

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.05.005

基于 Critic-Cloud 模型的东江干流水质评价

白晓燕,赖成光,陈晓宏,于海霞,吴孝情

(中山大学地理与规划学院,广东 广州 510275)

摘要:将云模型引入到水质评价研究中,选用 COD_{Mn}、NH₃-N 和 TP 等 9 个指标构建云模型的特征数,利用 Critic 法推求各因子客观权重后采取最大确定度来判定水质的综合评价等级,对 2004—2010 年东江干流水质进行了综合评价,并选取东岸断面评价结果与由模糊综合评价法得出结果进行对比。结果表明:基于云模型的东江干流水质综合评价多为 I ~ II 级,这与实际水质相符,同模糊综合评价法评价结果吻合程度为 96.6%,表明基于云模型的地表水体水质评价方法合理可行,且能更为直观的表述水质评价中的模糊性和随机性。

关键词:水质评价;云模型;Critic 权;东江干流

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2014)05-0026-06

Evaluation of water quality of trunk stream of Dongjiang River based on Critic-cloud model

BAI Xiaoyan, LAI Chengguang, CHEN Xiaohong, YU Haixia, WU Xiaoqing

(School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: In this study, the cloud model was used for water quality evaluation. Nine evaluation indicators, including COD_{Mn}, NH₃-N, and TP, were chosen to describe the cloud feature, and the comprehensive levels of water quality were determined according to the maximum degree of certainty after the acquisition of each indicator's objective weight calculated by the Critic method. The water quality of the trunk stream of the Dongjiang River from the period of 2004 to 2010 was evaluated. The evaluation results of a section of the east bank were compared with those obtained by the fuzzy comprehensive assessment model. The study shows that the comprehensive level of water quality of the trunk stream of the Dongjiang River was mostly at grade I to II in the cloud model, which accords with the actual water quality. This result is consistent with that of the fuzzy comprehensive assessment model, with a degree of consistency of 96.6%, indicating that the cloud model-based surface water quality evaluation method is reasonable and feasible and can directly show the characteristics of fuzziness and randomness in water quality evaluation.

Key words: water quality evaluation; cloud model; Critic weight; trunk stream of Dongjiang River

水质评价是区域水环境、水安全研究的重要内容,通过水质评价可以定量分析区域水质面临的问题,并对现状和未来水安全管理提供决策依据^[1]。早在 20 世纪 60 年代, Jacobs^[2] 就提出水体质量评价

的水质指数(WOI)概念和计算公式;而后,综合指数法广泛运用于水质评价,国内外学者提出的 Nemerow 模式、均方差模式、指数模和 Ross 水质指数法等多种综合模式被广泛应用^[3-5]; 20 世纪 80

基金项目:国家自然科学基金国际合作重大和重点项目(51210013, 50839005);国家自然科学基金(51209095, 41301627);水利部公益性行业科研专项(201201094, 201301002-02)

作者简介:白晓燕(1978—),女,讲师,博士研究生,主要从事区域水资源与环境变异研究。E-mail:xybai7829@163.com
通信作者:陈晓宏,教授。E-mail:eescxh@mail.sysu.edu.cn

年代以来,模糊集理论、灰色系统理论和数理统计等理论的应用,大大丰富了水质评价的方法^[6]。

目前,国内外最常见的水质评价方法有单因子指标法、综合污染指数法、基于多元统计的水质评价方法和基于数学模型的水质评价方法等。这些方法和模型各有特点,但在评价过程中不可避免地遇到模糊性和随机性问题;评价因子与水质等级间存在着复杂的非线性关系,当水质指标值界于两个相邻级别时,很难准确判断其属于哪个级别,因此充分考虑评价过程中的不确定性对获得准确的评价结果尤为重要^[1]。鉴于此,本文引入云模型的水质评价方法,综合考虑评价过程中存在的模糊性与随机性特点,根据所选取的评价因子和国家水质标准,生成各因子隶属于各级别的云模型,对东江干流的水质进行评价,并将评价结果与模糊综合评价的结果进行对比以验证云模型对水质进行评价的合理性。

1 云模型简介

云模型是李德毅等^[7]基于概率论和模糊数学理论,构建的一种定性概念与其定量数值表示之间的不确定性转换模型。正态云模型已被证明具有应用的普适性^[8],已成功运用于自然语言处理、时间序列预测、空间数据挖掘、决策分析、智能控制和图像处理等众多研究领域^[9-13]。

