

密云水库水体营养状态分析

杜桂森¹ 刘晓端² 刘霞¹ 葛晓立² 潘小川³

(1. 首都师范大学生物系, 北京 100037;

2. 国家地质实验测试中心, 北京 100037;

3. 北京大学公共卫生学院 北京 100083)

摘要: 调研结果显示, 密云水库的营养特征为浮游藻类响应型。浮游藻类的群落结构是绿藻 (*Chlorophyta*)—硅藻 (*Bacillariophyta*) 型。库区水体 TN 0.86mg/L, TP 0.022mg/L, 浮游藻类的细胞密度 $405.23 \times 10^4/L$ 。4 项指标 (Tr、TP、COD_{mn}、chl_a) 的 TSI_M 值 40.1—49.6, 水体为中营养。但 TN、TP 和浮游藻类细胞密度增长较快, 水体向富营养发展的趋势明显。主要制约因素是面源、点源和内源对水体的污染。北京市水资源紧缺, 密云水库是主要饮用水源地。保护流域生态环境, 治理污染, 涵养水源, 实现水资源的可持续利用已很迫切。

关键词: 密云水库; 浮游藻类; 中营养; 水源保护

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1000-3270(2004)02-0191-06

密云水库位于北京的东北方约 90km, 北纬 $40^{\circ}23'$, 东经 $116^{\circ}50'$ 。平均海拔 75m, 总库容 43.75 亿 m^3 , 相应水面面积 188km², 最大水深 43.5m, 控制流域面积 15788km², 为华北地区最大的山谷型水库。是以防洪、灌溉为主的多年调节、综合利用的水利枢纽。20 世纪 80 年代以来, 由于北京地区水资源紧缺, 水库功能已转变为防洪、供水为主。

20 世纪以来, 世界上随着人口增加和经济发展, 淡水资源愈呈紧缺状态, 但污染却在加剧。防治水体富营养化是各个国家和地区面临的共同问题^[1]。北京是一个严重缺水的大型城市, 人均淡水资源量仅 300m³。密云水库每年供水近 7 亿 m^3 , 占全市地表供水量的 50%, 城市自来水厂供水量的 60%。密云水库的水量多少、水质优劣直接影响到首都人民生活 and 经济发展。对于密云水库水体的营养状况宋福等曾有报道^[2-5]。

为了解密云水库库区水体现阶段的营养状态、发展趋势和制约因素, 于 2001 年对库区水体和流域的社会经济状况进行了调研, 并结合 1980 年以来多次的调查、测定结果进行综合分析, 以期保护库区水质, 防止其向富营养化发展, 实现水资源的可持续利用提供依据。

1 研究方法

从生态系统中选择了与水体富营养化关系密切的 12 个项目, 即蓄水量、水深、水温、透明度 (Tr)、pH 值、总氮 (TN)、总磷 (TP)、化学耗氧量 (COD_{mn})、生化需氧量 (BOD₅)、溶解氧 (DO)、叶绿素 a (chl_a) 和浮游藻类进行分析。根据水库的形态学特征, 在库区选择了 8 个有代表性的断面 (图 1), GPS 定位。于 2001 年 5 月 (代表枯水期) 和 9 月 (代表丰水期) 两次作现场调查, 各断面从表层开始, 每隔 5m (深度) 同步取样, 分别进行定性、定量测定, 并对水库上游潮、白河流域的自然和社会经济状况进行调查。

2 结果与讨论

2.1 调查结果

库区水体物理、化学、生物指标的测定结果见表 1、2、3。

2.2 密云水库浮游藻类的群落组成和优势种群

2001 年从库区水体定性、定量样品中共鉴定到浮游藻类 7 门、94 种 (属), 细胞密度平均为 $405.23 \times 10^4/L$ 。其中绿藻门占 34.35%, 硅藻门占 28.16%, 蓝藻门占 4.30%, 金藻门占 25.50%, 隐藻门占 6.69%, 黄藻门占 0.37%, 甲藻门占 0.64% (表 3), 浮游藻类群落组成属于绿藻 (*Chlorophyta*)—硅藻

