

高温热浪下北京城市水体典型蓝绿藻生长规律研究

张君枝¹, 邱丽佳¹, 张艳娜², 马文林¹, 张质明¹, 洪辛璐¹, 李卓霖¹

(1. 北京建筑大学 北京应对气候变化研究和人才培养基地, 北京 100044; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:以北京城市水体为媒介,在高温热浪条件下,研究温度和碱度两个变化因子对铜绿微囊藻和蛋白核小球藻生长规律的影响.结果表明:铜绿微囊藻对温度和碱度变化的适应能力较强,其最适温度为35℃,且添加10 mmol/L的碱度条件下生长较好;蛋白核小球藻对高温的耐受能力不如铜绿微囊藻,其最适温度为30℃,且低温时低碱度水平促进生长,随着温度的升高,需要同时提高水体的碱度才能保证蛋白核小球藻的旺盛繁殖,否则就会产生一定程度的抑制作用.

关键词:高温热浪;典型蓝绿藻;生长规律

中图分类号:X172

文献标志码:A

近年来,由于全球气候变化,极端天气事件频发,已经严重危害到人类的正常生活,全球气候变暖也因此成为社会十分关注的话题^[1].自20世纪80年代中后期以来,北京年平均气温呈现显著的增暖趋势^[2-3].气候变暖主要是由于大气中CO₂排放量持续增加,通过汽水平衡又可导致水中无机碳含量升高,从而改变水体的pH和碱度水平,对蓝绿藻水华的暴发具有一定影响^[4-6].因温度、水体碳源强度等是影响蓝绿藻繁殖的必要条件^[7],而高温热浪天气(我国一般把日最高气温达到或超过35℃时称为高温,连续数天(3d以上)的高温天气过程称之为高温热浪,或称之为高温酷暑)频繁出现,水体蒸发增强、水位下降、沉积物中营养物质释放、水体营养盐浓度增加,均增加了藻类暴发的风险^[8-9].因此,城市水体中藻类在高温热浪情境下频繁暴发是城市水管理部门最棘手的问题之一.

北京市区共有大小湖泊30余个,绝大部分湖泊与河道相通^[10].自2002年以来北京河湖水体已大多数处于富营养化状态,并在夏秋季节局部暴发藻类水华现象,给首都的生态环境和声誉均造成了不良影响^[11-12].微囊藻是一类全球性分布的淡水蓝藻,其中的铜绿微囊藻可产生藻毒素,在淡水水体中常常大量繁殖,并且持续时间较长,控制难度大,危害也更为严重^[13].另外由于城市水资源的短缺,再生水已作为景观水体的重要补水,因其营养盐含量丰富,在外界适宜条件下,也促进了水华暴发,且常见藻种有微囊藻、小球藻等^[14].

目前研究较多的是常温^[15-16]和水体较低碱度范围内^[17-18]藻类的生长情况,而对高温和高碱度情境下淡水藻类的生长规律较少涉及.鉴于高温热浪对藻类暴发产生严重影响,实验选用北京市景观水体水华的优势藻种铜绿微囊藻和以再生水为补给源的水体水华重要物种蛋白核小球藻为研究对象,在高温热浪情境下,建立以北京城市水体为营养环境的高温热浪模拟实验,分别进行温度和碱度两个因子变化对典型蓝绿藻生长规律的影响效果研究,从而为进一步揭示藻类对高温热浪的适应和响应机制提供初步的实验依据.

收稿日期:2015-04-06;修回日期:2016-02-10.

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51408022);北京市优秀人才培养资助项目(2013D005017000009);北京市自然科学基金项目(8154044).

第1作者简介:张君枝(1979-),女,河南焦作人,北京建筑大学副教授,博士,从事气候变化和水质安全保障技术研究.

通信作者:马文林(1968-),女,教授,博士,主要研究方向为应对气候变化、水环境生态修复技术和固体废物资源化处理和利用;E-mail:mawenlin@bucea.edu.cn.

1 材料与方 法

1.1 试剂和仪器

M11 培养基;硝酸钾(KNO₃),磷酸氢二钾(K₂HPO₄)等.

