

邸娜,崔超,王靖,等. 利用诱捕作物防除向日葵列当的研究现状及展望[J]. 江苏农业科学,2019,47(21):84-88.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.21.019

# 利用诱捕作物防除向日葵列当的研究现状及展望

邸娜,崔超,王靖,郑喜清

(河套学院农学系,内蒙古巴彦淖尔 015000)

**摘要:**向日葵列当是一种专化性较强的寄生性杂草,主要侵害向日葵,对我国乃至全球的向日葵生产都造成了严重影响。由于向日葵列当特殊的生活史,传统的防除措施防除效果均不尽如人意。利用诱捕作物诱导向日葵列当种子自杀发芽,可有效减小土壤中向日葵列当的种子库。结合生产实际,本文对向日葵列当的生物学特性、生活史、发生危害、萌发过程中的化感作用及诱捕作物等进行总结,并针对性地提出研究展望,以期高效、经济、绿色防除向日葵列当提供参考和思路。

**关键词:**向日葵列当;生物学特性;生活史;发生危害;诱捕作物;化感作用;化感物质;研究展望

**中图分类号:** S451.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)21-0084-04

向日葵(*Helianthus annuus* L.)为菊科(Asteraceae)向日葵属(*Helianthus*)的一年生草本作物,是世界第二大油料作物。目前我国的向日葵种植面积位于世界第6位,而内蒙古自治区是我国最大的向日葵种植区,向日葵种植主要分布在巴彦淖尔市、赤峰市、鄂尔多斯市、包头市、通辽市等地区。近年来巴彦淖尔市向日葵种植面积不断扩大,截至2010年,其向日葵播种面积占全区播种面积的50%<sup>[1]</sup>,成为内蒙古自治区最大的向日葵生产基地。

在巴彦淖尔市71.33万hm<sup>2</sup>可耕地中,盐碱化耕地面积约32.27万hm<sup>2</sup>,占总耕地面积的45.24%,其中轻度盐碱地面积为17.13万hm<sup>2</sup>,中度盐碱地面积为9.87万hm<sup>2</sup>,重度盐碱地面积为5.27万hm<sup>2</sup>,且有逐年增加的趋势<sup>[2]</sup>。由于向日葵具有耐盐碱、耐瘠薄、抗干旱、适应性强等特性,加之贫瘠的盐碱地上不适宜其他作物生长,造成盐碱地块向日葵连作严重,这也是造成向日葵列当迅速传播蔓延的主要原因之一。

## 1 向日葵列当的生物学特性及生活史

### 1.1 向日葵列当的形态特征

向日葵列当(*Orobanche cumana* Wallr.)属于列当科(Orobanchaceae)列当属(*Orobanche* spp.)一年生草本双子叶植物,是一种寄生于向日葵根部的全寄生型杂草,在世界各地均严重制约向日葵的生产<sup>[3]</sup>。向日葵列当具有较强的变异性,存在生理小种的分化<sup>[4]</sup>。1979年5个生理小种被鉴定并分别被命名为生理小种A、B、C、D、E<sup>[5-6]</sup>;近年来陆续又有3个生理小种被确定为小种F、G、H<sup>[7-10]</sup>。向日葵列当株高一

一般为20~50cm(个别高度可达80cm以上),茎围为1.5~5.0cm(个别粗度可达10cm以上)<sup>[11]</sup>;茎肉质,直立,不分枝,有纵棱,被黄褐色至紫褐色细毛,基部膨大;无叶绿素,不能进行光合作用,叶退化成三角形鳞片状,呈螺旋排列;没有真正的根,完全依靠短须状假根侵入寄主植物根组织内吸收养分和水分进行全寄生生活<sup>[12-13]</sup>;两性花,花萼深裂,每朵花上均有一个小苞片,无限穗状花序,小花排列紧密,一般每株30~80朵,多的可达百余朵,花色丰富,有兰紫、粉红、褐色和米黄等颜色<sup>[14]</sup>;蒴果梨形或卵形,具有3~4纵裂,成熟时呈深褐色,内含大量尘末状细小种子;种子形成初期呈黄色,较柔软,成熟后期呈黑褐色,比较坚硬,形状不规则,大小不一,种皮具有方形网纹<sup>[15-16]</sup>。

