

# 城市污泥农用的环境效应及控制标准的发展现状\*

李 琼<sup>1,2</sup> 华 珞<sup>1\*\*</sup> 徐兴华<sup>2</sup> 韦东普<sup>2</sup> 马义兵<sup>2</sup>

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院 资源环境与地理信息系统北京市重点实验室 北京 100048;  
2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 农业部作物营养与养分循环重点实验室 北京 100081)

**摘 要** 由于城市污泥中富含植物生长所需要营养元素和有机质,城市污泥农用已成为污泥资源化进程中的重要方式之一。近十几年来,国内外在污泥重金属的形态、生物有效性及其在污泥-土壤-植物系统中的迁移转化规律等方面进行了广泛的研究,并取得显著进展。同时,污泥中有机污染物质和病原体的环境效应也越来越受到关注。但是在我国,污泥农用的环境风险评价的长期性、系统性和田间数据验证还需进一步加强,为合理制定或修改污泥农用标准积累有效的科学数据和提供可靠的科学依据。本文简述了国内外城市污泥的理化性质、污泥农用环境效应以及我国污泥农用标准的研究现状和进展,并对污泥农用研究进行了展望,以期为我国污泥农用的研究和发展提供参考依据。

**关键词** 城市污泥 农用 重金属 有机污染物 控制标准 风险评价 环境效应 痕量元素  
**中图分类号**: X131.3; X705 **文献标识码**: A **文章编号**: 1671-3990(2011)02-0468-09

## A review on environmental effects and control criteria of biosolid agricultural application

LI Qiong<sup>1,2</sup>, HUA Luo<sup>1</sup>, XU Xing-Hua<sup>2</sup>, WEI Dong-Pu<sup>2</sup>, MA Yi-Bing<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Resource Environment and GIS, Beijing City; College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Key Laboratory of Crop Nutrition and Nutrient Cycling, Ministry of Agriculture; Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract** Due to biosolids contains plant nutrients and organic matter, its agriculture utilization is an important disposal or recycling method of this solid waste. In the past decade, there was much research on the forms, behaviors and bioavailability of heavy metals in biosolids and how they are transferred in soil/plant systems. Mean, the environmental effects of organic pollutants and pathogen in biosolids were attracted more and more attentions. This review compared the properties of domestic and foreign biosolids. It also summarized current advances in agro-application of biosolids, with special emphasis on environmental risk and control criteria/standards. A significant scientific progress was made in this regard. Despite this effort, many uncertainties and data gaps remained in the science of regulation of biosolids in especially China. The review concluded that future studies should focus on the risks of agro-application of biosolids by setting up systematic, long-term field experiments. This would foster greater understanding of the environmental behaviors/effects of biosolid contamination. Such would facilitate the setting up of scientific criteria on the use of biosolids in agricultural lands. This brief but comprehensive review has thus provided vital information on future development and utilization of biosolids in agricultural lands.

**Key words** Biosolids, Agricultural application, Heavy metal, Organic pollutants, Control criteria, Risk assessments, Environmental effects, Trace element

(Received Aug. 27, 2010; accepted Nov. 22, 2010)

随着我国城市化进程的加快和污水处理率的提高,城市污泥(即城市生活污水处理残余物)产生量也在急剧增加,急需无害化处理和资源化处置。综合比较各种污泥处置方式,污泥农用是一种经济有

\* 北京城市排水集团有限责任公司项目和公益性农业行业科研专项(200903015)资助

\*\* 通讯作者: 华珞(1948~), 女, 博士, 教授, 主要从事土壤生态环境方面的研究。E-mail: hua\_luo@sina.com.cn

李琼(1984~), 男, 博士研究生, 主要从事城市污泥农用的环境效应研究。E-mail: liq1130@163.com

收稿日期: 2010-08-27 接受日期: 2010-11-22

效的方法<sup>[1-2]</sup>。1998 年美国城市污泥堆肥及利用占其污泥产量的 53%<sup>[3]</sup>, 而 2002 年美国约 60% 的污泥用来改善土壤或者作为农作物的肥料<sup>[4]</sup>。欧洲污泥农用更为广泛, 40% 以上用于农业土地, 其中法国、西班牙、英国、丹麦和卢森堡的污泥农业利用率超过 50%<sup>[5]</sup>。北美和欧洲的污泥农用地还在不断持续增加, 而我国的污泥农用地率较低, 不足 10%。

污泥中含有丰富的 N、P、有机质和植物生长所需要的其他营养物质, 无害化处理的污泥能够改善土壤物理性质、提高土壤肥力、增加土壤微生物多样性和提高酶活性, 可以作为肥料或土壤的改良剂<sup>[6-8]</sup>。但除了营养物质, 污泥中还含有一些难降解的有机物、病原菌、寄生虫卵及重金属等有毒有害物质, 若处理不当会造成二次环境污染。国内许多学者对城市污泥的土地利用进行了研究<sup>[9-10]</sup>, 充分肯定了污泥的土地利用效果, 但由于国内外污泥性质的差异<sup>[11]</sup>, 使得国外污泥农用规范很难适用于我国。近年来, 国内外在污泥农用、环境效应以及控制标准方面已取得显著进展。本文对国内外城市污泥的理化性质、

污泥农用的环境效应研究进展以及我国污泥农用标准的研究现状进行综述, 并对城市污泥农用研究进行了展望。

## 1 城市污泥的性质

城市污泥是污水处理厂在废水处理过程中所产生的沉淀物质, 是由有机残片、细菌菌体、无机颗粒及胶体等组成的极其复杂的非均质体。可以进行农业利用的城市污泥都是经过减容化与稳定化的厌氧消化污泥, 其理化性质对其利用效率有直接影响。

### 1.1 有机质和养分

城市污泥中含有大量有机质<sup>[12-13]</sup>, 丰富的 N、P 以及少量的 K<sup>[14-15]</sup>, 并有作物生长需要的 B 和 Mo 等各种微量元素。与发达国家相比, 我国城市污泥属低有机组分类型。我国城市污泥(不包括工业污泥)的有机质平均含量为  $384 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 低于纯猪粪而高于猪厩肥; N 和 P 平均含量高于猪厩肥和纯猪粪; K 平均含量比纯猪粪和猪厩肥低(表 1)。此结果说明, 我国城市污泥是一个重要的植物生长所需要的 N、P 资源。

