

熵权模糊评判在双台子河水质评价中的应用

孙炳双¹, 杨肖肖^{2,3*}, 杨维³ (1. 辽宁省城市建设改造项目办公室, 辽宁沈阳 110004; 2. 河北外国语学院涉外建筑工程学院, 河北石家庄 050091; 3. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁沈阳 110168)

摘要 应用模糊评判理论, 以 2010 和 2011 年双台子河监测数据为研究对象, 选择 DO、COD_{Cr}、NH₃-N、TP、TN、BOD₅、氯化物 7 个评价因子, 建立模糊评价模型, 确定模糊关系矩阵, 选择熵权赋权法求各评价因子权重, 以最大隶属原理为评价类别, 提出一种基于熵权赋权的方法, 利用模糊变换对双台子河水质进行评价与分类。评价结果表明, 从权重分析, 主要污染因子为 BOD₅、TN、COD_{Cr}、TP, 次要因子依次为 NH₃-N、DO、氯化物; 由模糊向量大小分析, 水质类别为 IV、V 类; 由模糊向量平均值分析, 污染状况下游 > 中游 > 上游; 并将评价结果与综合标识指数法对比, 结果显示两种评价结果近乎一致, 但模糊评判使评价结果更直观反映河流水质状况, 评价结果更加合理准确。

关键词 模糊评判; 评价因子; 隶属函数; 权重; 双台子河

中图分类号 S181.3 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2013)07-03063-04

Application of Entropy Weight Fuzzy Evaluation of Water Quality in Shuangtaizi River

SUN Bing-shuang et al (Liaoning Urban Construction & Renewal Project Office, Shenyang, Liaoning 110004)

Abstract By using fuzzy mathematics, with monitoring data of Shuangtaizi River during 2010-2011 as study object, selecting DO, COD_{Cr}, NH₃-N, TP, TN, BOD₅, chloride seven evaluation factors, fuzzy evaluation model was established to set up an assessing matrix. The entropy weight was adopted to obtain weight of each evaluation factor. With maximum membership principle as evaluation category, fuzzy change was used to evaluate and classify water quality in Shuangtaizi River. The results showed: analysis from weight, main pollution factors are BOD₅, TN, COD_{Cr}, TP, secondary factors are NH₃-N, DO, chloride. Analysis from fuzzy vector size, water quality belongs to category IV and V; Analysis from fuzzy vector average point, the most important is downstream > middle > upstream; Compared with evaluation results and comprehensive identification index, the results showed that both almost unanimous, more intuitive to reflect the river water quality, the evaluation results are more reasonable and accurate.

Key words Fuzzy mathematics; Evaluation factor; Membership function; Weighing; Shuangtaizi River

水质污染程度、水质类别界限等问题均是一些客观存在的模糊概念, 模糊评判法可以处理高维变量和不确定性的数据, 借助隶属函数及权重, 可识别水体污染程度, 判定污染类别, 获得可靠、合理的评判结果。基于水质复杂性和动态变化性, 针对水质与各个污染因子之间的相互关联, 在水环境质量评价中引入模糊概念, 进行水质污染程度和水质类别的综合评判。对一特定区域的水质进行综合评价, 不仅需要考察各个污染因子浓度的高低, 而且必须将多个因素联系起来进行综合评定, 方可得出科学合理的评价结果^[1]。国外学者利用模糊评判方法对区域性的水质类别和污染程度评价做出尝试性的研究^[2-3], 其中, Shrestha^[4]、Isen^[5]、Altunkaynak^[6]应用模糊逻辑评价土耳其西部的希伯河, 从数据的整合能力和高质量的观测值去评价不同种类的污染因子。Shiow MeyLiou 等分析阶段和构造两个不同类型的隶属度函数, 选取 3 个监测点位的 1991~2000 年的 120 个数据, 以 DO、NH₃-N、BOD₅、SS 为评价因子, 评价台湾的河流水质^[7]。国内学者马英应用模糊评判法分析海城河水质变化的趋势, 并与传统的综合污染指数法进行比较, 采用多因子贡献率来判定断面水质隶属度^[8]。朱雷等从时间角度, 利用 1991~1998 年东湖主要污染指标年均值, 选用模糊综合指数评价水质动态变化^[9]。倪彬等以岷江下游 2004~2008 年资料为依据, 采用熵权法对水质模糊综合评价赋权, 对水质进行了分级评

