

宁波市城区内河水质与沉积物污染特征研究

郑琦宏¹, 沈浩², 李立山², 陈立行², 徐继荣¹

(1.宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211; 2.宁波市城区内河管理处, 浙江 宁波 315010)

摘要: 2009~2011 年分阶段对宁波市城区不同类型内河进行了水质和底质(沉积物)污染特征研究, 结果表明: 目前宁波市内河水质总体属劣 V 类, 主要污染因子为 TN、NH₃-N、TP、COD_{Mn}; 主要景观河道的水质好于一般河道, 城中村河道水质最差, 但差异并不大; 内河水质的电导率、COD_{Mn}、TN、NH₃-N、TP 和 Chla 之间的相关性显著($R^2=0.64\sim0.97$), 水体 pH 值受控于蓝绿藻, 呈夏季高冬季低; 连续降雨对水体水质有不同程度的稀释作用, 短暂的水量补充对提高内河水质分类等级作用不大; 清淤整治后水质有明显好转, 其中 COD_{Mn}、TP 指标下降明显, TN 指标虽然下降了 21%仍超标严重; 内河沉积物的主要污染因子为有机质、氮、磷, 沉积物的耗氧量非常大, 这是导致水质二次污染的重要原因。

关键词: 内河; 水质; 沉积物; 污染特征; 宁波

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1001-5132 (2012) 03-0109-05

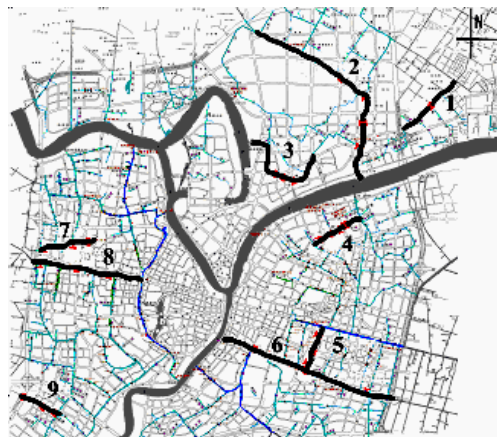
宁波市内河纵横交错, 水系发达, 但近三十年来内河水质不断恶化^[1]。其原因是城市人口急剧增加、建设高速发展, 但相应的排污管网系统滞后, 造成生活污水、甚至工业废水大量排入河道, 使得城区内河逐步演变成为城市纳污水域。目前, 国内外对河流污染的特点与规律进行了多方研究, 如河流水质的季节性变化^[2-4], 不同类型河道水质、底质污染特征^[5-6], 沉积物-水界面营养盐通量^[7-8], 并建立了多种水质、底质模型^[9]。为配合宁波城区内河整治工作, 2009~2011 年, 我们对宁波城区内河水质、沉积物的污染特征进行了调查研究。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁波城区共有内河 165 条, 按所处地域、水质、河道形象、环境景观、水文化价值以及旅游开发等河道功能, 分为主要景观河道、一般河道和城中村河道 3 类。目前, 主要景观河道有 10 条, 该类河道宽阔整洁, 水流通畅, 沿岸拥有布局较完善的绿化, 景观优美; 城中村河道全部或部分位于城中村区

域, 河道狭窄, 水体流动性差, 两岸脏乱, 缺乏景观绿化, 且生活设施不完善, 河水发黑发臭, 这类河道约占河道总数的 62%; 一般河道多位于城市建成区, 大多流经居民小区, 河道较为整洁, 宽度一般, 但水体流动性差, 夏季高温时段水体发绿现象较为严重, 局部有黑臭现象, 两岸有一定数量的景观绿化, 但不够完善。



1.张桂河; 2.江北大河; 3.压赛河; 4.直落河; 5.东柳河;
6.中塘河; 7.胜丰河; 8.西塘河; 9.关庄河

图1 宁波城区内河调查采样点

收稿日期: 2011-11-20.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://3xb.nbu.edu.cn>

基金项目: 国家自然科学基金(40676073); 宁波市江东区城市管理局研究项目(HK10141); 宁波大学教学改革项目(JYXMXZH200942).

