农药学学报 2021, 23(3): 469-475
Chinese Journal of Pesticide Science http://www.nyxxb.cn

·专论与综述·

doi: 10.16801/j.issn.1008-7303.2021.0041

典型咪唑啉酮类除草剂的微生物降解研究进展

王 新*, 侯佳文, 柳文睿, 鲍 佳

(沈阳工业大学 环境与化学工程学院，沈阳 110870)

摘 要：咪唑啉酮类除草剂是中国广泛应用的除草剂，具有杀草谱广、活性高、选择性强等优点，但其在土壤中残留期长，影响后茬作物。本文综述了典型的咪唑啉酮类除草剂甲氧咪草烟、咪唑乙烟酸和甲咪唑烟酸残留对后茬作物的影响，探究了降解部分咪唑啉酮类除草剂 (甲氧咪草烟、咪唑乙烟酸和咪唑烟酸) 的微生物所属类群及降解途径，分析了影响微生物降解咪唑啉酮类除草剂的因素，对目前除草剂污染修复存在的问题进行了讨论，并对未来发展进行了展望。该文对研究咪唑啉酮类除草剂的微生物降解有一定的参考作用。

关键词: 咪唑啉酮类除草剂；后茬作物；微生物降解；降解途径；研究进展

中图分类号：X592；S481.8；TQ450.2 **文献标志码：**A **文章编号：**1008-7303(2021)03-0469-07

Progress in microbial degradation of typical imidazolinone herbicides

WANG Xin*, HOU Jiawen, LIU Wenrui, BAO Jia

(*School of Environmental and Chemical Engineering*, *Shenyang University of Technology*, *Shenyang* 110870, *China*)

Abstract: Imidazolinone herbicides are widely used in China. Their advantages include wide herbicide spectrum, high activity and strong selectivity, but the pesticide remains in soil for a long time. In this paper, the effects of typical imidazolinone herbicides (imazamox, imazethapyr and imazapic) residues on succeeding crops, and investigated the microbial groups and degradation pathways of partially imidazolinone herbicides (imazamox, imazethapyr and imazapyr), the factors affecting the degradation of imidazolinone herbicides by microorganisms were analyzed. The existing problems and prospects for herbicide remediation were pointed out. It is helpful for the study on the microbial degraders of imidazolinone herbicides.

Keywords: imidazolinone herbicide; succeeding crops; microbial degradation; degradation pathway; research progress

咪唑啉酮类除草剂是一类广泛应用于农作物杂草防治的手性除草剂[1]，现有 6 个商品化品种，包括甲氧咪草烟 (imazamox)、咪唑乙烟酸 (imazethapyr)、甲咪唑烟酸 (imazapic)、咪唑烟酸 (imazapyr)、咪草酸 (imazamethabenz-methyl) 及咪唑喹啉酸 (imazaquin)[2]，其中后两种除草剂目前还未见其相关研究报道。该类除草剂既可用作土壤处理剂也可用作茎叶处理剂，广泛用于大豆田、花生地及林地杂草的防除[3]。但随着农药残留及其淋溶入地下水，对农作物的轮作及水生生态系统产生了一定影响[4]。

被农药污染的土壤可以通过物理、化学和生

收稿日期：2020-06-22；**录用日期：**2020-10-22.

基金项目：国家自然科学基金面上基金项目 (21976124，31670515)；辽宁省教育厅科学研究项目 (LJGD2020005).

作者简介：*王新，通信作者 (Author for correspondence)，女，副教授，主要研究方向为环境生物修复技术及污染土壤修复，**E-mail：**wangxin110870@sut.edu.cn

物技术进行修复[5-6]。其中，生物修复因其效果好、无二次污染等特点，已成为清除环境中农药污染的重要手段[7-8]。自 20 世纪起，随着对除草剂残留降解新方法的不断出现，对除草剂具有较好降解作用的微生物菌株逐渐被发现并得以分离，部分研究成果取得了重大的突破[9]。丁伟等[10] 从生产咪唑乙烟酸化工厂排污口的污泥和长期施用咪唑乙烟酸的混合土壤中分离得到 1 株产碱菌属 *Alcaligenes* sp.，其在 pH=5 及温度 25 ℃ 条件下培养 3 d，对 500 mg/L 的咪唑乙烟酸的降解率可达 90%。鉴于除草剂的微生物降解是当前环境研究中的热点问题，本文对典型的可降解咪唑啉酮类除草剂的微生物所属类群及降解途径的研究进展进行简要综述，指出当前除草剂污染修复存在的问题，并对未来的应用前景进行展望。

1 咪唑啉酮类除草剂残留对后茬作物的影响

随着除草剂使用量的增加，有 80%~90% 的除草剂在使用过程中会进入土壤，并主要残留在 0~20 cm 深度的耕作层土壤中[11]。土壤中残留的除草剂对后茬敏感作物的危害较为突出，了解除草剂残留对后茬作物的安全性，对科学合理使用除草剂，解决作物轮作等生产实际问题具有一定指导意义。

