

基于突变级数的突发性水污染事故预警研究^{*}

李晓非, 葛新权

(北京信息科技大学 经济管理学院, 北京 100192)

摘要:随着突发性水污染事故的频繁发生, 突发性水污染事故的预警已经成为环境治理和公共安全领域研究的热点问题。目前我国关于突发性水污染事故的预警研究主要集中在突发性水污染事故预警指标和评价建立上, 尚缺乏有效的预警方法。针对突发性水污染事故影响的复杂性, 基于突变理论的思想, 建立了一种基于突变级数的突发性水污染事故预警方法, 并从自然环境和公共安全两个方面对突发性水污染事故的影响进行了评价。该方法能够通过定量指标与定性指标有效地评价突发性水污染事故对自然环境和社会环境的影响。

关键词:突变级数; 水污染; 预警

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2013)04-0029-05

0 引言

随着工业化进程的加深, 我国水环境正在日趋恶化, 近年来突发性水污染事故频繁发生。2011年6月4日, 杭州市杭新景高速公路发生苯酚槽罐车泄漏事故, 导致部分苯酚泄漏并随雨水流入新安江, 造成部分水体受到污染。2012年1月15日, 宜州市怀远镇河段水质出现异常, 镉含量严重超标, 污染范围达300 km以上。2013年3月, 上海黄浦江松江段水域出现大量漂浮死猪的情况, 截止到2013年3月12日, 共打捞死猪5 916具, 引发上海市民对饮用水安全性的担忧, 大批市民开始抢购桶装纯净水和自来水过滤器。突发性水污染事故, 不仅严重威胁居民的生命健康, 还将导致居民恐慌, 进而引发社会动荡。因此, 突发性水污染事故的应急处理已经成为关系我国社会可持续发展的重大课题。

突发性水污染事故预警通过对水污染事故影响范围、影响程度等因素的评估与预测, 奠定了突发性水污染事故的应急处理基础。现有文献中关于水污染的研究, 大都集中在累积性水环境污染上, 或单纯关注于水环境质量的预警^[1-3], 对于突发性水污染事故的研究较少。于凤存^[4]和彭祺^[5]对突发性水污染的种类、特征进行了分析,

并在此基础上进行了突发性水污染应急对策系统的构建, 但是并未指出突发性水污染事故的具体预警指标。吕连宏^[6]和雷丽萍^[7]的研究虽然建立了突发性水污染事故预警指标体系和评价标准, 但并未给出可操作性的评价方法。针对现有研究的不足, 本文提出一种基于突变级数的突发性水污染事故预警方法, 这种方法能够有效地体现水污染事故对社会环境和自然环境的影响, 而且该方法计算简单, 不需要确定指标的权重。

1 突变级数理论及基本模型

突变理论是一种研究不连续现象的数学理论, 该理论由法国数学家 Rene Thom 创立^[8]。通过对事物稳定性结构的研究, 说明了事物不变、渐变以及突变的动态特征, 用以解释自然界和社会现象中所发生的不连续的变化过程, 描述各种现象从一种性状突然变化为另一种性状的过程。

突变级数法是一种基于突变理论思想的综合评价方法, 该方法首先将研究对象分层次分解为若干指标, 再由将各指标由低到高逐层综合, 最后利用突变模糊隶属函数归一为一个参数。常见的归一化公式如表1所示。采用这种方法进行评价无需确定指标的权重, 降低了评价的主观性, 从而在资源环境^[9]、经济管理^[10,11]和矿业安全^[12]等研究领域得到了广泛的运用。

