

XAY NGHIỀN NHƯ MỘT PHƯƠNG PHÁP GIẾT MỔ ẤU TRÙNG RUỒI LÍNH ĐEN (*HERMETIA ILLUCENS*) NUÔI CÔNG NGHIỆP: KHUYẾN NGHỊ THỰC NGHIỆM ĐỂ ĐẠT ĐƯỢC CÁI CHẾT TỨC THỜI

Tên bài gốc:

Grinding as a Slaughter Method for Farmed Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae: Empirical Recommendations to Achieve Instantaneous Killing

Tác giả:

Matthew Barrett, Camila Miranda, Isabella T. Veloso, Christopher Flint, Colin D. Perl, Alejandra Martinez, Bettina Fischer, Jeffrey K. Tomberlin

Xuất bản trong:

Animal Welfare, 33, e16

DOI:

<https://doi.org/10.1017/awf.2024.10>

Giấy phép:

Bài báo gốc được xuất bản theo giấy phép Creative Commons Attribution (CC BY 4.0). Người dùng được phép sao chép, phân phối, trình bày, chuyển ngữ và tạo tác phẩm phái sinh, kể cả cho mục đích thương mại, với điều kiện ghi rõ tác giả gốc, nguồn xuất bản và chỉ rõ đây là bản dịch. Để biết chi tiết: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Bản dịch tiếng Việt:

Dịch bởi:

Huỳnh Nguyễn Nguyên Hạ – Ngày hoàn thành: 01/07/2026

Link bài gốc:

<https://doi.org/10.1017/awf.2024.10>

Original Title:

Grinding as a Slaughter Method for Farmed Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae: Empirical Recommendations to Achieve Instantaneous Killing

Authors:

Matthew Barrett, Camila Miranda, Isabella T. Veloso, Christopher Flint, Colin D. Perl, Alejandra Martinez, Bettina Fischer, Jeffrey K. Tomberlin

Published in:

Animal Welfare, 2024, Volume 33, e16

DOI:

<https://doi.org/10.1017/awf.2024.10>

License:

The original article is published under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license. Users are permitted to copy, distribute, display, translate, and create derivative works, including for commercial purposes, provided that proper credit is given to the original authors, the source is cited, and it is clearly indicated that this is a translation. For full license details: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Vietnamese Translation:**Translated by:**

Huỳnh Nguyễn Nguyên Hạ — Completion date: 01/07/2026

Link to the original article:

<https://doi.org/10.1017/awf.2024.10>

TÓM TẮT

Mỗi năm có ít nhất 200 tỷ ấu trùng ruồi lính đen (*Hermetia illucens* — viết tắt BSFL) được nuôi để làm thực phẩm và thức ăn chăn nuôi, và ngành nuôi côn trùng được dự báo sẽ tiếp tục tăng trưởng nhanh. Dù người tiêu dùng, nhà sản xuất và các nhà lập pháp đều quan tâm đến vấn đề này, hiện chưa có bằng chứng thực nghiệm nào hướng dẫn nhà sản xuất thực hành giết mổ nhân đạo — hay giết mổ tức thời — đối với loại “gia súc thu nhỏ” mới mẻ này. BSFL có thể được giết mổ bằng cách đông lạnh, luộc, xay nghiền hoặc các phương pháp khác; tuy nhiên quy trình vận hành chuẩn (SOP) và thiết kế thiết bị có thể ảnh hưởng đến khả năng đạt được cái chết tức thời khi dùng các phương pháp này. Nhóm nghiên cứu đã kiểm tra xem kích thước cơ thể ấu trùng và đường kính lỗ của tấm lưới định cỡ hạt (particle size plate) ảnh hưởng thế nào đến khả năng chết tức thời của ấu trùng ruồi lính đen khi bị giết mổ bằng máy xay thịt tiêu chuẩn. Kết quả cho thấy kích thước cơ thể ấu trùng không ảnh hưởng đến khả năng chết tức thời đối với ấu trùng có khối lượng 106–175 mg. Tuy nhiên, đường kính lỗ của tấm định cỡ hạt có ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chết tức thời: chỉ 54% ấu trùng chết tức thời khi dùng tấm có lỗ lớn nhất (đường kính 12 mm), so với 84% khi dùng tấm có lỗ nhỏ nhất (2,55 mm). Dù vậy, tỷ lệ chết tức thời có thể được nâng lên tới 99% nếu giảm được tỷ lệ ấu trùng bị kẹt lại trong máy. Bài báo kết thúc bằng các khuyến nghị cụ thể giúp nhà sản xuất đạt tỷ lệ chết tức thời 99% thông qua các SOP phù hợp áp dụng cho các máy có thiết kế tương tự, đồng thời đề xuất một quy trình để nhà sản xuất có thể tự kiểm tra SOP xay nghiền của riêng mình.

Từ khóa: *Phúc lợi động vật; ruồi lính đen; phúc lợi côn trùng trong chăn nuôi; xay nghiền; giết mổ nhân đạo; côn trùng làm thực phẩm và thức ăn chăn nuôi*

Lịch sử bài báo: *Nhận ngày 03/11/2023; Sửa đổi ngày 02/01/2024; Chấp nhận ngày 12/01/2024; Xuất bản trực tuyến ngày 2024*

GIỚI THIỆU

Ngành công nghiệp côn trùng làm thực phẩm và thức ăn chăn nuôi (IAFF — insects as food and feed) hiện là sáng kiến chăn nuôi động vật lớn nhất trong lịch sử loài người, với hơn 1,2 nghìn tỷ cá thể côn trùng được nuôi mỗi năm (Rowe 2020). Ngành IAFF có tiềm năng giúp đạt các mục tiêu nông nghiệp bền vững bằng cách tối ưu hóa, thậm chí giảm thiểu, đất đai và các tài nguyên khác cần thiết để sản xuất protein động vật, đồng thời thúc đẩy các hệ thống thực phẩm tuần hoàn tại chỗ, biến chất thải thành thực phẩm, thức ăn chăn nuôi và nhiên liệu (van Huis & Tomberlin 2017; Parodi et al. 2022; Purkayastha & Sarkar 2022; van Huis & Gasco 2023). Những lợi ích này có thể góp phần tăng cường an ninh kinh tế và lương thực (van Huis 2013; Chia et al. 2019), điều đặc biệt quan trọng khi dân số toàn cầu đang tăng (Liên Hợp Quốc 2022) và biến đổi khí hậu càng làm trầm trọng thêm tình trạng mất an ninh lương thực (Makkar 2018).

Ngành IAFF đang phát triển nhanh chóng để đáp ứng nhu cầu của các thị trường mới nổi (de Jong & Nikolik 2021; World Wildlife Fund & Tesco 2021). Ví dụ, Makkar et al. (2014) ước tính rằng tới 100% bột cá có thể được thay thế an toàn bằng protein côn trùng trong thức ăn nuôi trồng thủy sản, điều này sẽ đòi hỏi nuôi thêm 160–320 nghìn tỷ côn trùng mỗi năm (tùy thuộc vào khối lượng cơ thể loài; Rowe 2020). Protein côn trùng cũng phù hợp cho thị trường tiêu dùng của con người, vật nuôi có xương sống (gà, lợn, v.v.) và thú cưng — những thị trường này đại diện cho lượng côn trùng nuôi thêm ngoài con số ước tính trên (de Jong & Nikolik 2021). Nhu cầu khổng lồ này đồng nghĩa với việc các cơ sở quy mô lớn đang được xây dựng và lên kế hoạch, có khả năng nuôi tới ba nghìn tỷ cá thể côn trùng hoặc hơn mỗi năm, cho mỗi cơ sở (van Huis & Tomberlin 2017; Innovafeed 2020).

Khi ngành phát triển, mối quan tâm đến phúc lợi của côn trùng với vai trò “gia súc thu nhỏ” cũng nảy sinh từ người tiêu dùng, nhà sản xuất, giới học thuật, nhà lập pháp và các nhóm vận động cho cả ngành công nghiệp lẫn động vật (de Goede et al. 2013; Bear 2019; IPIFF 2019; Lambert et al. 2021; van Huis 2021; Delvendahl et al. 2022; Barrett et al. 2023a,b; DEFRA 2023; Eurogroup for Animals 2023; Klobučar & Fisher 2023; Kortsmitt et al. 2023; Voulgari-Kokota et al. 2023). Tri giác (sentience) thường được xem là điều kiện tiên quyết để xem xét phúc lợi (dù xem thêm quan điểm khác của Dawkins 2017), và hiện chưa có sự đồng thuận khoa học về tri giác của côn trùng (Adamo 2016, 2019; Barron & Klein 2016; Klein & Barron 2016; Gibbons & Sarlak 2020; Mikhalevich & Powell 2020; Lambert et al. 2021; Loon & Bovenkerk 2021; Overgaard 2021; Kakrada & Colombo 2022; Elwood 2023; Voulgari-Kokota et al. 2023; Barrett & Fischer 2024).

