

DOI: 10.11689/sc.2022122901

雷琬莹, 滕培基, 李娜. 黑土区种养结合型循环农业模式探究-以海伦市为例[J]. 土壤与作物, 2023, 12 (4): 363–372.

LEI W Y, TENG P J, LI N. Developing cycled planting-livestock farming in black soil region -Taking Hailun City as an example[J]. Soils and Crops, 2023, 12 (4): 363–372.

# 黑土区种养结合型循环农业模式探究-以海伦市为例

雷琬莹<sup>1,2</sup>, 滕培基<sup>1,2</sup>, 李娜<sup>1,2</sup>

(1. 黑土地保护与利用全国重点实验室 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 黑龙江 哈尔滨 150081;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 种养结合型循环农业能有效发挥种植业和畜禽养殖业优势, 一定程度上减少资源浪费和环境污染。东北黑土区地处冷凉干旱区, 农业生产活动受气候影响显著, 该区域内农业资源利用率较低、资源再利用成本较高, 严重制约了区域经济发展, 开展种养结合型循环农业模式可最大限度加快农业系统内物质循环, 实现区域经济效益最大化。本文首先充分总结了东北黑土区内不同种养结合循环农业模式的特点, 对比分析了不同模式下的生态和经济效益, 再以位于松嫩平原北部厚层黑土区的海伦市为代表, 结合持续高效节粮型种养循环农业模式的实际需求, 重点阐述了海伦市开展种养结合型循环农业的发展历程, 对比分析了传统农业生产模式与循环农业模式的经济效益, 提出了海伦市种养结合循环农业的未来发展建议, 以期为持续提高黑土生态系统生产力, 保障黑土资源永续发展和利用提供参考依据, 为东北黑土区循环农业发展提供借鉴。

**关键词:** 种养循环; 经济效益; 生态效益; 东北黑土区; 可持续发展

**中图分类号:** F323.4      **文献标识码:** A

## Developing cycled planting-livestock farming in black soil region -Taking Hailun City as an example

LEI Wanying<sup>1,2</sup>, TENG Peiji<sup>1,2</sup>, LI Na<sup>1,2</sup>

(1. *State Key Laboratory of Black Soils Conservation and Utilization, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Cycled planting-livestock farming can effectively take the best advantages of farming and livestock industry, reduce the waste of resources, and prevent environmental pollution to a certain extent. The black soil region is located in the cold and arid area in Northeast (NE) China, and agricultural activities are significantly affected by climate. The lower rate of agricultural resource utilization and higher cost of resource reuse have extensively restricted the economic development in this region. Developing cycled planting-livestock farming may speed up the material circulation agricultural system to the most extent, and maximize the regional economic and ecological benefits. In this study, we summarized the characteristics of different cycled planting-livestock farming modes in the black soil region of NE China by collecting published literatures, and news in websites. The ecological and economic benefits among different modes were comprehensively compared. Then, the Hailun City, located in the heart of the black soil of the Songnen Plain in NE China, was selected as an example to demonstrate the actual demand of sustainable, high-efficient and grain-saving of the cycled planting-livestock farming. Emphasis on the development processes of the cycled agriculture mode was expounded. The economic effects between traditional agricultural mode and the cycled agriculture mode were further analyzed. Finally, suggestions of the future development of cycled planting-livestock farming in Hailun City were proposed. The paper is expected to provide some useful ideas in improving the productivity of the black soil system continuously, ensuring the sustainable

收稿日期: 2022-12-29; 修回日期: 2023-04-10.

基金项目: 吉林省自然科学基金 (YDZJ202201ZYTS517); 中国科学院战略性先导科技专项子课题 (XDA28010301); 中国科学院前沿科学研究重点计划项目 (ZDBS-LY-DQC017).

第一作者简介: 雷琬莹 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向为土壤有机质化学. E-mail: leiwanying@iga.ac.cn.

通信作者: 李娜 (1983-), 女, 研究员, 研究方向为土壤肥力调控和有机质生物化学. E-mail: nal@iga.ac.cn.

development and utilization of black soil resources. This study will also provide some references for the development of cycled agriculture in the NE region.

**Key words:** cycled planting-livestock farming; economic benefits; ecological benefits; black soil region of NE China; sustainable development

## 0 引言

我国东北黑土区是世界四大片黑土集中分布区之一, 该区域发育的黑土是最肥沃、最适宜耕作的土壤类型之一, 素有“一两土、二两油”的美称。在黑土上发展起来的农业, 虽时间较短, 但已逐步发展成为我国独具特色的一年一熟制农业生产模式。长期以来, 农业生产过程中种植和养殖要素的分离, 不仅造成资源浪费, 也会污染环境, 在一定程度上威胁着乡村生态环境的平衡, 影响地区发展。2020年6月, 农业农村部办公厅和生态环境部办公厅联合印发了《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》(农办牧[2020]23号)<sup>[1]</sup>, 强调要全面推进我国畜禽养殖废弃物资源化利用, 同时要加大环境监管力度, 加快构建种养结合、农牧循环的可持续发展新格局。2021年4月, 农业农村部发布了《关于开展绿色种养循环农业试点工作的通知》(农办农[2021]10号)<sup>[2]</sup>, 明确指出要加快推动农业绿色低碳发展, 促进绿色种养、循环农业发展, 以推进粪肥就地就近还田利用为重点。黑龙江省海伦市作为我国重要的粮食和畜牧生产大市, 已成功入选我国畜牧大县和畜禽粪污资源大县名单。在该地区大力发展种植和养殖一体化的循环型农业生产模式, 是改变传统的种植和养殖环节分离, 促进农业资源永续利用, 实现乡村生态环境和谐发展的重要途径; 也是保障农业系统内物质与能量的闭环循环和高效利用, 更是实现区域发展和乡村振兴的必然之路。

