

SCE 优化算法在地下水纳污能力计算中的应用

——以北京西郊地区为例

王新娟¹, 李阳², 孙颖¹, 李志萍¹

(1. 北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195; 2. 中地华安地质勘查有限公司, 北京 100083)

摘要: 在已建城近郊区地下水流模型的基础上, 通过对模型概化梳理建立水源三厂地区溶质运移模型。采用 SCE 优化算法与溶质运移模型相耦合, 计算一定时期内水源三厂区域可承纳的典型污染物最大允许排放量。经模拟计算, 20 年内不使水源三厂水质超标情况下, 水源三厂保护区内, 田村北、西冉村、北坞村东垃圾填埋场的最大 NO_3^- (以 N 计) 和 Cl^- 离子年排放量分别为: NO_3^- (以 N 计) 浓度, 北坞村东 18.59 t/a、田村北 42.29 t/a、西冉村 21.45 t/a; Cl^- 浓度, 北坞村东 235.66 t/a、田村北 441.13 t/a、西冉村 290.13 t/a。计算结果为水源地污染预警预报系统的建立及其水源地的保护提供科学依据。

关键词: SCE 算法; 溶质模型; 环境容量; 典型污染物

中图分类号: X505

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)05-0228-05

Application of SCE algorithm in calculation of environmental carrying capacity groundwater

WANG Xinjuan¹, LI Yang², SUN Ying¹, LI Zhiping¹

(1. Beijing Institute Of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing 100195 China;

2. Limited Company Of Huanan Geological Exploration, Beijing 100083 China)

Abstract: On the basis of groundwater flow model in the suburbs, the paper built the solute transport model of the third plant of water source in the western suburbs by generalizing the model. It calculated the maximum allowable emissions of the acceptable typical pollutants within a certain period by using the couple of SCE algorithm with the solute transport model. The result indicated that under the circumstance of water quality being no more than the class III water standard within twenty years, the maximum annual emissions of NO_3^- and Cl^- of landfills in the north of Tiancun, Xirancun, and the east of Beiwucun in the protected area of the third plant of water source are as follows, the density of NO_3^- , the east of Beiwucun is 18.59t/a, the north of Tiancun is 42.29t/a, Xirancun is 21.45t/a; and the density of Cl^- , the east of Beiwucun is 235.66t/a, the north of Tiancun is 441.13t/a, Xirancun is 290.13t/a. The result can provide the basis for the establishment of water pollution early-warning system and the protection of water source.

Key words: SCE algorithm; solute transport model; environmental capacity; typical pollutant

地下水污染问题是环境污染中较为严重的问题, 长期以来在国内未得到重视, 近年来, 随着社会的发展, 人们生活水平的提高加上污染的日益严重, 逐渐引起了大家的注意。另外, 地下水的污染由于其隐蔽性、复杂性和难以恢复的特点, 一旦遭受污染, 其恢复和净化的过程是漫长的, 而且处理技术难度大, 治理费用昂贵^[1-3], 所以要在经济快速发展的

同时做好水资源保护, 一方面要合理规划使用水资源, 另一方面则必须充分考虑地下水本身的防护能力即地下水环境容量。近年来地下水环境容量作为水环境容量的一个重要组成部分, 越来越受到重视, 地下水环境容量的确定将为地下水污染防治、地下水污染总量控制提供重要依据, 为地下水资源保护措施提出提供科学依据^[4-9]。

收稿日期: 2014-03-27; 修回日期: 2014-05-29

基金项目: 北京市科技计划项目 (D07050601510000)

