

# 北京市各种水体蓝细菌物种多样性研究

王天宇<sup>1</sup>, 赵文<sup>1\*</sup>, 尹东鹏<sup>1</sup>, 魏杰<sup>1</sup>, 王哲<sup>1</sup>, 庞雨佳<sup>1</sup>, 李博<sup>2</sup>, 时晓<sup>2</sup>

(1. 大连海洋大学水产与生命学院 辽宁省水生生物学重点实验室, 辽宁 大连 116023;

2. 北京市水生野生动植物救护中心, 北京 102100)

**摘要** 2016至2018年的5月和9月研究了北京市五大水系53个水体蓝细菌的物种多样性。结果表明, 共发现蓝细菌4目4科22属63种, 优势种( IRI) 为小型色球藻(*Chroococcus minor* (Kütz.) Näg.)、湖泊鞘丝藻(*Lyngbya limnetica* Lemm.)、水华束丝藻(*Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Rafls.)、小席藻(*Phormidium tendere* (Menegh.) Gom.)、钝顶节旋藻(*Arthrospira platensis*)、小颤藻(*Oscillatoria tenuis* Ag.)、铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)、水华微囊藻(*Microcystis flos-aquae*)。通过对北京各种水体的蓝藻优势种进行CCA分析, 得出大部分优势种与活性磷、叶绿素a、温度、溶解氧、总碱度、总硬度、pH呈正相关, 与TN、TP呈负相关, 与蓝藻的特性较符合, 其中活性磷是限制蓝细菌生长的重要因素。各水体蓝藻平均密度为 $1.32 \times 10^6$  ind/L, 平均生物量为0.0032 mg/L, 多样性指数平均为0.45, 2018年较2017年多数水体的密度和生物量下降, 多样性指数上升, 说明北京市水环境治理有所改善, 但仍需继续加强治理。

**关键词** 北京五大水系; 蓝细菌; 物种多样性; 典范对应分析

中图分类号 Q938.8 文献标识码 A 文章编号 1005-7021(2020)02-0031-13

doi:10.3969/j.issn.1005-7021.2020.02.004

## Species Diversity of Cyanobacteria in Various Waters in Beijing

WANG Tian-yu<sup>1</sup>, ZHAO Wen<sup>1</sup>, YIN Dong-peng<sup>1</sup>, WEI Jie<sup>1</sup>, WANG Zhe<sup>1</sup>,  
PANG Yu-jia<sup>1</sup>, LI Bo<sup>2</sup>, SHI Xiao<sup>2</sup>

(1. Coll. of Fish. & Life Sci., Dalian Ocean Uni., Liaoning Prov. Key Lab. of Hydrobiol., Dalian 116023;

2. Beijing Aquatic Wildlife Rescue & Conserv. Ctr., Beijing 102100)

**Abstract** The species diversity of cyanobacteria in Beijing 53 waters of five major river systems was studied during May and September, 2016-2018. The results showed that 63 species of the genus cyanobacteria belonged to 4 orders, 4 families, 22 genera were found, and the dominant species (IRI) was *Chroococcus minor*, *Lyngbya limnetica*, *Aphanizomenon flos-aquae*, *Phormidium tenue*, *Arthrospira platensis*, *Oscillatoria tenuis*, *Microcystis aeruginosa*, and *Microcystis flos-aquae*. By combining the results of CCA analysis of the dominant species in all waters in Beijing, most of the dominant species are positively correlated with active phosphorus, chlorophyll a, temperature, dissolved oxygen, total alkalinity, total hardness and pH, and TN, TP was negatively correlated with the characteristics of cyanobacteria, and active phosphorus is an important factor limiting the growth of cyanobacteria. The mean density of cyanobacteria in each waters was  $1.32 \times 10^6$  ind/L, the mean biomass was 0.0032 mg/L, and the diversity index was 0.45 in average. The density and biomass of most waters in 2018 decreased as compared with those of in 2017, and the diversity index increased, indicating that Beijing water environment management has improved, but it still needs continuing to strengthen the governance and improvement.

**Keywords** five major river systems in Beijing; cyanobacteria; species diversity; canonical correspondence analysis

蓝细菌是地球上最早出现的光合放氧原核生物。蓝细菌与水环境关系密切, 生长旺盛时, 会导致水体变色, 引起淡水水体水华的爆发, 有些蓝细

菌能发出草腥味或者土腥味, 导致水质恶化, 引起一系列环境问题。我国是一个严重缺水的国家, 虽然水资源总量丰富, 但作为能够饮用的水资源

基金项目: 北京市农业农村局项目(2016-2018)

作者简介: 王天宇 女, 硕士研究生。主要研究方向为水域生态学。E-mail: 1362650899@qq.com

\* 通讯作者。男, 教授, 博士生导师。研究方向为水域生态学。Tel: 0411-84763092, E-mail: zhaowen\_1963@163.com

收稿日期: 2019-09-16

却极其短缺。水库作为对水资源重新分配的重要工程,是人工湖泊、区域经济社会发展的基础<sup>[1]</sup>。城市景观水体在美化环境、涵养水源、调节气候、保护生物多样性和经济发展方面发挥极大地作用,但大多景观水体为封闭性水体,水质更容易受到污染<sup>[2]</sup>。当前北京市五大水系均遭到严重污染,北运河水系除城市中心区河段水质较好,基本为Ⅲ~Ⅳ类外,城市排水河流、远郊河流水质均为劣Ⅴ类;永定河水系氮污染较严重,大都超过Ⅴ类水标准,磷污染较轻,其含量低于Ⅲ类水标准;潮白河水系受到轻度污染,其中作为重要饮用水源地的密云水库也有了富营养化的趋势<sup>[3]</sup>。本研究对北京的景观和水源水库等各种水体的蓝细菌与

水环境状况进行调查,旨在为北京水生态环境的改善提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 采样点分布 2016 年 5 月及 9 月对潮白河水系设置 17 个水体 34 站位(站位 53~86),2017 年 5 月至 2018 年 9 月分别对永定河水系(站位 1~16)、北运河水系(站位 17~34)、大清河水系(站位 35~49)、蓟运河水系(站位 50~52)、潮白河水系(站位 53、54、56、57、67、71~76、84~86)共设置 36 个水体 52 个站位进行浮游植物采样 4 次。调查范围及站位设置见图 1。

