

目次

2013~2020年天津市PM _{2.5} -O ₃ 污染变化趋势和影响因素分析	肖致美, 李亚菲, 高璟赞, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)
2015~2020年济南市O ₃ 污染趋势及敏感性变化分析	孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)
南京市南部地区O ₃ 污染特征、生成敏感性及传输影响分析	郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)
天津市“十三五”期间O ₃ 污染特征和驱动因子	李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟赞, 郑乃源, 杨宁 (4241)
基于随机森林的南京市PM _{2.5} 和O ₃ 对减排的响应	尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)
基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化	吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓炯, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)
污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响	钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)
2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析	郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)
滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源	孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)
重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价	谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 王丹尼, 王志恒 (4304)
衡水市桃城区浅层地下水咸化成因	何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)
吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价	白凡, 周金龙, 周殷竹, 韩双宝, 孙英 (4325)
金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性	丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇诚, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)
白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征	程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)
基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制	朱奔, 叶建峰, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)
甾体激素在污水处理厂的赋存特征和行为归趋	刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)
博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价	郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)
太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价	吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)
雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价	郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)
基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析	段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)
锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价	余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)
老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价	王莹, 董爱俊, 杨建峰, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)
畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估	丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新亮, 曾巧云 (4440)
地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究	简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)
微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响	马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)
施加Fe ₃ O ₄ /桑树杆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响	阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)
生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制	张丽, 李如霞, 何玉奎, 姚彦坡, 林大松 (4479)
不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响	李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)
椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响	侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)
生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响	冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)
改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应	陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)
改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响	由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)
化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险	赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)
污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失	张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)
化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响	谢军, 王子芳, 王莹, 熊子怡, 高明 (4565)
黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测	刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)
微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (4585)
高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析	姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)
土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响	李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)
中国省域碳达峰路径与政策	苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)
基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制	钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 邹娜, 封强, 傅泽强 (4637)
不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析	刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘锦, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)
中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估	陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)
陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟	古圳威, 刘京, 陈怡, 卢新冉, 王思轶 (4666)
气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响	李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)
降水变化下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸	王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)
水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响	秦纪法, 张佳彭, 桑变, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)
中国省域土壤重金属空间分布特征及分区分区管控对策	石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)
壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议	洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)
微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展	张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圆, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)
生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展	周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)
铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展	魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)
畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术进展	安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)
《环境科学》征订启事(4230)	《环境科学》征稿简则(4303)
信息(4506, 4678, 4741)	

畜禽粪便污染的环境风险与资源化处理技术分析

安婧¹, 丁子明^{1,2}, 高程程^{1,2}, 胡芳雨^{1,2}, 魏树和¹

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所污染生态与环境工程重点实验室, 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 畜禽养殖业飞速发展大力促进了我国农村经济的繁荣振兴,但同时出现的畜禽粪便排放量大、处理率低和易造成环境污染等问题也日益突出。在总结我国畜禽粪便排放现状的基础上,系统分析了畜禽粪便中主要环境污染物及其在土壤、水和大气等介质中的赋存、迁移转化等污染特征,并以重金属和抗生素为特征污染物对畜禽粪便农用的环境风险评估方法与风险等级进行了阐述;对比分析了国内外常用的畜禽粪便无害化和资源化处理技术,并评估了热化学转化技术和生物技术等在畜禽粪便能源化和肥料化处理方面的发展前景和应用价值。此外,探讨了目前畜禽粪便污染治理工作中存在的常见问题,并展望了畜禽粪便资源化处理技术未来的发展方向。

关键词: 畜禽粪便; 环境污染; 生态风险; 无害化处理; 资源化利用

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4764-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202209018

Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology

AN Jing¹, DING Zi-ming^{1,2}, GAO Cheng-cheng^{1,2}, HU Fang-yu^{1,2}, WEI Shu-he¹

(1. Key Laboratory of Pollution Ecology and Environmental Engineering, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Rapid development of the livestock and poultry industry has greatly promoted the rural economic prosperity of China. However, the problems resulting from the livestock manure, such as large emissions, low utilization rate, and environmental pollution are also becoming increasingly serious. Based on the current situation of livestock manure discharge in China, the typical contaminants in livestock manure and their pollution characteristics in soil, water, and air were systematically analyzed in this study. Taking heavy metals and antibiotics as the characteristic pollutants, the common risk assessment methods for livestock manure pollution were described. Moreover, the main harmless disposal and recycling treatment technologies of livestock and poultry manure at home and abroad were compared and analyzed. The application prospect and value of these technologies such as the thermochemical conversion method and the biological method in energization or fertilization were evaluated. Furthermore, the prominent problems in the pollution control of livestock manure are discussed, and the development trends in the resource treatment technology of livestock manure were also prospected.

Key words: livestock manure; environmental pollution; ecological risk; innocuous management; resource utilization

改革开放以来,我国畜牧养殖业逐步从以家庭为单位的散养模式向规模化和集约化养殖方式转变,极大程度地提高了畜牧业的生产力,使其总产值占比提高了 13.3%^[1]。据统计,2020 年我国生猪、牛和羊出栏量分别为 52 704、4 565 和 31 941 万头,禽类出栏量 155.7 亿只,总产值超过 4 万亿元^[2]。畜禽养殖密集区主要集中在中东部地区,其中江苏、山东和河北等地的禽蛋类生产量较大,河南和山东等省份的生猪养殖较为集中;而放牧牲畜则主要集中在新疆、宁夏、甘肃、西藏和内蒙古等西北部地区^[3]。规模化畜禽养殖的飞速发展,为这些地区的经济和社会发展注入了强劲动力,但随之产生的大量未经有效处理的畜禽粪便所带来的环境污染问题也日益突出。我国畜禽养殖呈现东部密集西部稀疏的特点,地区畜禽养殖分布不均,布局不均衡,特别是养殖大省没有足够的农地匹配,导致畜禽粪便利用不畅^[3]。根据全国畜牧总站以及国家统计局最新畜禽存栏数据测算,2021 年我国畜禽粪便总排放量约 39 亿 t,其中生猪粪污年排放量约 19 亿 t,占畜禽粪

污总量的 49%;其次是牛粪和家禽粪污,两者排放量分别为 14 亿 t 和 6 亿 t^[4]。

目前,我国畜禽粪便主要采用好氧堆肥法和厌氧沼气池法进行处理,两者各有利弊。好氧堆肥法操作简单,但存在占地面积大、处理时间长等局限性^[5];厌氧沼气池法对畜禽粪便的消纳量大于好氧堆肥法,但会产生难以处理的沼液沼渣^[6]。然而,这两种最为常用的粪肥处理技术尚不能完全满足我国日渐增长的畜禽粪便排放量,仍有大量畜禽粪便未进行有效处理。据报道,我国每年畜禽粪便综合利用率不到 60%,未经妥善处理的畜禽粪污高达 15.6 亿 t^[7]。以上畜禽粪污不仅占用大量土地资源,还会将残留在其中的毒害物质通过多种途径输入到土壤、地表水和大气,甚至地下水中,造成区域环境污染,并威胁人类健康^[8]。

收稿日期: 2022-09-02; 修订日期: 2022-11-07

基金项目: 黑土地保护与利用科技创新工程专项(XDA28010503); 国家重点研发计划项目(2019YFC1804101); 国家自然科学基金项目(31971515); 中国科学院沈阳应用生态研究所重大项目(1AEMP202201)

作者简介: 安婧(1982~),女,博士,研究员,主要研究方向为污染生态过程与农业废弃物资源化利用, E-mail: anjing@iae.ac.cn

因此,研发高效节能的畜禽粪便处理技术,使畜禽粪便减量化、无害化和资源化,防止和消除畜禽粪便污染,对于保护城乡生态环境、推动现代农业产业进步和发展循环经济具有积极意义.

