

不同氮磷比对北洛河中藻类生长的影响

杨震, 张会强, 陈静, 赵荣娜, 张淳, 张秦铭, 殷宪强, 范晓腾

引用本文:

杨震, 张会强, 陈静, 赵荣娜, 张淳, 张秦铭, 殷宪强, 范晓腾. 不同氮磷比对北洛河中藻类生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(9): 2069–2076.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1236>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水生植物对不同氮磷水平养殖尾水的综合净化能力比较

冯优, 陈庆锋, 李金业, 郭贝贝, 刘婷, 李磊

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2397–2408 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0816>

不同植物组合人工湿地中磷去向特征研究

叶磊, 李希, 田日昌, 吴凤平, 孟岑, 夏梦华, 郭宁宁, 凡翔, 李裕元, 王辉

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2409–2419 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0761>

阿特拉津胁迫下外源磷对香蒲磷吸收和抗氧化酶系统的影响

武淑文, 侯磊, 洪子萌, 范黎明, 叶敏

农业环境科学学报. 2021, 40(4): 844–851 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1075>

钒胁迫对紫花苜蓿生长及钒积累与转移的影响

武振中, 杨金燕, 张有贤

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1198–1207 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1165>

复杂流域氮磷污染物输出特征及模拟——以南京市云台山河流域为例

任智慧, 赵春发, 王青青, 徐蕴韵, 郭加汛, 王腊春

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 174–184 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0853>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨震, 张会强, 陈静, 等. 不同氮磷比对北洛河中藻类生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(9): 2069–2076.

YANG Z, ZHANG H Q, CHEN J, et al. Effects of nitrogen/phosphorus ratios on algae growth in the Beiluo River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(9): 2069–2076.

不同氮磷比对北洛河中藻类生长的影响

杨震¹, 张会强¹, 陈静¹, 赵荣娜¹, 张淳¹, 张秦铭¹, 殷宪强², 范晓腾^{3*}

(1. 陕西省环境监测中心站, 西安 710054; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学动物科技学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为探究不同氮磷比条件下北洛河中藻类的生长情况与多样性变化,本研究于北洛河下桃水电站坝上水库采集水样,通过添加磷酸盐提高水体中总磷浓度、调整氮磷比,根据总磷浓度(0.02、0.05、0.10、0.15、0.20、0.25、0.30、0.35、0.40、0.45、0.50 mg·L⁻¹)共设置11个处理组,进行5 d的藻类培养实验。结果表明:不同培养体系中共鉴定出藻类4门31属,其中蓝藻门的微囊藻属、平裂藻属和绿藻门的栅藻属、十字藻属、惠氏藻属的占比相对较高,为北洛河中的优势种属;藻类细胞丰度随着总磷浓度升高先逐渐上升,并在0.40 mg·L⁻¹组达到最高;当总磷浓度≥0.10 mg·L⁻¹时,优势藻类开始暴发性生长,导致物种丰富度指数显著升高($P < 0.05$),而Shannon多样性指数、Simpson优势度指数、Pielou均匀度指数显著下降($P < 0.05$)。通过对水样中氮磷浓度进行测定发现,随着外源磷输入量的增加,藻类对总氮的吸收加快;当总磷浓度高于0.10 mg·L⁻¹时,可明显促进藻类对总氮的吸收,吸收氮磷比趋于平稳。综上所述,本研究初步发现外源磷的输入可促进北洛河中藻类对总氮的吸收,总磷浓度≥0.10 mg·L⁻¹可明显引起蓝藻门和绿藻门等优势藻类暴发性生长,存在水华发生的风险。

关键词:北洛河;氮磷比;水体富营养化;藻类

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)09-2069-08 doi:10.11654/jaes.2022-1236

Effects of nitrogen/phosphorus ratios on algae growth in the Beiluo River

YANG Zhen¹, ZHANG Huiqiang¹, CHEN Jing¹, ZHAO Rongna¹, ZHANG Chun¹, ZHANG Qinming¹, YIN Xianqiang², FAN Xiaoteng^{3*}

(1. Shaanxi Environmental Monitoring Center, Xi'an 710054, China; 2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. College of Animal Science and Technology, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: This study collected water samples from the Xiatao Hydropower Station dam, Beiluo River, and added phosphate to elevate the total phosphorus concentration and modify the nitrogen/phosphorus ratios to explore the algae growth and diversity in Beiluo River under different nitrogen/phosphorus ratios. In total, 11 groups with varying total phosphorus concentrations (0.02, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50 mg·L⁻¹) were set up for 5-day cultures. Results showed that the identified algae belonged to 31 genera and 4 phyla in the culture conditions, among which *Microcystis*, *Merismopedia* of the phylum Cyanobacteria, and *Scenedesmus*, *Crucigenia*, and *Placoma* of the phylum Chlorophyta were the dominant species that accounted for a relatively high proportion of algae in the Beiluo River. The algal abundance gradually increased with the total phosphorus concentrations, and the highest was in the 0.40 mg·L⁻¹ group. The dominant algae grew rapidly when the total phosphorus concentration was higher than 0.10 mg·L⁻¹, resulting in a significant increase in the species richness index ($P < 0.05$) and significant decreases in the Shannon diversity index, Simpson dominance index, and Pielou evenness index ($P < 0.05$). Besides, the determination of nitrogen and phosphorus in water samples showed that the absorption of total nitrogen by

