

地下水污染物迁移可靠性分析的小生境混合遗传算法

苏 飞¹, 董增川¹, 陈敏建²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室; 江苏 南京 210098;

2. 南京水利科学研究院水文水资源研究所, 江苏 南京 210029)

摘要:在地下水污染物迁移问题中, 考虑水动力弥散系数及测量误差的不确定性因素对浓度估计可靠性的影响, 采用小生境混合遗传算法, 对地下水污染物迁移的可靠性进行探讨, 并在可靠性条件下进行污染浓度正反问题分析, 为地下水环境保护和调控提供更多的决策依据。分析结果表明, 小生境混合遗传算法在地下水污染物迁移问题的可靠性分析中具有可行性和有效性。

关键词:地下水污染; 污染物迁移; 小生境混合遗传算法; 可靠性分析

中图分类号: X523

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2006)03-0024-04

Reliability analysis of contaminant transportation in groundwater using niche-hybrid genetic algorithm//SU Fei¹, DONG Zeng-chuan¹, CHEN Min-jian² (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Department of Hydrology and Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Considering the influences of uncertain factors of hydrodynamic dispersion coefficient and measurement error on the reliability of contaminant concentration estimation, a discussion was made on the reliability of contaminant transportation in groundwater by use of the niche-hybrid genetic algorithm, and the direct and inverse analysis of contaminant concentration was also performed under the reliability condition, providing more information for decision-making in groundwater environmental protection and regulation. The result of study shows that the niche-hybrid genetic algorithm is feasible and effective for reliability analysis of contaminant transportation in groundwater.

Key words: groundwater pollution; contaminant transportation; niche-hybrid genetic algorithm; reliability analysis

地下水溶质运移问题的研究多以确定性运移模型为基础, 进行溶质浓度的分布估计以及利用观测结果进行水动力弥散参数反演计算, 较少涉及可靠性的评价分析。由于受众多随机因素的影响, 地下水溶质运移实质上是复杂的随机过程, 在很大程度上应该考虑含水层介质的非均质性和尺度效应带来的不确定性问题^[1]。可靠性分析始于 20 世纪 30 年代, 从设备维修到结构可靠性分析, 现已广泛应用于水资源工程风险和科学研究中, 而将可靠性评价分析应用于地下水问题是近年来才开展起来的^[2]。如以一阶可靠性方法分析地下水恒定流和无吸附的污染物迁移问题^[3]; 将可靠性分析方法推广到地下稳定流的二维有限元分析中, 并研究空间变异的影响, 以及对地下水的不确定性建立污染风险管理模型^[4-5]。总体上, 国外对地下水溶质运移问题的研究相对较多, 主要针对含水层参数空间变异性、结构

性, 应用可靠性分析中的矩法, 利用 Monte-Carlo 法和有限元法等进行可靠性分析^[6-7]。在我国, 无论是非均质性研究, 还是随机理论的应用与相应模型的建立, 对这些方面的研究在近年才开始, 研究基础相对薄弱, 处在理论研究阶段。如考虑导水系数参数的不同分布, 对水源地地下水资源评价进行可靠性分析^[8]; 考虑水动力弥散的不同分布形式, 建立相应的地下水污染溶质运移模型^[9]; 应用一次二阶矩法(FOSM)和 Monte-Carlo 法对地下水污染的风险概率进行预测计算, 并对各种参数的灵敏度进行估计, 指出计算方法的某些不足^[10]。本文针对上述研究中存在的一些问题, 如 FOSM 对有些问题的函数形式迭代不收敛等, 结合可靠性计算中的矩分析方法, 对地下水污染物迁移中存在的不确定性因素加以考虑, 采用遗传算法和小生境算法相结合, 以克服计算方法的不足, 合理地分析和控制地下水污染物浓度

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目(2001BA610A-01)