实验中使用的仪器有显微镜(XSP-44X.9),紫外可见分光光度计(SPECORD 50),高速离心机(HC-3518),抽滤装置(津腾),浊度计(WGZ-1S),pH计(PB-10),自动电位滴定仪(ZDJ-5),高压蒸气灭菌器(MLS-3780),人工气候箱(LRH-300-GSI),智能光照培养箱(GTOP).另外还需要容量瓶、洗瓶、比色管、锥形瓶(500 mL)等.

1.2 实验方法

1.2.1 藻种扩大培养

从中国淡水藻种库购买微囊藻及蛋白核小球藻藻种,使用 M11 培养基(母液:硝酸钠(NaNO₃)100 mg/L,磷酸氢二钾(K₂HPO₄)10 mg/L,硫酸镁(MgSO₄·7H₂O)75 mg/L,氯化钙(CaCl₂·2H₂O)40 mg/L,碳酸钠(Na₂CO₃)20 mg/L,柠檬酸铁 6 mg/L,乙二胺四乙酸二钠(Na₂EDTA·2H₂O)1 mg/L,调节 pH 值为 8.0)稀释 10 倍制成工作液进行培养,在 25 ℃、光照强度 4000 lx(光照时间 12 h,黑暗时间 12 h)条件下连续培养 30~40 d,藻细胞密度达到 1.0×10⁶ mL 后,以 1:5 的比例扩大培养,以供实验过程使用.

1.2.2 水样的采集与处理

本课题小组对北京市 33 个景观水体进行了采样调查,结果发现,目前北京大多数景观水体在夏季已明显出现了藻类暴发现象.其中,对人们日常生活造成影响比较明显的是人口居住密度很高的北运河系^[19].因而,本研究在北运河系上选取了 2 个藻类繁殖尤为严重的景观水体作为室内研究的水质媒介.

其中,第 1 个采样点为海淀区白石桥附近的紫竹院公园,紫竹院湖水水质处于中度富营养化状态^[10],2014 年 4~6 月进行了 3 次取水样.第 2 个采样点为北京市玉渊潭公园.玉渊潭公园位于北京市海淀区西三环中路东侧,园中主湖玉渊潭为北京市娱乐性水域之一^[20],其水质也已达到中度富营养化程度.

实验水样分别取自 2 个采样点的表层水体(0.5 m).取样现场测定的指标有气温、水温以及光照,从调查结果看,北京市夏季水温仅比气温低 1~2 ℃.同步取样测定的指标有 pH、浊度、叶绿素以及 c_{TP} 和 c_{TN}(见表 1).水样带回实验室后,放入高压灭菌锅中进行灭菌处理.取出后静置 1 h,待水样冷却,上清液倒入灭菌后的 500 mL 锥形瓶中,每瓶倒入 300 mL,待用.

表 1 2 个景观水体水质参数

| 地点 | 对应藻种 | pH | 浊度/(TU) | c _{碱度} /(mmol·L ⁻¹) | c _{TN} /(mg·L ⁻¹) | c _{TP} /(mg·L ⁻¹) |
|-----|--------|------|---------|--|--|--|
| 紫竹院 | 铜绿微囊藻 | 8.22 | 56.3 | 2.0 | 1.05 | 0.06 |
| 玉渊潭 | 蛋白核小球藻 | 8.47 | 30.7 | 1.3 | 1.05 | 0.07 |

1.2.3 接种及指标测试

从培养基中吸取一定体积的藻液以 6000 r/min 的速度离心 5 min,弃掉上清液,再用蒸馏水清洗残余培养液,离心,弃掉上清液,重复 2 次后接种于水样中,使接种后的初始藻细胞密度为 1.0×10⁵ mL⁻¹.在培养体系中加入 2.0 mg/L TN(硝酸钾)和 0.2 mg/L TP(磷酸氢二钾),作为藻种生长所需的氮源和磷源,使实验体系的氮、磷质量浓度处于富营养水平;接种结束后,用透气膜封住锥形瓶口.每个条件分别做 3 个平行样.

