

# 两种沉水植物在不同水深和生长时期对入侵植物的响应



阿斯哈<sup>1</sup> 高海燕<sup>2</sup> 沈一夔<sup>1</sup> 孙凯<sup>1</sup> 薛晶晶<sup>1</sup> 蔡竟芳<sup>1</sup>  
程蕊<sup>1</sup> 杨丽娟<sup>1</sup> 李红丽<sup>1\*</sup>

(1. 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083; 2. 鄂尔多斯生态环境职业学院, 内蒙古鄂尔多斯 017010)

**摘要:** 为研究沉水植物在不同水深和生长时期对不同种类入侵植物的响应, 选取2种湿地入侵植物凤眼莲 *Eichhornia crassipes*、水盾草 *Cabomba caroliniana* 和2种常见本地沉水植物黑藻 *Hydrilla verticillata*、菹草 *Potamogeton crispus* 为研究对象, 通过模拟试验探究在不同水深(0.2、0.4 m)和生长时期(生长初期和生长旺期)的本地沉水植物对2种入侵植物的响应。结果显示, 当水深为0.4 m时更有利于黑藻的生长, 并可削弱入侵植物对黑藻生长的消极作用, 而水深对菹草的生长无显著影响; 入侵植物种类对本地沉水植物的生长无显著影响, 但影响方式却存在差异, 其中水盾草倾向于直接抑制本地沉水植物的生长, 而凤眼莲可以通过降低水体透明度以及总磷含量进而间接抑制本地沉水植物的生长。此外, 外来植物在本地沉水植物生长初期入侵对本地沉水植物产生的消极影响较生长旺期入侵时更显著。表明凤眼莲及水盾草入侵对本地沉水植物生长的影响机制存在差异, 本地沉水植物在适宜水深和生长旺期对2种入侵植物具有更强的抵抗能力。

**关键词:** 植物入侵; 沉水植物; 水深; 生长时期; 凤眼莲; 水盾草; 黑藻; 菹草

## Responses of two submerged plants to invasive plants at different water depths and growth periods

Asiha<sup>1</sup> Gao Haiyan<sup>2</sup> Shen Yiluan<sup>1</sup> Sun Kai<sup>1</sup> Xue Jingjing<sup>1</sup> Cai Jingfang<sup>1</sup>  
Cheng Rui<sup>1</sup> Yang Lijuan<sup>1</sup> Li Hongli<sup>1\*</sup>

(1. School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Ordos Vocational College of Eco-environment, Ordos 017010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

**Abstract:** In order to investigate the responses of submerged plants to different species of invasive plants in different water depths and growth periods, two wetland invasive plants, *Eichhornia crassipes* and *Cabomba caroliniana*, and two common native submerged plants, *Hydrilla verticillata* and *Potamogeton crispus*, were selected to investigate the response of native submerged plants to two invasive plants in different water depths (0.2, 0.4 m) and growth periods (early growth and peak growth) through simulation experiments. The results showed that the water depth of 0.4 m was more favorable to the growth of *H. verticillata* and could weaken the negative effect of invasive plants on the growth of *H. verticillata*, while the water depth had no significant effect on the growth of minced grass; the invasive plant species did not have a significant effect on the growth of native submerged plants, but there were differences in the mode of influence, in which *C. caroliniana* tended to inhibit the growth of native submerged plants, while *E. crassipes* could inhibit the growth of native submerged plants indirectly by decreasing the transparency of the water body and the content of total phosphorus. Total phosphorus con-

tent indirectly inhibited the growth of native submerged plants. In addition, the negative impacts of invasive plants on native submerged plants were more pronounced during the early stage of growth than those during the peak growth period of native submerged plants. These results suggested that there were differences in the mechanisms of the invasive effects on the growth of native submerged plants, and that native submerged plants were more resistant to the two invasive plants in the appropriate water depth and during the peak growth period.

**Key words:** plant invasion; submerged plant; water level; growth period; *Eichhornia crassipes*; *Cabomba caroliniana*; *Hydrilla verticillata*; *Potamogeton crispus*

生物入侵已成为全球性生态环境问题(杨力凤等, 2023), 严重威胁着本地物种的多样性和生态系统的稳定性(王从彦等, 2012; Xu et al., 2022; 赵彩云等, 2019)。随着生物入侵形势的日益严峻, 湿地生态系统中外来植物入侵的影响已成为生态学研究的重要议题(董贤茹, 2017; Huang et al., 2022)。沉水植物对水生生态系统的健康和稳定起着关键作用(Stansfield et al., 1997; 龚梦丹, 2020), 应高度重视其对外来植物入侵的响应。由于缺少天敌, 外来入侵植物的繁殖能力和竞争力强(王春林等, 2005), 在成功入侵本土水生环境后可以快速繁殖扩张, 从而占据本地沉水植物的生存空间, 抑制本地沉水植物生长繁殖(Louback-Franco et al., 2020)。此外, 外来入侵的水生植物还可以通过改变水体的理化性质来间接影响沉水植物的生存(Lazzaro et al., 2020)。

沉水植物的生长繁殖受到诸多水体环境因素的影响, 入侵植物在不同水体环境中对本地沉水植物的影响往往也存在差异(Li et al., 2021)。其中, 水深是影响沉水植物生长和繁殖的重要水体环境因素之一(穆亚楠等, 2018)。在不同水深下, 沉水植物生长繁殖所需的氧气、光照和养分循环途径都会发生变化, 从而影响其对入侵植物的响应(Fraser & Karnezis, 2005; 王涛, 2021)。另外, 水深也同样会影响入侵植物的生长繁殖, 进而影响其入侵能力(Huang et al., 2022)。例如, 随着水深增加, 入侵种穗状狐尾藻 *Myriophyllum spicatum* 的分枝数明显减少, 但分枝长度显著变长(Hussner et al., 2009)。

此外, 入侵植物在不同生长时期往往具有不同的生长性状, 这导致其在不同生长时期的入侵能力也存在差异(Beckmann et al., 2011)。如少花蔊藜草 *Cenchrus pauciflorus* 在不同生长时期的生长性状不同, 而生长性状往往会影响其生存和竞争能力, 从而影响其入侵能力(霍艳利等, 2021)。同样, 本地植物在不同生长时期也具有不同的生长速率、形态性状

和资源利用效率。如白刺 *Nitraria tangutorum* 在不同生长时期的不定根结构均为人字形, 而随着其生长, 各级根系直径逐渐增大, 灌木分枝逐渐复杂化, 资源利用范围逐渐扩大(Li et al., 2022), 这可能更有利于其在与入侵植物的竞争中获得优势。另外, 本地植物在不同生长时期对根际土壤的影响也存在差异。如抽薹期当归 *Angelica sinensis* 的根际土壤中参与氮循环的脲酶活性明显升高, 而参与碳循环的蔗糖酶活性明显下降(谢田朋等, 2023)。因此, 推测本地植物在不同生长时期对入侵植物的响应也会存在差异, 并进一步影响其对入侵植物的抵抗力。然而, 目前关于本地植物在不同生长时期对入侵植物响应的研究较少, 尤其是关于本地沉水植物在不同生长时期对入侵植物响应的研究极少。

