两种养殖方式下大豆田昆虫群落多样性对豆天蛾营养组分的影响*

李情怡[1,2**] 邹 言[3**] 陈博健[4] 李宗男[2] 邓 盼[2]
李烨华[2] 廖怀建[1,2***] 钱 蕾[2***]

（1. 江苏科技大学生物技术学院，镇江 212100；2. 江苏省农业科学院休闲农业研究所，南京 210014；
3. 南京农业大学植物保护学院，南京 210095；4. 中国海洋大学海德学院，青岛 266100）

摘 要 **【目的】** 豆天蛾幼虫 *Clanis bilineata tsingtauica*（“豆丹”）是重要的可食用昆虫，在生长过程中，其体内营养成分受多种因素的调控，其中生境生物多样性条件为不可回避的影响因素之一。本研究分析不同养殖生境下昆虫多样性与豆丹体内营养组分含量变化的相关性，以期通过改善养殖模式，提升豆丹营养品质。**【方法】** 通过马氏网法调查两种养殖方式（网棚养殖和露天养殖）下大豆田内昆虫多样性，测定豆丹体内蛋白质、氨基酸及脂肪酸含量，分析两种养殖方式下豆丹体内营养组分对大豆田内昆虫群落多样性的响应。**【结果】** 露天养殖方式下大豆田内昆虫数量明显高于网棚养殖（$P < 0.05$）。露天养殖豆田内共计捕获 11 068 头，分别隶属 9 目 39 科；网棚养殖豆田内共计捕获昆虫 6 805 头，分别隶属 8 目 28 科。α 多样性分析结果表明，露天养殖法大豆田 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数均显著高于网棚养殖法（$P<0.001$）。营养组分含量分析结果显示，露天养殖豆丹体内蛋白质、5 种氨基酸（丝氨酸、甘氨酸、丙氨酸、组氨酸和色氨酸）、2 种脂肪酸（十五碳酸和棕榈酸）含量明显高于网棚养殖（$P < 0.05$）。相关性分析结果显示，Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数与豆丹体内蛋白质、5 种差异氨基酸、2 种差异脂肪酸均呈正相关。**【结论】** 两种养殖方式下，露天养殖豆丹营养品质高于网棚养殖，推测可能是由于露天养殖大豆田内昆虫多样性更丰富，增强了豆丹竞争取食与食物吸收利用率。本研究为豆丹营养物质开发与利用提供了理论支撑。

关键词 豆天蛾；营养组分；养殖方式；昆虫群落；生物多样性

Effects of different soybean cultivation methods on insect community diversity, and on the nutritional composition of *Clanis bilineata tsingtauica*

LI Qing-Yi[1,2**] ZOU Yan[3**] CHEN Bo-Jian[4] LI Zong-Nan[2] DENG Pan[2]
LI Ye-Hua[2] LIAO Huai-Jian[1,2***] QIAN Lei[2***]

(1. College of Biotechnology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China;
2. Institute of Leisure Agriculture, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China;
3. College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;
4. Haide College, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract **[Aim]** To investigate the effect of habitat biodiversity on the nutritional quality of *Clanis bilineata tsingtauica*, an important edible insect. **[Methods]** The correlation between insect community diversity and the nutrient composition of *C. b. tsingtauica* living under different aquaculture regimes was analyzed. Malaise traps were used to investigate insect biodiversity

*资助项目 Supported projects：国家自然科学基金项目（32100398）；江苏省自然科学基金项目（BK20231393）；亚夫科技服务项目（KF(23)1304）

**共同第一作者 Co-first authors，E-mail：17843045542@163.com；2020202034@stu.njau.edu.cn
***共同通讯作者 Co-corresponding authors，E-mail：huaixiyu_08@126.com；qianlei14930@sina.cn

收稿日期 Received：2025-02-17；接受日期 Accepted：2025-09-28

in soybean fields under net-shed and open-field cultivation methods and the concentrations of amino acids, proteins, and fatty acids in *C. b. tsingtauica* larvae living under these two different soybean cultivation methods was measured and compared. **[Results]** Insect species diversity was significantly higher in open-fields than in net sheds ($P<0.05$); a total of 11 068 specimens belonging to 9 orders and 39 families were captured in the open-fields, compared to 6 805 specimens (8 orders and 28 families) in net-sheds. An α diversity analysis indicates that both the Shannon-Wiener diversity and Margalef richness indices of open fields were significantly higher than those of net sheds ($P<0.001$). The amount of protein, five amino acids (serine, glycine, alanine, histidine and tryptophan) and two fatty acids (pentadecanoic acid and palmitic acid) in *C. b. tsingtauica* were significantly higher in specimens from open-fields than those from net sheds ($P<0.05$). Both the Shannon-Wiener diversity and Margalef richness indices, were positively correlated with the abundance of proteins, five differential amino acids and two differential fatty acids in *C. b. tsingtauica*. **[Conclusion]** The nutritional quality of *C. b. tsingtauica* from open-field soybean crops was higher than that of those from net sheds, which may reflect the richer insect diversity of open-field soybean crops. These results provide a basis for the improving the nutritional value of *C. b. tsingtauica*.

Key words *Clanis bilineata tsingtauica*; nutritional composition; cultivation method; insect community; biodiversity

豆天蛾 *Clanis bilineata tsingtauica*（俗称豆丹，）是我国特有的食用昆虫，其生产受生境制约明显（Chen *et al.*，2009；Tian and Zhang，2012）。目前国内豆丹养殖方式主要分为大棚养殖法、网棚养殖法以及露天养殖法。其中大棚养殖法天敌少、产量高但投入较大；网棚养殖法天敌少、产量高且产量稳定；露天养殖法天敌较多、操作简单但产量难控制（李晓红等，2013；谢洁微，2023）。在豆丹规模化饲养中，大豆田内同样存在其他昆虫类群，田内生物群落随着时间的推移而变化。在不同养殖方式下，大豆田内昆虫结构、种群数量、优势类群及多样性均有所改变（Ramzan *et al.*，2021）。

研究表明，生物多样性可以增强群落生物量的生产及稳定性（Pennekamp *et al.*，2018；Chisholm and Dutta，2023），但对不同生境成员的影响是独立的（Cardinale *et al.*，2013）。在动物生产中，尤其食用昆虫领域，少有研究揭示生物多样性与生产的关系，一方面因为评价指标难以统一，另一方面生产环境受人为调控影响，研究难以总结规律。但是生境中生物群落的生物多样性会在一定程度上影响其内成员的生长繁殖和体内营养水平（Beeren *et al.*，2023）。研究表明，同一寄主植物上的不同食草昆虫之间存在着种间竞争（Wang *et al.*，2023），同时 Bühler 和 Schweiger（2024）发现，一类昆虫对植物的取食会影响植物体内的物质组成，进而影响另一类取食该植物的昆虫的生长性能。豆丹养殖中大豆田生存空间的竞争、天敌对抗、寄生与被寄生以及信息素干扰等昆虫行为对豆丹的生产有显著影响（Cusumano *et al.*，2016；Cheng *et al.*，2023）。这些种间行为可能间接地影响昆虫体内各种营养物质的代谢与储存，使昆虫体内的营养成分含量发生变化。田间昆虫物种丰富度与种间行为会影响昆虫营养物质积累，是食用昆虫生产不可或缺的一环。

