

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.02.005

基于云模型的中运河水安全评价

乔丹颖, 刘凌, 闫峰

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098)

摘要: 为了全面衡量河流水安全评价过程中的随机性与模糊性, 将云模型引入河流水安全评价, 并论述了确定度向量标准化的重要性, 根据实测值和评价阈值, 构建评价指标相对于各评语的确定度向量, 而后结合权重计算河流的综合水安全确定度向量, 并判断河流安全等级。并以南水北调东线工程的骨干输水河道——中运河为例, 进行河流水安全评价, 结果表明: 中运河2012年水安全等级为“良”; 与模糊综合模型和集对分析模型评价结果对比发现, 云模型是一种行之有效的河流水安全评价模型。

关键词: 河流; 水安全评价; 云模型; 正态云发生器; 中运河

中图分类号: TV213.4 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2015)02-0026-04

Assessment on water security of Zhong Canal based on cloud model

QIAO Danying, LIU Ling, YAN Feng

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to measure the problems of randomness and fuzziness during the river water security assessment, a cloud model is introduced, and the importance of determining vector standardization was discussed. Based on the measured values and the evaluation threshold, the index's quantitative certainty vector to the collection of comments is generated. And then the comprehensive certainty vector of river water security is calculated based on the weight, and the level of river security is determined. Taking Zhong Canal which is the major channel in the eastern route of South-to-North Water Diversion Project as an example, the author of paper made a water security assessment. The results show that the river security level of Zhong Canal is “good” in the year of 2012; compared with the assessment results by fuzzy synthetic model and set pair analysis model, the cloud model is an effective model of river water security assessment.

Key words: river; water security assessment; cloud model; normal cloud generator; Zhong Canal

河流是水文循环的重要环节,也是人类社会存在和发展的基础^[1]。由于自然的水文循环波动或人类对水循环不合理的改变,使得河流水状况发生对人类不利的演进,并将要对人类社会的各个方面产生不利影响^[2-3],进而引发水安全问题。因此,深入研究河流水安全问题,并对河流水安全状况进行客观真实的评估正逐步成为河流管理研究工作的重点。中运河是京杭运河江苏段的北段,也是南水北

调东线工程的骨干输水河道之一,对中运河进行水安全评价,对于南水北调东线工程顺利实施和区域经济社会可持续发展具有重要意义。

河流系统是典型的复杂系统^[4],影响因素众多且各要素之间的关系是复杂的、非线性的^[2],因此近年来诸如模糊数学、集对分析等不确定性分析方法在河流水安全评价中得到了广泛的应用。这些方法各具特色,能够在一定程度上反映河流系统的复

基金项目:国家自然科学基金(51279060);江苏省水利科技项目(2012023)

作者简介:乔丹颖(1989—),女,硕士研究生,研究方向为生态水文和水环境保护。E-mail:qiaody510@126.com

杂性,但评价指标数值一般是基于现场勘查和测定得出,具有很强的随机性,而评价标准往往根据专家经验得出,具有较强的模糊性,传统的不确定模型往往很难完成这两种不确定性的兼顾^[5]。

云模型是由中国李德毅院士于20世纪90年代基于概率论与模糊数学提出的一种全新的不确定性分析方法,它将随机性和模糊性全面结合起来,实现了由定量指标向定性评价的转换^[5]。近年来云模型在岩体稳定性评价^[5]、降雨时空分配研究^[6]和水体富营养化评价^[7]等领域均得到了成功的运用。笔者将云模型引入河流水安全评价中,并结合中运河水安全评价实例,验证模型的有效性。

1 云模型理论

1.1 云模型概述^[8]

设 U 是一个定量论域, C 是 U 上的定性概念,若 $x \in U$,且 x 对 C 的确定度 $u(x) \in [0, 1]$,是具有稳定倾向的随机数,那么 $u(x)$ 在 U 上的分布称为云^[8]。云是由大量云滴组成的,每一个云滴都是 C 在 U 上的一次随机实现。

云的3个基本数字特征为期望 Ex 、熵 En 和超熵 He 。其中 Ex 反映了云滴在 U 上的中心值; En 反映了云滴的离散程度,是随机性与模糊性的综合度量; He 反映了云滴的凝聚程度。

x 和 $u(x)$ 之间的转换是通过云发生器实现的,云发生器包括正向云发生器和逆向云发生器两类,前者借助 (Ex, En, He) 实现由 x 到 $u(x)$ 的映射,后者借助 (Ex, En, He) 实现由 $u(x)$ 到 x 的映射。

