

密云水库上游流域水体营养物质现状及来源分析

焦剑^{1,2}, 朱少波¹, 杨扬¹, 郎从³, 张天宇¹

(1. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;
2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 3. 中国地震局 地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 密云水库作为北京地区最重要的地表饮用水水源地, 其水质优劣直接关系到首都的社会经济发展, 开展密云水库水污染监测和治理研究具有重要的现实意义。以密云水库上游流域为研究区, 通过不同尺度流域水体营养物质监测, 分析了水库上游河流水体营养物质现状; 通过分割流量过程线, 划分了水体营养物质来自点源和非点源污染的比例。研究结果表明, 依据标准(GB3838—2002)要求, 密云水库上游河流水体 TN 含量几乎全部超标, 且 15.9% 样本的 TP 含量超标。密云水库的营养物质平均 40.3% 来自点源污染, 59.7% 来自非点源污染; 入库水体中 50.1% 的 TN, 49.1% 的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 39.0% 的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 26.5% 的 TP 和 36.8% 的 COD_{Mn} 来自点源污染; 49.9% 的 TN, 50.9% 的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 61.0% 的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 73.5% 的 TP 和 63.2% 的 COD_{Mn} 来自非点源污染。

关键词: 营养物质; 点源污染; 非点源污染; 水质; 密云水库

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)04-0012-06

中图分类号: X524, X824

Occurrences and Sources of Nutrients in Upper-river Basin of Miyun Reservoir

JIAO Jian^{1,2}, ZHU Shao-bo¹, YANG Yang¹, LANG Cong³, ZHANG Tian-yu¹

(1. School of Geography, State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 3. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Miyun Reservoir has become the most important source of drinking water for Beijing area. In the past 20 years, with the economic growth and development, nutrient load of Miyun Reservoir increased gradually, which will result in an increasing risk of the bloom of harmful algae. To address this issue, water samples collected from the river basins at different scales were analyzed. Total nitrogen(TN), nitrate($\text{NO}_3^- - \text{N}$), ammonium ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$), total phosphorus(TP) and index of potassium permanganate(COD_{Mn}) were measured to estimate flux and occurrence of nutrients. Based on the analysis of hydrological processes for each basin, the sources of nutrients that entered into the Miyun Reservoir were estimated. The results showed that TN concentrations in almost all the samples exceeded the environmental quality standards for drinking surface water of China. Concentrations of TP in 15.9% samples were exceeded the standards. It was estimated that 40.3% of nutrients in Miyun reservoir were from point-source pollution, while the other 59.7% were from non-point source pollution. Meanwhile, 50.1% of the TN, 49.1% of the $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 39.0% of the $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 26.5% of the TP and 36.8% of the COD_{Mn} that entered into the Miyun reservoir were from point-source pollution, while 49.9% of the TN, 50.9% of the $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 61.0% of the $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 73.5% of the TP and 63.2% of the COD_{Mn} that entered into the Miyun Reservoir were from non-point source pollution.

Keywords: nutrients; point-source pollution; non-point source pollution; water quality; the Miyun Reservoir

水是人类赖以生存和发展的物质基础, 是形成和支持生态系统的重要因素。近年来, 随着经济社会的发展, 水生生态系统破坏, 水体污染问题直接威胁到公众健康。其中, 水体富营养化是较为常见的水污染类型^[1-3], 其突出表现为氮、磷等营养物质异常富集, 及其引发的特征性藻类异常增殖^[4-5]。点源污染和非

点源污染是水体污染物的两类重要来源。美国国家环境保护局^[6]认为非点源污染是指污染物以不易直接辨识的、非固定的、分散的输移路径进入水体。众多研究表明, 非点源污染是造成水污染的主要原因, 是水体中 N 和 P 等营养元素的重要来源。例如, 美国 60% 的水体污染起源于非点源^[7]; 丹麦河流 94%

收稿日期: 2012-08-10

修回日期: 2012-11-09

资助项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目

作者简介: 焦剑(1983—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 工程师, 研究方向为土壤侵蚀与非点源污染。E-mail: 68283847@qq.com。