1.1 云和云滴

设 U 是 1 个用精确数值表示的定量论域, U 上对应着定性概念 C , 若定量值 $x \in U$, 且 x 是 C 的一次随机实现, x 对 C 的确定度 $\mu(x) \in [0, 1]$ 是具有稳定倾向的随机数^[8] $y = u_A(x)$ 。其中, x 为对 C 的确定度, x 在 U 上的分布称为云模型, 简称为云^[14], 每个 x 称为 1 个云滴。

1.2 云的数字特征

在云模型的基础理论中, 采用期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 构建云的数字特征, 充分地把随机性和模糊性结合起来^[8], 完成定性和定量之间的相互映射。

期望 E_x : 云滴在论域空间分布的期望, 最能代表定性概念的中心点, 是概念量化的最典型样本点。

熵 E_n : 定性概念的不确定性度量。一方面是定性概念重合度量, 反映论域空间中可被定性概念接受的云滴取值范围; 另一方面 E_n 又是定性概念随机性度量, 反映了能够代表这个定性概念云滴的离散程度。

超熵 H_e : 超熵是熵的不确定性的度量, 反映了在论域空间代表该语言值的所有点的不确定度的凝聚性, 其取值范围间接地反映了云滴的厚度, 由熵的随机性和模糊性共同决定。

1.3 云发生器

云模型中, 定性概念与定量数据之间相互映射是通过云发生器完成的^[15]。云发生器分为正向云发生器与逆向云发生器两大类(图 1), 其中正向云发生器是根据云的数字特征 (E_x, E_n, H_e) 产生云滴, 多个云滴构成 1 个完整的云, 是从定性向定量的转化; 逆向云发生器是实现从定量值到定性概念的转换模型, 其将一定数量的精确数据转换为云模型对应的 3 个数字特征 E_x, E_n, H_e 。

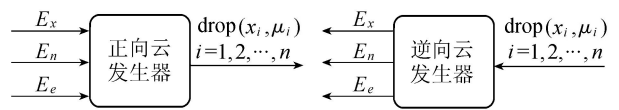


图 1 正向云发生器和逆向云发生器工作示意图

本文基于正态分布在自然界的普适性, 采用正向正态云发生器, 建立定性概念与定量数据之间的相互映射。算法如下。

输入: 表征概念的云向量 (E_x, E_n, H_e) 及需产生的云滴数目 n 。

输出: 带有确定度 μ 的云。

算法步骤:

第 1 步: 计算 $E'_{n_i} = \text{NORM}(E_n, H_e^2)$ (E'_{n_i} 是以 E_n 为期望、 H_e^2 为方差的正态随机值);

第 2 步: 计算 $x_i = \text{NORM}(E_x, E'^2_{n_i})$ (x_i 是以 E_x 为期望、 $E'^2_{n_i}$ 为方差的正态随机值);

第 3 步: 计算 $\mu_i = \exp\left[-\frac{(x_i - E_x)^2}{2E'^2_{n_i}}\right]$, $\text{drop}(x_i, \mu_i)$ 即为满足条件的云滴;

第 4 步: 重复以上步骤, 产生 n 个云滴构成整个云为止。

2 东江干流水质评价

2.1 研究区概况及数据来源

东江流域位于珠江三角洲的东北端 ($E113^{\circ}52' \sim 115^{\circ}52'$, $N22^{\circ}38' \sim 25^{\circ}14'$)。博罗水文站控制流域面积 27040 km^2 , 有新丰江、秋香江、西枝江等主要支流, 流域地势呈东北高, 西南低, 最高海拔不超过 1500 m 。流域地处亚热带湿润季风气候区, 多年平均气温为 20.4°C , 多年平均雨量为 1750 mm , 多年平均水面蒸发量为 1200 mm 。博罗站多年平均径流量为 244.44 亿 m^3 , 其中汛期 (4—9 月) 约占全年径流量的 $75\% \sim 80\%$ 。

东江是广州、深圳以及香港等大城市的重要供水来源, 其水质直接关系到这些地区社会经济稳定。研究采用东江干流河源段、惠州段和东莞段 2004—

2010 年各月份的监测数据,以及惠州境内东岸断面 2007—2009 年逐月监测数据对东江干流水体水质进行评价。

2.2 评价因子体系建立与 Critic 权重计算

根据东江流域的实际情况,选取 DO、COD_{Mn}、COD、BOD₅、NH₃-N、TP、TN、硫化物和粪大肠菌群 9 个因子建立水质评价体系。评价指标体系及分级标准^[16]见表 1。

