

精噁唑禾草灵、甲基二磺隆、扑草净处理后日本看麦娘残存植株的生长和结实能力

毛海燕^{1,2}, 王宇泽^{1,2}, 汪金源³, 王 津^{1,2}, 廖平强^{1,2}, 陈国奇^{1,2*}

(1. 江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏省作物栽培生理重点实验室, 扬州大学农学院 (水稻产业工程技术研究院), 扬州 225009; 2. 江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 扬州大学, 扬州 225009; 3. 南京善思生态科技有限公司, 南京 210039)

摘要 以采自江苏省扬州市小麦田的3个日本看麦娘种群(AJ191、AJ193、AJ195)为例,研究了供试种群对精噁唑禾草灵、甲基二磺隆、扑草净3种不同作用机理的代表性麦田除草剂的敏感性及其处理后残存植株的生长和结实能力。结果表明,在推荐剂量处理下,精噁唑禾草灵对3个种群的控制效果均不理想,扑草净对3个种群均有高活性,甲基二磺隆对AJ191和AJ193具有高活性。与AJ191相比,AJ193对精噁唑禾草灵表现出中抗性;AJ195对精噁唑禾草灵具有高抗性,对甲基二磺隆具有中抗性,对扑草净具有低抗性。AJ191种群经精噁唑禾草灵103.5 g/hm² (有效成分用量,下同)处理后残存植株继续单株盆栽至播种后180 d,地上部分干重、结实分蘖数和种子总产量与不用除草剂处理对照组相比,分别显著下降43.1%、42.6%和44.4% ($P < 0.05$)。AJ193和AJ195种群经精噁唑禾草灵103.5 g/hm²及扑草净375 g/hm²处理后以及AJ195种群经甲基二磺隆15.75 g/hm²处理后的残存植株继续培养至播种后180 d,地上部分干重、结实分蘖数、种子总产量均与未经除草剂处理无显著差异。上述结果表明,3种麦田除草剂处理后日本看麦娘种群残存植株均表现出较强的生长和结实能力;扑草净对日本看麦娘具有高活性,可用于抗精噁唑禾草灵或甲基二磺隆日本看麦娘种群的治理。

关键词 日本看麦娘; 除草剂抗药性; 生物量; 种子产量

中图分类号: S451.2 **文献标识码:** B **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2020528

Growth and fertility of *Alopecurus japonicus* plants survived from fenoxaprop-*P*-ethyl, mesosulfuron-methyl and prometryn

MAO Haiyan^{1,2}, WANG Yuze^{1,2}, WANG Jinyuan³, WANG Jin^{1,2}, LIAO Pingqiang^{1,2}, CHEN Guoqi^{1,2*}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology, Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology, Agricultural College (Research Institute of Rice Industrial Engineering Technology) of Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. Jiangsu Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 3. Nanjing Shansi Eco-technology Co., Ltd., Nanjing 210039, China)

Abstract Taking three *Alopecurus japonicus* populations (AJ191, AJ193 and AJ195) collected from wheat fields in Yangzhou, Jiangsu province as targets, sensitivity of these populations to fenoxaprop-*P*-ethyl, mesosulfuron-methyl and prometryn was investigated, and growth and fertility of *A. japonicus* plants survived from herbicide treatments were also determined. These three herbicides represent three different modes of action. The results indicated that treated with the recommended dose, fenoxaprop-*P*-ethyl showed low efficacies on the three populations, prometryn showed high efficacies on the three populations and mesosulfuron-methyl showed high efficacies on AJ191 and AJ193. Compared with AJ191, AJ193 showed moderate resistance to fenoxaprop-*P*-ethyl, AJ195 showed high resistance to fenoxaprop-*P*-ethyl, moderate resistance to mesosulfuron-methyl and low

收稿日期: 2020-10-10 修订日期: 2020-12-04

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金(CX(20)1012);江苏现代农业产业技术体系建设项目(JATS[2020]452);江苏省高校重点学术计划开发项目(PAPD)

* 通信作者 E-mail:chenguoqi@yzu.edu.cn

resistance to prometryn. Compared with AJ191 plants without any herbicide treatment, AJ191 plants survived from fenoxaprop-*P*-ethyl 103.5 g/hm² (active ingredient, the same below) treatments showed significant ($P < 0.05$) decreases in the dry weight of aboveground parts, number of reproductive tillers per plant and number of total seeds per plant 180 d after sowing, by 43.1%, 42.6% and 44.4%, respectively. Nevertheless, compared with plants from the same population without any herbicide treatment, AJ193 and AJ195 surviving plants after treated with fenoxaprop-*P*-ethyl at 103.5 g/hm² or prometryn at 375 g/hm², and AJ195 surviving plants after treated with mesosulfuron-methyl at 15.75 g/hm², showed no significant difference in the dry weight of aboveground parts, number of reproductive tillers per plant and number of total seeds per plant 180 d after sowing. In conclusion, after treated with the three representative wheat herbicides, all of the three *A. japonicus* populations showed high abilities on growth and reproduction. Prometryn showed high efficacies on *A. japonicus*, which could be used to manage *A. japonicus* populations with resistance to fenoxaprop-*P*-ethyl or mesosulfuron-methyl.

