文章编号：1006－544X（2006）01－0018－05

桂林桃花江水环境容量研究

曾全方[1]，张学洪[2]，张华[2]，王洪涛[2]

（1. 广西建设厅 职工培训中心，南宁 530012；2. 桂林工学院 资源与环境工程系，广西 桂林 541004）

摘 要：对桃花江水环境容量进行了初步研究，系统调查了桃花江沿岸主要排污口，分析了其污染特征. 根据其水文水质特点，选择一维推流模型，在枯水期现场取样，采用室内振荡实验，确定了水质模型中的综合衰减系数为：$K_{COD_{Mn}}=0.30\ d^{-1}$，$K_{NH_3\text{-}N}=0.35\ d^{-1}$. 据此计算出各控制单元的水环境容量及不同规划水平年污染物排放量和削减量：伍仙桥至飞鸾桥河段的 COD_{Mn}、NH_3-N 理论削减量，2010年分别为879和470.8 kg/d，2015年分别为901和477.8 kg/d，将远远超过相应河段的水环境容量. 北冲污水处理厂排放的“尾水”将是水污染治理的重点，也是改善桃花江水环境质量的关键.

关键词：水环境容量；衰减系数；桃花江；桂林

中图分类号：X522 **文献标识码：**A

桃花江是漓江的主要支流之一，为桂林市旅游度假胜地. 随着桂林市经济的持续增长和城市化、工业化进程的发展，桃花江水系水体污染日益加剧，其主要问题在于桃花江有限的水环境容量与逐年加重的水污染负荷之间存在着严重的矛盾. 桃花江水污染问题不仅制约该区域内的经济发展，而且影响漓江干流的水质和桂林市旅游业的发展. 以往水环境研究工作主要是围绕漓江干流开展的，而针对桃花江等支流的研究较少[1－7]. 近年研究证实：桂林市水系中污染最严重的是桃花江[8]. 针对桃花江流域水污染情况，水利部等单位曾对桂林市“两江四湖”环城水系整治和通航设计中的主要问题和环境景观要求进行过研究，并因地制宜地提出了一些水环境整治措施[9]；喻泽斌等对桃花江流域水污染进行了研究，并提出了桃花江水环境综合整治方案[10]. 以上研究仅限对污染现状进行调查，或从理论方面提出综合整治对策和措施，粗略计算了桃花江流域污染物之一的COD环境容量.

本研究拟根据桃花江市区段的水文、水质监测数据，建立合适的水质模型，计算出桃花江市区段的环境容量；根据污染源排污总量在不同规划水平年的预测，计算各控制单元的理论削减污染负荷，为桃花江制定合理可行的水污染控制规划提供理论依据.

1 桃花江流域概况

桃花江流域面积322 km^2，干流长65 km. 属亚热带季风气候，年平均降雨量1 900～2 000 mm. 雨季一般是5～7月，其降雨量为850～1 000 mm，旱季一般是9月至次年2月. 桃花江属雨源性河流，实测最大流量840 m^3/s，实测最小流量0.637 m^3/s，年平均流量11.6 m^3/s. 流域人口约23.8万人，其中上游5个乡镇总人口为17.46万人. 市区河段内有企业20多家，数个生活小区和16个自然村，其中城区人口近6万人，农业人口约4 000人.

收稿日期：2005－11－29

基金项目：国家高技术研究发展计划（863）资助项目（2003AA601060－02－03）；广西科技攻关项目（桂科攻0428008－4N）；广西科学基金资助项目（桂科基0342048）

作者简介：曾全方（1974－），男，硕士，工程师，环境工程专业.

2　桃花江市区段水环境容量

2.1　计算条件的确定

2.1.1　*主要排污口分布*　根据水质监测断面的分布，将桃花江市区河段分为 4 段进行研究. 河段的划分及主要排污口分布见图 1.

