

外来种福寿螺 (*Pomacea canaliculata*) 对 3 种沉水植物的牧食偏好及水体理化因子的响应*

杨 诚¹, 康玉辉², 高 健^{1**}, 张泽慧¹, 苗 滕², 廖明军¹, 焦一滢¹, 赵以军¹

(1: 湖北工业大学河湖生态修复与藻类利用湖北省重点实验室, 土木建筑与环境学院, 武汉 430068)

(2: 湖北省水利水电科学研究院, 武汉 430070)

摘 要: 外来种福寿螺 (*Pomacea canaliculata*) 相较我国本土螺类其牧食量更大且繁殖速度更快, 对栖息地水生植物的现存量 and 实施水生植被恢复的生态治理工程的成功性可能构成威胁, 目前对福寿螺影响浅水湖泊沉水植物的重建缺乏足够的研究. 本文通过设置不同沉水植物种类组合系统, 研究福寿螺对 3 种常用于浅水富营养化湖泊治理的沉水植物密刺苦草 (*Vallisneria denseserrulata*)、轮叶黑藻 (*Hydrilla verticillata*)、穗花狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*) 的牧食偏好以及不同植物配置系统理化因子的响应变化, 结果表明福寿螺对沉水植物植株附着偏好为密刺苦草 > 轮叶黑藻 > 穗花狐尾藻, 而牧食破坏强度为轮叶黑藻 > 穗花狐尾藻 > 密刺苦草, 轮叶黑藻最容易受到福寿螺牧食影响而快速消亡, 穗花狐尾藻叶片也会被全部牧食仅剩下茎, 而苦草存活受到的影响较小. 福寿螺会导致轮叶黑藻+密刺苦草组合系统中总氮、氨氮、总磷、正磷酸盐浓度显著升高, 而密刺苦草+穗花狐尾藻组合中总磷、正磷酸盐浓度显著升高, 但是在轮叶黑藻+穗花狐尾藻组合中仅总氮浓度显著升高. 研究表明福寿螺能够影响沉水植物间的竞争关系, 但是 3 种沉水植物均不能阻止福寿螺的牧食; 福寿螺牧食会显著降低沉水植物生物量, 最终会影响草型清水态系统的稳定性.

关键词: 福寿螺; 密刺苦草; 轮叶黑藻; 穗花狐尾藻; 牧食偏好; 理化因子

Effect of *Pomacea canaliculata* grazing on three submerged macrophytes and the related physicochemical factors*

Yang Cheng¹, Kang Yuhui², Gao Jian^{1**}, Zhang Zehui¹, Miao Teng², Liao Minjun¹, Jiao Yiyang¹ & Zhao Yijun¹

(1: Key Laboratory of Ecological Remediation of Lakes and Rivers and Algal Utilization of Hubei Province, School of Civil and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, P.R.China)

(2: Hubei Water Resources Research Institute, Wuhan 430070, P.R.China)

Abstract: Compared with native snails in China, *Pomacea canaliculata* snails exert a higher grazing pressure on plants and have faster growth and reproduction rates, which may negatively affect aquatic plants' standing stock and ecological reestablishment. However, few studies have examined the potential effects of the presence of *P. canaliculata* on submerged macrophyte reestablishment. In this study, we assessed the preference of *P. canaliculata* for three submerged plants, namely *Vallisneria denseserrulata*, *Hydrilla verticillata*, and *Myriophyllum spicatum*—which have been largely planted for recovering Chinese eutrophic shallow lakes. The results indicated that the attachment preference of *P. canaliculata* for submerged macrophytes was in the following order: *V. denseserrulata* > *H. verticillata* > *M. spicatum*. Moreover, *P. canaliculata* grazing negatively affected plant survival in the following order of magnitude: *H. verticillata* > *M. spicatum* > *V. denseserrulata*. *H. verticillata* was the most vulnerable to snail grazing and died out rapidly. *M. spicatum* leaves had been completely consumed by the end of the experiment. *V. denseserrulata* was the least influenced by *P. canaliculata*. Compared with the controls, the concentrations of total nitrogen (TN), ammonia nitrogen (NH₃-N),

* 2020-10-22 收稿; 2020-11-24 收修改稿.

湖北省自然科学基金面上项目(2020CFB537)、湖北省水利重点科研项目(HBSLKY201714, HBSLKY201905)、国家自然科学基金项目(31500378)和湖北省科技厅重大专项(2018ZYYD037)联合资助.

** 通信作者; E-mail: jgao13@hotmail.com.

total phosphorus (TP), and soluble reactive phosphate (SRP) were higher with the *H. verticillata* + *V. denseserrulata* treatment; TP and SRP concentrations were higher with the *V. denseserrulata* + *M. spicatum* treatment; and TN concentrations were higher with the *V. denseserrulata* + *M. spicatum* treatment. These results suggest that the grazing preference of *P. canaliculata* alters the competitive advantage of submerged macrophyte. However, none of the submerged macrophytes prevented *P. canaliculata* grazing, resulting in decreases in the production of the submerged macrophytes and in the likelihood of clear-water state establishment.

Keywords: *Pomacea canaliculata*; *Vallisneria denseserrulata*; *Hydrilla verticillata*; *Myriophyllum spicatum*; grazing preference; physicochemical factors

在浅水湖泊生态系统中,沉水植物通过防止再悬浮、吸收营养盐等方式减少水体营养盐、抑制藻类生长^[1-4],最终提高水体透明度,并维持清水态的稳定性.然而,在浅水湖泊中,随着外源营养盐负荷的增加,会引起水体富营养化,湖泊逐步从以底栖沉水植物为优势的清水态(草型湖泊)转变为以浮游藻类为主的浑水态(藻型湖泊)^[5-6],即稳态转换.在浅水富营养化湖泊的生态治理中,为了恢复清水态生态系统,在外源负荷削减、鱼类去除、底泥治理、沉水植物种植等措施实施后,沉水植物难以恢复或长期维持较高覆盖度^[7-8],重新繁衍的草食性鱼类的牧食往往对沉水植物现存量或恢复重建产生威胁^[9-11].外来种福寿螺(*Pomacea canaliculata*)已经在亚洲、欧洲和非洲等地成功入侵并导致沉水植物生物量急剧下降或沉水植物重建失败^[12-14],这可能是促使湖泊从草型清水态向藻型浑水态转变^[15-16]的另一关键因素.

福寿螺原产自南美洲,属中腹足目、瓶螺科、瓶螺属,繁殖力很强,适应环境能力强,且耐寒性逐步提升^[17],再加上气候变暖的影响^[18],增加了福寿螺从热带亚热带地区向温带地区扩散的可能性.在我国,福寿螺的潜在适生区主要分布在30°N以南地区,部分地区跨过了30°N线;模型研究表明其扩散速度持续增长,在南方的分布区将会继续扩大,甚至会有向北扩散的趋势^[12,19].目前,浙江、福建、江西、广东、广西、海南和台湾等省已成为我国福寿螺的高分布区,上海、湖北、湖南、四川、西藏、贵州、重庆和云南为中分布区,但也具有较高的潜在爆发风险^[12].福寿螺啃食水稻等农作物,会严重破坏入侵地农业经济^[20],因此2003年我国已把福寿螺列入首批16种“危害最大的外来物种”名单^[21].不仅如此,福寿螺入侵自然水体改变栖息地沉水植物群落结构,会对根茎叶有不同程度的牧食,甚至导致沉水植物群落消失^[22].福寿螺幼年期以浮游藻类和碎屑为食,成年主要以水生植物为食物^[23],然而不同植物对福寿螺牧食的响应存在差异,如气温15~30℃条件下在福寿螺优先牧食枝轮藻(*Chara contraria*)、角果藻(*Zannichellia palustris*)和*Stuckenia striata*,而绿穗花狐尾藻(*Myriophyllum quitense*)和黄花水龙(*Ludwigia peploides*)受到影响较小,但实验结束时生物量均显著降低^[24].将福寿螺置于水温18~24℃共培养的苦草(*Vallisneria natans*)、穗花狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)、轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)中,能够显著降低沉水植物群落的总生物量^[25].福寿螺牧食沉水植物的差异性会导致栖息地的水体营养盐响应变化不同^[13,25].

