

福建省“农-牧-菌”循环农业体系构建与技术实践

陈华, 叶菁, 刘朋虎, 王义祥, 翁伯琦

引用本文:

陈华, 叶菁, 刘朋虎, 王义祥, 翁伯琦. 福建省“农-牧-菌”循环农业体系构建与技术实践[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(5): 966-973.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1221>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

养殖业污染防控技术研究态势的文献计量分析

李红娜, 姜凯阳, 徐海圣, 常志州, 吴华山, 朱昌雄

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1314-1325 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1378>

“产业治污”模式削减丘陵区农业面源氮排放

刘广龙, 李涛, 薛利红, 樊丹, 戴志刚, 甘晓东, 张凯, 周宇翔, 胡荣桂

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1963-1970 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0369>

“十三五”国家重点研发计划农业面源专项标志性成果概述

徐长春, 熊炜

农业环境科学学报. 2023, 42(1): 11-16 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1038>

“农业面源和重金属污染农田综合防治与修复技术研发”专项组织实施进展分析

徐长春, 熊炜, 郑戈, 林友华

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1242-1246 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0337>

我国农业农村减排固碳标准现状与体系构建

霍丽丽, 姚宗路, 赵立欣, 罗娟, 张沛祯, 张心怡

农业环境科学学报. 2023, 42(2): 242-251 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0818>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈华, 叶菁, 刘朋虎, 等. 福建省“农-牧-菌”循环农业体系构建与技术实践[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(5): 966-973.

CHEN H, YE J, LIU P H, et al. System construction and technical practice of the circular agriculture of planting industry-animal husbandry-edible fungi in Fujian Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(5): 966-973.

福建省“农-牧-菌”循环农业体系构建与技术实践

陈华^{1,3}, 叶菁^{1,3}, 刘朋虎^{2,3*}, 王义祥^{1,3}, 翁伯琦^{1,3}

(1. 福建省农业科学院农业生态研究所, 福州 350003; 2. 福建省农林大学国家菌草工程技术研究中心, 福州 350002; 3. 福建省红壤山地农业生态过程重点实验室, 福州 350003)

摘要:因地制宜地构建农-牧-菌循环农业体系、研发配套关键技术并集成推广应用,有助于推动乡村产业振兴与农业绿色发展,其有效实施对建设人与自然和谐共生的农业现代化具有重要意义。本文总结了近10年福建省在农-牧-菌循环农业体系优化构建与关键技术研究方面的进展与应用成效,系统阐述了养猪场废弃物资源化循环利用与菌业高效生产、农牧菌废弃物资源化高效循环利用与有效链接技术、农牧废弃物-食用菌循环农业综合开发体系及调控技术,深入探索了有益微生物菌剂筛选、主要接口技术优化、高效栽培基质研发、温室气体有效减排、复合体系碳中和等集成创新及其技术集成应用,深入分析了科技创新带动乡村循环农业开发与促进乡村绿色低碳发展的有效作用,提出深化现代循环农业的研究方向及其重点技术攻关内容。

关键词:福建省;农-牧-菌;循环农业;体系构建;主要技术

中图分类号:F323.22 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)05-0966-08 doi:10.11654/jaes.2022-1221

System construction and technical practice of the circular agriculture of planting industry-animal husbandry-edible fungi in Fujian Province

CHEN Hua^{1,3}, YE Jing^{1,3}, LIU Penghu^{2,3*}, WANG Yixiang^{1,3}, WENG Boqi^{1,3}

(1. Agricultural Ecology Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China; 2. National Engineering Research Center of Juncao Technology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. Fujian Key Laboratory of Agro-Ecological Process in Hilly Red Soil, Fuzhou 350003, China)

Abstract: In promoting the revitalization of rural industries and green development of agriculture, optimizing the construction of a recycling agriculture system of planting industry-animal husbandry-edible fungi according to local conditions, as well as performing in-depth research and promoting related supporting technologies will have important, practical, and far-reaching significance for developing agricultural modernization systems, in which human and nature coexist harmoniously. This study reviewed and summarized the main progress of our project team, in the optimization and construction of a planting industry-animal husbandry-edible fungi circular agriculture system and the research on key technologies from the past decade; the specific focus was given to the recycling system for pig farm waste and efficient development of technology in the mushroom industry, recycling system of agricultural and pastoral mushroom resources and production application technology, optimization and regulation based on agricultural and pastoral wastes-mushroom development systems, and research and development progress of production technology. Integrated and innovative technologies such as breeding new varieties of edible fungi, screening beneficial microbial agents, optimizing main interface technologies, research and development of high-efficiency

收稿日期:2022-11-29 录用日期:2023-03-13

作者简介:陈华(1976—),男,福建福安人,副研究员,从事食用菌栽培与循环农业技术研究。E-mail:fjch1976@163.com

*通信作者:刘朋虎 E-mail:phliu1982@163.com

基金项目:福建省科技厅农业引导性项目(2022N0020);中央引导地方科技发展专项(2020L3030,2021L3021)

Project supported: The Guiding Project of Agriculture of Fujian Science and Technology Agency (2022N0020); The Project of the Central Government Leading Local Science and Technology Development(2020L3030,2021L3021)

cultivation substrates, effective greenhouse gas emission reduction, and system carbon dioxide neutralization were systematically expounded upon. This study analyzed the experiences and main lessons of science and technology innovations driving rural industry, promotion of green development in circular agriculture, and integrated promotion. Moreover, this study proposes the research direction for deepening modern circular agriculture and related key technical breakthrough information.

