

公共建筑节能项目外部性研究

——以北京某高校为例

张子博, 刘玉明

(北京交通大学 经济管理学院, 北京 100044)

摘要: 建筑节能是城市地区节约水资源的重要方式, 高校作为大规模公共建筑, 其节水项目的实施将带来良好的外部性。为了定量研究公共建筑节能项目“节水减排”的外部性, 基于外部性相关理论, 首先界定了公共建筑节能项目外部性的定义, 并运用费用效益理论建立了公共建筑节能项目外部性货币化的思路。其次, 介绍了公共建筑节能技术体系, 并推导建立了节水项目的外部性度量公式。最后对北京市某高校 2016 年用水量数据进行分析, 结果表明: 应用节水技术可以达到年人均节水量 16.6 m^3 , 建筑节能率达到了 42%; 某高校节水外部性为 476.56×10^4 元, 减污外部性为 264.82×10^4 元, 总外部性 741.38×10^4 元, 外部性的效益良好。

关键词: 公共建筑; 节水项目; 节水减排; 外部性; 费用效益理论

中图分类号: TV213.9; TU991.64

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)03-0130-08

Research on externality of water saving project in public buildings:

a case study of a university of Beijing

ZHANG Zibo, LIU Yuming

(School of Economics and Management, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Building water saving is an important way to conserve water resources in urban areas, and the implementation of water-saving projects in universities as a large-scale public building will bring good externality. To calculate water saving and emission reduction externality of water-saving project quantitatively, the definition of externality of public building water-saving projects is firstly defined based on the externality theory, and the cost-benefit theory is applied to establish the thinking of externalities and monetization of public building water-saving project. Next, the water saving system of public buildings is introduced and the externality measurement formula for water saving projects is deduced. In the end, the water consumption data of a university in Beijing in 2016 is analyzed. The results show that water saving technology can achieve the annual per capita water saving of 16.6 m^3 , and public building water-saving rate reached 42% with the use of water-saving technology. The water-saving externality of a university is $\text{¥} 4.7656$ million, the externality of pollution reduction is $\text{¥} 2.6482$ million, and the total externality is $\text{¥} 7.4138$ million, and the externality benefits are good.

Key words: public buildings; water saving project; water saving and emission reduction; externality; cost-benefit theory

1 研究背景

全球水资源危机愈演愈烈, 水环境污染问题及其引发的矛盾越来越突出。在这种形势下, 如何高效地推进节水、污水治理工作, 已成为全社会普遍关

心的课题之一^[1]。建筑行业作为高耗能、高耗水产业, 其节水技术的推广与运用对可持续发展有着重要的推动作用。2014 年, 我国实施《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378-2014), 该标准规定绿色建筑是指在建筑全寿命周期内, 满足居住者舒适的生活

收稿日期: 2018-01-05; 修回日期: 2018-02-05

基金项目: 北京市住建委“十三五”建筑节能规划项目(B15100240)

作者简介: 张子博(1991-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 研究方向为工程与项目管理、绿色建筑。

通讯作者: 刘玉明(1972-), 男, 北京人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为工程与项目管理、绿色建筑。

标准下,最大可能地节能、节水、节材、节地与环境保护。其中将节水作为组成部分,要求公共建筑的最低节水率为25%、非传统水源利用率不低于10%^[2]。2014年,仇保兴^[3]指出建筑节水将是绿色建筑未来发展的重要方向,通过使用节水器具、收集回用雨水与收集回用中水等措施将使建筑节水率达到35%以上。因此,使用节水器具、雨水回收利用技术、中水回收技术以提高节水量和提高非传统水源利用率为重点的节水项目,保证水资源的可持续发展,已经成为大规模公共建筑绿色运营的重要发展方向。

目前,相关学者关于公共建筑节水研究聚焦以下方面:(1)关于节水技术经济性研究,主要研究了节水技术的增量成本构成以及增量成本效益的研究^[4-5];(2)关于公共建筑节水技术的适用性研究,包括节水系统节水技术以及非传统水源回收技术的利用^[6];(3)关于公共建筑的节水潜力研究,分析具体公共建筑的用水结构、节水潜力以及存在问题,并模拟其他公共建筑的节水潜力以及面临的问题以及解决措施^[7-8]。通过分析上述相关文献可知,目前关于公共建筑节水外部性的研究文献较少且主要集中在外部性定性研究,缺乏公共建筑节水外部性的定量研究成果。

因此,本文运用外部性相关理论,建立公共建筑节水技术应用的外部性的测算模型,并以北京某高校为例进行公共建筑节水外部性的定量分析。本文研究成果可为公共建筑节水技术应用的外部性测算提供相关理论方法,也可为相关政府部门制定合理的公共建筑节水经济激励政策提供参考依据。

2 公共建筑节水项目外部性定义及研究方法

2.1 公共建筑节水项目外部性定义

外部性是指某些活动或者消费对社会强征了不可补偿的成本或给予了无需补偿的收益的情形。因此,公共建筑节水项目外部性是指由于采用节水器具或技术节约用水量、回收利用非传统水源以提高水资源利用率,减少了水资源消耗和环境污染,进而对他人、社会以及国家带来无需补偿的收益。

