

基于随机水质模型的水功能区 COD 超标风险分析

张浩^{1,2}, 季树凯³, 缪萍萍⁴, 孙凯艳⁵, 徐鹤⁶

(1. 海河流域水资源保护局, 天津 300170; 2. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098;

3. 天津水务投资集团有限公司, 天津 300200; 4. 水利部河北省水利水电勘测设计研究院, 天津 300250;

5. 海河流域水环境监测中心, 天津 300170; 6. 海河水利委员会 水资源保护科学研究所, 天津 300170)

摘 要: 由于水环境系统中存在诸多不确定因素, 建立在物理简化基础上的确定性水质模型并不能反映水质变化过程的不确定性。为了弥补确定性水质模型的局限性, 本文根据随机微分方程理论, 假设水质模型中的耗氧系数、沉降系数、复氧系数服从双侧截尾正态分布, 建立了考虑随机效应的水质模型。将模型应用于 COD 超标风险分析, 分别计算了不同水文、水质条件下 COD 浓度的概率分布。结果表明: 当三道营来水 COD 浓度为 16、17、18 mg/L 时, 超标概率为分别在 0.3、0.6、0.8 左右。

关键词: COD 浓度; 超标概率; 随机水质模型; 水功能区; 风险分析

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)02-0064-04

Study on risk analysis of COD exceed standard in water function zone based on stochastic water quality model

ZHANG Hao^{1,2}, JI Shukai³, MIAO Pingping⁴, SUN Kaiyan⁵, XU He⁶

(1. Water Resources Protection Bureau of Haihe River Basin, Tianjin 300170, China; 2. College of Hydrology and

Water Resoureces, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Tianjin Water Investment Group Co. Ltd, Tianjin

300200, China; 4. Hebei Reserach Institute of Survey & Design of Water Conservancy & Hydropower, Tianjin 300250, China;

5. Water Environmental Monitoring Center of Haihe River Basin, Tianjin 300170, China; 6. Water Resources Protection Science Research Institute, Haihe River Water Conservancy Commission, Tianjin 300170, China)

Abstract: Because of existence of many uncertain factors in water environmental system, the model established on the basis of the physical simple does not reflect the uncertainty of water quality and water quality change. In order to compensate the limitations of deterministic model of water quality, the paper supposed oxygen coefficient, sedimentation coefficient and reaeration coefficient to obey the doubly truncated normal distribution hypothesis in water quality model according to the theory of stochastic differential equation, and set up one-dimensional COD model considering random effect. The model was used to risk analysis of COD exceed the standard. The paper calculated the probability distribution of COD in different condition. The result showed that when the COD is 16, 17, 18 mg/L, the risk probability over standard is about 0.3, 0.6, 0.8.

Key words: COD; exceed the standard probability; stochastic water quality model; water function zone; risk analysis

水质模型是用来模拟水体中污染物的物理、化学和生物的变化过程的数学模型, 总体上可分为确定性水质模型和不确定性的随机模型。目前, 确定性水质模型已被广泛地应用于水资源保护的各个方面, 唐迎洲等^[1]实现了三级联解平原河网水动力模型与

WASP5 水质模型的耦合, 使之可以应用于平原河网水环境的模拟, 并把研究成果运用到实际引调水工程中去, 模拟引调水工程中不同实施方案下的环境效益; 朱茂森^[2]根据辽河流域的特点, 在水动力模型的基础上建立河流一维水质模型, 用于模拟污染物在水

收稿日期: 2014-09-15; 修回日期: 2015-03-12

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07203-008); 国家国际科技合作专项资助(2013DFA71340)

