温度和营养盐对微型裸腹溞生活史的影响

杨润东

温州大学生命与环境科学学院,浙江 温州

收稿日期: 2025年4月27日; 录用日期: 2025年5月20日; 发布日期: 2025年6月12日

摘要

在全球气候变化和水体富营养化日益加剧的背景下,温度升高与氮营养盐浓度变化已成为影响水生生态 系统结构和功能的关键环境因子。作为水生生态系统的关键消费者,浮游动物的生活史特征对环境变化 的响应机制是理解生态系统能量流动和物质循环的重要基础。本论文选取微型裸腹溞(Moina micrura) 为实验对象开展室内试验,设置不同氮营养盐浓度梯度(0.112,0.224,1.12,2.24,11.2 mg/L),探究了不 同氮营养盐条件下浮游动物对小球藻的摄食关系;随后基于摄食关系实验选取0.224 mg/L和2.24 mg/L 两个氮营养盐浓度及25℃和30℃两个温度梯度进行实验。通过对微型裸腹溞生活史进行研究,结果表明, 在25℃~30℃范围内,温度升高显著加快微型裸腹溞的代谢速度,使其内禀增长率和净生殖率提升,繁 殖时间与世代周期缩短,种群增长加快;而氮浓度升高能提高种群生物量,促进初期增殖,且使后代个 体更大。研究揭示了温度与氮营养盐相互作用对微型裸腹溞生活史的复杂影响机制,即温度主要通过加 速代谢过程影响繁殖效率,氮营养盐则从直接参与生理代谢和间接优化食物质量两方面发挥作用。

关键词

温度,营养盐,微型裸腹溞,生活史

The Effects of Temperature and Nutrient Salts on the Life History of *Moina micrura*

Rundong Yang

College of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou Zhejiang

Received: Apr. 27th, 2025; accepted: May 20th, 2025; published: Jun. 12th, 2025

Abstract

In the face of intensifying global climate change and increasing aquatic eutrophication, elevated temperatures and altered nitrogen nutrient salt concentrations have become pivotal environmental factors affecting the structure and functioning of aquatic ecosystems. As keystone consumers in aquatic ecosystems, the response mechanism of zooplankton's life history traits to environmental changes is an important basis for understanding the energy transfer and material cycling of ecosystems. This study selected *Moina micrura* as an experimental subject to conduct indoor experiments and set up different nitrogen nutrient salt concentration gradients (0.112, 0.224, 1.12, 2.24, and 11.2 mg/L) to study zooplankton-algal feeding relations under the conditions of different nitrogen nutrient salts. Then, it selected two nitrogen nutrient salt concentrations of 0.224 mg/L and 2.24 mg/L and two temperature gradients of 25°C and 30°C for further experiments based on the feeding relationship experiment. Through the study of the life history of *Moina micrura*, the results showed that at 25°C~30°C, higher temperatures sped up the metabolism of *Moina micrura*, increasing its intrinsic growth and net reproductive rates and shortening reproduction time and generation length, thus accelerating population growth. Higher nitrogen nutrient salt concentrations also increased the population biomass, enhanced initial reproduction, and produced larger offspring. The study revealed the complex interplay of temperature and nitrogen nutrient salt on the life history of *Moina micrura*. Temperature mainly affected reproduction efficiency by raising metabolic rates, while nitrogen nutrient salts influenced physiological metabolism directly and food quality optimization indirectly.

Keywords

Temperature, Nutrient Salts, Moina micrura, Life History

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC O Open Access

1. 引言

浮游动物(Zooplankton)是一类悬浮于水体中的微型无脊椎生物群落,浮游动物作为水生态系统的关键组分,在营养级中扮演着初级消费者的角色,在食物链中起着承上启下的重要作用[1],其具有生活史周期短、繁殖速率高和代谢活性强等生理性质[2]。浮游动物通过摄食细菌、有机碎屑和浮游植物调控初级生产者的生物量,同时为鱼类等高等消费者提供食物来源,从而维系水生态系统的物质循环与能量流动平衡[3]。浮游动物对环境变化具有高度敏感性,其群落结构、密度及生物多样性特征与水体营养状态(如总氮、总磷水平)、温度变化及污染物浓度等参数密切相关[4][5],这种特性使其成为评估水体富营养化、健康状况的有效生物指示物。浮游动物可划分为原生动物、轮虫、枝角类与桡足类四大类群,而微型裸腹溞(Moina micrura)作为枝角类的典型代表,具有繁殖周期短、环境敏感性高的生物学特性,是连接浮游植物与高等消费者的关键纽带以及研究中的模式生物。

