



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.03.031

刘冬梅, 张弛, 李敏, 等. 基于多目标优化模型的雨水管网改建[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 183-187, 193. LIU Dong mei, ZHANG Chi, LI Min, WANG Yur tao, et al. Reconstruction of rainwater pipeline network based on multi objective optimization model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 183-187, 193. (in Chinese)

基于多目标优化模型的雨水管网改建

刘冬梅, 张 弛, 李 敏, 王运涛

(大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 雨水管网是城市排涝工程体系的重要组成部分, 如何科学经济地对现状雨水管网进行优化改建, 是提升管网排水能力、缓解城市内涝的关键问题之一。建立以降低造价和工程量以及提高排水能力为目标的管网改建多目标优化模型, 以管径改建值作为变量, 利用 NSGA-II 多目标优化算法求解; 基于 Java 运行平台, 将 SWMM 源代码嵌入寻优过程, 实现程序自动调用水力学模拟软件, 得到快速获取可行解的新途径; 将新建模型应用于工程实例, 应用结果表明, 优化模型在保证工程合理性要求的前提下, 可快速获得多个经济可行的组合改建方案。研究对于雨水管网改建工作等具有借鉴意义。

关键词: 城市内涝; 雨水管网; 优化改建; 多目标优化模型; NSGA-II; SWMM; 耦合寻优

中图分类号: TU 992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)03-0183-05

Reconstruction of rainwater pipeline network based on multi-objective optimization model

LIU Dong mei, ZHANG Chi, LI Min, WANG Yur tao

(School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Rainwater pipeline network is an important part of urban drainage engineering system. Optimal reconstruction of the pipeline network scientifically and economically is the key to improving the capacity of its drainability and effectively relieving urban waterlogging disasters. In order to achieve this goal, a pipeline network optimal reconstruction model based on multi-objective optimization (NSGA-II) was established in this paper. There were three objective functions in this optimal reconstruction model including construction cost, drainability, and quantities. In addition, by invoking program source code, the paper realized automatically executing SWMM for hydraulics simulation. At last, the paper took a case for application whose results showed that this optimal reconstruction model could get feasible reconstruction plans and would have some referential value.

Key words: urban waterlogging disasters; rainwater pipeline network; optimal reconstruction; multi-objective optimal model; NSGA-II; SWMM; coupling optimization

我国许多城市, 尤其是东部降雨频发城市, 现状雨水管网普遍存在设计标准低、管理维护机制不健全等问题^[1], 在极端暴雨天气频现、下垫面条件变化等外界因素^[2]的综合影响下, 现状雨水管网过流能

力难以满足城市排涝需求, 亟需对其进行改建。城市雨水管网的改建需要考虑多方面的问题, 诸如新旧管网的衔接、对城市交通的影响等等, 因此管网改建应围绕多目标开展, 同时, 将优化思想引入改建工

收稿日期: 2015-11-08 修回日期: 2016-03-19 网络出版时间: 016-05-05

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160505.1107.008.html>

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(1102851037); 国家自然科学基金(51209032)

Fund: The Fundamental Research Funds for the Central Universities (1102851037); National Natural Science Foundation of China (51209032)

作者简介: 刘冬梅(1989), 女, 吉林九台人, 主要从事水文学及水资源及城市排水除涝方面研究。E-mail: 1076342346@qq.com

通讯作者: 李 敏(1975), 女, 河北安国人, 副教授, 博士, 主要从事防洪减灾与模糊水文水资源学研究。E-mail: 773693298@qq.com

作, 以实现突破传统排水工作中过分依赖于设计者经验与能力的弊端。雨水管网优化模型按照应用对象不同, 可分为针对规划新区的优化设计和老城区的优化改建; 目前, 优化设计相关研究^[39]已初具规模, 并成功应用于新城区排水规划中, 但由于技术、经济等原因限制, 已建城区雨水管网改建研究却未引起足够重视, 现有改建优化模型中, 研究者大多建立以管网造价为目标函数的单目标优化模型, 或在此基础建立考虑排水性能优化的多目标优化模型, 求解过程掺杂大量人工操作。针对以上问题, 本文提出了以提升排水能力、降低改建成本以及施工复杂度为目标函数的多目标优化改建模型; 利用面向多目标优化问题求解的改进遗传算法 (NSGA-0)^[10]和水力学模拟软件 SWMM^[11]联合进行求解, 为雨水管网改建提供新的研究方向。

