



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

基于GWLF模型的于桥水库流域氮磷负荷估算及来源变化解析

李泽利, 罗娜, 苏德岳, 高锴, 赵兴华, 梅鹏蔚, 张震

引用本文:

李泽利, 罗娜, 苏德岳, 等. 基于GWLF模型的于桥水库流域氮磷负荷估算及来源变化解析[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 63–71.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0054>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同降雨强度下旱地农田氮磷流失规律

王月, 房云清, 纪婧, 秦弋丰, 马瑞君, 李旭东

农业资源与环境学报. 2019, 36(6): 814–821 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0210>

山西省畜禽粪污年产生量估算及环境效应

李丹阳, 孙少泽, 马若男, 李国学, 李恕艳

农业资源与环境学报. 2019, 36(4): 480–486 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0193>

四川凯江流域农村非点源污染特征分析

张鹏远, 苟楚璇, 巫杨, 张德, 李飞, 牟子申

农业资源与环境学报. 2018, 35(5): 398–404 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0307>

黄淮海地区蔬菜废弃物污染风险及资源化潜力分析

徐子云, 李永强, 李洁, 王哲, 贾森

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 904–913 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0638>

云南高原湖泊流域种植业面源污染物的流失特征分析

赵祖军, 郑田甜, 赵筱青, 普军伟, 卢飞飞

农业资源与环境学报. 2018, 35(1): 40–47 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0169>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李泽利, 罗娜, 苏德岳, 等. 基于 GWLF 模型的于桥水库流域氮磷负荷估算及来源变化解析[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(1): 63–71.

LI Ze-li, LUO Na, SU De-yue, et al. Load estimation and source variation analysis of nitrogen and phosphorus for the Yuqiao reservoir watershed based on the GWLF model[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(1): 63–71.



开放科学 OSID

基于 GWLF 模型的于桥水库流域氮磷负荷估算及来源变化解析

李泽利¹, 罗娜^{1,2}, 苏德岳³, 高锴^{1*}, 赵兴华^{1,2}, 梅鹏蔚¹, 张震¹

(1. 天津市生态环境监测中心, 天津 300191; 2. 天津天滨瑞成环境技术工程有限公司, 天津 300191; 3. 天津市引滦工程于桥水库管理处, 天津 301900)

摘要: 外源氮磷污染物输入是于桥水库富营养化加剧的主要原因之一。为了研究“水十条”实施以来于桥水库流域氮磷污染负荷的变化, 采用 GWLF 模型模拟各个子流域产流量, 再乘以子流域出口断面总氮(TN)、总磷(TP)监测浓度, 进而估算整个流域氮磷污染负荷, 并对 2016—2017 年氮磷污染的来源和变化情况进行分析。结果显示: 2016—2017 年于桥水库流域年均 TN 负荷 2 574.6 t, TP 负荷 94.6 t。引滦调水、入境河流、库周产流和大气降水对 TN 的贡献占比分别为 27.9%、46.8%、17.3% 和 8.0%, 对 TP 贡献占比分别为 66.3%、17.3%、13.6% 和 2.8%。与 2016 年相比, 2017 年流域 TN 负荷增加 35.6%, 主要是由于引滦调水 TN 浓度大幅上升(增幅 239%)、沙河等流域产流量增加(增幅 11.4%)导致; 2017 年流域 TP 负荷减少 74.0%, 主要是由于引滦调水和沙河等河流 TP 浓度均明显下降(降幅分别为 87.8% 和 71.0%)导致。因此, 建议于桥水库流域环境管理部门加强总氮面源污染防控, 同时选择大黑汀水库氮磷浓度较低的时期调水, 以减少氮磷污染负荷。

关键词: 于桥水库; 氮; 磷; GWLF 模型; 负荷估算; 源解析

中图分类号: X824

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2021)01-0063-09

doi: 10.13254/j.jare.2020.0054

Load estimation and source variation analysis of nitrogen and phosphorus for the Yuqiao reservoir watershed based on the GWLF model

LI Ze-li¹, LUO Na^{1,2}, SU De-yue³, GAO Kai^{1*}, ZHAO Xing-hua^{1,2}, MEI Peng-yu¹, ZHANG Zhen¹

(1. Tianjin Eco-Environmental Monitoring Center, Tianjin 300191, China; 2. Tianjin Tianbin Ruicheng Environmental Technology Engineering Co., Ltd, Tianjin 300191, China; 3. Yuqiao Reservoir Administration of Diversion Project in Tianjin City, Tianjin 301900, China)

Abstract: The input of exogenous nitrogen and phosphorus is one of the primary reasons for the escalating eutrophication issues of the Yuqiao reservoir. The GWLF model was used to study the change of nitrogen and phosphorus pollution loads in the Yuqiao reservoir watershed since the implementation of the "Action Plan for Prevention and Control of Water Pollution". The model simulated the hydrological water yield in the watershed, estimated the nutrient loads by multiplying the simulated streamflow at the subbasin outlet by the observed total nitrogen(TN) and phosphorus(TP) concentration data at the same site, and analyzed the source and change of the TN and TP loads from 2016 to 2017. Results showed that the average annual TN and TP loads of the Yuqiao reservoir watershed from 2016 to 2017 were 2 574.6 t and 94.6 t, respectively. The contribution of water diversion from the Luanhe River, upstream incoming rivers, runoff around the reservoir, and atmospheric precipitation to the TN load accounted for 27.9%, 46.8%, 17.3%, and 8.0%, respectively. For the TP load,

收稿日期: 2020-02-17 录用日期: 2020-06-08

作者简介: 李泽利(1984—), 男, 河北承德人, 博士, 工程师, 从事水污染防治工作。E-mail: lizeli@tj.gov.cn

*通信作者: 高锴 E-mail: kaigao123@sina.cn

基金项目: 天津市生态环境局 2019 年引滦流域监督管理项目(TGPC-2019-D-0409)

Project supported: Supervision and Management Project of Tianjin Ecological Environment Bureau for Luanhe River Water Diversion Basin in 2019 (TGPC-2019-D-0409)

the aforementioned contributing factors accounted for 66.3%, 17.3%, 13.6%, and 2.8%, respectively. Compared with that of 2016, the TN load in the watershed increased by 35.6%, primarily because of the increase of the TN concentration of water diverted from the Luanhe River by 239% and the increase of the water yield in the watershed of upstream incoming rivers by 11.4% in 2017. The TP load in the watershed decreased by 74.0%, primarily because of the decrease of the TP concentration of water diverted from the Luanhe River and the upstream incoming rivers by 87.8% and 71.0%, respectively. The water environmental management department of the Yuqiao reservoir watershed should strengthen the prevention and control of TN source pollution and simultaneously divert water from the Luanhe River during periods of low nitrogen and phosphorus concentrations to reduce the input of the TN and TP loads.