近年来,全球气候变暖和水体富营养化进程加剧,水温升高与氮营养盐浓度变化已成为驱动浮游动 物群落结构改变的重要环境压力。水温是影响浮游动物种群动态变化、季节演替的重要非生物因子[6], 水温可以改变浮游动物的代谢速率,进而影响浮游动物的摄食、生物量及其分布[7]。温度升高通常会加 快浮游动物的代谢率,从而促进生长、繁殖和摄食,使浮游动物种群密度和多样性增加[8]。在水温适宜 时,浮游动物生物量与水温呈正相关关系[9],但当水温超过适宜范围时可能会引发其代谢压力,从而降 低浮游动物的存活率,导致其多样性减少[10]。此外,从生理机制层面来看,温度能够通过影响浮游动物 代谢率引起物种体长发生变化,进而影响种间竞争和捕食者-食饵之间的动态关系[11]。水温升高更有利 于小型浮游动物的生长繁衍,其促使浮游动物群落优势种由大型浮游动物转变为小型浮游动物。营养 盐浓度变化对浮游动物群落组成具有显著的调控作用[12]。研究表明,在一定范围内,浮游动物群落密 度通常随氮、磷浓度的升高而增加[13] [14],但随着营养水平进一步上升,浮游动物物种多样性下降, 此时,群落优势种逐渐更替为轮虫和小型枝角类,而桡足类和枝角类的数量则有所减少[15]。综上,浮 游动物群落特征与水体营养状态之间存在着紧密而复杂的关联,可作为评估水体营养状态的有效生物 指标。

然而,当前研究多聚焦单一因子效应,对温度与氮营养盐协同作用下微型裸腹溞生活史参数的动态 变化,如内禀增长率、净生殖率及个体发育特征的响应规律仍研究较少。在全球变暖与水体富营养化的 背景下,明确温度与氮营养盐对其生活史的调控机制具有重要的科学意义。基于此背景,本研究通过室 内控制实验设置 25℃与 30℃温度梯度及 0.224 mg/L (低氮)、2.24 mg/L (高氮)营养盐浓度,系统探究微型 裸腹溞的种群增长动态、繁殖特征及个体发育参数对环境变化的响应。研究旨在揭示:1)温度升高如何 影响微型裸腹溞的繁殖策略;2)氮营养盐浓度变化对其生物量积累和后代质量的作用;3)两者交互作用 下生活史参数的协同响应机制。研究结果可为理解气候变化下小型浮游动物的生态适应策略提供理论依 据,也为富营养化水体的生物调控与生态修复提供科学参考。

2. 数据与方法

2.1. 单种培养实验

为了探讨不同氮营养盐浓度对浮游动物的影响,选取微型裸腹溞为实验材料,设定了五个氮营养盐浓度(0.112,0.224,1.12,2.24,11.2 mg/L),开展微型裸腹溞的单种培养实验。通过添加不同浓度的硝酸钠 来调整实验组的浓度梯度。实验在 500 mL 烧杯中进行,每个实验设置三个平行,小球藻初始密度为 0.5 × 10⁶ cell/mL,浮游动物初始个数为 15 只,在含有不同氮浓度的烧杯中进行实验,实验持续 72 天。

2.2. 摄食率测定

本部分实验旨在研究微型裸腹溞不同氮营养盐浓度条件下的摄食率变化。实验选取五个氮营养盐浓 度梯度,以模拟不同营养水平的水体环境。实验中使用小球藻作为浮游动物的食物来源,小球藻起始浓 度为 1.0 × 10⁶ cells/mL。实验前挑选生长状态较好的微型裸腹溞 50 只,置于 5 L 烧杯中进行培养,随后 挑选 24 h 内出生的体型相近的新生幼仔取出备用。将新生幼仔置于 50 mL 烧杯中进行饥饿处理 8 h,排 空幼仔体内食物,用于摄食行为测量研究。

