

事故污染源目标分布函数中初始概率的确定方法

刘颖, 李勇, 欧阳峰, 龚清莲

(西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:为解决流域事故性污染源搜索中“初始信息”主观性的难题,基于流域事故性污染源搜索的特点建立了非持久性污染物水质模型,以长江宜宾段为研究对象,采用现场采样室内试验的方式确定了该河段COD综合衰减系数,从而模拟了该河段各排污口在正常排污条件下的扩散浓度,通过与实际监测值的拟合,验证了模型的有效性。在此基础上,运用误差序列建立了获得事故污染源的初始概率的方法以及利用搜索行动对初始概率进行修正的方案,并实现了初始概率向后验概率转化,为流域事故性污染源搜索模型的目标分布函数的确定提供一种客观的科学方法。

关键词:水质模型; 初始概率; 误差序列; 后验概率

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2015)05-0025-04

Method of determining original probability in target distribution function of accidental pollution sources

LIU Ying, LI Yong, OUYANG Feng, GONG Qinglian

(School of Environmental Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To solve the subjective problem of original information in searching accidental pollution source in a basin, the paper set up water quality model of non-persistent pollutants based on the search characteristics of accidental pollution source. It took Yibin section of the Yangtze river as research object, and got the complex degradation coefficient of COD by the scene sampling and indoor experiment. It simulated the diffusion concentration of the sewage outfall in the river reach. Through fitting the actual monitoring value, the validity of this model is validate. On the above basis, it built a method of getting original probability of accidental pollution sources by using error sequence and modified the original probability in search action. Therefore the original probability was transformed into posteriori probability. This result can provide an objective and scientific method for determining the target distribution function in the search model of accidental pollution sources in a basin.

Key words: water quality model; original probability; error sequence; posteriori probability

在流域事故性污染源搜索中,流域事故污染源初始概率的确定是流域事故性污染源最优搜索模型中急需解决的一大难题^[1-4]。最优搜索思想是建立在贝叶斯定理基础上的,但贝叶斯方法存在的重大问题是在获得样本的实验之前就已经存在的“先验信息”即初始概率具有主观性,如何使搜索理论中的目标分布函数符合客观实际是搜索理论发展和应用中的主要挑战之一^[5-9]。本文通过建立污染物预测模型来确定事故污染源的初始概率,可为流域事故性污染源搜索模型的目标分布函数的确定提供客

观的科学方法。

1 流域水质预测模型的建立

国际上已经有很多成熟的水质模型软件,然而这些模型输入参数多,分析工作量大,对于瞬时发生的污染事故预测有一定难度,因此需要合理建立水体中污染物迁移转化模型,模拟污染物对水质的影响^[10-13]。基于流域事故性污染源搜索涉及水域范围大,当前各行政区域段仅在出入境内断面布设了水质在线监测,污染物到达下游监测断面可视为达到

收稿日期:2015-04-27; 修回日期:2015-05-20

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51209178); 国家留学基金(201407005030)

作者简介:刘颖(1977-),女,四川雅安人,博士,副教授,主要从事流域污染控制方面研究和教学工作。

了混合均匀,故只考虑上游背景输入、河段内次级河流输入、河段内工业污染源输入、河段内生活污水集中排放口、河段内面源的均匀输入、河段的水质输出,研究纵向(即水流方向)的浓度变化。截取两个排污口之间的一段,起点A点源输入 Q_1 ,末端B点源输入 Q_2 ,AB长 L ,km,单位河段长的面源输入 q , $\text{kg}/(\text{km}\cdot\text{d})$,河段内面源输入为 $q\cdot L$,上游背景输入 Q_A ,下游B输出 Q_L ,设 Q_x 为河段内任一点 X 的输出。设污染物在AB河段上的衰减量 D ,则B点的污染物输出量为:

$$Q_L = Q_1 + Q_A + qL - D \quad (1)$$

忽略离散作用,可写出下式:

$$\frac{dQ}{dx} = I^* - K_c^* Q$$

沿 X 距离积分得

$$Q_x = Q_0 e^{-K_c^* X} + \frac{I^*}{K_c^*} (1 - e^{-K_c^* X}) \quad (2)$$

则根据旁侧点源的位置,将河段细分为若干个下河段 L_1, L_2, L_3 ,每个上河段的输出当作下河段的输入,再在河段的起始处把指定的点源负荷加进去,这样可以写出每个次级河段的输出负荷量。设控制江段内有 $n+1$ 个点源,分为 n 段,在河段末端断面输出为:

$$Q_{Ln} = Q_A \exp(-K_c^* L) + \sum_i^n [Q_i \exp(-K_c^* \sum_j^i L_j)] + \frac{I^*}{K_c^*} [1 - \exp(-K_c^* L)] \quad (3)$$

