



袁京, 尹子铭, 王国英, 李丹阳, 杨佳, 李国学. 羊垫料养殖技术研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(01): 140-145.  
YUAN Jing, YIN Ziming, WANG Guoying, LI Danyang, YANG Jia, LI Guoxue. Research progress of sheep bedding breeding technology[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(01): 140-145.  
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.01.13

## 羊垫料养殖技术研究进展

袁京 尹子铭 王国英 李丹阳 杨佳 李国学\*

(中国农业大学 资源与环境学院/农田土壤污染防治与修复北京市重点实验室, 北京 100193)

**摘要** 为实现规模化舍饲羊养殖的绿色可持续发展, 推动垫料养殖技术在羊养殖领域的应用, 采用文献综述和归纳总结的方法, 对羊垫料养殖技术最新研究进展进行系统探讨。通过分析羊垫料养殖技术的特点、垫料选择标准、以及垫料养殖对羊只饲养效果的相关参数, 期望从源头解决羊场粪污处理问题, 为养羊业的可持续发展提供理论支撑和技术指导。结果表明: 1) 羊垫料养殖技术能及时有效的处理羊粪污、改善圈舍环境, 减轻对环境的不良影响。2) 与传统养殖方式相比, 羊垫料养殖技术可减少羊患病率, 实现快速增重等, 对促进羊只生长健康和福利方面具有明显优势。3) 垫料的选择与管理是影响动物健康、生产性能以及环境可持续性的关键因素。

**关键词** 垫料养殖; 有机垫料; 圈舍环境; 饲养效果

中图分类号 X713; S141.4

文章编号 1007-4333(2024)01-0140-06

文献标志码 A

## Research progress of sheep bedding breeding technology

YUAN Jing, YIN Ziming, WANG Guoying, LI Danyang, YANG Jia, LI Guoxue\*

(Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Control and Remediation/ College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract** To realize the green and sustainable development of large-scale fattening sheep breeding and promote the application of bedding breeding technology in the field of sheep breeding, this paper systematically discussed the latest research progress of bedding breeding technology by literature review and summary. The results showed that: 1) The technology can effectively treat sheep manure and improve the enclosure environment, and mitigate adverse environmental impacts. 2) Compared with traditional breeding methods, bedding breeding could reduce the prevalence and increase the rapid weight gain, which had lots of obvious advantages in promoting the growth health and welfare of sheep. 3) The selection and management of sheep bedding was one of the important factors affecting sheep health, production performance, and environmental sustainability. Therefore, this paper mainly analyzed the characteristics of sheep bedding breeding technology, bedding selection criteria, as well as the feeding effect and related parameters of sheep bedding breeding, hoping to solve the problem of waste disposal in sheep farms from the source, improve production performance, improve the enclosure environment, and provide theoretical support and technical guidance for the sustainable development of sheep farming.

**Keywords** bedding culture; organic bedding; enclosure environment; feeding performance

近年来, 中国养羊业呈现规模化、集约化迅速发展态势, 羊养殖规模不断加大。据《中国统计年鉴

收稿日期: 2023-03-26

基金项目: 国家现代农业绒毛羊产业技术体系(CARS-39); 内蒙古自治区科技计划项目(2021GG0316)

第一作者: 袁京(ORCID: 0000-0002-6936-7615), 副教授, 从事废弃物处理与资源化利用研究, E-mail: jingyuan@cau.edu.cn

通讯作者: 李国学(ORCID: 0000-0002-7371-398X), 教授, 从事废弃物处理与资源化利用研究, E-mail: ligx@cau.edu.cn

2022》数据显示,2021年我国羊养殖量达到3.20亿只,其中山羊1.33亿只,绵羊1.86亿只。规模化养羊也使得羊粪污产量急剧增加,据《第二次全国污染源普查公报》<sup>[1]</sup>和羊粪尿产排污系数测算,2021年中国畜禽粪污年产量达30亿t,羊粪污占比达9.54%<sup>[2]</sup>,羊粪尿若不能及时有效处理,会严重威胁农业生态环境。随着国家对生态养殖的倡导和推行,养羊业作为畜牧养殖产业的重要一部分,加强羊粪污处理与资源化利用对污染防治至关重要。

