

江苏省城市污泥中多环芳烃的含量及其主要影响因素分析

张雪英^{1,2}, 周立祥^{1*}, 崔春红¹, 郑翔翔¹

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 南京工业大学环境学院, 南京 210009)

摘要:采用高效液相色谱, 对江苏省 21 家代表性城市污水处理厂污水污泥中多环芳烃含量进行了分析. 结果发现, 污泥中含有 7~16 种 PAH 化合物, 都是以 2(或 3) 个苯环的化合物为主, 而难降解 4~6 个苯环的化合物所占质量分数均较低. 但污水来源及其处理方式、污泥处理方法等均影响着污泥中 PAHs 的含量及组成, 消化可明显降低污泥中 PAHs 的含量. 污泥中 Σ PAHs 总量在 11.68~169.91 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 各污泥间含量差异显著; 具有致癌性的 PAHs 含量在 1.17~41.03 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 6.59 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 被列入中国环境“优先污染物”的 PAHs 含量在 4.07~59.06 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间. 其中蔡是江苏城市污泥中均含有的 PAHs 化合物, 而对于强致癌性化合物苯并(a)芘, 其含量相对较低, 在污泥中含量一般在 0~2.20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均含量为 0.15 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 远低于我国农用污泥控制标准的 3.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

关键词:江苏省; 城市污泥; 多环芳烃; 含量; 污水来源; 污水处理; 污泥消化

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)08-2271-06

Content and Its Major Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Municipal Sewage Sludge of Jiangsu Province

ZHANG Xue-ying^{1,2}, ZHOU Li-xiang¹, CUI Chun-hong¹, ZHENG Xiang-xiang¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agriculture University, Nanjing 210095, China; 2. College of Environment, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: Sewage sludge from 21 representative sewage treatment plants of Jiangsu Province were measured for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using HPLC. Results showed that PAHs were widely distributed in municipal sewage sludges. Total amount of PAHs (Σ PAHs, 16 PAHs in the priority contaminants of US EPA) ranged from 11.68 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ to 169.91 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, depending on sludge origins. Total concentration of carcinogenic PAHs was 1.17 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ to 41.03 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ with an average value of 6.59 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Total amount of PAHs classified as a priority contaminants in the light of regulations of EPA China was from 4.07 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ to 59.06 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. PAH Compounds with two or three benzene rings were dominant among the 7-16 PAHs found in the sludge, while the percentage of compounds containing four to six benzene rings was low. Naphthalin was the main PAHs' compounds in the selected municipal sludge. The concentration of BaP, a strong carcinogenic PAH, was found in sludge with 0-2.20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and the average of 0.15 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, which was much less than 3.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ of the control standard of sludge land application. Furthermore, it was also noted that wastewater types, sewage treatment techniques, and anaerobically sludge digestion had great effects on PAHs contents in sludge.

Key words: Jiangsu Province; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); municipal sewage sludge; content; waste water sources; waste water treatment; sludge digestion

江苏省作为我国经济发达的省份之一, 城市污水处理事业发展十分迅速. 截止 2006 年底全省共有城市污水处理厂 130 余座, 每天产生大量的污泥. 这种吸附了污水中 85% 以上有毒有害物质的污泥本身是一种极其复杂的非均质体, 主要由有机物质残片、细菌菌体、无机颗粒、有机无机胶体等组分^[1], 污水中的有机污染物在污水处理过程中高度富集于沉积物中, 富集系数高达几个数量级, 任何进入环境的有机化合物均可能在污泥中被发现^[2], 而污泥中有机污染物的种类和含量与污水的来源密切相关, 化工、木材加工、电器、农药、印染等行业的工业污水是污泥中有机污染物的重要来源^[3]. 长期以来, 国内外

对于城市污泥中的重金属含量、分布及污泥农用于重金属的环境风险进行了较多的研究^[4-6], 而对于持久难降解有机污染物尤其是多环芳烃(PAHs)类化合物在城市污泥中分布状况研究较少^[7].