作者简介: 王新娟 (1973-), 女, 陕西长安人, 博士, 高级工程师, 主要从事地下水资源和水环境影响评价工作。

国外将数学模型应用于地下水水质模拟的研究是从20世纪60年代开始的,研究人员首先进行了水动力弥散理论的研究。国内的研究工作是从20世纪80年代开始的^[10]。目前,国内外对地下水水质模拟的研究已有相当水平,相应的数学模型也日趋成熟,并且随着新的试验方法与测试手段的使用以及计算机科学的发展,使得获得的参数更加精确,数据量更大,促使地下水数值模拟的研究向新的广度和深度发展。而且一切能够提高溶质模型的有效性和精确程度的方法和手段也会不断被研究,包括参数的识别优化,局部区块的细化,过程的优化控制以及计算技术的发展^[11]。处理最优化问题目前包括一些精确算法及部分智能算法,精确算法包括线性规划、动态规划、整数规划等,算法计算复杂,适于求解规模较小的问题。智能算法主要包括模拟退火(SimuLated AnneLing)、遗传算法(Genetic ALgorithms)、禁忌搜索算法(Tabu Search)、蚁群算法(Ant CoLony ALgorithm)和神经网络方法(NeuraL Networks)以及一些混合算法^[12-14]。

利用SEC优化算法和地下水流和溶质运移模型相结合,进行地下水资源管理的最优化控制和水污染控制,是目前解决地下水管理和污染控制的有效方法。优化算法可以对开采方案 and 不同污染源污染排放量进行优化选择,为水流模型提供不同源汇项,水流模型和溶质运移模型可以进行不同方案 and 不同条件的模拟预测,根据预测结果确定优化选择是否达到最佳目标。

1 SCE 优化算法简介

SCE优化算法是1992年Qingyun Duan等在求解概念性降雨径流模型参数自动率定优化问题(QINGYUN DUAN,1992)时,针对问题的多线性、多极值、没有具体函数表达式、区间型约束等特点,提出了SCE(Shuffled Complex Evolution)算法。SCE算法结合了单纯形法、随机搜索和遗传算法中生物进化的思想等方法的优点,可以有效快速的搜索全局最优解。

SCE算法的主要特征是,采用遗传算法中生物竞争进化的思想,并通过对各个复合型的定期洗牌重组,来确保每个复合型获得的信息能在整个问题空间中得到共享,从而使算法快速收敛于全局最优解的同时,避免陷入局部最优并避免早熟现象的出现。相对于其他智能优化算法,SCE算法更有利于求解复杂、非线性、不可导、非凸的高维优化问题。

研究结果表明,相对于遗传算法和单纯形算法,SCE优化效果最佳,收敛速度较快,稳定性好,能一致、高效地收敛到全局最优解,特别是对于高维实际问题更能体现算法的稳健性^[15-17]。

2 应用实例

2.1 研究区概况

研究区位于永定河冲洪积扇中上部,主要分布了永定河冲洪积扇的第四系松散堆积物。含水层由永定河冲洪积砂、卵石、含砾砂及砂组成。含水层主要是接受大气降水、河谷潜流、山前侧向径流、河渠、农业灌溉及人工回灌的入渗补给。地下水补给条件良好,是冲洪积扇中下游和冲洪积平原地下水的补给区。

研究区分布有北京市重要的地下水源,拥有储量丰富且水质优良的地下水资源,目前市第三水厂、石景山水厂、首钢自备井等水源均位于西郊地区,地下水供水规模为 $53.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,是北京市主要的供水水源地^[10]。长期以来,快速的城市发展导致过量开采地下水;地下水位持续下降、地下水水质遭到了不同程度的污染,资源型缺水和水质型缺水加剧了本区用水紧张形势。

西郊地区的主要污染源有生活、工业和垃圾填埋场的渗滤污染,生活和工业污染主要通过污水管网渗漏,垃圾填埋场污染主要通过雨水补给地下过程的渗入。

2.2 地下水溶质运移模型的建立

2.2.1 模型范围的确定 首先,以在北京市城近郊区范围建立地下水流数值模型为基础建立溶质运移模型。通过对研究区地质、水文地质条件分析,将水流模型概化为模非均质各向同性、四层结构、三维空间的非稳定地下水流。在水文地质概念模型基础上,形成描述研究区地下水流动的数学模型,运用地下水模型软件Visual Modflow建立模拟区地下水流数值模型,通过流场和典型孔水位过程线的拟合,识别水文地质条件和参数,对模拟区地下水均衡进行分析,进行模型的识别和验证。