1.2 基于云模型的河流水安全评价方法

基于云模型进行河流水安全评价的思路为:

a. 根据河流的实际情况,结合专家经验和相关规范,对每个评价单元确定评语集、评价指标体系和阈值,并利用层次分析法计算评价指标的权重向量 ω 。

b. 设评价指标总数为 M ,评语总数为 N 。每一个评价指标对于各水安全等级的确定度可以用一朵云来表示,根据文献^[5],各指标数字特征计算方法为

$$\begin{cases} Ex_{ij} = \frac{B_{ij,max} + B_{ij,min}}{2} \\ En_{ij} = \frac{B_{ij,max} - B_{ij,min}}{6} \\ He = C \end{cases} \quad (1)$$

式中: $B_{ij,max}$ 、 $B_{ij,min}$ 分别为第 i 个指标、第 j 个级别的上边界和下边界; Ex_{ij} 、 En_{ij} 分别是第 i 个指标、第 j 个级别的期望和熵; He 为超熵,是根据变量不确定程度给出的常数。

而后结合实测值,利用正态云发生器生成确定

度,最终得到确定度矩阵 $U = [u_{ij}(x)]_{M \times N}$ 。

已有文献中一般使用正态云发生器和半正态云发生器生成确定度^[7]。

对于越小越好的指标:

当 $Ex_{i1} \leq x_i \leq Ex_{iN}$ 时:

$$u_{ij}(x) = e^{-\frac{(x_i - Ex_{ij})^2}{2(En_{ij})^2}} \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

当 $x_i < Ex_{i1}$ 时:

$$\begin{cases} u_{ij}(x) = 1 & j = 1 \\ u_{ij}(x) = 0 & j = 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

当 $x_i > Ex_{iN}$ 时:

$$\begin{cases} u_{ij}(x) = 1 & j = N \\ u_{ij}(x) = 0 & j = 1, 2, \dots, N - 1 \end{cases} \quad (4)$$

对于越大越好的指标:

当 $Ex_{iN} \leq x_i \leq Ex_{i1}$ 时:

$$u_{ij}(x) = e^{-\frac{(x_i - Ex_{ij})^2}{2(En_{ij})^2}} \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

当 $x_i > Ex_{i1}$ 时:

$$\begin{cases} u_{ij}(x) = 1 & j = 1 \\ u_{ij}(x) = 0 & j = 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (6)$$

当 $x_i < Ex_{iN}$ 时:

$$\begin{cases} u_{ij}(x) = 1 & j = N \\ u_{ij}(x) = 0 & j = 1, 2, \dots, N - 1 \end{cases} \quad (7)$$

式(2)和式(5)即为正态云发生器。

c. 在计算出确定度矩阵 $U = [u_{ij}(x)]_{M \times N}$ 后,现有文献大多直接根据式(8)利用权重向量和确定度矩阵计算河流水安全综合确定度向量 $v = [v_1, v_2, \dots, v_N]$,而后结合最大确定度原则,计算河流水安全等级。

$$v = \omega^T U \quad (8)$$

1.3 确定度向量标准化的必要性

尽管利用确定度向量 $u_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{iN}]$ 能够较好地度量评价指标的不确定性,但需要指出的是,直接使用正态云发生器的计算结果一般不满足

$\sum_{j=1}^N u_{ij}(x) = 1$;而且不同指标的确定度向量之间不具有可比性,即 $u_{ij}(x) > u_{kj}(x)$ 并不能导出指标 i 对等级 j 的接近程度高于指标 k 。那么直接使用 $u_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{iN}]$ 和 $U = [u_{ij}(x)]_{M \times N}$ 进行河流水安全评价将带来以下问题:① $\sum_{j=1}^N u_{ij}(x) \neq 1$ 意味着指标 i 对各等级确定性之和不为1,即指标可以不属于任何一个评价等级的逻辑错误。② 当各评价指标的最大确定度相差较大时,可能出现较大的确定度“吃掉”较小的确定度现象。如对于确定度矩阵:

$$U = \begin{Bmatrix} 0.23 & 0.10 & 0.00 & 0.00 \\ 0.17 & 0.08 & 0.00 & 0.00 \\ 0.12 & 0.04 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.02 & 0.13 & 0.77 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

采用均权评价模型发现综合确定度向量 $\nu = [0.13, 0.06, 0.43, 0.20]$ 。根据最大确定度原则, U 中前 3 个指标等级均为 1 级, 只有第 4 个指标等级为 4 级, 但由于 u_{44} 远大于 u_{11}, u_{21}, u_{31} , 使得综合评价结果也为 4 级。

