

蓝藻降解过程中营养盐的释放特征分析

李国莲, 袁志伟, 朱曙光, 谢发之

(安徽建筑大学 环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 以蓝藻在不同水环境条件(光照、氧气、湖泊水、超纯水)中进行降解实验,研究了降解液中 pH、DO、叶绿素 a、氮、磷含量变化,并进行了理化指标的相关性分析。实验结果表明:蓝藻在光照有氧 A 组实验条件下降解,水体叶绿素 a 含量在实验第 16 d 达到最大值 1 020.3 $\mu\text{g/L}$,而水体总溶解态磷(TDP)和总溶解态氮(TDN)在实验第 30 d 分别达到最大值 2.79 mg/L 和 14.78 mg/L;密封黑暗的 C 组实验条件下降解,水体叶绿素 a 含量在实验第 7 d 降至 127.9 $\mu\text{g/L}$,降解率达 76.96%;降解液中 TDP 在实验第 20 d 达到最大值 3.56 mg/L;TDN 在实验 13 d 达到最大值 21.25 mg/L。各实验组测试指标的相关性分析表明:蓝藻降解液中 TDP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TDN 及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量与 pH 呈显著相关性($p<0.05$),TDP 与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 均呈显著正相关性($p<0.01$), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 TDN 也呈现显著正相关关系($p<0.01$)。因此,蓝藻降解过程会产生大量 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 形态无机营养盐,而环境条件对氮磷营养盐释放规律具有显著影响。

关键词: 蓝藻;降解;特征分析;营养盐

中图分类号:X524

文献标识码:A

文章编号:2095-8382(2022)02-052-06

Characterization of Nutrient Release During the Degradation of Cyanobacteria

LI Guolian, YUAN Zhiwei, ZHU Shuguang, XIE Fazhi

(School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: Degradation experiments were conducted with cyanobacteria in different aqueous environmental conditions (light, oxygen, lake water and ultrapure water), and the changes of pH, DO, chlorophyll a, nitrogen and phosphorus contents in the degradation solution were studied, and correlation analysis of physicochemical indexes was performed. The experimental results showed that as the cyanobacteria degraded under the experimental conditions of light and oxygen (group A), the chlorophyll a content of the water column reached the maximum value of 1 020.3 $\mu\text{g/L}$ on the 16th day of the experiment, while the total dissolved phosphorus (TDP) and total dissolved nitrogen (TDN) of the water column reached the maximum value of 2.79 mg/L and 14.78 mg/L respectively on the 30th day of the experiment; as the cyanobacteria degraded under sealed dark experimental conditions (group C), the chlorophyll a content of the water column decreased to 127.9 $\mu\text{g/L}$ on the 7th day of the experiment, with the degradation rate of 76.96%. TDP in the degradation solution reached the maximum value of 3.56 mg/L on the 20th day of the experiment, and TDN reached a maximum value of 21.25 mg/L on the 13th day of the experiment. The correlation analysis of the indexes in each experimental group proved that TDP, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, TDN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ contents in the cyanobacterial degradation solution showed a significant correlation with pH ($p<0.05$); both TDP and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ as well as $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TDN showed significant positive correlation ($p<0.01$). It is concluded that the process of cyanobacterial degradation produces large amounts of inorganic nutrients in the form of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and $\text{NH}_4^+\text{-N}$, and environmental conditions have a significant effect on the release pattern of nitrogen and phosphorus nutrients.

Keywords: cyanobacteria; degradation; characterization; nutrient

收稿日期: 2021-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(21777001); 安徽省教育厅重点项目(KJ2018A0507); 安徽省科技攻关项目(202004i07020006)

作者简介: 李国莲(1979-), 女, 副教授, 博士, 研究方向: 环境化学与污染控制研究;