实验过程中每 2 d 测定一次两种典型藻类在不同碱度条件下的藻细胞密度、c_{TN} 和 c_{TP}.藻类计数采用血球计数板人工计数的方法,每个样品计数 200 个以上;TN 测试采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;c_{TP} 测试采用钼锑抗分光光度法,直至藻类生长至衰亡期.

1.3 室内模拟实验条件

在实验室内用人工气候箱模拟高温热浪条件下的两个主要气候因子——高温、CO₂ 的变化对铜绿微囊藻和蛋白核小球藻生长规律的影响.对温度的研究主要集中在高温热浪情境下,设置为 30 ℃(对照温度条件)、35 ℃和 40 ℃.大气中 CO₂ 浓度的变化通过汽水平衡会导致水中无机碳含量的增加,由于本研究所选实

际水体 pH 为 8.2~8.5,故选择以 NaHCO_3 调整水体无机碳浓度^[21],同时以碱度来指示水中无机碳的变化,设置碱度增加梯度为 0 mmol/L(实际水样碱度水平)、5 mmol/L 和 10 mmol/L.

2 结果与分析

2.1 铜绿微囊藻

2.1.1 高温对铜绿微囊藻生长趋势的影响

铜绿微囊藻的生长遵循着微生物生长的一般规律,即在外界条件不适于藻类生长时,铜绿微囊藻的生长会非常缓慢,表现为停滞期;当营养充足、环境条件适宜时则迅速生长,由于其繁殖能力强、世代较短,藻类生物量剧增,进入对数生长期;随后相当一段时间内藻类生物量处于稳定状态,藻体死亡率和新生率相当,此时为稳定期;随着营养物质被大量消耗至匮乏状态,藻类开始大量死亡,进入衰亡期^[22].

从图 1 可以看出,在实际水样碱度条件下,铜绿微囊藻对温度的适应范围非常宽,在 30 °C、35 °C 和 40 °C 的条件下均可很好繁殖.由于培养体系处于富营养水平,铜绿微囊藻几乎没有经过停滞期,很快便进入对数生长期.35 °C 条件下,铜绿微囊藻的生长速率最快,可以很快达到峰值,并且细胞密度峰值大于其他两个温度,同时, c_{TN} 和 c_{TP} 的消耗速度最快,达到对数期之后,藻开始出现衰亡现象,原本在藻细胞中的营养元素会释放出来,因而出现 c_{TN} 、 c_{TP} 质量浓度上扬的趋势(见图 2).但不容忽视的是,在极端高温 40 °C 条件下,铜绿微囊藻依旧可以较好地生长,可见,铜绿微囊藻对高温有较强的耐受能力.

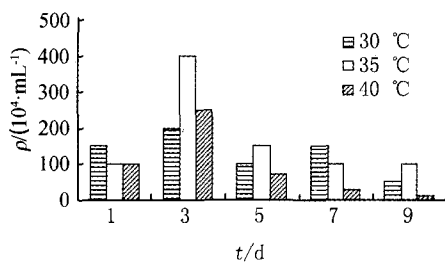


图1 实际水样碱度条件下在不同温度下培养体系中铜绿微囊藻细胞密度的变化情况

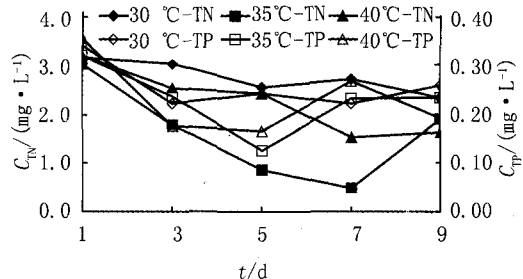


图2 实际水样碱度条件下在不同温度下培养体系中 c_{TN} 、 c_{TP} 的变化情况

2.1.2 碱度对铜绿微囊藻生长趋势的影响

在研究碱度对铜绿微囊藻生长的影响时,我们采用了控制变量法,即温度为定量,探讨不同碱度条件下铜绿微囊藻的生长规律.由前面的实验已知铜绿微囊藻的最适温度为 35 °C,所以选择 35 °C 温度为定量.

