

肖瑶, 黄岁樑, 孔凡青, 等. 基于水功能区控制单元的流域突发性水污染事件风险评价区划及其应用[J]. 灾害学, 2018, 33(3): 222–228. [XIAO Yao, HUANG Suiliang, KONG Fanqing, et al. Risk Zoning and Assessment of Watershed Sudden Water Pollution Incidents Based on Control Units of the Water Function Areas[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(3): 222–228. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.03.041.]

## 基于水功能区控制单元的流域突发性水污染事件风险评价区划及其应用\*

肖瑶<sup>1</sup>, 黄岁樑<sup>1</sup>, 孔凡青<sup>2</sup>, 刘明喆<sup>2</sup>, 李莹<sup>1</sup>

(1. 南开大学 环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津市城市生态环境修复与污染防治重点实验室, 环境科学与工程学院 水环境模拟研究室, 天津 300350; 2. 水利部海河水利委员会水资源保护局, 天津 300171)

**摘要:**以水功能区控制单元为基础, 结合子流域划分工作单元。采用压力-状态-响应(PSR)环境分析模型构建环境风险源危险性指标体系, 进行流域环境风险源识别及其危险性等级评价。增加“环境风险源下游特征”指标以考虑风险源流经下游重要性不同的水功能区(工作单元)对其本身危险性等级的影响。结合指标数据、标准和权重, 采用模糊综合评价法计算风险源的危险性(以及工作单元的脆弱性等级)。参考河流一维污染物衰减模型, 建立工作单元危险性等级评价方法。工作单元危险性等级由两部分叠加构成, 即本单元风险源的危险性等级和上游风险源通过河流对下游工作单元危险性的影响。结合工作单元的危险性和脆弱性等级, 通过风险矩阵评价工作单元的风险等级。在此基础上, 在同一水功能区控制单元, 合并风险相同的工作单元, 实现流域风险评价区划。将上述方法应用在滦河流域中上游。研究表明, 滦河流域中上游共55个风险区, 其中高风险区I有3个, 较高风险区II有15个, 较低风险区III有14个, 低风险区IV有23个, 说明滦河流域中上游整体风险性偏低; 并对不同等级风险区提出相应的管理方案。

**关键词:**突发性水污染事件; 流域; 风险; 水功能区控制单元; 滦河流域

**中图分类号:** X5; X45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2018)03-0222-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.03.041

近年来, 我国突发性水污染事件频发, 如2007年太湖水污染事件、2012年山西长治苯胺泄漏事件等<sup>[1]</sup>。这些突发性水污染事件发生概率小, 但具有突发性强、破坏性大的特点。由于流域突发性水污染事件风险区划尺度大, 且具有多源多受体的特点, 一直是研究的难点。

风险有多种定义<sup>[2]</sup>。最常用以下两种定义。第一种是用事件发生的可能性和事件发生后所产生的结果或后果的乘积<sup>[3-4]</sup>。第二种为危险性和易损性的结合<sup>[5-6]</sup>。第一种定义多用于保险、安全等领域的风险评价<sup>[7-8]</sup>, 也用于对环境风险源, 如企业、建设项目, 进行风险评价, 所以可称为事故风险<sup>[9]</sup>。区域或是流域尺度的环境风险评价, 多用第二种定义, 通过构建环境风险评价模型或系统来评价<sup>[10]</sup>。

风险区划有多种类型的基本单元, 可在区域内划分网格作为区划单元<sup>[11]</sup>, 所有单元的风险评价指标都需通过插值获得; 也可利用行政区作为区划单元<sup>[12]</sup>, 可直接获得社会经济评价指标, 但

行政区未充分考虑区域自然要素, 如存在区划单元内有多零散河段的情况。

流域突发性水污染事件风险评价、区划研究还比较少。张珂等引入相对风险模型(RRM), 量化模型评价要素, 对老灌河流域进行风险评价<sup>[13]</sup>。该研究以子流域为评价单元, 充分考虑了该流域的自然特征。但由于子流域在我国并未作为流域管理的基本单元, 因此在管理上存在困难。刘家宏等运用模糊故障树模型以及综合影响指数模型在资料盲区开展突发性水污染风险评价, 建立了由区域整体到河流单元的多尺度评价模式<sup>[14]</sup>。在该研究中, 将水功能区划作为受体的一个指标进行考查, 但未考虑流域通过河流上下游单元之间环境风险的相互影响。最重要的是, 这些研究一开始即确定“区划单元”, 然后对单元风险进行评价, 并不是真正意义上的“风险区划”, 因为区划单元应满足单元内风险相似性最大, 而单元间风险差异性最大的特点<sup>[15]</sup>。

