

# 城市垃圾堆肥的生态效应与对策研究

范海荣 华 珞\* 傅 桦 王学江

(首都师范大学资源环境与地理信息系统北京重点实验室 北京 100037)

**摘 要** 本文分析了城市垃圾堆肥的生态效应,其中包括肥力效应:提高土壤养分,改善土壤的理化性质;生物效应:改善土壤的微生物特性,提高植物的产量和品质;环境负效应:造成土壤的沙化、盐渍化、重金属积累等;环境正效应:修复被污染的土壤,防止水土流失;并阐述了垃圾堆肥环境效应的预防措施。最后提出了城市垃圾堆肥的发展对策:提高垃圾堆肥的质量,发展有机无机复合肥。

**关键词** 垃圾堆肥;生态效应;肥力效应;生物效应;环境效应;有机无机复合肥

**中图分类号** X705

垃圾堆肥是目前广泛应用且经济有效处理和消纳城市垃圾的重要途径之一。垃圾堆肥法就是利用微生物的活动将垃圾中的易腐有机质分解,转变成富含有机质和 N、P、K 等营养元素的有机质肥料,使垃圾实现从自然界来又回归自然界的良性循环。垃圾堆肥中含有大量的有机质以及植物生长所需的养分,可以用来肥田和改良土壤,同时堆肥中又含有重金属等物质,具有污染环境、危害健康的负效应,如何降低重金属的毒害效应已经成为垃圾堆肥研究的热点之一。目前,国内外关于垃圾堆肥的研究很多,本文就城市垃圾堆肥的肥力效应、生物效应和环境效应进行了系统论述,对垃圾堆肥环境效应的预防措施进行了阐述,并分析与提出了垃圾堆肥今后的发展对策。

## 1 垃圾堆肥的肥力效应

垃圾堆肥不仅含有丰富的有机质、N、P 等养分,而且可以明显地起到改良土壤的作用,有望成为发展粮食、蔬菜、花卉、林木生产等方面的有效资源。

### 1.1 垃圾堆肥能够提高土壤养分

许多研究已经证明垃圾堆肥能够提高土壤养分。陈文龙等通过 3 年的定位试验并结合盆栽试验,表明垃圾肥能明显提高土壤有机质含量,随着垃圾肥用量的增加,土壤有机质含量增加,同时随着垃圾肥施用年份的增加,土壤有机质含量也逐年增加,垃圾肥用量越大,有机质含量越高。除了提高

土壤有机质含量外,垃圾肥还能显著提高土壤全 N、速效 P 和速效 K 等养分的含量<sup>[1]</sup>。马琨等利用垃圾堆肥作为肥料,采用大田试验对春小麦和土壤的影响进行了试验研究,结果表明土壤有机质含量和堆肥用量同步增加,土壤全 N、碱解 N 亦随堆肥用量增加,土壤速效 P 因施垃圾肥也有较大幅度提高<sup>[2]</sup>。江荣凤等研究了施用垃圾肥在潮土上对花生的增产效果,试验结果也表明,施用垃圾肥能提高土壤有机质,全 N 以及有效 N、P、K 的含量,特别是有效微量元素含量提高幅度较大,Zn、Cu、B 各处理平均是对照处理的 2~10 倍,Fe、Mn、Mo 比对照处理提高 17%~38%<sup>[3]</sup>。Shen AL 等研究表明连续施用垃圾堆肥能提高土壤的 C、N、P 的含量和土壤的 pH<sup>[4]</sup>。

### 1.2 垃圾堆肥能够改善土壤的理化性质

垃圾堆肥有机质含量较高,不但富含营养元素,而且含有一定量的粗渣,所以垃圾堆肥施用得当时,能明显改善土壤物理性状,突出表现在非毛管空隙度增大,大的水稳性团粒增加,而小团粒减少。同时土壤质地也有所改善。由于堆肥增加了土壤有机质,为良好的水稳性团粒的形成提供了物质基础。一定量的粗渣可相应改变土质粘重的特性,这些都为毛管空隙的增多、改善非毛管空隙与毛管空隙的比例,以形成合理的固、液、气三相比创造了条件。随着非毛管空隙度的增加,土壤饱和导水率增加,土壤通气透水性能增强。在土壤有机质增加,结构改善、质地改善的同时,土壤耕作性能

资助项目:863 国家重大项目专题(2002AA224021);北京市自然科学基金委与北京市教育委员会科技发展计划重点项目(KZ200310028012);北京市教育委员会项目(01kg-109);首都师范大学资源环境与地理信息系统北京重点实验室项目。

\* 通讯作者

得以改善,便于通过耕作形成良好的种植条件<sup>[5]</sup>。Agassi M 研究了利用垃圾减少水土流失的可行性:在实验室条件下,采用  $100\text{ m}^3/\text{hm}^2$  的垃圾覆盖,可以有效地预防 260 mm 的降水对土壤的冲洗,使雨水渗入土壤,而且垃圾分解后可使土壤的理化性状得到明显改善<sup>[6]</sup>。施用垃圾堆肥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,从而提高土壤的保肥性<sup>[7]</sup>。在田间试验条件下,垃圾堆肥可使淤灌土的 pH 值下降,这对于提高土壤微量元素的生物有效性具有积极作用<sup>[2]</sup>。

