

## 5种稻田除草剂对羊角月芽藻的生长抑制研究

沈艳, 李沛明, 孙如意, 李蕾, 周凤艳, 高同春, 张勇\*

(安徽省农业科学院植物保护与农产品质量安全研究所, 安徽合肥 230031)

**摘要** [目的] 评价5种稻田除草剂(37.5%二甲四氯钠·灭草松水剂、20%嘧啶肟草醚·氰氟草酯可分散油悬浮剂、30%五氟磺草胺·吡嘧磺隆·丙草胺可分散油悬浮剂、5%丙炔噁草酮乳油、80%丙炔噁草酮可湿性粉剂)对羊角月芽藻生长的抑制作用。[方法] 参照《化学农药环境安全评价试验准则》, 分别测定5种供试药剂对羊角月芽藻生物量增长的抑制率和生长率的抑制率, 计算半效应浓度 $EyC_{50}$ 和 $ErC_{50}$ 。[结果] 37.5%二甲四氯钠·灭草松水剂对羊角月芽藻表现为低毒; 20%嘧啶肟草醚·氰氟草酯、30%五·吡·丙草胺可分散油悬浮剂、5%丙炔噁草酮乳油、80%丙炔噁草酮可湿性粉剂对羊角月芽藻均表现中高毒性, 对绿藻存在较大风险。[结论] 稻田高毒除草剂在实际生产应用中应严格控制用量, 尽量减小其对绿藻及水生生态系统造成危害。

**关键词** 稻田除草剂; 羊角月芽藻; 生物量增长抑制; 生长率抑制

**中图分类号** S482.4 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2019)19-0148-04

**doi**: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.19.043



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Study on the Growth Inhibition of Five Paddy Herbicides on *Pseudokirchneriella subcapitata*

SHEN Yan, LI Pei-ming, SUN Ru-yi et al (Institute of Plant Protection and Agro-Products Safety, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei, Anhui 230031)

**Abstract** [Objective] To evaluate the growth inhibition of five paddy herbicides on *Pseudokirchneriella subcapitata*. [Method] The inhibition rate of the yield and average growth rate of five paddy herbicides on *P. subcapitata* were determined, and the median effective concentration  $EyC_{50}$  and  $ErC_{50}$  were calculated referring to *Test Guidelines on Environmental Safety Assessment for Chemical Pesticides*. [Result] The acute toxicity of MCPA-Na·bentazone on *Pseudokirchneriella subcapitata* was low toxic; the acute toxicity of penoxsulam·pyrazosulfuron-ethyl·pretilachlor, pyribenzoxim·cyhalofop-butyl and oxadiargyl were mid-high toxic, and they were higher risk to green algae. [Conclusion] The dosage of these paddy high-toxic herbicides should be strictly controlled to minimize their harm to the green algae and water ecosystem.

**Key words** Paddy herbicides; *Pseudokirchneriella subcapitata*; Biomass growth inhibition; Growth rate inhibition

除草剂是化学农药中非常重要的一员, 据报道, 2015年农药登记产品共计3295个, 其中除草剂934个, 占比28.3%; 2015年全国农药总产量132.8万t, 其中除草剂82.7万t, 占比62.3%<sup>[1]</sup>。水稻是我国重要的粮食作物之一, 稻田中杂草的防治目前仍主要依靠化学防治, 稻田除草剂在农业生产中广泛应用。暴露于环境中的除草剂很大一部分可通过土壤浸出、降雨冲刷、地表径流等途径进入水生生态系统, 不仅污染水环境, 还对非靶标生物产生潜在毒性<sup>[2-3]</sup>。

藻类是水生系统的初级生产者, 为浮游无脊椎动物、鱼类等高等水生生物提供氧气和食物, 在水生生态系统中具有至关重要的地位<sup>[4]</sup>。同时藻类具有个体小、繁殖快、易获得等特点, 且对有毒物质敏感性高<sup>[5-7]</sup>, 因此广泛应用于化学品、污染物和各种农药对水生生态系统影响的毒理学研究<sup>[8]</sup>。而除草剂对藻类的毒性作用最强, 其毒性效应远高于杀虫剂和杀菌剂<sup>[1]</sup>。

