

DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0046

周文冠,孟永杰,陈锋,帅海威,刘建伟,罗晓峰,杨文钰,舒凯.除草剂研发及其复混使用的现状与展望.草业科学,2018,35(1):93-105.  
Zhou W G, Meng Y J, Chen F, Shuai H W, Liu J W, Luo X F, Yang W Y, Shu K. Current status and research progress of development and tankmix application of herbicides. Pratacultural Science, 2018, 35(1): 93-105.

## 除草剂研发及其复混使用的现状与展望

周文冠,孟永杰,陈锋,帅海威,刘建伟,  
罗晓峰,杨文钰,舒凯

(四川农业大学农学院生态农业研究所 农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室  
四川省作物带状复合种植工程技术中心,四川 成都 611130)

**摘要:**除草剂又称除莠剂,是可以有效消灭或抑制杂草生长的一类化学或生物药剂。近年来,化学除草剂种类的不断增长以及除草技术的日趋完善,极大地变革了传统的劳动生产方式。但是,化学除草剂的不合理使用,使生态环境遭到破坏,同时对食品安全造成威胁。如何降低化学除草剂对环境的污染,并进一步提高除草效率,是目前除草剂领域研究的热点。发展新型绿色环保的除草剂,也是农业可持续发展和绿色生产中亟待解决的问题。因此,生物除草剂以其低污染、无残留等优势,引起了人们的广泛关注。如何正确、安全、高效地使用除草剂或利用不同植物之间的化感作用来防除和抑制杂草的生长已成为当前研究的热点。本文综述了化学和生物除草剂的研究进展、使用现状,并对除草剂不合理使用所导致的药效降低以及引发的一系列环境问题展开阐述,着重讨论不同类型或成分的除草剂或助剂复混使用在农业生产、环境保护和生态平衡中的重要作用,并在此基础上探讨除草剂领域未来的主要研究方向。

**关键词:**化学除草剂;生物除草剂;复混;绿色环保

**中图分类号:**S482.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0629(2018)01-0093-13\*

### Current status and research progress of development and tankmix application of herbicides

Zhou Wen-guan, Meng Yong-jie, Chen Feng, Shuai Hai-wei, Liu Jian-wei,  
Luo Xiao-feng, Yang Wen-yu, Shu Kai

(Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest China, Ministry of Agriculture,  
Institute of Ecological Agriculture, Sichuan Agricultural University, Sichuan Engineering  
Research Center for Crop Strip Intercropping System, Chengdu 611130, Sichuan, China)

**Abstract:** Herbicides are a group of chemical or biological agents that effectively eliminate or inhibit the growth of weeds in the field. In recent years, increases in the types of chemical herbicides and the optimization of weeding technology have greatly improved the traditional mode of labor production, and have promoted the development of agricultural modernization. However, the abuse of chemical herbicides leads to various serious problems, such as the destruction of the ecological environment and risks to food security. Reducing environmental pollution and further improving the efficiency of herbicides are hotspots in herbicides research. The urgent problems currently occurring in the sustainable development of agriculture will be solved by the development of novel green herbicides; biological herbicides have attracted much attention because of their low pollution and residue levels. The use of these herbicides or the allelochemicals in different crops to control and inhibit the

\* 收稿日期:2017-01-21 接受日期:2017-03-24  
基金项目:国家重点基础研究发展计划(2016YFD0300209);中国博士后科学基金项目(2014M552377,2016T90868);四川省教育厅项目(16ZB0040)  
第一作者:周文冠(1992-),男,甘肃兰州人,在读硕士生,研究方向为作物生理学。E-mail:wenguanzhou@126.com  
通信作者:舒凯(1982-),男,四川武胜人,副研究员,硕导,博士,研究方向为作物生理学。E-mail:kshu@sicau.edu.cn  
共同通信作者:杨文钰(1958-),男,四川大英人,教授,博导,研究方向为大豆栽培生理。E-mail:mssiyangwy@sicau.edu.cn

growth of weeds have also become hotspots in current research. This updated review summarizes the progress of current research and the current situation regarding the use of chemical and biological herbicides, and describes the problems caused by the irrational usage of herbicides. The important roles of different herbicides or adjuvants in agricultural production, environmental protection, and ecological balance were also focused upon; based on this, we discussed probable directions for future research on herbicides.

**Key words:** chemical herbicide; bio-herbicide; mixture; green

**Corresponding authors:** Shu Kai E-mail:kshu@sicau.edu.cn

Yang Wen-yu E-mail:mssiyangwy@sicau.edu.cn

世界各地分布着大量的杂草,其中,多数会对农业生产造成危害,使作物产量大幅度降低,成为影响农业生产的重要因素之一<sup>[1]</sup>。虽然使用除草剂(herbicide)能抑制杂草生长,有效提高作物产量<sup>[2-5]</sup>。但是,化学除草剂的过量使用,以及单一除草剂或作用机理相同的除草剂的长期使用,会对环境造成严重的负面影响<sup>[6-7]</sup>。同时,会加速杂草耐药性的产生,使杂草的群体结构发生变化,影响除草效率<sup>[8-9]</sup>。据估计,杂草的多重抗性除草剂作用模式之间的矛盾日益加剧,对杂草防除构成了巨大的威胁<sup>[10]</sup>。因此,研究新型绿色环保、广谱高效的除草剂以及其高效使用方式对发展绿色环保农业有重要作用<sup>[11]</sup>。

目前,使用除草剂仍然被认为是最快捷、高效的杂草防除方法<sup>[2]</sup>。但除草剂的发展却面临严峻的挑战,要保持长期可持续的发展,就必须与环境保护紧密结合<sup>[12]</sup>。因此,研发或通过复混得到具有广谱、高效、低污染的新型除草剂是杂草防除领域重要的研究方向。本文综述了化学及生物除草剂的发展历史、研究现状及存在的问题,并在此基础上探讨生物除草剂以及除草剂复混使用的优势,以期对农业的可持续发展提供帮助。

## 1 化学除草剂发展现状及问题

### 1.1 化学除草剂的发展历史

研究表明,影响我国农业生产的杂草超过 200 种,而其中 30 多种影响尤其严重<sup>[13]</sup>。杂草是许多病虫害的中间寄主以及作物的水、肥竞争者,会对农业生产造成较大的损失<sup>[3]</sup>。以前,农民投入大量的劳动力进行人工除草,以减轻田间杂草对农业生产的影响,从而提高作物产量<sup>[13]</sup>。但是,这种传统的生产方式并不能满足农业现代化的发展需求。

早在 20 世纪 40 年代中期,2,4-D 就开始被用作防除田间阔叶杂草的除草剂;60 年代,一些地区使用

燕麦灵(Barban)防除田间野燕麦(*Avena fatua*)、五氯苯酚钠(Sodium pentachlorophenate)和除草醚(Nitrofen)防除水稻田间的稗草(*Echinochloa crusgal-li*)<sup>[13-14]</sup>。70 年代,随着新型除草剂的不断引进和研制,甲草胺(Alachlor)、利谷隆(Linuron)、百草枯(Gramoxone)<sup>[15]</sup>等化学除草剂逐渐进入了大豆(*Glycine max*)、小麦(*Triticum aestivum*)、棉花(*Gossypium hirsutum*)、玉米(*Zea mays*)等作物的生产领域,且适用的作物种类和区域不断扩大<sup>[13-14]</sup>,包括美国孟山都(Monsanto)公司开发研制的草甘膦[N-(phosphonomethyl) glycine],以及草甘膦铵盐、钠盐等一系列产品<sup>[16]</sup>。草甘膦作为一种灭生性化学除草剂,成为中国乃至全世界使用最为广泛、销量最大和发展速度最快的除草剂之一<sup>[17-19]</sup>。它主要通过茎叶吸收后传导到植物组织,影响蛋白质的合成,并最终导致植物死亡,可防除单子叶和双子叶、一年生和多年生、草本和灌木等 40 多科的杂草。特别是抗草甘膦的转基因作物问世以后,草甘膦的使用量迅猛增长。1997 年至 1998 年,抗草甘膦大豆的种植面积从 13% 增加到 36%,草甘膦的使用量增加了 81%,成为美国使用量最大的大豆除草剂,在除草剂市场上占很大优势<sup>[20-21]</sup>。

