

四川省茶坪河水环境容量及总量控制*

戴本林, 杨立中, 贺玉龙, 许文来

(西南交通大学环境科学与工程学院, 成都 610031)

摘要: 以流经四川绵阳市安县河流茶坪河为研究对象, 在对该河水污染负荷、水环境现状及水环境功能充分调查的基础上, 结合该河流的水文特征和排水规划以及四川省绵阳市环境监测站 2005 年实测的数据, 采用二维浅水水动力学—水质模型方程组对茶坪河的各监测断面 COD_{Cr} 和 NH₃-N 的浓度场进行了计算模拟和对比, 并用一维水环境容量计算模型计算了该河流的水环境容量, 提出了具体的总量控制措施。结果表明: 用二维浅水水动力学—水质模型方程组计算各监测断面的 COD_{Cr} 和 NH₃-N 与实测值相差不大; 茶坪河水环境容量 COD_{Cr} 为 123.96 t/a, NH₃-N 为 42.95 t/a, 所排放的 COD_{Cr} 量、NH₃-N 量已经超过该流域容量, 出水水质已超过水质保护目标 III 类标准。

关键词: 水环境容量; 总量控制; 二维模型; 污染负荷; 茶坪河

Water environmental capacity and total water pollution quantity control of Chaping River, Sichuan Province

DAI Benlin, YANG Lizhong, HE Yulong & XU Wenlai

(School of Environmental Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P.R. China)

Abstract: The object of research is Chaping River which flows over Anxian County in Mianyang City, Sichuan Province. Based on a great number of investigations on the load of water pollutants, the situation and function of water environment of the river, the river-basin hydrological character, the river draining plan, and observation data at environmental monitoring station of Mianyang City Sichuan Province in 2005, two-dimensional hydrodynamic shallow-water model equations were used for monitoring COD and NH₃-N concentrations in section of the Chaping River and the simulations were compared. A one-dimensional model was used to calculate the water volume capacity of the river's water environments and the ways controlling the total quantity were provided. Results indicated that using two-dimensional hydrodynamic shallow-water model equations to calculate the monitoring section showed a small measured difference for COD and NH₃-N. For the water environmental capacity of Chaping River, COD was 123.96 t/a and NH₃-N 42.95 t/a. The COD and NH₃-N emission volume would exceed the capacity in the basin, and the quality of output water would exceed the III grades of water protecting standards.

Keywords: Water environmental capacity; total quantity control; two-dimensional model; pollution load; Chaping River

近年来, 随着工业化、农业化和城市化进程的发展, 流域内水污染问题日渐严重, 甚至有的严重影响到人们的生活质量。合理划分河流水功能区, 控制河流污染物总量特别是城市内河的污染物总量是现在环境工作者需要解决的重要问题^[1]。水污染总量控制是国外 20 世纪 70 年代初期发展起来的一种比较先进的水环境保护管理方法, 其核心内容是研究规划区域污染物的产生、治理、排放规律与经济、人口发展的协调关系, 以便从客观上定量地把握经济、人口发展对水资源的影响, 提出保护对策, 促进水资源的可持续利用和社会经济与环境的协调发展^[2]。而在实践中, 水环境容量不仅是水环境目标管理的基本依据和环境规划的主要约束条件, 也是污染物总量控制的关键技术支持^[3]。我国环境界自 20 世纪 70 年代后期

* 四川省科技研究开发项目(01SG047-02)和铁道部科技研究开发计划项目(2005Z003)联合资助。2007-01-18 收稿; 2007-09-04 收修改稿。戴本林, 男, 1981 年生; E-mail: daibenlin_0@163.com.

