技术与方法

一种鳞翅目昆虫卵计数的方法及应用*

訾化彬[1,2**] 冀睿婕[1] 潘语涵[1] 白俊青[3] 李 奎[3]
蔚江涛[3] 郑紫青[1] 杨云秋[1***]

（1. 安徽农业大学，茶树生物学与资源利用国家重点实验室，合肥 230036；2. 咸宁市农业科学院，咸宁 437100；
3. 杨凌核盛辐照技术有限公司，咸阳 712100）

摘 要 【目的】鳞翅目昆虫卵的数量是昆虫科学研究中一个非常重要的指标，但是部分鳞翅目昆虫产卵数量难以统计，亟需一种比较便捷的方法进行统计。【方法】通过对不同数量和重量的灰茶尺蠖 *Ectropis grisescens* 和斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 卵进行测量和分析，得出了卵数和卵重之间的关系并建立对应的线性模型，通过试验验证了卵数-卵重线性模型的精确性、有效性和适用性。【结果】建立的灰茶尺蠖 W^+品系、灰茶尺蠖 W^-品系以及斜纹夜蛾的卵数-卵重线性回归方程分别为 Y=0.077 6X-0.264 0（R^2>0.99）、Y=0.086 5X-0.087 7（R^2>0.99）和 Y=0.053 7X-0.184 5（R^2>0.99），使用 3 组线性拟合方程所预测的卵数相对误差均在 3%以内；通过试验验证，在卵的 1-4 d 使用此方法最为精确，且使用此方法对卵的孵化率没有显著影响（P=0.364）；根据不同品系的卵数-卵重线性拟合差异还可以进行品系区分。【结论】成功开发了一种鳞翅目昆虫卵计数的新方法，建立了卵数-卵重线性模型，为鳞翅目害虫的防治和管理提供了可靠的理论和实际应用基础。

关键词 鳞翅目；卵数；线性模型；品系区分；害虫防治

A method for counting lepidopteran insect eggs and its application

ZI Hua-Bin[1,2**] JI Rui-Jie[1] PAN Yu-Han[1] BAI Jun-Qing[3] LI Kui[3]
WEI Jiang-Tao[3] ZHENG Zi-Qing[1] YANG Yun-Qiu[1***]

(1. State Key Laboratory of Tea Plant Biology and Utilization, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;
2. Xianning Academy of Agricultural Sciences, Xianning 437100, China;
3. Yangling Hesheng Irradiation Technologies Co., Ltd., Xianyang 712100, China)

Abstract **[Aim]** Accurate quantification of lepidopteran insect eggs is crucial for insect research. However, counting eggs in certain Lepidopteran species can be challenging, necessitating a more convenient method. **[Methods]** This study measured and analyzed eggs of varying quantities and weights from *Ectropis grisescens* and *Spodoptera litura*. We established a precise linear model describing the relationship between egg numbers and their weights, validating its accuracy, effectiveness, and applicability through experiments. **[Results]** Linear regression equations for egg number-weight relationships in W^+ and W^-strains of tea, geometrid, and tobacco cutworm were as follows: Y=0.077 6X-0.264 0 (R^2>0.99), Y=0.086 5X-0.087 7 (R^2>0.99), and Y=0.053 7X-0.184 5 (R^2>0.99), respectively. The relative error in egg predictions using these equations remained under 3%. Experimental validation indicated the method had the highest accuracy for egg counts on days 1 to 4, without significantly affecting hatching rates (P=0.364). Moreover, differences in linear fittings between the different strains allowed for practical strain differentiation. **[Conclusion]** This study introduces an innovative method for counting lepidopteran

*资助项目 Supported projects：安徽省优秀科研创新团队项目（2022AH010055）；国家重点研发计划课题（2021YFD1601105）；国家自然科学基金（32371581）

**第一作者 First author，E-mail：zhbhb1212@163.com
***通讯作者 Corresponding author，E-mail：yyq_lyh@ahau.edu.cn

收稿日期 Received：2023-09-08；接受日期 Accepted：2024-01-09

insect eggs and establishes a reliable theoretical and practical foundation for managing and controlling lepidopteran pests.

Key words Lepidoptera; number of eggs; linear model; strain differentiation; pest control