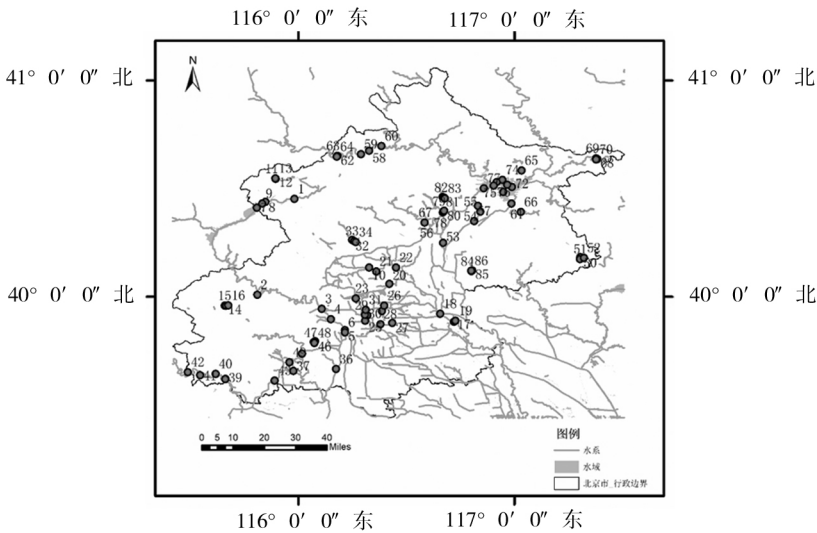


图 1 北京市水体调查站位示意图

Fig. 1 Schematic diagram of water sampling station in Beijing

1: 妫水河;2:清水河;3:门城湖;4:莲石湖;5:晓月湖;6:宛平湖;7~9:官厅水库;10:沙河水库;11~13:玉渡山水库;14~16:斋堂水库;17~19:北运河;20:清河;21~22:温榆河;23:昆明湖;24:后海;25:莲花池;26:柳荫公园;27:龙潭公园;28:陶然亭;29:玉渊潭大;30:玉渊潭小;31:紫竹院;32~34:十三陵水库;35:大石河;36:小清河;37:周口店;38:三渡;39:五渡;40:七渡;41:西石门;42:十八渡;43:天开;44~46:青龙湖北湖;47~48:青龙湖南湖;49:牛口峪;50~52:金海湖;53:潮白河;54~55:白河;56:怀沙河;57:碧水公园;58:干沟;59:二滩;60:龙湾;61:楼子峪;62~64:白河堡;65:栗泰寨;66:沙河水库;67:怀柔水库;68~70:遥桥峪;71~77:密云水库;78~80:雁栖湖;81~83:青龙峡;84~86:汉石桥湿地  
1: Guishui River;2: Qingshui River;3: Mencheng Lake;4: Lianshi Lake;5: Xiaoyue Lake;6: Wanping Lake;7-9: Guanting Reservoir;10: Shahe Reservoir;11-13: Yudu Mountain Reservoir;14-16: Zhaitang Reservoir;17-19: North Canal;20: Qing River;21-22: Wenyu River;23: Kunming Lake;24: Houhai Lake;25: Lotus Pond;26: Liuyin Park;27: Longtan Park;28: Taoranting Lake;29: Yuyuantan Lake grand;30: Yuyuantan Lake small;31: Zizhuyuan Lake;32-34: Shisanling Reservoir;35: Dashi River;36: Xiaoqing River;37: Zhokoudian River;38: Sandu in Juma River;39: Wudu in Juma River;40: Qidu in Juma River;41: Xishimen in Juma River;42: Shibadu in Juma River;43: Tiankai Lake;44-46: Qinglong Lake North;47-48: Qinglong Lake South;49: Niukouyu Reservoir;50-52: Jinhai Lake;53: Chaobai River;54-55: Baihe River;56: Huaisha River;57: Bishui Park;58: Gangou River;59: Ertan River;60: Longwan River;61: Louziyu River;62-64: Baihebao Reservoir;65: Lizhenzhai Reservoir;66: Shahe Reservoir;67: Huairou Reservoir;68-70: Yaoqiaoyu Reservoir;71-77: Miyun Reservoir;78-80: Yanqi Lake;81-83: Qinglongxia Reservoir;84-86: Hanshiqiao Lake

1.2 方法

1.2.1 蓝细菌样品的采集和处理 每个站位用 水生 80 型离心机采集水 1L,摇匀后加 15 ml 鲁哥氏

液固定,沉淀 48h,除去上清液浓缩至 50 mL。蓝细菌种类鉴定时充分摇匀样品,用定量吸管取 0.1 mL 至浮游植物计数框内,用光学显微镜(O-

lympus-CX21FSI)在10×40倍下观察计数<sup>[4]</sup>。计算藻类的密度和生物量<sup>[5]</sup>。

1.2.2 理化指标检测 包括水温、透明度、COD<sub>Mn</sub>、叶绿素 a、氮、磷指标等,具体测定方法参照《水和废水监测分析》<sup>[6]</sup>。采用 Excel 2016 软件对数据进行分析处理,对蓝细菌和环境因子进行典范对应分析(CCA)、SPSS 相关性分析以及聚类分析、利用 GIS 来反映蓝细菌的空间变化。蓝细菌多样性采用香农-维纳指数( $H'$ )<sup>[7]</sup>和均匀度指数( $J$ )<sup>[7]</sup>,优势种利用相对重要性指数( $IRI$ )<sup>[8-9]</sup>来计算。香农-维纳指数(Shannon-Wiener index)的计算公式: $H' = -\sum_{i=1}^s P_i \log 2 P_i$ ,  $P_i = n_i/N$ 。式中, $P_i$ 为样品中第*i*种个体所占比例; $N$ 为采集样品中所有物种的总个体数; $n_i$ 为第*i*种个体数。均匀度指数计算公式: $J = H'/\log_2 S$ ,式中, $S$ 为总种数。相对重要性指数计算公式: $IRI = (N + W) \times F$ ,式中, $N$ 为某物种数量在总

物种数量中所占百分比的值(%); $W$ 为某物种的生物量在总生物量中所占百分比的值(%); $F$ 为某物种出现的站位数占调查站位总数百分比的值(%)。本研究以相对重要指数超过 500 的为重要种,超过 1 000 的为优势种。

## 2 结果与分析

### 2.1 蓝细菌的种类组成及优势种

2.1.1 蓝细菌的种类组成与分布 调查期间北京市各水体共发现蓝细菌 4 目 4 科 22 属 63 种,其中北京市景观水体共发现蓝细菌 57 种,各水体中门城湖物种数最多,其次是宛平湖和晓月湖,清水河物种数最少;水源水库共发现蓝细菌 53 种,潮白河水系蓝细菌数最多,其次是大清河水系,蓟运河水系最少,各水系中青龙湖北湖和牛口峪物种数最多,其次是青龙湖南湖,雁栖湖物种数最少(图 2)。

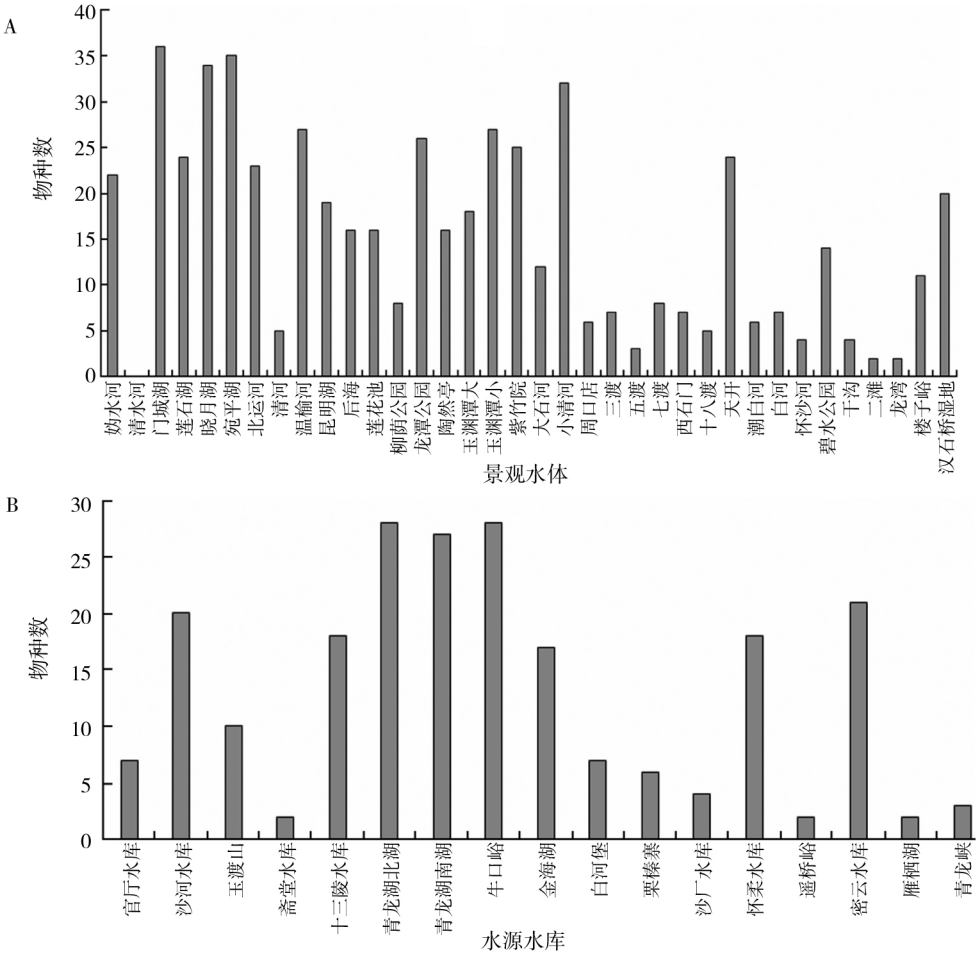


图 2 北京市各水体蓝细菌物种数

Fig. 2 Species number of cyanobacteria in various water bodies in Beijing

将某种藻类被检出的样品数占全部样品的百分比称为出现率,调查期间共采集样品 218 个,出现率超过 30% 的蓝细菌有小型色球藻、湖泊鞘丝藻、小颤

藻和小席藻,其中小型色球藻的出现率为 49. 08% ,湖泊鞘丝藻和小颤藻的出现率均为 30. 73% ,小席藻的出现率为 30. 28% ,具体分布见表 1。

表 1 北京市五大水系蓝藻门种类组成和分布  
Table 1 The species composition and distribution of cyanobacteria in Beijing

