

气相色谱 - 质谱法连续测定土壤中的多环芳烃和有机氯农药

刘立平¹, 邓柏依², 王子为¹, 赵锦华¹, 李超群^{1*}, 蒋敬思¹,
任颖俊¹, 梁 锋¹, 李 波¹, 粮红新¹

¹湖南省地质实验测试中心, 湖南 长沙

²中国地质大学(武汉), 湖北 武汉

收稿日期: 2022年12月15日; 录用日期: 2023年1月11日; 发布日期: 2023年1月19日

摘 要

建立同时测定土壤样品中18种有机氯农药和16种多环芳烃的快速溶剂萃取——气相色谱/质谱方法, 对前处理过程中的快速溶剂萃取以及净化步骤进行优化, 并优化气相色谱 - 质谱仪仪器参数。优化后测定时间较短, 目标物质分离效果良好。方法线性范围内线性相关系数0.9955~0.9998, 方法检出限为1.1 µg/kg~3.2 µg/kg, 测定低浓度(10 ppb)空白加标、中等浓度(100 ppb)基体加标、高浓度(500 ppb)基体加标相对标准偏差(n = 7)分别为2.8%~27.0%、1.6%~8.2%、0.7%~12.2%, 加标回收率分别为60.4%~128.9%、60.4%~126.7%、60.4%~125.5%, 证明该方法提取效果好, 精密度和准确度较高, 可以用于同时检测土壤中的多环芳烃和有机氯农药。

关键词

持久性有机污染物, 多环芳烃, 有机氯农药, 快速溶剂萃取, GC-MS

Continuous Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Soil by GC-MS

Liping Liu¹, Boyi Deng², Zhiwei Wang¹, Jinhua Zhao^{1*}, Chaoqun Li¹,
Jingsi Jiang¹, Yingjun Ren¹, Bo Li¹, Hongxin Lang¹

¹Hunan Province Geological Experiment and Testing Center, Changsha Hunan

²China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan Hubei

Received: Dec. 15th, 2022; accepted: Jan. 11th, 2023; published: Jan. 19th, 2023

*通讯作者。

文章引用: 刘立平, 邓柏依, 王子为, 赵锦华, 李超群, 蒋敬思, 任颖俊, 梁锋, 李波, 粮红新. 气相色谱 - 质谱法连续测定土壤中的多环芳烃和有机氯农药[J]. 农业科学, 2023, 13(1): 53-61. DOI: 10.12677/hjas.2023.131008

氧氯丹、环氧七氯 A、 α -氯丹、 γ -氯丹、p,p'-DDE、狄氏剂、异狄氏剂、p,p'-DDD、o,p'-DDT、p,p'-DDT，这些化合物在土壤中检出频率较高、环境毒性较强，是评估农业土壤污染的重要标准之一，通过分析结果可为揭示地块污染来源与区域环境治理提供数据基础。

2. 实验部分

2.1. 仪器与试剂

7890A + 5975C 气相色谱质谱仪(美国 Agilent 公司); Speed Extractor E-916 快速溶剂萃取仪(瑞士 Buchi 有限公司); EFAA-DC12-RT 氮吹仪(上海安谱实验科技有限公司); FD-1D-50 真空冷冻干燥仪(北京博医康实验仪器有限公司)。

19 种有机氯混合标准溶液、16 种多环芳烃混合标准溶液、4 种替代物(2-氟联苯、对三联苯-d14、四氯间二甲苯和和氯菌酸二丁酯)和 5 种氘代内标物(萘-d8、蒽-d10、菲-d10、蒾-d12 和芘-d12)均产自 O₂Si 公司; 正己烷、二氯甲烷、丙酮均为农残级, 由安谱有限责任公司生产。

2.2. 实验方法

2.2.1. 标准工作溶液的配制

将市售有证标准溶液用正己烷+丙酮(95 + 5)逐级稀释至标准溶液中间液, 在棕色安瓶中分别配制 PAHs、OCPs 和替代物浓度为: 2 ng/mL、5 ng/mL、10 ng/mL、20 ng/mL、50 ng/mL、100 ng/mL、200 ng/mL、500 ng/mL、1000 ng/mL、2000 ng/mL 的标准溶液, 5 种氘代内标浓度统一为 200 ng/mL。

