

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2012.03.011

北京怀柔水库的浮游藻类与水体营养状态

张 妮¹ ,陈晓江¹ ,杜桂森¹ ,黄振芳² ,刘 波²

(1.首都师范大学生命科学学院,北京 100048;2.北京市水文总站,北京 100048)

摘要 对怀柔水库 2009—2010 年的浮游藻类及其主要理化指标进行监测,结果显示,库区水体中浮游藻类的平均细胞密度为 988.16 万个/L,其中蓝藻占 47.0%;优势种群中 3 种为富营养型水体指示种,2 种为中营养型水体指示种;库区 Shannon-Weaver 物种多样性指数为 2.49, Pielou 指数为 0.37,显示库区水体为中度污染;怀柔水库 5 项理化指标的综合 I_M 指数为 49.42,显示库区水体处于中营养状态。相关分析表明,水体中的 Chl-a 与 TN 呈极显著正相关($P < 0.01$),与 TP 呈显著正相关($P < 0.05$)。认为控制和治理怀柔水库水域、京密引水渠、怀沙河、怀九河流域的点源和面源污染,降低水体中的 TN 和 TP 含量,是控制怀柔水库水体向富营养化发展的主要方法。

关键词 怀柔水库;浮游藻类;理化指标;营养程度

中图分类号:X171

文献标识码:A

文章编号:1004-6933(2012)03-0055-04

Planktonic algae and trophic state in Huairou Reservoir in Beijing City

ZHANG Ni¹, CHEN Xiao-jiang¹, DU Gui-sen¹, HUANG Zhen-fang², LIU Bo²

(1. College of Life Science, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. Beijing Hydrologic Center, Beijing 100048, China)

Abstract :The planktonic algae and the main physicochemical factors were monitored in the Huairou Reservoir in Beijing City from 2009 to 2010. The results show that the average density of planktonic algae was 988.16×10^4 ind./L, of which cyanobacteria accounted for 47.0%; three of the dominant populations were eutrophic indicator species, and two were mesotrophic ones; the Shannon-Weaver diversity index was 2.49, and the Pielou index was 0.37, indicating that the water in the reservoir was moderately polluted; and the I_M index was 49.42, indicating that the water in the reservoir was in a mesotrophic state. The bivariate correlation analysis shows that Chl-a was positively correlated with TN at a high significance level of $P < 0.01$ and positively correlated with TP at a significance level of $P < 0.05$. It is pointed out that to control the point source pollution and non-point source pollution in the Huairou Reservoir, the Jingmi Diversion Canal, the Huaisha River, and the Huaijiu River, and to reduce the contents of TN and TP in the water can be considered principal measures against eutrophication in the Huairou Reservoir.

Key words :Huairou Reservoir; planktonic algae; physicochemical factor; trophic state

1958 年 7 月建成的怀柔水库属海河流域的潮白河水系,位于北京市怀柔城区西侧的怀九河与怀沙河交汇处,控制流域面积 525 km²,总库容 9 670 万 m³,相应水面面积 666.7 hm²,库区四周是 213.3 hm²

的防护林。入库水源除怀沙河、怀九河外,还有京密引水渠输入的来自密云水库的水。怀柔水库为首都北京主要地表饮用水源地之一,1990 年建成并运行的北京市第九水源厂直接从怀柔水库取水,取水量

基金项目:国家自然科学基金(50878113)

作者简介:张妮(1986—),女,硕士研究生,研究方向为藻类生理生态。E-mail: zhangni-620@163.com

通讯作者:杜桂森,教授。E-mail: duguisen@126.com

约 50 万 m³/d^[1]。

水体富营养化及其引发的蓝藻水华,已经给包括中国在内的许多国家的饮水安全造成了危害^[2-3]。1999 年以来,我国华北地区连续干旱,怀柔水库来水量减少,流域内点源、面源污染叠加,使怀柔水库库区的生源物质含量上升,水体有向富营养化发展的趋势。也曾有关于怀柔水库库区的水质和浮游藻类的报道^[4-5]。笔者于 2009—2010 年对怀柔水库的浮游藻类及其主要理化指标进行了监测,以期了解怀柔水库水体的营养状态及其主要制约因子,旨在为怀柔水库水体富营养化防治与水资源可持续利用提供依据。

