

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2017. 05. 009

城市供水产销差率与漏损控制研究进展

王俊岭¹,徐怡¹,韩伟²,李爽²,张雅君¹,冯萃敏¹,许萍¹

(1. 北京建筑大学城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室,北京 100044;
2. 北京首创股份有限公司,北京 100028)

摘要:针对产销差率居高不下这一供水行业问题,研究了供水产销差率的定义和组成、水平衡分析、国内外供水产销差率及漏损现状,以及当前控制产销差率、漏损率的技术和方法,如DMA(district metering area)分区、管网压力控制、检漏工具和管网建模等。降低产销差率是一项综合性的任务,需各种措施共同施用,才能有效提升供水企业的效益。
关键词:产销差率;漏损率;DMA分区;水平衡分析
中图分类号:TU991 **文献标识码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2017)05 - 0048 - 05

Research progress of non-revenue water and leakage control of urban water supply system

WANG Junling¹, XU Yi¹, HAN Wei², LI Shuang², ZHANG Yajun¹, FENG Cuimin¹, XU Ping¹

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment, Ministry of Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;
2. Beijing Capital Co., Ltd, Beijing 100028, China)

Abstract: Aiming at the problem of high rate of NRW (non-revenue water) in water supply system, the paper studied the definition and components of NRW, water balance analysis, present situation of NRW and leakage at home and abroad. Besides, the existing control techniques and methods of NRW and leakage control, such as district metering area, pipe network pressure control, leakage detection tools and pipe network modeling, have also been introduced here. In the end, reduction of NRW is a comprehensive task, so a variety of measures should be taken together to effectively improve the benefits of water supply enterprises.
Key words: non-revenue water; leakage rate; district metering area; water balance analysis

供水产销差率指供水企业在一段时间内供水量和售水量之差与供水量的比率,供水量和售水量之差也称无收益水量(non-revenue water, NRW)。供水产销差率是衡量供水企业产、供、销、建、管、修全过程管理水平的综合性指标,控制产销差率具有十分重要的意义^[1-2]。

供水产销差率产生的原因可分为漏水原因和非漏水原因^[3-5],其中漏损水和偷盗水占很大比例^[6]。研究表明,漏损水量是影响供水产销差率最主要的

因素,在一些低收入国家,漏损水量占供水量的50%~60%^[7-8]。偷盗水在世界范围内也普遍存在,例如在大城市的边缘地区会发现很大比例的非法连接管道^[9],这类现象给水务公司造成很大损失。因此,研究供水产销差率和漏损控制对于水务公司具有十分重要的意义。

1 水量平衡研究现状

水量平衡是指某用水区域内恒定存在的水量平

基金基目:国家水体污染与治理科技重大专项(2014ZX07405002C);北京市社会科学基金(14CSB006)
作者简介:王俊岭(1973—),男,副教授,博士,主要从事水资源综合利用研究。E-mail:wangjunling@bucea.edu.cn

衡关系,即该区域的输入水量之和等于输出水量之和^[10-11]。在供水系统水量漏损控制过程中,水量的计量和平衡是其中关键一步^[12-13]。水量平衡分析需要在管网中设置大量的流量监测点,对各环节的进出水量相关数据进行检测、收集。国际水协(International Water Association, IWA)在 2002 年建立了水量平衡表^[14-15],见表 1。

表 1 IWA 水量平衡表

指标		第一层	第二层	
供水量	有效供水量	售水量	计量售水量	售水量
			未计量售水量	
		免费售水量	计量免费水量	
			未计量水量	
	管网漏损量	表观漏损水量	非法用水	NRW
			水表计量误差	
		输水管及干管漏损水量		
实际漏损水量		水量调节设施漏损溢流水量		
		进户管漏损水量		

IWA 的水量平衡表提供了各项水量组成及其相互关系,水量平衡分析工作需要长时间的经验积累和数据积累,按我国大部分供水企业的现状,很难对表 1 中各部分进行完整的量化^[16]。目前,国内对水量平衡分析的研究相对较少,国内学者使用较多的有美国水工业协会开发的 Water Audit 软件、欧盟开发的 Chech Cale 软件等。表 1 中的 NRW 即产销差水量,可以看出管网漏损量是其重要组成部分,马跃等^[7]的研究也表明供水产销差的主要影响因素是管网漏损。我国作为漏损程度较高的国家之一,有必要建立准确、有效的供水系统水量平衡分析表,加大漏损控制技术的系统研究。