Key words *Alopecurus japonicus*; herbicide resistance; biomass; seed production

草害是小麦生产中的主要生物灾害之一,在正常防控的情况下,我国每年因杂草危害损失小麦约 400 万 t,损失率约 15%^[1]。施用除草剂进行茎叶处理是麦田草害防控的重要手段。常规情况下,小麦田施用除草剂后多数靶标杂草陆续枯死,但是生产中常有部分杂草植株残存下来,并能形成成熟种子落入土壤种子库,进而在来年发生危害^[1-2]。研究施用除草剂后残存杂草的生长可以了解这些植株在当茬小麦田的危害性;而揭示残存植株的结实能力则可以用于评估下一茬相应杂草的出苗数,进而指导相应的防控^[2]。目前,有关除草剂施用后残存植株生长和结实能力的研究多聚焦于靶标位点突变抗除草剂植株与遗传背景接近的敏感植株之间比较,进而考察抗药性基因突变对杂草适合度的影响^[3-4]。然而,从指导田间杂草防控的实践来看,除草剂施用后残存植株并不一定具有靶标位点突变导致的抗药性,特别是田间推荐剂量处理下一些植株通过复杂的非靶标机制抗击除草剂的毒性而残存下来^[5-6]。因此,即使在未明确抗药性机制的情况下,从田间种群水平研究揭示除草剂用药后残存植株的生长和结实能力,也可以指导种植户及时采取相应措施进行防控^[4, 7]。

日本看麦娘 *Alopecurus japonicas* 是典型的小麦田禾本科恶性杂草,以种子繁殖,株高与小麦接近,生长量和结实量均很大,同时也是我国小麦田抗药性发生最严重的杂草之一^[1, 8]。在华东地区,小麦田茎叶处理施药后日本看麦娘残存植株十分常见。小麦拔节后使用除草剂药害风险很高,而人工除草受制于成本和雇工难度等因素难以大面积推行^[8],因此,农户对于小麦田茎叶处理后残存的日本看麦娘常任由其生长。尽管已经有一些文献比较分析了遗传背景接近的除草剂靶标位点突变抗药性与

日本看麦娘敏感生物型的生长和结实能力^[9],但是从种群水平研究除草剂用药后残存日本看麦娘的生长和结实能力的研究未见报道。

乙酰辅酶 A 羧化酶 (ACCase) 和乙酰乳酸合酶 (ALS) 抑制剂类除草剂是茎叶处理防除日本看麦娘的主要药剂^[10]。ACCase 抑制剂类麦田除草剂的代表性药剂为精噁唑禾草灵,ALS 抑制剂类麦田除草剂的代表性药剂为甲基二磺隆,我国已经研究报道了抗精噁唑禾草灵和甲基二磺隆日本看麦娘种群^[11-14]。扑草净在小麦田可作为早期茎叶处理剂使用,总体上应用面积较小,目前还没有关于抗扑草净日本看麦娘的研究报道。2019 年 5 月,我们在扬州市小麦田采集了 3 个日本看麦娘种群,通过整株生物测定的方法测定了这 3 个种群对精噁唑禾草灵、甲基二磺隆、扑草净的敏感性;进一步对上述药剂分别处理后的残存植株进行盆栽试验,并与未施药植株对比,研究这 3 种除草剂用药后不同种群残存植株的生长和结实能力,以期为本日本看麦娘防控提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试日本看麦娘种群

供试的 3 个日本看麦娘种群均于 2019 年 5 月采自江苏省扬州市,其中 AJ191 种群采自扬州市邗江区扬州大学校园内小麦试验田 (32°39'N, 119°42'E),另外 2 个种群均采自扬州市江都区小麦田,采集地分别为 AJ193 (32°29'N, 119°38'E) 和 AJ195 (32°47'N, 119°52'E)。采种时从相同田块日本看麦娘植株上随机采收成熟种子作为 1 个种群种子样本,在室内晾干、储存。

1.2 供试种群对除草剂敏感性测定

2019 年 10 月至 2020 年 3 月,在扬州大学农学

院校内温室内开展试验,测定 3 个日本看麦娘种群对 69 g/L 精噁唑禾草灵乳油(拜耳股份公司,小麦田推荐剂量 51.75 g/hm²)、30 g/L 甲基二磺隆可分散油悬浮剂(拜耳股份公司,小麦田推荐剂量 15.75 g/hm²)、50%扑草净可湿性粉剂(山东胜邦绿野化学有限公司,小麦田推荐剂量 750 g/hm²)的敏感性。上述剂量单位均为有效成分含量,下同。

