

混合智能算法在引水冲污方案优选中的应用

林高松^{1,2}, 李适宇², 陈璇²

(1. 深圳市环境科学研究所, 广东 深圳 518001; 2. 中山大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510275)

摘要 :考虑水质、经济和生态环境影响等因素,建立佛山水道的引水规划优化模型。利用河网水环境数学模型模拟多组引水冲污方案的水质,将输入输出数据作为样本用于人工训练神经网络,将训练好的网络嵌入遗传算法,形成混合智能算法,求解引水规划优化模型。结果表明,混合智能算法能够自动求出不同引水流量下的最优方案,精度较高,无需人工试算,运算速度快,不必对遗传算法与河网模型进行接口处理,具有普遍适用性,为求解耦合复杂模拟模型的优化问题提供了一种理想的工具。

关键词 :人工神经网络;遗传算法;引水冲污;优化;感潮河网

中图分类号:X143 文献标识码:A 文章编号:1004-693X(2009)04-0031-06

Application of a hybrid intelligent algorithm in scheme optimization of water diversion to flush out pollutants

LIN Gao-song^{1,2}, LI Shi-yu², CHEN Jing-xuan²

(1. Shenzhen Institute of Environmental Science, Shenzhen 518001, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract :Taking into account factors including water quality, economy and environmental impact, an optimal water diversion programming model was developed for the Foshan Channel. A river network water environment simulation model was utilized to predict the water quality of several water diversion schemes, and the input/output data were used as samples for training an artificial neural network (ANN). A hybrid intelligent algorithm (HIA) coupling a genetic algorithm (GA) with the trained ANN was employed to solve the optimal water diversion programming model. The results showed that the HIA can automatically find the optimal water diversion scheme for different quantities of diverted water with high accuracy and without trial periods. Furthermore, the HIA ran quickly and did not need to couple the GA with the river network simulation model, which is a universal algorithm and provides an ideal tool for solving optimal problems linked with a complicated numerical simulation model.

Key words :artificial neural network; genetic algorithm; diverting water to flush out pollutants; optimization; tidal river networks

佛山水道(包括佛山涌)是广东省佛山市的主要纳污水体,如图 1 所示。近 20 多年来,佛山市经济发展迅速,但污染治理措施相对滞后,排污量已远远超出河流环境容量。东平河是佛山市的饮用水源,为防止佛山水道对东平河造成污染,分别在沙口、石肯 2 处建造了水闸。这导致佛山水道与外界水体交换困难,污染程度进一步加重。目前,佛山水道枯水期水质为劣 V 类,水体恶臭,是珠江三角洲污染最严

重的河段之一^[1]。鉴于佛山水道流量较小,考虑利用泵站从东平河引入一定流量的洁净水,一方面加大河流的稀释能力,另一方面增加退潮流速,加快污染物向外输送。引水与截污等手段相结合,通过综合整治可使佛山水道的水质得到较大改善。

引水冲污是治理城市河流污染的一种有效辅助手段,国内外已有大量研究与实践。例如德国的鲁尔河,日本的中川、新町川、和歌川,俄罗斯的莫斯科

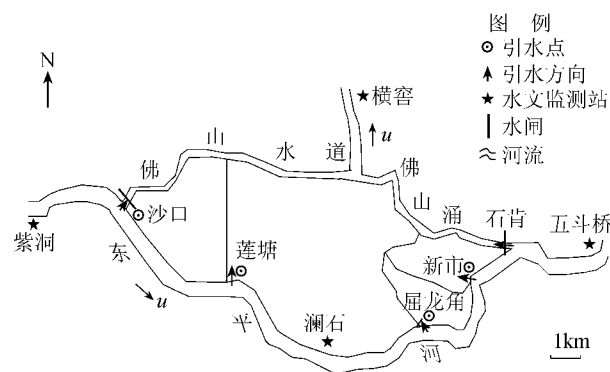


图1 佛山水道示意图

河,均利用引水方法改善水质,并取得较好效果^[2]。我国也对苏州护城河、上海苏州河、福建福州河和晋江、温州瑞塘河等河流进行了引水冲污的研究和应用^[3-7]。水环境数学模型是模拟预测各种引水方案水质的一种重要工具。同时,为取得较好的环境、经济和社会效益,还需要结合优化方法进行优选,制定最优方案,为引水工程建设提供指导。但目前一般通过人工试算法寻找最优方案^[3-7],不仅工作量大,计算繁琐,而且盲目性大,难以获得真正的最优解。

