

竞争条件下角突网纹溇和微型裸腹溇生活史策略对不同磷营养盐梯度的响应机制

施高俐

温州大学生命与环境科学学院, 浙江 温州

收稿日期: 2026年1月22日; 录用日期: 2026年3月2日; 发布日期: 2026年3月24日

摘要

浮游动物在水生态系统的物质循环和能量流动中扮演着重要角色, 其种群增长和群落结构对环境变化较为敏感, 常被作为水环境监测中的重要指标生物。因此, 探究环境因子对浮游动物种群增长的影响对水生态系统保护具有重要意义。为此, 本研究以温州市三垟湿地为背景, 采用室内模拟实验方法, 选取了角突网纹溇(*Ceriodaphnia cornuta*)和微型裸腹溇(*Moina micrura*)作为室内实验受试生物, 通过开展室内模拟实验, 探究了不同磷营养盐浓度及种间竞争对两种枝角类浮游动物生活史策略的影响。主要研究结果如下: 磷营养盐浓度与种间竞争对两种溇的生活史策略均产生显著影响, 但响应模式存在明显物种差异。对角突网纹溇而言, 磷浓度显著影响其种群增长参数与个体大小, 高磷环境促进其性成熟体长增长与净繁殖率提升, 而种间竞争对其影响主要体现在延迟首次繁殖日龄与缩短平均寿命。对微型裸腹溇来说, 磷浓度升高反而导致其内禀增长率下降, 低磷条件下其个体体型增大; 种间竞争对其抑制作用更为强烈, 显著降低其内禀增长率与净繁殖率。

关键词

角突网纹溇, 微型裸腹溇, 磷营养盐, 生活史策略, 种间竞争

The Response Mechanisms of Life-History Strategies in *Ceriodaphnia cornuta* and *Moina micrura* to Different Phosphorus Nutrient Gradients

Gaoli Shi

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

Received: January 22, 2026; accepted: March 2, 2026; published: March 24, 2026

文章引用: 施高俐. 竞争条件下角突网纹溇和微型裸腹溇生活史策略对不同磷营养盐梯度的响应机制[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(3): 465-475. DOI: 10.12677/aep.2026.163046

Abstract

Zooplankton play a crucial role in the material cycling and energy flow of aquatic ecosystems. Their population growth and community structure are sensitive to environmental changes, making them important indicator organisms for water environment monitoring. Consequently, the influence of environmental factors on zooplankton population growth is of great significance for the conservation of aquatic ecosystems. We conducted laboratory simulation experiments using *Ceriodaphnia cornuta* and *Moina micrura* in this study based on the Sanyang Wetland in Wenzhou City, exploring the effects of different phosphorus nutrient concentrations and interspecific competition on the life-history strategies of these two cladoceran species. The main findings are as follows: The concentration of phosphorus and interspecific competition significantly influenced the life-history strategies of both cladoceran species, but the response patterns exhibited great differences among two species. For *Ceriodaphnia cornuta*, phosphorus concentration significantly affected its population growth parameters and individual size, with high phosphorus environments promoting the body length at maturity and net reproduction rate, while interspecific competition primarily manifested in delayed age at first reproduction and reduced average lifespan. For *Moina micrura*, increased phosphorus concentration conversely decreased its intrinsic growth rate, and low phosphorus conditions increase its individual body size, while interspecific competition exerted a more pronounced inhibitory effect, significantly reducing its intrinsic growth rate and net reproduction rate.

Keywords

Ceriodaphnia cornuta, *Moina micrura*, Phosphorus Nutrients, Life History Strategy, Interspecific Competition

Copyright © 2026 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/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

浮游动物作为水生生态系统的重要组成部分，在物质循环、能量流动以及食物网调控中发挥着不可替代的作用[1]。它们对环境变化极为敏感，其种群动态与生活史策略常随营养盐水平、温度、种间关系等关键因子的改变而发生显著调整，因此被视为水环境监测与生态健康评估的理想指示生物[2]。在众多环境因子中，磷作为浮游动物生长与繁殖的关键限制性营养元素，其浓度变化直接影响浮游动物的个体发育、繁殖力及种间竞争格局，进而塑造群落结构与生态系统功能[3]-[5]。

当前，随着人类活动影响的加剧，全球范围内水体磷负荷普遍升高，导致水体富营养化现象日益突出，已成为威胁湿地生态健康的主要环境问题之一。在富营养化进程中，磷浓度的升高不仅直接促进藻类增殖，也可能通过“上行效应”影响浮游动物的种群增长与群落组成[6]。然而，磷营养盐对浮游动物的影响并非简单的线性关系，其效应往往与种间竞争、世代传递等多种生物互作过程交织在一起，形成复杂的生态响应网络[7]。尽管已有研究关注磷对浮游动物生长的影响，但多数集中于单一物种或短期暴露效应，对磷与种间竞争共同作用下的响应机制、生活史策略的塑造调整以及种间差异等方面的认识仍较为有限，尤其缺乏在模拟自然群落竞争情境下的长期动态观察[8]。

