

生物质炭输入对污泥施用土壤-植物系统中多环芳烃迁移的影响

花莉^{1,2}, 陈英旭², 吴伟祥², 马宏瑞¹

(1. 陕西科技大学资源与环境学院, 西安 710021; 2. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310029)

摘要: 利用温室盆栽黑麦草实验, 研究了生物质炭输入对污泥施用土壤性质、植物生长及土壤-植物系统中多环芳烃迁移性能的影响。结果表明, 施用含炭堆肥污泥更有利于改善土壤的缓冲性能及增加土壤养分含量, 与普通堆肥污泥处理相比, 施用含炭堆肥污泥的黄棕壤和红壤中阳离子交换量分别提高了 10% 和 5%, 而 2 种土壤总氮含量则分别提高了 13% 和 18%。同时, 生物质炭的输入更有利于促进植物生长, 与普通堆肥污泥处理相比, 2 种土壤中含生物质炭堆肥污泥处理黑麦草生物量均提高了 23%, 黄棕壤和红壤中种植的黑麦草叶绿素含量分别增加了 8% 和 10%。生物质炭的输入还使得污泥-土壤体系中的多环芳烃转移到植株中的量明显减少, 含炭堆肥污泥处理中多环芳烃在黑麦草中的累积量比普通污泥相应处理降低了 27% ~ 34%。因此, 生物质炭作为污泥堆肥调理剂, 不仅能进一步改良土壤性质, 促进植物生长, 还可以有效限制污泥-土壤体系中多环芳烃在环境中的迁移, 降低潜在的污染风险。

关键词: 生物质炭; 污泥; 黑麦草; 多环芳烃

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)08-2419-06

Effect of Bio-charcoal on the Trans of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil-Plant System with Composted Sludge Application

HUA Li^{1,2}, CHEN Ying-xu², WU Wei-xiang², MA Hong-rui¹

(1. College of Resource and Environment, Shannxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China; 2. College of Environmental and Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: The effects of bio-charcoal acted as sludge-composting additive on soil characteristics and plant growth were studied. Compared with the treatment of composted sludge without bio-charcoal, soil cation exchange capacity in treatment of composted sludge with bio-charcoal increased over 5% and 10% respectively and soil nitrogen content increased 13% and 18% respectively for two kind soils. The composted sludge with bio-charcoal also resulted in 23% higher enhancement on ryegrass biomass and 8%-10% higher enhancement on ryegrass chlorophyll content. In addition, with the amendment of bio-charcoal, the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in composted sludge was decreased, which resulted in the lower absorption and accumulation of ryegrass to PAHs. Compared with the control, the PAHs concentration in ryegrass amended composted sludge with bio-charcoal decreased 27%-34%. The results indicated that composted sludge with bio-charcoal resulted in much more improvement on the plant growth as well as less negative effect on environment. Therefore, bio-charcoal was in favor of the safe land application of sewage sludge.

Key words: bio-charcoal; sludge; ryegrass; polycyclic aromatic hydrocarbons

随着社会经济快速发展和城市化水平的不断提高, 工业污水和生活污水的排放量日益增多, 污水处理厂污泥产生量急剧增加。污泥富含氮、磷、钾等大量元素以及植物所需的多种微量元素, 其有机物的质量分数高达 60% ~ 70%^[1,2]。因此廉价、方便且能充分利用污泥养分资源的土地利用处理处置方式倍受关注。然而, 污泥形成过程中, 污水中重金属和有机污染物会通过微生物吸收、细菌和矿物颗粒表面吸附以及无机盐共沉淀等多种途径进入污泥, 造成污泥污染物浓度相对较高, 直接农会通过食物链威胁人类健康。草坪建设是城市现代化的重要标志, 它对保护环境和生态平衡起着重要的作用。污泥

经处理后用作草坪栽培基质, 不但避开了食物链, 同时又可以解决污泥的出路问题, 而且对于城市绿化发展也将起到一定的推动作用。生物质炭(bio-charcoal)是近年来出现的一个新的研究热点。生物质炭是植物热解过程的残余物, 作为一种新途径将其添加到土壤中可充分实现这种产物的价值。生物质炭的 2 个特征使它具备实现土地利用价值的功能:

收稿日期: 2008-09-16; 修订日期: 2008-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(40432004); 陕西省自然科学基金项目(2007E114); 陕西科技大学科研启动基金项目(BJ09-10)

