农药混剂可能损害大豆害虫蝽类卵寄生蜂提供的生态系统服务：一项全面的生态毒理风险评估

Matheus Rakes[1, 2*]；Maíra Chagas Morais[1,2]；Gabriel Rodrigues Palma[3]；Daniel Bernardi[1]；Anderson Dionei Grützmacher[1]；Leandro do Prado Ribeiro[2]

[1]佩洛塔斯联邦大学（UFPel）Eliseu Maciel农学院植物保护系，巴西南里奥格兰德州佩洛塔斯。

[2]圣卡塔琳娜农业研究与农村推广公司（CEPAF/EPAGRI）家庭农业研究中心，巴西圣卡塔琳娜州沙佩科。

[3]都柏林大学都柏林圣三一学院医学院生理学学科，爱尔兰都柏林

*通讯作者：电子邮箱：matheus.rakes@gmail.com（M. Rakes）

摘要

作物保护产品的桶混剂在农业系统中广泛使用，但其对生物防治剂的综合影响仍未得到充分了解。我们评估了四种合成杀虫剂单独施用或与三种杀菌剂和两种除草剂组成二元混合物施用时，对*Telenomus podisi*（膜翅目：小蜂科）成虫和蛹的致死、亚致死及跨代效应。该卵寄生蜂是害虫椿象的重要天敌。在成虫生物测定中，异噁唑虫酰胺与高效氯氟氰菊酯的 LC_{50} 值为 28.26 mg a.i. L^{-1}，而乙酰甲胺磷的 LC_{50} 值为 265.88 mg a.i. L^{-1} 。总体而言，与单一产品相比，混合物加剧了不良效应，降低了存活率、寄生率和寿命。异噁唑虫酰胺与百菌清或草甘膦可溶液剂混用时，寄生率最低。此外还检测到跨代效应，包括 F_1 代羽化率降低，以及部分处理中的雄性比例增加。蛹期暴露后，若干混合物降低了 F_0 代羽化率；乙虫腈与苯锈啶的混合物，以及乙酰甲胺磷、联苯吡菌胺、丙硫菌唑和肟菌酯组成的混合物，还降低了羽化成虫的寄生率和寿命。利用降低系数（Ex）综合评估致死和亚致死反应后发现，若干混合物的毒性增加，且

IOBC风险分类也发生变化；值得注意的是，所有杀虫剂与草甘膦的混合物在蛹期暴露后均达到Ex = 100%。这些发现表明，单独评估农药可能会低估其对*T. podisi*的生态毒理风险，并凸显了在综合害虫管理项目中考虑农药混剂的必要性。

关键词： *Telenomus podisi*；草甘膦；杀菌剂；生理选择性

引言

过去几十年来，随着免耕系统的采用以及连续种植系统的集约化，新热带区的农业发生了显著变化。例如，在巴西塞拉多的主要农业区，目前一个农业年度内最多可种植三茬作物（Fuentes-Llanillo et al. 2021；Kassam et al. 2022；Vezzani et al. 2024）。尽管这些变化使生产系统实现了现代化并提高了盈利能力，但这种集约化也促成了“绿色桥梁”的形成，为节肢动物害虫持续提供食物资源和庇护所，从而有利于它们在种植系统中存活（Panizzi and Lucini 2024；Queiroz et al. 2025）。在这些节肢动物中，新热带褐蝽 *Euschistus heros*（Fabricius, 1798）（半翅目：蝽科）被视为大豆生产系统中的关键害虫，尤其是在巴西、阿根廷和巴拉圭，以及美国东南部、北部和西部（Kistner 2017；Dellapé 2021；Ademokoya et al. 2022；Panizzi et al. 2022；Bueno 等 2023；Panizzi et al. 2026）。随着大豆种植在全球范围内扩展，*E. heros*已成为记录频率最高的物种，在大豆田中出现的植食性蝽总数中占比最高可达82%（Saldanha et al. 2024）。这种害虫通过取食大豆营养和生殖结构造成数量和质量损失（Corrêa-Ferreira and Panizzi 1999；Lucini and Panizzi 2018；Tessmer et al. 2022）。

植食性蝽类复合群的防治主要依赖施用合成杀虫剂进行化学防治（Pozebon 等，2020年）。尤其是在大豆作物中，对这些节肢动物害虫的防治占巴西田间杀虫剂施用总量的50%以上；有时在一个大豆生长季内，杀虫剂喷施次数多达五次（Carnevalli 等，2022；Ávila 等，2024；Bueno 等，2024；Saldanha 等，2024）。然而，在巴西及世界其他农业地区，杀虫剂很少单独施用，因为几乎所有种植者都会使用桶混剂，以发挥其操作上的优势

（Gazziero，2015年；Sparks，2025年）。在此背景下，杀虫剂-杀菌剂组合占农药混剂的30%以上；而在种植耐草甘膦大豆（Roundup® Ready 技术）的地区，超过70%的施药会将草甘膦与杀虫剂混用（Gazziero，2015年；Gandini 等，2020年）。尽管合成杀虫剂对巴西农业极为重要，但不加区分地使用（不考虑经济阈值和/或按日历施药）可能导致不良后果，包括植食性蝽类种群对杀虫活性成分的敏感性迅速降低（Tibola 等，2021年；Steinhaus 等，2022；Moreira 等，2024），以及破坏生物防治剂提供的生态系统服务；这些生物防治剂可能自然存在，也可能通过增殖式或淹没式生物防治项目释放（Carvalho 等，2019；Bueno 等，2026）。

在更可持续的害虫管理策略中，近年来增殖式生物防治的应用日益增多，处理面积每年扩大20% 以上（ van Lenteren 等，2021 年）。卵寄生蜂目前被视为大豆害虫蝽类最重要的生物防治剂，其中，*Telenomus podisi* Ashmead（膜翅目：小蜂科）是美国和巴西大豆田中数量最多的物种之一（Moonga 等，2018）。此外，由于其对气候变化具有广泛的适应能力（Braz 等，2021年）、人们对 *T. podisi* 生物生态学已有丰富了解（Parra 等，2023年），且释放技术不断进步，包括利用无人机释放蛹或预先饲喂的成虫寄生蜂（Weber 等，2022；Ramos 等，2024；Roswadoski 等，2024；Ribeiro 等，2024），因此仅在巴西，这种寄生蜂就有望在超过3800 万公顷的土地上释放（Parra，2019）。

鉴于化学防治仍是现实且实用的选择，而生物防治对于发展更具可持续性的种植系统日益不可或缺，因此，建立有效的综合害虫管理（IPM）方案的关键步骤，是了解这些防治策略在真实作物管理背景下的兼容性（Bueno 等，2023年）。因此，评估农药对天敌毒性的研究，对于整合化学防治与生物防治至关重要，无论采用增补式生物防治还是保育式生物防治方法（Rakes 等，2021；Bueno 等，2026）。然而，迄今为止，现有科学证据主要基于评估单一农药单独施用时与天敌的兼容性，其中包括 *T. podisi* [例如，Stecca 等（2018）；Zantedeschi 等（2018a、b）；Pazini 等（2019）；Silva 等（2022）；Santos 等（2022）]。这种方法并不能充分反映实际田间条件，因为使用桶混剂

可能改变混合外源化合物的理化性质，从而显著改变其对有益节肢动物的毒性（Gandini 等，2020年）。

本研究的主要假设是，杀虫剂与杀菌剂或除草剂的二元混合物会因其对该卵寄生蜂蛹期和成虫期的致死效应而与*T. podisi*不相容。作为次要假设，我们预测这些混合物还会诱导亚致死效应和跨代效应，损害该生物防治因子的关键生物学性状，并可能降低其对大豆害虫蝽类的防治效果。为检验这些假设，我们评估了成虫暴露后的致死毒性和蛹期暴露后的成虫羽化，以及对F_0 和F_1代寿命、寄生率、子代羽化和性比的亚致死效应和跨代效应。我们分别单独使用4种杀虫剂制剂，或将其与大豆生产中常用的3种杀菌剂和2种除草剂配制成二元混合物，以确定其对卵寄生蜂*T. podisi*的影响。

材料与方法

《昆虫》

生物测定所用的卵取自实验室饲养的*E. heros*种群；该种群源自于巴西圣卡塔琳娜州沙佩科大豆田采集的蝽类（27°05′19″ S, 52°38′13″ W）。种群维持程序遵循Silva 等（2011）所述方法。

*T. podisi*种群由从 Nitro BioControle（塞尔唐济纽，圣保罗，巴西）获得的个体建立。该卵寄生蜂按照 Peres 和 Corrêa-Ferreira（2004）所述方法进行饲养，以*E. heros*的卵作为寄主。蝽和寄生蜂种群均饲养于人工气候室内，温度为 25 ± 2 °C，相对湿度为 65 ± 10%（RH），光周期为14:10小时（L:D）。

农药

生物测定选用了四种属于不同化学类别的杀虫剂、三种杀菌剂和两种草甘膦类除草剂的商品制剂，因为这些制剂在巴西的大豆生产中应用广泛（Agrofit 2026）。所用农药及商品制剂的更多信息见表1。

生物测定

所有生物测定均在受控条件下进行，使用 BOD型气候控制箱（Eletrolab Indústria e Comércio de Equipamentos para Laboratório Ltda.，巴西圣保罗州圣保罗市），条件设定为 25 ± 0.5 °C 、 70 ± 5% RH 、 14:10 h （光照 : 黑暗）光周期，光照强度为 8,380 lx。所有生物测定均采用完全随机设计。处理包括单独施用各农药，以及每种杀虫剂分别与每种杀菌剂或除草剂组成的二元混合物，另设阴性对照，共计30种处理。

开展了两种生物测定，以评估杀虫剂与杀菌剂或除草剂二元混合物对卵寄生蜂 *T. podisi* 的影响。第一种生物测定评估了成虫寄生蜂暴露于处理后，F_0 代的死亡率（致死效应）、寄生率和寿命，以及F_1代的成虫羽化和性比。由于成虫期具有较高的敏感性，首先估算了所测杀虫剂的半数致死浓度（LC_{50}），随后将其用于该生物测定。第二种生物测定是在 *T. podisi* 达到蛹期时，对已被寄生的 *E. heros* 卵施用相同处理。评估指标包括存活F_0 代寄生蜂的成虫羽化、寄生率和寿命，以及F_1 代的成虫羽化和性比。对于蛹期暴露，使用每种农药标签推荐施用量中的最高值。即使某些产品在该浓度下不会影响寄生蜂羽化，也仍采用相同的施用量标准，以确保各处理间的方法学标准一致。

对 *T. podisi* 成虫的毒性

合成杀虫剂中位致死浓度（LC_{50}）的测定

乙酰甲胺磷、联苯菊酯、丁硫克百威、乙虫腈、异噁唑虫酰胺和高效氯氟氰菊酯的 LC_{50} 值，是在初步生物测定中根据相应商品制剂标签上标明的有效成分浓度测定的。这些测定分两个阶段进行。第一阶段旨在确定各杀虫剂可导致 5–95% 死亡率的浓度范围。为此，将各杀虫剂用蒸馏水稀释，制备有效成分浓度为 1,000 μg a.i. mL^{-1} 的储备液，并以此配制连续的 1:10 稀释液。第二阶段为正式的浓度-反应生物测定。根据第一阶段确定的浓度范围，

每种杀虫剂用蒸馏水稀释储备液，配制约七个浓度。

将羽化48小时的 *T. podisi* 成虫用二氧化碳（CO_2）麻醉后，放入培养皿（直径90 mm）中。随后，使用配备0.3 mm喷嘴、工作压力为20 psi的喷雾器（OVD Importadora e Distribuidora Ltda.，巴西南里奥格兰德州新汉堡）施用500-μL处理液。施药器经校准，喷液量相当于150 L ha^{-1}。施药后，将每组10只寄生蜂转移至平底玻璃管（直径25 mm× 95 mm高）中，管口用薄纱覆盖。每种浓度设10个重复。阴性对照仅使用蒸馏水。每天在薄纱上滴一滴纯蜂蜜，作为寄生蜂的食物来源。处理后72 h评估死亡率。经细毛刷轻轻刺激后仍无活动的个体判定为死亡。

致死效应（F_0 代）

评估了 *T. podisi* 暴露于乙酰甲胺磷、联苯菊酯 +丁硫克百威、乙虫腈和异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯的 LC_{50} 剂量后产生的成虫死亡率；这些药剂单独施用，或与杀菌剂联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯、苯锈啶和百菌清以及配制为可溶性浓缩剂（SL）或水分散粒剂（WG）的草甘膦除草剂组成二元混合物后施用。施药、寄生蜂处理和死亡率评估程序与 LC_{50} 测定所述程序相同。阴性对照仅使用蒸馏水。