袁志伟(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 环境化学与污染控制研究。

近年来,湖泊外源营养盐输入得到一定的控制,但湖泊水体富营养化仍未能有效改善^[1]。有研究表明,正磷酸盐可被藻类和细菌直接利用,引起水体富营养化^[2],破坏水生生态系统平衡。蓝藻的累积及其磷、氮等营养物质的释放是水质恶化的主要原因^[3],在控制和减少外源磷输入后,内源磷循环被认为是引起湖泊富营养化的关键原因^[4],因此内源磷的地球化学循环已成为当前湖泊富营养化研究中的重要领域。蓝藻中含有大量有机磷和聚磷酸盐,其腐解过程中产生的溶解态有机磷(DOP)可以直接被浮游植物利用^[5];产生的颗粒态磷(PP)是湖水中总磷的一部分,可沉降到湖底并释放溶解态磷进入上覆水^[6],PP也是维持浮游植物生长的磷源^[7]。蓝藻聚集过程中磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)为溶解性磷的主要形态,且磷和藻源有机物均在 6.5 d 或 9.5 d 内快速释放,而后降低并进入内源循环^[8]。目前对蓝藻降解过程中营养盐释放的系统研究却鲜见报道,本研究系统分析不同水环境条件下蓝藻降解液中总溶解态磷(TDP)、颗粒态磷(PP)、正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、总溶解态氮(TDN)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝酸盐氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)以及 pH 等理化参数的变化特征,对探索湖泊内源氮磷营养盐的迁移转化规律和富营养化湖泊的综合防治具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 实验设计

实验方案采用 4 个 6 L 的玻璃容器(直径 150 mm,下部设置取样口)进行平行实验,实验前用超纯水润洗玻璃容器数遍,自然晾干备用。称取 4 份 50 g 离心后新鲜藻体(经镜检 99% 以上为微囊藻)加入玻璃容器内,分别加入各组实验用水,并标记最初液面位置,实验过程无外源营养盐加入。实验方案见表 1,其中 A、B 组将玻璃容器放置于通风处并进行光照,模拟蓝藻自然状态下的有氧降解;C、D 组用铝箔密封玻璃容器,进行遮光处理并放置在黑暗环境中,模拟蓝藻的缺氧降解。实验处于常温环境(25 ℃左右),每天中午 12 时整从底部取样口采集水样。实验采用的湖水水质背景值如下:温度 26.7 ℃,pH 7.67,Chl-a 112.39 μg/L,DO 5.72 mg/L,TN 5.94 mg/L,TP 0.58 mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$

4.31 mg/L, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 0.78 mg/L, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 0.10 mg/L。

表 1 蓝藻降解实验方案

实验分组	实验用水	封闭处理	避光处理
A 组	湖水	否	否
B 组	超纯水	否	否
C 组	湖水	是	是
D 组	超纯水	是	是

1.2 样品分析测试

将水样经 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤后进行各项指标测试。DO 采用便携式 DO 水质分析仪测定;总氮(TN)、总磷(TP)分别使用碱性-过硫酸钾消解紫外分光光度法、过硫酸钾消解-钼酸盐分光光度法测定;溶解性总氮(TDN)、溶解性总磷(TDP)参照《水和废水监测分析方法》中 TN、TP 测定方法;硝酸盐氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、正磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)采用离子色谱法测定;氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)采用纳氏试剂光度法测定;叶绿素 a(Chl-a)用丙酮法提取测定^[9-10]。

2 结果与讨论

2.1 蓝藻降解液中 pH、DO 及叶绿素 a 分析

由图 1 可知,A、B 组实验初期叶绿素 a 浓度较低,随着降解时间增加,含量值上升到最大值后呈现下降趋势。而水环境中 pH 值呈现小范围内波动,最终有小幅上升;DO 在降解过程中呈先增加后降低趋势。因此,pH、DO 及叶绿素 a 含量变化表明,蓝藻在实验前期进行光合作用并保持良好的生长态势。A 组实验在第 16 d 叶绿素 a 含量达最大值 1 020.3 μg/L,通过观察蓝藻出现轻度黄绿色,部分藻体下沉到底部,水体逐渐浑浊且悬浮物增多,之后含量持续下降。B 组实验中蓝藻可能利用自身储存的营养物质来维系生长,在第 16 d 叶绿素含量达最大值 790.8 μg/L 后呈下降趋势。实验进行第 30 d 左右,A 组 DO 浓度由初始值 7.67 mg/L 降至 4.72 mg/L,同时容器内出现大量黄褐色悬浮物,容器壁上残留部分蓝藻。实验结束时,蓝藻残体大部分沉降,DO 浓度开始回升至 6.61 mg/L。由此可知,在光照条件下,蓝藻初期会进行光合作用,产生 O_2 和 OH^- ,导致水体叶绿素 a、DO 和 pH 值上升;后期随着蓝藻降解,叶绿素 a、DO 快速下降。

