

# 湿地中植物的化感效应研究进展

肖涛<sup>1</sup>, 石强胜<sup>1</sup>, 刘送平<sup>2</sup>, 闻熠<sup>1,3</sup>

(1. 江西长江经济带研究院, 九江学院, 江西九江 332005; 2. 江西省·中国科学院庐山植物园, 江西九江 332005;  
3. 国家环境保护生态工业重点实验室, 中国环境科学研究院, 北京 100012)

**摘要:** 研究湿地中植物的化感效应有助于揭示湿地生态系统中植物物种的组成和分布、群落演替及生物入侵等现象的机制。从湿地中植物的化感效应的基本概念、化感物质的种类及释放途径和作用机制出发, 综述了当前湿地中植物化感效应研究的主要内容: 对湿地中植物的物种组成和群落结构的影响; 对湿地中植物群落演替过程的影响; 对外来生物入侵过程的影响; 化感效应在湿地植被生态修复/恢复过程中的应用。提出需要进一步优化研究手段, 判断湿地中植物的化感效应及其作用结果及研究非生物环境条件变化下化感效应在湿地植物物种组成、群落结构演替等过程的作用, 并加强湿地生态修复/恢复过程中的自然化学调控系统的构建。

**关键词:** 植物; 化感效应; 群落结构; 演替; 湿地; 生态修复/恢复

中图分类号: Q948 文献标识码: A 文章编号: 1672-5948(2024)04-587-07

植物为了在生存竞争中保持优势, 通过向外界环境分泌一些次生代谢产物 (Secondary metabolites) 而对周围其他植物 (包含自身) 或微生物生长发育产生有害或有益影响的过程, 即为化感效应 (Allelopathy)<sup>[1-2]</sup>。化感效应本质上是植物在长期进化过程中形成的应对外界环境变化的一种适应机制或者适应策略。人类对植物化感效应的发现可以追溯到两千多年以前, 早在公元前3世纪和5世纪就观察到植物之间存在着某些化学物质的相互作用<sup>[3-5]</sup>。直到近半个世纪前, 特别是进入21世纪以后, 化感效应在植物种内种间关系、群落结构与演替及外来生物入侵等方面的重要作用才逐渐被认识, 相关研究也开始系统地开展起来, 植物化感效应也越来越被广泛关注并成为生态学领域的研究热点<sup>[6-15]</sup>。

湿地是介于水陆之间的过渡性生态系统, 其生态系统过程和功能的复杂性使得湿地中植物的化感效应没能得到应有的重视。一般认为, 湿地水环境对化感物质的稀释作用, 化感效应在湿地环境中的效应可能不如陆地环境普遍和强烈<sup>[16-17]</sup>;

但是, 相比于陆生植物, 湿地中的植物通常生长更迅速, 其次生代谢产物也更丰富, 具有的化感效应潜力也越大。随着实验技术手段的进步和研究的一步步深入, 很多研究表明, 化感效应在湿地中植物的物种组成、植被群落构建和演替过程、外来生物入侵及湿地生态修复/恢复等过程中具有不可忽视的作用, 植物化感效应在湿地生态环境中的作用不亚于陆地生态系统<sup>[15, 18-23]</sup>。归纳总结了当前湿地生态系统植物化感效应的研究现状, 分析了研究存在的主要问题, 并对未来的研究进行了展望, 以期对深入理解湿地中植物的化感效应对湿地生态系统诸多生态过程和功能的作用机制提供参考。

## 1 化感效应的基本概念

化感效应指植物通过分泌化感物质而对周围其他植物或微生物生长发育产生有害或有益影响<sup>[2, 5]</sup>。根据化感物质来源不同, 可以分为真化感和功能性化感。真化感的化感物质来源于植物的直接分泌和分解, 功能性化感则指植物与微生物

收稿日期: 2023-08-07; 修订日期: 2023-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(32000371)、九江学院博士科研启动基金项目(8722309)和中国环境科学研究院国家环境保护生态工业重点实验室开放基金项目(2002KFF-02)资助。

作者简介: 肖涛(1988—), 男, 湖北省潜江人, 博士, 讲师, 从事湿地植物化感效应及功能性状研究。E-mail: xiaotaoHZNU@163.com

物相互作用产生次生化感化合物<sup>[12]</sup>。

## 2 湿地中植物化感物质的种类

湿地中植物的化感物质来源于主要次生代谢途径,它们广泛分布于植物的各个器官中,分子量较小、结构简单,常见的湿地中植物的化感物质主要包括酚类、萜类和甾醇类化合物、简单的水溶性有机酸及不饱和内酯等几大类(表1)。

