

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2011.03.001

基于和谐论的水污染物总量控制问题研究

左其亭¹ 庞莹莹²

(1. 郑州大学水科学研究中心, 河南 郑州 450001; 2. 天津市龙网科技发展有限公司, 天津 300170)

摘要 :在剖析水污染物总量控制问题的基础上,将和谐论引入水污染物总量控制研究中,诠释水污染物总量控制的和谐问题。为保证水污染物总量控制的成功实施,建立基于和谐论的水污染物总量控制模型,从和谐的角度分析水污染物总量控制措施的制定,以改善进入水体的污染物总量与水体纳污能力之间的不和谐关系。最后将建立的模型应用于武汉市汤逊湖流域中,应用结果表明该模型可以较好地反映流域水污染物总量控制问题中“统一”与“分歧”的辩证关系,有助于解决水污染物总量控制和污染负荷分配问题,为水体污染防治提供技术支撑。

关键词 :水污染物;总量控制模型;和谐论;和谐度方程;污染负荷分配

中图分类号 :X52 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2011)03-0001-05

Total amount control problems of water pollutants based on harmony theory//ZUO Qi-ting¹, PANG Ying-ying² (1. Center of Water Science Research, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Tianjin Lonwin Technology Development Co., Ltd., Tianjin 300170, China)

Abstract :Based on the analysis of the total amount control problems of water pollutants, the harmony theory was introduced into the studies on the total amount control of water pollutants to analyze the problems. To ensure the successful implementation of the total amount control of water pollutants, a total amount control model of water pollutants based on the harmony theory was established. The preparation of measures for the total amount control of water pollutants was analyzed from the harmony view to improve the relationship between the pollutant amount input into water body and the bearing capacity of water body. This model was applied in Tangxun Lake basin. The results indicate that the proposed model can reflect the relationship between unification and division in the total amount control problems of water pollutants and contribute to solve the problems of the total amount control of water pollutants and waste load allocation so as to provide technical support for prevention and treatment of water pollution.

Key words :water pollutant; total amount control model; harmony theory; harmony degree equation; waste load allocation

水污染物总量控制是缓解水体环境问题、改善水质的一项重大举措,在水环境不断恶化的形势下,该举措发挥着重要的作用。水污染物总量控制方案的制定与实施是为了满足水体功能目标,根据一定的方式或规则,不断调整各控制单元排放污染物的数量,确定最终的可行性方案的过程。由于利益、技术条件等因素的影响,其中必然存在对立、分歧的现象,使方案的制定与实施存在一定的难度,无法满足每个相关参与者的要求。和谐论可以使具体的行为达到总体“和谐、一致、协调”,较好地解决分歧问题,为水污染物总量控制方案的合理制定和污染物负荷分配提供新的解决方法。因此,研究基于和谐论的水污染物总量控制非常必要,可以促进水污染物总

量控制技术的推广应用。

目前水污染物总量控制研究成果较多,国外较成熟的水污染控制策略主要有美国的最大日总量控制(TMDL)及欧盟的水框架指令^[1],国内研究较多的是总量控制方案制定方法,主要有环境基尼系数法^[2]、行业优化分配模型^[3]、Delphi-AHP法^[4]以及群体决策法^[5]等。和谐论是最近提出的新的理论方法,笔者对和谐论的概念、和谐论五要素、和谐度方程、和谐关键问题以及和谐论在自然科学和社会科学中的应用做了相关研究^[6-8]。目前关于水污染物总量控制的研究多数是针对某一控制对象,根据分配原则制定总量控制方案,强调总量分配方法,而忽略了控制方案的可行性评估、多因素影响及和谐问

题,因而所制定的污染负荷分配方案难以让人信服,影响方案的实施。

基于以上问题,笔者将和谐论引入水污染物总量控制工作中,在阐述水污染物总量控制面临主要问题的基础上,采用和谐论理论对水污染物总量控制问题进行解析,建立了基于和谐论的水污染物总量控制模型,并进行实例应用研究。

1 水污染物总量控制面临的主要问题

1.1 总量控制对象较单一、不完整

从污染源来看,目前水污染物总量控制的对象主要是点源污染,虽已意识到面源污染对水体污染的贡献逐渐升高,但由于对面源污染的产生、迁移转化过程缺少充分的认识,并未真正将面源污染纳入水污染物总量控制中。此外,水体内源中底泥释放污染物也是水体污染的重要来源,之前也未将其纳入水污染物总量控制中。

