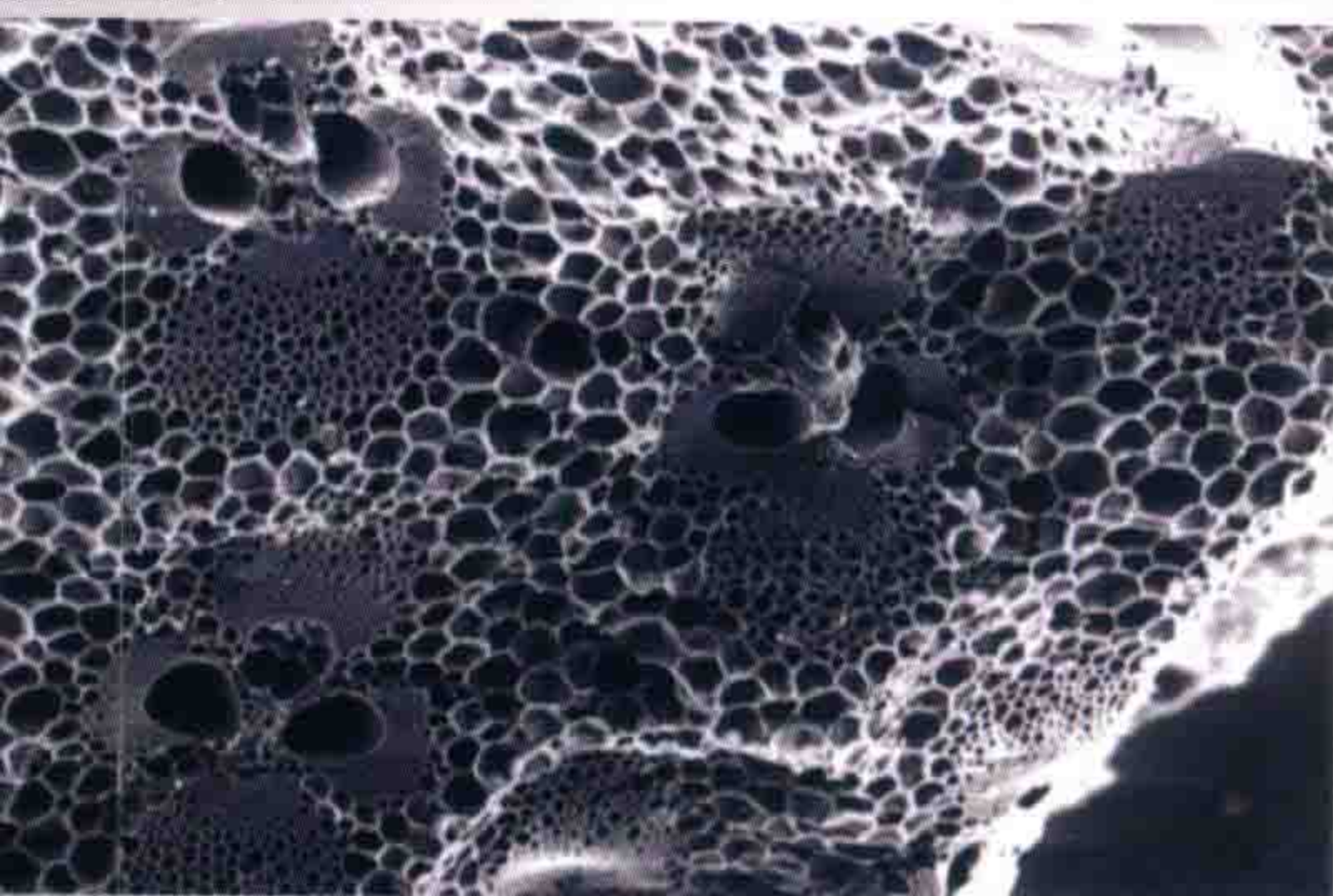




湖北省学术著作出版专项资金资助项目
新材料科学与技术丛书

竹炭及竹醋液用作猪粪堆 肥化添加材料研究

ZHUTAN JI ZHUCUYE YONGZUO
ZHUFEN DUI **F** EIHUA
TIANJIA CAILIAO YANJIU



黄向东◎著



武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

新材料科学与技术丛书

竹炭及竹醋液用作猪粪 堆肥化添加材料研究

黄向东 著

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

内 容 简 介

本书基于对新型环保机能材料竹炭、竹醋液特性及其在环境领域应用现状的分析总结,结合目前畜禽养殖业日益严重的环境污染问题,针对畜禽粪便堆肥化过程所存在的问题,通过猪粪堆肥化过程的研究,着重介绍了竹炭和竹醋液的合理添加对堆肥化过程的污染物控制效果,以及对堆肥产品品质的影响。