引入环境容量的概念, 并开始了水环境容量的研究^[4]. 经过20世纪70年代后期以及“六五”“七五”两次科技攻关研究, 对部分污染物在水体中的物理、化学行为及水污染物总量控制等方面取得了重要成果^[5], 对我国水环境管理工作的科学化和环境容量研究的发展, 起到了积极的推动作用^[6]. 但实践证明, 虽然浓度控制和目标总量控制一定程度上遏制了环境质量的恶化, 但是由于没有建立污染物排放总量和环境质量之间的定量对应关系, 实际上并没有根本解决污染物允许排放量的科学分配以及最终实现环境质量达标的核心问题, 要在根本上实现环境质量达到功能区规定的标准, 将依赖于实施以环境容量为基础的排污总量控制制度. 而保证该制度的有效实施, 首先必须科学、准确的掌握区域、流域和城市的环境容量.

纵观河流水环境容量研究的实践, 不难看出现有的研究基本上都是针对 COD、重金属水质指标, 在点源排污情形下进行的环境容量计算, 而对于河流氨氮的容量问题研究还很少且仅仅局限于用一维模型计算水环境容量. 本文针对我国西部地区河流污染特征, 并由于排入茶坪河的污水以城镇生活污水以及水泥厂、化工厂工业污水为主, 故选取各监测断面的监测污染因子为: COD_{Cr} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$, 通过对茶坪河水环境容量进行较深入、全面的研究分析, 用二维浅水水动力学—水质模型计算出流域各断面 COD_{Cr} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度值以及用一维模型计算出各污染物的最大允许排放量以及达到控制目标需削减的污染量, 以期为区域水污染控制提供决策依据.

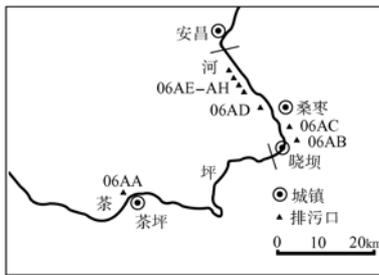


图 1 监测断面布置示意图

Fig. 1 Diagram layout of the monitoring section

1 区域概况

涪江属长江水系, 发源于四川省的南坪县, 流经川西北十多个县市, 在合川县与嘉陵江汇合, 流至重庆后汇入长江^[7]. 绵阳市境内除青江、西河属嘉陵江水系外, 其余全部属于涪江水系. 茶坪河是涪江下游左岸的二级支流, 发源于海拔 3000 多米的千佛山, 全长 30 多千米, 由南西向东北径流, 流至安县桑枣镇五福村, 汇入安昌河, 最终流入长江二级支流涪江. 该区域多年平均降雨量为 908.3mm.

该河段共设 8 个排污口, 除 06AB、06AC 排污口位于该流域右边外, 其余全部位于该河流左边, 其控制断面上断面为晓坝大桥(31°35'50"N, 104°19'07"E), 下断面为安昌

镇水文站(31°38'30"N, 104°24'58"E). 该河段河道形势和排污口分布见图 1.

2 水质浓度计算

2.1 模型建立

茶坪河水深相对较小(平均水深约为 4.3m), 河中的流动和污染物的对流扩散可按二维浅水问题来计算, 对 N-S 方程沿垂线积分引入垂向平均量, 可得二维浅水水动力学—水质模型方程组如下^[8-12].

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Hu) + \frac{\partial}{\partial y}(Hv) = 0$$

$$\frac{\partial uh}{\partial t} + u \frac{\partial uh}{\partial x} + v \frac{\partial uh}{\partial y} + gh \frac{\partial z}{\partial x} + guh \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} - \Omega vh = v \nabla^2 uh + \frac{C_w \rho_a w w_1}{\rho_w H} h$$

$$\frac{\partial Vh}{\partial t} + u \frac{\partial Vh}{\partial x} + v \frac{\partial Vh}{\partial y} + gh \frac{\partial z}{\partial y} + gVh \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 H} + \Omega uh = v \nabla^2 Vh + \frac{C_w \rho_a w w_2}{\rho_w H} h$$

$$\frac{\partial (Hc)}{\partial t} + \frac{\partial (uHc)}{\partial x} + \frac{\partial (VHc)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (HE_x \frac{\partial c}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (HE_y \frac{\partial c}{\partial y}) + f(C) + S$$