凤眼莲 *Eichhornia crassipes* 是雨久花科凤眼蓝属的一种浮水植物, 被列入世界百大外来入侵种之一, 原产于巴西, 作为动物饲料引入中国后入侵了长江流域、黄河流域以及华南各省(Thamaga & Dube, 2018; 张羽等, 2022)。水盾草 *Cabomba caroliniana* 是莼菜科水盾草属的一种沉水植物, 原产于南美洲, 作为观赏性植物引入中国后入侵了江苏、上海和北京等省市的水域(朱宏等, 2019)。黑藻 *Hydrilla verticillata* 是水鳖科黑藻属的一种多年生沉水草本, 广泛分布于欧亚大陆热带至温带地区(刘孟梅等, 2022); 菹草 *Potamogeton crispus* 是眼子菜科眼子菜属的一种多年生沉水草本, 属于世界广布种(胡傲等, 2022)。黑藻和菹草在我国多应用于园林水系中的水下生态系统构建, 有利于水体健康与稳定的同时也是很多鱼类喜食的饲料型植物。目前, 国内外关于水生入侵植物对本地沉水植物的影响已有一定研究(Adams et al., 2021; Mazurczyk & Brooks, 2022), 但关于不同类型沉水植物在不同水深和生长时期对湿地入侵植物的响应尚不明确。本研究选取2种不同类型的湿地入侵植物凤眼莲和水盾草及2种常见

的本地沉水植物黑藻和菹草为材料,分析2种入侵植物在不同水深和生长时期对本地沉水植物生长的影响以及对水质的改变,以期对湿地入侵植物的防治和本地沉水植物的恢复提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

**供试植物和底泥:**入侵植物水盾草于2021年8月从北京市圆明园的水域中采集,处于生长旺盛期,凤眼莲于2021年8月购自于浙江金华竹文园艺店,处于生长旺盛期;本地沉水植物黑藻和菹草于2021年8月采集自北京奥林匹克森林公园,选取生长状况良好且外形特征基本一致的幼苗期植株,同时采集供试底泥。以上植物统一在北京林业大学三坝园苗圃进行常规培养,分别在高16 m、直径15 cm的聚乙烯容器中培养7 d后供试。

**试剂和仪器:**本试验所用试剂均为国产分析纯。UV-5100B 紫外可见分光光度计,上海元析仪器有限公司;FXB101-1 烘箱,上海坤诚科学仪器有限公司;HFD-TMDI 便携式透明度仪,北京恒奥德仪器仪表有限公司。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 试验设计

本研究采用三因素试验设计,设置2种入侵植物(水盾草和凤眼莲)在2种水深(0.2 m和0.4 m)和本土沉水植物2个生长时期(生长初期和生长旺期)的入侵试验,在北京市海淀区北京林业大学三坝园进行,于2021年8月10日开始,9月25日收获,共计

45 d。由于前人研究中水深设置多从0.5 m深度开始(蓝于倩等,2018;李启升等,2019),缺乏对较0.5 m更浅水位的研究,且凤眼莲作为浮水植物可能会对浅水位沉水植物的生长造成影响,所以本研究的水深梯度设置较浅,分别为0.2 m和0.4 m。使用高16 cm、直径15 cm的聚乙烯容器,容器底部放置10 cm厚的底泥,选取生长状态良好且生物特征基本一致的约12 cm高的黑藻和菹草幼株,在每个容器中各种植2株,植株基部5 cm种植在底泥中,其余部分漂浮在水中。利用边长50 cm的方形塑料水桶,将大小为60 cm×60 cm的铁网置于桶上,桶内蓄满自来水,通过棉线在铁网上悬挂上述种植好的聚乙烯容器来控制水位,确保水深分别为0.2 m和0.4 m。本研究共设置10个处理,分别为0.2 m及0.4 m水深无入侵植物处理2个对照、0.2 m及0.4 m水深水盾草分别于本地植物生长初期和生长旺期入侵4个处理、0.2 m及0.4 m水深凤眼莲分别于本地植物生长初期和生长旺期入侵4个处理。每个处理设5个重复。水盾草为沉水植物,与本地沉水植物种植方式相同,每个容器中种植2株;凤眼莲为浮水植物且植株个体较大,每个容器上方种植1株。根据实地调查情况,在本地沉水植物群落的生长初期(种植后10 d)和生长旺期(种植后20 d)进行2种入侵植物的定植,实现不同时期的植物入侵(图1)。试验期间每3 d浇1次水,以保证水桶内水深基本不变,水体为未经处理的当地自来水(总氮含量为0.47 mg/L,总磷含量为0.021 mg/L),浇水时水贴容器壁缓慢流下,避免水体有较大流动对植株造成干扰。

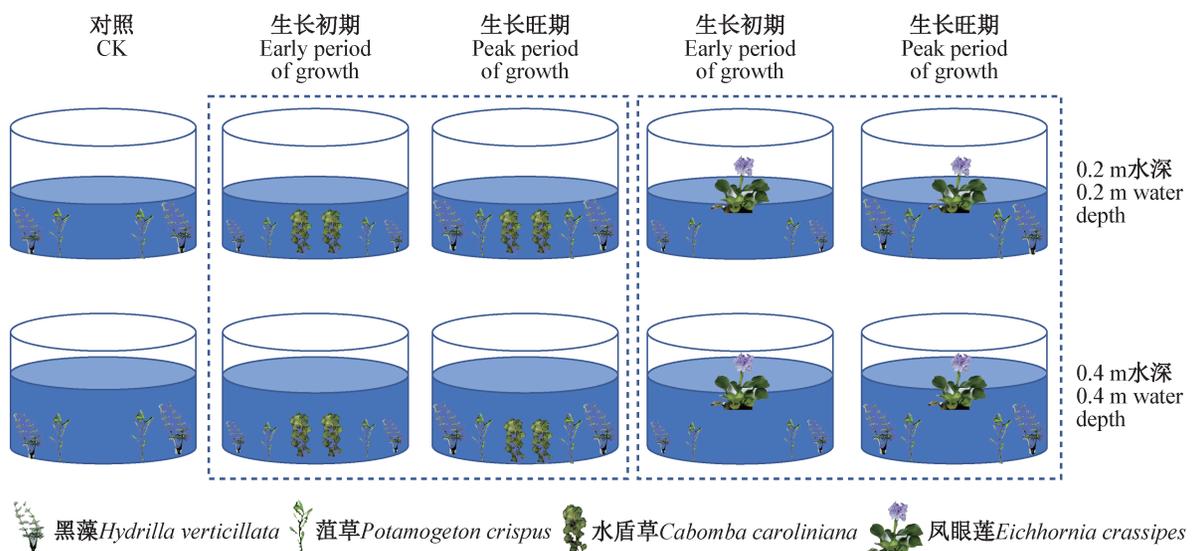


图1 试验设置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

### 1.2.2 不同植物生长指标和水体指标的测定

待试验结束时,从水桶中取出各处理聚乙烯容器,将黑藻与菹草完整取出,测量株高、分枝数和分节数共3个生长指标。随后将植株的地上部分分别装入牛皮纸袋中,在70℃恒温烘箱内烘干48h,至恒重后称量生物量。由于植物数量较多,每次测定保证完成相同组内的所有重复,以确保重复组之间没有生长时差。

