

DOI: 10.5846/stxb201306101627

焦剑,郎从,杨扬,郑娟娟,杨俊杰.北京半城子水库水体营养物质表观沉降速率.生态学报,2014,34(14):4107-4115.

Jiao J, Lang C, Yang Y, Zheng J J, Yang J J. Apparent settling velocity of nutrients in Banchengzi Reservoir, Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(14): 4107-4115.

## 北京半城子水库水体营养物质表观沉降速率

焦 剑<sup>1,2,\*</sup>, 郎 从<sup>1</sup>, 杨 扬<sup>1</sup>, 郑娟娟<sup>1</sup>, 杨俊杰<sup>1</sup>

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875;

2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

**摘要:** 表观沉降速率是流域非点源污染模型中反映水体营养物质通过不同过程, 输移进入水库沉积物净效果的参数。选择位于密云水库上游的半城子水库进行水体营养物质监测, 计算营养物质表观沉降速率, 分析其影响因素, 主要得出以下结论: 半城子水库 TN 表观沉降速率平均为 55.5mm/d, TP 表观沉降速率平均为 25.2mm/d, 相对于世界其它地区的湖泊水库而言, TP 表观沉降速率较慢。水体营养物质表观沉降速率受表层水温和水流条件共同影响。TN 表观沉降速率均随表层水温的升高而递增。上游来水后, 水体中 P 元素则经历了内源磷快速释放, 之后快速沉降的变化过程。研究成果可为水污染防治和流域环境综合治理提供理论依据。

**关键词:** 营养物质; 物质平衡; 表观沉降速率; 半城子水库

### Apparent settling velocity of nutrients in Banchengzi Reservoir, Beijing

JIAO Jian<sup>1,2,\*</sup>, LANG Cong<sup>1</sup>, YANG Yang<sup>1</sup>, ZHENG Juanjuan<sup>1</sup>, YANG Junjie<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China

**Abstract:** Beijing is suffering a severe water shortage in recent decades, and this problem will be more serious in future under the influence of urban expansion and population increasing. Several studies have been conducted on the nutrients problem in the water body or upper-rivers of Miyun reservoir in past 20 years. However, the studies concerning this issue have long ignored the connection of nutrients delivery between the upper-rivers and Miyun reservoir. Without this connection, it is difficult to simulate the nutrients delivery processes from rivers to reservoir. The apparent settling velocity can quantitatively represent the net effect of different processes that deliver nutrients to sediments. To estimate the apparent settling velocity of nutrients, in this present study, 213 water samples were collected from Banchengzi reservoir and the upper-river watershed in 2009—2010. The total nitrogen (TN), nitrate ( $\text{NO}_3^-$ -N), ammonium ( $\text{NH}_4^+$ -N), total phosphorus (TP) and index of potassium permanganate ( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ ) were analyzed to estimate the flux of nutrients. Based on the analysis of mass balance and seasonal variations of nutrients, the apparent settling velocity was calculated and the potential affecting factors were also analyzed. The results showed that the apparent settling velocity for nitrogen and phosphorus of the Banchengzi reservoir were 55.5mm/d and 25.2mm/d, respectively. Compared with many of lakes and reservoirs aboard, the apparent settling velocity for phosphorus was slower. This indicated that endogenous phosphorus was slowly released. The apparent settling velocity of the reservoir was influenced by surface temperature and conditions of disturbance of water body. Moreover, the seasonal variation of apparent settling velocity can be obviously found. The apparent settling velocity for nitrogen was increased with the increasing surface temperature of water body; however, the increasing trend of phosphorus

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项

**收稿日期:** 2013-06-10; **修订日期:** 2014-04-21

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 68283847@qq.com

was not obvious. The apparent settling velocity for nitrogen was rapidly increased when the river water flowing into the reservoir and the speed was 3 times faster than before. Moreover, after the river water flowed into the reservoir, the apparent settling velocity for phosphorus showed a rapidly increasing trend in the first month and then decreased rapidly for the resuspended sediments settled. The results of this study can provide scientific guidance in developing the conservation plan for the water quality of upper-river basin of Miyun Reservoir.

**Key Words:** nutrients; mass balance; apparent settling velocity; Banchengzi Reservoir

北京面临严重缺水,目前密云水库是北京地区最重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<sup>[1]</sup>,水质开始出现恶化。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,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<sup>[2-3]</sup>是诱发密云水库水体藻类增殖的重要原因。自上世纪 90 年代以来,许多学者对密云水库水体营养物质的季节和年际变化特征及空间分布状况<sup>[4-6]</sup>做了详细分析;并分析了水体 N、P 等营养元素对浮游植物生长和增殖的影响<sup>[1,6]</sup>。同时,对于上游河流水体营养物质状况也有所报道和分析<sup>[7-8]</sup>。但到目前为止,上述研究尚未建立本区水库水体营养物质浓度和其入库营养物质总量之间的定量联系,使得现有研究成果尚不足以为密云水库水污染防治及其上游地区流域综合治理提供有力的科学支持。因此,明确水库水体营养物质浓度与其上游河流营养物质之间的响应关系,对于模拟水体营养物质运移至关重要。