收稿日期:2022-12-01 录用日期:2023-02-16

作者简介:杨震(1972—),男,陕西咸阳人,硕士,主要从事生态环境保护和环境监测管理工作。E-mail:17608531@qq.com

*通信作者:范晓腾 E-mail:fanxiaoteng@nwfu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41877018)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41877018)

algae was accelerated with the increased input of exogenous phosphorus concentrations. The total nitrogen uptake was accelerated, and the nitrogen/phosphorus uptake ratios tended to plateau when the total phosphorus concentration exceeded $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. In summary, the present study found that the input of phosphorus could promote the absorption rate of total nitrogen by algae, increasing the risks of rapid growth and algal blooms of the Cyanobacteria and Chlorophyta phyla when the concentration of total phosphorus $\geq 0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

Keywords: Beiluo River; nitrogen/phosphorus ratio; eutrophication; algae

河流水体污染和富营养化是世界性的环境问题, 水体中氮、磷等营养盐浓度过高会引起水生生物异常生长和繁殖, 并在一定的温度、光照、水流等条件下容易暴发水华等, 危害水域生态系统与人类健康^[1-3]。其中, 形成水华的主要浮游藻类为蓝藻门的微囊藻 (*Microcystis*)、颤藻 (*Oscillatoria*)、平裂藻 (*Merismopedtia*) 以及绿藻门和裸藻门的部分藻类等, 其爆发性繁殖可以引起水色变化和水质污染, 并在水面形成藻类漂浮现象^[4]。相关研究表明, 营养盐过量输入是引起河流水体富营养化的根本原因, 氮、磷等营养盐是河流初级生产力的物质基础与驱动力^[5-6], 而氮磷的质量比也是影响藻类生长和群落结构组成的重要因素^[7-8]。通常认为藻类生长的最佳氮磷比为 16:1, 即 Redfield 比值^[9-10], 若水体中氮磷比大于 16:1, 则磷被认为是藻类生长的限制性因素, 反之, 则氮被认为是限制性因素。同时, 由于水体中浮游藻类组成差异性, 其生长所需的营养盐比例也不相同^[11]。针对不同河流情况, 明确其藻类群落结构、生长限制性因素及氮磷比特征, 对于水体富营养化防控与治理具有重要的指导意义。

北洛河作为黄河的二级支流, 是陕西省最长的河流, 对引水灌溉、水力发电和渔业发展等有重要作用。根据《陕西省水功能区划》, 北洛河水质目标为Ⅲ类。然而, 由于北洛河上游流域地形破碎, 水土流失严重, 面源和点源氮磷污染量较大^[12-13], 以及中下游流域内梯级小水电站的开发改变了河流的天然属性与水文情势, 水中营养盐堆积后可能引起藻类季节性泛滥生长、诱生水华等水体富营养化问题, 影响河流生态系统健康。通过前期调查发现, 北洛河水质指标中总氮水平普遍大幅超标、而总磷水平较低, 历年氮磷比的平均值均高于 30, 总体处于“磷限制”状态, 且水体中藻类以绿藻门、蓝藻门和硅藻门等为主, 推测总磷水平的波动可能是影响北洛河中藻类暴发、群落结构变化及水华分布范围的限制性因素。

为进一步明确外源磷输入水平与氮磷比变化对北洛河水体富营养化的综合影响, 本研究使用北洛河代表性水体进行藻类培养实验, 通过添加不同浓度的磷酸盐以调整总磷水平及氮磷比, 分析藻类生长情况

与物种多样性变化, 从而确定北洛河中藻类群落特征与营养盐水平的相关性以及磷风险阈值范围, 以期为河流富营养化的成因分析与控制策略研究提供基础资料与科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验设计

在北洛河的下桃水电站 ($35^{\circ}27'17''\text{N}$, $109^{\circ}27'47''\text{E}$) 坝上水库采集水样, 分装于 500 mL 的锥形瓶中, 通过添加磷酸二氢钾提高水体中总磷浓度、调整氮磷比。实验设置的总磷浓度见表 1, 每个处理浓度分别设置 3 个平行组, 于藻类培养箱中进行为期 5 d 的藻类培养实验, 设定培养温度为 25°C , 光照强度为 $50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 光暗比为 12 h:12 h。

1.2 藻类计数与多样性分析

根据《内陆水域浮游植物监测技术规程》(SL 733—2016) 的规定, 采用显微计数法统计藻类丰度变化。使用移液器将混匀液体注入 0.1 mL 的细胞计数板计数框中, 在光学显微镜下观察浮游藻类的形态结构特征, 并鉴定种类、数量, 计算藻类细胞密度, 确定优势种。每个样品计数 3 次, 每次计数结果与平均值的误

表 1 各培养体系中总磷浓度与氮磷比

Table 1 Total phosphorus concentrations and N/P ratios in different groups

总磷 Total phosphorus/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	总氮 Total nitrogen/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氮磷比 Total nitrogen/total phosphorus ratio
0.02(本底值 Background value)	2.94(本底值 Background value)	147.0
0.05	2.94	58.8
0.10	2.94	29.4
0.15	2.94	19.6
0.20	2.94	14.7
0.25	2.94	11.8
0.30	2.94	9.8
0.35	2.94	8.4
0.40	2.94	7.4
0.45	2.94	6.5
0.50	2.94	5.9

差应小于15%,否则进行第4次计数。

采用物种丰富度指数(Margalef richness index, D')、香农-威纳多样性指数(Shannon-Wiener diversity index, H)、辛普森优势度指数(Simpson dominance index, D)和均匀度指数(Pielou evenness' s index, J),分析藻类种类与数量的多样性。计算公式如下:

Margalef丰富度指数: $D' = (S-1)/\log_2 N$

Shannon-Wiener多样性指数: $H = -\sum P_i \times \log_2 P_i$

Simpson优势度指数: $D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$

Pielou均匀度指数: $J = H/\log_2 S$

式中: $P_i = N_i/N$, N_i 表示第*i*种物种的个体数, N 表示样品的总个体数; S 表示样品的种类总数。

1.3 水体中总氮和总磷的测定

将各培养体系的水样经0.45 μm滤膜过滤后,加入硫酸酸化处理,总氮的测定依据《水质 总氮的测定碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(HJ 636—2012),总磷的测定依据《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893—1989),使用紫外分光光度计测定OD值,通过制定的标准曲线计算总氮和总磷的浓度。根据初始水样和结束水样中氮磷浓度,计算得到藻类所吸收的氮磷的量与氮磷质量比。

1.4 数据处理

实验数据采用Excel 2016进行整理,采用SPSS Statistics 22.0软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA),确定各组间统计数据的显著性差异($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同氮磷比对藻类丰度的影响

不同氮磷比条件下水中藻类的生长情况如表2所示,实验共检出浮游藻类4门31属。根据藻类密度的相对丰度,依次为:蓝藻门8属(颤藻、节旋藻、螺旋藻、尖头藻、平裂藻、鞘丝藻、伪鱼腥藻、微囊藻),绿藻门15属(多芒藻、弓形藻、惠氏藻、集星藻、空星藻、卵囊藻、盘星藻、十字藻、栅藻、四角藻、新月藻、纤维藻、小球藻、四星藻、蹄形藻),硅藻门7属(茧形藻、脆杆藻、小环藻、星杆藻、针杆藻、直链藻、舟形藻)和裸藻门1属(裸藻)。统计结果显示,藻类细胞密度先随着磷浓度升高而逐渐上升,在0.40 mg·L⁻¹磷浓度(即总氮磷比=7.4)组中藻类细胞丰度最高,随后在更高磷浓度(0.45、0.50 mg·L⁻¹)组中细胞密度又有所下降。

通过对不同类型的藻类细胞数量进行统计发现,随着外源磷输入量的增加(即氮磷比的下降),中营养型水体的代表藻类——硅藻门比例逐渐降低,富营养

型水体的代表藻类——蓝藻门和绿藻门逐渐成为优势类群(图1)。其中,蓝藻门的微囊藻属、平裂藻属和绿藻门的栅藻属、十字藻属、惠氏藻属的占比相对较高,并随着总磷浓度的升高而加快繁殖,藻类细胞丰度与各培养体系中总磷浓度呈现明显的正相关性(图2)。同时,研究发现在初始磷浓度的培养体系中,蓝藻门的微囊藻属和平裂藻属占比达到23.8%和15.2%,并且最高占比分别达到了32.0%和37.2%,说明其为北洛河水体中的优势藻类。

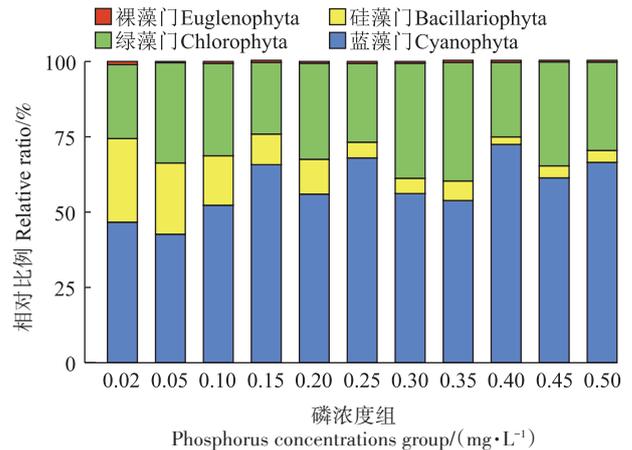


图1 各培养体系中藻类的相对比例

Figure 1 Relative ratio of algae in different groups

2.2 藻类生物多样性的变化

通过对藻类群落组成进行多样性分析发现(图3),外源磷输入后,藻类丰富度指数显著升高,而Shannon多样性指数、Simpson优势度指数、Pielou均匀度指数均发生不同程度的下降。整体而言,在总磷浓度 ≥ 0.10 mg·L⁻¹时,北洛河水体中优势藻类爆发性生长,导致藻类的物种多样性、优势度、均匀度等显著下降($P < 0.05$)。

2.3 水体中氮磷的消耗情况

在藻类培养实验结束后,对水样中氮磷的残留浓度进行测定,各培养体系中氮磷的吸收与剩余情况见表3和图4、图5。通过计算得出藻类所吸收的氮磷比,随着外源磷输入量的增加,水体中总氮的消耗量逐渐增加,反映出藻类对氮素的利用率增强。磷浓度 ≥ 0.10 mg·L⁻¹时(即吸收氮磷比 ≤ 24.81)明显促进了藻类对水体中氮的吸收;而总磷浓度 ≥ 0.20 mg·L⁻¹时(即吸收氮磷比 ≤ 12.80),各个培养体系中总氮的吸收量基本持平,说明磷对藻类生长的限制作用开始减弱。通常认为藻类细胞按一定比例吸收氮磷营养盐,本研究中藻类吸收的氮磷比随着磷输入量的增加而

表2 各培养体系中藻类细胞数量(万个·L⁻¹)
Table 2 Count of algae in different groups(×10⁴·L⁻¹)