每个氮浓度处理条件下,分别设置微型裸腹溞各 3 个平行重复,另设不含浮游动物的空白对照组, 以测定藻类的自然沉降和生长对实验的影响,每个实验均在 50 mL 烧杯中进行,每个烧杯中加入 10 只浮 游动物,于 25℃恒温培养箱黑暗条件下处理 4h。实验结束时通过分光光度计对小球藻浓度进行计算,摄 食率方程计算其公式如下:

$$F = \frac{V}{n} \times \frac{\ln(C_t/C_{t0})}{t}$$
(1)

$$G = F \times \frac{C_{t0} - C_t}{\ln C_{t0} - \ln C_t}$$
(2)

其中, F和G分别为微型裸腹溞的滤水率和摄食率; C_t为空白对照组的最终藻密度; C_{t0}为实验组的最终藻密度; V 表示实验中处理组液体体积; n 各实验组浮游动物的数量; t 为浮游动物的摄食时间。

2.3. 温度梯度实验

分别从微型裸腹溞中筛选 100 只体系相近的成体个体用于温度梯度实验,在 25℃恒温培养箱中进行 扩大培养以消除母体效应。培养期间每日更换 50%的培养基,及时清除残体及代谢废物。培养 7 天后, 从每个群体中挑选出生时间小于 24 小时的幼体作为实验对象。

对营养盐浓度和温度分别设置两个梯度开展竞争实验,分别为 25℃低氮营养盐组(0.224 mg/L)、25℃ 高氮营养盐组(2.24 mg/L)、30℃低氮营养盐组(0.224 mg/L)和 30℃高氮营养盐组(2.24 mg/L)。每个营养盐

和温度组合条件下设置每组包含 3 个重复。从培养群体中随机选取 10 只体型相近个体,置于 500 mL 烧杯中进行单独培养,每烧杯添加 500 mL 新鲜培养液,每日更换 50%培养基,实验持续 40 天。

2.4. 生命表实验

在实验结束第 40 天时,从各组平行样本中随机选取 4 只新生个体(出生时间 <24 小时),置于 10 mL 六孔板中,在 25±1℃恒温条件下培养。培养体系中小球藻浓度维持在 0.5×10° cells/mL,每日更换 50% 培养基并同步补充等量新鲜培养基。实验持续 10 天,每日记录成熟个体存活数及新生幼体数量。在首次 繁殖时,对母代个体及其第一胎后代进行形态学测量(体长等参数),并通过显微镜记录体长数据。

2.5. 生命表计算

种群动态分析中,以培养基内微型裸腹溞的存活数量为种群密度绘制增长曲线。结合第40天的生命 表参数,统计分析微型裸腹溞在不同培养条件下的生活史特征(首次繁殖年龄、成熟体长、幼体初始体长 等),并计算种群动态指标:

特定年龄存活率(l_x):年龄组 x 起始存活个体比例; 特定年龄繁殖率(m_x):年龄组 x 个体平均产仔数; 净生殖率(R_0):种群经过一个世代后的净增长率, $R_0 = \sum l_x m_x$; 世代时间(T):从母世代生殖到子世代生殖的时间, $T = \sum l_x m_x x \cdot R_0^{-1}$; 内禀增长率(r_m):种群在特定实验条件下最大增长率, $r_m = \ln R_0 \cdot T^{-1}$, r_m 的精确值是在粗略计算的基

础上根据方程 $\sum_{x=0}^{n} e^{-rx} l_x m_x = 1$,通过设定的程序用试算法在 Excel 中运算求得。

本研究使用 Excel 2010 进行数据整理,使用 SPSS 27.0 软件进行统计分析,统计分析结果使用 GraphPad Prism 10.1.2 进行绘图。

3. 结果

3.1. 摄食率结果

在不同氮营养盐条件下, 微型裸腹溞的摄食率情况如图 1 所示, 结果表明在不同氮营养盐浓度下微型裸腹溞的摄食率没有显著差异(*p* > 0.05)。



Figure 1. Changes in feeding rate of *Moina micrura* under different nitrogen nutrient salt concentrations 图 1. 微型裸腹溞在不同氮营养盐浓度下的摄食率变化

