

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 22 期 Vol.32 No.22 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 22 期

2012 年 11 月 (半月刊)

目 次

CO ₂ 浓度和温度升高对噬藻体 PP 增殖的联合作用	牛晓莹,程 凯,荣茜茜,等 (6917)
1956—2009 年内蒙古苏尼特左旗荒漠草原的降水格局	陈 军,王玉辉 (6925)
两个污水处理系统的能值与经济综合分析	李 敏,张小洪,李远伟,等 (6936)
退化草地阿尔泰针茅种群个体空间格局及关联性	赵成章,任 珩 (6946)
地表覆盖栽培对雷竹林凋落物养分及其化学计量特征的影响	刘亚迪,范少辉,蔡春菊,等 (6955)
福州酸雨区次生林中台湾相思与银合欢叶片的 12 种元素含量	郝兴华,洪 伟,吴承祯,等 (6964)
“雨花露”水蜜桃主要害虫与其捕食性天敌的关系	柯 磊,施晓丽,邹运鼎,等 (6972)
大兴安岭林区 10 小时时滞可燃物湿度的模拟	胡天宇,周广胜,贾丙瑞 (6984)
陕北风沙区不同植被覆盖下的土壤养分特征	李文斌,李新平 (6991)
南方型杨树人工林土壤呼吸及其组分分析	唐罗忠,葛晓敏,吴 麟,等 (7000)
黑河下游土壤水盐对生态输水的响应及其与植被生长的关系	鱼腾飞,冯 起,刘 蔚,等 (7009)
树木胸径大小对树干液流变化格局的偏度和时滞效应	梅婷婷,赵 平,倪广艳,等 (7018)
外来植物紫茎泽兰入侵对土壤理化性质及丛枝菌根真菌(AMF)群落的影响	于文清,刘万学,桂富荣,等 (7027)
基于 Landsat TM 的热带精细地物信息提取的模型与方法——以海南岛为例	王树东,张立福,陈小平,等 (7036)
雪被去除对川西高山冷杉林冬季土壤水解酶活性的影响	杨玉莲,吴福忠,杨万勤,等 (7045)
不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响	王唯逍,刘小军,田永超,等 (7053)
木蹄层孔菌不同居群间生长特性、木质素降解酶与 SRAP 标记遗传多样性	曹 宇,徐 晔,王秋玉 (7061)
加拿大一枝黄花入侵对土壤动物群落结构的影响	陈 雯,李 涛,郑荣泉,等 (7072)
间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响	张向前,黄国勤,卞新民,等 (7082)
接种 AM 真菌对玉米和油菜种间竞争及土壤无机磷组分的影响	张宇亭,朱 敏,钱岩相注,等 (7091)
大亚湾冬季不同粒级浮游生物的氮稳定同位素特征及其与生物量的关系	柯志新,黄良民,徐 军,等 (7102)
太湖水华期间有毒和无毒微囊藻种群丰度的动态变化	李大命,叶琳琳,于 洋,等 (7109)
锌胁迫对小球藻抗氧化酶和类金属硫蛋白的影响	杨 洪,黄志勇 (7117)
基于国家生态足迹账户计算方法的福建省生态足迹研究	邱寿丰,朱 远 (7124)
能源活动 CO ₂ 排放不同核算方法比较和减排策略选择	杨喜爱,崔胜辉,林剑艺,等 (7135)
基于生境等价分析法的胶州湾围填海造地生态损害评估	李京梅,刘铁鹰 (7146)
县级生态资产价值评估——以河北丰宁县为例	王红岩,高志海,李增元,等 (7156)
专论与综述	
丛枝菌根提高宿主植物抗旱性分子机制研究进展	李 涛,杜 娟,郝志鹏,等 (7169)
城市土壤碳循环与碳固持研究综述	罗上华,毛齐正,马克明,等 (7177)
基于遥感的光合有效辐射吸收比率(FPAR)估算方法综述	董泰锋,蒙继华,吴炳方 (7190)
光衰减及其相关环境因子对沉水植物生长影响研究进展	吴明丽,李叙勇 (7202)
浮游动物化学计量学稳态性特征研究进展	苏 强 (7213)
研究简报	
2010 年两个航次獐子岛海域浮游纤毛虫丰度和生物量	于 莹,张武昌,张光涛,等 (7220)
基于熵值法的我国野生动物资源可持续发展研究	杨锡涛,周学红,张 伟 (7230)
残落物添加对农林复合系统土壤有机碳矿化和土壤微生物量的影响	王意锟,方升佐,田 野,等 (7239)
人工湿地不同季节与单元之间根际微生物多样性	陈永华,吴晓芙,张珍妮,等 (7247)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2012-11



封面图说: 水杉农田防护林中的小麦熟了——水杉曾广泛分布于北半球,第四纪冰期以后,水杉属的其他种类全部灭绝,水杉却在中国川、鄂、湘边境地带得以幸存,成为旷世奇珍,野生的水杉是国家一级保护植物。由于水杉耐水,适应力强,生长极为迅速,其树干通直挺拔,高大秀颀,树冠呈圆锥形,姿态优美,自发现后被人们在中国南方广泛种植,不仅成为了湖边、道路两旁的绿化观赏植物,更成为了农田防护林的重要树种。此图中整齐划一的水杉防护林像忠实的哨兵一样,为苏北农村即将成熟的麦田站岗。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201110181547

牛晓莹,程凯,荣茜茜,许敏,赵以军,赵进. CO₂ 浓度和温度升高对噬藻体 PP 增殖的联合作用. 生态学报, 2012, 32(22): 6917-6924.

Niu X Y, Cheng K, Rong Q Q, Xu M, Zhao Y J, Zhao J. The combined effects of elevated CO₂ and elevated temperature on proliferation of cyanophage PP. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 6917-6924.