## 2 垃圾堆肥的生物学效应

垃圾堆肥中含有多种微生物,将含有大量微生物的垃圾堆肥施入土壤,可促进土壤有机质的分解、有效养分的释放,改善土壤的理化性质,从而促进植物的生长和品质的提高。

### 2.1 垃圾堆肥能够改善土壤的微生物特性

由于垃圾堆肥中含有 10% 以上的有机质,能增加土壤微生物活性。土壤微生物通过分解微生物残体参与生态系统的能量流动和物质循环,是土壤肥力的重要指标之一;土壤酶参与土壤的许多重要的生物化学过程和物质循环,可以客观的反映土壤的肥力状况<sup>[8]</sup>。微生物的生物量能代表参与调控土壤中能量和养分循环以及有机质转换的对应微生物的数量,与土壤有机质含量密切相关<sup>[9]</sup>。吴建峰等研究表明土壤微生物能够固定 N 素、释放难溶矿质中的营养元素、提高植物的抗逆性、降解污染物,减少毒性、促进腐殖酸的形成、产生植物激素、提供物理屏障,减少病原菌侵害,从而促进植物的生长和繁殖<sup>[10]</sup>。土壤酶活性大小直接影响到土壤中各种生物化学过程的强度,也与土壤肥力的关系十分密切。酶系统是土壤中最活跃的部分,过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性与土壤 C 转化水平有关<sup>[11]</sup>。马琨等通过田间试验,测得随垃圾堆肥施入量的增加,过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性升高,表明垃圾堆肥能补充大量有机 C,对酶活性有较强的刺激作用<sup>[2]</sup>。周立祥研究也发现使用垃圾堆肥可促使土壤微生物活跃,使土壤微生物总量及放线菌所占比例增加,土壤的代谢强度提高<sup>[7]</sup>。徐阳春等通过田间定位试验研究了施用有机肥料对土壤微生物量 C、N、P 的影响。结果表明土壤微生物量 C、N、P 与土壤有机 C、土壤全 N、土壤碱解 N 之间呈极显著的正

相关,表明其与土壤肥力关系密切,可作为评价肥力性状的生物学标志<sup>[12]</sup>。许月蓉等研究了垃圾堆肥对土壤微生物的影响,分别测定了施用垃圾堆肥并种植 2 季蔬菜的潮土、黄棕壤及红壤中细菌、真菌、固氮菌、纤维分解菌的数量,纤维分解强度,呼吸强度和微生物生物量 C、N 含量。结果表明:当土壤本身含有的微生物数量与垃圾堆肥相同时,垃圾堆肥用量大小对土壤微生物数量影响不大。土壤微生物 C、N 含量、土壤呼吸强度、微生物生物量的呼吸活性比、纤维分解强度均随垃圾堆肥用量增加而提高,且呈显著的正相关<sup>[13]</sup>。

### 2.2 垃圾堆肥促进植物产量和品质的提高

施用垃圾堆肥后,土壤的理化性质得到改善,养分含量提高,具有一定的培肥改土效果,从而保证了植物所需养分的充分供应,促进了植物生长,提高了植物的产量。李友宏等进行了银川市城市生活垃圾处理及利用效果的研究,试验结果表明,施用垃圾堆肥和垃圾复合肥对水稻、玉米、甜菜等作物均有明显的增产效果,施用垃圾堆肥可使水稻较空白对照增产 19.7%,甜菜增产 29.6%,玉米增产 34.3%;施用垃圾复合肥可使水稻较单独施用堆肥增产 61.8%,甜菜增产 55.3%,玉米增产 36.2%<sup>[14]</sup>。张水铭等研究了城市垃圾堆肥及垃圾专用肥对柑桔的增产效应,试验结果表明:垃圾堆肥作为基肥使用比施用一定比例的菜籽饼、稻草和化肥使柑桔增产 12.4%~14.5%,比空白对照增产 74.7%;施用垃圾专用肥的柑桔产量比施用一定比例的鸡粪和化肥增产 4.2%~50.3%,比空白对照增产 58.4%~129.0%<sup>[15]</sup>。朱汉娴等研究了城市垃圾堆肥连续 3 年在小麦、棉花上的施用效果,试验结果表明城市垃圾肥一般施用量在  $15000\text{kg}/\text{hm}^2$  以上,随着用量及施用年限的增加,小麦成穗数、千粒重随之增加,棉花铃数与铃重也增加,小麦、棉花产量均达显著与极显著水平<sup>[16]</sup>。安胜姬等研究发现把城市生活垃圾制备成生物有机肥料应用于小麦、黄瓜、玉米等作物,能明显提高作物的总生长量,可促进果实早熟,提高作物的抗病能力,具有很好的增产效果<sup>[17]</sup>。周德智等人研究了施用垃圾堆肥对黄棕壤、潮土、红壤上种植小麦和青菜的影响,结果表明:3 种土壤施用适量垃圾堆肥后,小麦和青菜均有增产效果,总体上是红壤最好,增产幅度高达 146%、217.2%<sup>[18]</sup>。李秀文等人研究了连续施用堆肥对大白菜产量有极显著提高,3 年试验中各处理经方差分析均

达到极显著水平,其产量与垃圾堆肥用量呈正相关<sup>[19]</sup>。马琨等人研究也表明每公顷施用 150 t 垃圾堆肥为小麦提供了适宜的土壤条件,水肥气热得到协调供应,从而改善了小麦的群体结构,增加了小麦的有效穗数和穗粒数而使小麦最终实现高产<sup>[2]</sup>。此外,很多研究者研究施用堆肥对番茄、谷子、大豆、油菜、青菜、绿菜花等多种农作物产量的影响,结果表明:适量施用垃圾堆肥均可以不同程度地提高农作物的产量<sup>[5,20~22]</sup>。

