

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.05.013

基于 BAS 算法的河渠突发水污染溯源

王忠慧¹, 贡力^{1,2}, 康春涛¹, 王鸿¹, 杨轶群¹

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;
2. 兰州交通大学调水工程及输水安全研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为了在河渠突发水污染事件发生后快速识别污染物的源项信息,结合正向的质量浓度过程与逆向位置信息之间的关系,实现污染物源项的解耦,确定了质量浓度与位置概率密度函数之间的相关关系以及质量浓度与正向质量浓度概率密度函数之间的关系,构建了水力学模型,并利用天牛须搜索(BAS)算法对水污染源项进行求解。数值模型仿真结果表明:该水力学模型与BAS算法的结合有效地降低了计算量,计算得到的源项信息与实际情况基本符合,精度较高;与粒子群算法相比,BAS算法收敛速度快,运算量小。

关键词:河渠;突发水污染;污染物源项;解耦;BAS算法

中图分类号:TV133;X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)05-0087-06

Tracing source of sudden water pollution in rivers and canals based on BAS algorithm//WANG Zhonghui¹, GONG Li^{1,2}, KANG Chuntao¹, WANG Hong¹, YANG Yiqun¹(1. Department of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Institute of Water Diversion Engineering and Water Security, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To identify the pollutant source term information rapidly after a sudden water pollution event in rivers and canals, combined with the relationship between the forward mass concentration process and the reverse location information, we realized the decoupling of the pollutant source terms, determined the relationships between the mass concentration and the probability density function of position, and between the mass concentration and the probability density function of forward mass concentration. According to these relationships the hydraulics model is built, and the information of water pollution source term is solved using beetle antennae search(BAS) algorithm. The results show that the combination of the hydraulics model and BAS algorithm can effectively reduce the amount of computations. The calculated source term information basically matches the actual situation and has a high accuracy. Compared with the particle swarm optimization algorithm, it is found that BAS algorithm is faster in search and smaller in computation.

Key words: river and canal; sudden water pollution; source term of pollutant; decoupling; BAS algorithm

突发水污染事件会使整个水生态环境遭到破坏,从而造成巨大的损失,甚至会引发社会动荡,需采取必要的应急措施来应对^[1-2]。在水污染事件发生的第一时间判断出污染源的位置、掌握其污染物的源强、获知污染事件发生的时间^[3],是处理这种不确定性问题的关键所在,而能否快速有效地找到污染源的位置决定着能否最大限度减小突发水污染事件影响的范围^[4]。

突发水污染事情追踪溯源就是了解水污染发生以及发展的全过程,而源项信息的识别尤其关键,国

内外在源项信息识别方面已取得了很多研究成果,但还没有形成一个完整的解决突发水污染事情溯源问题的体系。源项信息识别常用的方法有确定性方法、概率统计方法和耦合的概率密度分析方法 3 类^[5]。在确定性方法研究方面,辛小康等^[6]通过遗传算法与数学模型相结合的方法,对一维单点源单变量和多点源多变量问题分别进行了研究;Boano 等^[7]利用地质统计法有效恢复了任意分布源和多个独立点源的水污染释放历史;曹宏桂等^[8]将水污染问题利用有限元法进行正演,用 PSO-DE 混合优

基金项目:国家自然科学基金(51969011,51669010)