现今,沉水植物重建工程在我国热带亚热带的浅水富营养湖泊尤其是城市湖泊中正在大量实施,沉水植物重建后的湖泊水质和景观效果多数得到改善^[26-28].虽然大量研究证实底栖动物尤其是螺对水体中藻类、有机碎屑、无机颗粒有净化效果^[29],其中福寿螺也能够有效控制水体中丝状藻的生长和藻类“水华”的暴发^[30-31],间接有利于沉水植物的生长.然而,在一些成功恢复沉水植物的城市清水态湖泊和湿地中,福寿螺入侵导致重建的沉水植物消失,如暨南大学校内人工湖^[32],沉水植物恢复覆盖度高达100%,但在福寿螺入侵并大量繁殖后沉水植物覆盖度大大下降,加大了富营养化湖泊修复的难度;而在温州三垟湿地,福寿螺入侵后几乎啃食了所有的水生植物^[33].随着人为有意或无意的携带以及自然气候、水系流动等因素产生的自然扩散,福寿螺的分布将会继续扩大范围,因而应对其产生的负面影响更加重视.在我国,目前草甸型密刺苦草(*V. denseserrulata*)、冠层型轮叶黑藻和穗花狐尾藻因其景观效果好、耐污染能力强等特性已经作为浅水湖泊沉水植物重建的优先选择种^[34-37].本文假设3种植物不同搭配对福寿螺牧食的响应及其系统变化存在差异,研究结果可以指导如何在生态修复工程中合理搭配植物种类抵御福寿螺牧食^[38].基于以上背景,拟通过设置密刺苦草、轮叶黑藻、穗花狐尾藻两两组组合系统,探究福寿螺的牧食偏好以及不同植物组合系统理化因子的响应变化.

1 材料与方法

1.1 实验材料

密刺苦草、轮叶黑藻、穗花狐尾藻均采集于湖北省武汉市内沙湖。沉水植物培养底泥采自武汉市南湖出水河道——巡司河,将底泥自然风干、混匀并剔除其中大块杂质后备用。福寿螺采集于野外自然水体,挑选均匀大小个体用于本实验(福寿螺重 (26.0 ± 6) g,壳高 (3.25 ± 0.75) cm,壳长 (4.25 ± 0.75) cm)。在开始实验前,福寿螺饥饿处理 24 h。

1.2 实验设计

实验在 18 个聚乙烯塑料圆形大桶(上部直径为 60 cm,底部直径为 50 cm,高度为 70 cm)中进行,桶内放入约 15 cm 厚底泥(总氮(TN)=1.9 mg/g,总磷(TP)=0.52 mg/g),桶放置在带顶棚的室外实验水池内。将自来水(TN=1.08 mg/L;TP=0.11 mg/L)加入桶至 65 cm,在桶中间采用 45 cm×65 cm 带孔(孔为边长 5 cm 正方形)不锈钢丝网把桶隔为两部分(钢丝网的作用把沉水植物分割为两部分,避免两种植物影响彼此生长,而螺可以两边自由移动)。自来水放置 48 h 后,分别两两种植沉水植物,即密刺苦草+轮叶黑藻组、密刺苦草+穗花狐尾藻、轮叶黑藻+穗花狐尾藻组各 6 桶。沉水植物种植株数选择约相同生物量的密刺苦草 25 株,轮叶黑藻 30 株、穗花狐尾藻 10 株(轮叶黑藻和密刺苦草植株高约 50 cm,穗花狐尾藻株高约 60 cm,均带根),两种沉水植物分别种植在钢丝网两边。

培养 5 周后,3 种植物在其种植空间的覆盖度约 100%(每种植物各占桶表面覆盖度的 50%)。因植物生长速度差异,放福寿螺前初步观察实验桶中沉水植物生物量为轮叶黑藻>密刺苦草>穗花狐尾藻。在各组植物组合中分别选择 3 个桶各加入 2 只福寿螺,为实验组;各组另外 3 个桶作为对照组。

实验在 2019 年 7 月 31 日至 9 月 3 日期间进行,实验持续到部分桶内沉水植物被大量牧食甚至消失时终止,历时 28 d。实验桶放置在用仅由立柱搭建的防雨顶棚内,顶棚材质为透明 PVC 材料,四周通风,光照为自然光照,水温 (33 ± 1.5) °C。

1.3 采样与分析方法

水质理化指标:每周从每个桶中采集表层下约 10 cm 处水样 500 mL,用于分析 TN、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、TP、正磷酸磷(SRP)、叶绿素 a (Chl. a)浓度。TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、SRP 和 Chl. a 浓度检验方法依据《水和废水监测分析方法(第四版)》^[39],TN 浓度采用碱性硫酸钾消解紫外分光光度法测定, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度采用纳氏试剂分光光度法测定,TP 浓度采用过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,SRP 浓度采用钼锑抗分光光度法测定,Chl. a 浓度用 90% 丙酮避光提取后用分光光度法测定。

沉水植物指标:每两天统计一次密刺苦草、轮叶黑藻、穗花狐尾藻的断枝叶数量并称量湿重(捞出断枝后不放回),7 d 为一个统计数据周期。实验前后测量沉水植物的高度变化(随机选择 8~10 株植株测量均值,密刺苦草测量根部到叶片顶端距离,轮叶黑藻测量根部到顶端最长距离,穗花狐尾藻测量根部到顶端最长距离)。实验结束后统计每个实验水桶内剩余沉水植物湿重。

沉水植物总酚含量:植物整株采集后,洗净然后用剪刀剪下不同部位(叶、茎、根),80°C 分别烘干至恒重后磨成粉末,测量沉水植物的根、茎、叶的总酚含量。其中苦草茎为地下茎,轮叶黑藻和穗花狐尾藻由于根样品量较少而没有测定。植物总酚含量采用 Folin-Ciocalteu 比色法试验方法测定,在含有酚类物质的待测试样中加入一定量的 FC 试剂和一定量的 10% 碳酸钠溶液,定容至 25 mL,在一定温度下避光反应一定时间,以蒸馏水为空白,测定试样液体的吸光度值,依据没食子酸标准工作曲线的拟合方程,计算试样中的总多酚含量^[39]。

福寿螺对 3 种沉水植物附着偏好统计:每天上午 10:00 和下午 4:00 观察该时间点福寿螺所附着的沉水植物种类并作记录,0~7、8~14、15~21、22~28 d 分别为一个数据统计周期,计算每个周期的附着率。本研究通过记载福寿螺的附着偏好,拟作为指示福寿螺的牧食偏好的指标之一^[40-41]。

1.4 数据处理及分析

水质理化指标和沉水植物指标在加入福寿螺后随时间变化的趋势分析,采用以时间为重复因子的重复测量方差分析(repeated measures analyses of variance with time as the repeated factor, RM-ANOVAs)方法进行,

在进行方差分析之前使用 Levene's test 检验数据是否满足方差齐性的假设. 而实验组和对照组间的比较方差分析采用 LSD 多重比较法.

所有统计分析均采用 SPSS 19.0 软件 (SPSS, USA) 进行分析. 数据以平均值 \pm 标准差表示. 实验组与对照组有显著性差异用 * 在图上标示.

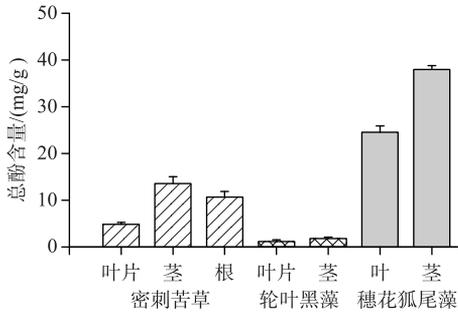


图1 密刺苦草、轮叶黑藻和穗花狐尾藻总酚含量

Fig.1 Total phenolic content of *V. denserrulata*, *H. verticillata* and *M. spicatum*

2 结果与分析

2.1 福寿螺对3种沉水植物的影响研究

2.1.1 3种沉水植物体内总酚含量分析 轮叶黑藻茎和叶片中总酚含量显著低于密刺苦草和穗花狐尾藻植物各部位的总酚含量 ($P < 0.01$); 密刺苦草叶片中总酚含量显著低于茎和根内的总酚含量 ($P < 0.01$); 穗花狐尾藻茎内总酚含量显著高于叶片内总酚含量 ($P < 0.01$), 且均显著高于密刺苦草和轮叶黑藻植物各部分体内的总酚含量 ($P < 0.01$) (图1).

