城市污泥应用于陆地生态系统研究进展

白莉萍*,伏亚萍
(中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所 国家林业局森林生态环境重点实验室,北京　100091)

摘要:随着城市化进程加快和人口剧增,城市污泥已成为世界许多城市面临的主要环境问题之一,且不合理的管理可引发严重的环境污染。城市污泥含有大量、微量元素和有机质,可能对土壤及其生产力有利,特别对退化土壤能进行有机修复,并改善土壤理化特性,譬如土壤结构和营养含量。目前,污泥作为一种有机肥料已成为普遍措施。但来自工业及生活污水的污泥常含有重金属、病原物及有毒有机物等,潜在的毒性可能对生态系统构成危险,因此必须经过污泥预处理才可安全施用。评述了近年来国内外污泥应用于陆地生态系统 4 个方面的主要研究进展:(1)污泥处理与处置方法;(2)污泥应用于农田、草地及森林生态系统;(3)污泥对土壤生态系统的影响,包括污泥对土壤理化性质、土壤酶及微生物的影响;(4)污泥应用的环境效应。提出未来我国污泥处置及利用需要重视的研究领域和方向。

关键词:污泥;陆地生态系统;土壤生态系统;环境效应
文章编号:1000-0933(2009)01-0416-11　**中图分类号**:Q147,X171,X13　**文献标识码**:A

Research progress of the application of urban sewage sludge to terrestrial ecosystems

BAI Li-Ping*, FU Ya-Ping
Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Beijing 100091, *China*

***Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 0416 ~ 0426.**

Abstract: Due to rapid population growth and urbanization, urban sewage sludge has become one of the most important environmental problems in many cities in the world, and improper management would cause serious environmental issues. Generally, sewage sludge contains macro and micro elements and organic matter, which are beneficial to soils and their productivity. In particular, sewage sludge can provide useful organic amendment in degraded soils to improve soil chemical and physical properties, such as soil structure and nutrient content. Nowadays, the use of sewage sludge as an organic fertilizer has become a common practice, however, sewage sludge derived from both industrial and domestic sources can often contain considerable amounts of heavy metals, pathogens and toxic organics, and the persistence and potential toxicity of these substances may pose a risk to ecosystems. Hence, the utilization of the sewage sludge safely has to be ensured by the preliminary treatment of sewage sludge. The recent advances of the application of sewage sludge to terrestrial ecosystems within four processes were reviewed as follow: (1) the sludge treatment and disposal technologies; (2) the application of sewage sludge to agricultural ecosystems, grassland ecosystems and forest ecosystems; (3) the effects of sewage sludge on soil ecosystem, including soil chemical and physical properties, soil enzymes and soil microorganisms; (4) the environmental effects of sewage sludge application. Finally, some important research fields and trends related to the disposal and application of sewage sludge in the future were also proposed.

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(5082019);中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金一般资助项目(CAFRIF200711);中国林业科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金重点资助项目(CAFYBB2007038)
收稿日期:2008-01-15;　**修订日期**:2008-10-12
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: blp95@126.com

Key Words: sewage sludge; terrestrial ecosystem; soil ecosystem; environmental effect

城市污泥是指城市生活污水、工业废水处理过程中产生的固体废弃物。因人口快速增长和城市化,不合理的污泥废弃物贮存对城市环境构成威胁,并日益成为世界许多城市的主要环境问题[1]。目前,我国年废水排放总量约在 400 多亿 t,每年排放干污泥约为 550 ~600 万 t,且不断增加[2]。到 2010 年,中国城市化率将达 40% ,城镇人口总量将增至 6.7 亿人。按每人每天产生 50g(干物质)污泥计算,城市污泥排放量每年将达 1200 万 t(干物质)以上[3]。因此,如何合理、经济有效地处置数量巨大的污泥已成为非常紧迫的任务。

1　污泥处理与处置方法

目前,国内外污泥处理与处置方法主要为土地利用、填埋、焚烧和投海。因填埋填坑中有害物质通过雨水浸蚀和渗漏污染地下水,而焚烧成本高,易产生大气污染等[2]。因此,填埋、焚烧和投海近年日渐减少或被禁止。城市污泥一般含有较高的有机质和矿质营养(有机质 300 ~600 $g \cdot kg^{-1}$、氮 10 ~40 $g \cdot kg^{-1}$ 和磷 6 ~15 $g \cdot kg^{-1}$)[4]。据计,我国 29 个城市污泥(不包括工业污泥)有机质平均含量为 384 $g \cdot kg^{-1}$,全氮、全磷和全钾分别为 27、14.3 $g \cdot kg^{-1}$ 和 7 $g \cdot kg^{-1}$;有机质、全氮、全磷比纯猪粪分别高出 1/3 ~2/3(全钾比纯猪粪低 1/3),有机质含量呈逐年增加趋势[5]。因此,城市污泥直接或经过干燥、堆肥等方式形成生物污泥(biosolids)应用于不同土地类型已是积极有效的处置方式,尤其一般林场、森林等地区污泥环境容量较大,在集约林地、城市园林、绿地及开垦荒地可避开食物链,对人类健康无害,施用安全[2,4,6,7]。

污水中有 50% ~80% 以上的重金属浓缩于剩余污泥中,其含量约为干污泥的 0.5% ~2% ,某些情况下重量达 4% 。因而,污泥土地利用前须进行无害化预处理,一般有好氧厌氧消化、加石灰稳定法、堆肥等处理方法,一则降低污泥体积,便于运输和施用;二则降低乃至去除病原菌、有毒有害有机物、重金属等[2,8,9]。近年亦出现了辐照污泥的方法[10]。而堆肥是目前许多国家处理污泥的主要方式[4],其指在一定条件下(如 pH、通气、水分、温度等),将污泥等有机废弃物进行好氧堆沤,使之转化成类腐殖质的过程。堆肥后,污泥物理性状改善,质地疏松,营养成分增加,病原菌、寄生虫卵等基本杀死,重金属有效态含量降低,有毒有机物降解率平均在 60% 以上。将污泥和垃圾或木屑、树皮、谷物壳、秸秆等复合堆肥,或与少量化肥制成污泥有机-无机复混肥,是近年开辟的新处理途径[11~14]。研究表明,污泥堆肥较厌氧消化或未经处理的污泥,引起土壤微生物区系平衡变化最小,并对土壤保持长期效用[11,15];污泥堆肥较厌氧消化、颗粒污泥而言,降低 Fe、Mn、Ni 和 Zn 有效性,但增加 Cu 有效性[16];污泥与其他生物废弃物堆肥,可能降低地下水污染的风险[17]。从安全性看,污泥堆肥用作园林肥料较农用更具广阔前景[18]。总之,无害化的污泥进行土地利用,益于:(1)降低潜在的污染源;(2)利于提高土地生产力,降低对合成肥料的需求[16]。