为此本研究重点分析了江苏 21 家代表性城市污水处理厂污泥 PAHs 的含量及其影响因素, 以期江苏城市污泥的科学处理处置和资源化利用提供

收稿日期: 2007-08-16; 修订日期: 2007-12-10

基金项目: 江苏省建设厅科技重点项目(JS2004ZB05); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-04-0505)

作者简介: 张雪英(1976~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为固体废物处理处置, E-mail: xueyingzhang@163.com

* 通讯联系人, E-mail: lxzhou@njau.edu.cn

科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试污泥

于 2004 年 11 月 ~ 2005 年 1 月对江苏地区 21 家分布在南京、苏州、无锡、常州、镇江、徐州、扬州、南通、宿迁、盐城、淮安等省辖市城区的污水处理厂和宜兴、张家港、江阴、常熟等县市级城区城市污水

处理厂进行调查采样,了解其污水处理工艺流程、污水进水水质及处理深度,污泥的产生量及其主要处理处置途径等(部分城市污水处理厂污水处理工艺见表 1).并在供调查的每个污水处理厂的污泥脱水机房传送带出口处每隔 15 min 取样 1 次,共收集 4 次约 1.0 kg 左右脱水污泥(含水率在 80%左右).污泥混合后装入塑料袋,即带回实验室,冷冻干燥,磨细过 20 目,贮存备用.

表 1 部分城市污水处理厂污水处理工艺简介
Table 1 Introduction to some selected wastewater treatment plants

污水处理厂	实际规模/万 m ³	处理工艺	工业废水比例/%	进水水质/mg•L ⁻¹		日产污泥/t	污泥含水率/%
				BOD ₅	COD		
苏州(一)	5.9	三槽交替式氧化沟	58.1	162	342	35	75 ~ 78
苏州(二)	5.7	UNITANK	17.7	119	273	17	74.1
张家港	2.0	氧化沟	—	86	157	7.89	79
常熟(一)	4.5	改进型三草市氧化沟	5	145	496	25	85
无锡(一)	20	AAO 除磷脱氮工艺	20	185	393	70	76
无锡(二)	4.9	AAO 奥贝尔氧化沟	20	174	528	49	78
无锡(三)	2.5	MSBR 活性污泥处理	70	139	245	8-10	80
宜兴(一)	1.1	AAO	10	182	411	9	87
常州(一)	12	AAO	18	250	500	130	80
常州(二)	2	SPF	100	400	1 300	40	80
镇江(一)	9	CAST	10	120	230	65	79
徐州(一)	2.2	水解酸化-好氧工艺	20 ~ 30	80	160	0.3	75
淮安(一)	5.0	A-B 法	60	90	234	35	80
盐城(一)	4.1	AAO	20	153	204	45	81
南京(一)	40	A/O	—	55	190	150	75
扬州(一)	6	改良型 SBR	5	130	240	30	78

1.2 供试标样

实验所用的有机试剂均为色谱纯,美国 EPA: 萘, 蒽, 二氢蒽, 芴, 菲, 蒽, 荧蒽, 芘, 一, 苯并(a)蒽, 苯并(b)荧蒽, 苯并(k)荧蒽, 苯并(a)芘, 茚并芘, 二苯并(a, h)蒽, 苯并(ghi)芘, 16 种优控多环芳烃(PAHs)购自美国 Supelco 公司.实验过程中以荧蒽作为加标回收样.

1.3 测定方法

分别称取过 20 目的冷冻干燥城市污泥样品各 1.0 g,于 35 mL 玻璃离心管中,加入 20 mL 丙酮:二氯甲烷(1:1,体积比),盖紧后于超声水浴中超声萃取 2 h,温度控制在 35℃以下.提取后的样品以4 000 r•min⁻¹离心 10 min,取 10 mL 上清液过 1 g 氧化铝、2 g 无水 Na₂SO₄ 和 2 g 硅胶的层析柱净化,依次用正己烷和二氯甲烷洗脱,收集洗脱液,洗脱液收集至旋

转蒸发瓶,于 35℃恒温下浓缩至干^[7],用乙腈定容到 2 mL,过 0.45 μm 孔径滤膜后,HPLC 分析.同时做空白实验和加标(荧蒽)回收实验.在空白实验中没有检出目标化合物,加标荧蒽的回收率在 62.8% ~ 82.1%之间.

采用 Agilent HPLC-1100 测定,紫外检测器 254 nm 检测分析,分析柱为 PAH C₁₈ 4.6 mm × 15 cm,5 μm,流动相为乙腈/水 = 4/6(体积比),流速 1.2 mL•min⁻¹,柱温 27℃,进样量 20 μL.

