

苏南运河水质影响区污染负荷研究^{*}

颜润润¹, 程 炜¹, 逢 勇², 崔云霞¹, 陈亚男²

(1. 江苏省环境科学研究院, 南京 210036; 2. 河海大学 环境科学与工程学院, 南京 210098)

摘 要: 结合河网区水系特征及区域污染物排放特点, 确定主要水质影响区。利用单因子指数法以及等标污染负荷法研究运河水质及其影响区污染负荷。借助平原河网区水环境数学模型对各支流入运河流量比的计算结果, 对包括区域外的入运河污染负荷总量进行计算。结果表明, 运河监测断面中超标断面占 76.2%, 氨氮超标最严重, 其次为总磷, 运河常州段、无锡段水质最差; 研究区内工业点源污染负荷贡献率最大, 生活源次之; 入苏南运河污染物总量为 COD 2.63 万 t、氨氮 2 614.3 t、TP 316.63 t, 其中研究区域内各类污染物入运河量所占比重均在 79% 以上。研究区域内污染负荷是苏南运河水质的主要影响源, 常州、无锡为污染控制的重点地区。

关键词: 水质; 污染负荷; 苏南运河

中图分类号: S522

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)05-0135-06

Study on Water Quality of Sunan Canal and Pollution Load of Corresponding Affecting Region

YAN Run-run¹, CHENG Wei¹, PANG Yong², CUI Yun-xia¹, CHEN Ya-nan²

(1. Jiangsu Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Studied region was determined while characteristics of water system of river network area and pollutant emission was fully considered. Water quality of Sunan Canal and pollution load of corresponding affecting region were analyzed with single factor index method and equivalent pollution load method. Total pollution load of Sunan Canal including pollutant in and out of the studied region was calculated with flow proportion by water environment mathematical model of plain river network area. The results indicate that the 76.2% of 21 sections of Sunan Canal exceeded the water quality standards, the main factors of exceeding standard were $\text{NH}_3\text{-N}$ and TP. The quality of water in Changzhou and Wuxi sections is poorer than the other two. In the studied region, industrial point source has the largest pollution load contribution and domestic pollution source takes second place. Sunan Canal has total pollution load with COD 2.63 million tons, $\text{NH}_3\text{-N}$ 2 614.3 ton and TP 316.63 ton, of which proportion of pollution load of intra-region is more than 79%. Intra-region pollution load is the main influencing source to water quality of Sunan Canal, Changzhou and Wuxi are the key regions to execute pollution control.

Key words: water quality; pollution load; Sunan Canal

京杭运河是我国水上交通的南北动脉, 对沿线地区工农业经济的发展和城镇的发展起到巨大作用。苏南运河, 作为京杭运河在长江以南的一段, 贯穿江苏经济最发达的镇江、常州、无锡、苏州等县市, 沟通了长江、太湖水系, 与上海、浙江等周边地区的省际河流相连。随着经济的快速发展, 平原地区水网水质已

受到较为严重的污染, 苏南运河的水环境形势不容乐观, 运河沿岸地区城镇密集, 两岸又建有众多印染、化工等重污染企业及大型港口、码头, 大量废水排放导致运河水质逐年下降, 目前总体已处于劣 V 类。李兵等^[1]曾对运河苏锡常 3 段 15 个县市的污染源进行过调查, 其划定范围太广, 对运河的污染负荷研究不

^{*} 收稿日期: 2009-05-05

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07526-007)

作者简介: 颜润润(1982-), 女, 江苏涟水人, 博士, 工程师, 主要从事水环境规划与环境影响评价研究。E-mail: annarr@163.com

够深入,不利于有针对性地制定控污和治理方案。本研究针对河网区水系特征及区域污染物排放特点确定运河水质的主要影响区范围,通过运河包括镇江的 4 个河段沿线的野外采样,利用单因子指数法对运河水质现状进行分析,利用等标污染负荷法以及平原河网区水环境数学模型,对包括区域外的输入运河的污染负荷进行了深入研究,为苏南运河污染控制及水环境保护提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区与采样概况

