

付春伶, 张国宾. 烟田残留除草剂药害治理研究进展 [J]. 广东农业科学, 2018, 45 (8): 98-106.

# 烟田残留除草剂药害治理研究进展

付春伶<sup>1</sup>, 张国宾<sup>2</sup>

(1. 丽水职业技术学院林业科技学院, 浙江 丽水 323000;  
2. 浙江天丰生物科学有限公司, 浙江 金华 321000)

**摘要:** 烟草是一类对除草剂较为敏感的叶类经济作物, 随着除草剂的广泛应用, 烟田除草剂残留问题日益严重, 导致烟草植株矮化、发育迟缓、生长畸形和老叶黄化等药害症状发生, 严重影响烟草质量和产量。综述了烟田土壤影响除草剂降解的环境因素、常见残留除草剂诱发的典型药害症状和烟田除草剂残留药害治理的研究进展。重点分析了烟草除草剂残留药害修复的常用传统方法(土壤翻耕、合理混配施药、灌水-排水法、酸碱中和法、喷药补救法、动物修复法)、除草剂安全剂、植物生长调节剂、抗性基因培育以及微生物降解菌的开发利用等多种方法, 旨在深入研究烟田除草剂残留药害的解决方法同时为今后烟田除草剂残留药害治理创新发展提供参考。

**关键词:** 除草剂; 残留; 药害; 降解; 修复方法

中图分类号: S572; S482.4 文献标识码: A 文章编号: 1004-874X (2018) 08-0098-09

## Research on phytotoxicity control of tobacco herbicides residues

FU Chun-ling<sup>1</sup>, ZHANG Gou-bin<sup>2</sup>

(1. College of Forestry Science and Technology, Lishui Vocational and Technical College, Lishui 323000, China;  
2. Zhejiang Tianfeng Biological Science Co., Ltd., Jinhua 321000, China)

**Abstract:** Tobacco is more sensitive to herbicides and express phytotoxicity symptoms such as dwarfing, growth retardation, malformation and yellowing of old leaves with widespread application of herbicides, which affect tobacco quality and yield seriously. The environmental factors affecting the degradation of herbicides, the typical phytotoxicity symptoms induced by common herbicides, and several methods to remediate herbicide residues were reviewed in this article. Traditional methods (soil plowing, herbicides rational combination, irrigation-drainage method, oil neutralization, pharmacy remedy, and animal repair), safeners application, plant growth regulators, cultivating resistant gene and microbial degradation in the treatment progress of herbicide residues were pointed out, which might provide evidences for the further research of herbicides phytotoxicity solution and promote the development of new methods for herbicides residues in the tobacco field.

**Key words:** herbicides; residues; phytotoxicity; degradation; remediation methods

烟草是我国重要的叶类经济作物, 作为世界上第一烟草大国, 种植面积达 100 万  $\text{hm}^2$  以上, 烟叶产量占世界总量的 35% 左右。除草剂的发现和发展为全世界农业生产带来巨大贡献, 自 1970 年除草剂成为世界农药工业主体以来,

我国化学除草剂施用面积以每年 200 万  $\text{hm}^2$  的速率递增, 截至 2011 年, 使用面积已达 6 000 万  $\text{hm}^2$ , 每年所用除草剂有效成分超过 8.0 万 t。近年来, 烟田除草剂的施用不仅极大减轻人工劳动强度, 而且有效提高了农业生产效率, 对

收稿日期: 2018-05-19

基金项目: 丽水职业技术学院青年基金 (LZYC201701)

作者简介: 付春伶 (1990-), 女, 硕士, 讲师, E-mail: 18867844345@163.com

烟草质量和产量的提高具有明显的积极促进作用。除草剂品种不断增多,使用量持续增加,因此除草剂引发的药害问题也日益严重<sup>[1]</sup>。烟草是一类对除草剂较为敏感的作物,而烟田除草剂药害主要是由于烟田上茬作物所施用的除草剂残留引起的。相关报道表明,在残留二氯喹啉酸的稻田中种植烟草,烟草通常畸形生长,主要表现为新叶叶缘下垂,叶片皱缩,严重影响烟叶的产量和品质<sup>[2]</sup>。而稻田中残留苄嘧磺隆对烟草具有强烈药害作用,主要表现为心叶卷曲、发黄,后期心叶无法抽出或抽出后长势不良,严重时整株烟苗死亡<sup>[3]</sup>。烟草中农药残留量问题也成为国际烟草贸易倍受关注的内容,国际烟草科学研究合作中心(CORESTA)农用化学品咨询委员会(ACAC)于2013年提出了烟草中常用120种农药的指导性残留限量,用于规定和限制各类农药尤其是除草剂在烟叶中的残留危害<sup>[4]</sup>。因此,烟田残留除草剂药害治理的研究对提高烟叶品质和产量具有极其重要意义。

目前,关于烟田土壤中除草剂残留修复技术研究有很多方案措施。除了利用传统方法来解决烟田除草剂残留问题之外,国内外学者还采用安全剂、植物生长调节剂以及微生物降解菌等新型手段来治理研究。本文主要综述了影响除草剂在土壤降解的主要因素、常见除草剂药害的典型症状以及除草剂残留药害治理方法,目的在于通过总结除草剂残留药害的治理方法为今后除草剂残留药害治理研究方向提供依据。