循环农业是指运用循环经济理论, 注重资源的高效循环利用, 以科技进步与管理优化为支撑的一种低消耗、低碳的现代农业发展模式<sup>[3]</sup>。循环农业生产模式将农业经济活动与自然生态循环融为一体, 以自身创新机制的运行和环境成本的内部化为方式, 化解经济发展与生态环境保护不平衡的矛盾, 实现经济与生态相协调的“双赢”<sup>[4]</sup>。在我国, 已有很多成功的种养结合型循环农业模式案例, 最著名的是珠江三角洲地区的“桑基鱼塘”<sup>[5]</sup>、太湖地区的“粮-草-牧-鱼”<sup>[6]</sup>等在湿地农业上发展起来的成功案例。在东北平原区, 受气候和区域环境的影响, 循环农业发展较为缓慢; 受地方和区域经济发展以及乡村振兴的需要, 也逐步形成了一系列具有区域特色的循环型农业模式<sup>[7]</sup>。如辽宁省的“稻-蟹”综合种养模式<sup>[8]</sup>、内蒙古自治区的“畜禽-沼(肥)-粮(果菜)-畜禽”<sup>[9]</sup>和“生态种植-肉牛和奶牛-粪肥-种植”区域生态循环模式<sup>[10]</sup>、吉林省西部的“苇-鱼-蟹-菌”盐碱湿地种养结合模式<sup>[11]</sup>和海伦市的“稻-草-鱼-牧”复合农业模式<sup>[7]</sup>等。这些种养循环型农业生产模式的提出和成功实践, 都为区域农业的可持续发展提供了实用模式范例。但到目前为止, 大部分已发表的文献多是针对某一具体区域开展的种养循环模式的应用实践介绍, 很少有文献综述性的介绍整个东北地区种养结合型循环农业模式的发展和应用实践, 关于不同循环农业生产模式下的生态和经济效益的比较分析更是少之又少, 这极大的限制了我们对于种养结合型循环农业模式的认识, 甚至会对区域内开展种养循环农业模式的实践具有消极认识, 影响种养循环农业模式技术的推广应用。

本文通过查阅相关已公开发表的文献资料和信息, 充分总结东北黑土区内的种养结合型循环农业模式特点, 对比分析了不同模式下生态效益和经济效益; 再以位于松嫩平原北部厚层黑土区的黑龙江省海伦市为例, 结合海伦市作为我国粮食和畜牧生产大市, 大力开展的以草食家畜家禽(肉牛、肉鹅)为代表的持续高效节粮型种养循环农业模式的实际, 重点阐述了海伦市开展种养结合型循环农业的发展历程, 进一步对比分析了海伦市传统农业生产模式与循环农业模式的经济效益; 最终给出未来海伦市种养结合型循环农业的发展建议, 以期持续提高黑土系统生产力, 保障黑土资源发展和永续利用提供参考依据, 为东北黑土区甚至我国的循环农业发展提供借鉴。

## 1 东北黑土区种养循环农业模式特点及效益分析

受珠江三角洲地区“桑基鱼塘”循环农业模式和太湖地区“粮-草-牧-鱼”模式启发,在东北黑土区,经过几十年不断的探索和尝试,也研发出一系列具有区域特点和农业特色的种养结合型农业生产模式(表1)。根据已公开发表的文献和资料总结,东北三省一区(黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古自治区)的耕地类型以旱田和水田为主,东北旱田区域已成功实践的种养循环模式包括:“畜禽粪便-肥料-种植”<sup>[12]</sup>、“玉米-鹅”<sup>[13-14]</sup>、“粮草轮作与奶牛一体化”<sup>[15-16]</sup>、“牛/羊-青贮玉米(苜蓿草)”<sup>[17]</sup>和“生态种植-肉牛和奶牛-粪肥-种植”<sup>[10]</sup>。

“玉-鹅”种养循环模式在黑龙江省大庆市广泛开展应用,已被证实是一种可以满足玉米与鹅同步生长的健康生态型农业模式。与传统玉米种植模式相比,“玉-鹅”模式下土壤有机质、有效磷、速效钾、碱解氮等养分含量可分别提升39.3%、369.0%、92.2%和66.0%<sup>[13]</sup>。此外,鹅粪直接还田可降低碱性土壤的pH值,提高土壤微生物活性,促进土壤养分循环,实现土壤培肥和作物增产<sup>[14]</sup>。“粮草轮作与反刍动物一体化农田高效循环生产模式”是黑龙江省慧丰奶牛养殖有限公司生态环境院士工作站的专家们多年来与养殖大户合作所取得的成果。通过优化配置农业生态系统中粮食作物和饲草饲料作物的种植比例,开展优质饲草种植-秸秆青贮-反刍动物饲养-有机肥堆腐还田-无公害作物生产等农牧结合高效循环生产研究。与常规耕作相比,采用高效循环生产模式后,可使大豆产量增加11.4%~23.2%,玉米产量增加13.5%~22.3%<sup>[15-16]</sup>。在内蒙古自治区兴安盟科尔沁右翼前旗,“畜禽-沼(肥)-粮(果菜)-畜禽”和“生态种植-肉牛和奶牛-粪肥-种植”区域种养一体化循环模式开展较多。实践证明,集农副资源综合开发与标准化清洁生产于一体的多元化种养循环模式,不仅提高了农业综合生产能力,还改善了周边农业生态环境,减少了秸秆焚烧导致的空气污染,使畜禽粪污资源化利用效率从65%提升至71%~75%,生态效益显著<sup>[9-10]</sup>。

