



山东省小麦田播娘蒿对双氟磺草胺抗性水平及靶标抗性机理

高兴祥, 张悦丽, 李美, 李健, 房锋

(山东省农业科学院植物保护研究所, 济南 250100)

摘要:【背景】播娘蒿 (*Descurainia sophia*) 是一种冬小麦田分布广泛且危害严重的阔叶杂草, 双氟磺草胺则是目前冬小麦田防除阔叶杂草应用面积最大的一种 ALS 抑制剂类除草剂。双氟磺草胺经多年应用后, 对部分区域冬小麦田播娘蒿防治效果下降, 可能与当地播娘蒿对双氟磺草胺产生抗性有关。【目的】明确山东省冬小麦田播娘蒿对双氟磺草胺的抗性水平和抗性机理, 为制定小麦田播娘蒿等阔叶杂草精准区域防控提供理论依据。【方法】以播娘蒿为研究对象, 在温室内采用整株生物测定法测定 40 个播娘蒿种群对双氟磺草胺和对比药剂苯磺隆、2 甲 4 氯共 3 种除草剂的抗性水平, 同时根据播娘蒿 ALS 基因序列, 设计引物, 提取对双氟磺草胺高抗的播娘蒿单株基因组 DNA, 测序获得序列与敏感型基因进行比对, 查找突变位点, 明确靶标抗性机理。【结果】抗性水平测定结果表明, 40 个播娘蒿种群中有 32 个对双氟磺草胺敏感, 占 80.00%, 低抗、中抗和高抗种群分别有 3、3 和 2 个, JN-1、JN-2、LY-2 为低抗种群, LC-3、LY-4、YT-1 为中抗种群, 相对抗性指数 (*RI*) 分别为 49.00、26.44、21.09, BZ-1 和 DZ-3 属于高抗种群, *RI* 分别为 52.00 和 194.00。对 BZ-1 和 DZ-3 进行的 ALS 基因检测结果表明, BZ-1 种群 ALS 基因第 197 位氨基酸发生 CCT (Pro) 到 TCT (Ser) 或 CTT (Leu) 突变, DZ-3 种群 ALS 基因第 574 位氨基酸发生 TGG (Trp) 到 TTG (Leu) 突变。另外, 40 个种群中对对比药剂苯磺隆产生抗性的种群有 19 个, 占总样点数的 47.50%, 低抗种群有 11 个, 中抗种群有 6 个, *RI* 分别为 38.05、13.55、11.54、10.45、11.50、11.02, 高抗种群为 DZ-3 和 LY-4, *RI* 分别为 244.75 和 68.50; 40 个播娘蒿种群对另一种对比药剂 2 甲 4 氯没有产生抗性。【结论】山东省小麦田采集的 40 个播娘蒿种群中已有 20.00% 的种群对双氟磺草胺产生抗性, 且高抗双氟磺草胺的播娘蒿种群发生不同位置氨基酸取代。播娘蒿对苯磺隆的抗性仍很严重, 但对激素类除草剂 2 甲 4 氯未产生抗性。针对播娘蒿发生区域, 不能单一使用双氟磺草胺, 应推广多种作用机理的除草剂交替、混和使用, 从而延缓和控制杂草产生抗性, 同时扩大杀草谱、降低除草剂使用量。

关键词: 双氟磺草胺; 播娘蒿; 抗性水平; 抗性机理

Resistance Level and Mechanism of *Descurainia sophia* to Florasulam in Wheat Field of Shandong Province

GAO XingXiang, ZHANG YueLi, LI Mei, LI Jian, FANG Feng

(Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Ji'nan 250100)

Abstract: 【Background】 *Descurainia sophia* is the most widely distributed and harmful broad-leaved weed in winter wheat field, and florasulam is the most widely used ALS inhibitor herbicide for controlling broad-leaved weeds. After several years of application, the control effect of florasulam on *D. sophia* has been found to decline in some wheat fields, which may be

收稿日期: 2019-12-30; 接受日期: 2020-03-02

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFD0201700)、山东省农业科学院农业科技创新工程 (CXGC2018E04)

联系方式: 高兴祥, E-mail: xingxiang02@163.com。张悦丽, E-mail: yueligaoxing@163.com。高兴祥和张悦丽为同等贡献作者。通信作者李美, E-mail: limei9909@163.com

related to the resistance. 【Objective】 The objective of this study is to clarify the resistance level and mechanism of *D. sophia* to florasulam, and to provide theoretical basis for the establishment of precise regional control of broad-leaved weeds in wheat field.

【Method】 A total of 40 populations of *D. sophia* were collected from winter wheat fields. Whole-plant dose response experiments were conducted to determine the resistance level of 40 populations to florasulam, tribenuron-methyl and MCPA in the greenhouse. At the same time, according to the ALS gene sequence of *D. sophia*, the genomic DNA of a single plant with high resistance to florasulam was extracted. The ALS gene sequences were obtained and compared with that of sensitive type *Arabidopsis thaliana* to find out the mutation site and the resistance mechanism. 【Result】 The results of resistance level determination showed that 32 of the 40 *D. sophia* populations were sensitive to florasulam, accounting for 80.00%. There were 3, 3 and 2 populations of low resistance, medium resistance and high resistance, respectively. JN-1, JN-2 and LY-2 belonged to low resistance populations. Three populations LC-3, LY-4 and YT-1 belonged to medium resistance with resistance index (*RI*) of 49.00, 26.44 and 21.09, respectively. BZ-1 and DZ-3 belonged to high resistance populations with *RI* of 52.00 and 194.00, respectively. The ALS sequence analysis showed that there were mutations from CCT (pro) to TCT (Ser) or CTT (Leu) in amino acid 197 of ALS gene in BZ-1, while TGG (Trp) to TTG (Leu) in amino acid 574 of ALS gene in DZ-3. In addition, 19 of the 40 *D. sophia* populations were resistant to tribenuron-methyl, accounting for 47.50%, among them, 11 populations were low resistance, 6 populations were medium resistance with *RI* of 38.05, 13.55, 11.54, 10.45, 11.50, 11.02, and DZ-3 and LY-4 belonged to high resistance populations with *RI* of 244.75 and 68.50, respectively. All 40 populations were sensitive to MCPA. 【Conclusion】 Among the 40 populations of *D. sophia* collected from wheat fields in Shandong Province, 20.00% of them are resistance to florasulam, and the substitutions of amino acids occur in different positions in the populations with high resistance to florasulam. The resistance of *D. sophia* to tribenuron-methyl is still very serious, but all the populations are not resistant to MCPA. In view of the resistance area of *D. sophia*, the alternative and mixed use of herbicides with multiple mechanisms should be promoted, which can not only delay and control the development of resistance in weeds, but also expand the weed control spectrum and reduce the use of herbicides.