种类 Specy	0.02 mg·L ⁻¹	0.05 mg·L ⁻¹	0.10 mg·L ⁻¹	0.15 mg·L ⁻¹	0.20 mg·L ⁻¹	0.25 mg·L ⁻¹	0.30 mg·L ⁻¹	0.35 mg·L ⁻¹	0.40 mg·L ⁻¹	0.45 mg·L ⁻¹	0.50 mg·L ⁻¹
颤藻 <i>Oscillatoria</i>	0	0	0	3	10	10	10	17	30	33	13
脆杆藻 <i>Fragilaria</i>	77	57	17	7	0	0	0	0	10	23	40
多芒藻 <i>Golenkinia</i>	3	10	50	17	47	43	37	83	57	33	13
弓形藻 <i>Schroederia</i>	7	10	3	7	17	13	10	7	13	20	10
惠氏藻 <i>Placoma</i>	0	557	583	777	1 510	993	1 680	2 903	2 053	2 133	1 887
集星藻 <i>Actinastrum</i>	13	53	60	113	73	93	280	97	203	600	287
茧形藻 <i>Amphiprora</i>	3	30	33	7	3	3	10	3	10	10	7
节旋藻 <i>Arthrospira</i>	20	10	47	113	60	130	223	140	267	307	347
尖头藻 <i>Raphidiopsis</i>	37	120	313	317	247	360	477	460	333	380	290
空星藻 <i>Coelastrum</i>	0	147	47	83	127	67	367	303	230	123	363
卵囊藻 <i>Oocystis</i>	87	83	100	150	107	100	93	177	243	167	137
螺旋藻 <i>Spirulina</i>	0	0	0	0	3	3	13	7	0	3	7
裸藻 <i>Euglena</i>	40	37	67	43	93	117	130	97	97	50	67
盘星藻 <i>Pediastrum</i>	253	0	53	53	80	53	27	160	53	27	213
平裂藻 <i>Merismopedia</i>	577	187	1 653	1 227	2 347	3 533	4 013	4 878	14 524	10 644	14 367
鞘丝藻 <i>Lyngbya</i>	70	87	237	327	247	243	477	360	303	420	647
十字藻 <i>Crucigenia</i>	13	427	1 240	1 220	813	1 980	2 333	2 740	3 040	3 187	1 200
栅藻 <i>Scenedesmus</i>	360	547	730	843	1 297	1 890	2 413	2 467	2 659	3 533	4 817
四角藻 <i>Tetraedron</i>	43	37	60	93	63	100	157	83	110	93	177
四星藻 <i>Tetrastrum</i>	13	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0
蹄形藻 <i>Kirchneriella</i>	3	90	240	263	173	187	337	297	320	337	113
微囊藻 <i>Microcystis</i>	907	2 686	4 125	8 900	5 365	10 767	6 425	7 485	12 506	7 300	6 338
伪鱼腥藻 <i>Pseudanabaenaceae</i>	167	47	163	237	203	247	413	143	357	137	220
小环藻 <i>Cyclotella</i>	83	277	477	343	733	493	367	633	380	480	453
星杆藻 <i>Asterionella</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	13	43	20
新月藻 <i>Closterium</i>	3	3	13	20	23	10	17	27	63	27	64
纤维藻 <i>Ankistrodesmus</i>	13	57	143	137	137	113	263	230	317	230	240
小球藻 <i>Chlorella</i>	120	413	513	243	360	240	183	283	307	297	280
针杆藻 <i>Synedra</i>	127	177	170	293	140	120	143	140	147	130	337
直链藻 <i>Melosira</i>	570	653	1 060	787	700	357	393	783	270	410	233
舟形藻 <i>Navicula</i>	197	547	293	287	173	203	173	63	153	187	253
总计 Total	3 807	7 359	12 492	16 910	15 152	22 470	21 465	25 066	39 069	31 364	33 439

逐渐平稳,进一步反映出培养体系中藻类群落结构多样性下降,优势藻种占据主导地位。

3 讨论

浮游植物(藻类)作为河流水质状态与生态健康的重要指示生物,其种类、数量和群落结构受环境因子如温度、光照、营养盐水平等影响。其中,氮、磷等营养元素是浮游藻类生长的必需营养物质,其浓度的升高常会导致藻类的爆发性生长,是水体富营养化的

主要因素。一般认为,当水体中总氮浓度大于0.2 mg·L⁻¹、总磷浓度大于0.02 mg·L⁻¹时,水体就处于富营养化状态^[14]。除了氮磷的绝对浓度外,氮磷比的变化也会明显改变水体中营养盐的限制状态,对藻类生长及群落结构演替具有重要影响。本研究中各培养体系的藻类丰度与总磷浓度具有一定的正相关关系,并表现出低浓度磷与中浓度磷促进、高浓度磷抑制的特性,这与铜绿微囊藻的培养实验结果一致^[15-16]。当氮磷比小于10时,普遍认为水体中藻类生长处于氮

限制状态;当氮磷比大于22.6时,认为其处于磷限制状态;当氮磷比介于10~22.6时,为藻类的最适生长区间^[8]。对北洛河初始水样进行测定发现,总氮背景值为 $2.94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氮磷比达到147.0,藻类生长处于明

显的磷缺乏状态。由于磷也是浮游藻类生长的首要限制性元素^[7],外源磷的补充大幅提升了培养体系中藻类的生长速度;当总磷浓度为 $0.10 \sim 0.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,氮磷比介于7.4~29.4之间,藻类处于最适生长区间,