式中: Z 为水位; H 为水深; u, V 为 x, y 方向的垂线平均流速. $\Omega=2\omega\sin\varphi$ 为地球自转偏心作用力的柯氏力系数, $\omega=2\pi/(24\times 3600)$ 为地球自转角速度(弧度/min), φ 为所在点的纬度. C 为河底对水流阻力作用大小的谢才系数; ν 为紊流涡粘性系数; ρ_a 为空气密度; ρ_w 为水体密度; W, W_1, W_2 为风速及其在 x, y 方向上的分量. C 为污染物水质浓度(mg/L); E_x, E_y 为 x, y 方向的紊动扩散系数和分散系数之和; $f(C)$ 为生化项; S 为外源负荷.

2.2 模型求解

该河段全长30.6km, 上端晓坝大桥附近河宽约1.4km, 河段在中部展宽, 最宽达2.3km, 下端安昌镇水文站附近河宽约1.0km. 首先把区域划分为 159×49 的网格, 网格沿河长方向大小为150–200m, 沿河宽方向为20–40m, 网格大小约为 $4.8\times 10^{-3}\text{km}^2$, 研究区域总面积为 30.6km^2 , 由于计算边界是单一区域, 网格的正交性保持较好. 同时将物理平面上的不规则区域经过坐标变换转换为计算平面上的规则区域, 并将模型方程也进行转换, 经过交错网格、剖开算子法求解可得区域内的流场和浓度场^[13].

2.2.1 自净系数 k 的估值方法 污染物自净系数 k 值可采用河流水环境质量平衡方程来确定, 具体如下^[14].

$$V \frac{dc}{dt} = C_p Q_p + W_0 - CQ - kCV$$

式中: V 为河流容积(m^3); C 为污染物浓度(mg/L); C_p 为污染物排放浓度(mg/L); Q_p 为废水排放量(m^3/a); Q 为出河流量(m^3/a); k 为自净系数(L/d); W_0 为河中现有污染物排入量(t/a).

利用绵阳市环境监测站 2005 年实测的数据可计算出 COD 自净系数 $k_{\text{COD}_{\text{Cr}}}$ 为 0.259 L/d, $\text{NH}_3\text{-N}$ 自净系数 $k_{\text{NH}_3\text{-N}}$ 为 0.112 L/d. 绵阳市环境监测站 2005 年实测的各排污口的排水量、COD 排放量、氨氮排放量以及水质实测资料等数据(表 1).

表 1 2005 年茶坪河排污口污染物入河量汇总
Tab. 1 River outfall summary volume of pollutants into Chaping River in 2005

排污口 编号	距离初始位置 (km)	排水量 (10^4t/a)	COD _{Cr} 排放 量(t/a)	NH ₃ -N 排放 量(t/a)	流量(m^3/s)		水质实测(mg/L)	
					河水	污水	COD	NH ₃ -N
06AA	0	3.00	9.31	2.80	2.3	1.1	14.16	0.13
06AB	16.8	3.90	8.76	3.58	2.0	1.1	13.98	0.26
06AC	18.9	73.50	34.30	14.35	2.3	2.1	24.15	1.16
06AC	18.9	14.00	9.40	5.01	2.3	0.9	14.26	0.63
06AD	19.4	6.00	30.60	3.81	2.2	2.0	22.80	0.33
06AE	20.8	11.80	9.11	4.09	1.9	1.2	14.12	0.58
06AF	21.2	12.50	10.21	6.02	2.1	0.9	17.43	0.77
06AG	21.5	12.60	11.15	7.13	2.1	0.9	18.96	0.83
06AH	21.7	31.60	18.70	9.35	2.4	1.2	20.15	0.93

2.2.2 风速的确定 根据绵阳市气象台站 2005 年实测资料(表 2). 本研究取 12 个月平均风速, 即 $w_{\text{平均}}$ 为 1.98 m/s.