## 1 土壤中除草剂降解的影响因素

土壤中的除草剂残留是造成烟田除草剂药害的主要原因,大部分除草剂在土壤可以迅速降解,残效期短,然而一些除草剂如磺酰脲类、咪唑啉酮类除草剂在土壤中不易降解,残效期长,易对烟草等敏感作物造成药害,除草剂在土壤中降解受诸多因素影响。

### 1.1 除草剂性质

除草剂化学结构和理化性质与其降解速率有关。光稳定性差的除草剂往往在土表易光解,

而挥发性大除草剂,如磺酰脲类除草剂,则不表现明显光降解性;除草剂的水溶性影响其在土壤中的吸附过程,水溶性大则容易在土壤中迁移渗透给下茬作物或邻近耕田作物造成药害。除草剂挥发性和自身饱和蒸气压密切相关,饱和蒸气压越高,挥发性越强,如硫代氨基甲酸酯类除草剂、二硝基苯胺类除草剂属于饱和蒸气压较高的除草剂。

### 1.2 光照

光照是除草剂降解的重要因素之一。除草剂主要是通过吸收紫外光或可见光的能量而发生不可逆的光解反应,光解作用对药效发挥、药剂残留以及环境安全等影响较大。大多数除草剂都能进行光解反应,光解速率取决于除草剂类型和分子结构,并且长时间光照能加快除草剂分解,但是对于那些光敏性较弱的除草剂则没有影响。郑丽英等<sup>[5]</sup>在研究双草醚降解试验中发现土壤湿度对双草醚降解影响较大,而光照对其分解影响不大。邓亚楠等<sup>[6]</sup>研究表明光照对乙草胺的降解无促进作用,水解是其降解的主要影响因素。

### 1.3 土壤环境

**1.3.1 温湿度** 土壤温湿度是除草剂降解不可忽视的因素。王险峰等<sup>[7]</sup>研究表明,随着地理位置自南向北,除草剂的降解速率降低,在我国,相同浓度的除草剂在南部地区的降解速率比北部地区快很多,温暖潮湿条件下,药剂的降解速度明显高于低温干旱条件。张晓伟等<sup>[8]</sup>指出土壤pH值为6.4时,含水率由25%升至75%,醚苯磺隆的半衰期由73 d减少为20 d,而气温由21℃提升为35℃时,降解速率也提升了50%到100%。土壤湿度与药剂在土壤中吸附—解吸附过程存在一定关系<sup>[9]</sup>。

**1.3.2 有机质** 土壤有机质含量影响除草剂在土壤中的残留和持效期,由于有机质的存在使得土壤胶体带有负电荷,并为除草剂的吸附提供了疏水结合位点,因此土壤有机质含量与土壤微粒对除草剂的吸附能力呈正相关。例如,脲类、均三氮苯类、硫代氨基酸酯类等许多类型除草剂在土壤中易被吸附,而磺酰脲类与咪唑啉酮类除草剂不易被吸附。未被土壤吸附的

除草剂可以随水迁移、扩散（包括淋溶、渗透和水土流失）进入水体，造成水体污染。

**1.3.3 微生物** 土壤微生物在大多数除草剂降解过程中扮演重要角色。土壤中含有丰富的真菌、细菌和放线菌等微生物资源参与除草剂降解反应。褚翠伟等<sup>[10]</sup>在研究微生物种群对8种常用除草剂降解行为中发现在非灭菌土壤中，除草剂的降解较快，而在灭菌条件下则相对减慢，并且当土壤中有机质含量较高且微生物增殖活跃时除草剂的降解速度相对较快。

**1.3.4 pH值** 土壤pH会影响除草剂的理化性质，如改变除草剂的水溶性、光解、水解等特性。此外，土壤pH还会影响土壤中微生物群落种类和数量。有学者研究发现，在中性或酸性条件下，磺隆类除草剂为中性型结构，易水解，微生物能够促进水解产物降解；而在碱性条件下，则以阴离子型结构存在，水溶性强但不易水解，微生物则作用于磺隆类除草剂，降解速率减弱。Sondhia等<sup>[11]</sup>研究表明磺酰脲类除草剂在土壤中的降解会随着pH的增加而加快。

## 1.4 其他因素

除草剂的施用方式、施用时间和用量、土壤类型等均会对除草剂在土壤降解产生一定的影响。综合来说，大多数除草剂在温度较高、长日照、湿度大、pH较低的土壤中降解较快，在温度低、短日照、湿度小、pH较高的土壤中则降解较缓慢。

## 2 常见除草剂残留药害症状类型

不同种类除草剂，对烟草生长发育过程作用及药害症状不同，主要表现为影响植株的生长发育周期、缺苗、组织褪色、形态异常以及烟叶产量和品质。常见的易残留除草剂种类主要包括有机磷类、苯甲酸类和苯氧羧酸类、喹啉羧酸类、酰胺类、磺酰脲类、咪唑啉酮类、三氮苯类、二苯醚类和联吡啶类除草剂，其主要残留药害症状如下。

