食用昆虫豆丹资源开发及其应用进展*

李戴敬[1**] 王俊杰[2**] 崔知凡[3] 钱 蕾[4***] 陈法军[1***]

（1. 南京农业大学植物保护学院，南京 211800；2. 南京农业大学农学院，南京 211800；
3. 四川农业大学生命科学学院，雅安 625014；4. 江苏省农业科学院休闲农业研究所，南京 210014）

摘 要 豆丹（即豆天蛾 *Clanis bilineata tsingtauica* 的幼虫）作为中国传统食用昆虫，因其高蛋白、低脂肪，养殖过程环境友好，绿色无公害等诸多优点，深受大众喜爱，具有显著的生态和经济价值及可持续开发潜力，已成为应对全球粮食短缺与推动生态农业转型的重要研究对象。近年来，豆丹作为食品和饲料的应用价值日益凸显。在农业领域，豆丹不仅是优质的蛋白补充来源，更凭借其高效的生物转化能力，在生态农业系统中扮演关键角色，促进农业废弃物的循环利用。本文系统综述了豆丹的生物学特性、人工养殖历程、资源化利用现状及面临的挑战，揭示了其从“农业害虫”到“多功能资源昆虫”的转变，旨在探索豆丹产业化发展与市场价值提升的中国可持续农业方案，助力国家“双碳”（碳达峰、碳中和）目标与乡村振兴。

关键词 豆丹；营养；人工养殖；资源化利用；生态经济；食用昆虫

Progress in resource development and application of edible insect *Clanis bilineata tsingtauica* larvae

LI Dai-Jing[1**] WANG Jun-Jie[2**] Cui Zhi-Fan[3] QIAN Lei[4***] CHEN Fa-Jun[1***]

(1. College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 211800, China; 2. College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 211800, China; 3. College of Life Science, Sichuan Agricultural University, Ya’an 625014, China; 4. Institute of Leisure Agriculture, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract DanBean (i.e., larvae of *Clanis bilineata tsingtauica*), a traditional edible insect in China, has emerged as a significant research focus for addressing global food insecurity and facilitating ecological agricultural tranition. This prominence stems from its high protein, substantial ecological and economic value, and considerable sustainable development potential. Recent studies have increasingly revealed its utility in food and feed applications. Within agricultural systems, DanBean serves not only as a high-quality protein supplement but also functions as a vital biological resource due to its efficient bioconversion capacity, enabling the recycling of agricultural waste in ecological frameworks. This paper systematically reviewed the biological characteristics, artificial breeding, resource utilization, current agricultural applications, and persistent challenges associated with DanBean. Furthermore, it delineates the paradigm shift in public perception from “agricultural pest” to “multifunctional resource insect”. Ultimately, this work aims to propose a China-specific sustainable agricultural strategy for enhancing DanBean industrialization and market value, thereby supporting national “Dual Carbon” goals (i.e., Carbon Peak and Carbon Neutrality) and rural revitalization initiatives.

Key words DanBean; nutrients; artificial rearing; resource utilization; ecological economy; edible insects

在当前全球粮食短缺日益加剧的背景下，全方位开发可持续食物资源已成为迫切需求。食用昆虫因其高营养价值和低环境负荷，被联合国粮农组织（Food and Agriculture Organization of the

*资助项目 Supported projects：大学生创新训练（SRT）项目（X2025103070190）；国家自然科学基金青年基金项目（32100398）资助

**共同第一作者 Co-first authors，E-mail：12123415@njau.edu.cn；11121203@njau.edu.cn

***共同通讯作者 Co-corresponding authors，E-mail：20200027@jaas.ac.cn；fajunchen@njau,edu.cn

收稿日期 Received：2025-07-27；接受日期 Accepted：2025-08-24

United Nations, FAO）认定为替代传统畜牧业的蛋白来源，其养殖过程的温室气体排放量仅为传统畜牧业的 1%左右，兼具生态与经济协同效益（Van Huis *et al.*, 2013; Xie *et al*., 2024）。目前全球已规模化利用的资源昆虫涵盖食用、药用、工业原料等多功能类别（金传玲，2004; Baiano, 2020; Chen *et al.*, 2022; Qian *et al.*, 2022），其中食用昆虫的蛋白质含量普遍高达 40%-80%（冯颖和陈晓鸣，1999），而豆丹（豆天蛾 *Clanis bilineata tsingtauica* 幼虫）作为中国传统食用昆虫的典型代表，其产业化开发实践为蛋白质资源领域提供了极具地域特色的“中国方案”。

在中国，食用豆丹的习俗由来已久。蒲松龄在《农桑经》中写道：“豆虫大，捉之可净又可熬油，以虫掐头，掐尽绿水，入釜少投水，烧之操之，久则清油浮出。每虫一升，可得油四两，皮焦亦可食”。在江苏省灌云县，每年 7-8 月份，当地人每天食用的豆丹多达十几吨。以致于与豆丹一起炒的配料小白菜“身价”也跟着飞涨。豆丹风味异常鲜美，令人食之难忘。在广东、江苏、安徽、山东及河南等地，“豆丹”这一昆虫食品的需求量也在不断上升，尤其在江苏省灌云县，“豆丹”作为当地的传统美食，人们对豆丹的开发利用更为全面，豆丹食品不仅种类丰富，而且烹饪方法也独具一格。近年来，江苏及山东等地宴请宾客时已将加工制成的豆丹搬上餐桌（刘立春, 1995）。而在全国最大的豆丹交易集散地，各地养殖户纷至沓来，辐射至河南、山东、安徽等地。据灌云县豆丹产业促进会介绍，灌云当地开设的豆丹养殖培训班每年约七成学员来自省外，学习技术，采购虫卵，返乡推广，进一步推动灌云豆丹走向全国（张晶晶等, 2025）。

随着生活水平提高，人们对绿色高品质的昆虫源食品的需求也在不断增加。目前，江苏省灌云县已经成为全国最大的“豆丹”食品市场，推进了豆丹资源利用的产业化发展，也带动了当地经济的快速发展。江苏省灌云县农村地区普遍以传统稻麦种植作为主要农业生产方式。在 2020 年以前，各村平均集体经营性收入仅为 30.6 万元，集体经营性收入超过百万元的村庄数量极少。然而，在短短 4 年时间内，灌云县各村集体收入呈现出“井喷式”增长态势。截至 2024 年，各村平均集体经营性收入已超过 90 万元，净收入超过 30 万元的村庄达 105 个，净收入超过 100 万元的村庄达到 18 个。在这一增长过程中，豆丹发挥了重要作用（朱一清等, 2025）。经多年发展，灌云豆丹现已形成“育种-养殖-销售-加工-餐饮-文旅”全产业链，年产值突破 10 亿元（张晶晶等, 2025）。可见，食用昆虫“豆丹”的市场潜力巨大。但是，“豆丹”常常出现供不应求的现状已成为不争的事实。因此，对于豆丹工厂化生产繁育技术的研究具有很高的经济价值和现实意义（吕飞等, 2006）。本文系统综述豆丹的生物学特性、人工养殖技术创新、资源化利用路径及农业生态贡献，揭示其从“田间害虫”向“多功能资源昆虫”的转型及其实践范式，旨在为全球食用昆虫产业化提供技术整合与政策适配双重参考，助力“双碳”（即碳达峰和碳中和）目标下的可持续蛋白供应链构建。

1　豆丹生物学特性基础研究

1.1　分类地位与形态特征

豆丹是鳞翅目天蛾科豆天蛾的幼虫。作为完全变态昆虫，其发育过程包含卵、幼虫、蛹、成虫四个阶段；其中，卵呈绿色小圆柱；幼虫呈绿色或黄色，特征为尾部具尾角，5 龄期体长可达 9 cm；幼虫老熟之后会钻入地下蛰伏化蛹，蛹则呈红褐色，且入土深度一般为 9-12 cm；待来年羽化成成虫，成虫体长约 5 cm，嫩绿色，头部色较深，尾部有尾角，从腹部第一节起，两侧有 7 对白色线；此外，成虫具雌雄异性现象，具体表现为雌性成虫具丝状触角，而雄性具羽毛状触角（朱弘复和王林瑶, 1997; 朱晨旭等, 2022）。豆丹危害大豆叶片，啮成孔洞，严重时植株尽成光秆而导致不能结荚，虽取食为害大豆，但是它的肉浆却无毒无害，农民捕捉食用豆丹既可除害又可充膳。此外，豆丹虽是大豆害虫，但可通过取食老叶，从而可将大豆产量损失降低至一个可被接受的较低水平；同时，随着豆丹取食增加，