使用透明度仪测定每个水桶中水体的透明度,并使用同一大小的塑料瓶采集每个水桶中的水样,测定总氮和总磷的含量。采用碱性过硫酸钾消解分光光度法测定水样中的总氮含量,采用钼酸铵分光光度法测定水样中总磷的含量(刘钰等,2021)。

### 1.2.3 结构方程模型的构建和检验

为明确入侵植物和水体理化性质对本地沉水植物的影响,利用R语言Lavaan包建立入侵植物和水体理化性质对本地沉水植物影响的结构方程模型(structural equation modeling, SEM),在构建初始模型时,假设沉水植物群落、入侵植物群落、水体理化性质任意2个变量之间以及变量的指标之间都会产生相互作用,这样的模型为饱和模型,通过删除不显著的变量关系(即 $P>0.05$ 的路径),或者基于不同变量之间的残差协方差来增加变量关系,对初始模型进行修正。同时获得相关系数及路径系数,相关系数用于检验观测变量之间的关系是否符合预期,从而验证模型的有效性;路径系数代表了一个变量对另一个变量的直接影响程度,路径系数越高,表示一个变量对另一个变量的直接影响越大。利用 $\chi^2$ 检验、拟合指数(comparative fit index, CFI)和近似的均方根误差(root mean square error of approximation, RMSEA)评估所建模型的拟合效果,当 $P>0.05$ 、 $CFI>0.95$ 、 $RMSEA<0$ 时模型的拟合较好。

### 1.3 数据分析

利用SPSS 22.0软件对试验数据进行统计分析,采用三因素方差分析法分析沉水植物和水质在不同水深和生长时期受入侵植物种类的影响,在进行方差分析前先对数据进行正态性检验和方差齐性检验,对于不满足方差分析的数据进行对数或开平方根转换,并使用Tukey检验法进行差异显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 本地沉水植物在不同条件下对入侵植物的响应

#### 2.1.1 黑藻在不同水深和生长时期对入侵植物的响应

水深和生长时期对沉水植物黑藻的所有生长指标均有显著影响,而入侵植物种类和所有因素的交互作用对黑藻的生长均无显著影响(表1)。在所有处理中,黑藻在0.4m水深处的生长情况均优于在0.2m水深处的生长情况(图2)。此外,与无入侵对照相比,不同水深下水盾草和凤眼莲的入侵均显著降低了黑藻的生物量、株高、分节数(0.2m水深下凤眼莲于黑藻生长初期入侵处理除外)和分枝数(0.2m水深下2种入侵植物于黑藻生长旺期入侵处理除外);当水盾草在黑藻生长旺期入侵时,黑藻的各生长指标均高于生长初期入侵处理,且这种趋势在0.4m水深时更明显(图2)。

#### 2.1.2 菹草在不同水深和生长时期对入侵植物的响应

仅生长时期对菹草的所有生长指标有显著影响,而水深和入侵植物种类以及各因素间的交互作用对菹草的所有生长指标均无显著影响(表2)。当水盾草和凤眼莲在生长旺期入侵时,菹草的各生长指标均高于生长初期入侵处理;且凤眼莲入侵后,0.2m水深处理的菹草各生长指标均低于0.4m水深处理(图3)。

表1 黑藻在不同水深和生长时期对入侵植物种类响应的方差分析结果

Table 1 Results of ANOVA on response of *Hydrilla verticillata* to invasive plant species under different water depths and growth periods

生长指标 Growth index	水深 Water depth (D)	入侵植物种类 Invasive plant species (S)	生长时期 Growth period (P)	$D \times S$	$D \times P$	$S \times P$	$D \times S \times P$
株高 Height	8.343**	0.223	40.355**	0.003	1.459	0.630	0.047
分枝数 Number of branches	8.042**	0.281	18.916**	0.001	0.584	0.333	0.088
分节数 Number of sections	8.765**	0.504	22.082**	0.073	1.170	0.736	0.020
生物量 Biomass	7.997**	0.298	26.900**	0.012	2.054	0.470	0.101

\*\*表示不同处理间经 Tukey 检验法检验差异极显著( $P<0.01$ )。 \*\* indicates significant difference among different treatments by Tukey test ( $P<0.01$ ).

