

我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析

吴浩玮, 孙小淇, 梁博文, 陈家斌, 周雪飞

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0218>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国畜禽粪便管理变化对温室气体排放的影响

朱志平, 董红敏, 魏莎, 马金智, 薛鹏英

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 743-748 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0095>

我国果菜茶中畜禽粪便有机肥替代化肥潜力

安思羽, 李艳霞, 张雪莲, 刘笑冰, 陈兴财, 童心, 胡柏杨, 刘克锋

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1712-1722 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1234>

畜禽粪便中氟喹诺酮类抗生素的生物转化与机制研究进展

夏湘勤, 黄彩红, 席北斗, 檀文炳, 唐朱睿

农业环境科学学报. 2019, 38(2): 257-267 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0268>

山东省畜禽粪污土地承载力时空分异特征分析

郑莉, 张晴雯, 张爱平, 刘杏认, 刘士清, 韩聪

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 882-891 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0863>

2006—2016年间我国畜禽养殖业氮元素入水通量估算

王梦竹, 赵越, 童银栋, 续衍雪, 李佳祺, 齐淼, 林岩

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2829-2836 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0111>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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 Hao-wei, SUN Xiao-qi, LIANG Bo-wen, 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.



开放科学 OSID

我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析

吴浩玮¹, 孙小淇¹, 梁博文¹, 陈家斌^{1,2}, 周雪飞^{1,2*}

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:随着我国经济发展水平的不断提高, 畜牧养殖业发展迅速, 但在畜牧业蓬勃发展的同时, 也产生了大量的畜禽粪便, 由此造成的环境污染问题日益严峻。以我国近年畜禽养殖(大型牲畜猪、牛、羊和家禽)数据为基础, 经污染量化评估得出, 各地养殖结构的不同导致畜禽污染COD、TN、TP负荷占比呈现显著差异。总结分析了目前畜禽粪便的典型处理及资源化利用技术特点, 为其污染防治工作提供决策支持。通过系统评估我国畜禽粪便资源化潜能, 认为我国主要畜禽粪便能源潜力非常可观, 畜禽粪便资源化可在较高程度上填补氮、磷肥的需求, 减少化肥过量施用对农田土壤的危害。

关键词: 畜禽粪便; 资源化利用; 能源潜力

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)06-1168-09 doi:10.11654/jaes.2020-0218

Analysis of livestock and poultry manure pollution in China and its treatment and resource utilization

WU Hao-wei¹, SUN Xiao-qi¹, LIANG Bo-wen¹, CHEN Jia-bin^{1,2}, ZHOU Xue-fei^{1,2*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Animal husbandry has developed rapidly with the continuous economic development of China. Consequently, large amount of livestock and poultry manure has been generated, resulting in increasingly serious environmental pollution. Based on the livestock and poultry breeding data (large-scale livestock, pig, cattle, sheep, and poultry) of China in recent years and through the quantitative assessment of pollution, this paper concludes that different breeding methods lead to significant differences in the proportion of COD, TN, and TP loads of livestock and poultry pollution. This paper analyzes and summarizes the characteristics of the typical treatment method and resource utilization technology of livestock and poultry manure and provides decision support for pollution control. Based on a systematic assessment of the potential of livestock and poultry manure resources in China, we believe that their energy potential in our country is considerable. The use of livestock and poultry manure resources can meet the demand for nitrogen and phosphate fertilizers to a greater extent and reduce the harmful effects of excessive application of fertilizers to farmland soil.

Keywords: livestock and poultry manure; resource utilization; energy potentiality

我国是农业大国, 畜牧业作为我国第一产业的重要组成部分, 为经济发展提供了重要支撑。过去 50 a, 我国畜牧业养殖方式从家庭散养向规模养殖加速转变, 且畜牧业总产值占比提高了 13.3%^[1]; 但部分地

区出现了养殖密度过高、土地畜禽废弃物超负荷等问题, 导致环境污染风险骤增。如畜禽废弃物经雨水冲刷流入水体, 会导致水体富营养化; 未经处理的畜禽粪污直接灌溉农田, 易造成土壤板结, 且有害污染物

收稿日期: 2020-02-28 录用日期: 2020-04-07

作者简介: 吴浩玮(1999—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 从事环境污染与修复技术研究。E-mail: wu.haowei@qq.com

*通信作者: 周雪飞 E-mail: zhouxuefei@tongji.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD1100500)

Project supported: National Key R&D Program of China(2018YFD1100500)

在土壤中的大量沉积会严重影响农作物生长^[2-4]。据原农业部统计,我国每年畜禽粪污产生量高达38亿t,但综合利用率却不足60%。在这种情况下,如何全面推进畜禽养殖废弃物的处理及资源化利用成为亟待解决的问题。本文着重从畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用等方面进行系统分析。

1 畜禽养殖现状及污染分析

1.1 畜禽养殖分布状况

随着我国经济迅速发展以及民众生活水平的提高,人们对肉蛋奶的需求不断增加。自改革开放以来,我国畜禽业发展取得的成就有目共睹。随着强农惠农政策的实施,我国畜禽业发展逐步加快,呈现稳步、健康发展的态势^[5-6]。依据中国畜牧兽医年鉴,全国2015—2017年畜禽出栏量与存栏量汇总见表1。3a中我国大型牲畜(猪、牛、羊)饲养量相对稳定,家禽饲养量有所上升。由于各地区耕地分布和人口密度的不同,导致我国畜禽养殖种类和疏密度出现了不平衡^[7]。2017年全国各地区主要畜禽养殖数量(以猪当量核算)分布情况见图1。从图1看出,我国畜禽养殖主要集中在山东、湖南、河南及四川等省份,以内蒙古新巴虎左右旗交界处到海南省东方市西海岸为界线,西侧为我国畜禽养殖的稀疏地区,而东侧则为畜

