

A Groundwater Pollution Source Identification Method Based on the Simple Genetic Algorithm

Jinglin Li¹, Yuqiao Long^{1,2}, Chunyong Wu^{1,2}

¹Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing Jiangsu

²Nanjing R&D Tech Group Co. Ltd., Nanjing Jiangsu

Email: jlli@nhri.cn, yqlong@nhri.cn, cywu@nhri.cn

Received: Jan. 29th, 2017; accepted: Feb. 14th, 2017; published: Feb. 21st, 2017

Abstract

The simple genetic algorithm is applied to find the pollution source location in groundwater. Numerical test is used to find the influence of estimated pollution range on the time consuming, mean, and standard deviation of identification result. The bigger the estimated range is, the more time is consumed. A slight movement of the estimated source in the direction perpendicular to the major migrate direction leads to big bias between the calculated source location and the real location. The chance that optimization model falls into the local optimum location is growing in the major migration direction.

Keywords

Groundwater Pollution, Identification, Simple Genetic Algorithm

基于标准遗传算法的地下水污染源溯源方法

李景林¹, 龙玉桥^{1,2}, 吴春勇^{1,2}

¹南京水利科学研究所, 江苏 南京

²南京瑞迪建设科技有限公司, 江苏 南京

Email: jlli@nhri.cn, yqlong@nhri.cn, cywu@nhri.cn

收稿日期: 2017年1月29日; 录用日期: 2017年2月14日; 发布日期: 2017年2月21日

摘要

本文将标准遗传算法应用于确定一维均质含水层中污染源位置, 利用数值实验分析污染源预估域对溯源

计算时间、均值及方差的影响。研究发现,基于标准遗传算法的溯源方法可以在文中的理想算例中取得较好的溯源效果。溯源时间在整体上呈现溯源问题越复杂溯源时间越长的规律。沿污染物运移主方向上,污染溯位置的变化对溯源结果的影响小于垂直于污染物运移主方向上的影响,而溯源方法陷入局部最优的可能要大于在垂直于污染物运移主方向上陷入局部最优的可能。

关键词

地下水污染, 溯源, 标准遗传算法

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于地下水污染具有极强的隐蔽性,当发现污染时,往往不易确定污染物的来源,这为锁定污染肇事者,判定其责任大小和污染治理带来了巨大困难。据全国 118 座大城市浅层地下水调查结果,97.5%的城市受到不同程度的污染,其中 40%的城市受到严重污染[1]。2011 年,全国城市 55%的地下水呈现较差至极差的水质[2]。可是在面对严峻的地下水污染危机的同时,在我国人口较为密集、人类活动干扰大、工农业生产发达的平原地区,地下水正遭受着越来越严重的污染[3]。可见我国地下水污染治理工作任重道远,而治理地下水污染的先决条件和必要基础就是确定地下水污染源的位置及其排放历史。

地下水污染溯源(地下水污染源解析)是通过有限的观测数据,估计污染源的位置及污染物迁移转化的历史[4]。它主要包括追溯污染物排放历史、确定污染源位置、估计污染物排放量[5]。地下水污染溯源的研究有助于判别不同污染源或污染肇事者的责任大小,有助于确定污染治理成本在不同污染肇事者间的分配比例,也有助于制定和选择经济的污染治理策略与方法[6]。在当前我国地下水资源供需矛盾突出,地下水环境不断恶化的情况下,加强地下水污染溯源的有关研究对于保护地下水资源、防治地下水污染有着重要的实际意义。

溯源方法可分为地球化学足迹法和数学模拟法[7]。本研究关注的是数学模拟法,即通过概化实际问题并建立数学模型,从而反演出污染源的位置与排放量(排放历史过程)等信息,是一种典型的逆问题(不适定问题)。该类问题是地下水科学及相关学科的研究难点与热点。采用数学方法追溯地下水污染源的问题在国外有近 30 年的研究历史,而我国仅少量学者发表了相关研究成果[6] [8] [9] [10]。目前,研究人员多将注意集中在模拟优化算法之上,线性规划法和多元线性回归[11]、非线性规划法[12]、二次规划[4]、进步式遗传算法[13]、禁忌搜索-模拟退火算法[14]、粒子群算法[15]等,但较少讨论污染源预估域、渗流场等重要因素对溯源效果的影响。本文将标准遗传算法应用于确定一维均质含水层中污染源位置,利用数值实验分析污染源预估域对溯源计算时间、均值及方差的影响。