苏南运河从镇江谏壁至苏州平望全长 210 km,其中镇江段长 42.6 km、常州段长 44.5 km、无锡段长 41.4 km、苏州段长 81.7 km,大部分底宽 20 m,水深 2 m。经过现场踏勘调研,在充分考虑河网区水系特征、污染物排放情况的基础上,以苏南运河及对运河水质影响较大的支流所在区域确定研究范围,北至长江沿岸,南至太湖沿岸及浙江边界,共约 4 656 km²。研究区域涉及到 4 市管辖的部分或全部区(市),包括镇江的京口区、丹徒区和丹阳市,常州的新北区、武进区、钟楼区、天宁区和戚墅堰区,无锡的北塘区、崇安区、南长区、惠山区、滨湖区、新区以及锡山区,苏州的相城区、高新区虎丘区、金阊区、平江区、沧浪区、吴中区和吴江市,共涉及 22 个区(市)的 45 个镇和 22 个街道。

于 2009 年 1—2 月在苏南运河共布设 21 个采样点,分 3 次采集水样,测定水质指标。其中选择镇江段样点 5 个(1#—5#),常州段样点 5 个(6#—10#),无锡段样点 6 个(11#—16#),苏州段样点 5 个(17#—21#),详细位置见图 1。主要监测指标有 COD、高锰酸盐指数、TP、氨氮、流速、流量等,污染物浓度监测分析方法全部严格按照国家标准监测分析方法进行,流量的监测主要运用 WNQLS1206 流速仪、卷尺等。初始数据处理采用多次监测数据的平均值。

1.2 研究方法

1.2.1 河网水环境数学模型建立

(1) 水流控制方程^[2]描述明渠一维非恒定流的基本方程为一维 Saint-Venant 方程组

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

(1)

式中: A , B , Q , Z ——过水面积、水面宽、流量、水位;

u ——流速; x ——沿河流方向的位移; t ——时间; q ——源汇项; g ——重力加速度; R ——水力半径; n ——曼宁糙率。

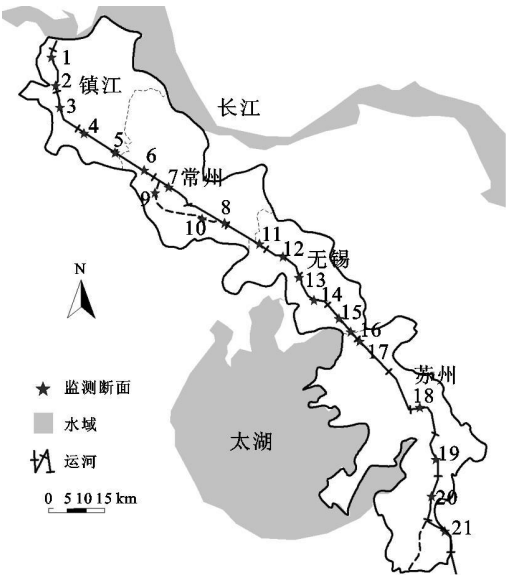


图 1 苏南运河研究范围及采样点分布示意

(2) 水质控制方程 描述河网中单一河道污染物质运动及浓度变化规律的控制方程^[3]为

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (AE_x \frac{\partial C}{\partial x}) - KAC + S$$

(2)

式中: C ——断面浓度; E_x ——扩散系数; K ——衰减系数; S ——污染源汇项。

用三级联合解法求解^[4]平原河网水力特性,根据顺流向(由首断面流向末断面)和逆流向(由末断面流向首断面)对水质方程进行离散,模型的详细求解方法及河网水量水质模型参数的率定与验证参见^[5-6]。

1.2.2 水质评价方法 采用《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),用单因子指数法^[7]对运河水质进行评价,其计算方法如下:

$$P_i = C_i / C_{0i}$$

(3)

式中: P_i ——该污染物的污染指数; C_i ——该污染物的实测浓度值; C_{0i} ——该污染物的允许浓度值(评价标准值),采用江苏省人民政府苏政复〔2003〕29 号文正式批复的《江苏省地表水(环境)功能区划》中 2010 年水质目标。

1.2.3 污染负荷评价及计算方法 采用等标污染负荷法对研究区域各种污染源的污染负荷进行评价^[8]。等标污染负荷的物理意义是:把排放介质稀释(或浓缩)到排放标准时的体积,以使不同类型的污染物具有可比性。计算公式如下:

$$H_i = (M_i / C_i) \times 10^{-6}$$

(4)

$$K_i = H_i / \sum H_i$$

(5)