作者简介:王忠慧(1996—),女,硕士研究生,研究方向为输水安全。E-mail: 903892370@qq.com

通信作者:贡力,教授。E-mail: gongl@mail.lzjtu.cn

化算法结合移动监测平台进行反演,证明了该优化算法在二维水环境下的适用性。确定性方法最大的特点是利用一组最优的污染物浓度信息求解污染源项;缺点是计算量较大且没有充分考虑数据的不确定性,而且当信息不准确时往往结果误差很大。在概率统计方法研究方面,陈海洋等^[9]在考虑有限宽度河流瞬时岸边污染泄漏的情况下,建立了水体污染识别数学模型,并以典型 Metropolis 算法构建马尔科夫链取得后验概率分布;姜继平等^[10]通过 Adaptive Metropolis 算法对后验概率密度进行采样,得到了操作参数推荐值,为贝叶斯推理技术的应用作出了重要贡献;Wei 等^[11]通过分析正向模型的不确定性,结合 AM 算法对假想的河道排放污染源项进行了反演。概率统计方法的应用主要是考虑到了突发水污染事件的不确定性,虽然能得到污染源项的“可能解”,但是计算时抽样过程极为耗时且结果对随机变量的分布信息过于依赖。在耦合的概率密度分析方法研究方面,早期的逆向概率密度函数来自地下水污染的研究,Neupauer 等^[12]研究表明,在一维和二维环境下的地下水,可以用逆向概率密度函数求得源项的位置和时间信息;程伟平等^[13]将水污染释放过程重构,通过对比传统的优化方法与逆向概率密度的优化方法,结果表明逆向概率密度优化方法减少了计算量,提高了计算效率;王家彪等^[14]提出结合概率密度分析的微分进化法对突发水污染事情进行溯源研究。耦合的概率密度分析方法通过实现源项信息之间的解耦,确保在计算过程中计算量不会过大,也能考虑到突发水污染事件的不确定性,是确定性方法和概率方法的结合。耦合的概率密度分析方法不仅简化了水污染溯源的过程,而且提高了溯源精度,是新一代的溯源研究方法。

本文采用耦合的概率密度分析方法,将突发水污染溯源的模型简化,利用天牛须搜索 (beetle antennae search, BAS) 算法^[14]识别一维河渠污染源项,并通过 Matlab 进行模型仿真试验来验证 BAS 算法的可行性及应用前景。

1 数学模型

水污染溯源问题就是通过已检测到的固定时刻的质量浓度信息确定污染源位置 x 、排放时刻 t 及源强 m_0 3 个污染源项^[15]。本文通过水力学计算方法,利用正向质量浓度概率密度函数(污染物从污染源传播到下游某一断面的概率)与逆向位置概率密度函数(从观测者角度出发,由观测断面判断污染物可能来自任意位置的概率)之间的关系,实现源项 3 个未知量之间的解耦,进而通过质量浓度与

位置概率密度函数之间的相关关系以及质量浓度与正向质量浓度概率密度函数之间的关系,构建水力学模型。

假设河渠在长度方向上远远大于宽度和深度方向,则污染物排入水体后能在短时间内与水体混合均匀,并且水流流速与污染物质量浓度均匀分布。在污染物只随流程方向变化的情况下,污染物输移数学模型可以简化为一维的水流水质耦合模型^[16],计算公式为

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial [u\rho(x, t)]}{\partial x} = E \frac{\partial^2 \rho(x, t)}{\partial^2 x} - K\rho(x, t) \quad (1)$$

式中: $\rho(x, t)$ 为污染物在 x 断面 t 时刻的平均质量浓度, mg/L; u 为河渠断面平均流速, m/s; E 为渠道纵向离散系数, m^2/s ; K 为污染物降解系数, s^{-1} 。

若水污染的排放形式为瞬时排放,则污染源以下河渠中的污染物质量浓度随河长的变化规律为

$$\rho(x, t) = \frac{M}{\sqrt{4\pi E(t-t_0)}} \exp \left\{ -\frac{[x-x_0-u(t-t_0)]^2}{4E(t-t_0)} - K(t-t_0) \right\} \quad (2)$$

式中: M 为瞬时排放的污染物面源强度,即源强, g/m^2 ; x_0 为污染物排放位置, m; t_0 为污染物排放时间, s。

任何形式的水污染在河渠输移过程中都可以用两种概率密度函数来表示:一种表示污染物在河渠中的质量浓度分布,为正向质量浓度概率密度函数,即污染物从源头传播到下游某一位置的质量浓度分布概率;另一种表示从观测断面判断污染物可能在上游的某个断面,为逆向位置概率密度函数,反映污染物在不同位置的可能性大小。而耦合的概率密度分析方法就是通过对正向质量浓度概率密度函数与逆向位置概率密度函数之间的关系,实现污染物排放位置、时间和源强之间的解耦。

该方法起初用于对地下水的研究, Neupauer 等^[17]得到了一维地下水域条件下正向质量浓度概率密度与逆向位置概率密度之间的关系:

$$P'(x_2, x_1, t) = \frac{\rho(x_2, x_1, t)}{M} = P(x_1, x_2, t') \quad (3)$$

式中: P 为 t' 时刻从断面 x_2 推断污染物的源头位置 x_1 处的逆向位置概率密度,具有 m^{-1} 的量纲; t' 为逆向计算时间点; P' 为 t 时刻污染物由 x_1 断面输移到 x_2 断面的正向质量浓度概率密度,也具有 m^{-1} 的量纲。