收稿日期: 2002-07-16; 修订日期: 2003-09-30

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (项目编号: G1999045705) 资助

作者简介: 杜桂森 (1947—) 男, 教授, 一直从事淡水藻类生态、水资源保护研究和本科生、研究生的教学与指导工作

(*Bacillariophyta*) 型。

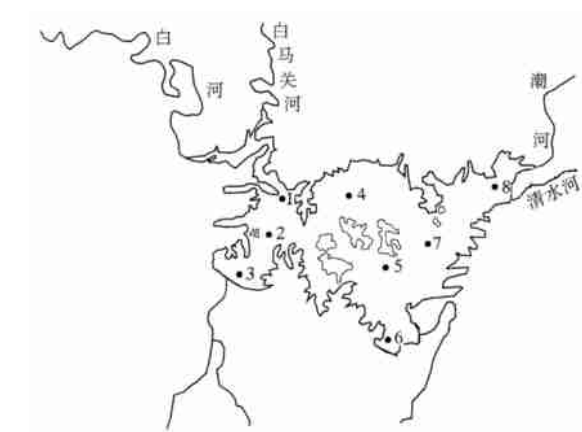


图1 密云水库采样断面分布图

Fig.1 Distribution of sampling section in Miyun Reservoir

库区水体浮游藻类在5月份优势种为: (1) 美丽星杆藻(*Asterionllaf armosa* Hassall.); (2) 巴豆叶脆杆藻

(*Fragilariacrotonensis* Kitton.); (3) 分歧锥囊藻(*Dinobryon divergens* Imh.), 出现频率均为100%; 亚优势种为库氏小环藻(*Cyclotella* Kütz. Thwaites), 出现频度为80%。9月份的优势种为: (1) 两喙尺骨针杆藻(*Synedra ulna* var. *amphirynchs* Her.); (2) 四齿光甲藻(*Glenodinium quadridens* Stein.); (3) 飞燕角甲藻(*Ceratium hirundinella* O. F. M.), 出现频率均为100%。

密云水库为大型、山谷型湖泊, 最大水深43.5m, 2001年蓄水量仅为13.5亿m³时, 平均水深23.63m, 超过了植物光合作用补偿点, 库区沉水植物很少, 仅在湖盆沿岸某些地方有少量菹草(*Potamogeton crispus* L.)、大茨草(*Najas marina* L.)和狐尾藻(*Myriophyllum spicatum* L.)等种类生长, 未采到漂浮和浮叶植物。库区北部湖边有少量禾本科(*Gramineae*)、莎草科(*Cyperaceae*)和蓼科(*Polygonaceae*)的挺水种类生长。湖泊的初级生产力主要决定于浮游藻类的群落组成和细胞密度^[6], 库区水体的营养特征为浮游藻类响应型。

表1 密云水库库区水体物理指标

Tab.1 Physical characters of water body in Miyun Reservoir

测定时间 Measured time	蓄水量(亿m ³) Water holding capacity	水温(℃) Water temperature	透明度(m) Transparency
2001年5月	13.2	13.9	3.12
2001年9月	13.8	15.9	1.49
平均 Mean	13.5	14.9	2.3

表2 密云水库库区水体化学指标

Tab.2 Chemical characters of water body in Miyun Reservoir

取样时间 Sampling time	pH 值	TN	TP (mg/L)	CODmn	BOD ₅	DO	Chla (μg/L)
2001年5月	8.26	0.612	0.019	1.71	0.55	7.39	2.63
2001年9月	8.33	1.102	0.025	2.21	0.62	3.34	5.64
平均 Mean	8.30	0.857	0.022	1.96	0.59	5.37	4.14

表3 密云水库浮游植物群落组成和细胞密度(×10⁴/L)

