

周 洁, 张敬锁, 刘晓霞, 等. 北京市郊农田土壤中多环芳烃污染特征及风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(4): 534-540.

ZHOU Jie, ZHANG Jing-suo, LIU Xiao-xia, et al. Pollution characteristics and risk assessment of PAHs in agricultural soil in suburb of Beijing[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4): 534-540.

北京市郊农田土壤中多环芳烃污染特征及风险评价

周 洁, 张敬锁*, 刘晓霞, 冯 洋, 王鸿婷, 徐淑波, 庞 博

(北京市农业环境监测站, 北京 100029)

摘 要:对北京市郊农田土壤中多环芳烃(PAHs)的种类、含量进行研究,并对其来源和生态风险进行探讨,以期了解京郊农田土壤中PAHs的污染现状和潜在风险,为农业环境保护提供科学依据和理论支持。结果表明:16种PAHs全部检出的检出率为74.4%,PAHs总含量(Σ PAHs)范围为7.19~1 811.99 ng·g⁻¹,平均值为460.75 ng·g⁻¹;土壤中PAHs的组成结构主要以2~4环为主,占总含量的78.2%,主要来源为石油和煤的高温燃烧。风险评价结果显示,京郊农田土壤已受到PAHs污染,并具有潜在生态风险。

关键词:农田土壤;多环芳烃;污染特征;风险评价

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2019)04-0534-07

doi: 10.13254/j.jare.2018.0203

Pollution characteristics and risk assessment of PAHs in agricultural soil in suburb of Beijing

ZHOU Jie, ZHANG Jing-suo*, LIU Xiao-xia, FENG Yang, WANG Hong-ting, XU Shu-bo, PANG bo

(Beijing Municipal Station of Agro-Environmental Monitoring, Beijing 100029, China)

Abstract: The PAHs were used as the goal pollutant in order to study the species, content, main source and ecological risk of PAHs in agricultural soil in suburbs of Beijing. This study can not only understand the pollution characteristics and potential risk of PAHs in agricultural soil in suburbs of Beijing, but also provide support for the decision making of agricultural environmental protection. The results showed that 16 PAHs were generally detected, with the detection ratio of 74.4%. The total PAHs concentrations was in range of 7.19~1 811.99 ng·g⁻¹, with an average value of 460.75 ng·g⁻¹. The dominant compounds were 2~4 ring PAHs, which accounted for 78.2%. PAHs in soil were mainly derived from the fossil oil and the combustion of coal. The analysis of risk assessment showed that the agricultural soil in suburbs of Beijing had been polluted by PAHs and had potential ecological risk.

Keywords: agricultural soil; PAHs; pollution characteristic; risk assessment

多环芳烃(PAHs)是一类广泛存在于环境中且具有严重危害的持久性有机污染物,具有强烈的致癌、致畸、致突变性,对环境和人体具有较大危害^[1]。土壤是PAHs的储藏库,环境中90%以上的PAHs存在于土壤中^[2]。

北京作为我国的政治中心,也曾经是北方重要的工业城市,工业燃煤量大,交通发达,潜在的污染源可能造成北京地区农田土壤中PAHs污染,进而威胁农产品质量安全。对北京地区土壤PAHs污染研究发

现,土壤表层中PAHs含量较高,有的地区已严重超标;道路公交站、修理厂门口PAHs含量最高,石化、热电厂生活区土壤中PAHs居次;北京西南部工业区周围土壤中PAHs总量较高,主要来源是石油源和燃烧源^[3]。现阶段,研究多集中于北京城市区域、公路工厂周边,而大范围农田土壤PAHs污染的研究较少。农田土壤是保障生产基地安全的首要因素,因此,农田土壤PAHs污染风险评价对农产品质量安全具有重要意义。

收稿日期:2018-08-08 录用日期:2018-10-26

作者简介:周 洁(1985—),女,天津人,高级工程师,主要从事农业生态环境保护工作。E-mail:zhoujie302@163.com

*通信作者:张敬锁 E-mail:zhjsuo1973@163.com

基金项目:北京市科技计划课题(D161100005516001)

Project supported: Beijing Municipal Science & Technology Plan(D161100005516001)

本文以美国环境保护署(EPA)公布的16种优先控制PAHs作为目标污染物,对北京市郊10个重点农业区的农田土壤中PAHs的种类、含量进行分析,并对其来源和生态风险进行探讨,以期了解京郊农田土壤中PAHs的污染现状和潜在风险,为农业环境保护提供科学依据和理论支持。