表 1 中国和美国有机肥和城市污泥的有机质及养分含量

Tab. 1 Organic matter and nutrient contents in organic manure and biosolids in China and USA  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}(\text{DW})$

| 有机肥 Organic fertilizer                           | 有机质 Organic matter | 全氮 Total nitrogen | 全磷 Total phosphorus | 全钾 Total potassium |
|--------------------------------------------------|--------------------|-------------------|---------------------|--------------------|
| 中国猪粪 <sup>[9]</sup> Pig manure of China          | 714                | 20.7              | 9.00                | 11.2               |
| 中国猪厩肥 <sup>[9]</sup> Pig manure compost of China | 302                | 9.4               | 4.70                | 9.5                |
| 中国鸡粪 <sup>[16]</sup> Chicken manure of China     |                    | 21.4              | 8.79                | 15.3               |
| 中国城市污泥 <sup>[9]</sup> Biosolids of China         | 384                | 27.1              | 14.30               | 6.9                |
| 美国城市污泥 <sup>[4]</sup> Biosolids of America       | 534                | 26.0              | 8.10                | 4.0                |

### 1.2 重金属

由于连续施用污泥会显著增加土壤-植物系统中重金属含量, 所以重金属是限制污泥农用的主要因素之一<sup>[17]</sup>。我国城市污泥重金属含量普遍低于欧美等发达国家<sup>[18]</sup>, 由于我国污水达标排放率不断提高, 使得城市污泥中的重金属呈现下降趋势。陈同斌等<sup>[18]</sup>研究表明, Zn 是我国城市污泥中平均含量最高的重金属元素, 其次是 Cu、Cr, 而毒性较大的元素 Hg、Cd、As 含量均较低, 通常在  $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  左右; 70% 统计样本中 As 含量在  $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  以内, 而 Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 含量则分别在  $2.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $417 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $130 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1701 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  以内。

城市污泥中重金属形态和生物有效性直接影响到污泥土地利用的安全性<sup>[19]</sup>。陈茂林等<sup>[20]</sup>对北京、济南、泰安、南京和厦门 5 个城市的污泥进行连续提取的形态分组研究表明, 污泥的 pH 明显影响污泥中重金属元素的形态及分布, 酸性污泥中各重金

属元素酸溶/交换态(可以直接被生物利用, 通常所说的有效态)比例明显高于其他污泥。污泥中 Cu、Cd、Cr 和 Pb 主要以残渣态和氧化态存在, 其酸溶/交换态比例较低; 污泥中 Zn、Ni 和 B 的形态分布受污水处理厂污泥性质的影响较大, 其中酸溶/交换态一般高于 10%。安森等<sup>[21-22]</sup>的研究也显示我国城市污泥中的 Zn 和 Ni 主要以不稳定态存在, Cu 主要以残渣态及氧化态存在, 而 Pb、Cd、Cr、As、Hg 等毒性较强重金属多以残渣态存在。此外, Hettiarachchi 等<sup>[23]</sup>采用同步加速器技术(微 X-射线荧光探针分析和微 X-射线吸收近边结构光谱)分析污泥中金属形态及金属间结合状况的研究结果显示, 在去除大部分有机碳后, Fe 和 Cd、Cr、Pb、Zn 之间有很强的空间相关性( $R^2=0.65\sim0.92$ ), 表明 Fe 的化合物在保留污泥中痕量元素方面起着重要的作用; Fe 和 Cu 之间较强的相关性出现在没有去除有机碳的样品中, 表明 Cu 与有机碳覆盖层有密切联系, Cu 很可能存在于 Fe 的化合物中。

去除或降低城市污泥中超标重金属元素是有效处置和利用污泥的关键。目前去除污泥中重金属的研究方法主要集中在生物淋滤法、化学方法、电力修复法等方面。生物淋滤法是利用微生物(氧化亚铁硫杆菌)分泌的胞外多聚物直接吸附在污泥中金属硫化物表面,通过细胞内特有的氧化酶系统直接氧化金属硫化物,生成可溶性的硫酸盐;或者利用其代谢物质或代谢物与污泥中某些物质反应的产物来溶解重金属<sup>[24-25]</sup>。该方法可实现重金属的有效去除,具有经济高效的优点,但是其受菌种稳定性及所吸附重金属浓度范围较小、生物淋滤滞留时间长的影响<sup>[26-28]</sup>。化学方法是利用各种酸或有机络合剂对污泥进行酸化或络合处理,使难溶态的金属化合物转化成可溶解的金属离子或金属络合物,在一定条件下可高效的去除重金属,但是该法操作复杂、耗酸量大、成本高,而且同时还在一定程度上溶解污泥中的 N、P 和有机质,降低污泥的肥效<sup>[29-31]</sup>。电化学法是利用电场使重金属通过离子迁移和电渗定向迁移而移出污泥的方法,该技术具有所用化学试剂少、能耗低、修复彻底、可以回收重金属等优点,是一门具有较好发展前途的绿色修复技术,但对渗透性高,传导性差的污泥不太适用<sup>[32-34]</sup>。

### 1.3 城市污泥中的有机污染物

城市污泥中含有多种有机污染物,主要有多环芳烃(PAHs)、邻苯二甲酸酯(PAEs)、多氯代二苯并芘、二恶英/呋喃类(PCDD/Fs)、多氯联苯类(PCBs)、氯苯(CBs)、氯酚(CPs)等,其中 PCBs、OCPs 和 PAHs 是常见的有机污染物<sup>[35]</sup>。对我国 9 个城市的 11 个污水处理厂的污泥进行研究,结果检测到 44 种半挥发性有机组成部分,其中 PAHs 是含量最多的污染物,其干物质含量在  $1.4\sim 79\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间<sup>[36]</sup>。我国大陆城市污泥的多环芳烃总量( $\Sigma\text{PAHs}$ )多数大于  $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,香港城市污泥的  $\Sigma\text{PAHs}$  在  $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  左右<sup>[26]</sup>。与国外相比,我国城市污泥的  $\Sigma\text{PAHs}$  总体偏高,而且在部分城市污泥中仅单个化合物如苯并(a)蒽、蒽、荧蒽和屈的含量就大于  $10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[37]</sup>。国内外城市污泥中的多氯联苯总量( $\Sigma\text{PCBs}$ )浓度一般在  $0.1\sim 20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间<sup>[37-38]</sup>。英国城市污泥中的  $\Sigma\text{PAHs}$  浓度为  $67\sim 370\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (超过欧盟标准), $\Sigma\text{PCBs}$  浓度为  $0.11\sim 0.44\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (低于欧盟标准)<sup>[39]</sup>。美国城市污泥中 16 种 PAH 的浓度为  $17\sim 2030\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其中菲的含量最多<sup>[40]</sup>。蔡全英等<sup>[41]</sup>对我国 11 个城市污泥中硝基苯、2,4-二硝基甲苯、2,6-二硝基甲苯、叠氮苯、联苯胺和 N-亚硝基二正丙胺 6 种含氮有机物进行分析发现其总量在  $0.087\sim 26.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  间。国外城市污泥中  $\Sigma\text{PAEs}$  的总含量一般