### 1.2 向日葵列当的生活史

向日葵列当的生活史主要包括<sup>[17]</sup>:(1)通过预培养打破种子休眠;(2)感受萌发刺激物,种子萌发;(3)附着于寄主根系表面并形成附着胞;(4)穿透寄主根组织,形成吸器并与寄主根部导管相连;(5)在寄主根表面形成瘤状物;(6)茎伸长生长并出土;(7)生长、开花、结实。向日葵列当形成吸器与寄主导管建立联系前为自养生长阶段,一旦吸器形成并与寄主导管连接起来,则由自养生长转变为寄生生长。

## 2 向日葵列当的危害及传播途径

### 2.1 向日葵列当的危害

向日葵列当是造成向日葵产量降低、品质下降的一个非常重要的因素,对我国乃至世界的向日葵生产都造成了严重的影响。大量研究表明,向日葵列当已经极大地威胁了占世界向日葵生产总量50%的地中海地区、东欧、美国和中国的向日葵生产<sup>[18-20]</sup>。我国自1959年在黑龙江省肇州县首次发现向日葵列当以来<sup>[21]</sup>,随着向日葵种植面积的增加,连作面积的增大,加之引种混乱、管理粗放、种子调运频繁等原因,向日葵列当在全国各向日葵种植地区迅速蔓延并逐年加重。在我国,向日葵列当主要分布于新疆、内蒙古、黑龙江、吉林、辽宁、河北、山西、陕西、甘肃等省(自治区),其中在内蒙古主要分布于兴安盟、通辽市、赤峰市、乌兰察布市、呼和浩特市、包

收稿日期:2018-08-02

基金项目:内蒙古自治区高等学校科学研究项目(编号: NJZY17381);内蒙古自治区高等学校科学研究重点项目(编号: NJZZ16333)。

作者简介:邸娜(1983—),女,河北秦皇岛人,硕士,副教授,主要从事植物逆境生理及天然产物提取和分离方面的研究。E-mail: 370526637@qq.com。

通信作者:崔超,博士,讲师,主要从事作物生理方向的研究。E-mail:443283900@qq.com。

头市、鄂尔多斯市、巴彦淖尔市等盟(市)。

列当寄生会造成向日葵植株生长减缓,茎秆矮小细弱,花盘变小,空瘪粒数量增加,产量和品质下降<sup>[22]</sup>。寄生严重时,向日葵花盘显著变小甚至枯萎凋落,整株枯死<sup>[23]</sup>。任文义等的研究表明,向日葵列当寄生严重度与向日葵的花盘直径、千粒质量、盘粒质量均呈极显著的负相关关系<sup>[24]</sup>。根据向日葵列当寄生率及寄生强度的不同,向日葵一般减产 30% ~ 45%,列当发生严重地块,向日葵甚至绝收<sup>[25-28]</sup>。崔超等研究发现,在向日葵列当轻度寄生和重度寄生处理条件下,向日葵灌浆期植株叶面积指数、干物质积累量、不同层位根系生物量均显著或极显著下降,同时向日葵收获株数、单盘粒数和百粒质量等因素也均显著或极显著降低,最终导致减产 16.32% ~ 48.70%<sup>[29]</sup>。

## 2.2 向日葵列当的传播途径

向日葵列当主要依靠种子繁殖,其种子具有产量大和生命力极强的特点。每株向日葵列当一般可产生 6 万 ~ 10 万粒种子,最多可产生 45 万粒种子,在土壤中主要分布于 5 ~ 10 cm 深的土层中,且在土壤中保存 5 ~ 10 年后仍具有萌发能力,因此在土壤中形成了巨大的向日葵列当种子库。向日葵列当种子极小,只有 0.25 mm × 0.30 mm 左右<sup>[30]</sup>,因此很容易黏附在寄主种子、果实、根茎、农机具、人或动物身上进行传播,也可借助土壤、风力、降水和流水等进行传播。

## 3 向日葵列当萌发过程中的化感作用

### 3.1 化感作用和化感物质

化感作用是指植物(包括微生物)通过向周围环境中释放化学物质影响邻近植物(包括微生物)生长发育的化学生态学现象<sup>[31]</sup>,是植物-土壤-微生物共同作用的结果,包括化感偏害作用、自毒作用、自促作用和互惠作用<sup>[32-34]</sup>。化感作用不同于植物对生长环境中养分、水分和光照等的竞争作用,而属于通过化感物质的释放和增加对植物生长环境产生的干预作用。

