

国内猪粪污染物处理研究进展

王艳^{1,2}, 韦杰², 谭维娜¹, 孙法军¹, 孙皓¹, 赵海涛^{2*}

(1. 连云港市职业农民培育指导站, 江苏连云港 222000; 2. 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏扬州 225127)

摘要 在探讨猪粪性质特征的基础上分析了当前国内猪粪处理利用的主要途径, 指出厌氧发酵、好氧发酵、栽培基料和饵料化是当前处理猪粪的主要技术模式, 最后提出资源化、无害化、增值化是未来处理猪粪的主要发展方向。

关键词 猪粪; 性质; 污染物; 进展

中图分类号 X 713 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2020)06-0004-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.06.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in Eliminating Pollutants from Pig Manure in China

WANG Yan^{1,2}, WEI Jie², TAN Wei-na¹ et al (1. Lianyungang City Professional Farmer Training Guide Station, Lianyungang, Jiangsu 222000; 2. College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225127)

Abstract On the basis of discussing the characteristics of pig manure, the main ways of treatment and utilization of pig manure in China were analyzed. It was pointed out that anaerobic fermentation, aerobic fermentation, cultivation base and bait are the main technical models for the treatment of pig manure. At last, it was pointed out that the main development direction of pig manure treatment in the future is to make it resource, harmless and value-added.

Key words Pig manure; Properties; Pollutants; Progress

我国是畜牧业生产大国, 生猪养殖在我国畜牧业中属于重要组成部分, 2014—2018 年我国生猪年存栏量分别为 7.35 亿、7.08 亿、6.85 亿、7.02 亿和 6.94 亿头。我国的生猪养殖规模位居全球第一, 每年出栏的生猪占全球生猪养殖量的 50% 左右^[1]。生猪养殖为国家食品供应安全提供了有效支撑, 而猪粪等养殖废弃物带来的环境污染问题日益成为困扰生猪养殖产业健康可持续发展的瓶颈。笔者在探讨猪粪性质特征的基础上拟分析当前国内猪粪处理利用的主要途径, 重点介绍猪粪中重金属和抗生素处理的技术和效果, 以期为猪粪处理利用和生猪养殖业健康可持续发展提供支撑。

1 猪粪性质特征

1.1 猪粪矿质元素 猪粪中含有大量的碳和矿质营养元素, 是提高土壤地力的宝贵资源。相关的检测结果表明, 猪粪中有机质含量为 65.47 g/kg, 铵态氮 3.08 g/kg, 总磷 3.41 g/kg, 总氮 5.88 g/kg。2015 年我国畜禽粪尿资源含量达 2 573.10 万 t, 氮、磷、钾含量分别为 1 278.50 万、366.12 万、928.44 万 t, 其中生猪猪粪中含有养分量为 542.95 万 t, 占总养分量的 21.10%^[3]。

1.2 猪粪中有机污染物 以猪粪为原料制备的有机肥中含有雌激素, 其中雌三醇(E3)、17 β -雌二醇(17 β -E2)、双酚 A (BPA)、炔雌醇(EE2) 4 种雌激素的含量分别为 609.71、41.84、32.69、46.74 μ g/kg^[4]。周婧^[5]检测了猪粪中的抗生素, 发现猪粪中含有各类抗生素, 其中四环素类抗生素(TCs)含量最高(1 260.42 mg/kg), β -内酰胺类(β -lacs)抗生素含

量为最低(0.26 mg/kg), 磺胺类(SAs)抗生素浓度为 17.05 mg/kg, 喹诺酮类(FQs)抗生素浓度为 6.32 mg/kg, 大环内酯类(MLs)抗生素浓度为 41.95 mg/kg。猪粪中抗生素含量整体上表现为秋冬季大于夏秋季。四环素类抗生素在不同规模猪场以及不同季节所占比重均为最高, 母猪猪粪中的抗生素含量相对较低, 保育猪猪粪中抗生素含量最高^[5]。