2.2.2. 样品前处理

样品的制备: 取适量土壤样品于冷冻干燥器中进行冻干, 若土壤含水较多, 则应先将样品置于冷冻箱中先进行冷冻操作。冻干干燥完成后置于操作台上进行初步碾碎, 挑出其中的草根、树叶、小石子等异物, 再充分研磨、过 60 目筛, 研磨完成后的样品转移到棕色样品瓶中, 贴好标签。

样品的萃取: 准确称取 10.0g 制备好的样品, 加入适量硅藻土混合均匀, 装载至萃取池中, 放入快速溶剂萃取仪进行萃取。萃取液经平行蒸发浓缩至 1 mL 左右, 用正己烷换相, 继续在平行蒸发仪上浓缩溶液至 1 mL 左右, 转入净化操作工序。

萃取液的净化: 向硅酸镁小柱内加入 5 mL 正己烷淋洗, 在硅酸镁填料暴露于空气前关闭控制阀并补加 4 mL 正己烷, 活化 5 min。活化完成后, 打开控制阀放出正己烷。随后向柱内加入萃取浓缩液, 再用约 10 mL 2% 丙酮 - 正己烷混合溶液洗脱, 调节控制阀使流速控制在 2 mL/min 收集洗脱液。

浓缩定容: 将洗脱液氮吹浓缩至 0.5 mL, 加入一定浓度的内标中间液, 用正己烷定容至 1 mL, 待上机测定。

2.2.3. 快速溶剂萃取仪条件

萃取温度 90°C, 萃取压力 100 bar, 萃取剂选用正己烷 - 丙酮(1+1)。

2.2.4. 色谱 - 质谱条件

色谱柱: HP-5MS 毛细管柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm); 进样口温度: 280°C; 流速: 1.5 mL/min; 分流比 5:1; 隔垫吹扫 3 mL/min; 进样量 1 μL; 柱温箱程序升温: 起始温度 80°C 保持 1 min, 以 15°C/min 的速度升至 210°C 保持 1 min, 然后以 14°C/min 的速度升至 300°C 保持 7 min。

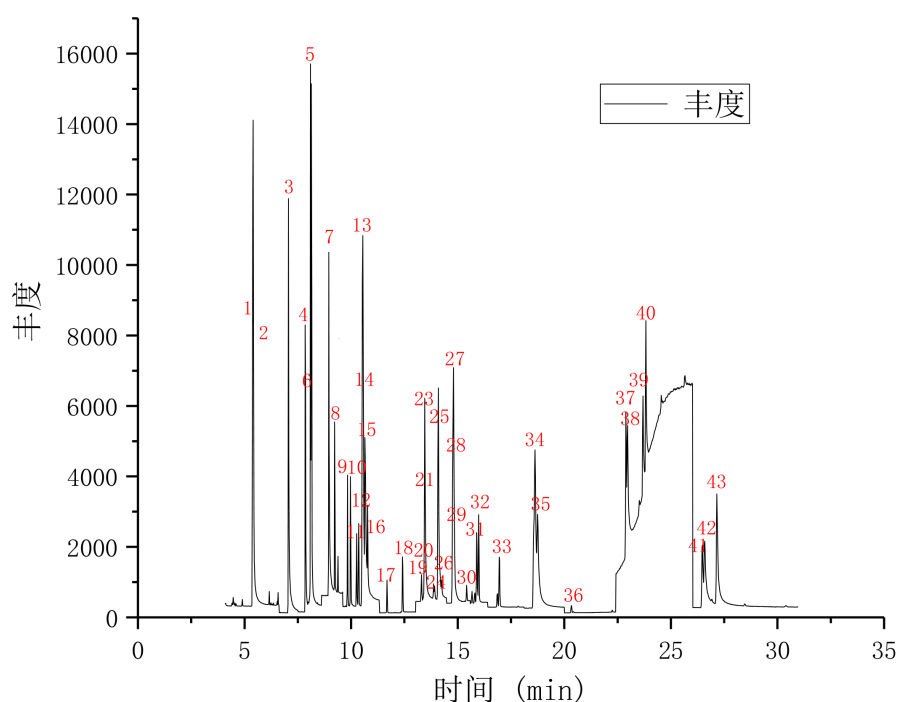
离子源(EI)温度: 230°C; 四极杆温度: 150°C; 测定模式: 选择离子扫描(保留时间、定性离子和定量离子见表 1, 选择离子扫描总离子流图见图 1); 溶剂延迟 5 min。

Table 1. Retention times and characteristic ions of targets, substitutes and internal standard materials
表 1. 目标物、替代物及内标的保留时间与特征离子