圈舍环境是保证养殖福利和生长性能<sup>[3]</sup>的重要途径。目前,羊规模化舍饲养殖主要采用硬化地面、漏缝地板及土垫圈等方式,但以上养殖方式往往无法及时对羊粪进行分离处理,易在圈舍中造成粪污堆积,产生大量臭气,脏污的圈舍环境会导致羊只患病、足蹄损伤等。垫料养殖技术是在羊舍内的地面上铺设一层垫料,高效利用垫料的吸附特性清理羊只排泄的粪尿,随后在粪便中微生物的作用下迅速发酵降解,在养殖过程中实现羊粪污的原位处理。同时,干燥和柔软的垫料床也能够保证羊只具有舒适的休息条件<sup>[4]</sup>,有利于提高生产性能。此外,羊粪有机质含量高,堆积状态下易自然发酵释放热量,属于热性肥料<sup>[5]</sup>,具备制备垫料温床的良好优势。因此,垫料养殖技术已成为可持续养殖和环境保护的重要方式。

国外,一些发达国家已经建立起较为成熟的羊垫料养殖模式,通过选择适宜垫料丰富集约化养殖圈舍环境,并取得了显著经济效益。诸多研究集中于垫料养殖技术对羊养殖成本、生长、福利、生产性能和肉质等相关方面的影响<sup>[6-8]</sup>,谷物秸秆是使用较广泛的垫料,同时还可作为饲料使用<sup>[9]</sup>。由于欧洲的牧区不存在耕作区域,采用农业副产物作为养殖垫料的成本不断升高,亟需经济可替代的垫料,如造纸工业副产品等<sup>[10]</sup>。也有学者开始关注垫料发酵产物,由于垫料粪污废弃物木质纤维素成分含量高,降解不彻底,因此需要通过好氧堆肥或厌氧发酵等方式进一步处理提高利用效率<sup>[11-12]</sup>。目前,传统的垫料养殖方式存在清圈频率低,厚度大,周期长等弊端。我国羊养殖场也逐步从硬化地面、漏缝地板及土垫圈等传统舍饲方式向垫料养殖技术转变。薄层叠铺垫料技术是我国学者基于国外垫料养殖技术进行改进后的技术,张伟涛等<sup>[13]</sup>提出育肥羊薄层叠铺免维护发酵床养殖模式,即首先铺设10~15 cm垫

料,后期根据粪污堆积程度及垫料污浊腐化情况再铺设一层(5~8 cm),发现圈舍NH<sub>3</sub>平均含量降低70%,并降低了管理难度。尹子铭<sup>[14]</sup>选取易获取的农业副产物秸秆、锯末以及不受市场控制的腐熟堆肥作为垫料,进行单次薄层铺设(10 cm),发现可有效减少羊养殖过程38%~48%的NH<sub>3</sub>排放;建议垫料发酵周期为45 d,以避免盐分过度累积影响后续资源化利用。相比于传统垫料养殖方式,薄层铺垫技术在确保原有垫料养殖优势的基础上,节约了人工成本及垫料用量,更具推广与应用优势。

垫料养殖技术在我国养羊业中应用仍不普遍,尤其缺乏标准化垫料选择与技术应用参数。因此,本文针对羊垫料养殖技术进行系统探讨,主要介绍垫料养殖对羊生产与环境控制的优势与管理实践,期望从源头解决规模化羊产业舍饲养殖粪污处理问题,提高羊只舒适度并实现更有效的技术应用,为养羊业的可持续发展提供指导。

## 1 垫料的选择

垫料养殖技术可为羊只提供柔软、干燥的圈舍环境,因此,垫料类型的选择尤为重要。目前,中国多从垫料的安全性、成本、发酵效果等方面出发,因地制宜选择原料,北方多以秸秆、锯末、花生壳等农业废弃物为主,南方则主要为稻秸、米糠、木屑等材料,但往往缺乏对羊只舒适度与其偏好的考虑。国外已有诸多关于羊只偏好垫料类型的研究。Teixeira等<sup>[15]</sup>研究了锯末、废纸、稻壳和秸秆4种有机废弃物作为单一垫料的效果,发现羊只更喜好锯末垫料,躺卧时间达80%。Færevik等<sup>[16]</sup>发现羊只在未剪毛和剪毛时都偏好在导热系数较低且柔软的秸秆垫料上躺卧。Wolf等<sup>[17]</sup>研究发现羊只在木屑垫料上活动的次数约是秸秆垫料的2倍。躺卧行为对于改善动物的福利非常重要,也有研究发现在羊只偏好垫料养殖条件下明显改善饲料转化率与健康情况<sup>[18]</sup>。因此,在选择垫料时,需充分考虑羊只对垫料的偏好以确保生长性能及其福利。

