

树状河流突发污染事故源强确定方法研究

王炳权¹, 钱新¹, 胡伟¹, 王成林²

(1. 南京大学环境学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏 南京 210046; 2. 解放军理工大学气象学院, 江苏 南京 211101)

摘要: 源强确定在突发污染事故的预警与应急过程中极为重要。本文针对树状河流的特性, 将污染源搜索和源强反算的方法结合起来构建了树状河流突发污染事故源强确定的一般方法, 并利于假设的突发污染事故情形对方法进行了评估。结果表明, 监测数据的误差对计算结果的影响很大, 源强的计算结果相比事故的地点与发生时间更为敏感。

关键词: 树状河流; 污染事故; 源强确定

中图分类号: X830.7

文献标识码: A

文章编号: 1674-6732(2013)-01-0017-04

Research on Method of Determining the Source of a Sudden Pollution Accident Occurred along a Tree-structure River

WANG Bing-quan¹, QIAN Xin¹, HU Wei¹, WANG Cheng-lin²

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210046, China; 2. School of Meteorology, People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 211101, China)

ABSTRACT: It is important to determine the source after a sudden pollution accident. This paper builds a general method of determining the source of a sudden pollution accident occurred along a tree-structure river by combining source search and source strength calculation, and assesses the method with hypothetical pollution accident situations. The results suggest that monitoring data errors have a huge impact on final calculation, and the source strength is more sensible compared to the location of the source and the time the accident occurred.

KEY WORDS: tree-structure river; pollution accident; source determination

0 引言

有统计分析表明, 2001—2005 年中国城市水源地的突发污染事件占 1985—2005 年总数的 48.0%^[1], 这表明中国的突发水污染事故的发生已经越来越频繁。突发水污染事故由于其固有的一些特点(如事故发生的 uncertainty、影响的长期性及应急主体的不明确性等)^[2], 往往具有极大的危害。因此, 针对突发水污染事故采取合适的预警及应急措施是非常必要的。

通常的预警应急步骤如下: 日常监测、发现异常、事故报告、应急监测、源强确定、污染扩散模拟、污染处理处置。源强确定位于上述过程的中间环节。在源强确定前, 控制的污染范围比实际需要的大, 因而需要投入较多的人力物力。源强确定后, 通过模拟得到污染扩散的具体范围, 即可在有限的范围内实施针对性的污染控制措施。因此, 源强确定在整

个应急预警中起到承上启下的关键作用。

按照突发污染事故发生的水域不同, 可将事故分为不同类型(如河流污染、湖泊污染、水库污染等)^[3]。不同水域, 水的流动及污染物在水中的迁移转化规律是不同的, 因此, 不同水域的污染事故, 源强确定的方法也是不同的。

河流污染事故是突发水污染事故中极为重要的一类, 这一类事故源强确定的研究主要包括污染源搜索以及源强反算两个部分。污染源搜索方面, 主要是建立一些优化模型, 合理分配搜索资源, 或者直接提出污染源搜索的步骤, 使找到污染源所花

收稿日期: 2012-03-12

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41105075); 国家水体污染与治理重大专项项目(2009ZX07528-005)。

作者简介: 王炳权(1987—), 男, 硕士, 从事环境规划与管理方面的研究。

费的时间尽可能缩短。如刘颖等应用最优搜索理论,尝试构建了流域事故污染源的最优搜索模型^[4];何进朝提出了一种从发现污染的地点开始溯流而上,逐步寻找污染源的方法^[5]。但是上述方法都不能在较短时间内找到确切的污染源位置。源强反算研究则集中于理论研究^[6,7],多是从数学的角度来探讨何种情况下,源强反算具有唯一解,或者是如何求解基本方程,并不关注实际应用。而大气污染的源强反算较偏向应用研究^[8,9]。

中国除南方部分水系发达,河流交错成网的地区以外,大部分地区的河流都是树状河流。因此,笔者针对树状河流的特性,尝试将污染源搜索和源强反算的方法结合起来,构建树状河流突发污染事故源强确定的一般方法,并利于假设的突发污染事故情形对方法进行评估。

1 方法构建

1.1 相关假定

在树状河流突发污染事故的源强确定方法构建之前,为了保证方法的适用性,需要进行一些假定,具体包括以下3项:

(1) 各条支流及没有支流汇入的各干流河段各项参数恒定;

(2) 突发污染事故的污染源为瞬时点源,非移动源;

