

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

蔡全英¹, 莫测辉^{1*}, 王伯光², 吴启堂¹, 李桂荣¹, 田 凯²

(1. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 2. 广州市环境保护科学研究所, 广州 510620)

摘要: 在水稻土上施用城市污泥和化肥盆栽通菜, 应用 GC/MS 联机检测技术对通菜中 17 种多环芳烃化合物进行了分析。结果表明, 各处理通菜中的 $\sum$ PAHs 含量在 0.414~5.404mg/kg 之间, 依次是佛山污泥+化肥>广州污泥+化肥>化肥>广州污泥>佛山污泥>空白; 致癌性 PAHs 化合物的总含量 ($\sum$ PAHs_{carc}) 在 0.068~0.944mg/kg 之间。绝大部分化合物在通菜中的含量大于在根系中的含量。与空白对照相比, 施用城市污泥和化肥均使通菜中的 $\sum$ PAHs 含量明显提高。各处理通菜中的 PAHs 都只是以一种或几种化合物为主, 主要是 3、4 个苯环的化合物, 显示不同的分布特征。

关键词: 城市污泥; 水稻土; 通菜; 多环芳烃

Effect of Municipal Sludges and Chemical Fertilizer on the Occurrence of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in *Ipomoea aquatic* Grown in Paddy Soil

CAI Quan-Ying¹, MO Ce-Hui^{1*}, WANG Bo-Guang², WU Qi-Tang¹, LI Gui-Rong¹, TIAN Kai²
(1. College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Guangzhou Institute of Environmental Science and Protection, Guangzhou 510620, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(7): 1091~1097.

Abstract: Seventeen compounds of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in *Ipomoea aquatic* potted in paddy soil fertilized with municipal sludges and chemical fertilizer in greenhouse were determined by GC/MS. The results showed that the total contents of PAHs ($\sum$ PAHs) in *Ipomoea aquatic* (aboveground) grown in varied treatments ranged from 0.414mg/kg to 5.404mg/kg, decreased in the order of Foshan sludge + fertilizer (5.404mg/kg) > Guangzhou sludge + fertilizer (2.291mg/kg) > fertilizer (1.961mg/kg) > Guangzhou sludge (1.339mg/kg) > Foshan sludge (0.747mg/kg) > control (0.414mg/kg), and the contents of carcinogenic PAHs compounds ($\sum$ PAHs_{carc}) were between 0.068 mg/kg and 0.944 mg/kg, decreased in the order of Guangzhou sludge + fertilizer (0.944mg/kg) > fertilizer (0.372mg/kg) > Foshan sludge + fertilizer (0.338mg/kg) > Foshan sludge (0.311mg/kg) > Guangzhou sludge (0.224mg/kg) > control (0.68mg/kg). Bioconcentration of PAHs in *Ipomoea aquatic* fertilized with sludges and fertilizer increased to a different extent compared with control, nearly one times to six times higher for $\sum$ PAHs, and three times to six times higher for $\sum$ PAHs_{carc}. The contents of $\sum$ PAHs, $\sum$ PAHs_{carc}, and most PAHs compounds in roots were all lower than those of which in plant (aboveground). Contents of

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(39870435); 广东省自然科学基金资助项目(970011); 广东省环保局科技研究开发基金资助项目(粤环 1997-16, 粤环 2001-20); 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室研究基金资助项目; 广东省科技计划资助项目(C21202); 教育部科技研究重点资助项目

收稿日期: 2001-09-01; **修订日期:** 2002-02-21

作者简介: 蔡全英, 女, 广西荔浦人, 博士研究生。主要研究方向为污染生态学、环境化学。

*** 通讯作者** Author for correspondence, E-mail: cehuimo@yahoo.com

different PAHs compounds in each treatment of *Ipomoea aquatic* varied significantly, only one or several of PAHs compounds usually belonging to 3-benzene ring or 4-benzene ring compounds such as phenanthrene, fluoranthrene, anthracene, benz(a)anthracene were predominant, while those compounds belonging to 2-benzene ring, 5-benzene ring, and 6-benzene ring were usually minor or even under detection limit, which displayed different distribution patterns of PAHs compounds.