Tuy nhiên, một tổng quan gần đây về các nghiên cứu thần kinh học và hành vi trên côn trùng cho thấy tri giác là điều hoàn toàn có thể xảy ra (Gibbons et al. 2022), đặc biệt ở một

số bộ côn trùng đang được nuôi công nghiệp (ví dụ ruồi lính đen, thuộc bộ Diptera). Đáng chú ý, giai đoạn phát triển có thể ảnh hưởng đến khả năng có tri giác của một loài côn trùng, nhất là ở các loài biến thái hoàn toàn (holometabolous) (xem thảo luận trong Gibbons et al. 2022; Barrett & Fischer 2023; Fischer & Sandall 2023). Cụ thể, Gibbons et al. (2022) phát hiện ruồi hai cánh (Diptera) trưởng thành đáp ứng 6/8 tiêu chí tri giác theo khung phân tích của Birch et al. (2021) dành cho động vật không xương sống, trong khi ấu trùng ở tuổi giết mổ chỉ đáp ứng 4/8 tiêu chí; hai hoặc bốn tiêu chí còn lại (tương ứng) chưa được đánh giá cho bộ này ở giai đoạn sống đó. Dù khung phân tích xếp Diptera trưởng thành vào nhóm “bằng chứng mạnh về tri giác”, ấu trùng ở tuổi cuối cùng vẫn đáp ứng đủ tiêu chí để được xếp vào nhóm “có bằng chứng đáng kể về tri giác” ở giai đoạn sống này. Do đó, với quy mô khổng lồ của ngành IAFF, các dữ liệu này cho thấy nên bắt đầu bảo vệ phúc lợi côn trùng nuôi công nghiệp theo tinh thần phòng ngừa (precautionary), ngay cả khi chưa có đầy đủ thông tin về tri giác côn trùng ở mọi giai đoạn sống (Birch 2017; Barrett & Fischer 2023).

Một vấn đề được đặc biệt quan tâm bởi nhà sản xuất (Bear 2019), nhà lập pháp (UK Government 2015; Council of Animal Affairs 2018) và giới truyền thông (Sebo & Schukraft 2021; Carlson 2023; Reynolds 2023) là phúc lợi của côn trùng trong quá trình giết mổ. Theo đó, việc thiếu hướng dẫn về thực hành tốt nhất cho giết mổ nhân đạo côn trùng đại diện cho một rủi ro đáng kể đối với “giấy phép xã hội” để ngành này được phép vận hành (Barrett & Adcock 2023). Điều này càng quan trọng khi nhóm người tiêu dùng am hiểu nhất và trẻ tuổi nhất của ngành dường như lại là nhóm quan ngại nhất về việc côn trùng có bị đau hay không (ít nhất là tại Mỹ; Fukuda et al. 2023) — cho thấy cùng với xu hướng bằng chứng khoa học (Gibbons et al. 2022), các xu hướng xã hội khó có thể khiến vấn đề phúc lợi côn trùng lúc giết mổ trở nên ít được công chúng quan tâm hơn theo thời gian.

Ruồi lính đen được dự đoán sẽ trở thành loài côn trùng được nuôi phổ biến nhất trong tương lai gần. Chúng thường được nuôi theo lô và bị giết mổ ở giai đoạn ấu trùng (BSFL). BSFL có thể bị giết mổ bằng nhiều phương pháp khác nhau, bao gồm (nhưng không giới hạn ở): đông lạnh (trong không khí hoặc nitơ lỏng); nướng bằng lò đối lưu; rang trong cát hoặc dưới ánh nắng; quay lò vi sóng; luộc/chần; gây ngạt; và xay nghiền/bấm nhỏ (xem tổng quan trong Barrett et al. 2023a). Giết mổ nhân đạo có thể được định nghĩa là “khi một con vật bị giết chết ngay lập tức hoặc bị làm cho mất cảm giác cho đến khi chết, mà không đau đớn, khổ đau hay đau khổ” (Hiệp hội Hoàng gia Phòng chống Ngược đãi Động vật [RSPCA] 2023). Rõ ràng, chỉ một số trong các phương pháp trên có khả năng đáp ứng tiêu chuẩn này. Điều quan trọng là các phương pháp và điều kiện tạo ra quy trình giết mổ nhân đạo nhất cho BSFL có thể khác với các loài đã được nghiên cứu trước đây (chủ yếu là động vật có xương sống), do số lượng cá thể cần giết và đặc điểm sinh lý/hình thái riêng biệt của

chúng (ví dụ cơ thể nhỏ, biến nhiệt, v.v.). Barrett et al. (2023a) cho rằng luộc/chần, đông lạnh trong nitrơ lỏng và xay nghiền/băm nhỏ là các phương pháp có khả năng tạo ra cái chết tức thời cao nhất, và do đó nhân đạo nhất, đối với BSFL; tuy nhiên các tác giả cũng thừa nhận cần có các quy trình vận hành chuẩn (SOP) để xác định thực hành nào tạo ra cái chết nhân đạo bằng từng phương pháp, trong khi vẫn đảm bảo tính thực tiễn và kinh tế.

Nghiên cứu này nhằm kiểm tra xem việc xay nghiền có thể tạo ra cái chết tức thời (dưới 1 giây), và do đó nhân đạo, cho BSFL hay không. Vì kích thước cơ thể ấu trùng tại thời điểm giết mổ có thể khác nhau, nhóm nghiên cứu đã thử nghiệm với hai kích thước cơ thể ấu trùng có liên quan đến thực tế giết mổ. Nhà sản xuất cũng có thể thay đổi độ mịn của sản phẩm xay bằng cách thay đổi đường kính lỗ của tấm định cỡ hạt trên máy xay; do đó, nhóm nghiên cứu cũng kiểm tra ảnh hưởng của đường kính lỗ tấm định cỡ hạt đến khả năng chết tức thời. Từ các dữ liệu này, nhóm xây dựng một bộ khuyến nghị thực tiễn cho nhà sản xuất về cách thiết lập SOP xay nghiền có khả năng cao nhất tạo ra cái chết tức thời. Hơn nữa, do sự khác biệt đáng kể về thiết kế máy móc so với máy xay được sử dụng trong nghiên cứu này, nhóm cũng cung cấp một quy trình để các nhà sản xuất quan tâm có thể tự kiểm tra máy móc và SOP của họ đối với BSFL ở bốn kích thước cơ thể khác nhau.

VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

Nuôi ấu trùng

Ruồi lính đen được lấy từ một đàn nuôi duy trì tại Cơ sở Thí nghiệm Côn trùng học Pháp y (Forensic Laboratory for Investigative Entomological Sciences) thuộc Đại học Texas A&M, Hoa Kỳ. Đàn gốc có nguồn từ một đàn tại Tifton, Georgia, và được duy trì, thu thập trứng theo phương pháp của Miranda et al. (2020). Sau khi nở, 27 lô lặp lại, mỗi lô 0,5 g ấu trùng mới nở (khoảng 10.000 con), được cân bằng cân Ohaus® Adventure™ Pro AV64, và mỗi lô được đặt trên 500 g khẩu phần Gainesville (50% cám lúa mì, 30% bột cỏ linh lăng, 20% bột ngô; Hogsette 1992) đã được làm ẩm 70% bằng nước RO (thẩm thấu ngược), trong hộp đựng thực phẩm 0,5 lít. Ấu trùng mới nở được cho ăn khoảng một tuần, sau đó toàn bộ nội dung (ấu trùng, khẩu phần và phân côn trùng) của các hộp 0,5 lít được đổ lên trên 8 kg khẩu phần Gainesville (70% độ ẩm) đặt ở giữa một hộp chứa Sterilite® ClearView Latch™ dung tích 30 lít, với khoảng 800 g khẩu phần khô rải quanh viền để ngăn ấu trùng bò ra ngoài. Để thu được ấu trùng cỡ trung bình, hai hộp 0,5 lít chứa ấu trùng 7 ngày tuổi (DOL) được đặt vào một khay 8 kg khẩu phần (khoảng 20.000 ấu trùng/khay); để thu được ấu trùng cỡ lớn, chỉ một hộp 7 DOL (10.000 ấu trùng/khay) được đặt vào mỗi khay 30 lít. Tổng cộng có 18 khay cho nhóm cỡ trung bình và 9 khay cho nhóm cỡ lớn. Ấu trùng được cho ăn trong khay thêm một tuần, sau đó được sàng lọc khỏi khẩu phần và phân để dùng cho các thí nghiệm mô tả dưới đây.