^{*} 收稿日期: 2013-03-12 修回日期: 2013-04-23

基金项目: 北京市属高等学校科技创新平台“北京世界城市循环经济体系(产业)协同创新中心”; 北京知识管理研究基地项目

作者简介: 李晓非(1978-), 男, 吉林延吉人, 博士, 讲师, 研究方向为循环经济。E-mail: ustblxf2007@126.com

通讯作者: 葛新权(1957-), 男, 安徽蚌埠人, 教授, 研究方向为知识管理。E-mail: xqge2001@yahoo.cn

表 1	常用突变模型及其归一公式汇总	
模型类型	势函数 $f(x)$	归一公式
尖点	$f(x) = x^4 + ux^2 + vx_0$	$x_u = \sqrt{u}; x_v = \sqrt[3]{v}_0$
燕尾	$f(x) = x^5 + ux^3 + vx^2 + wx_0$	$x_u = \sqrt{u}; x_v = \sqrt[3]{v}; x_w = \sqrt[4]{w}_0$
蝴蝶	$f(x) = x^6 + ux^4 + vx^3 + wx^2 + tx_0$	$x_u = \sqrt{u}; x_v = \sqrt[3]{v}; x_w = \sqrt[4]{w}; x_t = \sqrt[5]{s}_0$
棚屋	$f(x) = x^7 + ux^5 + vx^4 + wx^3 + tx^2 + sx_0$	$x_u = \sqrt{u}; x_v = \sqrt[3]{v}; x_w = \sqrt[4]{w}; x_t = \sqrt[5]{t}; x_s = \sqrt[6]{s}_0$

2 突发性水污染事故预警步骤

突发性水污染事故涉及的因素众多、每个因素的变化可能对环境造成巨大的影响，而且在对污染程度进行预警时，不仅需要考虑到各个具体因素的影响，还要对整体的污染程度进行综合评价。根据突变理论，运用突变级数法对突发性水污染事故进行预警分析，其基本过程如下：

2.1 预警指标体系的确定与突变模型的选择

根据突变级数法的思想，对影响突发性水污染事故的因素进行逐层分解，建立预警指标体系，并以指标的重要程度为标准进行排序，依据各层次指标的数量确定突变类型。

根据现有突发性水污染事故的研究成果^[4-7]，突发水污染事故对环境的影响主要体现在对自然环境和公共安全的影响上，对影响自然环境和公共安全的因素进行分解后建立预警指标体系如图 1 所示。根据指标的数量，“水质破坏程度”属于尖点突变系统；“受污染水体状态”属于燕尾突变系统；“外部催化条件”属于燕尾突变系统；“公共安全影响”属于燕尾突变系统；“突发性水污染事故”属于尖点突变系统。

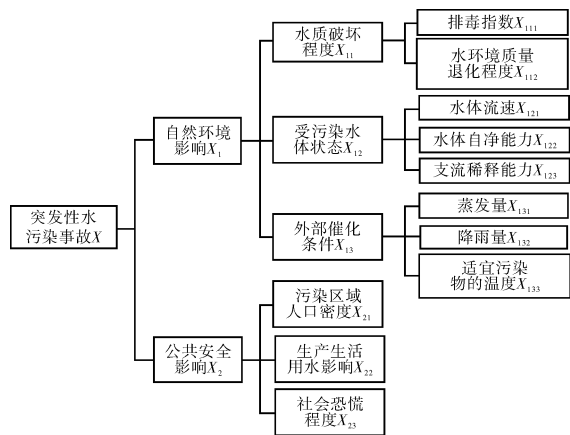


图 1 突发性水污染事故预警指标体系

另外，综合分析指标的重要性程度，按照重要程度确定指标的排序：重要性较大的指标排在前面，重要性较低的指标排在后面。

(1) 自然环境影响

突发性水污染事故对于自然环境的破坏受到三个因素的影响，分别是水质破坏程度、受污染水体状态以及外部条件催化。

①水质破坏程度

排毒指数^[6]。排毒指数指突发性水污染事故发生后，进入水体的污染物对受污染水体中水生物的伤害程度。排毒指数的计算公式如下：

$$PI = \frac{C}{C_s}。$$

(1)

式中：PI 表示排毒指数；C 表示污染事故后在水体中污染物的浓度；Cs 为浓度标准，一般采用水体中生物优势种群对该污染物的半致死浓度(LC50)或最低可见效应浓度(LOEC)。当多种污染物排入水体时，选取排毒指数最大的污染物作为度量指标。

水环境质量退化程度^[6]。水质退化程度越高，水污染的破坏程度越大。根据《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》^[13]的要求，将地面水环境质量分为Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ，Ⅳ，Ⅴ类及劣Ⅴ类共 6 个级别，以污染前后水质相差的级别来确定水质退化程度。相差级别越大，水质退化程度越高。