式中: M_i ——污染物排放量(即污染负荷)(t/a);
 C_i ——污染物浓度按(GB3838-2002) III 类标准
(COD 为 20 mg/L, 氨氮为 1.0 mg/L, TP 为 0.2
mg/L); H_i ——污染物等标排放量(m^3/a); K_i ——
污染率指数。污染源研究主要包括工业、生活、农业
3 大类, 其中农业分为种植业和养殖业(畜禽、水
产), 各类污染源排放量计算方法如下:

- ①工业污染物入河量= (工业污染物直排量+
污水处理厂排放量) × 入河系数
- ②生活污染物入河量= (乡镇人口数 × 排污系
数- 污水处理厂处理量) × 入河系数
- ③农田污染物入河量= 农田面积 × 排污系数 ×
入河系数 × 修正系数
- ④畜禽养殖入河量= (畜禽个体日产粪量 × 畜
禽粪中污染物平均含量+ 畜禽个体日产尿量 × 畜禽
尿中污染物平均含量) × 饲养期 × 饲养数 × 入河系
数
- ⑤水产养殖入河量= 年排水量 × 污染物浓度的
增量 × 入河系数

其中: 污染源统计数据采用 2008 年普查数据,
结合各地区环境统计、各地区统计年鉴以及各相关
部门资料。污染物产排当量和入河系数参照^[9] 及
《江苏省太湖流域污染源调查报告》确定。

影响苏南运河的污染源包括研究区域内污染物
和研究区域外污染物两个部分, 而区域内污染源包
括直接排入运河的污染物和沿支流间接排入运河的
污染物, 入苏南运河污染物的计算方法如下:

$$W = W_{\text{内}} + W_{\text{外}}$$

(6)

表 1 苏南运河水质监测指标与评价

河段	样点号	P_i 指数			COD _{Mn}
		COD	氨氮	TP	
镇江段	1# - 5#	0.53	0.90	0.74	0.25
		0.71	2.53	1.11	0.53
		0.52	1.53	0.76	0.30
		0.77	1.46	1.00	0.54
		0.81	1.21	0.95	0.54
无锡段	11# - 16#	0.6	1.23	0.69	0.4
		1.9	2.12	1.56	0.8
		1.0	1.12	0.84	0.6
		0.8	0.78	0.70	0.6
		0.9	0.93	0.86	0.7
		2.0	3.73	4.52	1.1
常州段	6# - 10#	0.48	1.07	0.93	0.4
		0.51	0.65	0.79	0.35
		0.45	3.28	1.16	0.5
		0.51	1.01	0.97	0.38
		0.54	3.33	1.28	0.42
苏州段	17# - 21#	0.93	2.38	1.06	0.6
		0.72	1.90	0.79	0.54
		0.95	1.60	0.98	0.65
		0.81	0.91	-	0.6
		0.90	0.84	0.76	0.56

由图 2 可以看出, 苏南运河的 COD 浓度及高锰
酸盐指数总体呈现上升趋势, 在无锡的 12# 和 16#

$$W_{\text{内}} = W_{\text{直排}} + W_{\text{支流}}$$

$$W = Q_1 C_1 - Q_0 C_0 + K V \bar{C}$$

(7)

(8)

式中: W ——入运河污染物总量; $W_{\text{内}}$ ——研究区域
内污染物量; $W_{\text{外}}$ ——研究区域外污染物量;
 $W_{\text{直排}}$ ——研究区域内污染物直排入运河量;
 $W_{\text{支流}}$ ——研究区域内由支流带入运河的污染物量;
 Q_0, Q_1 ——上下游水量, 由太湖河网水环境数学模
型提供; C_0, C_1 ——上下游水质, 取值为 2008 年实
测值; K ——降解系数, 取值参考太湖流域片区范围
值^[6]; V ——水体体积; $\bar{C} = (C_0 + C_1)/2$ 为河段平均
水质。