评价因子权重的确定是水质评价过程中的一个重要环节,权重的合理性直接影响水质评价结果。根据计算权重数据序列的来源,有关权重的确定方法可划分为主观权重法、客观权重法和组合赋权法。笔者采取由 Critic (Criteria importance through intercriteria correlation) 法计算的客观权重。Critic 法是由 Diakoulaki^[17]于 1995 年提出的以某评价因子间的对比强度和评价因子间的冲突性来综合衡量特征的客观赋权方法,是一种全面考虑数据特性和分布特点的客观权重确定方法。对比强度表示同一个因子各个级别之间取值差距的大小,以标准差的形式来表现,标准差越大则各级别之间的差距越大;存在于评价因子间的相关性是评价因子冲突性的基础,如果评价因子间正相关性较强,表明这两个特征的冲突性较低,第 j 个评价因子与其他评价因子之间的冲突性量化因子为 $\sum_{k=1}^m (1-R_{kj})$,其中 R_{kj} 表示第 j 个因子和第 k 个因子的相关系数。第 j 个因子所包含的信息量用以下式子表示

$$G_j = S_j \sum_{k=1}^m (1 - R_{kj}) \tag{1}$$

式中, S_j 表示第 j 个因子的类间标准差,则 Critic 法得到的第 j 个因子的归一化权重为

表 1 水质评价指标 C_i 和分级标准值 C_{jk}

		评价指标代码与评价因子								
分级标准值		C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
		$\rho(\text{DO})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{COD})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{BOD}_5)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{硫化物})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	粪大肠菌群含量/(万个 $\cdot \text{L}^{-1}$)
C_{jk}	I 级	7.5	2	15	3	0.15	0.2	0.2	0.05	0.02
	II 级	6	4	15	3	0.5	0.5	0.5	0.1	0.2
	III 级	5	6	20	4	1	1	1	0.2	1
	IV 级	3	10	30	6	1.5	1.5	1.5	0.5	2
	V 级	2	15	40	10	2	2	2	1	4

表 2 各水质评价指标的 Critic 权重

断面	Critic 权重								
	DO	COD _{Mn}	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TP	TN	硫化物	粪大肠菌群
东 岸	0.070 2	0.074 4	0.145 0	0.117 0	0.088 2	0.075 9	0.176	0.119	0.134
河源段	0.072 7	0.138 0	0.057 1	0.059 5	0.189 0	0.138 0	—	0.191	0.154
惠州段	0.069 4	0.098 6	0.207 0	0.124 0	0.110 0	0.133 0	—	0.158	0.101
东莞段	0.049 6	0.118 0	0.215 0	0.176 0	0.082 7	0.095 6	—	0.114	0.150

$$W_j = \frac{G_j}{\sum_{j=1}^m G_j} \tag{2}$$

将各评价因子的实测值代入式(1)和式(2),计算出所选取 9 个指标的客观权重,见表 2。

2.3 云模型的数字特征确定及云模型生成

根据已经选择的评价因子及参照标准,采用文献[18]提出的一种双边约束下的参数计算公式(式(3)),确定云模型的具体参数 E_x , E_n , H_e 。

$$\begin{cases} E_x = (B_{\min} + B_{\max})/2 \\ E_n = (B_{\max} - B_{\min})/6 \\ H_e = k \end{cases} \tag{3}$$

式中: $B_{\min}$ 、 $B_{\max}$ 分别为水质评价某等级的最小、最大值。超熵 H_e 是表征熵 E_n 不确定性的度量,即为熵的熵,本文假设其为 $H_e = kE_n$,并令 $k=0.01$ 。由于云模型中熵 E_n 的计算是基于正态分布的 3σ 原理,为避免实测数据在水质评价等级边界附近其确定度趋于零的问题,将 E_n 的计算公式做了一定调整(表 3)。

采用正向正态云发生器及半云发生器,生成水质评价因子隶属级别的定性概念云模型(图 2)。以图 2(e)为例,横坐标表示 NH₃-N 的质量浓度,纵坐标指代某一实际监测定值通过云模型映射所对应的确定度,从左至右,分别代表地表水环境质量标准中的 I 级至劣 V 级对应的云,图 2(a)则相反。

2.4 因子综合确定度计算

基于云模型的水质综合评价的流程主要包括:①建立评价因子体系;②根据 Critic 法计算各因子权重;③生成云模型数字特征,建立云模型;④计算因子综合确定度。其中建立评价因子规则库和评价因子权重是关键。确定因子综合确定度的计算步骤如下:

表3 云模型参数计算准则

等级	E_x		E_n		H_e
	$C_2 \sim C_9$	C_1	$C_2 \sim C_9$	C_1	$C_1 \sim C_9$
I	$(B_{1min}+B_{1max})/2$	$(B_{1min}+2B_{1min})/2$	$(E_{x1max}-E_{1min})/3$	$(E_{x1min}-E_{x2min})/3$	$0.01 E_n$
II	$(B_{2min}+B_{2max})/2$	$(B_{2min}+B_{2max})/2$	$(E_{x2max}-E_{2min})/3$	$(E_{x2max}-E_{x2min})/3$	$0.01 E_n$
III	$(B_{3min}+B_{3max})/2$	$(B_{3min}+B_{3max})/2$	$(E_{x3max}-E_{3min})/3$	$(E_{x3max}-E_{x3min})/3$	$0.01 E_n$
IV	$(B_{4min}+B_{4max})/2$	$(B_{4min}+B_{4max})/2$	$(E_{x4max}-E_{4min})/3$	$(E_{x4max}-E_{x4min})/3$	$0.01 E_n$
V	$(B_{5min}+B_{5max})/2$	$(B_{5min}+B_{5max})/2$	$(E_{x5max}-E_{5min})/3$	$(E_{x5max}-E_{x5min})/3$	$0.01 E_n$
劣V	$(B_{6min}+2B_{6min})/2$	$(B_{6min}+B_{6max})/2$	$(E_{x6min}-E_{6min})/3$	$(E_{x6max}-E_{x6min})/3$	$0.01 E_n$

