

污泥中病原物的环境与健康风险及其削减途径

孙玉焕^{1,2} 骆永明^{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 土壤与环境联合开放研究实验室 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; 2 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 污泥含有多种病原性生物体或病原物, 主要包括细菌、病毒、原生动物和寄生虫。污泥中的病原物进入土壤后有再发的现象, 存在环境与健康风险。对污泥的消化、碱性稳定、堆沤、辐射处理和巴氏灭菌, 以及完善污泥土地堆放或土地施用的法律法规等是削减污泥中病原物的环境与健康风险的主要措施。建议在我国尽快开展污泥和受其影响环境介质中病原物的环境行为、生态效应与健康风险研究, 并发展相关的削减对策和关键技术。

关键词 污泥; 病原物; 风险; 削减途径

中图分类号 X820.4

污泥一般是指污水处理厂在净化污水时的副产物, 是由有机残片、细菌菌体、无机颗粒、胶体等组成的复杂的非均质体。根据国家《“十五”计划纲要》和《“十五”城镇化发展重点专项规划》, 近 10 年我国污水处理率会有很大提高^[1], 相应的污泥产生量也会急剧增加。污泥含有丰富的养分和有机质, 施入土壤后, 可以改善土壤养分供应, 增加有机质含量, 提高土壤肥力^[2~5]。可见, 污泥及其产品是可利用的养分资源, 可作为土壤改良剂和有机肥料。

随着垃圾 (包括污泥) 填埋场地的越来越少以及对资源循环利用的需求, 污泥的土地利用已成为污泥处置的发展方向。调查表明, 污泥也含有多种重金属、有机污染物和病原物, 这些环境危险物质随污泥进入土壤, 对生态环境安全和人类健康带来风险, 甚至构成威胁。多年来, 污泥土地施用后的重金属、杀虫剂、多氯联苯 (PCBs) 及其他化学污染物对人类健康和环境的危害一直作为研究与管理的重点。目前, 关于污泥中重金属和有机污染物对土壤质量影响的研究较多^[6~12], 而对病原物的环境行为、生态效应和健康风险关注不多^[13]。未经妥善处理的污泥中病原物的种类和数量繁多, 当这些含有病原物的污泥施入土壤后, 其行为和归宿怎样? 对人类健康和生态环境带来的风险或造成的危害有多大? 如何来防治? 这些问题都有待科学分析和回答。污泥土地利用过程中的病原物污染风险, 随着

人们对生态环境保护意识的增强, 已愈来愈受关注。

本文就污泥土地利用过程中不同污泥的病原物种类、数量及其对土壤生态环境和人类健康的潜在影响, 以及削减这种环境与健康风险的措施作一综述, 以为污泥的安全处置及土地利用过程中的生态环境保护提供科学信息和管理经验。

1 污泥中的病原物

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^[14]。污泥中含有大量的细菌、病毒和寄生虫等病原物, 因此, 有关污泥中病原物的研究受到重视^[13, 15, 16]。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^[14]。美国环保署 (USEPA) 及其他组织的一些学者对污泥中存在的病原物进行过统计, 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^[13]。细菌能够单独存在于外部环境中, 在条件适宜时能够增长繁殖, 一般当温度高于 70 °C 时很快失活, 但有些细菌能够产生孢子或包囊, 需要较高的温度才能杀死。病毒离开细胞或寄主后不能繁殖, 但可以在逆境中长时间生存。原生动物和蠕虫在生长发育阶段会产生包囊或卵, 虽然它们离开寄主不会繁殖, 但在外界环境中的存活能力相当强。这些病原

①国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2002CB4108010) 资助。

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，污泥中病原物的一般含量见表1。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。Gaspard 等^[17]对法国89个污水处理厂污泥中的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样品中寄生虫卵平均为464个，最高为898个，其中47%的样品小于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，并且在外界环境中都有一定的存活能力，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。

表1 未处理污泥（湿样）中主要病原物的数量（个）

Table 1 Quantities of typical micro-organisms (wet weight) in untreated sewage sludge

病原物类型	病原物名称	数量
细菌	埃希氏大肠杆菌 (<i>Escherichia coli</i>)	10 ⁶ /g
	沙门氏菌 (<i>Salmonella</i>)	10 ² ~ 10 ³ /g
病毒	肠病毒 (<i>Enteroviruses</i>)	10 ² ~ 10 ⁴ /g
原生动物	鞭毛虫 (<i>Giardia</i>)	10 ² ~ 10 ³ /g
蠕虫	蛔虫 (<i>Ascaris</i>)	10 ² ~ 10 ³ /g
	弓蛔虫 (<i>Toxocara</i>)	10 ~ 10 ² /g
	绦虫 (<i>Taenia</i>)	5/g

