

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2010.05.005

新立城水库总磷优化管理

沈万斌,刘景帅,杨育红,钱德安,翟 影

(吉林大学环境与资源学院,吉林 长春 130012)

摘要 :为科学管理新立城水库水环境,确保长春市饮用水源安全,耦合了点源和非点源污染因素,建立了水库总磷优化管理模型,设计了 3 个总磷优化管理方案,以实现总磷的优化管理。结果表明 :水库现状入库总磷超过允许入库总磷约 6 倍,点源和非点源的共同作用导致水库总磷污染严重;非点源总磷是水库最大污染源,占总磷污染的 92%;其中养殖总磷污染是非点源总磷最大污染源,占总磷污染的 79%;水库总磷优化管理方案是点源入库总磷为零,农田非点源实施无污染施肥管理,非点源入库总磷为 15.10 kg/d,最大养殖规模为 25 416 头猪。指出重点治理总磷点源和非点源污染源,加强库尾人工湿地建设,加大湖域管理力度,是实现新立城水库总磷优化管理的根本措施。

关键词 :总磷;优化管理;点源污染;非点源污染;养殖规模;新立城水库

中图分类号 :X32 文献标识码 :B 文章编号 :1004-6933(2010)05-0020-04

Optimal management of total phosphorus in Xinlicheng Reservoir

SHEN Wan-bin, LIU Jing-shuai, YANG Yu-hong, QIAN De-an, ZHAI Ying

(College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract :In order to scientifically manage the water environment of the Xinlicheng Reservoir and ensure the safety of the drinking water source of Changchun City, an optimal management model of total phosphorus (TP) for reservoir coupling with the pollution factors from point and non-point sources was developed. Three schemes were designed to realize the optimal management of TP. The results showed that the present amount of TP entering the reservoir was about six times the permitted amount; TP from point and non-point source pollution caused serious contamination in reservoir; non-point source TP pollution was the largest pollution source in the reservoir, accounting for 92% of the TP pollution; and TP pollution from breed aquatics was the largest non-point source of TP pollution, accounting for 79% of TP pollution. The scheme for optimal management of TP was that the amount of TP entering the reservoir from point sources was zero; non-pollution fertilizer management was applied to control the non-point source pollution from croplands, and the permitted amount of TP entering the reservoir from non-point sources was 15.10 kg/d; and the maximum scale of animal husbandry was 25 416 pigs. TP from point and non-point source pollution should be intensively treated, constructed wetlands should be developed upstream of the reservoir, and the watershed management for the reservoir should be enhanced, all of which are rational measures for achieving the optimal management of TP for the Xinlicheng Reservoir.

Key words :total phosphorus; optimal management; point source pollution; non-point source pollution; husbandry scale; Xinlicheng Reservoir; Jilin Province

近 20 年来,新立城水库水环境处于中-富营养程度^[1]。随着水库流域工农业生产的快速发展,进入水库水域的总磷污染物逐年增加,致使水库水体

富营养化程度日益加剧^[2]。2007 年,水库首次暴发有史以来大规模的蓝藻水华现象,导致水库停止供水近 1 个月,给长春市的生产、生活用水造成了较大

困难^[3-5]。根据国际上治理湖泊的经验,湖泊一旦发生富营养化,需要几十年的控制才能恢复到较低的营养盐水平^[6-7]。因此,湖库水环境管理是长期的、艰巨的任务。新立城水库污染源分析及水质研究成果显示,点源与非点源是水库水质恶化的主要污染源;非点源污染的有增无减直接导致水库水质得不到明显改善^[8-9]。水环境管理模型作为一种科学有效的管理手段和工具,在国内外水环境管理中应用广泛^[10-12]。笔者以入库总磷为决策变量,在约束方程中耦合湖库水质模型,考虑总磷点源与非点源污染负荷,建立了水库总磷优化管理模型,优化出水库总磷管理方案,为新立城水库总磷优化管理提供科学依据。

