

农用肥料中有机污染物的初步检测

莫测辉¹, 李云辉², 蔡全英³, 曾巧云³, 王伯光¹, 李海芹³

(1. 暨南大学环境工程系, 广州 510632; 2. 广州市环境保护科学研究所, 广州 510620; 3. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642)

摘要:利用 GC/MS 技术对 21 种农用肥料中 8 类 43 种 US EPA 优控有机污染物进行了系统分析. 结果表明, 大部分肥料检出 3 类 5 种以上有机污染物, 主要是邻苯二甲酸酯、硝基苯、氯代烯和多环芳烃; 有 26 种有机污染物至少在 1 种肥料中被检出, 其中有 5 种污染物, 尤其是邻苯二甲酸酯在大部分甚至全部肥料中被检出, 最高达 9 764.57 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 强致癌性化合物苯并(a)芘在 2 种肥料中被检出. 包膜肥料、多功能复合肥料中有机污染物的含量明显较高, 表明在肥料生产中应注意原料的有机污染问题.

关键词: 农用肥料; 有机污染物; 土壤污染; 食品安全

中图分类号: X592 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)03-0198-05

Preliminary Determination of Organic Pollutants in Agricultural Fertilizers

MO Ce-hui¹, LI Yun-hui², CAI Quan-ying³, ZENG Qiao-yun³, WANG Bo-guang¹, LI Hai-qin³

(1. Department of Environmental Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Guangzhou Institute of Environmental Protection Science, Guangzhou 510620, China; 3. College of Resource & Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Organic pollutants such as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in agricultural fertilizers are new problem deserved more study. Eight kinds of organic pollutants including 43 compounds classified as US EPA priority pollutants in twenty one agricultural fertilizers which were universally used in China were determined by Gas chromatography-mass spectrum (GC-MS). Three kinds of organic pollutants including more than 5 compounds were detected in most fertilizers, composing mainly of phthalic acid esters (PAEs), nitrobenzenes (NBs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). There were 26 compounds detected in at least one fertilizer, five of them especially PAEs detected in most fertilizer and even in all fertilizers. Benzo(a)pyrene, a strongly carcinogenic compound was detected in two fertilizers. Higher concentrations of compounds were determined in those fertilizers such as multi-function compound fertilizers and coated fertilizers.

Key words: agricultural fertilizers; organic pollutants; soil pollution; food safety

农产品安全是全球关心的热点问题, 它依赖于安全优质的生产资料如农用肥料等. 关于农用肥料的重金属污染问题早已被人们关注并进行了较多的研究^[1,2], 但对于有机污染物如多环芳烃(PAHs)等却一直被人们忽视, 鲜见报道^[3,4]. 农业系统中的有机污染物研究是当前环境科学的国际前沿和热点课题, 有些国家甚至开展了一定程度的面上调查或有了控制标准^[5~7]. 相比之下我国在这方面的研究还十分薄弱, 势必对农产品的出口和人体的健康产生不利影响. 初步研究显示, 我国农业土壤和农作物的有机污染问题也不容忽视, 且与肥料(包括化肥)的施用有关^[8~10]. 由此笔者提出农用肥料的有机污染物问题, 并利用 GC/MS 技术首次对我国农用肥料中 8 类 43 种 US EPA 优控有机污染物进行系统分析.

1 材料与方法

1.1 测试肥料品种

分析了农业生产中常用的 21 种肥料, 包括进口肥料和国内各地生产的肥料, 主要是氮肥、磷肥、钾肥及其复合肥, 个别为有机无机复合肥或有机肥(表 1).

1.2 分析方法

(1) 样品提取 准确称取各肥料样品 20g, 用 100 mL 丙酮/二氯甲烷(1:1, 体积比)进行脱硫索氏抽提 24h. 提取液用无水硫酸钠脱水后, 在旋转蒸发器上以 50r/min 转速浓缩至约 1 mL, 再过无水硫酸钠-三氧化二铝-硅胶柱净化分离, 用二氯甲烷洗脱, 洗脱液经浓缩后, 转移到细胞瓶, 稀释吹干, 用二氯甲烷定容.