2　污泥在农田生态系统的应用

2.1　不同污泥类型和用量对作物生长及产量的影响

施用城市污泥(有机质含量 36.6%)可增加棉花产量和叶片 K 和 P 含量[19],但工业污泥有降低棉花生物及经济产量的趋势[20]。活性污泥应用后,燕麦生长和营养吸收均增加[21]。污泥复合肥(N-P_2O_5-K_2O = 8-8-6)与等养分化肥相比,小麦最大增产达 17% [22];污泥与化肥复混肥作底肥,冬小麦株高增加 2 ~4 cm, 千粒重提高 0.1 ~1.7g,增产 7.6% ~20.2% [23];污泥和城市垃圾混合堆肥用量 37.5 $t \cdot hm^{-2}$ 和 75$t \cdot hm^{-2}$,春小麦产量较对照分别增加 54.1% 和 14.7% [24]。辐照污泥(5 kGy 剂量的 γ 射线, 氮 43 $g \cdot kg^{-1}$)可增加小麦和水稻产量 11% ~27% [10]。制革脱毒污泥(有机质 50.1%)促进水稻生长,水稻苗期叶绿素含量、生物量(鲜重)和产量分别增加了 17.3% 、17.96% 和 16.95% ,但原始制革污泥则抑制水稻生长,产量较对照下降 27% [25]。另外,施用污泥和垃圾复混肥料($N + P_2O_5 + K_2O = 30\%$)后,油菜产量、叶绿素含量均明显提高[26];堆肥污泥对油菜籽出苗有少许影响,但低量污泥($< 150\ t \cdot hm^{-2}$)可促进油菜幼芽发育;而且对大麦和中国甘蓝的产量为正效应[27]。在碱性退化土壤上,累积施用污泥(全 N 22.2 $g \cdot kg^{-1}$)可使大麦从发育初期乃至抽穗期的干物质生产和叶蛋白质含量提高,产量显著增加[28]。堆肥污泥(有机质 58.3%)加入泥炭,增加椰菜营养及重金

属含量,且泥炭与30%的堆肥污泥混合,使椰菜产量最高[29]。热喷污泥复混肥(总养分26%)施于青菜,比等养分的无机复合肥多增产38%,青菜体内水溶性总糖等约提高30%[30]。热处理污泥颗粒(含水分9.5%)施于灌溉玉米,供应的全N、P含量约为无机肥料(尿素、磷酸氢二铵和KCl混合肥料)的45%,污泥与无机肥料对玉米产量和质量等效[31]。可见,污泥普遍促进作物生长,益于提高生产力,且同一作物或不同作物因污泥类型和施用方式的差异而增幅不一。

研究表明,污泥施用量至关重要,但污泥施用量的界限因不同作物品种及土壤条件而异。譬如,青菜产量随污泥用量增加而增加,但污泥用量高于40 $t\cdot hm^{-2}$时,青菜体内的硝酸盐含量超过国标,达80 $t\cdot hm^{-2}$后产量明显下降,Cd含量超标[32]。污泥施用适量,水稻返青加快、分蘖增多,产量提高,但污泥施用过量超过6000 $kg\cdot hm^{-2}$,秧苗生长及返青受影响;达15000 $kg\cdot hm^{-2}$以上,后期分蘖难以控制,生育延迟,产量显著下降;达24000 $kg\cdot hm^{-2}$以上,秧苗返青率降至80%左右;用量增至48000 $kg\cdot hm^{-2}$,秧苗返青率不足50%[33]。另有研究表明,对水稻而言适宜的污泥施用量应不高于45 $t\cdot hm^{-2}$[34]。当厌氧和脱水污泥用量较大, N供应过量导致小麦倒伏及糖用甜菜和小麦品质变差[35]。由此说明,污泥农用须根据作物品种及土壤条件的差异和作物对N的需要,避免过量施用污泥。

2.2 农田生态系统重金属含量特征

研究表明,堆肥污泥应用于大麦和中国甘蓝,在土壤表层(0~20 cm)、大麦籽粒和中国甘蓝叶片都有重金属(Cu、Zn)积累[27]。污泥施用后,Zn含量在土壤、小麦及蚜虫中随污泥增加而显著增加,而且Zn在迁移中有生物放大作用,蚜虫Zn含量是土壤的4倍,微量金属从土壤-植物-节肢动物乃至捕食性动物的迁移可能有风险[36]。污泥应用多年后,土壤表层因Cd含量及溶解性增加而导致大麦秸秆中Cd含量增加[37];硬质小麦叶片中Pb和Cu浓度较高,叶鞘中Cd、Cr、Cu和Pb浓度较高[38];小麦籽粒中N、P、Zn和Cu含量、糖用甜菜根N和Cu含量以及玉米籽粒中Cu含量均显著增加[35]。污泥性状受处理方式的影响,没有消化处理的污泥,Cd是潜在有毒元素中最有害的元素之一,在玉米植株与籽粒中明显较高[39]。

3 污泥在草地生态系统的应用

目前,城市污泥主要应用于人工草地,不仅增加生物量,而且改善土壤理化特性。譬如,干污泥(有机质42.97%~50.59%)施于无芒雀麦,3a地上生物量增幅分别为163%~203%、41%~120%和35%~106%;0~20cm土壤有机质、全氮、全磷和全钾含量显著增加,土壤容重减小[40]。污泥(有机质35.58%)应用使早熟禾和结缕草生物量增加,早熟禾吸收富集Pb,污泥在15、30、60 $t\cdot hm^{-2}$低施入量时.结缕草吸收富集Cd、Cu和Zn[41];污泥堆肥45 $t\cdot hm^{-2}$(干重)以下时,结缕草土壤中有机质、速效N、总N和总P分别比对照增加16%、78%、61%和140%,结缕草生物量提高1倍[42]。污泥加入不同比例粉煤灰钝化后,高麦草干物重显著增加。随着粉煤灰加入量增加,高麦草地上部Ca,Mg和B的浓度增加,而K,Fe,Mn和Zn的浓度下降,且粉煤灰钝化后没有重金属毒害现象[43]。

对黑麦草而言,施用14~70 $t\cdot hm^{-2}$的污泥堆肥(全N 16.1 $g\cdot kg^{-1}$),黑麦草的地上地下生物量和叶绿素含量明显提高;与不施化肥和施用化肥的对照相比,污泥堆肥可增加土壤有效态氮、磷含量[44];而施用污泥与化肥的复合肥可促进其根系发达及叶片对N的吸收,并提高草密度、覆盖度以及质量[45]。另外,付华等[46]施用污泥于黑麦草也有类似结论,即随污泥施用量(0.5~8 $kg\cdot m^{-2}$)增加,黑麦草盖度、密度、地上、地下生物量及叶绿素含量均显著增加,其地上部组织N、P、K、Mg、Fe、Zn和Cu含量增加,Mn含量减少,Ca和重金属元素Hg、Ni、Pb、As含量与对照间差异不显著;污泥适宜施用量为2.0~4.0 $kg\cdot m^{-2}$。同样,紫羊茅、马尼拉草和白三叶等施用污泥堆肥后,均获得良好生长响应,土壤理化性质明显改善;长期施用没有镉、汞毒害现象[47]。

研究表明,施用污泥(全N 6.5%)改善紫花苜蓿生长,并随污泥用量增加对紫花苜蓿茎中Fe、Cu和Zn含量没有影响[48]。污泥表施可增加荒漠草原生物量产量[49],并通过叶面积的增加而发挥有利作用,污泥春季应用光合速率较夏季高,但植物对污泥的响应却因灌溉制度和物种而异[50]。

