低可能由于 $n\text{C}_{25} \sim n\text{C}_{31}$ 的含量因植物类型和季节的变化而变化^[16].剖面深部土样中正构烷烃谱图特征较为一致(单峰态前峰型),表明不同剖面深部正构烷

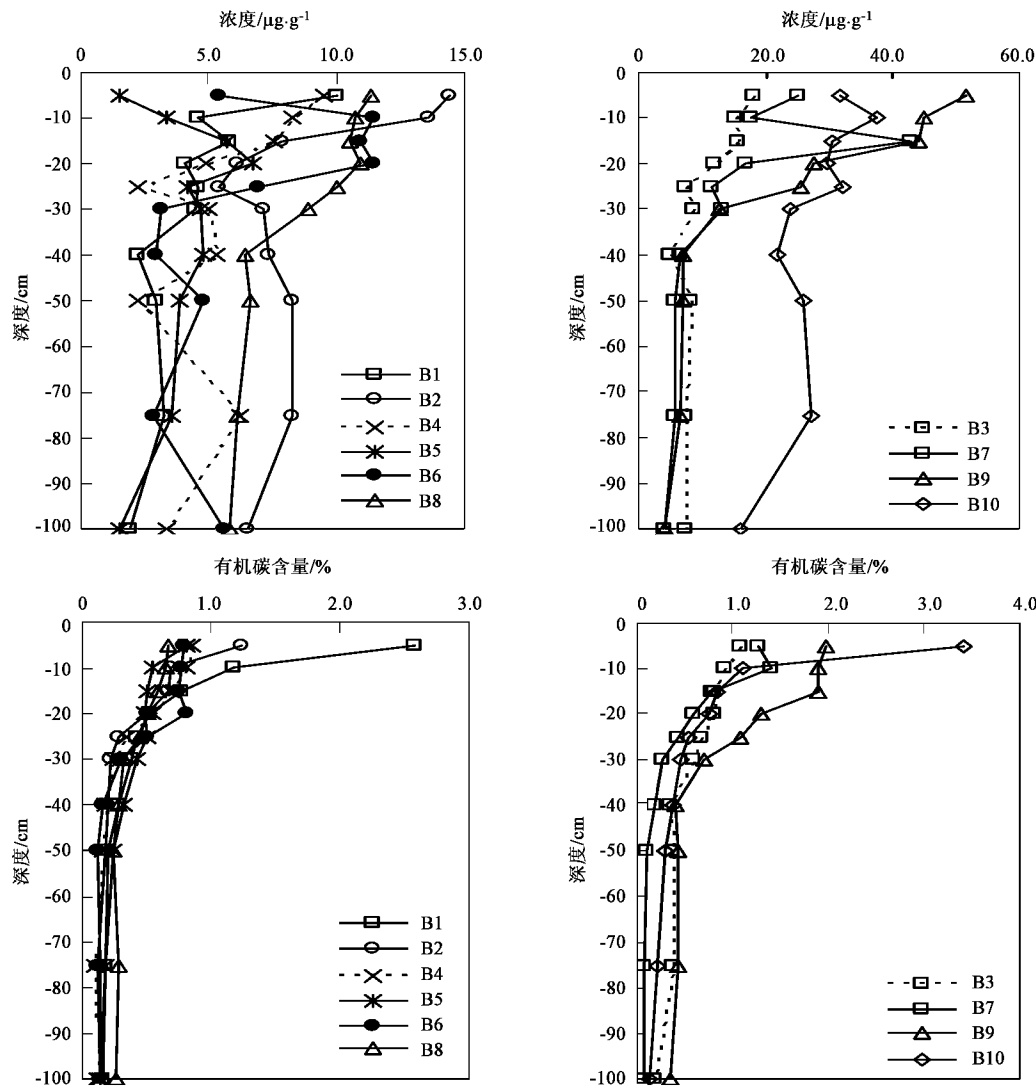
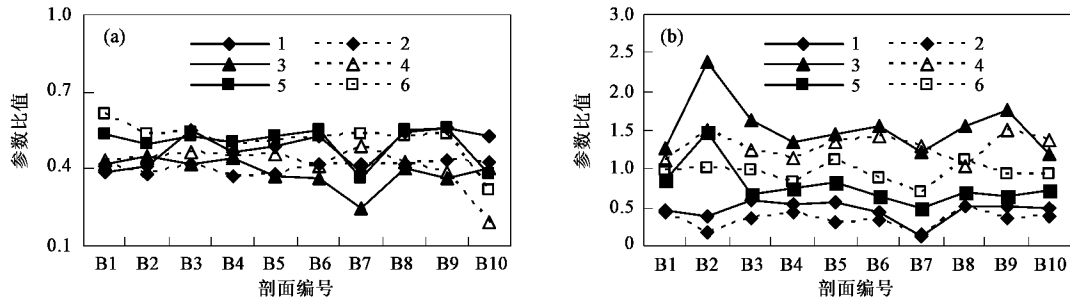


