

城市污泥的污染现状及其土地利用评价^①

申荣艳^{1,2,3}, 骆永明^{1,2,3*}, 滕应^{1,2}, 李振高^{1,2}

(1 中国科学院南京土壤研究所土壤与环境生物修复研究中心, 南京 210008; 2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 3 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 随着城市污泥产生量的迅速增加, 污泥的科学处置及土地利用是当前城市固体废弃物资源化的主要研究内容。本文较系统地阐述了污泥的基本性质、污泥污染和处置现状及土地利用的风险评价等相关研究, 并指出了目前城市污泥研究中存在的问题。

关键词: 城市污泥; 处置方式; 资源化; 土地利用

中国分类号: X825

城市污泥是一种既含有大量 N、P 等养分资源, 又含有重金属、有机污染物和病原物等有害物质的混合物。污泥中的重金属是最早引起人们重视的污染物, 近年来国外有关污泥中重金属方面的研究最多, 对有机污染物和病原物的研究则相对较少。虽然在上世纪 70—80 年代美国就有对污泥中病原物的许多研究^[1-2], 但人们普遍认为, 病原物对外界环境比较敏感, 如果污泥经过稳定处理, 一般就能达到杀菌、消毒的效果, 通常不会污染外界环境和威胁人类健康。近几年, 由于在污泥施用地种植的植物中检测到了多种有机污染物, 因此, 人们认为污泥中有机污染物的污染应受到高度重视, 并进行详细地研究。与国外相比, 我国污水处理产业发展较晚, 总体上研究的深度也不够, 目前多停留于总结国外研究状况、探讨污泥稳定方法和污泥的农艺价值等方面, 而有关污泥中的污染物及其环境风险的研究较少。鉴于此, 本文较系统地阐述了污泥的基本性质、污泥污染和处置现状及土地利用的风险评价等相关研究, 并指出了目前城市污泥研究中存在的问题。

1 污泥的基本性质

一般污水处理厂产生的污泥为含水量在 700 ~ 970 g/kg 之间的固体或流体状物质, 其中的固体成

分主要是有机残片、细菌菌体、无机颗粒和胶体等, 但主要以有机成分为主, 其中包含对农业有潜在利用价值的有机质、N、P、K 和各种微量元素养分。有机质的含量通常可占污泥干重的 30% ~ 40%, 相当于一般的农家肥。由于污泥来源于各种污水, 所以污泥中不可避免地含有各种有毒有害物质, 如重金属、有机污染物和病原物等, 且因为污泥含较多的易分解或腐化的成分, 通常会散发出难闻的气味。污泥中有益成分和有害成分共存的特点, 使其成为复杂化的问题。

1.1 污泥中的重金属

污泥中的重金属种类繁多, 主要有 Cu、Pb、Zn、Ni、Cr、Hg 和 Cd 等, 是污泥资源化利用的最主要障碍^[3-4]。我国各地污泥所含重金属的种类大同小异, 但其含量相差甚大^[5]。以处理生活污水为主所产生的污泥, 重金属含量通常较低, 如佛山市污泥^[5], 而以处理工业污水为主所产生的污泥, 重金属含量往往较高。随着社会、经济的发展和人们环保意识的不断提高, 污泥中的重金属含量会逐渐降低。

在不发达国家, 由于经济和政策的限制, 污泥管理的风险大于污水灌溉的风险^[6]。重金属是污泥中最主要的污染物之一。由于重金属具有难迁移、易富集和危害大等特点已成为限制污泥农业利用的最主要因素^[7-8]。对国内(1994—2001 年)有关污泥

①基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40432005)、国家重点基础研究发展规划项目(2002CB410810/9)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-429)共同资助。

* 通讯作者(ymluo@issas.ac.cn)

作者简介: 申荣艳(1977—), 女, 黑龙江佳木斯人, 博士研究生, 主要从事污泥的农业资源化利用研究。E-mail: ryshen1204@yahoo.com.cn

中重金属的资料进行统计分析表明^[9], 我国污泥中重金属 Ni、Pb、Cr、Cu 和 Zn 含量变化幅度很大, 极差最高达几千毫克/千克; Zn 是含量最高的元素, Cu 和 Cr 次之; 毒性较大的重金属 Hg、Cd 和 As 含量往往较低, 通常在几到十几个毫克/千克范围内。从统计结果和我国污泥农用标准来看, Cu 和 Zn 是我国污泥中含量最高的元素, 也是限制其土地利用的主要因素之一。对我国 44 个城市污水污泥的重金属含量进行统计分析表明^[8], Cu 和 Zn 的含量低于陈同斌等^[9]对我国部分污水处理厂污泥统计结果, 而毒性较大的 Hg 和 As 含量远远高于陈同斌等^[9]的统计结果。统计结果相差很大, 主要是由于其资料来源及其相关的污水处理厂数量、污水处理方式和污泥类型等因素不同造成的。