种名	拉丁文名	永定河水系	北运河水系	大清河水系	蓟运河水系	潮白河水系
固氮鱼腥藻	<i>Anabaena azotica</i> Ley.	+	+	+		
卷曲鱼腥藻	<i>Anabaena circinalis</i> Rab.	+				
类颤藻鱼腥藻	<i>Anabaena osicellarioides</i> Kleb.	+	+	+		+
史密斯鱼腥藻	<i>Anabaena smith</i> ( Komarek ) Watanabe					+
螺旋鱼腥藻	<i>Anabaena spiroides</i> Kleb.	+	+	+		
阿氏拟鱼腥藻	<i>Anabaenopsis arnoldii</i> Apetek.	+	+	+		+
水华束丝藻	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i> ( L. ) Ralfs.	+	+	+		+
伊沙束丝藻	<i>Aphanizomenon issatschenkoi</i> ( Usacev ) Proschk. -Lavr.		+	+		
细小隐球藻	<i>Aphanocapsa elachista</i> W. et G. S. West	+	+	+		+
美丽隐球藻	<i>Aphanocapsa pulchra</i> ( Kütz. ) Kab.	+				+
静水隐杆藻	<i>Aphanothece stagnina</i> ( Spr. ) A. Br.		+			
钝顶节旋藻	<i>Arthrospira platensis</i> ( Nordst. ) Gomont	+	+	+	+	+
湖沼色球藻	<i>Chroococcus limneticus</i> Lemm.	+	+	+		+
小型色球藻	<i>Chroococcus minor</i> ( Kütz. ) Näg.	+	+	+	+	+
微小色球藻	<i>Chroococcus minutes</i> ( Kütz. ) Näg.	+	+	+		+
束缚色球藻	<i>Chroococcus splendidus</i> Jao.	+	+			
光辉色球藻	<i>Chroococcus splendilus</i> Jao.			+		
膨胀色球藻	<i>Chroococcus turgidus</i> ( Kütz. ) Näg.	+	+	+		+
不定腔球藻	<i>Coelosphaerium dubium</i> Grunow		+	+		
柔软腔球藻	<i>Coelosphaerium kuetzingianum</i> Näg.	+	+	+	+	+
静水柱孢藻	<i>Cylindrospermum stagnale</i> ( Kütz. ) Born. et Flah.	+				
针状蓝纤维藻	<i>Dactylococcopsis acicularis</i> Lemm.	+	+	+		+
针晶蓝纤维藻	<i>Dactylococcopsis raphidioides</i> Lemm.	+	+	+		+
斯氏蓝纤维藻	<i>Dactylococcopsis smithii</i> Chod.		+			
点状粘球藻	<i>Gloeocapsa punctata</i> Näg.		+			+
湖生束球藻	<i>Gomphosphaeria lacustris</i> Chod.	+	+	+	+	+
螺旋鞘丝藻	<i>Lyngbya contarata</i> Lemm.	+	+	+		
湖泊鞘丝藻	<i>Lyngbya limnetica</i> Lemm.	+	+	+	+	+
马氏鞘丝藻	<i>Lyngbya martensiana</i> Men.	+	+			
旋折平裂藻	<i>Merismopedia convoluta</i> Breh		+	+		
优美平裂藻	<i>Merismopedia elegans</i> A. Br.	+	+	+		+
银灰平裂藻	<i>Merismopedia glauca</i> ( Ehr ) Näg.	+	+	+	+	+
细小平裂藻	<i>Merismopedia minima</i> Beck.	+	+	+	+	+
点状平裂藻	<i>Merismopedia punctata</i> Meyen.	+	+	+	+	+
微小平裂藻	<i>Merismopedia tenuissima</i> Lemm.	+	+	+		+
铜绿微囊藻	<i>Microcystis aeruginosa</i> Kütz.	+	+	+	+	
放射微囊藻	<i>Microcystis botrys</i> Teiling	+		+		
水华微囊藻	<i>Microcystis flos-aquae</i> ( Wittr. ) Kirchner	+	+	+	+	+
具缘微囊藻	<i>Microcystis marginata</i> ( Menegh ) Kütz.	+	+			+

续表 1

种名	拉丁文名	永定河水系	北运河水系	大清河水系	蓟运河水系	潮白河水系
挪氏微囊藻	<i>Microcystis novacekii</i> (Komárek) Compère	+	+	+	+	+
假丝微囊藻	<i>Microcystis pseudofilamentosa</i> Grow.	+				
史密斯微囊藻	<i>Microcystis smithii</i> Komárek & Anagnostidis					+
惠氏微囊藻	<i>Microcystis wesenbergii</i> Komárek	+	+	+		+
泡沫节球藻	<i>Nodularia spumigena</i> Mert.	+				
球形念珠藻	<i>Nostocs phaeurucum</i> Vauch.	+	+	+		+
美丽颤藻	<i>Oscillatoria Formosa</i> Bory.	+				
清浄颤藻	<i>Oscillatoria sancta</i> ( Kütz. ) Gom.			+		
阿氏颤藻	<i>Oscillatoria agardhii</i> Gom.	+	+	+		+
两栖颤藻	<i>Oscillatoria amphibia</i> Ag.	+	+	+	+	
泥污颤藻	<i>Oscillatoria limosa</i> Ag.	+	+	+		+
巨颤藻	<i>Oscillatoria princeps</i> Vauch.	+	+	+		+
灿烂颤藻	<i>Oscillatoria splendida</i> Grev.	+				
小颤藻	<i>Oscillatoria tenuis</i> Ag.	+	+	+	+	+
窝形席藻	<i>Phormidium foveolarrum</i> ( Mont. ) Gom.		+			
小席藻	<i>Phormidium tenue</i> ( Menegh. ) Gom.	+	+	+	+	+
链状伪鱼腥藻	<i>Pseudanabaena catenate</i> Lauterb	+	+	+	+	+
伪鱼腥藻 sp.	<i>Pseudoanabaena</i> sp.	+	+	+	+	+
弯头尖头藻	<i>Raphidiopsis curvata</i> Fritsch	+	+	+		+
中华尖头藻	<i>Raphidiopsis sinensia</i> Jao.	+	+	+	+	+
饶氏胶须藻	<i>Rivularia jaoi</i> Chu			+		+
大螺旋藻	<i>Spirulina maior</i> Kütz.	+	+	+		
极大螺旋藻	<i>Spirulina maxima</i> Setch. et. Gardn.	+	+			
螺旋藻 sp.	<i>Spirulina</i> sp.	+		+		

注:“ + ”代表发现该物种,无“ + ”代表没有发现该物种

2.1.2 蓝细菌优势种分布 根据相对重要性指数 IRI 北京市蓝细菌重要种包括小型色球藻 (A1)、湖泊鞘丝藻 (A2)、水华束丝藻 (A3)、小席藻 (A4)、钝顶节旋藻 (A5)、小颤藻 (A6)、铜绿微囊藻 (A7)、水华微囊藻 (A8)、微小色球藻 (A9)、微小平裂藻 (A10)、两栖颤藻 (A11)、银灰平裂藻 (A12)、细小隐球藻 (A13)、点状平裂藻 (A14)、惠氏微囊藻 (A15), 其中 A1 ~ A8 为优势种。景观水体的优势种前三位分别为小型色球藻、小颤藻、小席藻; 水源水库的优势种为湖泊鞘丝藻、小型色球藻、水华束丝藻。蓝细菌优势种中微囊藻属 (*Microcystis*)、平裂藻属 (*Merismopedia*)、色球藻属 (*Chroococcus*) 和颤藻属 (*Oscillatoria*), 这些藻属的种类或品系产生的次生代谢物易形成微囊藻毒素, 引起人类急慢性中毒<sup>[10]</sup>。五大水系景观水体的优势种和水库优势种见表 2。