1 研究区概况

新立城水库位于吉林省中部、伊通河中上游,地理位置为东经 125°42′57″,北纬 43°42′57″。距长春市 16 km,总库容 5.92 亿 m³,是长春市主要饮用水源地之一。20 世纪 80 年代,水库日供水能力 27 万 m³,占长春市供水量的 64%^[13];目前,新立城水库日供水能力 18 万 t,约占供水量的 30%^[8]。主要汇水河流有伊通河、新湖河和加官河等季节性河流,枯水期经常断流。新立城水库位置示意图 1。

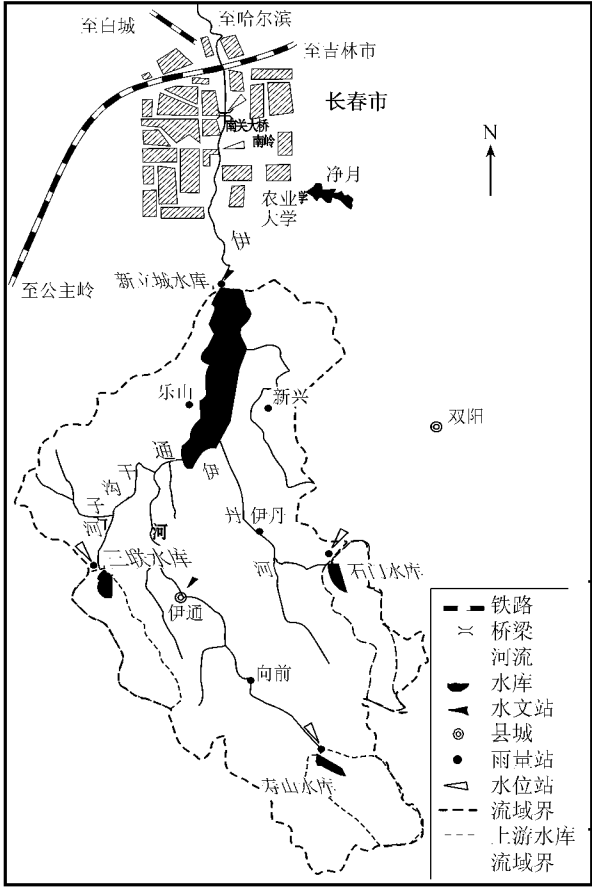


图 1 新立城水库位置示意图

新立城水库流域多低山丘陵,土地垦殖系数高达 83%。20 世纪 80 年代,全区森林覆盖率由建库初期(20 世纪 60 年代)的 46%降为 25%,20 世纪 90 年代末期减至 21%,而坡耕地以平均每年 2.39 km²的速度增加。流域所属河谷平地基本已全部开垦,库区周围以农田、宜林地为主,并有部分草地、荒地为辅。土壤为伊通河冲积而成,属于草甸土,渗透性弱,保水性强,酸碱度呈中性,土质肥沃,土层深厚,有机质含量高。库区属温带大陆性气候,年均温度 4.6℃,无霜期 140—150 d,11 月中旬之翌年 3 月上旬为冰冻期。年平均降水量 600 mm,多集中在 6—8 月,占全年降水的 70%以上。

新立城水库在吉林省地表水功能二级区划中为伊通河长春市饮用水源、渔业用水功能区,主导功能为饮用水源区,水质控制目标为Ⅱ类。

新立城水库流域为农业生产区,2004 年,化肥施用量为 833 kg/hm²,氮肥和磷肥比约为 4.5:1。大部分村镇缺乏排水设施,养殖废水与村镇生活污水随洒地表,最终以地表径流形式进入水库。库周新湖镇和乐山镇人口、耕地面积、规模化畜禽养殖情况见表 1。

表 1 新立城水库库周人口、耕地和畜禽养殖情况

地区	人口/ 万人	耕地/ hm ²	蛋鸡/ 万只	鹿/ 头	猪/ 头	黄牛/ 头	奶牛/ 头	折合 猪/头
新湖镇	2.4	7 499	200	28 748	28 139	204	280	
乐山镇	2.7	6 100	100	10 000	80 000	400	240	
合 计	5.1	13 599	300	38 748	108 139	604	520	225 942