1.1 咪唑啉酮类除草剂残留对后茬作物的影响原因

咪唑啉酮类除草剂对后茬作物产生影响的原因可归纳为以下几点[12]：1) 水稻、玉米等经济作物种植面积扩大，轮作复杂。2) 土地转包手续简单，无健全的技术档案，无法正确安排后茬作物。3) 除草剂受自然环境的不良影响，如遇到高温、干旱、大风等气候时使用者会随意加大除草剂的用量。4) 对于农田危害严重且难以防治的杂草，如苣荬菜等，使用者往往会盲目混配除草剂，或增加除草剂用量。5) 施药机械落后，导致药液喷施不均匀，造成后茬作物出现点、片药害。

1.2 咪唑啉酮类除草剂残留对后茬敏感作物的影响

1.2.1 甲氧咪草烟的影响 甲氧咪草烟是咪唑啉酮类除草剂中残效期短的品种，施药后土壤中的药剂绝大部分会分解失效，因而对绝大多数后茬作物安全，在一年一熟地区的轮作中，不会伤害后茬作物，但当混作、间种及复种时，则需考虑不同作物的敏感性及间隔时期。甲氧咪草烟在有效成分为 40、60 g/hm^2 下施药 1 年后，可以安全种植小麦、玉米和白瓜籽，2 年后可以安全种植油菜、甜菜、白菜、亚麻和马铃薯，但高剂量 (有效成分 80、120 g/hm^2) 甲氧咪草烟处理则对敏感作物有一定的药害[13]。

1.2.2 咪唑乙烟酸的影响 咪唑乙烟酸被施用后，当年即可降解 96% 以上，剩余不足 4% 的咪唑乙烟酸会长期残留，很难降解，可对后茬敏感作物造成较为严重的药害[14]，其主要影响如表 1[13] 所示。也有研究表明：咪唑乙烟酸残留可抑制油菜的株高，使植株叶片中的抗氧化酶发生变化，其中超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT) 活性降低，过氧化物酶 (POD) 活性升高，同时会降低叶片中叶绿素含量，增加丙二醛 (MDA) 含量[15]；两种后茬作物相比，油菜比小麦对咪唑乙烟酸更加敏感，在咪唑乙烟酸高浓度剂量处理下，油菜植株全部死亡[16]。

表 1 咪唑乙烟酸在 75 g/hm^2 的施用剂量下对后茬作物的影响[13]

Table 1 Effects of imazethapyr on succeeding crops at a dosage of 75 g/hm^2[13]

后茬作物 Succeeding crops	1 年后药害 Phytotoxicity after one year
小麦，玉米 Wheat, corn	正常生长 Normal growth
油菜 Oilseed rape	严重抑制，植株矮小 Severe inhibition, plant dwarfism
甜菜 Beet	严重抑制，大量死亡 Severe suppression, a large number of plants died
白菜 Cabbage	抑制，少量死亡 Suppression, a small number of plants died
白瓜子 Pumpkin seed	叶片皱缩 Leaves shrivel
亚麻 Flax	轻微抑制，叶色发黄 Slightly suppressed, yellowish leaves

1.2.3 甲咪唑烟酸的影响 甲咪唑烟酸残留对黄瓜、油菜、小麦和玉米等作物生长均存在一定的抑制作用，其中对根长的 IC_{10} 值分别为 0.013、0.68、13.14 和 85.87 μg/kg，对株高的 IC_{10} 值分别为 7.32、37.61、133.28 和 345.56 μg/kg。可以看出，黄瓜和油菜对残留的甲咪唑烟酸最为敏感，小麦和玉米耐性最强[17]。有研究表明，随着土壤中甲咪唑烟酸残留量的增加，麦苗的株高、单株鲜重及整株干重呈现降低趋势，麦苗叶片叶绿素含量也逐渐降低，暗呼吸速率上升，对麦苗光合速率有显著的抑制作用[18]。以上结果说明，甲咪唑烟酸在土壤中残留会对后茬小麦的生长产生严重影响，在使用过程中，应注意控制甲咪唑烟酸使用剂量和安全间隔期[19]。