作者简介: 张浩(1986-), 男, 山东滕州人, 硕士, 工程师, 主要从事水资源管理与保护、水生态治理与修复工作。

体中迁移扩散和衰减的过程以及污水排放限值制定;金春久等^[3]在讨论松花江流域水资源保护管理工作的基础上,运用降雨径流模型、水动力学模型、污染物传输扩散模型耦合的松花江干流水质模型,并以2005年水污染事件数据进行验证,随后进行了水功能区管理、入河排污口监督管理、日常水质模拟等水资源保护管理中的应用研究;张菊等^[4]以松花江水污染事件为例,通过对出库流量的控制,结合水质模型调算,得出污染物消减的耗时及相应的河道水位情况,检验通过调度水库出库流量来稀释污染物时,其相应河道水位是否影响到河道的通航情况,从而确立水库应急调度总原则;徐智廷^[5]通过对临沂市水功能区基本情况分析和对一维S-P水质模型的概化,建立水体中污染物的排放与受纳水体水质之间的关系,在给定的功能区现状的和规划的水质目标、设计水量、水质背景条件、排污口位置及排污口排放方式的前提下,定量分析计算出水功能区纳污能力;房睿^[6]通过对玛纳斯河水质现状的监测,分析出玛纳斯河的主要污染物为氨氮、氟化物、氯化物等。根据水功能区划的水质类别及水功能区水质目标,运用模糊综合评判发概算出玛纳斯河的纳污能力。进一步提出提高纳污能力的对策,对超过最大纳污能力的污染因子进行削减,使污染物的浓度达标后排放;冯健等^[7]应用Preissmann四点隐式差分格式和空间交错网格隐式差分迎风格式建立了龙门至三门峡断面的一维水动力及水质模型,计算了周边水功能区水质达标情况下三门峡水库的水环境容量;潘建波等^[8]以概化的水资源配置系统网络图为依据,构建了基于节点水量平衡、功能区水质达标的一维水体纳污能力计算模型。以COD、NH₃-N为控制指标,针对流域水体类型、污染现状的不同,在合理确定水文条件、水质参数的基础上,对松花江流域的水体纳污能力进行了计算分析。

但是,大量实测资料表明,水环境系统是一个十分复杂的系统。由于污染物的排放量与河流背景值的随机性;估计模型参数所需的河流与其他水质资料的不充分;对污染物输移过程和水质管理系统的简化缺乏充分的认识等因素。建立在物理简化基础上的确定性水质模型并不能反映水质变化过程中存在的诸多不确定因素,具有一定的局限性。然而,不确定性水质模型的研究相对滞后,仍处于探索阶段,还没有成熟的、公认的不确定性水质模型软件问世。对于控制变量、系统参数出现随机干扰,不确定性因子较多或变化过程难以在确定性模型中进行解析化表达以及水文、水质资料的不完全或人为误差而导

致确定性水质模型无法正常使用时,不确定性理论的各种处理技术就表现出了较强的优势。因此,为了提高水质模型模拟精度与模拟结果的可靠性,深化对水环境本质的探讨,不确定性水质模型的研究具有重要的学科理论和实践意义。

1 随机水质模型的建立

化学需氧量(COD)是在一定的条件下,采用一定的强氧化剂处理水样时,所消耗的氧化剂量。通常作为衡量水中有机物质含量多少的指标。化学需氧量越大,说明水体受有机物的污染越严重,这些有机物污染的来源可能是农药、化工厂、有机肥料等。COD是目前水功能区限制纳污红线管理的重要指标之一,因此本文以COD为例,探索随机水质模型在水功能区COD超标风险中的应用。COD在河道中的降解过程可用如下一级动力学反应式描述:

$$\frac{dC}{dt} = -KC \quad (1)$$

式中: C 为COD浓度, mg/L; K 为COD的综合降解系数, 1/d; t 为研究河段的水流传播时间, d。

综合衰减系数反映了污染物在水体作用下降解速度的快慢,是计算水环境容量、水体纳污能力的重要参数,与河流的水文条件:如流量、流速、河宽、水深、泥沙含量等因素有关,还与河道的污染程度有关。由于受污染物排放规律、河流背景值、模型概化等因素的影响,COD的综合降解系数 K 可以看作随机变量。

于是,对(1)式积分,得到:

$$C = C_0 e^{-Kt} \quad (2)$$

式中: C_0 为COD初始浓度, mg/L。

国内外的一些研究表明,COD的综合降解系数 K 服从一种取值范围有界的双侧截尾正态分布^[9-10],其密度函数为:

$$f(k) = \frac{d}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\frac{-(k-u)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