参照 Chen 等^[11]的方法进行生测试验,共分为 2 组。在 20℃/10℃(日/夜)的温室中,将预萌发的日本看麦娘种子播种到口径 7 cm 的塑料花盆内,每盆播种 12 粒种子,花盆内装满预先吸足水的营养土(pH 6.8,总营养成分 3.8%,总有机质含量>40%),2~3 叶期定苗至每盆 8 株。幼苗长到 2~3 叶期,采用茎叶喷雾施用扑草净;3~4 叶期,采用茎叶喷雾施用精噁唑禾草灵和甲基二磺隆。

第 1 组生测试验主要考察日本看麦娘在除草剂处理下的存活率,剂量设置为:69 g/L 精噁唑禾草灵 EC 51.75、103.5 g/hm², 30 g/L 甲基二磺隆 OD 15.75、31.5 g/hm², 50%扑草净 WP 375、750 g/hm²,并设置清水处理作为对照。由于精噁唑禾草灵与甲基二磺隆均为江苏地区小麦田大面积连续多年使用的除草剂^[1],因此试验中均采用了推荐剂量和推荐剂量 2 倍量处理;扑草净虽然登记在小麦田使用,但是在江苏地区小麦田的实际应用面积很小,因此采用推荐剂量及推荐剂量 50%的量处理。处理 30 d 后统计每盆日本看麦娘幼苗的存活率,每个处理重复 8 盆。

第 2 组生测试验在第 1 组试验结果的基础上设置不同的剂量梯度,其中 AJ191 种群精噁唑禾草灵和甲基二磺隆处理剂量梯度为:1/16、1/8、1/4、1/2、1 倍推荐剂量,扑草净处理剂量为 1/32、1/16、1/8、1/4、1/2 倍推荐剂量。AJ193 种群精噁唑禾草灵处理剂量梯度为:1/4、1/2、1、2、4 倍推荐剂量,甲基二磺隆和扑草净处理剂量为 1/16、1/8、1/4、1/2、1 倍推荐剂量。AJ195 种群精噁唑禾草灵处理剂量梯度为:1/4、1/2、1、2、4 倍推荐剂量,甲基二磺隆处理剂量为 1/8、1/4、1/2、1、2 倍推荐剂量,扑草净处理剂量为 1/16、1/8、1/4、1/2、1 倍推荐剂量。每个种群均设置清水处理作为对照。处理 30 d 后剪取每个花盆内日本看麦娘地上部分称取鲜重,每个处理重复 8 盆。

1.3 除草剂处理后日本看麦娘残存植株营养生长和结实能力测定

试验于 2019 年 11 月至 2020 年 5 月于扬州大学校内温室大棚内进行。基于第 1 组生测试验结果,取各个种群在不同除草剂处理后存活率>10%的处理组作为残存植株营养生长和结实能力研究的处理组(具体的种群-除草剂处理剂量见表 1)。按照前述生测试验方法培养幼苗并进行施药处理,确保每个种群在每种处理结束后残存日本看麦娘植株数在 20~25 株,挑选其中长势较好的单株移栽至直径和高均为 15 cm 的花盆中,据其需求浇水。每个花盆移栽 1 株日本看麦娘,每个处理重复 10 盆。试验期间,温室门窗敞开,温室内最低温度-2~21℃,平均 7.78℃;最高温度 4~35℃,平均 16.02℃。盆栽所用土壤 pH 6.8,总营养成分 3.8%,总有机质含量>40%。日本看麦娘进入拔节期时,按照每 667 m² 15 kg 用量在每个花盆内施用复合肥(N、P₂O₅、K₂O 含量各为 15%,中农集团控股股份有限公司)。

日本看麦娘种子进入成熟期后每隔 3 d 分别采收各个日本看麦娘单株的种子,从日本看麦娘播种开始计算,180 d 后剪取植株地上部分,测定各个单株的结实分蘖数、种子总量和茎叶干重。

1.4 数据处理和分析

文中所有剂量均为有效成分用量。采用 Excel 2010 和 SPSS 16.0 软件对数据进行统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行多重比较($\alpha=0.05$)。基于各个处理组日本看麦娘地上部分鲜重,计算各种除草剂对日本看麦娘鲜重抑制率:

鲜重抑制率=(对照组鲜重-处理组鲜重)/对照组鲜重 $\times 100\%$ 。

采用 R 软件“drc”程序包中的 *drc* 函数中的 3 参数 Logistic 方程拟合日本看麦娘鲜重抑制率与除草剂处理剂量之间的毒力回归曲线^[15-16],计算各供试除草剂抑制日本看麦娘鲜重 50%的剂量(GR₅₀),计算公式为:

$$Y=d/[1+(x/x_0)^b]$$

公式的 3 个参数中, x 代表处理药剂剂量, x_0 代表 GR₅₀, d 代表置信区间的上限, b 代表毒理回归曲线在 x_0 附近的斜率。采用 SigmaPlot 软件进行剂量-反应曲线作图。基于各个种群的 GR₅₀ 值,进一步计算不同种群对同种除草剂的相对不敏感指数,即以 GR₅₀ 值最低种群为最敏感种群,其他种群的

GR₅₀ 值与最敏感种群的 GR₅₀ 值的比值为相对不敏感指数,指数<2 为无抗性;指数 2~5 为低抗性;指数 6~10 为中抗性;指数 11~100 为高抗性;指数>100 为极高抗性^[17]。

2 结果与分析

2.1 不同除草剂处理下日本看麦娘种群幼苗的存活率及残存植株生物量

日本看麦娘 AJ191 种群幼苗经 69 g/L 精噁唑禾草灵 EC、50%扑草净 WP、30 g/L 甲基二磺隆 OD 不同剂量处理 30 d 后均表现出大量枯死的现象,

69 g/L 精噁唑禾草灵 EC 51.75、103.5 g/hm² 处理下植株存活率略高,分别为 29.69%和 12.50%,50%扑草净 WP 375 g/hm² 处理下植株存活率不到 2%,其余处理均完全杀灭日本看麦娘幼苗(表 1)。AJ193 种群经精噁唑禾草灵 EC 103.5 g/hm² 处理存活率高达 39.06%,50%扑草净 WP 375 g/hm² 处理下存活率为 21.88%,扑草净 750 g/hm² 和甲基二磺隆 15.75 g/hm² 及 31.5 g/hm² 处理下均全部枯死。AJ195 种群在精噁唑禾草灵 2 个试验剂量、扑草净 375 g/hm² 及甲基二磺隆 15.75 g/hm² 处理下均有较多的幼苗存活。

表 1 日本看麦娘 3 个种群幼苗在不同药剂处理后的植株存活率¹⁾

处理药剂 Herbicide		剂量/g•(hm ²) ⁻¹ Dose	植株存活率/% Seedling survival rate		
			AJ191	AJ193	AJ195
对照 Control		0	(100±0)a	(100±0)a	(100±0)a
69 g/L 精噁唑禾草灵乳油 fenoxaprop-P-ethyl 69 g/L EC		51.75	(29.69±3.52)b	(51.56±9.60)b	(76.56±6.89)b
50%扑草净可湿性粉剂 prometryn 50% WP		375	(1.56±1.67)d	(21.88±8.28)cd	(48.44±9.60)c
30 g/L 扑草净可湿性粉剂 mesosulfuron-methyl 30 g/L OD		750	(0±0)d	(0±0)d	(0±0)d
30 g/L 甲基二磺隆可分散油悬浮剂		15.75	(0±0)d	(0±0)d	(46.88±6.06)c
mesosulfuron-methyl 30 g/L OD		31.5	(0±0)d	(0±0)d	(0±0)d

1) 同一种群间不同处理组之间字母不同表示差异显著($P<0.05$)。下同。
Different letters among different treatment groups in the same population indicated significant difference ($P<0.05$). The same below.

表 2 不同药剂处理后日本看麦娘残存植株生长至播种后 180 d 的地上部干重

处理药剂 Herbicide		剂量/g•(hm ²) ⁻¹ Dose	地上部干重/g Aboveground dry weight		
			AJ191	AJ193	AJ195
对照 Control		0	(20.67±1.12)a	(10.82±0.94)a	(14.02±1.60)a
69 g/L 精噁唑禾草灵乳油 fenoxaprop-P-ethyl 69g/L EC		51.75	(15.27±1.53)b	(10.42±0.38)a	(11.61±0.72)a
50%扑草净可湿性粉剂 prometryn 50% WP		375	—	(10.75±0.57)a	(12.08±1.05)a
30 g/L 甲基二磺隆可分散油悬浮剂 mesosulfuron-methyl 30 g/L OD		15.75	—	—	(10.47±1.23)a

AJ191 种群幼苗经 69 g/L 精噁唑禾草灵 EC 51.75、103.5 g/hm² 处理后,残存植株继续培养至播种后 180 d 的植株干重与不用除草剂处理对照组相比显著下降(表 2),平均干重分别下降 26.1%和 43.1%。然而,日本看麦娘 AJ193 种群幼苗经 69 g/L 精噁唑禾草灵 EC 试验剂量处理以及 50%扑草净 WP 375 g/hm² 处理后残存植株继续培养至播种后 180 d 的地上部分干重与未用药处理的植株相比均无显著差异。日本看麦娘 AJ195 种群幼苗经 69 g/L 精噁唑禾草灵 EC 试验剂量处理、50%扑草净 WP 375 g/hm² 和 30 g/L 甲基二磺隆 OD 推荐剂量处理