4 污泥在森林生态系统的应用

目前,森林生态系统的污泥应用远不及农田土地类型。研究表明,污泥施用可提高森林生产力并改善土

壤特性[51]。污泥(仅镉不符合农用标准,全 N 17.1 $g \cdot kg^{-1}$)施用于 6 年生毛白杨人工纯林,平原林和丘陵林地的毛白杨胸径净生长量分别比对照提高 5.3% ~17.6% 和 1.2% ~5.8%,并以污泥施用量 75 kg· 株$^{-1}$效果最佳[52]。在杨树、泡桐、油松林木上施用干污泥,林木高度和直径都随污泥施用量增加而增加[53]。污泥堆肥(有机质 44.39%)施于榆树较对照树高增加 11% ~25% ,地径粗增加 19% ~50%[54];污泥(用量 300 和 600 kg N hm^{-2})施用在 6 龄松树上,污泥显著促进树木生长,5a 后被处理的树木最大枝条的直径较对照几乎超过了 1 cm[55];污泥施用(不加或混合石灰)均导致柳树茎生物量大幅增加[56, 57],且石灰污泥处理的土壤表层(0 ~10cm) pH 约高 2 个单位,这对低 pH 土壤及土壤酸化尤其有利[57]。污泥和垃圾堆肥(全 N 23.6 $g \cdot kg^{-1}$),明显促进苗木生长,提高叶片叶绿素含量,延长叶片生长期[58]。

施用制革污泥(有机质 48.88%)的杉木生长轮较未施污泥的宽,心材颜色深,且早材管胞的长度、弦向直径、射线频率和高度、壁的厚度均较高,并使杉木生长最快时期提前 3 ~4a,缩短主伐周期,并促进具有较强吸收 Cr 能力的凤尾蕨生长[59]。不同类型污泥(液态和脱水)应用在 50a 的欧洲赤松(*Pinus sylvestris* L.),土壤养分增加,松针 N、Ca 及 Mg 含量提高,土壤 pH 及铵态氮和硝态氮浓度显著提高,并降低腐殖质层的 C/N 比,特别是对 pH 和 C/N 比的影响在 11a 后仍显著,且脱水污泥较液态污泥有显著的长期效应,生态效益更为有利[60]。由此说明,污泥对树木应用的生态环境效应与污泥的类型和用量相关。

在丘陵地区,施用污泥(有机质 31.9%)可有效促进树木生长发育,增加株高和地径,对林中的灌、草层植被也有促进作用[61]。特别是典型丘陵地区缺乏营养的林地施用污泥后,对森林生态系统营养循环可能产生的环境影响,以及商业林区的污泥持续利用,都日益引起广泛关注和重视[62]。

5　污泥对土壤生态系统的影响

5.1　污泥对土壤理化性质的影响

由于污泥有机氮高,C/N 比低,使污泥矿化迅速及肥效较高,施入土壤后,有机物分解的同时也部分形成土壤腐殖物质[63]。研究表明,施用污泥对土壤有机质、全 N 及土壤理化性状如土壤电导率和速效 N、P、K 含量提高有利[20, 64, 65],并增加土壤有效 N、土壤全 C 及 pH[66]。特别是厌氧消化污泥和活性污泥应用 5 周后,土壤无机 N 从 25 增至 >60 $kg \cdot hm^{-2}$[22]。污泥施用 20a 后(用量 100 $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$,每两年施用),土壤有机碳约为对照的 2.5 倍;污泥施用近 6a,有机碳含量和微生物生物量均较对照高[67];好氧和厌氧消化的污泥施用 10a,中高用量(800、1200 kg N $hm^{-2} \cdot a^{-1}$)导致土壤有机质、腐殖质及腐殖酸显著增加,但对碳水化合物、团聚体稳定性无影响[68]。低用量污泥的长期效应对土壤有机质及其组分亦没有影响[69]。

污泥堆肥施入土壤后使其结构系数、水稳定性减小,促进雨水入渗、减少水土流失[54];并增加土壤持水能力、团聚稳定性和阳离子交换量,减少土壤容重[1]。盐化土施用污泥后,土壤改良主要是由于碱化度减少,而使非盐化土壤结构改善的主要因子是有机碳和碳水化合物含量增加,即污泥应用于土壤通过增加团聚体稳定性和降低土壤容重来改善土壤结构[70];石灰性土施污泥后,提高土壤生物化学特性,降低土壤 pH,增加土壤盐分,并随其用量的增加,累积 C 矿化、溶解有机 C、腐殖质和棕黄酸 C 及微生物生物量 C 均显著增加[71]。如污泥和煤灰以低至中等用量混合施用,没有显著的金属吸收或淋溶,利于土壤修复[72]。

污泥用于森林土壤可显著提高营养元素和相关重金属含量,如一次大量施入,可维持相当长时间的高浓度;在植被很少、质地极粗的土壤上一次施入厚达 25 cm 的污泥,15a 后大量养分特别是钙和镁等移动性很大,可移至较深土层[73]。其原因可能是森林土壤 pH 较低, 显著增加金属微量元素的有效性[74]。但在欧洲赤松成熟林施用污泥后,有机土壤层可溶性铵和磷酸盐及 Bs 层的磷酸盐明显增加,归因于污泥中养分淋溶,且污泥施用后土壤 pH 或有效 C 增加,促进土壤矿化过程,导致 N、P 淋失提高,从而可能影响营养循环以及森林土壤的营养损失[62]。

在矿山恢复系统中,施用污泥可提供有机碳并改善土壤肥力,改良矿山废弃地的理化性质和防治水土流失,利于迅速有效地恢复植被,并提高矿山废弃地微生物的活性[75, 76]。特别是污泥应用于铅/锌尾矿的垦植,不仅增加全碳含量及 N、P、K 含量,而且降低尾矿基质的 Zn、Pb、Cd 全量及 Pb 和 Cd 的 DTPA(二乙烯三胺五

乙酸)提取量,继而降低了长喙田菁和田菁植物器官对 Zn、Pb、Cd 的吸收和积累[77]。

5.2 污泥对土壤酶和微生物的影响

污泥施用于土壤生态系统,对土壤质量的影响具有双重性或结论不一,这种差异可能取决于污泥重金属含量和污泥分解速率。一方面,污泥施用使土壤微生物数量和活性增加,土壤中脲酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶及中性磷酸酶的活性增加,从而改善土壤结构,譬如污泥与化肥配施苇状羊茅后,较单施化肥提高煤矸石风化物微生物总数量 4 ~23 倍,脲酶活性 1.8 ~2.8 倍,生物量碳 0.3 ~2.4 倍,说明污泥利于矸石山微生物区系的建立[78 ~81];另一方面,无机或/和有机污染物富积对土壤微生物区系有负面影响,土壤遭受金属污染,譬如污泥中较高浓度 Zn,使微生物活性、生物量及生物量 C 降低[82 ~86];污泥分解时期,污泥中一些重金属可能负面影响土壤酶活性(b-葡糖甘酶,碱性磷酸酯酶,硫酸酯酶和脲酶),污泥中高 N 含量亦可能导致酶抑制[87]。

土壤微生物活性对生物化学过程和农用化学药品转化过程具有重要作用,并直接影响生态系统稳定和土壤肥力。因此,微生物参数被认为是土壤遭受胁迫和化学污染引起土壤环境改变的敏感指标[15, 88],其中土壤呼吸、微生物生物量及固氮被认为是研究土壤微生物区系最常用的参数[11, 83, 89],用于评价环境污染物对土壤肥力及农业生产力的影响[82]。研究表明,污泥连续应用后,随污泥增加,土壤微生物生物量 C、N、基础呼吸、代谢商及酶活性均随之增加,并与污泥用量呈正相关[90]。