垃圾堆肥能改善农产品的营养成分,已被大量研究证实。方亭等人的研究表明在棕红壤农田中施用垃圾堆肥可使油菜籽中蛋白质的含量显著增加;潮土中,随着施入垃圾堆肥量的增加,大豆籽粒中蛋白质含量也增加<sup>[20]</sup>。江荣风等人研究了垃圾堆肥在潮土上对花生的增产效果,表明施用垃圾堆肥对花生籽粒中的粗蛋白质、粗脂肪和全 P 含量有一定的提高<sup>[3]</sup>。李秀文等人研究表明施用垃圾堆肥使大白菜的品质有很大改善,粗纤维含量降低 13%~35%,硝酸盐含量减少 20%<sup>[19]</sup>。周立祥等人研究表明施用污泥堆肥生长的青菜体内硝酸盐含量仅及无机化肥处理的一半左右,前者 Vc 和水溶性总糖含量分别比后者高 32%和 28.5%<sup>[21]</sup>。

垃圾堆肥施用于城市绿化及观赏性植物,既脱离食物链,减少运输费用,节约化肥,而且对草坪、林木、花卉、育苗的生长有明显的促进作用。李艳霞等进行了污泥和垃圾堆肥用作林木育苗基质的研究,结果显示:污泥和垃圾堆肥可以部分替代泥炭,能明显促进苗木生长,苗木叶片中的叶绿素含量明显高于对照组,且叶片的生长期较对照组长<sup>[23]</sup>。梁伟连续 3 年对 7 类 30 个品种的花卉进行了大田及盆栽实验,结果表明:荷兰菊、八角金盘、睡莲、一串红等 24 个品种对垃圾堆肥表现了明显的肥效作用,不仅花卉的成活率提高,而且株高、株面积、叶宽、叶数及分蘖数都有明显增长,花朵数量增加,花龄期延长;一些药用植物如绞股蓝和曼陀罗其药用有效成分含量增加,达到了对照的 2 倍以上<sup>[24]</sup>。张天红等的研究结果显示林地施用垃圾堆肥后,树木的树高和树径的生长都明显高于对照组<sup>[25]</sup>。

### 3 垃圾堆肥的环境效应

#### 3.1 垃圾堆肥的负面环境效应

施用垃圾堆肥虽然可以改善土壤的理化性质,

提高农林产品的产量和品质,但是施用不当,也能对环境产生不良的影响。

3.1.1 过量垃圾堆肥的施用可引起土壤的砂化和盐渍化 垃圾堆肥虽然富含有机质和多种植物所需要的营养元素,但其腐殖质含量与厩肥、人粪尿等比较为低下,以及含有较大比例的砾石成分和一定量的盐分,长期施用会导致土壤沙化和盐渍化。贺立源等人研究表明连续施用垃圾堆肥,耕地土壤的机械组成发生了变化,<0.002 mm 的粘粒含量降低,而>0.02 mm 的砂和粗砂的含量显著增加,土壤质地由粉砂质粘壤土向砂质壤土转变,如长期施用有引起土壤“砂化”的可能<sup>[26]</sup>。王建民等人研究也表明垃圾堆肥对土壤质地具有明显的影响,在垃圾堆肥累计施用量分别达到 210 t/hm<sup>2</sup>和 157 t/hm<sup>2</sup>后,土壤分别由中壤土和重壤土变为轻壤土和中壤土<sup>[27]</sup>。陆文龙等人研究表明由于垃圾堆肥中含有一定量的盐分(全盐含量 11.6 g/kg 左右),因此施用垃圾堆肥后,土壤全盐含量将会升高,与垃圾堆肥的施用量成正相关。因此垃圾堆肥的使用,要依土壤类型而异,具体而言,在非盐渍土上,可长年适量使用,在轻度盐渍土上少用,在中度盐渍土上以不使用垃圾堆肥为宜<sup>[1]</sup>。李艳霞等研究表明,污泥和垃圾堆肥含盐量较高,而基质含盐量是影响种子出苗率的因素之一,所以当它们作为容器育苗基质时,用量不宜过高,在播种前应考虑淋洗脱盐<sup>[23]</sup>。

3.1.2 重金属污染 垃圾堆肥施入土壤使重金属积累是引人注意的问题。垃圾堆肥过程不能降低重金属离子的含量,相反由于堆肥过程中湿度降低,CO<sub>2</sub>和一些有机小分子释放出,pH 降低,重金属离子的浓度相对增加,但是 EDTA,DTPA 以及连续萃取实验的结果说明在垃圾处理过程中可被植物吸收和利用的重金属离子浓度降低,通过食物链进入人体从而危害人类健康的可能性减少<sup>[28]</sup>。但是长期使用垃圾堆肥,其土壤重金属的积累仍不可忽视,因此如何降低垃圾堆肥中重金属的危害已经成为一个热点问题。