表 2 2005 年各月的不同风向、风速 (单位: m/s)
Tab.2 Wind directions and wind speeds in different months in 2005

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
风向	NW	NW	NW	SW	NE	SW	NE	E	E	SW	SW	SW
风速	1.3	1.4	2.7	3.0	2.8	2.3	1.9	1.6	1.7	1.7	1.6	1.8

2.2.3 浓度场计算结果 茶坪河各监测断面水质 COD、NH₃-N 浓度场计算结果、实测值(图 2、图 3)。

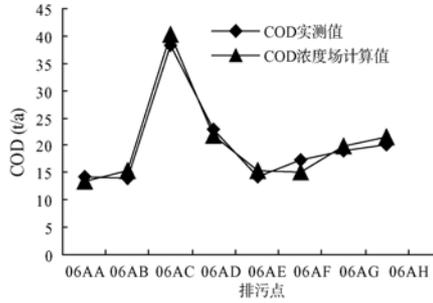


图 2 COD 实测值与计算值对比
Fig.2 Contrast between actual value of COD and calculated value of COD

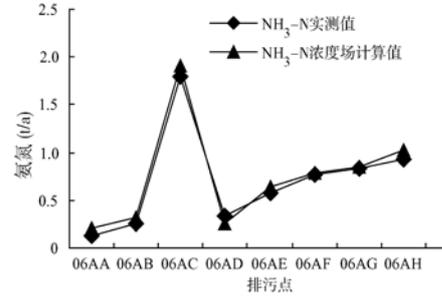


图 3 NH₃-N 实测值与计算值对比
Fig.3 Contrast between actual value of NH₃-N and calculated value of NH₃-N

3 水环境容量的计算

3.1 计算条件

3.1.1 水功能区划和水质保护目标 根据《涪江绵阳段地表水环境功能区划表》，涪江二级支流茶坪河为二级功能区，主要为饮用水源区、渔业用水区、工业用水区和农业用水区。水质保护目标为Ⅲ类。

3.1.2 控制污染物指标 由于该河段主要为有机污染，主要超标项为 NH₃-N 和 COD_{Cr}，因此本文选取具有代表性的 COD_{Cr} 和 NH₃-N 作为该河段的污染物控制指标。

3.1.3 水文设计条件的确定 收集绵阳市 30 处雨量站资料，其中资料最早的为 1991 年，至统计水平年(2005 年)，系列长达 14a，资料最短的也有 6a。本次水文设计条件推算的具体步骤为^[15-16]：(1)通过长序列的雨量资料，分析出降雨量典型年；并利用通用的经验公式，推求年径流变差系数 C_{vv} 值。(2)根据 $C_s=2C_{vv}$ 查 P—Ⅲ型曲线，求出径流设计频率 K_p 值。(3)利用 K_p 值，根据公式计算设计年径流深 h_p 。(4)利用以上参数，以 $C_s=2C_{vv}$ ，可得不同保证率下不同集雨面积每 km² 的径流量。(5)根据该河流的集雨面积计算该河流不同频率下的年径流量。水深、河宽根据断面的实测资料推算求得。

3.2 入河排污口概化

在水环境容量计算中，排污口的位置是极其重要的，因为它直接影响容量计算的结果。为了测算的准确，必须确保沿河排污口的分布格局保持不变。本次研究将距离很近的几个排污口概化为一个排污口，概化后的排污口位置为^[17-18]：

$$X=(Q_1C_1x_1+Q_2C_2x_2+\dots+Q_iC_ix_i+\dots+Q_nC_nx_n)/(Q_1C_1+Q_2C_2+\dots+Q_iC_i+\dots+Q_nC_n)$$