2 结果与讨论

2.1 城市污泥中的多环芳烃单个化合物含量分析

江苏不同城市,以及相同城市的不同污水处理厂的污泥中检测到的 PAHs 化合物的种类及其含量相差较大(表 2).萘由于在工业上应用广泛,如可作

为制造染料、塑料、合成纤维、杀真菌剂、杀虫剂和油漆等的原料,还可用作木材防腐和家用防蛀,因此可通过多种途径进入污水中而在污泥中沉积.在江苏污泥中均检测到萘,含量在 2.05 ~ 21.04 mg•kg⁻¹,平均占 $\sum$ PAHs 总量的 25.77%,在宜兴某污水处理厂污泥中萘的含量占 $\sum$ PAHs 总量的 47.05%.而常作为染料中间体、以及杀菌剂、杀虫剂的苊在污泥中除苏州和常熟某污水处理厂没有检测到外,其余污泥中均含有,含量在 1.25 ~ 134.7 mg•kg⁻¹,平均占 $\sum$ PAHs 总量的 36.78%,特别是宿迁某污泥中苊的含量高达 134.7 mg•kg⁻¹,占其 $\sum$ PAHs 总量的 79.3%.对于强致癌性化合物苯并(a)芘,其含量相对较低,在污泥中含量一般在 0 ~ 2.20 mg•kg⁻¹,平均含量为 0.152 mg•kg⁻¹,远低于我国农用污泥控制标准的 3.0 mg•kg⁻¹.对于在环境中难以降解的茚并(1,2,3-cd)芘只有在苏州等 7 家污水处理厂的污泥中检测到,占所测污泥样品个数的 32%,但在盐城某处理厂污泥中茚并(1,2,3-cd)芘的含量高达 10.32 mg•kg⁻¹,而其余 6 家污泥样品中茚并(1,2,3-cd)芘的含量均小于 1.0 mg•kg⁻¹.

2.2 城市污泥中的多环芳烃含量分析

2.2.1 城市污泥中 $\sum$ PAHs 的含量

不同城市污泥中 16 种多环芳烃化合物(PAHs)的含量见表 2,不同城市污泥中 $\sum$ PAHs 的含量及组成相差很大.由于 PAHs 的水中溶解度低和亲脂性较强,因此该类化合物易随污泥的沉降而残留在污泥中.

从表 2 中可见,供试污泥中含有 7 ~ 16 种 PAH 化合物, $\sum$ PAHs 总量在 11.68 ~ 169.9 mg•kg⁻¹,平均值为 39.62 mg•kg⁻¹,平均偏差为 36.81 mg•kg⁻¹,各污泥间 $\sum$ PAHs 含量差异显著.莫测辉等^[7]对中国大陆部分城市以及香港的城市污泥中的 PAHs 进行分析测定发现,污泥中 $\sum$ PAHs 的含量在 1.39 ~ 143.8 mg•kg⁻¹ 之间,大陆地区城市污泥中的 $\sum$ PAHs 含量普遍比香港高.有报道指出^[8],北京 6 家污水处理厂城市污泥中 $\sum$ PAHs 也较低,含量在 2.47 ~ 25.9 mg•kg⁻¹ 之间,而本研究结果发现江苏供试城市污泥中 $\sum$ PAHs 含量较高,这一方面与污泥种类不同有关,另一方面污泥干燥方法也可能有一定影响.本实验中的样品干燥是采用冰冻干燥的方

法进行,可最大限度地减少样品中小分子的 PAHs 通过挥发、光解、氧化分解等途径而损失.有研究发现低分子量的多环芳香烃(PAHs)如萘、苊等在实验研究中均能快速地被降解^[9,10].

2.2.2 城市污泥中 $\sum$ PAHs-cancer 的含量

苯并(a)蒽,苯并(b)荧蒽,苯并(k)荧蒽,苯并(a)芘,苯并(ghi)芘,茚并(1,2,3-cd)芘,二苯并(a,h)蒽被认为是具有致癌性 PAHs 化合物^[7]. $\sum$ PAHs-cancer 是指这些化合物在污泥中含量的总和.江苏供试城市污泥中 $\sum$ PAHs-cancer 的含量在 1.17 ~ 41.03 mg•kg⁻¹,平均值为 6.60 mg•kg⁻¹,占 $\sum$ PAHs 总量的 2.78% ~ 46.17%.其中常州某污水处理厂污泥中致癌性 PAH 含量最高(41.03 mg•kg⁻¹).但上述数据要比一些研究报道的结果低得多,例如莫测辉等^[7]发现,珠海城市污泥中 $\sum$ PAHs-cancer 含量高达 75.4 mg•kg⁻¹,占 $\sum$ PAHs 的 96.2%,而有研究发现国内 11 污水处理厂城市污泥中 $\sum$ PAHs-cancer 含量在 0.07 ~ 25.0 mg•kg⁻¹ 之间^[11].由此可见污水来源可能是影响污泥中 PAHs 含量及组成的最主要因素.