作者简介: 苏飞(1974—), 男, 内蒙古伊盟人, 博士研究生, 从事水资源可持续利用研究。E-mail: iefus@sohu.com

分布,为地下水环境评价的可靠性分析提供条件。在考虑可靠性的条件下,进行地下水污染物浓度的正反问题分析,以期对地下水环境保护和调控提供更多的依据。

1 可靠性分析中的小生境混合遗传算法

1.1 可靠性分析方法

对地下水溶质运移进行可靠性分析时,首先要定义功能函数 Z 。理论研究和工程实践表明^[11-12],对于荷载 L 和抗力 R ,功能函数取 $Z = L - R = g(x)$ 的形式能够给出精度较高的可靠性指标 β ,通常采用改进的一次二阶矩法(AFOSM)进行可靠性计算^[13-14]。通过在失效面(由 $Z = 0$ 的点组成的面) 上一个可能失效点 x^* , 利用 Taylor 展开法将 Z 线性化,当各统计变量相互独立时,用该失效点展开的二阶 Taylor 级数来近似表示 Z 的数学期望 $E(Z)$ 和方差 $\text{Var}(Z)$:

$$E(Z) = g(x^*) + \sum_{i=1}^n C_i(\bar{x}_i - x_i^*) = \sum_{i=1}^n C_i(\bar{x}_i - x_i^*) \tag{1}$$

$$\text{Var}(Z) = \sum_{i=1}^n C_i^2 \text{Var}(x_i) \tag{2}$$

$$\sigma_Z = \sum_{i=1}^n \alpha_i C_i \sigma_{x_i} \tag{3}$$

式中: α_i 为敏感系数, $\alpha_i = \frac{C_i \sigma_{x_i}}{\left[\sum_{i=1}^n (C_i \sigma_{x_i})^2 \right]^{1/2}}$, $C_i = \left. \frac{\partial g}{\partial x_i} \right|_{x^*}$ 。

可靠性指标 β 为

$$\beta = \frac{E(Z)}{\sigma_Z} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i(\bar{x}_i - x_i^*)}{\sum_{i=1}^n \alpha_i C_i \sigma_{x_i}} \tag{4}$$

从式(4)中,得到 n 个方程组,即

$$\sum_{i=1}^n C_i(\bar{x}_i - x_i^*) - \beta \sum_{i=1}^n \alpha_i C_i \sigma_{x_i} = 0 \tag{5}$$

$$\sum_{i=1}^n C_i(\bar{x}_i - x_i^* - \beta \alpha_i \sigma_{x_i}) = 0 \tag{6}$$

式(5)和式(6)成立的一个充分条件是对所有的 i : $\bar{x}_i - x_i^* - \beta \alpha_i \sigma_{x_i} = 0$ 都成立。则 $x_i^* = \bar{x}_i - \beta \alpha_i \sigma_{x_i}$, 由此 n 个方程再加上非线性回归方程 $g(x^*) = 0$ 就可以求得 $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$ 和 β 共 $n + 1$ 个未知数(通常利用迭代法求解)。

AFOSM 克服了系统必须为近似线性及均值附近展开的限制,且基本变量间相关程度不高、具有近

似正态分布时,对可靠性的估计影响不大。

对含水层参数不确定性的处理,是在一定的目标函数条件下分别求得各实测值的参数,得到水动力弥散参数的均值和标准差。对非线性模型,目标函数不同,得到的含水层参数也不相同。

由于构成失效面 $Z = g(x) = 0$ 的极值点众多,如何找出最有可能的失效点是求可靠性问题的关键所在。迭代法通常对具有复杂的非线性功能函数不能给出满意结果,尤其是功能函数的导数具有对数形式或具有病态性质,在迭代过程中产生的某些点,经常会出现一些使对数取负值或淹没真值等无意义的情况,使得迭代无法进行,因而转向寻求更为有效的求解方式。本文尝试使用小生境混合遗传算法来进行可靠性指标的直接计算。