上游河流水体进入水库后,流速明显减缓,水体中泥沙和胶体颗粒等携带吸附的营养物质易逐步沉积在水库底部。许多流域非点源污染模型都采用了表观沉降速率这一参数,定量描述营养物质通过不同过程,输移进入水库沉积物的净效果<sup>[9]</sup>。该参数也可用于定量描述水体污染物自河道向水库的迁移过程。本文在位于密云水库上游的半城子水库进行水体营养物质监测,并收集水库水文资料和降雨资料,在了解水库水体营养物质平衡及其季节变化特征的基础上,计算水体营养物质表观沉降速率,并分析其主要影响因素,以定量描述营养物质自河流向

水库迁移过程,从而为制订水污染防治对策,保障饮水安全提供理论依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料收集

本文研究区位于半城子水库,其位于北京密云水库北侧约 10km,处于入库河流之一的牯牛河上游,是以防洪、灌溉、发电为主,兼综合利用的中型水库。水库于 1976 年建成,总库容 1020 万 m<sup>3</sup>,正常水面面积 0.372 km<sup>2</sup>。水库呈狭长状(图 1),其所占据河道长度约 2100m,宽度为 100—300m 不等,其深度自上游向下游递增,最大深度约 23m,取样期内水库平均水深为 11.7m。半城子水库上游流域集水面积为 66.1km<sup>2</sup>。地貌为山地和低山丘陵,海拔 250—800m 之间,年平均气温 10.2℃,年均降水量 669mm,约 75%集中在 6—8 月。流域内有 5 个行政村,人口约 2400 人,人类活动以农业生产为主。半城子水库入库河流为牯牛河和古石峪,自北而南汇入半城子水库。

本文所收集资料为半城子水库逐日库水位、蓄水量、日平均入库流量和出库流量,以及水库雨量站逐日降水量资料,资料来自北京水务局网站(www.bjwater.gov.cn),其序列为 2009—2010 年。

### 1.2 水体营养物质监测

所采集样品共分为三类:河流径流样品、大气降水样品和水库水体样品。本文通过河流径流和大气降水样品分析入库水体营养物质状况,通过水库水体样品分析水库自身营养物质状况。

研究自 2009 年 6 月至 2010 年 11 月采集上述样品。河流径流样品采集点共 2 个,分别位于半城子水库入库河流——牯牛河和古石峪汇入半城子水库断面上游(图 1),两条入库河流仅在 2010 年 8—12 月来水,河流径流样品具体采集时间见图 2。依据入

库流量过程线,共采样 8 次。其中 4 次处于洪水过程中,4 次处于河流水位较为稳定时。由于研究区全年 90% 以上的降雨处于 5—10 月,因此每年此段时期在位于半城子水库东南的半城子村采集大气降水样品。本文将水库所在河道等分为五段,从距牯牛河入库断面下游方向 400m 处开始,每隔 400m 选取

一取样点,共计 5 个点。并依据取样点的水体深度,自上而下等分为 3 个水层,分别在每一水层采集水样。水库采样时间为每月的第 1 天。本文总计采集河流径流样品 14 个;大气降水样品 17 个;水库径流样品 182 个。在采集水库和河流径流样品时,现场测定水温。