资料来源: Evaluation of Sludge Treatments for Pathogen Reduction^[18]。

2 污泥中病原物的环境风险

2.1 对土壤环境的污染

病原物不但影响人类健康，而且能够降低土壤的生产潜力，改变土壤生物多样性，是影响土壤质量的一个重要因素^[19]。当施用含有病原物的污泥时，增加了土壤的卫生学风险。病原物对土壤环境的风险与土壤温度和湿度等有关，如低温和湿润的土壤条件有利于病原物的生存^[20]。可见，适宜的土壤条件，可以延长病原物的存活时间，增加环境风险。有关病原物对土壤质量影响的研究还有限^[13]。为了降低病原物对土壤环境的影响，提高污泥施用的安全性，一方面需要加强污泥土地利用过程的土壤环境影响评价研究，另一方面必须严格污泥土地利用的标准。

2.2 对水环境的污染

到目前为止，关于污泥中N、重金属等对地表水或地下水污染的研究较多^[21, 22]，而有关污泥中病

原物对水体环境污染的研究还未见报道。污泥的处置方式不同，对水体环境的污染情况也不相同。当污泥与城市垃圾一起填埋于垃圾场时，污泥中的病原物会随水下渗，污染地下水。污泥的海洋处置虽然已经禁止，但过去的这种处置方式会使污泥中所有的病原物全部进入水体，而造成海洋病原物污染。Edwarda 和 Larson^[23]研究结果表明，施用牛粪的地表径流中粪大肠菌群数量明显高于不施牛粪的对照区。土地利用被认为是最有前景的污泥处置方式，但施用与保护不当，病原物不仅会污染土壤环境，而且还会随地表径流和渗漏水污染地表水和地下水。选择合适的处置场所和方法，避免病原物引起的水体环境二次污染是污泥土地安全处置中的重要环节。

2.3 对大气环境的污染

污泥中的病原物进入大气环境主要通过以下几种途径：①在污水处理过程中，由于操作流程不规范，产生的污泥没有直接送入密闭装置，污泥颗粒会进入周围的大气环境；②施用液体污泥时，将污泥注射入土壤产生的强大压力使少量污泥溅出，形成细小颗粒进入大气；③污泥表层施用或混施进入土壤后，在耕作或收获作物和刮大风时会形成气溶胶或粉尘，病原物随这些气溶胶或粉尘进入大气。大气中的病原物既可以通过呼吸直接进入人体内，也可以吸附在皮肤或果蔬表面间接地进入人体内，危及人类健康。Pillai 等^[24]对施用商业性污泥产品的区域大气中病原物进行调查，发现空气中没有沙门氏菌、粪大肠菌或粪大肠菌噬菌体等指示生物的存在，认为施用此种污泥不存在病原物的大气污染。但污泥堆放地和非商业性未经处理的污泥的土地利用区大气中是否有污泥源病原物，还需进一步探明。

3 污泥中病原物的健康风险

人类对某些病原物非常敏感，这些菌类的存在对人和其他生物的健康构成了严重威胁。人和其他生物体可以通过摄取、吸入和皮肤接触等多种方式感染病原物^[14]。当含有病原物的城市污水污泥施于农田时，会导致许多疾病的爆发^[25-27]。污泥中的寄生虫进入人体后也会引起许多疾病，世界上大约有30亿人感染了寄生虫病^[28]。2002年6月，Lewis 等^①公布了由于污泥施用引起的健康危害：居住在离

① www.biomedcentral.com/1471-2458/2/11。

污泥施用地点 1 km 内的居民抱怨患有皮疹、红眼病、嗓子痛和肺病等。他们还发现葡萄球菌感染事件, 包括从轻微皮疹到白血病等一系列症状。美国国家研究院 (USNRC, United State National Research Council) 经过两年的调查, 建议重新考虑污泥农用的有关政策, 特别是 EPA 应加强对 B 类污泥施用引起的疾病进行调查^[29]。污泥中病原物对生物和人类健康的危害程度取决于几个方面: ①污泥的处理方式; ②病原物在土壤中的生存能力; ③人与病原物的接触方式; ④人的健康状况及抵抗能力等。在我国, 有关污泥中病原物的研究还很少, 并且有关污泥对生态安全和人类健康威胁的研究尚属空白。随着污泥产生量迅猛增加, 污泥土地处置的生态安全 and 人体健康风险的研究亟需开展。