在  $1\sim 100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间<sup>[38]</sup>,我国城市污泥 6 种邻苯二甲酸酯化合物的总含量为  $10.5\sim 114.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,平均含量为  $29.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[37]</sup>。研究发现北京城市污泥中  $\Sigma\text{PAEs}$  的总含量为  $20.8\sim 58.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其中 DEHP[邻苯二酯二(2-乙己基)酯]含量最高,约占  $\Sigma\text{PAEs}$  的 90%以上<sup>[42]</sup>。我国城市污泥中主要是六氯苯和 1,2,4-三氯苯,  $\Sigma\text{CBs}$  含量在  $0.01\sim 6.92\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[37]</sup>。甘平等<sup>[43]</sup>研究发现,氯原子的引入是氯苯类难以生物降解的原因,氯取代数越多,越难被微生物氧化,氯苯类化合物降解的难易顺序为 1,4-二氯苯<1,2,4-三氯苯<六氯苯。

## 2 城市污泥农用的环境效应

### 2.1 污泥农用对土壤性质的影响

众所周知,污泥施用到土壤中能够改善土壤的理化性质,如增加土壤孔隙度,减少土壤表面板结和地表径流<sup>[44]</sup>,增加土壤阳离子交换量,提高土壤团聚体的稳定性和保水保肥能力<sup>[45]</sup>。最近关于污泥农用对土壤性质影响的研究进展主要表现在对于生物学性质、土壤养分形态和有效性等方面。

Fernandes 等<sup>[46]</sup>报道适量污泥能够增加土壤微生物碳、氮、磷含量和增强基础呼吸,土壤淀粉酶和脲酶活性的增加与土壤微生物量显著相关。此结果与提高土壤中微生物活性的相关报道一致<sup>[46-49]</sup>,其原因可能是污泥给土壤提供了增强土壤微生物代谢和促进矿化进程的能源<sup>[50]</sup>。值得注意的是,污泥农用能抑制病原微生物活动,增强土壤酶活性<sup>[46,51-52]</sup>。Meyer 等<sup>[53]</sup>研究发现污泥施用可在土壤中使氨积累到一定水平对线虫类产生致命影响,从而抑制根瘤线虫(*Meloidogyne incognita*)群体数量。Zerzghi 等<sup>[54]</sup>报道在土壤中施加 B 类(美国划分为 A、B 两类)污泥 20 年后对土壤微生物(包括细菌、真菌、放射菌)数量没有显著影响,也未在土壤中检测出细菌或病毒产生的病原体,但显著提高了微生物活性。Criquet 等<sup>[55]</sup>研究发现污泥的施入增加了土壤中磷酸酶的活性、微生物密度及有效磷含量(水溶性磷和 Olsen-P)。

由于城市污泥富含 N、P、有机质及 B、Mo 等微量元素,污泥施加到土壤中,能增加土壤 N、P 含量,但对 K 无显著影响<sup>[56-58]</sup>。Sukkariyah 等<sup>[59]</sup>研究发现施加液态污泥增加了沿海平原肥沃土壤中 P 的饱和度和 Mehlich1-P 的浓度。Su 等<sup>[60]</sup>在缺 N 的沙质土壤中研究污泥对土壤 P 的迁移性和分组的影响,结果表明在污泥处理[相当于每 3 年施加  $600\text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$ ]的土壤中总磷和速效磷在 0~25 cm 土层中显著增加;同时污泥 P 绝大部分保留在土壤表层(0~25 cm)或者被植物利用。土壤中污泥 P 的迁移除

受土壤性质和灌水量影响外,还与污泥中P含量有重要关系。虽然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P含量<sup>[61-62]</sup>。Cogger等<sup>[63]</sup>研究了在酸性(pH 5.6)砂质土上种植羊茅(*Festuca arundinacea* Schreb),连续7年施加污泥后发现,每年施加6.7 t污泥处理使土壤表层中累积的植物可利用N超过了该牧草的吸收能力,从而限制了污泥的连续施加。由于植物生长需要的N素高于P素,大部分植物籽粒中N/P比例为4~9之间<sup>[64]</sup>,而我国污泥中N/P比例较低,约为2(表1)。所以,当污泥用做肥料时,如果基于污泥中N素含量来确定污泥的用量,往往会引起土壤中P素富集,从而导致P素流失所引起的环境风险。正因为如此,国际上对于污泥中P的形态开展了一些重要研究,其结果有助于认识污泥农用后P素损失的规律。Su等<sup>[60]</sup>研究发现污泥P主要由水溶态磷组成,砂质森林土中的P在施加污泥后,转变成了其他形态,如有效态无机磷、无定形和铝、铁结晶态磷。Huang等<sup>[65]</sup>采用配备了能量色散X射线光谱元素(EDXS)和X-射线衍射(XRD)的扫描电子显微镜对污泥中P的化学形态进行了研究,结果显示污泥中P由Ca-P形态构成,很可能是磷酸氢钙。同时,Shober等<sup>[66]</sup>利用X射线吸收近边结构(XANES)光谱技术测定城市污泥中P的形态,XANES拟合结果表明,有机磷(以碳-磷键结合的磷)主要来源包括羟基磷灰石、氢氧化铝吸附的 $\text{PO}_4^{3-}$ 和石灰固定污泥中的植酸等。这些结果对于认识污泥中P在土壤中的化学行为和生物有效性非常有帮助。

## 2.2 污泥农用对土壤重金属及其生物有效性的影响

污泥中重金属若在土壤中(特别是低pH土壤)积累到一定水平,进入食物链从而危害人体健康和影响生态安全<sup>[67]</sup>。Walter等<sup>[68]</sup>研究城市污泥农用过程中Cu、Zn在0~20 cm土层有显著积累,并随施肥量的增加而增加,土壤中大量Cu、Zn的积累与污泥中Cu、Zn的含量高相关。此外,Walter等<sup>[68-70]</sup>研究发现,污泥的施用促进了植物生长发育,提高了产量及果实和籽粒的品质。而高的污泥施用量和重金属含量会对植物的生长产生抑制甚至毒害作用<sup>[45,69]</sup>。徐兴华等<sup>[71]</sup>采用盆栽方法研究了污泥中重金属的植物有效性,并与等量重金属盐的植物有效性进行比较的结果表明,施用50 g(污泥)·kg<sup>-1</sup>(土壤)和100 g(污泥)·kg<sup>-1</sup>(土壤)能明显增加番茄和玉米苗期地上部Zn、Cu、As的含量,对Cr、Ni、Pb含量影响不大,施用污泥可以降低玉米苗期地上部Cd的含量;施用污泥与施用等当量水溶性重金属盐相比较,污泥重金