虫体内的多种营养物质得到大量积累，营养获取完全依靠其高效的消化吸收系统（李晓峰等, 2023）。

1.2 地理分布与生态适应性

豆丹在我国可分为两大种群，即大陆种群，以江苏、河南、安徽等地种群为代表，以及海南岛种群。其中，在大陆种群中，每年繁殖代数较少，如江苏、安徽等地种群普遍一年繁殖一代，而在湖北、江西等地种群每年繁殖则为两代；同时，在大陆种群中普遍存在滞育现象，一般需要低温诱导解除滞育，完成其生活史。海南种群繁殖代数则相较较多，一年普遍繁殖 5 代，且极少存在滞育现象（冯雨艳等, 2014; 郭明明等, 2021a; 李晓峰等, 2022）。研究表明，海南普遍的细砂质地土壤有助于解除滞育现象，能极大提高豆丹化蛹率，但在实际生产过程中应用成本较高，暂时缺乏低成本平替方案；主要在黏土等土壤中化蛹的大陆种群，其化蛹率较低（郭明明等, 2022）。

滞育现象对豆丹温度适应性有利，也是地理隔离导致其种群分化的内在原因（樊继伟等, 2019）。在豆丹养殖方面主要受到自然生态因素的影响，如天敌寄生、病菌危害，以及寄主植物受病虫危害等都会影响豆天蛾的地理分布和种群发生动态。目前，江苏地区人工饲养的豆丹种群呈退化趋势，近亲繁殖导致豆丹幼虫个体小且产卵量低，而通过采用不同种群杂交可显著提高后代产卵量及幼虫成活率（李晓峰等, 2022）。当前，对豆丹地理分布及其生态适应性的研究仅停留在种群的地理分布，以及土壤、光照、温度等对地理种群的影响分析方面（樊继伟等, 2019; 李晓峰等, 2021）。且豆丹不同种群间有明显性状差异（樊继伟等, 2019），人工养殖时易出现种群退化问题（李晓峰等, 2022），后续可进行更为细致的种间基因同质性研究，为豆丹品种改良提供助力。

1.3 发育周期与滞育机制

豆丹发育中存在一段较为明显的滞育期，老熟幼虫滞育期普遍为 8-9 个月（樊继伟等, 2019）。滞育期内，豆丹体内部分酶活性有明显的变化趋势，表现为前期活性不断提升至峰值，到后期则不断降低至较低水平（钱蕾等, 2024）。如参与糖原代谢的海藻糖酶在滞育 90 d 时活性最高，与能量代谢相关的碱性磷酸酶/己糖激酶在滞育 120 d 活性达峰值（钱蕾等, 2024）。此外，豆丹体内的营养物质含量亦有明显变化趋势，表现为前期营养物质不断消耗，后期营养物质不断积累，且蛋白质、氨基酸等含量逐渐达到峰值（郭明明等, 2023）。

豆丹滞育机制方面，有研究表明温度、光周期、基质等非生物因素对其滞育历期有显著影响（郭明明等, 2021a, 2023, 2024）。相同条件下，长光照能有效缩短滞育期和蛹期，但化蛹率和产卵量会大幅降低（郭明明等, 2023）。在适宜的温度条件下，豆丹可提前化蛹（刘艳和张露阳, 2010），且温度对豆丹滞育历期的影响呈现两重性，即在低温时豆丹滞育期将被延长，而在高温条件下滞育可被提前解除，且一般情况下，25 ℃时豆丹化蛹率最高，35 ℃时豆丹滞育期最短；同时，作为豆丹自身适应温度的策略，豆丹体内相关激素（如保幼激素）可调控其滞育历程（冯雨艳等, 2014; 郭明明等, 2021a）。以前豆丹发育周期与滞育机制的研究主要集中在其形态表型和单因子影响层面，现今在对非生物因素影响的研究基础上，已开展多因子互作及更深入的基因调控研究（Li *et al.*, 2025）。未来有望通过打破豆丹滞育而提高人工养殖的效率。

2 豆丹的营养与应用研究

“豆”即大豆，“丹”寓意仙丹，意指营养丰富，用途广泛（宋开霞, 2006）。豆丹依靠大豆叶子为食，因此它是天然无公害、无污染的绿色健康有机食品，在营养方面和医药方面都有独特的价值（王婷婷, 2016）。可见，豆丹是一种营养价值极高的食用昆虫资源，其丰富的营养成分组成使其成为极有开发前景的新型食物来源。

2.1 豆丹的营养成分特征

2.1.1 蛋白质和氨基酸 与肉类、鱼类和植物类

蛋白质相比，豆丹的蛋白质更适合人体营养需要，蛋白组成也更合理，是人类理想的优质蛋白质资源，其在虫体干物质中含量占 63.2%（宋开霞, 2006），粗蛋白含量更是高达 65.5%（折干重）（吴胜军等, 2000; 田华和张义明, 2012c）。同时，豆丹体内还含有 18 种氨基酸，种类丰富且均衡，其中必须氨基酸占 53.34%（田华和张义明, 2012a）。豆丹每 100 g 干物质中，含蛋氨酸 2.391 g，丙氨酸 2.729 g，酪氨酸 2.346 g，且其体内必需氨基酸占总氨基酸的比例（52.84%）又高于鸡蛋（50.94%）、牛奶（47.46 %）和大豆（43.58 %）（吴胜军等, 2000）；此外，豆丹体内的异亮氨酸、赖氨酸等人体必需氨基酸占总氨基酸量的 47.23%，对人体发育比例适中（宋开霞, 2006）。对成人而言，豆丹虫体内必需氨基酸含量远超 WHO 推荐标准的 0.86-2.79 倍。此外，豆丹体内必须氨基酸中的亚麻酸含量高达 36.53%，半必需氨基酸占总氨基酸的 9.70%（吴胜军等, 2000; 田华和张义明, 2012c）。此外，豆丹含硫氨基酸（如蛋氨酸、胱氨酸）含量比传统蛋白源高 2-3 倍，且显著高于植物蛋白源，可作为植物性膳食氨基酸的强化剂，远超大部分蛋白源的优质蛋白。

2.1.2　脂肪与脂肪酸　豆丹虫体的粗脂肪含量高达 23.68%，Go-Gs 脂肪酸占总脂肪酸的 99%以上，不饱和脂肪酸更是高达 61.74%-64.17%；其中，亚麻酸（C18:3）含量高达 34.11%-36.53%，远超传统食用油，还具有降血脂、抗血栓等潜在功效（吴胜军等, 2000; 詹永成等, 2009; 田华和张义明, 2012b, 2012c）。豆天蛾幼虫体内的主要脂肪酸组分有 6 种，即棕榈酸、棕榈油酸、硬脂酸、油酸、亚油酸及亚麻酸；其中，以棕榈酸和硬脂酸为主，其脂肪酸组成模式与鱼油相似，但无重金属风险，具备一定的开发功能性油脂的潜力（詹永成等, 2009）。且亚油酸和亚麻酸是人体必需脂肪酸，从营养学上来说，豆天蛾体内的脂肪酸成分均为不饱和脂肪酸类，对食用者的身体健康无明显负担。

2.2　功能活性成分及其药用价值

豆丹除了高营养价值和风味鲜美之外，还有极好的保健功能和很强的功能性开发价值。研究表明，豆丹有降压、降脂作用，对心脑血管疾病有一定疗效（闫茂华, 2001）。豆丹虫体内富含脂肪酸，其中，以 α-亚麻酸含量最为突出（王贺军, 1988）。而 α-亚麻酸具有抗血栓、降血脂、抗癌等功效（姜锡瑞等, 2016），并对婴幼儿、青少年的智力发育有重要影响（李孟楼, 2005）。同时，刘雪薇等（2014）研究指出，豆丹醇提物还具有抗疲劳作用。此外，研究还发现，食用豆丹有利于改善人体智力水平，并在一定程度上降低细胞的衰老速度，调节体内的内分泌平衡（赵国秀等, 2020）。这与豆丹虫体内特有的营养成分密切相关。其中，豆天蛾多糖 CBP3 具有显著体外抗氧化能力，对超氧阴离子自由基和羟基自由基的清除率 IC_{50} 分别为 591 和 536 μg/mL，还原能力与浓度呈正相关（田华和张义明, 2012b）。豆丹水提液可延长衰老小鼠负重游泳和爬绳时间，减少血乳酸和尿素氮堆积，增加肝糖原储备，并显示出显著抗疲劳效果（徐乐等, 2014）。可见，豆丹是一种极具潜力的抗氧化、防衰老的保健食品。