1 雨水管网多目标优化模型

1.1 优化模型的目标函数与约束条件

1.1.1 优化的目标函数

为实现改建过程中降低造价及工程量, 同时提升排水能力的优化目标, 本文确立 3 个目标函数。其中, f_1 是费用目标, 因本文针对管道进行优化, 故费用目标包含管道施工、材料造价等重要指标, 文献[9]已经做出具体说明; f_2 是管网排水性能目标, 用溢流量表达, 通过调用 SWMM 源代码进行水力学模拟求值; f_3 是施工目标, 由于管段改建数量决定工程合理性以及工程量, 故施工目标用改建数量进行量化。以上三个目标都是越小越优型, 存在相互联系制约关系。各地的施工条件和材料价格都有差异, 很难找到具有很强说服力的算例来说明哪一种单价模型更适合于计算。文献[9]依据工程概算规范, 应用 SPSS 工具软件对管道单价模型进行分析计算, 得到如下费用模型:

$$F = C_1 + C_2 H + C_3 H^2 + C_4 H D + C_5 D + C_6 D^2 + C_7 D^3 \quad (1)$$

式中: F 为各管径管道单位长度敷设造价; D 为管径 (mm); H 为管道埋设深度 (m); C_1, C_2, \dots, C_7 为地方系数和地方指数, 随地区不同而变化, 其中: $C_1 = 425.34, C_2 = 4903.39, C_3 = 69.89, C_4 = 1.43, C_5 = -18.69, C_6 = 0.06, C_7 \approx 0$ 。

费用模型(1)科学合理、计算精度高, 但需要根据本文研究目标与内容做出如下几方面修改: 本文研究对象为整个管网系统, 故应该在上式(1)单价模型的基础上乘以管段长度; 本文以管径 D 为优化变

量, 埋深 H 取现状值, 地方系数与指数按式(1)中内容取值, 由此得到改建费用目标见式(2):

$$f_1 = \min \sum (425.34 + 4903.39h + 69.89h^2 + 1.43hd_i - 18.69d_i + 0.06d_i^2) \quad (2)$$

式中: h 为管线埋深 (m) 取现状值, 不作为优化变量; l_i 为管段 i 长度; d_i 为管段 i 管径改建值 (mm), $d_i = d_j + d_k$, d_j 为管径改动值, d_k 为管径初始值。 f_1 为费用函数, 是造价优化的集中反映。

$$f_2 = \min (\sum Q_i) \quad (3)$$

$$f_3 = \min (\text{count}(d_i)) \quad (4)$$

式中: Q_i 为管网溢流量 (m^3)。 f_2 是评价管网排水性能的重要指标, 溢流量少则地面积水少, 管网排水能力强; $\text{count}(d_i)$ 为改建管段数量。在改建优化过程中, 需结合具体工况进行, 改建数量少则可以在降低造价的同时减少对施工区域周边环境的影响。

1.1.2 优化的约束条件

约束条件主要包括管径合理取值 (改建后管径满足规范要求)、管网拓扑关系合理以及满足水力学条件。管径参考国家设计规范及市售管径范围合理取值; 为降低工程造价、减少所用材料的不必要浪费, 拓扑关系应满足改建后的同一段管道下游管径大于等于上游管径; 相邻管径差值等其他水力学约束可通过 SWMM 模拟实现。

$$d_i \in D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\} \quad (5)$$

式中: D 为市售可选管径集合, 根据《室外排水设计规范》(GBJ14-87) 和《给水排水设计手册》^{[12][13]} 进行选择。

$$0 \leq d_{i+1} - d_i = C \quad (6)$$

式中: d_i 为上游管段; d_{i+1} 为下游管段; 进行管网优化设计时, C 由设计流量确定, 进行优化改建时, C 由 SWMM 模拟实现最优取值。

管网其他水力条件都作为约束条件体现在 SWMM 模型中, 在求解过程中将以上约束条件通过惩罚的方法加入目标函数, 从而达到考虑约束条件寻求最优解的目的。加入惩罚函数后目标函数如下式:

$$F_1 = f_1 + P_1 \times H \quad (7)$$

$$F_2 = f_2 + P_2 \times H \quad (8)$$

$$F_3 = f_3 + P_3 \times H \quad (9)$$

式中: F_1, F_2, F_3 为加入惩罚函数的目标函数; f_1, f_2, f_3 为初始目标函数; P_1, P_2, P_3 分别为惩罚数值, 目标值重要性不同, 惩罚数值随之产生差异变化; H 为 $(d_i - d_{i+1})$, 即改建管线上、下游管段管径差值, 当 $H < 0$, 取 $H = 0$ 。

