

上海城市绿地土壤中石油烃化合物的分布特征^①

丁 正^{1,2}, 梁 晶², 方海兰^{2*}, 郝冠军²

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2 上海市园林科学研究所, 上海 200232)

摘 要: 对上海不同类型绿地土壤的石油烃化合物(TPH)调查表明: 上海城市绿地表层土壤虽有不同程度的 TPH 累积, 但整体污染情况并不严重; 在不同类型绿地中, 以外环道路周边绿地的 TPH 含量最高, 且离道路和土壤表层越近, TPH 累积越明显; 汽车尾气可能是城市绿地土壤 TPH 的主要污染源。绿地土壤 TPH 含量与土壤有机质、Cu、真菌含量之间相关性不显著; 但与 Zn、Cd、细菌、微生物总量存在极显著相关, 与 Pb、放线菌含量之间存在显著相关; 在低浓度 TPH 含量下, 其可能作为绿地土壤微生物生长所需的碳源和能源, 刺激微生物量的增加。上海绿地土壤 C6 ~ C9 段 TPH 均低于检出限, 以高碳段 TPH 为主, 毒性较小; 但交通流量大且以燃烧柴油车为主的外环周边绿地不但 TPH 总量高且检出低碳段 TPH, 其 TPH 潜在污染和毒害应引起重视。

关键词: 绿地土壤; TPH; 微生物

中图分类号: X53

石油烃化合物(TPH)是由碳氢化合物组成的复杂混合物, 主要由烃类组成。土壤中石油烃主要成分为 C15 ~ C36 的烷烃、多环芳烃(PAHs)、烯烃、苯系物、酚类等, 其中环境优先控制污染物和美国协议法令规定的污染物多达 30 种^[1]。但以往大多研究注重其组分 PAHs, 而对总石油烃较少关注, 其实不仅石油的各种组分有一定毒性, 石油污染能破坏土壤生态系统的结构与功能, 可严重影响土壤的通透性, 使土壤肥力下降, 从而对生长的植物产生毒害作用^[2]。此外, 土壤作为烃类污染物的直接受体, 土壤中的烃类污染物也可通过地球化学循环进入水体和大气, 造成二次污染并对人类健康造成不同程度的危害^[3]。例如, 石油烃会通过渗透进入地下水, 或者通过雨水径流进入河水^[4]。石油烃污染物进入土壤还会改变土壤中原有微生物的种群数量和组成结构, 同时土壤中的微生物也会在生理代谢方面做出响应, 以适应环境的选择压力^[5]。

土壤石油污染在中国已经引起大家关注^[6], 但以往对土壤中石油烃的研究主要侧重于油田调查或者微生物等相关修复技术的研究, 缺少对城市土壤的关注。而城市是石油的主要消耗体, 加油站、交通运输、工厂等正常运行均离不开石油, 石油消耗对城市土壤环境的影响还缺少系统研究。特别是城市绿地虽然不

直接进入食物链, 但作为城市中与人接触最为密切的土壤组成部分, 其生态安全已经逐步引起大家关注, 城市绿地土壤重金属、PAHs 已有不少研究报道^[7-8], 但 TPH 对绿地土壤影响报道较少。因此研究典型城市中不同功能区或石油利用场所附近绿地土壤中 TPH 的分布特征及其影响因子, 有助于我们了解城市土壤中石油烃分布累积的规律, 同时也为城市土壤 TPH 污染的合理预测和评价以及采纳适宜的修复技术提供依据。

1 材料与方法

1.1 绿地土壤样品采集

为确保采集的绿地土壤有代表性, 样品采集主要选择上海市不同功能区绿地、典型道路以及加油站附近的绿地土壤。其中不同功能区绿地主要为发电厂、化工厂和焦化厂等典型工厂的附属绿地以及公园、大学校园和居民区绿地; 道路绿地选择上海市重要的交通枢纽外环、中环和延安高架 3 条主要道路的周边绿地。样品为 0 ~ 10 cm 的表层土样, 每个土壤样品由 3 ~ 5 个样品多点混合组成, 共采集 62 个样品, 其中发电厂 3 个, 加油站 3 个, 化工厂 5 个, 焦化厂 5 个, 公园 6 个, 大学校园 6 个, 居民区 5 个。道路采样点主要选择车流量大的地带, 其中延安高架 7 个,