从污染物类型来看,目前水污染物总量控制的指标主要是 COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN 等常规指标。而在水环境日益恶化的形势下,水体的污染指标不仅仅是常规性指标,还包括有机指标、重金属等,这些污染物对水体污染的影响也非常大。但由于有机指标和重金属的监测方法较复杂,监测资料较少、不完整,且监测时间间隔较长,较难评估这些污染物的影响,这也是水污染物总量控制无法考虑这些指标的重要原因之一。

1.2 总量控制方案未综合体现公平与效益原则

水污染物总量分配的原则包括公平性和效益性,由于二者之间相互制约、相互影响,在总量控制方案中未能综合体现。此外,目前我国实行的水污染物总量分配方法主要是等比例分配法和按贡献率分配法,这 2 种方法均以现状排放量为出发点,比较简单,实施容易,但未考虑现状排放量的合理性,也不能综合体现公平和效益原则,因此,所制定的水污染物总量控制方案的可行性还存在一定问题。

1.3 缺乏对污染物削减技术的研究

在制定水污染物总量控制方案时,仅结合总量控制目标与进入水体的污染负荷来计算污染物的削减量,虽可以保障水体环境达到水功能目标,但未充分考虑污染物削减技术是否可以满足污染物削减要求。由于缺少对污染物削减技术的研究,难以保障水污染物总量控制方案的顺利实施,降低了污染物总量控制方案的可行性。因此,不仅需要对污染物削减量进行计算,同时也要考虑污染物削减技术及其可实施性,从而保障水污染物总量控制方案的应用。

2 水污染物总量控制的和谐论解析

在水污染物总量控制实施过程中,为避免上述问题的影响,需要从不同层次来研究,综合考虑公平性和效益性,结合污染物削减技术制定可行的水污染物总量控制方案,从而满足水体功能目标,使水污染物排放量与水体承纳污染物能力之间达到“和谐”。由于水污染物总量控制涉及多个利益相关者,对总量控制的实施方案必然存在一定的分歧,影响方案的整体实施。为了减少分歧所带来的影响,笔者将和谐论引入水污染物总量控制中,采用和谐论来诠释水污染物总量控制问题。

2.1 和谐论五要素及和谐度方程

笔者将和谐论定义为“研究多方参与者共同实现和谐行为的理论和方法”,它的五要素如下^[6]: ①和谐参与者:就是参与和谐的各方,一般为双方或多方,称为“和谐方”,其集合表示为 $H = \{H_1, H_2, \dots, H_n\}$, n 为和谐方个数。②和谐目标:是指和谐参与者为了达到和谐状态所必须满足的目标。③和谐规则:是指和谐参与者为了达到和谐目标所制定的一切规则或约束。④和谐因素:是指和谐参与者为了达到总体和谐所需要考虑的因素。⑤和谐行为:是指和谐参与者针对和谐因素所采取的具体行为的总和。

笔者曾提出和谐度方程(根据和谐因素的数量,可以分为单一因素和多因素的和谐度方程),其中,单一因素的和谐度方程可以描述为

$$HD = ai - bj \quad (1)$$

式中: HD 为和谐度,当 $HD < 0$ 时,定义 $HD = 0$,则 $HD \in [0, 1]$; a 为统一度; b 为分歧度; $a, b \in [0, 1]$,如果和谐参与者存在弃权或既不赞成也不反对的行为,则 $a + b < 1$,否则 $a + b = 1$; i 为和谐系数,反映和谐目标的满足程度,由和谐目标计算确定, $i \in [0, 1]$; j 为不和谐系数,反映和谐方对存在分歧现象的反对程度,可由分歧度计算确定, $j \in [0, 1]$ 。

多因素的和谐度方程是在单一因素和谐度方程的基础上,考虑各因素的权重进行综合计算。权重的确定存在一定的人为性和随意性,为避免这一影响,可以借鉴较客观且能反映实际情况的确定方法,通过反复论证,得到可信度较高的权重。