作者简介: 花莉(1978~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为固体废弃物处理处置及资源化技术, E-mail: tuliphua@126.com

①相当稳定,难以降解;②与其他任何形式的有机物质相比,具有超强的养分持留功能.农业秸秆废弃物长期以来都缺乏有效的处理途径,而焚烧农作物秸秆带来的空气污染也屡见报道.农业废弃物炭化形成的生物质炭对植物生长及土壤性质的影响已经开展了一定的研究,结果表明生物质炭对植物的生长具有一定的促进作用^[3-6].但是这些研究都是基于生物质炭直接添加到土壤中,生物质炭材料作为堆肥添加剂与污泥一起施用对土壤性质、污染物控制、植物生长的影响还没有相关的研究报道.多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是污泥中含量较高、危害较大的有机污染物,其在污泥资源化过程中的迁移特性值得关注^[7-9].而目前关于多环芳烃土壤-植物系统的研究多为空白土壤加标实验,由污泥施用引入的多环芳烃在土壤-植物系统的环境行为的研究还开展得比较少,且主要集中在污泥作为有机肥料少量施用对蔬菜、水稻等农作物的影响方面^[7,10].而将堆肥污泥作为绿化栽培基质大量施用,其中的PAHs在土壤-植物系统的迁移转化特性还未见报道.

本研究的主要目的是通过对比含生物质炭堆肥污泥和普通堆肥污泥作为栽培基质施用对土壤性质和植物生长的不同作用,探讨生物质炭输入对堆肥污泥施用效果及污泥中PAHs迁移性能的影响,揭示堆肥污泥和生物质炭土地利用过程中的生物和环境效应.

1 材料与方法

1.1 实验材料

- (1)土壤 根据1998中国土壤分类系统,供试土壤分别为属于淋溶土纲,温暖淋溶土亚纲的黄棕壤及属于铁铝土纲,湿热铁铝土亚纲的红壤.其中黄棕壤来源于浙大华家池校区实验田,红壤来自杭州天子岭垃圾填埋场覆土层.土壤基本性质如表1所示.
- (2)堆肥污泥 分别为没有添加生物质炭的普通堆肥污泥及含7%生物质炭的堆肥污泥,堆肥污泥的制备方法见文献[11].生物质炭为农业废弃秸秆在600℃条件下炭化所得.
- (3)植物 黑麦草种子购自杭州凤起花鸟市场.

表 1 盆栽土壤及堆肥污泥理化性质
Table 1 Physical and chemical characteristics of soils and composted sludge

项目	黄棕壤	红壤	有生物质炭堆肥污泥	普通堆肥污泥
总氮含量/g·kg ⁻¹	1.4±0.1	1.0±0.1	17.3±1.4	14.8±1.1
总磷含量/g·kg ⁻¹	0.75±0.05	0.56±0.04	7.3±0.5	6.6±0.5
pH	7.47±0.10	6.8±0.1	7.02±0.1	7.14±0.1
有机质含量/g·kg ⁻¹	28.2±0.2	16.7±0.1	403.2±30.5	415.5±26.3
∑16 PAHs 含量/mg·kg ⁻¹	0.32±0.03	0.55±0.03	2.50±0.22	4.85±0.32

1.2 盆栽实验设计

堆肥污泥与土壤按1:4比例混合.盆栽使用直径18 cm,高16 cm的花盆,每盆装2.0 kg混合基质,下端出水孔用窗纱堵住.黑麦草播种量为35 g·m⁻²,每个处理4个平行,各处理随机排放于温室中,温度控制在15~35℃,适时适量浇灌去离子水.生长到70 d时收割,并分别用清水和去离子水清洗干净.于105℃杀青1 h,然后于80℃烘干至恒重,测定其干重.另外少量植株样品先用不锈钢刀片切碎采用冷冻干燥法进行干燥,然后粉碎过筛用于测定PAHs含量.

1.3 测试项目及方法

(1)土壤及堆肥污泥基本理化性质的测定 测定黄棕壤、红壤和2种堆肥污泥产品基本性质.包括有机质测定采用重铬酸钾容量法-外加热法;阳离子交换量(cation exchange capacity, CEC)测定采用乙酸

铵交换法;全氮采用凯氏消煮,靛酚蓝比色法测定,全磷采用钼锑抗比色法测定,土壤盐度用TY-2型盐度计测定.具体方法见文献[12].