每种处理设置五个重复，每个重复包含 10 只寄生蜂，暴露时日龄为 48 小时。每天在薄纱上提供一滴纯蜂蜜作为食物来源。处理 72 小时后评估死亡率；经细毛刷轻轻刺激后仍无活动的个体被视为死亡。

亚致死效应（F_0 代和 F_1 代）

在处理后存活72小时的寄生蜂中，每个处理随机选取五只雌蜂以评估寄生率。将雌蜂分别放入平底玻璃管中（直径25毫米× 95 毫米高），上端开口用薄纱覆盖，并用橡皮筋固定。每个

实验单元均放入一条天蓝色卡纸条，其上含有35枚新鲜的*E. heros*卵（~12 小时龄），并将这些卵暴露于一只雌性寄生蜂下24小时。

经过这一时段后，取出卵卡并分别转移至新的玻璃管中，以确定存活的 F_0 雌蜂所寄生的卵数。具有寄生蜂发育所特有黑色的卵被视为已寄生卵。随后，通过记录已寄生卵中羽化的 F_1 成虫数量，以及 F_1 后代中雄性和雌性的比例，评估跨代效应。

还使用与上述相同的实验单元，评估存活至处理暴露结束的 F_0 寄生蜂的寿命。每日记录死亡率，直至所有寄生蜂死亡，并提供纯蜂蜜液滴作为食物来源，自由取食。每只寄生蜂作为一个重复，每种处理设置 15 个重复。

***T. podisi*蛹的毒性**

致死效应（F_0 代）

针对蛹期的寄生后生物测定中，使用天蓝色卡纸制作 2.5-cm2 卵卡。每张卵卡上用无色无味的阿拉伯胶粘附 35 枚被*T. podisi*寄生的*E. heros*卵。随后将每张卵卡放入平底玻璃管（直径 25 mm、× 95 mm 高），并在寄生后 216 h（9 天）内置于 BOD 型恒温培养箱中，温度保持在 25 °C；这一时段对应*T. podisi*的蛹期（Stecca 等，2018）。

随后，每种农药处理分配五个重复进行施药。使用与成虫生物测定所述相同的设备对每张卡片喷洒 500 μL 相应的处理液，并将设备校准至喷液量相当于 150 L ha^{-1}；操作遵循国际生物防治组织（IOBC）制定的规程（Hassan 等 2000；Stecca 等 2018；Rakes 等 2022）。

处理后，将含有喷洒过药剂的*E. heros*卵和*T. podisi*蛹的卡片转移至与上述相同的玻璃管中，并置于 BOD 型恒温培养箱内。随后，测定蛹期暴露于各处理后的 F_0 代成虫羽化情况。只有完全从寄主卵中羽化的个体才被视为成功羽化。

亚致死效应（F_0 代和F_1 代）

在蛹期暴露于各处理后成功羽化的寄生蜂中，每个处理随机选取 15 只 F_0 代成虫，分别置于平底玻璃管中（直径 25 mm、高度× 95 mm），以评估其寿命。每日记录存活情况，直至每只寄生蜂死亡，并提供纯蜂蜜液滴作为食物来源。

此外，每种处理随机选取5只F_0 代雌蜂，以评估寄生率。评估成虫暴露后亚致死效应的程序与上述方法相同。最后，通过记录F_0 代雌蜂寄生的卵中羽化的成虫数量，并确定后代中雄性和雌性的比例，评估F_1 代的跨代效应。

数据分析、降低系数（Ex）和IOBC分类

为估算供试杀虫剂对成虫*T. podisi*的LC50值，使用SAS统计软件9.2版（SAS Institute 2011）中的PROBIT过程，拟合了采用互补对数-对数链接函数的二项模型（gompit模型）。

通过拟合二项式广义线性模型（GLMs）（Nelder和Wedderburn 1972；McCullagh和Nelder 1989；Demétrio等，2014），分析成虫死亡率和成虫暴露后F1代羽化率，并在线性预测子中纳入处理效应（logit链接）。通过拟合β-二项广义线性模型，分析成虫暴露后的寄生率和F_1 代雌蜂比例，以及蛹期暴露后的F0代羽化率、F1代羽化率和F1代雌蜂比例，并在线性预测子中纳入处理效应（logit链接）。

通过拟合位置、尺度和形状广义加性模型（GAMLSS）的贝塔-二项模型，对蛹期暴露后的寄生率进行分析（Stasinopoulos 等，2017）；在均值（logit链接）和离散度（对数链接）的线性预测子中纳入处理效应。重复之间无变异的处理（例如所有重复均为100%的死亡率或0%的羽化率）被排除在模型之外；由于死亡率较高而无法评估的处理也同样被排除。

通过拟合II型负二项广义线性模型，分析了存活于成虫暴露后并在蛹期暴露后羽化的寄生蜂的寿命。该模型的方差是均值的线性函数，并在线性预测子中纳入处理效应（对数链接）。使用gamlss软件包（Stasinopoulos et al. 2017）拟合β-二项和II型负二项广义线性模型，仅对均值进行建模。

通过对嵌套模型进行似然比（LR）检验，评估GAMLSS中处理效应的显著性。若结果显著，则通过LR检验评估处理间的两两差异。使用GAMLSS的虫形图（van Buuren and Fredriks 2001；Stasinopoulos et al. 2017）、广义线性模型的带模拟包络的半正态图（Moral et al. 2017），以及Cox比例风险模型的鞅残差目视分析（Therneau and Grambsch 2000），评估拟合优度。所有分析均使用R语言（R 核心团队 2026）完成。

采用 Cox比例风险模型分析寄生蜂死亡所需时间，针对每种杀虫剂进行拟合，并在线性预测变量中纳入处理的影响（单独施用的杀虫剂及其二元混合物、杀菌剂、除草剂和阴性对照）（对数链接）；同时，采用 Kaplan–Meier法估计生存曲线（Kaplan 和 Meier，1958）。

此外，采用降低系数（Ex）综合评估各处理对*T. podisi*的致死效应和亚致死效应，方法参照 Rakes 等（2022），将寄生蜂生物学表现的不同组成部分合并为单一指数。对于相对于阴性对照表示的变量，降低幅度按以下方式计算：

$$R\ (\%)\ =\ \max\left[0, (1\ -\ \frac{T}{C})\ \times\ 100\right]$$

其中，T 和 C 分别代表处理组和对照组的均值。负的降低值设为零。

所有生物测定均涵盖 F_0 和 F_1 代，并根据直接暴露的寄生蜂发育阶段而有所不同。在成虫暴露生物测定中，F_0 代寄生蜂直接暴露于各处理；因此，Ex 综合了 F_0 代成虫的死亡率（Emx）、寄生率降低幅度（PR）、F_0 代成虫寄生后代的羽化率降低幅度（ERF_1）、性比降低幅度（SR）以及寿命降低幅度（LR），如下所示：

$$Ex\ (\%)\ =\ 100\ \times\ \{1\ -\ [(1\ -\ \frac{Emx}{100})(1\ -\ \frac{PR}{100})(1\ -\ \frac{ER_{F1}}{100})(1\ -\ \frac{SR}{100})(1\ -\ \frac{LR}{100})]\}$$

在蛹期暴露生物测定中，F0代在蛹期直接受到处理；因此，直接效应以F_0 羽化率（ERF_0）的降低来表示，而非成虫死亡率。在这种情况下，Ex综合了羽化的F_0 成虫寄生率（PR）的降低、F_1 羽化率（ERF_1）的降低、性比（SR）的降低以及寿命（LR）的缩短，具体如下：

$$Ex\ (\%)\ =\ 100\ \times\ \{1\ -\ [(1\ -\ \frac{ER_{F0}}{100})(1\ -\ \frac{PR}{100})(1\ -\ \frac{ER_{F1}}{100})(1\ -\ \frac{SR}{100})(1\ -\ \frac{LR}{100})]\}$$

对于因寄生蜂未能存活或羽化而无法评估的变量，将其降低幅度设为100%。Ex值按照国际生物防治组织（IOBC）的实验室分类进行分类：1级，无害（Ex < 30%）；2级，轻微有害（30% ≤ Ex < 80%）；3级，中度有害（80% ≤ Ex ≤ 99%）；4级，有害（Ex >99%）。

结果

对*T. podisi*成虫的毒性

致死效应

T. podisi成虫的估算 LC_{50} 值介于 28.26 至 265.88 mg a.i. L^{-1}。按升序排列，异噁唑虫酰胺、 + λ-氯氟氰菊酯、联苯菊酯、+ 丁硫克百威、乙虫腈和乙酰甲胺磷的 LC_{50} 估算值分别为 28.26、42.97、68.27 和 265.88 mg a.i. L^{-1} （表2）。尽管大多数比较的 95% 置信区间并未重叠，但联苯菊酯、+丁硫克百威与乙虫腈之间观察到置信区间重叠，因此仅依据置信区间是否重叠，无法确认这两项估算值之间存在显著差异。

暴露 72 h 后，*T. podisi*成虫的累积死亡率在各处理间存在显著差异（$\chi2 = 620.26$；自由度 = 28；$p < 0.01$）（表3）。在所评估的处理组中，单独施用合成杀菌剂联苯吡菌胺、+ 丙硫菌唑、+ 肟菌酯、苯锈啶和百菌清，以及两种草甘膦类除草剂制剂（WG 和 SL），其结果与阴性对照相比均无显著差异（表3）。此外，将苯锈啶与 LC_{50} 剂量的乙酰甲胺磷联合施用，与单独施用 LC_{50} 剂量的乙酰甲胺磷相比，死亡率显著增加了 40% 以上（$p < 0.01$）（表3）。

暴露于异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯 LC_{50} 的成年*T. podisi*中，存活概率存在显著差异；这些药剂单独施用或与受试合成杀菌剂或除草剂组成二元混合物施用时，均观察到此差异（Cox比例风险模型的 LR 检验）。涉及的药剂包括乙酰甲胺磷（图 1B；$\chi2= 54.90$；自由度 = 11；$p < 0.01$）、联苯菊酯 + 丁硫克百威（图 1C；$\chi2 = 46.01$；自由度 = 11；$p < 0.01$）和乙虫腈（图 1D；$\chi2 = 28.11$；自由度 = 7；$p < 0.01$）。当百菌清、联苯吡菌胺+ 丙硫菌唑 + 肟菌酯或草甘膦（可溶液剂）与异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯 LC_{50} 混用时，中位生存时间比单独施用

杀虫剂（39.0 天）短 4.5 至 23 天，但差异不显著（$p > 0.05$）；而与苯锈啶混用则提高了存活率（43.5 天；$p = 0.03$）（图 1A）。成年*T. podisi*暴露于乙酰甲胺磷 + 联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 +肟菌酯二元混合物后的中位生存时间（22.0 天），与单独施用乙酰甲胺磷（43.5 天；$p = 0.03$）和阴性对照（62.0 天；$p < 0.01$）相比，分别显著缩短约 20 天和 40 天；而乙酰甲胺磷 + 草甘膦（水分散粒剂）混用时，与单独施用乙酰甲胺磷相比，存活率有所提高（45.5 天；$p < 0.01$）（图 1B）。对于联苯菊酯 + 丁硫克百威（图 1C）和乙虫腈（图 1D），没有任何二元混合物使存活率低于单独施用杀虫剂时的水平；联苯菊酯 + 丁硫克百威与联苯吡菌胺+ 丙硫菌唑 + 肟菌酯（53.0 天）或草甘膦（水分散粒剂；60.5 天）混用时，存活率均高于单独施用杀虫剂（48.0 天；$p = 0.02$）。除乙酰甲胺磷 + 草甘膦（水分散粒剂）以及联苯菊酯 + 丁硫克百威与联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯、或任一草甘膦制剂组成的混合物外，所有单独施用或混用的杀虫剂处理与阴性对照均存在显著差异（$p > 0.05$）。

亚致死效应

观察到经处理暴露后存活的雌蜂（F_0 代）所产卵的寄生率存在显著差异（$\chi2 = 132.82$；自由度 = 26；$p < 0.01$）（表3）。在评估的处理组中，与对照相比，只有联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯、苯锈啶和百菌清未显著降低寄生率（表3）。相比之下，当昆虫暴露于异噁唑虫酰胺 LC_{50} 与高效氯氟氰菊酯的二元混合物，并分别与百菌清和草甘膦（可溶液剂）混配时，寄生率最低（<15%）。这些处理与所有其他处理均存在显著差异（表3）。