不同城市污泥类型引起的响应不同,厌氧消化、堆肥及未经处理的原始污泥应用于典型灰色森林土并种植春大麦,堆肥污泥较无污泥的对照可增加土壤微生物生物量约 1.9 ~4.4 倍,土壤基础呼吸约 2.3 ~6.3 倍及固氮活性约 2.1 ~35 倍,而厌氧消化污泥对微生物量及其活性没有显著影响;原始污泥显著降低了固氮活性,而堆肥污泥对土壤微生物生物量及其活性有利[11]。另外,污泥增加导致动物区系活性增加,这可从排泄物富积及土壤总孔隙度增加显示出来[91]。反之,在污泥中加入蚯蚓,则有利于降低污泥中 Cu 和 Cd 的生物利用度,并显著改善土壤物理属性和有效养分[92]。

施用污泥对土壤固氮菌影响较小,而对硝化菌影响较大[93]。污泥施入农地,锌毒害降低细菌多样性[94]。污泥应用在松类及混交再生林土壤,对链球菌指示细菌数量没有显著影响,而总大肠菌群体随时间和污泥处理水平而变,因此污泥应用可能有一些细菌污染的风险,并取决于污泥类型和森林环境[95]。污泥对根瘤菌种群的大小和脱氢酶活性的影响明显有利,且与土壤 pH、污泥类型及用量和现存金属含量有关[96]。另外,在旱地和水田施用污泥复混肥与等量化肥相比,明显促进硝化细菌和好气性纤维素分解细菌的繁衍,对好气细菌、真菌、放线菌和氨化细菌也略有促进作用,并随污泥复混肥中污泥含量的提高而增强,但对施用多少量其激活作用最大或使用多少量和多长时间才会影响土壤微生物的生化活性或导致土壤和农产品的重金属污染,尚待深入研究[14]。

6 污泥应用的环境效应

一般情形下,污泥土地利用产生的主要环境问题可归结为:重金属污染;病原物污染;氮磷过剩引起的地表水和地下水污染等[63]。因污泥用量、时期以及环境影响因子如土壤特性等不同,污泥应用产生的环境效应研究结论亦不一。

研究表明,污泥可能会因导致营养失衡及有毒元素积累和淋溶而给环境造成危险[97, 98]。污泥携带重金属滞留土壤,吸附土壤含水氧化物、粘土及有机质,并以不溶性盐形式或污泥残留微粒存在[99]。在灌区沙土壤施用污泥,土壤表层 20cm 遭受重金属污染,Zn 和 Cu 积累,因受制于有机质而仅限于表层土壤,对地下水未造成污染[100]。污泥堆肥利用使土壤 Cd 含量比对照增加了 12.95% ~154.48%,而土壤 Pb、Cu、Zn 含量变化甚微[54]。通过模拟 20a 的污泥施用,表明 Cd 对地下水污染风险微小,但土壤表层高 Cd 含量将导致作物吸收 Cd 的风险较大[101]。污泥修复的土壤,Cu、Zn 淋溶数量可观[102];土壤 Cu 和 Zn 有效态增加,Cu 和 Zn 全量和有效量在蚯蚓粪便中均高于对照土壤[103],而且因污泥修复增加了土壤 P 有效性,可能导致水富营养化的危害[35]。

污泥长期施用可增加土壤重金属总量[41]。污泥处理 40a 后的土壤剖面,在表土和底土中 Zn,、Cu、Cd 和

Pb 的平均含量分别为 79.3、32、0.29 $mg \cdot kg^{-1}$和 1.15 $mg \cdot kg^{-1}$,在污泥土壤剖面 AB 层,所有金属含量均高于对照,Pb 和 Cu 具有相对高的迁移性,这些足以引起健康和植物性毒素的风险,因为 Cd 可能进入食物链,而 Zn、Cu 和 Pb 可能减少土壤生产力或污染浅蓄水层[104]。土壤特性如土壤有机质和土壤 pH 可能是影响金属迁移的主要因素。譬如可溶性有机质增加使 Cu 迁移增加,特别是高 pH 的沙土[105]。

然而,在酸性土壤施用污泥,重金属的迁移可以忽略[106]。污泥中高有机质含量及相应低的 pH,可能利于金属-有机质的络合,从而减少重金属迁移以及危害植物的毒性[104]。奶牛场污泥应用于草地,短期内(4a)不会导致重金属有害积累[107]。污泥施用于粘壤土,Cd 的长期迁移(41a)表明,表层土壤中有 92% 的污泥 Cd,而 7% 滞留在底土上层 17cm,Cd 淋失没有造成高风险[37]。而在杨树、泡桐、油松等林木上施用污泥亦未引起地下水污染,重金属均累积于土壤表层,未向下层转移[53];在丘陵区树木土壤施用污泥后,除 Pb 含量随污泥用量增加而增加外,其它重金属增加不显著[58]。另外,园林绿地施用污泥堆肥后,表层土(0 ~ 20 cm)Cd、Pb、Cu、Zn、Ni、Cr 的含量均明显提高,但径流水和渗滤水中 6 种重金属元素含量都很低[108]。污泥用于森林土壤 15a 后,重金属一般未移动至 20cm 以下,由于施用污泥会引起酸化作用增强,使 Cd 和 Pb 的溶解度增加而移动至 17 ~ 27 cm,但重金属仍停留在土壤表层,基本未向下层移动[73]。大豆施用污泥后,在土壤深 2m 处取样,NO_3-N 浓度略高于对照;地下水 NO_3-N 浓度有所增高,但差异很少显著[109]。不过,污泥施用增加 CO_2, N_2O 和 CH_4向大气排放通量,污泥最高用量(是玉米连作 4 次 N 含量的 8 倍)较对照分别增加 220% 、320% 和 165% ,但有一部分 C 被固定在土壤中[110]。

7　研究展望

目前,污泥作为一种有机肥料已成为普遍措施。尽管污泥利用会给植物-土壤系统带来重金属污染风险,但在这些元素浓度低的待修复土壤中,可能给植物带来有益的微量元素。随着城市化进程加快和人口剧增,我国污泥将大量增加,土地利用将是我国污泥处置的主要方法。尤其我国 K 肥严重缺乏,P 肥品位较低且大多难以开采,加之大面积中低产田需改良,废弃矿山需复垦。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、改良土壤以及防治水土流失的一种具有前景的发展途径。不过,与国外相比,我国污泥农林利用率较低, 对城市污泥资源化的理论研究与实践均相差甚远。故而,今后污泥处理及利用的研究展望具体如下:

(1)加强污泥土地利用后植物-土壤之间生态环境效应基础理论的系统研究。譬如,污泥应用后提高植物生产力的生理生态机制;污泥应用后土壤环境中重金属行为以及植物重金属的迁移机理;污泥重金属可能引起的生境污染;环境改变(譬如土壤质量)导致的植物多样性和生产力的变化(譬如杂草侵入)等。