## 3 湿地中植物的化感物质的释放途径和作用机制

湿地中的植物可以通过叶片自然挥发、雨雾淋溶、根系分泌、植株残体和凋落物分解等多种途径,向周围环境释放化感物质。大多数植物通常选择其中一种途径释放化感物质,但是也有少部分植物可以兼有几种途径,例如水稻(*Oryza sativa*)可以通过根系分泌、残体分解和淋溶释放化感物质<sup>[26-27]</sup>。

湿地中植物的化感物质具有直接和间接两种作用机制。直接作用主要表现为直接对受体光合作用和呼吸作用、细胞膜结构和功能、相关酶活性、相关基因表达和蛋白质合成等几个方面作用<sup>[21]</sup>,间接作用主要是化感物质通过影响土壤的化学性质、营养水平及根际微生物等从而间接作用于受体<sup>[20,28]</sup>。

### 3.1 对光合作用和呼吸作用的影响

化感物质对光合作用的影响主要包括提高气孔扩散阻力、降低细胞叶绿素含量、阻断电子传递链等。例如,肉桂酸和水杨酸等数10种化感物质都可以降低植物叶片的气孔导度<sup>[29]</sup>;壬基酸可以显著降低小球藻(*Chlorella vulgaris*)和月牙藻(*Selenastrum bibraianum*)的细胞叶绿素含量,进而

抑制其光合作用<sup>[20]</sup>。化感物质阻断电子传递链的机理主要是对光系统Ⅱ(PSⅡ)的破坏。研究表明,焦性没食子酸和N-苯基-2-萘胺可以分别破坏铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)和拟柱胞藻(*Cylindrospermopsis raciborskii*)的光系统Ⅱ,进而阻断电子传递链,抑制整个细胞进行光合作用<sup>[30-31]</sup>。

化感物质对细胞呼吸作用的抑制主要是通过通过对线粒体电子传递和氧化磷酸化两个过程的限制,降低氧气吸收浓度、阻碍NADH氧化,抑制ATP酶活性。桉叶素和苜蓿抑制黄瓜(*Cucumis sativus*)线粒体对氧气吸收的作用机制主要是通过对三羧酸循环(Tricarboxylic acid cycle, TCA cycle)过程中琥珀酸和延胡索酸之间的氧化或延胡索酯转化为苹果酸过程的抑制<sup>[14]</sup>。

### 3.2 对细胞结构和功能影响

化感物质可以改变细胞膜的通透性,导致电解质外溢,从而抑制植物生长<sup>[32]</sup>。菰(*Zizania latifolia*)浸泡液会导致铜绿微囊藻细胞膜离子通道开放紊乱、细胞渗透压显著升高,细胞直径逐渐缩短、体积变小,最后藻细胞整体进入程序性死亡<sup>[32-34]</sup>。此外,化感物质还会影响植物细胞的有丝分裂过程,进而抑制受体植物的生长发育过程:一些酚类化感物质会破坏有丝分裂过程中的微管蛋白,导致纺锤体功能丧失,细胞正常分裂周期被阻断<sup>[35]</sup>。

### 3.3 改变酶活性,影响代谢途径

酶是湿地中的植物细胞新陈代谢过程不可或缺的催化物质。一些化感物质可以通过影响相关酶活性,破坏植物细胞内的正常生理动态平衡状态,从而抑制植物生长发育。凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)根系分泌化感物质可以显著降低四尾栅

表1 湿地中的植物常见化感物质的种类

Table 1 Kinds of allelochemicals of plants in wetland

化感物质主要类别	常见化感物质名称	分泌该类化感物质的典型湿地植物
酚类	羟基多酚、单宁	穗花狐尾藻( <i>Myriophyllum spicatum</i> ) <sup>[2,20]</sup>
	邻羟基苯甲酸	空心莲子草( <i>Alternanthera philoxeroides</i> ) <sup>[2,24]</sup>
萜类和甾醇类	三萜、苯丙三醇、甾醇	马蹄莲( <i>Zantedeschia aethiopica</i> ) <sup>[20]</sup>
	呋喃二萜	浮叶眼子菜( <i>Potamogeton natans</i> ) <sup>[20]</sup>
简单水溶性有机酸	$\alpha$ -亚麻酸、 $\alpha$ -亚油酸	宽叶香蒲( <i>Typha latifolia</i> ) <sup>[16,20]</sup>
	咖啡酸、 $\beta$ -香豆酸、没食子酸	南方香蒲( <i>Typha domingensis</i> ) <sup>[10,20]</sup>
不饱和内酯	二氢猕猴桃内酯	荸荠属一种( <i>Eleocharis cdoradoensis</i> ) <sup>[20]</sup>
	邻苯二甲酸二丁酯	芦苇( <i>Phragmites australis</i> ) <sup>[25]</sup>
	亚油酸甘油酯、N-苯基萘胺	凤眼莲( <i>Eichhornia crassipes</i> ) <sup>[2]</sup>