1.2 优化算法与水力模拟

管网多目标优化改建求解过程涉及三个关键问题。其一,确定适合求解此类问题的数学方法,建立实际问题与寻优计算之间的联系;其二,应用水力模拟软件,计算各管径初始化组合方案的管井溢流量,评价实施改建方案后排水能力变化情况;最后,基于同一程序运行平台,实现二者的无缝结合,实现真正意义上的寻优。目前用于降雨-径流模拟的主流软件包括 SLAMM、STORM^[14]、SWMM 等,SWMM 具有功能丰富、模拟效果准确和易于学习掌握等突出特点;另外区域管网改建优化问题具有高度复杂、非线性等特点,宜采用多目标进化算法进行求解,Kalyanmoy Deb 提出的 NSGA-II,可同时采用精英策略和多样性保护方法,计算效率高且简单^[15-17]。以上两种软件及算法,适用于解决管网改建优化涉及到的关键问题。

如何概化城市雨水管网、将概化的雨水管网信息转化成 SWMM 特定的数据格式,是使用 SWMM 进行水力模拟的基础工作。本文在区域管网概化、DEM 生成、汇水区的划分^[18]等关键工作基础上,制作 SWMM 所需的输入文件,模拟后得到溢流量;采用 NSGA-II 方法进行改建方案寻优。

应用 NSGA-II 算法进行优化时,主要步骤包括编解码和遗传操作等。其中,编解码过程是为了建立优化变量(本研究为改建管径值)与进行遗传操作的染色体之间的对应关系,进而建立所求解管网优化改建问题与算法之间的联系;其他操作所涉及经验参数取算法默认值。采用适用于处理排水管网这样大空间搜索问题的整形编码方式^[19],将管段改建量 d_j 作为变量,依次对应于相应整数,并按一定顺序连接起来构成进行遗传操作所需的染色体编码。管段改建量 d_j 为 0 mm 对应整数 0,管径增量为 50 mm,整数编码增量为 1,以此类推,管径改建最大值 1 100 mm,则编码对应整数 21。

解码后,需要对解码的改建值做如下处理,即管径 $d_i = d_j + d_k$ 。其中: d_i 为目标函数中管径; d_k 为现状管网对应管径; d_j 为对应决策变量。这样处理的目的是合理评估改建后管网排水性能。雨水管网排水性能以地面积水量(管网溢流量 Q_i) 为重要评定指标,为了获取该部分数值,需通过水力学计算获取,本文借助 SWMM 模拟软件实现。

2 工程实例

大连市某排水区为雨污分流体制,雨水管线总长 2.7 km,集水区总面积为 0.35 km²。由于缺乏

有效的管理与维护、加之运行年代久远,管网管径偏小、老化等问题严重,排水能力无法满足城市发展需要。统计资料显示,该排水区内分布着两处常年易涝点,汛期频繁出现多处大面积积水,积水深度为 0.2~0.5 m,积水范围为 200~4 000 m²,持续至降雨结束,严重阻碍交通正常通行,亟需对该区雨水管网进行改建。

该地区现状设计标准为 2 年一遇降雨标准。随着该地区经济发展、建筑物与人口密度增长,按照《室外排水设计规范》^[20] 相关规定,降雨设计标准应达到 3 年一遇标准,以满足当前城市排水需要和远期排水规划要求。现有大连市 3 年一遇 2 h 降雨资料,以及该地区现状雨水管网分布等资料,采用第一节建立的雨水管网多目标优化模型,对该地区雨水管网改建方案进行优化求解。首先,将研究区雨水管网、降雨、下垫面资料等处理成 SWMM 输入格式 .inp,并运行模拟,确保模型运行成功;然后,建立包含费用、排水能力提升、施工三个目标的多目标优化模型,应用 NSGA-II 算法求解,其中,将改建管径增量作为费用函数 f_1 的优化变量,每次优化求解过程中初始化结果与各管段管径初始值之和作为改建管径组合方案,通过自动调用 SWMM 得到该方案下溢流量值,即管网排水能力提升目标 f_2 ;每次优化方案中改建管段数量总量作为施工目标 f_3 量化指标,通过不断寻优求解,最终得到令人满意的非劣可行解。