禽养殖的密集地区。统计分析表明:我国西南地区依据草原优势发展以牛羊为主的食草型畜牧业;生猪产业集中在四川、河南、山东等省;禽蛋产业集中于河北、山东、江苏等地。

1.2 畜禽养殖污染现状及评估

伴随畜牧业的飞速发展,畜禽养殖废弃物的产生量也在逐年增加,对生态环境造成了极大威胁,其主要体现在水体、土壤和大气污染三方面。

1.2.1 畜禽养殖污染种类

(1) 水体污染

畜禽养殖产生的水体污染物主要包括有机物、氮、磷等物质,而这些污染物进入水体后会导致藻类迅速生长、水中溶解氧含量持续降低,导致水生生物大量死亡;同时,死亡的水生生物尸体腐败后会导致厌氧细菌大量生长,使水体细菌指数超标,继而散发恶臭,甚至可使河流生态功能丧失^[8]。另外,渗入地下的污水会大幅增加地下水中硝态氮或亚硝态氮的浓度,降低地下水溶解氧含量,致使地下水水质严重下降。

(2) 土壤污染

集约化、规模化养殖模式导致畜禽粪便排放量,远超土壤承载能力,难以被及时消纳。畜禽粪便的大量堆积会导致土壤结构失衡及有害物质的不断

表1 全国2015—2017年主要畜禽出栏量与存栏量汇总

Table 1 Summary of China's main livestock and poultry output and stock in 2015—2017

年份 Years	猪 Pigs/万头 Ten thousand		牛 Cattle/万头 Ten thousand		羊 Sheep/万只 Ten thousand		家禽 Poultry/万只 Ten thousand	
	出栏量	存栏量	出栏量	存栏量	出栏量	存栏量	出栏量	存栏量
2017	70 202.1	44 158.9	4 340.3	9 038.7	30 797.7	30 231.7	1 302 190.6	605 302.2
2016	70 073.9	44 209.2	4 265.0	8 834.5	30 005.3	29 930.5	1 319 534.2	617 319.8
2015	70 825.0	45 112.5	5 003.4	10 817.3	29 472.7	31 099.7	1 198 720.6	586 703.0

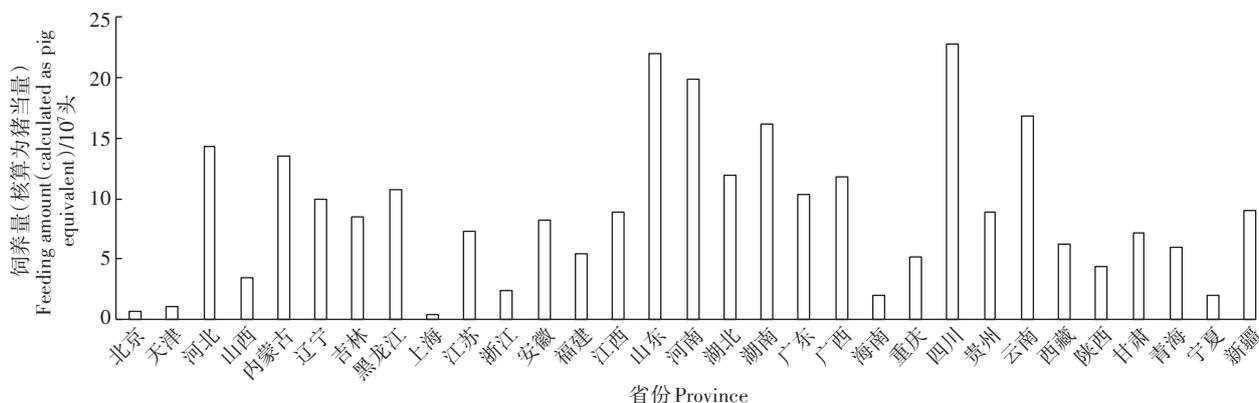


图1 2017年各地区主要畜禽养殖数量(以猪当量核算)分布情况

Figure 1 Distribution of main livestock and poultry raising in different regions in 2017 (calculated by pig equivalent)

累积,如农田土壤中粪便施用过量会使土壤中氮、磷、钾含量超标,严重抑制农作物生长^[9];此外,由于部分饲料中含有添加剂、抗生素等物质,将带有此类有害物质的畜禽粪便施入农田土壤后可导致大量有害组分被农作物吸收,进而严重威胁食品安全。

(3)大气污染

畜禽养殖产生的空气污染物以硫醇类、氨、硫化氢及粪臭素为主。在规模化养殖场中,由于养殖数量大且养殖区域集中,堆积的畜禽粪便经腐败分解后会产生诸如硫化氢等大量有毒有害气体,致使畜禽对疾病的抵抗力减弱,极易感染一些传染病^[10];此外,据统计,畜牧业是全球排名第二的温室气体来源产业,在我国,畜牧业也是农业领域第一大甲烷排放源,若畜禽粪尿处理不当,将会对人们的生活环境和健康产生严重威胁^[11]。