图 3 不同剖面饱和烃浓度及有机碳含量垂向变化特征

Fig.3 Vertical distribution of concentration of saturated hydrocarbons and content of organic carbon in different soil profiles



(a) 1: C_{29} 甾烷 $20S/(20S + 20R)$ (表层); 2: C_{29} 甾烷 $20S/(20S + 20R)$ (深部); 3: $Ts/(Ts + Tm)$ (表层); 4: $Ts/(Ts + Tm)$ (深部); 5: $C_{31}\alpha\beta$ 藿烷 $22S/(22S + 22R)$ (表层); 6: $C_{31}\alpha\beta$ 藿烷 $22S/(22S + 22R)$ (深部)
(b) 1: $(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31})/\Sigma$ 正构烷烃(表层); 2: $(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31})/\Sigma$ 正构烷烃(深部); 3: Pr/Ph (表层); 4: Pr/Ph (深部); 5: Ph/C_{18} (表层); 6: Ph/C_{18} (深部)

图 4 不同土壤剖面表层(0 ~ 30 cm)与深部(30 ~ 100 cm)中不同参数均值分布特征

Fig.4 Characteristics of mean value of different parameters between topsoil (0 ~ 30 cm) and deep part (30 ~ 100 cm)

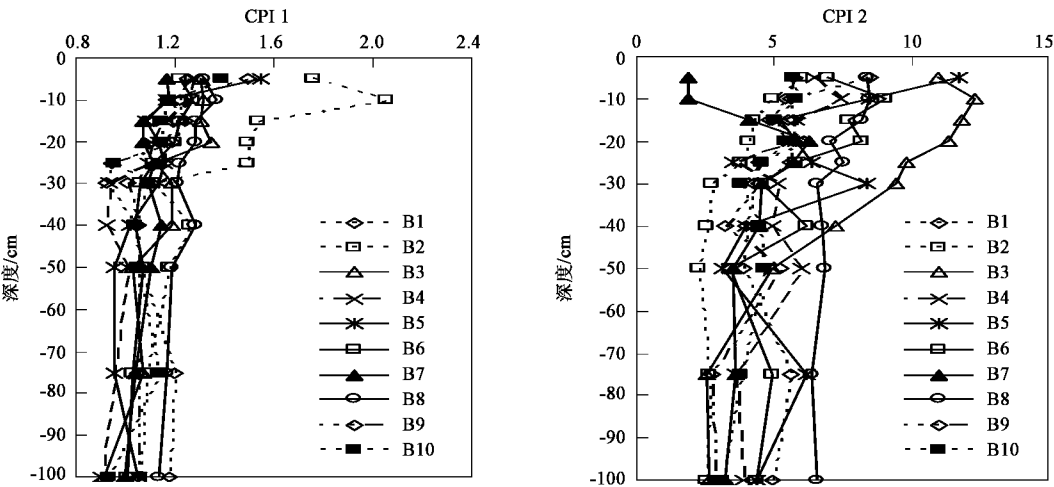


图 5 不同剖面 CPI1 和 CPI2 纵向变化特征

Fig.5 Vertical characteristics of CPI1 and CPI2 in different soil profiles

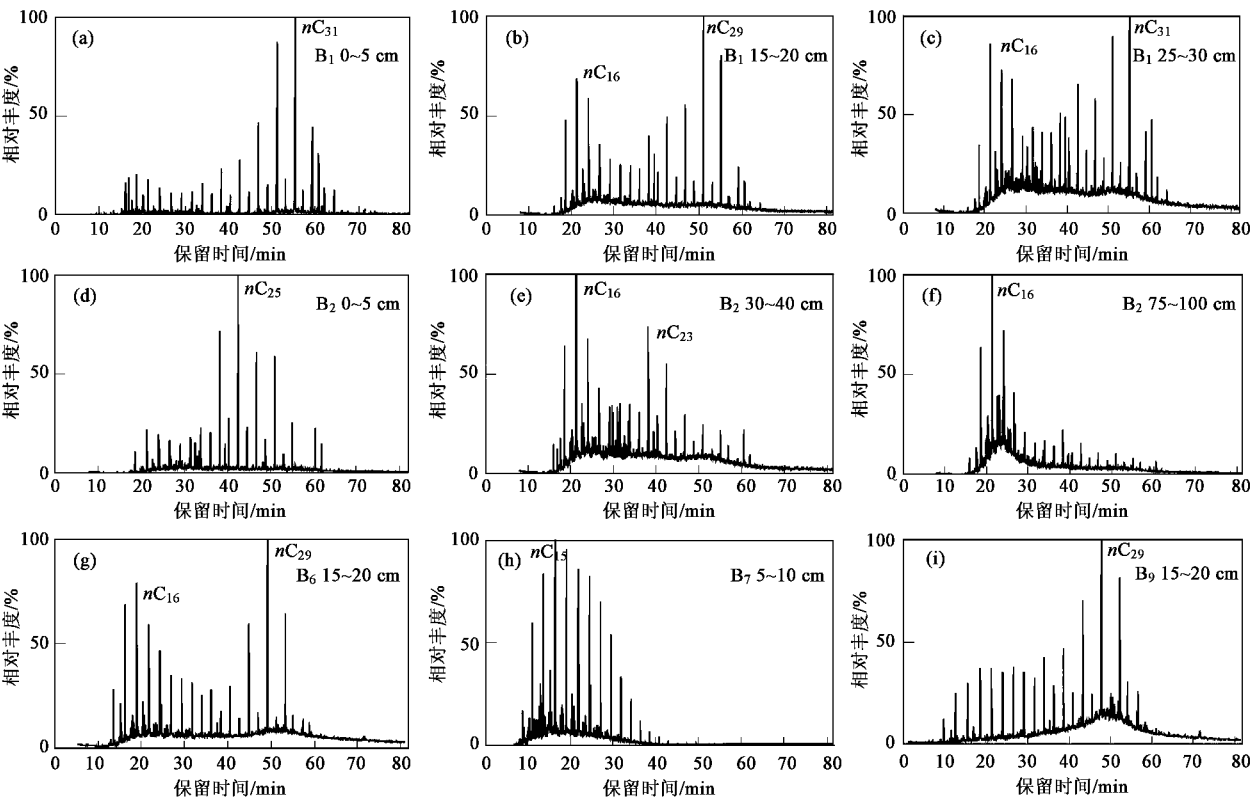


图 6 不同剖面具有代表性的饱和烃总离子流

Fig.6 Typical total ion chromatograms of saturated hydrocarbons from different soil profiles

烃的来源可能相同。

不同剖面中正构烷烃组成随深度的变化不同(图 7),大部分剖面表土中具有奇偶优势的高碳数正构烷烃占优势,低碳数正构烷烃的含量随着深度的增加而增加,这可能是由于表土中正构烷烃的浓度大,高低碳数正构烷烃的降解速率相同^[15],而高等植物贡献较高所以高碳数正构烷烃占优势,随着深度的增加高等植物的贡献减少而与土壤本身有关

