

水稻田除草剂三唑磺草酮的作用特性

王恒智^{1,2}, 王豪^{1,2}, 朱宝林^{1,2}, 张乐乐³, 刘伟堂^{1,2}, 王金信^{*,1,2}

(1. 山东农业大学植物保护学院, 山东泰安 271018; 2. 山东省农药毒理与应用技术重点实验室, 山东泰安 271018;
3. 山东黄河三角洲国家级自然保护区管理局, 山东东营 257100)

摘要: 为了明确水稻田除草剂三唑磺草酮(QYR301)的最佳施药条件, 以稗草 *Echinochloa crus-galli* 和水稻 *Oryza sativa* 作为测试靶标, 采用温室盆栽法研究了其施药适期、耐雨水冲刷性、温度和光照强度对其除草活性的影响。结果显示: 三唑磺草酮对不同叶龄水稻具有较高的安全性, 在有效成分 360 g/hm² 的剂量下, 对 2 叶期以后的水稻干重抑制率为 0%; 其除草活性与稗草的叶龄显著相关, 其中 2~3 叶期的稗草最为敏感, 有效成分 30 g/hm² 的三唑磺草酮对其干重抑制率为 95%~98%; 三唑磺草酮具有一定的耐雨水冲刷能力, 药后降雨间隔达到 8 h 以上, 其除草活性与药后降雨间隔时间无显著相关性, 在有效成分 30~120 g/hm² 的剂量下, 对稗草的干重抑制率为 75%~93%; 在 20~35 °C 区间, 三唑磺草酮药效稳定, 对稗草的 GR₅₀ 值在 44.6~51.4 g/hm² 之间; 相较于中度光照(45%)和低光照(4%), 高光照(100%)条件下三唑磺草酮对稗草的干重抑制率显著增加。分析表明杂草叶龄、降雨、温度和光照会显著影响三唑磺草酮除草活性, 为使其发挥最大药效, 应选择在水稻 2 叶期以后至稗草 2~4 叶期, 天气晴朗, 气温高于 20 °C 的情况下施药; 如药后 8 h 以内遇降雨天气, 则需进行补喷。

关键词: 水稻田除草剂; 三唑磺草酮; 作用特性; 除草活性; 环境因素; 稗草; 干重抑制率
中图分类号: S482.4 文献标志码: A

Herbicidal characteristics of herbicide-QYR301 in paddy

WANG Hengzhi^{1,2}, WANG Hao^{1,2}, ZHU Baolin^{1,2}, ZHANG Lele³, LIU Weitang^{1,2}, WANG Jinxin^{*,1,2}

(1. College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong Province, China; 2. Key Laboratory of Pesticide Toxicology and Application Technology, Tai'an 271018, Shandong Province, China; 3. Yellow River Delta National Natural Reserve Management Bureau, Dongying 257100, Shandong Province, China)

Abstract: Greenhouse studies were carried out to determine the suitable time of QYR301 application and rainfastness, examine influence of temperature and light intensity on its efficacy targeted by barnyard grass (*Echinochloa crus-galli*) and paddy (*Oryza sativa*). QYR301 showed high safety for paddy at different leaf stages, with 0% dry weight inhibition for over-2 leaf stage of the paddy at 360 g a.i./hm². Meanwhile, the growth stage of barnyard grass significantly influenced the efficacy of QYR301 and barnyard grass at 2-3 leaf stages was most sensitive to QYR301 with 95%-98% dry weight inhibition at 30 g a.i./hm². QYR301 had ability to quickly penetrate into the leaf tissues and remained effective on 8 h of simulate rainfall after application with 75%-93% dry weight inhibition at 30-120 g

收稿日期: 2019-04-17; 录用日期: 2019-07-04.

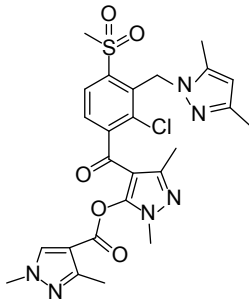
基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0300709).