\* 收稿日期: 2017-10-20 修回日期: 2017-12-19

基金项目: 国家自然科学基金(11672139); 天津市自然科学基金(15JCYBJC22500); 中央高校基本科研业务费专项资金资助

第一作者简介: 肖瑶(1993-), 女, 湖南宜章人, 硕士研究生, 主要从事环境风险评价等研究. E-mail: 2120150505@nankai.edu.cn

通讯作者: 黄岁樑(1964-), 男, 湖南南县人, 教授, 主要从事水体环境学与水环境模拟研究. E-mail: shuang@nankai.edu.cn

## 1 研究方法

本文以水功能区控制单元为基础, 结合子流域划分工作单元。在流域环境风险源识别的基础上, 采用压力-状态-响应(PSR)环境分析模型, 构建环境风险源危险性指标体系及工作单元脆弱性指标体系; 通过专家调查, 采用改进的层次分析法(AHP)确定指标权重; 采用模糊综合评价法进行风险源危险性评价及工作单元脆弱性评价; 建立从环境风险源危险性等级评价到工作单元危险性等级评价方法; 结合工作单元危险性等级和脆弱性等级结果, 通过风险矩阵获得工作单元风险等级; 根据环境风险区划理论, 对属于同一水功能区控制单元且风险等级相同的相邻工作单元进行合并区划, 获得流域风险区划单元。需要指出, 本方法针对陆源固定环境风险源。

### 1.1 水功能区与控制单元

水功能区是指为满足水资源合理开发、利用、节约和保护的需求, 根据水资源的自然条件和开发利用现状, 按照流域综合规划、水资源与水生态系统保护和经济社会发展要求, 依其主导功能划定范围并执行相应水环境质量标准的水域<sup>[16]</sup>。

从流域水系完整性和控制方案可实施性出发, 根据研究区域内污染源分布情况和河流水文特性, 结合水功能区区划及当地的行政区划, 以污染控制单元划分原则为指导, 在电子地图上将汇水区、水系分布及其流向、水功能区边界、控制断面分布、行政边界等指标的空间数据进行叠加获得控制单元。

水功能区与控制单元的关系: ①水功能区是划分控制单元的前提与基础, 先有水功能区划, 再结合汇水单元、行政区划及监测站点, 得到控制单元; ②水功能区针对的是水域, 控制单元包括水域及对应的陆域。

### 1.2 工作单元划分及优点

本文以流域管理机构确定的水功能区控制单元为基础, 定义水功能区控制单元内的每个子流域为工作单元, 作为风险评价的过渡单元, 所有指标均定义在工作单元上, 不在工作单元的指标需要插值到工作单元。

将水功能区控制单元与子流域结合作为流域区划的工作单元, 相较于传统的工作单元(或区划单元), 其优点是: ①工作单元内与河流相关的风险评价指标唯一, 不存在人为切割水域的情况; ②一般认为突发性水污染事件一旦发生, 污染物将在环境风险源所在的子流域内扩散并通过河道向下游传输; ③与我国现阶段的水资源管理单元一致, 便于管理。

### 1.3 环境风险源危险性等级评价

参考《国家突发环境事件应急预案》, 将环境风险源分为四个等级: 重大风险源、较大风险源、一般风险源和轻微风险源<sup>[17]</sup>。环境风险源危险性等级评价需要经过环境风险源识别、危险性指标体系构建、量化、指标权重确定和等级计算确定。

#### 1.3.1 环境风险源识别及危险性指标体系构建

通过制定调查表、实地调研、走访相关部门等获得环境风险源资料。参考前人工作<sup>[15]</sup>, 采用压力-状态-响应(PSR)环境分析模型, 从环境风险源危险性(压力), 危险受体(状态), 危险控制能力(响应)三方面, 构建环境风险源危险性评价指标体系, 包括目标层(流域风险源危险性指标体系)、主题层(环境风险源危险性 $S_1$ 、危险受体 $S_2$ 及危险控制能力 $S_3$ )和指标层( $I_1-I_{11}$ )。

#### 1.3.2 环境风险源危险性指标量化

##### 1.3.2.1 环境风险源危险性 $S_1$

环境风险源危险性指标包括风险源行业类别 $I_1$ <sup>[15,18]</sup>、风险源规模 $I_2$ <sup>[18-19]</sup>、离河流距离 $I_3$ <sup>[19-20]</sup>及下游特征 $I_4$ , 具体得分及其来源见指标右上角参考文献。重点介绍本文提出的指标 $I_4$ 。

