

基于三角模糊数-贝叶斯方法的九洲江水环境质量评价

邓渠成¹, 尹娟^{2,3}, 许桂苹^{3,4}, 黄玉清⁵, 王晓飞⁴, 滕云梅⁴, 陈洋⁴, 夏新建⁴

(1. 澳大利亚昆士兰大学地球与环境科学学院, 澳大利亚 布里斯班 4072;

2. 广西财经学院管理科学与工程学院, 广西 南宁 530003;

3. 广西大学轻工与食品工程学院, 广西 南宁 530004;

4. 广西壮族自治区环境监测中心站, 广西 南宁 530028;

5. 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室, 广西师范学院, 广西 南宁 530001)

摘要:为更为全面考察水质评价过程中的不确定性,将模糊集理论和贝叶斯理论引入河流水质评价中,建立了三角模糊数-贝叶斯方法的水环境质量评价模型,并选取2016年7月九洲江跨省交界处5个断面的溶解氧、生化需氧量、高锰酸盐指数、氨氮、总磷作为水质评价因子,将该模型应用于九洲江跨省段的水质评价中。结果表明,九洲江文车桥、圭地河下游、温水浪、山角、石角蟠龙桥断面水质区间数分别为[3.320, 3.365]、[3.120, 3.179]、[3.178, 3.196]、[3.432, 3.428]、[3.404, 3.470],均在[3, 4]区间范围,为III类水质;断面水质优劣排序为:石角蟠龙桥>山角>文车桥>温水浪>圭地河下游。该模型与综合污染指数法相比,断面水质优劣排序情况一致,除圭地河下游断面外,其他断面的水质评价结果也一致。由于模型计算过程中考虑了历史先验信息,并采用了三角模糊数及区间数的结果表达方式,有利于更客观反映流域水质状况。

关键词:三角模糊数;贝叶斯;九洲江;水质评价

中图分类号:X824 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2019)02-0014-06

随着社会经济的迅猛发展和人口的激增,我国面临着水体污染、水生态安全和水资源短缺等严重问题,这些问题严重制约并困扰着区域经济社会的可持续发展,威胁居民饮用水安全(陈永泰和金帅, 2015)。在水环境污染的控制过程中,对水环境质量进行科学、综合评价是一项重要的基础工作,并为水污染治理提供重要依据(伍晨和李洪兴, 2014)。

目前,水环境质量评价方法主要包括污染指数法、数理统计分析法及数学模型法三大类(罗玲莉等, 2010);这些方法已广泛运用于水质(李祚泳和张正健, 2013)、水体沉积物(樊梦佳等, 2010;李飞等, 2012a)、水环境健康风险(李如忠, 2007;祝慧娜等, 2009)及富营养化(智国铮等, 2013)等方面。然而,河流、湖泊等水体具有随机性、模糊性和未确知性的特征,尚存在由监测数据、采样数量、评价指标浓度

和标准等参数以及模型结构导致的不确定因素(Vandenbergh et al, 2007)。因此,需充分考虑在水质评价过程中的系统不确定性。而相对于模型结构和参数的不确定性,监测数据的不确定性可通过改善实验室条件、提高仪器精度来解决;模型结构的不确定性则需要选择合适的模型达到不确定性的有效控制(Gabriele et al, 2009);参数不确定性来源包括系统、随机等误差可通过用模糊数学、蒙特卡洛等理论来降低其对评价结果的影响(张慧哲等, 2009)。许多学者在不确定模型运用方面展开了深入的研究,如模糊综合评判模型(Geng et al, 2010)、盲数理论(唐晓娇等, 2012;李如忠等, 2003)、模糊数理论(金菊良等, 2011;李飞等, 2012a;余勋等, 2013)、区间数理论(祝慧娜等, 2009;祝慧娜等, 2015),并在地表水环境质量评价、地表水环境风险评价、河流沉积物重金属污染评价中取得的一定的成果。

本文着重考虑模型结构和参数的不确定性,通过贝叶斯概率推理表达模型结构的不确定性(Gabriele et al, 2010;祝慧娜等, 2015),引入三角模糊数综合考虑数据的平均值和标准差反映各评价指标浓度在一定置信水平下的波动区间数来表达参数的不确定性信息(李飞等, 2012b);建立了三角模糊数修正的贝叶斯方法的水质评价模型对九洲江跨省区域

