

DOI: 10.5846/stxb201409201861

魏利军, 汤龙升, 李胜男, 周建, 孔繁翔, 史小丽. CO<sub>2</sub> 升高对枝角类群落结构影响的原位模拟. 生态学报, 2016, 36(7): - .

Wei L J, Tang L S, Li S N, Zhou J, Kong F X, Shi X L. Effects of a Simulated Increase in Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration on Cladoceran Zooplankton Collected from Lake Taihu. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7): - .

## CO<sub>2</sub> 升高对枝角类群落结构影响的原位模拟

魏利军<sup>1</sup>, 汤龙升<sup>2</sup>, 李胜男<sup>1</sup>, 周建<sup>1</sup>, 孔繁翔<sup>1</sup>, 史小丽<sup>1,\*</sup>

1 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

2 南京师范大学生命科学学院, 南京 210046

**摘要:** 分别于春、夏两季在太湖梅梁湾进行原位试验, 设置三个 CO<sub>2</sub> 浓度梯度, 270 μL/L、380 μL/L 和 750 μL/L, 以斜生栅藻作为枝角类的食物, 研究了 CO<sub>2</sub> 浓度升高对枝角类群落结构的影响。结果表明高 CO<sub>2</sub> 浓度能促进斜生栅藻生长, 显著提高枝角类的食物数量; 此外 CO<sub>2</sub> 浓度的变化能显著改变枝角类的群落结构, 高 CO<sub>2</sub> 浓度有利于象鼻溞属、秀体溞属和春季溞属的生长, 而不利网纹溞属的生长。这可能是由于 CO<sub>2</sub> 浓度变化改变了枝角类的食物质量, 浮游藻类的 C:P 比值随 CO<sub>2</sub> 浓度的升高而增加, 从而有利于体内含磷量较低, 高 C:P 的枝角类生长。因此枝角类的群落结构主要受食物质量的影响而与食物的数量无关。本研究为预测未来气候变化对太湖浮游动物的影响提供了一些理论依据。

**关键词:** 太湖; CO<sub>2</sub> 升高; 枝角类; 斜生栅藻

## Effects of a Simulated Increase in Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration on Cladoceran Zooplankton Collected from Lake Taihu

WEI Lijun<sup>1</sup>, TANG Longsheng<sup>2</sup>, LI Shengnan<sup>1</sup>, ZHOU Jian<sup>1</sup>, KONG Fanxiang<sup>1</sup>, SHI Xiaoli<sup>1,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

2 School of Biological Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China

**Abstract:** With the increase of global carbon emissions since the industrial revolution, atmospheric CO<sub>2</sub> levels are expected to be twice the present level by the end of this century, reaching 750 μL/L. The water carbonate chemistry of the environment may change notably because of this increase in CO<sub>2</sub> levels, which would in turn have a dramatic effect on aquatic ecosystems. Studies related to the impacts of atmospheric CO<sub>2</sub> elevation on plankton mainly focus on oceanic, rather than fresh water ecosystems. Lake Taihu is a highly eutrophic lake, and carbon limitation due to intense cyanobacterial blooms might develop, even in the presence of high concentrations of dissolved inorganic carbon. Increased atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations could cause a shift in the chemical equilibrium of aquatic ecosystems. There is increasing evidence that the concentration of dissolved inorganic carbon (DIC) increases because of the uptake of CO<sub>2</sub> from the atmosphere, whereas the pH and CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> concentrations in the water decrease. This change in environmental conditions is likely to affect the physiology of phytoplankton, and has the potential to influence species composition and competition. Furthermore, elevated pCO<sub>2</sub> levels are expected to cause an increase in carbon-rich compounds stored within phytoplankton, and a shift in their overall elemental composition toward higher carbon to nutrient ratios. These changes in the carbon/nutrient stoichiometry of primary producers can have cascading effects on zooplankton. The effect of CO<sub>2</sub> enrichment on zooplankton communities in eutrophic

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31270507, 31070420)

收稿日期: 2014-09-20; 网络出版日期: 2015- -

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xlshi@niglas.ac.cn

lakes is an important topic from both scientific and lake management perspectives. Laboratory studies of both the direct and indirect effects of CO<sub>2</sub> are particularly suitable for determining the physiological thresholds and mechanisms of the response of plankton to rising CO<sub>2</sub> levels, but cannot address how zooplankton respond in their natural environment. In contrast, *in situ* controlled experiments are an important tool for studying the effects of water acidification on pelagic community dynamics under near-to-natural conditions. In this study, *in situ* simulated experiments were carried out at the Lake Taihu Ecosystem Station in the spring and summer, to explore the impacts of changes in CO<sub>2</sub> concentration on the community structure of Cladocera. This experiment included three treatments with CO<sub>2</sub> concentrations of 270(±40), 380(±20) and 750(±50) μL/L, which represent CO<sub>2</sub> concentrations at pre-industrial levels, the present level, and the predicted level at the end of this century. Our results showed that CO<sub>2</sub> enrichment could increase the biomass of *Scenedesmus*, and could change the community structure of Cladocera. High CO<sub>2</sub> levels favored the growth of *Bosmina* and *Diaphanosoma*, but were unfavorable for the growth of *Ceriodaphnia*. Elevated CO<sub>2</sub> concentrations may likewise cause an increase in C:P ratios due to elevated carbon fixation, which would be beneficial to Cladoceran populations with low phosphorus contents. Thus, the cladoceran community structure was governed by food quality, rather than food quantity. The extrapolation of our results to the context of natural ecosystems indicates that rising CO<sub>2</sub> concentrations will intensify phytoplankton blooms in eutrophic waters. This may further enhance the productivity of these waters. Increases in phytoplankton carbon:nutrient ratios can therefore alter the structures of food webs. Our results imply that rising atmospheric CO<sub>2</sub> levels will have dramatic consequences for eutrophic ecosystems. Our conclusions will help predict likely changes in the plankton community in Lake Taihu due to climate change.