Tỷ lệ chết tức thời do phân tách cơ học các đốt cơ thể

Nhóm nghiên cứu đánh giá khả năng chết tức thời sau khi ấu trùng nhận một vết cắt đơn tại một đốt cơ thể cụ thể, ở nhóm ấu trùng cỡ trung bình và cỡ lớn (18–19 DOL), cũng như nhóm 7 DOL và 23–24 DOL. Mỗi ấu trùng được cân riêng lẻ để xác định khối lượng cơ thể và xác nhận không có sự khác biệt đáng kể về kích thước giữa các nghiệm thức trong cùng một nhóm.

Ấu trùng được đặt riêng lẻ trên một tấm gia nhiệt giữ ở 32°C trong không khí ở nhiệt độ phòng (23,1–24,3°C) và được cho thích nghi 30 giây trước khi bắt đầu thử nghiệm. Việc sử dụng tấm gia nhiệt giúp ngăn cơ thể ấu trùng bị hạ nhiệt nhanh do kết hợp giữa làm mát đối lưu và mất dịch máu (haemolymph); khi không dùng tấm gia nhiệt, nhiệt độ cơ thể ấu trùng được ghi nhận giảm 1–5°C chỉ trong 5 giây sau khi bị cắt, điều này ảnh hưởng đến khả năng dùng cử động để đánh giá thời điểm chết. Tấm gia nhiệt giữ cho cơ thể ấu trùng luôn ở trên ngưỡng nhiệt tối thiểu, để cử động luôn có thể được thực hiện và đánh giá (Addeo et al. 2022).

Trong thí nghiệm này, 130 ấu trùng được sử dụng cho mỗi nhóm tuổi/kích thước, trong đó 10 con được phân ngẫu nhiên để nhận một vết cắt ngang lưng-bụng bằng lưỡi dao cạo tại một đốt cơ thể được chọn ngẫu nhiên (từ S1 đến S12), và 10 ấu trùng đối chứng trải qua cùng quy trình xử lý nhưng không bị cắt. Một giây sau khi bị cắt, cả hai nửa cơ thể ấu trùng được đánh giá cử động bằng cách chọc vào mặt lưng bằng đầu dò vi mô kim MT-29/1HT (Physitemp, Clifton, NJ, USA). Ấu trùng không phản ứng khi bị chọc (mất phối hợp vận động) được xem là “đã chết”. Cử động được phân loại là “có kiểm soát” (như di chuyển, xoay tròn đầu hoặc phần đuôi, quẫy đạp, lăn tròn, tự ăn thịt mình, v.v.; xem Video bổ sung 1–10 trong Barrett et al. 2023c) hoặc “không kiểm soát” (ví dụ phản xạ giật). Chỉ cử động có kiểm soát mới được tính là “còn sống”, nhưng không có phản ứng không kiểm soát nào xuất hiện ngoài các thử nghiệm thí điểm ban đầu (vốn diễn ra ở nhiệt độ thấp hơn). Việc chấm dứt hành vi có kiểm soát là một mốc hành vi thường được dùng để đánh dấu cái chết trong các nghiên cứu gây chết trên côn trùng (ví dụ Lighton & Turner 2004; Barrett et al. 2023d), dù chưa được xác nhận bằng phương pháp trao đổi chất hay điện sinh lý trong bối cảnh cụ thể này. Một điểm phức tạp là hành vi “có kiểm soát” cũng từng được quan sát ở phần thân bị mất đầu của động vật có xương sống bị chặt đầu (Michel 2019). Tuy nhiên, nếu các cân nhắc phòng ngừa biện minh cho việc cố gắng đảm bảo BSFL được giết mổ nhân đạo, thì những cân nhắc đó cũng biện minh cho việc coi các hành vi này là dấu hiệu cho thấy con vật chưa chết.

Trong tất cả các trường hợp, chỉ một nửa cơ thể cử động sau khi bị cắt: đối với ấu trùng cỡ trung bình, vết cắt ở đốt 1–5 cho thấy nửa sau cơ thể còn sống, trong khi vết cắt ở đốt 6–12 cho thấy nửa trước còn sống; đối với ấu trùng cỡ lớn, vết cắt ở đốt 1–4 cho thấy nửa sau còn sống, vết cắt ở đốt 5–12 cho thấy nửa trước còn sống.

Ấu trùng được theo dõi cử động thêm 90 giây; nếu cử động dừng lại, đầu dò được dùng để kiểm tra xem ấu trùng còn sống nhưng bất động hay đã ngừng cử động hoàn toàn và có thể coi là đã chết. Nếu chết, thời điểm chết được ghi lại. Sau 90 giây, ấu trùng được đưa ra khỏi khu vực thí nghiệm và giết bằng cách đặt vào tủ đông.

Đánh giá SOP xay nghiền tức thời ở quy mô lớn

Để xay ấu trùng, nhóm nghiên cứu sử dụng máy xay thịt Univex MG89 (Salem, NH, USA) có lưỡi dao xoay bên trong nằm ngay phía trước tấm định cỡ hạt. Ba loại tấm định cỡ hạt với lỗ đường kính 2,55 mm (nhỏ), 5,5 mm (trung bình) và 12 mm (lớn) được thử nghiệm, cùng hai kích thước cơ thể ấu trùng (cỡ trung bình và cỡ lớn). Kích thước cơ thể ấu trùng được xác định bằng cách cân năm nhóm, mỗi nhóm 10 ấu trùng, từ mỗi lô (hai lô ấu trùng cho mỗi kích thước, dùng cho hai thử nghiệm riêng biệt) để tính khối lượng trung bình mỗi con.

Ba lần lặp lại được thực hiện cho mỗi tổ hợp tấm-kích thước ấu trùng trong mỗi thử nghiệm, và hai thử nghiệm được thực hiện vào hai ngày khác nhau. Với mỗi lần lặp lại, máy xay được bật lên, sau đó 500 g ấu trùng được đổ qua phễu vào hòng nạp của máy. Khối lượng toàn bộ vật liệu xay đi qua được tấm định cỡ hạt vào một thùng nhựa được thu thập. Khi ấu trùng ngừng đi qua tấm định cỡ hạt, máy được tắt và khối lượng toàn bộ vật liệu bị kẹt lại phía sau tấm định cỡ hạt, tại vị trí lưỡi dao xoay bên trong, được thu thập. Nhóm nghiên cứu cũng thu thập và đếm số ấu trùng bị kẹt trong ống dẫn tới lưỡi dao, đồng thời ghi nhận bất kỳ thương tích rõ rệt nào (như vết thương hở hoặc biến dạng cơ thể do áp lực). Thời điểm bắt đầu và kết thúc đổ ấu trùng vào phễu, cũng như thời điểm ấu trùng bắt đầu và ngừng ra khỏi tấm định cỡ hạt, được ghi lại để tính tốc độ nạp liệu và tốc độ đầu ra cho mỗi lần lặp lại. Giữa mỗi lần lặp lại, toàn bộ máy được tháo rời và vệ sinh trước khi lắp lại.

Với mỗi nhóm ấu trùng (nhóm đi qua được tấm và nhóm bị kẹt tại lưỡi dao), vật liệu được khuấy đều cẩn thận trước khi lấy ba mẫu phụ 8–12 g từ mỗi nhóm, đặt vào các lọ nhựa riêng chứa dung dịch ethanol 70%; phần vật liệu còn lại được đông lạnh trong 24 giờ để đảm bảo giết chết mọi ấu trùng còn sống sót. Các mẫu phụ được bảo quản ở -4°C cho đến khi đếm, để tránh phân hủy.

Để đếm mỗi mẫu phụ, ethanol được lọc bỏ bằng rây lọc siêu mịn, và phần vật liệu còn lại được trải cẩn thận lên khăn giấy bằng kẹp. Dựa trên dữ liệu từ thí nghiệm phân tách cơ học các đốt cơ thể ở từng cá thể, nhóm nghiên cứu đếm và ghi lại vị trí vết cắt của các thân ấu trùng còn đủ nguyên vẹn để được coi là “còn sống” (xem Hình A trong Tập bổ sung 1). Phương pháp này giúp tránh đếm trùng, vì chỉ một nửa của một ấu trùng bị chia đôi được tính. Khi cơ thể ấu trùng không bị chia tách hoàn toàn, hoặc khi vết cắt theo đường chéo,

đốt cơ thể có vết thương chạm sâu nhất qua đường giữa cơ thể (gần vị trí hệ thần kinh nhất) được ghi nhận. Số ấu trùng không bị cắt (còn nguyên vẹn) cũng được đếm.

