

QUAL2E 模型在呼和浩特市水质模拟中的应用

陈家军,于艳新,李 森

(北京师范大学环境科学研究所环境模拟与污染控制国家重点联合实验室 北京 100875)

摘要 呼和浩特市的地表水系由黄河干流和支流组成,以支流为主,整个地表水系统呈树枝状分布,水质污染严重。建立了呼和浩特市的水质模型,选用 BOD₅、COD_{Mn} 作为模拟污染指标,给出模型关键参数的确定方法,应用 QUAL2E 模型进行河流水质模拟分析,检验 QUAL2E 模型参数。模拟结果表明,模型合理有效,能很好地描述河流的水质状况,可进一步为水环境规划提供有利工具和科学的参数依据。

关键词 水质模型;模拟;地表水系统;QUAL2E 模型

中图分类号:X824 文献标识码:A 文章编号:1004-693X(2004)03-0001-04

QUAL2E 模型使用有限差分方法求解包括反应机制在内的对流-弥散物质输移方程,可用于充分混合的树枝状河流,能模拟多种水质组分,在全世界得到广泛的应用。国内 QUAL2E 模型在有关文献中^[1-4]早有介绍,但在我国的实际水质模拟中应用较少,且应用河段为单一的线状河段^[5,6]。呼和浩特市地表水污染较为严重,尤其是接纳了大部分生活污水和工业废水的市区更为严重。因此有必要应用 QUAL2E 模型进行河流水环境模拟分析,检验 QUAL2E 模型,为河流水污染控制规划提供科学依据。本研究将 QUAL2E 模型应用于呼和浩特市树枝状河流的水质模拟中,并给出模型一些关键参数,如 BOD₅、COD_{Mn} 衰减系数的确定方法。模拟结果显示 QUAL2E 模型合理有效,能很好地描述河流的水质状况。

1 地表水系统及水环境

1.1 地表水

呼和浩特市地表水系统由黄河的不同级支流及流经该市的一部分黄河干流组成。黄河的不同级支流分别为大黑河、小黑河、什拉乌素河,以及浑河的一部分干流,但浑河距离市区相对较远。呼和浩特市地表水系分布见图 1,基本情况见表 1。

历史上,呼和浩特市公共饮水和工业生产用水取自地下水,由于地下水资源并不充足,农业用水使用地表水,但地表水的利用受引水能力的限制,除汛期之外,河流中的水(包括城市污水处理厂处理后的水)全部用于农业灌溉。随着城市规模的扩大、人

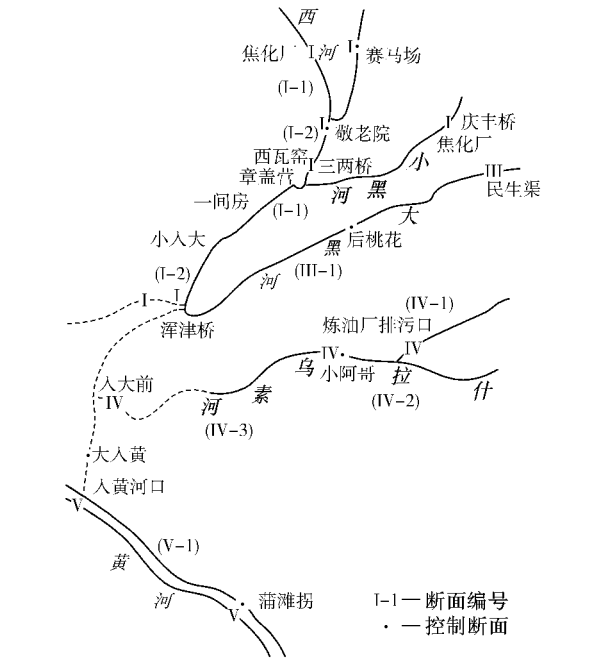


图 1 呼和浩特市地表水系分布

表 1 河流水文情况汇总

河流名称	境内长度/km	平均径流量/(万 m ³ ·a ⁻¹)
黄 河	102.5	24 800.20
大黑河	114.4	300.60
小黑河	48.0	70.34
什拉乌素河	72.1	12.08
西 河	18.0	33.11

口的增长和经济的发展,地下水资源很大程度上不能满足城市生产、生活的需要,处理能力和实际排污量的矛盾也日益突出,城市某些河段的水甚至不能用于灌溉,水污染问题非常严重。