藻(*Scenedesmus quadricauda*)的超氧化物歧化酶活性,使细胞体内活性氧产生和去除失衡,导致活性氧快速积累,藻体细胞超过耐受极限死亡<sup>[36]</sup>。荇菜(*Nymphoides peltata*)种植水则对铜绿微囊藻三磷酸腺苷酶活性有显著抑制作用,导致藻体细胞对钙、镁等重要矿质元素的吸收能力严重弱化,从而加剧藻细胞凋亡<sup>[37]</sup>。

### 3.4 对相关基因表达和蛋白质合成的影响

化感物质作用机制在基因层面的相关研究目前还不多,一般认为化感物质会通过阻碍DNA的转录和翻译来影响蛋白质的合成。小球藻(*Chlorella vulgaris*)经过外源化感物质N-苯基-2-萘胺处理后,其psa B和psb C基因表达过程中的转录阶段会受到显著抑制<sup>[38]</sup>。焦性没食子酸可以导致铜绿微囊藻细胞DNA修复基因(recA、gyrB)表达上调,同时胁迫反应基因(prx、ftsH、grpE和fabZ)表达水平显著降低,进而调控相关蛋白质合成状况,使得抗氧化酶活性增强<sup>[39]</sup>。

### 3.5 对土壤化学性质和营养水平的影响

化感物质与土壤矿质元素间的络合、吸附及酸溶解等活动会对土壤化学性质和营养水平产生一定影响。酚类物质会与土壤中阴离子竞争 $Fe^{2+}$ 、 $Mn^{2+}$ 、 $Al^{3+}$ 等金属阳离子,并通过与有机氮和磷结合成复合物,进而增加磷的供给、提高土壤营养水平和养分归还效率<sup>[40]</sup>。美国加利福尼亚州湿地沼松(*Pinus muricata*)叶提取物聚合酚会显著影响土壤可溶性有机氮的释放过程及速率<sup>[41]</sup>。将香草醛和对羟基苯甲酸2种化感物质加入土壤,结果表明2种化感物质都可以显著降低土壤有效氮和有效钾含量而提升有效磷含量<sup>[19]</sup>。

### 3.6 对根际微生物活动的影响

化感物质可以通过影响根际微生物组成、群落结构和多样性等,改变周围微生态环境,间接对其他植物产生化感效应<sup>[42-43]</sup>。例如,紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)根茎提取液能够显著提高细菌、真菌及一些好氧微生物数量,从而打破原生植被与土壤之间的生态环境平衡,抑制原生植被的生长发育,形成对自身有利的土壤生态环境,增强其入侵能力<sup>[44]</sup>。

## 4 化感效应对湿地中的植物物种组成和群落结构的影响

经典生态学理论一般认为影响湿地物种组成

和群落结构的主要驱动因子是资源竞争(Resource competition),但是越来越多的研究表明,湿地中的植物的化感效应也会显著影响湿地物种组成和群落结构特征,是湿地群落构建的重要机制之一<sup>[45-47]</sup>。研究表明,野生稻(*Oryza rufipogon*)与其伴生种慈姑(*Sagittaria trifolia*)之间存在化感抑制效应,慈姑通过更强的化感效应,能够显著抑制普通野生稻根系的生长,甚至可能在群落次生演替中取代普通野生稻<sup>[27]</sup>。空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)具有水陆两种不同生态型,通常空心莲子草水生群落相比陆生群落物种多样性更低,研究表明,可能是由于前者的可溶性蛋白、黄酮等抗氧化化合物含量较高,超氧化物酶歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶等保护酶活性较强,因此可能对周围环境具有更高的化感效应<sup>[24]</sup>。青藏高原高寒草甸湿地典型植物瑞香狼毒(*Stellera chamaejasme*)通过花粉化感效应能够抑制其周围物种湿生扁蕾(*Gentianopsis paludosa*)、鳞叶龙胆(*Gentiana squarrosa*)和高原毛茛(*Ranunculus tanguticus*)等的有性繁殖过程,进而可能影响它们的种群繁衍<sup>[48]</sup>。一些沉水植物如苦草(*Vallisneria spiralis*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)和穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)等可以通过化感效应抑制湿地水体浮游植物群落繁殖,从而调控藻类群落结构特征<sup>[49]</sup>。在水稻田中,具有化感效应的水稻品种(如化感水稻PI312777)根系分泌的一些化感物质如酚酸、半蒽化合物和胡桃醌等,会抑制其根际真菌群落生长,促进细菌群落生长,而另外一些含硫化合物则会促进放线菌群落生长<sup>[50]</sup>。

