

# 苏南地区农田表层土壤中多环芳烃和酞酸酯的污染特征及来源

张利飞, 杨文龙, 董亮, 黄业茹, 史双昕, 张焯, 周丽

(国家环境分析测试中心国家环境保护二恶英污染控制重点实验室, 北京 100029)

**摘要:**采用气相色谱质谱(GC-MS)法测定了苏南地区 13 个农田表层土壤样品中的多环芳烃(PAHs)和酞酸酯(PAEs)污染物, 分析比较了不同区域农田表层土壤, 尤其是来自钢铁企业周边的表层土壤中 PAHs 和 PAEs 的污染特征及其来源。结果表明, 苏南地区农田土壤中总 PAHs 和总 PAEs 的浓度分别在 147~40 300  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.575~762  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间, 其中钢铁厂周边的平均浓度分别为 6 130  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 47.4  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤样品中苯并(a)芘的浓度与总 PAHs 的浓度显著相关, 高分子量 PAHs 在钢铁厂周边表土中含量较高, 钢铁冶炼焦化和烧结等工序是其污染来源。酞酸正丁酯(DBP)和酞酸乙基己基酯是苏南地区农田土壤中含量最高的两种 PAEs 类物质, 钢铁厂周边有较高的 DBP 检出可能与炼钢、冷轧和炼铁等工序有关。本研究将为经济高速发展地区农田土壤环境质量评价、农产品安全生产及土壤污染防治对策的制定提供科学依据。

**关键词:** 苏南地区; 农田土壤; 多环芳烃(PAHs); 酞酸酯(PAEs); 钢铁厂

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2011)11-2202-08

## Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters in Agricultural Surface Soil from the Southern Jiangsu Province, China

ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, HUANG Ye-ru, SHI Shuang-xin, ZHANG Ting, ZHOU Li

(State Environmental Protection Key Laboratory of Dioxin Pollution Control, National Research Center for Environmental Analysis and Measurement, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and phthalic acid esters (PAEs) are ubiquitous in the environment. They were the key pollutants of the national survey of soil pollution. The Southern Jiangsu Province is the main part of the Yangtze River Delta, which was one of the most rapidly developing areas not only in China but also in the world. Agricultural pollution in the Southern Jiangsu Province is more concerned with the economic development. In this study, three cities including Suzhou, Wuxi, and Nantong in the Southern Jiangsu Province were selected for the determination of PAHs and PAEs. Thirteen agricultural surface soil samples, including five samples from an iron and steel factory were collected. The pollution characteristics and potential sources of PAHs and PAEs were investigated. The total PAHs and PAEs concentrations varied from 147 to 40 300  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , and from 0.575 to 762  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , respectively. Concentration of benzo[a] pyrene and the total PAHs of the surface soil was significantly correlated. Di-n-butyl phthalate (DBP) and di[2-ethylhexyl] phthalate were the predominant PAEs in the soil samples. The average PAHs and PAEs concentrations of soil nearby the iron and steel factory were 6 130  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  and 47.4  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Coking, sintering, and steel making processes were considered the potential sources of the high molecular weight PAHs and DBP. This study described the PAHs and PAEs concentrations, distribution patterns, and potential sources in one of the most rapidly developing areas in China. The results of this study should facilitate the development of soil environmental evaluation and safe food management practices in rapidly developing areas.

**Keywords:** Southern Jiangsu Province; agricultural surface soil; polycyclic aromatic hydrocarbons; phthalic acid esters; iron and steel factory

收稿日期: 2011-04-21

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB421602); 环境化学与生态毒理学国家重点实验室开放基金项目(KF2010-20)

作者简介: 张利飞(1979—), 男, 博士, 主要从事持久性有毒污染物的环境行为与降解研究。E-mail: lfzhang@eneac.com

土壤是构成生态系统的基本要素之一,是农业生产的重要基础。土壤污染直接威胁到农产品安全和农业的可持续发展。苏南地区雨水丰沛、土地肥沃,是我国传统的农产品生产基地之一。近30多年来,随着长江三角洲地区工农业生产的高速发展,苏南地区的环境污染逐年加重,由此产生的农田土壤质量和农业安全问题日益受到人们的关注<sup>[1]</sup>。农田土壤质量问题已成为我国和世界上土壤与环境科学领域的重要研究课题<sup>[2]</sup>。多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)和酞酸酯(Phthalic Acid Esters, PAEs)在土壤、大气和水体等环境介质中普遍存在<sup>[3]</sup>,也是我国土壤污染状况调查的两类重点有机污染物。近年来,有关长江三角洲地区土壤中PAHs的污染水平、分布特征及来源分析都有研究报道<sup>[4-6]</sup>,而关于长三角地区土壤中PAEs的报道相对较少。

本研究选择苏南地区苏州、无锡和南通三市不同区域的农田,分析测定了表层土壤中PAHs和PAEs的污染水平,比较了不同区域农田表层土壤,尤其是来自钢铁企业周边的表层土壤中PAHs和PAEs的污染特征。研究结果将为经济高速发展地区农田土壤环境质量评价、农产品安全生产及土壤污染防治对策的制定提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤样品的采集