CO₂ 浓度和温度升高对噬藻体 PP 增殖的联合作用

牛晓莹,程 凯*,荣茜茜,许 敏,赵以军,赵 进

(华中师范大学城市水环境生态学湖北省重点实验室,武汉 430079)

摘要:在 4 个条件下培养了鲍氏织线藻:(1) 25℃ + 400 μmol/mol (CK 组), (2) 29℃ + 400 μmol/mol (温度升高组), (3) 25℃ + 800 μmol/mol (CO₂ 升高组), (4) 29℃ + 800 μmol/mol (温室效应组),测定了藻的生物量及细胞大小,同时用离心法测定了噬藻体 PP 对相应条件下宿主藻的吸附率,用一步生长曲线法测定噬藻体 PP 的裂解周期和释放量。结果表明,不同培养条件对藻细胞的大小均没有影响;CO₂ 升高提高了宿主藻的生物量;温度和 CO₂ 浓度的升高不仅使噬藻体 PP 的裂解周期提前,而且对吸附率和释放量存在交互作用,使其发生了明显改变:其中,温度和 CO₂ 升高对噬藻体 PP 吸附率的影响属于协同作用,而对其释放量的影响则能够互相抵消。上述结果说明温室效应将能够导致噬藻体 PP 增殖能力大幅度增加。

关键词:温室效应;噬藻体;吸附;裂解周期;释放量

The combined effects of elevated CO₂ and elevated temperature on proliferation of cyanophage PP

NIU Xiaoying, CHENG Kai*, RONG Qianqian, XU Min, ZHAO Yijun, ZHAO Jin

Hubei Key Laboratory of Urban Water Environmental Ecology, Central China Normal University, Wuhan 430079, China

Abstract: Atmospheric CO₂ has increased by 25% in the past 200 years and its concentration is predicted to double by 2100. Much of the research effort into the impacts of elevated atmospheric CO₂ concentrations on algae has focused on marine algae and very little work has been conducted using freshwater algae or freshwater algal viruses. Furthermore, little is known about the combined impacts of future CO₂ and temperature increases on the infectivity of algal viruses, although the two impacts are closely connected. In this study, *Plectonema boryanum* IU597 was grown under four different conditions: (1) 25°C + 400 μmol/mol CO₂ (control); (2) 29°C + 400 μmol/mol CO₂ (elevated temperature); (3) 25°C + 800 μmol/mol CO₂ (elevated CO₂); (4) 29°C + 800 μmol/mol CO₂ (greenhouse effect). The cultures were incubated for one week, one month or three months before analysis. After incubation, the biomass of each culture was measured by the Chl a labeling method and by direct counting of cell numbers. The cell size was determined by microscopy measuring, the adsorption rate of cyanophage PP was determined using the centrifugation method, and the burst size and lytic cycle were affirmed by measuring the one-step growth curve. Results indicated that different culture conditions had no significant influence on the cell size of *P. boryanum*. However both the elevated CO₂ and the greenhouse effect conditions could significantly promote the cell number and total Chl a concentration of *P. boryanum*. The elevated CO₂ condition also decreased the Chl a content per cell by 31.35%—42.42% compared with the control condition. The latent period of cyanophage PP was about 260 minutes under control condition, while under the elevated CO₂, elevated temperature, and greenhouse effect conditions, the time was brought forward to 200, 170—200, and 140 minutes, respectively. The lytic

基金项目:国家自然科学基金 (30670088, 31200385); 湖北省科技攻关项目 (2006AA305A04); 国家科技重大专项 (2009ZX07105-001)

收稿日期:2011-10-18; **修订日期:**2012-05-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chengkaicn@163.com

cycle of cyanophage PP was about 380 minutes under the control condition, while in the elevated CO₂, elevated temperature, and greenhouse effect conditions, the time was brought forward to 320—380, 320, and 260—320 minutes, respectively. This indicated that elevated temperature and elevated CO₂ conditions had a synergistic effect on the latent period and lytic cycle of cyanophage PP. The first hour's adsorption rate of cyanophage PP was an average of 2.7% in the control condition, while under the elevated CO₂, elevated temperature, and greenhouse effect conditions, adsorption rates were an average of 1.7%, 4.8%, and 7.3%, respectively. This indicates that the elevated temperature and elevated CO₂ conditions had a synergistic effect on absorption rates of cyanophage PP. The burst size of cyanophage PP was an average of 32 PFU/cell in the control condition, while in the elevated CO₂, elevated temperature, and greenhouse effect conditions, the average burst size was 24, 51, and 32 PFU/cell, respectively. This indicates that the combined effect of elevated temperature and elevated CO₂ on burst size of cyanophage PP could be counteracted. These results not only suggest that the infectivity of cyanophage PP could be significantly promoted under the greenhouse effect conditions, but also imply that the combined effect of elevated CO₂ and elevated temperature on the infectivity of algal viruses was complex and caution is needed when studying the overall responses of freshwater virus-mediated processes to global change.

Key Words: greenhouse effect; cyanophage; adsorption; lytic cycle; burst size

温室效应已经成为不争的事实。根据现在状况和模型的预测,由于近年来 CO₂ 排放量以及其它温室气体的增加,到 2100 年大气 CO₂ 的浓度会加倍甚至更高,温室效应会使水体表面平均温度增加 4—5℃^[1]。

增加海面温度也可能会影响碳的利用,导致物种组成和多样性发生变化。同样地,温度也会不同程度的影响微藻和蓝藻的生长率、色素含量、光吸收能力以及光合作用的碳固定。也有研究表明,在过去的 50a,气候变化引起的温度上升是导致加拿大太平洋和大西洋地区有害水华增加的主要原因^[2]。

所以,在大气 CO₂ 浓度升高与水温升高的联合作用下对浮游藻类生理活动的影响将更为复杂^[3]。而藻类病毒在水体中的含量高、分布广,是海洋及湖泊中初级生产力的最主要控制因子之一,影响浮游藻类的种群结构与数量,调控富营养化水体中水华与赤潮的消长过程^[4-6]。基于噬菌体的很多研究表明,噬菌体对宿主的感染(包括对宿主的吸附率、裂解周期、释放量等)在很大程度上就决定于宿主的生理状态^[7],但是对藻类宿主和藻类病毒的相关研究尚未见诸报道。因此,在大气 CO₂ 浓度和温度升高联合作用的背景下,深入研究藻类病毒感染浮游藻类的动力学过程具有重要的生态意义。

1 材料与方法

1.1 实验材料

噬藻体 PP 本实验室 2001 年从本地分离得到的^[8];宿主鲍氏织线藻(*Plectonema boryanum*, IU597)来自中国科学院水生生物研究所,用 AA 培养基进行培养。整个实验周期的藻在自制的有机玻璃培养箱中培养,光周期为 12:12(L:D),光强为 1200 lx。