周德智等<sup>[18]</sup>利用上海安亭垃圾处理场用生活垃圾制成的堆肥分别用黄棕壤、潮土、红壤进行生菜、青菜、小麦的盆栽试验,探讨了土壤施加垃圾堆肥的允许负荷量。不同土壤类型对垃圾堆肥的容量不同,而决定土壤中垃圾堆肥容量的是土壤中垃圾堆肥的临界值,这一临界值主要决定于农产品的卫生质量(以农产品中污染物不超过国家卫生标

准)和作物产量(以减产幅度不超过10%为准)。因此,这二者标准是确定土壤施用垃圾堆肥量的决定性标准。在这二项指标中,只要有其中一项指标率先达到了临界值(极限值),即认为此时的垃圾堆肥施用量达到了土壤允许垃圾堆肥容量(负荷量)。根据上述原则,周德智等首先考虑了农产品的国家卫生标准值与垃圾堆肥施用量的数学关系,选用多元回归方程作为计算允许复合量的计算模型。结果说明,土壤施用垃圾堆肥的允许负荷量不仅受土壤类型的制约,还受作物品种的制约。最后周德智等把农产品产量和农产品卫生质量指标两者结合起来,农产品的卫生质量指标方面又以数学模型计算结果与实际试验结果结合起来,提出了在施用垃圾堆肥的过程中,不同的土壤对垃圾堆肥的允许负荷量,黄棕壤在种植蔬菜时允许负荷量为 $25\text{ t/hm}^2$ ,种植小麦时为 $15\text{ t/hm}^2$ ;潮土种植蔬菜时允许负荷量为 $24\text{ t/hm}^2$ ,种植小麦时为 $102\text{ t/hm}^2$ ;红壤种植蔬菜时允许负荷量为 $10\text{ t/hm}^2$ ,种植小麦时为 $120\text{ t/hm}^2$ 。当垃圾堆肥施用量大于以上限值时,由于重金属危害等原因,将导致作物和蔬菜产量的增幅减小。郭郦兰等人指出污泥与生活垃圾中所含的有害重金属低于国家污泥和垃圾的农用标准,按一般施肥量进行农用时,不会造成土壤重金属的积累。当用量高达通常用量的4倍时,土壤中的Cu、Zn、Pb、Cd等元素的含量亦未超过土壤安全控制标准<sup>[29]</sup>。潘洁等人在田间定位试验条件下,研究了垃圾堆肥对土壤和农产品重金属含量的影响,结果表明年施用量超过 $150\text{ t/hm}^2$ 时,土壤中上述重金属含量有一定的增加,但无明显的规律性,基本趋势是随着垃圾堆肥用量的增加而增加<sup>[30]</sup>。

适量施用垃圾堆肥对农产品的品质将不会产生影响。潘洁等研究指出连续多年施用垃圾堆肥 $150\text{ t/hm}^2$ 后,白菜和小麦籽粒中重金属含量与对照组相差不大<sup>[30]</sup>。马琨等研究表明 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层中Cu、Zn等重金属元素与垃圾堆肥施用量正相关,但在 $20\sim 40\text{ cm}$ 土层Cu浓度受堆肥施用的影响不大,说明垃圾堆肥进入土壤后Cu移动性较小,多数积累在 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层中,而在 $20\sim 40\text{ cm}$ 土层内Zn浓度随垃圾施用量的增加而有升高的趋势,说明Zn有向下层移动的趋势;施用垃圾堆肥后的小麦体内Cu、Zn等重金属元素含量有所增加,其浓度顺序为根系>籽粒>茎叶,但测定值远低于国家标准,即使施用垃圾堆肥 $600\text{ t/hm}^2$ 也不会产生明

显的重金属毒害<sup>[2]</sup>。

3.1.3 其他环境问题 垃圾堆肥施用后会不会造成地下水中总N、总P浓度的超标,从而污染地下水,或者因地面径流而污染下流流域,造成水环境问题,对于这一问题尚未有人研究报道,是垃圾堆肥环境问题的一个新的研究方向。

### 3.2 垃圾堆肥的正面环境效应

垃圾堆肥能够改善土壤的理化性质,提高土壤的微生物活性,有研究证明垃圾堆肥可修复被污染的土壤,防止水土流失。

3.2.1 垃圾堆肥可修复被污染的土壤 前面已经提到垃圾堆肥能提高土壤的微生物活性。由于垃圾堆肥提高了土壤中微生物活性,促进植物生长的速率,与此同时垃圾堆肥还可用于被大量农药污染的土壤修复,因为它可使除草剂、杀虫剂钝化,达到生物修复的目的<sup>[31]</sup>。一般而言,初始反应为水解反应的杀虫剂在城市垃圾堆肥过程中很容易被微生物降解<sup>[32]</sup>。Liu XZ等人研究了利用垃圾堆肥来降解农药的可能性,结果表明当垃圾堆肥的施用量达到 $20\%\sim 40\%$ 的时候,在温室里经过4个星期或实验室条件下经过16个星期,85%的氟乐灵(Trifluralin),100%的丙草安(Metolachlor)和79%的胺硝草(Pendimethalin)都能够被降解;实验结果同时显示:垃圾堆肥施用量与农药污染土壤的修复作用具有相关性<sup>[33]</sup>。Michael等1996年以1:1的质量比将被农药污染的土壤与废物堆肥混和,在温室进行种植或不种植试验,结果发现氟乐灵在种植条件下,与堆肥混合,去除效果最好,都尔在种植条件下,与堆肥混合,可达到未检出水平( $0.1\text{ mg/kg}$ )。除草通在所有处理中都得到降解。表明添加堆肥可促进农药分解,提高微生物活性及植物生长<sup>[34]</sup>。综上所述,垃圾堆肥是处理农药污染的一种经济、有效的方法。