式中： X 为概化后的排污口距离下一个控制断面的距离(km)； x_i 为第 i 个排污口距离下一个控制断面的距离(km)； Q_i 为第 i 个排污口的废水排放量(t/a)； C_i 为第 i 个排污口的污染物浓度(mg/L)。

3.3 确定模型

水环境容量为一定水体在规定的水环境目标下所能容纳的污染物最大负荷，从环境容量组成来划分，可分为自净容量和稀释容量两部分^[19]。本文的水环境容量指的是可分配的水环境容量。因茶坪河的水文条件以及各污染源主要为工业、生活污染源，污染物变化量较小，可假设排入河流中的污染物质不随时间变化，故可采用一维水环境容量计算模型，公式为^[20-21]：

$$W_i=31.54(C \cdot e^{\frac{k_1x}{86.4u}} - C_i) \cdot (Q_i + Q_j)$$

式中： W_i 为第 i 个排污口允许排放量(t/a)； C 为沿程浓度(mg/L)； C_i 为河段第 i 个节点处的水质本底浓度(mg/L)； k_1 为污染物衰减系数，即耗氧系数(L/d)； Q_i 为河道节点后流量(m³/s)； Q_j 为第 i 节点处废水入河量(m³/s)； u 为第 i 个河段的设计流速(m/s)； x 为计算点到第 i 节点的距离(m)。

3.4 耗氧系数 k_1 的估值

确定 k_1 值的方法有多种, 该研究主要采用实验室测定法. 实验室测定 k_1 值的基本方法是对所研究的河段取水样, 用 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的标准测定方法, 在 20°C 条件下, 做出 1-10d 时间序列培养样品, 分别测定 1-10d 的 COD 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度值, 对取得的实验室数据用最小二乘法换算成实际河流的耗氧系数. 该研究是在安昌镇水文站取水样, 测出的 COD 的 k_1 值为 0.33L/d (实验室测定的结果为 0.17L/d), $\text{NH}_3\text{-N}$ 的 k_1 值为 0.14L/d (实验室测定的结果为 0.10L/d). 该研究确定的 k_{COD_c} 为 0.25L/d , $k_{\text{NH}_3\text{-N}}$ 为 0.12L/d .

3.5 测算结果

通过对安县非点源调查, 即将非点源分为农村生活污染源、农田径流污染、矿山径流(固体废物)污染源、入河排污口 4 类进行调查, 运用调查、分析、类比等方法得到全县的非点源排放总量. 根据最终结果可知, 安县非点源污染源所排放的 COD_c 占排放总量的 5.78%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 占总排放量的 6.54%. 在此次水环境容量测算中, 将沿河面源污染物入河量作为茶坪河水体的污染物背景值考虑在内, 即茶坪河的水环境容量只反映可控点源的计算结果.

将表 1 数据代入一维水环境容量的计算公式可得茶坪河水环境容量, 得其 06AA、06AB、06AC、06AD、06AE、06AF、06AG、06AH 点环境容量计算值 COD 分别为 12.39 t/a 、 11.26 t/a 、 24.98 t/a 、 20.45 t/a 、 11.96 t/a 、 13.23 t/a 、 15.36 t/a 、 14.33 t/a , $\text{NH}_3\text{-N}$ 分别为 3.96 t/a 、 5.32 t/a 、 10.36 t/a 、 4.21 t/a 、 3.23 t/a 、 4.12 t/a 、 5.63 t/a 、 6.12 t/a ; 06AC、06AD、06AH 排污点削减量 COD 分别为 18.72 t/a 、 10.15 t/a 、 4.37 t/a , 06AC、06AE、06AF、06AG、06AH 点削减量 $\text{NH}_3\text{-N}$ 分别为 9.00 t/a 、 0.86 t/a 、 1.90 t/a 、 1.50 t/a 、 3.23 t/a .