基金项目: 上海辰山植物园专项(G102402)资助。

* 通讯作者(fhl_1969@126.com)

作者简介: 丁正(1987—), 男, 湖北神农架人, 硕士研究生, 主要从事城市绿地土壤评价及修复研究。E-mail: dingzheng_321@163.com

中环 13 个,外环 9 个;为研究不同空间分布对 TPH 的影响,选择 3 条道路周边绿地(分别记为 a、b 和 c),每条道路采集 3 组土壤样品,每组分别采集距离道路边缘 1、10 和 30 m 的样品,共采集 27 个土壤样品;同时选择 3 条道路路口(分别记为 A、B 和 C),每个路口采集 3 组土壤样品,每组分别采集 0~10、10~20 和 20~30 cm 3 个土壤层次,共采集 27 个土壤样品。

1.2 分析方法

1.2.1 TPH 测定 提取、测定参照 HJ 350—2007^[9]。

1.2.2 土壤基本性质 土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定,参照 LY/T 1237—1999^[10]。微生物种群数量测定参照程丽娟和薛泉宏^[11]编写的《微生物实验技术》。

1.2.3 重金属含量测定 盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消解法,参照 GB/T17138—1997^[12]。

1.2.4 数据分析 使用 SPSS 19.0。

2 结果与讨论

2.1 不同类型绿地的 TPH 总量分布

上海不同绿地类型表层土壤 TPH 含量见表 1,TPH 含量变化范围为 0~3 508 mg/kg,平均值为 306.85 mg/kg,低于环境容量(临界值)500 mg/kg^[13]。各个功能区 TPH 平均含量大小为外环>延安高架>加油站>焦化厂>化工厂>中环>大学校园>发电厂>公园>居民区。

表 1 不同绿地表层土壤 TPH 含量(mg/kg)
Table 1 TPH contents of surface soils in different functional areas

土地类型	样品数	范围	平均值	不同段石油烃含量			
				C6~C9	C10~C14	C15~C28	C29~C36
公园	6	0~61	18.17±24.22	ND	ND	ND~24	ND~38
居民区	5	0~26	14.60±11.68	ND	ND	ND	ND~26
大学校园	6	36~137	80.83±26.11	ND	ND	ND~82	29~55
加油站	3	220~382	274.33±71.78	ND	ND	86~167	131~215
延安高架	7	122~541	314.00±114.86	ND	ND	48~260	74~240
中环	13	22~417	169.46±71.11	ND	ND	ND~163	22~254
外环	9	480~3 508	1 196.56±895.09	ND	ND~23	241~2 180	221~1 310
焦化厂	5	100~618	258.40±143.84	ND	ND~22	47~334	53~262
化工厂	5	97~265	178.40±67.68	ND	ND~14	45~131	52~155
发电	3	20~117	60.33±37.78	ND	ND	ND~57	20~60
合计	62	0~3 508	306.85	ND	ND~23	ND~2 180	ND~1 310

注:ND 表示低于检测线,未检测出。

在所有样品中,上海道路周边绿地土壤的 TPH 含量普遍偏高,高于尼日利亚 Ibadan 市交通密集区(373 mg/kg)^[14]。道路周边绿地又以外环周边绿地土壤的 TPH 含量最高,为 480~3 508 mg/kg,平均值为 1 196.56 mg/kg,高出环境容量(500 mg/kg)一倍多;延安高架周边绿地土壤的 TPH 含量次之,为 122~541 mg/kg,平均值为 314.00 mg/kg;中环周边绿地土壤 TPH 在 3 条道路中含量相对最低,为 22~417 mg/kg,平均值为 169.46 mg/kg。究其原因,可能与所选取的道路均为上海市交通最繁忙的地带有关,3 条道路交通流量大,汽车排放尾气多,说明汽车排放的尾气是城市绿地土壤最主要的 TPH 污染源。此外,可能与 3 条道路的建成年限也有一定关系,3 条道路建成年限大小为外环(1997 年)>延安高架(1999 年)>中环(2005 年)。相对而言,建成年限越长,道路周边绿地土壤所受汽车尾气的污染越久,TPH 的含量也越高,这与马光军等^[15]调查的 PAHs

