

不同类型企业周边土壤中多环芳烃来源解析与风险评价

张慧¹, 郭文建¹, 朱晨^{1*}, 李红莉¹, 田露²

(1. 山东省环境监测中心, 山东 济南 250101; 2. 临沂大学, 山东 临沂 276000)

摘要: 研究对比了山东省不同类型污染企业周边土壤中16种多环芳烃(PAHs)的污染水平, 结果表明: 化工、钢铁、焦化企业周边土壤中 Σ PAHs范围分别为41.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ~ 804 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、1 230 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ~ 1 945 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和776 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ~ 1 299 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 土壤中PAHs成分谱轮廓相似, 4~6环PAHs占比普遍高于2~3环。特征比值法源解析表明, PAHs主要来源于煤、焦炉、木材等的不完全燃烧。企业周边土壤PAHs污染与企业产业结构有关, 钢铁、焦化、石化等大量消耗化石燃料的企业周边土壤中10种PAHs的毒性当量浓度 TEQ_{Bap} 超标0.6倍~3.8倍, 而高分子化工、精细化工、农药化工等企业周边土壤受PAHs污染较轻, 均满足荷兰土壤质量标准。

关键词: 多环芳烃; 污染水平; 源解析; 风险评价; 土壤

中图分类号: X825

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2019)04-0028-05

Source Apportionment and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils around Different Type of Enterprises

ZHANG Hui¹, GUO Wen-jian¹, ZHU Chen^{1*}, LI Hong-li¹, TIAN Lu²

(1. Shandong Environmental Monitoring Center, Jinan, Shandong 250101, China;

2. Linyi University, Linyi, Shandong 276000, China)

Abstract: The pollution of 16 PAHs in soils around different type of enterprises in Shandong province were studied. Results showed that the concentration range of Σ PAHs in soils around chemical enterprise, iron and steel enterprise, coking enterprise and petrochemical enterprise were 41.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ~ 804 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 1 230 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ~ 1 945 $\mu\text{g}/\text{kg}$ and 776 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ~ 1 299 $\mu\text{g}/\text{kg}$, respectively. The proportion of PAHs with 4 to 6 rings were more than that with 2 to 3 rings. Results of source apportionment by characteristic ratio method showed that PAHs were mainly from the incomplete combustion of coal, coke and wood, etc. PAHs pollution in soils around the enterprises was related to the industrial structure. The TEQ_{Bap} of 10 PAHs in soils around iron and steel enterprise, coking enterprise and petrochemical enterprise exceeded the standard limit by 0.6 ~ 3.8 times. The PAHs pollution was slight in soils around polymer chemical industry, fine chemical industry and pesticide chemical industry, and the concentrations all met Dutch soil quality standard demand.

Key words: PAHs; Pollution level; Source apportionment; Risk assessment; Soils

多环芳烃(PAHs)是一类持久性有机污染物^[1], 具有难降解性、生物累积性、致癌性等特点^[2-4], 主要产生于石油、煤炭、木材、垃圾等有机化合物的不完全燃烧。随着工业的发展, PAHs排放越来越多, 其中大部分通过大气沉降、污水灌溉等进入土壤, 并通过接触、食物链最终对人类健康造成危害。因此, 研究土壤中PAHs污染水平有较大的现实意义。

能源消耗型行业大量化石燃料的燃烧或高温裂解导致PAHs等污染物大量释放, 造成周边土壤的污染。近年来, 有关钢铁、焦化、化工等企业周边

收稿日期: 2018-05-09; 修订日期: 2019-06-18

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2017BB070)

作者简介: 张慧(1988—), 女, 山东菏泽人, 工程师, 硕士, 主要从事环境监测及科研工作。

* 通信作者: 朱晨 E-mail: chenzhuchen@163.com

土壤中 PAHs 污染状况的研究时有报道,可对上述不同类型企业周边土壤中 PAHs 污染水平的比较研究却较少。山东省是重工业大省,化工、钢铁、石化、煤化工企业众多,现研究比较该省不同类型企业周边土壤中 16 种 PAHs 残留状况,并进行来源解析和风险评价,以期为土壤 PAHs 污染防治及环境管理提供技术支持。

