

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*

王倩红¹, 刘正文^{1,3,4}, 甄伟^{2**}, 张秀梅³, 郝征³, 莫家勇⁵, 赵雪枫⁶

(1: 中国科学院大学中丹学院, 北京 101400)

(2: 武汉市规划设计有限公司, 武汉 430000)

(3: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(4: 暨南大学生态学系与水生生物研究中心, 广州 510632)

(5: 广州贝山水生态科技有限公司, 广州 510008)

(6: 广东省南方三农咨询服务中心, 广州 510600)

摘要: 冠层型水草轮叶黑藻在富营养情况下, 生长迅速, 覆盖水面, 对于草甸型水草密刺苦草具有明显的竞争优势. 为控制轮叶黑藻的竞争优势, 于湖北省鄂州市团头鲂原种场的一个池塘进行了原位围隔 (10 m×10 m) 实验, 研究不同密度 (0、0.5 和 1 尾/m²) 团头鲂牧食作用对轮叶黑藻和密刺苦草群落结构的影响, 并通过无人机数字图像处理获取水草覆盖度信息. 实验过程中, 沉水植物总覆盖度未发生变化. 研究发现, 团头鲂选择性牧食使得密刺苦草生物量和覆盖度显著增加. 随着牧食强度的加大, 团头鲂对轮叶黑藻的控制效果显著, 放养密度为 1 尾/m² 的围隔中轮叶黑藻比例降幅最明显. 群落中轮叶黑藻与密刺苦草的生物量之比迅速下降, 由 6.14 减少至 0.002, 覆盖度之比由 4.88 左右减少至约 1.44. 图像处理结果与实际采样情况相吻合, 且通过误差矩阵得到图像分类平均精度达到 90% 以上, 表明无人机数字图像处理在一定条件下可以作为获取沉水植物覆盖度的一种有效辅助手段. 实验结束后, 1 尾/m² 组的围隔中密刺苦草成为优势种, 其植株密度、株高、株重和单株叶片数均显著增加, 草甸更加密实. 实验结果表明, 放养 1 尾/m² 密度的团头鲂可以有效控制轮叶黑藻并维持密刺苦草种群优势, 结果为团头鲂对湖泊沉水植物群落控制提供了参考.

关键词: 团头鲂; 选择性牧食; 放养密度; 沉水植物群落结构; 无人机影像; 数字图像处理

Effects of different densities of Wuchang bream on community structure of *Hydrilla verticillata* and *Vallisneria denseserrulata*

WANG Qianhong¹, LIU Zhengwen^{1,3,4}, ZHEN Wei^{2**}, ZHANG Xiumei³, HAO Zheng³, MO Jiayong⁵ & ZHAO Xuefeng⁶

(1: Sino-Danish College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, P.R.China)

(2: Wuhan Planning and Design Company Limited, Wuhan 430000, P.R.China)

(3: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(4: Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, P.R.China)

(5: Belsun Aquatic Ecology Science and Technology Company Limited, Guangzhou 510008, P.R.China)

(6: Guangdong South Three Rural Consultation Service Center, Guangzhou 510600, P.R.China)

Abstract: Under the condition of eutrophication, canopy-forming *Hydrilla verticillata* grows fast and covers the water surface rapidly. It has an obvious competitive advantage over meadow-forming *Vallisneria denseserrulata*. In order to control the competitive ad-

* 中国科学院 STS 项目 (KFJ-STZ-ZDTP-038) 和国家自然科学基金项目 (41877415) 联合资助. 2018-09-23 收稿; 2018-10-19 收修改稿. 王倩红 (1995~), 女, 硕士; E-mail: wqhsdc@163.com.