按照外部性内涵分类,公共建筑节水项目具有“经济外部性”、“社会外部性”和“环境外部性”3个方面。经济外部性指因减少了水资源的供给与污水的排放而减少了城市自来水厂、管网基础设施、污水处理厂的运行费用。社会外部性指因节约水资源、减少污水排放进而减少了因水体污染造成的生物传染疾病的发生率,提高了人居环境、改善了生活品质。环境外部性指节约水资源、减少污水排放而减少了水体污染物的排放带来的环境改善^[9]。按照外部性来源分类,公共建筑节水项目具有“节水外部性”和“减排外部性”2个方面。“节水外部性”是指因节约水资源,缓解了国家水资源紧张的现状,降低了自来水厂处理用水的规模,减少了城市供水系统的运行压力,从而降低了国家财政、自来水厂、供水系统的损失或成本费用。“减排外部性”是指减少污水的外排,减少了城市的污染,降低了城市污水排放量,减轻了城市排水设施压力,降低了城市污水处理厂的污水处理量,从而降低了城市环境污染、排水系统的运行费用、污水处理厂的运行费用。

源、减少污水排放进而减少了因水体污染造成的生物传染疾病的发生率,提高了人居环境、改善了生活品质。环境外部性指节约水资源、减少污水排放而减少了水体污染物的排放带来的环境改善^[9]。按照外部性来源分类,公共建筑节水项目具有“节水外部性”和“减排外部性”2个方面。“节水外部性”是指因节约水资源,缓解了国家水资源紧张的现状,降低了自来水厂处理用水的规模,减少了城市供水系统的运行压力,从而降低了国家财政、自来水厂、供水系统的损失或成本费用。“减排外部性”是指减少污水的外排,减少了城市的污染,降低了城市污水排放量,减轻了城市排水设施压力,降低了城市污水处理厂的污水处理量,从而降低了城市环境污染、排水系统的运行费用、污水处理厂的运行费用。

2.2 公共建筑节水项目外部性研究方法

公共建筑节水项目节水减排效果分析采用有无对比的原则,测算采用节水技术前后的节水量与减污量。运用费用效益理论将公共建筑节水项目外部性货币化,便于定量分析公共建筑节水项目外部性,费用效益函数作为测量水资源外部性的工具已经在国内外得到广泛应用^[10],基于费用效益理论,采用因节约用水而减少的自来水厂处理费用、供水系统费用以及增加的城市供水效益作为公共建筑节水项目的节水外部性系数。采用因减少污水排放量而减少的排水系统费用、污染处理厂的费用、污染损失费用作为公共建筑节水项目减排外部性系数,进而测算出公共建筑节水项目总外部性,其度量思路见图1。

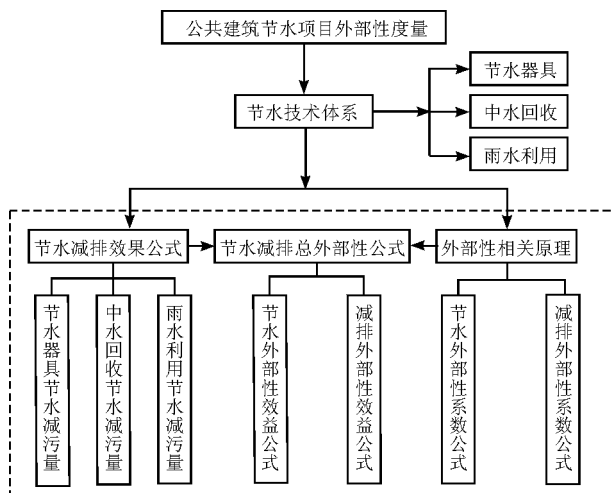


图1 公共建筑节水项目外部性度量思路

3 公共建筑的节水技术体系

目前,我国公共建筑普遍使用的节水技术体系

如图2所示,建筑物内通过采用节水器具或技术直接节省用水量,并通过中水回收利用技术将生活优质杂排水(主要为洗浴用水、盥洗用水)回收处理后用于景观补水或者绿化用水。建筑物外通过雨水回收利用技术将收集屋面与地面雨水进行集中处理后用于景观补水或者绿化用水。