因此, 直接使用 $u_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{iN}]$ 和 $U = [u_{ij}(x)]_{M \times N}$ 进行综合评价是不合理的, 在计算综合确定度向量之前, 必须对各个指标的确定度向量进行标准化:

首先计算

$$u_{ij}^*(x) = e^{-\frac{(x_j - E_{x_{ij}})^2}{2(E_{x_{ij}})^2}} \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

而后令

$$u_{ij}(x) = \frac{u_{ij}^*(x)}{\sum_{j=1}^N u_{ij}^*(x)} \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

标准化后的确定度向量既保留了原确定度向量的比例关系, 又满足 $\sum_{j=1}^N u_{ij}(x) = 1$, 且不同指标的确定度之间可以进行比较, 从而避免了前文论述的两类错误。

2 中运河水安全评价

中运河是京杭运河江苏段的北段, 南起淮安杨庄与里运河相连, 北至苏鲁界与韩庄运河相接, 全长 165.8 km。中运河承担着沿岸淮安、宿迁、徐州 3 市的行洪、灌溉、供水、航运任务, 对于苏北地区经济社会发展具有重要意义。同时, 中运河也是南水北调东线的骨干输水河道之一, 承担着东线洪泽湖—南四湖段的主要输水任务。

河流水安全是一个河流自然生态价值和人类社

会经济服务价值相统一的整合性的概念。安全的河流应当既能保持物理、化学和生物的完整性, 又能支撑相应的社会与经济需求, 因此笔者结合中运河的实际特点, 构建了包括自然环境子系统(包括物理特征、化学特征、生态特征 3 个方面)和社会服务子系统(即服务功能)的河流水安全评价指标体系。中运河水安全评价指标体系和评价标准, 见表 1。

评价指标实测值由江苏省水利厅提供, 结合 1.2 节中介绍的正向云发生器, 计算指标的确定度矩阵如下:

$$U = \begin{Bmatrix} 0.00 & 0.50 & 0.50 & 0.00 \\ 0.00 & 0.98 & 0.02 & 0.00 \\ 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.95 & 0.05 & 0.00 \\ 0.00 & 0.97 & 0.03 & 0.00 \\ 0.00 & 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.98 & 0.02 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.03 & 0.97 \\ 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.95 & 0.05 & 0.00 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

由式(12)可以看出, 与其他指标相比, 中运河的防洪工程达标率指标对的“差”级的确定度非常大, 这是由于中运河宿迁、淮安段的堤防均存在较严重的老化现象所致, 为了进一步改善中运河的水安全等级, 应加强这两市的防洪工程建设。

根据式(2)计算中运河水安全状况综合确定度向量为 $[0.30, 0.55, 0.05, 0.10]$, 因此, 中运河 2012 年水安全等级为“良”。为了验证云模型的有效性, 笔者还分别利用文献[3]、[9]提出的模糊综合评价模型和集对分析评价模型对中运河进行了水安全评价, 两者计算的水平向量分别为 $[0.40, 0.50, 0.10, 0.00]$ 和 $[0.42, 0.48, 0.08, 0.02]$, 评价结果也均为“良”, 这表明云模型是一种行之有效的河流水安全

表 1 中运河水安全评价指标体系和评价标准

目标层	控制层	准则层	指标层	分级标准				权重
				优	良	中	差	
河流水安全状况	自然环境子系统	物理特征	河岸稳定性	(0.9,1]	(0.75,0.9]	(0.5,0.75]	[0,0.5]	0.088
			水体流速(m·s ⁻¹)	(0.4,0.5]	(0.3,0.4]	(0.2,0.3]	[0,0.2]	0.080
		化学特征	$\rho(\text{DO})(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	(7.5,10]	(6,7.5]	(5,6]	[0,5]	0.091
			$\rho(\text{COD})(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	[0,2)	[2,4)	[4,6)	[6,15]	0.092
			$\rho(\text{NH}_3\text{-N})(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	[0,0.015)	[0.015,0.5)	[0.5,1)	[1,3]	0.084
	生物特征	岸坡植被结构完整性	(0.8,1]	(0.6,0.8]	(0.4,0.6]	[0,0.4]	0.087	
		浮游植物生物多样性指数	(3,4]	(2,3]	(1,2]	[0,1]	0.092	
	社会服务子系统	服务功能	防洪工程达标率(%)	(95,100]	(90,95]	(80,90]	[0,80]	0.096
			水功能区水质达标率(%)	(95,100]	(90,95]	(80,90]	[0,80]	0.104
			通航保证率(%)	(95,100]	(90,95]	(80,90]	[0,80]	0.096
公众满意度打分			(90,100]	(80,90]	(60,80]	[0,60]	0.088	