东北地区水田的种养循环模式主要有:“稻-草-鱼-鹅-牛”<sup>[7]</sup>、“苇-鱼-蟹-菌”<sup>[11]</sup>、“鸭-菌-稻”<sup>[18]</sup>、“稻-鸭”<sup>[19]</sup>及“稻-蟹”<sup>[20-23]</sup>循环模式。“鸭-菌-稻”种养循环模式是黑龙江省五常市二河乡基于5年的生产实践,建成的符合寒地黑土农业发展的以田养鸭、以鸭促稻、以稻育苗、以菌肥田的立体循环种养模式,该模式使有机稻米的品质和产量得到大幅提升,土壤有机质含量增加了0.05%<sup>[18]</sup>。“鸭-菌-稻”共育立体循环种养模式在黑龙江省其它地区进行推广示范均取得了良好的生态、社会和经济效益<sup>[18]</sup>。“苇-鱼-蟹-菌”循环模式是在吉林省松嫩平原西部大安市大岗子镇经过多年的探索总结出的一种湿地保护与农业发展紧密结合的盐碱湿地种养结合模式,是一种低投入高产出、生态效益与经济效益兼顾、能够自我维持的生态工程模式<sup>[11]</sup>。在牛心套保芦苇盐碱沼泽中养殖的鱼和蟹的排泄物可以为芦苇在生长期间持续供给补充养分,收割后芦苇可用于种养食用菌,食用菌的栽培废弃物菌糠又可经过处理制成肥料和饵料,重新投入苇塘,实现“一水多用、一地多收”种养循环与资源化利用。该模式实施后,生态综合恢复效果显著,芦苇的光合速率提高了5倍,光合固碳能力增强;水质净化作用明显改善,芦苇沼泽对上游来水中的总氮和总磷去除率可达70%以上;同时盐碱沼泽中高等植物、鸟类与鱼类等物种多样性水平也明显提高。该模式年收获芦苇产量超7000t,平均每吨干芦苇生产0.7t以上的鲜食食用菌,此外,每公顷芦苇盐碱沼泽还可产成蟹40kg,牛心套保芦苇盐碱沼泽年总产值可达1千万,经济收入十分可观<sup>[11]</sup>。“稻-鸭”共作模式是在吉林省梅河口市通过10余年生产实践总结出的具有经济和生态双重效益的种养循环模式,现已在该地区大范围示范推广。种植稻花香大米每亩可收入6976元,养殖鸭子每亩地产值为7136元,去除水稻种植、养鸭、肥料成本和人工及机械的投入费用,每亩收益可达4102元<sup>[19]</sup>。“稻-蟹”和“稻-鱼”综合种养模式是吉林省、辽宁省和内蒙古地区实施最普遍的种养循环模式<sup>[20-24]</sup>,不同地区的生产实践均证实了在稻田中发展渔业是实现经济收入增长与生态和谐双赢的重要途径。在吉林省白城市镇赉县推广后,农药和化肥施用量可分别减少超过15%和10%,在保证产量不减的同时减肥减药,还提高了稻田土壤肥力,生态效益显著<sup>[20]</sup>。在辽宁省本溪市桓仁县,“稻-蟹”综合种养模式具有较高的经济效益。稻蟹共育后水稻品质大幅提高,每千克稻谷价格提高0.5元左右,每亩产蟹15~20kg,平均每亩增收约1200元<sup>[8,22]</sup>。

表1 东北黑土区现有种养结合型循环农业模式

Table 1 The current cycled planting-livestock farming modes in Northeast China

耕地类型 Arable land type	循环农业模式 Cycled agriculture mode	生态/经济效益 Ecological and economic benefits	地点 Mode location
	畜禽粪便-肥料-种植 Livestock manure-fertilizer-planting	粪污减量化、资源化和无害化, 实现养殖粪污零排放。 Ecological environment improved.	黑龙江省哈尔滨市双城区 <sup>[12]</sup> Shuangcheng District, Harbin City, Heilongjiang Province
	玉米-鹅 Maize-geese	土壤有机质、有效磷、速效钾、碱解氮等养分含量分别提升39.3%、369%、92.2%、66.0%, 玉米增产22.3%。 The SOC, AP, AK, and AN contents increased by 39.3%, 369.0%, 92.2%, 66.0%, respectively; corn yield increased by 22.3%.	黑龙江省大庆市大同镇 <sup>[13-14]</sup> Datong Town, Daqing City, Heilongjiang Province
旱田 Dryland	粮草轮作与奶牛一体化 Grain-grass rotation-cattle	提高能量循环效率, 大豆增产11.4%~23.2%, 玉米增产13.5%~22.3%。 The efficiency of the energy cycle improved, and the yield of soybean and corn increased by 11.4%~23.2% and 13.5%~22.3%, respectively.	黑龙江省海伦市 <sup>[15-16]</sup> Hailun City, Heilongjiang Province
	牛/羊-青贮玉米(苜蓿草) Cattle/Sheep-silage corn (alfalfa)	--	辽宁省沈阳市、鞍山市、抚顺市、锦州市、阜新市、铁岭市、朝阳市 <sup>[17]</sup> Shenyang, Anshan, Fushun, Jinzhou, Fuxin, Tieling, Chaoyang City, Liaoning Province
	畜禽-粪肥(沼)-粮(果蔬) Livestock-organic fertilizer-food (fruit vegetable), cattle-organic fertilizer-planting	畜禽粪污资源化利用率提高6%~10%, 提高农业综合生产能力, 改善周边农业生态环境, 降低空气污染。 Ecological environment improved.	内蒙古自治区科尔沁右翼前旗 <sup>[9-10]</sup> Horqin Right Front Banner, Inner Mongolia Autonomous region
	稻-草-鱼-鹅-牛 Rice-grass-fish-geese-cattle	经济增收91.2%。 Economic benefits increased by 91.2%.	黑龙江省海伦市联发镇 <sup>[7]</sup> Lianfa Town, Hailun City, Heilongjiang Province
	鸭-菌-稻 Duck-mushroom-rice	稻米品质提高, 土壤有机质含量提升0.05%。 Rice yield and the content of SOC improved.	黑龙江省五常市二河乡 <sup>[18]</sup> Erhe Village, Wuchang City, Heilongjiang Province
	苇-鱼-蟹-菌 Reed-fish-crab-mushroom	芦苇光合固碳能力增强, 盐碱沼泽水质净化, 高等植物、鱼类和鸟类等物种多样性水平明显。 Ecological environment improved.	吉林省大安市大岗子镇 <sup>[11]</sup> Dagangzi Town, Da'an City, Jilin Province
	稻-鸭 Rice-duck	每亩收入增加4 102元。 Economic benefits increased.	吉林省梅河口市康大营镇 <sup>[19]</sup> Kangdaying Town, Meihekou City, Jilin Province
水田 Paddyland	稻-蟹 Rice-crab	降低面源污染, 提高土壤有机质和养分, 提高土地、水和能源等资源综合利用率, 减少化肥农药施用量, 每亩收入增加1 520元。 Ecological environment improved, economic benefits increased.	吉林省白城市镇赉县 <sup>[20]</sup> 、伊通满族自治县 <sup>[21]</sup> Zhenlai County, Baicheng City, Yitong Manchu Autonomous county, Jilin Province
	稻-鱼(蟹) Rice-fish (crab)	每亩收入增加1 200元。 Economic benefits increased.	辽宁省本溪市桓仁县 <sup>[8]</sup> Huanren County, Benxi City, Liaoning Province
	稻-蟹 Rice-crab	每亩收入增加1 397元。 Economic benefits increased.	辽宁省盘锦市、锦州市、丹东市、辽阳市 <sup>[22]</sup> Panjin, Jinzhou, Dandong, Liaoyang City, Liaoning Province
	稻-鱼 Rice-fishing	减少农药化肥施用量, 减少农业面源污染, 提高资源利用率, 变废为宝, 提高土壤肥力。 Ecological environment and soil fertility improved.	内蒙古自治区扎赉特旗 <sup>[24]</sup> Zhalaite Banner, Inner Mongolia Autonomous region
	稻-蟹 Rice-crab	--	内蒙古自治区兴安盟 <sup>[23]</sup> Xingan League, Inner Mongolia Autonomous region