属Zn、Cu、As的有效性低于等量水溶性重金属盐的有效性。李琼等<sup>[72]</sup>利用田间试验初步研究了污泥中痕量元素在土壤与植物可食部分之间的转移规律,结果表明:施用污泥后,尤其是36 t·hm<sup>-2</sup>施用量时,土壤中Zn、Cu、Cd、Pb、As和Hg的含量均显著增加,但施用4.5~36 t·hm<sup>-2</sup>污泥后,除小麦籽粒中Zn、Cu含量和玉米籽粒中Zn、Cr含量显著增加外,其他痕量元素(Cu、Cd、Pb、As和Hg)的含量未显著增加。Oliver等<sup>[73]</sup>研究表明随污泥施加到土壤中,土壤中增加的Zn和Cd会产生竞争吸附作用,从而降低作物对Cd的吸收。McLaughlin等<sup>[74]</sup>研究发现污泥中Cd的溶解度相当或大于可溶性镉盐,但污泥中的Cd对小麦的有效性和转移性显著低于镉盐,可能是由于污泥中Zn<sup>2+</sup>的竞争吸附或可溶有机物与可溶镉的络合作用,降低了Cd的生物吸收。此外,污泥施加后,土壤中的有机质含量增加,也会减少作物对Cd的吸收<sup>[75]</sup>。

## 2.3 污泥中有机物对环境的影响

关于污泥农用后植物中有机污染物的累积效应和在土壤中的残留作用已越来越被人们所关注<sup>[76-79]</sup>。Wild和Jones<sup>[80]</sup>通过在施加污泥的耕地上种植胡萝卜发现,70%的多环芳烃(PAHs)在果皮中,而果实含量很低(小于4.2 mg·kg<sup>-1</sup>)。Jackson和Edujee<sup>[81]</sup>通过建立模型对农用污泥中多氯代二苯并二恶英(PCDDs)和多氯代二苯并呋喃(PCDFs)进行了风险性评价,结果表明PCDDs、PCDFs进入食物链的可能性很小。而McLachlan等<sup>[82]</sup>对长期施用污泥的牧场进行检测,发现该牧场土壤及牛奶中PCDDs、呋喃(PCDD/Fs)和多氯联苯(PCBs)均有明显增加。Oleszczuk和Baran<sup>[83]</sup>研究发现施加污泥后植物中的2~3环的芳香烃含量显著增加,但其含量未达到影响人体健康的程度。城市污泥农用中的有机污染物在土壤中累积及食品安全问题也引起国内关注。比如,种植在施加污泥的土壤上的植物显著增加了以邻苯二甲酸酯和多环芳烃为主的有机污染物<sup>[84-86]</sup>。但是我国在城市污泥农用有机污染物方面的研究还处于起步阶段。

## 3 关于我国城市污泥农用标准的讨论

为了有效地控制污泥中的重金属、有毒有机物等有害物质,世界各国制定了相应控制标准。2002年,国家环境保护总局发布了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)<sup>[87]</sup>,调整了污泥中重金属Zn和Cu的标准(表2),健全了养分、有机污染物和病原菌等项目的标准。但GB18918—2002只是控制城镇污水处理厂的污泥中污染物排放标准,

而不是针对城市污泥农用所制定的标准,致使该标准对城市污泥农用没有约束力。施用污泥的金属浓度必须考虑到土壤的累积承载量、污泥的施用量及年限。一些发达国家对城市污泥农用做了详细的规范,包括污泥中重金属的浓度控制(表 2)、土壤的累积承载量、污泥施用量及不同污泥类别的浓度限制<sup>[88]</sup>。基于此,2009 年国家住房和城乡建设部发布了《城镇污水处理厂污泥处置:农用泥质》标准(CJ/T 309—2009),改变了根据土壤 pH 确定金属浓度限制,而是根据污泥所含金属浓度将污泥分为 A、B 两级,明确了各级别污泥所含金属总量的限值、有机污染物[苯并(a)芘、多环芳烃及矿物油]的限值、适用作物范围等,还增加了卫生学和营养学指标。此标准在一定程度上放宽了对危害较小的金属的限制,而对危害较大的重金属则从严控制,例如 A 级污泥总 Cd、总 Hg 均要求小于 3 mg·kg<sup>-1</sup>。美国和欧洲均制定了比较完善地防止城市污泥农用污染的法律法规。美国 1993 年修订的城市污泥土地利用条例(40

CFR Part 503)除了规定污泥重金属浓度的限量值外,还规定了每年允许从污泥中带入的重金属量和累积总量。由于欧洲污泥农用率较高(>50%)且范围较广,欧盟及各成员国制定了农用污泥重金属浓度标准、土壤中重金属浓度标准,并对单位面积土地污泥施用量、施用频率、施用时间等都作了严格限制。欧盟污泥农用标准(86/278/EEC)实际上仅供各成员国参考,一些成员国根据本国的国情(例如:荷兰、丹麦等国沙质土壤具有的高渗透性),制定了更为严格的污泥重金属浓度限制标准。

城市污泥中的有机污染物可在土壤中累积而造成农作物的污染,目前我国对有机污染物治理还缺乏完善的限量控制标准。各国对有机污染物的控制项目和标准有较大的差异,美国 EPA 没有将有机污染物列入污泥农用标准中,这主要是因为美国对所有优先控制有机污染物的排放已经作了严格规定。欧洲一些国家和我国的污泥农用的有机物控制标准如表 3。