1.2.2 畜禽养殖污染量化评估

本文只对我国畜禽养殖污染情况做粗略评估。因此,本研究在计算畜禽粪便排泄量时,只考虑猪、牛、羊及家禽这4类畜禽。据《畜禽养殖业污染治理工程技术规范》(HJ 497—2009)和国内相关文献^[12],饲养量估算如下:猪的饲养周期为199 d,因此猪1 a的饲养量按照当年的出栏数计算;牛按用途分类主要有肉牛、役牛、奶牛和种牛(种牛数量相对很少,本文做近似估算,不考虑),其中役牛和奶牛一般当年不出栏,采用年末存栏量作为当年饲养量。肉牛未出栏时通常算在役牛的年末存栏量里,肉牛的当年饲养量按当年的出栏量计;羊的饲养周期长于1 a,采用年末存栏量作为当年饲养量;由于无法收集各省家禽中肉鸡、蛋鸡、鸭及鹅的数据,故将家禽的年末存栏量近似认为是当年一个相对稳定的饲养量。依据我国生态环境部标准与国内相关文献^[12],对畜禽粪、尿排泄系数(表2)和畜禽粪、尿污染物平均含量(表3)进行了确定。

基于此,可采用公式(1)对畜禽粪便年产生量进行估算:

$$Q=N \cdot T \cdot P \quad (1)$$

式中: Q 为年度畜禽粪便产生量; N 为畜禽饲养量; T 为饲养周期,其中猪的饲养周期为199 d,肉牛、役牛、奶牛、羊为365 d; P 为畜禽粪便排泄系数。

在此基础上,采用公式(2)进一步求得畜禽粪便中各类污染物含量:

$$A=Q \cdot C \quad (2)$$

式中: A 为畜禽粪便中某类污染物含量; C 为单位质量

表2 畜禽粪、尿排泄系数($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$)

Table 2 Excretion coefficient of livestock and poultry manure($\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$)

畜禽种类 Livestock and poultry species	粪排泄系数 Feces excretion coefficient		尿排泄系数 Urine excretion coefficient	
	范围 Range	平均值 Mean	范围 Range	平均值 Mean
猪	2.0~5.0	3.50	3.3~5.0	4.15
肉牛、役牛	20.0~25.0	22.50	10.0~11.1	10.55
奶牛	30.0	30.00	11.1	11.10
羊	1.30~2.66	1.98	0.43~0.62	0.53
家禽	0.125	0.125	—	—

表3 畜禽粪、尿污染物平均含量($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)

Table 3 Average contents of pollutants of livestock and poultry manure($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)

类别 Category	COD	BOD	$\text{NH}_3\text{-N}$	TN	TP
猪粪	52.00	37.30	3.08	5.88	3.41
猪尿	9.00	5.00	1.43	3.30	0.52
大牲畜粪	31.00	24.53	1.71	4.37	1.18
大牲畜尿	6.00	4.00	3.47	8.00	0.40
羊粪	4.63	4.10	0.80	7.50	2.60
羊尿	4.63	4.10	0.80	14.00	1.96
鸡粪	45.00	47.87	4.78	9.84	5.37
鸭、鹅粪	46.00	30.00	0.80	11.00	6.20

畜禽粪便中该类污染物含量。

本研究由于无法收集各省家禽中肉鸡、蛋鸡、鸭、鹅的数据,故对家禽的粪便产生量做如下处理:将家禽的年末存栏量近似认为是当年一个相对稳定的饲养量;家禽粪便污染物含量则为鸡粪与鸭、鹅粪污染物含量的平均值。采用公式(3)对家禽粪便产量进行估算:

$$\text{年粪便产生量}(\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}) = \text{年末存栏数}(\text{头、只}) \times \text{日排泄系数}(\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}) \times 365 \quad (3)$$

本文以2017年畜禽养殖数据为基础,依据上述公式对我国各地区主要畜禽(大型牲畜猪、牛、羊和家禽)粪尿中COD、氮、磷分布及负荷占比进行了计算,结果如图2所示。

从各地区COD分布图来看(图2a),内蒙古、西藏、甘肃、青海、宁夏以及新疆牛粪便COD比例较高,均占其总排放量的70%以上,虽然这些地区羊养殖量显著多于猪和牛,但由于牛粪COD远超羊粪COD,因此牛粪反而成为了这些地区COD的最大来源;此外,黑龙江、贵州、云南及吉林牛粪便COD占其COD总量的60%左右,而其余地区猪为畜禽产业的主要

