

技术总结

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.09.007

# 基于冗余选择策略差分进化的供水管网多目标优化

杨佳莉, 杜坤, 陈洋, 宋志刚  
(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 针对进化算法在大规模供水管网优化设计过程中计算效率低的问题,提出一种基于冗余选择策略差分进化算法。该方法在选择阶段往每一代种群中重复添加冗余数个当代最优解向量形成父代种群,适当降低种群多样性引导种群向更好的方向进化、快速获取近似最优解。以管网造价为经济性目标函数、节点冗余水头方差为可靠性目标函数,建立供水管网优化设计的多目标数学模型,并采用BIN基准管网加以验证。利用冗余选择策略差分进化算法进行计算时,冗余度为6%可在保证解精度的情况下提高62.768%的计算效率,冗余度为1%~6%时得到的经济性指标和冗余度为1%~3%时得到的可靠性指标均优于标准差分进化算法,并得到 $F$ 最佳取值范围为0.1~0.3,CR取0.4最佳。基于冗余选择策略差分进化算法可提高计算效率,能快速有效地获得供水管网优化问题的近似最优解,表现出良好性能。

**关键词:** 冗余选择策略; 差分进化; 供水管网; 多目标优化

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)09-0040-06

## Multi-objective Optimization of Water Distribution System Based on Differential Evolution of Redundant Selection Strategy

YANG Jia-li, DU Kun, CHEN Yang, SONG Zhi-gang

(Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of low computational efficiency of evolutionary algorithms in optimization design of large-scale water distribution systems (WDSs), a redundant differential evolution algorithm (RDEA) based on redundant selection strategy was proposed. Several redundant vectors of contemporary optimal solution were repeatedly added to each generation population to form the parent generation population in the selection stage of this method, and the population diversity was appropriately reduced to guide the population to evolve in a better direction and obtain the approximate optimal solution quickly. By taking the cost of the pipe network as the economic objective function and the variance of node surplus head as the reliable objective function, a multi-objective model for optimal design of WDSs was established and verified by BIN benchmark network. When using RDEA to calculate, redundancy of 6% could increase the calculation efficiency by 62.768% while the accuracy of

基金项目: 云南省重点研发计划项目(202003AC100001); 国家自然科学基金资助项目(51608242); 云南省应用基础研究青年项目(2017FD094)

通信作者: 杜坤 E-mail: 765818261@qq.com

solutions was guaranteed. The obtained economic indexes when redundancies were 1% - 6% and the obtained reliability indexes when redundancies were 1% - 3%, were better than those calculated by standard DEA (SDEA), and the best range of  $F$  was 0.1 - 0.3 and CR was 0.4. RDEA could improve the computational efficiency, and near-optimal solutions of WDSs were obtained quickly and effectively, which showed good performance.

**Key words:** redundant selection strategy; differential evolution; water distribution system; multi-objective optimization

供水管网是支撑城市和区域经济发展的重要基础设施之一,结构复杂、规模庞大,对其进行合理地优化设计是保证管网经济性和可靠性的重要途径。Keedwell 等<sup>[1]</sup>指出,供水管网优化设计是一个 NP-hard 问题,包含众多离散变量(如管径)和非线性约束(如水头损失和流量)。针对此难题,一系列进化算法被用于供水管网优化设计研究。差分进化算法因结构简单,全局探索能力强,表现出更良好的性能,广泛用于供水管网优化设计研究,但其存在计算效率低的问题。正如 Maier 等<sup>[2]</sup>指出,进化算法计算效率低已成为其在实际应用中的主要阻碍。可见,提高差分进化算法计算效率具有重要意义。

为此,在过去 20 多年里,出现大量提高差分进化算法计算效率的方法,大致可概括为减少搜索空间法、代替模型(元模型)法以及并行编程技术等。Zheng 等<sup>[3]</sup>提出一种自适应差分进化算法进行供水管网优化设计,把变异系数( $F$ )和交叉系数(CR)编码到算法中并随进化过程不断调整,将原先指定世代数和计算预算的终止条件替换成一种新的收敛准则,减少优化过程中参数调整工作量来提高计算效率;陈颖等<sup>[4]</sup>提出了一种多种群多策略的并行差分进化算法,把种群划分成 3 个子种群并用各自的进化策略独立进化,在规定的进化代数之后才进行交流,以此来提高计算效率;刘勇等<sup>[5]</sup>提出了一种随种群进化代数自适应的变异因子,进化前期加强种群变异提高全局搜索能力,进化后期限定算法在优秀个体周围搜索,加强局部搜索能力和收敛性。