另一方面，华春和温鲁（2005）以豆丹为寄主接种蛹虫草菌种，培育出了豆虫草（即豆丹草）。而蛹虫草是冬虫夏草的近缘种，比较豆虫草与蚕蛹虫草、冬虫夏草的主要活性成分差异，结果表明，豆虫草的虫草素是冬虫夏草的 35 倍，腺苷含量与冬虫夏草相近，超氧化物歧化酶（Superoxidase dismutase, SOD）酶活性是冬虫夏草的 1.5 倍，多糖含量是蚕蛹虫草的 2 倍（华春和温鲁, 2005）。综上所述，豆虫草是一种有较高价值的新的虫草资源（樊继伟等, 2019）。另一方面，豆天蛾成虫作为保健食品在民间早有应用，但到目前为止，人们对豆天蛾的利用仍集中于食用方面，对其药用价值研究还有待深入挖掘（吴胜军等, 2000）。

2.3　微量营养素贡献

豆丹所含的人体所需要的微量元素含量也很丰富，如铁、硒、钾、钙、磷、镁、铁等含量非常高，维生素 E 含量也较高（宋开霞, 2006）。豆天蛾幼虫内的钙、铁、锌含量分别为 2 770、728.9 和 124.8 mg/kg（田华和张义明, 2012c），

可满足成人日均需求量的 30%-50%，对人体骨骼健康及血红蛋白合成等具有显著作用。同时研究表明，豆丹幼虫的植酸（Phytic acid, PA）/Zn 和 PA/Fe 比值均低于大豆，这表明昆虫中的锌和铁相较于大豆中的锌和铁对于人体的生物利用率更高，而作为锌和铁生物利用率最高的豆丹幼虫肉，相较于直接食用大豆，在一定程度上更能补充相关元素，具有成为相关微量元素补剂的潜力（Baqui *et al.*, 2002; 苏颖, 2023; Lu *et al.*, 2024）。豆丹在我国已有上百年的食用历史，也有作为食品添加剂的先例，相较于其他食用昆虫更有开发为补剂的基础（Lu *et al.*, 2024），在某些发展中国家，儿童普遍缺锌的现状下，该类低成本高效的锌补剂的开发具有深远意义（Baqui *et al.*, 2002）。

2.4 食品加工应用

豆丹养殖条件较为苛刻，主要取食新鲜豆叶，且对农药较为敏感，抗药性差，在挂卵养殖前一段时间起便不可向大豆喷施农药，是一种绿色无公害的天然食品（宋开霞, 2006），同时具有丰富的营养价值，因此具有潜在的食品加工价值。 苏北地区作为豆丹的重要产地，当地主流的食用方法是将豆丹的头部去掉，用擀面杖压出内容物，将其作为食材经常规加工即可食用，被人们誉为“豆参”、“地珍”，成为当地特色饮食名片（闫茂华, 2001）。

豆丹的食品加工应用主要是以食品添加剂的形式开展。研究显示，在传统鱼豆腐中添加10%豆丹为原料，其成品的蛋白质更均匀，结构更紧实，且口感偏软（曹佳佳等, 2019）。此类产品可满足补钙、补蛋白的老人等特殊人群的食用需求。但截止目前，相关制品的颜色会有一定程度地变黄，仍需通过进一步加工平衡营养与质构获得更好的产品外观。相比之下，传统的脂肪添加能提升鱼豆腐多汁性，但会在一定程度上降低蛋白质含量。综上，豆丹作为食品添加剂的优势在于营养强化而不是质构改良等方面（曹佳佳等, 2019）。在添加形式上，吴胜军等（2002）研究用蛋白酶将豆丹蛋白分解成小分子，加柠檬汁调香，制成富含氨基酸的有机饮料，经试验其具有一定的抗疲劳效果，且相较于普通蛋白饮更易消化，更适合运动后快速恢复，但“虫味”仍需相关调味技术掩盖。

3 豆丹生态经济发展状况

3.1 豆丹传统生态定位：从“农业害虫”到“资源昆虫”的认知转变

传统农业生产中，豆天蛾的幼虫（即豆丹）曾长期被界定为暴食性害虫，其危害最严重的 5 龄幼虫的取食量占其生命周期总食量的 90%，可导致大豆叶片损失率超 70%，单株产量下降 40%-50%（田华, 2009; 田金华和刘慧超, 2025）。另一方面，豆丹和豆天蛾的蛹、成虫都可作为鸟类、寄生性天敌等的重要食物来源，能在一定程度上维持农田食物网复杂度，并进一步提高农田生态系统稳定性，具有较高的生态价值。研究表明，豆丹种群密度与蜘蛛群落多样性呈正相关，表明豆丹在维持蜘蛛群落多样性上有一定价值，并体现了其作为生态“资源昆虫”的潜在价值（姜永涛, 2010）。

3.2 经济价值驱动

目前，豆丹产业已拥有从养殖到深加工的完整产业链。其中，江苏省灌云县作为豆丹核心产区，2022 年的豆丹交易量高达 10 万吨，年产值高达 50 亿元，带动超 5 万农户就业。在此巨大经济利益驱动下，反季节大棚养殖豆丹模式逐步成熟，春季豆丹批发价高达 300 元/kg，单棚年收益超 16 万元，具有极高的经济价值（康有亮, 2018）。通过基质优化和温控管理的人工制种技术，可使豆丹蛹的成活率从野生种群的 5%-10% 提升至 85%。此外，不被食用的豆丹外壳中的甲壳素可作为原料生产高纯度几丁质，用作生产医药的重要原料（吴胜军等, 2000; 田华和张义明, 2009）。值得注意的是，相较其他蛋白质来源，目前豆丹深加工产品市场份额较低，而消费的区域局限性极大阻碍了豆丹市场的进一步扩大。未来应从豆丹产业标准化、食品安全化、消费者接

受度等多维度打造品牌效应，从而进一步推广豆丹产业发展；同时，由于豆丹养殖的标准化程度较低，容易导致豆丹消费价格波动，表现出豆丹产业对小众市场依赖性过高，应推动制定相关行业准入标准制定，确保豆丹产业的良性发展。

3.3　生态功能革新

在可持续发展的战略背景下，豆丹是兼具生态效益和经济效益的资源昆虫。豆丹养殖过程中化学农药的使用率低，养殖期间害虫防控方式多为防虫网、黑光灯和生物制剂等环境友好型的防控技术与方法。通过对比研究，豆丹养殖区农药使用量较常规农田下降 83%，土壤中有机磷农药残留未检出（孙婷等, 2020; 李晓峰等, 2023）。此外，在环境恶劣的石漠化区推广的“葛藤-豆丹”模式中，豆丹亦可助力石漠化治理；同时，采用葛藤根系固碳量配合虫砂还田的方法，3 年可使土壤有机碳从 0.32 g/kg 提升至 0.87 g/kg（张海程和夏振强, 2017; 苏文英等, 2022）。即使是在大棚轮作模式下，豆丹也具有显著的生态功能，可使土壤脲酶活性提升 28%，线虫群落中植食性线虫比例下降 51%（康有亮, 2018; 谢洁微等, 2023）。作为农田生态系统的组成之一，豆丹因其独特的生态功能逐渐走进大众视野，并不断被食用开发，已成为代表性食用昆虫。

3.4　土壤健康与养分循环强化

豆丹虫砂含全氮、全磷、几丁质等残留物质，其施入土壤后可在一定程度上促进放线菌增殖，抑制病原菌如镰刀菌（谢洁微等, 2023）。在“大豆-豆丹-大球盖菇”模式中，菌渣与虫砂混合还田使氮磷利用率从 30%提升至 68%，可极大助力土壤养分循环（苏文英等, 2022）。在黄淮地区的“西瓜-豆丹-甘蓝”轮作模式中，豆丹取食可打破线虫生活史，使土壤线虫密度从 230 条/100 g 土降至 92 条/100 g 土，连作障碍指数从 0.8 降至 0.3，进而显著维持了土壤健康（张朝阳等, 2023）。此外，16S rRNA 测序显示，豆丹养殖区土壤厚壁菌门丰度较常规农田高 27%，其中的芽孢杆菌属占比提升 18%，与土壤抗病性呈正相关（苏文英等, 2022; 谢洁微等, 2023）。可见，豆丹在维持土壤健康和养分循环方面具有重要的应用价值。

3.5　农业废弃物资源化

张海程和夏振强（2017）研究指出，豆丹对大豆秸秆的干物质消化率可达 58.7%，每吨幼虫即可消纳 8.5 吨秸秆，显著减少露天焚烧产生的 CO_2 排放约 1.8 吨。豆丹的虫体废弃物虫砂与秸秆混合堆肥后，可变废为宝，可生产含腐殖酸 15%的生物有机肥，若用于蔬菜种植可在一定程度上降低施肥成本（康有亮, 2018）。此外，豆丹大棚养殖的尾水经沉淀后回用灌溉，其病死虫体通过厌氧发酵可日产沼气 1.2 m^3，而沼渣沼液含速效氮 1.2 g/L，可替代 50%化肥，既经济惠民，又绿色高效，还能满足农户炊事用能（苏文英等, 2022）。