Keywords: Yuqiao reservoir; nitrogen; phosphorus; GWLF model; load estimation; source apportionment

于桥水库位于天津北部蓟州区城东4 km处,是引滦入津输水工程的重要调蓄水库,同时也是天津市工农业和生活用水的重要水源地^[1],自1983年引滦入津以来一直为天津市人民生产和生活提供优质水源。然而自2014年开始,于桥水库富营养程度加剧^[2],2015—2017年夏秋季库区暴发大规模蓝藻水华,严重威胁了天津市城市供水安全。氮、磷作为浮游植物赖以生长的重要营养物质,参与光能转化代谢过程,是导致湖库富营养化最为重要的两个因子^[3-4]。由于氮、磷的输入与流域内人类活动密切相关,若要控制湖库富营养化和蓝藻水华,首先要明确进入到水体中氮、磷营养物质的来源及负荷^[5]。于桥水库的汇水主要来自引滦调水,沙河、黎河、淋河3条入库河流和库周30余条沟渠及大气降水等。研究表明,引滦源头潘家口、大黑汀水库水质恶化,以及流域氮磷面源污染加重,是于桥水库水质恶化、水生态平衡遭到破坏的重要原因^[6-8]。为了保护和改善于桥水库水质,“水十条”实施以来,津冀两省(市)政府采取多项举措来加强流域的保护力度^[9]:①2016年双方签订《关于引滦入津上下游横向生态补偿的协议》^[7],天津市根据跨界断面水质达标情况拨付补偿金;②2017年河北省对潘家口、大黑汀水库养鱼网箱进行全面拆除^[10];③天津市在入库沟渠截污、农村污水纳管和农业面源污染防治方面投入了大量资金,流域氮磷营养盐输入情况发生了较大变化。解析于桥水库流域氮磷营养盐来源、输入负荷及变化趋势,对区域水环境管理具有重要意义。

目前国内外在面源污染负荷估算上,机理模型的使用具有主导地位^[11]。赵磊^[12]总结了国内外应用广泛的GWLF、SWAT、AGNPS等模型的主要优缺点和适用范围,表明GWLF模型具有结构简单、参数易于获取等特点,同时该模型的水文模块原理与SWAT、AGNPS相同,在我国北方滦河流域^[13-14]、南方新安江流域^[15]都取得了很好的应用效果。本研究首先利用

GWLF模型的水文学模块模拟于桥水库各个子流域的降雨产流量,然后乘以子流域出口断面的氮磷浓度,进而估算氮磷面源污染负荷,最后针对2016—2017年于桥水库氮磷污染的来源、负荷和变化趋势进行分析,以为流域水环境管理提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

于桥水库正常蓄水面积为86.8 km²,控制流域面积2 060 km²,其中上游河北省境内面积占79%,下游天津市境内面积占21%。流域属于温带半湿润大陆性季风气候,四季分明,多年平均气温12.5℃,平均降水量670 mm,主要集中在6—9月。流域内主要入库河流为沙河、黎河(引滦调水通道)和淋河,此外库周还有30余条入库沟渠,多为季节性河流。

研究区内设有4个水文站,分别是大黑汀分水闸、前毛庄、水平口和淋河桥站,其中大黑汀分水闸站观测引滦调水流量,前毛庄站观测黎河自产流量与引滦调水流量,淋河桥站观测淋河子流域自产流量,但受上游龙门口水库蓄水影响长期断流,水平口站观测沙河流域自产流量,常年有水流动。研究区内设有4个水质监测断面,分别是隧洞出口、黎河桥、沙河桥和淋河桥,其中隧洞出口为大黑汀水库经引滦暗渠进入于桥水库流域的第一个监测断面,黎河桥、沙河桥和淋河桥分别为黎河、沙河、淋河的跨省界监测断面(图1)。此外,库周还设置38个沟渠水质观测点^[16],逐月开展水质监测工作。

1.2 研究方法

于桥水库流域氮磷污染源从空间上可分为引滦调水、沙河、黎河、淋河、库周地表水、库周地下水和库区大气降水7部分,从管理角度可汇总为引滦调水源、入境河流源(沙河、黎河和淋河)和境内源(库周地表水、地下水 and 大气降水)3大部分。用流量乘以氮磷浓度是计算负荷的最直接方法,但由于流域内各条