2 供水产销差及漏损控制现状

目前国内供水企业用于评定漏损水平的指标主要有两个:产销差率和漏损率,漏损水量作为产销差水量的一部分^[17-18]。产销差率和漏损率的计算公式为

D = (S - M) / S × 100% (1)

L = (S - S_e) / S × 100% (2)

式中:D 为产销差率;S 为供水量;M 为售水量;L 为漏损率;S_e为有效供水量。

2.1 国内外供水产销差及漏损现状

2.1.1 国外供水产销差及漏损现状

相比亚洲国家,欧洲发达国家的供水产销差率较低,一般为 5% ~ 15%,而亚洲的一些发展中国家供水产销差率较高,一般为 9% ~ 40%^[19]。发达国家产销差较低,一方面因为其供水系统具有良好的

设施条件和完善的运行方案,尤其是在 NRW 的管理方面具有丰富的经验;另一方面依赖于政府制定的完善的政策和管理制度。而亚洲一些发展中国家存在供水基础设施质量欠佳、运行管理缺乏规章制度、财务投入受到制约、NRW 监管缺失等问题,导致供水产销差居高不下。虽然发达国家供水产销差控制相对较好,但水司仍然面临许多挑战,据美国水工业协会(American Water Works Association, AWWA)估计,美国每年将有近 237 600 条管道破裂,造成大量饮用水泄漏^[20-21]。

饮用水漏损会导致取水和处理水的成本增加,使供水系统中的机械部件遭受更多磨损,从而增加了维修成本和管网破裂风险。过高的水压造成的漏损会加重地区水资源短缺^[22]。另外,饮用水漏损不仅是一个经济问题,也是服务质量问题,漏水可能导致饮用水污染,使公众健康受到威胁^[23]。

2.1.2 国内供水产销差及漏损现状

随着供水技术的不断发展和对城市老化管网的改造,我国城市的供水产销差与过去相比有所下降,但与欧洲国家水平相比,供水产销差依旧很大。根据 2006—2010 年和 2012 年《城市供水统计年鉴》^[24],我国近年城市供水产销差率平均值见图 1。

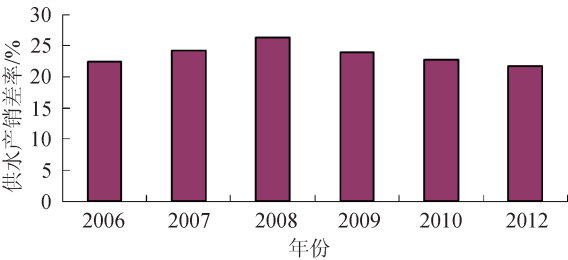


图 1 我国近年城市供水产销差率平均值

由图 1 可以看出,2006—2008 年我国城市供水产销差率逐年增加,可能是由于我国当时的供水行业仍属于公共福利事业,尚未向基于市场化机制的社会服务产业转变。随着供水行业制度改革,水司由传统的国营事业单位逐渐转变为产权多元化的企业,水司的绩效管理越来越受到关注,尤其是作为关键指标的产销差率,各水司都采取一些措施对其进行控制,因此 2008 年之后,产销差率有降低的趋势,但仍然较高。

由 2012 年供水年鉴可知,全国 661 座城市的供水产销差率平均值为 22.49%。从全国各城市上报的供水产销差数据来看,超过一半城市产销差率超过了 20%,其中 5 个城市的供水量与售水量几乎相等(供水产销差率小于 0.5%);145 个城市的供水产销差率低于 15%;165 个城市的供水产销差率在 15% 和平均值之间;43 个城市的供水产销差率超过

50%。

2012 年,全国城市漏损率平均值为 15.77%,供水漏损总量 609 480.61 万 m³,相当于近 17 座供水量 100 万 m³/d 的特大型水厂的 1 年供水总量。按全国平均自来水制水成本 1.0 元/m³,直接经济损失高达 60.95 亿元。因此,必须采取强有力的措施降低产销差,减少损失,提高效益^[25]。