因为 P 与 P' 具有相同的量纲,分别表示逆向位置概率密度输送过程与正向质量浓度概率密度输送过程,两者之间是相互伴随的过程,所以两者之间具

有高度的耦合性,即下游给定断面观测到的质量浓度过程与污染源在某一时刻出现在某一位置的概率相对应。

由式(2)(3)可推导出逆向的位置概率密度为

$$P(x_1, x_2, t') = \frac{1}{\sqrt{4\pi E(t_2 - t')}} \exp \left\{ -\frac{[x_2 - x_1 - u(t_2 - t')]^2}{4E(t_2 - t')} - K(t_2 - t') \right\} \quad (4)$$

式中 $t_2 - t'$ 为污染物从 x_1 断面(源头位置)到 x_2 断面所用的时间。

由式(4)可知在污染源位置和释放时间信息已知的情况下,就可以计算得到逆向位置概率密度 P 。

2 优化模型

2.1 优化模型的构建

由式(3)可知,逆向位置概率密度 P 与观测的质量浓度系列 ρ 之间线性相关,其相关系数 $r = 1$ 。相关系数的表达式为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\rho_i - \bar{\rho})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\rho_i - \bar{\rho})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (5)$$

式中: $\bar{\rho}$ 、 \bar{P} 分别为观测质量浓度 ρ_i 和逆向位置概率密度 P_i 的算术平均值; n 为观测质量浓度系列的个数。

优化模型建立的目的就是寻找最优解,既然逆向位置概率密度函数已经实现了污染源排放位置、时间和源强之间的解耦,便可以先从水污染现场推测得到的一系列污染物排放位置、时间,即 x'_0 、 t'_0 中寻优,确定最优的 x'_0 、 t'_0 为 x_0 和 t_0 ,再计算得到 M 。

根据观测的质量浓度系列 ρ_i ,假定的 x'_0 、 t'_0 以及对应时刻的质量浓度信息得到 P_i 的表达式,构造目标函数如式(6)所示。对于目标函数式(6),当且仅当 $x'_0 = x_0$ 、 $t'_0 = t_0$ 时,相关系数 $r = 1$,此时目标函数达到最优状态。

$$\min(1 - r) \quad (6)$$

由式(6)得到污染物排放位置和时间,则源强 M 可由下式大致推算:

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i}{P_i} \quad (7)$$

然后利用正向质量浓度概率密度函数与质量浓度信息之间的关系,进一步构建优化模型计算最终源强,其目标函数为

$$\min \left[\sum_{i=1}^n (MP'_i - \rho_i)^2 \right] \quad (8)$$

2.2 优化模型的求解

本文使用 BAS 算法求解一维河渠稳态点源扩

散模型,该算法是 2017 年提出的一种高效的智能优化算法^[18],它通过模拟天牛搜索食物的过程进行优化计算。天牛是甲虫一族,它最大的特征是拥有两只比身体还要长的触角(须),当天牛觅食的时候,利用两须搜索食物气味,通过食物的气味(也就是目标函数)控制移动行为和转向行为来搜索食物,当天牛搜索到食物的时候也就是计算得到最终的优化结果的时候。为了使模型的计算结果精确,本文将 BAS 算法中的步长进行改进,采用变步长的 BAS 算法求解模型,随着步长的减小,算法的计算速度由快变慢,完成从全局到局部寻优的一个过程,可以有效缩短算法的收敛速度,提高算法的计算精度。具体计算步骤如下:

步骤 1:确定优化模型的目标函数(式(6)(8))。

步骤 2:以 a_l 表示左须位置, a_r 表示右须位置, o 表示质心,用 d_0 表示两须之间的距离。假设天牛头朝向任意,因而从天牛右须指向左须的向量朝向也是任意的,由归一化的随机向量 l 表示:

$$l = \frac{\text{rands}(m, 1)}{\|\text{rands}(m, 1)\|} \quad (9)$$

式中: $\text{rands}(m, 1)$ 为一随机向量,与天牛须的指向有关; m 为维数,即目标函数未知数的个数。

步骤 3:经过 G 次迭代后,天牛左右两须的位置可以根据 l 确定为

$$\begin{cases} a_r = a_c + \frac{1}{2}d_c l \\ a_l = a_c - \frac{1}{2}d_c l \end{cases} \quad (10)$$

