城市雨水利用效益综合评价

李美娟[1,2]，徐向舟[1]，许士国[1]，赵广辉[3]

（1.大连理工大学 水利工程学院，辽宁 大连 116024；2.黑龙江省水利科学研究院，
黑龙江 哈尔滨 150080；3.北京时空筑城建筑设计有限公司 大连分公司，辽宁 大连 116085）

摘　要：城市雨水利用效益的定量识别和综合评价是一项前沿性研究工作，其结果可作为雨水利用工程的决策依据。系统分析了城市雨水利用效益评价指标体系，探索应用多层次半结构模糊决策法对雨水集蓄利用效益进行综合评价。以大连市瓦房店工业区雨水利用工程为例，对提出的 3 个雨水利用方案进行了综合效益评价和方案优选。结果表明，多层次半结构模糊决策法能较好地应用于城市雨水资源利用效益评价中。在雨水中水利用时，充分利用增渗设施和适当增加蓄水池容积可以提高雨水利用的综合效益。

关键词：雨水利用；效益分析；半结构模糊决策

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2011)01-0222-05　　**中图分类号**：TV1

Benefit Assessment of Urban Rainwater Utilization

LI Mei-juan[1,2], XU Xiang-zhou[1], XU Shi-guo[1], ZHAO Guang-hui[3]

(1. *School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning* 116024, *China*; 2. *Heilongjiang Provincial Hydraulic Research Institute, Harbin, Heilongjiang* 150080, *China*; 3. *Dalian Branch, Beijing Space-time Creator Architecture Design Co., LTD, Dalian, Liaoning* 116085, *China*)

Abstract: It is an exploratory research to quantitatively identify and comprehensively assess the benefit of the urban rainwater utility(URU), which can generate results helpful for decision making on the corresponding projects. Taken the rainwater utilization project in the Wafangdian industrial district as a case study, the index system of benefit assessment for URU was structured, the URU benefits were evaluated with a multi-level semi-constructive fuzzy optimization model, and an optimal scheme was then recommended. The results indicate that the multi-level semi-constructive fuzzy optimization model well met the needs of comprehensive benefit assessment of URU. The benefits of URU could be increased with enlarged reservoir volumes and/or infiltration enhancements.

Keywords: **rainwater utilization; benefit analysis; semi-constructive fuzzy optimization**

城市雨水利用的主要途径是应用透水性铺装材料加强土壤入渗调控和建立区域雨水收集及地下水储存系统来加大雨水贮留量。在具体实践中，雨水利用方式可以是单一的或几种方式的组合，不同的雨水利用方式产生不同的效益。雨水利用产生的效益不仅在于经济效益，更重要的是它可以实现涵养地下水源，防止地面沉降，防洪减灾，调节气候等诸多生态和社会效益[1]，而在这些效益指标中，既有定量指标，又有定性指标。

当前，多数研究只对雨水利用工程的经济效益进行分析，对其产生的生态和社会效益只做定性描述。张书函等[1]结合北京雨水利用示范工程的实际运行效果初步分析了雨水利用产生的经济、社会和环境效益。左建兵等[2]在综合考虑经济、生态、社会效益的情况下，利用成本效益法对北京市雨水利用工程效益做了具体分析。为提高城市雨水利用的建设质量和管理水平，使雨水利用工程经济适用和效益最优，对雨水利用工程从经济、生态和社会效益方面进行综合评价是非常必要的。综合评价方法经过多年发展已成为一种综合性科学技术，其中，陈守煜[3]提出的半结构性决策可变模糊集理论与方法由结构性决策和非结构性决策综合而成，综合的关键是在确定定量目

收稿日期：2010-09-13　　**修回日期**：2010-10-10

资助项目：教育部科学技术研究重点项目“城市透水面集水效应试验研究”(108035)；“十一五”国家科技支撑计划重点项目课题“雨洪资源利用的风险与效益评估方法研究”(2006BAB14B05)；中央高校基本科研业务费专项基金“城市雨水集蓄利用激励措施研究”(DUT10RW314)

作者简介：李美娟(1984—)，女(汉族)，山西省应县人，硕士，助理工程师，主要研究方向为水文水资源。E-mail:limeijuan.1984@163.com。