Key words: florasulam; *Descurainia sophia*; resistance level; resistance mechanism

0 引言

【研究意义】随着双氟磺草胺 (florasulam) 在我国冬小麦田的大面积应用, 部分区域已发现小麦田主要阔叶杂草播娘蒿 (*Descurainia sophia*) 对双氟磺草胺的敏感性降低, 在田间造成防治效果下降的现象, 研究播娘蒿对双氟磺草胺的抗性水平和抗性机理, 对制定抗性杂草区域性治理技术具有重要意义。【前人研究进展】播娘蒿是我国小麦田常见的一种恶性阔叶杂草, 在华东、华北、东北、西北等地区均有分布, 是黄淮海冬小麦田最主要的越年生阔叶杂草, 在河南^[1]、山东^[2]和河北^[3]等省发生优势度均居于前三位。播娘蒿因其茎叶伸展侵占面积大, 与禾本科作物小麦竞争有效资源占尽优势, 严重影响小麦产量和品质^[4-5], 对播娘蒿的抗性研究主要集中于其对苯磺隆 (tribenuron-methyl) 的抗性, 据报道播娘蒿抗苯磺隆主要是基因位点突变, 第 197、376 和 574 位发生突变, 且以 197 位点发生突变为主, 约占 90%^[6]。双氟磺草胺是美国陶氏益农公司在 20 世纪 90 年代中期开发成功的第 5 个三唑嘧啶磺酰胺类除草剂新品种^[7], 对小麦田几乎所有的阔叶杂草包括播娘蒿、荠菜、猪殃殃

等均有很好的防除效果^[8], 是继苯磺隆之后在小麦田用量最大的除草剂^[9], 并可与植物生长调节剂、杀菌剂、其他除草剂等混用, 现在黄淮海冬小麦田防除阔叶杂草的配方中几乎都有双氟磺草胺这一成分^[10], 但该药剂在我国应用多年后, 对部分区域播娘蒿等阔叶杂草防治效果已明显下降。关于小麦田阔叶杂草对双氟磺草胺抗性报道不多, 马鹏生^[11]报道了部分猪殃殃种群对双氟磺草胺产生一定抗性, 也有抗苯磺隆的荠菜种群对双氟磺草胺产生交互抗性的报道^[12], 但均无抗性机理报道, 而另一种重要阔叶杂草播娘蒿未见抗双氟磺草胺报道。【本研究切入点】笔者在田间调查时发现, 因为双氟磺草胺具有杀草谱广、用量少等优点, 近几年在小麦田推广面积很大, 部分区域已发现用量在提高, 防治效果下降现象, 这很可能与播娘蒿对双氟磺草胺产生抗性有关。【拟解决的关键问题】在山东省冬小麦田主产区采集播娘蒿种子 40 份, 采用整株生物测定法, 研究播娘蒿种群对双氟磺草胺和对比药剂苯磺隆、2 甲 4 氯 (MCPA) 3 种除草剂的抗性水平, 并对高抗双氟磺草胺播娘蒿种群进行靶标抗性位点测定, 为小麦田杂草抗药性精准治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

播娘蒿种子：2017 年 5 月于山东省 17 地（市）小麦田采集自然成熟的播娘蒿种子，装入牛皮纸袋，种子自然晾干后储藏柜低温储藏。种群名称以采集点所在地级市的首字母缩写命名（表 1）。

表 1 40 个播娘蒿种群采集地点
Table 1 Collection sites information of 40 *D. sophia* populations

序号 Number	采集地点 Collection site	序号 Number	采集地点 Collection site
BZ-1	滨州市邹平县台子镇 Taizi Town, Zouping County, Binzhou City	LY-2	临沂市郯城县胜利镇 Shengli Town, Tancheng County, Linyi City
BZ-2	滨州市惠民县胡集镇 Huji Town, Huimin County, Binzhou City	LY-3	临沂市费县探义镇 Tanyi Town, Fei County, Linyi City
DY-1	东营市利津县北宋镇 Beisong Town, Lijin County, Dongying City	LY-4	临沂市沂南县青驼镇 Qingtuo Town, Yi'nan County, Linyi City
DZ-1	德州市庆云县常家镇 Changjia Town, Qingyun County, Dezhou City	QD-1	青岛市莱西区河头店镇 Hetoudian Town, Laixi District, Qingdao City
DZ-2	德州市平原县恩城镇 Encheng Town, Pingyuan County, Dezhou City	QD-2	青岛市平度市云山镇 Yunshan Town, Pingdu County, Qingdao City
DZ-3	德州市武城县武城镇 Wucheng Town, Wucheng County, Dezhou City	RZ-1	日照市莒县小店镇 Xiaodian Town, Ju County, Rizhao City
HZ-1	菏泽市成武县张楼镇 Zhanglou Town, Chengwu County, Heze City	RZ-2	日照市五莲县西湖镇 Xihu Town, Wulian County, Rizhao City
HZ-2	菏泽市巨野县田桥镇 Tianqiao Town, Juye County, Heze City	TA-1	泰安市东平县大洋镇 Dayang Town, Dongping County, Taian City
JN-1	济南市长清区张夏镇 Zhangxia Town, Changqing District, Ji'nan City	TA-2	泰安市肥城县老城街道 Laocheng Street, Feicheng County, Taian City
JN-2	济南市历城区王舍人镇 Wangsheren Town, Licheng District, Ji'nan City	TA-3	泰安市宁阳县磁窑镇 Ciyao Town, Ningyang County, Taian City
JN-3	济南市章丘区刁镇 Diao Town, Zhangqiu District, Ji'nan City	WF-1	潍坊市潍城区于河街道 Yuhe Street, Weicheng District, Weifang City
JNI-1	济宁市汶上县郭仓镇 Guocang Town, Wenshang County, Jining City	WF-2	潍坊市昌乐市卜庄镇 Bozhuang Town, Changyi County, Weifang City
JNI-2	济宁市梁山县韩岗镇 Hangang Town, Liangshan County, Jining City	WF-3	潍坊市临朐县沂山镇 Yishan Town, Linqu County, Weifang City
JNI-3	济宁市嘉祥县疃里镇 Tuanli Town, Jiaxiang County, Jining City	WH-1	威海市乳山市夏村镇 Xiacun Town, Rushan County, Weihai City
JNI-4	济宁市任城区南张镇 Nanzhuang Town, Rencheng District, Jining City	YT-1	烟台市莱州市沙河镇 Shahe Town, Laizhou County, Yantai City
LC-1	聊城市莘县古城镇 Gucheng Town, Shen County, Liaocheng City	YT-2	烟台市莱阳市河头店镇 Hetoudian Town, Laiyang County, Yantai City
LC-2	聊城市阳谷县西湖镇 Xihu Town, Yanggu County, Liaocheng City	ZB-1	淄博市周村区南郊镇 Nanjiao Town, Zhoucun District, Zibo City
LC-3	聊城市东昌府区侯营镇 Houying Town, Dongchangfu District, Liaocheng City	ZB-2	淄博市临淄区齐陵街道 Qiling Street, Linzi District, Zibo City
LW-1	莱芜市莱城区口镇 Kou Town, Laicheng District, Laiwu City	ZZ-1	枣庄市滕州市鲍沟镇 Baogou Town, Tengzhou County, Zaozhuang City
LY-1	临沂市兰陵县卢柞镇 Luzuo Town, Lanling County, Linyi City	ZZ-2	枣庄市薛城区周营镇 Zhouying Town, Xuecheng District, Zaozhuang City

