

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200300

谢文凤, 吴彤, 石岳骄, 朱毅. 国内外有机肥标准对比及风险评价[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(12): 1958–1968

XIE W F, WU T, SHI Y J, ZHU Y. Chinese and international organic fertilizer standard comparison and risk assessment[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(12): 1958–1968

国内外有机肥标准对比及风险评价*

谢文凤[†], 吴彤[†], 石岳骄[†], 朱毅^{**}

(中国农业大学食品科学与营养工程学院 北京 100083)

摘要: 中国是人口最多的发展中国家, 生产生活中产生的有机废弃物数量巨大, 堆制有机肥是降低有机废物污染风险的重要方式, 而有机肥标准则是防止有机肥成为新的土壤污染源, 规范有机肥产业健康发展的重要保障。目前我国有机肥不合格现象时有发生, 针对有机堆肥的标准仅有一个8年前的行业标准(NY 525—2012)的现状, 本文对比了中国、日本、澳大利亚、欧盟、美国有机肥标准的重要指标, 对存在的重金属残留、抗生素污染、病原体污染、营养富集及土壤盐渍化等有机肥质量安全风险问题进行分析, 为我国有机肥行业未来绿色、健康、可持续发展提出建议。尽管我国现有有机肥质量标准, 在具体指标要求方面优于美国, 但和欧盟相比还有差距, 比如我国重金属Cu、Zn、Ni限量缺失, 对Cd等重金属限值要求不够严格, 长期施用会导致土壤重金属含量超过风险筛选值, 严重影响农作物安全; 同时, 由于部分畜禽养殖业不合理使用抗生素, 加之有机肥生产企业技术的欠缺, 农户施用缺乏指导, 监管部门执法不严等因素, 我国有机肥施用过程存在较大风险隐患。因此, 进一步完善有机肥标准体系, 强化对原料中有害物质的限制, 要求选用原料批批检, 加大准入和过程的落实力度, 才能保障我国有机肥产业有序健康发展。

关键词: 有机肥; 标准对比; 风险评价; 有机肥标准; 土壤重金属

中图分类号: S141.4

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Chinese and international organic fertilizer standard comparison and risk assessment*

XIE Wenfeng[†], WU Tong[†], SHI Yuejiao[†], ZHU Yi^{**}

(College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: China has a large population, daily life and manufacturing activities produce large quantities of organic waste. An efficient way to reduce organic waste pollution is by transforming it into organic fertilizer. Agricultural industry-standard NY 525—2012, established in 2012, is the only policy used to regulate organic fertilizers in China, but it is outdated. To improve the Chinese organic fertilizer standard system, we reviewed and analyzed the quality standards in Chinese, Japanese, Australian, European Union, and American organic fertilizers by comparing the organic matter, nutrient, and heavy metal concentrations and pathogen levels. The results showed that the Chinese organic fertilizer quality standard is stricter than that in the United States, but has disadvantages

* 黑龙江省密山市有机农业发展与职业培训项目(201905510610202)资助

** 通信作者: 朱毅, 主要研究方向为营养与食品安全。E-mail: zhuyi@cau.edu.cn

† 同等贡献者: 谢文凤, 主要研究方向为食品质量与安全, E-mail: xiewenfeng17112@163.com; 吴彤, 主要研究方向为食品质量与安全, E-mail: estela_tong@163.com; 石岳骄, 主要研究方向为食品质量与安全, E-mail: 18810791293@163.com

收稿日期: 2020-04-20 接受日期: 2020-08-14

* This work was supported by the Organic Agriculture Development and Vocational Training Project in Mishan City of Heilongjiang Province of China (201905510610202).

** Corresponding author, E-mail: zhuyi@cau.edu.cn

† Equivalent contributors

Received Apr. 20, 2020; accepted Aug. 14, 2020

compared to the European Union. In China, there are no organic fertilizer limits for copper, zinc, and nickel, and some of the heavy metal limits (e.g., cadmium) are loose. Therefore, long-term application may lead to soil heavy metal contamination, risking crops. Additive and antibiotic overuse in the livestock and poultry industries, an organic fertilizer production technology shortage, missing scientific and professional guidance for farmers, and insufficient direction from relevant departments and agencies all increase the risks associated with organic fertilizer application in China. Improving the standard system, restricting heavy metals, antibiotics, and other toxic substances, and inspecting raw material batches before processing will support the quality and sustainable development of the organic fertilizer industry in China.

Keywords: Organic fertilizer; Standard comparison; Risk assessment; Organic fertilizer standard; Soil heavy metal

中国是最大的化肥生产国, 化肥的使用促进了农作物产量提升, 但过量施用化肥的现象越来越严重。化肥的长期滥用导致土壤的微生物活动受影响、有机质减少、肥力降低, 且容易出现土壤硬化现象, 导致作物生长受影响, 农产品品质下降, 甚至会危害人的健康^[1]。因此有机肥作为绿色、生态农业中食品生产的重要养分, 重新受到了人们的重视。在很多发达国家, 有机肥施用量占总肥料的比例都已超过 50%, 我国有机肥施用量实际占比虽不到 50%, 但近年来也呈现逐年上升的趋势^[2]。有机肥可以提供全面的无机和有机营养物质, 比如多种有机酸、核酸、多肽、N、P、K、Ca、Mg、S 和微量元素 Fe、Mn、B、Zn、Mo、Cu 等^[3], 其营养作用长期缓慢, 对于土壤中有机质的积累、团状结构及土壤中有益微生物群落的形成以及农作物品质的提升十分重要^[4]。此外, 有机肥的使用还可以提高人们生产生活产生的有机废弃物的利用率, 避免由于管理不善导致的能源浪费和环境污染^[5]。但近年来, 由于有机肥在原料和生产中存在的问题, 导致部分有机肥不符合行业标准, 对农产品和生态环境产生了潜在的负面影响。尤其是作为有机肥制造主要原料的畜禽粪便中抗生素、重金属的残留, 在堆肥的工艺处理中不能被有效除去, 在使用过程中容易造成土地污染, 进入食物链后还会对人体健康带来危害。研究连续 7 年施用有机肥后, 重金属在土壤和作物的累计情况, 发现在施用高量鸡粪后, 土壤 Zn 含量超过了土壤污染风险筛选值, 小麦(*Triticum aestivum*)籽粒 Zn 和 Cd 含量显著增加, 增幅分别为 67.74%和 40.00%, 其中 Zn 含量已经超过相关食品安全标准^[6]。此外, 还有研究发现, 小麦-玉米(*Zea mays*)轮作体系下, 畜禽粪便有机肥是 Cu、Zn、Cd、Ni、Pb、Cr 等 6 种重金属元素主要输入源, 可能对人体健康造成潜在危害^[7]。