(2)加强污泥施用对生态环境长期影响的定位实验研究和长期定位监测。譬如,污泥中金属微量元素在深土层及地下水淋溶的长期研究;污泥有机质对土壤化学、生物和物理特性的长期影响;污泥矿化对营养循环的长期影响。特别是土壤环境条件(如温度、pH 和土壤水分含量等)变化时,土壤微生物区系受之影响,而土壤微生物是营养循环(C、N 及 P)中的重要部分,对土壤有机质降解起主要作用,因此污泥中综合有毒物对土壤微生物区系的影响已成为当前研究领域的一个热点。

(3)由于污水来源不同和处理技术各异,其成分、含量及特性差别很大,因此有必要研究不同类型及不同用量的污泥有机肥料或复合肥的生态安全适宜性,并有必要区分不同类型污泥营养有效性的差异,以便避免不充足或者过量的应用比例。正确评价污泥营养的有效性,有可能会降低对商业肥料供应的需求。

(4)增强城市污泥土地利用潜在的风险评价研究,尤其是城市污泥中有机污染物质的累计风险以及病原体的危害研究。

(5)寻求经济有效的污泥处理利用的新技术或集成技术示范研究。目前污泥稳定化处理技术主要有热喷、辐射、堆肥、碳化污泥处理等技术,今后须改进或创新污泥处理工艺或技术,减少污泥中有害物质的含量,提高污泥质量,并加强污泥处理技术—污泥应用定量化技术—产业化的集成技术示范研究。

References:

[1] Parkpian P, Ranamukhaarachchi S L, Hansen G K, *et al.* Benefits and risks of using a combination of sewage sludge and chemical fertilizer on rice in acid sulfate soil. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 65: 173－182.

[2] Ma N, Chen L, He P S, *et al.* Study on resource reuse of municipal sewage sludge. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23 (1): 86－89.

[3] Zou S W, Zhang S Q, Wang Y J, *et al.* Character and disposal of municipal sludge and its prospect of using on farmland and forestland in China. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21 (1): 198－201.

[4] Tan Q L, Hu C X, Zhao B, *et al.* Recent advance in agricultural disposal of sewage sludge. Journal of Huazhong Agricultural University, 2002, 21 (6): 587－592.

[5] Li Y X, Chen T B, Luo W, *et al.* Contents of organic matter and major nutrients and the ecological effect related to land application of sewage sludge in China. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23 (11): 2464－2474.

[6] Scheifler R, Ben B M, Gomot-de V A, *et al.* A field method using microcosms to evaluate transfer of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn from sewage sludge amended forest soils to Helix aspersa snails. Environmental Pollution, 2003, 122: 343－350.

[7] Sánchez-Monedero M A, Mondini C, de Nobili M, *et al.* Land application of biosolids. Soil response to different stabilization degree of treated organic matter. Waste Manage, 2004, 24: 325－332.

[8] Zhou L X, Shen Q R, Chen T B, *et al.* Distribution and chemical form of heavy metals in the principal components of undigested sludge. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20 (3): 269－274.

[9] Hua Y M, Chen Y X, Tian G M, *et al.* Techniques for reducing the harm of heavy metals in sludge. China Biogas, 2005, 23 (1): 36－38.

[10] Xu Y C, Jiang T H, Zheng S J, *et al.* Effect of irradiated sewage sludge on crop yield and soil nitrogen. Pedosphere, 1999, 9 (3): 281－288.

[11] Selivanovskaya S Y, Latypova, V Z, Kiyamova S N, *et al.* Use of microbial parameters to assess treatment methods of municipal sewage sludge applied to grey forest soils of Tatarstan. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2001, 86: 145－153.

[12] Zhang Z Q. The application of sludge compost on gardens' greenbelt. Agro-environmental Protection, 1996, 22 (2): 67－71.

[13] Zhao L J, Yang Y D. Study on municipal sewage sludge compost technologies. China Water & Wastewater, 1999, 15 (9): 58－60.

[14] Jing J F, Wang E Y, Yan Z D, *et al.* A study on influence of sludge-compounded fertilizer application to soil microbiota. Bulletin of Science and Technology, 2000, 16 (4): 316－319.

[15] Ros M, Hernandez N T, Garcia C. Soil microbial activity after restoration of a semiarid soil by organic amendments. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35: 463－469.

[16] Walter I, Martínez F, Cala V. Heavy metal speciation and phytotoxic effects of three representative sewage sludges for agricultural uses. Environmental Pollution, 2006, 139: 507－514.

[17] Insam H, Merschak P. Nitrogen leaching from forest soil cores after amending organic recycling products and fertilizers. Waste Management & Research, 1997, 15: 277－292.

[18] Zheng J M. The application of municipal sewage sludge compost on plants of gardens. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2004, 32 (2): 334.

[19] Tsadilas C D, Dim oyiannis D G, Samaras V. Sewage Sludge Usage in Cotton Crop Ⅰ. Influence on Soil Properties. Pedosphere, 1999, 9 (2): 147－152.

[20] Tan Q L, Hu C X, Wei W X, *et al.* Effect of industrial sludge application on cotton yield and soil heavy metals concentration. Journal of Huazhong Agricultural University, 2001, 20 (1): 36－39.

[21] Petersen S O, Petersen J, Rub k G H. Dynamics and plant uptake of nitrogen and phosphorus in soil amended with sewage sludge. Applied Soil Ecology, 2003, 24: 187－195.

[22] Chen T B, Li Y X, Jin Y, *et al.* The effects of compound fertilizer made from municipal sewage sludge compost on N P K and heavy metals uptake of wheat. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22 (5): 644－648.

[23] Li H Y, Zhang X J, Zhang S T, *et al.* Effect of applying sludge compound fertilizer on winter wheat yield. Journal of South China Agricultural University, 2006, 27 (1): 21－24.

[24] Yu C H, Li X W. Effects of municipal sewage sludge and household garbage compound compost on yield and quality of crop. Agro-environmental Protection, 1996, 15 (6): 264－265, 276.

[25] Lu Q B, Zhou L X. Effects of land utilization of bioleaching sludge on crop growth and soil properties: a field trial. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27 (10): 1663－1668.

[26] Yan S D, Bo Y S, Liu L J. Effects of municipal household garbage and sewage sludge compound fertilizer on the rape yield and soil fertility character. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2005, 33 (2): 45－48.

[27] Wei Y J, Liu Y S. Effects of sewage sludge compost application on crops and cropland in a 3-year field study. Chemosphere, 2005, 59: 1257－1265.

[28] Antolín M C, Pascual I, Garc a C, *et al.* Growth, yield and solute content of barley in soils treated with sewage sludge under semiarid Mediterranean conditions. Field Crops Research, 2005, 94: 224－237.

[29] Perez-Murcia M D, Moral R, Moreno-Caselles J, *et al.* Use of composted sewage sludge in growth media for broccoli. Bioresource Technology, 2006, 97: 123－130.

[30] Zhou L X, Zhan X H, Shen Q R, *et al*. Land application of steam-exploded sludge and the sludge compound fertilizer. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 20 (3): 269－274.

[31] Gavalda D, Scheiner J D, Revel J C, *et al*. Agronomic and environmental impacts of a single application of heat-dried sludge on an Alfisol. Science of the Total Environment, 2005, 343: 97－109.

[32] Zhao Y F, Zheng Z, Wang R F, *et al*. Effect of application of sewage on growth and quality of crops. Journal of Anhui Agricultural University. 2005, 32 (2): 216－220.

