北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

百合林下种植模式在农林复合系统中的应用

杨凤萍 马会怡 蓝茹滨 杜运鹏 陈绪清 张秀海

Application of lily in understory planting model in agroforestry systems

Yang Fengping, Ma Huiyi, Lan Rubin, Du Yunpeng, Chen Xuqing, Zhang Xiuhai

引用本文:
杨凤萍, 马会怡, 蓝茹滨, 杜运鹏, 陈绪清, 张秀海. 百合林下种植模式在农林复合系统中的应用[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(4):164–173. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250085
Yang Fengping, Ma Huiyi, Lan Rubin, Du Yunpeng, Chen Xuqing, Zhang Xiuhai. Application of lily in understory planting model in agroforestry systems[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4):164–173. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250085

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250085

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

复合种植模式下谷胱甘肽和*GST2*调控活性氧清除增强林下植物抗寒性
Glutathione and *GST2* regulating reactive oxygen species scavenging to enhance cold resistance of understory plants under intercropping patterns
北京林业大学学报, 2026, 48(1): 73–87. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250186

百合与花韭花朵开放过程的解剖观察
Anatomical observation of blooming process of lily and Chinese leek flowers
北京林业大学学报, 2025, 47(3): 107–115. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230330

‘回归’百合组织培养再生体系的建立
Establishment of tissue culture and regeneration system for *Lilium* ‘Regression’
北京林业大学学报, 2025, 47(6): 123–129. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250078

宽窄行栽植模式下三倍体毛白杨小麦复合系统的细根分布及形态特征
Fine root spatial distribution and morphology of triploid *Populus tomentosa*–wheat agroforestry system under wide– and narrow–row spacing planting schemes
北京林业大学学报, 2021, 43(10): 73–80. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200420

采伐干扰对吉林蛟河针阔混交林林下层木本植物生物量影响
Effects of logging disturbance on biomass of understory woody plants in conifer–broadleaved mixed forests in Jiaohe, Jilin Province of northeastern China
北京林业大学学报, 2025, 47(12): 76–86. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250117

基于MSPA–MCR模型与ROS理论的首都森林生态旅游区规划
Planning of capital forest ecotourism area based on MSPA–MCR model and ROS theory
北京林业大学学报, 2024, 46(10): 112–124. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220429

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250085

百合林下种植模式在农林复合系统中的应用

杨凤萍[1,2] 马会怡[1,3] 蓝茹滨[1,3] 杜运鹏[1,2] 陈绪清[1,2] 张秀海[1,2]
（1. 北京市农林科学院草业花卉与景观生态研究所，北京 100097；2. 百合国家林业和草原局重点实验室，北京 100097；
3. 西藏农牧学院资源与环境学院，西藏 林芝 860000）

摘要:【目的】当前农林复合体的研究多集中于林下单一模式的应用探索，各种模式之间缺乏交叉融合，导致资源循环利用率偏低。本研究旨在探索林花模式在农林复合体中的应用，为农林复合系统的高效生产、资源循环利用与开发提供科学依据。**【方法】**本研究选用‘穿梭’百合品种，在北京房山地区大石窝镇国家林下经济示范基地的露地及不同人工林（白蜡、柳树）林下种植，分析不同林分、不同土壤养分条件（园区农林废弃物腐熟发酵肥不同组合处理）对百合生长状况、鲜花品质以及百合种球品质的影响。在基地园区内槐树林下，分 6 个时间批次种植‘穿梭’百合种球，探究林下不同时期播种对百合可持续的景观花期、种球品质以及百合花瓣活性物质积累的影响。同时，将百合干花粉作为饲料添加剂饲喂北京油鸡，评估其对鸡肉品质的改良效果。**【结果】**（1）在 40%～50% 郁闭度的白蜡林下种植的百合花蕾数量、大小、植株茎粗以及收获的种球周径、质量与露地种植的百合无显著差异；在 70%～80% 郁闭度的柳树林下种植百合的株高显著高于露地百合植株，花蕾个数显著减少。（2）农林复合系统自产腐熟发酵肥可以显著改善因林地养分缺乏导致的植株生长缺素的问题，提高收获百合种球的品质，尤其是“叶面肥＋鸡粪肥”的组合处理表现出明显的优势，具备替代市售基质营养土的潜力。（3）林下不同批次种植的百合花中，深秋（种植批次 2023−11−01）、初夏（种植批次 2024−05−22）和盛夏（种植批次 2024−06−20）种植的百合花蕾最长，花鲜质量最高。分期分批种植可使百合花期可从 6 月初持续到 10 月底。百合花中总黄酮、总生物碱和总多糖的合成和积累在花瓣中因季节和温度的变化有明显差异，其中黄酮在初夏（种植批次 2023−11−01）和初秋（种植批次 2024−06−20）开花的花瓣中含量最高，生物碱、多糖分别在 8 月中旬（种植批次 2024−06−20）收获的花瓣中积累水平最高，花青素是在盛夏时期（种植批次 2024−05−22）收获的百合花瓣中积累最多。（4）用添加 4% 百合花干粉的鸡饲料喂食 3 月龄雏鸡 3 个月可使鸡胸肉中积累的皂苷、类活萝卜素比对照分别提高 43.4% 和 24.4%，黄酮和生物碱分别增加 1.0 倍和 3.7 倍，表明此方法可有效提升鸡肉的营养价值。**【结论】**本研究通过探索林下百合种植多种应用模式，实现了农林复合体中模式间的有机融合，达到林下百合生产、景观提升以及百合花营养价值开发和高值化利用的目标，将为促进农林复合系统的高效循环发展和综合开发利用提供更多的思路与借鉴。

关键词： 百合；林下种植；农林复合系统；林下经济；绿色发展
中图分类号： S682.2 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000−1522(2026)04−0164−10
引文格式： 杨凤萍，马会怡，蓝茹滨，等. 百合林下种植模式在农林复合系统中的应用［J］. 北京林业大学学报，2026，48(4)：164−173. Yang Fengping, Ma Huiyi, Lan Rubin, et al. Application of lily in understory planting model in agroforestry systems［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4): 164−173.