** 通信作者; E-mail: zhenwei157@163.com.

vantage of *H. verticillata*, an *in-situ* enclosure (10 m×10 m) experiment was conducted in Dushan Town, Ezhou City, Hubei Province to study the effects of herbivory by Wuchang bream (*Megalobrama amblycephala*) on the community structure of *H. verticillata* and *V. denseserrulata* with different densities of the fish (0, 0.5 and 1 ind./m²), UAV digital image processing was used to obtain the coverage information of macrophytes. The results showed that the biomass and coverage of *V. denseserrulata* increased significantly after fish grazing while the total coverage remained unchanged. With the increase of grazing intensity, the control effect of Wuchang bream on *H. verticillata* was significant, and the proportion of *H. verticillata* decreased most significantly in the enclosures with 1 fish/m². The ratio of biomass of *H. verticillata* to *V. denseserrulata* decreased rapidly from 6.14 to 0.002, and the ratio of coverage decreased from 4.88 to 1.44. The image processing results are consistent with the actual sampling situation, and the average classification accuracy of the image obtained by error matrix is more than 90%. It shows that the UAV digital image processing can be used as an effective means to obtain the coverage of submerged plants under certain conditions. At the end of the experiment, plant density, the length, weight and leaf number per plant of *V. denseserrulata* in the enclosure with 1 fish/m² treatment significantly increased, and the meadow became denser. The results showed that the dominance of *H. verticillata* could be controlled by stocking Wuchang bream. The results provides a useful information for a better control of submerged plant communities in lakes.

Keywords: Wuchang bream; selective grazing; stocking density; submerged macrophytes community structure; UAV image; digital image processing

水生植物,尤其是沉水植物,是浅水湖泊生态系统的重要组成部分.沉水植物群落的恢复与重建已成为富营养化湖泊治理的关键步骤^[1-2].冠层型沉水植物轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*),因其较强的环境适应及繁殖能力,能够生长在光照不强、浑浊、贫营养或富营养化的水体中^[3-5],在一些湖泊修复工程中,常作为先锋种种植^[6],利用其快速生长的特点,以迅速提高水体透明度.但由于轮叶黑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,而对整个水生生态系统产生不利影响^[7].故湖泊水质改善后往往去除轮叶黑藻,种植苦草等草甸型沉水植物.草甸型的密刺苦草(*Vallisneria denseserrulata*)生物量主要集中于沉积物表面,不易引起水体下层的缺氧和光照不足,同时还能有效地抑制由于鱼类活动等引起的沉积物再悬浮^[8].在植物的生长方式和形态方面,密刺苦草也要优于轮叶黑藻,更有利于维持湖泊清水稳态^[9].

富营养化条件下,为控制沉水植物的过度生长,常用的管理方法包括物理、化学和生物方法.物理方法即通过人工或机械对沉水植物进行收割.但这往往需要花费大量人力物力,且只能在短时间、小范围内起作用,不能长期消除沉水植物过度生长产生的危害^[10].化学方法如使用除草剂等杀灭有害植物,容易对周围水环境产生污染,威胁生态安全^[11].生物方法主要包括利用草食性鱼类等动物的牧食作用对沉水植物进行控制.该方法成本低、效果持久、安全性较高,近年来受到研究者的普遍关注.目前对沉水植物进行生物控制应用较多的鱼类是草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)^[12].但草鱼是一种生长迅速的大型鱼类,常常导致对水生植物的过度牧食,甚至导致其消失,从而使水体从清水态转变为浮游藻类占优势的浊水态^[13],现实中很少能够达到适度控制水草的目标.团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)是我国特有的草食性鱼类,体型中等,口和咽喉齿较小,进食量较少,生长也较草鱼慢^[14].陈少莲等研究发现草鱼对苦草和轮叶黑藻的牧食无明显选择性,而团头鲂对轮叶黑藻的选食性十分显著^[15].甄伟等研究比较了草鱼和团头鲂牧食对轮叶黑藻和密刺苦草种群的影响,结果表明团头鲂的牧食作用相较于草鱼更加温和,可作为草鱼的理想替代种用于沉水植物群落的管理^[16].

为进一步研究团头鲂在沉水植物种群控制中的应用,本文通过大型围隔实验(10 m×10 m),研究比较了不同放养密度的团头鲂对轮叶黑藻的控制及保持密刺苦草优势的效果.我们的假设是:由于团头鲂对轮叶黑藻的选择性牧食,轮叶黑藻覆盖度和生物量在群落中将逐渐降低,密刺苦草的生长逐渐得到改善,且高密度的团头鲂效果更加迅速明显.研究将为湖泊生态修复后期应用团头鲂进行沉水植物控制提供参考,为长江中下游富营养化湖泊沉水植物管理及合理利用鱼类资源提供依据.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

