

# 遗传算法在水资源与水环境研究中的应用综述

杨 薇, 南 军, 孙德智, 田 禹

(哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要** 论述了遗传算法在水污染控制规划、水资源优化配置、水库(群)优化调度、地下水系统的模拟与优化、水环境模型参数估计等水资源领域中的应用, 并对遗传算法在该领域的应用进行了展望。

**关键词** 遗传算法; 水污染控制; 优化配置; 水库调度; 参数估计

中图分类号: X32 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2007)01-0013-04

## Application of genetic algorithm in the fields of water resources and water environment

YANG Wei, NAN Jun, SUN De-zhi, TIAN Yu

(School of Municipal & Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract** The applications of GA in the field of water resources were summarized, including water pollution control, optimal allocation of water resources, optimal dispatching of reservoirs, simulation and optimization of groundwater, and parameter estimation in the water environmental modeling. And then the trends of GA in field were prospected.

**Key words** genetic algorithm; water pollution control; optimal allocation; reservoir dispatching; parameter estimation

遗传算法(Genetic Algorithm, 简称 GA)是建立在种群遗传机制和自然选择原理基础上, 模拟自然界“物竞天择、适者生存”的一种寻优算法。由 Michigan 大学的 Holland J. H. 于 20 世纪 60 年代初首次提出<sup>[1]</sup>。到目前为止, GA 已经广泛应用于计算机科学、工程技术、管理科学、社会科学等领域, 且在水资源领域的众多方面也有广泛应用, 如水污染控制规划、水库(群)调度、水环境模型参数估计等, 而且越来越受到水科学与环境领域工作者的重视。

### 1 在水污染控制规划中的应用

水污染控制规划是在环境预测的基础上, 运用系统分析的手法, 根据污染物的排放量、受纳水体的环境容量、污水处理厂的处理量及处理率、输水管道等信息, 确定水污染控制的最优规划方案。由于系统的复杂性, 所建立的模型均具有非线性、不连续等特征, 往往采用试探法或分段法求解, 计算耗时且准确性没有保证。而采用 GA 对该类问题进行求解,

避免了上述缺陷。刘首文等<sup>[2]</sup>利用 GA 对堵河的排污口优化处理规划加以研究, 采用罚函数法将约束条件纳入目标函数中, 在极短的时间内就求出了问题的解, 且与二次规划算法求得精确解非常接近, 目标函数值的相对误差仅为 0.019%。Rauch<sup>[3]</sup>以水环境受污染程度最小为目标, 采用 GA 求解整个城市污水系统(包括排水系统、污水处理厂和接纳水体)最优化规划的问题, 得到了满意的结果。Rauch<sup>[4]</sup>探讨了运用 GA 解决城市排水系统规划模型的求解问题, 对比传统方法, 该方法在模型校验和预测控制方法上有诸多优点, 作者还预言 GA 在多目标决策分析领域将会有很广泛的前景。魏加华等<sup>[5]</sup>采用 GA 处理一个涉及污染源的控制、污水的输送与预处理程度、净化水的贮存等多方面因素的区域污水控制规划问题, 最优化模型结构复杂, 约束条件繁琐, 用数学规划法无法求解, 但采用 GA 能很快搜索到全局近似的最优解。蔡明等<sup>[6]</sup>对渭河流域具有 85 个排污口的区域处理系统最优化问题进行

研究,采用 GA 求解的计算结果比传统的最优化均匀处理规划相比,可节省 27.54% 的费用。黄国如等<sup>[7]</sup>用 GA 求解新疆乌鲁木齐水磨河污染控制系统模型,计算结果优于动态规划法。秦肖生等<sup>[8]</sup>利用 GA 与传统非线性规划法相结合的混合数值算法,求解了水环境中的灰色非线性规划问题,而该问题采用常规最优化方法的难度很大。曾光明等<sup>[9]</sup>应用一种改进的 GA 求解水污染控制系统中的多目标规划问题,该算法采用十进制编码原理,所有操作均在实数域内进行,从而避免了二进制中编码和解码的麻烦。同时引入变权数综合距离评判模型和多个体交叉机制,对多目标函数进行求解,求解过程简单,优化结果合理。Choi<sup>[10]</sup>将 GA 与具有非线性特征的水质数学模型耦合,构成水质管理模型,使流域水质达标且污水处理费用最低,并采用 GIS 系统对环境信息进行管理。