本书主要内容包括:在综述我国规模化生猪养殖业污染现状及治理技术的基础上,针对传统猪粪堆肥过程存在的升温启动慢、脱水效率低、氮素损失严重、重金属钝化效果差等问题,以规模化养猪场猪粪为堆肥原料,系统研究了竹炭和竹醋液添加对猪粪堆肥化过程快速升温、脱水、氮素损失控制、磷素活性调节和重金属钝化效果的影响,并通过温室盆栽试验研究了添加竹炭及竹醋液对堆肥产品品质的影响。

本书所探讨的新型环境机能材料竹炭、竹醋液对堆肥化过程污染物控制效果,以及对堆肥产品品质影响的相关研究成果可供从事堆肥过程升温、脱水、氮素损失控制、磷素活化、重金属钝化,以及堆肥产品资源化利用等内容和竹炭、竹醋液材料性能开发相关研究科研人员、生产企业提供新的技术途径参考。

图书在版编目(CIP)数据

竹炭及竹醋液用作猪粪堆肥化添加材料研究/黄向东著. —武汉:武汉理工大学出版社,2017.9

(新材料科学与技术丛书)

ISBN 978-7-5629-5528-3

I. ① 竹… II. ① 黄… III. ① 畜粪-堆肥-研究 IV. ① S141.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 211143 号

项目负责人:李兰英

责任编辑:徐 环

责任校对:刘 凯

封面设计:匠心文化

出版发行:武汉理工大学出版社

邮 编:430070

网 址:<http://www.wutp.com.cn>

经 销:各地新华书店

印 刷:荆州市鸿盛印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:9

字 数:125 千字

版 次:2017 年 9 月第 1 版

印 次:2017 年 9 月第 1 次印刷

定 价:50.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

• 版权所有,盗版必究 •

前 言

堆肥化处理是实现畜禽粪便无害化处理与农业资源化利用的一项有效措施,但传统堆肥过程中往往存在升温启动慢、脱水效果差、氮素损失严重、重金属钝化效果差等问题,从而影响了畜禽粪便处理效果并限制了后续堆肥产品的农业资源化利用。堆肥化添加材料的合理使用是解决以上问题的有效措施,但常见的添加材料因为具有一定环境风险,或成本较高,或实际应用操作难度大而受到一定限制。竹炭是竹材热解的主要产品,具有丰富的孔隙分布特征和高比表面积,是一种新型机能材料和环境保护材料,具有极佳的吸水、保温性能,且能够持留养分。竹醋液是竹材热解的副产品,低浓度时具有促进微生物增殖的效果。

因此,以竹炭及竹醋液为堆肥化添加材料能有效解决以上问题,将有利于减少堆肥过程中的二次污染、提高堆肥品质,以及降低堆肥资源化利用过程的污染风险,最终促进规模化生猪养殖业的健康可持续发展。

本书的研究内容是作者近年来从事畜禽粪便堆肥化处理与资源化利用的研究及体会,并汲取了同行的最新研究成果。本书可供从事固体废物堆肥化处理及资源化利用的技术、科研人员及高校学生参考。因个人水平及能力所限,不足之处望读者不吝赐教。在该书的研究、成稿期间,得到了浙江大学陈英旭和吴伟祥教授的悉心指导,以及黄昌勇、姚槐应和张炳欣教授的大力支持,作者在此表示深深的谢意。