### 2.1 有机磷类

有机磷类除草剂的典型代表是草甘膦，属于内吸性除草剂。烟田中误用草甘膦5~7d后，植株药害症状表现为新叶叶片褪色，从绿色逐

渐变为浅黄色或白色，叶片呈条状或带状，边缘向内卷曲；施用浓度过高可导致植株不生新根或停止生长，且根部腐烂坏死<sup>[12]</sup>。

### 2.2 苯甲酸类和苯氧羧酸类

苯甲酸类和苯氧羧酸类除草剂的代表品种有麦草畏、2甲4氯丙酸、2,4-D丙酸，2,4-D丁酯等，因高效、广谱、低残留而被广泛应用，对阔叶杂草防治效果较好。此类除草剂对烟草药害症状为烟叶颜色变暗，叶柄弯曲，叶片狭长而下垂呈带状，叶脉突出，叶缘和叶尖常成锯齿状且向下卷缩<sup>[13]</sup>。

### 2.3 喹啉羧酸类

二氯喹啉酸是喹啉羧酸类除草剂的典型代表，由于其对稻田稗草防治效果好，受到广大农民的喜爱，但是在烟稻轮作的田中，对烟株的生长发育影响最为严重；烟草药害症状为子叶不能伸展，叶缘下卷叶背向背皱折，叶片狭长呈线状，根短茎长，鲜重减轻。陈泽鹏等<sup>[14]</sup>分别从农药残留、植物病理和植物生理等方面系统分析了广东部分地区烟叶畸形的原因，认为在烟稻轮作中，二氯喹啉酸的不科学使用是该地区烟叶生长畸形的最主要因素。

### 2.4 酰胺类

酰胺类除草剂的代表品种有乙草胺、异丙草胺、敌稗、丁草胺等，对单子叶杂草防除效果明显优于双子叶杂草。此类除草剂药害是由使用浓度过高和超范围使用所导致，使烟草幼苗矮化，叶片变黄，抑制新叶展开，叶尖到叶缘皱缩卷曲，严重时，植株畸形，叶片焦枯，生长发育被抑制<sup>[15]</sup>。

### 2.5 磺酰脲类

磺酰脲类除草剂的代表品种有氯嘧磺隆、砜嘧磺隆、氯磺隆、苯磺隆、环胺磺隆等，此类除草剂对稻田禾本科或阔叶杂草均有很好的防治效果，但由于残留期较长，对后茬作物如烟草存在明显药害，具体症状为烟株矮小，植株发育缓慢，新叶畸形，叶脉黄化，根系生长严重受阻，主根短、须根少<sup>[16]</sup>。

### 2.6 咪唑啉酮类

咪唑啉酮类除草剂典型代表有甲氧咪草烟、咪唑乙烟酸，具有光谱高效的特点，但由于在

土壤中的残留期长,易对后茬烟草造成药害,具体表现为烟株矮小,根系老化,心叶黄化等症状<sup>[17]</sup>。

### 2.7 三氮苯类

三氮苯类除草剂代表品种为莠去津、西玛津,用于防治禾本科或阔叶杂草。烟田残留这两种除草剂会影响烟株株高,轻者老叶叶脉间黄化,从叶尖和叶缘开始枯萎,烟株矮化;重者向叶基部扩展叶片色泽由黄化到白化再变为棕色,最后叶片脱落<sup>[13]</sup>。

### 2.8 二苯醚类

二苯醚类除草剂代表品种为氟磺胺草醚,其对烟草药害症状表现为植株矮小,叶片狭小,植株上部新叶萎蔫,老叶叶脉及其周围颜色黄化、失绿,烟叶心叶畸形,烟株主根短小,须根少<sup>[12]</sup>。

### 2.9 联吡啶类除草剂

联吡啶类除草剂的典型代表为百草枯、敌草快,属于灭生性除草剂,喷施农作物后初期表现正常,几小时之后则立即变为青枯状。烟草使用此类除草剂发生药害症状为烟茎和烟叶都产生白斑,施用浓度过高时,病斑串联成条,叶个叶片枯黄,叶片脉间组织死亡至叶片脱落<sup>[18]</sup>。

## 3 烟田除草剂残留药害修复方法

### 3.1 传统方法

**3.1.1 土壤翻耕** 利用耕地犁对土壤进行立体式翻耕,即对土壤表层和土心层位置相互置换,让土壤残留除草剂暴露在土壤的表层,加大其与空气的接触面积,从而加速其降解速度,可以有效减少对作物的影响。

**3.1.2 合理混配施药** 除草剂的合理混配既能够减少单一药剂使用量,增加防治效果,也能够减轻某种除草剂对后茬作物的残留药害影响,如张国宾等<sup>[19]</sup>通过6种烟田安全除草剂联合配施,对比分析其防治杂草效果,发现为异丙甲草胺(404.80 g/hm<sup>2</sup>)×仲丁灵(899.55 mL/hm<sup>2</sup>)的配比下,对双子叶杂草的株防效和鲜重防效增效作用最佳。