1 实验部分

1.1 采样点布设与样品采集

选取山东省境内 10 家大型企业作为研究对象,其中化工企业 6 家,涵盖煤化工(1#和 2#)、石油化工(3#)、高分子化工(4#)、农药化工(5#)和精细化工(6#);钢铁联合企业 2 家(7#和 8#);以焦炭生产为主的焦化企业 2 家(9#和 10#)。采样时间为 2018 年 3 月,采样点位布设于企业常年主导风向向下风向距厂界 100 m 内、受其他污染源干扰小、具有代表性的区域。按照《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)的规定,采用梅花布点法,采集 0 cm ~ 20 cm 表层土壤样品 1 kg 左右,混匀,置于棕色磨口玻璃瓶中,装满装实,运输过程中避光、密封、冷藏,及时送实验室分析。

1.2 样品测试

待测的 16 种 PAHs 分别为:萘(Nap)、萘烯(Acpy)、萘(Acp)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Fl)、芘(Pyr)、苯并[a]蒽(Baa)、蒽(Chr)、苯并[b]荧蒽(Bbf)、苯并[k]荧蒽(Bkf)、苯并[a]芘(Bap)、二苯并[a,h]蒽(Dba)、苯并[g,h,i]芘(Bghip)、茚并[1,2,3-cd]芘(Ind),16 种 PAHs 标准溶液购自美国 AccuStandard 公司。

实验所用主要仪器有:快速溶剂提取仪(美国 Dionex 公司,ASE-350 型);凝胶渗透色谱(Lab Tech 型,含 VWD 紫外检测器);高效液相色谱仪(Agilent 1260 型,配可变波长荧光及紫外检测器),色谱柱为 SUPELCOSILTM LC-PAH 专用柱(15 cm × 4.6 mm, 5 μm)。样品具体测定方法为:称取 10 g 新鲜土壤样品,与适量硅藻土充分混匀、脱水,研磨至散粒状,置于 ASE 萃取池中,采用二氯甲烷-丙酮(体积比 1:1 混合)作为萃取溶剂,萃取温度为 100 °C、压力 10.3 MPa,静态提取 5 min,循环 2 次,收集全部萃取液,采用 GPC 净化浓缩,最后以流动相定容至 1 mL,用高效液相色谱仪分析。最终将结果换算为干土中 PAHs 的含量。

1.3 质量保证和质量控制

空白试验测定结果均低于检出限。每 10 个样品增加 1 个实验室空白和 1 个平行样品,平行样品相对标准偏差 < 15%。每 20 个样品采用校准曲线中间点进行连续校准,连续校准的相对误差 < 20%。16 种 PAHs 基体加标回收率范围为 81.3% ~ 112%,RSD 为 4.6% ~ 13%。目标化合物的检出限为 0.2 μg/kg ~ 2.0 μg/kg。

2 结果与讨论

2.1 土壤中 PAHs 的质量比及组成

企业周边土壤中 16 种 PAHs 均被检出,其中 Nap、Flu、Phe、Pyr、Chr、Bbf 和 Bghip 检出率高达 100%;Acpy、Acp 检出率稍低,分别为 40% 和 70%;其余 PAHs 检出率均为 80% ~ 90%。表 1 为不同类型污染企业周边土壤中 PAHs 的质量比。

由表 1 可知,两家钢铁企业 7#和 8#周边土壤受 PAHs 污染最严重,16 种 PAHs 的总质量比(ΣPAHs)分别为 1 230 μg/kg 和 1 945 μg/kg;其次为焦化企业,9#和 10#的 ΣPAHs 分别为 1 299 μg/kg 和 776 μg/kg;6 家化工企业周边土壤受 PAHs 污染程度差异较大,ΣPAHs 在 41.4 μg/kg ~ 804 μg/kg 之间,从高到低为 2# > 1# > 3# > 6# > 4# > 5#。致癌性最强的 Bap 质量比范围为未检出 ~ 131 μg/kg,与 ΣPAHs 相似,整体呈现出钢铁 > 焦化 > 煤化工 > 其他化工企业的变化趋势。