2.1.2 福寿螺对3种沉水植物的附着偏好 在轮叶黑藻+穗花狐尾藻组中(图2a), 加入福寿螺后的前3周福寿螺主要附着在轮叶黑藻上 ($P < 0.05$); 到加入福寿螺后的第4周, 由于轮叶黑藻被牧食生物量大大减少, 福寿螺对轮叶黑藻和穗花狐尾藻附着的选择比例趋于相当, 结果表明福寿螺优先选择附着轮叶黑藻.

在轮叶黑藻+密刺苦草组中(图2b), 加入福寿螺后的前2周, 福寿螺对轮叶黑藻、密刺苦草的选择附着性无显著差异, 而在加入福寿螺后的3~4周, 随着轮叶黑藻量的减少, 福寿螺对密刺苦草的附着比例逐渐更高 ($P < 0.05$). 在密刺苦草+穗花狐尾藻组中(图2c), 实验期间福寿螺均主要附着在密刺苦草上 ($P < 0.05$), 表明福寿螺优先选择附着密刺苦草.

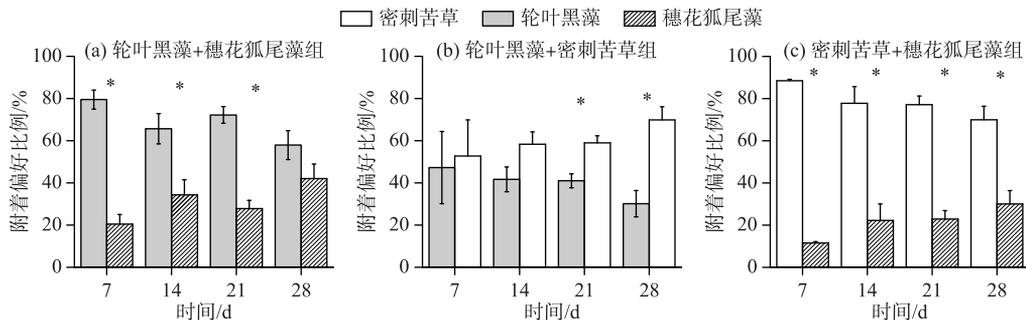


图2 福寿螺对不同沉水植物的附着偏好

Fig.2 Attached preference for different submerged macrophytes by *P. canaliculata*

2.1.3 福寿螺对3种沉水植物的牧食偏好比较 在轮叶黑藻+穗花狐尾藻组中(图3a), 实验结束时轮叶黑藻生物量显著低于对照组 ($P < 0.05$), 穗花狐尾藻生物量与对照组相比无显著变化; 在实验过程和实验结束时均观察到, 实验组轮叶黑藻和穗花狐尾藻均只剩下茎, 表明福寿螺牧食的主要是叶片. 在轮叶黑藻+密刺苦草组中(图3b), 实验结束时实验组剩余密刺苦草和轮叶黑藻生物量相对于对照组显著减少 ($P < 0.05$). 在密刺苦草+穗花狐尾藻组中(图3c), 实验组密刺苦草生物量与对照组相比显著减少 ($P < 0.05$), 而穗花狐尾藻生物量与对照组相比无显著变化; 在实验过程和实验结束时均观察到, 实验组密刺苦草叶片由于被牧食而变短, 而穗花狐尾藻叶片也多数被福寿螺牧食.

在轮叶黑藻+穗花狐尾藻组中, 实验结束时实验组沉水植物剩余生物量湿重均值为 (56 ± 83) g, 而无螺组沉水植物剩余量为 (810 ± 209) g, 相对减少了 93.1%; 在轮叶黑藻+密刺苦草组中, 实验组沉水植物剩余生物量均值为 (408 ± 102) g, 而无螺组沉水植物剩余量为 (964 ± 224) g, 相对减少了 57.7%; 而在密刺苦草+穗

花狐尾藻组中,实验组沉水植物剩余生物量均值为(387±178) g,而无螺组沉水植物剩余量为(826±210) g,相对减少了53.1%.

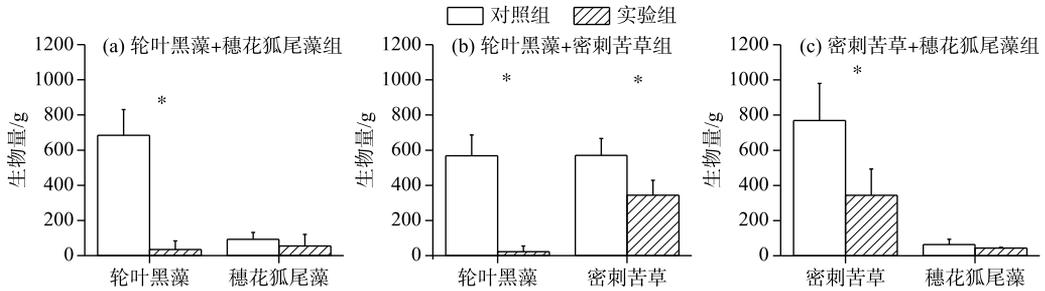


图3 福寿螺对3种沉水植物的牧食偏好

Fig.3 Grazing preference for three submerged macrophytes by *P. canaliculata*

2.1.4 福寿螺放置前后3种沉水植物植株高的差异分析 在轮叶黑藻+穗花狐尾藻组中(图4a),实验结束时实验组轮叶黑藻株高降低约0.35 m,相对于对照组显著降低($P<0.05$),而穗花狐尾藻株高相对对照组无显著变化;在实验过程中观察到福寿螺牧食易导致轮叶黑藻茎大量折断漂浮在水面,而穗花狐尾藻尽管叶片在实验结束时被福寿螺牧食,但其茎很少折断.在轮叶黑藻+密刺苦草组中(图4b),实验结束时实验组轮叶黑藻和密刺苦草的株高降低分别约0.44和0.36 m,相对对照组均显著降低($P<0.05$).在密刺苦草+穗花狐尾藻组中(图4c),实验结束时实验组密刺苦草株高降低约0.27 m,相对对照组显著降低($P<0.05$);而穗花狐尾藻实验组与对照组株高变化无显著区别.实验期间观察发现福寿螺主要是通过直接牧食叶片或牧食密刺苦草叶片中间部位导致叶片折断而显著降低植株叶片高度,而对轮叶黑藻是牧食或扰动导致轮叶黑藻茎折断而显著降低植株高度.尽管福寿螺会牧食穗花狐尾藻叶片,但对穗花狐尾藻茎的牧食很少,不会显著影响植株高度.

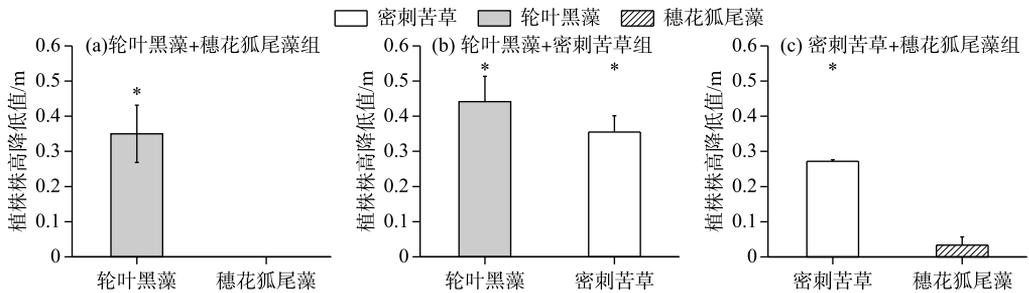


图4 福寿螺对3种沉水植物植株株高的影响

Fig.4 Plant height reduction of three submerged macrophytes in the mesocosms with *P. canaliculata* at the end of experiment

2.1.5 福寿螺对3种沉水植物形成断枝的比较分析 在轮叶黑藻+穗花狐尾藻组中(图5a),加入福寿螺后的前3周在水面收集的轮叶黑藻断枝量显著高于穗花狐尾藻($P<0.05$),加入福寿螺后的第4周收集的轮叶黑藻和穗花狐尾藻断枝均大大减少且二者数量无显著差异;4周共收集轮叶黑藻和穗花狐尾藻断枝湿重均值分别为118和31 g.在轮叶黑藻+密刺苦草组中(图5b),加入福寿螺后的第1周、3周、4周时收集的轮叶黑藻断枝和密刺苦草断枝数量没有显著差异,仅在加入福寿螺后的第2周收集到轮叶黑藻断枝量显著少于密刺苦草漂浮叶片数量($P<0.05$);4周共收集轮叶黑藻和密刺苦草断枝湿重均值分别为101和126 g.在密刺苦草+穗花狐尾藻组中(图5c),密刺苦草折断叶片漂浮数量显著高于穗花狐尾藻断枝量($P<0.05$);4周共收集密刺苦草和穗花狐尾藻断枝湿重均值分别为126和18 g.