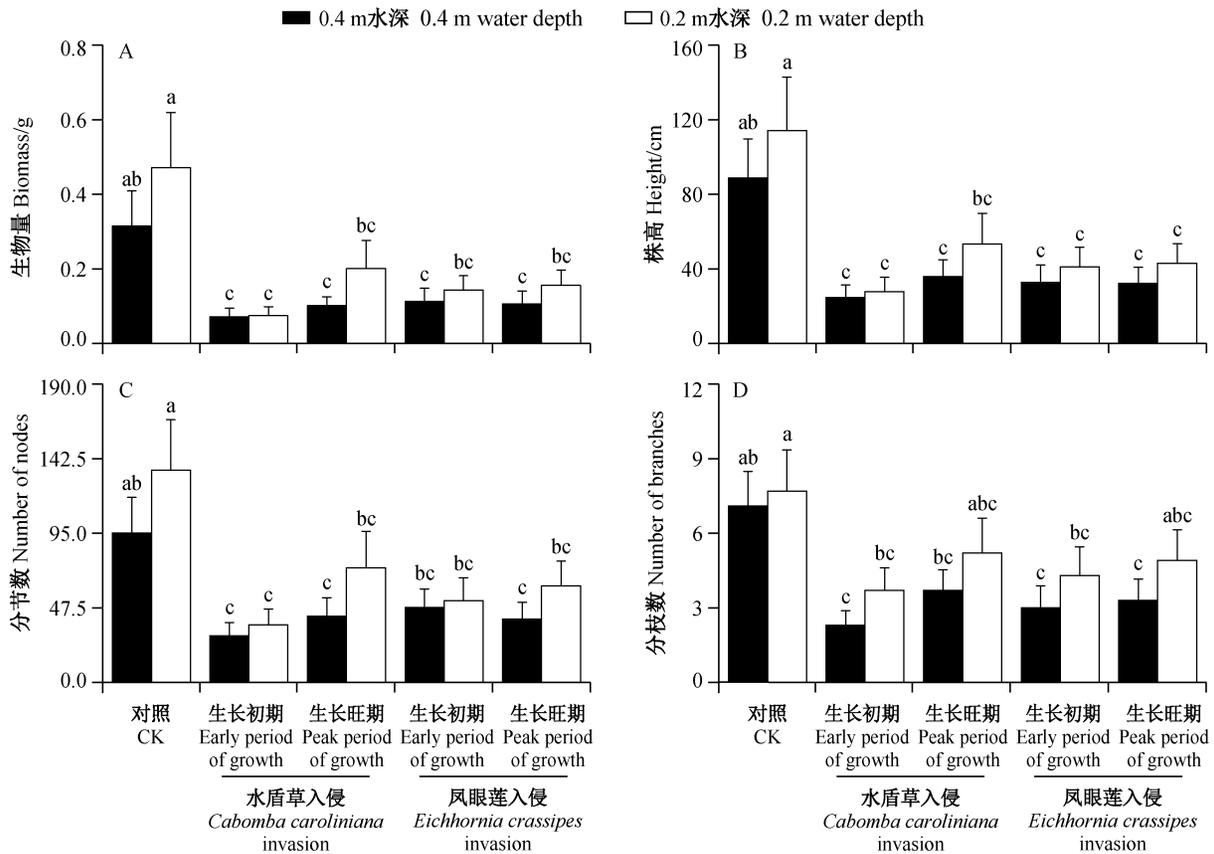


图2 黑藻在不同水深和生长期对入侵植物种类的响应

Fig. 2 Response of *Hydrilla verticillata* to invasive plant species under different water depths and growth periods

图中数据为平均数±标准误差。不同字母表示不同处理之间经 Tukey 检验法检验差异显著 ( $P < 0.05$ )。Data in the figure are mean±SE. Different letters indicate significant difference among different treatments by Tukey test ( $P < 0.05$ ).

表2 菹草在不同水深和生长期对入侵植物种类响应的方差分析结果

Table 2 Results of ANOVA on response of *Potamogeton crispus* to invasive plant species under different water depths and growth periods

生长指标 Growth index	水深 Water depth (D)	入侵植物种类 Invasive plant species (S)	生长期 Growth period (P)	$D \times S$	$D \times P$	$S \times P$	$D \times S \times P$
株高 Height	2.078	0.084	17.335**	3.297	1.733	0.026	1.100
分枝数 Number of branches	0.330	1.320	23.572**	0.587	0.110	0.440	0.147
分节数 Number of sections	0.525	2.830	24.575**	2.830	0.784	0.908	1.047
生物量 Biomass	2.438	1.164	11.483**	0.701	0.889	1.007	0.809

\*\*表示不同处理间经 Tukey 检验法检验差异极显著 ( $P < 0.01$ )。\*\* indicates significant difference among different treatments by Tukey test ( $P < 0.01$ ).

## 2.2 水深、植物种类及生长期对水体理化性质的影响

水深、入侵植物种类及两者的交互作用显著影响水体透明度,水深与入侵植物种类的交互作用对水体总磷含量有显著影响,但所有因素对水体总氮含量均无显著影响(表3)。与无入侵对照相比,在凤眼莲入侵时,2种水深下水体透明度均显著下降(图4-A);此外,水体总磷含量在凤眼莲入侵时降低,而在0.4 m水深处水盾草入侵时显著上升(图4-

B);水体总氮含量在所有处理下均无显著差异(图4-C)。

## 2.3 入侵植物和水质对本地沉水植物影响的SEM分析

通过选取影响沉水植物生长的因素,建立了本地沉水植物与水体理化性质、入侵植物凤眼莲的相互关系的SEM( $\chi^2=5.263$ ,  $CFI=0.95$ ,  $RMSEA=0.04$ )。拟合结果显示,本地沉水植物的生长情况与株高、分枝数、分节数和生物量均呈显著正相关,相关系数相

差不大,其中与分节数的相关系数最高,为0.985;水体理化性质与透明度和总磷含量均呈显著正相关,其中与透明度的相关系数最高,为0.915;与总氮含量呈显著负相关,相关系数为-0.421;水体理化性质

与本地沉水植物的生长情况呈显著正相关,路径系数为0.285;而凤眼莲与本地沉水植物的生长情况呈显著负相关,路径系数为-0.422,且凤眼莲与水体理化性质也呈显著负相关,路径系数为-0.965(图5-A)。