2.2.3 城市污泥中 $\sum$ PAHs-ppc 的含量

$\sum$ PAHs-ppc 是指被列入中国环境“优先污染物”的 PAHs 化合物的含量之和,主要包括萘、荧蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(a)芘、茚并(1,2,3-cd)芘和苯并(g,h,i)芘化合物.从表 2 中可以发现,江苏城市污水处理厂剩余污泥中 $\sum$ PAHs-ppc 含量在 4.07 ~ 59.06 mg•kg⁻¹ 之间,平均值为 14.79 mg•kg⁻¹,平均偏差为 13.52 mg•kg⁻¹.污泥中 $\sum$ PAHs-ppc 的含量占 $\sum$ PAHs 含量的 11.2% ~ 63.88%,而其中萘占了最主要部分,萘的含量占 $\sum$ PAHs-ppc 含量的 15.91% ~ 89.79%,平均占 63.98%.2005-01-31 美国卫生与人类服务部(HHS)公布的第 11 版致癌物报告(ROC)的致癌物名单中将多环芳烃中的萘列为“有理由认为可导致人类癌症的致癌物”^[12].因此必需加强江苏省污泥中萘的监测.但萘在污泥中也较易降解,李永君等^[13]就从活性污泥中分离到 24 株可降解萘的细菌分离株,宋昊等^[14]等也从厨房油烟污染的土壤中分离到高效降解的萘菌株,在 96 h 内可降解 98% 以上的萘.

2.3 江苏城市污泥中的多环芳烃含量的主要影响

表 2 江苏部分城市污水处理厂城市污泥中 PAHs 的含量¹⁾/mg·kg⁻¹
Table 2 PAHs content of sewage sludge from the selected waste-water treatment plants in Jiangsu Province/mg·kg⁻¹