第一作者: 郑琦宏(1973-), 男, 浙江宁波人, 硕士/实验师, 主要研究方向: 环境监测. E-mail: zhengqihong@nbu.edu.cn

对每一类河道各选择 3 条作为研究对象(图 1), 于 2009~2011 年分阶段进行采样分析. 根据河道的长度, 每条河道选择 3~4 个采样点.

1.2 采样分析方法

使用在线水质监测仪(Multi 340i)现场检测各采样点水质的温度、pH 值、电导率和 DO. 每个采样点采集表面水下约 0.5 m 深处的水样, 对于水深超过 1 m 的采样点, 采集表层与底层样. 水样分析参照相应的国家标准^[10].

内河沉积物采用有自主知识产权的 USSC-II 单管无扰动沉积物采样器^[11]采集. 采集的泥样运送至实验室分析^[12]. 用多管沉积物实验培养箱^[13]检测沉积物 SOD 值.

2 结果和讨论

2.1 宁波市内河水水质污染现状

2009 年不同类型内河水水质监测结果见表 1, 从表 1 看, 宁波市内河水水质污染较为严重, 其中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP、 COD_{Mn} 等指标严重超标, 基本为劣 V 类. 监测断面综合污染超标倍数大于 1 的断面为 100%, 即这些监测断面水质不能达到宁波市水功能区划目标的要求, 河网水环境污染严重.

主要景观河道的水质好于一般河道, 城中村河道水质最差, 但差异并不大. 主要原因一是主要景观河道的截污不到位, 二是水系是连通的, 污染

物质会通过水体流动而相互影响. 尽管各类河道的水质差异并不大, 但正是这点差异, 加上主要景观河道宽, 且相对较深, 水的容纳量大, 因而水体缓冲能力强, 不至于由于连续几天的干旱, 水体很快黑臭. 而城中村河道多数窄浅, 水量小, 所以在夏季若几天无水补充, 水质很容易黑臭.

2.2 水质指标的相关性分析

2009 年内河水水质理化指标的相关性分析见表 2. 表 2 显示水质的电导率、 COD_{Mn} 、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和 Chla 之间的相关性显著($R^2=0.64\sim0.97$). pH 值与 DO 的相关系数达 0.93, DO 又与水体中 Chla 的含量呈正相关, 水体 pH 值受控于蓝绿藻, 呈夏季高冬季低的特点. 部分河段表层水体溶解氧含量高并不是水质好转的信号, 而是水体富营养化可能出现水华的标志. 理论上, Chla 含量越高对应的藻类密度越大, 其光合作用产生的 DO 含量越高, 但其光合作用只限于水体表层, 并且由于藻类繁盛造成水体底部或水体—沉积物界面几乎无氧, 检测所得 DO 数据为包括水体表层和底层的综合数值, 所以 Chla 与 DO 的相关性系数仅为 0.13.

2.3 强降雨对内河水质的影响

2009 年 8 月, 宁波出现连续 3 d 的强降雨, 管理部门对内河进行了开闸换水, 降雨前后内河水水质监测结果见表 3. 由表 3 可知, 各监测指标值均有不同程度下降, 说明连续降雨对水体水质有不

表 1 2009 年不同类型内河水水质平均指标

河道类别	透明度/m	水温/ $^{\circ}\text{C}$	pH	电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	DO/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{COD}_{\text{Mn}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	TN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_3\text{-N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	浊度/ NTU	Chla/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)
主要景观河道	0.47	30.27	7.64	530.80	5.83	12.14	7.26	5.98	0.77	30.36	99.83
一般河道	0.27	30.68	7.88	522.69	8.27	11.70	8.94	6.13	0.86	39.19	88.98
城中村河道	0.29	30.00	7.88	616.78	7.72	16.88	10.81	7.02	0.98	39.21	132.80

表 2 2009 年水质理化指标相关性分析结果

	pH	DO	电导率	COD_{Mn}	TN	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP
DO	0.93	1.00					
电导率	0.13	0.08	1.00				
COD_{Mn}	0.01	-0.07	0.77	1.00			
TN	-0.15	-0.26	0.72	0.83	1.00		
$\text{NH}_3\text{-N}$	-0.25	-0.37	0.64	0.75	0.97	1.00	
TP	-0.04	-0.10	0.70	0.87	0.91	0.85	1.00
Chla	0.19	0.13	0.65	0.75	0.79	0.67	0.83