实验在靠近湖北省梁子湖的鄂州市杜山镇团头鲂原种场一个约 6000 m²的池塘内进行(30°24′40.40″N,

114°45'3.87"E), 干塘之后撒药清鱼, 初始条件下无水生植物。

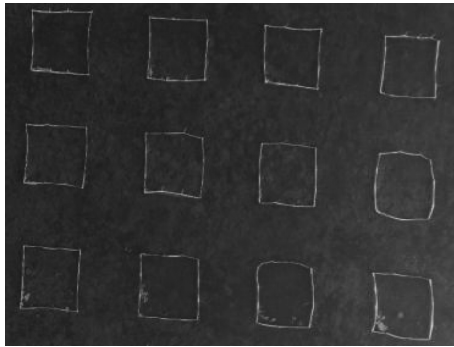


图1 围隔布置

Fig.1 Arrangement of enclosures

2017年6月,于实验区域均匀种植沉水植物,轮叶黑藻株簇间隔为30~40 cm,密刺苦草种植间距为16~18 cm,与轮叶黑藻相间种植.密刺苦草和轮叶黑藻生长期约为两个月,在水底形成一个均匀的苗圃.2017年9月,将12个围隔布置在水草种植区域.围隔尺寸为10.0 m×10.0 m×1.5 m,水深约为1.0 m.围隔为尼龙网制成,网目尺寸0.2 cm×0.2 cm,水流可自由交换,使各个围隔保持在同一营养水平.围隔上部开放,用竹竿固定在泥中,围网底部用钢筋固定在泥中,以防外界生物进入和鱼类游出.围隔结构布置见图1.实验用鱼均为原种场当年育种的同批次团头鲂幼鱼,平均体长约为12 cm,平均尾重约为20±2 g.采用单因素实验设计.2017年9月27日,按照设置放鱼密度(无鱼(对照组)、0.5尾/m²(低密度组)和1尾/m²(高密度组))加入团头鲂.每组设置4个重复,共计12个围隔.整个实

验在露天条件下进行,实验时间为2017年9月—2018年4月,每隔3个月采样1次.由于冬季温度较低,水温过低,团头鲂基本停止牧食,水生植物也基本停止生长,未进行采样.

1.2 样品的采集与分析

实验开始时,于围隔附近随机选取4个样方,采集密刺苦草和轮叶黑藻以确定水草的初始生物量.样方用钢筋焊制,尺寸为0.5 m×0.5 m.密刺苦草的性状测量在实验结束时进行.每个围隔随机采集一个水草样方,水草植株采集上来后,去除枯草,分类并仔细清洗叶片和根系上的附着物质.每个围隔内的密刺苦草和轮叶黑藻总生物量(湿重)用电子天平(最小读数0.01 g)来测量.仔细数出样方内的密刺苦草株数以计算密刺苦草植株密度.从每个样方中随机选取10株密刺苦草,对植物株重、叶片数、株高和最大叶长等指标进行测定.株重(包括叶片和根系)用电子秤(最小读数0.01 g)称量.株高和最大叶长用直尺(最小刻度1 mm)量取.

无人机(UAV, unmanned aerial vehicle)图像获取方便,处理简单,不需要花费较多的人力物力即可操作,对于此实验区域与实验条件,是比较合适的获取方法.所以实验后期,在采集水草样方的同时,选取天气状况良好,风小云少,所获取影像不受大气因素影响的时间点,通过无人机拍摄获取各个围隔的垂直俯视图,获得共计12幅图像用于获取两种沉水植物的覆盖度数据.获取图像包含红(R)、绿(G)、蓝(B)3个波段,空间分辨率小于0.1 m.

1.3 数据处理

对所获取图像运用ENVI 4.8进行分类处理.首先对原始图像进行几何校正处理以消除地形误差,并运用裁剪处理获取感兴趣区域(Regions of Interest, ROIs),即围隔部分图像.后对所获得ROIs进行图像拉伸以使轮叶黑藻和密刺苦草的区分更加明显.选择迭代式自组织数据分析算法(ISODATA),对所获图像的红、绿、蓝3个波段进行非监督分类,得到密刺苦草与轮叶黑藻在各个围隔中的覆盖度,图像处理流程为:原始图像→几何校正→图像拉伸→ISODATA→地物成分分析和信息提取→精度验证.最终,于ArcMap 10.2中进行沉水植物空间分布图的绘制.为评价覆盖度提取精度,在影像中随机生成62个点,利用在高分辨率影像中轮叶黑藻和密刺苦草很容易被目视识别的点,生成误差矩阵表计算总精度和Kappa系数.