Key words: municipal sludge; paddy soil; *Ipomoea aquatic*; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)
文章编号:1000-0933(2002)07-1091-07 中图分类号:X13 文献标识码:A

多环芳烃(PAHs)是由 2 个或 2 个以上苯环以不同方式聚合而成的一组有机化合物。化石燃料、固体废物等的不完全燃烧是 PAHs 的主要人类活动来源。PAHs 在环境中稳定、持久,通常具有生物累积效应和放大效应,可进入食物链而危及人体的健康安全。许多 PAHs 化合物属于 US EPA 的“优控污染物”,有的还具有“三致”(致癌、致畸、致突变)作用。PAHs 在环境中无处不在,在城市污泥中也普遍检测到^[1~8]。

城市污泥(简称污泥)是城市污水处理厂产生的亟待解决的城市固体废物,它通常含有丰富的氮、磷、钾和有机质,是良好的有机肥料资源,但也含有重金属和 PAHs 等有机污染物,需要妥善处置。农用资源化是城市污泥最有前景的处置方法,有利于城市和农业的可持续发展^[1],许多国家城市污泥的农用率都在 60%。但污泥农用后污染物在农业环境尤其是作物中的归宿问题是必须要解决的课题,对于重金属而言国内外都已进行了较多的研究,但对于有机污染物却较少研究^[6,8~11],在国内仍鲜见报道^[1],尤其是目前人们仍很少注意到化肥中可能存在的有机污染问题。本文在温室条件下以水稻土施用城市污泥和化肥盆栽通菜(*Ipomoea aquatic*),研究施肥对通菜中 PAHs 的影响。

1 材料与方法

1.1 通菜盆栽实验

供试通菜品种为白梗通菜;土壤为水稻土,取自华南农业大学农场稻田;城市污泥为广州污泥(简称广污)和佛山污泥(简称佛污),分别取自广州市大坦沙污水处理厂和佛山市镇安污水净化厂,其基本理化性质见表 1,污泥中 PAHs 化合物的含量特征见另文^[12]。所用化肥为尿素(化学纯)、过磷酸钙(化学纯)和氯化钾(分析纯)。盆栽试验在华南农业大学玻璃网室进行,设 6 个处理:空白对照、化肥对照、佛污、佛污+化肥、广污和广污+化肥,各有 5 个重复,随机排列。每盆用土 5kg,污泥施用量为 10g/kg 土,化肥施用量分别为 0.20g N/kg 土、0.15g P/kg 土和 0.20g K/kg 土。1999 年 4 月播种育苗。盆栽前将土壤与污泥、化肥混合均匀后装盆,用去离子水将土浇到田间持水量,土干后将其倒出粉碎混匀再装盆。从育苗床上移苗定植,每盆种植 3 株,用去离子水浇淋,严禁使用农药。种植 39d 后收割,用不锈钢剪刀从土表面将植株剪断,用去离子水轻轻清洗表面灰尘。为对比通菜不同器官对 PAHs 吸收的差异,对施用广州污泥的通菜的根系进行取样分析。

表 1 供试城市污泥和土壤的基本化学性质
Table 1 The properties of municipal sludges and soil

项目 Items	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	有效氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	EC ₂₅ (mS/cm)	CEC (cmol/kg)	pH 值(水:土 =2.5:1)
广污 ^①	298.49	29.60	13.35	21.43	125.38	1392.64	4712.00	1.9	—	—
佛污 ^②	354.11	24.98	26.82	10.28	123.71	1461.55	6355.17	2.25	—	—
水稻土 ^③	25.72	1.32	0.38	15.60	14.98	44.79	119.38	0.22	9.13	6.15