温州三垟湿地作为典型的浅水湿地生态系统，其浮游动物群落结构具有明显的时空异质性，且受磷等营养盐影响显著。前期野外调查已证实，磷是驱动该湿地浮游动物群落变化的关键因子之一。在此背景下，选择该湿地中常见的两种枝角类浮游动物——角突网纹溞(*Ceriodaphnia cornuta*)和微型裸腹溞(*Moina micrura*)作为研究对象，具有典型的区域代表性和生态指示价值。两者在生活史策略、竞争能力与环境适应性上可能存在显著差异，对其响应机制的比较研究有助于揭示湿地浮游动物适应环境变化的生态策略。

因此，本研究旨在通过室内控制实验，系统探究不同磷营养盐梯度下两种溞类的生活史响应及其在竞争条件下的动态变化，特别关注磷与竞争互作对种群增长、繁殖特征、个体发育等方面的跨代效应。该研究不仅可弥补现有研究在复合胁迫与跨代传递方面的不足，也为深入理解湿地浮游动物群落的形成与维持机制提供实验依据。

2. 研究方法

2.1. 实验设计

2.1.1. 竞争培养实验

分别从角突网纹溞(*Ceriodaphnia cornuta*)和微型裸腹溞(*Moina micrura*)中筛选 100 只体型相近的成体个体用于竞争实验，在 25°C 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，及时清除残体和代谢废物，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。

设置 5 个磷营养盐梯度开展微型裸腹溞(*Moina micrura*)和角突网纹溞(*Ceriodaphnia cornuta*)单培养及竞争实验，竞争实验条件设置见表 1，每组包含 3 个重复。

单培处理方式：从单物种培养群体中随机选取 10 只体型相近个体，置于装有 400 mL 新鲜培养液的 500 mL 烧杯中进行单独培养，每日更换 50% 培养基。

竞争组处理方式：对选取的两种浮游动物各取 10 只个体，混合置于同一 500 mL 烧杯中培养，培养液添加量与更换频率与单培组一致。培养基更换采用虹吸法操作，每次更换后补充新鲜培养液至 400 mL 刻度线。实验持续 40 天，每隔 4 天进行一次存活个体统计。

首次统计时记录全部存活个体，第二次统计 50% 培养基中的个体，后续统计 20% 培养基样本。计数前将培养基充分混匀，定量转移至玻璃培养皿后，依据形态特征(体型、运动模式)在光照条件下分类计数。统计完成后将溞类与培养基回注原培养容器继续培养。

Table 1. Competitive experimental conditions

表 1. 竞争实验条件

磷含量(mg/L)	培养方式	物种(n = 3)
1.55	单种培养	角突网纹溞 微型裸腹溞
	混合培养	角突网纹溞 + 微型裸腹溞
1.0	单种培养	角突网纹溞 微型裸腹溞
	混合培养	角突网纹溞 + 微型裸腹溞
0.5	单种培养	角突网纹溞 微型裸腹溞
	混合培养	角突网纹溞 + 微型裸腹溞
0.05	单种培养	角突网纹溞 微型裸腹溞
	混合培养	角突网纹溞 + 微型裸腹溞
0.00	单种培养	角突网纹溞 微型裸腹溞
	混合培养	角突网纹溞 + 微型裸腹溞

2.1.2. 生命表实验

在实验周期内, 分别于第 0、10、20、30 天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 $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 恒温条件下培养。培养过程中小球藻浓度维持在 0.5×10^6 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。

2.2. 测定指标及方法

生命表计算:

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): 种群中子代从母代出生到子代再产子的平均时间, $T = \sum x l_x m_x \cdot R_0^{-1}$ 。

内禀增长率(r_m): 种群在特定实验条件下的最大增长率, $r_m = \ln R_0 T^{-1}$, 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。

2.3. 数据分析

本研究使用 Excel 2010 进行数据整理, 统计分析结果使用 GraphPad Prism 10.1.2 和 Origin 23.0 进行绘图。

3. 研究结果

3.1. 竞争条件下两种枝角类浮游动物亲代的生活史响应

3.1.1. 竞争条件下角突网纹溞生活史响应

双因素方差分析表明, 磷浓度与竞争培养方式对角突网纹溞(*Ceriodaphnia cornuta*)的多数生活史指标产生了独立或交互的显著影响, 揭示了其应对环境压力的复杂策略(表 2)。

Table 2. Single-factor ANOVA results on the effect of phosphorus concentration on the life history indicators of parent *Ceriodaphnia cornuta* in a competition culture experiment

