

畜禽粪便还田所致环境污染现况及其健康危害

吴玉高, 李卓阳, 方菁

昆明医科大学健康研究所, 云南 昆明 650500

摘要: 中国现代畜牧业的快速发展解决了我国居民肉、蛋、奶等动物源性食品的供应问题, 畜牧业高速向集约化转型的同时, 也产生了大量的畜禽粪便, 但由于我国养殖业未能与种植业有机结合, 致使大量动物粪便未能进行无害化和资源化利用, 带来了严重的环境污染问题和公众健康风险。动物粪便中的抗生素及其耐药基因、重金属、病原体等污染物, 可以在动物粪便的转运、储存、加工和利用过程中进入农田土壤、地表水和地下水, 污染食品, 对人类健康构成直接和间接的风险。本文依据公开发表的统计数据和文献分析了我国畜禽粪便排放的主要污染物及其对环境的影响, 以及暴露于这些污染物对人类健康的潜在风险。针对现存问题提出畜禽粪便的合理利用建议, 为有效利用畜禽粪便同时又保护人群健康提供助力。

关键词: 畜禽粪便; 环境污染; 健康风险

Environmental pollution and health hazards caused by animal agriculture manure WU Yugao, LI Zhuoyang, FANG Jing (Institute for Health Sciences, Kunming Medical University, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: The rapid growth of modern animal husbandry in China has supplied meat, eggs, and milk for Chinese residents, meanwhile the rapid transformation to intensive husbandry operations has also produced a large quantity of livestock and poultry manure. However, due to the failure of integration of animal husbandry and crop plantation, most of the livestock and poultry manure has not been treated and utilized, which may cause serious environmental pollution and public health risks. Antibiotics, heavy metals, pathogens, and other pollutants contained in livestock and poultry manure can enter farming soil, surface water, and groundwater during the transportation, storage, processing, and utilization of livestock and poultry manure, contaminate food, and pose direct and indirect risks to human health. Based on published statistics and papers, this article systematically analyzed the main pollutants discharged from livestock and poultry manure, their impacts on the environment, as well as the potential health risks by exposure to these pollutants. Recommendations on how to scientifically utilize animal manure were proposed, aiming to better protect human health.

Keywords: livestock and poultry manure; environmental pollution; health risk

随着中国居民对动物源性食品需求的不断增长, 传统的以家庭为基础的自由养殖逐渐向集约化, 规模化的养殖方式转变。与此同时, 这样的养殖方式也带来了严峻的环境问题。2020 年我国生态农业部等多个部门联合发布的《第二次全国农业污染源普查公报》显示, 对比 2010 年第一次普查结果, 我国主要污染物排放量总体大幅下降, 但数量大、区域广的农业面源污染仍是我国防控和治理的难题, 畜禽粪污是农业面源污染的主要来源与重要成因。由于我国畜牧业存在养殖面广、养殖数量大、养殖地点分散和隐蔽等特点^[1], 畜禽粪便造成的环境污染监督难度较大。与此同时, 畜禽粪便也是巨大的资源库, 我国畜禽粪便年均产量约 38 亿 t, 其中 40% 未得到有效处理和利用^[2]。近年来, 我国出台了多部关于粪污综合利用的政策, 鼓励各地根据不同区域的资源环境特点发展粪污能源, 对畜禽粪便进行肥料利用。然而, 畜禽粪污中包括病原体、天然和人工合

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2021.21133

基金项目
国家自然科学基金项目(19XGL022)

作者简介
吴玉高(1996—), 女, 硕士生;
E-mail: 1804866455@qq.com

通信作者
方菁, E-mail: fangjing07@126.com

伦理审批 不需要
利益冲突 无申报
收稿日期 2021-04-05
录用日期 2021-09-25

文章编号 2095-9982(2021)11-1284-07
中图分类号 S141.4
文献标志码 A

引用
吴玉高, 李卓阳, 方菁. 畜禽粪便还田所致环境污染现况及其健康危害[J]. 环境与职业医学, 2021, 38(11): 1284-1290.

本文链接
www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2021.21133

Funding
This study was funded.

Correspondence to
FANG Jing, E-mail: fangjing07@126.com

Ethics approval Not required
Competing interests None declared
Received 2021-04-05
Accepted 2021-09-25

To cite
WU Yugao, LI Zhuoyang, FANG Jing. Environmental pollution and health hazards caused by animal agriculture manure[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2021, 38(11): 1284-1290.