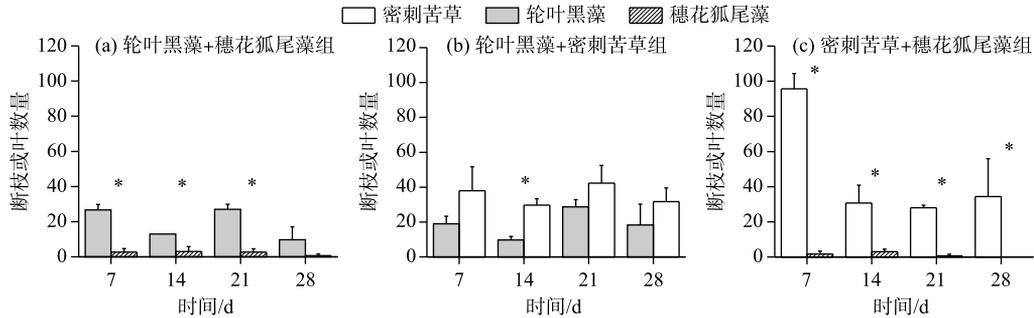


图 5 福寿螺对 3 种沉水植物断枝数量的影响

Fig.5 The number of broken stem or leaf of three submerged macrophytes in the mesocosms with *P. canaliculata*

2.2 福寿螺对水体营养盐影响

2.2.1 总磷和正磷酸盐 在加入福寿螺后,3 个实验组中总磷和正磷酸盐浓度随时间递增呈升高趋势(图 6). 在轮叶黑藻+穗花狐尾藻和轮叶黑藻+密刺苦草实验组中,总磷和正磷酸盐浓度均随时间递增显著升高(RM-ANOVAs, $P < 0.05$) (图 6a, b, d, e). 而在密刺苦草+穗花狐尾藻实验组中,总磷和正磷酸盐浓度在第 14~21 天期间有下降,其余时间段为总磷浓度随时间递增上升(图 6c, f).

在轮叶黑藻+密刺苦草和密刺苦草+穗花狐尾藻实验中,加入福寿螺后的第 3 周和第 4 周总磷和正磷酸盐浓度实验组高于对照组(LSD, $P < 0.05$),其余时间无显著差异(图 6b, c, e, f).

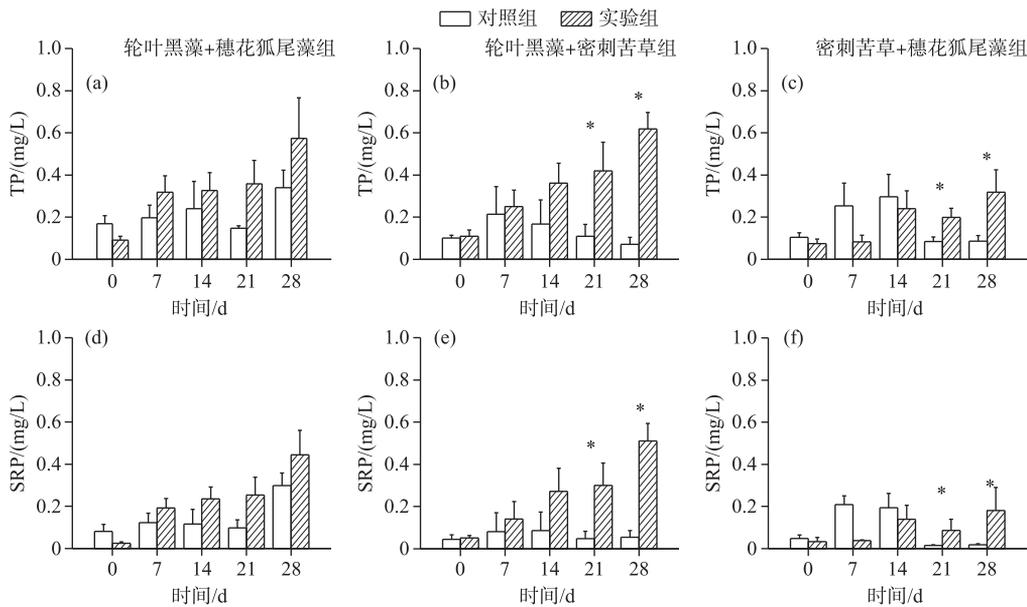


图 6 实验组和对照组水体总磷和正磷酸盐浓度的动态变化

Fig.6 Dynamics of TP and SRP concentrations in the control and treatment mesocosms

2.2.2 总氮和氨氮 在加入福寿螺后,仅在轮叶黑藻+穗花狐尾藻实验组中,总氮浓度随时间递增呈显著升高(RM-ANOVAs, $P < 0.05$),且在加入福寿螺后的第 2 周和第 3 周实验组总氮浓度显著高于对照组(LSD, $P < 0.05$) (图 7a). 在轮叶黑藻+密刺苦草组中,仅第 4 周实验组总氮浓度显著高于对照组(LSD, $P < 0.05$) (图 7b). 而在密刺苦草+穗花狐尾藻组中,实验组总氮浓度与对照组在实验期间均无显著(LSD, $P > 0.05$) (图 7c).

在加入福寿螺后,3组实验中实验组和对照组在4周实验期间氨氮浓度均无显著差异(LSD, $P>0.05$).

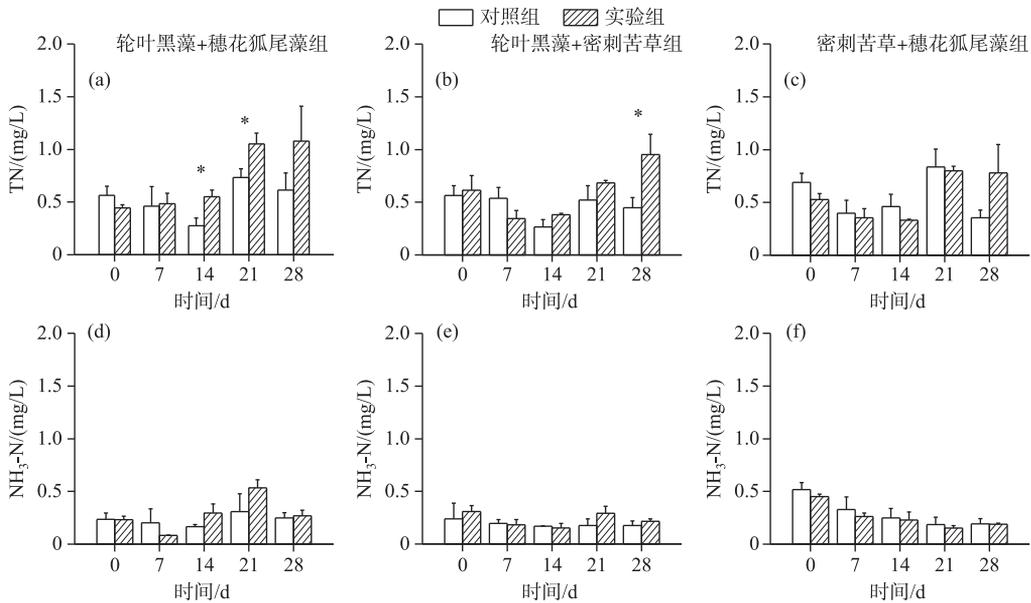


图7 实验组和对照组水体 TN 和 NH₃-N 浓度的动态变化

Fig.7 Dynamics of TN and NH₃-N concentrations in control and treatment mesocosms

2.2.3 叶绿素 *a* 在加入福寿螺后,仅轮叶黑藻+穗花狐尾藻组中,在加入福寿螺后的第4周实验组中叶绿素 *a* 浓度显著高于对照组(LSD, $P<0.05$)(图8).在轮叶黑藻+密刺苦草组和密刺苦草+穗花狐尾藻组中,实验组与对照组的叶绿素 *a* 浓度在实验期间均无显著差异(LSD, $P>0.05$).