价, 与传统权重法进行比较, 考虑了多个监测值之间的联系, 削弱异常值的影响^[10]。模糊评判把各种水质污染程度问题的实测值转化为反映水质质量优劣程度的质量值, 与综合污染指数法相比^[11], 具有较为明晰的计算原理, 而且结果可比性强, 评价结果更为合理而得到广泛的应用。笔者提出一种基于熵权赋权的方法, 利用模糊变换对双台子河水质进行评价与分类。

1 地理位置与样品采集

双台子河自盘锦市盘山县六间房入汇, 至大洼县赵圈河入辽河口, 境内全长 124.3 km, 流域面积 2 526 km², 沿途接纳一统河、小柳河、太平河、清水河、绕阳河和螃蟹沟等 6 条主要支流, 见图 1。该研究选择 2010~2011 年枯、丰、平水期水质监测数据^[12-13]作为研究对象, 设 11 个例行监测断面,

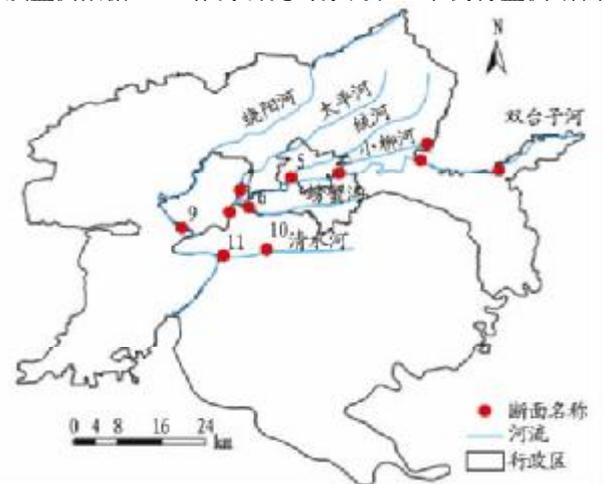


图 1 双台子河监测断面分布

基金项目 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07526)。
作者简介 孙炳双(1959-), 男, 辽宁沈阳人, 高级工程师, 从事水资源保护与管理研究。* 通讯作者, 硕士研究生, 研究方向: 水环境规划管理与技术模拟, E-mail: yangxiao2328@sina.com。
收稿日期 2013-02-25

以《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)^[14]为评价准则,分5个评价等级(表1)。

表1 地表水环境质量标准限值 mg/L

水质级别	DO	COD _{Cr}	NH ₃ -N	TP	TN	BOD ₅	氯化物
I类	7.5	15	0.15	0.02	0.2	3	250
II类	6.0	15	0.5	0.1	0.5	3	250
III类	5.0	20	1.0	0.2	1.0	4	250
IV类	3.0	30	1.5	0.3	1.5	6	250
V类	2.0	40	2.0	0.4	2.0	10	250

为了解双台子河环境质量状况,于2010和2011年对双台子河水质现场监测与调查。在双台子河设11个监测

点位(图1),具体监测方法按《水质河流采样技术指导》(HJ/T52-1999)中有关规定执行,每个监测断面选取DO、COD_{Cr}、NH₃-N、TP、TN、BOD₅、氯化物7个评价因子,监测数据见表2。

2 研究方法

2.1 熵权 熵表征信息的混乱性,从不确定事物中提取信息量,用于度量已知信息所包含的有效信息量,即根据各监测值的差异程度,确定各指标的权重。通过数据标准化,定义熵后,计算熵权。实施步骤:

表2 双台子河水质监测值 mg/L

监测断面	年份	DO	COD _{Cr}	NH ₃ -N	TP	TN	BOD ₅	氯化物	
上游	九台子	2010	7.79	87.60	1.27	0.37	10.06	10.28	34.09
		2011	7.05	58.50	1.41	1.01	4.33	18.12	40.36
	兴安	2010	6.23	23.71	1.58	0.25	12.15	9.80	37.26
		2011	7.89	35.93	0.71	0.64	3.31	11.26	45.76
河闸	2010	8.09	62.03	1.42	0.46	6.99	5.48	35.64	
	2011	7.83	48.87	0.88	0.54	4.69	19.83	45.63	
中游	丁家柳河桥	2010	9.10	76.97	0.95	0.35	8.13	12.25	227.08
		2011	7.84	75.17	0.78	0.85	2.95	25.83	152.83
	谷家闸	2010	1.87	55.40	3.82	0.27	16.98	10.64	297.46
		2011	5.62	66.97	1.39	0.42	5.06	21.44	422.57
入干流闸前	2010	6.45	63.43	8.26	1.09	15.44	24.00	770.92	
	2011	4.46	83.60	7.60	1.21	7.60	26.77	583.55	
曙光大桥	2010	6.16	24.41	1.34	0.98	7.94	8.26	121.42	
	2011	7.06	54.53	0.57	0.85	6.32	12.75	143.21	
下游	新生桥	2010	7.13	74.10	1.97	0.19	8.91	18.31	347.90
		2011	7.73	41.37	0.80	0.67	3.68	11.33	325.96
	万金滩	2010	6.85	59.27	2.13	0.40	7.77	10.08	307.10
		2011	7.20	67.90	1.26	0.66	4.28	19.57	253.29
清河桥	2010	7.58	47.27	3.71	1.01	9.09	11.76	1076.43	
	2011	3.33	81.10	1.37	0.91	5.27	90.94	847.65	
赵圈河	2010	7.23	39.28	2.94	0.15	8.08	17.39	335.64	
	2011	7.29	90.40	1.01	0.79	4.11	21.43	302.32	

(1)构建m个监测断面n个评价指标的判断矩阵: $R = (a_{ij})_{mn} (i=1,2,\dots,m,m=11;j=1,2,\dots,n,n=7)$ 。

(2)标准化处理:

$$\left. \begin{aligned} \text{效益型} \rightarrow R_{ij} &= \frac{a - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} \\ \text{成本型} \rightarrow R_{ij} &= 1 - \frac{a - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} \end{aligned} \right\}$$

式中, a_{\min} 、 a_{\max} 分别为监测断面的同一评价指标的最小值和最大值。指标DO数值越大,表征水质污染越轻,而指标COD_{Cr}、NH₃-N、TP、TN、BOD₅、氯化物的数值越大,表征水质污染程度越严重。因各个评价因子的量纲不一,对实测数据标准化,以2010年监测数据为例。

$$R_{11 \times 7} = \begin{pmatrix} 0.819 & 0.000 & 0.956 & 0.763 & 0.693 & 0.741 & 1.000 \\ 0.604 & 1.000 & 0.914 & 0.972 & 0.483 & 0.767 & 0.997 \\ 0.860 & 0.400 & 0.935 & 0.723 & 1.000 & 1.000 & 0.999 \\ 1.000 & 0.166 & 1.000 & 0.853 & 0.886 & 0.635 & 0.815 \\ 0.000 & 0.504 & 0.607 & 0.944 & 0.000 & 0.721 & 0.747 \\ 0.634 & 0.378 & 0.000 & 0.000 & 0.155 & 0.000 & 0.293 \\ 0.593 & 0.989 & 0.946 & 0.128 & 0.905 & 0.850 & 0.916 \\ 0.728 & 0.211 & 0.860 & 1.044 & 0.808 & 0.307 & 0.699 \\ 0.689 & 0.443 & 0.839 & 0.793 & 0.922 & 0.752 & 0.738 \\ 0.790 & 0.631 & 0.662 & 0.087 & 0.790 & 0.661 & 0.000 \\ 0.741 & 0.756 & 0.727 & 1.087 & 0.891 & 0.357 & 0.711 \end{pmatrix}$$

(3)定义熵:

$$\left\{ \begin{aligned} H_j &= -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \\ f_{ij} &= \frac{R_{ij}}{\sum_{j=1}^n R_{ij}} \\ f_{ij} &= 0, f_{ij} \ln f_{ij} = 0 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中, $i=1,2,\dots,m,m=11;j=1,2,\dots,n,n=7$ 。