Với mỗi lần lặp lại, khối lượng của mỗi nhóm ấu trùng (nhóm ở lưỡi dao và nhóm đi qua tấm) được chia cho khối lượng trung bình của một ấu trùng trong lô đó để xác định số lượng ấu trùng trong mỗi nhóm. Các con số này sau đó được cộng với số ấu trùng bị kẹt trong ống để có tổng số ấu trùng trong lần lặp lại đó. Số ấu trùng trong mỗi nhóm được chia cho tổng số trong lần lặp lại để xác định tỷ lệ phần trăm ấu trùng bị kẹt tại lưỡi dao hoặc đi qua được tấm định cỡ hạt cho từng nhóm.

Tổng số ấu trùng dự kiến trong mỗi mẫu phụ được xác định bằng cách chia khối lượng mẫu phụ cho khối lượng trung bình của một ấu trùng trong lô đó. Khả năng chết tức thời cho mỗi mẫu phụ được xác định bằng cách nhân số ấu trùng bị cắt tại một đốt cơ thể cụ thể với tỷ lệ ấu trùng bất động sau 1 giây khi bị cắt tại đốt đó trong các thử nghiệm phân tách cơ học từng cá thể; sau đó chia kết quả này cho tổng số ấu trùng dự kiến trong mẫu phụ. Khả năng chết nhân đạo tổng thể được xác định dựa trên tỷ lệ ấu trùng bị kẹt tại lưỡi dao so với đi qua được tấm, cùng khả năng chết nhân đạo của từng nhóm đó.

Phân tích thống kê

Dữ liệu được phân tích bằng GraphPad Prism v9.5.1 và R v4.1.3 (R Core Team 2019; GraphPad Software for Windows 2023); tính chuẩn và tính đồng nhất phương sai được kiểm tra trước khi lựa chọn phương pháp phân tích. Phân tích ANOVA hai chiều được dùng để đánh giá ảnh hưởng của kích thước cơ thể ấu trùng và đường kính lỗ tấm định cỡ hạt đến tốc độ nạp liệu và tốc độ đầu ra (tính bằng g/giây và số cá thể/giây). Mô hình hiệu ứng hỗn hợp với kiểm định so sánh bội Sidak được dùng để đánh giá liệu tốc độ đầu ra có chậm hơn tốc độ nạp liệu ở tất cả các nghiệm thức hay không; hồi quy tuyến tính được dùng để xác định mối quan hệ giữa hai tốc độ này. ANOVA một chiều được dùng để đánh giá phương sai khối lượng ấu trùng giữa các nhóm nghiệm thức trong thí nghiệm cắt bằng dao cạo. Ngưỡng ý nghĩa thống kê alpha được đặt ở $P < 0,05$.

Hồi quy beta (Cribari-Neto & Zeileis 2010) được dùng để phân tích ảnh hưởng của thử nghiệm và kích thước ấu trùng đến tỷ lệ chết tức thời; các thành phần mô hình cũng được đánh giá bằng ANOVA loại II (Fox & Weisberg 2019). Không có tương tác đáng kể giữa thử nghiệm và kích thước ấu trùng khi dự đoán tỷ lệ chết nhân đạo ($\chi^2=0,01$; $P=0,93$), cũng không có sự khác biệt đáng kể giữa các thử nghiệm ($\chi^2<0,1$; $P=0,31$), cho thấy không có hiệu ứng thử nghiệm. Tuy nhiên, thử nghiệm vẫn được đưa vào tất cả các mô hình như một hiệu ứng ngẫu nhiên để kiểm soát các khác biệt không thể lý giải giữa các lần thử.

Phân tích tỷ lệ phần trăm chết tức thời tổng thể (kẹt tại lưỡi dao và đi qua tấm, kết hợp), tỷ lệ chết tức thời chỉ tại lưỡi dao, và tỷ lệ chết tức thời chỉ ở nhóm đi qua tấm định cỡ hạt,

được thực hiện bằng mô hình tuyến tính tổng quát họ beta với hàm liên kết logit, phù hợp với dữ liệu phần trăm (Brooks et al. 2017). Khi tỷ lệ chết tức thời ước tính dưới 0% (đôi khi xảy ra ở nhóm “kẹt tại lưỡi dao” do phương sai khối lượng ấu trùng), giá trị 0% được thay thế. Số lần thử nghiệm được đưa vào như một hệ số chặn ngẫu nhiên. Các mô hình tối đa có số hạng tương tác được khóp trước, sau đó loại bỏ dần các số hạng không có ý nghĩa dựa trên kiểm định log-likelihood. So sánh hậu định theo cặp được thực hiện bằng gói ‘emmeans’ (Lenth 2023).

Một mô hình tuyến tính tổng quát họ beta với hàm liên kết logit cũng được dùng để phân tích xem sự thay đổi khả năng bị kẹt tại lưỡi dao có phụ thuộc vào kích thước cơ thể ấu trùng hay đường kính lỗ tấm định cỡ hạt hay không. Số lần thử nghiệm được đưa vào như hệ số chặn ngẫu nhiên, và so sánh hậu định theo cặp được thực hiện bằng gói emmeans. Dữ liệu, video và toàn bộ tệp bổ sung được công khai tại Barrett et al. (2023c).

Cơ sở đạo đức

Nghiên cứu trên côn trùng hiện không thuộc diện phải qua bất kỳ quy trình xét duyệt đạo đức bắt buộc theo luật nào; do đó, nghiên cứu này không cần phê duyệt đạo đức để thực hiện. Các tác giả đã nỗ lực giảm thiểu số lượng cá thể được sử dụng (ví dụ bằng cách chỉ chọn hai nhóm khối lượng cơ thể cho thí nghiệm quy mô lớn, và chạy các thử nghiệm thí điểm để xác định cỡ mẫu tối thiểu cho kết quả chính xác của một máy xay đầy đủ). Ấu trùng không thể được gây mê/gây choáng trước khi bị cắt (vì điều này sẽ ảnh hưởng đến đánh giá hành vi về cái chết) hoặc trước quá trình giết mổ (vì trên thực tế trang trại không gây choáng ấu trùng, và hoạt động của ấu trùng trong lúc giết mổ có thể ảnh hưởng đến khả năng sống sót mà nhóm nghiên cứu cần tái hiện). Tuy nhiên, ấu trùng được đông lạnh sau khi thí nghiệm và thu mẫu để đảm bảo cái chết diễn ra nhanh chóng. Đáng chú ý, hiện vẫn còn tranh luận về việc liệu đông lạnh có phải là phương pháp giết nhân đạo cho côn trùng hay không, tuy nhiên các hướng dẫn thực hành tốt nhất hiện tại vẫn cho phép sử dụng phương pháp này cho đến khi có thêm dữ liệu thực nghiệm giải quyết tranh cãi (Fischer et al. 2023). Dù đã cố gắng cân nhắc và giảm thiểu tác động đến phúc lợi của các đối tượng nghiên cứu, nhóm tác giả thừa nhận có một thực hành có thể cải thiện phương pháp và giảm thiểu hơn nữa tổn hại cho động vật trong các nghiên cứu tương lai muốn lặp lại thiết kế này: ấu trùng có thể được gây mê ngay sau khi ra khỏi máy giết mổ (hoặc ngay sau khi hoàn thành thí nghiệm cắt), tốt nhất bằng isoflurane. Cách làm này sẽ ngăn ngừa khả năng chịu đau khổ trong quá trình thu mẫu và cân, vốn diễn ra khi ấu trùng chưa được gây mê trong nghiên cứu quy mô lớn của nhóm, cũng như bất kỳ khổ đau nào có thể xảy ra trong quá trình đông lạnh.

KẾT QUẢ

Sự khác biệt theo kích thước cơ thể trong tỷ lệ chết tức thời do phân tách cơ học các đốt cơ thể

Không có khác biệt thống kê đáng kể về khối lượng ấu trùng giữa các nghiệm thức trong bất kỳ nhóm tuổi/kích thước nào (ANOVA một chiều; 7 DOL: $F=0,67$, $df=12$, $P=0,78$; cỡ trung bình: $F=1,14$, $df=12$, $P=0,34$; cỡ lớn: $F=0,91$, $df=12$, $P=0,54$; 23–24 DOL: $F=0,79$, $df=12$, $P=0,66$); do đó khối lượng của mỗi nhóm được tính từ toàn bộ BSFL sử dụng trong tất cả nghiệm thức (xem Bảng 1). Có sự chồng lấn nhất định về khoảng khối lượng giữa nhóm cỡ trung bình và cỡ lớn, cũng như giữa nhóm cỡ lớn và nhóm 23–24 DOL.