化感物质是植物生长过程中释放的、能够对受体植物产生化感作用的次生代谢产物。目前发现的天然存在的化感物质共有 14 类,分别为水溶性酸、直链醇、脂族醛和酮类、简单不饱和内酯、长链脂肪酸和聚乙炔、蒽醌类和复杂醌类、萜类、肉桂酸及其衍生物、香豆素类、黄酮类、单宁、没食子酸和原儿茶酸、氨基酸和多肽、生物碱、硫化物和芥子油苷、嘌呤和核苷酸<sup>[35]</sup>,其中酚类、萜类、糖和糖苷类、生物碱和非蛋白氨基酸等 4 类物质最为常见<sup>[36]</sup>。

植物化感物质通过根、根瘤、茎、叶、花(花粉)、果实和种子等部位释放到植物表面,并通过表面挥发进入环境,或通过根茬等植株残体的分解、根系直接分泌、降水、露水、灌溉等方式淋溶到土壤中。植物的生长环境(养分、水分、温度、矿质营养、紫外线辐射等)、器官的生长阶段、植物的遗传特性、病原微生物的入侵等都会影响植物化感物质的产生和释放<sup>[37]</sup>。

### 3.2 向日葵列当萌发过程中的化感作用

根寄生杂草种子只有感受到寄主(或非寄主)植物释放的化学信号物质的刺激才能萌发,否则即使温度、水分、氧气等萌发条件适宜也不会萌发,而进入二次休眠,等待寄主植物存在时再萌发,这是根寄生杂草种子对环境的一种进化适应

性选择<sup>[38]</sup>。目前已发现的能够诱导寄生植物种子萌发的物质主要有独脚金醇、二氢高粱酮和倍半萜烯内酯等 3 种物质<sup>[39]</sup>。独脚金醇是刺激包括独脚金属和列当属植物在内的许多寄生植物种子萌发的信号物质<sup>[40]</sup>。与独脚金醇具有相同结构特点的物质统称为独脚金内酯,是列当属植物种子萌发的刺激物质<sup>[41]</sup>,广泛存在于许多寄主或非寄主植物的根系分泌物中。Cook 等首先从棉花的根际分泌物中分离出独脚金醇和独脚金醇的乙酸盐<sup>[42-43]</sup>;Siame 等先后从高梁、玉米和谷子的根际分泌物中分离出独脚金醇<sup>[44]</sup>。其中棉花为独角金的非寄主植物,高粱、玉米和谷子为独角金的寄主植物。随后,在烟草、红三叶等其他许多植物的根系分泌物中均发现了能够刺激列当种子萌发的独角金内脂类化合物<sup>[45-46]</sup>。独脚金内酯类化合物是刺激寄生植物种子萌发活性最高的一类化合物,刺激列当种子发芽的浓度在  $10^{-15} \sim 10^{-7}$  mol/L 之间<sup>[47]</sup>。Joel 等发现,去氢木香内酯能够刺激向日葵列当萌发但不能刺激瓜列当萌发,且去氢木香内脂也来源于植物的根系分泌物<sup>[48]</sup>。

## 4 向日葵列当的诱捕作物及其防除效果

成熟的向日葵列当种子经过 1 ~ 2 周一定温度和湿度的预培养后,受到寄主或非寄主植物根系分泌物的刺激才可萌发。萌发后的向日葵列当种子形成发芽管,接着形成吸器,通过吸器与寄主植物根系建立联系,因此通常是向日葵列当还未出土即对寄主植物造成伤害和影响。目前常用的向日葵列当防除措施有化学药剂防除、物理防除、抗性品种选育、人工拔除等,但防除效果均不尽如人意<sup>[49]</sup>。