(2) 标准样品 标准物质包括苊-d₁₀标准溶液、

收稿日期: 2004-01-28; 修订日期: 2004-11-10

基金项目: 教育部科技研究重点项目(地方 02112); 广东省自然科学基金项目(021011, 036716); 广东省科技攻关项目(01C21202, 03A20504, 03C34505); 广东省环保科技研究开发项目(粤环 01-20); 广东省教育厅基金项目(Z02004)

作者简介: 莫测辉(1965~), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境有机污染与生物修复研究. E-mail: tchmo@jnu.edu.cn

表 1 分析的肥料品种及其基本特征/ %
Table 1 Fertilizers analyzed and their basic features/ %

肥料名称	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	备注
硫酸铵	21			
氯化铵	25.4			
尿素 1	46			
尿素 2	46.3			
包膜尿素 PRM	25.5			
硫磷酸铵	16	20		SO ₄ ²⁻ :20 %
磷铵				P ₂ O ₅ + N ≥60 %
磷酸二铵	18			
过磷酸钙		12		
氯化钾 1				K ₂ O ≥57 % H ₂ O ≤6 %
氯化钾 2	21			
芭田蓝复肥	15	6	8	
蓝宝复肥	15	15	15	
肥宝宝	17		8	Ca/ Mg/ S :20 %
复合肥料	15	15	15	
哈乐 3.15 复肥	15		15	
芭田金复肥	17	5	15	
包膜复肥(Os mocote)	14	13	13	
Luxecote				N + P ₂ O ₅ + K ₂ O :36 %
硫酸镁				MgSO ₄ ≥70 %
有机康宝肥	10	2.5	6	Ca/ Mg/ Zn/ Fe/ Cl/ Mn/ Cu/ S/ Mo/ B/ 12 %有机质/ 杀虫剂/ 改土剂

苯胺-*d*₅ 标准溶液和中-碱性化合物混合标准溶液, 前两者分别作内标化合物和加标空白用, 后者包括多环芳烃(PAHs)、邻苯二甲酸酯(PAEs)、醚类、氯代苯类、硝基苯类、胺类、氯代烷类和氯代烯类共 8 类 43 种属于 US EPA“优控污染物”或我国“黑名单”的化合物. 以上标准物质购自美国 ULTRA Scientific, Inc., North Kingstown; RI.

(3) GC/ MS 分析条件 GC/ MS 分析方法参考 US EPA 8270C 方法^[11]. 气相色谱仪为 HP 5890 II; 质谱检测器为 HP 5972A. 色谱柱: HP-1 25 m × 0.22 mm × 0.11 μm; 载气为高纯氦气; 初始压力 35 kPa, 载气流速 0.615 mL · min⁻¹, 最终压力 245 kPa; 采用不分流进样, 进样体积为 1 μL. 升温程序: 初始温度 45 ℃ → 200 ℃ (6.0 ℃/ min) → 300 ℃ (8.0 ℃/ min), 进样口温度: 250 ℃, 检测器温度: 280 ℃; 溶剂延迟时间: 3.00 min; 运行时间: 39.33 min. 质谱仪所用离子源为电子轰击源(EI); 电子倍增器的电压: 1800 eV, 扫描质量范围: 50 ~ 550 u. 数据采集与处理系统为 GC-MSD(5972A HP) 化学工作站. 根据质谱特征离子及相对保留时间进行样品定性, 并与仪器所附质谱库(Pripol. L, Nbs75k. L) 的标样质谱图进行比较, 其吻合度达 80 %, 使用标准曲线和内标法定量. 在空白中未检出目标化合物, 表明整个实验流程对目标化合物无人

为污染. 加标(苊-*d*₁₀) 回收率为 76.25 % ~ 83.84 %.