式中: a_c 为第 G 次迭代后质心的位置; d_c 为第 G 次迭代时天牛两须的距离。

步骤 4:由左右两须的适应值确定天牛下一时刻的位置坐标;

$$a_c = a_{c-1} + sl \text{sign}[f(a_l) - f(a_r)] \quad (11)$$

其中

$$s = cd_0$$

式中: s 为步长; c 为常数; $f(a_l)$ 为 a_l 的适应度值,表示向左走; $f(a_r)$ 为 a_r 的适应度值,表示向右走; sign 为符号函数,若 $f(a_l) < f(a_r)$,此时天牛向左须方向移动;若 $f(a_l) > f(a_r)$,此时天牛向右须方向移动。每进行一次迭代,搜索距离和步长的变化如下:

$$d_c = \eta_1 d_{c-1} + d_0 \quad (12)$$

$$s_c = \eta_2 s_{c-1} \quad (13)$$

式中 η_1 、 η_2 分别是搜索距离更新系数与步长衰减系数。

步骤 5:将步骤 4 计算得到的 a_c 代入目标函数式中,直到找到目标函数的最优解或达到最大迭代次数,结束迭代。

BAS 算法流程如图 1 所示。

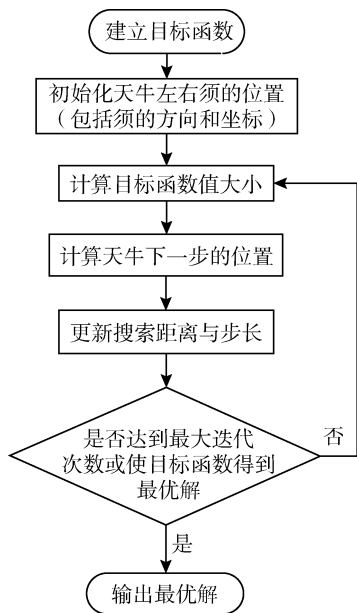


图 1 BAS 算法流程

Fig. 1 BAS algorithm flow chart

3 模型仿真试验

综合考虑了南水北调中线^[19]、引大入秦输水渠道等一些实际河渠的基本输水状况后,选定一段没有支流汇入或突然涌泄水的、可视为一维恒定流进行计算的矩形断面的河渠进行仿真试验。河渠为浆砌块石护面,糙率系数为 0.025,底宽为 10 m,水深 4 m,坡降 0.002 8%,流速 0.36 m/s,河渠纵向离散系数为 2.0 m²/s。假设上午 9:00 在 A 断面处(假定此处为坐标原点)瞬时排入 1000 kg 的污染物,为了便于对比分析污染物的质量浓度变化过程以及验证 BAS 算法的计算结果,在下游河道设置了距 A 点 800 m 和 1200 m 的 A1 和 A2 两个监测断面。根据污染物扩散模型(式(2)),在不考虑降解作用的情况下,分别计算两个断面的质量浓度过程,并在得到的计算结果中人为加入 10% 的观测误差(也就是在污染物扩散模型中得到的质量浓度数据中加入 10% 以内的变幅),生成污染物质量浓度变化过程如表 1 所示。

为便于说明 BAS 算法计算本文优化模型的可行性,将得到的两断面质量浓度信息分别进行两次水污染溯源计算。选择 Matlab 软件进行模型仿真计算,取初始步长为 1000,迭代 200 次,再进行 50 次计算求取平均值后,得到计算结果如表 2 所示。

从表 2 可看出,由 A1 断面计算得到的污染物质量为 975.72 kg,与实际值相比误差为 2.43%,计算得到的排放位置差 25.43 m,排放时间超出 7 min;由 A2 断面计算得到的污染物质量为 964.32 kg,与

表 1 人工生成的观测断面污染物质量浓度

Table 1 Mass concentration information in observed section

时间	污染物质量浓度/(mg · L ⁻¹)	
	A1 断面	A2 断面
9:20	0	
9:25	0.43	
9:30	22.56	0
9:35	97.00	2.55
9:40	79.89	34.12
9:45	23.97	89.57
9:50	2.45	64.97
9:55	0.25	19.00
10:00	0	1.81
10:05		0
10:10		0