Bảng 1. Khối lượng trung bình và khoảng khối lượng của ấu trùng theo từng nhóm tuổi/kích thước (đơn vị g)

Nhóm	Khối lượng trung bình ($\pm$ SD), g	Khoảng khối lượng, g
7 DOL	0,0063 ($\pm$ 0,0029)	0,0013–0,0132
Cỡ trung bình	0,0956 ($\pm$ 0,017)	0,0542–0,1480
Cỡ lớn	0,1573 ($\pm$ 0,0232)	0,1032–0,2179
23–24 DOL	0,2346 ($\pm$ 0,0307)	0,1565–0,2985

Tỷ lệ BSFL chết tức thời, hoặc chết sau 90 giây, thay đổi tùy theo kích thước cơ thể ấu trùng và nghiệm thức (ví dụ vị trí đốt cơ thể bị tổn thương; xem Hình 1). Ấu trùng nhỏ hơn có khả năng chết cao hơn ở tất cả các nghiệm thức. Trong bốn nhóm tuổi/kích thước, 160 BSFL bị cắt tại các đốt cơ thể 9–12, nơi chúng có thể dùng miệng chạm tới khoang cơ thể bị mở. Khi quan sát hành vi trong 90 giây, chỉ có một ấu trùng (một cá thể cỡ “trung bình” nặng 0,09 g) từng cố gắng tự ăn thịt mình, tương đương 0,63% số đối tượng được thử nghiệm. Các phản ứng hành vi khác được ghi nhận ở các nhóm tuổi/kích thước và nghiệm thức khác nhau bao gồm: di chuyển tới lui không có tác nhân kích thích; lăn liên tục sang một bên; lắc đầu qua lại; co rút các đốt cơ thể; quấy đạp; lăn tròn; xoay vòng đầu hoặc phần đuôi; cũng như bất kỳ cử động nào trong số này được kích hoạt để phản ứng với việc bị chọc bằng đầu dò sau một khoảng thời gian bất động (xem ví dụ trong Video bổ sung 1–10, Barrett et al. 2023c).

Tốc độ nạp liệu và tốc độ đầu ra

Tốc độ nạp ấu trùng vào máy (g/giây) không thay đổi theo kích thước cơ thể hay đường kính lỗ tấm định cỡ hạt (ANOVA hai chiều; tất cả $P > 0,05$). Ấu trùng được nạp với tốc độ trung bình $39,4 (\pm 6,5)$ g/giây trên mọi điều kiện. Ấu trùng cỡ lớn được nạp với tốc độ ước tính $227,0 (\pm 30,9)$ cá thể/giây, trong khi ấu trùng cỡ trung bình được nạp với tốc độ ước tính $369,7 (\pm 72,6)$ cá thể/giây.

Tốc độ đầu ra của ấu trùng (g/giây) từ máy cũng không thay đổi theo kích thước cơ thể hay đường kính lỗ tấm định cỡ hạt (ANOVA hai chiều; tất cả $P > 0,05$). Tốc độ đầu ra trung bình là $25,22 (\pm 4,41)$ g/giây, và luôn chậm hơn tốc độ nạp liệu (mô hình hiệu ứng hỗn hợp: $\chi^2=11,16$, $df=1$, $P=0,0008$; kiểm định Sidak MCT: cỡ lớn: $t=18,02$, $df=17$, $P<0,0001$; cỡ trung bình: $t=9,59$, $df=17$, $P<0,0001$). Tốc độ đầu ra ước tính của ấu trùng cỡ lớn là $150,2 (\pm 20,0)$ cá thể/giây, trong khi tốc độ đầu ra của ấu trùng cỡ trung bình là $228,6 (\pm 48,8)$ cá thể/giây.

Ảnh hưởng của kích thước cơ thể và đường kính lỗ tấm định cỡ hạt đến khả năng chết tức thời

Ấu trùng cỡ trung bình từ lô một và lô hai có khối lượng lần lượt là $0,1076 (\pm 0,0061)$ g và $0,1055 (\pm 0,0043)$ g, trong khi ấu trùng cỡ lớn từ hai lô này có khối lượng $0,1724 (\pm 0,0079)$ g và $0,1749 (\pm 0,0066)$ g. Cả hai giá trị đều nằm trong khoảng độ lệch chuẩn của các quần thể cỡ trung bình và cỡ lớn dùng cho thí nghiệm phân tách cơ học theo đốt cơ thể.

Tỷ lệ BSFL bị kẹt tại lưỡi dao và không đi qua được tấm định cỡ hạt cao hơn khi đường kính lỗ của tấm nhỏ hơn ($Z < -3,78$; $P < 0,001$), hoặc khi ấu trùng có kích thước cơ thể nhỏ hơn ($z \text{ ratio} = 2,47$; $P < 0,02$). Tỷ lệ trung bình ($\pm$ SD) ấu trùng cỡ trung bình bị kẹt tại lưỡi dao khi dùng tấm lỗ nhỏ nhất là $14,99 (\pm 3,21)\%$, so với $9,81 (\pm 1,13)\%$ với tấm lỗ trung bình, và $8,19 (\pm 1,51)\%$ với tấm lỗ lớn nhất. Với ấu trùng cỡ lớn, tỷ lệ bị kẹt lần lượt là $15,69 (\pm 1,49)\%$, $10,84 (\pm 0,81)\%$ và $9,19 (\pm 0,79)\%$ với tấm lỗ nhỏ, trung bình và lớn. Khả năng chết tức thời của BSFL bị kẹt tại lưỡi dao không thay đổi theo đường kính lỗ tấm hay kích thước cơ thể ($Z > -2,32$; $P > 0,05$). Trên toàn bộ ấu trùng, chỉ $2,65 (\pm 3,68)\%$ cho thấy chết tức thời khi bị kẹt tại lưỡi dao (khoảng dao động: 0,00–13,12%).

Tỷ lệ BSFL đi qua được tấm định cỡ hạt cao hơn khi đường kính lỗ càng lớn ($Z < -12,38$; $P < 0,0001$). Khả năng chết tức thời của ấu trùng đi qua được tấm định cỡ hạt thay đổi theo đường kính lỗ tấm, nhưng không theo kích thước cơ thể ($Z=1,26$; $P=0,21$). Cụ thể, tỷ lệ chết tức thời quan sát được là $99,27 (\pm 0,69)\%$ với tấm lỗ nhỏ nhất, và $84,97 (\pm 2,33)\%$ và $59,26 (\pm 3,10)\%$ với tấm lỗ trung bình và lớn nhất tương ứng.

Khả năng chết tức thời tổng thể (tính cả ấu trùng đi qua tấm và ấu trùng bị kẹt tại lưỡi dao) thay đổi theo đường kính lỗ tấm định cỡ hạt ($Z > -27,49$; $P < 0,0001$), nhưng không

thay đổi theo kích thước cơ thể ấu trùng ($\chi^2=0,01$; $P=0,91$). Trên toàn bộ ấu trùng trong một lần chạy máy, 83,82 ($\pm 2,57$)% chết tức thời khi dùng tấm lỗ nhỏ nhất, với 76,03 ($\pm 2,66$)% và 53,80 ($\pm 2,62$)% chết tức thời khi dùng tấm lỗ trung bình và lớn nhất tương ứng.

Cuối cùng, tổng cộng 743 BSFL được tìm thấy trong ống dẫn tới lưỡi dao vào cuối các lần chạy máy, tính trên tất cả các lần lặp lại; trong số đó, 6,19% có thương tích quan sát được từ bên ngoài (tương ứng 5,34% và 6,90% ở ấu trùng cỡ trung bình và cỡ lớn).

Mô tả các hình trong bài

Hình 1: Tỷ lệ ấu trùng ở các độ tuổi/kích thước khác nhau chết tức thời hoặc chết sau 90 giây do bị cắt bằng lưỡi dao cạo tại các đốt cơ thể khác nhau. Gồm 4 biểu đồ con: (a) tỷ lệ chết tức thời theo vị trí đốt cắt; (c) tỷ lệ chết sau 90 giây theo vị trí đốt cắt; (b) tỷ lệ chết tức thời tổng hợp trên tất cả nghiệm thức theo nhóm tuổi/kích thước; (d) tỷ lệ chết sau 90 giây tổng hợp theo nhóm tuổi/kích thước. Xu hướng chung: nhóm 7 DOL (nhỏ nhất) có tỷ lệ chết cao nhất, giảm dần qua nhóm cỡ trung bình, cỡ lớn, và thấp nhất ở nhóm 23–24 DOL (lớn nhất); vết cắt gây chết nhiều nhất tập trung quanh đốt S3–S5.