有研究表明,钢铁企业烧结工段产生的 PAHs 以 Acp、Phe、Bkf、Bap 为主^[5],焦化车间 PAHs 值比其余车间要高得多,高温炼焦是 PAHs 的重要污染源^[6],推焦、熄焦工段释放大量 PAHs。Khalili 等^[7]指出,焦化企业外排废气中以 Nap、Acpy、Phe、Ant、Fl 为主,不同种类化石燃料对产生的 PAHs 组成也有一定影响。将各点位 PAHs 进行归一化处理(PAHs 各单体质量比除以 ΣPAHs),见图 1。由图 1 可见,虽然各点位污染程度不同,但 PAHs 成分谱轮廓相似,Nap、Phe、Fl、Bbf、Bap、Bghip 相对质量比较高。除农药化工企业 5# 因排放最低致使环境中普遍存在的 Nap 占比较高外,其他采样点均以 4 环中分子量 PAHs 及 5、6 环高分子量 PAHs 为主,总占比为 58.9% ~ 84.2%。反映出,相比易挥发、较易降解的 2、3 环低分子量 PAHs,4 ~ 6 环中、高分子量 PAHs 由于饱和蒸气压较低、辛醇水分配系数 *K_{ow}* 相对较高等原因,更易于吸附在土壤颗粒物上的特性。

表1 不同类型污染企业周边土壤中PAHs质量比
Table 1 The mass ratios of PAHs in soils around different type of enterprises