由于区域生物质资源和养殖差异,经系统总结,总结了以下常用垫料种类和使用标准:1)锯末:锯末具有吸附性强、木质化程度高、不易发霉,使用周期长等优势,作为垫料的适宜含水率为30%~45%,容重约为180 kg/m<sup>3</sup>;2)作物秸秆:作物秸秆易降解,铺设后圈舍地面柔软干燥,透气性好,冬季

保温效果佳,适宜含水率为在5%~15%,容重约为95 kg/m<sup>3</sup>; 3)稻壳:稻壳耐水渗透、隔热、利于真菌生长,但水分保持能力有限,建议选取其他类型有机垫料与稻壳混合铺设,适宜含水率为5%~15%,容重为70~110 kg/m<sup>3</sup>; 4)腐熟堆肥:腐熟堆肥是优质的垫料材料,蓬松柔软、孔隙度高且富含有益微生物,具有物理吸附与生物接种降解双重优势,适宜含水率为30%~45%,容重为300~500 kg/m<sup>3</sup>。此外,腐熟堆肥一般受市场和季节性影响较小,可作为长期垫料来源。

此外,根据养殖场和地域的实际情况也可采用非生物源垫料。例如,沙土作为垫料具有成本低、来源广泛和抑制细菌生长的优点,但保温性较差,发病率相对较高,沙土适宜含水率为10%~20%,容重约为1 200 kg/m<sup>3</sup>。此外,橡胶垫也可作为垫料材料,穿孔的橡胶垫柔软,具有防滑、冬季保温,夏季凉爽的优点,在圈舍中易清洗,但成本相对较高,目前在开放式养殖场中应用有限。

## 2 垫料使用效果影响因素

垫料养殖技术对圈舍环境的改善与羊只生长状况密切相关<sup>[19]</sup>。在养殖过程中,加强对垫料使用管理是发挥效果优势的关键。影响垫料使用效果的主要影响因素为:

1)水分调节。一般认为含水率控制在40%~55%范围内有利于垫料中微生物对羊粪尿的降解。水分过高会使垫料颗粒间空隙充满水分,从而影响通风,降低垫料床氧气含量,易导致厌氧发酵;水分过低则不利于微生物生长需求,抑制降解<sup>[20-22]</sup>,同时也会增加灰尘,加剧形成气溶胶颗粒,引发动物的呼吸道疾病<sup>[23]</sup>; 2)垫料补充与更新。养殖过程中,随羊粪尿降解转化,垫料作为辅料也逐渐损耗。当垫料减少10%或垫料床厚度下降1/5时,应及时补充新垫料,并将其与表层的垫料混合均匀,实现菌群接种<sup>[24]</sup>。此外,针对患病羊只需进行个性化管理,及时将其排泄物与垫料的混合物清除,阻断疾病传播; 3)通透性管理。羊只习性好动,随养殖时间增加与羊蹄踩踏,会降低垫料床的柔软度,需定期翻抛垫料床以持续保持垫料床的舒适性,建议2~3周翻抛1次<sup>[25]</sup>; 4)饲养密度。一般认为羔羊的饲养密度在0.8~1.0 m<sup>2</sup>/只,成年羊1.2~1.5 m<sup>2</sup>/只<sup>[26]</sup>。饲养密度过大会导致羊粪尿产生过多,微生物无法

将其全部降解转化;与之相反,则难以满足微生物生命活动所需的营养物质,不利于对羊粪尿的降解。因此,需根据羊的不同生长阶段和个体大小调整垫料养殖饲养密度; 5)用药管理。垫料上不得使用化学药(消毒药)和抗生素类药物,防止药物杀灭垫料中微生物。可以对圈舍外部环境进行消毒,避免外部环境中有害微生物繁衍至垫料床。

## 3 垫料养殖对圈舍环境和生产性能的影响

### 3.1 温度

垫料床温度可以在一定程度上反映微生物对羊粪尿的降解状态<sup>[27]</sup>。羊粪尿与垫料混合后,微生物分解有机质降解会释放大量热量,形成垫料床发酵区域。温度一般随深度增加呈现先上升后下降趋势,在20 cm处温度最高,平均可达40~60℃<sup>[28]</sup>,当温度达到55℃维持5~7 d可有效破坏粪便中杂草种子活力<sup>[29]</sup>。而未发酵区域则维持在室温水平。此外,垫料床温度随季节变化差异也较大,Leso等<sup>[30]</sup>在夏季和冬季分别测量垫料10 cm处的温度,发现夏季垫料层温度为29.6℃,低于地面温度,在冬季为11.7℃,高于地面温度。因此,通过铺设垫料能够调节圈舍地面温度,确保羊只体感温度舒适。