由上所述,在提高差分进化算法计算效率方面,更多学者只关注初始种群、变异和交叉策略等方面,很少有学者对选择策略进行研究。考虑在有限计算时间内获得近似最优解,本研究首次提出了一种基于冗余选择策略差分进化算法,在选择阶段往每一代种群中重复添加冗余数个当代最优解向量形成父代种群,适当降低种群多样性对种群进行设计,引导

种群向更好的方向进化,进而提高计算效率。本研究的主要目的是把基于冗余选择策略差分进化算法应用到著名的“Balerna”基准管网中进行优化研究,以管网造价为经济性目标函数、节点富余水头方差为可靠性目标函数,测试和验证该算法的合理性和有效性。为深入研究算法性能,本研究的第二个目的是探究不同冗余度对差分进化算法参数( $F$ 和CR)的影响,并得到参数最佳取值范围。

## 1 供水管网优化设计模型

### 1.1 目标函数

本研究将供水管网优化设计经济性问题转化为以管道直径为决策变量的最小成本优化问题。管网造价  $f$  越小,管网系统经济性越高,公式表示为:

$$f(D_1, D_2, \dots, D_{np}) = \arg \min \sum_{i=1}^{np} C_i(D_i) L_i \quad (1)$$

式中: $D_1, D_2, \dots, D_{np}$ 为选取的  $np$  个商业离散管径; $D_i$ 为管道  $i$  的直径,mm; $C_i(D_i)$ 为管径  $D_i$  的管道单位成本,欧元/m; $L_i$ 为管道  $i$  的长度,m; $np$ 为管网中的管道总数。

供水管网各节点除满足最小压力水头外,还得留一定的富余水头,以保证供水管网能有足够水压克服水头损失,保障各用户用水需求。而节点富余水头分布可能均匀,可能离散,分布不均时,会造成管网局部高压或低压的供水不稳定问题。因此,本研究引入节点富余水头方差作为供水管网优化设计的可靠性目标函数,以此表征管网节点富余水头的分布情况。节点富余水头方差越小,表明节点富余水头分布越均匀,管网正常工作的概率就越大,供水管网可靠性就越高。可见,利用节点富余水头方差作为可靠性指标,无需复杂理论基础,具有原理简单、计算简便等优点。节点富余水头方差  $S$  公式:

$$S = \sum_{j=1}^m [(H_j - H_j^{\min}) - \frac{\sum_{j=1}^m (H_j - H_j^{\min})}{m}]^2 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

式中： $m$ 为管网中节点总数； $H_j$ 为节点 $j$ 处的水头， $m$ ； $H_j^{\min}$ 为节点 $j$ 所需的最小水头， $m$ 。

### 1.2 约束条件

求与整个管网管道尺寸（直径）组合相对应的最小成本时应满足以下条件：

① 节点水头约束：

$$H_j \geq H_j^{\min} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

② 可选用的管道尺寸集合：

$$D_i \in \{D\} \quad i = 1, 2, \dots, np \quad (4)$$

式中： $\{D\}$ 为管道尺寸集合。

## 2 冗余选择策略差分进化算法

由 Storn 和 Price<sup>[6]</sup>首次提出的差分进化算法是一种功能强大且广泛用于供水管网优化设计的进化算法。一个标准差分进化算法可概括为种群初始化、变异、交叉和选择几个步骤；更新种群之后，逐代重复变异、交叉和选择的步骤，直到找到最优解或者达到预设的终止条件（通常在进化时间内指定最大迭代代数  $G_{\max}$ ）。

与花费大量时间寻求实际大规模供水管网优化设计问题的全局最优解相比，在合适的计算开销范围内找到近似最优解是一个更值得关注的问题，且很少有学者对选择策略进行研究，本研究在引入种群冗余的基础上，首次提出了一种冗余选择策略。在对目标函数值一对一选择的基础上，往每一代种群中重复添加当代最优解向量形成新的父代种群，增加种群冗余，适当降低种群多样性，引导种群向更好的方向进化，提高计算效率。本研究提出的种群冗余可以解释为种群中重复最优解部分，种群冗余度是指种群中重复最优解部分与原先设定的默认最佳种群规模之比。种群冗余度越大，种群中最优个体重复越多，算法的计算效率就越高。由此可见，种群冗余度与计算效率呈正相关的特性。