随着国内畜禽养殖规模的不断扩大, 有机肥产业的发展将成为我国农业生产可持续发展的必然举措和重要保障。因此, 做好有机肥生产中的风险管控

意义重大。本文重点分析了国内外有机肥行业的相关标准, 并结合现状对国内外重金属污染、抗生素污染、病原体污染及营养富集和盐渍化风险进行评估。并就目前存在的问题提出了建立有关管理机构、完善相关标准以及生产风险的管理举措, 为实现农业的现代化发展提供一定的助力。

1 国内外有机肥标准对比

目前, 传统有机肥正朝着标准化、规模化方向发展。在现有的标准中, 我国的有机肥质量标准主要由农业农村部发布, 且仅停留在行业标准水平。2012 年农业农村部制定了有机肥料行业标准(NY 525—2012)^[8], 对商品有机肥外观、有机质质量分数、总养分含量、含水量、pH、5 项重金属限量指标、蛔虫卵死亡率等方面提出了质量要求及检测方法和规则。2019 年, 农业农村部制定畜禽粪便堆肥技术规范(NY/T 3442—2019)^[9], 规定了有机肥料规模化生产的场地、堆肥工艺、设施设备、质量检测等方面的要求。制定了畜禽粪便无害化处理技术规范(GB/T 36195—2018)^[10]、生物有机肥(NY 884—2012)^[11]、无机-有机复混肥料(GB/T 18877—2009)标准^[12]以及多项重金属(GB/T 23349—2009)^[13]和病原体(GB/T 19524.1—2004、GB/T 19524.2—2004)的检测标准^[14-15]。为加快国内有机肥行业标准化进程, 本文对比了中国、日本、澳大利亚、欧盟和美国的有机肥标准, 并对重要指标进行比较, 望有助于更加严格合理的中国有机肥标准体系的确立。

1.1 有机质与养分指标

1.1.1 有机质

有机肥料中的有机质含量会对土壤理化状况造成影响, 它对于土壤的结构性质、微生物活动、保肥能力、土层温度、作物生长发育、环境保护等方面都有着极其重要的作用。在我国, 农业农村部制定颁布的有机肥行业标准(NY525—2012)要求有机肥中的有机质质量分数不低于 45%(干燥基)^[8]。日本有机肥料的标准中, 有机物质的质量分数通常

需要超过 40%, 美国要求有机肥的有机质质量分数应大于或等于 30%, 澳大利亚大于或等于 20%, 欧盟大于或等于 20%^[16]。

1.1.2 养分

国内在有机肥料的行业标准(NY525—2012)^[8]中只对有机肥中总养分(N+P₂O₅+K₂O)做出了限制, 即要求总养分的质量分数大于或等于 5.0%(烘干基

计)。在此基础上, 有些地方标准会制定碳磷比(C/N)指标, 进而规范有机肥料的养分配比。例如鸡粪有机肥料生产技术规范中要求 C/N 控制在 25~30 1。日本对于树皮堆肥、家畜类堆肥、污泥堆肥等不同有机肥种类的养分含量有不同的标准, 详见表 1。欧盟仅对有机肥的全氮含量有最高限制, 即全氮含量不大于 2TS。

表 1 国内外有机肥养分含量标准

Table 1 Domestic and foreign standards for nutrients contents of organic fertilizer

国家/地区 Country/region	分类 Category	全氮含量 Total N content (%)	P ₂ O ₅ 含量 P ₂ O ₅ content (%)	K ₂ O 含量 K ₂ O content (%)	总养分 Total nutrient (%)
中国 China					≥5.0
日本 Japan	树皮堆肥 Bark composting	≥1.0			≥1.0
	下水污泥堆肥 Sewage sludge composting	≥1.5	≥2		≥3.5
	粪类污泥堆肥 Fecal sludge composting	≥2.0	≥2		≥4.0
	食品污泥堆肥 Food sludge composting	≥2.5	≥2		≥4.5
	家畜粪堆肥 Livestock manure composting	≥1.0	≥1	≥1	≥3.0
欧盟 European Union		≤2TS			

1.2 重金属限量指标

重金属含量一直是种植业、畜牧业、林业、水处理行业、环境保护行业等多行业人员关注的焦点^[17]。因此, 在制定肥料的质量标准时, 需要严格控制重金属的限量指标。

国内外堆肥产品的标准中, 对 8 种主要重金属 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、As、Hg、Ni 含量进行了限制(表 2)。欧盟将有机堆肥按用途分为生态标准、有机栽培和土壤改良剂 3 类, 不同类型的有机堆肥重金属限量也不同。此处我们只关注其中有机耕种用途的堆肥肥料标准。从表 2 可以看出, 大部分国家对于有机肥料中的 Cu、Zn、Ni 这 3 种金属有限量标准, 而我国现有的有机肥料标准(NY525—2012)^[8]对 Cu、Zn、Ni 没有制定相应的限量, 值得肯定的是, 中国对于 Pb 和 As 的限量标准比大多数其他国家的标准略高, 要求较为严格。

许多国家或地区规定中肥料的种类繁多, 并且都对重金属最高限量有着严格的规定。但是经过对比不难发现, 美国有机肥标准中各重金属的限量值与其他地区的标准相比较低(表 2)。杨帆^[18]的研究表明, 美国现阶段尚且缺乏联邦统一的肥料法, 而是各州根据各自地区的特点, 自发制定有关肥料法。各州在制定肥料法时需要参考美国植物食品管理机构协会(AAPFCO)所提出的指导性标准。该标准的提出是依据美国环境保护局(USEPA)和美国肥料协会(TIF)联合各地方的食品与农业部建立的肥料重金属

安全浓度的广义风险模型, 该模型的建立主要包括以下内容: 根据不同作物与土壤确定施肥量, 然后计算在 50~100 a 间连续施肥后由肥料带入土壤的重金属浓度(Kd 范围)与植物吸收的重金属量(PUF 范围), 分析计算出人类在食用这些农作物制成的食品后所摄入的重金属量, 再根据相关的试验结论联合评估, 最终确定人类食物中重金属浓度的卫生安全范围, 依据这些数据结果, 计算出肥料中安全的重金属含量(RBC)^[19]。根据该风险模型, 得到了 AAPFCO 的肥料重金属限量标准。该标准不是强制性的, 只是推荐方案。各州在 AAPFCO 规定标准的基础上, 对于不同的作物、轮作模式和耕作模式开展大量肥效鉴定的田间试验, 再通过田间试验观测土壤理化性质的变化情况以及有机质和养分的利用情况, 从而建立合理的施肥标准体系。由此推测, 美国为了能尽量考虑到各州的土壤成分特征和作物特征等问题, 由 AAPFCO 及美国环境保护局(USEPA)等相关机构提出的指导性标准中的重金属限量范围便相对宽泛些。