1 材料与方法

1.1 样品采集

样品采集范围为北京市昌平、大兴、房山、朝阳、海淀、怀柔、密云、顺义、通州和延庆10个重点农业区。依据典型性和代表性原则,采用环境单元和行政单元相结合的布点方式,在重点种植区布设监测点位168个,主要分布于菜田和粮田,采样点位分布如图1所示。样品采集采用GPS精确定位,依照《农田土壤环境质量监测技术规范》(NY/T 395—2012),于作物收获后进行土壤监测点采样,采样深度为0~20 cm,每个监测点选择5个样点进行采样,将多点取到的土样充分混合,去除杂质,按四分法取分析样品1.0 kg,用棕色玻璃瓶于4℃以下冷藏密封保存。

1.2 样品检测

土壤检测项目为EPA公布的16种优先控制PAHs:萘(NAP)、苊烯(ANY)、苊(ANA)、芴(FLU)、菲(PHE)、蒽(ANT)、荧蒽(FLT)、芘(PYR)、苯并[a]蒽

(BaA)、蒾(CHR)、苯并[b]蒽(BbF)、苯并[k]蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、茚并[1,2,3-cd]芘(IPY)、二苯并[a,h]蒽(DBA)和苯并[g,h,i]芘(BPE)。

PAHs含量的分析程序、方法和质量控制参照文献[4]方法执行。试验所用仪器设备为气质联用定量分析仪(Agilent 6890-5975C,安捷伦公司,美国)、加速溶剂提取仪(ASE-350 Dionex公司,美国)、氮吹仪(Organomation公司,美国)和SPE固相萃取装置(SUPELCO公司,美国)。PAHs混合标样包含16种同系物,内标物为氘代苊(ANA-d10)和氘代菲(PHE-d10)(SUPELCO公司,美国)。

土壤样品经风干、研磨,过100目筛,加速溶剂萃取(ASE),称取5 g土样与硅藻土混匀放入ASE萃取池,萃取溶剂为二氯甲烷-丙酮(1:1, V/V),萃取温度100℃,萃取压力10 MPa,萃取时间5 min×3次。使用氮吹仪将萃取液浓缩至2 mL,采用SPE固相萃取净化。取5 mL丙酮/正己烷(1:9, V/V)加入管柱,以低于5 mL·min⁻¹流量将液面抽至与固相物质持平,再加入5 mL正己烷重复上述处理;将2 mL萃取液加入管柱内,以低于5 mL·min⁻¹的流量过柱,抽空,收集流出液;向管柱加入5 mL丙酮/正己烷(1:9, V/V),以5 mL·min⁻¹流量进行淋洗、抽空和收集。使用高纯氮气吸干收集液,加入内标物,正己烷定容至1 mL,等待分析。

使用气质联用定量分析仪对所有PAHs进行测定,进样口温度300℃,柱前压力0.03 MPa,采用不分流方法进行进样;升温程序为:初始温度50℃,以20℃·min⁻¹升至120℃,再以40℃·min⁻¹升至250℃,再以3℃·min⁻¹升至310℃,保持30 min。

测定过程中,严格执行质量保证程序,采用方法空白、样品空白、加标回收率等进行质量控制。方法空白中待测物无检出,加标回收率范围为75%~108%。

2 结果与讨论

2.1 土壤中PAHs总量及组成特征

168个京郊农田土壤样本中,125个样本16种EPA优先控制的PAHs全部被检出,全部检出的检出率为74.4%。各个单体的检出率也较高,BaA、BbF、IPY、DBA和BPE的检出率高达100%,而致癌性最强的BaP的检出率高达98.8%,ANY的检出率最低,为83.3%(表1)。16种PAHs的总浓度($\sum$ PAHs)范围为7.19~1 811.99 ng·g⁻¹(以干质量计),平均值为460.75 ng·g⁻¹,单个组分中均值浓度最高的是NAP,为