作者简介: 王恒智, 男, 博士研究生, E-mail: hengzhiwang1993@163.com; *王金信, 通信作者(Author for correspondence), 男, 教授, 主要从事除草剂毒理及应用技术研究, Email: wangjx@sdau.edu.cn

a.i./hm². QYR301 exhibited relatively stable efficacy against barnyard grass under temperature of 20-35 °C with GR₅₀ of 44.6-51.4 g a.i./hm². Compared with middle (45%) and low (4%) light intensity, QYR301 showed significant higher efficacy against barnyard grass under high light intensity (100%) conditions. In conclusion, the growth stage of weeds, rainfall, temperature and light intensity significantly influenced the efficacy of QYR301 and the optimum time, temperature and light intensity for barnyard grass control were 2-4 leaf stage of the weeds and over-2 leaf stage of the paddy, 20-35 °C and 100% light intensity, respectively. The application needs to be reconducted if the rain occurs within 8 hours after application.

Keywords: Herbicide in paddy; QYR301; herbicidal characteristics; herbicidal activity; environmental factors; barnyard grass; dry weight inhibition

三唑磺草酮 (QYR301, 化学名称 4-(2-氯-3-((3,5-二甲基-1*H*-吡唑-1-基)甲基)-4-(甲磺酰基)苯甲酰基)-1,3-二甲基-1*H*-吡唑-5-基 1,3-二甲基-1*H*-吡唑-4-甲酸酯, 结构式见图式 1, 中国专利授权公告号: CN105399674B, CAS: 1911613-97-2) 是由青岛清原化合物有限公司研制开发的一种新型吡唑酮类化合物^[1]。



图式 1 三唑磺草酮结构式

Scheme 1 Structural formula of QYR301

初步研究表明, 三唑磺草酮是一种新型的对-羟苯基丙酮酸双氧化酶 (hydroxyphenylpyruvate dioxygenase, HPPD) 抑制剂类除草剂, 该类化合物通过抑制植物体 HPPD 的活性, 使对-羟苯基丙酮酸转化为尿黑酸的过程受阻, 从而导致质体醌无法正常合成, 而质体醌则是八氢番茄红素脱氢酶 (phytoene desaturase, PDS) 的关键辅因子, 质体醌减少, 使 PDS 催化作用受阻, 进而影响靶标体内类胡萝卜素生物合成, 导致叶片白化而死亡^[2]。三唑磺草酮杀草谱广, 苗后除草活性高, 尤其对稗草 *Echinochloa crus-galli*、千金子 *Leptochloa chinensis*、鸭舌草 *Monochoria vaginalis* 和鳢肠 *Eclipta prostrata* 有较高活性, 并且与当前稻田主流除草剂氟氯草酯、五氟磺草胺和二氯喹啉酸不

存在交互抗性, 同时, 其对水稻幼苗安全, 适用于水稻移栽田和直播田, 是目前解决稻田化学除草难题——防除抗性稗草和千金子的有效药剂, 具有广阔的应用前景^[1]。

除草剂的防效除了与除草剂的品种有直接关系外, 还与环境、土壤、杂草和作物等因素密切相关^[3-6], 因此, 明确除草剂的最佳施药条件对除草剂的正确高效使用有十分重要的指导意义。然而, 三唑磺草酮作为一种新型化合物, 尚未推广应用, 影响该化合物药效的因素国内外尚未见报道, 鉴于此, 本试验通过室内盆栽法研究其施药适期、耐雨水冲刷性、温度和光照强度对其除草活性影响, 明确其最佳施药条件。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试药剂 97% 三唑磺草酮 (QYR301) 原药, 由青岛清原化合物有限公司提供。

1.1.2 供试杂草 稗草 *E. crus-galli*, 采自山东省泰安市未使用过除草剂的荒地。

1.1.3 供试水稻品种 供试水稻 *Oryza sativa* (品种为宁粳 28), 购于宁夏石嘴山市场。

1.1.4 主要仪器 BSA-224S 型万分之一电子天平, 赛多利斯科学仪器 (北京) 有限公司; SPX 型智能光照培养箱, 宁波江南仪器厂; ASS-4 型自动控制农药喷洒系统 (TEEJET-9503EVS 扇形喷头), 国家农业信息化工程技术中心研制, 北京盛恒天宝科技有限公司; JLC-RY3 型便携式人工降雨模拟系统, 锦州利诚自动化设备有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 药液配制 使用万分之一天平准确称量一定量三唑磺草酮原药, 以少量丙酮溶解后用质量