化合物	煤化工1#	煤化工2#	石油化工3#	高分子化工4#	农药化工5#	精细化工6#	钢铁7#	钢铁8#	焦化9#	焦化10#
Nap	58.4 ± 9.81	16.8 ± 3.24	26.8 ± 3.95	11.7 ± 2.64	11.0 ± 3.14	16.4 ± 3.02	63.0 ± 8.65	223 ± 32.9	20.0 ± 3.74	106 ± 12.6
Acp	6.14 ± 2.12	42.1 ± 5.02	—	—	—	—	—	—	37.6 ± 5.27	33.8 ± 5.79
Flu	4.79 ± 2.01	1.96 ± 1.01	1.03 ± 0.52	0.91 ± 0.40	2.77 ± 1.12	22.7 ± 4.56	7.00 ± 3.02	21.6 ± 3.18	5.26 ± 2.37	20.2 ± 3.12
Phe	90.1 ± 11.5	25.0 ± 2.23	47.1 ± 5.36	11.4 ± 2.35	7.80 ± 2.31	25.1 ± 3.45	177 ± 20.6	198 ± 25.4	192 ± 21.5	141 ± 13.8
Ant	5.23 ± 2.73	6.65 ± 2.45	1.36 ± 0.69	—	1.15 ± 0.51	1.63 ± 0.53	13.0 ± 3.14	18.6 ± 3.64	80.0 ± 9.21	8.84 ± 3.16
Fl	104 ± 15.9	149 ± 16.9	26.7 ± 3.67	13.3 ± 3.41	—	26.5 ± 3.76	226 ± 30.7	278 ± 36.2	184 ± 19.3	117 ± 11.4
Pyr	52.4 ± 9.87	84.0 ± 9.24	11.3 ± 2.14	7.99 ± 2.43	0.81 ± 0.52	20.9 ± 4.12	147 ± 18.6	162 ± 20.3	88.4 ± 7.25	51.9 ± 6.71
Baa	44.4 ± 6.78	54.0 ± 6.89	7.48 ± 2.02	3.01 ± 1.01	—	14.7 ± 2.79	70.0 ± 6.98	119 ± 14.6	71.6 ± 5.96	29.7 ± 3.65
Chr	67.0 ± 13.5	67.9 ± 7.43	12.1 ± 2.76	2.34 ± 0.63	0.30 ± 0.10	18.4 ± 2.78	64.0 ± 6.46	137 ± 12.8	102 ± 12.6	36.5 ± 5.25
Bbf	70.9 ± 10.2	108 ± 12.3	69.4 ± 7.82	14.8 ± 2.63	5.94 ± 2.08	43.0 ± 5.97	143 ± 20.4	210 ± 30.5	132 ± 10.5	63.0 ± 8.34
Bkf	22.7 ± 5.45	39.0 ± 4.86	16.9 ± 2.93	—	—	8.49 ± 2.46	43.0 ± 5.76	59.7 ± 7.46	59.2 ± 7.28	18.0 ± 2.53
Bap	61.2 ± 10.7	53.8 ± 5.42	60.6 ± 6.42	—	—	12.3 ± 2.84	85.0 ± 9.47	131 ± 14.8	96.8 ± 10.3	44.6 ± 6.12
Db	10.2 ± 3.65	6.87 ± 2.04	10.1 ± 2.46	—	—	3.75 ± 1.25	14.0 ± 2.39	19.9 ± 3.01	12.8 ± 2.78	4.68 ± 2.11
Bghip	49.8 ± 9.34	61.4 ± 5.96	24.7 ± 4.24	13.0 ± 2.86	5.29 ± 2.01	28.7 ± 4.32	130 ± 15.9	296 ± 38.5	108 ± 13.7	72.8 ± 9.41
Ind	17.8 ± 5.35	53.5 ± 6.21	5.34 ± 2.43	—	1.12 ± 0.52	20.2 ± 3.98	42.0 ± 5.86	68.4 ± 8.24	105 ± 11.9	18.8 ± 3.15
ΣPAHs	665 ± 56.8	804 ± 60.4	323 ± 29.6	81.2 ± 9.65	41.4 ± 5.97	274 ± 16.8	1 230 ± 90.5	1 945 ± 130	1 299 ± 94.7	776 ± 40.2

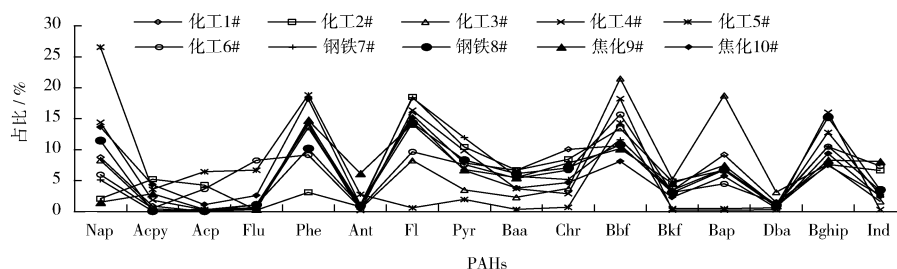


图1 不同点位16种PAHs归一化处理

Fig. 1 The normalized processing of 16 PAHs at different sampling points

2.2 土壤中PAHs源解析

PAHs一般来自燃烧源和石油源。石油源PAHs主要源自石油污染,2~3环PAHs(LMW PAHs)占比较高;燃烧源PAHs主要来自煤炭、木材、石油等化石燃料的不完全燃烧,4~6环PAHs(HMW PAHs)占比较高。因此,分析样品中PAHs组分可以判断该地区PAHs的可能来源。当前特征比值法在识别污染源类型中应用较为广泛^[8-9],常用于判断PAHs来源的指数包括样品中Fl与Pyr、Baa与Chr比值及LMW/HMW值。