参照《农田土壤环境质量监测技术规范》(NY/T

395—2000)对土壤监测的要求,采用混合样梅花点法进行农田表层土壤混合样品的采集,样品采集深度为0~10 cm。采集的5个分点样按四分法混合保留约1 kg,装于纸质样品袋中带回实验室。土壤样品经自然风干、研磨,过60目尼龙筛备用。图1为所采13个农田表层土壤样品点位的空间分布图,表1中列出了所采13个土样点位的相关信息。

### 1.2 土壤样品的分析测定

本研究所分析测定的目标化合物PAHs共16种,包括:萘(Naphthalene, Nap)、苊(Acenaphthylene, Acy)、二氢苊(Acenaphthene, Ace)、芴(Fluorene, Flu)、菲(Phenanthrene, Phe)、蒽(Anthracene, Ant)、荧蒽(Fluoranthene, Flt)、芘(Pyrene, Pyr)、苯并(a)蒽(Benzo[a] Anthracene, BaA)、蒾(Chrysene, Chr)、苯并(b)荧蒽(Benzo[b] Fluoranthene, BbF)、苯并(k)荧蒽(Benzo[k] Fluoranthene, BkF)、苯并(a)芘(Benzo[a] Pyrene, BaP)、茚并(1,2,3-c,d)芘(Indeno[1,2,3-c,d] Pyrene, IP)、二苯并(a,h)蒽(Dibenzo[a,h] Anthracene, DahA)和苯并(g,h,i)芘(Benzo[g,h,i] Perylene, BghiP)。6种PAEs包括:酞酸甲酯(Dimethyl Phthalate, DMP)、酞酸乙酯(Diethyl Phthalate, DEP)、酞酸正丁酯(Di-n-butyl Phthalate, DBP)、酞酸丁基苄基酯(Butyl Benzyl Phthalate, BBP)、酞酸乙基己基酯(Di[2-ethylhexyl] Phthalate, DEHP)和酞酸辛酯(Dioctyl Phthalate, DOP)。

土壤样品的分析测定所用的仪器和试剂、样品的前处理、凝胶渗透色谱净化条件、气相色谱质谱分析以及整个分析过程的质量保证与控制见参考文献[7]。PAHs



图1 农田表层土壤样品空间分布图

Figure 1 Field spatial distribution of surface soil samples

表 1 农田表层土壤样品点位信息  
Table 1 Information on agricultural surface soil samples

编号	经度	纬度	种植农作物种类	位置描述
S1	E 120°40.910′	N 31°58.810′	花生	苏州张家港市锦丰镇
S2	E 120°39.759′	N 31°58.312′	玉米、黄豆、蔬菜	苏州张家港市锦丰镇
S3	E 120°39.786′	N 31°57.584′	水稻、玉米、豆类	苏州张家港市锦丰镇
S4	E 120°36.015′	N 31°58.754′	豆类	苏州张家港市锦丰镇
S5	E 120°36.263′	N 31°57.910′	玉米	苏州张家港市锦丰镇
S6	E 120°45.051′	N 32°04.851′	豆类、玉米、花生	南通市通州区平潮镇
S7	E 120°21.033′	N 31°56.417′	花生	苏州张家港市金港镇
S8	E 120°18.964′	N 31°47.225′	水稻	无锡江阴市峭岐镇
S9	E 120°17.432′	N 31°40.619′	豆类、蔬菜	无锡市惠山区堰桥镇
S10	E 120°13.945′	N 31°24.649′	豆类、蔬菜	无锡市滨湖区南泉镇
S11	E 120°30.143′	N 31°28.103′	水稻	无锡市锡山区鸿山镇
S12	E 120°21.470′	N 31°13.090′	蔬菜	苏州市吴中区光福镇
S13	E 120°38.724′	N 31°00.990′	水稻	苏州吴江市平望镇

和 PAEs 的方法检出限的范围分别为 0.13~2.2  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.19~0.52  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤中多环芳烃和酞酸酯的污染水平

在所采集的 13 个农田表层土壤样品中,总 PAHs 的浓度差异较大(图 2)。其中,最低浓度值为 147  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (样品 S7),最高浓度值为 40 300  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (样品 S11),13 个样品的平均浓度为 7 710  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

采于苏州张家港市锦丰镇某钢铁企业周边的土壤样品(S1、S2、S3、S4 和 S5)中总 PAHs 的平均浓度为 6 130  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其中以 S3 和 S4 的浓度最高,分别为 15 700  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 14 200  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。总 PAHs 浓度最高的土壤样品是采于无锡鸿山镇的 S11,总 PAHs 浓度次高的土壤样品采自于无锡市南泉镇的 S10(24 300

$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。其他 6 个农田表层土壤样品中总 PAHs 含量相对较低,浓度在 147~1 680  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间。此外, BaP 在所有农田表层土壤样品中的浓度范围在 3.22~2 660  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,平均浓度为 704  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,BaP 含量水平由高到低依次为 S11>S3>S4>S10>S9>S6>S8>S13>S5>S1>S2>S12>S7。