(2)土壤、植株及堆肥污泥PAHs含量测定 土壤及植株样品中PAHs含量测定方法采用超声提取,层析柱净化后用GC/MS测定.气相色谱仪:安捷伦6890;质谱仪:美国HP5972系列.具体分析方法见文献[13].

2 结果与讨论

2.1 堆肥污泥施用对土壤性质的影响

表2显示了堆肥污泥施用对土壤性质的影响.从中可以看出,土壤有机质、氮磷养分含量、阳离子交换量、电极电位随着堆肥污泥施用量的增加而有不同程度的提高,pH值却有所降低,但是变化在1个单位范围内.表明堆肥污泥的施用可以改良土壤

理化性质,提高土壤离子交换和养分供给能力,并且对土壤酸碱性影响比较小.另外,含生物质炭的堆肥污泥施用对土壤阳离子交换量的提高明显高于普通堆肥污泥处理.与普通堆肥污泥处理相比,施用含炭堆肥污泥的黄棕壤和红壤中阳离子交换量分别提高了10%和5%.阳离子交换量是土壤缓冲性能的主要来源,较大的阳离子交换量表明土壤具有较好的保肥能力和缓冲性能.有研究表明,与其他土壤有机质相比,生物质炭对阳离子的单位碳吸附能力更强,这主要是由于它巨大的表面积、大量的表面负电荷以及电荷密度所引起^[14].因此,生物质炭的输入更有利于改善土壤的保肥能力和缓冲性能.这些特性使生物质炭能够持留土壤中可交换态形式存、在从而容易被植物利用的养分物质,并由此提供了提高作物产量并降低养分对环境造成污染的可能性.土壤中氮素含量的增加幅度量也大于施用普通堆肥污

泥的处理,与普通堆肥污泥处理相比,施用含炭堆肥污泥的黄棕壤和红壤中氮含量分别提高了13%和18%.土壤的盐度性质对植物的生长有很大的影响,Corwin等^[15]发现在盐度较高的土壤中,植物会由于根部对水分的吸收能力减弱或者植物毒性增加的原因减产甚至死亡.电极电位(electrical conductivity, EC)是应用最为广泛的表征土壤盐度的重要指标之一,它可以简单有效地表达出土壤盐度性质.Soumare等^[16]认为,在电极电位>1 500 μS·cm⁻¹时表明土壤盐度过高,会对植物的正常生长产生不利影响.在本研究中,施用了堆肥污泥后土壤的EC显著增加,表明堆肥污泥施用会导致土壤中的盐度增加.但是在20%的堆肥污泥施用量下,各处理EC值均低于600 μS·cm⁻¹,不会对植物带来危害.另外,2种堆肥对土壤盐度的增加的影响也有一定差异,说明生物质炭输入对土壤盐度缓冲性能也有影响.

表 2 2 种堆肥污泥施用对土壤性质的影响
Table 2 Effect of two kind composted sludge on soil characteristics

项目	黄棕壤			红壤		
	对照	施用普通堆肥	施用含炭堆肥	对照	施用普通堆肥	施用含炭堆肥
有机质含量/g·kg ⁻¹	28.2±2.0	74.2±4.8	72.8±3.0	16.7±0.9	66.6±3.3	64.2±5.2
总氮含量/g·kg ⁻¹	16.3±0.2	19.4±0.15	22.0±0.2	16.0±0.1	18.2±0.2	21.5±0.2
总磷含量/g·kg ⁻¹	2.1±0.1	3.2±0.4	4.1±0.3	1.5±0.2	2.5±0.2	2.9±0.2
CEC/cm ³ ·L ⁻¹	4.04±0.32	4.45±0.25	4.52±0.42	3.53±0.25	3.82±0.24	4.02±0.24
EC/μS·cm ⁻¹	300±35	520c±30	450±30	260±40	570±30	510±40
pH	7.5	7.3	7.4	5.8	5.6	5.7