Tab.3 Community composition and cell density of phytoplankton in Miyun Reservoir

取样时间 Sampling time	细胞密度 Cell density	硅藻门 Bacillariophyta	绿藻门 Chlorophyta	蓝藻门 Cyanophyta	金藻门 Chrysophyta	隐藻门 Cryptophyta	黄藻门 Xanthophyta	甲藻门 Pyrophyta
2001年5月	311.73	45.53	42.45	4.28	202.25	16.15	0.079	0.99
2001年9月	498.73	182.73	235.91	30.57	4.39	38.05	2.93	4.16
平均 Mean	405.23	114.13	139.18	17.42	103.32	27.10	1.50	2.58
%	100	28.16	34.35	4.30	25.50	6.69	0.37	0.64

2.3 库区水体的营养状态

2.3.1 现阶段对于淡水湖泊营养程度的评价方法可归纳为 6 种类型^[7-9]。湖泊中 TN、TP、chl_a、COD_{mn} 和 Tr 是反映水体营养程度的主要指标,而且存在着明显的相关性。Aizaki 修正的 Carlson 提出的以透明度为基准的 TSI(Trophic state index) 计算公式,以叶绿素 a 为基准,较好地解决了浮游藻类以外的因子对透明度的影响,并分析了叶绿素与 TN、TP、COD 等指标的相互关系,得出系列 TSI_M 指数计算公式^[8],用指数的大小判断湖泊的营养程度: TSI< 37, 贫营养; TSI 38—53, 中营养; TSI> 53, 富营养。密云

水库 4 项参数的 TSI 值计算结果为:

$$TSI_M(Tr) = 47.5$$

$$TSI_M(TP) = 43.8$$

$$TSI_M(chla) = 40.1$$

$$TSI_M(COD_{mn}) = 49.6$$

密云水库 4 项参数的 TSI_M 值均在中营养范围内,密云水库水体的营养程度为中营养型,但 TN 浓度偏高(TSI_M= 61.6)。

2.3.2 Snindler 根据磷是湖泊富营养化主要限制因子的研究,提出了如表 4 所示的湖泊富营养化程度判定标准(现已被美国环保局采用)。根据此标准,密云水库库区水体为中营养型,但 TP 浓度偏高。

表 4 湖泊富营养化阶段的判定标准
Tab. 4 Judgement standard of lakes eutrophication

项目	贫营养	中营养	富营养	密云水库
Item	Deficiency nutrition	Middle nutrition	Eutrophication	Miyun Reservoir
TP(ng/m ³)	< 10	10—20	20—25	22.0
chl _a (ng/m ³)	< 4	4—10	> 10	4.14
Tr(m)	> 3.7	2.0—3.7	< 2.0	2.3

2.4 密云水库水质的变化

在自然界,湖泊起着沉积池的作用,水体营养由贫到富,湖盆由深到浅,最后经过沼泽而陆化。这一演变过程十分缓慢,一般以地质年代计算。但是在

人类干扰下渐变过程加快,例如美国的 Erie 湖,由于大量营养物质排入湖内,该湖在 1900—1970 年的 70 年间发生的富营养化进展,相当于过去 10000 年的发展结果。

表 5 密云水库库区水体物理、化学和生物指标比较
Tab. 5 Comparisons of physical, chemical and biological targets in water body of Miyun Reservoir

时间	蓄水量	pH	Tr	TN	TP	COD _{mn}	BOD ₅	Chl _a	浮游藻类
Time	亿 m ³		(m)		(mg/L)			(μg/L)	× 10 ⁴ /L
1980 年	—	8.1	2.8	—	—	—	2.03	—	147.8
1988 年	17.2	8.1	2.5	0.76	0.016	1.95	1.80	2.39	263.9
1997 年	29.8	7.6	2.3	0.21	0.025	2.05	0.90	2.67	347.1
2001 年	13.5	8.3	2.3	0.86	0.022	1.96	0.59	4.14	405.2