2.2 水污染物总量控制的和谐问题

水污染物总量控制的研究内容可以用和谐论五要素来诠释。

a. 和谐参与者:在水污染物总量控制中,和谐参与者可以是污染源、流域的行政控制单元、各排污企业,也可以是各污水排放口。如研究流域污染源

的负荷削减问题时,可以把点源污染、流域范围内的面源污染等作为水污染物总量控制的和谐参与者;如研究流域内各行政分区污染负荷削减问题时,可以把不同行政分区作为水污染物总量控制的和谐参与者。

b. 和谐目标:为防止水体进一步恶化,应严格控制进入水体的污染负荷。当进入水体的污染负荷总量大于水体容纳的最大污染物数量时,水质将恶化,而当进入水体的污染负荷总量小于水体容纳的最大污染物数量时,可以保持或改善目前的水质状况。也就是说,可以采用“污染负荷总量小于水体容纳的最大污染物数量”作为和谐目标。

c. 和谐规则:各参与者的水污染物控制量之和必须小于或等于水体容纳的最大污染物数量;各种污染物的削减目标必须小于对应污染物进入水体的污染负荷量,且应控制在污染物削减措施的技术上限范围内;可以结合水污染物总量分配中的公平、效益原则或以人口、工业增加值与污染物排放量之间的关系来分配污染负荷,确定不同和谐参与者的污染物削减量。

d. 和谐因素:在水污染物总量控制问题研究中,不仅要使水质满足水功能目标,也要考虑污染物削减技术的可行性、经济的投入等因素。另外,从水污染物总量控制的指标来看,主要有 COD、NH₃-N、TN 等,如果考虑的因素不是单一的,该和谐问题则为多因素和谐问题。

e. 和谐行为:参与者所采取的具体的控制水污染物排放量的措施,可通过参与者分配得到的污染物允许排放量来表征控制措施的效果。为了定量研究水污染物总量控制和污染负荷分配方案,需要建立水污染物总量控制模型。

3 基于和谐论的水污染物总量控制模型

3.1 模型方程

笔者结合和谐论的研究方法和水污染物总量控制中总量分配方法,建立了基于和谐论的水污染物总量控制模型。该模型以和谐度最大作为目标函数,以水污染物总量控制总目标、治理措施的技术及经济投入等作为约束条件,建立单目标模型。

目标函数:

$$\max HD = \max(a_i - b_j) = \max \left\{ \frac{\sum_{k=1}^n G_k}{\sum_{k=1}^n A_k} i - \left(1 - \frac{\sum_{k=1}^n G_k}{\sum_{k=1}^n A_k} \right) j \right\} \quad (2)$$

约束条件:

$$\sum_{k=1}^n G_k \leq T_G$$

$$G_k = f(A_k)$$

$$0 < A_k - G_k < T_L \quad (A_k > G_k)$$

$$0 < C_k(A_1 - G_1) + \dots + C_k(A_k - G_k) + \dots + C_n(A_n - G_n) < C$$

$$0 \leq i, j \leq 1 \quad k = 1, 2, \dots, n$$

式中: A_k 为第 k 个和谐参与者排放某污染物的数量; G_k 为根据和谐规则确定的第 k 个和谐参与者允许排放的某污染物数量; T_G 为某污染物的总控制目标; T_L 为某措施治理某污染物的技术上限; $C_k(A_k - G_k)$ 为第 k 个和谐参与者治理某污染物的边际成本; C 为政府对环境治理的经济投入。

当 $A_k \leq G_k$ 时,表明该和谐参与者排放的污染物数量不需要削减,不需要考虑第 3 个约束条件,只有当 $A_k > G_k$ 时,第 3 个约束条件才成立。