(15.75 g/hm²)后残存植株继续培养至播种后 180 d 的地上部分干重与未用药处理的植株相比均无显著差异。

2.2 不同除草剂处理后残存日本看麦娘种群植株结实分蘖数和结实量

日本看麦娘 AJ191 种群幼苗经 69 g/L 精噁唑禾草灵 EC 51.75 g/hm² 处理后残存植株继续培养至 180 d 后与未用药处理的植株相比,结实分蘖数(表 3)和种子总产量(表 4)均无显著差异,在精噁唑禾草灵 103.5 g/hm² 处理后两个指标均显著下降,下降幅度分别为 42.6%和 44.4%。然而,日本看麦娘 AJ193

种群幼苗经 69 g/L 精噁唑禾草灵 EC 51.75 g/hm² 和 103.5 g/hm² 以及 50%扑草净 WP 375 g/hm² 处理后,残存植株继续培养至播种后 180 d 的结实分蘖数和种子总产量与未用药处理的植株相比尽管有所下降但均无显著差异。日本看麦娘 AJ195 种群幼苗经

69 g/L 精噁唑禾草灵 EC 51.75 g/hm² 和 103.5 g/hm²、50%扑草净 WP 375 g/hm² 和 30 g/L 甲基二磺隆 OD 15.75 g/hm² 处理后残存植株继续培养至播种后 180 d 的结实分蘖数与未用药处理的植株相比均无显著差异。

表 3 不同药剂处理后日本看麦娘残存植株生长至播种后 180 d 的结实分蘖数

Table 3 Number of reproductive tillers per plant of *Alopecurus japonicus* survived from herbicide applications and cultivated to 180 d after sowing

处理药剂 Herbicide	剂量/g·(hm ²) ⁻¹ Dose	结实分蘖数/个·株 ⁻¹ Number of reproductive tillers		
		AJ191	AJ193	AJ195
对照 Control	0	(59.10±4.29)a	(48.80±4.11)a	(42.70±6.39)a
69 g/L 精噁唑禾草灵乳油 fenoxaprop-P-ethyl 69 g/L EC	51.75	(46.30±7.14)ab	(47.70±3.48)a	(43.00±4.27)a
50%扑草净可湿性粉剂 prometryn 50% WP	375	—	(52.10±4.51)a	(37.70±6.55)a
30 g/L 甲基二磺隆可分散油悬浮剂 mesosulfuron-methyl 30 g/L OD	15.75	—	—	(33.20±4.92)a

表 4 不同药剂处理后日本看麦娘残存植株生长至播种后 180 d 的种子总量

Table 4 Total seeds per plant of *Alopecurus japonicus* survived from herbicide applications and cultivated to 180 d after sowing

处理药剂 Herbicide	剂量/g·(hm ²) ⁻¹ Dose	种子总量/粒·株 ⁻¹ Total seeds per plant		
		AJ191	AJ193	AJ195
对照 Control	0	(9 966.00±867.88)a	(6 501.30±514.69)a	(6 628.80±912.58)a
69 g/L 精噁唑禾草灵乳油 fenoxaprop-P-ethyl 69 g/L EC	51.75	(7 135.80±939.66)ab	(5 913.60±342.32)a	(6 460.90±480.27)a
50%扑草净可湿性粉剂 prometryn 50% WP	375	—	(6 613.30±579.08)a	(5 577.80±921.70)a
30 g/L 甲基二磺隆可分散油悬浮剂 mesosulfuron-methyl 30 g/L OD	15.75	—	—	(5 158.50±547.27)a

2.3 日本看麦娘种群对精噁唑禾草灵、甲基二磺隆、扑草净的敏感性

整株生物测定试验结果表明,3 个小麦田日本看麦娘种群对不同剂量精噁唑禾草灵处理表现出不同的响应曲线(图 1),AJ191 种群最为敏感,AJ195 种群敏感性较低。进一步比较日本看麦娘地上部分生物量对精噁唑禾草灵处理响应的毒力回归方程(表 5)发现,该药剂对日本看麦娘 AJ191、AJ193、

AJ195 种群的抑制 50% 剂量(GR₅₀)分别为 8.29、70.62、140.49 g/hm²,AJ193、AJ195 对于 AJ191 的相对不敏感指数达 9、17 倍。3 个日本看麦娘种群对不同剂量甲基二磺隆处理响应曲线见图 1,AJ191 和 AJ193 较为敏感,AJ195 敏感性较低,甲基二磺隆对 AJ191、AJ193、AJ195 种群的 GR₅₀ 分别为 1.74、3.87、11.27 g/hm²,AJ193、AJ195 对于 AJ191 的相对不敏感指数达 2、7 倍。3 个日本看麦娘种群对不