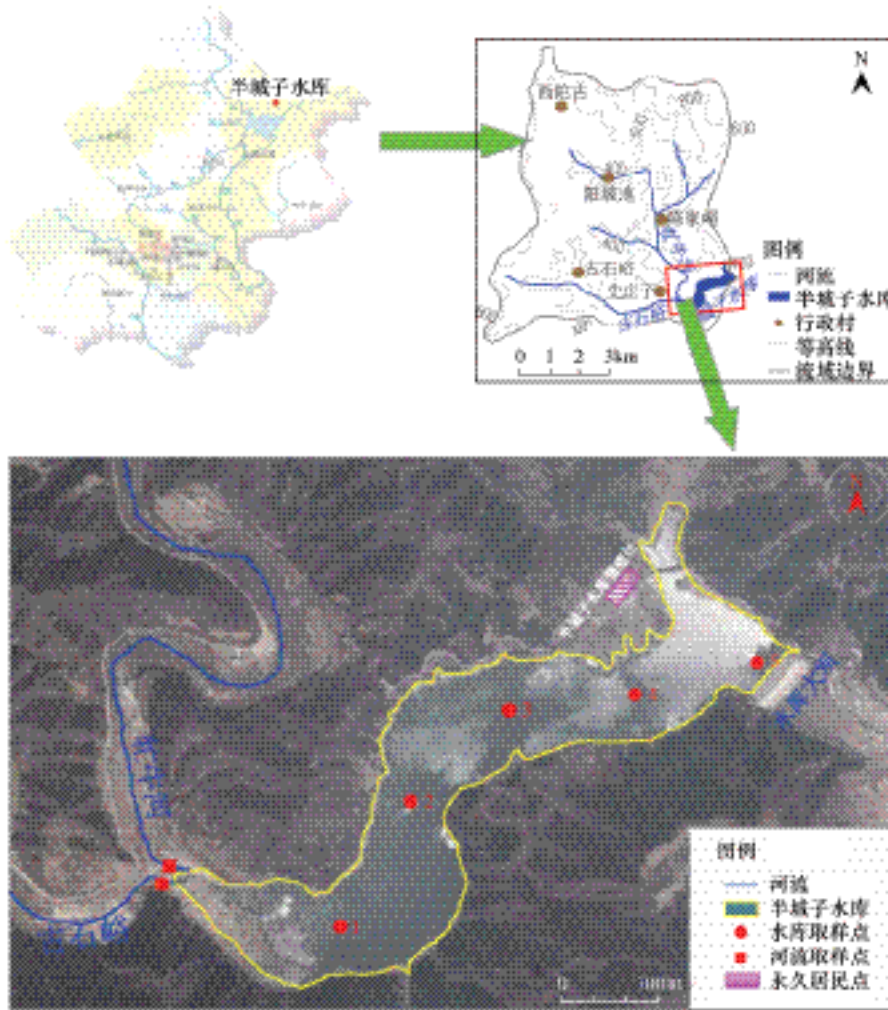


图 1 半城子水库取样点分布图  
Fig.1 Distribution of the sampling points

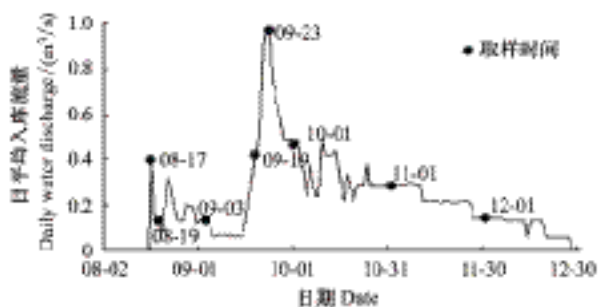


图 2 河流径流样品采集时间(2010 年)  
Fig.2 Date for the sampling of river runoff(in 2010)

### 1.3 实验分析

上述样品采集完毕后,尽快送至北京师范大学地理学教学实验中心实验室,分析水体营养物质含量。检测项目包括:硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)、铵态氮( $\text{NH}_4^+$ -N)、总氮(TN)、总磷(TP)和高锰酸钾盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )。具体测定方法为: $\text{NO}_3^-$ -N 采用紫外分光光度法<sup>[10]</sup>;  $\text{NH}_4^+$ -N 采用淀粉蓝比色法<sup>[11]</sup>; TN 采用碱性过硫酸钾消解分光光度法<sup>[12]</sup>; TP 采用钼酸铵分光光度法<sup>[13]</sup>;  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  采用高锰酸钾氧化法测定<sup>[14]</sup>。测

定 TN、TP 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  时,未对水样进行过滤; $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 则在过滤后测定。

#### 1.4 表观沉降速率计算

假设水库水体深度均一,水土界面面积与水体表面积相等(图 3),则水库水体营养物质表观沉降速率可表示如下<sup>[9]</sup>:

$$v = \frac{M_{\text{settling}}}{c_0 \cdot A_s \cdot dt} \quad (1)$$

式中,  $v$  为表观沉降速率,表示营养物质输移进入水库沉积物的净效果 ( $\text{m}/\text{day}$ );  $A_s$  为水库水面面积 ( $\text{m}^2$ );  $c_0$  为水体中初始营养物质平均浓度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),为各取样点浓度的平均值;  $dt$  为时间步长 ( $\text{d}$ );  $M_{\text{settling}}$  为沉淀损失的营养物质质量 ( $\text{kg}$ ),由下式计算获得:

$$M_{\text{settling}} = M_{\text{in}} + V_0 c_0 - V_t c_t - V_{\text{out}} \cdot c_{\text{out}} \quad (2)$$

式中,  $M_{\text{in}}$  为模拟时段内,通过河道径流和降水进入水库水体的营养物质总量 ( $\text{kg}$ )。依据逐日入库流量和逐次监测所得的河流水体中营养物质浓度,获得通过河道径流进入水库的营养物质总量;依据月降雨量 ( $\text{m}$ ) 和该月内监测所得的各次大气降水中营养物质浓度平均值 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),乘以水库水面面积 ( $\text{m}^2$ ),获得逐月通过降水进入水库的营养物质总量。

$V_0$  和  $c_0$  为模拟时段开始时,水库蓄水量 ( $\text{m}^3$ ) 和水体营养物质平均浓度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。其中,水库水体营养物质平均浓度为各取样点测得的营养物质浓度平均值,下同。

$V_t$  和  $c_t$  为模拟时段结束时,水库蓄水量 ( $\text{m}^3$ ) 和水体营养物质平均浓度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

$V_{\text{out}}$  和  $c_{\text{out}}$  为模拟时段内,水库出库水量 ( $\text{m}^3$ ) 和出库水体中营养物质平均浓度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。半城子水库通过其底部的隧洞,经由地下封闭管道将水库水体直接输送至密云水库。其中,底部隧洞直径 1.8m,洞底高程 244.0m,与水库死水位相同;地下管道总长 13.1km。观测期内,半城子水库于 2010 年 11 月向密云水库输水 308.2 $\text{m}^3$ ,相当于输水前蓄水总量的 47.0%,日均出库流量 1.23 $\text{m}^3/\text{s}$ 。出库水体营养物质浓度为 2010 年 11 月测得的水库中层和深层水体营养物质浓度平均值。

实际上,除了发生沉降和被浮游植物吸收外,水体中 N 元素也可被反硝化细菌利用,在缺氧条件下,还原硝酸盐,释放出分子态氮 ( $\text{N}_2$ ) 或一氧化二氮