目前很多研究者进行除草剂对藻类的毒性研究<sup>[9-12]</sup>, 但多数以原药或单剂为主。笔者选用37.5%二甲四氯钠·灭草松水剂、20%嘧啶肟草醚·氰氟草酯可分散油悬浮剂、30%五氟磺草胺·吡嘧磺隆·丙草胺可分散油悬浮剂、5%丙炔噁草酮乳油、80%丙炔噁草酮可湿性粉剂5种稻田除草剂(其中2种单剂、3种复配剂), 研究其对羊角月芽藻的生长

抑制影响, 旨在为稻田除草剂安全合理使用提供参考。

### 1 材料与方法

**1.1 试验生物** 羊角月芽藻(*Pseudokirchneriella subcapitata*), 购自中国科学院水生生物研究所淡水藻种库。选用BG11培养基转接培养, 温度(23±1)℃, 光照时间16h/8h, 光强4440~8880lx。试验前进行预培养, 每隔96h转接一次, 连续转接3次, 使绿藻处于对数生长期。

**1.2 试验药剂** 37.5%二甲四氯钠·灭草松水剂、20%嘧啶肟草醚·氰氟草酯可分散油悬浮剂、30%五氟磺草胺·吡嘧磺隆·丙草胺可分散油悬浮剂、5%丙炔噁草酮乳油、80%丙炔噁草酮可湿性粉剂均由安徽省农业科学院植物保护与农产品质量安全研究所提供。99.8%重铬酸钾由国药集团化学试剂有限公司提供。

二甲四氯标准品纯度99.2%, 由安徽丰乐农化有限责任公司提供; 灭草松标准品纯度98.48%, 由江苏激素研究所提供; 嘧啶肟草醚标准品纯度99%, 由德国Dr.提供; 氰氟草酯标准品纯度96.5%, 由黄山农化有限公司提供; 五氟磺草胺标准品纯度97%, 由青岛农冠农药有限责任公司提供; 吡嘧磺隆标准品纯度98.3%, 由上海农药研究所提供; 丙草胺标准品纯度98.1%, 由山东滨农科技公司提供; 丙炔噁草酮标准品纯度96.5%, 由黑龙江绿丰源生物科技有限公司提供。

**1.3 主要仪器设备** 智能人工气候箱、光学显微镜、紫外分光光度计、超净工作台、万分之一电子天平、高压灭菌锅、移液器、岛津LC-20AT高效液相色谱仪、岛津液相色谱质谱联用仪LCMS-8030、岛津GC-2010气相色谱仪(ECD检测器)、Agilent GC 7890A气相色谱仪(ECD检测器)、Agilent 1200高

**基金项目** 安徽省农业科学院农药安全应用与评价科技创新团队(15C1105)。

**作者简介** 沈艳(1987—), 女, 安徽蚌埠人, 助理研究员, 硕士, 从事农药环境毒理研究。\*通信作者, 副研究员, 博士, 从事杂草防治研究。

**收稿日期** 2019-04-22

效液相色谱仪(紫外检测器)、旋转蒸发仪、HC-3018 高速离心机、便携式 pH 计、光照计、电子温湿度计等。

**1.4 试验方法** 参照《化学农药环境安全评价试验准则》<sup>[13]</sup>, 分别用 5 种供试药剂进行预试验, 以较大的间距设置 4 个浓度组, 得出供试药剂对羊角月芽藻生长受抑制的最低浓度和不受抑制的最高浓度; 然后在此浓度范围内, 分别以一定的比例间距(几何级差控制在 3.2 倍以内)设置 7 个浓度组, 进行正式试验。分别取 50 mL 配制好的试验药液, 倒入 250 mL 三角瓶中; 再加入藻细胞密度在  $1.0 \times 10^5$  个/mL 的羊角月芽藻 50 mL, 使得初始藻种密度控制在  $5.0 \times 10^4$  个/mL 左右, 摇匀后用封口膜封口, 随机放入智能人工气候箱。每个浓度组设 3 个重复。同时以灭菌水加藻液作为空白对照。每天定时人工摇动 5~8 次。试验开始后每隔 24 h 取样, 用血球计数板准确计数藻细胞个数, 每个样品计数 3 次, 同时观察藻细胞颜色形态以及是否黏连或聚结等现象。试验调查持续 72 h。试验开始后分别在 0 和 72 h 留取各浓度组试验药液样品, 检测分析试验药液的浓度。