C、D 组处于完全封闭的黑暗环境,蓝藻主要利用水中 DO 进行呼吸作用,因此 C、D 组中 DO 含量在第 20 d 分别降到最低值 0.89 mg/L、0.97 mg/L;水样中叶绿素 a 含量也快速下降,在第 7 d 叶绿素 a 分别降至 127.9 $\mu\text{g/L}$ 、150.4 $\mu\text{g/L}$ 。有研究表明^[11],缺氧环境下,藻类在微生物作用下降解产生有机酸和 CO_2 。由于微生物利用有机酸同时产生铵盐,溶液 pH 上升,因此造成 C、D 组水样 pH 值变化。C 组叶绿素 a 降低速率比 D 组快,是因为湖水中的微生物含量高,蓝藻降解快。由此可知,蓝藻在黑暗封闭环境中快速降解,并伴随藻类呼吸和微生物作用,水体叶绿素 a、DO 和 pH 显著下降。

2.2 蓝藻降解液中磷形态与含量分析

实验过程中磷营养盐含量变化如图 2 所示。A 组 TDP 浓度初始值为 0.81 mg/L, B 组 TDP 浓度初始值为 0.21 mg/L,实验初期两组 TDP 含量略有下降,原因是蓝藻生长吸收水中磷所致。实验第 15–30 d, A、B 组 TDP 浓度显著提高,原因是在微生物作用下蓝藻降解,释放出溶解态磷进入水体^[12]。C、D 组 TDP 浓度均呈先上升后下降趋势,实验前 20 d, C、D 组 TDP 增长速率分别高达 0.21 mg/(L·d)、0.117 mg/(L·d),TDP 浓度在第 20 d 分别达最大值 3.60 mg/L 和 3.12 mg/L,原因是随着蓝藻残体快

速降解,蓝藻体内含磷物质被释放。随后 C、D 组 TDP 含量出现下降,观察发现蓝藻细胞残体沉积到容器底部或吸附于容器壁,C、D 组 TDP 含量下降原因是蓝藻残体中储存磷营养盐未完全释放,有部分磷随着蓝藻残体沉积到容器底部和容器壁。

四组实验中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度在前 15 d 均增长,幅度有所不同。有研究表明^[13],微囊藻残体先进行降解作用,成为 0.45 μm 的胶体颗粒物。胶体颗粒物经过分解,成为溶解态磷,分解过程中会产生大量 TDP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$,合理解释了本实验 A、B 组 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度变化。其中, A 组中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度表现出波动上升,平均值约为 0.40 mg/L; B 组与 A 组前 20 d 浓度变化情况相似,第 20 d 后 B 组 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度高于 A 组。C 组中前 7 d $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度平均增长速率最大,第 13 d 浓度达到最大值 1.51 mg/L; D 组前 6 d 浓度平均增长速率最大,第 20 d 浓度达到最大值 1.39 mg/L。两组存在差异的原因是加入水源不同,导致微生物分解作用强弱不同。

A、B 组 PP 浓度变化趋势差别较小,均呈现出上升后下降。因为蓝藻降解产生的颗粒物增加,PP 浓度开始上升。C、D 组 PP 浓度变化趋势均为持续下降,降解率为 90%,原因是 PP 在厌氧环境下部分转化为可溶态磷或快速降解沉降所致。