4 削减污泥中病原物的途径

当含有病原物的污泥施入土壤后, 地表环境就可能遭受病原物的污染, 栖居地表的生物和人类就可能暴露在病原物污染的环境中。为了减少污泥中病原物的含量, 降低病原物对生物和人类健康的危害程度, 污泥施用前经过一系列的灭菌处理是十分必要的。

4.1 污泥的消化

消化是污泥稳定的重要方法之一, 消化后的污泥恶臭减少, 如果高温条件存留一定时间, 可以有效杀死绝大多数病原物。周立祥等^[30]研究发现, 没有经过稳定化处理的二级污泥中大肠杆菌和蛔虫卵均超过国家规定的医院污水污泥排放标准。Haruki 等^[31]在对日本 17 家污水处理厂污泥中病原物进行调查研究时发现, 原始的生污泥粪大肠杆菌平均为 10^5 MPN/g, 消化后的污泥平均为 10^3 MPN/g, 与低温 (35 °C) 消化相比, 高温 (55 °C) 消化可以明显降低污泥中粪大肠杆菌和沙门氏菌含量, 二者均降到 10^3 MPN/g 水平。Oropeza 等^[32]也有相同的研究结果。Fukushi 等^[26]研究发现, 在厌氧消化过程中, 如果 pH < 5.5 的时间超过 2 天, 可以杀死大部分沙门氏菌。但 Jepsen 等^[33]的研究结果表明, 好氧和厌氧消化只能使污泥中粪链球菌降低 10 倍左右, 虽然沙门氏菌降低幅度较大, 但仍能检测到其存在, 没有达到污泥安全利用标准。还有研究者发现, 厌氧消化可以使绝大多数病原物减少 59.7 % ~ 93 %, 但是对蛔虫卵的降低效果并不明显^[34]。为了降低病原物对人和其他生物的健康风险, 实现污泥土地利用

和其他利用方式的安全化, 需要对污泥处理工艺进行改进。由此可见, 对污泥进行消化稳定虽然可以降低存在于其中的病原物数量, 但并不一定或没有达到污泥土地利用的安全标准, 如果要用于农田, 还需要进一步的灭菌处理。

4.2 污泥的碱性稳定

碱性稳定指污泥与足够数量的碱性物料混和, pH > 12 的时间持续 2 h 以上的过程。稳定过程中添加的碱性物料包括粉煤灰、炉渣、生石灰和熟石灰等, 添加碱性物质具有许多优点, 如有利于污泥脱水、降低恶臭、使重金属钝化、杀死和降低病原物的活性等^[20, 35-37]。有研究表明, 当添加 20 % 石灰时, 病原物 (*Listeria* sp. 和 *L. monocytogenes*) 在稳定处理样品中均未检测到^[33]。pH 是影响病原微生物活性的主要因素之一, 添加碱性物料可以显著提高污泥 pH 值, 有效抑制污泥中病原物活性^[38]。Gantzer 等^[39]认为, 当 pH > 11.5 持续 6 个月时, 能够有效杀死病原微生物。添加石灰引起的温度升高也是有效抑制病原物活性的重要原因, 当污泥处理温度高于 45 °C 时, 可以去除大部分病原微生物^[39]。另外, 污泥与碱性物料反应持续的时间也影响灭菌效果^[40]。但是, 石灰稳定还不能被认为是处理污泥的最有效方法, 因为添加石灰引起的 pH 升高虽然能显著降低病原物的数量, 但是不能将其全部杀死^[33, 39, 41, 42]。

4.3 污泥堆肥

堆肥是污泥处理的一种较好方法, 其原理是将污泥与填料充分混合堆积起来, 在一定的温度和微生物作用下, 堆内的有机物发生剧烈的生化反应, 使温度不断上升, 可达 50 ~ 70 °C, 并能维持一定时间, 使病原体、寄生虫卵、蝇蛆等死亡, 并迅速形成大量腐殖质达到无害化的目的。经过堆肥处理的污泥中病原物含量虽然大幅度降低, 但仍有少量的病原物存在^[43-45]。Ho 等^[44]研究表明, 随着污泥腐熟度增加, 堆制污泥过程中沙门氏菌浓度降低, 堆制 5 周后, 沙门氏菌浓度降到检测限以下, 但贮存 26 周后, 堆肥中又检测到沙门氏菌, 他们认为这可能与那段时间有一次降雨有关。可见, 污泥的病原物在贮存的条件发生变化时还可以再产生。

堆肥过程中, 堆肥条件、养分状况等是影响病原微生物活性的主要因素。当污泥处理温度高于 45 °C 时, 可以有效杀死病原微生物^[39]。随着污泥堆肥腐熟度增加, 水分含量降低, 病原物活性也降低^[44]。