表3显示了2种堆肥污泥施用对土壤PAHs含量的影响.从中可以看出,供试土壤中的PAHs本底值偏高,黄棕壤采集点靠近杭州市交通繁忙的干道秋涛路,可能由于汽车化石燃料不完全燃烧导致的PAHs在相邻地区累积,使得黄棕壤中PAHs含量偏高.红壤来源于杭州天子岭垃圾填埋场覆土层,PAHs含量高的原因不明,需要在今后的研究中作进一步的源解析.土壤PAHs含量的变化结果则表明,施用堆肥污泥后,土壤中PAHs的含量与对照处理相比有明显的提高.2种堆肥相比较,则是添加生物质炭的堆肥污泥施用导致的土壤PAHs残留量比较小,说明生物质炭的添加有利于土壤PAHs的转化和去除.由图1所示的生物质炭横截面扫描电镜照片可以看出,生物质炭具有发达的孔隙结构,而这些发达的孔隙结构可以为微生物的生长提供较好的栖息环境,促进了PAHs降解菌的生长繁殖.也有可能是因为生物质炭对PAHs起到了固定作用,使其不

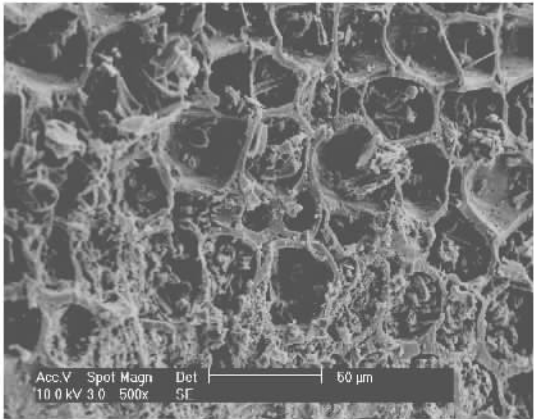


图 1 堆肥污泥中生物质炭横截面扫描电镜照片
Fig.1 SEM photo of bio-charcoal surface

容易被有机溶剂提取出来而表现为可测浓度的下降.而无论实际的作用机制如何,这一部分PAHs的生物有效性也相应降低,难以被植物吸收和累积.

表 3 2 种堆肥污泥施用对土壤 PAHs 含量的影响 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 3 Effect of composted sludge on PAHs concentration in soil / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	红壤			黄棕壤		
	对照	普通堆肥	含炭堆肥	对照	普通堆肥	含炭堆肥
萘	170 ± 15	330 ± 28	260 ± 30	250 ± 26	250 ± 28	250 ± 20
芴	ND 1)	ND	ND	30 ± 4	60 ± 7	60 ± 5
二氢芴	30 ± 3	30 ± 3	30 ± 3	ND	ND	ND
芘	67 ± 5	130 ± 10	110 ± 10	50 ± 4	103 ± 12	80 ± 7
菲	40 ± 3	70 ± 6	50 ± 5	30 ± 2	80 ± 10	50 ± 4
蒽	50 ± 4	50 ± 5	50 ± 4	20 ± 2	20 ± 3	20 ± 3
苊	53 ± 5	112 ± 10	75 ± 6	0	40 ± 5	20 ± 2
荧蒽	20 ± 2	50 ± 5	30 ± 3	20 ± 2	90 ± 11	60 ± 5
苯并(a)蒽	37 ± 3	80 ± 7	60 ± 5	34 ± 3	62 ± 6	30 ± 3
屈	ND	65 ± 5	40 ± 4	ND	50 ± 5	50 ± 4
苯并(b)荧蒽	ND	ND	ND	ND	ND	ND
苯并(k)荧蒽	ND	ND	ND	ND	ND	ND
苯并(a)苊	30 ± 3	30 ± 3	30 ± 3	ND	ND	ND
茚并苊	ND	46 ± 5	ND	30 ± 3	95 ± 10	60 ± 5
二苯并蒽	ND	50 ± 5	30 ± 3	0	50 ± 4	30 ± 2
苯并花	30 ± 3	36 ± 4	ND	50 ± 6	75 ± 6	50 ± 6
∑ 16 PAHs	527 ± 50	1079 ± 96	765 ± 68	514 ± 45	975 ± 95	760 ± 60

1)ND 表示未检出

2.2 植物对堆肥污泥施用的生长响应及作用机制

2.2.1 堆肥污泥施用对植物生长的影响

图 2 显示了 2 种堆肥污泥施用及对照土壤中黑麦草的生物量变化情况. 结果表明, 2 种堆肥污泥施用均能有效促进黑麦草生物量的增加. 这可能是由于堆肥污泥含有大量的有机物质, 这些物质在土壤中经微生物的活动分解转化产生大量的维生素、腐殖酸和激素等物质, 能促进作物的根系生长旺盛, 提高对养分的吸收能力, 干物质积累多, 从而使产量提高. 从图 2 还可以看出, 含生物质炭堆肥污泥施用对黑麦草生物量的增加更显著, 2 种土壤中种植的黑麦草均比施用普通污泥堆肥黑麦草生物量提高了 23% 左右. 分析其原因, 主要是因为生物质炭具有高吸水性、高保水性、高透水性和保肥性, 用来改良土