①Guangzhou sludge ②Foshan sludge ③Paddy soil

1.2 样品提取与分析

1.2.1 样品提取 通菜样品的预处理参考 Wang 的预处理方法^[13]。样品先经二氯甲烷泡洗(1min),然后粉碎、烘干(45~50℃),用乙醚进行索氏抽提 24h,提取液用无水硫酸钠脱水,在旋转蒸发仪上以 50r/min 转速浓缩至无溶剂残留,用无水硫酸钠-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。

合物主要是荧蒽、菲、蒽、苯并(a)蒽和 ,其中前两者含量大于 0.50mg/kg,后三者含量大于 0.10mg/kg。含量大于 0.05mg/kg 的化合物还有 2-氯萘、苯并(k)荧蒽和苯并(a)芘。各化合物的最高含量主要出现在佛污+化肥处理的通菜中,其次是广污+化肥处理,如有 9 种化合物的最高含量均出现在佛污+化肥处理的通菜中,其中荧蒽和菲的含量分别高达 3.442mg/kg 和 1.354mg/kg。总体而言,佛污、广污和化肥处理的通菜中低分子量的 PAHs 化合物(2 个苯环的化合物)低于空白对照,但 3 个或 3 个以上苯环的化合物则不同程度地高于空白对照。佛污处理的通菜中几乎全部化合物的含量都低于化肥处理的通菜,广污处理的通菜中只有少数化合物的含量高于化肥处理的通菜。佛污+化肥处理与佛污处理相比,或广污+化肥处理与广污处理相比,通菜中绝大部分化合物的含量都明显提高。对于强致癌性的化合物苯并(a)芘,在空白对照的通菜中未检出,在其它处理的通菜中含量达 0.078~0.099mg/kg (但在佛污+化肥处理中也未检出),远高于某些地区叶菜中的含量^[14,15]。

表 2 通菜和通菜根系中 PAHs 的含量 (mg/kg 干重)

Table 2 Contents of PAHs in *Ipomoea aquatic* and its roots (mg/kg D. W.)

序号 No.	化合物 Compounds	空白 Control	化肥 Fertilizer	佛污 Foshan sludge	佛污+化肥 Foshans sludge +fertilizer	广污 Guangzhou sludge	广污+化肥 Guanghzou sludge+ fertilizer	根系 ^① Roots
1	萘 Naphthalene (2) ^②	Nd ^③	Nd	Nd	0.006	0.001	0.004	0.015
2	2-氯萘(2) 2-chloronaphthalene	0.016	Nd	Nd	0.097	Nd	0.003	Nd
3	苊 Acenaphthylene (2)	0.012	0.006	Nd	0.025	0.013	0.012	0.005
4	二氢苊 Acenaphtnene (2)	0.005	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	0.014
5	芴 Fluorene (2)	0.005	0.007	Nd	Nd	0.001	0.009	0.008
6	菲 Phenanthrene (3)	0.046	0.568	0.116	1.354	0.055	0.314	0.022
7	蒽 Anthracene (3)	0.012	0.369	0.057	0.135	0.161	0.053	0.002
8	荧蒽 Fluoranthrene (3)	0.251	0.635	0.263	3.442	0.881	0.946	0.027
9	芘 Pyrene (4)	Nd	0.005	Nd	0.008	0.004	0.006	0.010
10	苯并(a)蒽* ^④ (4) Benz(a)anthracene	0.007	0.151	0.121	0.217	0.052	0.334	Nd
11	* Chrysene (4)	0.014	0.077	0.029	0.038	0.054	0.457	Nd
12	苯并(b)荧蒽* (4) Benzo(b)fluoranthene	Nd	0.003	0.003	0.009	0.006	0.004	Nd
13	苯并(k)荧蒽* (4) Benzo(k)fluoranthene	0.024	0.063	0.058	0.072	0.029	0.050	Nd
14	苯并(a)芘* (5) Benz(a)pyrene	Nd	0.078	0.099	Nd	0.079	0.098	0.075
15	茚并(1,2,3-cd)芘* (5) Indeno(1,2,3-cd)pyrene	Nd	Nd	Nd	0.002	Nd	Nd	Nd
16	二苯并(a,h)蒽* (5) Dibenzo(a,h)anthracene	0.023	Nd	0.001	Nd	0.004	0.001	Nd
17	苯并(ghi) * (6) Benzo(ghi)perylene	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
	∑ PAHs ^⑤	0.414	1.961	0.747	5.404	1.339	2.291	0.178
	∑ PAHs _{carc} ^⑥	0.068	0.372	0.311	0.338	0.224	0.944	0.075
	∑ (PAHs) _{≤3} / ∑ (PAHs) _{≥4} ^⑦	5.10	4.20	1.40	14.62	4.88	1.41	1.24