除草剂：98%双氟磺草胺原药，沈阳科创化学品有限公司；95%苯磺隆原药，江苏省激素研究所股份有限公司；95% 2 甲 4 氯原药，江苏辉丰生物农业股份有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 抗性水平测定 试验于 2018 年 2—4 月进行，在玻璃温室中进行播娘蒿试材的培养，光照为自然光，

温度靠暖气调整, 试验期间温室温度为 14—28℃。每个采集样点的播娘蒿为一个种群, 在直径为 9 cm 的塑料盆中单独种植, 覆土 1—2 mm, 每个种群种植 64 盆, 将塑料盆放入装有水的搪瓷盘中, 以盆钵底部渗灌方式浇水, 每隔 3 d 浇水一次, 保持土壤湿度。

抗性测定采用盆栽整株剂量-反应测定法^[4]。根据预试验, 每种除草剂设置 5 个剂量, 其中双氟磺草胺剂量为 0.37、1.11、3.33、10.0、30.0 g·hm⁻²; 苯磺隆剂量为 5、20、80、320、1 280 g·hm⁻²; 2 甲 4 氯剂量为 22.2、66.7、200、600、1 800 g·hm⁻², 每个种群均设置单独空白对照, 每处理 4 次重复, 于播娘蒿 3—6 叶期, 采用 ASS-4 型自动控制喷洒系统进行药剂喷雾, 喷头为扇形喷头, 喷雾压力为 0.35 MPa, 用水量按照每公顷 450 L 计算。

施药后, 观察同一种药剂下, 40 个播娘蒿种群的敏感差异, 详细记录播娘蒿表现症状、表现时期以及不同种群的敏感差异。施药后 30 d, 用剪刀剪取各种群各处理播娘蒿地上部分, 称量鲜重, 每个种群根据相应的空白对照鲜重, 计算鲜重抑制率。鲜重抑制率(%)=100×(空白对照鲜草重-处理区鲜草重)/空白对照鲜草重。

1.2.2 ALS 基因突变分析 根据播娘蒿 ALS 基因序列 (GenBank: FJ715633), 设计引物 (DS-F 5' GGTA TCAAATCCCGTGCTCT 3'和 DS-R 5' CATATGCA TACAATCACCGGTT 3'), 扩增片段包含目前已报道所有抗性相关位点。参照 1.2.1 的方法进行播娘蒿高抗种群植株的种植, 待播娘蒿长到 3—4 叶时, 采集药剂处理后存活植株的单株叶片, 采用植物基因组提取试剂盒 (TaKaRa) 提取基因组 DNA, 具体提取方法参照试剂盒相关流程; PCR 克隆 (25 μL 反应体系, 参数为 94℃ 3 min; 95℃ 30 s, 53℃ 45 s, 72℃ 2min, 30 个循环; 72℃ 10 min) 其 ALS 基因序列, 使用 UNIQ-10 DNA 纯化试剂盒 (上海生工生物工程有限公司) 回收 PCR 产物并送上海生工生物工程有限公司测序。将测序后获得序列与拟南芥敏感型 ALS 基因和氨基酸序列进行比对, 查找相关突变位点。每个种群检测 10 株。

1.3 数据分析

用 DPS 7.05 软件对药剂剂量的对数值与鲜重抑制率的概率值进行回归分析, 得到剂量-反应曲线、相关系数、抑制杂草生长 50% 的除草剂剂量 (GR₅₀) 及 95% 置信区间。由于不同种群本身种子活力、生长势等有差异, 所以相对抗性指数 (resistance index, RI)

<5.00 的均认定为敏感种群, $RI=GR_{50}(R)/GR_{50}(S)$, 其中 GR₅₀(R) 为抗性种群的 GR₅₀ 值, GR₅₀(S) 为敏感种群的 GR₅₀ 值。抗性判断参考高兴祥等^[4]: 1.00≤RI<5.00 为敏感种群, 5.00≤RI<10.00 为低抗性种群, 10.00≤RI<50.00 为中抗性种群, RI≥50.00 为高抗性种群。

2 结果

2.1 播娘蒿对双氟磺草胺抗性水平测定

双氟磺草胺药效表现较慢, 施药后 7 d 播娘蒿开始出现黄化, 而后生长被抑制, 至药后 15 d 后开始死亡。40 个播娘蒿种群中大部分种群对双氟磺草胺敏感, 但 BZ-1、DZ-3、LC-3、LY-4、YT-1 5 个种群敏感性明显低于其他种群。

施药后 30 d 调查结果统计 (表 2) 可见, 双氟磺草胺对大部分播娘蒿种群效果很好, 最敏感种群是 DY-1 和 JN1-4, GR₅₀ 均为 0.11 g·hm⁻², 敏感种群有 32 个, 占 80.00%, 抗性种群有 8 个, 占总种群数的 20.00%, 部分种群抗性已很明显。其中低抗、中抗和高抗种群数量分别为 3、3 和 2 个, 各自占总种群数的 7.50%、7.50% 和 5.00%。从山东省不同区域来看, 对双氟磺草胺产生抗性的播娘蒿种群分布无明显规律, 8 个抗性种群分布于 7 个地 (市), 最高抗性种群为 DZ-3, RI 为 194.00。

2.2 播娘蒿对对比药剂苯磺隆和 2 甲 4 氯的抗性水平测定

苯磺隆药效表现与双氟磺草胺差别不大, 施药后 7 d 播娘蒿开始出现黄化, 而后生长被抑制, 至药后 15 d 后开始死亡。表 3 为苯磺隆施药后 30 d 调查结果。40 个播娘蒿种群敏感性差异明显, 对苯磺隆最敏感的播娘蒿种群是 HZ-1, GR₅₀ 为 0.56 g·hm⁻², 另外, DY-1、DZ-1、JN-2、WH-1 等 20 个种群也比较敏感, RI<5.00, 敏感种群占 52.50%; 抗性种群有 19 个, 占总种群数的 47.50%, 而且在抗性种群中, 低抗、中抗、高抗种群分别为 11、6、2 个, 分别占总种群数的 27.50%、15.00%、5.00%。最高抗性种群是 DZ-3, RI 为 244.75。

