DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2021.06.14

再生水补水的景观水体优势藻种水华 爆发阈值条件的确定

于汇洋,徐志嫱,龙怡静,史可,曹琛洁 (西安理工大学水利水电国家级实验教学示范中心,陕西西安710048)

摘 要:再生水景观补水是污水再生利用的重要途径,但水华频发是其利用的主要制约因素。以从典型再生水补水的景观水体中识别出的3种优势藻种为研究对象,采用室内静态实验方法研究了在温度、光照强度和营养盐浓度共同作用下的优势藻种的生长状况。结果表明:在温度 T = 30 ℃、照度 = 9 000 lx、N/P 较低的再生水补水水体中,水华微囊藻更易成为优势藻种,仅培养3d,藻密度就由1.0×10⁴ cell/mL 增加到9.1×10⁴ cell/mL,接近水华爆发的阈值条件(大于10×10⁴ cell/mL);普通小球藻和四尾栅藻较适合在 T = 25 ℃、光照强度分别为5 000 和7 000 lx、N/P 相对较高的再生水原水中生长,培养5d 可达到或接近水华爆发阈值条件。降低再生水体中的磷浓度可在一定程度上抑制藻类的生长,当再生水补水水体中 TP 浓度从 0.3 mg/L 降低到 0.1 mg/L 时,对普通小球藻和四尾 栅藻的抑制率分别为 56.6%和40.7%,但对水华微囊藻的抑制作用相对较弱。研究结果揭示了再生水景观补水水体中 下藻类的生长规律,为控制藻华爆发提供了一定的理论依据。

关键词:再生水;优势藻种;藻密度;藻类水华;爆发阈值条件 中图分类号:TV213.4 文献标识码:A 文章编号:1672-643X(2021)06-0102-07

Determination of the threshold conditions for the outbreak of dominant algal blooms in landscape water bodies supplemented with reclaimed water

YU Huiyang, XU Zhiqiang, LONG Yijing, SHI Ke, CAO Chenjie

(State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi' an University of Technology, Xi' an 710048, China)

Abstract: Landscape replenishment with reclaimed water is one of the most important ways of sewage recycling, but frequent occurrence of algal blooms is the main bottleneck limiting its utilization. Three preponderant algae species identified from the typical reclaimed water bodies of landscape replenishment were taken as the research objects, and their growth status under the combined effects of temperature, light intensity and concentration of N/P were studied through indoor static experiments. The results show that *Microcystis* is more likely to become the dominant algae species at T = 30 °C, light intensity = 9,000 lx in low N/P reclaimed water. After only three days of cultivation, the agal density became 91×10^3 cell/mL compared with 10×10^3 cell/mL before cultivation, approaching the threshold condition for blooming $(10 \times 10^4 \text{ cell/mL})$; Chlorella vulgaris and Scenedesmus quadricauda like to grow in the raw reclaimed water with T = 25 °C, light intensity divided into 5, 000 lx 7, 000 lx, and relatively high N/P. They reached the threshold of alga bloom within 5 days of cultivation. The reduction of the P concentration can restrain the growth of alga. When the TP decreased from 0.3 mg/L to 0.1 mg/L in the reclaimed water, the inhibitory rates of the two kinds of green alga were 56.6% and 40.7%, respectively; however, the reduction of phosphorus concentration had relatively weak inhibitory effect on Microcystis. The research results give a theoretical support for comprehending the expansion of alga and curbing the outbreak of algal blooms in the reclaimed water bodies of landscape replenishment.

基金项目:西安理工大学水利水电国家级实验教学示范中心开放课题(WRHE1811)

通讯作者:徐志嫱(1969-),女,陕西西安人,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为污水处理与资源化利用。

收稿日期:2021-02-05; 修回日期:2021-07-06

作者简介:于汇洋(1998-),男,河南南阳人,硕士研究生,主要研究方向为城市污水资源化利用技术。

Key words: reclaimed water; dominant algae species; algal density; algal bloom; outbreak threshold conditions