20 世纪 80 年代以来,我国研制出高效、低毒、选择性取代脲类的除草剂莎扑隆(Dymrone),防除莎草科杂草<sup>[22]</sup>。90 年代引进的噻吩磺隆(Thifensulfuron methyl)对小麦和玉米田间的阔叶杂草有较好的防除效果<sup>[23]</sup>;氯吡嘧磺隆(Halosulfuron-methyl)作为一种新型的磺酰脲类除草剂,对阔叶杂草和莎草有较好的选择防除效果,先后在多个国家登记使用<sup>[24]</sup>。2010 年,防除禾本科作物田间禾本科杂草的除草剂恶唑草胺在中国获得登记,具有较大的发展空间<sup>[25]</sup>。除草剂的使用面积由 20 世纪 80 年代的 800 多万  $\text{hm}^2$  发展到 21 世纪初的 7 000 多万  $\text{hm}^2$ <sup>[14]</sup>,种类也日益繁多(表 1)。同时,除草剂的种类也在不断地

表 1 常用的化学除草剂及主要适用范围

Table 1 General chemical herbicides and primary scope of application

除草剂 Herbicide	主要适用作物 Crops mainly used on	防除对象 Control targets	参考文献 Reference
四唑嘧磺隆 Azimsulfuron	水稻 <i>Oryza glaberrima</i>	防除稗草、阔叶杂草和莎草科杂草 Controlling <i>Echinochloa crusgalli</i> , broadleaf weeds and cyperaceae weeds	[26]
精恶唑禾草灵 Fenoxaprop-p-ethyl	水稻 <i>Oryza glaberrima</i>	野燕麦、狗尾草、燕麦、稗草、马唐 <i>Avena fatua</i> , <i>Setaria viridis</i> , <i>Avena sativa</i> , <i>Echinochloa crusgalli</i> , <i>Digitaria sanguinalis</i>	[27]
2,4-D 2,4-D butylate	小麦、玉米、高粱 <i>Triticum aestivum</i> , <i>Zea mays</i> , <i>Sorghum bicolor</i>	阔叶杂草, 莎草 Broad-leaved weeds and sedges	[28]
异丙隆 Isoproturon	小麦 <i>Triticum aestivum</i>	防除一年生杂草 Controlling annual weeds	[29]
甲草胺 Alachlor	大豆、玉米、花生、棉花 <i>Glycine max</i> , <i>Zea mays</i> , <i>Arachis hypogaea</i> , <i>Gossypium hirsutum</i>	一年生禾本科杂草和阔叶杂草 Weeds annual grasses and broadleaf weeds	[30]
乙草胺 Acetochlor	玉米、大豆、棉花 <i>Zea mays</i> , <i>Glycine max</i> , <i>Gossypium hirsutum</i>	一年生禾本科杂草和部分阔叶杂草 Weeds annual grasses and some broadleaf weeds	[30]
广灭灵 Clomazone	大豆 <i>Glycine max</i>	一年生禾本科和阔叶杂草 Annual grasses and broadleaf weeds	[31-32]
扑草净 Prometryn	玉米、大豆、棉花 <i>Zea mays</i> , <i>Glycine max</i> , <i>Gossypium hirsutum</i>	防除一年生禾本科及阔叶草 Control annual grasses and broadleaf weeds	[30]
莠去津 Atrazine	玉米 <i>Zea mays</i>	防除多种一年生禾本科和阔叶杂草 Control many annual grasses and broadleaf weeds	[33]
双草醚 Bispyribac-sodium	水稻、棉花 <i>Oryza glaberrima</i> , <i>Gossypium hirsutum</i>	防除稗草和大多数阔叶杂草 Control of barnyard grass and most other broadleaf weeds	[34]
草甘膦 Glyphosate	棉花 <i>Gossypium hirsutum</i>	一年生、多年生杂草, 灭生性除草剂 Annuals, perennial weeds, fenuron-tca	[17-19]
甲基磺草酮 Mesotrione	玉米 <i>Zea mays</i>	一年生阔叶杂草与部分禾本科杂草 Annual broad-leaved weeds and some grasses	[35]
噻吩磺隆 Thifensulfuron methyl	小麦、玉米 <i>Triticum aestivum</i> , <i>Zea mays</i>	防除一年生阔叶杂草 Control annual broad-leaved weeds	[23]
除草醚 Nitrofen	水稻 <i>Oryza glaberrima</i>	可防除一年生杂草, 抑制多年生杂草 Control annual weeds, perennial weed suppression	[13]
氯吡嘧磺隆 Halosulfuron-methyl	小麦、玉米、水稻 <i>Triticum aestivum</i> , <i>Zea mays</i> , <i>Oryza glaberrima</i>	阔叶杂草, 莎草 Broad-leaved weeds and sedges	[24]

增加,截至2014年,我国登记的除草剂已经达到720种,其中包括大约20种不同剂型<sup>[36]</sup>。但是,随着除草剂的广泛使用,其引起的环境和安全问题也不断得到重视,除草剂的发展开始向高效、广谱、环保的方向进行。国家“十二五”关于农药规划指出,环保、高效的除草剂新品种将占除草剂市场的一半以上,在农药中除草剂占的比重将会逐渐增大,而剧毒、高残留的除草剂市场份额由原来的5%降低到3%以下<sup>[37]</sup>。

## 1.2 化学除草剂使用中存在的问题

### 1.2.1 影响化学除草剂效果的因素

除草剂的除草效果受多种因素的影响,温度、湿度、降水量均会对药效的发挥产生影响<sup>[38-39]</sup>,同时,其效率还受制于除草剂自身的特性,许多除草剂对杂草的防除具有选择性<sup>[40]</sup>。除草剂的药效除了受环境因素影响外,还受植物生长状况的影响。植物体在适宜的环境条件下,生长较快,代谢旺盛,除草剂容易被吸收,且在植株中的传输速率较快,效果较好;在干旱胁迫下,气孔关闭、蒸腾速率降低,对除草剂的吸收减少,药效降低<sup>[41]</sup>。此外,适当的施药时间对作物的安全性有较大的关系,作物处于不同的生育时期或不同的阶段,对除草剂的敏感程度不同。如玉米对除草剂的安全期在3-5叶期间,不在此范围内施用除草剂则容易产生药害,影响植物的正常生长<sup>[42]</sup>。

在药液稀释过程中,除草剂原药在喷施药液中只占很少的一部分,大部分是水,其硬度、pH对除草剂的药效均有影响。水的硬度通常用水中溶解的 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 的含量来衡量,而高硬度的水对弱酸性除草剂(特别是草甘膦)有较大影响,如 $100\text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的草甘膦在不含 $\text{Ca}^{2+}$ 或 $\text{Mg}^{2+}$ 时的防除效果可在40%以上,而在含有 $500\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{Ca}^{2+}$ 或 $\text{Mg}^{2+}$ 时其对杂草的防效只有15%左右<sup>[43]</sup>。有研究表明,用含有 $400\sim 800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{Ca}^{2+}$ 或 $\text{Mg}^{2+}$ 的水稀释麦草畏(Dicamba)或2,4-D,其防除地肤子(*Kochia scoparia*)的效果降低25%~45%<sup>[44-45]</sup>。同时,pH通过影响其溶解度进而影响其药效,在低pH条件下,烟嘧磺隆(Nicosulfuron)的溶解度降低,显著降低其防除马唐(*Digitaria sanguinalis*)的效果<sup>[46]</sup>。

### 1.2.2 化学除草剂对周边生物及环境的影响

除草剂的过量使用对周边的生物群体造成负面效应。在动物方面,草甘膦影响哺乳动物的健康及生育。例如,孕期的雌鼠在有草甘膦的条件下生活,则胎儿及雌鼠均会发生一些酶和大脑功能的变异,并影响骨骼系统的