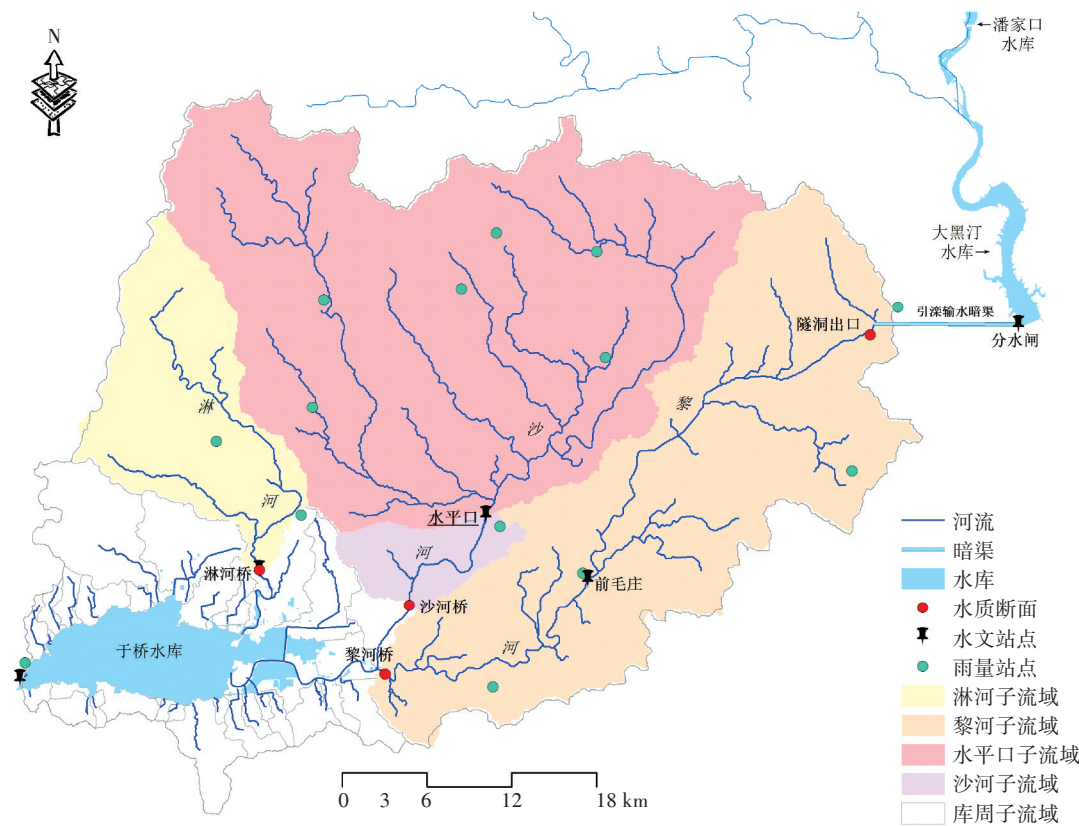


图 1 于桥水库流域河网及子流域示意图

Figure 1 Sketch map of river network and subbasins in Yuqiao reservoir watershed

河流的水文站和水质断面的位置在空间上并不全部重合,且沙河、黎河下游和库周均无流量监测数据,无法直接计算。为此,本研究选取气象、水文、下垫面数据比较齐全且受人类干扰较少的沙河水平口子流域,使用GWLF模型模拟产流过程并率定水文参数,然后将水文参数推及到整个流域^[17],模拟每个水质断面子

流域产流量,再乘以相应断面的氮磷浓度,进而估算整个流域的氮磷污染负荷。

于桥水库流域水量和氮磷污染负荷估算所需的数据见表 1。

1.2.1 GWLF 模型原理

GWLF 模型是 1987 年由美国宾夕法尼亚大学开

表 1 于桥水库流域氮磷污染负荷估算的数据源

Table 1 Original data source for nitrogen and phosphorus pollution load estimation in Yuqiao reservoir watershed

数据类型 Data type	数据来源 Data source	时间尺度 Time scale	数据描述 Data description
DEM	中国科学院地理空间数据云	2009 年	30 m×30 m
气象	中国气象数据网	2006—2017 年	遵化气象站逐日气温、降水数据
土地利用	天津市生态环境监测中心	2010 年	1:100 000 土地利用图
水文	天津市水务局	2006—2017 年	大黑汀分水闸历年调水数据;沙河水平口、黎河前毛庄和淋河桥月均流量数据
水质	天津市生态环境监测中心	2016—2017 年	地表水:隧洞出口、沙河桥、黎河桥、淋河桥 4 个水质断面逐月总氮、总磷监测数据;库周 38 条沟渠逐月总氮、总磷监测数据
		2016—2017、 2019 年	地下水:总氮浓度来源于蓟州区 2019 年 24 个千人以上地下水水源地下水水质监测结果;总磷浓度来源于蓟州区 2016—2017 年 2 个国家考核地下水井监测结果
		2016 年	大气降水:总氮浓度根据 2016 年天津市降水离子成分监测结果折算; 总磷浓度通过文献查阅获得

发的一个半分布式、半经验式的流域氮磷污染负荷模型^[18],该模型对地表径流量的计算基于日气象数据,使用径流曲线数模型(SCS-CN)计算目标流域内不同土地利用类型的径流深,作为表征地表径流量的模拟结果。其中最重要的参数是表征地表产流能力的径流曲线数(Curve number, CN)值,该值与土地利用类型、土壤类型密切相关。模型对地下潜流的计算基于日水量平衡,以浅层饱和区非重力自由水的迁移转化为核心,将浅层饱和区看作一个简单的线型水库进行模拟,通过两个关键参数退水系数 r (指浅层饱和区水体横向转移成为地下潜流水的比例)和渗漏系数 s (指浅层饱和区水体纵向向下转移进入深层饱和区的比例)调整水量平衡。将逐日的地表径流量与地下水潜流量相加,可得到逐日的河川径流量,即到达流域出口的产流量^[15]。

1.2.2 GWLF模型构建

GWLF模型产流模拟的输入数据主要包括气温、降水、土地利用类型及面积等。首先基于ArcGIS平台加载研究区的数字高程图(DEM),根据实际进行河网矫正后,以各个水质监测断面为出口分别生成沙河桥、黎河桥、淋河桥子流域和库周子流域(图1),然后与土地利用类型图叠加,分别提取出每个子流域中各个土地利用类型的面积,作为模型的输入数据;气温和降水数据以日为步长作为模型输入数据,水平口水文站实测流量数据以月为步长作为模型校准数据。与产流过程有关的参数,如各类土地利用类型的径流CN值、地下水退水系数 r 、渗漏系数 s 和不同月份的蒸发覆盖因子等,先采用模型推荐值输入,然后进行率定。