收稿日期:2016-09-30

基金项目:广西社会科学重点课题(GXSK201605);广西科技计划项目(1598014-3);广西自然科学基金重大项目(2013GXNSFEA053001)。

作者简介:邓渠成,1990年生,男,在读博士,研究方向为环境与健康。E-mail:deng.quch@gmail.com

通信作者:尹娟。E-mail:yinjuan101@163.com;

黄玉清。E-mail:838841223@qq.com

的进行水质评价,从而较好的弥补了确定性评价中水质监测信息模糊性和随机性描述缺失、区域水质历史实际考虑欠缺、多指标影响程度均一化等不足,以期更为客观地表征评价区域水环境的污染现状与空间分布差异。

1 材料与方法

1.1 区域概况

九洲江是跨粤桂两省(区)独流入海的河流,全长 168 km,流域总面积为 1 491 km²;其中,广西境内面积 1 082 km²,占流域面积的 72.6%,广东境内面积 409 km²,占流域面积的 27.4%。该流域畜禽养殖污、生活污水大量排放进入九洲江,导致其出现水环境污染问题,进而对沿岸居民的生产生活与生命健康产生不良影响,科学合理地评价九洲江水环境质量可为构建粤桂两省协同流域环境治理、确保下游饮用水安全提供重要依据。考虑到河流自身所具有随机性、模糊性和未确知性的特征外,流域非法抽砂等偶发现象导致河段 COD、BOD₅、氨氮、总磷的监测指标数据存在不确定性,本文借助贝叶斯概率推理和三角模糊数来表达系统模型结构和参数的不确定性。

1.2 监测断面设置与样品采集

在九洲江跨省交界处设置 5 个监测断面,每个监测断面设 1 个采样点,具体分布情况如图 1 所示。于 2016 年 7 月进行连续 2 次,每次 3 天的样品采集,共计 30 组水质样品。样品采用深水采样器并分装在硬质玻璃瓶中,0~4℃ 运送至实验室分析。



图 1 九洲江文车桥至蟠龙石角桥断监测断面布设
Fig.1 Location of the monitoring sections from Wenche Bridge to Panlongshijiao Bridge of Jiuzhou River

1.3 水质监测指标与测定方法

结合九洲江的实际情况,本次研究监测指标包括 pH 值(pH)、溶解氧(DO)、生化需氧量(BOD₅)、

高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)共 6 项。

pH 采用梅特勒 SG8 便携式 pH 测定仪现场测定;溶解氧采用美国 PRO 20 便携式溶氧仪现场测定;COD_{Mn}采用重铬酸盐法测定;NH₃-N 采用纳氏试剂法测定;TP 采用钼酸铵分光光度法测定;BOD₅采用稀释与接种法测定。

1.4 监测数据的三角模糊数及 α-截集处理

设实数 a, b, c 且 $a \leq b \leq c$,分别为水质评价指标浓度的最小可能值、最可能值和最大可能值,则 (a, b, c) 构成三角模糊数 $\beta = (a, b, c)$,隶属函数 θ_β 定义为(Ronald et al,1997):

$$\theta_\beta = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & x \geq c \end{cases} \quad (1)$$

令: $\beta = (a, b, c)$, α 为置信水平且 $\alpha \in [0, 1]$, α -截集技术(李如忠,2007)则可以将三角模糊数 β 转化为与一定置信水平 α 相对应的区间数, α 越大,表示数据越接近平均值,该数据出现的频率越大,区间范围越小。 β^α 为三角模糊数 β 的 α -截集,是置信水平不低于 α 的数据集合:

$$\beta^\alpha = \{X | (X) \geq \alpha, X \in X\} \quad (2)$$

$$\text{即: } \beta^\alpha [a_L^\alpha, a_H^\alpha] = [(b-a)\alpha + a, -(c-b)\alpha + c] \quad (3)$$

根据数理统计方法和数值上下限分析原理(Mudassir et al,2006),正态或近似正态分布的数列有 95% 以上的数据落入平均值 ± 2 倍标准差之间,故取值方法为: $a = \bar{o} - 2\sigma, b = \bar{o}, c = \bar{o} + 2\sigma$,即: $\beta = (\bar{o} - 2\sigma, \bar{o}, \bar{o} + 2\sigma)$,其中 $\bar{o}$ 和 σ 分别为一组数据的平均值和标准差。