分数为 0.1% 的吐温-80 水溶液配制成母液, 继而再稀释成各试验所需浓度药液。以不含三唑磺草酮的 0.1% 吐温-80 水溶液作为空白对照。

1.2.2 培养土制备 参照文献方法^[7-8]进行。取未使用过农药的表层土壤过 3.35 mm 孔径筛并风干, 装入塑料盆钵, 备用。土壤类型为壤土, pH 值为 7.67, 有机质含量为 15.79 g/kg, 氮含量为 14.28 g/kg, 磷含量为 2.00 g/kg, 钾含量为 23.15 g/kg。

1.2.2.1 杂草培养 选择籽粒饱满的稗草种子, 置于铺有 2 层滤纸 (Whatman No.1, Maidstone, UK) 的培养皿中, 添加 8 mL 无菌水保持湿润, 于光照培养箱 (恒温 25 °C, 光周期 12 h, 相对湿度 75%) 中催芽。待种子露白后, 将其播入 130 mm × 80 mm 装有筛风干土的圆形塑料盆钵中, 每盆播种 10 粒, 覆细土 0.2 cm, 置于可控日光温室 (自然光照, 白天 24~33 °C, 夜间 18~24 °C, 相对湿度 65%~79%) 内培养。待稗草长至 2 叶 1 心期时进行间苗, 每盆保留长势一致的 7 株幼苗。采用盆钵底部渗灌方式保持土壤湿润 (土壤含水量 32%~38%)。

1.2.2.2 水稻培养 选择籽粒饱满的水稻种子用 25 °C 清水浸泡 6 h, 置于铺有两层滤纸的培养皿中, 添加适量无菌水保持湿润, 置于光照培养箱 (恒温 28 °C, 光周期 12 h, 相对湿度 75%) 中催芽。待种子露白后, 将其播入 150 mm × 100 mm × 50 mm 方形塑料盆钵中, 每盆播种 10 粒, 覆细土 0.5 cm, 置于条件同 1.2.2.1 节的可控日光温室培养。待水稻长至 1 叶 1 心期时进行间苗, 每盆保留长势一致的 5 株幼苗。采用盆钵顶部灌溉方式保持土壤水分饱和。

1.2.3 施药方式 于稗草 2~4 叶期, 水稻 2 叶 1 心期 (特殊说明除外), 采用 ASS-4 型自动控制农药喷洒系统进行茎叶喷雾处理, 喷雾压力 0.275 MPa, 喷液量 450 L/hm², 喷头与塑料盆钵之间的距离为 50 cm。

1.2.4 施药后降雨间隔时间对三唑磺草酮药效的影响 选取稗草为测试靶标, 三唑磺草酮处理的有效成分剂量为 30、60 和 120 g/hm², 进行茎叶喷雾处理。分别于施药后 0、0.5、1、2、4、8、12、24 和 48 h 模拟人工降雨 (降雨强度为 9 mm/h, 降雨量为 5 mm), 并设置空白对照及无雨水冲刷对照, 处理后将稗草置于可控日光温室内培养, 培养条件同 1.2.2.1 节。于药后 21 d 剪取稗草地上部分, 80 °C 烘干 72 h, 称其干重, 根据公式 (1)

计算干重抑制率 (I_{DW})。

$$I_{DW}/\% = [(m_{CK} - m_t) / m_{CK}] \times 100 \quad (1)$$

式中, m_{CK} 为对照组稗草或水稻干重, m_t 为处理组稗草或水稻干重。

1.2.5 温度对三唑磺草酮药效的影响 选取稗草为测试靶标, 三唑磺草酮处理的有效成分剂量为 0、7.5、15、30、60 和 120 g/hm², 进行茎叶喷雾处理。施药后将稗草置于光照培养箱 (相对湿度 75%, 光周期 12 h), 分别设置处理温度 (夜/昼温度): 15/20 °C、20/25 °C、25/30 °C 和 30/35 °C。于药后 21 d, 剪取稗草地上部分, 80 °C 烘干 72 h, 称重, 用 DPS v 13.5 进行数据分析, 以剂量对数值 (x) 和干重抑制率几率值 (y) 建立回归方程 ($y = a + bx$), 计算 GR₅₀ 及 95% 置信限。