每个种群的冗余度  $R$  可以表示为：

$$R = \frac{P}{NP} \times 100\% \quad (5)$$

式中： $P$ 为种群冗余数； $NP$ 为种群规模。

冗余选择策略的主要步骤可以概括为以下3步，原理如图1所示。①剔除父代种群  $X_c$  中的重复向量得到  $X_{c,1}$ ，如果剔除重数  $M$  小于种群冗余数  $P$ ，即  $M < P$ ，则进行下一步；②重复生成冗余数  $P$  个最优解向量  $(x_c^*)$ ，填在  $X_{c,2}$  种群的前排个体位置，并在  $X_{c,1}$  种群中从上到下依次选择解向量填到  $X_{c,2}$  矩阵

中，直到  $X_{c,2}$  的维数和  $X_{c,1}$  的维数相等；③以  $X_{c,2}$  作为下一代的父代种群  $X_{c+1}$ ，重复差分进化算法的迭代过程。

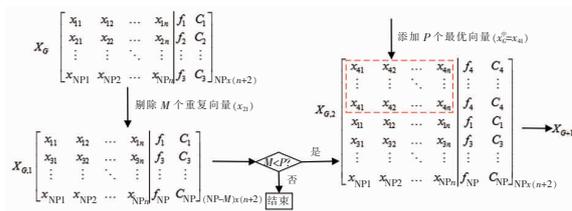


图1 冗余选择策略原理

Fig.1 Principle of redundant selection strategy

所提出的冗余选择策略，一方面可在种群中重复添加冗余数个最优解向量，加快向最优解收敛的速度，另一方面又可以控制添加最优解向量的个数，不至于降低太多的种群多样性而造成早熟收敛。

## 3 案例研究与结果分析

### 3.1 BIN 模型

以 BIN 基准管网为例，验证基于冗余选择策略差分进化的供水管网多目标优化设计的合理性。BIN 基准管网是一个位于西班牙的多水源灌溉管网<sup>[7]</sup>，包含4个水源、443个节点、454个管道和8个环路，管网布局如图2所示。市售可选管径是10种商用PVC管，直径范围125~600mm，所以该优化设计模型的搜索空间是  $10^{454}$ ，是个较复杂的实际大管网。管道绝对粗糙度系数  $k = 0.0025$  mm，每个节点要求的最小压力水头为20m。



图2 BIN 管网布局

Fig.2 Layout of the BIN

利用 MATLAB 和 EPANET 软件，建立了以供水管网造价和可靠性为目标函数的优化设计模型。使用 MATLAB 编写了改进差分进化算法的程序代码，

并通过 EPANET 工具箱把 EPANET 链接到 MATLAB 中。运行程序代码,会在每次功能评估中执行管网水力分析,得到每个节点水压和管段流量等数据。在明确目标函数和约束条件后,确定改进差分进化算法中的其他参数:种群规模  $NP = 500$ 、最大允许迭代代数  $G = 6\ 000$  以及每次差分进化试验的最大允许评估数  $= 3\ 000\ 000$ 。

模拟试验设计如下:①为保证结果对比的公平性与客观性,且考虑到 BIN 管网的复杂性,两种算法均选用  $F = 0.3$  和  $CR = 0.5$ 。对经济性指标进行分析对比时,前 6 个冗余度、 $F$  和  $CR$  参数组合运行 50 次,后 4 个冗余度组合及标准差分独立运行 10 次,共运行 350 次,算法性能评估包括搜索速度和搜索质量两个方面;对可靠性指标进行分析对比时,每个参数组合运行 10 次,共运行 110 次。②为探究冗余度对  $F$  和  $CR$  的影响,本研究还对标准差分以及冗余度为  $\{2\%, 4\%, 6\%\}$ 、 $F \{0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9\}$  和  $CR \{0.2, 0.4, 0.6, 0.8\}$  的每个参数组合均运行 3 次取其最小值,共运行 12 次。

### 3.2 结果与讨论

① 默认最佳参数组合 ( $F = 0.3$ 、 $CR = 0.5$ ) 下的算法性能评估。为验证改进差分进化算法在提高计算效率和搜索质量方面的有效性,图3给出了改