**Key Words:** Lake Taihu; CO<sub>2</sub> enrichment; Cladocera; *Scenedesmus obliquus*

由于人类活动的影响,全球大气二氧化碳(CO<sub>2</sub>)浓度已经从工业前的 270 μL/L 上升至现在的 380 μL/L,已有研究报告预计未来 100 年之内,大气 CO<sub>2</sub> 浓度将达到 750 μL/L<sup>[1]</sup>。湖泊作为内陆水体的重要组成单元,大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高会显著影响其碳化学环境<sup>[2]</sup>,导致表层水体的 CO<sub>2</sub> 水气扩散通量以及水体中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 的含量升高<sup>[3]</sup>。CO<sub>2</sub> 作为浮游植物的直接碳源,其浓度升高会影响浮游植物的生理和生态过程,不仅增加了浮游植物光合作用的碳源,可能会削弱浮游植物对碳浓缩机制(Carbon Concentrating Mechanism, CCM)的依赖性<sup>[4-5]</sup>,进而影响水体中浮游动物的数量和群落结构。

太湖是中国五大淡水湖之一,对长江三角洲的发展至关重要。长期的富营养化导致太湖浮游植物优势种由绿藻和硅藻逐渐转变为蓝藻<sup>[6]</sup>。研究表明,大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高会降低太湖蓝藻在春、夏、秋三个季节的竞争优势,而绿藻的竞争优势会得到加强<sup>[7]</sup>;相对蓝藻而言,绿藻对浮游动物具有更强的可食性,其对 CO<sub>2</sub> 水平的生理响应,会直接影响浮游动物的数量和群落结构,因此本研究选取绿藻门的斜生栅藻作为浮游动物的食物,利用透析袋培养斜生栅藻与枝角类浮游动物,揭示 CO<sub>2</sub> 浓度升高对斜生栅藻的生长及枝角类浮游动物群落结构的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 斜生栅藻的来源

实验采用斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)由中国科学院水生生物研究所藻种库提供,采用 BG-11 培养基<sup>[8]</sup>无菌条件下在光照培养箱内培养。

#### 1.1.2 枝角类浮游动物的选择与培养

实验中选择枝角类均分离自太湖,其中春季枝角类选用溞属(*Daphnia*)、网纹溞属(*Ceriodaphnia*)以及象鼻溞属(*Bosmina*)三类,夏季为溞属(*Daphnia*)、网纹溞属(*Ceriodaphnia*)和秀体溞属(*Diaphanosoma*),同时

为避免室内培养(7 d)的枝角类浮游动物无法适应野外环境,实验开始前在太湖实验站对其进行了原位驯化(3 d)。

## 1.2 实验设计

### 1.2.1 原位实验

野外实验分两季(春季:2012.4.29—2012.5.26;夏季:2012.8.16—2012.9.5)在中国科学院太湖生态系统研究站(无锡本部:31°25'15''N,120°12'55''E)进行,取太湖梅梁湾水样置于150 L塑料桶(高70 cm、内径58 cm,共9个),置于太湖岸边的水池内。本研究设置的低浓度水平(270 μL/L)由当地空气通过Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>溶液吸收制备,作为对照组的现有水平(380 μL/L)采用当地空气,高CO<sub>2</sub>浓度水平(750 μL/L)由CO<sub>2</sub>加富器制备(CO<sub>2</sub> enrichlor CE-300,中国),采用CO<sub>2</sub>红外检测仪(Testo 535,德国)跟踪并及时修正的CO<sub>2</sub>浓度水平;每个浓度梯度设置3个平行组,采用气石鼓气(微小气泡)的形式模拟大气CO<sub>2</sub>浓度升高的过程,控制鼓气速度为1.0 L/min(图1)。