(4)确定评价因子熵权 ω :

$$\omega_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$$

以2010、2011年实测数据经初等变化标准化后,根据公式(1)~(2),得出权重见表3。由表3可知,2010年评价因

表3 评价因子权重

年份	DO	COD _{Cr}	NH ₃ -N	TP	TN	BOD ₅	氯化物
2010	0.097	0.128	0.097	0.202	0.212	0.145	0.120
2011	0.097	0.164	0.050	0.257	0.181	0.179	0.072

子权重:TN > TP > BOD₅ > COD_{Cr} > 氯化物 > NH₃-N > DO,主要超标因子为TN、TP、BOD₅。2011年TP > TN > BOD₅ >

$COD_{Cr} > DO > \text{氯化物}$, 主要超标因子为 TN、TP、 BOD_5 、 COD_{Cr} , 属有机型污染, 次要超标因子为 $NH_3 - N$ 、DO、氯化物。

表 4 权重对比结果

方法	DO	COD_{Cr}	$NH_3 - N$	TP	TN	BOD_5	氯化物
传统加权法	0.091	0.138	0.073	0.186	0.246	0.201	0.065
熵权法	0.097	0.128	0.097	0.202	0.212	0.145	0.120

为验证熵权赋权法的有效性, 笔者将熵权法与传统加权求权重的方法对比^[15], 应用到模糊评判中。结果表明, 熵权赋权法和传统加权法赋权的结果近乎一致。由表 4 可知, TN、TP、 BOD_5 的熵权值分别为 0.212、0.202、0.145, 与传统加权法相比, TN 的权重误差为 13.9%, 由此使得水质监测断面中 TN 超标严重。熵权赋权法与传统赋权法相比, 对双台子河 11 个监测断面进行水质评价时, 只需赋权 1 次即可得出各监测断面的权重, 大大减少了评价工作量。熵权法将多个监测断面中的同一评价因子综合确定权重, 考虑了多个断面间联系, 可削弱异常值的影响。

2.2 模糊评判 模糊综合评价法的评价步骤^[16]如下:

(1) 确定评价因子的集合: $U = (u_1, u_2, \dots, u_j)$, 共 j 个因子, u_j 为评价的第 j 个指标, j 为评价因子数。该研究中, $U = (DO, COD, NH_3 - N, TP, BOD, TN, CL)$, 共 7 个评价因子。

(2) 确定评价等级的集合: $V = (v_1, v_2, \dots, v_p)$, 共 p 个因子, v_p 为评价因子归属的类别, p 为评价类数。该研究中, 评价集 $V = (I, II, III, IV, V)$, 共 5 个评价水质类别。

(3) 进行单个因子评价, 建立模糊关系矩阵 R , 其中 r_{jp} 为 U 中的因子 u_j 对应 V 中等级的隶属关系。 R 是由每个评价因子模糊评价集组成的评价矩阵, 具体形式:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{1p} \\ \vdots & \vdots \\ r_{j1} & r_{jp} \end{pmatrix}$$

隶属度可通过对隶属函数的计算进行确定^[17-18]。

第 1 级水质, 即 $p=1$ 时, 隶属函数:

$$R = \begin{cases} 1 & 0 \leq a_i \leq S_{jp} \\ \frac{S_{jp+1} - a_i}{S_{jp+1} - S_{jp}} & S_{jp} \leq a_i \leq S_{jp+1} \\ 0 & S_{jp+1} < a_i \end{cases}$$

第 2 ~ ($w-1$) 级水质, 即 $p=2, 3, \dots, w-1$ 时, 隶属函数:

$$R = \begin{cases} 1 & a_i = S_{jp} \\ \frac{a_i - S_{jp-1}}{S_{jp} - S_{jp-1}} & S_{jp-1} \leq a_i \leq S_{jp} \\ \frac{a_i - S_{jp+1}}{S_{jp} - S_{jp+1}} & S_{jp} \leq a_i \leq S_{jp+1} \end{cases}$$

第 w 级水质, 即 $j=w$ 时, 隶属函数:

$$R = \begin{cases} 1 & a_i \geq S_{jp} \\ \frac{a_i - S_{jp-1}}{S_{jp} - S_{jp-1}} & S_{jp-1} < a_i < S_{jp} \\ 0 & a_i \leq S_{jp-1} \end{cases}$$