实际监测结果表明,多年来新立城水库水质没有明显变化,各水期水质基本稳定在Ⅲ类水质标准,未能达到Ⅱ类水质标准,主要超标因子为总磷,丰水期总磷污染最严重。水库周边没有排放总磷及有机污染物的工业点源,但是新湖镇、乐山镇的工业废水、城镇生活污水对水源地水质均有影响,而丰水期降雨径流携带污染严重的泡塘水和农田中的农药、化肥,以及村屯畜禽粪便、生活污染物进入水库,是库周主要的非点源总磷污染源。

2 总磷优化管理模型建立

2.1 目标函数

新立城水库总磷管理的目标函数是在满足水库总磷水质标准的约束下,水库容纳总磷量最大,数学表达式为:

$$\max Z = W_1 + W_2 \tag{1}$$

式中:Z 为水库容纳总磷量;W₁ 为点源总磷排放量,kg/d;W₂ 为非点源总磷排放量,kg/d。

2.2 约束方程

a. 水库控制点总磷浓度约束

$$\rho_i \leq \rho_i^s$$

$$\text{其中: } \rho_i = \rho_j \exp\left(-\frac{k_1 \phi H r_i^2}{172800 Q_j}\right) + \rho_{hj} \quad (2)$$

式中: ρ_i 为第 i 个控制点总磷质量浓度 mg/L ; ρ_i^s 为第 i 个控制点总磷水质标准 mg/L ; ρ_j 为污水总磷质量浓度 mg/L ; Q_j 为污水排放量, 排入新立城水库的污水量为生活污水量、工业废水量和地表径流量之和 m^3/s ; k_1 为总磷衰减系数; ϕ 为混合角度, 平直岸边取 π 弧度; H 为平均水深 m ; r_i 为排放口到监测点的距离 m ; ρ_{hj} 为水库本底总磷质量浓度 mg/L 。

b. 点源总磷排放浓度和排放量约束:

$$\rho_{pi} \leq \rho_{pi}^s \quad (3)$$

$$W_1 = \sum_{i=1}^n q_i \rho_{pi}^s \leq W_{\max} \quad (4)$$

式中: ρ_{pi} 为第 i 个点源总磷排放质量浓度 mg/L ; ρ_{pi}^s 为第 i 个点源总磷排放标准 mg/L ; q_i 为第 i 个点源污水排放量 m^3/d ; $W_{\max}$ 为总磷最大排放量 kg/d ; 其他符号同前。

c. 非点源总磷排放量约束:

$$W_2 = \sum_{l=1}^m E_l A_l k \leq W_{\max} \quad (5)$$

式中: E_l 为第 l 个非点源营养源总磷产生系数; A_l 为第 l 种土地利用类型面积(或牲畜数量、人口数量); k 为总磷污染入库系数, 在径流过程中由于沿途堆积、沉淀、搬运等作用, 非点源总磷有效入库量小于污染物产生量, 二者的比值为总磷污染入库系数, 其他符号同前。

d. 非负约束:

$$W_l \geq 0 \quad (6)$$

上述目标函数(1)和约束方程(2)~(6)构成一个多目标线性规划模型, 也就是新立城水库总磷优化管理模型。

3 总磷优化管理计算

湖库水环境管理的目的是确定实现水环境管理目标的污水允许排放量或允许排放浓度。典型水环境管理是设法确定允许的污染物排放量, 以满足其水环境标准; 对于已经污染的湖库, 水环境管理的任务就是设法确定各污染源的减排量或处理率等管理方案, 以期在规定时间内达到水域功能标准。

3.1 总磷管理目标

管理目标为水库水质达到集中式饮用水源水质标准, 使城乡居民饮用水源的水环境质量得到保障; 库区流域内工业废水达标排放; 各监测断面水环境质量满足其水域功能标准; 在满足水质功能标准的前提下, 使污水排放量最大。