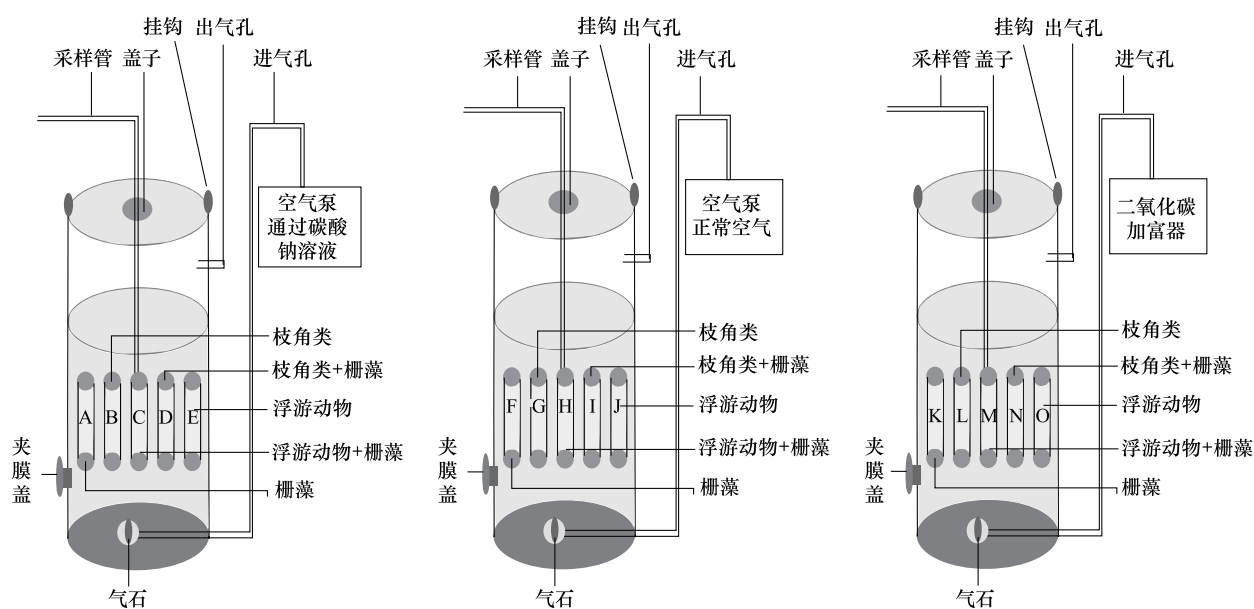


图1 实验装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

### 1.2.2 实验装置中理化指标的控制

模拟实验中,控制实验大桶内各营养盐参数基本维持初始状态,通过高频率测定水体各项营养盐指标(总氮,总磷,铵态氮,硝态氮,磷酸根浓度)并及时添加KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>、NH<sub>4</sub>Cl、NaNO<sub>3</sub>等形式的营养盐,使不同CO<sub>2</sub>处理组之间的营养盐浓度无显著性差异,并基本维持初始状态。

此外,控制实验在距离太湖水体2—4 m的水池内进行,保证了实验水体温度、光照和太湖一致,温度相差<±0.5℃。所以,本研究基本做到了单因素(CO<sub>2</sub>)的控制实验,可以模拟大气CO<sub>2</sub>升高对太湖浮游动物群落的影响。

### 1.2.3 斜生栅藻和枝角类控制实验

将室内纯培养的斜生栅藻置于装有湖水的多个透析袋中,控制初始藻密度约为5×10<sup>5</sup>个/mL。一部分透析袋用于斜生栅藻的培养,用于研究CO<sub>2</sub>对斜生栅藻生长的影响,另一部分透析袋中添加枝角类,添加的数量参考太湖水体中的数量。其中透析袋的体积约为350 mL,截留分子量为14000Da,能够保证透析袋内与桶内水进行正常交换,水体理化性质保持一致,同时防止透析袋内浮游植物和浮游动物向外扩散,将其置于不同CO<sub>2</sub>浓度的大桶内,每隔一定天数采样,采样时每个浓度组取出两个透析袋作为平行,研究CO<sub>2</sub>浓度升高对栅藻生物量的影响,并观察枝角类种群数量及群落结构的变化情况。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 水体理化参数

总氮(原液)、溶解性总氮(过 GF/C 膜滤液)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB11894-89)测定;总磷(原液)、溶解性总磷(过 GF/C 膜滤液)先经过碱性过硫酸钾消解,然后用钼酸铵分光光度法(GB11893-89)测定;铵态氮采用纳氏试剂分光光度法(HJ535-2009)法测定;硝态氮采用酚二磺酸分光光度法(GB7480-87)法测定。

#### 1.3.2 斜生栅藻和枝角类计数

斜生栅藻计数是通过鲁哥试剂固定的样品浓缩后用血球计数板在显微镜 10×40 倍镜下观察计数,通过浓缩倍数得出斜生栅藻密度,枝角类浮游动物通过显微镜观察计数<sup>[9]</sup>。

#### 1.3.3 数据分析

本研究利用 sigmaplot 12.5 及 R 3.0.2 进行双因素方差分析(Two-Way ANOVA)和画图,其中  $P < 0.01$  表示存在极显著性差异,  $P < 0.05$  表示显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 CO<sub>2</sub>升高对斜生栅藻密度的影响