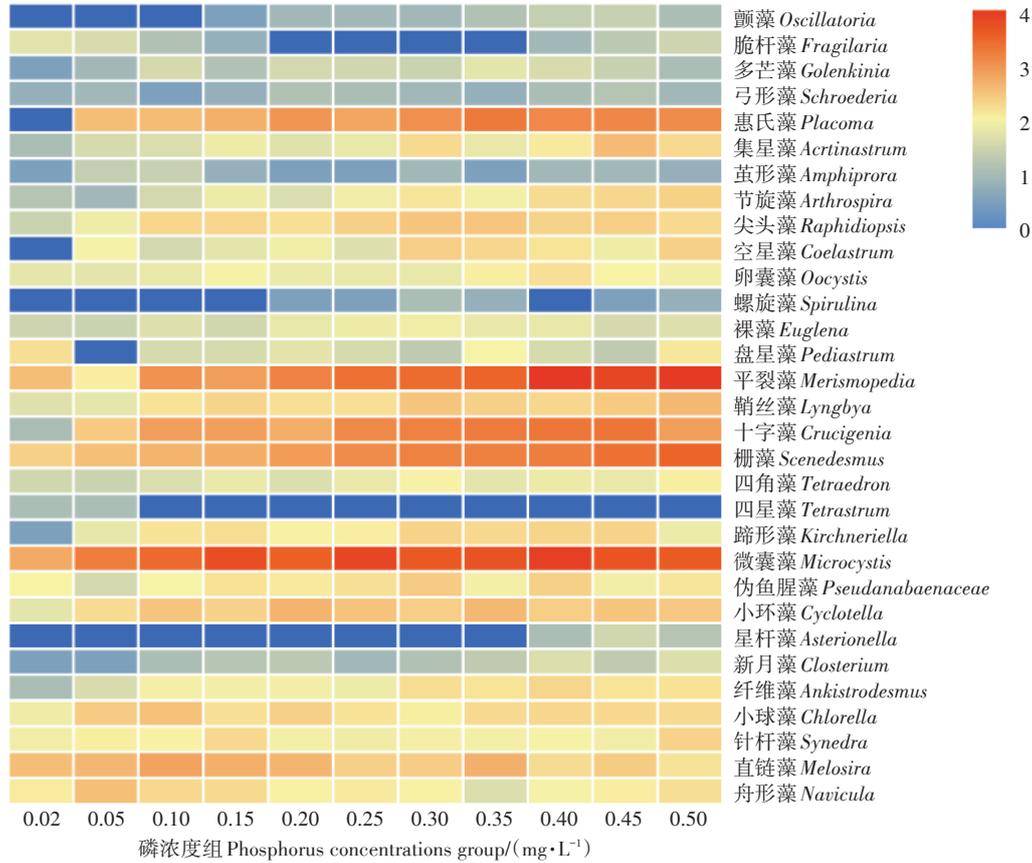


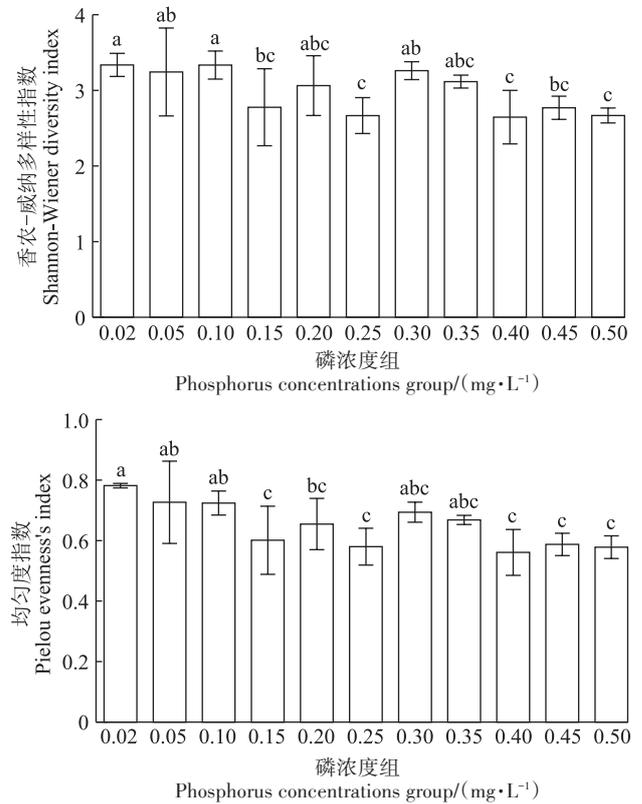
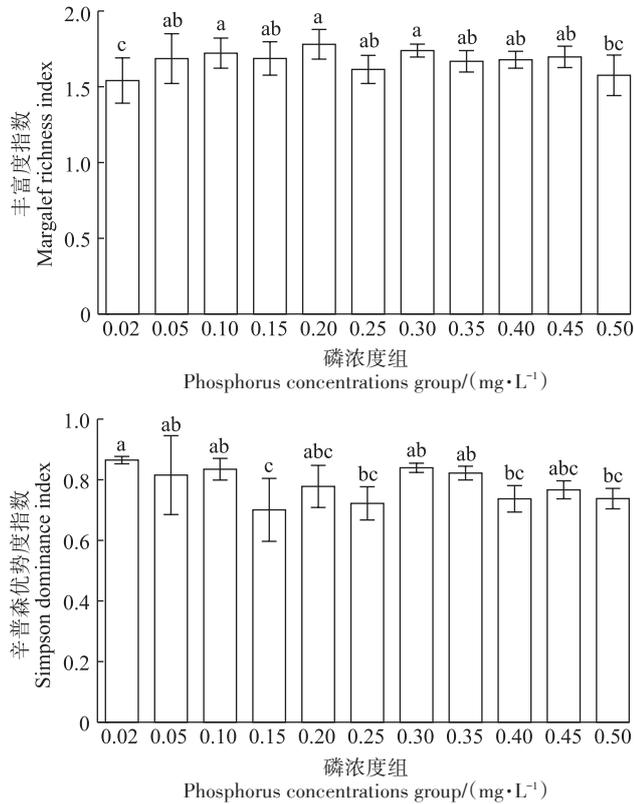
图2 各培养体系中藻类的相对密度(lg值)