Keywords: Fujian; planting industry-animal husbandry-edible fungi; recycling agriculture; system construction; main technologies

为贯彻落实绿色发展理念,各地深入探索生态循环农业模式与配套技术并取得了良好成效。据统计,我国每年种植业秸秆量超过7亿t,养殖业废弃物接近40亿t^[1]。福建省农牧菌业废弃物资源总量超过0.5亿t,但有效处理率不到50%,乡村面源污染仍然由农牧菌业废弃物排放所致,尤其是养殖业粪尿排放,使小流域水体超出适宜负荷量的31.6%;虽然通过有机肥生产、食用菌栽培、沼气开发等消纳了农牧菌业废弃物总量的40%,但是其余60%的农牧菌业废弃物仍有待于实施循环利用,因此发展现代循环农业的潜力巨大^[2]。近10年来,福建省在现代循环农业创新研究与集成推广及其生产实践方面取得一系列进展,为现代农业绿色发展与乡村产业振兴探索了新的途径。

福建省以食用菌产业绿色发展为牵引,充分利用农牧业废弃物,既生产优质菌物产品又转化消纳有机废物^[3],研发并形成了农-牧-菌循环农业高质量发展新格局,为乡村产业振兴与农民增收致富做出了积极贡献。进入新发展阶段,农-牧-菌循环农业也面临着如何固碳提质与节能减排的新课题,既要充分开发利用农牧废弃物,创新高效循环利用技术,实现优质生产与农民增收,又要做到资源节约与环境友好^[3-4],创立农-牧-菌体系碳中和新途径。因此,本文概述了福建省农-牧-菌循环农业体系中不同生产模式的成效及其生产技术研究进展,并提出深化探索与集成推广应用的对策,为乡村现代农业绿色发展与循环农业转型升级提供理论参考与实践借鉴。

1 农-牧-菌循环农业体系优化构建的总体思路

以农业绿色发展理念为指导,通过农牧菌业结合与不同要素有序匹配,以有效消纳种植业与养殖业废弃物为目标,按照减量化、再利用、再循环、可调控的原则来优化设立链接环节与接口技术,因地制宜地设立农牧耦合、农菌复合的高效循环利用环节,使之合理匹配,循环利用,推动产业生态化与生态产业化的有效融合发展,促进与完善现代循环农业的绿色生产,有效保护区域生态环境,助力乡村产业振兴与农

民增收致富。在总体思路实施过程中,需要注重以下几个方面的内容:

(1)开展农牧菌业废弃物利用及其风险评价,研究有机肥施用对农田生态环境的影响。农业废弃物产生与污染风险评价的目的在于明确农牧菌业废弃物产生量及其对乡村生态环境影响与负荷状况,要深入分析种植业秸秆、养殖业粪便和食用菌菌渣等废弃物去向及其再利用匹配特征,重点评价区域种养业废弃物负荷及其区域耕地的适宜承载力。长期定位观测点数据显示,长期施用猪粪、鸭粪配制的有机肥处理与对照处理相比,氮的利用率提高12.3%,蔬菜硝酸盐含量降低19.6%^[5];连续3a施用双孢蘑菇菌渣生产的专用肥(菌渣造粒)可提高水稻产量8.9%~12.5%;稻田土壤有机质含量提高3.6%~8.7%;化肥和牛粪有机肥长期配施,可使蔬菜硝态氮、亚硝酸盐分别降低16.6%、13.3%^[6]。试验结果表明,连续5a施用菌渣有机肥 $10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,可替代传统稻作50%化肥施用量(以纯N养分核算),且稻田连续5a施用复合有机肥可消纳菌渣 $60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,同时有效减少双氰胺化学添加剂使用量,减少化肥投入成本,保护稻田生态环境^[7]。

(2)强化农业废弃物资源化技术攻关与应用。在农-牧-菌循环农业体系中,要优化构建以食用菌生产为核心的转化平台,有效利用作物秸秆与养殖废物栽培食用菌,以菌渣等废弃物生产优质有机肥,进而再进入农田生态系统,实现循环利用。栗方亮等^[8]研究了菌渣作复合有机肥造粒黏结剂的技术,并改进了有机/无机菌渣复合肥制备工艺与产业化技术;王焯平等^[9]探索了菌渣生物炭制备技术,利用带土双孢蘑菇菌渣作为黏结剂,替代高岭土等原料生产有机/无机复合颗粒肥与酸化土壤调理剂,以有机/无机复合颗粒肥和化肥分别施入土壤后15d,其氮素损失率分别为8%和41%。以菌渣为堆肥主料生产有机/无机复合颗粒肥,再以菌渣有机颗粒肥+菌渣生物炭+有益微生物菌剂作为稻田基肥^[10],其水稻作物氮肥利用率比对照处理(普通有机肥)提高23%。连续2a施用菌渣生物炭有助于菜地酸化土壤改良,菜地土壤pH

提升0.4~0.5个单位^[11]。其中筛选堆肥高温菌剂是重要环节,其有助于农牧菌业废弃物高效分解,对微生物丰度和群落变化具有明显影响。王义祥等^[12]在猪粪渣+鸭粪便的堆肥中添加高温发酵的菌株后,堆肥发酵时间缩短了5~7 d。刘波等^[13]按照不同作物生长需求,在发酵物料中分别添加不同的化学农药、化学肥料、生物菌剂、生物质炭,研制不同系列的专用肥料、复合肥料、药肥基质、生物炭调理剂等产品,并实现了产业化生产,其应用成效十分显著。