本文将混合智能算法与感潮河网动态水环境数学模型相结合,对引水方案进行自动优选,不仅可以为佛山水道的综合整治提供技术支持,而且对解决类似的复杂环境优化决策问题具有借鉴意义。

1 引水规划优化模型

根据规划,预建5个引水站点,分别为沙口、莲塘、屈龙角、新市和石肯^[1],如图1所示。引水规划主要考虑3个目标:一是引水后的环境效益;二是经济成本;三是对水源地的生态环境以及其他功能用水的影响。事实上,后2个目标的量化十分复杂,需要做进一步的技术论证。但一般而言,引水流量越大,经济成本越高,对水源地的生态影响也越大。因此,本文以总引水流量衡量后2个目标,建立佛山水道的引水规划优化模型:在一定的引水流量下,通过优化引水组合获得最好的水质改善效果。模型数学表述如下:

目标函数

$$\min f = \max\{\rho_j | j = 1, 2, \dots, N\} \quad (1)$$

约束条件

$$\rho_j = f(X, W_L, H_y) \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_K\} \quad (3)$$

$$x_i \leq x_i^{\text{limit}} \quad (i = 1, 2, \dots, K) \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^K x_i \leq T \quad (5)$$

式中: f 为水质指标,以控制断面的污染物质量浓度

最大值表示; ρ_j 为控制断面 j 的污染物质量浓度; N 为控制断面数; x_i 为站点 i 的引水流量,是决策变量; K 为站点个数; $f(X, W_L, H_y)$ 表示在一定污染源强 W_L 、水文条件 H_y 和引水流量组合 X 下控制断面 j 的污染物质量浓度; x_i^{limit} 为站点 i 的引水流量上限; T 为引水流量限值。

式(1)为目标函数,其目的是降低水质最劣的控制断面污染物质量浓度最大值。式(2)描述了水质与引水流量、污染源强以及水文条件之间的关系,在污染源强和水文条件已确定的情况下,河流水质取决于引水流量,其相互关系通过数值模拟得出。式(3)为引水流量组合 X 的表达式。式(4)为各站引水流量约束条件。式(5)为总引水流量限制条件。决策者可根据情况设置 x_i^{limit} 和 T 来限制引水流量,从而控制经济成本和对水源地的生态环境影响。以佛山水道为例,为确保引水水源地东平河的生态需水量,枯水期总引水流量应控制在 $15 \text{ m}^3/\text{s}$ 内,其中沙口、石肯不超过 $8 \text{ m}^3/\text{s}$,其余各引水点不超过 $4 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[1]。

式(2)不是解析式,引水流量 x_j 与水质 ρ_j 之间的关系必须采用数学模型进行数值模拟才能求出,这是引水规划优化模型的最大特点,也是造成求解困难的原因。

2 河网水环境数学模型

佛山水道属于珠江三角洲感潮河网,水动力条件与污染物输移扩散机制均十分复杂。目前,国内感潮河网中应用较多的是基于“河道-节点-河道”算法的动态水环境数学模型(以下简称河网模型),包括水动力模块^[8]和水质模块^[9]。河网模型的解法复杂,但计算效率较高,具有良好的模拟效果^[10-11]。

2.1 水动力模块

2.1.1 河段控制方程

河网可分解为若干单一河道,其水流运动服从Saint-Venant方程组:

$$\text{连续方程} \quad \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = q_L \quad (6)$$

运动方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + g \frac{u |u|}{C^2 R} = 0 \quad (7)$$

式中: H 为水位; Q 为流量; B 为过水宽度; q_L 为旁侧入流; u 为流速; g 为重力加速度; R 为水力半径; C 为谢才系数; x, t 分别为位置和时间的坐标。

谢才系数与糙率 n 的关系采用曼宁公式来表示,即

$$C = R^{1/6}/n$$

2.1.2 汉点连接方程

河网汉点(节点)连接包括流量连接条件和动力衔接条件:

$$\sum Q_i = \frac{\partial \Omega}{\partial t} \tag{8}$$

$$H_{i1} + \frac{u_{i1}^2}{2g} = H_{i2} + \frac{u_{i2}^2}{2g} \tag{9}$$

式中: Q_i 为通过 i 断面进入节点的流量; Ω 为节点的蓄水量; $i1$ 和 $i2$ 为进入节点的任意断面编码。

如果蓄水面积很小,并且出入各节点的水位平缓,式(8)、式(9)可简化为

$$\sum Q_i = 0$$
$$H_{i1} = H_{i2} = \dots = H_0$$

式中 H_0 为常数,表示所有断面的水位相等。

2.1.3 差分格式与求解方法

利用四点偏心隐格式对河网非恒定流的基本方程进行差分,并采用三级联合解法求解,即把参加计算的方程分成微段、河段、汉点三级,逐级处理,再联合运算,求得河网中各断面的水位和流量等值^[8]。