2.2 控制产销差措施

世界各国从节约资源和提高效益角度出发,在控制产销差方面积累了大量经验。目前主要方法与措施有 DMA(district metering area)分区、供水管网压力控制、供水管网仪器查漏、建立供水管网模型等。

2.2.1 DMA 分区

目前针对产销差控制取得很好成效的方法之一是进行 DMA 分区^[26]。在 1980 年初,英国水工业协会在水务联合大会上首次提出 DMA 分区方法,其核心思想是简化复杂的供水管网,实时监测夜间最小流量,迅速、主动定位且修复漏点,降低漏损量^[27]。DMA 被定义为供配水系统中一个被切割分离的独立区域,通常采取关闭阀门或安装流量计的方法对进入和流出这一区域的水量进行计量,根据流量分析来定量泄漏水平,从而利于检漏人员进行泄漏控制^[28]。DMA 分区管理在英国已开展近 30 年,取得了不错的效果,同时北美、澳大利亚部分地区也开展了 DMA 分区管理,使管道漏损得到了很好的控制。

在我国,一些水司已开始进行 DMA 分区实践。南京水司应用 DMA 分区进行漏损控制,提出了检、修一体化漏损控制策略,使得产销差率降低了 1.92%、DMA 平均漏损率降低了 27.4%^[29]。鞍山水司在已建成的 DMA 小区运行管理的基础上,针对深沟寺小区进行管网建模,结果表明,产销差率与管网漏损率高度线性相关,及时发现并修复漏点对降低产销差有着重要意义^[30]。

2.2.2 供水管网压力管理

2001 年,Lambert^[31]研究了某管段漏损水量与该管段压力之间的关系,得出漏损量是随管网压力变化而变化的,通过控制整个或局部管网压力可降低漏损发生的频率,进而减少漏损水量。基于压力管理的漏损控制就是在保证供水安全可靠的前提下,尽可能降低富余水头^[32],若要更好地进行压力控制,需要建立管网模型,根据用水量变化实时调整压力^[33]。除此之外,另一种相对方便、快捷的降压措施是在系统进水口处安装减压阀^[34]。

2.2.3 供水管网仪器检漏

供水管网检漏仪器主要用来检测管网中是否存在漏损,其技术发展到今天主要依赖于声学 and 电子声学^[35]的原理,利用声音传递及放大原理的有听漏棒、检漏饼等,后来研究人员利用电子声学^[36]的原理发明了电子声音放大仪。20 世纪 80 年代中期,英、美、法、日等国相继研发成功金属管道传声的相关检漏仪,其对除漏水声之外的干扰信号有过滤功能^[32]。同一时期,日本成功开发探地雷达,可以利用无线电波对地面以下管道沉降、漏损情况进行探索,并描绘具体图像,不仅可以检测漏点,在一定程度上也可以防止漏损;其缺点在于费用高、易受现场实际情况影响,仪器对于不同土质、埋深、管材等复杂情况适应性差且一次性搜索的范围较小^[36-37]。

2.2.4 供水管网建模

建立供水管网模型可以进行管网漏损预测。供水管网漏损预测主要是指通过历史漏损数据,利用数学方法找到漏损规律,进而预测未来供水管网可能发生的漏损^[38]。近年来,随着 SCADA(supervisory control and data acquisition)系统的完善和普及,国内外许多学者致力于研究和开发供水管网漏损检测的模型^[39],主要有点式渗漏模型和一致渗漏模型两大类,采用较多的为一致渗漏模型。如 Mounce 等^[40]提出的基于模式识别的漏损检测方法,根据逻辑规则模块对管网的状态进行分类并由压力变化来确定漏损位置;韩阳等^[41]提出的基于支持 SVM(support vector machine)的给水管网漏损定位模型,通过建立监测点与其他节点压力变化的非线性关系分析监测点的压力变化来定位漏点。