2.2 北京市蓝细菌密度时空变化

2016 年平均密度为  $0.16 \times 10^6$  ind/L,2017 年平均密度为  $7.32 \times 10^6$  ind/L,2018 年平均密度为  $3.20 \times 10^6$  ind/L。三年内 5 月的平均密度为  $3.81 \times 10^6$  ind/L,9 月的平均密度为  $6.87 \times 10^6$  ind/L。

2.2.1 蓝细菌密度季节对比 首先对北京市各水体进行时间变化分析,结果表明密度有明显的季节变化,北京市整体蓝细菌密度 9 月大于 5 月。景观水体中蓝细菌密度 9 月大于 5 月,5 月宛平湖平均密度最高 ( $14.91 \times 10^6$  ind/L),9 月门城湖的平均密度达到峰值 ( $23.06 \times 10^6$  ind/L)。其中龙潭公园、小清河、玉渊潭大、玉渊潭小、柳荫公园的 5 月密度高于 9 月;水源水库中 9 月密度同样明显大于 5 月,官厅水库的 5 月 ( $2.06 \times 10^6$  ind/L) 和 9 月 ( $7.47 \times 10^6$  ind/L) 密度均为最大,其中沙河水库、牛口峪和玉渡山的蓝细菌密度 5 月高于 9 月 (图 3)。

表 2 北京市五大水系蓝细菌优势种的 IRI 相对指数

Table 2 IRI of dominant species of cyanobacteria in five water systems in Beijing

水系 优势种	景观水体				水源水库					总体
	永定河	北运河	大清河	潮白河	永定河	北运河	大清河	蓟运河	潮白河	
A1	1 441.6	4 083.2	3 631.2	3 460.8	3 032.0	2 348.0	4 552.3	2 326.2	3 216.9	
A2	2 028.2	1 917.7	3 527.2	2 328.9	4 064.2		1 856.7	3 045.6	4 776.1	2498.9
A3	1 892.0	1 278.9	2 316.6	3 487.8	1 841.4	3 287.2	1 076.4		3 708.4	2 391.5
A4		946.1	4 562.2	2 647.3	1 375.3	2 511.3	789.1	3 492.0	2 375.3	1 614.8
A5	563.8	1 587.7		1 756.7	1 956.5		1 360.6	559.6	3 019.6	1 526.6
A6		1 553.0	4 200.6						809.4	1 491.5
A7		1 180.2								1 180.2
A8	1 529.1			1 830.5	744.4	1 641.0		1 049.2	1 034.1	
A9		1 016.2		1 564.0	3 223.4		710.4		1 178.6	980.2
A10	642.6	989.0	1 485.0	877.0					871.5	
A11	719.7		1 110.4		794.7		1 196.8	1 226.6		799.5
A12	734.1	602.0		583.7	593.5		542.7	2 145.4	958.3	739.7
A13		743.5		800.9	541.0	903.7			1 280.8	651.9
A14	528.1			1 549.1			943.8		614.4	
A15									1 228.9	505.2

注:空格表示该水系没有该物种,下表同

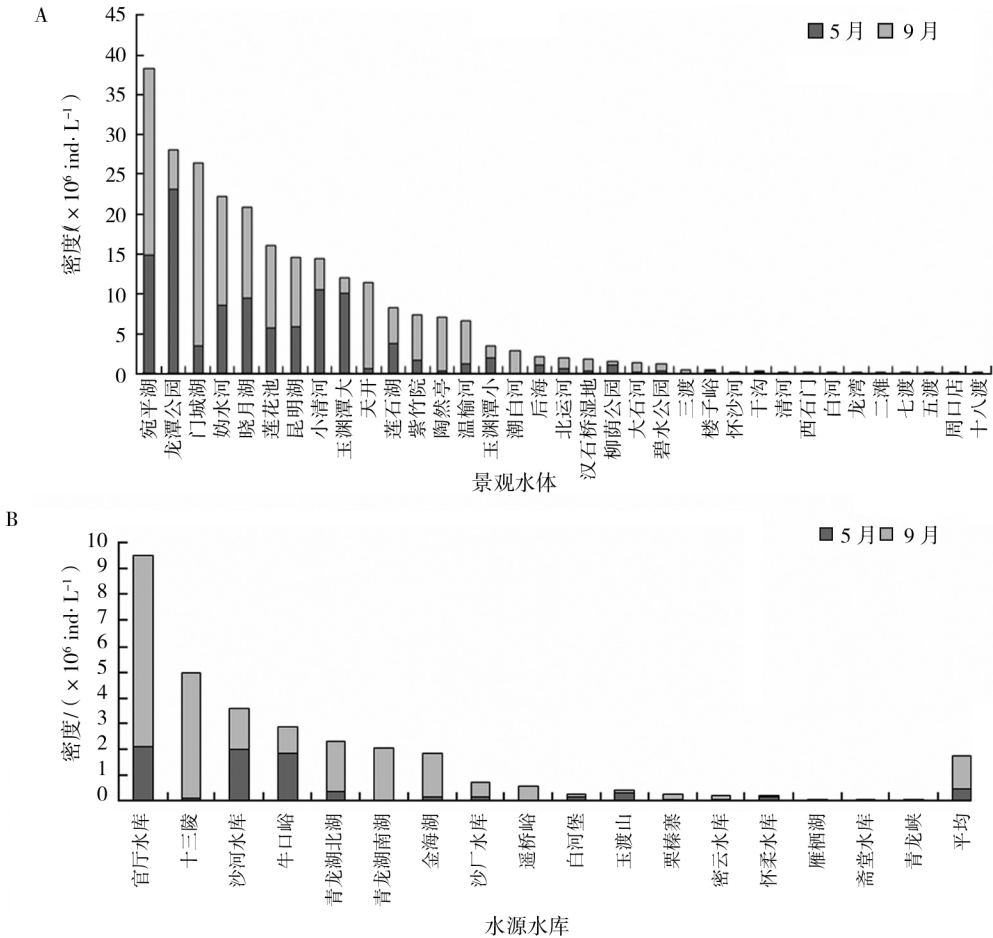


图 3 北京市各水体蓝细菌密度空间变化

Fig. 3 Spatial variation of cyanobacterial density in various water bodies in Beijing

2.2.2 蓝细菌密度年变化 如图 4 所示,对部分水体的密度年增降变化进行比较,整体密度下降的较多,集中在永定河水系和北运河水系。景观水体中,门城湖、陶然亭、碧水公园和汉石桥湿地与其他水体不同,密度增多;七渡变化不大。水源水库中,沙河水库、金海湖和密云水库的密度增

大;怀柔水库变化不大,密度较稳定。

2.2.3 蓝细菌密度在浮游植物中占比的时空变化 各水体蓝细菌密度占浮游植物百分比按年变化整体上占比下降,按季节变化整体密度 9 月大于 5 月,但莲花池、玉渊潭大、玉渊潭小、小清河、牛口峪、怀柔水库在总浮游植物中 5 月大于 9 月(表 3)。

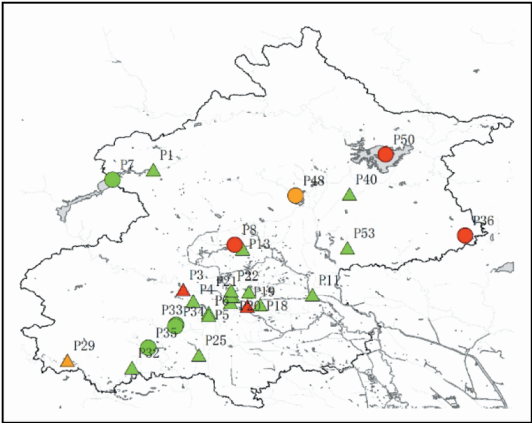


图 4 各水体蓝细菌密度年增降分布

Fig. 4 Distribution table of annual increase and decrease of cyanobacteria density in each water body

三角形为景观水体,圆形为饮用水源水库,红色代表增长,绿色代表下降,橙色代表密度变化较稳定,图 6 同

The triangle is the landscape water body, the circle is the drinking water source reservoir, the red represents growth, the green represents decline, and the orange represents the density change is more stable, the same figure 6

表 3 北京市各水体蓝细菌密度占浮游植物总密度百分比

Table 3 The cyanobacteria density percentage of total phytoplankton density in water bodies in Beijing