2.2 水质模块

河网污染物对流输移的基本方程为河道方程

$$\frac{\partial(A\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(Q\rho)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x}\left(AE_x \frac{\partial \rho}{\partial x}\right) + K_d A \rho - S = 0 \tag{10}$$

节点方程

$$\sum_{i=1}^{N_L} (Q\rho)_{l,j} = (\rho\Omega)_j \left(\frac{dH}{dt}\right)_j \tag{11}$$

式中: A 为河道过水断面面积; E_x 为纵向扩散系数; ρ 为水流输送的污染物质量浓度; K_d 为污染物衰减系数; S 为外部的源或汇; l 为与节点 j 相连的河段编号; N_L 为与节点 j 相连的河段个数。

采用隐式差分迎风格式对式(10)进行离散,根据河流流向顺逆不定的特点分为4种情况,并结合式(11)采用“河段-节点-河段”的算法求解^[9]。

2.3 模型验证

利用2000年1月4~5日的实测水文、水质资料对模型进行率定,计算范围包括紫洞、五斗桥和横窖之间的河网(图1)。据验证,水文计算值拟合较好,水位绝对误差平均值为0.07m,流量相对误差平均值为18%。水质指标采用COD,其质量浓度的相对误差为10%~40%,变化趋势与实测值一致^[1]。总体而言,模型的模拟效果良好,能够满足精度要求,可用于实际预测计算。

3 混合智能算法

求解式(1)~(5)需要结合优化算法与河网模

型。传统的Newton法、共轭梯度法等优化算法要求式子连续可微,在此并不适用。Holland等^[12-13]提出的遗传算法(genetic algorithm,GA)是一种启发式随机搜索方法,对目标函数和约束条件没有特殊要求,而且具有良好的全局搜索能力,在环境管理领域已获得广泛应用^[14-18]。对于含有数值模拟的优化问题,可以利用GA链接数学模型的方法求解。例如:Chen等^[17]结合GA与Streeter-Phelps模型,求解流域水质管理优化模型;Cho等^[18]结合GA与Qual2e模型,优化污水处理厂的处理率。然而,GA必须在决策空间内进行多次搜索才能获得最优解。这有2个问题需要解决:一是需要对GA与数学模型的接口进行处理;二是GA在优化过程中反复调用数学模型造成的耗时问题。如果数学模型较为简单,例如Streeter-Phelps模型,则接口处理相对容易,反复调用也不会对计算时间造成太大影响。但河网模型采用差分法求解,结构复杂,计算量大。GA调用模型不仅接口处理存在困难,而且耗时较长。假设河网模型运算1次为1m,GA搜索5000次后得到最优解,则计算总耗时达到3.5d,实际应用难以接受。

混合智能算法(hybrid intelligent algorithm,HIA)是结合GA与人工神经网络(artificial neural network,ANN)的一种优化方法,利用ANN映射复杂模型,不仅能大大提高计算速度,而且能保证较高的计算精度^[19-20]。HIA在实际优化问题中也开始获得应用,并取得良好效果^[21-22]。例如,Muleta等^[22]采用HIA求解带有SWAT模型模拟的优化问题,计算时间比GA减少了84%。目前,HIA法在国内水环境管理领域的研究尚不多见。为了对佛山水道引水方案进行优选,以及对河网模型与智能算法的结合使用做进一步探索,本文采用HIA法求解式(1)~(5)。HIA的计算步骤如图2所示,具体说明如下:

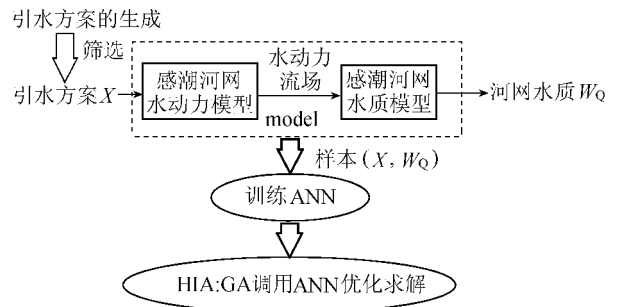


图2 混合智能算法步骤

3.1 生成与筛选引水方案

HIA的优化效果与ANN的映射精度有关,而样本数量和质量是影响ANN映射精度的一个重要因素。样本选取应遵循3个原则:数量充足、具有代表

性和分布均匀^[23]。一组样本可记为 (X, W_Q) ,其中 X 为引水流量组合(引水方案), W_Q 是对应的水质。为使样本具有代表性而且分布均匀,需要对 X 进行筛选。方法是在可行域内随机生成 N 组数据,从中筛选出差异最大的 n ($n < N$)组^[24-25]。由于筛选后的样本差异较大,空间分布较为均匀,减少了河网模型的计算量,并且使ANN在相同数量的训练样本下能够获得更好的映射精度。

3.2 采用河网模型模拟各种引水方案的水质

根据筛选出的 n 组引水方案,利用河网模型(包括水动力模型和水质模型)计算出相应的水质 W_Q ,从而得到 n 组样本 (X, W_Q) 。 X 与 W_Q 的关系可记作 $W_Q = \text{model}(X)$, $\text{model}()$ 表示河网模型的模拟计算。

3.3 利用样本训练人工神经网络

ANN是基于生物学的神经网络原理而建立的一种信息处理系统,具有极强的非线性映射能力。本文采用最为常用的前馈型人工神经网络(feed-forward artificial neural networks, FFANN),训练方法为误差反向传播(back propagation, BP)算法^[26]。

FFANN由1个输入层、1个隐层和1个输出层以信息前向传播的方式连接而成。研究表明,只要隐层的神经元数目足够多,仅1个隐层的FFANN即可以无限逼近任意的连续函数^[26]。目前隐层的神经元个数仍然没有较好的方法事先确定,常用的确定方法是在训练过程中逐渐增加或减少其数目,直到精度达到要求为止^[23]。BP算法的一次学习迭代可分为2个过程——信息流的正向传递过程和误差的逆向修改过程。BP算法通过反复的学习迭代不断地修正网络权重,直至网络的输出误差满足精度要求,或达到预定的学习次数为止。实际应用时,为避免过度训练,通常保留一部分样本作为测试样本,对训练效果进行检验,通过反复比较确定最佳训练次数^[27]。

利用3.2计算步骤所得样本 (X, W_Q) 对ANN进行训练,训练后的ANN可用于映射河网模型。对于任意 X ,有 $\text{ANN}(X) \approx \text{model}(X)$, $\text{ANN}()$ 表示网络映射;“ $\approx$ ”表示神经网络预测值与模型模拟值存在一定误差,误差大小取决于ANN的映射精度。

3.4 GA调用ANN优化求解

GA的计算流程为:首先选择运行参数,生成初始种群,然后评价个体适应度,并进行选择、交叉和变异等运算,最后生成新一代种群。GA通过多次迭代进化,以最优个体作为问题的最优解。与一般GA相比,HIA的最大特点是在GA中嵌入了ANN,利用ANN取代河网模型进行预测,而其余步骤完全相

同。对于GA的任一个体 X (引水方案),可以利用训练后的ANN求得相应的水质 W_Q ,继而进行评价个体适应度等操作。HIA中的GA计算流程如图3所示。

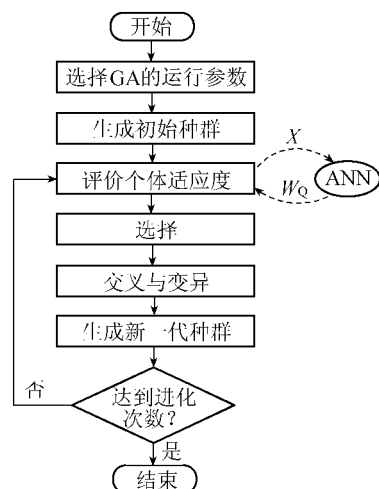


图3 HIA中的GA计算流程

ANN的运算速度极快,在GA优化过程中即使被多次调用,对计算时间影响也不大。HIA的耗时主要在于河网模型提供样本以及训练ANN,其值远低于GA直接调用河网模型。此外,HIA中链接GA与ANN较为简单,而河网模型作为一个独立部分提供样本,不必与GA链接,可采用不同的语言编程,甚至提供样本和优化求解可分别由不同技术人员完成,具有很强的灵活性。