的氮负荷和 52% 的磷负荷是由非点源污染引起^[8]; 荷兰农业非点源提供的总氮和总磷分别占环境污染总量的 60% 和 40%~50%^[9]; 我国非点源污染已导致许多湖泊和水库营养物质负荷逐年增加, 水体富营养化问题日趋严重^[10]。

北京市是一座严重缺水的特大型城市, 目前密云水库是北京地区主要的地表饮用水水源地, 其水质直接影响到首都人民生活和城市的可持续发展。然而, 随着人口增加和经济发展, 水库水污染问题逐渐凸显。自 20 世纪 90 年代以来, 密云水库水体呈自中营养化向富营养化发展趋势^[11-12]。到目前为止, 水体富营养化已成为密云水库最主要的水污染问题。研究表明^[13-14], 水土流失过程以及畜禽粪便、农村生活垃圾和污水等不合理排放所产生大量营养物质是诱发密云水库水体藻类增殖的重要原因。许多学者^[15-19]对密云水库水体营养物质的季节和年际变化特征和空间分布状况做了详细分析; 并分析了水体 N 和 P 等营养元素对浮游植物生长和增殖的影响^[20], 有些学者^[21]利用国外较为成熟的水质模型, 模拟了水体 P 元素变化对水库藻类增殖的影响。但到目前为止, 大多数水体富营养化研究仅限于水库水体本身, 对于上游河流水体营养物质报道相对较少, 且局限于主要河流的入库河段^[15, 22], 而有关入库水体营养物质来源的研究也尚处于初始阶段, 仅能初步判断入库营养物质主要来自非点源污染^[13-14]。由于对水库上游水体营养物质基本状况缺乏详细了解, 对入库水体营养物质来源缺乏明确认识。因此, 开展水库上游水体营养物质现状调查和来源分析, 对保护本区生态和环境, 保障首都饮水安全具有重要意义。

1 资料与方法

1.1 资料收集

密云水库上游流域处于北纬 40°19′—41°31′ 和

东经 115°25′—117°33′ 之间, 东南侧靠燕山西端, 南侧为军都山, 西屏大马群山, 北接坝上高原, 流域面积为 15 788 km²。流域内有潮河、白河两大水系。所收集的资料包括水文资料、农业生产资料和水质监测资料。其中, 水文资料包括 15 个水文站点的逐日径流量和含沙量(悬移质)资料, 以及 39 个雨量站的逐日降水量资料。水文站中 9 个为现有水文站, 资料序列为 1956—1990 年和 2008—2010 年。6 个为已撤销水文站, 资料序列为 1956—1975 年。雨量站资料序列为 2008—2010 年。其中, 2008 年之后的水文资料来自北京水务局网站、河北水文网和中国水文信息网。同时, 收集了密云水库上游流域 60 个乡镇农业生产资料, 包括人口、耕地面积、化肥施用、畜禽养殖等。为了分析不同年份水体营养物质来源差异, 还收集了潮河入密云水库断面逐月水质监测资料, 检测项目为总氮和总磷, 资料序列为 1987—1988 年^[15]。

1.2 水体营养物质监测

在选择水体营养物质监测点时, 除了涵盖不同面积的流域外, 还考虑以下两方面因素。首先, 为了解入库水体营养物质状况, 在白河、潮河、白马关河、牯牛河和清水河这 5 条河流注入密云水库断面的上游分别选择了一个采样点, 共 5 个采样点。其次, 为了分析水库上游两条主要河流——潮河和白河上、中游及其主要支流的水体营养物质状况, 分别在白河上游、潮河中游、黑河和汤河汇入白河断面上游、安达木河汇入潮河断面上游、以及汤河上游各选择了一个取样点, 总计 6 个取样点。所有采样点总计 11 个, 其基本信息详见表 1。

研究自 2008 年 7 月至 2009 年 6 月, 在上述河流断面采集径流样品。在潮河辛庄断面, 样品采集期为 2008 年 7 月至 2010 年 6 月。各断面径流样品采集时间为雨季(6—9 月份)每月的 1 和 16 日; 枯季(10 月至翌年 5 月)每隔 2 个月采集 1 次。