的分布规律基本一致。此外,外环 TPH 含量高可能与其道路上行驶有大量使用柴油的卡车也有一定关系,马光军等^[15]也认为外环 PAHs 含量最高的原因除了建成年限外,就是延安高架和中环禁止大型卡车进入,而外环主要是运输货物的大卡车。

与尼日利亚的 Lagos 市污染情况相似^[4,16],加油站、工厂(焦化厂和化工厂)是除道路周边绿地之外 TPH 污染程度较高的功能区,TPH 含量(mg/kg)范围和平均值分别为 220~382,274.33;100~618,258.40;97~265,178.40。这是由于在石油生产、储运、炼制加工及使用过程中,井喷、泄漏、检修等原因都会有石油烃类的溢出和排放,造成落地石油污染^[17]。公园、居民区、大学校园、发电厂 TPH 含量(mg/kg)范围和平均值分别为 0~61,18.17;0~26,14.60;36~137,80.83;20~117,60.33,TPH 平均含量都低于 100 mg/kg。这可能与自身所处区域远离道路,并且接触污染源的几率较小,因此 TPH 污染程度较低。

2.2 不同空间分布对绿地土壤 TPH 的影响

道路不同距离土壤 TPH 含量见图 1。距道路 1 m 处绿地的表层土壤 TPH 含量均远高于距道路远处绿地(10 m 和 30 m)。经配对 t 检验,距道路 1 m 处绿地表层土壤 TPH 含量与距道路 10 m 处绿地($P = 0.036 < 0.05$)、30 m 处($P = 0.043 < 0.05$)表层土壤 TPH 含量均差异显著;而距道路 10 m 处绿地表层土壤 TPH 含量与距道路 30 m 处绿地表层土壤 TPH 含量差异不显著($P = 0.748 > 0.05$)。这进一步说明道路周边绿地中 TPH 主要来源于汽车尾气,汽车尾气对 TPH 的影响主要富积在道路的近距离。

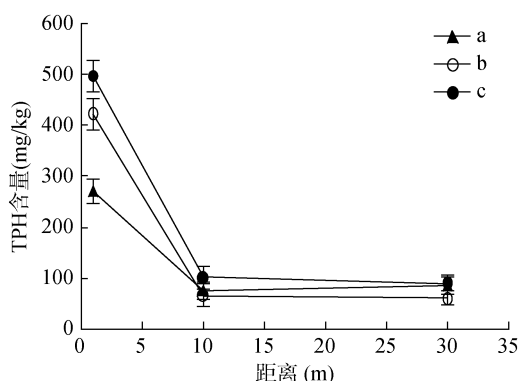


图 1 土壤 TPH 含量与道路距离的关系

Fig. 1 Soil TPH content at different distances from the road

绿地土壤不同层次 TPH 含量如图 2 所示。从图 2 中可以看出,TPH 含量随着土壤剖面深度加大而显著降低。这说明汽车尾气对土壤 TPH 的污染主要累积于土壤表层,且 TPH 在土壤中迁移能力较小。而在 Li 等^[18]的研究中,随着深度的增加,TPH 含量有一个系统增加的趋势,本次研究结果相反,可能与上海土壤质地黏重,土壤入渗率小有一定关系^[19]。