表 2. 竞争培养实验中磷浓度对亲代角突网纹溞生活史指标影响的单因素方差分析结果

生活史指标		平方和(SS)	自由度(df)	均方(MS)	F 值	p 值
内禀增长率(d^{-1})	磷浓度	0.05994	4	0.01498	5.618*	0.0124
	培养方式	0.0001605	1	0.0001605	0.06017	0.8112
	磷浓度 * 培养方式	0.02903	4	0.007257	2.721	0.0908
净繁殖率(R_0)	磷浓度	84.48	4	21.12	6.027**	0.0098
	培养方式	10.41	1	10.41	2.971	0.1155
	磷浓度 * 培养方式	72.6	4	18.15	5.179*	0.016
世代周期(d)	磷浓度	3.754	4	0.9385	1.202	0.3685
	培养方式	3.028	1	3.028	3.878	0.0773
	磷浓度 * 培养方式	2.818	4	0.7046	0.9022	0.4983

续表

平均寿命(<i>d</i>)	磷浓度	6.492	1	1.623	6.44**	0.0079
	培养方式	1.352	1	1.352	5.365*	0.043
	磷浓度 * 培养方式	2.548	4	0.637	2.528	0.1068
首次繁殖日龄(<i>d</i>)	磷浓度	1.8	4	0.45	9**	0.0024
	培养方式	14.45	1	14.45	289***	0.0001
	磷浓度 * 培养方式	1.8	4	0.45	9**	0.0024
性成熟体长(μm)	磷浓度	66582	4	16645	49.99***	0.0001
	培养方式	1.02	1	1.02	0.0030	0.957
	磷浓度 * 培养方式	1827	4	456.8	1.372	0.311
新生幼体体长(μm)	磷浓度	5636	4	1409	7.339**	0.005
	培养方式	447.5	1	447.5	2.331	0.1578
	磷浓度 * 培养方式	221.3	4	55.33	0.2882	0.8791

注：显著性水平：* $p < 0.05$ ，** $p < 0.01$ ，*** $p < 0.001$ 。下同。

(1) 种群增长参数

磷浓度对角突网纹溞(*Ceriodaphnia cornuta*)内禀增长率具有显著的主效应($F(4, 20) = 5.618, p < 0.05$)，而竞争的主效应及两者间的交互作用均未达到显著性水平($p > 0.05$) (图 1(A))。而净繁殖率同时受到磷浓度的显著主效应($F(4, 20) = 6.027, p < 0.01$)及磷浓度与竞争的显著交互作用的影响($F(4, 20) = 5.179, p < 0.05$) (图 1(B))，这表明竞争对繁殖输出的影响依赖于环境磷水平。世代周期则未受磷浓度或竞争的显著影响($p > 0.05$) (图 1(C))。

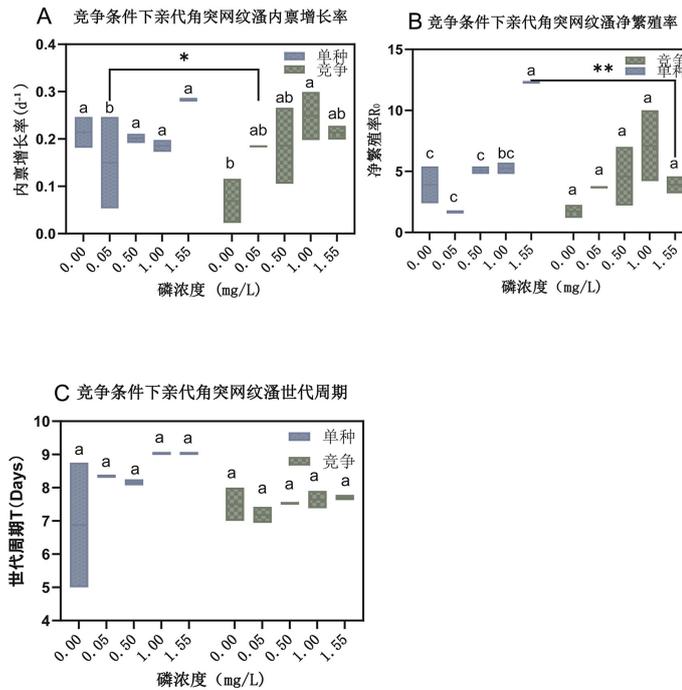


Figure 1. The intrinsic growth rate (A), net reproduction rate (B), and age cycle (C) of the parent *Ceriodaphnia cornuta* under different concentrations of phosphorus nutrients in a competition culture experiment

图 1. 竞争培养实验中不同磷营养盐浓度下亲代角突网纹溞的内禀增长率(A)，净繁殖率(B)，世代周期(C)