整个实验过程中每隔 15d 传代 1 次,培养基与藻液的比例为 90:10。做实验之前的一次传代,要求 4 个组的藻浓度一致,均为 5×10^6 个/mL。

1.2 实验装置

本实验使用的是温室效应自动控制系统,该系统可以用于模拟大气 CO₂ 浓度增加和温度升高。系统中的有机玻璃箱为半封闭式,带有两个进气口(分别通入 CO₂ 和空气)和一个出气口,通过控制 CO₂ 和空气的供气量调节箱内 CO₂ 浓度(并非直接将 CO₂ 通入培养液中)。经过长期运行,温室效应组箱体内部气体 CO₂ 浓度为 $(800 \pm 20) \mu\text{mol/mol}$,气温为 $(29 \pm 0.6)^\circ\text{C}$,其中 CO₂ 浓度升高系统由 CO₂ 控制器、电磁阀、流量计、减压阀和 CO₂ 钢瓶构成;温度升高系统是由温度控制器、风扇、加热器等构成。

整个实验期间藻的培养是在 4 个有机玻璃箱中,依次对应(1) 25℃ + 400 μmol/mol (CK 组), (2) 29℃ +

400 μmol/mol(温度升高组), (3) 25℃ + 800 μmol/mol(CO₂ 升高组), (4) 29℃ + 800 μmol/mol(温室效应组)。

1.3 实验流程

将鲍氏织线藻(*P. boryanum*, IU597)在上述的4个条件下进行培养,培养体积为200mL(于500mL的烧杯中),每个条件下均设置3个平行;培养至1周、1个月、3个月分别测定藻细胞大小和生物量,然后将4个条件下的藻细胞浓度调成一致,分别与噬藻体PP混合,测定4个条件下噬藻体PP的吸附能力和增殖能力。

1.4 测定方法

1.4.1 不同时期藻生物量的测定

(1) 不同时期藻密度的测定

在不同条件下培养7、37、97d时分别取样,采用显微直接计数法测定藻细胞密度。

(2) 不同时期藻叶绿素a(chl a, chlorophyll a)的测定

改进的甲醇萃取法^[9]:在不同条件下培养7、37、97d时分别取5mL藻液于10mL离心管中,10000r/min离心10min,去掉上清,加入相同体积的90%甲醇,于4℃黑暗条件下浸提24h后,10000r/min离心10min,测上清665nm处的吸光度。用以下公式计算叶绿素a的含量:Chl a(mg/L) = OD_{665nm} × 13.9

用总的叶绿素a含量除以藻细胞密度即得单个藻细胞中叶绿素a的平均含量。

1.4.2 不同时期藻长度和宽度的测定

在不同条件下培养7、37、97d时分别取样,每个样品用目镜测微尺在100倍物镜下挑取10根藻丝测量藻细胞宽度及长度。

1.4.3 噬藻体PP对不同条件、不同时期藻的裂解周期的测定

取在不同条件下培养的藻,计数,分别稀释到 1×10^7 个/mL,各取样20mL,加入适量效价为 2×10^7 PFU/mL(PFU, plaque-forming units)的噬藻体PP,使MOI(感染复数, multiplicity of infection)为1:1。于相应条件下继续培养至30、60、90、120、180、240、300min取样,用血球计数板计数藻细胞数,然后以各时间点为横坐标、藻的密度为纵坐标作图,从图中观察噬藻体PP的裂解周期。

1.4.4 噬藻体PP对不同条件、不同时期藻的吸附率的测定

在不同条件下培养7、37、97d时对4组的藻计数后,通过稀释使4个条件下的藻浓度相同(2×10^7 个/mL),各取20mL,然后加入适量已知效价的噬藻体PP(2×10^7 PFU/mL),使MOI为 $1:10^4$,各取1mL测噬藻体PP的效价作为噬藻体PP吸附率的初始效价,感染60min后取样,10000r/min、10min离心洗涤两次以去除游离的噬藻体PP,用空斑法^[10]测定噬藻体PP的效价。按照以下公式计算噬藻体PP的吸附率: $A = P_1/P_0$, 其中,A为吸附率,以百分数的形式表示; P_1 为沉淀藻细胞中噬藻体PP的效价; P_0 为噬藻体PP的初始效价。

1.4.5 噬藻体PP对不同条件、不同时期藻的释放量的测定

在4个条件下培养7、37、97d时,同1.4.4的方法使4个条件下的藻的浓度相同(2×10^7 个/mL),各取20mL,加入适量已知效价的噬藻体PP(2×10^7 PFU/mL),使MOI达到 $1:10^4$,静置感染30min后10000r/min离心,洗涤两次,定容至原来的体积,分别取1mL用于测定噬藻体PP的效价,将其作为噬藻体PP释放量的初始效价(P_0)。然后放在4个条件下进行培养,同时用磁力搅拌器搅拌,以防止噬藻体PP发生二次吸附。分别于感染后60、90、120、180、240、300、360、390min取样,用空斑法测定噬藻体PP的效价后绘制病毒的一步生长曲线,并据此测算噬藻体PP的潜伏期(静置感染的30min和操作时间约50min均计算在潜伏期内)、裂解周期及释放量。

1.5 分析方法

作图采用GraphPad Prism 5完成(误差量用SD表示, $n=3$);双因素方差分析采用SPSS11.0完成。

2 结果和分析

2.1 温度和CO₂升高对藻生物量的影响

由上图可见,CO₂升高组和温室效应组的藻细胞生物量均明显高于CK组和温度升高组($P < 0.05$),第1

个月时的增幅最大,第3个月次之。这一结果不但说明 CO_2 升高对鲍氏织线藻 (*P. boryanum*, IU597) 的生长具有显著的影响,而且也说明鲍氏织线藻 (*P. boryanum*, IU597) 对 CO_2 浓度的升高可能具有某种适应的机制 (从而使第3个月的增幅变小)。此外,由图1还可以发现,以藻细胞密度计的生物量增幅明显大于以叶绿素 a 计的生物量增幅,这一结果直接导致了单个藻细胞中叶绿素 a 含量的下降 (图2)。

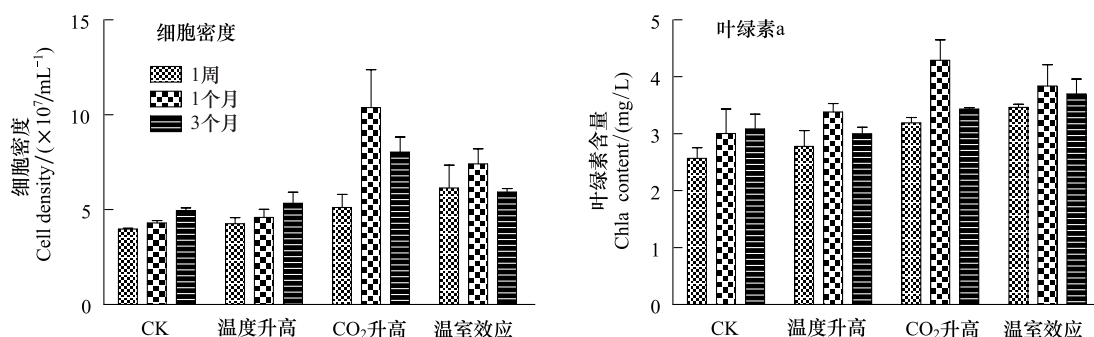


图1 鲍氏织线藻生物量的变化

Fig. 1 The change of *P. boryanum* biomass

由图2可见, CO_2 升高组的单个藻细胞中的叶绿素 a 含量发生了明显的下降: 1个月和3个月时该条件下单个细胞中的叶绿素 a 的含量比同期的对照组分别降低了42.42%和31.35%。