## 2 在水资源优化配置中的应用

区域水资源优化配置是社会、经济及环境综合效益最佳的大系统多目标规划问题,其求解一般是基于决策者的偏好,将多目标加权转化为单目标再进行求解,规划的客观性和合理性一定程度上受主观因素的影响。采用 GA 对多目标、非线性问题进行求解,避免了这一不足。方红远等<sup>[11]</sup>应用多目标决策遗传算法解决了多目标水资源系统优化运行问题。采用浮点向量表达解的结构,并定义适应度为任一目标点与理想点的距离。对构建的模型,GA 的收敛过程相当有效,计算结果合理。Cai 等<sup>[12]</sup>将 GA 和线性规划法(LP)相结合,求解大型非线性水资源管理模型。先用 GA 识别出复杂的变量,这些变量不变时,问题趋于线性化,然后长期的流域水资源管理模型就可以分段用 LP 求解。贺北方等<sup>[13]</sup>建立了区域水资源优化配置模型,利用大系统分解-协调技术,将多目标遗传算法应用于区域水资源二级递阶优化模型中,提供了求解大系统规划问题的新思路。在水资源优化配置中,由于系统的特性,目标函数的效益系数(权重)也是影响配置方案合理与否的重要因素。沈军等<sup>[14]</sup>采用 GA 确定水资源优化配置模型中的效益系数,并在此基础上对水资源进行了优化配置。赵得军等<sup>[15]</sup>在此基础上,将效益系数看做是时间的函数,在约束条件变化的情况下,利用 GA 的竞争机制优化效益系数,并利用效益系数的权重实现了开封市不同水源的合理配置。

## 3 在水库(群)优化调度中的应用

遗传算法在水库(群)优化调度中已有很广泛的

研究。Robin 等<sup>[16]</sup>将 GA 用于 4 座水库优化调度中,并与传统方法进行比较,发现 GA 鲁棒性强,很容易用于复杂系统,有潜力取代随机动态规划,同时实数编码快于二进制码,结果更优。Romero 等<sup>[17]</sup>采用 GA 对水库的运行进行寻优,并与模拟退火算法进行对比,GA 得出了更好的结果,且鲁棒性很好。畅建霞等<sup>[18]</sup>、胡明昱等<sup>[19]</sup>均采用十进制(实数)编码遗传算法对水库的优化调度进行了研究,该方法省去了编码和解码的麻烦,且寻优效率高,是一种有效的自适应随机搜索算法。宋朝红等<sup>[20]</sup>在此基础上针对水库(群)模型中约束条件的特点,提出了用于初始种群有条件的随机生成与非随机变异等策略。游进军等<sup>[21]</sup>提出一种基于目标序列的排序矩阵评价个体适应度的多目标遗传算法,改进了遗传算法的参数确定方法,有效控制了非劣解集的替换选取过程,可以一次交互求得非劣解集,将该方法应用于供水和发电综合利用水库的多目标调度中,验证了其可行性。朱仲元等<sup>[22]</sup>利用该方法确定了串联水库系统优化运行策略,并与多维随机离散动态规划结果相比,得出类似的结论。罗云霞等<sup>[23]</sup>采用遗传模拟退火算法研究了水电站单一水库的优化调度问题,提出了基于遗传模拟退火算法优化调度的基本步骤,通过实例计算,并与简单遗传算法相比较,表明该算法具有极强的局部搜索能力和较好的收敛性能。付永锋等<sup>[24]</sup>针对建立的黑河金盆水库优化调度多目标非线性数学模型,分别利用动态规划、遗传算法和自适应遗传算法求解,结果表明:自适应遗传算法由于能够根据群体适应度的分散程度以及个体优劣进行参数的自适应调整,使得算法在保持种群多样性的同时保证收敛性,其收敛速度和计算结果都明显优于其他两种算法。

## 4 在地下水系统中的应用

遗传算法还被广泛用于地下水系统的研究。Harrouni 等<sup>[25]</sup>将 GA 应用于地下水领域,解决了从各向同性水层取水的水泵管理问题和各向异性水层模型的参数估计问题。Katsifarakis 等<sup>[26]</sup>将 GA 与边界元法相结合,解决了三类常见的地下水流动和物质传输相关问题,包括优化地下水层的透射系数、降低泵站从井群取水的运行费用、地下水污染带的水力控制等,通过实例分析,得到了理想的结果。吴剑锋<sup>[27]</sup>提出一种新的基于遗传算法的模拟退火罚函数方法,求解地下水管理模型,通过模拟退火罚函数方法来处理约束条件,可以保证算法逐渐收敛于可行的最优解。金菊良等<sup>[28]</sup>采用 GA 求解地下水动态预测双线性模型。Giacobbo<sup>[29]</sup>用 GA 估计地下水