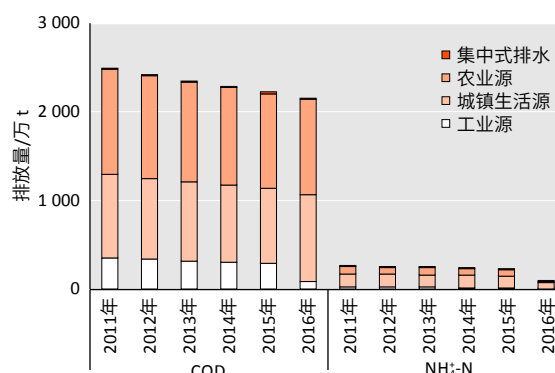
Link to this article
www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2021.21133

成的激素、兽用抗生素和重金属等污染物。畜禽粪便经过无害化处理回田可以大大提高农作物的种植效率,但如果在动物粪便的转运、储存、加工和利用过程中未进行无害化处理,会使畜禽粪便中的污染物进入当地农田土壤、地表水和地下水,污染食品,对人类健康构成直接和间接的危害^[3]。此外,我国农业种植复种指数高,畜禽粪便直接还田会增加土壤中残留的重金属与抗生素被植物吸收的可能性,继而参与食物链流转,最终可能会进入人体,威胁人类健康。本文依据公开发表的统计数据 and 文献初步分析了我国畜禽粪便的环境污染现状,并结合现状对畜禽粪便回田后重金属污染、抗生素污染、病原体污染对人类健康的直接和潜在风险进行了分析,针对现存问题提出畜禽粪便的合理利用建议,为有效利用畜禽粪便同时又保护人群健康提供助力。

1 我国畜禽养殖废弃物环境污染现状

在全球范围内畜牧业活动对环境产生了不同程度的影响,畜牧业产生的氮磷相关污染物占了全球许多地区环境污染负荷的一半以上,导致了严重的环境污染、人类健康损害和全球气候变暖^[4]。为在有限的农田上实现农民增收、农业增效、农村致富,我国鼓励多地发展集约化和规模化养殖,近年来畜牧业集约化程度高速增长,高面源污染的畜禽养殖业正在我国各大流域飞速发展。集约化的畜禽养殖技术促进了我国养殖业向高产优质高效发展,但同时也导致种养分离的局面。当前我国集约化养殖场大多集中在远离农田的城市郊区,农村畜禽养殖和城乡结合部的生活排污是造成耕地、水体及地下水 N、P、氨态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD) 污染的主要原因,其贡献率大大超过来自城市生活污水和工业的点源污染。如图 1 所示,农业活动,包括农业、水产养殖和畜禽养殖,已经是 COD 的最大来源和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的第二大来源。2011—2016 年期间,在工业、农业和城镇生活三个废水有机污染排放源里,农业源一直占到将近一半,其中畜牧养殖业的污染又占到农业源污染的 95%以上,畜禽养殖业已成为我国环境污染的重要来源之一。畜禽废弃物还田的运输成本较大,加上畜禽废弃污染物产生的连续性和还田的季节性,造成畜禽废弃物的大量剩余而无法返田利用,对环境造成了严重污染^[5]。除水源污染外,封闭的养殖环境和粪便运输还会产生大量生物气溶胶,如果处置不当将会为人类和动物疾病传播提供条件。养殖场夏季产生

的降温废水、冲洗圈舍废水、尿液和饮用废水等会暂时储存在蓄粪池中,在集约化强降雨的情况下,由于蓄粪池的溢流,畜禽粪便传播的病原体会进入河流和湖泊^[6]。



[注] 数据来源于《中国环境年鉴》《全国第二次污染源普查公报》。

图 1 2011—2016 年期间中国主要 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 来源排放量

Figure 1 Main sources of COD and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ emissions in China over the 2011–2016 period