本实验使用单因素重复性方差分析(One-way ANOVA)来分析团头鲂牧食作用对密刺苦草及轮叶黑藻群落结构的影响.运用Excel 2003、Origin Pro 2018进行数据整理、统计分析和作图.

2 实验结果

2.1 团头鲂牧食对沉水植物生物量和覆盖度的影响

实验开始前各围隔轮叶黑藻与密刺苦草的初始生物量分别约为2330和670 g/m²,各组无显著性差异

($P>0.05$). 实验结束后,相较于对照组,低密度组围隔中水草总生物量下降约 20%. 并且,由于团头鲂的选择性牧食,轮叶黑藻生物量减少约 40%,密刺苦草生物量增加约 60%,密刺苦草在总生物量中占比增加约 15%. 表明此时团头鲂对轮叶黑藻表现出一定的控制作用,对密刺苦草的生长有所促进. 高密度组围隔中水草总生物量增加约 30%,此时密刺苦草在总生物量中占比接近 100% (图 2),群落中轮叶黑藻与密刺苦草的生物量之比亦迅速下降,由 6.14 减少至 0.002. 此时高密度组密刺苦草已成为围隔优势种. 表明两种沉水植物的竞争优势已发生显著变化,较高密度团头鲂的牧食作用可以有效控制轮叶黑藻生长,促进密刺苦草的生长.

通过数字图像处理及空间制图,每幅围隔图像包含轮叶黑藻类、密刺苦草类及其他 3 类 (图 3). 实验过程中沉水植物总覆盖度维持在 100%,而低密度组围隔中,密刺苦草覆盖度相较于对照组约增加 5%,高密度组密刺苦草覆盖度增加至 40% 以上 (图 4). 轮叶黑藻与密刺苦草覆盖度之比由 4.88 左右减少至 1.44 左右. 另外,通过现场采样,发现高密度组中,大量轮叶黑藻枯萎的断草覆盖于密刺苦草上,密刺苦草实际覆盖度大于图像处理结果. 通过误差矩阵进行精度验证,得到图像分类总体精度高于 90% (表 1).

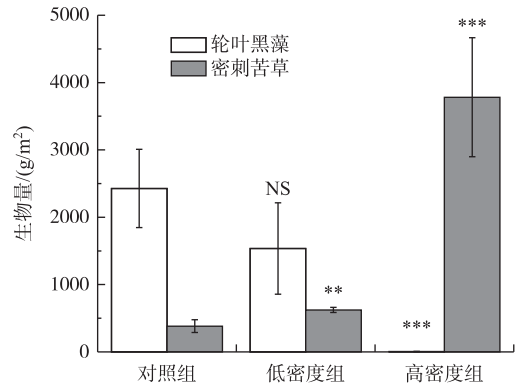


图 2 密刺苦草与轮叶黑藻生物量 (NS:不显著; **: $P<0.05$; ***: $P<0.01$)