通信作者：许士国(1958—)，男(汉族)，山东省临沂市人，博士，教授，主要研究方向为水文水资源。E-mail:sgxu@dlut.edu.cn。

标与定性目标的相对优属度时,具有相对的统一标准。

本研究旨在探索一种城市雨水利用工程效益综合评价的方法。大连市瓦房店工业区雨水利用工程包含雨水渗透利用和集蓄利用多种典型方式,将其作为雨水利用综合效益评价的背景区域具备一定的代表性。

1　研究区雨水利用方案与水量平衡分析

大连市是我国缺水最严重的城市之一,人均水资源占有量仅为全国平均占有量的 1/4,水资源短缺已经成为制约大连市经济和社会发展的一个重要因素,因此,开展雨水利用研究具有重要的现实意义。

1.1　工程的方案设计

瓦房店工业区位于大连市瓦房店市新城区的西部,总占地面积 1.72×10^5 m^2,其中建筑基底总面积 4.4×10^4 m^2,道路及场地面积 1.11×10^5 m^2,绿地总面积 1.8×10^4 m^2。在建造设计工业园时,综合考虑厂区雨水利用,除主干道路由于污染严重,雨水收集直接进入市政排水管网外,其它如建筑屋面、不透水路面、绿地、透水砖路面、停车场等汇水面产生的雨水径流都用来收集回用。

(1) 方案 1:中水利用+绿地+排放。屋面雨水设计重现期 $T=5$ a,设计暴雨强度为 2.1 mm/min。雨水径流根据地势经过初雨弃流收集到地下 1 000 m^3 雨水蓄水池中,多余的雨水通过雨水管网排放。中水系统中,蓄水池中的雨水经过处理达到中水使用标准后进入中水蓄水池,而后由变频供水装置供给几个建筑的冲厕、拖布池、地面冲洗以及洗车、厂区绿地浇洒和路面清洗用水,当中水量不足时由自来水补充。

(2) 方案 2:中水利用+绿地+排放。考虑方案 1 中蓄水池容积不能集蓄足够雨水用于日常杂用,在方案 1 的基础上,将蓄水池的容积扩大为 1 500 m^3,使雨水利用量增多,但该方案的总费用也加大,同时由于雨水的季节性和随机性,会造成中水系统不连续,蓄水池利用率不高。

(3) 方案 3:中水利用+透水路面+低绿地。

在方案 1 的基础上,将部分路面采用透水砖铺设。同时将部分绿地建为下凹式绿地用来自然滞渗。该方案采用了多种增渗设施来减少雨水产生的地表径流,涵养地下水源。

1.2　水量平衡分析

该项雨水利用工程的水量平衡计算包括雨水集蓄利用量和雨水下渗利用量两部分。蓄水池集蓄雨水的主要目的是生活杂用,当池子充满水后便开始外排。因此,本文计算蓄水池集蓄水量时以天(d)为单位,利用日降雨资料(选取平水年 2004 年)、日需水量以及蓄水池容积,通过各变量循环计算得到蓄水池年集蓄雨水量。调蓄计算的主要变量有径流量、雨水可利用量、日需水量、蓄水池剩余水量[4]。径流量为降雨量、汇水面面积、径流系数之积,结合厂区实际情况,各种下垫面径流系数取值如下:屋面 0.9;绿地 0.4;道路 0.6;堆场 0.9;渗透砖路面0.4。收集到的径流在进入蓄水池前需扣除初期降雨量(3 mm),若前日降雨超过初期降雨量,则认为连续雨水污染较轻,则当日不扣除初雨,扣除初雨量后的径流量即为雨水可利用量。根据当日需水情况计算,蓄水池当日剩余水量 (m^3)为:

$$B_1=\begin{cases}0 & (B_2+B_3-B_4<0)\\ B_2+B_3-B_4 & (0<B_2+B_3-B_4<B_5)\\ B_5 & (B_2+B_3-B_4>B_5)\end{cases}\quad(1)$$

式中:B_2——前日剩余水量(m^3);B_3——当日雨水可利用量(m^3),根据集水面的径流系数和面积及当年的日降雨量分布确定;B_4——当日需水量(m^3),为工业区内的洗车、浇灌等需水量;B_5——蓄水池容积(m^3)。当前日蓄水池剩余水量加上当日来水量减去当日需水量大于蓄水池容积时,则有外排雨水量 B_6(m^3)。则蓄水池的年雨水集蓄量 B_7(m^3)为:$B_7=\sum(B_3-B_6)$。

