

污泥的土地利用及其环境影响^①

乔显亮 骆永明 吴胜春

(中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

摘 要 本文介绍了目前国内外污水污泥处置与利用的现状和趋势;重点综述了污泥土地利用的途径、利益、风险、管理以及我国近十年来研究进展;认为将稳定化、无害化、资源化处理的污泥作为一种有机肥料或土壤改良剂进行土壤利用,将成为我国污泥处置与利用方面很有应用前景的一种途径,但有必要开展污泥土地利用后污染物的环境行为、影响评价、控制管理等方面的长期研究。

关键词 污泥;处置;土地利用;环境影响

污泥(Sewage Sludge 或 Biosolids)是污水处理厂对污水进行处理过程中产生的沉淀物质以及污水表面漂出的浮沫所得的残渣,简单地讲,污泥是污水中的固体部分。随着世界工业生产的发展,城市人口的增加,工业废水与生活污水的排放量日益增多,污泥的产出量迅速增加。据有关资料统计,目前美国所积累的干污泥总量已达 1000 万吨,欧洲各国总计达 660 万吨,日本为 240 万吨左右^[1]。我国由于环境产业起步较晚,目前污水处理量 and 处理率虽然不高(4.5%),但年产污泥量已达 30 万 t(干重计)^[2]。根据《中华人民共和国国民经济与社会发展的“九五”计划和 2010 年远景目标纲要》的要求,到 2000 年我国污水处理率要达到 25%,那就意味着一年有几百万吨的污泥产量。大量积累的污泥,不仅将占用面积广大的土地,而且其中的有害成分如重金属、病原菌、寄生虫、有机污染物及臭气将成为影响城市环境卫生的一大公害。因此,妥善科学地处理处置污泥已是一个亟待解决的环境问题。

1 污泥的主要处置方式

目前,污水污泥的主要处置方式有:填埋、投海、焚烧、土地利用。一般来说,各地区对于污泥处置方式的选择是根据本地区的地理环境、经济水平、技术措施、交通运输等因素而确定的,而且会随着公众认识的提高和兴趣的改变而发生变化。据王联^[3]的资料统计,目前,美国污泥中有 49%的生活污泥农用,35%填埋或丢弃,15%焚烧,其它方式只占 1%;而日本填埋和焚烧却占污泥处置总量的 82%,其它方式则较少。总体来讲,各种处置方法在实际的应用上都存在着一定的优点和限制条件。

填埋处置存在以下问题,如合适的场地不宜寻找,污泥运输和填埋场地建设费用较高,填埋场容量有限,有害成分的渗漏可能会对地下水造成污染,填埋场的废气排放等。在发达国家,这种方法过去采用较多,但目前可供填埋的场地越来越少。

大海投弃是利用海洋巨大的稀释和容纳能力来处理污泥。相对而言,这种途径操作起来比较简单,对于海岸城市来讲费用也较低。但是,随着生态环境意识的加强,沿海国家越

^① 中国科学院院长特别基金,国家自然科学基金(49831070),江苏省青年科技基金(BQ(98050)),中国科学院南京土壤研究所土壤圈物质循环开放研究实验室基金和土壤与环境联合开放研究实验室基金项目资助。

来越关注污泥投海后对海洋生态环境可能存在的影 响。美国于 1988 年已禁止向海洋倾倒污泥,并于 1991 年全面加以禁止。欧共体规定 1998 年以后禁止将污泥向大海投弃。日本也对污泥的海洋投弃作了严格的规定。中国政府在 1994 年初接受三项国际协议,承诺于 1994 年 2 月 20 日起不在海上处置工业废物和污水污泥^[2]。这种趋势必然会引起污泥处置方式的很大转变,特别是对于那些过去污泥投海量较大的国家,更是给污泥的处置增加了很大的压力。

焚烧是利用污泥中有机成分较高、具有一定热值等特点来处置污泥。但焚烧在过去一直存在着以下几个问题:1)投资和操作费用较高;2)计划实施较困难;3)焚烧产生的气体若控制不当可能会产生二次污染;4)污泥中的有用成分未得到充分的利用。