昆虫体内含有丰富的氨基酸，主要存在于血淋巴内，其含量高于人体血液和大豆。血淋巴中高浓度的氨基酸被作为是昆虫的生物化学特征之一（Zhao *et al.*，2021）。昆虫血淋巴内的氨基酸含量受环境的影响而变化，随着温度的降低，寄生蜂 *Nasonia vitripennis* 进入滞育状态，其体内的脯氨酸含量随之升高，以提高寄生蜂的耐寒性（Li *et al.*，2015）；亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* 低温滞育时，其体内丙氨酸的含量随着氧气浓度的降低而增加（Goto *et al.*，2001）；棉蚜 *Aphis gossypii* 在被棉刺蚜茧蜂 *Binodoxys communis* 寄生后其体内的酪氨酸含量逐渐增加（Xue *et al.*，2022）。因此，当豆丹所处环境中的昆虫群落发生改变，昆虫活动及其种群数量是否会造成豆丹体内各营养组分含量发生变化？由此分析豆丹体内各营养物质含量与不同豆丹养殖模式的相关性。

本研究调查了网棚养殖法和露天养殖法大

豆田内昆虫群落多样性与种群结构，并测定不同养殖方式下豆丹蛋白质、氨基酸与脂肪酸含量的差异，分析不同豆丹养殖模式与豆丹营养成分之间的相关性，揭示豆丹各营养成分对昆虫群落多样性的响应机制，为人工养殖高产量与高品质豆丹提供参考数据。

1 材料与方法

1.1 研究地点

本研究以江苏省淮安市涟水县徐集乡（119.38174°N，33.72221°E）与南集镇（119.46779°N，33.73892°E）的瑞豆 1 号大豆田作为研究地点。选取相距 10 km 的两块大豆田以降低互相干扰的可能性，所选取的大豆田温度、气候、土壤条件、周边植被条件均保持一致，由此降低环境及生物群落对于实验的影响。两地大豆田同时进行取样，其中徐集大豆田采用网棚养殖法，网棚材质选用 40 目防虫网，利用支架覆盖于大豆田正上方和周围，网棚占地面积 640 m^2，长 80 m，宽 8 m，高 3 m；南集大豆田采用露天养殖法，大豆田上方无任何遮挡物，面积与网棚养殖法大豆田一致。于 2023 年 4 月 28 日进行挂卵，每个卵袋中装有 60 粒豆丹卵，用订书钉固定于大豆叶片背面，共计挂卵 20 000 粒。针对两地大豆田分别设定 5 个采样点，于挂卵前 10 d、挂卵当天、挂卵后 10、20 和 30 d 分别对这 5 个采样点依次采样。

1.2 大豆田昆虫群落收集与调查

于 2023 年 4 月 18 日-6 月 17 日，选取调查点布置马氏网，用 95%乙醇收集昆虫，每个调查点每隔 10 d 进行 1 次昆虫采集，共进行 5 次采样。将采集的昆虫带回实验室采用形态学鉴定方法分类计数制作标本，并对昆虫多样性指数进行对比分析（董会等，2017）。

2023 年 6 月于徐集、南集大豆田内采用五点取样法各采集 5 只同一批次体态大小一致的老熟豆丹，用去离子水洗净虫体后放入 50 mL 离心管内，放入液氮中速冻，整只储存于 - 80 ℃环境中。用于豆丹体内蛋白质、氨基酸、脂肪酸含量的测定，1 头幼虫为 1 个样本，每组重复 5 次。

1.3 豆丹营养成分分析方法

1.3.1 蛋白质含量测定方法 采用凯氏定氮法测定蛋白质含量。称取 0.2 g 样品于消化管中，加入 0.4 g 硫酸铜、6 g 硫酸钾及 12 mL 硫酸于消化炉进行消化，待消化炉温度达到 420 ℃、消化管中的液体呈蓝绿色并转为澄清透明后继续消化 1 h，取出冷却后加入 20 mL 无菌水，放冷，于自动凯氏定氮仪（K9840，济南海能仪器股份有限公司）上蒸馏 7 min，接收瓶中加指示剂混合溶液 1-2 滴和 10 mL 硼酸溶液（20 g/L），待接收蒸馏液至 200 mL 后用盐酸标准溶液（0.1 mol/L）滴定，终点为浅灰红色，同时做试剂空白。根据公式（5）计算豆丹体内蛋白质的含量，换算系数为 6.25。

1.3.2 氨基酸含量测定方法 通过氨基酸自动分析仪（LA8080，日本株式会社日立高新技术科学）测定豆丹体内 17 种水解氨基酸（天冬氨酸 Aspartic acid、苏氨酸 Threonine、丝氨酸 Serine、谷氨酸 Glutamic acid、甘氨酸 Glycine、丙氨酸 Alanine、胱氨酸 Cystine、缬氨酸 Valine、蛋氨酸 Methionine、异亮氨酸 Isoleucine、亮氨酸 Leucine、酪氨酸 Tyrosine、苯丙氨酸 Phenylalanine、赖氨酸 Lysine、组氨酸 Histidine、精氨酸 Arginine、脯氨酸 Proline）含量。采用高效液相色谱法（HPLC）测定豆丹体内色氨酸（Tryptophan）含量，采用 Agilent C_{18}（4.6 mm×150.0 mm×5.0 μm）色谱柱，设置柱温为 35 ℃，进样量 10.0 μL 流速为 1.2 mL/min，波长为 280 nm。

1.3.3 脂肪酸含量测定方法 利用气相色谱仪质谱仪（Trace1310 ISQ，Thermo）测试豆丹体内脂肪酸的含量，选用 TG-FAME（50.00 m×0.25 mm×0.20 μm）色谱柱，进样温度设为 260 ℃，载气流速 0.63 mL/min，分流比 100∶1。质谱条件设为离子源温度 280 ℃，传输线温度 240 ℃，溶剂延迟时间 4.0 min，离子源为 EI 源，电子能量 70 eV。升温程序设置为 80 ℃保持

1 min，以 20 ℃/min 的速率升温至 160 ℃，保持 1.5 min，再以 5 ℃/min 的速率升温至 230 ℃，保持 6 min（何金明等，2023）。

1.4　数据分析

采用 α 多样性指数计算分析大豆田内昆虫群落多样性，包括 Shannon-Wiener 多样性指数（H）、Poelou 均匀度指数（E）、Margakef 丰富度指数（D）和 Simpson 优势度指数（C），计算公式如下：

$$H=-\sum_{i=1}^{S}P_i\times\ln(P_i)P_i=N_i/N \quad (1)$$

$$E=H/H_{\max}\ H_{\max}=\ln S \quad (2)$$

$$D=(S-1)/\ln N \quad (3)$$

$$C=\sum_{i=1}^{S}(P_i)^2\ P_i=N_i/N \quad (4)$$

在式中，S 为物种数，N_i 为样地第 i 个物种的个体数；N 为样地内所有物种的个体数；P_i 为第 i 种个体数占总个体数 N 的比例，即 $P_i=N_i/N$。

$$\text{蛋白质含量}=\frac{(\text{试样消耗盐酸量}-\text{空白消耗盐酸量})\times0.100\times0.010}{\text{样品量}\times\text{消化液体积}/100}\times 6.250\times100 \quad (5)$$