**1.5 数据处理与分析** 根据试验期间观察记录的数据, 分别计算不同浓度组羊角月芽藻生物量增长抑制百分率和生长率增长抑制百分率。处理组藻生物量增长的抑制百分率按公式(1)计算:

$$I_y = \frac{Y_c - Y_t}{Y_c} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $I_y$  为处理组生物量增长的抑制百分率(%);  $Y_c$  为空白对照组测定的藻类单位生物量, 用细胞数表示时单位为个/mL;  $Y_t$  为处理组测定的藻类单位生物量, 用细胞数表示时单位为个/mL。

处理组藻类生长率抑制百分率按公式(2)计算:

$$I_r = \frac{\mu_c - \mu_t}{\mu_c} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $I_r$  为处理组藻类生长率的抑制百分率, %;  $\mu_c$  为空白对照组生长率的平均值;  $\mu_t$  为处理组生长率平均值。其中  $\mu$  按公式(3)计算:

$$\mu_{j-i} = \frac{\ln X_j - \ln X_i}{t_j - t_i} \quad (3)$$

式中,  $\mu_{j-i}$  为在时间点  $i$  时间点  $j$  之间的平均生长率;  $X_i$  为在时间点  $i$  时的藻类单位生物量, 用细胞数表示时单位为个/mL;  $X_j$  为在时间点  $j$  时藻类单位生物量, 用细胞数表示时单位为个/mL。

采用统计软件 SPSS 20.0 进行分析, 通过藻生物量增长的抑制百分率和生长率抑制百分率, 得到 5 种供试药剂对羊角月芽藻半效应浓度 72 h- $EyC_{50}$  和 72 h- $ErC_{50}$ 、毒力回归方程以及各自的 95% 置信区间。

**1.6 供试药剂对绿藻的毒性判定** 试验结果的毒性等级均参照《化学农药环境安全评价试验准则》进行划分, 划分标准见表 1。

## 2 结果与分析

**2.1 参比试验结果** 为了解选用的羊角月芽藻的生长状况

及敏感性, 试验之前用重铬酸钾进行绿藻参比试验。重铬酸钾对羊角月芽藻的参比试验结果显示, 其半效应浓度 72 h- $EyC_{50}$  为 0.077 mg/L, 95% 置信限为 0.062~0.095 mg/L; 72 h- $ErC_{50}$  为 0.353 mg/L, 95% 置信限为 0.271~0.487 mg/L。以此作为参考。

表 1 农药对藻类的毒性等级划分

Table 1 Classification of toxicity levels of pesticides on algae

编号 Code	毒性等级 Toxicity grade	$EC_{50}$ (72 h) mg/L
1	高毒	$EC_{50} \leq 0.3$
2	中毒	$0.3 < EC_{50} \leq 3.0$
3	低毒	$EC_{50} > 3.0$

**2.2 绿藻细胞毒性反应** 用光学显微镜观察试验期间羊角月芽藻的毒性反应。绿藻毒性反应症状主要表现为: 藻细胞分解抱团, 部分呈絮状, 藻细胞明显变小, 且有断裂、黏连等现象。高浓度组的藻细胞症状出现较早; 低浓度组试验初期症状不明显, 随着药剂作用时间的延长, 毒力效应也逐渐增强, 症状逐渐明显。

**2.3 供试水样浓度** 5 种除草剂的水样浓度检测结果显示, 实测浓度与理论浓度的变化在  $\pm 20\%$  范围内, 试验结束时浓度与初始浓度的变化在  $\pm 10\%$  范围内, 说明 5 种除草剂产品在试验体系中较稳定, 因此采用理论浓度计算半效应浓度及其 95% 置信区间。