(3) 在污染事故发生至事故应急和处理完成期间,没有其他污染事故发生。

1.2 方法详述

为了确定发生在树状河流的突发污染事故的源强,首先要根据树状河流的特点将污染源的可能范围缩小到某个具体的河段,然后利用河流污染物扩散的一维模型计算事故发生的地点、时间、源强,图1为具体流程。

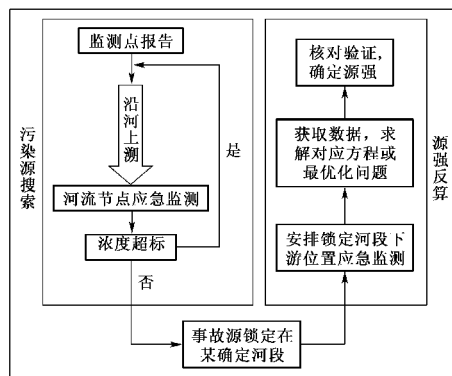


图1 树状河流污染事故源强确定流程

1.2.1 缩小污染源的可能范围

从显示污染物浓度超标的监测点开始,沿干流上溯,收集干流中各支流汇入点下游水流混合均匀处的污染物浓度,若发现浓度超标,继续上溯,直到污染物浓度不超标为止。这样,就可以将污染源的可能范围确定在干流某河段或某一条旁侧支流。然后,通过对支流汇入干流前的水质进行检测,便可以最终确定污染源究竟在支流还是在上述干流河段。至此,污染源便被锁定在某个具体的河段。

1.2.2 计算事故发生的地点、时间、源强

对于稳态河流,在污染源为瞬时点源的情况下,计算公式如下:

$$C(x, t) = \frac{M}{A \sqrt{4\pi t}} \exp\left[-\frac{(x - U_x t)^2}{4 D_x t}\right] \exp(-Kt) \quad (1)$$

式中: C ——污染物浓度,它是时间 t 和空间位置 x 的函数; D_x ——纵向弥散系数; U_x ——断面平均流通流速; K ——污染物的衰减速度常数; M ——瞬时投放的污染物质; A ——断面平均面积。

从公式(1)可以看出,河流中某时某处的污染物浓度仅与污染源源强(M),距污染源的(x)及距污染发生的时间(t)有关,即 $C = f(M, x, t)$ 。因此,为求出污染源的地点、污染发生的时间以及污染源源强,仅需要3个不同的监测数据即可。

假设已知3个监测浓度 C_1, C_2, C_3 ,则可列出以下3个方程

$$\begin{cases} C_1 = f(M, x_1, t_1) \\ C_2 = f(M, x_1 + \Delta x_2, t_1 + \Delta t_2) \\ C_3 = f(M, x_1 + \Delta x_3, t_1 + \Delta t_3) \end{cases} \quad (2)$$

式中, x_1 —— C_1 浓度处距污染源的(x)距离; t_1 —— C_1 浓度监测距污染发生的时间; Δx_2 —— C_2 浓度处距 C_1 浓度处的距离; Δt_2 —— C_2 浓度监测距 C_1 浓度监测的时间; Δx_3 —— C_3 浓度处距 C_1 浓度处的距离; Δt_3 —— C_3 浓度监测距 C_1 浓度监测的时间。

在方程(2)中,仅有 M, x_1, t_1 是未知数,求解方程即可得出。

当可利用的监测浓度值更多时,求解方程转为求解如下的最优化问题:

$$\begin{cases} \text{Min} \sum_{i=1}^n [f(M, x_1 + \Delta x_i, t_1 + \Delta t_i) - C_i]^2 \\ \text{s.t. } x_1 < L \end{cases} \quad (3)$$

式中, n ——监测数据的个数; C_i ——第 i 个监测数据; $x_1 + \Delta x_i$ —— C_i 对应的地点; $t_1 + \Delta t_i$ —— C_i 对应的时间; L ——锁定河段的长度。

因此, 将污染源锁定在某个河段后, 即可在河段下游安排应急监测, 利用监测数据构建上述的方程组或最优化问题计算事故发生的地点、时间以及源强。

实际情况下, 由于监测数据以及各种参数未必精确, 可能会导致求解出现误差。因此, 通过此种方法得到的事故的具体地点、时间、源强, 还要与实际情况进行核对印证。

2 案例分析

2.1 假设事故情形

如图 2 所示的水系, AC 河段与 A'C'河段的基本情况如下: 河宽 20 m, 河深 2 m, 流速 0.5 m/s, 纵向弥散系数 1 m²/s, 某污染物降解系数 0。现在假设以下两种事故情形。