同程度的稀释作用. 主要水质指标 COD_{Mn} 、 TN 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 下降了一半左右, Chla 指标平均降低了 72.2%, 降幅最大. 主要景观河道下降幅度最大, 一般河道次之, 城中村河道下降幅度最小, 说明城中村河道在降水后经地表汇入河流带来的污染比较大. 主要景观河道和一般河道 DO 的平均值下降, 而城中村河道 DO 的平均值反而明显上升, 这可能与主要景观河道和一般河道水体藻类含量下降较多, 而城中村河道藻类含量仍然较高, 其光合作用使得水体表面 DO 仍然偏高有关.

连续降雨使内河水量得到了充分的更换, 但内河水质仍达不到Ⅳ类, 其原因可能是: (1)上游的水质不够好, 雨水经地表直接汇入造成地表面源河流污染; (2)内源性污染, 底泥释放出了较多的污染物质. 由此看来, 通过短期换水要全面达到Ⅳ水质的可能性不大.

2.4 整治对内河水质的影响

2010 年以来宁波市开展了大范围的内河整治工程, 如清淤、截污、植物修复等, 整治前后水质监测结果见表 4.

表 3 2009 年 8 月降雨前后内河水质指标比较

河道类别		pH	电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	DO/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{COD}_{\text{Mn}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	TN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_3\text{-N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Chla/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)
主要景观河道	降雨前	7.6	531	5.8	12.14	7.26	5.98	0.77	99.8
	降雨后	7.1	438	3.6	6.85	4.12	2.18	0.48	23.6
	变化率/%	-6.5	-17.5	-37.9	-43.6	-43.3	-63.5	-37.7	-76.4
一般河道	降雨前	7.9	523	8.3	11.70	8.94	6.13	0.86	89.0
	降雨后	7.3	466	6.7	7.92	5.36	3.65	0.84	34.8
	变化率/%	-6.9	-10.9	-19.3	-32.3	-40.0	-40.5	-2.3	-60.9
城中村河道	降雨前	7.9	617	7.7	16.88	10.81	7.02	0.98	132.8
	降雨后	7.3	516	12.5	9.66	7.19	5.23	1.18	75.7
	变化率/%	-6.9	-16.4	61.9	-42.8	-33.5	-25.5	-20.4	-43.0

表 4 内河河道整治前后水质的平均值与标准差

		透明度/ m	水温/ $^{\circ}\text{C}$	pH	DO/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	电导率/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_3\text{-N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{COD}_{\text{Mn}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	Chla/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)
整治前	平均值	0.5	21.0	7.9	7.4	599	13.64	9.51	1.05	10.96	58.2
(2010 年)	标准差	0.3	1.7	0.7	17.2	245	4.22	3.47	0.71	4.33	75.8
整治后	平均值	0.7	16.7	7.9	4.8	629	10.8	7.95	0.61	9.02	41.5
(2011 年)	标准差	0.3	2.0	0.5	4.8	216	5.27	4.96	0.41	2.3	42.6
变化率/%		40	-20.5	0	-35.1	5.0	-20.8	-16.4	-41.9	-17.7	-28.7

表 5 2009 年不同类型内河沉积物指标比较

河道类别		Eh/mv	氨氮含量/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有机质 含量/%	有效磷含量/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	总磷含量/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH
主要景观河道	范围	-200~-420	46.52~593.37	1.02~6.06	44.73~131.03	4103~11530	5.81~7.83
	平均值	-274	301.12	3.55	74.49	7843	6.87
一般河道	范围	-240~-400	127.15~607.89	1.10~7.17	37.53~127.43	3613~6867	5.72~7.62
	平均值	-313	366.04	3.75	80.54	5652	6.85
城中村河道	范围	-280~-330	21.00~226.01	1.67~4.10	33.94~136.78	2664~3470	5.07~6.46
	平均值	-310	163.03	2.64	80.93	3096	5.59