试验数据均采用 Microsoft Excel 2019 进行整理，利用 IBM SPASS Statistics20.0 软件进行统计分析，用 GraphPad Prism 9.5.0 软件和 Origin 2024 软件对营养物质数据、多样性指数作图。利用 t 检验（Student’s t-test）比较徐集、南集两地豆丹体内氨基酸组分和脂肪酸组分的差异及显著性（$P<0.05$），利用 Pearson 相关性系数分析营养物质与生物多样性之间的相关性。

2　结果与分析

2.1　两种养殖方式下大豆田内昆虫群落组成

网棚养殖和露天养殖大豆田的 10 个采样点内共计捕获 17 873 只昆虫，隶属于 9 目 40 科，分别为鞘翅目、膜翅目、鳞翅目、双翅目、半翅目、直翅目、脉翅目、缨翅目和革翅目，共计 46 种昆虫（表 1）。其中网棚养殖大豆田内共计捕获 6 805 只，隶属 8 目 28 科；露天养殖法大豆田内共计捕获 11 068 只，隶属 9 目 39 科。生物多样性统计学分析表明，露天养殖法大豆田的昆虫资源更为丰富（表 1）。两地捕获数量及科数最多的均为双翅目；捕获数量第二高的均为缨翅目，但其在科数上却远低于鞘翅目、鳞翅目、膜翅目和半翅目。两地豆田中双翅目、鳞翅目、膜翅目和半翅目昆虫无论是种数还是科数均远高于其他昆虫，缨翅目虽仅有一科，但种群数量庞大。两地大豆田内采集数量最多的前 5 个目中有 4 种目表现为一致，不同的那一目在网棚养殖大豆田中表现为鳞翅目，在露天养殖大豆田中表现为鞘翅目，同时两地大豆田中鞘翅目昆虫的数量存在显著差异（$P<0.05$；图 1）。网棚养殖法大豆田内并未采集到直翅目昆虫，脉翅目、鞘翅目和革翅目采集的数量也极为稀少（表 1）。

2.2　两种养殖方式下大豆田内昆虫群落多样性分析

与网棚养殖法相比，露天养殖法大豆田的 Shannon-Wiener 多样性指数显著升高了 17.9%（$P<0.001$），Margalef 丰富度指数显著升高了 60.8%（$P<0.001$），露天养殖法大豆田的 Simpson 优势度指数显著降低了 53.8%（$P<0.05$）（图 2：A-D）。

2.3　两种养殖方式下豆丹体内营养组分分析

与网棚养殖法相比，露天养殖的豆丹体内蛋白质含量显著升高了 8.1%（$P<0.01$）（图 3：A），总氨基酸和总脂肪酸含量无明显差异（$P>0.05$）（图 3：B，C）。与网棚养殖法相比，在检测的 18 种氨基酸中，豆丹体内丝氨酸、丙氨酸、色氨酸、甘氨酸和组氨酸含量分别显著升高了 34.5%（$P<0.001$）、17.4%（$P<0.01$）、42.9%（$P<0.01$）、17.6%（$P<0.05$）和 15.4%（$P<0.05$）（表 2）。35 种脂肪酸中，露天养殖豆丹体内十五碳酸[C15:0，（0.01±0.00）g/100 g]和棕榈酸[C16:0，0.86±0.18）g/100 g]含量显著高于网棚养殖的 14.8%（$P< 0.001$）和 34.4 %（$P<0.01$）（表 3）。

表 1 两种养殖方式下大豆田内昆虫群落的种类和数量比较

Table 1 Comparison of insect community composition and abundance in soybean fields under two breeding methods

目（科）Order (family)	个体数 Individual number		个体比例（%）Individual proportion (%)		物种数 Species number		物种比例（%）Species proportion (%)	
	网棚法 Net shed culture	露天法 Open-air farming	网棚法 Net shed culture	露天法 Open-air farming	网棚法 Net shed culture	露天法 Open-air farming	网棚法 Net shed culture	露天法 Open-air farming
鞘翅目 Coleoptera	22	219	0.32	1.98	5	8	15.625	17.778
瓢虫科 Coccinellidae	18	127	0.27	1.14	2	3	6.250	4.444
叶甲科 Chrysomelidae	1	49	0.01	0.44	1	1	3.125	2.222
芫菁科 Meloidae	0	2	0.00	0.02	0	1	0.000	2.222
龟甲科 Cassididae	1	0	0.01	0.00	1	0	3.125	0.000
金龟子科 Scarabaeidae	0	1	0.00	0.01	0	1	0.000	2.222
鳃金龟科 Melolonthidae	0	3	0.00	0.03	0	1	0.000	2.222
花蚤科 Mordellidae	2	3	0.03	0.03	1	1	3.125	2.222
肖叶甲科 Eumolpidae	0	34	0.00	0.31	0	1	0.000	2.222
膜翅目 Hymenoptera	212	282	3.12	2.55	4	5	12.500	11.111
泥蜂科 Sphecidae	7	33	0.10	0.30	1	1	3.125	2.222
胡蜂科 Vespidae	0	1	0.00	0.01	0	1	0.000	2.222
姬蜂科 Ichneumonidae	64	48	0.94	0.43	1	1	3.125	2.222
小蜂总科 Chalcidoidea	139	172	2.04	1.55	1	1	3.125	2.222
茧蜂科 Braconidae	2	28	0.03	0.25	1	1	3.125	2.222
鳞翅目 Lepidoptera	50	217	0.73	1.96	6	9	18.750	20.000
麦蛾科 Gelechiidae	21	128	0.31	1.16	3	3	9.375	6.667
夜蛾科 Noctuidae	1	19	0.01	0.17	1	1	3.125	2.222
草螟科 Crambidae	23	57	0.34	0.51	1	1	3.125	2.222
螟蛾科 Pyralidae	0	3	0.00	0.03	0	1	0.000	2.222
尺蛾科 Geometridae	5	1	0.07	0.01	1	1	3.125	2.222
粉蝶科 Pieridae	0	8	0.00	0.07	0	1	0.000	2.222
天蛾科 Sphingidae	0	1	0.00	0.01	0	1	0.000	2.222
双翅目 Diptera	5 414	9 390	79.56	84.84	12	16	37.500	35.556
果蝇科 Drosophilidae	1 388	3 111	20.40	28.11	2	2	6.250	4.444
蠓科 Ceratopogonidae	1 328	1 296	19.52	11.71	1	1	3.125	2.222
长足虻科 Dolichopodidae	239	1 033	3.51	9.33	1	1	3.125	2.222
食蚜蝇科 Syrphidae	2	44	0.03	0.40	0	1	0.000	2.222
蝇科 Muscidae	1 012	1 496	14.87	13.52	2	2	6.250	4.444
粪蝇科 Scathophagidae	425	621	6.25	5.61	1	1	3.125	2.222
花蝇科 Anthomyiidae	17	30	0.25	0.27	1	1	3.125	2.222
食虫虻科 Asilidae	0	2	0.00	0.02	0	2	0.000	4.444