表 5 显示出密云水库 1980—2001 年水质的动态变化。2001 年库区水体中的 TN、TP 比 1988 年分别增长了 13.2% 和 37.5%,TP 增长幅度较大。N:P 处于 10—25:1 的范围时,N 量、P 量与浮游藻类现存量之间构成明显的直线关系^[9]。库区水体的 N:P 比 1988 年为 47.5:1,2001 年为 39.1:1。密云水库为磷控型湖泊,随着 N、P 含量的增加和两者比例的缩小,浮游藻类细胞密度上升较快。与 1988 年相比,chl_a 增加 73.22%。与 1980 年相比,2001 年浮游藻类细胞密度增加 2.7 倍,Tr 降低 17.9%。Tr 值降低的主要原因是浮游生物密度的增加以及水体中无

机、有机溶解物和悬浮物的影响。21 年来库区水体 COD_{mn} 波动较小,基本稳定。pH 值上升 2.5%,主要是浮游藻类密度增加所致^[1]。BOD₅ 下降 70.9%,原因可能是:(1) 有机物污染减少;(2) 某些厂矿废水中的污染物不易被微生物降解或对微生物的代谢活动有抑制作用,有待进一步探讨。

多年来经过各方面(特别是上游地区)的不懈努力,使密云水库的水质稳定在中营养程度。国内外有关研究表明,N、P 是导致水体富营养化的主要营养元素^[8,9]。随着库区蓄水量的减少,TN、TP 和叶绿素含量的增加,导致水体向富营养发展。据初步

调查,主要制约因素如下。

(1) 潮、白河流域上游生态环境恶化,水源枯竭
潮、白两河是密云水库的主要入库河流。潮河发源于河北省承德市丰宁县上黄旗,流经丰宁、滦平县汇入密云水库,流域面积 6716km²,多年平均注入密云水库水量 5.04 亿 m³。丰宁是国家级贫困县,在 8765km² 的县域面积中,轻度以上水土流失面积达 4900km²,年侵蚀总量 1727 万 t。尽管 1989 年以来已实施多项水土保持和生态建设项目、治理工程区收到明显的生态和经济效益,但由于人口、资源、环境、经济的不协调、项目的有限投资、贫困与资源依赖型生产方式制约,出现局部治理好转,整体恶化拓展。丰宁县严重的水土流失导致植被退化、土壤沙化、水源枯竭、水质污染、生态恶化、灾害频发。加之 1999~ 2001 年连续干旱,使潮河产水量锐减,三年平均径流量仅 0.84 亿 m³,为多年平均径流量的 26.9%。密云水库上游承德市水土流失面积达 8300km²。

白河发源于河北省沽源县,流经赤城、延庆、怀柔三县,在密云水库大关桥注入密云水库,流域面积 9072km²。白河及其支流黑河虽源于沽源县,但产

流、汇流基本在赤城县。赤城县亦是国家级贫困县。河北省张家口市属白河流域的面积 5774km²,其中在赤城县境内流域面积占 91.6%。黑河是白河的主要支流,在赤城县境内流域面积 1497km²。1959—1984 年实测多年平均径流量为 1.23 亿 m³,1985—2000 年年均径流量减至 0.997 亿 m³(减少 18.9%)。白河在赤城县境内的流域面积为 3789km²,1956—1984 年实测多年平均径流量 2.24 亿 m³,1985—2000 年年均径流量减至 1.18 亿 m³(减少 47.3%)。黑河、白河流域内植被破坏、水土流失和气候干暖是径流量锐减的主要因素。张家口地区水土流失面积达 3 万多 km²,土地沙化面积在不断扩大。许多事实证明,在干旱多风的条件下,人类活动是土地沙化的主要原因。

由于潮、白两河上游水土流失面积大、植被覆盖率低,每遇暴雨大量泥沙被冲下山,经过河道输入水库。至 1995 年,密云水库已淤积泥沙 1.7 亿 m³,减少库容、加快水体陆化、缩短水库寿命,同时泥沙中含有大量的可被水体中初级生产力直接或间接吸收、利用的营养盐和有机物,影响水体的营养状态(表 6)。

表 6 密云水库底积物中营养物质测定(2001 年)
Tab. 6 Nutrient measure of base mud in Miyun Reservoir