(2) 个体生存、发育与体型

磷浓度与种间竞争均显著影响角突网纹溞(*Ceriodaphnia cornuta*)的生存与发育。首次繁殖日龄对磷浓度(F = 9.000, p < 0.01)和竞争(F = 289.000, p < 0.001)均表现出极强的响应, 且存在显著的交互作用(F = 9.000, p < 0.01) (图 2(A)), 表明竞争对生殖启动时间的影响因磷浓度不同而异。平均寿命受到磷浓度(F= 6.440, p < 0.01)与竞争(F= 5.365, p < 0.05)的显著主效应影响, 但两者无交互作用(图 2(B))。在个体大小方面, 性成熟体长与新生幼体体长均仅受磷浓度的显著主效应影响(分别为 F = 49.990, p < 0.001; F = 7.339, p < 0.01), 竞争及交互作用均不显著(图 2(C)、图 2(D))。

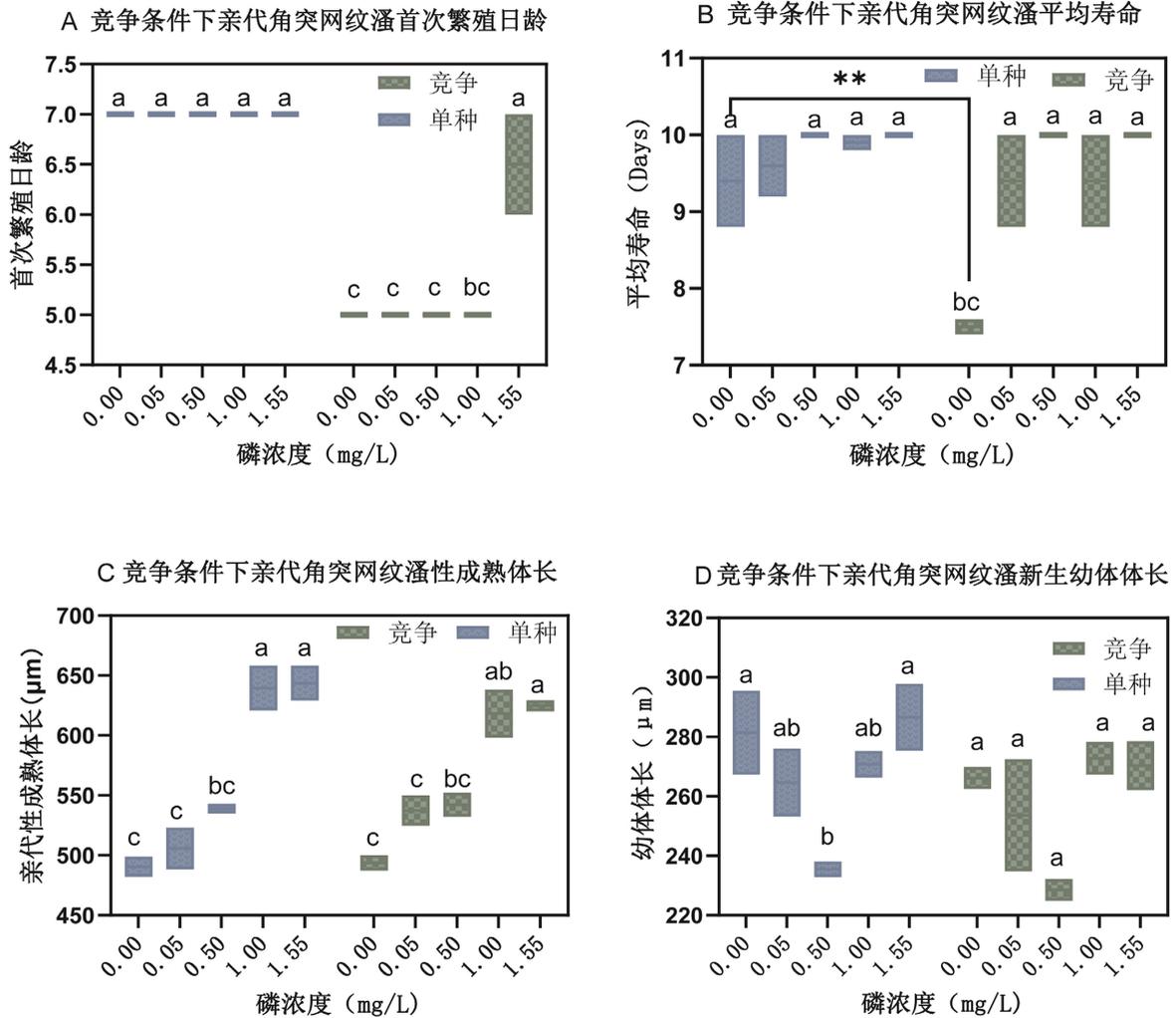


Figure 2. The age at first reproduction (A), average lifespan (B), mature body length (C) and body length (D) of newborn offspring of parent *Ceriodaphnia cornuta* under different phosphorus nutrient concentrations in a competition culture experiment