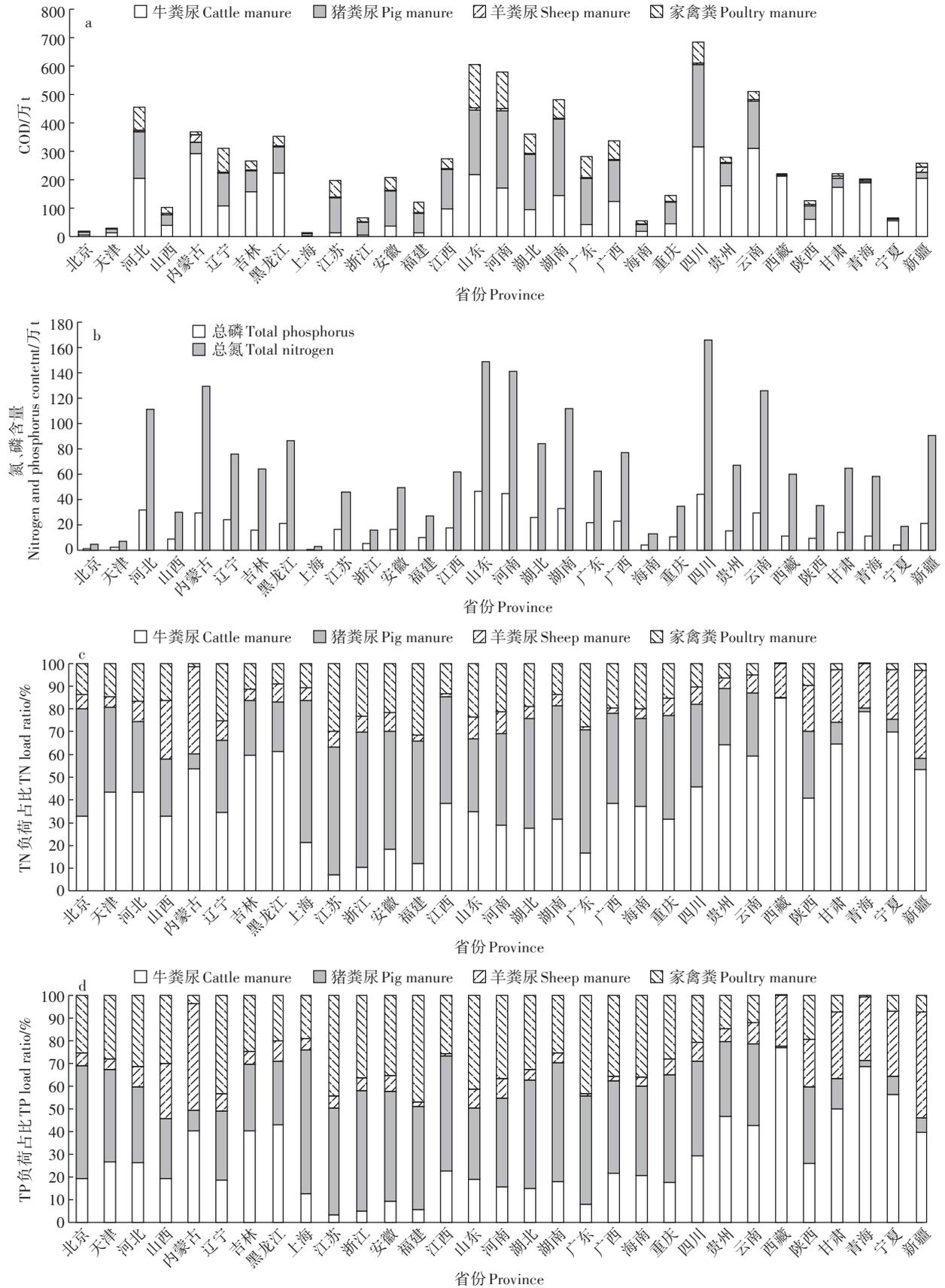


图2 各地区主要畜禽粪便中COD、氮、磷分布及负荷占比

Figure 2 Distribution and load proportion of COD, TN and TP in manure of main livestock and poultry in different regions

养殖对象,因此猪粪COD占比较大。

从各地区畜禽粪便总氮、总磷分布图来看(图2b),四川、山东、河南、内蒙古、云南排名靠前,与排放量基本一致。由总氮负荷占比分布图(图2c)可看出,绝大多数省份产出的四类畜禽粪便中,牛粪便氮含量占比最高,猪粪便次之;而内蒙古、西藏、甘肃、青海、宁夏以及新疆等地区由于猪的养殖量较低,因此牛粪便的总氮比例较高,同时,这些地区羊养殖数量庞大,因此羊粪便的总氮比例显著高于其他地区。从总磷负荷占比分布图(图2d)中可发现,西藏、青海、宁夏等地畜禽粪便中牛粪便含磷量均超过了50%,内蒙古与新疆两地区羊粪便中磷占比最高,均超过46%,而猪粪便与家禽粪含磷量在其他地区占有较高比例。由此可见,各地区养殖结构的不同直接导致畜禽粪便中各类污染物占比呈现显著差异。

2 畜禽粪便处理与资源化利用技术

通过对畜禽粪便进行有效处理,可在消除畜禽粪便污染的同时,使之变废为宝,从而进行资源化利用。

2.1 畜禽粪便处理技术

2.1.1 除臭处理

针对畜禽养殖过程中产生的诸如氨气和硫化氢等臭气,主要从以下两方面进行除臭处理:一是在饲料中添加除臭剂,强化饲料中蛋白质的消化吸收进而减少臭气排放^[13];二是采用物理法(水洗法、空气稀

释法)、化学法(燃烧法、投加药剂法)和生物法(微生物菌剂、生物滤床法)等手段控制动物排泄后粪便的臭味,主要除臭手段的适用性及优缺点见表4。

2.1.2 固液分离处理

据推算,我国每年由畜禽养殖场排放污水的化学耗氧量(COD)总量已接近工业废水的COD排放总量,而排放的总固体含量(TS)是工业固体废弃物的4倍,达19亿t^[9]。鉴于畜禽养殖废水和固废混合物的复杂性,目前国内外普遍采用固液分离技术将畜禽废物进行干湿分离,以便于后续处置(如厌氧发酵)。通过固液分离可以分离出高COD固相,有利于厌氧效果的提升;同时,液相COD的降低缩小了厌氧处理装置的容积和占地面积,可有效节约成本。目前,广泛应用的固液分离技术包括重力沉降技术、蒸发技术、絮凝分离技术、筛分技术、压滤技术及沉淀离心技术,其应用优缺点如表5所示。