表 1 研究区水体营养物质监测点基本情况

编号	采样点			所属河流		采样点控制
	地名	纬度	经度	河流名称	注入河流(水库)	面积/km ²
1	太师屯	40°32′08.4″	117°06′27.1″	清水河	密云水库	536
2	二道河	40°34′05.7″	117°08′47.6″	安达木河	潮河	368
3	古北口	40°41′24.1″	117°09′18.5″	潮河	密云水库	5 123
4	辛庄	40°35′06.4″	117°07′55.6″	潮河	密云水库	6 098
5	不老屯	40°33′52.3″	116°59′15.7″	牯牛河	密云水库	130
6	石佛	40°35′09.0″	116°52′10.5″	白马关河	密云水库	218
7	张家坟	40°37′50.3″	116°46′09.7″	白河	密云水库	8 506
8	汤河口	40°43′47.4″	116°37′59.4″	汤河	白河	1 257
9	四道穴	40°57′56.3″	116°37′29.1″	汤河	白河	673
10	沙梁子	40°43′30.4″	116°28′03.8″	黑河	白河	1 600
11	下堡	40°41′08.3″	116°08′15.6″	白河	密云水库	4 040

1.3 样品测试分析

径流样品采集完毕后,尽快将其送至实验室,分析水体营养物质含量。检测项目包括 pH 值,硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$),铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$),总氮(TN),总磷(TP)和高锰酸钾盐指数(COD_{Mn})。pH 值测定采用玻璃电极法, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 采用紫外分光光度法^[23], $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用淀粉蓝比色法^[24],TN采用碱性过硫酸钾消解分光光度法^[25],TP采用钼酸铵分光光度法^[26], COD_{Mn} 采用高锰酸钾氧化法测定^[27]。

1.4 水体来自点源和非点源营养物质分割

研究视取样前后一周河流断面水体营养物质含量保持不变,则由营养物质浓度和对应水文站点测得的逐日径流量,推算每日经过断面的营养物质总量。对于已撤销水文站点,其逐月断面径流量可依据历史资料中该站点与现有站点的上、下游径流量关系推算。研究依据一年内不同时期降雨和径流特征,分割流量过程线,分析进入河道水体的营养物质来源。

首先,确定各流域河川基流量,即点源污染所对应的径流量。王晓燕等^[13]在分割本区河川基流量时,采用枯季径流法(直线平割法),以年内几个月径流量的最小平均值为基准,平行切割全年径流量,直线以下部分即为河川基流量。该方法最大的缺陷是在进行基流分割时,缺乏严格的理论依据,操作上的人为性和随意性较大,故其可靠性受到质疑^[28-29]。为了解决这一问题,本文采用基流指数(base flow index, BFI)法推算流域基流量^[30]。该方法是在年内日流量过程图上,确定出基流所对应的所有拐点,并将拐点进行连线,连线以下的面积即是要计算的基流量。

其次,确定点源污染所对应的水体营养物质浓度。考虑到河流冰冻时,河道内无畜禽养殖,降水稀少,可视水体营养物质仅来自深层地下水和点源污染。由于在河流冰冻期内的 2 月份取样 1 次,故视本次水体营养物质浓度为点源污染所对应的浓度。这样,可利用公式(1)推算全年来自点源污染和深层地下水的营养物质:

$$A_p = C_p \times Q_p \quad (1)$$

式中: A_p ——某一流域全年来来自于点源污染和深层地下水的营养物质的总量(kg); C_p ——点源污染所对应的营养物质浓度(kg/m^3); Q_p ——划分的年基流量(m^3)。之后,依据逐次监测所得的水体中营养物质浓度和流域逐日径流量,获得流域全年营养物质总量 A (kg),减去上述来自点源和深层地下水营养物质的量,则可推算来自非点源污染的营养物质总量 A_N (kg)。

$$A_N = A - A_p \quad (2)$$

在此基础上,确定各流域来自点源和非点源污染

的水体营养物质在全年总量中所占比重,并分析降水和人类活动对上述来源构成的影响。

实际上,人类活动造成点源污染可能有一部分沉积在河床里,随激增流量进入水库。但是,该区河流流经山区,河床比降较大,且水流流速较快,含沙量低,监测期内潮河平均含沙量仅为 0.312 g/L ,白河仅为 0.307 g/L ,使污染物不易随泥沙沉积入河床,故未对沉积在河床中的污染物在总量中所占比例进行讨论。

