

基于 MCW - 正态云模型的黑河流域 突发水污染安全评价

马梦含, 靳春玲, 贡力, 逯晔坤, 王婧
(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 突发水污染事件已成为水安全管理的一个重要问题, 鉴于传统评价方法无法兼顾评价体系中模糊性和随机性问题, 将正态云模型运用于突发水污染安全评价中, 建立 MCW - 正态云评价模型对张掖祁连山黑河流域 2012 - 2017 年突发水污染安全情况进行评价。遴选 15 个指标利用 PSR 模型构建指标体系及分级标准, 利用混合交叉赋权法 (MCW) 和正向云发生器分别求出权重和隶属度, 将两者结合对突发水污染安全程度进行评价, 最终与改进密切值法和模糊综合评价法的评价结果进行对比分析。结果表明: 2012 年张掖祁连山黑河流域突发水污染安全处于 II 级重大危险, 2013 - 2017 年处于 III 级较大危险, 结果与改进密切值法、模糊综合评价法基本一致。该方法能有效实现定性定量的转化, 对突发水污染安全评价具有可行性, 可作为一种新的突发水污染安全评价模型。

关键词: 突发水污染; 水污染安全评价; 混合交叉赋权; 正态云模型; 祁连山黑河流域

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2020)02-0103-07

Safety assessment of water pollution emergencies in Heihe Catchment based on MCW - normal cloud model

MA Menghan, JIN Chunling, GONG Li, LU Yekun, WANG Jing

(College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Water pollution emergency incidents have become an important issue in water safety management. In view of the fact that traditional assessment methods cannot balance the problems of ambiguity and randomness in the evaluation system, the author applied the normal cloud model to the safety assessment of water pollution emergencies, and the mixed cross-weighting (MCW) - normal cloud evaluation model was established to carry out the water pollution emergency safety assessment of the Heihe Catchment in Qilian Mountains, Zhangye from 2012 to 2017. We selected 15 indicators to build an indicator system and grading standards using the PSR model, and adopted the MCW - normal cloud model to determine the weight and membership, respectively. And then, the values of the weight and membership were combined to evaluate the safety level of water pollution emergencies. Finally, the results of the assessment were compared and analyzed with those of the improved close value method and the fuzzy comprehensive evaluation method. The results showed that the safety level of water pollution emergencies in the Heihe Catchment of Zhangye in 2012 was at Class II major risk, and it was at Class III in 2013 - 2017. The evaluation results are basically consistent with the improved close value method and the fuzzy comprehensive evaluation method. This method can effectively realize qualitative and quantitative transformation, and is feasible for the safety assessment of water pollution emergencies. Therefore, it can be used as a new safety assessment model for water pollution emergencies.

Key words: water pollution emergency; safety assessment of water pollution; mixed cross-weighting (MCW); normal cloud model; Heihe catchment of Qilian Mountains

收稿日期: 2019-08-12; 修回日期: 2019-10-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51669010)

作者简介: 马梦含 (1996-), 女, 甘肃临洮人, 硕士研究生, 研究方向为水环境及渠系工程安全评价。

通讯作者: 靳春玲 (1976-), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士, 教授, 硕士生导师, 主要从事水安全及水利工程项目管理研究。

1 研究背景

突发水污染事故是指固定污染源由于突发事件排放污染物,或者由于自然灾害导致各类型有毒有害物质进入水体或供水管网,发生水质变化,导致人类生产生活受到危害,破坏生态平衡的事故^[1-2]。突发水污染事故对于人类生产生活已经逐渐造成了巨大的威胁、危害。近年来,我国突发水污染事件频发,据全国环境统计公报统计,2012至2017年共592起突发环境污染事件,其中561起为突发性水污染事件^[3],突发性水污染事件不仅威胁当地水质安全,破坏水生生态,造成巨大的社会和经济损失,还可能干扰当地社会秩序,引发社会恐慌^[4]。因此对于突发水污染事件的研究以及治理已经迫在眉睫。