Hình 2: Số lượng ước tính cá thể BSFL được xử lý mỗi giây bằng kỹ thuật xay nghiền, gồm (a) tốc độ nạp liệu ước tính (cá thể/giây) cho ấu trùng cỡ lớn và cỡ trung bình, và (b) tốc độ đầu ra ước tính của máy xay cho hai kích thước ấu trùng, phân theo ba loại lỗ tấm (nhỏ/trung bình/lớn). Tốc độ đầu ra luôn thấp hơn tốc độ nạp liệu ở cả hai kích thước ấu trùng.

Hình 3: Tỷ lệ phần trăm ấu trùng bị kẹt tại lưỡi dao theo đường kính lỗ tấm định cỡ hạt hoặc kích thước cơ thể ấu trùng. Tỷ lệ kẹt cao hơn đáng kể khi dùng tấm lỗ nhỏ hơn (S so với M: $Z=-9,98$, $P<0,0001$; S so với L: $Z=-13,59$, $P<0,0001$; M so với L: $Z=-3,78$, $P=0,0005$), và ấu trùng cỡ lớn bị kẹt nhiều hơn cỡ trung bình ($Z=-2,47$, $P=0,013$).

Hình 4: Tỷ lệ chết tức thời của ấu trùng chỉ tính trong nhóm đi qua được tấm định cỡ hạt, theo đường kính lỗ tấm. Tỷ lệ chết tức thời cao hơn đáng kể khi lỗ tấm nhỏ hơn (S so với M: $Z=-12,38$, $P<0,0001$; S so với L: $Z=-16,12$, $P<0,0001$; M so với L: $Z=-14,22$, $P<0,0001$).

Hình 5: Tỷ lệ chết tức thời tổng thể của toàn bộ ấu trùng trong một lần chạy 500 g (gồm cả nhóm kẹt tại lưỡi dao và nhóm đi qua tấm), theo đường kính lỗ tấm. Tỷ lệ chết tức thời cao hơn đáng kể khi lỗ tấm nhỏ hơn (S so với M: $Z=-8,24$, $P<0,0001$; S so với L: $Z=-27,49$, $P<0,0001$; M so với L: $Z=-20,44$, $P<0,0001$).

THẢO LUẬN

Nghiên cứu cho thấy rất ít BSFL chết tức thời sau khi bị cắt tại một đốt cơ thể đơn lẻ. Các đốt cơ thể mà vết cắt tạo ra một khả năng chết tức thời nhất định thay đổi theo kích thước ấu trùng, với ấu trùng nhỏ hơn (7 DOL) có khả năng chết tức thời cao hơn ấu trùng lớn hơn (23–24 DOL). Điều này có thể do hai yếu tố: (1) vị trí hệ thần kinh trong khoang cơ thể thay đổi khi con vật lớn lên không đồng hướng về khối lượng cơ thể và não (Barrett et al. 2022); và (2) khả năng cung cấp oxy giảm do mất dịch máu (haemolymph) tỷ lệ lớn hơn ở ấu trùng nhỏ. Ấu trùng biểu hiện nhiều hành vi bất thường khi bị phân tách cơ học các đốt cơ thể, bao gồm lăn tròn liên tục, quấy đạp, hoặc di chuyển lùi. Dù có nhiều báo cáo rộng rãi về hiện tượng côn trùng tự ăn thịt mình khi cơ thể bị tổn thương làm vỡ khoang cơ thể (ví dụ Eisemann et al. 1984), nghiên cứu này chỉ ghi nhận một ấu trùng (0,63% đối tượng) thực hiện hành vi này (Video bổ sung 10, Barrett et al. 2023c).

Đường kính lỗ tấm định cỡ hạt — chứ không phải kích thước cơ thể ấu trùng (trong khoảng 106–175 mg) — ảnh hưởng đến khả năng chết tức thời khi dùng thiết kế máy xay thịt tiêu chuẩn. Khả năng chết tức thời cao nhất (84%) khi dùng tấm lỗ nhỏ nhất (2,55 mm) và thấp nhất (54%) khi dùng tấm lỗ lớn nhất (12 mm). Tuy nhiên, một thách thức đáng kể khi dùng phương pháp giết mổ này để tạo ra cái chết tức thời là tình trạng giết mổ không hoàn toàn ở một nhóm ấu trùng bị kẹt tại lưỡi dao vào cuối mỗi lần chạy máy: chỉ 3% trong số này chết tức thời. Nếu loại bỏ được nhóm này (ví dụ mọi ấu trùng đều đi qua được tấm định cỡ hạt), khả năng chết tức thời sẽ cao hơn ở mọi kích thước lỗ tấm: 99% với tấm nhỏ nhất và 59% với tấm lớn nhất.

Từ các dữ liệu này, nhóm nghiên cứu đưa ra các khuyến nghị sau cho nhà sản xuất, nhằm đảm bảo 99% khả năng chết tức thời khi dùng phương pháp xay nghiền để giết mổ:

- Kiểm chứng tỷ lệ tử vong với từng máy cụ thể, sử dụng các thông số đã xác định trong nghiên cứu này;
- Đối với máy xay có sử dụng tấm định cỡ hạt, dùng đường kính lỗ 2,55 mm hoặc nhỏ hơn cho quần thể BSFL có khối lượng trung bình tối thiểu 106 mg;
- Để tránh tình trạng BSFL bị giết mổ không hoàn toàn (ví dụ bị kẹt tại lưỡi dao), nên cho một loại vật liệu độn (giá thể, BSFL đã chết, rau củ, v.v.) chạy qua máy vào cuối mỗi lần chạy, để đảm bảo toàn bộ BSFL được xử lý hoàn toàn; và
- Khi sử dụng máy có thiết kế khác, hoặc giết mổ BSFL có khối lượng trung bình nhỏ hơn 106 mg hoặc lớn hơn 175 mg, nhà sản xuất nên tự kiểm tra SOP cụ thể của mình (xem phương pháp và vật liệu trong Tập bổ sung 1 và 2) để xác định khả năng chết tức thời.

Một hạn chế quan trọng của kết quả nghiên cứu là nhóm tác giả không thể đánh giá các thương tích xảy ra trong máy trước khi ấu trùng chạm tới lưỡi dao/tấm, vốn có thể góp phần gây đau đớn/khổ đau trước thời điểm chết. Nghiên cứu ghi nhận ấu trùng dành trung bình 3,78 giây trong máy (tính từ lúc đổ vào đến lúc ra), nghĩa là có vài giây trong đó ấu trùng có thể bị thương trước khi chết tại lưỡi dao/tấm. Thực tế, 6,19% ấu trùng được tìm thấy trong ống dẫn, phía trước lưỡi dao, vào cuối các lần chạy máy đã bị thương; tuy nhiên, do mật độ nạp liệu bất thường ở mức thấp vào cuối mỗi lần chạy máy, chưa rõ liệu nhóm ấu trùng này có đại diện cho trải nghiệm của toàn bộ ấu trùng hay không.

Xay nghiền cũng có thể là một phương pháp tiêu hủy đàn nhân đạo (humane depopulation), nếu nhà sản xuất cần tiêu hủy vật nuôi để ứng phó với tình huống khẩn cấp (ví dụ bùng phát dịch bệnh). Trong trường hợp tiêu hủy đàn, côn trùng có thể chưa được tách khỏi giá thể ăn của chúng, trong khi ở thời điểm giết mổ thông thường (và do đó trong nghiên cứu này), ấu trùng đã được tách khỏi thức ăn. Kết quả nghiên cứu này có thể không phản ánh chính xác các trường hợp tiêu hủy đàn khi giá thể vẫn còn trộn lẫn với ấu trùng, hoặc khi ấu trùng nhỏ hơn 106 mg (vì có thể cần tiêu hủy đàn ở giai đoạn tuổi rất non). Cho đến khi có dữ liệu thực nghiệm cho các kích thước cơ thể này, và với giá thể trộn lẫn, nhóm nghiên cứu khuyến nghị nhà sản xuất tự theo dõi SOP tiêu hủy đàn bằng cách xay nghiền của riêng mình, thông qua điều chỉnh phương pháp và vật liệu đã đề cập trong Tập bổ sung 1 và 2.