土地利用被认为是最有发展潜力的处置方式。这种处置方式是把污泥应用于农田、菜地、果园、林地、草地、市政绿化、育苗基质及严重扰动的土地修复与重建等。污泥中含有大量的有机质和植物所需的营养成分,是有价值的生物资源,科学合理的土地利用,可减少其负面效应,使污泥重新进入自然环境的物质、能量循环中。林地、园林绿地施用污泥可促进树木、花卉、草坪的生长,提高其观赏品质,并且不易构成食物链污染的危害。因此,污泥的林地和市政绿化的利用是一条很有发展前途的利用方式。污泥还可以用于严重扰动土地的修复。严重扰动的土地是指各种采矿后残留的矿场、建筑取土排废用的深坑、森林采伐场、垃圾填埋场、地表严重破坏区等需要复垦的土地。这类土地一般已失去土壤的优良特性,无法直接植树种草,施入污泥可以增加土壤养分,改良土壤特性,促进地表植物的生长。这种方法也避开了食物链,对人类生活潜在威胁较小,既处置了污泥,又恢复了生态环境,是一种很好的利用途径。但是,污泥的土地利用需要具备的一个重要的条件是:其所含的有害成分不超过环境所能承受的容量范围。污泥由于来源于各种不同成分和性质的污水,一般不可避免地含有一些有害成分,如各种病原菌、重金属和有机污染物等,这都在一定程度上限制了污泥在土地利用方面的发展。因此,污泥利用前一般需要经过一定的无害化处理,来降低污泥中易腐化发臭的有机物,减少污泥的体积和数量,杀死病原物,降低有害成分的危险性。

此外,污泥还有其它几种处置利用方式,如炼油,作建材等,但都未得到广泛采用。

2 土地利用

2.1 用于土地的污泥稳定化和无害化方法

目前,稳定的方法有:好氧消化、厌氧消化、堆肥化、双消化、以及加石灰或氯气等。

堆肥化处理是其中最常用的。将污泥与调理剂(如秸秆、锯末、树叶、粪便、垃圾等)及膨 胀剂(木屑、秸秆、树叶、花生壳、玉米芯等可增加污泥与空气接触的成分)在一定的条件下(如 pH、C/N、通气、水分、温度)进行好氧堆沤,即是污泥的堆肥化,其产物也叫生物固体(Biosolids)。污泥经堆肥化后,病原菌、寄生虫卵、杂草种子等几乎全部被杀死,挥发性成分减少,臭味减低,重金属有效态的含量也会降低,速效养分含量有所增加,污泥成为一种比较干净而且性质比较稳定的物质。随着污泥处理技术的发展,污泥堆肥化的工艺也在不断发展更新,从原始的厌氧发酵、自然通风发酵,逐渐发展到现代的机械通风、高温好氧发酵法。污泥中的养分一般对于植物吸收来讲不太平衡,因此,有人尝试在污泥堆肥中补充一些含量较低的元素,进行搭配,制成复合堆肥后使用,发现效果更好^[4,5]。

80 年代, 美、英、澳等国家开发了一种污泥处理的新方法——西蒙—N—Viro 法。其过程为: 首先用螺旋搅拌器把固体含量 18% 以上的污泥饼和特定的碱性掺合剂进行适当混合, 使之变为泥土状易拿的碱性稳定的浓缩污泥。当浓缩污泥 pH 值超过 12 时, 利用碱性掺合剂的放热反应, 使整体温度升至 52℃ 以上, 并保持 12 小时, 再间歇吹入干燥空气或用其它干燥方法(保持 $\text{pH} > 12$)直到污泥的干燥度达到 50%。处理后, 可以杀死绝大部分病原菌, 而且高 pH 也降低了重金属的溶解性。此外, 还有良好的物理特性, 没有恶臭或臭味极低, 贮存稳定, 外形美观, 易处理和利用等优点。由于其具有高 pH 的特点, 不宜使用于原来 pH 已较高的土壤。针对我国来讲, 南方有大面积的酸性土壤, 其中一些地区长期以来靠使用石灰来调节土壤的 pH, 若采用这种方法处理的碱化污泥, 可达到施肥和改良土壤的双重目的。因此, 在我国应是一种有发展前途的技术。

2.2 污泥土地利用的利益

污泥中含有丰富的植物所需的各种养分, 施入后, 会明显地增加土壤氮、磷养分^[6], 并能有效地向植物提供养分, 减少化学肥料的施用量, 从而可降低农业生产的成本。郭媚兰等对太原市污泥所做的肥效试验表明, 污泥肥效相当于优质的农家肥^[7]。污泥中的有机物质可以改善土壤的物理性质。周立祥等在苏州的试验表明, 使用生活污水污泥可以明显改善土壤的结构性, 使土壤的容重下降, 孔隙增多, 土壤的通气透水性变好^[2, 9]。郭媚兰的研究也发现, 随着污泥及污泥堆肥用量的增加, 土壤可供植物吸收的氮、磷等营养成分和有机质含量相应递增, 污泥或污泥堆肥的施用不同程度地提高了土壤的田间持水量^[8]。污泥还能提高土壤的阳离子代换量, 改善土壤对酸碱的缓冲能力, 提供养分交换和吸附的活性位点, 从而提高土壤保肥性。此外, 污泥还能够改变土壤的生物学性状, 使土壤中微生物总量及放线菌所占比例增加, 土壤的代谢强度提高^[9]。