2　降解咪唑啉酮类除草剂的微生物种类及特性

在厌氧条件下，土壤微生物几乎不分解咪唑啉酮类除草剂，但在有氧条件下，微生物降解则是咪唑啉酮类除草剂的主要降解方式。

目前，对于可降解咪唑啉酮类除草剂微生物的研究集中于土壤中的细菌，其他如真菌和放线菌的研究报道不多。其中有关咪唑乙烟酸降解菌的研究报道最多，主要有丙酸杆菌属 *Propionibacterium*、海球菌属 *Marinococcus*[20]，还有一种曲霉属真菌黑曲霉 *Aspergillus niger*[21] 以及一种放线菌大宫链霉菌 *Streptomyces omiyaensis*[22]。臧海莲等[23] 从长期生产咪唑乙烟酸的农药厂排污口处的污泥及污水中分离出 1 株能够降解咪唑乙烟酸的拜叶林克氏菌 *Beijerinckia* sp.，该菌株在含 100 mg/L 咪唑乙烟酸的无机盐基础培养液中培养 5 d 后，可使咪唑乙烟酸降解 80.0% 以上。王学东等[24-26] 从长期使用咪唑烟酸的非耕地土壤中分离出 2 株该除草剂的高效降解菌，分别为荧光假单胞菌 II 型 *Pseudomonas fluorescenes* biotype II 和蜡状芽孢杆菌 *Bacillus cereus*，其在 5 d 内对咪唑烟酸的降解率分别可达 89.4% 和 95.6%。杨鑫[27] 从长期使用甲氧咪草烟的土壤中分离出 14 株能够以甲氧咪草烟为唯一碳源生长的微生物，其中细菌中鲍氏不动杆菌 *Acinetobacter baumannii* 在培养 48 h 后对甲氧咪草烟的降解率达到 92.5%。表 2 为部分可降解的咪唑啉酮类除草剂的微生物种类及特性。

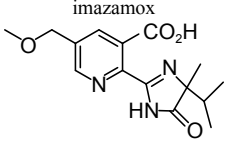
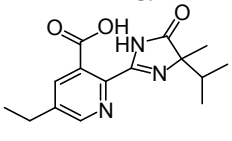
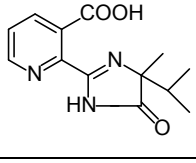
3　咪唑啉酮类除草剂的微生物降解途径

3.1　咪唑烟酸的降解途径

王学东等[34] 对浙江华家池的非灭菌小粉土样

表 2　部分可降解咪唑啉酮类除草剂的微生物种类及特性

Table 2　Microbial species and characteristics of partially biodegradable imidazolinone herbicides

除草剂名称及结构 Name and structure of herbicide	微生物 Microorganism	降解特性及降解率 Degradation characteristic and degradation rate	物化性质 Physico-chemical property
甲氧咪草烟 imazamox 	鲍氏不动杆菌 *Acinetobacter baumannii* IB5[28]	37 ℃, pH 7.0, 400 mg/L, 48 h: 98.6%	制剂为清黄色黏性液体，密度 1.39 g/cm³，蒸气压<0.013 MPa，熔点为166 ℃，溶解度为：丙酮 29.3 g/L The preparation is a clear yellow viscous liquid with a density of 1.39 g/cm³, a vapor pressure of <0.013 MPa, a melting point of 166 ℃, and a solubility in acetone: 29.3 g/L
咪唑乙烟酸 imazethapyr 	脱色希瓦菌 *Shewanella decolorationis* P14[29]	30 ℃, pH 6.0, 100 mg/L, 5 d: 92.0%	工业品为黄色到棕色结晶，有刺激性气味。纯品为白色无臭结晶体，熔点 169~173 ℃，蒸气压 < 0.013 MPa(60 ℃)，丙酮中溶解度 (25 ℃)为48.2 g/L[30]，密度 1.01 g/cm³，沸点与水接近，在酸性及中性条件下稳定，有腐蚀性 Industrial products are yellow to brown crystals with pungent odor. The pure product is white odorless crystal. melting point 169-173 ℃, vapor pressure < 0.013 MPa (60 ℃), solubility (25 ℃) in acetone: 48.2 g/L[30], density 1.01 g/cm³, boiling point close to water, stable under acidic and neutral conditions, corrosive
	大宫链霉菌 *Streptomyces omiyaensis* S181[22]	30 ℃, pH 7.0, 200 mg/L, 5 d: 84.0%	
	短密木霉 *Trichoderma brevicompactum*[31]	25 ℃, pH 8.0, 100 mg/kg, 7 d: 78.4%	
	表皮短杆菌 *Brevibacterium epidermidis* IM9603[32]	26.2 ℃, pH 5.5, 50 mg/L, 7 d: >90.0%	
	粪产碱菌 *Alcaligenes faecalis* P2[33]	30 ℃, pH 7.0, 100 mg/kg, 2 d: 87.8%	
	曲霉属真菌黑曲霉 *Aspergillus niger* LZ1[21]	30 ℃, pH 7.0, 200 mg/L, 8 d: 72.5%	
咪唑烟酸 imazapyr 	荧光假单胞菌 II 型 *Pseudomonas fluorescenes* biotype II ZJX-5[24]	30 ℃, pH 较高, 100 mg/L, 5 d: 89.4%	灰白色晶体，密度 1.34 g/cm³，熔点 169~173 ℃，沸点 425.1 ℃(标况)，折射率1.61，闪光点 210.9 ℃，储存条件0~6 ℃ Off-white crystal, density: 1.34 g/cm³, melting point: 169-173 ℃, boiling point: 425.1 ℃ (standard condition), refractive index: 1.61, flash point: 210.9 ℃, storage conditions: 0-6 ℃