### 3.2 污染气体

养殖过程中排放的温室气体(CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O)和恶臭气体(NH<sub>3</sub>和H<sub>2</sub>S)会造成严重的环境问题及人畜健康风险。CH<sub>4</sub>排放是羊粪尿在厌氧环境下产生,传统养殖方式中,粪污在圈舍内长期堆积,堆体孔隙结构差,氧气供应不足,极易发生厌氧发酵,导致CH<sub>4</sub>产生。而垫料养殖可有效减少CH<sub>4</sub>产生,李丹阳<sup>[31]</sup>研究发现,沙土与秸秆混合垫料的CH<sub>4</sub>排放量最低,这可能是由于沙土中有机质含量低以及秸秆疏松多孔的特性导致,锯末垫料减排N<sub>2</sub>O效果最佳(43.4%~81.9%),这与锯末自身较大的孔隙度特性有关。但沙土垫圈养殖方式会加剧N<sub>2</sub>O排放,这可能由于沙土微生物接种到羊粪尿中,充足的碳源和氮源强化了硝化和反硝化作用有关。NH<sub>3</sub>和H<sub>2</sub>S是圈舍恶臭气体的主要来源,较差的圈舍环境以及粪污堆积会加剧其排放,垫料养殖可在养殖过程中对粪尿进行一定程度吸附、固定和降解,减少恶臭气体产生,同时,垫料疏松多孔的结构对气体吸附具有良好作用。

### 3.3 生长性能

垫料养殖技术可有效提高羊只生长性能与养殖福利。Richmond等<sup>[32]</sup>研究发现铺设秸秆垫料可维持剪羊毛后的羊只体温恒定,减少温度应激和免受硬化地面的摩擦伤害。Aguayo-Ulloa等<sup>[33]</sup>研究发现羊只在铺设秸秆垫料圈舍下比不铺垫料每天多增重56 g,育肥评分更高。Klont等<sup>[34]</sup>研究发现铺设垫料减少羊只应激现象,促进糖原利用,肉质更佳。单慧等<sup>[35]</sup>选用断奶小尾寒羊羔羊随机分配饲养于垫料圈舍与普通羊舍内,进行为期90 d的育肥试验,相比于普通羊舍,垫料养殖下小羊平均日增重提高34.2%,饲料费用降低2.8%,兽药费用降低60.0%,料重比降低17.8%。严光礼等<sup>[36]</sup>将垫料水分控制在45%~50%内,进行黔北麻羊垫料养殖试验,发现相较于传统养殖方法,垫料养殖可以节约饲料成本,提高饲料转化,并能提供更适宜的生长环境,减少应激现象和不良行为。江宇等<sup>[37]</sup>发现与传统养殖相比,采用垫料养殖可以明显提高羊只抵抗力,使发病率降低7.5%,死亡率降低7.0%,满足福利饲养的要求,提升养殖场经济效益。

## 4 养殖垫料的高值化利用

由于垫料存在一定使用寿命,再利用问题亟待解决。养殖垫料通常由垫料与羊粪尿的混合物构成,具备较高的C/N以及疏松的结构,有利于微生物的增殖及物料发酵。因此,采用好氧堆肥工艺是养殖垫料资源化处理的重要途径,后续所生产的有机肥可施用于农田<sup>[38]</sup>,从而构建种养结合模式。已有研究表明,施用羊粪有机肥能够提高土壤肥力,改善土壤物理性状,增强土壤酶活性<sup>[39]</sup>,且对作物生长、产量和品质产生积极影响。Mendonca等<sup>[40]</sup>将羊养殖垫料与牛粪( $\geq 50\%$ )混合堆肥后,发现获得的羊粪有机肥更稳定,养分含量更高。此外,后续的腐熟堆肥也可作为养殖垫料循环利用。厌氧发酵是利用羊养殖垫料的另一种途径。Cestonaro等<sup>[41]</sup>发现羊养殖垫料与牛粪进行协同厌氧发酵可以增加沼气产量。许多学者也将垫料作为育苗基质进行开发,葛慈斌等<sup>[42]</sup>以 $V_{\text{垫料}}:V_{\text{沙土}}=1:3$ 的比例将垫料用于蔬菜育苗基质研发,取得良好效果。魏宾斌等<sup>[43]</sup>以30%~50%废弃垫料替代泥炭作为栽培基质,有效促进了金花茶生长。清粪后的垫料是较好的有机肥、基质原料,经处理后可实现高值化利用。