① 根系:广污处理的通菜根系; ② 括号中的数字为化合物的苯环数; ③ Nd: 未检出,检出限为 0.007μg/kg; ④ 带* 号的为致癌性化合物; ⑤ ∑ PAHs: 17 种化合物含量之和; ⑥ ∑ PAHs_{carc}:带* 号的致癌化合物含量之和; ⑦ ∑ (PAHs)_{≤3}/ ∑ (PAHs)_{≥4}: ≤3 个苯环的化合物含量与 ≥4 个苯环的化合物含量之比值

2.3 通菜中多环芳烃化合物的分布特征

各处理通菜中 PAHs 化合物的含量都是以一种或几种化合物为主,其余化合物的含量都较低或未检出(表 2 和图 1)。广污处理和空白对照的通菜中主要是荧蒽,各自占了 $\sum$ PAHs 的 66%和 61%;佛污+化肥处理的通菜中主要是荧蒽和菲,分别占了 $\sum$ PAHs 的 64%和 25%;化肥处理的通菜中主要是荧蒽、菲和蒽,分别占了 $\sum$ PAHs 的 32%、29%和 19%;佛污处理的通菜中主要是荧蒽、苯并(a)蒽和菲,分别占了 $\sum$ PAHs 的 35%、16%和 15%;广污+化肥处理的通菜中主要是荧蒽、屈、苯并(a)蒽和菲,分别占了 $\sum$ PAHs 的 41%、20%、15%和 14%。显然,不同处理的通菜中占优势的个别或少数几个化合物的种类是不同的,从而显示出不同的 PAHs 分布模式(图 1)。其共同特征是荧蒽在各处理的分布模式中均呈峰态。总体上,广污处理和空白对照呈单峰式分布,峰值位于荧蒽;佛污+化肥处理呈双峰式分布,峰值位于荧蒽和菲;而化肥、佛污和广污+化肥处理都呈多峰式分布,但其峰值位置略有不同。就 PAHs 化合物的分子结构而言,广污、佛污+化肥、化肥处理和空白对照的通菜中都是以 3 个苯环的化合物为主,占 $\sum$ PAHs 的 70%以上;广污+化肥处理的通菜中以 3 个和 4 个苯环的化合物为主,占 $\sum$ PAHs 的 90%以上;佛污处理的通菜中以 3 个、4 个和 5 个苯环的化合物为主。总体上看,各处理通菜中都是以 3 个或以 3 个和 4 个苯环的化合物为主,而 2 个、5 个和 6 个苯环化合物的含量都较低或未检出。因此,各处理的分布模式都大体上显示了正态分布的特征。