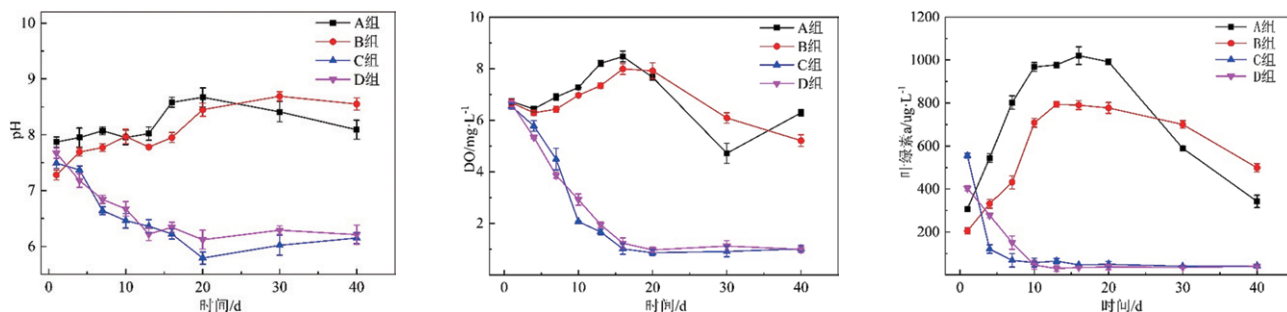


图 1 蓝藻降解过程水体中 pH、DO、叶绿素 a 随时间变化

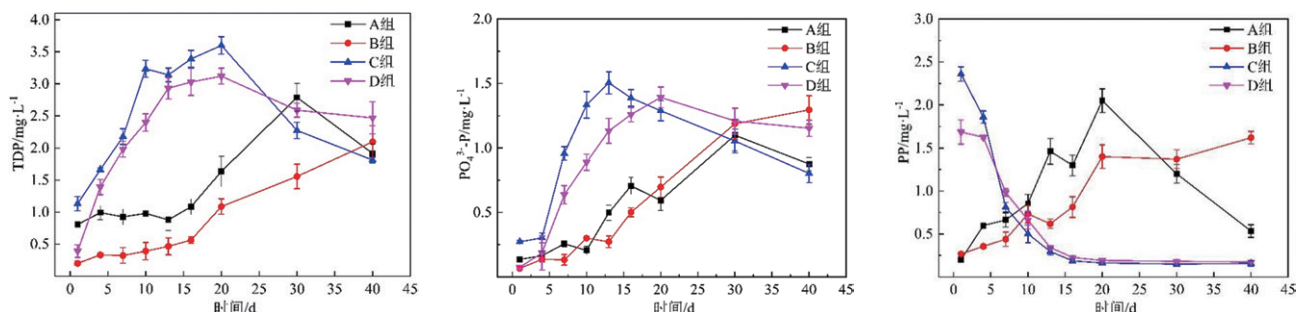


图 2 蓝藻降解过程水体中 TDP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、PP 浓度随时间变化

2.3 蓝藻降解液中氮形态与含量分析

蓝藻降解水中总溶解态氮(TDN)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)及硝酸盐氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)的浓度变化如图3所示。实验中A组TDN浓度前10 d持续下降,第10 d TDN浓度达到最低值5.1 mg/L后,开始上升;B组TDN浓度在前10 d表现为先上升后降低,在第10 d浓度值下降至4.81 mg/L,随后再次上升,在第20 d又降低,此时TDN浓度值为7.06 mg/L。在第20 d后TDN浓度一直处于上升状态,直到实验结束。C、D组TDN浓度变化总体趋势均为先上升后下降,其中C、D组均在第20 d浓度达到峰值,分别为21.4 mg/L、20.68 mg/L,之后TDN浓度均开始降低。实验过程中出现恶臭味,原因是C、D组为避光封闭会形成缺氧环境,导致水体中有机氮发生氨化作用产生 $\text{NH}_3^{[14]}$ 。A组 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化趋势为先下降后上升,其中实验第1~10 d期间 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为持续下降,原因是蓝藻生长吸收水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$;B组 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化趋势为持续上升。李柯等^[15]报道蓝藻分解过程中氮的两种主要释放途径分别是被细菌或浮游动物矿化形成 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 以及自溶产生溶解性有机(DON);Dai等^[16]研究也表明藻类死亡后,有机氮在微生物作用下会向无机氮转化。实验初期C、D组 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 快速增长,第20 d $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度开始降低。此过程原因可能是蓝藻死亡后沉降,在微生物作用下有机物分解出 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 释放到水体中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度增加;随后由于硝化作用 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 开始转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 导致浓度降低。蒋小欣等^[17]在文献中提到好氧状态下硝化细菌会进行硝化作用导致 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度降低,印证了本实验过程中氮营养盐变化。

A组 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度在前7 d呈下降趋势,在第7 d达到最低值0.84 mg/L。随后浓度开始上升,

在第20 d达到最大值1.26 mg/L后继续下降;B组 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度在第7 d处于下降,浓度为0.6 mg/L,随后 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度直到实验结束都处于上升状态;C、D组 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度呈现先增加后减少趋势,其中C组在第7 d达到最大值1.38 mg/L,D组在第10 d达到最大值1.13 mg/L。C、D组实验过程中伴随 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度不断上升,浓度呈下降态势。有文献证实^[18],随着氧气消耗,部分 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 会转化为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。由此可知,在蓝藻降解过程中,会产生 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,伴随水环境变化和微生物作用,水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 之间可能会相互转化。