1.2.6 光照强度对三唑磺草酮药效的影响 采用绿色遮阴网 (基本不改变光谱成分) 模拟类似于自然环境中的不同光照条件^[9]。首先用铁架搭建 3 个长宽高均为 1 m 的立方体, 然后在其中一个立方体上用 2 层遮阴网遮阴, 在一个立方体上用 1 层遮阴网遮阴, 另一个立方体不遮阴, 以分别模拟 3 个光照水平: 强光照 (100% 光照)、中等光照 (45% 光照) 和低光照 (4% 光照)。选取稗草为测试靶标, 采用三唑磺草酮进行茎叶喷雾处理, 有效成分剂量为 0、60 和 120 g/hm², 施药后置于不同光照强度的立方体中培养, 将立方体置于可控日光温室, 条件同 1.2.2.1 节。于药后 21 d, 剪取稗草地上部分, 80 °C 烘干 72 h, 称重, 用公式 (1) 计算干重抑制率。

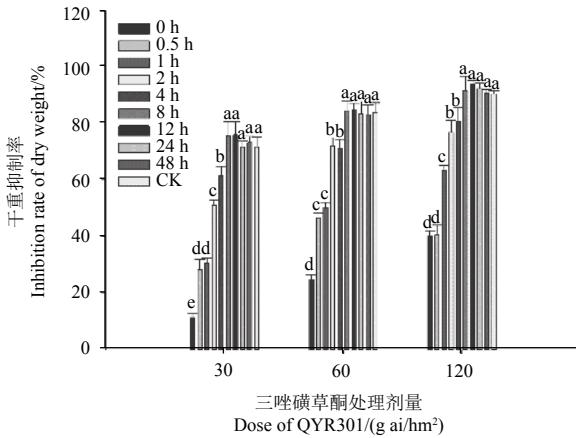
1.2.7 施药适期试验 分别选取水稻宁粳 28 和稗草为测试靶标, 待供试靶标长至 0、1、2、3、4、5 和 6 叶期进行三唑磺草酮茎叶喷雾处理^[10]。稗草处理的有效成分剂量为 0、30、60 和 120 g/hm², 水稻处理的有效成分剂量为 0、180 和 360 g/hm²。处理后将材料置于可控日光温室内培养, 条件同 1.2.2.1 节。于施药后 21 d, 剪取植株地上部分, 80 °C 烘干 72 h, 称重, 用公式 (1) 计算干重抑制率。

1.2.8 统计分析 所有试验每处理重复 3 次, 整体重复 2 次。使用 DPS v 13.5 对 2 次试验结果进行 ANOVA 分析, 由于不同试验的同一处理之间不存在差异显著性 ($P > 0.05$), 故对 2 次结果进行合并处理。使用 SigmaPlot v14.0 (Systat Software, San Jose, CA, USA) 作图。

2 结果与分析

2.1 耐雨水冲刷能力

测定结果(图1)表明,在有效成分30、60和120 g/hm²剂量下,三唑磺草酮药后不同时间模拟降雨处理对稗草的干重抑制率分别为11%~75%、25%~84%和40%~93%。由图1还可以看出,在不同剂量处理下,三唑磺草酮药后降雨的间隔时间越长,对其药效的影响越小,在降雨间隔达到8 h后,稗草的干重抑制率之间无显著性差异,药效稳定。



注:同一剂量处理内不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

Note: Different letters in the same dose of QYR301 treatment indicate significant difference at the $P < 0.05$ level according to Duncan's new multiple range test.

图1 三唑磺草酮在药后不同时间模拟降雨处理的除草活性

Fig. 1 The efficacy of QYR301 on different time of simulated rainfall after treatment

2.2 温度对三唑磺草酮药效的影响

在夜/昼温度分别为15/20℃、20/25℃、25/30℃和30/35℃条件下,三唑磺草酮对稗草的GR₅₀值(有效成分)分别为76.1、51.1、51.4和44.6 g/hm²(表1)。可以看出,当温度处于20~35℃时,三唑磺草酮对稗草的活性基本处于同一水平,表明三唑磺草酮在此温度区间药效稳定。

2.3 不同光照强度对三唑磺草酮药效的影响

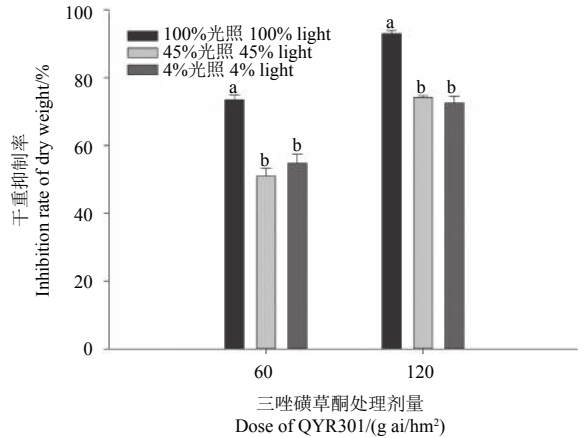
从图2数据可以看出:在有效成分60和120 g/hm²剂量下,不同光照条件下三唑磺草酮对稗草的干重抑制率分别为51%~73%和73%~93%。随着光照强度减弱,干重抑制率在4%光照强度和45%光照强度下无显著差异,而在100%光照强度下干重抑制率显著升高(图2)。