春季在 270  $\mu\text{L/L}$  和 380  $\mu\text{L/L}$  的 CO<sub>2</sub> 浓度下,斜生栅藻密度先缓慢上升,到 11—14 d 时达到峰值,然后出现缓慢下降,实验期间斜生栅藻平均密度分别为  $1.39 \times 10^6$  个/mL、 $1.59 \times 10^6$  个/mL,当 CO<sub>2</sub> 浓度为 750  $\mu\text{L/L}$  时,斜生栅藻在实验后期藻密度在高水平保持波动,实验期间平均藻密度为  $2.06 \times 10^6$  个/mL;夏季斜生栅藻在实验初期快速生长,第 6 天后,保持在一个平稳的水平,后期稍有下降,在 270  $\mu\text{L/L}$ 、380  $\mu\text{L/L}$  和 750  $\mu\text{L/L}$  下,实验期间的平均密度分别为  $1.33 \times 10^6$  个/mL、 $1.04 \times 10^6$  个/mL、 $1.30 \times 10^6$  个/mL(图 2)。

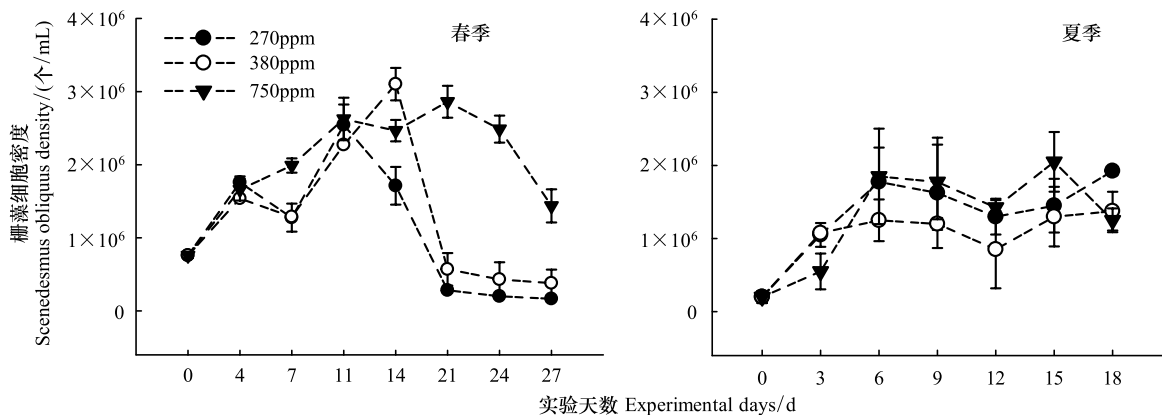


图 2 不同 CO<sub>2</sub> 浓度对春夏两季斜生栅藻密度的影响

Fig. 2 The effect of CO<sub>2</sub> concentration on *Scenedesmus obliquus* density during different seasons

随着时间的变化,斜生栅藻密度在两季均存在显著性差异。在单独 CO<sub>2</sub> 浓度影响下,春季斜生栅藻密度在 3 个 CO<sub>2</sub> 浓度组间存在极显著性差异 ( $P < 0.01$ ),高 CO<sub>2</sub> 浓度下斜生栅藻密度总体水平要高于低浓度组。春季温度光照等条件适宜斜生栅藻的生长,但实验后期可能受营养盐的限制,斜生栅藻密度出现了下降,此时高 CO<sub>2</sub> 浓度提高了斜生栅藻光合活性<sup>[10-14]</sup>,可能会增强斜生栅藻对低营养环境的耐受力,延缓了其生物量的降低。

单独 CO<sub>2</sub> 浓度影响下,夏季斜生栅藻密度不存在显著性差异。夏季高 CO<sub>2</sub> 浓度组斜生栅藻密度略微高于低浓度组,但差异性不显著。夏季,虽然实验期间斜生栅藻有一个生长的过程,但初期过后无明显变化,由于绿藻生长的适宜 N/P 为 5/1—10/1,适宜温度为 25—30  $^{\circ}\text{C}$ <sup>[15]</sup>,而夏季太湖梅梁湾区域 N/P 在 16.8/1 左右,

同时夏天湖水温度在 30 ℃ 以上<sup>[16]</sup>,可见夏季湖区的营养盐和温度限制了斜生栅藻的生长,此时栅藻对 CO<sub>2</sub> 不敏感,斜生栅藻的密度并没有达到春季的最高水平,因此斜生栅藻的生长受 CO<sub>2</sub> 浓度影响不明显。总体而言,当斜生栅藻快速生长,密度较高时,水体中的 CO<sub>2</sub> 已经不能满足其生长,增加 CO<sub>2</sub> 浓度能够促进斜生栅藻生长,并有利于其生存。