(3)探索影响农-牧-菌体系循环转化内外因素。农牧菌业多级循环利用模式合理与否取决于废弃物中碳、氮等物质转化效率及其环境响应。陈钟佃等^[14]以栽培杏鲍菇的菌渣作为再生基质,双孢蘑菇的碳素再利用率为10.8%~16.9%,氮素转化率为21%~54%;黄勤楼等^[15]优化创立了规模化养猪场污染及废弃物的多级循环利用模式,以农牧废弃物栽培食用菌,再利用菌渣生产有机肥,不仅增加经济效益25%以上,而且可相对减少碳排放19.6%。事实上,在发酵微生物菌株筛选及菌渣堆制过程中主要因子变化规律与调控是关键。颜明娟等^[16]研究牧草轮作对奶牛场污水氮、磷的净化效果,阐明了温度、湿度、酸度、氮量、碳量、菌剂等关键要素的作用,其中酸度影响最大,温度与湿度影响次之;刘波等^[13]优化构建了以纤维素高效降解菌筛选、微生物区系动态变化规律及其配套应用技术等为核心的优化调控体系;杨国良等^[17]筛选并构建的高效纤维素降解复合菌剂在菌渣原料发酵过程中应用效果十分显著,其与对照处理相比,堆体升温5~6℃,缩短发酵时间5~7 d,不仅加快了有机物的分解,同时明显提高了堆肥中滤纸纤维素酶的活性。

(4)创新并开发应用循环系统的碳转化技术。 CO_2 排放发生于食用菌栽培生产全过程,而 CH_4 和 N_2O 排放则发生于栽培料发酵过程。影响 CO_2 排放的主要因子为温度、湿度及基质的酸碱度调控等,研究表明pH 6.5~7.0为适宜范围^[18]。要实现农-牧-菌循环系统碳中和,需要促进系统内碳排放与碳吸收的平衡。李艳春等^[19]深入探讨了茶枝代料栽培灵芝、茶园合理套种灵芝和菌渣就地回园对茶园土壤有机碳库的影响,分析了内在规律并优化调整了套种比例及其菌渣回园方法。李振武等^[20]研究并建立了茶-菌-菌渣回园循环利用模式并进行运营实践,结果表明山地茶园单位面积内 CO_2 含量高低顺序为单一灵芝>茶叶-灵芝>单一茶叶,茶叶+灵芝系统 CO_2 含量比单一灵芝系统减少71.6%,有利于茶-菌系统内部 CO_2 中和

利用;茶园套种灵芝不仅提高土壤肥力,连续套种3 a后茶园土壤有机质提高8.75%,且每667 m²增加280~420元产值,经济效益显著。

2 农-牧-菌循环农业体系实践成效

2.1 大中型养猪场废弃物资源化循环利用模式实践成效

在乡村规模化养殖场废弃物减量化基础上,优化构建资源化循环利用模式并有效实施是现代循环农业发展的重要基础。该模式的主要技术包括4个方面:(1)生猪饲料氮磷减量及营养配方技术优化。包括在生猪饲养不同阶段,优化减少饲粮氮含量2.5%~3.0%、磷含量0.1%~0.2%,降低铜、铁、锌等微量元素添加水平。在饲料中添加植酸酶30~40 mg·kg⁻¹、非淀粉多糖酶100~120 mg·kg⁻¹的处理与对照处理相比,粪磷、粪氮含量分别减少8.64%、10.80%,同时可减少粪锌12%、粪铜9.7%^[21]。(2)养猪场废物固液分离及沼液高效利用技术。研发的新型固液分离机使粪便废液的总固体含量(TS)去除率达到75%以上。优化设计细菌固定化颗粒制备工艺并研发养殖污水复合过滤方法,明显提高了养猪场废液的总氮和总磷的去除率,21 d后,去除率达到88.6%和55.0%;经固液分离之后,猪粪渣作为双孢蘑菇栽培基质,废液则导入沼气池,沼液应用氧化塘净化等集成技术处理后,水体中化学需氧量(COD)和生化需氧量(BOD)的去除率分别提高75.3%和64.0%,水体中 COD_{Cr} 值则从260~280 mg·L⁻¹降到50~60 mg·L⁻¹^[22]。利用氧化塘净化后的沼液养鱼,通过筛选适宜鱼种和投苗数量,可使产量达4.65 t·hm⁻²。(3)集约化养猪场废物作基质循环利用技术。将固液分离机分离出的猪粪渣作为基质原料,用于替代牛粪栽培双孢蘑菇,与常规栽培基质处理相比,产量提高了15.8%~22.0%。以猪粪渣替代45%的木屑栽培木耳和替代55%的棉籽壳栽培银耳,其产量分别比对照提高12.6%和9.7%;以猪粪渣替代45%的棉籽壳栽培糙皮侧耳,其产投比达3.65,比常规栽培原料处理提高了1.79倍^[23]。(4)集约型养猪场沼液多级化循环利用技术。实践表明,以沼液灌溉狼尾草草地,每667 m²产量达9.8 t·a⁻¹,一般666.7 m²鱼塘可配套666.7 m²狼尾草(夏季)+黑麦草(冬季套种)草地,草鱼/鲢(鳙)鱼鱼种搭配比例以1:1.2~1:1.3为宜,杂交狼尾草用于草鱼饵料,其最佳刈割期为28 d左右,草鱼对狼尾草中干物质的消化率达到70.28%,同时

