

温度与食物质量对太湖河蚬摄食及排泄的影响

李 伟^{1,2}, 韩燕青², 张 又², 李宽意²

(1. 重庆三峡学院环境与化学工程学院, 重庆 404100;
2. 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, 江苏 南京 210008)

摘要:河蚬(*Corbicula fluminea*)作为太湖大型底栖动物的优势物种,易受温度和食物质量等外界因素的影响,研究不同环境条件胁迫下的河蚬摄食及排泄变化,可为维护太湖生态稳定提供技术支持。室内模拟实验温度设置 20~32℃ 的 7 个温度梯度处理组,河蚬食物分为藻华湖水、50%藻华湖水+50%绿藻、绿藻、50%绿藻+50%蓝藻、蓝藻共 5 种,通过温度与食物组合,测定不同条件下河蚬摄食率与排泄率,探究温度与食物质量对河蚬生存状态的影响。结果表明,温度对河蚬的摄食率具有显著影响($P<0.05$),摄食率在 20~24℃ 逐渐增至峰值后呈下降趋势;食物质量对河蚬的摄食率具有显著影响($P<0.05$),表现为:绿藻>50%藻华湖水+50%绿藻>藻华湖水>50%绿藻+50%蓝藻>蓝藻;温度与食物质量对河蚬的摄食率具有显著的交互作用($P<0.05$),且食物质量对其摄食的影响力会在高温胁迫下减弱。河蚬的排泄率会在食物质量较低的环境下增大,温度和食物质量对河蚬排泄具有显著的交互作用($P<0.05$)。夏季高温期,河蚬的高能耗以及太湖蓝藻水华暴发造成的低质量食物,导致河蚬可用于生长和繁殖的能量锐减,可能是其种群衰退的重要原因之一。

关键词:太湖;河蚬;温度;食物质量;摄食率;排泄率

中图分类号:Q178.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2021)03-0099-07

在全球变暖的大背景下,大型浅水富营养湖泊太湖中的浮游植物群落结构发生了巨大变化,微囊藻(*Microcystis*)为主的蓝藻水华暴发提前和周期延长的现象较为显著(Deng et al, 2016)。蓝藻水华会分泌藻毒素,导致水体溶氧降低,并抑制其他藻类生长(李媛等, 2015);也会间接影响其他水生生物的生存,如造成大型枝角类(*Daphnia*)种群衰退(李静和陈非洲, 2010)。河蚬(*Corbicula fluminea*)作为太湖大型底栖动物优势种,自 20 世纪 80 年代末起,其密度总体下降,且呈现小型化趋势(Cai & Gong, 2015)。虽然河蚬生物量下降可能与底泥疏浚、过度捕捞等有关,但夏季高水温也会影响其代谢速率,并且以微囊藻为主的蓝藻水华由于其缺少关键营养物质且难以消化(Summons et al, 2006; Schwarzenberger et al, 2010),由此造成的低质量食物也会影响其营养结构,这也可能是太湖河蚬种

群衰退的重要原因之一。

双壳贝类的摄食行为是其生长发育的关键,与外界环境因素的影响密切相关。自 20 世纪七八十年代以来,有学者已经针对外界因素与贝类的关系开展了大量研究,包括食物质量、藻类浓度、无机悬浮颗粒物、温度、盐度等,其中食物质量(食物能被摄食及转化为自身所需营养物质的程度)是贝类摄食效率的关键(包永波和尤仲杰, 2006; 吕昊泽等, 2016)。在食物质量方面,20 世纪八九十年代,国外学者对河蚬等亚洲贝类在当地水体泛滥后展开了大量研究,涉及浮游藻类、悬浮颗粒物、人造食物等不同食物质量对双壳贝类生长的影响,发现浮游藻类是相对合适的食物,并且贝类的营养主要来源于浮游藻类(Foster-smith, 1975; Foe & Knight, 1985);而国内对贝类食物质量的研究起步较晚,仅见浮游藻类与悬浮颗粒物等方面的相关研究(吴庆龙等, 2005; 张继红等, 2013)。

温度是贝类生存的关键环境因子,对其摄食率、耗氧率、滤水率、同化率、排泄等方面造成重要影响(栗志民等, 2011; 王盛青等, 2016)。有研究表明,在适宜的温度范围内,贝类的摄食率会随着温度的上升而增加,当上升到一定程度后便会逐渐降低(徐钢春等, 2007);而河蚬及大部分淡水贝类在 25℃ 左右摄食状况最优,耗氧率在 30℃ 左右最大(刘其根