洛阳理工学院 黄向东

2017年4月

目 录

1 畜禽养殖污染及竹炭、竹醋液在环境领域的应用研究进展	(1)
1.1 我国生猪养殖业猪粪产生量及污染现状	(2)
1.2 猪粪的主要污染物成分及其污染	(2)
1.2.1 氮磷污染	(3)
1.2.2 盐分污染	(4)
1.2.3 重金属污染	(4)
1.2.4 生物病原污染	(5)
1.2.5 抗生素污染	(5)
1.2.6 恶臭污染	(6)
1.3 猪粪处理技术	(7)
1.3.1 好氧堆肥	(7)
1.3.2 厌氧发酵	(9)
1.3.3 蚯蚓堆肥	(10)
1.3.4 饲料化处理	(11)
1.4 畜禽粪便堆肥存在的问题及其研究进展	(11)
1.4.1 畜禽粪便堆肥脱水	(11)
1.4.2 畜禽粪便堆肥氮素损失	(17)
1.4.3 畜禽粪便中重金属及其钝化措施研究	(26)
1.5 畜禽粪便堆肥土地资源化利用的肥力效应、生物效应和 环境效应	(29)
1.5.1 畜禽粪便堆肥的肥力效应	(29)
1.5.2 畜禽粪便堆肥的生物效应	(31)
1.5.3 畜禽粪便堆肥的环境效应	(32)
1.6 竹炭与竹醋液在环境领域的应用	(34)

1.6.1	竹炭在环境领域的应用	(34)
1.6.2	竹醋液在环境领域的应用	(36)
2	竹炭及竹醋液对猪粪堆肥化过程理化参数及微生物群落多样性的影响	(39)
2.1	研究材料与方法	(40)
2.1.1	研究材料	(40)
2.1.2	堆肥工艺条件	(41)
2.1.3	研究设计及采样方法	(42)
2.1.4	堆肥样品指标分析方法	(43)
2.1.5	堆肥样品总 DNA 提取	(43)
2.1.6	堆肥样品 DNA 的 PCR 扩增	(44)
2.1.7	变性梯度凝胶电泳(DGGE)	(46)
2.1.8	DGGE 图谱分析	(47)
2.2	结果与讨论	(47)
2.2.1	竹炭及竹醋液对猪粪堆肥过程温度变化及升温效果的影响	(47)
2.2.2	竹炭及竹醋液对猪粪堆肥过程物料含水率的影响	(50)
2.2.3	竹炭及竹醋液对猪粪堆肥过程 pH 值的影响	(52)
2.2.4	竹炭及竹醋液对猪粪堆肥过程电导率的影响	(54)
2.2.5	竹炭及竹醋液对猪粪堆肥过程 GI 的影响	(55)
2.2.6	竹炭及竹醋液对猪粪堆肥过程微生物多样性的影响	(57)
2.3	本章小结	(64)
3	竹炭及竹醋液对猪粪堆肥过程氮素损失控制及磷素活化的影响	(65)
3.1	研究材料与方法	(66)
3.1.1	研究材料	(66)
3.1.2	研究设计及采样方法	(67)
3.1.3	样品指标分析方法	(67)
3.2	结果与讨论	(68)
3.2.1	猪粪堆肥过程铵态氮含量变化	(68)
3.2.2	猪粪堆肥过程硝态氮含量变化	(69)

3.2.3	猪粪堆肥过程有机氮含量变化	(70)
3.2.4	猪粪堆肥过程总氮含量变化	(72)
3.2.5	猪粪堆肥过程氮素损失率变化	(73)
3.2.6	猪粪堆肥过程总磷含量变化	(74)
3.2.7	猪粪堆肥过程有机磷含量变化	(76)
3.2.8	猪粪堆肥过程有效磷含量变化	(77)
3.3	本章小结	(79)
4	竹炭及竹醋液对猪粪堆肥过程重金属钝化的影响	(80)
4.1	研究材料与方法	(81)
4.1.1	研究材料	(81)
4.1.2	研究设计及采样方法	(81)
4.1.3	样品指标分析方法	(82)
4.2	结果与讨论	(83)
4.2.1	猪粪堆肥过程全 Cu 含量变化	(83)
4.2.2	猪粪堆肥过程全 Zn 含量变化	(85)
4.2.3	猪粪堆肥过程 DTPA 提取态 Cu 含量变化	(86)
4.2.4	猪粪堆肥过程 DTPA 提取态 Zn 含量变化	(87)
4.2.5	猪粪堆肥过程 DTPA 提取态 Cu、Zn 分配系数变化	(88)
4.2.6	猪粪堆肥对蚯蚓的急性毒性研究	(90)
4.3	本章小结	(92)
5	添加竹炭及竹醋液猪粪堆肥对黑麦草和黄瓜生长的影响	(94)
5.1	研究材料与方法	(95)
5.1.1	研究材料	(95)
5.1.2	研究设计	(96)
5.1.3	指标分析及植物管理方法	(98)
5.2	结果与讨论	(99)
5.2.1	猪粪堆肥黑麦草盆栽研究	(99)
5.2.2	猪粪堆肥黄瓜盆栽研究	(104)
5.3	本章小结	(108)