## 5 化感效应对湿地中的植物群落演替过程的影响

湿地群落演替过程不仅受水文特征、营养状况等多种环境因子的影响,化感效应也是其重要的驱动力之一<sup>[51]</sup>。并且,化感效应不仅影响湿地群落演替的先锋阶段,对包括亚顶级群落和顶级群落演替阶段在内的几乎所有演替阶段都能产生影响<sup>[11]</sup>。藨草(*Phalaris arundinacea*)是滨江湿地原生演替过程中的典型先锋种群,具有强大的抗逆性,演替过程一般经历裸地、藨草群落、藨草—芦苇(*Phragmites australis*)群落,最终达到顶级群落即芦苇群落,研究表明该演替过程中芦苇群落最终替代藨草群落成为演替最终顶级群落,原因可

能是由于芦苇根、茎、叶及植株凋落物分解过程中均具有较强的化感效应,通过强烈的化感效应抑制了藨草群落发展并最终对其替代<sup>[8]</sup>。随着水体富营养化的加剧,众多湖泊湿地正经历着由“草型植物群落”向“藻型植物群落”转变的演替过程,该演替过程中化感作用可能起着重要作用<sup>[52]</sup>。例如,研究发现常见水华蓝藻之一的铜绿微囊藻产生的化感物质微囊藻毒素-LR(MC-LR)能使水蕴草(*Elodea canadensis*)、金鱼藻等高等植物的光合放氧速率显著降低,进而使湖泊湿地中这些植物群落由最初的优势地位逐渐演替成为从属地位<sup>[7,52]</sup>。

## 6 化感效应对湿地外来生物入侵的影响

当前外来生物入侵已经成为区域生态环境安全和社会经济可持续发展的严重威胁<sup>[53-54]</sup>。湿地生态系统由于生境类型多样、分布广泛、受人类社会经济发展干扰强烈等原因,是最易受外来生物入侵的生态系统之一<sup>[55]</sup>,因此,了解湿地生态系统外来生物的入侵机制具有重要意义。前人提出了入侵植物的“新武器假说”(Novel weapon hypothesis)并对此假说做出了大量基础性研究,化感效应对外来植物成功入侵的重要作用越来越被广泛认知和关注<sup>[18,21]</sup>。但是由于湿地水环境对化感物质的稀释作用,一般认为化感作用在湿地生态系统中的效应不如陆地生态系统强烈和普遍<sup>[17]</sup>,以往研究湿地外来植物入侵机制也主要考虑的是种间竞争,而对植物是否会通过化感效应增强种间竞争能力的关注不够。随着技术手段革新和研究的深入,越来越多研究表明,化感效应对湿地外来植物成功入侵也可能具有关键作用<sup>[56-60]</sup>。狭叶香蒲(*Typha angustifolia*)是北美的一种外来入侵植物,通常在受干扰的湿地中形成单一栽培种,比其同属的本地香蒲更具侵略性,其强大的入侵能力可能与该植物在入侵北美湿地时使用了一种新的可溶性酚类化感物质高度相关<sup>[16]</sup>。入侵中国沿海滩涂及河口湿地的互花米草(*Spartina alterniflora*),可以通过分泌化感物质分别抑制本土植物海三棱藨草(*Scirpus mariqueter*)种子萌发和短叶茼蒿(*Cyperus malaccensis*)根系分蘖,促进其入侵<sup>[1,26]</sup>。研究表明,典型入侵植物加拿大一枝黄花(*Solidago Canadensis*)和春飞蓬(*Erigeron philadelphicus*)成功入侵杭州湾湿地也可能与它们具有强烈的化感

能力有关<sup>[61]</sup>。总体上,化感效应在湿地生态系统外来植物入侵中的作用可能不亚于陆地生态系统,探究湿地外来植物入侵化感效应机制的研究已取得了一定进展;当前,众多探究外来入侵植物化感效应的研究大都还是在实验室进行,方法主要是通过提取外来入侵植物各部位浸提液作用于本地植物或是对化感效应敏感的蔬菜种子,如此只能证明入侵植物化感效应的存在,不能很好地证明化感效应是相关植物入侵成功的主要驱动力,因此,后续还须加强湿地外来入侵植物化感效应的长期原位实验研究,以更好地解释其成功入侵的化感效应作用机制<sup>[62-64]</sup>。