3.2 模型参数的确定

该模型中涉及几个重要参数,其确定方法说明如下:①污染物总控制目标 T_G :为保证水质达到水功能目标,降低突发性水环境污染事故对水体环境造成的危害,可以考虑预留一部分水体容纳的污染物数量作为安全余量,并结合进入水体的污染负荷总量与水体允许容纳的最大污染物数量来确定污染物的总控制目标 T_G 。②治理措施的技术上限 T_L :从水污染物总量分配方案的可行性角度出发,需要考虑污染物治理措施的技术削减范围,满足污染物削减的要求,从而保障总量分配方案可实施。治理措施的技术上限与治理措施的选择有重要关系,不同治理措施的治理效果是不同的。技术上限的确定可以通过查阅相关文献、参考已有研究成果来确定。③治理污染物的边际成本 $C_k(A_k - G_k)$ 边际成本主要与污染物的治理措施、治理效果、污染物特性等因素有关。相关研究表明^[9],治理污染物的边际成本随着污染物削减量的增加呈下降趋势,当削减量大于治理措施的技术上限时,边际成本出现上升的趋势,因此,边际成本呈 U 形变化规律。研究还表明^[10-12],采用指数函数可以较好地拟合边际成本与处理水量之间的关系。综上所述,边际成本函数需要考虑污染物治理措施,依据基建成本和运行成本,综合分析边际成本与削减量之间的关系来确定。④允许排放的污染物数量 G_k :该变量与和谐规则及和谐参与者排放污染物的数量 A_k 有密切的联系,可通过和谐规则中的最低、最高约束或规则比例来确定。⑤和谐系数 i :反映和谐目标的满足程度,可以根据和谐目标来计算,比如笔者在文献[7]中提出的与和谐目标满足程度呈线性关系的方程。⑥不和谐

系数 j 反映和谐方对存在分歧现象的反对程度,可以根据分歧度来计算,比如笔者在文献[7]中提出的与分歧度呈线性关系的方程。

3.3 模型计算方法

如果模型中治理污染物的边际成本函数是线性函数,该模型为单目标线性规划模型,求解此类模型的方法主要有图解法、单纯形法、改进单纯形法等。如果模型中治理污染物的边际成本函数是非线性函数,则该模型为单目标非线性规划模型,目前尚未有通用的方法来求解该类模型,需要根据模型的特点选择合适的求解方法。对于存在约束条件的非线性规划,可以通过建立惩罚函数的方法将其转化为无约束极值的非线性规划,进一步采用梯度法、共轭梯度法或变尺度法进行求解。这些方法各有优缺点,可以根据具体实例中的目标函数和约束条件的复杂程度来选择求解方法。

本文应用实例中建立的治理污染物的边际成本函数是指数函数,因此,该模型为单目标非线性规划模型,利用 matlab7.0 工具箱来进行求解。

4 应用举例

以武汉市汤逊湖 COD_{Mn} 污染物为例,采用所建立的基于和谐论的水污染物总量控制模型进行流域水污染防治问题研究。

4.1 研究区概况

汤逊湖流域位于武汉市东南部,湖泊水面面积占武汉城区湖泊面积的 18.7%,占流域总面积的 13.6%^[13]。受经济利益的驱动,人类生产活动不断侵占汤逊湖流域,导致水面面积不断减少,水环境受到严重威胁,水质呈现不断恶化的趋势。为了缓解水环境问题,迫切需要实行水污染物总量控制。根据污染物的产生来源,可将汤逊湖流域的污染来源分为点源、面源、内源和外源,其中点源污染包括生活污水和工业废水,面源污染包括农田径流、畜禽养殖及城镇径流产生的污染,内源污染包括渔业养殖及底泥释放产生的污染,外源污染为连接汤逊湖流域的巡司河在汛期产生的污染^[13]。在汤逊湖流域水环境管理中,仅通过控制点源污染已不能满足水功能目标的要求,必须对面源、内源和外源污染都进行控制,而面源、内源和外源污染控制措施的资金投入及治理效果影响三者分配得到的污染负荷量,如何使各污染源的负荷分配整体达到和谐状态需要认真研究。此外,汤逊湖流域的水环境管理还涉及江夏区、洪山区以及东湖高新区之间的整体协调,而每个行政区都希望有更大的水污染物可入湖量,以保障区域的经济的发展。因此,各行政区对水污染物总

量控制的最终方案均有一定的争议,阻碍了湖泊流域的水环境管理。

4.2 模型及参数确定

根据所建立的基于和谐论的水污染物总量控制模型,以污染源(点源、面源、内源和外源)作为和谐参与者,分析汤逊湖流域 COD_{Mn} 污染物总量控制的和谐问题。这里的和谐目标是:水污染物入湖总量不超过纳污能力,水质可以满足水体功能目标(Ⅲ类水);当水污染物入湖总量大于 1.2 倍的纳污能力时,水体将无法承纳污染物的入湖总量,水质恶化。和谐规则是内源和外源按各自的贡献率控制污染负荷量,点源和面源根据最小边际成本投入控制污染负荷量。其中,统一度 a 采用式(3)计算:

$$a = \frac{W_{\text{PWL}}}{W_{\text{WL}}} \quad (3)$$

式中: W_{PWL} 为污染物的允许入湖总量; W_{WL} 为污染物的实际入湖总量。

在汤逊湖水污染物总量控制中,由于每个污染源对水体均产生了较大的影响,仅削减部分污染源不能达到和谐目标,每个污染源必须都有不同程度的削减。因此,不存在和谐参与者弃权或既不赞成也不反对的行为,故取 $a + b = 1$,此时,分歧度 b 可以通过 $b = 1 - a$ 来计算。