3 结 语

a. 河流水安全是一个兼具随机性与模糊性的概念,为全面考虑这两种不确定性,可以将云模型引入河流水安全评价。在云模型计算过程中,确定度向量的标准化步骤是不可缺少的。通过与已有的模糊综合模型和集对分析模型比较,发现云模型是一种可行的评价方法。

b. 中运河 2012 年水安全评价结果为“良”,这表明中运河能够较好地承担南水北调东线工程的输水任务,并为苏北地区经济社会可持续发展服务。为了进一步提升中运河的水安全等级,应加强宿迁、淮安两市的防洪工程建设,提高河流行洪能力。

参考文献:

[1] 叶守泽,詹道江. 工程水文学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007:38-69.

[2] 张翔,夏军,贾绍凤. 水安全定义及其评价指数的应用[J]. 资源科学,2005,27(3):145-149. (ZHANG Xiang, XIA Jun, JIA Shaofeng. Definition of water security and its assessment using water poverty index [J]. Resources Science,2005,27(3):145-149. (in Chinese))

[3] 韩宇平,阮本清,谢建仓. 多层次多目标模糊优选模型在水安全评价中的应用[J]. 资源科学,2003,25(4):37-42. (HAN Yuping, RUAN Benqing, XIE Jiancang. Multi-objective and multilevel fuzzy optimization model and its application in water security evaluation[J]. Resources Science, 2003,25(4):37-42. (in Chinese))

[4] 李文君,邱林,陈晓楠. 基于集对分析与可变模糊集的

河流生态健康评价模型[J]. 水利学报,2011,42(7):775-782. (LI Wenjun, QIU Lin, CHEN Xiaonan. Assessment model for river ecology health based on set pair analysis and variable fuzzy set [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011,42(7):775-782. (in Chinese))

[5] 帅青燕,何亚伯. 基于云模型的坝基岩体质量综合评价[J]. 东南大学学报:自然科学版,2013,43(1):54-58. (SHUAI Qingyan, HE Yabo. Comprehensive evaluation on rock quality of dam foundation based on cloud model [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2013,43(1):54-58. (in Chinese))

[6] 刘德地,陈晓宏,楼章华. 基于云模型的降雨时空分布特性分析[J]. 水利学报,2009,40(7):850-857. (LIU Dedi, CHEN Xiaohong, LOU Zhanghua. Analysis on characteristics of spatial-temporal precipitation distribution based on cloud model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009,40(7):850-857. (in Chinese))

[7] 丁昊,王栋. 基于云模型的水体富营养化程度评价方法[J]. 环境科学学报,2013,33(1):251-257. (DING Hao, WANG Dong. The evaluation method of water eutrophication based on cloud model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013,33(1):251-257. (in Chinese))

[8] 李德毅,杜鹃. 不确定性人工智能[M]. 北京:国防工业出版社,2005:84-184.

[9] 卢敏,张展羽,石月珍. 集对分析法在水安全评价中的应用研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2006,34(5):505-508. (LU Min, ZHANG Zhanyu, SHI Yuezhen. Application of set pair analysis to evaluation of water safety [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(5):505-508. (in Chinese))

(收稿日期:2014-08-30 编辑:徐娟)

(上接第6页)

[10] 冯明磊,胡荣桂,许克翠,等. 三峡小流域水体 NO₃-N 含量变化特征及其影响因素研究[J]. 环境科学,2008,29(1):13-18. (FENG Minglei, HU Ronggui, XU Kecui, et al. Variations and influencing factors of nitrate nitrogen concentration in water in a small watershed of Three Gorges Area [J]. Environmental Science, 2008, 29(1):13-18. (in Chinese))

[11] 郎海鸥,王文杰,王维,等. 基于土地利用变化的小江流域非点源污染特征[J]. 环境科学研究,2010,23(9):1158-1166. (LANG Haiou, WANG Wenjie, WANG Wei, et al. Effect of land use change on spatial-temporal characteristics of non-point source pollution in Xiaojiang Watershed [J]. Research of Environmental Sciences, 2010,23(9):1158-1166. (in Chinese))

[12] 黄金良,李青生,洪华生,等. 九龙江流域土地利用景观格局-水质的初步关联分析[J]. 环境科学,2011,32

(1):64-71. (HUANG Jinliang, LI Qingsheng, HONG Huasheng, et al. Preliminary study on linking land use & landscape pattern and water quality in the Jiulong River Watershed [J]. Environmental Science, 2011, 32(1):64-71. (in Chinese))

(收稿日期:2014-09-09 编辑:彭桃英)