2 我国兽用抗生素使用情况和畜禽粪便中残留的抗生素带来的健康风险

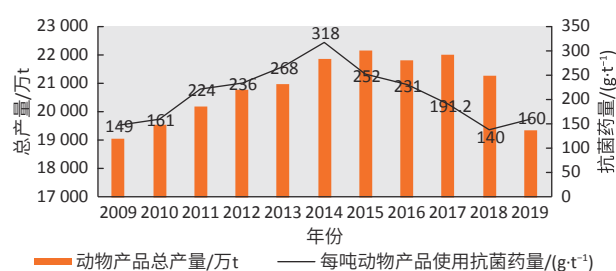
2.1 我国兽用抗生素使用情况

兽用抗生素是保证畜禽养殖业大规模、集约化发展的基础之一。为了提高饲料利用率和促进动物生长,兽用抗生素被广泛运用于畜禽和水产养殖以预防和治疗疾病^[7]。我国曾允许在动物饲料中添加部分抗菌药物来降低养殖风险,如四环类和磺胺类抗生素就被广泛用于牲畜消炎。但部分养殖工厂和个体养殖户为了追求经济效益,缩短畜禽的生长周期,会选择在饲养过程中使用大量的抗菌药物。我国是抗生素生产和消耗最大的国家,比起人类医疗行为滥用的抗生素,兽用抗生素药物的滥用更为严重^[8]。农业农村部发布的《2019 年中国兽用抗菌药使用情况报告》显示,我国 2019 年畜禽肉产量 7759 万 t,各类兽用抗菌药的使用总量为 30 903.66 t,兽用抗菌药的整体使用量呈下降趋势。如图 2 所示,自 2009 年以来,我国每吨动物产品使用抗菌药的量在 2014 年达到顶峰,之后开始显著下降,2018 年下降到基本接近 2009 年的水平,但是由于畜禽养殖的规模和饲养密度仍然在不断增加,兽用抗生素的滥用情况仍不容乐观。

2.2 直接健康影响: 畜禽粪便中残留的抗生素进入环境和食物链

由于抗生素在动物体内吸附力很差,约有 30% 到 90% 可通过粪便或尿液排泄到外界环境中^[9]。而利

用畜禽粪便施肥是动物体内抗生素进入土壤环境的一个重要途径。进入土壤环境中的抗生素可通过淋溶、渗滤等迁移途径污染地表水、地下水和饮用水源,并通过作物吸收和积累进入食物链^[10]。随着我国居民生活水平的提高,有机绿色农产品不断兴起,畜禽粪便的发酵肥就是有机果蔬种植基地重要的肥料来源,畜禽粪便作为有机肥回田后,土壤中会有一部分残留抗生素通过吸附、迁移、降解等过程损失掉,另一部分则仍然残留在土壤之中。有研究表明有机蔬菜养殖场长期频繁施用畜禽粪便,土壤中抗生素残留量高于其所属养殖场土壤中的抗生素残留量^[11]。



[注] 数据来源于《中国畜牧兽医年鉴》《水产统计年报》。

图2 我国2009—2019年动物产品总量和每吨动物产品使用抗菌药量

Figure 2 Total amount of animal products and amount of antibiotics used per ton of animal products in China from 2009 to 2019

虽然我国不断出台法律法规来确保食用农产品的质量安全,但动物性食品在抽检过程中仍存在抗生素残留情况。我国农业农村部发布的《2020年食用农产品市场监管部门抽检不合格情况》显示:畜禽产品和水产品为食品农产品抽检不合格的主要类型,占比分别为21.14%和30.22%。恩诺沙星、氟苯尼考、磺胺类等兽药残留超标为畜禽产品和水产品抽检主要不合格项。长期摄入抗生素残留的动物性食品可引发过敏、生殖障碍、骨髓毒性等多种慢性损伤^[12]。如食用氯霉素超标的动物性食品可引起致命的“灰婴综合症”反应,严重时还会造成人的再生障碍性贫血^[13]。磺胺类药物制剂在动物体内代谢周期长,长期食用磺胺类药物残留的动物性食品,残留的抗菌药物将会随着畜禽肉类进入人体、产生积累,引起过敏反应或者使机体产生抗药性^[14]。复旦大学公共卫生学院对江苏、浙江、上海1000多名8到11岁的在校儿童尿液进行检验,共检出21种人用、兽用或人兽用抗生素,79.6%的学龄儿童尿液中检出一种或几种抗生素,其中检出的金霉素、恩诺沙星、泰乐菌素等三种抗生素一般只限于畜禽使用。兽用抗生素暴露与儿童肥胖、

性早熟相关,医用抗生素使用,实质上是短期高剂量暴露,而来自食品或环境中的抗生素暴露,是长期低剂量暴露^[15]。

2.3 间接健康影响: 畜禽养殖与抗生素耐药性的产生和传播

兽用抗生素的滥用加速了抗生素耐药基因(antibiotic resistance genes, ARGs)和抗生素耐药细菌(antibiotic resistance bacteria, ARB)的产生和传播。世界卫生组织(World Health Organization, WHO)已将抗生素耐药性列为21世纪人类健康将应对的最严重风险之一。养殖场产生的粪便、污水以及养殖环境空气中的气溶胶、灰尘和细菌滋生的食物等都是ARGs在宿主之间通过环境传播的重要媒介^[16]。长期滥用兽用抗生素,会使养殖动物的肠道中被诱导出抗生素耐药菌株,这些编码抗生素耐药基因的菌株是环境中抗生素耐药基因最重要的来源。动物粪便中的抗生素耐药菌株可以通过雨水和灌溉用水从农用动物粪便中过滤出来,从而进入地表水和地下水系统。抗生素耐药菌可在人类、动物、食物、环境逐渐相互传播^[17]。人类可通过多种途径接触耐药细菌,包括食用受污染的作物、饮用受污染的水、呼吸受污染的空气等。在人体中,耐药细菌可将ARGs传播至人体微生物群,可能会破坏胃肠道菌群平衡,进而影响人类健康^[18]。