环境风险源一旦失控, 发生突发性水污染事件, 一般认为泄露的污染物不能越过单元所在的子流域, 但可以通过河流输移扩散到下游, 对下游工作单元产生影响; 而且环境风险源离该单元距离越近, 影响越大。实际说来, 下游工作单元越重要, 越需要控制上游环境风险源的危险, 即该风险源的危险性越高。因此, 环境风险源下游特征 $I_4$ 包括两个方面, 即风险源距下游工作单元的距离以及下游工作单元的重要性(根据工作单元所在水功能区特征, 见表1)。具体计算公式为:

$$I_{4j} = \frac{\omega_1}{\theta_1} + \frac{\omega_2}{\theta_2} \cdots + \frac{\omega_n}{\theta_n} \quad (1)$$

式中:  $I_{4j}$ 为下游特征得分;  $j$ 为风险源所在工作单元编号;  $n$ 为风险源污染物通过河流流经的下游第 $n$ 个工作单元;  $\omega_n$ 为第 $n$ 个工作单元的水功能区特征得分, 见表1;  $\theta_n$ 为风险源离第 $n$ 个工作单元的距离(单位: 10 km)。

##### 1.3.2.2 危险受体 $S_2$

危险受体是指突发性环境污染事件危险的潜在承受体<sup>[15]</sup>, 包括敏感保护目标 $I_5$ 、水生态风险 $I_6$ 、暴露人口 $I_7$ <sup>[17]</sup>及排入河流级别 $I_8$ <sup>[21]</sup>4个指标, 具体得分及其来源见指标右上角参考文献。以下重点介绍指标 $I_5$ 和 $I_6$ 。

参考唐行鹏<sup>[22]</sup>等人的研究, 结合实际情况, 根据工作单元是否有自然保护区、所在水功能区是否为饮用水源地及其人口数得到敏感保护目标 $I_5$ 的分值, 见表1。

水生态是指作为环境因子的水对生物的影响和生物对各种水分条件的适应<sup>[23]</sup>。当水体中含有某些特征污染物时, 会对水生态环境产生不同程度的危险, 参考文献<sup>[24]-[25]</sup>, 结合实际情况, 选取风险源排入河流污染物类型进行分级评分(表1)。

##### 1.3.2.3 危险控制能力 $S_3$

一个区域应对突发环境事件的危险控制能力, 可以从所在区域的危险控制能力和风险源的危险控制能力两方面进行评价。区域危险控制能力选择风险源所属县域的人均GDP $I_{10}$ <sup>[26]</sup>及医疗机构千人床位数 $I_9$ <sup>[27]</sup>进行评价, 具体得分及其来源见指标右上角参考文献。风险源危险控制能力 $I_{11}$ 通过4个因素的叠加来进行评价(表1)。

表 1 部分风险源危险性指标得分统计表

工作单元水功能区特征	饮用	保护、保留	缓冲	工业、农业
分值	1	0.8	0.5	0.3
敏感保护目标	20 万人口饮用水源地或国家级自然保护区	15 万人口饮用水源地或省级自然保护区	10 万人口饮用水源地或市级自然保护区	其它或无自然保护区
分值	9	6	3	0
污染物类型	化学需氧量	营养物质	其它化工类	铬(六价)
分值	0.4	0.4	0.6	1
风险源危险控制能力	污染源类别	签订环境保护承诺书	环保违法信息	排污许可证
得 1	国家级	是	无	有
分 0	其它	否	有	无

1.3.3 环境风险源危险性评价指标权重确定

通过专家调查,采用改进的层次分析法(AHP)确定指标的权重,采用模糊综合评价法计算环境风险源危险性等级<sup>[19]</sup>。

1.4 工作单元危险性

以往研究认为,工作单元的危险性等级等同于所在单元的风险源的危险性等级<sup>[13-14]</sup>。本文认为,上游风险源一旦发生突发性水污染事件,泄漏的危险物质将通过河流输运扩散到下游,对下游工作单元产生影响。因此,下游工作单元的危险性等级会受到上游风险源的影响。

考虑上游风险源对下游工作单元的影响,工作单元危险性等级分为两部分,一部分为本单元风险源的危险性等级得分,另一部分为上游风险源对下游工作单元危险性的影响;考虑到工作单元内风险源同时发生突发性水污染事件的概率极低,所以取工作单元中所有风险源危险性等级得分的最高值,代表在本工作单元的风险源的危险性等级得分  $G_{MAX}$ 。

$$F = G_{MAX} + \sum_{i=1}^m C_x, (i = 1, 2, 3 \cdots m)。$$
 (2)