昆虫卵的数量可以反映昆虫种群的数量和生长动态，从而帮助研究人员了解昆虫生物学，如繁殖策略、繁殖周期、繁殖能力等（周康念, 2013；侯国辉, 2022；刘香亚, 2022）；昆虫卵数量在生态学研究中也非常重要，了解昆虫卵数量的变化可以提供关于生态系统健康状况和环境变化的线索，通过长期监测和统计昆虫卵数量，科学家可以评估生态系统的稳定性、生物多样性以及昆虫对干扰和变化的响应（曹振军, 2010；景军等, 2014）；昆虫卵的数量还可以很好反映有害昆虫绿色防控技术的效果，例如昆虫不育技术（SIT）（赵钧等, 2021；Jiang *et al*., 2022a, 2022b）。但是，部分昆虫产卵数量难以统计，尤其是鳞翅目昆虫，不仅单雌产卵数量多、卵粒小，而且喜好在植物枝干缝隙、土面落叶或枝叶间产卵，堆积成卵块。手工计卵数费时费力，主观因素较大，并且会对卵造成一定的损伤。许多研究人员对卵计数的方法也进行了一些研究，目前卵计数的方法大致可分为四类，如称重法、显微镜计数法、鼠标自动计数法和计算机图像处理计数法，但这些方法都有一定的局限性（杨慧赞等, 2011；张杭文等, 2013；刘中文等, 2018；李枫烨等, 2021）。一般称重法只适用于粗略地评估卵的数量，多用于商业交易行为，但在进行严谨、规范的科学实验时，计卵精度通常达不到要求；显微镜计数也需要借助人力进行清点，工作量大、效率低且精确度不高；鼠标自动计数法在提升准确度和效率方面有所帮助，但需要小心操作以避免错误，仍然不够方便；计算机图像处理计数法一般依托于 PS 软件和 ImageJ 软件，具有高精度和高效率的优点，例如 Georgina 等（2021）提出了一种基于图像处理技术的四纹豆象 *Callosobruchus maculatus* 卵自动计数方法，利用基于 ImageJ 软件的图像处理算法对昆虫卵图像进行分割和特征提取，并使用机器学习算法进行自动计数，报道了使用 Fast Filter（快速筛选）方法效率最高，相对于手工计数效率提升了 65.53%，但是计算机图像计数需要大量的样本数据进行训练，该技术有一定的技术壁垒，仍处于发展阶段。目前，想要便捷统计鳞翅目昆虫具体的卵数难度还是相当大的，亟需一种系统、规范的卵计数方法，准确快速地得出相对应鳞翅目昆虫卵的数目，依据数目进行分析，判别其科学指标。

在昆虫学研究中，研究人员常常会将野外采集的鳞翅目昆虫卵带回实验室进行深入研究。此外，研究过程中可能需要培养多种不同品系的昆虫，以解决复杂的科学问题。许多昆虫体内含有共生菌沃尔巴克氏体（*Wolbachia*），*Wolbachia* 对昆虫宿主的繁殖力、生长周期、行为、抗病毒能力、寿命以及营养代谢等方面都有显著影响（Zhang *et al*., 2021）。在相关研究中，常通过使用抗生素精准清除昆虫体内的 *Wolbachia*，从而稳定培育出没有 *Wolbachia* 的昆虫品系，用于特定科学研究（Wangkeeree *et al*., 2022）。例如，*Wolbachia* 去除后昆虫产卵量的变化（Perrot-Minnot *et al*., 2002）、发育时间的变化（Lopez *et al*., 2018）以及行为的改变（Bi and Wang, 2020）。然而，若品系标签发生混淆，将难以准确识别具体品系，对后续试验影响较大。

本研究通过构建灰茶尺蠖 *Ectropis grisescens*、斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 等代表性鳞翅目昆虫卵数与卵重的线性拟合模型，得出一种快速统计卵数的方法，可以有效地解决鳞翅目昆虫产卵结痂、卵小、卵数多而难以统计的问题，并有助于区分不同品系的鳞翅目昆虫。此外，对此方法的准确度、适用性进行评定，为后续昆虫的科学研究提供了一种可靠的手段。

1 材料与方法

1.1 供试虫源与饲养条件

供试虫源：灰茶尺蠖 W^+品系从安徽黄山采集，在实验室稳定继代培养到第 12 代，为未经过处理的正常灰茶尺蠖品系；灰茶尺蠖 W^-品系以灰

茶尺蠖 W^+品系为基础，经定向清除 *Wolbachia* 处理后，在实验室稳定继代培养的体内不含 *Wolbachia* 的品系。斜纹夜蛾从安徽省合肥市大杨镇高新技术农业园试验田的棉花上采集。

饲养条件：灰茶尺蠖用新鲜白毫早品种茶枝饲养，茶枝采自安徽省合肥市大杨镇高新技术农业园；斜纹夜蛾用人工饲料饲养（杨江福等, 2019）。饲养环境为人工气候室（HBQG-50C，常州海博仪器设备有限公司），温度（23±2）℃，相对湿度 75%±5%，光周期 16 L∶8 D。

1.2　试验方法

1.2.1　卵数-卵重模型的构建　在分析天平（AR224CN，上海奥豪斯仪器有限公司）上放置称量纸并清零其重量。在体视显微镜（SMZ-168，北京瑞宏诚科技发展有限公司）下用毛刷手工计数 50、100、200、300、400、500 和 600 粒 1-4 d 鳞翅目昆虫卵（此试验以灰茶尺蠖 W^+品系、灰茶尺蠖 W^-品系、斜纹夜蛾卵为例），依次放入称量纸，用尖嘴镊子清除杂质，在分析天平上称重，待分析天平稳定后记录下数据，将取得的卵称重 3 次并取均值。重复此试验 3 次。