Nhìn chung, kết quả nghiên cứu cho thấy xay nghiền có thể là một phương pháp giết mổ tức thời cho BSFL có khối lượng 106–175 mg, nhưng SOP ảnh hưởng mạnh mẽ đến xác suất đạt được cái chết nhân đạo. Tấm định cỡ hạt có lỗ nhỏ, sử dụng vật liệu độn vào cuối mỗi lần chạy để giảm xác suất giết mổ không hoàn toàn, và việc kiểm tra từng thiết kế máy mới hoặc kích thước cơ thể ấu trùng mới có thể đảm bảo việc xay nghiền được sử dụng một cách nhân đạo để giết mổ BSFL. Ngoài ra, cần xem xét thêm tính khả thi về kinh tế và thực tiễn của phương pháp này. Cuối cùng, dù xay nghiền có thể là một phương pháp giết mổ tức thời, nó vẫn có thể bị công chúng xem xét kỹ lưỡng do nhận thức tiêu cực về các phương pháp được sử dụng; nghiên cứu sâu hơn về mức độ chấp nhận của xã hội đối với thực hành này trong ngành nuôi côn trùng sẽ rất có giá trị.

Ý NGHĨA ĐỐI VỚI PHÚC LỢI ĐỘNG VẬT

Hiện nay, hàng tỷ BSFL nuôi công nghiệp bị giết mổ mỗi năm mà không có SOP được thiết lập để đảm bảo cái chết tức thời. Nghiên cứu này cung cấp hướng dẫn đầu tiên có cơ sở thực nghiệm cho việc xử lý nhân đạo BSFL; việc nhà sản xuất áp dụng các thực hành này sẽ giúp giảm nguy cơ tiềm ẩn về khổ đau không cần thiết cho hàng tỷ cá thể động vật.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả cảm ơn TS. Terry McGlynn (CSUDH) đã hỗ trợ không gian phòng thí nghiệm để thực hiện một phần nghiên cứu này.

XUNG ĐỘT LỢI ÍCH

MB và BF có mối quan hệ (không hưởng lương, với vai trò hội đồng cố vấn) với Insect Welfare Research Society. CP có mối quan hệ lao động với Insect Welfare Research Society. JKT có mối quan hệ với công ty EVO Conversion Systems, LLC.

TÀI TRỢ

MB là nghiên cứu viên sau tiến sĩ của NSF (mã 2109399) tại thời điểm thực hiện nghiên cứu. CP được tài trợ bởi Insect Welfare Research Society. JKT và CF ghi nhận sự hỗ trợ tài chính từ Sáng kiến Chất lượng Không khí Bang của Texas A&M AgriLife Research (SAQI). JKT và CM đã sử dụng nguồn lực từ Viện Texas A&M AgriLife về Thúc đẩy Sức khỏe thông qua Nông nghiệp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Adamo SA (2016). *Côn trùng có cảm thấy đau không? Một câu hỏi tại giao điểm của hành vi động vật, triết học và robot học*. Animal Behaviour 118: 75–79.
2. Adamo SA (2019). *Liệu đó có phải là đau nếu nó không gây đau đớn? Bàn về khả năng thấp của việc côn trùng cảm thấy đau*. The Canadian Entomologist 151: 685–695.
3. Addeo NF, Li C, Rusch TW, Dickerson AJ, Tarone AM, Bovera F and Tomberlin JK (2022). *Ảnh hưởng của tuổi, kích thước và giới tính đến sở thích nhiệt độ của ruồi lính đen trưởng thành [Hermetia illucens L. (Diptera: Stratiomyidae)]*. Journal of Insects as Food and Feed 8: 129–139.
4. Barrett M and Adcock SJJ (2023). *Khoa học phúc lợi động vật: một mảnh ghép không thể thiếu của nông nghiệp côn trùng bền vững*. Journal of Insects as Food and Feed 1: 1–15.
5. Barrett M, Chia S, Fischer B and Tomberlin JK (2023a). *Các cân nhắc về phúc lợi trong nuôi ruồi lính đen, Hermetia illucens (Diptera: Stratiomyidae): một mô hình cho ngành công nghiệp côn trùng làm thực phẩm và thức ăn chăn nuôi*. Journal of Insects as Food and Feed 9: 119–148.
6. Barrett M and Fischer B (2023). *Những thách thức trong phúc lợi côn trùng nuôi công nghiệp: Vượt ra ngoài câu hỏi về tri giác*. Animal Welfare 32: e4.
7. Barrett M and Fischer B (2024). *Kỷ nguyên vượt ra ngoài Eisemann và cộng sự (1984): Con đau của côn trùng trong thế kỷ 21*. OSF Preprints.

8. Barrett M, Godfrey RK, Schnell A and Fischer B (2023b). *Phúc lợi của sâu bột vàng nuôi công nghiệp (Tenebrio molitor; Coleoptera: Tenebrionidae): Khuyến nghị riêng cho loài dành cho một ngành công nghiệp toàn cầu*. Journal of Insects as Food and Feed.
9. Barrett M, Godfrey RK, Sterner EJ and Waddell EA (2022). *Ảnh hưởng của sự phát triển và giới tính con trưởng thành đến số lượng tế bào não ở Ruồi lính đen, Hermetia illucens L. (Diptera: Stratiomyidae)*. Arthropod Structure & Development 70: 101174.
10. Barrett M, Miranda C, Veloso IT, Flint C, Perl CD, Martinez A, Fischer B, and Tomberlin JK (2023c). *Dự án OSF: Xây dựng như một phương pháp giết mổ ấu trùng ruồi lính đen (Hermetia illucens) nuôi công nghiệp: Khuyến nghị có cơ sở thực nghiệm cho thực hành tức thời và nhân đạo hơn*. OSF.
11. Barrett M, Tigreros N, Davidowitz G and O'Donnell S (2023d). *Ảnh hưởng của kích thước cơ thể đến ngưỡng chịu nhiệt tối đa ở ong sa mạc sống đơn độc cái*. Ecological Entomology.
12. Barron AB and Klein C (2016). *Côn trùng có thể cho chúng ta biết điều gì về nguồn gốc của ý thức*. Proceedings of the National Academy of Science 113: 4900–4908.
13. Bear C (2019). *Tiếp cận cái chết của côn trùng: Cách hiểu và thực hành của những người nuôi côn trùng ăn được tại Anh*. Society & Animals 27: 751–768.
14. Birch J (2017). *Tri giác động vật và nguyên tắc phòng ngừa*. Animal Sentience 2.
15. Birch J, Burn C, Schnell A, Browning H and Crump A (2021). *Tổng quan bằng chứng về tri giác ở động vật thân mềm chân đầu và giáp xác mười chân*. London School of Economics.
16. Brooks ME, Kristensen K, van Benthem KJ, Magnusson A, Berg CW, Nielsen A, Skaug HJ, Mächler M and Bolker BM (2017). *glmmTMB cân bằng tốc độ và tính linh hoạt giữa các gói phần mềm cho mô hình tuyến tính hỗn hợp tổng quát có phân phối zero-inflated*. The R Journal 9: 378–400.
17. Carlson T (2023). *Đầu bếp Joseph Yoon: Côn trùng ăn được chỉ là một lựa chọn khác để con người cân nhắc*. Fox News.
18. Chia SY, Tanga CM, van Loon JJ and Dicke M (2019). *Côn trùng làm thức ăn chăn nuôi bền vững: các mô hình kinh doanh bao trùm có sự tham gia của nông hộ nhỏ*. Current Opinion in Environmental Sustainability 41: 23–30.
19. Council on Animal Affairs (2018). *Ngành công nghiệp côn trùng mới nổi*.