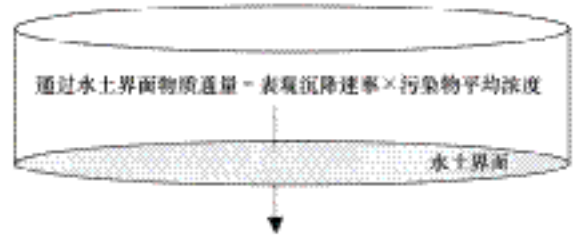


图 3 沉淀损失的营养物质质量计算示意图

Fig.3 Settling losses calculated as flux of mass across the sediment-water interface

( $\text{N}_2\text{O}$ ),以气态形式进入大气。但该水库位于华北北部山区,水温较低,反硝化作用较弱<sup>[7]</sup>,因此本文未对反硝化损失的 N 进行详细探讨。同时,水体中化合价为 -3 价的 N 元素主要以  $\text{NH}_4^+$ -N 的形式存在,且其浓度远未达到饱和,故其不易以氨的形式挥发至大气中,本文未对该过程进行详细探讨。

## 2 结果分析

### 2.1 半城子水库水体营养物质时间变化特征

半城子水库入库河流牯牛河和古石峪为季节性河流,河道来水持续时间较短。2009 年水库上游河道全年无水;其中,古石峪来水时间约 4 个月,牯牛河来水时间仅 3 个月。上游来水之前,除  $\text{NH}_4^+$ -N 外,水库水体各类营养物质浓度均呈逐步下降趋势(图 4)。可见沉降作用和水体浮游植物的吸收对水体营养物质的浓度变化起重要作用。

2010 年 8 月至 12 月,水库上游来水期间,入库径流量总计 282.0 万  $\text{m}^3$ ,相当于来水前水库蓄水量的 68.0%。上游河道径流进入水库后,水库水体营养物质浓度发生了显著变化。上游河流水体 TN 和  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度平均为 8.65 $\text{mg}/\text{L}$  和 5.97 $\text{mg}/\text{L}$ ,明显高于来水前水库水体 TN 和  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度;致使来水后水库水体 TN 和  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度显著升高(图 4)。上游河流水体  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度平均为 0.24 $\text{mg}/\text{L}$ ,仅为来水前水库  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度的 49.3%;在上游来水的稀释作用下,水库水体  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度从 0.49 $\text{mg}/\text{L}$  降至 0.34 $\text{mg}/\text{L}$ 。上游河流来水初期,水体 TP 浓度为 0.03 $\text{mg}/\text{L}$ ,来水半月后降至 0.01  $\text{mg}/\text{L}$ 。水库水体 TP 浓度在上游来水后明显上升,之后迅速回落,接近来水之前浓度。上游河流水体  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度平均为 2.1 $\text{mg}/\text{L}$ ,来水前水库水体  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度为 3.7 $\text{mg}/\text{L}$ ,入库后,水库水体  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度并未因入库水体稀释而下降,反而略有增

