

# 城镇生活用水新型节水“5R”技术体系

王红武<sup>1</sup>, 张 健<sup>2</sup>, 陈洪斌<sup>1</sup>, 毕学军<sup>3</sup>, 夏四清<sup>1</sup>

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 万若<北京>环境工程技术有限公司, 北京 100088; 3. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 山东 青岛 266033)

**摘 要:** 水资源危机已成为全球关注热点问题,快速城镇化导致生活用水需求剧增,亟需开发新型实用节水技术。为解决城镇生活用水资源紧张的问题,提出了城镇生活节水“5R”技术体系,一是开发超低用水量的真空便器、无水气冲便器、智能计量沐浴系统等节水器具并推广使用,实现用水量减少(Reduce);二是采用污水源分离系统,实现黑水的能量回收和灰水资源的多用途回用(Resource, Recycle);三是开发雨水收集、处理和贮存技术体系,实现水资源回收(Recover);四是对原城镇排水系统污水处理厂出水与中水进行水质调控,提出保证不同用水水质的安全回用(Reuse)技术。对以上技术进行集成与综合节水定量评价,形成节水综合管理和决策系统(“5R”技术体系),以期解决城镇生活用水多水源多用户的水量平衡和水质转化关系等问题。

**关键词:** 生活用水; 节水器具; 源分离; 雨水收集; 水质安全; 节约用水

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)02-0011-07

## A Novel “5R” Technology System for Urban Domestic Water Saving

WANG Hong-wu<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>2</sup>, CHEN Hong-bin<sup>1</sup>, BI Xue-jun<sup>3</sup>, XIA Si-qing<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science & Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Enviro Systems <Beijing> Engineering & Technology Co. Ltd., Beijing 100088, China; 3. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China)

**Abstract:** The water resource crisis has become a hot issue in the world. Rapid urbanization has led to a sharp increase in demand for domestic water, and it is urgent to develop new and practical water-saving technologies. A novel “5R” technology system for urban domestic water saving was put forward, in which the following four parts were included: ①developing the ultra-low water consumption of vacuum toilet, water free flushing toilet, intelligent metering bath system and other water-saving appliances to realize water reduction (Reduce); ②using sewage source separation system to realize the energy recovery of black water and the multipurpose reuse of the gray water resources (Resource, Recycle); ③developing rainwater collection, processing and storage technology system to realize water resource recovery (Recover); ④controlling water quality of effluent from sewage treatment plant and reclaimed water in the original urban drainage system, and putting forward the safe reuse (Reuse) technology to ensure different water quality. Then, the integrated and comprehensive water saving quantitative evaluation system would be carried out to form a water-saving management and decision-making system (“5R” technology system) which would solve the problem of water consumption and water quality

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0403400)

通信作者: 夏四清 E-mail: siqingxia@tongji.edu.cn

conversion of multi-water sources and multi-users in urban domestic water consumption.

**Key words:** domestic water; water-saving appliances; source separation; rainwater collection; water quality safety; water saving

随着经济社会快速发展和城市化进程的不断加快,各类用水消耗速度飞升,使水资源的供需矛盾日益突出。联合国发布的2018年世界水资源报告指出,全球对水资源的需求正以每年1%的速度增长,在未来二十年还将大幅加快;并且未来工业用水和生活用水需求量将远大于农业需水量。发展中国家和新兴经济体对水资源需求的增长最为迫切,我国水资源水量地域分布不均,约有45%的国土处于干旱、半干旱、少水和缺水的地区,淡水分布与人口和耕地的分布不相适应<sup>[1]</sup>;我国淡水资源年均拥有量为 $2.77 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,名列世界第六位,但人均资源总量不及世界人均淡水资源量的1/4<sup>[1]</sup>,仅列世界第109位。尽管我国已开展了大规模的防治水害和开发利用水资源的工作,取得了巨大成就,但缺水问题仍然严重,水环境污染和水资源危机成为制约全社会发展的瓶颈。