通常认为,LMW/HMW > 1为石油源,LMW/HMW < 1为燃烧源;Fl/(Fl + Pyr) < 0.4为石油源,在0.4~0.5之间为液体燃料的燃烧,>0.5为煤、焦炉、木材等燃烧源的燃烧;Baa/(Baa + Chr) < 0.2为石油源,在0.20~0.35之间为石油源和燃烧源的混合源,>0.35为燃烧源。各点位的特征

比值见表2。

由表2可知,除农药化工企业5#周边土壤中LMW/HMW为1.85外,其他企业周边土壤中LMW/HMW值在0.19~0.70之间,均<1,提示土壤中PAHs主要源自煤炭、石油等化石燃料的不完全燃烧。除5#周边土壤中Fl和Baa未检出外,其余9家企业Fl/(Fl + Pyr)值在0.56~0.70之间,Baa/(Baa + Chr)值在0.38~0.56之间,均属于燃烧源区域,进一步提示土壤中PAHs主要源自煤、焦炉、木材等的不完全燃烧。

源解析结果与各企业实际生产中使用煤炭等化石燃料的情况具有相关性。农药化工企业5#周边土壤中ΣPAHs较低,可能与该企业以吡啶、苯、甲苯等有机溶剂为原料生产农药原药产生的工艺废气排放有一定关系,且该企业燃煤少,高环PAHs排放较少。煤化工1#和2#、石油化工3#、高分子

化工 4#和精细化工 6#,在日常生产中均用到锅炉,特别是煤化工和石油化工企业,利用煤燃烧提供大量热源,这与其 PAHs 总排放量和高环 PAHs 排放量较高有一定关系。钢铁企业 7#和 8#在生产活动中涉及炼焦、炼钢、炼铁等生产行为,以及消耗大量的煤炭等化石燃烧,其表层土壤中 Phe、Fl、Pyr 三

者之和占比分别为 44.7% 和 32.8%,而这 3 种成分正是煤燃烧源排放的重要特征。焦化企业 9#和 10#以煤为主要原料,其车间内化石燃料的不完全燃烧及焦油、煤气等产品的加工过程都可导致 PAHs 类物质的大量排放,大量研究表明,焦化厂是 PAHs 的重要污染源。

表 2 LMW/HMW、Fl/(Fl + Pyr)和 Baa/(Baa + Chr)的特征比值
Table 2 The characteristic ratio of LMW/HMW, Fl/(Fl + Pyr) and Baa/(Baa + Chr)

点位	LMW/HMW	Fl/(Fl + Pyr)	Baa/(Baa + Chr)	点位	LMW/HMW	Fl/(Fl + Pyr)	Baa/(Baa + Chr)
1#	0.33	0.66	0.40	6#	0.39	0.56	0.44
2#	0.19	0.64	0.44	7#	0.28	0.61	0.52
3#	0.32	0.70	0.38	8#	0.31	0.63	0.46
4#	0.47	0.62	0.56	9#	0.35	0.68	0.41
5#	1.85			10#	0.70	0.69	0.45

2.3 土壤中 PAHs 风险评价

目前我国颁布了《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)和《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018),农用地中仅规定了 Bap 风险筛选值,建设用地中规定了 Baa、Bap、Bbf、Bkf、Chr、Dbf、Ind、Nap 的风险筛选值和管制值,而文中相应 PAHs 质量比均未超过上述标准值,并且这两个标准中对应的 PAHs 值远高于荷兰等国家的土壤质量标准。为了全面评价土壤中 PAHs 污染状况,首先参照 Maliszewska-Kordybach 建议的欧洲农业土壤中 PAHs 污染程度分级方法(无污染, $\sum PAHs < 200 \mu g/kg$; 轻度污染, $200 \mu g/kg \leq \sum PAHs < 600 \mu g/kg$; 中度污染, $600 \mu g/kg \leq \sum PAHs < 1000 \mu g/kg$; 重度污染, $\sum PAHs \geq 1000 \mu g/kg$)对各点位 PAHs 污染程度进行评价。评价结果显示,钢铁企业 7#、8#均属于重度污染;焦化企业 9#为重度污染,10#为中度污染;化工企业中除煤化 1#、2#处于中度污染外,其余企业均属于无污染或轻度污染。