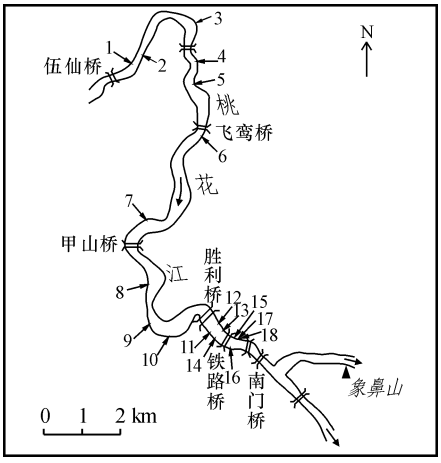


图 1　桃花江市区河段划分和排污口示意图

Fig. 1　Water quality monitoring section and drainage spots of Taohuajiang River

1—长海机械厂排污口；2—第二造纸厂排污口；3—道光小溪汇入口；4—乌金河汇入口；5—北冲污水处理厂排污口；6—飞鸾桥下游左岸排污口；7—乳胶厂排污口；8—徐家村小溪汇入口；9—敦睦村小溪汇入口；10—银荔宾馆处排污口；11—胜利桥下右岸污水口；12—胜利桥下左岸污水口；13—篦子园生活排污口；14—铁路桥上 30 m 右排污口；15—铁路桥下 20 m 左排污口；16—铁路桥下游 8 m 右排污口；17—春天湖出口旁排污口；18—西门桥上游左岸排污口

2.1.2　*基本水文条件*　计算水期选枯水期；环境容量的研究区间选取伍仙桥至南门桥河段，河段计算长度为 17.5 km；根据桃花江市区段的水质监测及水环境评价结果，选定计算因子为 NH_3-N、COD；根据 1990 ~ 2000 年桂林水文站漓江最枯月平均流量，按汇水面积比较，推算出桃花江流域象鼻山漓江入口断面的相应流量，然后根据桃花江不同断面的汇水面积及求得的最枯月平均流量推算出相应断面流量和流速（表 1）.

2.1.3　*模型选择*　桃花江最大河宽 71 m，污染源排放基本上是连续排放且水量随时间没有明显变化，可只考虑纵向（水流方向）的浓度变化，即认为河流中污染物浓度仅沿水流方向上变化，而在整个横断面上和水深方向上不变，故选择一维推流模型[11]. 根据 Streeter – Phelps 模型微分式的托曼修正式，建立桃花江水质模型[12]：

$$u\frac{\partial L_C}{\partial X} = \frac{d}{dX}\left(E_x\frac{dL_C}{dX}\right) - K^C L, \qquad (1a)$$

$$u\frac{\partial L_N}{\partial X} = \frac{d}{dX}\left(E_x\frac{dL_N}{dX}\right) - K^N L. \qquad (1b)$$

式中：L_C—COD 浓度，mg/L；L_N—NH_3-N 浓度，mg/L；E_x— 纵向扩散系数，$E_x = 0.058\ XQ/(IB)$；X— 距离，km；u— 水流速度，m/s；K^C—COD 综合衰减系数；K^N—NH_3-N 综合衰减系数.

2.1.4　*参数确定*　选定乌金河排污口下游 20 m 断面至北冲污水厂排污口上游 20 m 断面作为调查

表 1　桃花江不同断面的最枯月平均流量及流速

Table 1　Basic hydrological parameters in different sections in the droughtiest season of Taohuajiang River

断　面	汇水面积 /km²	最枯月平均流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	水　深 H/m	断面宽度 B/m	横截面积 A/m²	设计流速 V/($m \cdot s^{-1}$)
漓江桂林水文站断面	2 762	8.710	–	–	–	–
桃花江入漓江断面	322	1.01	–	–	–	–
南门桥	310	0.98	2.8	35	98	0.010 0
铁路桥	300	0.95	3.5	32	112	0.008 5
胜利桥	290	0.92	3.3	36	118	0.007 8
飞鸾桥	275	0.89	2.1	63	132	0.007 0
伍仙桥	170	0.55	1.1	40	44	0.013 0

表 2　枯水期桃花江综合衰减作用监测结果

Table 2　Monitoring result of integrative attenuation in the droughtiest season of Taohuajiang River