2 结果与分析

2.1 农用肥料中各类有机污染物的总含量

对肥料中各类有机污染物的含量进行统计表明(表 2), 21 种肥料中分别检出 1 类至 6 类有机污染物. 其中有 7 种肥料(包膜尿素、硫酸铵、磷酸二铵、复合肥、芭田金复肥、有机康宝肥和纯有机肥) 检出 5 类以上有机污染物, 只有 4 种肥料(氯化钾 1、氯化钾 2、芭田蓝复肥和 Luxecote) 仅检出 1 或 2 类有机污染物. 包膜尿素比尿素检出的有机污染物种类多, 含量也较高(氯代烯类除外). 被检出的有机污染物种类主要是邻苯二甲酸酯、硝基苯类、氯代烯类和多环芳烃, 分别在 21、15、13 和 10 种肥料中被检出, 而且其含量也相对较高, 如邻苯二甲酸酯在 8 种肥料中其含量约在 200 μg/ kg 以上, 最高含量近 3 000 μg/ kg. 氯代苯类在所有肥料中均未检出, 氯代烷类仅在 1 种肥料(氯化铵) 中被检出, 含量也较低(2.35 μg/ kg).

不同肥料中各类有机污染物的含量差别很大. 有机康宝肥中不仅检出的有机污染物种类最多, 其含量也最高, 如硝基苯类、邻苯二甲酸酯和氯代烯类的含量分别高达 9 764.57 μg/ kg、2 794.80 μg/ kg 和 897.10 μg/ kg, 醚类、胺类和多环芳烃的含量也在

138.02 ~ 241.53 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 之间.包膜复肥中的氯代烯类(438.25 $\mu\text{g}/\text{kg}$)和硝基苯类(246.52 $\mu\text{g}/\text{kg}$)以及包膜尿素中的胺类(18.23 $\mu\text{g}/\text{kg}$)和邻苯二甲酸酯(216.21 $\mu\text{g}/\text{kg}$)的含量也相对较高.总体而言,肥料

中各类有机污染物的检出频率及总含量高低次序为:邻苯二甲酸酯>硝基苯类>氯代烯类>醚类>胺类>多环芳烃>氯代烷类.

2.2 农用肥料中各种有机污染物的含量

表 2 农用肥料中各类有机污染物的总含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Total concentrations of varied kinds of organic pollutants in agricultural fertilizers/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

肥料名称	醚类	氯代苯类	氯代烷类	氯代烯类	胺类	硝基苯类	PAEs	PAHs
尿素 1	ND	ND	ND	3.86	0.77	32.01	29.70	ND
尿素 2	ND	ND	ND	11.74	ND	9.32	45.91	ND
包膜尿素	5.54	ND	ND	8.79	18.23	63.83	216.21	5.54
氯化铵	ND	ND	2.35	58.01	ND	13.33	38.81	ND
硫酸铵	2.31	ND	ND	8.87	5.78	66.34	457.05	8.10
过磷酸钙	ND	ND	ND	189.68	ND	5.10	20.95	ND
磷铵	0.44	ND	ND	ND	ND	8.75	42.90	ND
磷酸二铵	5.92	ND	ND	ND	31.02	0	311.59	3.14
硫磷酸铵	ND	ND	ND	ND	0	0	710.67	ND
氯化钾 1	52.10	ND	ND	ND	ND	ND	237.36	ND
氯化钾 2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	7.97	ND
复合肥	ND	ND	ND	5.22	8.16	24.15	46.02	10.77
包膜复肥	ND	ND	ND	438.24	ND	246.51	191.73	ND
蓝宝复肥	ND	ND	ND	107.68	ND	3.52	1.17	7.34
巴田金复肥	ND	ND	ND	4.34	0.29	9.55	61.96	79.04
芭田蓝复肥	ND	ND	ND	ND	ND	ND	8.50	ND
哈乐 3.15	3.53	ND	ND	ND	ND	14.94	54.05	0.27
肥宝宝	ND	ND	ND	7.09	ND	ND	49.94	3.12
Luxecote	ND	ND	ND	ND	ND	3.56	196.10	ND
有机康宝肥	241.53	ND	ND	897.10	207.02	9764.57	2794.80	138.02
纯有机肥	6.24	ND	ND	8.32	ND	7.49	2.50	0.83