式中, a_i 为第 i 个因素 u_j 的实测值; S_{jp-1} 、 S_{jp} 、 S_{jp+1} 分别为因子 u_j 的第 $p-1$ 、 p 、 $p+1$ 级水质的标准值^[19]。以 2010 年九台子断面为例, 根据评价因子的隶属函数及实测值, 求出各评价因子对各级水质的隶属度, 并组成模糊矩阵 R_{jp} 。

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.45 & 0.55 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.29 & 0.71 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

(4) 确定评价模型 $A = \omega \times R$: 根据矩阵的运算法则, 把矩阵 ω 的元素分别与矩阵 R 的列元素乘积后取最大值得出水质的评价等级。按照水环境质量评价模型: $A = \omega \times R = (0.217 0, 0.043 7, 0.054 3, 0.625, 0.622 5)$, 为此 2010 年九台子断面的水质类别为 V 类。同理得出其余断面的评价等级。

3 结果与分析

3.1 评价结果分析 模糊矩阵复合运算结果以隶属度的最大值为水质断面综合评价结果。2010 和 2011 年评价结果见

表 5 2010 年水质评价结果

序号	监测断面	模糊评价向量 A					评价结果	评价结果 平均值	
		I类	II类	III类	IV类	V类			
1	上游	九台子	0.217 0	0.043 7	0.054 3	0.062 5	0.622 5	V	0.411 0
2		兴安	0.135 5	0.081 5	0.235 5	0.285 4	0.262 1	IV	
3		河闸	0.217 0	0.105 8	0.047 5	0.281 4	0.348 3	V	
4	中游	丁家柳河桥	0.207 0	0.010 7	0.086 3	0.010 3	0.685 7	V	0.630 7
5		谷家闸	0.031 5	0.020 6	0.059 4	0.152 6	0.735 9	V	
6		入干流闸前	0.030 1	0.066 9	0.065 4	0.163 3	0.674 3	V	
7		曙光大桥	0.130 7	0.086 3	0.146 1	0.209 9	0.427 0	V	0.658 0
8	下游	新生桥	0.072 8	0.029 7	0.182 3	0.105 8	0.609 4	V	
9		万金滩	0.054 3	0.042 7	0.093 5	0.110 2	0.699 3	V	
10		清河桥	0.097 0	0.046 7	0.068 2	0.139 5	0.648 6	V	
11		赵圈河	0.079 5	0.125 6	0.103 9	0.016 2	0.674 8	V	

表 5、表 6。双台子河 2010 年兴安监测断面的水质为 IV 类, 其余断面均为 V 类; 2011 年九台子和兴安断面的水质为 IV 类,

其余断面均为 V 类, 低于双台子河执行 IV 类预期目标, 属于较差水质。

表 6 2011 年水质评价结果

序号	监测断面	模糊评价向量 A					评价结果	评价结果 平均值	
		I类	II类	III类	IV类	V类			
1	上游	九台子	0.139 9	0.029 1	0.009 0	0.781 0	0.041 0	IV	0.271 5
2		兴安	0.169 0	0.029 5	0.020 5	0.675 6	0.105 4	IV	
3		河闸	0.169 0	0.012 0	0.038 0	0.113 0	0.668 0	V	
4	中游	丁家柳河桥	0.169 0	0.022 0	0.028 0	0.031 0	0.750 0	V	0.763 8
5		谷家闸	0.015 0	0.060 1	0.047 9	0.039 0	0.838 0	V	
6		入干流闸前	0.127 0	0.035 0	0.071 8	0.026 2	0.740 0	V	
7		曙光大桥	0.140 9	0.070 6	0.007 5	0.054 0	0.727 0	V	
8	下游	新生桥	0.097 0	0.020 0	0.030 0	0.108 0	0.745 0	V	0.801 0
9		万金滩	0.076 6	0.020 4	0.024 0	0.026 0	0.853 0	V	
10		清河桥	0.052 0	0.048 0	0.028 5	0.118 5	0.753 0	V	
11		赵圈河	0.083 4	0.013 6	0.049 0	0.001 0	0.853 0	V	