图 2. 竞争培养实验中不同磷营养盐浓度下亲代角突网纹溞的首次繁殖日龄(A), 平均寿命(B), 性成熟体长(C), 新生幼体体长(D)

3.1.2. 竞争条件下微型裸腹溞生活史响应

双因素方差分析结果表明, 竞争培养方式对微型裸腹溞(*Moina micrura*)的多数关键生活史指标产生了主导性影响, 而磷浓度的效应相对较弱, 且两者在部分指标上表现出显著的交互作用(表 3)。

Table 3. Single-factor ANOVA results on the effect of phosphorus concentration on the life history indicators of parent *Moina micrura* in a competition culture experiment**表 3.** 竞争培养实验中磷浓度对亲代微型裸腹溞生活史指标影响的单因素方差分析结果

生活史指标		平方和(SS)	自由度(df)	均方(MS)	F 值	p 值
内禀增长率(d^{-1})	磷浓度	0.01848	4	0.004619	3.29	0.0576
	培养方式	0.0462	1	0.0462	32.9***	0.0002
	磷浓度 * 培养方式	0.01527	4	0.003819	2.72	0.0909
净繁殖率(R_0)	磷浓度	121.5	4	30.38	3.466	0.0504
	培养方式	271.9	1	271.9	31.02***	0.0002
	磷浓度 * 培养方式	158.4	4	39.6	4.519*	0.0242
世代周期(d)	磷浓度	2.203	4	0.5506	1.113	0.4028
	培养方式	3.199	1	0.7998	1.617	0.2447
	磷浓度 * 培养方式	0.2318	4	0.2318	0.4687	0.5091
平均寿命(d)	磷浓度	1.48	4	0.37	0.6229	0.6567
	培养方式	0.002	1	0.002	0.003367	0.9549
	磷浓度 * 培养方式	2.168	4	0.542	0.9125	0.4932
首次繁殖日龄(d)	磷浓度	1.3	4	0.325	2.167	0.1466
	培养方式	1.25	1	1.25	8.333*	0.0162
	磷浓度 * 培养方式	2.5	4	0.625	4.167*	0.0306
性成熟体长(μm)	磷浓度	209179	4	52295	5.497*	0.0132
	培养方式	25713	1	25713	2.703	0.1312
	磷浓度 * 培养方式	66606	4	16651	1.75	0.2153
新生幼体体长(μm)	磷浓度	35625	4	8906	17.9***	0.0001
	培养方式	11786	1	11786	23.68***	0.0007
	磷浓度 * 培养方式	70122	4	17530	35.23***	0.0001

(1) 种群增长参数

竞争对微型裸腹溞(*Moina micrura*)的种群增长表现出强烈的抑制效应。微型裸腹溞(*Moina micrura*)的内禀增长率($F = 32.9, p < 0.001$)和净繁殖率($F = 31.02, p < 0.001$)均受到竞争的极显著主效应抑制, 而磷浓度的主效应及交互作用均未达显著性水平(图 3(A))。同时净繁殖率受到磷浓度与竞争的显著交互作用的影响($F = 4.519, p < 0.05$) (图 3(B)), 表明竞争对其繁殖力的影响程度依赖于环境磷水平。世代周期未受任一因子或其交互作用的显著影响(图 3(C))。

(2) 个体发育与体型

在发育时间上, 首次繁殖日龄受到竞争的显著主效应影响($F = 8.333, p < 0.05$), 且存在显著的交互作用($F = 4.167, p < 0.05$) (图 4(A)), 表明竞争对生殖启动时间的影响因磷浓度不同而异。平均寿命则未受磷浓度或竞争的显著影响(图 4(B))。在个体大小方面, 性成熟体长主要受磷浓度的显著主效应影响($F = 5.497, p < 0.05$) (图 4(C))。与之形成鲜明对比的是, 新生幼体体长同时受到磷浓度($F = 17.9, p < 0.001$)与竞争($F = 23.68, p < 0.001$)的极显著主效应影响, 并且两者之间存在极显著的交互作用($F = 35.23, p < 0.001$) (图 4(D)), 表明亲代所处环境共同决定了后代的初始大小。