2 结果分析

2.1 运河污染指数及沿程水质变化

2009 年 1- 2 月苏南运河各项污染物的污染指
数计算结果见表 1。从表 1 中可知, 监测的 21 个断
面中, 高锰酸盐指数基本达标, 仅有一点略微超标;
而其他因子中, 仅有镇江段 1#、常州段 7#、无锡段
14#、15# 以及苏州段 21# 共计 5 个断面达标, 累
计超标断面占 76.2%, 主要超标项目为氨氮, 其次
为总磷。其中, 无锡为 COD 和 TP 超标最严重河
段, 平均超标倍数为 0.2 和 0.53; 常州为氨氮超标
最严重河段, 平均超标倍数为 0.87; 16# 为水质超
标最严重断面, COD、氨氮和 TP 超标倍数分别高达
1.0、2.73 和 3.52。整体而言, 苏南运河水质镇江段
最好, 苏州段次之, 常州段、无锡段水质最差, 由此可
见运河所在地区污染物的大量排放严重影响了运河
的水质。

断面有 2 个显著的高峰; 氨氮浓度变化规律不明显,
在镇江基本呈现先上升然后逐渐下降的趋势, 在常

州和无锡出现较大的波动,进入苏州基本呈现下降趋势,在常州的 8#、10# 和无锡的 16# 断面有 3 个高峰;TP 浓度变化较为稳定,仅 16# 断面出现一个高值。从不同河段的交界断面浓度看,镇江的出水断面浓度较小,对常州市基本无影响;常州的出水断面氨氮和 TP 值较大,一方面表明常州水质污染严

重,另一方面也影响了无锡的来水水质;无锡的出水断面 4 项指标均超标,对苏州水质造成重要影响;从苏州出流水质看,苏州出流水质浓度较低,对下游的影响较小。总体而言,苏南运河上游来水经过镇江基本没变,经过常州、无锡后水质有所恶化,经过苏州后水质有所改善。