1 研究背景

将再生水作为城市河湖的补充水源,不仅可置换出大量的新鲜水资源,改善城市的生态环境,还可为工业、市政杂用等其他用途提供水资源储备。再生水已在许多国家和地区得到应用,例如,北京的奥林匹克湖、西安的护城河、美国的埃尔西诺(Elsinore)湖、韩国的西娃(Shihwa)湖等^[1-4]。但再生水中有机物含量、氮磷浓度、pH值、含盐量等水质指标均大于天然水^[5-6],加之城市水系一般流动性较差,所以,用再生水补入城市水系极易引发藻类水华等生态风险问题^[7-8]。

氮磷营养盐、光照和温度对藻类水华爆发的影 响显著^[9]。在淡水湖泊中,正常代谢的藻类最佳生 长营养盐浓度比(N/P)约为16:1,此时藻细胞的生 长主要受磷浓度的限制,当水温大于15℃时,容易 诱发蓝藻水华[10-11],而以再生水补水的城市景观水 体中蓝藻和绿藻为优势藻种(占比达60%以上),易 发生蓝绿藻水华^[12]。所以氮磷浓度,尤其是磷浓 度,是造成富营养化的决定性因素,通过限制磷输入 可控制富营养化湖泊中有害藻类的生长^[13]。温度 对水体富营养化的影响显著,温度的波动能够影响 藻细胞生长代谢速率[14],在城市湖泊中较高的营养 水平指数和叶绿素 a(Chl-a)浓度会出现在春夏 季[13]。在天然水体中,绿藻在低温时相较蓝藻更加 具有竞争力,更易成为优势群体,而温度较高时则相 反^[15-16]。再生水的补入可能会引起浮游植物的种 群组成发生改变[17],温度变化引发的藻种之间的竞 争优势是否还遵循上述藻类的竞争规律还需进一步 论证。光照是藻细胞光合作用必不可少的条件,光 照会给藻类的生长提供充足的能量,但光照强度过 于强烈反而会抑制其生长。例如,小球藻在5500 lx 照度下生长繁殖状况最佳,当照度超过9000 lx时, 会对其生长繁殖产生抑制作用^[18]。由于不同的研 究区域气温及光照强度均存在一定差异,造成再生 水补水的水体中优势藻种的组成也不尽相同,不同 优势藻种对光照强度的反应效果可能也存在一定的 差异。但目前有关再生水补水的水体中藻类在营养 盐浓度、温度和照度共同影响下生长趋势的研究成 果还不多见,对再生水补水的水体中水华爆发的条 件和规律还缺乏全面的认识。

本文以西安市护城河为例开展藻类生长影响研

究。护城河东、西两段(长度约6.2 km)分别用大峪 水库地表水和西安市清远中水有限公司生产的再生 水进行补水,监测结果显示^[2],再生水补水段的TN、 TP、PO₄³⁻平均浓度均高于地表水补水段,尤其是 PO₄³⁻浓度高出9倍以上。在春夏季,地表水补水段 的Chl-a浓度基本维持在50 mg/m³以下,再生水 补水段Chl-a浓度大部分时间段大于100 mg/m³, 更易爆发藻类水华^[19]。所以,要解决有害藻类水华 问题,需结合研究区域再生水补水水体的水质变化 规律,从对藻类影响最显著的氮磷浓度、光照和温度 3个因素入手,明确藻类爆发的阈值条件,从而为再 生水补水水体藻类水华的控制提供理论依据。

2 实验材料与研究方法

2.1 实验材料

(1)实验水样。本研究选取西安市护城河再生 水补水段原水和再生水厂出厂水作为实验用水,并 按 N/P(总氮浓度与总磷浓度之比)的平均值对水 质进行适当调控后作为实验水样。由西安市护城河 再生水补水段和再生水厂出水水质的监测结果(表 1、2)可知,再生水中的总氮主要以硝态氮的形式存 在(占比约为85%~95%),磷主要以正磷酸盐为主 (占比约为80%~90%),春夏季再生水补水段 N/P 平均值为17.5:1,再生水厂出厂水中 N/P 平均值 为30:1。