2016年Larsen等<sup>[2]</sup>指出城镇化水资源管理迫切需要在技术研究、政策制定和工程实践方面开展跨学科工作,应开发对城市生活和水生态系统都有影响的替代品,通过实现污水源分离、分质处理及回用,雨水可持续利用及节水器具使用等来破解水资源危机。为此,提出以用水终端节水(Reduce)、污水再生资源化和雨水回收利用(Recycle, Resource, Recover, Reuse)为核心的“5R”城镇生活节水技术体系,从不同的用水环节、非传统水资源开发以及加强管理等多个角度、多个层面来实现城镇生活节水及其综合管理,从而解决城镇生活用水水资源紧张的问题。

## 1 城镇生活用水排水的现状问题

目前的城镇生活用水包括饮用、洗涤、洗澡、冲厕等,其节水方法包括节水器具使用、雨水收集回用和污水再生利用等方面,这三个方面的研究和应用问题已经逐渐受到关注,而排水方式上的水资源和能源浪费问题却往往被忽略。大约200年前,冲水马桶引入家庭是欧洲早期城市化的标志,在此基础上冲水马桶排污和生活污水甚至雨水混合通过下水道排放的水载重力排水系统得以发展,成为近代全球城镇排水的基本模式<sup>[3]</sup>。100多年前发明的活性

污泥法则成为目前最重要的一种以去除COD为主的污水处理技术,而被处理的混合污水中粪尿仅占污水总量的1%左右,却包含了污水中大部分的COD和营养盐。后来随着富营养化等环境污染问题的出现,城镇污水的脱氮除磷技术得到发展<sup>[4]</sup>。这些传统模式都是先将粪尿成百倍地稀释,然后再消耗大量能量将其分离分解,在技术和经济方面严重不合理,浪费大量水资源和能源,传统模式的混合排放和远距离输送均不利于污水的资源化和城市水圈的良性循环,经处理后的出水如要回用必将涉及较高的输水费用,从经济上又限制了再生水在城镇区域的应用。

传统排水系统的发展历程及其弊端分析如图1所示。

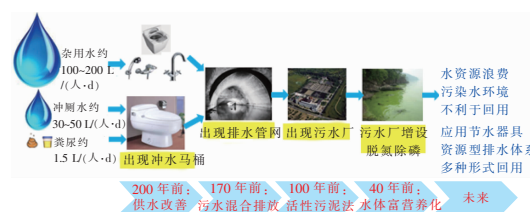


图1 传统排水系统的发展历程及其弊端

Fig. 1 Development course and disadvantages of traditional drainage system

此外,某些传统用水器具在结构和功能上存在缺陷,导致水资源的浪费。虽然我国近30年来一直推行节水器具,但目前的节水器具尤其是节水便器依然有待改进;另一方面,在非规水水资源的使用和开发方面,亟需开展雨水的收集、处理和贮存研究及雨水利用工作,同时需要开展高排放标准的城镇污水处理厂出水作为中水回用的输送关键技术,以及水质保障技术的研究和应用示范。

## 2 城镇生活用水终端节水

世界各国早已注意到计量器具和节水器具的安装和使用可起到良好的节水效果。美国一项研究表明:通过计量和安装节水装置,家庭用水量可降低11%。以色列、日本等国通过引进节水型器具可实现家庭用水量减少20%~30%,其中日本节水龙头可节水1/2、真空式抽水便池可节水1/3、节水型洗

衣机每次可节水 1/4。值得注意的是,国外在开发相应节水器具的同时,采取了多种配套政策措施以推广节水器具的使用,如以色列、意大利以及美国部分州,要求在新建住宅、公寓和办公楼内安装的用水设施必须达到一定的节水标准;各国政府要求制造商只能生产低耗水的卫生洁具和水喷头,日本还对节水效果好的节水器具给予奖励<sup>[5]</sup>。