3.2 总磷管理方案

管理方案要力争做到技术可行、经济合理、管理方便; 点源污染源达标排放; 各功能区达到其水质标准; 按先点源后非点源的顺序进行污染源治理。

新立城水库总磷优化管理模型建立的条件是上游来水达标。因水库所在的东北地区冬季温度低, 河流处于冰冻期, 水库周边排水以散排为主, 所以污染物很难进入水库; 降雨径流产生的非点源污染多发生在6—9月丰水期。根据新立城水库各监测点总磷多年超标实际情况, 共设计3个优化管理方案: ①库周点源污水通过管道排入水库大坝下游, 库区单位面积化肥施用量不变, 库尾水质达到Ⅲ类标准(GB3838—2002《地表水环境质量标准》, 下同), 库中水质达到Ⅱ类标准; ②库周点源污水通过管道排入水库大坝下游, 库区单位面积化肥施用量减少50%, 库尾水质达到Ⅲ类标准, 库中水质达到Ⅱ类标准; ③库周点源污水排放方式不变, 库区单位面积化肥施用量减少50%, 库尾水质达到Ⅲ类标准, 库中水质达到Ⅱ类标准。

3.3 总磷排放量估算

3.3.1 基础数据

根据新立城水库水环境质量现状、管理目标和库周实际情况, 库尾水质确定为Ⅲ类标准; 在满足允许入库总磷负荷条件下, 具体管理方案主要是通过控制点源和化肥施用量, 求得库周最佳养殖规模。耕地面积根据新立城水库退耕还林规划, 到2010年退耕还林面积达30 km^2 , 计算用耕地面积为现状耕地面积与退耕还林面积之差; 目前, 库周实际施磷量约为120 kg/hm^2 , 新立城水库氮磷优化配比为3:1^[9], 根据我国大田作物无污染施氮量平均每季为180 kg/hm^2 ^[14]的标准, 库周属一年一季作物种植, 最优施磷量应为60 kg/hm^2 。

3.3.2 点源和非点源入库总磷量估算

通过调查分析, 新立城水库库周工业污染源主要有20家, 总磷污染负荷以统计数据为准; 生活污染源未统计, 以现状人口和排放系数进行估算, 生活污水取100 $\text{L}/(\text{人} \cdot \text{d})$, 总磷取1.6 $\text{g}/(\text{人} \cdot \text{d})$; 农田总磷排放系数取1.2 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 畜禽养殖以猪计, 折算比例参照GB18596—2001《畜禽养殖业污染物排放标准》, 总磷取3.6 $\text{g}/(\text{头} \cdot \text{d})$ 。库周总磷主要通过地表径流入库, 因此, 以丰水期122 d(6—9月)估算入库总磷量。

库周入库总磷量 W_p 计算以湖泊推流衰减模型^[15]为基础, 采用平均浓度法计算, 公式如下:

$$W_p = 86.4 \rho_j Q_j = 86.4 Q_j (\rho_i - \rho_{hj}) \exp\left(-\frac{k_1 \phi H r_i^2}{172800 Q_j}\right) \quad (7)$$

表 2 新立城水库总磷优化管理模型优化结果

方案	允许入 库总磷/ (kg·d ⁻¹)	点源与非点源 总磷合计/ (kg·d ⁻¹)	点源入 库总磷/ (kg·d ⁻¹)	非点源入库总磷/(kg·d ⁻¹)			点源 比例/%	非点源 比例/%	折合成猪的 最大养殖 规模/头
				农田源	畜禽源	小计			
现状排放		106.97	8.45	14.14	84.38	98.52	8	92	225 942
优化方案 1	15.10	15.10	0	11.14	3.96	15.10	0	100	10 561
优化方案 2	15.10	15.10	0	5.57	9.53	15.10	0	100	25 416
优化方案 3	15.10	15.10	8.45	5.57	1.08	6.65	56	44	2 880

点源和非点源入库总磷估算结果见表 2。表 2 表明,现状入库总磷为 106.97 kg/d。其中点源入库总磷为 8.45 kg/d,占总磷污染的 8%;农田源入库总磷为 14.14 kg/d,占总磷污染的 13%;畜禽源入库总磷为 84.38 kg/d,占总磷污染的 79%,规模化畜禽养殖是入库总磷最大污染源。