从图 3 铜绿微囊藻的藻细胞密度变化情况可以看出,35 °C 时铜绿微囊藻在不同碱度条件下均可以生长,3 d 后即达到对数生长期,且碱度增加 10 mmol/L 时,铜绿微囊藻藻细胞密度明显高于另外两个碱度条件,是其藻细胞密度的 1.5~2.5 倍.从 c_{TN} 、 c_{TP} 变化曲线(见图 4)中也可看到,1~3 d 铜绿微囊藻处于旺盛生长阶段,水体中氮、磷等营养元素被大量消耗,呈直线下降趋势,之后,铜绿微囊藻进入衰亡期,随着胞内氮、磷的释放, c_{TN} 、 c_{TP} 的数值出现上升趋势.

2.2 蛋白核小球藻

2.2.1 高温对蛋白核小球藻生长趋势的影响

由图 5 可知,不管是未添加碱度(0 mmol/L)还是添加了 5 mmol/L 或 10 mmol/L NaHCO_3 的培养体系中,蛋白核小球藻的生长情况都是 30 °C 时最好,且培养到第 5 d 时藻数目达到最大值.40 °C 时,碱度增加 0 mmol/L 和 5 mmol/L 条件下,蛋白核小球藻的生长周期很短,第 3 d 藻液就开始衰亡,说明蛋白核小球藻在低碱度条件下对 40 °C 高温的耐受力较弱.但是,当碱度增加 10 mmol/L 时,40 °C 条件下的藻却一直生存下来,并在第 7 d 达到对数期,且藻细胞密度比接种时多了一个数量级,说明极端高温条件下,较大的碱度会对蛋白核小球藻的生长起到促进作用,而在中低碱度水平下其最适生长温度在 30 °C 左右.