加,平均为 4.0mg/L。主要是因为牯牛河水体中携带的 N、P 等营养元素促进了藻类的生长繁殖,将水体

中的无机营养盐转化为有机物, COD<sub>Mn</sub> 浓度相应升高。

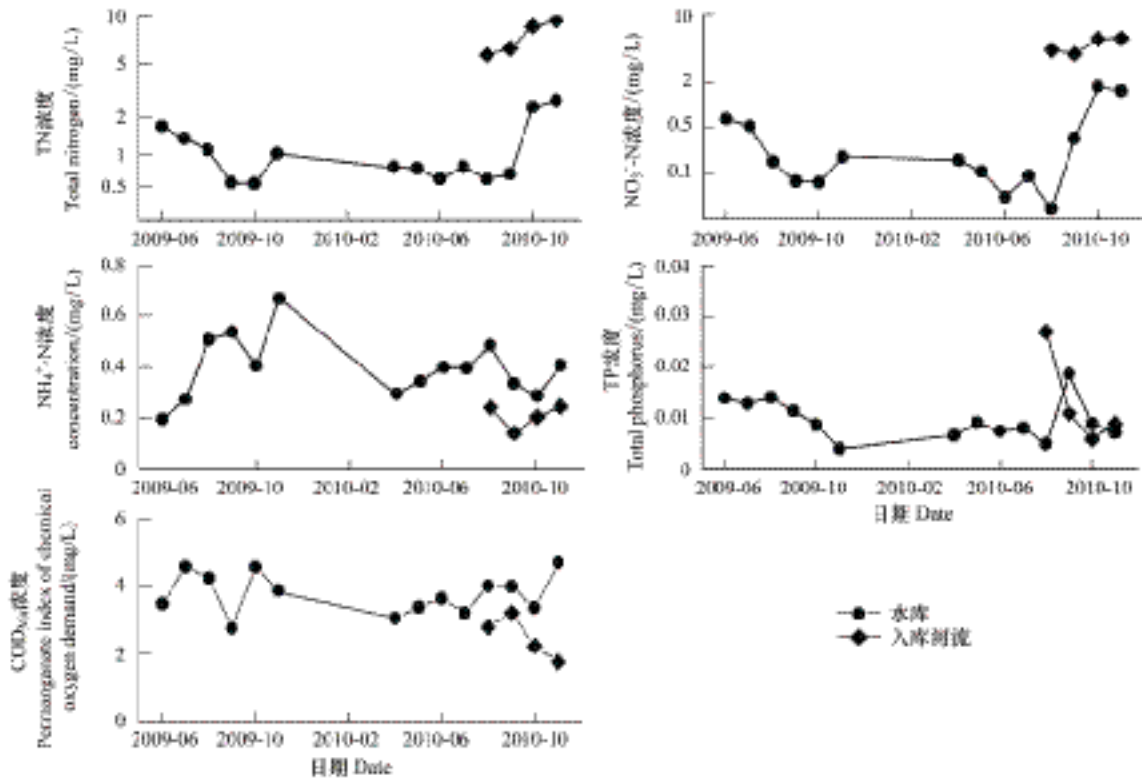


图 4 半城子水库及入库河流水体 TN、NO<sub>3</sub>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP 和 COD<sub>Mn</sub> 逐月浓度变化

Fig.4 Monthly nutrients concentrations in the water body of Banchengzi Reservoir and the rivers entered it

2.2 半城子水库水体营养物质平衡分析

表 1 是 2009 年 11 月初至 2010 年 10 月底期间半城子水库水体营养物质平衡计算,水库上游流域面雨量为 706.0mm,略多于年平均雨量。在该时段

内,水库未出水。2009 年 11 月初,水库水体 TN 总量为 4247.8kg;2009 年 11 月初至 2010 年 10 月底,通过大气降水和上游河流进入水库的 TN 总计 22909.9kg,以上两者之和为 27157.7kg。

表 1 半城子水库水体营养物质平衡计算

Table 1 Calculation of mass balance for nutrients in the water body of Banchengzi Reservoir

营养物质循环过程 Circulation of nutrients	营养物质总量/kg Total amount of nutrients		
	TN	TP	COD <sub>Mn</sub>
2009 年 11 月初水库水体营养物质 Nutrients in water body of the reservoir at the beginning of November, 2009	4247.8	37.8	14684.2
2009 年 11 月至 2010 年 10 月大气降水 Nutrients from air precipitation during November, 2009 to October, 2010	1447.3	4.7	752.4
2009 年 11 月至 2010 年 10 月上游河流输入 Nutrients from upper rivers during November, 2009 to October, 2010	21462.6	19.0	5379.5
2009 年 11 月至 2010 年 10 月沉淀和吸收* Deposition and absorption for nutrients during November, 2009 to October, 2010	-9087.4	-14.3	9972.7
2010 年 10 月底水库水体营养物质 Nutrients in water body of the reservoir at the end of October, 2010	18070.3	47.2	30788.8

\* 负值表示营养物质发生沉淀,或被浮游植物吸收;正值表示营养物质总量增加

而 2010 年 10 月底,水库水体 TN 总量为 18070.3kg, 相当于前者的 66.5%。2009 年 11 月初,水库水体



TP 总量为 37.8kg;2009 年 11 月初至 2010 年 10 月底,通过大气降水和上游河流进入水库的 TP 总计 23.7kg,以上两者之和为 61.5kg。而 2010 年 10 月底,水库水体 TP 总量为 47.2kg,相当于前者的 76.7%。2009 年 11 月初,水库水体 COD<sub>Mn</sub>总量为 14684.2kg;2009 年 11 月初至 2010 年 10 月底,通过大气降水和上游河流进入水库的 COD<sub>Mn</sub>总计 6131.9kg,以上两者之和为 20816.1kg。而 2010 年 10 月底,水库水体 COD<sub>Mn</sub>总量为 30788.8kg,比前者增加了 47.9%。水库水体 COD<sub>Mn</sub>的增加量超过了入库水体中 COD<sub>Mn</sub>质量总和。这主要是因为输入水体的 N、P 等营养元素促进了藻类的增长和繁殖,其将大量的无机养分转化为有机物。

### 2.3 半城子水库水体营养物质表观沉降速率分析

#### 2.3.1 水体营养物质表观沉降速率

由图 5 可见,半城子水库水体 TN 和 TP 表观沉降速率逐月变化幅度较大。在观测期间,TN 表观沉降速率平均为 55.5mm/d,TP 表观沉降速率为 25.2mm/d。本文所指的营养物质表观沉降速率是不同过程输移营养物质进入水库沉积物的净效果,体现了营养物质在水库中沉淀、底泥中营养物质释放和水体生物对其吸收作用的共同结果。

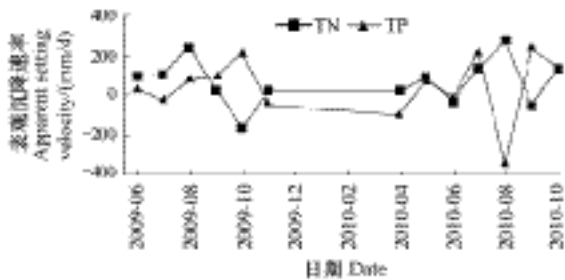


图 5 半城子水库水体 TN 和 TP 表观沉降速率

Fig.5 Apparent settling velocities for TN and TP in Banchengzi Reservoir

水库水体 TN 表观沉降速率高于 TP。相对于世界其它地区的湖泊水库而言,半城子水库水体营养物质表观沉降速率较慢。以 TP 为例,Higgins 和 Kim<sup>[15]</sup>报道 P 表观沉降速率在田纳西州的 18 个水库的变化范围为 -246.6—737.0mm/d,其平均值为 115.6mm/d。对于美国中西部 27 个水库,Walker 和 Kihner<sup>[16]</sup>报导 P 表观沉降速率变化范围为 -2.7—342.5mm/d,其平均值为 34.8mm/d。