②受污染水体状态

水体流速。水体流速是指受污染水体的流动速度，水体流速会对水污染的程度产生影响。水体流速越高，污染物越易被稀释^[14]。

水体自净能力。水体自净能力是指在物理、化学与生物的作用下，水体中的污染物浓度降低。水体自净能力与生物群落、水体酸碱性、河床岩性与植被等多种因素有关。另外，对应不同污染物，水体自净能力存在较大差别^[15]。因此，水体自净能力需要专家根据污染物的性质和水体自身的状况来判断，评分方式为 1~10 分，分数越高水体自净能力越强。

支流稀释能力。支流对于干流下游的污染物的稀释起到很强的作用^[16]，支流的稀释能力受到流量、无机物成分、生物构成等多种因素的影响。由于支流稀释能力的影响因素众多，也需要专家根据实际情况进行综合判断，评分方式为 1~10

分，分数越高支流稀释能力越强。

③外部催化条件

蒸发量。蒸发量是指在一定时段内，水分经蒸发而散布到空中的量，蒸发量越高，污染物的浓度则越高。

降雨量。降雨量是指未经蒸发、渗透、流失而在水面上积聚的降水水层的深度，降雨量越大，污染物的浓度越低。

适宜污染物的温度。在不同的温度下，污染物的挥发性、扩散性都会发生变化，适宜的温度会加剧污染物对环境的破坏。

(2)公共安全影响

①污染区域人口密度

人口密度是指水污染事故波及范围内，每平方公里的人口数量。人口密度越大，受水污染影响的人数越多。

②生产生活用水影响

水污染事故发生后，可能会对污染区域内居民的生产生活用水发生影响。水污染事故对于生产生活用水的影响需要专家从污染物的性质、污染源与饮用水取水口距离等因素进行综合判断，评分方式为 1~10 分，分数越高影响越大。

③社会恐慌程度

水污染事故发生后，污染区域内居民会出于对自身生命安全的担心而产生恐慌情绪，而相关知识的缺乏以及各种流言也会进一步地放大居民

的恐慌情绪。事故发生后的社会恐慌程度无法采用定量指标直接度量，需要专家根据污染物的性质、以往污染事件的状况、居民的知识水平等进行预测，评分方式为 1~10 分，分数越高恐慌程度越大。

2.2 确定指标数值并进行标准化处理

确定受污染水体最底层的指标(突变模型中的控制变量)值，对于定量指标如水体流速、降雨量等可以通过对水体测量和当地水文观测直接获得，对于那些需要定性分析的指标如社会恐慌程度等则需要通过专家评价的方式获得。由于各指标反的取值范围和单位存在差别，无法直接进行归一计算，因此需要对指标进行标准化，将不同单位和取值范围的指标转换为 0~1 的标准化值。标准化处理的基本方法为：

对于越大(高)越安全的指标

$$b_i = \frac{a_i - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}}。$$
(2)

对于越小(低)越安全的指标

$$b_i = \frac{a_{\max} - a_i}{a_{\max} - a_{\min}}。$$
(3)

式中： a_i 是每个指标的原始值，而 b_i 是标准化后的指标值。根据各指标的特征以及相应的历史数据确定各指标的最大值 a_{\max} 和最小值 a_{\min} ，在这种情况下如果而造成指标标准化值大于 1 的，标准化值取 1，标准化值小于 0 的，标准化值取 0。标准化原则，各指标的 a_{\max} 和 a_{\min} 取值如表 2 所示。

表 2 标准化原则， a_{\max} 和 a_{\min} 取值

指标	数据来源	标准化原则	最大值 a_{\max}	最小值 a_{\min}
排毒指数	水体测量	越低越安全	0.5	0
水环境质量退化程度	水体测量	越小越安全	退化 5 级	退化 0 级
水体流速	水文观测	越高越安全	有记录以来水体最高流速	有记录以来水体最低流速
水体自净能力	专家判断	越高越安全	10	1
支流稀释能力	专家判断	越高越安全	10	1
蒸发量	气象观测	越低越安全	有记录以来当地最高蒸发量	有记录以来当地最低蒸发量
降雨量	气象观测	越高越安全	有记录以来当地最高降雨量	有记录以来当地最低降雨量
适宜污染物的温度	水文观测	越低越安全或越高越安全，根据污染物特征确定	有记录以来水体最高温度	有记录以来水体最低温度
污染区域人口密度	统计数据	越低越安全	当年人口密度最高的省市的密度	当年人口密度最低的省市的密度
生产生活用水影响	专家判断	越小越安全	10	1
社会恐慌程度	专家判断	越低越安全	10	1