Application of lily in understory planting model in agroforestry systems

Yang Fengping[1,2] Ma Huiyi[1,3] Lan Rubin[1,3] Du Yunpeng[1,2] Chen Xuqing[1,2] Zhang Xiuhai[1,2]
(1. Institute of Grassland, Flowers and Ecology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China;
2. Key Laboratory of National Foresry and Grassland Administration on Lily, Beijing 100097, China;
3. College of Resources and Environment, Xizang University of Agriculture and Animal Husbandry, Linzhi 860000, Xizang, China)

收稿日期: 2025−03−12 **修回日期:** 2025−04−07
基金项目: 北京市农林科学院院级科研项目（KJCX20240506、KJCX20230809、KJCX20200601），国家重点研发计划（2023YFD2201805）。
第一作者: 杨凤萍，副研究员。主要研究方向：观赏园艺。Email: yangfengping@baafs.net.cn 地址：100097 北京市海淀区曙光中路 9 号北京市农林科学院。
责任作者: 张秀海，研究员。主要研究方向：观赏园艺。Email: zhangxiuhai@baafs.net.cn 地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

Abstract:［**Objective**］Current research on agroforestry systems often focuses on exploring single model application in understory, with limited cross-integration between different models, which lead low resource recycling efficiency. This study aims to explore the application of the forest-ornamental mode in agroforestry systems and provide a scientific basis for the efficient production, resource recycling, and development of agroforestry systems.［**Method**］*Lilium* ‘Tresor’ bulbs was planted in the open field and under-forest of willow and Chinese ash in the National Underforest Economic Demonstration Base in Dashiwo Town, Fangshan County, Beijing. Subsequently, the effects of different forest stands and soil nutrient conditions (different combination treatments of decomposed and fermented fertilizer by agroforestry waste (DFF-AW) in the park) were analyzed on the growth status of lilies, the quality of fresh flowers, as well as the quality of lily bulbs. Six batches of *Lilium* ‘Tresor’ bulbs were planted under the *Sophora japonica* forest to investigate the effects of planting at different times on the sustainable flowering period, bulb quality, and accumulation level of active substances in lily petals. Meanwhile, dried lily petal meal (DLPE) was fed to Beijing-You chicks as feed additive to evaluate its improvement effect on chicken quality.［**Result**］(1) When canopy density was 40%−50%, there was no significant difference in bud number, size, stem diameter, circumference and quality of harvested bulbs between lily planted under *Fraxinus chinensis* stands and those planted in open field; when canopy density was above 70%, lily plant height under willow forest was significantly higher than that of open field, and bud number decreased significantly. (2) DFF-AW could significantly alleviate plant nutrient deficiencies caused by insufficient soil nutrients in forest lands, and improve the quality of lily bulbs. In particular, the combination of “foliar fertilizer + chicken manure” showed obvious advantages and had the potential to replace commercially available substrate nursery soil. (3) Among different batches, lilies planted in late autumn (batch 2023−11−01), early summer (batch 2024−05−22) and midsummer (batch 2024−06−20) had the longest flower buds and the heaviest fresh flower weight. Planting lilies in batches under the forest could make the flowering period last from early June to late October. The synthesis and accumulation of total flavonoids, total alkaloids and total polysaccharides varied significantly with seasons and temperatures. Among which, flavonoids content of flower petals were highest in early summer (batch 2023−11−01) and early autumn (batch 2024−06−20). The content of alkaloids and polysaccharides of lily petals harvested in mid-August (batch 2024−06−20) were highest. Anthocyanins accumulate most in petals harvested in the hot summer (batch 2024−05−22). (4) Feeding 3-month-old Beijing-You chick three months by chicken feed with 4% dried lily petal meal (DLPE) as dietary supplementation could promote the content of saponins and carotenoids in chicken breast meat by 43.4% and 24.4% respectively compared with the control group, and the content of flavonoids and alkaloids increased by 1.0 times and 3.7 times respectively, indicating that this method could effectively improve the nutritional value of chicken meat.［**Conclusion**］By exploring various application models for the lily planting under forest, this study successfully promoted organic cross-integration between forest-ornamental mode with other modles of agroforestry systems, and realized the goals such as lily production under forest, landscape improvement as well as nutritional value exploring and high-value utilization of lily flower. These application modles provide more ideas and references for promoting the efficient cyclic development and comprehensive utilization of agroforestry systems.

Key words: lily; understory planting; agroforestry system; understory economy; green development

百合（*Lilium* spp.）是我国传统药食兼用的植物资源，也是名贵蔬菜之一，具有滋补润肺的功效；作为多年生球根花卉，百合生长适应性强，且具有一定的耐荫性[1]。前人试种结果[2]表明，百合是发展林下经济、打造林下景观的优选花卉品种。广西壮族自治区龙胜各族自治县江底乡建新村在竹林和杉木林下发展种植大百合 1 200 多亩，可采收面积达 600 亩以上，不仅拓宽了集体经济发展路径，也为当地村民带来了可观的经济收益[3]。湖北省十堰市张湾区西沟乡在猕猴桃（*Actinidia chinensis*）林下套种兰州百合（*Lilium davidii* var. *unicolor*），相关栽培技术可有效降低生产成本，提高土壤水分与养分含量，同时

对猕猴桃和兰州百合的产量均表现出一定的增益效果[4]。福建省农业科学院生物技术研究所蔡宣梅等[5]在林下套种卷丹百合(*Lilium lancifolium*),充分利用福建省丰富的林地资源,实现每亩净收入达 4 000 元,既增加了种植者的收益,又有效防止了水土流失。

农林复合的生产实践活动在我国由来已久[6]。农林复合系统实现了农、林、牧各产业的有机结合,有效促进了系统内部资源的整合和废弃物的循环再利用,是维持农林复合生产模式可持续发展的重要路径;该系统在提高资源使用效率的基础上,有助于减少环境污染,增强生态系统服务功能,并推动农业向绿色、高效、和谐的方向发展[7]。农林复合经营是一种高效的土地利用方式,本研究团队前期成功研发了林–菌、林–花、林–草和林–禽等多元化的农林复合生态种养模式[8],并开展了相应的推广示范工作,现已成为北京林下经济高质量发展的成功范式,不仅有效缓解了当地林业废弃物处理难题,也促进了生态循环的绿色发展。农林复合经营模式目前虽然取得了一定的综合效益,但是仍面临许多问题亟待解决。农林复合经营尚缺乏全方位评价,区域层面的最优化组合模式及组合模式间的融合研究也鲜有报道,难以客观、全面地评价农林复合经营的总体效益。本团队前期研发出多元农林复合生态种养模式及相关的林下生产技术,并依托智能纳米膜快速发酵技术,实现了农林复合系统内的混合废弃物的肥料化应用的“大循环”。然而,不同农林复合模式间的“小循环”交叉融合技术仍研究不够充分,模式间相对独立,这导致产生的农林废弃物还未得到高值化利用。

为进一步挖掘林花模式在农林复合体中的应用潜力,探究与其他模式之间的交叉融合,提升林下百合种植的经济效益空间,本研究在北京市房山区大石窝镇国家林下经济示范基地人工林下种植有一定耐荫能力的赏、药、食兼用型‘穿梭’百合(*Lilium* ‘Tresor’)品种,拟系统分析不同林分、不同土壤养分条件(园区农林废弃物腐熟发酵肥不同组合处理)对百合生长状况、鲜花品质和种球质量、产量的影响,并探究不同播期对林下百合可持续的景观花期和百合花活性成分含量的影响。此外,团队在前期研究[8]中发现,百合花干粉作为鸡饲料添加辅料可以显著提高蛋黄中的卵磷脂、降低胆固醇的含量。百合花中含有大量对人体有益的药性活性成分,但其对鸡肉的营养价值是否有影响尚不清楚。因此,本研究进一步选用 3 月龄北京油鸡,连续喂养 3 个月含 4% 百合花干粉的饲料,分析百合花干粉作为饲料添加辅料对北京油鸡鸡肉营养品质的提升效果,以深入探究林下百合种植的多种应用模式以及与其他模式间的有效融合路径,以期为促进农林复合系统的高效循环发展和综合开发利用提供更多的思路和借鉴。