草鱼肉中多不饱和脂肪酸(PUFA)、亚麻酸(18:3n-3)的含量分别是全饲料喂养处理的1.86、10.17倍^[24]。

2.2 养猪场发酵床微生物制剂研发与垫料多级循环利用模式实践成效

规模化养猪场发酵床微生物制剂研发与废弃物多级循环利用模式(图1)由4个系统构成,即有益微生物饲料系统、有益微生物垫料系统、养殖环境因子调控系统、群体监测与智能化反馈系统。以微生物发酵床标准化养猪为核心的循环农业园区,配套菌剂创制、优化配方、基质生产、循环利用、智能大棚等技术,实现循环农业高效运营。取得的成效主要有:(1)畜牧养殖废弃物微生物降解技术研发。福建省农科院联合项目组收集了国内外芽孢杆菌34 892株,分离筛选了饲用益生菌剂,创制了饲用益生菌(稗窠1~5号);先后研发了系列有机废弃物堆肥发酵专用菌剂、微生物发酵床粪污降解菌剂等14种菌剂^[25],对集约化养猪场发酵床微生物复合制剂研发与废弃物多级循环利用模式开发提供了厚实基础。(2)设计与建设微生物发酵床养猪场。刘波等^[26]研究并筛选了微生物发酵床的替代垫料,以菌渣+椰壳粉+秸秆+专用菌剂为混合原料替代紧缺的锯末,构建了微生物发酵床大栏养猪体系并研发了配套装备,主要包括微生物发

酵床大栏养猪场、养殖生态环境监控系统、大栏养猪场发酵床垫料翻堆机械。微生物发酵床+大栏方式养猪与传统模式相比,不仅可节约63%的建场用地,而且节约26%的建场成本,同时节约85%的养殖用水,效益增加31%,养殖废弃物进入循环系统,基本实现零排放^[27]。(3)利用养猪场发酵床垫料开发基质。以养殖场发酵床垫料为主原料,筛选并添加无致病力的地衣芽孢杆菌(FJAT-4)等系列生防菌,研发出种苗培育基质,与对照处理相比,其蔬菜种苗病害发生率降低了76%。以发酵床垫料为基材,实现产业化生产食用菌栽培基质;以添加10%~15%养猪场垫料的基质栽培的姬松茸、真姬菇,产量分别比常规配料栽培提高16.5%、10.8%^[28]。卢政辉等^[29]以杏鲍菇菌渣替代传统基质,筛选了栽培双孢蘑菇新配方,因地制宜优化了工厂化设施栽培模式与环境调控技术;翁伯琦等^[30]经多年选育并成功获得“福蘑38”双孢蘑菇新品种,工厂化栽培产量比传统品种As2796提高19.6%,分别以55%和65%杏鲍菇渣替代常规基质料栽培双孢蘑菇,其产量分别比传统栽培基质增产11.7%和10.2%。刘波等^[26]扶持合作企业共同研发不同种类生物基质生产线1条(年生产能力达10万t),开发优质基质产品6类13个,批量生产生物肥药产品3个。(4)建立微生物发酵床养殖场示范区。刘波等研究制定并获准发布了《微生物发酵床大栏养猪技术规范》(DB35/T 1543—2015),并按照标准化、循环化、工业化的理念,优化构建了以微生物发酵床养殖场为核心,配套人工腐殖质生产的园区,构建了现代循环农业优质生产与高效经营模式。

2.3 规模化养牛场牧草净化治理及其饲草高效循环利用模式实践成效

利用牧草治理规模化养牛场废液,并实施牧草高效循环利用技术,有助于养分吸收转化与生态环境保护。该模式的主要技术包括:(1)利用杂交狼尾草有效消纳养牛场废水。南平长富乳业集团第27牧场利用53 hm²红壤山地,大面积连片种植闽牧6号狼尾草。定位观测数据表明,配套53 hm²草地可消纳1 200头养牛场沼液废水,杂交狼尾草对养牛场沼液氮、磷的吸收率分别达40.23%和37.25%^[31]。(2)引进牧草新品种以提高饲草营养品质。项目组引进系列红象草品种,开展品种区试评比后筛选出红象草FJ-2新品种,并通过省级审定。红象草新品种茎叶的 α -亚麻酸含量比对照品种高62.2%^[32];¹⁵N示踪试验数据显示,杂交狼尾草粗纤维、粗蛋白、粗脂肪含量分别达

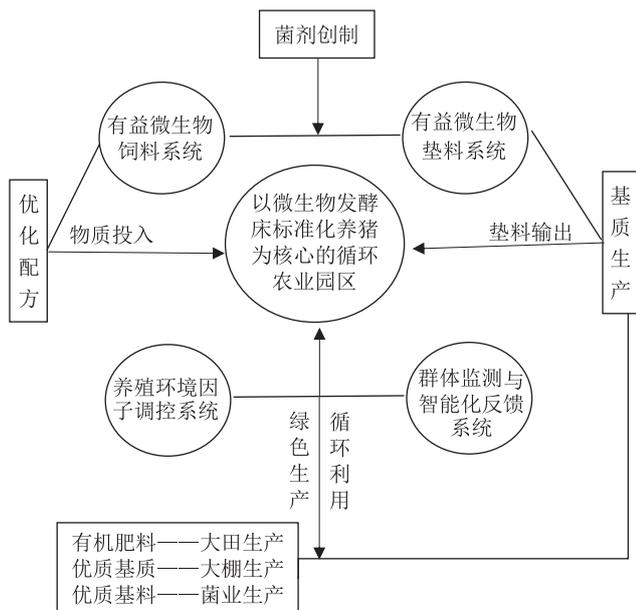


图1 规模化养猪场发酵床微生物制剂研发与废弃物多级循环利用模式

Figure 1 The model of research and development of microbial preparation in fermentation bed and multi-stage recycling of waste in large-scale pig farm