表1 西安市春夏季护城河再生水补水段原水水质参数

水质指标	数值	水质指标	数值
T∕℃	19 ~ 33	$COD_{Mn}/(mg \cdot L^{-1})$	7~12
рН	8~9	$\mathrm{Chl} - \mathrm{a}/(\mathrm{mg} \cdot \mathrm{L}^{-1})$	85 ~115
$TN/(mg \cdot L^{-1})$	3.2 ~4.0	$\mathrm{NH}_4^+-\mathrm{N/(mg\cdot L^{-1})}$	0.16~0.34
$TP/(mg \cdot L^{-1})$	0.1~0.3	$PO_4^{3-}/(mg \cdot L^{-1})$	$0.08 \sim 0.27$
$DO/(mg \cdot L^{-1})$	4 ~ 12	电导率/(µS・cm ⁻¹)	600 ~ 800

表 2 西安市护城补充再生水的出厂水水质参数

水质指标	数值	水质指标	数值
T/℃	15 ~ 27	$COD_{Mn}/(mg \cdot L^{-1})$	6~13
рН	8~9	$Chl - a/(mg \cdot L^{-1})$	$20 \sim 70$
$TN/(mg \cdot L^{-1})$	8.5~9.5	$\mathrm{NH_4}^+-\mathrm{N/(mg\cdot L^{-1})}$	0.7~1.6
$TP/(mg \cdot L^{-1})$	$0.2 \sim 0.4$	$PO_4^{3-}/(mg \cdot L^{-1})$	0.16~0.36
$DO/(mg \cdot L^{-1})$	6.5 ~ 10.5	电导率/(µS・cm ⁻¹)	700~950

(2)藻类生长水环境。本研究分3种氮磷营养 水环境工况进行藻类生长研究。

工况1:根据护城河再生水补水水源(再生水出 厂水)氮磷平均浓度进行调控,即氮、磷的调控值 为:TN = 9 mg/L,TP = 0.3 mg/L,N/P = 30:1;

工况2:根据护城河再生水补水段2019年春夏 季水体氮磷平均浓度进行调控,即氮、磷的调控值 为:TN = 3.5 mg/L,TP = 0.2 mg/L,N/P = 17.5:1;

工況3:根据护城河再生水补水段实际 TN 和 TP 浓度现状和未来再生水厂提标改造到准Ⅳ类水 质标准要求,同时考虑 TN 浓度进一步降低比较困 难^[20-21],再生水补水段 TN 浓度仍按工况2考虑, 再生水厂经提标后,TP 浓度将执行《地表水环境质 量标准》(GB 3838—2002)中的Ⅳ类标准,此过程在 实验室使用磷吸附剂实现,该工况氮、磷的调控值 为;TN = 3.5 mg/L,TP = 0.1 mg/L, N/P = 35 :1。

(3) 优势藻种的扩培。护城河再生水补水段春 夏季主要的优势藻种为水华微囊藻、普通小球藻和 四尾栅藻^[2]。从中国科学院淡水藻种库分别购置 了水华微囊藻(FACHB – 1028)、普通小球藻 (FACHB – 8)和四尾栅藻(FACHB – 1468),采用配 置好的 BG – 11 培养基在恒温培养箱中进行优势藻 种的扩培,培养条件为温度 $T = 20 ~ 25 \, ^\circ C$ 、光照强 度 = 1 000 ~ 2 000 lx、光暗比 = 12 h : 12 h,培养时间 为 20 ~ 30 d。

(4) 藻液的配制。将扩培好的 3 种优势藻液分 别在显微镜下计数, 根据计数得出的培养基中的藻 密度以及设计实验中的藻密度和水样体积计算实验 所需藻液量。将适量的藻液放入无菌的离心管内, 以 4 000 r/min 转速离心 15 min, 去掉上清液, 添加 NaHCO₃ 溶液(15 mg/L) 至离心管原始刻度, 循环上 述步骤 3 次, 即可洗掉藻液中的营养盐成分, 得到实 验所需藻液。

2.2 实验方法

(1)单因素实验。

①藻类生长最佳温度的确定:以工况 2 为实验 水样(模拟西安市护城河再生水补水段水质),对实 验水样进行杀菌后,分别接种水华微囊藻(藻密度 为 1.0×10^4 cell/mL,Chl – a 浓度为 2 mg/m³)、普通 小球藻(藻密度为 1.0×10^4 cell/mL,Chl – a 浓度为 5 mg/m³)、四尾栅藻(藻密度为 1.0×10^4 cell/mL, Chl – a 浓度为 10 mg/m³),在光照强度 = 5 000 lx、 光暗比 = 12 h : 12 h 条件下,观测不同温度(15、20、 25、30、35、40 ℃)的藻类生长情况,确定藻类生长的 最佳温度。测试指标为3种藻种的藻密度和 Chl - a 浓度。