2.2 畜禽粪便资源化处理技术

2.2.1 厌氧发酵处理

畜禽粪便中有机质含量为30%~70%,是具有巨大应用潜力的碳源,可通过厌氧发酵转化为甲烷、氢气等清洁能源;同时,消化产物沼液和沼渣富含多种有益微生物及氮、磷等营养元素,可用作土壤有机肥^[20]。因此,畜禽粪便的厌氧发酵处理是一种可同时实现畜禽废弃物减量化、资源化和能源化的高效资源化技术。典型的畜禽粪便厌氧处理流程如图3所示。

表4 各种除臭方法的比较^[14-16]

Table 4 Comparison of various deodorization methods^[14-16]

除臭方法 Deodorization methods	适用范围 Scope of application	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
水洗法	水溶性恶臭气体	工艺简单、运行费用低	效果差、排水产生二次污染
空气稀释法	低浓度恶臭气体	成本低且效果好	易产生空气污染
燃烧法	小气量、高浓度可燃气体	彻底分解臭气成分	成本高、燃料消耗量大、设备易腐蚀且易产生二次污染
投加药剂法	大气量、中高浓度气体	工艺成熟且有针对性	效率低、药剂损耗大、易发生二次污染
生物滤床法	适用气体范围较广	工艺成熟且成本低	占地大、高温气体不适用

表5 几种固液分离技术的优缺点^[17-19]

Table 5 Advantages and disadvantages of several solid-liquid separation technologies^[17-19]

固液分离技术 Solid-liquid separation technologies	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
重力沉降技术	不需外加能量、工艺简单	占地大,停留时间长,沉淀渣含水率高、有臭气
蒸发技术	不需外加能量、工艺简单	占地大,易形成环境污染
絮凝分离技术	方法简单、成本低廉	需要额外加入絮凝剂
筛分技术	设备安装方便、管理简单	固体截留率低、含水率高
压滤技术	处理能力强、滤饼含水率低	滤布磨损大,费时费钱
沉淀离心技术	分离效果好、固体含水率低	震动大、磨损大、噪声高

目前,养殖场中常见的畜禽粪便厌氧发酵方式包括家庭式小型厌氧发酵罐、小型沼气池及工程化升流式/卧式厌氧反应器。前两种简易厌氧发酵技术成本低、处理能力小,主要应用于个体养殖户;而工程化升流式/卧式厌氧反应器主要应用于规模化养殖小区粪污集中处理。

2.2.2 堆肥化利用

畜禽粪便肥料化利用模式主要包括粪污全量还田、粪水肥料化利用、粪水达标排放、异位发酵床及粪污堆肥利用等5种^[22]。相较而言,堆肥手段具有对粪污无害化处理比较彻底、粪便附加值高、经济效益好等优点,是目前应用较广的畜禽粪便处理模式^[23]。畜禽粪便堆肥是利用堆料中的微生物发酵降解粪中有机物质并产生高温,促进粪便腐熟并杀灭其中的病原微生物及杂草种子等,最后形成有利于植物利用的化合物及腐殖质的一种生物化学过程^[24-25]。典型的畜禽粪便堆肥工艺流程如图4所示。

目前主要使用的堆肥技术包括条垛式堆肥、静态堆垛堆肥、槽式堆肥和反应器堆肥4类,其实际应用

范围及优缺点如表6所示。

3 畜禽粪便的资源化利用潜能评估

对畜禽粪便进行资源化利用不仅能减少畜禽粪便的丢弃浪费,提高利用效率,且对畜禽养殖行业的可持续发展具有重要意义。按目前技术发展水平,畜禽粪便资源化利用方式主要为能源化利用和肥料化利用。本文以畜禽粪便产生量为基础对畜禽粪便的能源化利用和肥料化利用潜能进行评估,旨在为畜禽养殖污染控制及能源布局提供数据支持。

3.1 能源化利用潜能评估

畜禽粪便能源化利用是基于厌氧发酵技术处理粪便的同时,将有机废弃物转化为甲烷、氢气等清洁能源的过程。由于该法处理畜禽养殖废弃物的一次性投资较大,对操作技术要求高,因而主要适用于大规模养殖或散养密集区畜禽养殖废弃物的集中式资源化处置。进行畜禽粪便能源潜力(产沼气量)评估时,以粪便的干物质含量或COD含量为基准进行计算,不同畜禽粪便的产气率见表7^[12,28]。

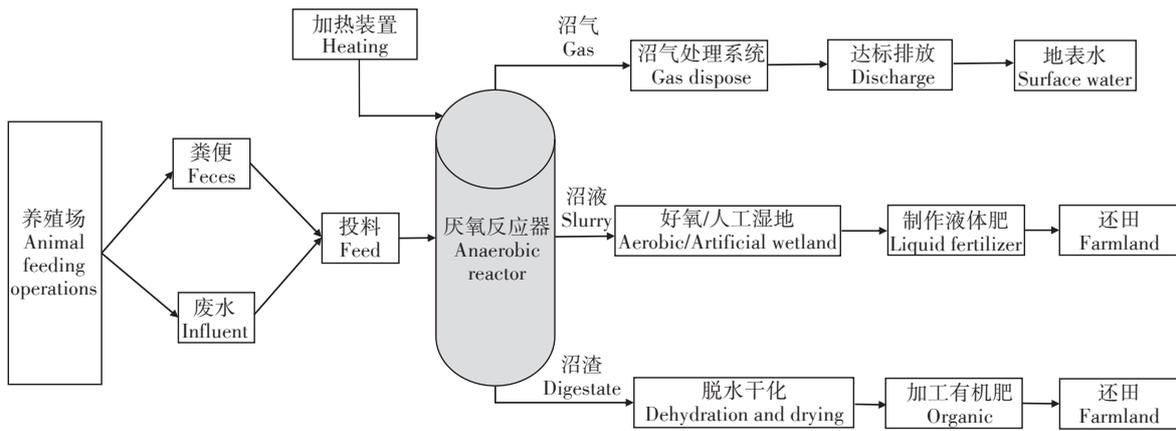


图3 典型畜禽粪便厌氧处理系统^[21]