突发性水污染的综合研究已成为水环境管理的重要课题^[5]。国内外专家学者对于突发水污染事件开展了一系列的研究,其中Huang等^[6]提出了一种基于多指标综合评价方法的环境风险识别模型;Hou等^[7]提出了一种基于不确定性分析和突发性水污染事故风险评估的动态预警模型;龙岩等^[8]采用数据包络分析方法对于突发水污染应急调控措施进行分析;练继建等^[9]对突发水污染事件进行评价以及应急调度方案研究;靳春玲等^[10]采用模糊层次评价法对突发水污染进行风险评价;王永桂等^[11]对流域性突发水污染事件研发了一套快速模拟与预警系统;逯晔坤等^[12]采用和谐度方程的综合评价模型对兰州黄河段突发水污染事故级别进行预测分析。

黑河是发源于祁连山冰川的三大内陆河之一^[13],张掖则是地处河西走廊中段,坐落于祁连山和黑河湿地的一座绿洲城市,人类活动频繁,对水资源利用需求较大,为主要耗水区,存在产生突发水污染事件的潜在风险,对于祁连山黑河流域供水以及生态环境具有一定的安全隐患。由于张掖地区特殊的地理位置,使其肩负起保护祁连山生态环境的重任,但对于祁连山黑河流域张掖地区突发水污染安全评价的研究不多,因此本文将祁连山黑河流域中段张掖地区为例,采用pressure - state - response (PSR)^[14]环境评价模型建立突发水污染安全评价指标体系,利用MCW - 正态云^[15]评价模型,以张掖地区2012 - 2017年为例进行突发水污染安全评价,分析得出张掖地区2012 - 2017年间产生突发水污染事件安全评价等级,研究成果有利于提升突发水污染事件应急防控水平和安全评价能力,对后续保护祁连山生态环境有重要意义。同时,将评价结果

与改进密切值法、模糊综合评价法进行对比分析,旨在验证MCW - 正态云评价模型运用于突发水污染安全评价的准确性、可靠性以及可行性。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文研究数据主要来源于:(1)《甘肃省水资源公报(2012 - 2017)》《甘肃省统计年鉴(2012 - 2017)》《张掖市统计年鉴(2012 - 2017)》;(2)相关文献资料。

2.2 指标体系构建及等级划分

2.2.1 利用PSR模型构建指标体系 我国的水污染安全评价指标体系主要由准则层和指标层构成,而在本文中,笔者也将采用这2种层次构建突发水污染安全评价指标体系,其中,准则层主要是由压力、状态和响应^[16]三者构成,其中压力(P)主要指人类活动所引起的对于资源、环境以及经济所带来的压力影响,如人口密度、工业废水排放量等;状态(S)指与水资源相关的各种经济以及环境要素当前所处的状态,如水功能区水质达标率、产(供)水模数等;响应(R)指人们在自身社会经济活动以及政策上对于突发水污染等水安全问题的能动反映^[17],同时也包括水资源的自身恢复能力以及自净性,这些都是动态变化的,如防灾应急能力、工业废水排放达标率等。最后,对于各组指标体系进行数据处理,去除研究阶段内变化剧烈的指标,按照客观性、科学性、全面性以及实用性的原则^[18],确定最终完整的指标体系,见表1。

表1 突发水污染安全评价指标体系

目标层	准则层	指标层	指标类型
突 发 水 污 染 安 全 评 价 体 系 PSR	压 力 P	人口密度 $C_1 / (\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$	-
		人均水资源量 C_2 / m^3	-
		工业废水排放量 $C_3 / (\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	-
	状 态 S	沿河危险企业数 C_4	-
		水资源开发利用效率 $C_5 / \%$	-
		水功能区水质达标率 $C_6 / \%$	+
	响 应 R	产水量模数 $C_7 / (\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	+
		供水量模数 $C_8 / (\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$	+
		水生生态 C_9	-
	PSR	水质类别 C_{10}	-
		防灾应急能力 C_{11}	+
		工业废水排放达标率 $C_{12} / \%$	+
	PSR	工业用水重复利用率 $C_{13} / \%$	+
		饮用水水源达标率 $C_{14} / \%$	+
			蓄水工程供水率 $C_{15} / \%$