1.3 病原体指标

有机肥料的原料主要是畜禽粪便、动物性产品加工废弃物以及作物秸秆、豆粕、棉粕、菇渣、沼渣、菌渣、木质素渣、落叶、草炭等农业废弃物, 所以很容易携带细菌、病毒和寄生虫这 3 种传染性病原体或毒素。例如鸡粪中的禽流感病毒、大肠杆菌、链球菌、沙门氏菌、梭菌、李斯特菌等病原菌和虫

卵, 可以通过堆肥等热处理方法减少或完全消除, 以防止病菌繁殖和传播。

表 2 国内外有机堆肥产品中重金属限量标准

Table 2 Domestic and foreign standards for heavy metals limits of organic fertilizer

国家/地区 Country/region	分类 Category	重金属质量分数 Heavy metal mass fraction (mg·kg ⁻¹)							
		Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	As	Hg	Ni
中国 China			50		3	150	15	2	
日本 Japan			100		5	500	50	2	300
澳大利亚 Australia		200	200	250	3	400	20	1	60
欧盟 European Union	有机耕种 Organic farming	70	45	200	0.7	70		0.4	25
美国 American		1 500	300	2 800	1.5	100			

商品化有机肥料需要达到无害化处理要求, 主要的病原体检测指标有蛔虫卵死亡率、类大肠杆菌数、沙门氏菌等。国内外有机肥料生产标准中病原体残存量详见表 3。相较于其他几个国家的标准, 仅有我国对于蛔虫卵死亡率有最低限制, 即死亡率不小于 95%。而且我国对于类大肠杆菌数和沙门氏菌的限制也较为严格, 以畜禽粪便为原料生产的有机

肥料产品中, 要求类大肠杆菌的数量不能超过 100 个·g⁻¹, 沙门氏菌也不能被检测出来。

在欧盟内部一些成员国, 有机肥的使用和质量标准存在很大差异, 大部分原因是土壤政策和法定准则的差异, 缺乏统一的评估病原体存在和植物毒性的方法和标准, 部分成员国的病原体评估标准如表 4 所示^[20]。

表 3 国内外有机肥病原体残余标准

Table 3 Domestic and foreign standards for pathogen residues of organic fertilizer

国家/地区 Country/region	分类 Category	蛔虫卵死亡率 Mortality of ascaris eggs (%)	类大肠杆菌数 <i>Escherichia coli</i> value	沙门氏菌 <i>Salmonella</i> spp.
中国 China/region	畜禽粪便人工堆肥 Artificial livestock manure compost	≥95	≤100 个·g ⁻¹	不得检出 No detected
	畜禽粪便机械堆肥 Mechanical livestock manure compost			不得检出 No detected
日本 Japan			≤1 000 MPN·g ⁻¹	25 g 样品中不得检出 No detected in 25 g sample
欧盟 European Union			<100 CFU·g ⁻¹	25 g 样品中不得检出 No detected in 25 g sample

表 4 欧盟部分成员国有机肥的病原体质量评估标准

Table 4 Pathogen quality assessment criteria of organic fertilizer in some European Union Member States

国家 Country	参数 Parameter	极限值 Limit value
捷克共和国 Czech Republic	沙门氏菌 <i>Salmonella</i> spp.	不存在 Absent
	大肠杆菌 <i>Escherichia coli</i>	<1 000 CFU·g ⁻¹
	肠球菌 <i>Enterococcus</i> spp.	<1 000 CFU·g ⁻¹
德国 German	沙门氏菌 <i>Salmonella</i> spp.	50 g 样品中不存在 Absent in 50 g sample
	铜色浆虫 <i>Plasmodoph</i> Brass	感染指数 ≤50% Infection index ≤50%
	烟草花叶病毒 1 Tobacco mosaic virus 1	≤8·plant ⁻¹
	杂草繁殖体 Weeds/propagules	发芽率 ≤2 粒·L ⁻¹ Germination ≤2 plants·L ⁻¹
意大利 Italy	沙门氏菌 <i>Salmonella</i> spp.	25 g 样品中不存在 Absent in 25 g sample
	大肠杆菌 <i>Escherichia coli</i>	≤1 000 CFU·g ⁻¹
	杂草 Weeds	发芽率 ≥60% Germination index ≥60%
荷兰 Netherlands	蠕虫 Eelworms	不存在 Absent
	铜色浆虫 <i>Plasmodoph</i> Brass	不存在 Absent
英国 United Kingdom	沙门氏菌 <i>Salmonella</i> spp.	25 g 样品中不存在 Absent in 25 g sample
	大肠杆菌 <i>Escherichia coli</i>	≤1 000 CFU·g ⁻¹
	杂草繁殖体 Weeds/propagules	发芽杂草植物: 0·L ⁻¹ Germination weed plant: 0·L ⁻¹

2 有机肥施用风险评价

有机肥商品化是规模养殖场畜禽粪便合理资源化的重要途径,但在有机肥行业快速发展的过程中,一些不安全因素也渐渐显露。高盐、高营养以及重金属、抗生素和病原残留等原料特点^[21],可能导致农田土壤污染物的快速积累,影响农产品质量。因此,明确畜禽粪便的使用风险,对完善行业标准和制定合理科学的施肥措施具有积极意义。

2.1 重金属污染风险

有机肥原辅料来源广泛,主要来自有机废弃物,如畜禽粪便,其中大多含有重金属等有害物质。尤其是规模化、集约化的畜禽养殖企业大量使用 Pb、Cd、As、Cu、Zn、Ni 等微量元素作为饲料添加剂,但由于动物胃肠道不易吸收利用这类微量元素,导致其在畜禽粪便中的蓄积^[22],并直接影响了腐熟的有机肥中重金属含量,使用后重金属会积累于土壤中。在我国,以猪粪、鸡粪等畜禽粪便为原料的有机肥是土壤中 Cu、Zn、Pb、As 的重要来源。土壤中累积的重金属被植物吸收利用后,通过食物链进入人体,危害健康^[23]。虽然短期施用有机肥并未使农作物中重金属含量显著上升,但随有机肥施用次数增加,长此以往, Pb、Cd 等重金属在作物可食部分中含量上升,甚至超过国家标准限值,引起重金属超标,造成食品安全问题^[24]。而很多农产品对重金属有富集特性,如水稻(*Oryza sativa*)对金属 Cd 有很强的富集性,近年来 Cd 大米事件层出不穷,这无疑敲响了食品安全的警钟。明确有机肥中的重金属风险,对防止农田土壤受重金属污染,保障粮食和农产品安全具有重要意义。