3.2. 不同氮营养盐对微型裸腹溞生长的影响

在不同氮营养盐条件下,微型裸腹溞种群生物量变化情况如图 2 所示。在营养盐浓度为 0.112 mg-N/L 条件下,微型裸腹溞最大种群生物量为 1410 ind./L;在营养盐浓度为 0.224 mg-N/L 条件下,微型裸腹溞 最大种群生物量为 3330 ind./L;在营养盐浓度为 1.12 mg-N/L 条件下,微型裸腹溞最大种群生物量为 6506 ind./L;在营养盐浓度为 2.24 mg-N/L 条件下,微型裸腹溞最大种群生物量为 5912 ind./L;在营养盐浓度 为 11.2 mg-N/L 条件下,微型裸腹溞最大种群生物量为 8564 ind./L。图 2 结果表明,当营养盐浓度较低时 (0.112 mg-N/L 和 0.224 mg-N/L),微型裸腹溞生物量在实验初期有所升高,但随后生物量开始下降并处于 较低水平;而当营养盐浓度较高时(2.24 mg-N/L 和 11.2 mg-N/L),微型裸腹溞生物量在实验初期呈现较快 增长趋势,并快速达到其最大生物量水平,尽管在实验后期生物量有所下降,但仍高于同期低营养水平 下微型裸腹溞生物量,且微型裸腹溞生物量在实验期内呈波动变化趋势。图 2 结果表明,相较于低营养 水平,微型裸腹溞在高营养盐浓度水平下增长较好。



Figure 2. Population growth curves of *Moina micrura* under different nitrogen nutrient salt concentrations 图 2. 微型裸腹溞在不同氮营养盐浓度下的种群增长曲线

3.3. 不同温度和氮营养盐对微型裸腹溞生活史的影响

微型裸腹溞在不同条件下的种群动态变化如图 3 所示。在相同温度下,氮营养盐升高促进微型裸腹 溞生物量增加,在 25℃时,微型裸腹溞的最大种群生物量相比低氮营养盐环境下增加了 27%;在 30℃ 时,微型裸腹溞的最大种群生物量相比低氮营养盐环境下增加了 67%。而在相同营养盐浓度下,温度升 高也促进了微型裸腹溞生物量,在低氮营养盐环境下时,30℃下的微型裸腹溞生物量相比于 25℃增加了 12%;在高氮营养盐环境下时,30℃下的微型裸腹溞生物量相比于 25℃增加了 47%。微型裸腹溞在 30℃ 高氮营养盐环境下种群生物量达到最高,为 4385 ind./L。

在单种培养时,在不同处理的微型裸腹溞内禀增长率均存在显著差异(*p* < 0.01),30℃高氮处理下的 微型裸腹溞内禀增长率最高,极显著(*p* < 0.01)高于其他三个处理(见图 4(A));在不同处理的微型裸腹溞 净生殖率均存在显著差异,30℃高氮处理下的微型裸腹溞净生殖率最高,高于其他三个处理(见图 4(B)); 25℃处理下的微型裸腹溞世代时间显著高于 30℃处理下的微型裸腹溞世代时间,25℃低氮组的微型裸腹 溞有最高的世代时间(见图 4(C))。25℃处理下的微型裸腹溞首胎时间高于 30℃处理下的微型裸腹溞首胎 时间,25℃低氮组的微型裸腹溞的首胎时间最长(见图 4(D))。在单种培养时,25℃高氮组的微型裸腹溞每 个时期幼仔体长均最长,在高氮营养盐环境下的微型裸腹溞幼仔体长显著比低氮营养盐环境中的微型裸 腹溞幼仔体长更长(见图 4(E));而微型裸腹溞在不同条件下成熟时体长没有显著性差异。总体来看,温度 升高和氮营养盐浓度增加了微型裸腹溞的内禀增长率和净生殖率,减少了其世代时间和繁殖时间,而幼 仔体长受氮营养盐浓度变化更大。



Figure 3. Population growth curves of *Moina micrura* under different temperatures and nitrogen nutrient salts for 40 days