2.3 污泥土地利用的风险

2.3.1 盐分 一部分含盐量高的污泥会明显提高土壤的电导率, 过高的盐分会破坏养分之间的平衡, 抑制植物对养分的吸收, 甚至会对植物根系造成直接的伤害。离子之间的拮抗作用也会加速有效养分如 K^+ 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 等的淋失。一般地, 堆肥化会明显降低盐分, 提高污泥的适用性。

2.3.2 病原物 未经处理的污泥中含有较多的病原微生物和寄生虫卵^[10]。在污泥的应用中, 它们可通过各种途径传播, 污染土壤、空气、水源, 并通过皮肤接触、呼吸和食物链危及人畜健康, 也能在一定程度上加速植物病害的传播。前面提到的堆肥化处理和西蒙—N—Viro 法均可有效地杀死绝大部分病原菌。此外, 辐射处理、巴氏灭菌法也是较常用的灭菌处理。至于厌氧消化、干燥法及超声波处理等虽也有一定的杀菌效果, 但常因杀菌不完全或其它缺点, 不如上面几种方法常用。

2.3.3 重金属 重金属是限制污泥大规模土地利用的最重要因素。污泥虽然会因其污水来源不同, 成份存在一定差异, 但一般都或多或少含有一定量重金属。一般地, 生活污水污泥养分较高, 重金属主要以 Zn、Cu 为主, 其他金属含量较低。我国城市大量使用镀锌管道, 因此, 生活污水污泥中含有较高的 Zn。工业污水污泥则因不同行业排放的污水成分不同而不同。如皮革行业污水中含较高的 Cr, 电镀污水中含较高的 Cd, 冶炼制造行业含较高的 Pb 塑料行业含较多的 Hg。这些重金属随污泥进入土壤, 就可能对环境造成一定的危害。因

此,应该尽可能地减少其在污泥中的含量。但重金属不象有机物可以通过降解除去。而且,重金属一般溶解度很小,在污泥中性质较稳定,较难除去。目前,主要通过化学和生物学两种方法来降低污泥中的重金属含量。化学方法就是利用 H_2SO_4 、 HCl 、 HNO_3 、 EDTA 等化学物质从污泥中提取重金属,但此法存在投资费用高、操作困难、需大量的强酸和生石灰等问题,使之难于得到广泛应用。生物学法是利用细菌循环还原一氧化 S,使重金属的难溶硫化物转变成可溶性硫酸盐而滤出污泥系统。相对于化学提取法,该方法提取率较高(可达 90%),且投资费用低,易于操作,因此,生物学法具有较为乐观的应用前景。

2.3.4 氮磷等养分 污泥中通常含有丰富的 N、P 等各种养分,如果在降雨量较大地区的土质疏松土地上大量施用,有机物分解速度大于植物对 N、P 的吸收速度,就很可能随水流失,进入地表水体造成水体的富营养化,进入地下引起地下水的硝酸盐污染。养分的迁移是一个需长期监测研究的工作。

2.3.5 有机污染物 一些生产部门排放的污水中含有一定的有机污染物,如聚氯二酚、多环芳烃以及农药的残留物。这些物质在污水和污泥的处理过程中会得到一定程度的降解,但一般难以完全除去,在污泥的使用时还需考虑其可能产生的危害。国外学者对此研究较多,国内还罕见这方面的报道,需要进行研究。

3 我国在污泥土地利用方面的研究进展

我国污泥土地利用很早就开始了,如 1961 年北京高碑店污水处理厂的污泥大多被当地的农民施用于土地^[1]。接下来几十年,我国污水处理事业飞速发展,污水处理厂已由当时的几家发展到现在的 300 多家,相应的污泥年产量已达 30 多万吨。关于污泥农用的研究,经过“七·五”、“八·五”、“九·五”几个阶段的努力,已经有几十家研究单位正在进行,就污泥的肥效、科学施用,污泥有害成分的潜在威胁及其防治对策等方面做了一定的工作。