农田Cr污染能够抑制植物生长,Cr在可食部分的残留还会通过食物链而影响人体健康,故Cr污染的土壤已经引起国内外的广泛重视<sup>[35~37]</sup>。国内外目前采用的修复方法,虽都有一定的改良效果,但也都有一定的局限性。根据有机质对6价Cr的还原作用原理,黄启飞等运用二次通用旋转组合试验设计,通过模拟土培试验,进行了垃圾堆肥对Cr污染土壤的修复机理研究,结果表明,垃圾堆肥可显著减少Cr污染土壤中有效Cr含量,垃圾堆肥主要是促进水溶态Cr向结晶形沉淀态Cr转化;垃圾

堆肥用于修复 Cr 污染土壤至少在短期内是安全的,利用城市生活垃圾堆肥修复污染农田具有较大的经济和环境效益<sup>[38]</sup>。重金属 Cu 也同样存在着土壤污染问题,由于 Cu 与土壤有机质之间存在着特殊的亲和力,陈世俭研究了在盆栽条件下泥炭和堆肥两种有机质对几种不同污染水平土壤 Cu 化学活性的影响,表明,添加泥炭和堆肥能显著降低污染土壤化学活性 Cu 的含量,与对照相比,有机质使化学活性 Cu 平均减少 34.6 %<sup>[39]</sup>。

**3.2.2 垃圾堆肥可防止水土流失** 我国现有人均耕地不到世界平均水平的 1/4,耕地土壤肥力偏低;山区耕地面积比例大,自然生态系统脆弱,水土流失严重,土地退化、荒漠化加剧。加强生态环境保护,防治水土流失,维持和提高地力,是我国农业可持续发展的根本保证。根据城市污泥的特点,即含有丰富的 N、P、K 和有机质,具有较强的粘性和吸水性等,以及据水土保持的基本原则<sup>[40]</sup>,莫测辉等<sup>[41]</sup>提出了利用城市污泥来改良土壤,防治水土流失的可能性和必要性。研究表明,施用城市污泥堆肥后,土壤结构系数、水稳定性团聚体、空隙率、透水率和持水量随着污泥施用量的增大而增大,土壤体积质量(容重)和表土抗剪力随之减小。这些性质的改善都有利于增加雨水入渗,减少水土流失。在 28°坡地上施用污泥进行试验(混入土壤和直接铺在其表面,200~400 t/hm<sup>2</sup>),在模拟降雨条件下(64 mm/hm<sup>2</sup>),无论有无植被,与对照地相比土壤侵蚀率均有明显降低(减少侵蚀 10 %以上),降低程度与污泥的施用量成正比<sup>[42]</sup>。同时施用污泥堆肥还能促进植被生长,提高土壤的微生物活性,改善土壤的性质和结构,最终达到防治水土流失的目的。由于垃圾堆肥与污泥堆肥具有相似的特性,能改善土壤的理化性质和结构,提高微生物特性,促进植物生长,所以由此可推论垃圾堆肥也可以防止水土流失,但需要进一步验证。

### 3.3 垃圾堆肥环境效应的预防措施

垃圾堆肥的质量主要受垃圾来源和性质的影响,由于城市垃圾中煤灰渣占相当比例,引起垃圾堆肥中粗砂和砾石级别的颗粒含量较高,大量的施用农田,确有可能引起土壤渣化和砾化。因此城市垃圾堆肥前的分选,生产过程的工艺控制例如粉碎、温度控制等工程都很重要,要全面达到国家规定的各项指标,必须加强垃圾堆肥生产过程中的管理和检测。垃圾堆肥中还含有一定的盐分,土壤全

盐量与垃圾堆肥的施用量成正相关,长期施用可能会引起土壤的盐渍化,因此施用前应淋洗脱盐。重金属污染不仅能降低土壤中营养元素的有效性<sup>[43]</sup>,还能污染食品,影响人体健康,因此如何降低垃圾堆肥的重金属污染问题已经成为研究的热点。蒋晓惠研究发现垃圾堆肥粒度越细,所含的重金属离子量越低,因此可通过筛选法使垃圾堆肥中重金属离子含量进一步降低,从而达到保护环境,造福人类的目的<sup>[28]</sup>。莫测辉等研究指出可以用微生物法降低城市污泥中重金属含量,微生物对污泥中重金属的溶解,是通过细菌对污泥中 Fe 和 S 的氧化作用,使污泥的氧化还原电位升高,pH 值降低,从而使重金属发生溶解,将溶解的重金属淋滤出来,就可以降低污泥中的重金属的含量<sup>[44]</sup>。蔡全英等论述了用化学方法降低城市污泥中重金属含量,去除污泥中重金属的化学方法首先是溶解作用,然后进行淋滤,氯化作用、离子交换作用、酸化作用、螯合剂和表面活性剂的络合作用,均可使难溶态的金属化合物形成可溶解的金属离子或金属络合物。最常用的化学试剂是硫酸、盐酸或硝酸和有机络合剂(如 EDTA)<sup>[45]</sup>。同样也可以用微生物法和化学法结合降低垃圾堆肥中的重金属含量。谢思琴等研究表明单施垃圾堆肥会增加蔬菜中重金属的累积量,而施垃圾堆肥同时拌施 CaCO<sub>3</sub>,可有效地降低蔬菜中重金属的累积水平,与单施垃圾堆肥相比,拌施 CaCO<sub>3</sub>能使番茄中 Pb 含量下降 29 %~41 %;Cr 下降 5 %~46 %;Cd 下降 9 %~42 %;Cu 下降 2 %~24 %;As 下降 4 %~60 %,有的元素如 Pb 和 Cd 甚至能降到本底值以下<sup>[46]</sup>。要降低垃圾堆肥对环境的影响就必须提高垃圾堆肥的质量,使垃圾堆肥各项指标都达到农用标准。

