

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbqk.2022.0086

师林蕊, 朱永楠, 李海红, 等. 北京居民用水调查及节水潜力[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(5): 851-861. SHI L R, ZHU Y N, LI H H, et al. Simulation of residential water consumption and analysis of water-saving potential in Beijing[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(5): 851-861. (in Chinese)

北京居民用水调查及节水潜力

师林蕊, 朱永楠, 李海红, 赵勇, 王建华, 王丽珍, 曲军霖, 詹力炜

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 为量化描述居民生活用水需求程度与节水潜力的关系, 提高居民生活用水效率, 提出适应于不同居民特征的节水管理措施建议, 以北京市为例, 开展居民生活用水和节水行为习惯调查。建立居民生活用水及节水模型, 从个体特征角度分析居民生活用水量和行为用水规律, 采用层次化需水理论, 计算居民各行为的刚性、弹性和奢侈用水量及节水潜力。结果表明, 居民生活用水量特别是洗浴、冲厕、洗衣和饮食用水量与年龄和性别等个体特征呈显著的规律性变化。根据计算, 女性平均用水量比男性高 13%, 青年女性和老年男性是用水需求最高和最低的人群, 平均用水量分别为 156 L/(人·d) 和 118 L/(人·d), 奢侈用水量占比分别为 27% 和 3%。研究模拟结果显示, 在不改变个人生活质量的前提下, 通过实施家庭内部废水再利用、换装节水器具、减少无效用水等方式, 可节约 15%~20% 的家庭用水量, 为城市生活用水及节水管理提供理论参考。

关键词: 居民生活用水; 个体特征; 层次用水量; 节水潜力; 北京

中图分类号: TV213.4 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



近年来, 通过产业结构调整, 北京市的工业和农业用水量已大幅压缩, 生活用水量则呈增长趋势^[1-2], 生活节水成为城市水资源管理工作的重点。

国内外学者开展了较多关于居民生活节水的研究, 分析影响居民生活用水的因素, 为城市水资源管理政策的制定提供理论依据。研究发现将家庭中用水设备更换成高效节水型, 可节约 10%~50% 的用水需求^[3-5], 并且节水型冲便器和洗衣机的节水潜力最大^[6-7], 节水型淋浴器最具成本效益^[8]。此外, 改变个人用水习惯是管理生活用水需求的重要环节^[9], 因为节水态度和用水习惯是家庭节水的决定因素, 也是预测节水意愿最重要的指标^[10-12]。Torres 等^[13] 定期向居民发送用水量信息以提高节水意识, 使家庭用水量减少 6.8%; Zhao 等^[14] 的研究结果表明, 节水政策能够帮助居民提高对水资源紧缺现状的认知并培养良好用水习惯, 使香港的居民生活用

水量减少 14.7%; 姜海珊等^[15] 的研究表明, 培养节水意识可以改变居民的生活用水习惯, 从而降低用水量。

以往的研究较多关注在居民生活人均用水和节水的影响分析, 忽视了居民生活用水的群体差异性。实际上, 居民生活用水需求有显著的个体差异性^[16-19], 如居民性别、年龄、教育程度、收入等, 使其生活方式、行为习惯和意识观念相差甚远, 导致生活用水需求和节水潜力存在较大差异。因此, 本研究重点关注居民生活用水的群体差异性, 通过问卷调查分析不同特征群体居民生活用水量的特点, 以及相关的用水习惯, 构建居民生活用水及节水模型。依据居民生活层次化用水理论计算刚性用水、弹性用水和奢侈用水, 针对居民用水行为和意识特征计算减小奢侈用水量的最大节水潜力, 为不同个体特征居民提出有针对性的节水措施, 以提高居民生活用水效率。

收稿日期: 2022-03-12 修回日期: 2022-04-30 网络出版时间: 2022-05-10

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220509.1219.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200204); 国家自然科学基金项目(52009141); 国家杰出青年科学基金项目(52025093)

作者简介: 师林蕊(1993—), 女, 北京人, 博士生, 主要从事城市综合节水研究。E-mail: slarld@126.com

通信作者: 朱永楠(1985—), 女, 北京人, 高级工程师, 博士, 主要从事城市综合节水研究。E-mail: zhyn@iwhr.com

1 居民生活用水调查和计算方法

居民生活用水调查采用问卷的方式,调查问卷设置 5 大类问题共 46 道小题。问卷内容主要涉及居民个人及家庭基本情况、对家庭水费及用水了解程度、个人用水行为习惯、节水意识和用水设施状况等信息,问卷最后设置开放性问题,以了解民众对促进节水的建议。为保证问卷填写的有效性并准确了解受访家庭的用水量和相关行为习惯,问卷由课题组人员与居民面对面指导完成填写。问卷收集时间为 2020 年 10 月至 2021 年 4 月,在北京市城区内获取 1 438 份有效问卷,有效问卷的收集情况见图 1。在研究前期,分析了居民个体特征与生活用水习惯和节水行为的相关性,发现年龄和性别是最显著的影响因素,而收入水平、教育水平、职业特征等因素的影响作用较小。因此,在本文中不同个体特征包含不同年龄阶段和性别差异,对调查对象的控制尽量满足个体特征样本的均衡分布。回收的有效问卷中男性与女性比例分别为 46% 和 54%,少年(18 岁以下)、青年(18~29 岁)、中青年(30~39 岁)、中年(40~59 岁)和老年(60 岁以上)的

比例分别为 10%、20%、25%、27% 和 18%,这与《2021 年北京市统计年鉴》统计的人口现状基本相符。

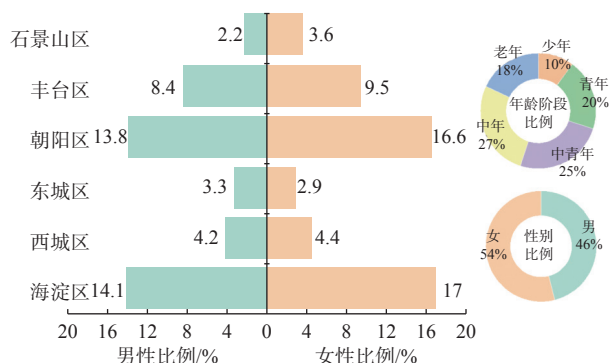


图 1 样本数据的分布情况

Fig. 1 The distribution of sample data

通过问卷调查核算受访居民的个人生活用水总量及不同行为的用水需求,并建立居民生活用水及节水模型,具体计算方法在 2.1 和 2.2 部分详细说明。采取层次用水评价将居民生活各用水行为划分为刚性、弹性和奢侈用水量^[20],结合奢侈水量分析不同个体特征的节水潜力,研究工作流程见图 2。