城镇生活用水对象包括饮用、洗涤、洗澡、冲厕等,曾有调查表明冲厕水所占比例可高达 26.8%,研发节水卫生器具是实现生活节水的一条重要途径。我国在节水器具研发方面起步虽晚,但开发力度很大,2015 年发布了国家标准《节水型卫生洁具》(GB/T 31436—2015),要求节水型蹲便器一次冲洗水量 $\leq 6$  L,坐便器 $\leq 5$  L,小便器 $\leq 3$  L;但受制于坐(蹲)便器以冲洗水本身作为驱动力和输送载体的冲厕原理,致使传统的卫生器具(包括节水型卫生器具)具有高耗水、混合收集和排放人类排泄物的特点,从而导致后续的排水系统具有高耗水、高耗能及资源流失等弊端。如果不从结构和原理上对卫生器具进行改进,民用上几乎不可能实现大幅度降低厕所冲洗水量(即节水)的目的。开发超低用水量的真空便器、无水气冲便器以及基于负压的新型节水卫生器具等,可以实现大幅降低冲洗水(即节水)的目的,对于优化排水模式和构建节水型社会具有明显的现实意义。

假设每人每天大便 1 次,小便 5 次,按照常规便器每次冲水 10 L,常规节水型便器每次大便/小便分别冲水 6 L/3 L,常规粪尿分离便器每次大便/小便分别冲水 5 L/2 L,负压便器每次冲水 1 L,负压粪尿分离便器每次大便/小便分别冲水 1 L/0.1 L,计算 1 000 人使用不同便器每天的冲洗需水量及不同便器产生的污水量,结果见图 2。

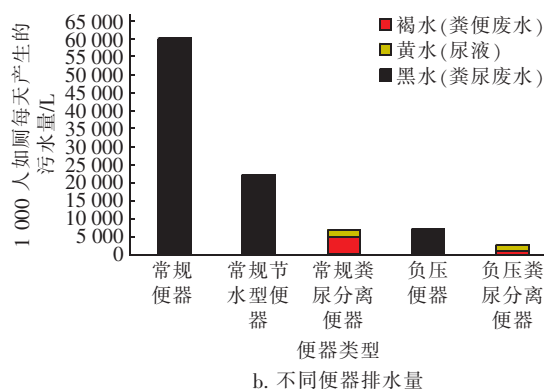
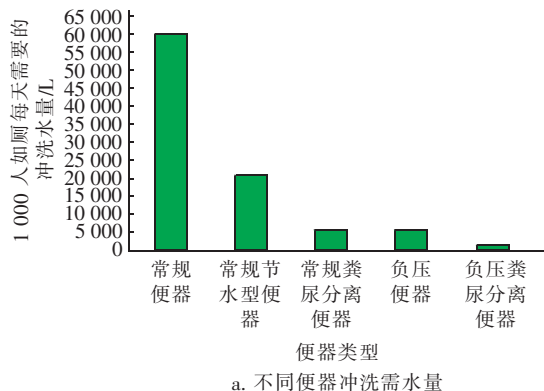


图2 不同便器的排污量分析

Fig. 2 Analysis of sewage discharge from different toilets

### 3 污水源分离及回用

前已述及,传统排水模式以水为媒介,形成人粪尿仅占污水总量 1% 的混合污水,再“以能耗能”的方式实现污染物去除。这种集中式排水管网和处理系统属于末端处理模式,不仅输送和收集的管网距离远,投资费用高,而且污水净化后难以有效回用,浪费大量水资源和能源。