从表 4 看, TP、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 、Chla 指标有所好转; 透明度、DO、电导率指标值恶化. 测定值好转, 说明整治工程取得了一定的成效, 而测定值恶化并不意味着水质真正的“恶化”. 其中 DO 含量降低, 反应出内河水体的 DO 含量并不是主要受温度控制, 而是受水体中藻类含量和 Chla 含量控制, 呈现冬季低于春季的状态. 电导率升高意味着水体中新鲜水的补充少, 污染物质被浓缩. 水体中 TP 降低最为明显, 达 41.9%, 说明清淤是降低内河水体中磷含量的有效手段. COD_{Mn} 平均值降低了约 18%, 已达到 IV 类水质标准, 这是经过整治水质好转的最重要的标志. TN 平均值下降了 20.8%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 下降了 16.4%, 说明水质有了明显好转. 但 TN 含量仍为 V 类水质标准的 5.4 倍, 同时 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的下降比例低于 TN, 说明水体的还原性环境改变不大, 设法提高水体中溶氧含量是一项重要任务. 从标准差可知, 水体电导率、Chla、和 DO 的变化很大, 表明这几个参数在不同河道的水体中有较大的差异.

2.5 沉积物污染特征

从 2009 年内河底泥采样情况看, 各河道均未发现有底栖生物的活体、残骸和活动痕迹, 说明所调查内河的底栖生物已经绝迹.

不同类型内河沉积物监测结果见表 5, 从表 5 可知, 内河沉积物的主要污染因子为有机质、氮、磷. 各类河道所采沉积物的表层 Eh 值处于 -200 至 -420 mV 之间, 平均 -299 mV, 说明各河沉积环境都是深度的还原环境, 耗氧强, 这是内河治理难以见效的原因之一. 沉积物有机质含量为 1.02%~7.17%, 平均为 3.31%, 高于平均含量为 2.65% 的苏州河黑泥层有机质. 对胜丰河监测发现, 西段的有机质含量达 7%, 而东段仅为 2.5%, 这可能与东段一直在进行增氧治理有关, 有机质的降低是治理效果的显现, 因此增氧作用能够对沉积物产生修复作用. 沉积物中氨氮的含量为 21.00~607.89 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 277 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与 285 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的苏州河平均值相近, 是水体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的 30~100 倍, 这意味着沉积物中的氨氮有可能向水体释放. 此外, 沉积物中氨氮在硝化细菌的作用下, 会被氧化成亚硝酸盐和硝酸盐, 消耗氧, 使水质恶化. 沉积物是磷的汇源, 沉积物中总磷在所有营养物中差

异最小, 含量 2 664~11 530 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 6 532 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是水体的 10 000 倍左右, 是水相与沉积物相差异最大的. 沉积物中磷的释放将是最大的危害, 特别是目前水体中氮含量很高, 磷含量的升高将进一步加剧水体的富营养化, 导致蓝绿藻暴发, 加速水体恶化. 沉积物中有效磷为 33.94~136.78 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均 78.65 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 为水体总磷的 200 倍. 沉积物都有不同程度的酸化趋势, pH 值为 5.07~7.83, 平均为 6.77.

有研究表明 SOD 中 90% 为化学耗氧^[14-15]. SOD 值越大说明底泥需氧量越大, 水体缺氧越严重, 水质越差. 在测定城中村河道张桂河路林市场采样点的 SOD 时, 往沉积物上层注入氧含量较高的去离子水($\text{DO}=7.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 在不到 1 min 内, 水中 DO 消耗殆尽, 说明严重污染的沉积物其耗氧非常强烈, 是导致黑臭的重要原因. 张桂河沉积物 SOD 为 $6.96\times 10^4\text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$, 主要景观河道西塘河沉积物 SOD 为 5 159 $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$. 因此, 对高 SOD 河道进行底泥疏浚是改善其水质的必要手段.

3 结论

(1) 宁波市内河水质污染较为严重, 其中 TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、 COD_{Mn} 等指标严重超标, 基本为劣 V 类. 主要景观河道的水质好于一般河道, 城中村河道水质最差, 但差异不大.

(2) 内河水质的电导率、 COD_{Mn} 、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和 Chla 之间的相关性显著($R^2=0.64\sim 0.97$). 水体 pH 值受控于蓝绿藻, 呈夏季高冬季低的特点.

(3) 连续降雨对水体水质有不同程度的稀释作用, 主要景观河道降幅最大; 短暂的水量补充对提高内河水质作用不大.