[33] Wang L M, Wang C Y, Wang L Z, *et al*. Study on effect of sewage sludge on promoting rice tillering and yield increase. Journal of Safety and Environment, 2005, 5 (1): 35－37.

[34] Wang X, Chen T, Liang R L, *et al*. Effects of land utilization of sewage sludge on crops and soils. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13 (2): 163－166.

[35] 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. Water Research, 2005, 39: 289－296.

[36] Green I D, Merrington G, Tibbett M. Transfer of cadmium and zinc from sewage sludge amended soil through a plant aphid system to newly emerged adult ladybirds (*Coccinella septempunctata*). Agriculture. Ecosystems and Environment, 2003, 99: 171－178.

[37] Bergkvist P, Jarvis N, Berggren D, *et al*. Long-term effects of sewage sludge applications on soil properties, cadmium availability and distribution in arable soil. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2003, 97: 167－179.

[38] Frost H L, Ketchum J L H. Trace metal concentration in durum wheat from application of sewage sludge and commercial fertilizer. Advances in Environmental Research, 2004, 4: 347－355.

[39] Lavado R S, Rodr guez M B, Taboada M A. Treatment with biosolids affects soil availability and plant uptake of potentially toxic elements. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, 109: 360－364.

[40] Zhou Z Y, Fu H, Zhang H R, *et al*. Effect of sludge utilization on smooth brome growth. Acta Agrestia Sinica, 2000, 8 (2): 144－149.

[41] Wang X, Zhou Q X, Chen T, *et al*. Effects of land utilization of sewage sludge on grass and soils. Environmental Science, 2003, 24 (2): 50－53.

[42] Chen T, Wang X, Liang R L, *et al*. Sewage sludge as fertilizer for grassland. Chinese Journal of applied Ecology, 2002, 13 (4): 463－466.

[43] Su D C, Zhang F S, Huang H Z. The growth of *Agropyron elongatum* in an artificial soil mix with coal fly ash and sewage sludge. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 1997, 3 (3): 230－235.

[44] Li Y X, Zhao L, Chen T B. The municipal sewage sludge compost used as lawn medium. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22 (6): 797－801.

[45] Zhao L, Li Y X, Chen T B, *et al*. The application of municipal sewage sludge compound fertilizer on turfgrass production. Plant Nurition and Fertilizer Science, 2002, 8 (4): 501－503.

[46] Fu H, Zhou Z Y, Zhang H R, *et al*. The effects of application of sludge on the growth and element contents of *Lolium perenne*. Acta Agrestia Sinica, 2002, 10 (3): 167－172.

[47] Zhang Z Q, Xue C Z. Responses of some turfgrasses to sludge compost. Acta Prataculturae Sinica, 1997, 22 (2): 67－71.

[48] Su D C, Wong J W C, Jagadeesan H. Implications of rhizospheric heavy metals and nutrients for the growth of alfalfa in sludge amended soil. Chemosphere, 2004, 56: 957－965.

[49] Mata-Gonz lez R, Sosebee R E, Wan C. Shoot and root biomass of desert grasses as affected by application of biosolids. Journal of Arid Environments, 2002, 50: 477－488.

[50] Mata-Gonzúlez R, Sosebee R E, Wan C. Physiological impacts of biosolids application in desert grasses. Environmental and Experimental Botany, 2002, 48: 139－148.

[51] Henry C L, Cole D W. Use of biosolids in the forest: technology, economics and regulations. Biomass Bioenergy, 1997, 13: 269－277.

[52] Shi J, Guo W Z, Xu Z H, *et al*. Effects of municipal sewage sludge on *Populus tomentosa* plantation land. Forestry Science and Technology Exploitation, 2007, 21: 24－26.

[53] Zhang T H, Xue C Z. The effects of Xian sewage sludge applied to the forest lands. Acta Universitatis Agriculturalis Boreali-occidentalis, 1994, 22 (2): 67－71.

[54] Wang X, Zhou Q X. Effects of land utilization of sewage sludge compost on trees growth and soil environment. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24 (1): 174－177.

[55] Kimberleya M O, Wang H L, Wilksb P J, *et al*. Economic analysis of growth response from a pine plantation forest applied with biosolids. Forest Ecology and Management, 2004, 189: 345－351.

[56] Labrecque M, Teodorescu T I, Daigle S. Early performance and nutrition of two willow species in short-rotation intensive culture fertilized with wastewater sludge and impact on the soil characteristics. Canadian Journal of Forest Research, 1998, 28: 1621－1635.

[57] Adegbidi H G, Briggs R D, Volk T A, *et al*. Effect of organic amendments and slow-release nitrogen fertilizer on willow biomass production and soil chemical characteristics. Biomass and Bioenergy, 2003, 25: 389－398.

[58] Li Y X, Xue C Z, Chen T B. Use of sludge and refuse compost as medium for sapling cultivation. Rural Eco-Environment, 2000, 16 (1): 60－63.

[59] Wang C T, Mu Q Y, Liu A Y. Study on the variation of the wood structure and floras under *Cunninghamia lanceolata* forestry affected by tanning