近年来, 由于我国环境污染管理制度和法规的完善与实施, 污水达标排放率不断提高, 城市污水中 Hg、Cd、As 和 Pb 等重金属含量逐年下降^[9], 这将有利于污泥的农用, 降低污泥土地利用的环境风险。陈同斌等^[9]调查表明, 北京高碑店污水处理厂污泥中的重金属含量每年都以 2.7% ~ 4.9% 的幅度下降; 1988—1999 年天津纪庄子污水处理厂的污泥重金属含量每年下降幅度为 0.1% ~ 2.4%。对英、美等国污水处理厂污泥中重金属进行统计分析也得到相同的结果。英国污泥中的重金属以 Cd 和 Pb 的下降幅度最大, 年平均下降 6% ~ 8%; 美国污泥则以 Cr 和 Pb 下降幅度最大, 年平均下降 17% ~ 18%^[9]。随着社会、经济的发展和科技水平的提高, 污泥中的重金属含量逐渐降低是一个普遍趋势。

1.2 污泥中的有机污染物

污泥中常含有一些有机污染物, 如氯酚 (CPs)、氯苯 (CBs)、硝基苯 (NBs)、多氯联苯 (PCBs)、多氯代二苯并二恶英/呋喃 (PCDD/Fs)、邻苯二甲酸酯 (PEs)、多环芳烃 (PAHs) 和有机氯农药 (OCPs) 等^[10~13]。污泥农用常增加土壤中 PAHs 的浓度, 考虑到对人类的危害, PAHs 已被列为污泥中重要有机污染物的研究对象。污泥农用后其中 PCBs 的去向和转化的结果说明了其对生物及人类有潜在危害^[14]。

污泥使用后, 一部分污染物可进入食物链^[14], 其中的 PAHs 可被土壤吸附^[15], 在大多数植物器官中也可检测到 PAHs, 通常范围在 1 ~ 100 μg/kg, 个别值高达 1 ~ 10 mg/kg 及以上, 有些研究者还检测到植物根系中高浓度的有机污染物^[16]。Simon 等^[17]

长期进行了污泥土地利用后有机污染物的行为和去向的研究, 主要对象为 PAHs, 对 1942—1961 年间连续施污泥与不施污泥的农田进行了 PAHs 的检测, 并对 1942—1984 年的土壤样品进行了收集和保存。研究结果显示, 施用污泥后土壤中 PAHs 浓度至 1984 年已增加 3 倍多。对英国的 444 份污泥进行分析的结果显示, 污泥中的 PCBs、r-HCH (灵丹) 和 dieldrin (地特灵) 的检出率和浓度均比 aldrin (阿特灵) 和 endrin (安特灵) 要高^[11]。任何进入环境的有机化合物均可能在污泥中被发现。但许多污泥中检测到的有机污染物的含量要比当地土壤背景值高出数倍、数十倍甚至上千倍^[18]。

国内对污泥中有机污染物的研究不多, 且以调查为主。莫测辉等^[29]测定了我国内地和香港地区共 11 个污泥中的 PAHs 含量, 范围在 2.27 ~ 143.8 mg/kg 之间, 其含量已高于香港及国外一些污泥, 部分污泥中苯并[a]芘 (B[a]P) 含量超过了我国农用污泥标准; 蔡全英等^[19]对污泥中氯苯类化合物进行了分析, 其含量在 0.01 ~ 6.92 mg/kg 之间, 其中主要以 1,2,4-三氯苯和六氯苯为主; 蔡全英等^[20]研究还发现, 污泥农用后土壤中 PAHs 含量明显提高, 主要是 3、4 和 5 环的化合物; 堆肥和污泥消化处理可降低污泥中有机污染物的含量^[19]; 广州市大坦沙污水处理厂的污水中检测到毒性有机污染物 54 种, 主要包括邻苯二甲酸酯类、单环芳烃、PAHs、苯酸类、芳香胺类、芳香酸类、氨基甲酸甲酯衍生物和杂环化合物等, 其含量多在几十微克/升以上, 最高达 808 μg/L^[21]; 莫测辉等^[13]对该厂的污泥检测结果也发现了这些污染物, 同时用该厂污泥施肥栽种通菜 (*Ipomoea aquatica*), 收获的植株中邻苯二甲酸酯类 (酞酸酯类) 和 PAHs 等多类优控污染物含量比空白对照高 10 倍以上; 栽种菜心的土壤渗漏水中氯代苯类和硝基酚类的含量也明显比空白对照和化肥对照高^[13]。最近我们对长江三角洲地区 46 个城市污泥的 PCBs、OCPs、PAHs 的含量与组分进行了系统研究。结果表明: 该地区城市污泥中 PCBs 的含量为 0 ~ 0.720 mg/kg, 平均为 0.076 mg/kg, 大部分低于 0.1 mg/kg, 仅 2 个样品含量超过我国污泥农用标准 (0.2 mg/kg); OCPs 的含量为 0 ~ 0.426 mg/kg, 平均为 0.055 mg/kg, 大部分低于 0.05 mg/kg。污泥中 PCBs 以 PCB44 检出量最高, OCPs 以 o,p'-DDT 检出量最高。污泥中 PAHs 的含量为 0.0167 ~ 15.486 mg/kg, 平均为 1.376 mg/kg, 大部分低于 1.5 mg/kg,