借鉴国内外学者通常采用的荷兰土壤质量标准^[10](见表 3,规定了 10 种 PAHs 的标准限值)对企业周边土壤 PAHs 污染状况进行评价。结果表明,高分子化工 4#和农药化工 5#周边土壤中 10 种 PAH 单体均满足荷兰土壤质量标准;精细化工 6#周边土壤中 Nap、Fl、Bghip 超标 0.09 倍~0.77 倍;石油化工 3#周边土壤中 Nap、Fl、Bghip、Bap 超标 0.24 倍~1.42 倍;消耗大量煤炭等化石燃料的钢

铁 7#、8#,焦化 9#、10#,煤化工 1#、2#企业周边土壤中 10 种 PAH 单体普遍超标,除 Ant(超标 17%)外,超标率达 67%~100%,其中 Nap、Fl、Baa、Chr、Bap 和 Bghip 6 家企业全部超标。

荷兰土壤标准中规定的 10 种 PAHs 的 Bap 毒性当量浓度 TEQ_{Bap} 为 $33 \mu g/kg$ 。其中, TEQ_{Bap} 等于 PAHs 质量比与其对应的 Bap 毒性当量因子 TEF 的乘积之和,TEF 见表 3。依据此标准对企业周边土壤的健康风险进行评价,计算可知,1#—10#企业周边土壤中 10 种 PAHs 的 TEQ_{Bap} 分别为: $71.1 \mu g/kg$ 、 $70.0 \mu g/kg$ 、 $64.1 \mu g/kg$ 、 $0.74 \mu g/kg$ 、 $0.42 \mu g/kg$ 、 $17.2 \mu g/kg$ 、 $103 \mu g/kg$ 、 $160 \mu g/kg$ 、 $124 \mu g/kg$ 和 $52.8 \mu g/kg$ 。钢铁企业周边土壤的健康风险最大,钢铁 7#、8#的 TEQ_{Bap} 分别超标 2.1 倍和 3.8 倍;其次为焦化,焦化 9#、10#的 TEQ_{Bap} 分别超标 2.8 倍和 0.6 倍;化工行业中煤化工周边土壤 PAHs 的健康风险相对较大,煤化工 1#、2#的 TEQ_{Bap} 分别超标 1.2 倍和 1.1 倍;石油化工 3#的 TEQ_{Bap} 超标 0.9 倍;其他高分子化工、精细化工、农药化工的 TEQ_{Bap} 均低于荷兰土壤的标准值。 TEQ_{Bap} 超标企业均为钢铁、煤化、石化等在生产过程中需大量消耗煤炭、石油等化石燃料的企业,提示该类企业周边存在潜在健康风险。

经实地观察,钢铁企业 7#、8#和焦化企业 9#、10#周边植被较为稀疏,在低气压天气时周围空气中有异味。煤化工和石油化工企业周边环境也存在一定问题,废水、废气对庄稼和居民生活环境有一定影响。

表3 荷兰土壤10种PAHs标准限值
及毒性当量因子(TEF)

Table 3 10 PAHs standard limits and toxic equivalency factors (TEF) in Dutch soil

化合物	荷兰标准 $w/$ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	TEF	化合物	荷兰标准 $w/$ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	TEF
Nap	15	0.001	Chr	20	0.01
Phe	50	0.001	Bkf	25	0.1
Ant	50	0.01	Bap	25	1
Fl	15	0.001	Bghip	20	0.01
Baa	20	0.1	Ind	25	0.1