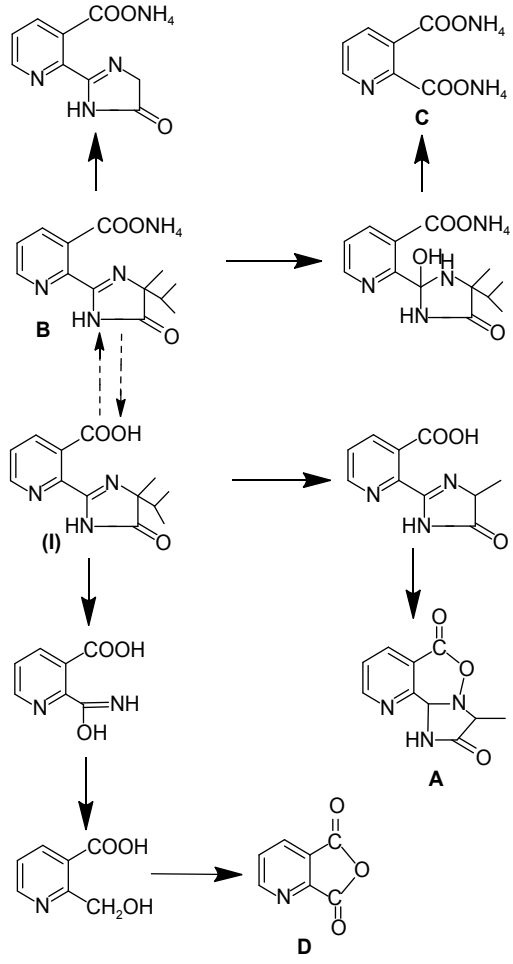
品进行提取、净化，通过液相色谱-质谱联用 (LC-MS) 检测到吡啶-2,3-并六氢嗪酮并-5-甲基四氢咪唑啉酮 **(A)**、2-(2-吡啶-3-甲酸铵)-二氢化咪唑啉酮 **(B)**、2,3-吡啶二甲酸二铵 **(C)** 和吡啶-2,3-二甲酸酐 **(D)** 4 种产物。推测咪唑烟酸的降解途径如图式 1 所示。其中：产物 A 主要来自咪唑烟酸 **(I)** 中异丙基的断裂、咪唑啉酮环的开裂及其与羧酸结构的重排；产物 B 主要来自咪唑烟酸中甲基和异丙基的断裂及在土壤中羧酸可能被微生物转化成更为稳定的羧酸铵；产物 C 主要来自其甲基和异丙基的断裂、咪唑啉酮环的开裂；产物 D 主要来自咪唑啉酮环的开裂和重排。

3.2 咪唑乙烟酸的降解途径

金雷[35] 从长期受咪唑乙烟酸污染的农田土壤中分离到 1 株咪唑乙烟酸降解菌芽孢杆菌属 *Bacillus* sp. QC-13，通过对咪唑乙烟酸培养物中代谢产物结构的分析，推测其在菌株 QC-13 作用下的代谢途径 (图式 2)：首先，从咪唑乙烟酸 **(II)** 的吡啶环上脱去 1 个羧基，得到化合物 **A'**，分子式为 $C_{14}H_{19}N_3O$；然后，从化合物 **A'** 的咪唑环上脱去异丙基，得到产物 **B'**，分子式为 $C_{11}H_{13}N_3O$。

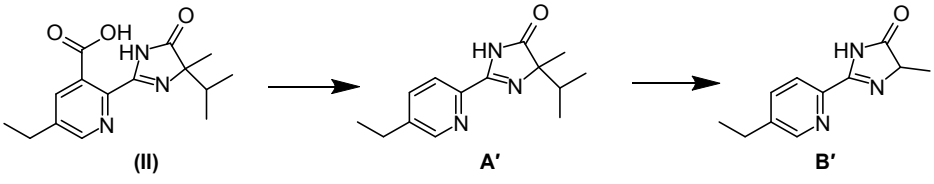
3.3 甲氧咪草烟的降解途径

Liu 等[28] 从被甲氧咪草烟污染的大豆田中分离出鲍氏不动杆菌 *Acinetobacter baumannii* IB5，并对 IB5 降解甲氧咪草烟的代谢途径进行了分析。研究中共获得了 **a**, **b**, **c**, **d** 4 种降解产物，推测其可能的降解途径为：首先，甲氧咪草烟 **(III)** 通过断裂咪唑环部分的 C—N 键而开环，形成中间产物 **e** ($C_{15}H_{21}N_3O_4$)；然后，产物 **e** 脱去氨基甲酰基形成中间体 **f** ($C_{14}H_{18}N_2O_3$)；**f** 中吡啶环上羧基经还原形成醛基，得到产物 **a** ($C_{14}H_{18}N_2O_2$)；**a** 中的 C=N 双键经水解反应断裂形成羧基，得到产物 **b**；继而产物 **b** 吡啶环上的甲氧基被羟基取代，生成产物 **c**；最后产物 **c** 脱羧形成产物 **d** (图式 3)。