3.4 总磷管理方案优化结果分析

采用单纯形法求解新立城水库总磷优化管理模型,优化结果见表 2。

表 2 的优化结果表明:

a. 新立城水库现状入库总磷为 106.97 kg/d,允许入库总磷为 15.10 kg/d,现状入库总磷超过允许入库总磷约 6 倍。

b. 优化方案 1 是进行点源排放限制,点源污水通过管道在水库大坝下游排放,点源允许入库总磷为零,非点源允许入库总磷为 15.10 kg/d,农田总磷以退耕还林后的耕地面积计,施肥量不变,最大养殖规模为 10 561 头猪;优化方案 2 是既要求点源入库总磷为零,又对农田非点源进行无污染施肥管理,非点源允许入库总磷为 15.10 kg/d,最大养殖规模为 25 416 头猪;优化方案 3 是仅对农田非点源总磷进行管理,而维持现状点源排放量和排放方式不变,最大养殖规模为 2 880 头猪。3 个优化管理方案均可实现对新立城水库总磷的优化管理。

c. 根据《中华人民共和国水法》第三十四条的规定:“禁止在饮用水水源保护区内设置排污口”,综合考虑新立城水库库周城镇以畜禽养殖业为支柱产业,比较 3 个优化管理方案对畜禽养殖规模求解结果,水库总磷优化管理应采用优化方案 2:即点源入库总磷为零,库周农田实行无污染施肥管理,非点源允许入库总磷为 15.10 kg/d,库周最大养殖规模为 25 416 头猪。

4 措施建议

为更好地保护饮用水水源地,保障居民饮用水安全,扩大库周规模化养殖,需加强点源和非点源以及工业、生活、农田和畜禽养殖等方面的综合管理。

a. 水库点源污染采取“源头控制”和“末端治理”双向治理措施。一级保护区内禁止工业、生活点

源污染源排放;二级保护区内应重点控制耗水量大、污染严重企业,实行关、停、并、转,减少污染物排放;鼓励居民减少含磷洗涤剂的使用;树立节约用水和环境保护意识,加快城镇污水处理厂建设,加快规模化畜禽养殖粪便无害化处理设施建设,处理工艺要具备脱氮除磷功能。

b. 建议水库库区坡度在 15°以上的坡耕地退耕还林,坡度在 5°~15°的耕地应采取培堤埂、种植物篱、修筑梯田、预留植被缓冲带等水土保持措施,鼓励农民合理堆放和使用畜禽粪便,政策扶持建设畜禽粪便处理厂,推广测土施肥技术成果,引导农民科学施肥,改变单一作物种植方式,采用轮作种植。

c. 在库尾建设一定规模的人工湿地。

d. 加强库域水环境管理,加大法律监督、政府干预和投资力度,统一规划发展,协调资源配置。

5 结 论

新立城水库现状入库总磷超过允许入库总磷约 6 倍,非点源总磷是新立城水库最大污染源,占总磷污染的 92%。其中养殖总磷是非点源总磷最大污染源,占总磷污染的 79%。点源和非点源污染的共同作用导致了新立城水库总磷污染严重。

从线性规划理论出发,耦合了点源和非点源污染因素,建立了新立城水库总磷优化管理模型,设计了 3 个管理方案,用单纯形法求解管理模型,3 个优化管理方案均可实现新立城水库总磷的优化管理。

应实施优化方案 2 对新立城水库进行总磷优化管理,即点源入库总磷为零,周围农田实行无污染施肥管理,非点源允许入库总磷为 15.10 kg/d,最大养殖规模为 25 416 头猪。

总之,重点治理总磷点源污染源和非点源污染源,加强库尾人工湿地建设,加大湖域管理力度,是实现新立城水库总磷优化管理的根本措施。

参考文献:

[1] 严登华,何岩,邓伟,等.吉林省典型湖库中无机氮含量变化规律初探[J].环境科学学报,2001,21(1):89-94.
[2] 马树兴.生物措施治理新立城水库蓝藻的可行性分析[J].吉林水利,2009(2):43-44. (下转第 28 页)



图 10 通明段流场(二期引水箱涵方案)