2.2 温度和 CO_2 升高对藻细胞长度和宽度的影响

由图3可以看出,在整个实验周期中,不同培养条件下的藻细胞长度和细胞宽度没有显著差异 ($P > 0.05$)。

2.3 温度和 CO_2 升高对噬藻体 PP 吸附率的影响

从图4可以明显看出,温度升高和温室效应组噬藻体 PP 的吸附率均明显高于 CK 组和 CO_2 升高组 ($P < 0.05$),且双因素分析也表明,在整个实验期间温度升

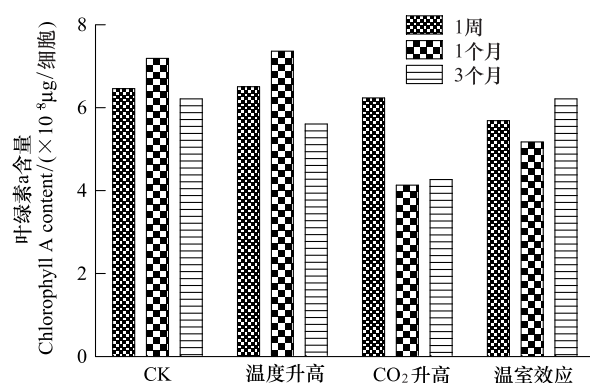


图2 单个藻细胞中的叶绿素 a 含量的变化

Fig. 2 The change of chl a in a single cell

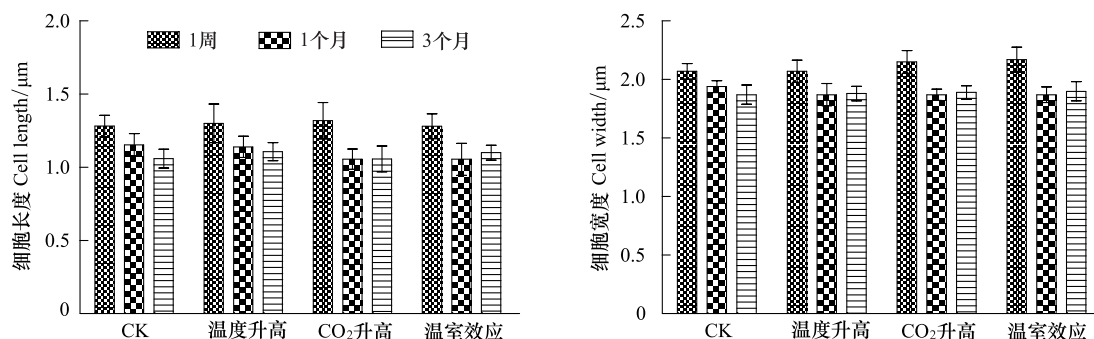


图3 藻细胞长度和宽度的变化

Fig. 3 The change of cell width and cell length

高和 CO_2 浓度升高存在交互作用 ($P < 0.05$)。CK 和 CO_2 升高组下的噬藻体 PP 的吸附率在1个月时达到最大,温度升高和温室效应组的在3个月时有所降低 ($P < 0.05$)。与鲍氏织线藻 (*P. boryanum*, IU597) 的生物量变化相似,这更加说明了该藻的生理状态可能在 CO_2 升高条件下出现了某种适应机制,从而导致噬藻体 PP 的吸附率也发生了变化。

2.4 温度和 CO₂ 升高对噬藻体 PP 裂解周期的影响

该实验从藻细胞浓度侧面反映了噬藻体 PP 对不同条件下藻的裂解周期的变化。由图 5 可以看出 CK 组的裂解从 180min 开始,CO₂ 升高组的裂解开始于 120min,而温度升高组和温室效应组中的藻细胞数目在 90min 和 60min 时就有了明显的下降。可见温度和 CO₂ 的上升会使噬藻体 PP 的裂解周期明显提前。