②藻类生长最佳光照强度的确定:以工况 2 为 实验水样,以上述①中所确定的最佳生长温度为控 制条件,在光暗比 = 12 h : 12 h 的条件下,观测不同 光照强度(0、1 000、3 000、5 000、7 000、9 000 lx)下 3 种优势藻种的生长情况,以确定最佳光照条件。

③以上述①和②中所确定的最佳温度和光照强 度为控制条件,在光暗比 = 12 h : 12 h 的条件下,观 测 3 种工况下 3 种优势藻种的生长情况。

上述每组实验均设3个平行样,藻类培养时间为10 d。

(2)藻类爆发实验。

①水华微囊藻爆发条件实验:以单因素实验中 获得的水华微囊藻最佳温度和光照强度为控制条 件,在工况2(模拟护城河再生水补水段水质)的水 样中接种水华微囊藻(藻密度=1×10⁴ cell/mL),在 光暗比=12h:12h条件下,观测水华微囊藻藻密 度变化情况,获得其水华爆发的条件。

②普通小球藻爆发条件实验:以单因素实验中 获得的普通小球藻最佳温度和光照强度为控制条 件,在工况1(模拟再生水厂出水水质)的水样中接 种普通小球藻(藻密度=1.0×10⁴ cell/mL),在光暗 比=12 h:12 h条件下,观测普通小球藻藻密度变 化情况,获得其水华爆发的条件。

③四尾栅藻爆发条件实验:以单因素实验中获得 的四尾栅藻最佳温度和光照强度为控制条件,在工况 1(模拟再生水厂出水水质)的水样中接种四尾栅藻 (藻密度=1.0×10⁴ cell/mL),在光暗比=12 h:12 h 条件下,观测四尾栅藻藻密度变化情况,获得其水华 爆发的条件。

上述每组实验均设3个平行样,藻类培养时间为10 d。

2.3 分析与计算方法

藻密度采用浮游生物框计数法计算;Chl-a浓 度采用叶绿素荧光测定仪和丙酮-超声法(校核叶 绿素仪)测定;藻类抑制率计算公式如下:

 $IR = (1 - N/N_0) \times 100\%$ (1) 式中:IR 为藻类抑制率,%; N_0 为初始藻密度, cell/mL; N 为产生抑制后的藻密度,cell/mL。

3 结果与分析

3.1 温度对藻类生长的影响

采用工况2实验水样在光暗比=12h:12h、光

照强度 = 5000 lx 的条件下,水华微囊藻、普通小球 藻和四尾栅藻3种优势藻的藻密度和 Chl-a 浓度 随生长温度(*T* = 15~40 ℃)的变化情况如图1所 示。由图1可知,随着温度的逐步升高,3种藻种的 生长速率呈先增大后减小的趋势。当温度 T = 25℃时,普通小球藻和四尾栅藻的藻密度达到最大,分 别为74.3×10⁴和38.1×10⁴ cell/mL,此时水样中 两种藻类的 Chl-a 浓度也达到峰值, 分别为 368 和 376 mg/m³。而水华微囊藻的最佳生长温度为 30 ℃,此时其藻密度和 Chl-a 浓度分别为 105.2×10⁴ cell/mL 和 209 mg/m³。之后,随着温度的进一步升 高,3种藻种的生长速率开始下降,当T=40℃时, 水华微囊藻、普通小球藻和四尾栅藻的藻密度分别 降至 15.8×10⁴、0.7×10⁴ 和 0.7×10⁴ cell/mL, 说 明高温环境对3种优势藻的生长有抑制作用。在模 拟再生水补水的水体中,水华微囊藻的生长最为旺 盛,其次为普通小球藻和四尾栅藻。相比较而言,水 华微囊藻在较高温度(30℃左右)的再生水补水条 件下生长旺盛,竞争优势较强,而普通小球藻和四尾 栅藻等绿藻在中温(25℃左右)条件下具有一定的 竞争优势。