调查地点	乌金河汇入口下 20 m 断面				北冲污水厂排污口上游 20 m 断面			
取样时间(2004 – 01 – 25)	11:00	11:30	12:00	平均	14:00	14:30	15:00	平均
水温 t/℃	14.8	14.6	14.5	14.6	14.2	14.4	14.1	14.3
流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	–	–	–	8.80	–	–	–	7.84
断面面积/m^2	–	–	–	40.10	–	–	–	112.00
平均流速/($m \cdot s^{-1}$)	–	–	–	0.15	–	–	–	0.07
$\rho(COD_{Mn})$/($mg \cdot L^{-1}$)	4.60	4.50	4.70	4.69	4.50	4.56	4.53	4.53
$\rho(NH_3\text{-}N)$/($mg \cdot L^{-1}$)	0. 70	0.78	0.74	0.74	0.71	0.69	0.72	0.71

区间. 调查取样时间为 2004 - 01 - 25,代表枯水期.

为分析综合衰减能力,对各监测断面每隔 30 min 在河流中部采集 1 个水样,共采集 3 个样本,分别测定流速、流量、水温、COD_{Mn}、NH_3-N 等,监测结果以平均值表示,详见表 2.

收集上述不同断面不同时间的水样,带回实验室作室内振荡实验. 振荡频率 $f=50$ 次/min,在 0、2、4、8、24、36、48 h 取样分析,结果见表 3.

表 3 振荡实验结果

Table 3 Result of vibration test

振荡时间/h	0	2	4	8	24	36	48
振荡天数/d	0	0.083	0.167	0.333	1.000	1.50	2.000
$\rho(COD_{Mn})/(mg\cdot L^{-1})$	4.70	4.60	4.50	4.20	3.40	3.20	2.90
$\rho(NH_3\text{-}N)/(mg\cdot L^{-1})$	0.78	0.75	0.69	0.65	0.60	0.58	0.55
$\ln\rho(COD_{Mn})$	1.55	1.53	1.50	1.45	1.22	1.16	1.06
$\ln\rho(NH_3\text{-}N)$	-0.25	-0.36	-0.43	-0.51	-0.70	-0.92	-1.05

分别以振荡天数为横轴,以 $\ln\rho(COD_{Mn})$、$\ln\rho(NH_3\text{-}N)$ 为纵轴,用最小二乘法求得直线回归方程,直线斜率即为室内振荡实验 COD_{Mn}、NH_3-N 综合衰减系数. 求得枯水期 COD_{Mn}、NH_3-N 衰减系数分别为 0.25/d、0.31/d.

此外,还可用两点法求衰减系数[13]:根据质量守衡原理,在均匀河段中进行一级衰减反应的单一水质组分的稳态方程为

$$u\,\partial C/\partial X = -KC. \tag{2a}$$

据此解出 $$K = uX^{-1}\ln(C_1/C_2). \tag{2b}$$

式中:C_1— 初始断面的污染物浓度,mg/L;C_2— 计算断面的污染物浓度,mg/L;X— 初始断面到计算断面的距离,m;u— 河段平均流速,m/s.

根据表 2,将单项污染物控制指标的上下断面浓度代入公式,可以求得 COD_{Mn}、NH_3-N 相应单项污染物控制指标的综合衰减系数:$K_{COD_{Mn}}=0.31\ d^{-1}$;$K_{NH_3\text{-}N}=0.40\ d^{-1}$.

比较可知:两点法与实验室测定法求得的衰减系数基本一致. 这说明试验方法和选择区间比较合适. 事实上,长委和珠委推荐广西采用经验值[14]($K_{COD_{Mn}}=0.16\sim0.30\ d^{-1}$,$K_{NH_3\text{-}N}=0.30\sim0.40\ d^{-1}$)与计算值接近,说明模型参数估计比较合理,所建模型可用于水质计算.

综上,本研究水环境容量计算综合衰减系数取值为:$K_{COD_{Mn}}=0.30\ d^{-1}$,$K_{NH_3\text{-}N}=0.35\ d^{-1}$.