表 2 欧盟国家及中国农用污泥中痕量元素限值比较<sup>[89]</sup>  
Tab. 2 Comparison of trace elements limits of biosolids of agricultural application for the European Union countries and China  
mg·kg<sup>-1</sup>

| 国家 Country                      | 痕量元素 Trace element |       |       |       |     |    |     |    |
|---------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-----|----|-----|----|
|                                 | Zn                 | Cu    | Pb    | Cr    | Ni  | Cd | Hg  | As |
| 欧盟 <sup>1)</sup> European Union | 2 500              | 1 000 | 750   | 1 000 | 300 | 10 | 1-  | —  |
| 德国 Germany                      | 3 000              | 1 000 | 800   | 1 000 | 200 | 15 | 10  | —  |
| 法国 France                       | 2 500              | 800   | 900   | 900   | 200 | 10 | 8   | —  |
| 瑞典 Sweden                       | 800                | 600   | 100   | 100   | 50  | 2  | 2.5 | —  |
| 中国 CJ/T 309—2009 China          |                    |       |       |       |     |    |     |    |
| A 级 Rank A                      | 1 500              | 500   | 300   | 500   | 100 | 3  | 3   | 30 |
| B 级 Rank B                      | 3 000              | 1 500 | 1 000 | 1 000 | 200 | 15 | 15  | 75 |

1)欧盟 86/278/EEC 标准 2000 年修订版 EU. 86/278/EEC revised in 2000.

表 3 部分国家污泥农用的有机污染物控制标准<sup>[4-5]</sup>  
Tab. 3 Control standards of organic pollutants in biosolids of agricultural application of some countries  
mg·kg<sup>-1</sup>(DM)

| 国家 Country | 二恶英、呋喃类<br>PCDD/Fs | 多氯联苯类<br>PCBs     | 有机卤化合物<br>AOX | 壬基酚聚氧乙烯醚<br>NPE | 多环芳烃<br>PAH         | 甲苯<br>Methylbenzene | 苯并芘(a)<br>Benzopyrene |
|------------|--------------------|-------------------|---------------|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| 法国 France  | —                  | 0.8 <sup>1)</sup> | —             | —               | 2~5 <sup>3)</sup>   | —                   | —                     |
| 德国 Germany | 100                | 0.2 <sup>2)</sup> | 500           | —               | 1.5~4 <sup>4)</sup> | —                   | —                     |
| 瑞典 Sweden  | —                  | 0.4               | —             | 100             | 3                   | 5                   | —                     |
| 中国 China   | —                  | —                 | —             | —               | 5 <sup>5)</sup>     | —                   | 2 <sup>5)</sup>       |

1)所有 PCBs 的总量 Total quantities of PCBs; 2)每一种 PCB 的量 Content for a special PCB; 3)萤蒎 Fluoranthene; 4)当污泥用到牧场时的限制标准 Limits for biosolids applied to pasture; 5)A 级污泥 Rank A biosolids.

我国较早的《农用污泥中污染物控制标准》没有规定病原体指标,但我国于 1987 年颁布的《粪便无害化卫生标准》(GB 7959—87)明确要求病原体达到下述标准:蛔虫卵死亡率为 95%~100%,粪大肠菌值为 0.01~0.1。CJ/T 309—2009 污泥农用标准采用如下两项指标:①粪大肠菌值>0.01;②蠕虫卵死

亡率>95%。美国 EPA 将土地利用的污泥产品分为 A、B 两级<sup>[4]</sup>: A 级要求污泥中的粪便大肠菌浓度<1 000 MPNs·g<sup>-1</sup>(DW)或沙门氏菌浓度<3 MPNs·g<sup>-1</sup>(DW),且 A 级产品必须采用附加除病原体工艺; B 级则要求粪便大肠菌浓度几何平均值<2×10<sup>6</sup> MPNs·g<sup>-1</sup>(DW)。欧洲国家在污泥土地利用的病原体方面一般只考察

沙门氏菌和肠虫卵。

污泥农用污染物控制标准应针对不同的土地利用类型(如园艺、林地、粮食、蔬菜等)和作物类型制定相应的污染物控制标准。早期,当污泥用于园林绿化、林地利用、退化地修复时,尚缺乏重金属、病原菌和有机物等污染物的控制标准。于是,2009年国家质量监督检验检疫总局发布了《GB/T 24600—2009 城镇污水处理厂污泥处置 土地改良用泥质》和《GB/T 23486—2009 城镇污水处理厂污泥处置园林绿化用泥质》,规定了不同土地利用类型的污泥污染物控制指标。

我国现行污泥农用标准将重金属列为最大风险因素来考虑污泥的施用量,但是由于农业面源污染的产生,城市污泥农用引起的 N、P 污染风险也越来越受到关注。15 年前,在澳大利亚城市污泥土地利用的施用量通常是基于满足作物对 N 的需求而制定的<sup>[90]</sup>。例如, N 限制污泥用量(NLBAR)通常是用污泥中潜在有效氮(PAN)<sup>[91]</sup>、植物有效氮或可矿化氮<sup>[92]</sup>计算的。但是,不同学者和国家对于 PAN 的估算采用不同的方法。例如, Pierzynski<sup>[91]</sup>用来估算 PAN 的方程:  $PAN = N_{NO_3} + XN_{NH_4} + YN_O$ , 通常都用重量的百分比表示, X 表示  $NH_4-N$  的部分, 但其变化不大, 一般认为是 1; Y 表示有机氮被矿化的部分。美国的 Gilmour 等<sup>[93]</sup>估算第 1 年污泥中 PAN 含量为:  $PAN_1 = [\%NO_3-N + \%NH_4-N \times (1 - \%V/100) \times 20] + [\%D_{yr1} \times \%No \times 0.2]$ , 要求污泥的 C/N < 15, V 表示变化系数, 污泥的变化可以被忽略; D 表示分解系数, 考虑到矿化速率在随后的几年会降低, 每年的变化会给出一系列的系数。基于厌氧消化的脱水污泥数据, Rawlinson<sup>[94]</sup>建议矿化速率为 15% 和变化系数为 20%, 此后变化系数为 50% 也被采用<sup>[83]</sup>。由于基于污泥中 N 素含量来确定污泥用量, P 的施加量往往会超过作物的需求<sup>[95]</sup>, 从而产生水体污染的环境风险。因此, P 限制污泥用量(PLBAR)被广泛接受。PLBAR 可用以下方程估算:  $PLBAR(t \cdot hm^{-2}) = \text{作物需求}(kg \cdot hm^{-2}) / \text{污泥总磷}(kg \cdot t^{-1})$ <sup>[96]</sup>。但是, 考虑到污泥中 P 的利用率和土壤的供 P 能力, 此方程比较保守, 或者说还存在着一定的缺陷。从理论上讲, 不仅考虑作物需要, 还要考虑到土壤 P 素状况, 尤其是要考虑到土壤中 P 素的面源污染发生阈值, 这样才能合理地利用污泥中的养分资源又有效降低了污泥农用的环境风险。