总体而言,以上模式中,旱田的种养循环模式通过优化种植养殖用地,属地化种植养殖链条的各要素,变废为宝,延长农业产业循环链条,将畜禽养殖过程中产生的畜禽粪污转换为农业种植中的宝贵养料,减少了化肥的施用量,高效降低了养殖废弃物污染,达到了一废多用、农业废弃物的资源化和无害化利用目的。水田的种养循环模式通过在稻田发展渔业和建立水稻、禽类和菌类共育的立体农牧循环种养体系,解决了粮食品质与生态不平衡的矛盾,也实现了一水多用,一地多收的经济增收。东北三省一区的种养结合循环农业生产模式在实现农业系统物质和能量内循环的同时,也增加了土壤有机质含量,提高了土壤肥力和系统产能,减少了病虫害发生,恢复了土壤健康指标,提高了单位面积内的经济产出。因此,在东北地区实施和创新种养结合循环农业生产模式是不断改善乡村生态环境、实现黑土保护与利用可持续发展的主要措施和手段。

## 2 海伦市开展种养结合型循环农业的发展历程

海伦市位于松嫩平原北部的厚层黑土区腹地,拥有珍贵而富饶的黑土地资源,作为农业大县,种植业和养殖业一直是海伦市经济发展和乡村振兴的支柱产业。多年来,海伦市的农业发展策略在种植业和养殖业连接环节上集中发力,依托“寒地黑土”和“黑土硒都”的地域品牌,工作重点完成了由抓总量向提高农畜产品品质和质量目标的快速转变,农业模式也实现了从种养分离的传统农业向种养循环一体化的现代农业方式转型发展,在种养结合和循环农业方面展现了独特的区域特色和广阔的发展潜力。

关于海伦市的种养循环模式,早在1986年就开始了初步探索尝试。韩晓增等<sup>[7]</sup>在充分借鉴南方湿地生态系统的成功经验后,率先在海伦市百发村进行实践,提出了“稻-草-鱼-牧”复合湿地农业模式,循环链条为水稻的副产品喂养牛鹅,牛鹅的粪便入塘养鱼,鱼的排泄物和底泥归田,供给作物生长所需养分,往复循环。为期三年的探索实验发现,由于在该系统内,外部输入的养分在内部多次循环利用,氮磷养分元素在系统内达到了收支平衡并略有盈余;该生态系统能量流动也呈现逐年增加的趋势,三年时间系统内净生物产能增长了22.7%,并在系统内结构完善以后产能量趋于稳定,还可抵抗自然界旱涝的影响。此外,优化后的“稻-草-鱼-牧”复合农业模式既提高了系统中能量转化效率和物质循环的速度,经济效益又得到了明显提升,亩产值为469.39元,每亩纯收入为355.1元<sup>[7]</sup>。此成功案例为海伦市农业的可持续发展提供了非常有效且实用的模式借鉴。

随着国家和政府对畜禽养殖业的鼓励和扶持力度的加大,海伦市养殖业迅猛发展,大量养殖场迅速落地建成,并呈现投资大、规模大、标准高的特点。养殖业蓬勃发展的同时畜禽粪便的合理化处置与粪污污染乡村生态环境等问题也随之而来。为此,海伦市积极推广畜禽粪污资源化利用,探索绿色种养循环的农业生产模式,并在种植业和养殖业一直都在寻求合适的能促进资源利用最优化和经济效益最大化的循环农业模式的构建和优化发展。结合自身面临的问题和区域特色,重点围绕黑土地保护和利用的核心问题,综合考虑农业系统内的多要素、全链条、高附加值和环境友好属性后,在已成功实践的“稻-草-鱼-牧”复合湿地农业模式的基础上,2005年韩晓增等<sup>[16]</sup>再次积极探索具有区域适应性的旱地农业生产模式,提出多链条多要素的种植与养殖相结合的“粮草轮作与奶牛一体化产业技术模式”,率先实现了“牧草肥田、以草代粮、以牛增效、以粪肥田”。该研究以慧丰奶牛养殖有限公司为示范基地,以东北黑土区典型农业生态系统为研究对象,通过集成组装适于海伦市气候特点的优质青贮玉米品种筛选和种植配套,青贮玉米及甜菜渣青贮高效利用,牛饲养过程中高效养殖技术,反刍动物饲料添加剂技术以及奶牛养殖过程中产生的粪便进行无害化、资源化处理等多项技术,开展农牧结合型农业高效循环生产关键技术试验研究和推广示范,累积示范应用81万亩,增加纯收入约640万元,增加产值约1200万元<sup>[16]</sup>。该案例的成功实践也推进了海伦市的生产规模由初期的自我消纳模式逐渐向规模集约种养循环一体化转化,即实现由早期的对拥有种植土地的散户和家庭农场型养殖场,实行种养循环一体化,利用养殖场户自有或流转的土地消纳养殖场粪污的模式向大型规模化畜禽养殖场、加工厂、大型农业合作社联合的种养循环一体化转变。