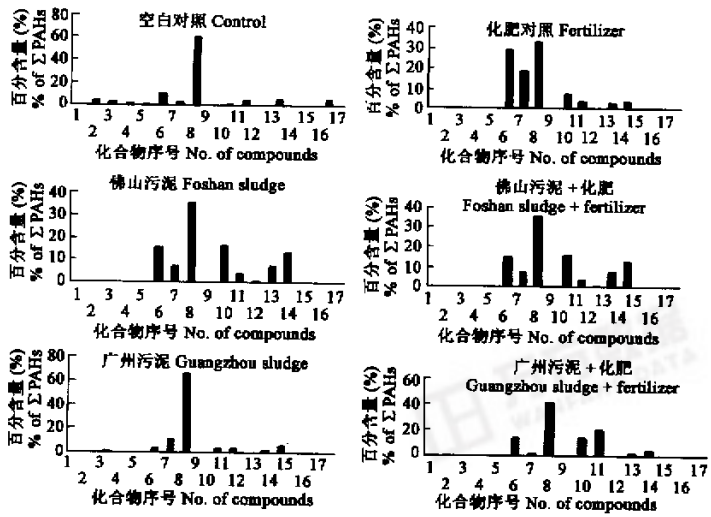


图 1 各处理通菜中 PAHs 的分布特征

Fig. 1 Distribution patterns of PAHs in *Ipomoea aquatic* of different treatment

从低分子量化合物(≤ 3 个苯环)与高分子量化合物(≥ 4 个苯环)之比值($\sum$ (PAHs) $_{\leq 3}$ / $\sum$ (PAHs) $_{\geq 4}$)来看(表 2),佛污和广污+化肥处理的通菜中比值均为 1.4,说明通菜中高分子量化合物和低分子量化合物的含量大体相当;而空白对照、化肥、广污和佛污+化肥处理的通菜中比值较大(4.2~14.6),表明通菜中以低分子量的化合物为主。

2.4 通菜根系中多环芳烃化合物的含量及其分布特征

广污处理的通菜根系中 $\sum$ PAHs 的含量为 0.178mg/kg, $\sum$ PAHs_{carc} 为 0.075mg/kg,两者都远低于通菜中相对应的含量。换句话说,广污处理通菜中 $\sum$ PAHs 和 $\sum$ PAHs_{carc} 的含量分别是其根系含量的 7.5 倍和 3 倍。数据最高含量的化合物为 0.075mg/kg,占 $\sum$ PAHs 的 42%,其它化合物的含量都低于 0.030mg/kg 或未检出。根系中仅检测到 9 种化合物,而通菜中检测到 13 种化合物。2-氯萘、苊并(1,2,3-

cd) 芘和苯并(ghi) 在根系和通菜中均未检测到。二氢苊在根系中检测到,但在通菜中未检测到。根系中萘、芴的含量高于在通菜中的含量,苯并(a)芘的含量与在通菜中的含量基本相同,其它化合物的含量都远低于在通菜中的含量。除了苯并(a)芘外,根系中主要是 2 个和 3 个苯环的化合物,而通菜中则主要是 3 个和 4 个苯环的化合物。

3 讨 论

土壤溶液中 PAHs 化合物可以穿过根皮层而进入木质部,通过根毛细胞的作用累积于植物茎,或通过运输作用达到叶部并累积^[16,17]。根际富集的 PAHs 更易转移到根内^[18]。植物对 PAHs 的吸收与 PAHs 化合物的理化性质、植物种类、土壤性质、耕作措施(如施用方式)、环境条件等因素有关。低分子量的 PAHs 化合物水溶性相对较高,较易被植物吸收,因而植物中常以低分子量的 PAHs 化合物为主^[10]。因此,各处理的通菜中主要是 3 个或 4 个苯环的中、低分子量的化合物,5 个和 6 个苯环的高分子量化合物的含量较低。通菜中 2 个苯环的化合物的含量之所以也较低,可能与它们在污泥中的含量本来就较低(芴除外)有关,广州污泥和佛山污泥中的 PAHs 都是以 2 个和 3 个苯环的化合物为主^[12]。但是,对比 PAHs 化合物在污泥中的含量^[12]和在通菜中的含量(表 2)发现,有些化合物在污泥和通菜中含量的高低并非完全对应。有的化合物在污泥中的含量较高,但在通菜中的含量却较低,而有的化合物在污泥中的含量较低,在通菜中的含量却较高。也就是说不同化合物的生物有效性不同,这难以简单地用它们的水溶性大小来解释,可能还与其挥发性大小、辛醇/水之间的分配系数(K_{ow})以及植物的吸收转移特性(如植物中化合物的转移情况)等因素有关。若简单地从化合物在污泥和通菜中的含量高低对比来看^[12](表 2),对于本研究中的通菜来说,芴和芘是相对较难被吸收和累积的化合物,而芘蒽、蒽、菲和苯并(a)芘是相对较易被吸收和累积的化合物。