Figure 2 Relative density of algae in different groups(lg)

表3 各培养体系中氮磷的吸收与剩余情况

Table 3 Uptake and residual concentrations of total nitrogen and total phosphorus in different groups

磷浓度组 Phosphorus concentrations group/(mg·L ⁻¹)	总氮-吸收 Uptake of total nitrogen/(mg·L ⁻¹)	总氮-剩余 Residue of total nitrogen/(mg·L ⁻¹)	总磷-吸收 Uptake of total phosphorus/(mg·L ⁻¹)	总磷-剩余 Residue of total phosphorus/(mg·L ⁻¹)	吸收氮磷比 Uptake ratio of nitrogen/phosphorus
0.02	0.20	2.74	0.02	0.00	9.91
0.05	0.17	2.77	0.03	0.02	5.27
0.10	1.83	1.11	0.07	0.03	24.81
0.15	1.43	1.51	0.11	0.04	12.46
0.20	2.20	0.74	0.17	0.03	12.80
0.25	2.27	0.67	0.21	0.04	10.74
0.30	2.37	0.57	0.24	0.06	9.74
0.35	2.59	0.35	0.32	0.03	8.13
0.40	2.05	0.89	0.35	0.05	5.78
0.45	2.23	0.71	0.40	0.05	5.56
0.50	2.44	0.50	0.44	0.06	5.50



数据为平均值±标准差,柱上不同小写字母代表组间具有显著性差异($P < 0.05$)。

Data shown as mean±standard deviation, different lowercase letters on the column indicated significant differences between groups ($P < 0.05$).

图3 各培养体系中藻类的多样性

Figure 3 Species diversity analyses of algae in different groups

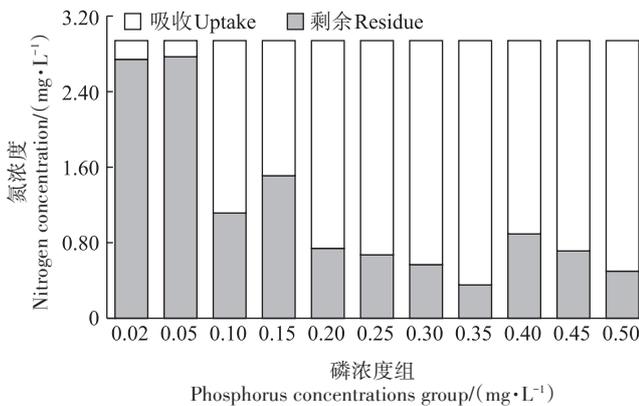


图4 各培养体系中总氮的吸收情况

Figure 4 Uptake of total nitrogen in different groups

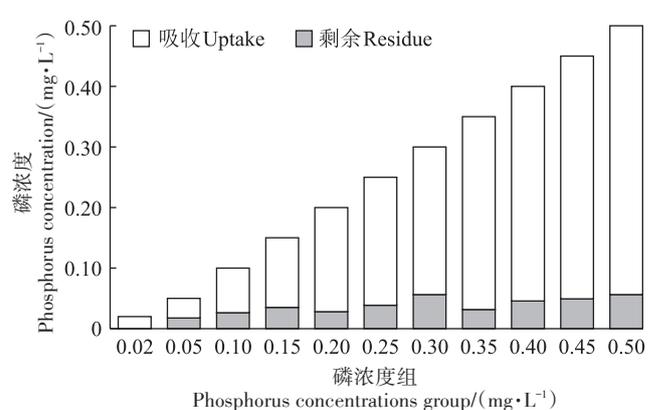


图5 各培养体系中总磷的吸收情况

Figure 5 Uptake of total phosphorus in different groups

开始爆发性生长,其细胞丰度显著升高;而随着总磷浓度升至 0.45 、 $0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (氮磷比小于 7.0),即转换为氮限制状态,藻类的进一步生长受到了抑制,可能是由于培养体系中藻类可有效利用的无机氮含量不足,导致细胞中蛋白质合成过程受到了影响。相关研究同样指出,水体中无机磷浓度超过藻类实际需求时,藻类的物质成分如叶绿素a含量会发生变化,进

而生长受到限制^[18-19]。此外,不同氮磷浓度的水体中有机态和无机态氮磷会发生赋存形态变化与生物或非生物转化过程,其水平波动对藻类生长的影响机制仍有待深入研究。