2.2.2 指标体系等级划分 根据《突发环境事件信息报告办法》^[19] 以及相关资料文献 [4,12,20-22] 将突发水污染安全评价等级分为

I、II、III、IV 级 4 个等级,具体分为特别重大(I 级)、重大(II 级)、较大(III 级)和一般(IV 级)4 级,各指标具体等级分级标准见表 2。

表 2 突发水污染安全评价指标等级划分

指标名称	风险分级				上下限值
	I	II	III	IV	
C_1	≥ 80	[50,80)	[2,50)	< 25	[5,100]
C_2	> 5000	(3000,5000]	(1000,3000]	≤ 1000	[500,6000]
C_3	≥ 20000	[10000,20000)	[2000,10000)	< 2000	[1000,30000]
C_4	≥ 50	[30,50)	[5,30)	< 5	[2,60]
C_5	> 65	(45,65]	(25,45]	≤ 25	[5,90]
C_6	< 50	[50,70)	[70,90)	≥ 90	[20,100]
C_7	< 40	[40,50)	[50,60)	≥ 60	[30,70]
C_8	< 2	[2,3)	[3,4)	≥ 4	[1,5]
C_9	> 0.1	(0.001,0.1]	(0,0.001]	0	[0,0.2]
C_{10}	V	IV	II III	I	[0,100]
C_{11}	无应急投入 无应急预案	应急投入低 初步预案	应急投入中 较完善预案	应急投入高 完善预案	[0,100]
C_{12}	< 60	[60,75)	[75,90)	≥ 90	[40,100]
C_{13}	≤ 30	(30,50]	(50,80]	> 80	[10,90]
C_{14}	< 60	[60,80)	[80,95)	≥ 95	[40,100]
C_{15}	< 40	[40,50)	[50,60)	≥ 60	[20,80]

2.3 MCW - 正态云评价模型

2.3.1 云模型简介 云模型 (cloud model)^[23] 是由中国科学院院士李德毅于 1995 年根据随机数学和模糊数学理论的基础提出的,它主要是实现客观事物或现象的定性和定量之间不确定性转换的数学模型^[24],这是一个具有一定随机性和偶然性的离散转换过程,运用该模型能够有效解决突发水污染安全评价中有关离散性和随机性等问题^[25]。期望 Ex (expected value)、熵 En (entropy) 以及超熵 He (hyper entropy)^[26] 三者结合组成云模型,使得不确定语言和定量数据可进行相互转化^[27]。计算过程如下:

(1) 利用正向云发生器生成正态随机数 En_i , 其期望值为 En , 方差为 He^2 。

(2) 再次生成一个正态随机数 x_i , 以 Ex 为期望值, En^2 为方差。

(3) 计算 $u(x) = e^{(-x-Ex)^2/(2(En)^2)}$, 其中 $(x_i, u(x_i))$ 为数域中任意一个云滴。

(4) 重复以上几个步骤, 直至产生满足要求数目的 n 个云滴为止。

2.3.2 MCW 确定指标权重 本文权重采用混合交叉赋权 (mixed cross-weighting, MCW) 进行计算, 主要采用主观赋权 G1 法与客观变异系数法进行组合确定权重, 旨在减少 G1 法的主观性。具体计算步骤如下:

(1) 专家完成各个评价指标的打分与排序。

(2) 对评价指标序列 X_k 计算指标变异系数:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{ki} - \bar{X}_k)^2}{n}} \quad (1)$$

($k = 1, 2, \dots, n$)

$$C_k = \frac{\sigma_k}{\bar{X}_k} \quad (2)$$

式中: σ_k 为第 k 个评价指标的标准差; C_k 为第 k 个评价指标的变异系数值。

(3) 计算两相邻指标的重要性程度比值 r_k :

$$r_k = \begin{cases} \frac{C_{k-1}}{C_k} & (C_{k-1} \geq C_k) \\ 1 & (C_{k-1} < C_k) \end{cases} \quad (3)$$