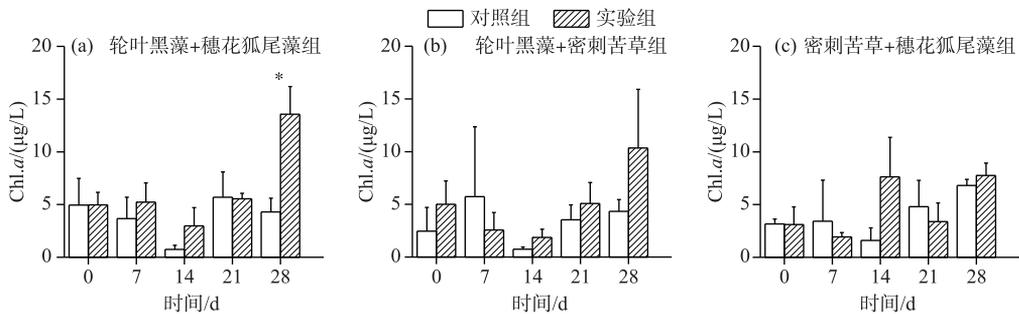


图8 实验组和对照组水体 Chl.*a* 浓度的动态变化比较

Fig.8 Dynamics of Chl.*a* concentrations in control and treatment mesocosms

3 讨论

本研究中福寿螺对3种沉水植物的生长均有显著的负面影响,但沉水植物及其不同植物组合系统理化因子对福寿螺的牧食响应却呈现较大的差异性.通过比较福寿螺对不同组合的沉水植物系统的影响,轮叶黑藻和密刺苦草被牧食破坏而降低的生物量最大,但是冠层型轮叶黑藻整体被牧食和穗花狐尾藻叶片几乎全部被牧食而导致其生存受到的负面影响最大,草甸型密刺苦草受到的负面影响相对较小.3种组合中沉水植物整体生物量均下降,系统中水体营养盐和 Chl.*a* 浓度均呈现不同程度的升高,不利于清水态系统的稳定,但不同沉水植物组合系统理化因子的变化存在差异性.

福寿螺对沉水植物的牧食具有偏好性, 优先牧食轮叶黑藻或密刺苦草, 其原因可能与福寿螺本身的牧食方式和植物的营养价值、防御机制和生长特性有关。福寿螺为舔刮式牧食, 倾向于牧食高营养、低韧性、纤维素和酚类含量低的植物^[38,42]。植物的化学防御是影响福寿螺对其牧食的关键因子之一。研究已表明轮叶黑藻对牧食动物的化学防御能力低于密刺苦草和穗花狐尾藻^[43-44], 轮叶黑藻这种生长较快的水生植物更容易受到螺类的影响^[45]。与本研究不同的是, 何日利在 18.8~24.0℃ 条件下, 研究福寿螺对密刺苦草、穗花狐尾藻和轮叶黑藻共存系统的牧食, 结果表明其偏爱牧食密刺苦草和穗花狐尾藻, 而较少牧食轮叶黑藻, 何日利判断可能是因为轮叶黑藻酚类化合物含量较高^[32], 但该研究并没有实测轮叶黑藻酚类含量。本研究同期测定的总酚含量结果为穗花狐尾藻>密刺苦草>轮叶黑藻, 其中穗花狐尾藻总酚含量显著更高。袁昌波等研究也表明穗花狐尾藻总酚含量((16.98±2.66) mg/g)显著高于密刺苦草((3.40±0.21) mg/g)和轮叶黑藻((5.22±1.30) mg/g), 与本研究结果类似^[43]。Sun 等研究也发现沉水植物体内酚类化合物——黄酮含量表现为穗花狐尾藻>密刺苦草>轮叶黑藻, 而草鱼对其的牧食量表现为轮叶黑藻>密刺苦草>穗花狐尾藻, 沉水植物被牧食的量与植物体内的黄酮含量呈显著负相关^[44]。除了酚类等次生代谢物高低可能影响福寿螺的附着和牧食喜好外, 3种植物的茎/叶韧性、硬度及其纤维素、半纤维素和木质素含量等也对牧食起到机械防御作用, 轮叶黑藻和密刺苦草相对穗花狐尾藻更加脆弱、机械强度更低^[44], 可能最易受到牧食的影响而消亡。本研究中福寿螺对 3 种沉水植物的附着偏好表现为密刺苦草>轮叶黑藻>穗花狐尾藻, 也表明福寿螺更喜爱栖息于密刺苦草和轮叶黑藻上。无脊椎动物尤其是螺类往往会被沉水植物所释放的化学信号所吸引而偏好牧食和栖息^[42-43]。需要说明的是, 本研究中尽管在放入福寿螺时 2 种沉水植物生物量存在差异, 但福寿螺在实验开始时均优先选择密刺苦草和轮叶黑藻附着, 综合可以看出福寿螺相对更喜食密刺苦草和轮叶黑藻。

福寿螺对轮叶黑藻牧食为整体性牧食, 包含叶片和茎, 会导致轮叶黑藻整体消亡; 对于密刺苦草, 福寿螺多牧食叶片, 密刺苦草根在底泥中扎根较深, 茎短不明显, 福寿螺无法对密刺苦草其他部位造成过多影响^[46], 但是密刺苦草幼苗生长发育可能会受到牧食的影响^[45]; 福寿螺主要牧食穗花狐尾藻的部位是叶片, 原因可能是穗花狐尾藻茎较粗壮且总酚含量更高, 福寿螺对其茎牧食较少, 并且穗花狐尾藻再被牧食时会提高体内酚类的含量^[47], 这也会降低福寿螺对其牧食的可能性。综合分析, 福寿螺牧食破坏对轮叶黑藻影响最为严重, 其整体因福寿螺牧食而很快消亡; 穗花狐尾藻叶片几乎全部被福寿螺牧食, 导致其生长及发育受到严重的不利影响; 福寿螺对于密刺苦草只会导致其最顶层一部分叶片被牧食, 但是根茎都保存完好, 密刺苦草整体生长状态保持最好。但长期来说, 福寿螺(尤其是在高密度条件下)对 3 种植物的牧食破坏均具毁灭性^[32]。

福寿螺入侵后对水体营养盐的影响一部分来自沉水植物生物量下降, 导致沉水植物对水体净化能力减弱, 但是螺自身排泄也会在水体营养盐浓度产生影响^[48], 并且螺类牧食会影响氮、磷的释放和同化^[49]。在本研究中, 在放入福寿螺之前 3 组组合沉水植物覆盖度均高, 植物生长良好, 其水体营养盐较低且无显著差异。然而, 放入福寿螺后, 在轮叶黑藻+密刺苦草组和密刺苦草+穗花狐尾藻组, 当植物被牧食后总磷和正磷酸盐浓度开始升高, 并在实验结束时显著高于对照组; 而轮叶黑藻+密刺苦草组和轮叶黑藻+穗花狐尾藻组, 当植物被牧食后总氮浓度呈上升趋势。沉水植物对水体均具有非常强的净化能力, 但不同种对水体营养盐净化能力还与水体和基质中的营养盐以及植株生物学特征等有关。例如, 一些研究表明黑藻净化水体中氮和磷的能力强于金鱼藻^[50-51], 但另外一些研究结果却与之截然相反^[52]。金树权等研究结果显示对水体氮磷的吸收效率为: 轮叶黑藻>金鱼藻>苦草>穗状狐尾藻>微齿眼子菜, 且沉水植物吸附、提高微生物转化等作用对氮磷从水体去除的贡献率要大于直接吸收作用^[53]。而任文君等研究表明金鱼藻和黑藻对水体总磷主要为超量吸收, 微齿眼子菜和马来眼子菜以吸附沉降为主^[54], 这与金树权等的结果不同。在本研究中, 密刺苦草对氮、磷展现较强的固定能力^[55], 当密刺苦草被牧食后, 实验组营养盐浓度显著高于对照组。此外, 轮叶黑藻+穗花狐尾藻组合中植物生物量减少最高(93.1%), 其在实验结束时 Chl.a 浓度也显著升高, 而有密刺苦草的另外两组中 Chl.a 浓度未出现显著升高, 其主要原因是沉水植物还保持一定的生物量, 能够抑制藻类的增加^[4]。方玲^[30]通过原位围隔实验研究发现(短期, 33 天)福寿螺入侵后水体中氮、磷的浓度均维持在低水平, 而且与福寿螺的密度不相关; 关于 Chl.a 浓度和浮游藻类的群落结构, 二者变化与体系中的植物种类有