**3.1.3 灌水-排水法** 通过灌水可以影响药剂

在土壤中吸附-解吸过程,排水可以将未被吸附的药剂以及解吸附出的药剂排除,降低土壤中除草剂残留量。

**3.1.4 酸碱中和法** 土壤pH往往影响除草剂在土壤中的存在形式进而影响其降解速率。如磺酰脲类除草剂在酸性和中性条件下,以中性型存在,易于水解,半衰期短;而在碱性条件下,以阴离子形式存在,水溶性强,不易水解,所以该类药剂在土壤中的降解速率随pH的降低而加快<sup>[20]</sup>。研究表明,在土壤中施加生石灰可减轻二氯喹啉酸残留对烟草药害的程度,用生石灰或者生石灰和生物炭混合施用于稻田,土壤pH值均明显升高,而常规施肥对照组和单施生物炭处理土壤pH值处于较低水平<sup>[21-22]</sup>。

**3.1.5 喷药补救法** 激素型除草剂如二氯喹啉酸导致的药害,可喷施喷洒10 mmol/L的CaCl<sub>2</sub><sup>[23]</sup>;而2,4-D、二甲四氯等引起的药害,可喷施赤霉素或50%腐殖酸钠颗粒。

**3.1.6 动物修复法** 段海明等<sup>[24]</sup>通过往土壤中释放蚯蚓,发现在相同浓度条件下,土壤中加入蚯蚓后能够加快乙草胺和丁草胺的降解速度,明显缩短了两种药剂的半衰期。

### 3.2 使用安全剂

除草剂安全剂(safener)也称解毒剂(antidote)或保护剂(protestant),是指用以保护作物免受除草剂药害,从而增加作物的安全性并改进杂草防除效果的化学物质。Hoffman<sup>[25]</sup>在1947年偶然发现此类化学物质,并于1962年首次提出了“安全剂”一词。几年后,Hoffman推出了世界上第一个安全剂1,8-萘二甲酸酐(NA)并于1972年正式商品化,用于保护玉米免受硫代氨基甲酸酯类、氯代乙酰胺类和灭草啞等除草剂药害。目前已经商品化的安全剂有10余种,其中最成功的是二氯乙酰胺类安全剂。安全剂的作用机制目前尚不清楚,但比较认同的理论机制主要有Lay&Casida-谷胱甘肽耦合作用机制论、Stephenson-相似构效关系(QS)、Robert-细胞色素P450单氧化酶(CytP450)催化的羟基化理论、乙酰乳酸合成酶(ALS)活化理论。

除草剂安全剂按结构不同,可分为萘酸酐

类、二氯乙酰胺类、脲醚类、杂环类、磺酰脲(胺)类等,其中种类比较多的是二氯乙酰胺类和杂环类安全剂,主要应用在玉米田、小麦田、稻田,在烟田使用却鲜有报道<sup>[26]</sup>。萘酸酐类安全剂中 1,8-萘二甲酸酐(NA)是最早商品化的安全剂,除了作为氨基甲酸酯类除草剂的安全剂之外,还是某些磺酰脲类除草剂的安全剂,主要通过提高作物体系中 P450s 的活性,使苄嘧磺隆和吡嘧磺隆的 O-脱甲基作用增强,增强作物对其的代谢能力,使作物得到保护。但范志金等<sup>[27]</sup>发现,1,8-萘二甲酸酐(NA)主要通过提高玉米体内游离脯氨酸和叶绿素含量,增强其抗逆性来保护玉米免受高浓度单嘧磺隆药害。二氯乙酰胺类安全剂主要是通过提高作物中的 GSH 水平来保护作物免受药害。比如二氯丙烯胺通过增强 ATP 硫酸化酶的活性,刺激玉米和其它植物中的谷胱甘肽水平升高,从而达到减缓绿磺隆药害的目的。某些二氯乙酰胺类除草剂不仅能提高植物体内的 GSH 水平也能提高 ALS 活性从而达到解毒目的,叶非等<sup>[28]</sup>发现安全剂 AD-67 对除草剂单嘧磺隆造成玉米的药害的有保护作用,并发现通过浸种处理幼苗中 GSH 含量和 ALS 活性分别是对照的 109.76% 和 113.33%;安全剂 R-28725 可以通过提高玉米体内 GSH 含量来保护玉米免受咪唑乙烟酸药害<sup>[29]</sup>。此外,加入双苯恶唑酸或吡喃解草唑作为安全剂,可以明显降低烟嘧磺隆对玉米的药害,改性植物油类增效剂的添加也可以降低除草剂用量、提高其安全性。

### 3.3 应用微生物降解菌

目前烟草种植过程中发生药害,主要是由于上茬作物施用了残留期长的除草剂,因此高效、快速地降解除草剂是解决这一问题的关键。微生物降解是除草剂在土壤中的降解的重要因素,降解速率不仅与土壤的有机质含量,温度,湿度, pH 以及微生物活跃程度有关,还与药剂的结构类型紧密相关。