(4) 根据上述确定的重要性程度比值, 计算第 m 个评价指标的权重 w_m :

$$w_m = [1 + \sum_{k=2}^n (\prod_{i=k}^n r_i)]^{-1} \quad (4)$$

(5) 依次计算第 $m - 1, m - 2, \dots, 3, 2$ 个指标的权重。

$$w_{k-1} = r_k w_k \quad (k = m, m - 1, \dots, 3, 2) \quad (5)$$

(6) 重复以上权重计算步骤,确定准则层权重,最终计算指标对目标层的权重。

$$w_{kj}^* = w_{kj} \phi_j \quad (6)$$

式中: w_{ij}^* 和 ϕ_j 分别为指标层和准则层对总目标的权重; w_{kj} 为指标层对准则层的权重;其中, j 和 k 分别代表准则层和指标层。

2.3.3 突发水污染综合评价步骤 对突发水污染的安全评价是一个复杂定性的多属性指标评价,结合对于水污染安全评价的各项指标以及实际情况,将目标层进行逐层细化用来构建指标体系。结合云模型理论,笔者将评价过程大致分为4个步骤。步骤1:构建指标体系;步骤2:利用合理的算法构造关于危害评价的云模型(评价指标云);步骤3:利用混合交叉赋权法计算指标权重;步骤4:计算突发水污染危害云。

具体流程如图1所示。

(1) 确定评价指标权重

① 利用公式进行正负指标处理

正向指标:

$$x'_{ij} = (x_{ij} - x_{\min}(j)) / (x_{\max}(j) - x_{\min}(j)) \quad (7)$$

负向指标:

$$x'_{ij} = (x_{\max}(j) - x_{ij}) / (x_{\max}(j) - x_{\min}(j)) \quad (8)$$

② 基于混合交叉赋权(MCW)的基本原理以及公式(1)~(6),求出突发水污染安全评价指标权重矩阵 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$,其中 n 为总共的评价指标个数。

(2) 确定隶属度矩阵

① 云模型参数的计算。云模型参数依据以下公式计算:

$$Ex = (x_{ij}^1 + x_{ij}^2) / 2 \quad (9)$$

$$En = |x_{ij}^1 - x_{ij}^2| / 2.355 \quad (10)$$

$$He = n \quad (11)$$

式中: n 为任意常数,通常通过经验以及试算进行确定,主要反映云模型的离散程度。

根据公式(9)~(11),可以确定出突发水污染安全评价云模型的特征参数 (Ex, En, He) ,利用云模型特征参数数据,并使用 Matlab 软件进行编程,利用正向云发生器对人口密度、人均水资源量等15个指标生成正态云图,由于篇幅原因,本文仅给出压力状态下人口密度、人均水资源量、工业废水排放量、沿河危险企业数和水资源开发利用5个指标的云模型特征参数以及正态云图,见表3和图2。其中,设置云滴数 $n = 2000$,以平均值为最后的度量值。

② 隶属度矩阵的确定。通过收集资料确定各个指标体系原始数据,对每一项指标数据运用正向云发生器进行处理,即 $u(x) = e^{(-x-Ex)^2 / (2(En)^2)}$,重复计算 $N = 500$ 次,计算所得指标数据隶属于不同突发水污染安全评价等级下的平均隶属度,构成隶属矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times m}$ 。