收稿日期:2019-06-18 修回日期:2020-10-30
基金项目:国家自然科学基金(31930074, 31770509, 32001156);中国科学院科技服务网络 STS 计划区域重点项目(KFJ-STQYD-156);中国科学院南京地理与湖泊研究所引进人才启动项目(NIGLAS2019QD02)。
作者简介:李伟, 1994 年生,男,硕士研究生,研究方向为湖泊生态学。E-mail: lvx_1994@163.com
通信作者:张又。E-mail: yzhang@niglas.ac.cn

等, 1999); 实验发现, 在夏季高温天气且河蚬食物浓度较自然状态下低 50% 的条件下, 其生长率下降 60% (Foe & Knight, 1985)。可见温度和食物是河蚬生命活动的重要影响因子。

河蚬作为太湖底栖动物优势种, 是维持生态稳定不可或缺的重要组成部分 (Cai & Gong, 2015)。近年来, 国内外针对环境因素对河蚬影响的研究大多集中于温度等单个因子 (徐钢春等, 2007; 薛庆举等, 2014), 对多因子的交互作用关注较少。为此, 本研究将通过实验测定不同温度 and 不同食物质量条件下河蚬的摄食率与排泄物, 分析温度和食物质量双因子对其摄食和排泄的影响, 进而探讨太湖河蚬种群变化的原因。

1 材料与方法

1.1 研究材料

实验所用河蚬采于太湖, 在恒温 (25℃) 水族箱中暂养 7~30 d, 期间充分曝气, 每日投喂藻类, 3 d 换水 1 次 (经 64 μm 孔径的 25 号浮游生物网过滤太湖水)。实验前 24 h, 选取壳长 15 mm 左右且活性高的河蚬, 清洁其表面的附着物后, 在充分曝气的自来水中暂养。实验时按照太湖河蚬年均生物量投加 (Cai & Gong, 2015), 各处理组生物量控制在 (18.3 ± 0.1) g。实验所需绿藻选用斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*, 以下统称绿藻), 蓝藻选用铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*, 以下统称蓝藻), 均从中国科学院水生生物研究所购买, 在恒温箱中分化培养 30 d 左右, 以下实验中投加的浓缩藻液均为实验室培养的高浓度藻种。

1.2 实验设计

国内外在温度对贝类影响的研究中, 温度跨度通常在 4℃ 以上, 不能够客观精确地反映贝类对温度的适应性, 在贝类养殖及环境影响等方面的科学指导意义不足。为研究温度对河蚬滤食率的影响, 本实验设置 7 个温度梯度处理组 (20℃、22℃、24℃、26℃、28℃、30℃、32℃), 每组设置 3 个平行, 同时设置 2 个空白对照以观察藻类的自然生长情况。实验装置在大水浴箱中进行, 水温变化较小, 可以较好地控制温度, 在预实验过程中使用水银温度计测量结果与控制目标温度仅相差 0.1~0.2℃。河蚬饵料采用经 25 号浮游生物网过滤后的太湖水, 其中绿藻 (5.5 ± 0.1) $\mu\text{g/L}$ 、蓝藻 (14.9 ± 0.3) $\mu\text{g/L}$ 、叶绿素总浓度 (22.7 ± 0.3) $\mu\text{g/L}$ 。实验在 8 L 透明方形实验箱中进行, 箱体置于 95 cm×62 cm×26 cm 的水浴

箱中恒温, 每个实验箱加注实验用水 5 L, 鉴于曝气会影响河蚬排泄物沉降, 所以未进行曝气, 在静水状态下持续 3 h。

实验用湖水提前 24 h 放置在室内, 使其温度达到 25℃ 后保持恒温, 同时停止投喂实验河蚬。实验用藻水在 160 L 圆形桶内配置, 配置过程中缓慢投加浓缩藻液, 同时使用造浪泵混匀水体, 使用 BBE 原位藻类分析仪测定, 使得藻类密度相同。实验开始前从桶中分装到实验箱中, 同时将河蚬放置到装有 1 L 蒸馏水的烧杯中, 随实验装置一同升温, 系统会在 4~6 h 内缓慢达到预定温度。实验系统达到预定温度后, 使用 BBE 原位藻类分析仪测定每个实验箱中叶绿素含量作为起始值, 并开始实验。实验结束时虹吸出 4 L, 并采用 BBE 原位藻类分析仪测量每个样品的叶绿素 a (Chl-a)、蓝藻与绿藻浓度, 计算河蚬摄食率。