2 结果分析

2.1 密云水库上游流域水体营养物质现状

2008 年 7 月至 2009 年 6 月,总计在密云水库上游流域采集径流水样 107 个。由于牯牛河中游建有半城子水库拦蓄径流,位于不老屯的取样断面全年无水;因安达木河上游建有遥桥峪水库拦蓄径流,位于二道河的取样断面仅在 2008 年雨季采到 2 次河道径流样品。其余取样断面均全年有水。各取样点 TN 年平均浓度变化于 $2.28 \sim 5.47 \text{ mg/L}$,各取样点平均为 3.79 mg/L ; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 年平均浓度变化于 $1.31 \sim 3.79 \text{ mg/L}$,各取样点平均为 2.60 mg/L ; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 年平均浓度变化于 $0.111 \sim 0.169 \text{ mg/L}$,各取样点平均为 0.130 mg/L ; TP 年平均浓度变化于 $0.020 \sim 0.043 \text{ mg/L}$,各取样点平均为 0.028 mg/L ; COD_{Mn} 年平均浓度变化于 $1.81 \sim 2.76 \text{ mg/L}$,各取样点平均为 2.27 mg/L (表 2)。

取样点所在河流断面多位于密云水库二级保护区内,其水体营养物质含量不得超过我国地表水环境质量标准(GB3838—2002)^[31]基本项目标准限值Ⅲ类中的相应要求。若以该标准作为水质是否达标的依据,则在所有的检测水样中,pH 值变化于 $7.25 \sim 8.85$,均符合 GB3838—2002 中关于水体 pH 值变化范围(6~9)的要求; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量变化于 $0.34 \sim 6.36 \text{ mg/L}$,均低于地表水源地补充项目中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的标准限值(10 mg/L); $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量变化于 $0.026 \sim 0.339 \text{ mg/L}$,均低于Ⅲ类标准所规定的水体 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 上限含量(1.0 mg/L)。所有的检测水样中,TN 含量变化于 $0.92 \sim 11.18 \text{ mg/L}$,99.1%的样品 TN 含量超过Ⅲ类标准所规定的水库水体 TN 上限含量(1.0 mg/L),各监测断面水体 TN 年平均浓度是该上限含量的 2.3~5.5 倍(表 3),密云水库入库水体 TN 年平均浓度超过该上限含量 2.79 倍,多达 86.0%的样本 TN 含量高于 GB3838—2002 中 V 类标准的要求。在所有的检测水样中,TP 含量变化于 $0.005 \sim 0.102 \text{ mg/L}$,15.9%样本的 TP 含量超过Ⅲ

类标准所规定的水库水体 TP 上限含量(0.05 mg/L), 各监测断面水体 TP 年平均浓度均未超过该上限值。在所有的检测水样中, COD_{Mn} 含量变化于 0.77 ~

7.60 mg/L, 仅 0.9% 的样本 COD_{Mn} 含量超过 III 类标准所规定的水体 COD_{Mn} 上限含量(6.0 mg/L), 即 COD_{Mn} 含量达标率高达 99.1%。