Van等^[19]通过食源性病原体的流行率调查,分析了全球901个监测点的动物源性抗生素耐药性流行率结果显示,从2000年到2018年,全球鸡中表现出50%以上耐药性的抗生素比例从15%增加到41%,猪中从13%增加到34%,中国的抗生素耐药性流行区域集中在东北等养殖密集区。中国农业大学沈建忠领衔的耐药性研究团队2016年对国内鸡肉生产链收集的1000多份样本进行耐药性监测与分析,发现大肠杆菌能携带耐药基因 $mcr-1$ 从上游种鸡场沿鸡肉生产链条一直传播到超市。动物源性食品的消费、水产养殖发达程度和水产品的消费对人群中 $mcr-1$ 阳性大肠杆菌的定植和传播中起着重要作用。动物源性耐药菌和饲用抗生素及其活性代谢物会随动物排泄物排到环境中,对环境产生污染,并且细菌的耐药性会随着畜禽粪便施肥的次数增加^[20-21]。碳青霉烯耐药肠杆菌科细菌是近年来发现的超级细菌,尤其是在中国等亚洲地区尤为严重,碳青霉烯类药物在我国已经在养殖中禁用,但仍在我国养殖动物、伴侣动物、野生动物中发现,并在养殖产业链和养殖环境中传播,通过候鸟迁徙、虫媒、人员流动^[22]。目前关于动物源性耐药菌的研究大部分

为观察性的,而不是实验性的,耐药细菌从食源性动物转移到肉制品,再进一步侵入人类机体的过程并不能被证实,一些专家呼吁改进风险评估方法,以更好地研究抗生素耐药性和人类健康之间的潜在联系。

3 畜禽粪便中重金属残留与相关健康风险

合理剂量的重金属微量元素添加剂可以用来防治动物疾病。我国《饲料添加剂安全使用规范》允许养殖工厂以及个体户合理使用重金属添加剂如 Cu、Zn、Pb、As 等微量元素。但养殖过程中仍存在部分养殖者过量添加,导致部分畜禽粪便中重金属超标^[23]。据统计,我国每年添加约 15~18 万 t 的重金属到畜禽饲料中,但近 10 万 t 未被动物利用而随粪便排出体外,造成土壤和水的污染^[24]。土壤是畜禽粪便中有害残留物向大气、水体和有机体传播的主要介质,长期连续施用重金属超标的畜禽粪便会向土壤-植物系统中输入大量外源性重金属元素,导致土壤和蔬菜中的重金属超标^[25]。人通过经口摄入和皮肤接触等方式,重金属单质会与人体多种活性物质相互作用,使人体

原有的生化功能丧失或改变,引起病理变化,导致重金属中毒,部分重金属还会穿过人体血脑屏障,积聚在脑组织中,影响神经和行为功能^[26]。

畜禽粪便是有肥的主要来源,不同国家的堆肥产品的标准中,对 9 种主要重金属 Zn、Cu、As、Cr、Cd、Pb、Hg、Ni、Co 含量进行了限制(表 1),但目前我国对某些潜在有毒金属和金属的总浓度的最大允许限值仍然没有作出明确规定,如 Cu、Zn、Ni、Co 没有制定相应的限量标准。部分重金属有机制剂我国和其他国家的规定不同,以 As 为例,作为动物饲料添加剂在欧盟和美国已被禁止添加,但在我国曾一度批准苯胂酸类有机胂制剂作为饲料添加剂来促进家禽生长,治疗球虫病和预防胃肠道感染。使用有机砷为饲料添加剂的猪场周围土壤或者长期施用猪粪作为肥料的农田,大部分土壤砷含量超标,并在地下水,农产品中发生砷富集^[27]。我国畜禽粪便商品有机肥中重金属含量绝大部分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。

表 1 国内外有机堆肥产品中重金属限量标准^[28]

Table 1 Limits of heavy metals in organic compost products at home and abroad^[28]

