

基于京杭运河五牧断面水质达标的水环境容量计算研究

韩梓流^a, 逢勇^{a,b}

(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: 为保证京杭运河五牧断面的水质达标率及水体环境健康, 依据《江苏省地表水(环境)功能区划》, 综合考虑水文、水体污染来源等因素, 对整治范围内入运河的污染源进行概化, 通过建立一维水量水质数学模型确定模型参数, 计算五牧断面水质达标时各概化排口的允许排污量, 进而得到该研究区域的水环境容量, 与现状污染物入河量对比, 确定污染物削减量, 为改善京杭运河水环境质量提供依据。结果表明: 确保京杭运河五牧断面水质达标情况下, 研究区域近期 COD、氨氮、总磷水环境容量分别为 47 216 t/a、5 376.1 t/a、508.1 t/a, 远期 COD、氨氮、总磷水环境容量分别为 28 977.3 t/a、2319.1 t/a、301.1 t/a。污染物削减率与水质超标率对比二者差距在 30% 以内, 说明水环境容量计算结果基本合理。

关键词: 水环境容量; 水环境数学模型; 水质达标; 京杭运河

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)04-0081-07

Water environment capacity calculation based on water quality standards at Wumu section in the Grand Canal

HAN Ziliu^a, PANG Yong^{a,b}

(College of Environment; b. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to ensure water quality control rates and the water environmental health of Wumu section in the Grand Canal, according to the water quality target of the surface water (environment) function zonation in Jiangsu province, considering factors such as hydrology, water pollution source, generalized pollution sources of the study area into the canal. Through the establishment of the study area a one-dimensional mathematical model for water quality determines the research area of water quality model parameters, calculated from the allowable discharge amount and water environment capacity of drain outlets when quality reaching the standard in Wumu section. Compared with the amount of present pollutant discharge into account, it calculated the amount of pollutants to be reduced, so as to provide basis for improving water environmental health of the Grand Canal. The results showed that, in order to ensure water quality reaching standard of Wumu section, in the near future the study area water environmental capacity of COD, $\text{NH}_3 - \text{N}$, TP were 47216, 5376.1 and 508.1 t/a respectively, in the forward water environmental capacity of COD, $\text{NH}_3 - \text{N}$, TP were 28977.3, 2319.1 and 301.1 t/a respectively. Contrast pollutant reduction rate and the excess rate of water quality which gap within 30%. The calculation results of water environment capacity are reasonable.

Key words: water environment capacity; mathematical model of water environment; water quality standard; the Grand Canal

收稿日期: 2016-04-06; 修回日期: 2016-05-26

基金项目: 国家水体污染与治理科技专项(2012ZX07506-007)

作者简介: 韩梓流(1993-), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 主要研究方向为环境规划与综合评价、水环境数值模拟、水资源保护。

通讯作者: 逢勇(1958-), 男, 山东人, 博士、教授、博士生导师, 主要研究方向为环境规划与综合评价、水环境数值模拟、水资源保护。

水环境容量即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]。水环境容量主要研究方法有解析法^[2],模型试错法^[3],系统分析法^[4],概率稀释模型法^[5-6]。在水环境容量计算方面,面对不同的河流、湖泊,国内已有丰富的研究成果。鲍琨等^[7]以殷村港为例,通过建立水量水质数学模型、控制断面与其上游概化排污口污染源的响应关系,进而计算控制单元的水环境容量。在河流湖库化问题上,张玉珍等^[8]针对九龙江流域,突出湖库化河段水环境容量计算方法,确定了流域河流湖库化对水环境容量计算的影响。李兵等^[9]对苏南运河苏锡常段水环境容量进行了研究,根据确定的水质目标,分别计算各段水体的水环境容量、排污控制量和削减率。多个点源排污口问题上,阎非等^[10]研究了基于排污口权重的水环境容量计算方法,并给出了相应的排污控制方案。黄真理等^[11]通过建立三峡水库一维水量水质数学模型、库区排污口混合区平面二维和水平分层的三维紊流模型,对三峡水库的水环境容量进行了计算研究。