1.5 三角模糊数-贝叶斯评价模型构建

离散贝叶斯模型表示为:

$$P(B_i | A) = \frac{P(B_i)P(A | B_i)}{\sum P(B_i)P(A | B_i)} \quad (4)$$

式中: B_i 表示水质类别(I, II, III, IV, V 类); A 表示样本水质指标值; $P(B_i)$ 为事件 B_i 的先验概率,即通过先验信息判断水质属于类别 i 的可能性; $P(A | B_i)$ 为条件概率,即当水质类别为 i 时,出现水质指标值 A 的可能性; $P(B_i | A)$ 为后验概率,即获得水质指标值 A 的条件下,水质属于类别 i 的可能性(祝慧娜等,2015)。

将各监测指标的浓度表示为 $\beta=(a,b,c)$,运用 α -截集转化成对应的 β^α ,则基于三角模糊数的贝叶斯水质评价模型可表示为:

$$P^{\alpha}(y_{ij}|\beta_{kj}^{\alpha})=\frac{P(y_{ij})P^{\alpha}(\beta_{kj}^{\alpha}|y_{ij})}{\sum_{i=1}^sP(y_{ij})P^{\alpha}(\beta_{kj}^{\alpha}|y_{ij})}\tag{5}$$

式中: y_{ij} 表示水质为 i 时,第 j 个水质监测指标的标准值; β_{kj}^{α} 表示第 k 点位的第 j 个水质监测指标以三角模糊数和 α -截集转化后的区间形式值; $P^{\alpha}(y_{ij}|\beta_{kj}^{\alpha})$ 表示为第 j 个水质监测指标相对于各水质等级 i 的后验概率; $P(y_{ij})$ 为第 j 个水质监测指标、水质为 i 时的先验概率; $P^{\alpha}(\beta_{kj}^{\alpha}|y_{ij})$ 表示为第 j 个水质监测指标相对于各水质等级 i 的条件概率; i 为标准类型, $i=1,2,\cdots s$; j 为监测指标项目, $j=1,2,\cdots m$; k 为监测断面, $k=1,2,\cdots n$ 。

根据几何概率的概念,条件概率的计算方式采用距离法(赵晓慎等,2011),用监测指标与所选水质类型标准之间差值绝对值的倒数进行计算,公式如下:

$$P^{\alpha}(\beta_{kj}^{\alpha}|y_{ij})=\frac{1/d_{kj}^{\alpha}}{\sum_{i=1}^s1/d_{kj}^{\alpha}}\tag{6}$$

式中: d_{ij}^{α} 表示监测点水质指标 j 的观测值 x_j 离标准值 y_{ij} 的距离,距离越远,水质类别属于 i 的可能性就越小,取其倒数便可代表 x_j 属于水质类别 i 的可能性。

水质多个监测指标下的后验概率计算公式:

$$P_i^{\alpha}=\sum_{j=1}^m\omega_jP^{\alpha}(y_{ij}|\beta_{kj}^{\alpha})\tag{7}$$

式中: P_i^{α} 为水质评价过程中多个监测指标的综

合后验概率; ω_j 为不同水质监测指标权重,根据水质分级标准矩阵,由变异系数法得出各水质评价因子的权重(赵微等,2013)。

为使水质优劣状况的描述连续化和得出综合水质得分,水质类别的赋值采用专家咨询法(余勋等,2013)。若 R 跨越两个区间,则可计算 R 对各水质类别的隶属度(祝慧娜等,2009);公式如下:

$$R=\sum_{i=1}^5P_i^{\alpha}\times V_i\tag{8}$$

式中: R 表示监测点的水质等级综合得分值; P_i^{α} 为水质评价过程中多个监测指标的综合后验概率指标; V_i 为各等级水质对应的权重赋值,水质 I-V 类赋值权重及对应水质等级的综合得分评价标准参考表 1。