在 21 种肥料中分别检出 2 ~ 15 种有机污染物(表 3),绝大部分肥料检出 5 种以上有机污染物,其中包膜尿素、磷铵、复合肥、蓝宝复肥和芭田金复肥检出 10 种以上有机污染物,主要属于多环芳烃类和邻苯二甲酸酯类化合物.约一半的肥料中检出 1 种以上多环芳烃类化合物,其中包膜尿素、蓝宝复肥、芭田金复肥和肥宝宝中检出 5 ~ 8 种多环芳烃类化合物,主要是 3 个和 4 个苯环的化合物.几乎所有的肥料中检出 3 种以上的邻苯二甲酸酯类化合物.不同肥料中检出的有机污染物其含量相差很大.有机康宝肥中检出的有机污染物如六氯环戊二烯、联苯胺、双(2-氯异丙基)醚、2,6-二硝基甲苯、邻苯二甲酸正二丁酯、邻苯二甲酸双(2-乙基己基)酯和萤蒎等其含量都最高,且远高于其它肥料中的含量,如 2,6-二硝基甲苯达 9 764.57 $\mu\text{g}/\text{kg}$,邻苯二甲酸正二丁酯达 1 966.72 $\mu\text{g}/\text{kg}$,六氯环戊二烯和邻苯二甲酸双(2-乙基己基)酯均在 800 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 左右.另外,包膜尿素、包膜复肥、硫酸铵、复合肥和芭田金复肥等肥料中多种有机污染物的含量也相对较高,如包膜复

肥中六氯环戊二烯和 2,6-二硝基甲苯的含量分别高达 438.25 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 246.51 $\mu\text{g}/\text{kg}$.

在 43 种有机污染物中有 26 种化合物至少在 1 种肥料中被检出,其中邻苯二甲酸二甲酯、邻苯二甲酸正二丁酯和邻苯二甲酸双(2-乙基己基)酯几乎在全部肥料中被检出,六氯环戊二烯和 2,6-二硝基甲苯在大部分肥料中被检出.强致癌性化合物苯并(a)芘在 2 种肥料中被检出,含量分别为 2.05 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 5.22 $\mu\text{g}/\text{kg}$.氯代苯类化合物等 17 种有机污染物(1,2-二氯苯、1,3-二氯苯、1,4-二氯苯、1,2,4-二氯苯、双(2-氯乙基)醚、4-氯苯基苄基醚、4-溴苯基苄基醚、六氯乙烷、N-亚硝基二正丙胺、硝基苯、异佛尔酮、萘、2-氯萘、茚并(1,2,3-cd)芘、二苯并[a,h]蒎、苯并[ghi]芘)在全部肥料中均未检出.不同有机污染物之间含量差别也很大.含量较高的主要是双(2-氯异丙基)醚、六氯环戊二烯、联苯胺、2,6-二硝基甲苯、邻苯二甲酸正二丁酯和邻苯二甲酸双(2-乙基己基)酯,其含量高达数百 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 以上.其它化合物的含量相对较低,在 100 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 以下,尤其多环芳烃化合物

表 3 农用肥料中各种有机污染物的含量¹⁾/μg•kg⁻¹

Table 3 Concentrations of individual organic pollutants in agricultural fertilizers/μg•kg⁻¹

污染物名称	尿素 ¹	尿素 ²	包膜尿素	氯化铵	硫酸铵	过磷酸钙	磷铵	磷酸二铵	硫磷酸铵	氯化钾 ¹	氯化钾 ²
双(2-氯异丙基)醚	ND	ND	5.54	ND	2.31	ND	0.44	5.92	ND	52.10	ND
双(2-氯乙氧基)甲烷	ND	ND	ND	2.35	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
六氯丁二烯	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
六氯环戊二烯	3.86	11.74	8.79	58.01	8.87	189.68	ND	ND	ND	ND	ND
联苯胺	0.77	ND	18.23	ND	5.78	ND	ND	31.02	0	ND	ND
2,4-二硝基甲苯	ND	ND	10.42	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
2,6-二硝基甲苯	32.01	9.32	52.42	13.33	66.34	5.10	8.75	0	0	ND	ND
叠氮苯	ND	ND	0.98	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
邻苯二甲酸二甲酯	5.01	8.28	0.98	15.68	5.78	3.96	5.25	ND	92.70	86.84	4.48
邻苯二甲酸二乙酯	ND	ND	0.65	ND	1.16	ND	ND	ND	ND	ND	ND
邻苯二甲酸正二丁酯	18.13	29.68	94.10	17.25	303.93	12.46	21.89	175.66	617.98	52.10	1.74
邻苯二甲酸丁基苄基酯	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
邻苯二甲酸正二辛酯	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.25
邻苯二甲酸双(2-乙基己基)酯	6.56	7.94	120.48	5.88	146.18	4.53	15.76	135.93	ND	98.42	1.49
萘	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
二氢萘	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
芴	ND	ND	1.95	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
菲	ND	ND	1.30	ND	2.31	ND	ND	1.04	ND	ND	ND
蒽	ND	ND	1.30	ND	2.70	ND	ND	1.04	ND	ND	ND
荧蒽	ND	ND	0.32	ND	1.54	ND	ND	0.70	ND	ND	ND
芘	ND	ND	0.65	ND	1.54	ND	ND	0.35	ND	ND	ND
苯并[a]蒽	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
苯	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
苯并[b]荧蒽	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
苯并[k]荧蒽	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
苯并[a]芘	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