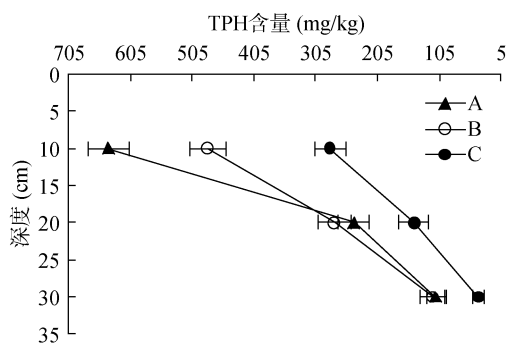


图 2 不同土壤剖面 TPH 含量

Fig. 2 Vertical distributions of TPH contents in soil profiles

2.3 绿地土壤 TPH 与土壤性质的关系

2.3.1 TPH 含量与有机质含量的关系 各个典型绿地土壤的有机质含量及与 TPH 含量的相关性分别

见表 2 和表 3。从表 2 和表 3 中可以看出,各个绿地土壤的 TPH 与有机质含量相关性不显著。Li 等^[18]的研究也证实二者无相关性。结果可能与样品来源有一定关系,本次研究主要选择的是城市绿地土壤样品,绿地土壤一方面表面存在不同量的枯枝落叶,同时绿地土壤本身许多是合成土壤,土壤中存在不同的有机添加物,同时像焦化厂土壤有机质含量非常高,可能还存在燃煤等其他来源的碳,这些均可能是造成有机质含量异常的原因。从图 3 可知,在 A、B、C 这 3 处的剖面土壤中,有机质含量随着土壤深度的增加而降低,这也说明绿地土壤中有机质来源主要是外源的影响比较大。

2.3.2 TPH 含量与重金属含量的关系 从表 2 和表 3 中可以看出:Zn、Cd 含量均与 TPH 含量呈极显著正相关($Zn: r = 0.956, P < 0.01$; $Cd: r = 0.969, P < 0.01$); Pb 含量与 TPH 含量呈显著正相关($r = 0.673, P < 0.05$); Cu 含量与 TPH 含量相关性不显著,这与 Adeleke 和 Olabisi^[4]的研究结果相符。Fang 等^[20]研究证实 Zn、Cu、Pb 和 Cd 是城市土壤中最容易累积的 4 种重金属,其中 Zn 的累积程度是最高的,特别是在道路两侧。汽车轮胎的制作材料中含有 Zn。刘延良等^[21]研究认为轮胎的磨损产生的粉尘是城市土壤中 Zn 污染的主要来源。卢瑛等^[22]研究认为汽油中的 Pb 随机动车尾气的排放以及机动车轮胎中的 Pb 磨损后进入城市土壤,是城市土壤 Pb 的主要来源。这也进一步说明城市土壤中 TPH 和 Zn、Pb 的污染具有同源性,大都来源于城市交通。

2.3.3 TPH 含量与微生物数量的关系 由于石油烃污染物进入土壤会改变土壤中原有微生物的种群数量和组成结构,因此对微生物数量进行分析有助于了解 TPH 污染情况。从表 2 和表 3 中可以看出:土壤细菌数量和微生物总量均与 TPH 平均含量呈极显著正相关,相关系数分别为 0.977($P < 0.01$)和 0.978($P < 0.01$);放线菌数量与 TPH 平均含量呈显著正相关($r = 0.756, P < 0.05$);但真菌数量与 TPH 平均含量相关性不显著($r = -0.165, P > 0.05$)。表明上海市表层绿地土壤在当前 TPH 含量较低的情况系下,TPH 反而促进土壤微生物的增长,可能是与 TPH 污染物虽然有一定程度累积但还没有达到严重毒害程度,反而为微生物生长提供所需的碳源与能源^[23]。另有研究认为能够利用石油烃作为碳源并参与 TPH 降解的大部分微生物是细菌和真菌^[24-27],细菌和真菌数量会随着 TPH 浓度的增加而增加。但本次调查中真菌数

表 2 土壤样品物理化学性质及微生物数量
Table 2 Soil physical and chemical properties and microbial quantities