的正构烷烃量增加;在城区整个剖面中低碳数正构烷烃明显占优势,但随深度增加其相对含量降低,可

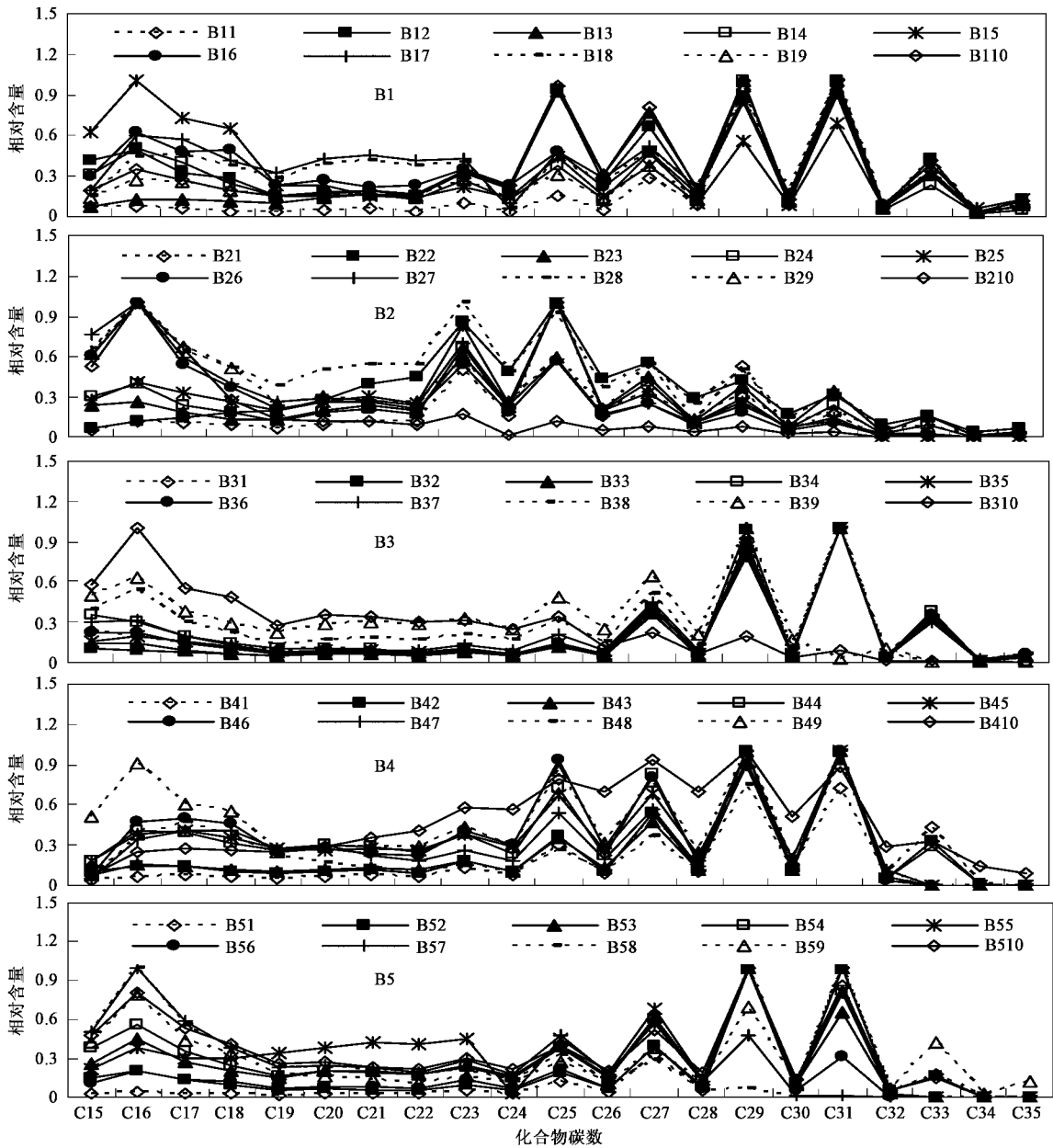


图 7a 不同土壤剖面正构烷烃化合物组成随深度变化特征
Fig. 7a Compositional change of normal alkane with depth in different soil profiles

能是因来源于矿物油的低碳数正构烷烃对深部贡献减少而引起,与受污染的沉积物中饱和烃的分布特征一致,即低碳数正构烷烃减少而富集 $C_{23} \sim C_{35}$ 的正构烷烃和藿烷^[17].

2.3 甾萜类化合物

在古代沉积物、化石燃料、天然生物质和未受污染的现代沉积物中均发现甾萜类化合物,但来源的不同使其结构特征存在明显的差别,其难降解,能提供更多污染物来源的信息.样品中检出的甾萜类包括倍半萜、三环萜烷、藿烷和甾烷等,这些化合物组

成随深度的变化可分为 4 类(图 8),即水库周边[图 8(a)]、农田和果园[图 8(b)]、城区[图 8(c)]和燕山石化附近[图 8(d)].由图 8 知,17 α ,21 β -30-降藿烷和 17(α)H,21(β)H 藿烷含量较高,无天然 $\beta\beta$ 构型,与部分地区大气颗粒物中藿烷组成一致^[18];甾烷总体特征为 $C_{29} \gg C_{27} > C_{28}$ 的反“L”型,与其在北京大气颗粒物中的特征一致^[8,9],这是高等植物生源占优势的煤中甾烷的分布特征^[7],说明土壤中的甾萜类化合物部分来自大气降尘.燕山石化区[图 8(d)]组成变化特征说明污染物来源复杂,化合物含量随着深