近些年来,海伦市政府为积极推进畜禽养殖废弃物资源化利用,实现生态和谐、乡村振兴的战略目标,

先后制定了《海伦市畜禽养殖废弃物资源化利用工作方案》<sup>[25]</sup>、《海伦市畜禽养殖污染防治规划》<sup>[26]</sup>和《海伦市种养结合发展规划》<sup>[27]</sup>等行动方案。海伦市践行以绿色生态发展理念,保障农村地区生态环境安全、促进畜禽养殖产业转型升级为目标,以提高畜禽养殖废弃物资源化利用水平和主要污染物减排为主线,以规模化畜禽养殖场、畜禽养殖专业户和散养密集区为重点单元,以种养结合资源化利用为根本途径,深入落实《畜禽规模养殖污染防治条例》<sup>[28]</sup>,着力构建种养结合、农牧循环、资源化利用的可持续发展新格局。自海伦市政府对实施种养循环一体化模式的重视程度与推广力度加大以来,该地区的畜禽粪污利用率逐年稳步提高,2017年畜禽粪污利用率为65.6%,2018年为69.5%,2019年达到73.4%<sup>[29]</sup>。除了考虑到种植和养殖单元的有机整合,海伦市还充分考虑畜禽粪污的特殊性,发挥畜禽养殖在农业生态循环中的关键作用,把资源化利用作为解决畜禽养殖污染问题的优先选择;依托种植业,通过有机肥加工、沼气工程等途径,加速种养结合的生态农业发展,突破农业可持续发展面临的资源和环境瓶颈。结合实施黑土地保护有机肥替代化肥试点项目经验,集成推广了畜禽粪便堆沤还田、沼渣沼液无害化处理还田等有机肥还田技术模式,增强了技术的支撑。2020年上半年畜禽粪污产量59.2万t,还田利用量45.2万t,还田利用率达76.4%<sup>[29]</sup>。

为继续加快推进畜禽粪污资源化利用,促进种养循环,实现粪肥还田和化肥减量增效的目的,推动农业绿色高质量发展,2021年开始,海伦市在长发镇、永富镇、前进镇和东林镇4个乡镇实施绿色种养循环农业试点项目,共建立绿色种养循环农业试点面积10万亩。此外,为了提高畜禽养殖污染防治技术水平,构建畜禽养殖污染处理设施及资源化综合利用长效运行机制,还遴选了3家运行模式佳、处理设备全、技术力量强的企业和合作社作为粪肥收集处理还田的主体,搭建了粪肥还田平台,以积极推进农村生态文明建设,全面建设小康社会提供环境安全保障。目前,该项目的实施已卓有成效,成功集成推广了畜禽粪便堆沤还田、沼渣沼液无害化处理还田等有机肥还田技术模式。海伦市每年能够生产13.2万t有机肥料,可替代约4.4万t无机肥料使用,按化肥平均每吨价格为3600元计算,可节约资源、能源成本达1.584亿元。同时,有机肥抛撒还田后,每亩农田平均可减少化肥用量达30%,化肥节本每亩45元,每亩增产30公斤左右,亩增收60元左右,亩综合增收105元左右<sup>[30]</sup>。

### 3 种养结合型循环农业的未来发展建议

2022年8月1日,《中华人民共和国黑土地保护法》<sup>[31]</sup>正式实施,这标志着我国对黑土地的保护和重视程度已上升为国家战略。加强黑土资源的保护,就是要实现黑土资源在被利用的过程中完成保护,种养结合型循环农业模式将是未来黑土区农业发展的必然之路。为此,对种养结合型循环农业模式也必然提出更高的要求,需要集成种养一体化、农业废弃物资源化、黑土退化阻控和提质增产等多要素兼容、多物质流通、多过程循环、多方面协调的产业发展链条,优化区域资源配置,实现经济效益、生态效益和社会效益的统一。

通过借鉴不同地区种养结合型循环农业模式,并充分结合海伦市种植业和养殖业实际情况,优化提出一套比较系统全面的旱地种养结合型循环农业模式的框架(图1)。该框架模式在现有的玉米种植-玉米青贮饲料-养殖肉牛-粪肥还田4个种植养殖单元的基础上引入草食禽畜高效饲养生产单元,通过种植优质经济作物-采用青贮技术最大限度保存作物养分-经草食家畜过腹增值生产高级畜产品-畜禽粪便腐熟堆沤有机肥-有机肥还田培肥地力等环节,开展鲜食玉米品质提升、秸秆高效青贮加工、草食家畜高效饲养、畜禽粪便快速发酵、黑土耕层肥力快速提升等研究,突出“土壤(及土壤微生物)-作物-禽畜”生态系统食物链关键技术接口的高效耦合集成,达到“玉米青贮、以草代粮、以禽畜增效、以粪肥田、秸秆换肉”的目的,实现种养一体化、经济效益最大化、农业废弃物资源化、黑土保护与综合利用最优化,为黑土区种养结合型生态循环农业模式提供理论参考。

在该框架模式中,最好选择集中连片的田块种植青贮玉米,在玉米长至1m左右时将雏鸭、鹅放入田间,鸭、鹅通过啃食玉米老叶及杂草减少除草剂用量和养家禽的饲养成本;鸭、鹅的排泄物作为有机肥还



注: A 秸秆高效青贮加工; B 草食家畜高效饲养; C 畜禽粪便快速发酵; D 黑土快速培肥增效; E 鲜食玉米品质提升。

Note: A: High-efficiency corn straw silage processing technology; B: High-efficiency feeding technology of herbivorous livestock; C: Rapid fermentation technology of livestock manure; D: Rapid fertilization and synergistic technology of black soil; E: Quality improvement technology of fresh corn.