1.2 小生境混合遗传算法处理及测试

遗传算法(GA)对要求解问题的目标函数要求不高,能够很好地适应各类具有连续或不连续目标的问题,并以其高度的非线性和全局性的搜索能力而广泛应用于函数拟合以及优化求解等领域中^[15]。然而,通常遗传算法的局部搜索能力不强,并且对具有多个最优解的优化和拟合问题难以找出更多的最优解,有时发生早熟收敛的现象。小生境混合遗传算法能够有效地克服以上缺点,这种算法的基本思想是:首先进行群体的遗传算法操作;然后依据海明距离划分小生境范围,对距离内适应度小的个体给以惩罚,实现小生境淘汰,保持群体的多样性;在各自的小生境范围内进行模拟退火操作,以增强个体的局部搜索能力,之后再转入群体遗传操作循环。

1.2.1 算法步骤

a. 对优化参数进行编码,随机产生 $P(t)$ 个初始群体,进化代数计数器初始化: $t = 0$ 。

b. 根据定义的适应度评价函数 $F(X)$,评价群体 $P(t)$ 的适应度,并记忆前 N_p 个适应度最好的个体。

c. 进行选择、交叉、变异的遗传操作,产生 $P_1(t)$ 群体。

d. 小生境淘汰运算:将当前已得到的 $P_1(t)$ 群体和第 b 步所记忆的 N_p 个优秀个体合并在一起,构成一个含有 $M = P_1(t) + N_p$ 个个体的新群体,按照式(7)求出新群体中每两个个体 X_i 和 X_j 之间的距离。

$$\|X_i - X_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^M (x_{ik} - x_{jk})^2} \tag{7}$$

($i = 1, 2, \dots, M - 1; j = i + 1, \dots, M$)

当 $\|X_i - X_j\| < L$ 时,比较个体 X_i 和 X_j 的适应度大小,并对其中适应度较低的个体处以罚函数:

$$F_{\min}(X_i, X_j) = C \tag{8}$$

式中: C 为惩罚因子。

e. 依据这 M 个个体的新适应度对个体进行降序排序, 记忆前 N_p 个优秀个体。

f. 模拟退火操作: 将现有的 N_p 个个体作为当前最优状态, 进行局部搜索的模拟退火操作, 更新已得到的 N_p 个最优解个体。

g. 终止条件判断: 以最优目标功能函数是否已经接近于零与进化代数计数器是否已达到设置的最大代数 $T_{\max}$, 二者之中满足其一即可; 否则, 进化代数 $t = t + 1$, 降序排列更新后 M 个群体的适应度, 选取前 $P(t)$ 个个体作为下一代的 $P(t + 1)$ 初始群体, 转入第 c 步。

h. 进行可靠性指标计算: 将当前最优个体作为最可能的失效点 x^* , 按照可靠性指标 β 所满足充分条件的非线性方程组, 进入 β 的遗传寻优计算。

1.2.2 算法测试

对上述建立的小生境混合遗传算法进行 Shubert 和 De Jong F2 函数^[16]的测试, 以保证该算法的可行性和有效性。

Shubert 函数有 760 个局部极小点、18 个全局最小点, 全局最优值为 -186.731 。采用小生境混合遗传算法求其中 6 个全局最优点, 目标函数值在 $[-186.7305, -186.7308]$ 范围内。

De Jong F2 函数是单峰二维病态函数, 只有一个全局最小点 $f(1, 1) = 0$, 一般算法难以找到此最优点, 采用小生境混合遗传算法运行几次, 基本上都可以得到满意的结果, 其中运行较好的结果为 $(x_1, x_2) = (0.9996, 0.9983)$, 函数值为 8.4×10^{-5} 。

经过验证, 小生境混合遗传算法均能找到较满意的全局最优解, 证实了其求解可靠性指标 β 的可行性。应该指出, 这种算法求得的可靠性指标是进行可靠性分析的充分条件(可以从式(6)看出)。

2 算例分析

选用文献[17]算例进行问题的可靠性扩展分析。某工厂沿河排放污染物质量浓度 $C_0 = 0.23 \text{ kg/m}^3$ 的废水, 地质上可概化为均质各向同性的半无限潜水含水层, 野外实测的弥散系数均值 $D_L = 6.83 \text{ m}^2/\text{d}$, 由地质资料推求得到地下水的平均流速 $\bar{v} = 0.34 \text{ m/d}$, 该工厂期望在地区规划期(3 年)内生产规模稳中有增, 环保部门在距离河流 0.5 km 处设有监测井, 要求保证污染物质量浓度不超标, 并提出整改措施。