进和标准差分进化算法的平均收敛评估次数和平均成本随冗余度变化趋势。改进算法的平均收敛评估次数随冗余度增大呈明显的下降趋势,且都比标准算法的低,说明改进差分进化算法在提高计算效率方面明显优于标准差分进化算法。改进算法的平均成本在冗余度为  $1\% \sim 6\%$  范围内变化缓慢且低于标准算法,而在冗余度大于  $6\%$  时增长速度较快且明显高于标准算法,说明冗余度越大对解质量的影响也越大,较好的冗余度范围是  $1\% \sim 6\%$ 。

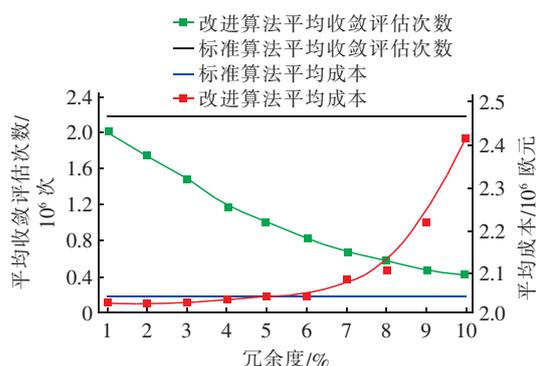


图3 平均收敛评估次数和平均成本随冗余度的变化趋势

Fig.3 Trend chart of average convergence evaluations times and average cost with redundancy

具体针对解质量方面,表1详细说明了改进和标准差分进化算法在 BIN 管网中的测试结果。

表1 标准和改进差分进化算法在 BIN 管网上的测试结果

Tab.1 Test results of the standard DE and the improved DE algorithm applied to BIN

冗余度	最低成本/ 10 <sup>6</sup> 欧元	平均成本/ 10 <sup>6</sup> 欧元	DMO/%	平均成本 下降率/%	平均收敛 评估次数	计算开销 下降率/%	运行次数
标准	1.985	2.035	5.93		2 194 600		10
1%	1.984	2.019	5.11	0.776	2 017 130	8.087	50
2%	1.985	2.004*	4.21*	1.043	1 740 040	20.713	50
3%	1.984	2.022	5.24	0.655	1 503 920	31.472	50
4%	1.963	2.027	5.51	0.400	1 172 950	46.553	50
5%	1.927*	2.033	5.72	0.098	1 019 920	53.526	50
6%	1.975	2.034	5.88	0.049	817 100	62.768*	50
7%	2.014	2.072	7.84	-1.798	654 100	70.195	10
8%	2.028	2.098	9.21	-3.092	578 300	73.649	10
9%	2.177	2.212	15.15	-8.697	451 500	79.427	10
10%	2.320	2.406	25.25	-18.233	407 150	81.448	10

注: ①DMO 为平均成本与当前已知最低成本的百分比偏差,当前已知最低成本为 Zheng 等<sup>[8]</sup>发现的  $1.923 \times 10^6$  欧元; ②“\*”是较好的结果;③“平均成本下降率”中的负值表示改进差分进化算法的平均成本比标准差分进化算法的高; ④标准和改进差分进化算法均选用同一个默认最佳参数组合  $F = 0.3$ 、 $CR = 0.5$ 。

可见,针对冗余度为  $1\% \sim 6\%$  的情况,改进算法得到的最低成本、平均成本和 DMO 都比标准差分进化算法的结果更好,其中冗余度为  $5\%$  时得到

$1.927 \times 10^6$  欧元的最低成本,表明冗余度在  $1\% \sim 6\%$  范围内能得到更优良的解,可有效解决管网优化问题。另外,当冗余度为  $6\%$  时,平均成本下降率仅

为0.049%,但收敛所需计算时间节省62.768%,说明该算法在保证解质量的情况下可大大提高计算效率以寻求近似最优解,在大规模实际供水管网优化设计中很有应用前景。

就搜索速度方面,图4给出了标准差分进化算法与冗余度为3%、6%和9%的改进差分进化算法收敛曲线。可见,改进算法的3条收敛曲线下降斜率均比标准算法的要大,说明改进算法的搜索速度比标准算法的更快,更容易引导种群向更好的方向进化。此外,随着冗余度的增大,曲线下下降斜率不断增加,说明搜索速度与冗余度成正比,冗余度越大,搜索速度也越快,越能够快速获取近似最优解。