## 5 展望

垫料养殖技术是一种环保有效的生态养殖法,解决了当下规模化舍饲羊养殖粪污环境污染问题,也提高了羊只养殖福利。但关于垫料生产标准、种类特性及不同区域垫料养殖应用参数的问题研究仍有待完善,本文提出以下两点展望,以期推动羊垫料养殖技术因地制宜发展:

### 5.1 垫料的多元化与组合利用

我国生物质资源种类繁多且性质差异较大,可在羊养殖垫料技术中发挥重要作用,但任何一种有机资源都有局限性,在垫料技术的后续研究中可根据实际需求,研发多类有机垫料的组合复配利用,从物理结构空隙支撑,材料介质高吸附性能以及菌糠类废弃物微生物降解特性等方面充分发挥不同种类有机废弃物的互补优势,实现羊粪尿高效无害化和资源化利用,减控养殖环境污染气体,促进羊养殖绿色发展。

### 5.2 垫料混合物无害化与资源化处理

随着羊养殖过程防病、促生以及饲料结构调整摄入的含有盐分、重金属、抗生素等物质,经肠道未被吸收部分会随粪尿排出,粪污中病原菌等风险污染物会在垫料中不断累积。目前发现垫料养殖过程受高盐分和高污染物的影响,仍无法达到完全无害化和腐熟。因此,垫料养殖后羊粪尿与垫料混合物仍需进行后续的异位生物转化处理,例如采用高温好氧堆肥技术,快速灭活病原菌等,进而实现就地就近资源化利用。

## 参考文献 References

- [1] 生态环境部. 第二次全国污染源普查公报[N]. 环境保护, 2020, 48(18): 8-10  
Ministry of Ecology and Environment. *Bulletin of the Second National Pollution Sources Survey*[N]. *Environmental Protection*, 20, 48(18): 8-10 (in Chinese)
- [2] 李丹阳, 王娟, 袁京, 元传仁, 张燕卿, 丁京涛, 王惠惠, 沈玉君, 李国学. 不同饲养方式下的羊产排污系数对比研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 672-681  
Li D Y, Wang J, Yuan J, Qi C R, Zhang Y Q, Ding J T, Wang H H, Shen Y J, Li G X. Comparative study of pollutant production and the discharge coefficient of sheep under different feeding methods[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(3): 672-681 (in Chinese)
- [3] Swanson J C. Farm animal well-being and intensive production systems[J]. *Journal of Animal Science*, 1995, 73(9): 2744
- [4] Norring M, Manninen E, Passillé A M, Rushen J, Saloniemi H. Preferences of dairy cows for three stall surface materials with small amounts of bedding[J]. *Journal of Dairy Science*, 2010, 93(1): 70-74