Figure 3 Typical anaerobic treatment system of livestock manure^[21]

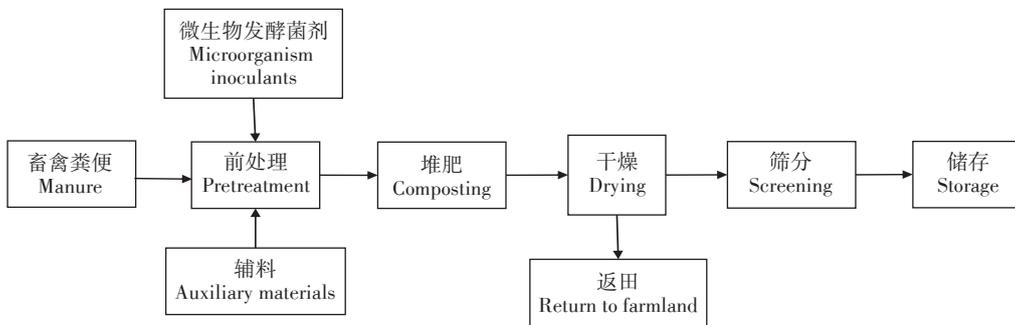


图4 堆肥工艺流程

Figure 4 Process flow of the composting

表6 4种堆肥技术的优缺点^[26-27]Table 6 Advantages and disadvantages of four composting techniques^[26-27]

堆肥技术 Composting techniques	适用范围 Scope of application	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
条垛式堆肥	中小型养殖场	人工或机械进行定期翻堆,运行简单、投资少	需要添加一定的辅料、易受气候和周边环境影 响、臭气不易控制、发酵周期长、占地面积大
静态堆垛堆肥	中小型养殖场	机械通风保证好氧环境,运行简单、投资少	需要添加一定的辅料、易受气候和周边环境影 响、臭气不易控制、发酵周期更长、占地面积大
槽式堆肥	大中型养殖场	翻抛机机械化程度高、可以控制温度和氧含量、不受 气候影响、臭气易收集控制、发酵周期较短	需要添加辅料、设备多、操作复杂、占地面积较 大、土建投资高
反应器堆肥	自动化程度较高的 中小型养殖场	密闭式反应器、无需添加辅料、保温节能、不受气候影 响、臭气易控制、发酵周期短、占地面积小、土建投资少	单体处理量小、无法实现大规模的工厂化生产

本文以干物质含量计,公式如下:

$$Y = \sum_{i=1}^n M_i D_i \beta_i \quad (4)$$

式中:Y为畜禽粪便产沼气预估量, m^3 ;n为畜禽种类数量; M_i 为第*i*种畜禽粪、尿产量, kg ; D_i 为第*i*种畜禽粪便干物质含量; β_i 为第*i*种畜尿粪便产气率, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

以公式(1)中的畜禽粪、尿年产生量(Q)作为 M_i ,以表7提供的干物质含量与产气率数据为基础,采用公式(4)对我国2017年各地区大型牲畜猪、牛、羊和家禽粪便可产沼气量进行了估算,结果如图5所示。

表7 畜禽粪便的干物质含量及产气率

Table 7 Dry matter content and biogas production rate of livestock and poultry manure

畜禽种类 Livestock and poultry species	干物质含量 Dry matter content/%		干物质产气率 Biogas production rate/ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	
	粪Feces	尿Urine	粪Feces	尿Urine
猪	20	0.4	0.2	0.2
牛	19	0.6	0.3	0.2
羊	75	0.4	0.3	0.1
家禽	80	—	0.3	—

由图可知,我国主要畜禽粪便能源潜力非常可观,2017年我国大型牲畜猪、牛、羊和家禽粪便产沼气总潜能为1 983.00亿 m^3 ,通过折算后相当于产出1.42亿t标准煤(以1 m^3 沼气折合标准煤系数为0.714 kg ce 进行计算)。我国大型牲畜猪、牛、羊和家禽粪便产沼气潜力均值为63.97亿 m^3 ,其中,产沼气潜力较高的省份包括山东(161.78亿 m^3)、内蒙古(156.85亿 m^3)、河南(143.18亿 m^3)、四川(137.80亿 m^3)和新疆(113.48亿 m^3);而产沼气潜力相对较低的省份主要包括浙江(14.55亿 m^3)、海南(12.03亿 m^3)、天津(6.31亿 m^3)、北京(3.86亿 m^3)和上海(1.99亿 m^3)。以市场价标准煤450~550元 $\cdot \text{t}^{-1}$ 为基准,可推算出我国大型牲畜猪、牛、羊和家禽粪便所产生的能源效益至少为637.14亿元,各地区所产生的平均能源效益为20.55亿元。

3.2 肥料化利用潜能评估

通常畜禽粪便污染物的流失率为25%~30%^[29],如按30%计,则2017年我国大型牲畜猪、牛、羊和家禽粪便氮、磷损失量分别为622.38万t和171.26万t。畜禽粪便养分主要包括氮和磷,经堆肥处理过的畜禽

