

淀山湖流域平原河网水环境容量及 控制断面水质达标方案研究

王子轩^a, 逢勇^{a,b}, 罗缙^{a,b}, 王一舒^a

(河海大学 a. 环境学院; b. 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 根据2013年淀山湖水质监测数据, 淀山湖水质总体评价为轻度富营养水平。通过建立淀山湖流域一维平原河网水量水质模型, 对各项参数进行率定验证, 计算得到2020年COD环境容量为13091 t/a, 氨氮环境容量为1 021 t/a, 总磷环境容量为196 t/a。结合各水功能区污染物最大允许入河量计算结果以及各入湖河道污染物通量占比结果, 设计了相应的断面水质达标方案, 建议进一步对面源进行治理以改善总磷指标, 为进一步实行淀山湖流域水环境综合整治提供了理论支撑。

关键词: 水环境容量; 参数率定; 平原河网; 断面水质达标方案; 淀山湖

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2015)06-0061-05

Study of water environment capacity and standard program of water quality on control section in plain river network of Dianshan Lake basin

WANG Zixuan^a, PANG Yong^{a,b}, LUO Jin^{a,b}, WANG Yishu^a

(a. College of Environment; b. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources

Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the data of water quality monitoring in Dianshan lake in 2013, the water quality in Dianshan Lake was evaluated as mild eutrophication. The paper constructed one-dimensional model of river network water quantity and water quality for Dianshan Lake basin and verified the parameters of the model. The results show that by 2020, the environmental capacity of COD will be 13901 t/a, the environmental capacity of NH₃—N be 1021 t/a, the environmental capacity of TP be 196 t/a. By combining the calculation results of the maximum allowed volume of pollutants of the water function zones into the river as well as the pollutant flux ratio into river lake, the paper designed the corresponding compliance program of section water quality and proposed suggestions that is to further treat the nonpoint source so as to improve the total phosphorus index. The result can provide theoretical support for the further implementation of comprehensive improvement of water environment in Dianshan Lake basin.

Key words: water environmental capacity; parameter calibration; plain river network; standard program of section water quality; Dianshan Lake basin

1 研究背景

水环境容量是进行污染物总量控制一个关键的技术参数。我国从20世纪70年代引进水环境容量这一概念, 并开始了相关的研究工作。目前, 较为普

遍的水环境容量定义为: 水体在规定的目标下所能容纳的污染物的最大负荷, 其大小与水体特征、水质目标及污染物特性有关。通常以单位时间内水体所能承受的污染物总量表示, 水环境容量也可称为水域的纳污能力^[1]。

收稿日期: 2015-04-18; 修回日期: 2015-05-28

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-010)

作者简介: 王子轩(1992-), 男, 江苏扬州人, 硕士研究生, 主要从事环境规划与影响评价研究。

通讯作者: 逢勇(1958-), 男, 山东人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境规划与影响评价研究。

水环境容量以计算纳污量为目的,以水质数学模型为手段,国内外学者在这方面进行了很多研究,并取得了一系列的成果^[2]。熊风等^[3]从水环境容量的定义出发利用一维稳态水质模型推算了有机物水环境容量的不同条件下的计算公式。孙卫红等^[4]探讨了基于不均匀系数的水环境容量计算方法,提出不均匀系数求解思路,并应用二维水量、水质数学模型进行求解。朱晓娟^[5]通过调整各评价因子的分配系数权重,计算基尼系数,对吉林省松花江干流环境容量进行了优化配置。美国国家环保局(EPA)于1972年提出了TMDL(Total Maximum Daily Loads)计划。TMDL计划探讨了控制单元的划分原则和划分尺度问题,并着重分析了大小尺度控制单元的各自优缺点^[6-7]。

在对控制断面达标的研究方面,鲍琨等^[8]对影响太湖流域无锡市殷村港断面水质的污染源进行污染控制单元划分,并计算了控制单元内外污染权重。温丽容等^[9]对广东省跨市河流边界水质控制断面监测方案进行了讨论,为加强广东跨市河流边界水质的达标管理提供了技术支撑。李强坤等^[10]基于平均浓度法原理,提出了多沙河流非点源污染负荷估算模型,并对黄河干流潼关断面非点源污染负荷进行估算;张瑞斌^[11]利用水环境数值模型对武进流域污染物负荷削减方案进行了评估,提出水污染源头的各种对策以及总量控制的经济与管理措施及河道污染控制技术。