根据上一实验结果, 另外选取摄食率最高和最低的两个温度 (24℃ 和 32℃), 进行温度和食物质量双因子交互作用对河蚬滤食率影响实验。该实验食物质量设置 3 个处理组, 分别为 100% 湖水 (25 号浮游生物网过滤后的太湖水, 投加浓缩蓝藻液以增加叶绿素浓度)、50% 湖水 + 50% 绿藻 (2.5 L 湖水 + 2.5 L 绿藻水)、100% 绿藻 (曝气 24 h 的自来水中添加浓缩绿藻液混匀制成), 所有处理组的叶绿素浓度均配置为 (55 ± 5) $\mu\text{g/L}$ 。实验操作与方法与上个实验一致。

为了与自然水体藻类结果进行对比, 以培养的不同纯藻为食物, 进行温度和食物质量对河蚬摄食和排泄交互影响实验。该实验设置 4 个温度梯度 (20℃、24℃、28℃、32℃), 在各个温度下, 河蚬分别在蓝藻 (由太湖水经 25 号浮游生物网过滤浓缩加曝气自来水配置而成)、50% 蓝藻 + 50% 绿藻 (2.5 L 蓝藻水 + 2.5 L 绿藻水)、绿藻 (曝气 24 h 自来水添加浓缩绿藻液混匀制成) 中进行滤食, 采用曝气 24 h 的自来水添加浓缩藻液, 配成后混匀, 使得各个实验用水的总叶绿素浓度在 (55 ± 5) $\mu\text{g/L}$ 。实验操作与方法与上个实验一致。

在滤水实验后, 将河蚬置于充分曝气的自来水中 2 h 进行排泄, 收集河蚬的排泄物, 测定排泄物总量 (TPM, mg) 和排泄物中有机物含量 (POM, mg)。TPM 和 POM 的测定方法如下: 先将 Whatman GF/C 玻璃纤维滤纸 (孔径为 1.2 μm) 经过 450℃ 灼烧 4 h, 称重 (W_0 , mg) 并标记。用上述滤纸过滤采集的河蚬排泄物样品, 在 65℃ 条件下烘干 12 h 后称

重,记为 W_{65} (mg);接着在 450°C 下灼烧 4 h 后再称重,记为 W_{450} (mg);则: $\text{POM} = W_{65} - W_{450}$; $\text{TPM} = W_{65} - W_0$ 。

1.3 数据分析

摄食率(R_F)是指贝类在单位时间内所滤食的叶绿素质量(mg/h),计算公式如下(Jørgensen et al, 1990):

$$R_F = V \times [C_{eo} - (C_{eo} \times S_{ed}) - C_{et}] / (N \times T) \quad \text{①}$$

式中: V 为透明箱中水的体积(L); C_{eo} 、 C_{et} 分别为实验开始和 T 时刻的藻类浓度(mg/L); N 为实验贝个数; T 为实验进行时间(h); S_{ed} 是对照组藻类浓度变化系数:

$$S_{ed} = (C_{eo} - C_{et}) / C_{eo} \quad \text{②}$$

式中: C_{eo} 、 C_{et} 分别为对照组实验开始和 T 时刻的藻类浓度(mg/L)。

所有实验数据采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析;采用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验不同组间的差异显著性;采用双因素方差分析(Two-way ANOVA)检验温度和食物质量对河蚬滤食和排泄是否有交互作用。图形均由 Excel 完成,* 表示差异性水平为显著($P < 0.05$),** 表示差异性水平为极显著($P < 0.01$)。

2 结果与分析

2.1 温度对河蚬摄食率的影响

河蚬在不同温度下的摄食率如图 1 所示。由于绿藻在湖水中占比较少,所以摄食率较低,且趋势不够明显。在河蚬对叶绿素 a 和蓝藻的摄食曲线中可以明显看出,河蚬摄食率是随着温度升高而增大,在 24°C 处达到最大后,之后出现降低的趋势;此外,河蚬摄食率在 $28 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 处出现了反折上升现象,在超过 30°C 后继续降低。

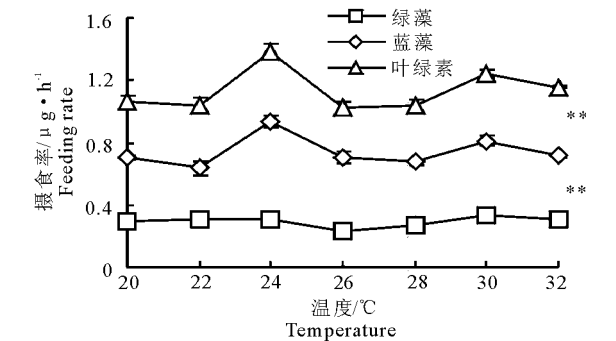


图 1 不同温度下河蚬对各种藻类的摄食率
Fig.1 Feeding rates of *C. fluminea* on different algae at different temperatures