式中:  $F$  为工作单元危险性得分,与工作单元危险性等级对应关系见表 2;  $G_{MAX}$  为工作单元内各个风险源得分的最大值,风险源等级与得分对应关系见表 2;  $C_x$  为上游风险源通过河流对本工作单元的影响,  $i$  为影响本工作单元(通过河流)的上游第  $i$  个工作单元,  $m$  为本工作单元上游工作单元总数。

表 2 风险源等级及工作单元危险性等级与得分对应表

风险源等级	得分 $G_{MAX}$	工作单元危险性等级	得分 $F$
重大风险源	10	高危险性	$F \geq 8$
较大风险源	6	较高危险性	$4.5 \leq F < 8$
一般风险源	3	较低危险性	$2 \leq F < 4.5$
轻微风险源	1	低危险性	$0 \leq F < 2$

风险源的危险性等级分值可作为广义的物质(污染物)。因此,为简化起见,上游风险源的危险性等级对下游工作单元的影响参考河流一维衰减模型<sup>[28]</sup>:

$$C_x = C_0 \exp(-K \frac{x}{\mu})。$$
 (3)

式中:  $C_x$  为上游风险源通过河流对本工作单元的影响;  $x$  为沿河段的纵向距离(m);  $C_0$  为上游风险

源等级得分见表 2;  $\mu$  为设计流量下河道断面的平均流速(m/s);  $K$  为污染物综合衰减系数(1/s)。

1.5 工作单元脆弱性

脆弱性指的是事物容易受到伤害或损伤的程度<sup>[29]</sup>。与划分的危险性等级对应,将脆弱性划分为 4 级:高脆弱性、较高脆弱性、较低脆弱性、低脆弱性。工作单元脆弱性等级评价需要经过脆弱性指标体系构建、量化、权重确定和等级计算。

1.5.1 工作单元脆弱性指标体系构建

工作单元脆弱性指标体系为三个层次,即目标层(工作单元脆弱性指标体系)、主题层(自然因素  $S_1$  和社会因素  $S_2$ )和指标层( $I_1 - I_6$ )。

1.5.2 工作单元脆弱性指标量化

自然因素  $S_1$  指标包括降雨量  $I_1$ <sup>[19]</sup>、敏感性  $I_2$  和水体水质  $I_3$ <sup>[30]</sup>。社会因素  $S_2$  包括人均 GDP  $I_4$ <sup>[13]</sup>、人均耕地面积  $I_5$ <sup>[22]</sup> 和人口密度  $I_6$ <sup>[11]</sup>,具体得分及其来源见指标右上角参考文献。以下介绍敏感性指标  $I_2$ 。

敏感性  $I_2$  由工作单元所在水功能区特性及自然保护区等级两部分组成,将两部分分数叠加作为工作单元敏感性得分见表 3。

表 3 工作单元敏感性赋值表

水功能区特性	饮用	保护、保留	缓冲	工业、农业
分数	1	0.8	0.5	0.3
自然保护区等级	国家级	省级	省级以下	/
分数	1	0.5	0	/

1.5.3 工作单元脆弱性指标权重确定及等级计算

如前文所述,通过专家调查,采用改进的层次分析法(AHP)计算确定指标的权重,采用模糊综合评价法计算工作单元脆弱性<sup>[19]</sup>。

1.6 风险评价及区划

在进行工作单元危险性等级和脆弱性等级评价的基础上,借助风险等级矩阵<sup>[31]</sup>可得到每个工作单元的风险等级。

结合水功能区控制单元,根据环境风险区划理论<sup>[15]</sup>,对属于同一水功能区控制单元且风险等级相同的相邻工作单元进行合并区划,得到流域风险区划。

表 4 指标分级标准及权重表

目标层	主题层	指标层	权重	I 级	II 级	III 级	IV 级
滦河流域中上游环境风险源危险性评价指标	环境风险源危险性	行业类别得分	0.0485	0.8	0.6	0.4	0.2
		规模/千万元	0.0882	100	50	10	1
		离河流距离/km	0.0514	0.1	0.8	1.5	3
		下游特征	0.0267	10	6	3	1
	危险受体	敏感保护目标	0.0797	18	12	6	0
		水生态风险	0.0274	1	0.8	0.6	0.4
		暴露人口/万人	0.1483	15	10	5	1
		排入河流级别	0.0416	1	0.8	0.6	0.4
	危险控制能力	风险源所属县域人均 GDP/(美元/人)	0.1498	4800	8600	12300	16100
		医疗机构千人床位数/(床/千人)	0.0514	1	3	6	10
		风险源危险控制能力	0.2519	1	2	3	4
滦河流域中上游脆弱性评价指标	自然因素	年降雨量/mm	0.12121	390	490	600	700
		敏感性	0.18092	1.8	1.3	0.7	0.2
		水体水质现状	0.14813	2	3	4	5
	社会经济因素	人均 GDP/(美元/人)	0.15874	16100	12300	8600	4800
		人均耕地面积/(hm <sup>2</sup> /人)	0.16965	0.413	0.233	0.187	0.073
		人口密度(人/km <sup>2</sup> )	0.22156	392	280	165	52