3.6　多维度豆丹产业模式

豆丹产业相关模式在不同区域实践中展现出多样特征，已有研究从多维度开展探索（表 1）。在江苏灌云大棚立体种养模式方面，孙婷等（2020）介绍了一种以“大豆-豆丹-蔬菜”周年轮作及温控延长生长期为技术内核的模式，从生态指标上做到土壤利用率的提高，并在一定程度上降低了农药的使用，经济效率达均年利润 63 万元/hm^2，实现生态与经济协同；康有亮（2018）则对河南济源的“塑料大棚豆丹-豆丹-芹菜三种三收”进行介绍，该技术有效减少了根结线虫等多种蔬菜病虫害，使当地获得 39.3 万元/hm^2 均年利润。其次，张朝阳等（2023）研究的露天轮作模式通过“西瓜-豆丹-甘蓝”轮作，缓解了连作障碍，改良了土壤，缓解了梅雨影响，这一模式在江苏灌云地区取得了均年纯利润 22.05 万元/hm^2 的经济收益。最后，石漠化生态修复模式通过“葛藤固土+豆丹养殖+菌菇”栽培复合系统，有望改善石漠化地区植被覆盖与土壤状况，该技术不仅预期改善生态环境，还为石漠化地区提供了经济收入的新途径（张海程和夏振强, 2017）。

表 1 豆丹产业相关模式的区域实践与效益对比

Table 1 Regional practices and benefit comparison of related industry models of DanBeen (i.e., larvae of the soybean hawk moth *Clanis bilineata tsingtauica*)

模式类型 Pattern type	技术内核 Technical core	生态指标 Ecological indicators	经济效率 Economic efficiency	典型区域 Typical regions	参考文献 References
大棚综合种养 Greenhouse integrated farming	大豆-豆丹-蔬菜周年轮作，温控延长生长期 Soybean-bean worm-vegetable annual rotation, with temperature control to extend the growth period	土地全年利用率提高，农药使用量减少 Increased annual land utilization rate, reduced pesticide usage	年均纯利润 63 万元/hm^2 Annual net profit 630 000 yuan per hm^2	江苏灌云 Jiangsu, Guanyun	孙婷等, 2020
	塑料大棚豆丹-豆丹-芹菜三种三收 Plastic greenhouse bean worm-bean worm-celery three crops in three harvests	减少根结线虫等多种蔬菜病虫害 Reduced various vegetable pests and diseases, including root-knot nematodes	年均纯利润 39.3 万元/hm^2 Annual net profit 393 000 yuan per hm^2	河南济源 Henan, Jiyuan	康有亮, 2018
露地轮作模式 Open field rotation pattern	西瓜-豆丹-甘蓝轮作，缓解连作障碍 Watermelon-bean worm-cabbage rotation, alleviating continuous cropping obstacles	改良土壤，缓解梅雨影响 Improved soil quality, alleviating the impact of the rainy season	年均纯利润 22.05 万元/hm^2 Annual net profit 220 500 yuan per hm^2	江苏灌云 Jiangsu, Guanyun	张朝阳等, 2023
石漠化生态修复种养 Rocky desertification ecological restoration farming	葛藤固土+豆丹养殖+菌菇栽培复合种养 Kudzu soil fixation + bean worm farming + mushroom cultivation composite farming	有效改善石漠化地区植被覆盖与土壤状况 Effectively improved vegetation coverage and soil conditions in rocky desertification areas	改善生态环境的同时，葛藤和豆丹都有收益 While improving the ecological environment, both kudzu and bean worm generate income	石漠化地区 Rocky desertification areas	张海程和夏振强, 2017

综上所述，豆丹的资源化利用以生态学理论为基础，通过技术创新突破产业瓶颈，最终实现生态效益与经济效益的改进。现有研究围绕豆丹产业不同模式，从技术、生态、经济等多维度剖析，为产业多元化发展及生态经济协同提供支撑，但不同模式在跨区域适配、长期效益稳定性等方面仍有深入研究空间，以促进豆丹产业可持续推广与优化。

4 豆丹人工养殖研究进展

4.1 养殖环境与设施

豆丹人工养殖的关键在于环境调控技术的突破。早期研究多采用露天大豆田散养模式，依赖自然温湿度，导致越冬死亡率高达 50%-60%，且年世代数受限。近年来，温室大棚技术的普及显著提升了豆丹养殖的可控性。刘艳和张露阳（2010）通过薄膜与草帘调控温湿度，使豆丹的成虫羽化提前 2 个月，年世代数增至 2 代，越冬死亡率较露天养殖降低 20%-30%。基质选择方面，林华峰等（2006）通过正交试验证实，纯锯末基质化蛹率显著高于纯土，归因于有机质含量对豆丹生理代谢的促进作用。而李晓峰等（2022）进一步研究发现，蘑菇料土经高压灭菌后，豆丹的存活率可提升至 66.67%，表明基质灭菌工艺是避免真菌污染的关键。但现有研究多局限在对于现象的分析，缺乏多因素耦合分析，无法量化各因素的影响作用及其交互作用，有望通过设计

多因素耦合分析试验对影响因子交互作用进行进一步的探究。针对不同区域养殖设施差异所反映的豆丹的地理适应性，南方多雨地区侧重大棚防雨设计（陈中琴, 2021），北方寒冷地区则强调越冬期土壤覆盖保温（苏颖, 2023），但对于养殖大棚内的微气候，如 CO_2、温湿度等的量化分析仍显不足。

4.2　种苗繁育与卵处理

豆丹种苗技术的核心突破主要在于卵消毒及其孵化调控，传统消毒方法虽能提升孵化率至 75%，但李晓峰等（2022）通过正交试验筛选出甲醛：双氧水：水=0.5：0.5：10（V/V）的最优化消毒配方，消毒 30 min 可使卵的孵化率达 86.67%，且 25 日龄幼虫存活率提升至 66.67%，表明氧化型消毒剂对卵表面病原真菌的高效杀灭作用。而卵孵化条件的研究则揭示了豆丹温度敏感性的阶段差异。如李晓峰等（2021）研究发现，卵期最佳孵化温度为 20 ℃，孵化率 92.33%；此外，《豆丹人工养殖技术规程》DB32/T 3528-2019（https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed?id=949D7DB5677B94DAE05397BE0A0A6D0D）指出，豆丹生长极限温度为 15-35 ℃，在该范围内温度越高豆丹生长越快，其中 30 ℃条件下，其总发育周期约为 30 d。豆丹卵期与幼虫期最适温度的差异表明未来需建立分段温控模型，实施时期精准调控，而非单一温度标准。

4.3　饲养密度与种植模式

汪西强等（2002）最早提出了豆丹的理论养虫量为 24 头/m²。郭明明等（2020）通过田间试验验证，密度 20 头/m²时大豆实荚率与豆丹存活率达最佳平衡；当密度超过 25 头/m²时，豆丹体重下降 20%，大豆空荚率增加 30%。大豆与玉米带状复合种植的创新模式显示，玉米产量较单作提升 15%，大豆产量损失小于 10%，综合收益提升 30%（苏颖, 2023），但其成功依赖品种搭配和空间配置优化。现有针对豆丹养殖最适密度的研究主要针对于豆丹全龄期的平均密度，忽略了豆丹不同发育阶段对于资源依赖的差异，同时对于豆丹种内竞争等生态学机制研究也较少。

4.4　饲料与种植模式

人工饲料的开发始终是豆丹规模化养殖的“瓶颈”之一。早期研究显示，单株大豆在养殖效果最好的情况下，可承载 2-3 头豆丹至 5 龄，但当进入五龄暴食期，其取食量达到总取食量的 75%，进一步加剧了豆丹之间的资源竞争（汪西强等, 2002）。为突破这一限制，有研究探索了用洋槐树饲养豆丹的养殖模式，相较于传统方法，该方法日常管理较为简单，且洋槐树自身病害较少，拓宽了豆丹饲料来源（夏振强，2018）。此外，陈中琴（2021）以豆粕等为基质，添加少量琼脂制成凝胶饲料，可支持豆丹发育至 3 龄，但适口性和营养转化率仍需优化。