编号	化合物名称	CAS 号	保留时间(min)	定量离子	定性离子
1	萘-d8	1146-65-2	5.374	136	137、108
2	萘	91-20-3	5.397	128	127、129
3	2-氟联苯	321-60-8	7.050	172	170、171
4	蒎烯	208-96-8	7.847	152	151、153
5	蒎烯-d10	15067-26-2	8.096	162	164、160
6	蒎	83-32-9	8.146	153	154、152
7	芴	86-73-7	8.951	166	165、167
8	四氯间二甲苯	877-09-8	9.235	207	244、242
9	α -BHC	319-84-6	9.837	181	183、219
10	六氯苯	118-74-1	9.973	284	286、282
11	β -BHC	319-85-7	10.265	181	183、219
12	γ -BHC	58-89-9	10.359	181	183、219
13	菲-d10	1517-22-2	10.519	188	189、160
14	菲	85-01-8	10.566	178	179、176
15	蒽	120-12-7	10.650	178	176、179
16	δ -BHC	319-86-8	10.782	181	183、219
17	七氯	76-44-8	11.694	272	100、274
18	艾氏剂	309-00-2	12.418	263	265、66
19	环氧七氯 B	1024-57-3	13.311	353	355、351
20	氧氯丹	27304-13-8	13.340	115	185、389
21	环氧七氯 A	28044-83-9	13.415	353	355、351
22	荧蒽	206-44-0	13.452	202	200、203
23	α -氯丹	5103-71-9	13.876	373	375、377
24	芘	129-00-0	14.092	202	200、203
25	γ -氯丹	5103-74-2	14.261	373	375、377
26	p,p'-DDE	72-55-9	14.778	246	248、318
27	对三联苯-d14	1718-51-0	14.806	244	245、240
28	狄氏剂	60-57-1	14.853	263	265、279
29	异狄氏剂	72-20-8	15.436	263	81、281
30	p,p'-DDD	72-54-8	15.907	235	237、165
31	o,p'-DDT	789-02-6	16.001	235	237、165
32	p,p'-DDT	50-29-3	16.969	235	237、165
33	苯并(a)蒽	56-55-3	18.558	228	236、229
34	屈-d12	1719-03-5	18.624	240	236、241

Continued

35	屈	218-01-9	8.746	228	226、229
36	氯菌酸二丁酯	1770-80-5	20.354	388	371、390
37	苯并(b)荧蒽	205-99-2	22.893	252	250、253
38	苯并(k)荧蒽	207-08-9	22.968	252	250、254
39	苯并(a)芘	50-32-8	23.683	252	250、253
40	芘-d12	1520-96-3	23.833	264	260、265
41	茚并(1,2,3-c,d)芘	193-39-5	26.457	276	274、277
42	二苯并(a,h)蒽	50-70-3	26.560	278	276、279
43	苯并(g,h,i)芘	191-24-2	27.153	276	274、277



注：1、萘-d8；2、萘；3、2-氟联苯；4、萘烯；5、萘烯-d10；6、萘；7、芴；8、四氯间二甲苯；9、 α -BHC；10、六氯苯；11、 β -BHC；12、 γ -BHC；13、菲-d10；14、菲；15、蒽；16、 δ -BHC；17、七氯；18、艾氏剂；19、环氧七氯B；20、氧氯丹；21、环氧七氯A；22、荧蒽；23、 α -氯丹；24、芘；25、 γ -氯丹；26、p,p'-DDE；27、对三联苯-d14；28、狄氏剂；29、异狄氏剂；30、p,p'-DDD；31、o,p'-DDT；32、p,p'-DDT；33、苯并(a)蒽；34、屈-d12；35、屈；36、氯菌酸二丁酯；37、苯并(b)荧蒽；38、苯并(k)荧蒽；39、苯并(a)芘；40、芘-d12；41、茚并(1,2,3-c,d)芘；42、二苯并(a,h)蒽；43、苯并(g,h,i)芘。

Figure 1. Total ion current chromatogram using SIM mode

图 1. 选择离子扫描总离子流图

3. 结果与讨论

3.1. 标准曲线和方法检出限

优化色谱、质谱上机条件后，在 SIM 模式下，根据 1.2.1 配制的标准溶液上机检测，得到的标准曲线回归方程及其线性相关系数见表 2。

Table 2. Linear regression equations, correlation coefficients and method detection limits of 34 compounds
表 2. 34 种目标物线性回归方程、相关系数及检出限 (单位: $\mu\text{g}/\text{kg}$)