关联,如在穗花狐尾藻实验中,随着福寿螺密度的增加,Chl.*a* 浓度增加,隐藻逐渐成为优势藻群;而在凤眼莲实验中,随着福寿螺密度的增加,Chl.*a* 浓度表现出无规律的变化,但浮游藻类却逐渐呈现出隐藻、绿藻和硅藻占优势的结构^[30]。

本研究结果能够为富营养湖泊的沉水植被重建和管理提供科学指导依据。在富营养化湖泊沉水植物重建过程中,选择适宜的植物是有效减少福寿螺对水生态修复结果产生负面影响的关键方法^[44]。此外,在一些湖泊修复工程中,轮叶黑藻和穗花狐尾藻因其冠层顶端优势,具有较强的环境适应及繁殖能力^[26,56-57],常作为先锋种^[45],利用其快速生长和植株较长的特点迅速提高水体透明度。然而,轮叶黑藻和穗花狐尾藻生物量主要集中于水体表面,容易引起水体底部的光照不足和缺氧^[58],故湖泊水质改善后往往要去除轮叶黑藻和穗花狐尾藻,让苦草等草甸型沉水植物占据优势,有利于维持清水型系统稳定^[59]。除了人工调节轮叶黑藻和穗花狐尾藻的优势度外,水生动物如团头鲂、螺对沉水植物的偏好牧食破坏也能够用于沉水植物群落的管理^[11,60-61]。但对外来种福寿螺来说,尽管在巴西有利用其偏好牧食破坏来控制外来种轮叶黑藻的过度生长^[62],但其在我国蔓延后危害大,因此不建议用来调控沉水植物结构。

4 结论

1) 福寿螺对沉水植物具有明显的附着牧食偏好,其附着偏好为密刺苦草>轮叶黑藻>穗花狐尾藻,密刺苦草的叶片和轮叶黑藻的茎更易受到福寿螺的牧食而折断。福寿螺对沉水植物生长的破坏强度为轮叶黑藻>穗花狐尾藻>密刺苦草,轮叶黑藻最容易受到福寿螺牧食破坏而快速消亡,穗花狐尾藻叶片也会被全部牧食只剩下茎而无法生长,密刺苦草的生长受到的影响相对较小。

2) 福寿螺入侵密刺苦草、轮叶黑藻、穗花狐尾藻3种植物两两组合系统最终会降低系统植物总生物量,影响沉水植物对水体的净化能力,导致系统中水体营养盐和叶绿素 *a* 浓度呈现不同程度的升高,但不同沉水植物组合系统理化因子的变化存在差异。

3) 福寿螺的偏好牧食损害能够抑制冠层型穗花狐尾藻和轮叶黑藻的优势地位,让密刺苦草生物量占比相对更高,但密刺苦草的绝对生物量也会因福寿螺的牧食而降低,甚至最后也会被牧食殆尽。

5 参考文献

- [1] Lauridsen TL, Lodge DM. Avoidance by *Daphnia magna* of fish and macrophytes: Chemical cues and predator-mediated use of macrophyte habitat. *Limnology and Oceanography*, 1996, **41**(4): 794-798. DOI: 10.4319/lo.1996.41.4.0794.
- [2] Meyer J, Dahlke S, Kafka M *et al.* Submerged vegetation in a shallow brackish lagoon does not enhance water clarity but offers substantial refuge for zooplankton. *Aquatic Botany*, 2019, **154**: 1-10. DOI: 10.1016/j.aquabot.2018.12.002.
- [3] Zhu MY, Zhu GW, Nurminen L *et al.* The influence of macrophytes on sediment resuspension and the effect of associated nutrients in a shallow and large lake (Lake Taihu, China). *PLoS One*, 2015, **10**(6): e0127915. DOI: 10.1371/journal.pone.0127915.
- [4] van Donk E, van de Bund WJ. Impact of submerged macrophytes including charophytes on Phyto- and zooplankton communities: Allelopathy versus other mechanisms. *Aquatic Botany*, 2002, **72**(3/4): 261-274. DOI: 10.1016/S0304-3770(01)00205-4.
- [5] Scheffer M, Jeppesen E. Regime shifts in shallow lakes. *Ecosystems*, 2007, **10**(1): 1-3. DOI: 10.1007/s10021-006-9002-y.
- [6] Liu ZW, Zhang XF, Chen FZ *et al.* The responses of the benthic-pelagic coupling to eutrophication and regime shifts in shallow lakes; Implication for lake restoration. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 1-10. DOI: 10.18307/2020.0101. [刘正文, 张修峰, 陈非洲等. 浅水湖泊底栖-敞水生境耦合对富营养化的响应与稳态转换机理: 对湖泊修复的启示. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 1-10.]
- [7] Lauridsen TL, Jensen JP, Jeppesen E *et al.* Response of submerged macrophytes in Danish lakes to nutrient loading reductions and biomanipulation. *Hydrobiologia*, 2003, **506/507/508/509**(1/2/3): 641-649. DOI: 10.1023/B: HYDR.0000008633.17385.70.
- [8] Jeppesen E, Søndergaard M, Jensen JP *et al.* Lake responses to reduced nutrient loading-an analysis of contemporary long-term data from 35 case studies. *Freshwater Biology*, 2005, **50**(10): 1747-1771. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2005.