2.4 土壤污染防治

据统计,我国耕地土壤点位超标率为19.4%,工矿业废弃地超标点位占34.9%,主要污染物均含PAHs^[11],PAHs污染防治迫在眉睫。首要办法是要从源头上减少PAHs的排放,PAHs主要来自工业污染源、交通运输污染源和生活污染源等,应加大立法执法力度,“倒逼”污染企业进行能源结构调整,改进油品质量,鼓励和提倡购买新能源汽车,取缔小型燃煤锅炉等。对已遭受污染的土壤要进行修复,可参考法国环保部的做法^[12],建立污染土地的数据库信息,将现存的污染地登记在册,包括地址、污染类型、责任人、修复手段等,使修复更有针对性,同时加强土壤污染修复方面的立法,明确企业在土壤污染防治中的作用。

3 结论

(1) 研究对比了化工、钢铁和焦化等不同类型企业周边土壤中16种PAHs污染状况,其 Σ PAHs范围分别为41.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ~ 804 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、1 230 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ~ 1 945 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和776 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ~ 1 299 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。土壤中PAHs成分谱轮廓相似,4~6环PAHs占比明显高于2~3环。钢铁企业周边土壤中 Σ PAHs最高,其次为焦化企业。

(2) PAHs组成、特征比值分析结果表明,企业周边土壤中PAHs主要来自煤炭、焦炉、石油等化石燃料的不完全燃烧。

(3) 依据Maliszewska-Kordybach建议的PAHs

污染分级方法及荷兰土壤标准,PAHs污染与企业产业结构有关,钢铁、焦化、石化等大量消耗化石燃料企业的 TEQ_{Bap} 普遍超标,超标0.6倍~3.8倍,而高分子化工、精细化工、农药化工等企业周边土壤受PAHs污染较轻,均满足荷兰土壤质量标准。

[参考文献]

- [1] 丁海霞,陶雪梅,吕康乐,等.兰州市土壤中PAHs和PCBs的分布特征及风险评价[J].环境监测管理与技术,2018,30(2):25-29.
- [2] 王钊,张俊,许维,等.固相萃取-高效液相色谱法测定河水中的多环芳烃[J].环境监测管理与技术,2016,28(6):41-43.
- [3] 张慧,郭文建,朱晨,等.农田土壤中多环芳烃的高效液相色谱法测定[J].中国环境管理干部学院学报,2016,26(5):66-69.
- [4] 徐建平,孙睿华,崔虎雄,等.上海市浦东新区 $\text{PM}_{2.5}$ 中多环芳烃的时空分布与风险评估[J].环境监测管理与技术,2017,29(3):37-40.
- [5] TSAI J H, LIN K H, CHEN C Y, et al. Chemical constituents in particulate emissions from an integrated iron and steel facility [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 147: 111-119.
- [6] 董捷,黄莹,李永霞,等.北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价[J].环境科学,2016,37(9):3540-3546.
- [7] KHALILI N R, SCHEFF P A, HOLSEN T M. PAH source fingerprints for coke ovens, diesel and gasoline engines, highway tunnels, and wood combustion emissions [J]. Atmospheric Environment, 1995, 29(4): 533-542.
- [8] 李晶,祝琳琳,王男,等.沈阳市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中多环芳烃的污染特征及来源解析[J].环境监测管理与技术,2019,31(1):24-28.
- [9] READMAN J W, FILLMANN G, TOLOSA I, et al. Petroleum and PAHs contamination of the Black Sea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, 44(1): 48-62.
- [10] 王学彤,贾英,孙阳昭,等.典型污染区农业土壤中PAHs的分布、来源及生态风险[J].环境科学学报,2009,29(11):2433-2439.
- [11] 庄国泰.我国土壤污染现状与防控策略[J].土壤与生态环境安全,2015,30(4):477-483.
- [12] 曾晖,吴贤静.法国土壤污染防治法律及其对我国的启示[J].华中农业大学学报(社会科学版),2013,106(4):107-112.

启 事

本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、万方数据-数字化期刊群、重庆维普中文科技期刊数据库,凡被录用的稿件将同时在相关数据库产品中进行网络出版或提供信息服务,其作者著作权使用费与本刊稿酬一并支付。如作者不同意将文章编入数据库,请在来稿中注明,本刊将做适当处理。