污泥中 B[a]P 含量均低于污泥农用标准 (3.0 mg/kg)。PAHs 单体以 3、4 环的检出率和含量较高, 2、5 和 6 环则较低。同时也发现城市污泥中上述有机污染物的含量、组分和分布与污泥类型、污水来源、污水处理工艺及化合物本身的理化性质等有关^[44]。

污泥因其来源于各种污水, 不可避免地含有多种有机污染物^[11-13]。不同污泥中有机污染物的种类和含量不同, 与污水的来源、污泥类型及其处理方式等因素有关。国外一些研究者对污泥农用中有机污染物的特征及其在农业环境中的行为、生态效应和调控措施等方面进行了一些研究。西方发达国家对污泥使用中有机污染物的浓度有一定的限制, 如对 PCBs 和 PCDD/Fs 等提出了一些限量建议。但我国 1984 年农业部颁布的标准 (GB4284-84) 中除了对 B[a]P 的含量制定了控制标准外, 还未能制订出较完善的污泥有机污染物限制标准。2002 年由国家环保局制定的《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002), 增加了一些有关有机污染物的新项目, 但也仅对 PCBs 和 B[a]P 有限制标准, 分别为 0.2 mg/kg 和 3.0 mg/kg。

就整体而言, 对于我国污泥中有机污染物的种类、含量、毒性、转化和去向等还需进行更深入、更全面的研究, 以便为污泥的安全土地利用提供科学依据。

1.3 污泥中的病原菌

近年来, 广大学者一直把污泥土地利用后重金属、杀虫剂和其他化学污染物对生态环境和人类健康的危害作为研究重点, 而关于病原物的研究却不多^[19, 22-23]。病原物是能够对人类或其他生物健康产生危害或引起疾病的一类有害生物或其他物质的总称^[24]。能够引起人类疾病的病原物主要有 4 类: 细菌、病毒、原生动物和寄生虫, 在生活污水污泥中一般都能检测到这些物质的存在^[24]。美国环保署及其他组织的一些学者对污泥中存在的病原物进行统计发现, 污泥中已确认的病原物中, 至少有 24 种细菌、7 种病毒、5 种原生动物和 6 种寄生虫^[24]。这些病原物在污泥中的含量取决于污水来源地区居民的健康状况、污水处理工艺和污泥处理方式等因素。到目前为止, 有关污泥中病原物含量的调查资料还非常有限。孙玉焕等^[25]对长江三角洲地区 15 个城市的 45 个污水处理厂污泥中粪大肠菌群 (FC) 进行了调查, 结果表明, 污泥中 FC 的最大可能数

(MPN) 的范围在 $0 \sim 3.41 \times 10^6$ MPN/g (干基), 平均为 3.79×10^5 MPN/g (干基), 检出率达 89.6%。不同类型污泥中 FC 的数量差别较大, “河流”污水污泥和污泥制品的 FC 数量最低, 以生活污水和混流污水为主的污泥中 FC 数量较高。Gaspard 等^[23]对法国 89 个污水处理厂污泥中病原物进行调查的结果表明, 在所有被调查的污泥样品中, 每 100 g 污泥样品中寄生虫卵平均为 464 个, 最高为 898 个, 其中 47% 的样品 < 60 个, 38% 的样品为 60 ~ 240 个, 有 15% 的样品高于 240 个。由此可见, 污泥中病原物种类和数量繁多, 当污泥土地利用时, 病原物可随污泥一起进入土壤环境, 增加土壤中病原物的含量。如果对污泥处理或施用不当, 会污染外界环境, 威胁人类健康。Gibbs 等^[26]的研究结果表明, 污泥施入土壤后, 粪大肠杆菌和沙门氏菌数量均较对照高, 随着施入时间的延长, 二者数量均降低, 施用 8 ~ 29 周后没有检出沙门氏菌。病原物在土壤中的存活时间受多种因素的影响如光照、温度、湿度、土壤和植被类型及土著微生物等。病原物的存活与土壤类型也有一定关系。植被的覆盖程度对病原物的存活也有较大影响。土壤并不是病原物生活的理想场所, 污泥中的病原物进入土壤后, 存在一个逐渐消减的过程, 而这种过程受多种因素的综合影响。同时, 在适宜条件下, 污泥中一部分易腐化分解的有机质分解会释放大量含 NH₃、H₂S、SO₂、有机硫、胺类和甲基吲哚类等有强烈难闻气味且有毒有害的气体^[27], 污染大气环境, 还会滋生蚊蝇传播各种疾病, 使周围环境变得恶劣, 影响景观和景观, 这些都给污泥的存放和施用带来很大的困难。因此, 对于未经稳定化和无害化处理的污泥应禁止施用到公园绿地和距离居民区较近的土地上。采取堆肥措施进行污泥稳定化可在一定程度上解决臭味的问题。堆肥场地也应远离居民区, 堆肥过程中需对臭气采取控制措施, 避免成为环境二次污染源。