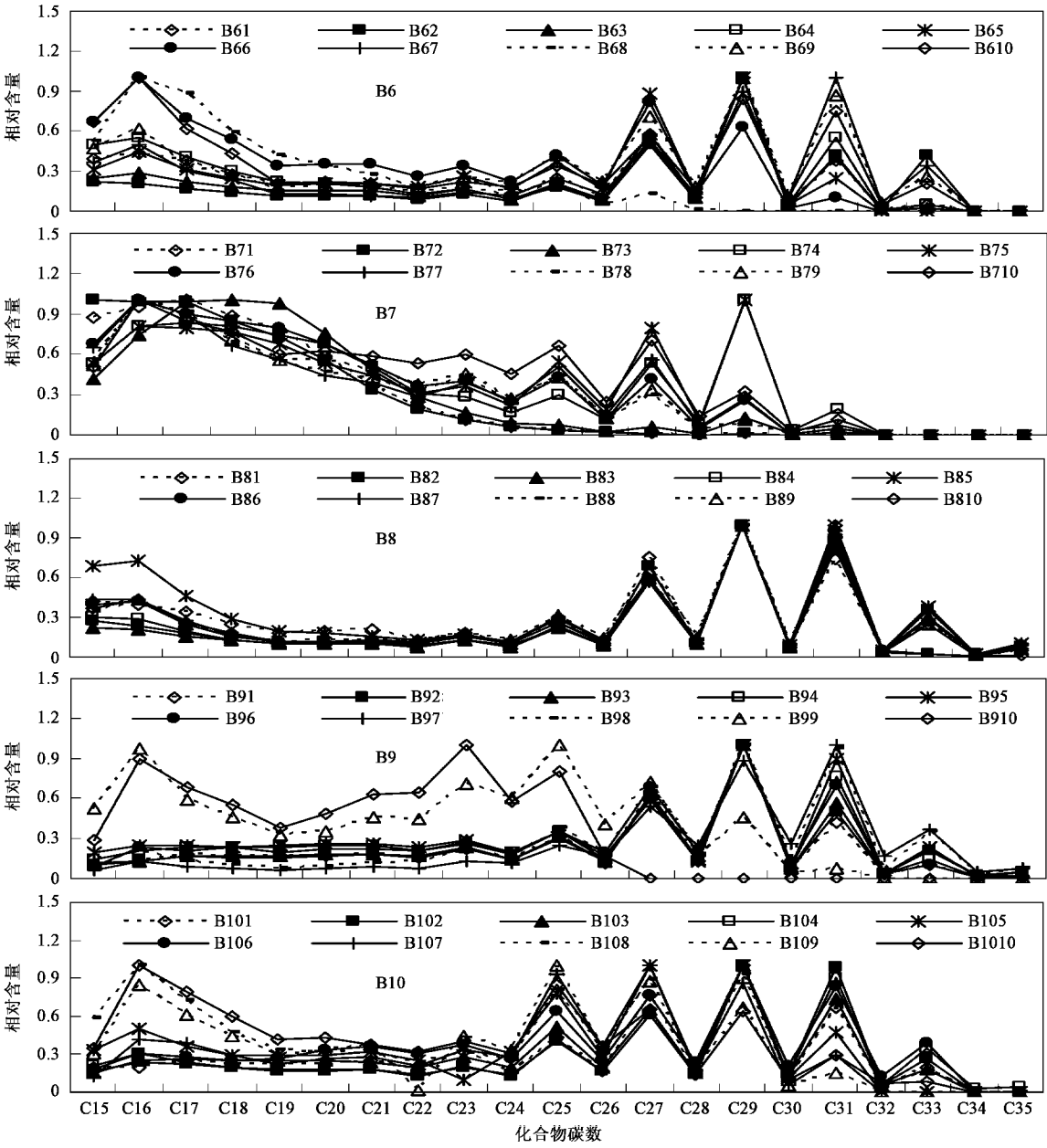


图 7b 不同土壤剖面正构烷烃化合物组成随深度变化特征

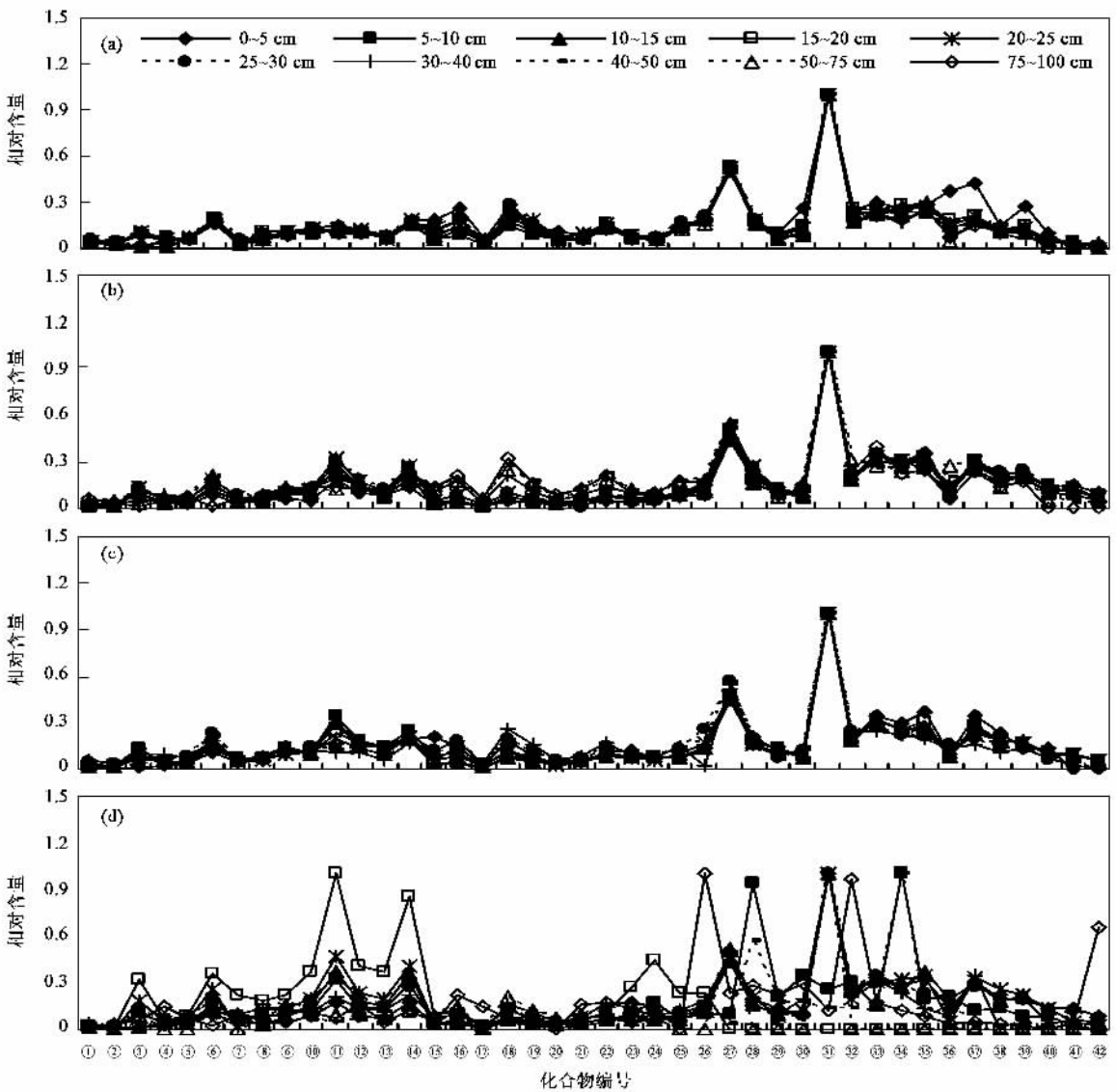
Fig. 7b Compositional change of normal alkane with depth in different soil profiles

度的增加而降低,在农田和燕山石化,至 20 cm 处含量明显降低,而水库、果园、城区和稻田存在亚表层(20 cm)富集,表明大气沉降对表土中甾萜类化合物的贡献量较高^[19].由实验数据可知,城区和稻田甾萜类化合物含量明显高于其它剖面,这是因为城区受化石燃料燃烧和交通源污染影响较大而稻田曾为污灌地. $T_s/(T_s + T_m)$ (T_s : 18 α , -22, 29, 30-三降藿烷; T_m : 17 α , -22, 29, 30-三降藿烷)、 C_{29} 甾烷 $22S/(22S + 22R)$ 及 $C_{31}\alpha\beta$ 藿烷 $22S/(22S + 22R)$ 等参数随深度变化不明显[图 4(a)],在表层和深部其平均值接近平

衡终点,推测表层和深部甾萜类化合物的来源一致.

2.4 类异戊二烯烷烃和烷基环己烷

类异戊间二烯烷烃和烷基环己烷是化石燃料的重要组成部分.姥鲛烷和植烷是煤和原油中丰度较高的类异戊间二烯烷烃. C_{10} 以上的烷基环己烷在原油中占很大比例^[1].不同样品中检出的类异戊间二烯烷烃主要有姥鲛烷和植烷等,在大部分剖面中其含量仅次于正构烷烃,而城区表土中其含量高于正构烷烃(图 2),说明城区受化石燃料污染较其它研究区严重. Pr/Ph 、 Pr/nC_{17} 和 Pr/nC_{18} 可以用于判断