2 甲 4 氯施药后观察, 播娘蒿表现速度快, 施药后 3 d 时播娘蒿即开始出现扭曲, 叶片不伸展, 药后 7 d 时茎叶开始黄化, 而后逐渐死亡。40 个播娘蒿种群对 2 甲 4 氯均敏感, 效果无明显差异。表 4 为 2 甲 4 氯施药后 30 d 调查结果。2 甲 4 氯对 40 个播娘蒿种群效果均很好, 无明显抗性产生, RI 在 1.00—5.00, 且大部分在 3.00 以下。

表 2 播娘蒿种群对双氟磺草胺抗性水平测定

Table 2 Resistance level of *D. sophia* populations to florasulam

序号	回归方程	相关系数	GR ₅₀ (g·hm ⁻²)	相对抗性指数
Number	Regression equation (y=)	Correlation coefficient	(95% CL)	RI
BZ-1	3.0871+2.5252x	0.9220	5.72 (3.89-10.98)	52.00
BZ-2	6.7548+2.0988x	0.8926	0.15 (0.01-0.39)	1.36
DY-1	6.1746+1.2088x	0.9405	0.11 (0.02-0.26)	1.00
DZ-1	6.1210+1.8228x	0.8825	0.24 (0.08-0.45)	2.18
DZ-2	6.1178+1.5045x	0.8717	0.18 (0.001-0.62)	1.64
DZ-3	3.7060+0.9736x	0.8519	21.34 (13.81-39.62)	194.00
HZ-1	5.6433+1.2505x	0.9203	0.31 (0.14-0.51)	2.82
HZ-2	6.2837+2.3134x	0.8914	0.28 (0.10-0.50)	2.55
JN-1	5.4469+1.6999x	0.9475	0.55 (0.33-0.78)	5.00
JN-2	5.5627+1.0454x	0.8902	0.29 (0.002-0.97)	2.64
JN-3	6.1607+1.3459x	0.9459	0.14 (0.03-0.31)	1.27
JNI-1	5.6161+2.1229x	0.9679	0.51 (0.30-0.74)	4.64
JNI-2	5.3038+1.5719x	0.9333	0.64 (0.18-1.20)	5.82
JNI-3	6.4349+1.5358x	0.8804	0.12 (0.01-0.30)	1.09
JNI-4	6.5989+1.6727x	0.9630	0.11 (0.01-0.31)	1.00
LC-1	6.6323+1.9998x	0.8911	0.15 (0.02-0.38)	1.36
LC-2	6.2404+1.7165x	0.9655	0.19 (0.05-0.39)	1.73
LC-3	3.3624+2.2387x	0.9631	5.39 (3.89-8.22)	49.00
LW-1	5.6180+1.4674x	0.9352	0.38 (0.19-0.59)	3.45
LY-1	6.4307+2.3490x	0.8925	0.25 (0.07-0.48)	2.27
LY-2	5.3477+1.7628x	0.9479	0.64 (0.41-0.87)	5.82
LY-3	6.0852+1.7614x	0.9592	0.24 (0.08-0.45)	2.18
LY-4	4.0274+2.0848x	0.9589	2.93 (2.48-3.44)	26.64
QD-1	5.9423+1.3467x	0.9401	0.20 (0.07-0.38)	1.82
QD-2	6.0594+1.2737x	0.9363	0.15 (0.04-0.32)	1.27
RZ-1	5.4556+1.6946x	0.9474	0.54 (0.15-1.01)	4.91
RZ-2	6.0120+1.6168x	0.8734	0.24 (0.004-0.70)	2.18
TA-1	5.9847+1.6603x	0.8744	0.26 (0.01-0.72)	2.36
TA-2	6.0133+1.9703x	0.8839	0.31 (0.13-0.52)	2.82
TA-3	6.1886+1.3238x	0.9432	0.13 (0.03-0.29)	1.18
WF-1	6.4373+1.8136x	0.8868	0.16 (0.03-0.37)	1.45
WF-2	6.4515+2.7972x	0.8939	0.30 (0.10-0.54)	2.73
WF-3	6.1546+2.1186x	0.8883	0.29 (0.11-0.50)	2.64
WH-1	5.7762+1.1081x	0.9022	0.20 (0.07-0.38)	1.82
YT-1	4.5119+1.3342x	0.8726	2.32 (1.26-3.85)	21.09
YT-2	6.2982+1.7011x	0.9642	0.17 (0.04-0.37)	1.55
ZB-1	5.4225+1.4153x	0.9245	0.50 (0.13-0.98)	4.55
ZB-2	6.2430+1.5091x	0.8754	0.15 (0.03-0.33)	1.36
ZZ-1	6.5223+2.1754x	0.8918	0.20 (0.04-0.43)	1.82
ZZ-2	6.0763+1.4651x	0.9454	0.18 (0.05-0.37)	1.64