2.4 三唑磺草酮的施药适期

三唑磺草酮对不同叶龄水稻的安全性数据见

表1 在不同温度条件下三唑磺草酮对稗草的生物活性
Table 1 The efficacy of QYR301 against *E. crus-galli* under different temperature conditions

温度(夜/昼) Temperature (night/day)/℃	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient, r	GR ₅₀ (95% CL)/ (g/hm ²)
15/20	$y = 3.26 + 0.924x$	0.983	76.1 (57.2~101)
20/25	$y = 1.67 + 1.95x$	0.973	51.1 (37.9~68.8)
25/30	$y = 0.0208 + 2.91x$	0.998	51.4 (47.3~55.9)
30/35	$y = 0.123 + 2.96x$	0.994	44.6 (38.9~51.2)



注:同一剂量处理内不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

Note: Different letters in the same dose of QYR301 treatment indicate significant difference at the $P < 0.05$ level according to Duncan's new multiple range test.

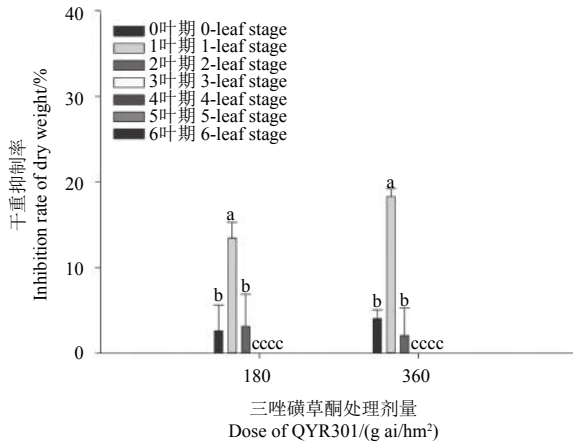
图2 三唑磺草酮在不同光照处理下的除草活性

Fig. 2 The efficacy of QYR301 under different light intensity conditions

图3,对不同叶龄稗草除草活性数据见图4。如图3所示:在有效成分180和360 g/hm²剂量下,三唑磺草酮对不同叶龄水稻(除1叶期)的干重抑制率均低于5%。三唑磺草酮对3~6叶期水稻幼苗安全,即使在有效成分360 g/hm²高剂量下对水稻幼苗的干重抑制率均为0。由图4可知:三唑磺草酮除草活性与稗草的叶龄显著相关,对2~4叶期稗草的除草活性显著高于0~1叶期和5~6叶期的稗草。2~3叶期的稗草对三唑磺草酮最敏感,即使在30 g/hm²的低剂量下,三唑磺草酮对稗草的干重抑制率也高达95%~98%。可见,水稻2叶期以后,稗草2~4叶期为三唑磺草酮的最佳施药时期。

3 讨论与结论

三唑磺草酮是中国自主研发的新型吡唑酮类水稻田除草剂,其作用靶标为HPPD,自20世纪90年代HPPD首次被发现为三唑酮类除草剂的作用

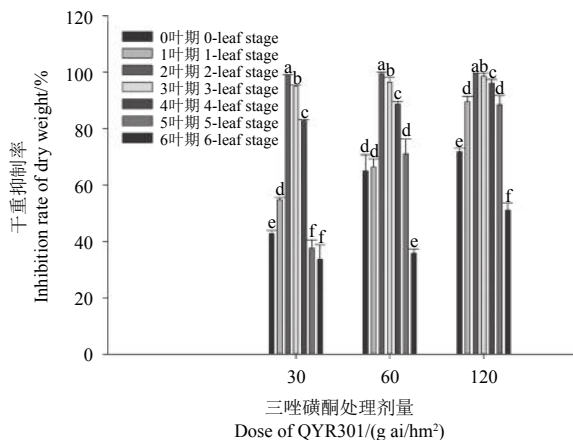


注: 同一剂量处理内不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

Note: Different letters in the same dose of QYR301 treatment indicate significant difference at the $P < 0.05$ level according to Duncan's new multiple range test.