2.2.2 碱度对蛋白核小球藻生长趋势的影响

由图 6 可以看出,在 30 °C 时,即对照温度条件下,未增加碱度的实际水体更能促进蛋白核小球藻的增

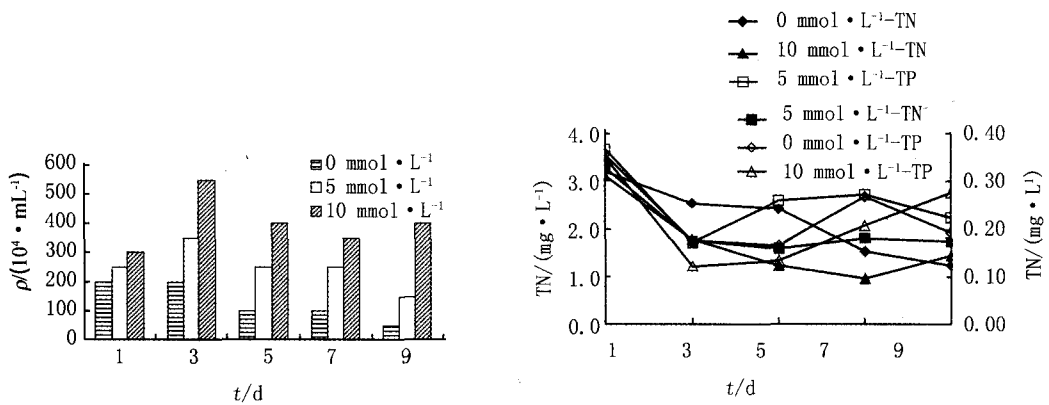


图3 35 °C时在不同碱度下培养体系中铜绿微囊藻细胞密度的变化情况 图4 35 °C时在不同碱度下培养体系中 c_{TN} 、 c_{TP} 的变化情况

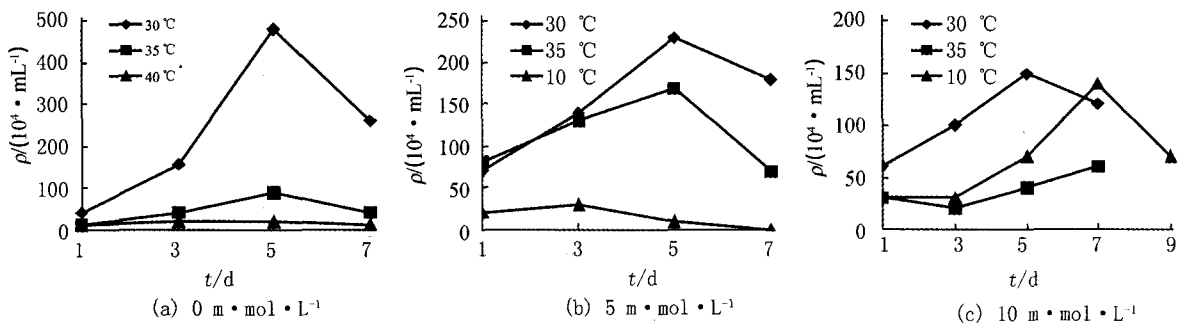


图5 不同高温条件下培养体系中蛋白核小球藻细胞密度的变化情况

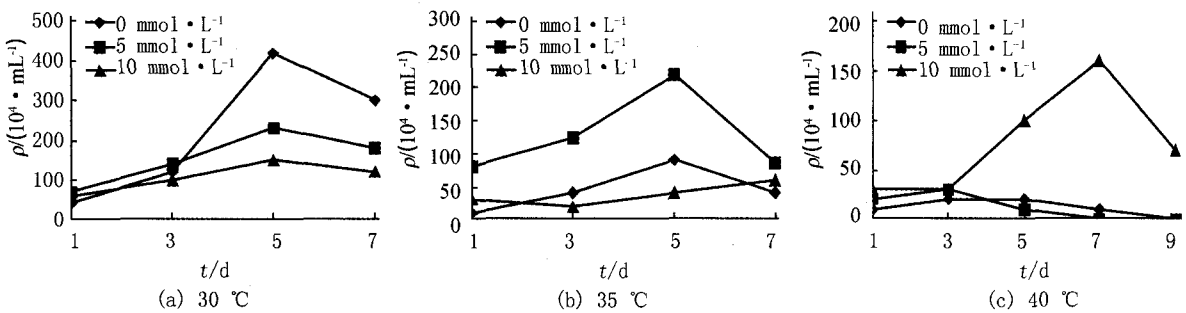


图6 不同高温条件下培养体系中蛋白核小球藻细胞密度的变化情况

殖,其次为增加 5 mmol/L NaHCO_3 的培养水体,而增加 10 mmol/L 的碱度会产生一定程度的抑制作用.随着温度升高至 35 °C,碱度为 5 mmol/L 时的藻细胞长势最好,这个条件下的蛋白核小球藻数量明显高于另外两个条件.当温度进一步升高至 40 °C 的极端高温时,实际水体和增加 5 mmol/L NaHCO_3 的培养液中藻的生长周期都很短,而且基本达不到对数期就已经死亡,只有碱度增加 10 mmol/L 水体中的蛋白核小球藻生长状况良好.由此可知,在满足氮、磷充足时,一定温度条件下,低碱度水平促进蛋白核小球藻的生长,而极端高温条件下只有同时具备高碱度条件才能保证蛋白核小球藻的旺盛繁殖.

3 讨论

在我国大部分富营养化水体中,蓝藻门中的铜绿微囊藻在数量和发生频率上之所以占有优势^[23],是由于铜绿微囊藻对温度和碱度变化都具有较强的适应性.由实验结果分析可知,在 30 °C、35 °C 和 40 °C 的高温条件下,铜绿微囊藻均具有较好的耐受能力.与此同时,藻细胞对碱度变化的适应能力也很强,在实际水体(0 mmol/L)、增加 5 mmol/L 碱度和增加 10 mmol/L 碱度条件下均可以生长,而且碱度越高铜绿微囊藻的

长势就越好。这主要是因为铜绿微囊藻可吸收水体中的 HCO_3^- , 在细胞中经扩散进入羧体后, 通过碳酸酐酶(CA)催化脱水形成 CO_2 , 引起胞内 CO_2 浓度升高^[24-25], 从而促进细胞的生长和发育。