6	结论与展望	(109)
6.1	结论	(109)
6.1.1	竹炭及竹醋液对猪粪堆肥过程理化参数及微生物群落多样性的影响	(109)
6.1.2	竹炭及竹醋液对猪粪堆肥过程氮素损失控制及磷素活化的影响	(110)
6.1.3	竹炭及竹醋液对猪粪堆肥过程重金属钝化的影响	(110)
6.1.4	添加竹炭及竹醋液猪粪堆肥对黑麦草和黄瓜生长的影响	(110)
6.2	展望	(110)
	参考文献	(112)

1 畜禽养殖污染及竹炭、竹醋液在环境领域的应用研究进展

随着我国畜禽养殖业的快速发展,畜禽粪便产生量与日俱增,已成为农业面源污染最主要的来源之一。畜禽粪便污染是制约畜禽养殖业快速健康发展的重要因素,成为当前亟须解决的重大环境问题之一。

畜禽粪便的无害化处理是养殖场污染防治的重要内容,但畜禽粪便含有大量有机质及氮、磷、钾等植物必需营养元素,也是宝贵的肥料资源,如能合理利用,不仅能防治污染,而且能为现代有机农业生产提供大量优质的有机肥料,节约化学肥料投入成本,改变长期单一施用化肥所造成的土壤板结及肥力下降现状,优化土壤环境生态系统。因此,从资源、经济和环境三方面综合考虑,并结合我国实际情况,畜禽粪便处置的理想出路应该是无害化处理后农业资源化利用。

堆肥化处理是实现畜禽粪便无害化处理与农业资源化利用的一项有效措施,但传统堆肥过程中往往存在升温启动慢、脱水效果差、氮素损失严重、重金属钝化效果差等问题,从而影响了畜禽粪便处理处置效果,并限制了后续堆肥产品的农业资源化利用。堆肥添加材料的合理使用是强化堆肥效果、减少氮素损失和增强重金属钝化效果的有效措施,但常见的堆肥保氮材料及重金属钝化材料常常因为具有一定环境风险,或是成本较高,或是实际应用操作难度大而受到一定限制^[1-3]。竹炭和竹醋液是新型机能材料和环境保护材料,能够吸附去除氮素、重金属等污染物,改良土壤及增强或抑制微生物活性、促进植物生长等。因此,研究开发竹炭及竹醋液作为新型堆肥添加材料以有效解决以上问题,并在猪粪堆肥农业资源化利用过程中,

研究堆肥添加材料对植物生长基质性质和植物生长的影响,从而提出合理的堆肥农业资源化利用措施,将不仅有利于减少堆肥过程中的二次污染、提高堆肥品质,以及降低猪粪堆肥农业资源化利用过程中对生态环境的污染风险,更重要的是可将猪粪堆肥纳入良性生态循环,合理解决猪粪污染问题,促进规模化生猪养殖业的健康可持续发展。

1.1 我国生猪养殖业猪粪产生量及污染现状

近年来,我国畜禽养殖业迅速发展并呈现出两个重要特点:一是向规模化、集约化和工厂化方向发展^[4],二是饲料添加剂的广泛使用^[5],随之而来的畜禽粪便污染问题也日趋严重。由于受资金和技术等因素的限制及种植业和养殖业脱节等问题的影响,我国养猪场产生的猪粪大多未经处理就直接排放或就近堆存,给周围环境造成了严重污染。诸多研究表明,近年来生猪养殖业已成为我国面源污染的主要来源^[6,7],如在香港,早在 20 世纪 90 年代每年就产生约 22000 t 猪粪,新界地区径流污染中 70% 是由猪场排出的废物所引起^[8]。