4.5　经济效益与产业化：从经验养殖到标准体系

早在 2017 年，豆丹便已成为我国农产品地理标志（http://www.greenfood.agri.cn/xxcx/dlbzcx/; 证书号: AGI02181）。现有研究表明，豆丹养殖的经济效益显著优于传统大豆种植收益。单作养殖模式下，投入约 5.4 万元/hm^2，产量 6 000-7 500 kg，按市场价 80 元/kg 计算，净利润达 42-69 万元（苏颖, 2023）。豆丹产业化瓶颈集中于种苗标准化和加工链条缺失。之前，对比国际昆虫养殖产业，豆丹养殖缺乏行业标准和良种认证体系，致豆丹产品质量参差不齐。相较于欧盟近年相继出台的食用昆虫相关政策，目前我国也已出台了多个地方性行业标准，如江苏省级标准《豆丹人工养殖技术规程》DB32/T 3528-2019（见 https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed?id=949D7DB5677B94DAE05397BE0A0A6D0D）和连云港市级标准《大豆-豆丹绿色种养技术规程》DB3207/T 1018-2021（https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed?id=D7B6A04F74BCACD9E05397BE0A0A143B）等，已逐步形成标准体系养殖。未来，豆丹产业标准化发展还可借鉴水产养殖的良种选育经验，建立“种虫库+繁育基地+养殖户”的三级繁育体系，并推动豆丹深加工产品的研发和认证。

5 未来展望

5.1 面临的问题与挑战

豆丹产业的可持续发展仍面临诸多难题，有待从基础研究、技术创新与产业升级等层面进行突破。目前，已有研究揭示滞育期豆丹的代谢酶活性及其营养物质动态变化，但缺乏对滞育调控网络的深度解析，如肠道微生物如何通过调控代谢产物协同宿主基因表达的机制尚不明确，以及跨学科领域融合研究不足等问题。实际应用方面，豆丹现有规模产业依赖经验性操作的人工养殖，但缺乏病原真菌等的有效预防措施，导致病害损失率较高；此外，豆丹的食品安全和产业规范化也有待推进。此外，由于深加工技术停留在粗加工阶段，豆丹的功能性产品（如豆天蛾多糖）研发及其转化缺乏跨行业合作，也亟待推进。生态和经济价值方面，豆丹虽然在土壤健康和碳汇中的生态功能显著，但尚未建立量化评估体系，生态补偿机制缺失，制约其生态经济效益发展（苏文英等, 2022）。国际上，欧盟已批准黄粉虫 *Tenebrio molitor* 作为新食品资源（European Commission, 2025; https://food.ec.europa.eu/food-safety/novel-food/authorisations/approval-insect-novel-food_en），而我国豆丹仍未纳入国家食品目录，出口面临法规壁垒，且国内消费者对昆虫食品的接受度不高，亟待科普宣传。

5.2 未来的研究方向与产业升级路径

5.2.1 基础生物学与种源创新 未来针对豆丹生物学基础特性的研究应着重于基因层面，如滞育机制的多组学解析应整合转录组、蛋白组与肠道微生物组等数据，构建“环境信号-激素调控-微生物代谢”互作网络，重点解析保幼激素合成相关基因与共生菌在滞育启动或解除中的协同作用。又如通过 CRISPR-Cas9 技术敲除豆丹滞育相关基因，培育无滞育或短滞育品系，突破“一年一代”的生产限制瓶颈。已有研究表明，鳞翅目昆虫的鳞片与触角等结构与其择偶行为具有一定联系（谭琼等, 2012; Johnson *et al.*, 2022），为分析豆丹择偶过程，进而做到调控繁殖代数，为豆丹养殖产业提供更加精细化的生产标准提供了一条潜在路径。当前，已有利用不同地理种群豆丹杂交以成功缓解种群退化的案例（李晓峰等, 2022）。下一步的研究应着重于豆丹世代遗传稳定性上，为豆丹产业发展提供稳定的优质种质资源。

5.2.2 智能化养殖与绿色加工技术 在大数据模型广泛应用的大背景下，应积极响应国家政策《全国智慧农业行动计划（2024-2028 年）》（中国绿色食品发展中心, 2017; http://www.greenfood.agri.cn/xxcx/dlbzcx/），着重于豆丹智慧养殖系统的开发，建成“多传感器融合-AI 预测-自动控制”的一体化养殖平台，通过成像实时监测豆丹虫体健康状态，预测真菌病害风险，并联合温度、湿度、通风控制等智能调控设施实现养殖环境的动态调节（张佳, 2023）。在实现智能化养殖的同时也可配套开发便携式检测设备，实时监测豆丹营养状况，生长发育动态，精确化豆丹采收时间，优化功能性成分的高效提取，并可借鉴应用超声辅助酶解技术，从滞育豆丹中提取高活性多糖（即豆天蛾多糖），开发抗衰老口服液等功能性产品，推动豆丹绿色加工技术的转型升级（赵克东等, 2025）。

5.2.3 生态产业化与循环经济模式 豆丹作为重要的资源昆虫和食用昆虫，其规模化养殖过程中，通过碳汇计量与生态补偿机制建立“豆丹养殖-大豆秸秆利用-大田土壤固碳”的碳足迹核算体系，量化年碳汇量/hm^2，并将其纳入全国碳交易市场，可凸显其生态价值效益。政府可通过购买生态服务，激励企业采用“葛藤-豆丹-菌菇”复合种养模式，推动农业废弃物的高值化利用（康有亮, 2018）。也可采用各地成熟的生态养殖模式，如“塑料大棚豆丹-豆丹-芹菜”（康有亮, 2018）、“芦蒿-大豆+豆丹”和“草莓-大豆+豆丹”（孙婷等, 2020）、“秸秆-大球盖菇-大豆-豆丹”（苏文英等, 2022）、“大球盖菇-豆丹”（孙潇潇等, 2023）以及“设施西瓜-豆丹-结球甘蓝”（张朝阳等, 2023）等绿色高效综合种养模式。同时，探索研发新的豆丹生态产业化模式，建立“作物秸秆收集-豆丹生态养殖-虫砂制肥还田”的绿色

养殖产业链，最终实现豆丹产业循环经济发展模式，推进乡村生态经济可持续发展。

5.2.4　政策协同与全球市场拓展　豆丹食品的合法性是豆丹市场大规模开拓的基础（Xie *et al.*, 2024）。我国相关行业目前存在一定的立法缺失。具体可参照欧盟《新食品法》等（Żuk-Gołaszewska *et al.*, 2022）开展豆丹食品立法。如制定“豆丹养殖卫生规范”、“豆丹深加工产品质量通则”等相关的地方、行业或国家标准或规范，建立从种源到终端产品的溯源体系。在市场营销方面应接轨国际，加入国际昆虫食品协会，参与ISO20416（食用昆虫安全标准）制定，推动豆丹罐头、豆丹蛋白粉等产品研发与出口创汇。此外，还应通过多种宣传策略（Xie *et al.*, 2024），如“科普+文化”双驱动策略，在全国中小学开展“昆虫食品课堂”，并通过社交媒体发起大众参与的豆丹食品科普，还可联合各地知名餐饮企业开发创意豆丹菜品，提升大众对豆丹食品的接受度。

综上所述，豆丹凭借其高蛋白、高亚麻酸和多元活性成分的复合优势，有望成为未来食品产业的重要蛋白源。现有豆丹研究已覆盖从基础生物学特性到产业模式，以及从营养分析到加工应用的技术的全链条，但仍需深化种源基因库构建、工艺创新与市场培育以及生态价值市场化机制构建等领域，探索更多具有实践意义的豆丹利用方式，为乡村振兴与“双碳”（即碳达峰和碳中和）目标提供更坚实的科技支撑。当前，现代生物技术的发展为豆丹功能成分的深度开发提供了新机遇，可通过基因组学、蛋白质组学和代谢组学研究，挖掘豆丹丰富的生物活性物质，探究其发挥作用的分子机理。另一方面，豆丹产业的未来发展需以科技创新为中心，驱动生态价值再转型，建立全球视野，并通过对于豆丹基础生物学特性研究的多领域深度交叉和技术应用的跨学科融合，以及国内政策和营销市场的协同发力，才能将其从区域性特色产业升级为具有国际竞争力的绿色蛋白产业。随着对豆丹深入的研发与利用，豆丹不再是农业害虫，而是有多维度生态价值的资源昆虫。通过进一步推动扶持政策的出台与行业准入的标准制定，在提高豆丹经济价值的同时，更将推动相关产业绿色发展。这一过程不仅将为解决粮食安全与生态可持续性问题提供中国方案，也将推动昆虫资源利用成为“双碳”目标下的新兴经济增长点。

参考文献 (References)

Baiano A, 2020. Edible insects: An overview on nutritional characteristics, safety, farming, production technologies, regulatory framework, and socio-economic and ethical implications. *Trends in Food Science & Technology*, 100: 35–50.

Baqui AH, Black RE, El Arifeen S, Yunus M, Chakraborty J, Ahmed S, Vaughan JP, 2002. Effect of zinc supplementation started during diarrhoea on morbidity and mortality in Bangladeshi children: Community randomised trial. *British Medical Journal*, 325(7372): 1059–1062.