1.3 猪粪中重金属 北京市、寿光市和岳阳市采集的猪粪中重金属存在积累现象, 猪粪中 Cu、Zn、Cd 以及 As 等重金属含量显著高于鸡粪、鸭粪和牛粪。根据畜禽粪便安全使用准则中在蔬菜地使用畜禽粪便限量标准, 猪粪中 Zn、Cu 和 As 超标率分别为 78.69%、74.59% 和 9.84%, Zn 和 Cu 明显严重超标。Cu 和 Zn 在种猪粪中含量较低, 依次低于育肥猪粪和乳猪粪。育肥猪粪中 As 含量高于乳猪粪和种猪粪; 种猪粪中的 Cd 含量高于乳猪粪和育肥猪粪。猪粪中 Cu、As 水溶态含量分别占总量的 30.47% 和 12.19%, EDTA 提取态 Cu、Zn 含量分别占总量 35.96% 和 48.93%^[6]。江西省猪粪中的 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Hg 和 Pb 平均质量分数分别为 2.94、14.8、456、732、14.0、1.94、0.170 和 5.74 mg/kg。若以猪粪为原料制成有机肥, 则江西省猪粪中 Zn、Cu、As、Ni 和 Cd 超标, 超标率为 8.3%~86.1%^[7]。山东省猪粪中 Zn、Cu 残留量均超过国内外堆肥参考标准^[8]。薄录吉等^[9]收集了我国 21 个省市规模化养猪场粪便和重金属浓度数据, 研究表明猪粪中 Cu、Zn、As、Cd、Cr 平均含量超标省市分别占 95.2%、85.7%、33.3%、20.0% 和 5.26%。猪饲料中重金属含量高是导致猪粪重金属含量高的主要原因, 猪饲料中的重金属被生猪食用后绝大部分以粪便的形式排出, 因此应从源头严格控制饲料中 Cu、Zn 等重金属元素的添加量, 从而降低粪便中重金属含量。

2 猪粪处理利用技术模式

2.1 厌氧发酵 厌氧发酵主要分为 3 个阶段, 第一阶段是发酵菌在胞外酶的作用下使固体物质转化成可溶于水的脂肪

基金项目 江苏省苏北科技专项(SZ-HA2017009); 江苏省农业科技创新资金项目[CX(18)2003, CX(17)2004]; 扬州市校合作专项(YZ2019136)。

作者简介 王艳(1978—), 女, 江苏连云港人, 农艺师, 从事农业废弃物资源化利用研究。* 通信作者, 教授, 博士, 从事资源环境科学研究。

收稿日期 2019-09-30; **修回日期** 2019-10-15

酸和醇类物质,使各类物质发生液化水解;第二阶段是可溶性物质在胞内酶的作用下继续分解进而转化成甲醇、乙醇、甲酸和乙酸等低分子物质,使其产氢产酸;第三阶段是产甲烷菌使产酸阶段的小分子化合物通过一步或几步的还原作用,最终形成甲烷和二氧化碳^[10]。猪粪中含有大量有机物与氮磷元素,利用厌氧发酵技术可以有效降低猪粪中 70%~80% 的 COD 含量^[11]。大型沼气工程的启动需要有大量的外源接种物,这使得启动成本增高。为了实现沼气工程低成本且快速启动,经研究稻草与猪粪按 0:1,1:2,1:1 和 2:1(VS)混合后在不外加接种物的情况下均能启动发酵进程,并且发现少量稻草与猪粪混合的启动效果优于单独猪粪的启动效果,稻草与猪粪 1:2 混合比例时效果最佳^[12]。(36±1)℃、发酵浓度为 20% 的条件下,分别添加 5% 的活性炭、磁铁粉和灰分进行厌氧干发酵,结果表明 3 种添加剂均可以缩短猪粪厌氧干发酵的发酵周期、提升猪粪厌氧干发酵的产气效率^[13]。将猪粪与玉米秸秆按照不同比例混合进行干法厌氧发酵,试验结果表明,在温度为 55℃、接种率为 30%、猪粪与玉米秸秆混合比例为 1:3 条件下,20 d 累积产气量最多,TS 降解率最高。湿度是影响干法厌氧发酵产气率的主要因素,同时可以影响发酵物的水解过程^[14],适当地控制湿度可以促进猪粪的发酵。