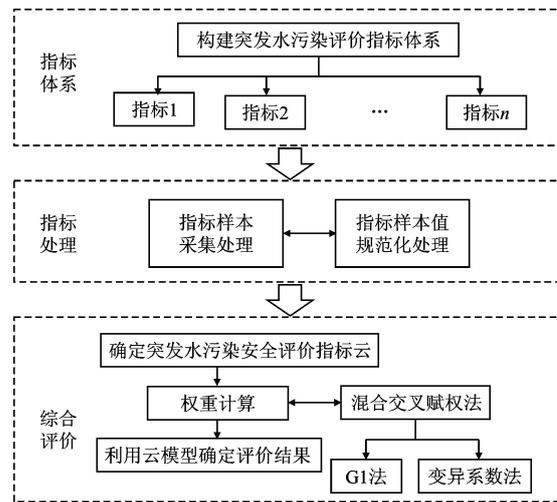


图1 突发水污染安全综合评价流程

表3 水污染系统安全评价压力状态下5个指标不同评价等级的正态云模型特征参数

指标	I 特别重大			II 重大			III 较大			IV 一般		
	Ex	En	He	Ex	En	He	Ex	En	He	Ex	En	He
C_1	90	8.4926	0.01	65	12.7389	0.01	37.5	10.6157	0.01	15	8.4926	0.01
C_2	5500	424.6285	0.01	4000	849.2569	0.01	2000	849.2569	0.01	750	212.3142	0.01
C_3	25000	4246.2845	0.01	15000	4246.2845	0.01	6000	3397.0276	0.01	1500	424.6285	0.01
C_4	60	8.4926	0.01	40	8.4926	0.01	17.5	10.6157	0.01	3.5	1.2739	0.01
C_5	77.5	10.6157	0.01	55	8.4926	0.01	35	8.4926	0.01	15	8.4926	0.01

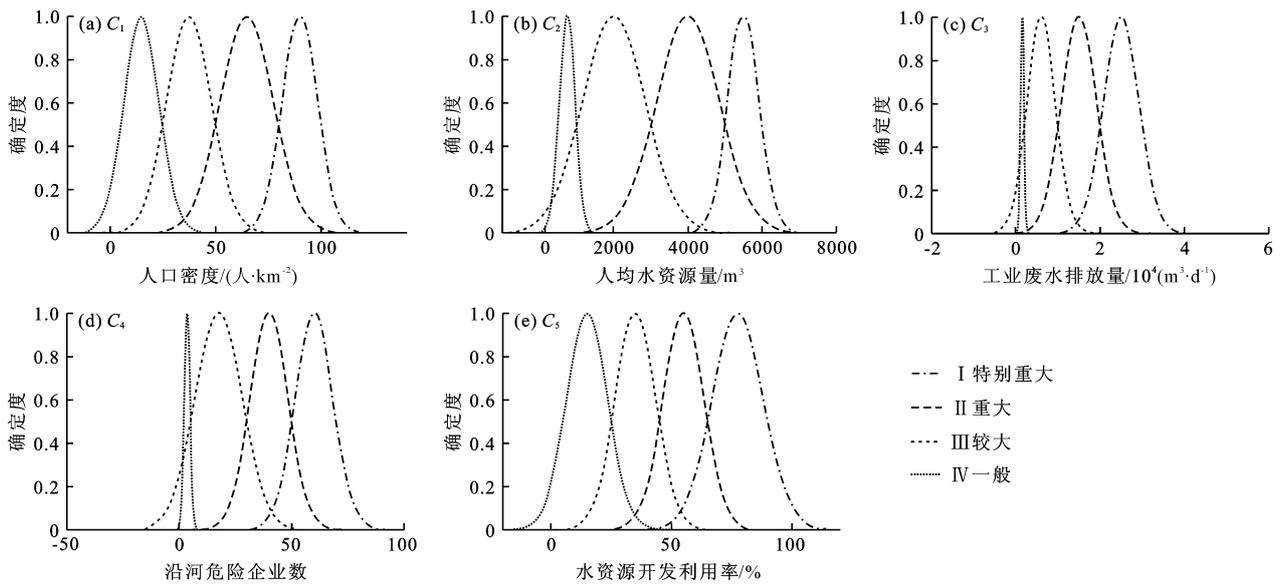


图 2 压力状态下 5 个指标的评价等级正态云图

③突发水污染安全评价

利用 MCW 确定出的权重集 W 和指标云隶属矩阵 R , 利用公式 $U = W^T \times R$, 计算获得 $U = [u_1, u_2, u_3, u_4]$ 。并且结合最大确定度原则, 计算得出突发水污染安全评价分级。