1 监测与分析

1.1 监测断面和监测项目的选择

根据怀柔水库的湖盆形态与来水特点,在库区用 GPS 定位,设立 3 个具有代表性的监测断面:怀沙河入库口、怀九河入库口和大坝前库区,选择 10 项监测理化指标:SD、DO、COD_{Mn}、COD、BOD₅、TN、NH₄-N、TP^[6]、Chl-a 和浮游藻类^[7],于 2009 年和 2010 年的 5 月(春季)、8 月(夏季)和 10 月(秋季)定期做现场调查,同步采集水样,在实验室作定性分析、定量测定。

1.2 数据分析

用 Excel 和 SPSS17.0 软件对测定的数据进行统计分析。浮游藻类物种的多样性和均匀度分析采用 Shannon-Weaver 多样性指数(H')和 Pielou 均匀度指数(J')^[8]进行:

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \log_2 p_i \quad (1)$$

$$J = \frac{H'}{\log_2 N} \quad (2)$$

式中: s 为藻类的种数; N 为藻类的数量; p_i 为第 i 种藻类占有所有藻类数量的比例。

浮游藻类优势种用优势度来表示,其计算公式为

$$y = f_i p_i \quad (3)$$

式中: f_i 为第 i 种藻类出现的频率。

当优势度大于 0.02 时,该藻类定为优势种。

营养状态指数计算公式主要用来研究水库的营养状态。本文采取卡尔森营养状态指数计算公式^[9]来计算不同理化指标的营养状态指数:

$$I_{M_{\text{Chl-a}}} = 10 \times (2.46 + \ln(\text{Chl-a})/\ln 2.5)$$

$$I_{M_{\text{SD}}} = 10 \times (2.46 + (3.69 - 1.53 \times \ln(\text{SD}))/\ln 2.5)$$

$$I_{M_{\text{TP}}} = 10 \times (2.46 + (6.71 + 1.15 \times \ln(\text{TP}))/\ln 2.5)$$

$$I_{M_{\text{TN}}} = 10 \times (2.46 + (3.93 + 1.35 \times \ln(\text{TN}))/\ln 2.5)$$

$$I_{M_{\text{COD}}} = 10 \times (2.46 + (1.50 + 1.36 \times \ln(\text{COD}))/\ln 2.5)$$

2 结果与讨论

2.1 浮游藻类的群落结构与细胞密度

浮游藻类多为单细胞或群体,形态结构简单,处于食物链的开始端,对水环境的变化比较敏感,是国内外进行水环境生物监测的首选项目^[10-11]。从怀柔水库的水样中共检出浮游藻类 7 门 57 种(包括属和变种)^[12],其中绿藻门(*Chlorophyta*) 22 种(38.6%)、蓝藻门(*Cyanophyta*) 14 种(24.6%)、硅藻门(*Bacillariophyta*) 12 种(21.1%)、裸藻门(*Euglenophyta*) 5 种(8.8%)、甲藻门(*Pyrrophyta*) 2 种(3.5%)、隐藻门(*Cryptophyta*) 1 种(1.8%)、金藻门(*Chrysophyta*) 1 种(1.8%)。

2009—2010 年怀柔水库浮游藻类的平均细胞密度为 988.16 万个/L,其中蓝藻、绿藻、硅藻分别占 47.0%、19.8%、30.3%。2009—2010 年怀柔水库浮游藻类细胞密度比 1981 年(106.56 万个/L)增长 9.27 倍,其中蓝藻细胞密度增长 27.17 倍,所占比例上升 31.1%^[15](图 1)。蓝藻细胞密度及其在浮游藻类群落中所占比例的大幅度上升,显示近 30 a 来随着怀柔水库库区水环境的变化,水体营养程度在增加^[13]。