2.2 好氧发酵 堆肥的原理是通过好氧发酵来处理有机废弃物,堆肥是好氧发酵的常用方法之一,可以实现使猪粪无害化和变废为宝的目的。堆肥的过程是好氧微生物通过自身的代谢作用,将废弃物中的有机物降解并转化为稳定程度较高的腐殖质,并通过添加微生物制剂来加速畜禽粪便的腐熟过程^[15-16]。从新鲜猪粪中分离出嗜热性较强、感官除臭力较好的芽孢杆菌 Y1、酵母菌 J2 和放线菌 F1,这 3 株菌种均能耐 55℃ 的高温,且对氨气和硫化氢有明显的抑制释放能力,将 3 株菌种按 1:1:1 体积复合,加入 1% 的剂量,其效果更加显著。利用以上筛选获得的复合发酵菌剂开展猪粪堆肥发酵试验,结果显示添加复合菌的堆肥处理温度上升较快,至第 9 天可上升至 65℃,且 55℃ 以上高温时间可维持近 7 d;堆肥 21 d 后结束,物料呈暗褐色,粉状,含水率由原来的 75% 下降至 25%;总氮含量和种子发芽指数也明显高于不接种的对照组^[17]。在厌氧条件下将猪粪制备成生物炭后添加到猪粪中进行好氧堆肥,添加猪粪生物炭的堆体温度在第 4 天达 50℃,最高温度达 66.2℃,高于对照组的 63.4℃。猪粪生物炭的加入可以降低堆体可溶性盐的浓度,降低堆体铵态氮的损失,促进速效钾的增加,利于堆肥产物 Cr 和 Cu 的固化^[18]。猪粪好氧发酵过程中增加通风频次有助于降低硫化氢和 TVOCs 的最高排放浓度,但会增加堆肥过程中硫化氢、TVOCs 以及二甲二硫和二甲三硫的累积排放量,增加环境危害程度。通风 5 min,间隔 30 min 是最佳通风方式^[19]。

2.3 栽培基料 规模化养猪场猪粪渣经固液分离处理后可制备成栽培双孢蘑菇的基料,使用 25% 猪粪渣替代牛粪栽培双孢蘑菇时产量略有提高,但是随着猪粪渣替换量的增加产量逐步降低^[20]。使用猪粪分离渣培养的毛木耳子实体粗蛋

白含量为 9.0%、粗纤维含量为 21.1%、粗脂肪含量为 1.1%、灰分含量为 2.61%、氨基酸含量为 6.1%,其中必需氨基酸占氨基酸总量的 43.6%^[21]。猪粪固液分离物替代部分棉籽壳栽培鸡腿菇能够降低成本、提高菌丝生长速度和质量,缩短栽培周期,提高经济效益,适宜的添加比例为 60%^[22]。

2.4 饵料化处理 蚯蚓生物堆肥具有工艺与设备简单、成本低、处理中节能环保等特点,能够有效处理猪粪。蚯蚓处理猪粪有露天养殖、林下和全遮雨等模式,由于猪粪牛粪等有机废弃物的渗水性较差,养殖床表面极易积水,建议采用全遮雨模式。处理的工作蚓基本都选用生长快、繁殖高、食性广和处理能力强等特点的赤子爱胜蚯蚓^[1]。猪粪中添加 1.0% 枯草芽孢杆菌,与秸秆混合调节碳氮比为 30,堆肥腐熟处理后养殖蚯蚓效果最佳^[23]。经蚯蚓生物处理后,猪粪和秸秆混合物料中的有机碳、全磷、速效磷以及全钾的含量随处理时间的增加而升高,全氮、硝态氮含量随时间的增加呈现出先降低后升高的趋势,铵态氮、速效钾的含量在养殖过程中逐渐降低。综合来看,猪粪经蚯蚓生物处理后,会具有较好的肥效^[24]。猪粪固液分离后的固体物料也能制成鱼类颗粒饵料,测试表明饵料中未检出粪大肠菌群,饵料含粗蛋白 25.4%,粗脂肪 6.8%,粗纤维 9.2%,钙 1.2%,磷 0.7%,灰分 8.1%,满足鱼饲料营养要求^[25]。