2. 方法

2.1. 地下水污染溯源的优化数学问题

模拟-优化方法将溯源问题转化成优化问题,即寻求污染源的位置、浓度等变量或它们的组合,使模拟模型的输出结果最接近观测数据。采用绝对误差的绝对值之和作为评价溯源结果的指标。目标函数可表示为:

$$f = \min \left(\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (|C_{Cal}^{i,t} - C_{Obs}^{i,t}|) \right), i = 1, 2, \dots, N, t = 1, 2, \dots, T \quad (1)$$

式中 $C_{Cal}^{i,t}$ 为第 t 个时刻观测点 i 的计算浓度, $C_{Obs}^{i,t}$ 为第 t 个时刻观测点 i 的观测浓度。 $C_{Cal}^{i,t}$ 是污染物运移模型计算得到的结果。将污染模运移模型的计算过程表示为 $F(\bullet)$, 则各时刻各观测点的计算值可表示为:

$$\begin{bmatrix} C_{Cal}^{1,1} & C_{Cal}^{2,1} & \cdots & C_{Cal}^{N,1} \\ C_{Cal}^{1,2} & C_{Cal}^{2,2} & \cdots & C_{Cal}^{N,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{Cal}^{1,T} & C_{Cal}^{2,T} & \cdots & C_{Cal}^{N,T} \end{bmatrix} = F(x, y, S, t), t = (1, 2, \dots, T) \quad (2)$$

式中 x, y, S 分别表示污染源的横坐标、纵坐标和污染源排放量。

2.2. 基于标准遗传算法的优化溯源模型结构

模拟优化模型采用嵌入式的模型结构, 即将污染物运移模拟模型嵌入到标准遗传算法中, 使它们在模拟优化模型中担负着个体适应度评价的重任, 而标准遗传算法则负责优化部分的工作, 包括决策变量编码(二进制编码时有解码操作)、产生各代群体、选择、交叉、变异、验证是否已达到终止进化代数等。

3. 数值算例

假定在 $1000 \text{ m} \times 2000 \text{ m}$ 的区域内, 有一水池原来贮存苯, 现用来存水, 水池位于 $(500 \text{ m}, 500 \text{ m})$ 位置上(图 1)。由于事故发生渗漏, 渗漏水进入水池之下的含水层中, 渗漏速度为 $1.93 \text{ m}^3/\text{年}$ 。由于苯的残留, 渗漏水仍含有一定量的苯, 浓度为 $12,950 \mu\text{g/L}$ 。含水层中的地下水沿 x 轴正方向流动, 水流平均实际速度为 0.235 m/d , 纵向弥散度为 12 m , 横向弥散度为 1.2 m , 含水层厚 1.0 m , 孔隙度为 0.35 。区域内的有 45 眼观测井, 每个观测井每 5 天观测一次, 各观测井均记录了自苯发生泄漏起 1 年内的各观测井中苯的浓度变化。

现假定水池的坐标位置 (x, y) 是未知量, 含水层参数、地下水流参数、观测数据均为已知量, 利用优化溯源方法求水池的坐标位置 (x, y) 。

4. 结果与讨论

4.1. 污染预估域对计算时间的影响

污染预估域范围越大, 溯源所需的计算时间越长。当预估域范围由 10 增大到 100 时, 计算时间整体呈增长趋势。曲线的波动受预估污染源位的影响。由于预估污染源位是随机生成的, 当预估污染源位距实际污染源位较近时, 优化过程会较快达到终止标准; 当预估污染源位距实际污染源位较远时, 优化过程会较慢达到终止标准, 相应的计算时间会增长, 因此曲线出现波动特征。当计算的次数足够多时, 不同预估域的计算会趋于稳定, 波动情况会减弱。两曲线在 100 米处均呈略下降趋势, 这种情况也是受波动影响。 y 曲线的波动幅度要大于 x 曲线。污染物是延 x 方向运移的, y 方向垂直于污染物运移方向。根据二维的解析公式, y 方向的浓度值相对于 x 方向要小得多。污染源在 y 方向上的微小移动, 使 y 方向的浓度值的变化程度远大于在 x 方向上的变化程度。因此预估污染源位在 y 方向的选取也较 x 方向上对计算时间有更大的影响(图 2)。