发育<sup>[47-48]</sup>。即使按照推荐的剂量长期使用除草剂,依然会使生态平衡遭到破坏,如使用草甘膦后,雌性害虫的比例显著大于雄性的比例<sup>[49]</sup>。而使用2,4-D(2,4-dichlorophenoxyacetic acid)和甲草胺(Alacor)后,食叶昆虫的产卵量和生存量都显著下降。莠去津影响家蚕的生长发育,容易使其死亡,而且这种现象伴随着莠去津使用浓度的增加而越明显,烟嘧磺隆对家蚕也具有较大的毒性,对其造成的死亡率超过80%<sup>[50]</sup>。

在植物方面,除草剂的使用会影响物种的多样性<sup>[51]</sup>。长期依赖草甘膦防除抗草甘膦作物田间的杂草,使杂草的种群转移到对草甘膦敏感的田间作物中<sup>[33]</sup>,造成杂草群落的转移,并且促进了抗草甘膦杂草的产生<sup>[52]</sup>。又如,莠去津的长期、大面积使用,导致人和动物的正常发育和生育受到影响<sup>[53-54]</sup>。因此,长期使用单一除草剂不利于农业可持续发展和生态农业建设。除草剂施用后,真正发挥作用的只占施用量的一个小部分,而大部分药剂都进入了土壤、水体和空气<sup>[55]</sup>,对环境造成严重的污染。过量使用除草剂对环境造成的危害日益严重<sup>[56]</sup>,如造成的土壤板结、地下水污染影响土壤中微生物的分布等<sup>[57-58]</sup>。化学除草剂的单一使用面临着环境、安全等各方面的压力,以复混后较为环保、高效的优势取代之前单一使用的剧毒、高污染是其发展的必要趋势<sup>[59]</sup>。

## 2 生物除草剂发展现状及其问题

生物除草剂(Bio-herbicide)是指利用自然界中的一些生物有机体或者其代谢产物,经过工业化生产后能用于防除杂草的生物制剂<sup>[60]</sup>。生物除草剂主要以植物病原微生物(细菌、真菌、放线菌以及病毒)作为重要来源<sup>[61]</sup>,且与化学除草剂相比具有对环境污染小、绿色、可持续的优点。

### 2.1 生物除草剂的发展历史

相对于化学除草剂,生物除草剂的发展及应用较为缓慢<sup>[62]</sup>。目前,用于生物除草剂研制的真菌病原菌有壳单孢菌属(*Ascochyta*)、疫霉属(*Phytophthora*)、交链孢菌属(*Alternaria*)等<sup>[63-64]</sup>;细菌病原菌有无色杆菌属(*Achranobacter*)、柠檬酸细菌属(*Citromyces*)、产盐杆菌属(*Alcalligenes*)等<sup>[11,64]</sup>;放线菌型生物除草剂则主要从土壤中分离获得<sup>[65]</sup>,主要有野村菌属(*Cordyceps*)、链孢囊菌属(*Streptospor angtum*)、糖多孢菌属(*Saccharopolyspora*)等<sup>[11]</sup>。这些不同来源的微生物为生物除草剂的进一步发展提供了空间。

在我国,20 世纪 60 年代研发的“鲁保一号”是最早应用于生产的生物除草剂之一。此外,利用胶孢炭疽菌菟丝子专化型(*Colletotrichum gloeosporioides* Sacc. f. sp. *cuseutae*)防治大豆田间菟丝子(*Cuscuta chinensis*),也取得了成功<sup>[66-67]</sup>。20 世纪 70 年代末期,王之樾等从罹病的列当(*Orobancha cumana*)中分离出镰刀菌(*Fusarium orobanche*),并将其制成“F798”菌剂,对列当有较好防效<sup>[68]</sup>。21 世纪初期,袁树忠等从罹病的空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)中分离得到镰孢菌属,可有效防除喜旱莲子草和藜(*Chenopodium album*)<sup>[69-70]</sup>;强胜等<sup>[71-73]</sup>研究发现,链格孢菌(*Alternaria alternata*)可防除紫茎泽兰(*Eupatorium adenophorum*);齐整小核菌(*Sclerotium rolfsii*)能有效防除加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*);张剑等<sup>[74]</sup>发现小孢拟盘多毛孢(*Pestalotiopsis microspora*)对狗尾草(*Setaria viridis*)、播娘蒿(*Descurainia sophia*)等杂草有显著的防除效果(表 2)。

在国外,20 世纪 80 年代初期,美国 Abbott 实验室发现,疫霉属中的棕榈疫霉(*Phytophthora palmivora*)可防除莫伦藤(*Morrenia odorata*)等杂草<sup>[75-76]</sup>。马唐作为典型的恶性杂草之一,具有极强的生命力,其须根和芽的断节在适宜条件下均能长成完整植株<sup>[77]</sup>。21 世纪初,美国路易斯安那理工大学采用分离杂草致病菌种的方式,从患病马唐植株中分离出的居间弯孢霉(*Curvularia intermedia*)对马唐有特异防除作用,以及之前报道的马唐黑粉菌(*Ustilagosyntherismae*)、画眉草弯孢霉(*Curvularia eragrostidis*)都可以作为马唐和稗草的生物防除剂<sup>[78]</sup>。同时,画眉草弯孢霉也可作为大豆、棉花等作物的田间生物除草剂<sup>[79]</sup>。佛罗里达大学从马唐、龙爪茅(*Dactyloctenium aegyptium*)和石茅(*Sorghum halepense*)中分离的内脐蠕孢菌(*Drechslera gigantea*)、突脐蠕孢菌(*Exserohilum longirostratum*)和嘴突凸脐蠕孢菌(*Exserohilum rostratum*)3 种病原菌按一定比例混合,可以对马唐、蒺藜草(*Cenchrus echinatus*)、金色狗尾草(*Setaria glauca*)等 7 种杂草具有较好的防除效果,并且不会对其他作物产生不利影响<sup>[80]</sup>(表 2)。

除了传统的以微生物为主导的生物除草剂外,加拿大还研发了以病毒为主的除草剂 SolviNix<sup>®</sup> LC,美国也在 2014 年登记了病毒型除草剂<sup>[60]</sup>。虽然突破了人们对传统生物除草剂的认识,但是由于该类除草剂

对环境要求高、专一性较强等局限性而暂时未能得到广泛应用<sup>[60]</sup>。生物除草剂的发展相对于其他生物药剂较为缓慢,2014 年到 2016 年全球每年均登记上市 40 多种农药,其中生物药剂分别占有 1/2 到 1/3,但是主要以杀虫剂和杀菌剂为主,没有生物除草剂<sup>[31,81-82]</sup>。

## 2.2 发展生物除草剂面临的问题

生物除草剂的许多自身特点,成为其发展的重要制约因素<sup>[60]</sup>。首先,与化学除草剂相比,生物除草剂作为活体的药剂,对植物的侵染需要较长时间,并且其潜伏期长、寄主相对单一、致死时间较长,不能达到使用者所期盼的“药到草除”的效果<sup>[32]</sup>。其次,生物除草剂的整个研发、生产以及运输过程中,都需投入较多的资金及设备,导致其成本较高,影响推广<sup>[83]</sup>。最后,农药相关政策的不完善使生物除草剂发展相对滞后。

## 2.3 影响生物除草剂效率的因素

研究表明,化肥对生物除草剂的除草效果有影响。巨腔茎点霉(*Phoma macrostoma*)作为防止阔叶杂草的一种生物除草剂<sup>[84]</sup>,当与硫酸钾混合使用时,其药效显著降低<sup>[85]</sup>。此外,环境中的相对湿度对生物除草剂中病原菌的侵入和再侵染能力也有影响,使防除效果降低<sup>[86]</sup>。温度也会影响病原菌侵入后的发病速率,一般而言,在一定温度范围内,温度高发病速率较快<sup>[87]</sup>。总之,生物除草剂的除草效果受到多种因素的影响,导致生物除草剂在市场上的占有程度相对较低<sup>[88]</sup>。

## 3 除草剂复混使用的优势

除草剂的复混使用通常是指在除草剂的应用中,将作用类型或有效成分不同的除草剂或助剂按一定的比例混合使用,在保持较高药效的前提下,可以达到扩大杀草谱的效果。这不仅降低了对环境的污染<sup>[57]</sup>,而且在一定程度上延缓了杂草抗药性的产生<sup>[1]</sup>。