污染物转移模型的参数——流速和弥散系数,通过实例验证了该方法的有效性。Mark<sup>[30]</sup>将 Niche Pareto 遗传算法(NPGA)用于地下水修复系统的多目标优化设计,并与单目标 GA 和随机搜索算法相比,计算结果最优。李祚泳<sup>[31]</sup>采用 GA 优化地下水污染损害指数公式中的参数,得出了地下水 38 项指标水质污染评价的通用公式,公式简单客观、易于计算,具有可比性和通用性。王锦国<sup>[32]</sup>采用实数编码的遗传算法优化反演地下水污染物的运移参数,不仅求得了弥散系数,还得到了地下水的运动速度。魏连伟<sup>[33]</sup>提出了水文地质参数识别的模拟退火遗传算法,实现了水文地质参数的自动识别。王福刚等<sup>[34]</sup>、姚磊华等<sup>[35]</sup>均采用改进的遗传算法进行地下水的数值模拟,从而对地下水资源进行综合评价。刘勇健<sup>[36]</sup>建立了基于 GA 和 BP 的地下水动态预测模型。Park<sup>[37]</sup>为合理开采地下水,防止海水入侵,提出基于 GA 的多目标优化方法,确定泵的运行速率和井的位置,计算结果优于已有文献的成果,为沿岸地区地下水的管理提供了一种经济有效的方法。高志亮等<sup>[38]</sup>用 GA 求解地下水非稳定流的导水系数和储水系数,仅用 50 次的迭代运算,精度完全达到要求,且快捷、方便、效果好。

## 5 用于水环境模型的参数优化

水环境数学模型一般具有非线性、非凸等不规则特点,平衡各参数的相对重要性并使其达到足够的精度是合理运用数学模型的关键。Wang<sup>[39]</sup>采用 GA 优化暴雨-径流模型,该模型具有 9 个参数,对于给定的参数最优值,GA 总能迅速找到接近于全局最优的近似解,从而证明了 GA 进行模型的参数优化是可行的。Cheng<sup>[40]</sup>采用模糊优化模型与 GA 组合的混合算法,求解多目标径流模型的参数优化问题,结果表明,该算法不仅可以揭示出洪水的重要特征,且鲁棒性很强。曾光明等<sup>[41]</sup>提出了一种采用最优个体保护、适应函数调整、双点杂交相结合的方法进行繁殖操作,同时又能自适应地改变杂交和变异率的改进遗传算法,利用该法对水质模型参数进行估值,结果具有更好的收敛性能。李海英等<sup>[42]</sup>通过对简单遗传算法进行全方位的改进,得到一种收敛速度更高、迭代次数更少的综合性遗传算法,并应用于水环境模型参数估值之中,通过与简单遗传算法计算结果的对比,验证了新方法的有效性。Ng 等<sup>[43]</sup>通过一系列数值试验,证实了从现有文献上获得的 GA 算子的有效性,并将这些算子应用于河网水质模型的参数优化中。杨晓华等<sup>[44]</sup>提出了蚁群加速遗传算法,用于水环境模型参数的优化,在污水

处理模型的参数识别问题中该方法得到了精度较高的全局最优解。杨晓华等<sup>[45]</sup>提出了用格雷码混合加速遗传算法进行水环境模型参数识别,给出了实施该算法的详细步骤,并在确定河流横向扩散系数等参数识别问题中,得到了精度较高的全局最优解。与格雷码遗传算法和常规优化方法相比,该改进算法具有精度高、速度快和适用性强等特点。王宗志等<sup>[46]</sup>提出通过设置断点对加速遗传算法加以改进,并成功地应用于多参数的多宾斯 BOD-DO 河流水质模型参数优化中,并对结果进行分析,表明改进 GA 的有效性和在环境科学参数优化领域中的可行性。

除此之外,遗传算法被用于其他方面的研究。Hong<sup>[47]</sup>将 GA 应用于污水处理厂的活性污泥系统,提出了基于遗传算法的自组织模型,用以模拟城市污水处理厂的活性污泥的动态特性,成功地预测了 MLSS 和悬浮固体的非线性动态变化过程。李碧涛<sup>[48]</sup>用 GA 解决工业企业复杂过程中的节水问题,采用遗传算法、遗传算法-模拟退火算法、遗传算法-单纯形法和遗传算法-单纯形法-模拟退火算法四种优化方法求解最小新鲜水量数学模型,发现四种优化方法均能获得较理想的结果,其中遗传算法-单纯形法最优。遗传算法还被应用于供水管网的优化规划<sup>[49]</sup>、农业灌溉规划管理<sup>[50]</sup>、排水泵站优化管理<sup>[51]</sup>等领域。