1.2.3 GWLF模型参数率定

利用沙河水平口水文站月观测流量进行水文参数率定,模拟时间跨度为2006年1月—2017年12月,共144个月。使用美国康奈尔大学基于GWLF模型原理开发的ReNuMa软件^[15-16,19]进行参数校准,该软

件在Excel文件下运行,利用了Excel强大的规划求解宏,基于月实测数据校准一个或多个参数,使得模拟结果与实测结果尽可能接近(误差平方和最小)^[20]。将2006年的数据作为模型“预热期”,使模型初始条件稳定平衡;2006—2013年作为模型校准期,校准的参数主要有径流曲线数CN值、地下水退水系数 r 和渗漏系数 s 等;2014—2017年作为验证期,验证模型参数的可信程度。采用Moriasi等^[21]推荐的统计指标和评价标准判断模型性能和适应性,包括判定系数(R^2)、纳氏系数(NSE)、百分比偏差(PBIAS),其评价标准见表2,后两者的计算公式如下:

$$NSE=1-\frac{\sum_{i=1}^n(Q_{oi}-Q_{pi})^2}{\sum_{i=1}^n(Q_{oi}-\bar{Q}_o)^2} \quad (1)$$

$$PBIAS=\frac{\sum_{i=1}^n(Q_{oi}-Q_{pi})}{\sum_{i=1}^n(Q_{oi})} \times 100\% \quad (2)$$

式中: Q_{oi} 为观测值; Q_{pi} 为模拟值; $\bar{Q}_o$ 为多年平均观测值; n 为样本个数。

如表2所示,水平口子流域径流模拟除了验证期的NSE<0.75外,在全模拟期的 R^2 、NSE和PBIAS分别为0.77、0.76和-3.4%,模型性能总体表现非常好。从图2的2006—2017年的降水过程与径流拟合效果图来看,模拟流量和实测流量过程线吻合得较好,GWLF模型适用于于桥水库流域的径流模拟。使用率定好的模型分别在沙河桥、黎河桥和库周沟渠子流域建模,通过变换土地利用类型和面积等输入数据模拟各个子流域出口的产流量,其中库周沟渠子流域模拟出的地表径流和地下潜流分开参与下一步的负荷量估算。

1.2.4 氮磷负荷估算

表2 基于月尺度径流模拟的模型性能等级评价标准及评价结果

Table 2 Evaluation standard of model performance levels and results based on monthly runoff simulation

项目 Items	性能等级 Performance levels	R^2	NSE	PBIAS
评价标准 ^[21]	非常好	$0.75 < R^2 \leq 1$	$0.75 < NSE \leq 1$	$ PBIAS < 10\%$
	好	$0.65 < R^2 \leq 0.75$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$10\% \leq PBIAS < 15\%$
	令人满意	$0.50 < R^2 \leq 0.65$	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$15\% \leq PBIAS < 25\%$
	不理想	$R^2 \leq 0.50$	$NSE \leq 0.50$	$ PBIAS \geq 25\%$
校准期	非常好	0.78	0.76	-5.4%
验证期	好	0.76	0.71	0.4%
全模拟期	非常好	0.77	0.76	-3.4%

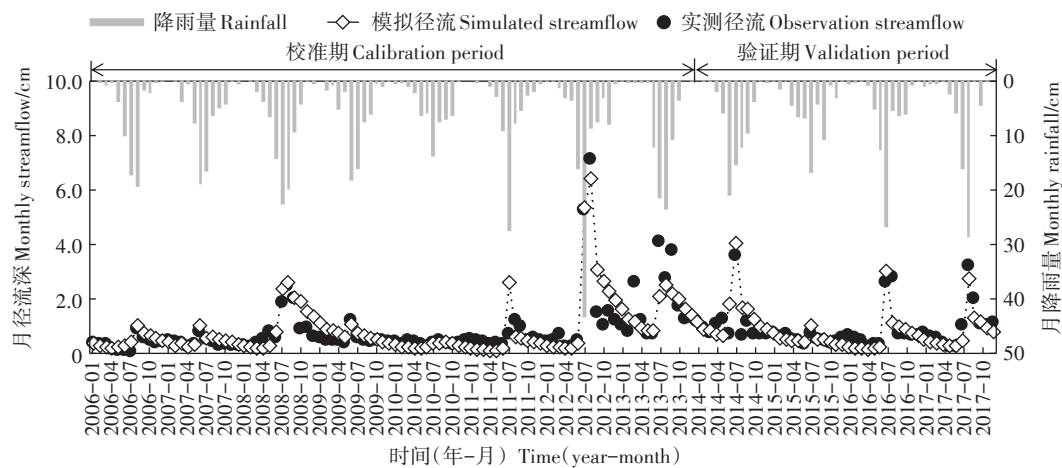


图2 沙河水平口子流域降水过程与径流拟合效果图

Figure 2 Precipitation process and runoff fitting diagram of Shuipingkou subbasin

引滦调水、沙河、黎河、淋河的氮磷负荷分别根据大黑汀分水闸水量、沙河桥模拟水量、黎河桥模拟水量、淋河桥站实测水量乘以隧洞出口、沙河桥、黎河桥、淋河桥断面对应月份的总氮(TN)、总磷(TP)浓度计算得出。2017年库周地表水氮磷负荷估算已另文发表^[16],2016年采用相同方法进行估算。库周地下水中TN浓度取自蓟州区2019年24个千人以上地下水源地水质监测结果,平均值为14.3 mg·L⁻¹;TP浓度取自蓟州区2016—2017年2个国家考核地下水井监测结果,平均值为0.04 mg·L⁻¹。根据地下潜流水量模拟结果乘以上述氮磷浓度值,估算出库周地下水输入到于桥水库的氮磷负荷。库区降水输入氮磷负荷采用降水量×水面面积×降水中氮磷浓度来估算,降水中TN浓度根据2016年天津市降水离子成分监测结果折算得到:雨水中铵离子(以N计)浓度年均值为