2.4 蓝藻降解液中营养盐的相关性分析

在不同实验条件下,蓝藻在生长期与死亡降解期均释放出N、P等营养元素。为探究营养元素迁移转化规律,本研究分析了此过程中各水质参数的相关性,具体见于表2。A、B组的DO以及C、D组的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与其他指标均无明显相关性,而pH与TDP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、PP、TDN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈显著的相关性,表明蓝藻不同的降解过程均对水体的pH影响较大,其中避光降解条件下降解液中DO快速消耗殆尽,pH也显著降低。C、D组降解液中TDP、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TDN及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与PP呈显著负相关性,这说明蓝藻降解产生的颗粒态磷最后转化为溶解态磷。A、B、C、D各组TDP与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 均呈显著正相关性($p<0.01$),说明 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 是可溶性磷的主要组成成分。A、B、C、D四组实验中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与TDN也呈现显著正相关关系($p<0.01$),但 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与其他指标均无明显相关性,这说明了蓝藻降解过程水体中的氮元素可能主要以无机氮的形式存在,且主要存在形态为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。降解液中营养盐的含量分析也表明,蓝藻衰亡降解过程中释放了大量 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 无机盐。

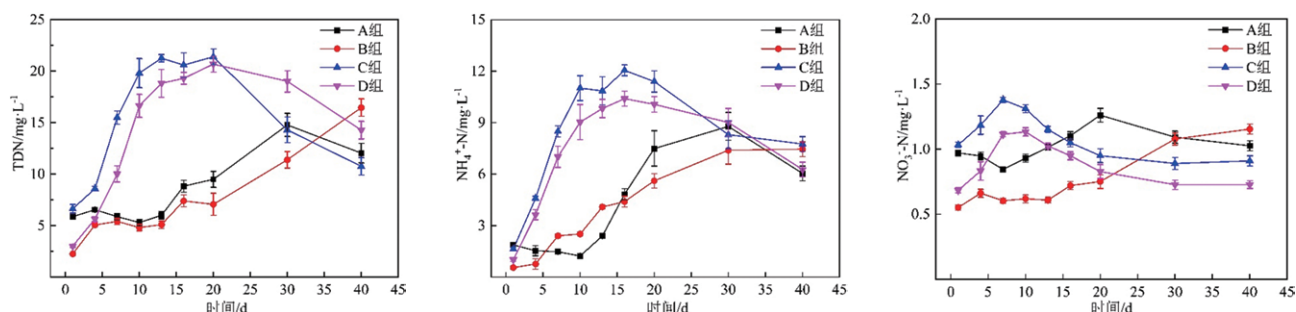


图3 蓝藻降解过程水体中TDN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 随时间变化

表 2 蓝藻降解过程中水体营养盐的相关性分析

	参数	pH	DO	TDP	PO ₄ ³⁻ -P	PP	TDN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N
A 组	pH	1							
	DO	0.159	1						
	TDP	0.523	-0.645	1					
	PO ₄ ³⁻ -P	0.637	-0.333	0.891**	1				
	PP	0.785*	0.391	0.289	0.419	1			
	TDN	0.568	-0.588	0.979**	0.935**	0.253	1		
	NH ₄ ⁺ -N	0.786*	-0.374	-0.913**	0.851**	0.582	0.895*	1	
	NO ₃ ⁻ -N	0.838**	0.143	0.579	0.592	0.777*	0.557	0.813*	1
B 组	pH	1							
	DO	-0.215	1						
	TDP	0.829**	-0.547	1					
	PO ₄ ³⁻ -P	0.724*	-0.398	0.950**	1				
	PP	0.929**	-0.259	0.936**	0.958**	1			
	TDN	0.732*	-0.549	0.970**	0.940**	0.797*	1		
	NH ₄ ⁺ -N	0.845**	-0.246	0.899**	0.968**	0.618	0.873**	1	
	NO ₃ ⁻ -N	0.861**	-0.569	0.954**	0.753*	0.598	0.839**	0.852**	1
C 组	pH	1							
	DO	0.903**	1						
	TDP	-0.717*	-0.722*	1					
	PO ₄ ³⁻ -P	-0.796*	-0.810**	0.824**	1				
	PP	0.964**	0.963**	-0.730*	-0.853**	1			
	TDN	-0.717*	-0.704*	0.978**	0.966**	-0.751*	1		
	NH ₄ ⁺ -N	-0.804*	-0.810**	0.959**	0.923**	-0.845**	0.973**	1	
	NO ₃ ⁻ -N	0.394	0.436	0.072	0.059	0.252	0.154	0.057	1
D 组	pH	1							
	DO	0.983**	1						
	TDP	-0.951**	-0.941**	1					
	PO ₄ ³⁻ -P	-0.972*	-0.965**	0.954**	1				
	PP	0.958**	0.984**	-0.925**	-0.989**	1			
	TDN	-0.932*	-0.882**	0.961**	0.968**	-0.942**	1		
	NH ₄ ⁺ -N	-0.830**	-0.807**	0.918**	0.866**	-0.822**	0.943**	1	
	NO ₃ ⁻ -N	-0.146	-0.066	0.331	0.121	-0.090	0.246	0.461	1