2.2.5 加强管理

除技术外,管理因素也是影响产供水销差率的重要原因。目前在管理方面主要存在以下几个问题:①维护费用偏高,有的水司修漏节省的效益及水泵运行节省的能源效益不足以弥补维修和维护供水管网的成本;②水司对维护及检漏等工作不重视,配备人员及设备不足,并经常遭遇维护方面的预算短缺;③专业人员认识不足,如 Andres 等^[42]认为减少水损失并不重要,认为管道泄漏对城市的日常运行没有明显影响,对居民生活亦无明显影响;④公众认为修复泄漏可能对居民的短期福利有负面影响,如挖人行道和沟渠开展维护工作会扰民,管理者通常重点工作是保证饮用水以最佳条件和最小成本到达用户,较少会关注怎样减少水的漏损。加强管理可以避免漏损带来的经济损失,例如 2007 年卡塔尔的供水管网漏损率为 59.1%,在对漏损进行控制管理 4 年后,卡塔尔管网的漏损水量降至原来的

50% ,每年节约 1400 万欧元。

3 研究前景

目前,关于降低供水产销差率方法的研究多侧重于采用单一因素对照试验,且多停留于定性层面。采用多种方法系统地进行产销差控制,在国内尚处于起步阶段,涉及定量评估的研究不多,应进一步探索。

在 DMA 分区管理方面,主要问题有:①无明确分区标准或规范,大都依靠经验确定分区,随机性强,不能确保分区方案的合理性;②我国供水管网以环状居多,分成独立区域必然要关闭一些阀门,因此供水安全性和可靠性受到影响,需深入研究针对环状管网的 DMA 分区方法;③进行 DMA 分区很少考虑水压与水质情况。在供水管网压力管理方面,减压阀的安装会影响用户供水压力,相应减少了售水量,因此需要研究降低压力的最佳技术。管理上,建议建立专项资金用于控制产销差率及漏损率。水司应以分区计量为核心,信息技术为支撑,实行全过程监控,精细化管理,明确漏损源头和责任主体。针对检漏工作,应制定相关的激励措施,最大程度地提高员工积极性。同时,应加强水表计量管理,进行周期检表和换表,对大口径水表开展水表数据实时远传监控,做好消火栓和绿化用水管理,保证凡用水处必装表。除此之外,加强偷盗水、人情水的管理也非常重要,需要相关部门制定相应法规。

4 结 语

供水产销差率控制是一项系统工程,不是单靠某一种技术或方法就能解决的,需要政策的支持、先进的设备、科学的管理、系统的理论和高素质的人才等综合作用。降低供水产销差率是实现可持续发展的必然要求,要基于精细化管理,加快实施 DMA 分区,加强提高供水管网压力管理,完善供水管网检漏制度,开发管网模型软件,结合智慧城市和物联网,对相关技术和措施进一步研究。

参考文献:

[1] FARLEY M, WYETH G, GHAZALI ZBM, et al. 无收益水量管理手册[M]. 侯煜堃, 等译. 上海: 同济大学出版社, 2011.

[2] LAMBERT A. Assessing non-revenue water and its components: a practical approach[J]. Water Loss, 2003, 21: 50-51.

[3] 赵明. 供水产销差控制的现状及未来发展趋势[C]// 中国城市规划协会地下管线专业委员会 2009 年年会论文集. 北京: 中国城市规划协会, 2009: 42-45.

[4] 黄卫. 浅谈如何加强表务管理降低产销差率[J]. 商品

与质量·建筑与发展, 2014(7): 6. (HUANG Wei. How to strengthen the management to reduce NRW[J]. Goods and Quality, Construction and Development, 2014(7): 6. (in Chinese))

[5] 李计敏, 张军峰. 加强计量管理降低产销差率[J]. 城镇供水, 2012(1): 57-59. (LI Jimin, ZHANG Junfeng. Strengthen the measurement management to reduce NRW[J]. City and Town Water Supply, 2012(1): 57-59. (in Chinese))

[6] KUMAR S. Incorporating unaccounted for water into the performance measurement: an application to the Indian water sector[J]. Social Science Electronic Publishing, 2008, 3: 1-30.

[7] 马跃, 袁一星. 浅析供水产销差与漏失关系[J]. 城镇供水, 2014(4): 65-69. (MA Yue, YUAN Yixing. The relationship between NRW and water leakage[J]. City and Town Water Supply, 2014(4): 65-69. (in Chinese))

[8] KHATRI K B, VAIRAVAMOORTHY K. Challenges for urban water supply and sanitation in the developing countries[C]// Proceedign of International Symposium Anniversary, Cambridge: INCOSE, 2007: 13-15.