污染物名称	复合肥	包膜复合肥	蓝宝复合肥	芭田金复合肥	芭田蓝复合肥	哈乐 3.15	肥宝宝	Luxecote	有机康宝肥	纯有机肥
双(2-氯异丙基)醚	ND	ND	ND	ND	ND	3.53	ND	ND	241.53	6.24
双(2-氯乙氧基)甲烷	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
六氯丁二烯	ND	ND	ND	0.87	ND	ND	ND	ND	ND	ND
六氯环戊二烯	5.22	438.24	107.68	3.47	ND	ND	7.09	ND	897.10	8.32
联苯胺	8.16	ND	ND	0.29	ND	ND	ND	ND	207.02	ND
2,4-二硝基甲苯	ND	ND	3.52	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
2,6-二硝基甲苯	23.83	246.51	ND	9.55	ND	14.94	ND	3.56	9764.57	7.49
叠氮苯	0.35	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
邻苯二甲酸二甲酯	3.59	82.17	ND	3.47	1.10	11.68	ND	4.57	ND	1.25
邻苯二甲酸二乙酯	0.33	ND	0.29	ND	ND	ND	0.28	ND	ND	ND
邻苯二甲酸正二丁酯	21.54	27.39	0.59	24.61	3.29	28.25	24.97	68.58	1966.72	0.42
邻苯二甲酸丁基苄基酯	0.65	ND	ND	1.45	1.64	ND	ND	ND	34.50	ND
邻苯二甲酸正二辛酯	1.30	ND	0.29	3.47	ND	ND	ND	ND	ND	ND
邻苯二甲酸双(2-乙基己基)酯	18.60	82.17	ND	28.95	2.47	14.12	24.68	122.95	793.59	0.83
萘	ND	ND	ND	ND	ND	0.27	ND	ND	ND	ND
二氢萘	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.57	ND	ND	ND
芴	0.98	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
菲	ND	ND	0.29	ND	ND	ND	0.57	ND	ND	ND
蒽	ND	ND	0.29	ND	ND	ND	0.85	ND	ND	ND
萤蒽	ND	ND	0.29	3.76	ND	ND	0.57	ND	69.01	0.42
芘	ND	ND	0.29	1.74	ND	ND	0.57	ND	ND	0.42
苯并[a]蒽	ND	ND	1.17	35.61	ND	ND	ND	ND	ND	ND
苯	ND	ND	2.05	33.88	ND	ND	ND	ND	69.01	ND
苯并[b]荧蒽	2.28	ND	0.88	2.03	ND	ND	ND	ND	ND	ND
苯并[k]荧蒽	2.28	ND	ND	2.03	ND	ND	ND	ND	ND	ND
苯并[a]芘	5.22	ND	2.05	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

1) ND表示未检出,检出限:0.02μg/kg;“0”表示检出该化合物但定量结果为0.