## 2.2 CO<sub>2</sub> 升高对枝角类种群数量的影响

春季不同种群枝角类的数量在实验期间均出现先增加后减少的趋势,大约在实验进行的第 21 天达到峰值。随着 CO<sub>2</sub> 浓度的升高,溞属的最大密度逐渐增大,在 270 μL/L、380 μL/L 和 750 μL/L CO<sub>2</sub> 浓度下,最大密度分别达到了每升 80 个、110 个和 140 个。象鼻溞属的数量也在 750 μL/L CO<sub>2</sub> 浓度下达到最大值。网纹溞属随着 CO<sub>2</sub> 浓度升高数量变化幅度逐渐减小,在 3 个 CO<sub>2</sub> 浓度梯度下,最大密度分别为每升 235 个、170 个和 130 个。在 3 个 CO<sub>2</sub> 浓度梯度下,整个枝角类平均数量分别为每升 86 个、58 个和 79 个。枝角类数量在春实验中,随时间的变化,在时间和 CO<sub>2</sub> 浓度的交互作用下,存在极显著差异性 ( $P < 0.01$ ) (图 3)。

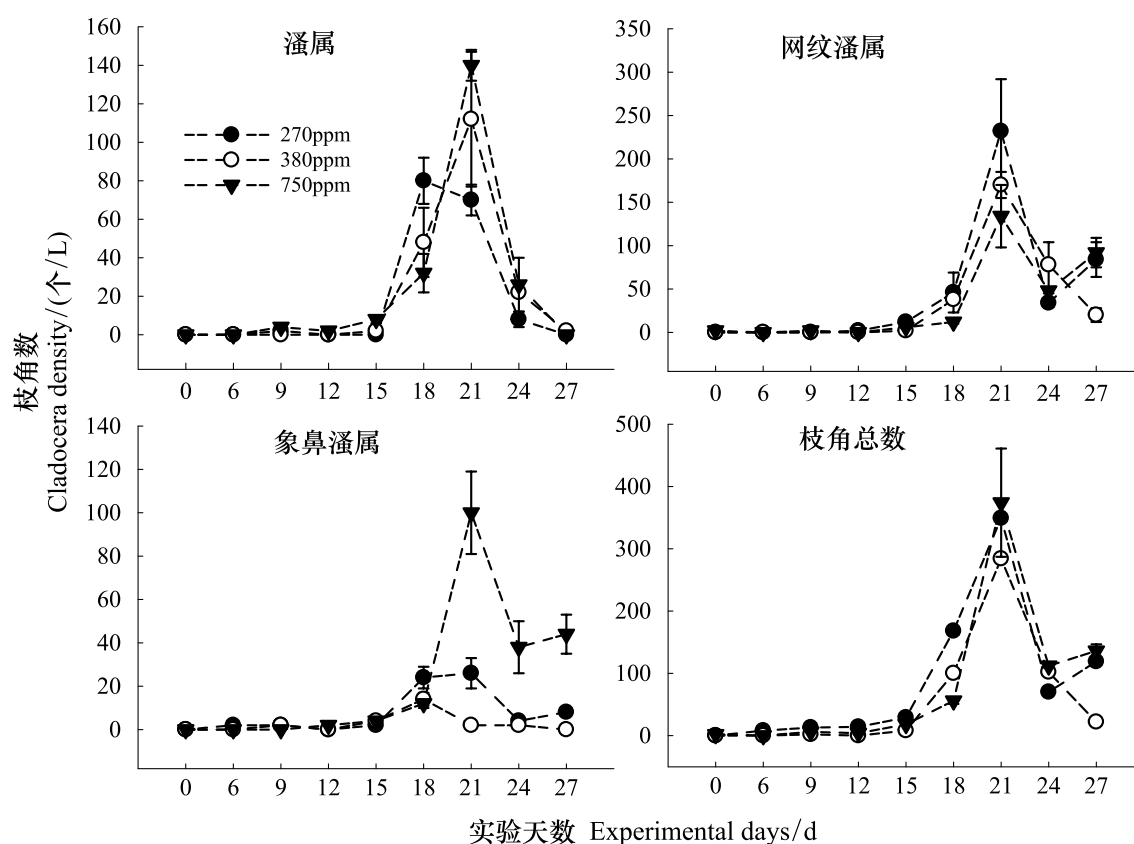


图 3 不同 CO<sub>2</sub> 浓度对春季枝角类种群数量的影响

Fig. 3 The effect of CO<sub>2</sub> concentration on Cladocera density in spring

夏季枝溞属数量在实验期间呈现逐渐减少的趋势,网纹溞属和秀体溞属则呈现先增加后减少的趋势,大约在实验进行的第 9 天达到峰值。网纹溞属随着 CO<sub>2</sub> 浓度的升高,最大数量逐渐减小,在 270 μL/L、380 μL/L、750 μL/L CO<sub>2</sub> 浓度下,最大数量分别为每升 320 个、125 个和 60 个。秀体溞属在当前 CO<sub>2</sub> 浓度下生长的最快,但在实验后期会在 750 μL/L CO<sub>2</sub> 浓度下保持稳定,约每升 40 个。在 3 个 CO<sub>2</sub> 浓度梯度下,夏季平均每升枝角数量分别为 233 个、59 个和 116 个。枝角类数量在夏季实验中,随时间的变化,在时间和 CO<sub>2</sub> 浓度的交互作用下,存在极显著差异性 ( $P < 0.01$ ) (图 4)。