### 3.1 不同除草剂之间的复混

目前,除草剂的复混使用已经取得了一定成果。南亚水稻早播生产中,面临着严重的杂草威胁。通过除草剂混配使用,如四唑嘧磺隆加精恶唑禾草灵或四唑嘧磺隆加双草醚加精恶唑禾草灵,可有效提高除草效果、延缓拮抗作用的产生<sup>[34]</sup>。在小麦生产大国印度,阔叶草严重影响着小麦的生产,导致产量下降,通过精恶唑禾草灵加 2,4-D 或精恶唑禾草灵加异丙隆,可显著抑制杂草生长<sup>[1]</sup>。在大豆生产中,咪唑乙烟酸

表2 用于生物除草剂研究的病原真菌及其防治对象

Table 2 The herbicides used in biological research on microorganism and its targets

微生物种类 Microbial species	主要适用作物 Crops mainly used on	主要防除对象 The primary targets	参考文献 Reference
镰刀菌属 <i>Fusarium</i>	西瓜 <i>Citrullus lanatus</i>	喜旱莲子草 <i>Alternanthera philoxeroides</i>	[60]
胶孢炭疽菌 <i>Colletotrichum golgeasporiodes</i>	大豆 <i>Glycine max</i>	菟丝子 <i>Cuscuta chinensis</i>	[58-59]
链格孢菌 <i>Alternaria alternata</i>	水稻、玉米 <i>Oryza glaberrima, Zea mays</i>	紫茎泽兰 <i>Eupatorium adenophorum</i>	[63-64]
小孢拟盘多毛孢 <i>Pestalotiopsis microspora</i>	玉米、棉花 <i>Zea mays, Gossypium hirsutum</i>	马唐、狗尾草、播娘蒿等 <i>Digitaria sanguinalis, Setaria viridis, Descurainia sophia</i> , etc.	[74]
画眉草弯孢霉 <i>Curvularia eragrostidis</i>	水稻、玉米 <i>Oryza glaberrima, Zea mays</i>	稗草 <i>Echinochloa crusgalli</i>	[78]
马唐黑粉菌 <i>Ustilago syntherismae</i>	水稻、玉米 <i>Oryza glaberrima, Zea mays</i>	马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i>	[78]
内脐蠕孢菌 <i>Drechslera gigantea</i>	小麦、玉米、番茄等 <i>Triticum aestivum, Zea mays, Lycopersicon esculentum</i> , etc	马唐、蒺藜草、金色狗尾草 <i>Digitaria sanguinalis, Cenchrus echinatus, Setaria glauca</i> , etc.	[80]
突脐蠕孢菌 <i>Exserohilum longirostratum</i>	小麦、玉米、番茄等 <i>Triticum aestivum, Zea mays, Lycopersicon esculentum</i> , etc	马唐、蒺藜草、金色狗尾草等 <i>Digitaria sanguinalis, Cenchrus echinatus, Setaria glauca</i> , etc.	[80]
嘴突凸脐蠕孢菌 <i>Exserohilum rostratum</i>	小麦、玉米、番茄等 <i>Triticum aestivum, Zea mays, Lycopersicon esculentum</i> , etc	马唐、蒺藜草、金色狗尾草 <i>Digitaria sanguinalis, Cenchrus echinatus, Setaria glauca</i> , etc.	[80]

(Imazethapyr)与苯嘧磺草胺(Saflufenacil)和噻吩草胺(Dimethenamid-p)混合后,除草效果和在大豆产量都有明显提高,并减少了单一除草剂的用量<sup>[89]</sup>。莠去津作为玉米生产中经常使用的除草剂,对玉米田中杂草的防除效果显著,但其在作物上的残留时期较长。当其与酰胺类除草剂,如与甲草胺、乙草胺等混配使用可适当减少莠去津的使用量,以达到降低残留的目的<sup>[90]</sup>。因此,除草剂的混配使用在生产中具有重要地位。

在玉米和大豆间、套、轮作种植区域中,通过不同除草剂混用,可以达到在两种作物均存在的条件下除草的目的,且对作物的伤害降到最低。在玉米—大豆带状种植模式下,60%的乙·嗪·滴丁酯对大豆的生长有抑制作用,而48%的灭草松效果不理想,将二者

复混使用,不仅避免了负面的影响,而且使大豆和玉米的产量分别增加39.7%和33.4%<sup>[91]</sup>。大豆田间广泛使用的除草剂是乙草胺与广灭灵,玉米田间使用的除草剂主要是乙草胺与莠去津;而广灭灵和莠去津分别对玉米和大豆产生严重的药害<sup>[92-93]</sup>。研究发现,大豆和玉米田间复混使用的除草剂有乙草胺和扑草净(Prometryn)等,每公顷施用50%的乙草胺2.5 kg与25%的扑草净5.0 kg混配后效果最佳<sup>[94]</sup>。同时有研究表明,96%的精·异丙甲草胺(S-metolachlor)乳油和50%扑草净可湿性粉剂分别在1 500 mL·hm<sup>-2</sup>和1 500 g·hm<sup>-2</sup>时,对杂草的株防效和鲜重防效在90%以上;但当其复混使用时,达到相同的效果分别仅需96%的精·异丙甲草胺乳油和50%扑草净可湿性粉剂1 125 mL·hm<sup>-2</sup>和375 g·hm<sup>-2</sup>,显著降低了单

一除草剂的用量,减轻了杂草抗性的产生和其对环境造成的污染<sup>[95]</sup>。2015 年袁伟等<sup>[96]</sup>研究表明,8% 炔草酯(Clodinafop-propargyl)1 200 mL·hm<sup>-2</sup>与使它隆(Fluroxypyr)900 mL·hm<sup>-2</sup>复混使用处理 25 d 后,对禾本科杂草和阔叶杂草的防除效果明显高于其单一使用,且均达到 100%。

除草剂的复混使用在农业生产中发挥着重要的作用。首先,除草剂的复混使用不仅显著提高了防除效果和杀草谱,而且复混时的用量较单一使用时有所减少<sup>[96-97]</sup>。其次,除草剂复混使用降低了其对环境的负面影响;同时,除草剂复混使用时,单一除草剂的用量减少,在一定程度上延缓了杂草抗性的产生,增加了作物产量,且降低了农药的残留<sup>[89]</sup>。最后,降低了除草剂对周边生物种群结构及分布的影响。因此,除草剂的复混使用是目前除草剂高效、环保的利用方式,对农业的可持续发展有重要的作用。

### 3.2 除草剂与助剂之间的复混优势

除草剂的复混使用促进了农业的绿色健康发展,但是在除草剂的使用过程中,助剂与除草剂复混也会对除草剂的药效有较大的影响。选择合适的除草剂与助剂复混,可以使除草剂最大限度的发挥作用、减少用药量,并能减少对环境的污染和生产的投入,如单一使用稀禾定(Sethoxydim)110 d 后对偃麦草(*Elytrigia-repens*)的防除效果为 87%,当其与不同的助剂混合使用后的防效显著提高,最高可以达到 99%<sup>[98]</sup>。助剂的添加还能有效地防止不同配方除草剂复混而导致的药效降低。研究表明,不同类型的除草剂复混以后其无机盐离子会发生交换反应,使原有的药效丧失或衰减<sup>[99]</sup>。通过采用添加适宜助剂的方法使除草剂能够保持原有的功效,如苯达松的钠盐与稀禾啉的铵盐复混使用时,钠离子与铵根离子发生离子间交换生成基本无效的稀禾啉钠盐,加入 BCG815 助剂能有效降低交换量<sup>[98]</sup>。在生物除草剂中添加助剂,为微生物提供相对湿润的环境,提高其活性,使其在不利的环境条件下生存,并成功地侵染植物组织<sup>[100]</sup>。

在除草剂喷施的过程中,由于叶面上的蜡质层和绒毛的存在,经常伴随着药液分布不均匀,影响除草效果。如果加入适量的油类助剂能够提高药滴在叶面上的附着程度,降低表面张力和接触角,最大限度发挥药效<sup>[101]</sup>。农业生产中,助剂并不是单一的使用,而是采用多种助剂相结合的方式使用。助剂虽然能使除草剂