城市	萘 (2)	苊 (2)	二氢 苊(2)	芘 (2)	菲 (3)	蒽 (3)	蒽 比 (4)	苯并 (a)蒽* (4)	蒽* (4)	苯并(b) 蒽* (4)	苯并(k) 蒽* (4)	苯并(a) 比* (5)	茚并(1, 2,3-cd) 比* (5)	苯并(ghi) 比* (6)	∑PAHs cancer	∑PAHs- ppc			
苏州(一)	1.67	11.15	1.26	0.204	0.081	0.464	0.206	1.87	0.213	0.434	1.68	0.084	0.033	0.046	0.153	0.743	20.29	3.38	4.46
苏州(二)	4.48	24.60	2.22	0.522	0.085	0.342	0.231	0.115	0.029	0.053	0.968	0.047	0.013	n.d.	0.049	0.008	33.76	1.17	5.75
苏州(三)	5.18	n.d.	2.07	1.15	0.304	n.d.	1.29	1.75	0.769	n.d.	1.72	0.272	0.122	0.638	3.77	0.107	19.15	7.40	9.33
苏州(四)	12.63	10.62	1.02	0.507	0.207	1.54	1.67	0.344	0.276	0.754	3.30	0.237	0.119	0.257	1.04	0.411	34.94	6.40	18.63
常熟(一)	21.04	n.d.	4.42	8.91	0.568	n.d.	16.06	16.59	n.d.	n.d.	5.11	0.066	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	72.76	5.17	42.28
无锡(一)	3.66	7.84	0.76	0.156	0.100	0.368	2.01	0.209	0.240	0.127	0.885	0.132	0.041	n.d.	n.d.	0.045	16.57	1.47	6.77
无锡(二)	8.73	15.39	1.99	0.668	0.125	0.910	0.091	1.48	0.399	0.015	1.52	0.087	n.d.	n.d.	0.379	n.d.	31.78	2.40	10.43
无锡(三)	2.72	3.59	1.58	0.537	0.121	0.397	0.231	0.336	1.10	0.214	0.981	0.009	0.087	n.d.	0.228	0.038	12.18	2.66	4.07
常州(一)	14.05	38.25	0.699	0.358	0.090	n.d.	n.d.	0.795	n.d.	0.417	1.60	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	56.26	2.02	15.65
常州(二)	9.40	16.84	0.578	1.36	0.398	1.50	9.45	11.92	0.239	0.416	39.44	0.225	0.118	0.388	0.153	0.051	92.46	41.03	59.06
镇江(一)	5.30	1.25	0.277	0.121	0.151	0.368	0.122	0.182	0.628	1.54	1.10	0.492	0.008	n.d.	0.153	0.005	11.70	3.92	7.03
扬州(一)	10.17	26.37	1.39	0.548	0.403	2.68	0.867	5.22	0.728	1.90	5.08	1.98	2.20	n.d.	n.d.	0.264	59.80	12.15	20.56
宜兴(一)	6.33	2.14	0.340	0.189	0.180	0.435	0.081	0.041	0.418	0.076	0.320	0.030	0.299	n.d.	2.21	0.371	13.46	3.72	7.44
张家港(一)	2.29	26.21	1.40	0.417	0.089	0.345	0.377	1.80	0.108	0.063	1.65	0.101	n.d.	n.d.	4.599	n.d.	39.45	6.52	4.42
徐州(一)	7.97	7.27	1.09	0.349	0.132	0.116	1.27	0.015	0.146	0.078	1.25	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.028	19.63	1.41	10.53
淮安(一)	7.98	3.59	0.57	0.472	0.175	0.867	0.768	0.335	1.27	0.596	1.83	0.531	0.027	0.037	0.288	0.024	19.36	4.60	11.20
南通(一)	13.23	7.11	0.53	0.946	0.219	1.73	0.214	1.50	0.153	0.797	1.71	0.034	0.009	0.051	2.65	0.180	31.06	5.58	15.42
宿迁(一)	20.01	134.7	2.64	2.59	0.665	n.d.	n.d.	4.55	0.486	0.957	3.10	0.181	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	169.9	4.72	23.30
盐城(一)	6.85	10.62	0.348	0.587	0.091	0.255	0.018	3.32	0.108	0.114	1.79	0.386	0.045	10.31	6.11	0.082	41.03	18.94	19.50
江阴(一)	2.05	4.93	0.288	0.379	0.099	0.446	1.17	0.222	0.342	0.351	0.955	0.322	0.081	n.d.	0.026	0.015	11.68	2.09	4.60
南京(一)	8.66	9.86	0.626	1.22	0.267	0.794	0.511	1.14	n.d.	0.656	0.829	0.266	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	24.82	1.75	10.26

1) n.d.表示未检出; ∑PAHs为16种PAHs化合物含量之和; ∑PAHs-cancer为带*号的致癌性PAHs化合物含量之和; ∑PAHs-ppc为列入中国环境“优先污染物”的PAHs化合物含量之和;括号中的数字为各化合物的苯环数,下同

因素分析

2.3.1 污水来源与污水处理工艺的影响

一般认为,以处理生活污水为主而产生的城市污泥 PAHs 含量较低,以处理工业污水特别是化工废水为主而产生的城市污泥中 PAHs 的含量较高,约比前者高 2.5 ~ 3.0 倍^[15],有的甚至高达 2 000 mg•kg⁻¹^[16].但结合表 1 和污泥 PAHs 分析结果来看,所调查的污水处理厂中工业废水的所占比重与污泥中 $\sum$ PAHs 含量没有明显的关系,说明污泥 PAHs 水平与工业废水种类有关而与工业废水总量关系不大.但值得注意的是,污水 BOD₅/COD 值与污泥中 PAHs 含量特别是与 $\sum$ PAHs-ppc 仍有一定负相关关系($r = -0.3648$),虽然未达到显著水平.这暗示着,污水中有机物生物降解能力越低,则在污泥中沉积 PAHs 的可能性也越大.