4 计算过程与结果

引水冲污通过改变河流的水文状况达到改善水质的目的。模拟引水方案的水质时,计算范围取佛山水道和佛山涌,即沙口、石肯和横窖内的河网部分(图1),各站点在原有流量的基础上增加引水流量作为边界条件,并假设为连续性引水。由于屈龙角与新市的引水在同一地点汇入佛山涌,因此引水流量取合并值。以COD为指标污染物,2000年的排污量为污染源强,模拟时间取2001年1月4~11日(枯水期,包括了完整的大、中、小潮),求解相应污染源强和水文条件下的最优引水方案。计算过程如下:(a)在决策空间内随机生成200组数据,从中筛选出50组差异最大的作为引水方案。(b)利用河网模型模拟计算50组引水方案的水质,得 (X_i, W_{Q_i}) , $(i=1, 2, \dots, 50)$ 。(c)以 (X_i, W_{Q_i}) 为样本,其中40组用于训练ANN,另外10组用于测试训练效果,相对误差 e 以式(12)计算。ANN的隐层节点个数取6,经过25000次训练后ANN已基本收敛,相对误差为1.6%,认为精度已满足要求,则停止训练。

$$e = |(\text{ANN}(X) - \text{model}(X)) / \text{model}(X)| \quad (12)$$

(d)将训练后的 ANN 嵌入 GA 求解式(1)~(5)。

引水流量限值 T 依次取 5,10,15,...,45 m^3/s , 共得到 9 组解,对应不同引水流量时的最优方案。计算过程由计算机自动完成,无需人为试错。为检验计算结果,利用河网模型模拟 9 组引水方案的水质,并且与 ANN 的预测值进行比较,如图 4 所示。经检验,ANN 预测值的相对误差为 1.2%~3.5%,平均相对误差为 2.1%,已达到精度要求。由于 ANN 的映射性能良好,可判断 HIA 的计算结果可靠,引水方案是模型的最优解或近似最优解。

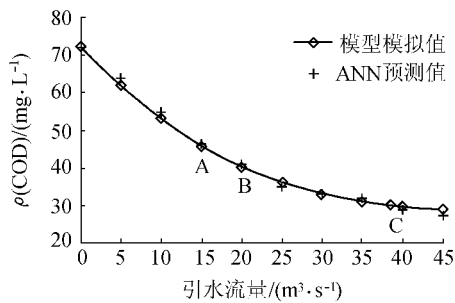


图 4 引水流量与 $\rho(\text{COD})$ 关系曲线

根据计算结果,佛山水道的污染物质量浓度在引水流量较低时下降迅速。例如,引水流量为 $15\text{ m}^3/\text{s}$ 时,COD 质量浓度从 72 mg/L 降至 46 mg/L ,水质改善效果明显。但随着引水流量的增加,污染物质量浓度下降幅度减小,引水流量从 $30\text{ m}^3/\text{s}$ 增加至 $45\text{ m}^3/\text{s}$ 时 COD 质量浓度仅降低约 7 mg/L 。将各种引水方案的总引水流量所对应的 COD 质量浓度连成曲线,可直观地得出引水流量与水质之间的关系,如图 4 所示。例如,如果东平河枯水期流量较小,为避免对其造成太大的生态环境影响,在引水流量不宜超过 $15\text{ m}^3/\text{s}$ 的情况下,佛山水道的 COD 质量浓度最大值为 46 mg/L (方案 A);如果佛山水道要达到 V 类和 IV 类水质标准,大约分别需要引水 $20\text{ m}^3/\text{s}$ (方案 B)和 $38.4\text{ m}^3/\text{s}$ (方案 C)。利用 HIA 法计算出的各站点引水流量组合如表 1 所示。

表 1 最优引水方案

方案	引水流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)					水质目标 $f/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
	沙口	莲塘	屈龙角和新市	石肯	合计	
A	4.7	4.0	2.6	3.7	15.0	46.2
B	8.4	5.3	2.1	4.2	20.0	40.0
C	15.6	5.9	6.4	10.5	38.4	30.0