达到增效降污的效果,但不同的助剂之间也存在协同或拮抗作用<sup>[102]</sup>。与化学除草剂相比,生物除草剂助剂的选择应更加严格。生物除草剂中有效成分是活的微生物个体,与各种助剂之间的兼容能力较差,因此,生物除草剂助剂的研发需要密切结合微生物的生活习性。

## 4 未来研究方向

除草剂的发展,既是重要的农业问题,也是值得关注的生态保护问题。虽然除草剂在当前农业生产中发挥着重要的作用,但其对环境造成污染,影响农业可持续发展。因此,研究并使用新型环保的除草剂将成为缓解这一矛盾的途径之一。

首先,为了使除草剂的发展适用于特定的种植模式,降低其对环境的危害,应该选择杀草谱不同的化学除草剂,以合适的比例混合,结合当地的高产栽培技术,实现能够适用于特定的种植模式下的除草剂,达到较高的除草效果。为了更好地发挥其优越性,可以适当加入一些对药效不产生拮抗作用的助剂,以期达到既能适用于不同区域的特色种植模式,又不对作物产生药害,同时杂草防除效果显著的目的。

其次,生物除草剂活性的保持期限较短。应深入研究如何延缓其活性丧失,最大限度地实现商品化生产及使用。可通过对一些作为生物除草剂的植物微生物病原体进行基因工程的修饰和加工,使其对杂草保持较强的持续侵染能力,而对作物的侵染能力降到最低。此外,微生物侵染植株是一个复杂的生物学过程,在不同环境条件下微生物对植物的侵染速率不同,导致植株发病不一致。通过添加合适的助剂,为微生物的侵染创造一个适宜的微环境,有利于生物除草剂药效的发挥。

最后,化感作用在维持生态系统的稳定性上发挥了较为重要的作用<sup>[103]</sup>。通过对植物化感物质的研究,已经证明了一些植物组织浸提物对其他物种生长产生影响<sup>[104]</sup>,但是其具体发挥作用的物质并不明晰。进一步分离纯化这些化感物质,并根据其作用机理对其进行分类,分离出抑制萌发和生长或打破杂草种子休眠并促进其萌发的化感物质,以降低杂草的生长或者在秋季作物收获后施用,诱导杂草种子萌发,使其幼苗不能安全越冬而死亡。或者通过化感物质和化学除草剂的混合使用,作为化学除草剂向生物除草剂转变

的过度产品,改变现在化学除草剂大剂量广泛使用现状<sup>[105]</sup>,减少对生态环境破坏,延缓杂草抗药性产生。但是化感物质与除草剂之间是否会发生相互作用,影响药效发挥等一系列问题,需要进一步深入研究。

### 参考文献 References:

- [1] Das T K, Yaduraju N T. The effects of combining modified sowing methods with herbicide mixtures on weed interference in wheat crops. *International Journal of Pest Management*, 2012, 58(4): 310-319.
- [2] Rahman M, Juraimi A S, Suria J, Man A B, Anwar P, Rahman M, Juraimi A S, Suria J, Man A B. Response of weed flora to different herbicides in aerobic rice system. *Scientific Research & Essays*, 2012(1): 12-23.
- [3] King S R, Garcia J O. Annual broadleaf control with KIH-485 in glyphosate-resistant furrow-irrigated corn. *Weed Technology*, 2009, 22: 420-424.
- [4] Udikovićolić N, Scott C, Martinlaurent F. Evolution of atrazine-degrading capabilities in the environment. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2012, 96(5): 1175-1189.
- [5] Tejada M, Morillo E, Gómez I, Madrid F, Undabeytia T. Effect of controlled release formulations of diuron and alachlor herbicides on the biochemical activity of agricultural soils. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 322: 334-347.
- [6] Norsworthy J K, Ward S M, Shaw D R, Llewellyn R S, Nichols R L, Webster T M, Bradley K W, Frisvold G, Powles S B, Burgos N R, Witt W W, Barrett M. Reducing the risks of herbicide resistance: Best management practices and recommendations. *Weed Science*, 2012, 60: 31-62.
- [7] Li Y, Sun Z, Zhuang X, Xu L, Chen S, Li M. Research progress on microbial herbicides. *Crop Protection*, 2003, 22(2): 247-252.
- [8] Green J M. Current state of herbicides in herbicide-resistant crops. *Pest Management Science*, 2014, 70(9): 1351-1357.
- [9] Wiederholt R J, Stoltenberg D E. Cross-resistance of a large crabgrass (*Digitaria sanguinalis*) accession to aryloxyphenoxypropionate and cyclohexanedione herbicides. *Weed Technology*, 1995, 9(3): 518-524.
- [10] 筱禾. 从除草剂抗性历史中反思. *世界农药*, 2015, 37(1): 26-28.  
Xiao H. From herbicide resistance historical reflection. *World Pesticides*, 2015, 37(1): 26-28. (in Chinese)
- [11] 曾秘, 张亚, 彭争科, 谢敏, 胡亚, 王爱玉, 易倩. 微生物除草剂的研究现状. *江西农业学报*, 2013, 25(2): 40-43.  
Zeng M, Zhang Y, Peng Z K, Xie M, Hu Y, Wang A Y, Yi Q. Research status of microbial herbicides. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2013, 25(2): 40-43. (in Chinese)
- [12] Green J M. Maximizing herbicide efficiency with mixtures and expert systems. *Weed Technology*, 1992, 5(4): 894-897.
- [13] Zhang Z P. Development of chemical weed control and integrated weed management in China. *Weed Biology & Management*, 2003, 3(4): 197-203.
- [14] 张泽溥. 除草剂在中国大陆农田的应用. *农药学学报*, 2009, 11(Z1): 50-55.  
Zhang Z P. The herbicide application in the mainland of China. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2009, 11(Z1): 50-55. (in Chinese)
- [15] 李颖慧, 陈勇. 杂草对百草枯的抗药性机制研究进展. *生态学杂志*, 2012, 31(1): 194-199.  
Li Y H, Chen Y. Advance in mechanism of resistance of weeds to paraquat. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(1): 194-199. (in Chinese)
- [16] 苏少泉. 草甘膦述评. *农药*, 2005(4): 145-149.  
Su S Q. Glyphosate review. *Agrochemicals*, 2005(4): 145-149. (in Chinese)
- [17] 刘苗苗, 程家慧, 林海燕, 沈志成, 王志勇, 林朝阳. 抗草甘膦转基因玉米 AG16 分子特征和抗性鉴定. *草业科学*, 2017, 34(9): 1830-1837.  
Liu M M, Cheng J H, Lin H Y, Shen Z C, Wang Z Y, Lin Z Y. Molecular characterization and efficacy of a transgenic corn event AG16. *Pratacultural Science*, 2017, 34(9): 1830-1837. (in Chinese)
- [18] Duke S O, Powles S B. Mini-review glyphosate: A once-in-a-century herbicide. *Pest Management Science*, 2008, 64: 319-325.
- [19] Annett R, Habibi H R, Hontela A. Impact of glyphosate and glyphosate-based herbicides on the freshwater environment. *Jour-*