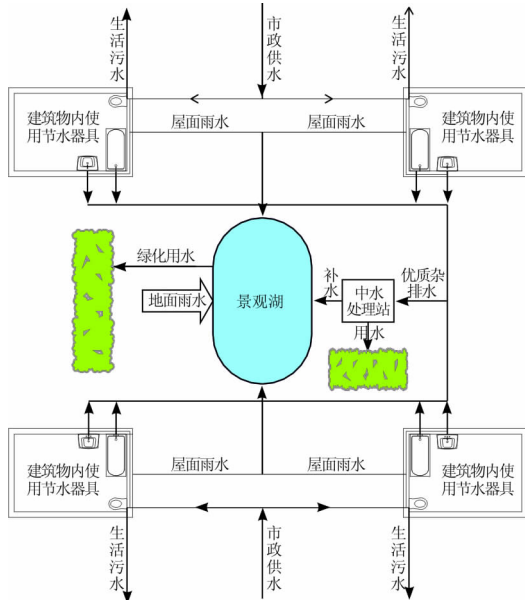


图2 某公共建筑节水体系图

3.1 节水器具节水

节水系统节水是指在供水系统、循环水系统、浇灌系统采用节水器具或技术以提高水资源的使用效率的技术,降低人均生活用水量和减少绿化用水量。

我国目前在节水系统推广的方案主要采用避免水资源运输过程中的管网漏损技术、无负压供水技术及管网漏水检测设备以减少水资源在运输过程中因管道泄漏造成的水资源浪费。研究表明,采用节水系统节水技术后节水率达到20%~30%^[11]。目前公共建筑使用的节水器具包括节水龙头、节水喷头、引射式蹲坑便器节水器、免冲水小便斗、节水喉、公共卫生间自控节水阀等器具。节水器具的节水能力强,性价比高,以公共建筑普遍采用红外线节水控制器与脚踏冲洗阀两种卫生器具为例,节水能力都在20%~50%之间,投资回收期3~5年^[12]。

3.2 中水回收利用

中水回收利用是指在“高质高用、低质低用”原则下,将生活用水回收处理后达到不同国家中水水质的中水用于环境景观用水、厕所冲洗、消防用水、绿化用水等途径。不同中水水源回收利用影响着中水处理方式、造价以及回收量。中水水源有以下3种类型:

(1)优质杂排水:主要指公共建筑中的盥洗用水、洗浴用水。其水质较好,有机物含量较少,处理工艺简单,成本费用低,性价比高,占生活排水的大部分比例,适用于一般城市的公共建筑的中水回收。

(2)杂排水(灰水):主要指公共建筑中的盥洗用水、洗浴用水、厨房用水、洗衣用水。其水质中等,有机物含量多和悬浮物浓度高,处理工艺复杂,成本费用高于优质杂排水的处理费用,适用于缺水型城市。

(3)生活污水(黑水):指公共建筑中包括粪便污水在内的所有生活用水。其水质最差,有机物含量最多,悬浮物浓度最高,处理工艺复杂,成本费用远远高于杂排水的处理费用,适用于严重缺水型城市和干旱地区的公共建筑的中水回收。

3.3 雨水回收利用

雨水回收利用是指采用雨水收集技术将一定区域内的雨水进行收集处理达到国家水质要求后再利用^[13]。根据下垫面类型,雨水回收利用主要有屋面雨水回收利用、硬化地面雨水回收利用、绿化用地雨水回收利用、水面雨水回收利用4种。

(1)屋面雨水回收利用:是一种城市建筑使用最早、最普遍的雨水收集方式,其径流量大,雨水回收率高,水质好,成本费用低,属于性价比较高的雨水回收利用方式。

(2)硬化路面雨水回收利用:随着城市化发展,城市硬化路面面积不断增加,硬化路面雨水回收技术逐渐受到重视,其容易形成地面径流,初期水质较差,成本费用较高。

(3)绿化用地雨水回收利用:由于绿地具有较大的渗透率,其雨水回收率较低,成本费用与硬化路面雨水回收相当,适用于降水量丰富地区。

(4)水面雨水回收利用:属于成本费用最低,雨水回收利用率最高的雨水回收利用方式。

4 公共建筑节水项目外部性度量

4.1 节水量与减污量公式推导

4.1.1 节水器具节水量与减污量公式 根据文献[14-16],节水器具节水量与减污量由用水人数、使用次数或时间、普通用水器具用水量、节水器具用水量决定,公式如下:

$$Q_{j1} = Q_{j2} = \frac{\sum_{i=1}^n [T_i \cdot (q_{1i} - q_{2i}) \cdot m]}{1000} \quad (1)$$

式中: Q_{j1} 为节水器具节水量, m^3 ; Q_{j2} 为节水器具减

污量, m^3 ; T_i 为每天每人使用次数; q_{1i} 为节水器具每次使用的用水量, L ; q_{2i} 为普通用水器具每次使用的用水量, L ; m 为使用人数。

4.1.2 中水回收利用的节水量与减污量公式 根据文献[17-19],中水回收系统可回收利用节水量与减污量由用水量、用水分项比例、排水量系数、中水回用量系数决定。

$$Q_{z1} = Q_{z2} = \sum (\beta \cdot Q_z \cdot b) \quad (2)$$

式中: Q_{z1} 为中水系统节水量, m^3 ; Q_{z2} 为中水系统减污量, m^3 ; Q_z 为建筑平均日用水量, m^3/d ; β 为排水量系数,一般取 0.8 ~ 0.9; b 为用水分项比例(中水水源占用水量的比例)。中水理论节水量与减污量不应超出中水设计处理能力。