Fig.2 Biomass of *Vallisneria denseserrulata* and *Hydrilla verticillata*

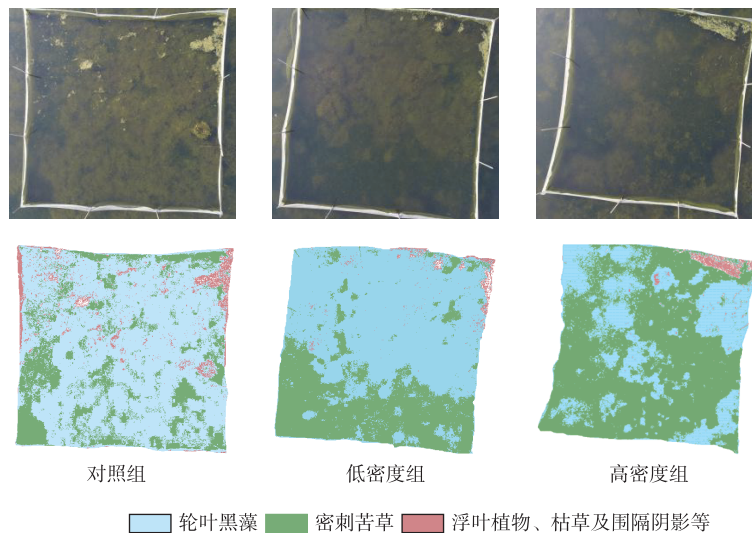


图 3 对照组与实验组数字图像处理结果

Fig.3 Image processing results of control groups and experimental groups

2.2 对密刺苦草性状的影响

由于团头鲂的选择性牧食,有鱼组的密刺苦草株高、株重与单株叶片数及叶长均增加 ($P<0.05$),其中高密度组增加显著 ($P<0.01$). 由对照组至 1 尾/ m^2 组,密刺苦草单株叶片数由 6.5 增加至 16.3,约增长 150%;单株株重由 1.9 g 增加至 10.1 g;株高由 26.4 cm 增加至 49.9 cm,约增长 90% (图 5). 结果表明团头鲂的选择性牧食降低了轮叶黑藻种群优势,促进了密刺苦草的生长. 密刺苦草植株密度和叶片数的增加使得草甸更加密实.

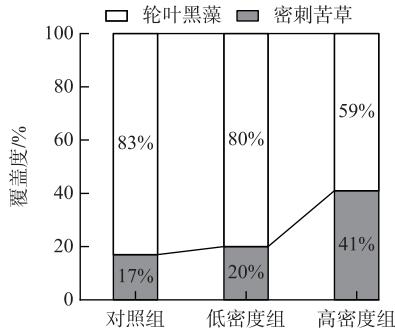


图4 轮叶黑藻与密刺苦草覆盖度

Fig.4 Coverage of *Hydrilla verticillata* and *Vallisneria denseserrulata*

表1 对照组图像处理混淆矩阵(像素值)*

Tab.1 Confusion matrix of control groups (pixel value)

	轮叶黑藻 (实际样点)	密刺苦草 (实际样点)	总计
轮叶黑藻(分类)	13055	493	13548
密刺苦草(分类)	119	15457	15576
总计	13174	15950	29124

* 总精度=97.8986%, Kappa 系数=0.9577.

草食性鱼类的适口饵料^[22]。陈少莲等^[14]研究发现,在5种常见沉水植物等量混合的条件下,团头鲂优先选择牧食轮叶黑藻,对其余几种沉水植物无选择性。团头鲂的选食作用导致轮叶黑藻被消耗和损害,水下光照得到改善,密刺苦草得以更好生长。

低密度组中,由于团头鲂优先选食轮叶黑藻,轮叶黑藻生物量有所减少,同时密刺苦草株高、株重、植株密度等均有所增加($P<0.05$),生物量大幅增加。表明低密度组团头鲂对轮叶黑藻表现出一定的控制作用,并促进了密刺苦草的生长。但此时轮叶黑藻覆盖度仍然很大,仍有较强的遮蔽作用。表明当团头鲂密度较低时,对轮叶黑藻的消耗和损害作用较弱。但随着团头鲂的生长,摄食量增加,将进一步抑制轮叶黑藻。

高密度组中,沉水植物总生物量增加,且密刺苦草占绝对优势,轮叶黑藻几乎从群落中消失。此时,较高密度的团头鲂牧食消耗并损害了绝大部分轮叶黑藻,随着轮叶黑藻冠层对水面的覆盖逐渐减少,水下光照得到改善,密刺苦草能够更好地获得光照进行光合作用,生长得到促进($P<0.01$) (图2)。另外,由于团头鲂优先选食轮叶黑藻,轮叶黑藻减少后,团头鲂转而牧食密刺苦草。研究显示,团头鲂的牧食能使密刺苦草植株密度和叶片数增加,草甸更加密实,增加的叶片厚度也使得叶片更加坚韧^[16]。本文研究结果显示,团头鲂的选择性牧食作用可改变沉水植物种群间的竞争态势,使受损较弱的植物种类占优势,尤其在鱼密度较高时,影响更为显著。实验期间也观察到,高密度组中水面漂浮有较多的植物残体,主要是破碎的轮叶黑藻叶片及断枝。实验结束后,高密度组中密刺苦草成为优势种,总生物量增加且生物量集中在水体底部,既避免水生植物贴水面生长,又可以在底泥表面保持较高的植物生物量,有利于维持湖泊清水态。