3.2 光照强度对藻类生长的影响

在工況 2 实验水样、光暗比 = 12 h : 12 h、水华 微囊藻生长温度 T = 30 ℃以及普通小球藻和四尾 栅藻生长温度 T = 25 ℃的条件下,3 种优势藻的藻 密度和 Chl – a 浓度随光照强度(0~9 000 lx)的变 化情况如图 2 所示。

由图 2 可知,光照强度为 0 时,藻类无法生长, 随着光照强度的增强,藻类开始生长繁殖,藻密度和 Chl-a浓度随之增大。当光照强度为 5 000 lx时, 普通小球藻的藻密度和 Chl-a浓度达到最大,分别 为 74.3×10⁴ cell/mL 和 368 mg/m³。之后,随着光 照强度的进一步增加,普通小球藻的生长受到抑制, 当光照强度达到 9 000 lx时,藻密度降为零,这也与 相关研究规律基本一致^[18]。四尾栅藻适宜的光照 条件为 7 000 lx,此时四尾栅藻的藻密度为 63.4× 10⁴ cell/mL,Chl-a浓度为 629 mg/m³。水华微囊 藻随着光照强度的增加而持续生长,当光照强度达 到 9 000 lx时,水华微囊藻的藻密度高达 134.0× 10⁴ mg/m³。可见,在春夏季的高温以及强照度条件 下,水华微囊藻在再生水补水的水体中更容易成为 优势藻,爆发水华的风险较高。



图 2 3 种优势藻的藻密度和 Chl-a 浓度随光照强度的变化情况(工况 2 实验水样)

3.3 氮磷浓度对藻类生长的影响

3 种优势藻分别在其最佳的生长温度和光照强 度下(水华微囊藻为: *T* = 30 ℃,光照强度 = 9 000 lx;普通小球藻为: T = 25 ℃, 光照强度 = 5 000 lx;
四尾栅藻为: T = 25 ℃, 光照强度 = 7 000 lx), 在 3
种工况(氮磷比 N/P 分别为 30:1、17.5:1、35:1)

的实验水样中培养 10 d,水华微囊藻、普通小球藻和 四尾栅藻的藻密度和 Chl - a 浓度变化情况如图 3 所示。由图 3 可知,普通小球藻和四尾栅藻在氮磷 浓度相对较高的工况 1(再生水出厂水)条件下更易 生长,其藻密度和 Chl - a 浓度分别可达 122 × 10⁴、 81 × 10⁴ cell/mL 和 593、794 mg/m³。而水华微囊藻 更易在氮磷比相对较低的工况 2(再生水补水)的水 环境中生长, 藻密度最大可增加至 134 × 10⁴



图 3 3 种优势藻在不同工况下的藻密度和 Chl - a 浓度变化情况(最佳生长温度和光照强度)

根据实验所得的 3 种优势藻的藻密度与 Chl - a 浓度平均值分别进行一元线性回归分析,水华微囊 藻、普通小球藻和四尾栅藻的藻密度与 Chl - a 浓度 的回归方程分别为 $y = 1.9730x + 0.4390(R^2 = 0.9978, n = 108, P < 0.05), y = 4.8270x + 0.6855$ $(R² = 0.9966, n = 108, P < 0.05) 和 <math>y = 9.9102x + 0.0067(R^2 = 0.9994, n = 108, P < 0.05), 3$ 个拟合 方程的拟合优度 R^2 值均接近 1,说明 3 种优势藻的 藻密度与 Chl - a 浓度之间均符合线性关系(n = 108, P < 0.05), 且显著性较高。