4.1.3 雨水回收利用的节水量与减污量公式 根据文献[20-22],雨水回收系统的节水量与减污量由该地区的降雨厚度、雨水径流系数、汇水面积、季节折减系数、初期雨水弃流系数决定,公式如下:

$$Q_{y1} = Q_{y2} = \frac{\alpha \cdot \varepsilon \cdot \sum (\psi \cdot H \cdot A)}{1000} \quad (3)$$

式中: Q_{y1} 为雨水回收系统的节水量, m^3 ; Q_{y2} 为雨水回收系统的减污量, m^3 ; α 为季节折减系数; ε 为初期雨水弃流系数; ψ 为雨水径流系数; H 为降雨厚度, mm ; A 为汇水面积, m^2 。

4.2 节水外部性系数与减排外部性系数公式

4.2.1 节水外部性系数公式 我国水资源短缺,每年因缺少用水造成国家财政产生损失,因实施节水项目一方面可为国家减少相应的财政损失^[23],另一方面,减少城市市政供水,从而降低自来水水厂引水、调水工程边际费用,同时减少市政供水设施的网管运输的压力以及投入供水设施运行的设备、人员、维修的费用^[24-25]。因此,节水外部性系数由国家缺水财政损失费用、水厂工程边际费用、市政供水费用决定,公式如下:

$$p_s = p_1 + p_2 + p_3 \quad (4)$$

式中: p_s 为节水外部性系数,元/ m^3 ; p_1 为国家缺水财政损失费用,元/ m^3 ; p_2 为水厂工程边际费用,元/ m^3 ; p_3 为市政供水费用,元/ m^3 。

4.2.2 减排外部性系数公式 实施节水项目后,一方面减少污水排放,减少了因环境污染造成的社会损失^[26],另一方面,降低污水量外排,减少市政排水设施的网管运输的压力以及投入排水设施运行的设备、人员、维修的费用,同时也减小了城市污水处理厂净化处理污水的规模,从而降低污水厂污水处理费

用^[27-28]。因此,污水减排的外部性系数由污水环境污染费用、污水市政排水费用、污水厂处理费用决定。

$$p_p = p_4 + p_5 + p_6 \quad (5)$$

式中: p_p 为减排外部性系数,元/ m^3 ; p_4 为污水环境污染费用,元/ m^3 ; p_5 为污水市政排水费用,元/ m^3 ; p_6 为污水厂处理费用,元/ m^3 。

4.3 公共建筑节水项目总外部性度量

节水项目总外部性由包括节水系统节水外部性、中水回收系统节水外部性、雨水回收节水外部性构成。减排外部性包括节水系统减污外部性、中水回收系统减污外部性、雨水回收系统减污外部性。因此节水总外部性 B_{E1} 、减排总外部性 B_{E2} 、节水项目总外部性 B_E 为:

$$B_{E1} = p_s \cdot (Q_{j1} + Q_{z1} + Q_{y1}) \quad (6)$$

$$B_{E2} = p_p \cdot (Q_{j2} + Q_{z2} + Q_{y2}) \quad (7)$$

$$B_E = B_{E1} + B_{E2} \quad (8)$$

5 案例分析

5.1 研究对象和技术方案概述

5.1.1 研究对象 北京某高校位于北京海淀区,学校占地面积为 $63.75 \times 10^4 m^2$,其中东校区 $9.56 \times 10^4 m^2$ 、主校区 $54.19 \times 10^4 m^2$,建筑面积为 $103.24 \times 10^4 m^2$,绿地面积 $15.3 \times 10^4 m^2$,学校拥有长 59.6 m,宽 39.4 m,深 4 m 的景观湖。全校总人数 30 760 人,其中学生人数 26 332 人,教师人数 4 428 人。某高校作为节约型校园建设示范单位,从 1985 年至今,该校一直致力于节水工作的推进。已经连续 3 次荣获“全国城市节约用水先进单位”称号,连续 16 年被评为“北京市节约用水先进单位”。

5.1.2 技术方案 (1)节水系统节水方案。学生浴室更换节水喷头 700 个,节水效果明显;学生宿舍水房更换恒流节水龙头 2600 个,在保证正常使用的前提下,出水更柔和;学校教学楼、宿舍厕所全部采用节水型器具,蹲便器采用脚踏式、红外感应式、延时自闭式等开关。小便斗(池)采用红外式、延时自闭式开关,全部各种红外用水器具 650 套;建立了能源监管平台,可以预警水管漏水现象,并及时通知后勤工作人员进行抢修,从而每年减少因水管漏水造成不必要的水资源浪费。

(2)中水回收利用。学校先后建立了 3 个中水处理站:学生活动中心中水处理站(2012 年)、学生学苑公寓中水处理站(2006 年)、公共浴室中水处理系统(1993 年),均用于回收利用学生生活优质杂排水,用于学校绿化、卫生间用水,其处理工艺见图 3。

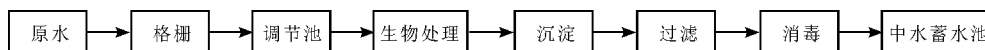


图3 中水处理工艺流程图

其中,学生活动中心中水处理站设计日中水处理能力为 500 m³ (182 500 m³/a),收集处理后中水水质满足《城市污水再生利用城市杂用水水质》标准,其中水用以主校区大部分冲厕用水。