Figure 4. Effects of temperature and nitrogen nutrient salts on *Moina micrura*: (A) Intrinsic growth rate; (B) Net reproductive rate; (C) Generation time; (D) First brood time; (E) Juvenile body length; (F) First brood length
图 4. 温度和氮营养盐对微型裸腹溞的影响: (A) 内禀增长率; (B) 净生殖率; (C) 世代周期; (D) 首次繁殖时间; (E) 幼仔体长; (F) 首次繁殖体长

4. 讨论

温度和营养盐是影响浮游动物生命活动的重要因素之一,温度不仅可以直接影响浮游动物生长、发

育和繁殖过程,还可以对浮游动物摄食效率产生影响。而营养盐主要通过影响浮游植物的生长间接影响 浮游动物。单种培养条件下,不同的温度和氮营养盐水平都显著改变了微型裸腹溞生物量(图 3)。

4.1. 温度对微型裸腹溞的影响

温度是影响微型裸腹溞生活史的关键因素。本研究发现,当温度由 25℃升至 30℃时,微型裸腹溞的 内禀增长率(图 4(A))和净生殖率(图 4(B))显著提高;同时,首次繁殖时间大幅缩短(图 4(D)),世代周期明 显变短(图 4(C)),表明高温加速了其代谢速率,使种群增长更为快速。研究表明,高温加速会增加代谢速 率,使种群增长更为快速。从生理代谢角度分析,高温能够增强酶活性,特别是那些参与能量代谢的关键 酶类,其活性在高温下可能会显著提升。这使得微型裸腹溞细胞内的能量产生效率增加,为其快速生长和 繁殖提供了充足的能量基础。同时,高温可能优化了能量分配机制,使得更多的能量资源倾斜于繁殖过程, 促进生殖细胞的发育和成熟,从而提升了微型裸腹溞的繁殖效率和种群扩张能力[8]。在相同营养盐浓度 下,温度升高可加快个体代谢,使生理活动更为活跃,进而增加总体生物量,为种群增长提供支撑。因此, 本研究中观察到的快速种群增长,很可能源于高温诱导的代谢水平提升。不过,由于本实验仅设计了 25℃ 和 30℃两个温度梯度,难以全面描述自然环境中更广温度波动对其的影响。当温度超出其适宜范围时,过 度代谢压力可能导致能量失衡、存活率下降,甚至影响繁殖行为和后代质量,从而改变种群动态。

除对增长速率的影响外,温度也会调控浮游动物个体体型。在无摄食压力条件下,浮游动物体型与 温度通常呈负相关关系[16];不同物种、甚至同一物种的不同基因型对温度变化的响应各异[17]。研究显 示,在适宜温度范围内,水温升高既可增加小型浮游动物的生物量,又能提高枝角类浮游动物体内相关 酶活性和代谢速率,促使个体向小型化转变[18]。总体来看,温度-体型法则同样适用于变温动物:低温 时生长速度缓慢但体型较大,高温时生长加快但个体更小[19]。在全球气候变暖背景下,水温普遍上升, 浮游动物体型及其在食物网中扮演的生态功能或将发生深刻变化。