考虑改建投资及施工等因素限制,选取改建管段数量低于 38 根(占整体 60%)的优化方案(结果见表 1,各改建方案对应造价及溢流量变化趋势见图 1)。

表 1 为管网不同管道改建数量所对应的造价及溢流量值。改建数量为 0,此时并未进行改建,造价为 0,溢流量高达 1 203 m³;随着改建数量的增加,造价逐渐递增,溢流量递减,当改建数量达到 37,此时造价 97 万元,相应溢流量降到 515 m³,排水性能提升约 57%。图 1 可以更加清晰的描述造价与改建数量、溢流量之间的关系:造价与改建数量大致呈正比关系,改建数量增加,相应造价随之增加;而溢流量与改建数量大致成反比关系,改建数量增加则管网排水能力得以提高,溢流量减少。

通过深入分析可知:造价、改建数量与溢流量三者之间并不是完全成正比的关系。对比改建方案 6 和 7,方案 7 改建管道数量 20 根,大于方案 6 的 19 根,但造价与溢流量均低于方案 6,这是因为管网中各管道的长度不均等,且在整个管网系统中所具有

表 1 三年一遇暴雨强度下管网改建结果

Tab. 1 The optimization results for pipeline network reconstruction based on rainfall once per 3 years

改建方案	改建数量/根	改建价格/万元	溢流量/m ³	改建方案	改建数量/根	改建价格/万元	溢流量/m ³
-	0	0.00	1 203.07	6	19	59.32	799.30
1	1	0.17	1 160.28	7	20	59.11	782.12
2	5	5.54	1 117.30	8	28	72.77	618.82
3	6	6.37	1 091.53	9	30	74.35	601.63
4	8	23.58	1 022.77	10	31	96.90	593.03
5	9	27.40	988.39	11	37	97.00	515.68

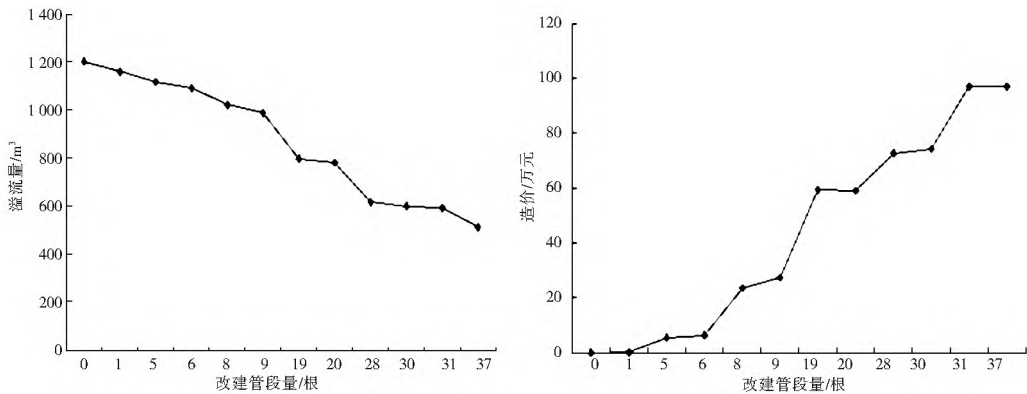


图 1 各改建方案中目标值对比情况

Fig. 1 The index values comparison of alternatives

的重要程度也不同,本文中重要程度指在管网排水方面发挥的作用。管道所处的地理位置、地形条件、干支流类型和是否为超载管道等因素,是决定该管道重要程度的重要指标,因此,在评定改建方案合理性时,需要侧重考虑上述影响因素。

改建管道分布合理性分析指针对不同管网改建组合方案,分析其改建位置、数量的成因是否满足经济要求、设计规范及工程实践经验,以便对优化结果进行评估。选取改建方案 1、方案 3 和方案 6 进行具体分析,各方案改建管道平面布置见图 2。