总 PAEs 的浓度范围在 0.575~762  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间(图 3),平均浓度为 80.2  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其中,采于南通市平潮镇的 S6 样品中总 PAEs 的浓度明显高于其他土壤样品(浓度为 762  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。此外,采于苏州张家港市锦丰镇某钢铁企业周边的土壤样品中总 PAEs 的浓度范围在 0.900~100  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,平均浓度为 47.4  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其中 S2 和 S3 样品中总 PAEs 含量相对较高,浓度分别为 100  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 81  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

钢铁行业是重污染、高能耗行业之一。然而,在已

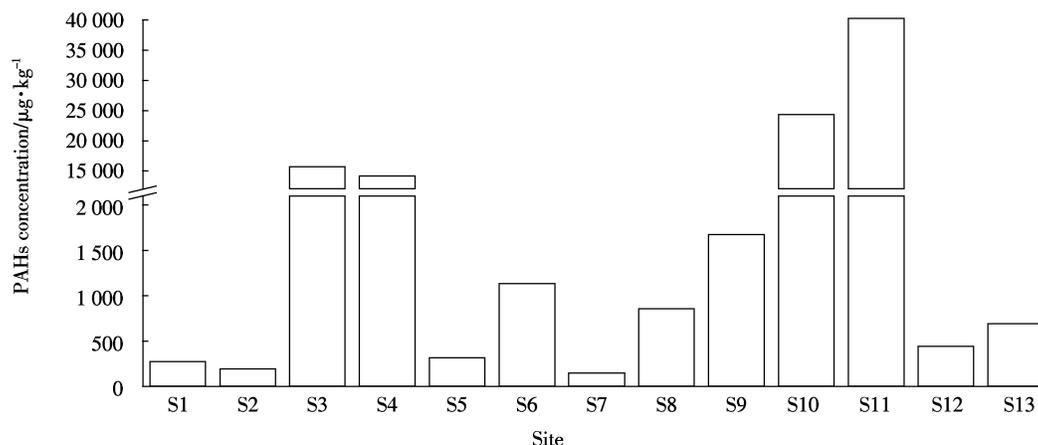


图 2 农田表层土壤样品中多环芳烃的浓度

Figure 2 Concentrations of PAHs in the agricultural surface soils

报道的文献中针对钢铁企业周边农田土壤中 PAHs 和 PAEs 含量对比的研究较少。本研究选择钢铁企业周边农田土壤与国内外相似的研究区域进行 PAHs 和 PAEs 含量的比较(表 2)。通过比较发现,本研究中的苏南某钢铁企业周边农田土壤中的总 PAHs 含量高于北京再生水灌区、四川南充炼油厂、香港工业区、西班牙 Tarragona 化工区和乌兹别克斯坦 Angren 工业区土壤中的总 PAHs,与沈抚石油类污灌区、浙江杭州钢铁厂区和珠三角经济高速发展区土壤中的总 PAHs 含量相当,但远低于报道的江西新余钢铁城的数据。土壤中总 PAEs 的含量与相似研究区域的报道相比,除高于广州市郊农区中总 PAEs 的含量外,处在一个相对较低的水平。总体而言,虽然目前我国没有农田土壤中 PAHs 相关的限量控制标准,由于本研究中苏南某钢铁企业周边农田土壤中的 PAHs 含量

(尤其是包括 BaP 在内的高分子量 PAHs)相对较高,也应引起重视。

## 2.2 多环芳烃和酞酸酯的污染特征

16 种 PAHs 在苏南地区所采集土样中的百分比率各不相同(图 4),在采自钢铁企业周边的土样 S3 和 S4 中,高分子量(High Molecular Weight, HMW) PAHs(MW>210,包括 BaA、Chr、BbF、BkF、BaP、IP、Da-hA 和 BghiP)所占比例分别高达 98.0%和 98.6%。其他土壤样品中 HMW PAHs 所占的比例在 8.52%~60.8%之间。而在采自苏州市光福镇的土样 S12 中,低分子量(Low Molecular Weight, LMW) PAHs(MW<210,包括 Nap、Acy、Ace、Flu、Phe、Ant、Flt 和 Pyr)所占的比例高达 91.5%。其他土壤样品中 LMW PAHs 所占的比例在 1.44%~81.3%之间。值得注意的是,总 PAHs 含量最高的两个样品(S10 和 S11)具有的 Flt、Phe、