由表 5 可知,2010 年上游、中游、下游的模糊评价向量分别为 0.411 0、0.630 7、0.658 0,评价向量大小:下游 > 中游 > 上游,污染状况依次严重。上游兴安断面的评价结果为 IV 类,九台子和河闸断面为 V 类水质,其余中游和下游断面全部为 V 类水质。中游支流一统河的谷家闸断面 2010 年 V 类的评价向量为 0.735 9,主要超标因子为 TN、BOD₅、COD_{Cr}、NH₃-N。据当地监管数据显示,附近的华锦工业排污及小型工业废水排污均超过功能区水质标准。入干流闸前断面属双台子河支流螃蟹沟的断面,当河流进入市区螃蟹沟河段后,水质明显恶化。相关资料显示,螃蟹沟有六零河等纳污河流汇入,附近排放的工业废水与生活污水对螃蟹沟水质造成了很大程度的污染。下游断面赵圈河断面 V 类的评价向量为 0.853 0,污染情况大于下游其他断面。由表 6 可知,2011 年上游、中游、下游的模糊评价向量分别为 0.801 0、0.763 8、0.271 5,评价向量大小:下游 > 中游 > 上游。上游九台子、兴安断面的评价结果为 IV 类,河闸断面为 V 类水质,其余中游和下游断面全部为 V 类水质。由表 4、表 5 可知,2010、2011 年下游段的评价向量分别 0.658 0、0.801 0,可见,2011 年水质较 2010 年污染严重。

3.2 评价结果对比 由图 2 可知,综合标识指数法评价分析表明,谷家闸、入干流闸前、万金滩、清河桥为劣 V 类,上游九台子和兴安断面的水质为 IV 类。综合标识指数法与模糊评判对比,两种评价结果一致,没有大的误差,但模糊评价以熵权确定评价因子的权重,进而表征了水质综合特征,又考虑了最大超标因子的影响,避免了模糊评价以偏概全的缺陷,且分辨率高。

4 结语

笔者以双台子河为研究对象,应用模糊数学评判,以《2010 年辽宁省水环境功能区划》和《地表水环境质量标准》为评价标准,对双台子河水质进行了综合评判。分析结果表明,2010 年双台子河整体水质为 IV 类,2011 年为 V 类,有机污染是造成河流污染的主要原因,评价河段下游污染最为严重,中游污染比下游轻,上游污染最轻。

熵权赋权的评价模型依据评价因子对水质的影响程度而得,充分地考虑多个样本间的相互联系,大幅度减小异常值对评价结果的影响,使评价结果更加合理准确,并可根

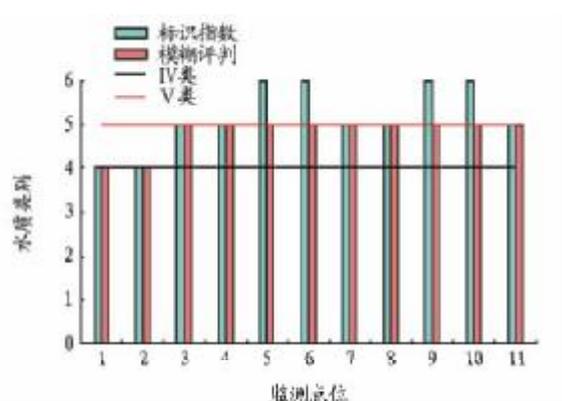


图 2 两种评价结果对比

水质监测数据,合理地确定各个因子对水质污染的贡献率即权重大小,对水质所属类别的判别更具分辨性。将模糊理论应用于大尺度、多断面、长时间的水质监测数据分析,相同水质类别依据模糊向量大小判断污染程度具有可靠性。笔者构造了模糊向量以评判水质类别,体现了水质样本的综合性,充分考虑了主要超标因子对水质的影响,避免了单因子评价法以单个因子超标概括全部因子超标的缺陷。