2.1.1 国外重金属污染风险

近代以来,很多国家在农业生产中都反映了重金属累积和超标问题。美国 As 超标的食品 60%来自大米,其原因一部分与大米本身有关,还有很大部分来自土壤环境中无机砷的沉积。有些养殖户将砷制剂拌在饲料中饲养畜禽,很大部分有机砷残留在畜禽粪便中,并制成有机肥,施用后在土壤中转化为无机砷,增加了土壤负担。有研究表明,在英格兰与威尔士地区的农田中,约 37%~40%和 8%~17%的农业 Zn 和 Cu 输入来自畜禽粪便^[1]。此外,芬兰的统计数据显示,牛粪中 Zn 的含量高于标准,其他欧洲国家也观察到了相同现象。

目前,很多国家尤其是发达国家意识到重金属污染的严峻形式,都制定和实施了有机肥相关标

准。此外,在农业生产中,美国在有机肥的质量把控及施用上积极开展大量研究。欧盟成员国在已有的欧盟标准基础上,设置了更严格的重金属标准限量。日本也早在 20 世纪 70 年代颁布了《肥力促进法》,提倡依靠有机肥料来耕种土地^[25]。

2.1.2 国内重金属污染风险

近年来,有机肥重金属污染问题在我国引起了广泛关注。据报道,我国每年使用的微量元素添加剂多达 15 万~18 万 t,但其中约 10 万 t 由于不能被吸收而随粪便排放到环境中^[26]。商品有机肥中重金属超标也时有检出,广东省 2013 年春季肥料产品监督抽查结果显示,有机肥料合格率 67%,主要问题为 Cr、As 重金属含量严重超标,有的超出限量值 36 倍多。黄绍文等^[22]收集了 2014 年在全国 18 个省(市)126 个有机肥样品,将样品分为商品鸡粪、商品猪粪和其他商品有机肥分析重金属含量状况。研究发现,有机肥中重金属超标情况与生产所用原料有关,商品鸡粪有机肥中 Cd、Pb 和 Cr 含量超标严重,其中 Cr 超标率高达 23.0%;商品猪粪有机肥 Cd 和 As 的超标率最高,分别为 20.0%和 6.7%;其他商品有机肥中 Cr 的超标率较高。沈月等^[27]调查并检测 2008—2017 年间浙江省主要商品有机肥的重金属含量发现,有机肥产品中虽然仍然有部分超标现象,但总体含量呈现下降趋势,产生这种变化趋势的首要原因是行业标准对主要质量指标限量标准的调整,尤其是对 Hg、Pb 和 Cr 含量限量标准的调整。魏益华等^[28]进行风险评估认为,以农业废弃物为原料制成的有机肥主要风险除重金属 Cd 外,还有 Cu 和 Zn。控制重金属污染风险,应从源头入手,加强饲料原料质量管理,严格按照相关要求依法科学合理使用微量元素添加剂和饲料药物添加剂,严禁超剂量、超范围使用。

我国有机肥中重金属 Cu、Zn 超标越来越引起重视,但目前我国标准中没有对有机肥或化肥中的重金属 Cu、Zn、Ni 设定限值,只有现行的《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[29]对耕地土壤中重金属 Cu、Zn 和 Ni 设定了相应的风险筛选值(表 5)。但风险筛选值不可以代替风险管制值,风险筛选值只是对于农田土壤及农作物质量安全的建议评估,而风险管制值则更为严格。茹淑华等^[6]采用田间小区试验,连续 7 年施用猪粪和鸡粪有机肥,发现连续 7 年施用后,0~15 cm 土壤中重金属含量显著增加,施用高量鸡粪后 Zn 含量超过土壤污染风险筛选值。小麦籽粒中 Cu、

Zn 含量也显著增加, 连续 7 年施用猪粪和高量鸡粪, 小麦籽粒 Zn 含量甚至超过相关的食品安全标准(NY 861—2004)。因此, 有机肥标准中应对重金属 Cu、Zn、Ni 设定限量值, 并制定更为严格的土壤风险管

制值。在制定这 3 种重金属在土壤中的风险管制值或在有机肥中限量值和施用标准时, 除了以此风险筛选值作为参考外, 还需要根据我国不同地区的土壤特征进行更严谨的评估试验和风险分析。

表 5 我国 Cu、Zn、Ni 的农用地土壤风险筛选值

Table 5 Domestic soil risk screening values of Cu, Zn, and Ni for agricultural soil in China

重金属 Heavy metal	分类 Category	风险筛选值 Risk screening value (mg·kg ⁻¹)			
		pH≤5.5	5.5<pH≤6.5	6.5<pH≤7.5	pH>7.5
Cu	果园土壤 Orchard soil	150	150	200	200
	其他农用地土壤 Other agricultural soil	50	50	100	100
Ni		60	70	100	100
Zn		200	200	250	300

农用地土壤污染风险筛选值: 农用地土壤中污染物含量等于或者低于该值, 对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境的风险低, 一般情况下可以忽略; 超过该值, 对农产品质量安全、农作物生长或土壤生态环境可能存在风险, 应当加强土壤环境监测和农产品协同监测, 原则上应当采取安全利用措施^[30]。The conception of Risk Screening Values for Soil Contamination of Agricultural Land is that if the pollutant content in farmland soil is equal to or lower than the value, the quality of agricultural products and the safety of crop growth or soil ecological environment is low, and can be ignored in general; but if the content exceeds the value, the quality and safety of crop is at risk, certain monitor of soil together with agricultural product is needed and measures should be taken to guarantee the safety as well^[30]。