不同藻类细胞的元素组成与营养需求存在差异,环境也会优先选择相适应的藻类而形成适者生存的特征藻类结构^[7,20]。通过对藻类群落进行分析后发

现,受总磷水平的影响,北洛河的藻类特征表现为蓝藻门的微囊藻、平裂藻和绿藻门的十字藻、栅藻、惠氏藻为优势种属,且其丰度与总磷水平呈正相关,外源磷的输入逐渐降低了藻类群落的物种多样性、优势度和均匀度。而藻类的种类组成、丰度与群落结构直接关系水体水质、生物能量与物质交换,对水域生态系统的稳定性具有重要作用^[21]。由此说明,外源磷输入可引起北洛河中蓝藻门和绿藻门等耐污型藻类占据优势,破坏藻类的多样性,进而降低水体自净能力、加剧水质恶化。另外,水体富营养化引起的蓝藻和绿藻暴发极易导致水华的产生,特别是蓝藻水华往往发生范围最广、危害最大^[22-23]。如蓝藻门中的微囊藻属产生的微囊藻毒素已被证明具有强烈的生物毒性,可通过吸收、迁移、转化等多种途径危害水生生物及人类健康^[24-26]。在本研究中发现,随着总磷输入量的增加,微囊藻的丰度迅速增加,在 $0.40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷浓度组中占比最高,达到了32.0%,从而指出北洛河水体富营养化存在蓝藻水华泛滥的生态风险。

根据资源竞争模型,限制性营养元素的比例是藻类组成的主要决定因素,不同的营养限制有利于形成不同的优势藻种^[27-28]。本研究结果显示,蓝藻门的平裂藻在较高磷浓度(低氮磷比)组中丰度最高,通常是因为大部分种类蓝藻对氮的竞争能力较强,而容易在低氮磷比引起的氮缺乏条件下形成优势^[29]。而对于缺乏固氮能力的蓝藻门中的微囊藻而言,氮磷的绝对浓度对其生长影响更大,其易在较高氮磷比条件下发展为优势藻种。另外,由于蓝藻生长所需氮磷浓度常低于绿藻,在较低氮磷浓度条件下易形成优势;而在营养盐相对充足的情况下,绿藻门的十字藻和栅藻等生长速率开始高于蓝藻^[30-31],逐渐成为另一优势种属。本研究指出,对于河流富营养化情况分析,应结合浮游藻类的群落特征与优势藻种的营养需求动态,综合考虑氮磷营养盐的绝对浓度与氮磷比来判别不同类型水华暴发风险,进而在水体富营养化防控与治理过程中采取有效措施。

4 结论

(1)北洛河藻类培养实验共检出浮游藻类4门31属,其中蓝藻门的微囊藻、平裂藻和绿藻门的十字藻、栅藻、惠氏藻为北洛河中优势种属。

(2)藻类的生长与总磷水平呈现出一定的正相关关系,低浓度磷与中浓度磷促进藻类生长,高浓度磷抑制藻类生长,在 $0.40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷浓度下藻类细胞丰度

最高。

(3)当水体中总磷浓度 $\geq 0.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,外源磷输入显著促进了藻类对总氮的吸收利用,进而降低了藻类群落的多样性指数、优势度指数以及均匀度指数。

参考文献:

- [1] 周云龙,于明.水华的发生、危害和防治[J].生物学通报,2004,39(6):11-14. ZHOU Y L, YU M. Occurrence, harm and control of water bloom[J]. *Bulletin of Biology*, 2004, 39(6):11-14.
- [2] PATRICIA M G. Eutrophication, harmful algae and biodiversity: challenging paradigms in a world of complex nutrient changes[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 124(2):591-606.
- [3] 张云潇,徐佳敏,卢少勇,等.风车草对低污染水体氮磷的净化效能[J].农业资源与环境学报,2021,38(5):735-745. ZHANG Y X, XU J M, LU S Y, et al. Purification effect of *Cyperus alternifolius* L. on low-polluted water[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5):735-745.
- [4] SCHLEYER G, VARDI A. Algal blooms[J]. *Current Biology*, 2020, 30(19):R1116-R1118.
- [5] 吴丰昌,金相灿,张润宇,等.论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性[J].湖泊科学,2010,22(1):1-7. WU F C, JIN X C, ZHANG R Y, et al. Effects and significance of organic nitrogen and phosphorous in the lake aquatic environment[J]. *Journal of Lake Science*, 2010, 22(1):1-7.
- [6] STEPHANIE J G, ROBERT E H. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: is there a common relationship? [J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(6):1213-1223.
- [7] 孙凌,金相灿,钟远,等.不同氮磷比条件下浮游藻类群落变化[J].应用生态学报,2006,17(7):1218-1223. SUN L, JIN X C, ZHONG Y, et al. Changes of algal communities in water body with different proportions of nitrogen and phosphorus[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(7):1218-1223.
- [8] 季鹏飞,许海,詹旭,等.长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素[J].环境科学,2020,41(9):4030-4041. JI P F, XU H, ZHAN X, et al. Spatial-temporal variations and driving of nitrogen and phosphorus ratios in lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(9):4030-4041.
- [9] ALFRED C, REDFIELD. The biological control of chemical factors in the environment[J]. *Science Progress*, 1960(11):150-170.
- [10] KLAUSMEIER C A, LITCHMAN E, DAUFRESNE T, et al. Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton[J]. *Nature*, 2004, 429(6988):171-174.
- [11] 宋玉芝,秦伯强,高光.氮及氮磷比对附着藻类及浮游藻类的影响[J].湖泊科学,2007,19(2):125-130. SONG Y Z, QIN B Q, GAO G. Effect of nutrient on periphytic algae and phytoplankton[J]. *Journal of Lake Science*, 2007, 19(2):125-130.
- [12] 于松延,徐宗学,武玮,等.北洛河流域水质空间异质性及其对土地利用结构的响应[J].环境科学学报,2014,34(5):1309-1315. YU S Y, XU Z X, WU W, et al. Spatial variation of water quality and its response to landuse in the Beiluo River basin[J]. *Acta Scientiae Cir-*