图式 1 咪唑烟酸在土壤中可能的代谢途径[34]

Scheme 1 Possible metabolic pathways of imazapyr in soil[34]



图式 2 咪唑乙烟酸的降解途径[35]

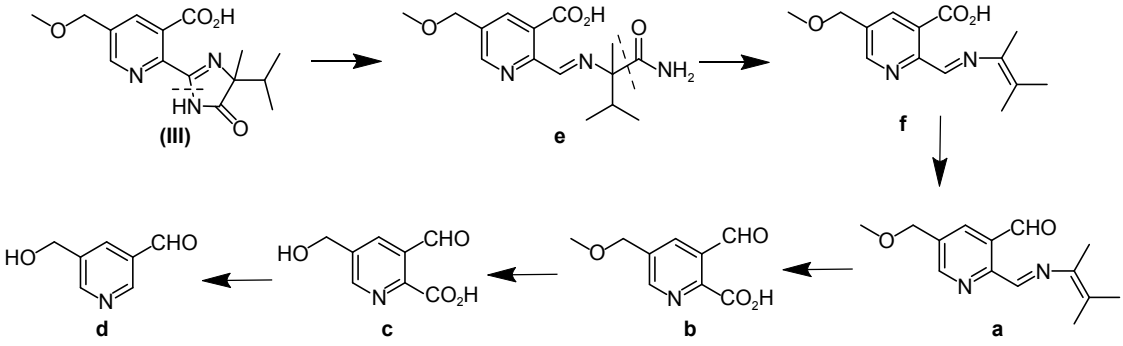
Scheme 2 Degradation pathways of imazethapyr[35]

4 微生物降解咪唑啉酮类除草剂的影响因素

在微生物降解咪唑啉酮类除草剂的过程中，还会受到一些影响因子的限制。一般来说，一切能够对微生物活性产生影响的因素均能影响其对除草剂的降解，主要表现在以下几个方面。

4.1 微生物自身的影响

研究表明，生长环境的不同会使不同种类或同种异株的微生物在对除草剂的降解性能上存在差异[36]。同时，微生物的数量、活性及其对环境的适应能力等均可影响微生物对除草剂的降解能力。Wang 等[37] 指出，咪唑烟酸在未灭菌土壤中的降解速率比在灭菌土壤中的降解速率快 2.3~4.4



图式 3　甲氧咪草烟的降解途径[28]

Scheme 3　Degradation pathways of imazamox[28]

倍，表明土壤微生物在除草剂降解过程中起着至关重要的作用。倪子钧[38] 研究表明，通过向含有甲氧咪草烟的土壤中投加链霉菌 Streptomycetaceae JX02 后，甲氧咪草烟在土壤中的半衰期缩短了近 18 倍，说明该链霉菌可以高效降解甲氧咪草烟。

4.2　除草剂本身的影响

一般情况下，除草剂的化学结构以及底物的初始浓度等也会影响微生物对其的降解。由于咪唑烟酸中含有易于产生氢键的吡啶环，因此会比其他咪唑啉酮类除草剂具有更好的极性，且在水中更易溶解，因此在土壤中具有更高的生物利用度，可能对微生物具有毒性作用[39]。除草剂底物的初始浓度对微生物降解能力影响很大，浓度过高可能会产生有毒中间物质，从而使微生物的生长受到抑制；浓度过低无法为微生物提供足够的可利用物质促进其生长，进而影响其降解效果[40]。Zhang 等[41] 报道，在大豆生长的土壤中施用咪唑乙烟酸，按照田间施用剂量使用，其对微生物的生长无不良影响，但加大剂量施用时则对微生物表现出毒性作用，最终会影响到微生物对除草剂的降解效果。

4.3　温度、湿度的影响

微生物及其产生的酶系均需要在适宜的温、湿度条件下进行增殖和代谢，不同的微生物所适宜的生长温度条件也不同。李志国[33] 的研究表明，随着温度升高，粪产碱菌 *Alcaligenes faecalis* P2 对咪唑乙烟酸的降解率呈现先升高后降低的趋势，这是因为温度过高或过低都会抑制微生物及其酶的活性，从而影响微生物对除草剂的降解。水是微生物生命活动的基本条件之一，土壤中的水分直接影响微生物的繁殖及代谢。湿度高的土壤会使微生物保持较高的活性，进而刺激微生物对甲咪唑烟酸的降解[42]，但水量过多会导致土壤通气性较差，不利于微生物的生长，进而影响其对除草剂的降解。