2.2 桃花江市区段水环境容量

2.2.1 控制单元水环境容量数学模型的确定 污染物进入水环境后,受稀释、迁移和净化作用,水环境容量由 3 部分组成[15],其数学表达式为

$$W_T = W_d + W_t + W_s. \tag{3a}$$

其中:$$W_d = q(C_S - C_B)(1 + q/Q), \tag{3b}$$

$$W_t = Q(C_S - C_B)(1+\frac{q}{Q})\left\{\frac{\sqrt{4E_x t\pi}}{u}\exp\left[\frac{(X-ut)^2}{4E_x t}\right]\right\}, \tag{3c}$$

$$W_s = Q(C_S - C_B)(1+\frac{q}{Q})\left\{-\exp\left[\frac{KX}{t}\right]+1\right\}, \tag{3d}$$

$$W_T = Q(C_S - C_B)(1+\frac{q}{Q})\cdot \left\{2+\frac{\sqrt{4E_x t\pi}}{u}\exp\left[\frac{(X-ut^2)}{4E_x t}\right]-\exp\left(\frac{KX}{u}\right)\right\} \tag{3e}$$

式中:W_T— 水环境的总容量,t/d;W_d— 稀释环境容量,t/d;W_t— 迁移环境容量,t/d;W_s— 净化环境容量,t/d;C_S— 断面控制浓度,mg/L;C_B— 污水来水浓度,mg/L;q— 污水流量,m^3/s;Q— 河流流量,m^3/s;u— 流速,m/s;K— 综合衰减系数,d^{-1};E_x— 纵向离散系数,m^{-1};X— 距离,m.

对中小河流,易降解的污染物一般只需考虑自净容量. 由于喀斯特地貌的岩性特点,漓江泥沙含量小,多年平均含沙量仅为 0.08 kg/m^3,为广西含沙量最小的河流之一. 因此本研究未考虑底泥吸附的影响[12]. 此外,桃花江流域绝大部分地下水贮存在分布广泛的地下岩溶裂隙之中,为地表水枯水期的主要补给来源[5],地下水对地表水的这种补给造成水环境容量计算的不确定性,这是水环境容量计算中尚未完全解决的一个难题. 在本研究中,暂未考虑这种不确定性. 假设入河污染物的衰减为非线性,河流两岸为均匀排污,每个河段的降解系数和沉浮系数为常数,可推导出河流控制单元水环境容量计算公式

$$W_T = 86.4[(C_S - C_0)Q_0 + C_S(Q_S - Q_0) + \lim C_S\sum_{i=q}^{n-1} q_i(1-e^{-k\Delta t_i})]; \tag{4a}$$

当 $n\to\infty$,$\Delta t_i\to 0$,上式变为

$$W_T = 86.4(C_S Q_S - C_0 Q_0) + ((Q_0+Q_S)/2)C_S KX/u. \tag{4b}$$

式中:C_0,C_S 分别为控制单元的上、下段面的浓度,mg/L;Q_0,Q_S 分别为控制单元的上、下段面的流量,m^3/s;K 为污染物的综合衰减系数,d^{-1};X/u 为输移时间,s.

2.2.2 水环境容量计算 根据河流控制单元水环境容量计算公式(4b)和控制单元的水质资料(表 4),可计算出各控制单元的水环境容量(表 5).

表 4　水环境容量计算使用的参数

Table 4　Parameters for the calculation of water environmental capacity

区段	取样位置	距上断面距离/km	流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	流速/($m \cdot s^{-1}$)	$\rho(COD_{Mn})$/($mg \cdot L^{-1}$)	$\rho(NH_3\text{-}N)$/($mg \cdot L^{-1}$)	综合衰减系数 K/(d^{-1})
伍仙桥	伍仙桥	0	0.55	0.0130	4.0	0.4	
↓	飞鸾桥	7.5	0.89	0.0070	4.5	0.6	$K_{COD_{Mn}}=0.30$
南门桥	胜利桥	4.5	0.92	0.0078	5.0	0.7	
	铁路桥	3.5	0.95	0.0085	5.5	0.9	$K_{NH_3\text{-}N}=0.35$
	南门桥	3.0	0.98	0.0100	6.0	1.0	

表 5　桃花江市区段各控制单元的水环境容量

Table 5　Water environment capacity of each monitoring section in Taohuajiang River