3.4 水华爆发状况分析

由 3.1 ~ 3.3 节的研究结果可知,3 种藻种的最 优生长条件分别为:水华微囊藻 $T = 30 \,^\circ$ 、光照强 度 = 9 000 lx, N/P = 17.5 : 1;普通小球藻 $T = 25 \,^\circ$ C, 光照强度 = 5 000 lx, N/P = 30 : 1;四尾栅藻为 T =25 $^\circ$ 、光照强度 = 7 000 lx, N/P = 30 : 1。按照水华 发生的统计标准,当水体中藻密度大于 1 × 10⁴ cell/mL时,水体会发生富营养化问题,当藻密度大 于10 × 10⁴ cell/mL 时,水体中会出现水华爆发现 象^[22]。3 种优势藻在各自最优生长条件下的藻密 度随生长时间的变化情况见图 4。由图 4 可知,水 华微囊藻生长速度最快,在培养到第 3 d 时,藻密度 就从初始值 1.0 × 10⁴ cell/mL 增大至 9.1 × 10⁴ cell/mL,已接近水华爆发的条件(藻密度 > 10 × 10⁴ cell/mL),在继续培养到第 10 d 时,藻密度高达 138 × 10⁴ cell/mL,水体已发生严重水华。普通小球藻 和四尾栅藻在培养到第5d时藻密度分别为20.0×10⁴、9.2×10⁴ cell/mL,也达到或接近水华爆发阈值,到第10d时同样也发生了较严重的水华。总体来看,水华微囊藻和普通小球藻发生水华爆发的程度更严重。

cell/mL,增长率达133%。通过对再生水出厂水进

行水质提升后(主要措施为降低 TP 浓度,即工况

3),3种优势藻的生长趋势均得到减缓,因总磷浓度

降低(由TP=0.3 mg/L 降至 TP=0.1 mg/L)使得水

华微囊藻、普通小球藻、四尾栅藻的藻密度分别由工

况1的104×10⁴、122×10⁴和81×10⁴ cell/mL减小

到85×10⁴、53×10⁴和48×10⁴ cell/mL,其抑制率分

别为18.3%、56.6%和40.7%。



4 讨论

通过对西安市护城河再生水补水段识别出的3 种优势藻种开展的温度、光照强度和氮磷营养盐浓 度单因素影响实验的结果表明,3种因素对藻类生 长的影响显著,3种藻种最佳生长条件具有一定的 差异性。在较高的温度和光照强度且 N/P 值相对 较低的水体中,水华微囊藻等蓝藻的生长状况较佳, 而在温度适宜、照度相对较弱且 N/P 值相对较高的 水体中,普通小球藻和四尾栅藻等绿藻将会成为优 势种群。这与天然水体中温度和光照强度变化引起 的蓝藻和绿藻优势种群发生的演替规律相一 致^[15-16]。但在氮磷浓度较高、N/P值较大的再生水 体中,普通小球藻和四尾栅藻等绿藻更容易成为优 势藻种^[24]。降低氮磷浓度,可在一定程度上抑制藻 类的生长^[23],尤其当TP浓度≤0.1 mg/m³时,对普 通小球藻和四尾栅藻的抑制作用较显著,但对水华 微囊藻的抑制作用一般。说明通过降低再生水出厂 水的总磷浓度,可在一定程度上缓解再生水补入景 观水体后绿藻水华爆发现象,但还需防范再生水补 水引起的蓝藻水华。可见,再生水水质的提升和改 善可能会引起再生水水体由绿藻优势种群转变为蓝 藻优势种群。

对 3 种优势藻种的藻密度与 Chl - a 浓度进行的线性回归分析表明,藻密度与 Chl - a 浓度之间呈显著正相关(*P* <0.05)。所以,在进行藻类生长状况的观测和评估时,可以选用两者之一作为依据,这也与其他相关研究结果一致^[25]。

3 种优势藻种在各自的最佳生长条件下生长 3~5 d 内便可达到水华爆发阈值,且水华微囊藻和 普通小球藻的生长速率更快。表明在水华爆发的高 风险时段,监测优势藻生长环境变化趋势对于水华 控制至关重要。另外,随着藻类生长环境的变化,尤 其是氮磷浓度的变化,再生水水体中优势藻类种群 结构与竞争关系可能也会发生改变,还需在这方面 进行研究和探索,从而为再生水水体水华爆发的阶 段演替以及水华控制提供理论支撑。