淀山湖是太湖流域第二大省界湖泊,地处江苏省昆山市、吴江区和上海市青浦区交界处,总面积约62 km²,环淀山湖区域的水环境状况及治理效果直接关系到周围区域水环境、水生态安全及区域下游黄浦江上游水源地的供水安全。根据2013年淀山湖水质监测数据,淀山湖水质总体评价为劣V类,淀山湖营养状态为轻度富营养水平。总体而言,淀山湖水体水环境状况不容乐观,对淀山湖流域进行水环境综合整治的行动迫在眉睫。

2 计算方法

2.1 水量模型基本方程

水量计算的微分方程是建立在质量和动量守恒定律基础上的圣维南方程组,以流量 $Q(x, t)$ 和水位 $Z(x, t)$ 为未知变量,并补充考虑了漫滩和旁侧入流的完全形式圣维南方程组为:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial x} + B_w \frac{\partial Z}{\partial t} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + 2u \frac{\partial Q}{\partial x} + (gA - Bu^2) \frac{\partial A}{\partial x} + g \frac{n^2 |u| Q}{R^{4/3}} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: Q 为流量, m³/s; B_w 为调蓄宽度,是包括滩地在内的全部河宽, m; Q 为旁侧入流流量,入流为正值,出流为负值, m³/s; A 为主槽过水断面面积, m²; B 为主流断面宽度, m; R 为水力半径, m; U 为断面平均流速, m/s; Z 为水位, m; g 为重力加速度, m/s²; n 为河床糙率; x, t 为沿水流方向的空间坐标和时间坐标, m, s;

2.2 水质模型基本方程

河网对流传输移动问题的基本方程表达如下:

河道方程

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(AEx \frac{\partial C}{\partial x} \right) + Sc - S = 0 \quad (2)$$

河道叉点方程

$$\sum_{I=1}^N (QC)_{I,j} = (C\Omega)_j \left(\frac{dZ}{dt} \right)_j \quad (3)$$

式中: Q 为流量, m³/s; Z 为水位, m; A 为河道面积, m²; Ex 为纵向分散系数, m²/s; C 为水流输送的物质浓度, mg/L; Ω 为河道叉点-节点的水面面积, m²; j 为节点编号; I 为与节点 j 相联接的河道编号; Sc 为衰减项 $Sc = K_d \cdot A \cdot C$; S 为外部的源或汇项; K_d 为衰减因子。

2.3 水环境容量计算公式

河网(河道)区环境容量具体计算公式如下:

$$W_{\text{环境容量}} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \alpha_{ij} \cdot W_{ij\text{环境容量}} \quad (4)$$

式中: α_{ij} 为不均匀系数; $\alpha_{ij} \in (0, 1]$; 河道越宽、水面越大,则 α_{ij} 越小。

$$W_{ij\text{环境容量}} = Q_{0ij} (C_{sij} - C_{0ij}) + KV_{ij} C_{sij} \quad (5)$$

W_{ij} 为计算中的最小空间计算单元和最小时间计算单元。计算中最小空间计算单元为河段(河段为两节点之间的河道);最小时间计算单元为天。

根据确定的边界水文条件,利用研究区域河网水量数学模型,计算出研究区域最小空间单元和最小时间单元的环境容量值,再根据公式(4)汇总出各控制单元的环境容量值。

3 模型建立及参数率定

3.1 河网数学模型构建

3.1.1 河网概化 由于河网内部河道多而复杂,为了便于计算,首先将内部河道进行概化,形成一个有河道、有节点的概化河网。概化时将主要的输水河道纳入计算范围,将次要的河道和水体根据等效原理,归并为单一河道和节点,使概化前后河道的输水

能力相等、调蓄能力不变。对于水系内不参加水流输送的一些小河、池塘等,采用调蓄不变原则模拟概化河网以外的调蓄作用,使概化前后河道的总调蓄容积不变。根据以上原则,将淀山湖流域的主干河道进行概化,具体概化结果见图1。

3.1.2 污染源概化 将模型区域范围内污水处理厂和直排工业企业根据就近排放原则概化成35个点源概化排污口,农业面源和生活直排污水按河道沿线排放成面源,点源概化排污口见图2。