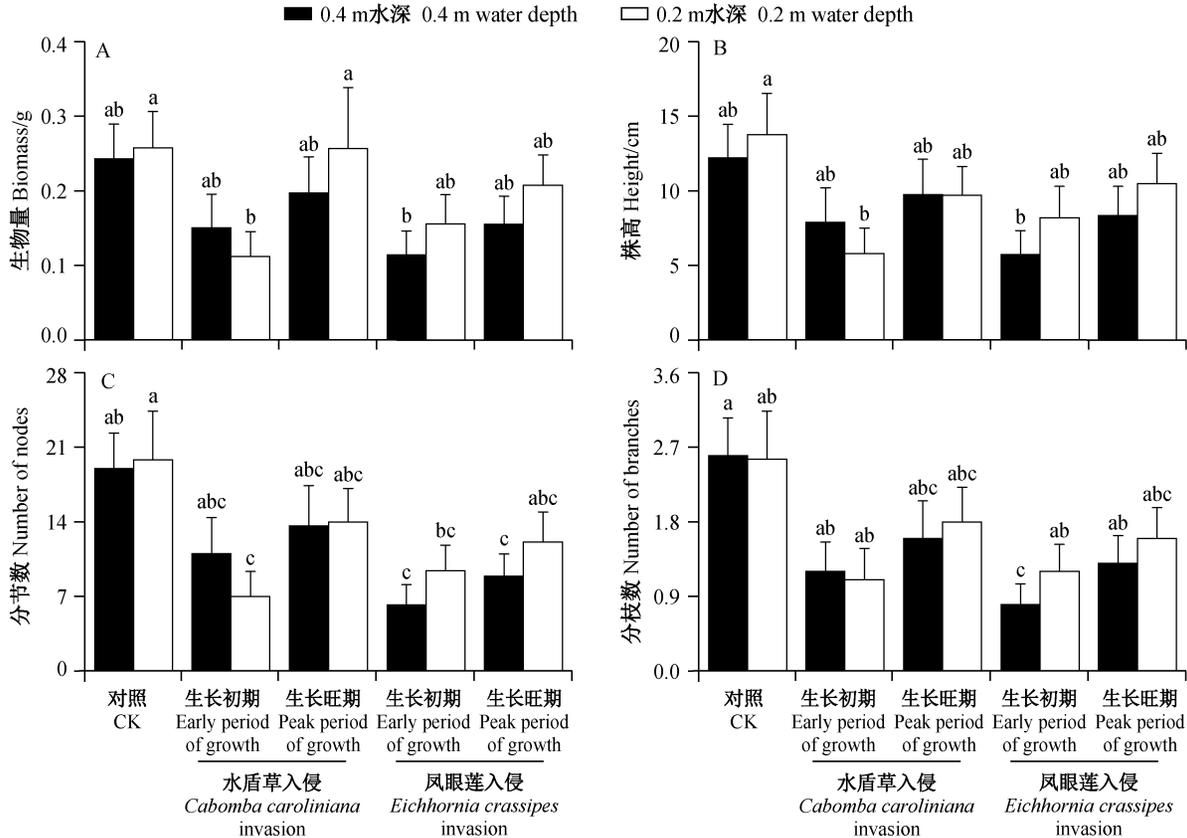


图3 菹草在不同水深和生长时期对入侵植物种类的响应

Fig. 3 Response of *Potamogeton crispus* to invasive plant species under different water depths and growth periods  
图中数据为平均数±标准误。不同字母表示不同处理之间经Tukey检验法检验差异显著( $P<0.05$ )。Data in the figure are mean±SE. Different letters indicate significant difference among different treatments by Tukey test ( $P<0.05$ ).

表3 水深、入侵植物种类及生长时期对水体理化性质影响的方差分析结果

Table 3 Results of ANOVA on effects of water depth, invasive plant species and growth period on physicochemical properties of water body

水体理化性质指标 Physicochemical properties of water body index	水深 Water depth (D)	入侵植物种类 Invasive plant species (S)	生长时期 Growth period (P)	$D \times S$	$D \times P$	$S \times P$	$D \times S \times P$
透明度 Transparency	5.583*	0.076*	0.658	15.358*	3.621	0.064	1.698
总氮含量 Total nitrogen content	3.374	0.226	0.882	0.058	0.554	0.940	0.643
总磷含量 Total phosphorus content	0.880	10.738	1.322	3.598*	4.349	0.671	1.836

\*表示不同处理间经Tukey检验法检验差异显著( $P<0.05$ )。\* indicates significant difference between different treatments by Tukey test ( $P<0.05$ ).

本研究建立了本地沉水植物与水体理化性质、入侵植物水盾草的相互关系的SEM( $\chi^2=4.891$ ,  $CFI=0.95$ ,  $RMSEA=0.03$ )。拟合结果显示,本地沉水植物生长情况与株高、分枝数、分节数和生物量均呈显著正相关,相关系数相差也不大,其中与分节数的相关

系数最高,为0.982;水体理化性质与透明度、总氮含量和总磷含量均呈显著正相关,其中与总氮含量的相关系数最高,为0.865;水体理化性质与本地沉水植物的生长情况呈显著正相关,路径系数为0.259;水盾草与本地沉水植物的生长情况呈显著负相关,

路径系数为-0.744, 而水盾草与水体理化性质也呈显著正相关, 路径系数为0.274(图5-B)。

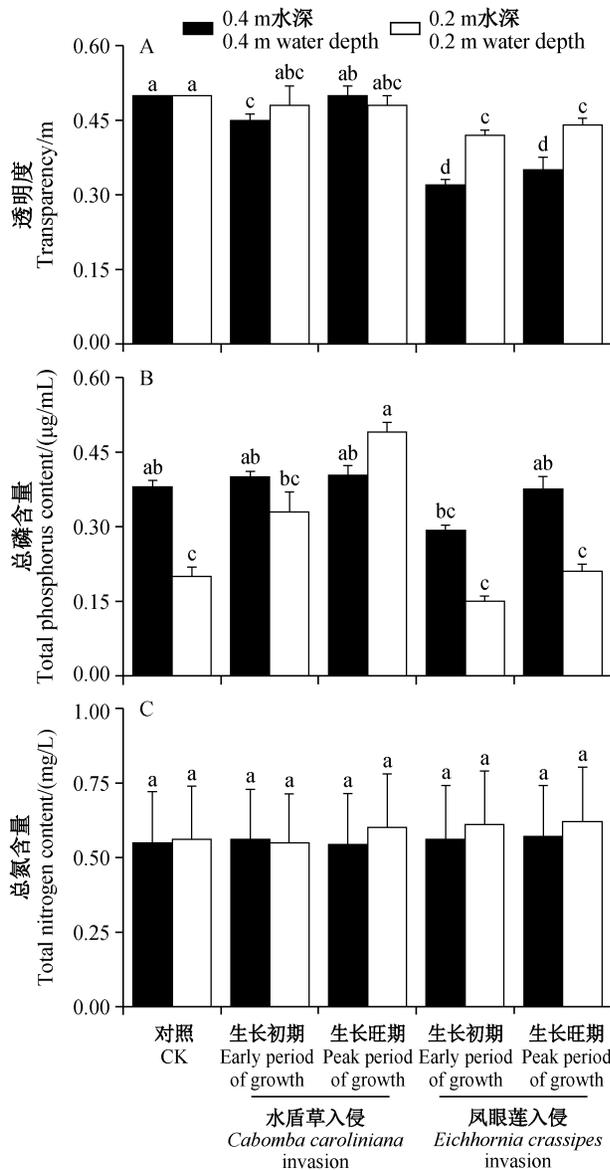


图4 水深、入侵植物种类及生长期对水体理化性质的影响

Fig. 4 Effects of water depth, invasive plant species and growth period on physicochemical properties of water body

图中数据为平均数±标准误。不同字母表示不同处理之间经Tukey检验法检验差异显著( $P<0.05$ )。Data in the figure are mean±SE. Different letters indicate significant difference among different treatments by Tukey test ( $P<0.05$ ).