30.5%、12.4%、2.8%。其对沼液氮的利用效率为18.20%~29.34%，杂交狼尾草作为饲料，其氮素消化率为27.67%~68.20%^[33]。(3)提高牧草加工品质以高效饲养奶牛。黄勤楼等^[34]引进了14个纤维素降解菌株，通过试验筛选出5株纤维素高效降解菌，进而研发出高效降解纤维素的复合菌剂“贮宝2号”，开发了以狼尾草为物料的不同系列青贮料，红象草茎叶青贮料乳酸含量提高16%以上，杂交狼尾草青贮料中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维降解率分别达31%和28%。项目组近年研究结果表明，杂交狼尾草/花生秧混合比为65:35，红象草/花生秧混合比为50:50为适宜比例；肉牛饲喂狼尾草/花生秧青贮料，料重比达50:1时，肉牛质量增加达1.19 kg·d⁻¹，奶牛饲喂红象草/花生秧青贮料，每100 g牛乳中 α -亚麻酸含量达15.88 mg，比对照处理增加43.5%。(4)构建草-牧-沼多级循环利用模式。以山区奶牛场为载体，通过多年研究并因地制宜地构建了草-牧-沼多级循环利用模式，形成了牧草饲料-奶牛生产-牛粪基质-沼气发电-沼液灌溉-牧草生长的递进循环利用新业态。通过系统产投比分析表明，南平市长富乳业集团第27牧场不仅节约饲料-肥料-灌溉-能量投入成本42%，而且环境承载负荷强度降低43%。通过反馈能值有效替代，系统的可持续发展指数(17.8)比对照处理增加33.6%，总体净效益比对照处理提高32.5%^[35]。

2.4 菌业生产温室气体减排及其菜-菌体系CO₂中和利用模式实践成效

实施食用菌生产过程CO₂有效减排，实现菌业废弃物资源化是现代循环农业的重要环节。该模式主要技术有：(1)草生菌碳排放规律与减排技术。项目组采用静态箱-气相色谱法，探讨双孢蘑菇、秀珍菇等栽培过程的温室气体排放动态，其呈现出前低-中高-后低的排放规律。双孢蘑菇在生长期全程排放CO₂，其中栽培基质中15%~20%的碳量被转化到菇体，25%~30%残留在菇渣中、50%~60%以CO₂形式排放到大气中^[36]。在进行栽培基质预处理过程碳排放方面，创立姬松茸培养料新型复式堆积法，优化堆料碳氮比和满格堆制厚度，改进层次交叉翻堆机械，缩短堆制发酵时间，减少温室气体排放。姬松茸栽培基质按照33:1或者35:1的C/N进行堆制发酵，既保障培养料发酵质量，又降低了23%的温室气体排放量，姬松茸产量与对照处理相比提高了29%~38%。(2)大棚菌菜共作栽培与碳中和技术。项目组研究并优化构建了温室大棚蔬菜和食用菌CO₂、O₂

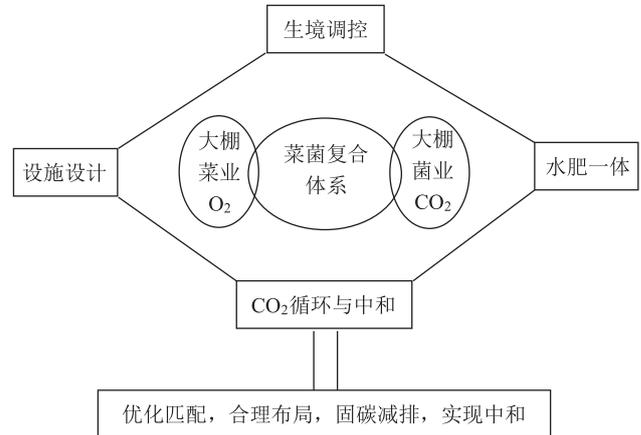


图2 温室大棚蔬菜和食用菌CO₂和O₂互补栽培体系

Figure 2 Complementary cultivation system of CO₂ and O₂ for vegetables and edible fungi in greenhouse

互补栽培体系(图2),该体系包括4个子系统,即架构设施、生境调控、水肥一体、CO₂中和。在温室大棚条件下,选择适宜蔬菜温室大棚栽培的食用菌品种(秀珍菇、平菇等),同时筛选适宜菌渣基质栽培的蔬菜品种,探索不同菇-菜栽培过程CO₂排放与体系内CO₂、O₂互补共赢的合理匹配技术,创立了蔬菜-菌物-菌渣-基质设施生态循环农业产业化模式。建立2 000 m²的菌-菜共作温室示范大棚并进行试验示范,其生产结果显示,菌-菜共作处理与单一种植蔬菜大棚相比,蔬菜增产18.6%,与单一栽培食用菌大棚相比,CO₂减排48.8%,平菇产量提高22.6%,取得良好的碳中和效果,该研究成果正在进一步扩大示范并组织集成推广^[37]。马路等^[38]合理调整木薯、芋头等作物的种植密度、套种时间,并因地制宜地套种竹荪,木薯+竹荪比芋头+竹荪处理的产量提高12%以上,促进废弃物中碳物质转化利用的成效十分显著。

3 农-牧-菌循环农业体系生产运营中的主要技术对策

农-牧-菌循环农业体系的生产运营需要关注资源优化匹配、循环途径拓展、链接接口优化和有效调控,还需要防控二次污染、启动利益驱动机制等。

要优化构建多级循环农业生产体系,实现提高效率、提升效能、提增效益的目标,今后应加强以下技术的研发。(1)扩大筛选微生物助堆剂并深化食用菌基质快速发酵技术。要深化纤维素降解菌筛选和混合菌剂复配、集成创新隧道式3次发酵配套设施,优化