关于对F_0 代的亚致死效应，成虫寄生蜂暴露于各处理后，观察到暴露后存活72 h的昆虫寿命存在显著差异（$\chi2 = 91.21$；自由度 = 25；$p < 0.01$）（图2）。与阴性对照（59.00天）相比，单独施用联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯（37.50天）、草甘膦（可溶液剂，36.00天；水分散粒剂，40.40天）和乙虫腈（40.90天）后，寿命显著缩短；施用乙酰甲胺磷与联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯（24.20天）、苯锈啶（35.40天）、百菌清（35.00天）和草甘膦（可溶液剂；42.60天）的二元混合物后，寿命也显著缩短；施用联苯菊酯 + 丁硫克百威与苯锈啶（43.20天）和百菌清（39.10

天）的二元混合物后也如此；此外，单独施用异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯（29.70天），或施用其与联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯（20.30天）、苯锈啶（39.80天）和百菌清（32.80天）的二元混合物后，寿命也显著缩短。与阴性对照相比，这些处理使寄生蜂寿命缩短了15.8至38.7天（图2）。

在由存活的 F_0 雌蜂寄生的卵中羽化出的后代（F_1 代）中检测到了跨代效应，各处理间的子代羽化率存在显著差异（$\chi2 = 201.14$；自由度 = 25；$p < 0.01$）（表 4）。在评估的各处理中，与对照相比，只有单独施用苯锈啶和乙酰甲胺磷与草甘膦（可溶液剂）的二元混合物未显著影响子代羽化率，羽化率均超过 78%（表 4）。此外，羽化后代的性比也存在显著差异（$\chi2 = 82.70$；自由度 = 25；$p < 0.01$）（表 4）。在单独测试的农药中，与对照相比，乙酰甲胺磷、乙虫腈、联苯吡菌胺、丙硫菌唑与肟菌酯、百菌清以及草甘膦（可溶液剂）均显著提高了雄性后代的比例（表 4）。与对照相比，乙酰甲胺磷分别与百菌清或任一剂型的草甘膦组成的二元混合物，以及联苯菊酯与丁硫克百威和草甘膦（可溶液剂）组成的混合物，也显著提高了雄性比例（表 4）。

_T. podisi_蛹期毒性（寄生后生物测定）

致死效应

当以标签推荐剂量中的最高剂量将杀虫剂及其相应的二元混合物施用于已被寄生的*E. heros*卵时，即卵寄生蜂*T. podisi*的蛹期，在纳入统计分析的各处理间观察到成虫羽化率存在显著差异（F_0 成虫羽化率 $\chi2 = 180.47$；自由度 = 14；$p < 0.01$）（表5）。在这些处理中，仅联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 +肟菌酯、百菌清，以及乙虫腈 + 联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 +肟菌酯的二元混合物与阴性对照相比无显著差异。此外，有15个处理未观察到成虫羽化，由于各重复之间不存在变异，这些处理被排除在统计分析之外（表5）。

此外，蛹期暴露于乙酰甲胺磷（图 3A；$\chi2 = 56.58$；自由度 = 8；$p < 0.01$）或乙虫腈（图 3B；$\chi2 = 40.01$；）时，观察到 *T. podisi* 的存活概率存在显著差异。

自由度 = 9；p < 0.01），无论是单独施用还是分别施用于相应的二元混合物中（Cox比例风险模型的 LR 检验）。与单独施用乙酰甲胺磷相比，联苯吡菌胺 +丙硫菌唑 + 肟菌酯与乙酰甲胺磷混用后，中位生存时间从 31 天降至 6 天，但差异不显著（p = 0.06）；而乙酰甲胺磷 + 百菌清混用后，存活率高于单独施用乙酰甲胺磷（36 天 vs. 31 天；p = 0.04）（图 3A）。相反，与单独施用乙虫腈相比，苯锈啶与乙虫腈的二元混合物使中位生存时间显著缩短约 50 天（4 天 vs. 55 天；p < 0.01）（图 3B）。

亚致死效应

羽化寄生蜂（F_0 代）的寄生率存在显著差异（$\chi2$ =50.40；自由度 = 12；p < 0.01），其在重复间的离散度也存在显著差异（$\chi2$ = 69.84；自由度 = 12；p < 0.01）（表5）。与阴性对照相比，单独施用乙酰甲胺磷，或将乙酰甲胺磷与联苯吡菌胺、丙硫菌唑、肟菌酯或百菌清混合施用，均显著降低了寄生率；将乙虫腈与联苯吡菌胺、丙硫菌唑、肟菌酯、百菌清或苯锈啶混合施用，也显著降低了寄生率。其中，乙酰甲胺磷与联苯吡菌胺、丙硫菌唑、肟菌酯混合施用，以及乙虫腈与苯*p*锈啶混合施用时，寄生率降幅超过40%（表5）。此外，成功羽化的寄生蜂成虫寿命存在显著差异（$\chi2$ = 97.80；自由度 = 12；$p < 0.01$）。与对照相比，接触两种草甘膦制剂、单独施用乙酰甲胺磷或将其与联苯吡菌胺、丙硫菌唑、肟菌酯或百菌清混合施用，以及将乙虫腈与联苯吡菌胺、丙硫菌唑、肟菌酯、百菌清或苯锈啶混合施用后，F_0 寄生蜂寿命均显著缩短（图4）。

关于跨代效应，子代羽化（F1代）存在显著差异（$\chi2$ = 31.58；自由度 = 12；$p < 0.01$）（表6）。与对照相比，单独施用百菌清、乙虫腈和乙酰甲胺磷，以及乙酰甲胺磷 + 联苯吡菌胺 +丙硫菌唑 + 肟菌酯、乙虫腈 + 百菌清和乙虫腈 + 苯锈啶的二元混合物，均显著降低了羽化寄生蜂的比例（表6）。羽化的F1后代性比也存在显著差异（$\chi2$ = 56.92；自由度 = 12；$p < 0.01$）（表6）。与阴性对照相比，单独施用乙酰甲胺磷、乙酰甲胺磷与百菌清或联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯的二元混合物，以及乙虫腈 + 苯锈啶的二元混合物，均显著提高了羽化雄蜂的比例（表6）。

蛹和成虫的降低系数

采用降低系数（Ex）综合评估致死效应和亚致死效应时，单独施用的农药与相应二元混合物之间存在明显差异（图5）。成虫暴露后，单独施用的杀菌剂和两种草甘膦制剂均被归为轻微有害（IOBC 2级），E_x 值介于45.8%至75.0%之间。在单独施用的杀虫剂中，联苯菊酯 + 丁硫克百威也被归为轻微有害，而乙酰甲胺磷、乙虫腈和异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯则被归为中度有害（3级）（图5A）。

总体而言，杀虫剂与杀菌剂或除草剂混用会增强对*T.podisi*的总效应。这一模式在联苯菊酯 + 丁硫克百威中尤为明显：单独施用时为轻微有害，而在评估的所有二元混合物中均转为中度有害。乙酰甲胺磷、乙虫腈和异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯单独施用时已被归为中度有害；其中一些二元混合物的分类转为有害（4级），具体包括乙虫腈和异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯与任一种草甘膦制剂混用、乙酰甲胺磷与草甘膦（可溶液剂）或苯锈啶混用，以及异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯与百菌清混用（图5A）。

蛹期暴露后，单独施用的农药中，联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯是唯一被归为无害（1级）的农药；其他杀菌剂、两种草甘膦制剂以及乙虫腈均被归为轻微有害（2级）（图5B）。乙酰甲胺磷被归为中度有害，而联苯菊酯 + 丁硫克百威和异噁唑虫酰胺 +高效氯氟氰菊酯被归为有害，二者的 Ex 值均达到100%。在二元混合物中，乙虫腈与苯锈啶或任一种草甘膦制剂混用时，E_x 显著增加。值得注意的是，所有含草甘膦的杀虫剂混剂，无论制剂类型如何，蛹期暴露后的 Ex 值均达到100%（图5B）。

讨论

在一次防治作业中同时使用不同农药，是拓宽害虫防治范围并获得作业便利的常见做法，包括减少田间作业次数，并且，

因此降低生产成本（Gazziero 2015年）。然而，农药桶混也可能产生不良影响，包括降低处理效果的拮抗相互作用，以及可能损害目标节肢动物防治效果、降低作物生产力并增加混合外源化合物毒性的理化变化（Karkanis 等，2018；Gandini 等，2020年；Morais 等，2024）。传统上，生态毒理学研究侧重于单独测试杀虫剂对有益节肢动物的影响，且往往只考察数量有限的生物学终点（Rakes 等，2021；Schmidt-Jeffris 2023；Elhamalawy 等，2024；Mata 等，2024）。本研究评估了杀虫剂与合成除草剂或杀菌剂二元混合物对卵寄生蜂*T. podisi*两个发育阶段造成的致死、亚致死和跨代效应。总体而言，结果显示，杀虫剂与杀菌剂或除草剂混用时，通常会增强其对*T. podisi*蛹和成虫的急性毒性。此外，视二元混合物的不同，还检测到亚致死和跨代效应，这表明农药混剂可能损害与该生物防治因子所提供的生态系统服务直接相关的生物学性状。

在巴西，几乎所有（>95%）获准用于防治大豆植食性蝽的合成杀虫剂，主要属于三个化学类别：有机磷酸酯类、新烟碱类和拟除虫菊酯类（Ibama 2022；Agrofit 2026）。然而，常有报告指出，属于这些类别的杀虫剂对有益节肢动物具有高毒性（Serrão 等，2022）。在*T. podisi*中，乙酰甲胺磷、高效氯氟氰菊酯 + 噻虫嗪以及联苯菊酯 + 丁硫克百威等杀虫剂，在按标签推荐的最高剂量进行测试时，会导致暴露寄生蜂完全死亡（Pazini 等，2017；Zantedeschi 等，2018a）。鉴于这些化合物具有较高毒性，我们在评估其二元混合物之前，首先测定了所测试杀虫剂的 LC_{50}。结果显示，在某些组合中，加入草甘膦制剂会显著提高成虫死亡率，并明显降低其随时间推移的存活率。桶混可能通过有效成分与制剂成分之间的相互作用，改变农药分子的理化行为，并可能影响酸解离（pKa）和辛醇-水分配系数（Kow）等性质（Zhang 等，2018；Gandini 等，2020年）。pKa 的变化可能影响电离程度，进而影响化合物溶解度；而 log Kow 的改变可能改变分子亲脂性，从而影响其对生物膜的亲和力以及暴露生物体对其的吸收（Brooks 等，1976；deBoer 和 Satchivi，2014；Ren 等，2023）。

除急性死亡外，存活于农药暴露后的个体还可能因亚致死效应而出现生物学表现的显著受损（Bartling 等，2024）。在本研究中，成年*T. podisi*单独暴露于杀虫剂后，寄生率虽有所下降，但与杀菌剂百菌清、联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯或苯锈啶混用时，这些影响通常更为明显；某些含草甘膦的混合物也呈现类似情况。寄生率的亚致死效应可能由多种机制引起，包括运动行为和繁殖行为改变导致寄主搜寻能力受损（Araújo 等，2024），以及农药诱导的神经生理紊乱（Agathokleous 等，2023），最终影响与适合度相关的性状和生命表性状（Araújo 等，2022）。这些机制也可能导致存活寄生蜂寿命缩短。对单一农药进行评估时，Silva 等（2022）发现，与对照相比，跗节暴露于乙虫腈后*T. podisi*的寄生率没有显著下降。相反，雌性*T. podisi*暴露于联苯菊酯 + 丁硫克百威后，其寄生率相较于对照降低了30多倍。类似地，Zantedeschi 等（2018a）报告称，*T. podisi*经跗节接触暴露于杀菌剂肟菌酯 + 环丙唑醇的干燥残留物，或草甘膦类除草剂 Glyphosate Atanor®后，寄生率均未受到显著影响。采用类似的暴露方法，Santos 等（2022）发现，暴露于肟菌酯 + 丙硫菌唑后，*T. podisi*的寿命没有显著缩短。尽管单一农药对天敌的致死效应和亚致死效应已得到广泛研究，但人们对农药混剂如何改变这些反应仍知之甚少，尤其是在同时考察多个生物学终点时。