续表 1 (Table 1 continued)

目（科） Order (family)	个体数 Individual number		个体比例（%） Individual proportion (%)		物种数 Species number		物种比例（%） Species proportion (%)	
	网棚法 Net shed culture	露天法 Open-air farming	网棚法 Net shed culture	露天法 Open-air farming	网棚法 Net shed culture	露天法 Open-air farming	网棚法 Net shed culture	露天法 Open-air farming
蚊科 Culicidae	479	943	7.04	8.52	2	2	6.250	4.444
大蚊科 Tipulidae	0	1	0.00	0.01	0	1	0.000	2.222
摇蚊科 Chironomidae	14	260	0.21	2.35	1	1	3.125	2.222
蚋科 Simuliidae	510	553	7.49	5.00	1	1	3.125	2.222
半翅目 Hemiptera	47	220	0.69	1.99	2	3	6.250	6.667
蝽科 Pentatomidae	0	1	0.00	0.01	0	1	0.000	2.222
叶蝉科 Cicadellidae	45	204	0.66	1.84	1	1	3.125	2.222
飞虱科 Delphacidae	2	15	0.03	0.14	1	1	3.125	2.222
直翅目 Orthoptera	0	6	0.00	0.05	0	1	0.000	2.222
剑角蝗科 Acrididae	0	6	0.00	0.05	0	1	0.000	2.222
脉翅目 Neuroptera	3	14	0.04	0.13	1	1	3.125	2.222
草蛉科 Chrysopidae	3	14	0.04	0.13	1	1	3.125	2.222
缨翅目 Thysanoptera	1 056	719	15.52	6.50	1	1	3.125	2.222
蓟马科 Thripidae	1 056	719	15.52	6.50	1	1	3.125	2.222
革翅目 Dermaptera	1	1	0.01	0.01	1	1	3.125	2.222
蠼螋 Dermaptera	1	1	0.01	0.01	1	1	3.125	2.222

表中个体比例为该科、目内昆虫数量占田内昆虫总数的百分比（%）；物种比例为该科、目内昆虫种数占田内昆虫总种数的百分比（%）。The individual proportion in the table represents the percentage (%) of insects within a family or order out of the total number of insects in the field; The species proportion represents the percentage (%) of insect species within a family or order out of the total number of insect species in the field.

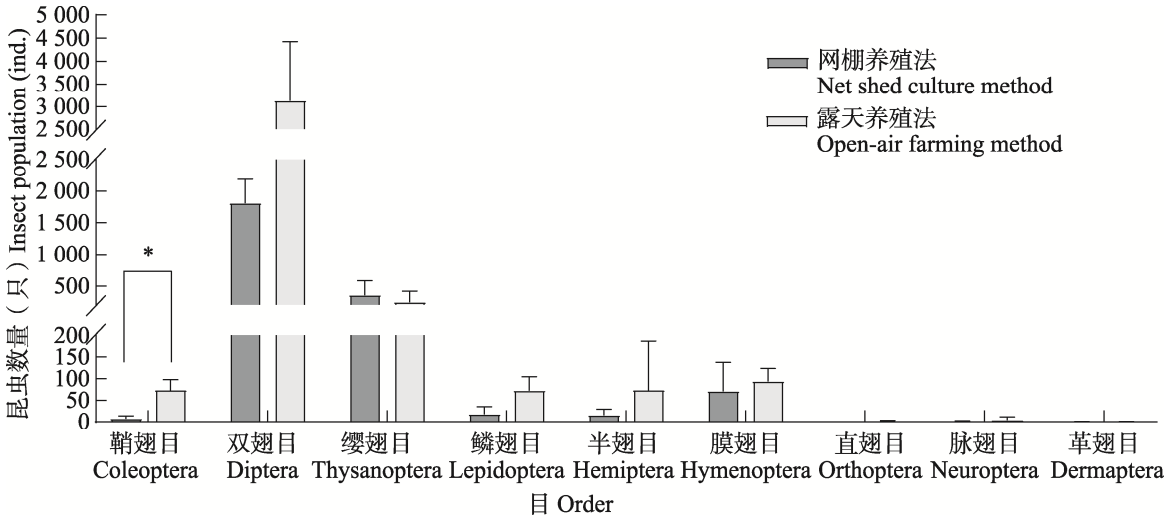

图 1　两种养殖方式下大豆田内不同种类昆虫数量比较

Fig. 1　Abundance of different insect species in soybean fields under two breeding methods

图中星号表示差异显著（*P<0.05，独立样本 t 检验）。

The asterisk indicates significant difference (*P<0.05, independent samples t-test).

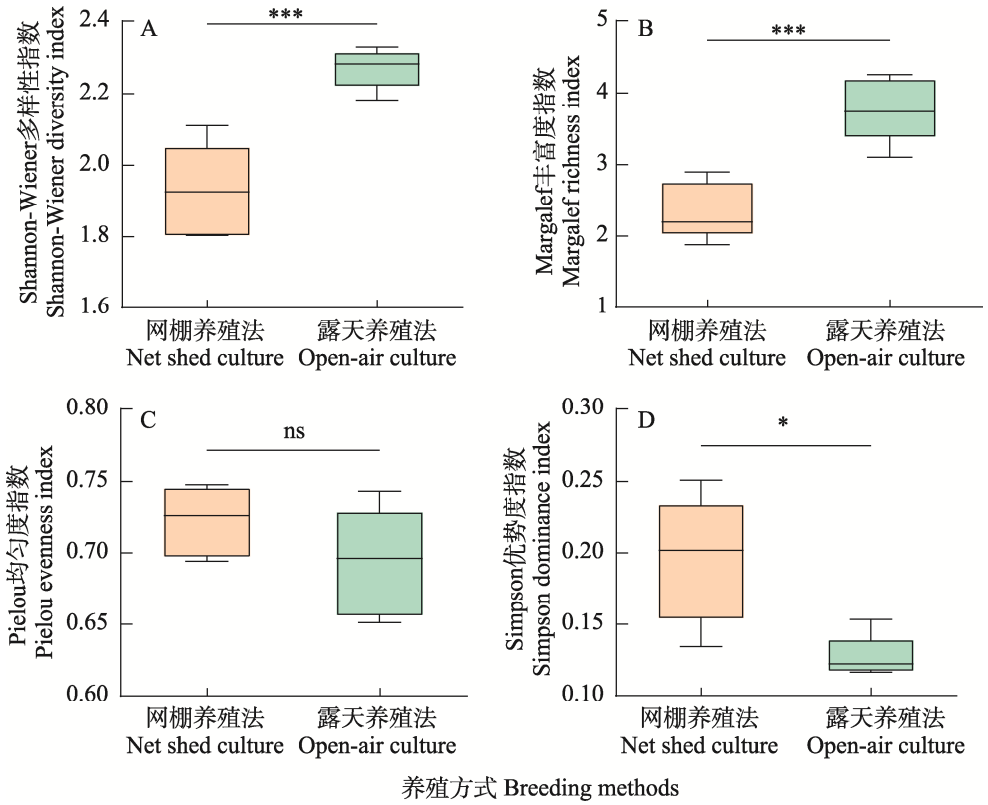

图 2　两种养殖方式下大豆田内昆虫群落多样性分析

Fig. 2　Analysis of insect community diversity in soybean fields under two breeding methods