诱捕作物是指能够产生列当种子萌发所必需的发芽刺激物质但又不被其寄生的作物,又称假寄主<sup>[50]</sup>。在诱捕作物存在的情况下,向日葵列当种子因感受到萌发刺激物的刺激而萌发,但由于找不到寄主不能完成寄生过程而死亡,向日葵列当的这种发芽称为“自杀发芽”<sup>[51]</sup>。采用诱捕作物诱导向向日葵列当“自杀发芽”,可以有效减小土壤中的种子库,又可以收获诱捕作物获得产量和收益。张维等通过研究大豆根际土壤及植株器官的提取液对向日葵列当和瓜列当种子萌发的作用发现,大豆根际土壤和植株器官的提取液均能诱导向向日葵列当和瓜列当种子萌发,萌发刺激物由大豆根部合成,分泌到土壤中并能在土壤中稳定存在<sup>[52]</sup>。董淑琦的研究表明,冬小麦根系分泌物可刺激向日葵列当和瓜列当种子的萌发,且发芽率随着根系分泌物浓度的增加和小麦基因型的加倍呈现逐步上升趋势<sup>[53]</sup>。朗明的试验同样证明,棉花与小列当之间存在化感作用,化感物质为独角金醇<sup>[54]</sup>。余蕊等利用大麻的根际土壤、植株提取液分别诱导瓜列当及向日葵列当种子萌发,结果发现,根际土壤提取液诱导瓜列当种子的发芽率显著大于向日葵列当,且大麻植株提取液诱导的瓜列当种子发芽率表现为根 > 茎 > 叶<sup>[55-57]</sup>。王钟研究发现,马铃薯根系分泌物和植株样品对瓜列当和向日葵列当种子萌发的刺激作用表现为前者强于后者,且低浓度促进高浓度抑制<sup>[58]</sup>。贾雪婷等从 69 种中草药中筛选出 21 种具有促进向日葵列当种子萌发的作用的中草药<sup>[59]</sup>。以上研究成果表明,大豆、小麦、棉花、大麻以及中草药等许多植物均可以作为向日葵列当的诱捕作物。

研究表明,利用不同小麦品系作为诱捕作物可有效降低小

列当的寄生率<sup>[60]</sup>;通过连续2次种植油菜作为诱捕作物防除瓜列当,可大量减小土壤中列当的种子库<sup>[61]</sup>;通过轮作诱捕作物,每年土壤种子库中的寄生杂草种子能够减少10%~40%<sup>[62]</sup>;玉米轮作使后茬向日葵列当的寄生率较对照下降97%<sup>[63]</sup>。由此可见,利用诱捕植物防除列当存在着客观的可行性。

## 5 展望

向日葵列当是我国农田生态系统中的一种恶性杂草,对全球的农业生产都造成了严重的影响,对农产品的产量和品质构成了严重的威胁。由于向日葵列当具有种子小、数量多、土壤中种子库巨大,易随风、雨、水等进行传播,而且发生隐蔽,还未出土即已完成侵染,对寄主植物产生伤害,在寄主的整个生育期均可侵染出土等特点,使得防除工作异常困难,目前世界各国仍无行之有效的防除方法。利用诱捕作物的化感作用,诱导向向日葵列当种子“自杀发芽”,促使大量的向日葵列当种子萌发,但由于找不到寄主而死亡,该方法可有效减小土壤中向日葵列当的种子库,且整个过程不使用任何化学药剂,也不会增加人力劳作的负担,同时可以正常收获诱捕作物,获得产量和收益,这对高效、经济、绿色防除向日葵列当具有重要意义。

近年来,我国越来越多的学者把关注点放在植物根系分泌物及植株提取液对列当种子萌发的刺激作用上,致力于研究列当的寄生机制,以期阐明列当与寄主间的化感作用,寻找可以作为诱捕作物的植物,为列当的防除寻找新的切入点。同时在国外,利用诱捕作物防除列当的研究在实验室条件下也已经进行多年<sup>[51,64-65]</sup>。通过文献检索发现,利用诱捕作物防除列当的相关研究几乎均停留在实验室研究阶段,也取得了一定的成果,筛选出多种适用于向日葵列当、小列当、瓜列当等防除的诱捕作物,但在生产上的应用研究很少。针对这一问题,建议接下来的研究重点应在以下几个方面:(1)将筛选出的诱捕作物应用于农业生产,在田间生产的情况下研究其真实的防除效果,探讨田间应用的可行性。(2)以内蒙古巴彦淖尔市为例,该地区存在大量盐碱地,其他作物不宜种植,因此盐碱地上向日葵连作严重,是近年来向日葵列当在巴彦淖尔地区迅速蔓延的主要原因之一。应结合实地情况,筛选适合种植于盐碱地的诱捕作物;另外,种植捕获作物(向日葵),在向日葵列当出土但未结实前收获捕获作物,也可减小土壤中向日葵列当的种子库,但会大幅度降低农民收入,需要政府提供一定的经费支持。(3)筛选根系分泌物能够在土壤中稳定存在的诱捕作物,研究该根系分泌物的提取纯化工艺,为制成生物制剂应用于农业生产提供可能性。

向日葵列当在田间萌发并完成寄生作用受诸多因素影响,如土壤质地、温度、湿度、pH值、营养状况、寄主植物的生长情况等,且各种影响因素交织在一起综合影响向日葵列当的寄生,田间防除与室内研究存在较大差距。因此在前人室内研究的基础上应逐步向田间试验研究过度,进而为生产上防除向日葵列当提供切实的实践指导。

## 参考文献:

[1]吴敏南. 内蒙古巴彦淖尔市向日葵产业发展状况调查与思考[J]. 内蒙古农业科技,2011(6):121-123,128.