1 材料与方法

1.1 不同林分下百合种植

本研究在房山区大石窝镇国家林下经济示范基地的柳树林(*Salix* spp.)(郁闭度在 70% ~ 80%)、白蜡林(*Fraxinus chinensis*)(郁闭度在 40% ~ 50%)林下以及园区露地种植‘穿梭’百合(周径 12 ~ 14 cm),种植第 2 年,随机划取 2 m × 3 m 的 3 个重复区域,在每个区域中随机选取 10 株百合进行株高、茎粗、花蕾数量和花蕾长度的测量,并对该区域内收获百合种球的质量、周径进行测定,对比不同林分下种植对百合生长状况和产量的影响。

1.2 不同土壤养分条件百合种植

选择一处土壤养分匮乏的白蜡样地,整理 2 m × 3 m 的地块作为试验单元,以园区土和市售‘如青’牌基质土为双对照,分别使用园区自产食用菌菌渣发酵肥、鸡粪发酵肥以及由林木废弃物发酵制成的叶面肥作为供试肥料来源。试验共设置 3 种肥料组合处理,分别为菌渣肥 + 鸡粪肥、叶肥 + 鸡粪肥、菌渣肥 + 叶肥 + 鸡粪肥。各处理肥料与园区土 1∶1 比例混合后,开畦种植‘穿梭’百合。每个组合处理重复 3 个地块。每个地块栽植百合小籽球(周径 2 ~ 4 cm)300 粒或中籽球(周径 4 ~ 6 cm)200 粒。于花期分别测定小籽球和中籽球发育植株的株高、茎粗和开花数量。花期进入种球膨大期后,统一喷施以园区废弃物经液体发酵制成的叶面肥。秋季采收时统计种球大小与质量,分析不同肥料组合处理对百合生长和产量的影响,进而综合评价园区农林复合体中产生的废弃物腐熟发酵肥(菌渣发酵肥、鸡粪发酵肥和园林废弃物处理的叶面肥)在园区中的循环利用效果。

1.3 百合分期播种及活性成分检测

在基地园区内槐树(*Sophora japonica*)林下,以‘穿梭’百合种球(周径 12 ~ 14 cm)为材料,设置 6 个不同播种时期处理,分别为 2023 年深秋(2023−11−01)、2024 年早春(2024−03−26)、2024 年仲春(2024−04−10)、2024 年初夏(2024−05−22)、2024 年盛夏(2024−06−20、2024−07−22),每个时期 3 个重复,每个重复播种 300 个种球,种植密度为 20 cm × 30 cm。于花期分别统计其花蕾长、花蕾个数(正常花蕾和败蕾个数)、鲜花质量并检测其营养品质(营养成分如总多糖、总黄酮、总生物碱、类胡萝卜素和皂苷等)等指标,收获时分别统计其种球周径和质量,分析不

同播期对百合花期和花朵、种球产量和质量的影响。总多糖、总黄酮、总生物碱、类胡萝卜素和皂苷检测试剂盒从武汉诺敏科达公司购买，参照试剂盒说明书进行检测，每个检测样品设置 3 个生物学重复。

1.4　百合花干粉喂食北京油鸡

在百合盛花期采集鲜花，用 60 ℃ 烘箱进行干燥，粉碎后按 4% 比例添加至鸡饲料中，喂食林下养殖的 3 月龄北京油鸡雏鸡，具体喂食方式操作参考郑明利等[8]方法。喂食 3 个月后，将鸡肉分鸡胸和鸡腿两个部位进行类胡萝卜素、皂苷、总生物碱和总黄酮检测，检测试剂盒从武汉诺敏科达公司购买，参照试剂盒说明书进行检测，每个检测部位设置 3 个生物学重复。

1.5　数据统计

使用软件 Prism 8.0 和 PASW Statistics 18 进行数据统计和差异显著性分析。

2　结果与分析

2.1　不同林下种植对百合生长的影响

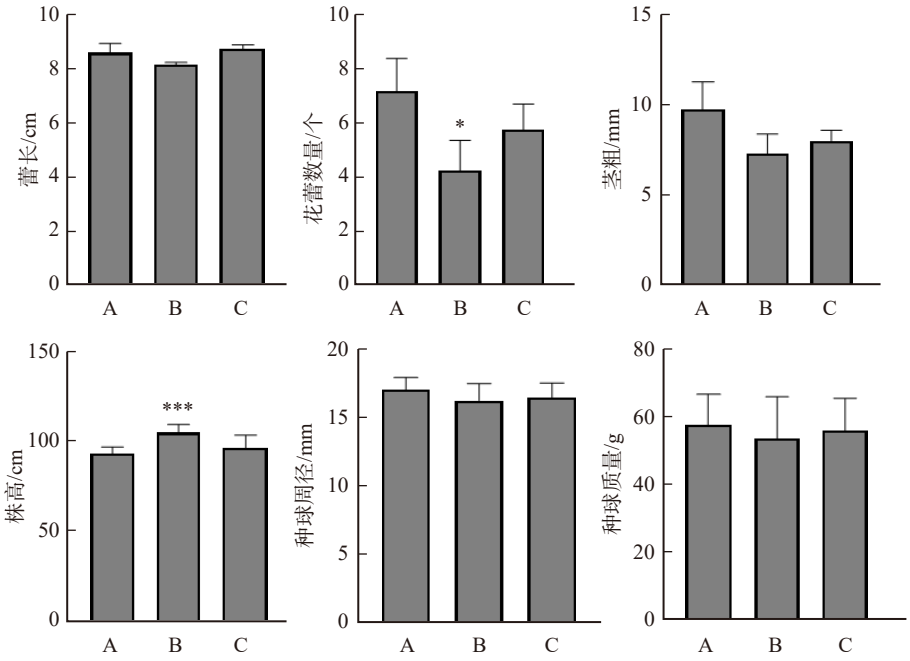
百合在柳树（郁闭度在 70% ~ 80%）、白蜡林（郁闭度在 40% ~ 50%）下种植第 2 年生长状况良好（图 1）。但林木的郁闭度对百合株高有一定的影响，郁闭度高的柳树林下种植的百合株高显著高于露地百合植株，而郁闭度相对低的白蜡林与露地没有显著差异。不同林分中花蕾数量和植株茎粗与露地种植的百合存在一定的差异，其中郁闭度高于 70% 的花蕾数量显著少于露地百合的花蕾数量；但 40% ~ 50% 的郁闭度对花蕾长度和花蕾数量没有显著影响（图 2）。在两种林分下收获种球的周径和质量与露地百合种球均无明显差异（图 2）。以上结果表明，林分的郁闭度超过 70%，仅对百合的株高和花蕾数量有一定的影响，而 40% ~ 50% 郁闭度的林下光合效



a 露地种植　　b 柳树林下种植　　c 白蜡林下种植

图 1　百合在露地、柳树和白蜡林下的生长状况

Fig. 1　Growth status of lily in the open field, under-forest of willow and Chinese ash