表 1 水质各等级赋值权重和水质等级综合得分评价

Tab.1 Weight and evaluation standard of the water quality affiliated to grades I to V					
水质类别	I	II	III	IV	V
赋值权重	5	4	3	2	1
综合得分值	5	[5,4]	[3,4]	[2,3]	[1,2]

2 结果

2.1 三角模糊数转换的各断面水质监测数据

九洲江各监测断面的指标数据用三角模糊数表示如表 2 所示。

2.2 α -截集简化三角模糊数数据

由于地表水环境质量标准(GB3838-2002)对 pH 未有等级区分,因此本文 α 取 0.9,对 DO、BOD₅、COD_{Mn}、NH₃-N、TP 共计 5 个指标三角模糊数的 α -截集处理结果如表 3 所示。

表 2 各监测断面水质监测数据的三角模糊数结果

Tab.2 Results of water quality monitoring data by triangular fuzzy numbers

编号	断面名称	pH 值	DO/	BOD ₅ /	COD _{Mn} /	NH ₃ -N/	TP/
			mg · L ⁻¹	mg · L ⁻¹	mg · L ⁻¹	mg · L ⁻¹	mg · L ⁻¹
1	文车桥	(6.72,6.95,7.18)	(5.76,6.82,7.88)	(0.98,1.90,2.82)	(2.63,4.25,5.87)	(0.34,0.72,1.10)	(0.24,0.28,0.32)
2	圭地河下游	(6.95,7.08,7.21)	(5.17,6.93,8.69)	(1.93,2.45,2.97)	(3.75,4.73,5.72)	(0.69,1.21,1.74)	(0.22,0.33,0.43)
3	温水浪	(6.67,7.20,7.73)	(4.21,6.70,9.19)	(0.65,2.05,3.45)	(2.80,4.10,5.39)	(0.25,1.11,1.97)	(0.15,0.23,0.31)
4	山 角	(6.64,7.14,7.65)	(5.19,6.62,8.05)	(0.72,1.73,2.75)	(2.54,4.22,5.89)	(0.21,0.39,0.57)	(0.11,0.21,0.32)
5	石角蟠龙桥	(6.34,6.95,7.56)	(3.73,4.80,5.87)	(0.39,1.30,2.21)	(3.31,5.55,7.79)	(0.08,0.48,0.88)	(0.18,0.22,0.26)

表 3 α -截集处理各监测断面水质监测数据结果

Tab.3 Data of monitoring sections treated by α -cut

编号	断面名称	DO/	BOD ₅ /	COD _{Mn} /	NH ₃ -N/	TP/
		mg · L ⁻¹	mg · L ⁻¹	mg · L ⁻¹	mg · L ⁻¹	mg · L ⁻¹
1	文车桥	[6.711,6.928]	[1.808,1.992]	[4.088,4.411]	[0.680,0.757]	[0.280,0.287]
2	圭地河下游	[6.757,7.109]	[2.398,2.502]	[4.635,4.832]	[1.158,1.264]	[0.318,0.339]
3	温水浪	[6.451,6.950]	[1.910,2.190]	[3.970,4.230]	[1.035,1.198]	[0.225,0.241]
4	山 角	[6.474,6.759]	[1.632,1.834]	[4.049,4.384]	[0.371,0.408]	[0.203,0.224]
5	石角蟠龙桥	[4.693,4.907]	[1.208,1.391]	[5.326,5.774]	[0.439,0.519]	[0.214,0.222]

2.3 水质监测指标的权重确定

根据地表水环境质量标准(GB3838-2002),本研究的 DO、BOD₅、COD_{Mn}、NH₃-N 和 TP 水质分级标准矩阵如 A 所示;运用变异系数法分别计算5个指标的权重为 0.148、0.177、0.218、0.225、0.232。

A =
$$\begin{bmatrix} 7.5 & 6 & 5 & 3 & 2 \\ 3 & 3 & 4 & 6 & 10 \\ 2 & 4 & 6 & 10 & 15 \\ 0.15 & 0.5 & 1 & 1.5 & 2 \\ 0.02 & 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.4 \end{bmatrix}$$

2.4 后验概率计算

以 2014 年 1 月至 2016 年 6 月九洲江 5 个监测断面的每月水质数据为先验信息,正态分布拟合运用 SPSS 软件中的 Kolmogorov-Smirnov 检验,其结果如表 4 所示,表明在 α=5% 的置信水平下拟合结果可接受(Gleit,1985)。故采用矩估计以及正态分布概率函数计算出各监测断面的指标对各水质等级的先验概率。