- [2]韩继旺. 巴彦淖尔综合治理484万亩盐碱地[N]. 内蒙古日报(汉),2015-07-15(001).
- [3]吴海荣,强胜. 检疫杂草列当(*Orobanche L.*)[J]. 杂草科学,2006(2):58-60.
- [4]石必显,雷中华,向理军,等. 中国4省区向日葵列当生理小种鉴定[J]. 中国油料作物学报,2016,38(1):116-119.
- [5]Bchvarova R. Physiological specialization in broomrape (*Orobanche cernua* Wall.) and the resistance of inbred sunflower lines [J]. Rastenievudni Nauki,1979,17:127-132.
- [6]Shi B X,Chen G H,Zhang Z J,et al. First report of race composition and distribution of sunflower broomrape, *Orobanche Cumana*, in China [J]. Plant Disease,2015,99(2):291-292.
- [7]Molinero - Ruiz L. Molero - Vara J M. Virulence and aggressiveness of sunflower broomrape populations (*Orobanche Cumana*) overcoming the *Or5* gene [C]//Proc. 16th Int Sunflower Conf,2004:165-169.
- [8]Skoric D, Pacureanu - Joila M, Sava E. Sunflower breeding for resistance to broomrape (*Orobanche cumana* Wallr.) [J]. Fundulea, 2010,78(1):63-79.
- [9]Gontcharov S V, Antonova T S, Araslanova N M. Sunflower breeding for resistance to the new broomrape race [J]. Helia,2004,27(40):193-198.
- [10]Pacureanu - Ioita M, Raranciuc S, Procopovici E, et al. The impact of the new races of roomrape (*Orobanche cumana* Wallr.) parasite in sunflower crop in Romania [C]//Proc 17th Int Sunflower Conf. Córdoba; Spain,2008:225-229.
- [11]王靖,崔超,李亚珍,等. 全寄生杂草向日葵列当研究现状与展望[J]. 江苏农业科学,2015,43(5):144-147.
- [12]Rodriguez - Ojeda M I, Fernandez - Martinez J M, Velasco L. Extent of cross - fertilization in *Orobanche cumana* Wallr [J]. Biologia Plantarum,2013,57(3):559-562.
- [13]Aly R, Dubey N K, Yahyaa M, et al. Gene silencing of CCD7 and CCD8 in *Phelipanche aegyptiaca* by tobacco rattle virus system retarded the parasite development on the host [J]. Plant Signaling & Behavior,2014,9(8):e29376.
- [14]王丽,王佰众,朱统国,等. 向日葵列当生物学特性及防除研究[J]. 农业科技与信息,2017(15):61-64.
- [15]胡建芳,马红红. 隰县向日葵列当发生成因及其防治技术初探[J]. 运城学院学报,2004,22(5):32-33.
- [16]黄长权. 向日葵列当寄生机理的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2012.
- [17]Joel D M, Hershenhorn J, Eizenberg H, et al. Biology and management of weedy root parasites [J]. Horticultural Reviews, 2007(33):267-349.
- [18]Kohlschmid E, Sauerborn J, Müller - Stöver D. Impact of *Fusarium oxysporum* on the holoparasitic weed *Phelipanche ramosa*: biocontrol efficacy under field - grown conditions [J]. Weed Research,2009,49(S1):56-65.
- [19]Thomas H, Sauerborn J, Müller - Stöver D, et al. The potential of *Fusarium oxysporum* f. sp. *orthoceras* as a biological control agent for *Orobanche Cumana* in sunflower [J]. Biological Control,1998,13(1):41-48.
- [20]Velasco L, Pérez - Vich B, Yassein A A M, et al. Inheritance of resistance to sunflower broomrape (*Orobanche cumana* Wallr.) in an interspecific cross between *Helianthus annuus* and *Helianthus debilis* subsp *tardiflorus* [J]. Plant Breeding,2012,131(1):220-