改进栽培基质堆制技术等研究与集成应用。(2)进一步深化菌渣再利用及其食用菌高优栽培技术。要深入开展菌渣再利用相容性研究,建立便捷应用数据库,深化不同菌渣再利用配方与生产模式的复合研究,提高循环利用效率^[39]。(3)选育低重金属含量食用菌新品种及专用料栽培技术。要进一步选育低重金属富集的食用菌新品种,同时要构建低污染栽培体系,保障子实体产品符合食品卫生安全标准。(4)深化草生菌栽培替代料筛选与高质量生产配套技术。要进一步系统研发并完善牛粪、猪粪、稻草、茭白茎叶、笋壳等混合型的系列配方,形成高质量与节料型替代基质生产技术体系。(5)深化旱地作物及果园、茶园套种食用菌高效栽培技术。要在山地果园、茶园套种食用菌,以果园杂草为原料,以果园后沟为场地栽培食用菌,在山地茶园套种灵芝等品种,力求每667 m²果园、茶园增加收入300~500元。深化实用模式与便捷技术耦合研究,提高资源利用率并实施绿色防控技术。(6)深化菌业加工废弃物资源循环利用增值技术。以蘑菇预煮液为主原料加工制作蘑菇酱油,深化研发蘑菇酱油加工工艺与系列配方;优化树脂纯化菌物多糖工艺参数与喷雾干燥技术,有效提取菇脚、残次料及菇品预煮液的多糖成分;利用食用菌加工漂烫液喷雾干燥制备营养精粉工艺;与企业合作研发加工工艺及其生产线^[40],系统开发食用菌精粉胶囊、含片、饮料等新产品,拓展精深加工领域,研发新一代产品,提高菌业加工副产品的循环利用价值。

多年研究与推广应用实践表明,农-牧-菌循环农业体系的高效运营,有赖于标准化、机械化、智能化、绿色化新技术的导入与应用,其中各个环节与接口直接的优化调控十分重要,保障资源的合理匹配,使上一道生产环节废弃物成为下一道环节的资源,促进循环农业产业链的延伸与有效利益驱动,从而实现经济-社会-生态效益协同,以保障乡村产业生态化与区域生态产业化的双赢目标实现。在建设农业强国的新阶段,现代循环农业要大力提倡节能减排生产与收获高效优质产品,以食用菌产业为载体的农-牧-菌循环农业高质量发展必将为建设资源节约与环境友好新农村起到重要作用,其成功的探索与有效的经验,对福建省乃至全国乡村产业振兴与农业提质增效具有重要的实践意义。

参考文献:

[1] 马雪娟. 农业废弃物如何资源化、肥料化利用[N]. 农民日报, 2019-

- 11-14. MA X J. How to make use of agricultural wastes as resources and fertilizers[N]. *Farmers' Daily*, 2019-11-14.
- [2] 秦志伟. 福建, 现代循环农业的“特区”[N]. 中国科学报, 2017-04-27. QIN Z W. Fujian, Special zone of modern circular agriculture[N]. *China Science Daily*, 2017-04-27.
- [3] 翁伯琦, 王义祥, 王煌平, 等. 福建省农业废弃物多级循环模式优化与集成应用研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(12): 91-103. WENG B Q, WANG Y X, WANG H P, et al. Research progress on optimization of multistage circulation of agricultural wastes mode and integrated application in Fujian Province[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(12): 91-103.
- [4] 尹昌斌. 加大技术创新和制度创设 推进生态循环农业发展[J]. 民主与科学, 2018(4): 21-24. YIN C B. Increase technological innovation and system creation to promote the development of ecological circular agriculture[J]. *Democracy & Science*, 2018(4): 21-24.
- [5] 熊国华. 钾与尿素和有机肥配施菜园土壤环境质量及蔬菜品质的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2004. XIONG G H. Effects of potassium combined with urea and organic fertilizer on soil environmental quality and vegetable quality in vegetable garden[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [6] 刘志平, 罗涛, 王煌平, 等. 双孢蘑菇菌渣专用肥在水稻、香蕉上施用效果[J]. 东南园艺, 2015(4): 15-19. LIU Z P, LUO T, WANG H P, et al. Effects of special *Agaricus bisporus* residue fertilizer applied on rice and banana[J]. *Southeast Horticulture*, 2015(4): 15-19.
- [7] 张潘丹, 王煌平, 张青, 等. 不同有机肥对萝卜产质量和土壤肥力的影响[J]. 湖南农业科学, 2012(3): 54-58. ZHANG P D, WANG H P, ZHANG Q, et al. Effects of different organic fertilizers on yield and quality of radish and soil fertility[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2012(3): 54-58.
- [8] 栗方亮, 王煌平, 张青, 等. 稻田施用菌渣土壤团聚体的组成及评价[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(3): 340-345. LI F L, WANG H P, ZHANG Q, et al. Effect of application of mushroom residue on composition of soil aggregates in paddy field and its evaluation[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(3): 340-345.
- [9] 王煌平, 张青, 翁伯琦, 等. 双氰胺单次配施和连续配施的土壤氮素形态和蔬菜硝酸盐累积变化[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4608-4615. WANG H P, ZHANG Q, WENG B Q, et al. Changes of soil nitrogen types and nitrate accumulation in vegetables with single or multiple application of dicyandiamide[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(15): 4608-4615.
- [10] 刘晓梅, 邹亚杰, 胡清秀, 等. 菌渣纤维素降解菌的筛选与鉴定[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(7): 1384-1391. LIU X M, ZOU Y J, HU Q X, et al. Screening and identification of cellulose-degrading bacteria from spent substrate of edible mushroom[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(7): 1384-1391.
- [11] 何梓林, 鲜杨, 孟晓霞, 等. 菌渣生物炭对镉污染土壤性质及小白菜吸收镉的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 340-344, 352. HE Z L, XIAN Y, MENG X X, et al. Effects of mushroom residues biochar on properties of cadmium-cotaminated soil and Cd uptake by Chinese cabbage[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1): 340-344, 352.