在污泥堆肥腐熟过程中，堆肥中的微生物大量生长繁殖，这些微生物与病原物竞争养分基质，抑制了其生长繁殖^[46]。Skanavis 和 Yanko^[45]研究发现，与生物固体堆肥相比混有其他材料的堆肥，沙门氏菌和粪大肠杆菌的浓度较高，说明外加养分可能会影响堆肥的灭菌效果。这再次说明堆肥中的病原物在外界条件适宜的情况下，会再度大量繁殖，对生态环境和人类健康造成新的风险。因此，堆肥贮存时间不宜过长。

4.4 污泥辐射处理

辐射处理是污泥稳定化的一种重要方式，它可以降低污泥中有害物质的毒性，杀死污泥中存在的各种病原物，达到无害化要求。辐射处理包括紫外、伽马射线、电子束和同位素辐射处理等。Franco-Hernández 等^[47]研究发现，经过 ^{60}Co (30 kGy) 辐射处理 30 min，污泥中粪大肠菌值从原来的 1200 CFU/g 降到 3 CFU/g，沙门氏菌由 250 CFU/g 降到 1 CFU/g，活性寄生虫卵没有被检测到。伽马辐射可以有效杀死污泥中的大肠杆菌，当辐射强度为 2 kGy 时，大肠杆菌值 < 100 CFU/g，可以安全施用^[48]。电子束 (electron beam) 辐射是快速有效的城市污水污泥灭菌方法，能使寄生虫卵降低 1000 倍，大肠杆菌降低 100 倍。紫外辐射也是一种有效的灭菌方法，紫外照射 (45 W/min) 60 min 后，污泥中的细菌和大肠杆菌可以降低近 1000 倍^[49]。一般认为，辐射处理是一种有效的灭菌方式，它可以杀死污泥中的绝大多数病原物，达到污泥安全利用标准。

4.5 污泥巴氏灭菌

高温可以使微生物的蛋白质变性、酶类失活、新陈代谢紊乱，最后直至死亡。巴氏灭菌是一种通用的高温灭菌方法，它被广泛应用于食品科学、医学和一些其他学科。对污泥进行巴氏灭菌处理可以有效杀死污泥中的病原微生物，实现污泥的卫生学、无害化。但是，巴氏灭菌的处理效果与污泥的性质和处理时间有一定的关系。Franco-Hernández 等^[47]的研究结果表明，60 °C 条件下灭菌 30 min 虽然能够显著降低病原物的数量，但是不能将其全部杀死。由于巴氏灭菌不能将污泥中的病原物全部杀死，经过巴氏灭菌处理的污泥还需进一步稳定化处理才能应用于农田土壤。将巴氏灭菌处理的污泥进行第二次稳定化处理，如中温厌氧消化^[50]，可以防止污泥中病原物再发，满足污泥土地利用的生物学要求。

4.6 严格污泥土地利用标准

生活污水中的病原物，在污染土壤、水和农作物后，经呼吸和饮食能够引起某些传染病和寄生虫病等，因此污泥土地处置除要防止如重金属和有机污染物等化学污染之外，还要防止病原物等生物学污染，必须符合一定的土地安全使用标准。世界上许多发达国家都制定了污泥土地利用的法律法规。如美国 EPA^[51]根据病原物的含量，把污泥分为 A 类和 B 类。A 类污泥的施用不受施用场所、作物种类等的限制，而 B 类污泥的施用，如人和家畜的允许进入时间、种植作物种类和收获时期及施用地点的选择等，都必需遵守一定的法律法规。我国医院污水污泥排放标准^[52]规定：粪大肠菌值不小于 10^{-2} ，蛔虫卵的死亡率 $> 95\%$ ，每 10 g 污泥（原检样中）不得检出肠道致病菌和结核杆菌。高温堆肥的卫生标准是：蛔虫卵死亡率 $95\% \sim 100\%$ ，粪大肠菌值 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ ^[53]。我国的污泥农用标准^[54]规定了重金属和有机污染物限制标准，但对病原物没有任何规定。新的污泥农业标准^[55]对部分重金属和有机污染物的标准值做了一定的修改，虽然没有制定病原物的标准，但在污泥稳定化中增加了病原物的控制指标。目前，关于病原物对人体健康的危害国际上还缺少有效评价方法^[20]。USNRC 建议 EPA 对生污泥 (Raw sludge) 和处理过的污泥进行全国性调查及建立生物固体 (Biosolids) 中病原物检测的 QMRA (Quantitative microbial risk-assessment) 标准方法^[56]。随着我国污泥产生量的不断增加和清洁生产与循环经济理念的应用，愈来愈多的污泥会被循环利用，污泥施用带来的环境与健康问题也会更加严峻。为了生存环境的卫生，人类健康的保障，社会的可持续发展，对污泥土地利用标准及法律法规的制定和健全工作的开展迫在眉睫。