表 5 水质隶属于各等级的后验概率

Tab.5 Posterior probability of the water quality affiliated to grades I to V

编号	断面名称	I	II	III	IV	V
1	文车桥	[0.0191,0.0269]	[0.541,0.581]	[0.163,0.175]	[0.220, 0.238]	[0.0172,0.0187]
2	圭地河下游	[0.0684, 0.102]	[0.326,0.368]	[0.256,0.282]	[0.221,0.237]	[0.0445,0.0947]
3	温水浪	[0.008, 0.0268]	[0.358, 0.382]	[0.378,0.479]	[0.130, 0.169]	[0.0447, 0.0245]
4	山角	[0.007, 0.013]	[0.497,0.505]	[0.402,0.409]	[0.0728, 0.0802]	[0.0071, 0.0078]
5	石角蟠龙桥	[0.004,0.0136]	[0.433,0.490]	[0.450, 0.524]	[0.0380,0.0465]	[0.0002,0.0005]

2.5 水质评价结果

根据式(8)计算 5 个监测断面的水质综合得分,以区间值表示并最终确定水质类别,评价结果见表 6。由表 6 可知,5 个监测断面的水质综合得分均在 [3,4]区间范围内。根据表 1 的评价标准,判定 5 个监测断面的水质均属于Ⅲ类。从水质评价综合得分来看,3 号温水浪之前的断面受宁潭河、圭地河下游、下垌河 3 条支流影响,水质评价综合得分较低;尤其是 2 号圭地河下游断面,长期受圭地河劣 V 类水的影响,水质评价综合得分最低;九洲江下游的 4 号山角和 5 号石角蟠龙桥断面,由于水体自净使得水质好转,但 5 号样点受支流古城河不稳定水质影响,水质评价综合得分低于 4 号山角断面。

3 讨论

为验证本研究方法的可靠性,选用综合污染指数法与本研究方法的水质评价结果进行比较分析。综合污染指数法(P)是取各评价指标的单因子污染指数的平均,当 $P \leq 0.400$ 、 $[0.400, 0.700]$ 、 $[0.700,$

表 4 各监测指标的先验信息的

Kolmogorov-Smirnov 检验结果

Tab.4 Results of Kolmogorov-Smirnov test of monitoring indexes

项目		DO	COD _{Mn}	BOD ₅	NH ₃ -N	TP
正态参数 ^{a、b}	平均值	5.924	3.772	3.501	0.974	0.199
	标准偏差	1.013	0.669	1.300	0.871	0.084
最极端差分	绝对	0.084	0.105	0.104	0.204	0.151
	正	0.037	0.105	0.104	0.204	0.151
	负	-0.084	-0.073	-0.052	-0.141	-0.051
检验统计		0.084	0.105	0.104	0.204	0.151
渐近显著性 ^c (双尾)		0.050	0.004	0.005	0.000	0.000

注:a.检验分布是正态分布;b.根据数据计算;c. Lilliefors 显著性校正。

Note: a. Normal distribution; b. Calculate according to the data; c. Lilliefors significant correction.

根据式(5)-(7)对各个评价指标计算其后验概率,将各监测断面不同水质等级的 5 个指标后验概率相加求平均值,得到综合指标的后验概率如表 5 所示。

1.000]、[1.000, 1.200]、>1.200 时,水质分别为 I、II、III、IV、V 类。

表 6 2016 年 7 月九洲江各监测断面水质综合评价结果

Tab.6 Water quality assessment results of the monitoring sections in July 2016

编号	断面名称	三角模糊数的贝叶斯方法	
		水质评价综合得分	水质类别
1	文车桥	[3.320,3.365]	III
2	圭地河下游	[3.120,3.179]	III
3	温水浪	[3.178,3.196]	III
4	山 角	[3.432,3.428]	III
5	石角蟠龙桥	[3.404,3.470]	III