4.2. 污染源预估域的大小对溯源最优值与均值的影响

污染源预估域的大小对溯源最优值的影响不大, 但对溯源结果的平均值影响较大。当污染源搜索范

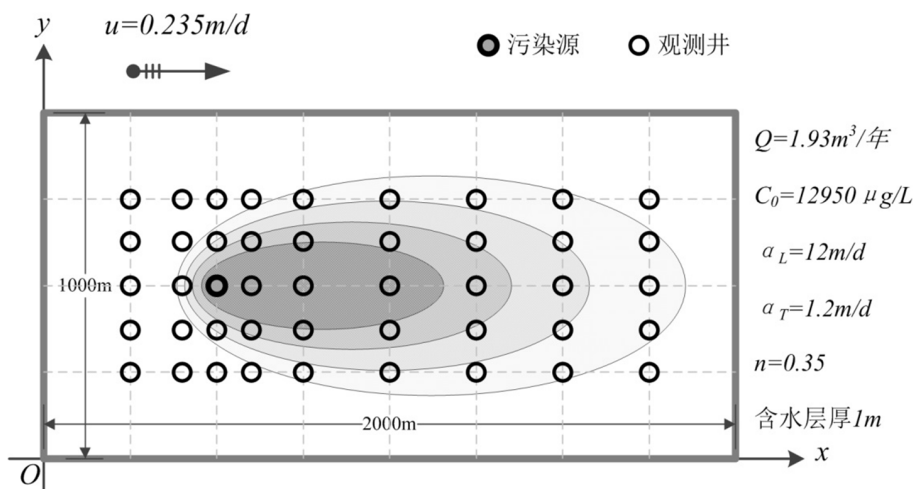


Figure 1. The modeling field situation of the numerical case
 图 1. 数值算例示意图

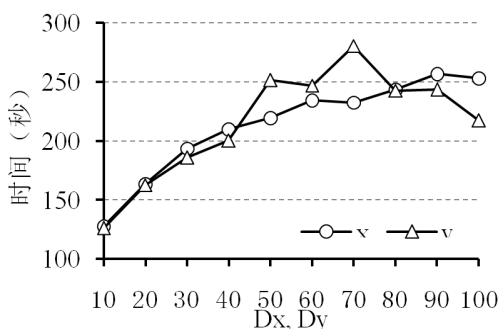


Figure 2. The relationship of the computation time cost and the potential contaminate scope
 图 2. 溯源计算时间与污染预估域的关系曲线

围延 x 或 y 方向由 10 米向 100 米变化时，溯源结果平均值的波动开始变大，而最优值保持在实际源位附近波动。

对比对应 x 和 y 方向的四条曲线，可以发现对应于 y 方向的曲线离实际源位较 x 方向曲线要近。污染源在 y 方向上的微小移动对溯源计算的影响要大于 x 方向上的移动，因此优化方法更易在 x 方向上陷入局部最优。优化方法本身就有陷入局部最优的可能，而在污染物在不同方向上的运移规律对局部最优是存在影响的，即延污染物运移主方向上，加大了陷入局部最优的可能，而在垂直于污染物运移主方向上削弱了陷入局部最优的可能(图 3)。

4.3. 污染源预估域的大小对溯源结果方差的影响

由图 4 可知各曲线的波动不大，但 y 方向上的相对误差和均值与方差都较 x 方向上较大。这也反映了 y 方向上位置的微小变化会让溯源结果发生较大变化。

5. 结果与讨论

(1) 基于标准遗传算法的溯源方法可以在文中的理想算例中取得较好的溯源效果。(2) 污染物若延 x 方向运移，y 方向垂直于污染物运移方向时，污染源在 y 方向上的位置变化对溯源结果的影响要大于在 x 方向上的位置变化对溯源结果的影响。(3) 溯源时间在整体上呈现溯源问题越复杂溯源时间越长的规律。