则控制断面的浓度 C_Q 为:

$$C_Q = Q_{Ln} / (86.4W) \quad (4)$$

式中: Q_x 为河流中任意点 X 处断面输出的污染物的量, kg/d ; Q_{Ln} 为控制断面(河流末端)输出的污染物的量, kg/d ; C_Q 为控制断面(河流末端)的污染物浓度, mg/L ; X 为河段中任意点距起始断面距离, km ; K_c^* 为污染物的综合衰减系数, km^{-1} ; L 为控制河段的长度, km ; L_j 为 j 点到控制断面的距离, km ; I^* 为河段内单位河长上分散源输入的污染物, $\text{kg}/(\text{km}\cdot\text{d})$; W 为河流流量, m^3/s 。

方程(3)为流域稳态一维水质数学模型的表达式,可以看出,只要预先知道了某河段上游的背景输入、河段内各点源大型排污口或次级河口的污染负荷,以及各点源至控制断面的距离,河段单位长度上面污染源的污染负荷,污染物的衰减速率,便可计算出控制河段末端即控制断面的污染负荷量。反之,由水质预测模型可以看出,在突发污染事故时,用模

型(3)分别模拟各排污口某项指标在非正常排污条件下的下游污染指标值,通过污染指标模拟值与实际监测到的值比较,即可判断出疑似事故性污染源。

2 水质模型验证

C_Q 和 I^* 可在当地环保部门收集,因此关键是确定污染物的衰减系数 K_{COD}^* 。根据对宜宾沿长江排污口的调查,涉及行业主要为食品酿造、化工、化纤、机电、服务业、造纸和纸,主要污染物是COD,所以选择该段流域进行COD参数的分析。

2.1 化学需氧量降解系数确定原理

化学需氧量反映了水中受还原性物质污染的程度,水中还原性物质包括有机物、亚硝酸盐、亚铁盐、硫化物等。COD的降解符合一级动力学反应,即:

$$\frac{dC_{\text{COD}}}{dt} = -K_{\text{COD}} L_{\text{COD}}$$

其积分式为:

$$C_{\text{COD}} = C_{\text{COD}0} \exp(-K_c t)$$

$$K_{\text{COD}} = \frac{1}{t} \ln \left| \frac{C_{\text{COD}0}}{C_{\text{COD}}} \right| \quad (5)$$

根据单位换算为:

$$K_c^* = \frac{K_{\text{COD}}}{u} \quad (6)$$

式中: t 为反应时间, d ; K_{COD} 为综合降解系数, $1/\text{d}$; C_{COD} 为 t 时刻测定的污染物浓度, mg/L ; $C_{\text{COD}0}$ 为初始浓度, mg/L 。

2.2 实验研究

因长江宜宾段COD浓度不高,选定两个断面相距2km(长江口和宜宾发电厂,两断面之间没有明显的排污口),采样垂线设置了左、中、右3条,对每个断面各取一份综合水样。将取得水样放到玻璃缸反应器中,模拟水流扰动,间隔4h取样,利用重铬酸钾法测定COD。考虑实验测定条件与实际水环境的差异,对降解系数作如下修正:

$$K_{\text{COD}} = K_{\text{COD experiment}} \times 1.047^{T-T_0} + a \frac{U}{H} \quad (7)$$

式中: T 为河流实际温度, $^{\circ}\text{C}$; T_0 为实验时水样温度, $^{\circ}\text{C}$; U 为河流平均流速, m/s ; H 为平均水深, m ; A 为0~0.6,按照河流比降 J 取值。

根据公式(5)计算得出不同时间点下降解系数。实验得降解系数平均值 $\bar{K}_{\text{COD experiment}} = 0.64$ 。实验室温度 23.5°C ,取样时水温为 20.9°C ,河流流速 $u = 0.94 \text{ m}/\text{s}$,平均水深 $H = 13.42 \text{ m}$,平均水面坡降 $J = 0.28 \text{ m}/\text{km}$,取 $a = 0.09$ 。由公式(7)得

$$K_{\text{COD}} = K_{\text{COD experiment}} \times 1.047^{T-T_0} + a \frac{U}{H}$$