据报道,城市污泥中 PAHs 的含量及分布也与污水的处理方式有一定关系.例如,在污水的一级处理过程中,主要是通过吸附作用去除 PAHs,特别是具有高 K_{ow} 值的大分子量 PAHs(富集系数 > 20);在二级处理时,通过生物降解和挥发作用,可以去除大量的(> 40%)低分子量的 PAHs,而大分子量的 PAHs 较难去除,在接触氧化阶段可以使 PAHs 稳定化^[17].上述规律也可在本研究中得到佐证:从表 2 中可看出,在徐州某污水处理厂采用的是水解酸化-好氧工艺,虽然在污水中有 20% ~ 30% 是工业废水,但在污泥中 $\sum$ PAHs 含量仅为 19.63 mg•kg⁻¹,比处理 100% 生活污水的南京某污水处理厂污泥中的含量低 21%,而且 4 ~ 6 环的大分子 PAHs 含量很少,这极有可能是由于在水解酸化阶段厌氧微生物进行芳香烃及杂环化合物的开环裂解所致^[18].

2.3.2 污泥处理的影响

城市污水处理厂污泥在不同工段沉降浓缩以及消化处理也被认为是影响污泥中 $\sum$ PAHs 含量的重要因素之一.据报道,PAHs 富集到初沉池污泥的量在 12% (蔡) ~ 81% [苯并(a)芘、苯并(k)荧蒹]^[19],而二沉池污泥仅富集 7% 的 PAHs^[7].初沉池或二沉池的污泥经消化处理后,消化污泥中 $\sum$ PAHs 的含量会不同程度的降低^[20,21].

表 3 为无锡某污水处理厂厌氧消化和未消化污泥的 PAHs 含量及组分分析.显然,消化处理促进了污泥中 PAHs 的降解, $\sum$ PAHs 含量下降了 10.44 mg•kg⁻¹,去除率达 62.99%.其中 2 ~ 3 环的 PAHs 化

合物的含量下降最为明显,如污泥中蔡和范的去除率分别达 77.9% 和 61.9%.但 4 ~ 6 环的 PAHs 化合物的含量下降较少,去除率仅为 4.3%.

表 3 污泥消化对 PAHs 含量的影响/mg•kg⁻¹

Table 3 Effects of sludge digestion on PAHs content in sewage sludge/mg•kg⁻¹

PAHs	未消化污泥	厌氧消化污泥
蔡(2)	3.66	0.811
范(2)	7.84	2.99
二氢范(2)	0.763	0.23
芴(2)	0.156	0.069
菲(3)	0.100	0.099
蒽(3)	0.368	0.359
荧蒽(3)	2.01	0.08
芘(4)	0.209	0.087
苯并(a)蒽*(4)	0.240	0.094
*(4)	0.127	0.027
苯并(b)荧蒽*(4)	0.885	1.28
苯并(k)荧蒽*(4)	0.132	0.006
苯并(a)芘*(5)	0.041	n. d.
茚并(1,2,3-cd)芘*(5)	n. d.	n. d.
二苯并(a,h)蒽*(5)	n. d.	n. d.
苯并(ghi)芘*(6)	0.045	n. d.
$\sum$ PAHs	16.57	6.13
$\sum$ PAHs-cancer	1.47	1.41
$\sum$ PAHs-ppc	6.77	2.18

3 结论

(1)江苏城市污水处理厂污泥中含有 7 ~ 16 种 PAH 化合物, $\sum$ PAHs 总量在 11.68 ~ 169.9 mg•kg⁻¹,平均值为 39.62 mg•kg⁻¹,各污泥间 $\sum$ PAHs 含量差异显著.但污水来源及其处理方式、污泥处理方法等均影响着污泥中 $\sum$ PAHs 的含量及组成,如污泥消化可明显降低污泥中 $\sum$ PAHs 的含量.

(2)江苏城市污泥中具有致癌性的 PAHs 含量在 1.17 ~ 41.03 mg•kg⁻¹,平均值为 6.59 mg•kg⁻¹.被列入中国环境“优先污染物”的 PAHs 含量在 4.07 ~ 59.06 mg•kg⁻¹之间,平均值为 14.79 mg•kg⁻¹,其中蔡占了最主要部分,平均占 63.98%.