Panuska 和 Robertson<sup>[17]</sup>归纳了内源磷释放通量

高低与湖泊水库 TP 表观沉降速率的对应关系(表 2)<sup>[17]</sup>,观测期间半城子水库 TP 表观沉降速率为 25.2mm/d,属于内源磷释放通量较低的湖泊。半城子水库底部淤泥中的磷除了来自死亡的藻类外,还来自上游流域的土壤侵蚀过程。半城子水库上游流域位于燕山南麓的迎风坡,夏季降水多以暴雨形式出现;加之地形上坡陡沟深,易在短时期内形成大量地表径流,冲刷地表土壤。例如 1976 年 7 月 23 日,密云北部山区普降大暴雨,日雨量大于 200mm 的暴雨区达 320km<sup>2</sup>,半城子水库上游洪水最大洪峰流量达 745m<sup>3</sup>/s,使水库河床被泥沙淤高,占去库容 60 万 m<sup>3</sup>,约为总库容的 6%<sup>[18]</sup>。自 20 世纪 90 年代中期以来,水库上游地区将坡耕地逐步改种经济林,保护植被,牝牛河径流含沙量逐步降低。但水库泥沙中的内源磷仍在缓慢释放。

表 2 内源磷释放通量高低与湖泊水库 TP 表观沉降速率的对应关系<sup>[17]</sup>

Table 2 The relationships between apparent settling velocity values for phosphorus and net internal phosphorus flux<sup>[17]</sup>

内源磷释放通量的高低 Dynamics for net internal phosphorus flux of water bodies	TP 表观沉降速率 Range in apparent settling velocity values/(mm/d)
高 High	<0
中 Moderate	0—13.7
低 Low	13.7—43.8
很低 Very low	>43.8

#### 2.3.2 表观沉降速率影响因素

半城子水库水体营养物质表观沉降速率的高低受温度和水流条件的共同影响。水库上游来水前,水库 TP 和 TN 表观沉降速率均随表层水温的升高而递增(图 6),相对 TP 而言,TN 沉降速率增加趋势更为明显,且与表层水温相关系数更高。TN 表观沉降速率与表层水温的相关系数为 0.61,明显高于 TP 的 0.15。随着表层水温的增高,藻类数量逐步增加,其生长代谢更加旺盛,对水体 N 元素吸收相应增加,使其含量降低。

上游河道径流注入水库后,由于水流扰动作用,使得水库底泥再悬浮,释放 N、P 等营养物质,对其表观沉降速率产生影响。上游来水之前,TN 和 TP 表观沉降速率相对接近;上游来水之后 TN 表观沉降速率明显高于 TP(图 7)。上游来水后,底泥再悬浮产

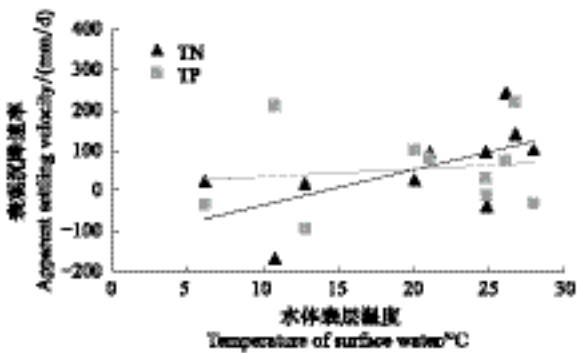


图 6 TN 和 TP 表观沉降速率与表层水温关系

Fig.6 The relationships between the apparent settling velocities and the temperature of surface water layer

生的 P 元素进入水体,但其多为难溶的磷酸盐颗粒,易附着于固体或有机物颗粒上,不易被藻类等浮游植物吸收<sup>[19-21]</sup>;此段时期牯牛河径流多为暴雨径流,其中 P 元素易以颗粒态形式存在,也不易在短期内被藻类吸收。由图 5 可见,2010 年 8 月牯牛河径流进入水库后,TP 表观沉降速率为 -356.7mm/d,水库内源磷的释放十分显著。之后的 9 月和 10 月,随着上游来水量的减少和水库水深的增加,牯牛河径流对底泥的扰动有所减弱,有利于降低内源磷的释放。同时,悬浮的底泥开始逐步沉降,附着于底泥颗粒上的 P 元素也随之沉降;在这一过程中,底泥颗粒还会吸附水体中溶解态 P<sup>[22]</sup>,促进其沉降,使水体中 TP 含量明显降低。2010 年 9 月和 10 月,水库水体中 TP 表观沉降速率显著增加,分别为 258.0 和 124.3mm/d,明显高于上游来水之前的 TP 表观沉降速率。