5 结 论

(1)明确了 3 种优势藻种的最佳生长条件。水 华微囊藻在 $T = 30 \, \mathbb{C} \,$ 、光照强度 = 9 000 lx 且 N/P 较低的再生水补水的水体中较易生长和繁殖,培养 3 d 便可达到水华爆发的阈值条件;普通小球藻和 四尾栅藻在 $T = 25 \, \mathbb{C} \,$ 、光照强度分别为 5 000 和 7 000 lx 且 N/P 相对较高的再生水出厂水中更易生 长,培养 5 d 即可达到或接近水华爆发的阈值。

(2)3种优势藻种的藻密度与其 Chl-a浓度之间呈显著正相关性(P < 0.05)。可选用两者之一作为藻类生长状况观测和评估的依据。

(3)降低再生水水体中磷浓度可在一定程度上 抑制藻类的生长,尤其当 TP 浓度≤ 0.1 mg/m³时, 对普通小球藻和四尾栅藻的抑制作用显著,藻密度 的抑制率分别可达 56.6% 和 40.7%,而对水华微囊 藻的抑制率仅为 18.3%。

参考文献:

- [1] LI Dongqing, HUANG Di, GUO Xiaoyu, et al. Multivariate statistical analysis of temporal-spatial variations in water quality of a constructed wetland purification system in a typical park in Beijing, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment[J]. 2015, 187(1): 4219.
- [2] LIU Wei, XU Zhiqiang, LONG Yijing, et al. Replenishment of urban landscape ponds with reclaimed water: Spatiotemporal variations of water quality and mechanism of algal inhibition with alum sludge[J]. Science of the Total Environment, 2021, 790: 148052.
- [3] MARKS J S. Taking the public seriously: The case of potable and non potable reuse [J]. Desalination, 2006, 187(1-3): 137-147.
- [4] OH S, KIM M K, YI S M, et al. Distributions of total mercury and methylmercury in surface sediments and fishes in Lake Shihwa, Korea[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(5): 1059 - 1068.
- [5] RIBOT M, BERNAL S, NIKOLAKOPOULOU M, et al. Enhancement of carbon and nitrogen removal by helophytes along subsurface water flowpaths receiving treated waste water [J]. Science of the Total Environment. 2017, 599 – 600: 1667 – 1676.
- [6] YANG Lei, HE Jiangtao, LIU Yumei, et al. Characteristics of change in water quality along reclaimed water intake area of the Chaobai River in Beijing, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 50(12): 93 – 102.
- [7] XU Lingjing, YANG Dezhou, GREENWOOD J, et al. Riverine and oceanic nutrients govern different algal bloom domain near the Changjiang Estuary in summer [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2020, 125 (10): e2020JG005727.
- [8] WANG Mingzhi, LI Qian, FAN Gaina, et al. Effect of nitrogen nutrients on chlorophylla and algal density in landscape water supplied with reclaimed water[J]. Water Supply and Drainage, 2010, 36(1): 117-121.
- [9] LI Zhe, GUO Jinsong, FANG Fang, et al. Potential impact of TN/TP ratio on the cycling of nitrogen in Xiaojiang backwater area, Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(4): 509-517.
- [10] KIM T J. Prevention of harmful algal blooms by control of growth parameters [J]. Advances in Bioscience and Biotechnology, 2018, 9(11): 613-648.
- [11] LI Ruixiang, ZHU Mingyuan, CHEN Shang, et al. Responses of phytoplankton on phosphate enrichment in mesocosms
 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(4): 603-607.
- [12] ZHAO Haijiang, WANG Yi, YANG Liangliang, et al. Relationship between phytoplankton and environmental

factors in landscape water supplemented with reclaimed water[J]. Ecological Indicators, 2015, 58: 113 - 121.

- [13] XIONG Jiaqing, WANG Xiaochang, ZHANG Qingqing, et al. Characteristics of a landscape water with high salinity in a coastal city of China and measures for eutrophication control[J]. Ecological Indicators, 2016, 61(2): 268 – 273.
- [14] 覃宝利,杨州,张民.温度波动对浮游藻类生长及多糖 组成的影响[J].湖泊科学,2014,26(3):432-440.
- [15] DOMINIK W, FRANZISKA B, PETER B, et al. Growth of *Cyanobacterium aponinum* influenced by increasing salt concentrations and temperature [J]. Biotechnology, 2015, 5(3): 253 - 260.
- [16] 晁建颖,颜润润,张毅敏.不同温度下铜绿微囊藻和斜 生栅藻的最佳生长率及竞争作用[J].生态与农村环境 学报,2011,27(2):53-57.
- [17] KRAUS TEC, CARPENTER KD, BERGAMASCHI BA, et al. A river-scale Lagrangian experiment examining controls on phytoplankton dynamics in the presence and absence of treated wastewater effluent high in ammonium[J]. Limnology and Oceanography, 2017, 62(3): 1234 – 1253.
- [18] 徐 慧,纪道斌,崔玉洁,等.不同光照强度对小球藻生长的 影响[J]. 微生物学通报,2016,43(5):1027-1034.