- 221.
- [21] 关洪江. 黑龙江省向日葵列当发生与危害初报[J]. 作物杂志, 2007(4): 86–87.
- [22] Seiler G J, Jan G C. Virulence groups of *Orobanche cumana* Wallr. differential hosts and resistance sources and genes in sunflower[J]. *Helia*, 2014, 131(53): 74–80.
- [23] 于海燕, 薛丽静, 乔亚民, 等. 吉林省向日葵新引资源对列当抗性鉴定[J]. 植物遗传资源科学, 2000, 1(2): 65.
- [24] 任文义, 李毅, 马洪锡, 等. 向日葵列当对向日葵主要经济性状的影响及防治方法研究[J]. 河北农业大学学报, 1992, 15(3): 63–66.
- [25] 白全江, 云晓鹏, 高占明, 等. 内蒙古向日葵列当发生危害及其防治技术措施[J]. 内蒙古农业科技, 2013(1): 75–76.
- [26] 王鹏冬, 杨新元, 张学武, 等. 山西省向日葵列当初报[J]. 山西农业科学, 2003, 31(2): 75–77.
- [27] 张治家, 白全江, 曹丽霞, 等. 优质向日葵种质资源抗山西不同区域向日葵列当研究[J]. 山西农业科学, 2012, 40(2): 153–155.
- [28] Louarn J, Carbone F, Delavault P, et al. Reduced germination of *Orobanche cumana* seeds in the presence of Arbuscular Mycorrhizal fungi or their exudates[J]. *PLoS One*, 2012, 7(11): e49273.
- [29] 崔超, 王靖, 王伟伟, 等. 不同列当寄生严重度对向日葵产量形成及生理特性的影响[J]. 中国油料作物学报, 2016, 38(4): 518–523.
- [30] 白素娥. 向日葵列当的识别与防除[J]. 中国农学通报, 1994, 10(6): 34–37.
- [31] Rice E L. Allelopathy[M]. 2nd ed. New York: Academic Press, 1984: 421.
- [32] Einhellig F A. Allelopathy: current status and future goals[M]. Washington D C: American Chemical Society, 1995: 1–24.
- [33] 林文雄, 熊君, 周军建, 等. 化感植物根际生物学特性研究现状与展望[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(4): 1–8.
- [34] Duke S O. Allelopathy: current status of research and future of the discipline; a commentary[J]. *Allelopathy Journal*, 2010, 25(1): 17–29.
- [35] Lorenzo P, Pazos–Malvido E, Reigosa M J. Differential responses to allelopathic compounds released by the invasive *Acacia dealbata* Link (Mimosaceae) indicate stimulation of its own seed[J]. *Australian Journal of Botany*, 2010, 58(7): 546–553.
- [36] 王红强, 成水平, 张胜花, 等. 伊乐藻生物碱的 GC–MS 分析及其对铜绿微囊藻的化感作用[J]. 水生生物学报, 2010, 34(2): 361–366.
- [37] Coder K D, Warnell D B. Tree allelochemicals: ways and means[M]. New York: the Univeristy Georgia Press, 1999: 1–4.
- [38] Matusova R, van Mourik T, Bouwmeester H J. Changes in the sensitivity of parasitic weed seeds to germination stimulants[J]. *Seed Science Research*, 2004, 14(4): 335–344.
- [39] Yoneyama K, Awad A A, Xie X N, et al. Strigolactones as germination stimulants for root parasitic plants[J]. *Plant & Cell Physiology*, 2010, 51(7): 1095–1103.
- [40] 陈宏伟, 张汝民, 高岩, 等. 化学信号物质对寄生植物种子萌发的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2008, 29(1): 257–261.
- [41] Fischer N H, Weidenhamer J D, Riopel J L, et al. Stimulation of witchweed germination by sesquiterpene lactones: a structure activity study[J]. *Phytochemistry*, 1990, 29(8): 2479–2483.
- [42] Cook C E, Whichard L P, Turner B, et al. Germination of witchweed (*Striga lutea* Lour.): isolation and properties of a potent stimulant[J]. *Science*, 1966, 154(3753): 1189–1190.