**2.4 5 种除草剂对羊角月芽藻生物量增长的抑制效果** 于试验开始后 24、48、72 h 取样, 在光学显微镜下用血球计数板计算藻细胞数。72 h 时 5 种稻田除草剂对羊角月芽藻生物量增长的抑制情况见表 2。根据 5 种稻田除草剂对羊角月芽藻生物量增长的抑制率, 采用统计软件 SPSS 20.0 分别分析半抑制效应结果  $EyC_{50}$ , 结果见表 3。37.5% 二甲四氯钠·灭草松水剂、20% 嘧啶羟草醚·氰氟草酯可分散油悬浮剂、30% 五氟磺草胺·吡嘧磺隆·丙草胺可分散油悬浮剂、5% 丙炔噁草酮乳油、80% 丙炔噁草酮可湿性粉剂 5 种药剂对羊角月芽藻的半抑制效应结果  $EyC_{50}$  分别为 10.040、0.123、0.059、0.002、0.003 mg/L。根据 5 种药剂对绿藻生物量增长的抑制情况, 37.5% 二甲四氯钠·灭草松水剂表现为低毒, 其他 4 种除草剂表现为高毒。

**2.5 5 种除草剂对羊角月芽藻生长率的抑制效果** 试验结束时, 对照组绿藻的羊角月芽藻细胞密度达  $1.35 \times 10^6$  个/mL, 比试验初始浓度增加了 26 倍。各浓度组羊角月芽藻的平均生长率, 5 种药剂对羊角月芽藻生长率的抑制百分率(72 h)见表 2。用 SPSS 20.0 分别分析半抑制效应结果  $ErC_{50}$ , 结果见表 4。由表 4 可知, 37.5% 二甲四氯钠·灭草松水剂、20% 嘧啶羟草醚·氰氟草酯可分散油悬浮剂、30% 五氟磺草胺·吡嘧磺隆·丙草胺可分散油悬浮剂、5% 丙炔噁草酮乳油、80% 丙炔噁草酮可湿性粉剂 5 种药剂对羊角月芽藻的半抑制效应结果  $EyC_{50}$  分别为 48.445、1.317、0.144、0.008、0.008 mg/L。根据 5 种药剂对绿藻生长率的抑制情况, 37.5% 二甲四氯钠·灭草松水剂表现为低毒, 20% 嘧啶羟草

醚·氰氟草酯可分散油悬浮剂为中等毒性,其他3种除草剂表现为高毒。

表2 5种稻田除草剂对羊角月芽藻生物量增长和生长率的抑制百分率  
Table 2 The inhibition percentage of five paddy herbicides on biomass growth and growth rate of *P. subcapitata*

编号 Code	供试药剂 Test agent	质量浓度 Mass concentration mg/L	72 h 抑制率 Inhibition rate at 72 h//%	
			生物量增长 Biomass growth	生长率 Growth rate
1	37.5%二甲四氯钠·灭草松水剂	2.50	21.60	8.19
		5.00	38.87	16.40
		10.00	50.75	23.36
		20.00	61.55	31.12
		40.00	75.58	44.59
2	20%嘧啶肟草醚·氰氟草酯可分散油悬浮剂	0.025	26.62	8.96
		0.055	38.02	13.79
		0.121	46.77	18.11
		0.266	63.50	28.61
		0.586	72.24	36.00
3	30%五·吡·丙草胺可分散油悬浮剂	1.288	83.65	49.57
		2.834	90.87	62.99
		0.012	11.91	4.26
		0.022	21.18	7.97
		0.039	33.09	13.37
4	5%丙炔噁草酮乳油	0.070	54.26	25.59
		0.126	67.50	36.07
		0.227	90.00	66.88
		0.408	96.62	85.15
		0.000 5	21.37	7.94
5	80%丙炔噁草酮可湿性粉剂	0.000 9	31.42	12.39
		0.001 6	40.22	16.82
		0.002 9	51.54	23.46
		0.005 2	67.88	35.99
		0.009 4	80.45	50.01
		0.017 0	93.02	73.58
		0.001	28.17	11.08
		0.002	38.90	16.39
		0.003	49.63	22.61
		0.004	59.02	29.11
		0.007	73.77	42.48
		0.011	83.16	54.61
		0.017	95.23	80.59

### 3 结论与讨论

藻类是水生系统的初级生产者,藻类生物量和群落结构的变化会影响水生系统生物链的更高营养级,如食草浮游动物和鱼类<sup>[3,14]</sup>。对藻类的危害将影响整个水生生态链,甚至通过食物链影响人类的健康<sup>[4]</sup>。稻田除草剂作为可直接污染水体的重要来源,其安全合理使用日益受到重视<sup>[11]</sup>。