2.2 温度和食物质量对河蚬摄食率的影响

如图 2 所示,温度 24°C 时食物质量对河蚬摄食具有显著影响($P < 0.05$),而 32°C 时食物质量对河蚬的摄食率影响不显著($P > 0.05$)。在 24°C 时河蚬的摄食率表现为:纯绿藻 $> 50\%$ 绿藻 + 50% 湖水 $>$ 湖水,说明 24°C 时,食物质量越高,河蚬的摄食率越大。采用双因素方差分析检验温度和食物质量对河蚬摄食率的影响,发现温度和食物质量对摄食率有显著的交互影响($P < 0.05$)。可见食物质量对河蚬摄食率的影响力在高温胁迫下减小。

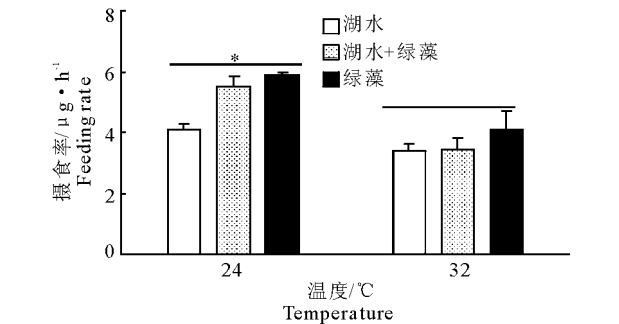


图 2 不同食物质量中河蚬在 24°C 与 32°C 时的摄食率
Fig.2 Feeding rates of *C. fluminea* on different food quality at 24°C and 32°C

河蚬对 3 种不同纯藻食物的摄食实验结果如图 3 所示。可以看出,3 种藻类饵料条件下,不同温度的河蚬摄食率均存在显著差异,且不同温度下河蚬摄食均随着温度的升高而呈现出先升后降的趋势。双因素方差分析结果表明,温度和藻类对河蚬摄食率有显著的交互影响($P < 0.05$)。

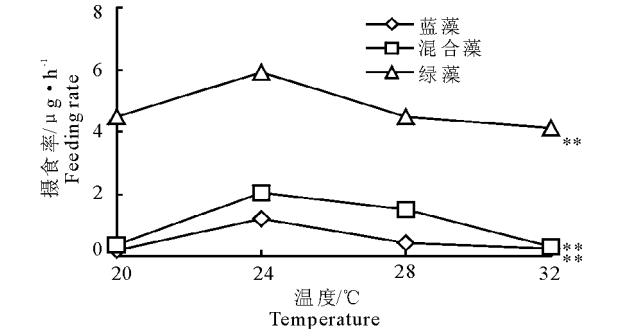


图 3 河蚬在不同温度下对不同藻类的摄食率
Fig.3 Feeding rates of *C. fluminea* on different algae at different temperatures

对 50% 绿藻 + 50% 蓝藻 + 湖水(简称湖水组)和 50% 绿藻 + 50% 蓝藻 + 曝气自来水(简称纯藻组)两个混合藻食物中河蚬的摄食情况进行分析,结果如图 4 所示。河蚬在纯藻水体中,低温环境下对藻类摄食的选择性不显著;而在高温条件下摄食的选择性差异极显著($P < 0.01$),并优先摄食质量较

高的绿藻。对于湖水,两个温度下河蚬对蓝藻和绿藻的选择性摄食均不显著。

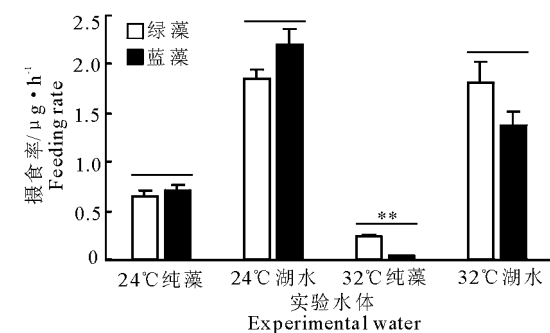


图4 河蚬在不同水体中对不同藻类的摄食率
Fig.4 Feeding rates of *C. fluminea* on different algae in different waters