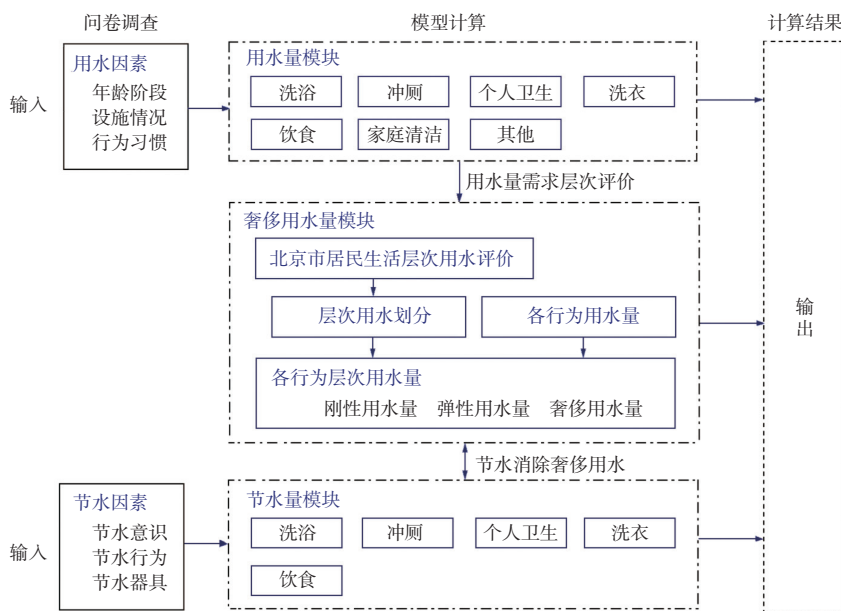


图 2 居民生活用水及节水计算流程

Fig. 2 Flow chart of residential water use and saving calculation

1.1 居民生活用水量计算方法

问卷调查结果显示,北京市居民家庭中仅有少数拥有室外庭院,因此,构建的居民生活用水模型主要考虑室内用水,用水终端主要分布在卫生间和厨房,分别为淋浴器、冲便器、洗脸盆水龙头、洗菜

盆水龙头、洗衣机,少数家庭还使用洗碗机。根据用途,生活用水行为主要为洗浴、冲厕、个人卫生、洗衣、饮食、家庭清洁及其他用水。调查问卷中关于用水行为习惯的内容包含每种用水行为的用水频率、用水时长、每次新鲜水用水量、废水重复利

用情况,涉及公式(1)~(8)中的每个计算参数。基于收集的居民用水行为习惯数据,构建居民生活用水量计算方法,计算每种行为的新鲜水使用水量,计算公式为

$$Q = \sum_{i=1}^7 Q_i \quad (1)$$

$$Q_1 = U_s \times E_s \times F_{11} \times T_{11} + U_b \times F_{12} \times q_{12} \quad (2)$$

$$Q_2 = U_{to} \times E_{to} \times F_2 \times (1 - K_{rec}) \times (1 - K_{reu}) \quad (3)$$

$$Q_3 = U_{ta} \times E_{ta} \times \left(\sum_{i=1}^2 F_{3i} \times T_{3i} \right) + (F_{33} \times q_{33}) \quad (4)$$

$$Q_4 = U_{ta} \times F_{4h} \times q_{4h} + \sum_{i=1}^2 (U_{4i} \times E_{Ci}) + (F_{4i} \times W_i) \quad (5)$$

$$Q_5 = U_{ta} \times E_{ta} \times \sum_{i=1}^4 (F_{5i} \times q_{5i}) \quad (6)$$

$$Q_6 = U_{ta} \times E_{ta} \times \sum_{i=1}^2 (F_{6i} \times q_{6i}) \quad (7)$$

$$Q_7 = U_{ta} \times E_{ta} \times \sum_{i=1}^3 (F_{7i} \times q_{7i}) \quad (8)$$

式中: Q 为居民生活用水总量, L/(人·d); Q_i 为不同行为的用水量, L/(人·d); $i=1\sim7$ 分别为洗浴、冲厕、个人卫生、洗衣、饮食、家庭清洁及其他行为; U_s 、 U_{to} 、 U_{ta} 和 E_s 、 E_{to} 、 E_{ta} 分别为淋浴器、冲便器、水龙头的使用状态(0/1值, 1为是, 0为否)和用水效率(表1); U_{41} 、 U_{42} 和 E_{C1} 、 E_{C2} 分别为波轮式洗衣机、滚筒式洗衣机的使用状态和用水效率; U_b 为浴缸的使用状态; F_{11} 和 T_{11} 分别为淋浴频率和冲水时长; F_{12} 和 q_{12} 分别为使用浴缸的频率和1次用水量; F_2 为冲厕频率; K_{rec} 为再生水使用情况(0/1值, 1为是, 0为否); K_{reu} 为废水重复利用量占总用水量比例; $F_{3i}(i=1\sim3)$ 分别为洗脸、洗手和刷牙行为的频率; T_{31} 和 T_{32} 分别为洗脸和洗手频率; q_{33} 为刷牙1次用水量。 F_{4h} 、 F_{41} 和 F_{42} 分别为手洗衣服、使用波轮式洗衣机和滚筒式洗衣机的频率; q_{4h} 为手洗衣服1次用水量; W_{31} 和 W_{32} 分别为波轮式洗衣机和滚筒式洗衣机的洗涤重量; F_{5i} 和 $q_{5i}(i=1\sim4)$ 分别为洗碗、洗菜、饮水、烹饪的频率和1次用水量; F_{6i} 和 $q_{6i}(i=1\sim2)$ 分别为擦地、清洁的频率和1次用水量; F_{7i} 和 $q_{7i}(i=1\sim3)$ 分别为浇花、宠物用水、洗车的频率和1次用水量。

上述公式中, F_x 、 T_x 和 q_x 分别为平均每日发生的频率、平均每次的用水时长和平均每次的用水量, 单位分别为次/d、min/次和 L/次。在调查问卷中, 涉

及洗浴、冲厕和个人卫生的问题为个人用水行为, 洗衣、饮食、家庭清洁及其他行为是家庭集体行为, 问题设置时关于行为频率的单位有次/d和次/周, 在计算过程中将所有参数的单位统一折算为人均日指标。关于用水器具的用水效率相关指标 E_x , 根据国家发布的节水型用水器具用水效率等级标准^[21-24], 规定1级和2级为节水型器具, 3级及以上为非节水型器具, 见表1。