目前, 我国绝大部分畜禽粪便有机肥中重金属含量在国家标准限量值内, 但由于部分重金属限量标准不够严格, 长期大量施用仍然会导致土壤中重金属积累, 对土壤环境造成不利影响, 甚至对人类健康造成威胁。董同喜等^[7]在华北农田小麦-玉米轮作体系下, 设定秸秆全部还田, 用土壤重金属的累积量=输入总量-输出总量的方法, 计算土壤中重金属的积累速率, 研究发现, 畜禽粪便有机肥的施用是华北农田土壤中重金属的主要输入源, 其中 Cd 最易超标, 若按 0.002 38 mg·kg⁻¹·a⁻¹ 的累积速率预估, 42 年后就会超过土壤环境质量 级标准(pH 6.5~7.5)的限值。我国有机堆肥产品中对重金属 Cd 的限量为 150 mg·kg⁻¹, 是欧盟的两倍以上。Cd 是国际癌症研究署(IARC)认定的 类致癌物, 其在人体内潜伏时间可长达 10~30 a, 会引起高血压、心脑血管疾病、肾萎缩、肾炎等, 尤以对肾脏损害最为明显, 婴幼儿如果长期食用会影响神经系统及骨骼的发育。2018 年 6 月 21 日起, 国家卫生健康委员会为保障婴幼儿健康, 制定婴幼儿谷类辅助食品中 Cd 的临时限量值为 0.06 mg·kg⁻¹, 有机肥是食品中重金属的重要来源, 因此要对有机肥制定更严格的限量标准, 以降低食品中重金属超标的安全隐患。此外, 由于我国不同区域土壤的重金属背景值有显著差异, 西南地区土壤中的重金属背景值远高于全国平均值, 不能等量齐观。若按现行的行业标准生产有机肥和风险管控标准施用有机肥, 将对土壤环境和作物生长造成极其严重的负面影响, 威胁人体健康。因此, 在严格控制所施用的有机肥中重金属含量的基础上, 要结合

实地情况, 合理施用, 才能降低农田土壤的重金属污染风险。

2.2 抗生素污染风险

在规模化生产中, 抗生素常被用于防控畜禽疾病, 由于用量不加限制, 导致其大量残留在畜禽粪便中。研究表明, 60%以上的抗生素都以原药和代谢物的形式随粪便排出^[3], 虽然在堆肥和干燥等处理过程中可以得到一定程度的降解, 但有机肥样品中仍然普遍检出^[21]。虽然多数抗生素残留浓度相对较低, 但有机肥产品施入土壤后, 残留的抗生素会影响土壤微生物生长和土壤中酶活性, 间接影响土壤肥力; 通过食物链积累也容易影响人的健康, 土壤中的抗生素极易向植物体内富集, 富集率可高达万倍以上^[30]。不仅如此, 残留的抗生素还会导致细菌产生耐药性, 成为抗性细菌传播的重要库和源^[31]。

据估计, 全世界每年使用的抗生素数量巨大, 约为 10 万~20 万 t, 其中约 70%用于畜牧业治疗和促进作物生长, 而 40%~90%的药物又通过粪便排出, 且在未来几十年中, 抗生素的使用量将以 67%的速度继续增长^[32-33]。国外各类抗生素中, 四环素类使用量最大。德国使用的抗生素 30%为四环素类, 在欧洲国家也高达 66%。在美国, 抗生素也仍在使用, 用以增加产量。但人们越来越意识到抗生素污染的风险, 在丹麦, 抗生素首次在猪饲料中被批量禁用, 并在 2000 年被完全禁用; 2006 年 4 月 1 日, 欧盟也开始禁止在饲料中添加抗生素^[32]。

我国每年有 5 万多吨抗生素通过畜禽粪便进入

水流和土壤,对土壤和水环境造成严重污染^[1]。研究发现,大环内酯类和磺胺类化合物在畜禽养殖中的检出率较高,其中泰洛菌素和磺胺噻唑的检出率分别高达 100%和 96.1%^[23]。进入土壤的抗生素难以降解,且过程漫长而复杂,在施用前应进行无害化综合处理。而据统计,80%以上的畜禽粪便没有经过综合无害化处理而仅通过堆肥简单处理就施于农田中,带来了较高的土壤污染风险。我国抗生素污染风险不断增加,凸显出一系列值得关注的问题。首先,有机肥生产标准中缺少对抗生素指标的限量要求,需积累资料和结合实际情况,对有机污染物的种类和限量设定统一标准;虽然已制定了有机肥料中土霉素、四环素、金霉素和强力霉素含量检测的国家标准(GB/T 32951—2016)^[34],但尚无其他种类抗生素的标准检测方法。其次,规模化养殖场对兽药使用的监管不严,存在滥用现象,需加强监管力度,从源头上减少畜禽粪便中残留的抗生素。此外,有机肥加工过程中缺乏配套的抗生素去除技术工艺,需开展有效工艺的研究,降低抗生素污染风险。2016 年,国家肥料分级标准就已完成编制工作,拟通过限制原料的准入和控制成品中有害物质的指标,将肥料分为园林级、农田级、生态级 3 个层级,对肥料中重金属、抗生素总量提出更为细化的要求,比如生态级肥料中抗生素总量限制为 $\leq 1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。但直到如今也未见标准出台。欧盟也没有类似标准,但欧盟对终端农产品中抗生素含量有严格规定,因此国内一些出口企业不得不对投入品抗生素做出限制,部分地区已经行动起来,比如浙江丽水制订了《丽水山耕:肥料安全使用规范》,新增了“典型兽用抗生素总量、铜、锌”3 项指标。

2.3 病原体污染风险

病原体主要来源于畜禽粪便等农业废弃物,也有部分工业废弃物、城市生活垃圾等原料物质。农场中常用的堆肥方式可以灭活部分病原体,但在适宜的条件下,少量的病原体仍可以在堆肥成品中长期存活,甚至再生到较高水平^[35]。含病原体的有机肥施用到土壤后,细菌病原体如沙门氏菌和李斯特菌能够生存 120 d,有些细菌形成孢子在土壤中存在 10 a 之久;肠毒素在土壤中也生存约 100 d^[32,36]。虽然在农作物成熟时未检测到病原体,但病原体可能随水流进入露天水系,仍有通过其他途径感染人体的风险。

施用畜禽粪便生产的有机肥,需重视病原体污染。2000 年,加拿大瓦尔克顿爆发了一场由食用菌

污染引起的大肠杆菌疫情,导致 7 人死亡,2 300 多人患病;欧洲食品安全机构的数据显示^[37],欧盟 1/3 的种猪场发现有沙门氏菌,2018 年欧盟几乎 1/3 的食源性疾病爆发是由沙门氏菌引起的。日本在防止病原体污染方面,对原料无害化处理的要求较为严格,以鸡粪为原料的有机肥为例,在日本有机肥制作过程要经过多次发酵,才能进行下一步工序。在我国规模养殖过程中,病菌污染时有发生。在加工原料前,应先综合考虑杀菌效果和系统性能等因素进行热处理,可选择巴氏灭菌杀灭原料中的病原体^[32,38]。此外,在生产生物有机肥产品过程中,也可能引入病原菌。近年来很多研究发现,常作为生产菌种的芽孢杆菌属和类芽孢杆菌属中的个别菌株能检测到溶血素基因,存在产生毒素的隐患^[39]。除生产菌种可能产毒素外,生产过程中产品也可能受到杂菌污染。因此在生产过程中需进一步完善生产菌种的生物安全评价体系,建立生产菌种溯源机制,加强风险管控。