污水“源分离”理念由瑞士、德国、瑞典等国学者于 20 世纪 90 年代相继提出<sup>[6]</sup>。生活污水来自于盥洗、淋浴、洗衣、卫生间冲厕以及厨房等用水点,其污染物浓度差异很大,可简单分为灰水、黑水与厨房废水。其中灰水由洗浴、洗衣和盥洗等废水组成,占生活用水量的 30% ~ 45%,污染物浓度低,无病原微生物和色度,易于净化。黑水由来自卫生间的大小便和冲洗废水组成,占生活用水量的 25% ~ 35%,有机碳和氮磷等含量占 70% 以上,且含各类病原微生物和色度;厨房废水包括餐饮和厨房用水,约占生活用水量的 20% ~ 30%,主要污染物属于有机碳类、油类和表面活性剂等。污水源分离即是将生活污水从源头进行分离和收集、输送,将灰水和黑水分别处理和资源化、能源化;尽量让处理设施靠近居民区或用户终端,环境友好,再生水可就地利用;系统规模灵活,服务人口从几千人到几万人不等;在一定区域内实现污染物排放最少、水资源循环利用与节水、废物资源化和能源化利用。

采用污水源分离并实现黑水能量回收和灰水资源的多用途回用(Resource, Recycle),欧美等发达国家已有较小尺度的实践案例。同济大学、青岛理工大学及德国达姆斯塔特 IWAR 研究所联合提出“半集中式处理”概念<sup>[7]</sup>,先导试验工程已在青岛市应



用示范(见图 3)。

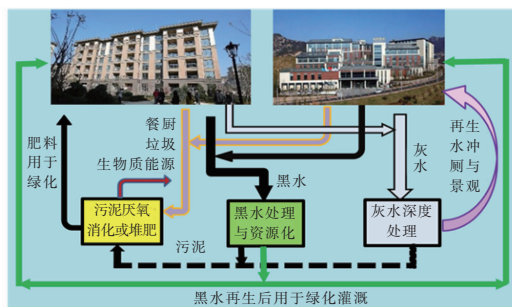


图 3 基于污水源分离的区域性分质供排水和资源化工程案例

Fig. 3 Case study of regional water supply and drainage projects based on sewerage separation

#### 4 城镇社区雨水综合利用

雨水综合利用可节水、削减面源污染、控制内涝。国外雨水利用实践由来已久,区别于单一分散住宅的雨水利用装置,国外大规模系统化的城市雨水收集利用始于 20 世纪 80 年代美国马里兰州进行的低影响开发(LID)建设。与分散住宅相比较,社区规模的雨水收集系统在环境改善、经济利益和住户满意度等方面均有优势<sup>[8]</sup>。国外典型雨水收集系统的节水效率见表 1。

表 1 国外有关城市社区雨水收集系统的节水效率

Tab. 1 Water-saving efficiency of rainwater collection system in abroad urban communities %

研究区域及类型	节水效率	雨水用途
韩国大邱, 城市生态社区	65(估算)	冲厕、清洁
德国柏林, 城市社区	70(实测)	冲厕
巴西, 城市社区	41 ~ 79(估算)	饮用及杂用
澳大利亚, 城市社区	6 ~ 74(估算)	冲厕、洗衣、热水及户外
日本东京, 商业区大型建筑	59(实测)	冲厕、灌溉

Russell 等<sup>[9]</sup>通过美国 2 700 个已建雨水收集系统的分析比较,确认收水材料、蓄水池材料尺寸以及雨水用途是确定节水效能的关键因素。Moglia 等<sup>[10]</sup>分析了澳大利亚墨尔本 477 个雨水收集系统的运行情况,指出雨水收集系统良好运转的关键在于施工质量与日常维护。近年来国外相关的研究多集中于雨水系统模型优化决策和雨水存蓄期间的水质变化及终端利用前的深度净化技术。例如, Akter 等<sup>[11]</sup>采用基于 HEC-HMS 的层次分析法(AHP)研

究了孟加拉吉大港市南安格班德社区的雨水收集系统,结果表明设计合理的雨水收集系统可以削减 26% 的降雨,并常年替代 20 L/(人·d) 的供水消耗,模型研究结果为雨水收集系统建设提供了技术决策。从国外有关城市社区雨水收集利用的实践经验来看,建筑类型、密度和居住人口决定综合节水效率,收水、转输管道及蓄水池材料影响雨水处理技术的选择。