控制单元	距离/km	流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)		水环境容量/($kg \cdot d^{-1}$)	
		上断面	下断面	COD_{Mn}	NH_3-N
伍仙桥－飞鸾桥	7.5	0.55	0.89	168.4	30.2
飞鸾桥－胜利桥	4.5	0.89	0.92	85.6	24.5
胜利桥－铁路桥	3.5	0.92	0.95	65.9	15.2
铁路桥－南门桥	3.0	0.95	0.98	68.8	15.0
伍仙桥－南门桥	–	–	–	390.5	86.20

注：因从南门桥断面到象鼻山入口断面无排污口污水流入，环境容量计算只考虑自净环境容量，不再考虑稀释环境容量（迁移环境容量），故该断面的环境容量不再列出

2.3　污染物排放量与削减量计算

污染物排放量计算公式为

$$W_{入} = 86.4\sum_{i=1}^{n} q_i C_i. \qquad (5a)$$

式中：$W_{入}$— 污染物实际排放量；q_i— 污染物 i 的排放速度(m^3/s)；C_i— 污染物 i 的排放浓度(mg/L).

污染物削减量计算公式

$$W_{削} = W_{允} - W_{入}. \qquad (5b)$$

式中：$W_{削}$— 控制单元污染物削减量，kg/d；$W_{入}$— 控制单元污染物实际排放量，kg/d；$W_{允}$— 控制单元污染物允许排放量，kg/d.

根据桃花江市区段入河排污口污水监测情况及公式（5a），可计算出污染物在不同规划水平年的排放量和削减量（表 6）.

由计算结果可知：到 2010 年桃花江伍仙桥至飞鸾桥河段的 COD、NH_3-N 理论削减量分别达到 879、470.8 kg/d，远远超过相应河段的环境容量. 这主要是由于新建的北冲污水处理厂排放“尾水”所引起. 因此在规划年内，北冲污水处理厂排放的“尾水”将是桃花江今后水污染治理的重点，也是桃花江水环境质量与改善的关键所在.

3　结　论

（1）对桃花江水环境容量计算结果表明：NH_3-N、COD_{Mn}实际纳污量已超过了环境容量，因此必须进行污染物削减. 伍仙桥至飞鸾桥河段的 COD_{Mn}和 NH_3-N 的消减量，2010 年分别为 879 和 470.8kg/d，2015 年分别为 901 和 477.8 kg/d.

（2）北冲污水处理厂在规划年内是桃花江河段的主要污染源之一，因此建议开展该厂尾水的深度处理技术研究，并对处理技术进行论证分析，

表 6　2004 年及不同规划水平年桃花江控制单元纳污量与削减量

Table 6　Acceptance and reduce capacity of sewage in each section in years　　kg/d

年度	控制单元	水环境容量		纳污量		理论削减量	
		COD_{Mn}	NH_3-N	COD_{Mn}	NH_3-N	COD_{Mn}	NH_3-N
2004	伍仙桥－飞鸾桥	168.4	30.2	233.2	37.1	064.8	7.0
	飞鸾桥－胜利桥	85.6	24.5	110	32.3	24.4	7.8
	胜利桥－铁路桥	65.9	15.2	114.1	29.3	48.2	14.1
	铁路桥－南门桥	68.8	15.0	82.6	24.1	13.8	9.1
2010	伍仙桥－飞鸾桥	168.4	30.2	1047	501	879	470.8
	飞鸾桥－胜利桥	85.6	24.5	120.4	33.9	34.8	9.4
	胜利桥－铁路桥	65.9	15.2	–	–	–	–
	铁路桥－南门桥	68.8	15.0	–	–	–	–
2015	伍仙桥－飞鸾桥	168.4	30.2	1069	508	901	477.8
	飞鸾桥－胜利桥	85.6	24.5	167.4	47.2	81.8	22.7
	胜利桥－铁路桥	65.9	15.2	–	–	–	–
	铁路桥－南门桥	68.8	15.0	–	–	–	–

注：在 2010、2015 年，胜利桥－南门桥段的废水进入第四污水处理厂，因此其相应的污染物排放量与削减量不再计算

找出切实可行的处理方法. 这是确保桃花江水体功能的关键.