3 猪粪中污染物处理

3.1 重金属处理 堆肥可通过降低畜禽粪便中水溶态重金属的含量和将水溶态重金属络合在腐殖质类物质上从而降低产品中重金属的生物有效性^[26]。在好氧堆肥处理过程中,猪粪中 Cr 和 Ni 含量峰值均在第 23、28 天以后趋于平稳;Cu、Mn 和 Zn 含量峰值均在第 41 天保持稳定;Pb 总体是呈下降趋势,在第 13、23 天其含量分别比第 1 天显著下降 61.22% 和 81.63%,在第 41 天以后其含量未检出;有效 Cu、Mn、Zn 含量远低于元素总量,分别为 2.35~5.79、17.82~20.28 和 47.39~70.29 mg/kg^[27]。堆肥过程中添加生物炭有利于猪粪中重金属活性的钝化。李冉等^[28]研究发现,在猪粪堆肥处理中添加 FeCl₃ 改性生物炭对 Cu、Zn 和 Pb 元素表现出相对较好的钝化能力,钝化效果分别为 78.70%、43.53%、66.45%。蚯蚓能富集猪粪中的 Cu、Zn、Cd 和 As 等重金属元素并且降低猪粪中的重金属含量,同时减少猪粪中的部分重金属残渣态比例,有利于重金属的转移和去除^[29]。也有研究表明,蚯蚓堆制处理猪粪后,堆利物中 Cu、Zn 这 2 种重金属元素含量分别降低了 26.41% 和 19.58%,重金属元素主要以残渣态形式存在,在蚯蚓的处理下逐渐向稳定态方向转化,可见蚯蚓处理能够有效降低重金属元素的生物有效性^[30]。矿质材料亦能够有效钝化猪粪中的重金属,硫化钠对猪粪中 Cu 的钝化率可达 86.84%,对 Zn 的钝化率为 65.64%;凹凸棒土对 Cu 的钝化率为 87.86%,对 Zn 的钝化率为 32.82%;粉煤灰对 Cu 的钝化率为 74.70%,硫化钠和凹凸棒土可以作为钝化猪粪中重金属的添加剂^[31],并且有较好的效果。重金属分离技术和钝化技术相结合来处理猪粪中重金属,不仅可以减少猪粪中 Cu、Zn 和 Mn 重金属的总量,而且对于其生物利

用性可有效降低。柠檬酸浸和硫化钠钝化对猪粪中 Cu、Zn、Mn 总处理效率显著,分别达 73.00%、61.44%、29.90%^[32]。

3.2 抗生素处理 好氧堆肥有利于去除猪粪中的雌激素^[4],当猪粪中多种雌激素共存时,其中初始浓度最大的雌激素具有较高的降解速率。雌激素的降解受光照、温度、微生物等多种方面的影响,其中微生物影响最大。微生物活动会影响堆体内雌激素的降解速率,在堆肥中期微生物活动最为活跃,且雌激素的降解速率最高,并且高于堆肥前期和后期^[33]。好氧条件下的堆肥处理对于土霉素、四环素、金霉素、磺胺甲基嘧啶、磺胺嘧啶、磺胺甲恶唑、环丙沙星、恩诺沙星和泰乐菌素等主要类别抗生素的去除率可达 65.5%~100.0%。厌氧发酵对四环素、氨基青霉素、磺胺甲氧二噻唑的去除率可达 100.0%,但对磺胺嘧啶、磺胺二甲基嘧啶、磺胺氯噻唑、泰乐菌素的去除率极低^[10]。

4 展望

猪粪对环境的污染正由传统概念上的氮、磷、碳等元素污染进一步扩增至重金属和抗生素等污染,并且重金属和抗生素产生的中间产物亦会对环境造成二次污染,资源化、无害化、增值化是未来处理猪粪的主要发展方向。