- [43] Cook C E, Whichard L P, Wall M E, et al. Germination stimulants. II. The structure of strigol – a potent seed germination stimulant for witchweed (*Striga lutea* Lour.) [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1972, 94: 6198–6199.
- [44] Siame B P, Weerasuriya Y, Wood K, et al. Isolation of strigol, a germination stimulant for *Striga asiatica*, from host plants[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1993, 41(9): 1486–1491.
- [45] Takikawa H, Jikumaru S, Sugimoto Y, et al. Synthetic disproof of the structure proposed for solanacol, the germination stimulant for seeds of root parasitic weeds[J]. *Tetrahedron Letters*, 2009, 50(31): 4549–4551.
- [46] Xie X N, Yoneyama K, Yoneyama K. The strigolactone story[J]. *Annual Reviews*, 2010, 48: 93–117.
- [47] Kondo Y, Tadokoro E, Matsuura M, et al. Synthesis and seed germination stimulating activity of some imino analogs of strigolactones[J]. *Bioscience Biotechnology and Biochemistry*, 2007, 71(11): 2781–2786.
- [48] Joel D M, Chaudhuri S K, Plakhine D, et al. Dehydrocostus lactone is exuded from sunflower roots and stimulates germination of the root parasite *Orobanche cumana* [J]. *Phytochemistry*, 2011, 72(7): 624–634.
- [49] Sauerborn J, Buschmann H, Ghiasik K G, et al. Benzothiadiazole activities resistance in sunflower (*Helianthus annuus*) to the root parasitic weed *Orobanche Cumana* [J]. *Phytopathology*, 2002, 92(1): 59–64.
- [50] Carson A G. Studies on striga in Gambia[C]. //Robson T O, Broad HR. Consultation on Striga Control. Rome: Maroua, 1988, 37–43.
- [51] Joel D M. The long – term approach to parasitic weeds control: manipulation of specific developmental mechanisms of the parasite[J]. *Crop Protection*, 2000, 19(8/10): 753–758.
- [52] 张维, 马永清, 郝智强. 不同大豆 (*Glycine max*) 品种对根寄生杂草瓜列当 (*Orobanche aegyptiaca*) 种子萌发的诱导作用[J]. 大豆科学, 2012, 31(6): 956–960.
- [53] 董淑琦. 不同基因型冬小麦刺激根寄生杂草列当种子萌发的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [54] 郎明. 不同品种棉花对列当化感作用初步研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [55] 余蕊, 马永清. 大麻对瓜列当和向日葵列当种子萌发诱导作用研究[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(4): 38–46.
- [56] Lang M, Yu R, Ma Y Q, et al. Extracts from cotton over the whole growing season induce *Orobanche cumana* (sunflower broomrape) germination with significant cultivar interactions[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2017, 4(2): 228–236.
- [57] Ye X X, J J N, Ma Y Q, et al. Effectiveness of ten commercial maize cultivars in inducing Egyptian broomrape germination[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2016, 3(2): 137–146.
- [58] 王钟. 马铃薯对列当化感作用的初步研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [59] 贾雪婷, 马永清, 田丰, 等. 青藏地区中草药浸提液诱导瓜列当和向日葵列当种子萌发的研究[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(2): 82–92.