A. 露地；B. 柳树林；C. 白蜡林。* 和 *** 表示林下百合和露地百合在 0.05 和 0.001 水平上存在显著性差异。

图 2　不同林下种植对百合生长的影响

Fig. 2　Impact of different understory planting on lily growth

能就可以满足百合植株生长的需求，对林下百合种球的生产没有影响。

2.2 农林废弃物腐熟发酵肥改善林下百合生长状况

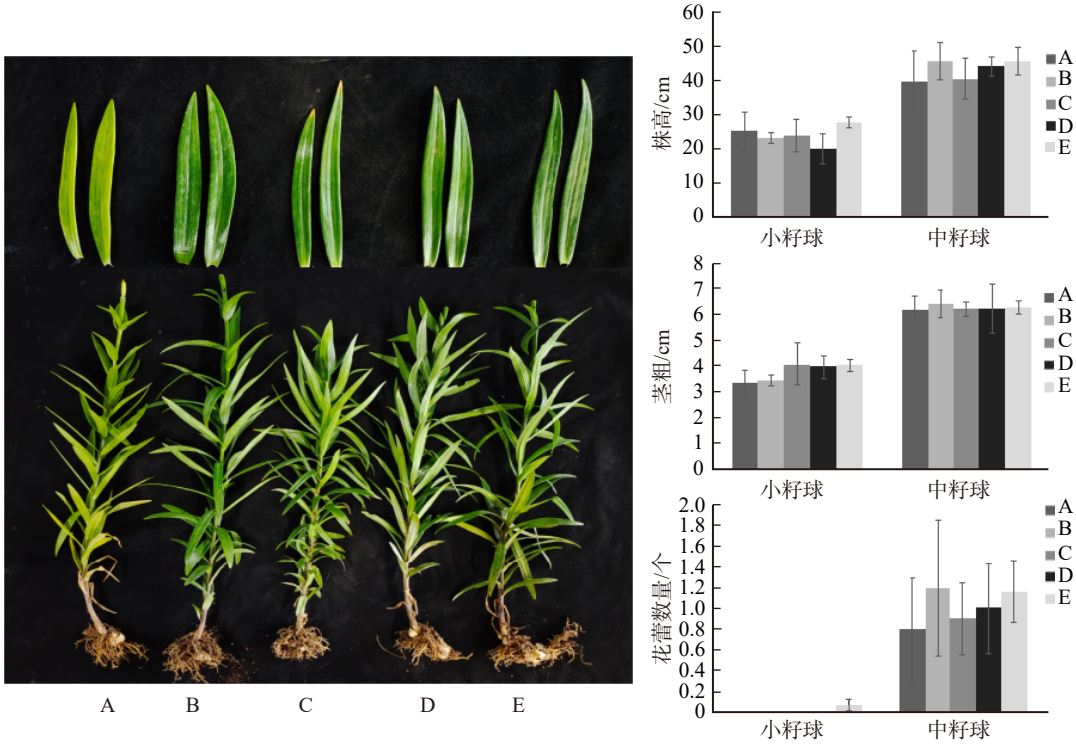
在选取的土壤养分匮乏的白蜡试验样地，林下土壤种植的百合植株叶片发黄，表现为缺素症状。在此样地不同肥料组合处理下分别种植百合小球和中籽球，结果(图 3)发现：园区林地土壤直接种植的百合小籽球长出的植株细弱，叶片明显发黄，而在加入‘如青’营养土以及 3 种园区废弃物肥料组合(菌渣肥 + 鸡粪肥、叶面肥 + 鸡粪肥、菌渣肥 + 鸡粪肥 + 叶面肥)处理的基质中，百合植株叶色油绿，茎秆健壮。结果表明：此处园区林地土壤可能缺乏某种百合生长所需的某些养分，导致植株生长发育不良；而通过施加园区自产废弃物腐熟发酵肥料，可显著改善土壤养分情况，使其满足百合正常生长的养分需求。

为进一步明确不同基质处理的改善效果，本研究于开花期对百合植株的株高、茎粗及花蕾数量进行了统计分析。结果(图 3)表明：在 3 种园区发酵肥任意组合处理下，小籽球百合植株的茎粗均高于园区土和“如青”营养土上生长的植株，菌渣 + 鸡粪 + 叶面肥组合处理下的株高明显高于园区土和“如青”营养土；中籽球植株的茎粗、株高和花蕾数量均高于园区土处理。

值得注意的是，经过一个生长季的白蜡林下种植后，无论是小籽球还是中籽球，其收获种球的质量和周径在 5 个处理间表现出明显的差异。具体来说，与纯园区土壤种植效果相比，3 种园区腐熟发酵肥(菌渣 + 鸡粪、叶面肥 + 鸡粪、菌渣 + 鸡粪 + 叶面肥)组合种植的小籽球收获的种球周径分别增加了 15.9%、28.6% 和 26.6%，质量分别增加了 32.1%、91.7% 和 55.9%；而中籽球收获的种球周径增加了 20.8%、49.6% 和 28.8%，质量增幅更为显著，增加了 76.7%、165.0% 和 84.5%，尤其是“叶面肥 + 鸡粪肥”的组合处理效果最为明显，达到极显著水平(图 4)。此外，该组合处理下小籽球和中籽球收获的百合种球的质量与市售基质营养土种植的百合相比分别提升了 22.7% 和 25.4%(图 4)，表现出明显的优势。这表明“叶面肥 + 鸡粪肥”的组合处理具备替代市售基质营养土的潜力，可在实现农林复合体废弃资源循环利用的同时，节约有机肥采购成本。

2.3 林下不同时期播种对百合开花和种球品质的影响

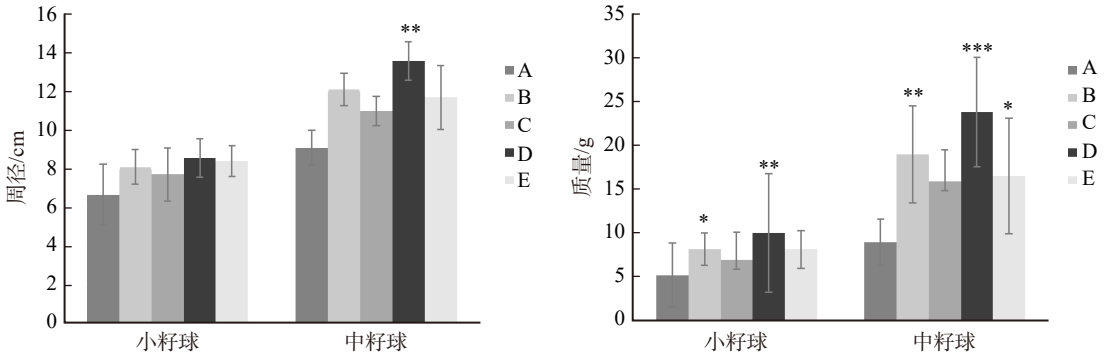
林下种植百合是提升林地景观的有效途径，而高品质景观的持续时长可直接影响林下经济效益的提升。本研究结果(图 5)显示，在温度、开花所需天数均满足的前提下，百合可在林下实现分批多次种植。整体来看，百合开花所需天数随着种植温度的升高逐渐缩短，前年深秋种植(2023−11−01)和次年