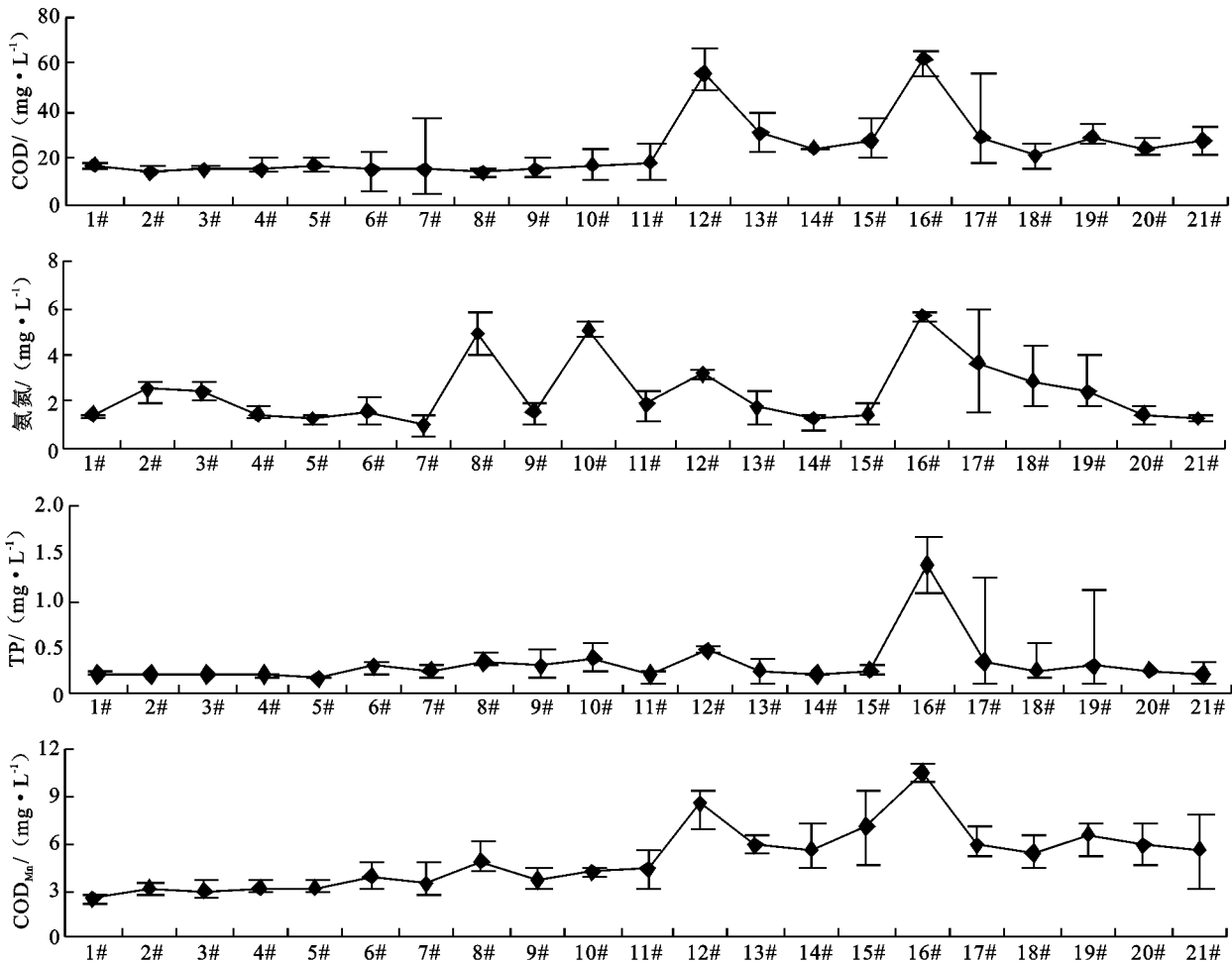


图 2 苏南运河水质沿程变化趋势

2.2 影响区的污染负荷量计算

研究区域 5 类污染源等标排放量计算结果见表 2。由表 2 可知,各类污染源排放大量的氮、磷污染物是苏南运河水质(氮、磷)浓度超标的重要原因。总体看来,研究区内污染负荷以工业点源的排放所造成污染的贡献率最大(占 44.1%),未接管的生活污水排放所造成的污染居第二位(占 40.6%),畜禽粪尿污染居第三位(占 11.0%),表明苏南运河的治理重点在于工业点源污染和生活污水污染的控制;氨氮污染所占比重最大(占 45.4%),其次为 TP(占 30.1%),而这两项因子超标严重,这与运河水质监测数据 displays 的结果一致。从污染负荷的地区分布看(图 3),苏州污染负荷等标量最大(占 34.9%),无锡第二(占 29.1%),常州第三(占 27.3%),镇江最小

(占 8.7%),由于不同地区污染源分布不同,且水系特点也存在差异,因而各地区对运河污染负荷量的贡献有所不同。

2.3 苏南运河的污染负荷量计算

2.3.1 支流入运河比例计算 由于污染负荷调查年为平水年,利用太湖流域河网模型得到的各河流之间的每日流量交换数据,计算得平水年各主要支流出入苏南运河流量比例成果见图 4。由图 4 可知:①全年流入比较大即超过 90% 水量流入苏南运河的河流有:九曲河、新孟河、德胜河、北塘河、伯渎港、中心河、扁担河、直湖港、浒光运河、上塘河、瓜泾港、斜塘、太浦河、迪塘、麻溪、大德塘;②全年流入比较小即不足 30% 水量流入苏南运河的河流有:三山港、锡北运河、采菱港、武进港、梁溪河、吴淞江。

表 2 苏南运河研究区域污染负荷来源及其等标排放量

来源	等标量/ (m ³ · a ⁻¹)				污染率 指数/ %
	COD	氨氮	TP	合计	
工业污水	2217.55	2869.80	2128.50	7215.85	44.0
生活污水	1522.99	3914.65	1209.65	6647.29	40.6
农田施肥	60.41	321.77	302.05	684.23	4.2
畜禽粪尿	190.59	342.34	1275.75	1808.68	11.0
水产养殖	10.44	0.00	26.10	36.54	0.2
合计	4001.98	7448.56	4942.05	16392.59	100.0
所占比重/ %	24.40	45.40	30.10		

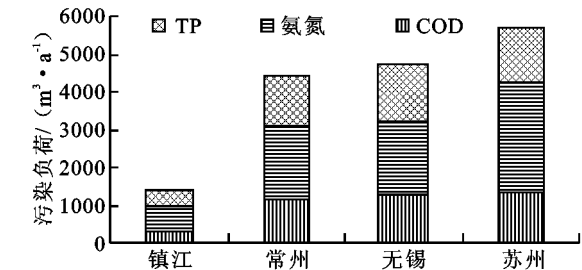


图 3 苏南运河研究区域的污染负荷(等标量)地区分布

2.3.2 运河污染负荷量及影响区权重分析 根据太湖流域河网模型计算所得的各主要支流出入江

南运河流量比,对研究区域内运河各支流的入运河污染物量进行了计算;根据公式(6)–(8)计算得到入运河污染物总量及区域外入运河量见表3,同时计算苏南运河各河段单位长度等标排放量见表4。
结果显示,入苏南运河污染物总量为COD 2.63 万 t、氨氮 2 614.3 t、TP 316.63 t,其中研究区域内各类污染物入运河量为COD 2.32 万 t、氨氮2 073.5 t、TP260.59 t,分别占总量的 88.25%, 79.31%, 82.30%,所占比重均在 79% 以上,而区域内直排量所占比重为 55% ~ 79%,为区域内污染的重点。