1.2 猪粪的主要污染物成分及其污染

猪粪中所含的污染物主要包括悬浮物、有机质、盐、沉积物、病原微生物、寄生虫卵、Cu、Zn、N、P 等,这些物质在猪粪的收集、贮存、运输、土地资源化利用等处理与处置过程中都有可能造成严重的有机污染和生物污染,造成环境公害,甚至危害人畜健康,进入水体则易造成水体面源污染。根据猪粪中污染物质的特点,猪粪所带来的污染主要可以分为氮磷污染、盐分污染、重金属污染、生物病原污染、抗生素污染及恶臭物质污染 6 个方面。

1.2.1 氮磷污染

Van der Peet-Schwering 等^[9]以实际养猪生产中的平均生产水平和平均饲料 N、P 含量为基础,计算了不同类型生猪对 N、P 的摄入、持留及损失情况(表 1-1)。表 1-1 的数据表明,母猪、断奶仔猪、生长肥育猪 N 损失量占总摄入量的比例分别为 76%、46%和 67%,P 损失量占总摄入量的比例分别为 75%、38%和 63%,其中 N 主要通过尿液排泄损失,而 P 则主要通过粪便排泄损失。由表 1-1 数据可知,生猪饲养过程中,猪经由食物摄取的 N、P 营养物质除少部分用于生长发育外,大多通过粪便或尿液排出,因此畜禽粪便处置不当极有可能造成氮磷污染^[10]。

表 1-1 不同类型生猪对 N、P 的摄入、持留及排泄情况(kg/头)

元素	生猪类型	摄入量	持留量	排泄量		
				粪便	尿液	粪尿合计占摄入量比例(%)
N	母猪	25.19	6.04	5.03	14.11	76
	断奶仔猪	0.82	0.44	0.12	0.26	46
	生长肥育猪	6.40	2.14	1.09	3.17	67
P	母猪	5.38	1.35	2.58	1.46	75
	断奶仔猪	0.16	0.10	0.05	0.01	38
	生长肥育猪	1.16	0.43	0.65	0.08	63

注:母猪每年生育 21.6 头仔猪;断奶仔猪体重 7.5~26 kg;生长肥育猪体重 26~113 kg。

猪粪中的 N、P 是植物生长必需元素,然而土壤过量施用猪粪却会带来局部地区 N、P 的过量。如王方浩等^[11]研究发现,2003 年河北、河南及山东 3 省的耕地畜禽粪便氮养分负荷超过 150 kg·hm⁻²,部分地区造成了环境污染,而北京市的耕地畜禽粪便氮养分负荷高达 230 kg·hm⁻²,更是对土壤环境造成了严重威胁。氮、磷进入土壤后,分别转化为硝酸盐和磷酸盐,土壤蓄积大量氮素不仅造成土壤污染,而且在降水或灌溉条件下通过土壤冲刷和毛细管作用,以硝酸盐

形态存在的氮素会进入地下水造成污染^[10,12]。在作为饮用水源的地下水体中,硝酸盐若转化为具有致癌性的亚硝酸盐则严重威胁人体健康,而这种地下水污染通常需要 300 年才能自然恢复^[13]。大量的氮、磷等营养物质会造成水体富营养化,并导致鱼类不能利用的藻类和其他水生植物大量繁殖,这些生物死亡后产生的毒素不仅使水体丧失饮用功能,而且急剧减少水体溶解氧浓度,导致水生动物缺氧死亡及水质进一步恶化^[14]。随意堆存的猪粪更易在降水作用下通过下渗及径流影响地下水和地表水水质。猪粪中氮素还会以氨的形式挥发到大气中成为酸雨形成的因素之一,以 NO_x 的形式挥发还将导致温室效应加剧^[15]。