本研究还通过 F_1 子代羽化和性比评估了跨代效应。结果表明，成年 *T. podisi* 暴露于杀虫剂与除草剂或杀菌剂的二元混合物后，F_1 代的生物学表现会受到显著损害，尤其是与单独施用农药相比，子代羽化率有所降低。尽管某些二元混合物对子代羽化的影响显著，但对性比的影响通常较弱。一个重要例外是乙酰甲胺磷或联苯菊酯 +丁硫克百威与草甘膦（可溶液剂）组成的二元混合物：羽化的 F_1 子代中，雄性分别占 54.84% 和 58.39%，而阴性对照中为 10.50%（表 4）。迄今为止，研究农药诱导的天敌跨代效应的研究相对较少（Pazini 等，2019；Dai 等，2021；Morais 等，2022；Rakes 等，2024；Santana 等，2025），而

这些反应背后的机制仍知之甚少。亲代效应可能涉及亲代通过改变对下一代的投入，将自身状态传递给子代（Bonduriansky & Crean 2018；Sánchez-Tójar 等，2020；Castano-Sanz 等，2022）；也可能是预期性亲代效应，即亲代根据环境条件改变子代表型（Burgess and Marshall 2014）。在寄生蜂中，子代性别分配还受内源性和外源性因素的复杂交互作用调控，其中包括农药暴露等环境诱导的生理胁迫（Desneux 等，2007；Moiroux 等，2014；Yadav & Borges 2024）。例如，Rakes 等（2022）发现，亲代寄生蜂通过跗节接触氰氟草酯类除草剂施药 5 天后的残留物后，*T. podisi* 的 F_1 代性比发生了变化。同样，在鳞翅目卵寄生蜂 *Trichogramma pretiosum* Riley（膜翅目：纹翅卵蜂科）中，Costa 等（2023）报告称，硫双威暴露导致子代羽化率显著降低，同时雄性比例大幅上升。

农药的影响可能从无害到有害不等，具体取决于暴露寄生蜂的发育阶段（Stecca 等 2018；Theenoor 等 2024）。与成虫相比，卵寄生蜂的未成熟期通常可获得寄主卵及其周围层结构的一定保护，从而减少与农药残留的直接接触。然而，在整个未成熟发育过程中，敏感性可能存在显著差异，蛹期尤其容易受到农药暴露的影响（Hassan 等 2009；Rakes 等 2021；Gill 等 2022）。我们的研究也显示了这一规律：寄生卵寄主中含有蛹期 *E. heros* 的 *T. podisi* 卵暴露于异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯、乙酰甲胺磷或联苯菊酯 + 丁硫克百威，以及其中若干种与除草剂或杀菌剂组成的二元混合物后，寄生蜂羽化均受到严重抑制。相反，与成虫直接暴露相比，蛹期暴露对寄生率及随后跨代响应的影响通常较为轻微。处理寄生卵寄主后观察到的毒性，至少部分可能取决于喷雾液的理化性质与寄主卵壳的结构和渗透性特征之间的相互作用。昆虫卵壳是一种复杂的多层细胞外基质，主要由结构蛋白构成，脂质和碳水化合物也参与其结构和渗透性的形成。因此，农药渗透可能同时取决于卵壳性质以及相关化合物的理化特性。然而，农药理化性质与其穿过寄主卵并到达未成熟寄生蜂之间的关系仍缺乏充分表征，尤其是对于农药混剂而言。

值得注意的是，通过降低系数（Ex）整合致死和亚致死终点，进一步证实了农药混剂具有更高的生态毒理风险。在若干情况下，将杀虫剂与杀菌剂或除草剂混用后，其处理等级从单独施用杀虫剂时的等级提升至更高的 IOBC毒性等级。这一规律在成虫暴露下的联苯菊酯 + 丁硫克百威以及蛹期暴露下的乙虫腈处理中尤为明显。此外，所有杀虫剂–草甘膦混合物在蛹期暴露后均达到 100% 的 Ex，尽管单独使用草甘膦仅被归类为轻微有害。这些发现表明，根据单一农药得出的选择性分类可能无法充分预测其混合物对 *T. podisi* 的总体影响，并进一步强调了在生态毒理风险评估中纳入多个生物学终点的重要性。

总之，我们的研究结果表明，当这些化合物以二元混合物形式使用时，单独考察农药有效成分可能会低估其对*T. podisi*的总体影响。本研究综合评估了成虫期和蛹期暴露后产生的致死、亚致死及跨代响应，从而更全面地刻画了大豆生产中常用农药混剂可能带来的生态毒理风险。若干混合物表现出的显著影响表明，不能仅根据单一产品的选择性谱推断农药与生物防治剂的兼容性。这些响应可能损害*T.podisi*种群有效发挥作用并持续存在所必需的生物学性状，因此可能削弱这种寄生蜂在田间条件下对生物防治的贡献。

作者贡献

MR：概念化、方法学、调查、数据整理、形式分析、撰写——初稿。MCM：调查、数据整理、撰写——审阅与编辑。GRP：数据整理、形式分析、撰写——审阅与编辑。DB、ADG和LPR：概念化、资源、监督、项目管理、经费获取、撰写——审阅与编辑。所有作者均已阅读并批准本稿的最终版本。

声明

资金

作者谨向巴西国家科技发展委员会（CNPq，资助编号310385/2022-9）和圣卡塔琳娜州研究与创新基金会（FAPESC，资助编号2023TR000220）表示感谢。我们还感谢CNPq（项目编号163544/2021-2）为第一作者提供奖学金。本文所表达的观点、研究结果以及结论或建议均属于作者个人意见，不一定代表资助机构的立场。

利益冲突

作者声明不存在利益冲突。

数据和材料的可用性

不适用

代码可用性

不适用

伦理批准

本研究不包含任何作者开展的涉及人类参与者或大型动物的研究。本研究以《昆虫》和农作物为研究对象，因此无需获得研究伦理委员会的批准。

参与同意

作者声明同意参与本文。

发表同意

作者同意发表本文。

参考文献

Ademokoya B, Athey K, Ruberson J（2022）。北美洲蝽类（半翅目：异翅亚目）的天敌与生物防治。《昆虫》，13：932。https://doi.org/10.3390/insects13100932

Agathokleous E, Blande JD, Masui N, Calabrese EJ, Zhang J, Sicard P, Guedes RN, Benelli G（2023年）农业和环境领域中具有重要意义的节肢动物寄生蜂和寄生虫的亚致死化学刺激。环境研究 15:116876。https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116876

Agrofit。巴西。农业、畜牧业和供应部。2025年。http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons。访问日期：2025年1月10日。

Araújo MB, Peglow SV, Rakes M, Escher JP, Ribeiro LP, Bernardi D, Zefa E, Grütz macher AD（2024）寄生蜂的产卵行为*Telenomus remus*（膜翅目：小蜂科）对草地贪夜蛾（鳞翅目：夜蛾科）卵的产卵行为。巴西科学院年鉴 7:e20240632。https://doi.org/10.1590/0001-3765202420240632

Araújo MB, Rakes M, Pasini RA, Bernardi D, Grützmacher AD（2022）。杀虫剂对卵寄生蜂的生物学特性所产生的影响 *Telenomus remus*（膜翅目：小蜂科）。《生物防治科学与技术》，32：877-890。https://doi.org/10.1080/09583157.2022.2060495

Ávila CJ, Vessoni IC, Silva IF, Vieira ECS, Mariani A, Moreira SCS（2024）大豆综合害虫管理：如何减少作物损害并提高农户利润。《新热带农业评论》11：e8214-e8214。https://doi.org/10.32404/rean.v11i2.8214

Bartling MT, Brandt A, Hollert H, Vilcinskas A（2024）。关于农药对昆虫亚致死效应的最新认识。《国际分子科学杂志》，25：6007。https://doi.org/10.3390/ijms25116007

Bonduriansky R, Crean AJ（2018）什么是亲代状态转移效应，如何检测？《生态学与进化方法》9：450-456。 https://doi.org/10.1111/2041-210X.12848

Braz ÉC, Bueno ADF, Colombo FC, Queiroz AP（2021年）温度对田间释放的未保护和封装寄生蜂蛹中*Telenomus podisi*羽化的影响。《新热带昆虫学》50：462-469。https://doi.org/10.1007/s13744-021-00857-3

Brooks GT（1976）杀虫剂的渗透与分布。载于：Wilkinson CF（编）《杀虫剂生物化学与生理学》，1976th 版。Springer US，波士顿，第3–58页。

Bueno ADF、Sutil WP、Jahnke SM、Carvalho GA、Cingolani MF、Colmenarez YC、Corniani N（2023）生物防治作为大豆综合害虫管理（综合害虫管理）的一部分：潜力与挑战。《农学》13：2532。https://doi.org/10.3390/agronomy13102532

Bueno AF、Colmenarez YC、Carnevalli RA、Sutil WP（2023）采用大豆综合害虫管理的益处与展望：巴西项目的成功。《植物健康案例》phcs20230006：1–16。https://doi.org/10.1079/planthealthcases.2023.0006

Bueno AF、Sutil WP、Hoshino A、Silva GV（2024）精准诊断对于综合害虫管理的重要性与挑战：从大豆—玉米生产系统内部的不同视角看待问题。《昆虫学通讯》6：ec06011–ec06011。https://doi.org/10.37486/2675-1305.ec06011

Bueno AF、Hoback WW、Colmenarez YC、Valmorbida I、Sutil WP、Zang LS、Horikoshi RJ（2026）大豆综合害虫管理的进展、挑战与未来展望，重点关注全球主要生产者对生物防治的采用。《植物》15：366。https://doi.org/10.3390/plants15030366

Burgess SC、Marshall DJ（2014）。适应性亲代效应：适当估计环境可预测性和子代适合度的重要性。《Oikos》，123：769-776。https://doi.org/10.1111/oik.01235

Carnevalli RA, Oliveira AB, Gomes EC, Possamai EJ, Silva GC, Reis EA, Roggia S, Prando AM, Lima D（2022）巴拉那州2021/2022作季大豆综合害虫管理结果。巴西农业研究公司大豆研究中心，

隆德里纳，文档448。http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1147914。访问日期：2025年5月5日。

Carvalho GA, Grützmacher AD, Passos LC, Oliveira RL（2019）。农药对昆虫天敌的生理和生态选择性。载于：Souza B, Vázquez L, Marucci R（编）。新热带农业生态系统中害虫的天敌。施普林格，冈，第469-478页

Castano-Sanz V, Gomez-Mestre I, Garcia-Gonzalez F（2022）. 农药暴露的进化后果包括跨代可塑性和潜在的终末投资跨代效应。《进化》, 76:2649-2668. https://doi.org/10.1111/evo.14613

Chapman RF, Simpson SJ, Douglas A。《昆虫：结构与功能》，2013。第五版。剑桥大学出版社，纽约，美国。

Corrêa-Ferreira BS, Panizzi AR（1999）。大豆蝽及其管理，技术通报第24号。巴西农业研究公司- CNPSo，隆德里纳。

Costa MA, Farias ES, Andrade ED, Carvalho VC, Carvalho GA（2023年）。棉花上登记使用的杀虫剂对未成熟期*Trichogramma pretiosum*的致死、亚致死及跨代效应。《害虫科学杂志》，96:119-127。https://doi.org/10.1007/s10340-022-01481-9

Dai C, Ricupero M, Wang Z, Desneux N, Biondi A, Lu Y（2021年）。一种新烟碱类杀虫剂和一种新型亚砜亚胺类杀虫剂对异色瓢虫的跨代效应。《昆虫》，12:681。https://doi.org/10.3390/insects12080681

DeBoer GJ，Satchivi N（2014）比较杀虫剂与除草剂的转运特性，阐明了新型杀虫剂 isoclastTM active 和新型除草剂 arylexTM active 如何实现对害虫的有效对照。载于：Myung K、Satchivi NM、Kingston CK（编）《农用化学品在植物中的滞留、吸收和转运》，第1171卷，美国化学会，第75–93页。

Dellape G（2021年）。阿根廷蝽类的分布更新（半翅目：蝽科）。《阿根廷昆虫学会杂志》，80：23–32。https://doi.org/10.25085/rsea.800103

Demétrio CGB, Hinde J, Moral RA（2014）昆虫学中过度离散数据的模型。载于：Ferreira CP, Godoy WAC（编）《应用于昆虫学的生态建模》。施普林格，尚，页219-259。https://doi.org/10.1007/978-3-319-06877-0_9

Desneux N, Decourtye A, Delpuech JM（2007）农药对有益节肢动物的亚致死效应。昆虫学年度评论 52:81-106。https://doi.org/10.1146/annurev.ento.52.110405.091440

Donoughe S（2022）。昆虫卵形态：进化、发育与生态学。Curr Opin Insect Sci 50:100868。https://doi.org/10.1016/j.cois.2021.12.008

Elhamalawy O, Bakr A, Eissa F（2024）农药对农业生态系统中非靶标无脊椎动物的影响。Pestic Biochem Physiol 202:105974。https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2024.105974

Fuentes-Llanillo R, Telles TS, Junior DS, Melo TR, Friedrich T, Kassam A (2021年) 巴西保护性农业中免耕实践的扩展。Soil Till Res 208:104877.https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104877

Gandini EMM, Costa ESP, Santos JB, Soares MA, Barroso GM, Corrêa JM, Zanuncio JC (2020年) 桶混剂中农药和/或肥料的兼容性。J Cleaner Produc 268:122152 https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122152

Gazziero DLP (2015年) 巴西农场桶内农药混合物。Planta Daninha, 33:83-92. https://doi.org/10.1590/S0100-83582015000100010.