1.2 污水排放与污染源分布

呼和浩特市市政污水排放系统为 :中心城区以西河为界 ,西河以西区域污水经管网流至西河后汇入小黑河 ,西河以东区域污水经管网进入污水处理厂 ,处理后排入小黑河。来自如意开发区、污水处理厂、小黑河、金川开发区及电厂的废水先进入小黑河 ,然后在浑津桥汇入大黑河。石化工业区生产污水排入什拉乌素河 ,生活污水进入大黑河。呼和浩特市只有 1 座处理级别为一级的污水处理厂 ,处理能力 5 万 t/d ,不能满足城市污水处理的需要 ,大量污水经提升后直接外排。

根据几年的分析结果 ,呼和浩特市废水排放量为 21.9 万 t/d ,其中 ,工业废水排放量为 9.9 万 t/d ,生活污水排放量为 12 万 t/d ,废水排放量及排放途径见表 2。

表 2 废水排放途径及排放量

区域	主要排放途径	排放量(万 t·d ⁻¹)	纳污河道
中心城区	污水厂	11	小黑河
	西 河	9.6	小黑河
金川开发区	乌素图河		小黑河
如意开发区	哈拉沁河	0.28	小黑河
电 厂	小黑河	0.54	小黑河
石化工业区	大黑河	0.15	大黑河
	什拉乌素河	0.52	什拉乌素河

1.3 地表水水质现状

根据呼和浩特市水功能区划 ,大黑河水系以 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅴ类水为控制标准。通过对呼和浩特市境内大黑河水系各河流不同断面、不同水期 11 个监测项目(pH 值、COD_{Mn}、BOD₅、NO₂-N、挥发酚、氰化物、As、Cr⁶⁺、Pb、Cd、油类)1993 年的监测数据进行评价和计算分析 ,除黄河河口水质所有指标达标外 ,其余各河流水质均超标 ,西河、小黑河污染尤为严重 ,COD_{Mn} 超标十几倍 ,BOD₅ 近十倍 ,西河的挥发酚污染也相当突出 ,各河流不同水期综合污染指数相差无几。河流各断面污染程度随纳污量的增加变化很大 ,较突出的污染指标有 :COD_{Mn}、BOD₅、挥发酚和油类。根据 1996 ~ 1998 年呼和浩特市地表水水质监测数据 ,绘制出各断面的 COD_{Mn}、BOD₅ 质量浓度和沿不同河流纵向断面的剖面浓度图(见图 3 ~ 6)。从小黑河—大黑河河流纵向剖面 BOD₅ ,COD_{Mn} 质量浓度分布来看 ,上下游 BOD₅ ,COD_{Mn} 质量浓度高 ,恰与该段为河流的主要纳污河段相一致 ,城市生活污水及工业废水主要在该段排放 ;下游入黄河口处浓度低 ,说明河流在此处流量大 ,稀释净化能力增强。西河—小黑河—大黑河纵向断面显示污染指标从上游至下游逐渐减小 ,说明上

游西河污染已相当严重 ,这也正与西河为呼和浩特市城市生活污水和工业废水的集中排放段相符。

2 水质模型与模拟

根据对呼和浩特市河流的水文和水污染特征的调查分析 ,确定采用应用最为广泛、技术上最为成熟的综合一维河流水质模型 QUAL2E ,以确保模型的可靠性、实用性。

2.1 模拟原理

QUAL2E 水质模型是一种全面的多用河流水质模型 ,可模拟多达 15 种水质组分 ,适用于充分混合的树枝状河流。它可以以稳态流或似动态流运行 ,有时称为似动态模型。当用作稳态流时 ,可以用来研究污染(大小、质量、位置)对水质的影响 ;以非稳态流方式运行时 ,可以研究在不同数据条件下水质的逐日变化情况(主要是 DO 和温度) ,也可研究藻类生长的复氧作用产生的 DO 变化情况。在动态模拟中 ,QUAL2E 水质模型缺陷是不能模拟上游水流或点负荷。综合一维水质模型的基本形式是一维对流-弥散方程

$$A_x \frac{\partial C}{\partial t} dx = \frac{\alpha A_x D_x \frac{\partial C}{\partial x}}{\partial x} dx - \frac{\alpha A_x u C}{\partial x} dx + S \tag{1}$$

式中 :C 为水质组分的浓度 ,mg/m³ ;A_x 为河流断面的面积 ,m² ;D_x 为纵向弥散系数 ,m²/d ;u 为纵向平均流速 ,m/s ;S 为水质组分的源项 ,mg/d ;dx 为微小河段的长度 ,m。