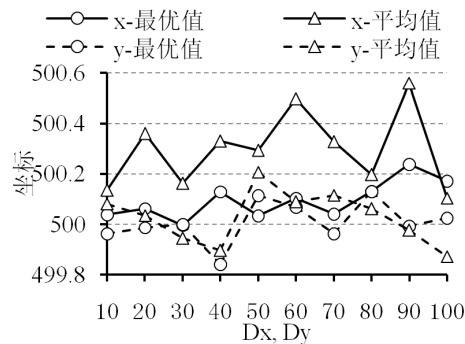


Figure 3. The relationship of the optimum and the mean

图 3. 溯源最优值与均值的关系曲线

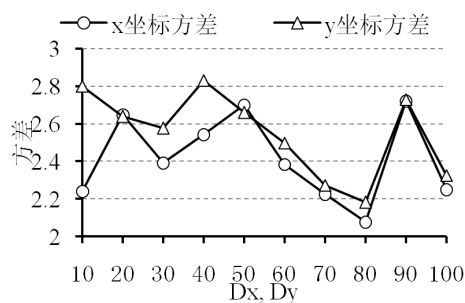


Figure 4. The curve of the variance

图 4. 溯源结果方差变化曲线

(4) 延污染物运移主方向上,溯源方法陷入局部最优的可能要大于在垂直于污染物运移主方向上陷入局部最优的可能。

资助项目

国家自然科学基金(51409161, 51509157); 江苏省科技计划项目(BK20140080); 水利部技术示范项目(编号 SF-201706)。

参考文献 (References)

- [1] 姜建军, 文冬光. 合理开发利用地下水缓解水资源紧缺状况[J]. 中国水利, 2005(13): 36-39.
- [2] 新浪网. 数据显示全国城市 55%地下水为较差至极差水质[EB/OL]. http://news.sina.com.cn/c/2013-02-22/001726323489.shtml?bsh_bid=195660861, 2013-02-23.
- [3] 薛禹群, 张幼宽. 地下水污染防治在我国水体污染控制与治理中的双重意义[J]. 环境科学学报, 2009, 29(3): 474-481.
- [4] Sun, A.-Y., Painter, S.L. and Wittmeyer, G.W. (2006) A Constrained Robust Least Squares Approach for Contaminant Source Release History Identification. *Water Resources Research*, **42**, W04414. <https://doi.org/10.1029/2005WR004312>
- [5] Zoi, D. and George, F.P. (2009) Optimal Search Strategy for the Definition of a DNAPL Source. *Journal of Hydrology*, **376**, 542-556. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.062>
- [6] Li, G.-S., Tan, Y.-J., Cheng, J., et al. (2006) Determining Magnitude of Groundwater Pollution Sources by Data Compatibility Analysis. *Inverse Problems in Science and Engineering*, **14**, 287-300. <https://doi.org/10.1080/17415970500485153>
- [7] Milnes, E. and Perrochet, P. (2007) Simultaneous Identification of a Single Pollution Point-Source Location and Contamination Time under Known Flow Field Conditions. *Advances in Water Resources*, **30**, 2439-2446.

<https://doi.org/10.1016/j.advwtres.2007.05.013>

- [8] 李功胜, 姚德, 马昱, 杨富贵. 一维溶质运移源(汇)项系数反演的迭代正则化算法[J]. 地球物理学报, 2008, 51(2): 582-588.
- [9] Long, Y.-Q., Li, W. and Huang, J. (2012) Advance of Optimization Methods for Identifying Groundwater Pollution Source Properties. *Applied Mechanics and Materials*, **178**, 603-608. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.178-181.603>
- [10] Long, Y., Wu, C. and Wang, J. (2014) The Influence of Estimated Pollution Range on the Groundwater Pollution Source Identification Method Based on the Simple Genetic Algorithm. *Applied Mechanics and Materials*, **587**, 836-841. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.587-589.836>
- [11] Gorelick, S.M., Evans, B. and Ramson, I. (1983) Identifying Sources of Groundwater Pollution: An Optimization Approach. *Water Resources Research*, **19**, 779-790. <https://doi.org/10.1029/WR019i003p00779>
- [12] Mahar, P.S. and Datta, B. (1997) Optimal Monitoring Network and Ground-Water Pollution Source Identification. *Journal of Water Resources Planning and Management*, **123**, 199-207. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1997\)123:4\(199\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1997)123:4(199))
- [13] Aral, M.M., Guan, J. and Maslia, M.L. (2001) Identification of Contaminant Source Location and Release History in Aquifers. *Journal of Hydrologic Engineering*, **6**, 225-234. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2001\)6:3\(225\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2001)6:3(225))
- [14] Yeh, H.D., Chang, T. and Lin, Y. (2007) Groundwater Contaminant Source Identification by a Hybrid Heuristic Approach. *Water Resources Research*, **43**, W09420. <https://doi.org/10.1029/2005WR004731>
- [15] Bharat, T.V., Sivapullaiah, P.V. and Allam, M.M. (2009) Swarm Intelligence Based Inverse Model for Characterization of Groundwater Contaminant Source. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **14**, 1-14.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aep@hanspub.org