参考文献

- [1] 胡红文,刘贵平,李清亮,等.利用蚯蚓堆肥处理猪粪技术[J].中国畜牧业,2019(15):51-52.
- [2] 李林海.畜禽粪便中的主要养分和重金属含量分析[J].南方农业,2018,12(23):126-128.
- [3] 王志国,李辉信,岳明灿,等.中国畜禽粪资源及其替代化肥潜力分析[J].中国农学通报,2019,35(26):121-128.
- [4] 韩进,程鹏飞,周贤,等.基于畜禽粪便的有机肥中雌激素污染特征[J].农业资源与环境学报,2019,36(5):673-678.
- [5] 周婧.猪粪中曾用抗生素检测方法及其季节性污染特征研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.
- [6] 贾武霞,文炯,许望龙,等.我国部分城市畜禽粪便中重金属含量及形态分布[J].农业环境科学学报,2016,35(4):764-773.
- [7] 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.
- [8] 刘兴华,朱荣生,王怀中,等.规模化猪场配合饲料和猪粪中矿物质元素含量特征[J].山东农业科学,2019,51(8):84-90.
- [9] 薄录吉,李彦,JIANG L,等.我国规模化养猪场粪便重金属污染特征与农用风险评估[J].农业机械学报,2018,49(1):258-267.

- [10] 成登苗,李兆君,张雪莲,等.畜禽粪便中曾用抗生素削减方法的研究进展[J].中国农业科学,2018,51(17):3335-3352.
- [11] 管志云,邵敏,刘玉坤.畜禽粪便厌氧发酵技术分析[J].今日畜牧兽医,2018,34(11):60-59.
- [12] 矫云阳,WACHEMO A C,李秀金,等.稻草与畜禽粪便混合物厌氧消化快速启动研究[J].中国沼气,2019,37(4):35-40.
- [13] 郑盼,尹芳,张无敌,等.不同外源添加剂对猪粪厌氧干发酵的影响[J].中国沼气,2019,37(3):35-40.
- [14] 郭全忠.不同处理对猪粪干法厌氧发酵产气性能的影响[J].陕西农业科学,2019,65(4):78-82.
- [15] 金珠理达,王顺利,邹荣松,等.猪粪堆肥快速发酵菌剂及工艺控制参数初步研究[J].农业环境科学学报,2010,29(3):586-591.
- [16] 贾聪俊,张耀相,杜鹤辰,等.接种微生物菌剂对猪粪堆肥效果的影响[J].家畜生态学报,2011,32(5):73-76.
- [17] 邢伟杰,储卫华,金波,等.嗜热除臭型发酵菌剂筛选及其对猪粪堆肥发酵中的研究[J].农业开发与装备,2019(1):121-122.
- [18] 谢胜禹,余广伟,潘兰佳,等.添加生物炭对猪粪好氧堆肥的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(6):1365-1372.
- [19] 沈玉君,张明月,孟海波,等.通风方式对猪粪堆肥主要臭气物质控制的影响研究[J].农业工程学报,2019,35(7):203-209.
- [20] 张雪瑶,钟祝烂.猪粪渣栽培双孢蘑菇技术初探[J].食用菌,2017,39(3):49-50,66.
- [21] 杨菁,林代炎,翁伯琦,等.应用猪粪分离渣栽培毛木耳的品质研究[J].中国食用菌,2015,34(1):29-31.
- [22] 郭惠东,万鲁长,单洪涛,等.猪粪固液分离物栽培鸡腿菇配方优选试验[J].中国食用菌,2017,36(2):17-19.
- [23] 宋高杰,李涵,刘兴发.猪粪堆肥处理及用于蚯蚓养殖的研究[J].黑龙江畜牧兽医,2017(19):124-127,136.
- [24] 陈杰,谢飞,雍毅,等.蚯蚓生物处理猪粪肥效变化研究[J].环境保护科学,2018,44(1):89-94.
- [25] 江华明,李仁全,彭万仁,等.猪粪固形物饵料化试验研究[J].四川职业技术学院学报,2016,26(5):179-182.
- [26] 卜贵军,于静,邱慧慧,等.鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究[J].环境科学,2014(11):4352-4358.
- [27] 尹晓明,王荣江,徐潇潇,等.猪粪堆肥过程中养分和重金属含量的动态变化[J].植物营养与肥料学报,2019,25(2):254-263.
- [28] 李冉,孟海波,沈玉君,等.改性生物炭对猪粪堆肥过程重金属钝化效果研究[J].农业环境科学学报,2018,37(10):2304-2311.
- [29] 黄伟,刁晓平,李森楠,等.蚯蚓处理对猪粪重金属富集的影响[J].热带生物学报,2019,10(2):151-158.
- [30] 李晶.蚯蚓堆制猪粪对 Cu、Zn 形态变化与关键生物学指标间关系的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.
- [31] 李文姣,张丽,刘东方,等.不同钝化剂对猪粪中重金属 Cu Zn Mn 钝化效果的研究[J].农业环境科学学报,2018,37(6):1262-1269.
- [32] 李文姣,张丽,刘东方,等.化学淋洗与硫化钠钝化联合处理猪粪中重金属[J].环境工程学报,2018,12(6):1808-1818.
- [33] 韩进,程鹏飞,周贤,等.畜禽粪便堆肥过程中雌激素降解特征[J].农业资源与环境学报,2019,36(5):679-686.