表 2 仿真溯源结果

Table 2 Table of simulation traceability results

项目	污染物质量/kg	排放位置/m	排放时间
实际值	1000	0	9:00
A1 断面计算值	975.72	25.43	9:07
A2 断面计算值	964.32	56.22	9:09

实际值的误差为 3.57%,计算得到的排放位置差 56.22 m,排放时间超出 9 min。通过不同观测断面的两次计算结果发现,由 A1 断面的浓度信息计算得到的源项信息的精度比 A2 断面高。因为在计算过程中没有考虑降解作用,所以不能从水力学的角度来分析误差。考虑到 BAS 算法在计算时对初始步长的选取具有一定的随机性,并且通过多次计算发现当初始步长在大于自变量 2/3 的范围内取值时,计算结果的精度较高。由于两个断面所求的污染物排放位置和时间(即自变量)范围不同,A2 断面的自变量范围较 A1 断面大,因此,初始步长为 1000 时,对于 A2 断面来说,得到的溯源精度就没有 A1 断面高。在实际发生突发水污染事情时,可以通过现场考察或是通过已有的资料分析得到自变量的大致范围,再计算源项,便可得到更加精准的污染物排放位置和时间。

为了测试溯源结果的准确性,把由 A1 断面计算得到的源项信息代入污染物扩散模型(式(2))中,得到污染物在 A1 断面处的计算质量浓度变化过程;将计算质量浓度变化过程与观测质量浓度变化过程进行比较(图 2)可知,在质量浓度未达到峰值之前计算质量浓度较观测质量浓度高,但质量浓度达到峰值之后,观测质量浓度系列比计算质量浓度系列大。总体上,两条曲线的相关性较高,溯源的计算结果具有较高的精度,因此溯源模型重构的突发水污染事件能够反映实际水污染全过程。

为说明 BAS 算法在突发水污染溯源计算中的特点,在模型仿真试验中采用粒子群算法(partical

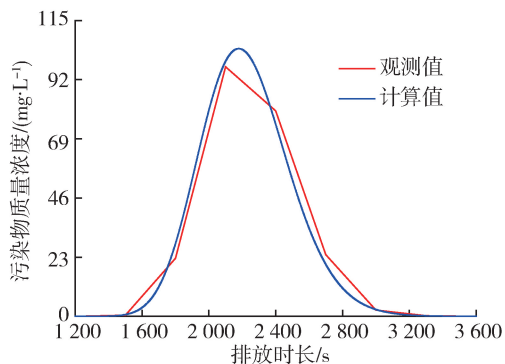


图2 A1断面污染物质量浓度过程

Fig.2 Concentration process diagram of A1 section

swarm optimization, PSO)进行了计算,结果表明,同样取50次计算结果的平均值,PSO算法的精度比BAS算法高。但进一步分析发现BAS算法在迭代了106次之后趋于稳定,而PSO算法迭代了564次后才趋于稳定;BAS算法计算50次后取平均值的计算精度与PSO算法计算42次后取平均值的计算精度相同,但BAS算法所用的总计算时间为30s,而PSO算法为125s。可见BAS算法的单次计算精度比PSO算法低,但是BAS算法收敛速度快,达到相同的计算精度BAS算法所用的计算时长也明显低于PSO算法。

总体来说,BAS算法计算结果精度高,收敛速度快,算法简单,在将来的基于污染物源项解耦的突发水污染溯源方面有较好的应用前景。但BAS算法在计算过程中步长一直在随着迭代次数的增加而减小,无论能否进一步找到最优位置,步长一直在衰减,缺少一种反馈机制,这也是BAS算法在水污染溯源研究中有待提高的地方。

4 结 语

本文利用耦合的概率密度分析方法将一维水力学条件下的正向的质量浓度信息与逆向的位置信息进行解耦,构建了污染物排放时间、位置和源强解耦后的水力学模型。将优化后的水力学模型利用BAS算法进行模型仿真计算,发现BAS算法可以很好地实现源项信息的求解;通过不同断面的溯源计算以及与PSO算法进行比较,结果表明BAS算法收敛速度快,运算量小,但是步长具有衰减性,不管每一步计算得到的结果是否变得更优,步长总会衰减,但多次求取平均值后可以达到计算精度要求。本文论证了BAS算法在突发水污染溯源领域的可行性,拓宽了BAS算法的应用领域,但是对于复杂的水力学模型以及更高维问题的研究还有待深入。

参考文献:

[1] YAO Hong, YOU Zhen, LIU Bo. Economic estimation of

the losses caused by surface water pollution accidents in china from the perspective of water bodies' functions[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2016, 13(2):154-167.