化合物编号: ①5 α (H), 14 β (H)-孕甾烷; ②C₂₂ 孕甾烷; ③20S- $\alpha\alpha\alpha$ -胆甾烷; ④20R- $\alpha\beta\beta$ -胆甾烷; ⑤20S- $\alpha\beta\beta$ -胆甾烷; ⑥20R- $\alpha\alpha\alpha$ -胆甾烷; ⑦20S-24-甲基- $\alpha\alpha\alpha$ -胆甾烷; ⑧20R-24-甲基- $\alpha\beta\beta$ -胆甾烷; ⑨20S-24-甲基- $\alpha\beta\beta$ -胆甾烷; ⑩20R-24-甲基- $\alpha\alpha\alpha$ -胆甾烷; ⑪20S-24-乙基- $\alpha\alpha\alpha$ -胆甾烷; ⑫20R-24-乙基- $\alpha\beta\beta$ -胆甾烷; ⑬20S-24-乙基- $\alpha\beta\beta$ -胆甾烷; ⑭20R-24-乙基- $\alpha\alpha\alpha$ -胆甾烷; ⑮C₂₀, 13 β (H), 14 α (H)-三萜烷; ⑯C₂₁, 13 β (H), 14 α (H)-三萜烷; ⑰C₂₂, 13 β (H), 14 α (H)-三萜烷; ⑱C₂₃, 13 β (H), 14 α (H)-三萜烷; ⑲C₂₄, 13 β (H), 14 α (H)-三萜烷; ⑳C₂₅, 13 β (H), 14 α (H)-三萜烷; ㉑C₂₄-三萜烷; ㉒C₂₆-三萜烷; ㉓C₂₈-三萜烷; ㉔C₂₉-三萜烷; ㉕Ts; ㉖Tm; ㉗17 α , 21 β -30-降藿烷; ㉘C₂₉ Ts; ㉙18 α (H)-藿烷; ㉚17 β (H), 21 α (H)-降莫烷; ㉛17 α (H), 21 β (H)-藿烷; ㉜17 β (H), 21 α (H)-莫烷; ㉝22S-17 α (H), 21 β (H)-升藿烷; ㉞22R-17 α (H), 21 β (H)-升藿烷; ㉟伽玛蜡烷; ㊱22R-17 β (H), 21 α (H)-升莫烷; ㊲22S-17 α (H), 21 β (H)-二升藿烷; ㊳22R-17 α (H), 21 β (H)-二升藿烷; ㊴22S-17 α (H), 21 β (H)-三升藿烷; ㊵22R-17 α (H), 21 β (H)-三升藿烷; ㊶22S-17 α (H), 21 β (H)-四升藿烷; ㊷22R-17 α (H), 21 β (H)-四升藿烷

图 8 不同土壤剖面甾萜类化合物组成随深度变化特征

Fig. 8 Compositional change of terpenoids and steranes with depth in different soil profiles

是否受原油污染以及正构烷烃是否受到生物降解. 不同剖面表层和深部土壤中 Pr/Ph 和 Pr/nC₁₈ 平均值变化特征见图 4(b), Pr/nC₁₈ 在深部比表层高, 可能是由于正构烷烃比 Pr 更容易降解. 不同剖面表层和深部 Pr/Ph 变化趋势一致[图 4(b)], 表明在表层和深部其来源可能相同. 检测到的烷基环己烷主要包括 C₈ ~ C₂₇ 烷基环己烷, 在城区表土中其含量高于甾

萜类化合物而其它剖面表土中其含量最低(图 2). 各剖面中烷基环己烷的垂向变化特征与甾萜类相同, 而且这类化合物是化石燃料的重要组成部分, 天然产物中含量较低, 因此认为其来源于化石燃料污染.

3 结论

(1) 北京地区不同土壤剖面及同一剖面不同层

位土壤样品中饱和烃的浓度差别明显,变化范围为 1.5 ~ 54.1 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,城区、燕山石化和污灌农田的浓度较高.所有样品均检出正构烷烃、类异戊间二烯烷烃、甾萜类和烷基环己烷,大部分剖面中(除 B7 外)其相对含量为:正构烷烃 > 类异戊间二烯烷烃 > 甾萜类 > 烷基环己烷,正构烷烃明显占优势.

(2)CPI1、CPI2 和 $(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31})/\Sigma$ 正构烷烃等参数以及正构烷烃谱图特征表明,城区表土正构烷烃主要来自化石燃料及其燃烧产物,其它剖面表层正构烷烃主要来源于高等植物.藿烷、甾烷、Ts 及 Tm 等生物标志物及参数说明研究区域普遍受化石燃料及其燃烧产物的污染.