计算各梯度卵数的重量均值后进行线性拟合分析，得到线性回归方程。此时横坐标值对应的是卵数，纵坐标值对应的是卵重，拟合优度 R^2>0.98 方程即可使用。

1.2.2　卵计数后准确度评定　体视显微镜下用毛刷手工计数 120、240 和 360 粒 1-4 d 鳞翅目昆虫卵（此试验以灰茶尺蠖 W^+品系、灰茶尺蠖 W^-品系、斜纹夜蛾卵为例），将取得的卵称重 3 次并取均值，代入对应卵数-卵重线性回归方程（*Y* 代表卵重，单位：mg；*X* 代表卵数，单位：粒），得到预测卵数。将预测卵数（测量值）与真实卵数（真实值）进行误差分析，评估此方法卵计数准确度；绝对误差=｜测量值-真实值｜；相对误差=（绝对误差÷真实值）×100%。

1.2.3　不同卵期所测卵数评定　鳞翅目昆虫卵期一般为 6-7 d，将 1-2 d 卵记为卵前期，3-4 d 卵记为卵中期，5-6 d 卵记为卵后期。以灰茶尺蠖 W^+品系卵为基础，在体视显微镜下用毛刷手工计数 600 粒灰茶尺蠖 W^+品系卵，分别在各个卵期进行称重，称重 3 次取其均值代入灰茶尺蠖 W^+品系卵数-卵重线性回归方程得出卵数。重复此试验 3 次。

1.2.4　卵计数后孵化率测定　以灰茶尺蠖 W^+卵为研究对象，设置 10 组灰茶尺蠖成虫，每组 10 对，分开隔养并产卵。前 5 组通过卵数-卵重线性模型流程称重和计算卵数，在人工气候室中观察统计其孵化率；后 5 组不做处理，孵化后统计幼虫数和未孵化卵数，以评估孵化率。通过显著性差异分析，评估试验方法对孵化率的影响。

1.2.5　一种灰茶尺蠖品系的区分方法　利用灰茶尺蠖 W^+和 W^-品系的卵数-卵重线性模型区分不同品系。取同一品系卵（100-600 粒），称其重量 M。将此分别代入两个线性模型的回归方程，获得对应的预测卵数 X1、X2。预测的卵数 X1、X2 与实际卵数的相对误差≤5%，则判定为相应品系。

1.3　数据处理

所有数据采用 Excel 2019 和 SPSS 25.0 统计软件进行统计与分析，计算卵重均值，采用独立样本 *t* 检验分析卵计数后孵化率的差异显著性；利用 Origin 2021 软件进行卵数与卵重的线性拟合分析并制图。

2　结果与分析

2.1　灰茶尺蠖 W^+品系、灰茶尺蠖 W^-品系、斜纹夜蛾卵数-卵重线性模型的构建

将称得的各个梯度卵数的重量取平均值，进行卵数-卵重的线性拟合分析，以卵数为横坐标 *X*（粒），卵重为纵坐标 *Y*（mg），构建灰茶尺蠖 W^+品系、灰茶尺蠖 W^-品系、斜纹夜蛾卵数-卵重线性模型。其中，灰茶尺蠖 W^+品系卵数-卵重线性回归方程为 Y=0.077 6X-0.264 0，拟合优度 R^2>0.99（图 1：A）；灰茶尺蠖 W^-品系卵数-卵重线性回归方程为 Y=0.086 5X-0.087 7，拟合优度 R^2>0.99（图 1：B）；斜纹夜蛾卵数-

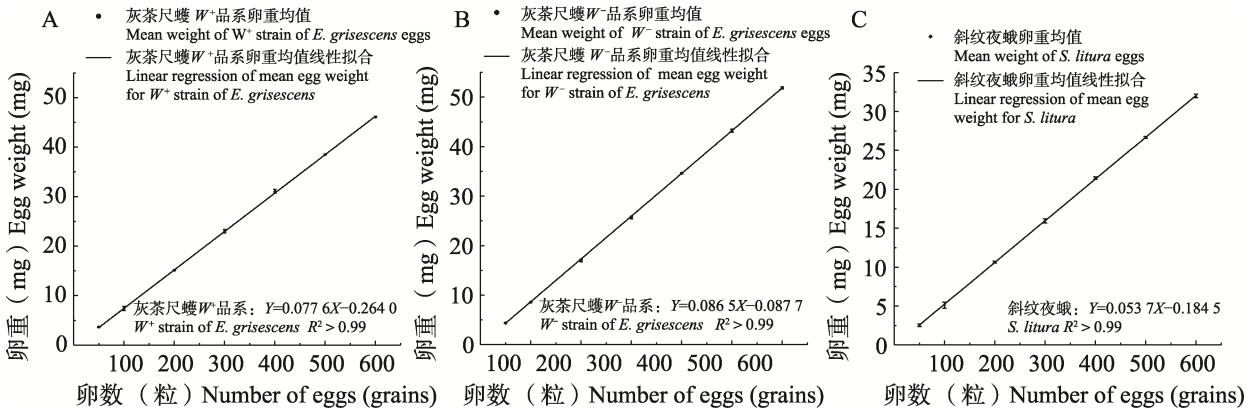

图 1　卵数-卵重线性模型的构建

Fig. 1　Construction of the egg number-egg weight linear model

A. 灰茶尺蠖 W^+品系；B. 灰茶尺蠖 W^-品系；C. 斜纹夜蛾。

A. W^+ strain of *E. grisescens*; B. W^- strain of *E. grisescens*; C. *S. litura*.

卵重线性回归方程为 Y=0.053 7X-0.184 5，拟合优度 R^2>0.99（图 1：C）。3 组线性模型拟合优度均大于 0.99，模型拟合效果较好，能够很好地描述观测数据，说明构建的卵数-卵重线性模型比较可靠。