土地类型	TPH (mg/kg)	重金属 (mg/kg)			
		Cu	Zn	Pb	Cd
公园	18.17 ± 24.22	27.37 ± 1.27	109.39 ± 10.78	35.98 ± 4.32	0.26 ± 0.08
居民区	14.60 ± 11.68	34.56 ± 6.84	138.94 ± 17.33	54.15 ± 13.84	0.24 ± 0.05
加油站	274.33 ± 71.78	86.92 ± 22.50	299.63 ± 85.84	78.81 ± 13.88	0.46 ± 0.08
延安高架	314.00 ± 114.86	57.49 ± 8.89	285.50 ± 99.83	67.78 ± 9.39	0.36 ± 0.05
中环	169.46 ± 71.11	43.53 ± 9.50	148.70 ± 30.55	47.43 ± 6.63	0.30 ± 0.09
大学校园	80.83 ± 26.11	36.02 ± 3.97	158.20 ± 48.57	55.42 ± 4.94	0.32 ± 0.06
外环	1 196.56 ± 895.09	78.29 ± 22.70	820.38 ± 499.05	106.49 ± 27.80	0.98 ± 0.67
焦化厂	258.40 ± 143.84	165.71 ± 88.19	431.71 ± 183.83	113.77 ± 41.23	0.43 ± 0.09
化工厂	178.40 ± 67.68	51.67 ± 7.69	189.49 ± 30.95	79.33 ± 22.10	0.29 ± 0.03
发电厂	60.33 ± 37.78	29.25 ± 5.16	77.47 ± 19.12	41.92 ± 6.52	0.14 ± 0.03

土地类型	有机质 (g/kg)	微生物(CFU/ g 干土)			
		细菌(×10 ⁷)	真菌 (×10 ⁵)	放线菌(×10 ⁶)	合计(×10 ⁷)
公园	22.56 ± 8.56	4.04 ± 1.25	1.00 ± 0.61	6.01 ± 3.95	4.66 ± 1.63
居民区	18.99 ± 2.47	6.02 ± 2.95	1.62 ± 0.53	6.88 ± 4.33	6.72 ± 3.29
加油站	36.14 ± 4.28	6.82 ± 0.96	1.29 ± 0.42	12.65 ± 2.88	8.09 ± 0.89
延安高架	37.42 ± 5.88	8.27 ± 3.15	1.49 ± 1.05	13.36 ± 1.99	9.62 ± 3.35
中环	23.35 ± 3.37	6.86 ± 2.97	1.17 ± 0.51	15.23 ± 8.43	8.40 ± 3.64
大学校园	34.17 ± 10.31	4.97 ± 2.35	1.90 ± 0.91	23.00 ± 23.26	7.30 ± 4.16
外环	57.87 ± 20.33	38.70 ± 25.00	1.37 ± 0.46	29.54 ± 17.43	41.67 ± 26.61
焦化厂	85.50 ± 13.65	7.02 ± 1.76	3.25 ± 1.04	9.54 ± 2.36	8.01 ± 1.96
化工厂	52.38 ± 15.72	6.90 ± 3.36	1.55 ± 0.33	7.82 ± 1.70	7.70 ± 3.36
发电厂	25.26 ± 6.87	3.96 ± 1.06	3.13 ± 1.12	9.14 ± 2.68	4.91 ± 1.34

表 3 土壤 TPH 含量与土壤性质的相关性
Table 3 Correlation matrix between chemical and biological parameters of soil

	TPH	有机质	Cu	Zn	Pb	Cd	细菌	真菌	放线菌	微生物总
TPH	1.000									
有机质	0.576	1.000								
Cu	0.336	0.862**	1.000							
Zn	0.956**	0.743*	0.571	1.000						
Pb	0.673*	0.942**	0.860**	0.830**	1.000					
Cd	0.969**	0.609	0.423	0.971**	0.722*	1.000				
细菌	0.977**	0.485	0.208	0.914**	0.578	0.944**	1.000			
真菌	-0.165	0.401	0.446	-0.029	0.248	-0.219	-0.205	1.000		
放线菌	0.756*	0.297	0.067	0.676*	0.362	0.765**	0.754*	-0.181	1.000	
微生物总量	0.978**	0.480	0.202	0.912**	0.572	0.947**	0.999**	-0.206	0.783**	1.000