A. 多样性比较；B. 丰富度比较；C. 均匀度比较；D. 优势度比较。图中星号表示差异显著（*P<0.05；***P<0.001，独立样本 t 检验），ns 表示差异不显著（P>0.05，独立本 t 检验）。图 3 同。

A. Comparison of diversity; B. Comparison of species richness; C. Comparison of species evenness; D. Comparison of dominance. The asterisk indicates significant difference (*P<0.05; ***P<0.001, independent samples t-test），ns indicates no difference (P>0.05, independent samples t-test). The same for Fig. 3.

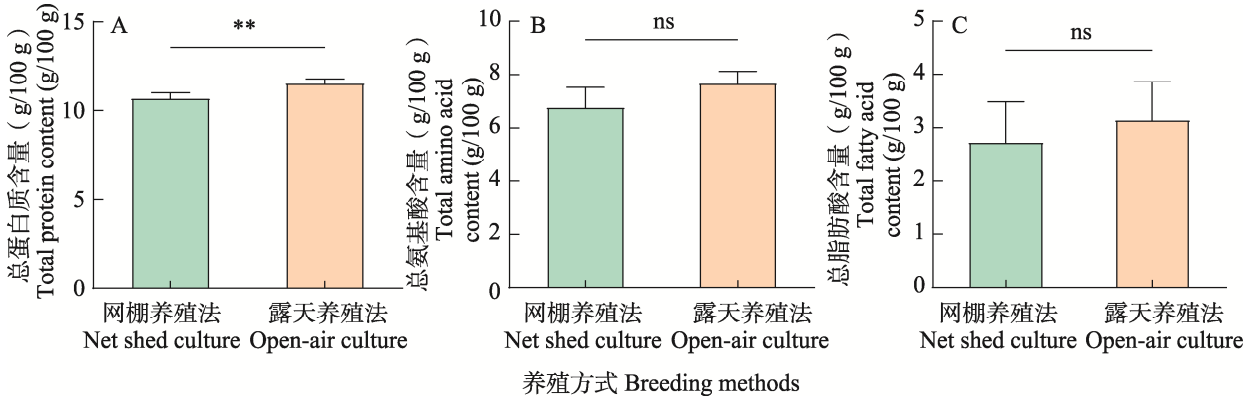

图 3　两种养殖方式下豆丹体内蛋白质、总氨基酸和总脂肪酸含量比较

Fig. 3　Comparison of protein, total amino acid, and total fat content in *Clanis bilineata tsingtauica* under two breeding methods

A. 总蛋白质含量比较；B. 总氨基酸含量比较；C. 总脂肪酸含量比较。

A. Comparison of total protein content; B. Comparison of total amino acid content; C. Comparison of total fatty acid content.

表 2　两种养殖方式下豆丹体内氨基酸含量比较

Table 2　Comparison of amino acid content in *Clanis bilineata tsingtauica* under two breeding methods

氨基酸组分（g/100 g）Amino acid components (g/100 g)	养殖方式 Breeding methods		自由度 *df* Degree of freedom	*P* 值 *P*-value
	网棚法 Net shed culture	露天法 Open-air farming		
天冬氨酸 Asp	0.68±0.09	0.76±0.05	4	0.11
苏氨酸 Thr	0.33±0.04	0.37±0.02	4	0.11
丝氨酸 Ser	0.29±0.03	0.39±0.02***	4	0.00
谷氨酸 Glu	0.86±0.10	0.95±0.08	4	0.15
甘氨酸 Gly	0.34±0.03	0.40±0.03*	4	0.02
丙氨酸 Ala	0.46±0.03	0.54±0.04**	4	0.01
胱氨酸 Cys	0.05±0.01	0.06±0.01	4	0.06
缬氨酸 Val	0.43±0.06	0.49±0.03	4	0.09
蛋氨酸 Met	0.06±0.01	0.06±0.01	4	0.82
异亮氨酸 IIe	0.34±0.05	0.38±0.03	4	0.11
亮氨酸 Leu	0.52±0.07	0.58±0.04	4	0.14
酪氨酸 Tyr	0.35±0.06	0.39±0.03	4	0.25
苯丙氨酸 Phe	0.37±0.06	0.43±0.03	4	0.08
赖氨酸 Lys	0.54±0.07	0.60±0.04	4	0.11
组氨酸 His	0.26±0.02	0.30±0.02*	4	0.01
精氨酸 Arg	0.48±0.05	0.53±0.04	4	0.12
脯氨酸 Pro	0.38±0.04	0.42±0.01	4	0.09
色氨酸 Trp	0.07±0.02	0.10±0.01**	4	0.01

表中星号表示差异显著（*P<0.05；**P<0.01；***P<0.001，独立样本 t 检验）。下表同。

The asterisk indicates significant difference (*P<0.05; **P<0.01; ***P<0.001, independent samples t-test). The same below.

2.4　两种养殖方式下大豆田内昆虫群落多样性与豆丹营养组分相关性分析

通过两种养殖方式下大豆田内昆虫群落多样性指数与豆丹营养组分含量的相关性分析，发现 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数与豆丹体内蛋白质、5 种氨基酸[丝氨酸（Serine，Ser）、甘氨酸（Glycine，Gly）、丙氨酸（Alanine，Ala）、组氨酸（Histidine，His）、色氨酸（Tryptophan，Trp）]、2 种脂肪酸[十五碳酸（n-Pentadecanoic acid，n-Pen）和棕榈酸（Palmitic acid，Pal）]均呈正相关（图 4）。

表 3　两种养殖方式下豆丹体内脂肪酸含量比较

Table 3　Comparison of fatty acid content in *Clanis bilineata tsingtauica* in net sheds culture method and in the open air culture method

脂肪酸组分（g/100 g）Fatty acid components（g/100 g）		养殖方式 Breeding methods		自由度 *df* Degree of freedom	*P* 值 *P*-value
名称 Name	化学式 Chemical formula	网棚法 Net shed culture	露天法 Open-air farming		
肉豆蔻酸 Myristic acid	C14:0	0.01±0.00	0.01±0.00	4	0.75
十五碳酸 n-Pentadecanoic acid	C15:0	0.01±0.00	0.01±0.00*	4	0.02
棕榈酸 Palmitic acid	C16:0	0.64±0.09	0.86±0.18*	4	0.04
棕榈油酸 Palmitoleic acid	C16:1	0.02±0.00	0.02±0.00	4	0.70