3.1 不同方法的九洲江水质评价结果对比

1 号文车桥、2 号圭地河下游、3 号温水浪、4 号山角、5 号石角蟠龙桥断面的综合污染指数依次为 0.936、1.128、0.963、0.783、0.781,水质等级对应为 III、IV、III、III、III。结合表 6 可知,两种方法对文车桥、温水浪、山角、石角蟠龙桥断面的水质均为 III 类水,圭地河下游断面两种方法的评价结果有差异,2 号圭地河下游断面评价结果等级相对于确定性平均方法结果偏低的主要原因,在于贝叶斯后验分布

计算过程中 DO、BOD、COD_{Mn} 评价指标具备较高的 II、III 类水质先验信息。各监测断面的水质优劣排序方面,本研究模型结果以区间形式表达,可利用区间数排序法(祝慧娜等,2009)对水质优劣情况进行排序,依次为:石角蟠龙桥>山角>文车桥>温水浪>圭地河下游,与综合污染指数 P 值的大小排序一致。从水质优劣情况一致性说明本模型的客观性与可行性。

3.2 不同方法的水环境质量评价模型优势对比

与确定性评价方法仅描述评价指标浓度的平均水平相比,三角模糊数处理技术在数据资料不足或数据精度不高时具有很好的适用性,能在一定置信水平下表示指标浓度波动范围,在一定程度上包含了水质监测指标的不确定性信息,耦合贝叶斯方法则综合考虑该条河流水质统计资料推断隶属各水质级别的可能性。因此,基于三角模糊数的贝叶斯方法水质评价与以综合污染指数法为代表的确定性水质评价模型相比,在表达模型结构和模型参数不确定性方面均具有明显的优势,能体现流域评价指标因子对水质的影响,使其水质评价结果更为客观、更符合实际。

参考文献

陈永泰,金帅,2015. 我国湖泊流域水环境保护研究现状及展望[J]. 生态经济, 31(10): 107-110.

樊梦佳,袁兴中,祝慧娜,等,2010. 基于三角模糊数的河流沉积物中重金属污染评价模型[J]. 环境科学学报, 30(8): 1700-1706.

金菊良,刘丽,汪明武,等,2011. 基于三角模糊数随机模拟的地下水环境系统综合风险评价模型[J]. 地理科学, 31(2): 143-147.

李飞,黄瑾辉,曾光明,等,2012a. 基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究[J]. 环境科学, 33(7): 2352-2358.

李飞,黄瑾辉,曾光明,等,2012b. 基于三角模糊数和重金属化学形态的土壤重金属污染综合评价模型[J]. 环境科学学报, 32(2): 432-439.

李如忠,钱家忠,汪家权,等,2003. 基于盲数理论的河流水质未确知风险分析初探[J]. 水电能源科学, 21(1): 18-21.

李如忠,2007. 基于不确定信息的城市水源水环境健康风险评估[J]. 水利学报, 38(8): 895-900.

李祚泳,张正健,2013. 基于回归支持向量机的指标规范值的水质评价模型[J]. 中国环境科学, 33(8): 1502-1508.

罗玲莉,潘俊,安志娟,等,2010. 基于区间数排序的水环境质量评价方法研究[J]. 环境科学与管理, 35(2): 176-

179.

唐晓娇,黄瑾辉,李飞,等,2012. 基于盲数理论的水体沉积物重金属污染评价模型[J]. 环境科学学报, 32(5): 1104-1112.

伍晨,李洪兴,2014. 水质指数在水质综合评价中的应用研究进展[J]. 环境与健康杂志, 31(1): 87-89.

余勋,梁捷,曾光明,等,2013. 基于三角模糊数的贝叶斯水质评价模型[J]. 环境科学学报, 33(3): 904-909.

张慧哲,王坚,任子晖,2009. 三角模糊数判断矩阵理论及排序方法研究[J]. 模糊系统与数学, 23(4): 120-125.

赵微,林健,王树芳,等,2013. 变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响[J]. 环境科学, 34(4): 1277-1283.

赵晓慎,张超,王文川,2011. 基于熵权法赋权的贝叶斯水质评价模型[J]. 水电能源科学, 29(6): 33-35.

智国铮,陈耀宁,袁兴中,等,2013. 基于延拓盲数的洞庭湖湖泊综合营养状态评价模型[J]. 中国环境科学, 33(11): 2095-2101.