A. 园区林下土壤；B. ‘如青’基质；C. 菌渣 + 鸡粪；D. 叶面肥 + 鸡粪；E. 菌渣 + 鸡粪 + 叶面肥。

图 3 农林废弃物腐熟发酵肥对百合生长的影响

Fig. 3 Effect of decomposed and fermented fertilizer by agroforestry waste (DFF-AW) on lily growth



A. 园区林下土壤；B. ‘如青’基质；C. 菌渣 + 鸡粪；D. 叶面肥 + 鸡粪；E. 菌渣 + 鸡粪+叶面肥。* 、**和***分别表示与园区林下土壤相比在 0.05、0.01 和 0.001 水平上差异显著。

图 4　农林废弃物腐熟发酵肥对百合种球的影响

Fig. 4　Effect of DFF-AW on lily bulbs

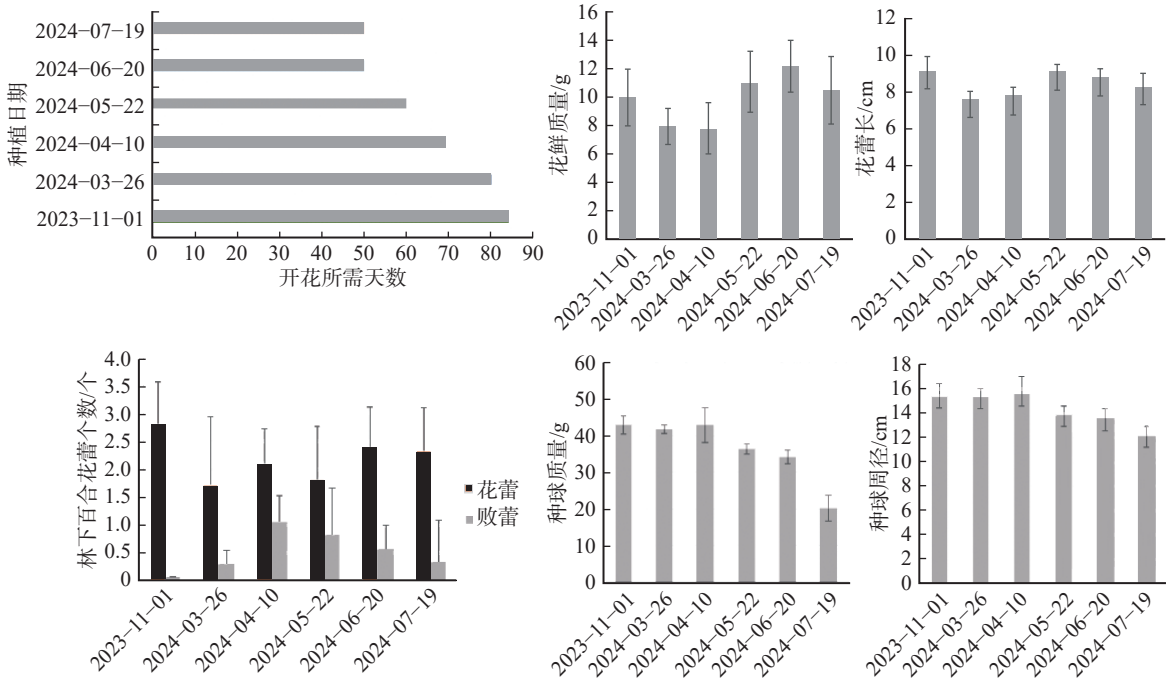


图 5　不同播种时期对百合生长状况的影响

Fig. 5　Impact of different planting times on the growth status of lilies

早春种植(2024−03−26)的植株至少需要 80 d 才能开花，百合最早一批开花的时间为 6 月初；盛夏种植(2024−06−20、2024−07−22)的百合植株，由于种植时温度高，植株生长速度加快，开花时间可缩短至 50 d，使最后一批百合在 10 月中下旬开花(图 5)，由此可见，在北京地区，百合的花期可以从 6 月初持续到 10 月底。以上结果表明，林下种植百合可根据种植者的需求，分期分批种植，利用当地的环境气候条件有的放矢地调整种植时间，以达到调控百合花期的目的。

不同批次种植的百合开花品质(花鲜质量和花蕾长)有一定的差异，其中深秋(2023−11−01)、初夏(2024−05−22)和盛夏(种植批次 2024−06−20)种植的百合花蕾最长、鲜花质量最高(图 5)。在种植过程中，不同批次种植的百合出现了一定程度的败蕾现象。其中，仲春(2024−04−10)种植的百合，虽然经过不到 70 d 可以开花，但此时期败蕾现象较为严重；而深秋(2023−11−01)和早春(2024−03−26)种植的百合败蕾现象发生程度最轻；初夏(2024−05−22)以及之后种植的百合，随着季节推移和气温升高，败蕾程度逐步缓解(图 5)。盛夏(2024−07−19)和早春(2024−03−26)这两个时间种植的百合总体上败蕾现象较少，推测这两个时期对应的温度和环境有利于百合的花芽分化，形成的花蕾都能正常发育并开花，而其他批次虽出现败蕾问题，但大部分花蕾都能正常开花，对林下景观影响不大。

前年深秋和次年春季和初夏种植的百合，生长周期较长，10 月下旬收获的种球品质(种球质量和种球周径)总体较好，而盛夏(2024−05−22)及以后种植，由于生长周期逐渐缩短，压缩了百合在花期后的

种球膨大所需的时间，导致收获的种球较小(图 5)。结合前面关于百合花期的结果，如果种植者不考虑种球收获的品质，只为考虑打造林下景观，百合在春、夏、秋 3 个季节皆可在北京林下种植，可以使百合花的观赏期从 6 月初一直持续到 10 月底，维持长达半年的开花周期。但如果从林下百合生产的角度考虑，建议 5 月下旬(2024−05−22)后就不要再种植，避免影响百合种球的品质和产量。综上，种植者应根据需求不同、目的不同，选择不同的种植批次。