学校的学生学苑公寓中水站设计日处理中水能力为 110 m³ (40 150 m³/a),对学苑公寓学生盥洗用水、洗浴用水等优质中水进行回收处理,用于学生公寓全部使用中水冲厕所以及部分绿化用水。

学校自行设计的“浴室中水处理系统工程”被北京市列入节水示范工程项目,设计日处理中水能力 90 m³ (32 850 m³/a),用于回收利用主校区公共浴室的洗浴用水。

(3)雨水回收利用。学校将景观湖附近 20 × 10⁴ m² 汇水面积(湖面 2 348 m²、绿地 51 000 m²、屋面 101 452 m²、道路及广场 45 200 m²)的雨水通过 148 个雨水篦子,约 600 m 的管路将雨水汇集到景观湖,并在两个进水口建了两个沉淀过滤井处理雨水,使其达到《景观回用水水质标准》。湖内可蓄水 9 393 m³,除满足景观用水外,还对湖周边半径 200 m 面积 31 015 m² 的绿地进行浇灌。并建设固定水泵站与过滤设施 4 处。将湖水通过地下管道引至图书馆、芳华园、思源楼、第九教学楼等处周围的绿地,并全部安装自动控制地理升降式喷灌设备。并购置了 1 台洒水车。可对校园其他地方及家属区的绿地拉水浇灌。学校学生训练用的 13 555 m² 的土操场采用湖水喷洒,其处理工艺见图 4。

5.2 节水量与减污量计算

5.2.1 节水器具节水量与减污量计算 (1)在校

表 1 节水器具技术指标

名称	单位	数值	名称	单位	数值
一般水龙头	L/次	6	一般马桶	L/次	9
节水型水龙头	L/次	4.5	节水型马桶	L/次	6
盥洗次数	次/d	学生 4 次/d	大便次数	次/d	学生、老师各 1 次/d
一般洗浴喷头	L/次	100	一般小便斗	L/次	6
节水型洗浴喷头	L/次	70	节水型小便斗	L/次	3.8
洗澡次数	次/d	学生 1 次/d	小便次数	次/d	老师 3 次/d、学生 6 次/d

(3)节水量与减污量计算。根据公式(1),1 月份在校老师人数为 3 765 人,使用节水器具为节水型马桶、节水型小便斗。所以 1 月份在校老师使用节水器具的节水量与减污量为:

人数统计情况。根据学校后勤信息管理中心数据得出 2016 年每月在校师生人数见图 5。

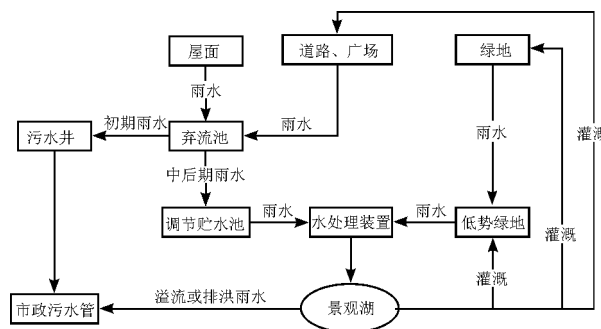


图 4 雨水回收系统示意图

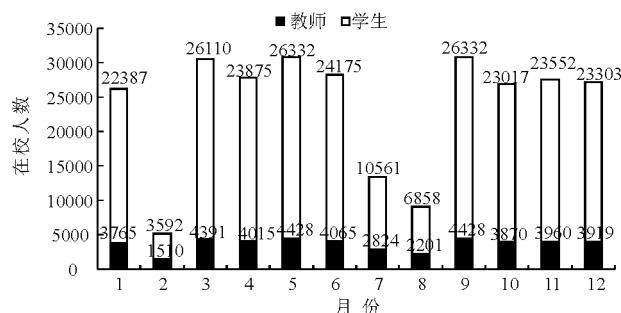


图 5 2016 年在校人数统计图

(2)节水器具的技术指标。高校学生在校时间为 24 h/d 包括学习和生活时间)相当于节假日住宅使用标准,老师在校时间为 8 h/d,相当于工作日住宅使用标准。学生宿舍安装了节水型水龙头、节水型洗浴喷头,学生在宿舍的使用次数为工作日住宅使用标准,老师没有使用节水型龙头、节水型洗浴喷头,根据文献[15-16,29-30]得出技术指标见表 1。

$$Q_{j1} = Q_{j2} = \frac{31 \cdot \sum_{i=1}^n (T_i \cdot (q_{1i} - q_{2i}) \cdot m)}{1000}$$