表 3 播娘蒿种群对苯磺隆抗性水平测定

Table 3 Resistance level of *D. sophia* populations to tribenuron-methyl

序号	回归方程	相关系数	GR ₅₀ (g·hm ⁻²)	相对抗性指数
Number	Regression equation (y=)	Correlation coefficient	(95% CL)	RI
BZ-1	4.4592+0.4070x	0.9305	21.31 (7.80-41.91)	38.05
BZ-2	3.4995+2.1764x	0.8938	4.89 (1.73-9.05)	8.73
DY-1	4.5408+1.5010x	0.8883	2.02 (0.27-5.44)	3.61
DZ-1	4.5400+1.3410x	0.8811	2.20 (0.42-5.40)	3.93
DZ-2	3.7377+1.7915x	0.8886	5.07 (1.96-9.11)	9.05
DZ-3	2.7435+1.0560x	0.9480	137.06 (58.29-448.11)	244.75
HZ-1	4.0109+1.4039x	0.9423	0.56 (0.03-11.73)	1.00
HZ-2	4.0697+1.2949x	0.9481	5.23 (2.24-9.17)	9.34
JN-1	4.1869+0.9237x	0.9913	7.59 (3.73-12.60)	13.55
JN-2	4.7999+0.9194x	0.9239	1.65 (0.34-4.16)	2.95
JN-3	4.2133+1.3990x	0.9533	3.65 (1.18-7.25)	6.52
JNI-1	4.5819+1.1696x	0.9575	2.28 (0.53-5.29)	4.07
JNI-2	3.4317+1.9362x	0.8894	6.46 (2.96-10.70)	11.54
JNI-3	4.4136+1.5958x	0.8898	2.33 (0.37-5.92)	4.16
JNI-4	4.1771+1.2621x	0.9501	4.49 (1.76-8.23)	8.02
LC-1	3.7939+1.5722x	0.9610	5.85 (2.59-9.96)	10.45
LC-2	4.4694+1.8515x	0.8941	1.93 (0.12-6.05)	3.45
LC-3	4.2146+0.9707x	0.9104	6.44 (3.02-10.96)	11.50
LW-1	4.8448+0.7822x	0.8931	1.58 (0.33-4.02)	2.82
LY-1	4.3215+1.7573x	0.8925	2.43 (0.35-6.26)	4.34
LY-2	4.7095+1.5411x	0.8909	1.54 (0.10-5.04)	2.75
LY-3	4.4512+1.5314x	0.8883	2.28 (0.37-5.77)	4.07
LY-4	3.3832+1.0208x	0.8737	38.36 (18.32-67.62)	68.50
QD-1	4.0803+1.2919x	0.9503	5.15 (2.19-9.07)	9.20
QD-2	3.7652+1.5620x	0.9589	6.17 (2.83-10.34)	11.02
RZ-1	4.3648+1.5478x	0.8879	2.57 (0.50-6.12)	4.59
RZ-2	4.5092+1.3450x	0.8808	2.32 (0.47-5.55)	4.14
TA-1	3.9601+1.6906x	0.8879	4.12 (1.35-8.00)	7.36
TA-2	3.2026+2.4882x	0.8944	5.28 (1.95-9.52)	9.43
TA-3	4.2321+1.4666x	0.9509	3.34 (0.96-6.92)	5.96
WF-1	4.8405+1.4052x	0.8883	1.30 (0.07-4.49)	2.32
WF-2	4.7478+1.2172x	0.8773	1.61 (0.23-4.46)	2.88
WF-3	4.4687+1.5162x	0.9677	2.24 (0.36-5.70)	4.00
WH-1	4.7373+1.4737x	0.8894	1.51 (0.10-4.85)	2.70
YT-1	4.3582+0.9489x	0.9037	4.75 (1.94-8.67)	8.48
YT-2	4.6091+1.5464x	0.8902	1.79 (0.17-5.28)	3.20
ZB-1	4.4016+1.2996x	0.8750	2.89 (0.03-10.85)	5.16
ZB-2	4.3259+1.8489x	0.8936	2.32 (0.26-6.31)	4.14
ZZ-1	4.8315+1.4640x	0.8900	1.30 (0.06-4.64)	2.32
ZZ-2	4.3491+1.7430x	0.8924	2.36 (0.32-6.18)	4.21

表 4 播娘蒿种群对 2 甲 4 氯抗性水平

Table 4 Resistance level of *D. sophia* populations to MCPA

序号	回归方程	相关系数	GR ₅₀ (g·hm ⁻²)	相对抗性指数
Number	Regression equation (y=)	Correlation coefficient	(95% CL)	RI
BZ-1	2.0945+2.5738x	0.8928	13.45 (2.43-29.10)	3.61
BZ-2	3.3409+1.6892x	0.8819	9.60 (1.80-21.89)	2.57
DY-1	3.9377+1.3693x	0.8715	5.97 (0.69-16.27)	1.60
DZ-1	4.3261+1.0307x	0.9189	4.51 (0.60-12.56)	1.21
DZ-2	3.7099+1.5489x	0.8802	6.91 (0.73-18.38)	1.85
DZ-3	3.4617+1.7590x	0.8866	7.49 (0.66-20.53)	2.01
HZ-1	4.2287+0.9926x	0.9061	5.98 (1.17-14.62)	1.60
HZ-2	4.9736+0.7651x	0.8886	3.88 (0.40-12.68)	1.04
JN-1	3.2623+1.7257x	0.8826	10.16 (2.04-22.62)	2.72
JN-2	3.7622+1.4396x	0.9516	7.24 (1.10-18.09)	1.94
JN-3	3.4954+1.7896x	0.8880	6.93 (0.41-20.41)	1.86
JNI-2	3.3834+1.6609x	0.8811	9.40 (1.75-21.55)	2.52
JNI-2	3.6806+1.4785x	0.9582	7.81 (1.29-18.91)	2.09
JNI-3	3.4141+1.6799x	0.8826	8.79 (1.39-21.08)	2.36
JNI-4	4.3825+1.0806x	0.9246	3.73 (0.32-11.68)	1.00
LC-2	3.7705+1.5307x	0.8802	6.36 (0.59-17.83)	1.71
LC-2	3.5698+1.4654x	0.8705	9.46 (0.03-34.75)	2.54
LC-3	3.2963+1.5965x	0.8749	11.67 (3.24-23.58)	3.13
LW-1	3.0031+2.1808x	0.8924	8.24 (0.33-24.44)	2.21
LY-1	3.4446+1.8365x	0.8889	7.03 (0.38-20.88)	1.88
LY-2	3.4498+1.6801x	0.8831	8.37 (1.18-20.70)	2.24
LY-3	4.0256+1.3975x	0.8761	4.98 (0.33-15.47)	1.34
LY-4	3.0374+1.8191x	0.8837	11.99 (2.97-24.79)	3.21
QD-1	3.1072+1.9785x	0.8897	9.05 (0.95-23.20)	2.43
QD-2	3.1567+1.9338x	0.8890	8.98 (1.00-22.84)	2.41
RZ-1	3.5592+1.7137x	0.8860	6.93 (0.52-19.76)	1.86
RZ-2	4.1233+1.4701x	0.8825	3.95 (0.07-15.40)	1.06
TA-1	3.2322+1.6788x	0.8794	11.30 (2.83-23.52)	3.03
TA-2	3.7666+1.4893x	0.8774	6.73 (0.80-17.88)	1.80
TA-3	3.0389+2.0898x	0.8914	8.68 (0.61-23.81)	2.33
WF-1	4.2364+1.2589x	0.9485	4.04 (0.24-13.34)	1.08
WF-2	3.5311+1.8064x	0.8888	6.50 (0.27-20.34)	1.74
WF-3	3.5460+1.6892x	0.8849	7.26 (0.68-19.82)	1.95
WH-1	3.2738+1.8467x	0.8876	8.60 (0.98-21.99)	2.31
YT-1	3.4549+1.8182x	0.8884	7.08 (0.42-20.75)	1.90
YT-2	3.7438+1.3591x	0.9397	8.40 (1.82-18.96)	2.25
ZB-1	3.0505+1.6576x	0.9504	15.00 (5.39-27.35)	4.02
ZB-2	3.6460+1.7483x	0.8881	5.95 (0.20-19.50)	1.60
ZZ-1	3.3559+1.8120x	0.8873	8.08 (0.81-21.35)	2.17
ZZ-2	4.2640+1.1111x	0.9285	4.60 (0.55-13.04)	1.23

2.3 双氟磺草胺高抗种群 ALS 基因突变分析

对双氟磺草胺产生高抗种群 BZ-1 和 DZ-3 进行了 ALS 基因测序, 测序分析结果显示两个高抗播娘蒿植株均发生了 ALS 基因功能位点的突变, 但是突变位点

或突变方向存在差异。BZ-1 ALS 基因第 197 位氨基酸发生 CCT (Pro) 到 TCT (Ser) 或 CTT (Leu) 的突变, DZ-3 ALS 基因第 574 位氨基酸发生了 TGG (Trp) 到 TTG (Leu) 的突变 (表 5)。