- [5] 贾林霞. 家畜粪便有机肥的特性[J]. 养殖技术顾问, 2011(4): 260  
Jia L X. Characteristics of organic fertilizer from livestock manure [J]. *Modern Animal Husbandry Science & Technology*, 2011(4): 260 (in Chinese)
- [6] Wolf B T, Molloy H R B, Trayte M J, Rose M T. Behaviour of growing lambs housed on straw or woodchip bedding materials and their preference for floor type [J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2010, 124(1/2): 45-50
- [7] Teixeira D L, Miranda-de la Lama G C, Pascual-Alonso M, Aguayo-Ulloa L, Villarroel M, Maria G A. A note on lamb's choice for different types of bedding materials [J]. *Journal of Veterinary Behavior*, 2013, 8(3): 175-179
- [8] Teixeira D L, Villarroel M, Maria G A. Assessment of different organic beddings materials for fattening lamb [J]. *Small Ruminant Research*, 2014, 119(1/3): 22-27
- [9] Teixeira D L, Miranda-de la Lama G C, Villarroel M, Garcia-Belenguier S, Sanudo C, Maria G A. Effect of straw on lamb welfare, production performance and meat quality during the finishing phase of fattening [J]. *Meat Science*, 2012, 92(4): 829-836
- [10] Teixeira D L, Miranda-de la Lama G C, Villarroel M, Olleta J L, Garcia-Belenguier S, Escós J, Maria G A. Effects of alternative bedding substrates on lamb welfare, productive performance, and meat quality during the finishing phase of fattening [J]. *Journal of Veterinary Behavior*, 2015, 10(2): 171-178
- [11] Mendonça Costa M S S, Cestonaro T, Mendonça Costa L A, Rozatti M A T, Carneiro L J, Pereira D C, Lorin H E F. Improving the nutrient content of sheep bedding compost by adding cattle manure [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 86: 9-14
- [12] Cestonaro T, Mendonça Costa M S S, Mendonça Costa L A, Rozatti M A T, Pereira D C, Lorin H E F, Carneiro L J. The anaerobic co-digestion of sheep bedding and  $\geq 50\%$  cattle manure increases biogas production and improves biofertilizer quality [J]. *Waste Management*, 2015, 46: 612-618
- [13] 张伟涛, 邱凤珍, 王健诚, 樊秀利. 育肥羊薄层叠铺免维护发酵床养殖模式之探索[J]. 北方牧业, 2021(13): 21  
Zhang W T, Qiu F Z, Wang J C, Fan X L. Exploration on the breeding mode of fattening sheep in thin layer and maintenance-free fermentation bed [J]. *BeiFang MuYe*, 2021(13): 21 (in Chinese)
- [14] 尹子铭. 羊粪垫料-堆肥-陈化全链条腐熟与污染气体排放特征研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2023  
Yin Z M. Study on characteristics of decomposing and polluting gas emission of sheep manure bedding composting-aging chain [D]. Beijing: China Agricultural University, 2023 (in Chinese)
- [15] Teixeira D L, Miranda-de la Lama G C, Pascual-Alonso M, Aguayo-Ulloa L, Villarroel M, Maria G A. A note on lamb's choice for different types of bedding materials [J]. *Journal of Veterinary Behavior*, 2013, 8(3): 175-179
- [16] Færevik G, Andersen I L, Bøe K E. Preferences of sheep for different types of pen flooring [J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2005, 90(3/4): 265-276
- [17] Wolf B T, Molloy H R B, Trayte M J, Rose M T. Behaviour of growing lambs housed on straw or woodchip bedding materials and their preference for floor type [J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2010, 124(1/2): 45-50
- [18] Stubsoen S M, Moe R O, Mejdell C M, Tømmerberg V, Knappe-Poindecker M, Kampen A H, Granquist E G, Muri K. Sheep welfare in different housing systems in South Norway [J]. *Small Ruminant Research*, 2022, 214: 106740
- [19] Fitzpatrick J, Scott M, Nolan A. Assessment of pain and welfare in sheep [J]. *Small Ruminant Research*, 2006, 62(1/2): 55-61
- [20] 李东平, 余功富, 金洁瑜, 林滨, 王翀, 茅慧玲. 发酵床在反刍动物养殖中的应用研究进展[J]. 浙江畜牧兽医, 2018, 43(1): 29-32  
Li D P, Yu G F, Jin J Y, Lin B, Wang C, Mao H L. Research progress on application of fermentation bed in ruminant breeding industry [J]. *Zhejiang Journal Animal Science and Veterinary Medicine*, 2018, 43(1): 29-32 (in Chinese)
- [21] 李彬辉, 庄毅璇, 林巍, 谭自航, 胡虎. 生态发酵床运行参数变化规律研究[J]. 工业安全与环保, 2020, 46(2): 99-101  
Li B H, Zhuang Y X, Lin W, Tan Z H, Hu H. Study on the variation law of operating parameters of ecological fermentation bed [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2020, 46(2): 99-101 (in Chinese)
- [22] 辛世杰. 微生物菌剂在有机废弃物堆肥中的作用及其机理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012  
Xin S J. Study on the role and mechanism of microbial agents in organic waste composting [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012 (in Chinese)
- [23] 曹珍, 陈峰, 张祥斌, 毕英佐. 发酵床养殖畜禽基本技术参数研究进展[J]. 家畜生态学报, 2014, 35(4): 7-11  
Cao Z, Chen F, Zhang X B, Bi Y Z. Review of basic parameters of deep-litter system for breeding livestock and poultry [J]. *Acta Ecologica Animalis Domastici*, 2014, 35(4): 7-11 (in Chinese)
- [24] 陈祖鸿, 符世雄, 宋汝谋, 杨开明. 发酵床养牛技术及其推广应用[J]. 贵州畜牧兽医, 2018, 42(3): 25-29  
Chen Z H, Fu S X, Song R M, Yang K M. The technology and extended application of fermentation bed cattle raising [J]. *Guizhou Journal of Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2018, 42(3): 25-29 (in Chinese)
- [25] 付艳芳, 杨丹. 发酵床养羊的制作方式及注意事项[J]. 北方牧业, 2019(15): 20  
Fu Y F, Yang D. Production method and matters needing attention of raising sheep in fermentation bed [J]. *BeiFang MuYe*, 2019(15): 20 (in Chinese)
- [26] 赵立君. 发酵床养羊的优点及其工作原理[J]. 现代畜牧科技, 2015(2): 16  
Zhao L J. Advantages and working principle of raising sheep in fermentation bed [J]. *Modern Animal Husbandry Science & Technology*, 2015(2): 16 (in Chinese)
- [27] Mosquera J, Hol J M G, Monteny G J. Gaseous emissions from a deep litter farming system for dairy cattle [J]. *International Congress Series*, 2006, 1293: 291-294
- [28] Llonch L, Castillejos L, Mainau E, Manteca X, Ferret A. Effect of forest biomass as bedding material on compost-bedded pack performance, microbial content, and behavior of nonlactating dairy cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103(11): 10676-10688
- [29] Eghball B, Lesoing G W. Viability of weed seeds following manure windrow composting [J]. *Compost Science & Utilization*, 2000, 8(1): 46-53
- [30] Leso L, Barbari M, Lopes M A, Damasceno F A, Galama P, Taraba J L, Kuipers A. Invited review: Compost-bedded pack barns for dairy cows [J]. *Journal of Dairy Science*, 2020, 103(2): 1072-1099
- [31] 李丹阳. 中国规模化羊场粪污产排特征与羊粪堆肥污染气体减控机制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2021  
Li D Y. Characteristics of manure production and discharge in large-scale sheep farms in China and pollution reduction mechanism of sheep manure compost [D]. Beijing: China Agricultural University, 2021 (in Chinese)
- [32] Richmond S E, Wemelsfelder F, Heredia I B, Ruiz R, Canali E, Dwyer C M. Evaluation of animal-based indicators to be used in a welfare assessment protocol for sheep [J]. *Frontiers in Veterinary Science*, 2017, 4: 210
- [33] Aguayo-Ulloa L A, Villarroel M, Pascual-Alonso M, Miranda-de la Lama G C, Maria G A. Finishing feedlot lambs in enriched pens using feeder ramps and straw and its influence on behavior and physiological welfare indicators [J]. *Journal of Veterinary Behavior*, 2014, 9(6):