表1 居民家庭用水器具用水量

Tab. 1 Efficiency of water devices

| 用水器具 | 用水量 | | |
|--------------------------------------|-----------------|-------------|-------------|
| | 3级及以上 (非节水型) | 2级 (节水型) | 1级 (节水型) |
| 冲便器/(L·次 ⁻¹) | ≥6 | 5 | 4 |
| 淋浴器/(L·s ⁻¹) | 0.15 | 0.12 | 0.08 |
| 水龙头/(L·s ⁻¹) | 0.150 | 0.125 | 0.100 |
| 波轮式洗衣机/[L·(cycle·kg) ⁻¹] | >14 | ≤14 | ≤10 |
| 滚筒式洗衣机/[L·(cycle·kg) ⁻¹] | >7 | ≤7 | ≤6 |

1.2 居民生活奢侈用水量计算方法

层次需求理论由马斯洛提出, 指人类的动机由需求决定, 需求按优先次序可分为生理、安全、社交、尊重、自我实现和自我超越6类, 由低到高逐级形成并得到满足。基于马斯洛需求层次理论和人类正常生活对水资源的需求, 世界卫生组织^[25] 提出人类生存的层次化需水理论, 将生活用水需求分为短期生存、中期维持和长期持续3个层次。赵勇等^[20] 将居民生活用水需求分为刚性、弹性和奢侈3个层次: 刚性用水是满足居民正常生活需求的用水, 对应于生理和安全需求; 弹性用水是居民提高生活水平所需的水量, 对应于社交、尊重和自我实现需求; 奢侈用水是由于非节水型用水器具的低用水效率或浪费行为导致的非必要用水量, 对应于自我超越需求。根据赵勇等^[20] 在居民生活用水层次化评价研究中对北京市居民家庭生活用水刚性、弹性、奢侈区间的界定方法, 计算北京市居民不同用水行为的层次需求用水量。在保证居民生活品质条件下, 满足所需的刚性和弹性用水, 尽量避免奢侈用水, 需要针对不同年龄阶段居民的用水行为特征开展分析以降低奢侈用水。因此, 基于本研究调查的居民生活用水量数据, 利用概率密度法划分刚性、弹性和奢侈用水区间, 计算公式见(9)~(14)。

$$P_s = \frac{\int_{Q_{i,a}}^{Q_{i,m}} f(Q_i) dQ}{\int_{Q_{i,a}}^{Q_{i,b}} f(Q_i) dQ} \times 100\% \quad (9)$$

$$P_e = \frac{\int_{Q_{i,a}}^{Q_{i,m}} f(Q_i) dQ}{\int_{Q_{i,a}}^{Q_{i,n}} f(Q_i) dQ} \times 100\% \quad (10)$$

$$P_1 = \frac{\int_{Q_{i,a}}^{Q_{i,b}} f(Q_i) dQ}{\int_{Q_{i,a}}^{Q_{i,n}} f(Q_i) dQ} \times 100\% \quad (11)$$

$$Q_{i,s} = \frac{\sum_{j=1}^5 \bar{q}_{ij}}{5} \times P_s \quad (12)$$

$$Q_{i,e} = \frac{\sum_{j=1}^5 \bar{q}_{ij}}{5} \times P_e \quad (13)$$

$$Q_{i,l} = \frac{\sum_{j=1}^5 \bar{q}_{ij}}{5} \times P_1 \quad (14)$$

式中: P_s 、 P_e 、 P_1 分别为刚性、弹性和奢侈用水的分配比例,%; $f(Q_i)$ 为概率密度函数; $Q_{i,a}$ 是不同行为用

水量的系列最小值; $Q_{i,b}$ 是不同行为用水量的系列最大值; $Q_{i,m}$ 是刚性与弹性用水的分界点; $Q_{i,n}$ 是弹性与奢侈用水的分界点; $Q_{i,s}$ 、 $Q_{i,e}$ 和 $Q_{i,l}$ 分别为不同行为的刚性、弹性和奢侈用水量; \bar{q}_{ij} 为不同年龄阶段各行为的平均用水量。

参考相关研究^[20,26],并基于对北京市居民生活的用水行为调查,得到居民对各类行为用水量分布的概率密度曲线,根据对不同行为用水量的分配比例,确定刚性、弹性和奢侈用水区间界定的相关行为习惯参数。对不同用水行为的层次区间界定主要依据有终端用水效率,用水行为的频率、时长和水量等,见表 2。根据定义,将缺乏节水意识和远超正常生活需求的用水习惯定义为存在浪费水的行为,该部分用水即为奢侈用水量,并将其视为可节水量。依据居民用水量公式(1)~(8),代入层次用水量区间界定的行为习惯参数,计算样本数据中关于不同特征居民的奢侈用水量。

表 2 居民生活用水层次区间界定

Tab. 2 Defining rigid, flexible and luxury ranges of residential water consumption

| 用水行为 | | 刚性区间 | 弹性区间 | 奢侈区间 |
|------|----------------------------------|-------|--------|-------|
| 冲厕 | 冲洗阀流量/(L·次 ⁻¹) | (0,3] | [4,5] | >5 |
| | 频率/[次·(周·人) ⁻¹] | (0,4] | (4,10] | >10 |
| 洗浴 | 用水时长/(min·次 ⁻¹) | (0,5] | (5,10] | >10 |
| | 淋浴喷头用水效率 | 1级 | 2级 | 3级及以上 |
| | 使用清洁产品时关闭阀门 | 是 | 是 | 否 |
| 个人卫生 | 水龙头用水效率 | 1级 | 2级 | 3级及以上 |
| | 使用清洁产品时关闭阀门 | 是 | 是 | 否 |
| 洗衣 | 洗衣机使用频率/[次·(人·周) ⁻¹] | (0,3] | (3,5] | >5 |
| | 手洗衣服用水量/(L·次 ⁻¹) | (0,8] | (8,12] | >12 |
| | 洗衣机用水效率 | 1级 | 2级 | 3级及以上 |
| | 手洗衣服用水重复利用 | 是 | 是 | 否 |
| 饮食 | 洗菜或洗碗用水量/(L·次 ⁻¹) | (0,8] | (8,12] | >12 |
| 家庭清洁 | 拖地频率/[次·(户·周) ⁻¹] | (0,5] | (5,14] | >14 |

2 结果与分析

2.1 居民生活用水习惯差异及用水需求分析

通过对北京市居民生活用水行为的调查,发现洗浴、冲厕和饮食等用水行为习惯与居民性别、年龄阶段等个体特征有着显著相关性,见图 3。结果显示:老年人洗浴频率显著偏低,老年人中冬季洗浴频率仅为 1~2 次/周的比例为 78%,夏季为 1~4 次/周的比例为 51%;其他年龄阶段,冬季洗浴频率为 3~6 次/周的比例超过 50%,夏季洗浴频率为