国内系统化城市社区雨水利用实践始于 2006 年,建设部为推进城市水资源利用颁布了《建筑与小区雨水利用工程技术规范》(GB 50400—2006),之后国家在 2010 年启动的城市内涝防治和 2013 年开始的海绵城市建设中,均将城市雨水综合利用列为重要建设内容。国内早期与城市雨水利用相关的研究,主要集中于研究屋面及道路的雨水径流污染特征和产流特征<sup>[12-15]</sup>。从已有的研究来看,目前城镇社区雨水处理多以绿地截污和土壤下渗为主,雨水存蓄期间的水质变化缺乏系统研究,尚无存蓄前后高效节能的初期雨水分流和作为补充水资源的强化处理技术;雨水利用多集中在生态补水、绿化灌溉和下渗补给,雨水的饮用处理及规模化的自来水替代未见报道;蓄水设施多采用钢筋混凝土和塑料模型构件,对不同工程地质条件的针对性不强;同时,由于雨水 pH 值较低,水质偏软,在存储输配过程中极有可能造成管网、设施腐蚀,由此造成的水质稳定性降低、微生物滋生等问题尚未得到全面阐述;社区雨水利用模式以及能耗等方面缺乏系统数据的技术支撑。

综上所述,有必要对我国城镇社区雨水综合利用的模式与系统开展研究,探索社区规模雨水利用的途径和雨水水质处理技术,并进行规模化城镇雨水利用工程示范,为全面实现城镇节水目标提供技术依据。

#### 5 城镇生活杂用水水质保障与安全供水

开发利用非传统水源(再生水、雨水等)是全世界节水的重点工作,在美国、日本、以色列等发达国家已有几十年的历史,其在水质标准、监督机制、金融制度、技术规范等方面已经形成了较为成熟且完整的体系。我国非传统水源利用起步晚,且在非传统水源利用技术、管理、政策方面缺乏有效的指导与引导,导致非传统水源的应用发展缓慢<sup>[16-17]</sup>。据统计,国内再生水利用率仅占污水处理量的 10% 左

右,远低于发达国家70%的利用率。

与再生水相比,雨水受污染程度较低,经简单沉淀后可直接用于回灌地下水、浇灌绿地或营造水景观。然而作为杂用水源的雨水水量稳定性差,尤其是干旱季节或干旱地区,单靠雨水难以保证杂用水量。而再生水是经过处理的污水,水源稳定,其与雨水结合共同替代传统水资源有利于解决水资源短缺导致的水资源危机。然而再生水处理成本相对雨水较高,其亦可能在利用过程中由于复杂的水质条件而引起土壤结构退化、污染含水层以及危害人体健康等问题。目前国内关于城镇生活杂用水的研究大多针对城市污水再生回用中微生物和化学安全性进行评价,关于再生水中的毒性化学污染物、重金属、病原微生物的水质标准尚未建立,再生水的处理技术也处于初始研究阶段,制约了城镇生活杂用水技术系统的推广应用。