(3)江苏各城市污泥中都是以 2(或 3)个苯环的化合物为主,而难降解的 4 ~ 6 个苯环的化合物的百分含量都较低.其中蔡是江苏城市污泥中均含有的

PAHs 化合物, 平均占 $\sum$ PAHs 总量的 25.77%, 其次是芘(有部分没有检测到), 平均占的 36.78%. 对于强致癌性化合物苯并(a)芘, 其含量相对较低, 在污泥中含量一般在 $0 \sim 2.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均含量为 $0.152 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远低于我国农用污泥控制标准的 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

参考文献:

- [1] Macnicol R D, Beckett P H. The distribution of heavy metal between the principal components of digested sewage sludge [J]. *Water Research*, 1998, **23**(2): 199-206.
- [2] Hulsall C, Burnett M, Davis B, *et al.* PCBs and PAHs in UK urban air [J]. *Chemosphere*, 1993, **26**: 2185-2197.
- [3] 汪大猷, 徐新华, 宋爽. 工业废水中专项污染物处理手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000. 322-357.
- [4] 周立祥. 中国城市污泥土地利用策略及其污泥重金属环境化学行为的机制研究[D]. 北京: 中国科学院地理所博士后研究报告, 1998.
- [5] 周立祥, 沈其荣, 陈同斌, 等. 重金属及养分元素在城市污泥主要组分中的分配及其化学形态[J]. *环境科学学报*, 2000, **20**(3): 269-274.
- [6] Artola A, Balaguer M D, Rigola M. Heavy metal binding to anaerobic sludge [J]. *Water Research*, 1997, **31**(5): 997-1004.
- [7] 莫测辉, 蔡全英, 吴启堂, 等. 我国一些城市污泥中多环芳烃(PAHs)的研究[J]. *环境科学学报*, 2001, **21**(5): 613-618.
- [8] Dai J Y, Xu M Q, Chen J P, *et al.* PCDD/F, PAH and heavy metals in the sewage sludge from six wastewater treatment plants in Beijing, China [J]. *Chemosphere*, 2007, **66**: 353-361.
- [9] 张路, 范成新. 底泥中多环芳烃(PAHs)提取方法评析[J]. *土壤与环境*, 2001, **10**(3): 242-245.
- [10] 赵璇, 陶雪琴, 卢桂宁, 等. 萘降解菌的筛选及降解性能的初步研究[J]. *广东化工*, 2006, **33**(4): 37-40.
- [11] Cai Q Y, Mo C H, Wu Q T, *et al.* Occurrence of organic contaminants in sewage sludges from eleven wastewater treatment plants, China [J]. *Chemosphere*, 2007, **68**: 1751-1762.
- [12] 刁春娜, 高利军, 李刚, 等. 乌鲁木齐市新市区大气气溶胶中多环芳烃的 GC-MS 分析[J]. *中国环境监测*, 2005, **21**(5): 45-49.
- [13] 李永君, 赵化冰, 任河山, 等. 萘降解细菌的分离及其降解基因的分子检测[J]. *生态学杂志*, 2006, **25**(7): 738-742.
- [14] 宋昊, 邱森, 章俭, 等. 高活性萘降解细菌 *Hydrogenophaga palleronii* LHJ38 的研究[J]. *化工环保*, 2006, **26**(2): 87-92.
- [15] Bodzek D, Janoszka B. Comparison polycyclic aromatic compounds and heavy metals contents in sewage sludges from industrialized and non-industrialized region [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1999, **111**(1-4): 359-369.
- [16] Wild S R, Berrow M L, Jones K C. The persistence of polynuclear aromatic hydrocarbon (PAHs) in sludge-amended agricultural soils [J]. *Environ Pollution*, 1991, **72**: 141-157.
- [17] Manoli E, Samara C. Occurrence and mass balance of polycyclic aromatic hydrocarbons in the thessaloniki sewage treatment plant [J]. *J Environ Qual*, 1999, **28**: 176-187.
- [18] 钱易, 汤鸿霄, 文湘华, 等. 水体颗粒物和难降解有机物的特性与控制技术原理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000.
- [19] Webber M D, Lesage S. Organic contaminations in municipal sludges [J]. *Waste Manage Research*, 1989, **7**: 63-82.
- [20] Parker W J, Monteith H D, Melcer H. Estimation of anaerobic biodegradation rates for toxic organic compounds in municipal sludge digestion [J]. *Water Research*, 1994, **28**(8): 1779-1789.
- [21] 赵剑强, 张希衡. 34 种有机毒物对厌氧消化影响试验研究[J]. *中国环境科学*, 1992, **12**(4): 250-254.