壤可促进作物根系的良好生长. 生物质炭可能通过以下 2 种机制增加土壤肥力. 第一, 提高离子交换能力, 由于阳离子交换性能提高导致营养物质的缓慢释放及有机质的稳定化, 从而有效促进植物对营养成分的吸收; 第二, 生物质炭对土壤养分有一定的束缚作用, 使其不易随灌溉水冲洗而流失, 可以促进土壤中营养元素的保留. 这也从 2 种堆肥施用对土壤性质的影响差异得到证实, 即含炭堆肥污泥处理中土壤的养分和阳离子交换量增加幅度更大. 此外生物质炭能吸附一定的矿物质, 一些对植物有益的细菌和微生物附着于生物质炭中孔隙中, 生长繁殖得到促进, 进而也有效促进了植物的生长. 2 种堆肥污泥施用对黑麦草叶绿素含量的影响如图 3 所示, 2 种堆肥污泥施用均能明显增加黑麦草中的叶绿素含

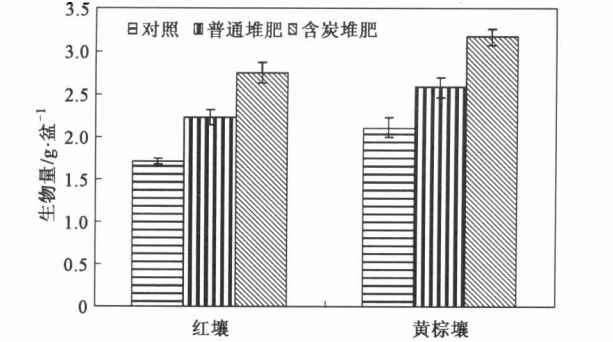


图 2 添加堆肥污泥黑麦草生物量变化

Fig.2 Effect of composted sludge on biomass of ryegrass

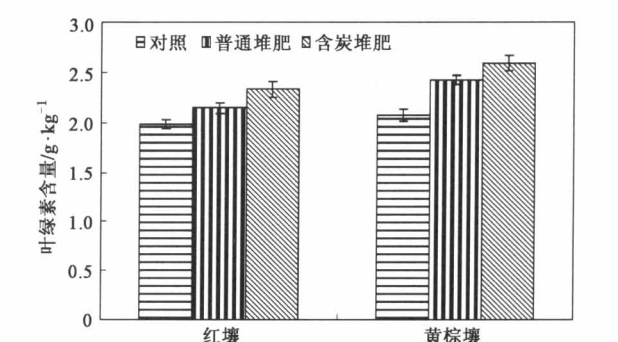


图 3 添加堆肥污泥黑麦草叶绿素含量变化

Fig.3 Effect of composted sludge on chlorophyll contents of ryegrass

量,并且含生物质炭堆肥污泥施用更有利于黑麦草叶绿素含量的增加,黄棕壤和红壤中黑麦草叶绿素含量分别增加了 8% 和 10%.这可能是由于含炭堆肥中的氮、磷营养更为丰富,能更有效地促进植株中叶绿素的合成.而叶绿素含量的增加又会促进植物光合作用的加强,最终也反应为生物量的增加.其他一些研究者也发现了生物炭具有改良土壤性质和促进植物生长的作用.Major 等^[3]研究了生物炭对野草生长的影响,在施用无机肥料的同时添加生物炭,植株对地表的覆盖率比单独施用无机肥料时提高了则提了 46%.Steiner 等^[4]则发现,生物质炭和无机肥料一起施用与单独施用无机肥料相比,谷物的产量提高了 2 倍.Rondon 等^[17]发现,在土壤中添加生物质炭后,对胡萝卜和大豆产量的增加有明显的促进作用.