**3.3.1 磺酰脲类除草剂的降解** 磺酰脲类除草剂具有活性高、易残留等特点,容易对烟草造成药害。降解磺酰脲类除草剂微生物主要包括放线菌浅灰链霉菌 (*Streptomyces*

*griseolus*)、真菌黑曲霉 (*Aspergillus niger*) 和青霉属 (*Penicillium* sp.)<sup>[30]</sup>。目前除了已有报道放线菌浅灰链霉菌可以降解氯磺隆 (Chlorsulfuron-ethyl)、氟磺隆 (Prosulfuron)、氟胺磺隆 (Triflusulfuron-methyl) 等多种磺酰脲类除草剂外,还有研究表明黑曲霉和青霉能催化磺酰脲桥水解,产生相应的磺酰胺和杂环。Boschin 等<sup>[31]</sup>研究发现,在一定条件下,黑曲霉 (*A. niger*) 对氯磺隆以及氟吡嘧磺隆的净降解率分别为 30% 和 32%,主要的降解途径是脲桥断裂,也可以使氯磺隆的芳香环羟基化。杨亚君等<sup>[32]</sup>通过富集培养技术从水样中分离出一株黑曲霉 (*A. niger*),该菌种能以烟嘧磺隆为唯一氮源、碳源,并发现当烟嘧磺隆含量为 2 mg/kg 时,其对药剂的降解率可达 80.31%。沈东升等<sup>[33]</sup>发现一株可降解甲磺隆的青霉属真菌 (*Penicillium*.sp.),该菌株可使甲磺隆在土壤中的半衰期由对照的 27.7 d 缩短到 16.5~18.8 d,明显促进土壤中甲磺隆的降解,且有较好的持续性。

2011 年,李依韦等<sup>[34]</sup>用菌株鞣丸酮丛毛假单胞菌 (*Comamonas testosteroni*) 降解甲磺隆,在适宜条件下培养 36 h,甲磺隆的降解效率达 70% 以上,培养 72 h 甲磺隆几乎完全被降解。张国民等<sup>[35]</sup>从长期使用烟嘧磺隆的玉米田土壤中分离到一株能高效降解烟嘧磺隆的光合细菌红假单胞菌 (*Rhodospseudomonas* sp.),经研究发现该菌株在 pH7.0、温度 30℃ 条件下培养 7 d,对 400 mg/L 烟嘧磺隆的降解率达 32.2%。试验证明这些微生物往往具有多重活性,即同一种微生物可以降解多种磺酰脲类除草剂,并且同一种磺酰脲类除草剂也可被不同的微生物所降解。

**3.3.2 咪唑啉酮类除草剂的降解** 咪唑啉酮类化合物是继磺酰脲类后的第二类超高活性的除草剂,主要用于防除豆科作物田中阔叶杂草及 1 年生禾本科杂草。该类品种杀草谱广、活性高、残留期长,对后茬敏感作物造成药害。此类除草剂在土壤中可通过光解、水解以及微生物降解而消失,而在有氧条件下微生物降解是其降解的主要途径。研究发现可降解咪唑啉酮类除草

剂的微生物主要是细菌,其他真菌和放线菌报道不多。关于咪唑乙烟酸的降解微生物研究很多,主要有节杆菌属、丙酸杆菌属、链霉菌属、酸单胞杆菌属及产碱菌属等<sup>[36]</sup>。霍莹等<sup>[37]</sup>在长期使用咪唑乙烟酸的土壤中筛选出1株大官链霉菌种(*Streptomyces omiyaensis*) (命名为S181),在一定条件下,对咪唑乙烟酸的降解率最高可达到84%。丁伟等<sup>[38]</sup>分离到产碱菌属的一种菌种,在一定条件下,该菌株在72 h内对500 mg/L的咪唑乙烟酸降解率达到90%以上。除此之外,Josh等<sup>[30]</sup>分离得一株哈夫尼希瓦氏菌的菌种(*Shewanella hafniensis*),该菌种能以咪唑乙烟酸为唯一碳源,在一定条件下,3 d内的降解率高达92%。Huang等<sup>[39]</sup>分离出1株假单胞菌(*Pseudomonas* sp.),其能够降解多种咪唑啉酮类除草剂。

**3.3.3 三氮苯类除草剂的降解** 三氮苯类除草剂属于选择性输导型土壤处理剂,主要通过根部吸收,也可被茎叶吸收,易被土壤吸附,残效期长。此类除草剂在环境中不易水解,不易光解,主要依靠微生物进行降解,其微生物降解以混合菌联合代谢为主,纯菌种降解不彻底或者速率较低。三氮苯类除草剂及其代谢物结构中的环可以被裂解且能被利用作微生物生的碳源、氮源。郑柳柳等<sup>[40]</sup>分离到13个能以阿特拉津为唯一氮源生长的细菌菌株,其中11个菌株被鉴定为节杆菌属(*Arthrobacter* sp.),2个菌株被鉴定为*Pseudomonas* sp.,其中降解活力最高为*Arthrobacter* sp. AD30和*Pseudomonas* sp. AD39,并得出混合菌的降解效果好于单菌。此外,闫彩芳等<sup>[41]</sup>分离到一株节杆菌属阿特拉津降解菌X-4,该菌种能以阿特拉津为唯一碳氮源生长,在30℃、pH 7的最适条件下,42 h内对100 mg/L的阿特拉津降解效果为95.7%。杨晓燕等<sup>[42]</sup>在排污河废水中分离出一株高效降解阿特拉津降解菌CS3,最适条件下,48 h内可完全降解50 mg/L的阿特拉津,甚至能够在6 d内将500 mg/L的阿特拉津彻底降解。相关研究表明某些微生物只有在活体中才能表现降解活性,如Ozawa等<sup>[43]</sup>从玉米植株根部以及大豆植株的根瘤中分别分离出放射土壤杆菌,通过