式中: d 为截尾系数; u 、 σ 分别为 K 的均值和方差。

利用Monte Carlo法在上述模型里生成随机样本,可得到随机水质模型的解。

2 模型的应用

水功能区划是水资源保护的基本单元,对指导水资源开发利用和保护有着重要意义。省界缓冲区是流域机构开展水功能区管理工作的重点,对协调上下游水资源保护和合理开发利用起到重要作用,

本文选择黑河冀京缓冲区对模型进行了验证,黑河发源于河北沽源,入北京市延庆县,南流与白河汇合,注入密云水库,是北京重要供水水源之一,全长 92.5 km。黑河冀京缓冲区由河北省三道营断面起,至北京市白河口断面止,全长 20 km,水质目标为Ⅱ类(COD 浓度不大于 15 mg/L)。

水功能区设计流量采用黑河三道营站 50%、75%、90% 保证率下的年平均流量;起始断面 COD 浓度依次取 16、17、18 mg/L;随机系数 K 的均值和方差根据海河流域水环境监测中心多次实测资料率定,考虑到不同来水保证率下 K 值的差异,对 K 值进行如下修正:

$$K' = K + \Delta K$$

(4)

$$\Delta K = \alpha \frac{V}{H}$$

(5)

式中: K' 为修正后的综合降解系数; ΔK 为修正数; α 为 0 ~ 0.6 的常数; V 为断面平均流速, m/s; H 为断面平均水深, m。

根据不同保证率下的流速和水深,对实测降解系数的修正结果见表 1。

表 1 降解系数修正表					
$P / \%$	$Q /$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	$V /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	H / m	α	ΔK
50	3.44	0.65	0.25	0.100	0.260
75	2.10	0.57	0.20	0.098	0.279
90	1.44	0.50	0.22	0.083	0.189

由(2)~(5)式,分别假设三道营断面来水 COD 浓度为 16、17、18 mg/L,在不同保证率的水文条件下,利用 Monte Carlo 法分别随机生成 500 个样本,可得黑河冀京缓冲区白河口断面 COD 浓度的概率分布:当三道营断面 COD 浓度为 16 mg/L 时,白河口断面在 50%、75%、90% 3 个保证率下 COD 超标的概率分别为 0.32、0.30、0.24;当三道营断面 COD 浓度为 17 mg/L 时,白河口断面在 50%、75%、90% 3 个保证率下 COD 超标的概率分别为 0.64、0.63、0.49;当三道营断面 COD 浓度为 18 mg/L 时,白河口断面在 50%、75%、90% 3 个保证率下 COD 超标的概率分别为 1.00、0.88、0.77。在不同来水水文条件下,90% 保证率的超标风险最低,这主要受水流在水功能区中的传播时间影响。不同来水水质条件下,当三道营来水 COD 浓度为 16、17、18 mg/L 时,超标概率为分别在 0.3、0.6、0.8 左右。详细结果见表 2~表 4。

表 2 来水为 16 mg/L 时白河口断面 COD 浓度概率分布

$C_0 /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	不同保证率下的概率分布 $P(C \leq C_0)$		
	50%	75%	90%
13.0	0	0	0.10
13.2	0	0.05	0.18
13.4	0.01	0.14	0.25
13.6	0.10	0.21	0.34
13.8	0.20	0.26	0.40
14.0	0.31	0.33	0.45
14.2	0.39	0.40	0.54
14.4	0.45	0.48	0.60
14.6	0.53	0.56	0.65
14.8	0.61	0.63	0.70
15.0	0.68	0.70	0.76
15.2	0.76	0.75	0.83
15.4	0.84	0.81	0.88
15.6	0.90	0.88	0.93
15.8	0.94	0.94	0.97
16.0	1	1	1

表 3 来水为 17 mg/L 时白河口断面 COD 浓度概率分布

$C_0 /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	不同保证率下的概率分布 $P(C \leq C_0)$		
	50%	75%	90%
13.6	0	0	0.04
13.8	0	0	0.09
14.0	0	0.04	0.17
14.2	0	0.13	0.24
14.4	0.08	0.19	0.31
14.6	0.18	0.25	0.39
14.8	0.27	0.31	0.43
15.0	0.36	0.37	0.51
15.2	0.44	0.45	0.57
15.4	0.48	0.51	0.63
15.6	0.56	0.58	0.67
15.8	0.63	0.65	0.72
16.0	0.69	0.71	0.78
16.2	0.76	0.76	0.85
16.4	0.84	0.83	0.88
16.6	0.89	0.88	0.93
16.8	0.96	0.95	0.98
17.0	1	1	1