表2 研究区各取样点水体营养物质年平均浓度

取样点	河流	控制面积/km ²	营养物质年平均浓度/(mg·L ⁻¹)				
			NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP	COD _{Mn}
下堡	白河	4 040	2.97	0.169	4.37	0.043	2.30
沙梁子	黑河	1 680	2.70	0.138	3.62	0.030	2.50
汤河口	汤河	1 257	2.08	0.147	2.81	0.020	2.10
四道穴	汤河	673	1.31	0.121	2.28	0.024	2.76
张家坟	白河	8 506	2.06	0.111	2.85	0.025	1.93
石佛	白马关河	228	2.85	0.119	3.95	0.022	2.74
古北口	潮河	5 123	3.79	0.130	5.47	0.034	2.00
辛庄	潮河	6 098	3.29	0.115	5.43	0.026	1.81
太师屯	清水河	536	2.37	0.119	3.32	0.032	2.29
入库水体平均	—	15 788	2.60	0.130	3.79	0.028	2.27

总体而言,密云水库上游流域河流水体 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量符合密云水库水质要求, 水体 COD_{Mn} 含量基本符合密云水库水质要求, 约 84.1% 的水体 TP 含量符合密云水库水质要求, 但河流水体 TN 含量明显超标。由此可见, 入库水体营养物质对水库水质达标仍造成一定压力, 且尤以氮最为严重。

2.2 入库水体营养物质来源及影响因素分析

2.2.1 入库水体营养物质来源 密云水库入库水体营养物质的来源如图 1 所示。由图 1 可以看出, 各类营养物质中, 分别有 50.1% 的 TN, 49.1% 的 NO₃⁻-N, 39.0% 的 NH₄⁺-N, 26.5% 的 TP 和 36.8% 的 COD_{Mn} 来自点源污染, 这一比重平均为 40.3%。由此可知, 进入密云水库的营养物质中, 分别有 49.9% 的 TN, 50.9% 的 NO₃⁻-N, 61.0% 的 NH₄⁺-N, 73.5% 的 TP 和 63.2% 的 COD_{Mn} 来自非点源污染, 所占比重平均为 59.7%。

进入水库的各类营养物质的来源构成存在一定差异。入库的 TN, NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 中来自非点源污染的比重平均为 54.0%, 对 TP 和表征水体有机物和还原性物质含量的 COD_{Mn} 而言, 该比重平均为 68.4% (图 1)。由于有机物和含磷化合物不易溶于水, 故难以随径流进行较长距离迁移; 上述物质需要以泥沙为吸附载体^[32], 实现自坡面经河道直至流域出口的迁移过程。而雨季则是水土流失的多发季节, 地表径流含沙量相对较高, 易吸附 P 元素和有机物, 因而水土流失过程成为河流水体 TP 和 COD_{Mn} 的重要来源。而 N 元素由于其活性较强, 且其形成的 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 等无机化合物易溶于水, 故即使在枯水期, 亦可随河道径流进行长距离迁移, 进入水库。

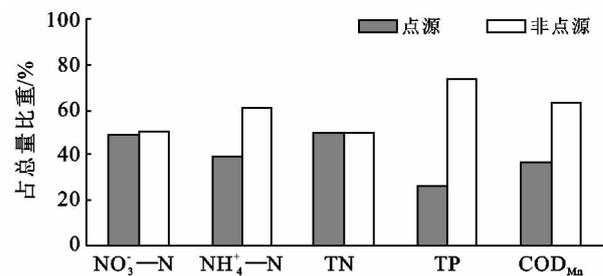


图1 密云水库水体营养物质来源

2.2.2 影响营养物质来源构成的主要因素

(1) 自然因素。利用潮河辛庄断面 1987 年 7 月至 1988 年 6 月、2008 年 7 月至 2009 年 6 月和 2009 年 7 月至 2010 年 6 月 3 个水文年的流量和水质监测资料, 分析不同降水年份中, 水体营养物质来源构成差异。各水文年年降水量分别为 574.9, 493.9 和 364.4 mm, 而潮河流域多年平均降水量为 494.0 mm, 说明这 3 个水文年分别对应多雨年、平雨年和少雨年。