$$= \frac{31 \times [(9 - 6) + 3 \times (6 - 3.8)] \times 3765}{1000}$$

$$= 1120.46(\text{m}^3)$$

1月份在校学生人数22387人,使用节水器具

$$Q_{j1} = Q_{j2} = \frac{31 \cdot \sum_{i=1}^n (T_i \cdot (q_{1i} - q_{2i}) \cdot m)}{1000} = \frac{31 \times [4 \times (6 - 4.5) + (100 - 70) + (9 - 6) + 6 \times (6 - 3.8)] \times 22387}{1000}$$

$$= 36226.64(\text{m}^3)$$

根据公式(1)2016年在校师生使用节水器具“节水减污”量见表2。

表2 在校师生年使用节水器具“节水减污”量 m^3

月份	老师		学生	
	节水量	减污量	节水量	减污量
1	1 120.46	1 120.46	36 226.64	36 226.64
2	405.89	405.89	5 250.07	5 250.07
3	1 306.76	1 306.76	42 251.20	42 251.20
4	1 156.32	1 156.32	37 388.25	37 388.25
5	1 317.77	1 317.77	42 610.44	42 610.44
6	1 170.72	1 170.72	37 858.05	37 858.05
7	840.42	840.42	17 089.81	17 089.81
8	655.02	655.02	11 097.62	11 097.62
9	1 275.26	1 275.26	41 235.91	41 235.91
10	1 151.71	1 151.71	37 246.11	37 246.11
11	1 140.48	1 140.48	36 882.43	36 882.43
12	1 166.29	1 166.29	37 708.91	37 708.91
合计	12 707.12	12 707.12	382 845.45	382 845.45

5.2.2 中水回收利用的节水量与减污量计算

(1)用水量统计。根据后勤统计2016年学校市政用水总量为987012 m^3 ,其中学生活动中心、学生公寓、浴室用水量分别为72910、134368、41736 m^3 。

(2)中水回收利用的技术指标。学校的学生活动中心用于学生学习与娱乐,属于公共建筑,因此优质杂排水占用水量比例参照公共建筑供水比例。学生公寓用于学生生活和休息,属于住宅建筑,因此优质杂排水占用水量比例参照民用建筑供水比例,浴室用于学生集体洗浴,其排水均为优质杂排水,因此比例取为1,技术指标参照文献[18,31-33],见表3。

表3 中水回收利用技术指标

名称	年用水量 Q_z/m^3	排水量系数 β	用水分项比例 b	设计处理能力/ m^3
学生活动中心	72 910	0.9	0.86	182 500
学生公寓	134 368	0.9	0.65	40 150
浴室	41 736	0.9	1.00	32 850

为节水型水龙头、节水型洗浴喷头、节水型马桶、节水型小便斗。故,1月份在校学生使用节水器具的节水量与减污量为:

(3)中水回收利用的节水量与减污量计算。根据公式(2),学生活动中心年用水量为72910 m^3 ,排水量系数为0.9,用水分项比例为0.86,设计的中水处理能力为182500 $\text{m}^4/\text{年}$,故学生活动中心的节水量与减污量为:

$$Q_{z1} = Q_{z2} = \sum (\beta \cdot Q_z \cdot b) = 72910 \times 0.9 \times 0.86$$

$$= 56 432.34 \text{ m}^3$$

学生活动中心的节水量低于设计的中水处理能力,因此节水量为56432.34 m^3 。

根据公式(2),中水回收利用的“节水减污”量见表4:

表4 中水回收利用的“节水减污”量 m^3

名称	理论节水量	理论减污量	设计处理能力	实际节水量	实际减污量
学生活动中心	56 432	56 432	182 500	56 432	56 432
学生公寓	78 605	78 605	40 150	40 150	40 150
浴室	37 562	37 562	32 850	32 850	32 850
合计				129 432	129 432

5.2.3 雨水回收系统节水量与减污量计算

(1)降雨情况。北京位于北纬39°26'至41°03',东经115°25'至117°30',气候属于典型的北温带半湿润大陆性季风气候,全年降水的80%集中在夏季6、7、8这3个月,2016年全年的总降雨量为680.6 $\text{mm}^{[33]}$ 。

(2)雨水回收利用的技术指标。学校景观湖的汇水面20 $\times 10^4 \text{ m}^2$,包括建筑物屋面、广场及道路混凝土路面、绿地、景观湖水面。参考文献[18,20-22]技术指标见表5。

表5 雨水回收利用技术指标

地面类型	汇水面积 A/m^2	降雨厚度 H/mm	径流系数/ ψ	弃流系数 ε	季节折减系数 α
绿地	51 000	680.6	0.15	0.87	0.85
屋面	101 452	680.6	0.9	0.87	0.85
道路广场	45 200	680.6	0.9	0.87	0.85
景观湖面	2 348	680.6	1	0.87	0.85

(3)雨水回收系统节水量与减污量计算。根据公式(3),绿地面积为 51 000 m²,降雨厚度为 680.6 mm,雨水径流系数为 0.15,初期雨水弃流系数为

$$Q_{y1} = Q_{y2} = \frac{\alpha \times \varepsilon \times \sum \psi \times H \times A}{1000} = \frac{0.85 \times 0.87 \times 680.6 \times (0.15 \times 51000 + 0.9 \times 101452 + 0.9 \times 45200 + 1 \times 2348)}{1000} = 71461.48 (\text{m}^3)$$