在 QUAL2E 模型中^[7 8] ,河段划分为若干个计算单元 ,每个计算单元根据水流均衡、热均衡和物质均衡列出相应的方程。在物质均衡中既考虑对流也考虑弥散。每一计算单元的物质由于输移、废水排放和提取而增加或减少 ,也可因内部过程的源或生物转化而增加或减少。

假定模型的主要输移机制是对流和弥散 ,主要发生在水流的主方向上(即河流或渠道的纵轴方向上)。模型考虑了多个废水排放口、取水口、支流和流入流出量的增加 ,能计算出由于流量增加产生的稀释作用 ,以满足预先规定的 DO 水平。

从水力学角度来看 ,QUAL2E 模型限于模拟河流流域水量和输入的污染负荷基本不变的时段。河流的平均流速和流量、水深和流量之间的关系为^[7] :

$$\bar{u} = \alpha Q^\beta \tag{2}$$

$$d = \gamma Q^\delta \tag{3}$$

本模型涉及的参数包括 :纵向弥散系数 D_x ; BOD₅ 衰减系数 K₁ ,1/d ;COD_{Mn} 衰减系数 K₂ ,1/d ;流

速与流量关系系数 α, β 水深和流量关系系数 γ, δ 。

QUAL2E 模型在模拟时,输入的数据有 3 类:
①河流系统量,即几何数据,包括河段数、河段名称、各河段长度、计算单元长度等;②全局变量,即水力数据,包括各河段上、下游流量、点源排放量、流速与流量的关系、水深与流量的关系等;③强制函数,即水质数据,包括 D_x 与 u_x 关系、 K_1 、 K_2 等。

对于源项 模拟 BOD₅ 时

$$S = K_1 C \tag{4}$$

模拟 COD_{Mn} 时

$$S = K_2 C \tag{5}$$

QUAL2E 模型中,河流系统被分成河段,每个河段具有相同的水力特性,每一河段又进一步划分为长度相等的计算单元。计算单元有 7 种类型(上游单元、标准单元、连接点上游单元、连接单元、下游单元、点源和取水单元),河段是绝大多数输入数据的基础。当输入各河段流量时(对某具体河段,流量认为是定值),可根据流量与流速及水深的关系求出具体河段的流速及断面面积,带入式(1)就可以由有限差分法求解各浓度值。各参数确定公式和方法如下。

2.1.1 纵向弥散系数 D_x

假设河流只有纵向浓度梯度,对于狭窄河渠采用 Elder 经验公式^[7]

$$D_x = Kdu^* \tag{6}$$

式中: K 为弥散常数,其经验平均值为 5.93; d 为平均河深, m ; u^* 为平均剪切流速, m/s 。

而对于宽阔河渠采用经验公式^[7]

$$D_x = 3.82Kn\bar{u}d^{5/6} \tag{7}$$

式中: n 为曼宁粗糙系数; $\bar{u}$ 为河段平均流速, m/s 。

2.1.2 COD_{Mn}、BOD₅ 衰减系数 K_2 、 K_1

a. 实验室方法。利用实验室中测定 BOD₅ 和时间的关系数据,可以估计 K_2 值和 K_1 值。

根据已有的数据,从 BOD₅ 反应动力学出发,用最小二乘法计算,可估出 K_1 值。

最小二乘法是根据回归线的耗氧量值和实测耗氧量值的差,取平方和最小来决定所求的回归线,再利用包士柯(K. Bosko, 1966)计算方法,计算 BOD₅ 衰减系数 K_1

$$K_1 = K_c + \eta \frac{u_x}{d} \tag{8}$$

式中: u_x 为河流平均流速, m/s ; η 为河床的活度系数,通常与河床的坡度有关。

b. 野外现场监测法。可按式(9)计算

$$K_1 = \frac{1}{t} \ln \frac{L_A}{L_B} \tag{9}$$

式中: L_A, L_B 分别为河流上游断面 A 和下游断面 B 处的 BOD₅ 质量浓度, mg/L ; t 为两个断面间水的流动时间, s 。

2.1.3 流量系数 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$

根据式(2)(3)和历史观测数据计算。

2.2 水质模拟

本次模拟的主要污染指标为 BOD₅、COD_{Mn}。模拟的范围以呼和浩特市为主,包括部分郊区,模拟的河流有西河、小黑河、大黑河。考虑到模拟范围和污染监测断面数量的限制,确定西河、小黑河和大黑河统一模拟,模拟的下界定位为浑津桥(根据 QUAL2E 模型的要求,概化河流系统如图 2 所示)。