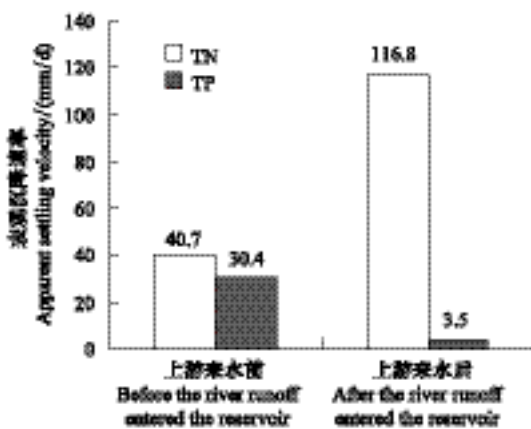


图 7 上游来水前后 TN 和 TP 表观沉降速率

Fig.7 Apparent settling velocities before and after the river runoff entered the reservoir

上游来水后,TN 表观沉降速率约为上游来水前的 3 倍(图 7)。虽然上游来水会导致底泥扰动,释放内源 N,但因湖库底泥中的 N 主要以有机氮的形式存在<sup>[23]</sup>,其扩散进入水体后,相对颗粒态的 P 而言,更易被浮游植物吸收;同时,此段时期水库外源 N 中,有 92.7%来自上游河流水体,其中含有大量易被藻类吸收的 NO<sub>3</sub>-N。2010 年 8 月水库上游来水期间,水体表层温度处于全年最高时段,多在 26—28℃ 之间,藻类生长代谢旺盛,可大量吸收水体中 N 元素,特别是来自上游河流水体的 NO<sub>3</sub>-N,致使 TN 表观沉降速率有所增加。之后的 9 月,表层水温逐步降低,藻类对营养物质的生物吸收逐步受抑制,致使 TN 表观沉降速率有所减缓。进入 10 月,水库水温下降迅速,该月内降低幅度约 10℃,使有机氮在水体中溶解度显著降低,部分 N 元素被析出水体,故 TN 表观沉降速率有所回升。

### 3 结论和讨论

本文选择半城子水库进行水体营养物质监测,在了解水库水体营养物质平衡及其季节变化的基础上,计算其表观沉降速率,并分析其影响因素,主要得出以下结论:

(1)上游河道来水前,除 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 外,水库水体营养物质浓度均呈逐步下降趋势。上游河道来水后,水库水体 TN 和 NO<sub>3</sub>-N 浓度因上游河流中两种物质浓度相对较高而升高;水库水体 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度在上游来水的稀释作用下有所降低。水库水体 TP 浓度在上游来水后明显上升,之后迅速回落,接近来水之前浓度。水库水体 COD<sub>Mn</sub> 浓度并未因入库水体稀释而下降,反而略有增加。输入水体的 N、P 等营养元素促进了藻类的增长和繁殖,将大量的无机养分转化为有机物。

(2)半城子水库 TN 表观沉降速率平均为 55.5mm/d,TP 表观沉降速率为 25.2mm/d,相对于世界其它地区的湖泊水库而言,TP 表观沉降速率较慢。

(3)水体营养物质表观沉降速率受表层水温和水流条件的共同影响。TP 和 TN 表观沉降速率均随表层水温的升高而递增,TN 表观沉降速率递增趋势更为明显。上游来水后,TN 表观沉降速率显著增加,约为来水前的 3 倍。而水体中 P 元素则经历了

内源磷快速释放,之后快速沉降的变化过程。

本文推算了半城子水库水体营养物质表观沉降速率,并定量描述了水体营养物质自河流向水库迁移过程。此外,本文需对以下两个问题进行说明:

首先,除上游河流集水区外,半城子水库周边集水面积为 $0.47\text{km}^2$ ,仅为上游河流集水面积的 $0.7\%$ 。水库周边永久居民点仅有半城子水库管理处(图1),土地利用类型以林地为主,无点源排污口;且水库周边也没有开垦农田或发展畜禽养殖,营养物质面源输入也十分有限。因此,本文暂未对水库周边营养物质状况进行分析。对于周边农业扰动较为显著的水库,在分析水体营养物质平衡时,应结合坡面尺度非点源污染模型,推算非点源营养物质负荷。

其次,在计算表观沉降速率时,本文将水库视为一个整体,未深入探讨不同深度水体营养物质沉降特征差异。实际上,就水库内部而言,不同深度光照、温度、溶解氧条件的差异,可能使营养物质沉降速率存在差异。此外,本文计算的表观沉降速率是营养物质经历外源输入和内源释放(表观沉降速率为负值)等不同过程,输移进入水库沉积物的净效果。实际上,营养物质在水中主要有3种存在形态:水体中的溶解态,颗粒表面的吸附态,以及浮游植物形态。今后应加强水体浮游植物生长变化监测,以明确藻类等浮游植物与水体营养物质之间相互作用,从而为水体营养物质模拟进一步提供理论支持。