和谐系数 i 根据和谐目标来确定,其数学描述曲线见图 1。图 1 中, M 指该流域的水体纳污能力, G 为入湖污染物总量。即当污染物入湖总量小于纳污能力时, $i = 1$; 当污染物入湖总量大于纳污能力且小于 1.2 倍纳污能力时, i 随着入湖总量的增加而减小,通过线性插值获得相应值;当污染物入湖总量大于 1.2 倍纳污能力时, $i = 0$ 。

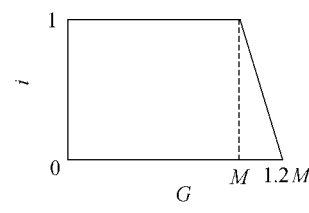


图 1 和谐系数 i 的数学描述曲线

不和谐系数 j 根据分歧度来确定,也有多种形式,如文献[7]论述,可以取“ j 与 b 成正比的曲线形式”,即 $j = b$ 。

4.3 结果分析

根据前文建立的水污染物总量控制模型,分别计算按照现状发展趋势 2015 年、2020 年 75% 和 90% 来水频率下汤逊湖流域 COD_{Mn} 的纳污能力、入湖量、允许入湖量以及和谐度,计算结果见表 1。根

据文献 [6] 对和谐等级划分的标准,2015 年 75% 来水频率的和谐度在 0.4~0.6 之间,处于较不和谐状态;2015 年 90% 来水频率下和谐度处在 0~0.4 之间,处于基本不和谐状态;而 2020 年 75% 和 90% 来水频率条件下的和谐度均为 0,处于不和谐状态,表明 2020 年污染物来源的入湖结构处于不和谐状态。通过分析和谐度的计算过程可知,2015 年 75% 和 90% 来水频率下污染物的入湖量虽已超出水体的纳污能力,但小于 1.2 倍的水体纳污能力,表明湖泊还可以承受,但湖泊的水体纳污能力与污染物排放总量之间已出现不和谐状态,必须通过和谐参与者的和谐行为来控制污染物的排放量,使不和谐状态向和谐状态转变。

表 1 按现状发展趋势计算得到的 COD_{Mn} 排放量及和谐度

来水频率/%	年份	纳污能力/ (t·a ⁻¹)	入湖量/ (t·a ⁻¹)	允许入湖量/ (t·a ⁻¹)	和谐度
75	2015	1 381.852	1 439.043	1 144.814	0.589
	2020	1 385.311	1 764.777	1 237.313	0
90	2015	1 297.446	1 439.691	1 059.955	0.263
	2020	1 300.180	1 763.622	1 134.226	0

根据制定的和谐规则,即内源和外源按各自的贡献率控制污染负荷量,点源和面源根据最小边际成本投入控制污染负荷量,调整 2015 年、2020 年 75% 和 90% 来水频率条件下 COD_{Mn} 的污染源允许排放量,并计算调整后的和谐度,结果见表 2。从表 2 中可以看出,和谐度均为 1.000,处于和谐状态,表明表中各污染源的允许入湖量即为满足和谐目标所具有的最佳和谐行为。

表 2 按照和谐模型计算的 COD_{Mn} 允许入湖量及和谐度

来水频率/%	年份	允许入湖量/(t·a ⁻¹)				和谐度
		点源	面源	内源	外源	
75	2015	802.413	96.114	153.969	92.317	1.000
	2020	966.260	65.687	139.286	66.080	1.000
90	2015	773.111	77.333	132.250	77.261	1.000
	2020	923.739	42.938	115.214	52.334	1.000