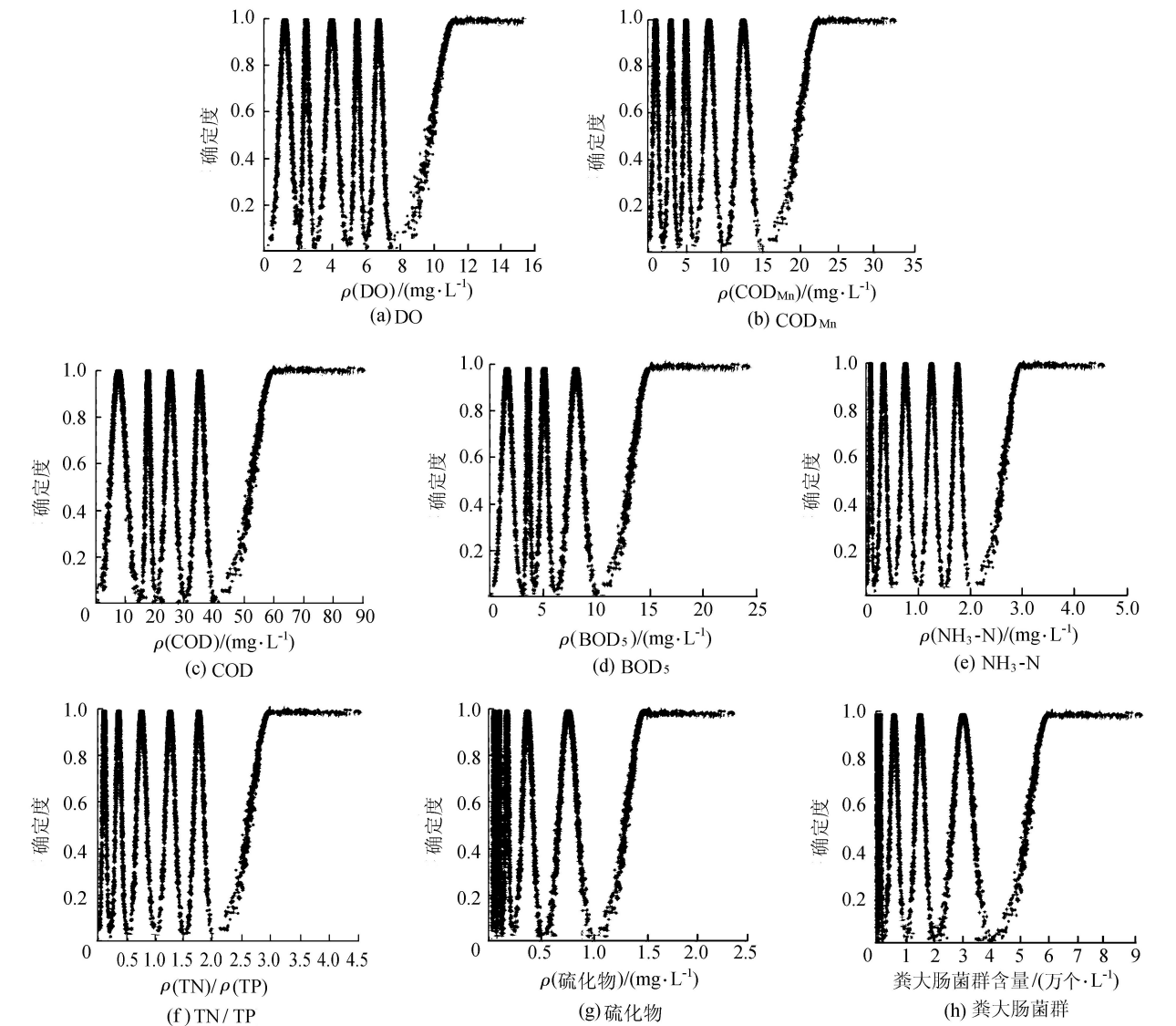


图2 水质评价因子隶属级别的定性概念云模型

第1步:将监测数据的实测值输入云模型中,得到各个实测值隶属于某一级别的确定度 $\mu(x)$;
第2步:根据总体监测数据序列确定评价因子权重;
第3步:将步骤1和步骤2计算结果相乘得出综合确定度,选取相应最大确定度所属级别作为各监测断面水体的水质综合评价级别。

3 结果分析与讨论

东岸断面水质评价结果如表4所示,可以看出

东岸断面2007—2009年水质综合评价等级大多位于Ⅱ级,但个别时段达到Ⅲ级甚至Ⅴ级。2007年全年均为Ⅱ级,而2008年变化幅度较大,大部分月份达到Ⅱ级,4月份达到Ⅲ级,7月份则高达Ⅴ级。2008年7月水质发生突变的主要原因是该月TN浓度超标,由于TN权重较大,浓度超标容易造成高级别确定度增大。2009年1—3月水质能达到Ⅰ级,4—9月水质变为Ⅱ级,10—12月的枯水期由于TN浓度有所提高,水质变为Ⅲ级。

表 4 东岸断面水质级别确定度及综合评价结果

年份	月份	水质级别确定度						评价等级	
		I 级	Ⅱ 级	Ⅲ 级	Ⅳ 级	V 级	劣 V 级	云模型	模糊综合
2007	1	0.09	0.24	0.02	0.08	0.01	0	Ⅱ	Ⅱ
	3	0.11	0.30	0.06	0.02	0.08	0.01	Ⅱ	Ⅱ
	5	0.18	0.63	0.11	0.02	0	0	Ⅱ	Ⅱ
	7	0.26	0.49	0.11	0.02	0	0	Ⅱ	Ⅱ
	9	0.21	0.59	0.10	0.02	0	0	Ⅱ	Ⅱ
	11	0.23	0.44	0.09	0.03	0	0	Ⅱ	Ⅱ
2008	1	0.62	0.27	0.11	0.03	0	0	I	I
	3	0.35	0.11	0.03	0.01	0	0	I	I
	4	0.15	0.26	0.28	0.03	0	0	Ⅲ	Ⅱ
	5	0.09	0.38	0.05	0.01	0	0	Ⅱ	Ⅱ
	6	0.15	0.24	0.19	0.04	0.01	0	Ⅱ	Ⅱ
	7	0.16	0.14	0.05	0.01	0.33	0.02	V	V
	8	0.10	0.15	0.05	0.02	0	0	Ⅱ	Ⅱ
	9	0.12	0.45	0.22	0.01	0	0	Ⅱ	Ⅱ
	10	0.12	0.49	0.25	0.01	0	0	Ⅱ	Ⅱ
	11	0.10	0.13	0.06	0.02	0	0	Ⅱ	Ⅱ
	12	0.11	0.13	0.05	0.01	0	0	Ⅱ	Ⅱ
2009	1	0.22	0.10	0.05	0.01	0	0	I	I
	2	0.50	0.09	0.04	0.06	0.06	0.01	I	I
	3	0.15	0.13	0.04	0.01	0	0	I	I
	4	0.06	0.12	0.11	0.01	0	0	Ⅱ	Ⅱ
	5	0.08	0.27	0.04	0.01	0	0	Ⅱ	Ⅱ
	6	0.09	0.12	0.05	0.02	0	0	Ⅱ	Ⅱ
	7	0.10	0.14	0.06	0.02	0	0	Ⅱ	Ⅱ
	8	0.08	0.22	0.06	0.02	0	0	Ⅱ	Ⅱ
	9	0.08	0.12	0.10	0.02	0	0	Ⅱ	Ⅱ
	10	0.07	0.06	0.21	0.03	0	0	Ⅲ	Ⅲ
	11	0.05	0.06	0.19	0.01	0	0	Ⅲ	Ⅲ
	12	0.05	0.06	0.18	0.01	0	0	Ⅲ	Ⅲ