#### 4 对我国城市污泥农用的研究展望

为制定出适合我国国情的城市污泥土地利用控制标准, 实现有效的资源化利用, 需要了解城市污

泥的环境效应、土壤有害物质承载量变异、作物差别、各因素对土壤中重金属和有机污染物等的影响等。尽管城市污泥农用是一种经济有效的资源化利用方式, 但是存在的一些问题也亟待解决。比如, 降低污泥中重金属和有机污染物的含量, 是污泥安全农用的关键。所以, 在不能控制源头的情况下, 污泥中重金属和有机污染物的去除也成为重要的途径, 例如, 生物淋滤法剔除污泥中重金属。综上所述, 我国的城市污泥农用还需在以下几个方面深入研究: (1) 建立基于污泥农用研究的污染物毒性数据库, 对污泥农用进行生态风险评价, 对污泥农用带入土壤中的重金属要通过研究元素在污泥-土壤-植物-人体或动物间的转移特点进行健康风险评价和生态风险评价; (2) 通过室内试验和长期田间试验相结合的方法, 研究污泥中重金属元素对植物的生物有效性; (3) 由于农业面源污染的产生, 城市污泥农用引起的 N、P 对土壤及地下水的污染风险也必须通过长期田间试验研究来进行分析和评价。

#### 参考文献

- [1] McGrath S P, Zhao F J, Dunham S J, et al. Long-term changes in the extractability and bioavailability of zinc and cadmium after sludge application[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(3): 875-883
- [2] Oliver I W, McLaughlin M J, Merrington G. Temporal trends of total and potentially available element concentrations in sewage biosolids: A comparison of biosolid surveys conducted 18 years apart[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 337(1/3): 139-145
- [3] USEPA. Biosolids generation, use, and disposal in the United States[R]. United States Environmental Protection Authority, EPA 530-R-99-009, 1999
- [4] National Research Council. Biosolids applied to land: Advancing standards and practices[R]. Washington, DC: National Academy Press, 2002
- [5] Commission of the European Communities. Report from the Commission to the Council and the European Parliament on the Implementation of Community Waste Legislation[R]. Brussels, 2000
- [6] Richards B K, Steenhuis T S, Peverly J H, et al. Effect of sludge-processing mode, soil texture and soil pH on metal mobility in undisturbed soil columns under accelerated loading[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 109(2): 327-346
- [7] Magesan G N, Wang H L. Application of municipal and industrial residuals in New Zealand forests: An overview[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2003, 41: 557-569
- [8] González M, Mingorance M D, Sánchez L, et al. Pesticide adsorption on a calcareous soil modified with sewage sludge and quaternary alkyl-ammonium cationic surfactants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*

- International, 2008, 15(1): 8–14
- [9] 李艳霞, 陈同斌, 罗维, 等. 中国城市污泥有机质及养分含量与土地利用[J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2464–2474
- [10] 王新, 周启星. 污泥堆肥土地利用对树木生长和土壤环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(1): 174–177
- [11] 邹绍文, 张树清, 王玉军, 等. 中国城市污泥的性质和处置方式及土地利用前景[J]. 中国农学通报, 2005, 21(1): 198–201, 284
- [12] Logan T J, Harrison B J. Physical characteristics of alkaline stabilized sewage sludge (N-Viro Soil) and their effects on soil physical properties[J]. Journal of Environmental Quality, 1995, 24(1): 153–164
- [13] Caravaca F, Garcia C, Hernández M T, et al. Aggregate stability changes after organic amendment and mycorrhizal inoculation in the afforestation of a semiarid site with *Pinus halepensis*[J]. Applied Soil Ecology, 2002, 19(3): 199–208
- [14] Shober A L, Stehouwer R C, Macneal K E. On-farm assessment of biosolids effects on soil and crop tissue quality[J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32(5): 1873–1880
- [15] Martínez F, Cuevas G, Calvo R, et al. Biowaste effects on soil and native plants in a semiarid ecosystem[J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32(2): 472–479
- [16] 农产品质量检测中心. 我国主要有机肥养分含量表[EB/OL]. 2005-09-16. <http://www.fert.cn/1005/2005/9/16/20059161405737185.shtml>
- [17] Kidd P S, Domínguez-Rodríguez M J, Díez J, et al. Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge[J]. Chemosphere, 2007, 66(8): 1458–1467
- [18] 陈同斌, 黄启飞, 高定, 等. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势[J]. 环境科学学报, 2003, 23(5): 561–569
- [19] Calvet R, Bourgeois S, Msaky J J. Some experiments on extraction of heavy metals present in soil[J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 1990, 39(1): 31–45
- [20] 陈茂林, 胡忻, 王超. 我国部分城市污泥中重金属元素形态的研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(6): 1102–1105
- [21] 安森, 周琪, 李永秋. 城市污泥中重金属的形态分布和處理方法的研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 199–202
- [22] 胡忻, 陈茂林, 吴云海, 等. 城市污水处理厂污泥化学组分与重金属元素形态分布研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 387–391
- [23] Hettiarachchi G M, Scheckel K G, Ryan J A, et al.  $\mu$ -XANES and  $\mu$ -XRF investigations of metal binding mechanisms in biosolids[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(1): 342–351
- [24] Bosecker K. Bioleaching: Metal solubilization by microorganisms[J]. FEMS Microbiology Reviews, 1997, 20(3/4): 591–604
- [25] Tyagi R D, Blais J F, Auclair J C. Bacterial leaching of metal from sewage sludge by indigenous iron-oxidizing bacteria[J]. Environmental Pollution, 1993, 82(1): 9–12
- [26] Couillard D, Mercier G. Bacterial leaching of heavy metals from sewage sludge—bioreactors comparison[J]. Environmental Pollution, 1990, 66(3): 237–252
- [27] Shoor F, Tyagi R D. Thermophilic microbial leaching of heavy metals from municipal sludge using indigenous sulfur-oxidizing microbial[J]. Application Microbiology and Biotechnology, 1996, 45(3): 440–446
- [28] Chan L C, Gu X Y, Wong J W C. Comparison of bioleaching of heavy metals from sewage sludge using iron-and sulfur-oxidizing bacteria[J]. Advances in Environmental Research, 2003, 7(3): 603–607
- [29] Mingot J I, Obrador A, Alvarez J M, et al. Acid extraction and sequential fractionation of heavy metals in water treatment sludges[J]. Environmental Technology, 1995, 16(9): 869–876
- [30] Veeken A H M, Hamelers H V M. Removal of heavy metals from sewage sludge by extraction with organic acids[J]. Water Science Technology, 1999, 40(1): 129–136
- [31] Marchioreto M M, Bruning H, Loan N T P, et al. Heavy metals extraction from anaerobically digested sludge[J]. Water Science Technology, 2002, 46(10): 1–8
- [32] Jeong H, Kang B. Removal of lead from contaminated Korean marine clay by electrokinetic remediation technology[M]. Contaminated ground: Fate of pollutants and remediation. London: Thomas Telford Publishing, 1997
- [33] Jakobsen M R, Fritt-Rasmussen J, Nielsen S, et al. Electrodi-alytic removal of cadmium from wastewater sludge[J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, 106(2/3): 127–132
- [34] Wang J Y, Zhang D S, Olena S. Evaluation of electrokinetic removal of heavy metals from sewage sludge[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 124(1/3): 139–146
- [35] Schnaak W, Kuchler T, Kujawa M, et al. Organic contaminants in sewage sludge and their ecotoxicological significance in the agricultural utilization of sewage sludge[J]. Chemosphere, 1997, 5(1/2): 5–11
- [36] Cai Q Y, Mo C H, Wu Q T, et al. Quantitative determination of organic priority pollutants in the composts of sewage sludge with rice straw by gas chromatography coupled with mass spectrometry[J]. Journal of Chromatography A, 2007, 1143(1/2): 207–214
- [37] 莫测辉, 蔡全英, 吴启堂, 等. 城市污泥中有机污染物的研究进展[J]. 农业环境保护, 2001, 20(4): 273–276
- [38] Smith S R. Agricultural recycling of sewage sludge and the environment[J]. Wallingford: CAB International, 1996: 207–236
- [39] Stevens J L, Northcott G L, Stern G A, et al. PAHs, PCBs, PCNs, organochlorine pesticides, synthetic musks, and polychlorinated *n*-alkanes in U.K. sewage sludge: Survey results and implications[J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(3): 462–467
- [40] Pérez S, Farré M L, García M J, et al. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in sewage sludge and their contribution to its toxicity in the ToxAlert<sup>®</sup> 100 bioassay[J]. Chemosphere, 45(6/7): 705–712
- [41] 蔡全英, 莫测辉, 赖坤容, 等. 我国城市污泥中含氮有机污染物的初步研究[J]. 生态学杂志, 2004, 23(3): 76–80
- [42] 郑晓英, 周玉文. 城市污水污泥中邻苯二甲酸酯的研究[J]. 给水排水, 2005, 31(11): 27–29
- [43] 甘平, 樊耀波, 王敏健. 氯苯类化合物的生物降解[J]. 环境科学, 2001, 22(3): 93–96