祝慧娜,闫庆,尹娟,2015. 基于区间型贝叶斯的湖泊水质评价模型[J]. 环境工程, 33(2): 130-134.

祝慧娜,袁兴中,曾光明,等,2009. 基于区间数的河流水环境健康风险模糊综合评价模型[J]. 环境科学学报, 29(7): 1527-1533.

Gabriele F, Giorgio M, Gaspare V, 2009. Uncertainty in urban stormwater quality modelling: the effect of acceptability threshold in the GLUE methodology[J]. Water research, 408:138-145.

Gleit A, 1985. Estimation for small normal data sets with detection limits[J]. Environmental Science & Technology, 19(12): 1201-1206.

Muddassir N, Faisal I K, 2006. Human health risk modeling for various exposure routes of trihalomethanes (THMs) in potable water supply[J]. Environmental Modelling & Software, 21(10): 1416-1429.

Ronald E G, Robert E Y, 1997. Analysis of the error in the standard approximation used for multiplication of triangular and trapezoidal fuzzy numbers and the development of a new approximation[J]. Fuzzy Sets and Systems, 91(1): 1-13.

Vandenberghe V, Bauwens W, Vanrolleghe P A, 2007. Evaluation of uncertainty propagation into river water quality predictions to guide future monitoring campaigns[J]. Environmental Modelling & Software, 22(5): 725-732.

Geng X L, Chu X N, Zhang Z F, 2010. A new integrated design concept evaluation approach based on vague sets[J]. Expert Systems with Applications, 37(9): 6629-6638.

Water Quality Assessment of Jiuzhou River Based on the Integrated Method of Triangular Fuzzy Numbers and Bayesian Network

DENG Qu-cheng¹, YIN Juan^{2,3}, XU Gui-ping^{3,4}, HUANG Yu-qing⁵,
WANG Xiao-fei⁴, TENG Yun-mei⁴, CHEN Yang⁴, XIA Xin-jian⁴

- (1.School of Earth and Environmental Science, University of Queensland, Brisbane 4072, Australia;
- 2.Department of Management Science and Engineering, Guangxi University of Finance and Economics, Nanning 530003,P.R.China;
- 3.College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004,P.R.China;
- 4.Environmental Monitoring Station of Guangxi, Nanning 530028,P.R.China;
- 5.Key laboratory of Environmental Change and Resources Use in Beibu Gulf, Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001,P.R.China)

Abstract: With increasing economic development and population growth in China, water pollution, water security and shortage of water resources have become issues of concern. To date, few studies have addressed both the uncertainties of model structure and parameterization when assessing water quality. As a result, the accuracy and comprehensiveness of the assessment results is compromised. This study aimed to investigate the uncertainties in the process of water quality assessment. An integrated fuzzy Bayesian water quality evaluation model has been developed and the fuzzy set and Bayesian analysis were introduced in this study. Water quality parameters included in the assessment included dissolved oxygen (DO), biochemical oxygen demand (BOD₅), permanganate index (COD_{Mn}), ammonia nitrogen (NH₃-N) and total phosphorus (TP). Approximately 30 water samples were collected from the Jiuzhou River within the trans-provincial basin areas in July 2016. The integrated fuzzy Bayesian water quality evaluation model was then used to evaluate water quality based on the monitoring results. The water quality interval numbers at Wenche Bridge, Guidi River 1 000 m downstream, Wenshuilang, Shanjiao and Shijiaopanlong Bridge monitoring sites were, respectively, [3.320, 3.365], [3.120, 3.179], [3.178, 3.196], [3.432, 3.428] and [3.404, 3.470]. Water quality in all sections was Class III according to water quality evaluation standards. The order of sections, in order of water quality was Shijiaopanlong Bridge>Shanjiao>Wenche Bridge>Wenshuilang>Guidi River 1 000 m downstream. Compared with water quality evaluation results based on the comprehensive pollution index, ranking was the same and the water quality classification was consistent for all monitoring sections, except for Guidi River 1 000 m downstream. In conclusion, the triangular fuzzy number model of assessment was shown to have a strong model structure and mitigated model parameter uncertainties. The assessment results obtained using this method are therefore more objective for evaluating water quality.

Key words: triangular fuzzy numbers; Bayesian theory; Jiuzhou River; water quality assessment