- nal of Applied Toxicology, 2014, 34(5):458-479.
- [20] Prado J R, Segers G, Voelker T, Carson D, Dobert R, Phillips J, Cook K, Cornejo C, Monken J, Grapes L. Genetically engineered crops: From idea to product. *Annual Review of Plant Biology*, 2014, 65:769-790.
- [21] 陈海伟, 张鲁华, 陈德富, 陈喜文. 除草剂及抗除草剂作物的应用现状与展望. *生物技术通报*, 2012(10):35-40.  
Chen H W, Zhang L H, Chen D F, Chen X W. Current utilization status and future prospect of herbicide and herbicide-resistant crops. *Biotechnology Bulletin*, 2012(10):35-40. (in Chinese)
- [22] 蒋修安, 马锡洪. 新型除草剂莎扑隆的研制. *江苏化工*, 1984(3):54-57.  
Jiang X A, Ma X H. Development of a new herbicide, dymrone. *Jiangsu Chemical Industry*, 1984(3):54-57. (in Chinese)
- [23] 丁成芳. 75% 噻吩磺隆 WG 防除春玉米田杂草药效试验. *农药*, 2007, 46(2):140-141.  
Ding C F. Weed control efficacy of thifensulfuron-methyl 75% WG in spring cornfield. *Agrochemicals*, 2007, 46(2):140-141. (in Chinese)
- [24] 庄治国, 徐娜娜, 庄占兴, 刘钰, 韩艺欣, 范金勇. 除草剂氯吡嘧磺隆的开发与应用. *农药*, 2016, 55(5):316-319.  
Zhuang Z G, Xu N N, Zhuang Z X, Liu Y, Han Y X, Fan J Y. The development and application of herbicide halosulfuron-methyl. *Agrochemicals*, 2016, 55(5):316-319. (in Chinese)
- [25] 刘祈星, 柳爱平, 胡艾希, 黄明智, 欧晓明, 周海峰. 2-(4-芳氧苯氧基)丙酸类化合物的研究进展. *农药*, 2015, 54(8):551-558.  
Liu Q X, Liu A P, Hu A X, Huang M Z, Ou X M, Zhou H F. Progress on 2-(4-aryloxyphenoxy) propionic acid derivative. *Agrochemicals*, 2015, 54(8):551-558. (in Chinese)
- [26] Shirakura S, Ito K, Aizawa H. Effect of cytochrome P-450 monooxygenase inhibitors on the rice tolerance of azimsulfuron and bensulfuron-methyl. *Journal of Weed Science & Technology*, 1995, 40(3):218-220.
- [27] Singh V P, Singh G, Singh M. Effect of fenoxaprop-p-ethyl on transplanted rice and associated weeds. *Indian Journal of Weed Science*, 2004, 36(3-4):190-192.
- [28] 王振雷. 几种常用除草剂的使用方法. *河北农业科技*, 1992(2):25.  
Wang Z L. Several commonly used herbicides are used. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 1992(2):25. (in Chinese)
- [29] 王贵启, 李香菊, 崔海兰, 刘学, 李秉华. PPM 法确定异丙隆对几种冬小麦田主要杂草的最低致死剂量. *华北农学报*, 2008, 23(S1):274-277.  
Wang G Q, Li X J, Cui H L, Liu X, Li B H. The determination of minimum lethal dosage of isoproturon to the main weeds in winter wheat by PPM method. *Journal of North China Agriculture*, 2008, 23(S1):274-277. (in Chinese)
- [30] 马小艳, 马艳, 彭军, 奚建平, 马亚杰, 李希凤. 我国棉田杂草研究现状与发展趋势. *棉花学报*, 2010, 22(4):372-380.  
Ma X Y, Ma Y, Peng J, Xi J P, Ma Y J, Li X F. Current situation and developing tendency of the weed researches in cotton field of China. *Journal of Cotton*, 2010, 22(4):372-380. (in Chinese)
- [31] 杨吉春, 王秀丽, 刘长令. 2014 年登记或上市的农药品种. *农药*, 2015, 54(2):129-142.  
Yang J C, Wang X L, Liu C L. New active ingredients registered or launched in 2014. *Agrochemicals*, 2015, 54(2):129-142. (in Chinese)
- [32] Auld B A, Morin L. Constraints in the development of bioherbicides. *Weed Technology*, 1995, 9(3):638-652.
- [33] Wilson R G, Miller S D, Westra P, Kniss A R, Stahlman P W, Wicks G W, Kachman S D. Glyphosate-induced weed shifts in glyphosate-resistant corn or a rotation of glyphosate-resistant corn, sugarbeet, and spring wheat. *Weed Technology*, 2016, 21:900-909.
- [34] Mahajan G, Chauhan B S. Weed control in dry direct-seeded rice using tank mixtures of herbicides in South Asia. *Crop Protection*, 2015, 72:90-96.
- [35] 程正载, 王洋, 龚凯, 王光华, 李文兵, 叶龙. 新型除草剂甲基磺草酮的合成. *农药*, 2013, 52(5):328-330.  
Cheng Z Z, Wang Y, Gong K, Wang G H, Li W B, Ye L. Synthesis of new herbicide mesotrion. *Agrochemicals*, 2013, 52(5):328-330. (in Chinese)
- [36] 吴晓峰, 刘秀, 金晨钟, 陈维, 孔玄庆. 我国化学除草剂剂型研究进展. *现代农药*, 2015, 14(5):10-13.  
Wu X F, Liu X, Jin C Z, Chen W, Kong X Q. Research progress of chemical herbicide formulations in China. *Modern Agrochemicals*, 2015, 14(5):10-13. (in Chinese)

- [37] 景小兰,董良利,张建华,曹昌林,郭瑞峰,史丽娟,彭之东,范娜,李光,白文斌.中国除草剂的发展现状及其在高粱上的应用.中国农学通报,2015,31(25):182-185.  
Jing X L, Dong L L, Zhang J H, Cao C L, Guo R F, Shi L J, Peng Z D, Fan N, Li G, Bai W B. Development status of herbicides in China and its application in sorghum. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(25): 182-185. (in Chinese)
- [38] Jha P, Kumar V, Garcia J, Reichard N. Tank mixing pendimethalin with pyroxasulfone and chloroacetamide herbicides enhances in-season residual weed control in corn. Weed Technology, 2015, 29(2): 198-206.
- [39] Johnson B C, Young B G. Influence of temperature and relative humidity on the foliar activity of mesotrione. Weed Science, 2009, 50: 157-161.
- [40] 王笛,李达,徐安凯,徐博,高阳.吉林中部地区紫花苜蓿地除草剂筛选试验.草业科学,2016,33(5):956-962.  
Wang D, Li D, Xu A K, Xu B, Gao Y. Herbicides screening test of alfalfa pasture in the central area of Jilin Province. Pratacultural Science, 2016, 33(5): 956-962. (in Chinese)
- [41] 金守花,金桂玉,程庆峰.影响除草剂除草效果的环境因素和提高其效果的有效途径.现代农业,2008(10):14-15.  
Jin S H, Jin G Y, Cheng Q F. Impact of herbicides weeding effect of environmental factors and effective ways to improve their effectiveness. Modern Agriculture, 2008(10): 14-15. (in Chinese)
- [42] 陈志石,李贵,吴亮仑.玉米田化学除草剂的发展及其在我国的应用.杂草科学,2008(2):1-4.  
Chen Z S, Li G, Wu J L. Development of chemical herbicides in maize field and its application in China. Weed Science, 2008(2): 1-4. (in Chinese)
- [43] Shea P J, Tupy D R. Reversal of cation-induced reduction in glyphosate activity with EDTA. Weed Science, 1984, 32(6): 802-806.
- [44] Nalewaja J D, Matysiak R. Spray carrier salts affect herbicide toxicity to kochia (*Kochia scoparia*). Weed Technology, 1993, 7(1): 154-158.
- [45] Roskamp J M, Turco R F, Bischoff M, Johnson W G. The influence of carrier water pH and hardness on saflufenacil efficacy and solubility. Weed Technology, 2013, 27(3): 527-533.
- [46] Green J M, Cahill W R. Enhancing the biological activity of Nicosulfuron with pH adjusters. Weed Technology, 2013, 17(2): 338-345.
- [47] Daruich J, Zirulnik F, Gimenez M S. Effect of the herbicide glyphosate on enzymatic activity in pregnant rats and their fetuses. Environmental Research, 2001, 85(3): 226-231.
- [48] Dallegre E, Mantese D G, Coelho R S, Pereira J N D, Dalsenter P R, Langeloh A. The teratogenic potential of the herbicide glyphosate-Roundup in Wistar rats. Toxicology Letters, 2003, 142(1/2): 45-52.
- [49] Hasan F, Ansari M S. Ecotoxicological hazards of herbicides on biological attributes of *Zygogramma bicolorata* pallister (Coleoptera: Chrysomelidae). Chemosphere, 2016, 154: 398-407.
- [50] 汪雪飞,夏润玺,王雅婷,秦利,刘限.几种常用除草剂对家蚕生长发育的影响.安徽农业科学,2017,45(2):174-176.  
Wang X F, Xia R X, Wang Y T, Qin L, Liu X. Effects of several common herbicides on the growth of silkworm. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(2): 174-176. (in Chinese)
- [51] 李鸿林.两种除草剂对狼毒-矮嵩草草地群落重要值及多样性的影响.草业科学,2011,28(9):1645-1648.  
Li H L. Effect of two herbicides on the important values and plant diversity of *Stellera chamaejasme* - *Kobresia humilis* communities. Pratacultural Science, 2011, 28(9): 1645-1648. (in Chinese)
- [52] Cornelius C D, Bradley K W. Carryover of common corn and soybean herbicides to various cover crop species. Weed Technology, 2017, 31(1): 21-31.
- [53] Hayes T, Haston K, Tsui M, Hoang A, Haeffele C, Vonk A. Atrazine-induced hermaphroditism at 0.1 ppb in american leopard frogs (*Rana pipiens*): Laboratory and field evidence. Environmental Health Perspectives, 2003, 111: 568-575.
- [54] Wrobel M H, Mlynarczuk J. The inhibition of myometrial contractions by chlorinated herbicides (atrazine and linuron), and their disruptive effect on the secretory functions of uterine and ovarian cells in cow, in vitro. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2017, 142: 44-52.
- [55] Peña D, López-Piñero A, Albarrán, Becerra D, Sánchez-Llerena J. Environmental fate of the herbicide mcpa in agricultural soils