该研究选择5种用于直播水稻田或移栽水稻田的除草剂制剂对羊角月芽藻进行生长抑制试验,结果表明,除37.5%二甲四氯钠·灭草松水剂对藻类是低毒外,其他4种药剂对绿藻均表现为中高毒性,尤其是2个丙炔噁草酮制剂,  $EyC_{50}$  为0.002~0.003 mg/L,远低于0.3 mg/L的高等毒性等级节点,对绿藻存在较大风险。

目前除草剂对藻类的毒性研究,多数以原药或单剂为主,而实际农业生产应用中则多为除草剂制剂。原药对绿藻的研究仅能反映有效成分本身对绿藻的毒性,无法综合评估添加助剂等后的制剂产品对水生生态系统的实际影响。目前已有多篇关于杀虫剂对非靶标动物的毒性研究,与原药相比制剂对供试生物的毒性更高,如20%丁硫克百威乳油制剂对土壤中蚯蚓死亡率的影响高于原药<sup>[15]</sup>;50%二嗪磷乳油和10%二嗪磷颗粒剂对鹌鹑和鹁鸽的毒性均比原药毒性高<sup>[16]</sup>;阿维菌素等8种杀虫剂原药对家蚕的  $LC_{50}$  均大于其制剂的  $LC_{50}$ <sup>[17]</sup>。陈兆杰等<sup>[11]</sup>比较了3种水稻除草剂及其原药对斑马鱼和羊角月芽藻的急性毒性,结果表明制剂的毒性普遍高于原药。因此除草剂的毒性研究也应注意原药和制剂的比较,多关注制剂的毒性。

2018年我国水稻田除草剂登记产品总计484个,其中单剂272个,复配混剂212个<sup>[18]</sup>,复配剂占比43.8%。多数复配混剂以高效、低毒、不易产生抗性等优点,成为农药登记的热点。但该研究中3个复配剂只有37.5%二甲四氯钠·灭草松水剂对藻类表现为低毒,另外2个均为中高毒。因此,除草剂复配剂对水生生物的毒性风险也不容忽视。

该研究是在实验室条件下进行的,稻田除草剂在田间实际施用,其对水生系统的影响更为复杂,不仅包括其在自然环境中降解产生代谢产物的毒性效应<sup>[19-20]</sup>,还存在杀虫剂、杀菌剂等多种类型农药共存的现象,使得除草剂对藻类及水生系统的潜在风险评估难度更大。因此,稻田除草剂在使用时应注意剂型的选择,尽量选择低毒除草剂;对于高效高毒除草剂应严格控制用药量,尽量减少其对水生生态系统的影响。

表3 5种稻田除草剂对羊角月芽藻生物量增长的中效应浓度(72 h)

Table 3 Half-effect concentration of five paddy herbicides on the biomass growth of *P. subcapitata* (72 h)

编号 Code	供试药剂 Test agent	毒力回归方程 Toxic regression equation	$R^2$	$EyC_{50}$ (95%置信限) mg/L	毒性等级 Toxicity grade
1	37.5%二甲四氯钠·灭草松水剂	$y = -1.211 + 1.209x$	0.992	10.040(8.031~12.331)	低毒
2	20%嘧啶肟草醚·氰氟草酯可分散油悬浮剂	$y = 0.859 + 0.944x$	0.996	0.123(0.093~0.159)	高毒
3	30%五·吡·丙草胺可分散油悬浮剂	$y = 2.358 + 1.923x$	0.983	0.059(0.052~0.068)	高毒
4	5%丙炔噁草酮乳油	$y = 3.691 + 1.389x$	0.977	0.002(0.002~0.003)	高毒
5	80%丙炔噁草酮可湿性粉剂	$y = 4.315 + 1.683x$	0.961	0.003(0.002~0.003)	高毒

表 4 5 种稻田除草剂对羊角月芽藻生长率的半效应浓度(72 h)

Table 4 Half-effect concentration of five paddy herbicides on the growth rate of *P. subcapitata* (72 h)