2.1 质量浓度可靠性分析

对该问题可以应用相应的地下水一维溶质对流-弥散模型来描述^[17], 其函数表达式为

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x - \bar{v}t}{2\sqrt{D_L t}}\right) + \frac{C_0}{2} \exp\left(\frac{\bar{v}x}{D_L}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x + \bar{v}t}{2\sqrt{D_L t}}\right) \quad (9)$$

分析步骤: ①确定水动力弥散参数以及观测污染物质量浓度误差的分布形式, 进行显著性检验, 将其转换为近似正态分布, 以满足可靠性计算的要求; ②计算确定性模型和考虑参数随机变化在规划期内的污染物质量浓度, 应用评价函数进行可靠性指标的计算。

由于水动力弥散系数 D_L 受介质微观和中观结构、溶液的物化性质等众多随机因素的影响, 对实测的 D_L 作数据分布拟合检验, 接受形式为 $N(6.83, 0.87^2)$ 的正态分布(置信水平 $\alpha = 0.07$)。根据误差分析理论和实际应用^[18], 观测到的污染物质量浓度可以视为均方差为均值 5% 的近似正态分布, 要求规划期内污染物质量浓度不超过 0.04 kg/m^3 , 其分布形式相应为 $N(0.04, 0.002^2)$ 。

如果不考虑参数的随机影响, 在规划期内污染物质量浓度达到 0.0414 kg/m^3 , 必然超出要求。应用上述建立的可靠性指标计算方法, 评判功能函数 $Z = C(x, t) - C_S$ (C_S 为标准要求), 可靠性指标 $\beta = 0.454$, 在此情况下超标的可能性为 $\Phi(0.454) = 67.5\%$ 。如果要求污染物质量浓度不超过 0.045 kg/m^3 , 考虑可靠性条件则超标的可能性为 $\Phi(-0.732) = 23.3\%$ 。

2.2 问题反演分析

逆问题为: 如果在一系列可靠性条件下要求污染物质量浓度不超标, 工厂的排放标准应如何调整。

分析步骤: ①利用上述建立的算法和对应的约束方程, 以评价函数等于零为目标, 依据给定的可靠性指标进行相应的水动力参数的反演计算; ②应用控制模型对反演的污染物质量浓度进行计算, 并与排放的污染物质量浓度比较, 进行方案的设计与调整。

在已知道 β 的情况下, 搜索满足上述充分条件的非线性方程组相对应的失效点 x^* , 以评判功能函数 $Z = C(x, t) - C_S = g(X)$ 为零的 $C(x, t)$, 代入对应的描述控制方程中, 可以反演出 C_0 , 与排放的污染物质量浓度 0.23 kg/m^3 相比较作为调整依据。方案调整结果见表 1。

由表 1 可以看出, 在考虑各种可靠性要求的条件下, 对调整方案的结果也不相同。由上述分析知, 如果不考虑随机影响, 在规划期内污染物质量浓度不超过 0.040 kg/m^3 的情况下只有削减排污量的调整方案。

表 1 可靠性控制方案对比

可靠度/%	β	$C(x,t)/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$C_0/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	调整方案
95	1.645	0.051	0.261	P_1
90	1.282	0.055	0.232	P_1 或 P_2
80	0.842	0.041	0.247	P_1
60	0.253	0.047	0.223	P_2 或 P_3
50	0	0.040	0.222	P_2 或 P_3
30	-0.524	0.038	0.208	P_3
10	-1.282	0.034	0.183	P_3