京杭大运河全长 1 794 km,具有 2500 多年的历史,至今济宁以南 1 100 km 的航道仍在被利用。但目前运河存在着生态环境不断被破坏,人文环境关注度不断降低的问题。五牧断面位于京杭运河常州市区与无锡市区的交界处,两地工业、生活污染源对京杭运河影响巨大。本文通过建立京杭运河一维水量水质数学模型,根据例行水质监测和同步监测数据进行模型参数率定,在保证五牧断面水质达标的情况下,对研究区域的水环境容量进行计算,对于提高重点断面水质达标率,改善京杭运河水环境质量有重要意义。

1 研究区域概况

京杭运河镇江段全长 42.6 km,古城徒阳运河,流经镇江京口区的谏壁镇,丹徒的辛丰镇,穿过丹阳市区、陵口镇及吕城镇。主要支流为:九曲河、香草河、简渎河、丹金溧漕河等。常州段全长 44.7 km,流经新北区奔牛镇,然后穿过常州钟楼区、天宁区,经武进区横林镇后入无锡市。主要支流:新孟河、德胜河、溧港河、关河、三山港、扁担河、武宜运河、采菱港、武进港等。无锡段西起五牧口与常州交接,东至五七桥与苏州相连,全长 41.4 km,流经惠山区的洛

社镇,无锡建成区的北塘区、崇安区、南长区和滨湖区的滨湖区华庄街道等入苏州市。主要支流:锡澄运河、锡北运河、九里河、伯渎港、直湖港、梁溪河、蠡河等。

研究区域地处江苏省南部、中国经济发达的长江三角洲中部,北靠长江,南至太湖边界。五牧断面位于京杭运河常州市区与无锡市区的交界处,根据京杭运河苏南段的汇水区域及五牧断面的位置,考虑五牧断面往复流的水文特征,确定本次研究区域为京杭运河苏南段沿线对五牧断面产生影响的全部上游行政区和部分下游行政区,包括镇江市、丹阳市、常州市区和无锡市区。详见图 1 研究区域位置及水系图。

2 水量水质数学模型构建

2.1 水文、水质同步监测

2.1.1 例行监测数据及断面 例行水质监测资料来源于江苏省监测站提供的 2010 - 2014 年省控断面逐月水质资料、2011 - 2014 年五牧断面水质自动监测站逐日水质资料,常州市监测站提供的 2011 - 2015 年常州市内手动站和自动站水质资料,无锡市惠山区环保局提供的 2011 - 2014 年环境质量报告书。根据以上资料,本次共采用研究区域内京杭运河及其支流 30 个例行水质监测断面资料进行水质现状分析,断面位置详见图 2 研究区域例行水质监测断面位置分布图。

2.1.2 本次补充监测数据及断面 2016 年 1 月 13 日,课题组在分析例行水质监测数据的基础上,发现五牧断面整治范围内的京杭运河常州段及无锡惠山段水质恶化程度大,且存在较大波动,故进行补充监测。共布设 8 个断面,其中 2 个断面布设在支流上,取得水样在南京大学江苏省环境演变与生态建设重点实验室进行检测,各补充监测断面分布见图 3 现状水质补充监测断面位置分布图。

2.2 模型建立

2.2.1 水量模型 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,方程组如下:

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

式中: Q 为流量, m^3/s ; x 为沿水流方向空间坐标,

m ; B_w 为调蓄宽度,指包括滩地在内的全部河宽, m ; Z 为水位, m ; t 为时间坐标, s ; q 为旁侧入流流量, m^3/s ,入流为正,出流为负; u 为断面平均流速, m/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; A 为主槽过水断面面积, m^2 ; B 为主流断面宽度, m ; n 为糙率; R 为水力半径, m 。