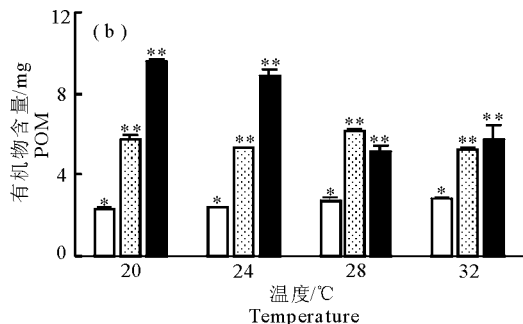
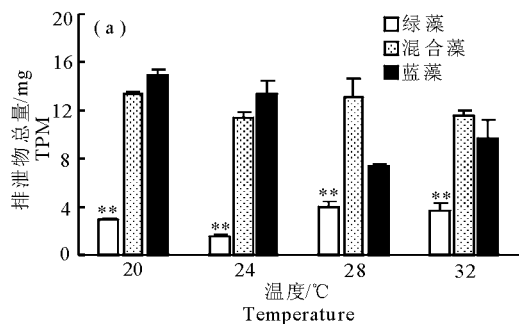


图5 河蚬在不同温度不同食物质量下的排泄物总量(a)和有机物含量(b)
Fig.5 Total particulate matter (TPM) (a) and particulate organic matter (POM) (b) of *C. fluminea* under different food qualities and different temperatures

3 讨论

3.1 高温环境抑制了太湖河蚬的摄食率

本次实验发现,河蚬在 24℃ 的活性最好,此结果与徐钢春等(2007)的研究结果相似。摄食率在 28~30℃ 处出现反折上升现象,在 30℃ 下的摄食高峰可能是由于在该温度下河蚬应对高温环境时热休克蛋白(HSPs)的分泌调节机能有关(Piano et al, 2005);该激素的分泌使河蚬增强了生命活性,进而摄食活动也增强了;也可能与蓝藻在 28℃ 生长迅速、水体溶氧下降间接导致河蚬活性降低有关(王得玉等, 2008);但国内外并无相关研究,因此该猜测还需进一步验证。

国内外学者的相关研究表明,河蚬摄食率随温度变化的趋势与其他双壳贝类的研究结果相似,摄食率都随着温度的升高而升高,在达到一定值后不再升高反而下降(方建光等, 1999;王芳等, 2000)。Foe & Knight(1985)模拟了食物充足条件下不同温度中河蚬生长情况,发现在高温环境的生长率较低温环境下降 1.65 倍;Vohmann 等(2010)在莱茵

2.3 温度和食物质量对河蚬排泄物的影响

在蓝藻和混合藻的摄食环境中(图 5),河蚬排泄物总量(TPM) 和有机物含量(POM) 都相对较高,但在绿藻的摄食环境中相对较低,且 TPM/POM 较小,可见河蚬对绿藻的消化程度较高。

在不同温度及不同食物质量下的河蚬排泄物均值表现存在差异,TPM: 绿藻<蓝藻<混合藻, POM: 绿藻<混合藻<蓝藻。双因素方差分析表明,不同处理的 TPM ($P<0.05$) 与 POM ($P<0.01$) 均存在显著差异,说明温度和食物质量对河蚬的排泄活动有显著的交互影响。对不同食物质量下的 TPM、POM 单因素方差分析,发现河蚬在不同质量下的 POM 会受温度显著影响。

河畔的实验证明,在夏季高温条件下,食物是限制河蚬生长的重要因素。本研究结果也表明,在蓝藻暴发的高温季节,太湖水体的高温环境与低食物质量可能是造成河蚬平均体长逐年减小的原因之一(Cai & Gong, 2015);同时验证了食物限制假说(Olson & Olson, 1989)。有研究表明,河蚬等双壳贝类在繁殖前存在蓄能阶段(Rajagopal et al, 2000),而食物限制对营养摄取的重要影响,则会间接影响其繁殖活动。

3.2 河蚬摄食率随食物质量下降而降低

本研究中的食物质量水平表现为:绿藻>50%藻华湖水+50%绿藻>藻华湖水>50%绿藻+50%蓝藻>蓝藻,与张继红等(2013)对 5 种摄食性贝类的实验结果相似。但略有不同的是,在同样藻类组成下,河蚬的摄食在湖水中较自来水中略占优势性,这可能是由于湖水含有一定数量的有机悬浮颗粒物。有研究表明,在高有机质悬浮物的水体中,有机悬浮颗粒物可以作为贝类的良好饵料,在沉积物再悬浮导致的高浓度悬浮颗粒环境中比中等浓度环境中的生长率更高(Foe & Knight, 1985),可