为保障城镇生活杂用水的安全,国内外研究者们针对再生水的风险评估和水质保障方面进行了大量研究。Nurizzo等<sup>[18]</sup>研究了再生水经次氯酸钠、过氧酸、紫外线照射等消毒过程中产生消毒副产物的问题,发现过氧酸和紫外线照射没有明显导致消毒副产物的增加,即使在TOC浓度很高的情况下,也只是观察到低浓度的醛和卤代烃的生成。Tajima等<sup>[19]</sup>研究了再生水处理系统的病原微生物行为,发现采用砂滤+絮凝沉淀工艺可以降低似隐孢菌素(cryptosporiopsin)的传染风险,同时研究指出大肠菌群并不适合作为再生水的细菌检测指标,因此必须建立新的细菌和病毒的检测方法。Park等<sup>[20]</sup>研究表明,采用泥炭生物过滤器和间歇式氯化消毒可有效减少致病微生物,从而保证回用水的安全。Weber等<sup>[21]</sup>认为除微生物以外,再生水中的化学污染物也应受到足够重视,但对于具体的水质,应根据常规的污染物控制指标,采用危险源辨识、风险评估、剂量反应关系的特性和风险特征来描述对人体健康影响的可接受程度。何星海等<sup>[22]</sup>对北京市再生水中氯仿等19种主要污染物的健康风险进行了定量评价,结果表明用于公园绿化灌溉和道路清扫的再生水对职业人群致癌的总危险度为 $8.47 \times 10^{-6}$ ,是非职业人群致癌总危险度的两倍多。而刘克明等<sup>[23-24]</sup>在城市回用水中检测出各种多环芳烃等毒性化学污染物,并且通过Ames试验发现城市回用水处理后有机污染物并未完全去除,仍具有致

突变作用。杨军等<sup>[25]</sup>通过土柱模拟试验研究认为以北京市当前的再生水进行灌溉,As、Cu、Pb对浅层地下水的污染风险不大。

结合目前研究现状,城镇生活杂用水的水质保障和安全供给尚需解决一系列瓶颈问题,如确定不同水源水质的关键污染因子,研究水质差异对应的水质保障技术,探索杂用水在储存和输配过程中的水质变化规律,并提出水质保障及安全供给策略。这些瓶颈问题的解决将为城镇生活杂用水的水质标准及技术指南奠定理论基础,为节水技术的应用推广提供技术支持。

## 6 城镇生活“5R”节水技术体系

综上所述,城镇生活“5R”节水技术体系应包括以下几个方面:①开发超低用水量的真空便器、无水气冲便器、智能计量沐浴系统等节水器具并推广使用,实现用水量减少(Reduce);②采用污水源分离系统,实现黑水的能量回收和灰水资源的多用途回用(Resource, Recycle);③开发雨水收集、处理和贮存技术体系,实现水资源回收(Recover);④对原城镇排水系统污水处理厂出水与中水进行水质调控,提出保证不同用水水质的安全回用(Reuse)技术。对以上技术进行集成与综合节水定量评价,形成节水综合管理和决策系统。城镇生活“5R”节水技术体系见图4。

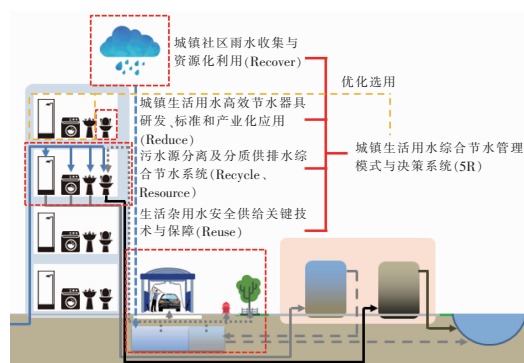


图4 城镇生活“5R”节水技术体系

Fig.4 “5R” technology system for domestic water saving

根据此技术体系,针对城镇生活不同用水对象和用水特征,从节流、开源、管理三个层面,开展引入负压排水的城镇生活用水超低用水量节水器具的研发、标准化和产业化;开展基于生活污水灰黑源分离的半集中式分质供排水综合节水技术与集成应用;开展基于城镇社区雨污水综合利用的节水技术研究;开展基于非常规水源的城镇生活