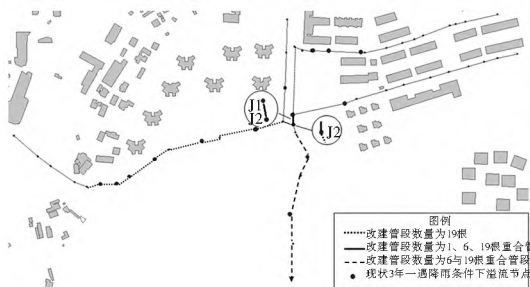


图 2 改建管道平面位置

Fig. 2 Reconstructed pipes location in the catchment

方案 1: 改建数量为 1(见图 2 加粗线型管段),管径由 400 mm 增加到 500 mm,小于下游管径的 700 mm,满足约束。经分析得知,现状黄色管段管径与上游两段管径大小相等,过流能力小;进一步通过 SWMM 进行模拟校核可知,黄色管段在降雨量

最大时段出现管渠超载,进水节点 J1 发生节点超载现象,且持续 30 min,期间地面积水水位达 0.65 m,溢流总量 31m³。通过对其进行改建,J1 及管渠超载现象均消失,溢流总量减少 43 m³。改建管段位于广场,施工对周边交通影响较小,实际应用中可行。

方案 3: 改建数量为 6(见图 2 长虚线型管段),改建管段位于整个管网系统下游近雨水口,设计管径偏低导致过流能力受限,上游节点 J2 出现溢流量达 395 m³,占溢流总量的 32.86%,是主要溢流节点。通过对其进行改建,使节点 J2 下游排水通畅,此时该节点溢流量减少 69 m³,管网溢流总量减少 112 m³,可见改建组合方案效果明显。改建管段位于广场及公园,施工对周边环境等影响较小,具有工程实际意义。

方案 6: 改建数量为 19(见图 2 短虚线型管段),改建管段主要集中位于溢流节点或其下游,这样的改建方式对于减少节点溢流量,缓解管道过流压力,效果明显;进一步对研究区域雨水系统历史及现状资料分析可知,原有集水区域有截洪沟辅助排水措施,设计管径组合方案的排水能力满足要求;但随着近年城市建设快速发展,下垫面条件改变致使径流系数明显提高,同时大部分截洪沟废除,集水区径流只能依靠管网排放,原有设计管径无法满足要求。通过改建,管网溢流总量减少 321 m³。虽然管网溢

流量降低明显,即管网排水能力提升较高,但改建管网主要位于主干道路,施工对交通等影响较大,改建方案在实际应用中受限。

通过以上分析,各改建方案合理性分析指标及判断结果见表2。

表2 改建方案合理性分析

Tab. 2 Rationality analysis of reconstruction plan

改建方案	改建数量/根	溢流节点/个	超载管段/根	溢流量减少/ m^3	改建位置	合理性
1	1	2	1	43	广场	合理
3	6	3	4	112	公园	合理
6	19	14	11	321	主干道路	较合理

3 结语

与城市雨水管网改建相关研究相比,本文研究具有以下两方面改进:(1)重新构建包含三个目标函数的多目标优化模型,除考虑改建费用及排水性能目标外,还加入施工目标,将管网改建对环境及城市生产生活的影响纳入考虑范围,优化模型更加贴近工程实际;(2)通过调用接口的建立,将SWMM源代码嵌入NSGA-II优化计算过程,实现水力学模拟软件与数学计算方法的结合,不仅可以获得经济上可接受、排涝效果较明显且施工位置可行的改建方案,还可以提高优化求解的效率与精度;(3)将模型应用于工程实例,研究结果表明优化模型在保证工程合理性要求的前提下,可快速获得多个经济可行的组合改建方案。研究对于雨水管网改建工作等具有借鉴意义。

参考文献(References):

[1] 荣梅. 老城区市政排水管网改造设计浅析[J]. 城市道桥与防洪, 2012(9): 175-177. (RONG Mei. Elementary analysis on reconstruction of city municipal drainage pipeline network[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2012(9): 175-177. (in Chinese))

[2] 吴玉成. 我国城市内涝灾害频发原因分析[J]. 中国防汛抗旱, 2011, 21(6): 7-8. (WU Yur cheng. Disaster of water logging reasons analysis of China urban[J]. China Flood & Drought Management, 2011, 21(6): 7-8. (in Chinese))

[3] 李阳. 城市雨水管网系统优化设计研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010. (LI Yang. Optimazation design for urban rainwater pipe networks system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010. (in Chinese))

[4] 张桂彬. 基于可靠性的城市雨水管网优化设计研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009. (ZHANG Gui bin. The research of optimal design of urban rainwater pipe networks based on reliability. [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in

Chinese))