由上可知该河流最大允许排放量 COD 为 123.96 t/a 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 42.95 t/a , 实际入河量 COD 为 141.64 t/a 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 56.14 t/a , 已经超过流域的水环境容量, 导致茶坪河水质状况较差, 水质保护目标已超过 III 类. 要达到控制目标, 该流域今后污染物的削减量 COD 至少为 33.24 t/a 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 至少为 16.49 t/a . 而 06AC(安县罗浮山温泉度假有限公司、安县浮山集团水泥总厂)排污口的 COD 排放量为 43.70 t/a , 占总排放量的 30.9%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 排放量为 19.36 t/a , 占总排放量的 34.5%, 所以该流域的水污染控制应重点整治该排污口所排放的污水, 同时兼顾其他排污口的防治.

4 结果分析与总量控制对策

4.1 结果分析

1) 该研究采用二维浅水水动力学—水质模型方程组进行茶坪河水质浓度场分析, 计算了 2005 年茶坪河各监测断面的 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度场, 从图 2、图 3 可看出每个图形的两条曲线都接近重合, 说明该模型求解水质浓度场是有效的.

2) 茶坪河沿岸各个排污点排入该河的污水以工业废水和生活污水为主, 2005 年污水排放量已达到 $168.9 \times 10^4\text{ t/a}$, 主要特征污染物 COD 排放量为 141.64 t/a , $\text{NH}_3\text{-N}$ 为 56.14 t/a .

3) 考虑绵阳市安县地区的水系特点, 选择一维水环境容量计算模型, 采用此方法计算绵阳市安县北部地区在保证茶坪河入口水质达到 III 类水质功能要求下, COD 允许排放总量为 123.96 t/a , $\text{NH}_3\text{-N}$ 允许排放总量为 42.95 t/a , 为该区域的经济发展规划和水环境治理提供了科学依据.

4) COD 主要超标点为 06AC、06AD、06AH, 超标量为 18.72 t/a 、 10.15 t/a 、 4.37 t/a ; $\text{NH}_3\text{-N}$ 主要超标点为 06AC、06AE、06AF、06AG、06AH, 超标量为 9.00 t/a 、 0.86 t/a 、 1.90 t/a 、 1.50 t/a 、 3.23 t/a . COD 总削减量至少为 33.24 t/a , $\text{NH}_3\text{-N}$ 总削减量至少为 16.49 t/a , 而 06AC 点 COD 排放量占总排放量的 30.9%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 排放量占总排放量的 34.5%, 所以应重点整治该排污点.

5) 由于排入茶坪河的生活污水占总量的 51.2%, 故其 BOD_5 、粪性大肠菌群的排放量可能远超过 III 类水质标准所规定的正常值, 应该引起注意, 并需加强对水域中 BOD_5 、粪性大肠菌群污染因子的问题的研究.

4.2 总量控制对策

污染物排放总量控制是改善区域环境质量的重要举措和途径. 实施污染物排放总量控制, 将促进资源节约, 产业结构优化, 技术进步和污染治理, 推动经济增长方式转变^[12]. 经以上计算可知, 根据该流域

的水功能区划及该地区的经济水平,需在现有基础上削减上游地区 COD 排放总量 23.5%、NH₃-N 排放总量 29.4%,该流域 COD 和 NH₃-N 超标相对比较严重,若要保证该河流水质达到 III 类水质标准,就须采取以下措施扩大水环境容量.

4.2.1 河道整治 绵阳市安县地区农业生产发达,土地利用率高,耕作强度大,水土流失相对较为严重,在所研究的地区主要河流都存在河道淤积的问题.在区域范围内,应对河道进行清淤疏浚,增加河水流速及流量,提高河流水体的自净能力,扩大水环境容量,同时通过清除河底污泥,可消除河底污泥中的沉积物对水体的二次污染.