注:东岸断面在 2008 年 3 月以前对水质进行 2 个月 1 测,之后采取 1 个月 1 测。

为了验证评价结果是否科学合理,采用模糊综合评价法^[19]并输入相同原始数据、分类标准和权重得出东岸站断面评价结果(表 3)。可以看出除 2008 年 4 月外,基于云模型的评价结果和模糊综合评价结果基本一致。该月基于云模型的水质评价结果为Ⅲ级,而模糊综合评价结果为Ⅱ级,两者相差一个级别。造成差异原因除二者计算原理不同外,二者对处于临界值附近的数值判断能力也有所区别。分析 2008 年 4 月各因子数据,除 DO 和 TN 外,其余 6 个因子数据均位于非临界值附近。DO 质量浓度实测值为 6.23 mg/L,位于临界值 6.00 mg/L 附近,根据分类标准可知应归为Ⅱ级。而 TN 质量浓度为 0.84 mg/L,位于临界值 1.00 mg/L 附近,根据分类标准可知应归为Ⅲ级。由表 2 可知,DO 权重仅为 0.0702,而 TN 的权重则达到 0.176,因此在计算确定度时 TN 因子应该起主导作用,判别为Ⅲ级的概率更大,Ⅲ级的确定度更大,因而云模型的评价结果更为合理。但模糊综合评价法计算出属于Ⅱ级的隶属度比Ⅲ级的大从而将该月判别为Ⅱ级。显然对于此月份的结果,模糊综合评价法没有很好识别临界

值附近数值的模糊性而导致判别失误。由此可知,基于云模型的评价方法比模糊综合评价法能更好识别临界值附近的模糊性,可以更好解决评价过程中的模糊性问题。再对各个评价月份进行统计分析可知,两种结果吻合程度达到 96.55%,表明本文基于云模型建立起来的评价方法是合理可行的,评价结果可作为流域水质管理的依据。

对东江干流河源段、惠州段、东莞段 2004—2010 年各个月份的综合评价结果进行统计分析,得出各年份每一级别所占百分比,如图 3 所示。由图 3 可知,河源段 2004—2010 年水质能常年达到Ⅰ级,主要是因为河源段位于新丰江水库和枫树坝水库下游,且河源境内工业较少,治理点源和面源污染力度较大,使得水质保持良好。惠州段在 2004—2010 年期间水质总体能保持在Ⅰ~Ⅱ级,个别月份达到Ⅲ级。东莞段水质总体保持在Ⅱ级。总体来说,东江干流水质良好,表明广东省为切实保护和改善东江水质做出了不懈的努力,这为香港、广州、深圳等城市的供水提供了重要的水质保障。

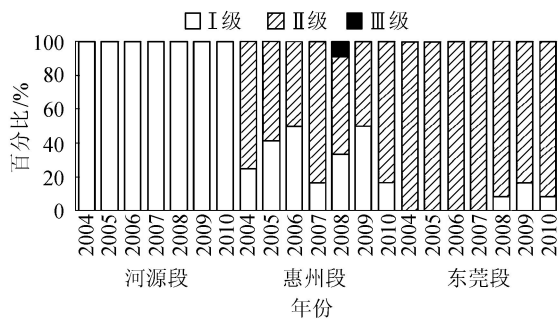


图3 2004—2010年东江干流河段水质类别百分比

4 结 论

a. 将基于 Critic 权的云模型引入到水质评价中,对东江干流河段和东岸断面水质进行评价,并把评价结果与模糊综合评价结果进行对比,发现两种方法评价结果吻合程度高达 96.55%,但在评判临界值数据时云模型评判更为准确,可以较好地解决评价中的模糊性问题,表明基于云模型的水质评价方法是合理可行的,评价结果可作为流域水质管理的依据。

b. 基于云模型的东江干流河源段水质综合评价结果为 I 级,惠州段和东莞段多为 II 级,这与实际水质相吻合。近年来,东江水质总体较好与广东省大力执行严格的环境管理制度,切实保护和改善东江水质所做的努力密切相关。

c. 云模型理论与方法已在数据挖掘、时间序列预测分析等领域得到广泛应用,而在水质方面研究不多。本文建立的基于 Critic 权重的云模型能更好识别临界值附近的模糊性,较好处理评价因子与水质等级间存在的复杂非线性关系,在水质评价中取得较好效果。当然,模型也存在一定不足,如何科学合理地确定云的 E_n ,使生成的云模型更能综合反映水体污染程度,尚需在今后做进一步研究。