2.2　灰茶尺蠖 W^+品系、灰茶尺蠖 W^-品系、斜纹夜蛾卵计数后精确度评定

根据相对误差指标评定卵计数后的精确度，一般来说，相对误差在 5%以内的测量结果可认为精确性较好，对后续试验影响不大。

将取得的 120、240 和 360 粒灰茶尺蠖 W^+品系卵称重 3 次取平均值，代入灰茶尺蠖 W^+品系的线性回归方程 Y = 0.077 6X - 0.264 0，得到预测卵数；将预测卵数与真实卵数进行误差分析，结果如表 1 所示。120 粒灰茶尺蠖 W^+品系卵用此方法预测得出的数是 122 粒，与真实卵数相差 2 粒，相对误差为 1.67%。240 粒的相对误差是 1.67%，360 粒的相对误差是 1.94%，相对误差均在 2%以内。由此可得出灰茶尺蠖 W^+品系卵数的测量值与真实值偏差较小，准确性较好，说明本方法具有一定的精度。

将取得的 120、240 和 360 粒灰茶尺蠖 W^-品系卵称重 3 次取平均值，代入灰茶尺蠖 W^-品系的线性回归方程 Y = 0.086 5X - 0.087 7，得到预测卵数；将预测卵数与真实卵数进行误差分析，结果如表 1 所示。120 粒灰茶尺蠖 W^-品系卵用此方法得出的测量值与真实值相差 3 粒，相对误差为 2.50%；240 和 360 粒灰茶尺蠖 W^-品系卵，测得卵数与真实卵数相差 2 粒，相对误差小于 1%。灰茶尺蠖 W^-品系 3 次取样所测卵数的相对误差均在 3%以内，说明本方法准确可行。

取 120、240 和 360 粒斜纹夜蛾卵，将取得

表 1　卵计数后精确度评定

Table 1　Accuracy assessment of egg counting

真实卵数（真实值）（粒）True egg count (true value) (grains)	灰茶尺蠖 W^+品系 W^+ strain of *E. grisescens*			灰茶尺蠖 W^-品系 W^- strain of *E. grisescens*			斜纹夜蛾 *S. litura*		
	测量值 Measurement value	绝对误差 Absolute error	相对误差 Relative error	测量值 Measurement value	绝对误差 Absolute error	相对误差 Relative error	测量值 Measurement value	绝对误差 Absolute error	相对误差 Relative error
120	122	2	1.67%	123	3	2.50%	123	3	2.50%
240	236	4	1.67%	242	2	0.83%	244	4	1.67%
360	367	7	1.94%	358	2	0.56%	360	0	0.00%

的卵称重 3 次并取均值，代入斜纹夜蛾的线性回归方程 Y=0.053 7X - 0.184 5，得到预测卵数，将预测卵数与真实卵数进行误差分析，评估此方法卵计数准确度，结果如表 1 所示。真实卵数 120、240 和 360 粒用此方法所测卵数分别为 123、244 和 360 粒，相对误差对应为 2.50%、1.67%和 0.00%，相对误差均在可接受范围内。

2.3　不同卵期卵数测定

鳞翅目昆虫不同卵期的卵重量差异关系到所采用方法的准确性。取 600 粒灰茶尺蠖 W^+ 品系卵，分别在不同卵期称重。由图 2 可以看出，600 粒卵在前期、中期、后期的重量均值分别是 46.24、46.03 和 45.07 mg，相对应的卵数均值为 599、597 和 584 粒，此试验数据反映的相对误差分别为 0.17%、0.50%和 2.70%。分析结果显示，该方法在卵前期和中期的相对误差较小，后期相对误差较大。因此，在应用此方法时，建议取卵前期或中期进行计数。