采样点	N(μg/g)		P(μg/g)		TOC(%)		有机质(%)	
	5 月	9 月	5 月	9 月	5 月	9 月	5 月	9 月
1	1704.1	892.3	927.1	892.3	2.245	—	3.861	—
2	2418.9	947.0	846.0	947.0	—	2.660	—	4.575
3	1856.0	884.0	870.1	884.0	1.720	2.837	2.958	4.880
4	2118.0	894.0	832.0	894.0	—	2.277	—	3.916
5	1876.0	619.0	769.1	619.0	—	—	—	—
6	2239.8	888.0	990.0	888.0	—	—	—	—
7	1887.8	842.7	875.6	842.7	—	—	—	—
8	1489.6	838.0	760.6	838.0	1.236	1.747	2.126	3.657
\bar{x}	1948.8	850.6	856.6	850.6	1.734	2.380	2.982	4.257
\bar{x}	1399.7		853.6		2.057		3.620	

测定结果显示,库区水体底积物中的 N、P 已分别达到 1399.7μg/g 和 853.6μg/g,TOC、有机质已分别达到 2.057% 和 3.620%。

(2) 水体污染
多年来为了保护密云水库的水质,上游流域在经济困难的情况下,投资治理厂矿污染,对污染企业进行关停并转,取得一定效果。但总体未得到根本

转变。加之近几年连续干旱,水源枯竭、水域自净能力降低,水体污染有加重趋势。除面污染源外,还有工业、农业和人类生活污染源。潮、白河流域内的工业污染源主要有酿造、制药、造纸、采矿等,年度污水入河量约 495 万 m³,污染物排放量约 520t。另外内源污染也是一个值得重视的问题。在密云水库取底积物样品时,八个断面底部均是程度不等的黑臭泥。

底栖动物中以正颤蚓(*Tubifex tubifexi*) 占优势, 此物种是一种耐污种类, 能忍受缺氧环境, 常为污染水体底栖动物中的优势种群。在距水底 2m 左右的水层中 TN、TP、COD_{mn} 等指标明显升高(表 7), 表明底积

物中的有机物, 被细菌降解后释放, 污染水体。密云水库水深, 水底温度低、缺氧, 有机物以厌氧降解为主, 且缓慢、不完全。故库区底积物污染具有持效性。

表 7 密云水库水体指标比较(2001.5)
Tab. 7 Targets comparison of water body in Miyun Reservoir

水层 Water layer	水温(℃)	COD _{mn} (mg/L)	TOC (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)
表层 surface layer	21.2	1.70	5.65	0.73	0.013
底层 ground layer	9.0	1.75	5.80	0.81	0.036

注: (1) 蓄水量 13.2 亿 m³, 平均水深 24.5m; (2) 表层: 距水表 0.5m, 底层: 距水底 2m

北京地区饮用水源, 地下水约占 60%, 地表水约占 40%。地下水连年超采, 至 1995 年已累计超采 40 亿 m³, 地下水位下降最深处达 40m, 现已形成以规划市区东部为中心的地下降落漏斗区, 面积达 2000km²。地下水超采导致地面沉降, 水质超标等一系列问题。

北京市地面供水水库只有官厅和密云两座。由于污染严重, 官厅水库已于 1997 年被迫退出饮用水源地。由于连年干旱和上游地区用水量的增加, 密云水库 2001 年蓄水量仅 13.5 亿 m³, 不足总库容的 1/3。为了保障首都人民的用水安全, 稳定密云水库水质, 涵养水源, 增加水量, 防止其发生富营养化已十分迫切。

参考文献:

[1] UNEP EARTHWATCH. Eutrophication [J], *World Environment*, 1994, (1): 23—26. [联合国环境规划署, 水体富营养化. 世界环境. 1994, (1): 23—26]
[2] Song F, Zhang J Q, Wang X H, *et al.* Initial water quality evaluation of miyun reservoir [J]. *China Environmental Sciencs*, 1996, 6(4): 52—55. [宋福, 张冀强, 王昕皓, 等. 密云水库水质探讨. 中国环境科学, 1996, 6(4): 52—55]
[3] Du G S. Study on water quality of miyun Reservoir [J]. *Journal of*