图 1 旱地种养结合型循环农业模式的框架模式图

Fig. 1 The cycled planting-livestock farming mode of "maize-geese-cattle-organic fertilizer" in dryland

田供应玉米生长,可替代部分化肥的施用。青贮玉米收获后通过青贮加工成为肉牛养殖的饲料,肉牛粪便通过微生物菌剂快速发酵腐熟堆制成有机肥料,直接归还于种植青贮玉米的耕地;鲜食玉米和养殖的禽畜产品可直接出售或加工,实现农业生态系统内部的玉米-家禽-肉牛-有机肥的养分内循环。同时,玉米秸秆、田间杂草等作为养殖饲料,其来源健康绿色,有机肥还田最大限度保证了食品安全,维护人类健康,也消除了化肥肥效缓慢的弱点。这一框架模式是一种生态、环保、高效型的提高农田耕地质量和可持续发展的农业模式,可以实现一田多用,一地多收的合理循环利用。鸭、鹅在生长期啃食玉米根部的老叶和杂草,可有效改善玉米田间通风透光状况;鸭、鹅在田间活动时还会啄食裸露于地表的玉米须根系,促进玉米根系的深扎,提高玉米植株抗倒伏能力和玉米产量<sup>[13,32]</sup>。此外,玉米行间养家禽既可以丰富家禽所吃食物的种类和物种的多样性,还可抑制田间杂草和控制虫害,减少农药(除草剂和杀虫剂)的喷施,在节本增效的同时促进生态环境良性发展。家禽粪便直接还田可取代部分或全部的化肥投入,即可减少化肥的施用量,节约投入成本,也可有效提升土壤的肥力状况,沃土肥田<sup>[18]</sup>。玉米收获后通过青贮可最大限度的保存秸秆中的养分,可直接加工成肉牛饲料,经过牛的咀嚼和体内消化分解排出体外,减少养分的浪费。牛粪做成有机肥归还农田使其得到合理充分的利用,有效阻控或减缓土壤有机质含量下降。雷琬莹等<sup>[33]</sup>利用海伦站长期定位实验数据,分析发现有机粪肥还田可以显著增加黑土有机碳含量,并且还田年限越长土壤有机碳含量增长越高,超过连续 8 年的有机粪肥还田,农田黑土增碳率可达 16.6%。

据不完全估计,此框架模式在确保循环链条完整、生态系统内部可以自给自足的情况下,每亩农田可

节约种植和养殖成本,同时额外增加家禽肉产品和蛋制品收益可达1500元以上,农业废弃资源利用率提高到90%以上,节本增效明显。同时,建议考虑开发和挖掘具有区域特色的绿色生态农畜产品品牌,因地制宜的选择不同的畜禽动物和地方优势经济作物品种,如玉米种植-玉米青贮饲料-养殖肉牛(肉鹅)-粪肥还田、玉米种植-玉米秸秆栽培菌类培养基-菌糠还田等种养结合模式,兼顾好农业废弃物资源化利用和黑土地保护利用,以期带动区域经济的快速发展,为乡村振兴提供样板和技术支撑。

## 4 展 望

黑土区农业的可持续发展,科学用养黑土地是关键,全面实施种养结合型循环农业模式是构建农业系统内循环模式、资源和效益最大化、最终实现黑土可持续发展的重要突破口。种养结合型循环农业生产模式中涉及多个环节,包括经济作物-草食家畜-土壤等诸多生物及环境因素,同时也包括经济作物品种筛选、种植技术、青贮技术、家禽高效饲养技术、有机肥快速熟化技术、有机肥施用技术等诸多方面。通过以上关键技术的优化、集成和组装,可以提高农田系统养分循环效率、提升土壤肥力、增加经济效益、改善农村生态环境,意义重大。

在今后的发展中,黑土资源的保护与利用、生态环境友好型技术模式的研发与构建、国家和地方政策的制定和科学宣传推广、公众的参与度和配合度都至关重要。各级政府管理部门和实施主体都要严格遵循最新颁布的《黑土地保护法》的要求,建立针对性、系统性的黑土地保护制度,坚持用养结合,促进形成绿色可持续的黑土区农业发展模式。建议重点关注以下几个方面:

(1) 不同地区可根据实际情况适当改变种养循环链条的要素,构建因地制宜的种养结合型农业循环模式。如延长循环链条,增加食用菌栽培与废弃菌糠还田环节;玉米秸秆收获后可作为食用菌的培养基,生产食用菌;废弃的菌糠再次还田,培肥土壤。

(2) 种养循环模式的研发与建立还有诸多重要环节与技术需要攻关突破,在推广应用方面,与当地农民、合作社和政府间的协调合作的重要性仍需关注。需加强公众参与度,让广大农民自愿加入到种养循环型农业生产模式中,以保障黑土区循环农业模式的规模性和可持续性发展。

(3) 建立黑土资源保护和生态补偿制度。未来的政策需要制订促进农业系统内部(种植业与养殖业)自我调节和执行的可持续性管理制度和激励措施,以确保黑土资源最优化配置,促进乡村振兴战略的实施。

## 参考文献 (References):

- [1] 中华人民共和国中央人民政府. 农业农村部办公厅 生态环境部办公厅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[EB/OL]. (2020-06-04) [2022-09-10]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-06/20/content\\_5520767.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-06/20/content_5520767.htm).  
The Central People's Government of the People's Republic of China. Office of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ministry of Ecology and Environment. On further clarification of livestock and poultry manure return to land use requirements to strengthen the supervision of farming pollution notice [EB/OL]. (2020-06-04) [2022-09-10]. [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-06/20/content\\_5520767.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-06/20/content_5520767.htm).
- [2] 中华人民共和国农业农村部. 农业农村部办公厅 财政部办公厅关于开展绿色种养循环农业试点工作的通知 [EB/OL]. (2021-05-13) [2022-09-10]. [http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202105/t20210514\\_6367691.htm?ivk\\_sa=1024320u](http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202105/t20210514_6367691.htm?ivk_sa=1024320u).  
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Office of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ministry of Ecology and Environment. Notice on the pilot work of green breeding and recycling agriculture [EB/OL]. (2021-05-13) [2022-09-10]. [http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202105/t20210514\\_6367691.htm?ivk\\_sa=1024320u](http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202105/t20210514_6367691.htm?ivk_sa=1024320u).
- [3] 白金明. 我国循环农业理论与发展模式研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.  
BAI J M. Study on the theory and development model of circular agriculture in China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008.
- [4] 王钰. 陕西省中部地区循环农业典型模式分析与评价 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.  
WANG Y. Analysis and evaluation of typical models of circular agriculture in central Shaanxi Province [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forest University, 2020.