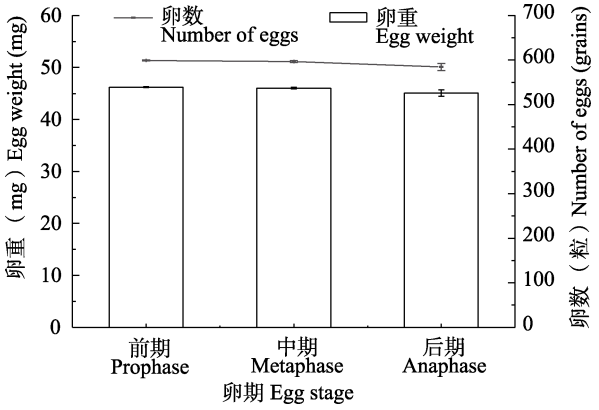

图 2　不同卵期卵数

Fig. 2　Egg counts in different egg stages

2.4　灰茶尺蠖 W^+卵计数后卵存活率测定

将前 5 组卵数-卵重线性模型方法计数和后 5 组手工计数的卵的孵化率进行显著性差异分析，结果如图 3 所示，卵数-卵重线性模型方法计数后孵化率分别为 100.00%、98.87%、100.00%、96.70%和 98.41%；手工计数后孵化率分别为 100.00%、100.00%、100.00%、98.41%和 98.94%。统计分析结果表明，前 5 组和后 5 组的孵化率无显著差异（P=0.364）。说明所采用的卵计数方法对卵的影响小，对卵孵化率没有显著影响。因此，这一方法的应用在统计繁殖力等科学指标时，是可靠的，为其广泛运用提供了有力的理论支持。

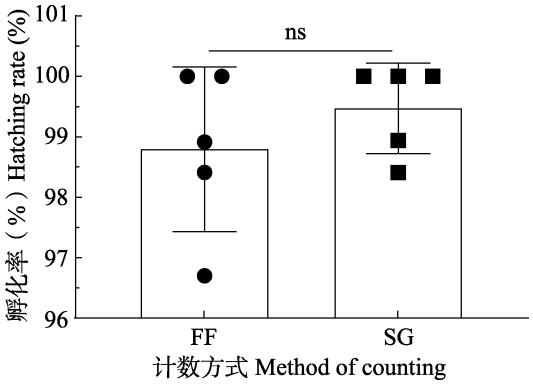

图 3　卵计数后孵化率测定

Fig. 3　Hatching rate assessment post egg counting

FF：卵数-卵重线性模型方法计数；SG：手工计数
ns：无显著差异（P>0.05，t 检验）。
FF: Egg number-weight linear model method for counting; SG: Manual counting; ns: No significant difference (P>0.05, t-test).

2.5　一种灰茶尺蠖品系的区分方法

灰茶尺蠖在经过抗生素定向清除 *Wolbachia* 后，卵重发生了一定的变化，根据这一变化和所建立的卵数-卵重线性模型可以区分不同品系的灰茶尺蠖。以 350 粒灰茶尺蠖卵为例，称重 3 次，得到灰茶尺蠖卵的重量均值为 27.16 mg，将该重量分别代入线性回归方程 Y=0.077 6X - 0.264 0 和 Y=0.086 5X - 0.087 7 进行预测，如图 4 所示，预测得到的卵数分别为 353 和 315 粒。将预测的卵数与真实卵数进行相对误差分析，相对误差分别为 0.86%与 10.00%。线性回归方程 Y=0.077 6X - 0.264 0 预测的卵数相对误差小于 5%，可判断该卵属于线性方程 Y=0.077 6X - 0.264 0 对应的灰茶尺蠖 W^+品系。

3　讨论

鳞翅目是昆虫纲中仅次于鞘翅目的第二大目，全球已知鳞翅目物种约 50 万种，且近年来

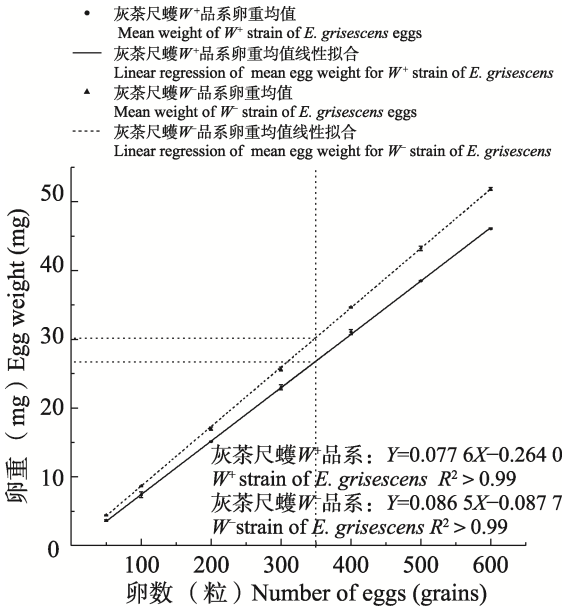

图 4 灰茶尺蠖品系区分示意图

Fig. 4 *Ectropis grisescens* strain differentiation diagram

每年递增 800 种以上（古丽扎尔·阿不都克力木等, 2022）。鳞翅目分布范围极广，绝大多数种类的幼虫会危害各类栽培植物（刘媛等, 2021）。鳞翅目昆虫在一些方面是有显著共性的，尺蛾科 Geometridae 和夜蛾科 Noctuidae 是鳞翅目中的重要家族，其中尺蛾科约包含 23 000 多个物种（马涛等, 2019），夜蛾科约包含 35 000 多个物种（潘朝晖等, 2023），是危害农、林、粮食贮藏等方面的重要害虫，具有深厚的科学研究价值。因此，本文选择鳞翅目尺蛾科和夜蛾科具有代表性的昆虫灰茶尺蠖和斜纹夜蛾作为研究对象。鳞翅目昆虫卵因堆积、体积小、数量多等因素难以精确统计，本研究提供了一种新的鳞翅目昆虫卵计数方法。通过构建鳞翅目昆虫卵的卵数-卵重线性模型，得到线性回归方程，将目标虫卵称得的重量代入方程中，就可得出目标虫卵的卵数；若鳞翅目昆虫不同品系的卵重不同还可以借助卵数-卵重的线性模型进行品系区分。此方法为昆虫的科学研究提供了一种可靠的手段，并为鳞翅目昆虫品系区分提供了新的思路。