参考文献

- [1] 李祚泳,丁晶,彭荔红. 环境质量评价原理与方法[M]. 北京:化学工业出版社,2004:83-86.
- [2] SURINDRA SUTHAR, JITENDER SHARNLA, ARVIND K NEMA. Water quality assessment of river Hindon at Ghaziabad, India: impact of industrial and urban waste water [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 165(1/4): 103-112.
- [3] CHANG N, CHEN H W, KING S K. Identification of river water quality using the fuzzy synthetic evaluation approach [J]. Journal of Environmental Management, 2001, 63(5): 293-305.
- [4] SHRESTHA S, KAZAMA F. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of the Fuji river basin, Japan [J]. Environmental Modelling Software, 2007, 22(4): 464-475.
- [5] ISCEN C F, EMIROGLU O, ILHAN S. Application of multivariate statistical techniques in the assessment of surface water quality in Uluabat Lake, Turkey [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 144(1/3): 269-276.
- [6] ALTUNKAYNAK A, ÖZGER M, ÇAKMAKCI M. Fuzzy logic modeling of the dissolved oxygen fluctuations in Golden Horn [J]. Ecological Modelling, 2005, 189: 436-446.
- [7] LIOU S M, LO S L, HU C Y. Application of two-stage fuzzy set theory to river quality evaluation in Taiwan [J]. Water Research, 2003, 37(6): 1406-1416.

(下转第 3131 页)

2.2 超高压正交试验 按表 1 设计安排试验,其试验方案与结果见表 2。以满足菌落总数 < 100 cfu/ml 为前提,以溶菌酶活性为指标进行优化结果分析,数据为 3 次测试后的平均值。

表 2 超高压调味液态蛋清试验方案与结果

试验号	因素				试验指标与结果	
	A	B	C	D	菌落总数 cfu/ml	溶菌酶活 性//U/mg
1	1	1	1	1	473	831.725
2	1	2	2	2	298	970.005
3	1	3	3	3	223	1 016.114
4	2	1	2	3	111	1 115.988
5	2	2	3	1	76	1 252.270
6	2	3	1	2	39	1 082.860
7	3	1	3	2	24	1 026.781
8	3	2	1	3	20	992.445
9	3	3	2	1	31	882.679
K_1	2 817.844	2 974.494	2 907.030	2 966.674		
K_2	3 451.118	3 214.720	3 045.310	3 249.056		
K_3	2 901.905	2 981.653	3 295.165	3 014.781		
R	633.274	240.226	388.135	282.382		

对试验数据进行方差分析显示, $F_{校正模型} = 14.116$, $F_{截距} = 5 987.250$, $F_A = 27.112$, $F_B = 4.783$, $F_C = 10.454$; $P_{模型} = 0.068$, $P_{截距} = 0.000$, $P_A = 0.036$, $P_B = 0.173$, $P_C = 0.087$ 。由此可以看出,因素 A 对结果的影响显著,因素 B 对结果有一定影响,因素 C 对结果的影响较显著。当压力达到 300 MPa 时,菌落总数 < 100 cfu/ml,且此时溶菌酶活性较高,因此选取 A_2 水平;温度越高,杀菌效果越好且溶菌酶活性较高,因此因素 C 选择 C_3 水平;而因素 B 重要程度最低,考虑杀菌效果和溶菌酶活性的关系,选取 B_2 水平。即最优组合为 $A_2B_2C_3$,即压力 300 MPa,保压时间 15 min,温度 40 °C。而直观分析结果的最优组合为 $A_2B_2C_3$,二者一致。但考虑温度单因素影响关系和保压时间的影响较小,选择 $A_2B_2C_2$ 、 $A_2B_2C_3$ 与 $A_2B_1C_2$ 进行验证,结果见表 3。

从表 3 可以看出,3 种方案的菌落总数均 < 100 cfu/ml,但处理时间为 10 min 时,菌落总数接近于 100 cfu/ml,考虑食用安全性,保压时间宜选择 15 min。温度对溶菌酶活性有一定的影响,30 °C 时溶菌酶活性较强,因此选择 $A_2B_2C_2$ 为最优

方案,即调味液态蛋清的超高压工艺条件为压力 300 MPa,保压时间 15 min,温度 30 °C;按此条件进行超高压处理,溶菌酶活性比未处理的高出约 50%。