见太湖水中的高有机含量悬浮物也是河蚬食物的重要组成部分。

河蚬在高质量食物中摄食率较高,在低质量食物中摄食率较低,与 Bontes 等(2007)得出贝类无选择性摄食的结论相悖,可能由于其实验是在多种藻类的混合水体中进行,与本实验的条件有所不同。Milke & Ward(2003)利用内窥镜对贝类的摄食过程进行观察,发现在低食物质量下,河蚬唇瓣对食物的分类选择过程会限制其摄食速度,且不同食物质量下,其鳃腔对食物的运输机制及速率也会受到影响。由于摄食器官在不同食物质量下的运动速率不同,所以食物质量会影响河蚬的摄食率。

3.3 高温胁迫下食物质量对河蚬摄食影响力降低

对于在高温胁迫下食物质量对河蚬摄食影响力有所降低的实验现象,Jørgensen (1996)的机械学派认为温度改变了鳃的物理性质以及水流的粘滞性,而食物表面物理性质导致食物颗粒的摄食速率不同,从而进一步使得河蚬在高温和低质量食物环境下摄食效率更为低下,但此观点显然不能解释河蚬在高温状态下对湖水与纯藻环境中的摄食选择性不同的现象。

以 Bayne & Hawkins(1987)为代表的生理学派认为在食物质量较低且能耗较高的情况下,河蚬会通过选择高质量的食物来维持体内能量,即对环境的变化进行生物补偿,而湖水的相对高质量性,使得河蚬具有更高的能量用来摄食活动。有研究表明,河蚬属于数量选择型,在高浓度藻类条件下,会选择质量较高的食物以减少过多摄食低质量食物的大量耗能,在 32℃ 的高耗能纯混合藻(50% 蓝藻 + 50% 绿藻 + 曝气自来水)中,河蚬为维持能量而选择摄食质量较高的绿藻。在高温且低食物质量的条件下,河蚬为了维持自身能量会降低摄食活动,所以在 32℃ 的蓝藻食物下摄食率最低。可见在太湖蓝藻暴发的高温季节,河蚬的高能耗及可摄取的营养短缺,可能会严重影响其生长状态。

3.4 河蚬的排泄率与食物质量具有显著相关性

不同食物质量条件下的河蚬排泄物研究结果表明,绿藻组的 TPM/POM 较小,说明河蚬对绿藻消化程度较高,而蓝藻组的结果则相反,且产生假粪最多。沈和定等(2006)也得出类似结论,在测量毛蚶(*Scapharca subcrenata*)对 5 种单细胞藻的消化状况时,发现不同藻类下毛蚶的排泄活动及消化状况不同,并且某些不消化的藻类会以假粪形式排出完整个体;刘旭博等(2011)对三角帆蚌(*Hyriopsis*

cumingii)的滤食实验也发现,部分蓝藻未被三角帆蚌消化,而以假粪的形式排出体外;孙旭和杨柳燕(2018)研究表明,蓝藻浓度过高会降低河蚬肠道内的细菌丰度和多样性,而影响其消化系统。本实验中,不同食物质量下,温度对河蚬排泄率的影响程度,与何苗等(2017)对缢蛏(*Sinonovacula constricta*)碳收支研究中得出温度对其排泄率无显著影响的结论存在差异。

4 结论

(1)温度是河蚬生存的重要因子,在 24℃ 左右时摄食情况最佳。高温状态下,河蚬生理能耗高,而较低的摄食率会导致可用于生长和繁殖的能量减少,严重影响其生命活性。

(2)食物质量的高低会严重影响河蚬的摄食速度及能量摄取,太湖水中的高有机含量悬浮物也是其食物的重要组成部分,会在高耗能的条件下为河蚬提供部分能量。

(3)温度与食物质量对河蚬摄食具有显著的交互影响,在高温胁迫下食物质量对河蚬摄食率的影响会有所减少。太湖夏季高水温下的高能耗以及蓝藻水华的低质量,造成河蚬可用于生长和繁殖的能量减少,会对其种群繁衍造成极大威胁。

(4)河蚬对绿藻消化程度较高,而对蓝藻食物多以假粪形式排出体外,其在蓝藻等低质量食物中摄取的营养极其有限,反而会增加其识别及消化所需能量,对河蚬生存活性造成重要影响。