	线性回归方程	相关系数	5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 加标 标准偏差	10 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 加标 标准偏差	检出限 ($\mu\text{g}/\text{kg}$)
萘	$y = -0.03208 + 0.00593x$	0.9998		0.66	2.1
芴烯	$y = -0.18635 + 0.00889x$	0.9990	0.48	-	1.5
芴	$y = -0.10234 + 0.00695x$	0.9996	0.50		1.6
芴	$y = -0.07918 + 0.00663x$	0.9998	0.40		1.3
α -BHC	$y = -0.00845 + 0.699244x$	0.9995	0.43		1.4
六氯苯	$y = 2.30646 + 9.1709x$	0.9986	0.36		1.1
β -BHC	$y = -0.0043 + 0.000505x$	0.9992	0.44		1.4
γ -BHC	$y = -0.0033 + 0.00062x$	0.9991	0.35		1.1
菲	$y = -0.13485 + 0.00635x$	0.9994	0.49		1.5
蒽	$y = -0.09678 + 0.00486x$	0.9996	0.47	-	1.5
δ -BHC	$y = -0.00585 + 5.3309x$	0.9994	0.43	-	1.4
七氯	$y = -0.00117 + 1.76731x$	0.9990	0.44	-	1.4
艾氏剂	$y = -0.00505 + 3.91096x$	0.9989	0.50	-	1.6
环氧七氯 B	$y = -0.00201 + 1.99174x$	0.9995		0.65	2.0
氧氯丹	$y = -0.7.22387 + 8.2407x$	0.9991	-	0.83	2.6
环氧七氯 A	$y = -0.00031989 + 2.983x$	0.9988	0.52		1.6
荧蒽	$y = -0.17863 + 0.00614x$	0.9985		0.56*	1.8
α -氯丹	$y = -0.000311466 + 1.0392x$	0.9986	-	0.68	2.1
芘	$y = -0.2265 + 0.00714x$	0.9984	0.50	-	1.6
γ -氯丹	$y = -0.0021 + 0.00010515x$	0.9994	0.51		1.6
p,p'-DDE	$y = -0.01977 + 0.00138x$	0.9990	0.53		1.7
狄氏剂	$y = -0.00144 + 1.5675x$	0.9992	0.40		1.3
异狄氏剂	$y = -0.00344 + 1.65335x$	0.9996	-	1.02	3.2
p,p'-DDD	$y = -0.2637 + 0.0017x$	0.9986	0.51	-	1.6
o,p'-DDT	$y = -0.00775 + 0.00144x$	0.9987	0.46	-	1.4
p,p'-DDT	$y = -0.02054 + 0.00118x$	0.9991		0.80	2.5
苯并(a)蒽	$y = -0.09063 + 0.0043x$	0.9991	0.48		1.5
屈	$y = -0.0184 + 0.00411x$	0.9981	0.46		1.4
苯并(b)荧蒽	$y = -0.08159 + 0.00472x$	0.9985	-	0.95	3.0
苯并(k)荧蒽	$y = -0.05662 + 0.00556x$	0.9983	0.46		1.4
苯并(a)芘	$y = -0.18451 + 0.00615x$	0.9990		0.80	2.5
茚并(1,2,3-c,d)芘	$y = -0.05972 + 0.00448x$	0.9982	0.45		1.4
二苯并(a,h)蒽	$y = 0.02144 + 0.00229x$	0.9965	0.46		1.4
苯并(g,h,i)芘	$y = 0.04021 + 0.00551x$	0.9954	0.43		1.4

*加标浓度为 8 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

从各目标物的线性回归方程看,在各自的浓度范围内,线性相关系数均大于 0.995,说明线性较好,可用于定量分析各目标物质浓度。

选取空白土壤样品中加入 5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 10 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 两种加标浓度分别进行 7 次平行测定,依据 HJ 168-2020 中方法检出限(MDL)计算方法,得到各目标化合物的检出限,详见表 2。