春季和夏季由于水温等条件适宜枝角类大量繁殖,因此实验初期有一个明显的生长过程,但后期由于食物缺乏,环境容纳量有限等因素限制,故最后种群数量又出现下降<sup>[17-19]</sup>。由于不同种群的枝角类对 CO<sub>2</sub> 升高

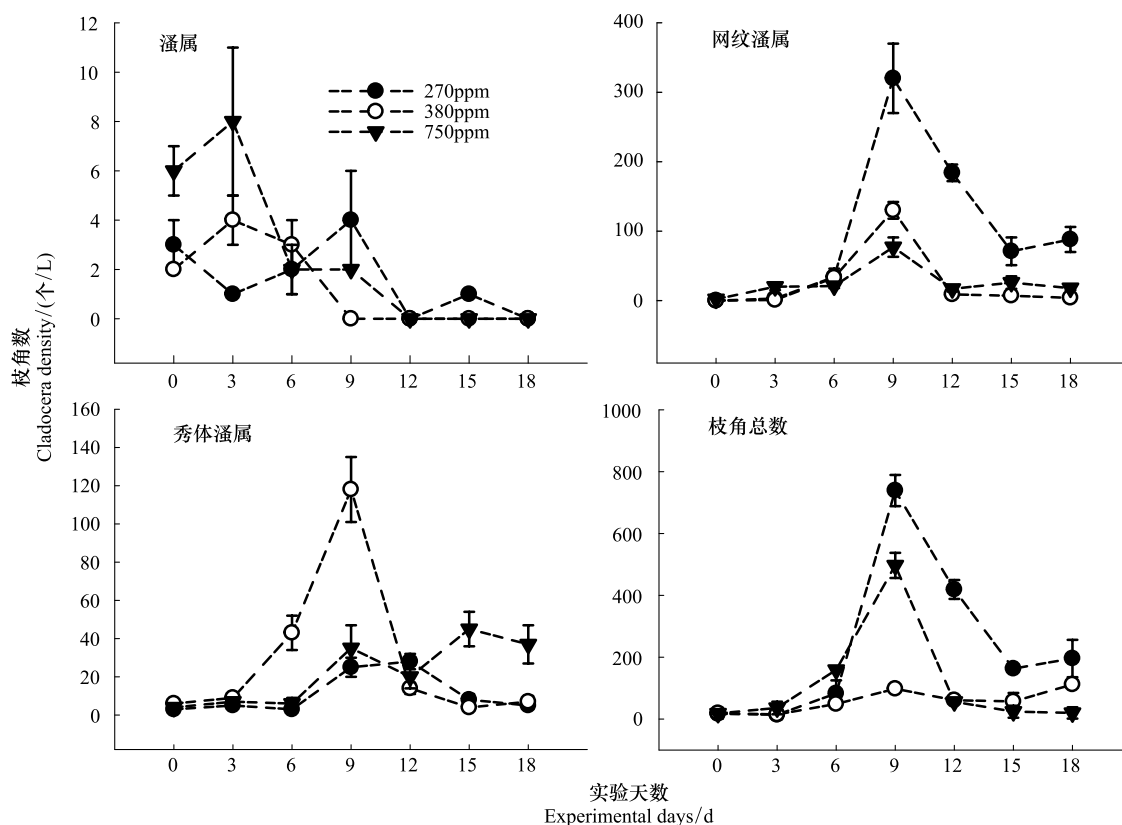


图 4 不同 CO<sub>2</sub> 浓度对夏季枝角类种群数量的影响

Fig. 4 The effect of CO<sub>2</sub> concentration on Cladocera density in summer

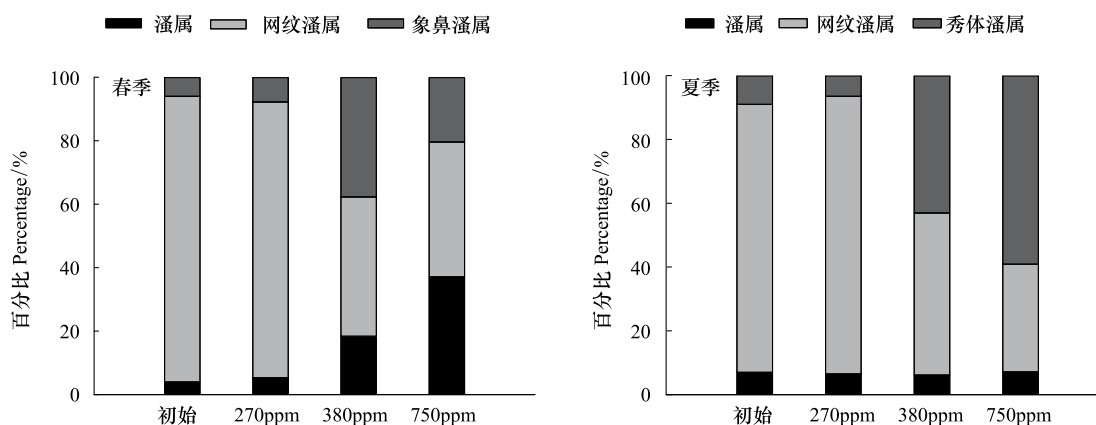
的响应不一样,因此 CO<sub>2</sub> 浓度升高对整个枝角类浮游动物数量影响的趋势并不明显。