2.2.2 污泥-土壤复合基质中 PAHs 在植物体内的累积及影响因素

堆肥污泥中的 PAHs 组分在植物中的富集作用和土壤中的残留作用与其理化性质、植物种类、土壤性质和环境条件等诸多因素有关.施用污泥堆肥后植株中 PAHs 含量测定结果如表 4 所示,植株中主要检测出萘、芴、菲、荧蒹等低分子量 PAHs 化合物,而高分子量的 PAHs 含量很低,未被检测到.2 种土壤相比较,则是红壤中的 PAHs 更容易转移到植物中.在施用普通堆肥处理中,种植于黄棕壤中黑麦

草的 PAHs 总含量比对照提高了 38%,而种植于红壤中黑麦草 PAHs 总含量比对照提高了 62%.这主要是由于土壤的性质差异造成的.多环芳烃在土壤中的吸附除了与多环芳烃自身性质、土壤有机炭含量、土壤有机质的结构和性质、温度有关之外,介质环境的 pH 和离子强度也影响多环芳烃在土壤中的吸附.Johnson 等^[18]研究发现土壤中的胡敏酸(HA)和富里酸(FA)能够明显增强多环芳烃的水溶性,而且胡敏酸的效果比富里酸更显著.Chiou 等^[19]的研究结果则表明,在低 pH 条件下,腐殖质中激发态半奎宁的松弛时间变长,腐殖质呈分子状态,可以保护重要的疏水性位点,有利于 PAHs 的吸附.高 pH 时,由于腐殖质分子构型的改变,疏水性位点消失,PAHs 的吸附受到抑制.因此,不同土壤中的 PAHs 的生物有效性会有差异.另外,不同化合物的理化性质不同,其在植物和土壤中的含量分布也不同.低分子量有机化合物的水溶性较高,易于被作物吸收.例如,芘与苯并芘相比有较高的水溶性,因此更容易迁移,所以堆肥污泥施用后其中的芘通过植物-土壤系统转移在植株中的含量往往要比苯并芘高,而残留在土壤中的芘含量就相对要低.生物质炭输入情况下,也会显著减少植物对 PAHs 物质的吸收,例如在黄棕壤中,施用含生物质炭堆肥的黑麦草中 PAHs 含量比普通堆肥处理中 PAHs 含量低 27.2%,而红壤中含生物质炭处理黑麦草中 PAHs 含量比普通

表 4 堆肥污泥施用对黑麦草中 PAHs 含量的影响/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 4 Effect of composted sludge PAHs concentration in ryegrass / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

项目	红壤			黄棕壤		
	对照	普通堆肥	含炭堆肥	对照	普通堆肥	含炭堆肥
萘	104 ± 8	167 ± 15	132 ± 11	112 ± 10	125 ± 11	107 ± 8
芴	70 ± 6	70 ± 6	41 ± 4	30 ± 3	30 ± 3	ND*
二氢芴	33 ± 4	40 ± 5	20 ± 2	30 ± 2	30 ± 2	ND
芴	57 ± 6	96 ± 8	72 ± 5	22 ± 2	93 ± 6	67 ± 5
菲	22 ± 3	80 ± 8	75 ± 6	93 ± 6	145 ± 12	114 ± 8
蒽	30 ± 3	30 ± 3	ND	20 ± 2	20 ± 1	ND
芘	70 ± 6	98 ± 10	36 ± 3	55 ± 4	78 ± 5	61 ± 2
荧蒽	0	30 ± 3	20 ± 2	ND	ND	30
苯并(a)蒽	15 ± 1	40 ± 5	32 ± 2	ND	ND	ND
	ND ¹⁾	ND	ND	ND	ND	ND
苯并(b)荧蒽	ND	ND	ND	ND	ND	ND
苯并(k)荧蒽	ND	ND	ND	ND	ND	ND
苯并(a)芘	ND	ND	ND	ND	ND	ND
茚并芘	ND	ND	ND	ND	ND	ND
二苯并蒽	ND	ND	ND	ND	ND	ND
苯并芘	ND	ND	ND	ND	ND	ND
∑ 16 PAHs	401 ± 40	651 ± 56	428 ± 40	362 ± 30	521 ± 40	379 ± 26

1)ND 表示未检出

堆肥处理 PAHs 含量低 34.1%。这与前面检测得到的 2 种堆肥施用后土壤中 PAHs 的累积情况相一致,表明生物质炭的输入可以使得 PAHs 污染物在污泥-土壤-植物体系中的迁移得到有效的抑制,可以进一步降低 PAHs 的污染风险。

3 结论

(1)堆肥污泥施用,能够改善土壤的营养状况。与普通堆肥污泥相比,施用含生物质炭堆肥污泥可以进一步提高土壤的离子交换能力和增加土壤养分,所引起的土壤盐度增加量也相对较低,更有利于改善土壤性质。另外,含炭堆肥污泥施用对植物生长的促进更为明显,其中所种植黑麦草的生物量和叶绿素含量均高于普通堆肥污泥相应处理。