由表 2 可知,在空白加标浓度为 5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 的实验结果中,有 25 个目标化合物的 3~5 倍 MDL 包括了该浓度,即:对于 5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 的样品浓度,本文中 34 种目标化合物中,有 73.5% 被分析物样品在 3~5 倍 MDL 范围内,并且 100% 被分析物浓度在 1~10 倍 MDL 中,所有被分析物浓度均没超过 20 倍 MDL,因此可以认为初始加标浓度为 5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 是合适的,不在此范围内的其他化合物采用 10 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 加标浓度实验来计算 MDL,有 8 个目标化合物的 3~5 倍 MDL 包括了该浓度,占比 23.5%,只有荧蒽的 MDL 不在这两个浓度所测定的范围内,可以通过加标 8 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 浓度检测后,计算出 MDL 为 1.8 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。从检测结果来看,测定的 MDL 值符合 HJ 168-2020 标准要求,结果有效。因此,该方法检出限为 1.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ~3.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

3.2. 方法的准确度

方法的准确度包括精密度和正确度,本实验选择海南某地区土壤作为基体土壤,通过测定低含量(10 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、中含量(10 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、高含量(50 $\mu\text{g}/\text{kg}$)基体加标平行测定 7 次,利用基体加标回收率 R、对标准偏差 RSD 分别考察方法的正确度及精密度的,详见表 3。

Table 3. Precision and accuracy of the method

表 3. 方法的精密度和正确度

	不同含量基体加标相对标准偏差 RSD 及加标平均回收率 R					
	10 $\mu\text{g}/\text{kg}$		100 $\mu\text{g}/\text{kg}$		500 $\mu\text{g}/\text{kg}$	
	RSD (%)	R (%)	RSD (%)	R (%)	RSD (%)	R (%)
萘	15.3	86.6	5.3	99.9	1.9	69.2
2-氟联苯	21.5	92.3	6.4	60.4	12.2	64.2
萘烯	11.8	84.7	6.6	69.1	0.7	65.4
萘	4.2	79.5	2.0	96.6	1.5	60.4
芴	10.2	105.4	1.6	125.6	1.3	70.4
四氯间二甲苯	11.9	63.0	6.7	61.4	2.2	66.4
α -BHC	6.7	154.1	3.4	98.2	4.7	125.5
六氯苯	11.2	60.4	7.0	62.3	1.0	63.4
β -BHC	22.5	78.3	2.4	89.1	4.1	81.1
γ -BHC	12.2	61.6	4.2	88.2	2.6	72.3
菲	20.8	118.1	2.2	113.7	3.1	93.9
蒽	12.2	100.8	2.5	82.5	5.3	77.5
δ -BHC	13.2	64.5	8.3	80.1	2.7	73.3
七氯	18.5	88.1	4.7	98.7	3.1	87.6
艾氏剂	20.6	71.4	3.3	91.2	2.4	77.0
环氧七氯 B	15.4	84.2	2.2	109.7	1.3	93.2
氧氯丹	7.1	116.6	4.5	105.4	6.0	101.2

Continued

环氧七氯 A	6.9	75.5	6.3	106.5	6.0	83.4
荧蒽	16.7	110.6	3.0	108.6	2.0	98.7
α -氯丹	7.0	97.2	4.3	110.8	2.5	93.4
芘	12.7	97.7	3.2	105.7	2.2	81.1
γ -氯丹	10.2	80.2	5.7	112.1	1.7	82.9
p,p'-DDE	9.3	90.4	3.8	101.0	2.7	81.7
对三联苯-d14	2.8	105.4	2.0	78.0	4.5	68.8
狄氏剂	8.0	99.6	1.7	112.6	2.3	91.5
异狄氏剂	10.2	104.2	6.5	126.7	2.3	111.9
p,p'-DDD	3.7	111.2	4.2	114.5	1.0	111.0
o,p'-DDT	27.0	85.4	3.9	103.0	5.1	66.1
p,p'-DDT	12.4	71.2	7.1	65.2	7.8	58.0
苯并(a)蒽	5.0	128.9	2.2	109.6	6.2	99.2
屈	10.2	98.2	6.2	113.9	4.5	72.4
苯并(b)荧蒽	9.6	127.5	3.0	106.9	1.6	89.0
苯并(k)荧蒽	8.0	118.5	4.3	93.0	5.1	71.2
苯并(a)芘	9.4	83.8	5.8	81.0	1.4	69.5
茚并(1,2,3-c,d)芘	7.2	76.7	6.0	101.8	1.8	70.1
二苯并(a, h)蒽	10.5	104.4	8.2	88.0	4.2	82.1
苯并(g, h, i)芘	7.2	91.3	5.3	76.2	3.3	65.9