鳞翅目昆虫卵在雌性成虫的卵巢中随着发育形成，经过交配后产下的卵才能孵化。在卵巢中形成的卵大小较为均匀，这为本研究所提出的方法的应用提供了可能性。首先，称取了不同梯度灰茶尺蠖 W^+品系、灰茶尺蠖 W^-品系和斜纹夜蛾卵数的重量，拟合得到其线性回归方程，且拟合优度 R^2 均大于 0.99，说明卵数与卵重之间存在线性关系，可以通过称量卵重来预测卵数；其次，选取 120、240 和 360 粒灰茶尺蠖 W^+品系、灰茶尺蠖 W^-品系和斜纹夜蛾卵进行了称重，代入各自方程得出预测卵数，并分析相对误差，所得相对误差均在 3%以内，预测值非常接近真实值，表明了此方法精确性较高。需要注意的是，鳞翅目昆虫在产卵过程中会附带有一些杂质，所以在实际操作过程中需要尽可能地将杂质清除干净，以保持卵计数的准确性；最后，为了验证此方法对卵的孵化率是否有影响，比较了运用此方法计数的灰茶尺蠖 W^+品系卵的存活率与人工计数的同品系卵的存活率，结果表明两者之间无显著差异，说明此方法并不会对卵产生损伤，不影响后续的孵化及试验结果。

尽管现有研究奠定了鳞翅目昆虫卵数-卵重线性回归方程的基础，但仍存在一些问题需要关注，例如影响卵数和卵重的因素。首先，不同鳞翅目昆虫的繁殖策略不同，不同的繁殖策略也会影响卵的大小。一些鳞翅目昆虫产的卵呈粒状且个体相对较大，这种卵形态特征能够为幼虫的早期发育阶段提供更充足的营养储备和生存保障，例如茶蚕 *Andraca bipunctata*（秦华光等, 2021）；一些鳞翅目昆虫如灰茶尺蠖和斜纹夜蛾，产卵量大但卵较小，以增加幼虫的存活机会（井晓宇等, 2019；赵桃彦, 2024）。其次，环境因素也可能影响生殖行为和卵的发育情况。例如，温度、湿度等因素可能对灰茶尺蠖的生殖行为和卵的孵化率产生影响，进而对卵的重量产生影响（景军等, 2014）。另外，还需要考虑不同区域和不同时间段的生长环境的影响。同一地区在不同时间段及同一时间段不同地区的环境差异都可能导致卵重的变化。尽管卵重受多种因素影响，但同一批次的鳞翅目昆虫的卵重是相对稳定的（Calvo and Molina, 2005；徐云敏, 2013），可以通过构建的卵数-卵

重模型计算出对应的卵数。对于不同批次的卵，由于环境因素等影响可能有一定差异，因此需要重新构建卵数-卵重模型。

虽然本方法目前还有些局限性，但是相较于传统的计数方法还是有一定的优势。传统的鳞翅目昆虫卵计数通常采取人工收集、数计的方式，耗时耗力，易产生数据误差，严重影响后续预测和防治工作。而通过构建卵数-卵重模型的卵计数方法，准确性较高，且能够有效提高计数的速度和效率。本方法不仅可以用于灰茶尺蠖和斜纹夜蛾卵的计数，还可以运用到其他鳞翅目昆虫卵，也可以利用不同品系的模型快速区别灰茶尺蠖的不同品系，解决试验过程中因培养多种品系而导致品系标签混淆的问题。

本研究还具有以下意义：在茶园害虫防治中，通过对鳞翅目昆虫卵数和卵重之间的线性关系进行建模，可以使茶园中鳞翅目昆虫的虫卵数量的估算变得更加自动化、简便和精确；为灰茶尺蠖、斜纹夜蛾等茶园害虫的防治提供理论依据。灰茶尺蠖、斜纹夜蛾等是重要的茶树害虫（孙钦玉等, 2021），对茶树生产造成很大影响，而利用该研究提供的鳞翅目昆虫卵计数方法，可以更加准确地掌握茶园中灰茶尺蠖或斜纹夜蛾种群的数量和分布等情况，有助于制定更优化的茶园病虫害防治策略，提升茶叶生产效益。

本研究提供了一种新的以鳞翅目卵为基础的昆虫计数方法，其他昆虫和生物的卵也可借鉴此方法进行精确定量。随着技术的不断发展和数据的积累，相信这种基于卵重建立模型的计数方法在未来一定会得到更广泛的应用和推广。

参考文献 (References)

Abdukirim·Gulzar, Zhang XY, Subinur·Eli, Li HH, 2022. Annual report of new taxa for Chinese Lepidoptera in 2021. *Biodiversity Science*, 30(8): 37–45. [古丽扎尔·阿不都克力木, 张秀英, 苏比奴尔·艾力, 李后魂, 2022. 中国鳞翅目新物种 2021 年年度报告. 生物多样性, 30(8): 37–45.]