### 2.3 CO<sub>2</sub> 升高对不同季节枝角类群落结构的影响

通过比较实验期间不同枝角类种群在 3 个 CO<sub>2</sub> 浓度梯度下的平均数量,可以看出 CO<sub>2</sub> 水平升高对枝角类群落结构的影响。春季在 270  $\mu\text{L/L}$ 、380  $\mu\text{L/L}$ 、750  $\mu\text{L/L}$  3 个 CO<sub>2</sub> 浓度下,蚤属在枝角类群落中所占比例随浓度升高而升高,从初始的 4% 一直上升至 37.1%;网纹蚤属所占比例则随 CO<sub>2</sub> 浓度升高而降低,其中在 270  $\mu\text{L/L}$  和 380  $\mu\text{L/L}$  两个浓度下下降尤为明显,从 86.9% 降至 44%;象鼻蚤属所占比例数在 3 个浓度下相对初始状态均有所上升,但在 380  $\mu\text{L/L}$  浓度下数值最高,由初始的 6% 上升到 37.7%,变化最为明显(图 5)。3 个梯度下网纹蚤属占绝对优势,网纹蚤属体积明显小于蚤属,这可能是由于富营养化水体有利于小个体枝角类动物形成优势<sup>[20-21]</sup>。随 CO<sub>2</sub> 浓度升高,网纹蚤属在枝角类群落中所占比例有所下降,相应的蚤属和象鼻蚤属所占比例逐渐增大。可见,CO<sub>2</sub> 浓度升高对食物组成及质量带来影响会间接影响到枝角类群落,对于网纹蚤属 CO<sub>2</sub> 浓度越高胁迫效应越明显,对于蚤属和象鼻蚤属,CO<sub>2</sub> 浓度升高有利于其生存;CO<sub>2</sub> 浓度升高对枝角类群落的直接影响还有待进一步研究。

夏季在 270  $\mu\text{L/L}$ 、380  $\mu\text{L/L}$ 、750  $\mu\text{L/L}$  3 个 CO<sub>2</sub> 浓度下,蚤属在枝角类群落中所占比例基本保持不变,数值保持在初始的 7% 左右;网纹蚤属所占比例同样随着 CO<sub>2</sub> 浓度升高而降低,和春季有相同的趋势,在 270  $\mu\text{L/L}$  和 380  $\mu\text{L/L}$  两个浓度下从 87% 降至 50.8%,但仍为优势种;秀体蚤属在 CO<sub>2</sub> 浓度为 270  $\mu\text{L/L}$  时所占比例有所下降,但在 380  $\mu\text{L/L}$  和 750  $\mu\text{L/L}$  下迅速升高,从初始的 9% 增加到 43% 和 59%,促使其成为优势种(图 5)。可见,夏季高温可能抑制了蚤属的生长和繁殖,不利于其生存;随 CO<sub>2</sub> 浓度升高网纹蚤数量所占比例同样有所降低,有利于秀体蚤属生长繁殖。

本研究结果表明 CO<sub>2</sub> 浓度升高,会显著增加斜生栅藻生物量,但食物数量的增加并不能在相同程度上促

图 5 不同 CO<sub>2</sub> 浓度对春季和夏季枝角类群落结构的影响Fig. 5 The effect of CO<sub>2</sub> concentration on Cladocera community structure in spring and summer

进所有枝角类动物的生长。事实上 CO<sub>2</sub> 浓度的升高还会改变食物的质量,大量的研究表明浮游藻类的化学计量值 C:P 比值会随着 CO<sub>2</sub> 浓度的升高而显著增加<sup>[22-23]</sup>。在枝角类中,一般象鼻溞属 *Bosmina* 和秀体溞属 *Diaphanosoma* 的 C:P 比例较大,即含磷量较低,而另一些枝角类如网纹溞属 *Ceriodaphnia* 的 C:P 比较小,即含磷量较高。因此,CO<sub>2</sub> 浓度升高会产生相对高 C:P 比的食物,更有利于象鼻溞属和秀体溞属的生长,而不利网纹溞属的生长。对溞属 *Daphnia* 而言,不同种类差异也较大,如溞属种类 *Daphnia pulicaria* 的 C:P 比是 *Daphnia magna* 的 2 倍<sup>[24]</sup>,因此溞属对 CO<sub>2</sub> 升高的响应在种间还存在差异。