蛋白核小球藻是再生水作为景观水补水时的常见藻种^[14], 属于绿藻门中的小球藻属。与铜绿微囊藻的适宜温度不同, 对比多个高温条件(30℃、35℃和40℃)下的实验结果发现, 蛋白核小球藻在对照温度30℃时长势最好, 且在未添加 NaHCO_3 的水体中繁殖速度最快。这是因为通常情况下, 在高 CO_2 浓度或低 pH 水体中, 绿藻往往成为水华优势藻种^[26]。因而随着实验所添加 NaHCO_3 逐渐增加, 水体 pH 呈上升趋势, 蛋白核小球藻生长受到一定程度的限制。

4 结 论

从本课题小组的调查结果可知, 北京城市景观水体在夏季的温度范围是 23~40℃, 碱度范围是 0.87~17.71 mmol/L, 其中碱度介于 4~12 mmol/L 的居多, 约占 74%。通过室内模拟实验研究可得到如下结论:

1) 铜绿微囊藻对温度变化具有较强的适应性, 且最适温度为 35℃; 而蛋白核小球藻在 30℃ 时的长势最好, 当水温极端升高至 40℃, 其生长周期就会变短, 繁殖速率减缓。由此可见, 典型蓝藻的温度适应范围比绿藻更宽, 对高温的耐受力也更强。如果高温热浪情况继续加剧, 城市水体中典型蓝藻水华比部分绿藻水华更容易暴发。

2) 铜绿微囊藻对碱度变化的适应能力很强, 且碱度增加 10 mmol/L 时藻细胞生长最快, 消耗氮、磷的速度也最快; 而蛋白核小球藻的生长规律有所不同, 在低温时低碱度水平促进生长, 随着温度的升高, 只有同时提高水体的碱度才能保证藻细胞的旺盛繁殖, 否则就会产生一定程度的抑制效果。因而, 在全球气候变暖的大趋势背景下, 水体碱度的增加会促进部分绿藻水华的大规模暴发, 从而严重影响城市水体的景观效果。