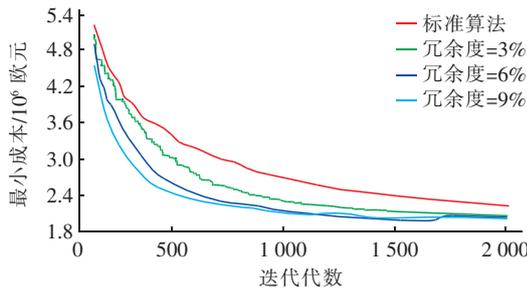


图4 标准与改进差分进化算法收敛曲线

Fig.4 Convergence curves of SDEA and RDEA

为进一步探究改进差分进化算法在供水管网可靠性和经济性方面的表现,图5给出了不同冗余度下的节点富余水头方差和管网平均成本计算结果。

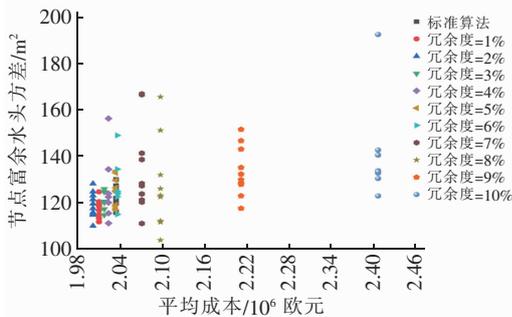


图5 不同冗余度下节点富余水头方差和平均成本计算结果

Fig.5 Computed results of variances of node surplus head and average costs with different redundancies

图5中11种算法各自得到10个方案,共包含110个节点富余水头方差和11个平均成本。经分析得出,在同一冗余度下,随着节点富余水头方差的减小,管网系统内水压分布趋于均匀,供水可靠性提高,但管网成本不断增加,导致经济性降低,这与刘书明等<sup>[9]</sup>的研究结果一致。此外,从图5可见,冗余

度为1%~3%时,节点富余水头方差分布集中且数值较小,平均成本也较低,且都优于标准差分进化算法所得结果,说明冗余度为1%~3%时,节点富余水头方差和平均成本均可得到较小值,管网可靠性和经济较高,是冗余度最佳取值范围。

② 冗余度对  $F$  和 CR 最佳取值范围的影响。为探究冗余度对  $F$  和 CR 最佳取值范围的影响,图6给出了标准算法和3个冗余度的改进差分进化算法结果等值线图。从图6可见,随着冗余度增大,CR 最佳取值范围缩小很快,且比  $F$  更明显,说明冗余度对 CR 最佳取值范围的影响比  $F$  大,可见加入冗余度加强算法局部收敛能力,更容易收敛到次优解。从图6还可看出,  $F$  最佳取值范围是0.1~0.3, CR 取0.4或其附近最佳。

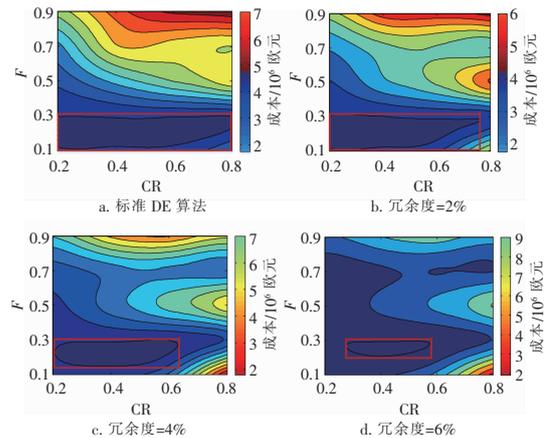


图6 标准和改进差分进化算法结果等值线图

Fig.6 Contour plots of the results of SDEA and RDEA

## 4 结论

开展了基于冗余选择策略差分进化的供水管网多目标优化研究,采用BIN基准管网测试和验证该算法的有效性。结果表明:①在保证解精度的情况下,可提高62.768%的计算效率,且得到  $1.927 \times 10^6$  欧元的最低成本;②冗余度为1%~6%得到的经济性指标和冗余度为1%~3%得到的可靠性指标均优于标准差分进化算法,且搜索速度和管网成本随冗余度增大不断加大;③冗余度对CR的影响比对  $F$  的影响更显著,并得到  $F$  的最佳取值范围0.1~0.3,CR取0.4或其附近最佳。冗余选择策略差分进化算法可大大提高计算效率,能快速有效地获得供水管网优化问题的近似最优解。基于此,决策者可根据实际情况确定目标函数,选取合适参数进行供水管网优化设计,以达到不同优化目的。