参考文献:

[1] 张先起,梁川. 基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报,2005,36(9):1057-1062. (ZHANG Xianqi, LIANG Chuan. Application of fuzzy matter-element model based on coefficients of entropy in comprehensive evaluation of water quality[J]. Journal of Hydranlic Engineering, 2005, 36(9): 1057-1062. (in Chinese))

[2] JACOBS H L. Water quality criteria[J]. Journal of Water Pollution Control Federation,1965,37(5):292-300.

[3] 徐鸿楷. 半集均方差水质评价模式[J]. 环境科学,1985,6(4):55-59. (XU Hongkai. Half a set of mean square error of water quality evaluation model[J]. Journal of Environmental Sciences, 1985, 6(4): 55-59. (in

Chinese))

[4] 申葆诚,徐国义. 希耳伯空间 (Hilbert Space) 理论在环境污染综合评价中的应用[J]. 环境科学,1981,2(4):57-60. (SHEN Baocheng, XU Guoyi. Hilbert Space application in comprehensive evaluation of environmental pollution[J]. Journal of Environmental Sciences, 1981, 2(4):57-60. (in Chinese))

[5] SHANNON E E, BREZONIK P L. Relations between lake trophic state and nitrogen and phosphorus loading rates [J]. Environmental Science & Technology, 1972, 6(8): 719-725.

[6] 李如忠. 水质评价理论模式研究进展及趋势分析[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2005, 28(4): 369-373. (LI Ruzhong. Progress and trend analysis of theoretical methodology of water quality assessment [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2005, 28(4): 369-373. (in Chinese))

[7] 李德毅,孟海军,史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展,1995,32(6):15-20. (LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators [J]. Computer Research & Development, 1995, 32(6): 15-20. (in Chinese))

[8] 李德毅,刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学,2004,6(8):28-34. (LI Deyi, LIU Changyu. Study on the universality of the normal cloud model [J]. Engineering Science, 2004, 6(8): 28-34. (in Chinese))

[9] WANG S, LI D, SHI W, et al. Cloud model-based spatial data mining[J]. Geographic Information Sciences, 2003, 9(1/2): 60-70.

[10] ZHANG Jinchun, HU Guyu. Application of uncertainty reasoning based on cloud model in time series prediction [J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2003, 4(5): 578-583.

[11] LIU Y C, MA Y T, ZHANG H S, et al. A method for trust management in cloud computing: data coloring by cloud watermarking[J]. International Journal of Automation and Computing, 2011, 8(3): 280-285.

[12] 姚红,王国胤,张清华. 基于粗糙集和云模型的彩色图像分割方法[J]. 小型微型计算机系统,2013,34(11):2615-2620. (YAO Hong, WANG Guoyin, ZHANG Qinghua. Color image segmentation method based on rough sets and cloud model [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2013, 34(11): 2615-2620. (in Chinese))

[13] 王国胤,许昌林,张清华,等. 双向认知计算的 p 阶正态云模型递归定义及分析[J]. 计算机学报,2013,36(11):2316-2329. (WANG Guoyin, XU Changlin, ZHANG Qinghua, et al. P -order normal cloud model recursive definition and analysis of bidirectional cognitive computing [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(11): 2316-2329. (in Chinese))

(下转第 59 页)