2.62 mg·L⁻¹,硝酸根离子(以N计)浓度年均值为1.30 mg·L⁻¹,因此TN(以N计)年均浓度为3.92 mg·L⁻¹;降水中TP浓度无实测数据,根据太湖流域研究经验^[22],按照0.05 mg·L⁻¹计算。

2 结果与讨论

2.1 氮磷负荷及来源构成

表3为2016—2017年于桥水库流域产流量、氮磷负荷估算结果。从表3可以看出,2016年于桥水库流域产流量约4.6亿t,TN输入负荷2 185.9 t,TP输入负荷150.2 t;2017年产流量约4.1亿t,TN输入负荷2 963.1 t,TP输入负荷39.0 t。徐宁等^[23]利用SWAT模型模拟2010—2013年于桥水库入库污染负荷,结果显示年均TN入库负荷为2 900.6 t,TP负荷为163.2 t,本研究估算的TN、TP负荷与其在量级上一致,表明

表3 2016—2017年于桥水库流域产流量、氮磷负荷估算结果

Table 3 Estimation results of water yield and nitrogen and phosphorus load of Yuqiao reservoir from 2016 to 2017

传输路径 Transmitting channels	产流量 Water yield/10 ⁴ t			总氮 TN/t			总磷 TP/t		
	2016年	2017年	均值 Mean	2016年	2017年	均值 Mean	2016年	2017年	均值 Mean
引滦调水	19 136.7	13 441.5	16 289.1	444.1	991.8	718.0	113.3	12.1	62.7
沙河	7 543.4	8 406.2	7 974.8	589.8	710.8	650.3	11.8	5.68	8.74
黎河	5 132.7	5 531.7	5 332.2	192.9	364.5	278.7	7.53	5.77	6.65
淋河	3 162.2	3 560.5	3 361.4	283.0	268.1	275.6	1.09	0.95	1.02
库周地表水	4 205.7	3 656.2	3 931.0	246.0	213.9	230.0	13.1	11.4	12.3
库周地下水	1 462.7	1 554.7	1 508.7	209.2	222.3	215.8	0.59	0.62	0.61
大气降水	5 635.0	4 889.6	5 262.3	220.9	191.7	206.3	2.82	2.44	2.63
入境河流源小计	15 838.3	17 498.4	16 668.4	1 065.7	1 343.4	1 204.6	20.4	12.4	16.4
境内源小计	11 303.4	10 100.5	10 702.0	676.1	627.9	652.0	16.5	14.5	15.5
合计	46 278.4	41 040.4	43 659.5	2 185.9	2 963.1	2 574.6	150.2	39.0	94.6

GWLF模型适用于于桥水库流域污染负荷研究。

将2016—2017年于桥水库流域产流量、氮磷负荷估算结果求平均值后进行来源解析(图3)。从图3可以看出,产流量由大到小依次表现为引滦调水>沙河>黎河>大气降水>库周地表水>淋河>库周地下水,分别占37.3%、18.3%、12.2%、12.0%、9.0%、7.7%和3.5%;TN负荷贡献由大到小依次表现为引滦调水>沙河>黎河>淋河>库周地表水>库周地下水>大气降水,分别占27.9%、25.3%、10.8%、10.7%、8.9%、8.4%和8.0%;TP负荷贡献由大到小依次表现为引滦调水>库周地表水>沙河>黎河>大气降水>淋河>库周地下水,分别占66.3%、13.0%、9.2%、7.0%、2.8%、1.1%和0.6%。

0.6%。

从管理角度将氮磷负荷估算结果归并为引滦调水源、入境河流源和境内源3部分,并与天津市水务局2010年发布的《于桥水库周边水污染源近期治理工程实施方案》有关研究结果^[24]进行比较。从表4可以得出,与2010年相比,2017年入境河流源TN、TP贡献比例分别下降10.2个百分点和9.2个百分点,但总体贡献均在30%以上;引滦调水源TN、TP贡献比例分别上升2.9个百分点和10.6个百分点,总体贡献均在30%以上;境内源TN贡献比例上升7.3个百分点,TP贡献比例下降1.5个百分点。值得注意的是,2016年引滦调水TP贡献比例高达75.4%,还需进一步开展研究分析。

表4 基于管理角度的于桥水库氮磷负荷来源比较

Table 4 Comparison of nitrogen and phosphorus load based on management perspective of Yuqiao reservoir

污染来源 Pollutant source	总氮占比TN/%			总磷占比TP/%		
	2010年	2016年	2017年	2010年	2016年	2017年
引滦调水源	30.6	20.3	33.5	20.5	75.4	31.1
入境河流源	55.5	48.8	45.3	41.0	13.6	31.8
境内源	13.9	30.9	21.2	38.6	11.0	37.1

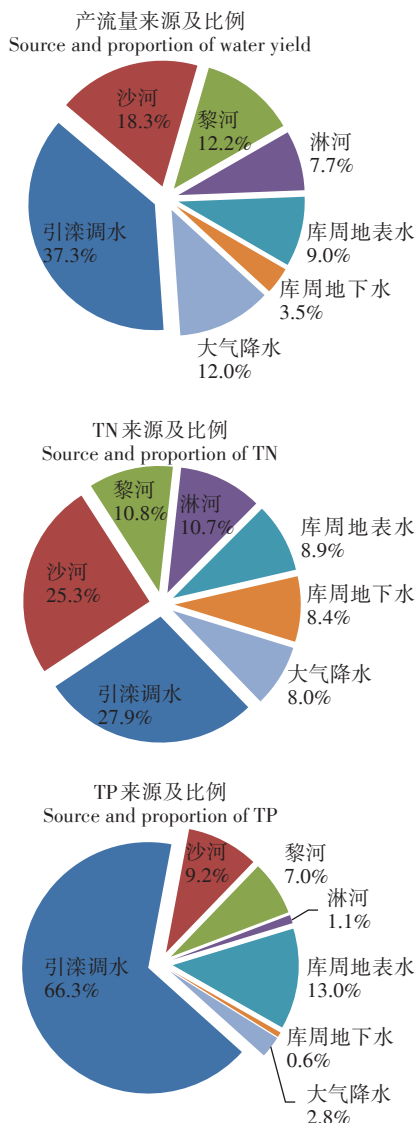


图3 不同来源产流量及氮磷负荷贡献比例

Figure 3 Contribution ratio of water yield and nitrogen and phosphorus load from different sources