(3) 桃花江水质受其水量的影响较大. 因枯水期水量少, 加剧了水质污染, 建议对桃花江实施补水.

参考文献:

[1] 叶桂忠, 刘俊. 漓江桂林市区段水环境容量研究 [J]. 水资源保护, 2003, (3): 10 – 12.

[2] 李永军, 刘俊, 蒋亚萍. 桂林市区饮用水水源地保护研究 [J]. 桂林工学院学报, 2002, 22 (4): 466 – 471.

[3] 蒋亚萍, 陈余道, 阎志为. 桂林市水资源利用与存在的问题 [J]. 桂林工学院学报, 2003, 23 (1): 50 – 54.

[4] 李永军, 彭苏萍, 陈余道, 等. 漓江桂林市区段水环境自净容量地理信息模型探讨 [J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33 (5): 595 – 599.

[5] 王洪涛, 陆燕勤, 王红君, 等. 漓江流域水污染控制软件系统初步研究 [J]. 桂林工学院学报, 2005, 25 (3): 297 – 300.

[6] 喻泽斌, 王敦球. 漓江水环境质量现状评价 [J]. 桂林工学院学报, 2003, 23 (1): 68 – 71.

[7] 蒋初成. 漓江水质变化对水处理工艺的影响 [J]. 桂林工学院学报, 2003, 23 (3): 50 – 54.

[8] 李振平, 熊传信, 解庆林, 等. 桂林水系沉积物间隙水中几种毒性元素分析 [J]. 桂林工学院学报, 2005, 25 (3): 293 – 296.

[9] 黎运棻, 范惠生. 桂林市环城水系水环境整治和通航工设计 [J]. 山西水利科技, 2002, (1): 83 – 86.

[10] 喻泽斌, 张学洪, 王敦球, 龙腾锐. 桂林桃花江水环境综合整治方案 [J]. 重庆大学学报, 2004, 27 (3): 137 – 137.

[11] 郭劲松, 李胜海, 龙腾锐. 水质模型及其应用研究进展 [J]. 重庆建筑大学学报. 2002, 24 (2): 109 – 115.

[12] 喻泽斌. 漓江流域水资源可持续利用研究 [D]. 重庆: 重庆建筑大学, 2004.

[13] 张逢甲. 水污染物容许排放量计算方法 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.

[14] 桂林市水电水利局. 桂林市水源地保护规划 [R]. 桂林: 桂林市水电水利局, 1999.

[15] 付国伟, 程声通. 水污染控制系统规划 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1985.

Water environment capacity of Taohuajiang River in Guilin

ZENG Quan-fang[1], ZHANG Xue-hong[2], ZHANG Hua[2], WANG Hong-tao[2]

(1. *Staff Training Center, Department of Construction of Guangxi, Nangning* 530012, *China*;
2. *Department of Resources and Environmental Engineering, Guilin University of Technology, Guilin* 541004, *China*)

Abstract: Water environment capacity of Taohuajiang River is studied. The characteristics of main pollutants are systemically analyzed after investigating the current state of the Taohuajiang watershed. Based on the hydrological conditions and water quality, one-dimension water quality model is established. Sampling is taken from low water period and sent to the laboratory to collect the attenuation coefficient by vibration test. In the water quality model, the attenuation coefficients of colligation are determined to be $K_{COD_{Mn}} = 0.3\ d^{-1}$, $K_{NH_3\text{-}N} = 0.35\ d^{-1}$. The water environment capacity of each section and the reduce capacity of sewage in different years are calculated. The results show that the theoretical reduction of COD_{Mn} and NH_3-N from Wuxian bridge to Feiluan bridge section of Taohuajiang river in 2010 and 2015 will be larger than the water environment capacity, which are 879 kg/d and 470.8 kg/d in 2010, 901 kg/d and 477.8 kg/d in 2015. In the near future, the effluent of the Beichong Wastewater Treatment Plant will be the main contributor to water pollution of Taohuajiang River, and the serious factor polluting the environment quality of Taohuajiang River.

Key words: water environment capacity; attenuation coefficient; Taohuajiang River; Guilin