对西玛津的降解研究,表明放射土壤杆菌只有在玉米植株体内才能有效地降解西玛津。

**3.3.4 二苯醚类除草剂的降解** 二苯醚类除草剂氟磺胺草醚在土壤中不易挥发和光解,残留期较长,易对后茬敏感作物造成药害。Liang等<sup>[44]</sup>从长期使用氟磺胺草醚的土壤中分离出一株赖氨酸芽孢杆菌(*Lysinibacillus* sp.),该菌种能以氟磺胺草醚做为唯一碳源生长,在30℃条件下,7 d后降解率可以达到81.32%;此外该菌种还可以有效降解乳氟禾草灵和乙羧氟草醚等除草剂。杨峰山等<sup>[45]</sup>分离出一株假单胞菌属门多萨假单胞菌(*Pseudomonas mendocina*) FB8,该菌株在96 h内对500mg/L氟磺胺草醚的降解率高达86.75%。战徊旭等<sup>[46]</sup>分离筛选出6株能够以氟磺胺草醚为唯一碳源生长的降解菌,其中一个菌株黄曲霉(*Aspergillus flavus*),实验室命名为TZ1985,在查氏液体培养基中培养5 d,对40mg/L氟磺胺草醚的降解率为92.13%。

**3.3.5 其他类除草剂的降解** 土壤中微生物的降解主要受有机质含量和土壤pH影响,一些激素类除草剂如2,4-D、2甲4氯(MCPA)、二氯喹啉酸,在有机质含量高的土壤中降解较快,而在酸性土壤中相对稳定。李伟伟等<sup>[47]</sup>从遭受不同程度2,4-D漂移危害的土壤中,筛选出降解2,4-D的菌株D(5)和D(3)并测得其对2,4-D的降解率分别为91.22%和81.56%。一般情况下,二氯喹啉酸微生物降解很微弱,几乎无挥发和水解。然而,刘华山等<sup>[48]</sup>在含二氯喹啉酸的土壤中,加入博德特氏菌(*Bordetella* sp.),结果表明,该菌种能加速二氯喹啉酸降解,有效改善土壤质量,并且株细胞超微结构及烟叶品质明显得到修复。

### 3.4 植物生长调节剂的应用

有些植物生长调节剂对作物药害具有一定的解毒作用,如芸薹素内酯可以通过提高玉米体内ALS活性来保护玉米免受胺苯磺隆的药害,也可以缓解甲磺隆对水稻的药害。李人一等<sup>[3]</sup>研究发现水杨酸明显有利于受到土壤中苯嘧磺隆危害下烟草的恢复生长。

### 3.5 基因技术应用

应用基因技术解决除草剂残留致使烟草药害的相关研究鲜有报道。自1996年起,相继培育出抗草甘膦基因的作物和抗咪唑啉酮的玉米、水稻、油菜、甜菜等。Matringe等<sup>[49]</sup>将HPPD (p-hydroxyphenylpyruvate dioxygenase) 基因导入烟草后,获得了高抗恶唑草酮除草剂的烟草品种。Webster等<sup>[50]</sup>将烟草AIS突变基因和细菌 *Klebsiella ozaenae* 编码的腈水解酶 (bromoxynil-specific nitrilase, BXN) 基因导入农作物中,分别培育出抗磺酰脲类和溴化苯腈除草剂的转基因烟草品种。

### 3.6 其他方法

近年来,许多学者致力于二氯喹啉酸土壤残留致烟株药害的检测与降解研究。杨森等<sup>[51]</sup>用竹炭与酒糟有机肥配施方式来修复二氯喹啉酸对烟株药害症状,发现120 g竹炭与100 g酒糟有机肥配施对致害烟株药害症状缓解效果最佳,并且施用后30 d和60 d后对致害烟株株高、叶宽的缓解效果显著,基本恢复到正常烟株的性状水平。

## 4 展望

目前对烟田除草剂药害的研究仍旧比较局限,烟草药害的症状研究大部分只是对烟株外表症状特征的简单描述,而药害治理多是从传统角度来考虑和解决问题。因此在遵循传统方式防治烟田除草剂药害的同时,还应从以下方面着手研究:(1)在细胞水平和分子水平的基础上解释除草剂致使烟草产生药害的作用机制;(2)利用安全剂来治理除草剂残留药害,现有的安全剂大部分应用在玉米小麦水稻等作物上,在烟草上应用的很少,而且大部分安全剂起到的是保护作用而不是治疗作用,此外安全剂的作用机制至今没有统一说法,需要进一步从生物分子水平探究除草剂安全剂对作物影响,因此治疗性安全剂的开发尤为重要;(3)利用微生物降解菌,目前造成烟田除草剂药害的主要原因是上茬作物使用的易残留药物或有害代谢物造成,所以研究微生物分解除草剂机理,从而开发新的微生物分解除草剂途径并加快降