杨 荧,刘莉文,李建宏. 微藻富集重金属的机制及在环境修复中的应用综述[J]. 江苏农业科学,2019,47(21):88-94.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.21.020

# 微藻富集重金属的机制及在环境修复中的应用综述

杨 荧,刘莉文,李建宏

(南京师范大学生命科学学院,江苏南京 210023)

**摘要:**消除环境中的重金属污染是亟待解决的课题。微藻具有很高的富集重金属的能力,它们具有繁殖快、易培养、可选择种类多等特点,具有广阔的应用前景,引起了科研工作者的广泛关注。系统梳理目前国内外有关微藻富集重金属的机制的研究进展,概述影响微藻富集重金属的生物因素(包括藻种生活状态、种类、耐受能力、大小、生物量浓度)和非生物因素(包括金属离子浓度和形态、pH 值、温度、接触时间、光照等),介绍了微藻在重金属污染环境修复中的运用(包括修复污染水体、稻田以及土壤)。

**关键词:**重金属;微藻;机制;影响因素;污染修复

**中图分类号:** X173;X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)21-0088-07

重金属在自然环境中的污染问题日趋凸显,给生态环境和人类健康造成极大危害。环境中最受关注的重金属主要是汞(Hg)、镉(Cd)、铅(Pb)、砷(As)、铬(Cr)等元素<sup>[1]</sup>,这些元素的蓄积,可引发癌症、神经肌肉控制缺陷、智力缺陷、肾功能障碍等疾病<sup>[2]</sup>,威胁人类健康。如何消除环境中的重金属一直是人们广泛关注的问题。自 20 世纪 50 年代提出利用微藻处理污水的想法以来,国内外针对进一步发挥藻类净化污水的潜力进行了大量的研究,在藻类进化污水的机制研究方面取得了很大进展,尤其在藻类处理含重金属污水方面,取得了很多的成果。同时,在污染环境修复方面,研究人员不但尝试应用微藻修复重金属污染水体,也尝试了将微藻应用于水稻田以及重金属污染土壤进行原位修复。

本文就微藻富集重金属的特点、微藻富集重金属的机制、影响微藻对重金属吸附效果的因素以及微藻在污染修复中的应用进行概述,以期对相关领域的研究和应用提供借鉴。

## 1 微藻吸附重金属的机制

工业污水是重要的重金属污染来源,通常采用化学沉淀、

电解、离子交换、反渗透以及活性炭吸附等方法从中除去重金属<sup>[3]</sup>,但这些方法均存在一定的局限性,特别是在重金属浓度较低的情形下,一般都存在效率较低、能耗较高、成本昂贵、处理过程容易产生二次污染等问题。相对而言,利用微生物吸附重金属,处理过程简单、效率高、成本低廉,已成为科研人员探索研究的热点。常见的微生物吸附材料主要包括细菌、真菌和藻类,由于藻类植物属光合自养型生物,具有生长及代谢速度快、培养容易、吸附作用强、净化效率高等优势,更具有广阔的应用前景。利用微藻吸附重金属具有明显优势:(1)藻种种类多、来源广,廉价易得,适应性强,应用范围广;(2)人为选择性强,可根据污水类型、重金属类型、以及重金属浓度的不同,选择特异性藻种;(3)吸附效率高、富集容量大,处理过程能耗低、不产生二次污染;(4)富集产物易回收,有利于资源循环利用,符合可持续发展理念。微藻富集重金属的优势与其吸附重金属的机制密切相关。

关于藻类吸附重金属的机制,已有了大量的研究报道。一般认为,在宏观吸附过程中,活藻体吸附分为 2 个阶段:第 1 阶段是物理吸附,速度较快,与代谢无关,金属离子可能通过配位、离子交换<sup>[4]</sup>、表面络合<sup>[5]</sup>、氧化还原<sup>[6]</sup>、微沉淀<sup>[7]</sup>以及物理吸附等作用中的 1 种或几种附着在细胞表面;在这一过程中,金属和生物基质的作用较快,典型的吸附过程数分钟或数小时内就可完成。Kanchana 等对藻类的生物吸附动力学行为的研究表明,初始吸附期快,平衡期较晚,平衡时间为 10~60 min 不等,蓝绿藻对金属的吸附平衡时间为 5~

收稿日期:2018-07-20

基金项目:国家自然科学基金(编号:31370217);江苏省高校优势学科建设工程(编号:PAPD)。

作者简介:杨 荧(1993—),女,江苏连云港人,硕士,主要从事藻类生理学的研究。E-mail:yangying\_regina@sina.com。

通信作者:李建宏,博士,教授,主要从事藻类生理生态研究。E-mail:lijianhong@njnu.edu.cn。

[60] Lins R D, Colquhoun J B, Mallory - Smith C A. Investigation of wheat as a trap crop for control of *Orobanche minor* [J]. Weed Research, 2006, 46(4): 313-318.

[61] Acharya B D, Khattri G B, Chettri M K, et al. Effect of brassica campestris var. toria as a catch crop on *Orobanche aegyptiaca* seed bank [J]. Crop Protection, 2002, 21(7): 533-537.

[62] Oswald A, Ransom J K. Striga control and improved farm productivity using crop rotation [J]. Crop Protection, 2001, 20(2): 113-120.

[63] 叶晓馨. 玉米和谷子作为诱捕作物防除列当有效性研究 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2017.

[64] Kasasian L. Miscellaneous observations on the biology of *Orobanche crenata* and *O. aegyptiaca* [C]. Proceedings of the International Symposium on Parasitic Weeds, 1973: 68-75.

[65] Manschadi A M, Sauerborn J, Stützel H. Quantitative aspects of *Orobanche crenata* infestation in faba beans as affected by abiotic factors and parasite soil seedbank [J]. Weed Research, 2001, 41(4): 311-324.