1.2.2 盐分污染

猪粪中含有大量 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 等盐基离子,这些盐基离子虽然不是有毒、有害物质,但若长期在土壤中积累会对其生态健康功能产生危害^[16,17]。如果盐分含量较高的猪粪被大量施入农业土壤,尤其温室大棚土壤,则可能导致土壤次生盐渍化^[18],存在因盐分在土壤表面聚集而影响作物出苗及生长的风险。大量猪粪施入土壤导致有机质积累,阴离子交换量增加,进而使无机盐累积,不易迁移的磷酸盐在土壤下层的富集还将引起土壤板结^[19]。因此,猪粪农用需要考虑其盐分含量问题。

1.2.3 重金属污染

世界各国较为普遍地在生猪配合饲料中添加 Cu、Zn 等重金属元素,用以减少集约化生猪养殖过程中生猪疾病的产生及促进生长发育、缩短饲养周期^[20,21]。适量的重金属元素在生猪生产中能产生较好的经济效益,但其排放也给生态环境造成了新的压力^[22,23]。畜禽对配合饲料中添加的 Cu、Zn 等重金属元素利用率较低,多随粪便排出,如生猪饲料中 72%~80% 的 Cu 随粪便排出,导致猪粪中 Cu

浓度比正常土壤高出了 10~40 倍^[24,25]。刘荣乐等^[26]研究了我国的畜禽粪便性质后发现,猪粪中的 Cu、Zn 浓度分别高达 $1726 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2286 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,鸡粪中的 Cu、Zn 浓度分别高达 $736 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1017 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,若按照德国腐熟堆肥中重金属限量标准 (Cu $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Zn $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[27],我国猪粪、鸡粪堆肥样品中 Cu 的超标率分别为 69% 和 23%,Zn 的超标率分别为 59% 和 32%。

1.2.4 生物病原污染

畜禽粪便中含有大量的病原菌和寄生虫卵,如猪粪中含有大肠埃希氏菌、空肠弯曲杆菌、单核细胞增生李斯特氏菌^[28]。张树清等^[25]研究发现,猪粪中总大肠杆菌的数量约为 $3.5 \times 10^2 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$,蛔虫卵为 $0.2 \sim 14.8 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$ 。多数病原菌及寄生虫卵不易失活,如自然堆肥条件下污泥内粪大肠杆菌群在 2~3 个月后才可以达到排放标准,沙门氏菌则需 4~5 个月,蛔虫卵经 10 个月贮存后死亡率方可达 90%^[29]。由此可见,猪粪也需经过无害化处理以有效降低有害生物的数量,避免造成环境污染。

畜禽粪便若处理不当则会滋生大量蚊蝇,使环境中的病原种类增多、菌量增大,甚至造成人畜传染病的传播^[30,31]。

1.2.5 抗生素污染

在规模化畜禽养殖业中,饲料添加剂(维生素、激素等)和兽药(抗生素类)在促进畜禽生长、提高饲料报酬和疾病防治等方面发挥着重要作用。最常用的兽药包括抗生素类、生长促进剂类、灭锥虫药类、抗原虫药类、驱肠虫药类、 β -肾上腺素类和镇静剂类 7 类^[25]。目前,我国已有 17 种抗生素、抗氧化剂和激素类药物及 11 种抗菌剂作为兽药用于饲喂畜禽^[32]。

目前养殖户对饲料添加剂及兽药的应用比较混乱,如若滥用不

仅危害动物健康,而且危害动物性食品的食用安全,导致动物性食品兽药残留事件频发,如 2001 年广州发生的猪肉“瘦肉精”事件^[33]。此外,许多抗生素类药物会随畜禽尿液排出,混合在粪便当中。如张树清^[25]对北京、浙江萧山、江苏南京、山东济南、吉林四平、陕西杨凌、宁夏吴忠等 7 个省、市、自治区的 32 个猪粪样品的测定结果表明,猪粪中土霉素、四环素和金霉素的均值分别为 $9.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $5.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $3.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而且北京、浙江等经济发达地区的用药量明显高于陕西、宁夏等经济落后地区,前者猪粪样品中的四环素含量明显高于后者样品中的含量。畜禽排泄物是四环素进入环境的主要途径,而且四环素类抗生素在环境中的半衰期很长^[34]。抗生素一旦进入环境还能够影响环境微生物种群变化,致使耐药菌在环境中被诱发和散播,对环境和人体健康产生危害^[35,36]。