解速率,缩短安全间隔期才是解决问题的根本所在;(4)抗除草剂烟草品种选育,运用转基因技术获得抗除草剂烟草品种,如已经获得的抗草甘膦烟草,或者运用自然选择杂交、化学诱变以及植物组织培养法等非转基因技术获得抗药害能力强的品种,从而解决除草剂残留导致烟田药害问题。

### 参考文献:

- [1] 陈泽鹏,王静,万树青,等.广东部分地区烟叶畸形生长的原因及治理的研究[J].中国烟草学报.2004(3):38-41.
- [2] 王静,陈泽鹏,万树青,等.二氯喹啉酸在烟草水培液中的消解动态及对烟苗生长的影响[J].广东农业科学,2007(2):59-61.
- [3] 李人一,陈家盛,胡汝检,等.几种植物生长调节剂对苯嘧磺隆胁迫下烟草的生长作用[J].福建农业学报,2016,31(8):863-868.
- [4] 张燕,陈丹,王春琼,等.烟草农药残留分析检测技术研究进展[J].现代农药,2017,16(6):9-13.
- [5] 郑丽英,杨仁斌,郭正元.双草醚在稻田土壤中的降解及其影响因子的研究[J].土壤通报,2006(3):569-571.
- [6] 邓亚男,柏连阳,金晨钟,等.乙草胺的降解及影响因素研究进展[J].湖南农业科学,2014(20):52-54.
- [7] 王险峰,范志伟,胡荣娟,等.除草剂药害新进展与解决方法[J].农药,2009,48(5):384-388.
- [8] 张晓玮.磺酰脲类除草剂土壤残留降解方式研究进展[J].山东农业工程学院学报,2017,34(10):164-165.
- [9] 陈荣华,张祖清,申昌优,等.烟叶生产中的除草剂药害[J].江西农业学报,2008(7):116-117.
- [10] 褚翠伟,阮志勇,姚利,等.除草剂的微生物降解研究进展[J].生物资源,2018,40(2):93-100.
- [11] Sondhia S, Waseem U, Varma R K. Fungal degradation of an acetolactate synthase (ALS) inhibitor pyrazosulfuronethyl in soil [J]. Chemosphere, 2013, 9: 2140-2147.
- [12] 杨森,黄化刚,龙友华,等.除草剂土壤残留致烟草药害及其修复技术[J].山地农业生物学

- 报, 2017, 36 (3): 61-67.
- [13] 张玉聚, 李继德, 张德胜, 等. 苯氧羧酸类和苯甲酸类除草剂药害诊断与安全应用技术 [J]. 河南农业科学, 2001 (11): 13-15.
- [14] 陈泽鹏, 王静, 万树青, 等. 烟区土壤残留二氯喹啉酸的消解动态 [J]. 农药, 2007 (7): 479-480.
- [15] 李瑾, 刘秀, 金晨钟, 等. 酰胺类除草剂安全剂作用机理及研究应用进展 [J]. 现代农业科技, 2016 (21): 107-109, 114.
- [16] 郝文波, 李丽春, 韩云, 等. 6 种长效除草剂土壤残留致烟草药害症状及其致害临界值 [J]. 广东农业科学, 2013, 40 (9): 80-82, 89.
- [17] 赵爽, 叶非. 咪唑啉酮类除草剂的应用及降解 [J]. 植物保护, 2009, 35 (2): 15-19.
- [18] 彭娟莹, 杨仁斌. 联吡啶类除草剂的作用机制及环境行为 [J]. 农业环境科学学报, 2006, 25 (S1): 435-437.
- [19] 张国宾, 陈永明, 冯秀杰, 等. 6 种烟田安全除草剂联合防治杂草效果及评价 [J]. 广东农业科学, 2015, 42 (8): 56-60.
- [20] 尹乐斌, 刘勇, 张德咏, 等. 磺酰脲类除草剂残留的微生物降解研究进展 [J]. 微生物学通报, 2010 (4): 594-600.
- [21] 陈泽鹏, 邓建朝, 万树青, 等. 二氯喹啉酸致烟草畸形的解毒剂筛选与解毒效果 [J]. 生态环境, 2007 (2): 453-456.
- [22] 黄庆, 刘忠珍, 黄玉芬, 等. 生物炭 + 石灰混合改良剂对稻田土壤 pH、有效镉和糙米镉的影响 [J]. 广东农业科学, 2017, 44 (9): 63-68.
- [23] 刘华山, 王晓军, 韩锦峰, 等. 外源钙对二氯喹啉酸胁迫下烤烟活性氧及保护酶的修复效应 [J]. 河南农业科学, 2012, 41 (2): 64-67.
- [24] 段海明. 毒死蜱降解细菌的筛选、降解特性及其固定化研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
- [25] Hoffmann O L. Inhibition of auxin effects by 2,4,6-trichlorophenoxyacetic acid [J]. Plant Physiology, 1953, 28 (4): 622.
- [26] 彭亮航, 柏连阳, 吴景. 除草剂安全剂的研究进展 [J]. 广东农业科学, 2010, 37 (7): 108-111.
- [27] 范志金, 钱传范, 陈俊鹏, 等. 1, 8- 萘二甲酸酐对高浓度单啉磺隆胁迫下玉米的解毒作用 [J]. 农药学学报, 2004 (4): 55-61.
- [28] 叶非, 张荣全, 李冬梅. 除草剂安全剂 AD-67 的合成与表征 [J]. 东北农业大学学报, 1998 (3): 89-93.
- [29] 叶非, 曲虹云. 安全剂 R-28725 保护玉米免受咪唑乙烟酸药害的机理研究 [J]. 农药学学报, 2002 (1): 18-22.
- [30] Joshi M M, Brown H M, Romesser J A. Degradation of chlorsulfuron by soil microorganisms [J]. Weed Science, 1985, 11: 888-893.
- [31] Boschini G, D'Agostina A, Arnoldi A, et al. Biodegradation of Chlorsulfuron and Metsulfuron-Methyl by *Aspergillus niger* in Laboratory Conditions [J]. Journal of Environmental Science and Health (Part B), 2003, 38 (6): 737-746.
- [32] 杨亚君. 水体中烟啉磺隆的微生物降解代谢研究 [D]. 郑州: 河北农业大学, 2008.
- [33] 沈东升, 方程冉, 周旭辉. 一株甲磺隆降解真菌 (*Penicillium* sp.) 的降解特性研究 [J]. 浙江大学学报, 2002 (5): 73-77.
- [34] 李依韦, 银玲, 薛兰兰. 甲磺隆降解菌的降解特性及降解体系 [J]. 江苏农业科学, 2011, 39 (6): 614-616.
- [35] 张国民, 张松柏, 刘勇, 谭周进. 一株降解烟啉磺隆光合细菌的分离鉴定及降解特性研究 [J]. 环境污染与防治, 2011, 33 (5): 18-21, 26.
- [36] Cantwell J R, Liebl R A, Slife F W. Biodegradation characteristics of imazaquin and imazethapyr [J]. Weed Science, 1989: 815-819.
- [37] 霍莹, 许景钢, 李淑芹, 等. 咪唑乙烟酸降解菌 S181 的分离鉴定及其降解特性 [J]. 环境科学, 2011, 32 (5): 1518-1523.
- [38] 丁伟, 白鹤, 程茁, 等. 咪唑乙烟酸降解菌的分离、鉴定及其降解特性研究 [J]. 环境科学, 2008 (5): 1359-1362.
- [39] Huang X, Pan J J, Liang B, et al. Isolation, characterization of a strain capable of degrading imazethapyr and its use in degradation of the herbicide in soil [J]. Current Microbiology, 2009, 59 (4): 363-367.