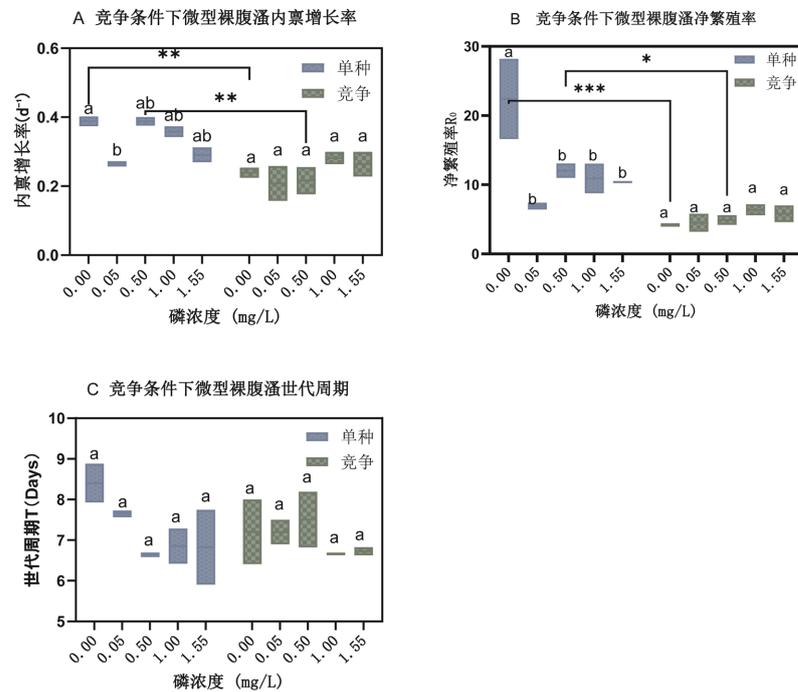


Figure 3. The intrinsic growth rate (A), net reproduction rate (B), and age cycle (C) of the parent *Moina micrura* under different concentrations of phosphorus nutrients in a competition culture experiment

图 3. 竞争培养实验中不同磷营养盐浓度下亲代微型裸腹蚤的内禀增长率(A), 净繁殖率(B), 世代周期(C)

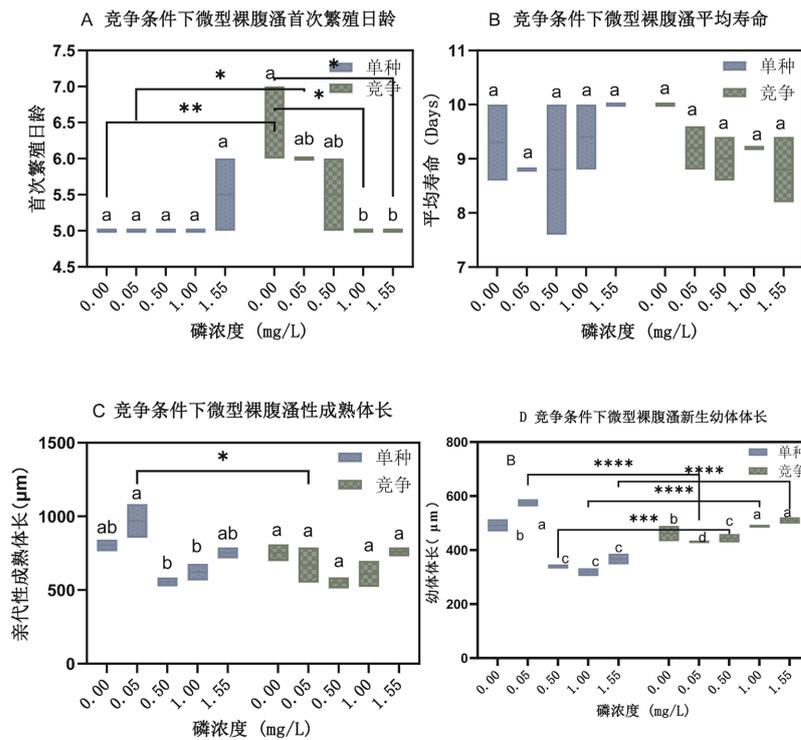


Figure 4. The age at first reproduction (A), average lifespan (B), mature body length (C) and body length (D) of newborn offspring of parent *Moina micrura* under different phosphorus nutrient concentrations in a competition culture experiment

图 4. 竞争培养实验中不同磷营养盐浓度下亲代微型裸腹蚤的(A) 首次繁殖日龄, (B) 平均寿命, (C) 性成熟体长, (D) 新生幼体体长

图5展示了不同磷浓度条件下角突网纹溞(*Ceriodaphnia cornuta*)和微型裸腹溞(*Moina micrura*)在单独培养与竞争培养中的最大种群密度变化,在单培养条件下,角突网纹溞(*Ceriodaphnia cornuta*)的最大种群密度随磷浓度的升高呈现明显上升趋势,在磷浓度达到较高水平(如2.0 mg/L)时,其种群密度接近15,000 ind./L,表明磷营养盐对其种群增长具有显著促进作用。而在与微型裸腹溞(*Moina micrura*)共培养的条件下,角突网纹溞(*Ceriodaphnia cornuta*)在各磷浓度下的最大种群密度均低于单独培养,尤其在低磷条件下下降更为明显,说明种间竞争显著限制了种群增长。