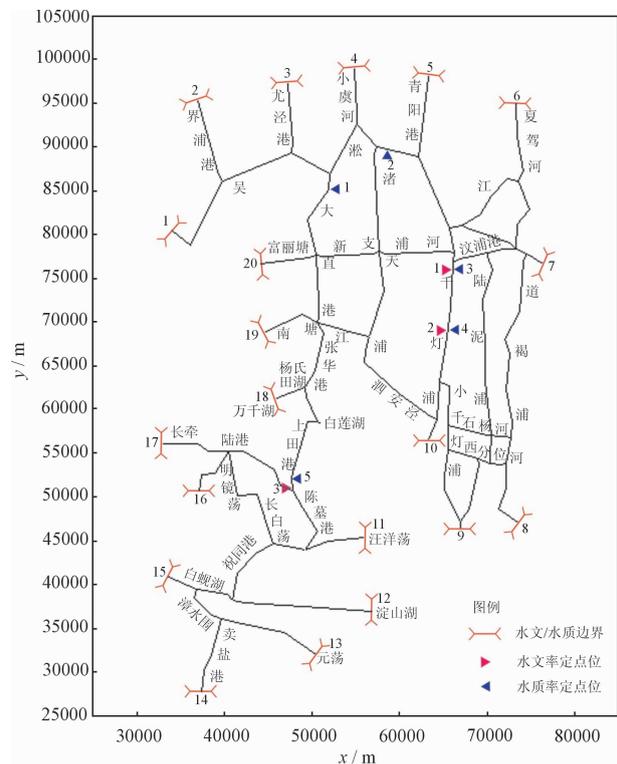


图1 淀山湖流域数学模型河网概化及率定点位图

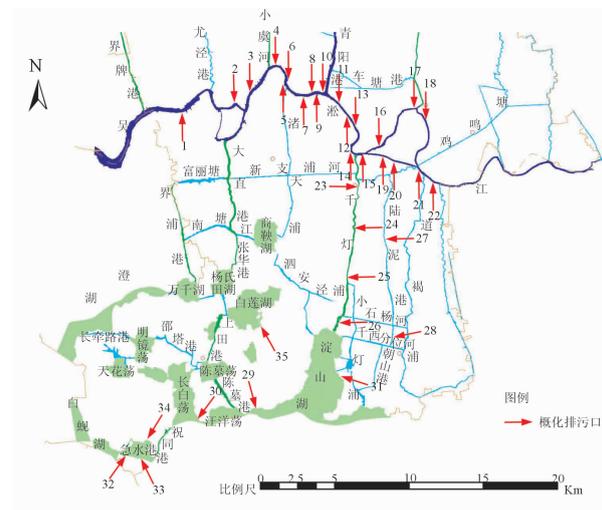


图2 研究区域及污染源概化排污口位置图

3.2 模型边界条件选取

根据模型的概化结果,选取20个边界断面,边界具体位置见图1,模型的水动力、水质边界条件均采用2014年11月18日-2014年11月19日水量水质同步监测结果。

3.3 水动力水质率定

3.3.1 水动力参数率定 水动力率定控制断面位置见图1。根据建立的淀山湖流域河网水动力水质模型,将计算得到各主要控制断面的水动力条件计算值与同步监测数据进行对比,得到模型计算结果与实测值平均相对误差均在30%以内,满足误差要求。率定得到河道糙率为0.03。流量、水位计算值与实测值对比结果见图3。

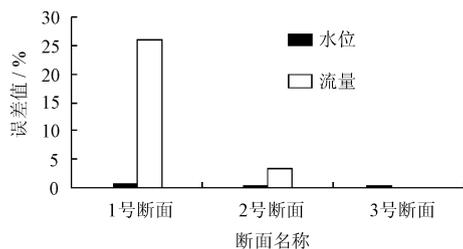


图3 各断面水动力条件计算值与实测值平均误差图

3.3.2 水质参数率定 水质率定主要控制断面位置见图1。根据建立的淀山湖流域河网水动力水质模型,将各主要控制断面不同类型污染物浓度的计算值与同步监测数据进行对比,得到COD、氨氮、TP计算结果值与实测值的相对误差均在25%内,满足误差要求。率定得到COD降解系数为0.08~0.1,氨氮降解系数为0.06~0.08,TP降解系数为0.06~0.08。各断面不同类型污染物计算值与实测值对比见图4。

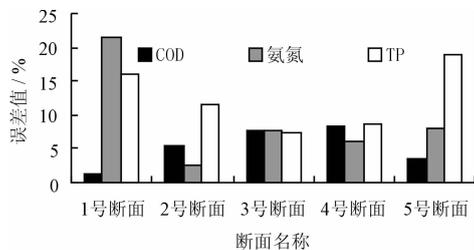


图4 各断面不同污染物计算值与实测值平均误差图

4 水环境容量计算

4.1 参数选取

(1)降解系数选取。水环境容量计算水质降解系数采用水动力水质数学模型率定确定的结果参数。

(2)设计水文条件。采用降雨资料确定各计算

河网区90%保证率的设计水文条件,对淀山湖流域1960-2010年连续50年的逐日降雨资料进行频率分析,得出淀山湖流域90%保证率下典型年为1971年。

(3)不均匀系数确定。水体水环境容量的理论值为水体污染物均匀混合后的数值,为保证水环境容量计算结果与实际不均匀现象相一致,在河网(河道)区水环境容量计算过程中采用了不均匀系数进行订正^[12],将水体均匀混合的水环境容量乘以不均匀系数,得出水体满足控制条件下的水体水环境容量,河网(河道)区不均匀系数如表1。