## 6 在水资源与水环境领域的应用展望

相对于传统的优化技术,GA 是近几年逐渐发展起来的一种优化技术,它利用简单的编码技术和繁殖机制来表示复杂的现象,并根据目标函数来构造适应函数,且不要求连续、可导、凸性、线性等假设,所以在水资源领域大规模、非线性、多不确定性因素、多目标的优化中得到了广泛的使用。展望遗传算法今后在该领域的进一步发展,归结起来有以下几个方面。

### 6.1 算法本身的改进

遗传算法本身也存在一些不足,如在应用于解决复杂的有约束高维非线性规划问题方面,有待进一步研究,算法控制参数、初始群体、适应度函数、选择算子、杂交算子、变异算子等的选择对收敛速度影响也很大,若选择不当容易导致种群早熟或算法在高阶徘徊。如何对遗传算法本身进行改进,是进一步拓展遗传算法理论并使其更广泛推广应用的关键。

### 6.2 与其他方法相结合

遗传算法是一种开放式的算法,很容易与其他方法相结合,以增加其寻优能力。如遗传算法与神

神经网络算法(ANN)相结合,采用遗传算法对网络结构和参数进行优化,得到采用ANN模型求解的必要条件;遗传算法与模拟退火算法(SA)相结合寻优,先由GA决定SA的初始结构和初始温度,使SA脱离局部极小值,随即搜索全局最优解;GA与单纯形法相结合,GA能把握搜索的方向,确保混合算法找到全局最优点,单纯形法加快了全局寻优过程,防止GA种群早熟,多次调用单纯形法,把产生的新模型带回GA种群;GA与模糊算法相结合,使得在不确定的环境中寻求最优控制策略更加可行。

### 6.3 应用范围的延拓

除了上述被人们热衷于研究的水污染控制规划、水资源优化配置、水库(群)优化调度、地下水的模拟与优化、水环境模型参数优化等之外,遗传算法还逐渐被应用到了环境评价、暴雨径流模型、地下水模拟、工业企业用水结构优化、污水处理厂运行参数优化控制、城市供水管网优化等领域。遗传算法及其改进算法与面向对象技术、GIS系统、决策支持系统等的结合,也是未来遗传算法发展的方向之一。在未来的发展中,GA将会在这些领域中起到更大更优的作用。

随着算法本身的发展和人们不断的探索和尝试,GA把最优化理论与水资源理论有机地结合起来,将逐步渗透水资源领域的各个角落,在水资源科学优化领域中具有一定的推广应用前景。

### 参考文献:

[1] 翁文斌,王忠静.现代水资源规划——理论、方法和技术[M].北京:清华大学出版社,2004:152-156.

[2] 刘首文,冯尚友.遗传算法及其在水污染控制系统规划中的应用[J].武汉水利电力大学学报,1996,29(4):95-99.

[3] RAUCH W. Genetic algorithms in real time control applied to minimize transient pollution from urban wastewater systems[J]. Water Research, 1999, 33(5):1265-1277.

[4] RAUCH W. On the potential of genetic algorithms in urban drainage modeling[J]. Urban Water, 1999, 1(1):79-89.

[5] 魏加华,张建立.非线性水污染控制系统规划的遗传算法[J].煤田地质与勘探,1999(4):49-53.

[6] 蔡明,白丹.遗传算法在水污染控制系统最优规划中的应用[J].西安理工大学学报,2002,18(1):58-61.

[7] 黄国如,胡和平,田富强.基于遗传算法的水污染控制系统规划[J].清华大学学报:自然科学版,2002,42(4):551-554.

[8] 秦肖生,曾光明.遗传算法在水环境灰色非线性规划中的应用[J].水科学进展,2002,13(1):31-37.

[9] 曾光明,王薇,谢更新,等.改进GA在水污染控制系统多目标规划中的应用[J].湖南大学学报:自然科学版,

2004,31(3):29-24.

[10] CHO J H. A river water quality management model for optimizing regional wastewater treatment using a genetic algorithm[J]. Environmental Management, 2004, 74:229-242.