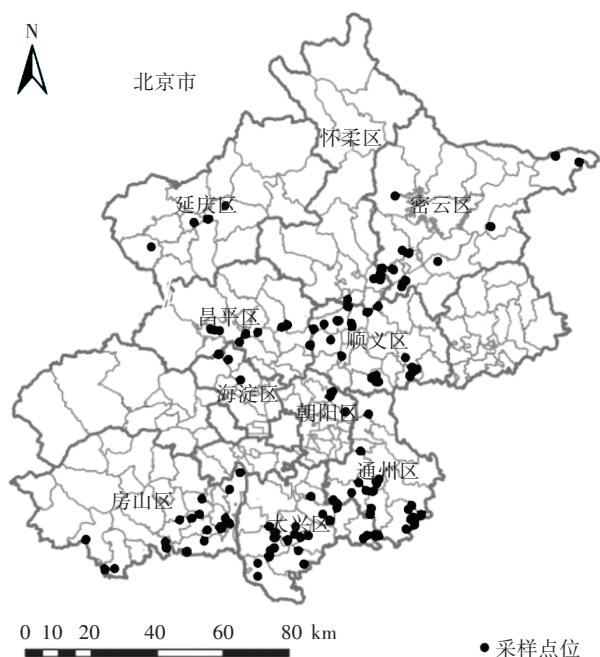


图1 采样点位分布图

Figure 1 Map of the sampling sites

表1 北京市郊农田土壤中16种PAHs含量

Table 1 Concentrations of 16 PAHs in agricultural soils in suburbs of Beijing

多环芳烃 PAHs		含量范围	平均值	中位数	检出率
化合物 Compound	环数 Ring	Range/ ng·g ⁻¹	Average/ ng·g ⁻¹	Median/ ng·g ⁻¹	Detection ratio/%
NAP	2环	ND~285.08	96.20	85.97	97.6
ANY	3环	ND~21.22	4.87	3.94	83.3
ANA	3环	ND~32.55	3.35	2.21	92.3
FLU	3环	ND~111.54	31.52	28.11	97.0
PHE	3环	ND~395.09	93.60	84.16	98.8
ANT	3环	ND~478.01	47.29	4.61	98.8
FLT	3环	ND~244.01	31.89	24.16	99.4
PYR	4环	ND~266.68	23.80	15.15	99.4
BaA	4环	0.63~90.72	15.72	12.70	100
CHR	4环	ND~280.37	23.51	17.66	99.4
BbF	5环	0.41~168.81	30.65	24.25	100
BkF	5环	ND~157.84	22.03	19.77	91.7
BaP	5环	ND~91.99	12.05	7.43	98.8
IPY	5环	0.14~107.92	14.18	9.53	100
DBA	5环	0.11~15.99	3.34	2.81	100
BPE	6环	0.24~105.97	14.93	11.09	100
ΣPAHs	—	7.19~1 811.99	460.75	388.11	—

96.20 ng·g⁻¹, PHE次之, 为93.60 ng·g⁻¹。延庆区、密云区和房山区ΣPAHs含量低于全市平均水平, 而海淀区农田土壤ΣPAHs为全市平均水平的2.2倍(图2和图3)。北京近郊(如海淀区)由于交通密集、工业历史问题等原因, 受点源污染危害较以种植农业为主的远郊区严重。有关污染源类型对农田土壤PAHs的研究也发现, 点源污染大田土壤中ΣPAHs含量和致癌PAHs的比例均高于非点源污染大田^[5-6]。

京郊农田土壤中PAHs的组成特征如图3所示, 综合全市来看, 2~3环PAHs含量最高, 其次是4环和5环, 6环PAHs含量浓度最低。中低环(2~4环)PAHs

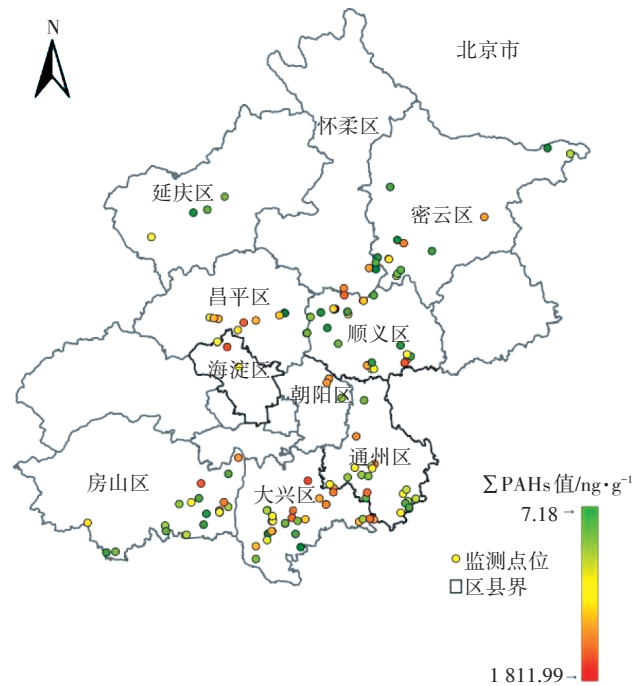


图2 北京市郊农田土壤中ΣPAHs含量分布图

Figure 2 Distribution of total PAHs concentrations in agricultural soils in suburbs of Beijing