由图 2 可见, 在平雨年, 潮河流域水体中 TN 来自非点源污染的比重为 52.1%; 在少雨年, 水体 TN 来自非点源污染的比重仅为 30.5%, 表明通过地表径流冲刷进入水体的 N 元素大为减少。而多雨年水体中 TN 来自非点源污染的比重为 41.8%, 少于平雨年, 可能是因为 20 世纪 80 年代潮河流域农村地区人类活动强度相对现阶段而言相对较弱, 化肥农药的施用量相对有限, 且畜禽养殖规模尚未扩大, 使得来自非点源污染的氮元素总量相对略低。而随着年降水量的增加, 水体 TP 来自非点源污染的比重逐步增加, 主要是来自雨季地表径流携带的磷元素不断增长造成, 由此也可见雨季水体中的泥沙在磷元素运移中的重要作用。

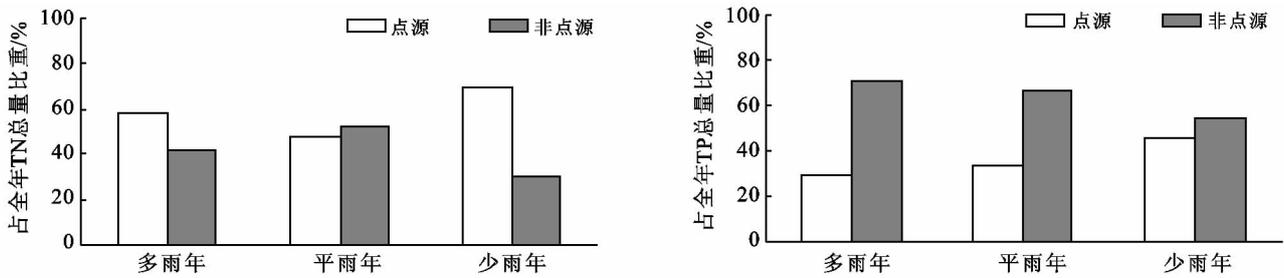


图 2 不同年份潮河流域水体 TN 和 TP 来源构成

(2) 人类活动。潮河流域水体中营养物质的来源构成存在着一定空间差异。现以潮河和白河流域为例,分析这一现象。白河流域人口密度为 43.3 人/ km^2 , 各类营养物质来自点源污染比重变化于 24.4~51.3%, 平均为 36.5%, 来自非点源污染的比重变化于 48.7~75.6%, 平均为 63.5%。潮河流域人口密度为 68.5 人/ km^2 , 各类营养物质来自点源污染的比重变化于 33.2~75.1%, 平均为 51.6%, 来自非点源污染的比重变化于 24.9~66.8%, 平均为 48.4%。潮河流域水体营养物质来自于点源污染的比重高于白河流域, 来自于非点源污染的比重低于白河流域。

近年来, 由于密云水库水源地保护措施的实施, 水库上游工业点源污染得到有效控制, 但生活点源污染仍不容忽视, 主要是因为很多乡镇的生活污水排放所导致^[33]。特别是一些人口密度较大的乡镇, 单位面积上排放的生活污水量相对更多, 致使更多的营养物质以点源的形式排入水体, 使其在营养物质总量中的比重相应增加^[34]。这使得人口密度相对较高的潮河流域, 水体营养物质来自点源污染的比重高于白河流域。

潮河流域水体营养物质来源于非点源污染的比重小于白河流域, 其原因主要有两点: (1) 在人口密度较大的潮河流域, 大量的雨季河道径流被用于农业灌溉和城镇生活生产用水, 这一引水过程在一定程度上改变了地表水循环过程: 大量雨季地表径流未能直接汇入流域主河道, 而被引至农田, 经作物吸收和蒸腾后, 剩余部分以地下水的方式补给至河道径流; 或被用于生活用水, 最终通过管道以点源排放的方式, 进入河道。这就造成其中营养物质未能直接汇入河道, 而是经由地下水和点源排放的方式进入河道。(2) 中、小型水利工程的兴建和水土保持措施的实施, 对流域内暴雨径流进行了有效拦蓄, 以潮河流域为例, 流域内大规模水利工程建设主要集中于 20 世纪 70 年代末和 80 年代初; 从 1981 年开始, 流域以点片治理为主, 进行水土保持小流域试点治理, 逐步实