5 稳定化污泥中病原物的再发现象

通常，含有病原物的污泥在利用之前贮存一段时间有利于进一步清除污泥中的病原物，但是，如果贮存时间和贮存条件不当会导致污泥中病原物的大量繁殖，危害人类健康和生态环境。石灰稳定污泥和污泥堆肥中的肠道致病菌（如大肠杆菌）在放置一段时间后会有再发现象^[39]。影响稳定化污泥中病原物再发能力的因素很多，包括储藏时间、条件、稳定化方式、病原物种类和土著微生物等。如在生物固体储藏处理的开始阶段，随着储藏时间的延长，粪大肠菌群和沙门氏菌的数量降低，储藏 16 周时，

二者均未检出。但随着储藏时间的延长,二者开始增加,并超过开始储藏时的数量^[57]。在污泥堆肥贮存过程中,堆肥灭菌后沙门氏菌的再发能力较未灭菌的堆肥强,这可能是因为灭菌处理在杀死病原物的同时,也杀死了堆肥中的土著微生物,病原物失去了与之竞争养分和生活基质的对手^[44, 46]。因此,稳定化污泥不宜放置时间过长。污泥中的病原物进入土壤后也有一定的再发能力。生物固体施入土壤后,粪大肠杆菌和沙门氏菌量均较对照高,随着施入时间的延长,二者数量均降低,施用后 8~29 周没有检测出沙门氏菌,但到 36 周时,沙门氏菌的 MPN 值高于开始施用时^[57]。

污泥中的病原物在储藏和施入土壤后都有一定的再发能力,为了评价其对生态环境、动物及人类健康的风险,需要确定指示病原物再发情况的指标。一些学者认为沙门氏菌对外界环境较为敏感,以污泥中沙门氏菌的再发情况来指示稳定化处理污泥中病原物的再发能力较好^[58]。但是,有关这方面的研究还有待系统和深化。

6 结语

综上所述,污泥中病原物的种类繁多,并且在土壤中还存在一定的再发现象,如果在污泥产生和处置过程中没有采取相应的安全措施,必将对生态环境、人类和其他生物健康产生风险或构成威胁。降低污泥中病原物风险的措施很多,主要有消化,堆肥,碱性稳定,辐射,巴氏灭菌和完善污泥土地利用的法律法规等。由于每种措施都存在一定的优缺点,同时采用几种方法对污泥进行稳定化处理是改善污泥本身性能和降低病原物风险的有效措施。目前,关于污泥及其土地利用过程中病原物的环境行为和生态效应还缺乏了解,病原物的生物与人类健康的风险评价还缺少快捷、有效的方法与指标体系,这必将影响污泥及其产品的土地利用的病原物管理标准和法律法规的制定,这一方面需要土壤科学、环境科学、农学和医学等相关学科及其专家们的通力合作,同时也需要政府、管理部门和企业与科技界共同努力,以推动和促进污泥及其土地资源化利用的研究与管理工作。