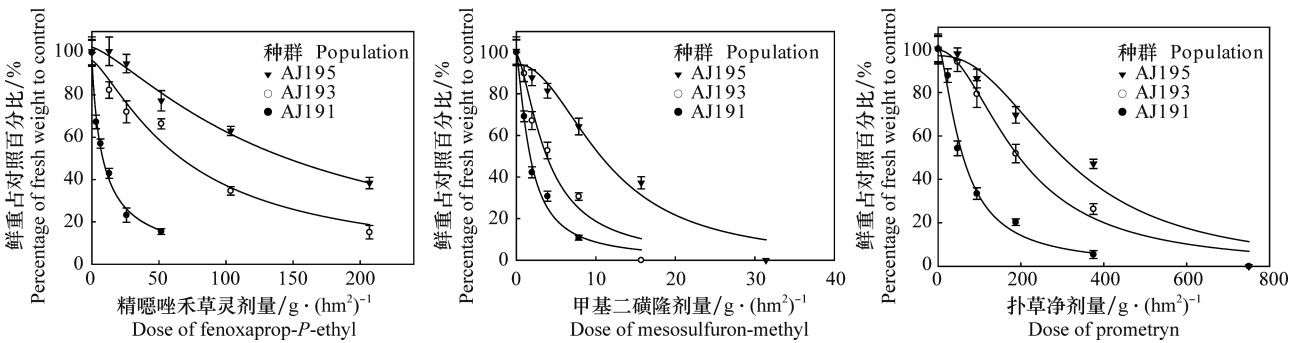


图 1 供试日本看麦娘种群对 3 种除草剂敏感性的剂量-反应曲线

Fig. 1 Dose-response curves of *Alopecurus japonicus* populations after treated with three different herbicides

表 5 供试日本看麦娘种群对 3 种除草剂的剂量-反应曲线、鲜重抑制率达 50% 剂量 (GR₅₀) 和相对不敏感性指数 (RISF)
Table 5 Logistic regression curves, doses cause 50% reduction in fresh weights (GR₅₀) and relative insensitivity factors of *Alopecurus japonicus* populations to three different herbicides

除草剂 Herbicide	种群 Population	剂量-反应曲线 Dose-response curve	GR ₅₀ / g•(hm ²) ⁻¹	RISF
69 g/L 精噁唑禾草灵乳油 fenoxaprop- <i>P</i> -ethyl 69 g/L EC	AJ191	$Y=99.51/[1+(x/8.29)^{0.91}]$	8.29±1.23	—
	AJ193	$Y=96.26/[1+(x/70.62)^{1.32}]$	70.62±8.71	9
	AJ195	$Y=102.51/[1+(x/140.49)^{1.33}]$	140.49±14.60	17
30 g/L 甲基二磺隆可分散油悬浮剂 mesosulfuron-methyl 30 g/L OD	AJ191	$Y=99.95/[1+(x/1.74)^{1.34}]$	1.74±0.18	—
	AJ193	$Y=99.04/[1+(x/3.87)^{1.53}]$	3.87±0.38	2
	AJ195	$Y=94.27/[1+(x/11.27)^{2.11}]$	11.27±0.95	7
50% 扑草净可湿性粉剂 prometryn 50% WP	AJ191	$Y=101.94/[1+(x/59.49)^{1.50}]$	59.49±7.84	—
	AJ193	$Y=99.50/[1+(x/197.45)^{1.95}]$	197.45±16.53	3
	AJ195	$Y=97.16/[1+(x/309.27)^{2.27}]$	309.27±25.24	5

同剂量扑草净处理响应曲线见图 1, AJ195 敏感性最低, 扑草净对 AJ191、AJ193、AJ195 种群的 GR₅₀ 分别为 59.49、197.45、309.27 g/hm², AJ193、AJ195 对于 AJ191 的相对不敏感指数达 3、5 倍。因此, 基于相对不敏感指数分级划分标准, 与日本看麦娘 AJ191 种群相比, AJ193 种群表现出对精噁唑禾草灵的中抗性、对甲基二磺隆和扑草净低抗性, AJ195 表现出对精噁唑禾草灵具有高抗性、对甲基二磺隆中抗性、对扑草净低抗性。