2.5 温度和 CO₂ 升高对噬藻体 PP 一步生长曲线的的影响

图 6 可见,不同条件下对噬藻体 PP 的潜伏期有较大影响,但整个裂解周期变化不大,为方便起见,将以上信息制表 1。

表 1 噬藻体 PP 潜伏期、裂解周期和释放量的变化

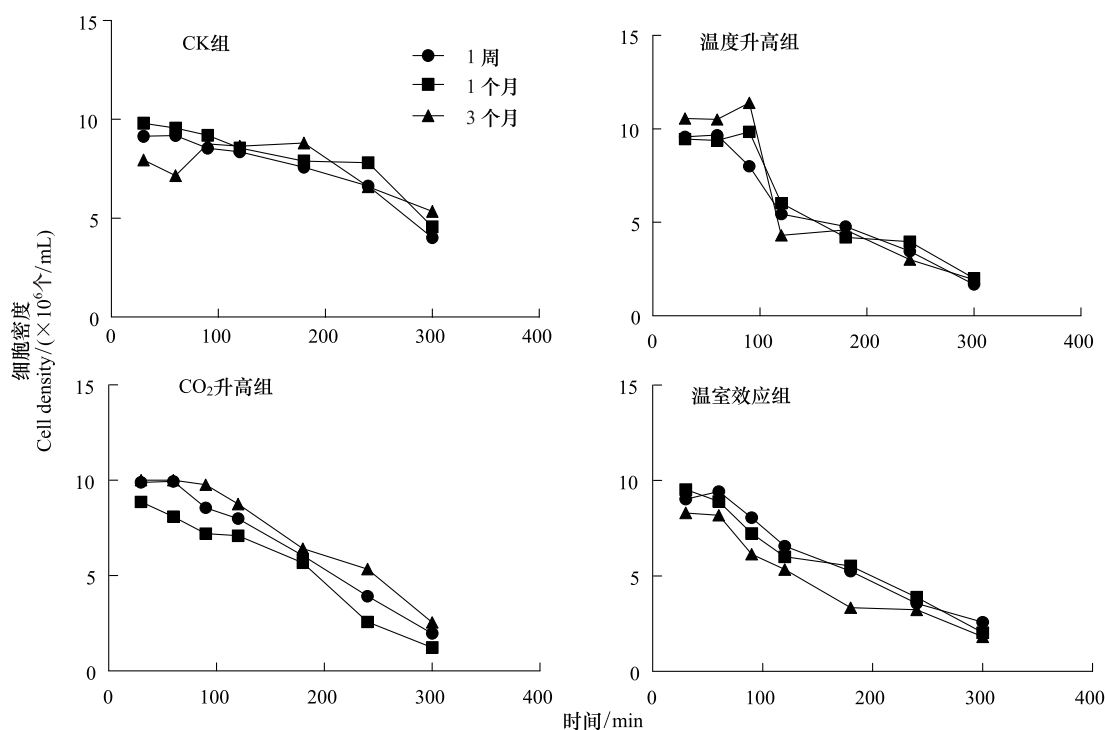


图 5 噬藻体 PP 裂解周期的变化

Fig. 5 The change of lytic cycle of cyanophage PP

该图中时间点依次为 30、60、90、120、180、240、300min

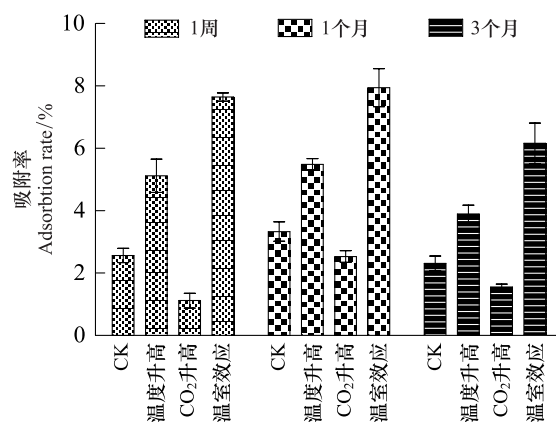


图 4 噬藻体 PP 吸附率的变化

Fig. 4 The change of adsorption of cyanophage PP

Table 1 The change of latent period, lytic cycle and burst size of cyanophage PP

实验组 Experiment group	潜伏期/min Latent period			裂解周期/min Lytic cycle			平均释放量/(PFU/个) Average burst size		
培养时间 Cultural time	1 周	1 个月	3 个月	1 周	1 个月	3 个月	1 周	1 个月	3 个月
CK 组 Ambient control	260	260	260	380	380	380	25.92	33.13	37.75
温度升高组 Elevated temperature	170—200	170—200	170—200	320	320	320	49.85	47.17	57.07
CO ₂ 升高组 Elevated CO ₂	200	200	200	380	320	320	19.6	26.17	25.96
温室效应组 Greenhouse effect	140	140	140	260	320	320	26.64	32.73	36.24

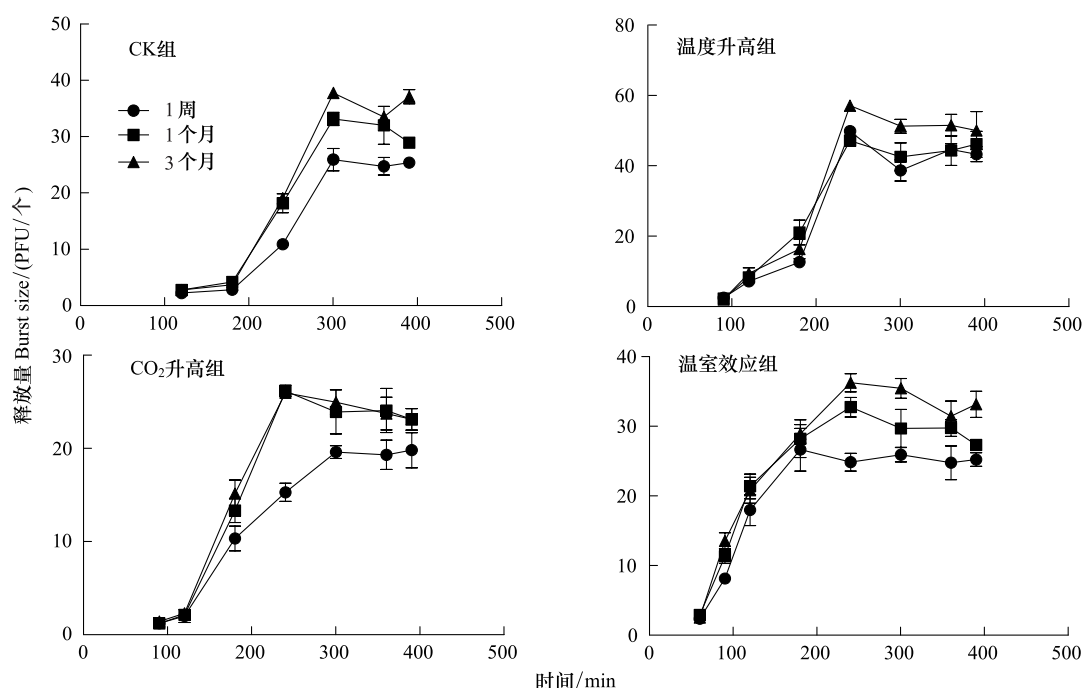


图6 噬藻体 PP 一步生长曲线的变化

Fig. 6 The change of One-step growth curves of cyanophage PP

由表1可见,各试验组条件下噬藻体 PP 的潜伏期均较对照组有明显的缩短,特别是温室效应组的潜伏期缩短了接近一半,同时,裂解周期也有一定程度的缩短(但减少幅度要小于潜伏期的减幅),这一结果与2.4的实验结果基本吻合,说明 CO₂ 和温度的升高会加速宿主的裂解。而且3个月时温度升高组的释放量显著高于其它3个组($P < 0.05$),CO₂ 升高组的最低,而温室效应组则介于两者之间,双因素分析也表明,在整个实验期间温度升高和 CO₂ 浓度升高存在交互作用($P < 0.05$)。温度升高组和 CO₂ 升高组下噬藻体 PP 的释放量分别在3个月和1个月时有较为明显的提高($P < 0.05$),温室效应组则没有出现显著变化($P > 0.05$)。