注：** 表示在 $P<0.01$ 水平极显著相关；* 在 $P<0.05$ 水平上显著相关。

量与 TPH 相关性不显著，可能与采集土壤样品分布范围比较大，不同类型绿地土壤的环境条件差别比较大有一定的关系。而由于测定样品中细菌占了微生物数量中的绝大部分，细菌数量与 TPH 浓度呈极

显著正相关，造成微生物总数与 TPH 浓度呈极显著正相关。

2.4 不同绿地类型土壤 TPH 毒性分析

石油烃是由碳氢化合物组成的复杂混合体，其中

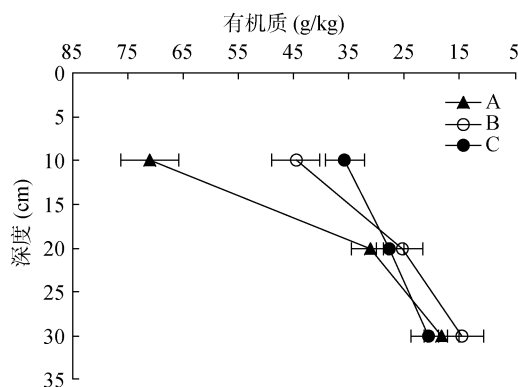


图3 不同土壤剖面有机质含量

Fig. 3 Vertical distributions of organic matters in soil profiles

的组分由于沸点不同,对人体危害不同,因此一般将其分为4段:C6~C9,C10~C14,C15~C28,C29~C36。其中C6~C9段毒性最强,如澳大利亚新南威尔士州环保局(NSW EPA)规定TPH在C6~C9段含量应该小于65 mg/kg,否则认为存在毒害;而对C10~C40段的TPH含量则放宽到1 000 mg/kg。国内由于TPH检测技术发展相对滞后,还是笼统地将TPH总量控制指标限值设定为1 000 mg/kg^[9],这显然不利于科学和全面地评价TPH的毒害程度。为此本文将各样品TPH的各段含量也进行分析(表1),从表1中可以看出所有绿地土壤的TPH分段组成有共同特点。其中,C6~C9段的TPH含量均低于检出限;C10~C14段的TPH在只有在外环、焦化厂和化工厂等少量样品中检出,大部分样品低于检出限;而C15~C28和C29~C36段的TPH在大部分样品中均可检出,是上海绿地土壤TPH的主要组成部分。由于C15~C28和C29~C36段的石油烃毒性小于C6~C9和C10~C14段的石油烃,这也表明整体而言,上海城市土壤TPH虽然有一定累积,但整体污染毒害程度并不严重。

从表1还可以看出,不同类型的绿地土壤不但TPH总量存在差异,其不同段的含量也有所不同。其中,外环样品基本检出C10~C14段的TPH,毒性最强;焦化厂和化工厂虽然TPH总量并不高,但也检出C10~C14段的TPH,说明工厂绿地土壤中TPH累积程度不高但潜在毒性强;而公园、居民区和大学校园不但TPH总量低,低碳段的TPH基本没有检出,许多样品高碳段的TPH也低于检出限。同样就交通道路周边绿地而言,建成年限和车型对道路周边绿地土壤TPH分段组成的影响也较大。比较建成年限相当的外环和延安高架,延安高架周边绿地土壤不但TPH总量低,而且基本没有检出C6~C9和C10~

C14段的TPH,低碳段TPH含量低;而外环周边绿地土壤中不但TPH总量高,并已检出了C10~C14段的TPH;因此,对类似交通流量大且以燃烧柴油车为主的道路,其周边绿地土壤TPH的污染累积和毒害应该引起重视。