另外,还需对各透水面的雨水下渗量和回补地下水量进行分析计算。下渗雨水量计算公式如下:

$$B_8=\alpha_1\times P_1\times A_1\times10^{-3}=(1-r)\times P_1\times A_1\times10^{-3}\quad(2)$$

式中:B_8——下渗雨水量(m^3);r——径流系数;P_1——大连市多年平均降雨量,为 681 mm;A_1——透水面承雨投影面积(m^2);α_1——降雨过程中透水面对地表径流的截留系数,影响 α_1 的因素主要有:降雨的大小和强度,土壤的性质和结构,透水面的种类等[5]。

下渗雨水回补地下水量计算公式如下:

$$B_9=\alpha_2\times P_1\times A_1\times10^{-3}\quad(3)$$

式中:B_9——雨水回补地下水量(m^3);α_2——雨水对地下水的下渗补给系数。降雨入渗补给系数主要受地下水埋深、降雨量和含水层岩性的影响,地形地貌、植被等因素的影响是次要的。本研究中,各种透水面的降雨入渗补给系数均近似可取为 0.2[5]。瓦房店工业区雨水集蓄和渗透利用量的计算结果见表 1。

表1 各方案雨水利用量

方案	年雨水集蓄量 B_7/m³	年雨水下渗量 B_8/m³	年回补地下水量 B_9/m³	年径流削减率 R/%
方案1	20 733.1	7 181.5	2 393.9	35.8
方案2	24 445.6	7 181.5	2 393.9	40.6
方案3	20 327.5	12 084.8	2 666.3	44.0

1.3 成本分析

1.3.1 固定资产 固定资产投资应计算达到设计效益和规模所需的全部工程建设费用，包括土建工程费、设备及其安装工程费和其它工程费用。雨洪利用工程建设并不是独立于小区单独为雨洪而建设的，它们一般是结合小区排水工程建设而进行的，不管示范工程是位于老城区、新建区和将建区。因此在固定资产中未考虑雨水管道投资，计算包括了沉淀池、蓄水池和过滤室的建设费用。

1.3.2 运行成本 雨水中水回用工程的运行成本 C_r 主要包括清淤费、运行费、维护费、雨水处理费。若有其它措施如人工湿地等，另加这些设施的管理费[4]。

(1) 清淤费 C_{r1}(元)。由于洪水利用工程主要集中在汛期(5—9月)运行，按照每月清理1次，每1 km² 5个工日，每个工日30元计算，则 $C_{r1}=750\times A$。A 为雨水利用规划区面积。

(2) 运行费 C_{r2}(元)。根据北京雨水利用经验，收集利用1 m³ 的雨水运行费用约为0.1元。

(3) 维护费用 C_{r3}(元)。主要是对沉淀池、过滤室、蓄水池、雨水回用管道、屋顶绿化和相关设施的维护，维护费为总投资的1%。

(4) 雨水处理费用 C_{r4}(元)。根据相关研究，处理雨水的运行费用约是0.53元/m³。

1.3.3 雨水集蓄成本 单位雨水集蓄成本应用动态法计算公式如下：

$$C=\{I(1-e)i(1+i)^n/[(1+i)^n-1]+C_r\}/B_7 \quad (4)$$

式中：C——单位体积雨水集蓄成本(元)；I——固定资产(元)；i——折现率，取值7%[6]；n——项目寿命期，一般可选20～30 a；e——寿命期终了时的残余价值率(%)，国家规定城市公用事业单位固定资产报废时的净残值为4%；C_r——年运行成本(元)；B_7——年雨水集蓄量(m³)。

该工程3个方案的雨水集蓄成本计算结果见表2。由于蓄水池设在地下，建筑时需考虑承压等方面的因素，导致雨水成本偏大。

2 效益综合评价

2.1 效益识别方法

城市雨水利用是在当前城市化过程中，城市面临的种种问题而逐步发展起来的，如通过雨水利用来减缓水紧缺，消洪减污，提高地下水位等。根据具体需要，选择不同的雨水利用途径，不同的雨水利用方式会发挥不同的功能作用，通过功能的发挥而实现诸多的经济、生态、社会效益。本文应用雨水利用措施与功能效益对接的思路，识别城市雨水资源产生的效益，效益识别步骤见图1。