续表 3 (Table 3 continued)

脂肪酸组分（g/100 g）Fatty acid components（g/100 g）		养殖方式 Breeding methods		自由度 *df* Degree of freedom	*P* 值 *P*-value
名称 Name	化学式 Chemical formula	网棚法 Net shed culture	露天法 Open-air farming		
十七碳酸 Heptadecanoic acid	C17:0	0.02±0.00	0.02±0.00	4	0.88
硬脂酸 Stearic acid	C18:0	0.17±0.02	0.19±0.03	4	0.18
反式油酸 Elaidic acid	C18:1n9c	0.50±0.11	0.64±0.14	4	0.13
反式亚油酸 Linolelaidic acid	C18:2n6c	0.29±0.11	0.30±0.12	4	0.87
花生酸 Eicosanoic-12,12,13,13-d4-acid	C20:0	0.02±0.00	0.02±0.00	4	0.12
γ-亚麻酸 Gamma linolenic Acid	C18:3n6	0.01±0.00	0.01±0.00	4	0.43
二十碳一烯酸 Eicosenoicacid	C20:1	0.99±0.58	1.02±0.53	4	0.95
二十二碳酸 Behenic acid	C22:0	0.02±0.00	0.02±0.00	4	0.11
二十碳三烯酸 Eicosatrienoic acid	C20:3n3	0.01±0.00	0.01±0.00	4	0.41
芥酸 Erucic acid	C22:1n9	0.01±0.00	0.01±0.00	4	0.81
二十三碳酸 Tricosanoic acid	C23:0	0.01±0.00	0.01±0.00	4	0.33
二十四碳酸 Tetracosanoic acid	C24:0	0.01±0.00	0.01±0.00	4	0.65

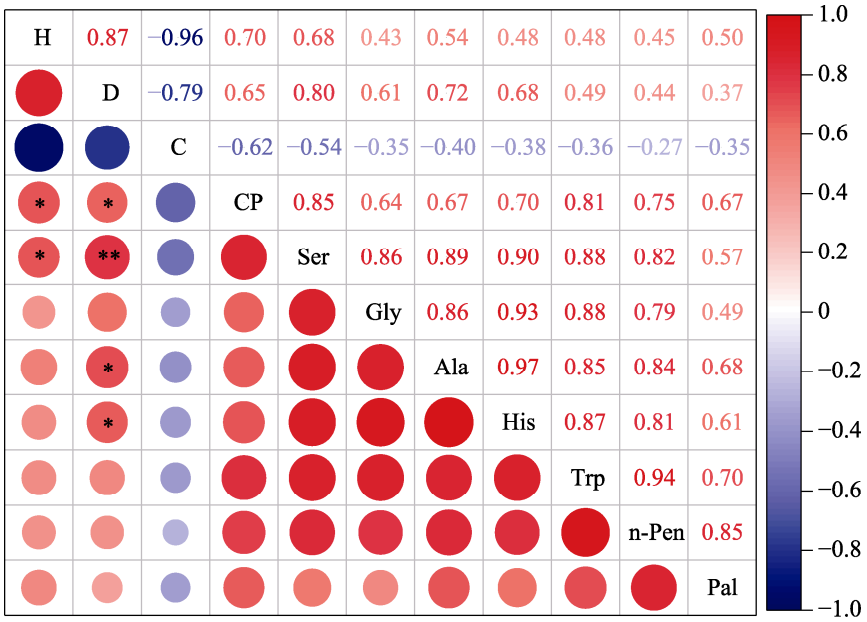

图 4　大豆田昆虫多样性指数与豆丹蛋白质、氨基酸和脂肪酸的相关性

Fig. 4　Correlation between insect diversity indices in soybean fields and the content of protein, amino acids, and fatty acids in *Clanis bilineata tsingtauica*

H：Shannon-Wiener 多样性指数；D：Margalef 丰富度指数；C：Simpson 优势度指数；CP：粗蛋白质；Ser：丝氨酸；Gly：甘氨酸；Ala：丙氨酸；His：组氨酸；Trp：色氨酸；n-Pen：十五碳酸；Pal：棕榈酸。对角线上方数字表示相关系数；对角线下圆由红变白表示正相关性逐渐降低，由白变蓝表示负相关性逐渐增强。图中星号表示差异显著（*P<0.05；**P<0.01；***P<0.001，皮尔逊相关系数）。

H: Shannon-Wiener diversity index; D: Margalef richness index; C: Simpson dominance index; CP: Crude protein; Ser: Serine; Gly: Glycine; Ala: Alanine; His: Histidine; Trp: Tryptophan; n-Pen: Pentadecanoic acid; Pal: Palmitic acid. The numbers above the diagonal represent correlation coefficients. The circles below the diagonal represent the strength and direction of the correlation. A gradient from red to white indicates decreasing positive correlation, while a gradient from white to blue indicates increasing negative correlation. The asterisk indicates significant difference (*P<0.05; **P<0.01; ***P<0.001, Pearson correlation coefficient).

3　讨论

本研究通过调查网棚养殖与露天养殖模式下大豆田内昆虫群落多样性，比较两地豆丹体内营养成分差异，并对 α 多样性指数与豆丹的营养成分进行相关性分析。发现与网棚养殖法大豆田相比，露天养殖法大豆田内的昆虫多样性更高，且豆丹体内的蛋白质、丝氨酸、丙氨酸和组氨酸与 α 多样性指数呈显著正相关。这表明增加大豆田内生物多样性有利于豆丹体内营养成分的积累，在生产实践中，通过适当调整大豆田内昆虫群落结构，可能有助于豆丹的营养价值和品质的提升。

比较网棚养殖法大豆田和露天养殖法大豆田内昆虫种类及数量，除鞘翅目外，二者之间无显著差异，其原因为两地距离接近、生境相似，同时两地大豆田内优势昆虫在大豆田前期具有较大的种群规模，进而即使后期出现了更多的昆虫类群，其占据的优势地位仍保持不变（Mwalusepo *et al.*，2014）。在昆虫群落中，各种昆虫组成了从初级消费者到顶级捕食者的各个营养级，其中鞘翅目、膜翅目昆虫可作为捕食者捕食其他昆虫（Butt *et al.*，2018）。露天养殖大豆田内鞘翅目昆虫数量显著高于网棚养殖大豆田，因鞘翅目昆虫无法通过网棚进入大豆田，减少了网棚养殖大豆田鞘翅目昆虫数量。生态系统中植物群落组成会影响昆虫物种组成及数量（陈秀芝，2012；曹梓渝等，2024），网棚养殖是一个封闭环境，隔绝了一些昆虫与种子的进入，能够降低大豆田内植物群落生物量及多样性。防虫网下易形成不利于昆虫生存的小气候环境（Simon *et al.*，2014）。因此，相对于露天养殖法，网棚养殖法的大豆田昆虫科数、总数及整体丰富度均较低。由于缺少天敌的控制，一部分昆虫种群呈现不均衡的扩大（金泉泉等，2024）。