Bi J, Wang YF, 2020. The effect of the endosymbiont *Wolbachia* on the behavior of insect hosts. *Insect Science*, 27(5): 846–858.

Calvo D, Molina JM, 2005. Fecundity-body size relationship and other reproductive aspects of *Streblote panda* (Lepidoptera: Lasiocampidae). *Annals of the Entomological Society of America*, 98(2): 191–196.

Cao ZJ, 2010. Host plant preference and distribution projection of *Ophraella communa* (Coleoptera: Chrysomelidae), a biological control agent of common ragweed. Master dissertation. Nanjing: Nanjing Agricultural University. [曹振军, 2010. 入侵豚草的天敌广聚萤叶甲的寄主选择性及潜在分布区预测. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学.]

Georgina J, Arun CH, Ramani Bai M, 2021. Automatic detection and counting of *Callosobruchus maculatus* (Fab.) eggs on *Vigna radiata* seeds, using ImageJ. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 9(2): 182–186.

Hou GH, 2022. Effects of temperature and photoperiod on the reproductive biology characteristics of *Euzophera pyriella* Yang. Master dissertation. ALaEr: Tarim University. [侯国辉, 2022. 温度和光周期对香梨优斑螟繁殖生物学特性的影响. 硕士学位论文. 阿拉尔: 塔里木大学.]

Jiang S, Fu XW, Jiang SS, Yang XM, Zhao HY, Wu KM, 2022a. Effect of X-ray irradiation on development, flight, and reproduction of *Spodoptera litura*. *Frontiers in Physiology*, 13: 947848.

Jiang S, He LM, He W, Zhao HY, Yang XM, Yang XQ, Wu KM, 2022b. Effects of X-ray irradiation on the fitness of the established invasive pest fall armyworm *Spodoptera frugiperda*. *Pest Management Science*, 78(7): 2806–2815.

Jing J, Su C, Fang Y, Li K, 2014. Effects of temperature on fecundity of nine lepidopteran species in Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25(3): 819–824. [景军, 苏超, 方燕, 李凯, 2014. 温度对浙江天童国家森林公园 9 种鳞翅目昆虫繁殖力的影响. 应用生态学报, 25(3): 819–824.]

Jing XY, Zhou L, Zhang HZ, Chen WB, Li YY, Mao JJ, Wang MQ, Zhang LS, 2023. Optimization of oviposition conditions for artificial rearing of *Spodoptera litura*. *Chinese Journal of Biological Control*, 39(6): 1301–1308. [井晓宇, 周磊, 张洪志, 陈万斌, 李玉艳, 毛建军, 王孟卿, 张礼生, 2023. 斜纹夜蛾人工扩繁产卵条件优化. 中国生物防治学报, 39(6): 1301–1308.]

Li FY, Wu JY, Lan YN, Huang YY, Tan FY, Liang GJ, Pu YX, 2021. Application and counting effect analysis of automated silkworm egg counting methods. *Guangxi Sericulture*, 58(3): 19–24. [李枫烨, 吴静颜, 兰艳妮, 黄扬玉, 谭福洋, 梁光健, 浦月霞, 2021. 蚕卵自动计数方法的应用及计数效果分析. 广西蚕业, 58(3): 19–24.]

Liu XY, 2022. Effects of starvation stress on fecundity and energy substances of *Helicoverpa armigera* (Hübner). Master dissertation. Nanchang: Jiangxi Agricultural University. [刘

香亚, 2022. 饥饿胁迫对棉铃虫生殖力及其能源物质的影响. 硕士学位论文. 南昌: 江西农业大学.]

Liu Y, Wang H, Wang ZP, Chen LM, Wang YR, Hou YM, 2021. Research progress of endosymbionts in lepidopteran insects. *Acta Entomologica Sinica*, 64(12): 1465–1477. [刘媛, 王浩, 王志鹏, 陈利民, 王亚如, 侯有明, 2021. 鳞翅目昆虫内共生菌研究进展. 昆虫学报, 64(12): 1465–1477.]

Liu ZW, Bu LM, Song S, Xu X, Cui ZX, 2018. Several methods for counting silkworm eggs. *North Sericulture*, 39(4): 53–55. [刘中文, 卜黎明, 宋松, 徐欣, 崔自学, 2018. 蚕卵计数的几种方法. 北方蚕业, 39(4): 53–55.]

Lopez V, Cortesero AM, Poinsot D, 2018. Influence of the symbiont *Wolbachia* on life history traits of the cabbage root fly (*Delia radicum*). *Journal of Invertebrate Pathology*, 158: 24–31.