1 畜禽粪便中主要污染物

1.1 氮磷

畜禽粪便中含有丰富的氮磷,2020 年我国畜禽养殖业排放总氮(TN)约 60 万 t 和总磷(TP)约 12 万 t^[9]. 动物种类不同,其粪便中含有的氮磷总量也有所差异. 有研究表明,奶牛粪便中 ω (TN) 和 ω (TP) 范围分别为 0.32 ~ 4.13 kg·t⁻¹ 和 0.22 ~ 8.74 kg·t⁻¹,猪粪中 ω (TN) 和 ω (TP) 范围为 0.20 ~ 5.19 kg·t⁻¹ 和 0.39 ~ 9.35 kg·t⁻¹,而鸡粪中 ω (TN) 和 ω (TP) 要显著高于牛粪和猪粪,范围分别可达 4 ~ 8 kg·t⁻¹ 和 2 ~ 6 kg·t⁻¹ (表 1),这与不同类别禽畜体内营养吸收系统的差异性有关^[10]. 以禽类养殖为例,鸡的消化道内基本上不存在消化饲料粗纤维的酶,饲料中的粗纤维主要靠盲肠中的微生物分解. 由于鸡小肠内容物仅少量通过盲肠且停留时间短,使得微生物对粗纤维的消化能力受限^[10],故鸡粪中 TN 和 TP 含量更高.

表 1 畜禽粪便氮磷污染物含量/kg·t⁻¹

Table 1 Nitrogen and phosphorus pollutant concentration from livestock manure/kg·t⁻¹

项目	ω			文献
	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N	
猪粪	5.88	3.41	3.08	[10]
牛粪	4.37	1.18	1.71	[11]
羊粪	7.50	2.60	0.80	[12]
鸡粪	9.84	5.37	4.78	[12]

有研究表明,畜禽粪便中的氮主要以负三价的 NH₄⁺-N 和正五价的 NO₃⁻-N 为主,而磷则以正五价的磷酸盐为主^[13]. 畜禽粪便中氮磷的污染途径主要是通过渗透和雨水侵蚀^[14],如图 1 所示,TN 的损失主

要来自于 NH₄⁺-N 的渗透损失,少量 NO₃⁻-N 转化为 NH₃ 扩散到大气中; TP 的损失主要依赖于降雨侵蚀,在短时降雨的条件下颗粒态磷(AP)为主要损失形态,在雨季,磷的主要损失形态为可溶性磷(SP).

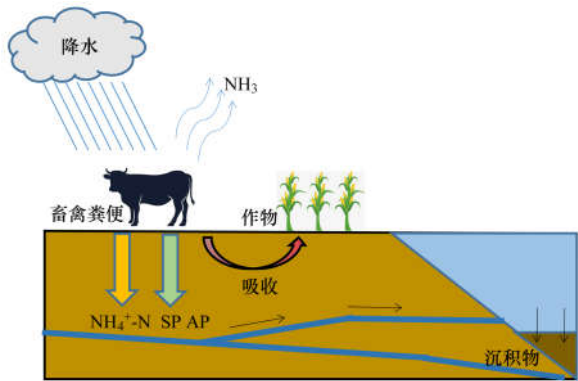


图 1 畜禽粪便氮磷迁移转化示意

Fig. 1 Schematic representation of nitrogen and phosphorus transport and transformation in livestock manure

1.2 重金属

畜禽粪便中重金属的检出率较高,镉(Cd)、锌(Zn)、铜(Cu)、铅(Pb)、铬(Cr)、砷(As)、汞(Hg)和镍(Ni)等在畜禽粪便样品中均有检出(表 2). 畜禽粪便中 Zn 的检出量较高,平均值范围可达 178.83 ~ 1 019.98 mg·kg⁻¹,尤其是在猪粪中的残留较为突出. Li 等^[15]研究发现,在生猪粪便样品中 Zn 的检出量可高达 4 638.72 mg·kg⁻¹. 除 Zn 之外,Cu 和 Cr 在畜禽粪便中的检出率和检出量也较为显著,两者的检出量平均值范围分别可达 56.93 ~ 531.37 mg·kg⁻¹ 和 12.27 ~ 58.93 mg·kg⁻¹. 畜禽粪便中高含量的 Zn 和 Cu 等重金属残留与这些元素在动物饲料中的大量添加有关^[16]. 有研究表明^[16],各种饲料中的 Zn 和 Cu 的添加含量通常可达数十至数百 mg·kg⁻¹,在一些饲料中甚至可高达数千 mg·kg⁻¹. 与 Zn 和 Cu 相比,Pb、Cd、Hg 和 As 含量相对较低,但是这些元素的生态毒性效应较大,给土壤生态系统造成的潜在生态风险也较高^[17].

表 2 不同畜禽粪便中重金属含量平均值/mg·kg⁻¹

Table 2 Average concentration of heavy metals in livestock manure/mg·kg⁻¹

项目	ω								文献
	Zn	Cu	Pb	Cd	Cr	Hg	As	Ni	
猪粪	1 019.98	531.37	8.63	2.97	26.80	0.10	16.47	10.69	[18]
牛粪	221.27	56.93	11.72	0.84	24.53	0.12	2.09	10.10	[18]
羊粪	178.83	60.89	11.14	1.09	12.27	0.78	1.53	7.62	[19]
鸡粪	346.17	96.05	12.43	1.34	58.93	0.13	6.88	13.93	[20]
鸭粪	339.11	71.78	14.47	0.97	30.37	0.05	3.99	10.77	[20]

动物类型对其粪便中残留的重金属种类和含量也具有一定的影响. 有研究表明^[21],猪粪和鸡粪中重金属含量较高,其中 Cu 和 Zn 超标率分别可高达

69.0% 和 66.0%. 相对于猪粪和鸡粪,牛粪和羊粪中重金属检出率和检出量较低^[22]. 这可能是由于不同种类动物的养殖方式不同导致的,特别是饲料配

比上的差异可直接影响畜禽粪便中重金属的残留。在中国,生产和使用的鸡饲料和猪饲料中添加的 Zn 和 Cu 含量较高,而牛羊饲料配比中 Zn 和 Cu 的添加量则相对较低^[23]。

1.3 抗生素及抗性基因

畜禽养殖业对抗生素的消耗十分巨大,几乎是人类医用抗生素用量的两倍^[24]。2020 年我国用于畜牧业生产(猪、牛和家禽)的抗生素总量为 16 万 t,且随着畜牧业产能的提升呈逐年上升趋势^[25]。抗生素作为抗菌剂、生长促进剂和疫苗等进入畜禽体内后,在动物肠道中的吸附性较弱,仅有小部分抗生素可以被代谢和吸收,50%~90% 的抗生素将伴随粪便和尿液排出体外^[25]。国内外已有大量文献报道了畜禽粪便中抗生素残留情况,其中检出率较高的抗生素种类主要有四环素类、磺胺类和氟喹诺酮类等。这些抗生素均为广谱抗菌类药物,在动物饲养中常用来防止各类细菌性感染、立克次体病、衣原体病和支原体病等。有研究发现^[26,27],猪粪和鸡粪中四环素类含量平均值分别为 $8\,963\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $9\,669\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,磺胺类含量平均值分别为 $2\,279\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $4\,368\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,氟喹诺酮类含量平均值分别为 $628\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1\,680\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Martínez-Carballo 等^[28]研究证实,大密度养殖和抗生素过量使用是四环素类和磺胺类药物在猪粪和鸡粪中残留的主要原因。反刍动物(牛和羊等)由于消化生理与单胃动物差异较大,抗生素体内停留时间和吸收率大于猪和禽类,因此牛粪中检出四环素类、磺胺类和氟喹诺酮类抗生素含量平均值明显低于猪粪和鸡粪,分别为 563 、 41 和 $709\ \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[29]。

抗生素的长期残留会产生选择性压力,诱导产生抗生素抗性基因(ARGs)、可移动基因元件(MGEs)和抗生素抗性细菌(ARB)^[30]。有研究表明^[28],环境中四环素类、磺胺类和氟喹诺酮类等 ARGs 在畜禽粪便中的多样性和丰度均较为突出,这与畜禽粪便中抗生素的污染种类与浓度密切相关。Mu 等^[31]调查了我国北方多个畜禽养殖场畜禽粪便中 ARGs 的种类和丰度,发现不同畜禽粪便中 ARGs 含量的总体趋势为:鸡粪>猪粪>牛粪,其中四环素类和磺胺类 ARGs 多样性和丰度较为突出,两者的 ARGs 相对丰度分别可达 10^{-6} ~ 10^{-3} 和 10^{-5} ~ 10^{-2} 。ARGs 给生态系统带来的风险比抗生素本身更大。有研究表明,与牲畜相关的 ARB 和 ARGs 在动物和人类中的流行率之间存在密切联系^[32]。因此,抗生素及其抗性基因对生态环境和人类健康的潜在风险已经成为全球关注的热点。