3 讨论

本实验中 CO₂ 升高组和温室效应组的细胞密度和叶绿素 a 含量明显高于其它两组,说明 CO₂ 浓度升高促进了该藻的生物量。该结论与很多学者的研究相符,大部分学者认为 CO₂ 浓度升高会促进浮游植物的初级生产,如 Hein 和 Jensen^[11] 及 Yoshimura^[12] 表明 CO₂ 加富会促进海洋浮游植物的初级生产。但是有的学者持不同的意见,如 Fei-Xue Fu^[1] 研究表明单独升高 CO₂ 虽然促进了赤潮异湾藻的生长,但对微小原甲藻没有影响。甚至 Czerny^[13] 等人发现 CO₂ 加富造成的海水酸化使 *Nodularia spumigena* 的细胞分裂速率降低。本实验中温度升高组并没有明显提高藻的生物量。同时 Fei-Xue Fu^[1] 也发现温度升高分别降低和增加了赤潮异湾藻和微小原甲藻的叶绿素 a 含量;温度升高有利于项圈藻和念珠藻的光合作用,但是对微囊藻和螺旋藻没有影响^[14]。可见,单独的 CO₂ 升高和温度升高对藻生物量的影响具有物种特异性,可能依赖于它们的生理特征。

本实验中 CO₂ 升高组中单个藻细胞中的叶绿素 a 含量在1个月和3个月的时候明显降低,但是其在对应的时间段藻的总生物量并没有减少,可能是 CO₂ 的升高使其更容易被藻类所吸收,从而弥补了单个细胞中叶绿素 a 含量较少的不足。此外,夏建荣^[15] 的发现 CO₂ 浓度升高导致蛋白核小球藻细胞中叶绿体的数量提高,可见 CO₂ 浓度升高对藻细胞叶绿素 a 的影响也可能具有物种特异性。

CO₂ 升高和温度升高会使噬藻体 PP 的裂解周期有较明显的提前,而二者的联合作用(即温室效应)更是会使裂解周期大幅度提前至 60min,这与 Weinbauer^[16] 发现的温度升高使病毒的潜伏期缩短的现象较吻合,其原因可能是温度升高等因素能够诱导宿主细胞内的某些酶的活性,从而提高病毒大分子合成与核衣壳装配的

效率。

吸附是病毒感染的第一步,可进一步分作非特异性吸附和特异性吸附两个阶段,其中非特异性吸附的效率可以用病毒与宿主随机碰撞的接触率(数学模型)来进行表征,与本试验有关的参数分别是宿主细胞大小、水温及水的粘度^[17]。Børshiem^[18]等于 1992 年研究发现,噬菌体对于实验室条件下的宿主比自然条件下的吸附率要高出 50%,造成这种现象的原因可能是实验室中的宿主体积比自然条件下的要大;Choi^[19]的相关研究也证明 T4 类噬菌体感染不同大小的 *E. coli* B23 有显著差异。但在本实验中,不同条件下的宿主藻的细胞大小没有显著变化,即宿主藻的细胞大小并不是造成噬藻体 PP 吸附发生变化的原因。水温升高使水分子内能升高,造成水粘度下降、扩散系数升高^[20],从而使病毒和其宿主的布朗运动加剧,增加了这两者之间的碰撞机会。根据本次试验的设计,当水温从 25℃ 升高到 29℃ 时,水的粘度会相应的从 0.8937Cp 降到 0.8180Cp,参照接触率模型^[17],其接触率会提高 10.7%,这至少可以部分解释噬藻体 PP 在水温增加时吸附能力增强的现象。

影响病毒特异性吸附的主要因素为宿主细胞表面的受体数量与受体状态。首先,水温的升高会使细胞膜上的蛋白质和脂类的表达量发生变化,从而影响受体的数量,Samimi 和 Drews^[21]发现在 4—37℃ 范围内噬藻体 AS-1 对单细胞蓝藻 *Anacystis nidulans* 的吸附率随温度的升高而升高,这是因为 AS-1 吸附需要的脂多糖随温度的升高表达量也有所提高。就本次试验而言,温度升高组的吸附率增幅高于 60%,而前述的非特异性吸附部分的增幅仅为 10.7%,因此水温升高对特异性吸附的影响更为显著。其次,pH 也可能影响受体的数量,Benedi^[22]等人也表明,噬菌体 FC3-1 对于生长在低 pH 下的细菌的成斑率显著降低,是因为 FC3-1 在吸附过程中需要脂多糖,而在低 pH 下宿主有较少的脂多糖暴露于细胞表面,对本次试验 3 个阶段而言,经测定发现,由于 CO₂ 浓度升高均使藻液的 pH 值下降约 0.4,从而可能削弱病毒的吸附能力。

本次试验还发现,噬藻体 PP 对温室效应组下噬藻体 PP 吸附宿主的能力大大提高,这说明温度上升和 CO₂ 浓度升高对噬藻体 PP 的吸附具有某种协同效应,该协同效应不但弥补了由于伴随 CO₂ 浓度升高的藻液 pH 值下降所引起的吸附率降幅,甚至足以超越了单独温度升高所引起的吸附率增幅。

病毒的释放量是衡量病毒感染力的重要指标。影响病毒释放量的一个重要因素就是宿主的生理状态,通常,宿主的生长代谢越活跃,病毒的感染力就越强^[23-24],但本次试验却出现完全相反的情况:CO₂ 升高导致宿主的生长加速,但噬藻体 PP 的释放量却明显减少了,这与 Larsen^[25]等人对海洋球石藻病毒 EhV (*Emiliania huxleyi* virus) 的研究结果相似;温度升高虽对宿主的生长没有影响,但噬藻体 PP 的释放量却大幅度增加了。造成这一现象的原因可能与噬藻体的增殖过程中所需要的一些特有酶类(这些酶类与宿主的初级代谢酶类具有一定的竞争关系)的活性能够被较高的温度所诱导有关,如噬藻体可以利用自身编码的 DNA 聚合酶(这些酶与宿主的 DNA 聚合酶竞争共同的底物)进行增殖^[26]。此外,本次试验还发现温室效应条件下的噬藻体 PP 的释放量介于温度升高组与 CO₂ 升高组之间,与对照组无显著差异,说明温度升高和 CO₂ 升高对噬藻体 PP 释放量的影响能够互相抵消。

综上所述,本实验显示 CO₂ 升高提高了 *P. boryanum* 的生物量;温度和 CO₂ 升高不仅使噬藻体 PP 的裂解周期提前,而且也对其吸附率和释放量存在交互作用,使其发生明显改变:其中,温度和 CO₂ 升高对噬藻体 PP 吸附率的影响属于协同作用,而对释放量的影响则能够互相抵消。

References:

- [1] Fu F X, Zhang Y H, Warner M E, Feng Y Y, Sun J, Hutchins D A. A comparison of future increased CO₂ and temperature effects on sympatric *Heterosigma akashiwo* and *Prorocentrum minimum*. Harmful alage, 2008, 7(1): 76-90.
- [2] Mudie P J, Rochon A, Levac E. Palynological records of red tide-producing species in Canada: past trends and implications for the future. Palaeogeogr, Palaeoclimatol, Palaeoecol, 2002, 180(1/3): 159-186.
- [3] Fu F X, Warner M E, Zhang Y H, Feng Y Y, Hutchins D A. Effects of increased temperature and CO₂ on photosynthesis, growth, and elemental ratios in marine *Synechococcus* and *Prochlorococcus* (Cyanobacteria). Journal of Phycology, 2007, 43(3): 485-496.