Ma T, Huang ZJ, Zhu Y, Lin N, Xiao Q, He YR, Wen XJ, 2019. Progress in sex pheromone components in Geometrid species (Lepidoptera: Geometridae) and their applications. *Scientia Silvae Sinicae*, 55(5): 152–162. [马涛, 黄志嘉, 朱映, 林娜, 肖强, 何余容, 温秀军, 2019. 尺蛾科昆虫性信息素组分特征及应用进展. 林业科学, 55(5): 152–162.]

Pan CH, Chen EY, Yu X, 2023. Three new record species of Noctuidae (Lepidoptera) from China. *Journal of Plateau Agriculture*, 7(2): 113–117. [潘朝晖, 陈恩勇, 于霞, 2023. 夜蛾科(鳞翅目) 3 中国新记录种记述. 高原农业, 7(2): 113–117.]

Perrot-Minnot MJ, Cheval B, Migeon A, Navajas M, 2002. Contrasting effects of *Wolbachia* on cytoplasmic incompatibility and fecundity in the haplodiploid mite *Tetranychus urticae*. *Journal of Evolutionary Biology*, 15(5): 808–817.

Qin HG, Li Q, Sheng PP, Mu D, 2021. Advances in research on biological characteristics and control of *Andraca bipunctata* Walker. *Journal of Yichun University*, 43(12): 8–12. [秦华光, 李沁, 盛萍萍, 穆丹, 2021. 茶蚕的生物学特性及防治研究进展. 宜春学院学报, 43(12): 8–12.]

Sun QY, Zhang R, Ye T, Chen WL, Ge CM, Li SG, Guo K, Zhang JX, 2021. Study on pest and natural enemy community diversity in tea plantations of Huangshan region. *Journal of Tea Business*, 43(4): 166–173. [孙钦玉, 张冉, 叶涛, 陈伟立, 葛超美, 李世广, 郭珂, 张家侠, 2021. 黄山地区茶园害虫和天敌群落多样性调查研究. 茶业通报, 43(4): 166–173.]

Wangkeeree J, Suwanchaisri K, Roddee J, Hanboonsong Y, 2022. Selective elimination of *Wolbachia* from the leafhopper *Yamatotettix flavovittatus* Matsumura. *Current Microbiology*, 79(6): 173.

Xu YM, 2013. Studies on inner eggshell proteins and a lethal egg mutant (l-e^m) of the silkworm, *Bombyx mori*. Doctor dissertation. Chongqing: Southwest University. [徐云敏, 2013. 家蚕内层卵壳蛋白及蚕卵致死突变体 (l-e^m) 突变机理研究. 博士学术论文. 重庆: 西南大学.]

Yang HZ, Lin Y, Tang ZS, Zhang YD, Chen Z, Huang Y, Gan X, 2011. The method research of counting fish spawns based on image processing. *Journal of Hydroecology*, 32(5): 138–141. [杨慧赞, 林勇, 唐章生, 张永德, 陈忠, 黄姻, 甘西, 2011. 基于图像处理的鱼卵计数方法研究. 水生态学杂志, 32(5): 138–141.]

Yang JF, Huang LT, Wang ZD, 2019. Research progress on artificial diets for *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae). *Yunnan Agricultural Science and Technology*, 2019(3): 60–62. [杨江福, 黄良涛, 王占娣, 2019. 斜纹夜蛾人工饲料研究进展. 云南农业科技, 2019(3): 60–62.]

Zhang HW, Yuan GL, Zhang Y, Yu WC, 2013. The method research of counting fish spawns based on image processing. *International Electronic Elements*, 21(14): 190–193. [张杭文, 袁国良, 张云, 于文驰, 2013. 基于数字图像处理的鱼卵计数的研究. 电子设计工程, 21(14): 190–193.]

Zhang Y, Liu S, Jiang R, Zhang C, Gao T, Wang Y, Liu C, Long YH, Zhang YL, Yang YQ, 2021. *Wolbachia* strain *w* gri from the tea geometrid moth *Ectropis grisescens* contributes to its host's fecundity. *Frontiers in Microbiology*, 12: 694466.

Zhao J, Li Q, Wang XF, Xu M, He L, Miao P, Liu DS, Li CJ, Wu KM, Li SJ, 2021. Releasing sterile male adults for control of *Heliothis assulta*. *Chinese Tobacco Science*, 42(4): 31–35. [赵钧, 李琦, 王雪芬, 徐敏, 何雷, 苗圃, 刘东升, 李成军, 吴孔明, 李淑君, 2021. 释放辐射不育雄虫防治烟青虫的效果研究. 中国烟草科学, 42(4): 31–35.]

Zhao TY, 2024. Study on overwintering adaptability of *Ectropis grisescens* in tea garden from Shandong. Doctor dissertation. Tai'an: Shandong Agricultural University. [赵桃彦, 2024. 山东茶园灰茶尺蠖越冬适应性研究. 博士学术论文. 泰安: 山东农业大学.]

Zhou KN, 2013. Reproductive biology in the pine caterpilar, *Dendrolimus punctatus* Walker (Lepidoptera: Lasiocampidae). Master dissertation. Nanchang: Jiangxi Agricultural University. [周康念, 2013. 马尾松毛虫繁殖生物学的研究. 硕士学位论文. 南昌: 江西农业大学.]