表 5 高抗种群 ALS 基因突变分析

Table 5 Analysis of ALS gene mutations in highly resistant populations

序号 Number	相对抗性指数 RI	ALS 基因突变 ALS gene mutation	检出比例 Detection rate
BZ-1	52.00	Pro-197-Leu; Pro-197-Ser	Pro-197-Leu, 40%; Pro-197-Ser, 60%
DZ-3	194.00	Trp-574-Leu	100%
DY-1	1.00	Wild type	—

3 讨论

3.1 播娘蒿对双氟磺草胺及对比药剂苯磺隆、2 甲 4 氯的抗性水平

1988 年美国杜邦公司的苯磺隆在我国正式登记, 我国小麦田除草剂进入一个飞速发展期, 但苯磺隆连续多年使用后, 小麦田播娘蒿^[13-16]、荠菜^[17-20]、猪殃殃^[21-23]、麦家公^[24-25]等阔叶杂草的抗性逐年加重, 苯磺隆单剂逐渐退出市场, 仅作为复配制剂的成分之一。本研究中, 播娘蒿对苯磺隆的抗性仍然很普遍, 抗性种群占 47.50%, 最高相对抗性指数为 244.75。

双氟磺草胺是继苯磺隆之后在小麦田应用最广的防除阔叶杂草的除草剂, 该药剂与苯磺隆一样, 均属于 ALS 抑制剂类除草剂, 目前市场上防除小麦田阔叶杂草的除草配方中, 双氟磺草胺已成为一种必不可少的成分, 该药剂由于用量低、活性高, 且对小麦安全性高, 已大面积应用, 国内学者对双氟磺草胺以及复配制剂的应用进行了大量报道^[8,10], 但随着用药时间延长, 效果逐渐下降, 用药量逐渐加大, 已是最初登记用量的 3 倍甚至更高, 已有报道小麦田猪殃殃对双氟磺草胺产生一定程度的抗性^[11], 但未有小麦田主要杂草播娘蒿对双氟磺草胺的抗性报道, 对双氟磺草胺产生抗性也没有引起足够的重视。从本试验结果可见, 虽然仅有 20.00% 的播娘蒿种群对双氟磺草胺产生抗性, 但两个高抗种群 BZ-1 和 DZ-3 的相对抗性指数分别达到了 52.00 和 194.00。

本试验中播娘蒿种群未对对比药剂 2 甲 4 氯产生抗药性, 2 甲 4 氯在小麦田也主要应用于防除播娘蒿、荠菜, 因此以播娘蒿、荠菜为主的地块, 可以使用 2 甲 4 氯等不易产生抗药性的激素类药剂进行防除, 多种阔叶杂草混生地块, 可采用多种作用机制的除草剂

混合使用或者交替使用^[26-29], 减少双氟磺草胺单一药剂的使用。

综合山东省播娘蒿 40 个种群对双氟磺草胺和对比药剂苯磺隆、2 甲 4 氯的抗性水平测定结果, 2 甲 4 氯为激素类除草剂, 40 个播娘蒿种群未发现抗性产生, 这也进一步印证了激素类除草剂不易产生抗药性。双氟磺草胺和苯磺隆为 ALS 抑制剂类除草剂, 也是容易产生抗性的除草剂类型, 从结果可以看出, 抗双氟磺草胺和抗苯磺隆的播娘蒿种群存在着一定程度的一致性, 但又不是完全一致。抗双氟磺草胺种群有 8 个, 抗苯磺隆种群有 19 个, 其中抗双氟磺草胺的 8 个种群中有 7 个也是抗苯磺隆种群, 如高抗双氟磺草胺的播娘蒿种群 BZ-1 和 DZ-3 同时也是中抗和高抗苯磺隆种群; 中抗双氟磺草胺种群 LC-3、LY-4、YT-1 同时分别为中抗、高抗和低抗苯磺隆种群; 低抗双氟磺草胺的种群 JN-1、JN-2 同时也是中抗苯磺隆种群, 只有低抗双氟磺草胺的种群 LY-2 对苯磺隆没有抗性。其他抗苯磺隆的 12 个种群未见对双氟磺草胺的抗性。

3.2 播娘蒿对双氟磺草胺的抗性机理

靶标抗性机理和非靶标抗性机理是杂草对 ALS 类除草剂产生抗性的两大原因^[6,30-31]。靶标 ALS 基因突变或代谢作用增强是报道最多的 ALS 类除草剂抗性机理, 国内外大量研究证实 ALS 存在 8 个抗性突变位点, 分别为第 122 位丙氨酸、第 197 位脯氨酸、第 205 位丙氨酸、第 376 位天冬氨酸、第 377 位精氨酸、第 574 位色氨酸、第 653 位丝氨酸和第 654 位甘氨酸^[32-34], 任一位点发生氨基酸替代均可导致杂草抗药性的产生。本试验结果表明, 靶标突变是播娘蒿种群 BZ-1、DZ-3 对双氟磺草胺产生高水平抗性的重要原因之一, 种群 BZ-1 和 DZ-3 均发生 ALS 关键位点突变, 但突变方式存在差异, 这进一步证实了 ALS 突

变的多样性^[6]。BZ-1 的 ALS 基因第 197 位氨基酸发生了 CCT (Pro) 到 TCT (Ser) 或 CTT (Leu) 的突变, 而 DZ-3 的 ALS 基因则是第 574 位氨基酸发生了 TGG (Trp) 到 TTG (Leu) 的突变, 这一结果与邓维^[6]报道的关于播娘蒿对苯磺隆靶标抗性突变的 3 个位点 (197、376 和 574 位) 研究结果具有一定的一致性, 但突变方式不一样。至于二者抗性机理的关联性, 有待进一步研究。非靶标抗性机理比靶标抗性复杂^[28,35], 这方面的研究报道较少。非靶标抗性机制是尽量减少除草剂到达目标部位的数量, 从而减少除草剂对杂草的损伤, 目前有关非靶标抗性机理报道最多的是植物代谢能力的增强。播娘蒿对双氟磺草胺抗性机理除了主要的靶标抗性外, 是否还有非靶标抗性是下一步研究的重点内容之一。

4 结论

山东省 40 个播娘蒿种群中已有 20.00% 的种群对双氟磺草胺产生明显抗性, 其中高抗种群的 BZ-1 和 DZ-3 相对抗性指数已高达 52.00 和 194.00, 且主要为靶标抗性。另外, 播娘蒿种群对对比除草剂苯磺隆的抗性仍很普遍, 对另一种激素类除草剂 2 甲 4 氯未产生抗性。因此, 针对冬小麦田播娘蒿发生区域, 不能单一使用双氟磺草胺, 应推广多种作用机理的除草剂交替、混和使用, 从而延缓和控制杂草产生抗药性, 同时扩大杀草谱、降低除草剂使用量。