站 位	密度占比/%				站 位	密度占比/%					
	2017.06	2017.09	2018.06	2018.09		2016.06	2016.09	2017.06	2017.09	2018.06	2018.09
奶水河	66.3	79.8	3.7	27.9	五渡				16.7	3.7	0.0
清水河				0.0	七渡			3.7	11.1	14.3	0.0
门城湖	37.3	75.4	11.8	62.4	西石门				0.0	5.6	5.0
莲石湖	91.3	83.2	8.3	36.1	十八渡			6.7	0.0	0.0	0.0
晓月湖	77.9	86.2	8.0	53.6	天开			5.8	77.5	15.9	29.9
宛平湖	79.2	91.8	11.5	92.4	青龙湖北湖			30.9	64.2	1.9	6.5
官厅水库	68.4	70.3	10.7	59.7	青龙湖南湖				86.3		29.0
沙河水库	31.3	7.7	5.1	30.7	牛口峪			48.6	3.7	13.4	23.1
玉渡山			8.3	27.5	金海湖			21.5	44.2	3.3	28.9
斋堂水库				1.1	潮白河	4.0			57.5		
北运河	22.6	65.7	3.2	4.7	白河				39.0		0.0
清河			2.2	8.3	怀沙河						19.4
温榆河	16.2	50.4	8.6	18.5	碧水公园		17.5		49.1	8.0	3.3
昆明湖	64.3	86.4			干沟	15.4	20.0				
后海	46.8	51.4	3.8	7.3	二滩	0.0	15.7				
莲花池	64.6	71.4	37.9	11.5	龙湾	5.0	25.0				
柳荫公园			9.7	10.1	楼子峪	8.2	29.2				
龙潭公园	63.5	77.9	16.0	20.3	白河堡	11.5	24.6				
陶然亭		45.5	8.2	24.9	栗榛寨	17.9	49.0				
玉渊潭大	80.5	62.9	30.1	3.9	沙厂水库	22.9	43.7				
玉渊潭小	82.3	60.7	26.8	10.1	怀柔水库	28.1	4.2			11.3	
紫竹院	52.8	87.5	6.7	17.2	遥桥峪	0.0	54.4				

续表 3

站 位	密度占比/%				站 位	密度占比/%					
	2017.06	2017.09	2018.06	2018.09		2016.06	2016.09	2017.06	2017.09	2018.06	2018.09
十三陵水库	19.7	71.1			密云水库	2.6	51.6		70.7	8.3	3.8
大石河	7.0	51.9			雁栖湖	0.0	6.7				
小清河	77.5	40.5	34.9	8.8	青龙峡	10.0	0.0				
周口店	5.3	0.0			汉石桥湿地			53.5		10.4	44.9
三渡	0.0	71.4	0.0	0.0							

2.3 北京市蓝细菌生物量时空变化

2016 年平均生物量为 0.001 25 mg/L,2017 年为 0.012 95 mg/L ,2018 为 0.011 5 mg/L,2018 年与 2017 年年均生物量相对减少但相差不大。5 月平均生物量为 0.007 mg/L,9 月平均生物量为 0.019 mg/L,9 月明显高于 5 月,可能与蓝藻喜高温有关。

2.3.1 蓝细菌生物量季节变化 北京市景观水体中生物量 9 月大于 5 月,龙潭公园生物量在 5

月最多(0.03 mg/L),宛平湖生物量在 9 月最多 (0.12 mg/L), 其中龙潭公园、昆明湖、温榆河、玉渊潭大、莲花池、小清河、玉渊潭小、楼子峪、汉石桥湿地、干沟、周口店、五渡、十八渡的生物量 5 月比 9 月高;水源水库中 9 月生物量明显大于 5 月生物量,5 月青龙湖北水库的生物量最多,9 月官厅水库生物量最多,其中沙厂水库、牛口峪、怀柔水库、青龙峡的生物量 5 月比 9 月高(图 5)。

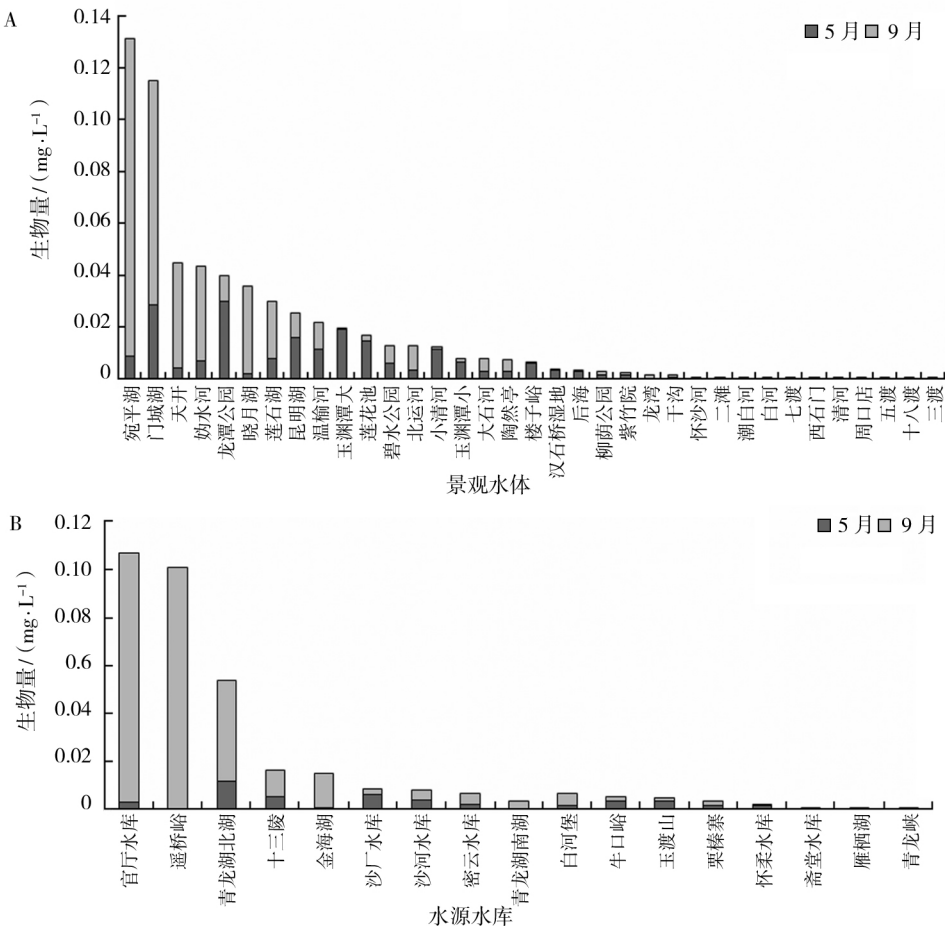


图 5 北京市各水体生物量时间变化

万方数据

Fig. 5 Time variation of cyanobacterial biomass in various water bodies in Beijing



2.3.2 蓝细菌生物量年变化 如图6所示,对五大水系部分水体的生物量年增降进行比较,整体来看生物量减少,其中景观水体中永定河水系晓月湖和宛平湖,北运河水系的玉渊潭大、莲花池和陶然亭,潮白河水系的碧水公园和汉石桥湿地的生物量呈现增长的趋势,其他水体生物量均下降;水源水库中永定河水系官厅水库和沙河水库,大清河水系的青龙湖北湖水库等生物量下降,其他水体生物量上升。

2.3.3 蓝细菌生物量在浮游植物中占比的时空变化 各水体蓝细菌的生物量占浮游植物百分比按年变化来看整体下降,但莲花池、玉渊潭大、金海湖的百分比上升;按季节变化来看整体9月大于5月。但门城湖、沙河水库、后海、莲花池、柳荫公园、玉

渊潭大、玉渊潭小、十三陵水库、小清河、牛口峪、怀柔水库的生物量占比9月小于5月(表4)。

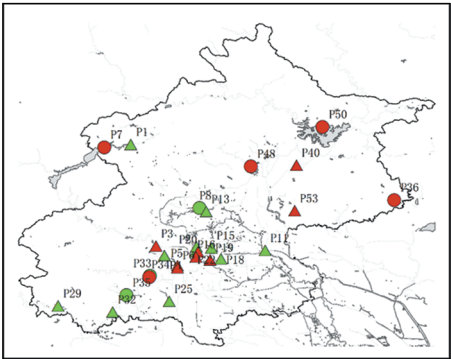


图6 各水体蓝细菌生物量年增降分布  
Fig.6 Distribution map of cyanobacteria biomass increase and decrease in each water body