Cao JJ, Qiu CJ, Guo Y, 2019. Effect of the addition of *Clanis bilineata tsingtauica* on qualitative properties of fish tofu. *Food Research and Development*, 40(8): 133–138. [曹佳佳, 邱春江, 郭优, 2019. 豆丹的添加量对鱼豆腐品质的影响. 食品研究与开发, 40(8): 133–138.]

Chen XM, Chen H, Zhao M, Yang ZX, Feng Y, 2022. Insect industrialization and prospect in commerce: A case of China. *Entomological Research*, 52(4): 178–194.

Chen ZQ, 2021. Study on the efficient breeding of *Clanis bilineata* (Lepidoptera: Sphingidae). Master dissertation. Guangzhou: South China Agricultural University. [陈中琴, 2021. 豆天蛾高效养殖研究. 硕士学位论文. 广州: 华南农业大学.]

China Green Food Development Center, 2017. Search for geographical indications of nationally registered agro-products. 2025-8-22, http://www.greenfood.agri.cn/xxcx/dlbzcx/. [中国绿色食品发展中心, 2017. 全国农产品地理标志登记产品查询. 2025-8-22, http://www.greenfood.agri.cn/xxcx/dlbzcx/.]

European Commission, 2025. Approval of another insect/insect-derived food as a novel food. Food, farming, fisheries: Food safety. https://food.ec.europa.eu/food-safety/novel-food/authorisations/approval-insect-novel-food_en.

Fan JW, Sun ZW, Li Q, Wang KJ, Zhang GX, Zhao XJ, Chen F, Guo MM, 2019. Advances in research on biological characteristics and applications of the Lianyungang population of *Clanis bilineata tsingtauica*. *Agricultural Development & Equipments*, 2019(2): 170–172. [樊继伟, 孙中伟, 李强, 王康君, 张广旭, 赵雪君, 陈凤, 郭明明, 2019. 豆天蛾连云港种群生物学特性及应用研究进展. 农业开发与装备, 2019(2): 170–172.]

Feng Y, Chen XM, 1999. Review on nutritive values of edible insects. *Forest Research*, 12(6): 662–668. [冯颖, 陈晓鸣, 1999. 食用昆虫营养价值评述. 林业科学研究, 12(6): 662–668.]

Feng YY, 2014. Study on the biology of *Clanis bilineata tsingtauica*. Master dissertation. Haikou: Hainan University. [冯雨艳, 2014. 豆天蛾生物学研究. 硕士学位论文. 海口: 海南大学.]

Feng YY, Ma GC, Jin QA, Lü BQ, Peng ZQ, Jin T, Wen HB, 2014. Effect of temperature on developmental duration and feeding amount of *Clanis bilineata tsingtauica*. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 35(12): 2442–2444. [冯雨艳, 马光昌, 金启安, 吕宝乾, 彭正强, 金涛, 温海波, 2014. 温度对豆天蛾发育历期及取食量的影响. 热带作物学报, 35(12): 2442–2444.]

Guo MM, Li XF, Deng P, Li DW, Li JL, Fan JW, Chen F, 2021a. Diapause termination and post-diapause of overwintering *Clanis bilineata tsingtauica* larvae. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 58(4): 966–972. [郭明明, 李晓峰, 邓盼, 李大维, 李俊领, 樊继伟, 陈凤, 2021. 豆天蛾越冬幼虫滞育解除后生物学特性的研究. 应用昆虫学报, 58(4): 966–972.]

Guo MM, Li XF, Zhao XJ, Li GQ, Fan JW, 2024. Responses of post-diapause biological characteristics to substrate of two populations of *Clanis bilineata*. *South China Agriculture*, 18(21): 90–94, 100. [郭明明, 李晓峰, 赵雪君, 李国权, 樊继伟, 2024. 两个豆天蛾种群滞育后生物学特性对基质的响应. 南方农业, 18(21): 90–94, 100.]

Guo MM, Li XF, Zhao XJ, Lu MX, Fan JW, 2023. Effect of post-diapause photoperiod on the biological characteristics of *Clanis bilineata tsingtauica* Mell. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(1): 150–155. [郭明明, 李晓峰, 赵雪君, 陆明星, 樊继伟, 2023. 光周期对豆天蛾滞育后生物学特性的影响. 应用昆虫学报, 60(1): 150–155.]

Guo MM, Lu MX, Li XF, Zhao XJ, Deng P, Fan JW, 2022. Variance analysis on the nutrient ingredients of common population and yellow population of greenish brown hawk moth. *South China Agriculture*, 16(7): 225–229. [郭明明, 陆明星, 李晓峰, 赵雪君, 邓盼, 樊继伟, 2022. 豆天蛾普通种群和黄色种群营养成分差异分析. 南方农业, 16(7): 225–229.]

Guo MM, Tang YL, Fu GC, Chen F, Liu HL, Fan JW, Ma L, Zhao XJ, Li XF, Peng H, Sun T, Shi WH, Bian PG, Wang D, 2021b. Technical regulation for green cultivation and rearing of soybean and Doudan (DB3207/T 1018-2021). Jiangsu: Lianyungang Market Regulatory Bureau. [郭明明, 唐玉林, 伏广成, 陈凤, 刘恒亮, 樊继伟, 马亮, 赵雪君, 李晓峰, 彭辉, 孙婷, 侍伟红, 卞佩光, 王东, 2021. 大豆-豆丹绿色种养技术规程 (DB3207/T 1018-2021). 江苏: 连云港市市场监督管理局.]

Hua C, Wen L, 2005. Determination of active components in *Cordyceps militaris* (*Clanis bilineata*). *Journal of Huaiyin Institute of Technology*, 14(5): 55–56. [华春, 温鲁, 2005. 豆虫草活性成分测定. 淮阴工学院学报, 14(5): 55–56.]

Jiang XR, Huo XY, Huang JH, Sun ZT, 2016. Technology of Biotech Fermentation Industry. Beijing: China Light Industry Press. 326–327. [姜锡瑞, 霍兴云, 黄继红, 孙中涛, 2016. 生物发酵产业技术. 北京: 中国轻工业出版社. 326–327.]

Jiang YT, 2010. Biology and control of *Clanis bilineata tsingtauica*. *Agriculture of Henan*, 2010(17): 64. [姜永涛, 2010. 豆天蛾的发生与防治. 河南农业, 2010(17): 64.]

Jin CL, 2004. Applications of Resource Insects. *Forest By-Product and Speciality in China*, 2004(1): 54–55. [金传玲, 2004. 资源昆虫的利用. 中国林副特产, 2004(1): 54–55.]

Johnson TL, Elgar MA, Symonds MRE, 2022. Movement and olfactory signals: Sexually dimorphic antennae and female flightlessness in moths. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10: 919093.

Kang YL, 2018. High yield and high-efficiency cultivation techniques for triple cropping and triple harvesting of *Clanis bilineata* larvae-*C. bilineata* larvae-celery in plastic greenhouses. *Jiangxi Agriculture*, 2018(4): 11. [康有亮, 2018. 塑料大棚豆丹-豆丹-芹菜三种三收高产高效栽培技术. 江西农业, 2018(4): 11.]

Li ML, 2005. Resource Entomology. Beijing: China Forestry Publishing House. 414. [李孟楼, 2005. 资源昆虫学. 北京: 中国林业出版社. 414.]

Li XF, Chen F, Deng P, Li JL, Fan JW, Guo MM, 2022. Comparison of biological characteristics of different geographical populations of *Clanis bilineata*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(6): 1428–1435. [李晓峰, 陈凤, 邓盼, 李俊领, 樊继伟, 郭明明, 2022. 豆天蛾不同地理种群若干生物学特征的比较. 应用昆虫学报, 59(6): 1428–1435.]

Li XF, Fan JW, Li KB, Yin J, Guo MM, 2023. Effectiveness of four insecticides against *Clanis bilineata* larvae in the field. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 60(6): 1860–1867. [李晓峰, 樊继伟, 李克斌, 尹娇, 郭明明, 2023. 四种杀虫剂对豆天蛾幼虫的田间防效. 应用昆虫学报, 60(6): 1860–1867.]

Li XF, Guo MM, Liao HJ, Deng P, Li DW, Li JL, Fan JW, Chen F, 2021. Egg development of *Clanis bilineata tsingtauica* Mell under different conditions. *Plant Protection*, 47(6): 174–179. [李晓峰, 郭明明, 廖怀建, 邓盼, 李大维, 李俊领, 樊继伟, 陈凤, 2021. 不同条件下豆天蛾卵的发育情况研究. 植物保护, 47(6): 174–179.]

Li XF, Li DW, Guo MM, Li JL, Wang S, Chen F, 2022. Three-seasons cropping and cultivation model with soybean and

Clanis bilineata. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 50(6): 36–39. [李晓峰, 李大维, 郭明明, 李俊领, 王帅, 陈凤, 2022. 大豆-豆丹一年三季种养模式探索. 安徽农业科学, 50(6): 36–39.]