- 01415.x.
- [9] Wang XP, Wang YB, Yang GJ *et al.* The effects of different fish species on growth of submerged macrophytes. *J Lake Sci*, 2016, **28**(6): 1354-1360. DOI: 10.18307/2016.0621. [王晓平, 王玉兵, 杨桂军等. 不同鱼类对沉水植物生长的影响. 湖泊科学, 2016, **28**(6): 1354-1360.]
- [10] Van Onsem S, Triest L. Turbidity, waterfowl herbivory, and propagule banks shape submerged aquatic vegetation in ponds. *Frontiers in Plant Science*, 2018, **9**: 1514. DOI: 10.3389/fpls.2018.01514.e.
- [11] Zhen W, Zhang XM, Guan BH *et al.* Stocking of herbivorous fish in eutrophic shallow clear-water lakes to reduce standing height of submerged macrophytes while maintaining their biomass. *Ecological Engineering*, 2018, **113**: 61-64. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.10.011.
- [12] Zhou Y, Yuan XY, Yang ZX *et al.* Spread pattern and potential distribution of the invasive species *Pomacea* spp. in China. *J Lake Sci*, 2018, **30**(5): 1379-1387. DOI: 10.18307/2018.0519. [周宇, 袁雪颖, 杨子轩等. 福寿螺入侵中国的扩散动态及潜在分布. 湖泊科学, 2018, **30**(5): 1379-1387.]
- [13] Gilioli G, Schrader G, Carlsson N *et al.* Environmental risk assessment for invasive alien species: A case study of apple snails affecting ecosystem services in Europe. *Environmental Impact Assessment Review*, 2017, **65**: 1-11. DOI: 10.1016/j.eiar.2017.03.008.
- [14] Appleton CC. Alien and invasive fresh water Gastropoda in South Africa. *African Journal of Aquatic Science*, 2003, **28**(1): 69-81. DOI: 10.2989/16085914.2003.9626602.
- [15] Carlsson NOL, Brönmark C, Hansson LA. Invading herbivory: The golden apple snail alters ecosystem functioning in Asian wetlands. *Ecology*, 2004, **85**(6): 1575-1580. DOI: 10.1890/03-3146.
- [16] Fang L, Wong PK, Lin L *et al.* Impact of invasive apple snails in Hong Kong on wetland macrophytes, nutrients, phytoplankton and filamentous algae. *Freshwater Biology*, 2010, **55**(6): 1191-1204. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2009.02343.x.
- [17] Matsukura K, Izumi Y, Yoshida K *et al.* Cold tolerance of invasive freshwater snails, *Pomacea canaliculata*, *P. maculata*, and their hybrids helps explain their different distributions. *Freshwater Biology*, 2016, **61**(1): 80-87. DOI: 10.1111/fwb.12681.
- [18] Lei JC, Chen L, Li H. Using ensemble forecasting to examine how climate change promotes worldwide invasion of the golden apple snail (*Pomacea canaliculata*). *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, **189**(8): 1-11. DOI: 10.1007/s10661-017-6124-y.
- [19] Zhang HT, Luo D, Mu XD *et al.* Predicting the potential suitable distribution area of the apple snail *Pomacea canaliculata* in China based on multiple ecological niche models. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(4): 1277-1284. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201604.027. [张海涛, 罗渡, 牟希东等. 应用多个生态位模型预测福寿螺在中国的潜在适生区. 应用生态学报, 2016, **27**(4): 1277-1284.]
- [20] Halwart M. The golden apple snail *Pomacea canaliculata* in Asian rice farming systems: Present impact and future threat. *International Journal of Pest Management*, 1994, **40**(2): 199-206. DOI: 10.1080/09670879409371882.
- [21] China Environmental Protection Administration. China's first list of invasive alien species. *Journal of the State Council of the People's Republic of China*, 2003, (23): 41-46. [中国环境保护总局. 中国第一批外来入侵物种名单. 中华人民共和国国务院公报, 2003, (23): 41-46.]
- [22] Burks RL, Kyle CH, Trawick MK. Pink eggs and snails: Field oviposition patterns of an invasive snail, *Pomacea insularum*, indicate a preference for an invasive macrophyte. *Hydrobiologia*, 2010, **646**(1): 243-251. DOI: 10.1007/s10750-010-0167-1.
- [23] Carlsson NOL, Brönmark C. Size-dependent effects of an invasive herbivorous snail (*Pomacea canaliculata*) on macrophytes and periphyton in Asian wetlands. *Freshwater Biology*, 2006, **51**(4): 695-704. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2006.01523.x.
- [24] Manara E, Maldonado MA, Martín PR. The role of an invader in its native range: Could differential grazing by apple snails structure the submersed macrophytes assemblages in Southern Pampas (Argentina)? *Hydrobiologia*, 2019, **828**(1): 229-242. DOI: 10.1007/s10750-018-3815-5.
- [25] He RL, Liu ZW. Effect of *Pomacea canaliculata* grazing on the community of the submerged macrophytes. *Journal of Safety and Environment*, 2016, **16**(3): 338-342. [何日利, 刘正文. 福寿螺牧食对沉水植物群落结构的影响. 安全与环境

- 学报, 2016, **16**(3): 338-342.]
- [26] Liu CY, Liu PP, Liu ZW *et al.* Study on the functions of submerged macrophytes in ecological restoration and water quality improvement. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, **36**(7): 2908-2910. [刘从玉, 刘平平, 刘正文等. 沉水植物在生态修复和水质改善中的作用——以惠州南湖生态系统的修复与构建(中试)工程为例. 安徽农业科学, 2008, **36**(7): 2908-2910.]
- [27] Zhang M, Yu JL, He H *et al.* Effects of ecological restoration on water quality of Wuli Bay, Lake Taihu. *Ecological Science*, 2012, **31**(3): 240-244. [章铭, 于谨磊, 何虎等. 太湖五里湖生态修复示范区水质改善效果分析. 生态科学, 2012, **31**(3): 240-244.]
- [28] Yang JC, Kang YH, Zhou C *et al.* Theory and practice of ecological restoration of degraded urban lakes—a case study of Neisha Lake in Wuhan// Healthy Lakes and Beautiful China—Proceedings of the 3rd China Lake Forum and the 7th Hubei Science and Technology Forum. 2013. [杨金春, 康玉辉, 周驰等. 退化城市湖泊生态修复理论与实践——以武汉内沙湖为例// 健康湖泊与美丽中国——第三届中国湖泊论坛暨第七届湖北科技论坛论文集. 2013.]
- [29] Chen YX, Lu XM, He Y *et al.* Research progress of benthic mollusks for water environmental ecological restoration. *Water Purification Technology*, 2010, **29**(1): 5-8. [陈玉霞, 卢晓明, 何岩等. 底栖软体动物水环境生态修复研究进展. 净水技术, 2010, **29**(1): 5-8.]
- [30] Fang L. Impact of herbivory by invasive apple snail (*Pomacea canaliculata*) on wetland aquatic plants and nutrients in water body[Dissertation]. Guangzhou: Sun Yat-Sen University, 2010. [方玲. 福寿螺(*Pomacea canaliculata*)对湿地水生植物以及水体营养盐的影响[学位论文]. 广州: 中山大学, 2010.]
- [31] Lee MH, Kim MJ. Control of phytoplankton bloom using apple snail (*Pomacea canaliculata*: Ampullariidae). *Korean Journal of Environmental Biology*, 2015, **33**(1): 83-91. DOI: 10.11626/kjeb.2015.33.1.083.
- [32] He RL. Effects of apple snail *Pomacea canaliculata* grazing on submerged macrophytes[Dissertation]. Guangzhou: Jinan University, 2016. [何日利. 福寿螺牧食对沉水植物的影响[学位论文]. 广州: 暨南大学, 2016.]
- [33] Nan CR, Miao KP. The present situation investigation and the idea of ecological restoration on aquatic ecosystem in Sangyang wetland, Wenzhou. *Wetland Science*, 2018, **16**(5): 612-617. [南春容, 缪克排. 温州三垟湿地水生生态系统现状调查及修复思路. 湿地科学, 2018, **16**(5): 612-617.]
- [34] Guo PC, Lu H. The application of close-to-nature construction technology on lake ecological restoration in north area. *Environmental Science Survey*, 2019, **38**(6): 16-19. [郭鹏程, 卢慧. 近自然构建在北方人工湖生态修复中的应用研究. 环境科学导刊, 2019, **38**(6): 16-19.]
- [35] Liu Z, Qian X, Gao HL *et al.* Effect of submerged macrophyte community allocation on water diversion in Gonghu Ecological restoration area of Taihu Lake. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, **44**(5): 480-483. [刘喆, 钱新, 高海龙等. 沉水植物群落配置对太湖贡湖生态修复区的调水效果. 江苏农业科学, 2016, **44**(5): 480-483.]
- [36] Wang Y, Gao G, Qin B *et al.* Ecophysiological and anatomical responses of *Vallisneria spiralis* to nitrogen and phosphorus enrichment. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 2012, **405**(5): 1-11. DOI: 10.1051/kmae/2012011
- [37] Xie D, Yu D, You WH *et al.* Morphological and physiological responses to sediment nutrients in the submerged macrophyte *Myriophyllum spicatum*. *Wetlands*, 2013, **33**(6): 1095-1102. DOI: 10.1007/s13157-013-0465-2.
- [38] Yam RS, Fan YT, Wang TT. Importance of macrophyte quality in determining life-history traits of the apple snails *Pomacea canaliculata*: Implications for bottom-up management of an invasive herbivorous pest in constructed wetlands. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016, **13**(3): E248. DOI: 10.3390/ijerph13030248.
- [39] Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China eds. Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods: 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [40] Lodge DM. Selective grazing on periphyton: A determinant of freshwater gastropod microdistributions. *Freshwater Biology*, 1986, **16**(6): 831-841. DOI: 10.1111/j.1365-2427.1986.tb01020.x.
- [41] Mormul RP, Thomaz SM, da Silveira MJ *et al.* Epiphyton or macrophyte: which primary producer attracts the snail *Hebetancylus moricandi*? *American Malacological Bulletin*, 2010, **28**(1/2): 127-133. DOI: 10.4003/006.028.0205.
- [42] Elger A, Lemoine D. Determinants of macrophyte palatability to the pond snail *Lymnaea stagnalis*. *Freshwater Biology*, 2005, **50**(1): 86-95. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2004.01308.x.