3 讨论

本研究所用的 3 个日本看麦娘种群均采自江苏中部地区小麦田, 精噁唑禾草灵对 AJ191 种群仍然具有一定的控制效果, 但是已经无法有效防控 AJ193 和 AJ195 种群。此外, 尽管 AJ191 种群 3~4 叶期幼苗经精噁唑禾草灵推荐剂量 2 倍量处理后, 残存植株的生长受到抑制且结实能力下降, 但是其生物量、结实分蘖数、种子总产量(平均每株产生 5 539 粒)仍然高达未用除草剂处理植株的 55% 以上, 因此仍然能在小麦田造成危害。精噁唑禾草灵是 ACCase 抑制剂类除草剂的典型代表, 其除草机理是通过作用于 ACCase 阻碍脂肪酸正常代谢, 使植株无法正常生长, 最终枯死^[1]。精噁唑禾草灵 1998 年开始在我国小麦田推广使用, 随后的 10 多年时间里一直是江苏地区小麦田当家除草剂; 自 2012 年以来越来越多的研究报道了对精噁唑禾草灵高抗性的日本看麦娘种群^[11, 13-15]。近年来, 由于抗药性发生普遍, 精噁唑禾草灵在我国小麦田的实际应用面积大幅下降, 已经不再是小麦田当家除草剂。

本研究中甲基二磺隆对 AJ191 和 AJ193 均表现出较好的防效, AJ195 种群表现出对该药剂具有

中抗性。甲基二磺隆推荐剂量处理后残存的 AJ195 种群植株生长受到较轻程度的抑制(栽培至播种后 180 d 的地上部分生物量平均为对照植株的 74.7%), 然而其结实能力指标与对照植株无显著差异。这表明, 甲基二磺隆用药后残存植株仍然能造成与未用药处理植株相近的危害和结实能力。甲基二磺隆属于 ALS 抑制剂, 其作用机理是茎叶吸收该药剂后, 由木质部、韧皮部进行传导, 通过抑制植物体内 ALS 的活性来阻止支链氨基酸的生物合成, 最终导致植物死亡^[1]。甲基二磺隆具有杀草谱广、活性高等优点, 能防除小麦田日本看麦娘、茵草 *Beckmannia syzigachne*、节节麦 *Aegilops tauschii* 等禾本科杂草和牛繁缕 *Myosoton aquaticum* 等阔叶杂草, 因此可以用于抗 ACCase 抑制剂杂草的治理。该除草剂自 2002 年上市以来, 其在小麦田使用的面积不断扩大。有研究报道 ALS 抑制剂在连续使用不到 10 次的情况下, 杂草就可对其产生抗性^[17], 因此长期单一使用甲基二磺隆也具有极高的抗性风险。Feng 等^[12] 和 Bi 等^[13] 2016 年均报道了采自安徽小麦田抗甲基二磺隆日本看麦娘种群, 并且这些抗性种群均对精噁唑禾草灵具有多抗性。若是日本看麦娘对甲基二磺隆为代表的 ALS 抑制剂也普遍不敏感, 那么在精噁唑禾草灵等 ACCase 抑制剂防效普遍下降的情况下, 小麦田日本看麦娘的防治将面临无茎叶处理剂可用的窘境。

在本研究中, 扑草净用于日本看麦娘早期茎叶处理(2~3 叶期)对 3 个日本看麦娘种群均表现出很好的防效。值得注意的是, 推荐剂量 50% 的扑草净处理后残存的 AJ193 和 AJ195 植株继续培养后, 其成株的生物量、结实分蘖数和种子总量均与对照植株无显著差异, 也就是说残存植株具有相当的生长和结实能力, 因此仍然能造成较重危害并积累种

子库。扑草净是三嗪类内吸传导型除草剂,属于光系统 IIA 位点抑制剂,经茎叶、幼芽及根系吸收,通过木质部和韧皮部传导至分生组织,抑制植株生长,通常处理后 7~14 d 顶芽坏死,2~4 周植株死亡^[1]。扑草净的杀草谱广,适于防除禾本科杂草和阔叶类杂草。景进等报道扑草净可用于防控荠菜 *Capsella bursa-pastoris*、猪殃殃 *Galium spurium* 等麦田阔叶杂草,在 750 g/hm² 剂量处理下对 2~3 叶期小麦安全,但对 1~2 叶期小麦不安全^[18]。张真益等报道小麦播后苗前使用扑草净 375~1 125 g/hm² 对小麦安全,并且在 750 g/hm² 剂量处理下,对牛繁缕防效达到 92.2%,对早熟禾 *Poa annua* 和棒头草 *Polypogon fugax* 等禾本科杂草的总防效达到 98.1%^[19]。目前,我国小麦田扑草净应用面积小,该除草剂对日本看麦娘仍然具有较好的防效。扑草净的作用机理与其他 44 种我国小麦田登记使用的除草剂活性成分均不同^[10],因此,理论上可以用于小麦田抗药性日本看麦娘治理。此外,AJ195 种群对精噁唑禾草灵、甲基二磺隆、扑草净表现出多抗性,该种群采集田块从未使用扑草净,AJ195 对扑草净的低抗性可能是抗其他药剂导致的附带效应。有研究报道了日本看麦娘 ALS、ACCCase 基因突变或者代谢解毒能力增强均可导致抗药性^[12-15]。