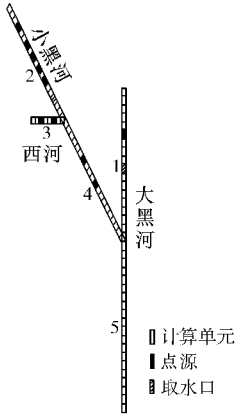


图 2 呼和浩特市水系河段划分

稳态水质模拟能预测每个河段污染指标浓度的空间分布, BOD₅、COD_{Mn} 的衰减系数由式(9)确定。河段的选择上要考虑河段的条件比较简单,仅为没有排水口和取水口,为此,选定从章盖营至一间房河段,输入数据见表 3。

对于源项的处理,河流上污水排放量大而排放口集中的污染源处理成点源;对于排放口相对分散的污染源则处理成线源或概化成集中的点源。模拟中的源项数据见表 4。

运行 QUAL2E 模型对呼和浩特市进行模拟,模拟结果以及模拟浓度值与实测浓度值的对照见图 3~8。

从模拟结果可以看出,污染指标质量浓度的模拟值与实测值基本吻合,说明 QUAL2E 模型能很好地描述水质组分的真实值。另外,模拟结果还表明选取的参数及参数的确定方法是适用的,进一步证明了模型的可靠性。

3 结 论

呼和浩特市河流具有规模小、呈树枝状分布的特征,且污染严重,可以认为水流在横断面上充分混合。根据呼和浩特市河流水文、水质条件建立呼

表 3 呼和浩特市水质模拟的主要输入数据							
河段 编号	河段 名称	河段 长度 /km	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)			点源 排放量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	取水口 取水量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
			上游	下游	增加		
1	大黑河	18.0	3.10	1.78	-0.837	0.0173	-0.5
2	小黑河	19.0	1.52	3.40	0.827	1.5527	-0.5
3	西 河	8.0	0.15	2.96	2.270	0.5450	0
4	小黑河	16.0	3.64	3.84	0.115	0.0850	0
5	大黑河	20.0	5.62	3.40	-2.220	0	0

河段 编号	河段 名称	α	β	γ	δ	曼宁系 数 n	D_x ($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)
1	大黑河	0.14	0.39	0.33	0.36	0.03	160
2	小黑河	0.38	0.37	0.16	0.81	0.04	20
3	西 河	0.25	0.30	0.36	0.09	0.04	20
4	小黑河	0.22	0.30	0.13	0.36	0.04	20
5	大黑河	0.36	0.44	0.10	0.92	0.03	160

河段 编号	河段 名称	K_1/d^{-1}	K_2/d^{-1}	BOD ₅ 质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		COD _{Mn} 质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	
				上游 河段	增加 水量	上游 河段	增加 水量
1	大黑河	0.45	0.01	8.50	16.0	9.16	12.3
2	小黑河	3.32	3.20	13.00	18.2	8.42	12.0
3	西 河	1.97	8.60	60.20	38.8	48.70	27.6
4	小黑河	1.06	3.20		52.4		39.6
5	大黑河	3.66	0.01				

表 4 点源和取水口取水的 BOD ₅ 、COD _{Mn} 质量浓度					
河段 编号	点 源		取 水 口		
	种类	BOD ₅ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	COD _{Mn} ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BOD ₅ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	COD _{Mn} ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
1	石化小区 生活污水	280	460	40	60
	如意开发区 生活污水	280	460	65	100
2	啤酒厂废水	90	402		
	棉纺厂废水	90	184		
	造纸厂废水	80	180		
	污水厂废水	92	241		
3	化工化纤 厂废水	87.95	143.82		
	沿河工业和 生活废水	61.72	163.27		无取水口
4	电厂废水	100	190		
	金川开发 区废水	280	460		无取水口
5	无点源				无取水口