- amended with fresh and aged de-oiled two-phase olive mill waste. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(18):1-11.
- [56] Wicks G A, Mahnken G W. Control of triazine-resistant kochia (*Kochia scoparia*) in conservation tillage corn (*Zea mays*). *Weed Science Journal of the Weed Science Society of América*, 1993, 41(2):225-231.
- [57] Bacmaga M, Borowik A, Kucharski J, Tomkiel M, Wyszowska J. Microbial and enzymatic activity of soil contaminated with a mixture of diflufenican + mesosulfuron-methyl + iodosulfuron-methyl-sodium. *Environmental Science and Pollution*, 2015, 22(1):643-656.
- [58] Joly P, Bonnemoy F, Charvy J C, Bohatier J, Mallet C. Toxicity assessment of the maize herbicides s-metolachlor, benoxacor, mesotrione and nicosulfuron, and their corresponding commercial formulations, alone and in mixtures, using the microtox<sup>®</sup> test. *Chemosphere*, 2013, 93(10):2444-2450.
- [59] 杨恒友, 刘杰, 张剑. 微生物除草剂研究发展及开发展望. *中国植保导刊*, 2010, 30(7):14-17.  
Yang H Y, Liu J, Zhang J. Research review and development prospect of microbial herbicides. *China Plant Protection*, 2010, 30(7):14-17. (in Chinese)
- [60] 陈世国, 强胜. 生物除草剂研究与开发的现状及未来的发展趋势. *中国生物防治学报*, 2015, 31(5):770-779.  
Chen S G, Qiang S. The status and future directions of bioherbicide study and development. *Chinese Journal of Biological Control*, 2015, 31(5):770-779. (in Chinese)
- [61] Abbas H K, Duke S O. Phytotoxins from plant pathogens as potential herbicides. *Toxin Reviews*, 1995, 14(4):523-543.
- [62] Duke S O, Dayan F E, Romagni J G, Rimando A M. Natural products as sources of herbicides: Current status and future trends. *Weed Research*, 2000, 40(1):99-111.
- [63] 王利, 朱朝华. 生物除草剂研究进展. *农业研究与应用*, 2008(1):15-17.  
Wang L, Zhu Z H. Research progress on bioherbicide. *Research and Application of Agriculture*, 2008(1):15-17. (in Chinese)
- [64] 马娟, 董金皋. 微生物除草剂与生物安全. *植物保护*, 2006, 32(1):21-23.  
Ma J, Dong J G. Microbial herbicides and biosafety. *Plant Protection*, 2006, 32(1):21-23. (in Chinese)
- [65] 朱宏建, 易图永, 周鑫钰. 土壤放线菌生防活性物质的研究进展. *作物研究*, 2007, 21(2):149-151.  
Zhu H J, Yi T Y, Zhou X Y. Soil actinomycetes in biocontrol research progress of bioactive substances. *Crop Research*, 2007, 21(2):149-151. (in Chinese)
- [66] 刘炳文. 用“鲁保一号”菌液防治大豆菟丝子效果好. *河北农业*, 2003(5):20-20.  
Liu B W. Use of “Lu Bao No.1” bacteria liquid on control of soybean dodder effect is good. *Hebei Agriculture*, 2003(5):20-20. (in Chinese)
- [67] 高昭远, 干静娥. 菟丝子的生物防除: “鲁保一号”的研究进展. *生物防治通报*, 1992, 8(4):173-175.  
Gao Z Y, Gan J E. Biological control of dodder a review on research progress of the bioherbicide “Lu bao No.1”. *Biological Bulletin*, 1992, 8(4):173-175. (in Chinese)
- [68] 王之樾, 朱广冀, 马德成. 应用镰刀菌防治瓜列当. *中国生物防治学报*, 1985, 1(1):24-26.  
Wang Z Y, Zhu G J, Ma D C. Control of egyptian broomrape with fusarium orobanches. *Chinese Journal of Biological Control*, 1985, 1(1):24-26. (in Chinese)
- [69] 陆俊姣, 马瑞燕. 真菌防治喜旱莲子草研究进展. *植物保护*, 2008, 34(2):10-13.  
Lu J J, Ma R Y. Advances in fungal pathogens against the alligatorweed (*Alternanthera philoxeroides*). *Plant Protection*, 2008, 34(2):10-13. (in Chinese)
- [70] 袁树忠, 何平平, 廉吉衷, 王彰明, 陈厚德. 一种镰刀菌对空心莲子草的致病力与寄主专一性测定. *中国生物防治学报*, 2006, 22(2):137-141.  
Yuan S Z, He P P, Lian J Z, Wang Z M, Chen H D. Host range and pathogenicity of a fusarium species to alternanthera philoxeroides. *Chinese Journal of Biological Control*, 2006, 22(2):137-141. (in Chinese)
- [71] Qiang S, Zhu Y, Summerell B A, Li Y. Mycelium of alternaria alternata as a potential biological control agent for eupatorium adenophorum. *Biocontrol Science & Technology*, 2006, 16(7):653-668.
- [72] 万佐玺, 朱晶晶, 强胜. 链格孢菌毒素对紫茎泽兰的致病机理. *植物资源与环境学报*, 2001, 10(3):47-50.