**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给予的帮助。

#### References:

- [ 1 ] Wang Z J, Hong J M, Du G S. Use of satellite imagery to assess the trophic state of Miyun Reservoir, Beijing, China. *Environmental Pollution*, 2008, 155(1): 13-19.
- [ 2 ] Ou Y, Wang X Y. Identification of critical source areas for non-point source pollution in Miyun reservoir watershed near Beijing, China. *Water Science and Technology*, 2008, 58(11): 2235-2241.
- [ 3 ] Huang S B, Ye Z H, Liu B Y. Review on non-point source pollution in Miyun Reservoir. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(5): 1311-1316.
- [ 4 ] Wang Y H, Jiang Y Z, Liao W H, Gao P, Huang X M, Wang H, Song X S, Lei X H. 3-D hydro-environmental simulation of Miyun reservoir, Beijing. *Journal of Hydro-environment Research*, 2013, doi: 10.1016/j.jher.2013.09.002.
- [ 5 ] Wang X Y, Wang C, Bao L L, Xie S G. Abundance and community structure of ammonia-oxidizing microorganisms in reservoir sediment and adjacent soils. *Applied Microbiology Biotechnology*, 2014, 98(4): 1883-1892.
- [ 6 ] Su M, Yu J W, Pan S L, An W, Yang M. Spatial and temporal variations of two cyanobacteria in the mesotrophic Miyun reservoir, China. *Journal of Environmental Science*, 2014, 26(2): 289-298.
- [ 7 ] Beijing Municipal Station of Soil and Water Conservation. *Water Quality of Miyun Reservoir*. 2004: 7-10.
- [ 8 ] Zhang W W, Li H, Sun D F, Zhou L D. Fourier and wavelet analysis of phosphorus concentration time series in Baihe River in Miyun Reservoir upstream watershed. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(10): 2060-2069.
- [ 9 ] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, Williams J R. *Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation (Version 2005)*. Temple, Texas, USA: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, 2005.
- [ 10 ] State Environmental Protection Administration. HT/J 346—2007, Water quality-determination of nitrate-nitrogen-ultraviolet spectrophotometry. Beijing: China Standard Press, 2007.
- [ 11 ] Wang F, Li Y H. Photometric determination of ammonia-nitrogen in seawater with indigo phenol-blue. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2002, 19(5): 631-633.
- [ 12 ] State Environmental Protection Administration. GB 11894—89, Water quality-Determination of total nitrogen-Alkaline potassium persulfate digestion-UV spectrophotometric method. Beijing: China Standard Press, 1989.
- [ 13 ] State Environmental Protection Administration. GB 11893—89, Water quality-Determination of total phosphorus-Ammonium molybdates spectrophotometric method. Beijing: China Standard Press, 1989.
- [ 14 ] State Environmental Protection Administration. GB 11892—89, Water quality-Determination of permanganate index. Beijing: China Standard Press, 1989.
- [ 15 ] Higgins J M, Kim B R. Phosphorus retention models for Tennessee Valley Authority reservoirs. *Water Resource Research*, 1981, 17(3): 571-576.
- [ 16 ] Walker W W, Kihner J. An empirical analysis of factors controlling eutrophication in midwestern impoundments // Paper presented at the International Symposium on the Environmental Effects of Hydraulic Engineering Works. Knoxville: University of Tennessee, 1978.
- [ 17 ] Panuska J C, Robertson D M. Estimating phosphorus concentrations following alum treatment using apparent settling velocity. *Lake and Reservoir Management*, 1999, 15(1): 28-38.
- [ 18 ] The Chaobai River Management Office in Beijing. *Floods and Droughts in the Chaobai River Basin*. Beijing: China Water &



Power Press, 2004: 1-2.

- [19] Chung E G, Bombardelli F A, Schladow S G. Modeling linkages between sediment resuspension and water quality in a shallow, eutrophic, wind-exposed lake. *Ecological Modelling*, 2009, 220 (9/10): 1251-1265.
- [20] Ellison M E, Brett M T. Particulate phosphorus bioavailability as a function of stream flow and land cover. *Water Research*, 2006, 40 (6): 1258-1268.
- [21] Berretta C, Sansalone J. Hydrologic transport and partitioning of phosphorus fractions. *Journal of Hydrology*, 2011, 403 (1/2): 25-36.
- [22] Li D P, Huang Y, Fan C X, Yuan Y. Contributions of phosphorus on sedimentary phosphorus bioavailability under sediment resuspension conditions. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 168 (3): 1049-1054.
- [23] He B, Kanae S, Oki T, Hirabayashi Y, Yamashiki Y, Takara K. Assessment of global nitrogen pollution in rivers using an integrated biogeochemical modeling framework. *Water Research*, 2011, 45 (8): 2573-2586.

#### 参考文献:

- [3] 黄生斌, 叶芝茵, 刘宝元. 密云水库流域非点源污染研究概述. *中国生态农业学报*, 2008, 16(5): 1311-1316.
- [7] 北京市水保总站. 密云水库水质项目. 北京: 北京市水保总站, 2004: 7-10.
- [8] 张微微, 李红, 孙丹峰, 周连第. 密云水库上游白河磷浓度时间序列的傅立叶与小波分析. *中国农业科学*, 2011, 44(10): 2060-2069.
- [10] 国家环境保护总局. HT/J 346-2007 水质 硝酸盐氮的测定. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [11] 王峰, 李玉环. 靛酚蓝光度法测定海水中的氨型氮. *光谱实验室*, 2002, 19(5): 631-633.
- [12] 国家环境保护局. GB 11894—89 水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- [13] 国家环境保护局. GB 11893—89 水质 总磷的测定 钼酸盐分光光度法. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- [14] 国家环境保护局. GB 11892—89 水质 高锰酸钾盐指数的测定. 北京: 中国标准出版社, 1989.
- [18] 北京市潮白河管理处. 潮白河水旱灾害. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 1-2.