[2] 褚俊英,周祖昊,王浩,等.流域综合治理的多维嵌套理论与技术体系[J].水资源保护,2019,35(1):1-5. (CHU Junying, ZHOU Zuhao, WANG Hao, et al. Study on multi-dimensional nested theory and technological system for comprehensive watershed management [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(1):1-5. (in Chinese))

[3] 孙杰,章卫胜,荆立,等.基于进化算法和水质模型的河口污染物溯源方法[J].科学技术与工程,2019,19(14):384-391. (SUN Jie, ZHANG Weisheng, JING Li, et al. Method of traceability of pollutants in estuary areas based on evolutionary algorithms and water quality model[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(14):384-391. (in Chinese))

[4] 蓝志峰,肖桂荣.基于流域要素空间关系的水污染溯源研究[J].水资源保护,2019,35(1):56-62. (LAN Zhifeng, XIAO Guirong. Water pollution traceability based on spatial relationship of basin elements [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(1):56-62. (in Chinese))

[5] 雷晓辉,权锦,王浩,等.跨流域调水工程突发水污染应急调控关键技术与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2017.

[6] 辛小康,韩小波,李建,等.基于遗传算法的水污染事故污染源识别模型[J].水电能源科学,2014,32(7):52-55. (XIN Xiaokang, HAN Xiaobo, LI Jian, et al. Pollutant source identification model of water pollution incident based on genetic algorithm [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(7):52-55. (in Chinese))

[7] BOANO F, REVELLI R, RIDOLFI L. Source identification in river pollution problems; a geostatistical approach[J]. Water Resources Research, 2005, 41(7):1-13.

[8] 曹宏桂,负卫国.基于PSO-DE算法的突发水域污染溯源研究[J].中国环境科学,2017,37(10):3807-3812. (CAO Honggui, YUN Weigu. Research of the abrupt waters pollution source based on optimization algorithm of PSO-DE [J]. China Environmental Science, 2017, 37(10):3807-3812. (in Chinese))

[9] 陈海洋,滕彦国,王金生,等.基于Bayesian-MCMC方法的水体污染识别反问题[J].湖南大学学报(自然科学版),2012,39(6):74-78. (CHEN Haiyang, TENG Yanguo, WANG Jinsheng, et al. Event source identification of water pollution based on Bayesian-MCMC [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2012, 39(6):74-78. (in Chinese))

[10] 姜继平,董英嘉,刘仁涛,等.基于河流示踪实验的Bayes污染溯源:算法参数、影响因素及频率法对比[J].中国环境科学,2017,37(10):3813-3825. (JIANG Jiping, DONG Fujia, LIU Rentao, et al. Applicability of Bayesian

- inference approach for pollution source identification of river chemical spills; a tracer experiment based analysis of algorithmic parameters, impacts and comparison with frequentist approaches [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(10): 3813-3825. (in Chinese))
- [11] WEI G, CHI Z, YU L, et al. Source identification of sudden contamination based on the parameter uncertainty analysis [J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2016, 18(6): 919-927.
- [12] NEUPAUER R M, WILSON J L. Adjoint-derived location and travel time probabilities for a multidimensional groundwater system [J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(6): 1657-1668.
- [13] 程伟平, 廖锡健. 基于逆向概率密度函数的一维污染源排放重构 [J]. *水动力学研究与进展: A 辑*, 2011, 26(4): 460-469. (CHENG Weiping, LIAO Xijian. Recovering the release history of contaminant based on backward probability density function for the one-dimensional convection diffusion equation [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2011, 26(4): 460-469. (in Chinese))
- [14] 王家彪, 雷晓辉, 廖卫红, 等. 基于耦合概率密度方法的河渠突发水污染溯源 [J]. *水利学报*, 2015, 46(11): 1280-1289. (WANG Jiabiao, LEI Xiaohui, LIAO Weihong, et al. Source identification for river sudden water contamination based on coupled probability density function method [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(11): 1280-1289. (in Chinese))
- [15] 杨海东. 河渠突发水污染追踪溯源理论与方法 [D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [16] THOMANN R V, MUELLER J A. *Principal of surface water quality modelling and control* [M]. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1987.
- [17] NEUPAUER R M, WILSON J L. Adjoint method for obtaining backward location and travel time probabilities of a conservative groundwater contaminant [J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(11): 3389-3398.
- [18] JIANG Xiangyuan, LI Shuai. BAS: beetle antennae search algorithm for optimization problems [J]. *International Journal of Robotics and Control*, 2018, 1(1): 1-5.
- [19] 王兴伟, 陈家军, 郑海亮. 南水北调中线京石段突发性水污染事故污染物运移扩散研究 [J]. *水资源保护*, 2015, 31(6): 103-108. (WANG Xingwei, CHEN Jiajun, ZHENG Hailiang. Research on pollutant migration and diffusion in sudden water pollution accident in Beijing-Shijiazhuang Section of Middle Route of South-to-North Water Transfer Project [J]. *Water Resources Protection*, 2015, 31(6): 103-108. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-10-22 编辑: 熊水斌)