表2 各方案的雨水利用成本

项目	固定资产 I/10^4 元	运行成本 C_r/10^4 元	雨水集蓄成本 C/(元·m⁻³)
方案1	123.14	2.55	5.82
方案2	184.70	3.40	7.24
方案3	123.14	2.52	5.93

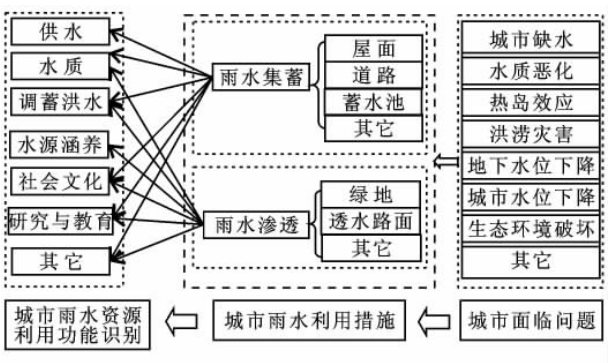


图1 城市雨水资源利用效益识别步骤图

2.2 效益评价指标体系

应用雨水利用措施与功能效益对接的思路，对该项雨水利用工程进行效益识别和分析计算，建立效益评价指标体系。

2.2.1 经济效益

(1) 收集回用雨水置换自来水收益。把蓄水池所收集的雨水用于生活用水，从而代替置换自来水，减少了自来水用水费用，节省的费用即为这部分效益，可依照自来水价格计算。有的经济效益评价为负值，这是因为自来水水价取的是市场水价，就目前而言，我国水价是不完全水价，若考虑水资源价值，则应使用影子水价来计算。2008年我国水资源影子价格为4.1元/m³[7]。

(2) 节省城市排水设施的运行费用。雨水收集利用以及入渗地下后，每年可减少向市政管网排放雨水量，当采用收集设施回用雨水时，减少的外排雨量即为雨水回用量。当采取渗透设施如草地、林地、透水路面等时，有大量雨水入渗地下，减少的外排量即下渗量。这部分收益可按每方水的管网运行费用乘以减少的外排水量计算。按管网运行费用0.08元/m³，污水处理费0.6元/m³ 计算[8]，即每减少单位雨水外排量，节省的费用为0.68元。

2.2.2　生态效益

(1) 净化水质效益。在雨水生态化利用过程中,雨水的传输通道及储存介质,如明沟、人工湿地、集水塘等,对雨水中污染物具有一定的自然净化能力,可使进入城市水体中的面源污染大为减少,这部分效益即是因消除污染而减少的社会损失。据分析,为消除污染每投入 1 元可减少的环境资源损失是 3 元,即投入产出比为 1∶3[7]。

以目前大连市污水排污费为0.6元/m^3 作为消除污染投入的费用,可计算出消除污染减少的社会损失为 1.8 元/m^3。

(2) 补充地下水效益。当通过草地、林地下渗补充地下水时,单位体积集水量效益按水资源影子价格考虑。透水砖铺砖路面成本比不透水砖路面高 10%左右[9],按 1 m^2 透水砖材料费为 60 元计算,则铺设 1 m^2 的透水砖路面成本提高值约为 5 元,那么通过透水砖路面下渗补充地下水时,其产生的净效益值为渗透回补地下水效益值减去透水砖铺设路面成本提高值。

2.2.3　社会效益

(1) 防洪排涝产生的效益。对于收集回用的雨水利用方式,其防洪效益包括减少由洪水引起的破坏损失和因雨水利用设施的建立而减少的洪水控制设施费用。其中,用径流削减率,即研究区域雨水收集利用量与降雨产流量之比,表示洪水减小的程度,来间接地反映减少的洪水引起的破坏损失;减少的洪水控制设施费用可按如下计算得到。首先根据研究区域河道拓宽、堤坝加高费用,按面积分摊得到单位面积的防洪成本,再乘以雨水利用规划面积即可估算雨水利用的防洪效益。