## 7 化感效应在湿地生态修复/恢复过程中的应用

湿地生态修复/恢复,水体是“灵魂”、植被是关键,厘清湿地生态修复/恢复过程中各引种植物之间相互的化感效应化学生态关系<sup>[65-66]</sup>,有助于科学指导湿地生态修复/恢复过程中植物物种的选择与合理配置,降低修复/恢复成本,缩短修复/恢复时间,提高湿地生态修复/恢复成功率<sup>[67]</sup>。研究表明,利用无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)对互花米草的化感作用,可以有效促进沿海滩涂红树林湿地的生态修复/恢复<sup>[68-69]</sup>。在内陆浅水湖泊、坑塘的修复/恢复过程中,防控湿地水-沉积物界面上由藻类和光能自养微生物等形成的“底栖生物膜(Benthic biofilm)”的过度生长对整体生态系统的正常运行构成威胁是一个需要重点关注的方面,通过组合多种大型水生植物的实验发现,苦草和轮藻(*Chara globularis*)的组合可以显著抑制浅水湖泊和坑塘“底栖生物膜”的过度发育<sup>[70]</sup>。

## 8 总结与展望

湿地中的植物的化感效应研究虽然起步较晚,但是在化感物质的释放途径和作用机制、化感效应对湿地物种组成和群落结构的影响、化感效应对湿地中的植物群落演替和外来生物入侵的影响及化感效应在湿地生态修复/恢复过程中的应用等方面取得了显著的研究进展。总体上,对于湿地中的植物的化感效应的认识还处于初级阶段,今后可以在如下方面加强研究。

判断湿地中的植物的化感效应及其作用结果需要进一步优化研究手段,应采取更加科学合理

的实验设计,充分考虑野外实际生境多重因素(如水生植物化感物质在水体中的自然扩散、种间竞争及不同化感物质之间的协同拮抗作用等)的影响,结合室内控制实验和野外小区实验进行对比分析、相互印证,以提高湿地中的植物的化感效应评判的严谨性和规范性,增加研究结果的可信度。

水体富营养化、土壤或水体中农药和重金属含量超标等环境因素变化将会如何影响湿地中的植物的化感效应,进而作用于湿地中植物的群落物种组成、群落结构演替等过程?目前,相关研究还较少,今后需要就此方向加强研究。

加强湿地生态修复/恢复过程中自然化学调控系统的构建。建议应当就目前对于湿地中植物的化感效应知识的掌握,充分利用植物之间的有益化学相互作用,避免或降低有害化学相互作用,挖掘或培育对湿地病虫害等具有较强化学防御功能的植物品种,构建湿地生态修复/恢复过程中的自然化学调控系统。