- [4] Suttle C A. Viruses in the sea. *Nature*, 2005, 437(7057): 356-361.
- [5] Suttle C A, Chan A M, Cottrell M T. Infection of phytoplankton by viruses and reduction of primary productivity. *Nature*, 1990, 347: 467-469.
- [6] Tucker S, Pollard P. Identification of cyanophage Ma-LBP and infection of the cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* from an Australian subtropical lake by the virus. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71(2): 629-635.
- [7] Weinbauer M G, Höfle M G. Size-specific mortality of lake bacterioplankton by natural virus communities. *Aquatic Microbial Ecology*, 1998, 15(2): 103-113.
- [8] Zhao Y J, Cheng K, Shi Z J, Guo Y X, Zhu H Y, Zhang J H. The first report of the isolation and identification of cyanophage in P. R. China. *Progress Nature Science*, 2002, 12(9): 923-927.
- [9] Zhang T M, Du G L, Wu D W, Hua Z L. Effects of Zinc on Two Phytoplanktons in Fresh Water. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, 26(8): 1722-1726.
- [10] Jiang H, Cheng K, Xiao C Q, Zhang Y H, Zhao Y J, Zhao J. The relationship between cyanophage PP and its wild host (filamentous cyanobacteria): adsorption rate, latent period and burst size. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2911-2915.
- [11] Hein M, Sand-Jensen K. CO₂ increases oceanic primary production. *Nature*, 1997, 388: 526-527.
- [12] Yoshimura T, Nishioka J, Suzuki K, Hattori H, Kiyosawa H, Watanabe Y W. Impacts of elevated CO₂ on phytoplankton community composition and organic carbon dynamics in nutrient-depleted Okhotsk Sea surface waters. *Biogeosciences Discuss*, 2009, (6): 4143-4163.
- [13] Czerny J, Barcelose Ramos J, Riebesell U. Influence of elevated CO₂ concentrations on cell division and nitrogen fixation rates in the bloom-forming cyanobacterium *Nodularia spumigena*. *Biogeosciences*, 2009, (6): 1865-1875.
- [14] Giordano M F, Strauch S M, Villafañe V E, Helbling E W. Influence of temperature and UVR on photosynthesis and morphology of four species of cyanobacteria. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2011, (103) 68-77.
- [15] Xia J R, Gao K S. Change of Cell Structure of *Chlorella pyrenoidosa* Grown under Different CO₂ Concentration. *Journal of Wuhan botanical research*, 2002, 20(5): 403-404.
- [16] Weinbauer M G. Ecology of prokaryotic viruses. *FEMS Microbiology Reviews*, 2004, 28: 127-181.
- [17] Murray A G, Jackson G A. Viral dynamics: a model of the effects of size, shape, motion and abundance of single-celled planktonic organisms and other particles. *Marine Ecology Progress Series*, 1992, 89: 103-116.
- [18] Børsheim K Y. Native marine bacteriophages. *FEMS Microbiology Letters*, 1993, 102(3/4): 141-159.
- [19] Choi C, Kuatsjah E, Wu E, Yuan S. The Effect of Cell Size on the Burst Size of T4 Bacteriophage Infections of *Escherichia coli* B23. *Journal of Experimental Microbiology and Immunology*, 2010, 14: 85-91.
- [20] Lou Y M, Liu J H, Zhou X P, Liu J C. Temperature on the Viscosity and Diffusion Coefficient of Water. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition)*, 2009, 34(6): 34-39.
- [21] Samimi B, Drews G. Adsorption of Cyanophage AS-1 to Unicellular Cyanobacteria and Isolation of Receptor Material from *Anacystis nidulans*. *Journal of virology*. 1978, 25(1): 164-174.
- [22] Benedi V J, Regué M, Albertí S, Camprubí S, Tomás J M. Influence of environmental conditions on infection of *Klebsiella pneumoniae* by two different types of bacteriophages. *Canadian Journal of Microbiology*, 1991, 37(4): 270-275.
- [23] Parada V, Herndl G J, Weinbauer M G. Viral burst size of heterotrophic prokaryotes in aquatic systems. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2006, 86(03): 613-621.
- [24] Gnezdá-Meijer K, Mahne I, Poljsak-Prijatelj M, Stopar D. Host physiological status determines phage-like particle distribution in the lysate. *FEMS Microbiol Ecol*. 2006, 55(1): 136-45.
- [25] Larsen J B, Larsen A, Thyrhaug R, Bratbak G, Sandaa R A. Interactive comment on "Marine viral populations detected during a nutrient induced phytoplankton bloom at elevated pCO₂ levels" by J. B. Larsen et al. *Biogeosciences Discuss*, 2007, 4: 2024-2027.
- [26] Chen F, Lu J R. Genomic Sequence and Evolution of Marine Cyanophage P60: a New Insight on Lytic and Lysogenic Phages. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, 68(5): 2589-2594.

参考文献:

- [8] 程凯,赵以军,石正丽,郭亚新,祝海燕,张建红.我国首株噬藻体(蓝藻病毒)的分离与鉴定. *自然科学进展*, 2002, 12(9): 923-927.
- [9] 张铁明,杜桂森,杨忠山,武佃卫,华振玲. 锌对两种淡水浮游藻类增值的影响. *西北植物学报*, 2006, 26(8): 1722-1726.
- [10] 姜红,程凯,肖慈琼,张艳慧,赵以军,赵进. 噬藻体 PP 对野生宿主-丝状蓝藻的吸附率、裂解周期及释放量的影响. *生态学报*, 2007, 27(7): 2911-2915.
- [15] 夏建荣,高坤山.不同 CO₂ 浓度下培养的蛋白核小球藻细胞结构的变化. *武汉植物学研究*, 2002, 20(5): 403-404.
- [20] 娄彦敏,刘娟红,周晓平,刘锦超. 温度对水的粘度和扩散系数影响的研究. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2009, 34(6): 34-39.