### 3 讨论

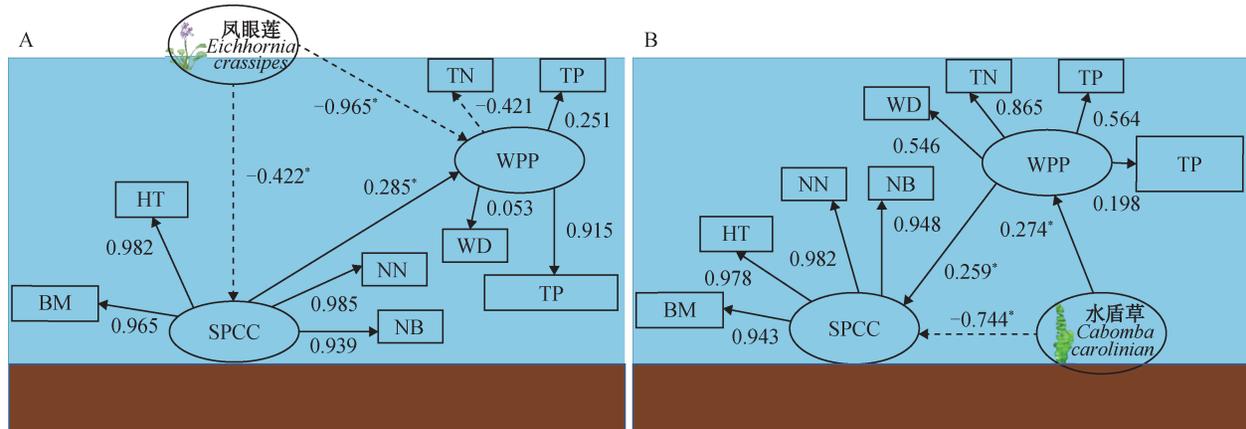
本研究结果表明, 凤眼莲和水盾草入侵后2种本地沉水植物的生长都受到抑制, 尤其对黑藻的抑制作用更强, 表明菹草对入侵植物的抵抗性强于黑藻。这可能是由于菹草具有更宽的生态位, 对环境的适应能力更强(楼春华等, 2021)。此外, 菹草作为深

水中的沉水植物, 对水深的适应性强于黑藻(吕杰等, 2021)。因此在本研究中, 无论有无外来植物入侵, 水深的变化对菹草生长均无显著影响; 而相较之下, 水深会显著影响黑藻的生长, 本研究结果表明0.4 m水深更适宜黑藻生长。值得注意的是, 在0.4 m水深下, 受外来植物入侵影响的黑藻也表现出更好的生长情况, 这说明在适宜水深下黑藻可以更好地抵御外来植物入侵, 这与蔡竞芳等(2022)研究结果相似。

不同生长时期的沉水植物对入侵植物的抵抗能力也不相同。本研究结果显示, 当2种本地沉水植物在生长初期遭受凤眼莲和水盾草入侵时, 入侵植物对其生长的抑制作用更强, 表明沉水植物在生长初期对入侵植物的抵抗能力相对更弱, 而在生长旺期对入侵植物的抵抗能力变得更强。这可能是由于生长初期的本地沉水植物对生长资源需求更高, 与入侵植物之间的竞争作用更激烈, 从而导致外来植物入侵对生长初期本地沉水植物的影响更大(Mangla et al., 2011; Gioria & Osborne, 2014)。且2种本地沉水植物在生长旺期的根系较生长初期发达, 能够吸收足够的养分和水分供给地上部分, 扩大自己的生存空间, 从而具备更强的抵抗入侵植物能力(陈小峰, 2006; 张丁予, 2016)。但更深层次的作用机制还需进一步研究。

外来入侵植物具有极强的适应能力和繁殖能力, 不仅可以通过种间竞争直接影响本地沉水植物的生长, 也能通过改变水体的理化性质间接对本地沉水植物的生长造成威胁。本研究结果表明, 尽管凤眼莲和水盾草入侵对2种本地沉水植物生长的影响无显著差异, 但通过结构方程模型可知, 2种入侵植物对本地沉水植物的影响方式存在差异, 凤眼莲倾向通过影响水体理化性质间接影响沉水植物的生长(吴富勤等, 2011), 而水盾草更倾向于直接影响沉水植物的生长。这主要是因为凤眼莲作为大型浮水植物, 与本土沉水植物之间的直接竞争较小, 它主要是通过大量繁殖后减少本土沉水植物可获取的有效光和氧气, 从而抑制本土沉水植物生长(Thamaga & Dube, 2018)。张羽等(2022)研究结果证实, 凤眼莲入侵后水体透明度和总磷含量均显著降低, 凤眼莲的生长繁殖会覆盖水面, 而它的根系尚未能截留水体悬浮物, 因此会显著降低水体的透明度; 而徐寸发等(2018)研究发现凤眼莲丰富的根系对水体中的颗粒态磷具有截留和吸附作用, 从而降低了水体的总磷含量。相比之下, 水盾草作为沉水植物, 它可以通过快速的生长繁殖迅速抢占本土沉水植物的生态

位,与本土沉水植物之间存在着激烈的种间竞争(丁瑜欣等,2020)。



SPCC: 沉水植物群落特征; WPP: 水体理化性质; BM: 生物量; HT: 株高; NN: 分节数; NB: 分枝数; TN: 总氮含量; TP: 总磷含量; WD: 水深; TP: 透明度; 直线: 正相关; 虚线: 负相关; \*表示显著相关( $P<0.05$ )。SPCC: Submerged plant communities characteristics; WPP: water physical properties; BM: biomass; HT: height; NB: number of branches; TN: total nitrogen content; TP: total phosphorus content; WD: water depth; TP: transparency; straight line: positive correlation; dashed line: negative correlation; \* indicates significant correlation ( $P<0.05$ ).

图5 入侵植物凤眼莲(A)和水盾草(B)与沉水植物以及水体理化性质相互关系的结构方程模型

Fig. 5 Structural equation model of the relationship between invasive plants *Eichhornia crassipes* (A) and *Cabomba caroliniana* (B) submerged plants and water physicochemical properties

综上所述,黑藻对水深的变化更敏感,当水深为0.4 m时更有利于其生长和抵御外来植物入侵。黑藻和菹草在生长旺期对入侵植物的抵御能力强于生长初期。凤眼莲和水盾草对本地沉水植物生长的抑制作用无显著差异,但是影响方式存在不同,凤眼莲更倾向通过降低水体的透明度和总磷含量来间接影响本地沉水植物的生长;而水盾草更倾向于直接影响本地沉水植物的生长。但是本研究局限于相关的试验条件,对本地沉水植物在不同水深和生长期对入侵植物种类的响应仍需要更全面的研究探索。