表4 北京市各水体蓝细菌生物量占浮游植物总生物量百分比

Table 4 The cyanobacterial biomass of water bodies in Beijing accounts for the total

站位	生物量占比/%				站位	生物量占比/%					
	2017.06	2017.09	2018.06	2018.09		2016.06	2016.09	2017.06	2017.09	2018.06	2018.09
妫水河	4.0	33.0	0.0	1.2	五渡				55.6	0.3	0.0
清水河				0.0	七渡			5.6	8.8	13.3	0.0
门城湖	53.3	35.2	13.4	26.8	西石门				0.0	1.4	0.1
莲石湖	49.8	46.4	3.5	28.5	十八渡			10.1	0.0	0.0	0.0
晓月湖	1.6	38.4	4.4	29.2	天开			4.2	23.4	9.0	12.3
宛平湖	19.4	82.5	10.7	70.5	青龙湖北湖			13.5	17.1	0.9	0.3
官厅水库	6.4	30.5	11.7	19.2	青龙湖南湖				46.0		4.9
沙河水库	27.4	2.6	0.9	19.0	牛口峪			13.0	0.7	3.2	1.8
玉渡山			13.5	32.4	金海湖			0.2	5.5	0.1	8.7
斋堂水库				0.1	潮白河	0.3			0.9		
北运河	15.2	29.6	1.7	1.2	白河				4.6		0.0
清河			0.3	0.9	怀沙河						5.7
温榆河	71.0	3.4	1.6	3.0	碧水公园		17.5		4.0	4.9	1.4
昆明湖	6.4	6.9			干沟	3.4	2.2				
后海	26.9	2.5	0.5	1.4	二滩	0.0	18.0				
莲花池	1.0	1.4	13.6	0.6	龙湾	4.4	21.4				
柳荫公园			6.5	5.0	楼子峪	7.9	0.0				
龙潭公园	30.1	93.7	1.8	2.1	白河堡	0.6	3.9				
陶然亭		0.6	7.2	4.1	栗榛寨	19.7	20.7				
玉渊潭大	26.4	2.0	34.0	1.6	沙厂水库	11.1	14.6				
玉渊潭小	57.9	2.5	15.4	7.0	怀柔水库	23.9	2.1			2.0	
紫竹院	6.1	5.3	0.3	9.8	遥桥峪	0.0	32.0				
十三陵水库	13.5	2.9			密云水库	0.2	8.1		17.4	2.0	1.0
大石河	1.8	61.7			雁栖湖	0.0	0.2				
小清河	42.5	2.1	9.0	0.2	青龙峡	0.5	0.0				
周口店	2.7	0.0			汉石桥湿地			2.1		3.7	5.5
三渡	万无数据	0.1	0.0	0.0							

2.4 北京市蓝细菌多样性指数季节变化

调查期间北京市各水体 3 年的平均多样性指数为 0.45,2016 年为 0.384,2017 年为 1.515,2018 年为 1.736,多样性指数增加。各水体蓝细菌多样性指数总体趋势是 9 月大于 5 月。景观水体中,门城湖在 5 月多样性指数最大(3.96 mg/L)

),天开在 9 月多样性指数最大(5.75 mg/L)。其中莲石湖、小清河、昆明湖、楼子峪、玉渊潭大、汉石桥湿地、干沟的多样性指数 5 月大于 9 月;水源水库中,怀柔水库在 5 月达到最大,官厅水库在 9 月最大。其中沙河水库、金海湖的多样性指数 5 月小于 9 月(图 7)。

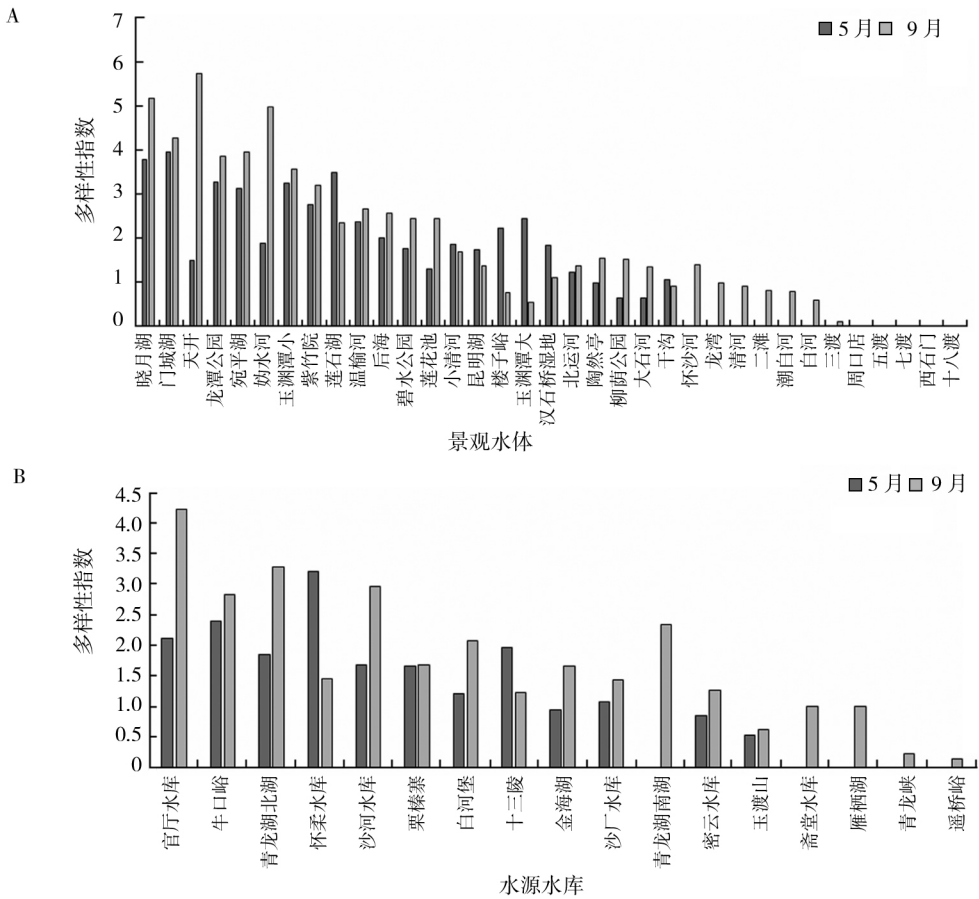


图 7 北京市各水体蓝细菌多样性时间变化

Fig. 7 Time variation of cyanobacterial diversity in various water bodies in Beijing

2.5 北京市各水体蓝细菌与环境因子典范对应分析

2.5.1 北京市各水体蓝细菌群落与环境因子关系分析 如图 8 所示,对北京各种水体的优势种做 CCA 分析并与相关性分析结果相结合,得出北京市蓝细菌中的大部分优势种受各种环境因子的综合影响。且大部分优势种的密度和生物量与活性磷、叶绿素 a、温度、溶解氧、总碱度、总硬度、pH 呈正相关,与 TN、TP 呈负相关。其中水华束丝藻、湖泊鞘丝藻、水华微囊藻、小席藻的密度与 pH 呈显著正相关( $r=0.300, p=0.029; r=0.466,$

$p=0; r=0.466, p=0.048; r=0.449, p=0.001$ ),水华束丝藻、小形色球藻的密度与 COD 呈显著正相关( $r=0.304, p=0.027; r=0.271, p=0; r=0.049$ )。2.5.2 典型水体蓝细菌群落与环境因子关系 选取典型景观水体 IRI 指数超过 500 的重要物种,对其与理化因子进行 DCA 分析,其中得出 Lengths of gradient 的第一轴均大于 2 ,并做 CCA 分析,表明 CCA 分析结果可靠,如图 9 所示。其中龙潭公园的 B3、D3 与 COD、硝酸态氮呈正相关,D1、D8、B8、B9 与氨态氮、总氮呈正相关,与溶