Li YH, Ji FY, Zhang PJ, Xiao TT, 2025. The salivary gland mRNA and protein datasets after diapause of the soybean hawkmoth, *Clanis bilineata tsingtauica*. *Scientific Data*, 12(1): 730.

Lin HF, Wu FZ, Li SG, Liu ZH, Gao YB, Yang XJ, Zhang SY, Xia SA, Wu SX, 2006. Study on effect of different breeding dusts upon overwintering of *Clanis bilineata* (Walker). *Journal of Economic Animal*, 2006(3): 161–163. [林华峰, 吴福中, 李世广, 刘志红, 高亿波, 杨新军, 张世玉, 夏顺安, 吴书侠, 2006. 不同饲养基质对豆天蛾越冬影响的研究. 经济动物学报, 2006(3): 161–163.]

Liu LC, 1995. Anecdotes of insects as food. *Entomology Knowledge*, 32(2): 126–127. [刘立春, 1995. 昆虫食品趣闻. 昆虫知识, 32(2): 126–127.]

Liu XW, Chen XL, Zhang Y, Li YJ, Chen FL, Wang J, Li L, Li J, Ding H, 2014. Studies on anti-fatigue effect of alcohol extract of *Clanis bilineata* Walker. *Science and Technology of Food Industry*, 35(13): 362–363, 368. [刘雪薇, 陈晓蕾, 张羊, 李一婧, 陈凤凌, 王晶, 李丽, 李建, 丁虹, 2014. 豆丹醇提物抗疲劳作用的研究. 食品工业科技, 35(13): 362–363, 368.]

Liu Y, Zhang LY, 2010. Analysis of meteorological conditions for greenhouse cultivation of *Clanis bilineata*. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2010(14): 303–304. [刘艳, 张露阳, 2010. 豆天蛾温室养殖气象条件分析. 现代农业科技, 2010(14): 303–304.]

Lu MX, Zhu CX, Smetana S, Zhao M, Zhang HB, Zhang F, Du YZ, 2024. Minerals in edible insects: Review of content and potential for sustainable sourcing. *Food Science and Human Wellness*, 13(1): 65–74.

Lü F, Liu YS, Wang ZP, Zhang XB, 2006. Advances in production and comprehensive utilization of *Clanis bilineata tsingtauica*. *Entomological Journal of East China*, 15(3): 192–195. [吕飞, 刘玉升, 王振鹏, 张秀波, 2006. 豆天蛾生产与综合利用的研究进展. 华东昆虫学报, 15(3): 192–195.]

Qian L, Deng P, Chen FJ, Cao Y, Sun HW, Liao HJ, 2022. The exploration and utilization of functional substances in edible insects: A review. *Food Production*, *Processing and Nutrition*, 4(1): 11.

Qian L, Qin Y, Zhang J, Li ZN, Deng P, Zhou G, Li QY, Liao HJ, 2024. Effects of diapause time on nutritional components and metabolic enzymes activities in *Clanis bilineata tsingtauica* larvae. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 40(1): 149–155. [钱蕾, 秦毅, 张佳, 李宗男, 邓盼, 周刚, 李情怡, 廖怀建, 2024. 滞育时间对豆天蛾幼虫营养成分及代谢酶活性的影响. 江苏农业学报, 40(1): 149–155.]

Song KX, 2006. Edible insect: *Clanis bilineata tsingtauica*. *Middle School Biology*, 22(12): 11–12. [宋开霞, 2006. 食用昆虫: 豆天蛾. 中学生物学, 22(12): 11–12.]

Su WY, Ji W, Liu XM, Liang CD, Li JL, Zhu BH, Ren LK, 2022. Cycling farm model of straw-*Stropharia rugosoannulata*-soybean-*Clanis bilineata tsingtauica* larvae in Lianyungang region. *Agriculture and Technology*, 42(22): 53–56. [苏文英, 纪伟, 刘晓梅, 梁长东, 李俊领, 朱必辉, 任立凯, 2022. 连云港地区秸秆-大球盖菇-大豆-豆丹种养循环模式. 农业与技术, 42(22): 53–56.]

Su Y, 2023. Analysis of nutritional composition and overwintering characteristics of *Clanis bilineata tsingtauica* and exploration of scale breeding techniques. Master dissertation. Yangzhou: Yangzhou University. [苏颖, 2023. 豆天蛾营养成分与越冬特征分析及规模化饲养技术探索. 硕士学位论文. 扬州: 扬州大学.]

Sun T, Fu GC, Feng SF, Wang D, Xing GL, Liu HL, Ma L, 2020. High-efficeny planting and rearing model and its benefit analysis: "Mugwort-soybean-*Clanis bilineata tsingtauica* larvae", "strawberry-soybean-*C. bilineata tsingtauica* larvae" in Guanyun County. *The Farmers Consultant*, 2020(14): 61, 147. [孙婷, 伏广成, 冯素飞, 王东, 邢光磊, 刘恒亮, 马亮, 2020. 灌云县"芦蒿-大豆+豆丹""草莓-大豆+豆丹"高效种养模式及效益分析. 农家参谋, 2020(14): 61, 147.]

Sun XX, Hu SY, Su WY, Zhang ZQ, Han SH, Li J, 2023. Integrated green and high-efficiency planting and rearing technology for *Stropharia rugosoannulata* and *Clanis bilineata tsingtauica* larvae in Lianyungang region. *China Vegetables*, 2023(9): 129–131. [孙潇潇, 胡曙鋆, 苏文英, 张正球, 韩善红, 李进, 2023. 连云港地区大球盖菇-豆丹绿色高效综合种养技术. 中国蔬菜, 2023(9): 129–131.]

Tan Q, Wen JB, Li ZY, 2012. Comparison among the ultrastructures and characteristics of wing scales in 5 species of pine caterpillar moths. *Journal of Beijing Forestry University*, 34(4): 99–106. [谭琼, 温俊宝, 李镇宇, 2012. 5 种松毛虫翅面鳞片超微结构观察与比较. 北京林业大学学报, 34(4): 99–106.]

The State Council of The People's Republic of China, 2024. National smart agriculture action plan (2024-2028), 2025–8–22, https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202410/content_6983057.htm. [中华人民共和国中央人民政府, 2024. 全国智慧农业行动计划（2024-2028 年）, 2025–8–22, https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202410/content_6983057.htm.]

Tian H, 2009. Integrated control measures to the harms of soybean pest *Clanis bilineata tsingtauica* Mell. *Journal of Nanyang Normal University*, 8(6): 58–60. [田华, 2009. 大豆害虫豆天蛾的危害与综合防治. 南阳师范学院学报, 8(6): 58–60.]

Tian H, Zhang YM, 2009. Advances of integrated utilization on resource insect *Clanis bilineata tsingtauica*. *Guizhou Agricultural Sciences*, 37(6): 111–113. [田华, 张义明, 2009. 资源昆虫豆天蛾综合利用研究进展. 贵州农业科学, 37(6): 111–113.]

Tian H, Zhang YM, 2012a. Amino acids and fatty acids analysis and evaluation of *Clanis bilineata tsingtauica* Mell. *Food Science and Technology*, 37(5): 68–70, 73. [田华, 张义明, 2012a. 豆天蛾氨基酸及脂肪酸分析与评价. 食品科技, 37(5): 68–70, 73.]

Tian H, Zhang YM, 2012b. The anti-oxidant activity of polysaccharide CBP3 in *Clanis bilineata tsingtauica* Mell. *Food Science and Technology*, 37(6): 228–231. [田华, 张义明, 2012b. 豆天蛾多糖 CBP3 抗氧化活性研究. 食品科技, 37(6): 228–231.]

Tian H, Zhang YM, 2012c. The nutritional components analysis and evaluation of *Clanis bilineata tsingtauica* Mell. *Acta Nutrimenta Sinica*, 34(3): 289–291. [田华, 张义明, 2012c. 豆天蛾主要营养成分分析及营养评价. 营养学报, 34(3): 289–291.]

Tian JH, Liu HC, 2025. Population dynamics analysis of Sphingidae insects by monitoring lights. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 71(4): 89–94. [田金华, 刘慧超, 2025. 天蛾科昆虫灯诱种群数量动态分析. 陕西农业科学, 71(4): 89–94.]

Van Huis A, Itterbeeck JV, Klunder H, Mertens E, Halloran A, Muir G, Vantomme P, 2013. Edible insects: Future prospects for food and feed security. *FAO Forestry Paper*, 171: 187.

Wang HJ, 1988. Severe outbreak of *Clanis bilineata* in Hebei Province. *Plant Protection*, 14(1): 55. [王贺军, 1988. 豆天蛾在河北发生严重. 植物保护, 14(1): 55.]