2.4 不同时期播种对百合花瓣活性物质积累的影响

不同批次种植的林下百合，其花瓣中活性物质的积累水平因开花时期所在的季节、气候以及环境条件的不同而存在差异(图 6)。本研究对不同播期对应各开花时期的百合花瓣中总多糖、总生物碱、类胡萝卜素、总花青素、总黄酮及皂苷等含量进行检测，结果(图 6)发现：类胡萝卜素与皂苷的含量在不同开花时期基本一致，而总生物碱、总多糖的含量则随播期推移总体上呈现逐渐增加的趋势。其中，盛夏(2024−06−20)种植的百合花期在 8 月上中旬，其花瓣中总生物碱和总多糖的含量在 6 个种植批次中均为最高；深秋(2023−11−01)盛夏(2024−06−20)种植的百合花期分别为 5 月底—6 月初和 8 月上中旬，其花瓣中总黄酮的积累量在这两个时期达到峰值。本研究种植的‘穿梭’百合是橙色花系列，类胡萝卜素是其花瓣中的主要色素，但检测结果(图 6)显示，花青素在橙色花中也有合成和积累。其中，初夏(2024−05−22)种植的百合花期在 7 月下旬，该时期百合花瓣中花青素的积累量最高。综上所述，百合花瓣中不同活性物质的合成和积累受环境因素影响较大。因此，在百合花的高值化开发与利用过程中，可依据各活性物质合成积累的条件差异，针对不同花期进行有目的的选择。

2.5 百合花干粉对鸡肉营养品质的影响

本研究选用 3 月龄北京油鸡，连续喂食 3 个月的含 4% 百合花干粉的饲料。结果显示，喂食百合花干粉的油鸡屠体皮肤表面(图 7B)以及鸡肉脂肪组织中均出现明显的类胡萝卜素积累现象(图 7D)。进一步检测验证表明，百合花中的类胡萝卜素、皂苷、总黄酮以及总生物碱都可以在鸡肉中实现有效积累(表 1)。其中，鸡胸部位的积累效果尤为显著，其中皂苷、类胡萝卜素的含量比对照分别显著提高了 43.4% 和 24.4%，总黄酮和总生物碱的含量分别显著增加了 1.0 倍和 3.7 倍之多；鸡腿部位除皂苷以外，类胡萝卜素、总黄酮和总生物碱的积累量较对照也达到了显著水平。上述结果表明，将百合干粉作为饲料添加剂饲喂油鸡，可使花中活性成分在鸡肉中有效积累，从而实现百合花与油鸡的双重高值化利用。这一方式也促进了农林复合系统中“林花”与“林

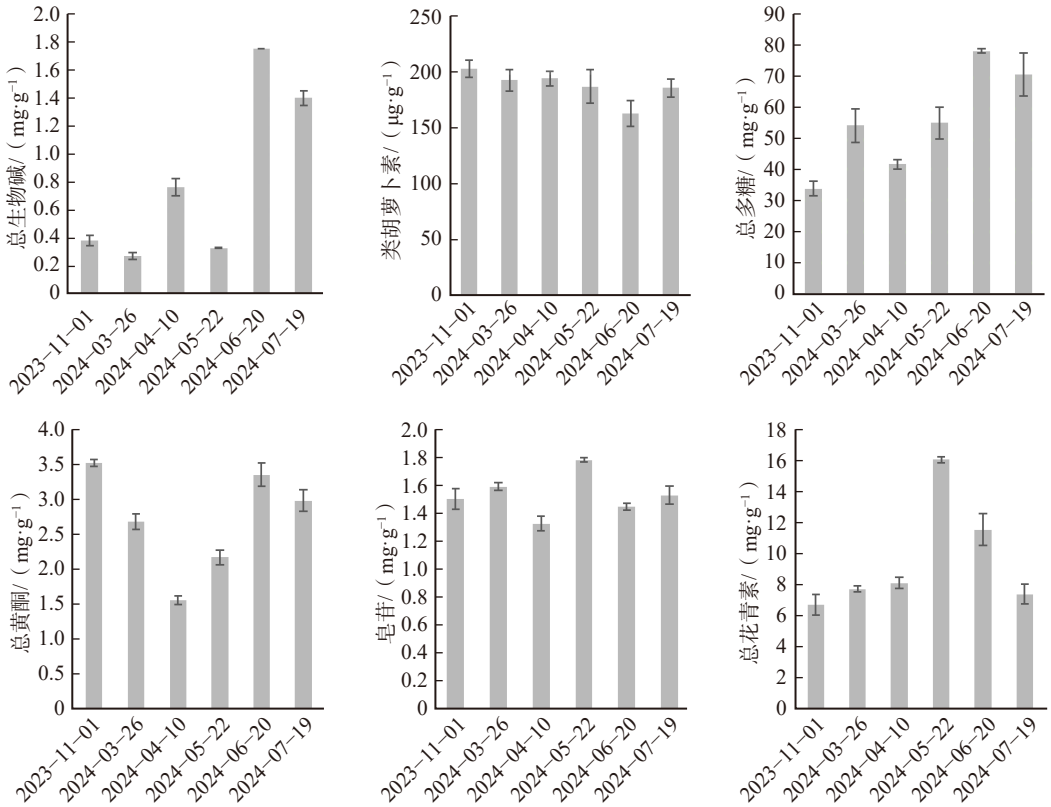
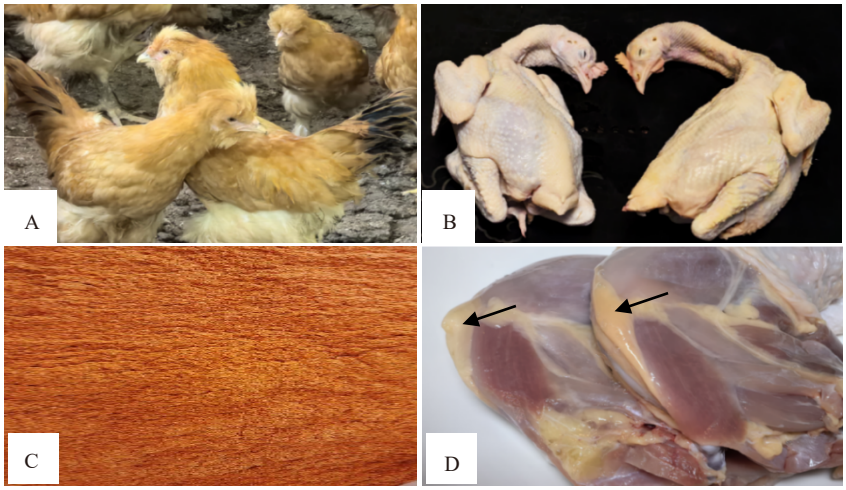


图 6 不同时期播种的百合花瓣活性物质含量分析

Fig. 6 Analysis of the content of active substances in lily petals planted in different periods