4.2. 氮营养盐对微型裸腹溞的影响

氮营养盐浓度通过直接和间接作用共同影响微型裸腹溞的种群动态。本研究中,高氮处理使种群生物量显著增加(图 2),并在实验初期表现出快速增殖的特点(图 3)。氮营养盐参与渗透调节和离子平衡,增强了浮游甲壳动物的生理代谢能力[20]。氮元素是构成蛋白质和核酸的重要元素,高氮环境可以为微型 裸腹溞提供更充足的氮源,促进其体内蛋白质和核酸的合成,有助于细胞的生长、分裂和修复,从而加 快幼体发育速度,微型裸腹溞的成熟体长没有显著差异(图 4(F)),但其首次繁殖时间明显缩短(图 4(D)、 图 4(E))。高氮条件下,小球藻的氮磷比例发生变化,优化了其营养成分,从而提高了食物质量和能量转 化率,为微型裸腹溞的种群扩张创造了有利条件。小球藻在高氮环境下,其体内的脂肪酸、蛋白质等营 养物质的含量和组成可能发生改变,满足了微型裸腹溞的营养需求。由于浮游动物无法自主合成多不饱 和脂肪酸,必须依赖食物摄取,因此氮营养盐通过改变浮游植物的脂肪酸含量,间接调控浮游动物体内 多不饱和脂肪酸水平,进一步影响其生长和种群动态。在本研究中,无论温度如何变化,高氮处理均使 种群生物量高于低氮处理,且首次繁殖时间更短、后代体型更大,表明氮营养盐浓度对个体质量亦具有 正向促进作用。之前的研究表明,当食物资源的 C:N:P 比率偏离浮游动物的生理需求时,会抑制脂质合 成、蛋白质组装和核酸代谢,导致个体生长减缓、繁殖成功率下降和存活压力增大[21]-[23]。因此,在氮 浓度更高的环境中,微型裸腹溞能够获得更适宜的食物,满足其生长和繁殖的营养需求,从而表现出更 强的生长和繁殖能力。

5. 结论

本研究探究了温度和氮营养盐对微型裸腹溞生活史的影响。结果表明,在25℃~30℃范围内,温度升

高能加快微型裸腹溞代谢,提升内禀增长率和净生殖率,缩短繁殖时间和世代周期,种群增长加快。此 外,高氮浓度可提高种群生物量,加快初期增殖,并使后代个体更大。温度和氮营养盐相互作用,共同 影响微型裸腹溞的生活史。后续研究可拓宽温度研究范围,探究不同氮磷比及其他营养盐的综合作用, 为水生生态研究提供更多参考。