图 3 三唑磺草酮对不同叶龄水稻的干重抑制率

Fig. 3 The dry weight inhibition of QYR301 against *Oryza sativa* of different leaf stages



注: 同一剂量处理内不同小写字母表示经 Duncan 氏新复极差法检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

Note: Different letters in the same dose of QYR301 treatment indicate significant difference at the $P < 0.05$ level according to Duncan's new multiple range test.

图 4 三唑磺草酮对不同叶龄稗草的干重抑制率

Fig. 4 The dry weight inhibition of QYR301 against *Echinochloa crus-galli* of different leaf stages

靶标以来^[1], HPPD 抑制剂类除草剂因其高效、低毒、不易产生抗药性、对后茬作物安全和对环境友好等一系列的优点而得到广泛应用^[12]。目前, 三唑磺草酮正在中国申请登记, 用于直播水稻田和移栽水稻田防除一年生杂草。研究发现: 在温室条件下, 有效成分 120 g/hm² 的三唑磺草酮对水稻田杂草千金子 *L. chinensis*、稗草 *E. crus-galli*、鳢肠 *E. prostrata*、鸭舌草 *M. vaginalis*、碎米莎草 *Cyperus iria* 和稻稗 *Echinochloa phyllopogon* 具有良

好的防效, 干重抑制率可达 79%~96%, 杀草谱较广; 在田间条件下, 有效成分 135~180 g/hm² 的三唑磺草酮对抗五氟磺草胺的稗草的目测防效为 93%~98%, 对千金子的目测防效为 84%~95%, 且对水稻安全^[1]。随着水稻田稗草对二氯喹啉酸及乙酰乳酸合成酶 (ALS) 抑制剂类除草剂的抗性问题的日益严重, 同时, 千金子对乙酰辅酶 A 羧化酶 (ACCCase) 抑制剂类除草剂也产生了一定的耐药性^[13-17], 三唑磺草酮作为 HPPD 抑制剂类除草剂与当前稻田主流除草剂不存在交互抗性, 具有广阔的应用推广前景。

明确除草剂的最佳施药条件对除草剂的正确高效使用有十分重要的指导意义。例如, 施用乙氧氟草醚防除杂草时, 在有光条件下才能高效的杀死杂草^[18]; 而氟乐灵在光照条件下易挥发和降解, 施药后需立即混土^[19]; 当环境温度由 10 °C 升到 40 °C 时, 氟烯草酸对反枝苋 *Amaranthus retroflexus* 的活性提高了 3 倍^[5]。本研究发现, 三唑磺草酮施药后 0~4 h, 模拟降雨对其药效影响较大, 降雨可以将杂草叶片表面的除草剂冲刷掉或者将其稀释到较低浓度, 进而杂草对除草剂的吸收减少, 导致除草剂防效降低^[20]。施药 8 h 以后模拟降雨, 三唑磺草酮药效稳定, 因此施药 8 h 之内如遇到降雨天气, 需补喷。当环境温度在 20~35 °C 范围内时, 三唑磺草酮药效稳定, 显著高于其在 15~20 °C 的除草活性。环境温度变化可以引起植物叶片蜡质层的成分和结构发生变化^[21], 这种变化会影响除草剂药效^[22]。同时, Caseley 等^[23]研究发现, 温度升高会加速杂草对除草剂的吸收和传导, 进而提高除草剂的除草活性。这些发现在一定程度上解释了三唑磺草酮在 20~35 °C 的除草活性高于其在 15~20 °C 的除草活性。在水稻施药时期, 温度较高有利于三唑磺草酮药效的发挥, 因此三唑磺草酮是一个与水稻生长期相契合的药剂。光照强度的变化可以影响杂草的生长, 进而影响除草剂的药效, 本研究发现, 高光照强度有助于三唑磺草酮充分发挥药效。高光照强度可以提高杂草的光和速率, 进而加速除草剂在杂草内部的迁移, 提高药效^[20]。同时, 三唑磺草酮作为 HPPD 抑制剂, 抑制杂草体内抗氧化剂—类胡萝卜素和生育酚的合成^[24-25], 高光照强度使杂草体内产生过多的活性氧不能被及时清除, 导致叶绿素和类囊体膜氧化降解, 进而提高了其药效, 因此应选择在天气晴朗的时间施用三唑磺草酮。