- 347-356
- [34] Klont R E, Hulsegge B, Hoving-Bolink A H, Gerritzen M A, Kurt E, Winkelman-Goedhart H A, Jong I C, Kranen R W. Relationships between behavioral and meat quality characteristics of pigs raised under barren and enriched housing conditions[J]. *Journal of Animal Science*, 2001, 79(11): 2835-2843
- [35] 单慧, 孙喜奎, 杨立军, 刘玉坤, 董汉荣, 郑平. 利用微生物发酵床养羊试验[J]. 黑龙江动物繁殖, 2013, 21(5):55-56  
Shan H, Sun X K, Yang L J, Liu Y K, Dong H R, Zheng P. Experiment on raising sheep by microbial fermentation bed[J]. *Heilongjiang Journal of Animal Reproduction*, 2013, 21(5): 55-56 (in Chinese)
- [36] 严光礼, 徐猛. 微生态发酵床养羊与传统养羊效果的对比分析[J]. 养殖技术顾问, 2012(1):234-235  
Yan G L, Xu M. Comparative analysis on the effect of raising sheep in microecological fermentation bed and traditional sheep raising [J]. *Modern Animal Husbandry Science & Technology*, 2012(1): 234-235 (in Chinese)
- [37] 江宇, 崔艳霞, 张卫平, 徐亚楠, 潘晓亮. 秸秆制作发酵床在养羊业中的应用研究[J]. 饲料博览, 2012(4):26-28  
Jiang Y, Cui Y X, Zhang W P, Xu Y N, Pan X L. Application research of the fermentation bed made of straw in sheep [J]. *Feed Review*, 2012(4): 26-28 (in Chinese)
- [38] 王岩, 王文亮, 霍晓婷. 家畜粪尿的堆肥化处理技术研究II. 堆肥材料的发酵特性和氨气挥发[J]. 河南农业大学学报, 2002, 36(3): 284-287  
Wang Y, Wang W L, Huo X T. Study on composting treatment of livestock wastes II. decomposition of composting materials and emission of ammonium [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2002, 36(3): 284-287 (in Chinese)
- [39] 冯焕德, 党志国, 倪斌, 陈鸿宇, 何翠翠, 魏志远, 陈业渊. 羊粪发酵肥替
- 代化肥对芒果园土壤性状、叶片营养及果实品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(6): 190-195  
Feng H D, Dang Z G, Ni B, Chen H Y, He C C, Wei Z Y, Chen Y Y. Effects of sheep fermentation fertilizer substituting for different quantities of chemical fertilizer on soil characters, leaf nutrition and fruit quality in mango orchard[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(6): 190-195 (in Chinese)
- [40] Mendonça Costa M S S, Cestonaro T, Mendonça Costa L A, Rozatti M A T, Carneiro L J, Pereira D C, Lorin H E F. Improving the nutrient content of sheep bedding compost by adding cattle manure[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 86: 9-14
- [41] Cestonaro T, Mendonça Costa M S S, Mendonça Costa L A, Rozatti M A T, Pereira D C, Lorin H E F, Carneiro L J. The anaerobic co-digestion of sheep bedding and  $\geq 50\%$  cattle manure increases biogas production and improves biofertilizer quality [J]. *Waste Management*, 2015, 46: 612-618
- [42] 葛慈斌, 黄素芳, 刘波, 朱育菁, 蓝江林, 余山红. 利用养殖垫料、蘑菇渣土制备育苗基质的研究[J]. 武夷科学, 2013, 29(1):211-215  
Ge C B, Huang S F, Liu B, Zhu Y J, Lan J L, Yu S H. Study on the preparation of nursing media with pig bedding compost and mushroom residue[J]. *Wuyi Science Journal*, 2013, 29(1): 211-215 (in Chinese)
- [43] 魏宾斌, 李章汀, 张燕青, 林方喜, 潘宏. 发酵床废弃垫料基质化处理对金花茶生长的影响[J]. 安徽农学通报, 2018, 24(21):66-68  
Wei B B, Li Z T, Zhang Y Q, Lin F X, Pan H. Effect of substrate treatment of waste bedding in fermentation bed on the growth of *Camellia chrysantha*[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2018, 24(21): 66-68 (in Chinese)