图 1 滦河流域中上游位置示意图

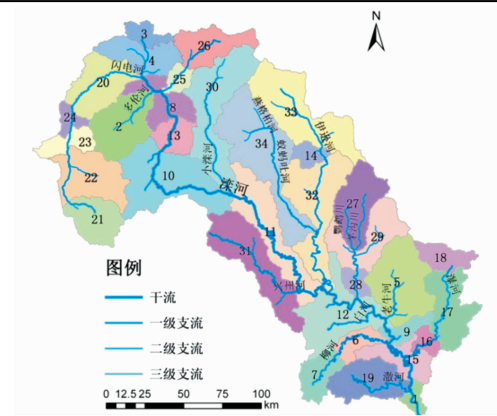


图 2 滦河流域中上游水功能区控制单元分布图

## 2 案例研究

### 2.1 研究区域概况

滦河流域中上游是天津市和河北省唐山市重要的水源地<sup>[32]</sup>,范围是指滦河干流的大黑汀水库坝前以上的滦河流域,共 3.42 万 km<sup>2</sup>,主要涉及内蒙古自治区和河北省 2 个省(自治区)的 18 个县(区/旗/市)(图 1)。

### 2.2 数据来源

DEM 数据来源于美国地质勘探局(USGS),分辨率 90 m × 90 m,采用 Albert 等积投影, GCS\_Beijing\_1954 地理坐标系。通过查阅统计年鉴、查找文献、实地调研、走访相关部门等获得滦河流域中上游流域地形、水功能区、环境风险源及各县域自然经济社会资料。

### 2.3 水功能区与控制单元

根据水功能区控制单元划分方法,滦河流域中上游共包含 34 个水功能区及其对应的控制单元(资料来源于水利部海河水利委员会水资源保护局)(图 2)。

### 2.4 工作单元划分

通过输入 DEM,运用 ArcGIS 的水文分析模型,得到滦河流域中上游子流域分布,将水功能区控制单元与子流域结合共划分 107 个工作单元(图 3)。

### 2.5 评价指标标准

基于 1.3 节及 1.5 节各指标标准值的获取方法,结合表 1 及滦河流域中上游实际情况,获得各指标具体的分级标准及权重(表 4)。

### 2.6 环境风险源危险性评价

结合 2.5 节指标标准及权重采用模糊综合评价法得出滦河流域中上游环境风险源危险性等级结果。滦河流域中上游 43 个风险源评价结果如图 4。由图 4 可见,滦河流域中上游风险源分布较为集中,多分布在研究区域中下段。43 个风险源中 15