化肥处理的通菜中 PAHs 的含量明显比空白对照的高,这可能是由于化肥的施用增加了土壤的可交换性离子,活化了土壤的有机质并改变其对 PAHs 的吸附性能,使 PAHs 由吸附态转化为自由态,易于被作物吸收^[19]。另一方面,化肥的施用也可能带入了一定量的 PAHs,这有待以后进一步研究。虽然污泥中含有一定浓度的 PAHs,但广污和佛污处理的通菜中 PAHs 的含量甚至比化肥处理的低,主要原因可能是由于污泥给土壤带入 PAHs 的同时,也带入了丰富的有机质和微生物种群,提高了土壤微生物的活性,使 PAHs 在一定程度上被降解,同时也提高了土壤对 PAHs 的吸附能力,降低了其生物有效性^[20],使其不易被作物吸收。植物吸收疏水性化合物的量与土壤中有机质含量成反比^[21]。

污泥的性质也是影响通菜中 PAHs 含量的重要因素。广州污泥的 $\sum$ PAHs 比佛山污泥的 $\sum$ PAHs 高,广污处理的通菜中 $\sum$ PAHs 的含量也比佛污处理的通菜中 $\sum$ PAHs 的含量高。但是,对于某些化合物来说,情况就不完全是这样。如广州污泥中的含量明显比佛山污泥中的低,但施用前者的通菜中的含量却明显比后者的高;广州污泥中苯并(a)蒽的与佛山污泥中的大体相当,但施用后者的通菜中苯并(a)蒽的含量是前者的 2 倍多。这种情况难以从两种污泥中有机质含量相对高低来解释,需要进一步研究。

目前常用生物浓度系数(BCF)即植物中化合物的浓度与其在土壤中的浓度之比来表示有机污染物在植物中的累积程度。对于多数有机污染物尤其疏水性的化合物来说,这个比值通常小于 1,甚至是千分之几,也就是说它们在植物中的累积程度较低。这可能是至今人们对作物中的有机污染问题仍未引起足够重视的重要原因之一。BCF 作为有机污染物在植物中的累积程度,但它不直接反映植物受污染的程度。从本文的研究结果来看,化肥和污泥处理的通菜中 PAHs 的含量是空白对照的数倍甚至十余倍,表明施肥使通菜受到了 PAHs 的污染。另一方面,空白对照和化肥处理的通菜中都检测到了 11 种 PAHs 化合物,有些化合物的含量甚至比较高。这种情况虽然不排除受广污和佛污处理的土壤中挥发出来的 PAHs 污染的可能,取自农场的水稻土本身可能就存在有机污染问题,同时化肥本身也可能存在有机污染物,这是值得注意和进一步探讨的。尤其是目前所谓的“无公害蔬菜”的研究与生产实践中就忽略了毒性有机物如多环芳烃、邻苯二甲酸酯等的污染问题。

4 结 论

各处理通菜中的 $\sum$ PAHs 含量在 0.414~5.404mg/kg 之间, $\sum$ PAHs_{carc} 含量在 0.068~0.950mg/kg 之间。与空白对照相比,施用城市污泥和化肥均使通菜中的 PAHs 含量明显提高。各处理通菜