流流速和回流区域都有所减小,工况三回流区域长 293 m,最大回流流速为 0.09 m/s。为了定量地对其分析,在进、出水口口门区布置 9 个监测点。统计分析可见,低水位大流量(工况七)条件下,上游河道各监测点的最大流速为 0.27 m/s,最大横向流速为 0.24 m/s,最大纵向流速为 0.13 m/s;下游河道最大流速为 0.40 m/s,最大横向流速为 0.21 m/s,最大纵向流速为 0.36 m/s。对于设计引水流量为 40 m³/s、低水位(工况三)时,上游河道最大流速为 0.20 m/s,最大横向流速为 0.18 m/s,最大纵向流速为 0.10 m/s;下游河道最大流速为 0.29 m/s,最大横向流速为 0.15 m/s,最大纵向流速为 0.26 m/s。二期工程设计流量为 40 m³/s 时能够满足通航要求,后期可能扩大引水流量到 55 m³/s 时,也能满足通航要求,靠近引水口处的横向和纵向流速和一期工程比较接近,其余测点由于水域开阔横向和纵向流速都有所减小。

4 结 论

通过以上计算和分析,可以得出以下结论:

a. 建立曹娥江至宁波引水工程平面二维水流动力数学模型,并用大库引水工程 1:50 模型试验资料进行对比验证,各方案水流流态和流速值吻合较好,计算所采用的模型和参数可靠,可用于引水工程的相关研究。

b. 通过对通明一期和二期引水工程的计算表明,从水流流态和流速分布角度来看,通明引水工程一期和二期的设计是合理的。通明引水工程一期和二期上、下游横向流速、纵向流速和回流流速都能满足通航设计规范,工程的建设对通航影响不大,在引水工程的进、出口横向流速最大,过往船只需注意即可。

参考文献:

[1] 周辉,沙海飞.曹娥江至宁波引水工程水工模型试验研究报告[R].南京:南京水利科学研究院,2009.
[2] 于利均,王斌,包中进.浙东引水工程萧山枢纽进口优化数值模拟[J].水利水电技术,2009,40(3):33-35.
[3] 吴时强,丁道扬.剖开算子法解具有自由表面的平面紊流速度场[J].水利水运科学研究,1992(1):39-47.

[4] 吴时强,吴修锋,周辉.淮河入海水道淮安地涵枢纽河道水流数值计算[J].河海大学学报:自然科学版,2001,29(3):27-32.

(收稿日期 2010-04-18 编辑 徐 娟)

(上接第 23 页)

[3] 李青山,苏保健.新立城水库藻类污染成因分析及治理对策措施[J].水文,2008,28(6):45-46.
[4] 杨铭威,石亚东,孙志,等.太湖蓝藻暴发引发无锡供水危机的思考[J].水利经济,2009,27(3):36-38.
[5] 侯俊,王超,兰林,等.我国饮用水水源地保护法规体系现状及建议[J].水资源保护,2009,25(1):79-82,85.
[6] SCHEFFER M. Ecology of shallow lakes[M]. Netherlands, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001: 89-307.
[7] NIXDORF B, DENEKE R. Why 'very shallow' lakes are more successful opposing reduced nutrient load[J]. Hydrobiologia, 1997, 342/343: 269-284.
[8] 于常荣,赫影,钟艳兵.新立城水库水质研究[J].吉林水利,1992(1):30-34.
[9] 杨爱玲.城市饮用水地表水源保护研究:以东北区为例[D].长春:中国科学院东北地理与农业生态研究所,2000.
[10] 沈万斌,杨育红,董德明.松花江吉林省段水环境的优化管理[J].吉林大学学报:理学版,2007,45(6):1043-1045.
[11] HSIEH Cheng-daw, YANG Wan-fa. Optimal nonpoint source pollution control strategies for a reservoir watershed in Taiwan[J]. Journal of Environmental Management, 2007, 85: 908-917.
[12] JONES L, WILLIS R, YEH W W W-G. Optimal control of nonlinear groundwater hydraulics using differential dynamic programming[J]. Water Resources Research, 1987, 23: 2097-2106.
[13] 肖桂义,陆继龙,蔡波,等.长春市石头口门水库水质演变及对策[J].地质与勘探,2003,39(6):61-63.
[14] 侯彦林,周永娟,李红英,等.中国农田氮面源污染研究:1.污染类型区划和分省污染现状分析[J].农业环境科学学报,2008,27(4):1271-1276.
[15] 国家环境保护局.环境影响评价技术导则:地面水环境(HJ/T2.3-93)[S].1993.

(收稿日期 2009-12-30 编辑 徐 娟)