占表层土壤总PAHs的比例为78.2%, 高环(5~6环)PAHs占表层土壤总PAHs的比例为21.8%。各区来看, 除海淀区以外, 各区农田土壤中的PAHs以3环为主, 其次是2环、4环和5环, 6环PAHs含量最低; 海淀区4~5环PAHs含量最高。研究表明, 环境中的PAHs来源分为燃烧源和石油源, 中高环(4~6环)PAHs主要来源于煤等化石燃料的高温燃烧和裂解, 低环(2~3环)PAHs主要来源于石油类产品和化石燃料的不完全燃烧或天然成岩过程^[7-9]。京郊农田土壤中PAHs以中低环为主, 表明其PAHs污染来源可能主要为石油类产品和化石燃料的不完全燃烧。北京近郊

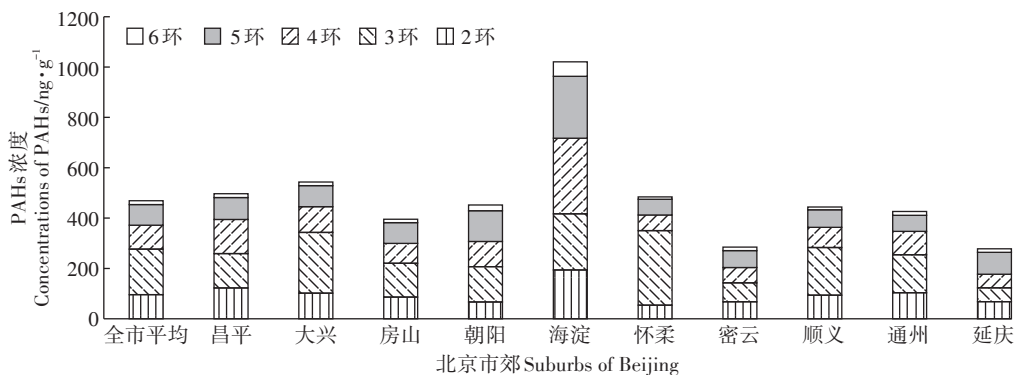


图3 北京市郊农田土壤中PAHs组成特征

Figure 3 Composition characteristics of PAHs in agricultural soils in suburbs of Beijing

海淀区PAHs主要以中高环为主,这可能是由于近郊地区人口密集、交通发达,存在固体废弃物和废水等点源污染。有研究表明,非点源污染大田中2~3环PAHs的比例显著高于点源污染大田,而点源污染大田中4~6环PAHs比例较高^[5],这可能是由于低环PAHs的分子量小,长距离迁移能力强,而高环PAHs的分子量大,长距离迁移能力弱,因此点源污染附近的农田土壤高环PAHs占比较大^[10]。

2.2 土壤中PAHs的来源分析

土壤中内源性PAHs主要来自于植物的分解或自然灾害等^[11],土壤内源性PAHs含量为1~10 ng·g⁻¹,京郊农田土壤中 Σ PAHs含量远高于这一标准,说明存在外源污染。研究发现,同分异构体比值法是判断环境中PAHs来源的常用方法^[12-14],利用所测样品中PAHs同分异构体浓度的比值与污染源排放的同分异构体浓度的比值进行比对,从而可以定性判断PAHs的主要来源。研究发现,可以用BaA/(BaA+CHR)和FLT/(FLT+PYR)的比值来推断PAHs来源^[15-16]。BaA/(BaA+CHR)的比值小于0.2,表明污染来自于石油类物质的泄漏,大于0.3则燃烧占主要优势,0.2~0.3之间表明存在石油泄漏和燃烧的混合作用;当FLT/(FLT+PYR)比值小于0.4时,表明污染主要来源于油类污染,大于0.5时表明这类化合物主要来源于化石燃料或木材的燃烧,尤其与煤或木材的燃烧产物排放有关,0.4~0.5之间时表明受汽油燃烧影响较大^[14]。