在昆虫生长发育的过程中，蛋白质至关重要，它不仅参与昆虫身体组织的构成，也为昆虫的生命活动代谢提供能源并行使各种功能（Walski *et al.*，2017）。氨基酸通过合成途径合成蛋白质，其摄入量的增加会上调蛋白质合成途径；当摄入的氨基酸与昆虫所需氨基酸一致时，昆虫体内蛋白质的质量会显著提高（Ma *et al.*，2022）。本研究结果表明，露天养殖豆丹体内总蛋白质含量显著高于网棚养殖，推测这与豆丹体内氨基酸含量相关，由于露天养殖豆丹体内总氨基酸含量高于网棚养殖，使得更多的氨基酸参与蛋白质合成途径，总蛋白质含量也更高（Qian *et al.*，2023）。

研究表明，昆虫生长活动过程中体内氨基酸会随着周围环境（如昆虫群落多样性、温度、氧气浓度等）的变化发生波动，以适应不同的生存环境（Renault *et al.*，2006；Koštál *et al.*，2011）。露天养殖豆丹体内总氨基酸含量高于网棚养殖的豆丹，其中丝氨酸、丙氨酸和组氨酸含量显著高于网棚养殖。Andersen（2007）发现丙氨酸与组氨酸参与昆虫表皮角质层的形成，推测与豆丹为抵御其他昆虫的侵扰、降低其被寄生的概率有关。另一种可能的解释是，更高的多样性环境导致了更高的种间竞争和生存压力，为应对此压力，豆丹可能需要合成更多的信息素进行防御和警示（Aldrich *et al.*，1997）。Tillman 等（1999）发现昆虫体内部分信息素由氨基酸作为前体物质合成，其中芳香族氨基酸在鞘翅目和鳞翅目昆虫体内用于合成信息素，而亮氨酸可以为鳞翅目昆虫合成信息素提供碳骨架。前期研究表明，豆丹体内苏氨酸含量与大豆叶片中谷氨酸和半胱氨酸含量呈正相关，大豆叶的谷氨酸与幼虫的谷氨酸和苯丙氨酸呈正相关（Qian *et al.*，2023）。本研究中露天养殖大豆田内昆虫种群数量高，促使昆虫种间形成竞争，豆丹大量取食大豆叶片，从叶片中获得大量的氨基酸储存在体内，促进体内氨基酸含量升高（Holdbrook *et al.*，2024）。

脂肪酸对于昆虫的生命活动同样重要。脂肪酸可结合蛋白参与黑腹果蝇 *Drosophila melanogaster* 几丁质的合成；飞行中昆虫会消耗线粒体内的脂肪酸，以此为昆虫的飞行提供能量；脂肪酸同样也可以作为前体物质，为昆虫的信息素合成提供原料（Koutroumpa and Jacquin-Joly，2014；Chen *et al.*，2022）。在检测出的 16 种脂肪酸中，两种养殖方式下豆丹体内的十

五碳酸和棕榈酸存在显著性差异，但目前国内外关于十五碳酸和棕榈酸对于昆虫有何功能机制尚不明确，推测这与豆丹的某些活动或受其他昆虫影响有关。

本研究的结果表明，与网棚养殖法相比，露天养殖法大豆田内昆虫群落生物多样性水平更为丰富，很有可能会相应地提升豆丹营养品质。网棚养殖法虽保护了豆丹免受鸟类和天敌的袭害，确保了豆丹产量的稳定，但同样降低了大豆田内昆虫群落的多样性，相较于露天养殖法，网棚养殖方式下豆丹所含的蛋白质、氨基酸、脂肪酸含量均有所降低，尤其是丝氨酸、丙氨酸和组氨酸。两豆田内昆虫数量存在较大差异，其中露天养殖大豆田内鞘翅目昆虫显著高于网棚养殖大豆田。因此，在保证豆丹产量的前提上，未来可探索一种更优化养殖策略。例如，适当向网棚内引入特定、无害或有益的鞘翅目昆虫，以期在可控范围内提高昆虫多样性和丰富度，增强豆丹竞争取食行为，从而提高豆丹营养品质。本研究结果为豆丹健康养殖提供了理论依据和技术参考，为豆丹营养物质开发与利用奠定了理论基础。

参考文献 (References)

Aldrich JR, Leal WS, Nishida R, Khrimian A, Lee CJ, Sakuratani Y, 1997. Semiochemistry of aposematic seed bugs. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 84(2): 127–135.

Andersen SO, 2007. Involvement of tyrosine residues, N-terminal amino acids, and β-alanine in insect cuticular sclerotization. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 37(9): 969–974.

Bühler A, Schweiger R, 2024. Influence of previous infestation of wheat leaves and ears by *Sitobion avenae* on interaction with *Rhopalosiphum padi*. *Insects*, 15(11): 871.

Butt A, Qurat-Ul-Ain, Rehman K, Khan MX, Hesselberg T, 2018. Bioaccumulation of cadmium, lead, and zinc in agriculture-based insect food chains. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(12): 698.

Beeren CV, Pohl S, Fikácek M, Kronauer DJC, Tishechkin AK, Yamamoto S, Chani-Posse M, Zyla D, Tokareva A, Maruyama M, Hall WE, Sandoval LP, Kronauer DJC, 2023. Army ant middens-home and nursery of a diverse beetle fauna. *Ecology and Evolution*, 13(9): e10451.

Cardinale BJ, Gross K, Fritschie K, Flombaum P, Fox JW, Rixen C, van Ruijven J, Reich PB, Scherer-Lorenzen M, Wilsey BJ, 2013. Biodiversity simultaneously enhances the production and stability of community biomass, but the effects are independent. *Ecology*, 94(8): 1697–1707.

Cusumano A, Peri E, Colazza S, 2016. Interspecific competition/facilitation among insect parasitoids. *Current Opinion in Insect Science*, 14: 12–16.

Chisholm RA, Dutta GT, 2023. A critical assessment of the biodiversity-productivity relationship in forests and implications for conservation. *Oecologia*, 201(4): 887–900.

Chen XM, Feng Y, Chen ZY, 2009. Common edible insects and their utilization in China. *Entomological Research*, 39(5): 299–303.

Cheng JJ, Chen QH, Guo QS, Du YJ, 2023. Moth sex pheromones affect interspecific competition among sympatric species and possibly population distribution by modulating pre-mating behavior. *Insect Science*, 30(2): 501–516.

Chen JQ, Zou X, Zhu WX, Duan YW, Merzendorfer H, Zhao ZW, Yang Q, 2022. Fatty acid binding protein is required for chitin biosynthesis in the wing of *Drosophila melanogaster*. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 149: 103845.

Chen XZ, 2012. Shanghai jiuduansha national wetland nature reserve research on insect diversity and its influencing factors. *Journal of Shanghai Normal University* (*Natural Science Edition*), 41(4): 399–409. [陈秀芝, 2012. 上海九段沙国家级湿地自然保护区昆虫多样性及其影响因素研究. 上海师范大学学报(自然科学版), 41(4): 399–409.]