1.4 病原微生物

畜禽粪便是病原微生物繁衍的温床,有研究表明^[33],畜禽粪便中含有大量的病毒、致病菌和寄生虫卵等。据统计,每年随畜禽粪便排至环境中的隐孢子虫卵囊约 3.2×10^{23} 个,平均每 mL 粪尿混合物含有 33 万个大肠杆菌和 69 万个大肠球菌,每升畜禽粪污中含有 190 个蛔虫卵和 100 个线虫卵^[34]。有研究证明,多数致病微生物及寄生虫卵在未经处理的畜禽粪便中可长期生存,如沙门氏菌和李斯特菌等细菌病原体能够持续生存 120 d,而蛔虫卵能够存活数年^[35]。畜禽粪便中含有多种可适应宿主或人畜共患的病原体,如大肠杆菌、沙门氏菌、轮状病毒和贾第虫等,直接在土地上施用畜禽粪便将对环境和健康构成威胁^[35]。以上微生物可能会污染粮食作物,通过食物链影响人类健康,甚至可能引发严重疾病,如李氏杆菌不仅能引起牛、羊流产和死胎,还能感染婴儿、孕妇、老年人和免疫功能较弱的人群,引发败血症和脑膜炎等^[33]。

1.5 恶臭及温室气体

畜禽粪便长期堆放过程中会向大气中持续释放具有恶臭的气体,包括 NH_3 、 H_2S 、挥发性脂肪酸(VFAs)和对-甲酚等。其中,对-甲酚浓度高达 $1.228\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[36]。与猪粪和牛粪相比,家禽粪便释放 NH_3 与有机硫化物的浓度相对较高,这可能与家禽饲料添加蛋氨酸以预防疾病有关。有研究表明,在畜禽粪便堆肥发酵过程中 $\varphi(\text{NH}_3)$ 可达 $4\,100\times 10^{-6}$,其可在高温环境下产生甲基硫醇和二甲基二硫醚等有害气体^[37]。这些气体不但气味难闻,而且具有刺激性,会使人感到眼睛刺痛、头痛和呼吸困难,不仅严重影响区域环境质量,造成空气污染,还会增加呼吸道疾病感染率,给人类健康带来威胁^[38]。更为重要的是,畜禽粪便长期堆放向大气中排放大量 CH_4 和 N_2O 等温室气体,有研究表明,两种温室气体的共同作用对预期全球变暖贡献率约为 20%^[38]。随着我国对“双碳”目标的不断重视,提升畜禽粪污无害化处理率,降低温室气体排放量,也是一项迫在眉睫的工作。

2 畜禽粪便的环境污染特征

2.1 土壤污染

由于畜禽粪肥可分解产生适宜的腐殖质,可有效改善耕地土壤肥力,促进作物生长,因此被大量施用于农田中。然而,过度施用或施用未经处理的畜禽粪便会影响土壤功能,降低区域土壤环境质量。有研究发现,过度施用畜禽粪肥会使土壤中钾盐和钠盐含量升高,进而对某些土壤微孔结构产生反聚作用,

使微孔数量减少,造成土壤通透性下降,破坏土壤结构^[39].施用未经无害化处理的畜禽粪肥,还会将粪肥中重金属、抗生素和病原微生物等毒害物质释放到土壤环境中.有研究表明,施用畜禽粪肥的土壤中重金属 Cu 和 Zn 等含量显著升高,中国的农田土壤中 69% 的 Cu 和 51% 的 Zn 来自于畜禽粪便^[40].此外,粪肥的长期施用还会增加土壤中抗生素残留浓度,增加 ARGs 污染风险^[41].Zhang 等^[42]研究发现,长期施用畜禽粪便的农田中土霉素含量平均值为 $8\,400\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.畜禽粪肥的施用会显著改变土壤微生物群落和结构多样性.李基棕等^[43]对 2 个规模化猪场畜禽粪便堆放地周边土壤的微生物群落进行分析,发现土壤样品中大肠杆菌、沙门氏菌、链球菌、葡萄球菌、芽孢杆菌和巴氏杆菌等致病菌多为优势菌群.这些优势菌群具有抗逆性强、繁殖快和易迁移等特点,通过土壤进入其他环境介质的致病菌,将提高人畜疫病感染率,极大影响养殖业发展与人类健康.

2.2 水体污染

畜禽粪便中携带的大量氮磷等营养元素可以通过多种途径进入到水体环境中^[44].有研究发现^[45],猪粪中氮和磷的量分别占总量的 6% 和 4%,进入地表水体的畜禽粪污将携带大量氮素磷素,随着沉积作用进入底泥,并长期存在于水体中.一般认为,当水体中总氮超过 $0.3\,\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、总磷超过 $0.02\,\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,水体将处于富营养化状态.水体中藻类植物大量繁殖,将导致水体溶解氧下降,引发鱼类大量死亡,形成黑臭水体,极大影响饮水安全,破坏水体的生态功能^[46].汤秋香等^[47]研究证实,对湖泊水体来说,畜禽粪便是氮和病原微生物的主要来源.根据对洱海北部地区畜禽粪便的调查,洱海北部地区每年产奶牛粪约 130 万 t,猪粪约 28 万 t,目前由于缺乏有效的收集和处理措施,进一步加剧了洱海的富营养化.而水体质量下降将吸引大量蚊蝇产卵繁殖,病原微生物的存活时间、传染范围将得到显著增强.例如,畜禽粪便中常见优势菌爱尔托型霍乱弧菌,进入水体后存活时间明显延长,在河水、井水、池塘水和海水中可存活 1~3 周,甚至更长,有时在局部自然水中可越冬.又如沙门氏菌,在自然环境的粪便中可存活 1~2 个月,在水中不易繁殖,但仍可生存 2~3 周.畜禽粪污进入水体将扩大污染范围,增加生态风险,为污染防控与处理造成困难.

2.3 空气污染和气候影响

与工业排放不同,畜牧业的气味排放具有浓度低、类型复杂和分布不均的特点^[48].Avery 等^[49]研究发现,畜禽粪便产生的恶臭将使人类分泌唾液中免疫球蛋白 A 的含量降低,并影响其产生效率进而

影响黏膜的免疫功能.畜禽粪便产生的恶臭气体中含有数百种化合物,其中 NH_3 、 H_2S 、VFAs 和对-甲酚在各类养殖场中均有检出^[37].以 NH_3 为例,畜禽粪便存放和堆肥可产生大量 NH_3 ,将直接和间接地影响人类健康.例如,刺激皮肤和黏膜,长期接触将增加患黏膜刺痛、头痛和呼吸系统疾病的风险; NH_3 能够促进大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的形成,进而损害人体肺功能和心血管系统^[50].

此外,畜禽粪便对温室效应有着不可忽视的贡献.有研究表明^[51],畜禽粪便产生的 CH_4 和 N_2O 约占畜牧业排放温室气体总量的 24%.根据《京都议定书》^[52]提出的温室气体名录,其中 CH_4 的全球升温效应是等体积 CO_2 的 20~84 倍, N_2O 的全球升温效应是等体积 CO_2 的 150~310 倍.为实现 2030 年前碳排放达峰和 2060 年前碳中和目标,农业减碳是我国减碳行动中不可或缺的一部分,而畜禽粪便的减碳工作则是重中之重,面临着更为严峻的挑战.

2.4 农产品污染

畜禽粪便中各类污染物会随畜禽有机肥的施用而进入农作物体内,进而对作物生长发育及其营养品质造成不良影响.有研究发现^[53],在常规施肥和施加畜禽粪肥的条件下,在小麦的茎叶、颖壳和籽粒中均检测到了不同含量的 Cu、Zn 和 As.其中籽粒样品中检测到的重金属含量 ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最高,分别为 6 093.57 (Cu)、63 985.88 (Zn) 和 30.41 (As).而且,随着畜禽粪肥施用比例的提高,小麦体内各部位检出重金属含量也显著提高^[53].作物体内的重金属,尤其是可食部位残留的重金属,可通过食物链进入人体,并产生一系列的毒害效应,如破坏肝肾功能和诱发心脑血管疾病等,进而对人类健康造成严重威胁.