References

- [1] 高兴祥, 李美, 房锋, 李健. 河南省冬小麦田杂草组成及群落特征. 麦类作物学报, 2016, 36(10): 1402-1408.
GAO X X, LI M, FANG F, LI J. Species composition and characterization of weed community in winter wheat fields in Henan Province. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(10): 1402-1408. (in Chinese)
- [2] 高兴祥, 李美, 房锋, 张悦丽, 孙作文, 齐军山. 山东省小麦田杂草组成及群落特征. 草业学报, 2014, 23(5): 92-98.
GAO X X, LI M, FANG F, ZHANG Y L, SUN Z W, QI J S. Species composition and characterization of weed communities in wheat fields in Shandong Province. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(5): 92-98. (in Chinese)
- [3] 李秉华, 王贵启, 魏守辉, 樊翠芹, 黄红娟, 张朝贤. 河北省冬小麦田杂草群落特征. 植物保护学报, 2013, 40(1): 83-88.
LI B H, WANG G Q, WEI S H, FAN C Q, HUANG H J, ZHANG C X. Characterization of weed community in winter wheat in Hebei Province. *Journal of Plant Protection*, 2013, 40(1): 83-88. (in Chinese)
- [4] 高兴祥, 李美, 高宗军, 房锋, 张悦丽, 齐军山. 山东省小麦田播娘蒿对苯磺隆的抗性测定. 植物保护学报, 2014, 41(3): 373-378.
GAO X X, LI M, GAO Z J, FANG F, ZHANG Y L, QI J S. Determination of flixweed (*Descurainia sophia*) resistance to tribenuron-methyl in Shandong Province. *Journal of Plant Protection*, 2014, 41(3): 373-378. (in Chinese)
- [5] 房锋, 李美, 高兴祥, 李健, 李燕. 麦田播娘蒿发生动态及其对小麦产量构成因素的影响. 中国农业科学, 2015, 48(13): 2559-2568.
FANG F, LI M, GAO X X, LI J, LI Y. Occurrence of flixweed (*Descurainia sophia*) in wheat fields and its influence on wheat yield components. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(13): 2559-2568. (in Chinese)
- [6] 邓维. 抗苯磺隆播娘蒿抗性机理及抗性突变对乙酰乳酸合成酶功能影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
DENG W. The resistance mechanisms of tribenuron-methyl-resistant flixweed (*Descurainia sophia* L.) and effects of resistance-endowing mutations on ALS functionality[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [7] 苏少泉. 三唑啉磺酰胺类除草剂新品种——双氟磺草胺. 世界农药, 2001, 23(4): 53-54.
SU S Q. Florasulam: A new triazole pyrimidine sulfonamide herbicide. *World Pesticides*, 2001, 23(4): 53-54. (in Chinese)
- [8] 李美, 高兴祥, 高宗军, 赵维, 吴加军, 李茂昇. 双氟磺草胺、2 甲 4 氯联合作用及作物安全性评价. 植物保护学报, 2013, 40(6): 557-563.
LI M, GAO X X, GAO Z J, ZHAO W, WU J J, LI M S. Weed control effect and crop response to florasulam plus MCPA. *Journal of Plant Protection*, 2013, 40(6): 557-563. (in Chinese)
- [9] 侯珍, 谢娜, 董秀霞, 张晓芳, 李凌绪, 王金信. 双氟磺草胺的除草活性及对不同小麦品种的安全性评价. 植物保护学报, 2012, 39(4): 357-363.
HOU Z, XIE N, DONG X X, ZHANG X F, LI L X, WANG J X. Evaluation of herbicidal activity of florasulam and its safety to various wheat varieties. *Journal of Plant Protection*, 2012, 39(4): 357-363. (in Chinese)
- [10] 李美, 高兴祥, 房锋, 李健, 吴加军, 李茂昇. 氟氯吡啶酯与双氟磺草胺复配的田间除草效果及其对作物安全性评价. 植物保护学报, 2016, 43(3): 514-522.
LI M, GAO X X, FANG F, LI J, WU J J, LI M S. Weed control effect and safety to crops of a mixed formulation (halauxifen-methyl 10% + florasulam 10%). *Journal of Plant Protection*, 2016, 43(3): 514-522.