Cao ZY, Zhang HX, Xiong CY, Cui YF, Wang Y, Shi C, Ban LP, Zhang R, Wei SH, 2024. Effects of different types of steppe fencings on insect diversity. *Journal of Plant Protection*, 51(5): 1189–1202. [曹梓渝, 张海翔, 熊昌宇, 崔艺凡, 王颖, 石淳, 班丽萍, 张蓉, 魏淑花, 2024. 不同类型草原围栏封育对昆虫多样性的影响. 植物保护学报, 51(5): 1189–1202.]

Dong H, Yang GL, Kong LG, Zhang WG, 2017. Collection, production and preservation of insect specimen. *Journal of Laboratory Science*, 20(1): 37–39. [董会, 杨广玲, 孔令广, 张卫光, 2017. 昆虫标本的采集、制作与保存. 实验室科学, 20(1): 37–39.]

Goto M, Sekine Y, Outa H, Hujikura M, Suzuki K, 2001. Relationships between cold hardiness and diapause, and between glycerol and free amino acid contents in overwintering larvae of the oriental corn borer, *Ostrinia furnacalis*. *Journal of Insect Physiology*, 47(2): 157–165.

He JM, Sun ZY, Niu QS, Liu YL, Xu K, 2023. Comparative study on amino acids and fatty acids contents of queens from colony foundation success and colony foundation failure in bumblebees. *Journal of Environmental Entomology*, 45(2): 520–527. [何金明, 孙智禹, 牛庆生, 刘玉玲, 徐凯, 2023. 熊蜂成群与未成群蜂王体内氨基酸和脂肪酸含量的比较研究. 环境昆虫学报, 45(2): 520–527.]

Holdbrook R, Andongma AA, Randall JL, Reavey CE, Tummala Y, Wright GA, Simpson SJ, Smith JA, Wilson K, Cotter SC, 2024. The transition from diet to blood: Exploring homeostasis in the insect haemolymph nutrient pool. *Physiological Entomology*, 49(3): 227–243.

Jin QQ, Xiang Y, Wang H, Xi XQ, 2024. Drosophilidae species

diversity and parasitism rate in different types of green spaces in Xianlin university town, Nanjing, China. *Biodiversity Science*, 32(8): 151–156. [金泉泉, 向颖, 王华, 习新强, 2024. 南京仙林大学城三种绿地类型中果蝇多样性及其被寄生率. 生物多样性, 32(8): 151–156.]

Koutroumpa FA, Jacquin-Joly E, 2014. Sex in the night: Fatty acid-derived sex pheromones and corresponding membrane pheromone receptors in insects. *Biochimie*, 107: 15–21.

Koštál V, Renault D, Rozsypal J, 2011. Seasonal changes of free amino acids and thermal hysteresis in overwintering heteropteran insect, *Pyrrhocoris apterus*. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 160(2): 245–251.

Li XH, Zhang JQ, Ma SS, Zhu LK, Wu SB, Xing GL, 2013. Artificial rearing technology for the larvae of *Clanis bilineata tsingtauica*. *Rural Economy and Science and Technology*, 24(11): 36–37, 28. [李晓红, 张继晴, 马士胜, 朱里科, 吴淑宝, 邢光磊, 2013. 豆天蛾幼虫人工养殖技术. 农村经济与科技, 24(11): 36–37, 28.]

Li YY, Zhang LS, Chen HY, Koštál V, Simek P, Moos M, Denlinger DL, 2015. Shifts in metabolomic profiles of the parasitoid *Nasonia vitripennis* associated with elevated cold tolerance induced by the parasitoid's diapause, host diapause and host diet augmented with proline. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 63: 34–46.

Ma C, Mirth CK, Hall MD, Piper MDW, 2022. Amino acid quality modifies the quantitative availability of protein for reproduction in *Drosophila melanogaster*. *Journal of Insect Physiology*, 139: 104050.

Mwalusepo S, Tonnang HEZ, Massawe ES, Johansson T, Ru BPL, 2014. Stability analysis of competing insect species for a single resource. *Journal of Applied Mathematics*, 14: 285350.

Pennekamp F, Pontarp M, Tabi A, Altermatt F, Alther R, Choffat Y, Fronhofer EA, Ganesanandamoorthy P, Garnier A, Griffiths JI, Greene S, Horgan K, Massie TM, Mächler E, Palamara GM, Seymour M, Petchey OL, 2018. Biodiversity increases and decreases ecosystem stability. *Nature*, 563(7729): 109–112.

Qian L, Chen BJ, Gui FR, Qin Y, Deng P, Liao HJ, 2023. Nutritional and feeding adaptability of *Clanis bilineata tsingtauica* larvae to different cultivars of soybean, (*Glycine max*). *Foods*, 12(8): 1721.

Ramzan U, Majeed W, Rana N, Nargis S, 2021. Occurrence of different insect species with emphasis on their abundance and diversity in different habitats of Faisalabad, Pakistan. *International Journal of Tropical Insect Science*, 41(2): 1237–1244.

Renault D, Bouchereau A, Delettre YR, Hervant F, Vernon P, 2006. Changes in free amino acids in *Alphitobius diaperinus* (Coleoptera: Tenebrionidae) during thermal and food stress. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*: *Molecular & Integrative Physiology*, 143(3): 279–285.

Simon S, Komlan FA, Adjaïto L, Mensah A, Coffi HK, Ngouajio M, Martin T, 2014. Efficacy of insect nets for cabbage production and pest management depending on the net removal frequency and microclimate. *International Journal of Pest Management*, 60(3): 208–216.

Tillman JA, Seybold SJ, Jurenka RA, Blomquist GJ, 1999. Insect pheromones: An overview of biosynthesis and endocrine regulation. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 29(6): 481–514.

Tian H, Zhang YM, 2012. The nutritional components analysis and evaluation of *Clanis bilineata tsingtauica* Mell. *Acta Nutrimenta Sinica*, 34: 289–291.

Wang AY, Peng YQ, Cook JM, Yang DR, Zhang DY, Liao WJ, 2023. Host insect specificity and interspecific competition drive parasitoid diversification in a plant-insect community. *Ecology*, 104(7): e4062.

Walski T, De Schutter K, Van Damme EJM, Smagghe G, 2017. Diversity and functions of protein glycosylation in insects. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 83: 21–34.

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.]

Xue H, Zhao YY, Wang L, Zhu XZ, Zhang KX, Li DY, Ji JC, Niu L, Cui JJ, Luo JY, Gao XK, 2022. Regulation of amino acid metabolism in *Aphis gossypii* parasitized by *Binodoxys communis*. *Frontiers in Nutrition*, 9: 1006253.

Zhao M, Wang CY, Sun L, He Z, Yang PL, Liao HJ, Feng Y, 2021. Edible aquatic insects: Diversities, nutrition, and safety. *Foods*, 10(12): 3033.