此外,畜禽粪便中的抗生素也会随着有机肥施用而被蔬菜等作物吸收.有研究表明,白萝卜和小白菜按施猪粪 $15\sim 22.5\,\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 计算,小白菜种植 35 d 收获时,其根和茎叶中四环素含量分别为 $51.56\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $44.83\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土霉素含量分别为 $31.89\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $27.66\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;白萝卜种植 50 d 收获时,其皮肉和茎叶中四环素含量分别为 $9.02\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $13.93\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,土霉素含量分别为 $11.49\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $14.39\,\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[54].畜禽粪便中的抗生素经由食物链进入人体,可引起人体的过敏反应、干扰免疫系统和内分泌系统,甚至产生致癌、致畸等毒理效应,危害人体健康^[55].

3 畜禽粪便的生态风险评估

3.1 基于畜禽粪便农用的重金属污染风险评估

目前针对畜禽粪便中重金属污染的生态风险评

估主要采用地质累积指数(GAI)和潜在生态风险指数(PERI)等方法。

GAI 指数考虑了自然地质过程造成的背景值的影响,同时充分注意了人为活动对重金属污染的影响,反映了重金属分布的自然变化特征,而且可以判别人为活动对环境的影响,是区分人为活动影响的重要参数.该方法的计算公式为^[56]:

$$GAI = \log_2 (C_n / 1.5 B_n)$$

式中, C_n 为特定重金属的含量, B_n 为重金属背景值,畜禽粪便中常见重金属如 Cd、Cr、Zn、Cu 和 Pb 的 B_n 值依次为 0.08、64、90、25 和 26 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 计算所得 GAI 值根据污染程度将分为 7 个等级: $GAI \leq 0$ 表示受测样品无污染; $0 < GAI \leq 1$ 表示样品轻微污染; $1 < GAI \leq 2$ 表示样品轻微至中度污染; $2 < GAI \leq 3$ 表示样品中度污染; $3 < GAI \leq 4$ 表示样品中度至重度污染; $4 < GAI \leq 5$ 表示样品重度至极度污染; $GAI > 5$ 表示样品极度污染。

Wang 等^[57]利用 GAI 指数评估了畜禽粪便衍生生物炭中重金属的污染程度,结果表明,羊粪衍生生物炭中 Cr、Pb、Zn 和 Cu 的 GAI 值均小于零,属于低风险;猪粪衍生生物炭中重金属 GAI 值结果依次是: $\text{Cu}(2.60) > \text{Cd}(1.87) > \text{Zn}(1.81)$. 同时指出, GAI 值与热解温度有关,当裂解温度较高时 (800°C) 热解可以有效降低污染等级。

PERI 指数是一种可以反映单个重金属污染物的污染水平,反映多个重金属污染物的联合效应的方法.综合考虑了多元素协同作用、毒性水平、污染浓度以及环境对重金属污染敏感性等因素,该指数可以解释重金属的毒性、敏感性和含量.因此在环境风险评价中得到了广泛应用,该指数的计算公式为^[58]:

$$C_r^i = C_D^i / C_R^i$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i$$

$$\text{FERI} = \sum_{i=1}^n E_r^i$$

式中, C_r^i 为给定重金属的污染系数, C_D^i 为样品中重金属的含量, C_R^i 为重金属背景值, T_r^i 为重金属毒性反应因子, PERI 为整个污染造成的潜在风险. Cd、Cr、Zn、Cu 和 Pb 的毒性反应因子为 30、2、1、5 和 5. 土壤中 Cd、Cr、Zn、Cu 和 Pb 背景值分别为 0.08、64、90、25 和 26 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与 GAI 方法中 B_n 相同. 在反应单一重金属污染物的污染水平时, 计算所得 $E_r^i \leq 5$ 时则表示低风险; $5 < E_r^i \leq 10$ 表示中等风险; $10 < E_r^i \leq 20$ 表示较大风险; $20 < E_r^i \leq 40$ 表示高风险; $E_r^i > 40$ 表示极高风险. 在反映多个重金属污染水平时, 需要利用 PERI 指数分析, $\text{RI} < 105$ 表

示生态风险低; $105 \leq \text{RI} < 210$ 表示生态风险中等; $210 \leq \text{RI} < 420$ 表示生态风险较大; $\text{RI} \geq 420$ 表示生态风险极高。

Wang 等^[59]利用 PERI 指数法有效判断了江西省猪粪灌溉农田土壤中重金属 (Cu、Pb、Cd、Zn、As 和 Cr) 的浓度所造成的生态风险,在选取的 11 处样点中 PERI 最大值为 87.08,生态风险指数表明,所有采样点均处于低风险水平,但通过分析最大样点各类重金属 E_r^i 值可以发现, Cd 对此样点的 PERI 值有显著贡献,因此,该场地的重金属污染应引起高度重视。

3.2 基于畜禽粪便农用的抗生素污染风险评估

风险商(RQ)是暴露的点估计值和影响的点估计值的比率,通常用于评估抗生素对生态系统的潜在生态风险^[60]. RQ 值分为 4 个风险水平:不显著风险 (< 0.01)、低风险 ($0.01 \sim 0.1$)、中等风险 ($0.1 \sim 1$) 和高风险 (> 1). 通过预测的土壤环境含量 (PECs) 和预测的终点无影响含量 (PNECs) 计算^[61]:

$$RQ = \text{PECs} / \text{PNECs}$$

式中, PECs 为土壤中预测的环境含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 用于推导 PEC 的公式如下:

$$\text{PECs} = C_A M / (\rho \times 10 \times D)$$

式中, C_A 为受试抗生素的含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); M 为每年施用的动物粪便或基于粪便的肥料量 (干重) ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$), 鲜重设置为 $100 (\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$; ρ 为根据之前的研究得出的 $1.3 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的农业土壤容重^[62]; D 为施用肥料后抗生素可能穿透的 0.2 m 土壤深度; 10 是转换系数. 其中粪肥含水率分别为 44.54% (牛粪)、38.62% (猪粪)、27.77% (鸡粪) 和 34.77% (鸭粪)^[63]. Zhou 等^[64]利用风险商(RQ)评估了畜禽粪便施用后残留抗生素对小麦幼苗的生态风险,结果表明磺胺二甲嘧啶 (SM2)、磺胺氯吡嗪 (SPD) 和环丙沙星 (CIP) 的 RQ 值大于 1, 表明在土壤中发现的这些抗生素的浓度对作物的潜在风险较高。

4 畜禽粪便无害化/资源化技术

4.1 肥料化

堆肥法是当前最广泛使用的畜禽养殖废弃物管理方案之一,该法具有投资低和操作简单等优点^[65]. 然而,在堆肥过程中存在的氮素损失、重金属生物有效性高、有机质腐殖质含量低、抗生素残留、ARGs 的潜在风险和恶臭及温室气体排放等问题,在一定程度上限制了堆肥技术的产业化推广. 为了降低这些不利因素的影响,可以通过外源添加功

能材料或助剂,提高畜禽粪便的有效处理率,提升肥料质量。例如,Wang 等^[66]研究发现,在猪粪堆肥过程中添加沸石、木醋和生物炭的混合物可以减少氨挥发、温室气体排放和氮素损失。Yuan 等^[67]在堆料中添加过磷酸钙可有效减少氨气排放,添加过磷酸钙有助于提高最终产品的营养含量。Awasthi 等^[68]通过添加生物炭和微生物菌剂的方式抑制了堆体气体排放,减少了堆肥过程中的碳氮损失,提高了碳氮固存。