- [40] 郑柳柳, 袁博, 朱希坤, 等. 阿特拉津降解菌株的分离、鉴定和工业废水生物处理试验[J]. 微生物学通报, 2009, 36(7): 1099-1104.
- [41] 闫彩芳, 娄旭, 洪青, 等. 一株阿特拉津降解菌的分离鉴定及降解特性[J]. 微生物学通报, 2011, 38(4): 493-497.
- [42] 杨晓燕, 李艳苓, 魏环宇, 等. 阿特拉津降解菌 CS3 的分离鉴定及其降解特性的研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1149-1158.
- [43] Ozawa T, Yoshida R, Wakashiro Y, et al. Improvement of simazine degradation by inoculation of corn and soybean plants with rhizobacteria [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2004, 50(8): 1295-1299.
- [44] Liang B, Lu P, Li H, et al. Biodegradation of fomesafen by strain *Lysinibacillus* sp. ZB-1 isolated from soil [J]. *Chemosphere*. 2009, 77(11): 1614-1619.
- [45] 杨峰山, 刘亮, 刘春光, 等. 除草剂氟磺胺草醚降解菌 FB8 的分离鉴定与土壤修复[J]. 微生物学报, 2011, 51(9): 1232-1239.
- [46] 战徊旭, 任洪雷, 蒋凌雪, 等. 氟磺胺草醚降解菌的分离鉴定及生长特性研究[J]. 作物杂志, 2011(2): 40-44.
- [47] 李伟伟, 李琰, 叶胜龙, 等. 漂移除草剂广灭灵和 2, 4-D 高效降解菌株的筛选[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(11): 143-146.
- [48] 刘华山, 左涛, 韩锦峰, 等. 降解菌 HN36 对二氯喹啉酸胁迫下烟草茎尖和叶片超微结构的影响[J]. 植物生态学报, 2012, 36(3): 262-268.
- [49] Matringe M, Sailland A, Pelissier B, et al.  $\alpha$ -Hydroxyphenylpyruvate dioxygenase inhibitor-resistant plants [J]. *Pest Management Science*, 2005, 61(3): 269-276.
- [50] Webster E P, Masson J A. Acetolactate synthase-inhibiting herbicides on imidazolin-one-tolerant rice [J]. *Weed Science*, 2016, 49(5): 652-657.
- [51] 杨森, 尹显慧, 黄化刚, 等. 竹炭与酒糟有机肥配施对除草剂胁迫下烟草生长的影响[J]. 福建农业学报, 2018, 33(3): 240-247.

(责任编辑 邹移光)