注:方案 A 引水流量限于 $15\text{ m}^3/\text{s}$;方案 B 达到 V 类水质标准;方案 C 达到 IV 类水质标准。

需要指出,本文重点研究了引水流量与水质的关系,得出了初步引水方案,但引水是一个十分复杂的系统工程,最终决策还需要结合经济成本、生态环境影响等多种因素做进一步论证。上述方案是对应一定设计水文条件与污染源强的最优解,而随着污

染治理的加强及排污量的减少,在相同引水流量下佛山水道可获得更好的水质。文献[1]给出了不同源强及水文条件下的引水方案,在此不再赘述。尽管人工试算可得出近似最优解,但无法避免工作量大和盲目性高的缺陷;本文采用 HIA 自动求解,计算速度较快,而且优化结果更科学。HIA 可用于求解其他类似的复杂优化决策问题,具有普遍适用性。

5 结 论

笔者建立了佛山水道引水规划优化模型,并结合河网模型与混合智能算法求解,得出了不同引水流量下的最优引水方案。研究表明:

- a. ANN 的相对误差为 1.2%~3.5%,平均相对误差为 2.1%,精度满足要求。据此,可判断 HIA 的计算结果可靠,获得了模型的最优解或近似最优解。
- b. 以 2000 年排污量为基准,枯水期为设计水文条件,引水流量为 $15\text{ m}^3/\text{s}$ 时,COD 质量浓度由 72 mg/L 降至 46 mg/L 。为使佛山水道达到 V 类或 IV 类水质标准,需要来自东平河的引水流量分别为 $20\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $38.4\text{ m}^3/\text{s}$ 。
- c. 对于耦合复杂模拟模型的优化问题,HIA 不必对模拟模型与 GA 进行接口处理,计算速度快,具有普遍适用性,是一种较为理想的优化工具,有着广阔的应用前景。

参考文献:

[1]李适宇,林高松,陈璟璇,等.佛山水道综合调水优选方案研究[R].广州:中山大学环境科学与工程学院,2003.

[2]汤建中,宋韬,江心英,等.城市河流污染治理的国际经验[J].世界地理研究,1998,(2):114-119.

[3]丁训静,姚琪.苏州水网水量调控研究[J].河海大学学报,1995,23(5):81-87.

[4]程曦,张明旭,孙从军.综合调水前后苏州河下游水体耗氧特性比较[J].上海环境科学,2001,20(5):215-217.

[5]李大勇,刘凌,董增川,等.改善张家港地区水环境引水方案的对比研究[J].水利水电科技进展,2004,24(6):17-20.

[6]曾思育,徐一剑,张天柱.环状河网水质模型在水污染控制规划中的应用[J].水科学进展,2004,15(2):193-196.

[7]周俊,李国斌,梁震,等.引水冲污工程治理东湖磷污染[J].环境科学与技术,2002,25(4):27-29.

[8]张二骏,张东生,李挺.河网非恒定流的三级联合解法[J].华东水利学院学报,1982,10(1):1-12.

[9]褚君达.河网对流输移问题的求解及应用[J].水利学报,1994(10):14-23.

[10]逢勇,李学灵.珠江三角洲河网入伶仃洋污染物通量计算研究[J].水利学报,2001(9):40-44.

[11] 徐贵泉 , 褚君达 , 吴祖扬 , 等 . 感潮河网水环境容量影响因素研究 [J]. 水科学进展 , 2000 , 11(4) : 375-380 .

[12] HOLLAND J . Adaptation in natural and artificial systems [M]. Ann Arbor , MI : University of Michigan Press , 1975 .

[13] GOLDBERG D . Genetic algorithm in search , optimization and machine learning [M]. Roston , MA : Addison Wesley Publishing Company , 1989 .

[14] 韩龙喜 . 河道一维污染源控制反问题 [J]. 水科学进展 , 2001 , 12(1) : 40-44 .

[15] MCKINNEY D C , LIN M D . Genetic algorithm solution of groundwater management models [J]. Water Resource Research , 1994 , 30 : 1987-1906 .

[16] BURN D H , YULIANTI J S . Waste-load allocation using genetic algorithm [J]. Journal of Water Resources Planning and Management , 2001 , 127(2) : 121-129 .

[17] CHEN H W , CHANG N B . Water pollution control in the river basin by fuzzy genetic algorithm-based multi-objective programming modeling [J]. Water Science and Technology , 1998 , 37(3) : 55-63 .