本实验围隔中仅有轮叶黑藻及密刺苦草两种沉水植物,混杂极少部分的穗花狐尾藻及漂浮的枯草,且水体清澈见底,轮叶黑藻和密刺苦草区分明显,无人机获取图像与实际情况基本一致,运用RGB图像分类处理进行覆盖度获取具有一定的可行性。且通过实地观察及实验数据发现,获得的沉水植物覆盖度数据可明显反映轮叶黑藻和密刺苦草种群的相对关系。但由于图像本身性质的限制,此方法具有一些不确定性,例如

3 讨论

在实验过程中,各围隔水草总覆盖度保持在100%。实验结束时,对照组(无鱼)围隔中轮叶黑藻覆盖度与生物量远远大于密刺苦草,实际采样中也发现此时围隔中仅存在极少的密刺苦草,轮叶黑藻表现出明显的竞争优势。这主要是由于形态结构和生长方式的不同导致二者对光照竞争优势的差异。轮叶黑藻生长速率较高,能够较早生长至水面;且轮叶黑藻繁殖能力很强,匍匐茎可于水面横向生长,在水体表面分枝^[17],形成类似于树冠的冠层。而草甸型的密刺苦草生长于水下的位置,生物量主要集中于下层水体或沉积物表面^[18]。由于轮叶黑藻冠层对光的遮蔽作用,密刺苦草光合作用将受到限制,生长受到影响。Haller等发现黑藻冠层可阻挡至少95%的光照透过^[19]。卢姣姣等研究发现,当光照低于入射光的30%时,苦草生长与碳代谢受阻严重,碳水化合物储存量降低^[20]。表明光照对沉水植物光合作用影响非常显著,对沉水植物的存活率和生长有重要影响^[21]。

而有鱼处理组轮叶黑藻覆盖度与生物量均有不同程度的减少,密刺苦草株高、株重、植株密度及叶片数均有增加,表明团头鲂对轮叶黑藻和密刺苦草两种沉水植物的牧食作用有明显的选择性。轮叶黑藻是一种理想的高蛋白植物,粗纤维和粗脂肪的含量均较低,是

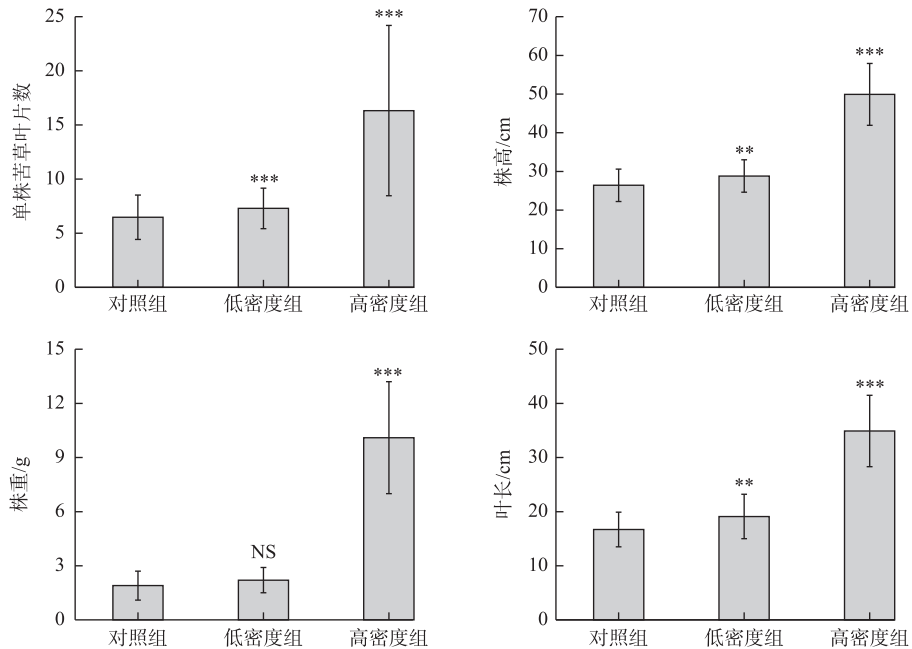


图5 密刺苦草株重、株高、叶长和单株叶片数(NS,不显著; **, $P < 0.05$; ***, $P < 0.01$)