1.2.6 恶臭污染

畜禽养殖场恶臭物质会导致畜禽对疫病的易感性提高,引起呼吸道疾病及其他疾病,并最终影响畜禽生长,导致畜禽生产能力下降。同时,恶臭的传播可使较大范围内空气质量恶化,长期生活在养猪场周边的人们更易患气管炎、支气管炎、肺炎等呼吸系统疾病^[31,37]。

畜禽养殖场的恶臭污染来源于多方面,如动物呼吸、动物体液分泌物、饲料残余、病死畜禽、养殖场所通风、动物粪尿和污水等,但主要来源于畜禽粪便排出体外后的腐败分解^[30,38]。畜禽粪便恶臭主要来自饲料中蛋白质的代谢终产物,或粪便中代谢产物和残留养分经细菌分解产生的恶臭物质,包括氨、硫化氢、吲哚、硫醇等,在恶臭物质中对人畜健康影响最大的主要为 NH_3 和 H_2S ^[10],而且产生量较大,如一个年出栏 5000 头的猪场每天 NH_3 产生量就达 0.8 kg 以上^[39]。 NH_3 、 H_2S 均易挥发,浓度低时可刺激眼、鼻腔和呼吸道黏膜,浓度高时可造成组织细胞缺氧^[40]。若仔猪生活环境中空气里氨体积分数达到 5×10^{-5} 会使其增重率下降 12%,氨体积分数升至

10^{-4} 或 5×10^{-4} 则增重率会下降 30%；鸡舍空气中氨体积分数达到 2×10^{-5} 则可使鸡患上角膜炎，达到 5×10^{-5} 时鸡呼吸频率下降，产蛋量显著减少^[41]。此外， NH_3 挥发到大气中即增加了大气中的氮含量，严重时可形成酸雨，进而对农作物及建筑物造成危害^[15,42,43]。

1.3 猪粪处理技术

猪粪水分及污染物含量高，一旦排泄极易腐败变质，对于环境而言无疑是一种污染物，然而猪粪富含 N、P 等矿质元素及有机质，对植物而言却是优质的肥料资源。因此，减量化、无害化处理和资源化综合利用是猪粪处理的基本方向。目前，集约化养猪场猪粪的处理主要包括好氧堆肥、厌氧发酵、蚯蚓堆肥及饲料化处理。

1.3.1 好氧堆肥

好氧堆肥是在人为控制堆肥因素的条件下，根据各种堆肥原料的营养成分和堆肥过程中微生物对混合堆料中水分含量、碳氮比 (C/N)、碳磷比 (C/P)、pH 值和颗粒大小等要求，将各种堆肥材料按一定比例混合堆积，在有氧条件下利用好氧微生物的作用达到无害化(有害性生物失活)、稳定化(有机物分解、腐殖质形成)，转变为有利于土壤性状改变并对作物生长有益和容易吸收利用的有机肥的方法^[44,45]。好氧堆肥过程主要受含水率、C/N 等堆肥物料初始特性及温度、pH 值、通气量等环境参数的影响。

(1) 含水率：堆肥物料含水率与堆肥温度密切相关。过多的水分会充满颗粒间的空隙使堆肥体系通气不佳，堆体温度难以上升，分解速度下降，导致厌氧发酵形成恶臭的中间产物。而太低的含水率会造成堆肥微生物活动减弱，致使有机物难以被分解，堆体温度不易上升^[46]。一般认为含水率控制在 60%~65% 较好，如庞金华等^[47]