3~6 次/周 的居民比例为 70% 左右;少年和青年女性频率最大,冬季大于 5 次/周的比例分别为 37% 和 30%,夏季该比例分别为 58% 和 70%。随着居民年龄的增长洗浴用水时长呈增加趋势,老年人冬季用水时长大于 20 分钟的比例为 30%,在其他年龄阶段该比例小于 20%,女性的洗浴频率和用水时长均高于男性。由于少年和老年群体居家时间相对更长,冲厕需求较大,并且女性的冲厕频率高于男性,超过 50% 的少年和老年居民每日冲厕 5~10 次,而一半以上的青年、中青年和中年居民每日冲厕为 5

次以内。另外,居民的烹饪频率随年龄增长而增加,每日在家烹饪3次及以上频率的比例在老年人中

为70%,该比例在中青年和中年居民中分别为42%和45%。

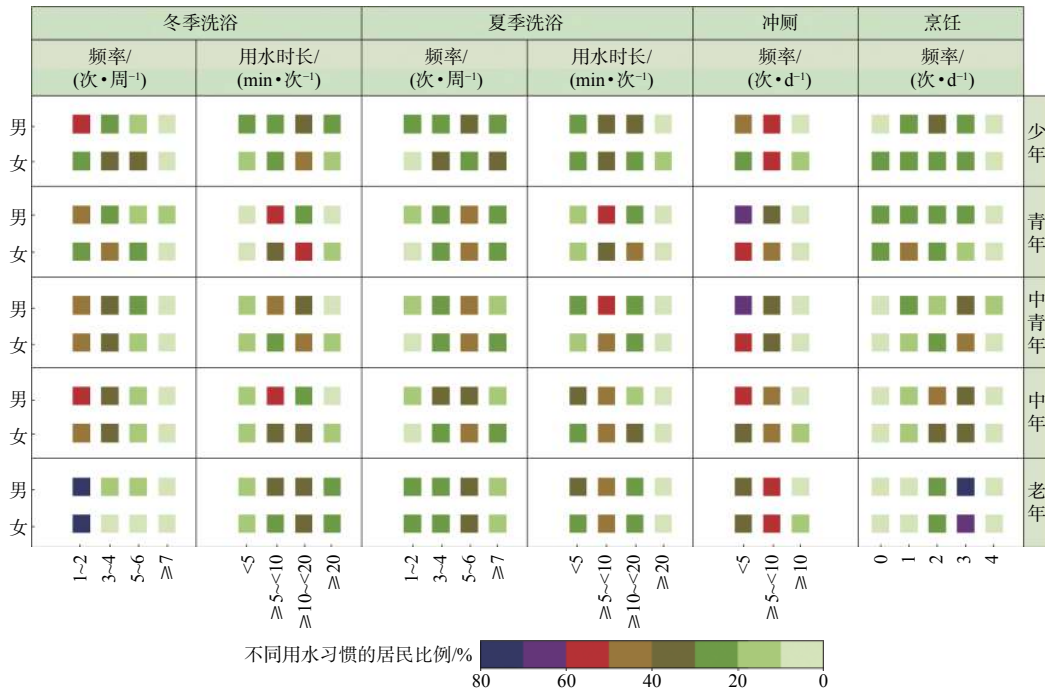


图3 不同个体特征居民用水习惯分布

Fig. 3 Water consumption habits for residents with different individual characteristics

不同个体特征居民的用水习惯存在较大差异,造成对各种行为用水量的差别。在居民生活各种行为的用水需求(图4)中,洗浴和冲厕用水比例最高,用水量占个人用水总量的60%左右,且与年龄阶段和性别有显著相关性。除少年群体外,居民的洗浴用水量随年龄增长呈下降趋势,相反冲厕用水量呈上升趋势,并且女性用水量高于男性。青年至老年阶段的居民,女性和男性的洗浴用水量分别由34~107 L/(人·d)和22~73 L/(人·d)降低至28~78 L/(人·d)和18~50 L/(人·d),平均冲厕用水量分别由16~37 L/(人·d)和13~26 L/(人·d)上升至19~42 L/(人·d)和20~40 L/(人·d)。男性洗衣用水与年龄呈负相关,女性饮食用水与年龄呈正相关,青年至老年阶段的居民,男性洗衣用水量由8~22 L/(人·d)降低至6~16 L/(人·d),女性饮食用水量由4~11 L/(人·d)升高至6~15 L/(人·d)。此外,个人卫生和家庭清洁用水量与居民年龄无显著的相关性,平均用水量分别为16~32 L/(人·d)和1~3 L/(人·d)。

从用水总量(图5)上看,居民生活用水量随年龄的增加而呈现降低的趋势,同时用水量需求存在很大的性别差异,男性用水量普遍低于女性。青年女性的用水量最大约为119~193 L/(人·d),平均用水量约为156 L/(人·d),老年女性的用水量为105~

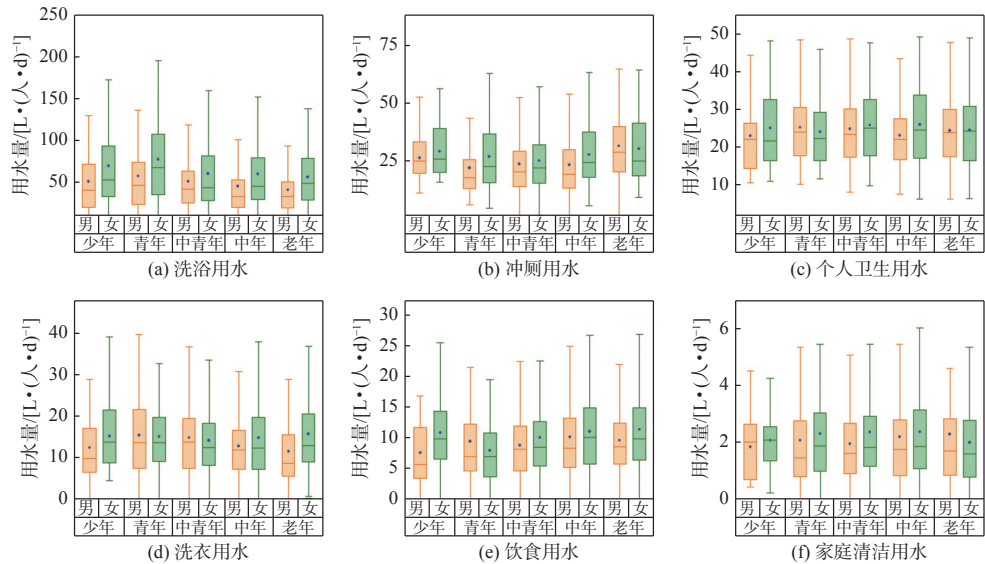
165 L/(人·d),平均用水量为135 L/(人·d)。相似地,少年男性的用水量最大,用水量范围为103~177 L/(人·d),平均用水量为140 L/(人·d),老年男性用水量为95~141 L/(人·d),平均用水量为118 L/(人·d)。根据北京市水资源公报^[2],2019年和2020年北京市城镇人均居民生活用水量分别为139 L/(人·d)和135 L/(人·d),本文中全部调查样本的人均用水量为136 L/(人·d),统计结果与地区统计公报数据基本一致。