3 结论

(1) 上海绿地表层土壤TPH平均含量为306.85 mg/kg,低于环境容量(临界值)500 mg/kg;不同类型绿地土壤平均浓度由高到低依次为外环>延安高架>加油站>焦化厂>化工厂>中环>大学校园>发电厂>公园>居民区;其中平均含量最高的外环周边绿地表层土壤TPH含量高达1 196.56 mg/kg,而平均浓度最低的居民区表层土壤TPH含量仅为14.60 mg/kg;道路周边绿地土壤中TPH含量高是和汽车尾气排放直接相关的,而且距离道路越近TPH累积越明显,TPH主要累积在土壤表层。上海绿地土壤TPH存在不同程度的累积,但由于毒性大的C6~C9段TPH基本没有检出,基本以高碳段的TPH为主,因此上海绿地土壤TPH整体污染情况并不严重。

(2) 绿地土壤TPH含量与有机质含量、Cu含量、真菌数量之间相关性不显著,但与Zn含量、Cd含量、细菌数量、微生物总量存在极显著相关;与Pb含量、放线菌数量之间存在显著相关。上海市表层土壤在当前污染情况下,低浓度的TPH污染物可以作为微生物生长所需的碳源与能源,刺激微生物量的增加。

(3) 在不同绿地类型中,交通流量大且大量使用柴油卡车运行的外环线周边绿地土壤TPH污染程度最为严重,超出环境容量一倍多;其中,单点最高含量高达3 508 mg/kg;而且基本检测出C10~C14段TPH,潜在毒性大。因此就整个上海市绿地土壤而言,汽车尾气可能是城市绿地土壤最主要的TPH污染源,因此交通流量大的道路两侧其潜在污染和毒害程度大,应引起足够重视。

参考文献:

- [1] 刘五星, 骆永明, 滕应, 李振高, 吴龙华. 我国部分油田土壤及油田的石油污染初步研究[J]. 土壤, 2007, 39 (2): 247-251
- [2] 杨妹倩, 李素玉, 李法云, 谯兴国, 罗岩, 张志琼. 沈抚污灌区结冻土壤中微生物群落及石油烃优势降解菌的筛选[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(3): 54-56
- [3] Menzie CA, Potocki BB, Santodonato J. Exposure to carcinogenic PAHs in the environment[J]. Environmental Science & Technology, 1992, 26:1 278-1 284
- [4] Adeleke AA, Olabisi JO. Total petroleum hydrocarbons and trace heavy metals in roadside soils along the Lagos-Badagry