- (in Chinese)
- [11] 马鹏生. 猪殃殃抗双氟磺草胺的生理机制研究. 山东农业大学学报(自然科学版), 2014, 45(5): 778-781.
- MA P S. Study on the physiological mechanism of the resistance of *Galium aparine* L. against florasulam. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2014, 45(5): 778-781. (in Chinese)
- [12] LIAN L, LU X T, WU J L, ZHANG H J. A novel alternative herbicide bipyrzoxone as for the control of resistant shepherd's purse (*Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik.) in wheat. *Chinese Journal of Pesticides Science*, DOI: 10.16801/j.issn.1008-7303.2020.0034.
- [13] DENG W, LIU M J, YANG Q, MEI Y, LI X F, ZHENG M Q. Tribenuron-methyl resistance and mutation diversity of Pro197 in flixweed (*Descurainia sophia* L.) accessions from China. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2015, 117: 68-74.
- [14] CUI H L, ZHANG C X, WEI S H, ZHANG H J, LI X J, ZHANG Y Q, WANG G Q. Acetolactate synthase gene proline (197) mutations confer tribenuron-methyl resistance in flixweed (*Descurainia sophia*) populations from China. *Weed Science*, 2011, 59(3): 376-379.
- [15] CUI H L, ZHANG C X, ZHANG H J, LIU X, LIU Y, WANG G Q, HUANG H J, WEI S H. Confirmation of flixweed (*Descurainia sophia*) resistance to tribenuron in China. *Weed Science*, 2008, 56(6): 775-779.
- [16] 许贤, 王贵启, 樊翠芹, 李秉华. 河北省境内播娘蒿对苯磺隆抗药性研究. 华北农学报, 2011, 26(增刊): 241-247.
- XU X, WANG G Q, FAN C Q, LI B H. Confirmation of flixweed (*Descurainia sophia*) resistance to tribenuron-methyl in Hebei Province. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, 26(Suppl.): 241-247. (in Chinese)
- [17] 刘君良, 王金信, 刘伟堂, 金涛, 李小芳, 毕亚玲. 中国北方部分地区麦田荠菜对苯磺隆的抗性水平. 农药学学报, 2011, 13(4): 347-353.
- LIU J L, WANG J X, LIU W T, JIN T, LI X F, BI Y L. Resistance level of *Capsella bursa-pastoris* to tribenuron-methyl in winter wheat fields in northern China. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2011, 13(4): 347-353. (in Chinese)
- [18] 高新菊, 王恒亮, 马毅辉, 陈威, 秦光宇, 宋语娇. 河南省部分地区麦田荠菜对苯磺隆的抗性水平及抗性靶标分子机制. 植物保护学报, 2017, 44(3): 501-508.
- GAO X J, WANG H L, MA Y H, CHEN W, QIN G Y, SONG Y J. Resistance of *Capsella bursa-pastoris* to tribenuron-methyl in winter wheat fields in some areas of Henan Province and its molecular mechanism. *Journal of Plant Protection*, 2017, 44(3): 501-508. (in Chinese)
- [19] 张乐乐, 王倩, 王伟. 河南省麦田荠菜对苯磺隆的抗性及其交互抗性. 植物保护学报, 2018, 45(3): 536-542.
- ZHANG L L, WANG Q, WANG W. Resistance to tribenuron-methyl and cross resistance in shepherd's purse *Capsella bursa-pastoris* from wheat fields in Henan Province. *Journal of Plant Protection*, 2018, 45(3): 536-542. (in Chinese)
- [20] ZHANG L L, GUO W L, LI Q, WU C X, ZHAO N, LIU W T, WANG J X. Tribenuron-methyl resistance and mutation diversity of the AHAS gene in shepherd's purse (*Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik.) in Henan Province, China. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2017, 143: 239-245.
- [21] 彭学岗, 王金信, 段敏, 杨纪辉. 中国北方部分冬麦区猪殃殃对苯磺隆的抗性水平. 植物保护学报, 2008, 35(5): 458-462.
- PENG X G, WANG J X, DUAN M, YANG J H. The resistance to tribenuron-methyl in *Galium aparine* in winter wheat fields in northern China. *Journal of Plant Protection*, 2008, 35(5): 458-462. (in Chinese)
- [22] 孙健, 王金信, 张宏军, 刘君良, 卞圣楠. 抗苯磺隆猪殃殃乙酰乳酸合成酶的突变研究. 中国农业科学, 2010, 43(5): 972-977.
- SUN J, WANG J X, ZHANG H J, LIU J L, BIAN S N. Study on mutations in ALS of resistance to tribenuron-methyl in *Galium aparine* L. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(5): 972-977. (in Chinese)
- [23] 崔海兰, 王藏月, 徐林林, 李香菊. 猪殃殃对 AHAS 抑制剂靶标抗性的快速分子检测. 植物保护学报, 2016, 43(6): 1049-1054.
- CUI H L, WANG C Y, XU L L, LI X J. Rapid molecular detection of the resistance of *Galium aparine* var. *tenerum* to AHAS inhibitors. *Journal of Plant Protection*, 2016, 43(6): 1049-1054. (in Chinese)
- [24] 吴小虎, 王金信, 刘伟堂, 郭鹤久, 崔夕英, 陈业兵. 山东省部分市县麦田杂草麦家公 *Lithospermum arvense* 对苯磺隆的抗药性. 农药学学报, 2011, 13(6): 597-602.
- WU X H, WANG J X, LIU W T, GUO H J, CUI X Y, CHEN Y B. Resistance of *Lithospermum arvense* to tribenuron-methyl in winter wheat fields in part of Shandong Province. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2011, 13(6): 597-602. (in Chinese)
- [25] 王恒智, 白霜, 吴小虎, 吴翠霞, 刘伟堂, 王金信. 小麦田麦家公对苯磺隆的抗性机理. 植物保护学报, 2019, 46(1): 216-223.
- WANG H Z, BAI S, WU X H, WU C X, LIU W T, WANG J X. Resistance mechanism of *Lithospermum arvense* L. to tribenuron-methyl in winter wheat field. *Journal of Plant Protection*, 2019, 46(1): 216-223. (in Chinese)
- [26] GRSEL J, SEGEL L A. Herbicide rotations and mixtures: Effective

- strategies to delay resistance. *Symposium Series American Chemical Society*, 1990, 421: 430-458.
- [27] 李永丰, 李宜慰, 刘正道, 曾宪彬. 抗药性杂草种群的发展及其防治对策. *江西农业大学学报*, 1999, 21(1): 42-46.
- LI Y F, LI Y W, LIU Z D, ZENG X B. New developments in herbicide resistance in weed species and management strategies. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 1999, 21(1): 42-46. (in Chinese)
- [28] 李健, 李美, 高兴祥, 房锋, 董连红. 杂草抗药性及其机理研究进展. *山东农业科学*, 2016, 48(12): 165-170.
- LI J, LI M, GAO X X, FANG F, DONG L H. Herbicide resistance and its mechanism of weed. *Shandong Agricultural Sciences*, 2016, 48(12): 165-170. (in Chinese)
- [29] 周清元, 王倩, 叶桑, 崔明圣, 雷维, 郇欢欢, 赵愉风, 徐新福, 唐章林, 李加纳, 崔翠. 苯磺隆胁迫下油菜萌发期相关性状的全基因组关联分析. *中国农业科学*, 2019, 52(3): 399-413.
- ZHOU Q Y, WANG Q, YE S, CUI M S, LEI W, GAO H H, ZHAO Y F, XU X F, TANG Z L, LI J N, CUI C. Genome-wide association analysis of tribenuron-methyl tolerance related traits in *Brassica napus* L. under germination. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(3): 399-413. (in Chinese)
- [30] YU Q, POWLES S B. Metabolism-based herbicide resistance and cross-resistance in crop weeds: A threat to herbicide sustainability and global crop production. *Plant Physiology*, 2014, 166(3): 1106-1118.
- [31] YU Q, POWLES S B. Resistance to AHAS inhibitor herbicides: Current understanding. *Pest Management Science*, 2014, 70(9): 1340-1350.
- [32] TRANEL P J, WRIGHT T R, HEAP I M. Mutations in herbicide-resistant weeds to ALS inhibitors. <http://www.weedscience.org/Mutations/MutationDisplayAll.aspx>.
- [33] 黄兆峰, 刘倩, 王园园, 姜翠兰, 周欣欣. 杂草对 ALS 抑制剂抗药性概述. *农药科学与管理*, 2019, 40(2): 34-41.
- HUANG Z F, LIU Q, WANG Y Y, JIANG C L, ZHOU X X. Overview of weed resistance to ALS inhibitors. *Pesticide Science and Administration*, 2019, 40(2): 34-41. (in Chinese)
- [34] LIU W T, WU C X, GUO W L, DU L, YUAN G H, WANG J X. Resistance mechanisms to an acetolactate synthase (ALS) inhibitor in water starwort (*Myosoton aquaticum*) populations from China. *Weed Science*, 2015, 63(4): 770-780.
- [35] MA R, KAUNDUN S S, TRANEL P J, RIGGINS C W, MCGINNESS D L, HAGER A G, HAWKES T, MCINDOE E, RIECHERS D E. Distinct detoxification mechanisms confer resistance to mesotrione and atrazine in a population of waterhemp. *Plant Physiology*, 2013, 163(1): 363-377.

(责任编辑 岳梅)