1.4 污泥中 N 和 P 的过剩问题

前人的研究表明, NO₃⁻ 的淋溶流失和地面径流分别是地下水和地表水污染的重要原因^[28]。国内外对于饮水中 NO₃⁻ 含量过高导致“蓝婴病”和癌症已有多次报道^[29]。对 NO₃⁻-N 淋溶污染地下水问题, 世界各国都给予了高度重视, 世界卫生组织规定饮用水的 NO₃⁻ 含量不超过 45 mg/L, 美国限制 NO₃⁻ 在 10 mg/L 以下, 我国政府 1985 年起也要求 NO₃⁻

不得超过 20 mg/L。

有研究表明, 污泥中有机质的分解矿化在前 6 周较快, 随后逐渐变慢^[30]。国外有研究发现, 污泥施用的当季, 其土壤渗滤液中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量高于对照处理。也有研究发现, 施用污泥后 N 的有效性、植物吸收和淋溶与污泥来源及性质有关。虽然一次大量施用可获得高产, 但 N 的淋溶率较高, 会污染地下水。从保证产量和防止水污染综合考虑, 多次少量比一次大量施用对 N 的利用更合理。并且土壤 N 的淋溶还受到土壤条件的影响, 壤土的淋溶速度和淋失量显著高于黏土^[6]。

虽然通常 P 素在土壤中的迁移性较小, 但污泥施用后会提高污泥施用层以下的土壤的 P 含量。有研究发现, 土壤中可提取态 Fe 和 Al 对 P 在土壤中的持留有显著影响, 可明显降低砂土中 P 的剖面迁移^[31]。

从前人的研究可发现, 污泥施用时间、单次施用量和所施用的土壤条件对污泥施用后 N、P 的迁移都有重要影响。因此, 可通过减少施用量、选择适宜的施用条件、调节施用时间, 使污泥分解矿化时间与作物吸收一致等措施来提高养分利用率, 降低对环境二次污染的风险。

2 污泥的处置方式及状况

目前, 污泥的主要处置方式有填埋、焚烧、土地利用和用作建材等。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、技术措施和交通运输等因素确定, 且随着公众认识的提高和兴趣的改变而发生变化。通常在实际应用时各种处置方法主要体现在技术要求、费用和安全性等方面。由于操作简便、处理费用较低等优点, 海洋倾倒曾是污泥处理的主要途径之一。但随着人们生态环境意识的加强, 向海洋倾倒废物对生态环境的严重影响已引起人们的广泛关注。美国已于 1988 年禁止污泥的海洋倾倒, 并于 1991 年全面加以禁止。日本对污泥的海洋投弃作了严格的规定。中国政府承诺于 1994 年 2 月 20 日起不再海上处置工业废物和污水污泥。1998 年, 欧盟城市废水处理法令(91/2/EC)也已禁止其成员国向海洋倾倒污泥。

由于可供填埋的场地越来越少, 今后土地填埋必将受到严格控制, 一些国家和地区已对污泥的土地填埋实行收费制度^[24]。由于大量污泥的填埋影响了垃圾场的正常使用寿命, 我国长江三角洲地区的

部分城市垃圾填埋场已拒绝接受污泥, 这迫使污水处理厂为污泥寻找新的出路。由于焚烧法具有设备及运行费用昂贵、投资大且可能有二次污染及浪费能源等缺点, 无法得到推广应用。根据人类可持续发展及对可再生资源循环利用的要求, 土地利用已成为最有前景的污泥处置方式之一。由于污水处理技术和法规的日益完善和提高, 近些年美国、欧盟等发达国家的污泥中污染物的含量有了明显的下降^[7]。在我国, 由于工业污水达标排放等原因, 污泥中的污染物含量也有逐年下降的趋势^[9]。这一系列因素都促使人们对污泥的土地利用日渐关注。