方程组求解方法:Abbott - Ionescu 六点隐式有限差分法。按照网格点的计算顺序交替计算水位或流量,两类计算点又被称为 h 点和 Q 点。首先求解

各节点处的水位,然后将各节点水位回代至单一的河道方程中,并最终求得各单一河道各微断面水位及流量。

2.2.2 水质模型 河网区水体中污染物对流扩散方程表述如下:

河道方程:

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x}(AEx \frac{\partial C}{\partial x}) + S_c - S = 0$$

(2)

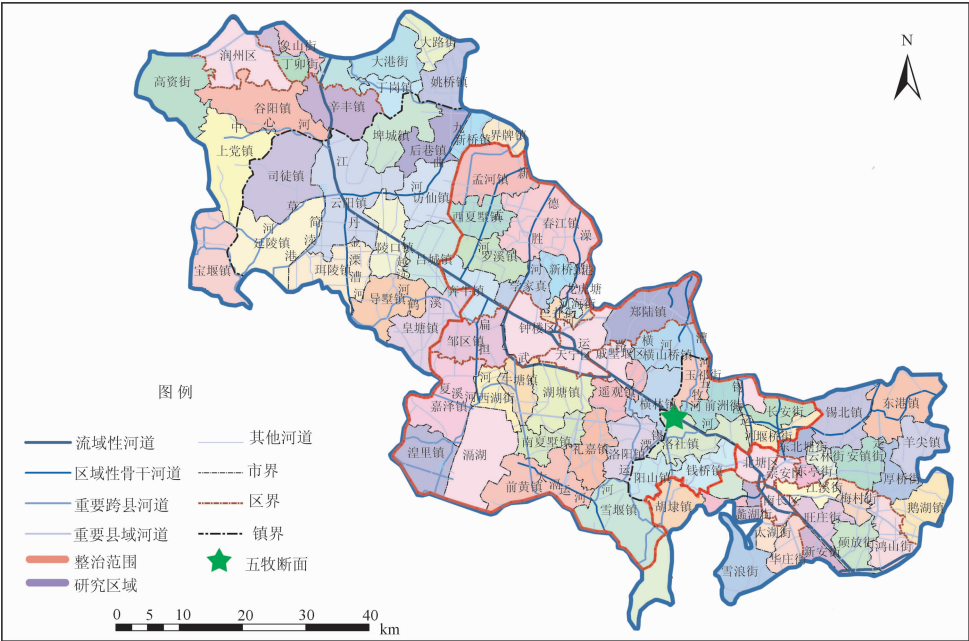


图1 研究区域位置及水系图

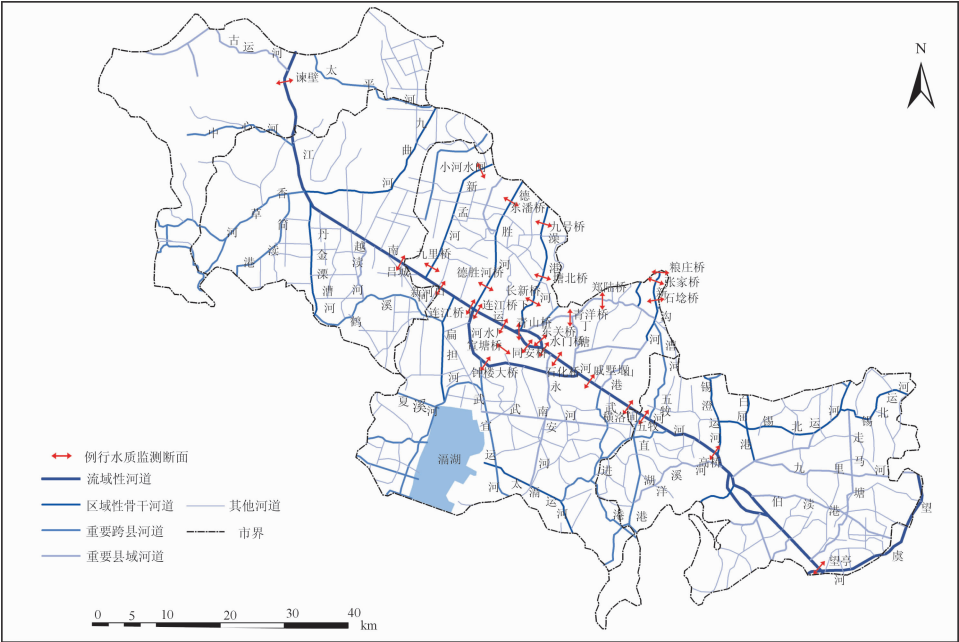


图2 研究区域例行水质监测断面位置分布图

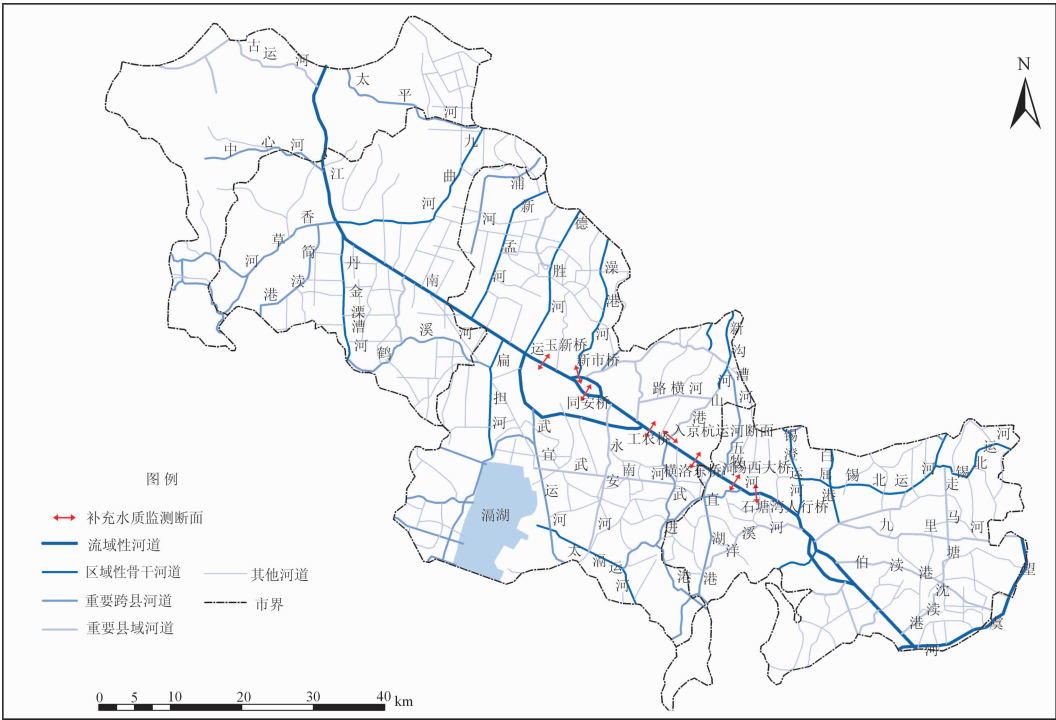


图3 现状水质补充监测断面位置分布图

河道叉点方程:

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

式中: Q 为流量, m^3/s ; Z 为水位, m ; A 为河道面积, m^2 ; E_x 为纵向分散系数; 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, m^2 ; j 为节点编号; I 为与节点 j 相联接的河道编号; S_c 为与输送物质浓度有关的衰减项, 例如可写为 $S_c = K_d C$, K_d 为衰减因子; S 是外部的源或汇项。

在对方程求解时, 时间项采用向前差分的方式, 对流项则采用上风格式求解, 扩散项采用中心差分格式。

2.3 模型参数率定

2.3.1 水量模型参数率定 采用 2013 年 1 月 1 日 - 12 月 31 日京杭运河常州(二)站、洛社站、无锡(二)站逐日水位监测资料, 以及 2013 年 1 月 1 日 -