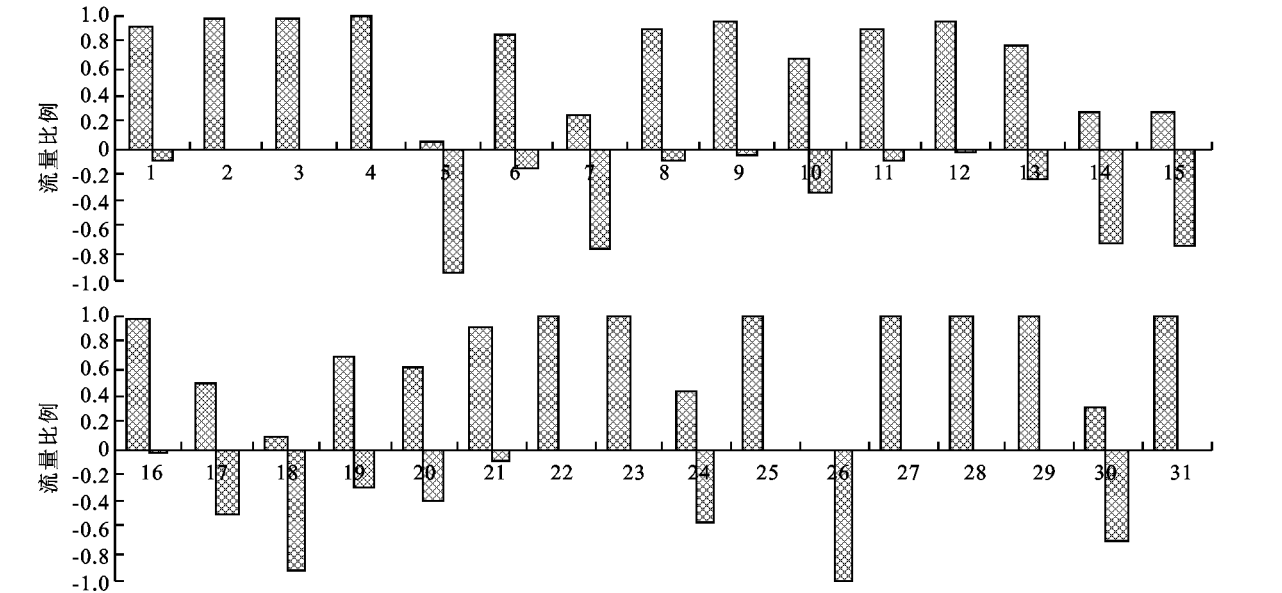


图 4 平水年各主要支流出入苏南运河流量比例

(“+”表示入运河、“-”表示出运河;“1~31”依次为九曲河、新孟河、德胜河、北塘河、三山港、锡澄运河、锡北运河、伯渎港、中心河、香草河、丹金溧漕河、扁担河、武宜运河、采菱港、武进港、直湖港、洋溪河、梁溪河、骂蠡港、蠡河、浒光运河、上塘河、瓜泾港、行船路、斜塘、吴淞江、太浦河、迪塘、麻溪、紫云塘、大德塘)

从各河段单位长度等标排放量看,依次为无锡段>苏州段>常州段>镇江段,可见无锡对运河的污染物输入强度最大。计算区域内外污染源对苏南运河各河段污染贡献率见图5。区域内(各分区)污染源对苏南运河(各河段)污染负荷的贡献率约占71%~91%(图5),其中镇江、苏州区域内污染源对运河水质贡献最大,均大于80%。可见研究区域内