- [44] Tejada M, Gonzalez J L. Influence of organic amendments on soil structure and soil loss under simulated rain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 93(1): 197–205
- [45] Cheng H F, Xu W P, Liu J L, et al. Application of composted sewage sludge (CSS) as a soil amendment for turfgrass growth[J]. *Ecological Engineering*, 2007, 29(1): 96–104
- [46] Fernandes S A P, Bettiol W, Cerri C C. Effect of sewage sludge on microbial biomass, basal respiration, metabolic quotient and soil enzymatic activity[J]. *Applied Soil Ecology*, 2005, 30(1): 65–77
- [47] Barkay T, Tripp S C, Olson B H. Effect of metal-rich sewage sludge application on the bacterial communities of grasslands[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1985, 49(2): 333–337
- [48] Parat C, Chaussod R, Lévêque J, et al. Long-term effects of metal-containing farmyard manure and sewage sludge on soil organic matter in a fluvisol[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(4): 673–679
- [49] Kizilkaya R, Bayrakli B. Effects of N-enriched sewage sludge on soil enzyme activities[J]. *Applied Soil Ecology*, 2005, 30(3): 192–202
- [50] García-Gil J C, Plaza C, Senesi N, et al. Effects of sewage sludge amendment on humic acids and microbiological properties of a semiarid Mediterranean soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 39(5): 320–328
- [51] Pascual J A, Hernandez T, Garcia C, et al. Enzymatic activities in an arid soil amended with urban organic wastes: Laboratory experiment[J]. *Bioresource Technology*, 1998, 64(2): 131–138
- [52] Antolín M C, Pascual I, García C, et al. Growth, yield and solute content of barley in soils treated with sewage sludge under semiarid Mediterranean conditions[J]. *Field Crops Research*, 2005, 94(2/3): 224–237
- [53] Meyer S L F, Zasada I A, Tenuta M, et al. Application of a biosolid soil amendment, calcium hydroxide, and streptomycetes for management of root-knot nematode on cantaloupe[J]. *Hort Technology*, 2005, 15(3): 635–641
- [54] Zerkzghi H, Gerba C P, Brooks J P, et al. Long-term effects of land application of class B biosolids on the soil microbial populations, pathogens, and activity[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 39(1): 402–408
- [55] Criquet S, Braud A, Nèble S. Short-term effects of sewage sludge application on phosphatase activities and available P fractions in Mediterranean soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(4): 921–929
- [56] Krogstad T, Sogn T A, Asdal Å, et al. Influence of chemically and biologically stabilized sewage sludge on plant-available phosphorous in soil[J]. *Ecological Engineering*, 2005, 25(1): 51–60
- [57] 阎双堆, 卜玉山, 刘利军, 等. 污泥垃圾复混肥对油菜及土壤的影响[J]. *土壤学报*, 2006, 43(3): 524–527
- [58] Casado-Vela J, Sellés S, Navarro J, et al. Evaluation of composted sewage sludge as nutritional source for horticultural soils[J]. *Waste Management*, 2006, 26(9): 946–952
- [59] Sukkariyah B F, Evanylo G, Zelazny L, et al. Cadmium, copper, nickel, and zinc availability in a biosolids-amended piedmont soil years after application[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(6): 2225–2262
- [60] Su J J, Wang H L, Kimberley M O, et al. Fractionation and mobility of phosphorus in a sandy forest soil amended with biosolids[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2007, 14(7): 529–535
- [61] Sui Y B, Thompson M L, Mize C W. Redistribution of biosolids-derived total phosphorus applied to a mollisol[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 28(4): 1068–1074
- [62] Sui Y B, Thompson M L, Shang C. Fractionation of phosphorus in a mollisol amended with biosolids[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(5): 1174–1180
- [63] Cogger C G, Bary A I, Fransen S C, et al. Seven years of biosolids versus inorganic nitrogen applications to tall fescue[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(6): 2188–2194
- [64] Gilbertson C B, Norstadt F A, Mathers A C, et al. Animal waste utilization on cropland and pastureland: A manual for evaluating agronomic and environmental effects[R]. Washington, DC: Utilization Res. Rep. 6. USDA, 1979
- [65] Huang X L, Chen Y, Shenker M. Solid phosphorus phase in aluminum-and iron-treated biosolids[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(2): 549–556
- [66] Shober A L, Hesterberg D L, Sims J T, et al. Characterization of phosphorus species in biosolids and manures using XANES spectroscopy[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(6): 1983–1993
- [67] Udom B E, Mbagwu J S C, Adesodun J K, et al. Distributions of zinc, copper, cadmium and lead in a tropical ultisol after long-term disposal of sewage sludge[J]. *Environment International*, 2004, 30(4): 467–470
- [68] Walter I, Martínez F, Cala V. Heavy metal speciation and phytotoxic effects of three representative sewage sludges for agricultural uses[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 139(3): 507–514
- [69] Wei Y J, Liu Y S. Effects of sewage sludge compost application on crops and cropland in a 3-year field study[J]. *Chemosphere*, 2005, 59(9): 1257–1265
- [70] Mantovi P, Baldoni G, Toderi G. Reuse of liquid, dewatered, and composted sewage sludge on agricultural land: Effects of long-term application on soil and crop[J]. *Water Research*, 2005, 39(2/3): 289–296
- [71] 徐兴华, 马义兵, 韦东普, 等. 污泥和水溶性重金属盐的植物有效性比较研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2008(6): 51–54
- [72] 李琼, 徐兴华, 左余宝, 等. 污泥农用对痕量元素在小麦-玉米轮作体系中的积累及转运的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(10): 2042–2049
- [73] Oliver D P, Hannam R, Tiller K G, et al. The effects of zinc fertilization on cadmium concentration in wheat grain[J]. *Journal Environmental Quality*, 1994, 23: 705–711
- [74] McLaughlin M J, Whatmuff M, Warne M, et al. A field investigation of solubility and food chain accumulation of biosolid-cadmium across diverse soil types[J]. *Environmental Chemistry*, 2006, 3(6): 428–432
- [75] Chaudri A, McGrath S, Gibbs P, et al. Cadmium availability to wheat grain in soils treated with sewage sludge or metal salts[J]. *Chemosphere*, 2007, 66(8): 1415–1423
- [76] Nadal M, Schunhacher M, Domingo J L. Levels of PAHs in