采用BaA/(BaA+CHR)和FLT/(FLT+PYR)质量比值参数对京郊产地表层土壤中PAHs的来源进行分析(表2),BaA/(BaA+CHR)比值范围为0.08~0.81,平均值为0.41;FLT/(FLT+PYR)比值范围为0.48~0.99,平均值为0.60。京郊农田土壤样本中BaA/(BaA+CHR)比值小于0.2的占3.6%,大于0.3的占80.2%,0.2~0.3之间的占16.2%;FLT/(FLT+PYR)比值在0.4~0.5之间的占3.0%,大于0.5的占97.0%。综合来看,土壤样点的各质量比值参数主要集中于燃烧源区域,有78.2%的采样点BaA/(BaA+CHR)质量比值大于0.3且FLT/(FLT+PYR)质量比值大于0.5(图4),表明石油、煤及生物物质的高温燃烧是农田土壤中

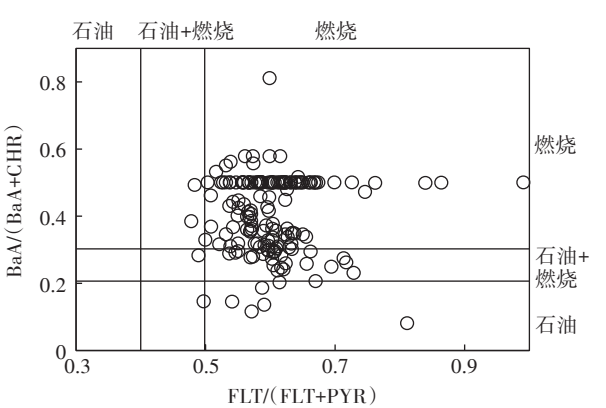


图4 北京市郊农田土壤中BaA/(BaA+CHR)和FLT/(FLT+PYR)比值分布图
Figure 4 Polt of PAHs between BaA/(BaA+CHR) and FLT/(FLT+ PYR) in agricultural soils in suburbs of Beijing

PAHs的主要来源。这一结论与北京地区其他相关研究结果一致,汤莉莉^[3]对北京地区土壤中PAHs来源的分析中得出,城市道路土壤中多环芳烃污染主要来源于燃烧源;张枝焕等^[17]研究发现,北京地区交通干线、工矿企业附近表层土壤样品中PAHs质量分数较高,且来源主要为燃烧源。

京郊农田土壤中PAHs来源一方面是通过燃煤或化石燃料产生的PAHs以烟尘颗粒为载体通过大气干湿沉降进入到土壤环境中,另一方面,各种交通运输工具排放的废气以及车辆轮胎的磨损会使大部分PAHs随烟气直接进入大气环境,进而通过沉降过程进入水体和土体。此外,对京郊沟渠水体和底泥中PAHs污染特征的研究发现,灌渠水体和底泥中16种PAHs全部检出^[18],因此,土壤中PAHs的含量特征与灌溉水质和灌溉历史有很大的关系。

2.3 土壤中PAHs污染风险评价

北京地区农田土壤PAHs研究较少,邹正禹等^[19]对北京市3个郊区20个表层农业土壤研究发现, Σ PAHs含量为1200~3350 ng·g⁻¹,远高于本研究结果。张枝焕等^[17]对北京地区不同环境功能区土壤研究结果显示, Σ PAHs含量为175.1~10 344 ng·g⁻¹,平均值为508.7 ng·g⁻¹,工矿企业周边和交通干线周边土壤中

表2 北京市郊农田土壤中PAHs来源分析
Table 2 Source apportionment of PAHs in agriculture soils in suburb of Beijing

比值范围 Ratio range	BaA/(BaA+CHR)			FLT/(FLT+PYR)		
	<0.2	0.2~0.3	>0.3	<0.4	0.4~0.5	>0.5
所占比例 Proportion/%	3.6	16.2	80.2	0	3.0	97.0

PAHs 含量远高于农业土壤。李艳等^[20]对北京东南灌区 31 个土壤样本进行多环芳烃研究发现,灌区表层土壤 16 种 PAHs 总量为 113.5~449.8 ng·g⁻¹,平均值为 258.5 ng·g⁻¹,低于本研究结果。

将京郊农田土壤中 Σ PAHs 与国内外其他地区农田土壤相比较(表 3),北京市郊农田土壤中 Σ PAHs 高于南京市六合区农田、黄淮平原农田、嘉兴市农田、慈溪市农田、宜兴市农田和珠江三角洲农田,与南昌市周边农田、长江三角洲农村郊区和河北省大清河流域农田 Σ PAHs 相当,低于福州市农田、杭州市农田和吴江市农田 Σ PAHs,远低于兴化市农田、沈阳污灌区和太原小店污灌区 Σ PAHs 含量,处于中等污染水平。与国外研究区相比,京郊农田土壤中 Σ PAHs 高于英国乡村、韩国农业区和波兰农田,属于中等偏高的污染水平。