## 4 城市垃圾堆肥的发展对策

城市垃圾的养分普遍偏低,有机无机有毒物质含量多,直接影响垃圾堆肥的质量,从而严重影响其农用效果和农用前景。如何完善和提高堆肥技术以及提高堆肥质量,真正解决城市垃圾的出路,已经成为垃圾堆肥今后发展的关键。

### 4.1 提高垃圾堆肥的质量

如何提高垃圾堆肥的养分含量已经成为国内外研究的热点。郭秀芳等利用新鲜垃圾分别与鸡粪、人粪尿、啤酒厂脱水污泥、纸渣进行堆肥,垃圾堆肥的养分含量均有明显的提高,其中垃圾加啤

酒厂污泥效果最佳,其 N、P、K 总养分含量比原垃圾堆肥增加了 23.2 %、19.6 %,有机质含量也有一定的提高<sup>[47]</sup>。Ferreira ME 等采用经过蚯蚓消化处理的城市垃圾施用于玉米试验田,发现在不加石灰,而仅施用 60 ~ 80 t/hm<sup>2</sup> 垃圾堆肥和化学肥料,或在同时施用 40 ~ 60 t/hm<sup>2</sup> 垃圾堆肥和石灰、化学肥料时都能产生显著的增产效应<sup>[48]</sup>。郭笃发用盆栽法研究了  $\alpha$ -射线处理的垃圾对蔬菜生长的影响及其机理,结果发现经  $\alpha$ -射线处理的垃圾比未处理的有更大的增产效果,这种效果在肥力低的土壤上尤为显著;但产量的提高并不随着照射量的增加而明显增加,这是由于  $\alpha$ -射线能提高垃圾中有机质和 N、P、K 的活性,但其活性的提高不随照射量的增加而增加<sup>[49]</sup>。

#### 4.2 发展垃圾有机无机复合肥

垃圾堆肥运用现代工艺,把经过两次发酵处理的堆肥作为处理原料,经过烘干、杂质清除、粉碎、过筛等措施,根据需要添加适当的化肥和微量元素,造粒制成不同植物需要的复合肥,使其达到肥效高、体积小、运输方便、使用简单的目的,是垃圾堆肥今后主要的研究发展方向,它是垃圾堆肥农业利用中轻量化的一种途径,也是开拓垃圾堆肥新市场,增加垃圾消纳量的有效方法,宏观上有助于维护生态平衡,对垃圾的资源化、商品化具有重要的意义。

许多研究表明施用有机肥添加一定量的无机肥研制成的有机无机复合肥不仅能提高土壤的生产力,而且能促进农业的可持续发展,降低对环境的污染<sup>[50]</sup>。利用垃圾堆肥与化肥混合制成有机复混肥后,对有机复混肥的重金属特点,及其蔬菜效应、土壤效应、环境效应的影响进行的研究结果表明:由于化肥的稀释作用,复混肥中重金属含量远低于城市垃圾堆肥重金属含量标准,与直接施用垃圾堆肥比较,复混肥具有增产、改善品质、减少作物产品和土壤中重金属含量的特点,并能达到同样的培肥土壤效果,与直接施用化肥比较,复混肥同样具有增产、改善品质和减少产品中硝酸盐含量的优点。另外复混肥还有迟滞或阻止硝态氮向下淋失的作用,对地下水污染作用较小<sup>[34]</sup>。李勋光等把经无害化处理的生活垃圾堆肥风干,过 1mm 筛,与化肥按一定的比例(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=11:4:10,N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=12.8:3.2:4.0)混合拌匀,制成专用肥。并通过小区和大田试验,研究了其对蔬菜和土壤环境的效应。

结果表明:施用该专用肥的辣椒、番茄或茄子、莴笋和青菜的小区和大田的产量,与对照组相比分别增加 27.0 % ~ 88.8 %和 20.7 % ~ 95.4 %,其增产在 P<sub>0.01</sub> 水平上达到显著,且蔬菜中一些营养成分的含量增加,而重金属 Cd、Cr、Pb、As 元素的含量均未超过有关卫生标准。长期施用,可补充土壤有机质,且肥料中重金属元素不会引起菜地环境的污染<sup>[51]</sup>。毛建华等经过多次小试和反复调整,采用 30 % ~ 40 % 垃圾堆肥,30 % ~ 40 % 的无机肥料,20 % ~ 40 % 的粘合剂(包括食品酿造、生物制药等废料),另外添加 0.5 % ~ 1.0 % 的微量元素(Zn、B、Mn 等)制成垃圾有机无机复合肥。农田应用结果表明,垃圾有机无机复合肥广泛适用于菜、瓜、果、粮及花卉、草坪等,作物品质有所改善,表现为蔬菜、瓜果中 Vc 含量及果实的含糖量增加,产量也有明显提高,而且施用土壤和农作物的重金属残留比施用垃圾堆肥更加安全<sup>[52]</sup>。