- expressway, Nigeria[J]. Environ. Monit. Assess., 2010, 167: 625–630
- [5] 王梅, 江丽华, 刘兆辉, 郑福丽, 张文君, 林海涛, 宋效宗, 董健. 石油污染物对山东省三种类型土壤微生物种群及土壤酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 341–346
- [6] 朱昌雄. 农业生物资源与环境修复[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2009: 340–341
- [7] Liang J, Ma GJ, Fang HL, Chen L, Christie P. Polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations in urban soils representing different land use categories in Shanghai[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(1): 33–42
- [8] Tam NF, Liu WK, Wong MH, Wong YS. Heavy metal pollution in roadside urban parks and gardens in Hong Kong[J]. Sci. Total Environ., 1987, 59: 325–328
- [9] 上海市环境科学研究院. HJ 350-2007: 展览会用地土壤环境质量评价标准(暂行)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007: 53
- [10] 中国林业科学研究院林业研究所森林土壤研究室. LY/T 1237-1999: 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999: 106–107
- [11] 程丽娟, 薛泉宏. 微生物学实验技术[M]. 西安: 世界图书出版公司, 2000: 81
- [12] 中国环境监测总站. GB/T 17138-1997: 土壤质量: 铜、锌的测定: 火焰原子吸收分光光度法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997
- [13] 李慧, 陈冠雄, 杨涛, 张成刚. 沈抚灌区含油污水灌溉对稻田土壤微生物种群及土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(7): 1 355–1 359
- [14] Onianwa PC. Petroleum hydrocarbon pollution of urban topsoil in Ibadan City, Nigeria[J]. Environment International, 1995, 21(3): 341–343
- [15] 马光军, 梁晶, 方海兰, 张甘霖. 上海市主要道路绿地土壤中多环芳烃的分布特征[J]. 土壤, 2009, 41(5): 738–743
- [16] Adeniyi AA, Afolabi JA. Determination of total petroleum hydrocarbons and heavy metals in soils within the vicinity of facilities handling refined petroleum products in Lagos metropolis[J]. Environment International, 2002, 28: 79–82
- [17] 孙铁珩, 周启星, 李培军. 污染生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 57
- [18] Li JH, Zhang JT, Lu Y, Chen YQ, Dong SS, Shim H. Determination of total petroleum hydrocarbons(TPH) in agricultural soils near a petrochemical complex in Guangzhou, China[J]. Environ. Monit. Assess., 2012, 184: 281–287
- [19] 伍海兵, 方海兰, 彭红玲, 梁晶, 胡永红, 蔡云鹏, 郝冠军. 典型新建绿地上海辰山植物园的土壤物理性质分析[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 85–90
- [20] Fang HL, Dong Y, Gu B, Hao GJ, Lv ZW, Liang J, Chen L. Distribution of Heavy metals and arsenic in greenbelt roadside soils of Pudong new district in Shanghai[J]. Soil and Sediment Contamination An International Journal, 2009, 18(6): 702–714
- [21] 刘延良, 高松武次郎, 佐濑裕之. 日本城市土壤的重金属污染研究[J]. 环境科学研究, 1996, 9(2): 47–51
- [22] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤 Pb 的含量及其化学形态[J]. 环境科学学报, 2002, 22(2): 156–160
- [23] Guo H, Yao J, Cai MM, Qian YG, Guo Y, Richnow HH, Blake RE, Doni S, Ceccanti B. Effects of petroleum contamination on soil microbial numbers, metabolic activity and urease activity[J]. Chemosphere, 2012, 87: 1 273–1 280
- [24] Deborah DR, Joanna M, Cerniglia CE. Utilization of mixtures of polycyclic aromatic hydrocarbons by bacteria isolated from contaminated sediment[J]. FEMS Microbiol. Ecol., 2002, 41(1): 1–7
- [25] 耿春女, 李培军, 陈素华, 张海荣, 韩桂云. 不同丛枝菌根真菌对万寿菊生长及柴油降解率的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1 775–1 779
- [26] 李培军, 郭书海, 孙铁珩, 台培东, 张春桂, 白玉兴, 孙强, 生平. 不同类型原油污染土壤生物修复技术研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1 455–1 458
- [27] Michiel JJK, Eric HV, Jim AF. Successive mineralization and detoxification of benzo[a]pyrene by the white rot fungus Bjerkandera sp. strain BOS55 and indigenous microflora[J]. Appl. Environ. Microbio., 1998, 64(8): 2 853–2 858

Distribution Characteristics of Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) of Urban Greenbelt Soils in Shanghai

DING Zheng^{1,2}, LIANG Jing², FANG Hai-lan^{2*}, HAO Guan-jun²

(1 College of Resources and Environment Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2 Shanghai Institute of Landscape Gardening, Shanghai 200232, China)

Abstract: Some different types of greenbelt soils were selected to research the petroleum hydrocarbons (TPH) in Shanghai. The results showed that although there were different levels of TPH accumulation, but the overall pollution was not serious. The TPH contents of greenbelt soils around the outer ring road were highest among all types of greenbelt, the more closer to the road and the soil surface, the more obvious of TPH accumulation. The main source of pollution about TPH in greenbelt soils may be automobile exhaust. The TPH content of greenbelt soil had no significant correlation with the organic matter content, Cu content, fungi quantity, but it had extremely significant correlation with Zn content, Cd content, bacteria quantity and microbial quantity, and it also had significant correlation with Pb content, actinomycetes quantity. The TPH could act as the sources of carbon and energy at low concentrations which will stimulate an increase in microbial quantity. In greenbelt soils from Shanghai, the C6 - C9 segment of TPH was below the detection line, the main part was the high carbon segment with less toxicity. But the greenbelt soils around the outer ring road with heavy traffic and the main vehicles burning diesel, where had highly TPH content and low carbon segment could be detected, should be getting more attention to the potential contamination and poison of TPH.

Key words: Greenbelt, TPH, Microorganism