- [19] 杨柳燕,杨欣妍,任丽曼,等.太湖蓝藻水华暴发机制与 控制对策[J].湖泊科学,2019,31(1):18-27.
- [20] 孔 欣,张树林,戴 伟,等. 不同磷浓度下氮磷比对小球 藻生长的影响[J]. 农业与技术,2019,40(3):7-10.
- [21]曹煜成,李卓佳,胡晓娟,等.磷浓度与氮磷比对蛋白核 小球藻氮磷吸收效应的影响[J].生态科学,2017,36 (5):34-40.
- [22] 李 颖,施 择,张榆霞,等.关于用藻密度对蓝藻水华程 度进行分级评价的方法和运用[J].环境与可持续发 展,2014,39(2):67-68.
- [23] MA Jianmin, JIN Ping, GUO Meng, et al. Influences of phosphorus concentration on interactions among *Microcystis aeruginosa*, *Daphnia magna* and *Ceratophyllum demersum* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1520-1526.
- [24] LV Xuemin, ZHANG Jiao, LIANG Peng, et al. Phytoplankton in an urban river replenished by reclaimed water: Features, influential factors and simulation[J]. Ecological Indicators, 2020, 112: 106090.
- [25] 杜胜蓝,黄岁樑,臧常娟,等.浮游植物现存量表征指标 间相关性研究Ⅱ:叶绿素 a 与藻密度[J].水资源与水 工程学报,2011,22(2):44-49.

(上接第101页)

- [21] ZHOU Sha, YU Bofu, HUANG Yuefei, et al. The complementary relationship and generation of the Budyko functions [J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42 (6): 1781-1790.
- [22] ZHOU Sha, YU Bofu, ZHANG Lu, et al. A new method to partition climate and catchment effect on the mean annual runoff based on the Budyko complementary relationship [J]. Water Resources Research, 2016, 52 (9): 7163 - 7177.
- [23] 赵娜娜,王贺年,于一雷,等. 基于 Budyko 假设的若尔 盖流域径流变化归因分析[J].南水北调与水利科技, 2018,16(6):21-26.
- [24] 管晓祥,张建云,鞠琴,等.多种方法在水文关键要素 一致性检验中的比较[J].华北水利水电大学学报(自 然科学版),2018,39(2):51-56.
- [25]代晓颖,许有鹏,林芷欣,等.长江下游秦淮河流域径流 变化及影响因素分析[J].水土保持研究,2019,26 (4):68-73.

- [26] 李 秀,郎 琪,雷 坤,等.1958-2018 年永定河流域蒸发 皿蒸发量的变化特征及其影响因子分析[J]. 气候与环 境研究,2021,26(3):323-332.
- [27] 鲍振鑫,严小林,王国庆,等. 气象因子在海河流域蒸发 悖论中的作用机理[J]. 水资源与水工程学报,2014,25
 (3):1-7.
- [28] 张连伟,张琳.北京永定河流域生态环境的演变和治理[J].北京联合大学学报(人文社会科学版),2017, 15(1):118-124.
- [29] 张建中,刘江侠,任涵路.流域下垫面变化对永定河官 厅水库径流影响分析[J].海河水利,2016(6):7-10.
- [30] 刘子豪,陆建忠,陈晓玲,等. 基于 Budyko 假设的鄱阳 湖抚河流域径流变化归因分析[J].河南科学,2019,37 (8):1303-1310.
- [31]侯 蕾,彭文启,刘培斌,等. 永定河上游流域土地利用 变化及生态环境效应研究[J].中国水利水电科学研究 院学报,2017,15(6):430-438.