3.1 提高土壤肥力,促进植物生产,营造生态环境

污泥中含有机质和多种植物所需的养分,施用污泥后,对土壤物理、化学及生物学性状有一定的改良作用。污泥中的有机物质可明显改善土壤的结构性,使土壤的容重下降,孔隙增多,土壤的通气透水性和田间持水量提高^[2,6],从而改善土壤的物理性质。施用污泥可提高土壤的阳离子代换量,改善土壤对酸碱的缓冲能力,提供养分交换和吸附的活性位点,从而提高土壤保肥性^[8]。污泥中丰富的各种养分,明显地增加土壤氮、磷养分,并能有效地向植物提供养分^[6],减少化学肥料的施用量,从而可降低农业生产的成本。此外,污泥使土壤中微生物量增加和代谢强度提高而改变土壤的生物学性状^[9]。

施用污泥对粮食、蔬菜均有一定的增产效果^[2,12]。钟熹光和吴启堂的研究表明,污泥用于养分水平较低的砂质土效果较好;施用于生长期较长的块根类作物的增产效果比茎叶类、果实类作物更显著^[13]。郭媚兰等对太原市污水污泥所做的肥效试验表明,污泥肥效相当于优质的农家肥^[7]。据张天红等的研究结果,林地施用污泥后,树木的树高和树径的生长都明显高于对照,林地的土壤得到了改良^[14]。张增强^[15]对园林绿地施用污泥的研究表明,污泥施用可促进树木、花卉、草坪的生长,提高其观赏品质。

3.2 重金属污染

庞金华在上海的调查研究发现,在其研究的土地上连续施用污泥达 10 年以上时,土壤

中 Cd、Zn、Cu 含量均很高, 种植的水稻、蔬菜受到严重的污染, 而且, 污泥施用越多, 污染情况越严重^[16]。欧阳喜辉报道, 施用污泥的农田, 虽然土壤有机质明显增加, 土壤酸度基本无变化, 但土壤中的 Hg、Cd 污染严重, 已经引起小麦、玉米的污染^[17]。污泥与粉煤灰配合使用后, 可降低小麦对汞的吸收^[18]。王宏康等人的研究也报道, 因施用污泥而积累过量的重金属(如 Cu、Pb)会导致水稻、小麦和大豆减产, 并建议农用污泥铅的控制标准为 600 mg kg^{-1} , 镍为 330 mg kg^{-1} , 石灰性土壤上铜的标准为 800 mg kg^{-1} ^[19~21]。李国学对青菜的研究结果表明, 随着污泥施用量的增加, 青菜中的重金属(包括 Cu、Cd、Zn、Ni、Pb)含量也呈增加趋势。当污泥施用量 $> 5\%$ 时, 青菜中的 Cu、Zn 超过国家允许标准; 当施用量在 10% 以上时, Cd 超标。重金属在植物体内的积累规律大致为: 根系 $>$ 茎叶 $>$ 籽粒和果实^[22]。郭媚兰等人对谷子、玉米和白菜的研究结果显示, 当污泥堆肥施用量达到 240 吨/公顷时, 植物可食部分的重金属含量还未超标^[7]。杨国栋等对含铬污泥研究认为, 对于我国北方 Cr 环境容量较大的土壤, 根据试验结果所得的 Cr 残留量计算, 施用污泥二十年, Cr 也不会超标^[23]。

3.3 养分和重金属移动性和植物有效性

曹仁林等认为, 只要控制污泥在一定的使用量下, 不致造成地下水的污染^[24]。但薛栋森根据污泥施用于林地 15 年后养分监测发现, NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等有很大的移动性, 可移至较深土层^[25]。据张天红的研究, 污泥施入土壤后, 一般重金属存在于表层 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 范围内^[14], 这与国外一些学者^[26, 27]的研究结果相一致。据李香真的研究, 污泥中 94% 的水性 Cu 以带负电荷的螯合物存在, 而且主要是小分子量有机物。这种螯合作用, 可提高 Cu 的迁移能力^[28]。李香真的研究还发现表土施入污泥后, 显著增加了 Cu、Ni、Zn 从土柱中的淋出量^[29]。王鹏新对施用污泥娄土的研究发现, 施用污泥后, 土壤中有态铜在各种形态中增加最多, 而镍则以碳酸盐态增加最多^[30]。鲁艳兵认为, 进入土壤的重金属, 在不同的土壤类型和不同的土壤条件下, 形态分布各不相同, 不同形态的重金属对植物的有效性和毒性也不相同, 其中以交换态与植物吸收关系最密切^[31]。