2.2 氮磷来源变化分析

氮磷负荷受水质和水量共同影响。由于在估算库周地表水、地下水和大气降水等境内源氮磷负荷时,2016年和2017年氮磷浓度数据相同,其负荷量变化主要受年降水量影响,2016年流域平均降水量为675.6 mm,2017年为637.7 mm,降幅为5.6%,2017年境内源氮磷污染负荷均低于2016年。对2016—2017年引滦调水、沙河、黎河、淋河输入的氮磷负荷变化进行分析如下。

2.2.1 引滦调水污染负荷变化

引滦调水水质和水量共同决定调水污染负荷。从图4可以看出,引滦调水TP浓度由2016年初最高的 $0.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 明显下降到2017年的 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,降幅87.8%。同时,调水水量由2016年(1月、5月、6月之和)的1.91亿 m^3 下降到2017年(6月、8月、9月之和)的1.34亿 m^3 ,下降了29.8%。水量和浓度的共同下降使得TP负荷由2016年的113.3 t下降到2017年的12.1 t,降幅高达89.3%,这也是表4中引滦调水贡献比例由75.4%下降到31.1%的主要原因。资料显示2016年11月—2017年5月,国家、河北省、天津市

财政共同出资清理潘家口和大黑汀水库的养鱼网箱,共清理拆解网箱 79 687 个,拆除后大黑汀水库总磷浓度明显下降^[10]。

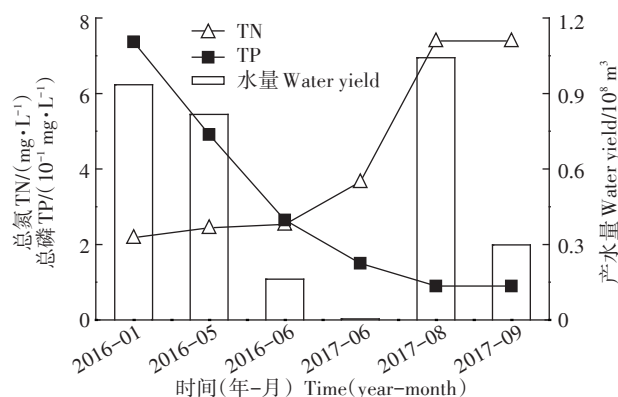


图4 2016—2017年引滦调水量和污染物浓度变化

Figure 4 Comparison of water diversion and pollutant concentration in Luanhe River from 2016 to 2017

然而,引滦调水 TN 负荷不降反升。监测结果显示引滦调水 TN 浓度由 2016 年初的 $2.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升到 2017 年的 $7.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,增幅 239%,这可能是由于调水期 8—9 月正值汛期,此时段滦河流域面源污染较重^[25-26]。尽管 2017 年调水水量较 2016 年下降了 29.8%,但调水中 TN 浓度的升幅较调水水量的降幅变化更大,导致 2017 年引滦调水 TN 输入负荷较 2016 年上升了 123.3%。

2.2.2 入境河流污染负荷变化

沙河、黎河、淋河子流域的面源污染物通过降水产流过程进入于桥水库。由于三个流域具有相似的面源污染特点,现以沙河子流域为例分析 TN、TP 负荷变化。沙河子流域 2017 年产流量较 2016 年上升了 11.4%。从图 5 可以看出,2017 年沙河各月 TP 浓度均低于 2016 年,平均浓度由 $0.238 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降到 $0.069 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,下降了 71.0%,由于 TP 浓度的降幅较产流量