Gill JK、Sangha KS、Shera PS、Sharma S（2022）。杀虫剂对稻螟赤眼蜂Ishii（膜翅目：纹翅卵蜂科）的毒性及其对寄生效率和成虫羽化的后续影响

子代发生率。《国际热带昆虫科学杂志》42：3489-3498。 https://doi.org/10.1007/s42690-022-00873-9

Hassan HA（2009）某些新型杀虫剂对棉叶虫生理、组织学和分子水平的作用效率。《埃及生物科学学术期刊》。A辑，昆虫学，2：197-209。https://doi.org/10.21608/eajbsa.2009.15443

Ibama（2022）巴西环境与可再生自然资源研究所。 http://www.ibama.gov.br/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos。访问日期：2025年1月6日

Kaplan EL、Meier P（1958）基于不完整观测的非参数估计。《美国统计学会会刊》53：457-481。https://doi.org/10.1080/01621459.1958.10501452

Karkanis AC、Vellios E、Grigoriou F、Gkrimpizis T、Giannouli P（2018）不同环境条件下除草剂与杀菌剂在硬粒小麦（*Triticum durum* Desf.）中的药效和相容性评价：对籽粒产量和麸质含量的影响。《克卢日-纳波卡植物学、园艺与农业生物学杂志》46：601-607。 https://doi.org/10.15835/nbha46211208

Kassam A、Friedrich T、Derpsch R（2022）全球保护性农业的成功经验与教训。《农学》12：769。https://doi.org/10.3390/agronomy12040769

Kistner EJ（2017）。气候变化对褐斑翅蝽（半翅目：蝽科）潜在分布和丰度的影响，特别关注北美洲和欧洲。Environmental Entomology，46：1212-1224。 https://doi.org/10.1093/ee/nvx157

Lucini T, Panizzi AR（2018）。刺吸电位记录技术（EPG）：揭示蝽科蝽类取食植物行为的突破性工具。《新热带昆虫学》 47：6-18。https://doi.org/10.1007/s13744-017-0574-3

Mata L, Knapp RA, McDougall R, Overton K, Hoffmann AA, Umina PA（2024）农药对有益生物的急性毒性效应——破除迷思，促进农业环境中更可持续地使用化学品。《Science of the Total Environment》930：172521。 https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172521

McCullagh P，Nelder JA（1989）《广义线性模型》，第2版。Chapman and Hall，伦敦

Moiroux J、Brodeur J、Boivin G（2014）卵寄生蜂的性比随温度变化：行为调节与生理限制。Animal Behaviour 91：61-66。https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2014.02.021

Moonga MN、Kamminga K、Davis JA（2018）。路易斯安那州大豆中蝽（半翅目：蝽科）卵寄生蜂的现状。Environmental Entomology，47：1459-1464。https://doi.org/10.1093/ee/nvy154

Morais MC、Rakes M、Balzan F、Grützmacher AD、Bernardi D、Ribeiro LDP（2024）停留剂、驱离剂和取食刺激剂与合成杀虫剂混合使用对绿腹蝽的影响：行走行为评估、理化相互作用以及实验室和田间试验。J Econ Entomol 117：167-177https://doi.org/10.1093/jee/toad215

Morais MC, Rakes M, Pasini RA, Grützmacher AD, Nava DE, Bernardi D. (2022). 杀虫剂对 *Trichopria anastrephae*（膜翅目：阔腹螯蜂科）的毒性及跨代效应。《新热带昆虫学》，51:143-150. https://doi.org/10.1007/s13744-021-00925-8

Moral RA, Hinde J, Demétrio CGB (2017) R语言中的半正态图与过度离散模型：hnp 软件包。Journal of Statistical Software 81:1-23. https://doi.org/10.18637/jss.v081.i10

Moreira RP, Palharini RB, Massoli GS, Diniz LH, Godoy DN, Warpechowski LF, Steinhaus EA, Stürmer GR, Bernardi, O（2024）巴西南部 *Euschistus heros* 和*Diceraeus furcatus* （半翅目：蝽科）对选定杀虫剂的地理变异和种间变异。Crop Protection 179:106625。https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106625

Nelder JA, Wedderburn RWM（1972）广义线性模型。皇家统计学会杂志 135:370-384https://doi.org/10.2307/2344614。

Panizzi AR、Lucini T（2024）生活史研究及其对蝽管理的影响。载于：Bueno AF、Panizzi AR（编）《蝽（半翅目：蝽科）研究与管理：来自巴西、欧洲和美国的最新进展与案例研究》，1st版。施普林格·自然瑞士，第41–50页。

Panizzi AR、Lucini T、Aldrich JR（2022）新热带区植食性蝽害虫地位的动态变化。《新热带昆虫学》51：18–31。https://doi.org/10.1007/s13744-021-00928-5

Panizzi AR、McPherson JE、Bundy CS、Esquivel JF、Pozzebon A、Mele A、Scaccini D、Musolin DL、Karpun NN、Neimorovets VV、Javahery M、Numata H、Shintani Y、Lim UT、Zang LS、Chen YM、Mensah RK、Miles MM、Walter GH、Jackai LEN、

合害虫管理）的创新。《普通昆虫学》46：341–364。
https://doi.org/10.1127/entomologia/3800

Parra JRP (2019) 巴西农业中的生物防治。《昆虫学通讯》 1:ec01002. https://doi.org/10.37486/2675-1305.ec01002

优化卵寄生蜂 *Telenomus podisi* 的规模化饲养，以防治褐蝽 *Euschistus heros*。《昆虫》14:435。https://doi.org/10.3390/insects14050435

农药对 *Euschistus heros*（半翅目：蝽科）及其寄生蜂 *Telenomuspodisi*（膜翅目：小蜂科）的差异化影响。科学报告 9:6544。https://doi.org/10.1038/s41598-019-42975-4

Pazini JDB、Pasini RA、Seidel EJ、Rakes M、Martins JFDS、Grützmacher AD（2017）农药在水稻灌区使用时对*Telenomus podisi* Ashmead（膜翅目：小蜂科）的副作用。《生态毒理学》26：782-791。 https://doi.org/10.1007/s10646-017-1809-0

Peres WAA、Corrêa-Ferreira BS（2004）在*Telenomus podisi* Ash.和*Trissolcus basalis*（Woll.）（膜翅目：小蜂科）上，以*Euschistus heros*（Fab.）（半翅目：蝽科）的卵为寄主进行大量繁殖的方法。《新热带昆虫学》33：457-462。https://doi.org/10.1590/S1519-566X2004000400010

Pozebon H, Marques RP, Padilha G, O´Neal M, Valmorbida I, Bevilaqua JG, Tay WT, Arnemann JA（2020年）。巴西节肢动物入侵与大豆生产：综述。《J Econ Entomol》113:1591- 1608. https://doi.org/10.1093/jee/toaa108

Queiroz AP, Panizzi AR, França-Neto JDB, Bueno AF（2025年）大豆（夏季）—玉米（秋冬季）轮作体系中Diceraeus melacanthus*Diceraeus melacanthus*（Dallas）的管理策略。《新热带昆虫学》54:1-12。https://doi.org/10.1007/s13744-024-01219-5

R 开发核心团队（2021年）R——用于统计计算的语言和环境。版本3.6.2。http://r-project.org

R 核心团队 (2026) R语言：用于统计计算的语言和环境。R 统计计算基金会，奥地利维也纳。版本 4.6.1。https://www.R-project.org

Rakes M, Morais, MC, Ribeiro LP, Palma GR, Moral, RA, Bernardi D, Grützmacher AD (2024). 合成杀虫剂对用于大豆作物中蝽科昆虫生物防治的寄生蜂 *Telenomus podisi* 的温度改变效应。《作物健康杂志》，76:1027-1038。 https://doi.org/10.1007/s10343-024-01020-9

Rakes M、Pasini RA、Morais MC、Araujo MB、Pazini JB、Seidel EJ、Bernardi D、Grützmacher AD（2021）对寄生蜂 *Trichogramma pretiosum*的农药选择性：一份涵盖10年的模式数据库及其对综合害虫管理的意义。《生态毒理学与环境安全》208：111504。https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111504

Rakes M、Pasini RA、Morais MC、Zanella R、Prestes OD、Bernardi D、Grützmacher AD（2022）灌溉水稻上使用的农药对寄生蜂 *Telenomus podisi*的残留效应和叶面持留性（膜翅目：小蜂科）。《害虫科学杂志》95：1121–1133。https://doi.org/10.1007/s10340-021-01436-6

Ramos GS、Dalbianco AB、Santos DM、Alvarez DL、Oliveira R（2024）在巴西大豆中释放*Euschistus heros*进行管理。*Telenomus podisi*。《生物防治》69：529-537。https://doi.org/10.1007/s10526-023-10235-0

Ren Y、Li Y、Ju Y、Zhang W、Wang Y（2023）昆虫表皮与杀虫剂研发。《昆虫生物化学与生理学档案》114：e22057。https://doi.org/10.1002/arch.22057

Ribeiro LP、Frassini G、Nesi CN、Rakes M（2024）在大豆作物中进行*Telenomus podisi* Ashmead（膜翅目：小蜂科）的接种式释放，以管理蝽类复合种群。《植物寄生生物》52：78。https://doi.org/10.1007/s12600-024-01193-z

Roswadoski L, Sutil WP, Carneiro GS, Maciel RM, Coelho Jr A, Bueno AF（2024）不同日粮饲喂的*Telenomus podisi*成虫的释放策略和卵寄生。《生物防治》198:105626。https://doi.org/10.1016/j.bioControle.2024.105626

Saldanha AV, Horikoshi R, Dourado P, Lopez-Ovejero RF, Berger GU, Martinelli S, Head GP, Moraes T, Corrêa AS, Schwertner CF（2024）巴西大豆作物上蝽类（半翅目：蝽科）的物种组成和丰度的首次广泛分析。《害虫管理科学》80:3945-3956。https://doi.org/10.1002/ps.8097

Sánchez-Tójar A, Lagisz M, Moran NP, Nakagawa S, Noble DW, Reinhold K（2020年）关于适应性“跨代效应”普遍性的争论仍未有定论。《生态学快报》，23:1715-1718。https://doi.org/10.1111/ele.13479

Santana EDR, Thiesen LV, Ribeiro LP, Takahashi TA, Parra JRP, Yamamoto PT（2025年）。对亲代有害、对子代无害：植物源和合成杀虫剂对卵寄生蜂的致死效应及跨代效应 *Trichogramma atopovirilia*。《昆虫》，16:493。https://doi.org/10.3390/insects16050493

Santos LV, Alvarez DL, Santos LM, Prado JC, Bueno RCO, Hoback WW（2022）农药对 *Telenomus podisi*（膜翅目：小蜂科）未成熟期和成虫期的选择性及亚致死效应。《国际热带昆虫科学杂志》42：1731-1736。https://doi.org/10.1007/s42690-021-00698-y

Sparks TC（2025年）。杀虫剂混剂——用途、益处与注意事项。《害虫管理科学》81：1137-1144。https://doi.org/10.1002/ps.7980

SAS Institute（2011）。统计分析系统：SAS学习入门，第9.2版。SAS Institute，美国北卡罗来纳州卡里。

Schmidt-Jeffris RA（2023年）。农药对害虫天敌的非靶标影响：当前认知的进展与不足。《Curr Opin Insect Sci》58：101056。https://doi.org/10.1016/j.cois.2023.101056