- cumstantiae*, 2014, 34(5):1309-1315.
- [13] 赵丽芸. 北洛河干流水质变化特征浅析[J]. 陕西水利, 2021(10): 127-128, 133. ZHAO L Y. Analysis of water quality change characteristics in the main stream of Beiluo River[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2021(10): 127-128, 133.
- [14] 马迎群, 曹伟, 赵艳民, 等. 典型平原河网区水体富营养化特征、成因分析及控制对策研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(2): 174-183. MA Y Q, CAO W, ZHAO Y M, et al. Eutrophication characteristics, cause analysis and control strategies in a typical plain river network region[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(2): 174-183.
- [15] 王静. 不同水源条件下氮磷营养物对铜绿微囊藻生长的影响研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016. WANG J. Effects of nitrogen and phosphorus nutrients on the growth of *Microcystis aeruginosa* of different water sources[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
- [16] 丰茂武, 吴云海, 冯仕训, 等. 不同氮磷比对藻类生长的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(5): 1759-1763. FENG M W, WU Y H, FENG S X, et al. Effect of different N/P ratios on algal growth[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2008, 17(5): 1759-1763.
- [17] 程文娟, 包立, 罗雄鑫, 等. 滇池水体沉积物磷素特征及其对藻类的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(6): 822-828. CHENG W J, BAO L, LUO X X, et al. Characteristics of phosphorus in the sediment of Dianchi Lake and its effects on algae[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(6): 822-828.
- [18] 张亮, 张震斌, 于德贵, 等. 氮和磷对藻类的抑制研究[J]. 绿色科技, 2020(10): 186-187. ZHANG L, ZHANG Z B, YU D G, et al. Inhibition of nitrogen and phosphorus on algae[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2020(10): 186-187.
- [19] 李胜男, 纪雄辉, 朱坚, 等. 藻类在农业面源污染防治中的应用[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5): 970-979. LI S N, JI X H, ZHU J, et al. Utilizing algae for agricultural non-point source pollution control: a review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(5): 970-979.
- [20] 田艺苑, 杨薇, 刘强, 等. 白洋淀流域水文连通对浮游植物群落的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1538-1547. TIAN Y Y, YANG W, LIU Q, et al. Effects of hydrological connectivity on phytoplankton community in Baiyangdian basin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(7): 1538-1547.
- [21] 岳一鸿, 傅志伟, 陈学萍, 等. 乌江流域某水库浮游藻类群落结构及多样性分析[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2021, 27(1): 97-105. YUE Y H, FU Z W, CHEN X P, et al. Community structure and diversity phytoplankton in the Wujiang River basin reservoir[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science Edition)*, 2021, 27(1): 97-105.
- [22] 谢平. 蓝藻水华及其次生危害[J]. 水生态学杂志, 2015, 36(4): 1-13. XIE P. Cyanobacterial blooms and their secondary harms[J]. *Journal of Hydroecology*, 2015, 36(4): 1-13.
- [23] HUO D, GAN N, GENG R, et al. Cyanobacterial blooms in China: diversity, distribution, and cyanotoxins[J]. *Harmful Algae*, 2020, 109: 102106.
- [24] 姜锦林, 宋睿, 任静华, 等. 蓝藻水华衍生的微囊藻毒素污染及其对水生生物的生态毒理学研究[J]. 化学进展, 2011, 23(1): 246-253. JIANG J L, SONG R, REN J H, et al. Advances in pollution of cyanobacterial blooms-producing microcystins and their ecotoxicological effects on aquatic organisms[J]. *Progress in Chemistry*, 2011, 23(1): 246-253.
- [25] LETICIA D, MARIA P, DANIEL G, et al. Microcystin-RR: occurrence, content in water and food and toxicological studies: a review[J]. *Environmental Research*, 2018, 168: 467-489.
- [26] LETICIA D, ANA I, REMEDIOS G, et al. Occurrence and toxicity of microcystin congeners other than MC-LR and MC-RR: a review[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2018, 125: 106-132.
- [27] BURSON A, STOMP M, GREENWELL E, et al. Competition for nutrients and light: testing advances in resource competition with a natural phytoplankton community[J]. *Ecology*, 2018, 99(5): 1108-1118.
- [28] 王小冬, 秦伯强, 高光. 氮磷的不同供应比例和频度对藻类水华形成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12): 2533-2541. WANG X D, QIN B Q, GAO G. Effect of different ratios and frequencies of nitrogen and phosphorus addition on algal bloom formation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12): 2533-2541.
- [29] ESTEVES-FERREIRA A A, INABA M, FORT A, et al. Nitrogen metabolism in cyanobacteria: metabolic and molecular control, growth consequences and biotechnological applications[J]. *Critical Reviews in Microbiology*, 2018, 44(5): 541-560.
- [30] 万蕾, 朱伟, 赵联芳. 氮磷对微囊藻和栅藻生长及竞争的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1230-1235. WAN L, ZHU W, ZHAO L F. Effect of nitrogen and phosphorus on growth and competition of *M. aeruginosa* and *S. quadricauda*[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(6): 1230-1235.
- [31] 许海, 朱广伟, 秦伯强, 等. 氮磷比对水华蓝藻优势形成的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(10): 1676-1683. XU H, ZHU G W, QIN B Q, et al. Influence of nitrogen-phosphorus ration dominance of bloom-forming cyanobacteria (*Microcystis aeruginosa*) [J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(10): 1676-1683.

(责任编辑:李丹)