在研究区地下水流模型的基础上,利用质点反向追踪技术,研究水源地的补给范围。确定地下水溶质运移模型范围,在捕获带范围内进行污染源调查,再对调查所得的固体废弃物填埋场进行正向追踪,判断固体废弃物填埋场对水源三厂的影响以及相互之间的关系。

通过指点追踪,得到水力捕获带范围,如图1,

确定溶质模型范围,面积为 84.08 km²。

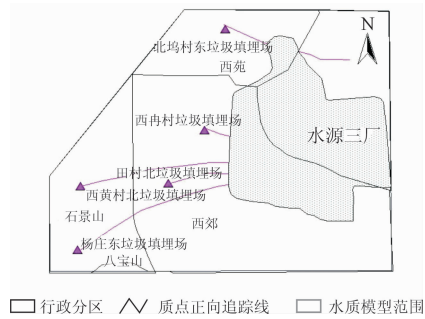


图1 质点反向追踪轨迹与水质模型范围

2.2.2 地下水溶质运移模型的建立 在简化的水流模型的基础上,采用 MT3DMS 程序建立溶质运移模型。MT3DMS 不但可以同时模拟地下水中多种污染物组份的物理迁移过程(包括对流、弥散、吸附等),而且可以(或结合其它软件如 RT3D)模拟组份在运移过程中发生的简单(或复杂)生物和化学反应。

模型采用 2008 年 6 月的污染物浓度数据作为初始浓度数据。潜水含水层自由水面为系统的上边界,通过该边界,潜水与环境发生垂向上的溶质交换,如接受污染物入渗补给等。地下水中污染物主要来源为垃圾淋滤液的入渗、城市管网渗漏;主要排泄方式为随着地下水流动流出,另外假定流入研究区的地下水污染物浓度均为零。

根据模型实际情况,可采用含有对流、弥散和源汇项、一级动力学衰减作用的溶质运移微分方程的定解问题表示:

$$\left\{\begin{array}{l} R \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i C) + \frac{q_s}{n} C_s - \lambda C \\ x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \\ C(x, y, z, t) |_{t=0} = C_0(x, y, z) \\ x, y, z \in \Omega, t \geq 0 \\ C(x, y, z, t) |_{\Gamma_1} = C_1(x, y, z) \\ x, y, z \in \Gamma_1, t \geq 0 \\ -D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \Big|_{\Gamma_2} = f_i(x, y, z) \\ x, y, z \in \Gamma_2, t \geq 0 \end{array}\right. \quad (1)$$

式中: Ω 为渗流区域; C 为污染组分浓度,mg/L; u_i 为三个方向下水实际流速,m/d; D_{ij} 为水动力弥散张量的 9 个分量; R 为阻滞因子,其值常大于 1; C_0 为污染组分的初始浓度,mg/L; Γ_1 为一类边界; C_1 为一类浓度边界值,即在该边界上浓度值已知,mg/L; Γ_2 为二类边界; f_i 为二类边界值,即通过该

边界的溶质通量已知,mg/m²; q_s 为源汇项单位流量; C_s 为源汇项溶质浓度; λ 为一级反应系数。

2.2.3 源汇项处理

(1)面状污染源。研究区内主要的面状污染源为城市管网的渗漏,以 2005 年两区城市污水管网渗漏量计算,渗漏量按污水排放量的 4% 计算,计算城市管网的渗漏强度,以面状强度带入模型计算。

表 1 城市管网渗漏量计算 km², 万 t/a, %, m/d

分区	区面积 A	2005 年污水排放量 t	渗漏比例	管网渗漏强度 M
海淀	426	19259	4.00%	4.95E-05
石景山	116.6	714.3	4.00%	6.73E-06

分区	入渗强度	污水浓度 C	入渗浓度 CI
海淀	4.06E-04	NO ₃ ⁻ - N	0.817
	4.06E-04	Cl ⁻	17.91
石景山	3.63E-04	NO ₃ ⁻ - N	0.124
	3.63E-04	Cl ⁻	2.713