12 月 31 日京杭运河洛社站逐日平均流量监测资料对水量模型参数进行率定, 率定得到河道糙率值为 0.017 ~ 0.025。

(1) 水位率定结果。2013 年 1 月 1 日 - 12 月 31 日京杭运河常州(二)站、洛社站、无锡(二)站水位计算值和实测值对比结果见图 4。由图 4 可知, 各站点的水位计算值与实测值吻合较好, 平均相对误差约为 0.08 m, 该模型可用于描述研究区域京杭运河及其主要支流的水位变化过程。

(2) 水量率定结果。2013 年 1 月 1 日 - 12 月 31 日京杭运河洛社站流量计算值和实测值对比结果见图 5。由图 5 可知, 洛社站的流量计算值与实测值吻合较好, 平均相对误差约为 5.8%, 该模型可用于描述研究区域京杭运河及其主要支流的水量变化过程。

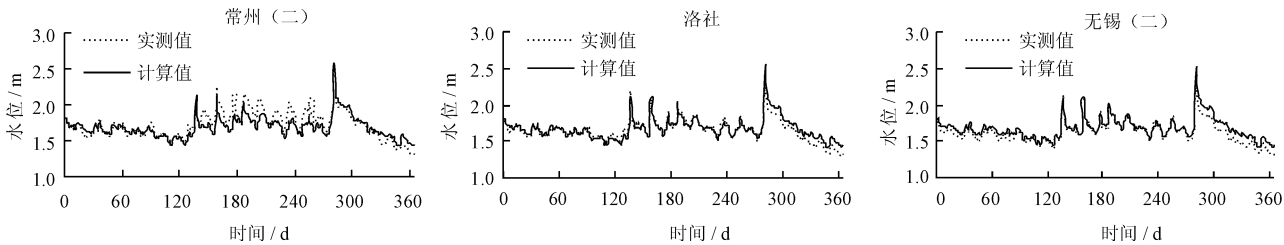


图4 各站点水位计算值与实测值对比图

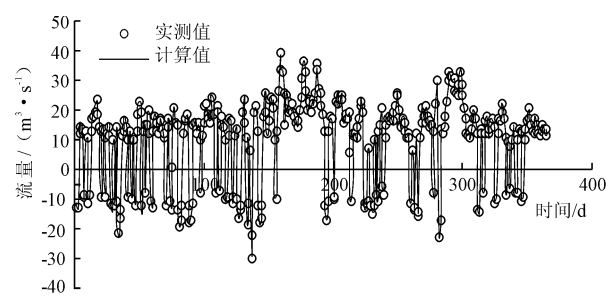


图 5 洛社站水量计算值与实测值对比图

2.3.2 水质模型参数率定 采用 2013 年京杭运河

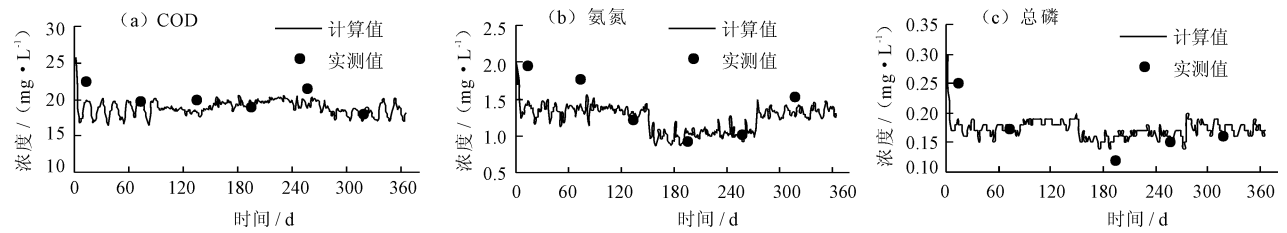


图 6 石化厂断面水质计算值与实测值对比

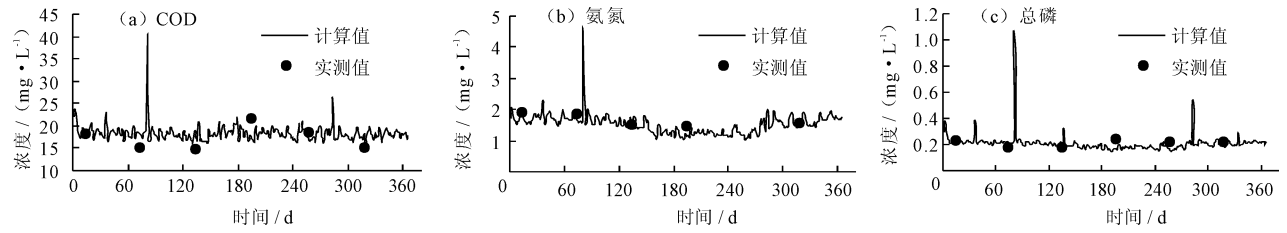


图 7 戚墅堰断面水质计算值与实测值对比图

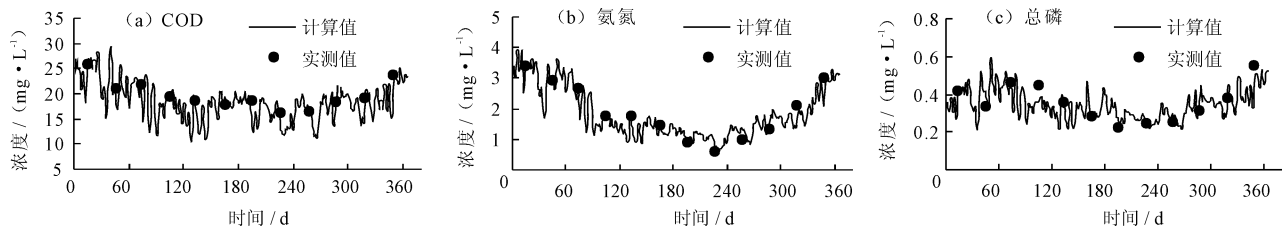


图 8 五牧断面水质计算值与实测值对比图

3 基于五牧断面水质达标的水环境容量计算

3.1 研究区域排污口概化