- [43] Yuan CB, Cao T, Zhou CY *et al.* Contents of C, N and total phenols in leaves of aquatic macrophytes in Lake Erhai, China. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, **40**(5): 1025-1032. DOI: 10.7541/2016.133. [袁昌波, 曹特, 周存宇等. 洱海3种生活型水生植物叶片中碳、氮与总酚含量的比较研究. 水生生物学报, 2016, **40**(5): 1025-1032.]
- [44] Sun J, Wang L, Ma L *et al.* Factors affecting palatability of four submerged macrophytes for grass carp *Ctenopharyngodon idella*. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(36): 28046-28054. DOI: 10.1007/s11356-017-0153-5.
- [45] Min FL, Zuo JC, Lin QW *et al.* Impacts of animal herbivory and water depth on seed germination and seedling survival of *Vallisneria natans* (Lour.) Hara and *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2019, **28**(1): 275-281. DOI: 10.15244/pjoes/83690.
- [46] Monette D, Ewe S, Markwith SH. Effects of the consumption behavior of adult *Pomacea maculata* and *Pomacea paludosa* on *Vallisneria americana*. *Southeastern Naturalist*, 2016, **15**(4): 689-696. DOI: 10.1656/058.015.0411.
- [47] Lemoine DG, Barrat-Segretain MH, Roy A. Morphological and chemical changes induced by herbivory in three common aquatic macrophytes. *International Review of Hydrobiology*, 2009, **94**(3): 282-289. DOI: 10.1002/iroh.200811087.
- [48] Mo SQ, Zhang XF, Tang YL *et al.* Effects of snails, submerged plants and their coexistence on eutrophication in aquatic ecosystems. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*, 2017, **418**(44): 1-7. DOI: 10.1051/kmae/2017034.
- [49] Li KY, Liu ZW, Hu YH *et al.* Snail herbivory on submerged macrophytes and nutrient release: Implications for macrophyte management. *Ecological Engineering*, 2009, **35**(11): 1664-1667. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2008.05.009.
- [50] Yao Y, Huang LZ, Chen XY *et al.* Purification effects of different submerged plants on nitrogen and phosphorus. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2011, **52**(4): 789-792. [姚瑶, 黄立章, 陈少毅等. 不同沉水植物对水体氮磷的净化效果. 浙江农业科学, 2011, **52**(4): 789-792.]
- [51] Pan BY, Yang GT, Mu LQ *et al.* Removal ability of three submersed macrophytes on nitrogen and phosphorus from water. *Bulletin of Botanical Research*, 2015, **35**(1): 141-145. [潘保原, 杨国亭, 穆立菁等. 3种沉水植物去除水体中氮磷能力研究. 植物研究, 2015, **35**(1): 141-145.]
- [52] Liu Y, Wan FX, Wang HQ. Removal effects on phosphorus and nitrogen in eutrophic water with different kinds of hydrophytes. *China Forestry Science and Technology*, 2013, **27**(3): 72-75. [刘燕, 万福绪, 王瀚起. 不同水生植物对富营养化水体氮磷的去除效果. 林业科技开发, 2013, **27**(3): 72-75.]
- [53] Jin SQ, Zhou JB, Bao WH *et al.* Comparison of nitrogen and phosphorus uptake and water purification ability of five submerged macrophytes. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 156-161. DOI: 10.13227/j.hjks.201606135. [金树权, 周金波, 包薇红等. 5种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较. 环境科学, 2017, **38**(1): 156-161.]
- [54] Ren WJ, Tian ZF, Ning GH *et al.* Purification efficiency of four species submerged macrophytes for the eutrophic water in Baiyangdian Lake. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, **20**(2): 345-352. [任文君, 田在锋, 宁国辉等. 4种沉水植物对白洋淀富营养化水体净化效果的研究. 生态环境学报, 2011, **20**(2): 345-352.]
- [55] Liu JT. Nutrient removal capacities of four submerged macrophytes in the Poyang lake basin. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2016, **14**(2): 107-124. DOI: 10.15666/aer/1402_107124.
- [56] Li W, Liu GH, Xiong BH *et al.* The restoration of aquatic vegetation in lakes of Poyang lake nature reserve after catastrophic flooding in 1998. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2004, **22**(4): 301-306. [李伟, 刘贵华, 熊秉红等. 1998年特大洪水后鄱阳湖自然保护区主要湖泊水生植被的恢复. 武汉植物学研究, 2004, **22**(4): 301-306.]
- [57] Lin C, Han CM, Pan H *et al.* Effects of different light intensity on growth of the eight submerged plants. *Environmental Engineering*, 2016, **34**(7): 16-19. DOI: 10.13205/j.hjgc.201607004. [林超, 韩翠敏, 潘辉等. 不同光照条件对8种沉水植物生长的影响. 环境工程, 2016, **34**(7): 16-19.]
- [58] Zhang JQ, Fang XG, Gao XY *et al.* Advances in biological control techniques for overgrowth of submerged plants. *Agro-Environment & Development*, 2013, **30**(3): 66-68. [张嘉琦, 方祥光, 高晓月等. 沉水植物过度生长的生物控制技术研究进展. 农业环境与发展, 2013, **30**(3): 66-68.]
- [59] Chai X, Liu CY, Xie C *et al.* Choice of hydrophyte species in remediation and building of ecosystem—taking Huizhou ecosystem in Hunan Province as an example. *Pollution Control Technology*, 2008, **21**(2): 18-20, 115. [柴夏, 刘从玉, 谢超等. 生态系统修复与构建过程中的水生植物品种选择——以惠州西湖生态系统的修复与构建工程为例. 污染防治技术, 2008, **21**(2): 18-20, 115.]
- [60] Wang QH, Liu ZW, Zhen W *et al.* Effects of different densities of Wuchang bream on community structure of *Hydrilla verticillata* and *Vallisneria denseserrulata*. *J Lake Sci*, 2019, **31**(3): 862-868. DOI: 10.18307/2019.0324. [王倩红, 刘正

文,甄伟等.不同密度团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)对轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)和密刺苦草(*Vallisneria denseserrulata*)群落结构的影响.湖泊科学,2019,31(3):862-868.]

- [61] Li KY, Liu ZW, Li CH *et al.* The herbivory effects of snail *Radix swinhoei* on submerged plant community. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2007, 38(6): 576-580. [李宽意,刘正文,李传红等.螺类牧食损害对沉水植物群落结构的调节.海洋与湖沼,2007,38(6):576-580.]
- [62] Cruz C, Silva AF, Venturini FP *et al.* Food preference and consumption of aquatic macrophytes submerged by snail *Pomacea canaliculata*. *Planta Daninha*, 2015, 33(3): 433-439. DOI: 10.1590/s0100-83582015000300006.

J. Lake Sci.(湖泊科学),2021,33(4):1253

DOI 10.18307/2021.0428

© 2021 by *Journal of Lake Sciences*

关于“东太湖围网拆除前后水生植被群落遥感监测及变化”一文的勘误

由于作者的疏忽和编辑把关不严,杨井志成,罗菊花,陆莉蓉等发表在《湖泊科学》2021年第2期507-517页的论文“东太湖围网拆除前后水生植被群落遥感监测及变化”(DOI:10.18307/2021.0228)中的前言部分提及的浮游藻类指数(floating algae index, *FAI*)和后文提出的藻类指数(*FAI*)使用了同一个缩略语 *FAI* 表述,容易造成读者误解.由于 *FAI* 在相关文献中已经广泛使用,本文提出的藻类指数应该改为 *AI*(algae index, *AI*),对应的1.4节所有段落、表2、图2部分的 *FAI* 均应该是 *AI*.

此外,图3中的上部两幅假彩色遥感图的图例加注为排版错误,不应加注图例,应删除.特此勘误.

Corrigendum to “Changes in aquatic vegetation communities based on satellite images before and after pen aquaculture removal in East Lake Taihu”(DOI:10.18307/2021.0228)

The corrigendum is for the following paper published by Yang Jingzhicheng *et al* “Changes in aquatic vegetation communities based on satellite images before and after pen aquaculture removal in East Lake Taihu”(J. Lake Sci., 2021, 33(2): 507-517. DOI:10.18307/2021.0228). Due to the carelessness of the authors and the editor, the *FAI* for algae index in Chpt. 1.4, Fig.2 and Tab.2 is misused, which should be presented as algae index (*AI*). The *FAI* was a common abbreviation for floating algae index as indicated in Preface and references, such a misuse could lead a misunderstanding for the readers.

In addition, the legends on the upper two figures in Fig.3 are redundant, which is a casual mistake during proof-reading and should be deleted.

We regret for the inconvenience to the readers.