CONTENTS

The combined effects of elevated CO ₂ and elevated temperature on proliferation of cyanophage PP	NIU Xiaoying, CHENG Kai, RONG Qianqian, et al (6917)
Precipitation pattern of desert steppe in Inner Mongolia, Sunite Left Banner: 1956—2009	CHEN Jun, WANG Yuhui (6925)
Emergy and economic evaluations of two sewage treatment systems	LI Min, ZHANG Xiaohong, LI Yuanwei, et al (6936)
Individual spatial pattern and spatial association of <i>Stipa krylovii</i> population in Alpine Degraded Grassland	ZHAO Chengzhang, REN Heng (6946)
Litter characteristics of nutrient and stoichiometry for <i>Phyllostachys praecox</i> over soil-surface mulching	LIU Yadi, FAN Shaohui, CAI Chunju, et al (6955)
Characteristics of leaf element concentrations of twelve nutrients in <i>Acacia confusa</i> and <i>Leucaena glauca</i> in secondary forests of acid rain region in Fuzhou	HAO Xinghua, HONG Wei, WU Chengzhen, et al (6964)
Relationships between main insect pests and their predatory natural enemies in “Yuhualu” juicy peach orchard	KE Lei, SHI Xiaoli, ZOU Yunding, et al (6972)
Simulating 10-hour time-lag fuel moisture in Daxinganling	HU Tianyu, ZHOU Guangsheng, JIA Bingrui (6984)
Soil nutrient characteristics under different vegetations in the windy and sandy region of northern Shaanxi	LI Wenbin, LI Xinpeng (6991)
Partitioning of autotrophic and heterotrophic soil respiration in southern type poplar plantations	TANG Luozhong, GE Xiaomin, WU Lin, et al (7000)
Soil water and salinity in response to water deliveries and the relationship with plant growth at the lower reaches of Heihe River, Northwestern China	YU Tengfei, FENG Qi, LIU Wei, et al (7009)
Effect of stem diameter at breast height on skewness of sap flow pattern and time lag	MEI Tingting, ZHAO Ping, NI Guangyan, et al (7018)
Invasion of exotic <i>Ageratina adenophora</i> Sprengel. alters soil physical and chemical characteristics and arbuscular mycorrhizal fungus community	YU Wenqing, LIU Wanxue, GUI Furong, et al (7027)
Models and methods for information extraction of complex ground objects based on LandSat TM images of Hainan Island, China	WANG Shudong, ZHANG Lifu, CHEN Xiaoping, et al (7036)
Effects of snow pack removal on soil hydrolase enzyme activities in an alpine <i>Abies faxoniana</i> forest of western Sichuan	YANG Yulian, WU Fuzhong, YANG Wanqin, et al (7045)
Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice	WANG Weixiao, LIU Xiaojun, TIAN Yongchao, et al (7053)
Growth characteristics, lignin degradation enzyme and genetic diversity of <i>Fomes fomentarius</i> by SRAP marker among populations	CAO Yu, XU Ye, WANG Qiuyu (7061)
Effects of the invasion by <i>Solidago canadensis</i> L. on the community structure of soil animals	CHEN Wen, LI Tao, ZHENG Rongquan, et al (7072)
Effects of intercropping on quality and yield of maize grain, microorganism quantity, and enzyme activities in soils	ZHANG Xiangqian, HUANG Guoqin, BIAN Xinmin, et al (7082)
Influence of mycorrhizal inoculation on competition between plant species and inorganic phosphate forms	ZHANG Yuting, ZHU Min, XIAN Yanxiangwa, et al (7091)
The stable nitrogen isotope of size-fractionated plankton and its relationship with biomass during winter in Daya Bay	KE Zhixin, HUNG Liangmin, XU Jun, et al (7102)
Dynamics of toxic and non-toxic <i>Microcystis</i> spp. during bloom in the large shallow hypereutrophic Lake Taihu	LI Daming, YE Linlin, YU Yang, et al (7109)
Activities of antioxidant enzymes and Zn-MT-like proteins induced in <i>Chlorella vulgaris</i> exposed to Zn ²⁺	YANG Hong, HUANG Zhiyong (7117)
Ecological footprint in Fujian based on calculation methodology for the national footprint accounts	QIU Shoufeng, ZHU Yuan (7124)
The comparison of CO ₂ emission accounting methods for energy use and mitigation strategy: a case study of China	YANG Xiai, CUI Shenghui, LIN Jianyi, et al (7135)
Ecological damage assessment of Jiaozhou Bay reclamation based on habitat equivalency analysis	LI Jingmei, LIU Tieying (7146)
The value assessment of county-level ecological assets: a case in Fengning County, Hebei Province	WANG Hongyan, GAO Zhihai, LI Zengyuan, et al (7156)
Review and Monograph	
Molecular basis for enhancement of plant drought tolerance by arbuscular mycorrhizal symbiosis: a mini-review	LI Tao, DU Juan, HAO Zhipeng, et al (7169)
A review of carbon cycling and sequestration in urban soils	LUO Shanghua, MAO Qizheng, MA Keming, et al (7177)
Overview on methods of deriving fraction of absorbed photosynthetically active radiation (FPAR) using remote sensing	DONG Taifeng, MENG Jihua, WU Bingfang (7190)
Research progress on influencing of light attenuation and the associated environmental factors on the growth of submersed aquatic vegetation	WU Mingli, LI Xuyong (7202)
The framework of stoichiometry homeostasis in zooplankton elemental composition	SU Qiang (7213)
Scientific Note	
Abundance and biomass of planktonic ciliates in the sea area around Zhangzi Island, Northern Yellow Sea in July and August 2010	YU Ying, ZHANG Wuchang, ZHANG Guangtao, et al (7220)
Research of wildlife resources sustainable development based on entropy method in China	YANG Xitao, ZHOU Xuehong, ZHANG Wei (7230)
Influence of residue composition and addition frequencies on carbon mineralization and microbial biomass in the soils of agroforestry systems	WANG Yikun, FANG Shengzuo, TIAN Ye, et al (7239)
Seasonal changes in microbial diversity in different cells of a wetland system constructed for municipal sewage treatment	CHEN Yonghua, WU Xiaofu, ZHANG Zhenni, et al (7247)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 22 期 (2012 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 22 (November, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元