sludges. Journal of Plant Resources and Environment, 1995, 4 (2): 43－47.
[60] Bramryd T. Effects of liquid and dewatered sewage sludge applied to a Scots pine stand (*Pinus sylvestris* L.) in Central Sweden. Forest Ecology and Management, 2001, 147: 197－216.
[61] Li G B, Yin C Q, Lin Y B, *et al*. Artifical improvement of soil fertility in a degraded forest ecosystem by using municipal sewage sludge. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13 (2): 159－162.
[62] Mitchell D S, Edwards A C, Ferrier R C. Changes in fluxes of N and P in water draining a stand of Scots pine treated with sewage sludge. Forest Ecology and Management, 2000, 139: 203－213.
[63] Zhou L X, Hu A T, Ge N F, *et al*. Study on utilization of municipal sewage sludge in farmland and forest land. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19 (2): 185－193.
[64] Shao H L, Bo Y S, Yan S D, *et al*. Effects of municipal household garbage and sewage sludge on soil and *Brassica campestris*. Journal of Shanxi Agricultural University, 2004, 24 (3): 297－299.
[65] Chen L X, Huang J, Wei F, *et al*. The effects of application of municipal sewage sludge for a long-term on soil physics and chemistry characteristic. Shang Hai Agriculture Science and Technology. 2005, 2: 27－28.
[66] Munn K J, Evans J, Chalk P M. Mineralization of soil and legume nitrogen in soils treated with metal contaminated sewage sludge. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32: 2031－2043.
[67] 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. Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37: 673－679.
[68] Albiach R, Canet R, Pomares F, *et al*. Organic matter components, aggregate stability and biological activity in a horticultural soil fertilized with different rates of two sewage sludges during ten years. Bioresource Technology, 2001, 77: 109－114.
[69] Adani F, Tambone F. Long-term effect of sewage sludge application on soil humic acids. Chemosphere, 2005, 60: 1214－1221.
[70] García-Orenes F, Guerrero C, Mataix-Solera J, *et al*. Factors controlling the aggregate stability and bulk density in two different degraded soils amended with biosolids. Soil & Tillage Research, 2005, 82: 65－76.
[71] Usman R A, Kuzyakov Y, Stahr K. Dynamics of organic C mineralization and the mobile fraction of heavy metals in a calcareous soil incubated with organic wastes. Water, Air, and Soil Pollution, 2004, 158: 401－418.
[72] Sajwan K S, Paramasivam S, Alva A K, *et al*. Assessing the feasibility of land application of fly ash, sewage sludge and their mixtures. Advances in Environmental Research, 2003, 8: 77－91.
[73] Xue D S, Rob H, Chuck H. Research on the distribution of nutrients and heavy metals in forest soil amended with municipal sewage sludge after 15 years. Acta Universitatis Agriculturalis Boreali-occidentalis, 1992, 20 (3): 20－27.
[74] Römkens P, Salomon W. Cd, Cu and Zn solubility in arable and forest soils: consequences of land use changes for metal mobility and risk assessment. Soil Scienceence, 1998, 163: 859－871.
[75] Rate A W, Lee K M, French P A. Application of biosolids in mineral sands mine rehabilitation: use of stockpiled topsoil decreases trace element uptake by plants. Bioresource Technology, 2004, 91: 223－231.
[76] Mo C H, Cai Q Y, Wang J H. Application of sewage to the abandoned mining land reclamation. Chinese Journal of Ecology, 2001, 20 (2): 44－47.
[77] Ye Z H, Yang Z Y, Chan G Y S, *et al*. Growth response of *Sesbania rostrata* and *S. cannabina* to sludge-amended lead/zinc mine tailings A greenhouse study. Environment International, 2001, 26: 449－455.
[78] Wu D M, Zhang J H, Hong J P, *et al*. Effect of applying chemical fertilizers and sludge on micro-organisms activities of gangue weathering matter. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14 (3): 100－103.
[79] Jiang C, Yang J, Chen Z T, *et al*. Study on Agricultural Application of sewage sludge and sewage sludge compound fertilizer. Journal of Jilin Agricultural University, 1998, 18 (2): 46－50.
[80] Zhang Q, Wu Q T, Huang H Z, *et al*. Effect of sludge compost application on crop and soil. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9 (4): 277－280.
[81] Tan Q L, Hu C X, Zhou H J, *et al*. Forms of heavy metal in sewage sludge and its effects on soil enzymes activities of alluvial soil. Journal of Huazhong Agricultural University, 2002, 21 (1): 36－39.
[82] Brendecke J W, Alexson R D, Pepper I L. Soil microbial activity as an indicator of soil fertility: long-term effects of municipal sewage sludge on an arid soil. Soil Biology and Biochemistry, 1993, 25: 751－758.
[83] Flie bach A, Martens R, Reber H H. Soil microbial biomass and microbial activity in soils treated with heavy metal contaminated sewage sludge. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26: 1201－1205.
[84] Leita L, De Noblil M, Muhlbachova G, *et al*. Bioavailability and effects of heavy metals on soil microbial biomass survival during laboratory incubation. Biology and Fertility of Soils, 1995, 19: 103－108.
[85] Khan I M, Scullion J. Effect of soil on microbial responses to metal contamination. Environmental Pollution, 2000, 110: 115－125.
[86] Rosta U, Joergensenb I R G, Chander K. Effects of Zn enriched sewage sludge on microbial activities and biomass in soil. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33: 633－638.
[87] Kızılkaya R, Bayrakll B. Effects of N-enriched sewage sludge on soil enzyme activities. Applied Soil Ecology, 2005, 30: 192－202.

[88] Chander K, Brookes P C. Residual effects of zinc, copper and nickel in sewage sludge on microbial biomass in a sandy loam. Soil Biology and Biochemistry, 1993, 25: 1231 - 1239.

[89] Anderson T H, Domsch K H. The metabolic quotient for CO_2 (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. Soil Biology and Biochemistry, 1993, 25: 393 - 395.

[90] Fernandes S A P, Bettiol W, Cerri C C. Effect of sewage sludge on microbial biomass, basal respiration, metabolic quotient and soil enzymatic activity. Applied Soil Ecology, 2005, 30: 65 - 77.

[91] Adesodun J K, Davidson D A, Hopkins D W. Micromorphological evidence for changes in soil faunal activity following application of sewage sludge and biocide. Applied Soil Ecology, 2005, 29: 39 - 45.

[92] Liu X L, Hu C X, Zhang S Z. Effects of earthworm activity on fertility and heavy metal bioavailability in sewage sludge. Environment International, 2005, 31: 874 - 879.

[93] Zhou L X, Hu A T, Ge N F. The effects of utilization of municipal sewage sludge in farmland on soil fertility character. Chinese Journal of Soil Scienceence, 1994, 25 (3): 126 - 129.

[94] Moffett B F, Nicholson F A, Uwakwe N C, *et al*. Zinc contamination decreases the bacterial diversity of agricultural soil. FEMS Microbiology Ecology, 2003, 43: 13 - 19.

[95] Vasseur L, Cloutier C, Labelle A, *et al*. Responses of indicator bacteria to forest soil amended with municipal sewage sludge from aerated and non-aerated ponds. Environmental Pollution, 1996, 92: 67 - 72.

[96] Obbard J P. Ecotoxicological assessment of heavy metals in sewage sludge amended soils. Applied Geochemistry, 2001, 16: 1405 - 1411.

[97] McBride M B, Richards B K, Steenhuis T, *et al*. Mobility and solubility of toxic metals and nutrients in soil fifteen years after sludge application. Soil Science, 1997, 162: 487 - 500.

[98] Bhogal A, Nicholson F A, Chambers B J, *et al*. Effects of past sewage sludge additions on heavy metals availability in light textured soils: implications for crop yields and metal uptakes. Environmental Pollution, 2003, 121: 413 - 423.

[99] Alloway B J, Jackson A P. The behaviour of heavy metals in sewage sludge-amended soils. Science of the Total Environment, 1991, 100: 151 - 176.

[100] Madyiwa S, Chimbari M, Nyamangara J, *et al*. Cumulative effects of sewage sludge and effluent mixture application on soil properties of a sandy soil under a mixture of star and kikuyu grasses in Zimbabwe. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27: 747 - 753.

[101] Moradi A, Abbaspour K C, Afyuni M. Modelling field-scale cadmium transport below the root zone of a sewage sludge amended soil in an arid region in Central Iran. Journal of Contaminant Hydrology, 2005, 79: 187 - 206.

[102] Karathanasis A D, Johnson D M C, Matocha C J. Biosolid colloid mediated transport of copper, zinc and lead in waste-amended soils. Journal of Environmental Quality, 2005, 34: 1153 - 1164.

[103] Kızılkaya R. Cu and Zn accumulation in earthworm *Lumbricus terrestris* L. in sewage sludge amended soil and fractions of Cu and Zn in casts and surrounding soil. Ecological Engineering, 2004, 22: 141 - 151.

[104] 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. Environment International, 2004, 30: 467 - 470.

[105] McBride M B, Richards B K, Steenhuis T, *et al*. Long-term leaching of trace elements in a heavily sludge-amended silty clay loam soil. Soil Science, 1999, 164: 613 - 623.

[106] Camobreco V J, Richards B K, Steenhuis T S, *et al*. Movement of heavy metals through undisturbed and homogenized soil columns. Soil Science, 1996, 161: 740 - 750.

[107] López-Mosquera M E, Moir n C, Carral E. Use of dairy-industry sludge as fertilizer for grasslands in northwest Spain: heavy metal levels in the soil and plants. Resources, Conservation and Recycling, 2000, 30: 95 - 109.