指标	Zn	Cu	As	Cr	Cd	Pb	Hg	Ni	Co
重金属质量分数/(mg·kg ⁻¹)									
中国 ^[29]	—	—	15	150	3	50	2	—	—
澳大利亚(有机种植)	200	70	—	70	0.7	45	0.4	25	—
澳大利亚(普通种植)	500	150	—	70	1	120	0.7	60	—
加拿大(任何用途)	700	400	13	210	3	150	0.8	62	34
加拿大(限制使用)	1850	757	75	1060	20	500	5	180	150
欧盟(有机种植)	200	70	—	70	0.7	45	0.4	25	—
欧盟(普通种植)	300	100	10	100	1	100	1	50	—
英国	400	200	—	100	1.5	200	1	50	—
美国	2800	1500	41	—	39	300	17	420	—
超标率/%									
中国	—	—	13.7	4.2	2.4	1.4	0	—	—
澳大利亚(有机种植)	66.5	33.5	—	8.0	27.8	1.4	9.0	7.5	—
澳大利亚(普通种植)	24.5	14.6	—	8.0	18.9	0.5	5.2	2.8	—
加拿大(任何用途)	13.7	7.1	17.5	3.3	2.4	0.5	3.8	2.8	1.9
加拿大(限制使用)	3.3	0.9	0	0.9	0	0	0	0	0
欧盟(有机种植)	66.5	33.5	—	8.0	27.8	1.4	9.0	7.5	—
欧盟(普通种植)	46.2	21.2	25.9	5.7	18.9	0.9	2.8	3.8	—
英国	32.1	13.2	—	5.7	10.4	0	2.8	3.8	—
美国	1.9	0	1.9	—	0	0	0	0	—

Yang 等^[28]2014 年调查并检测了全国 10 个人口密集、畜牧养殖密度高的省份的 212 家有机肥堆肥工厂,发现有机肥仍然存在部分重金属超标现象,部分

Zn、Cu、Cd 和 Hg 含量最高的有机肥,会在较短的时间内使土壤金属浓度翻倍。农业农村部 2020 年对天津、河北等 23 个省(区、市)肥料生产企业生产有机肥料

进行了监督抽查,结果显示有机肥料抽检合格率为87.8%,有机肥不合格的主要原因是重金属含量超标和有机质不足。食用了重金属超标的农作物和饮用受污染的水源,会引发一系列食品安全问题与健康问题。我国有机商品堆肥中对重金属 Cr、Cd、Hg 的限量标准均是欧盟标准的两倍以上,WHO 下属的国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)认定 Cr、Cd、As 均为 I 类致癌物。食用 Hg 超标产品与水俣病密切相关;Cd 能引发高血压,心血管系统、多个器官损伤以及代谢类疾病的发生,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^[30]。

4 畜禽粪便中人畜共患病原体传播的公众健康风险

畜禽粪便是多种病原体的贮存库,含有大量的致病菌、病毒、寄生虫及寄生虫卵,同时还是 150 多种疾病的潜在发病源^[31]。堆肥技术是杀灭大多数病原体的有力手段,但处理过程中不当的操作会带来严重的环境污染和人类健康风险。在动物活动和粪便处置过程中病原体很容易被气溶胶化,逸散到空气中生成生物气溶胶。生物气溶胶逸散到养殖场周围,可能对养殖场工人和周围居民产生健康风险,长期处于生物气溶胶的暴露环境中很容易让人产生急性和慢性炎症^[32]。畜禽粪便具有传播疾病的潜力,致病菌和病毒不但会直接影响养殖动物自身的健康情况,还会通过各种渠道与人类接触,影响人体健康,畜禽粪便中对人体健康影响最重要的病原菌包括沙门氏菌、大肠杆菌、空肠弯曲菌、小肠结肠炎耶尔森氏菌和产气荚膜梭菌,这些条件致病菌能导致呼吸道感染,肠胃感染等^[33]。农田中直接施用畜禽粪、自然堆肥和人工翻堆粪,人类通过直接接触动物粪便,或者间接接触被动物粪便污染的土壤,食物和水源都会导致人畜共患病原体的粪口传播。WHO 数据显示,全球每年共有 6 亿人因食用受污染的食品而生病,而食品中病原菌的污染与畜禽排泄物密切相关。2011 年德国爆发了肠出血性大肠杆菌感染疫情,感染者的数目达到 3 816 人,死亡 54 人,生食被大肠杆菌污染的蔬菜为此次疫情最主要的源头^[34]。畜禽粪便中的病原菌大多数离开宿主后,还能在外界环境中存活很长时间,例如,粪源大肠杆菌在土壤中可存活超过 45 d,并可以通过根部侵染来破坏生菜的食用部分^[35]。畜禽粪便中的病原体同时和抗生素耐药基因具有协同作用,畜禽粪便在用