解氧、活性磷呈负相关。小清河的 D7、D8 与 TP、透明度呈正相关,与温度、pH 呈负相关。玉渊潭大的 D8、D15、B8、B9、B15 与 TP、氨态氮呈正相关,与活性磷呈负相关;B4、D4 与叶绿素 a 呈正相关,与总硬度、总碱度呈负相关。玉渊潭小的 D1、D13、B13 与 TN 呈正相关,与硝酸态氮、Do 呈负相关;B4、D4、D11、B11 与 COD、叶绿素 a 呈正相关,与总碱度、总硬度呈正相关;B8、B9、D8 与 TP、氨态氮呈正相关,与活性磷呈负相关。汉石桥湿地公园的 D3、B3 与 COD 呈正相关。莲花池公园的 B8、B9、D8 与 TP 叶绿素 a 呈正相关,与温度呈负相关;D3、B3 与 COD 呈正相关;B1、D1 与 Do、氨态氮呈正相关,与亚硝酸态氮呈负相关。门城湖公园的 B1、D1 与活性磷呈正相关与亚硝酸态氮、COD 呈负相关;B11、D11 与亚硝酸态氮、COD 呈正相关,与活性磷呈负相关;B2、B13、B15、B9、D2、D13、D15 与总碱度、总硬度和氨态氮呈正相关与 pH、TP 和叶绿素 a 呈负相关。天开水库的 B4、D4 与总硬度、总碱度和亚硝酸态氮呈正相关,与氨态氮、温度呈负相关;B3、B7、B8、B9、D3、D7、D8 与总磷、叶绿素 a 呈正相关,与 pH、硝酸态氮呈负相关。紫竹院公园的 B4、B7、D4、D7 与叶绿素 a、总磷、亚硝酸态氮呈正相关,与温度呈负相关。

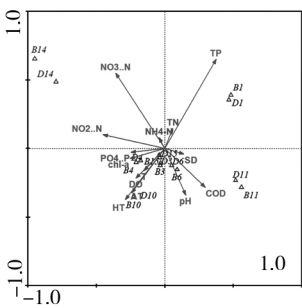
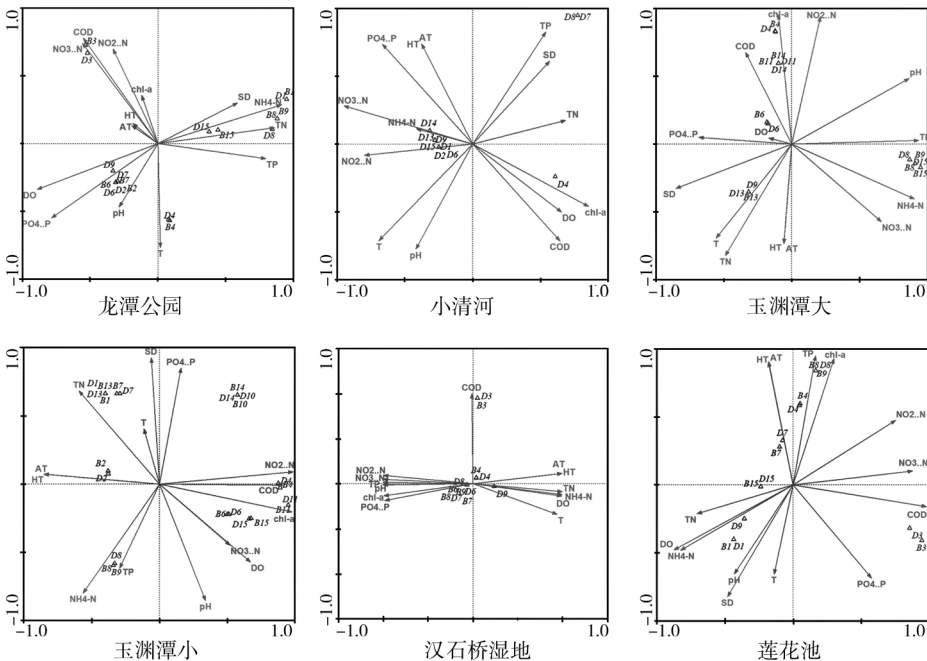


图8 各水体蓝细菌优势种与理化因子的典范对应分析

Fig.8 Canonical correspondence analysis of dominant species and physical and chemical factors of cyanobacteria in various water bodies

密度(D)和生物量(B)优势种一致,1:水华束丝藻,2:细小隐球藻,3:钝顶节旋藻,4:小型色球藻,5:微小色球藻,6:湖泊鞘丝藻,7:银灰平裂藻,8:点状平裂藻,9:微小平裂藻,10:铜绿微囊藻,11:水华微囊藻,12:惠氏微囊藻,13:两栖颤藻,14:小颤藻,15:小席藻,下图同

The dominant species of density (D) and biomass (B) are the same, respectively, 1: *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs., 2: *Aphanocapsa elachista*, 3: *Arthrospira platensis*, 4: *Chroococcus minor* (Kütz) Näg., 5: *Chroococcus minutus* (Kütz) Näg., 6: *Lyngbya limnetica* Lemm., 7: *Merismopedia glauca* (Ehr) Nag, 8: *Merismopedia punctata*, 9: *Merismopedia tenuissima*, 10: *Microcystis aeruginosa*, 11: *Microcystis flos-aquae*, 12: *Microcystis wesengbergii*, 13: *Oscillatoria amphibibia* Ag., 14: *Oscillatoria tenuis* Ag., 15: *Phormidium tenue* (Menegh.) Gom., The following picture is consistent



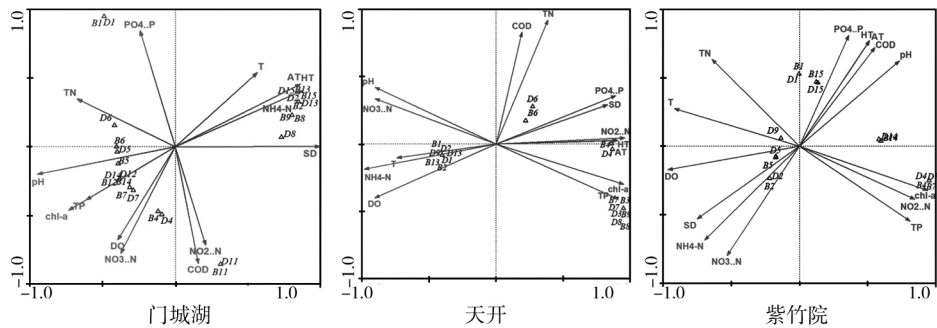


图9 典型景观水体重要物种与理化因子的典范对应分析

Fig. 9 Typical correspondence analysis of important species and physical and chemical factors of typical landscape water

对水源水库的重要物种进行 CCA 分析,如图 10 所示。其中沙河水库 B1、B3、B9、D1、D3、D9 与 TP 呈正相关,与 TN 呈负相关;B4、D4 与 COD、亚硝酸态氮呈正相关与硝酸态氮呈负相关。牛口峪水库的 B6、D6 与氨态氮呈正相关,与 TN 呈负相关;B4、D4 与透明度和叶绿素 a 呈正相关,与硝酸

态氮呈负相关。金海湖(海子水库)的 B3、D3 与亚硝酸态氮、叶绿素 a 呈正相关;B4、D4 与透明度呈正相关与 TP 呈负相关,密云水库的 B5、D5 与 TP、氨态氮和叶绿素 a 呈正相关与 TN、总硬度、总碱度和亚硝酸态氮呈负相关;B3、B11、B12、D3、D11、D12 与 DO、COD 呈正相关,与温度、pH 呈负相关。

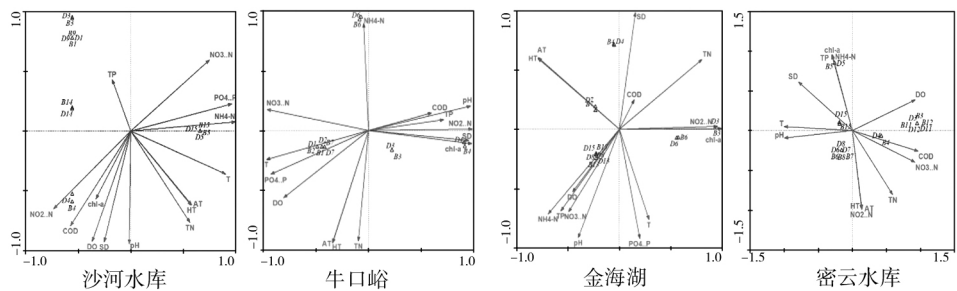


图10 水源水库重要物种与理化因子的典范对应分析

Fig. 10 Canonical correspondence analysis of important species and physical and chemical factors in water source reservoir