参考文献

1 《中国环境年鉴》编辑委员会. 中国环境年鉴. 北京: 中国环境年鉴社, 2001

- 2 Albiach R, Canet R, Pomares F, Ingelmo F. 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 (2): 109 ~ 114
- 3 Debosz K, Petersen SO, Kure LK, Ambus P. Evaluating effects of sewage sludge and household compost on soil physical, chemical and microbiological properties. *Applied Soil Ecology*, 2002, 19 (3): 237 ~ 248
- 4 Zibilske LM, Clapham WM, Rourke RV. Multiple applications of paper mill sludge in an agricultural system: Soil effects. *J. Environ. Qual.*, 2000, 29: 1975 ~ 1981
- 5 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
- 6 Bert, WR, Jacobs L. Distribution of trace elements in soil from repeated sewage sludge applications. *J. Environ. Qual.*, 1998, 27: 1280 ~ 128
- 7 De Jonge H, De Jonge LW, Blicher BW, Moldrup P. Transport of di(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP) applied with sewage sludge to undisturbed and repeated soil columns. *J. Environ. Qual.*, 2002, 31: 1963 ~ 1971
- 8 Jackson AP, Eduljee GH. An assessment of the risks associated with PCDDs and PCDFs following the application of sewage sludge to agricultural land in the UK. *Chemosphere*, 1994, 29 (12): 2523 ~ 2543
- 9 Vulkan R, Mingelgrin U, Ben-Asher J, Frenkel H. Copper and zinc speciation in the solution of a soil-sludge mixture. *J. Environ. Qual.*, 2002, 31: 193 ~ 203
- 10 O'Riordan EQ, Dodd VA, Fleming GA. Repeated application of a metal-rich sewage sludge to grassland: Effect on metal levels in soil. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 1994, 33: 41 ~ 51
- 11 Luo YM. Cu and Zn speciation in an acid soil amended with alkaline biosolids. *Pedosphere*, 2002, 12 (2): 165 ~ 170
- 12 廖继佩, 林先贵, 曹志洪. 红壤中丛枝菌根真菌对污泥态铜生物有效性的影响. *土壤学报*, 2003, 40 (6): 929 ~ 937
- 13 Lewis DL, Gattie DK. Pathogen risks from applying sewage sludge to land. *Environ. Sci. Technol.*, 2002, 36: 287A ~ 293A
- 14 United States Environmental Protection Agency. Environmental Regulations and Technology—Control of

- Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge. EPA/625/R-92/1013, Washington DC, 1999
- 15 Deportes I, Benoit-Guyod JL, Zmirou D. Hazard to man and the environment posed by the use of urban waste compost—A review. *Science of the Total Environment*, 1995, 172 (2-3): 197 ~ 222
- 16 Sahlström L. A review of survival of pathogenic bacteria in organic waste used in biogas plants. *Bioresource Technology*, 2003, 87 (2): 161 ~ 166
- 17 Gaspard P, Wiart J, Schwartzbrod J. Parasitological contamination of urban sludge used for agricultural purposes. *Waste Management & Research Volume*, 1997, 15 (4): 429 ~ 436
- 18 European Commission. Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2001
- 19 Cowell SJ, Clift R. A methodology for assessing soil quantity and quality in life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 2000, 8 (4): 321 ~ 331
- 20 Gaspard P, Ambolet Y, Schwartzbrod J. Urban sludge reused for agricultural purposes: Soils contamination and model development for the parasitological risk assessment. *Bulletin De L Academie Nationale De Medecine*, 1997, 181 (1): 43 ~ 57
- 21 Luo YM, Qiao XL, Song J, Christie P, Wong MH. Use of a multi-layer column device for study on leachability of nitrate in sludge-amended soils. *Chemosphere*, 2003, 52 (9): 1483 ~ 1488
- 22 Sukreayapongse O, Holm PE, Strobel BW, Panichsakpatana S, Magid J, Hansen HCB. pH-dependent release of cadmium, copper, and lead from natural and sludge-amended soils. *J. Environ. Qual.*, 2002, 31(6): 1901 ~ 1909
- 23 Edwards DR, Larson BT. Runoff nutrient and fecal coliform content from cattle manure application to fescue plots. *Journal of the American Water Resources Association*, 1999, 36 (4): 711 ~ 722
- 24 Pillai SD, Widmer KW, Dowd SE, Ricke SC. Occurrence of airborne bacteria and pathogen indicators during land application of sewage sludge. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1996, 62 (1): 296 ~ 299
- 25 Craun GF, Berger PS, Calderon RL. Coliform bacteria and waterborne disease outbreaks. *Journal of American Water Works Association*, 1997, 89 (3): 96 ~ 104
- 26 Fukushi K, Babel S, Burakrai S. Survival of *Salmonella* spp. in a simulated acid-phase anaerobic digester treating sewage sludge. *Bioresource Technology*, 2003, 86 (1): 53 ~ 57
- 27 Toze S. PCR and the detection of microbial pathogens in water and wastewater. *Water Research*, 1999, 33 (17): 3545 ~ 3556
- 28 Drake LJ, Bundy DAP. Multiple helminth infections in children: impact and control. *Parasitology*, 2001, 122 (suppl.): S73 ~ S81
- 29 NRC targets pathogens in sludge for research (Environmental News). *Environ. Sci. Technol.*, 2002, 36: 388A
- 30 周立祥, 郑绍建, 胡霁堂. 污泥农牧地应用中病原物的存活及其控制措施. *农业环境保护*, 1995, 14 (3): 128 ~ 131
- 31 Haruki W, Tomokazu K, Shuichi O, Masaaki O. Inactivation of pathogenic bacteria under mesophilic and thermophilic conditions. *Water Science and Technology*, 1997, 36 (6-7): 25 ~ 32
- 32 Oropeza MR, Cabirol N, Ortega S, Ortiz LPC, Noyola A. Removal of fecal indicator organisms and parasites (fecal coliforms and helminth eggs) from municipal biologic sludge by anaerobic mesophilic and thermophilic digestion. *Water Science and Technology*, 2001, 44 (4): 97 ~ 101
- 33 Jepsen SE, Krause M, Grüttner H. Reduction of fecal streptococcus and salmonella by selected treatment methods for sludge and organic waste. *Water Science and Technology*, 1997, 36 (11): 203 ~ 210
- 34 Paulino RC, Castro EA, Thomaz-Soccol V. Helminth eggs and protozoan cysts in sludge obtained by anaerobic digestion process. *Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical*, 2001, 34 (5): 421 ~ 428
- 35 Boost MV, Poon, CS. The effect of a modified method of lime-stabilisation sewage treatment on enteric pathogens. *Environment International*, 1998, 24 (7): 783 ~ 788
- 36 Garrec N, Picard-Bonnaud F, Pourcher AM. Occurrence of *Listeria* sp. and *L. monocytogenes* in sewage sludge used for land application: Effect of dewatering, liming and storage in tank on survival of *Listeria* species. *FEMS Immunology and Medical Microbiology*, 2003, 35 (3): 275 ~ 283
- 37 McBride MB. Soluble trace metals in alkaline stabilized