[5] 李贵义. 排水管网优化设计[J]. 中国给水排水, 1986(5): 18-23. (LI Gui yi. The optimization of drainage network[J]. China Water & Wastewater, 1986, 5: 18-23. (in Chinese))

[6] 王赫婧. 城市雨水管网多目标优化设计研究[D]. 天津: 天津大学, 2011. (WANG He jing. The multi objective optimization design research of city stormwater network[D]. Tianjing: Tianjing University, 2011. (in Chinese))

[7] 郭宇峰. 雨水管网多目标优化设计的探讨[J]. 山西建筑, 2011, 37(21): 121-122. (GUO Yur feng. Inquiry on multi objective optimization of rainwater pipe network[J]. Shanxi Architecture, 2011, 37(21): 121-122. (in Chinese))

[8] 丁煜, 柯水洲. 排水管网改建计算机辅助优化设计系统[J]. 湖南城建高等专科学校学报, 2001, 10(2): 22-24. (DNIG Yu, KE Shur zhou. On CAD optimization system used in reconstruction of drainage network[J]. Journal Of Hunan Urban Construction Collage, 2001, 10(2): 22-24. (in Chinese))

[9] 董颖. 排水管网系统改扩建优化设计研究—以浙江省某经济开发区排水管网改扩建工程为例[D]. 西安: 西安理工大学, 2006. (DONG Ying. The study on optimal design to rehabilitation and extension of drainage pipe network —taking the project of drainage pipe network in an zone for example[D]. Xi an: Xi an University of Technology, 2006. (in Chinese))

[10] 高媛. 非支配排序遗传算法(NSGA)的研究与应用[D]. 浙江: 浙江大学, 2006. (GAO Yuan. Non dominated sorting genetic algorithm and its applications[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2006. (in Chinese))

[11] Rossman LA. Storm water management model, V5, user's manual [M]. USA: US Environmental Protection Agency, 2005.

[12] 中华人民共和国国家标准. GBJ14-87 室外排水设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1988. (GBJ14-87 Code for design of outdoor wastewater engineering[S]. Beijing: China Planning Press, 1988. (in Chinese))

[13] 北京市政设计院. 简明给水排水设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992. (Beijing general municipal engineering design & Research institute Co., Ltd. Plain water supply and drainage design manual[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1992. (in Chinese))

[14] Hydro Eng Center. Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model, STORM, generalised computer program 723-58 L7520 [M]. Davis, California: Hydrologic Engineering Center, US Corps of Engineers, 1977.

[15] 俞汝安, 董增川, 王好芳. 基于NSGA2的水库多目标优化[J]. 山东大学学报, 2010, 40(6): 124-128. (YUN Ru an, DONG Zeng chuan, WANG Ha o fang. Multiobjective optimization of a reservoir based on NSGA2[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2010, 40(6): 124-128. (in Chinese))

[16] Deb K, Agrawal S, Partap A, et al. A fast elitist nondominated sorting genetic algorithm of multi objective optimization: NSGA-III[A]. Proc of the Parallel Problem Solving from Nature VI Conf[C], Paris, 2000: 849-858.

(下转第193页)