$$= 0.64 \times 1.047^{20.9-23.5} + 0.09 \times \frac{0.94}{13.42}$$

$$= 0.57\text{d}^{-1}$$

由公式(6) 得

$$K_c^* = \frac{K_{\text{COD}}}{u} = 7.04 \times 10^{-3}\text{km}^{-1}$$

由于宜宾段水深较大,故其流速和水深的变化的影响可忽略,根据多年水文资料水温逐月变化,计算得到不同时期 COD_{Cr}的降解系数。

表 1 综合降解系数实验数据及计算结果

测定时 间/h	硫酸亚 铁铵/mL	空白/mL	COD _{Cr} / (mg · L ⁻¹)	K _{COD experiment} /d
0	14.73	17.95	12.88	
4	14.32	17.10	11.12	0.882
8	18.53	20.7	9.76	0.882
12	17.73	20.1	9.38	0.613
16	18.05	20.3	9.00	0.538
20	17.2	19.3	8.48	0.513

表 2 河段水温

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
水温	11.6	8.8	12.0	19.0	20.5	21.0	25.0	26.0	22.5	20.8	17.0	12.0

表 3 COD_{Cr}降解系数

水期	水温/ ℃	坡度/ (m · km ⁻¹)	实际水 温/℃	修正后降 解系数/d ⁻¹
枯水期(11、12、1 和 2 月)	12.35			0.38
平水期(3、4、5 和 10 月)	18.08	0.28	20.9	0.50
丰水期(6、7、8 和 9 月)	23.63			0.65

2.3 模型的验证

在计算排污口的平均排放浓度时,污水密度按 1 000 kg/m³ 计,并且在统计排污口时,为使模型简化,把距离下游相同距离的排污口合并为一个排污口计算,具体统计数据如表 4。

表 4 长江宜宾段 COD 排放量统计

排污口 距下断 面距/km	排污口 个数	COD 排放 量/(t · a ⁻¹)	污水排 放量/ (t · a ⁻¹)	平均排 放浓度/ (mg · L ⁻¹)
83.3	9	6828.75	10977461	0.6221
82.3	4	193.46	1964400	0.0985
81.3	2	441.44	2375279	0.1858
80.3	5	2103.2	3000000	0.7011
79.3	1	5405.40	7207200	0.7500
77	1	10702.00	13800000	0.7755
61	2	43.65	125766	0.3471
56.1	1	49.35	585000	0.0844
42.3	1	27.00	28000	0.9643
40.2	12	1974.52	5377383	0.3672
38	1	144.00	288000	0.5000
22.8	1	410.27	2051351	0.2000
19.6	1	1000.00	1500000	0.6667
5.5	2	256.90	881000	0.2916

长江宜宾段在 5 月份的河流基本情况为, W = 4 530.45 m³/s,河宽 B = 355.8 m,流速 u = 0.94 m/s,水深 H = 13.4 m,长江宜宾段两断面(挂弓山和井口断面)的监测值分别为 11.74、11.25 mg/L。长江宜宾段河段长 L = 83.3 km,根据郑丙辉等^[14]的研究,三峡上游的长江干流 COD 面源污染总值为 43.99 × 10⁴ t/a,宜宾到三峡入口的距离 L₁ = 842 km,可粗略计算出长江宜宾段面源 I*。

$$I^* = \frac{I}{L_1} = \frac{109.99 \times 10^7 / 365}{842}$$

$$= 1179.26 \text{ kg}/(\text{km} \cdot \text{d})$$

已知 K_c* = 7.04 × 10⁻³/km,起始 COD_{Cr} 浓度采用挂弓山监测值,即 COD_{CrLn} = 11.74 mg/L,则长江宜宾段的化学需氧量的水质模型为:

$$C_{\text{CODLn}} = 0.56C_{\text{CODA}} + \sum_i^n [C_{\text{CODi}} \exp(-7.04 \times 10^{-3} \sum_j^n L_j)] + \frac{I^*}{7.04 \times 10^{-3}}(1 - 0.56) + 0.56C_{\text{CODA}} + 63.03I^* + \sum_i^n [C_{\text{CODi}} \exp(-7.04 \times 10^{-3} \sum_j^n L_j)] \quad (8)$$

$$C_{\text{COD}} = C_{\text{CODLn}} / (86.4W) = \{0.56C_{\text{CODA}} + 63.02I^* + \sum_i^n [C_{\text{CODi}} \exp(-7.04 \times 10^{-3} \sum_j^n L_j)]\} / (86.4W) \quad (9)$$

根据表 4 所统计的排污口分布可得出在各排污口正常排污条件下井口断面的 COD_{Cr} 浓度为 11.21 mg/L,与监测值 11.25 mg/L 的误差为 0.36%,由此可以看出模型在实际的应用中有较强的适用性。