2.1 国外污泥的处置状况

投海的禁止使许多以前以投海为污泥主要处置方式的国家如英国、日本等不得不重新考虑污泥的其他处置方式。美国环保署对美国近 10 年内的污泥产生和处置的预测^[24]表明, 在最近 10 年中美国污泥产生量将稳步增加; 污泥有益利用的数量和比例将显著提高, 采取焚烧填埋处置方式的污泥将较少; 土地利用将成为污泥有益利用的主要方式, 在 2010 年将占到污泥总量的 48%, 远远高于填埋和焚烧等其他处置方式。欧盟诸国也有类似的趋势^[8]。

2.2 中国污泥的处置现状

我国污泥处置从一开始就以土地利用为主。如最早的上海、北京几家污水处理厂, 大多采用湿污泥做农家肥, 直接施到附近的农田中^[9]。近些年, 随着污水处理产业的迅速发展, 污泥产生量不断增加, 对污泥的处置也开始走向多元化, 但仍以土地利用和土地填埋为主。对我国 29 家污水处理厂的调查结果表明, 采用土地利用、土地填埋和堆肥处置污泥的污水处理厂比例为 14 : 10 : 1, 43 个城市 75 家污水处理厂中约有 90% 的污泥用作农家肥^[32]。对长江三角洲地区实地调查发现^[25], 该地区对污泥产生量、成分和性质等缺少清楚的认识, 其利用和处置方式的选择往往贪图简单、节省, 就近随意处置, 有些甚至任意丢弃; 采取土地填埋的污泥往往也没有预先脱水, 填埋场也往往没有采取有效的防渗漏、防废气爆炸的措施, 因此很有可能造成二次污染和其他环境安全隐患; 土地利用的污泥中有些污染物含量往往很高, 施用前常常缺少有效的稳定化措施, 对施用方法和施用量缺少科学的依据。因此在很大程度上, 污泥的处置与利用存在着盲目性。同时, 对污泥放任自流, 在实际中制定的标准也没有得到有效的贯彻实施。特别在今后 10~20 年里污水处理

量和处理水平将会有更大的发展, 势必会产生更多的污泥。如果还是采取原来的态度对污泥进行处置, 必将会对我国环境质量和公众健康造成很大的威胁, 同时也违背了资源循环利用和可持续发展的要求。

3 污泥的土地利用现状及标准

3.1 污泥土地利用的现状

污泥中含有很高的有机质、大量的N、P和K等速效养分, 有明显的培肥效果, 同时还含有许多植物所必需的微量元素, 在土壤中缓慢释放, 供植物生长需要, 很多研究者已做了这方面的研究^[33-36]。因此, 污泥是有用的养分资源、很好的土壤改良剂和肥料。污泥土地利用包括把污泥应用于农田^[37]、菜地^[38-39]、林地^[40]、草地^[41]、市政绿化^[42]、育苗基质^[36]及污染土壤的修复与重建^[43]等。但有报道认为, 中国污泥中的重金属、有机污染物和病原菌是限制污泥循环利用的主要障碍^[18, 44]。

3.2 污泥土地利用的标准

3.2.1 国外污泥土地利用的标准 为了防止过量施用污泥对环境和作物造成危害, 保护人类健康和环境安全, 美国联邦政府对城市污水污泥的土地利用有严格的规定, 在污泥土地利用标准^[1]中, 规定了污泥施用的基本要求、污染物浓度、操作标准、管理措施及对污泥施用地点的定期监测、记录保留和按时汇报等。除此之外, 还规定了污泥土地利用者和污泥生产过程操作者及其他参与污泥处理处置人员的责任和义务。在该标准中, 根据污泥中病原物的含量将污泥分为A和B两大类: 经脱水、高温堆放无菌化处理后, 各项有毒有害物指标达到环境允许标准的为A类, 可作肥料、园林培植土、生活垃圾填埋场覆盖土等所有土地类型。经过脱水或部分脱水等简单化处理的为B类污泥, 只能作林业用, 不能直接用于粮食作物耕地。此标准是一个相对比较健全的污泥土地利用控制标准。但在该标准中, 没有对有机污染物的控制范围做出规定, 对病原物的控制标准过于严格, 不利于污泥的循环利用。为了便于污泥的循环利用, USEPA^[24]对污泥土地利用的病原物限制做了调整, 重新规定了A和B类污泥的病原物标准及施用条件: 污泥中的FC数低于 1×10^3 MPN/g(干基)或沙门氏菌数量低于3 MPN/g(干基)时, 属A类污泥, 土地利用时不受限制; 污泥中的FC介于 $1 \times 10^3 \sim 2 \times 10^6$ MPN/g