从上述研究报道可见, 污泥土地利用的农业价值和环境风险受到气候条件、土壤性质、植物种类、污泥性状和用量以及研究对象等多因子的影响, 是一个多元系统中的复杂问题。我国在这方面的研究还相当有限, 尤其对污泥及施污泥土壤中有机污染物的研究则更少。这种现状不利于污泥土地利用的规范化管理和土壤生态环境的保护。

4 我国在污泥土地利用中应注意的管理问题

迄今, 我国还缺乏一套较为完善的污泥农用技术规范。从我国污泥农用的现状看, 大多数施用者对污泥的施用方法存在着盲目性和任意性, 不仅没有达到安全有效处置污泥的目的, 反而引起局部土地的污染。根据上述的研究和应用现状, 我国在污泥土地利用的管理上还需注意以下几个方面:

4.1 污泥的质量

理想的污泥是含较高的有效养分, 而有害成分尽可能低。但是很少有污泥符合这样的条件, 每种农用污泥即使在经过一定的稳定化和无害化处理后, 仍然存在一定的潜在污染危险性。因此, 污泥出厂时应该标明其有效和有害成分的含量及农业适用性, 为污泥的安全有效利用提供指导。开发研究、借鉴更有效的污泥处理处置技术, 如堆肥技术, 碱化稳定技术

等,为我国污泥资源化服务。

4.2 污泥的施用量和适用土壤

不同的污泥性质和成分差异很大,不同的土壤条件对污泥污染物具有不同的环境容量,不同的植物种类对污泥的适宜施用量也不同,因此应该根据土地的承受能力,植物的敏感程度,食物链风险,作物需肥量(主要是 N、P)等因素综合考虑,科学地确定污泥施用的土壤类型、季节和数量。

4.3 环境监测

污泥的有害成分进入土壤后,一般不会立刻表现出其不利影响。如 N、P 短期内在土壤剖面上迁移量较小,一次施用污泥后重金属的含量一般也不会增加很多,但若长期大量使用,其负面效应就会明显地表现出来。因此,应该进行长期定位监测,研究污泥施入土壤后,其所含的有害成分在土壤中的行为及变化,为污泥的长期安全使用提供科学依据和技术支撑。

4.4 制定和健全法律法规,推广与普及环境知识

许多发达国家已对污泥的处置利用制定了法律法规,对污泥的标准、施用地点的选择、水源的保护、病原菌的控制、重金属的允许施入量、运输等都作了相应的规定。目前,我国关于污泥施用的法律法规还不健全,有待于在科学研究指导下进一步完善。另一方面是向社会各界大力传播环保知识。污泥农用一个重要问题是,要让广大的污泥用户了解科学施用污泥的利益和盲目施用污泥的危害,自觉地遵守污泥土地利用的环境法律法规和科学施用技术规范。

5 结 语

污泥是一种很有利用价值的潜在资源,随着工业和城市的发展,污水处理率的提高,其产生量必然越来越大。为了充分利用这种资源,减少环境公害,世界上许多国家都在大力发展污泥处理处置和利用的各种技术。目前,我国污泥的产生量正随着污水处理率的提高而迅速增加,污泥的处置问题日益突出,亟待解决。但相对于发达国家来讲,我国污泥处理利用技术还比较落后,同时考虑到我国农业发展中,有大面积的中低产田需要改良,许多被破坏的土地需要复垦,且我国 K 肥严重缺乏, P 肥品位较低且大多在边远地区,难以开采。因此,将经过稳定化、无害化处理后的污泥进行土地循环利用,应该是我国污泥处置利用较有发展前景的一种途径。鉴于污泥土地利用所涉及的研究与应用等方面的种种问题,要想达到安全有效的目标,需要科研部门、环保部门、污泥使用者等各个环节的通力合作才能真正实现。

参 考 文 献

- 1 史崇文,郭媚兰. 污水污泥的农业利用. 世界农业, 1994, (5): 37~39
- 2 周立祥等. 城市污泥土地利用研究. 生态学报, 1999, 19(2): 185~193
- 3 王 联. 污泥的处置现状及趋势. 环境导报, 1994, (6): 36~37
- 4 戈乃玲等. 污泥化肥混肥加工工艺和肥效的研究. 土壤通报, 1997, 28(1): 41~43
- 5 薛澄泽等. 污泥制作堆肥及复合有机肥料的研究. 农业环境保护, 1997, 16(1): 11~15, 31