- Wan Z X, Zhu J J, Qiang S. The pathogenic mechanism of toxin of *Alternaria alternata* (Fr.) Keissler to *Eupatorium adenophorum* Spreng. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2001, 10(3): 47-50. (in Chinese)
- [73] Tang W, Zhu Y Z, He H Q, Qiang S. First report of southern blight on canadian goldenrod (*Solidago canadensis*) caused by *Sclerotium rolfsii* in China. *Plant Disease*, 2010, 94(9): 1172.
- [74] 张剑, 董晔欣, 张金林, 董金皋. 一株具有高除草活性的真菌菌株. *菌物学报*, 2008, 27(5): 645-651.  
Zhang J, Dong Y X, Zhang J L, Dong J G. A fungal strain having high herbicidal activity. *Mycosystema*, 2008, 27(5): 645-651. (in Chinese)
- [75] 李扬汉, 冀玲惠. 有关真菌除草剂研究的进展. *中国生物防治学报*, 1994, 10(1): 35-39.  
Li Y H, Ji L H. A review on the recent progresses of mycoherbicide development in the world. *Chinese Journal of Biological Control*, 1994, 10(1): 35-39. (in Chinese)
- [76] 刘顺宇, 曹永军. 微生物源农药应用现状及发展前景. *河南农业科学*, 2015, 44(5): 22-25.  
Liu S Z, Cao Y J. Application situat and development prospect of microbial pesticides. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2015, 44(5): 22-25. (in Chinese)
- [77] 吕德滋, 白素娥. 升马唐种群生态及其田间密度调控指标的研究. *植物生态学报*, 1995, 19(1): 55-63.  
Lyu D Z, Bai S E. Study on the population ecology and control of ascendent crab grass in summer grain crops in Hebei Province. *Acta Phytocologica Sinica*, 1995, 19(1): 55-63. (in Chinese)
- [78] Zhu Y, Qiang S. Isolation, pathogenicity and safety of curvularia eragrostidis isolate QZ-2000 as a bioherbicide agent for large crabgrass (*Digitaria sanguinalis*). *Biocontrol Science & Technology*, 2004, 14(8): 769-782.
- [79] Tilley A M, Walker H L. Evaluation of curvularia intermedia (*Cochliobolus intermedius*) as a potential microbial herbicide for large crabgrass (*Digitaria sanguinalis*). *Biological Control*, 2002, 25(1): 12-21.
- [80] Chandramohan S, Charudattan R. Control of seven grasses with a mixture of three fungal pathogens with restricted host ranges. *Biological Control*, 2001, 22(3): 246-255.
- [81] 吴峤, 杨吉春, 刘彦斐. 2016年登记或上市的农药品种. *农药*, 2017(1): 56-68.  
Wu Q, Yang J C, Liu Y F. New active ingredients registered or launched in 2016. *Agrochemicals*, 2017(1): 56-68. (in Chinese)
- [82] 吴峤, 杨吉春, 李子亮. 2015年登记或上市的农药品种(续). *农药*, 2016(1): 55-64.  
Wu Q, Yang J C, Li Z L. New active ingredients registered or launched in 2015(continue). *Agrochemicals*, 2016(1): 55-64. (in Chinese)
- [83] 虞轶俊, 许方程, 吴永汉, 余昌宏, 吕老富. 秋甘蓝鳞翅目害虫不同防治体系的研究. *植物保护*, 2002, 28(4): 23-26.  
Yu Y J, Xu F C, Wu Y H, Yu C H, Lyu L F. Study on autumn cabbage lepidoptera pests of different control systems. *Plant Protection*, 2002, 28(4): 23-26. (in Chinese)
- [84] Bailey K L, Falk S. Turning research on microbial bioherbicides into commercial products—a phoma story. *Science*, 2011, 5(S1): 73-79.
- [85] Bailey K L, Falk S, Derby J A, Melzer M, Boland G J. The effect of fertilizers on the efficacy of the bioherbicide, phoma macrostoma, to control dandelions in turfgrass. *Biological Control*, 2013, 65(1): 147-151.
- [86] 李水清, 赵春. 我国生物除草剂的研究进展. *湖北农学院学报*, 2003, 23(2): 135-139.  
Li S Q, Zhao C. The research progress on bioherbicide in China. *Journal of Hubei Agricultural College*, 2003, 23(2): 135-139. (in Chinese)
- [87] TeBeest D O, Yang X B, Cisar C R. The status of biological control of weeds with fungal pathogens. *Annual Review of Phytopathology*, 1992, 30(1): 637-657.
- [88] 何美仙, 陈桂华, 盛仙俏. 生物农药推广面临的问题及对策. *农业资源与环境学报*, 2005, 22(3): 9-10.  
He M X, Chen G H, Sheng X Q. Problem and countermeasure faced popularization of biologic pesticide. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2005, 22(3): 9-10. (in Chinese)
- [89] Walsh K D, Soltani N, Shropshire C, Sikkema P H. Weed control in soybean with imazethapyr applied alone or in tank mix with saflufenacil/dimethenamid-p. *Weed Science*, 2015, 63(1): 329-335.
- [90] 林长福, 杨玉廷. 除草剂混用、混剂及其药效评价. *农药*, 2002, 43(8): 5-7.

- Lin C F, Yang Y Y. Methods for efficacy evaluation of herbicide mixtures or herbicide prepackage mixtures. *Agrochemicals*, 2002, 43(8): 5-7. (in Chinese)
- [91] 杜青, 王青梅, 陈平, 戴炜, 杨文钰, 雍太文. 玉米—大豆带状间作下除草剂的筛选. *大豆科学*, 2017(1): 98-103.  
Du Q, Wang Q M, Chen P, Dai W, Yang W Y, Yong T W. Screening of herbicides in maize-soybean relay strip intercropping system. *Soybean Science*, 2017(1): 98-103. (in Chinese)
- [92] Curran W S, Liebl R A. Corn (*Zea mays*) injury following use of clomazone, chlorimuron, imazaquin, and imazethapyr. *Weed Technology*, 1991, 5(3): 539-544.
- [93] Vidrine P R, Reynolds D B, Blouin D C. Grass control in soybean (*Glycine max*) with graminicides applied alone and in mixtures. *Physics of Wave Phenomena*, 1995, 19(1): 43-46.
- [94] 杜晓军, 崔锡花, 姜成, 金香花, 吴明根. 玉米、大豆地两用除草剂的筛选. *延边大学农学学报*, 2001, 23(4): 282-286.  
Du X J, Cui X H, Jiang C, Jin X H, Wu M G. The screening of current herbicide both used for maizes and soybeans. *Journal of Agricultural Science Yanbian University*, 2001, 23(4): 282-286. (in Chinese)
- [95] 赵银月, 耿智德, 张莲芝, 王铁军. 控制大豆与玉米间作田杂草的除草剂初步筛选. *杂草科学*, 2013, 31(1): 30-33.  
Zhao Y Y, Geng D Z, Zhang L Z, Wang T J. Preliminary screening of herbicides applied to soybean-maize intercropping fields. *Journal of Weed Science*, 2013, 31(1): 30-33. (in Chinese)
- [96] 袁伟, 李荣贵, 周定邦, 李进前, 杨立年, 魏丽. 不同小麦除草剂筛选试验. *现代农业科技*, 2017(2): 85-87.  
Yuan W, Li R G, Zhou D B, Li J Q, Yang L N, Wei L. Screening test on different herbicide of wheat. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2017(2): 85-87. (in Chinese)
- [97] 赵铭森, 邬腊梅, 孔佳茜, 孟晓康, 柏连阳. 除草剂混用对大麻田一年生杂草的防除效果. *山西农业科学*, 2017(1): 105-107.  
Zhao M S, Wu L M, Kong J Q, Meng X K, Bai L Y. Control effect of herbicides on annual weeds in cannabis fields. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2017(1): 105-107. (in Chinese)
- [98] Wanamarta G, Penner D, Kells J J. Identification of efficacious adjuvants for sethoxydim and bentazon. *Weed Technology*, 1989, 3(1): 60-66.
- [99] 王成菊, 张文吉. 助剂在除草剂应用中的作用及发展前景. *农药学报*, 2003(1): 12-20.  
Wang C J, Zhang W J. A review and prospect on herbicide adjuvants. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2003(1): 12-20. (in Chinese)
- [100] 李春光, 张建萍, 余柳青. 助剂在微生物除草剂中的应用. *中国生物防治学报*, 2006, 22(4): 265-267.  
Li C G, Zhang J P, Yu L Q. The adjuvants as components of microherbicides. *Chinese Journal of Biological Control*, 2006, 22(4): 265-267. (in Chinese)
- [101] 鲁梅, 王金信, 王云鹏, 刘伟. 除草剂助剂对药液物理性状及对磺草酮药效的影响. *农药学报*, 2004, 6(4): 78-82.  
Lu M, Wang J X, Wang Y P, Liu W. The effect of herbicide adjuvants on the physical characteristics and the bioactivity of sulcotrione. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2004, 6(4): 78-82. (in Chinese)
- [102] Shaw D R, Arnold J C. Weed control from herbicide combinations with glyphosate. *Weed Technology*, 2014, 16(1): 1-6.
- [103] Batish D R. Allelopathic interactions and allelochemicals: New possibilities for sustainable weed management. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2003, 22(3): 239-311.
- [104] 高兴祥, 李美, 房锋, 李健. 小飞蓬水浸提液对杂草萌发和生长的抑制效果. *草业科学*, 2015, 32(1): 48-53.  
Gao X X, Li M, Fang F, Li J. Effects of aqueous extractions of *Conyzaca nadensis* on germination and seedling growth of four weeds. *Pratacultural Science*, 2015, 32(1): 48-53. (in Chinese)
- [105] Dilipkumar M, Tseseng C. Is combination ratio an important factor to determine synergistic activity of allelopathic crop extract and herbicide? *International Journal of Agriculture & Biology*, 2013, 15(2): 259-265.

(责任编辑 王芳)