(干基)时, 属B类污泥, 土地利用时应综合考虑土壤类型、作物种类、允许进入时间等; 当污泥中的FC $>2 \times 10^6$ MPN/g(干基)时, 污泥不能土地利用。该标准虽然对污泥中病原物及污泥土地利用时的许多方面做了较为详细的规定, 但一些研究者^[2, 22]认为, 该标准对病原物的B类标准范围过宽, 制定该标准的必要性不能充分体现, 建议USEPA重新考虑污泥土地利用的病原物标准。

在欧盟或英国, 污泥土地利用的现行标准不是根据污泥中污染物的浓度来确定的, 而是根据土壤中重金属的最大允许浓度和年平均施用浓度来确定的。欧盟的各成员国都有本国的污泥土地利用标准, 但各标准对污染物的限制浓度是不同的^[8]。1986年6月12日, 欧共体通过了“欧洲议会环境保护、特别是污泥农用土地保护准则”。目前, 欧洲委员会正在考虑对重金属和可能的有机污染物进行限制, 但这将会限制污泥循环利用的潜力。

3.2.2 中国污泥土地利用的标准 为了便于污泥土地利用, 降低因盲目施用而带来的环境二次污染风险, 1984年农业部起草了中华人民共和国国家标准《农用污泥中污染物控制标准》(GB4284-84), 于1985年3月1日起正式实施。其中对污泥中重金属、矿物油和B[a]P等污染物的最高含量做了明确的规定, 还对年最大施用量和连续施用年限以及污泥施用的前处理和环境条件做了规定。此外, 还有建设部的部颁标准《城市污水处理厂污水污泥排放标准》, 其中的农用标准同国标《农用污泥中污染物控制标准》。这在当时的研究条件和污泥利用现状下, 具有一定的参考价值。

为了贯彻各项环保法规, 促进城镇污水处理厂的建设和管理, 加强城镇污水处理厂污染物的排放控制和污水资源化利用, 保障人体健康, 维护良好的生态环境, 结合我国《城市污水处理及污染防治技术政策》, 由国家环境保护总局科技标准司提出, 由北京市环境保护科学研究院、中国环境科学研究院负责起草了一套新的《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002), 从2003年7月1日开始实施。标准中分年限规定了城镇污水处理厂出水、废气和污泥中污染物的控制项目和标准值。

与GB4284-84相比, 新的污泥利用标准在整体上更全面。从污染物控制标准来看, 对重金属、有机污染物、病原物等多种污染物都做了明确的规定。其中对Zn和Cu两种重金属的控制标准的调整, 将

对我国污泥农用有较大的影响。在污泥年施用量和连续施用年限不变的情况下，污泥中重金属含量的提高意味着进入农田生态系统的重金属增加。根据我国农业污泥目前所规定的污染物最高浓度、年施用量和施用年限，可计算污泥施用带入土壤的污染物总量，如每年每公顷施用30 t，连续施用20年，土壤中增加的Zn为800 mg/kg，Cu为400 mg/kg，Pb和Cr均为267 mg/kg，Ni为53 mg/kg，As为20 mg/kg，B为40 mg/kg，Cd为5 mg/kg^[25]。根据连续施用污泥所增加的污染物含量来看，即使不考虑土壤的背景值，很多项目也已超过土壤二级标准的要求。也就是说，按照目前的农用污泥标准实施，会引起土壤环境质量的显著下降。因此，对于新的污泥农用标准是否能实现“保障人体健康，维护良好的生态环境”的初衷，值得进一步探讨。

4 结语

基于我国污水处理产业迅速发展的现状，污泥处置问题必将受到社会各界的关注。对典型区域城市污水处理厂污泥的系统研究，有利于全面了解中国污泥的特性、改进对污泥的管理。以上海、南京、杭州等城市为代表的长江三角洲地区是我国经济发展最迅速、最开放的地区之一，该地区城市污泥的基本情况在一定程度上能够代表我国东南沿海经济发达地区乃至我国城市污泥的基本情况。因此对该地区城市污水处理厂污泥的有机污染物来源、组成、性质、污泥处理处置方式、去向等基本情况的系统调查研究是非常必要的。

污泥的土地利用不仅包含农用，还包含其他方式。如果污泥施用到与食物链无关的土地上，如林地、草地和矿区复垦地等，对有些污染物的含量可适当放宽，当然，在采用非农业类的土地利用时也需考虑对生态环境和人类健康的污染风险。土地利用可在一定程度上利用污泥中的有机质和N、P养分等，但污泥中各种有害成分也会随之重新进入生态环境，因此污泥土地利用时需根据其组成、性质等采取科学、合理、有效的土地施用措施，尽量降低或避免其负面效应的产生，以确保污泥在土壤生态系统中安全有效地循环利用。