## 5 结 语

城市垃圾堆肥含有丰富的有机质和一定量的 N、P、K,能够作为肥料改良土壤,提高植物的产量和品质,但是长期大量使用,土壤沙化、盐渍化和重金属的积累等问题仍不可忽视,使得垃圾堆肥的农业应用受到限制,因此应该加强和完善垃圾堆肥的技术条件,提高垃圾堆肥的质量,发展以垃圾堆肥为原料,配以一定量化肥的有机无机复合肥的生产,加强其肥效和施用安全性等方面的研究,使垃圾堆肥真正成为城市垃圾资源化利用的有效途径。

## 参考文献

- 1 陆文龙,毛建华,潘洁,李秀文,孟繁雨,张宝祥,郭秀芳.垃圾肥对土壤养分及物理性状的影响.农业环境保护,1998,17(3):104 ~ 108
- 2 马琨,王兆骞,杜西,戈乃玢,胡霭堂.城市生活垃圾堆肥对春小麦和土壤的影响.农业环境保护,2000,19(5):312 ~ 314
- 3 江荣凤,韩琅丰,王建民,程伟.垃圾肥在潮土上对花生的增产效果.应用与环境生物学报,1995,1(4):358 ~ 363
- 4 Shen AL, Li XY, Kanamori T, Arao T. Effect of long term application of compost on some chemical properties of wheat rhizosphere and non-rhizosphere soils. Pedos-

- phere, 1996, 6 (4): 355 ~ 363
- 5 向长萍, 邓波儿, 刘同仇. 春露地番茄施用城市生活垃圾肥栽培试验研究. 华中农业大学学报, 1995, 14 (6): 603 ~ 606
- 6 王晓娟, 金樑, 顾宗濂, 林先贵. 垃圾堆肥在农业生产和环境保护中的作用. 土壤, 2001, 33 (3): 131 ~ 134
- 7 周立祥, 胡霭堂, 戈乃玢. 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
- 8 薛立, 邝立刚, 陈红跃, 谭绍满. 不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究. 土壤学报, 2003, 40 (2): 280 ~ 285
- 9 何振立. 土壤微生物量及其在养分循环和环境质量评价中的意义. 土壤, 1997, 29 (2): 61 ~ 69
- 10 吴建峰, 林先贵. 土壤微生物在促进植物生长方面的作用. 土壤, 2003, 35 (1): 18 ~ 21
- 11 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986
- 12 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响. 土壤学报, 2002, 39 (1): 89 ~ 96
- 13 许月蓉, 顾希贤. 垃圾堆肥对土壤微生物的影响. 应用与环境生物学报, 1995, 1(4): 398 ~ 402
- 14 李友宏, 王芳, 陈觉民, 郑济柏. 银川市城市生活垃圾处理及利用效果的研究. 农业环境保护, 2000, 19 (3): 145 ~ 147
- 15 张水铭, 张桂英, 林静慧, 孙汉中, 孙小华. 城市生活垃圾堆肥及垃圾专用肥对柑桔增产效应. 应用与环境生物学报, 1995, 1(3): 279 ~ 284
- 16 朱汉嫔, 王志进, 朱建桦, 张晓建, 严玉娟. 小麦棉花施用城市垃圾肥效果研究. 土壤肥料, 2001, (2): 34 ~ 36
- 17 安胜姬, 张兰英, 郑松志, 吴烨, 赵艳玲. 生活垃圾转化高效生物有机肥料的肥效研究. 环境科学研究, 2000, 13 (3): 47 ~ 50
- 18 周德智, 顾宗濂, 谢思琴. 土壤施加垃圾堆肥的允许负荷量. 应用与环境生物学报, 1995, 1 (4): 349 ~ 357
- 19 李秀文, 潘杰. 连续施用垃圾堆肥对大白菜产量品质效应的影响. 天津农业科学, 2001, 7 (2): 21~23
- 20 方亭, 张延毅, 金涛. 城市生活垃圾堆肥对油菜、大豆籽粒中蛋白质含量的影响. 中国油料作物学报, 1992, 21 (4): 45 ~ 50
- 21 周立祥, 占新华, 沈其荣, 陈金和, 王斌, 张强, 陶先兵. 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
- 22 刘悦秋, 石爱平, 刘克锋, 王红利, 李月华. 北京市城市生活垃圾利用研究 II. 生活垃圾肥施用于绿菜花的效果分析. 北京农学院学报, 1998, 13 (2): 31 ~ 35
- 23 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
- 24 梁伟, 张纪伍, 顾建宁. 垃圾堆肥在花卉栽培中的应用研究. 应用与环境生物学报, 1995, 1 (4): 387 ~ 397
- 25 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
- 26 贺立源, 陈建军, 李章波. 城市垃圾堆肥的质量及其应用效果评价. 华中农业大学学报, 1996, 15 (6): 552 ~ 558
- 27 王建民, 程伟, 韩琅丰, 江荣凤. 垃圾堆肥在北方潮土地区的农用研究. 应用与环境生物学报, 1995, 1(4): 379 ~ 386
- 28 蒋晓惠. 垃圾堆肥中重金属离子研究. 四川师范学院学报, 1993, 20 (1): 31 ~ 35
- 29 郭郢兰, 米尔芳, 田若涛, 席鸣岐, 王秀林. 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
- 30 潘洁, 毛建华, 陈文龙, 郑鹤龄, 孟繁雨, 张宝祥, 郭秀芳. 垃圾肥对土壤和农产品重金属含量的影响. 农业环境保护, 1998, 17 (3): 109 ~ 112
- 31 Cole MA, Zhang L, Liu XZ. Remediation of pesticide contaminated soil by planting and compost addition. Compost Science and Utilization, 1995, 3 (4): 20 ~ 30
- 32 Racke KD, Frink CR. Fate of organic contaminants during sewage sludge composting. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1989, 42 (4): 526 ~ 533
- 33 Liu XZ, Cole MA, Bertoldi M, Sequi P, Lemmes B, Papi T. Minimum effective compost addition for remediation of pesticide-contaminated soil. The science of composting: part 2, 1996, 903 ~ 912
- 34 李国学, 张福锁. 固体废物堆肥化与有机复混肥生产. 北京: 化学工业出版社, 2000
- 35 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应. 北京: 中国环境科学出版社, 1992
- 36 Bartlett RJ, Kimble JM. Behavior of chromium in soils. I. Trivalent forms. J Environ. Qual., 1976, 5 (4): 379 ~ 383
- 37 Bartlett RJ, KIMBLE JM. Behavior of chromium in soils. II. Hexavalent forms. J Environ. Qual., 1976, 5 (4): 383 ~ 386
- 38 黄启飞, 高定, 丁德蓉, 陈同斌. 垃圾堆肥对铬污染土