2.3 进行归一计算，确定水污染事故安全系数

利用各指标的标准化值，按照不同突变模型的归一公式计算出上一级指标的数值并且逐步向上汇总，确定水污染事故安全系数。

在利用归一化公式进行递归计算时需要考虑同一对象及各控制变量之间存在的关系，根据突变理论，控制变量分为非互补型的突变系统和互补型的突变系统。非互补型的突变系统每个因素的变动都会独立地对上一级因素产生作用，而不受同级因素的影响，如对于“自然环境影 响”和“公共安全影响”而言，无论另一因素处于何种状态，其中某个因素都会突发性水污染事故的危险状态产生影响，非互补型突变系统采用“大中取小”的原则进行归一，即取突变级数中的最小值；非互补型的突变系统内的每个因素的变动对上级因素的作用会受到同级指标的影响，例如在“水体流速”对于“水污染状态”的作用，要受到“水体自净能力”和“支流稀释能力的”影响，互补性型突变系统取各突变级数的平均数。根据指标间的关系确定各指标的系统类型如下：“排毒指数”与“水环境质量退化程度”；“水体流速”、“水体自净能力”与“支流稀释能力”；“蒸发量”、“降雨量”与“适宜污染物的温度”；“自然环境影 响”与“公共安全影响”属于非互补型突变系统。“污染区域人口密度”、“生产生活用水影响”、“社会恐慌程度”；“水质破坏程度”、“受污染水体状态”与“外部催化条件”属于互补型突变系统。

2.4 确定水污染事故预警等级

根据水污染事故安全系数高低，将其水污染

事故划分为 5 个预警等级，如表 3 所示。

3 突发性水污染事故预警算例

假设某沿江工业园区发生化学品泄露事故，污染物直接排入水中，利用突变级数法进行事故预警过程如下：

Step1：数据采集与标准化

对于定量的数据，通过水文观测、气象观测等方式获得，对于哪些无法定量测量的数据根据受污染水体状况，聘请五名专家共同进行评价，将各位专家评分的平均值作为该指标的取值。各指标的取值及标准化后的数据如表 4 所示。根据污染物的性质适宜污染物的温度按照越低越安全进行标准化。

Step2：计算水污染事故安全系数

下面以“水质破坏程度”的计算为例说明水污染事故安全系数的计算过程。

“水质破坏程度”所包含的指标“排毒指数”与“水环境质量退化程度”属于非互补型突变系统，为尖点突变系统。

$$x_{11u} = \sqrt{x_{111}} = \sqrt{0.36} = 0.60; \tag{4}$$

$$x_{11v} = \sqrt[3]{x_{112}} = \sqrt[3]{0.60} = 0.84。 \tag{5}$$

按照“大中取小”的原则，对“水质破坏程度”指标有：

$$x_{11} = \min(x_{11u}, x_{11v}) = 0.60。 \tag{6}$$

同理计算其他指标，详细计算过程从略，计算结果如表 5 所示。

表 3 水污染危险性等级

预警等级	特险	重险	中险	轻险	微险
安全系数	0 ~ 0.20	0.21 ~ 0.40	0.41 ~ 0.60	0.61 ~ 0.80	0.81 ~ 1.0

表 4 样本原始数据及标准化数据

指标	原始数据	最大值	最小值	标准化数据
排毒指数	0.32	0.5	0	0.36
水环境质量退化程度	退化 2 级	退化 5 级	退化 0 级	0.60
水体流速/(m/s)	0.21	0.35	0.1	0.44
水体自净能力	5.44	10	1	0.49
支流稀释能力	4.38	10	1	0.38
蒸发量/mm	852	966	625	0.33
降雨量/mm	1 276	1 452	899	0.68
适宜污染物的温度/℃	27.22	32.23	4.22	0.18
污染区域人口密度/(人/km ²)	1 123	2130 *	2 **	0.47
生产生活用水影响	5.48	10	1	0.50
社会恐慌程度	4.66	10	1	0.59