2.2 居民生活层次用水分析

上述结果表明,居民生活用水量与个体特征呈显著相关性,主要由于行为习惯差异导致对各类行为的用水需求不同。尽管如此,居民普遍存在浪费水的行为,并非全部用水均为生活必要的需求用水。为了分析不同个体特征居民的奢侈用水情况,并且在不改变用水习惯的条件下尽量避免奢侈用水,实现节水潜力的最大化。根据赵勇等^[20]对北京市居民家庭生活用水刚性、弹性、奢侈用水区间的界定方法,基于对居民生活用水行为习惯的调查和统计确定刚性、弹性和奢侈用水行为的分配比例,并计算北京市居民生活不同用水行为需求的层次用水量。本次调查统计结果见表3,在用水器具方面,76%的家庭使用节水型冲便器,相比之下节水型淋浴器、水龙头和洗衣机的使用率偏低,分别为49%、

59% 和 40%。在居民用水习惯方面,手洗衣服用水重复利用的奢侈比例较大,约为 39%,其他行为的奢侈比例不超过 30%。根据表 3 中不同行为的层次比例和公式(12)~(14)的计算方法,得出北京市居民

生活的刚性用水需求为 64 L/(人·d),奢侈用水需求为 >116 L/(人·d)。其中,洗浴、冲厕、个人卫生、洗衣、饮食和清洁用水行为的奢侈用水量依次为大于 48、24、21、12、9 和 2 L/(人·d)。



注: 此处各行为用水量的统计均为新鲜水。

图 4 北京市居民不同行为的用水量分布

Fig. 4 Residential water consumption of different behaviors

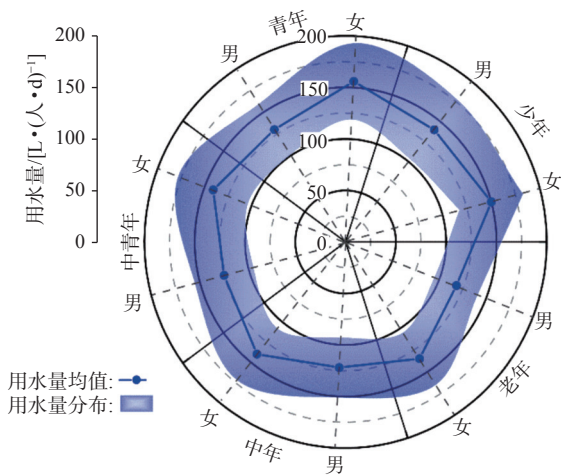


图 5 不同个体特征居民生活用水量分布

Fig. 5 Water consumption of residents with different individual characteristics

根据本文对北京市居民生活不同行为的用水量调查,计算不同年龄阶段居民的奢侈用水量见图 6。结果表明,青年至老年阶段的居民奢侈用水量呈逐渐减小的趋势,女性的奢侈用水量高于男性。老年男性奢侈用水量最低,为 3 L/(人·d),占该人群用水总量的 3%。青年女性是奢侈用水量最高的人群,奢侈用水量为 41 L/(人·d),占其人均总用水量的 27%;少年女性奢侈用水量为 35 L/(人·d),是节水的主要目标人群。在不同的用水行为中,洗浴的奢侈用水最大,少年、青年和中青年中的女性居民洗

浴奢侈用水量较大,分别为 20、29 和 14 L/(人·d),男性居民中少年群体的洗浴奢侈用水量最大,为 12 L/(人·d)。对于冲厕用水,老年人的冲厕奢侈用水量均最大,约为 7 L/(人·d),少年女性约为 6 L/(人·d),其他年龄阶段约为 1~4 L/(人·d)。个人卫生、洗衣和饮食行为中的奢侈用水量较小,分别为 3~5、0~3 和 0.5~2.5 L/(人·d),在各年龄阶段的差异不大。因此,在居民不同用水行为中,需要重点提高奢侈用水量较大的洗浴和冲厕用水效率。

2.3 居民生活节水潜力分析

对北京市居民的节水行为习惯进行统计分析,其中主要包括家庭废水重复利用情况,如用洗衣水冲厕等行为,使用节水型器具及居民节水意识,具体包括洗浴、洗手及洗脸过程中使用清洁产品时是否及时关闭阀门。

经统计分析,不同个体特征居民节水行为比例见图 7。图 7 显示:约 80% 的老年人有废水重复利用习惯,在其他年龄阶段仅为 50%~60%;超过 90% 的老年人有洗浴、洗手或洗脸过程中及时关闭阀门的习惯,该比例在其他年龄阶段相对较低;平均 60%~70% 的居民家庭中均有安装和使用高用水效率的节水型器具,相比之下,在中青年和中老年人的家庭中节水型器具的使用率相对偏高,在老年人家庭中相对偏低。

表 3 北京市居民生活用水层次用水需求
Tab. 3 Hierarchical water demand for residents in Beijing

| 用水行为 | | $P_j/\%$ | $P_l/\%$ | $P_r/\%$ | $Q_s/[L/(人\cdot d)^{-1}]$ | $Q_e/[L/(人\cdot d)^{-1}]$ | $Q_r/[L/(人\cdot d)^{-1}]$ |
|----------|-------------|----------|----------|----------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 冲厕 | 冲洗阀流量 | 34 | 42 | 24 | (0,18] | (18,24] | >24 |
| | 频率 | 50 | 44 | 6 | | | |
| 洗浴 | 用水时长 | 33 | 39 | 28 | (0, 27] | (27,48] | >48 |
| | 淋浴喷头用水效率 | 17 | 32 | 51 | | | |
| | 使用清洁产品时关闭阀门 | | 70 | 30 | | | |
| 个人卫生 | 龙头用水效率 | 21 | 38 | 41 | (0,12] | (12,21] | >21 |
| | 使用清洁产品时关闭阀门 | | 83 | 27 | | | |
| 洗衣 | 洗衣机使用频率 | 47 | 36 | 17 | | | |
| | 手洗衣服用水量 | 45 | 41 | 14 | (0,7] | (7,12] | >12 |
| | 洗衣机用水效率 | 13 | 27 | 60 | | | |
| | 手洗衣服用水重复利用 | | 61 | 39 | | | |
| 饮食 | 洗菜或洗碗水量 | 62 | 24 | 14 | (0,6] | (6,9] | >9 |
| 家庭清洁 | 拖地频率 | 47 | 45 | 8 | (0,1] | (1,2] | >2 |
| 总计层次用水需求 | | | | | (0,64] | [64,116] | >116 |