## 参考文献:

- [1] KEEDWELL E C, KHU S T. Novel cellular automata approach to optimal water distribution network design[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2006, 20(1): 49–56.
- [2] MAIER H R, KAPELAN Z, KASPRZYK J, *et al.* Evolutionary algorithms and other metaheuristics in water resources: current status, research challenges and future directions [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2014, 62: 271–299.
- [3] ZHENG F F, ZECCHIN A C, SIMPSON A R. Self-adaptive differential evolution algorithm applied to water distribution system optimization [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2013, 27: 148–158.
- [4] 陈颖, 林盈, 胡晓敏. 多种群多策略的并行差分进化算法[J]. *计算机科学与探索*, 2014, 8(12): 1502–1510. CHEN Ying, LIN Ying, HU Xiaomin. Parallel differential evolution with multi-population and multi-strategy [J]. *Journal of Frontiers of Computer Science & Technology*, 2014, 8(12): 1502–1510 (in Chinese).
- [5] 刘勇, 于颖锐, 李满仓, 等. 基于自适应变异方法的差分进化算法[J]. *科技创新导报*, 2019, 16(21): 136–138. LIU Yong, YU Yingrui, LI Mancang, *et al.* Differential evolution algorithm based on adaptive mutation method [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2019, 16(21): 136–138 (in Chinese).
- [6] STORN R, PRICE K. Differential evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. *Journal of Global Optimization*, 1997, 11(4): 341–359.
- [7] RECA J, MARTINEZ J. Genetic algorithms for the design of looped irrigation water distribution networks [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(5): W05416.
- [8] ZHENG F F, SIMPSON A R, ZECCHIN A C. A combined NLP-differential evolution algorithm approach for the optimization of looped water distribution systems [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(8): W08531.
- [9] 刘书明, 李明明, 王欢欢, 等. 基于 NSGA-II 算法的给水管网多目标优化设计 [J]. *中国给水排水*, 2015, 31(5): 50–53. LIU Shuming, LI Mingming, WANG Huanhuan, *et al.* Multi-objective optimization design of water distribution system based on non-dominated sorting genetic algorithms-II [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(5): 50–53 (in Chinese).
- 作者简介: 杨佳莉 (1995–), 女, 白族, 云南大理人, 硕士研究生, 主要研究方向为供水管网优化。  
E-mail: 956985585@qq.com  
收稿日期: 2020-01-14  
修回日期: 2020-09-08
- (编辑: 孔红春)
- 
- (上接第 39 页)
- emission in low-oxygen simultaneous nitrification and denitrification process: sources and mechanisms [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 136: 444–451.
- [21] LATEEF S K, SOH B Z, KIMURA K. Direct membrane filtration of municipal wastewater with chemically enhanced backwash for recovery of organic matter [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 150: 149–155.
- [22] SANCHO I, LOPEZ-PALAU S, ARESPACOCCHAGA N, *et al.* New concepts on carbon redirection in wastewater treatment plants: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 647: 1373–1384.
- [23] 王淑莹, 彭永臻, 周利, 等. 用溶解氧浓度作为 SBR 法过程和反应时间控制参数 [J]. *中国环境科学*, 1998, 18(5): 415–418. WANG Shuying, PENG Yongzhen, ZHOU Li, *et al.* The control parameter of SBR process and its reaction time using DO [J]. *China Environmental Science*, 1998, 18(5): 415–418 (in Chinese).
- [24] BELCHIOR C A C, RUI A M A, LANDECK J A C. Dissolved oxygen control of the activated sludge wastewater treatment process using stable adaptive fuzzy control [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2012, 37: 152–162.
- 作者简介: 吴青 (1975–), 女, 河南新乡人, 博士, 主要从事水污染控制研究。  
E-mail: wuqingkuailie@hotmail.com  
收稿日期: 2020-06-30  
修回日期: 2020-07-20
- (编辑: 李德强)