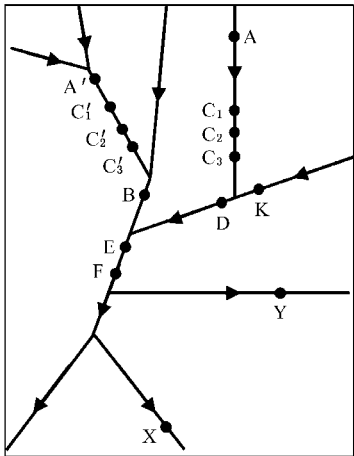


图 2 事故水系示意

情形 1: A 点于 0 时(时间基点)发生污染事故, 排放含有该污染物的废水进入河流, 总计排入该污染物的量为 $M = 5.287 \text{ t}$ 。X, Y 两处监测站最先监测到超标污染物(污染物浓度超过本底值 0)并予以报告。

情形 2: A' 点于 0 时(时间基点)发生污染事故, 排放含有该污染物的废水进入河流, 总计排入该污染物的量为 $M = 5.287 \text{ t}$ 。X, Y 两处监测站最先监测到超标污染物(污染物浓度超过本底值 0)并予以报告。

2.2 方法应用

对于情形 1, 理论上会得到 E, D 两处污染物浓

度超标, B 处污染物浓度不超标的结果, 这时可以将污染源的可能范围锁定在 AC 河段或旁侧的支流河段, 然后监测支流河段下游 K 处的浓度, 根据 K 处浓度不超标, 即可将污染源的可能范围最终确定在 AC 河段。然后, 安排应急监测, 获取 AC 河段下游处 3 个不同的监测值(图 2 中的 C_1, C_2, C_3), 即可进行计算, 得到 A 点的确切位置, 污染发生的时间及源强。

假定 C_1, C_2, C_3 距污染源的距离分别为 $x_1 = 16.953 \text{ km}, x_2 = 17.953 \text{ km}, x_3 = 18.953 \text{ km}$, 监测时间分别为 $t_1 = 9.953 \text{ h}, t_2 = 10.453 \text{ h}, t_3 = 10.953 \text{ h}$ (相对于时间基点)。此时, C_1, C_2, C_3 的真值分别 0.307 5 mg/L, 1.373 8 mg/L, 4.711 2 mg/L [应用公式(2)计算得到]。实际监测获得的 C_1, C_2, C_3 值因为误差的存在不可能与真值相同, 因此, 通过对真值增加一个随机量(最大 1%)的方式, 模拟真实的监测值。利用模拟的监测值, 列方程求解, 可得到如表 1 所示的结果。

表 1 情形 1 计算结果

	$C_1/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$C_2/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$C_3/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	源强/ t	时间/ h	距离/km
真值	0.307 5	1.373 8	4.711 2	5.287	9.953	16.953
数值	1 0.309 4	1.384 9	4.676 1	3.638 8	9.289 3	15.816 2
	2 0.310 4	1.364 4	4.75545	11.033 5	11.407 2	19.451 4
	3 0.310 0	1.377 4	4.673 3	4.495 0	9.727 1	16.569 1
	4 0.310 3	1.373 4	4.739 5	7.306 7	10.605 0	18.074 2
	5 0.306 1	1.375 1	4.754 3	5.927 0	10.092 4	17.188 9
	6 0.305 3	1.371 7	4.750 4	6.140 2	10.154 0	17.294 2
相对 误差	1 0.62%	0.81%	-0.75%	-31.17%	-6.67%	-6.71%
	2 0.94%	-0.68%	0.94%	108.69%	14.61%	14.74%
	3 0.81%	0.26%	-0.80%	-14.98%	-2.27%	-2.26%
	4 0.91%	-0.03%	0.60%	38.20%	6.55%	6.61%
	5 -0.46%	0.09%	0.91%	12.11%	1.40%	1.39%
	6 -0.72%	-0.15%	0.83%	16.14%	2.02%	2.01%

对于情形 2, 步骤是类似的, 根据 E, B 两处污染物浓度超标, D 两处污染物浓度不超标的结果, 可以将污染源的可能范围锁定在 A'C'河段或 A'C'汇入前的主流河段, 然后监测 A'C'河段下游某点处的浓度, 根据此点浓度超标, 即可将污染源的可能范围最终确定在 A'C'河段。接着, 安排应急监

测,获取 C_1', C_2', C_3' 的值,即可求算 A' 点的位置、污染发生时间及源强。

假定 C_1', C_2', C_3' 距污染源的距离分别为 $x_1' = 5.3 \text{ km}, x_2' = 6.3 \text{ km}, x_3' = 7.3 \text{ km}$, 监测时间分别为 $t_1' = 2.683 \text{ h}, t_2' = 3.183 \text{ h}, t_3' = 3.683 \text{ h}$ 。根据模拟的监测值,计算得到的结果如表 2 所示。