目前,关于土壤 PAHs 风险评价的研究还相对较少,我国在《农用地土壤环境质量标准(征求意见稿)》中仅规定了 BaP 的含量限值(100 ng·g⁻¹),168 个产地土壤样本中 BaP 含量均低于该标准值。荷兰政府规定了无污染土壤标准为 20~50 ng·g⁻¹^[36],依据此标准,京郊农田土壤仅有 2 个点位处于无污染状态,98.8%

的土壤样点 Σ PAHs 超标。Maliszewska 等^[37]提出了 PAHs 总量标准,将土壤分为 4 个级别:清洁(<200 ng·g⁻¹)、轻度污染(200~600 ng·g⁻¹)、中度污染(600~1000 ng·g⁻¹)和重度污染(>1000 ng·g⁻¹)。依据此标准,京郊农田土壤中 12.5% 的点位处于清洁水平,87.5% 的点位处于污染水平,其中,轻度污染、中度污染和重度污染分别占 63.7%、19.0% 和 4.8%。由此可知,京郊农田土壤已受到 PAHs 污染。

3 结论

(1)京郊农田土壤中 16 种 PAHs 全部检出的检出率为 74.4%; Σ PAHs 总含量为 7.19~1 811.99 ng·g⁻¹,平均值为 460.75 ng·g⁻¹;单个组分中均值浓度最高的是 NAP,为 96.2 ng·g⁻¹,PHE 次之,为 93.6 ng·g⁻¹;延庆区、密云区和房山区 Σ PAHs 含量低于全市平均水平,而海淀区农田土壤 Σ PAHs 为全市平均水平的 2.2 倍。

(2)京郊农田土壤中 PAHs 的组成结构主要以 2~4 环为主,占总含量的 78.2%;主要来源为石油、煤及生物物质的高温燃烧。

(3)京郊农田土壤已受到 PAHs 污染,并具有潜在生态风险,必须引起足够重视。

表 3 国内外不同区域农业土壤 Σ PAHs 含量比较

Table 3 Comparison of PAHs in agriculture soils from different regions at home and abroad

区域 Regions	PAHs 种类 Type	Σ PAHs/ng·g ⁻¹	平均值 Mean/ng·g ⁻¹	参考文献 Reference
南京市六合区农田	16	45~211	127	[21]
黄淮平原农田	15	33~1246	152	[22]
嘉兴市农田	15	9~2421	152	[23]
英国乡村	12	—	187	[24]
慈溪市农田	15	70~325	189	[25]
宜兴市农田	16	93~266	211	[21]
韩国农业区	16	23~2384	236	[26]
珠江三角洲农田		330~4790	244	[27]
波兰农田	13	28~2450	264	[28]
苏州市农田	15	45.4~3703	312.5	[23]
南昌市周边农田	15	145~695	385	[29]
长江三角洲农村和郊区		8.6~3381	397	[30]
河北省大清河流域农田	16	54~3231	405	[31]
北京市郊区农田	16	7~1811	461	本研究
福州市农田		100~1215	522	[32]
山东省农田		111.5~2 744.1	556.3	[5]
杭州市农田	16	507~781	675	[33]
吴江市农田	16	219~1628	801	[21]
兴化市农田	16	673~2286	1370	[21]
沈阳污灌区		950~2790	2133	[34]
太原小店污灌区	16	315~7661	3568	[35]

参考文献:

- [1] Lynch S M, Rebbeck T R. Bridging the gap between biologic, individual, and macro environmental factors in cancer: A multilevel approach[J]. *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, 2013, 22(4):485-495.
- [2] Wild S R, Jones K C. Polynuclear aromatic hydrocarbons in the United Kingdom environment: A preliminary source inventory and budget[J]. *Environmental Pollution*, 1995, 88(1):91-108.
- [3] 汤莉莉. 北京城市土壤中多环芳烃的污染研究[D]. 南京:南京气象学院, 2004.
TANG Li-li. Contamination of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils in Beijing[D]. Nanjing: Nanjing Institute of Meteorology, 2004.
- [4] USEPA. Semivolatile organic compounds by gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS)[EB/OL].[2018-08-08]. <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/8270d.pdf>.
- [5] 葛蔚, 程琪琪, 柴超, 等. 山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析[J]. 环境科学, 2017, 38(4):1587-1595.
GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, et al. Pollution characteristics and source analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils from Shandong[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(4):1587-1595.
- [6] 曹云者, 柳晓娟, 谢云峰, 等. 我国主要地区表层土壤中多环芳烃组成及含量特征分析[J]. 环境科学学报, 2012, 32(1):197-203.
CAO Yun-zhe, LIU Xiao-juan, XIE Yun-feng, et al. Patterns of PAHs concentrations and components in surface soils of main areas in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(1):197-203.
- [7] Readman J W, Fillmann G, Tolosa I, et al. Petroleum and PAH contamination of the Black Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, 44(1):48-62.
- [8] 李恭臣, 夏星辉, 王然, 等. 黄河中下游水体中多环芳烃的分布及来源[J]. 环境科学, 2006, 27(9):1738-1743.
LI Gong-chen, XIA Xing-hui, WANG Ran, et al. Pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in middle and lower reaches of the Yellow River[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(9):1738-1743.
- [9] Men B, He M, Tan L, et al. Distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Daliao River estuary of Liaodong Bay, Bohai Sea (China)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(6):818-826.
- [10] Yu X Z, Gao Y, Wu S C, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils at Guiyu area of China, affected by recycling of electronic waste using primitive technologies[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(9):1500-1509.
- [11] Edwards N T. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the terrestrial environmental review[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1983, 12:427-441.
- [12] Luca G D, Furesi A, Leardi R, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons assessment in the sediments of the Porto Torres Harbor (Northern Sardinia, Italy)[J]. *Marine Chemistry*, 2004, 86(1/2):15-32.
- [13] Atanassova I, Brummer G W. Polycyclic aromatic hydrocarbons of anthropogenic and biopogenic origin in a colluviated hydromorphic soil of western Europe[J]. *Geoderma*, 2004, 120(1/2):27-34.
- [14] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, et al. PAHs in the Fraser River basin: A critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition[J]. *Organic Geochemistry*, 2002, 33(4):489-515.
- [15] 冯承莲, 夏星辉, 周追, 等. 长江武汉段水体中多环芳烃的分布及来源分析[J]. 环境科学学报, 2007, 27(11):1900-1908.
FENG Cheng-lian, XIA Xing-hui, ZHOU Zhui, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Wuhan section of the Yangtze River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(11):1900-1908.
- [16] 杨清书, 雷亚平, 欧素英, 等. 珠江广州河段水环境中多环芳烃的组成及其垂直分布特征[J]. 海洋通报, 2008, 27(6):34-43.
YANG Qing-shu, LEI Ya-ping, OU Su-ying, et al. Vertical distribution, composition of polycyclic aromatic hydrocarbons in water column from Guangzhou channel in the Pearl River[J]. *Marine Science Bulletin*, 2008, 27(6):34-43.
- [17] 张枝焕, 卢另, 贺光秀, 等. 北京地区表层土壤中多环芳烃的分布特征及污染源分析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4):668-675.
ZHAN Zhi-huan, LU Ling, HE Guang-xiu, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbon compounds in topsoil of Beijing, China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4):668-675.
- [18] 张敬锁, 周洁, 刘晓霞, 等. 京郊灌渠水体和底泥中多环芳烃污染特征[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(3):236-243.
ZHANG Jing-suo, ZHOU Jie, LIU Xiao-xia, et al. Pollution characteristics of PAHs in water and sediments of irrigation canal in suburb of Beijing[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2017, 39(3):236-243.
- [19] 邹正禹, 唐海龙, 刘阳生. 北京市郊农业土壤中多环芳烃的污染分布和来源[J]. 环境化学, 2013, 32(5):874-880.
ZOU Zheng-yu, TANG Hai-long, LIU Yang-sheng. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbon compounds in topsoil of Beijing, China[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(5):874-880.