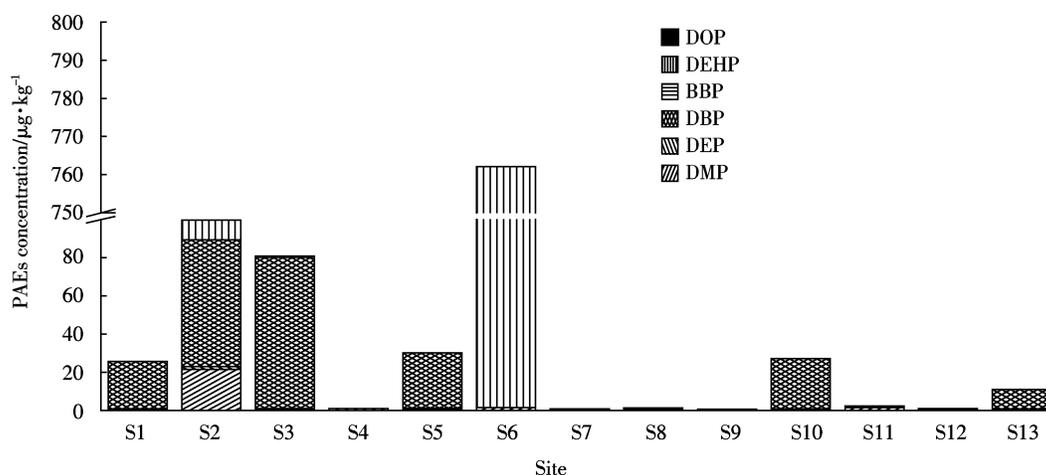


图3 农田表层土壤样品中酞酸酯的浓度

Figure 3 Concentrations of PAEs in the agricultural surface soils

表2 不同研究区域表层土壤中多环芳烃和酞酸酯含量比较

Table 2 Comparisons of PAHs and PAEs in surface soils from different research areas

研究区域	PAHs 浓度范围(平均值)/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	文献	研究区域	PAEs 浓度范围(平均值)/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	文献
沈抚石油类污灌区	787~24 600(4 950)	[8]	辽宁鞍山某钢铁厂区	750~32 600(1 770)	[17]
北京再生水灌区	0.40~53.1(207)	[9]	浙江湖州地区	n.d.~1 100(156)	[18]
四川南充炼油厂	9.1~2 270(644)	[10]	广东雷州半岛农区	n.d.~5 450(736)	[19]
江西新余钢铁城	32.3~241 000(80 400)	[11]	贵州省部分地区	n.d.~8 220(630)	[20]
浙江杭州钢铁厂区	476~3 250(1 440)	[12]	广东广州市郊农区	0.195~33.6(2.57)	[21]
香港工业区	n.d.~2 790(590)	[13]	浙江杭州地区农土	(4 000)*	[22]
珠三角经济高速发展区	160~3 700(1 480)	[14]	珠三角经济高速发展区	3 000~45 700	[23]
西班牙 Tarragona 化工区	166~1 002(558)	[15]	丹麦	27~46	[24]
乌兹别克斯坦 Angren 工业区	118~5 913	[16]	荷兰	(37.8)*	[25]
苏南地区某钢铁厂周边	193~15 700(6 130)	本研究	苏南地区某钢铁厂周边	0.900~100(47.4)	本研究

注:n.d.:未检出;\*:DEP + DBP + DEHP。

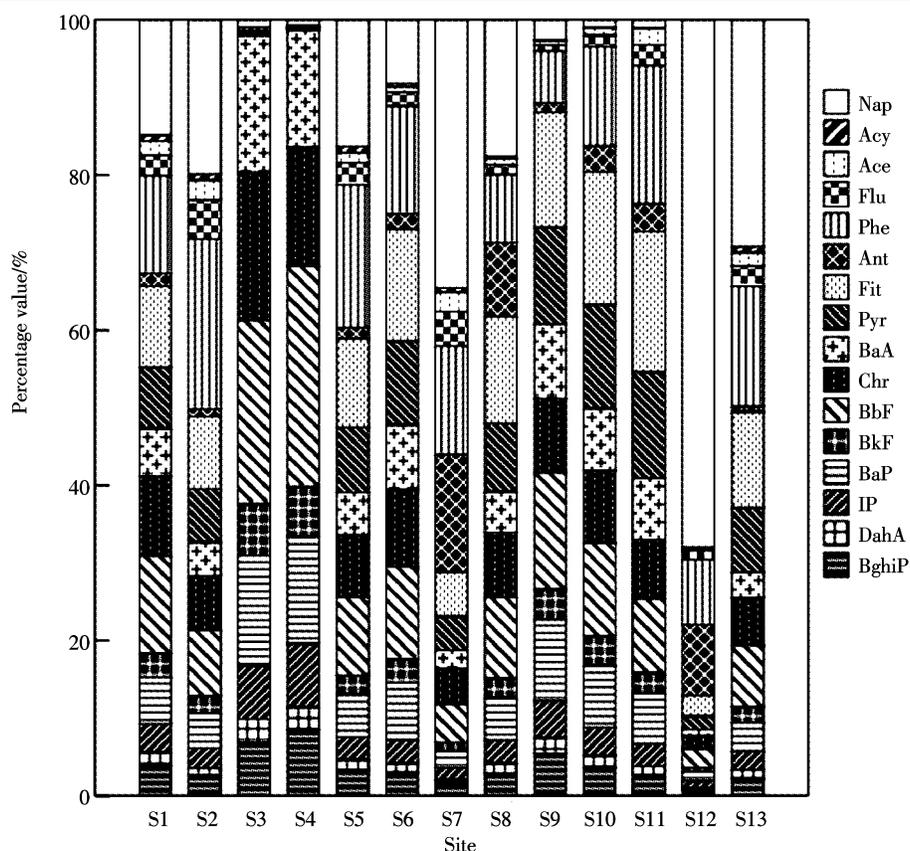


图4 苏南地区农田表层土壤中多环芳烃的污染特征

Figure 4 PAHs pollution pattern of the agricultural surface soils from the Southern Jiangsu Province