表1 河道不均匀系数分析成果表

河宽/m	不均匀系数	河宽/m	不均匀系数
0~50	0.8~1.0	100~150	0.4~0.6
50~100	0.6~0.8	150~200	0.1~0.4

4.2 水环境容量计算结果

根据水质目标、设计水文条件、河道属性及水利工程状况,利用总体达标法计算得到各功能区最大允许入河量,具体结果见表2;进一步计算得到各入湖河道污染物通量占比,计算结果见表3。

表2 各水功能区污染物最大允许入河量计算结果表 t/a

编号	功能区名称	COD	NH ₃ -N	TP
1	长牵路吴江工业、农业用水区	177	14	3
2	淀山湖苏沪边界缓冲区	5064	392	75
3	急水港吴江工业、农业用水区	322	25	5
4	八荡河吴江工业、农业用水区	211	16	3
6	元荡苏沪边界缓冲区	1288	100	19
7	三白荡苏沪边界缓冲区	297	23	4
8	牛长泾吴江工业、农业用水区	123	10	2
9	半月港吴江工业、农业用水区	78	6	1
10	太浦河苏浙缓冲区	372	35	7
11	千灯浦昆山工业、农业用水区	399	31	6
12	北窑港吴江缓冲区	24	2	0
13	芦墟塘苏浙边界缓冲区	139	11	2
14	吴淞江苏州工业、农业用水区	2101	163	31
15	长牵路吴江工业、农业用水区	327	25	5
16	大、小朱砂苏沪边界缓冲区	78	6	1
17	急水港苏沪边界缓冲区	325	25	5
18	千灯浦苏沪边界缓冲区	55	4	1
19	大直港昆山工业、农业用水区	741	28.5	11
20	界浦昆山工业、农业用水区	383	30	6
21	新开河昆山工业、农业用水区	589	46	9
总计		13091	1021	196

表3 淀山湖入湖河道通量占比计算结果表

入湖河道名称	流量占比/%	通量贡献比		
		COD/%	NH ₃ -N/%	TP/%
千灯浦	6.65	7.25	19.49	10.60
汪洋荡	37.56	34.65	25.60	49.65
急水港	39.62	40.28	46.87	27.93
元荡	16.18	17.82	8.03	11.82
总计	100.00	100.00	100.00	100.00

4.3 千灯浦口断面水质达标方案分析

在河流中,通常用水体的水质状况来表征水环境的优劣,而影响水质的的主要因素包括河道自身水动力条件等自然因素和污染物的排放及水利设施控制等人为因素两大类。根据这两大类因素制定相应的计算方案,利用水环境数学模型针对千灯浦计算出各方案情况下千灯浦口断面的水质状况,同时对影响千灯浦口断面水质达标污染权重进行分析。结合水文边界、水质边界及污染源的不同条件,本次共设计7种计算方案,利用水环境数学模型计算不同方案下千灯浦口断面氨氮和总磷的水质变化,计算方案见表4。

将沿线直排工业、污水处理厂及农田面源根据就近原则进行排污口的概化,概化排口位置见图2。为进一步分析各部分污染源对千灯浦口断面水质达标权重影响,将千灯镇内部污染源称为内部源,千灯镇以外污染源称为外部源,并进一步对内部和外部污染源进行细分,划分方案见表5。

在本次制定的7种污染物削减方案下千灯浦口断面氨氮和总磷水质改善效果见表6。

根据方案预测结果可见,设计的7种方案对千灯浦口断面水质有不同程度的改善,对氨氮的改善效果明显优于总磷。由于本次设计的污染物削减方案均基于直排企业进行接管处理或上游来水及支流达到功能区水质标准,因此断面总磷水质还需进一步对面源进行治理才能起到明显的改善效果。从不同方案改善效果来看,改善上游青阳港水质使其达到功能区水质标准对千灯浦口断面水质改善效果最明显。由于青阳港两岸为开发区工业集中区,青阳港水质常年较差,建议对青阳港周边直排工业企业进行接管集中处理,其次是对千灯浦镇内直排工业企业进行接管集中处理,对千灯浦口断面改善效果较好。