5.2.4 节水减排效果分析 根据北京市地方标准《公共生活取水定额》(DB11/55.4.2-2008)规定北京市高校人均综合年取水量为 55.2 m³,某高校 2016 年人均用水量为 38.6 m³,则高校人均年节水量为 16.6 m³。其中非传统水源利用率为 17%、节水率为 42%,高于《绿色建筑评价标准》(GB/T50378-2014)要求的公共建筑非传统水源最低利用率 10%、最低节水率 25% 的要求,节水效果良好,数据见表 6。

表 6 学校 2016 年用水情况

类型	用水量/m ³	比例/%	人均用量/m ³
传统水源	987 012	83	32.1
中水回收	129 432	11	4.2
雨水利用	71 461	6	2.3
合计	1 187 905	100	38.6

注:在校人数 30760 人。

5.3 节水项目节水减排外部性系数计算

根据文献[28,35-37],节水项目外部性系数指标见表 7。

表 7 节水项目系数指标 元/m³

名称	数值
国家缺水财政费用(p_1)	5.84
水厂工程边际费用(p_2)	2.07
市政供水费用(p_3)	0.08
污水环境污染费用(p_4)	3.00
市政排水费用(p_5)	0.08
污水厂处理费用(p_6)	1.36

根据公式(4)、(5),节水外部性系数与减排外部性系数为:

$$p_s = p_1 + p_2 + p_3 = 5.84 + 2.07 + 0.08 = 7.99 (\text{元}/\text{m}^3)$$

$$p_p = p_4 + p_5 + p_6 = 3.00 + 0.08 + 1.36 = 4.44 (\text{元}/\text{m}^3)$$

5.4 节水项目总外部性度量

5.4.1 节水项目节水量与减污量汇总 某高校节水项目在建筑物内采用了节水器具,在学生活动中心、学生公寓、浴室建立中水处理系统进行中水回收利用,同时利用校园内的景观湖实施雨水回收利用。

0.87,季节折减系数为 0.85,故绿地 2016 年年节水量与减污量为:

因此,节水项目的总节水量与减污量,由节水器具、中水回收利用系统、雨水回收利用系统 3 个部分累加,其总“节水减污”量见表 8。

表 8 节水项目年总“节水减污”量 m³

项目	节水量	减污量
节水器具	395 552.57	395 552.57
中水回收利用	129 432	129 432
雨水回收利用	71 461.48	71 461.48

5.4.2 节水项目总外部性 根据公式(6)、(7)、(8),节水项目节水外部性、减排外部性、总外部性为:

$$B_{E1} = p_s \cdot (Q_{j1} + Q_{z1} + Q_{y1}) = 7.99 \times (395552.57 + 129432 + 71461.48) = 476560394 \approx 476.56 \times 10^4 (\text{元})$$

$$B_{E2} = p_p \cdot (Q_{j2} + Q_{z2} + Q_{y2}) = 4.44 \times (395552.57 + 129432 + 71461.48) = 4648220.46 \approx 264.82 \times 10^4 (\text{元})$$

$$B_E = B_{E1} + B_{E2} = 476.56 \times 10^4 + 264.82 \times 10^4 = 741.38 \times 10^4 (\text{元})$$

6 结论

(1)基于外部性理论,对高校节水项目的外部性进行分析研究,确定了节水项目具有正外部性、代内与代际外部性、公共外部性的特征。其次,按照效益内涵,将外部性分为“经济外部性”、“社会外部性”、“环境外部性”。按照效益来源分为“节水外部性”与“减排外部性”,并按照效益来源建立了节水项目外部性度量的公式。

(2)通过对某高校节水技术应用效果进行分析,参照北京市地方标准《公共生活取水定额》(DB11/55.4.2-2008)规定北京市高校人均综合年取水量为 55.2 m³,某高校 2016 年人均用水量为 38.6 m³,则高校人均年节水量为 16.6 m³。非传统水源利用率为 17%、节水率为 42%,高于《绿色建筑标准》(GB/T50378-2014)要求的公共建筑非传统水源最低利用率 10%、最低节水率 25% 的要求,节水效果良好。

(3)通过2016年的运行数据进行节水应用的外部性的效益测算,结果表明:该节约型高校2016年节水外部性为 476.56×10^4 元,减排外部性为 264.82×10^4 元,节水项目节水减排外部性为 741.38×10^4 元,节水效益效果明显,具有很好的外部性效益。

参考文献:

- [1] 王俊安,李冬,张杰,等. 高校节水潜力分析与对策[J]. 给水排水,2009,45(2):73-76.
- [2] 王洪涛,李凤亭,徐冉,等. 绿色建筑评估体系与节水[J]. 中国给水排水,2007,23(2):99-102.
- [3] 仇保兴. 新常态·新绿建——中国绿色建筑现状与发展前景[J]. 建设科技,2015(12):8-11.
- [4] 柴宏祥,曲凯,赵芳. 绿色建筑节水项目增量成本的构成与算法[J]. 中国给水排水,2011,27(20):32-35.
- [5] 柴宏祥,胡学斌,彭述娟,等. 绿色建筑节水项目全生命周期增量成本经济模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2010,38(11):59-63.
- [6] 王佳,管子,迟艺侠,等. 高校非常规水资源优化利用[J]. 安徽农业科学,2016,44(32):47-48.
- [7] 刘英,李克勋,周建芝,等. 天津市高等院校节水潜力分析[J]. 中国水利,2008,26(13):21-22+26.
- [8] 王利平,胡原君,罗真,等. 常州大学城用水现状与节水潜力的分析[J]. 给水排水,2007,33(9):93-96.
- [9] 刘玉明,刘长滨. 采暖区既有建筑节能改造外部性分析与应用[J]. 同济大学学报(自然科学版),2009,37(11):1521-1525.
- [10] 王国友,谭灵芝. 重庆地区再生水回用模式及环境经济效益研究[J]. 水土保持通报,2012,32(4):312-316.
- [11] 柴宏祥,孙永利,林玲,等. 绿色建筑供水系统的节水设计要点[J]. 中国给水排水,2008,24(14):44-46+60.
- [12] 白玉华,张兴华,章小军,等. 高校用水现状与节水潜力分析[J]. 北京工业大学学报,2005,31(6):629-634.
- [13] 何强,柴宏祥. 绿色建筑小区雨水资源化综合利用技术[J]. 环境工程学报,2008,2(2):205-207.
- [14] 李爽,张海迎,李青,等. 城市大规模节水器具改造的费用效益分析案例[J]. 给水排水,2012,38(5):143-147.
- [15] 魏天云,刘德明. 节水用水器具的节水效益分析与工程应用[J]. 安阳工学院学报,2016,15(2):54-56.
- [16] 张勤,赵福增. 住宅建筑节水器具的经济评价[J]. 重庆建筑大学学报,2007,29(5):123-125.
- [17] 李妍,狄彦强,张宇霞. 建筑小区中水处理工程的运行情况及问题分析[J]. 环境工程,2015,33(9):6-9+15.
- [18] 曹杨. 厦门某生态园区雨水及中水利用技术研究与探讨[J]. 给水排水,2014,40(4):75-78.
- [19] 夏树威,王涤平,刘海. 建筑中水系统水量平衡计算探讨[J]. 给水排水,2009,45(7):80-82.
- [20] 王一钧,欧阳志云,郑华,等. 雨水回收利用生态工程及其应用——以中国科学院研究生院怀柔新校区为例[J]. 生态学报,2010,30(10):2687-2694.
- [21] 孙轲,荀志远,赵琛琛. 小区雨水回收利用系统的经济效益分析[J]. 工程管理学报,2017,31(3):92-96.
- [22] 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.
- [23] 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(S1):399-403.
- [24] 陈煜红,甘晓倩. 城市中水回用综合效益分析——以重庆市龙头寺公园中水回用工程为例[J]. 中国市政工程,2014(5):44-46+114.
- [25] 李爽,张海迎,李青,等. 城市大规模节水器具改造的费用效益分析案例[J]. 给水排水,2012,48(5):143-147.
- [26] 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.
- [27] 周亚群,王维平,邓海燕. 屋面雨水深井回灌裂隙岩溶水工程的效益评价[J]. 济南大学学报(自然科学版),2014,28(1):37-40.
- [28] 李晨,王桂锋,张传杰,等. 北方城市海绵社区生态效益分析[J]. 水土保持通报,2017,37(3):119-124.
- [29] 赵文耕. 住宅用节水器具简介[J]. 给水排水,2005,31(2):93-96.
- [30] 邓林,王峰,杨海真. 基于需求侧管理的城市公共用水节水激励措施研究——以上海市节水器具为例[J]. 给水排水,2010,46(3):148-152.
- [31] 李春阳. 住宅小区内建筑中水回用的水量和水质分析[J]. 才智,2010(4):30.
- [32] 申芷娟,刘筠,刘永亮,等. 建筑中水回用技术在星级酒店的应用[J]. 给水排水,2010,46(s1):320-322.
- [33] 张立成,兰宇,李明才,等. 住宅冲厕用水比例问题探讨[J]. 给水排水,2014,40(9):156-157.
- [34] 北京气象局. 盘点2016年北京气候特征[DB/OL][2017-01-13](2017-12-27). <http://www.bjmb.gov.cn/info/842/4960266.html>.
- [35] 柴宏祥,胡学斌,彭述娟. 绿色建筑节水项目全生命周期综合效益经济模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2010,38(9):113-117.
- [36] 北京市水务局. 北京市居民用水水价[DB/OL][2015-07-01](2017-12-27). <http://www.bjwater.gov.cn/bjwater/300747/300772/559422/index.html>.
- [37] 易琦,窦小东,和克俭,等. 城市中水利用的潜力与发展方略——以昆明市为例[J]. 城市问题,2012(1):30-34.