表 3 调味液态蛋清超高压工艺验证试验方案与结果

试验号	试验组合方案	试验指标与结果	
		菌落总数//cfu/ml	溶菌酶活性//U/mg
10	$A_2B_2C_2$	46	1 255.721
11	$A_2B_2C_3$	21	993.874
12	$A_2B_1C_2$	96	920.635
13	未处理(30 °C)	12 000	839.624

3 结论

液态调味蛋清超高压杀菌增活工艺优化结果显示,超高压处理可有效杀灭液态调味蛋清中微生物,并能使蛋清中溶菌酶保持高活性。最优工艺条件为:处理压力 300 MPa,保压时间 15 min,温度 30 °C。压力对增活影响显著,温度次之,最后是保压时间。按优化工艺条件处理的液态调味蛋清,其菌落总数 < 100 cfu/ml,溶菌酶活性较未处理蛋清液高出约 50%。

参考文献

- [1] 傅鹏,马美湖,钟凯民,等. 液态蛋液非热杀菌技术[J]. 中国家禽, 2007,29(24):58-60.
- [2] 于美娟,王飞翔,马美湖. 冷杀菌技术在液蛋制品加工中的应用研究[J]. 湖南农业科学,2008(5):116-118.
- [3] PROCTOR V A, CUNNINGHAM F E, FUNG D C. The chemistry of lysozyme and its use as a food preservative and a pharmaceutical[J]. CRC Critical Rev in Food Science and Nutrition,1988,26:359-369.
- [4] 林亲录,马美湖,金阳海,等. 鸡蛋卵清中溶菌酶的提取与纯化[J]. 食品科学,2002,23(2):43-46.
- [5] ISIKER G, GURAKAN G C, BAYLINDIRLI A. Combined effect of high hydrostatic pressure treatment and hydrogen on Salmonella Enteritidis in liquid whole egg[J]. European Food Research and Technology,2003,217:244-248.
- [6] PONCE E, PLA R, SENDRA E, et al. Destruction of Salmonella enteritidis inoculated in liquid whole egg by high hydrostatic pressure[J]. Food Microbiology,1999,16:357-365.
- [7] 夏远景,李志义,陈淑花,等. 液体蛋的超高压杀菌效果试验研究[J]. 家禽生态学报,2008,29(1):67-69.
- [8] 马先红. 液态鸡蛋超高压杀菌工艺的研究[J]. 吉林化工学院学报,2010,27(4):32-35.
- [9] 李志义,刘学武,张晓冬,等. 液体蛋的超高压处理[J]. 食品研究与开发,2004(4):94-97.
- [10] 国家环保总局. GB3838-2002 地表水环境质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [11] 陈水木,陈爱平. 水质模糊综合评价模型的建立与应用——以鄱阳湖为例[J]. 安徽农业科学,2011,39(3):1615-1617.
- [12] 郭齐胜. 系统建模[M]. 北京:国防工业出版社,2006:255-265.
- [13] NIVES S G. Water quality evaluation by index in Dalmatia[J]. Water Research,1999,33(16):3423-3440.
- [14] FLORES SINTAS A, CADENAS J M, MARTIN F. Membership functions in the fuzzy C-means algorithm[J]. Fuzzy Sets and Systems,1999,101(1):49-58.
- [15] 李明昌,张光玉,司琦,等. 非线性隶属函数集对分析方法在海域水质评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(4):70-75.

(上接第 3066 页)

- [8] 马英. 模糊数学在海城河水质评价中的应用[J]. 环境科学与管理,2011,36(9):168-172.
- [9] 朱雷,陈威. 模糊综合指数法在水质评价中的应用[J]. 武汉理工大学学报,2001,23(8):61-65.
- [10] 倪彬,李旭东,王红磊,等. 岷江下游水环境质量评价与变化趋势分析[J]. 长江流域资源与环境,2010,19(22):172-176.
- [11] 郭劲松,龙腾锐,霍国友. 四种水质综合评价方法的比较[J]. 重庆建筑大学学报,2000,22(4):6-12.
- [12] 国家环境保护总局. HJ/T52-1999 水质河流采样技术指导[S]. 北京:国家环境保护总局,1999.
- [13] 国家环境保护总局. HJ/T91-2002 地表水和污水监测技术规范[S]. 北京:中国环境科学出版社,2002.