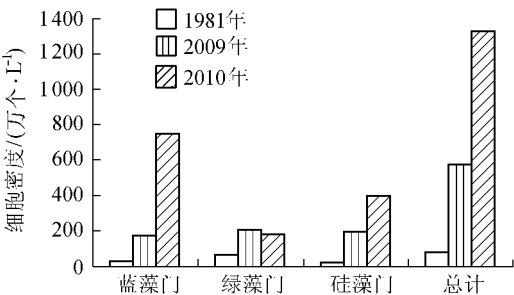


图 1 蓝藻门、绿藻门、硅藻门藻类细胞密度比较

2009 年 3 个监测断面怀沙河入库口、怀九河入库口和大坝前库区浮游藻类细胞密度差异不大,分别为 505.63 万个/L、448.86 万个/L 和 597.31 万个/L。而 2010 年怀沙河入库口浮游藻类细胞密度(2 305.45 万个/L)分别是怀九河入库口(1 316.903 万个/L)和大坝前库区(1 327.383 万个/L)浮游藻类细胞密度的 1.75 倍和 1.74 倍。这可能是由于怀沙河库区的水体流态和生源物质含量更适合浮游藻类生长增殖所致。

2.2 浮游藻类的优势种群

优势度分析显示,怀柔水库库区浮游藻类群落中有 5 个优势种群,其优势度值为 0.12 ~ 0.25(表 1),其中微囊藻(*Microcystic sp.*)、颤藻(*Oscillatoria*

sp.) 尖针杆藻(*Synedra acus*)为富营养型水体指示种 ,脆杆藻(*Fragilaria* sp.) 小环藻(*Cyclotella* sp.)为中营养型水体指示种^[7]。

表 1 怀柔水库浮游藻类优势种群(属)

优势种	优势度
尖针杆藻(<i>Synedra acus</i>)	0.12
脆杆藻(<i>Fragilaria</i> sp.)	0.14
小环藻(<i>Cyclotella</i> sp.)	0.14
微囊藻(<i>Mycrocystis</i> sp.)	0.19
两栖颤藻(<i>Oscillatoria amphibia</i>)	0.25

2.3 浮游藻类的物种多样性指数与均匀度指数

Shannon-Weaver 多样性指数可以反映水体的水质状况 ,当物种多样性指数大于 3 时 ,水体为轻污染或无污染 ;指数为 1~3 时为中度污染 ;指数为 0~1 时为重度污染^[8]。监测结果显示 ,2009—2010 年怀柔水库浮游藻类的 Shannon-Weaver 多样性指数平均值为 2.49(2.16~2.81) ,显示库区水体处于中度污染状态。

Pielou 均匀度指数的评价标准是 :0~0.3 为重污染 ,0.3~0.5 为中污染 ,0.5~0.8 为轻污染或无污染^[8]。怀柔水库浮游藻类 Pielou 均匀度指数平均值为 0.37(0.34~0.39) ,显示库区水体处于中污染程度 ,这与物种多样性指数分析得出的结论是一致的。

2.4 营养状态

怀柔水库 2009—2010 年 9 项理化指标的平均值为 : $\rho(\text{DO}) = 9.15 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{NH}_4\text{-N}) = 0.12 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{COD}_{\text{Mn}}) = 3.77 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{BOD}_5) = 1.45 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TP}) = 0.02 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{TN}) = 1.21 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{COD}) = 8.60 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{Chl-a}) = 2.84 \mu\text{g/L}$, $\text{SD} = 1.79 \text{ m}$ 。

水体中的 TN、TP、Chl-a、COD_{Mn} 和 SD 是反映水体营养程度的主要指标 ,而且这些指标间存在明显的相关性。

Aizaki 以 Chl-a 为基准 ,修正了 Cardson 提出的营养状态指数计算公式 ,较好地解决了浮游藻类以外的其他因子(水色、湖水中的溶解物质以及其他悬浮物质)对 SD 的影响 ,并分析了 Chl-a 与 TN、TP、COD_{Mn} 等指标的相互关系 ,得出系列营养状态指数计算公式。根据修正的卡尔森营养状态指数(I_M)评价标准 : $I_M \leq 37$ 为贫营养 , $I_M = 38 \sim 53$ 为中营养 , $I_M \geq 54$ 为富营养。在同一营养状态下 ,指数值越高 ,其营养程度越高^[13]。

2009—2010 年怀柔水库 5 项理化指标的 I_M 值 : $I_{M_{\text{TN}}} = 70.46$, $I_{M_{\text{TP}}} = 51.05$, $I_{M_{\text{COD}_{\text{Mn}}}} = 47.55$, $I_{M_{\text{Chl-a}}} = 36.19$, $I_{M_{\text{SD}}} = 46.54$ 综合 $I_M = 49.42$,营养级别为中。