注:*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关,**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

3 结论

(1)通过实验探究光照、氧气对蓝藻的降解影响,结果表明,光照有氧条件下,蓝藻先会继续生长,后因营养物质减少而降解;密封遮光条件下,蓝藻快速降解。而微生物利用和颗粒物吸附可降低湖水降解液中 TDP、PO₄³⁻-P 和 TDN 的含量。

(2)各组实验中的营养盐含量普遍增加,无机营养盐形态及其含量变化趋势表明,蓝藻在光照好氧环境下首先主要产生 PP,实验第 20 d 后 PP 沉降进入内循环或进一步分解释放 PO₄³⁻-P,致使上覆水中 PO₄³⁻-P 含量上升;避光无氧降解环境下,蓝藻会迅速腐解并产生大量 PP,致使水体中 PO₄³⁻-P 含量快速上升。

(3)相关性分析结果表明 NO₃⁻-N 与其他指标无明显相关性;TDP、PO₄³⁻-P、TDN 及 NH₄⁺-N 与 pH 呈显著相关性($p<0.05$);各组降解液中 TDP 与 PO₄³⁻-P 均呈显著正相关性($p<0.01$);NH₄⁺-N 与 TDN 均呈显著正相关性($p<0.01$)。相关性分析表明,PO₄³⁻-P 和 NH₄⁺-N 营养盐是蓝藻衰亡降解过程中释放的无机盐主要组分。

参考文献:

[1] 阳振,史小丽,陈开宁,等.巢湖水华蓝藻原位生长率的时空变化及其环境影响因子[J].湖泊科学,2021,33(4):1043-1050.

[2] 张迪,马媛媛,邹文生.富营养化水体中磷酸盐荧光分析材料进展[J].安徽建筑大学学报,2020,28(4):14-20.

[3] Xu H,Paerl H W,Qin B Q,et al.Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu,China[J].Limnology and Oceanography,2010,55(1):420-432.

[4] 黎睿,王圣瑞,肖尚斌,等.长江中下游与云南高原湖泊沉积物磷形态及内源磷负荷[J].中国环境科学,2015,35(6):1831-1839.

[5] Giles C D, Lee L G, Cade-Menun B J, et al.Characterization of organic phosphorus form and bioavailability in lake sediments using ³¹P nuclear magnetic resonance and enzymatic hydrolysis[J].Journal of Environmental Quality, 2015,44(3):882-894.

[6] Bai X L, Sun J H, Zhou Y K, et al.Variations of different dissolved and particulate phosphorus classes during an algae bloom in a eutrophic lake by ³¹P NMR