A. 3月龄北京油鸡；B. 左为饲料喂食鸡屠体，右为 4% 百合花干粉喂食鸡屠体；C. 百合花干粉；D. 左为饲料喂食鸡肉，右为 4% 百合花干粉喂食鸡肉

图 7　百合花干粉对鸡肉营养品质的影响

Fig. 7　Effect of dried lily petal meal on nutrient quality of chicken

表 1　4% 百合花干粉对鸡肉营养品质的影响

Tab. 1　Effect of 4% dried lily petal meal on nutrient quality of chicken

检测部位	处理	类胡萝卜素/(μg·g^{-1})	皂苷/(mg·g^{-1})	总黄酮/(mg·g^{-1})	总生物碱/(mg·g^{-1})
鸡胸肉	对照	2.54 ± 0.10	0.16 ± 0.09	27.34 ± 2.05	0.15 ± 0.01
	4%百合花干粉	3.16 ± 0.04^{a}	0.23 ± 0.02^{a}	54.04 ± 1.92^{a}	0.71 ± 0.03^{a}
鸡腿肉	对照	3.07 ± 0.10	0.34 ± 0.02	11.46 ± 1.04	0.16 ± 0.02
	4%百合花干粉	3.42 ± 0.10^{a}	0.34 ± 0.01	21.91 ± 0.06^{a}	0.26 ± 0.02^{a}

注：a表示处理与对照之间差异显著（$P < 0.001$）。

禽”两种模式的有机融合。

3　讨　　论

林下经济作为农林复合生态系统的重要组成部分，是盘活林地资源、实现生态效益与经济效益协同发展的核心路径，而百合作为兼具观赏、药用与食用价值的经济作物，其林下规模化种植一直受光照条件、林地养分状况、产品产业链延伸不足等问题制约，现有相关研究[9]多聚焦单一组织再生体系、单一栽培条件或单一利用方向，缺乏系统性的模式整合与技术突破。本研究围绕林下百合种植的郁闭度、土壤养分改良以及百合的花期、活性成分及高值化利用展开探究，实现了多项技术与应用层面的创新，为农林复合系统的高效发展提供了全新参考。

百合是林下种植优选的高附加值经济花卉种类，在观赏、药用以及可食用性方面具有独特的优势。因此，从观赏角度而言，百合在林下种植的观赏性、花期的可持续性以及对场景的打造效果都是种植者需要综合考虑的重要因素。为此，本团队针对这 3 方面问题进行了较为系统的分析。本研究选用亚洲系列百合品种‘穿梭’，种植结果显示该品种具有一定的耐荫能力，当林木的郁闭度达到 70% 以上，百合的株高和花蕾的数量会受到明显影响，进而在一定程度上影响林下景观效果。林下种植因光照在一定程度上减弱，给种植者带来一定的生产难度。因此，寻求有效解决措施也是发展林下种植的必要手段。在本研究中，高郁闭度导致林下百合植株过高，茎秆硬度减弱，部分植株出现倒伏现象。尽管这对种球生长影响不大，但会直接影响林下景观效果。矮壮素是一种可矮化植株、有效解决倒伏问题的常规产品。研究[10−12]表明，百合喷施矮壮素不仅可以矮化植株，还可以明显促进地下种球的膨大，提高种球产量。另外，百合资源种类丰富，其中不乏非常适合高郁闭度林下生长的种类，如阔叶大百合（*Cardiocrinum giganteum*）、轮叶百合（*Lilium distichum*）等品种，需要在几乎完全遮蔽的林下才能良好生长。因此，林下种植应根据不同林地的具体情况，有针对性地选择适合的百合种类，才能更好地发展林下百合种植。

其次，百合作为药用植物，其生长环境的道地性对药材价值的影响显著。本研究通过林下分期分批种植百合，分析了不同林地类型、气温条件及林分郁闭度对百合生长和开花的影响，同时检测了不同播

种批次花瓣的药用活性成分含量的差异，明确了一年中不同的林下种植时间对百合花瓣活性成分的合成和积累具有显著影响。然而，药用植物在林下种植时，光合作用、呼吸作用等生理活动均会在不同程度上影响其产量与品质，这与林内环境因子（如林下光照变化、空气湿度、土壤等特点）及林内作物间的相互作用密切相关[13]。但本研究目前尚未深入涉及这些影响因素，后续可将此纳入研究范畴，针对不同林区、不同环境气候条件筛选适宜的百合品种，以实现百合产量、品质和价值的最大化。

林地土壤养分匮乏是限制林下经济作物生长的普遍问题，以往研究多聚焦单一有机肥（如羊粪、牛粪等）对作物的促生效果。本研究所在园区每年产生大量废弃物，包括枯枝落叶、鸡粪、菌渣等，不仅存在处理难题，还构成林区防火的重要安全隐患。已有研究[14−15]表明，利用微生物腐熟发酵技术将废弃物转化为肥料的技术已趋于成熟，该技术可实现农林复合体各种废弃物的资源化利用，既解决了废弃物处理问题，又提升了林下作物的产量，一举两得，有效实现了资源的绿色循环[16−18]。本研究依托该技术，利用园区养鸡产生的鸡粪、菌类种植产生的菌渣以及各种园林废弃物，经发酵腐熟后获得叶面肥、鸡粪肥和菌渣肥，并将其以不同组合方式应用于百合种植。结果表明，多种有机肥的组合应用显著提升了林下百合的产量。本研究构建了“林地废弃物−腐熟有机肥−百合种植”的内部养分循环体系，在降低化肥与外购基质使用成本的同时，契合了生态循环农业的发展要求，为农林复合系统的养分高效利用提供了可复制的技术方案。

在百合花高值化利用领域，现有百合产业链多集中于鳞茎加工，花瓣资源多被废弃，利用率极低，鲜有将其应用于畜禽养殖的相关研究。本研究创新性地将 4% 百合花干粉添加至鸡饲料，饲喂 3 月龄雏鸡 3 个月后，鸡胸肉中皂苷、类胡萝卜素、黄酮、生物碱含量均显著提升，有效提高了鸡肉的营养价值。该研究突破了传统百合产业的边界，将林下百合种植与畜禽养殖跨界融合，构建了“林下百合生产−鲜花加工−功能化养殖−高品质禽肉产出”的全产业链闭环模式，实现了林地、百合、畜禽养殖的三重增值，对比传统“林−禽”复合模式，本模式的附加值与生态效益实现双重提升，为农林复合系统的综合开发与高值化利用开辟了全新方向。

综上，本研究整合了林下百合的生态栽培、养分循环、活性成分调控与跨界高值化利用，实现了农林复合系统模式的有机融合，既解决了林下百合种植的关键技术难题，又延伸了产业链条，具备较强的理论价值与实践推广意义。但本研究仍存在一定局限，后续可进一步拓展试验林分树种范围，深入探究环境因子对百合活性成分合成的分子调控机制，同时开展规模化示范试验，优化模式的经济效益与落地可行性，为林下经济的高质量发展提供更全面的技术支撑。