(2) 提高人们节水意识或提高社会整体素质。雨水利用工程能够使居民在休闲、娱乐的同时,受到水资源和环境意识的教育,增强惜水、节水和利用雨水的意识。建立的效益评价指标体系见表 3。

表 3　效益评价指标体系

第二层		第一层		方 案		
序号	子系统	序号	特征目标	方案 1	方案 2	方案 3
1	经济效益	①	收集回用雨水置换自来水效益/元	−35 761.0	−76 666.5	−37 168.5
		②	节省城市排水设施运行费用/元	18 982.0	21 506.5	22 040.3
2	生态效益	①	净化水质效益/元	50 246.4	56 928.9	58 342.1
		②	补充地下水/元	4 787.7	4 787.7	−6 871.1
3	社会效益	①	防洪效益/元	190.5	190.5	190.5
		②	排涝效益/%	35.8	40.6	44.0
		③	提高节水意识			

注:经济效益中"收集回用雨水置换自来水效益"为负值,是因为蓄水池建在地下成本较高,导致这部分雨水利用成本较高。

2.3　多层次半结构模糊综合评价

2.3.1　*确定评价指标的相对优属度矩阵*　该评价指标体系有 3 个子系统,除子系统 3 中的目标③为定性指标,其余为定量指标,且均为越大越优。采用二元比较互补性决策思维理论、方法确定定性指标优属度[3]。对于定量指标,应用相对优属度公式确定:

$$r_{ij}=(x_{ij}-\min x_{ij})/(\max x_{ij}-\min x_{ij}) \quad (5)$$

计算得到 3 个子系统目标的相对优属度矩阵为:

$$\boldsymbol{R}_{11}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0.966\\ 0 & 0.825 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{12}=\begin{bmatrix}1 & 0.825 & 1\\ 1 & 1 & 0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{13}=\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\ 0 & 0.557 & 1\\ 0.818 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

2.3.2　*确定权向量*　利用优属度矩阵,采用熵权法确定各系统的指标权重系数。

子系统 1、子系统 2 和子系统 3 的目标权向量分别为:$W_1=(0.170, 0.158)$,$W_2=(0.158, 0.174)$,$W_3=(0, 0.173, 0.166)$。

雨水利用的效益不仅在于经济效益,更重要的是它可实现节水、水资源涵养与保护等生态和社会效益。采用二元比较互补性决策思维理论,得到子系统对于重要性的相对隶属度为(1, 0.739, 0.538),归一化得到子系统的权向量为 $W=(0.439, 0.325, 0.236)$。

2.3.3　*方案优属度的确定*　采用 5 级模糊优选模型进行计算,即优、良、中、可、劣。对于 5 级模糊优选模型,对任一目标从 1 级到 5 级各个级别的相对优属度标准值向量取为 $S=(1, 0.8, 0.6, 0.3, 0)$。

将方案 j 的 m 个相对优属度 r_{1j}, r_{2j}, r_{3j},..., r_{mj} 分别与向量式 S 进行逐一比较后,得到方案 j 的 m 个目标相对优属度分别介于相邻级别区间$[a_{1j}, b_{1j}]$,…,$[a_{mj}, b_{mj}]$。则得方案 j 的级别上限值 b_j 与下限值 a_j:

$$a_j = \min a_{ij} \tag{6}$$

$$b_j = \max a_{ij} \tag{7}$$

设方案集归属于各个级别的相对隶属度矩阵为 U_{hj}，U_{hj} 是方案 j 对级别 h（$h=1, 2, 3, 4, 5$）的相对隶属度。由于方案 j 在级别区间$[a_j, b_j]$范围内，故矩阵 U 应满足归一化条件

$$\sum_{h=a_j}^{b_j} U_{hj} = 1 \tag{8}$$

根据加权广义欧式权距离与最小二乘法准则可得方案 j 的相对优属度 u_j 的计算公式如下：

$$U_{hj} = \begin{cases} 0 & (h < a_j \text{ 或 } h > b_j) \\ (d_{hj}^2 \cdot Z_j)^{-1} & (a_j \leqslant h \leqslant b_j, d_{hj} \neq 0) \\ 1 & (d_{hj} = 0) \end{cases} \tag{9}$$