进行污染源的排污口概化时,应遵循以下原则:

(1)当工业企业排污口污染物排放流量较大(超过单元总量的 10%),必须作为独立的概化排污口处理;

(2)其他排污口若距离较近,可把多个排污口简化成集中的排污口;

(3)距离较远并且排污量均比较小的分散排污口,可概化为非点源入河;

石化厂、戚墅堰、五牧断面的逐月水质监测数据进行水质模型的参数率定,率定得到 COD 的降解系数为 $0.09 \sim 0.12 \text{ d}^{-1}$,氨氮的降解系数为 $0.07 \sim 0.09 \text{ d}^{-1}$,TP 的降解系数为 $0.06 \sim 0.09 \text{ d}^{-1}$ 。各断面水质计算值和实测值的对比结果见图 6 ~ 图 8,从图可知,研究区域水质模型计算值与实测值吻合较好,COD 的平均相对误差小于 19.81%,氨氮的平均相对误差小于 15.31%,TP 的平均相对误差小于 19.39%,说明该模型可用于描述研究区域京杭运河及其主要支流的水质变化过程。

(4)大型的污水处理厂需作为概化排污口考虑;

(5)城市人口聚集地需概化排污口。

根据整治范围内各街道乡镇地形条件以及各类入运河污染源的空间分布,本次计算共有概化排污口 93 个,包括一级概化排污口 56 个,二级概化排污口 37 个(一级概化排口是指京杭运河干流上的概化排口(包括常州新开运河),二级概化排口是指入京杭运河主要支流上的概化排口)。其中:京杭运河吕城-高桥段(包括常州新开运河)有 56 个一级概化排口,新孟河有 6 个二级概化排口,德胜河有 1 个二级概化排口,澡港河有 8 个二级概化排口,三山港有 9 个二级概化排口,五牧河有 6 个二级概化排