4 结　　论

本研究针对农林复合体区域层面缺乏交叉融合的技术问题，探讨了林下百合种植在农林系统中对林下景观提升、百合种球生产、百合花高值化开发利用及其在农林复合循环系统中的应用模式，首次在林−菌、林−花、林−草−禽 3 个技术熟化度及经济价值较高的模式基础上，将农林废弃物的肥料化、基料化和饲料化关键技术，与林下种植、林下养殖模式相融合，实现了从林−花与林−禽、林菌、农林废弃物肥料化模式结合再应用到林−禽的组合循环模式，研究得到以下结论。

（1）林分的郁闭度超过 70%，仅对百合的株高和花蕾数量有一定的影响，而 40% ~ 50% 郁闭度的林下光合效能就可以满足百合植株生长的需求，对林下百合种球的生产没有影响。

（2）农林复合系统自产腐熟发酵肥可有效改善林地养分缺乏问题、提升百合种球品质，其中，“叶面肥 + 鸡粪肥”的组合处理具备替代市售基质营养土的潜力，可在实现农林复合体废弃资源循环利用的同时，节约有机肥采购成本。

（3）百合的花期可以从 6 月初持续到 10 月底，种植者可根据不同需求，分期分批种植，利用当地的环境气候条件有的放矢地调整种植时间，以达到调控百合花期的目的。不同批次种植的林下百合，其花瓣中活性物质的积累水平因开花时期所在的季节、气候以及环境条件的不同而存在差异，在百合花的高值化开发与利用过程中，可依据各活性物质合成积累的条件差异，针对不同花期进行有目的的选择。

（4）将百合干粉作为饲料添加剂饲喂油鸡，可使花中活性成分在鸡肉中有效积累，从而实现百合花与油鸡的双重高值化利用。

本研究结果将为农林复合系统的高效循环发展、综合开发利用提供科学依据与思路借鉴，未来可进一步优化林花模式的种植参数、拓展百合及其副产物的高值化利用途径，推动农林复合体模式的多元化融合与推广。

参 考 文 献

[1] 杜方. 百合属的起源、分类及资源多样性 [J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(4): 68−79.

Du F. Origin, classification and resource diversity of *Lilium* [J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(4): 68−79.

［2］李茂娟, 廖祯妮, 邓少华, 等. 百合新品种引种筛选及组培快繁技术研究 [J]. 中国农学通报, 2019, 35(22): 65−70.
Li M J, Liao Z N, Deng S H, et al. Introduction and tissue culture propagation technology of new lily cultivars [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(22): 65−70.

［3］潘正伟, 鲁恩林, 吴贵斌. “大百合”带来“合家欢”—龙胜农村种植大百合加工淀粉见闻 [J]. 广西林业, 2019(1): 32−33.
Pan Z W, Lu E L, Wu G B. ‘Giant lily’ brings ‘family joy’: observations on the cultivation and starch processing of giant lily in Longsheng rural area [J]. Forestry of GuangXi, 2019(1): 32−33.

［4］李坤, 郭彦, 张泽志, 等. 兰州百合猕猴桃林下栽培技术 [J]. 湖北农业科学, 2018, 57(10): 77−78.
Li K, Guo Y, Zhang Z Z, et al. Planting techniques of *Actinidia chinensis* interplanting with *Lilium davidii* var. *unicolor* [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2018, 57(10): 77−78.

［5］蔡宣梅, 张洁, 方少忠, 等. 福建地区林下卷丹百合栽培技术 [J]. 长江蔬菜, 2016(13): 38−39.
Cai X M, Zhang J, Fang S Z, et al. Cultivation techniques of under-forestry for *Lilium lancifolium* Thunb. in Fujian region [J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2016(13): 38−39.

［6］潘康乐, 郭梁, 陈欣, 等. 农林复合生态系统服务功能研究进展 [J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(12): 1535−1544.
Pan K L, Guo L, Chen X, et al. Advance in the research on agroforestry ecosystem services [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(12): 1535−1544.

［7］李金英. 农业循环经济与农业可持续发展 [J]. 河北农机, 2024, 356(18): 145−147.
Li J Y. Agricultural ircular conomy and ustainable gricultural development [J]. Hebei Agricultural Machinery, 2024, 356(18): 145−147.

［8］郑明利, 毛培春, 杨凤萍, 等. 百合干花粉对北京油鸡生产性能、蛋品质和营养成分的影响 [J]. 中国家禽, 2025, 47(2): 34−39.
Zheng M L, Mao P C, Yang F P, et al. Effects of dried lily petal meal on production performance egg quality and nutrients of Beijing-You chicken [J]. China Poultry, 2025, 47(2): 34−39.

［9］姜婧瑶, 吕博妍, 骆远方, 等. ‘回归’百合组织培养再生体系的建立 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(6): 123−129.
Jiang J Y, Lü B Y, Luo Y F, et al. Establishment of tissue culture and regeneration system for *Lilium* ‘Regression’ [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(6): 123−129.

［10］Zheng R R, Wu Y, Xia Y P. Chlorocholine chloride and paclobutrazol treatments promote carbohydrate accumulation in bulbs of *Lilium* Oriental hybrids ‘Sorbonne’ [J]. Journal of Zhejiang University Science B, 2012, 13(2): 136−144.

［11］Wu Y, Sun M, Zhang J, et al. Differential effects of paclobutrazol on the bulblet growth of oriental lily cultured in vitro: growth behavior, carbohydrate metabolism, and antioxidant capacity [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2019, 38(2): 359−372.

［12］Torres-Pio K, de la Cruz-Guzmán G H, Arévalo-Galarza M, et al. Morphological and anatomical changes in *Lilium* cv. Arcachon in response to plant growth regulators [J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2021, 62: 325−335 .

［13］文定梅, 张洪彪, 秦凤园, 等. 林下环境因子对药用植物林下种植的影响 [J]. 中国中药杂志, 2025, 5(50): 1164−1171.
Wen D M, Zhang H B, Qin F Y, et al. Effects of understory environmental factors on understory planting ofmedicinal plants [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2025, 5(50): 1164−1171.

［14］Manea E E, Bumbac C, Dinu L R, et al. Composting as a sustainable solution for organic solid waste management: current practices and potential improvements [J]. Sustainability, 2024, 16(15): 6329.

［15］Xu M, Zhan Y, Xu J, et al. Succession of micro-food webs and their role in lignocellulose degradation during pepper stalk composting [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 44922.

［16］Wu D, Wei Z, Mohamed T A, et al. Lignocellulose biomass bioconversion during composting: mechanism of action of lignocellulase, pretreatment methods and future perspectives [J]. Chemosphere, 2022, 286: 131635.

［17］de Souza C C B, García A C, Lima E S A, et al. Humic substances formation during poultry litter composting and its influence on the structural characteristics of the compost [J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2023, 25(4): 2232−2244.

［18］de Mendonça Costa M S S, Bernardi F H, de Mendonça Costa L A, et al. Composting as a cleaner strategy to broiler agro-industrial wastes: selecting carbon source to optimize the process and improve the quality of the final compost [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 2084−2092.

（责任编辑　赵田芸
责任编委　戴思兰）