20. Cribari-Neto F and Zeileis A (2010). *Hồi quy beta trong R*. Journal of Statistical Software 34: 1–24.
21. Dawkins MS (2017). *Phúc lợi động vật có và không có ý thức*. Journal of Zoology 301: 1–10.
22. de Goede D, Erens J, Kapesomenou E and Peters M (2013). *Nuôi côn trùng quy mô lớn và phúc lợi động vật*. Trong: Röcklinsberg H và Sandin P (Chủ biên), *Đạo đức học của Tiêu dùng*, tr 236–243. Wageningen Academic Publishers.
23. de Jong B and Nikolik G (2021). *Không còn bỏ trườn nữa: Protein côn trùng sẽ trưởng thành trong thập niên 2020*. RaboBank.
24. Department for Environment, Food, and Rural Affairs (2023). *Đánh giá vòng đời của các quy trình sản xuất protein côn trùng tại Anh dùng cho thức ăn lợn và gia cầm*.
25. Delvendahl N, Rumpold BA and Langen N (2022). *Côn trùng ăn được làm thực phẩm — Phúc lợi côn trùng và các khía cạnh đạo đức từ góc nhìn người tiêu dùng*. Insects 13: 121.
26. Eisemann CH, Jorgensen WK, Merritt DJ, Rice MJ, Cribb BW, Webb PD and Zalucki MP (1984). *Côn trùng có cảm thấy đau không? — Một góc nhìn sinh học*. Experientia 40: 164–167.
27. Elwood RW (2023). *Các chỉ dấu hành vi của đau đớn và khổ đau ở động vật chân khớp, và liệu con đau có thể "phản đòn"? Animals 13: 2602*.
28. EuroGroup for Animals (2023). *Tương lai của ngành nuôi côn trùng: Vương mắc nằm ở đâu?*
29. Fischer B, Barrett M, Adcock S, Barron A, Browning H, Chittka L, Drinkwater E, Gibbons M, Haverkamp A, and Perl C (2023). *Hướng dẫn bảo vệ và thúc đẩy phúc lợi côn trùng trong nghiên cứu*. Insect Welfare Research Society.
30. Fischer B and Sandall E (2023). *Nếu côn trùng trưởng thành có ý nghĩa đạo đức, thì côn trùng non có ý nghĩa đến mức nào? Rethink Priorities*.
31. Fox J and Weisberg S (2019). *Cẩm nang R đồng hành cùng Hồi quy Ứng dụng*, tái bản lần 3. Sage Publications.
32. Fukuda EP, Carrasco MN, Perez AJ, Fischer B and Drewery ML (2023). *Nhận thức của người tiêu dùng Mỹ về côn trùng làm thức ăn chăn nuôi: các cân nhắc đạo đức đối với côn trùng*. Journal of Insects as Food and Feed 1: 1–15.

33. Gibbons M, Crump A, Barrett M, Sarlak S, Birch J and Chittka L (2022). *Chương ba - Côn trùng có thể cảm thấy đau không? Một tổng quan về bằng chứng thần kinh học và hành vi*. *Advances in Insect Physiology*, tr 155–229.
34. Gibbons M and Sarlak S (2020). *Ức chế đau hoặc phản ứng với tổn thương ở động vật không xương sống và có xương sống*. *Animal Sentience* 5.
35. GraphPad Software (2023). *GraphPad Prism v9.5.1 cho Windows*.
36. Hogsette JA (1992). *Các khâu phần mới để sản xuất ruồi nhà và ruồi chuồng (Diptera: Muscidae) trong phòng thí nghiệm*. *Journal of Economic Entomology* 85: 2291–2294.
37. Innovafeed (2020). *Cơ sở sản xuất protein côn trùng lớn nhất tại Illinois*.
38. IPIFF (2019). *Đảm bảo tiêu chuẩn cao về phúc lợi động vật trong sản xuất côn trùng*, tr 1–2.
39. Kakrada E and Colombo M (2022). *Mở rộng giả thuyết không (null hypothesis) sang tri giác đau ở động vật không xương sống*. *Animal Sentience* 7.
40. Klein C and Barron A (2016). *Côn trùng có năng lực trải nghiệm chủ quan*. *Animal Sentience* 1.
41. Klobučar T and Fisher DN (2023). *Khi nào chúng ta bắt đầu quan tâm đến phúc lợi côn trùng?* *Neotropical Entomology* 52: 5–10.
42. Kortsmit Y, van der Bruggen M, Wertheim B, Dicke M, Beukeboom L and van Loon J (2023). *Hành vi của hai loài ruồi được nuôi làm thức ăn chăn nuôi: tối ưu hóa sản xuất và phúc lợi côn trùng*. *Journal of Insects as Food and Feed* 9: 149–169.
43. Lambert H, Elwin A and D'Cruze N (2021). *Sẽ không làm hại một con ruồi? Một tổng quan về nhận thức và tri giác côn trùng liên quan đến việc sử dụng chúng làm thực phẩm và thức ăn chăn nuôi*. *Applied Animal Behaviour Science* 243: 105432.
44. Lenth R (2023). *emmeans: Trung bình biên ước tính, còn gọi là trung bình bình phương tối thiểu*. Gói phần mềm R, phiên bản 1.8.5.
45. Lighton JRB and Turner RJ (2004). *Đo hô hấp giới hạn nhiệt: một đánh giá khách quan về ngưỡng chịu nhiệt tối đa ở hai loài kiến thu hoạch sa mạc cùng khu vực phân bố, Pogonomyrmex rugosus và P. californicus*. *Journal of Experimental Biology* 207: 1903–1913.
46. Loon MSV and Bovenkerk B (2021). *Đạo đức học và đời sống tâm trí của côn trùng*. Trong *Công lý và An ninh Lương thực trong Bối cảnh Biến đổi Khí hậu*: 218–223.

47. Makkar HPS (2018). *Tổng quan: Bối cảnh nhu cầu thức ăn chăn nuôi và hàm ý của chiến lược "thực phẩm không làm thức ăn chăn nuôi" đối với an ninh lương thực và biến đổi khí hậu*. *Animal* 12: 1744–1754.
48. Makkar HPS, Tran G, Heuzé V and Ankers P (2014). *Hiện trạng công nghệ trong việc sử dụng côn trùng làm thức ăn chăn nuôi*. *Animal Feed Science and Technology* 197: 1–33.
49. Michel M (2019). *Cá và vi mạch: Bàn về cơn đau của cá và tính đa hiện thực hóa*. *Philosophical Studies* 176: 2411–2428.
50. Mikhalevich I and Powell R (2020). *Những tâm trí không có cột sống: Đạo đức học động vật mang tính bao trùm về tiến hóa*. *Animal Sentience* 29.
51. Miranda CD, Cammack JA and Tomberlin JK (2020). *Sản xuất hàng loạt Ruồi lính đen, *Hermetia illucens* (L.), (Diptera: Stratiomyidae) được nuôi trên ba loại phân chuồng*. *Animals* 10: 1243.
52. Overgaard M (2021). *Ý thức của côn trùng*. *Frontiers in Behavioral Neuroscience* 15.
53. Parodi A, Ipema AF, Van Zanten HHE, Bolhuis JE, Van Loon JJA and De Boer IJM (2022). *Các nguyên tắc cho việc sử dụng có trách nhiệm côn trùng nuôi công nghiệp làm thức ăn chăn nuôi*. *Nature Food* 3: 972–974.
54. Purkayastha D and Sarkar S (2022). *Quản lý chất thải bền vững bằng ấu trùng ruồi lính đen: Một tổng quan*. *International Journal of Environmental Science and Technology* 19: 12701–12726.
55. R Core Team (2019). *R: Một ngôn ngữ và môi trường tính toán thống kê*. R Foundation for Statistical Computing.
56. Reynolds M (2023). *Ngành nuôi côn trùng đang bùng nổ. Nhưng liệu nó có tàn nhẫn?* *Wired*.
57. Rowe A (2020). *Côn trùng được nuôi làm thực phẩm và thức ăn chăn nuôi — quy mô toàn cầu, thực hành và chính sách*.
58. Royal Society for the Prevention of Cruelty to Animals (2023). *Thuật ngữ "giết nhân đạo" hay "giết mổ nhân đạo" có nghĩa là gì?*
59. Sebo J and Schukraft J (2021). *Đừng nuôi côn trùng*. Aeon.
60. UK Government (2015). *Phụ lục 4*.

61. United Nations (2022). *Triển vọng dân số thế giới 2022: Tóm tắt kết quả*. Ban Dân số.
62. van Huis A (2013). *Tiềm năng của côn trùng làm thực phẩm và thức ăn chăn nuôi trong việc đảm bảo an ninh lương thực*. Annual Review of Entomology 58: 563–583.
63. van Huis A (2021). *Phúc lợi của côn trùng nuôi công nghiệp*. Journal of Insects as Food and Feed 7: 573–584.
64. van Huis A and Gasco L (2023). *Côn trùng làm thức ăn cho sản xuất chăn nuôi*. Science 379: 138–139.
65. van Huis A and Tomberlin J (2017). *Côn trùng làm Thực phẩm và Thức ăn chăn nuôi: Từ Sản xuất đến Tiêu dùng*, xuất bản lần 1. Wageningen Academic Publishers.
66. Voulgari-Kokota A, van Loon MS and Bovenkerk B (2023). *Côn trùng như một dạng gia súc thu nhỏ: Xem xét phúc lợi côn trùng trong sản xuất thức ăn chăn nuôi*. NJAS: Impact in Agricultural and Life Sciences 95: 2191797.
67. World Wildlife Fund and Tesco (2021). *Tương lai của thức ăn chăn nuôi: Lộ trình của WWF nhằm thúc đẩy protein côn trùng trong thức ăn chăn nuôi tại Anh*.