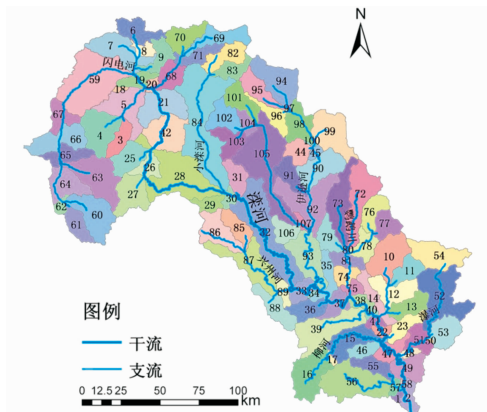


图3 滦河流域中上游工作单元划分图

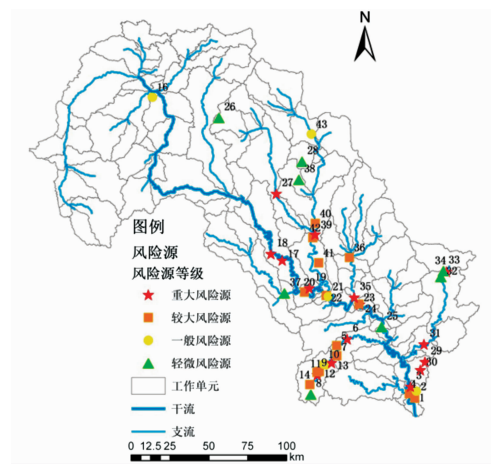


图4 风险源危险性等级分布图

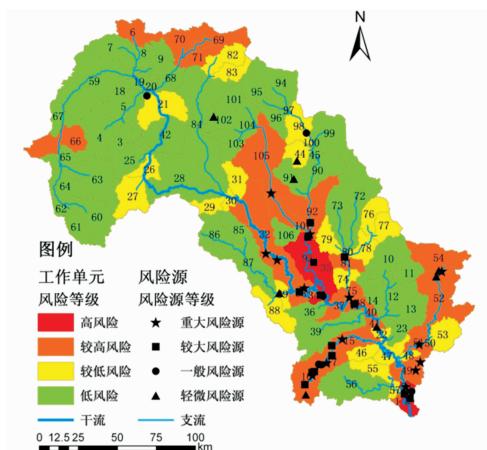


图5 工作单元风险等级分布图

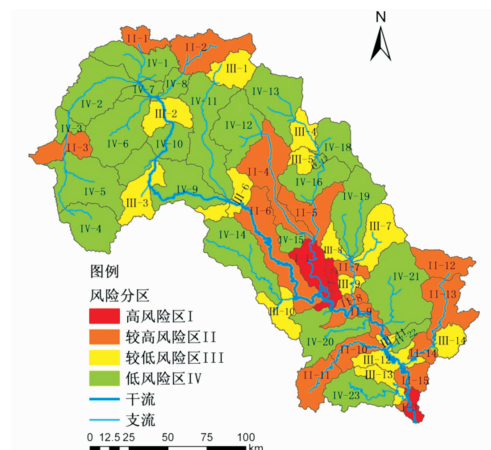


图6 基于水功能区控制单元的滦河流域中上游风险区划图

个为重大风险源, 14 个较大风险源, 6 个一般风险源和 8 个轻微风险源。从等级来看多属于危险较大, 分布集中且多分布在研究区域的中下段。

### 2.7 工作单元风险等级评价

综合工作单元危险性和脆弱性等级评价结果结合风险矩阵, 得到工作单元风险等级。从图 5 可见, 滦河流域中上游多为低风险性 (53 个工作单元), 其次为较低风险性 (25 个工作单元) 和较高风险性 (25 个工作单元), 最少的为高风险性 (4 个工作单元), 滦河中上游整体风险性偏低。

### 2.8 基于水功能区控制单元的滦河流域中上游风险评价及区划

在得出各工作单元风险性高低之后, 在同一水功能区控制单元, 合并风险相同的工作单元, 得到高风险区 I、较高风险区 II、较低风险区 III 和低风险区 IV 这 4 个风险区划单元, 共 57 个风险区。从图 6 中可以看出, 滦河流域中上游风险区划分布零散, 高风险区 I 有 4 个, 较高风险区 II 有 15 个, 较低风险区 III 有 15 个, 低风险区 IV 有 23 个。说明滦河流域中上游风险较低, 并对不同等级风险区提出相应的管理方案。

## 3 讨论

通过运用上述方法得出的滦河流域中上游突发性水污染事件风险评价区划, 其结果已得到相关部门的认可并运用到实际工作中。例如, 重大风险源承德盛丰钢铁有限公司由于位于大黑汀水库这一饮用水源地附近, 已经在有关部门的监督下关闭。

在对下游特征指标  $I_4$  进行研究时, 由于流域面积一般很大, 上游风险源对下游工作单元危险性的影响一般要求解耦合的河流一维、二维和三维水动力、水质数值模拟模型。如在本文的区域, 潘家口水库属于大水深河道型水库需要应用三维数值模拟模型, 而大黑汀水库水面较宽、相对水深较小, 采用平面二维数值模拟模型比较合适, 而潘、大水库以上, 河道狭长属于网状水系, 采用一维河网模型较好。同时, 方程中的系数需要通过实际观测和实验确定。

## 4 结论

本文在前人工作基础上,对流域突发性水污染事件风险评价区划进行了以下改进:①以水功能区控制单元为基础,结合子流域划分工作单元,作为突发性水污染事件风险评价区划的过渡单元;②在环境风险源危险性评价指标体系中,考虑到风险源流经下游重要性不同的水功能区(工作单元)会影响环境风险源本身危险性等级,增加“环境风险源下游特征”指标;③建立了从风险源危险性到工作单元危险性的计算方法:工作单元危险性等级由两部分叠加构成:即本单元风险源的危险性等级和上游风险源通过河流对下游工作单元危险性的影响;④运用风险区划理论,将同一水功能区控制单元内风险等级相同的工作单元进行合并,得到最终风险区划单元。