根据表 2 的计算结果,2015 年、2020 年 75% 和 90% 来水频率下点源的允许入湖量占允许入湖总量的平均比例为 75.7%,面源、内源和外源的平均比例分别为 6.2%、11.8% 和 6.3%,这与汤逊湖流域污染物来源对水体的贡献是类似的,同时也表明汤逊湖流域 COD_{Mn} 污染的主要来源是点源,这与实际调研的结果是吻合的。

从和谐规则来看,内源和外源采用按贡献率法进行允许入湖量的分配,充分体现二者对水体的贡献,而采用最小边际成本法对点源和面源进行分配,从优化的角度来体现点源和面源治理污染物的难易程度,也充分体现经济投入的最小化。该和谐规则

不仅体现了公平性,也考虑了优化的分配原则,表明该和谐规则是合理的。另外,从和谐度的评价结果也可以看出,按照目前各污染源的允许入湖量排放污染物,可以使湖泊处于和谐状态,表明分配得到的各污染源的允许入湖量是合理的,能够达到湖泊的和谐目标,满足水功能目标的要求。

根据以上研究,首先确定了汤逊湖流域污染负荷分配方案,包括污染源之间的控制分配、行政区之间的控制分配、排污口之间的控制分配。其次,在汤逊湖水污染物总量分配结果的基础上,为保证总量分配方案的顺利实施,针对点源、面源、内源以及外源提出了具体的水环境防治措施,包括陆域点源污染防治措施、陆域面源污染防治措施、渔业内源污染防治措施。

5 结 语

水污染物总量控制是缓解流域水环境问题、改善水质的一项重大举措,在该项措施的实施过程中涉及许多利益相关者,在制定水污染总量控制方案时不能满足所有利益相关者的要求,存在一定的分歧,如何分析总量控制方案中的统一与分歧问题是方案成功实施的关键。本文将和谐论引入水污染物总量控制研究中,通过分析水污染物总量控制的和谐问题,建立了基于和谐论的水污染物总量控制模型,并成功应用于实例研究中。应用结果表明,该模型可以从整体上衡量水污染物总量控制方案的合理性,反映各和谐参与者对总量控制方案的反应程度,可以为流域水污染物总量控制方案的制定提供技术支撑。

参考文献:

[1] 孟伟.流域水污染物总量控制技术与示范[M].北京:中国环境科学出版社,2008.

[2] 吴悦颖,李云生,刘伟江.基于公平性的水污染物总量分配评估方法研究[J].环境科学研究,2006,19(2):66-70.

[3] 王亮,张宏伟,岳琳.水污染物总量行业优化分配模型研究[J].天津大学学报:社会科学版,2006,8(1):60-63.

[4] 李如忠,汪家权,钱家忠.区域水污染负荷分配的 Delphi-AHP 法[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(1):84-88.

[5] 张志耀,张海明.污染物排放总量分配的群体决策方法研究[J].系统科学与数学,2001,21(4):473-479.

[6] 左其亭.和谐论的数学描述方法及应用[J].南水北调与水利科技,2009,7(4):129-133.

[7] 左其亭.和谐论及其应用的关键问题讨论[J].南水北调与水利科技,2009,7(5):101-104.

(下转第 12 页)

并与水文领域常用的季节性一阶自回归模型和典型解集模型^[14]进行比较。对于每个模型,在其模拟的径流过程系列对应取出 7 万个年径流量,分别组成 1000 个样本容量为 70 的年径流量样本。对每个年径流量样本分别估计统计特征参数(均值, C_v 和 C_s) ,并分别计算统计特征参数的均值。采用综合相对均方误差 $RMSE^{[9-10]}$ 作为模型评价指标:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\hat{Z}_i - Z}{Z} \right)^2} \times 100\% \quad (6)$$

式中: Z 为实测资料系列的统计特征估计值; $\hat{Z}$ 为模拟系列的统计特征估计值; N 为模拟系列的样本个数,这里 $N = 1000$)。

评价指标 $RMSE$ 的值越小,说明随机模型越能够保持实测系列的统计特征。表 1 给出了实测系列和模拟系列的年径流量统计特征值及评价指标值。由表 1 可知,季节性一阶自回归模型模拟径流过程的年径流量统计特征效果相对较差;基于 Copula 函数的解集随机模型的 $RMSE$ 均低于季节性一阶自回归模型和典型解集模型的 $RMSE$ 。究其原因,基于 Copula 函数的解集随机模型避开了季节性一阶自回归模型和典型解集模型中对水文序列的正态转化(难免会出现部分信息失真),而是直接随机模拟年径流总量,然后选用实测径流过程分解为模拟的径流过程,因此能够很好地保持实测系列的径流过程形状及年径流量的统计特征。