[9] FRANCISCO G G, MIGUEL A G R, JORGE G. Why is non-revenue water so high in so many cities? [J]. International Journal of Water Resources Development, 2011, 27(2): 345-360.

[10] 李文运, 张伟, 戈建民, 等. 水量平衡分析方法及应用[J]. 水资源保护, 2011, 27(6): 83-87. (LI Wenyun, ZHANG Wei, GE Jianmin, et al. Water balance analysis method and its application [J]. Water Resources Protection, 2011, 27(6): 83-87. (in Chinese))

[11] 陈喜, 陈洵洪. 美国 Sand Hills 地区地下水数值模拟及水量平衡分析[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 94-99. (CHEN Xi, CHEN Xunhong. Numerical modeling of groundwater flow and analysis of water budget in Nebraska Sand Hills, USA[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(1): 94-99. (in Chinese))

[12] 王光辉. 城市供水系统“水平衡专家”分析管理系统[C]// 供水管网分区定量控制产销差一体化系统解决方案论文集. 沈阳: 中国城镇供水排水协会, 辽宁省城镇供水协会, 2010: 25-30.

[13] 张建伟, 韩伟, 付婉霞, 等. 供水产销差率影响因素及控制措施浅析[J]. 给水排水, 2012(增刊2): 213-215. (ZHANG Jianwei, HAN Wei, FU Wanxia, et al. Analysis on influencing factors and control measures of NRW[J]. Water and Wastewater Engineering, 2012(sup2): 213-215. (in Chinese))

[14] BROTHERS K J. Practial approach initiatives to water loss reduction[C]// Proceedings of International Conference and Workshops on Efficient Management of Water Systems. Rome: International Water Association, 2006.