(2)堆肥污泥施用,会增加植株体内的 PAHs 含量,尤其是小分子量的 PAHs 容易转移到植株体内。由于生物质炭的输入降低了堆肥污泥-土壤复合体系中 PAHs 的迁移性,含生物质炭堆肥污泥处理中黑麦草对 PAHs 的累积量与普通污泥堆肥相应处理相比有明显降低。

(3)生物质炭可以作为优良的污泥堆肥调理剂,不仅可以降低污泥土地利用的风险,进一步促进植物生长,还可以有效解决农业废弃物焚烧所引起的一系列环境污染问题,是一条提高废弃物综合处置效率的新途径。然而,生物质炭输入到土壤中后,对土壤碳素、氮素循环、土壤微生物群落结构变化的影响还有待于进一步的研究。

参考文献:

- [1] Casado-Vela J, Sellés S, Navarro J. Evaluation of composted sewage sludge as nutritional source for horticultural soils [J]. *Waste Manage*, 2005, **12**: 143-149.
- [2] 张鸿龄,孙丽娜,孙铁珩. 粉煤灰钝化污泥人工土壤理化性质研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(7): 2068-2072.
- [3] Major J, Steiner C, Dittomasso A, *et al.* Weed composition and cover after three years of soil fertility management in the central Brazilian Amazon: Compost, fertilizer, manure and charcoal applications [J]. *Weed Biol Manage*, 2005, **5**: 69-76.
- [4] Steiner C. Microbial response to charcoal amendments of highly weathered soil and Amazonian dark earths in central Amazonia: Preliminary results [A]. In: Glaser B, Woods W I, (Eds). *Amazonian Dark Earths: Explorations in Time and Space* [C].

- Heidelberg: Springer, 2007. 95-212.
- [5] Lehmann J. Black is the new green [J]. *Nature*, 2006, **442**(10): 624-626.
- [6] Lehmann J. A handful of carbon [J]. *Nature*, 2007, **447**(10): 143-144.
- [7] Cai Q Y, Mo C H, Wu Q T. Quantitative determination of organic priority pollutants in the composts of sewage sludge with rice straw by gas chromatography coupled with mass spectrometry[J]. *J Chromatogr A*, 2007, **1143**: 207-214.
- [8] Amir S, Hafidi M, Merlina G, *et al.* Fate of polycyclic aromatic hydrocarbons during composting of lagooning sewage sludge [J]. *Chemosphere*, 2005, **58**: 449-458.
- [9] 张雪英,周立祥,崔春红,等. 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[J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2271-2276.
- [10] 蔡全英,莫渊辉,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] Hua L, Wu W X, Liu Y X, *et al.* Reduction of nitrogen loss and Cu and Zn mobility during sludge composting with bamboo charcoal amendment [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2009, **16**: 1-9.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000. 46-128.
- [13] Hua L, Wu W X, Chen Y X, *et al.* Effect of composting on polycyclic aromatic hydrocarbons removal in sewage sludge [J]. *Water Air Soil Poll*, 2008, **193**: 259-267.
- [14] Liang B, Lehmann J, Solomon D, *et al.* Black carbon increases cation exchange capacity in soils [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, **70**: 1719-1730.
- [15] Corwin D L, Lesch S M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines [J]. *Agron J*, 2003, **95**: 455-471.
- [16] Soumare M, Tack F M, Verloo M G. Characterisation of malian and belgian solid waste composts with respect to fertility and suitability for land application[J]. *Waste Manage*, 2003, **23**: 517-522.
- [17] Rondon M, Ramirez A, Hurtado M. Charcoal additions to high fertility ditches enhance yields and quality of cash crops in Andean hillsides of Colombia [R]. *CIAT Annual Report Cali, Colombia*, 2004. 65-88.
- [18] Johnson W P, Amy G, Facilitated L. Transport and enhanced desorption of polycyclic aromatic hydrocarbon by natural organic matter in aquifer sediments [J]. *Environ Sci Technol*, 1995, **29**: 807-817.
- [19] Chiou C, Susan E M, Daniel E K. Partition characteristics of PAHs on soils and sediments [J]. *Environ Sci Technol*, 1998, **32**: 264-26.