参考文献

- Karmakar, S.R., Hossain, M.B., Sarker, M.M., Nur, A.U., Habib, A., Paray, B.A., *et al.* (2022) Diversity and Community Structure of Zooplankton in Homestead Ponds of a Tropical Coastal Area. *Diversity*, 14, Article No. 755. <u>https://doi.org/10.3390/d14090755</u>
- [2] Ger, K.A., Urrutia-Cordero, P., Frost, P.C., Hansson, L., Sarnelle, O., Wilson, A.E., et al. (2016) The Interaction between Cyanobacteria and Zooplankton in a More Eutrophic World. Harmful Algae, 54, 128-144. https://doi.org/10.1016/j.hal.2015.12.005
- [3] Sotton, B., Guillard, J., Anneville, O., Maréchal, M., Savichtcheva, O. and Domaizon, I. (2014) Trophic Transfer of Microcystins through the Lake Pelagic Food Web: Evidence for the Role of Zooplankton as a Vector in Fish Contamination. *Science of the Total Environment*, 466, 152-163. <u>https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.020</u>
- [4] Xiong, W., Ni, P., Chen, Y., Gao, Y., Li, S. and Zhan, A. (2019) Biological Consequences of Environmental Pollution in Running Water Ecosystems: A Case Study in Zooplankton. *Environmental Pollution*, 252, 1483-1490. <u>https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.055</u>
- [5] Heneghan, R.F., Everett, J.D., Blanchard, J.L., Sykes, P. and Richardson, A.J. (2023) Climate-Driven Zooplankton Shifts Cause Large-Scale Declines in Food Quality for Fish. *Nature Climate Change*, 13, 470-477. <u>https://doi.org/10.1038/s41558-023-01630-7</u>
- [6] Tao, T., Wang, H., Na, X., Liu, Y., Zhang, N., Lu, X., et al. (2023) Temperate Urban Wetland Plankton Community Stability Driven by Environmental Variables, Biodiversity, and Resource Use Efficiency: A Case of Hulanhe Wetland. Frontiers in Ecology and Evolution, 11, Article 1148580. https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1148580
- [7] 吴明姝. 安徽省太平湖水库浮游动物群落结构及水质评价[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海师范大学, 2015.
- [8] Huntley, M.E. (1992) Temperature-Dependent Production of Marine Copepods: A Global Synthesis. *The American Naturalist*, **140**, 201-242. <u>https://doi.org/10.1086/285410</u>
- [9] Sarma, S.S.S., Nandini, S. and Gulati, R.D. (2005) Life History Strategies of Cladocerans: Comparisons of Tropical and Temperate Taxa. *Hydrobiologia*, 542, 315-333. <u>https://doi.org/10.1007/s10750-004-3247-2</u>
- [10] Sokolova, I. (2021) Bioenergetics in Environmental Adaptation and Stress Tolerance of Aquatic Ectotherms: Linking Physiology and Ecology in a Multi-Stressor Landscape. *Journal of Experimental Biology*, 224, jeb236802. <u>https://doi.org/10.1242/jeb.236802</u>
- [11] Zhao, Q., Liu, S. and Niu, X. (2020) Effect of Water Temperature on the Dynamic Behavior of Phytoplankton-Zooplankton Model. *Applied Mathematics and Computation*, 378, Article ID: 125211. <u>https://doi.org/10.1016/j.amc.2020.125211</u>
- [12] Elser, J.J., Fagan, W.F., Denno, R.F., Dobberfuhl, D.R., Folarin, A., Huberty, A., et al. (2000) Nutritional Constraints in Terrestrial and Freshwater Food Webs. Nature, 408, 578-580. <u>https://doi.org/10.1038/35046058</u>
- [13] Auer, B., et al. (2004) Comparison of Pelagic Food Webs in Lakes along a Trophic Gradient and with Seasonal Aspects: Influence of Resource and Predation. Journal of Plankton Research, 26, 697-709. <u>https://doi.org/10.1093/plankt/fbh058</u>
- [14] Moody, E.K. and Wilkinson, G.M. (2019) Functional Shifts in Lake Zooplankton Communities with Hypereutrophication. Freshwater Biology, 64, 608-616. <u>https://doi.org/10.1111/fwb.13246</u>
- [15] Vehmaa, A., Katajisto, T. and Candolin, U. (2018) Long-Term Changes in a Zooplankton Community Revealed by the Sediment Archive. *Limnology and Oceanography*, 63, 2126-2139. <u>https://doi.org/10.1002/lno.10928</u>
- [16] Moore, M. and Folt, C. (1993) Zooplankton Body Size and Community Structure: Effects of Thermal and Toxicant Stress. *Trends in Ecology & Evolution*, 8, 178-183. <u>https://doi.org/10.1016/0169-5347(93)90144-e</u>
- [17] Bruijning, M., ten Berge, A.C.M. and Jongejans, E. (2018) Population-Level Responses to Temperature, Density and Clonal Differences in *daphnia Magna* as Revealed by Integral Projection Modelling. *Functional Ecology*, **32**, 2407-2422. <u>https://doi.org/10.1111/1365-2435.13192</u>
- [18] Pineda-Mendoza, R.M., Zúñiga, G. and Martínez-Jerónimo, F. (2014) Infochemicals Released by Daphnia Magna Fed on Microcystis Aeruginosa Affect Mcya Gene Expression. *Toxicon*, 80, 78-86. <u>https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2014.01.008</u>
- [19] Brooks, J.L. and Dodson, S.I. (1965) Predation, Body Size, and Composition of Plankton. Science, 150, 28-35.

https://doi.org/10.1126/science.150.3692.28

- [20] Morgan, C.A., Cordell, J.R. and Simenstad, C.A. (1997) Sink or Swim? Copepod Population Maintenance in the Columbia River Estuarine Turbidity-Maxima Region. *Marine Biology*, 129, 309-317. <u>https://doi.org/10.1007/s002270050171</u>
- [21] Wagner, N.D., Hillebrand, H., Wacker, A. and Frost, P.C. (2013) Nutritional Indicators and Their Uses in Ecology. *Ecology Letters*, 16, 535-544. <u>https://doi.org/10.1111/ele.12067</u>
- [22] Sterner, R.W. (1993) Daphnia Growth on Varying Quality of Scenedesmus: Mineral Limitation of Zooplankton. *Ecology*, 74, 2351-2360. <u>https://doi.org/10.2307/1939587</u>
- [23] Frost, P.C., Evans-White, M.A., Finkel, Z.V., Jensen, T.C. and Matzek, V. (2005) Are You What You Eat? Physiological Constraints on Organismal Stoichiometry in an Elementally Imbalanced World. *Oikos*, 109, 18-28. https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2005.14049.x