应用本文方法对滦河流域中上游突发性水污染事件进行风险评价区划。滦河流域中上游水功能区控制单元共 34 个,以此为基础结合子流域共划分为 107 个工作单元。环境风险源共 43 个,其中 15 个为重大风险源,14 个较大风险源,分布集中且多分布在研究区域的中下段地区。综合工作单元危险性和脆弱性等级评价结果结合风险矩阵,得出各个工作单元风险性等级。对属于同一水功能区控制单元且风险等级相同的工作单元进行合并,得到 55 个风险区,其中高风险区 I 有 43 个,较高风险区 II 有 15 个,较低风险区 III 有 14 个,低风险区 IV 有 23 个,说明滦河流域中上游整体风险性偏低;并对不同等级风险区提出相应的管理方案。上述研究成果已提供给流域有关部门参考。

## 参考文献:

- [1] 徐小钰,朱记伟,李占斌,等. 国内外突发性水污染事件研究综述[J]. 中国农村水利水电, 2015(6): 1-5.
- [2] 黄崇福,刘安林,王野,等. 灾害风险基本定义的探讨[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(6): 8-16.
- [3] Orvos D R, Jr J C. Developing a risk assessment strategy for the Chesapeake Bay[J]. Hydrobiologia, 1991, 215(3): 189-203.
- [4] Blair A N, Ayyub B M, Bender W J. Fuzzy stochastic risk-based decision analysis with the mobile offshore base as a case study[J]. Marine Structures, 2001, 14(1/2): 69-88.
- [5] 刘杨华,敖红光,冯玉杰,等. 环境风险评价研究进展[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(8): 159-163.
- [6] 许妍,马明辉,高俊峰. 流域生态风险评估方法研究——以太湖流域为例[J]. 中国环境科学, 2012, 32(9): 1693-1701.
- [7] 毛海峰. 论安全科学的若干基本规律与概念[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(9): 12-16.
- [8] 谢志刚,周品. 重新认识风险这个概念[J]. 保险研究, 2013(2): 101-108.
- [9] Hou D, Ge X, Huang P, et al. A real-time, dynamic early-warning model based on uncertainty analysis and risk assessment for sudden water pollution accidents[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(14): 8878-92.
- [10] Liu R, Liu J, Zhang Z, et al. Accidental water pollution risk analysis of mine tailings ponds in guanting reservoir watershed, Zhangjiakou City, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(12): 15269-15284.
- [11] 薛鹏丽,曾维华. 上海市突发环境污染事故风险区划[J]. 中国环境科学, 2011, 31(10): 1743-1750.
- [12] 曲常胜,毕军,黄蕾,等. 我国区域环境风险动态综合评价研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 477-482.
- [13] 张珂,刘仁志,张志娇,等. 流域突发性水污染事故风险评价方法及其应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(4): 675-684.
- [14] 刘家宏,胡剑,褚俊英,等. 缺资料地区河流突发性水污染多尺度风险评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(6): 830-835.
- [15] 曾维华,宋永会,姚新,等. 多尺度突发环境污染事故风险区划[M]. 北京:科学出版社, 2013: 5-17.
- [16] 水利部水资源司,水利部水利水电规划设计总院. 全国重要江河湖泊水功能区划手册[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2014: 5-83.
- [17] 国务院办公厅. 国家突发环境事件应急预案[Z]. 北京:人民出版社, 2015.
- [18] 曲常胜,毕军,葛怡,等. 基于风险系统理论的区域环境风险优化管理[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(11): 169.
- [19] 陈超,贾尔恒·阿哈提,文方等. 西北内陆典型流域水环境风险源识别研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(1): 188-190.
- [20] 张芳. 南四湖流域突发水污染事故风险源识别和评价研究[D]. 济南:山东师范大学, 2011.
- [21] 宋雅珊. 松花江流域佳木斯段水环境风险源评价[D]. 哈尔滨:黑龙江大学, 2013.
- [22] 唐行鹏. 流域突发性水污染风险区划与管理方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.
- [23] 张兴平,朱建强. 水生态、水环境问题及其对策[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(S1): 8.
- [24] GB-8978 污水综合排放标准[S]. 北京:中国环境科学出版社, 1996.
- [25] GB5749 生活饮用水卫生标准[S]. 北京:中国标准出版社, 2006.
- [26] 兰冬东,刘仁志,曾维华. 区域环境污染事件风险分区技术及其应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(s1): 82-91.
- [27] 中华人民共和国卫生部. 医疗机构设置标准(试行)[EB/OL]. (1994)[2017-08-16]. <http://www.moh.gov.cn/mohczfsg/pgz/200804/18713.shtml>.
- [28] GB/T 25173 水域纳污能力计算规程[S]. 北京:中国标准出版社, 2010.
- [29] 蒋勇军,袁道先,章程,等. 典型岩溶农业区土地利用变化对土壤性质的影响——以云南小江流域为例[J]. 地理学报, 2005, 60(5): 751-760.
- [30] GB 3838-2002 地表水环境质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2003.
- [31] 杜鹃,何飞,史培军. 湘江流域洪水灾害综合风险评价[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6): 38-44.
- [32] 中国河湖大典编纂委员会. 中国河湖大典——海河卷[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2013: 214-219.