3 目标分布函数初始概率的确定方法

对目标初始概率分布的估计就是要确定目标最可能出现在哪些污染源,或者说每个污染源出现目标的概率是多大。目标初始函数是指在 $t=0$ 时刻,目标可能在某一区域内(或者目标可能是某一污染源)的概率,用函数 p 表示, $p:J \rightarrow [0,1]$ 或 $p:X \rightarrow [0,1]$,由水质模型获取。

通过上述水质模型模拟各排污口在非正常排污条件下的扩散浓度及其与实际监测值的拟合,即可获得事故污染源的初始概率。由于模拟中存在计算误差,且模拟结果可能有多个匹配值,以及研究的非正常情况仅针对污染物未采取任何处理措施直接排放这一类型,故获得的信息应为概率值。定义二元组: $A(a_i, Q_j)$,其中, $a_i, i=1, \dots, n$ 为第 i 个总入河排污口, $Q_j, j=1, \dots, m$ 为第 j 个排污单位,二元组 $A(a_i, Q_j)$ 为第 i 个总入河排污口的第 j 个排污单位。可见 $A(a_i, Q_j)$ 可以唯一的表示某个排污单位。

假定某个排污单位 $A(a_i, Q_j)$ 为事故源,采用公式(3)计算出下游监测断面的COD值(监测断面处水质浓度),称之为计算COD值,记为 $C'_{\text{COD}}(a_i, Q_j)$ 。下游监测断面的实测COD浓度为 C_{COD} ,定义浓度偏差为监测断面的计算COD和实测COD差值,记为:

$$r(a_i, Q_j) = |C'_{\text{COD}}(a_i, Q_j) - C_{\text{COD}}|, \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (10)$$

$$m(a_i, Q_j) = \frac{\max(r(a_i, Q_j))}{r(a_i, Q_j)} \quad (11)$$

即可计算 $A(a_i, Q_j)$ 为排污源的概率值 $P^0(a_i, Q_j)$ (即先验概率):

$$P^0(a_i, Q_j) = \frac{m(a_i, Q_j)}{\sum_{i,j} m(a_i, Q_j)} = \frac{1}{r(a_i, Q_j) \sum_{i,j} r(a_i, Q_j)} \quad (12)$$

在水质模型给定的初始概率基础上,经过一系列排查后,每次查看的结果也就是新经验的获得,这样尽管不能根据水质模型信息准确知道目标的精确位置,但是可以根据新信息对目标分布函数进行修正。显然随着搜索的进行查看次数的增加,新经验修正的部分越来越大,也更加贴近实情。其基本的思路是:在 A 事件的初始概率基础上,通过观察 B 事件的发生与否,将 A 事件的初始概率由 $P(A)$ 修正为 $P(A|B)$ 。

当搜索持续一定时间 T 后,仍然没有发现事故

性污染源,令 $\tilde{p}(j)$ 为搜索时间 T 后的目标分布函数,即后验目标分布函数。设 $\varphi^*(j, T)$ 是对搜索时间 T 的最优分配方案, $\sum_{j \in J} \varphi^*(j, T) = T, j=1, 2, \dots, n$ 。则 $P[\varphi^*(\cdot, T)]$ 为根据最优分配方案搜索到流域事故性污染源的初始概率,则 $P[\varphi^*(\cdot, t)] = \max\{P[\varphi(\cdot, T)]\}$ 。由此可以得到后验目标分布函数为:

$$\tilde{p}(j) = \frac{p(j) \exp[-\varphi^*(j, T)]}{1 - P[\varphi^*(\cdot, T)]} \quad (13)$$

4 结 语

(1) 基于流域事故性污染源搜索的需要和非持久性污染物的衰减特性,本研究建立了河段多排口水质模拟模型,可模拟河段沿岸众多排污口对下游水质的影响。理论上通过模拟各排污口在非正常排污条件下的扩散浓度,将模拟值与实际监测值的拟合,即可锁定事故污染源。

(2) 鉴于模型参数的不确定性,以及模拟结果出现多个匹配值的情况,因此计算获得的事故源信息应以概率形式表征。本研究运用误差序列和上述河段多排口水质模拟模型,建立了获得事故污染源的初始概率的方法,并提出了利用搜索行动对初始概率作进一步修正的方案,为流域事故污染源搜索中初始概率的确定提供了一种客观的方法。

(3) 验证实例研究中也显露出模型参数的不确定性(如取值的区间性等)会影响模拟结果,因此模型参数尚需进一步优化。

参考文献:

- [1] Liu Ying, Liu Dan, Zhang Fan, et al. Application of optimal search theory in the detection of water pollution accident source [C]// The first international multi-symposiums of computer science and computational sciences, CHINA: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [2] 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.
- [3] 刘颖,朱清新,刘丹.基于最优搜索理论的流域事故污染源搜索新方法[J].环境科学与技术,2008,31(11):140-145.
- [4] Liu Ying, Liu Dan. Determination of the target distribution function for the accidental pollution sources in a drainage area [C]// International Conference on Challenges in Environmental Science and Computer. Wuhan: IEEE Press, 2010.