于农业种植之前进行的堆肥处理并不能彻底清除其病原体携带的抗生素耐药基因,这类应用会促进 ARGs 在粪便源细菌与土壤中携带移动基因元件(如宿主广泛的质粒、1 型整合子等)的微生物之间的水平传播。特别值得关注的是,在这类土壤中生产的蔬菜类植物存在 ARGs 水平显著上升的风险^[36]。

5 结论和建议

畜禽粪便带来的重金属污染、抗生素污染、病原体污染已经成为了严重影响人类、动植物和环境的全球性公共卫生问题。但我国对其带来的环境污染和人类健康风险的关注和监控工作起步较晚,目前尚未引起足够的重视,目前对抗生素及其抗性基因,重金属的迁移和消亡规律,对人体健康的损害机制以及对人类生存环境和生态系统产生的综合影响仍然需要进一步研究明确。但另一方面畜禽粪便作为商品有机肥的主要原材料,为生态农业提供了巨大的机会,可以帮助中国实现其“化肥投入零增长”的政策目标。但由于畜禽养殖者兽药的不合理使用,商品有机肥生产企业的相关技术不成熟,农户还田利用时缺乏科学专业的指导,相关部门和机构执法力度不严格等因素,我国在畜禽粪便的资源化利用方面仍存在较大健康风险隐患。故本文对畜禽粪便的还田利用提出以下建议:

一是健全畜禽粪便还田利用的制度体系。建立科学规范、权责清晰、约束有力的畜禽粪便资源化利用制度体系,纳入地方政府绩效评价考核体系。基层监管部门应对养殖户进行严格监管,规范畜禽养殖户生产,加强对养殖户的管理和宣传教育。地方农业部门加强对畜禽粪便还田农户的技术指导,避免不科学的还田方式带来的环境和健康风险。二是倡导科学饲养,合理规范用药。目前我国农业部发布了公告,要求禁止在饲料中添加促生长类药物,动物养殖过程中减量使用抗生素,但饲料“禁抗”落实到养殖现场并不容易,长久以来,抗生素等药物在饲料中的广泛使用,为畜禽健康树起了一道“防御屏障”,所以饲料和养殖行业应加大科技创新、升级转型,研发新型饲料,逐步替代抗生素等药物的使用。三是实现信息化管理。对畜禽规模养殖场粪污资源化利用实现信息化监管,不断完善畜禽规模养殖场直联直报信息系统,实现对全国规模养殖场全覆盖监管,主要监管内容包括养殖量、兽药使用量,饲料添加情况、粪污产生量、粪污处理设施装备情况等。四是完善有机肥相关标准。目前我国