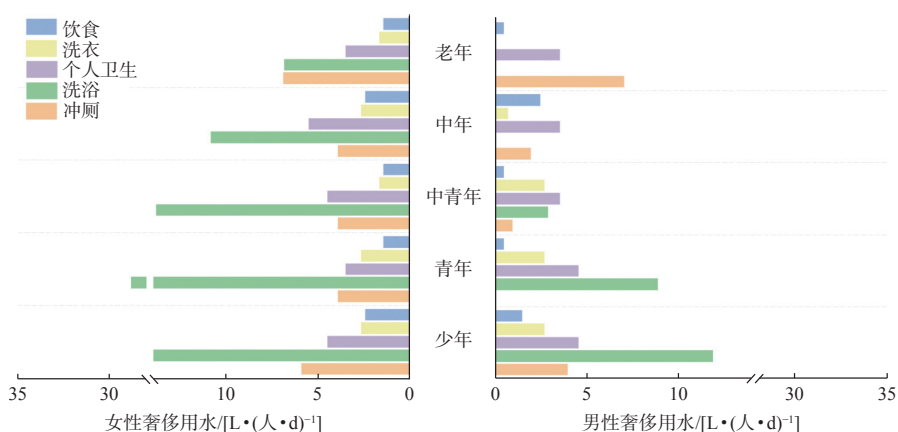


图 6 不同个体特征居民奢侈用水量

Fig. 6 Luxury water consumption for residents with different individual characteristics

总体而言:老年人有良好的节约用水行为习惯和较强的节水意识,但是需要提高节水型用水器具使用率;中青年和中年人节水型器具的使用率较高,但应提高节水意识,特别是需要提高洗浴时及时关闭阀门的意识。

为降低居民各种行为的奢侈用水,从提高节水意识和节水型器具使用率两种途径对不同行为的节水潜力进行模拟。根据表 2 中对奢侈用水区间的行为定义,居民节水意识的主要表现形式为对手洗衣服的废水重复利用、洗浴和洗手或洗脸及时关闭阀门、合理减少洗浴用水时长、减少过多用水频率,包括洗浴、拖地、使用洗衣机等,节约使用水量,包括手洗衣服、洗碗或洗菜等。当居民的节水意识和节水器具使用率均提高至最大可能时,计算不同个

体特征居民的节水量见图 8。结果表明不同个体特征居民的可提高节水率约为 15%~20%,其中,老年人可提高节水率最低,中青年最高。由于少年、青年和中青年群体的奢侈用水行为比例相对较高,其可提高的节水潜力也较大,平均可提高节水量在 25 L/(人·d)以上,中年和老年分别为 22 和 19 L/(人·d)。在居民生活的各个节水行为中,对于存在奢侈用水行为的居民而言,提高其节水意识将手洗衣服的废水回用于冲厕等,平均可节约水量 4.7 L/(人·d);在洗浴过程中使用清洁产品时及时关闭阀门,平均可节约水量 4.5 L/(人·d);更换节水型冲便器和淋浴器后,平均可节约水量分别为 4.3 和 5.8 L/(人·d)。

尽管提高节水意识和使用节水型器具对居民节水有显著的效果,但是通过对不同年龄阶段居民的

节水量和奢侈用水量的模拟和分析发现,在年龄群体(少年、青年女性、中年女性和老年女性)中奢侈用水量仍高于文中分析的最大节水潜力,说明在居民用水习惯没有受到过多地改变时,仅靠提高节水器具使用率和节水意识不能全部抵消其奢侈用水量。由 2.2 分析得知,较高的洗浴和冲厕用水导致奢侈用水偏高,主要原因是冲厕频率、洗浴频率和洗浴用水时长相对较大。

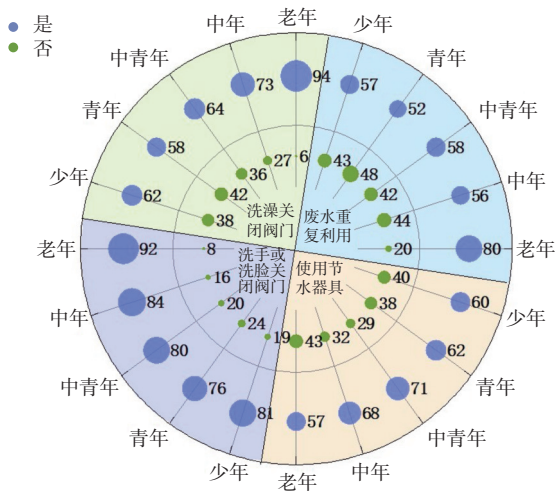


图 7 不同个体特征居民节水行为比例

Fig. 7 Proportion of water saving behaviors for residents with different individual characteristics

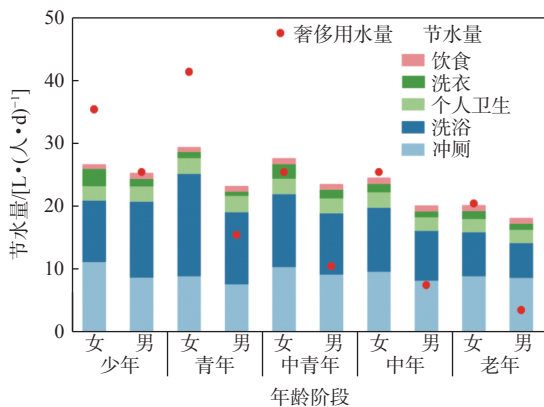


图 8 不同个体特征居民的节水潜力

Fig. 8 Water saving potential for residents with different individual characteristics

3 讨论

本文对北京市居民节水行为的调查结果显示,50% 以上居民有良好的节水意识,废水重复利用、使用节水型器具和非必要时及时关闭阀门等行为均广泛存在。为了提高居民用水效率和合理降低奢侈用水,通过统计分析不同年龄阶段居民的用水量、节水潜力和奢侈用水量,总结了针对不同年龄阶段居民用水情况的节水建议。

少年和青年群体生活用水量最大,特别是女性,其用水量和奢侈用水量均较高,并且节水意识相对薄弱。为了提高用水效率,需加强对该年龄阶段居民的节水教育以提高节水意识,包括对废水的重复利用、洗浴及时关闭阀门和使用节水型器具。此外,该年龄阶段的奢侈用水中超过一半为洗浴用水,由于洗浴频率较高,为了减少不必要的用水浪费,建议适当减少每次洗浴时过长的用水时间。