参考文献

- 包永波, 尤仲杰, 2006. 海洋滤食性贝类摄食率影响因子研究现状[J]. 渔业科学进展, 27(1): 76-80.
- 方建光, 孙慧玲, 匡世焕, 等, 1999. 泥蚶幼虫滤水率和摄食率的研究[J]. 海洋与湖沼, 30(2): 167-171.
- 何苗, 来琦芳, 么宗利, 等, 2017. pH、温度对缢蛏碳收支的影响[J]. 生态学杂志, 36(4): 1014-1019.
- 李静, 陈非洲, 2010. 太湖夏秋季大型枝角类(*Daphnia*)种群消失的初步分析[J]. 湖泊科学, 22(4): 552-556.
- 李媛, 张家卫, 魏杰, 等, 2015. 我国蓝藻水华的发生机理、危害及防控利用研究进展[J]. 微生物学杂志, 35(4): 93-97.
- 栗志民, 刘志刚, 邓海东, 2011. 温度和盐度对企鹅珍珠贝清滤率、滤食率、吸收率的影响[J]. 水产学报, 35(1): 96-103.
- 刘其根, 沈和定, 周洪琪, 等, 1999. 河蚬的耗氧率和排氮率[J]. 上海水产大学学报, 8(4): 298-303.

- 刘旭博, 李柯, 周德勇, 等, 2011. 三角帆蚌对蓝藻的滤食作用及其对沉水植物生长的影响[J]. 水生态学杂志, 32(2): 17-24.
- 吕昊泽, 刘健, 陈锦辉, 等, 2016. 盐度对长江口3种滤食性贝类滤水率、摄食率、同化率的影响[J]. 海洋科学, 40(8): 10-17.
- 沈和定, 张饮江, 卢华春, 等, 2006. 毛蚶对单胞藻的滤除率、选择性和消化状况[J]. 上海水产大学学报, 15(2): 195-200.
- 孙旭, 杨柳燕, 2018. 蓝藻堆积对河蚬 N_2O 释放通量及其肠道细菌群落结构的影响[J]. 微生物学通报, 45(11): 2376-2386.
- 王芳, 董双林, 张硕, 等, 2000. 海湾扇贝和太平洋牡蛎的食物选择性及滤除率的实验研究[J]. 海洋与湖沼, 31(2): 139-144.
- 王得玉, 冯学智, 周立国, 等, 2008. 太湖蓝藻爆发与水温和关系的 MODIS 遥感[J]. 湖泊科学, 20(2): 173-178.
- 王盛青, 尤宏争, 邵蓬, 等, 2016. 温度和盐度对文蛤耗氧率、排氨率、滤食率的影响[J]. 经济动物学报, 20(2): 69-73, 77.
- 吴庆龙, 陈宇炜, 刘正文, 2005. 背角无齿蚌对浮游藻类的滤食选择性与滤水率研究[J]. 应用生态学报, 16(12): 2423-2427.
- 徐钢春, 顾若波, 闻海波, 等, 2007. 温度、体重和饵料密度对河蚬滤食率与同化率的影响[J]. 上海水产大学学报, 16(2): 151-156.
- 薛庆举, 蔡永久, 许浩, 等, 2014. 温度对河蚬(*Corbicula fluminea*)氮、磷排泄影响的初步研究[J]. 湖泊科学, 26(6): 864-870.
- 张继红, 吴桃, 高亚平, 等, 2013. 5种滤食性贝类对牙鲆的粪便、残饵及网箱养殖区沉降物的摄食行为[J]. 水产学报, 37(5): 727-734.
- Bayne B L, Hawkins A J S, Navarro E, 1987. Feeding and digestion by the mussel *Mytilus edulis* L. (Bivalvia; Mollusca) in mixtures of silt and algal cells at low concentrations[J]. Journal of Experimental Marine Biology & Ecology, 111(1): 1-22.
- Bontes B M, Verschoor A M, Dionisio P L M, et al, 2007. Functional response of *Anodonta anatina* feeding on a green alga and four strains of cyanobacteria, differing in shape, size and toxicity[J]. Hydrobiologia, 584(1): 191-204.
- Cai Y, Lu Y, Gong Z, 2015. Changes in macrozoobenthic assemblages in a shallow subtropical lake (Lake Taihu, China): 1987-1988 vs. 2007[J]. Journal of Freshwater Ecology, 30(1): 157-168.
- Deng J, Qin B, Sarvala J, et al, 2016. Phytoplankton assemblages respond differently to climate warming and eutrophication: A case study from Pyhajarvi and Taihu [J]. Journal of Great Lakes Research, 42(2): 386-396.
- Foe C, Knight A, 1985. The effect of phytoplankton and suspended sediment on the growth of *Corbicula fluminea* (Bivalvia) [J]. Hydrobiologia, 127(2): 105-115.
- Foster-smith R, 1975. The effect of concentration of suspension and inert material on the assimilation of algae by three bivalves[J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 55(2): 411-418.
- Jørgensen C B, Larsen P S, Riisgard H U, 1990. Effects of temperature on the mussel pump[J]. Marine Ecology Progress Series, 64: 89-97.
- Jørgensen C B, 1996. Bivalve filter feeding revisited[J]. Marine Ecology Progress, 142(1/3): 287-302.
- Milke L M, Ward J E, 2003. Influence of diet on pre-ingestive particle processing in bivalves: II. Residence time in the pallial cavity and handling time on the labial palps [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 293(2): 151-172.
- Olson R R, Olson M H, 1989. Food limitation of planktotrophic marine invertebrate larvae: Does it control recruitment success? [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 20(1): 225-247.
- Piano A, Franzellitti S F, Fabbri E, 2005. Sequencing and expression pattern of inducible heat shock gene products in the european flat oyster, *Ostrea edulis* [J]. Gene, 361(1): 119-126.
- Rajagopal S, Velde G, Vaate A, 2000. Reproductive biology of the asiatic clams *Corbicula fluminalis* and *Corbicula fluminea* in the river rhine[J]. Archiv Fur Hydrobiologie, 149(3): 403-420.
- Schwarzenberger A, Zitt A, Kroth P, et al, 2010. Gene expression and activity of digestive proteases in Daphnia: effects of cyanobacterial protease inhibitors[J]. BMC Physiology, 10(1): 1-15.
- Summons R E, Bradley A S, Jahnke L L, et al, 2006. Steroids, triterpenoids and molecular oxygen[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 361: 951-968.
- Vohmann A, Borchering J, Kureck A, et al, 2010. Strong body mass decrease of the invasive clam *Corbicula fluminea* during summer[J]. Biological Invasions, 12(1): 53-64.