Serrão JE, Plata-Rueda A, Martínez LC, Zanuncio JC (2022). 农业中农药对非靶标昆虫的副作用：一篇简评。《科学与自然》109:17。https://doi.org/10.1007/s00114-022-01788-8

Silva DM, Carvalho GA, Souza WR, Bueno ADF (2022) 杀虫剂对卵寄生蜂的毒性*Telenomus podisi* 和 *Trissolcus teretis*（膜翅目：小蜂科）。《巴西昆虫学杂志》66:e20220035。https://doi.org/10.1590/1806-9665-RBENT-2022-0035

Silva FAC, Calizotti GS, Panizzi AR (2011) 实验室饲养条件下植食性蝽科昆虫的存活率和产卵量。《新热带昆虫学》40:35-38。https://doi.org/10.1590/S1519-566X2011000100005

Stasinopoulos DM, Rigby RA, Heller GZ, Voudouris V, De Bastiani F（2017）《灵活回归与平滑：在 R语言 中使用 GAMLSS》。Chapman and Hall/CRC，博卡拉顿

Stecca CS, Bueno AF, Pasini A, Silva DM, Andrade K, Zirondi Filho DM（2018）大豆作物中使用的杀虫剂对卵寄生蜂 *Telenomus podisi* （膜翅目：小蜂科）。《新热带昆虫学》47：281-291。 https://doi.org/10.1007/s13744-017-0552-9

Steinhaus EA, Warpechowski LF, Braga LE, Morin M, Tenório C, Boff JS., Bernardi O, Farias JR (2022) 巴西南部侵害大豆和玉米的蝽类（半翅目：蝽科）对杀虫剂的种内和种间敏感性变异。《J Econ Entomol》115:631-636。https://doi.org/10.1093/jee/toac013

Therneau TM, Grambsch PM (2000) 生存数据建模：扩展Cox模型。施普林格，纽约。https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3294-8

Tessmer MA, Kuhn TMA, Appezzato-da-Glória B, Lopes JRS, Erler G, Bonani JP (2022) *Euschistus heros*（F.）若虫对大豆荚和种子造成损害的组织学研究。《新热带昆虫学》51:112-121。https://doi.org/10.1007/s13744-021-00931-w

Theenoor R, Ghosh A, Venkatesan R（2024）协调对照：了解农药对寄生蜂的复杂影响，以加强害虫管理。Curr Opin Insect Sci 65:101236。https://doi.org/10.1016/j.cois.2024.101236

Tibola CM, Silva L, Sgubin F, Omoto C（2021）利用*Euschistus heros*（Fabricius）（半翅目：蝽科）包埋式人工饲料生物测定监测其对杀虫剂的抗性。《昆虫》12:599。https://doi.org/10.3390/insects12070599

van Buuren S, Fredriks M（2001）Worm图：一种用于拟合生长参考曲线的简单诊断工具。*Stat Med* 20:1259–1277。https://doi.org/10.1002/sim.746

Van Lenteren JC, Bueno VH, Klapwijk JN (2021) 增殖式生物防治，载于：Mason PG（编）《生物防治：害虫管理的全球影响、挑战与未来方向》，1st 版。Csiro Publishing，墨尔本，第90-109页。

Vezzani FM, Anghinoni I, Cherubin MR, Mendes IC (2024) 土壤健康与现代巴西农业, 载于：Karlen DL（编）土壤健康系列：第3卷《巴西的土壤健康与可持续农业》，第1-18页。

Weber ID, Garcia AG, Bueno AF, Oliveira RC, Godoy WAC (2022)。释放策略 *Telenomuspodisi*，用于防治*Euschistus heros*：一种计算建模方法。《害虫管理科学》，78：4544-4556。https://doi.org/10.1002/ps.7074

Yadav P, Borges RM (2024). 寄生蜂在环境诱导的生理胁迫下的产卵决策。Curr Opin Insect Sci, 65:101240. https://doi.org/10.1016/j.cois.2024.101240

Zantedeschi R, Grützmacher AD, Pazini JDB, Bueno FA, Machado LL (2018a) 登记用于大豆作物的农药对 *Telenomus podisi* 和 *Trissolcus basalis* 的选择性。热带农业研究 48:52-58.https://doi.org/10.1590/1983-40632018v4850348

Zantedeschi R, Rakes M, Pasini RA, Araújo MB, Bueno FA, Grützmacher AD (2018b) 大豆登记农用化学品对 *Telenomus podisi* 和 *Trissolcus basalis* 未成熟期的毒性。《植物寄生生物》46:203-212. https://doi.org/10.1007/s12600-018-0660-z

Zhang Y, Lorsbach BA, Castetter S, Lambert WT, Kister J, Wang NX, Klittich CJ, Roth J, Sparks TC, Loso MR. 现代农用化学品的理化性质指南（2018）《害虫管理科学》74:1979-91。https://doi.org/10.1002/ps.5037

表1. 用于测试对*Telenomus podisi.*的致死效应和亚致死效应的农药。

有效成分	商品名	制剂	测试剂量 [1] (mL或g ha^{-1})	制造商
杀虫剂				
联苯菊酯 + 丁硫克百威	Talisman®	乳油 (EC)	600*	巴西FMC化学有限公司
乙酰甲胺磷	Perito 970 SG®	水溶性颗粒剂 (SG)	1000*	UPL do Brasil Indústria e Comércio de Insumos Agropecuários S.A
异噁唑虫酰胺 + lambda-cyhalo-噻虫	Verdavis®	悬浮剂（SC）+ 微囊悬浮剂（CS）	250*	Syngenta Proteção de cultivos Ltda.
乙虫腈	Curbix 200 SC®	悬浮剂（SC）	1000*	Bayer S.A.
杀菌剂				
联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 三-氟唑菌酰羟胺	Fox® Xpro	悬浮剂（SC）	500	Bayer S.A.
苯锈啶	Versatilis®	乳油（CE）	500	巴斯夫欧洲公司
百菌清	Bravonil 720®	悬浮剂（SC）	2000	Syngenta Proteção de cultivos Ltda.
除草剂				
草甘膦（可溶液剂）	Roundup Original Mais®	可溶性浓缩剂（SL）	6000	Bayer S.A.
草甘膦（水分散粒剂）	Roundup WG®	水分散粒剂（WG）	3500	Bayer S.A.

*剂量对应于蛹期暴露生物测定中使用的最高标签推荐剂量。对于成虫暴露生物测定，杀虫剂按其估算的 LC_{50} 值（表2）施用，而杀菌剂和除草剂则按所示剂量施用。。

表2. 采用局部喷雾生物测定测得的不同杀虫剂对*Telenomus podisi*成虫的致死浓度（LC_{50}，mg

处理	n [1]	斜率 （± SE）	χ^{2} [(2)]	df [3]	h [4]	LC_{50} (IC) [5]
联苯菊酯 + 丁硫克百威	275	3.24 ± 0.29	1.26	2	0.63	42.97（36.99 – 48.98）
乙酰甲胺磷	290	3.79 ± 0.29	2.22	2	1.10	265.88（200.90 – 346.56）
异噁唑虫酰胺 + λ-氯氟氰菊酯	649	1.70 ± 0.15	1.98	2	0.99	28.26（23.32 – 34.46）
乙虫腈	672	1.58 ± 0.16	2.21	2	1.11	68.27（41.51 – 122.16）

[1]n：测试的昆虫数量；[2] χ2：计算所得的卡方值；[3] d.f.：自由度；[4] h：异质性因子；[5] IC：95%置信区间；

表3. 在 F_0 代中，成虫暴露于杀虫剂及其二元混合物后，成虫的累积死亡率和*Telenomus podisi*的寄生率。

处理	死亡率[1] （%） [1]	寄生率（%） [2]
对照	2.50 ± 2.50 j	89.50 ± 3.43 a
异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯	54.60 ± 3.47 ghi	48.10 ± 0.74 efg
乙虫腈	47.92 ± 4.58 你好	50.73 ± 3.99 defg
乙酰甲胺磷	45.48 ± 4.43 你好	53.29 ± 12.63 defg
联苯菊酯 + 丁硫克百威	46.70 ± 5.31 i	66.98 ± 1.58 bcde
联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯	7.50 ± 4.79 j	79.51 ± 3.32 ab
苯锈啶	4.58 ± 2.67 j	78.43 ± 3.55 abc
百菌清	6.79 ± 4.72 j	73.56 ± 4.34 abcd
草甘膦（可溶液剂）	8.12 ± 4.75 j	66.06 ± 4.29 bcde
草甘膦（水分散粒剂）	5.05 ± 2.94 j	70.49 ± 3.69 bcde
异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯 + 联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + tri-strobin	72.41 ± 9.57 fghi	32.46 ± 13.86 h
异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯 + 苯锈啶	76.50 ± 4.32 def	34.80 ± 11.00 gh
异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯 + 百菌清	82.92 ± 7.47 bcdef	10.45 ± 6.69 i
异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯 + 草甘膦（可溶液剂）	92.73 ± 2.43 abc	2.42 ± 2.42 i
异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯 + 草甘膦（水分散粒剂）	96.88 ± 3.12 ab	-[#]
乙虫腈 + 联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯	74.23 ± 2.52 def	54.80 ± 4.96 def
乙虫腈 + 苯锈啶	85.42 ± 3.56 bcde	54.42 ± 14.57 defg
乙虫腈 + 百菌清	78.41 ± 2.84 cdef	55.95 ± 7.27 cdef
乙虫腈 + 草甘膦（可溶液剂）	100.00 ± 0.00*	-[#]
乙虫腈 + 草甘膦（水分散粒剂）	93.51 ± 2.33 ab	-[#]
乙酰甲胺磷 + 联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯	66.02 ± 6.70 fgh	30.48 ± 5.96 gh
乙酰甲胺磷 + 苯锈啶	97.73 ± 2.27 a	55.26 ± 3.62 def
乙酰甲胺磷 + 百菌清	70.00 ± 7.07 efg	51.18 ± 6.25 defg
乙酰甲胺磷 + 草甘膦（可溶液剂）	94.64 ± 3.42 ab	47.31 ± 4.71 efg
乙酰甲胺磷 + 草甘膦（水分散粒剂）	75.43 ± 5.32 def	56.02 ± 20.57 bcdef
联苯菊酯 + 丁硫克百威 + 联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯	79.17 ± 7.50 cdef	65.00 ± 8.38 bcde
联苯菊酯 + 丁硫克百威 + 苯锈啶	90.87 ± 5.51 abcd	54.43 ± 12.16 defg
联苯菊酯 + 丁硫克百威 + 百菌清	77.64 ± 9.13 def	32.47 ± 1.62 fgh
联苯菊酯 + 丁硫克百威 + 草甘膦（可溶液剂）	92.92 ± 2.39 ab	51.99 ± 4.78 defg
联苯菊酯 + 丁硫克百威 + 草甘膦（水分散粒剂）	87.35 ± 2.82 bcd	63.30 ± 2.59 bcde
χ^{2}	620.26	132.82
Df	28	26
P	< 0.01	< 0.01