[15] 余蔚茗, 李树平. 基于水量平衡的管道漏损分析[J]. 给水排水, 2008, 34(4): 116-119. (YU Weiming, LI

- Shuping. Water loss analysis based on water balance model [J]. Water and Wastewater Engineering, 2008, 34 (4): 116-119. (in Chinese))
- [16] 郑小明,姚黎光. 我国供水企业漏损控制的研究和发展 [J]. 建设科技, 2015, 13 (13): 42-44. (ZHENG Xiaoming, YAO Liguang. Research and development of the leakage control of water supply enterprises in China[J]. Construction Science and Technology, 2015 (13): 42-44. (in Chinese))
- [17] 舒诗湖. 分区计量下区域供水产销差率修正算例研究 [J]. 供水技术, 2015, 9 (4): 42-44. (SHU Shihu. Example of correction calculation for distribution loss rate of regional water supply based on partition metering[J]. Water Technology, 2015, 9(4): 42-44. (in Chinese))
- [18] 刘斌,廖建国. 浅谈产销差控制和计量管理、漏损控制的关系[C]//中国水协设备委第二届供水行业水表选型与应用技术研讨会资料汇编. 北京:中国城镇供水协会, 2006:309-311.
- [19] 徐锦华,龚德洪,刘阔,等. 我国供水管网漏损控制中的问题及对策 [J]. 城镇供水, 2015 (2): 23-25. (XU Jinhua, GONG Dehong, LIU Kuo, et al. The problems and countermeasures of leakage control of water supply network in China[J]. City and Town Water Supply, 2015(2): 23-25. (in Chinese))
- [20] BERG C V D, DANILENKO A. The IBNET water supply and sanitation performance blue book [J]. General Information, 2011, 325 (3): 1017-1038.
- [21] GURRIA A. Guest editorial; water - a global challenge and a priority for the OECD [J]. International Journal of Water Resources Development, 2007, 23 (4): 563-570.
- [22] ORTIZ J R, SCATENA F N, ANDERSSON L, et al. Integrated water resources management in the Luquillo Mountains, Puerto Rico: an evolving process [J]. International Journal of Water Resources Development, 2004, 20 (3): 387-398.
- [23] KHONDAKER A H. Water management in Dhaka [J]. International Journal of Water Resources Development, 2006, 22 (2): 291-311.
- [24] 中国城镇供水排水协会. 城市供水统计年鉴 [M]. 北京:中国城镇供水排水协会, 2006-2013.
- [25] 陈雅宾. 自来水产销差率调研报告 [J]. 现代商业, 2010 (15): 204-205. (CHEN Yabin. NRW research report of tap water [J]. Modern Business, 2010 (15): 204-205. (in Chinese))
- [26] 单国平,丁宏进,张俊杰. 独立计量分区在南京水司降低产销差中的应用 [J]. 中国给水排水, 2012, 28 (19): 63-65. (SHAN Guoping, DING Hongjin, ZHANG Junjie. Application of DMA to reduction in NRW by Nanjing tap water general company [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28 (19): 63-65. (in Chinese))
- [27] 凌文翠,张涛,强志民,等. 城市供水管网独立计量区域的研究与应用进展 [J]. 中国给水排水, 2011, 27 (13): 46-50. (LING Wencui, ZHANG Tao, QIANG Zhimin, et al. Research and application of district metering area for urban water distribution network [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27 (13): 46-50. (in Chinese))
- [28] 刘俊,孙佳,俞国平. 分区供水技术在漏损控制中的研究现状与进展 [J]. 中国给水排水, 2010, 26 (16): 7-10, 15. (LIU Jun, SUN Jia, YU Guoping. Current situation and progress of water distribution system zoning technologies for water loss control [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26 (16): 7-10, 15. (in Chinese))
- [29] 周克梅,窦建军. 南京水司分区计量试点工程介绍 [J]. 城镇供水, 2008 (6): 73-75. (ZHOU Kemei, DOU Jianjun. Introduction of Nanjing tap water general company district metering pilot project [J]. City and Town Water Supply, 2008 (6): 73-75. (in Chinese))
- [30] 王戈平,杨旭东,赵普. 城市区域供水产销差率动态平衡的研究与实践 [J]. 给水排水, 2011, 37 (5): 85-89. (WANG Geping, YANG Xudong, ZHAO Pu. The research and practice of NRW dynamic balance of urban water supply [J]. Water and Wastewater Engineering, 2011, 37 (5): 85-89. (in Chinese))
- [31] LAMBERT A. What do we know about pressure; leakage relationships in distribution system? [C]// Proceedings of System Approach to Leakage Control and Water Distribution Systems Management. Brno: IWA Conference, 2000.
- [32] 马悦. 哈尔滨市供水系统产销差分析与管网物理漏失研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
- [33] KANAKOUDIS V, MUHAMMETOGLU H. Urban water pipe networks management towards non-revenue water reduction; two case studies from Greece and Turkey [J]. Clean Soil Air Water, 2014, 42 (7): 880-892.
- [34] 徐悦,张晓宇. 基于分区计量和集中多种措施的降低管网供水产销差率研究 [J]. 给水排水, 2013, 39 (3): 97-101. (XU Yue, ZHANG Xiaoyu. Research of reducing the none revenue water on the base of district metered areas and various methods [J]. Water and Wastewater Engineering, 2013, 39 (3): 97-101. (in Chinese))
- [35] ELLUL I R. Advances in pipeline leak detection techniques [J]. Pipes and Pipeline International, 1989, 34 (3): 7-12.
- [36] 曾昭发. 探地雷达方法原理及应用 [M]. 北京:科学出版社, 2006.
- [37] 刘澜波,钱荣毅. 探地雷达:浅表地球物理科学技术中的重要工具 [J]. 地球物理学报, 2015, 58 (8): 2606-2617. (LIU Lanbo, QIAN Rongyi. Ground penetrating radar: a critical tool in near-surface geophysics [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58 (8): 2606-2617. (in Chinese))

(下转第 97 页)

Conservancy and Hydroelectric Power, 2012, 33(4): 22-24. (in Chinese))

[12] GUIZANI M. Storm water harvesting in Saudi Arabia: a multipurpose water management alternative [J]. Water Resources Management, 2016,30(5):1819-1833.

[13] LIUZZO L, NOTARO V, FRENI G. A reliability analysis of a rainfall harvesting system in Southern Italy [J]. Water, 2016, 8(1): 1-20.

[14] GUO Y, BRIAN W B. Sizing of rainwater storage units for green building application [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2007, 12: 197-205.

[15] 张兆祥, 杨帆, 黄咏洲. 城市雨水资源利用及规划 [C]//中国城市规划学会. 2012 中国城市规划年会论文集. 昆明:中国城市规划学会, 2012.