除了添加物理和化学材料,在堆肥过程中添加动物或微生物助剂也可有效缩短堆肥周期,提升堆肥质量。Hanc 等^[69]研究了不同品种蚯蚓添加对堆肥过程的促进作用,结果表明蚯蚓堆肥将提升堆体成熟度,相比传统堆肥技术,干物质量和碳氮比等有明显提高。Soobhany 等^[70]的研究也证实,蚯蚓与有机或无机助剂协同作用可以提高营养物质的生物利用率、有机质矿化率、碳和氮的固存,同时减少气体排放,缩短堆肥周期。虽然与传统堆肥法相比,蚯蚓堆肥可以提高粪便的回收率,且节省空间,但存在着无法完全消毒和一次性投资较高等问题,需要逐步解决。此外,添加微生物助剂可以促进纤维素降解,加速腐殖质的形成,提升肥料品质^[71]。Awasthi 等^[72]研究发现,精确筛选的黑曲霉(*Aspergillus niger* MTCC 1344)、木霉(*Trichoderma* MTCC 793)和黄曲霉(*Aspergillus flavus* MTCC 1425)能显著提高堆肥过程中的有机质矿化,明显缩短堆肥周期,堆肥的最终产物成熟良好,碳氮比稳定(≤ 25),但对潜在病原微生物的处理效果较差和堆体保温要求较高等问题仍需进一步研究解决。

4.2 饲料化

畜禽粪便因含有大量粗蛋白和钙等营养物质而被考虑可向饲料化应用的方向发展。如何有效回收营养元素是限制畜禽粪便饲料化应用的技术难点和重点。由于鸡的肠道短,饲料中约 70% 的营养物质没有经过吸收即被排出体外,因此,鸡粪的营养价值较高,在饲料化利用方面最具有应用前景。为提高饲料的适口性,通常是把秸秆、草料或其他粗饲料和畜禽粪便一起青贮,通过青贮法可以有效杀死虫卵和病原菌,减少粗蛋白流失。有研究发现,青贮完成的饲料可以保存 10 a 以上^[73]。但是,青贮法的时间较长,普通青贮饲料一般需要 40 d 以上,而豆科植物则需要 50 ~ 60 d,在一定程度上增加了时间成本。为了克服青贮法的时间成本问题,有学者研发了利用蝇蛆强化畜禽粪便饲料化的处理技术。例如,余桂平等^[74]利用蝇蛆取食利用粪便腐败物质的生物特性,生产蝇蛆产品,使粪便中的物质能量充分转化成

虫体蛋白质和脂肪加以回收。结果表明该方法可大幅缩短处理时间,并增加动物蛋白含量,快速消耗粪污,且具有更高的经济价值。然而在畜禽粪便饲料化的过程中,若技术处理手段不达标,极易产生二次污染与人畜病害,具有一定的安全隐患^[75],并且由于饲料化环境效益和经济效益较小,应用方面仍将受到限制。

4.3 能源化

能源化技术是当前最受关注的畜禽粪便资源利用的发展方向。能源化技术的研发和应用有利于“减污降碳、协同增效”工作的实施,为我国经济社会发展和实现全面绿色转型贡献力量。当前能源化技术研究较多的主要有厌氧发酵技术、水热碳化技术、气化燃烧技术和柴油制备技术等。

4.3.1 厌氧发酵技术

厌氧发酵技术是在厌氧条件下,将有机分子生物转化为沼气的传统技术,沼气主要由 CH_4 和 CO_2 组成,国内外普遍利用该技术处理处置集约化养殖场的畜禽粪污。由于畜禽粪便存在木质纤维和生物质纤维等顽固结构,传统厌氧发酵技术处理效率往往较低^[76]。为了提高处理效率,有学者提出利用不同基质与畜禽粪便共消化以提高工艺效率^[77],在德国,大多数使用粪便的沼气厂通常使用农业残留物进行共消化,例如玉米、草料和青贮饲料^[78]。在基质的选择上,Tsapekos 等^[79]提出了使用城市生物废物与畜禽粪便进行共消化的方案,可以充分发挥两种基质的优势:城市生物垃圾将提升甲烷产出,同时畜禽粪便良好的缓冲能力能够避免反应器酸化。

4.3.2 水热碳化技术

热解碳化技术主要是利用畜禽粪便制作生物炭。畜禽粪便富含纤维素木质素,具有生产生物炭的潜力,学者们考虑将畜禽粪便作为原料生产生物炭。Sarfaraz 等^[80]研究发现,在理想氧气条件下,牛粪和家禽粪便生物炭的转化效率最高,分别为 58% 和 57%,并随热解温度的升高产率降低。该技术不仅可以实现对畜禽粪便的大规模减量化,还可以发挥生物炭在生态环境领域的应用潜力。生物炭具有多孔结构、丰富的官能团和较大的芳香表面,对有机和无机污染物具有较高的吸附固定能力,并提高营养物质的长期缓释能力^[81]。然而,该畜禽粪污源生物炭生产与应用过程中仍存在一定的技术问题。例如,热解碳化过程中氮素会流失,需要全过程严格控温以保证产品中碳氮磷元素的比例和含量;热解时间和氧气通量对生物炭材料的制备也具有明显的影响,通常需要采用慢速热解以减少原料中磷和其他微量元素的损失。与传统热解碳化技术的 300 ~

700℃热解温度相比,水热碳化技术是在相对温和的温度(180~250℃)下进行的热化学过程,与干法热解产生的生物炭相比,水热碳化技术生产的生物炭更接近煤炭,其结构的优势适用广泛,如碳固存、吸附剂、燃料和土壤添加剂^[82].而且,该技术在水中完成,不需要干燥过程,对于高水分含量的畜禽粪污来说,水热碳化技术具有更强的竞争力.

4.3.3 气化燃烧技术

畜禽粪便含有较高的热值,尤其是牛粪中粗纤维含量较高,具有成为燃料补充剂的潜力. Anukam等^[83]提出采用气化燃烧技术,在800~1000℃高温下引发部分氧化和分子解离过程,将生物质中储存的能量转化为清洁的合成气. Vamvuka等^[84]研究指出,可以利用畜禽粪便与其他高质量燃料共燃烧/气化技术来代替传统的燃烧或者气化方案,其优势在于气化和燃烧技术实现了畜禽粪便与农业废弃物的同时处理,减少空气污染,生产清洁能源等.然而此技术仍未解决畜禽粪便相对传统燃料存在大量不可燃成分的问题,畜禽粪便中特有的氯化物和碱在高温环境下对燃烧系统的钢制材料表面具有腐蚀作用^[85]. 气化燃烧技术是畜禽粪便处理技术的前沿探索,一些发达国家已经开展相关实验研究,但在我国相关研究仍较少,尽管在实际应用中仍然存在一些尚待解决的问题,然而气化燃烧技术仍然被认为是非常适合对牲畜粪便进行减量化和资源化利用的技术,具有十分广阔的应用前景.

4.3.4 生物柴油制备技术

生物柴油是通过食用作物、动物油和废弃食用油中所含脂质的酯交换而生产的^[86].为了将脂质转化为生物柴油,需要在醇存在下进行游离脂肪酸的酯化和甘油三酯的酯交换.通常,甲醇用作醇组分,用于在碱性或酸性催化剂下进行脂质酯交换^[87].由于鸡、羊和牛的粪便中含脂量较高,因此,有学者研究了利用畜禽粪便制作生物柴油的可能性.结果表明,将鸡粪、羊粪和牛粪干燥、均质后,在50℃下使用共溶剂(氯仿:甲醇=2:1)同时进行脂质提取和酯交换,可提取的生物柴油产量分别为上述3种干粪量的4%、6%和6.5%^[88].由于酯化反应对油脂提取物中的杂质(游离脂肪酸、水、其他有机和无机物种)高度敏感,因此猪粪中的生物柴油产量较低,为提高生物柴油产量, Kim等^[89]引入了热化学非催化酯交换反应,在此过程下油脂提取物在高温下(200~400℃)与甲醇和多孔材料二氧化硅快速转化为生物柴油,猪粪油脂酯交换制备生物柴油在不低于360℃的条件下的产率达到90%以上.该工艺还可将猪粪直接转化为生物柴油,无需提取油脂,

直接酯交换法生产生物柴油的最高产率高于94%^[89].