3 结果分析与讨论

3.1 评价结果与分析

(1) 指标权重计算。利用上述公式对原始数据进行归一化处理以及权重计算, 计算结果见表 4。

表 4 2012 - 2017 年各评价指标归一化及处理及权重计算结果

指标	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	W_1	W_2	W
C_1	1	0.9091	0.8182	0.7273	0.0000	0.2727	0.2650		0.0902
C_2	0.2264	0.0165	0.0000	0.2103	0.6577	1	0.2650		0.0902
C_3	0	0.2883	0.4465	0.5693	0.8769	1	0.1647	0.3405	0.0561
C_4	0.9286	1.0000	0.6429	0.2857	0.0714	0	0.1647		0.0561
C_5	1	0.7192	0.5407	0.3901	0.2036	0	0.1407		0.0479
C_6	0	0.3557	0.4803	0.6918	0.8595	1	0.1917		0.0653
C_7	0	0.4800	0.5200	0.6400	0.7600	1	0.1917		0.0653
C_8	0.0916	0.0000	0.8244	0.9160	0.9618	1	0.2353	0.3405	0.0801
C_9	0	0.4000	0.9200	1.0000	1.0000	1	0.1906		0.0649
C_{10}	0	0.2500	0.3846	0.3462	0.5000	1	0.1906		0.0649
C_{11}	0.0222	0.0000	0.2444	0.6444	0.8222	1	0.1936		0.0617
C_{12}	0	0.7128	0.6895	0.8837	0.7483	1	0.1936		0.0617
C_{13}	0	0.4774	0.6590	0.7480	0.9148	1	0.2124	0.3189	0.0677
C_{14}	0	0.5577	0.8052	1.0000	0.7505	0.8976	0.2002		0.0639
C_{15}	0	0.4122	0.7252	0.8000	0.8439	1	0.2002		0.0639

注: C_{10} 和 C_{11} 采用专家打分法确定权重。

利用上述 MCW 权重计算方法, 经计算, 求得张掖地区突发水污染安全评价各指标权重, 即:

$$W = [0.0902, 0.0902, 0.0561, 0.0561, 0.0479, 0.0653, 0.0653, 0.0801, 0.0649, 0.0649, 0.0617, 0.0617, 0.0677, 0.0639, 0.0639]^T$$

(2) 隶属度计算。

采用云模型正向发生器计算隶属度, 以 2012 年为例, 所求矩阵如下:

$$R = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 0.0172 & 0.0000 & 0.0000 & 0.9999 & 0.7791 & 0.0099 & 0.0029 & 0.4999 & 0.0029 & 0.0125 & 0.0019 & 0.0246 & 0.9837 \\ 0.0261 & 0.0524 & 0.8847 & 0.0625 & 0.0000 & 0.0122 & 0.0092 & 0.7920 & 0.5567 & 0.4999 & 0.5703 & 0.4871 & 0.4916 & 0.9347 & 0.0066 \\ 0.8096 & 0.9973 & 0.1272 & 0.9727 & 0.0570 & 0.0000 & 0.0000 & 0.2471 & 0.0000 & 0.0625 & 0.4544 & 0.5129 & 0.5055 & 0.0782 & 0.0000 \\ 0.1851 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.9992 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0003 & 0.0005 & 0.0000 & 0.0015 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

同理,可计算得出 2013 - 2017 年隶属度矩阵。

(3) 分级对比评价。

根据最大确定度原则,对综合确定度 U 进行评价,获得突发水污染安全评价最终结果,其中采用公式 $U = W^T \times R$ 计算综合确定度 $U = [U_1, U_2, U_3, U_4]$,并利用本文权重使用改进密切值法、模糊综合评价法对本文原始数据进行评价分析,分析结果与本文结果进行比较(鉴于篇幅,上述两者辅助对比分析方法评价过程从略)评价结果见表 5。