均值 ± 标准误后跟同一列中相同字母的数值，根据成对似然比检验，差异不显著（$p > 0.05$）。[1]二项式广义线性模型。

[2]贝塔-二项广义线性模型。
[*]处理未纳入统计分析（方差为零）。
[#]由于死亡率较高，未进行评估。

表 4. *Telenomus podisi*的羽化和性比，F_1 代成虫暴露于杀虫剂及其二元混合物时。

处理	羽化率（%）[1]	性比（%）[2#]
对照	88.71 ± 1.76 a	89.50 ± 2.15 a
异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯	32.24 ± 6.28 gh	83.03 ± 2.25 abcd
乙虫腈	77.85 ± 4.40 bc	75.43 ± 4.03 bcde
乙酰甲胺磷	66.31 ± 8.68 bcd	61.91 ± 16.09 ef
联苯菊酯 + 丁硫克百威	66.00 ± 8.60 cd	82.34 ± 1.72 abcd
联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯	72.17 ± 4.67 bcd	76.60 ± 2.54 bcde
苯锈啶	80.93 ± 3.64 ab	79.67 ± 2.49 abcde
百菌清	67.57 ± 6.47 cd	69.54 ± 2.71 def
草甘膦（可溶液剂）	67.83 ± 4.31 cd	70.79 ± 2.91 cdef
草甘膦（水分散粒剂）	74.26 ± 1.55 bcd	80.23 ± 2.18 abcd
异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯 + 联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯	28.76 ± 9.00 h	83.57 ± 5.31 abcd
strobin		
异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯 + 苯锈啶	66.39 ± 8.24 cde	82.41 ± 5.09 abcde
异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯 + 百菌清	63.33 ± 3.33 bcdef	75.71 ± 4.29 abcdef
乙虫腈 + 联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯	70.60 ± 3.08 bcd	83.57 ± 2.78 ab
乙虫腈 + 苯锈啶	61.81 ± 4.95 de	82.74 ± 3.13 abcd
乙虫腈 + 百菌清	50.51 ± 4.84 ef	83.49 ± 4.13 ab
乙酰甲胺磷 + 联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯	39.14 ± 7.55 fgh	84.42 ± 4.55 ab
乙酰甲胺磷 + 苯锈啶	68.02 ± 2.19 cd	83.82 ± 2.93 ab
乙酰甲胺磷 + 百菌清	40.72 ± 8.18 fgh	62.49 ± 2.81 f
乙酰甲胺磷 + 草甘膦（可溶液剂）	78.19 ± 5.69 abc	45.16 ± 4.38 g
乙酰甲胺磷 + 草甘膦（水分散粒剂）	44.44 ± 18.23 bcd	72.12 ± 3.36 bcdef
联苯菊酯 + 丁硫克百威 + 联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯	76.57 ± 2.78 bc	83.82 ± 4.95 ab
联苯菊酯 + 丁硫克百威 + 苯锈啶	78.10 ± 7.53 bcd	67.33 ± 17.22 abc
联苯菊酯 + 丁硫克百威 + 百菌清	45.66 ± 6.42 efg	77.42 ± 6.72 abcde
联苯菊酯 + 丁硫克百威 + 草甘膦（可溶液剂）	68.44 ± 3.59 cd	41.61 ± 10.90 g
联苯菊酯 + 丁硫克百威 + 草甘膦（水分散粒剂）	71.51 ± 7.08 bcd	77.84 ± 3.06 abcde
χ^2	201.14	82.70
Df	25	25
P	< 0.01	< 0.01

均值 ± > 0 05 [1]
标准误后跟列中相同字母的数值，根据成对似然比检验，差异不显著（p .）。二项式广义线性模型。[2]贝塔-二项广义线性模型。#羽化雌性的百分比。

表 5. 蛹暴露于杀虫剂及其二元混合物后，F_0 代 *Telenomus podisi* 的羽化率和寄生率。

处理	羽化率（%）[1]	寄生率（%）[2]
对照	81.71 ± 2.94 a	92.79 ± 2.23 a
异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯	0.00 ± 0.00*	-#
乙虫腈	67.43 ± 2.65 bc	89.43 ± 1.58 ab
乙酰甲胺磷	17.14 ± 2.02 f	77.86 ± 11.88 bcd
联苯菊酯 + 丁硫克百威	0.00 ± 0.00*	-#
联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯	81.71 ± 2.49 a	90.43 ± 2.45 ab
苯锈啶	34.86 ± 10.12 e	88.08 ± 3.94 abc
百菌清	82.86 ± 5.50 a	85.47 ± 2.84 abc
草甘膦（可溶液剂）	59.43 ± 6.22 cd	85.97 ± 2.60 abc
草甘膦（水分散粒剂）	64.57 ± 3.08 bc	86.50 ± 1.78 abc
异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯 + 联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯	0.00 ± 0.00*	-#
strobin		
异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯 + 苯锈啶	0.57 ± 0.57 小时	-#
异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯 + 百菌清	0.00 ± 0.00*	-#
异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯 + 草甘膦（可溶液剂）	0.00 ± 0.00*	-#
异噁唑虫酰胺 + 高效氯氟氰菊酯 + 草甘膦（水分散粒剂）	0.00 ± 0.00*	-#
乙虫腈 + 联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯	74.29 ± 4.69 ab	72.46 ± 18.19 d
乙虫腈 + 苯锈啶	48.57 ± 4.24 d	53.49 ± 17.38 d
乙虫腈 + 百菌清	64.57 ± 4.48 bc	68.84 ± 17.33 d
乙虫腈 + 草甘膦（可溶液剂）	0.00 ± 0.00*	-#
乙虫腈 + 草甘膦（水分散粒剂）	0.00 ± 0.00*	-#
乙酰甲胺磷 + 联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯	10.29 ± 1.46 fg	52.42 ± 5.43 d
乙酰甲胺磷 + 苯锈啶	5.14 ± 2.46 g	-#
乙酰甲胺磷 + 百菌清	14.29 ± 3.38 f	73.74 ± 9.01 cd
乙酰甲胺磷 + 草甘膦（可溶液剂）	0.00 ± 0.00*	-#
乙酰甲胺磷 + 草甘膦（水分散粒剂）	0.00 ± 0.00*	-#
联苯菊酯 + 丁硫克百威 + 联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯	0.00 ± 0.00*	-#
联苯菊酯 + 丁硫克百威 + 苯锈啶	0.00 ± 0.00*	-#
联苯菊酯 + 丁硫克百威 + 百菌清	0.00 ± 0.00*	-#
联苯菊酯 + 丁硫克百威 + 草甘膦（可溶液剂）	0.00 ± 0.00*	-#
联苯菊酯 + 丁硫克百威 + 草甘膦（水分散粒剂）	0.00 ± 0.00*	-#
χ^2	180.47	50.40
Df	14	12
P	< 0.01	< 0.01

均值 ± > 标准误后

0 05 [1] [2]

跟同一字母的数值，根据成对似然比检验（p .）差异不显著。贝塔-二项广义线性模型。贝塔-二项式广义加性模型位置、尺度和形状，其中处理对均值和离散度具有影响。*该处理未纳入统计分析（方差为零）。#由于死亡率较高，未进行评估。

表6。 当蛹暴露于杀虫剂及其二元混合物时，F_1 代 *Telenomus podisi* 的羽化率和性比

二元混合物。

处理	羽化率（%）[1]	性比（%）[1#]
对照	86.37 ± 1.87 a	85.71 ± 4.54 a
乙虫腈	69.48 ± 4.32 cd	72.81 ± 16.56 a
乙酰甲胺磷	59.13 ± 6.83 de	30.00 ± 16.77 bc
联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯	83.28 ± 3.57 abc	81.20 ± 4.48 a
苯锈啶	85.37 ± 3.50 ab	84.25 ± 1.76 a
百菌清	70.94 ± 6.02 cd	81.75 ± 3.66 a
草甘膦（可溶液剂）	81.23 ± 3.64 abc	74.20 ± 3.83 a
草甘膦（水分散粒剂）	81.47 ± 3.50 abc	78.80 ± 3.50 a
乙虫腈 + 联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯	76.91 ± 4.72 abcd	63.87 ± 21.82 ab
乙虫腈 + 苯锈啶	47.62 ± 17.71 e	22.22 ± 22.22 cd
乙虫腈 + 百菌清	70.05 ± 3.72 cd	83.73 ± 2.78 a
乙酰甲胺磷 + 联苯吡菌胺 + 丙硫菌唑 + 肟菌酯	70.35 ± 8.09 bcd	4.32 ± 2.70 d
乙酰甲胺磷 + 百菌清	73.72 ± 4.39 abcd	21.94 ± 15.62 cd

χ^2	31.58	56.92
Df	12	12
P	< 0.01	< 0.01

同一列中后接相同字母的均值 ± 0 05 1 > 标准误，根据成对似然比检验，差异不显著（p .）。贝塔-二项广义线性模型。#羽化雌性的百分比。

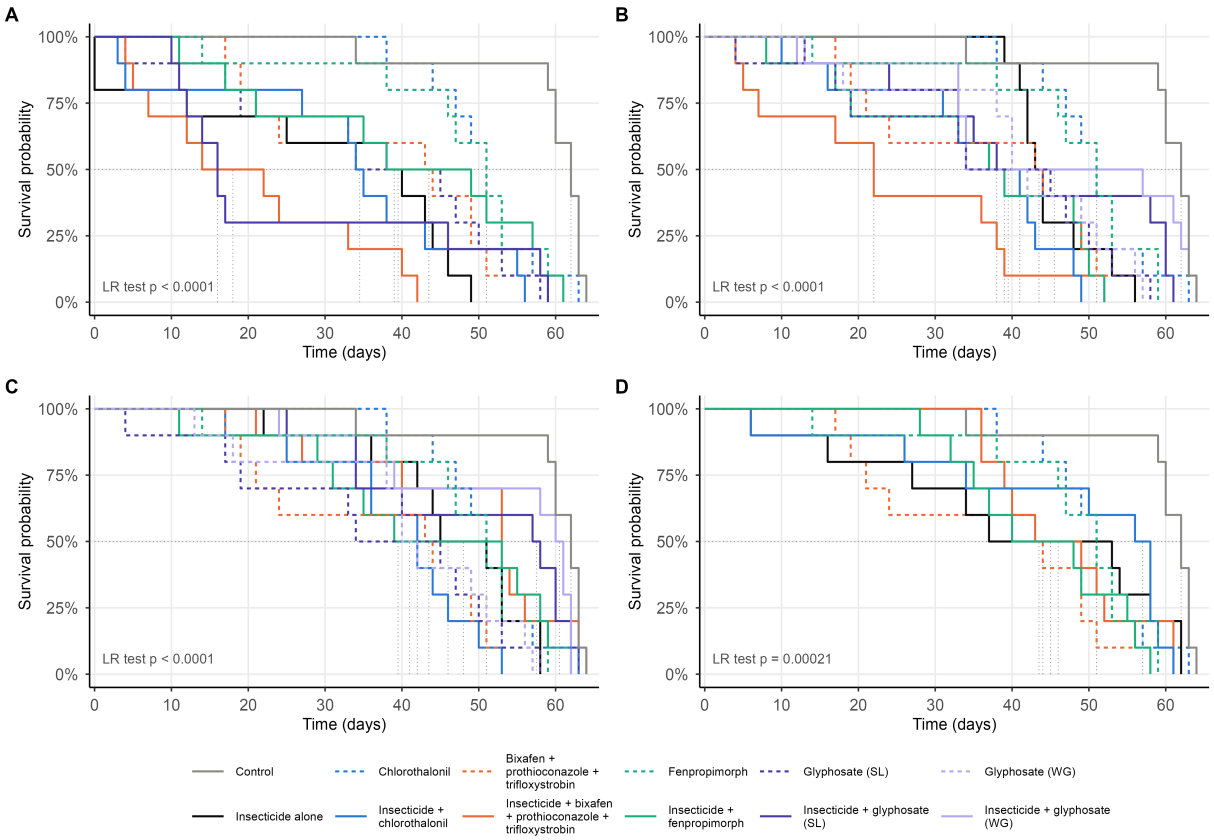

图 1. 成虫 *Telenomus podisi* 暴露于半数致死浓度异噁唑虫酰胺后，随时间变化的存活概率 + 高效氯氟氰菊酯（A）、乙酰甲胺磷（B）、联苯菊酯 + 丁硫克百威（C）和乙虫腈（D）的存活概率；这些药剂单独施用，或与一种受试合成杀菌剂或除草剂配成二元混合物施用。 颜色表示杀菌剂或除草剂；虚线表示单独施用的药剂，实线表示其与各面板所示杀虫剂配成的二元混合物。灰线和黑线分别表示阴性对照和单独施用的杀虫剂。点线表示各处理的中位生存时间，p 值来自 Cox比例风险模型的似然比检验。