5 展望

随着党的十九大报告把生态文明建设提到了前所未有的高度,关于畜禽粪污风险监管、无害化和资源化等工作逐渐受到关注.国家多部门先后出台了《关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见》(2017年)^[90]、《关于进一步明确畜禽粪污还田利用要求强化养殖污染监管的通知》(2020年)^[91]和《“十四五”全国农业绿色发展规划》(2021年)^[92]等一系列政策法规,以不断完善制度体系,加大政策支持力度,以加快推进畜禽粪污资源化利用.但畜禽粪污监管与资源化技术研发方面仍有待进一步落实与细化.

首先,针对畜禽粪便源头收集工作存在不及时、不彻底和不完善的问题.政府职能部门应加大监管力度,对实行最佳畜禽粪便管理做法的养殖场提供经济奖励,分担技术成本,减轻养殖场资金压力,并对实行不安全、不完善的畜禽粪便处理处置的养殖场施加处罚.针对散户养殖应当细化各级政府的管理,以村庄为单位统一管理,将补贴政策落实到户,充分调动养殖户的积极性.

其次,畜禽粪污的无害化和资源化处理技术方面存在短板.例如,饲料化技术由于不能有效规避抗生素和病原微生物等风险而存在健康隐患;厌氧发酵技术仍存在着沼气产出率不足,且污水处理不达标的问题;现行的好氧堆肥技术氮损失较高,有明显的氨污染,且发酵热利用率低.因此,在改良传统方案与应用新兴技术的选择上应当因地制宜,提高处理效能.例如,可考虑将肥料管理纳入生物炼制概念,再加上肥料养分的综合回收和肥料管理规划,加快向循环生物经济迈进的步伐,使环境风险最小化,利润最大化.

此外,将畜牧业生产与作物种植联系起来也是一项具有发展前景的联合技术模式.制定更多的缓解战略,以满足不断增长的畜牧产品需求,同时尽量减少直接使用畜禽粪便对环境的影响,减少排泄物携带疾病的传播,减少排泄物中重金属的积累等.如稻鸭共作模式,利用鸭的杂食性,吃掉稻田内的杂草和害虫,由于水稻与杂草根系深度与生物量的明显差异,鸭的活动将刺激水稻根系,对水稻生长有促进作用,并会抑制杂草生长,同时对水稻虫害也有抑制作用,鸭的粪便还可以作为有机肥料被稻田利用.

我国农业生产者长久以来将注意力放在经济效益而忽视了利用畜禽粪便资源构建生态农业的长期

效益,当前尚未形成种植养殖相协调、生态循环可持续发展的农业体系。因此,未来的研究中要建立一个系统框架,综合技术、农学、环境学、经济与社会和健康安全等领域来解决和落实具体的方案和措施。中国具有极大的畜禽养殖市场,每年产生的畜禽粪便量十分巨大,如果可以结合畜禽粪便的结构组成与理化性质等特点,研发有针对性的高效粪污处理技术,不但可以消除粪污的生态环境风险,还可变废为宝,实现经济效益。

参考文献:

- [1] 王明利. 改革开放四十年我国畜牧业发展:成就、经验及未来趋势[J]. 农业经济问题, 2018, (8): 60-70.
Wang M L. China's livestock industry development: achievements, experiences and future trends [J]. Issues in Agricultural Economy, 2018, (8): 60-70.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [3] Ma L, Ma W Q, Velthof G L, *et al.* Modeling nutrient flows in the food chain of China[J]. Journal of Environmental Quality, 2010, **39**(4): 1279-1289.
- [4] 吴浩玮, 孙小淇, 梁博文, 等. 我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析[J]. 农业环境科学学报, 2020, **39**(6): 1168-1176.
Wu H W, Sun X Q, Liang B W, *et al.* Analysis of livestock and poultry manure pollution in China and its treatment and resource utilization[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, **39**(6): 1168-1176.
- [5] Jiang J S, Kang K, Chen D, *et al.* Impacts of delayed addition of N-rich and acidic substrates on nitrogen loss and compost quality during pig manure composting[J]. Waste Management, 2018, **72**: 161-167.
- [6] Tsapekos P, Kougiou P G, Treu L, *et al.* Process performance and comparative metagenomic analysis during co-digestion of manure and lignocellulosic biomass for biogas production[J]. Applied Energy, 2017, **185**: 126-135.
- [7] 李莉, 杨昕润, 何家俊, 等. 我国畜禽粪便资源化利用的现状与展望[J]. 中国奶牛, 2020, (11): 55-60.
Li L, Yang X J, He J J, *et al.* The present situation and prospect of utilization technology of animal manure resources[J]. China Dairy Cattle, 2020, (11): 55-60.
- [8] 刘晨阳, 马广旭, 刘春, 等. 畜禽粪便资源化利用研究综述与对策建议——基于供给与需求二维度视角[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2022, (2): 13-17, 25.
Liu C Y, Ma G X, Liu C, *et al.* Review and countermeasures on resource utilization of livestock and poultry manure——based on the two-dimensional perspective of supply and demand [J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2022, (2): 13-17, 25.
- [9] 张靖雨, 汪邦稳, 袁先江, 等. 安徽省畜禽养殖粪尿及养分含量时空分布特征[J]. 农业资源与环境学报, 2021, **38**(2): 295-304.
Zhang J Y, Wang B W, Yuan X J, *et al.* Spatial and temporal distribution features of livestock and poultry manure and nutrient content in Anhui Province[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, **38**(2): 295-304.
- [10] 吕宁, 张颖, 黄燕, 等. 新疆地区畜禽粪污环境效应及资源化利用价值估算[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2021, (20): 17-23.
Lyu N, Zhang Y, Huang Y, *et al.* Environmental effect of livestock and poultry manure and its energy utilization value estimation in Xinjiang region[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2021, (20): 17-23.
- [11] 郑微微, 沈贵银, 李冉. 畜禽粪便资源化利用现状、问题及对策——基于江苏省的调研[J]. 现代经济探讨, 2017, (2): 57-61, 82.
- [12] 姜茜, 王瑞波, 孙伟琳. 我国畜禽粪便资源化利用潜力分析及对策研究——基于商品有机肥利用角度[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2018, (4): 30-37.
Jiang Q, Wang R B, Sun W L. Potential evaluation and countermeasures on livestock manure resource utilization——based on perspective of commercial organic fertilizer utilization [J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2018, (4): 30-37.
- [13] Chang H C, Chou P Y, Cheng M P, *et al.* Phosphorus conversion during anaerobic digestion of high-calcium chicken manures and phosphorus recovery as struvite[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, **10**(3), doi: 10.1016/j.jece.2022.107615.
- [14] Costamagna P, Giordano A, Lazzarini Y, *et al.* Process of ammonia removal from anaerobic digestion and associated ammonium sulphate production: pilot plant demonstration[J]. Journal of Environmental Management, 2020, **259**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109841.
- [15] Li S H, Zou D S, Li L C, *et al.* Evolution of heavy metals during thermal treatment of manure: a critical review and outlooks[J]. Chemosphere, 2020, **247**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.125962.
- [16] Wang H, Dong Y H, Yang Y Y, *et al.* Changes in heavy metal contents in animal feeds and manures in an intensive animal production region of China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, **25**(12): 2435-2442.
- [17] Jensen J, Kyvsgaard N C, Battisti A, *et al.* Environmental and public health related risk of veterinary zinc in pig production—using Denmark as an example[J]. Environment International, 2018, **114**: 181-190.
- [18] 牛新胜, 巨晓棠. 我国有机肥料资源及利用[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, **23**(6): 1462-1479.
Niu X S, Ju X T. Organic fertilizer resources and utilization in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, **23**(6): 1462-1479.
- [19] Peng H, Chen Y L, Weng L P, *et al.* Comparisons of heavy metal input inventory in agricultural soils in north and South China: a review[J]. Science of the Total Environment, 2019, **660**: 776-786.
- [20] Liu W R, Zeng D, She L, *et al.* Comparisons of pollution characteristics, emission situations, and mass loads for heavy metals in the manures of different livestock and poultry in China [J]. Science of the Total Environment, 2020, **734**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139023.
- [21] 王玉军, 窦森, 李业东, 等. 鸡粪堆肥处理对重金属形态的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 913-917.
Wang Y J, Dou S, Li Y D, *et al.* Speciation change of heavy metals during composting process of chicken manure [J]. Environmental Science, 2009, **30**(3): 913-917.
- [22] 何其辉, 梁玉峰. 畜禽粪便中重金属来源及对土壤污染分析[J]. 农业与技术, 2017, **37**(4): 238-239.
- [23] Ni R X, Ma Y B. Current inventory and changes of the input/output balance of trace elements in farmland across China[J]. PLoS One, 2018, **13**(6), doi: 10.1371/journal.pone.0199460.