- water storage[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(12): 1512-1516. (in Chinese)
- [8] 解建仓, 韩霖昌, 王涛, 等. 蓄水和蒸发条件下土壤过渡层中水盐运移规律研究[J]. 水利学报, 2009(40): 245-247. (XIE Jiancang, HAN Jinchang, WANG Tao, et al. Experiment and numerical simulation on salt movement in the transition layer of soil under ponding and evaporating conditions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(2) 239-244. (in Chinese))
- [9] 冯琛, 解建仓, 孙博, 等. 蓄水条件下水体土壤循环压盐机理试验研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1) 184-187. (FENG Chen, XIE Jiancang, SUN Bo, et al. Study of salt mechanism by cyclic changing water level in the storage condition [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(1) 184-187. (in Chinese))
- [10] 郭元裕. 农田水利学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995. (GUO Yuan yu. Irrigation and drainage engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 1995. (in Chinese))
- [11] 雷志栋, 苏立宁, 杨诗秀, 等. 青铜峡灌区水土资源平衡分析的探讨[J]. 水利学报, 2002(6): 11-14. (LEI Zhidong, SU Lining, YANG Shixiu, et al. Balance analysis of water resources in Qingtongxia Irrigation Area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(6): 11-14. (in Chinese))
- [12] 李凤霞, 郭永忠, 王学琴, 等. 不同改良措施对宁夏盐碱地土壤微生物及苜蓿生物量的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(30) 49-55. (LI Fengxia, GUO Yongzhong, WANG Xueqin, et al. Effect of different soil improvement measures on microbial diversity and alfalfa biomass in saline alkali soil in Ningxia [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(30) 49-55. (in Chinese))
- [13] 韩霖昌, 解建仓, 王涛, 等. 陕西卤泊滩盐碱地“改排为蓄”后盐碱指标试验观测[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6) 59-67. (HAN Jinchang, XIE Jiancang, WANG Tao, et al. Experimental observation of saline alkali of soil in saline land after changing drainage to impoundment in Lubotan of Shaanxi Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(6) 59-67. (in Chinese))
- [14] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993. (WANG Zunqin, ZHU Shouquan, YU Renpei, et al. Salty soil in China[M]. Beijing: Science Press, 1993. (in Chinese))
- [15] 李彬, 王志春, 孙志高, 等. 中国盐碱地资源与可持续利用研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 154-158. (LI Bing, WANG Zhichun, SUN Zhigao, et al. Resources and sustainable resource[J]. Exploitation Salinized Land in China. 2005, 23(2): 154-158. (in Chinese))
- [16] 周和平, 张立新, 禹锋, 等. 我国盐碱地改良技术综述及展望[J]. 现代农业科技, 2007(11): 159-164. (ZHOU Heiping, ZHANG Lixin, YU Feng, et al. Research progress of the improvement on saline alkali technology in China[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2007(11): 159-164. (in Chinese))
- [17] 王水献, 杨鹏年, 董新光, 等. 内陆河流域绿洲灌区盐碱地改良分区及治理模式探究—以新疆焉耆县平原灌区为例[J]. 节水灌溉, 2008, (3): 5-8. (WANG Shuixian, YANG Pengnian, DONG Xiguang, et al. Study on control mode and amelioration regionalization for Salt-affect land in oasis irrigation district of inland river basin[J]. Water Saving Irrigation, 2008, (3): 5-8. (in Chinese))
- [18] Zhang Jianfeng, Xing Shangjun, Zhang Xudong. Principles and practice of forestation in saline soil in China[J]. Chinese Forestry Science And Technology, 2004, 3(2): 62-70(in English).
- [19] Western Sydney Regional Organisation of Councils. Western Sydney Regional State of the Environment Report 2000. Sydney. 2000.
- [20] 刘建红. 盐碱地开发治理研究[J]. 山西农业科学, 2008(12): 51-53. (LIU Jianhong. Research progress of development and control of saline land[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2008(12): 51-53. (in Chinese))
- [21] 王伟, 解建仓, 黄俊铭, 等. 盐碱地治理新模式研究[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(5) 118-122. (WANG Wei, XIE Jiancang, HUANG Junming, et al. Study on the new improvement mode for saline land[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2009, 20(5) 118-122. (in Chinese))
- [22] Guitjens J C. Drainage design for water quality management: overview[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1997, 123(3): 148-153.
- [23] 张建锋. 盐碱地的生态修复研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4): 74-78. (ZHANG Jianfeng. Discussion on ecological rehabilitation of salt affected soils[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(4): 74-78. (in Chinese))

(上接第 187 页)

- [17] 郑向伟, 刘弘. 多目标进化算法研究进展[J]. 计算机科学, 2007, 34(7): 187-192. (ZHENG Xiangwei, LIU Hong. Progress of research on multi objective evolutionary algorithms [J]. Computer Science, 2007, 34(7): 187-192. (in Chinese))
- [18] 李彦伟, 尤学一, 季民, 等. 基于 SWMM 模型的雨水管网优化[J]. 中国给水排水, 2010, 26(23): 40-43. (LI Yanwei, YOU Xueyi, JI Min, et al. Optimization of rainwater drainage system based on SWMM[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(23): 40-43. (in Chinese))
- [19] 张超群, 郑建国, 钱洁. 遗传算法编码方案比较[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(3): 819-822. (ZHANG Chaqun, ZHENG Jianguo, QIAN Jie. Comparison of coding schemes for genetic algorithms[J]. Application Research of Computers, 2011, 28(3): 819-822. (in Chinese))
- [20] 中华人民共和国国家标准. GB50014-2006 室外排水设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006. (GB50014-2006 Code for design of outdoor wastewater engineering[S]. Beijing: China Planning Press, 2006. (in Chinese))