三唑磺草酮对不同叶龄的水稻具有较高的安全性,除0叶期外,随着水稻叶龄升高,耐药性也增强,同时该药剂对2~4叶期稗草的活性显著高于0~1叶期和5~6叶期的稗草,因此三唑磺草酮的施药适期为水稻2叶期以后,稗草2~4叶期。同时,本研究发现,三唑磺草酮对未出苗(0叶期)的稗草也表现出一定的防效,说明其具有土壤处理活性。在杂草化学防控中,选择适宜时间进行施药是保证除草剂防效的重要条件,茎叶处理剂如果施用过早,部分杂草尚未出苗或者杂草叶龄较小,不能接触到足够的药量,导致防效降低;如果施用过晚,杂草叶龄过大,除草剂在杂草中的降解速度会加快,同样会导致防效降低^[26]。

综合来看,为了使三唑磺草酮发挥最大药效,应在水稻2叶期以后至稗草2~4叶期,选择天气晴朗,气温高于20℃的情况下施药。如药后8h以内遇降雨天气,则需进行补喷。本研究结果是在温室条件下获得的,需要开展田间试验验证并进一步明确施药时间及环境因子对三唑磺草酮药效的影响^[5,27]。

参考文献 (References):

- [1] WANG H Z, LIU W T, ZHAO K P, et al. Evaluation of weed control efficacy and crop safety of the new HPPD-inhibiting herbicide-QYR301[J]. *Sci Rep-UK*, 2018, 8(1): 7910.
- [2] GROSSMANN K, EHRHARDT T. On the mechanism of action and selectivity of the corn herbicide topramezone: a new inhibitor of 4-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase[J]. *Pest Manag Sci*, 2007, 63(5): 429-439.
- [3] COUPLAND D. Influence of light, temperature and humidity on the translocation and activity of glyphosate in *Elymus repens* (= *Agropyron repens*)[J]. *Weed Res*, 1983, 23(6): 347-355.
- [4] KUDSK P, OLESEN T, THONKE K E. The influence of temperature, humidity and simulated rain on the performance of thiameturon-methyl[J]. *Weed Res*, 1990, 30(4): 261-269.
- [5] FAUSEY J C, RENNER K A. Environmental effects on CGA-248757 and flumiclorac efficacy/soybean tolerance[J]. *Weed Sci*, 2001, 49(5): 668-674.
- [6] WANG H Z, HUANG Y Z, ZHANG L L, et al. Japanese foxtail (*Alopecurus japonicus*) management in wheat in China: seed germination, seedling emergence, and response to herbicide treatments[J]. *Weed Technol*, 2018, 32(2): 211-220.
- [7] 农药室内生物测定试验准则除草剂第8部分:作物安全性试验茎叶喷雾法:NY/T 1155.8—2007[S].北京:中国农业出版社,2006. Pesticides guidelines for laboratory bioactivity tests part 8: Foliar spray application test for herbicide bioactivity: NY/T 1155.8—2007[S]. Beijing: China Agricultural Press, 2006.
- [8] 农药室内生物测定试验准则除草剂第9部分:水田除草剂活性试验茎叶喷雾法:NY/T 1155.9—2008[S].北京:中国农业出版社,2006. Pesticides guidelines for laboratory bioactivity tests part 9: Foliar spray application test for paddy phytocidal bioactivity: NY/T 1155.9—2008[S]. Beijing: China Agricultural Press, 2006.