Wang TT, 2016. Study on the vacuum freeze-drying and quality of the bean worm. Master dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [王婷婷, 2016. 豆丹真空冷冻干燥工艺及品质实验研究. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学.]

Wang XQ, Chen CQ, Zhao H, Zhang YQ, 2002. Rearing *Clanis bilineata* in soybean field and its profit. *Entomological Knowledge*, 39(1): 30–33. [汪西强, 陈春秋, 赵虎, 张艳秋, 2002. 豆天蛾田间饲养量及效益研究. 昆虫知识, 39(1): 30–33.]

Wu SJ, Jiang LF, Chen SJ, 2002. A study on the enzymatic hydrolysis of *Herse bilineata tsingtauica*. *Journal of Huaihai Institute of Technology*, 11(1): 52–55. [吴胜军, 江龙法, 陈绍军, 2002. 豆天蛾幼虫水解试验研究. 淮海工学院学报, 11(1): 52–55.]

Wu SJ, Meng X, Chen SJ, 2000. The analysis and evaluation of main nutrient components for *Herse bilineata tsingtauica*. *Journal of Huaihai Institute of Technology*, 9(1): 58–61. [吴胜军, 孟旭, 陈绍军, 2000. 豆天蛾主要营养成分的分析与评价. 淮海工学院学报, 9(1): 58–61.]

Xia ZQ, 2018. A method for rearing of *Clanis bilineata tingtauica* larvae using locust trees. Chinese Patent, ZL 2014 1 0318731.0. 2018–05–18. [夏振强, 2018. 一种洋槐树养殖豆丹的方法. 中国发明专利, ZL 2014 1 0318731.0. 2018–05–18.]

Xia ZQ, Ma SS, Xu MQ, Shang QW, Sun ZP, Li XH, Zhuo L, Song YH, Liu G, Liu SM, Sun B, Wang QY, Xu D, Wang X, Zhao JM, Wang C, 2019. Technical regulation for artificial rearing of Doudan (larva of *Clanis bilineata*) (DB32/T 3528-2019). Jiangsu: Jiangsu Provincial Market Regulatory Bureau. [夏振强, 马士胜, 徐敏权, 尚庆伟, 孙召平, 李晓红, 卓丽, 宋玉和, 刘刚, 刘淑梅, 孙波, 王庆轶, 徐达, 王绪, 赵家珉, 王超, 2019. 豆丹人工养殖技术规程(DB32/T 3528-2019). 江苏: 江苏省市场监督管理局.]

Xiao T, Guo J, Chen HZ, Wu QY, Zhu GM, Yang JH, Pan YL, 2010. Effect of low temperature on overwintering and pupation of *Clanis bilineata*. *Journal of Economic Animal*, 14(1): 49–51. [肖婷, 郭建, 陈宏州, 吴琴燕, 朱桂梅, 杨敬辉, 潘以楼, 2010. 低温处理对豆天蛾幼虫越冬以及化蛹的影响. 经济动物学报, 14(1): 49–51.]

Xie BX, Zhu YX, Chu XY, Pokharel SS, Qian L, Chen FJ, 2024. Research progress and production status of edible insects as food in China. *Foods*, 13(13): 1986.

Xie JW, Li XL, Shi QS, Wu JS, Zhu JF, Li RM, Hu WF, 2023. Effects of *Pueraria lobata* leaf on growth performance and intestinal microflora diversity of *Clanis bilineata tingtauica* larvae. *Journal of Northern Agriculture*, 51(1): 107–117. [谢洁微, 李雪玲, 施庆珊, 吴俊松, 朱剑锋, 李锐明, 胡文锋, 2023. 饲喂葛叶对豆天蛾幼虫生长性能及肠道菌群多样性的影响. 北方农业学报, 51(1): 107–117.]

Xu L, Kong DY, Li YJ, Li L, Chen FL, Wang J, 2014. Effects of *Clanis bilineata tsingtauica* Mell on anti-fatigue in aged mice. *Food Science and Technology*, 39(8): 64–67.[徐乐, 孔德瑛, 李一婧, 李丽, 陈凤凌, 王晶, 2014. 研究豆丹对老年小鼠的抗疲劳作用. 食品科技, 39(8): 64–67.]

Yan MH, 2001. *Clanis bilineata tsingtauica*-feed. *Journal of Biology*, 18(2): 25–33. [闫茂华, 2001. 豆天蛾的人工饲养. 生物学杂志, 18(2): 25–33.]

Zhan YC, Liu T, Chang JX, 2009. Extraction of fat and analysis of fatty acid composition in *Clanis bilineata tsingtauica*. *Food and Nutrition in China*, 15(2): 52–54. [詹永成, 刘涛, 常金秀, 2009.

豆天蛾中油脂的提取及脂肪酸组成分析. 中国食物与营养, 15(2): 52–54.]

Zhang JJ, Mou JY, Sun H, 2025. Jiangsu: Guanyun Doudan transforming into a “Golden Nugget” to drive rural prosperity through industry chain. 2025-9-10, https://www.lyg.gov.cn/zglygzfmhwz/gcyw/content/dd0d27cf-4180-4a04-9fa3-729a44625044.shtml. [张晶晶, 牟进勇, 孙航, 2025. 江苏: 灌云豆丹化身“金疙瘩” “链”动富民兴村, 2025-9-10, https://www.lyg.gov.cn/zglygzfmhwz/gcyw/content/dd0d27cf-4180-4a04-9fa3-729a44625044.shtml.]

Zhang CY, Xu BH, Gu Y, Huang DY, Sun YD, 2023. Annually high efficiency model for planting and cultivation of greenhouse watermelon, *Clanis bilineata tsingtauica* and cabbage. *China Vegetables*, 2023(1): 129–130. [张朝阳, 徐兵划, 顾妍, 黄大跃, 孙玉东, 2023. 设施西瓜-豆丹-结球甘蓝周年高效种养模式. 中国蔬菜, 2023(1): 129–130.]

Zhang HC, Xia ZQ, 2017. A novel model for rocky desertification control: Cultivating kudzu vine and rearing *Clanis bilineata Larvae*. *Soil and Water Conservation in China*, 2017(8): 39–41. [张海程, 夏振强, 2017. 石漠化治理新模式: 种葛藤养豆丹. 中国水土保持, 2017(8): 39–41.]

Zhang J, 2023. Application of smart devices in agricultural greenhouses. *Management of Agricultural Science and Technology*, 5(6): 151–153. [张佳, 2023. 智能装置在农业大棚中的应用. 农业科技管理, 5(6): 151–153.]

Zhao GX, Yang XR, Sun GR, Liu YQ, 2020. Preparation of *Clanis bilineata tsingtauica* Mell pupal protein hydrolysate beverage. *Food Research and Development*, 41(20): 162–168. [赵国秀, 杨鑫茹, 孙广仁, 刘艳秋, 2020. 豆天蛾蛹蛋白水解液饮料的研制. 食品研究与开发, 41(20): 162–168.]

Zhao KD, Ruan CQ, Li ZJ, Tang HC, Wang CY, 2025. Research progress on ultrasound-assisted preparation of resistant starch. *Science and Technology of Food Industry*, 46(5): 8–16. [赵克东, 阮长青, 李志江, 汤华成, 王长远, 2025. 超声辅助制备抗性淀粉研究进展. 食品工业科技, 46(5): 8–16.]

Zhu CX, Lu MX, Du YZ, 2022. Identification characteristics of different insect forms of *Clanis bilineata tsingtauica* Mell. *Journal of Yangzhou University* (*Agricultural and Life Science Edition*), 43(4): 137–142. [朱晨旭, 陆明星, 杜予洲, 2022. 豆天蛾不同虫态的鉴别特征研究. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 43(4): 137–142.]

Zhu HF, Wang LY, 1997. Fauna Sinica, Insecta Vol. 11: Lepidoptera, Sphingidae. Beijing: Science Press. 234. [朱弘复, 王林瑶, 1997. 中国动物志: 昆虫纲第十一卷: 鳞翅目天蛾科. 北京: 科学出版社. 234.]

Zhu YQ, Wang SY, Jiang D, 2025. Beijing: Guanyun County of Jiangsu Province: Revitalizing dormant land to unlock the code to common prosperity. 2025-9-10, https://rmzxb.183read.cc/#/home. [朱一清, 王尚银, 江迪, 2025. 北京: 江苏灌云县: 盘活“沉睡”土地 解锁“共富密码”, 2025-9-10, https://rmzxb.183read.cc/#/home.]

Żuk-Gołaszewska K, Gałęcki R, Obremski K, Smetana S, Figiel S, Gołaszewski J, 2022. Edible insect farming in the context of the EU regulations and marketing-an overview. *Insects*, 13(5): 446.