- soil and vegetation samples from Tarragona County, Spain[J]. Environmental Pollutant, 2004, 132(1): 1–11
- [77] Oleszczuk P, Baran S. Influence of soil fertilization by sewage sludge on the content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in crops[J]. Journal of Environmental Science and Health, 2005, 40(11): 2085–2103
- [78] Oleszczuk P, Baran S. Kinetics of PAHs losses and relationships between PAHs properties and properties of soil in sewage sludge-amended soil[J]. Polycyclic Aromatic Compounds, 2005, 25(3): 245–269
- [79] 申荣艳, 骆永明, 章钢娅, 等. 城市污泥农用对植物和土壤中有有机污染物的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 651–657
- [80] Wild S R, Jones K C. Polycyclic aromatic hydrocarbons uptake by carrots grown in sludge-amended soil[J]. Journal of Environmental Quality, 1992, 21(2): 217–225
- [81] Jackson A P, Eduljee G H. An assessment of the risks associated with PCDDs and PCDFs following in the application of sewage sludge to agricultural land in the UK[J]. Chemosphere, 1994, 29(12): 2523–2543
- [82] McLachlan M S, Hinkel M, Reissinger M, et al. A study of the influence of sewage sludge fertilization on the concentrations of PCDD/F and PCB in soil and milk[J]. Environmental Pollution, 1994, 85(3): 337–343
- [83] Oleszczuk P, Baran S. Polycyclic aromatic hydrocarbons content in shoots and leaves of willow (*salixviminalis*) cultivated on the sewage sludge-amended soil[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2005c, 168(1/4): 91–111
- [84] 莫测辉, 蔡全英, 吴启堂, 等. 城市污泥及其堆肥施用对通菜中有机污染物的累积效应[J]. 环境科学, 2002, 23(5): 52–56
- [85] 蔡全英, 莫测辉, 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
- [86] 蔡全英, 莫测辉, 朱夕珍, 等. 城市污泥对通菜-水稻土中有机污染物的累积效应[J]. 中国环境科学, 2003, 23(3): 321–326
- [87] 国家环保总局. GB18918–2002, 城镇污水处理厂污染物排放标准[S]. 北京, 2002
- [88] USEPA. Municipal solid waste in the United States: 2000 facts and figures executive summary[R]. Office of Solid Waste and Emergency Response, EPA-530-5-02-001, Washington, DC, 2002
- [89] EEA. Sludge treatment and disposal management approaches and experience[R]. European Environmental Agency, 1997
- [90] NSW EPA. Environmental guidelines: Use and disposal of biosolids products[R]. Environmental Protection Authority, New South Wales, Sydney, 1997
- [91] Pierzynski G M. Plant nutrient aspects of sewage sludge[M]//Clapp C E, Larson W E, Dowdy R H. Sewage sludge: Land utilization and the environment, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, 1994
- [92] Kanak A, Osborne G, Swinton E A. Beneficial use of biosolids in the sydney region[J]. Water Magazine, 1995, 7: 9–12
- [93] Gilmour J T, Wilson S A, Cogger C G, et al. Estimating plant-available nitrogen in biosolids: A revision[C]. Water Environment Federation. Proceedings of the residuals and biosolids management conference, WEF, Alexandria, VA, 2000
- [94] Rawlinson L V. Biosolids land application trial at Muresk Institute of Agriculture (Northam) for the Water Corporation of Western Australia[R]. L V Rawlinson and Associates Pty Ltd, Berry, NSW, 1997
- [95] Penney N. Review of environmental factors: Biosolids land application—Annadale Farm, Gillingarra[R]. Water Corporation of Western Australia, Leederville, Appendix 1: Based on Occasional paper WTC, No. 1/95, 1999
- [96] DEP, WRC, DOH. Western Australian guidelines for direct land application of biosolids and biosolids products[R]. Department of Environmental Protection, Waters and Rivers Commission and Department of Health, Perth, 2002