- 383.
- [3] 田庆久, 闵祥军. 植被指数研究进展[J]. 地球科学进展, 1998, 13 (4) : 328-332. (TIAN Qingjiu, MIN Xiangjun. Advances in study on vegetation indices [J]. Advance in Earth Sciences, 1998, 13 (4) : 328-332. (in Chinese))
- [4] 王正兴, 刘闯. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J]. 生态学报, 2003, 23(5): 980-987. (WANG Zhengxing, LIU Chuang. From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: advances in vegetation index rescarch [J]. Acta Sologica Sinica, 2003, 23(5): 980-987. (in Chinese))
- [5] XIAO X M, BOLES S, LIU J Y, et al. Characterization of forest types in Northeastern China, using multi temporal SPOT-4VEGETATION sensor data [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 8(2): 335-348.
- [6] NEMANI R, KEELING C, HASHIMOTO H. Climate-driven increases in global terrestrial net primary prodction from 1982 to 1999[J]. Science, 2003, 300: 1560-1563.
- [7] RATAN A P, HUETE A R, YUAN Y, et al. Interrelation among MODIS vegetation products across an Amazon Eco-climatic Gradient[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. Korea: IGARSS, 2005: 3009-3012.
- [8] DEFRIES R S, TOWNSHED J G R. NDVI derived land cover classification at a globescale [J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 5: 3567-3586.
- [9] 宋富强, 邢开雄, 刘阳. 基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价[J]. 生态学报, 2011, 31(2): 354-363. (SONG Fuqiang, XING Kaixiong, LIU Yang. Monitoring and assessment of vegetation variation in Northern Shaanxi based on MODIS/NDVI [J]. Acta Sologica Sinica, 2011, 31(2): 354-363. (in Chinese))
- [10] 朱玉霞, 覃志豪, 徐斌. 基于 MODIS 数据的草原荒漠化年际动态变化研究: 以内蒙古自治区为例[J]. 中国草地学报, 2007, 29(4): 2-8. (ZHU Yuxia, QIN Zhihao, XU Bin. Annual dynamic variation of grassland desertification based on MODIS data: an example from Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Grassland, 2007, 29(4): 2-8. (in Chinese))
- [11] 杨昕, 张玮. 基于 MODIS 植被指数 NDVI 的内蒙古锡林郭勒草场荒漠化监测方法研究[J]. 中国农学通报, 2007, 23(6): 611-615. (YANG Xin, ZHANG Wei. Study on desertification monitoring model for grassland in Xilinguole based on MODIS vegetation index [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(6): 611-615. (in Chinese))
- [12] 赵冰茹, 刘闯, 王晶杰, 等. 锡林郭勒草地 MODIS 植被指数时空变化研究[J]. 中国草地, 2004, 26(1): 1-8. (ZHAO Bingru, LIU Chuang, WANG Jingjie, et al. Spatial and temporal change of MODIS-NDVI in Xilinguole Grassland [J]. Grassland of China, 2004, 26(1): 1-8. (in Chinese))
- [13] 严建武, 李春娥, 袁雷, 等. EOS-MODIS 数据在草地资源监测中的应用进展综述[J]. 草业科学, 2008, 25(4): 1-9. (YAN Jianwu, LI Chun'e, YUAN Lei, et al. Application summary of EOS-MODIS data in the monitoring of grassland resources [J]. Pratacultural Science, 2008, 25(4): 1-9. (in Chinese))
- [14] 毛飞, 卢志光, 张佳华. 近 20 年藏北地区 AVHRR NDVI 与气候因子的关系[J]. 生态学报, 2007, 27(8): 3198-3205. (MAO Fei, LU Zhiguang, ZHANG Jiahua. Relations between AVHRR NDVI and climate factors in Northern Tibet in recent 20 years [J]. Acta Sologica Sinica, 2007, 27(8): 3198-3205. (in Chinese))
- [15] 何京丽, 李锦荣, 邢恩德. 半干旱草原潜在土壤风力侵蚀空间格局研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5): 12-19. (HE Jingli, LI jinrong, XIN Ende. Study on the spatial pattern of potential soil wind erosion in semi arid grassland [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(5): 12-19. (in Chinese))
- [16] HUTE A, JUSTICE C, VAN L W. MODIS vegetation index (MODIS13) algorithm theoretical basis document [M]. New York: NASA Press, 1996: 35-39.
- [17] TUCKER C J, NEW COMB W W, DREGNE H E. AVHRR data sets for determination of desert spatial extent [J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 17: 354-356.

(收稿日期: 2014-04-14 编辑: 徐 娟)

(上接第 31 页)

- [14] 刘常昱, 李德毅, 杜鹁, 等. 正态云模型的统计分析[J]. 信息与控制, 2005, 34(2): 236-239. (LIU Changyu, LI Deyi, DU Yi, et al. Some statistical analysis of the normal cloud model [J]. Information and Control, 2005, 34(2): 236-239. (in Chinese))
- [15] 李德毅, 杜鹁. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [16] GB3838—2002 地表水环境质量标准[S].
- [17] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems; the critic method [J]. Computers & Operations Research, 1995, 22(7): 763-770.
- [18] 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))
- [19] 王兆礼, 赖成光, 陈晓宏. 基于熵权的洪灾风险空间模糊综合评价模型[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 35-40. (WANG Zhaoli, LAI Chengguang, CHEN Xiaohong. Spatially fuzzy comprehensive assessment model for flood hazard risk based on entropy weight [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5): 35-40. (in Chinese))

(收稿日期: 2014-03-13 编辑: 高渭文)