责任编辑: 秦梅



**第一作者简介:** 袁京, 博士, 中国农业大学资源与环境学院副教授, 博士生导师, 现任农田土壤污染防治与修复北京市重点实验室副主任、中国农业大学废弃物循环利用高水平创新团队骨干、绿色食品评审专家、北京市生活垃圾分类指导专家、青海省和内蒙古自治区科技人才, 科技特派团成员。长期从事城乡有机固体废物资源化处理和污染物控制研究, 主持国家自然科学基金、十四五国家重点研发计划项目、海南省重大科技计划项目、以及企事业委托项目 15 余项。

在有机废弃物绿色循环利用的基础理论、关键技术研发与模式集成创新、资源循环管理与评价等方面取得了一系列创新研究成果。发表学术论文 75 篇, 其中第一/通讯作者 60 篇 (SCI/EI 45); 申请发明专利 22 件, 授权 8 件, 出版专著 3 部, 作为副主编出版《规模以下养殖场(户)畜禽粪污资源化利用实用技术与典型案例》, 研发的装备入选 2020 中国农业农村十大新装备, 在全国 20 余个省份和地区开展畜禽粪污资源化利用示范推广工作; 荣获教育部科学技术进步奖二等奖 1 项 (2018 年), 农业农村部神农奖科技进步奖 1 项 (2019 年), 农业农村部全国农牧渔业丰收奖一等奖 1 项 (2019 年), 中华环保联合会科学技术奖一等奖 1 项 (2023 年, 第 2 完成人)。



**通讯作者简介:** 李国学, 二级教授, 中国农业大学人才培养计划领军教授、废弃物处理与循环利用高水平创新团队负责人、生物质工程中心主任; 农田环境污染防治与修复北京市重点实验室主任; 国家绒毛用羊产业体系粪污处理岗位科学家、农业农村部畜禽养殖废弃物资源化利用技术指导委员会委员、国家畜禽养殖废弃物资源化科技创新联盟专家委员会主任、青海省畜禽养殖废弃物资源化利用首席专家、青海省牦牛产业发展咨询专家组成员、中国农学会农业环境损害鉴定评估分会副主任委员、国务院扶贫办和山西省外资扶贫项目“山西省包容性农业产业融合发展项目”咨询专家。

长期从事循环农业与污染控制研究, 承担完成国家和省部级项目 80 余项, 荣获国家及省部级奖项 14 项; 作为“十二五”国家科技支撑计划“循环农业科技工程”项目首席, 领导全国 188 家单位创建了适合我国不同生态类型区循环农业发展的 5 大技术集和 6+1 模式群, 在全国 23 个省/区推广应用。申请专利 44 项 (授权 25 项), 出版学术专著 15 部, 发表学术论文 381 篇 (其中 SCI/EI 论文 188 篇)。