4.2.2 工业污染控制 茶坪河沿岸工业污染源以水泥厂、化工厂为主,应实现茶坪河沿岸工业废水达标排放,进一步削减工业污染物的排放总量.特别是 06AC、06AH 排污口,要在此建立排污权帐户,实施排污权交易,确保 COD_{Cr}、NH₃-N 排放量在允许范围内.并针对茶坪河目前这种污染状况,应按国家环保要求,坚持治污设施的正常运行,大力推行清洁生产,改进生产工艺,循环利用水资源和废原料,削减各企业行业的排污量,以实现企业污染源全面达标排放.

4.2.3 生活污染控制 建议加快建设安县北部城镇污水处理厂,处理工艺应包括除磷脱氮设施.进一步完善城镇污水收集管网,临河工业实施中水回用,减少污水排放量.因安县罗浮山温泉度假有限公司污水排放量占总量的 43.5%,故需在罗浮山度假区新建一座污水处理厂,收集处理度假区内的生活污水,使其 COD_{Cr} 和 NH₃-N 的排放量控制在允许范围内.

5 参考文献

- [1] 喻 良,刘遂庆,王牧阳.基于水环境模型的水环境容量计算的研究.河南科学,2006,24(6): 874-876.
- [2] 郭 森,韩保新,杨 静等.纳污海域水环境容量计算与总量分配方法研究.环境科学与技术,2006,29(8): 19-22.
- [3] 李鹏书,张文志.东江干流惠州市区段水环境容量计算及分析.人民珠江,2006,(3): 53-54.
- [4] 张永良,洪继华,夏 青等.我国水环境容量研究与展望.环境科学研究,1988,1(1): 73-81.
- [5] 张永良,刘培哲主编.水环境容量综合手册.北京:清华大学出版社,1991: 138-145.
- [6] 鲍全盛,王华东,曹利军.中国河水环境容量区划研究.中国环境科学,1996,16(2): 87-91.
- [7] 王中琪.涪江中游沿岸某单位的生活水质监测分析.西南工学院学报,1999,14(4): 51-55.
- [8] 陈燕华,李彦武,牟海省等.长江九江段水环境容量研究.环境科学研究,1994,7(1): 24-29.
- [9] 崔建国,康勇锋,孙建星.漳泽水库水环境容量及水污染控制方案研究.太原理工大学学报,2006,37(3): 366-368.
- [10] 姜海萍,汪德耀.珠江河口治理工程对水环境容量的影响研究.河海大学学报,2001,29(1): 93-95.
- [11] 王玉敏,周孝德,李家科.湖泊水环境容量迭加计算方法研究.干旱区资源与环境,2005,19(6): 108-112.
- [12] 于乃利,王爱杰,单德鑫.小河水环境容量测算与容量总量控制.东北农业大学学报,2006,37(2): 219-224.
- [13] 冯民权,周孝德,赵克玉.湖泊平面二维水流与水质分布研究.中国水力学,2002: 183-190.
- [14] 安贞煜,曾光明,张硕辅等.疏浚对洞庭湖水环境容量的影响分析.湖泊科学,2006,18(5): 509-514.
- [15] 关 卉.湛江市水环境容量测算.水资源保护,2006,22(3): 78-80.
- [16] 王素娜,吕 军,王世界.曹娥江上游支流水环境容量的研究.农机化研究,2006,(9): 198-201.
- [17] 单中超,朱焕山,刘佳宁.抚西河流域水环境容量测算.环境保护科学,2004,30(4): 24-25.
- [18] 于国荣.潼关—三门峡段水质浓度及污染物削减量计算.人民黄河,2006,28(6): 37-39.
- [19] 罗 缙,罗清吉,林 颖等.太湖流域平原河网区往复流河道水环境容量研究.河海大学学报,2004,32(2): 144-146.
- [20] 吴 丹,李 薇,肖锐敏.水环境容量与总量控制在制定排放标准中的应用.环境科学与技术,2005,28(2): 48-50.
- [21] 关 卉.九洲江广东段水环境容量研究.水资源保护,2003,(2): 20-21.