编号 Code	供试药剂 Test agent	毒力回归方程 Toxic regression equation	$R^2$	ErC <sub>50</sub> (95%置信限) mg/L	毒性等级 Toxicity grade
1	37.5%二甲四氯钠·草松水剂	$y = -1.804 + 1.071x$	0.989	48.445 (36.543~70.562)	低毒
2	20%嘧啶吡草醚·氰氟草酯可分散油悬浮剂	$y = 0.098 + 0.818x$	0.992	1.317 (0.931~2.048)	中毒
3	30%五·吡·丙草胺可分散油悬浮剂	$y = 1.570 + 1.866x$	0.969	0.144 (0.125~0.168)	高毒
4	5%丙炔噁草酮乳油	$y = 2.729 + 1.307x$	0.961	0.008 (0.007~0.010)	高毒
5	80%丙炔噁草酮可湿性粉剂	$y = 3.476 + 1.648x$	0.938	0.008 (0.007~0.009)	高毒

## 参考文献

- [1] 黄健,姜辉,曲蕊莹,等. 36 种典型除草剂对绿藻的毒性研究[J]. 生态毒理学报,2017,12(4):193-201.
- [2] CAPEL P D, LARSON S J, WINTERSTEIN T A. The behavior of thirty-nine pesticides in surface waters as a function of scale[J]. Hydrological processes, 2001, 15: 1251-1269.
- [3] 倪妍,王毛兰,赖劲虎,等. 除草剂对藻类的生态毒理学研究述评[J]. 江西农业大学学报,2014,36(3):536-541.
- [4] 钱海丰,陈思,金瑜剑. 藻类在除草剂生物毒性安全评估中的应用[J]. 浙江工业大学学报,2017,45(1):32-36.
- [5] 孔玄庆,郭军,金晨钟,等. 农药与藻类互作研究进展[J]. 现代农业科技,2016(5):222-224,228.
- [6] 叶丹,陈洁,袁琳,等. 除草剂对 3 种绿藻的毒性测试研究[J]. 人民长江,2014,45(18):82-86.
- [7] 谭建仪,卢泽铨,李祥英,等. 吡啶磺隆对 3 种藻的生长抑制及安全评价[J]. 农业工程技术,2018,38(8):18.
- [8] 杜丽娜,曹宇,穆玉峰,等. 羊角月芽藻在制药废水毒性评价中的应用[J]. 环境科学研究,2014,27(12):1525-1531.
- [9] 张燕宁,张兰,毛连纲,等. 26 种除草剂对斜生栅藻的生长抑制活性[J]. 安徽农业科学,2016,44(23):132-133,173.
- [10] 沈艳,陈亮,孙如意,等. 噻吩酰胺对 3 种水生物体的急性毒性与安全性评价[J]. 农药,2016,55(11):817-820.
- [11] 陈兆杰,宋世明,雷雨豪,等. 3 种水稻除草剂对 2 种水生生物的急性毒性及安全性评价[J]. 农药,2017,56(11):819-823.
- [12] 张敏敏,慕卫,刘峰. 不同作用机制除草剂对斜生栅藻的急性毒性评价[J]. 农药,2012,51(10):745-747.
- [13] 曲蕊莹,杨亚哲,瞿唯钢,等. 化学农药环境安全评价试验准则 第 14 部分:藻类生长抑制试验:GB/T 31270.14—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [14] AHLGREN G, LUNDSTEDT L, BRETT M, et al. Lipid composition and food quality of some freshwater phytoplankton for cladoceran zooplankters [J]. Journal of plankton research, 1990, 12(4):809-818.
- [15] 潘波,方佳,林勇,等. 丁硫克百威原药和制剂对蚯蚓的毒性及其降解产物克百威的动态变化[J]. 热带作物学报,2013,34(11):2272-2277.
- [16] 韩志华,周军英,程燕,等. 不同剂型二嗪磷制剂及原药对鸟类的毒性评价[J]. 农业环境科学学报,2008,27(5):2033-2038.
- [17] 姬小雪,王菲菲,刘政军,等. 8 种稻田常用杀虫剂原药和制剂对家蚕的急性毒性与安全性评价[J]. 农药,2018,57(9):654-657.
- [18] 辉胜农药. 2018 年我国水稻田除草剂的最新登记情况[J]. 农药市场信息,2018(29):30.
- [19] 沈俭龙,纪明山,田宏哲. 农药的水环境化学行为研究进展[J]. 农药,2015,54(4):248-250.
- [20] 何健,孔德洋,李菊颖,等. 苯氧羧酸类除草剂在水-沉积物系统中降解特性[J]. 农药,2015,54(7):487-489.