- [9] 马银山, 杜国祯, 张世挺. 光照强度和肥力变化对垂穗披碱草生长的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(14): 3908-3916. MA Y S, DU G Z, ZHANG S T. The effects of light intensity and fertilization on the growth of *Elymus nutans*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(14): 3908-3916.
- [10] 徐小燕, 陈杰, 台文俊, 等. 新型水稻田除草剂SIOC0172的作用特性[J]. *植物保护学报*, 2009, 36(3): 268-272. XU X Y, CHEN J, TAI W J, et al. Herbicidal characteristics of novel herbicide SIOC0172 in paddy[J]. *Acta Phytophylacica Sin*, 2009, 36(3): 268-272.
- [11] 何波, 王大伟, 杨文超, 等. 对羟基苯丙酮酸双加氧酶(HPPD)的结构及其吡唑类除草剂的最新研究进展[J]. *有机化学*, 2017, 37(11): 2895-2904. HE B, WANG D W, YANG W C, et al. Advances in research on 4-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase(HPPD) structure and pyrazole-containing herbicides[J]. *Chin J Org Chem*, 2017, 37(11): 2895-2904.
- [12] VAN ALMSICK A. New HPPD-inhibitors-a proven mode of action as a new hope to solve current weed problems[J]. *Outlooks Pest Manag*, 2009, 20(1): 27-30.
- [13] HEAP I M. The international survey of herbicide resistant weeds[DB/OL]. [2019-3-29]. <http://www.weedscience.org>.
- [14] CHEN G Q, WANG Q, YAO Z W, et al. Penoxsulam-resistant barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) in rice fields in China[J]. *Weed Biol Manag*, 2016, 16(1): 16-23.
- [15] 李永丰, 杨霞, 张自常, 等. 稗草兼抗二氯喹啉酸和ALS抑制剂类除草剂的多抗性分子机制[C]//中国第八届植物化感作用学术研讨会论文集, 南京, 2017. LI Y F, YANG X, ZHANG Z L, et al. The molecular mechanism of barnyard grass resistance to dichloroquinolinic acid and ALS inhibitor herbicides[C]//Abstract collection of papers of the 8th Chinese symposium on allelopathy, 2017.
- [16] MANEECHOTE C, SAMANWONG S, ZHANG X Q, et al. Resistance to ACCase-inhibiting herbicides in sprangletop (*Leptochloa chinensis*)[J]. *Weed Sci*, 2005, 53(3): 290-295.
- [17] YU J X, GAO H T, PAN L, et al. Mechanism of resistance to cyhalofop-butyl in Chinese sprangletop (*Leptochloa chinensis* (L.) Nees)[J]. *Pestic Biochem Physiol*, 2017, 143: 306-311.
- [18] 于海峰. 豆田除草剂乙炔氟草醚的活性及安全性研究[C]//第六次全国杂草科学学术会议论文集. 广西壮族自治区南宁, 1999: 399-403. YU H F. Study on the activity and safety of the herbicide ethylflurane in soybeans[C]. National symposium on weed science, Nanning, Guangxi, 1999.
- [19] 刘亚静, 曹立冬, 张嘉坤, 等. 氟灵乐微囊的制备、表征及其光稳定性研究[J]. *农药学报*, 2015, 17(3): 341-347. LIU Y J, CAO L D, ZHANG J K, et al. Preparation and characterization of trifluralin microcapsules and their photostability[J]. *Chin J Pestic Sci*, 2015, 17(3): 341-347.
- [20] VARANASI A, PRASAD P V V, JUGULAM M. Impact of climate change factors on weeds and herbicide efficacy[J]. *Adv Agro*, 2016, 135: 107-146.
- [21] ECKL K, GRULER H. Phase transitions in plant cuticles[J]. *Planta*, 1980, 150(2): 102-113.
- [22] FLORE J, BUKOVAC M. Pesticide effects on the plant cuticle. III. EPTC effects on the qualitative composition of Brassica oleracea L. leaf cuticle[J]. *J Am Soc Horticult Sci*, 1978, 103(3).
- [23] CASELEY J C, COUPLAND D. Environmental and plant factors affecting glyphosate uptake, movement and activity[J]. *Herbicide Glyphosate*, 1985.
- [24] RUIZ-SOLA M Á, RODRÍGUEZ-CONCEPCIÓN M. Carotenoid biosynthesis in *Arabidopsis*: A colorful pathway[J]. *Arabidopsis Book*, 2012, 10: e0158.
- [25] FOYER C H, DESCOURVIERES P, KUNERT K J. Protection against oxygen radicals: an important defence mechanism studied in transgenic plants[J]. *Plant Cell Environ*, 1994, 17(5): 507-523.
- [26] SINGH S, SINGH M. Effect of growth stage on trifloxysulfuron and glyphosate efficacy in twelve weed species of *Citrus Groves*[J]. *Weed Technol*, 2004, 18(4): 1031-1036.
- [27] DORAN D L, ANDERSEN R N. Effectiveness of bentazon applied at various times of the day[J]. *Weed Sci*, 1976, 24(6): 567-570.

(责任编辑: 金淑惠)