Pyr 和 BbF 等高浓度单体一致。

若 16 种 PAHs 以苯环数分类, Nap、Acy、Ace 和 Flu 属于二环 PAHs; Phe、Ant 和 Flt 属于三环 PAHs; Pyr、BaA、Chr、BbF 和 BkF 属四环 PAHs; BaP、IP、DahA 和 BghiP 属五环 PAHs。在苏南地区所采集的 13 个农田表层土壤样品中, 样品 S12 的二环 PAHs 百分含量最高, 占 69.5%, 样品 S11 的三环 PAHs 百分含量最高, 占 39.5%, 样品 S3 的四环 PAHs 百分含量最高, 占 67.3%, 样品 S4 的五环 PAHs 百分含量最高, 占 33.4%。采于苏州张家港市锦丰镇某钢铁企业周边的土壤样品(S1、S2、S3、S4 和 S5)中, 二、三、四和五环 PAHs 所占的平均百分比率分别为 14.3%、17.9%、47.2% 和 20.6%, 这与曲健等<sup>[8]</sup>和沈菲等<sup>[12]</sup>报道的沈抚石油类污灌区和杭州钢铁工业区附近农田土壤中 PAHs 的污染特征相似(图 5)。

6 种 PAEs 在苏南地区 13 个土壤样品中的检出率由高到低依次为 DMP(100%)>DEP(84.6%)>DBP(61.5%)>DEHP(15.4%)>BBP(7.7%)>DOP(0%)。由图 3 可以看出, DBP 和 DEHP 是苏南地区农田土壤中含量最高的两种物质, 这与我国使用这两种 PAEs

较多的情况相符。朱媛媛等<sup>[30]</sup>在天津市不同区域的土壤中也发现了类似的发现。

### 2.3 土壤中多环芳烃和酞酸酯的来源分析

不同的污染源类型是导致 PAHs 污染特征差异的主要原因。统计分析表明, 所有苏南地区农田表层土壤样品中 BaP 的浓度与总 PAHs 的浓度显著相关 ( $R=0.928, P<0.001$ )。对于 PAHs 的来源分析常采用比值法<sup>[9-10,13-14,27]</sup>、主成分分析(PCA)法<sup>[13-14,26]</sup>、正定矩阵因子(PMF)法<sup>[27]</sup>和典型源三角图判别法<sup>[9,26]</sup>等。由于本研究所采集的土壤样品相对较少, 适宜采用比值法进行土壤中 PAHs 污染来源的分析。比值法是依据不同燃烧源的类型和强度产生 PAHs 各单体浓度差异的原理, 采用  $Ant/(Ant+Phe)$ 、 $Flt/(Flt+Pyr)$ 、 $BaA/(BaA+Chr)$  和  $LMW/HMW$  等的比值来对 PAHs 的产生源进行识别。通常  $Ant/(Ant+Phe)=0.1$  为燃烧源和石油源的判别值;  $Flt/(Flt+Pyr)>0.5$  代表生物质、煤燃烧为主;  $BaA/(BaA+Chr)>0.35$  主要为燃烧源(石油类、生物质、煤等燃烧);  $LMW/HMW=1$  为燃烧源和石油源的判别值。苏南地区 13 个土样 PAHs 中  $Ant/(Ant+Phe)$ 、 $Flt/(Flt+Pyr)$ 、 $BaA/(BaA+Chr)$  和  $LMW/HMW$