参考文献：

- [1] United States Environmental Protection Agency. Land application of sewage sludge-a guide for land appliers on the requirements of the federal standards for the use or disposal of sewage sludge (40 CFR Part 503. EPA/831-B-93-002b). Washington, DC: Office of Enforcement and Compliance Assurance, 1994
- [2] United States National Research Council. Biosolids Applied to Land: Advancing Standards and Practice: Board on Environmental Studies and Toxicology, Division on Earth and Life Studies. Washington, DC: National Academy Press, 2002
- [3] Goi D, Tubaro F, Dolcetti G. Analysis of metals and EOX in sludge from municipal wastewater treatment plants: A case study. *Waste Management*, 2006, 26 (2): 167–175
- [4] Udom BE, Mbagwu JSC, Adesodun JK. Distributions of zinc, copper, cadmium and lead in a tropical ultisol after long-term disposal of sewage sludge. *Environment International*, 2004, 30 (4): 467–470
- [5] 莫测辉, 吴启堂, 周友平. 城市污泥对作物种子发芽及幼苗生长影响的初步研究. *应用生态学报*, 1997, 8 (6): 645–649
- [6] Sogbedji JM, Van EHM, Yang CL. Nitrate leaching and nitrogen budget as affected by maize nitrogen rate and soil type. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29: 1813–1820
- [7] 唐建国, 马远东, 李波. 污水处理厂污泥处理处置技术介绍//污泥处理处置技术与装备国际研讨会文集. 深圳, 2003
- [8] 李季, 吴为中. 国内外污水处理厂污泥产生、处理及处置分析//污泥处理处置技术与装备国际研讨会文集. 深圳, 2003: 1–11
- [9] 陈同斌, 黄启飞, 高定. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势. *环境科学学报*, 2003, 23 (5): 561–569
- [10] Harrison EZ, Oakes SR, Hysell M. Organic chemicals in sewage sludges. *Science of The Total Environment*, 2006 (in press)
- [11] McIntyre AE, Lester JN. Occurrence and distribution of persistent organochlorine compounds in U.K. sewage sludges. *Water, Air and Soil Pollution*, 1984, 23: 397–415
- [12] Webber MD and Lessage S. Organic contaminants in Canadian municipal sludges. *Waste Management and Research*, 1989, 7: 63–82
- [13] 莫测辉, 蔡全英, 吴启堂. 城市污泥中有机污染物的研究进展. *农业环境保护*, 2001, 20 (4): 273–276
- [14] Wild SR, Berrow ML, McGrath SP. Polynuclear aromatic