- 6 周立祥等. 苏州市生活污水污泥成分性质及其对蔬菜和菜地土壤的影响. 南京农业大学学报, 1994, 17(2): 54 ~ 59
- 7 郭媚兰等. 太原市污水污泥农业利用研究. 农业环境保护, 1993, 12(6): 254 ~ 262
- 8 郭媚兰等. 城市污泥和污泥与垃圾堆肥的农田施用对土壤性质的影响. 农业环境保护, 1994, 13(5): 204 ~ 209
- 9 周立祥等. 城市生活污水污泥农田利用对土壤肥力性状的影响. 土壤通报, 1994, 25(3): 126 ~ 129
- 10 周立祥等. 污泥农牧地应用中病原物的存活及其控制措施. 农业环境保护, 1995, 14(3): 128 ~ 131
- 11 北京东南郊环境污染调查及防治途径研究污灌协作组. 北京东南郊环境污染调查及防治途径研究报告集, 1980
- 12 林春野等. 污泥农用对土壤及作物的影响. 农业环境保护, 1994, 13(1): 23 ~ 25, 33
- 13 钟熹光, 吴启堂, 林毅. 城市污泥直接施用对农田的生态效应研究初报. 热带亚热带土壤研究, 1992, 1(2): 91 ~ 98
- 14 张天红等. 西安市污水污泥林地施用效果的研究. 西北农业大学学报, 1994, 22(2): 67 ~ 71
- 15 张增强, 薛澄泽. 几种草本植物对污泥堆肥的生长效应. 西北农业大学学报, 1996, 24(1): 65 ~ 69
- 16 庞金华. 污泥对区域生态环境的影响. 热带亚热带土壤科学, 1994, 3(1): 41 ~ 47
- 17 欧阳喜辉, 崔晶, 佟庆. 长期使用污泥对农田土壤和农作物影响的研究. 农业环境保护, 1994, 13(6): 271 ~ 274
- 18 刘国新, 张桂银. 污泥粉煤灰配合施用对小麦积累汞规律的研究. 农业环境保护, 1993, 12(5): 201 ~ 203
- 19 杨卓亚, 王宏康. 污泥施肥铅对作物污染的研究. 环境科学, 1993, 14(6): 8 ~ 11, 37
- 20 张素霞, 王宏康. 污泥施肥时重金属镍对农用物的毒害研究. 环境科学学报, 1991, 11(1): 71 ~ 78
- 21 王宏康, 阎寿沧. 污泥施肥时铜对农作物的污染. 环境科学, 1990, 11(3): 6 ~ 11
- 22 李国学. 施用污泥堆肥对土壤和青菜 (*Brassicachinensis*) 重金属积累特性的影响. 中国农业大学学报, 1998, 3(1): 113 ~ 118
- 23 杨国栋, 石晓枫. 含铬皮革废水污灌和施用含铬污泥时铬在土壤环境中的残留. 农业环境保护, 1999, 18(1): 28 ~ 30, 37
- 24 曹仁林等. 园林绿地施用污泥堆肥对环境影响研究. 环境科学研究, 1997, 10(3): 46 ~ 50
- 25 Harni, R. 薛栋森. 污泥用于林地 15 年后养分和重金属在土壤中分布的研究. 西北农业大学学报, 1992, 20(3): 20 ~ 27
- 26 McGrath, S P. In: P. J., Martin M. H. and Unsworth M. H. (eds), Pollutant, Transport and Fate in Ecosystems. Blackwell Scientific Publications, Oxford. 1987, 301 ~ 317
- 27 Alloway, B J and Jackson, A P. The Science of the Total Enviroment (Supplement) 1991, 23 ~ 25
- 28 李香真. 污泥中水溶性 Cu , Zn 的形态及水溶性有机物与 Cu^{2+} 的复合特性. 中国农业大学学报, 1996, 1(3): 113 ~ 117
- 29 李香真. 污泥中几种重金属元素在砂土中的运移. 中国农业大学学报, 1997, 2(3): 113 ~ 118
- 30 王鹏新. 施用污泥娄土中铜和镍的形态及其转化. 农业环境保护, 1993, 12(1): 14 ~ 16
- 31 鲁艳兵. 施用污泥的土壤重金属元素有效性的影响因素. 热带亚热带土壤科学, 1998, 7(1): 68 ~ 71