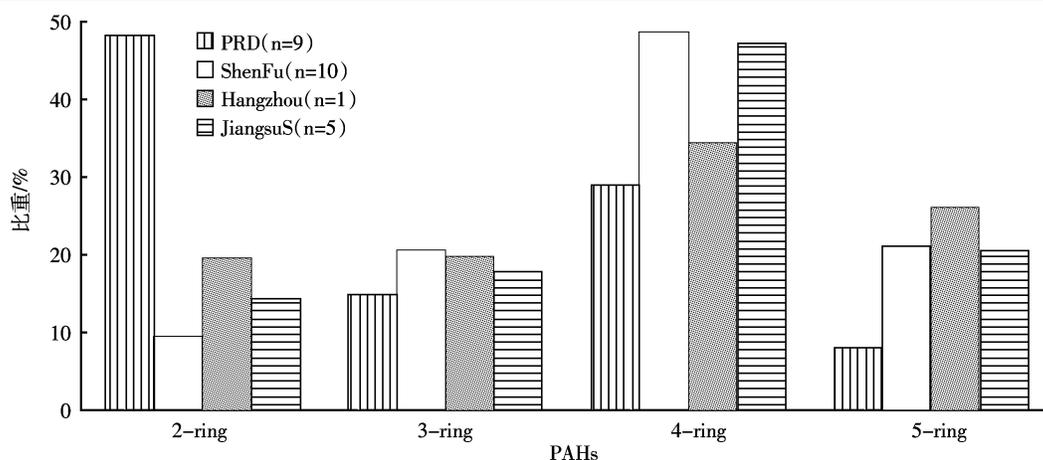


图5 不同研究区域农田土壤 PAHs 中二、三、四和五环的比重(ShenFu<sup>[8]</sup>, Hangzhou<sup>[12]</sup>, PRD<sup>[14]</sup>, JianguSu 本研究)

Figure 5 Percentage of 2-ring, 3-ring, 4-ring and 5-ring PAHs on soils from different research areas (ShenFu<sup>[8]</sup>, Hangzhou<sup>[12]</sup>, PRD<sup>[14]</sup>, JianguSu: this study)

HMW 的比值见表 3。

根据各个土壤样品的实际采集点位信息,结合各土样的 4 种比值进行综合判别,总 PAHs 浓度最高的 S10 和 S11 样品周边均为农田或荒地,没有工业生产,与之相似的还有采于苏州市金港镇的 S7 和苏州市光福镇的 S12,其 PAHs 污染应主要为来自秸秆、薪柴等生物质及煤的燃烧。

钢铁冶炼过程中烧结、焦化和高炉等工序被认为是二恶英<sup>[28]</sup>、PAHs<sup>[11-12]</sup>、PAEs<sup>[17]</sup>等有机污染物的排放源。高分子量 PAHs 更易于与环境空气中的颗粒物结合,通过干或湿沉降等过程污染农田土壤。采于苏州张家港市锦丰镇某钢铁企业周边农田的土样中,总 PAHs 浓度较高的 S3 和 S4 中 PAHs 主要来自于钢铁冶炼焦化、烧结等工序,而 S1、S2 和 S5 可能同时受到燃烧源和石油源的影响。此外,采于距离交通主干道较近农田的土样 S6、S8 和 S13 可能同时受到燃烧源和交通源的影响;采于城市郊区农田的土样 S9 可能同时受到石油化工、交通源和燃烧源的影响。

农田土壤中 PAEs 污染的来源一般与农用聚氯乙烯(PVC)农膜、污水灌溉、塑料废品的堆积和化肥施用等有关<sup>[23,29]</sup>,空气沉降<sup>[30]</sup>也是导致土壤 PAEs 污染

的重要因素。苏南地区农田土壤中 PAEs 的污染以 DBP 和 DEHP 为主(图 3),其中钢铁企业周边土样中 DBP 的检出率较高,炼钢、冷轧、炼铁等过程可能是其周边土壤中 DBP 的污染来源<sup>[7]</sup>。采于南通市平潮镇云台村的 S6 样品中含有较高的 DEHP,PVC 农膜的使用或家用塑料废制品的堆积可能是导致其高 DEHP 含量的主要原因<sup>[31]</sup>。由于本研究所测土样中总 PAEs 浓度及其各单体浓度相对较低,致使土壤中 PAEs 污染的来源分析难以实现。

### 3 结论

(1)苏南地区农田土壤中总 PAHs 的浓度在 147~40 300  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,钢铁厂周边的平均浓度为 6 130  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。BaP 的浓度与总 PAHs 的浓度显著相关。高分子量 PAHs 在钢铁厂周边表土中含量较高,钢铁冶炼焦化和烧结等工序是其污染来源。

(2)苏南地区农田土壤中总 PAEs 的浓度在 0.575~762  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,钢铁厂周边的平均浓度为 47.4  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。DBP 和 DEHP 是苏南地区农田土壤中含量最高的两种物质。钢铁厂周边有较高的 DBP 检出可能与炼钢、冷轧和炼铁等生产工序有关。

表 3 苏南地区土样 PAHs 中 Ant/(Ant+Phe)、Flt/(Flt+Pyr)、BaA/(BaA+Chr)和 LMW/HMW 的比值

Table 3 Ratios of Ant/(Ant+Phe), Flt/(Flt+Pyr), BaA/(BaA+Chr), and LMW/HMW on the surface soils

土样编号	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
Ant/(Ant+Phe)	0.12	0.04	0.07	0.11	0.07	0.12	0.52	0.52	0.15	0.21	0.17	0.52	0.04
Flt/(Flt+Pyr)	0.57	0.58	0.59	0.58	0.57	0.57	0.57	0.61	0.54	0.56	0.57	0.60	0.60
BaA/(BaA+Chr)	0.38	0.38	0.48	0.50	0.41	0.45	0.34	0.38	0.50	0.46	0.51	0.33	0.35
LMW/HMW	1.11	2.06	0.02	0.01	1.56	1.10	4.35	1.56	0.65	1.01	1.45	10.7	2.48