商品有机肥生产标准尚未对杂菌种类和数量, 抗生素和部分重金属做出限量规定。对此, 可参考其他国家进一步完善我国有机肥标准, 探索制定出符合我国国情的有机肥标准。

参考文献

- [1] WANG X, WU X, YAN P, et al. Integrated analysis on economic and environmental consequences of livestock husbandry on different scale in China[J]. *J Clean Prod*, 2016, 119: 1-12.
- [2] ZHUANG M, SHAN N, WANG Y, et al. Different characteristics of greenhouse gases and ammonia emissions from conventional stored dairy cattle and swine manure in China[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 722: 137693.
- [3] HU Y, CHENG H, TAO S. Environmental and human health challenges of industrial livestock and poultry farming in China and their mitigation[J]. *Environ Int*, 2017, 107: 111-130.
- [4] ZHUANG F F, LI H, ZHOU X Y, et al. Quantitative detection of fecal contamination with domestic poultry feces in environments in China[J]. *AMB Express*, 2017, 7: 80.
- [5] JUST N, KIRYCHUK S, GILBERT Y, et al. Bacterial diversity characterization of bioaerosols from cage-housed and floor-housed poultry operations[J]. *Environ Res*, 2011, 111(4): 492-498.
- [6] MO W Y, CHEN Z, LEUNG H M, et al. Application of veterinary antibiotics in China's aquaculture industry and their potential human health risks[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2017, 24(10): 8978-8989.
- [7] WANG W Z, CHI S L, XU W H, et al. Influence of long-term chicken manure application on the concentration of soil tetracycline antibiotics and resistant bacteria variations[J]. *Appl Ecol Environ Res*, 2018, 16(2): 1143-1153.
- [8] SARMAH A K, MEYER M T, BOXALL A B A. A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(5): 725-759.
- [9] LEE C, JEONG S, JU M, et al. Fate of chlortetracycline antibiotics during anaerobic degradation of cattle manure[J]. *J Hazard Mater*, 2020, 386: 121894.
- [10] ZHANG L X, HU Q H, WANG C B. Emergy evaluation of environmental sustainability of poultry farming that produces products with organic claims on the outskirts of mega-cities in China[J]. *Ecol Eng*, 2013, 54: 128-135.
- [11] 李会贤, 赵晶, 姚春霞, 等. 施用有机肥对生菜和土壤中可培养抗生素耐药菌的影响[J]. 上海农业学报, 2020, 36(5): 91-95.
- [12] LI H X, ZHAO J, YAO C X, et al. Influence of organic fertilizer application on the profiles of cultivable antibiotic resistant bacteria in lettuce and soil samples[J]. *Acta Agric Shanghai*, 2020, 36(5): 91-95.
- [13] BACANLI M, BAŞARAN N. Importance of antibiotic residues in animal food[J]. *Food Chem Toxicol*, 2019, 125: 462-466.
- [14] MANYI-LOH C, MAMPHWELI S, MEYER E, et al. Antibiotic use in agriculture and its consequential resistance in environmental sources: potential public health implications[J]. *Molecules*, 2018, 23(4): 795.
- [15] 向俊, 唐万里, 刘慧, 等. 湖南省各地区畜禽肉中磺胺类药物残留情况分析[J]. 食品与机械, 2020, 36(9): 82-86, 107.
- [16] XIANG J, TANG W L, LIU H, et al. Detection and analysis of sulfonamides residues in meat poultry in Hunan province[J]. *Food Mach*, 2020, 36(9): 82-86, 107.
- [17] WANG H, WANG N, WANG B, et al. Antibiotics in drinking water in shanghai and their contribution to antibiotic exposure of school children[J]. *Environ Sci Technol*, 2016, 50(5): 2692-2699.
- [18] TIEDJE J M, WANG F, MANAIA C, et al. Antibiotic resistance genes in the human-impacted environment: a one health perspective[J]. *Pedosphere*, 2019, 29(3): 273-282.
- [19] WHO. Antimicrobial resistance: global report on surveillance[R]. Geneva: World Health Organization, 2014.
- [20] ZAINAB S M, JUNAID M, XU N, et al. Antibiotics and antibiotic resistant genes (ARGs) in groundwater: a global review on dissemination, sources, interactions, environmental and human health risks[J]. *Water Res*, 2020, 187: 116455.
- [21] VAN BOECKEL T P, PIRES J, SILVESTER R, et al. Global trends in antimicrobial resistance in animals in low- and middle-income countries[J]. *Science*, 2019, 365(6459): eaaw1944.
- [22] SHEN Y, ZHOU H, XU J, et al. Anthropogenic and environmental factors associated with high incidence of *mcr-1* carriage in humans across China[J]. *Nat Microbiol*, 2018, 3(9): 1054-1062.
- [23] WANG Y, ZHANG R, LI J, et al. Comprehensive resistome analysis reveals the prevalence of NDM and MCR-1 in Chinese poultry production[J]. *Nat Microbiol*, 2017, 2: 16260.
- [24] LI J, BI Z, MA S, et al. Inter-host transmission of carbapenemase-producing *Escherichia coli* among humans and backyard animals[J]. *Environ Health Perspect*, 2019, 127(10): 107009.
- [25] LANG Q, CHEN M, GUO Y, et al. Effect of hydrothermal carbonization on heavy metals in swine manure: speciation, bioavailability and environmental risk[J]. *J Environ Manage*, 2019, 234: 97-103.
- [26] KUMAR R R, PARK B J, CHO J Y. Application and environmental risks of livestock manure[J]. *J Korean Soc Appl Biol Chem*, 2013, 56(5): 497-503.
- [27] 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 等. 我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 986-996.
- [28] MU H Y, ZHUANG Z, LI Y M, et al. Heavy metal contents in animal manure in China and the related soil accumulation risks[J]. *Environ Sci*, 2020, 41(2): 986-996.
- [29] ANDRADE V M, ASCHNER M, MARREILHA DOS SANTOS A P. Neurotoxicity of metal mixtures[J]. *Adv Neurobiol*, 2017, 18: 227-265.
- [30] 王付民, 陈杖榴, 孙永学, 等. 有机饲料添加剂对猪场周围及农田环境污染的调查研究[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 154-162.