(3)饱和烃浓度和有机碳含量随深度的变化特征一致,表层 30 cm 随着深度的增加浓度明显降低,大于 40 cm 基本趋于恒定.在表层高碳数正构烷烃含量明显占优势,随着深度的增加低碳数正构烷烃相对含量增加,至深部正构烷烃的谱图特征相似,推测不同剖面深部正构烷烃的来源与表层不同,可能与土壤本身或成土母岩中所含的有机质的地球化学演化有关.甾萜类化合物含量随深度增加明显降低,表明大气沉降对表土的贡献较高,在表层与深部其参数平均值变化不大而且接近平衡终点,表明表层和深部甾萜类化合物的来源一致.

参考文献:

[1] 张枝焕,陶澍,彭正琼,等.天津表层土中饱和烃污染物的组成及分布特征[J]. 中国环境科学, 2003, **23**(6): 602-605.

[2] Wu Y, Zhang J. Geochemistry of *n*-Alkanes and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from the South China Sea[J]. Journal of Ocean University of China, 1999, **29**(1): 112-120.

[3] Rogers K M, Savard M M. Detection of petroleum contamination in river sediments from Quebec City region using GC-RMS[J]. Organic Geochemistry, 1999, **30**: 1559-1569.

[4] 张枝焕,王学军,陶澍,等. 天津地区典型土壤剖面多环芳烃的垂向分布特征[J]. 地理科学, 2004, **24**(5): 562-567.

[5] 康跃惠,麦碧娴,盛国英,等. 珠江三角洲地区水体表层沉积物中有机污染状况初步研究[J]. 环境科学学报, 2000, **20** (增刊): 164-170.

[6] 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[J]. 极地研究, 2004, **16**(4): 281-294.

[7] 张枝焕,陶澍,叶必雄,等. 土壤和沉积物中烃类污染物的主要来源和识别标志[J]. 土壤通报, 2004, **35**(6): 793-798.

[8] 周家斌,王铁冠,黄云碧,等. 北京地区大气颗粒物中正构烷烃的粒径分布及污染源示踪研究[J]. 中国石油大学学报, 2004, **28**(5): 121-130.

[9] 刘大锰,李运勇,蒋佰坤,等. 北京首钢地区大气颗粒物中有机污染物的初步研究[J]. 地球科学, 2003, **28**(3): 327-332.

[10] He L Y, Hu M, Huang X F, *et al.* Seasonal pollution characteristics of organic compounds in atmospheric fine particles in Beijing [J]. Science of the Total Environment, 2006, **359**: 167-176.

[11] 汤莉莉,唐翔宇,朱永官,等. 北京地区土壤中多环芳烃的分布特征[J]. 解放军理工大学学报, 2004, **5**(2): 95-99.

[12] 王晓燕,尚纬,马梅,等. 北京永定河(官厅—三家店)水体有毒有机污染物的致突变性研究[J]. 地球化学, 2001, **30**(6): 613-616.

[13] 康跃惠,刘培斌,王子健,等. 北京官厅水库-永定河水系水体中持久性有机氯农药污染[J]. 湖泊科学, 2003, **15**(2): 125-132.

[14] Hostettler F D, Pereira W E, Kvenvolden K A, *et al.* A record of hydrocarbon input to San Francisco Bay as traced by biomarker profiles in surface sediment and sediment cores [J]. Marine Chemistry, 1999, **64**: 115-127.

[15] Jonge H D, Feijer J I, Verstraten J M, *et al.* Relation between Bioavailability and Fuel Oil Hydrocarbon Composition in Contaminated Soils [J]. Environmental Science and Technology, 1997, **31**(3): 771-775.

[16] Cameron K D, Teece M A, Bevilacqua E, *et al.* Diversity of cuticular wax among *Salix* species and *Populus* species hybrids[J]. Phytochemistry, 2002, **60**: 715-725.

[17] Colombo J C, Cappelletti N, Lasci J, *et al.* Sources, Vertical Fluxes, and Accumulation of Aliphatic Hydrocarbons in Coastal Sediments of the Río de la Plata Estuary, Argentina [J]. Environmental Science and Technology, 2005, **39** (21): 8227-8234.

[18] Sihabut T, Ray J, Northcross A, *et al.* Sampling artifact estimates for alkanes, hopanes and aliphatic carboxylic acids [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**: 6945-6956.

[19] Wilcke W, Zech W, Kobza J. PAH-Pool in soil along a PAH-deposition gradient [J]. Environmental Pollution, 1996, **92**(3): 307-313.