2.4 营养富集及盐渍化风险

2.4.1 营养富集风险

农田过量施用有机肥会导致养分流失,引起地表水和地下水污染,可能增加水体富营养化的风险^[40]。大量研究表明,过量施用有机肥会直接导致硝态氮和 P 在土壤剖面不断积累,当土壤对 N 和 P 吸附能力达到一定程度后,会增大淋溶风险,易发生径流流失^[41]。

研究表明,农田 N、P 流失与有机肥施用量呈显著正相关,避免有机肥过量施用可有效减少水体营养富集的风险^[42]。在大多数欧洲国家,有机肥的施用量是基于 N 含量计算,往往会导致 P 含量富裕;而在瑞典,则主要根据 P 含量计算,并规定磷肥的年度最大施用量。美国的农场主为确定单位土地施用量,在施用猪粪前,会先将样品送到检验基地,测出粪便中 N 含量后再施用到土壤中,避免施肥过度或不足。在我国,由于缺少科学专业的指导,农户不能合理地施用有机肥,存在滥用现象。

而研究表明,不同畜禽粪便来源的有机肥 N/P 比不同,不能一概而论,如猪粪和鸡粪来源的有机肥 P 含量更高^[22]。政府相关部门也应根据当地实际情况,开展关于有机肥科学使用的技术培训,确保农户做到正确施用;同时对土壤进行检测,对症下药;并根据作物种类、施肥地点和施肥时间,对 N、P 和 K 的最佳使用量提出建议,实现有机肥的精准投放。

2.4.2 盐渍化风险

盐渍化是有机肥施用过程中存在的重要风险之一。在规模化养殖中, 为提高畜禽食欲, 帮助消化, 普遍向饲料中添加食盐; 大量使用的添加剂中也常含有较高的盐分。这些因素使畜禽粪便中盐分含量高, 高盐的畜禽粪便又直接导致相应的有机肥产品盐分偏高^[21]。高盐的有机肥施用后, 较高浓度的钠离子、钾离子作为分散剂导致土壤团聚能力降低, 团粒减少, 通气透水性降低, 还有可能造成局部农田土壤次生盐渍化^[40,43]。因此, 在施用有机肥时, 要结合土壤特性, 合理选用, 防止盐分过高对土壤带来不利影响。此外, 可在畜禽粪便中添加其他植物辅料, 研究表明, 在畜禽粪便中加入秸秆有利于提高土壤通气性, 并增强土壤的持水性^[3,44]。

2.5 其他风险

现有标准中有机质、N、P、K 含量的测定方法, 都分不清有机和无机来源, 存在非法添加化肥冒充有机来源的造假现象。另外, 有机肥的生产和施用还会导致其他环境问题, 例如堆肥过程中会产生二氧化碳、甲烷等温室气体, 加剧温室效应; N 以氨气的形式挥发, 产生臭味, 影响堆肥厂附近居民的生活^[45]。这些环境污染风险仍需引起重视, 需开展相关研究, 减少对环境的损害, 以环境友好型为目标并向其发展。

3 结论与展望

从国内外有机肥标准对比和文献研究来看, 我国现有的有机肥质量标准, 无论是在具体项目还是在指标要求方面, 大都优于国外。在有机质和养分、重金属、病原体等相关指标上, 我国都有严格的质量管控标准。但由于畜禽养殖企业不合理使用添加剂和抗生素, 有机肥生产企业的相关技术有所欠缺, 农户施用缺乏科学专业的指导, 相关部门和机构执法力度不严格等多方面因素, 我国在有机肥施用过程中存在较大风险隐患。下一步, 应对我国有机肥质量做大量的实际调查, 分析有机肥资源状况, 找到生产施用中存在的实际问题, 对风险进行合理评估, 从而明确改进方向, 更好地服务于有机肥生产与安全使用。针对目前存在的风险, 也急需采取一系列相关举措, 从源头入手, 完善有机肥标准体系, 加大监控管理力度, 让改善农田污染成为可能。

3.1 完善标准体系

有机肥的准入门槛低, 是现在国内有机肥市场良莠不齐的原因之一, 与欧美日等发达国家相比,

目前我国的有机肥质量及施用等标准仍需完善。商品有机肥生产标准中尚无对抗生素、杂菌种类数量以及 Cu、Zn、Ni 等重金属指标的限制; 对于 Hg、Cd 的限量标准不尽合理; 并且由于对堆肥及有机肥尚未进行严格划分, 导致了标准参照不一的问题。对此, 可以参照其他国家的相关标准, 根据堆肥原料、方法、用途的不同对堆肥产品进行分类并完善肥料的质量标准, 建立适合中国国情的标准体系从而更好地推动有机肥行业的发展。

此外, 由于畜禽粪便是商品有机肥重要的原料来源, 而在集约化养殖过程中, 饲料添加剂、抗生素等的使用是造成有机肥产品高重金属含量、高盐分、抗生素残留的重要原因。因此, 完善养殖相关标准、加强饲料原料质量管理、做好畜禽排泄物与农田土壤环境的衔接等工作对于有机肥产品的安全也十分重要。

3.2 成立专门机构

欧美各国建立了专门的协会来制定废物的处理标准, 如英国的有机废物堆肥协会、意大利的堆肥协会等。目前我国还缺乏这样的组织, 因此有必要推进组建有机肥专业协会以便进一步完善堆肥及有机肥质量标准以及生产加工技术标准, 并且可以由协会牵头推动成品质量检测体系建立, 包括建立成品质量追溯制度、不定期抽查等, 做好生产监管, 保障商品有机肥的质量, 给消费者提供更优质的产品。此外, 协会还可以通过对不同地区农田土壤质量的检测评估, 结合不同有机肥在不同类型土壤中的使用效果, 做好有机肥科学施用的方案处理, 并在肥料的用量、时间、方式等方面给农民提供一定的指导, 减少因有机肥的不恰当施用而给农田环境造成的污染危害。

3.3 其他

国家可以在资金、政策和人才上对于有机肥的生产提供支持。比如鼓励企业研发和生产优质有机肥; 提倡垃圾分类, 以便于生活废弃物的高效利用; 按照一定的标准, 对施用有机肥的农户进行经济补助, 以鼓励农民正确认识和使用有机肥。

在“两山理论”指导下, 当前我国生态农业发展进入新常态, 最近发布的《2020 年种植业工作要点》指出今年重点工作是继续推动有机肥替代化肥^[46], 也体现了我国对于农业可持续发展的重视。肥料是食物的“食物”, 是食物链安全的起始点, 相信在国家政策的正确引导和社会公民的支持下, 在不远的将来, 有机肥产业将会在土壤问题、资源利用上发