口,锡澄运河有 7 个二级概化排口,概化排口具体位置分布见图 9。

在进行水环境容量计算时,各概化排污口污染

削减原则是:以污染源现有排污量为基础;依据污染源削减潜力分析结果确定削减量。

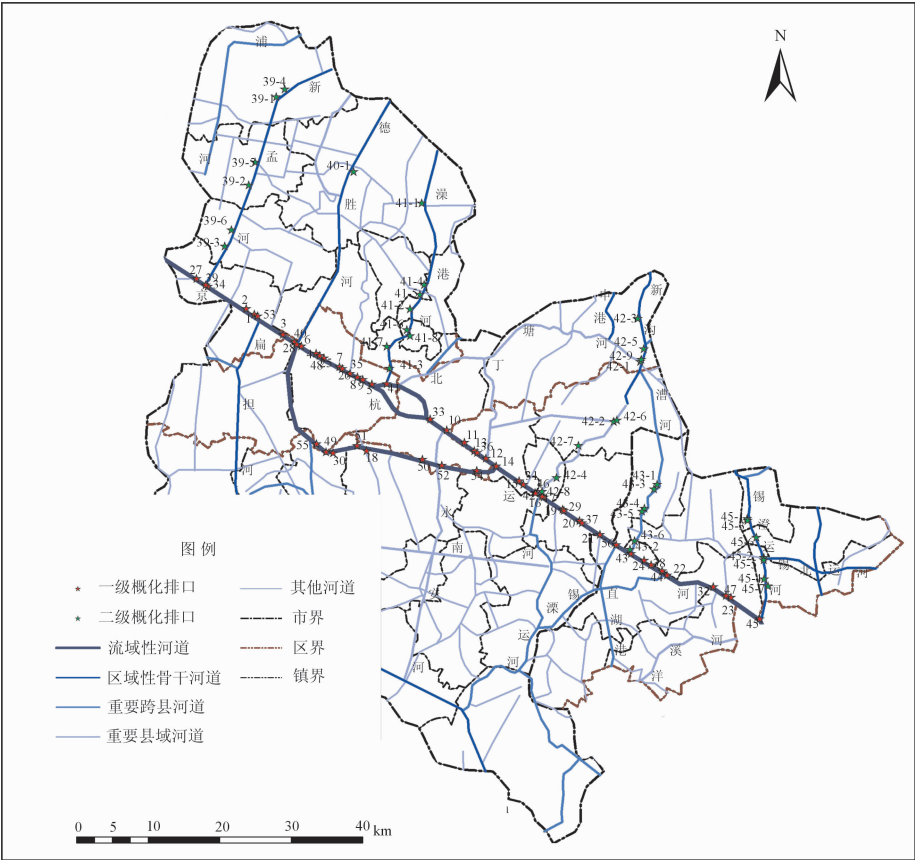


图9 概化排污口位置分布图

3.2 计算方法

根据《江苏省地表水(环境)功能区划,江苏省人民政府,2003 年》规定的水质目标值,五牧断面近期应达到Ⅴ类水标准,远期应达到Ⅳ类水标准。综合考虑水文、水体污染来源等因素,对整治范围内入运河的污染源进行概化,并依据 90% 保证率设计水文条件,水功能区边界水质,利用已建立的研究区域水环境数学模型,计算得出五牧断面水质达标时各概化排口的允许排污量。

3.3 水环境容量计算结果及分析

根据以上计算方法和条件参数,基于污染源削减潜力分析,计算得到在 90% 水文保证率下满足五牧断面近期(Ⅴ类)、远期(Ⅳ类)水质目标的各概化排口的允许排污量,在此基础上,统计得出研究区域常州市区及惠山区近期、远期水环境容量,具体见表 1 整治范围水环境容量计算结果。