3 结 语

构造了最大月径流量和年径流量的联合分布,采用基于联合分布的随机抽样方法模拟了大样本的径流过程,从而提出了一种新的径流过程随机模拟方法,建立了基于 Copula 函数的解集随机模型。该模型避开了季节性一阶自回归模型和典型解集模型中对水文序列的正态转化和相依形式的主观假定,很好地考虑了最大月径流量和年径流量之间的相关性,及两者频率组合的随机性,选用实测径流过程作为随机模拟径流过程的时程分配形式,能很好地保持实测系列的径流过程形状及年径流量的统计特征。实例计算结果表明,基于 Copula 函数的解集随机模型的模拟效果至少可以与常用的典型解集模型相当,适用于水文时间序列的随机模拟,从而为水文水资源的随机模拟提供了一种新途径。

参考文献:

[1] 芮孝芳,刘方贵,邢贞相. 水文学的发展及其所面临的若干前沿科学问题[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27 (1): 75-79.

[2] 胡庆芳,王银堂,刘克琳,等. 基于改进的两参数月水量平衡模型的月径流模拟[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2007, 35(6): 638-642.

[3] 葛朝霞,王会容. 黄河上游月径流量与海温的关系研究[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2003, 31(6): 605-608.

[4] KOUTSOYIANNIS D, MANETAS A. Simple disaggregation accurate adjusting procedures [J]. Water Resources Research, 1996, 32(7): 2105-2117.

[5] SHARMA A, TARBOTON D G, LALL U. Streamflow simulation: a nonparametric approach[J]. Water Resources Research, 1997, 33(2): 192-308.

[6] 王文圣,丁晶. 基于核密度估计的多变量非参数随机模型初步研究[J]. 水利学报, 2003, 34(2): 9-14.

[7] PRAIRIE J R, RAJAGOPALAN B, FULP T J, et al. Modified K-NV model for stochastic streamflow simulation[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2006, 11(4): 371-378.

[8] SALVADORI G, de MICHLELE C. Frequency analysis via copulas theoretical aspects and applications to hydrological events[J]. Water Resources Research, 2004, 40(12): 1-17.

[9] 闫宝伟,郭生练,刘攀,等. 基于 Copula 函数的径流随机模拟[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2010, 42(1): 5-9.

[10] 肖义,郭生练,熊立华,等. 一种新的洪水过程随机模拟方法研究[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2007, 39(2): 55-60.

[11] 张涛,赵春伟,雒文生. 基于 Copula 函数的洪水过程随机模拟[J]. 武汉大学学报:工学版, 2008, 41(4): 1-4.

[12] 郭生练,闫宝伟,肖义,等. Copula 函数在多变量水文分析计算中的应用及研究进展[J]. 水文, 2008, 28(3): 1-7.

[13] NELSON R B. An introduction to Copula[M]. New York: Springer, 1999.

[14] 中华人民共和国能源部,中华人民共和国水利部. 水利水电工程设计洪水计算手册[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2001. (收稿日期: 2010-07-23 编辑: 骆超)

+++++
(上接第 5 页)

[8] 左其亭,马军霞. 和谐论:一种新的研究社会科学的理论方法[J]. 社科纵横, 2010, 25(3): 8-10.

[9] 庞莹莹,肖伟华,秦大庸,等. 湖泊流域点源和非点源污染负荷分配方法研究及应用[C]// 夏军. 第七届中国水论坛论文集. 北京:中国水利水电出版社, 2009.

[10] 鄢恒珍. 小城镇污水处理方案技术经济分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.

[11] USEPA. The use of best management practices in urban watershed[M]. Cincinnati, Ohio: EPA, 2004.

[12] HERNANDEZ-SANCHO F, SALA-GARRIDO R. Cost modeling in waste water treatment processes: an empirical analysis for Spain[J]. Dangerous Pollutants(Xenobiotics) in Urban Water Cycle, 2008, 3(4): 219-226.

[13] 庞莹莹. 湖泊流域纳污能力及污染负荷分配研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.

(收稿日期: 2010-08-25 编辑: 骆超)