- sludge products. J. Environ. Qual., 1998, 27: 578 ~ 584
- 38 Awuah E, Lubberding HJ, Asante K, Gijzen HJ, Pena MR, Gijzen, HJ, Mara DD. The effect of pH on enterococci removal in Pistia-, duckweed- and algae-based stabilization ponds for domestic wastewater treatment. Water Science & Technology, 2002, 45 (1): 67 ~ 74
- 39 Gantzer C, Gaspard P, Galvez L, Huyard A, Dumouthier N, Schwartzbrod J. Monitoring of bacterial and parasitological contamination during various treatment of sludge. Water Research, 2001, 35 (16): 3763 ~ 3770
- 40 Mignotte-Cadiergues B, Maul A, Huyard A, Capizzi S, Schwartzbrod L, Morris R, Jofre J. The effect of liming on the microbiological quality of urban sludge. Water Science & Technology, 2001, 43 (12): 195 ~ 200
- 41 Gaspard P, Wiat J, Schwartzbrod J. Urban sludge reuse in agriculture: Waste treatment and parasitological risk. Bioresource Technology, 1995, 52: 37 ~ 40
- 42 Jiménez-Cisneros BE, Maya-Rendón C, Salgado-Velázquez G. The elimination of helminth ova, faecal coliforms, Salmonella and protozoan cysts by various physico-chemical processes in wastewater and sludge. Water Science and Technology, 2001, 43 (12): 179 ~ 182
- 43 Deportes I, Benoit-Guyod JL, Zmirou D, Bouvier MC. Microbial disinfection capacity of municipal solid waste (MSW) composting. J. Appl. Microbiol., 1998, 85 (2): 238 ~ 246
- 44 Ho GE, Sidhu J, Gibbs RA. Composting of wastewater biosolids. Proceedings of International Workshop on Biosolid Management and Utilization, Nanjing, 2000, 141 ~ 164
- 45 Skanavis C, Yanko WA. Evaluation of composed sewage sludge based soil amendments for potential risks of Salmonellosis. J. Environ. Heal., 1994, 56 (7): 19 ~ 23
- 46 Sidhu J, Gibbs RA, Ho GE, Unkovich I. The role of indigenous microorganisms in suppression of *Salmonella* regrowth in composted biosolids. Water Research, 2001, 35 (4): 913 ~ 920
- 47 Franco-Hernández O, Mckelligan-Gonzalez AN, Lopez-Olguin AM, Espinosa-Ceron F, Escamilla-Silva E, Dendooven L. Dynamics of carbon, nitrogen and phosphorus in soil amended with irradiated, pasteurized and limed biosolids. Bioresource Technology, 2003, 87 (1): 93 ~ 102
- 48 Rawat KP, Sharma A, Rao SM. Microbiological and physicochemical analysis of radiation disinfected municipal sewage. Water Research, 1998, 32 (3): 737 ~ 740
- 49 Li XZ, Chua H, Zhang M. Disinfection of municipal wastewater by sensitized photooxidation. Water Science and Technology, 1996, 33 (3): 111 ~ 118
- 50 Ward A, Stensel HD, Ferguson JF, Ma G, Hummel S. Preventing growth of pathogens in pasteurized digester solids. Water Environment Research, 1999, 71 (2): 176 ~ 182
- 51 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. Office of Enforcement and Compliance Assurance, Washington, DC., 1994
- 52 中华人民共和国国家标准. 医院污水污泥排放标准 (GBJ48-83). 北京: 中国环境科学出版社, 1983
- 53 中华人民共和国国家标准. 粪便无害化标准 (GB 7958-87). 北京: 中国标准出版社, 1987
- 54 中华人民共和国国家标准. 农用污泥中污染物控制标准 (GB 4284-84). 北京: 中国标准出版社, 1984
- 55 中华人民共和国国家标准. 城镇污水处理厂污染物排放标准 (GB 18918-2002). 北京: 中国环境科学出版社, 2002
- 56 United States National Research Council. Biosolids applied to land: Advancing standards and practice. In: Committee on Toxicants and Pathogens in Biosolids Applied to Land. ed. Board on Environmental Studies and Toxicology, Division on Earth and Life Studies. Washington DC: National Academy Press, 2002
- 57 Gibbs RA, Hu CJ, Ho GE, Unkovich I. Regrowth of faecal coliforms and salmonellae in stored biosolids and soil amended with biosolids. Water Science and Technology, 1997, 35 (11-12): 269 ~ 275
- 58 Sidhu J, Gibbs RA, Ho GE, Unkovich I. Selection of *Salmonella* Typhimurium as an indicator for pathogen regrowth potential in composted biosolids. Letters in Applied Microbiology, 1999, 29 (5): 303 ~ 307