表 4 来水为 18 mg/L 时白河口断面 COD 浓度概率分布

$C_0 /$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	不同保证率下的概率分布 $P(C \leq C_0)$		
	50%	75%	90%
14.4	0	0	0.04
14.6	0	0	0.09
14.8	0	0.03	0.16
15.0	0	0.12	0.23
15.2	0.06	0.18	0.29
15.4	0.15	0.24	0.37
15.6	0.23	0.28	0.41
15.8	0.32	0.35	0.47
16.0	0.40	0.40	0.55
16.2	0.45	0.48	0.60
16.4	0.53	0.54	0.65
16.6	0.58	0.61	0.69
16.8	0.65	0.67	0.73
17.0	0.71	0.72	0.80
17.2	0.78	0.77	0.85
17.4	0.85	0.84	0.89
17.6	0.90	0.89	0.94
17.8	0.96	0.95	0.98
18.0	1	1	1

3 结 语

根据上游来水水质水量情况,对河流水质超标风险进行定量分析,是水资源保护与水污染防治的重要手段。本文考虑了水质方程中参数的不确定性,建立了河流随机水质模型。假设随机系数服从双侧截尾正态分布,根据实测资料率定了随机系数的均值和方差,并根据不同断面的水力学特征对系数进行了修正,之后采用 Monte Carlo 法求解模型。由于考虑了水质参数的随机性,随机水质模型在水功能区监督管理及达标考核中具有更强的实用性。

对于贯彻落实最严格的水资源管理制度,强化水资源保护监督管理,科学制定水功能区限排总量具有支撑作用。

本文将随机水质模型应用于黑河冀京缓冲区 COD 浓度超标风险分析中,分别计算了不同来水水质条件、不同来水水文条件下白河口断面 COD 浓度的概率分布。计算结果表明:不同来水保证率条件下,当三道营来水 COD 浓度为 16、17、18 mg/L 时,白河口断面 COD 超标风险分别在 0.3、0.6、0.8 左右。总体上,上游水质是影响下游水功能区达标的主要因素。对于水质模型中随机参数的分布特征、率定方法以及随机微分方程的求解技术还有待进一步深入研究。

参考文献:

[1] 唐迎洲,阮晓红,王文远. WASP5 水质模型在平原河网区的应用[J]. 水资源保护,2006,22(6):43-46+50.

[2] 朱茂森. 基于 MIKE11 的辽河流域一维水质模型[J]. 水资源保护,2013,29(3):6-9.

[3] 金春久,王 超,范晓娜,等. 松花江干流水质模型在流域水资源保护管理中的应用[J]. 水利学报,2010,41(1):86-92.

[4] 张 菊,周祖昊,李旺琦,等. 应对突发性水污染事件的水动力与水质模型[J]. 人民黄河,2013,35(11):44-47.

[5] 徐智廷,李河海. S-P 概化模型在临沂水功能区纳污能力分析中的应用[J]. 水资源保护,2007,23(3):27-29.

[6] 房 睿. 玛纳斯河纳污能力及排污总量控制分析[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(6):200-202.

[7] 冯 健,周怀东,彭文启,等. 三门峡水库水质模型与水环境容量分析[J]. 人民黄河,2014,36(3):35-36+39.

[8] 潘建波,张修宇. 水体纳污能力计算模型在松花江流域的应用[J]. 人民黄河,2011,33(6):61-63+66.

[9] 陈家鼎,李东风. 随机截尾情形下正态分布参数的最大似然估计[J]. 应用数学学报,2011,34(6):961-975.

[10] 赵瑞学,钱林方,陈龙森,等. 基于双侧截尾正态分布的机构运动可靠度研究[J]. 计算机仿真,2011,28(2):248-251.