- WANG FM, CHEN ZL, SUN YX, et al. Investigation on the pollution of organoarsenical additives to animal feed in the surroundings and farmland near hog farms[J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, 26(1): 154-162.
- [28] YANG X, LI Q, TANG Z, et al. Heavy metal concentrations and arsenic speciation in animal manure composts in China[J]. *Waste Manag*, 2017, 64: 333-339.
- [29] 有机肥料: NY 525—2012[S]. 北京: 中国农业出版社, 2012. Organic fertilizer: NY 525 —2012[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2012.
- [30] 谢文凤, 吴彤, 石岳骄, 等. 国内外有机肥标准对比及风险评估[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(12): 1958-1968.
- XIE WF, WU T, SHI YJ, et al. Chinese and international organic fertilizer standard comparison and risk assessment[J]. *Chin J Eco-Agric*, 2020, 28(12): 1958-1968.
- [31] DELAHOY MJ, WODNIK B, MCALILEY L, et al. Pathogens transmitted in animal feces in low- and middle-income countries[J]. *Int J Hyg Environ Health*, 2018, 221(4): 661-676.
- [32] 高敏, 仇天雷, 秦玉成, 等. 养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征[J]. 环境科学, 2017, 38(2): 510-516.
- GAO M, QIU TL, QIN YC, et al. Sources and pollution characteristics of antibiotic resistance genes and conditional pathogenic bacteria in concentrated poultry feeding operations[J]. *Environ Sci*, 2017, 38(2): 510-516.
- [33] BLAIS-LECOURS P, PERROTT P, DUCHAINE C. Non-culturable bioaerosols in indoor settings: impact on health and molecular approaches for detection[J]. *Atmos Environ (1994)*, 2015, 110: 45-53.
- [34] DUFOUR A, BARTRAM J, GANNON V, et al. Animal waste, water quality and human health[M]. London: IWA, 2012.
- [35] 薛同宣, 孔雀飞, 张开心, 等. 无抗养殖鸡粪对土壤环境和玉米生长的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2021(5): 112-117, 122.
- XUE TX, KONG QF, ZHANG KX, et al. The effect of antibiotic-free chicken manure on soil environment and maize growth[J]. *Heilongjiang Anim Sci Vet Med*, 2021(5): 112-117, 122.
- [36] ZHANG YJ, HU HW, CHEN QL, et al. Transfer of antibiotic resistance from manure-amended soils to vegetable microbiomes[J]. *Environ Int*, 2019, 130: 104912.
- (英文编辑: 汪源; 责任编辑: 陈姣)

(上接第 1283 页)

- [43] DU G, HU J, HUANG Z, et al. Neonatal and juvenile exposure to perfluorooctanoate (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS): advance puberty onset and kisspeptin system disturbance in female rats[J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2019, 167: 412-421.
- [44] KJELDSEN L S, BONEFELD-JORGENSEN E C. Perfluorinated compounds affect the function of sex hormone receptors[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2013, 20 (11): 8031-8044.
- [45] WANG X, BAI Y, TANG C, et al. Impact of perfluorooctane sulfonate on reproductive ability of female mice through suppression of estrogen receptor α -activated kisspeptin neurons[J]. *Toxicol Sci*, 2018, 165(2): 475-486.
- [46] FENG X, WANG X, CAO X, et al. Chronic exposure of female mice to an environmental level of perfluorooctane sulfonate suppresses estrogen synthesis through reduced histone H3K14 acetylation of the StAR promoter leading to deficits in follicular development and ovulation[J]. *Toxicol Sci*, 2015, 148(2): 368-379.
- [47] CHEN Y, ZHOU L, XU J, et al. Maternal exposure to perfluorooctanoic acid inhibits luteal function via oxidative stress and apoptosis in pregnant mice[J]. *Reprod Toxicol*, 2017, 69: 159-166.
- [48] CHAPARRO-ORTEGA A, BETANCOURT M, ROSAS P, et al. Endocrine disruptor effect of perfluorooctane sulfonic acid (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA) on porcine ovarian cell steroidogenesis[J]. *Toxicol Vitro*, 2018, 46: 86-93.
- [49] TARTU S, GABRIELSEN G W, BLÉVIN P, et al. Endocrine and fitness correlates of long-chain perfluorinated carboxylates exposure in arctic breeding black-legged kittiwakes[J]. *Environ Sci Technol*, 2014, 48(22): 13504-13510.
- [50] BENNINGHOFF A D, BISSON W H, KOCH D C, et al. Estrogen-like activity of perfluoroalkyl acids in vivo and interaction with human and rainbow trout estrogen receptors in vitro[J]. *Toxicol Sci*, 2011, 120 (1): 42-58.
- (英文编辑: 汪源; 责任编辑: 王晓宇)