(2)点状污染源的處理。模型中固体废弃物填埋场污染物通过淋滤方式污染地下水,淋滤液渗滤强度控制为 100 m³/d。据以往调查成果,垃圾场淋滤液的化学成分极为复杂,既有有机污染组分,又有无机污染组分,此外还有一些微量重金属污染组分,表现出很强的综合污染特征;垃圾场的淋滤液成分和浓度受垃圾种类的影响。生活垃圾 NH₄⁺ 含量为 2 720 mg/l,NO₂⁻-N 含量为 0.00304 mg/l;建筑垃圾淋滤液中 NH₄⁺ 含量为 1.4~4 mg/L,NO₂⁻-N 含量为 5.78~13.69 mg/L,都已超过地下水Ⅲ标准。

2.2.4 水文地质参数 溶质模型所用水文地质参数根据以往的研究经验确定,纵向弥散度为 30,横向弥散度为 6,孔隙度为 0.3。另外由于研究区内主要是颗粒粗大的砂卵砾石含水层,渗透系数大,NO₃⁻ 的吸附可忽略,衰减系数为一级反应动力学系数,参考值为 4.32×10⁻⁵/d,Cl⁻ 的吸附与衰减均可忽略。

2.3 可承纳的典型污染物最大控制总量

为了分析污染源对水源三厂水质的影响,并且计算三厂水质保持一定目标浓度条件下各污染源所允许的最大排污量。需对溶质运移模型进行多方案试算,结合优化算法最终得到在三厂水质保持一定条件下污染源所允许的最大排污总量。

研究区存在的污染源主要表现出两种特征,即点状与面状污染。为了计算三厂水质保持一定条件下各污染源所允许的最大排污量,首先假定面状形

式的污染物排放程度稳定,仅优化固体废弃物填埋场的污染物排放量。根据质点追踪情况,仅考虑对地下水威胁程度较大的田村北、北坞村东、西冉村固体废弃物填埋场。

2.3.1 优化方法 本次研究区最大可容纳污染物量计算以 SCE 算法和溶质模型相耦合进行计算。

本次 SCE 算法的具体步骤如下:
(1) 初始化。共选取参与进化的复合型 40 个和每个复合型包含的顶点数目为 5,计算样本点数目 $s = 40 * 5$ 。

(2) 产生样本点。在可行域内随机产生 200 个样本点,分别计算每一点 x 的适应度。

(3) 样本点排序。把生成的 200 个样本点按适应度值升序排列。

(4) 划分复合型群体。将 200 个样本点划分为 40 个复合型, $A^1 \cdots A^K, k = 1, 2 \cdots 40$ 。复合型按照如下标准划分,按照排序第一个复合型包含 $40 * (k - 1) + 1, k = 1, 2 \cdots 5$ 位置处的样本点,第二个复合型包含 $40 * (k - 1) + 2, k = 1, 2 \cdots 5$ 位置处的样本点。以此类推。

(5) 复合型进化。按复合型进化算法 (CCE) 算法分别进化各个复合型。

(6) 复合型混合。把进化后的每个复合型的的所有顶点组合成新的点集,再次按适应度值排列。

(7) 收敛性判断。如果满足收敛条件或者累计循环次数达到总循环次数,终止循环;否则返回步骤 4。若累计循环次数达到总循环次数,但未得到优化结果,终止循环后提示用户调整参数重新进行计算。具体流程图如图 2。

本实例中设定 $q = 3, a = 5, b = 5$, 由于优化对象有 3 个,在每一次反射、收缩及突变操作时,随机选择其中一个对象作为进化对象,而保持其他两个不变。这样既方便于算法的编码实现又能保证算法有效的寻求全局最优解。

2.3.2 优化方案 溶质模型应力期为 20 a,因此,在 20 a 内不使水源三厂水质超标情况下,本次优化分析即为各污染源所允许的总的最大排污量。标准即《地下水质量标准》GB/T14848 - 93 中所规定的关于 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 及 Cl^- 离子的 III 类水标准,即 $\text{NO}_3^- - \text{N} \leq 20 \text{ mg/L}, \text{Cl}^- \leq 250 \text{ mg/L}$ 。判定目标为水源三厂范围内任意点均不超标,最终根据 SCE 优化算法与 MT3DMS 程序包耦合程序计算得出 20 年内在假设各固体废弃物填埋场淋滤液渗滤量为 $100 \text{ m}^3/\text{d}$ 情况下,垃圾填埋场总的最大临界排放浓度。根据