挥积极作用, 迎接中国的必定是可持续发展的健康土壤。

参考文献 References

- [1] 武升, 邢素林, 马凡凡, 等. 有机肥施用对土壤环境潜在风险研究进展[J]. 生态科学, 2019, 38(2): 219–224
WU S, XING S L, MA F F, et al. Review on potential risk of soil environment from organic fertilizer application[J]. Ecological Science, 2019, 38(2): 219–224
- [2] 王紫艳, 杨桂玲, 虞轶俊, 等. 有机肥施用对农产品质量安全及土壤环境的影响研究[J]. 农产品质量与安全, 2020, (4): 67–73
WANG Z Y, YANG G L, YU Y J, et al. Study on the effects of organic fertilizer application on the quality and safety of agricultural products and soil environment[J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2020, (4): 67–73
- [3] 魏树和, 徐雷, 韩冉, 等. 重金属污染土壤的电动-植物联合修复技术研究进展[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2019, 43(1): 154–160
WEI S H, XU L, HAN R, et al. Review on combined electrokinetic and phytoremediation technology for soil contaminated by heavy metal[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2019, 43(1): 154–160
- [4] 尹荣秀, 王文华, 郭灿, 等. 有机肥对茶园土壤及茶叶产量与品质的影响研究进展[J]. 茶叶通讯, 2020, 47(1): 6–12
YIN R X, WANG W H, GUO C, et al. Research progress on the effects of organic fertilizer on tea garden soil, tea yield and quality[J]. Journal of Tea Communication, 2020, 47(1): 6–12
- [5] SHARMA B, VAISH B, MONIKA, et al. Recycling of organic wastes in agriculture: An environmental perspective[J]. International Journal of Environmental Research, 2019, 13(2): 409–429
- [6] 茹淑华, 徐万强, 侯利敏, 等. 连续施用有机肥后重金属在土壤-作物系统中的积累与迁移特征[J]. 生态环境学报, 2019, 28(10): 2070–2078
RU S H, XU W Q, HOU L M, et al. Effects of continuous application of organic fertilizer on the accumulation and migration of heavy metals in soil-crop systems[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(10): 2070–2078
- [7] 董同喜, 杨海雪, 李花粉, 等. 华北农田小麦-玉米轮作体系下土壤重金属积累特征研究[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(4): 355–365
DONG T X, YANG H X, LI H F, et al. Accumulation characteristics of heavy metals in the soil with wheat-corn rotation system in North China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, 31(4): 355–365
- [8] 中华人民共和国农业部. NY 525—2012 有机肥料[S]. 北京: 中国农业出版社, 2012
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY 525—2012 Organic Fertilizer[S]. Beijing: China Agricultural Press, 2012
- [9] 中华人民共和国农业农村部. NY/T 3442—2019 畜禽粪便堆肥技术规范[S]. 北京: 中国农业出版社, 2019
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. NY/T 3442—2019 Technical Specification for Livestock and Poultry Manure Composting[S]. Beijing: China Agricultural Press, 2019
- [10] 中华人民共和国农业农村部. GB/T 36195—2018 畜禽粪便无害化处理技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. GB/T 36195—2018 Technical Specification for Sanitation Treatment of Livestock and Poultry Manure[S]. Beijing: China Standards Press, 2018
- [11] 中华人民共和国农业部. NY 884—2012 生物有机肥[S]. 北京: 中国农业出版社, 2012
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. NY 884—2012 Microbial Organic Fertilizers[S]. Beijing: China Agricultural Press, 2012
- [12] 中国石油和化学工业联合会. GB/T 18877—2009 有机-无机复混肥料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009
China Petroleum and Chemical Industry Association. GB/T 18877—2009 Organic-inorganic Compound Fertilizers[S]. Beijing: China Standards Press, 2009
- [13] 中国石油和化学工业联合会. GB/T 23349—2009 肥料中砷、镉、铅、铬、汞生态指标[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009
China Petroleum and Chemical Industry Association. GB/T 23349—2009 Ecological Index of Arsenic, Cadmium, Lead, Chromium, and Mercury for Fertilizers[S]. Beijing: China Standards Press, 2009
- [14] 中华人民共和国农业部种植业管理司. GB/T 19524.1—2004 肥料中粪大肠菌群的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004
Department of Crop Management, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. GB/T 19524.1—2004 Determination of Fecal Coliforms in Fertilizers[S]. Beijing: China Standards Press, 2004
- [15] 中华人民共和国农业部种植业管理司. GB/T 19524.2—2004 肥料中蛔虫卵死亡率的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004
Department of Crop Management, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. GB/T 19524.2—2004 Determination of Mortality of Ascarid Egg in Fertilizers[S]. Beijing: China Standards Press, 2004
- [16] 沈玉君, 李冉, 孟海波, 等. 国内外堆肥标准分析及其对中国的借鉴启示[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 265–271
SHEN Y J, LI R, MENG H B, et al. Analysis of composting standards at home and abroad and its enlightenment to China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(12): 265–271
- [17] 鲁洪娟, 马友华, 樊霆, 等. 有机肥中重金属特征及其控制技术进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(12): 2022–2030
LU H J, MA Y H, FAN T, et al. Research progress on characteristics of heavy metals in organic manure and control technology[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(12): 2022–2030
- [18] 杨帆. 美国肥料管理模式与启示[J]. 中国土壤与肥料, 2007, (3): 1–3