3 讨论

蓝细菌是喜温藻类,最适宜温度为 25 ~ 35 ℃<sup>[11]</sup>,蓝细菌密度的季节变化明显,在 9 月最为旺盛,与文献报道较为一致<sup>[12]</sup>。景观水体和水源水库蓝细菌的年均密度和生物量均减少、多样性指数上升说明北京市环境治理有所改善。本研究通过各水体与环境因子的 CCA 分析发现蓝细菌优势种的密度与生物量与总氮总磷呈负相关,总氮影响不大,但与活性磷呈正相关,活性磷的含量是控制磷、限制蓝细菌生长的重要因素,与蓝藻喜高温、好强光、喜低氮高磷、喜高碱度和高 pH<sup>[13]</sup>的观点基本吻合。导致 TP 与多数优势种呈负相关与活性磷呈正相关的原因可能是因为活性磷是水体中游离的可直接被蓝细菌利用的有效磷,而

总磷是水体中有效磷和其他非有效磷的总和,随着环境的变化,有效磷与非有效磷之间可以相互转化。因此水体中总磷的增加可能是由于非有效磷含量的增加,而这种增加可能会使有效磷的含量降低,从而体现出总磷与蓝细菌呈负相关,与活性磷呈正相关。

水体富营养化及其引发的藻类水华是世界各国共同面临的水环境污染问题<sup>[14]</sup>,在一定程度上,水体中浮游藻类密度越大(蓝、绿藻占优势),其富营养程度越重<sup>[15]</sup>。本研究中 2018 年蓝细菌密度较 2017 年减少,富营养化程度减轻。其中典型水体与环境因子的 CCA 分析中发现龙潭公园、小清河、玉渊潭大、玉渊潭小、莲花池、天开水库中的优势种点状平裂藻均与氨态氮、总磷呈正相关,与活性磷呈正相关的现象,与这些样站的营养化

程度有关,这也解释了这些水体与其他水体呈现不同变化规律的原因。

Shannon-Wiener 多样性指数可以反映水体中水质状况以及蓝细菌种类的多少,在水体污染越严重时,蓝细菌种类就会减少,多样性指数就越低。当物种多样性指数大于 3 时为轻污染或无污染,指数为 1~3 时为中度污染,指数为 0~1 时为重度污染<sup>[16]</sup>。北京市各水体均属于中度污染,2018 年较 2017 年有所增加,但变化不大,仍需加强管理。

尹涛等<sup>[17]</sup>描述的水华蓝藻中的平裂藻、微囊藻、纤维藻、鞘丝藻、螺旋藻在本研究中的奶水河、门城湖、莲石湖、晓月湖、宛平湖、官厅水库、温榆河、昆明湖、后海、莲花池、龙潭公园、陶然亭、玉渊潭大、玉渊潭小、紫竹院、十三陵水库、大石河、小清河、天开水库、青龙湖北、青龙湖南、牛口峪、金海湖、怀柔水库、潮河口、汉石桥湿地均有分布,需要监测和防治水华的爆发。赵文等<sup>[13]</sup>研究的淡水常见的产毒蓝藻中的微囊藻属、束丝藻属、节球藻属、鱼腥藻属、颤藻属、鞘丝藻属、念珠藻属、席藻属、节旋藻属均在本研究中有分布,特别是危害最大、在蓝藻中爆发频率最高产量最大的微囊藻属、束丝藻属在本研究中属于优势藻种。据报道,蓝藻毒素会引起急性腹泻,微囊藻毒和柱孢藻毒素会引起人类的肝脏和肾的损害,给人类健康造成威胁<sup>[18]</sup>。蓝藻过度生长产生的毒素及其残体分解时会消耗大量的溶解氧也会造成鱼类和其他浮游生物的死亡,降低水域生物多样性,破坏水域生态平衡<sup>[19]</sup>。

在环境适宜的情况下,氮磷的增多会引起蓝细菌密度快速增长并造成水体蓝藻占优势,增加水华爆发的可能性,为更好地治理北京市水环境,应降低氮磷等营养盐的输入,景观水体等不易流动的水体建立水循环设施,旅游季加强水源的保护和治理,进一步加强水源周围植被恢复。

水体微生物检测多靠传统方法和分子生物学方法,本研究蓝细菌分类使用显微镜直接观察法,通过对藻体的形状、颜色、大小等对微生物的种类进行判断,能够直接观察到蓝细菌的种类组成和丰度,但是由于部分细菌形态相似,显微镜观察误差较大,容易造成丢失不可培养的微生物信息<sup>[13]</sup>。随着分子生物学技术的发展,出现了基于 16S rDNA 的分析技术,它能够体现不同菌属之间的差异,直接在分子层面研究微生物的多样性,不仅能够检测到普通的可以培养的物

种,也可以检测到培养难度高、丰度低、从样品中曾经存活以及不易分离的物种,可以弥补传统显微镜观察的不足<sup>[20]</sup>。在未来的样品检查时会将两种检测方法结合起来,让细菌多样性的研究能够更加准确完善。

## 参考文献:

- [1] 韩博平. 中国水库生态研究的回顾与展望[J]. 湖泊科学, 2010, 22(2): 151-160.
- [2] 曲疆奇, 张清靖, 刘盼, 等. 北京陶然亭湖水质的时空变化[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 1077-1084.
- [3] 景焕平, 王崇臣, 王鹏. 北京河流水污染现状分析研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(6): 31-35.
- [4] 胡鸿钧, 魏印心. 2006. 中国淡水藻类[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [5] 赵文. 水生生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 499-510.
- [6] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [7] Shannon CE, Weaver W. The mathematical theory of communication Urbana, IL[M]. Illinois: University of Illinois Press, 1949.
- [8] Pinkas L, Oliphant MS, Iverson ILK. Fish Bulletin 152. Food habits of Albacore, Bluefin Tuna, and Bonito in California Waters[J]. Scripps Institution of Oceanography Library, 1970.
- [9] 李显森, 于振海, 孙珊, 等. 长江口及其毗邻海域鱼类群落优势种的生态位宽度与重叠[J]. 应用生态学报, 2013, 24(8): 2353-2359.
- [10] 张娟, 梁前进, 周云龙, 等. 官厅水库水体中微囊藻毒素及其与微囊藻细胞密度相关性研究[J]. 安全与环境学报, 2006, (5): 53-56.
- [11] Lassé Moritz, Deb-Choudhury S, Haines S, et al. The impact of pH, salt concentration and heat on digestibility and amino acid modification in egg white protein[J]. Journal of Food Composition & Analysis, 2015, 38: 42-48.
- [12] 宋永昌. 淀山湖富营养化及其防治研究[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1992.
- [13] 赵文, 魏杰. 我国饮用水源水库微生物多样性研究述评[J]. 微生物学杂志, 2018, 38(4): 1-10.
- [14] 沈菊芳. 水体中微囊藻毒素的污染状况和毒效应及其检测方法[J]. 上海预防医学, 2010, 22(5): 263-266.
- [15] 华振玲, 杜桂森, 武佃卫, 等. 北京温榆河浮游藻类与水质分析[J]. 世界科技研究与发展, 2010, 32(2): 213-215.
- [16] 沈韞芬, 顾曼如, 龚循矩, 等. 微型生物监测新技术[J]. 北京: 中国建筑工业出版社 1994.
- [17] 尹涛, 丁爱中. 北京南海子湖水华期间浮游植物对环境周期性变化的生理响应[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(4): 650-653.
- [18] Francesco Pomati, Silvia Sacchi, Carlo Rossetti, et al. The freshwater cyanobacterium planktothrix sp. fp1: molecular identification and detection of paralytic shellfish poisoning toxins[J]. Journal of Phycology, 2000, 36(3): 553-562.
- [19] 陈晓江, 杨劼, 杜桂森, 等. 官厅水库浮游植物功能群季节演替及其驱动因子[J]. 中国环境监测, 2016, 32(3): 74-81.
- [20] 张敏, 张艳, 黄丽丽, 等. 基于 16S rDNA 高通量测序方法比较新疆西北部地区乳品中微生物的多样性[J]. 食品科学, 2017, (20): 34-40.