- [24] Aarestrup F. Get pigs off antibiotics [J]. *Nature*, 2012, **486** (7404): 465-466.
- [25] Cai Y J, Tang R G, Tian L L, *et al.* Environmental impacts of livestock excreta under increasing livestock production and management considerations: implications for developing countries [J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2021, **24**, doi: 10.1016/j.coesh.2021.100300.
- [26] Zhang H B, Luo Y M, Wu L H, *et al.* Residues and potential ecological risks of veterinary antibiotics in manures and composts associated with protected vegetable farming [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(8): 5908-5918.
- [27] Yang L B, Si B C, Tan X B, *et al.* Valorization of livestock manure for bioenergy production: A perspective on the fates and conversion of antibiotics [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, **183**, doi: 10.1016/j.resconrec.2022.106352.
- [28] Martínez-Carballo E, González-Barreiro C, Scharf S, *et al.* Environmental monitoring study of selected veterinary antibiotics in animal manure and soils in Austria [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **148**(2): 570-579.
- [29] Widyasari-Mehta A, Hartung S, Kreuzig R. From the application of antibiotics to antibiotic residues in liquid manures and digestates: a screening study in one European center of conventional pig husbandry [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **177**: 129-137.
- [30] Oberoi A S, Jia Y Y, Zhang H Q, *et al.* Insights into the fate and removal of antibiotics in engineered biological treatment systems: a critical review [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(13): 7234-7264.
- [31] Mu Q H, Li J, Sun Y X, *et al.* Occurrence of sulfonamide-, tetracycline-, plasmid-mediated quinolone-and macrolide-resistance genes in livestock feedlots in Northern China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(9): 6932-6940.
- [32] Ding D, Zhu J Y, Gao Y L, *et al.* Effect of cattle farm exposure on oropharyngeal and gut microbial communities and antibiotic resistance genes in workers [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150685.
- [33] Vermeulen L C, Benders J, Medema G, *et al.* Global cryptosporidium loads from livestock manure [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(15): 8663-8671.
- [34] Saha R, Dey N C, Rahman M, *et al.* Geogenic arsenic and microbial contamination in drinking water sources: exposure risks to the coastal population in Bangladesh [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2019, **7**, doi: 10.3389/fenvs.2019.00057.
- [35] Rahman A, Rahaman H. Contamination of arsenic, manganese and coliform bacteria in groundwater at Kushtia District, Bangladesh: human health vulnerabilities [J]. *Journal of Water and Health*, 2018, **16**(5): 782-795.
- [36] Melse R W, Hol J M G. Biofiltration of exhaust air from animal houses: evaluation of removal efficiencies and practical experiences with biobeds at three field sites [J]. *Biosystems Engineering*, 2017, **159**: 59-69.
- [37] 周忠强, 沈根祥, 徐昶, 等. 上海市典型畜禽养殖场恶臭污染物排放特征调查 [J]. *浙江农业学报*, 2019, **31**(5): 790-797.
- Zhou Z Q, Shen G X, Xu C, *et al.* Investigation into emission characteristics of odor pollutants in typical livestock and poultry farms in Shanghai [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, **31**(5): 790-797.
- [38] Wang C, Xi J Y, Hu H Y, *et al.* Effects of design parameters on performance and cost analysis of combined ultraviolet-biofilter systems treating gaseous chlorobenzene based on mathematical modeling [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2012, **6**(4): 588-594.
- [39] 赵青玲, 杨继涛, 李遂亮, 等. 畜禽粪便资源化利用技术的现状及展望 [J]. *河南农业大学学报*, 2003, **37**(2): 184-187.
- Zhao Q L, Yang J T, Li S L, *et al.* The present situation and prospect of resource technology on the feces of livestock and poultry [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2003, **37**(2): 184-187.
- [40] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, *et al.* An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(8): 2524-2530.
- [41] Xu Y G, Yu W T, Ma Q, *et al.* Occurrence of (fluoro) quinolones and (fluoro) quinolone resistance in soil receiving swine manure for 11 years [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **530-531**: 191-197.
- [42] Zhang H B, Zhou Y, Huang Y J, *et al.* Residues and risks of veterinary antibiotics in protected vegetable soils following application of different manures [J]. *Chemosphere*, 2016, **152**: 229-237.
- [43] 李基棕, 高颖, 杜海燕, 等. 规模化养猪场环境细菌的调查与分析 [J]. *中国畜牧兽医*, 2010, **37**(8): 199-203.
- Li J Z, Gao Y, Du H Y, *et al.* Investigation and analysis of bacteria in the environment of the scaled farm [J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2010, **37**(8): 199-203.
- [44] 李民. 规模化畜禽养殖场粪污污染与防治措施 [J]. *农业科技通讯*, 2001, (10): 22-23.
- [45] 樊丽霞, 杨智明, 尹芳, 等. 畜禽粪便利用现状及发展建议 [J]. *现代农业科技*, 2019, (1): 175-176, 181.
- Fan L X, Yang Z M, Yin F, *et al.* Utilization status and development suggestion of livestock manure [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2019, (1): 175-176, 181.
- [46] Sims J T, Wolf D C. Poultry waste management: agricultural and environmental issues [J]. *Advances in Agronomy*, 1994, **52**: 1-83.
- [47] 汤秋香, 任天志, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区不同轮作农田氮、磷流失特性研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, **17**(3): 608-615.
- Tang Q X, Ren T Z, Lei B K, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus loss in various crop rotation systems in northern watershed of Erhai Lake [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, **17**(3): 608-615.
- [48] Rappert S, Müller R. Odor compounds in waste gas emissions from agricultural operations and food industries [J]. *Waste Management*, 2005, **25**(9): 887-907.
- [49] Avery R C, Wing S, Marshall S W, *et al.* Odor from industrial hog farming operations and mucosal immune function in neighbors [J]. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, 2004, **59**(2): 101-108.
- [50] Hanajima D, Kuroda K, Morishita K, *et al.* Key odor components responsible for the impact on olfactory sense during swine feces composting [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(7): 2306-2310.
- [51] Knapp J R, Laur G L, Vadas P A, *et al.* Invited review: enteric methane in dairy cattle production: quantifying the opportunities and impact of reducing emissions [J]. *Journal of Dairy Science*,