4.4　pH 值的影响

不同的微生物种群对其生长环境的 pH 值要求也存在差异。通常，细菌在中性或偏碱的条件下生长得更好，而真菌更适宜在微酸环境中生长[43]。吕翻洋等[32] 研究发现，菌株 IM9603 在 pH 值为 5.5 时对咪唑乙烟酸的降解率最高，过高或过低的 pH 值均会改变细胞内酶活性，从而影响微生物的繁殖，甚至会导致死亡。

5　小结与展望

咪唑啉酮类除草剂长期使用所产生的农药残留易对土壤环境及后茬敏感作物造成影响，因此寻找一种绿色高效的方法降低其在环境中的残留依然是世界各国研究的热点。大量文献表明，除草剂可以通过植物、动物、微生物和紫外线辐射等作用使其降解，但微生物对除草剂的降解因其降解效果好、无二次污染等特点被科研人员大量研究并取得成果，特别是细菌、真菌、放线菌和藻类，目前细菌的研究较为深入。

由于咪唑啉酮类除草剂苗后处理具有较长的残效期，将其应用于耕地时需要注意不同使用剂量下对后茬作物的安全性，并可安排一些耐咪唑啉酮类的作物作为后茬作物。目前，对该类除草剂的微生物降解研究已经取得了较大进展，但在实际应用中还存在许多问题，主要的限制因素是这些降解微生物的活性易受到复杂的环境条件影响。因此建议：进一步筛选和驯化生物修复菌株，构建菌种库；加强微生物代谢途径研究，控制其转化途径；强化降解基因的结构与功能研究，

重组构建功能优化的基因工程菌株；优化组合修复技术，如动物-微生物、植物-微生物、物化方法-微生物等组合修复。

参考文献 (References):

[1] HU M F, LIU K F, QIU J S, et al. Behavior of imidazolinone herbicide enantiomers in earthworm-soil microcosms: degradation and bioaccumulation[J]. Sci Total Environ, 2020, 707: 135476.

[2] 田发军, 吴艳兵, 赵欢欢, 等. 土壤微生物降解咪唑啉酮类除草剂研究进展[J]. 河南农业科学, 2014, 43(7): 1-5.
TIAN F J, WU Y B, ZHAO H H, et al. Progress on degradation of imidazolinone herbicides by soil microorganisms[J]. J Henan Agric Sci, 2014, 43(7): 1-5.

[3] 宋慧, 李海峰, 付楠, 等. 咪唑啉酮类除草剂及其抗性作物的发展现状[J]. 河北农业科学, 2018, 22(3): 38-41.
SONG H, LI H F, FU N, et al. Development status of imidazolinone herbicides and their resistant crops[J]. J Hebei Agric Sci, 2018, 22(3): 38-41.

[4] 季彬, 杜军国, 祁宏山, 等. 微生物菌剂在土壤修复中的应用[J]. 吉林农业, 2016(16): 93.
JI B, DU J G, QI H S, et al. Application of microbial agents in soil remediation[J]. Agric Jilin, 2016(16): 93.

[5] FALCIGLIA P P, GUIDI G D, CATALFO A, et al. Remediation of soils contaminated with PAHs and nitro-PAHs using microwave irradiation[J]. Chem Eng J, 2016, 296: 162-172.

[6] JIA J L, WANG B B, WU Y, et al. Environmental risk controllability and management of VOCs during remediation of contaminated sites[J]. Soil Sediment Contam: Int J, 2016, 25(1): 13-25.

[7] CYCOŃ M, MROZIK A, PIOTROWSKA-SEGET Z. Bioaugmentation as a strategy for the remediation of pesticide-polluted soil: a review[J]. Chemosphere, 2017, 172: 52-71.

[8] SILVA V P, MOREIRA-SANTOS M, MATEUS C, et al. Evaluation of *Arthrobacter aurescens* strain TC1 as bioaugmentation bacterium in soils contaminated with the herbicidal substance terbuthylazine[J]. PLoS One, 2015, 10(12): e0144978.

[9] HUANG X, HE J, YAN X, et al. Microbial catabolism of chemical herbicides: microbial resources, metabolic pathways and catabolic genes[J]. Pestic Biochem Physiol, 2017, 143: 272-297.

[10] 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, 29(5): 1359-1362.
DING W, BAI H, CHENG Z, et al. Isolation, identification and degradation characteristics of imazethapyr degrading bacteria[J]. Chin J Environ Sci, 2008, 29(5): 1359-1362.

[11] 张可鑫. 5 种大豆田除草剂残留的垂直分布及对后茬作物生长的影响 [D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020.
ZHANG K X. Vertical distribution of herbicide residues in 5 soybean fields and their effects on growth of succeeding crops[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural Reclamation University, 2020.