- [5] 刘通,程炯,苏少青,等.珠江三角洲桑基鱼塘现状及创新发展研究[J].生态环境学报,2017,26(10):1814-1820.  
LIU T, CHENG J, SU S Q, et al. Current situation and innovative development countermeasures of the mulberry dike-fish pond in the Pearl River Delta[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26 ( 10 ): 1814-1820.
- [6] 张晴丹.循环农业开启太湖生态保护之门[J].农村.农业.农民(B版),2016,438(6):37-39.  
ZHANG Q D. Recycling agriculture opens the door of ecological protection in Taihu Lake[J]. Rural Areas, Agriculture & Farmers (B), 2016, 438 ( 6 ): 37-39.
- [7] 韩晓增,夏恩君,李春特.东北北部平原区湿地湿生农业生态模式的研究[J].农业现代化研究,1990,11(4):39-42.  
HAN X Z, XIA E J, LI C. Study on wetland agroecological model in northeast plain area [J]. Research of Agricultural Modernization, 1990, 11(4): 39-42.
- [8] 本溪市农业农村局.辽宁省本溪市开展推进稻蟹综合种养工作[EB/OL].[2020-08-03][2022-09-10].[https://nyncj.benxi.gov.cn/gzdt/gzdt1/content\\_480717](https://nyncj.benxi.gov.cn/gzdt/gzdt1/content_480717).  
Benxi Agriculture and Rural Bureau. Comprehensive cultivation of rice and crab carried out in Benxi City, Liaoning Province [EB/OL]. [2020-08-03][2022-09-10].[https://nyncj.benxi.gov.cn/gzdt/gzdt1/content\\_480717](https://nyncj.benxi.gov.cn/gzdt/gzdt1/content_480717).
- [9] 国家畜禽粪污资源化利用科技创新联盟.内蒙古兴安盟科尔沁右翼前旗畜禽粪污资源化利用整县推进情况[J].畜牧业环境,2019,3:49-52.  
National Livestock and Poultry Breeding Waste Resources Utilization Technology Innovation Alliance. The county's progress in the utilization of livestock and poultry manure resources in the Horqin Right Front Banner, Xing an League, Inner Mongolia[J]. Animal industry and Environment, 2019, 3: 49-52.
- [10] 周丹丹,庞中伟,程方,等.绿色发展理念下区域生态循环农业发展路径研究——以科右前旗为例[J].江西科学,2018,36(6):1069-1072.  
ZHOU D D, PANG Z W, CHENG F, et al. Research on the development path of regional ecological recycling agriculture in the perspective of green development—taking Keyouqianqi as an example[J]. Jiangxi Science, 2018, 36 ( 6 ): 1069-1072.
- [11] 李晓宇,刘兴土,李秀军,等.松嫩平原西部盐碱湿地农业的范例:苇-鱼-蟹-菌模式[J].湿地科学,2021,19(1):106-109.  
LI X Y, LIU X T, LI X J, et al. Sample of saline-alkaline wetland agriculture in western Songnen plain: reed-fish-crab-mushroom mode[J]. Wetland Science, 2021, 19 ( 1 ): 106-109.
- [12] 周芝佳,郑桂亮.黑龙江双城粪污处理模式分析[J].中国畜禽种业,2022,18(7):44-45.  
ZHOU Z J, ZHENG G L. Analysis of manure treatment mode in Shuangcheng, Heilongjiang Province[J]. The Chinese Livestock and Poultry Breeding, 2022, 18 ( 7 ): 44-45.
- [13] 刘爽,王艳宇,杨焕民,等.玉鹅种养模式对玉米生长、养分积累及产量的影响[J].河南农业科学,2021,50(6):28-36.  
LIU S, WANG Y Y, YANG H M, et al. Effect of Co-cultivation mode of breeding goose in cornfield on growth, nutrient accumulation and yield of corn[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2021, 50 ( 6 ): 28-36.
- [14] 刘爽.玉-鹅种养模式对土壤改良和玉米增产效果的研究[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2021.  
LIU S. Study on the effect of jade-goose breeding model on soil improvement and maize yield increase [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2021.
- [15] 中国科学院东北地理与农业生态研究所农业技术中心.“退化黑土生态恢复重建技术与模式”项目通过鉴定[EB/OL].(2011-01-11)[2022-12-29].[http://www.neigaehrb.cas.cn/xwdt/zhxw/201101/t20110111\\_3059989.html](http://www.neigaehrb.cas.cn/xwdt/zhxw/201101/t20110111_3059989.html).  
Center for Agricultural Research, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences. The project of "Ecological restoration and reconstruction technology and model of degraded black soil" passed the appraisal [EB/OL]. (2011-01-11) [2022-12-29].  
[http://www.neigaehrb.cas.cn/xwdt/zhxw/201101/t20110111\\_3059989.html](http://www.neigaehrb.cas.cn/xwdt/zhxw/201101/t20110111_3059989.html).
- [16] 韩晓增.退化黑土生态恢复重建技术与模式的研究[R].吉林省:中国科学院东北地理与农业生态研究所,2011.  
HAN X Z. Research on the technology and model of ecological restoration and reconstruction of degraded black soil[R]. Jilin: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [17] 史书强,丁岩.辽宁省推广粮改饲促进种养业协调发展研究[J].农业科技管理,2020,39(5):67-70.  
SHI S Q, DING Y. Study on promoting grain to feed in Liaoning Province to promote the coordinated development of breeding industry[J]. Management of Agriculture Science and Technology, 2020, 39 ( 5 ): 67-70.
- [18] 赵文忠,孙文鹏,戚国强.鸭菌稻立体循环种养模式[J].乡村科技,2019(30):105-106.  
ZHAO W Z, SUN W P, QI G Q. Three-dimensional circulation planting and breeding model of duck-fungus rice[J]. Rural Science and Technology, 2019 ( 30 ): 105-106.
- [19] 李君.稻鸭共作增效益 循环农业显生机——梅河口市“稻鸭共作水稻种养结合生态循环农业技术示范项目”总结[J].吉林农业,2019(8):34.  
LI J. Rice-duck farming increases benefits and circular agriculture shows vitality-summary of Meihokou city's "Rcie-duck farming and rice breeding combined with ecological agriculture technology demonstration project" [J]. Agriculture of Jilin, 2019 ( 8 ): 34.