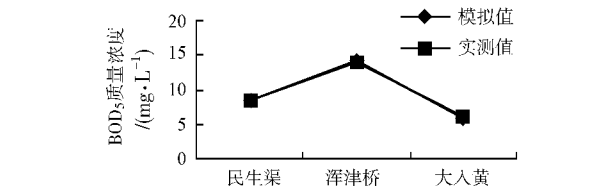


图 3 大黑河断面 BOD₅ 拟合对比

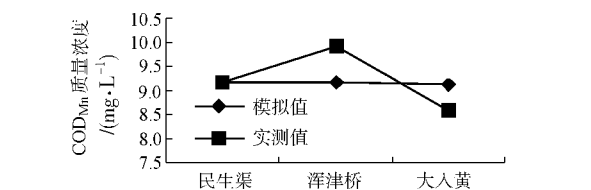


图 4 大黑河断面 COD_{Mn} 拟合对比

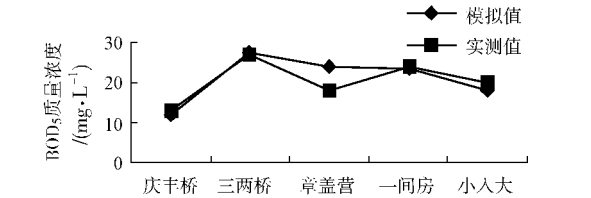


图 5 小黑河断面 BOD₅ 拟合对比

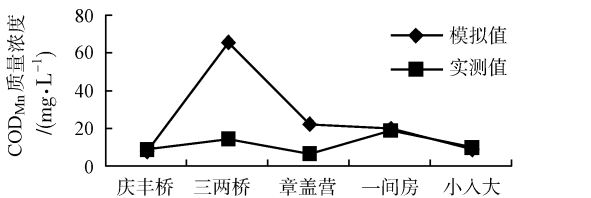


图 6 小黑河断面 COD_{Mn} 拟合对比

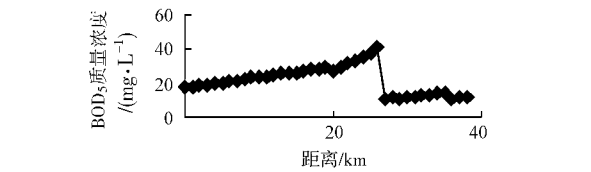


图 7 小黑河沿程 BOD₅

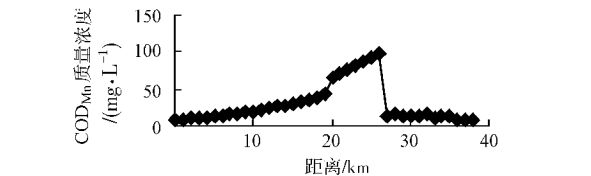


图 8 小黑河沿程 COD_{Mn}

和浩特市地表水模拟系统。

a. 应用 QUAL2E 模型模拟 ,以 BOD₅、COD_{Mn}为模拟组分 ,给出模型中关键参数如 BOD₅、COD_{Mn}衰减系数的确定方法 ,进一步证明模型的适用合理。模拟结果表明 ,QUAL2E 模型合理有效 ,能很好地模拟河流水质状况 ,该研究是国内 QUAL2E 模型应用于树枝状河流的有益实践尝试。由于目前国内缺少这方面的经验 ,因此 ,该研究可以作为 QUAL2E 模型应用的参考。

b. 应用 QUAL2E 模型对呼和浩特市主要污染指标的迁移进行模拟分析 ,可为污染指标的排放与河流水质提供定量的关系。

c. 通过模拟不同的流量或流速可以得出不同的污染指标浓度 ,从而可确定河流最大允许污染指标的排放浓度 ,进行河段水体的纳污优化分配。

d. 通过模拟分析所得参数结果 (下转第 25 页)

表 1 湘江衡阳市段各功能区的最大纳污能力、控制排放量和削减量

功 能 区	最大允许纳污量/(t·a ⁻¹)		现状排放量/(t·a ⁻¹)		控制排放量/(t·a ⁻¹)		削减量/(t·a ⁻¹)	
	COD	NH ₃ -N	COD	NH ₃ -N	COD	NH ₃ -N	COD	NH ₃ -N
衡阳城南区饮用、工业用水区	13 114	3 694	17 690	1 900	13 114	1 900	4 576	0
合江套排污控制区	16 750	1 548	18 560	1 750	16 750	1 548	1 810	202
衡阳耒河口—站门前过渡区	4 767	1 194	1 960	440	1 960	440	0	0

别相应的取值范围内 综合考虑与其相邻的上、下游功能区的相互关系 原则上不低于现状水质 ①各河段内的 C_0 值采用上一个功能区的控制目标 C_s 值 ; ②各功能区的 C_s 值 ,既要满足各功能区的水质要求 ,又要充分考虑该功能区的实际排污情况 ,所以 ,必须确定适当的水质控制目标值 C_s 。