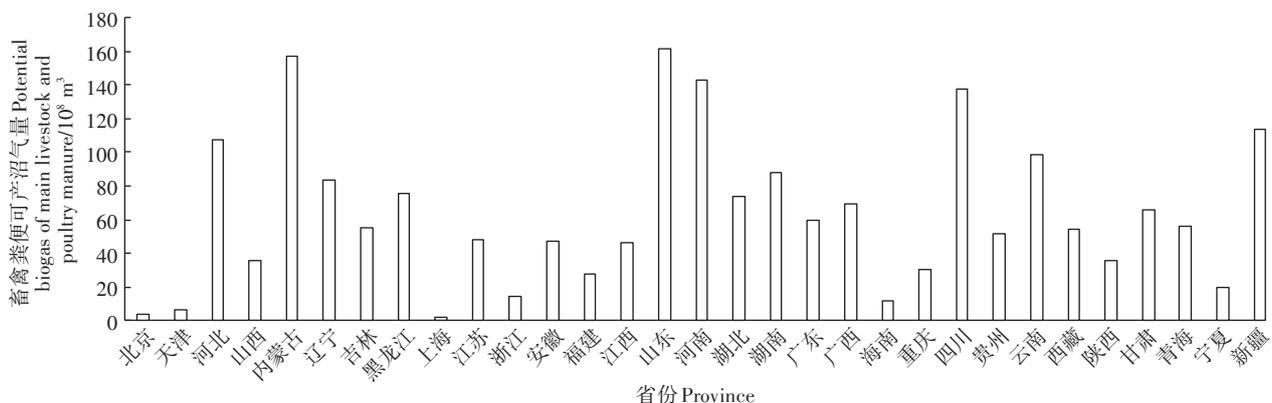


图5 各地区主要畜禽粪便的产沼气潜力

Figure 5 Potential biogas of main livestock and poultry manure of different regions

粪便中重金属活性显著降低,且养分更有利于植物吸收利用。

由中国统计年鉴数据可知,2017年我国施用氮肥、磷肥分别为2 221.82万t和797.59万t。由此可知,我国大型牲畜猪、牛、羊和家禽粪便氮、磷养分含量分别达到氮肥、磷肥施用量的93.4%和71.6%。综上,我国畜禽粪便肥料化潜力可以在较高程度上填补氮肥、磷肥的需求量,因此应增加畜禽粪便还田比例以减少化肥的施用,在降低农业生产成本的同时,解决畜禽废弃物的污染问题并减少化学肥料对农田土壤的危害。

4 结论

(1)我国大型牲畜猪、牛、羊和家禽养殖主要集中在山东、湖南、河南及四川等省份,畜牧业的发展带来的水体、土壤和大气污染不容忽视。各地区养殖结构的不同直接导致畜禽粪便中各类污染物(COD、总氮、总磷)占比呈现显著差异。

(2)目前对畜禽粪便主要采用厌氧发酵、堆肥等资源化利用技术。由于堆肥具有对粪污无害化处理比较彻底、粪便附加值高、经济效益好等优点,已成为我国畜禽粪便资源化利用的主流技术。

(3)我国大型牲畜猪、牛、羊和家禽粪便年产沼气潜力为1 983.00亿 m^3 ,折合1.42亿t标准煤;在肥料化潜力方面,粪便总氮、总磷养分含量分别达到氮肥、磷肥施用量的93.4%和71.6%,可以在较高程度上填补氮、磷肥的需求量,减少化肥过量施用对农田土壤的危害。

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 Ming-li. China's livestock industry development: achievements, experiences and future trends[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2018(8):60-70.
- [2] Zhang C Z, Liu S, Wu S X, et al. Rebuilding the linkage between livestock and cropland to mitigate agricultural pollution in China[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2019, 144:65-73.
- [3] Qian Y, Song K H, Hu T, et al. Environmental status of livestock and poultry sectors in China under current transformation stage[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622/623:702-709.
- [4] Hu Y A, Cheng H F, Tao S. Environmental and human health challenges of industrial livestock and poultry farming in China and their mitigation[J]. *Environment International*, 2017, 107:111-130.
- [5] 王建华,陶君颖,陈璐. 养殖户畜禽废弃物资源化处理方式及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(5):127-137.
WANG Jian-hua, TAO Jun-ying, CHEN Lu. Resource utilization method and influencing factors of farmers' behaviors towards livestock and poultry waste[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(5):127-137.
- [6] 黄美玲,夏颖,范先鹏,等. 湖北省畜禽养殖污染现状及总量控制[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(2):209-219.
HUANG Mei-ling, XIA Ying, FAN Xian-peng, et al. Pollution status and total amount control of livestock and poultry breeding in Hubei Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, 26(2):209-219.
- [7] 付强,诸云强,孙九林,等. 中国畜禽养殖的空间格局与重心曲线特征分析[J]. 地理学报, 2012, 67(10):1383-1398.
FU Qiang, ZHU Yun-qiang, SUN Jiu-lin, et al. Spatial patterns and gravity centers curve of livestock and poultry breeding in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(10):1383-1398.
- [8] 刘晓永,王秀斌,李书田. 中国农田畜禽粪尿磷负荷量及环境风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(11):2594-2608.
LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian. Phosphorus loading rates from livestock and poultry faeces, and environmental evaluation in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(11):2594-2608.
- [9] 吴根义,廖新伟,贺德春,等. 我国畜禽养殖污染防治现状及对策[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(7):1261-1264.
WU Gen-yi, LIAO Xin-di, HE De-chun, et al. Current situation and countermeasures of livestock industry pollution control in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7):1261-1264.
- [10] Park J, Kang T, Heo Y, et al. Evaluation of short-term exposure levels on ammonia and hydrogen sulfide during manure-handling processes at livestock farms[J]. *Safety and Health at Work*, 2020, 11(1):109-117.
- [11] 汪开英,吴捷刚,赵晓洋. 畜禽场空气污染物检测技术综述[J]. 中国农业科学, 2019, 52(8):1458-1474.
WANG Kai-ying, WU Jie-gang, ZHAO Xiao-yang. Review of measurement technologies for air pollutants at livestock and poultry farms[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(8):1458-1474.
- [12] 张田,卜美东,耿维. 中国畜禽粪便污染现状及产沼气潜力[J]. 生态学杂志, 2012, 31(5):1241-1249.
ZHANG Tian, BU Mei-dong, GENG Wei. Pollution status and biogas-producing potential of livestock and poultry excrements in China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(5):1241-1249.
- [13] Beata G, Katarzyna M, Sebastian B, et al. Removal of odorous compounds from poultry manure by microorganisms on perlite-bentonite carrier[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 141:70-76.
- [14] Sebastian B, Katarzyna M, Szymon P, et al. A novel microbial-mineral preparation for the removal of offensive odors from poultry manure[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 119:299-308.
- [15] Katarzyna M, Magdalena O, Sebastian B, et al. The use of *Yucca schidigera* and microbial preparation for poultry manure deodorization and hygienization[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 170:50-59.