[11] 方红远,邓玉梅,董增川.多目标水资源系统运行决策优化的遗传算法[J].水利学报,2001(9):22-27.

[12] CAI X, MCKINNEY D C, LASDON L S. Solving nonlinear water management models using a combined genetic algorithm and linear programming approach[J]. Advances in Water Resources, 2001, 24:667-676.

[13] 贺北方,周丽,马细霞,等.基于遗传算法的区域水资源优化配置模型[J].水电能源科学,2002,20(3):10-12.

[14] 沈军,刘勇健.水资源优化配置模型参数识别的遗传算法[J].武汉大学学报:工学版,2002,35(3):13-16.

[15] 赵得军,洪林,李远华,等.效益系数年际动态变化的水资源合理配置[J].中国农村水利水电,2004(9):34-36.

[16] ROBIN W, MOHD S. Evaluation of genetic algorithms for optimal reservoir system operation[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1999, 12:25-33.

[17] ROMERO C E, CARTER J N. Using genetic algorithms for reservoir characterisation[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2001, 31:113-123.

[18] 畅建霞,黄强,王义民.水电站水库优化调度几种方法的探讨[J].水电能源科学,2000,18(3):19-22.

[19] 胡明罡.基于遗传算法的梯级水库调度问题的研究[J].济南大学学报:自然科学版,2003,17(4):344-346.

[20] 宋朝红,罗强,纪昌明.基于混合遗传算法的水库群优化调度研究[J].武汉大学学报:工学版,2003,36(4):26-31.

[21] 游进军,纪昌明,付湘.基于遗传算法的多目标问题求解方法[J].水利学报,2003(7):64-69.

[22] 朱仲元,朝伦巴根,杜丹,等.多目标遗传算法在确定串联水库系统优化运行策略中的应用[J].灌溉排水学报,2004,23(6):71-74.

[23] 罗云霞,周慕逊.基于遗传模拟退火算法的水库优化调度[J].华北水利水电学院学报,2004,25(3):20-22.

[24] 付永锋,沈冰,李智录,等.基于自适应遗传算法的金盆水库优化调度研究[J].水电能源科学,2004,22(3):47-50.

[25] HARROUNI K E, OUAZAR D, WALTERS G A, et al. Groundwater optimization and parameter estimation by genetic algorithm and dual reciprocity boundary element method[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 1996, 18(4):287-296.

[26] KATSIFARAKIS K L, KARPOUZOS D K, THEODOSSIU N. Combined use of BEM and genetic algorithms in groundwater flow and mass transport problems[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 1999, 27(9):555-565.

(下转第34页)

- 理研究 M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001: 162-187.
- [2] 刘昕宇, 冯玉君, 刘玲花, 等. 黄河重点河段水环境有毒有机物污染现状浅析 J]. 水资源保护, 2004(2): 37-38.
- [3] 邓南圣, 吴峰. 环境化学教程 M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2000: 197.
- [4] 胡国华, 李鸿业, 赵沛伦, 等. 黄河多泥沙水体石油污染物自净实验研究 J]. 水资源保护, 2000(4): 31-32.
- [5] 侯灵, 赵元慧, 赵晓明, 等. 江河中有机污染物挥发速率的模拟与预测 J]. 环境化学, 1997, 16(4): 333-340.
- [6] 赵元慧, 郎佩珍, 龙凤山. 模拟实验测定江河中有机物的挥发速率 J]. 环境科学, 1990, 11(13): 53-57.
- [7] CHENG Wen-hsi, CHOU Ming-shean, PERNG Chih-hao. Determining the equilibrium partitioning coefficients of volatile organic compounds at an air-water interface J]. Chemosphere, 2004, 54: 935-942.
- [8] ALEXANDER P B, MARK S V. Volatilisation processes in wastewater treatment plants as a source of potential exposure to VOCs J]. Pergamon, 1997, 21: 5-7.
- [9] REBECCA E C, REBECCA M D, ELIZABETH A C. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) distributions and associations with organic matter in surface waters of the York River, VA Estuary J]. Organic Geochemistry, 2003, 34: 209-224.
- [10] 牛明颖, 王伟, 王静. 黄河水沙对水环境的影响 J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2003, 15(4): 10-12.
- [11] 李怡庭, 张曙光, 李淑贞, 等. 黄河泥沙对水质参数影响的研究 J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(1): 11-13.
- [12] 全雯, 郎佩珍. 挥发性有机物挥发速率的影响因素 J]. 环境化学, 1988, 7(6): 39-43.