[12] 刘延, 刘波, 王险峰, 等. 中国化学除草问题与对策[J]. 农药, 2005, 44(7): 289-293.
LIU Y, LIU B, WANG X F, et al. Problems and solutions for chemical weed control in China[J]. Pesticides, 2005, 44(7): 289-293.

[13] 黄春艳, 陈铁保, 王宇, 等. 咪唑啉酮类除草剂对后茬作物安全性研究初报[J]. 农药学学报, 2001, 3(2): 29-34.
HUANG C Y, CHEN T B, WANG Y, et al. Study on safety of imidazolinone herbicides to succeeding crops[J]. Chin J Pestic Sci, 2001, 3(2): 29-34.

[14] 史伟. 咪唑乙烟酸对土壤微生物、酶活性的影响及其降解真菌的筛选 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
SHI W. Effects of imazethapyr on soil microorganism, enzyme activity and isolation of imazethapyr degrading fungi[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science, 2010.

[15] 李新安, 李广领, 谢兰芬, 等. 咪唑乙烟酸残留对后茬作物油菜生理指标的影响[J]. 农药, 2015, 54(9): 671-673.
LI X A, LI G L, XIE L F, et al. Effects of imazethapyr residue on physiological indices of succeeding crop of rapeseed[J]. Agrochemicals, 2015, 54(9): 671-673.

[16] 谷珊山. 两种长残效除草剂对作物的影响及药害修复 [D]. 新乡: 河南科技学院, 2015.
GU S S. The effects of two herbicides on crop and remediation of biochar[D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2015.

[17] 苏旺苍, 孙兰兰, 吴仁海, 等. 甲咪唑烟酸模拟残留对后茬作物的敏感性[J]. 农药, 2014, 53(4): 260-262.
SU W C, SUN L L, WU R H, et al. Sensitivity of succeeding crops to simulated imazapic residue in laboratory[J]. Pesticides, 2014, 53(4): 260-262.

[18] 苏旺苍, 孙兰兰, 张强, 等. 甲咪唑烟酸在土壤中的残留对后茬小麦幼苗生长和光合作用的影响[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(6): 168-173.
SU W C, SUN L L, ZHANG Q, et al. Effects of imazapic residues on the growth and photosynthetic parameters of wheat seedlings as succeeding crop[J]. J Triticeae Crop, 2013, 33(6): 168-173.

[19] 苏旺苍. 甲咪唑烟酸残留对后茬作物的影响及土壤修复研究 [C]//第十一届全国杂草科学大会论文集. 长沙, 2013: 101.
SU W C. Effects of imazapic residue on succeeding crops and soil remediation[C]//The 11th National Weed Science Congress. Changsha, 2013: 101.

[20] 刘亚光, 庞福德. 咪唑乙烟酸高效降解菌降解性能的研究[J]. 植物保护, 2009, 35(2): 63-66.
LIU Y G, PANG F D. Degradation characteristics of the highly efficient degradative bacteria of imazethapyr[J]. Plant Prot, 2009, 35(2): 63-66.

[21] 曹知平, 许景钢, 李淑芹, 等. 黑曲霉 LZ1 降解咪唑乙烟酸的特性[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(7): 66-70.
CAO Z P, XU J G, LI S Q, et al. Degradation of imazethapyr by *Aspergillus* sp. LZ1[J]. J Northeast Agric Univ, 2010, 41(7): 66-70.

[22] 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.
HUO Y, XU J G, LI S Q, et al. Isolation and identification of imazethapyr degradable actinomyces S181 and its degradation characteristics[J]. Environ Sci, 2011, 32(5): 1518-1523.

[23] 臧海莲, 熊明华, 成小松, 等. 一株咪唑乙烟酸降解菌的分离鉴定及其降解特性[J]. 作物杂志, 2010(3): 40-44.
ZANG H L, XIONG M H, CHENG X S, et al. Isolation and characteristics of a imazethapyr degradation bacterium[J]. Crops, 2010(3): 40-44.

[24] 王学东, 欧晓明, 王慧利, 等. 除草剂咪唑烟酸在土壤中的微生物降解研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 156-159.
WANG X D, OU X M, WANG H L, et al. Study on degradation of imzapyr by microorganism in soil[J]. Acta Pedol Sin, 2004, 41(1):

156-159.

[25] 王学东, 欧晓明, 王慧利, 等. 除草剂咪唑烟酸高效降解菌的筛选及其降解性能的研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(1): 102-105.
WANG X D, OU X M, WANG H L, et al. Optimized cultivation of highly-efficient degradation bacterial strains and their degradation ability towards imazapyr[J]. J Agro - Environ Sci, 2003, 22(1): 102-105.

[26] 王学东, 欧晓明, 王慧利, 等. 咪唑烟酸高效降解菌的降解特性[J]. 中国环境科学, 2003, 23(1): 21-24.
WANG X D, OU X M, WANG H L, et al. The degradation characteristics of highly efficient degradation bacteria of imazapyr[J]. China Environ Sci, 2003, 23(1): 21-24.