ENVIRONMENTAL AND HEALTH RISKS OF PATHOGENS IN SEWAGE SLUDGE AND THEIR ABATING APPROACHES

SUN Yu-huan^{1,2} LUO Yong-ming^{1,2}

(1 Soil and Environmental Bioremediation Center of Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Soil and Environment Joint Open Laboratory, Key State Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008;

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract There is a variety of pathogenic organisms or pathogens in sewage sludge, among which four major types of human pathogens are bacteria, viruses, protozoa, and helminthes, and they all may be present in domestic sewage sludge. Pathogens can regrow in appropriate conditions in the soil after being applied with the sledge into the soil, thus posing environmental and health risks. Digestion, alkali-stabilization, composting, irradiation, Pasteurism, and perfection of laws and regulations for stacking and application of sewage sludge are main measures that can be used to abate the pathogenic risks on environment and health. It is, therefore, recommended that studies on environmental behaviors, ecological effects and health risks of pathogens in sewage sludge and sludge-affected environmental media be developed as soon as possible, and corresponding abating approaches and key technologies also be explored.

Key words Sewage sludge, Pathogens, Risks, Controlling methods.

《土壤》期刊征订启事

《土壤》杂志是我国土壤科学领域最具权威性的专业期刊之一，是中国科技核心期刊，已被《中国期刊网》、《中国学术期刊（光盘版）》全文收录，被认定为《中国学术期刊综合评价数据库》、《中国科学引文数据库》来源期刊。

《土壤》办刊宗旨：以科学的态度，求实的精神，严谨的作风，传播土壤科学最新研究成果，交流改土培肥经验，普及土壤科学知识，提倡百家争鸣，活跃学术思想，繁荣我国土壤科学事业，促进农业生产，服务于国民经济建设。

《土壤》自 1958 年创刊以来，在选题上紧密结合国民经济建设、改革开放的发展形势，以能及时反映国内外土壤科学发展的最新动向为目的，刊载土壤科学方面的学术论文、试验研究报告、文献综述、简报、科研和生产实践中的新技术、新方法、国内外考察报告等。

《土壤》杂志从 2003 年改版，双月刊，大 16 开本，双栏排版，112 页，彩色封面，双月 25 日出版。

新版《土壤》杂志以能最大限度为作者、读者提供服务为宗旨，注重新思想、新理论、新技术方法的探讨，注重对实际应用的指导。有深度、广度；严肃、严谨；流畅、活泼；形成独特的风格，成为深受广大作者、读者欢迎的期刊。

《土壤》期刊的邮发代号：28-21，每期定价 25.00 元，全年定价 150.00 元。全国各地邮局均可订阅，也可随时直接向《土壤》编辑部订阅。

地址：江苏南京市北京东路 71 号，中国科学院南京土壤研究所《土壤》编辑部，邮政编码：210008，电话和传真：025-86881236，电子邮箱：soils@mail.issas.ac.cn 或 tr@mail.periodicals.net.cn。

欢迎订阅、投稿和刊登综合信息。