(上接第 120 页)

自然环境中 PFOA 含量的增加会使其最终载体(水和土壤)中 PFOA 含量增加。土壤和水体作为植物生长的必要条件,其 PFOA 含量的增加会使植物吸收积累更多的 PFOA。当植物体内 PFOA 含量达到一定浓度后,很有可能会影响作物的生长、产量与质量。虽然科学家已经对其环境污染、生物学行为进行了广泛的研究,但是,植物方面主要集中在吸收和富集等,毒性作用机制方面的研究还比较少,特别是相应的遗传机制。

PFOA 作用下,拟南芥 4 个 Ib bHLH 家族转录因子的上调表明这 4 个转录因子可能参与到拟南芥的 PFOA 解毒作用中。该研究构建的 Ib bHLH 家族 4 个基因的 CRISPR/Cas9 敲除载体可以通过农杆菌花序侵染的方法转移到植物体内,拟通过 CRISPR/Cas9 敲除技术获得 Ib bHLH 家族沉默的四突变体,为后续 PFOA 毒性作用机制的研究提供了遗传材料。

## 参考文献

- [1] 张宏娜,温蓓,张淑贞. 全氟和多氟烷基化合物异构体的分析方法、环境行为和生物效应研究进展[J]. 环境化学,2019,38(1):42-50.
- [2] STAHL T, HEYN J, THIELE H, et al. Carryover of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) from soil to plants[J]. Arch Environ Contam Toxicol, 2009, 57(2):289-298.
- [3] YANG X P, YE C C, LIU Y, et al. Accumulation and phytotoxicity of perfluorooctanoic acid in the model plant species *Arabidopsis thaliana* [J]. Environ Pollut, 2015, 206:560-566.
- [4] ZHOU L N, XIA M J, WANG L, et al. Toxic effect of perfluorooctanoic acid (PFOA) on germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Chemosphere, 2016, 159:420-425.
- [5] GHISI R, VAMERALI T, MANZETTI S. Accumulation of perfluorinated alkyl substances (PFAS) in agricultural plants: A review [J]. Environ Res, 2019, 169:326-341.
- [6] YUAN Y X, WU H L, WANG N, et al. FIT interacts with AtbHLH38 and AtbHLH39 in regulating iron uptake gene expression for iron homeostasis in *Arabidopsis* [J]. Cell Res, 2008, 18(3):385-397.
- [7] SIVITZ A B, HERMAND V, CURIE C, et al. *Arabidopsis* bHLH100 and bHLH101 control iron homeostasis via a FIT-independent pathway [J]. PLoS One, 2012, 7(9):1-12.
- [8] WANG H Y, KLATTE M, JAKOBY M, et al. Iron deficiency-mediated stress regulation of four subgroup Ib *BHLH* genes in *Arabidopsis thaliana* [J]. Planta, 2007, 226(4):897-908.
- [9] WANG N, CUI Y, LIU Y, et al. Requirement and functional redundancy of Ib subgroup bHLH proteins for iron deficiency responses and uptake in *Arabidopsis thaliana* [J]. Mol Plant, 2013, 6(2):503-513.
- [10] MA X L, ZHANG Q Y, ZHU Q L, et al. A robust CRISPR/Cas9 system for convenient, high-efficiency multiplex genome editing in monocot and dicot plants [J]. Molecular plant, 2015, 8(8):1274-1284.
- [11] LIU W S, ZHU X H, LEI M G, et al. A detailed procedure for CRISPR/Cas9-mediated gene editing in *Arabidopsis thaliana* [J]. Science bulletin, 2015, 60:1332-1347.
- [12] 曾栋昌,马兴亮,谢先荣,等. 植物 CRISPR/Cas9 多基因编辑载体构建和突变分析的操作方法[J]. 中国科学,2018,48(7):783-794.
- [13] LINDSTROM A B, STRYNAR M J, LIBELO E L. Polyfluorinated compounds: Past, present, and future [J]. Environ Sci Technol, 2011, 45(19):7954-7961.