(上接第 3 页)

参考文献

- [1] ZHOU X J, LIU Z G, XU S, et al. An automated comparative observation system for sun-induced chlorophyll fluorescence of vegetation canopies[J]. Sensors, 2016, 16(6):1-15.
- [2] RATTAN K J. Comparative analyses of physiological assays and chlorophyll a variable fluorescence parameters: Investigating the importance of phosphorus availability in oligotrophic and eutrophic freshwater systems[J]. Aquatic ecology, 2017, 51(3):359-375.
- [3] PORRA R J. The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophylls a and b[J]. Photosynthesis research, 2002, 73(1/2/3):149-156.
- [4] 弗里德 GH, 黑德莫诺斯 GJ. 生物学[M]. 田青淦, 殷莹, 马洌, 等译. 2 版. 北京: 科学出版社, 2002.
- [5] 武卫华, 刘忠荣, 黄先敏, 等. 叶绿体色素的提取方法改进及其应用[J]. 北方园艺, 2010(24):67-69.
- [6] 徐新娟, 李勇超, 张尚攀, 等. 两种叶绿素提取方法的比较[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(21):5303-5304, 5321.
- [7] 徐澜, 许冰霞, 张珏, 等. 不同材料叶绿素提取条件探究术[J]. 广州化

- 工, 2017, 45(9):102-105.
- [8] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [9] QIU N W, WANG X S, ZHOU F. A new method for fast extraction and determination of chlorophylls in natural water[J]. Z Naturforsch (C), 2018, 73(1/2):77-86.
- [10] 吴兴壮, 张华, 张晓黎, 等. 西兰花叶叶绿素提取条件研究[J]. 农业科技与装备, 2013(11):57-59.
- [11] 昌梦雨, 魏晓楠, 王秋悦, 等. 植物叶绿素含量不同提取方法的比较研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(27):177-180.
- [12] HISCOX J D, ISRAELSTAM G F. A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration[J]. Canadian journal of botany, 1979, 57(12):1332-1334.
- [13] 王琴, 崔素萍, 杨智明. 盐地碱蓬中叶绿素的提取研究[J]. 当代畜牧, 2017(36):57-59.
- [14] ALPERT P. Analysis of chlorophyll content in mosses through extraction in DMSO[J]. The bryologist, 1984, 87(4):363-365.
- [15] 徐敏, 刘君, 阿衣古力·阿布都瓦依提. 植物生理实验教学中叶绿素提取方法比较[J]. 实验科学与技术, 2018, 16(4):129-133.