表4 千灯浦水环境数学模型设计计算方案

编号	方案	设计水文条件	设计水质边界	污染物削减情况
1	方案一	90% 保证率	监测不利值	千灯镇直排工业点源接污水处理厂集中处理后排吴淞江
2	方案二	90% 保证率	监测不利值	青阳港达地表水Ⅳ类水标准
3	方案三	90% 保证率	吴淞江大桥断面达地表水Ⅲ类水标准	无削减
4	方案四	90% 保证率	吴淞江大桥断面达地表水Ⅲ类水标准	青阳港达地表水Ⅳ类水标准
5	方案五	90% 保证率	吴淞江大桥断面达地表水Ⅲ类水标准	千灯镇直排工业点源接污水处理厂集中处理后排吴淞江;青阳港达地表水Ⅳ类水标准
6	方案六	90% 保证率	监测不利值	千灯镇直排工业点源接污水处理厂集中处理后排吴淞江;青阳港达地表水Ⅲ类水标准
7	方案七	90% 保证率	吴淞江大桥断面达地表水Ⅲ类水标准	千灯镇直排工业点源接污水处理厂集中处理后排吴淞江;青阳港达地表水Ⅲ类水标准

表5 研究区域内部污染源和外部污染源范围界定信息表

编号	名称	污染源范围
1	内部源1	千灯镇排入千灯浦污染源
2	内部源2	千灯镇排入吴淞江污染源
3	外部源1	吴淞江大桥断面上游排入吴淞江污染源
4	外部源2	吴淞江大桥断面到千灯浦段除千灯镇外排入吴淞江污染源

表6 各方案千灯浦口断面水质预测结果表

方案	对应水质/(mg·L ⁻¹)		改善比例/%	
	氨氮	总磷	氨氮	总磷
方案一	1.31	0.269	11.23	13.48
方案二	1.09	0.271	73.92	11.68
方案三	1.32	0.276	8.99	5.24
方案四	1.06	0.267	82.92	16.93
方案五	1.02	0.256	94.72	30.52
方案六	1.05	0.251	85.67	37.00
方案七	0.97	0.246	100.00	42.28

5 结 语

以2014年11月份水量水质同步监测为参考,通过模型计算得到各入湖河道的流量及污染物通量,得到2020年COD环境容量为13091 t/a,氨氮环境容量为1 021 t/a,总磷环境容量为196 t/a。结合表2各水功能污染物最大允许入河量计算结果以及表3各入湖河道污染物通量占比结果,设计出相应的断面水质达标方案。预测结果显示,各方案对千灯浦口断面水质有不同程度的改善作用,对氨氮的改善效果明显优于总磷,需要进一步对面源进行治理才能对改善总磷

指标起到明显效果。该方案为进一步实行淀山湖流域水环境综合整治提供了理论支撑。

参考文献:

- [1] 逢勇. 水环境容量计算理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 李蜀庆, 李谢玲, 伍溢春, 等. 我国水环境容量研究状况及其展望[J]. 高等建筑教育, 2007, 16(3): 58-61.
- [3] 熊风, 罗洁. 河流水环境容量计算模型分析[J]. 中国测试技术, 2005, 31(1): 116-117+126.
- [4] 孙卫红, 姚国金, 逢勇. 基于不均匀系数的水环境容量计算方法探讨[J]. 水资源保护, 2001(2): 25-26+44.
- [5] 朱晓娟. 吉林省松花江干流环境容量优化配置研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [6] Teegavarapu R, Ormsbee L, Elshorbagy A. Total maximum daily load (TMDL) approach to surface water quality management: concepts, issues, and applications[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2005, 32(2): 442-448.
- [7] 邢乃春, 陈捍华. TMDL计划的背景, 发展进程及组成框架[J]. 水利科技与经济, 2005, 11(9): 534-537.
- [8] 鲍琨, 逢勇, 孙瀚, 等. 基于控制单元划分技术的百渡港断面水质达标分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(6): 651-655.
- [9] 温丽容, 刘乙敏, 刘国光, 等. 广东省跨市河流边界水质控制断面方案讨论[J]. 生态环境, 2005, 14(4): 620-624.
- [10] 李强坤, 李怀恩, 胡亚伟, 等. 黄河干流潼关断面非点源污染负荷估算[J]. 水科学进展, 2008, 19(4): 460-466.
- [11] 张瑞斌. 基于水质模型的武进港流域容许负荷量计算与负荷削减方案评估研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [12] 罗缙, 逢勇, 罗清吉, 等. 太湖流域平原河网区往复流河道水环境容量研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 144-146.