中青年和中年群体生活用水量水平居中,节水意识相对较强,但仍有部分奢侈用水量可以避免。对于该年龄阶段的居民,需加强居民的节水教育以提高节水意识,包括废水重复利用和洗浴及时关闭阀门的意识。此外,女性居民的夏季洗浴频率和洗浴用水时间相对较大,导致其洗浴奢侈用水增加,同样需适当地控制洗浴用水浪费。

老年群体生活用水量较低,节水意识较强,但要加强对该年龄阶段居民的节水器具推广宣传和普及,特别是提高节水型冲便器的使用率,可以帮助提高用水效率。

4 结论

基于北京市居民生活用水调查结果,结合居民生活层次用水需求评价方法,构建居民生活用水及节水模型,分析不同特征群体居民生活总用水量及各行为的用水特点。分析发现,性别和年龄是影响个体用水的显著影响因素,主要由于用水和节水的行为习惯导致用水量差异。通过对各行为用水量和用水习惯的分析,提出不同用水行为的层次用水区间划分方法,计算不同个体特征居民的刚性、弹性和奢侈用水量及节水潜力。结果表明,北京市居民生活平均用水量为 136 L/(人·d),刚性和弹性用水需求为 116 L/(人·d)。其中,女性平均用水量比男性高 13%,青年女性和老年男性是用水需求最高和最低的人群,平均用水量分别为 156 L/(人·d)和 118 L/(人·d),奢侈用水量占比分别为 27% 和 3%。根据奢侈用水量的定义和计算,通过实施家庭内部废水再利用、换装节水器具、减少无效用水等方式,可节约 15%~20% 的用水量。针对不同群体居民的用水特征,提出节水工作的重点,为城市生活用水及节水管理提供理论参考。

参考文献(References):

[1] 中华人民共和国水利部.水资源公报(2000—

- 2020)[M]. 北京:中国水利水电出版社,(2000—2020). (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Water Resources Bulletin (2000-2020)[M]. Beijing: China Water and Power Press, (2000-2020).(in Chinese))
- [2] 何凡, 顾冰, 何国华, 等. 中国用水量变化的驱动效应[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(3): 417-428. (HE F, GU B, HE G H, et al. Analysis of driving effect evolution and spatial differentiation of water use change in China[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022, 20(3): 417-428. (in Chinese)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsb-dgk.2022.0042](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsb-dgk.2022.0042).
- [3] LEE M, TANSE B, BALBIN M. Urban sustainability incentives for residential water conservation: Adoption of multiple high efficiency appliances[J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(7): 2531-2540. DOI: [10.1007/s11269-013-0301-8](https://doi.org/10.1007/s11269-013-0301-8).
- [4] STEVENSON E G J, AMBELU A, CARUSO B A, et al. Community water improvement, household water insecurity, and Women's psychological distress: An intervention and control study in Ethiopia[J]. *Plos One*, 2016, 11(4): 1-13. DOI: [10.1371/journal.pone.0153432](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153432).
- [5] 秦长海, 赵勇, 李海红, 等. 区域节水潜力评估[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(1): 36-42. (QIN C H, ZHAO Y, LI H H, et al. Assessment of regional water potential[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2021, 19(1): 36-42. (in Chinese)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2021.0003](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2021.0003).
- [6] ESCRIVA-BOU A, LUND J R, PULIDO-VELAZQUEZ M. Optimal residential water conservation strategies considering related energy in California[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(6): 4482-4498. DOI: [10.1002/2014WR016821](https://doi.org/10.1002/2014WR016821).
- [7] SHI L R, WANG L Z, LI H H, et al. Impact of residential water saving devices on urban water security: The case of Beijing, China[J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2022, 8: 326-342. DOI: [10.1039/d1ew00669j](https://doi.org/10.1039/d1ew00669j).
- [8] PRICE J I, CHERMAK J M, FELARDO J. Low-flow appliances and household water demand: An evaluation of demand-side management policy in Albuquerque, New Mexico[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 133: 37-44. DOI: [10.1016/j.jenvman.2013.11.025](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.025).
- [9] KOOP S H A, DORSSSEN A J V, BROUWER S. Enhancing domestic water conservation behaviour: A review of empirical studies on influencing tactics[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 247: 69-79. DOI: [10.1016/j.jenvman.2019.06.126](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.126).
- [10] Hasan H H, Razali S F M, Razali N H M. Does the household save water? Evidence from behavioral analysis[J]. *Sustainability*, 2021, 13: 641-660. DOI: [10.3390/su13020641](https://doi.org/10.3390/su13020641).
- [11] SALLY V R, CHRISTOF K. Exploring the psychosocial and behavioural determinants of household water conservation and intention[J]. *International Journal of Water Resources Development*, 2019, 36(6): 940-955. DOI: [10.1080/07900627.2019.1638230](https://doi.org/10.1080/07900627.2019.1638230).
- [12] 穆泉, 张世秋, 马训舟. 北京市居民节水行为影响因素实证分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2014(3): 587-594. (MU Q, ZHANG S Q, MA X Z. Driving factors of household adoption of water conservation behaviors[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014(3): 587-594. (in Chinese)) DOI: [10.13209/j.0479-8023.2014.078](https://doi.org/10.13209/j.0479-8023.2014.078).
- [13] MONICA M, TORRES J, CARLSSON F. Direct and spillover effects of a social information campaign on residential water-savings[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2018, 92: 222-243. DOI: [10.1016/j.jeem.2018.08.005](https://doi.org/10.1016/j.jeem.2018.08.005).
- [14] ZHAO Y, BAO Y, LEE W L. Barriers to adoption of water-saving habits in residential buildings in Hong Kong[J]. *Sustainability*, 2019, 11: 1-13. DOI: [10.3390/su11072036](https://doi.org/10.3390/su11072036).
- [15] 姜海珊, 赵卫华. 北京市居民用水行为调查分析及节水措施[J]. *水资源保护*, 2015, 31(5): 110-113. (JIANG H S, ZHAO W H. Analysis of residential water consumption behavior in Beijing and water saving measures[J]. *Water Resources Protection*, 2015, 31(5): 110-113. (in Chinese)) DOI: [10.3880/j.issn.1004-6933.2015.05.021](https://doi.org/10.3880/j.issn.1004-6933.2015.05.021).
- [16] 王春艳, 张景翔, 龙洁, 等. 基于面板数据回归模型的家庭水能消费时空特征与影响因素[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(3): 614-626. (WANG C Y, ZHANG J X, LONG J, et al. Panel data regression model for identifying the spatiotemporal characteristics and key factors influencing household water-energy consumption[J]. *Journal of Tsinghua University (Science & Technology)*, 2022, 62(3): 614-626. (in Chinese)) DOI: [10.16511/j.cnki.qhdxxb.2021.26.021](https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2021.26.021).
- [17] 赵卫华. 居民家庭用水量影响因素的实证分析: 基于北京市居民用水行为的调查数据考察[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(4): 137-142. (ZHAO W H. Empirical analysis of influencing factors of household water consumption[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(4): 137-