- hydrocarbons in crops from long-term field experiments amended with sewage sludge. *Environmental Pollution*, 1992, 76: 25–32
- [15] Ryan JA, Bell RM, Davidson JM. Plant uptake of non-ionic organic chemicals from soils. *Chemosphere*, 1988, 17: 2299 – 2323
- [16] Webber JB, Donney JR, Overcash MR. Crop plant growth and uptake of toxic organic pollutants found in sewage sludge: Polynuclear aromatics. Duke University: In Process, Triangle of Environmental Technology, 1984, 3: 1–17
- [17] Simon W, Wild, Kelth S. Organic contaminants in an agricultural soil with a known history of sewage sludge amendments: Polynuclear aromatic hydrocarbons. *Environmental Science and Technology*, 1990, 24: 1706–1711
- [18] Wang MJ. Land application of sewage sludge in China. *Science of the Total Environment*, 1997, 197 (1/3): 149–160
- [19] 蔡全英, 莫测辉, 吴启堂. 部分城市污泥中氯苯类化合物的初步研究. *环境化学*, 2002, 21 (2): 139–143
- [20] 蔡全英, 莫测辉, 吴启堂. 城市污泥和土壤中苯并[a]芘的初步研究. *应用生态学报*, 2001, 12 (5): 769–772
- [21] 王新明, 李顺诚. 广州大坦沙污水处理厂有机物的去除及其向空气中的排放. *环境化学*, 1999, 18 (2): 157–162
- [22] Lewis DL, Gattie DK. Pathogen risks from applying sewage to land. *Environmental Science and Technology*, 2002, 287–293
- [23] Gaspard P, Ambolet Y, Schwartzbrod J. Urban sludge reused for agricultural purposes: Soil contamination and model development for the parasitological risk assessment. *Bulletin De L Academic National De Medicine*, 1997, 181 (1): 43–57
- [24] United States Environmental Protection Agency. Biosolids generation, use and disposal in the United States (EPA530-R-99-009). Washington, DC: Office of Solid Water and Emergency Response, 1999
- [25] 孙玉焕. 长江三角洲地区污水污泥化学组成、病原生物学特性和土壤利用风险研究(博士学位论文). 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2005
- [26] Gibbs RA, Hu CJ, Hu G.E. Regrowth of faecal coliforms and salmonellae in stored biosolids and soil amended with biosolids. *Water Science and Technology*, 1997, 35 (11/12): 269–275
- [27] 李琳, 刘俊新. 挥发性有机污染物与恶臭的生物处理技术及其工艺选择. *环境污染治理技术与设备*, 2003, 2 (5): 41–47
- [28] 吕耀. 农业生态系统中氮素造成的非点源污染. *农业环境保护*, 1998, 17 (1) 35–39
- [29] 白晓慧, 王宝贞. 饮用水中硝酸盐污染及其去除技术. *环境科学动态*, 1998 (3): 19–21
- [30] 周立祥, 胡霭堂, 胡忠明. 城市污泥有机氮矿化动态及其影响因素的研究. *环境科学学报*, 1997, 17 (3): 359–364
- [31] Lu P, O'Connor GA. Biosolids effects on phosphorous retention and release in some sandy Florida soils. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30: 1059–1063
- [32] 李贵宝, 尹澄清, 单保庆. 我国森林与园林绿地污泥的利用及其展望. *北京林业大学学报*, 2001, 23 (4): 71–74
- [33] 周立祥, 胡霭堂, 胡忠明. 城市污泥土地利用研究. *生态学报*, 1999, 19 (2): 185–193
- [34] Warman PR and Termeer WC. Evaluation of sewage sludge, septic waste and sludge compost applications to corn and forage: Yields and N, P and K content of corps and soils. *Bioresource Technology*, 2005, 96 (8): 955–961
- [35] 乔显亮, 骆永明. 污泥土地利用研究 IV. 无锡污泥与香港碱化污泥的肥效比较. *土壤*, 2001, 33 (4): 218–221
- [36] 陈同斌, 高定, 李新波. 城市污泥堆肥对栽培基质保水能力和有效养分的影响. *生态学报*, 2002, 22 (6): 802–807
- [37] Wei YJ and Liu YS. Effects of sewage sludge compost application on crops and cropland in a 3-year field study. *Chemosphere*, 2005, 59 (9): 1257–1265
- [38] Dolgen D, Alpaslan MN, Delen N. Use of an agro-industry treatment plant sludge on iceberg lettuce growth. *Ecological Engineering*, 2004, 23 (2): 117–125
- [39] 乔显亮, 骆永明. 污泥土地利用研究 V. 高铜污泥施用对保护地辣椒生长及其品质的影响. *土壤*, 2001, 33 (4): 222–224
- [40] Smith P. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. *European Journal of Agronomy*, 2004, 20 (3): 229–236
- [41] Adesodun JK, Davidson DA, Hopkins DW. Micromorphological evidence for changes in soil faunal activity following application of sewage sludge and biocide. *Applied Soil Ecology*, 2005, 29 (1): 39–45

- [42] 薛澄泽, 杜新科, 张增强. 复合污泥堆肥施用于高速公路绿化带效果的研究 I. 中央分隔带、护坡及转盘不同植物的生长响应. 农业环境保护, 2000, 19 (4): 204–208
- [43] Calace N, Campisi T, Iacondini A. Metal-contaminated soil remediation by means of paper mill sludges addition: chemical and ecotoxicological evaluation. Environmental Pollution, 2005, 136 (3): 485–492
- [44] 申荣艳. 长三角地区污泥有机污染特征、毒性评价及复合污染土壤修复研究 (博士学位论文). 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2006

The Advances in Municipal Sewage Sludge and Assessment for Its Land Application

SHEN Rong-yan^{1,2,3}, LUO Yong-ming^{1,2,3}, TENG Ying^{1,2}, LI Zhen-gao^{1,2}

(1 Soil and Environment Bioremediation Research Centre, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

3 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Municipal sewage sludge is the residual material after wastewater being cleaned in wastewater treatment plants (WWTPs), generally after primary and secondary treatment processes. It is an unwanted and inevitable by-product of WWTPs. According to national planning, the municipal wastewater treatment rate in China will rapidly increase and indicate a dramatic increase in sewage sludge production in China very soon. Land application is the main way of sludge disposal. The advances in sewage sludges and its land application were reviewed and the problems of the current study on sewage sludges were discussed.

Key words: Municipal sewage sludge, Disposal way, Reclamation, Land application