Fig.5 Individual weight, total length, leaf length and individual plant leaf number of *Vallisneria denseserrulata*

低密度组生物量与覆盖度变化的不一致性:生物量存在显著变化,而覆盖度变化显著性不强.这可能是由于虽然团头鲂的选择性牧食促进了密刺苦草的生长,使其生物量有所增加,但由于团头鲂对表层轮叶黑藻牧食损害较弱,轮叶黑藻仍具有较强的遮蔽作用,使得密刺苦草在图像中并不可见,导致密刺苦草覆盖度偏低.此外高密度组中获取的轮叶黑藻覆盖度过高,主要是由于高密度组水体表层漂浮较多轮叶黑藻的断草及枯叶,遮蔽密刺苦草,使得处理结果中轮叶黑藻的覆盖度偏大.同时部分区域轮叶黑藻与密刺苦草分布不均匀,以及实验取样的随机性,样方中存在大量的密刺苦草而仅有较少的轮叶黑藻.而实地观测中发现围隔中仍存在部分轮叶黑藻分布区域,这与无人机照片得到的观测结果一致.此外,由于分类过程中图像拉伸的作用,对比度增大,阴影加深,并可能将黑藻间隙阴影等划分为密刺苦草,会在较小程度上增大密刺苦草的覆盖度,但这对本实验结果并无根本性影响.

4 结论

通过围隔实验,研究比较了不同密度团头鲂在控制湖泊常见沉水植物种群的效果.至实验结束时,放养密度为 0.5 尾/ m^2 的团头鲂对控制轮叶黑藻生长、维护密刺苦草种群优势效果不明显,而放养 1 尾/ m^2 的团头鲂具有显著作用,这为团头鲂控制湖泊沉水植物群落结构提供了参考,并对湖泊渔业管理和资源可持续利用具有一定指导意义,但仍要关注鱼类生长后可能产生的过度牧食风险,合理控制鱼类种群数量.另外,结合有限的实地考察,无人机数字图像处理可以作为一种有效的辅助手段来监测沉水植物覆盖度的变化,有助于监测草食性鱼类牧食的影响.

5 参考文献

- [1] Song BY, Wang J, Cao M *et al.* Ecological effects of submerged macrophytes restoration by using the mesocosm enclosure. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, **18**(5): 21-24. [宋碧玉, 王建, 曹明等. 利用人工围隔研究沉水植被恢复的生态效应. 生态学杂志, 1999, **18**(5): 21-24.]
- [2] Gulati RD, Pires LMD, Donk EV. Lake restoration studies: Failures, bottlenecks and prospects of new ecotechnological measures. *Limnologica*, 2008, **38**(3): 233-247.