## 参考文献

- [1]陈依婷, 乔文慧, 曾从盛. 闽江河口入侵植物互花米草对短叶茳芏的化感效应[J]. 应用海洋学报, 2018, **37**(1): 45-52.
- [2]孔垂华, 胡飞, 王朋. 植物化感(相生相克)作用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [3]何池全, 赵魁义. 植物的生化他感效应及其在湿地研究中的应用[J]. 生态学杂志, 1999, **18**(4): 46-51.
- [4]MULLER C H. Allelopathy as a factor in ecological process[J]. *Plant ecology*, 1969, **18**(1): 348-357.
- [5]RICE E L. Allelopathy [M]. New York: Academic Press, 1984.
- [6]杜照奎, 李钧敏, 钟章成. 空心莲子草水浸提液的化感作用及化感物质分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, **34**(8): 53-60.
- [7]方婷轩, 马增岭. 铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)次生代谢物对普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)生长及有效量子产率的影响[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(3): 732-740.
- [8]付为国, 尹淇淋, 李萍萍, 等. 镇江滨江湿地芦苇腐解物化感作用对藨草生长指标的影响[J]. 湿地科学, 2015, **13**(1): 118-123.
- [9]高施楠, 何诗甜, 刘淑桐, 等. 入侵植物互花米草对本土红树植物秋茄的化感效应[J]. 杂草科学, 2021, **39**(2): 7-13.
- [10]何池全, 叶居新. 石菖蒲(*Acorus tatarinowii*)克藻效应的研究[J]. 生态学报, 1999, **19**(5): 754-758.
- [11]平晓燕, 王铁梅. 植物化感作用的生态学意义及在草地生态系统中的研究进展[J]. 草业学报, 2018, **27**(8): 175-184.
- [12]强胜. 杂草学[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2009.
- [13]任元丁, 尚占环, 龙瑞军. 中国草地生态系统中的化感作用研究进展[J]. 草业科学, 2014, **31**(5): 993-1002.
- [14]师小平, 陈银萍, 闫志强, 等. 植物化感作用研究进展[J]. 生物技术通报, 2020, **36**(6): 215-222.
- [15]HIERRO J L, CALLAWAY R M. The ecological importance of allelopathy[J]. *Annual review of ecology evolution and systematics*, 2021, **52**: 25-45.
- [16]JARCHOW M E, COOK B J. Allelopathy as a mechanism for the invasion of *Typha angustifolia*[J]. *Plant ecology*, 2009, **204**: 113-124.
- [17]MORRIS C, GROSSL P R, CALL C A. Elemental allelopathy: processes, progress, and pitfalls [J]. *Plant ecology*, 2009, **202**: 1-11.
- [18]吴锦容, 彭少麟. 化感—外来入侵植物的“Novel Weapons”[J]. 生态学报, 2005, **25**(11): 3093-3097.
- [19]席蓉, 郝建锋. 植物化感作用及其生态学意义[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(14): 8196-8198, 8218.
- [20]鲜啟鸣, 陈海东, 邹惠仙, 等. 淡水水生植物化感作用研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, **24**(6): 664-669.
- [21]CALLAWAY R M, RIDENOUR W M. Novel weapons: invasive success and the evolution of increased competitive ability[J]. *Frontiers in ecology and the environment*, 2004, **2**(8): 436-443.
- [22]CHEN B M, LIAO H X, BIN C W, *et al.* Role of allelopathy in plant invasion and control of invasive plants[J]. *Allelopathy*, 2017, **41**: 155-166.
- [23]INDERJIT W D A, KARBAN R, CALLAWAY R M. The ecosystem and evolutionary context of allelopathy[J]. *Trends ecology evolution*, 2011, **26**(12): 655-662.
- [24]ZUO S P, MA Y Q, SHINOBU I. Differences in ecological and allelopathic traits among *Alternanthera philoxeroides* populations [J]. *Weed biology and management*, 2012, **12**(3): 123-130.
- [25]UDDIN M N, ROBINSON R W. Allelopathy and resource competition: the effects of *Phragmites australis* invasion in plant communities[J]. *Botanical studies*, 2017, **58**: 29.
- [26]汤鹏, 于鲁冀, 彭赵旭, 等. 水生植物化感作用抑藻研究进展[J]. 生物学杂志, 2021, **38**(4): 104-108.
- [27]汪秀芳, 邢伟, 萧葳, 等. 湿地植物普通野生稻和慈姑之间的化感作用[J]. 植物科学学报, 2011, **29**(3): 307-311.
- [28]朱细娥. 外来种互花米草对九段沙湿地植物及其丛枝菌根真菌的化感效应[D]. 上海: 上海大学, 2014.
- [29]PATTERSON D T. Effects of allelopathic chemicals on growth and physiological responses of soybean (*Glycine max*) [J]. *Weed science*, 1981, **29**(1): 53-59.
- [30]刘瑞, 白芳, 冉小飞, 等. N-苯基-2-萘胺对拟柱胞藻生长、抗氧化酶及光合系统 II 的影响[J]. 水生生物学报, 2015, **39**(4): 774-781.
- [31]LIU Y, LI F, HUANG Q X. Allelopathic effects of gallic acid from *Aegiceras corniculatum* on *Cyclotella caspia*[J]. *Journal of environmental sciences*, 2013, **25**(4): 776-784.
- [32]ŠOLN K, KLEMENČIČ M, KOCE J D. Plant cell responses to allelopathy: from oxidative stress to programmed cell death[J]. *Protoplasma*, 2022, **259**(5): 1111-1124.
- [33]荆晓玲, 李林, 汪淑贞, 等. 鄱阳湖洲滩菰浸泡液对铜绿微囊藻生长的影响[J]. 环境科学与技术, 2019, **42**(2): 12-16.