注： P_1 表示削减排污量， P_2 表示考虑维持现状； P_3 表示可适当扩大生产能力。

3 结 语

本文将可靠性分析方法结合遗传算法应用于地下水污染物迁移问题中，对污染物质量浓度超标估计的结果进行了可靠性评价分析。

a. 在考虑可靠性的条件下，对地下水环境有要求的污染物迁移的浓度估计问题，并不随可靠性的大(小)而相应地增(减)，从表 1 中可以看出具有非线性特点，总体上呈现正相关的特性。实例中以规划期内污染物质量浓度不超过 0.040 kg/m^3 的标准考虑，可靠性为 73.5%。

b. 将小生境混合遗传算法应用于可靠性分析，克服了 AFOSM 针对导数具有对数形式以及病态性的功能函数等无法进行迭代计算的缺点，经过测试及本次计算证实了本文算法的可行性和有效性。

c. 经试算表明，水动力弥散参数的分布形式总体上在均值附近一定范围内对可靠性估计的结果影响不大，但在分布的极值处可靠性出现大的变动。

d. 在地下水环境评价中，考虑随机因素的影响，既可以为评价提供更多的指标，同时可靠性分析也为水环境污染的经济风险分析提供参考依据。

各种随机因子对地下水溶质运移问题的影响是一个比较复杂的综合过程，其运动空间是动态随机场。对时空上具有不同分布形式的随机变量进行随机性和结构性分析，仍需做大量的基础工作，以便能够更切合实际地反映可靠性分析在地下水问题中的作用。

参考文献：

[1] 薛禹群, 吴吉春. 面临 21 世纪的中国地下水模拟问题[J]. 水文地质工程地质, 1999(5): 1-3.

[2] 王栋, 朱元生. 风险分析在水系统中的应用研究进展及其展望[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2002, 30(2): 71-77.

[3] SITAR N, CAWLFIELD J D, KIUREGHIAN A D. First order reliability approach to stochastic analysis of subsurface flow and contaminant transport[J]. Water Resour Res, 1987, 23(5): 794-

804.

[4] DETTINGER M D, WILSON J L. First order analysis of uncertainty in numerical models of groundwater flow 1: mathematical development[J]. Water Resour Res, 1981, 17(1): 149-161.

[5] HOBBS B F, Von PATTERSON C, MACIEJOWSKI M E, et al. Risk analysis of aquifer contamination by brine[J]. J Water Resour Plan Mgmt, 1988, 114(6): 667-685.

[6] LaVENUE M, ANDREWS R W, RAMARAO B S. Groundwater travel time uncertainty analysis using sensitivity derivatives[J]. Water Resour Res, 1989, 25(7): 1551-1566.

[7] JANG Y S, SITAR N, KIUREGHIAN A D. Reliability analysis of contaminant transport in saturated porous media[J]. Water Resour Res, 1994, 30(8): 2435-2448.

[8] 束龙仓, 朱元生, 孙庆义, 等. 地下水资源评价结果的可靠性探讨[J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 21-24.

[9] 王超, 汪德. 地下水系统中污染物变系数动力迁移模型解[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1996, 11(4): 475-484.

[10] 蔡树英, 杨金忠. 地下水污染风险分析的初步研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(1): 6-10.

[11] 陈玲俐, 李杰. 城市供水管网系统抗震功能可靠度分析[J]. 工程力学, 2004, 21(4): 45-50.

[12] 胡德秀, 周孝德. 均值一次二阶矩法在水质非突发性风险分析中的应用[J]. 西北水资源与水工程, 2003, 14(1): 18-20.

[13] 闫强刚, 戴建国. 粘性土中锚杆板桩墙锚杆抗拉力的可靠度分析[J]. 勘察科学技术, 1999(3): 14-18.

[14] 谭晓慧. 边坡稳定可靠度分析方法的探讨[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2001, 24(6): 40-44.

[15] 金菊良, 魏一鸣. 层次分析法在水环境系统工程中的应用[J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 467-472.

[16] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 74-76.

[17] 陈崇希, 李国敏. 地下水溶质运移理论及模型[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 42-45.

[18] 郭建青, 李云峰, 王洪胜. 泰斯公式性态分析与误差估计方法[J]. 煤田地质与勘探, 1999(4): 38-42.

(收稿日期: 2005-07-04 编辑: 高建群)