- [7] Milovanovic M. Water quality assessment and determination of pollution sources along the Axios/Vardar River, South-eastern Europe [J]. *Desalination*, 2007, 213(1-3): 159-173.
- [8] Freni G, Mannina G, Viviani G. Assessment of the integrated urban water quality model complexity through identifiability analysis[J]. *Water Research*, 2011, 45(1): 37-50.
- [9] 殷淑华, 何江涛, 钟佐. 地下水有机污染评价的分级综合指数模型[J]. *水利水电技术*, 2006, 37(1): 56-58.
- [10] 宋印胜. 地下水水质污染的灰色综合评价方法[J]. *勘察科学技术*, 1990(6): 20-22.
- [11] 翟由涛, 赵玉军. 模糊综合指数在判断水质变化趋势和水体管理中的应用[J]. *环境工程*, 1995, 13(6): 44-50.
- [12] 秦传玉, 赵勇胜, 张伟红, 等. 基于BP神经网络的齐齐哈尔地区地下水水质评价[J]. *环境监测管理与技术*, 2007, 19(2): 15-18.
- [13] 谷朝君, 潘颖, 潘明杰. 内梅罗指数法在地下水水质评价中的应用及存在问题[J]. *环境保护科学*, 2002, 28(1): 45-47.
- [14] 寇文杰. 修正的模糊综合评判法在地下水水质评价中的应用[J]. *南水北调与水利科技*, 2013, 11(2): 71-75.
- [15] 中华人民共和国国家技术监督局. 地下水质量标准(GB/T 14848-93)[S]. 1993
- [16] 中华人民共和国卫生部. 生活饮用水卫生标准(GB 5749-2006)[S]. 2006.
- [17] 陈建耀, 王亚, 张洪波, 等. 地下水硝酸盐污染研究综述[J]. *地理科学进展*, 2006, 25(1): 34-44.
- [18] 冷家峰, 崔丽英, 肖美丽. 济南市地下水硝酸盐污染研究[J]. *农村生态环境*, 1998, 14(1): 55-57.
- [19] 朴春香. 延边地区硝酸盐、亚硝酸盐污染现状分析[D]. 延吉: 延边大学, 2006.
- [20] 张晓叶, 张永祥, 任仲宇, 等. 不同地下水水质评价方法的比较及实例应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(2): 98-101.

(上接第28页)

- [5] Jacobson S H, Mclay L A, Hall S N, et al. Optimal search strategies using simultaneous generalized hill climbing algorithms [J]. *Mathematical and Computer Modeling*, 2006, 43(9-10): 1061-1073.
- [6] Hoyle M, Cresswell J E. A search theory model of patch-to-patch forager movement with application to pollinator-mediated gene flow [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2007, 248(1): 154-163.
- [7] Guitouni, K. Jabeur, M. Allouche, et al. Application of search theory for large volume surveillance planning [C]//. *The 11th International Conference on Information Fusion*. Cologne: IEEE Press, 2008.
- [8] Wybo M, Robert J, Léger PM. Using search theory to determine an applications selection strategy [J]. *Information & Management*, 2009, 46(5): 285-293.
- [9] Dokou Z, Pinder G F. Optimal search strategy for the definition of a DNAPL source [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 376(3-4): 542-556.
- [10] Chen Liping, Jiang Juncheng, Yin Liang. Numerical simulation water pollution diffusions for sudden hazardous chemical [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, 22(6): 761-765.
- [11] He Qiang, Peng Shujuan, Zhai Jun, et al. Development and application of a water pollution emergency response system for the Three Gorges Reservoir in the Yangtze River China. [J] *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(4): 595-600.
- [12] Grifoll M, Jordà G, Espino M, et al. A management system for accidental water pollution risk in a harbour: The Barcelona case study [J]. *Journal of Marine Systems*, 2011, 88(1): 60-73.
- [13] 陶亚, 任华堂, 夏建新. 突发水污染事故不同应对措施处置效果模拟[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2013, 21(2): 203-213.
- [14] 郑丙辉, 王丽婧, 龚斌. 三峡水库上游河流入库面源污染负荷研究[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(2): 125-131.