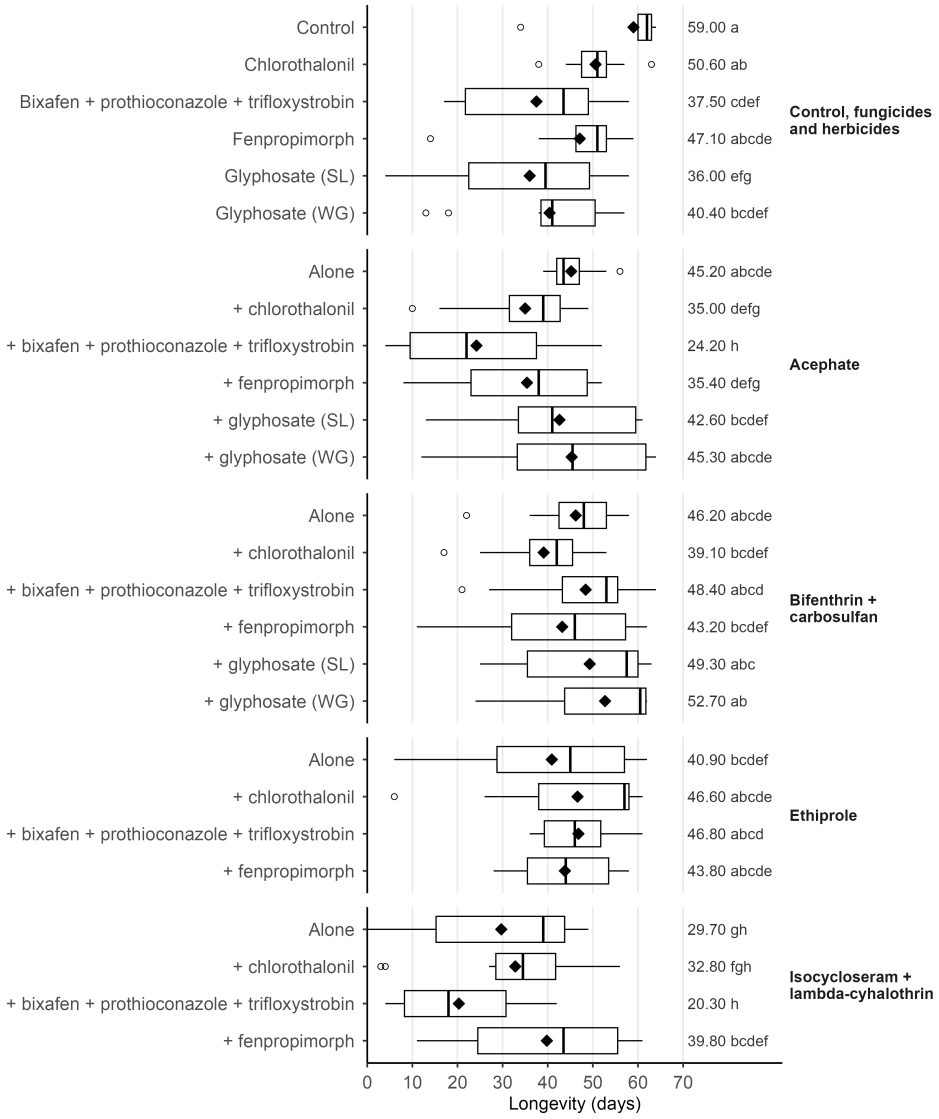

图2。 暴露于杀虫剂下的成年 *Telenomus podisi*（F_0 代）在相应 LC_{50} 值下，以及在标签推荐施用量下，接触单独施用或以二元混合物形式施用的杀菌剂和除草剂时的寿命。处理按杀虫剂分组（“单独”，即单独施用杀虫剂；“+”，即与所示杀菌剂或除草剂组成二元混合物）。箱体内的竖线表示中位数，箱体范围为第一至第三四分位数（四分位距，IQR），须线延伸至 1.5 × IQR 范围内的最小值和最大值，空心圆表示离群值，菱形表示均值。右侧数值为均值，后随字母；共享同一字母的处理根据 II 型负二项广义线性模型的成对似然比检验，差异不显著（$p > 0.05$）。

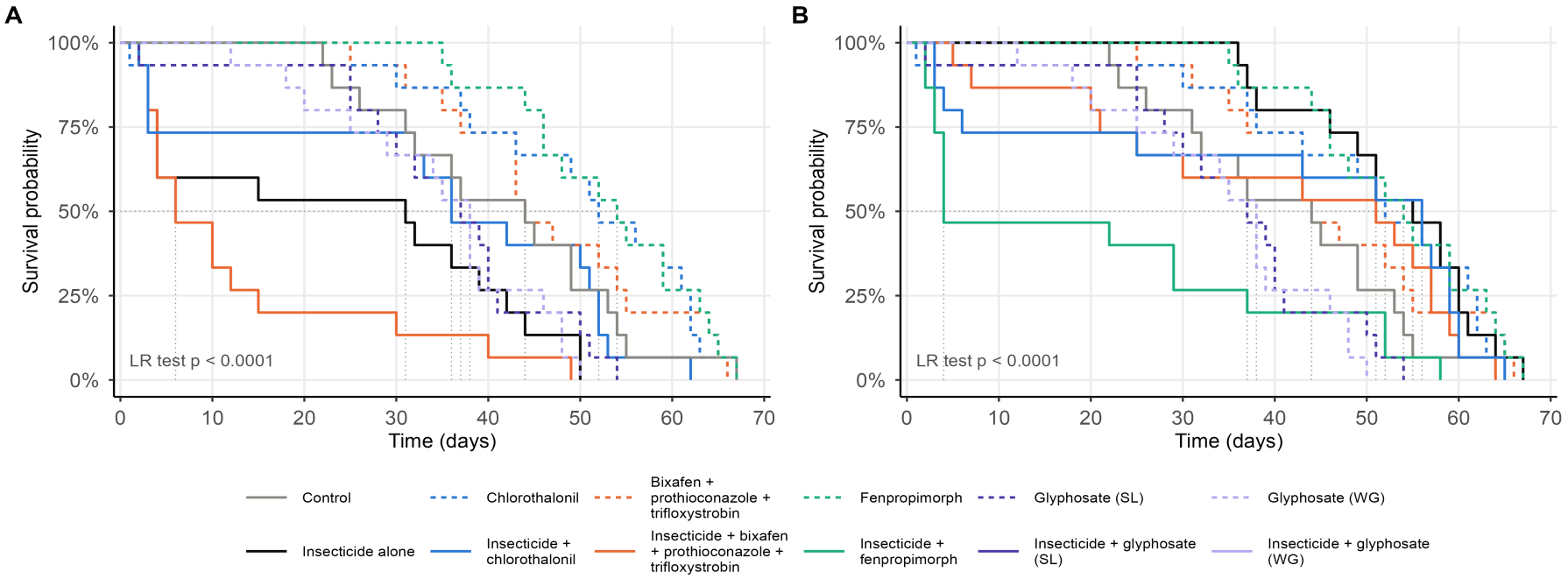

图 3. 成虫*Telenomus podisi*在寄生蜂蛹期暴露于乙酰甲胺磷 (A) 和乙虫腈 (B) 后的存活概率；这些药剂单独施用，或分别与一种受试合成杀菌剂或除草剂组成二元混合物施用。 颜色和线型同图 1。虚线表示各处理的中位生存时间，p 值来自 Cox比例风险模型的似然比检验。

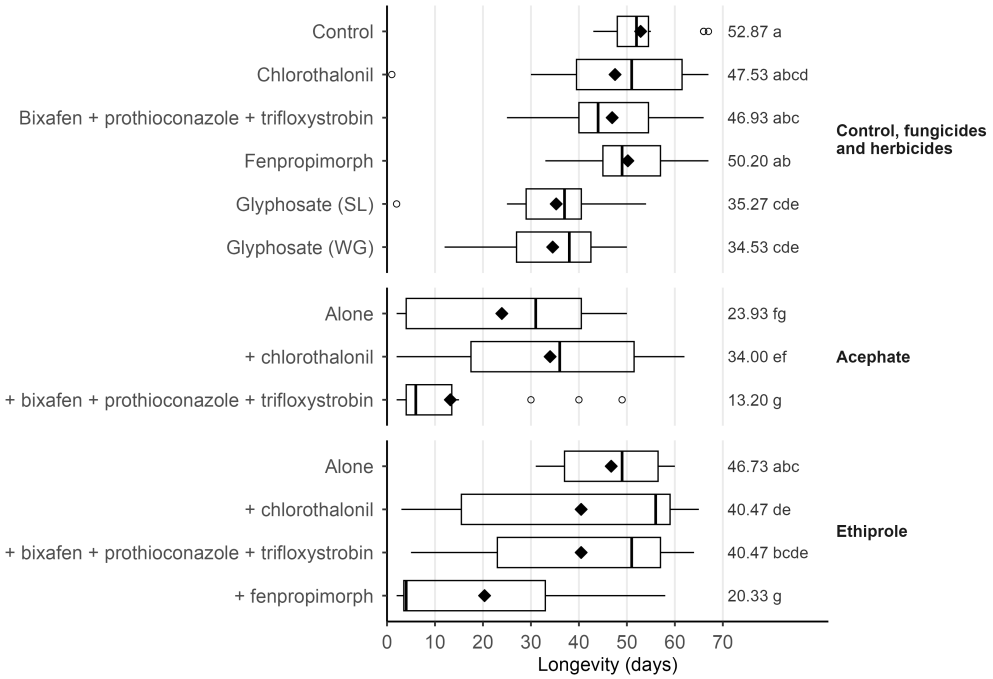

图4。成虫寿命（*Telenomus podisi* F_0 代）——蛹期暴露于所测试的杀虫剂、杀菌剂和除草剂后，分别单独施用或以二元混合物形式施用。处理、箱线图及字母标注同图2。

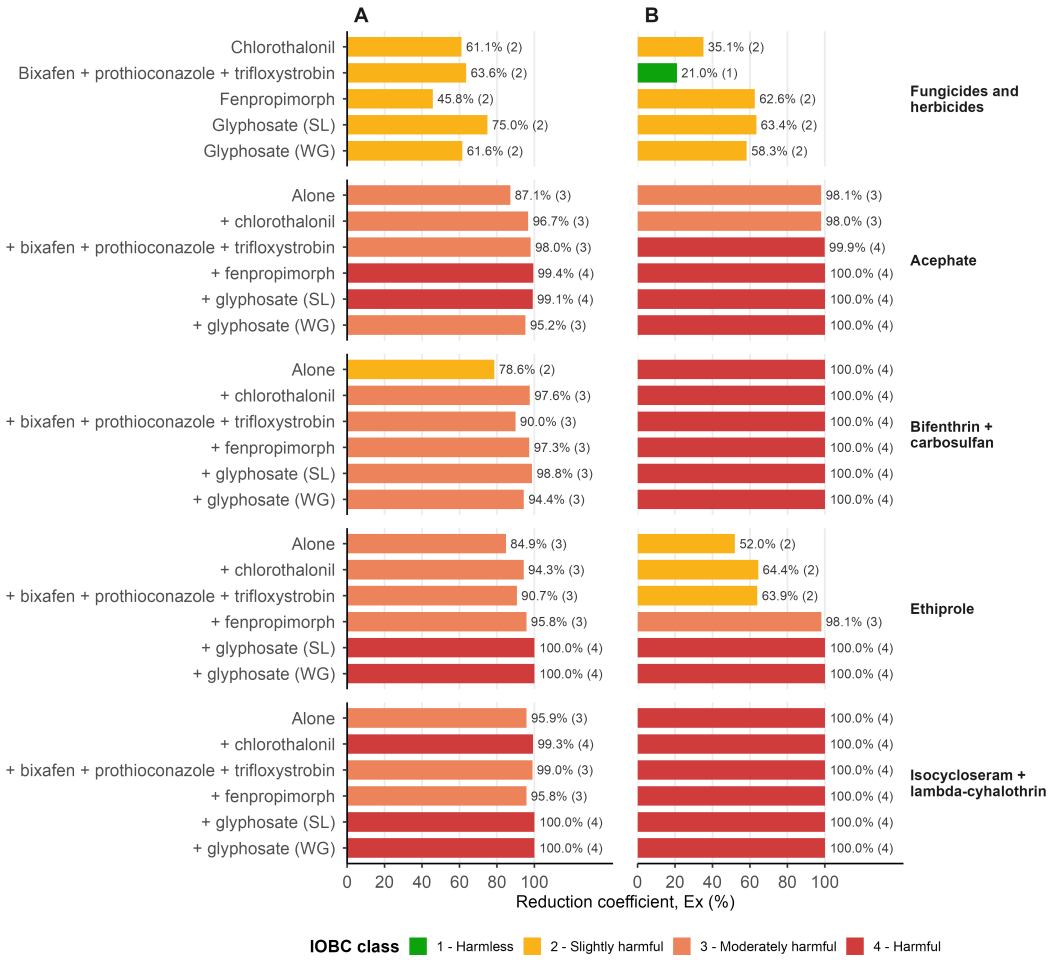

图5。 农药处理的降低系数（Ex）及其根据 IOBC/WPRS毒性等级的分类，针对 *Telenomus podisi*在成虫期（A）和蛹期（B）暴露后的情况。 处理按杀虫剂分组，与图2一致。条形表示 Ex（%），颜色表示 IOBC/WPRS等级，各数值后括号中也标出了相应等级：1 = 无害（Ex < 30%），2 = 轻微有害（30% ≤Ex < 80%），3 = 中度有害（80% ≤Ex ≤99%），以及4 = 有害（Ex > 99%）。