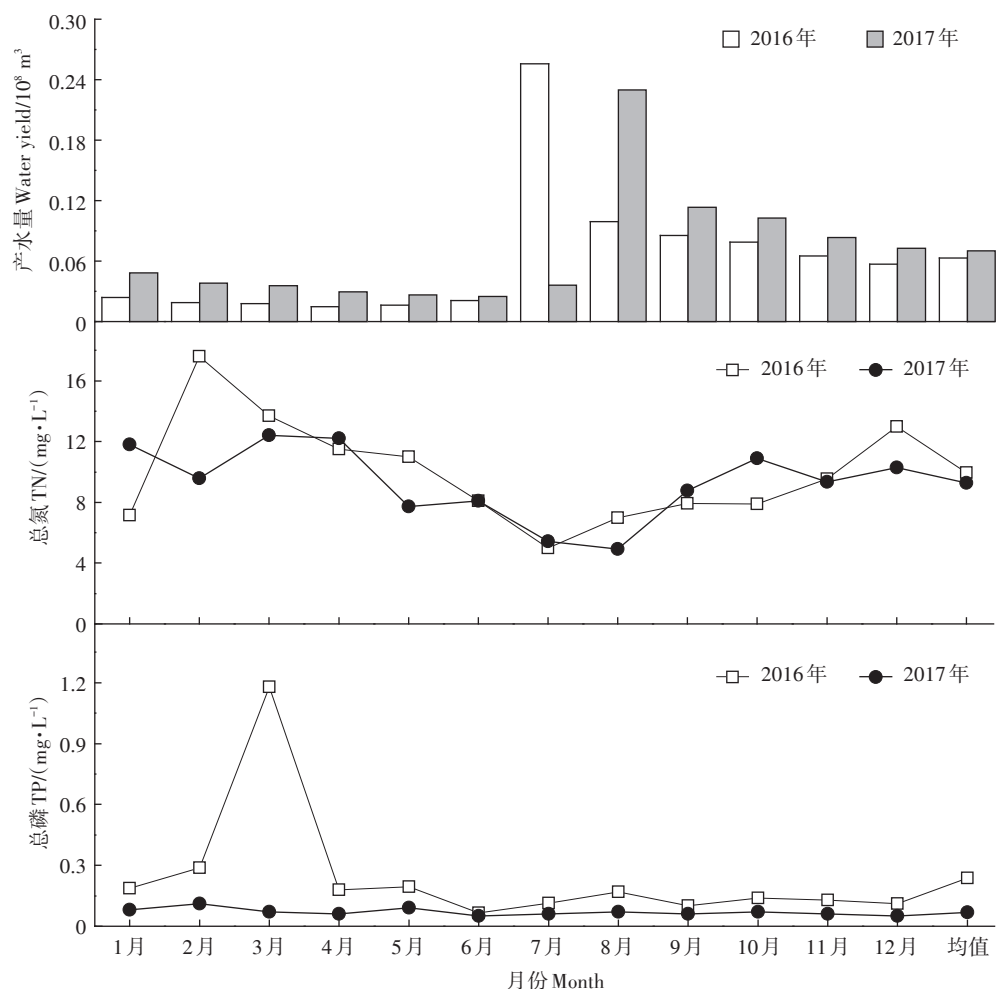


图5 2016—2017年沙河子流域产流量及氮磷浓度变化

Figure 5 Comparison of water yield and TN, TP concentration in Shahe River from 2016 to 2017

的升幅变化更大,相乘后使得2017年TP负荷较2016年下降了51.9%。2017年沙河各月TN浓度与2016年相比互有高低,平均浓度由 $9.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降到 $9.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,下降了6.6%,但由于2017年产流量的升幅较TN浓度的降幅变化更大,相乘后使得2017年TN负荷较2016年上升了20.5%。

2016年京津冀两省(市)政府签订《关于引滦入津上下游横向生态补偿的协议》以来,河北省加大了沙河、黎河、淋河流域污染治理力度,河道水质明显改善,TP等五项考核指标年均值均满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类水质要求^[7]。但由于TN浓度尚未纳入考核体系,关注程度和治理力度不大,流域内农业种植^[27]、畜禽和水产养殖、农村生活污水排放的氮素很容易通过水体流动输入到于桥水库,为藻类大量生长提供充足的营养物质。

3 结论

(1)GWLF模型对于桥水库流域水文模拟效果较好。2016—2017年于桥水库流域年均产流量约4.4亿 m^3 ,其中引滦调水贡献占比37.3%,3条入境河流贡献38.2%,库周产流和大气降水共占24.5%;年均总氮负荷2 574.6 t,其中引滦调水贡献占比27.9%,3条入境河流贡献46.8%,库周产流和大气降水共占25.3%;年均总磷负荷94.6 t,其中引滦调水贡献占比66.3%,3条入境河流贡献17.3%,库周产流和大气降水共占16.4%。

(2)与2016年相比,2017年于桥水库流域总磷负荷减少了74.0%,主要是由于引滦调水和入境河流总磷浓度均明显下降(降幅分别为87.8%和71.0%)。然而,全流域总氮负荷却增加了35.6%,这是由引滦调水总氮浓度大幅上升(增幅239%)以及入境河流产流量增加(增幅11.4%)导致。

(3)于桥水库流域总磷污染防治取得了一定效果,但总氮污染有加重的趋势,需要加强流域非点源氮污染防治力度,同时选择大黑汀水库水质较好的月份调水,以减少氮污染负荷。

参考文献:

- [1] 张晨,宋迪迪,廉铁辉.引水结构变化对天津于桥水库磷滞留的影响分析与生态水量估算[J].湖泊科学,2020,32(2):370-379. ZHANG Chen, SONG Di-di, LIAN Tie-hui. The influences of the water diversion structure change on total phosphorus retention and implication for ecological flows in Yuqiao reservoir, Tianjin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(2):370-379.
- [2] 徐媛,谢汝芹,卢蔚,等.于桥水库富营养化评价及空间分布特征研究[J].水资源与水工程学报,2014,25(1):1-6. XU Yuan, XIE Ru-qin, LU Wei, et al. Study on eutrophication evaluation and spatial distribution characteristics of Yuqiao reservoir[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2014, 25(1):1-6.
- [3] Wang J N, Yan W J, Chen N W, et al. Modeled long-term changes of DIN:DIP ratio in the Changjiang River in relation to Chl-a and DO concentrations in adjacent estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 166:153-160.
- [4] 何为媛,王莉玮,王春丽.不同水体中叶绿素a与氮磷浓度关系及富营养化研究[J].安徽农学通报,2019,25(14):121-123. HE Wei-yuan, WANG Li-wei, WANG Chun-li. Study on the relationship between chlorophyll a and nitrogen and phosphorus concentration and eutrophication in different water bodies[J]. *Anhui Agriculture Science Bulletin*, 2019, 25(14):121-123.
- [5] 王箫璇,曹燕芝,丁颖,等.氮磷营养盐控制与湖泊蓝藻水华治理研究进展[J].农业灾害研究,2017,7(24):36-40. WANG Xiao-xuan, CAO Yan-zhi, DING Ying, et al. Research progress in the control of nitrogen and phosphorus nutrients and the management of cyanobacterial bloom in lakes[J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2017, 7(24):36-40.
- [6] 吴涛,王建波,杨洁,等.大黑汀水库水质时空变化特征及下游引水策略[J].水资源保护,2020,36(2):65-72. WU Tao, WANG Jian-bo, YANG Jie, et al. Spatio-temporal characteristics of water quality in Daheiting reservoir and downstream water transfer strategy[J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(2):65-72.
- [7] 葛丽婷.协同治理视角下流域跨界水污染防治模式的构建——以引滦入津工程水污染防治为例[J].中国农村水利水电,2018(2):60-63. GE Li-ting. The construction of transboundary water pollution control model from the perspective of collaborative governance: Taking the prevention and control of water pollution of Luan River to Tianjin project as an example[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018(2):60-63.
- [8] 张庆强,周潮晖,王旭丹,等.引滦输水污染物对于桥水库水环境的影响[J].水资源保护,2014,30(6):35-39. ZHANG Qing-qiang, ZHOU Chao-hui, WANG Xu-dan, et al. Effects of water pollutants from Luanhe Tianjin water diversion on water environment of Yuqiao reservoir[J]. *Water Resources Protection*, 2014, 30(6):35-39.
- [9] 么男.于桥水库水环境保护工作初探[J].水利技术监督,2020(1):133-135,138. YAO Nan. Preliminary study on water environment protection of Yuqiao reservoir[J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2020(1):133-135,138.
- [10] 王佰梅,王潜,张睿昊.网箱养鱼清理对潘大水库水质影响分析[J].海河水利,2017(5):14-15,26. WANG Bai-mei, WANG Qian, ZHANG Rui-hao. Analysis of the influence of cage fish cleaning on the water quality of Pan-da reservoir[J]. *Haihe Water Resources*, 2017(5):14-15,26.
- [11] 刘庄,晁建颖,张丽,等.中国非点源污染负荷计算研究现状与存在问题[J].水科学进展,2015,26(3):432-442. LIU Zhuang, CHAO Jian-ying, ZHANG Li, et al. Current status and problems of non-point source pollution load calculation in China[J]. *Advances in*