(4) 清淤后水质有明显好转, TP、TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 COD_{Mn} 、Chla 指标下降, 但 TN 指标仍超标严重.

(5) 内河沉积物的主要污染因子为有机质、氮、磷; 沉积物的耗氧量非常大, 是导致水体二次污染的重要原因.

参考文献:

- [1] 史建静. 宁波市城市内河配水研究[J]. 浙江水利科技, 2006(4):54-55.
- [2] Ouyanga Y, Nkedi-Kizzab P, Wuc Q T, et al. Assessment of seasonal variations in surface water quality[J]. Water

- Research, 2006, 40:3800-3810.
- [3] Muslima I, Jones G. The seasonal variation of dissolved nutrients, chlorophyll a and suspended sediments at Nelly Bay, Magnetic Island[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 57:445-455.
- [4] Michael J B, Jim T S, Colin N. The value of high-resolution nutrient monitoring: A case study of the river frome, Dorset, UK[J]. Journal of Hydrology, 2009, 378:82-96.
- [5] 胡雪峰, 高效江, 王少平, 等. 上海市郊中小河流夏季水污染特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2001, 10(5): 448-453.
- [6] 严以新, 蒋小欣, 阮晓红, 等. 平原河网区城市水污染特征及控制对策研究[J]. 水资源保护, 2008, 24(5):1-3.
- [7] Grenz C, Denis L, Pringault O, et al. Spatial and seasonal variability of sediment oxygen consumption and nutrient fluxes at the sediment water interface in a subtropical lagoon (New Caledonia)[J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, 61(7/12):399-412.
- [8] Marie T, Gilles B, Josette G. Modelling nutrient exchange at the sediment-water interface of river systems[J]. Journal of Hydrology, 2007, 341(1/2):55-78.
- [9] Yana Topalova, Yovana Todorova, Antoaneta Panova, et al. Modelling of the relationship moisture content to nutrient transformation rate in river sediments[J]. Ecological Modelling, 2009, 220(23):3325-3330.
- [10] 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] 王绍友, 徐继荣. 一种无边界扰动的单管无扰动采样器: 中国, ZL200410026847.3[P]. 2004-04-13.
- [12] 劳家桢. 土壤农化分析手册[M]. 北京: 农业出版社, 1988.
- [13] 马晓磊, 徐继荣, 张德民, 等. 城市内河强还原性沉积物耗氧及相关因素研究[J]. 环境科学研究, 2010, 23(12): 1499-1505.
- [14] Parr L, Mason C. Causes of low oxygen in a lowland, regulated eutrophic river in Eastern England[J]. Sci Total Environ, 2004, 321(1/3):273-286.
- [15] Walker R, Snodgrass W. Model for sediment oxygen demand in lakes[J]. Environ Engineering, 1986, 12(1): 25-43.

Research on the Pollution Characteristics of Water Quality and Sediments in Inner Rivers of Ningbo

ZHENG Qi-hong¹, SHEN Hao², LI li-san², CHEN Li-xing², XU Ji-rong¹

(1.Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315000, China;

2.Inner River Management Office of Ningbo, Ningbo 315010, China)

Abstract: According to the study on the pollution characteristics of water qualities and sediment in different inner rivers of Ningbo from 2009 to 2011, the water qualities of Ningbo inner rivers are ranked at Grade V currently, and the main pollution agents are identified as being TN, NH₃-N, TP and COD_{Mn}. The water qualities of landscape rivers, on the other hand, are found to be better than common rivers, and the water qualities of the rivers in village amidst the city are considered the worst with almost the same pollution level. The relative coefficient among electric conductivity, COD_{Mn}, TN, NH₃-N, TP and Chla are higher ($R^2=0.64-0.97$), and the pH of water body is controlled by cyanobacteria, which turns higher in summer than that in winter. Although the continuous rainfalls may improve water quality by diluting, it has little impact on improving water quality of inner rivers just because of addition of water. The water quality is obviously improved after dredging, and this improvement can be manifested by the indices mitigation of COD_{Mn}, TP. The main pollution agents of the sediments include organic, nitrogen and phosphorus, and these elements consume enormous amount of oxygen, resulting in secondary pollution that is responsible for deterioration of water quality.

Key words: inner river; water quality; sediment; pollution characteristics; Ningbo

(责任编辑 史小丽)