- 壤的修复机理研究. 土壤与环境, 2001, 10 (3): 176 ~ 180
- 39 陈世俭. 泥炭和堆肥对几种污染土壤中铜化学活性的影响. 土壤学报, 2000, 37 (2): 280 ~ 283
- 40 王礼先. 水土保持学. 北京: 中国林业出版社, 1995
- 41 莫测辉, 吴启堂, 蔡全英, 李桂荣. 利用城市污泥防治水土流失. 土壤与环境, 1999, 8 (1): 66 ~ 70
- 42 Sort X, Alcaniz JM. Contribution of sewage sludge to erosion control in the rehabilitation of limestone quarries. Land Degradation and Development, 1996, 7 (1): 69 ~ 76
- 43 Tu C, Zheng CR, Chen HM. Effect of heavy metals on phosphorus retention by typic udic ferrisols: equilibrium and kinetics. Pedosphere, 2002, 12 (1): 15 ~ 24
- 44 莫测辉, 蔡全英, 吴启堂, 李桂荣. 微生物方法降低城市污泥的重金属含量研究进展. 应用与环境生物学报, 2001, 7 (5): 511 ~ 515
- 45 蔡全英, 莫测辉, 吴启堂, 李桂荣. 化学方法降低城市污泥的重金属含量及其前景分析. 土壤与环境, 1999, 8 (4): 309 ~ 313
- 46 谢思琴, 顾宗濂, 周德智. 垃圾堆肥拌施  $\text{CaCO}_3$  对蔬菜中重金属的累积影响. 应用与环境生物学报, 1995, 1 (3): 260 ~ 266
- 47 郭秀芳, 潘洁, 陆文龙, 毛建华, 李秀文. 提高生活垃圾堆肥质量的试验. 环境卫生工程, 2002, 10 (3): 128 ~ 129
- 48 Ferreira ME, Cruz MCP, Da Cruz MCP. Effects of a compost from municipal wastes digested by earthworms on the dry matter production of maize and on soil properties. Cientifical Jaboticabal., 1992, 20 (1): 217 ~ 22
- 49 郭笃发.  $\alpha$ -射线处理城市生活垃圾的农业利用. 农业环境保护, 1996, 15 (2): 78 ~ 80
- 50 Cao ZH. Environmental issues related to chemical fertilizer use in China. Pedosphere, 1996, 6 (4): 289 ~ 303
- 51 李勋光, 李小平. 城市垃圾堆肥制备专用肥对蔬菜生产和环境的效应. 应用与环境生物学报, 1995, 1 (3): 267 ~ 273
- 52 毛建华, 潘洁, 孙长载, 郭秀芳, 吕勋. 垃圾有机无机复合肥工厂化生产及农田应用. 天津农业科学, 2002, 8 (3): 7 ~ 9

## ECOLOGICAL EFFECTS OF URBAN WASTE COMPOST AND THEIR COUNTERMEASURES

FAN Hai-rong HUA Luo FU Hua WANG Xue-jiang

(Resource, Environment and GIS Key Laboratory of Beijing, Department of Geography, Capital Normal University, Beijing 100037)

**Abstract** Ecological effect of urban waste compost are analyzed, including its fertility effect: increasing soil nutrients and improving soil physical and chemical properties; its biological effect: improving soil microbiological properties and crop yield and quality; its negative environmental effect: causing soil desertification and salinization, and heavy metal accumulation etc; its positive environmental effect: remediation of contaminated soils, and preventing soil and water losses. Countermeasures to its negative environment effect are also elaborated. In the end, it points out improving quality of the compost and developing organic-inorganic compound fertilizer are the ways to develop waste compost.

**Key words** Waste compost, Ecological effect, Fertility effect, Biological effect, Environmental effect, Organic-inorganic compound fertilizer