Effects of Temperature and Food Quality on *Corbicula fluminea*
Feeding and Excretion in Taihu Lake

LI Wei^{1,2}, HAN Yan-qing², ZHANG You², LI Kuan-yi²

(1.College of Environmental and Chemical Engineering, Chongqing Three Gorges
University, Chongqing 404100,P.R.China;

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

Abstract: *Corbicula fluminea*, the dominant species of macrobenthos in Taihu Lake, are very sensitive to external factors such as temperature and food quality. Investigation of changes in feeding and excretion of *C. fluminea* under different environmental conditions provides a theoretical basis for better understanding the ecological dynamics and stability of Taihu Lake. In this study, our aim was to identify factors leading to changes in *C. fluminea* populations. More specifically, laboratory experiments were conducted to investigate the single factor effects of temperature and food quality, and the effect of their interaction, on *C. fluminea* feeding and excretion. Seven experimental temperatures were set in the range 20 – 32℃ (20℃, 22℃, 24℃, 26℃, 28℃ 30℃, 32℃), along with five different food sources [(100% lake water), (50% lake water+50% *Scenedesmus obliquus*), (100% *Scenedesmus obliquus*), (50% *Scenedesmus obliquus* + 50% *Microcystis aeruginosa*), (100% *Microcystis aeruginosa*)]. The temperature and food quality interaction was investigated using different combinations of temperature (24℃ and 32℃) and food quality [(100% lake water), (50% lake water+50% *Scenedesmus obliquus*), (100% *Scenedesmus obliquus*)]. Results show that temperature had a significant effect on the feeding rate of *C. fluminea*; the rate gradually increased to a peak at 20 – 24℃ and then decreased. Food quality also had a significant impact on the feeding rate of *C. fluminea* ($P<0.05$); lower food quality decreased the feeding rate, in the order (100% *Scenedesmus obliquus*)>(50% lake water + 50% *Scenedesmus obliquus*)>(100% lake water)>(50% *Scenedesmus obliquus* + 50% *Microcystis aeruginosa*)>(100% *Microcystis aeruginosa*). Further, the interactive effect of temperature and food quality had a significant effect on the feeding rate of *C. fluminea* ($P<0.05$); the effect of food quality on the feeding rate of *C. fluminea* decreased under the stress of high temperature. The excretion rate of *C. fluminea* increased in an environment with low food quality, and temperature and food quality had a significant interactive effect on the excretion of *C. fluminea* ($P<0.05$). The higher temperatures in summer lead to higher energy consumption, during the time that cyanobacteria blooms result in lower food quality. These two factors reduce the energy available to *C. fluminea* for growth and reproduction and are primarily responsible for the observed declines in *C. fluminea* population in Taihu Lake during the summer.

Key words: Taihu Lake; *Corbicula fluminea*; temperature; food quality; feeding rate; excretion rate