- [12] 王义祥, 高凌飞, 辛思洁, 等. 菌渣-发酵床废弃垫料堆肥中温室气体排放及与微生物的关系[J]. 环境科学学报, 2017, 37(12):4662-4669. WANG Y X, GAO L F, XIN S J, et al. Green house gas emission and its correlation with microbial in composting of waste packing and fungus chaff[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(12):4662-4669.
- [13] 刘波, 陈倩倩, 王阶平, 等. 整合微生物组菌剂的提出、研发与应用[J]. 中国农业科学, 2019, 52(14):2450-2467. LIU B, CHEN Q Q, WANG J P, et al. Proposition, development and application of the integrated microbiome agent (IMA) [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(14):2450-2467.
- [14] 陈钟佃, 黄秀声, 郭仲杰, 等. 杂交狼尾草栽培料对双孢蘑菇产量及品质的影响[J]. 热带作物学报, 2011, 32(9):1615-1618. CHEN Z D, HUANG X S, GUO Z J, et al. Effects of *Pennisetum hybrid* cultivation materials on yield and quality of *Agaricus bisporus*[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2011, 32(9):1615-1618.
- [15] 黄勤楼, 黄秀声, 陈钟佃, 等. 规模化猪场污染及废弃物循环利用研究[J]. 中国农学通报, 2007, 23(10):175-178. HUANG Q L, HUANG X S, CHEN Z D, et al. Study on pollution and waste recycling of large-scale pig farms[J]. *Chinese Agronomy Bulletin*, 2007, 23(10):175-178.
- [16] 颜明娟, 方志坚, 翁伯琦, 等. 牧草轮作对奶牛场污水氮、磷的净化效果[J]. 生态环境学报, 2011, 20(10):1540-1546. YAN M J, FANG Z J, WENG B Q, et al. Purification effect of pasture rotation on nitrogen and phosphorus in dairy farm sewage[J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2011, 20(10):1540-1546.
- [17] 杨国良, 何晓兵. 蘑菇堆肥高压发酵隧道技术的应用[J]. 浙江食用菌, 2010, 18(2):17-19. YANG G L, HE X B. Application of high pressure fermentation tunnel technology in mushroom composting[J]. *Zhejiang Shiyongjun*, 2010, 18(2):17-19.
- [18] 肖生美. 食用菌栽培过程碳素物质转化及CO₂排放规律的研究[D]. 福州:福建农林大学, 2013. XIAO S M. Study on carbon transformation and CO₂ emission in Edible fungi cultivation process[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013.
- [19] 李艳春, 林忠宁, 陆燕, 等. 茶园间作灵芝对土壤细菌多样性和群落结构的影响[J]. 福建农业学报, 2019, 34(6):690-696. LI Y C, LIN Z N, LU Z, et al. Microbial diversity and community structure in soil under tea bushes - *Ganoderma lucidum* intercropping[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 34(6):690-696.
- [20] 李振武, 韩海东, 林忠宁, 等. 幼龄茶园套种大球盖菇生产技术规范[J]. 亚热带农业研究, 2014, 10(3):172-176. LI Z W, HAN H D, LIN Z N, et al. Technical specification of young tea plantation intercropped with *Stropharia rugosoannulata*[J]. *Subtropical Agricultural Research*, 2014, 10(3):172-176.
- [21] 刘景, 林维雄, 方桂友, 等. 环保型饲料对生长猪生长性能和养分排泄量的影响[J]. 福建农业学报, 2016, 31(4):345-349. LIU J, LIN W X, FANG G Y, et al. The effects of environment protecting diet on growth performance and nutrient excretion of growing pigs[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 31(4):345-349.
- [22] 吴晓梅, 叶美锋, 吴飞龙, 等. 固化微生物处理规模化养猪场废水的试验研究[J]. 能源与环境, 2017(1):14-15. WU X M, YE M F, WU F L, et al. Experiment study on treatment of large-scale pig farm wastewater by solidified microorganism[J]. *Energy and Environment*, 2017(1):14-15.
- [23] 杨菁, 林代炎, 翁伯琦, 等. 应用猪粪分离渣栽培毛木耳的品质研究[J]. 中国食用菌, 2015, 34(1):29-31. YANG J, LIN D Y, WENG B Q, et al. Study on quality of *Auricularia polytricha* cultivated with pig feces[J]. *Edible Fungl of China*, 2015, 34(1):29-31.
- [24] 冯德庆, 黄勤楼, 唐龙飞, 等. 杂交狼尾草对草鱼肉脂肪酸组成的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(6):487-490. FENG D Q, HUANG Q L, TANG L F, et al. Effect of hybrid *Pennisetum* on fatty acid composition of grass carp meat[J]. *Chinese Agronomy Bulletin*, 2008, 24(6):487-490.
- [25] 朱育菁, 刘波, 陈峥, 等. 福建芽孢杆菌资源保藏中心的建设与管理[J]. 福建农业科技, 2016, 47(8):74-76. ZHU Y J, LIU B, CHEN Z, et al. Development and management of fujian bacillus resource collection center[J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2016, 47(8):74-76.
- [26] 刘波, 陈倩倩, 陈峥, 等. 饲料微生物发酵床养猪场设计与应用[J]. 家畜生态学报, 2017, 38(1):73-78. LIU B, CHEN Q Q, CHEN Z, et al. Design and application of piggery with feed microbial fermentation bed[J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2017, 38(1):73-78.
- [27] 曾庆才, 肖荣凤, 刘波, 等. 以微生物发酵床养猪垫料为主要基质的哈茨木霉 FJAT-9040 固体发酵培养基优化[J]. 热带作物学报, 2014, 35(4):771-778. ZENG Q C, XIAO R F, LIU B, et al. Optimization of solid-state fermentation culture medium consisted of the microbial fermentation bed for the biocontrol strain of *Trichoderma harzianum* FJAT-9040 by response surface methodology[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2014, 35(4):771-778.
- [28] 应正河, 林衍铨, 江晓凌, 等. 微生物发酵床养猪垫料对5种食用菌菌丝生长的影响[J]. 福建农业学报, 2014, 29(10):982-986. YING Z H, LIN Y Q, JIANG X L, et al. Effect of the litter of feeding pigs in the microbial fermentation bed on the mycelial growth of five edible fungi[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 29(10):982-986.
- [29] 卢政辉, 廖剑华, 蔡志英, 等. 杏鲍菇菌渣循环栽培双孢蘑菇的配方优化[J]. 福建农业学报, 2016, 31(7):723-727. LU Z H, LIAO J H, CAI Z Y, et al. Optimized formulation using *Pleurotus eryngii* discard for *Agaricus bisporus* cultivation[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 31(7):723-727.
- [30] 翁伯琦, 廖建华, 罗涛, 等. 农田秸秆菌业主要环节与资源循环利用技术思路[C]//中国农学会耕作制度分会. 中国农作制度研究进展2008. 沈阳:辽宁科学技术出版社, 2008:530-535. WENG B Q, LIAO J H, LUO T, et al. Main links of crop straw fungus industry and technical ideas of resource recycling[C]//China Association of Agricultural Science Societies. Research Progress of China's Agricultural System in 2008. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 2008:530-535.
- [31] 钟珍梅, 宋亚娜, 黄秀声, 等. 沼液对狼尾草地土壤微生物群落的影响[J]. 草地学报, 2016, 24(1):54-60. ZHONG Z M, SONG Y N, HUANG X S, et al. Effects of biogas slurry application on the soil microorganisms of *P. americanum* × *P. purpureum* grassland[J]. *Acta*