微型裸腹溞(*Moina micrura*)在单独培养时亦表现出随磷浓度升高种群密度增加的趋势,在磷浓度为0.05 mg/L时达到约12,000 ind./L。然而,在竞争条件下,其种群密度整体低于单培组,尤其在中等磷浓度(如1.0 mg/L)下下降幅度较大,反映其在与角突网纹溞(*Ceriodaphnia cornuta*)的种间竞争过程中受到明显制约。

综上,磷营养盐水平对两种枝角类的种群增长均具有重要影响,高磷环境有利于其种群发展;同时,种间竞争显著限制了两者在各磷水平下的最大种群密度,表明在资源有限条件下竞争关系对种群动态具有关键调控作用。

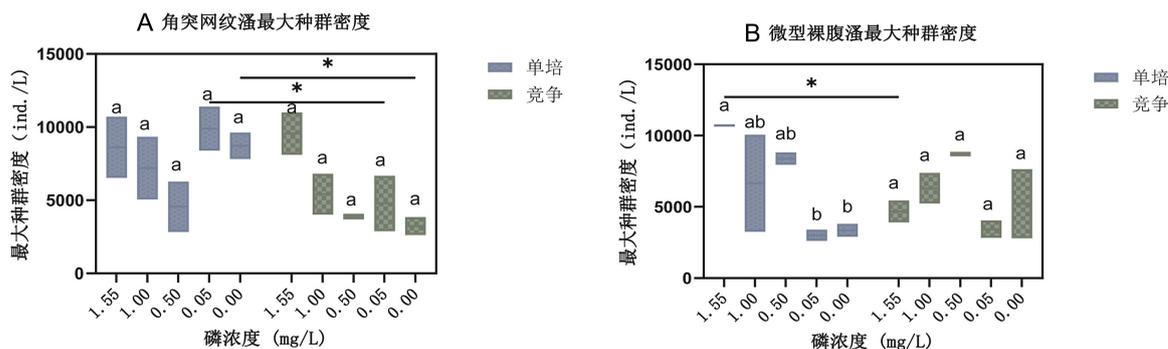


Figure 5. Maximum population density of *Ceriodaphnia cornuta* (A) and B *Moina micrura* (B) in monoculture and competitive culture experiments under different phosphorus nutrient concentrations

图5. 不同磷浓度条件下, 单培和竞争培养实验中角突网纹溞 (A)和微型裸腹溞 (B) 的最大种群密度

4. 结论与建议

4.1. 总结

本研究以温州三垟湿地为背景,采用野外试验和室内实验方法,探究了浮游动物群落时空分布特征及环境因子对浮游动物群落结构的影响。基于野外试验结果,选取角突网纹溞(*Ceriodaphnia cornuta*)和微型裸腹溞(*Moina micrura*)作为室内实验受试生物,通过开展室内模拟实验,探究了不同磷营养盐浓度及种间竞争对两种溞生活史策略的影响。主要结论如下:

(1) 磷营养盐的影响存在显著物种差异

高磷环境显著促进角突网纹溞体长增长与净繁殖率提升,表现出典型的“资源促进型”响应。而微型裸腹溞(*Moina micrura*)子代的新生幼体体长始终对磷浓度极为敏感,而亲代的体长仅在后期才受显著影响。此种结果表明,在资源受限时,亲代采取了一种“优先后代质量”的适应策略[9],即将有限资源优先用于保障后代的初始竞争能力(较大的幼体通常具有更高的存活率),而相对牺牲了自身的躯体生长。这种策略在波动环境中可能具有进化优势。

此外,在当前繁殖与未来生存/繁殖的权衡上,竞争压力下的子代普遍表现出首次繁殖日龄推迟和内禀增长率下降。这符合生命史理论中的“赌徒原理”,在预期死亡率高(竞争激烈)的环境中,生物体倾向

于延迟繁殖并将能量用于维持生存,以待更佳时机[10]。然而,这种策略的代价是降低了种群的内禀增长能力,这或许可以解释为何在竞争培养中,微型裸腹溞(*Moina micrura*)的种群数量增长往往受限。

(2) 种间竞争对不同物种的影响强度不同

角突网纹溞在竞争条件下主要表现为首次繁殖延迟与平均寿命缩短,竞争效应依赖磷水平。而微型裸腹溞对竞争更为敏感,竞争显著抑制其内禀增长率与净繁殖率,尤其在中等磷浓度下抑制效应最强。