[27] 杨鑫. 咪唑啉酮类除草剂降解菌的分离鉴定及降解特性研究 [D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2011.
YANG X. Isolation, identification and degradation characteristics of imidazolinone herbicides degradation bacteria[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2011.

[28] LIU C G, YANG X, LAI Y, et al. Imazamox microbial degradation by common clinical bacteria: *Acinetobacter baumannii* IB5 isolated from black soil in China shows high potency[J]. J Integr Agric, 2016, 15(8): 1798-1807.

[29] 陈玉洁. 咪唑乙烟酸降解菌分离、鉴定及降解特性研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2011.
CHEN Y J. Isolation, identification and characterization of an imazethapyr-degrading strain[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2011.

[30] 刘长令. 世界农药大全：除草剂卷 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
LIU C L. World pesticide encyclopedia: herbicide volume[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.

[31] 刘晴, 刘宇彤, 邓世林, 等. 短密木霉降解咪唑乙烟酸候选基因的筛选[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(4): 63-70.
LIU Q, LIU Y T, DENG S L, et al. Screening candidate genes of degradating imazethapyr by *Trichoderma brevicompactum*[J]. J Huazhong Agric Univ, 2019, 38(4): 63-70.

[32] 吕翻洋, 许泽华, 毛晓洁, 等. 咪唑乙烟酸降解菌的分离鉴定及降解条件优化[J]. 生物技术通报, 2017, 33(10): 163-168.
LÜ F Y, XU Z H, MAO X J, et al. Isolation and identification of an imazethapyr-degrading bacterium, and optimization of biodegradation conditions[J]. Biotechnol Bull, 2017, 33(10): 163-168.

[33] 李志国. 降解菌、大豆和咪唑乙烟酸对土壤微生物多样性的影响 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.
LI Z G. Effects of highly efficient degrading microbe, soybean and imazethapyr on soil microbial diversity[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018.

[34] 王学东, 王慧利, 樊德方. 咪唑烟酸在土壤中的微生物降解及其代谢物分析[J]. 环境科学研究, 2004, 17(6): 42-45, 53.
WANG X D, WANG H L, FAN D F. Degradation and metabolism of imazapyr by microorganisms in soils[J]. Res Environ Sci, 2004, 17(6): 42-45, 53.

[35] 金雷. 咪草烟降解菌株 QC-13 的分离鉴定、降解特性及应用研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
JIN L. Isolation, identification, degradating characteristics and soil bioremediation application of imazethapyr-degrading strain QC-13[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.

[36] 卢美名, 尹雯悦, 刘传龙, 等. 除草剂微生物降解的研究进展[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(3): 5-8.
LU M M, YIN W Y, LIU C L, et al. Research progress on biodegradation of herbicides[J]. Hubei Agric Sci, 2019, 58(3): 5-8.

[37] WANG X D, LIU X J, WANG H L, et al. Utilization and degradation of imazaquin by a naturally occurring isolate of *Arthrobacter crystallopoietes*[J]. Chemosphere, 2007, 67(11): 2156-2162.

[38] 倪子钧. 烟嘧磺隆和甲氧咪草烟优势菌的筛选及其降解特性研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020.
NI Z J. Screening and degradation characteristics study of nicosulfuron and imazamox degrading bacteria[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2020.

[39] RECK L, REIMCHE G B, ALVES C R, et al. Efeito dos herbicidas imazapire imazapiquena comunidade fitoplanctônica em lavoura de arroz irrigado[J]. Iheringia Ser Bot, 2018, 73(2): 298-307.

[40] 孙诗雨. 复合菌系对磺酰脲类除草剂降解性能的研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
SUN S Y. Study on degradation property of sulfonylurea herbicides by composite bacteria[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.

[41] ZHANG C P, LIU X G, DONG F S, et al. The effect of imazethapyr on soil microbes in soybean fields in northeast China[J]. Chem Ecol, 2010, 26(3): 173-182.

[42] 陈旭艳, 葛宝坤, 常春艳. 咪唑啉酮类除草剂环境行为研究进展[J]. 精细化工中间体, 2010, 40(2): 1-6.
CHEN X Y, GE B K, CHANG C Y. Advances in studies on the environmental behaviors of imidazolinone herbicides[J]. Fine Chem Intermed, 2010, 40(2): 1-6.

[43] 张悦周, 吴耀国, 胡思海, 等. 微生物降解有机磷农药的研究进展[J]. 化工环保, 2007, 27(6): 514-519.
ZHANG Y Z, WU Y G, HU S H, et al. Research advances in biodegradation of organic phosphorus pesticides[J]. Environ Prot Chem Ind, 2007, 27(6): 514-519.

(责任编辑: 金淑惠)