- [34] HE Y, ZHOU Q, LIU B, *et al.* Programmed cell death in the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* induced by allelopathic effect of submerged macrophyte *Myriophyllum spicatum* in co-culture system[J]. Journal applied phycology, 2016, **28**: 2805-2814.
- [35] 赵锐明, 郭凤霞, 赵庆芳, 等. 6种化感物质对鬼针草种子萌发及根尖细胞有丝分裂的影响[J]. 草地学报, 2014, **22**(1): 166-174.
- [36] PEI Y, LIU L, HILT S, *et al.* Root exudated algicide of *Eichhornia crassipes* enhances allelopathic effects of cyanobacteria *Microcystis aeruginosa* on green algae[J]. Hydrobiologia, 2018, **823**: 67-77.
- [37] 汪丽, 王国祥, 唐晓燕, 等. 荇菜(*Nymphoides peltatum*)对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)生长的抑制效应及其机制[J]. 生态与农村环境学报, 2010, **26**(3): 257-263.
- [38] 吴程, 常学秀, 董红娟. 粉绿狐尾藻(*Myriophyllum aquaticum*)对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)的化感抑制效应及其生理机制[J]. 生态学报, 2008, **28**(6): 2595-2603.
- [39] WANG J, LIU Q, FENG J, *et al.* Effect of high-doses pyrogallol on oxidative damage, transcriptional responses and microcystins synthesis in *Microcystis aeruginosa* TY001 (*Cyanobacteria*) [J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2016, **134**: 273-279.
- [40] 肖辉林, 彭少麟, 郑煜基, 等. 植物化感物质及化感潜力与土壤养分的相互影响[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(9): 1747-1750.
- [41] NORTHUP R R, YU Z S, DALIGREN R A, *et al.* Polyphenol control of nitrogen release from pine litter[J]. Nature, 1995, **377**: 227-229.
- [42] GAO J W, GUAN B, GE M J, *et al.* Can allelopathy of *Phragmites australis* extracts aggravate the effects of salt stress on the seed germination of *Suaeda salsa*? [J]. Frontiers in plant science, 2022, **13**: 990541.
- [43] QU T, DU X, PENG Y, *et al.* Invasive species allelopathy decreases plant growth and microbial activity[J]. PLoS one, 2021, **16**(2): e0246685.
- [44] 李霞霞, 张钦弟, 朱珣之. 近十年入侵植物紫茎泽兰研究进展[J]. 草业科学, 2017, **34**(2): 283-292.
- [45] LALBIAKDIKA, LALNUNMAWIA F, LALRUATSANGA H. Allelopathic effect of common weeds on germination and seedling growth of rice in wetland paddy fields of Mizoram, India [J]. Plant, soil and environment, 2022, **68**: 393-400.
- [46] LI F R, LIANG S C, LI M, *et al.* The effects of N deposition on allelopathic potential of invasive plant *Spartina alterniflora* Loisel[J]. Allelopathy journal, 2017, **41**(2): 201-210.
- [47] REYNOLDS S A, ALDRIDGE D C. Embracing the allelopathic potential of invasive aquatic plants to manipulate freshwater ecosystems [J]. Frontiers in environmental science, 2021, **8**: 551803.
- [48] 孙庚, 罗鹏, 吴宁. 瑞香狼毒对青藏高原东部高寒草甸主要物种花粉萌发和种子结实的花粉化感效应[J]. 生态学报, 2010, **30**(16): 4369-4375.
- [49] 姚远, 贺锋, 胡胜华, 等. 沉水植物化感作用对西湖湿地浮游植物群落的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(4): 971-978.
- [50] 胡开辉, 罗庆国, 汪世华, 等. 花感水稻根际微生物类群及酶活性变化[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(6): 1060-1064.
- [51] THIÉBAUT G, THOUVENOT L, RODRÍGUEZ-PÉREZ H. Allelopathic effect of the invasive *Ludwigia hexapetala* on growth of three macrophyte species [J]. Frontiers in plant science, 2018, **9**: 1835.
- [52] PFLUGMACHER S. Possible allelopathic effects of cyanotoxins, with reference to microcystin-LR, in aquatic ecosystems[J]. Environmental toxicology, 2002, **17**: 407-413.
- [53] 鞠瑞亭, 李慧, 石正人, 等. 近十年中国生物入侵研究进展[J]. 生物多样性, 2012, **20**(5): 581-611.
- [54] BAIS H P, VEPACHEDU R, GILROY S, *et al.* Allelopathy and exotic plant invasion: from molecules and genes to species interactions [J]. Science, 2003, **301**: 1377-1380.
- [55] 李洪远, 孟伟庆. 湿地中的植物入侵及湿地植物的入侵性[J]. 生态学杂志, 2006, **25**(5): 577-580.
- [56] HUSSNER A, HEIDBÜCHEL P, COETZEE J, *et al.* From introduction to nuisance growth: A review of traits of alien aquatic plants which contribute to their invasiveness[J]. Hydrobiologia, 2021, **848**(9): 2119-2151.
- [57] POLECHOŃSKA L, GLEŃSK M, KLINK A, *et al.* Allelopathic potential of invasive wetland plant *Veronica peregrina* [J]. Plant biosystems- an international journal dealing with all aspects of plant biology, 2020, **154**(4): 481-487.
- [58] SVENSSON J R, NYLUND G M, CERVIN G, *et al.* Novel chemical weapon of an exotic macroalga inhibits recruitment of native competitors in the invaded range[J]. Journal of ecology, 2013, **101**: 140-148.
- [59] XU D, GAO Z Q, ZHANG X W, *et al.* Allelopathic interactions between the opportunistic species *Ulva prolifera* and the native macroalga *Gracilaria lichvoides* [J]. PloS one, 2012, **7**(4): e33648.
- [60] ZHANG Z J, LIU Y J, YUAN L, *et al.* Effect of allelopathy on plant performance: a meta-analysis[J]. Ecology letters, 2021, **24**(2): 348-362.
- [61] 叶小齐, 宁祖林, 吴明. 杭州湾湿地围垦区42种草本植物化感潜力和优势度关系的研究[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2021, **20**(6): 596-602.
- [62] 缪丽华, 王媛. 外来水生植物再力花的化感作用探析[J]. 湿地科学, 2012, **10**(1): 81-86.
- [63] CIPOLLINI K A, SCHRADIN K. Guilty in the court of public opinion: Testing presumptive impacts and allelopathic potential of *Ranunculus ficaria* [J]. American midland naturalist, 2011, **166**: 63-74.
- [64] DHAOU D, BALDY V, VAN TAN D, *et al.* Allelopathic potential of mangroves from the Red River Estuary against the rice weed *Echinochloa crus-galli* and variation in their leaf metabolome[J]. Plant, 2022, **11**(19): 2464.
- [65] 梁雪, 贺锋, 徐栋, 等. 人工湿地植物的功能与选择[J]. 水生态学杂志, 2012, **33**(1): 131-138.