### 参考文献 (References)

- Adams CR, Hovick SM, Anderson NO, Kettenring KM. 2021. We can better manage ecosystems by connecting solutions to constraints: learning from wetland plant invasions. *Frontiers in Environmental Science*, 9: 715350
- Beckmann M, Bruelheide H, Erfmeier A. 2011. Germination responses of three grassland species differ between native and invasive origins. *Ecological Research*, 26(4): 763-771
- Cai JF, Sun K, Zhang Y, Li YL, Jiang F, Liu XS, Shen YL, A SH, Li HL. 2022. Effects of invasion intensity of *Eichhornia crassipes* and water depth on growth and interspecific relationships of submerged plants. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 42(1): 36-46 (in Chinese) [蔡竟芳, 孙凯, 张羽, 李雨玲, 姜帆, 刘宣劼, 沈一栾, 阿斯哈, 李红丽. 2022. 凤眼莲入侵强度和水深对沉水植物生长及种间关系的影响. *环境科学学报*, 42(1): 36-46]
- Chen XF. 2006. Study on biology, anatomy structure and physiological characteristics of submerged macrophyte, *Potamogeton crispus* under different light condition. Master thesis. Nanjing: Nanjing Agricultural University (in Chinese) [陈小峰. 2006. 不同光照环境下菹草(*Potamogeton crispus*)生物学特征、形态解剖及其生理特性研究. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学]
- Ding YX, Wu J, Cheng SP. 2020. Invasion mechanism and control measures of the aquatic weed *Cabomba caroliniana* Gray. *Journal of Biosafety*, 29(3): 176-86, 90 (in Chinese) [丁瑜欣, 吴娟, 成水平. 2020. 水盾草入侵机制及防治对策. *生物安全学报*, 29(3): 176-80, 90]
- Dong XR. 2017. The effect of nutrient on responses of two aquatic invasion plants to water level, herbivory and clonal integration. Master thesis. Wuhan: Wuhan University (in Chinese) [董贤茹. 2017. 高营养条件下两种入侵水生植物对水位、牧食及克隆整合的响应. 硕士学位论文. 武汉: 武汉大学]
- Fraser LH, Karnezis JP. 2005. A comparative assessment of seedling survival and biomass accumulation for fourteen wetland plant species grown under minor water-depth differences. *Wetlands*, 25(3): 520-530
- Gioria M, Osborne BA. 2014. Resource competition in plant invasions: emerging patterns and research needs. *Frontiers in Plant Science*, 5: 501
- Gong MD. 2020. Purification efficiency of submerged macrophyte for eutrophic water. *Environment and Development*, 32(2): 95-97 (in Chinese) [龚梦丹. 2020. 沉水植物对水体水质净化效果的研究. *环境与发展*, 32(2): 95-97]
- Hu A, Li YH, Yang YJ, Peng QT, Li ZQ. 2022. Effects of different growth form submerged macrophyte assemblages on biomass ac-

- cumulation and water purification. *Journal of Lake Sciences*, 34(5): 1484–1492 (in Chinese) [胡傲, 李宇辉, 杨予静, 彭秋桐, 李中强. 2022. 不同生长型沉水植物配置对生物量积累和水质净化效果的影响. *湖泊科学*, 34(5): 1484–1492]
- Huang XL, Ke F, Li QS, Zhao Y, Guan BH, Li KY. 2022. Functional traits underlying performance variations in the overwintering of the cosmopolitan invasive plant water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) under climate warming and water drawdown. *Ecology and Evolution*, 12(8): e9181
- Huo YL, Tian X, Lu X, Zhou LY. 2021. Growth and resource allocation strategies of functional leaves of invasive plant *Cenchrus incertus*. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, (4): 44–48, 54 (in Chinese) [霍艳利, 田迅, 卢轩, 周立业. 2021. 入侵植物少花蒺藜草功能叶的生长和资源分配策略. *黑龙江农业科学*, (4): 44–48, 54]
- Hussner A, Meyer C, Busch J. 2009. The influence of water level and nutrient availability on growth and root system development of *Myriophyllum aquaticum*. *Weed Research*, 49(1): 73–80
- Lan YQ, Zhu WJ, Mai YY, Luo M, Liu SL, Zhao Y. 2018. Influence of water depths on the growth of four submerged plants in light eutrophic water. *Environmental Engineering*, 36(11): 29–34 (in Chinese) [蓝于倩, 朱文君, 麦颖仪, 骆梦, 刘帅磊, 赵燕. 2018. 轻度富营养水体水深对四种沉水植物的生长影响. *环境工程*, 36(11): 29–34]
- Lazzaro L, Bolpagni R, Buffa G, Gentili R, Lonati M, Stinca A, Acosta ATR, Adorni M, Aleffi M, Allegranza M, et al. 2020. Impact of invasive alien plants on native plant communities and Natura 2000 habitats: state of the art, gap analysis and perspectives in Italy. *Journal of Environmental Management*, 274: 111140
- Li QS, Han YQ, Chen KQ, Huang XL, Li KY, He H. 2021. Effects of water depth on the growth of the submerged macrophytes *Vallisneria natans* and *Hydrilla verticillata*: implications for water level management. *Water*, 13(18): 2590
- Li QS, Huang Q, Li YJ, Han YQ, Jin H, He H, Li KY. 2019. Effects of water depth on growth of submerged macrophytes *Vallisneria natans* and *Myriophyllum spicatum*. *Journal of Lake Sciences*, 31(4): 1045–1054 (in Chinese) [李启升, 黄强, 李永吉, 韩燕青, 靳辉, 何虎, 李宽意. 2019. 水深对沉水植物苦草(*Vallisneria natans*)和穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)生长的影响. *湖泊科学*, 31(4): 1045–1054]
- Li XL, Dang XH, Gao Y, Meng ZJ, Chen X, Wang YY. 2022. Response mechanisms of adventitious root architectural characteristics of *Nitraria tangutorum* shrubs to soil nutrients in nabkha. *Plants*, 11(23): 3218
- Liu MM, Qiao RT, Liu JH, Yu YX, Zhang M, Li Y, Wang HJ. 2022. Spatial and temporal distribution and environmental effects of *Potamogeton crispus* population in Bao'an Lake. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 46(11): 1730–1740 (in Chinese) [刘孟梅, 乔瑞婷, 刘佳豪, 余业鑫, 张苗, 李艳, 王海军. 2022. 保安湖菹草种群的时空分布特征及环境效应分析. *水生生物学报*, 46(11): 1730–1740]
- Liu Y, Yang F, Zhang YM, Gao YX, Zhang ZW, Zhu YM, Kong M, Zhao Y, Qian WH. 2021. Temporal and spatial variation characteristics of chlorophyll a and analysis of related environmental factors in the estuary area of Gehu Lake. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 37(6): 733–739 (in Chinese) [刘钰, 杨飞, 张毅敏, 高月香, 张志伟, 朱月明, 孔明, 赵远, 钱文瀚. 2021. 漏湖入湖河口区叶绿素 a 时空变化特征及相关环境因子分析. *生态与农村环境学报*, 37(6): 733–739]
- Lou CH, He CL, Zhao P, Qian SS, Li TY. 2021. Relationship between the distribution of submerged plants and the water environment factors in Beijing City river. *Beijing Water*, (4): 61–65 (in Chinese) [楼春华, 何春利, 赵鹏, 钱松山, 李添雨. 2021. 北京城区河流沉水植物分布特征及环境因子关系研究. *北京水务*, (4): 61–65]
- Louback-Franco N, Dainez-Filho MS, Souza DC, Thomaz SM. 2020. A native species does not prevent the colonization success of an introduced submerged macrophyte, even at low propagule pressure. *Hydrobiologia*, 847(7): 1619–1629
- Lü J, Yuan M, Qu BP, Su HM, Miao J, Yue YY. 2021. Growth conditions and planting and maintenance methods of common submerged plants. *Contemporary Horticulture*, 44(13): 93–95, 106, 109 (in Chinese) [吕杰, 袁敏, 曲炳鹏, 苏慧敏, 苗杰, 岳依阳. 2021. 常见沉水植物的生长条件及栽植养护方法. *现代园艺*, 44(13): 93–95, 106, 109]
- Mangla S, Sheley RL, James JJ, Radosevich SR. 2011. Intra and interspecific competition among invasive and native species during early stages of plant growth. *Plant Ecology*, 212(4): 531–542
- Mazureczyk T, Brooks RP. 2022. Native biodiversity increases with rising plant invasions in temperate, freshwater wetlands. *Wetlands Ecology and Management*, 30(1): 139–160
- Mu YN, An SQ, Zhi YB, Zhang MX, Li HL. 2018. Effect of water level on intra and inter specific relationships of *Spartina anglica* and *Scirpus triqueters*. *Chinese Journal of Ecology*, 37(4): 1010–1017 (in Chinese) [穆亚楠, 安树青, 智颖枫, 张明祥, 李红丽. 2018. 水位对大米草和蘆草种内种间关系的影响. *生态学杂志*, 37(4): 1010–1017]
- Stansfield JH, Perrow MR, Tench LD, Jowitt AJD, Taylor AAL. 1997. Submerged macrophytes as refuges for grazing Cladocera against fish predation: observations on seasonal changes in relation to macrophyte cover and predation pressure.//Kufel L, Prejs A, Rybak JI. *Shallow Lakes' 95*. Dordrecht: Springer, pp. 229–240
- Thamaga KH, Dube T. 2018. Remote sensing of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): a review on applications and challenges. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 10: 36–46
- Wang CL, Zhang ZY, Huang YL. 2005. Strategies to counter the invasion of exotic and harmful plant pests. *Journal of Plant Protection*, 32(1): 104–108 (in Chinese) [王春林, 张宗益, 黄幼玲. 2005. 外来植物有害生物入侵及其对策. *植物保护学报*, 32(1): 104–108]
- Wang CY, Xiang JG, Du DL. 2012. The ecological effects of two invasive plants on soil microorganism community in rhizosphere.