2009—2010 年怀柔水库 5 项理化指标的综合 I_M 值在中级营养范围内 ,其中 TN 浓度偏高($I_{M_{\text{TN}}} =$

70.46) ,库区水体的主要污染物为 TN 和可降解有机物。怀柔水库 2010 年比 2009 年的综合 I_M 值增加 4.88 ,显示库区水体有向富营养发展的趋势。从 2009—2010 年怀柔水库 5 项理化指标的 I_M 值也可以看出 ,TN 和 TP 是怀柔水库水体向富营养化发展的主要制约因子。控制和治理怀柔水库水域、京密引水渠、怀沙河、怀九河流域的点源和面源污染 ,降低水体中的 TN 和 TP 含量是主要方法。

根据我国 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》 ,怀柔水库水体中的 DO、NH₄-N、BOD₅、TP、COD 属于Ⅰ类饮用水源水质标准 ,COD_{Mn} 属于Ⅱ类 ,怀柔水库是首都北京安全的地表饮用水源地 ,但其 TN 属于Ⅳ类 ,含量超标。

2.5 水环境因子的动态特征

在年周期中 ,怀柔水库温度呈现先上升后下降的趋势。监测期间怀柔水库春、夏、秋季的平均水温分别为 22.8℃、26.1℃、16.35℃ ,随着水温的升高 ,水体中 DO 质量浓度降低(图 2)。

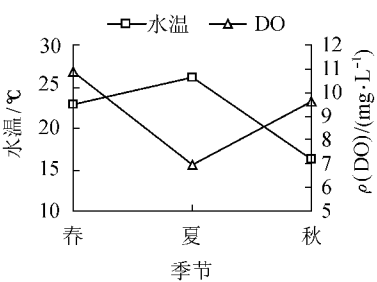


图 2 怀柔水库水温和 DO 质量浓度随季节变化情况

此外 ,随着水体中浮游藻类细胞密度因温度升高而增多 ,水体 SD 也明显降低。SD 的变化除与藻类细胞密度有关外 ,很大程度上还与水中有机物的含量有关(图 3)。随着有机物含量的升高 ,水体 SD 降低 ,水体 SD 与有机物含量呈现一定的负相关。

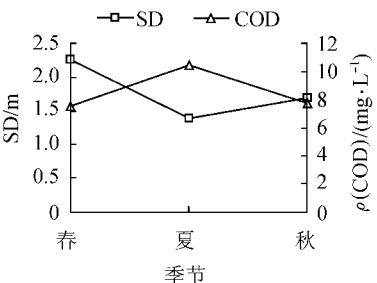


图 3 怀柔水库 SD 与 COD 质量浓度随季节变化情况

2.6 Chl-a 与 N、P 的相关性

Chl-a 是表明浮游藻类现存量的重要指标 ,而氮、磷是浮游藻类生长繁殖所必需的营养成分^[14-17]。这 3 者之间的相互关系对确定湖泊水体富营养化的限制因子具有重要意义。对怀柔水库 2009—2010 年的监测数据进行相关分析 ,结果显示 ,

库区水体中的 Chl-a 与 TN 呈现极显著正相关 ($P = 0$; $P < 0.01$) 与 TP 呈现显著正相关 ($P = 0.038$; $P < 0.05$) 表明库区水体中 N、P 对浮游藻类生长繁殖具有显著影响^[18] 且 TN 比 TP 对浮游藻类生长繁殖的影响更加显著。N、P 丰富是引起浮游藻类细胞密度增长较快且蓝藻占优势的重要原因。库区水体中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量只占 TN 含量的 10% 左右, 可见水体中还存在有大量其他形态氮(如 $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$)。2009 年和 2010 年怀柔水库 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度的平均值分别为 0.137 mg/L 和 0.09 mg/L, TN 质量浓度的平均值分别为 1.013 mg/L 和 1.403 mg/L, 由此可见, 2010 年比 2009 年怀柔水库的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 水平下降, 而 TN 水平却有所上升。有关报道指出, 在 5~30℃ 之间, 硝化细菌的硝化速度随着温度的升高而加快、随着温度的降低而减慢。监测期间的水温在 15~28.1℃ 之间, 2010 年怀柔水库库区水温较 2009 年高, 硝化速度快, 从而使更多的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。虽然 $\text{NO}_3\text{-N}$ 是一种氮源, 大多数藻类可以利用, 但是当水体中有 $\text{NH}_3\text{-N}$ 存在时, 藻类一般趋向于先利用 $\text{NH}_3\text{-N}$ 。2010 年怀柔水库水体中藻类密度是 2009 年的 2.33 倍, 浮游藻类数量增多, 将消耗更多的 $\text{NH}_3\text{-N}$, 导致水体中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量降低。据调查, 2010 年主汛期降雨量比常年减少 77.4%, 使怀柔水库上游来水量锐减, 导致水库库存水量不足, 污染物质和营养物质富集, TN、TP 含量升高。