多在 $5\mu\text{g}/\text{kg}$ 以下。

3 讨论

关于农用城市污泥的有机污染物问题国外已进行了不少研究,笔者也做了一些工作^[8~10,12],但关于农用肥料尤其是化肥的有机污染物问题至今尚未引起人们注意。近年来笔者在研究农用城市污泥的有机污染物问题时发现,施用化肥可能导致土壤和作物中某些有机污染物的累积^[8~10]。上述分析结果直接表明,农用肥料中的有机污染物问题不容忽视。肥料中的有机污染物可能是其生产过程中产生的副产品,或原料本身带入,也可能是在包装和贮运过程中受到污染。比如化肥包装内层普遍使用的薄膜中含有 PAEs,而 PAHs 是有机质不完全燃烧的产物,如垃圾焚烧、森林火灾等均产生大量的 PAHs。因此,在有机肥、有机无机复肥、包膜肥(控释肥)和各种功能性肥料的生产中尤其要注意有机质、包膜、添加剂和填充剂等原材料的有机污染物问题。如本文中包膜肥和复肥中有机污染物的种类和含量均有所提高,特别是有机康宝肥中含有机质 12%,并含有杀虫剂和改土剂,该肥料中各种有机污染物的含量都较高。包膜尿素与尿素相比被检出的有机污染物的种类更多,含量也明显提高。

农用肥料(化肥)中有机污染物的含量与农用城市污泥中的含量相比尽管可能较低,但其生物可利用性或生物有效性却相对较高,因而更容易被作物吸收而达到较高的含量,也可能残留在土壤中不断累积;与空白对照相比,施用化肥确实导致作物和土壤中各种有机污染物不同程度的污染^[9,10]。

4 结论

所分析的农用肥料中普遍检出各种有机污染物,主要是邻苯二甲酸酯、硝基苯、氯代烯和多环芳烃。其中包膜肥料、多功能复合肥料中有机污染物的

含量明显较高。因此,需要进一步加强农用肥料中有机污染物的研究尤其是它们在土壤-作物系统中的环境行为与归宿及其调控机制研究。

参考文献:

- [1] 鲁如坤,等.土壤-植物营养学原理和施肥[M].北京:化学工业出版社,1998.
- [2] 李国学,张福锁.固体废物堆肥化与有机复混肥生产[M].北京:化学工业出版社,2000.
- [3] Berset JD, Holzer R. Organic micropollutants in Swiss agriculture: distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and polychlorinated biphenyls (PCB) in soil, liquid manure, sewage sludge and compost samples: a comparative study[J]. International Journal of Environ. Anal. Chem., 1995, **59**: 145 ~ 165.
- [4] Grossi G, Lichtig J, Krauß. PCDD/F, PCB and PAH content of Brazilian compost[J]. Chemosphere, 1998, **37**(9 ~ 12): 2153 ~ 2160.
- [5] Manz M, Wenzel KD, Dietze U, *et al.* Persistent organic pollutants in agricultural soils of central Germany[J]. Sci. Total. Environ., 2001, **277**: 187 ~ 198.
- [6] Kipopoulou AM, Manoli E, Samara C. Bioconcentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetables grown in an industrial area[J]. Environ. Pollut., 1999, **106**: 369 ~ 380.
- [7] Vos DRH, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in Dutch total diet samples (1984 ~ 1986) [J]. FD Chem. Toxic., 1990, **28**(4): 263 ~ 268.
- [8] 蔡全英,莫测辉,吴启堂,等.水稻土施用城市污泥盆栽通菜土壤中多环芳烃的残留[J].土壤学报,2002, **39**(6): 201 ~ 205.
- [9] 蔡全英,莫测辉,朱夕珍,等.城市污泥对通菜植株-水稻土中有机污染物的累积效应[J].中国环境科学,2003, **23**(2): 321 ~ 326.
- [10] 蔡全英,莫测辉,王伯光,等.城市污泥和化肥对水稻土种植的通菜中多环芳烃(PAHs)的影响[J].生态学报,2002, **22**(7): 1091 ~ 1097.
- [11] 中国环境监测总站,中国科学院生态环境研究中心,北京市环境监测中心译.固体废弃物试验分析评价手册[M].北京:中国环境科学出版社,1992.156 ~ 332.
- [12] 莫测辉,蔡全英,吴启堂,等.城市污泥及其堆肥施用对通菜中有机污染物的累积效应[J].环境科学,2002, **23**(5): 52 ~ 56.