- [20] 王立辉,周翠花,赵慧,等.镇赉县水稻种养结合生态循环农业技术示范探究[J].吉林农业,2019(15):33.  
WANG L H, ZHOU C H, ZHAO H, et al. Demonstration of rice planting and breeding combined with ecological recycling agriculture technology in Zhenlai County[J]. Agriculture of Jilin, 2019 ( 15 ) : 33.
- [21] 李杭.伊通满族自治县稻蟹种养产业发展现状探析[J].中国管理信息化,2021(9):184-186.  
LI H. Analysis on the development status of rice crab breeding industry in Yitong Manchu Autonomous Country[J]. China Management Informationization, 2021 ( 9 ) : 184-186.
- [22] 李小进,王丽,马民,等.稻蟹综合种养新模式试验[J].中国水产,2022(4):85-87.  
LI X J, WANG L, MA M, et al. Experiment on a new model of comprehensive planting and breeding of rice and crab[J]. China Fisheries, 2022 ( 4 ) : 85-87.
- [23] 史福成.兴安盟稻蟹综合种养技术[J].中国水产,2021(4):77-78.  
SHI F C. A technical introduction of rice-crab culture system in Hinggan league[J]. China Fisheries, 2021 ( 4 ) : 77-78.
- [24] 岳中海,李泽友,高杰,等.内蒙古扎赉特旗稻渔综合种养现状与发展对策[J].中国水产,2019(9):54-56.  
YUE Z H, LI Z Y, GAO J, et al. Current situation and development countermeasures of rice-fishing comprehensive planting and breeding in Zhalaite Banner, Inner Mongolia[J]. China Fisheries, 2019 ( 9 ) : 54-56.
- [25] 海伦市人民政府.海伦市人民政府办公室关于印发海伦市畜禽养殖废弃物资源化利用工作方案的通知[EB/OL].(2018-05-08)[2022-12-29].<https://www.hailun.gov.cn/zwgk/content.html?id=25655>.  
Hailun Municipal People's Government. Notice of the Office of Hailun Municipal People's Government on printing and distributing the work plan of resource utilization of livestock and poultry breeding wastes in Hailun city[EB/OL]. (2018-05-08) [2022-12-29].<https://www.hailun.gov.cn/zwgk/content.html?id=25655>.
- [26] 海伦市人民政府.海伦市人民政府办公室关于印发海伦市畜禽养殖污染防治规划的通知[EB/OL].(2018-11-02)[2022-12-29].<https://www.hailun.gov.cn/Article/content.html?id=13493>.  
Hailun Municipal People's Government. Notice of the Office of Hailun Municipal People's Government on printing and distributing the pollution prevention and control plan of livestock and poultry breeding in Hailun city[EB/OL]. (2018-11-02) [2022-12-29].<https://www.hailun.gov.cn/Article/content.html?id=13493>.
- [27] 海伦市人民政府.“十四五”规划[EB/OL].(2021-12-10)[2022-12-29].<https://www.hailun.gov.cn/zwgk/content.html?id=28018>.  
Hailun Municipal People's Government. The 14th Five-Year Plan[EB/OL]. (2021-12-10) [2022-12-29]. <https://www.hailun.gov.cn/zwgk/content.html?id=28018>.
- [28] 中华人民共和国生态环境部.畜禽规模养殖污染防治条例[EB/OL].(2013-11-26)[2022-12-29].[https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/xzfg/201311/t20131126\\_263957.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/xzfg/201311/t20131126_263957.shtml).  
Ministry of Ecology and Environment of People's Republic of China. Regulations on pollution prevention and control of scale livestock and poultry breeding[EB/OL]. (2013-11-26) [2022-12-29].[https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/xzfg/201311/t20131126\\_263957.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/xzfg/201311/t20131126_263957.shtml).
- [29] 海伦市人民政府.张佐带领部分市政协常委、政协委员对我市畜禽养殖废弃物资源化利用情况开展视察[EB/OL].(2020-10-27)[2022-12-29].<https://www.hailun.gov.cn/article/content.html?id=21867>.  
Hailun Municipal People's Government. Zhang Zuo led some members of the CPPCC Standing Committee and CPPCC members to inspect the resource utilization of livestock and poultry breeding waste in Hailun city [EB/OL]. (2020-10-27) [2022-12-29].<https://www.hailun.gov.cn/article/content.html?id=21867>.
- [30] 人民网.海伦市加快推广畜禽粪污资源化利用探索绿色种养循环农业高效转型[EB/OL].黑龙江频道,(2022-02-14)[2022-12-29].<http://hlj.people.com.cn/n2/2022/0214/c220024-35133288.html>.  
People.cn. Hailun city speeds up the utilization of livestock and poultry manure and explores the efficient transformation of green breeding and recycling agriculture[EB/OL]. Heilongjiang, (2022-02-14)[2022-12-29]. <http://hlj.people.com.cn/n2/2022/0214/c220024-35133288.html>.
- [31] 中华人民共和国黑土地保护法 [EB/OL].(2022-06-24)[2022-12-29]<https://flk.npc.gov.cn/detail2.html>.  
Blackland Protection Law of the People's Republic of China [EB/OL]. [2022-12-29]<https://flk.npc.gov.cn/detail2.html>.
- [32] 余兵兵,汪春,李海亮,等.甜玉米行间养鹅循环种养互作机理研究[J].农业技术与装备,2019(7):68-70+73.  
YU B B, WANG C, LI H L, et al. Interaction mechanism of recirculating cultivation and breeding of goose between rows of sweet corn[J]. Agricultural Technology and Equipment, 2019 ( 7 ) : 68-70+73.
- [33] 雷琬莹,李娜,滕培基,等.农田生态系统有机物料腐解过程及土壤培肥机制研究[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(9):1393-1408.  
LEI W Y, LI N, TENG P J, et al. Decomposition processes of organic materials and their mechanisms of improving soil fertility in cropland ecosystems[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30 ( 9 ) : 1393-1408.