表 2 情形 2 计算结果

	$C_1/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$C_2/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$C_3/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	源强/ t	时间/ h	距离/km
真值	1.229 2	0.286 4	0.067 3	5.287	2.683	5.3
数值	1 1.236 4	0.289	0.067 5	8.329	1.399 7	2.881 7
	2 1.217 8	0.288 4	0.067 9	10.448 8	1.408 8	2.905 8
	3 1.226 6	0.287 3	0.066 9	3.862 1	1.158 9	2.398 2
	4 1.217 8	0.286	0.067 1	14.184 3	1.547 1	3.179 8
	5 1.235 7	0.288 1	0.066 9	3.683 5	1.160 6	2.400 1
	6 1.234 3	0.287 9	0.067	5.360 6	1.274 1	2.628 2
相对 误差	1 0.59%	0.91%	0.30%	57.54%	-47.83%	-45.63%
	2 -0.93%	0.70%	0.89%	97.63%	-47.49%	-45.17%
	3 -0.21%	0.31%	-0.59%	-26.95%	-56.81%	-54.75%
	4 -0.93%	-0.14%	-0.30%	168.29%	-42.34%	-40.00%
	5 0.53%	0.59%	-0.59%	-30.33%	-56.74%	-54.72%
	6 0.41%	0.52%	-0.45%	1.39%	-52.51%	-50.41%

2.3 结果分析

2.3.1 误差分析

从表 1 和表 2 可以看出,不到 1% 的监测数据的相对误差,在情形 1 中,可以造成计算结果 1% ~ 109% 的相对误差,在情形 2 中,可以造成计算结果 1% ~ 168% 的相对误差。由于仅仅对于每种情形取了 6 组随机模拟的监测值进行计算。上述计算结果的误差范围并不是对应监测数据误差范围下 (0 ~ 1%) 的精确范围。因此,监测数据的相对误差对计算结果的相对误差影响非常大。

2.3.2 敏感性分析

情形 1 中,源强的相对误差范围 12% ~ 109%,时间和地点误差范围 1% ~ 14%;情形 2 中,源强 1% ~ 168%,时间和地点误差范围 40% ~ 57%。因此,源强相较时间和地点,更易受监测数据误差的影响。同时,对于确定的一组监测数据,时间和地点的相对误差基本齐平,且方向相同。

2.3.3 情形对比分析

情形 1 相较情形 2,时间与地点的真值相对都较大,但相对误差反而较小,基本都在可接受的范围 (1% ~ 14%)。

3 结论

(1) 对于树状河流的突发污染事故,在源强确定时,应首先利用河流节点快速监测的结果缩小污染源的可能范围至某个具体河段,然后通过源强反算得到污染源的具体位置、时间及强度并与实际情况印证。

(2) 利用河流中污染物扩散的一维解析模型计算得到的事故源位置、时间和源强,由于监测数据误差的缘故,误差可能会很大。

(3) 时间和地点的计算误差相比源强要小很多,因此计算结果在现实中对于最终精确定位事故污染源是有帮助的。

[参考文献]

[1] 张勇,王东宇,杨凯. 1985—2005 年中国城市水源地突发污染事件不完全统计分析[J]. 安全与环境学报,2006,6(2): 79-84.

[2] 丁贤荣,徐健等. GIS 与数模集成的水污染突发事件时空模拟[J]. 河海大学学报:自然科学版,2003,31(2):203-206.

[3] 方子云. 中国水利百科全书环境水利分册[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.

[4] 刘颖,刘丹,杨森. 流域事故性污染源监测资源的最优分配方法[J]. 西南交通大学学报,2006,41(6):779-782.

[5] 何进朝. 突发水污染事故预警应急系统研究[D]. 成都:四川大学,2005.

[6] 王泽文,徐定华. 流域点污染源识别的唯一性[J]. 宁夏大学学报:自然科学版,2006,27(2):124-129.

[7] 闵涛,周孝德. 污染物一维非恒定扩散逆过程反问题的数值求解[J]. 西安理工大学学报,2003,19(1):1-5.

[8] 陈增强. 基于模式搜索算法的毒气泄漏源强反算研究[J]. 中国科技信息,2009,(14):45-46.

[9] 陈军明,徐大海,朱蓉. 遗传算法在点源扩散浓度反演排放源强中的应用[J]. 气象,2002,28(9):12-16.

(本栏目编辑 周立平)