## 参考文献:

- [1] 赵其国,周炳中,杨浩.江苏省环境质量与农业安全问题研究[J].土壤,2002(1):1-8.  
ZHAO Qi-guo, ZHOU Bing-zhong, YANG Hao. Environmental quality and agricultural safety in Jiangsu Province[J]. *Soils*, 2002(1):1-8.
- [2] 沈建伟,徐加宽,刘建国,等.苏州市农田土壤重金属污染状况研究[J].环境科学与技术,2010,33(12F):87-89,93.  
SHEN Jian-wei, XU Jia-kuan, LIU Jian-guo, et al. Study on heavy metal pollution in agricultural soils of Suzhou[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(12F):87-89,93.
- [3] CAI Quanying, MO Cehui, WU Qitang, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalic acid esters in the soil-radish(*Raphanus sativus*) system with sewage sludge and compost application[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(6):1830-1836.
- [4] 丁爱芳,潘根兴,张旭辉.吴江市水稻土中多环芳烃(PAHs)含量及来源的研究[J].农业环境科学学报,2005,24(6):1166-1170.  
DING Ai-fang, PAN Gen-xing, ZHANG Xu-hui. Contents and origin analysis of PAHs in paddy soils of Wujiang County[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6):1166-1170.
- [5] 张祥志,赵永刚,章勇,等.江苏省不同典型生态示范区土壤中多环芳烃污染调查[J].环境监测管理与技术,2008,20(1):18-21.  
ZHANG Xiang-zhi, ZHAO Yong-gang, ZHANG Yong, et al. Investigation on PAHs soil pollution in different typical ecological demonstration area of Jiangsu Province[J]. *Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2008, 20(1):18-21.
- [6] 刘增俊,滕应,黄标,等.长江三角洲典型地区农田土壤多环芳烃分布特征与源解析[J].土壤学报,2010,47(6):1110-1117.  
LIU Zeng-jun, TENG Ying, HUANG Biao, et al. Distribution and sources analysis of PAHs in farmland soils in areas typical of the Yangtze River Delta, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(6):1110-1117.
- [7] 张利飞,黄业茹,史双昕,等.土壤中多环芳烃和酞酸酯类有机污染物气相色谱-质谱测定方法中的质量控制与质量保证[J].色谱,2010,28(5):465-469.  
ZHANG Li-fei, HUANG Ye-ru, SHI Shuang-xin, et al. Quality assurance/quality control for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalate esters in soils using gas chromatography mass spectrometry[J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 2010, 28(5):465-469.
- [8] 曲健,宋云横,苏娜.沈抚灌区上游土壤中多环芳烃的含量分析[J].中国环境监测,2006,22(3):29-31.  
QU Jian, SONG Yun-heng, SU Na. Analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in upriver soil of Shen-Fu irrigation area[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2006, 22(3):29-31.
- [9] 何江涛,金爱芳,陈素暖,等.北京东南郊再生水灌区土壤PAHs污染特征[J].农业环境科学学报,2010,29(4):666-673.  
HE Jiang-tao, JIN Ai-fang, CHEN Su-nuan, et al. Distribution characteristics of soil PAHs in reclaimed water irrigation area in the southeastern suburb of Beijing[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(4):666-673.
- [10] 史兵方,杨秀培,刘细祥.土壤中多环芳烃的分布特征及其来源分析[J].农业环境科学学报,2010,29(5):904-909.  
SHI Bing-fang, YANG Xiu-pei, LIU Xi-xiang. Distribution characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5):904-909.
- [11] 叶安珊.多环芳烃对土壤环境影响的调查与思考[J].江西科学,2009,27(5):745-749.  
YE An-shan. PAHs on the environmental impact of soil investigation and reflection[J]. *Jiangxi Science*, 2009, 27(5):745-749.
- [12] 沈菲,朱利中.钢铁工业区附近农田蔬菜PAHs的浓度水平及分布[J].环境科学,2007,28(3):669-672.  
SHEN Fei, ZHU Li-zhong. Concentration and distribution of PAHs in vegetables grown near an iron and steel industrial area[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(3):669-672.
- [13] Chung M K, Hu R, Cheung K C, et al. Pollutants in Hong Kong soils: Polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Chemosphere*, 2007, 67(3):464-473.
- [14] CAI Quanying, MO Cehui, LI Yunhui, et al. Occurrence and assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from vegetable fields of the Pearl River Delta, South China[J]. *Chemosphere*, 2007, 68(1):159-168.
- [15] Nadal Marti, Schuhmacher Marta, Domingo L Jose. Levels of metals, PCBs, PCNs and PAHs in soils of a highly industrialized chemical/petrochemical area: Temporal trend[J]. *Chemosphere*, 2007, 66(2):267-276.
- [16] Musa Bandowe A Benjamin, Shukurov Nosir, Kersten Michael, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their oxygen-containing derivatives (OPAHs) in soils from the Angren industrial area, Uzbekistan[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(9):2888-2899.
- [17] 朱媛媛,田靖,王伟,等.土壤中15种酞酸酯类化合物测定[J].中国环境监测,2009,25(2):79-83.  
ZHU Yuan-yuan, TIAN Jing, WANG Wei, et al. Determination of 15 kinds of phthalate in soil[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2009, 25(2):79-83.
- [18] 费勇,陈江,倪晓芳,等.湖州地区土壤邻苯二甲酸酯空间分布现状特征分析[J].农业环境与发展,2010,29(2):83-86.  
FEI Yong, CHEN Jiang, NI Xiao-fang, et al. Spatial distribution of phthalates in soils from Huzhou area[J]. *Agro-Environment and Development*, 2010, 29(2):83-86.
- [19] 关卉,王金生,万洪富,等.雷州半岛典型区域土壤邻苯二甲酸酯(PAEs)污染研究[J].农业环境科学学报,2007,26(2):622-628.  
GUAN Hui, WANG Jin-sheng, WAN Hong-fu, et al. PAEs pollution in soils from typical agriculture area of Leizhou peninsula[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2):622-628.
- [20] 李存雄,方志青,张明时,等.贵州省部分地区土壤中酞酸酯类污染现状调查[J].环境监测管理与技术,2010,22(1):33-36.  
LI Cun-xiong, FANG Zhi-qing, ZHANG Ming-shi, et al. Some areas investigation of phthalic esters in soil of Guizhou Province[J]. *Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2010, 22(1):33-36.