(上接第 78 页)

- [38] 王霞, 王经顺, 张绪美, 等. 江苏省地级以上城市饮用水水源地环境状况调查、评估与管理对策研究 [J]. *环境科学与管理*, 2014, 39(9): 164-166. (WANG Xia, WANG Jingshun, ZHANG Xumei, et al. Environmental investigation, assessment and management strategies for centralized drinking water sources in Jiangsu Province [J]. *Environmental Science and Management*, 2014, 39(9): 164-166. (in Chinese))
- [39] 方国华, 刘羽, 黄显峰. 南京市固城湖饮用水源地保护措施对策 [J]. *水利经济*, 2014(3): 45-47. (FANG Guohua, LIU Yu, HUANG Xianfeng. Measures for protecting drinking water source of Gucheng Lake in Nanjing [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2014(3): 45-47. (in Chinese))
- [40] 高亚岳, 周俊, 陈志宁, 等. 太湖富营养化进程中沉水植被的演替及重建设想 [J]. *江苏环境科技*, 2008, 21(4): 21-24. (GAO Yayue, ZHOU Jun, CHEN Zhining, et al. Environmental investigation, assessment and management strategies for centralized drinking water Sources in Jiangsu Province [J]. *Jiangsu Environment Science and Technology*, 2008, 21(4): 21-24. (in Chinese))
- [41] 何尚卫. 重污染湖区综合整治后水环境效应研究 [D]. 苏州: 苏州科技学院, 2014.
- [42] 李爱权, 宋晓兰. 太湖富营养化进程及其综合整治对策研究 [J]. *环境科学与管理*, 2013, 38(8): 85-87. (LI Aiquan, SONG Xiaolan. Eutrophication status of Gehu Lake and comprehensive control countermeasures [J]. *Environmental Science and Management*, 2013, 38(8): 85-87. (in Chinese))
- [43] 赵晨, 王远, 谷学明, 等. 基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率 [J]. *生态学报*, 2013, 33(5): 1636-1644. (ZHAO Chen, WANG Yuan, GU Xueming, et al. Water use efficiency of Jiangsu Province based on the data envelopment analysis approach [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(5): 1636-1644. (in Chinese))
- [44] 张姗姗, 张磊, 张落成, 等. 苏南太湖流域污染企业集聚与水环境污染空间耦合关系 [J]. *地理科学*, 2018, 38(6): 954-962. (ZHANG Shanshan, ZHANG Lei, ZHANG Luocheng, et al. Coupling relationship between polluting industrial agglomeration and water environment pollution in southern Jiangsu of Taihu Lake Basin [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(6): 954-962. (in Chinese))
- [45] 简晓彬, 沈正平, 刘宁宁. 苏北与苏中、苏南经济发展差异的演变及成因探析 [J]. *经济问题探索*, 2007(2): 53-59. (JIAN Xiaobin, SHEN Zhengping, LIU Ningning. The discussion and analysis of the change reason of the area economy development differences between Su Zhou City's North, Center and South Area [J]. *Inquiry Into Economic Issues*, 2007(2): 53-59. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-02-13 编辑: 王 芳)