中的 PAHs 都只是以一种或几种化合物为主,主要是 3、4 个苯环的化合物,显示不同的分布特征。施肥可能引起农产品和农业环境的有机污染问题有待进一步研究。

参考文献

- [1] Mo C H(莫测辉), Wu Q T(吴启堂), Cai Q Y(蔡全英), *et al.* Utilization of municipal sludge in agriculture and sustainable development. *Chin. J. Appl. Ecol.* (in Chinese)(应用生态学报), 2000, **11**(1):157~160.
- [2] Feliciano D V. Sludge on land—but where are we going? *J. Water Pollut. Cont. Fed.*, 1993, **9**:1259~1266.
- [3] Jacobs L W, O'Connor G A, Overcash M R, *et al.* Effects of trace organics in sewage sludge on soil-plant systems and assessing their risk to humans. In: Page A L, Logan T G, Ryan J A eds. *Land application of sludge*. Lewis Publisher, Chelsea, MI, 1987. 101~143.
- [4] Webber M D, Lesage S. Organic contaminants in Canadian municipal sludges. *Waste Management and Research*, 1989, **7**:63~82.
- [5] Wild S R, McGrath S P, Jones K C. The polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) content of archived sewage sludge. *Chemosphere*, 1990, **20**: 703~716.
- [6] Wild S R and Jones K C. Polycyclic aromatic hydrocarbons uptake by carrots grown in sludge-amended soil. *J. Environ. Qual.*, 1992, **21**:217~225.
- [7] Frost P, Camenzind R, Magert A, *et al.* Organic micropollutants in Swiss swage sludge. *J. Chromatogr.*, 1993, **643**:379~388.
- [8] Smith S R. *Agricultural recycling of sewage sludge and the environment*. Wallingford: CAB International. 1996. 207~236.
- [9] Wild S R, Berrow M L, Jones K C. The persistence of polynuclear aromatic hydrocarbon (PAHs) in sludge-amended agricultural soils. *Environ. Pollut.*, 1991, **72**:141~157.
- [10] Kipopoulou A M, Manoli E, Samara C. Bioconcentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetables grown in an industrial area. *Environ. Pollut.*, 1999, **106**:369~380.
- [11] Durate-Davidson R, Jones K C. Screening the environmental fate of organic contaminants in sewage sludge applied to agricultural soils; II. The potential for transfers to plants and grazing animals. *Sci. Total Environ.*, 1996, **185**:59~70.
- [12] Mo C H(莫测辉), Cai Q Y(蔡全英), Wu Q T(吴启堂), *et al.* Study on Polynuclear Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Municipal Sludge of China. *Acta Environ. Circumstantiae*(in Chinese)(环境科学学报), 2001, **21**(5): 613~618.
- [13] Wang M J, Jones K C. Occurrence of chlorobenzenes in nine United Kingdom retail vegetables. *J. Agric. Food Chem.*, 1994, **42**: 2322~2328.
- [14] Vos R H, Dokkum W, Schouten A, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in Dutch total diet samples. *Fd Toxic*, 1990, **28**(4):263~268.
- [15] Wang A L(王爱玲), Jin Z N(靳振南), Xie W S(薛文山), *et al.* Investigation on the benzo(a)pyrene pollution of vegetables in suburb of Yuncheng. *Environ. Sci. Series* (in Chinese)(环境科学丛刊), 1991, **12**(2):39~43.
- [16] Paterson S, Machay D, Tam D, *et al.* Uptake of organic chemical by plants; a review of processes, correlations and models. *Chemosphere*, 1990, **21**:297~331.
- [17] Bell P F, James B R, Chaney R L. Heavy metal extractability in long-term sewage sludge and metal salt-amended soils. *J. Environ. Qual.*, 1991, **20**:481~486.
- [18] Xliste H H, Alexander M. Accumulation of phenanthrene and pyrene in rhizosphere soil. *Chemosphere*, 2000, **40**(1):11~14.
- [19] Raber B, Kogel-Knabner I, Stein C, *et al.* Partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons to dissolved organic matter from different soils. *Chemosphere*, 1998, **36**(1):79~97.
- [20] Weissenfels W D, Klewer J H, Langhoff J. Adsorption of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by soil particles: influence on biodegradability and biotoxicity. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1992, **36**(5): 689~696.
- [21] Zhang C(张从), Xie L J(夏立江), *The bioremediation technology for contaminated soil* (in Chinese). Beijing: Environmental Science Press of China, 2000. 155~206.