施了大量的水土保持措施。自 20 世纪 80 年代开始, 流域水利水保措施开始显著生效, 1981—1990 年、1991—2000 年、2001—2005 年受水利水保措施影响所产生的年均减水量分别为 $1.15 \times 10^8 \text{ m}^3$, $2.80 \times 10^7 \text{ m}^3$, $1.10 \times 10^8 \text{ m}^3$; 分别相当于各时段只受降水影响时的“天然径流量”的 32.0%, 7.1%, 40.7%。在 1981—2005 年, 其年均减水量为 $7.90 \times 10^7 \text{ m}^3$, 相当于该时段只受降水影响时的“天然径流量”的 23.8%^[35]。而上述措施在消减了雨季洪峰径流的同时, 也使土壤侵蚀过程中径流和泥沙携带的营养物质有所减少。

3 结论

(1) 密云水库入库水体中, 除 TN 含量较高外, 其它营养物质含量基本符合 GB3838—2002 中有关地表饮用水水源地的要求。若以该标准作为判断依据, 则上游水体 TN 含量几乎全部超标, 且 15.9% 样本的 TP 含量也超过了该标准规定上限含量要求。可见, 现阶段入库水体中营养物质对水库水质达标造成一定压力。

(2) 进入密云水库营养物质中, 其平均 40.3% 来自点源污染, 59.7% 来自非点源污染。其中, 50.1% 的 TN, 49.1% 的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 39.0% 的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 26.5% 的 TP 和 36.8% 的 COD_{Mn} 来自点源污染; 另有 49.9% 的 TN, 50.9% 的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 61.0% 的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 73.5% 的 TP 和 63.2% 的 COD_{Mn} 来自非点源污染。白河流域中, 各类营养物质来自点源污染比重平均为 36.5%, 来自非点源污染的比重平均为 63.5%。潮河流域中, 各类营养物质来自点源污染的比重平均为 51.6%, 来自非点源污染的比重平均为 48.4%。

(3) 在人口密度较高的流域, 以点源方式排放的生活和养殖污水相应增加, 来自点源污染的营养物质在总量中所占比重相应增加; 而雨季河道径流被用于农业灌溉和城镇生活生产用水, 加之小型水利工程的兴建和水土保持措施的实施, 对流域内暴雨径流进行了有效拦蓄, 使得通过雨季地表径流进入河道水体的

营养物质相应减少,降低了来自于非点源污染的营养物质在总量中所占比重。

致谢:感谢北京师范大学地理学教学实验中心对本文在实验分析方面给予的帮助。

[参 考 文 献]