- [20] 李艳, 顾华, 黄冠华, 等. 北京东南郊灌区多环芳烃污染风险与人体健康风险评估[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9):237-249.
LI Yan, GU Hua, HUANG Guan-hua, et al. Contamination and health risk assessment of PAHs in irrigation district in southeastern suburb of Beijing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(9):237-249.
- [21] 丁爱芳, 潘根兴, 李恋卿. 江苏省部分地区农田表土多环芳烃含量比较及来源分析[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(2):71-75.
DING Ai-fang, PAN Gen-xing, LI Lian-qing. Contents and sources of PAHs in top soils of farm lands in parts of Jiangsu, China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2007, 23(2):71-75.
- [22] 周玲莉, 薛南冬, 李发生, 等. 黄淮平原农田土壤中多环芳烃的分布、风险及来源[J]. 中国环境科学, 2012, 32(7):1250-1256.
ZHOU Ling-li, XUE Nan-dong, LI Fa-sheng, et al. Distribution, source analysis and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in farmland soils in Huanghuai Plain[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(7):1250-1256.
- [23] 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.
- [24] 徐慧洁, 杨静慧, 刘艳军. 盐胁迫对野生樱桃幼苗生长的影响及其耐盐性分析[J]. 中国南方果树, 2014, 43(3): 39-42.
- XU Hui-jie, YANG Jing-hui, LIU Yan-jun. Effect of salt stress on growth of wild cherry seedlings and analysis of their salt tolerance[J]. *South China Fruits*, 2014, 43(3): 39-42.
- [25] 李久海, 董元华, 曹志洪, 等. 慈溪市农田表层、亚表层土壤中多环芳烃(PAHs)的分布特征[J]. 环境科学学报, 2007, 27(11): 1909-1914.
- LI Jiu-hai, DONG Yuan-hua, CAO Zhi-hong, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surface and subsurface soils in Cixi County[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(11): 1909-1914.
- [26] Nam J J, Song B H, Eom K C, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in South Korea[J]. *Chemosphere*, 2003, 50(10): 1281-1289.
- [27] 杨国义, 张天彬, 高淑涛, 等. 珠江三角洲典型区域农业土壤中多环芳烃的含量分布特征及其污染来源[J]. 环境科学, 2007, 28(10): 2350-2354.
- YANG Guo-yi, ZHANG Tian-bin, GAO Shu-tao, et al. Source and distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in the Pearl River Delta[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(10): 2350-2354.
- [28] Maliszewska-Kordybach B. Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland: Preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination[J]. *Applied Geochemistry*, 1996, 11(1/2): 121-127.
- [29] 樊孝俊, 刘忠马, 夏新, 等. 南昌市周边农田土壤中多环芳烃的污染特征及来源分析[J]. 中国环境监测, 2009, 25(6): 109-112.
- FAN Xiao-jun, LIU Zhong-ma, XIA Xin, et al. Analysis of pollution characteristics and sources of PAHs in farmland soil around Nanchang City[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2009, 25(6): 109-112.
- [30] Ping L F, Luo Y M, Zhang H B, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in thirty typical soil profiles in the Yangtze River Delta region, east China[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147(2): 358-367.
- [31] 赵健, 周怀东, 陆瑾, 等. 大河流域表层土壤中多环芳烃的污染特征及来源分析[J]. 环境科学学报, 2009, 29(7): 1452-1458.
- ZHAO Jian, ZHOU Huai-dong, LU Jin, et al. Concentration and origin of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil in the Daqing River basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(7): 1452-1458.
- [32] 韩志刚, 杨玉盛, 杨红玉, 等. 福州市农业土壤多环芳烃的含量、来源及生态风险[J]. 亚热带资源与环境学报, 2008, 3(2): 34-41.
- HAN Zhi-gang, YANG Yu-sheng, YANG Hong-yu, et al. Concentrations, sources and ecological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils of Fuzhou City[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2008, 3(2): 34-41.
- [33] 于国光, 张志恒, 叶雪珠, 等. 杭州市郊区表层土壤中的多环芳烃[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 925-928.
- YU Guo-guang, ZHANG Zhi-heng, YE Xue-zhu, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in topsoil of suburban Hangzhou[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(3): 925-928.
- [34] 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.
- [35] 赵颖, 张丽. 太原小店污灌区农田土壤多环芳烃的污染特征及其来源[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 99-105.
- ZHAO Ying, ZHANG Li. Pollution characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in farmland soil of sewage irrigation area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(4): 99-105.
- [36] Van B T, Verweij R, Wedzinga S, et al. Enrichment of polycyclic aromatic hydrocarbons in forest soils near a blast furnace plant[J]. *Chemosphere*, 1996, 32(2): 293-314.
- [37] Maliszewska-Kordybach B, Smreczak B, Klimkowicz-Pawlas A, et al. Monitoring of the total content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in arable soils in Poland[J]. *Chemosphere*, 2008, 73(8): 1284-1291.