### 3 结论

(1) CO<sub>2</sub> 浓度升高有利于斜生栅藻生长,其生物量随 CO<sub>2</sub> 浓度的升高而增加。

(2) CO<sub>2</sub> 浓度的变化能显著改变枝角类的群落结构。CO<sub>2</sub> 浓度的升高更加有利于象鼻溞属、秀体溞属和春季溞属的生长,而不利网纹溞属的生长。这可能是由于 CO<sub>2</sub> 浓度的升高使得浮游藻类的 C:P 有所增加,食物质量的改变进而影响了枝角类的群落结构。

### 参考文献 (References):

- [1] IPCC. Summary for Policymakers of Climate Change 2007: The Physical Science Basis // Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Xia J R, Gao K S. Effects of doubled atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on the photosynthesis and growth of *Chlorella pyrenoidosa* cultured at varied levels of light. Fisheries science, 2003, 69(4): 767-771.
- [3] Stumm W, Morgan J J. Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons, 1996: 206-315.
- [4] Meehl G A, Stocker T F, Collins W D, Friedlingstein P, Gaye A T, Gregory J M, Kitoh A, Knutti R, Murphy J M, Noda A, Raper S C B, Watterson I G, Weaver A J, Zhao Z C. Global climate projections // Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt K B, Tignor M, Miller H L, eds. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 747-845.
- [5] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, Noguer M, van der Linden P J, Dai X, Maskell K, Johnson C A. Climate change 2001: The scientific basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 1-32.
- [6] 钱奎梅, 陈宇炜, 宋晓兰. 太湖浮游植物优势种长期演化与富营养化进程的关系. 生态科学, 2008, 27(2): 65-70.
- [7] 赵旭辉. 模拟大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对太湖浮游植物生理特性和群落结构的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2013.
- [8] 岳龙, 付秋果, 张素芬, 王伟, 汪海燕, 叶庆富. 栅藻的优化培养及脂质提取方法研究. 核农学报, 2012, 26(6): 894-899.
- [9] 黄祥飞, 陈伟民, 蔡启铭. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 2000: 1-247.
- [10] Hein M, Sand-Jensen K. CO<sub>2</sub> increased oceanic primary production. Nature, 1997, 388(6642): 526-527.

- [11] Schippers P, Lürling M, Scheffer M. Increase of atmospheric CO<sub>2</sub> promotes phytoplankton productivity. *Ecology letters*, 2004, 7(6): 446-451.
- [12] Schippers P, Vermatt J E, de Klein J, Mooij W M. The effect of atmospheric carbon dioxide elevation on plant growth in freshwater ecosystems. *Ecosystems*, 2004, 7(1): 63-74.
- [13] 夏建荣, 高坤山. CO<sub>2</sub>浓度升高对斜生栅藻生长和光合作用的影响. *植物生理学通讯*, 2002, 38(5): 431-433.
- [14] Gao K S, Aruga Y, Asada K, Ishihara T, Akano T, Kiyohara M. Enhanced growth of the red alga *Porphyra yezoensis* Ueda in high CO<sub>2</sub> concentrations. *Journal of Applied Phycology*, 1991, 3(4): 355-362.
- [15] 贾含帅, 刘汉湖, 胡舒, 周江. 4种环境因子对景观水体绿藻生长繁殖的影响. *中国城市林业*, 2011, 9(6): 52-54.
- [16] 徐海, 秦伯强, 朱广伟. 太湖不同湖区夏季蓝藻生长的营养盐限制研究. *中国环境科学*, 2012, 32(12): 2230-2236.
- [17] 牛翠娟, 娄安如, 孙儒泳, 李庆芬. 基础生态学(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2007: 1-412.
- [18] DeMott W R. Foraging strategies and growth inhibition in five daphnids feeding on mixtures of a toxic cyanobacterium and a green algae. *Freshwater Biology*, 1999, 42(2): 263-274.
- [19] Hietala J, Reinikainen M, Walls M. Variation in life history responses of *Daphnia* to toxic *Microcystis aeruginosa*. *Journal of Plankton Research*, 1995, 17(12): 2307-2318.
- [20] 杨州, 孔繁翔. 浮游动物诱发藻类群体的形成. *生态学报*, 2005, 25(8): 2083-2089.
- [21] Geng H, Xie P, Deng D G, Zhou Q. The rotifer assemblage in a shallow, eutrophic Chinese lake and its relationships with cyanobacterial blooms and crustacean zooplankton. *Journal of Freshwater Ecology*, 2005, 20(1): 93-100.
- [22] Burkhardt S, Zondervan I, Riebesell U. Effect of CO<sub>2</sub> concentration on C:N:P ratio in marine phytoplankton: A species comparison. *Limnology and Oceanography*, 1999, 44(3): 683-690.
- [23] Verschoor A M, van Dijk M A, Huisman J, van Donk E. Elevated CO<sub>2</sub> concentrations affect the elemental stoichiometry and species composition of an experimental phytoplankton community. *Freshwater Biology*, 2013, 58(3): 597-611.
- [24] Sterner R W, Andersen T, Elser J J, Hessen D O, Hood J M, Urabe J, McCauley E. Scale-dependent carbon: nitrogen: phosphorus seston stoichiometry in marine and freshwaters. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53(3): 1169-1180.