- [1] Agarwal S K. Water Pollution[M]. New Delhi: A. P. H. Publishing Corporation, 1988:265-267.
- [2] Klausmeier C A, Litchman E, Daufresne T, et al. Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton[J]. Nature, 2004,429(6988):171-174.
- [3] Smol J P. Pollution of Lakes and Rivers: A Paleoenvironmental Perspective[M]. Hong Kong: Blackwell Publishing Ltd, 2008:180-181.
- [4] Gunnell A. Phosphorus as growth-regulating factor relative to other environmental factors in cultured algae[J]. Hydrobiologia, 1988,170(1):191-210.
- [5] Hosub K, Soonjin H, Jaeki S, et al. Effects of limiting nutrients and N:P ratios on the phytoplankton growth in a shallow hypertrophic reservoir [J]. Hydrobiologia, 2007,58(1):255-267.
- [6] U. S. Environmental Protection Agency Office of Water. National Management Measures to Control Nonpoint Pollution from Agriculture[M]. Washington D C: Environmental Protection Agency Office of Water, 2003.
- [7] 贺缠生. 非点源污染的管理及控制[J]. 环境科学, 1998,19(5):87-91,96.
- [8] 杨爱玲,朱颜明. 地表水环境非点源污染研究[J]. 环境科学进展, 1999,7(5):60-67.
- [9] Boers P C. Nutrient Emissions from Agriculture in the Netherlands: Causes and remedies [J]. Water Science Technology, 1996, 33(4/5): 183.
- [10] 金相灿,刘洪亮,屠清瑛,等. 中国湖泊富营养化[M]. 北京:中国环境出版社, 1990.
- [11] 杜桂森,刘晓端,刘霞,等. 密云水库水体营养状态分析[J]. 水生生物学报, 2004,28(3):192-196.
- [12] 王庆锁,梅旭荣,张燕卿,等. 密云水库水质研究综述[J]. 中国农业科技导报, 2009,11(1):45-50.
- [13] 王晓燕,郭芳,蔡新广,等. 密云水库潮白河流域非点源污染负荷[J]. 城市环境与城市生态, 2003,16(1):31-33.
- [14] 黄生斌,叶芝茵,刘宝元,等. 密云水库流域非点源污染研究概述[J]. 中国生态农业学报, 2008,16(5):1311-1316.
- [15] 常持正. 密云水库水质现状评价[J]. 北京水利科技, 1990(2):49-55.
- [16] 杜桂森,孟繁艳,李学东,等. 密云水库水质现状及发展趋势[J]. 环境科学, 1999(2):110-112.
- [17] 王蕾,杨敏,郭召海,等. 密云水库水质变化规律初探[J]. 中国给水排水, 2006,22(13):45-48.
- [18] 徐清,刘晓端,王辉峰,等. 密云水库沉积物内源磷负荷的研究[J]. 中国科学(D辑):地球科学, 2005,35(S1):281-287.
- [19] 梁秀娟,肖长来,杨天行,等. 密云水库中氮分布及迁移影响因素研究[J]. 中国科学(D辑):地球科学, 2005,35(S):272-280.
- [20] 刘晓端,葛晓立,杜桂森,等. 密云水库内湖富营养化现状分析[J]. 湖泊科学, 2002,14(4):331-336.
- [21] Wang Jianping, Chen Shengtong, Jia Haifeng. Water quality changing trends of the Miyun Reservoir [J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2005, 21(2):215-219.
- [22] 于一雷,王庆锁. 密云水库及其主要河流入库河段水质的季节变化[J]. 中国农业气象, 2008,29(4):432-435.
- [23] 国家环境保护总局. HT/J346—2007 水质“硝酸盐氮的测定”[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2007.
- [24] 王峰,李玉环. 靛酚蓝光度法测定海水中的氨型氮[J]. 光谱实验室, 2002,19(5):631-633.
- [25] 国家环境保护总局. GB11894—89 水质“总氮的测定”:碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法[S]. 北京:中国环境科学出版社, 1989.
- [26] 国家环境保护总局. GB11893—89 水质“总磷的测定”:钼酸盐分光光度法[S]. 北京:中国环境科学出版社, 1989.
- [27] 国家环境保护总局. GB11892—89 水质“高锰酸钾盐指数的测定”[S]. 北京:中国环境科学出版社, 1989.
- [28] 黄国如,陈永勤. 枯水径流若干问题研究进展[J]. 水电能源科学, 2005,23(4):61-64.
- [29] 林学钰,廖资生,钱云平,等. 基流分割法在黄河流域地下水研究中的应用[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2009,39(6):959-967.
- [30] Wahl L, Wahl T. Determining the Flow of Comal Springs at New Braunfels, Texas[C]// American Society of Civil Engineers. Proceedings of Texas Water, A Component Conference of the First International Conference on Water Resources Engineering, San Antonio, Texas: 1995:77-86.
- [31] 国家环境保护总局. GB3838—2002 地表水环境质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [32] Ellison M E, Brett M T. Particulate phosphorus bioavailability as a function of stream flow and land cover [J]. Water Research, 2006,40(6):1258-1268.
- [33] 尹洁,郑玉涛,王晓燕. 密云水库水源保护区不同类型村庄生活污水排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2009,28(6):1200-1207.
- [34] 焦剑. 密云水库上游流域水体营养物质来源及迁移特征研究[D]. 北京:北京师范大学, 2011:64-68.
- [35] 李子君,李秀彬. 水利水保措施对潮河流域年径流量的影响:基于经验统计模型的评估[J]. 地理学报, 2008,23(9):958-968.