- spectroscopy[J].Chemosphere,2017,169:577-585.
- [7] Read E K,Ivancic M,Hanson P,et al.Phosphorus speciation in a eutrophic lake by ^{31}P NMR spectroscopy[J].Water Research,2014,62:229-240.
- [8] 陈丙法,冯慕华,尚丽霞,等.聚积蓝藻不同打捞强度下藻源污染物释放特征研究[J].环境科学学报,2016,36(11):4077-4086.
- [9] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法(第4版)[M].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [10] 冯顺卿,陈钰欣,姚骏骅.离子色谱法同时测定研磨液中氨三乙酸、柠檬酸和磷酸盐[J].分析试验室,2016,35(11):1334-1337.
- [11] Otsuki A,Hanya T.Production of dissolved organic matter from dead green algal cells.i.aerobic microbial decomposition[J].Limnology and Oceanography,1972,17(2):248-257.
- [12] 孙远军.淀山湖蓝藻碎屑的好氧降解和营养盐释放规律研究[J].中国环境科学,2013,33(11):2047-2052.
- [13] 陈伟民,蔡后建.微生物对太湖微囊藻的好氧降解研究[J].湖泊科学,1996,8(3):248-252.
- [14] 尚丽霞,柯凡,李文朝,等.高密度蓝藻厌氧分解过程与污染物释放实验研究[J].湖泊科学,2013,25(1):47-54.
- [15] 李柯,关保华,刘正文.蓝藻碎屑分解速率及氮磷释放形态的实验分析[J].湖泊科学,2011,23(6):919-925.
- [16] Dai J Y,Chen D,Wu S Q,et al.Dynamics of phosphorus and bacterial *phoX* genes during the decomposition of *Microcystis* blooms in a mesocosm[J].PLoS One,2018,13(5):e0195205.
- [17] 蒋小欣,阮晓红,邢雅因,等.城市重污染河道上覆水氮营养盐浓度及DO水平对底质氮释放的影响[J].环境科学,2007,28(1):87-91.
- [18] Li J H,Yang X Y,Wang Z F,et al.Comparison of four aquatic plant treatment systems for nutrient removal from eutrophied water[J].Bioresource Technology,2015,179:1-7.

(上接第51页)

- [5] 肖凤玲,杜宏茹,张小雷.“15分钟生活圈”视角下住宅小区与公共服务设施空间配置评价——以乌鲁木齐市为例[J].干旱区地理,2021,44(2):574-583.
- [6] 敖琴,贾利高,刘军安,等.城乡基层医疗卫生机构基本公共卫生服务居民满意度研究:以湖北省为例[J].中国卫生政策研究,2018,11(4):73-76.
- [7] 徐铎,王迪娜,王道森,等.杭州市居民基层医疗卫生服务满意度及影响因素分析[J].预防医学,2020,32(10):977-982.
- [8] 夏庆华,徐静东,杨芳,等.武汉市流动人口基本公共卫生服务利用及影响因素分析[J].中国健康教育,2017,33(12):1082-1084,1099.
- [9] 宋正娜,颜庭干,刘婷,等.新重力P中值模型及其在城市综合医院院区决策中的实证检验——以无锡市为例[J].地理科学进展,2016,35(4):420-430.
- [10] Drezner T,Drezner Z.The gravity multiple server location problem[J].Computers & Operations Research,2011,38(3):694-701.
- [11] Donald H,Taylor J,Helen H.Access to Health Care Services for the Disabled Elderly[J].Health Services Research,2006,41(3p1):743-758.
- [12] Guagliardo M F.Spatial accessibility of primary care: concepts,methods and challenges[J].International Journal of Health Geographics,2004,3(1):3.
- [13] 丁榛,陈报章.城市医疗设施空间分布合理性评估[J].地球信息科学学报,2017,19(2):185-196.
- [14] Phibbs C S.Correlation of travel time on roads versus straight line distance[J].Medical Care Research and Review,1995,52(4):532-542.
- [15] 吴夏安,徐磊青,仲亮.《城市居住区规划设计标准》中15分钟生活圈关键指标讨论[J].规划师,2020,36(8):33-40.
- [16] 彭镇华,王成.论城市森林的评价指标[J].中国城市林业,2003,1(3):4-9.
- [17] 刘常富,李小马,韩东.城市公园可达性研究——方法与关键问题[J].生态学报,2010,30(19):5381-5390.
- [18] 曹根榕,顾朝林,张乔扬.基于POI数据的中心城区“三生空间”识别及格局分析——以上海市中心城区为例[J].城市规划学刊,2019(2):44-53.
- [19] 浩飞龙,王士君,冯章献,等.基于POI数据的长春市商业空间格局及行业分布[J].地理研究,2018,37(2):366-378.
- [20] 潘思东.基于夜光遥感和小区POI的住宅发展与经济增长的空间耦合研究[J].地球信息科学学报,2017,19(5):646-652.
- [21] 汪方胜,郑凯,程堂明.基于POI的老城区商业空间活力测度与提升策略研究——以淮南市老城区为例[J].安徽建筑大学学报,2021,29(2):54-60.