式中：$d_{hj}^2 = \sum_{i=1}^{m} [W_i (r_{ij} - s_h)]^2$；$Z_j = \sum_{k=a_j}^{b_j} (d_{kj}^2)^{-1}$

$h = a_j, a_{j+1}, \cdots, b_j$；$j = 1, 2, \cdots, n$

（1）第一层各子系统方案优属度的确定。第一层有 3 个子系统，由上述计算结果知各子系统的目标相对优属度矩阵为：

$$\boldsymbol{R}_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.966 \\ 0 & 0.825 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0.825 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_{13} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0.557 & 1 \\ 0.818 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

各子系统目标权向量也已知，采用多级模糊优选理论模型，计算子系统各方案对各级相对优属度，得 $u_1 = (0.607, 0.489, 0.996)$，$u_2 = (0.610, 0.923, 0.563)$，$u_3 = (0.481, 1, 0.594)$。

（2）第二层方案的相对优属度确定。根据多层次多目标多级模糊优选原理，第一层的输出，就是第二层的输入。即各子系统的方案相对优属度矩阵

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} 0.607 & 0.489 & 0.996 \\ 0.610 & 0.923 & 0.563 \\ 0.518 & 1 & 0.486 \end{bmatrix}$$

前面已经确定了分系统权向量 $W = (0.439, 0.325, 0.236)$，计算第二层方案相对优属度与第一层计算相同。计算结果为 $u = (0.599, 0.715, 0.763)$，即方案 1，2，3 的相对优属度向量为$(0.599, 0.715, 0.763)$，方案 2 与方案 3 效果较接近，但方案 3 更优。

2.3.4 结果分析

（1）方案 1 与方案 2 比较，方案 2 较优，说明适当增加蓄水池容积，综合效益提高。

（2）由方案 1 的计算结果得知，由于蓄水池容积有限，导致年实际雨水利用量仅占年径流量的35.8%，因而提出方案 2 与方案 3 来减小径流量；方案 2 中，蓄水池容积扩大后，由于日用水量有限，导致年径流削减率仅为 40.6%，雨水利用效果并没有明显提高，而且雨水成本偏高。

（3）方案 3 比方案 2 优。与方案 2 相比，方案 3 是通过下凹式绿地和透水砖路面来提高雨水利用综合效益，而且雨水利用效果较好，说明新的雨水利用模式（如通过下渗设施使雨水下渗回补地下水等）是值得推荐的。

3 结 论

（1）综合效益评价在雨水利用决策时意义重大，可用多层次半结构模糊决策法进行城市雨水资源利用效益综合评价。在实施雨水利用工程时，应综合考虑其产生的经济、生态、社会效益，促进城市建设的可持续发展。

（2）雨水利用工程中下渗设施产生的生态和社会效益非常明显，在方案设计时应着重考虑。

（3）在雨水利用工程实例计算中，得到的雨水成本偏大，其原因是我国在雨水利用系统的设备方面没有形成规模化、系统化生产。另外，本研究中雨水贮存设备采用的是钢筋混凝土储水池，建在地下，造价偏高。

[参 考 文 献]

[1] 张书函，陈建刚，丁跃元. 城市雨水利用的基本形式与效益分析方法[J]. 水利学报，2007(S)：399-402.

[2] 左建兵，刘昌明，郑红星. 北京市城市雨水利用的成本效益分析[J]. 资源科学，2009，31(8)：1295-1302.

[3] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连：大连理工大学出版社，2005.

[4] 张丽，田富强. 城市人工水体的水资源效应与利用[M]. 北京：科学出版社，2008.

[5] 张洪涛，徐向舟，曹健，等. 城市透水面集水效益评价研究：以大连市为例[J]. 水土保持通报，2010，30(4)：163-166.

[6] 孙静. 北京市非传统水资源利用潜力及效益综合评价研究[D]. 北京：中国水利水电科学研究院，2007.

[7] 何静，陈锡康. 我国水资源影子价格动态可计算均衡模型[J]. 水利水电科技进展，2005，25(1)：12-13.

[8] 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(12)：25-28.

[9] 田树生，周集体，武华锋. 大连城区雨水利用探讨[J]. 工程建设与设计，2007(9)：76-78.