(3) 磷与竞争具有交互作用

两种溞的净繁殖率、首次繁殖日龄等指标均表现出显著的“磷 × 竞争”交互效应,说明环境磷水平调节了种间竞争的强度与方向。

(4) 种群密度受磷与竞争共同调控

高磷条件下两种溞在单培养中种群密度均显著上升;而竞争条件下两者种群密度普遍下降,角突网纹溞在低磷环境中受竞争抑制更明显。

综上,本研究采用室内实验方法,揭示了单一磷营养盐因子及其与种间竞争交互作用对浮游动物生活史的影响机制,为湿地水质管理和生物多样性保护提供了重要的理论支持。

4.2. 展望

本研究分析了不同磷营养盐条件下角突网纹溞(*Ceriodaphnia cornuta*)和微型裸腹溞(*Moina micrura*)单独培养时的增长规律及竞争培养时的竞争关系。根据实验结果,未来的研究可以从以下几个方面展开:

(1) 多营养盐交互与环境因子耦合研究:后续研究可结合温度、光照等环境因子与氮营养盐、磷营养盐等营养盐的交互作用,探究多因子耦合条件下浮游动物种群动态变化规律及生活史策略,为真实水生生态系统中浮游动物群落演替研究提供支撑。

(2) 浮游动物种群增长机制的微观与分子层面解析:可深入开展生理生化及分子机制研究,例如分析不同磷营养条件下两种溞类的代谢产物差异、抗氧化系统响应及营养吸收相关基因的表达规律,从微观层面揭示竞争优势的内在调控机制。

(3) 外源添加磷元素不仅可以直接影响浮游动物的生长及发育过程,还会通过影响食物质量间接影响浮游动物[3],因此后续应重点聚焦水体磷添加实验中“溶解磷环境”与“食物磷质量”的独立及交互影响机制。例如,采用不同磷浓度预培养藻类作为食物来源,系统化溶解态磷对水体环境的直接作用与藻类磷含量(食物磷质量)对浮游动物的间接作用,明确二者在水体生态过程(如浮游生物生长、群落结构变化)中的差异化贡献;为水体磷循环相关研究的实验设计优化和结论严谨性提升提供理论支撑与实践参考。

参考文献

- [1] Su, Y.L., Gan, Y.X., Shi, L.M., *et al.* (2022) Does Ancient Permafrost-Derived Organic Carbon Affect Lake Zooplankton Growth? An Experimental Study on *Daphnia Magna*. *Environmental Pollution*, **300**, Article 118968. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118968>
- [2] Ratnarajah, L., Abu-Alhaija, R., Atkinson, A., Batten, S., Bax, N.J., Bernard, K.S., *et al.* (2023) Monitoring and Modelling Marine Zooplankton in a Changing Climate. *Nature Communications*, **14**, Article No. 564. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36241-5>
- [3] Zhou, L., Lemmen, K.D., Zhang, W. and Declerck, S.A.J. (2018) Direct and Indirect Effects of Resource P-Limitation Differentially Impact Population Growth, Life History and Body Elemental Composition of a Zooplankton Consumer. *Frontiers in Microbiology*, **9**, Article 172. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00172>
- [4] Hartnett, R. (2019) Variation in Life-History Traits Among *daphnia* and Its Relationship to Species-Level Responses to Phosphorus Limitation. *Royal Society Open Science*, **6**, Article 191024. <https://doi.org/10.1098/rsos.191024>
- [5] Zhang, X., Yi, Y., Cao, Y. and Yang, Z. (2023) Disentangling the Effects of Phosphorus Loading on Food Web Stability

-
- in a Large Shallow Lake. *Journal of Environmental Management*, **328**, Article 116991. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116991>
- [6] Lu, T., Zhu, Y.C., Ke, M., Peijnenburg, W.J.G.M., Zhang, M., Wang, T., *et al.* (2019) Evaluation of the Taxonomic and Functional Variation of Freshwater Plankton Communities Induced by Trace Amounts of the Antibiotic Ciprofloxacin. *Environment International*, **126**, 268-278. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.02.050>
- [7] 韩煦. 氮磷输入对白洋淀芦苇湿地水体浮游生物多样性及生物量的影响[D]: [硕士学位论文]. 保定: 河北大学, 2024.
- [8] 冯婷婷, 项贤领, 朱敏. 转轮虫种群对培养基氮磷含量的响应及动力学特征[J]. 扬州大学学报: 自然科学版, 2023, 26(3): 35-42.
- [9] Glazier, S.A., Campbell, E.R. and Campbell, W.H. (1998) Construction and Characterization of Nitrate Reductase-Based Amperometric Electrode and Nitrate Assay of Fertilizers and Drinking Water. *Analytical Chemistry*, **70**, 1511-1515. <https://doi.org/10.1021/ac971146s>.
- [10] Stearns, S.C. (1992) *Natural Selection: Domains, Levels, and Challenges*. Oxford University Press.