表 5 基于 MCW - 正态云模型对 2012 - 2017 年黑河流域张掖地区突发水污染安全评价结果及比较

年份	确定度				本文方法	改进密切值法	模糊综合评价法
	I 级	II 级	III 级	IV 级			
2012	0.2160	0.3524	0.3503	0.0647	II 级	II 级	II 级
2013	0.0659	0.4155	0.4946	0.0571	III 级	III 级	II 级
2014	0.0278	0.2473	0.5385	0.0615	III 级	III 级	III 级
2015	0.0085	0.2410	0.6715	0.1197	III 级	III 级	III 级
2016	0.0030	0.1691	0.7139	0.1249	III 级	III 级	III 级
2017	0.0019	0.1278	0.7382	0.2232	III 级	III 级	IV 级

3.2 讨论

(1) 本文评价方法与改进密切值法、模糊综合评价法评价结果大致相同,表明本文所用 MCW - 正态云模型对于突发水污染进行安全评价是可行的,可作为一种新的突发水污染安全评价模型。其中,改进密切值法与本文评价结果一致;模糊综合评价法与本文评价结果在 2013 和 2017 年存在一个等级差异,这是由片面性和主观性造成的。表明 MCW - 正态云模型这一评价方法更为详细,具有一定的合理性、可操作性和可信性。

(2) 采用 MCW - 正态云模型对于黑河流域张掖地区 2012 - 2017 年突发水污染进行安全评价,结果为:2012 年突发水污染安全评价等级为 II 级重大危险;2013 - 2017 年突发水污染安全等级均为 III 级较大危险。其中从确定度来看,在 2012 年 II 级与 III 级确定度相差不大,且二者随时间均呈下降趋势;2013 - 2017 年 III 级与 IV 级确定度随时间呈上升趋势。由此说明黑河流域张掖地区对突发水污染安全治理的能力随时间逐步提升。

(3) 从表 4 的计算结果来看,黑河流域张掖地区在 2012 - 2017 年间,由于受气候因素以及当地发展状况的影响,在压力范围内的评价指标值具有较大的不确定性和随机性,对于突发水污染安全评价的影响也显现出较强的随机性;状态范围内的评价指标中,产、供水量模数以及水生生态变化不是很明

显,水功能区水质达标率呈明显上升趋势,水质类别随时间变化整体趋于变好状态;响应指标中,工业废水排放达标率以及工业用水重复利用率呈明显上升趋势,其余指标随时间变化整体也呈现上升或波动上升趋势。

综合来看,压力指标对突发水污染安全水平的提升贡献不大。2012 - 2017 年由于张掖地区经济水平的快速发展、民生水平的逐渐提升以及环境保护治理措施日渐完善,因此响应体系指标对于突发水污染安全评价尤为重要,需进一步加大对于工业、农业用水的节水力度,完善突发水污染应急措施,加大惩戒力度,从根源上解决突发水污染安全问题。

4 结论

(1) 本文通过突发水污染安全评价的定义及其影响因素,构建了黑河流域张掖地区突发水污染安全评价指标体系以及分级标准,将正态云模型运用到评价体系中,建立 MCW - 正态云突发水污染安全评价模型。通过正向云发生器生成等级云图和分级评价指标的隶属度,再结合权重计算得出各指标权重,确定突发水污染安全评价结果。并将结果与其他评价方法进行对比分析,证明其用于突发水污染安全评价的合理性和可行性。

(2) 利用 G1 法与变异系数法组合的形式计算权重,减少主观性,使权重确定结果更加客观,从而

突出当前黑河流域张掖地区突发水污染各评价指标的相对性,符合实际。

(3)基于MCW-正态云模型对于黑河流域张掖地区2012-2017年突发水污染安全进行评价,结果为2012年处于Ⅱ级重大危险,2013-2017年处于Ⅲ级较大危险,表明对突发水污染安全的治理正在进一步向完善的趋势发展,应继续加强改革措施,提高突发水污染防治能力。同时,本文模型评价结果有效合理可靠,对其他不同类型的体系综合评价同样适用。

参考文献:

- [1] 许静,王永桂,陈岩,等. 中国突发水污染事件时空分布特征[J]. 中国环境科学,2018,38(12):4566-4575.
- [2] LONG Yan, XU Guobin, MA Chao, et al. Emergency control system based on the analytical hierarchy process and coordinated development degree model for sudden water pollution accidents in the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project in China. [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2016, 23(12):12332-42.
- [3] 肖筱瑜. 2012-2017年国内重大突发环境事件统计分析[J]. 广州化工,2018,46(15):146-148+157.
- [4] 龙岩,雷晓辉,杨艺琳,等. 南水北调工程突发水污染事件分级体系研究[J]. 水力发电学报,2019,38(3):12-22.
- [5] 周宏伟,黄佳聪,高俊峰,等. 太湖流域太浦河周边区域突发水污染潜在风险评估[J]. 湖泊科学,2019,31(3):646-655.
- [6] HUANG Lei, WAN Wenbo, LI Fengying, et al. A two-scale system to identify environmental risk of chemical industry clusters[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(1):247-255.
- [7] HOU Dibo, GE Xiaofan, HUANG Pingjie, et al. A real-time, dynamic early-warning model based on uncertainty analysis and risk assessment for sudden water pollution accidents[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2014, 21(14):8878.
- [8] 龙岩,李有明,孔令仲,等. 基于数据包络分析的突发水污染事件应急调控后评价研究[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(5):157-161.
- [9] 练继建,孙萧仲,马超,等. 水库突发水污染事件风险评估及应急调度方案研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2017,50(10):1005-1010.
- [10] 靳春玲,王运鑫,贡力. 基于模糊层次评价法的黄河兰州段突发水污染风险评估[J]. 安全与环境学报,2018,18(1):363-368.
- [11] 王永桂,张潇,张万顺. 流域突发性水污染事故快速模拟与预警系统[J]. 环境科学与计术,2018,41(7):164-171.
- [12] 逯晔坤,靳春玲,贡力. 黄河兰州段突发水污染事故级别预测[J]. 人民黄河,2019,41(6):62-65+70.
- [13] 苏琦,袁道阳,谢虹. 祁连山-河西走廊黑河流域地貌特征及其构造意义[J]. 地震地质,2016,38(3):560-581.
- [14] ZHOU De, LIN Zhulu, LIU Liming, et al. Assessing secondary soil salinization risk based on the PSR sustainability framework. [J]. Journal of Environmental Management, 2013,128:642-54.
- [15] 石晓静,查小春,刘嘉慧,等. 基于云模型的汉江上游安康市洪水灾害风险评估[J]. 水利水电科技进展,2017,37(3):29-34+48.
- [16] 张崇森,李森,张力喆,等. 基于PSR模型的城市生态安全评价与贡献度研究——以铜川市为例[J]. 安全与环境学报,2019,19(3):1049-1056.
- [17] 王国重,李中原,张继宇,等. 基于压力-状态-响应模型的河南省水库生态安全评估[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(4):12-17.
- [18] LIU Jie, YAN Zhen, YUAN Jianping, et al. One large glitch in PSR B1737-30 detected with the TMRT[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2019, 19(5):115-124.
- [19] 突发环境事件信息报告办法[J]. 司法业务文选,2011(27):37-41.
- [20] 朱炜玉. 基于数据驱动模型的突发水污染预警技术与应急管理研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [21] 王运鑫. 基于模糊贝叶斯网络的突发水污染事故风险评估研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2018.
- [22] 周云哲,粟晓玲. 基于指标规范化的正态云模型的水安全评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(4):18-24+66.
- [23] 高玉琴,赖丽娟,姚敏,等. 基于正态云-模糊可变耦合模型的水环境质量评价[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(5):1-7.
- [24] YAN Fang, XU Kaili. Methodology and case study of quantitative preliminary hazard analysis based on cloud model [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019,60:116-124.
- [25] 梁力,邢观华,吴凤元. 基于云理论的评估模型和方法[J]. 东北大学学报(自然科学版),2019,40(6):881-885.
- [26] SONG Wen, ZHU Jianjun. A multistage risk decision making method for normal cloud model considering behavior characteristics [J]. Applied Soft Computing Journal, 2019,78:393-406.
- [27] 季晓翠,王建群,傅杰民. 基于云模型的滨海小流域水生态文明评价[J]. 水资源保护,2019,35(2):74-79.