SCE 算法特点,进化过程采取总量控制原则,按照 SCE 算法的进化准则改变各污染源的排放浓度,逐步得到各污染源总的排放浓度的最大值。污染点总的最大临界排放浓度进化过程如图 3 和图 4,各污染点污染物排放优化结果如表 2。

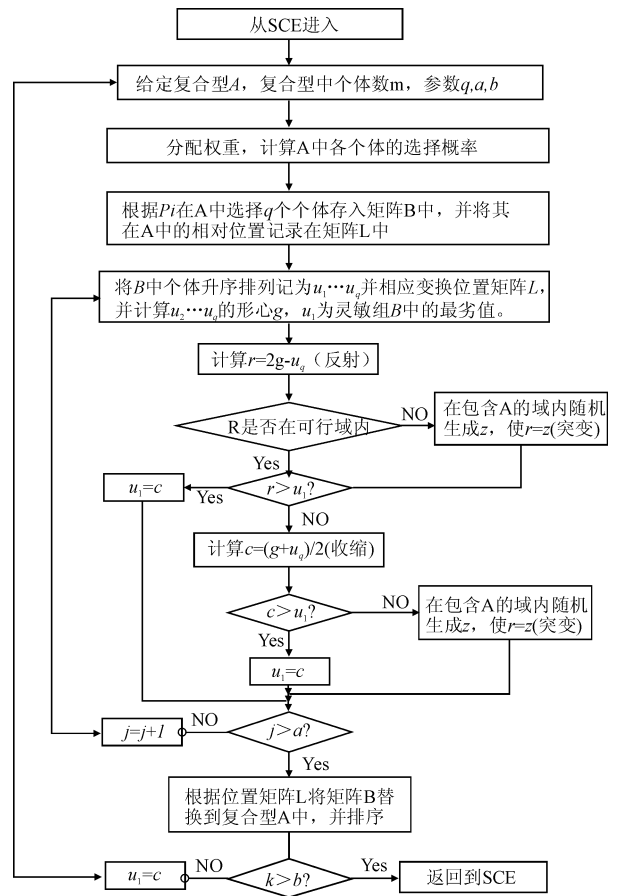


图 2 SCE 算法复合型进化流程图

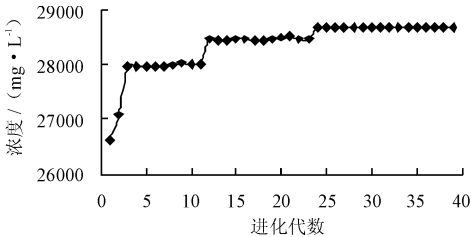


图 3 污染源 Cl^- 总排放量进化过程图

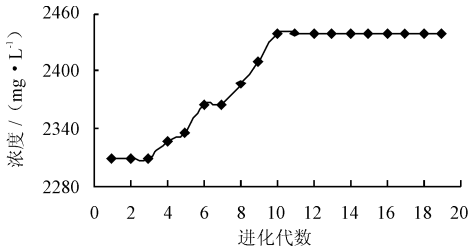


图 4 污染源 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 总排放量进化过程图

表 2 SCE 算法各污染源优化结果概况					mg/L, t/a
污染源	NO ₃ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	Cl ⁻ 临界	Cl ⁻ 最大	
名称	临界浓度	最大排放量	浓度	排放量	
北坞村东	509.41	18.59	6456.36	235.66	
田村北	1164.23	42.29	12085.77	441.13	
西冉村	587.64	21.45	7400.72	270.13	