- [16] Piotr R, Bartosz S, Jacek G, et al. Treatment of malodorous air in biotrickling filters: A review[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2019, 141:146-162.
- [17] Horacio A, Rebecca A, Mahmoud A, et al. Solid-liquid separation, and drying of dairy manure: Measuring constituents and modeling emission[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 696:134059.
- [18] 盛婧, 周炜, 王子臣, 等. 畜禽养殖粪污工程化处理对污水理化性状的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(6):877-883.
SHENG Jing, ZHOU Wei, WANG Zi-chen, et al. Effect of engineering treatment on the physical and chemical properties of livestock slurry[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(6):877-883.
- [19] 江滔, 温志国, 马旭光, 等. 畜禽粪便固液分离技术特点及效率评估[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(增刊2):218-225.
JIANG Tao, WEN Zhi-guo, MA Xu-guang, et al. Characteristics and efficiency evaluation of livestock slurry separation technologies[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(Suppl 2):218-225.
- [20] Zhou S, Liang H, Han L, et al. The influence of manure feedstock, slow pyrolysis, and hydrothermal temperature on manure thermochemical and combustion properties[J]. *Waste Management*, 2019, 88:85-95.
- [21] 成登苗, 李兆君, 张雪莲, 等. 畜禽粪便中兽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.
CHENG Deng-miao, LI Zhao-jun, ZHANG Xue-lian, et al. Removal of veterinary antibiotics in livestock and poultry manure: A review[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(17):3335-3352.
- [22] 曾锦, 徐锐, 梁高飞, 等. 畜禽养殖废弃物资源化利用技术及推广模式研究进展[J]. *畜牧与饲料科学*, 2018, 39(8):56-63.
ZENG Jin, XU Rui, LIANG Gao-fei, et al. Research advances on the resource recycling technology and extension model of livestock and poultry wastes[J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2018, 39(8):56-63.
- [23] Saez J, Clemente R, Bustamante A, et al. Evaluation of the slurry management strategy and the integration of the composting technology in a pig farm-agronomical and environmental implications[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 192:57-67.
- [24] 刘颖, 肖尊东, 杨恒星. EM发酵菌在畜禽粪便自然堆肥中的应用研究[J]. *环境科学与管理*, 2015, 40(7):80-82.
LIU Ying, XIAO Zun-dong, YANG Heng-xing. Application of EM microorganism in poultry and livestock excrement composting[J]. *Environmental Science and Management*, 2015, 40(7):80-82.
- [25] 刘江, 张德晖. 猪舍粪污垫料堆肥工艺流程与翻抛机研究概况[J]. *农业工程*, 2019, 9(9):55-58.
LIU Jiang, ZHANG De-hui. Pig house dung mat material composting process and overview of research on turning machine[J]. *Agricultural Engineering*, 2019, 9(9):55-58.
- [26] Xu Z, Zhao B, Wang Y, et al. Composting process and odor emission varied in windrow and trough composting system under different air humidity conditions[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297:122482.
- [27] David A, Lara E, Alex V, et al. A model-based investigation of the potential advantages of multi-layer packed beds in solid-state fermentation[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2010, 48(2):195-203.
- [28] 田宜水. 中国规模化养殖场畜禽粪便资源沼气生产潜力评价[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(8):230-234.
TIAN Yi-shui. Potential assessment on biogas production by using livestock manure of large-scale farm in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8):230-234.
- [29] 董雪霁, 吴志毅, 吴娟, 等. 包头市畜禽养殖污染特性及资源化潜力分析[J]. *环境与发展*, 2018, 30(2):38-41.
DONG Xue-ji, WU Zhi-yi, WU Juan, et al. Analysis of pollution characteristics and resource-based potential of livestock and poultry wastes in Baotou City[J]. *Environment and Development*, 2018, 30(2):38-41.