综上所述,本文的研究结果表明,供试的 3 种除草剂处理后残存日本看麦娘植株仍然具有较强的生长和结实能力。因此,在小麦种植中应该重视除草剂施药后残存的日本看麦娘植株可能造成的草害,及时追加防控措施,避免种子库大量输入和积累。需要指出的是,本研究考察了非竞争且适宜条件下除草剂处理后残存日本看麦娘植株的生长和结实能力,在小麦大田其实际造成危害的能力通常会低于本试验的结果,然而本研究揭示的残存日本看麦娘植株与未用药处理植株的生长和结实能力接近的现象仍然值得高度警惕。日本看麦娘是目前我国小麦田抗除草剂报道最多的杂草,这可能与其用药后残存植株强大的生长和结实能力相关。

参考文献

- [1] 中国农业科学院植物保护研究所,中国植物保护学会. 中国农作物病虫害[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2015.
- [2] NORSWORTHY J K, KORRES N E, BAGAVATHIANNAN M V. Weed seedbank management: revisiting how herbicides are evaluated [J]. Weed Science, 2018, 66(4): 415-417.
- [3] COUSENS R D. A question of logic: experiments cannot prove lack of an herbicide-resistance fitness penalty [J]. Weed Science, 2020, 68(3): 197-198.
- [4] BAUCOM R S. Evolutionary and ecological insights from herbicide-resistant weeds: what have we learned about plant adaptation, and what is left to uncover? [J]. New Phytologist, 2019, 223(1): 68-82.
- [5] BARRES B, MICOUD A, CORIO-COSTET M F, et al. Trends and challenges in pesticide resistance detection [J]. Trends in Plant Science, 2016, 21(10): 834-853.
- [6] DÉLYE C, JASIENIUK M, LE CORRE V. Deciphering the evolution of herbicide resistance in weeds [J]. Trends in Genetics, 2013, 29(11): 649-658.
- [7] 廖平强, MASOOM A, 毛海燕, 等. 特异性适应稻作系统的稗草种群生活史特性 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(9): 3067-3074.
- [8] LIU Xiangying, XIANG Shihai, ZONG Tao, et al. Herbicide resistance in China: a quantitative review [J]. Weed Science, 2019, 67(6): 605-612.
- [9] WU Xibao, ZHANG Teng, PAN Lang, et al. Germination requirements differ between fenoxaprop-*P*-ethyl resistant and susceptible Japanese foxtail (*Alopecurus japonicus*) biotypes [J]. Weed Science, 2016, 64(4): 653-663.
- [10] 中国农药信息网. 农药登记数据[EB/OL]. [2020-09-01]. <http://www.chinapesticide.org.cn/hysj/index.jhtml?from=singlemessage>.
- [11] CHEN Guoqi, WANG Lingyue, XU Hongle, et al. Cross-resistance patterns to acetyl-CoA carboxylase inhibitors associated with different mutations in Japanese foxtail (*Alopecurus japonicus*) [J]. Weed Science, 2017, 65(4): 444-451.
- [12] FENG Yujuan, GAO Yuan, ZHANG Yong, et al. Mechanisms of resistance to pyroxsulam and ACCase inhibitors in Japanese Foxtail (*Alopecurus japonicus*) [J]. Weed Science, 2016, 64(4): 695-704.
- [13] BI Yaling, LIU Weitang, GUO Wenlei, et al. Molecular basis of multiple resistance to ACCase- and ALS-inhibiting herbicides in *Alopecurus japonicus* from China [J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2016, 126: 22-27.
- [14] CUI Hailan, WANG Cangyue, HAN Yujiao, et al. Cross-resistance of Japanese foxtail (*Alopecurus japonicus*) to ACCase inhibitors in China [J]. Weed Technology, 2015, 29(3): 444-450.
- [15] CHEN Guoqi, XU Hongle, ZHANG Teng, et al. Fenoxaprop-*P*-ethyl resistance conferred by cytochrome P450s and target site mutation in *Alopecurus japonicus* [J]. Pest Management Science, 2018, 74(7): 1694-1703.
- [16] 徐宇宽, 陈国奇, 张琳, 等. 三氯吡氧乙酸、氯氟吡氧乙酸、2 甲 4 氯和草甘膦对律草的防除活性比较 [J]. 植物保护, 2020, 46(4): 253-257.
- [17] BECKIE H J, TARDIF F J. Herbicide cross resistance in weeds [J]. Crop Protection, 2012, 35: 15-28.
- [18] 景进, 沈碧玉, 冯俊涛. 扑草净防除麦田杂草初报 [J]. 农药, 1985(1): 46.
- [19] 张真益, 胥国昌. 扑草净防除麦田杂草 [J]. 四川农业科技, 1985(5): 25.