142. (in Chinese)) DOI: [10.13448/j.cnki.Jalre.2015.130](https://doi.org/10.13448/j.cnki.Jalre.2015.130).
- [18] 林人财, 齐艳冰, 范海燕, 等. 北京市居民家庭生活用水现状及影响因素分析[J]. *中国农村水利水电*, 2021(5): 160-164, 169. (LIN R C, QI Y B, FAN H Y, et al. An analysis of the present situation and influencing factors of household water consumption in Beijing[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(5): 160-164, 169. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1007-2284.2021.05.028](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2284.2021.05.028).
- [19] 胡振, 柳燕, 李迎峰. 家庭规模对生活基础用水分布特性的影响: 基于中国城市居民家庭消费金融调查[J]. *人口与经济*, 2019(5): 106-116. (HU Z, LIU Y, LI Y F. Research on water distribution characteristics used by basic domestic related to the family size: Financial survey on household consumption in urban China[J]. *Population & Economics*, 2019(5): 106-116. (in Chinese)) DOI: [10.3969/j.issn.1000-4149.2019.00.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-4149.2019.00.009).
- [20] 赵勇, 王丽珍, 王浩, 等. 城镇居民生活刚性, 弹性, 奢侈用水层次评价方法与应用[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(6): 51-60. (ZHAO Y, WANG L Z, WANG H, et al. Hierarchical evaluation method and application of rigid, elastic and luxury water for urban residents[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, 28(6): 51-60. (in Chinese)) DOI: [10.16058/j.issn.1005-0930.2020.06.005](https://doi.org/10.16058/j.issn.1005-0930.2020.06.005).
- [21] 中国国家标准化管理委员会. 水嘴用水效率限定值及用水效率等级: GB 25501—2010[S]. 中国标准出版社, 2011: 1-6. (Standardization Administration of China. Minimum allowable values of water efficiency and water efficiency grades for faucets: GB 25501-2010[S]. Standards Press of China, 2011: 1-6. (in Chinese))
- [22] 中国国家标准化管理委员会. 淋浴器用水效率限定值及用水效率等级: GB 28378—2012[S]. 中国标准出版社, 2012: 1-6. (Standardization Administration of China. Minimum allowable values of water efficiency and water efficiency grades for showers: GB 28378-2012[S]. Standards Press of China, 2012: 1-6. (in Chinese))
- [23] 中国国家标准化管理委员会. 电动洗衣机能效限定值及用水效率等级: GB 12021.4—2013[S]. 中国标准出版社, 2013: 1-8. (Standardization Administration of China. Maximum allowable values of the energy, water consumption and grades for household electric washing machines: GB 12021.4-2013[S]. Standards Press of China, 2013: 1-8. (in Chinese))
- [24] 中国国家标准化管理委员会. 便器冲洗阀用水效率限定值及用水效率等级: GB 28379—2012[S]. 中国标准出版社, 2012: 1-6. (Standardization Administration of China. Minimum allowable values of water efficiency and water efficiency grades for flush valve for water closets: GB 28379-2012[S]. Standards Press of China, 2012: 1-6. (in Chinese))
- [25] World Health Organization. Minimum water quantity needed for domestic use in emergencies[J]. *Technical Notes for Emergencies*, 2005, 9: 1-4.
- [26] 李翠梅, 张绍广, 郜阔, 等. 居民生活用水最低保障量研究[J]. *兰州理工大学学报*, 2014, 40(3): 139-142. (LI C M, ZHANG S G, GAO K, et al. Study of guaranteed minimum of domestic water consumption[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2014, 40(3): 139-142. (in Chinese)) DOI: [10.13295/j.cnki.jlut.2014.03.027](https://doi.org/10.13295/j.cnki.jlut.2014.03.027).

Simulation of residential water consumption and analysis of water-saving potential in Beijing

SHI Linrui, ZHU Yongnan, LI Haihong, ZHAO Yong, WANG Jianhua,
WANG Lizhen, QU Junlin, ZHAN Liwei

(State Key Laboratory of Stimulation and Regulation of Water Cycles in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Domestic water consumption proportion is high in Beijing due to the adjustment of industrial structure in recent years, and domestic water saving has become the focus of urban water resources management. However, previous studies focused more on the impact of per capita water consumption and water saving, while ignoring the group differences in residential water consumption, such as gender, age, education, income, etc. The group differences made diversity in lifestyle, behavior habits, and consciousness, resulting in a large difference in water demand. Therefore, the targeted water-saving measures to improve water use efficiency were proposed based on the analysis of water consumption for residents with different individual characteristics. Questionnaire was used for data

collection in Beijing's households, residential water use habits and their characteristics such as gender and age, but not with income and education. Especially for the habits of showering, toilet flushing, and cooking, there were great differences among residents with different individual characteristics, which led to differences in water consumption for various behaviors. The proportion of water consumption for showering and toilet in households were the largest, and the difference was the most obvious. There was also a striking difference between the water consumption for washing clothes or cooking and individual characteristics, but no significant correlation for personal hygiene or household cleaning. In terms of total residential water consumption, it decreased with the increase of age, and the average water consumption for females was 13% higher than that of males. Young women and old men had the highest and lowest water demand, with average water consumption of 156 L/(person·d) and 118 L/(person·d), respectively. According to the theory of the hierarchical water demand and definition behaviors, the luxury water demand for showering, toilet flushing, personal hygiene, laundry, cooking, and household cleaning in Beijing's households was more than 48 L/(person·d), 24 L/(person·d), 21 L/(person·d), 12 L/(person·d), 9 L/(person·d) and 2 L/(person·d), respectively. Young women and old men had the highest and lowest luxury water consumption, which the proportion were 27% and 3%, respectively. The analysis showed that there was a need to focus on improving the efficiency of showering and toilet flushing, which consumed more luxury water. Based on the investigation of water conservation behaviors for residents with different individual characteristics, the water conservation potential of improving the wastewater behaviors was calculated, and the rate of water saving would be increased by 15% to 20%. Among these, the water-saving rate of the elderly was lowest, and the middle young was highest. The water conservation potential results exhibited that the measures and key points of residential water conservation with different characteristics were put forward. The residential water consumption and water saving model were constructed combined with the theory of hierarchical water demand. The total and each behavior against water consumption was analyzed for residents with different individual characteristics. According to the luxury water demand and water conservation potential, the measures and key points for water saving work were put forward, which could provide a theoretical reference for urban water management.

Key words: residential water consumption; individual characteristics; hierarchical water consumption; water conservation potential; Beijing