[18] CHO J H , SUNG K S , HA S R . A river water quality management model for optimising regional wastewater treatment using a genetic algorithm [J]. Journal of Environmental Management , 2004 , 73(3) : 229-242 .

[19] GAO J W , LIU B D . Fuzzy multilevel programming with a hybrid intelligent algorithm [J]. Computers and Mathematics with Application , 2005 , 49 : 1539-1548 .

[20] LIU B D . Random fuzzy dependent-chance programming and its hybrid intelligent algorithm [J]. Information Science , 2002 , 141 : 259-271 .

[21] CHEN W C , CHANG N B . Advanced hybrid fuzzy-neural controller for industrial wastewater treatment [J]. Journal of Environmental Engineering , 2001 , 127(11) : 1048-1059 .

[22] MULETA M K , NICKLOW J W . Decision support for watershed management using evolutionary algorithms [J]. Journal of Water Resources Planning and Management , 2005 , 131(1) : 35-44 .

[23] 苑希民 , 李鸿雁 , 刘树坤 , 等 . 神经网络和遗传算法在水科学领域的应用 [M]. 北京 : 中国水利水电出版社 , 2002 .

[24] STEUER R E , CHOO E U . An interactive weighted Tchebycheff procedure for multiple objective programming [J]. Mathematical Programming , 1983 , 26(1) : 326-344 .

[25] SUN M , STAM A , STEUER R E . Solving multiple objective programming problems using feed-forward artificial neural networks the interactive FFANN procedure [J]. Management Science , 1996 , 42(6) : 835-849 .

[26] HECHT-NIELSEN R . Theory of the back-propagation neural network [C] // Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks . Washington , DC , USA [s . n .] , 1989 : 593-605 .

[27] 刘宝碇 , 赵瑞清 , 王纲 . 不确定规划及应用 [M]. 北京 : 清华大学出版社 , 2003 .

(收稿日期 : 2008 - 08 - 20 编辑 : 陈吉平)

(上接第 30 页)

4 结 论

- a. 针对某垃圾填埋场区水文地质结构特征及垃圾特性 , 在短期内 , 采用抽水的地下水污染控制技术 , 控制效果最好 ; 但从长期来看 , 采取源项去除控制技术为最优选择。
- b. 帷幕灌浆、河流防渗以及顶部覆盖不透水层的控制技术只能阻滞潜水中的污染物向外迁移 , 而无法阻止污染物对微承压水的入渗。

参考文献 :

[1] 沈东升 , 何若 , 刘宏远 . 生活垃圾填埋生物处理技术 [M]. 北京 : 化学工业出版社 , 2003 : 11-15 .

[2] 陈忠荣 , 王翊虹 , 袁庆亮 , 等 . 北京地区垃圾填埋场对地下水的污染及垃圾填埋场选址分区 [J]. 城市地质 , 2006 , 1(1) : 29-33 .

[3] FOOSE G J , BENSON C H , EDIL T B . Prediction leakage through composite landfill liners [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering , 2001 , 127(6) : 510-520 .

[4] 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(6) : 45-48 .

[5] REINHART D R , MCCREANOR P T , TOWNSENT T . The bioreactor landfill : its status and futur [J]. Waste Management & Research , 2002 , 20 : 172-186 .

[6] 蒋建国 , 邓舟 , 杨国栋 . 生物反应器填埋场技术发展现状 & 研究前景 [J]. 环境污染与防治 , 2005 , 27(2) : 122-126 .

[7] 程天 , 赵新泽 , 熊辉 . 垃圾卫生填埋场防渗及水收集系统设计 [J]. 环境保护 , 2005(5) : 12-14 .

[8] 戴伟华 , 俞觐觐 . 灌浆帷幕防渗技术在天子岭生活垃圾卫生填埋场中的应用 [J]. 有色金属 , 2003 , 55(S1) : 113-117 .

[9] HANS-JORG G D . FEFLOW 有限元地下水流系统 [M]. 谷源泽 , 译 . 徐州 : 中国矿业大学出版社 , 2001 : 3-10 .

[10] 郑建民 . 帷幕灌浆法防渗技术在垃圾填埋场建设中的应用 [J]. 浙江建筑 , 1999(4) : 38-39 .

[11] BUSS S R , HERBERT A W , MORGAN P , et al . A review of ammonium attenuation in soil and groundwater [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology , 2004 , 37 : 347-359 .

(收稿日期 : 2008 - 08 - 02 编辑 : 傅伟群)