(收稿日期 2006-01-04 编辑: 傅伟群)

(上接第 16 页)

- [27] 吴剑锋. 基于遗传算法的模拟退火罚函数方法求解地下水管理模型 J]. 中国科学: E 辑, 1999, 29(5): 474-480.
- [28] 金菊良, 杨晓华, 金保明, 等. 基于遗传算法的地下水位动态预测双线性模型 J]. 水科学进展, 2001, 12(3): 361-366.
- [29] GIACOBBO F. Solving the inverse problem of parameter estimation by genetic algorithms: the case of a groundwater contaminant transport model J]. Annals of Nuclear Energy, 2002, 29: 967-981.
- [30] MARK E. Multi-objective optimal design of groundwater remediation systems: application of the niched Pareto genetic algorithm (NPGA) J]. Advances in Water Resources, 2002, 25: 51-65.
- [31] 李祚泳. 一个基于 GA 优化的地下水水质评价的通用公式 J]. 水文, 2002, 22(5): 31-34.
- [32] 王锦国, 周志芳, 黄勇, 等. 基于实码遗传算法的地下水污染物运移参数反演 J]. 水文, 2002, 22(5): 9-12.
- [33] 魏连伟. 基于模拟退火遗传算法的水文地质参数识别 J]. 天津大学学报, 2003, 36(5): 618-621.
- [34] 王福刚, 曹剑锋. 改进的遗传算法在地下水数值模拟中的应用 J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2002, 32(1): 64-68.
- [35] 姚磊华, 李竞生, 李钊, 等. 用改进的遗传算法反演地下水数值模型参数 J]. 水利学报, 2003, 12(4): 40-46.
- [36] 刘勇健. 基于智能算法的地下水位动态预测模型的建立与应用 J]. 水文地质工程地质, 2004, 3(3): 55-59.
- [37] PARK C H. Multi-objective optimization of pumping rates and well placement in coastal aquifers J]. Journal of Hydrology, 2004, 290: 80-99.
- [38] 高志亮, 陈石, 高鹏. 基于遗传算法的地下水非稳定流求参方法 J]. 西安科技大学学报, 2004, 24(4): 434-437.
- [39] WANG Q J. Using genetic algorithms to optimize model parameters J]. Environmental Modeling & Software, 1997, 12(1): 27-34.
- [40] CHENG C T. Combining a fuzzy optimal model with a genetic algorithm to solve multi-objective rainfall-runoff model calibration J]. Journal of Hydrology, 2002, 268: 72-86.
- [41] 曾光明, 洪亚雄, 秦肖生, 等. 改进的遗传算法在水环境模型参数估值中的应用研究 J]. 水电能源科学, 2002, 20(1): 38-40.
- [42] 李海英, 秦肖生. 综合性遗传算法用于水质模型参数估值 J]. 中国给水排水, 2002, 18(5): 28-30.
- [43] NG A W M, PERERA B J C. Selection of genetic algorithm operators for river water quality model calibration J]. Engineering Application of Artificial Intelligence, 2003, 16: 529-541.
- [44] 杨晓华, 杨志峰, 郦建强, 等. 蚁群加速遗传算法在水环境优化问题中的应用 J]. 水电能源科学, 2003, 21(4): 42-45.
- [45] 杨晓华, 杨志峰, 郦建强, 等. 水环境模型参数识别的一种新方法 J]. 水科学进展, 2003, 14(5): 554-557.
- [46] 王宗志, 金菊良, 张玲玲, 等. 改进的 GA 在河流水质模型参数优化中的应用 J]. 合肥工业大学: 自然科学版, 2004, 12(12): 1515-1519.
- [47] HONG Y S. Evolutionary self-organizing modeling of a municipal wastewater treatment plant J]. Water Research, 2003, 37(6): 1199-1212.
- [48] 李碧清. 城市节约用水的理论与方法 D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
- [49] MORLEY M S. GA net: genetic algorithm platform for pipe network optimization J]. Advances in Engineering Software, 2001, 32(6): 467-475.
- [50] KUO S F, MERKLEY G P, LIU C W. Decision support for irrigation project planning using a genetic algorithm J]. Agricultural Water Management, 2000, 45(3): 243-266.
- [51] YAGI S, SHIBA S. Application of genetic algorithms and fuzzy control to a combined sewer pumping station J]. Water Science and Technology, 1999, 39(9): 217-224.

(收稿日期 2005-06-04 编辑: 傅伟群)