- Agrestia Sinica*, 2016, 24(1):54-60.
- [32] 陈钟佃, 黄勤楼, 黄秀声, 等. 闽引红象草栽培技术[J]. 福建农业科技, 2013(4):54-56. CHEN Z D, HUANG Q L, HUANG X S, et al. Cultivation techniques of *Pennisetum purpureum* Schumab cv. Red "Minyin"[J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2013(4):54-56.
- [33] 黄秀声, 钟珍梅, 黄勤楼, 等. 利用¹⁵N示踪技术研究8种禾本科牧草对氮肥的吸收和转化效率[J]. 核农学报, 2014, 28(9):1677-1684. HUANG X S, ZHONG Z M, HUANG Q L, et al. Fertilizer-N uptake and conversion efficiency in 8 species of *Gramineous pastures* by using ¹⁵N-tracing technique[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2014, 28(9):1677-1684.
- [34] 黄勤楼, 钟珍梅, 黄秀声, 等. 纤维素降解菌的筛选及在狼尾草青贮中使用效果评价[J]. 草业学报, 2016, 25(4):197-203. HUANG Q L, ZHONG Z M, HUANG X S, et al. Screening of cellulose-degrading bacteria and evaluation of silage performance of *Pennisetum*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(4):197-203.
- [35] 钟珍梅, 黄勤楼, 翁伯琦, 等. 以沼气为纽带的种养结合循环农业系统能值分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14):196-200. ZHONG Z M, HUANG Q L, WENG B Q, et al. Energy analysis on planting-breeding circulating agriculture ecosystem linked by biogas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(14):196-200.
- [36] 王义祥, 叶菁, 肖生美, 等. 铺料厚度对双孢蘑菇栽培过程酶活性和CO₂排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(12):2418-2425. WANG Y X, YE J, XIAO S M, et al. Effects of substrate thickness on CO₂ emissions and enzyme activities of substrates during *Agaricus bisporus* cultivation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(12):2418-2425.
- [37] 陈华, 叶菁, 黄毅斌, 等. 灵芝-蔬菜温室间作栽培对产量的影响及其CO₂互补效应[J]. 福建农业学报, 2019, 34(3):293-297. CHEN H, YE J, HUANG Y B, et al. Intercropping ganoderma lucidum and vegetable for improvement on crop yield and CO₂ emission[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 34(3):293-297.
- [38] 马璐, 林衍铨, 肖胜刚, 等. 与槟榔芋间作的棘托竹荪栽培配方筛选[J]. 菌物研究, 2016, 14(1):55-58. MA L, LIN Y Q, XIAO S G, et al. Selection on substrate formula of *Dictyophora echinvolvata* intercropped with *Colocasia esculenta*[J]. *Journal of Fungal Research*, 2016, 14(1):55-58.
- [39] 方小锋. 工厂化杏鲍菇菌渣的再次利用研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2018. FANG X F. Study on reuse factory eryngiibacterial slag[D]. Hefei:Anhui Agricultural University, 2018.
- [40] 陈君琛, 周学划, 赖谱富, 等. 大球盖菇漂烫液喷雾干燥制营养精粉工艺优化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21):272-279. CHEN J C, ZHOU X H, LAI P F, et al. Optimization of processing nutrient powder from blanching liquid of *stropharia rugoso-annulata* with spray drying technology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(21):272-279.