- Ecology and Environmental Sciences, 21(7): 1247–1251 (in Chinese) [王从彦, 向继刚, 杜道林. 2012. 2种入侵植物对根际土壤微生物种群及代谢的影响. 生态环境学报, 21(7): 1247–1251]
- Wang T. 2021. Study on the mechanism of benthic algae growth and submerged macrophytes response in eutrophic water. Master thesis. Wuhan: South-Central University for Nationalities (in Chinese) [王涛. 2021. 富营养化水体中底栖藻类生长和沉水植物响应的机制研究. 硕士学位论文. 武汉: 中南民族大学]
- Wu FQ, Liu TM, Wang ZT, Wang YH, He SZ. 2011. Effects of *Eichhornia crassipes* growth on aquatic plant in Dianchi Lake. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 39(15): 9167–9168 (in Chinese) [吴富勤, 刘天猛, 王祖涛, 王跃华, 和树庄. 2011. 滇池凤眼莲生长对水生植物的影响. 安徽农业科学, 39(15): 9167–9168]
- Xie TP, Zhang J, Liu N, Liu YM, Kou L, Qu X, Bo SQ, Jing M. 2023. Changes in rhizosphere soil enzymatic activities and microbial communities across growth stages of *Angelica sinensis*. Chinese Journal of Soil Science, 54(1): 138–150 (in Chinese) [谢田朋, 张建, 柳娜, 刘越敏, 寇亮, 曲馨, 薄双琴, 景明. 2023. 当归不同生长时期根际土壤酶活性及微生物群落结构变化. 土壤通报, 54(1): 138–150]
- Xu CF, Wen XZ, Song W, Zhang YY, Liu HQ, Wang Y, Qin HJ, Zhang ZY. 2018. Growth responses of *Eichhornia crassipes* to changes of water quality in ecological treatment engineering. Ecology and Environmental Sciences, 27(9): 1741–1749 (in Chinese) [徐寸发, 闻学政, 宋伟, 张迎颖, 刘海琴, 王岩, 秦红杰, 张志勇. 2018. 污染水体生态治理工程中凤眼莲对水质变化的生长响应. 生态环境学报, 27(9): 1741–1749]
- Xu HW, Ai ZM, Qu Q, Wang MG, Liu GB, Xue S. 2022. Invasibility and recoverability of a plant community following invasion depend on its successional stages. Soil Ecology Letters, 4(2): 171–185
- Yang LF, Yang N, Fu HB, Chu D. 2023. Research advances in the application of environmental DNA (eDNA) technique in biological invasions. Journal of Plant Protection, 50(1): 1–10 (in Chinese) [杨力凤, 杨楠, 付海滨, 褚栋. 2023. 环境DNA技术在生物入侵研究中的应用进展. 植物保护学报, 50(1): 1–10]
- Zhang DY. 2016. Research on the impact of *Potamogeton crispus* on sediment microbial community structure and phosphorus migration and transformation. Master thesis. Nanjing: Nanjing Normal University (in Chinese) [张丁予. 2016. 菹草对沉积物微生物群落结构及磷迁移转化的影响研究. 硕士学位论文. 南京: 南京师范大学]
- Zhang Y, Cai JF, Wan Y, Gao HY, Sun K, Shen YL, A SH, Li HL. 2022. Effects of *Eichhornia crassipes* invasion degree on the growth traits and inter-specific relationship between *Ceratophyllum demersum* and *Hydrilla verticillata*. Acta Ecologica Sinica, 42(16): 6863–6873 (in Chinese) [张羽, 蔡竞芳, 万云, 高海燕, 孙凯, 沈一栾, 阿斯哈, 李红丽. 2022. 凤眼莲入侵程度对金鱼藻和黑藻生长及种间关系的影响. 生态学报, 42(16): 6863–6873]
- Zhao CY, Li JS, Liu F. 2019. Effects of different habitats on distribution of invasive alien grasses in Nabanhe River Basin National Nature Reserve, Yunnan Province. Journal of Plant Protection, 46(1): 114–121 (in Chinese) [赵彩云, 李俊生, 刘峰. 2019. 云南省纳板河流域国家级自然保护区不同生境对外来入侵草本植物分布的影响. 植物保护学报, 46(1): 114–121]
- Zhu H, Zhou TT, Li X, Ruan HH, Xie D. 2019. Effects of epiphytic algae community on invasion abilities of submerged macrophyte *Cabomba caroliniana* A. Gray in Taihu Lake. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 31(11): 1880–1887 (in Chinese) [朱宏, 周婷婷, 李欣, 阮宏华, 谢冬. 2019. 太湖沉水植物附生藻类群落对水盾草入侵能力的影响. 浙江农业学报, 31(11): 1880–1887]

(责任编辑: 李美娟)