参 考 文 献

- [1] 于宏源. 2015 年气候治理发展及动向展望[J]. 上海交通大学学报(哲学社会科学版), 2016, 24(1): 5-16.
- [2] 郑祚芳, 丁海燕, 范水勇. 北京 1960-2008 年气候变暖及极端气温指数变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(3): 189-196.
- [3] 王佳丽, 张人禾, 王迎春. 北京不同区域表面气温的变化特征以及北京市观象台气温的代表性[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(5): 563-573.
- [4] 王跃思, 王长科, 郭雪清, 等. 北京大气 CO_2 浓度日变化、季变化及长期趋势[J]. 科学通报, 2002, 47(14): 1108-1112.
- [5] 刘 强, 王跃思, 王明星. 北京地区大气主要温室气体的季节变化[J]. 地球科学进展, 2004, 19(5): 817-823.
- [6] Paerl H W, Paul V J. Climate change: Links to global expansion of harmful cyanobacteria[J]. Water Research, 2012, 46(5): 1349-1363.
- [7] 赵 珊, 孟春霖, 刘晶晶, 等. 奥林匹克森林公园人工湖营养盐与藻类生长规律研究[J]. 给水排水, 2010, 36(2): 38-41.
- [8] 宋晨阳, 王 锋, 张 韧, 等. 气候变化背景下我国城市高温热浪的风险分析与评估[J]. 灾害学, 2016, 31(1): 201-206.
- [9] 李双双, 杨赛亮, 刘焱序, 等. 1960~2013 年京津冀地区干旱-暴雨-热浪灾害时空聚类特征[J]. 地理科学, 2016, 36(1): 149-156.
- [10] 荆红卫, 华 蕾, 孙成华, 等. 北京城市湖泊富营养化评价与分析[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3): 357-363.
- [11] 北京市环境保护局. 2014 年北京市环境状况公报[EB/OL]. (2015-04-16)[2016-03-25]. <http://www.bjepb.gov.cn/bjepb/resource/cms/2015/04/2015041609380279715.pdf>
- [12] 黄振芳, 刘昌明, 刘 波, 等. 北京城市水华预警指标体系研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(5): 8-10.
- [13] 刘河川, 张 伟, 余国忠, 等. 铜绿微囊藻对浮游动物生长繁殖的影响[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2004, 17(4): 437-439.
- [14] 周 律, 李春丽, 吴薇薇, 等. 以再生水为补水的景观水体水华暴发特征调查和药剂应急控藻效果评价[J]. 环境工程学报, 2012, 6(12): 4429-4435.
- [15] 徐 良, 冯 平, 孙冬梅, 等. 水温对藻类生长变化影响的数值模拟[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(5): 76-80.
- [16] 高 欣, 许 敏, 薛学洋, 等. CO_2 浓度升高和温度升高对铜绿微囊藻生长及产毒影响[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(9): 1-4.
- [17] 康丽娟, 潘晓洁, 常锋毅, 等. 碱度增加对蛋白核小球藻光合活性与胞外多糖的影响[J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 251-256.
- [18] 王思莹, 张君枝, 马文林. 超富营养水平下初始碱度对铜绿微囊藻生长影响的研究[J]. 绿色科技, 2015, (2): 203-206.
- [19] 郭 婧, 荆红卫, 李金香, 等. 北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1511-1518.
- [20] 赵兴媛, 朱先芳, 曹万杰, 等. 北京玉渊潭水化学特征及其控制因素分析[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2012, 33(1): 73-79.
- [21] Jones J I, Young J O, Eaton J W, et al. The influence of nutrient loading, dissolved inorganic carbon and higher trophic levels on the interaction between submerged plants and periphyton[J]. Journal of Ecology, 2002, 90(1): 12-24.
- [22] 黄钰铃, 纪道斌, 陈明曦, 等. 水体 pH 值对蓝藻水华生消的影响[J]. 人民长江, 2008, 39(2): 63-65.
- [23] 余 游, 冉奎林, 张 涛. 环境因子对铜绿微囊藻生长、生理影响研究进展[J]. 科技致富向导, 2011, (24): 265-267.

- [24] 邱保胜,高坤山. 蓝藻浓缩二氧化碳的机制[J]. 植物生理学通讯;2001,37(5):385-392.
- [25] 张宝燕,田平芳. 羧酶体结构及其 CO₂ 浓缩机制研究进展[J]. 生物工程学报,2014,30(8):1164-1171.
- [26] 杨波,储昭升,金相灿,等. CO₂/pH对三种藻生长及光合作用的影响[J]. 中国环境科学,2007,27(1):54-57.

Study on Growth Pattern of Typical Cyanobacteria and Chlorophyta in Urban Water Bodies of Beijing under the Heat Wave Scenarios

ZHANG Junzhi¹, QIU Lijia¹, ZHANG Yanna², MA Wenlin¹, ZHANG Zhiming¹,
HONG Xinlu¹, LI Zhuolin¹

(1. Beijing Climate Change Response Research and Education Center, Beijing University of Civil
Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract: Taking Beijing urban water as medium, the effects of the growth pattern of *Microcystis aeruginosa* and *Chlorella pyrenoidosa* at different levels of temperature and alkalinity were studied under the heat wave scenarios. The results showed that *Microcystis aeruginosa* had strong abilities to adapt to the change of temperature and alkalinity, and its optimum growth temperature was 35 °C, and it was better to grow when added the alkalinity of 10 mmol/L. The tolerance of *Chlorella pyrenoidosa* for high temperature was worse than *Microcystis aeruginosa*, and the optimum temperature of *Chlorella pyrenoidosa* was 30 °C. In addition, low alkalinity level promoted the growth of *Chlorella pyrenoidosa* when the temperature was low. With the increasing of temperature, improving the alkalinity of water was needed to ensure the strong proliferation of *Chlorella pyrenoidosa* at the same time; otherwise it would produce a certain degree of inhibition.

Keywords: heat wave; typical Cyanobacteria and Chlorophyta; growth pattern