由表 3 数据可知：低浓度(10 $\mu\text{g}/\text{kg}$)空白加标样品测定结果的 RSD 在 2.8%~27.0%之间；中浓度(100 $\mu\text{g}/\text{kg}$)基体加标样品测定结果的 RSD 在 1.6%~8.3%之间；高浓度(500 $\mu\text{g}/\text{kg}$)基体加标样品测定结果的 RSD 在 0.7%~12.2%之间。PAHs 与 OCPs 均属于半挥发性有机物，标准规范要求半挥发性有机物的精密度实验结果的相对偏差 < 30%，与表 3 结果比较，本实验中三种浓度的分析测试结果精密度均满足规范要求，说明该方法精密度良好。

从方法的正确度来看，在空白加标浓度为 10 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、基体加标浓度为 100 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 500 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 时，目标化合物的回收率分别为：60.4%~128.9%、60.4%~126.7%和 60.4%~125.5%。半挥发性有机物的基体加标回收率须在 60%~160%，本实验的基体加标回收率在 60.4%~128.9%，满足标准规范要求，说明本实验方案的正确度良好。

4. 结论

1) 本文建立起一套快速溶剂同时萃取、净化、并同时检测的土壤样品分析方法，以保留时间和特征离子定性，内标法定量。优化后的仪器分析条件为：萃取剂选用正己烷 - 丙酮(1:1)，萃取温度 90 $^{\circ}\text{C}$ ，萃取压力 100 bar；柱温箱升温程序为起始温度 80 $^{\circ}\text{C}$ 保持 1 min，以 15 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升至 210 $^{\circ}\text{C}$ 保持 1 min，然后以 14 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度升至 300 $^{\circ}\text{C}$ 保持 7 min。

2) 通过测定空白加标样，得到该套分析方法的检出限为 1.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ~3.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ；通过测定低浓度(10 ppb)空白加标、中等浓度(100 ppb)基体加标、高浓度(500 ppb)基体加标相对标准偏差(n = 7)分别为 2.8%~29%、

1.6%~8.3%和 0.7%~12.2%；基体加标回收率分别为：60.4%~128.9%、60.4%~126.7%和 60.4%~125.5%，说明整套方法的检出限低、准确度和精密度较好，可用于同时检测土壤中的多环芳烃与有机氯农药。

参考文献

- [1] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014, 36(5): 1689-1692.
- [2] 黄何何, 孙倩倩, 刘文菁, 等. 土壤中持续性有机污染物分析技术研究进展[J]. 福建分析测试, 2018, 27(6): 15-24.
- [3] Cabrerizo, A., Dachs, J., Barceló, D. and Jones, K.C. (2012) Influence of Organic Matter Content and Human Activities on the Occurrence of Organic Pollutants in Antarctic Soils, Lichens, Grass, and Mosses. *Environmental Science & Technology*, **46**, 1396-1405. <https://doi.org/10.1021/es203425b>
- [4] 吴维兴. 土壤中多环芳烃污染及其环境行为研究进展[J]. 安徽农业科学, 2014, 25(25): 8563-8565.
- [5] 李国文, 吉正元, 杨春涛, 等. 加速溶剂萃取-气相色谱质谱法测定土壤中 16 种多环芳烃研究[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(2): 591-599.
- [6] Yang, G., Guo, X., Ji, H., *et al.* (2016) Potential Threat of Heavy Metals and PAHs in PM_{2.5} in Different Urban Functional Areas of Beijing. *Atmospheric Research*, **178-179**, 6-16. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.03.015>
- [7] 尚庆彬, 段永红, 程荣. 中国农业土壤多环芳烃污染现状及来源研究[J]. 山东农业科学, 2019, 51(3): 62-67.
- [8] Moret, S., Amici, S., Bortolomeazzi, R., *et al.* (1995) Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and Water-Based Alcoholic Beverages. *Zeitschrift Fuer Lebensmittel Untersuchung Und Forschung*, **201**, 322-326. <https://doi.org/10.1007/BF01192725>
- [9] Gómez, J., Solar, D.R., Pazos, M., *et al.* (2006) Applicability of *Corioloopsis Rigida* for Biodegradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. *Biotechnology Letters*, **28**, 1013-1017. <https://doi.org/10.1007/s10529-006-9039-1>
- [10] Gao, X.S., Xia, J., *et al.* (2002) Behaviors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the Soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **13**, 501-504.
- [11] 杨代凤, 刘腾飞, 谢修庆, 等. 我国农业土壤中持久性有机氯类农药污染现状分析[J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(4): 40-43.