- YANG F. Mode of fertilizer management in United State and elicitation for us[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2007, (3): 1–3
- [19] 杨旭, 余垚, 李花粉, 等. 我国与欧美化肥重金属限量标准的比较和启示[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(1): 149–156
- YANG X, YU Y, LI H F, et al. Comparison of heavy metal limits for chemical fertilizers in China, EU and US and enlightenments[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(1): 149–156
- [20] CESARO A, BELGIORNO V, GUIDA M. Compost from organic solid waste: Quality assessment and European regulations for its sustainable use[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2015, 94: 72–79
- [21] 倪治华, 孙万春, 林辉, 等. 浙江省畜禽粪源有机肥质量安全风险与控制对策[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(2): 299–307
- NI Z H, SUN W C, LIN H, et al. Quality risk assessment and management of manure based organic fertilizers in Zhejiang[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2020, 32(2): 299–307
- [22] 黄绍文, 唐继伟, 李春花. 我国商品有机肥和有机废弃物中重金属、养分和盐分状况[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 162–173
- HUANG S W, TANG J W, LI C H. Status of heavy metals, nutrients, and total salts in commercial organic fertilizers and organic wastes in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(1): 162–173
- [23] 马鸣超, 姜昕, 曹凤明, 等. 我国生物有机肥质量安全风险分析及其对策建议[J]. 农产品质量与安全, 2017, (5): 44–48
- MA M C, JIANG X, CAO F M, et al. Risk analysis of quality safety of bio-organic fertilizer in China and its countermeasures and suggestions[J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2017, (5): 44–48
- [24] 李志洋. 有机肥部分替代化学氮肥安全施用及土壤环境容量研究——以生菜和水稻为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2019
- LI Z Y. Safety application of organic manure partial substitution chemical nitrogen fertilizer and soil environmental capacity — Taking lettuce and rice as example[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019
- [25] 肖莹, 张来峰, 王宁. 国内外有机肥产业现状浅析与发展[J]. 农业工程技术, 2017, 37(26): 78–79
- XIAO Y, ZHANG L F, WANG N. Analysis and development of organic fertilizer industry at home and abroad[J]. Agricultural Engineering Technology, 2017, 37(26): 78–79
- [26] 邢廷铄. 研究和应用环保型饲料是未来饲料工业发展的必然趋势[J]. 饲料工业, 2005, 26(11): 1–5
- XING T X. Study and application of environmental protection feed to be trend in future[J]. Feed Industry, 2005, 26(11): 1–5
- [27] 沈月, 麻万诸, 邓勋飞, 等. 浙江省商品有机肥中主要质量指标含量的时空变异[J]. 浙江农业学报, 2019, 31(12): 2073–2083
- SHEN Y, MA W Z, DENG X F, et al. Spatio-temporal characteristics of ingredients contents of organic fertilizers in Zhejiang[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2019, 31(12): 2073–2083
- [28] 魏益华, 邱素艳, 张金艳, 等. 农业废弃物中重金属含量特征及农用风险评估[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 212–220
- WEI Y H, QIU S Y, ZHANG J Y, et al. Characteristic of heavy metal contents in agricultural wastes and agricultural risk assessment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(14): 212–220
- [29] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB 15618—2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018
- Ministry of Ecology and Environment of People's Republic of China, State Administration for Market Regulation of People's Republic of China. GB 15618—2018 Soil Environmental Quality Risk Control Standard for Soil Contamination of Agricultural Land[S]. Beijing: China Standard Press, 2018
- [30] 李洁, 刘善江. 抗生素在有机肥料-土壤-农作物系统中的转化及影响的研究进展[J]. 上海农业学报, 2013, 29(4): 128–131
- LI J, LIU S J. Advance in researching into the transformation and effects of antibiotics in an organic fertilizer-soil-crop system[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2013, 29(4): 128–131
- [31] AWASTHI M K, SARSAIYA S, WAINAINA S, et al. A critical review of organic manure biorefinery models toward sustainable circular bioeconomy: Technological challenges, advancements, innovations, and future perspectives[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 111: 115–131
- [32] BLOEM E, ALBIHN A, ELVING J, et al. Contamination of organic nutrient sources with potentially toxic elements, antibiotics and pathogen microorganisms in relation to P fertilizer potential and treatment options for the production of sustainable fertilizers: A review[J]. Science of the Total Environment, 2017, 607/608: 225–242
- [33] KÜMMERER K. Antibiotics in the aquatic environment: A review-Part I[J]. Chemosphere, 2009, 75(4): 417–434
- [34] 中国石油和化学工业联合会. GB/T 32951—2016 有机肥料中土霉素、四环素、金霉素与强力霉素的含量测定 高效液相色谱法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016
- China Petroleum and Chemical Industry Association. GB/T 32951—2016 Determination of Oxytetracycline, Tetracycline, Chlortetracycline and Doxycycline Content for Organic Fertilizers — HPLC Method[S]. Beijing: China Standards Press, 2016
- [35] KUMAR R R, PARK B J, CHO J Y. Application and environmental risks of livestock manure[J]. Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry, 2013, 56(5): 497–503
- [36] NYBERG K A, VINNERSÅS B, OTTOSON J R, et al. Inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 and *Salmonella* Typhimurium in manure-amended soils studied in outdoor lysimeters[J]. Applied Soil Ecology, 2010, 46(3): 398–404
- [37] MANN R. 猪场沙门氏菌控制新标准[J]. 王治仓, 译. 国外畜牧学: 猪与禽, 2009, 29(2): 47–48
- MANN R. New standards for salmonella[J]. WANG Z C, trans. Animal Science Abroad: Pigs and Poultry, 2009, 29(2):

- 47–48
- [38] 管燕燕. 畜禽粪便有机肥加工技术及设备的研究[J]. 农业技术与装备, 2019, (12): 114–115
GUAN Y Y. Study on processing technology and equipment of manure organic fertilizer[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2019, (12): 114–115
- [39] 马鸣超, 姜昕, 曹凤明, 等. 生物有机肥生产菌种安全分析及管控对策研究[J]. 农产品质量与安全, 2019, (6): 57–61
MA M C, JIANG X, CAO F M, et al. Study on the security analysis and control measures of strains produced by bio-organic fertilizer[J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2019, (6): 57–61
- [40] CHEW K W, CHIA S R, YEN H W, et al. Transformation of biomass waste into sustainable organic fertilizers[J]. Sustainability, 2019, 11(8): 2266
- [41] DARCH T, BLACKWELL M S A, HAWKINS J M B, et al. A meta-analysis of organic and inorganic phosphorus in organic fertilizers, soils, and water: Implications for water quality[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2014, 44(19): 2172–2202
- [42] 徐云连, 马友华, 吴蔚君, 等. 农田中有机肥氮磷流失的研究[J]. 中国农学通报, 2017, 33(14): 75–80
XU Y L, MA Y H, WU W J, et al. Nitrogen and phosphorus loss under organic fertilizer application in farmland[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(14): 75–80
- [43] YAO L X, LI G L, TU S H, et al. Salinity of animal manure and potential risk of secondary soil salinization through successive manure application[J]. Science of the Total Environment, 2007, 383(1/3): 106–114
- [44] 王元元, 李超, 刘思超, 等. 有机肥对水稻产量、品质及土壤特性的影响研究进展[J]. 中国稻米, 2019, 25(1): 15–20
WANG Y Y, LI C, LIU S C, et al. Research advances on effects of organic fertilizer on yield, quality of rice and soil characteristics[J]. China Rice, 2019, 25(1): 15–20
- [45] GUO Z C, ZHANG Z B, ZHOU H, et al. Long-term animal manure application promoted biological binding agents but not soil aggregation in a Vertisol[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 180: 232–237
- [46] ZUBAIR M, WANG S Q, ZHANG P Y, et al. Biological nutrient removal and recovery from solid and liquid livestock manure: Recent advance and perspective[J]. Bioresource Technology, 2020, 301: 122823