根据整治范围现状入运河污染物量及水环境容量值,可计算得到污染物削减率,将 2013 年污染物

入运河量、90% 水文保证率下的水环境容量、污染物入运河量削减率及五牧断面水质超标率汇总,详见表 2 现状入运河量削减率与水质超标率对比表。通过对比现状年污染物削减率与水质超标率可知,二者的差距在 30% 以内,说明上述方法得到的水环境容量基本合理。

表 1 整治范围水环境容量计算结果			t/a
整治范围	水质指标	近期水环境容量(Ⅴ类)	远期水环境容量(Ⅳ类)
常州市区	COD	38924.2	22635.1
	氨氮	2773.6	1815.1
	总磷	405.3	238.6
惠山区	COD	8291.8	6342.2
	氨氮	802.5	504.0
	总磷	102.8	62.5
合计	COD	47216.0	28977.3
	氨氮	3576.1	2319.1
	总磷	508.1	301.1

表2 现状入运河量削减率与水质超标率对比表

水质指标	现状入运河量/ (t·a ⁻¹)	近期(V类)			远期(Ⅳ类)		
		水环境容量/ (t·a ⁻¹)	现状削 减率/%	水质超 标率/%	水环境容量/ (t·a ⁻¹)	现状削 减率/%	水质超 标率/%
COD	37354	47216.0		0	28977.3	22.42	3.15
氨氮	4315	3576.1	17.12	40.68	2319.1	46.25	57.91
总磷	571	508.1	10.95	32.96	301.1	47.23	59.15

4 结 论

(1)构建了京杭运河水环境数学模型,以例行水质监测及同步监测数据为依据对模型的参数进行了率定,率定得到河道糙率值为 0.017 ~ 0.025, COD 的降解系数为 0.09 ~ 0.12d⁻¹,氨氮的降解系数为 0.07 ~ 0.09d⁻¹,TP 的降解系数为 0.06 ~ 0.09 d⁻¹。由率定结果可知,模型参数选取合理,研究区域水质模型计算值与实测值吻合较好,可用于模拟运河及其主要支流的水量水质变化过程。

(2)确保京杭运河五牧断面水质达标的情况下,计算得到研究区域近期 COD、氨氮、总磷水环境容量分别为 47 216、5 376.1、508.1 t/a,远期 COD、氨氮、总磷水环境容量分别为 28 977.3、2 319.1、301.1 t/a。

参考文献:

[1] 逢 勇,陆桂华. 水环境容量计算理论及应用[M]. 北京: 科学出版社,2010.

[2] 赵 军. 浅论污染物排放总量控制[J]. 山东环境, 2000 (S1):28-29.

[3] 戴正德,王 蕾,马生伟,等. 杞麓湖水污染总量控制和工程治理的效益分析[J]. 云南大学学报:自然科学版, 2000,22(1):18-19.

[4] 袁寿荣. 陆良县水污染控制系统规划研究[J]. 云南环境科学,2000,19(4):20-22.

[5] 林国强. 南流江玉林城区段污染物总量控制及方案[J]. 广西水利水电,2002(1):54-57.

[6] 徐心彤,逢 勇. 吴江市水功能区纳污能力及限制排污总量研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(1):52-55.

[7] 鲍 琨,逢 勇,孙 瀚. 基于控制断面水质达标的水环境容量计算方法研究——以殷村港为例[J]. 资源科学, 2011,33(2):249-252.

[8] 张玉珍,曹文志,陈 锦,等. 九龙江流域湖库化河段水环境容量研究[J]. 福建师范大学学报:自然科学版,2015, 31(6):85-89.

[9] 李 兵,张建强,张绍修. 苏南运河苏锡常段水环境容量和排污控制量研究[J]. 水资源与水工程学报,2007,18 (5):61-63+66.

[10] 阎 非,苏保林,贾海峰. 基于排污口权重的一维河流水环境容量计算[J]. 水资源保护,2006,22(2):16-18+22.

[11] 黄真理,李玉梁,李锦秀,等. 三峡水库水环境容量计算[J]. 水利学报,2004(3):7-14.