[108] Cao R L, Huo W R, Jia X K. Study on the environmental impact of sludge compost utilization on green area. Research of Environmental Sciences, 1997, 10 (3): 46 - 50.

[109] Currie V C, Angle J S, Hill R L. Biosolids application to soybeans and effects on input and output of nitrogen. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2003, 97: 345 - 351.

[110] Fernandes S A P, Bettiol W, Cerri C C, *et al*. Sewage sludge effects on gas fluxes at the soil - atmosphere interface, on soil $\delta^{13}C$ and on total soil carbon and nitrogen. Geoderma, 2005, 125: 49 - 57.

参考文献:

[2] 马娜,陈玲,何培松,等. 城市污泥资源化利用研究. 生态学杂志,2004,23(1):86 ~ 89.

[3] 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. 中国农学通报,2005,21(1):198 ~ 201.

[4] 谭启玲,胡承孝,赵斌,等. 城市污泥的特性及其农业利用现状. 华中农业大学学报,2002,21(6):587 ~ 592.

[5] 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. 生态学报,2003,23(11):2464 ~ 2474.

[8] 周立祥,沈其荣,陈同斌,等. 重金属及养分元素中城市污泥主要组分中的分配及其化学形态. 环境科学学报,2000,20(3):269 ~ 274.

[9] 华玉妹,陈英旭,田光明,等. 污泥中重金属的无害化技术. 中国沼气,2005,23(1):36 ~ 38.

[12] 张增强. 污泥堆肥在园林绿地的利用. 农业环境保护,1996,15(1):36 ~ 40.

[13] 赵丽君,杨意东. 城市污泥堆肥技术研究. 中国给水排水,1999,15(9):58～60.
[14] 景金富,王恩义,严志达,等. 污泥复混肥对土壤微生物区系影响的研究. 科技通报,2000,16(4):316～319.
[18] 郑建敏. 城市污泥堆肥在园林植物中的应用. 安徽农业科学,2004,32(2):334.
[20] 谭启玲,胡承孝,魏文学,等. 施用工业污泥对棉花产量及土壤重金属含量的影响. 华中农业大学学报,2001,20(1):36～39.
[22] 陈同斌,李艳霞,金燕,等. 城市污泥复合肥的肥效及其对小麦重金属吸收的影响. 生态学报,2002,22(5):644～648.
[23] 李海英,张学军,张书廷,等. 利用污水厂污泥生产复混肥及对冬小麦增产效果研究. 华南农业大学学报,2006,27(1):21～24.
[24] 于彩虹,李秀文. 城市垃圾和污泥混合堆肥对作物产量和品质的影响. 农业环境保护,1996,15(6):264～265,276.
[25] 路庆斌,周立祥. 污泥生物脱毒后土地利用对农作物及土壤环境的影响研究:田间试验. 环境科学学报,2007,27(10):1663～1668.
[26] 闫双堆,卜玉山,刘利军. 城市污泥、垃圾复混肥对油菜产量及土壤肥力性状的影响. 山西农业科学,2005,33(2):45～48.
[30] 周立祥,占新华,沈其荣,等. 热喷处理污泥及其复混肥的养分效率与生物效应. 环境科学学报,2001,21(1):95～100.
[32] 赵永富,郑正,王荣富,等. 施用辐照污泥对农作物生长及其品质的影响. 安徽农业大学学报,2005,32(2):216～220.
[33] 王连敏,王春艳,王立志,等. 污泥对水稻分蘖及产量形成影响的研究. 安全与环境学报,2005,5(1):35～37.
[34] 王新,陈涛,梁仁禄,等. 污泥土地利用对农作物及土壤的影响研究. 应用生态学报,2002, 13(2): 163～166.
[40] 周志宇,付华,张洪荣,等. 施用污泥对无芒雀麦生育的影响. 草地学报,2000,8(2):144～149.
[41] 王新,周启星,陈涛,等. 污泥土地利用对草坪草及土壤的影响. 环境科学,2003,24(2):50～53.
[42] 陈涛, 王新, 梁仁禄, 等. 污泥草地利用的初步研究. 应用生态学报,2002,13(4):463～466.
[43] 苏德纯,张福锁,黄焕忠. 粉煤灰钝化污泥人工土壤上高麦草生长发育及营养状况研究. 应用与环境生物学报,1997,3(3):230～235.
[44] 李艳霞,赵莉,陈同斌. 城市污泥堆肥用作草皮基质对草坪草生长的影响. 生态学报,2002,22(6):797～801.
[45] 赵莉,李艳霞,陈同斌,等. 城市污泥专用复合肥在草皮生产中的应用. 植物营养与肥料学报,2002,8(4):501～503.
[46] 付华,周志宇,张洪荣,等. 施用污泥对黑麦草生育及其元素含量的影响. 草地学报,2002, 10(3):167～172.
[47] 张增强,薛澄泽. 污泥堆肥对几种草坪草生长的响应. 草业学报,1997,6(1):57～65.
[52] 史靖,郭伟珍,徐振华,等. 城市污泥应用于毛白杨林地施肥试验. 林业科技开发,2007,21(5): 24～26.
[53] 张天红,薛澄泽. 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.
[54] 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. 农业环境科学学报,2005,24(1):174～177.
[58] 李艳霞,薛澄泽,陈同斌. 污泥和垃圾堆肥用作林木育苗基质的研究. 农村生态环境, 2000,16(1):60～63.
[59] 王昌台,木乔英,刘爱英. 制革污泥对杉木木材结构及杉木林下植被的影响. 植物资源与环境,1995,4(2):43～47.
[61] 李贵宝, 尹澄清,林永标,等. 城市污泥对退化森林生态系统土壤的人工熟化研究. 应用生态学报,2002,13(2):159～162.
[63] 周立祥,胡蔼堂,戈乃玢,等. 城市污泥土地利用研究. 生态学报,1999,19(2):185～193.
[64] 邵海林,卜玉山,严双堆,等. 生活垃圾和污泥对土壤肥力及油菜生长的影响. 山西农业大学学报,2004,24(3):297～299.
[65] 陈凌霞,黄杰,魏峰,等. 生活污泥长期施用对土壤理化性状的影响. 上海农业科技, 2005,2:27～28.
[73] 薛栋森,Rob Harrison,Chuck Henry. 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.
[76] 莫测辉,蔡全英,王江海. 城市污泥在矿山废弃地复垦的应用探讨. 生态学杂志,2001,20(2):44～47
[78] 武冬梅,张建红,洪坚平,等. 施肥对煤矸石风化物的微生物活性的影响. 水土保持学报,2000,14(3):100～103.
[79] 姜城,杨金,陈振天,等. 污泥、污泥复合肥农业应用的初步研究. 吉林农业大学学报,1998,18(2):46～50.
[80] 张桥,吴启堂,黄焕忠,等. 施用污泥堆肥对作物和土壤的影响. 土壤与环境,2000,9(4): 277～280.
[81] 谭启玲,胡承孝,周后建,等. 城市污泥中的重金属形态及其对潮土酶活性的影响. 华中农业大学学报,2002,21(1):36～39.
[93] 周立祥,胡霭堂,戈乃玢. 城市生活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.
[108] 曹仁林,霍文瑞,贾晓葵. 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.