注：*2011 年上海人口密度；**2011 年西藏人口密度。

表5 水污染事故安全系数计算过程

指标体系			
$X_{111}=0.36$	$X_{11}=0.60$	$X=0.57$	
$X_{112}=0.60$			
$X_{121}=0.44$	$X_{12}=0.66$		
$X_{122}=0.49$			
$X_{123}=0.38$	$X_1=0.61$		
$X_{131}=0.33$	$X_{13}=0.57$		
$X_{132}=0.68$			
$X_{133}=0.18$	$X_2=0.52$		
$X_{21}=0.47$			
$X_{22}=0.50$			
$X_{23}=0.59$			

Step3: 评价水污染事故的预警等级

根据计算结果, 该水污染事故的安全系数为0.57, 对照表2水污染危险性等级, 将该事故的危险性定义为“中险”。并且通过评价过程可以看出该事故对自然环境的影响较大, 属于“轻险”, 对公共安全的影响较大, 属于“中险”。

4 结论

利用突变理论的思想, 建立了基于突变级数的突发性水污染事故的预警模型, 采用这一方法进行突发性水污染事故预警能够将定量预警指标与定性预警指标有效地结合, 其所反应的信息更加全面。同时采用这种方法, 无需确定指标的权重, 计算过程简单, 具有很强的操作性。

参考文献:

[1] 闫云侠. 淮河水污染现状及防治[J]. 灾害学, 2006, 21

(1): 52-54.

[2] 郭松影, 周直, 高成卫. 水安全风险预警系统研究[J]. 中国水运: 学术版, 2007, 7(10): 48-50.

[3] 闻常玲, 王莉红, 贺徐蜜. 水库型饮用水水源地生态安全评价及应用[J]. 水资源保护, 2008, 24(3): 91-94.

[4] 于凤存, 方国华, 高玉琴. 城市水源地突发性水污染事故思考[J]. 灾害学, 2007, 22(4): 104-107.

[5] 彭祺, 胡春华, 郑金秀, 等. 突发性水污染事故预警应急系统的建立[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(11): 58-61.

[6] 吕连宏, 罗宏, 路超君. 突发性水污染事故预警指标体系实证研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(4): 148-154.

[7] 雷丽萍, 余廉, 吴国斌. 基于事故树的三峡库区水体污染公共安全事件诱因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(3): 318-323.

[8] 雷纳·托姆. 结构稳定性与形态发生学[M]. 成都: 四川教育出版社, 1992.

[9] 李艳, 陈晓宏, 张鹏飞. 突变级数法在区域生态系统健康评价中的应用[J]. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(3): 50-55.

[10] 朱顺泉. 基于突变级数法的上市公司绩效综合评价研究[J]. 系统工程理论与实践, 2002(2): 91-97.

[11] 鲍新中, 李晓非. 基于时序数据的高技术企业成长性分析[J]. 科学学研究, 2010, 28(2): 275-281.

[12] 李芳玮, 金龙哲. 基于突变级数的油母页岩粉尘爆炸危险性分析[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2010, 29(2): 1024-1027.

[13] 国家环境保护局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准[EB/OL]. [2002-06-01]. http://kjs.mep.gov.cn/hjbhbz/bzwb/shjbh/shjzlbz/200206/t20020601_66497.htm.

[14] 吕贤弼. 流量可调节的河流污染控制规划[J]. 中国环境科学, 1995, 15(3): 195-198.

[15] 刘强, 陈进, 黄薇, 等. 水资源承载力研究[J]. 中国水利, 2003(5): 15-22.

[16] 刘连成. 松花江水系有机污染的现状 & 防治对策[J]. 灾害学, 1996, 11(1): 30-33.

Accident Water Pollution Warning Based on Catastrophe Series

Li Xiaofei and Ge Xinquan

(School of Economics and Management, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: With frequent water pollution accidents, the accident water pollution warning has become a hot issue in environmental management and public security. Currently, the study focuses on index and evaluation of accident water pollution warning in China, but still lacks effective warning methods. Aiming at complicated accident water pollution, an accident water pollution warning method based on catastrophe series is established according to the mutation theory, and the impact of accident water pollution has been evaluated in natural environment and public security. This method can evaluate effectively the impact of accident water pollution on natural and social environment by the efficient combination of quantitative and qualitative indexes.

Key words: catastrophe series; water pollution; warning