研究认为,猪粪堆肥时 66% 的含水率可使堆肥温度相对快速上升,在 3 d 内便出现持续高温。

(2) C/N: 好氧堆肥过程中,碳既是微生物生长的能量来源之一,又是微生物体的主要组成元素。氮是组成核酸和蛋白质的重要元素,所以,氮对微生物的生长发育有着重要的作用。堆肥物料 C/N 过高将导致微生物缺乏足够的氮而无法快速生长,使堆肥进展缓慢。但吴银宝等^[48]认为,高 C/N 不仅不影响猪粪堆肥进程,而且有利于堆肥的升温及钾、腐殖质含量的增加,但会使堆肥体积增大、成本增加。造成以上研究结论不同的原因可能是碳源物质的生物有效性不同。另一方面,C/N 过低将使微生物生长过于旺盛,消耗大量氧气以致堆体局部出现厌氧发酵、散发恶臭气体,同时大量的氮以氨气形式释放导致堆肥质量降低和空气污染。所以通常认为,C/N 控制在适合微生物生长的 25~30 较好。一般各种畜禽粪便的 C/N 为:鸡粪 3~10、猪粪 11~15、牛粪 11~30。因此,畜禽粪便可好氧堆肥常添加木屑、锯末、树皮、稻草、稻壳、米糠等 C/N 较高的碳源物质将 C/N 调节到 25~30,以加快堆肥进程和减少氮素损失。

(3) 温度:堆肥过程温度多控制在 65℃ 左右,过高的温度会抑制堆体中多种微生物的生长,影响堆肥反应速度,过低的温度则不利于无害化处理和物质降解。温度的控制可以通过调节通气量、加水及翻堆的方法进行。

(4) pH 值:pH 值是堆肥过程中的重要环境参数之一,堆肥中微生物的生存环境以中性为宜,pH 值一般在 6~8,过高或过低都将影响微生物活性甚至导致微生物的死亡^[49]。微生物(尤其是细菌和放线菌)生长最适宜的 pH 值为 6.5~7.5,但它们可以在 pH 值为 6~8 范围内繁殖,因而一般不需要调整堆肥物料的 pH 值,微生物通常会自动调节以适应堆肥过程中 pH 值的动态变化^[50,51]。通常只有当 pH 值过高($\text{pH} > 9$)或过低($\text{pH} < 4$)而减缓微生物降解速度时才需调整堆肥的 pH 值。除影响微生物活性以外,过高的 pH 值还会导致堆肥中的氮以氨气的形式挥发造成大量损失。

(5) 通风:通风是好氧堆肥的必需条件。在堆肥过程中,通风具有三重作用:一是为微生物的活动提供足够的氧气及带走微生物呼吸释放的二氧化碳;二是带走水蒸气,去除堆肥物料过多的水分;三是调节堆肥过程的温度和稀释臭味^[44]。堆肥的通风方式可分为翻堆、自然通风、被动通风和强制通风等。翻堆、自然通风和被动通风方式常应用于条垛式好氧堆肥系统,强制通风方式常用于强制通风静态垛和大多数反应器堆肥系统^[52]。不同的通风方式和通风量可直接影响高温好氧堆肥的微生物生长活动,并最终影响堆体温度的升高、病原菌的杀灭效果及有机质的分解^[53]。例如,通风量不足则不能满足好氧堆肥反应要求,局部出现厌氧发酵抑制好氧反应的进行并产生恶臭气体;通风量过大则堆体产生的热量散失快,影响堆体升温^[54]。杨国义等^[55]研究认为,强制通风与机械翻堆相结合是猪粪稻草混合堆肥的最佳通风方式,可以加快堆肥温度升高及堆肥腐熟,而单一机械翻堆次之,单一强制通风效果最差。廖新倮等^[56]研究表明,虽然机械通风与人工翻堆在促进猪粪稻草混合堆肥物料的腐熟进程上没有显著差别,但单纯的机械通风其最后物料的均匀度不如人工翻堆。在堆肥生产实践中,通风方式的选择还要考虑堆肥者的经济条件、设备条件、设备操作维护水平和堆肥场地与堆肥生产规模等因素。

1.3.2 厌氧发酵

厌氧发酵即厌氧生物处理,也是一种利用微生物自身的新陈代谢作用而实现有机固体废弃物处理的方法。与好氧生物处理法相比,厌氧发酵法具有耗能低、占地面积小、处理效率高等优点,而且厌氧发酵产生的沼气是高热值的能源^[57]。厌氧发酵过程主要受温度、酸度、厌氧条件、C/N、微生物营养、有机负荷率、含水率、搅拌装置、破碎程度及其他毒性物质(重金属、氨氮及各种杀菌剂等)等的影响^[58]。

目前,厌氧发酵主要用来处理水冲方式收集的猪粪尿,猪粪经厌