[16] IMTEAZ M A, AHSAN A, SHANABLEH A. A reliability analysis of rainwater tanks using daily water balance model: variation within a large city [J]. Resources Conservation & Recycling, 2013, 77(2): 37-43.

[17] 李俊奇, 车武, 孟光辉, 等. 城市雨水利用方案设计与技术经济分析[J]. 给水排水, 2001, 27(2): 25-28. (LI Junqi, CHE Wu, MENG Guanghui, et al. Design and technical economic analysis of urban rainwater utilization Project [J]. Water & Wastewater Engineering, 2001, 27(2): 25-28. (in Chinese))

[18] 国家计委, 建设部. 建设项目经济评价方法与参数 [M]. 3 版. 北京: 中国计划出版社, 2008.

[19] 韩宇平, 阮本清. 水资源短缺风险经济损失评估研究 [J]. 水利学报, 2007, 38(10): 1253-1257. (HAN Yuping, RUAN Benqing. Economic loss assessment of shortage risk of water resources [J]. Journal of Hydraulics Engineering, 2007, 38(10): 1253-1257. (in Chinese))

[20] 左建兵, 刘昌明, 郑红星. 城市雨水利用的成本效益分析[J]. 资源科学, 2009, 31(8): 1295-1302. (ZUO Jianbin, LIU Changming, ZHENG Hongxing. Cost-benefit analysis of urban rainwater harvesting: a case study of Beijing [J]. Resources Science, 2009, 31(8): 1295-1302. (in Chinese))

[21] 车伍, 李俊奇. 城市雨水利用技术与管理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.

[22] ZHANG Qianqian, WANG Xiaoke, HOU Peiqiang, et al. Quality and seasonal variation of rainwater harvested from concrete, asphalt, ceramic tile and green roofs in Chongqing, China [J]. Journal of Environmental Management, 2014, 132C: 178-187.

[23] 徐军红, 刘舜. 屋面雨水收集回用的应用分析[J]. 给水排水, 2010(增刊 2): 117-119. (XU Junhong, LIU Shun. Application analysis of roof rainwater harvesting [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010(sup2): 117-119. (in Chinese))

[24] DB11/685—2013 雨水控制与利用工程设计规范[S]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2013.

[25] DB11/T 349—2006 草坪节水灌溉技术规定[S]. 北京: 北京市质量技术监督局, 2006.

[26] 胡茂川, 张兴奇, 陈刚. 城市屋面雨水利用潜力分析: 以南京市河西地区某小区为例[J]. 长江流域资源与环境, 2012(4): 489-493. (HU Maochuan, ZHANG Xingqi, CHEN Gang. Analysis of potential of urban roof rainwater utilization: a case study on a community of Hex in Nanjing [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012(4): 489-493. (in Chinese))

[27] 车武, 汪慧珍, 任超, 等. 北京城区屋面雨水污染及利用研究[J]. 中国给水排水, 2001, 17(6): 57-61. (CHE Wu, WANG Huizhen, REN Chao, et al. Study on the pollution and utilization of rainwater in the roof of Beijing [J]. China Water & Wastewater, 2001, 17(6): 57-61. (in Chinese))

(收稿日期: 2016-12-26 编辑: 徐 娟)

(上接第 52 页)

[38] 王丽娟, 张宏伟. 供水管网漏失模型研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(9): 68-70. (WANG Lijuan, ZHANG Hongwei. Study on leakage loss model for water distribution network[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(9): 68-70. (in Chinese))

[39] 涂敏. 供水管网在线监测漏失定位模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

[40] MOUNCE S R, BOXALL J B, MACHELL J. Development and verification of an online artificial intelligence system for detection of bursts and other abnormal flows [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2010, 136(3): 309-318.

[41] 韩阳, 王威. 供水管网实时故障诊断的支持向量机模型 [J]. 给水排水, 2007, 33(2): 109-112. (HAN Yang, WANG Wei. SVM based model for realtime diagnostic of water distribution network [J]. Water and Wastewater Engineering, 2007, 33(2): 109-112. (in Chinese))

[42] ANDRES J, PICAZO T, FRANCISCO G G, et al. Accounting for operating environments in measuring water utilities' managerial efficiency [J]. Service Industries Journal, 2009, 29(6): 761-773.

(收稿日期: 2016-09-05 编辑: 王 芳)