## Risk Assessment Zoning and Application of Watershed Sudden Water Pollution Events Based on Water Function Area Control Unit

XIAO Yao<sup>1</sup>, HUANG Suiliang<sup>1</sup>, KONG Fanqing<sup>2</sup>, LIU Mingzhe<sup>2</sup> and LI Ying<sup>1</sup>

(1. *Nankai University Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria of the Ministry of Education, Remediation and Pollution Control for Urban Ecological Environment, College of Environmental Science and Engineering Numerical Simulation Group for Water Environment, Tianjin 300350, China;*

2. *Water Resources Protection Bureau of Haihe Water Conservancy Commission of Ministry of water resources, Tianjin 300171, China)*

**Abstract:** Based on the water function area control unit, and combined with sub watershed, we divided the research units. The risk index system of environmental risk sources was constructed by using the pressure state response (PSR) environment analysis model to identify the environmental risk sources and evaluate the risk level. The downstream characteristics of the environmental risk source is added to take into account the impact of the water function areas (work units) on the risk level of the risk sources through the downstream importance of the water. Combined with index data, standards and weights, fuzzy comprehensive evaluation method is used to calculate the risk of risk sources (and the vulnerability level of work units). Referring to the one-dimensional pollutant convection diffusion model of rivers, a risk assessment method for working units is established. The risk level of the unit is composed of two parts, that is, the risk level of the source of this unit and the impact of the upstream risk source on the risk of the downstream work unit. Combining risk and vulnerability level of work unit, risk level of work unit is evaluated through risk matrix. On the basis of this, the watershed risk assessment zoning is implemented in the same water function area control unit and the working unit with the same risk. The above method is applied to the upper and middle reaches of the Luanhe River Basin. The study shows that there are 55 risk zones in the upper and middle reaches of the Luanhe River Basin, of which there are 3 I in high risk areas, 15 in higher risk areas, 14 in the lower risk area and 23 in the low risk area, and 23 in the low risk area, indicating that the overall risk of the upper and middle upper reaches of the Luanhe River Basin is low, and the management schemes for different grade risk areas are put forward.

**Key words:** sudden water pollution incidents; watershed; risk; control units of the water function areas; Luanhe River Basin

(上接第 221 页)

## Study on Catastrophic Model of Subway Tunnel Structure and its Application

HUANG Zhen<sup>1</sup>, FU Helin<sup>1</sup>, YIN Guangming<sup>2</sup>, WANG Hui<sup>1</sup>, ZHANG Jiabing<sup>1</sup> and SHI Yue<sup>1</sup>

(1. *School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;*

2. *Changsha Metro Group Co., Ltd., Changsha 410133, China)*

**Abstract:** The structure damage of metro tunnel affects the operation of subway and the surrounding environment. The study of its catastrophic mode and mechanism is of great value to the safety maintenance of tunnel structure. On the basis of metro tunnel structure catastrophe, the subway tunnel structure catastrophe chain structure and catastrophe mathematical model is constructed by the theory of catastrophe chain. Subway tunnel structure characteristics and different stages of disaster chain cutting disaster mitigation mechanism and measures are analyzed. The model is applied to the study of the catastrophic characteristics of a subway tunnel structure, and from the viewpoint of broken chain disaster reduction model, specific measures to control the catastrophic evolution of tunnel structures are put forward. The results show that the catastrophic process of tunnel structure has the characteristics of chain structure. Its catastrophic chain model can effectively describe the evolution process of structure disaster from incubation stage to explosion stage; The catastrophic process of tunnel structure has the characteristics of cause and effect, transition and mutation, coexistence and spread, and its mitigation measures are based on the chain breaking mechanism of different catastrophic stages; The model is applied to the catastrophic process of a metro tunnel structure, which effectively controls the catastrophic evolution of the tunnel structure.

**Key words:** metro; tunnel structure; catastrophic chain theory; disaster chain; disaster reduction measures