- Water Science*, 2015, 26(3):432-442.
- [12] 赵磊. 非点源污染负荷核算方法研究[J]. 环境科学导刊, 2008, 27(4):9-13. ZHAO Lei. Research on methods of estimating the load of the non-point source pollution[J]. *Environmental Science Survey*, 2008, 27(4):9-13.
- [13] 杜新忠, 李叙勇, 张汪寿, 等. 基于GWLF模型的流域总氮负荷模拟及污染源解析[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(3):19-23. DU Xin-zhong, LI Xu-yong, ZHANG Wang-shou, et al. Simulation of total nitrogen load in watershed and analysis of pollution source based on GWLF model[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2014, 25(3):19-23.
- [14] 张睿昊, 朱龙基, 王佰梅. 柳河流域特征污染物负荷模拟及污染源解析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4):120-127. ZHANG Rui-hao, ZHU Long-ji, WANG Bai-mei. Simulation of characteristic pollutant load and analysis of pollution source in Liuhe River basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(4):120-127.
- [15] 沙健. 通用流域污染负荷模型(GWLF)的改进与应用实践研究[D]. 天津:南开大学, 2014:56-67. SHA Jian. The study on General Watershed Load Function (GWLF) model for algorithmic improvement and practical application[D]. Tianjin: Nankai University, 2014: 56-67.
- [16] 李泽利, 赵兴华, 梅鹏蔚, 等. 于桥水库库周沟渠水质评价与污染负荷估算[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(3):142-150. LI Ze-li, ZHAO Xing-hua, MEI Peng-yu, et al. Water quality evaluation and pollution load estimation of the ditch around the Yuqiao reservoir [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(3):142-150.
- [17] 李爽, 张祖陆, 孙媛媛. 基于SWAT模型的南四湖流域非点源氮磷污染模拟[J]. 湖泊科学, 2013, 25(2):236-242. LI Shuang, ZHANG Zu-lu, SUN Yuan-yuan. Simulation of non-point source pollution of nitrogen and phosphorus in Lake Nansi watershed using SWAT model [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 25(2):236-242.
- [18] Haith D A, Shoenaker L L. Generalized watershed loading functions for stream flow nutrients[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1987, 23(3):471-478.
- [19] Sha J, Liu M, Wang D, et al. Application of the ReNuMa model in the Shahe River watershed: Tools for watershed environmental management[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 124:40-50.
- [20] Hong B, Swaney D P. Regional nutrient management (ReNuMa) model, Version 2. 2. 1 User's manual[R]. Ithaca, New York: Cornell University, 2013.
- [21] Moriasi D, Arnold J, Van Liew M, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3):885-900.
- [22] 牛勇, 牛远, 王琳杰, 等. 2009—2018年太湖大气湿沉降氮磷特征对比研究[J]. 环境科学研究, 2020, 33(1):122-129. NIU Yong, NIU Yuan, WANG Lin-jie, et al. Comparative study on nitrogen and phosphorus characteristics of atmospheric wet deposition in Lake Taihu from 2009 to 2018[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(1):122-129.
- [23] 徐宁, 高金强, 王潜. 基于SWAT模型的州河流域非点源污染模拟[J]. 海河水利, 2017(5):53-56. XU Ning, GAO Jin-qiang, WANG Qian. Simulation of non-point source pollution in Zhouhe River basin based on SWAT model[J]. *Haihe Water Resources*, 2017(5):53-56.
- [24] 张慧, 梁琼, 高如泰. 于桥水库水源外源污染分析及环境保护对策[J]. 安徽农学通报, 2014, 20(Z1):101-105, 144. ZHANG Hui, LIANG Qiong, GAO Ru-tai. Analysis on treatment solutions on external pollution at water source of Yuqiao reservoir[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2014, 20(Z1):101-105, 144.
- [25] 万超. 潘家口水库上游流域面源污染的模拟研究[D]. 北京:清华大学, 2002:73-81. WAN Chao. Study on the simulation of the non-point source pollution in the upstream watershed of the Panjiakou reservoir[D]. Beijing: Tsinghua University, 2002:73-81.
- [26] 翟卫东, 张海英. 滦河流域2017年7月6日暴雨成因分析[J]. 海河水利, 2018(5):20-23. ZHAI Wei-dong, ZHANG Hai-ying. Analysis on the causes of rainstorm in Luanhe River basin on July 6, 2017 [J]. *Haihe Water Resources*, 2018(5):20-23.
- [27] 罗良国, 陈崇娟, 赵天成, 等. 植物修复农田退水氮、磷污染研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(1):1-9. LUO Liang-guo, CHEN Chong-juan, ZHAO Tian-cheng, et al. Progress on phytoremediation of drainage water N and P pollution in farmland drainage ditches: A review[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(1):1-9.