2.2.5 水体纳污能力

运用上述方法和确定的参数 ,计算出湘江衡阳市段各功能区水体 COD 的最大允许纳污能力分别为 13 114 ,16 750 ,4 767 t/a ,NH₃-N 的最大允许纳污能力分别为 3 694 ,1 548 ,1 194 t/a。

3 污染物总量控制方案

3.1 现状排放量的确定

根据 NH₃-N ,COD 排放量计算 2000 年每一功能区内入河排污口和支流口所汇集的各污染源现状排放量之和 ,即为该功能区的现状排放量。

3.2 污染物控制排放量

湘江衡阳城南区生活、工业用水区的 COD 的最大允许纳污量小于现状排放量 ,以最大允许纳污量控制 ,削减量为 4 576 t/a ;NH₃-N 的最大允许纳污量大于现状排放量 ,以现状控制 ,削减量为 0。

湘江合江套排污控制区的 COD 的最大允许纳污量为 16 750 t/a ,小于现状排放量 18 560 t/a ,以最大允许纳污量控制 ,削减量为 1 810 t/a ;NH₃-N 的最大允许纳污量为 1 548 t/a ,大于现状排放量 1 750 t/a ,以最大允许纳污量控制 ,削减量为 202 t/a。

湘江衡阳耒河口—站门前过渡区的 COD , NH₃-N 的最大允许纳污量均大于其现状排放量 ,以现状控制 ,削减量均为 0。湘江衡阳段各功能区最大纳污量、控制排放量、削减量列于表 1。

4 结 语

湘江衡阳市段 NH₃-N ,COD 的主要来源是衡阳市市区生活污水和工业废水。根据污染物总量控制方案 ,COD ,NH₃-N 的削减量分别为 6 386 ,202 t/a ,因此必须加大对 COD ,NH₃-N 等有机物的控制、处理力度 ,才能达到控制目标。应根据水资源保护法规 ,依法治水 ,建立统一、高效、协调的水资源保护管理体制

制 ,加强流域水资源管理 ,加强入河排污口设置的管理 ,结合水域功能 ,逐步开展对排污口设置的审批工作 ,加强水资源保护的舆论宣传和监督 ,注重水资源保护与管理的科学研究 ,努力实现水资源可持续利用 ,支持经济社会的可持续发展。

参考文献 :

[1] 方子云 . 水资源保护手册 [M] . 南京 : 河海大学出版社 , 1988 .
[2] 朱党生 , 王超 , 程晓兵 . 水资源保护规划理论及技术 [M] . 北京 : 中国水利水电出版社 , 2001 .
(收稿日期 2003 - 07 - 21 编辑 徐 娟)

(上接第 4 页)

如水力参数——流速与流量的关系和水深与流量关系、污染物扩散参数——纵向弥散系数以及污染物降解参数——COD_{Mn} ,BOD₅ 衰减系数 ,可进一步根据城市的环境规划进行水环境预测分析 ,为选择污染物削减和污染控制方案提供科学的依据。

参考文献 :

[1] 程声通 , 陈毓龄 . 环境系统分析 [M] . 北京 : 高等教育出版社 , 1990 . 74 ~ 77 .
[2] 付国伟 . 河流水质数学模型及其模拟计算 [M] . 北京 : 中国环境科学出版社 , 1987 . 174 ~ 180 .
[3] 陈肇和 , 孙颖 , 李志 , 等 . 河流及水库水质模型与通用软件综述 [J] . 水资源保护 , 2001 (2) : 7 ~ 11 .
[4] 李本纲 , 陶澍 , 曹军 . 水环境模型与水环境模型库管理 [J] . 水科学进展 , 2002 , 13 (1) : 14 ~ 20 .
[5] 洪继华 . QUAL2E 模型在中小河流研究中应用 [J] . 环境科学与技术 , 1998 (2) : 5 ~ 7 .
[6] Brown L C , Barnwell T O J . The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS : Documentation and user manual , EPA-600/3-87/007 [R] . Athens : U S Environmental Protection Agency , 1987 .
[7] U S EPA . QUAL2E windows interface user ' s guide , EPA/823/B/95/003 [R] . 1995 .

(收稿日期 2003 - 12 - 15 编辑 胡新宇)