- [21] ZENG Feng, CUI Kunyan, XIE Zhiyong, et al. Phthalate esters(PAEs): Emerging organic contaminants in agricultural soils in peri-urban areas around Guangzhou, China[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 156(2):425-434.
- [22] GUO Baoyuan, WEN Bei, SHAN Xiaoquan, et al. Separation and determination of phthalates by micellar electrokinetic chromatography[J]. *Journal of Chromatography A*, 2005, 1095(1-2): 189-192.
- [23] 蔡全英, 莫测辉, 李云辉, 等. 广州、深圳地区蔬菜生产基地土壤中邻苯二甲酸酯(PAEs)研究[J]. *生态学报*, 2005, 25(2):283-288.  
CAI Quan-ying, MO Ce-hui, LI Yun-hui, et al. The study of PAEs in soils from typical vegetable fields in areas of Guangzhou and Shenzhen, South China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(2):283-288.
- [24] Vikesoe Jorgen, Thomsen Marianne, Carlsen Lars. Phthalates and nonylphenols in profiles of differently dressed soils[J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, 296(1-3): 105-116.
- [25] Peijnenburg J G M Willie, Struijs Jaap. Occurrence of phthalate esters in the environment of the Netherlands[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, 63(2):204-215.
- [26] 师荣光, 周启星, 蔡彦明, 等. 天津郊区土-水界面污染多环芳烃的污染特征及来源解析[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(4):874-881.  
SHI Rong-guang, ZHOU Qi-xing, CAI Yan-ming, et al. Contamination characteristics and source analyses of PAHs in contaminated flows from soil-water interfaces of Tianjin Suburban Areas, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(4):874-881.
- [27] 廖书林, 郎印海, 王延松, 等. 辽河口湿地表层土壤中 PAHs 的源解析研究[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(3):490-497.  
LIAO Shu-lin, LANG Yin-hai, WANG Yan-song, et al. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in the topsoil of Liaohe estuarine wetlands[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(3): 490-497.
- [28] 巩宏平, 田洪海, 周志广, 等. 钢铁企业排放的烟气及厂区土壤中二恶英类污染研究[J]. *环境保护科学*, 2007, 33(5):8-10.  
GONG Hong-ping, TIAN Hong-hai, ZHOU Zhi-guang, et al. Preliminary study on the dioxin pollutants in site soil and flue gas emitted by iron and steel in plant[J]. *Environmental Protection Science*, 2007, 33(5): 8-10.
- [29] 王红芬, 程晗煜, 洪坚平. 环境中酞酸酯的污染现状及防治措施[J]. *环境科学与管理*, 2010, 35(7):33-36.  
WANG Hong-fen, CHENG Han-yu, HONG Jian-ping. The status of phthalate esters pollution and its control measures in the environment[J]. *Environmental Science and Management*, 2010, 35(7):33-36.
- [30] 朱媛媛, 田靖, 杨洪彪, 等. 空气和土壤中酞酸酯的污染及相关性分析[J]. *环境污染与防治*, 2010, 32(2):41-45.  
ZHU Yuan-yuan, TIAN Jing, YANG Hong-biao, et al. Phthalate pollution in atmospheric particles and soils of Tianjin and their correlation[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2010, 32(2):41-45.
- [31] 徐刚, 李发生, 汪群慧. 模拟酸雨对聚氯乙烯农膜中增塑剂析出的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(6):1625-1630.  
XU Gang, LI Fa-sheng, WANG Qun-hui. Effect of simulated acid rain on release of plasticizer in PVC film[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(6):1625-1630.