污染负荷是苏南运河水质的主要影响源,针对研究区域内的污染控制对运河水质改善效果明显。

3 结论

(1)通过对苏南运河4个河段的21个断面的水质采样分析得知,运河主要超标项目为氨氮,其次为总磷;无锡段为COD和TP超标最严重,常州段为

表 3 入苏南运河的污染负荷量计算成果

t/a

运河	区域内						区域外		
	直排			支流流入					
	COD	氨氮	TP	COD	氨氮	TP	COD	氨氮	TP
镇江段	1027.08	45.77	7.47	1434.51	153.44	16.42	242.86	41.15	2.97
常州段	3077.83	192.63	32.37	437.34	203.00	26.69	832.60	156.54	17.26
无锡段	3599.69	224.76	45.65	568.64	247.27	34.65	1072.88	181.57	22.17
苏州段	12913.57	989.72	90.43	155.30	16.87	6.91	943.00	161.55	13.64
合计	20618.17	1452.88	175.92	2595.79	620.58	84.67	3091.34	540.81	56.04

表 4 苏南运河单位长度等标排放量

运河	长度/ km	污染负荷总量/(t·a ⁻¹)			单位长度等标量/ (m ³ ·a ⁻¹ ·km ⁻¹)
		COD	氨氮	TP	
镇江段	42.6	2704.45	240.36	26.86	11.97
常州段	44.5	4347.77	552.17	76.32	25.87
无锡段	41.4	5241.21	653.60	102.47	34.49
苏州段	81.7	14011.87	1168.14	110.98	29.67
合计	210.2	26305.30	2614.27	316.63	26.23

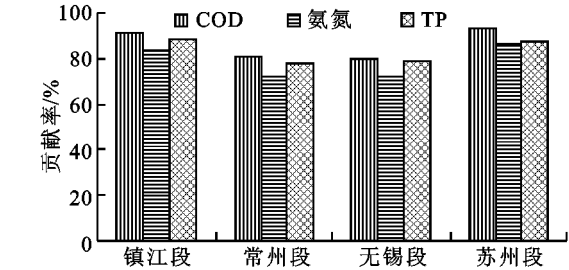


图 5 区域内污染源对苏南运河各河段污染贡献率

氨氮超标最严重。苏南运河上游来水经过镇江基本没变,经过常州、无锡后水质有所恶化,经过苏州后水质有所改善。苏南运河水质镇江段最好,苏州段次之,常州段、无锡段水质最差。

(2)通过对研究区域 5 类污染源等标排放量的计算得知,研究区内污染负荷以工业点源的排放所造成的污染贡献率最大(占 44.1%),未接管的生活污水排放所造成的污染居第 2 位(占 40.6%);氨氮污染所占比重最大(占 45.4%),其次为 TP(占 30.1%)。苏南运河的治理重点在于工业点源污染和生活污水中氨氮和 TP 污染的控制。

(3)通过对研究区域内外入运河污染物量的计算得知,入苏南运河污染物总量为 COD 2.63 万 t、氨氮 2 614.3 t、TP 316.63 t,其中研究区域内各类污染物入运河量所占比重均在 79% 以上。区域内各分区污染源对运河各河段污染负荷的贡献率约占 71%~91%,其中镇江、苏州区域内污染源对运河水

质贡献最大,而无锡对运河的污染物输入强度最大。研究区域内污染负荷是苏南运河水质的主要影响源,直排污染源是运河水质污染的重点源。

参考文献:

[1] 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.

[2] 韩龙喜, 陆冬. 平原河网水流水质数值模拟研究展望[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(2): 127-130.

[3] 苏飞,王士武,徐海波,等. 感潮平原河网水流水质计算模型应用研究[J]. 浙江水利科技, 2007(3): 4-6, 9.

[4] 张二俊,张东升,李挺. 河网非恒定流的三级联合解法[J]. 华东水利学院学报, 1982, 10(1): 1-13.

[5] 逢勇,姚琪,濮培民. 太湖地区大气-水环境的综合数值研究[M]. 北京: 气象出版社, 1998: 92-107.

[6] 罗缙,逢勇,林颖等. 太湖流域主要入湖河道污染物通量研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(2): 131-135.

[7] 尹海龙,徐祖信. 河流综合水质评价方法比较研究[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(5): 729-733.

[8] 张国琴,于金莲,黄浦江上游水源保护区非点源污染分析[J]. 上海师范大学学报: 自然科学版, 2008, 37(6): 632-636.

[9] 中国环境规划院. 全国水环境容量核定技术指南[R], 北京: 中国环境规划院, 2003.