根据表 2 里各污染源排放组合代入模型中,经模拟计算,水源三厂保护区内,最大的 NO₃⁻ (以 N 计)浓度为 19.99 mg/L,Cl⁻ 离子最大浓度为 249.13 mg/l。接近于三类水标准,说明 SCE 算法得到的污染物排放组合能够满足要求。

3 结 语

(1)北京西郊地区位于永定河冲洪积扇中上部地区,作为地下水补给区,富水条件好,分布有水源三厂和区县水厂,但是其含水层颗粒较粗,防污性能差,地下水极易遭受污染。因此,应对其进行防污控制,控制污染排放量。

(2)通过优化分析和模拟计算,20 年内不使水源三厂水质超标情况下,西郊地区各垃圾填埋场的最大 NO₃⁻ (以 N 计)和 Cl⁻ 离子年排放量分别为: NO₃⁻ (以 N 计)浓度,北坞村东垃圾填埋场 NO₃⁻ -N 排放量为 18.59 t/a ,Cl⁻ 为 235.66 t/a;田村北垃圾填埋场 NO₃⁻-N 排放量为 42.29 t/a ,Cl⁻ 为 441.13 t/a;西冉村垃圾填埋场 NO₃⁻-N 排放量为 21.45 t/a ,Cl⁻ 为 270.13 t/a。建议在最大容许排放量、地下水溶质模型和地下水水环境监测的基础上建立地下水预警预报系统,为地下水保护提供服务。

参考文献:

[1] 杨 辉,郭旭晶,陈 刚. 垃圾渗滤液溶质运移的机理及数学模型[J]. 工业安全与环保,2009,35(1):33-35.

[2] 杨金忠,等. 多孔介质中水分及溶质运移的随机理论[M]. 北京:科学出版社,2000.

[3] 刘长礼,张 云,张凤娥,等. 北京某垃圾处置场对地下水的污染[J]. 地质通报, 2003,22(7): 531-535.

[4] 孙清元,刘承国,冯春涛. 北京市地下水资源承载力评价及其开发利用对策研究[J]. 中国国土资源经济,2007, 20(9):21-24.

[5] 李蜀庆,李谢玲,伍溢春,等. 我国水环境容量研究状况及其展望[J]. 高等建筑教育,2007 ,16(3):58-61.

[6] 刘艳梅. 大理市西洱河环境容量测算初探[J]. 环境科学导刊,2007 ,26(2):21-23.

[7] 赵常兵,陈 萍,赵霞则,等. 溶质运移理论的发展[J]. 水利科技与经济,2006, 12(8):502-504.

[8] 王翊虹,赵勇胜. 北京北天堂地区城市垃圾填埋对地下水的污染[J]. 水文地质工程地质, 2002,29(6): 45-47+63.

[9] 王 俭,孙铁珩,李培军,等. 环境承载力研究进展[J]. 应用生态学报, 2005,16(4):768-772.

[10] 薛红琴. 地下水溶质运移模型应用研究现状与发展[J]. 勘察科学技术,2008(6):17-22.

[11] Zheng Chun miao. Recent Developments and Future Directions for MT3DMS and Related Transport Codes [J]. Groundwater ,2009,47(5):620-625.

[12] 姚磊华. 用改进的遗传算法和高斯牛顿法联合反演三维地下水流模型参数[J]. 计算物理,2005,22(4):311-318.

[13] 孔祥龙,朱国荣,江思珉. 应用改进并行遗传算法反求水文地质参数研究[J]. 高校地质学报, 2008,14(1): 126-132.

[14] Vrugt J A, Gupta H V, Bouten W, et al. A Shuffled Complex Evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters [J]. Water Resources Research, 2003, 39(8):1642-1659.

[15] 李向阳,程春田,武新宇,等. 水文模型模糊多目标 SCE-UA 参数优选方法研究[J] 中国工程科学, 2007,9(3):52-57.

[16] 马海波,董增川,张文明,等. SCE-UA 算法在 TOPMODEL 参数优化中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版) 2006,34(4):361-365.

[17] 徐冬梅,邱 林,王文川. SCE-UA 算法有效估计马斯京根模型参数[J]. 人民黄河 ,2008,30(11):31-32+35.