3 结 论

怀柔水库水体营养程度在增加, 已处于中度污染状态, TN 和 TP 是怀柔水库水体向富营养化发展的主要制约因子。控制和治理怀柔水库、京密引水渠、怀沙河、怀九河流域的点源和面源污染, 降低水体中的 TN 和 TP 含量, 是控制怀柔水库水体向富营养化发展主要方法。

参考文献:

[1] 洪世华. 独具特色的怀柔水库[J]. 北京水利, 2002, 26 (4) : 45-47.

[2] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 太湖梅梁湾 2007 年蓝藻水华形成及取水口污水团成因分析与应急措施建议[J]. 湖泊科学, 2007, 19 (4) : 357-358.

[3] SOEMEK H, USTAAGLU M R, YAGCI M. A case report 'algal bloom of microcystis aeruginosa in a drinking-water body, Egirdir Lake, Turkey'[J]. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2008, 8 : 177-179.

[4] 吴洪旭, 兰骊东, 迈志杰. 怀柔水库富营养化防治措施[J]. 北京水务, 2008 (1) : 32-34.

[5] 陈阜东, 杜桂森. 怀柔水库的浮游藻类[J]. 北京师范大学

院学报: 自然科学版, 1984 (2) : 45-50.

[6] 国家环境保护总局. 水与废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

[7] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 2 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 239-245, 301-302.

[8] 沈锡芬. 微型生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工程出版社, 1990.

[9] 蔡庆华. 湖泊富营养化综合评价[J]. 湖泊科学, 1997, 9 (1) : 89-94.

[10] 刘宇, 沈建忠. 藻类生物学评价在水质监测中的应用[J]. 水利渔业, 2008, 28 (4) : 5-7.

[11] IVANKA T, RUMEN M, DETELINA B, et al. Phytoplankton community of the drinking water supply reservoir Borovitsa (South Bulgaria) with an emphasis on cyanotoxins and water quality[J]. Central European Journal of Biology, 2010, 5 (2) : 231-239.

[12] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类: 系统、分类及生态[M]. 北京: 中国科学出版社, 2006.

[13] GENTIL R C, TUCCI A, SANT'ANNA C L. Phytoplankton community dynamics and sanitary aspects of a eutrophic urban lake, San Paulo, SP[J]. Hoehnea, 2008, 35 (2) : 265-280.

[14] 顾丁锡, 舒金华. 湖泊水污染预测及其防治规划方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988. 32-37.

[15] KLAUSMEIER C A, LITCHMAN E, DAUFRESNE T, et al. Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton[J]. Nature, 2004, 429 : 171-174.

[16] 朱艾嘉, 黄良民, 许战洲. 氮磷对大亚湾大鹏澳海区浮游植物群落的影响: I. 叶绿素 a 与初级生产力[J]. 热带海洋学报, 2008, 27 (1) : 38-45.

[17] VREDE T, BALLANTYNE A, MILLE-LCELLSBLOM C, et al. Effects of N : P loading ratios on phytoplankton community composition, primary production and N fixation in a eutrophic lake[J]. Freshwater Biology, 2009, 54 (2) : 331-344.

[18] WANG X L, LU Y L, HE G Z, et al. Exploration of relationships between phytoplankton biomass and related environmental variables using multivariate statistic analysis in a eutrophic shallow lake: a 5-year study[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19 (8) : 920-927.

(收稿日期: 2011-05-11 编辑: 彭桃英)