- 2014, **97**(6): 3231-3261.
- [52] Aakre S, Hovi J. Emission trading: participation enforcement determines the need for compliance enforcement [J]. *European Union Politics*, 2010, **11**(3): 427-445.
- [53] 李金峰, 聂兆君, 赵鹏, 等. 畜禽粪便配施对冬小麦产量及 Cu、Zn、As 在植株累积和土壤中垂直分布的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2016, **44**(4): 137-140.
- [54] 贺德春, 吴根义, 许振成, 等. 小白菜和白萝卜对四环素类抗生素的吸收累积特征 [A]. 见: 2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集 (第二卷) [C]. 厦门: 中国环境科学学会, 2017. 446-451.
- [55] 王佳宁, 徐永平, 李晓宇, 等. 畜禽粪便抗生素残留及其对环境的影响 [J]. *畜牧与兽医*, 2017, **49**(10): 140-144.
Wang J N, Xu Y P, Li X Y, *et al.* Environmental impact of livestock and poultry manures with antibiotic residues [J]. *Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2017, **49**(10): 140-144.
- [56] Iqbal J, Tirmizi S A, Shah M H. Statistical apportionment and risk assessment of selected metals in sediments from Rawal Lake (Pakistan) [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(1): 729-743.
- [57] Wang A D, Zou D S, Zhang L Q, *et al.* Environmental risk assessment in livestock manure derived biochars [J]. *RSC Advances*, 2019, **9**(69): 40536-40545.
- [58] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [59] Wang M L, Liu R H, Lu X Y, *et al.* Heavy metal contamination and ecological risk assessment of swine manure irrigated vegetable soils in Jiangxi Province, China [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2018, **100**(5): 634-640.
- [60] Menz J, Olsson O, Kümmerer K. Antibiotic residues in livestock manure: does the EU risk assessment sufficiently protect against microbial toxicity and selection of resistant bacteria in the environment? [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, **379**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.120807.
- [61] Halling-Sørensen B, Sengeløv G, Tjørnelund J. Toxicity of tetracyclines and tetracycline degradation products to environmentally relevant bacteria, including selected tetracycline-resistant bacteria [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2002, **42**(3): 263-271.
- [62] Nguyen N K, Dörfner U, Welz G, *et al.* Large variation in glyphosate mineralization in 21 different agricultural soils explained by soil properties [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **627**: 544-552.
- [63] Gao Y Z, Lu C, Shen D, *et al.* Elimination of the risks of colistin resistance gene (*mcr-1*) in livestock manure during composting [J]. *Environment International*, 2019, **126**: 61-68.
- [64] Zhou X, Wang J, Lu C, *et al.* Antibiotics in animal manure and manure-based fertilizers: occurrence and ecological risk assessment [J]. *Chemosphere*, 2020, **255**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127006.
- [65] Zhao S X, Schmidt S, Qin W, *et al.* Towards the circular nitrogen economy-A global meta-analysis of composting technologies reveals much potential for mitigating nitrogen losses [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **704**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135401.
- [66] Wang Q, Awasthi M K, Ren X N, *et al.* Combining biochar, zeolite and wood vinegar for composting of pig manure: the effect on greenhouse gas emission and nitrogen conservation [J]. *Waste Management*, 2018, **74**: 221-230.
- [67] Yuan J, Li Y, Chen S L, *et al.* Effects of phosphogypsum, superphosphate, and dicyandiamide on gaseous emission and compost quality during sewage sludge composting [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **270**: 368-376.
- [68] Awasthi M K, Duan Y M, Awasthi S K, *et al.* Effect of biochar and bacterial inoculum additions on cow dung composting [J]. *Bioresource Technology*, 2020, **297**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122407.
- [69] Hanc A, Enev V, Hrebeckova T, *et al.* Characterization of humic acids in a continuous-feeding vermicomposting system with horse manure [J]. *Waste Management*, 2019, **99**: 1-11.
- [70] Soobhany N, Mohee R, Garg V K. Inactivation of bacterial pathogenic load in compost against vermicompost of organic solid waste aiming to achieve sanitation goals: a review [J]. *Waste Management*, 2017, **64**: 51-62.
- [71] Zhao Y, Zhao Y, Zhang Z C, *et al.* Effect of thermo-tolerant actinomycetes inoculation on cellulose degradation and the formation of humic substances during composting [J]. *Waste Management*, 2017, **68**: 64-73.
- [72] Awasthi M K, Pandey A K, Khan J, *et al.* Evaluation of thermophilic fungal consortium for organic municipal solid waste composting [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **168**: 214-221.
- [73] da Silva Macêdo A J, Neto J M C, da Silva M A, *et al.* Potentialities and limitations of forage plants for silage: review [J]. *Revista Brasileira de Higiene e Sanidade Animal*, 2019, **13**(2): 320-337.
- [74] 余桂平, 翁晓星, 徐锦大, 等. 基于蝇蛆养殖技术的畜禽粪便处理模式 [J]. *农业工程*, 2020, **10**(5): 57-60.
Yu G P, Weng X X, Xu J D, *et al.* Manure treatment mode of livestock and poultry based on fly maggot culture technology [J]. *Agricultural Engineering*, 2020, **10**(5): 57-60.
- [75] 舒畅, 王瑾, 乔娟. 生猪养殖废弃物资源化利用现状及问题探讨——以北京市为例 [J]. *农业展望*, 2016, **12**(9): 57-60.
Shu C, Wang J, Qiao J. Status quo and problems of pig-breeding waste resource utilization——A case study of Beijing [J]. *Agricultural Outlook*, 2016, **12**(9): 57-60.
- [76] Soltanian S, Aghbashlo M, Almasi F, *et al.* A critical review of the effects of pretreatment methods on the exergetic aspects of lignocellulosic biofuels [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, **212**, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112792.
- [77] Kougias P G, Angelidaki I. Biogas and its opportunities-A review [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2018, **12**(3), doi: 10.1007/s11783-018-1037-8.
- [78] Daniel-Gromke J, Rensberg N, Denysenko V, *et al.* Current developments in production and utilization of biogas and biomethane in Germany [J]. *Chemie Ingenieur Technik*, 2018, **90**(1-2): 17-35.
- [79] Tsapekos P, Kougias P G, Kuthiala S, *et al.* Co-digestion and model simulations of source separated municipal organic waste with cattle manure under batch and continuously stirred tank reactors [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, **159**: 1-6.
- [80] Sarfaraz Q, da Silva L S, Drescher G L, *et al.* Publisher correction: characterization and carbon mineralization of biochars produced from different animal manures and plant residues [J]. *Scientific Reports*, 2021, **11**(1), doi: 10.1038/s41598-021-88167-x.
- [81] Qambrani N A, Rahman M, Won S, *et al.* Biochar properties and eco-friendly applications for climate change mitigation, waste

- management, and wastewater treatment: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, **79**: 255-273.
- [82] Guo S Q, Dong X Y, Wu T T, *et al.* Characteristic evolution of hydrochar from hydrothermal carbonization of corn stalk [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2015, **116**: 1-9.
- [83] Anukam A, Mamphweli S, Reddy P, *et al.* Pre-processing of sugarcane bagasse for gasification in a downdraft biomass gasifier system: a comprehensive review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **66**: 775-801.
- [84] Vamvuka D, Papas M, Galetakis M, *et al.* Thermal valorization of an animal sludge for energy recovery via co-combustion with olive kernel in a fluidized bed unit: optimization of emissions [J]. *Energy & Fuels*, 2016, **30**(7): 5825-5834.
- [85] Somogyi A, Simionovici A S, Ansell S, *et al.* Direct determination of cadmium speciation in municipal solid waste fly ashes by synchrotron radiation induced μ -X-ray fluorescence and μ -X-ray absorption spectroscopy [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(14): 3165-3169.
- [86] Manaf I S A, Embong N H, Khazaai S N M, *et al.* A review for key challenges of the development of biodiesel industry [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, **185**: 508-517.
- [87] Rezanian S, Oryani B, Park J, *et al.* Review on transesterification of non-edible sources for biodiesel production with a focus on economic aspects, fuel properties and by-product applications [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, **201**, doi: 10.1016/j.enconman.2019.112155.
- [88] Jung J M, Lee J, Kim J, *et al.* Pyrogenic transformation of oil-bearing biomass into biodiesel without lipid extraction [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, **123**: 317-323.
- [89] Kim M, Jung S, Lee D J, *et al.* Biodiesel synthesis from swine manure [J]. *Bioresource Technology*, 2020, **317**, doi: 10.1016/j.biortech.2020.124032.
- [90] 中华人民共和国农业农村部. 国务院办公厅关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见[EB/OL]. http://www.xmsyj.moa.gov.cn/zcjd/201904/t20190429_6287181.htm, 2019-04-29.
- [91] 中华人民共和国生态环境部. 《关于进一步明确畜禽粪污还田利用要求强化养殖污染监管的通知》的解读[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/zcjd/202006/t20200630_786581.shtml, 2020-06-30.
- [92] 中华人民共和国农业农村部. 农业农村部 国家发展改革委 科技部 自然资源部 生态环境部 国家林草局关于印发《“十四五”全国农业绿色发展规划》的通知[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/nybgb/2021/202109/202112/t20211207_6384020.htm, 2021-09-07.

CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM _{2.5} -O ₃ Pollution in Tianjin from 2013 to 2020	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O ₃ Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O ₃ Pollution During 13 th Five-Year Period in Tianjin	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM _{2.5} and O ₃ to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe ₃ O ₄ /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvio-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weiwei Dry Plateau Region of Shaanxi	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-ying, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)