- [66]陆茜, 张金池. 化感作用在水土保持生物措施治理中的应用研究[J]. 江西农业大学学报, 2013, **35**(6): 1333-1340.
- [67]ROJO C, SEGURA M, RODRIGO M A. The allelopathic capacity of submerged macrophytes shapes the microalgal assemblages from a recently restored coastal wetland[J]. Ecological engineering, 2013, **58**: 149-155.
- [68]JING L, PENG S L, CHEN L Y, *et al.* Use of *Sonneratia apetala* allelopathy to control *Spartina alterniflora* weed[J]. Allelopathy journal, 2010, **25**(1): 123-132.
- [69]ZHOU T, LIU S C, FENG Z L, *et al.* Use of exotic plants to control *Spartina alterniflora* invasion and promote mangrove restoration [J]. Scientific reports, 2015, **5**: 12980.
- [70]GETTE- BOUVAROT M, MERMILLOD- BLONDIN F, LEMOINE D, *et al.* The potential control of benthic biofilm growth by macrophytes: A mesocosm approach [J]. Ecological engineering, 2015, **75**: 178-186.

## Research Advances in Allelopathy of Plants in Wetland

XIAO Tao<sup>1</sup>, SHI Qiangsheng<sup>1</sup>, LIU Songping<sup>2</sup>, WEN Yi<sup>1,3</sup>

- (1. Jiangxi Yangtze River Economic Zone Research Institute, Jiujiang University, Jiujiang 332005, Jiangxi, P.R.China; 2. Lushan Botanical Garden, Jiangxi Province and Chinese Academy of Sciences, Jiujiang 332005, Jiangxi, P.R.China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-Industry, Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, P.R.China)

**Abstract:** Allelopathy of plants in wetland is of great significance for revealing the mechanism of plant species composition and distribution, community succession and biological invasion in wetland ecosystem. Based on the basic concept and variety/categories of allelopathy of plants in wetland and its means of release and action mechanisms, this paper discusses the main contents of current plants in wetland allelopathy researches from the following aspects: Allelopathic effects on species composition and community structure of plants in wetland. Allelopathic effects on the succession process of plant communities in wetland. Allelopathic effects on invasive processes of exotic plants. Application of allelopathy of plants in wetland ecological restoration. It is suggested that further optimization of research methods should be used to evaluate the allelopathic effects of plants in wetland and their results, and to study the effects of allelopathic effects on the processes of vegetation species composition and community structure succession under the changes of abiotic environmental conditions, and to strengthen the construction of natural chemical regulatory systems in the process of wetland ecological restoration.

**Keywords:** plant; allelopathy; community structure; succession; wetland; ecological restoration