Beijing Teacher College, 1991, 12: 82—85. [杜桂森. 密云水库水质研究. 北京师范学院学报, 1991, 12: 82—85]
[4] Chen Y C, Zhang B X, Li Y L. Analysis and prediction of eutrophication for miyun Reservoir [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, (7): 12—15. [陈永灿, 张宝旭, 李玉梁. 密云水库富营养化分析与预测, 水利学报, 1998, (7): 12—15]
[5] Du G S, Meng F Y, Li X D *et al.*, Water quality and development trend of miyun reservoir [J]. *Environment Sciences*, 1999, 20(2): 110—112 [杜桂森, 孟繁艳, 李学东等. 密云水库水质现状及发展趋势. 环境科学, 1999, 20(2): 110—112]
[6] Sakamoto M. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth [J]. *Archiv für Hydrobiologie*, 1996, 62: 1—28
[7] Cai Q H, On the comprehensive evaluation methods for lake eutrophication [J], *Journal of lake Sciencs*, 1997, 9(1): 89—94. [蔡庆华, 湖泊富营养化综合评价方法, 湖泊科学, 1997, 9(1): 89—94]
[8] Cai Q H, Liu J K. Effect of human population growth and fishery development on water Quality of lake Donghu Wuhan [J]. *Acta Hydrobiol. Sinica*, 1994, 18(1): 87—89. [蔡庆华, 刘建康. 人口增长与渔业发展对武汉东湖水质的影响. 水生生物学报, 18(1): 87—89]
[9] Tang T, Li D F, Liu R Q, *et al.* studies on trophic states of water in Yujiang Country, Jiangxi Province [J]. *Acta Hydrobiol. Sinica*, 2002, 26(4): 357—362. [唐涛, 道丰, 刘瑞秋, 等. 江西省余江县水体营养状况分析. 水生生物学报, 2002, 26(4): 357—362]

ANALYSIS ON TROPHIC STATE OF WATER BODY IN MIYUN RESERVOIR

DU Gui-Sen¹ LIU Xiao-Duan² LIU Xia¹ GE Xiao-Li² and PAN Xiao-Chuan³*(1. Department of Biology, Capital Normal University, Beijing 100037;**2. National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037;**3. Department of Occupational and Environmental Health School of Public Health, Peking University, Beijing 100083)*

Abstract: Beijing City is short of fresh water seriously. Water resources of every person is about 300m^3 . Miyun Reservoir is the chief drinking water resources in Beijing, which influenced people's lives and economic development greatly.

In order to know the trophic state and limitative factors on Miyun Reservoir, water quality of the reservoir and the valley's economic situation were investigated. Eight sites (fixed position by GPS) and twelve determinable items were selected in the reservoir and they were water holding capacity, water depth, water temperature, transparency, pH, TN, TP, COD_{Mn}, BOD₅, DO, Chlorophyll a and phytoplankton. Two investigations were finished, one in May 2001 (dry season) and the other in September 2001 (season for rain plenty).

The research results indicates that nutrition characteristic of Miyun Reservoir belongs to responding type of phytoplankton. Community structure of phytoplankton belongs to green algae diatom type. Total nitrogen in water is 0.86mg/L and total phosphorus is 0.022mg/L . The cells density of phytoplankton is $405.23 \times 10^4/\text{L}$. TSM of four targets (Tr, TP, COD_{Mn}, chl a) are from 35.8 to 49.6, water body of the lake has reached mesotrophy. But the TN, TP and cells density of phytoplankton are on the increase, water body tend to be of eutrophication. Primary factors are water and soil erosion in upper reaches of two rivers and pollution of the water body. Miyun Reservoir is principal drinking headwater for Beijing. It is very essential to protect ecological environment of the valley and to harness pollution.

Key words: Miyun Reservoir; Phytoplankton; Mesotrophy; Headwater protection