- [3] Jr IB, Cunha-Santino MB, Milan JAM *et al.* Growth of *Hydrilla verticillata*, (L.f.) Royle under controlled conditions. *Hydrobiologia*, 2010, **644**(1): 301-312.
- [4] Yan ZC, Zeng AY, Jin XC *et al.* Physiological effects of ammonia-nitrogen concentrations on *Hydrilla verticillata*. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(3): 1050-1055. [颜昌宙, 曾阿妍, 金相灿等. 不同浓度氨氮对轮叶黑藻的生理影响. 生态学报, 2007, **27**(3): 1050-1055.]
- [5] 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. [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.]
- [6] 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. 植物科学学报, 2004, **22**(4): 301-306.]
- [7] Zhang JQ, Fang XG, Gao XY *et al.* Advances in biological control technology for over-growth of submerged macrophytes. *Agro-Environment & Development*, 2013, (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. 农业资源与环境学报, 2013, (3): 66-68.]
- [8] Guo CC, Yu GH, Wang GX. Effect of macrophytes on resuspension of suspended particulates. *Yellow River*, 2007, **29**(4): 37-38. [郭长城, 喻国华, 王国祥. 高等水生植物对悬浮颗粒物再悬浮的影响. 人民黄河, 2007, **29**(4): 37-38.]
- [9] Lei TW, Wei XF, Dai YL *et al.* Research on water purification of 6 common submerged macrophytes. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, **43**(36): 160-161. [雷婷文, 魏小飞, 戴耀良等. 6 种常见沉水植物对水体的净化作用研究. 安徽农业科学, 2015, **43**(36): 160-161.]
- [10] Murphy KJ. Aquatic weed problems and their management; a review. I. The worldwide scale of the aquatic weed problem. *Crop Protection*, 1988, **7**(4): 232-248.
- [11] Wang HX, Cheng H, Sun X *et al.* Control measures for overgrowth of large aquatic plants in lakes and reservoirs. *Agro-Environment & Development*, 2011, **28**(2): 69-71. [王洪兴, 程红, 孙霞等. 湖库大型水生植物过度生长的控制对策. 农业资源与环境学报, 2011, **28**(2): 69-71.]
- [12] Yang WD, Yan PY, Tang YJ *et al.* Control of overgrown submerged macrophytes using grass carp: A review. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2014, **20**(9): 92-95. [杨卫东, 颜培炎, 唐永杰等. 草鱼对沉水植物过度生长的控制技术综述. 天津农业科学, 2014, **20**(9): 92-95.]
- [13] Catarino LF, Ferreira MT, Moreira AIS. Preferences of grass carp for macrophytes in Iberian drainage channels. *Journal of Aquatic Plant Management*, 1997, **35**(4): 79-83.
- [14] Chen SL, Liu XF, Su ZG. Nutrition and bioenergetics of the Chinese herbivorous with important food values, II. maximum consumption and digestion of seven aquatic plants by *Ctenopharyngodon idella* and *Megalobrama amblycephala*. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1993, (1): 1-12. [陈少莲, 刘肖芳, 苏泽古. 我国淡水优质草食性鱼类的营养和能量学研究: II. 草鱼、团头鲂对七种水生高等植物的最大摄食量和消化率的测定. 水生生物学报, 1993, (1): 1-12.]
- [15] Chen SL, Liu XF. Nutrition and bioenergetics of the Chinese herbivorous with important food values III. preliminary studies on the feeding selectivity of *Ctenopharyngodon idella* and *Megalobrama amblycephala*. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1991, (2): 180-183. [陈少莲, 刘肖芳. 我国淡水优质草食性鱼类的营养和能量学的研究: III. 水生生物学报, 1991, (2): 180-183.]
- [16] 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.
- [17] Langeland KA. *Hydrilla verticillata* (L.F.) Royle (Hydrocharitaceae), "The Perfect Aquatic Weed". *Castanea*, 1996, **61**(3): 293-304.
- [18] Wigand C, Stevenson JC, Cornwell JC. Effects of different submersed macrophytes on sediment biogeochemistry. *Aquatic Botany*, 1997, **56**(96): 233-244.
- [19] Haller WT, Sutton DL. Community structure and competition between *Hydrilla* and *Vallisneria*. *Hyacinth Control Journal*, 1975, **13**: 48-50.
- [20] Lu JJ, Zhang M, Quan SQ *et al.* Integrated effects of hypoxia, high ammonia and low light on the growth and physiological C-N metabolism indices of *Vallisneria natans*. *J Lake Sci*, 2018, **30**(4): 1064-1074. DOI: 10.18307/2018.0419. [卢姣姣, 张萌, 全水清等. 低氧、高氨和低光对沉水植物苦草 (*Vallisneria natans*) 生长与 C-N 代谢生理指标的影响特征. 湖泊科学, 2018, **30**(4): 1064-1074.]
- [21] Pérez GL, Torremorell A, Bustingorry J *et al.* Optical characteristics of shallow lakes from the Pampa and Patagonia regions of Argentina. *Limnologia*, 2010, **40**(1): 30-39.
- [22] Lin LS, Yue CM, Liao WM. *Hydrilla verticillata* and its utilization in aquaculture. *Journal of Hydroecology*, 2005, **25**(5): 33-34. [林连升, 岳春梅, 缪为民. 轮叶黑藻及其在水产养殖上的利用. 水生态学杂志, 2005, **25**(5): 33-34.]