杂用水水质保障与安全供水技术与集成应用;研究城镇生活用水综合节水管理模式,开发决策系统,将是今后的研究重点。

## 7 结语

城镇生活“5R”节水技术体系从“节水”“开源”“可持续利用”及综合管理四个层面构建了城镇生活综合节水途径,以高效节水器具开发、分类收集及互联输送技术、污水源分离及资源化利用技术、雨水高效利用技术、非传统水源安全回用水质保障技术研发和综合节水管理系统构建为主线开展研究,可解决城镇生活用水多水源多用户的水量平衡和水质转化关系等科学问题,对缓解水资源危机、减轻环境污染、促进经济和社会持续发展具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 王媛,盛连喜,李科,等. 中国水资源现状分析与可持续发展对策研究[J]. 水资源与水工程学报,2008,19(3):10-14.  
Wang Yuan, Sheng Lianxi, Li Ke, *et al.* Analysis of present situation of water resources and countermeasures for sustainable development in China [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2008, 19(3): 10-14 (in Chinese).
- [2] Larsen T A, Hoffmann S, Lüthi C, *et al.* Emerging solutions to the water challenges of an urbanizing world [J]. Science, 2016, 352(6288): 928-933.
- [3] van Loosdrecht M C M, Brdjanovic D. Anticipating the next century of wastewater treatment [J]. Science, 2014, 344(6191): 1452-1453.
- [4] 张健,章菁,高世宝,等. 关于资源型排水系统的探索与实践[J]. 给水排水,2011,37(11): 155-159.  
Zhang Jian, Zhang Jing, Gao Shibao, *et al.* Study and practice of resource-based drainage system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(11): 155-159 (in Chinese).
- [5] Lee M, Tansel B, Balbin M. Urban sustainability incentives for residential water conservation: Adoption of multiple high efficiency appliances [J]. Water Resour Manage, 2013, 27(7): 2531-2540.
- [6] Larsen T A, Udert K M, Lienert J. Source Separation and Decentralization for Wastewater Management [M]. London: IWA Publishing, 2013.
- [7] Zhu Jie, Wagner M, Cornel P, *et al.* Feasibility of on-site grey-water reuse for toilet flushing in China [J]. J Water Reuse Desal, 2018, 8(1): 1-13.
- [8] Domènech L, Saurí D. A comparative appraisal of the use of rainwater harvesting in single and multi-family buildings of the metropolitan area of Barcelona (Spain): Social experience, drinking water savings and economic costs [J]. J Clean Prod, 2011, 19(6/7): 598-608.
- [9] Russell B T, Kirisits M J, Dennis J L, *et al.* Rainwater harvesting in the United States: A survey of common system practices [J]. J Clean Prod, 2014, 75: 166-173.
- [10] Moglia M, Gan K, Delbridge N, *et al.* Investigation of pump and pump switch failures in rainwater harvesting systems [J]. J Hydrol, 2016, 538: 208-215.
- [11] Akter A, Ahmed S. Potentiality of rainwater harvesting for an urban community in Bangladesh [J]. J Hydrol, 2015, 528: 84-93.
- [12] 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.* Studies on roof runoff pollution and utilization in Beijing urban area [J]. China Water & Wastewater, 2001, 17(6): 57-61 (in Chinese).
- [13] 纪桂霞,王平香,邱卫国. 上海市屋面雨水水质监测与处理利用方法研究[J]. 上海理工大学学报,2006,28(6): 594-598.  
Ji Guixia, Wang Pingxiang, Qiu Weiguo. Quality monitoring and methods of treatment and utilization of the roof rainwater in Shanghai [J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2006, 28(6): 594-598 (in Chinese).
- [14] 施国飞. 昆明市城市住宅小区径流雨水水质特性及资源化利用研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2013.  
Shi Guofei. Studying on the Water Quality Characteristic and Resource Utilization of Runoff Rainwater for the Urban Residential Communities in Kun ming City [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013 (in Chinese).
- [15] 倪晶诚. 合肥市住宅区雨水资源利用研究[D]. 合肥:安徽建筑大学,2015.  
Ni Jingcheng. The Study of Rainwater Utilization in Hefei Residential [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2015 (in Chinese).
- [16] 李育宏,黄建军,李阳. 我国再生水利用发展现状分析[J]. 水工业市场,2012(5): 39-42.  
Li Yuhong, Huang Jianjun, Li Yang. Current situation analysis of reclaimed water utilization in China [J].



- Water - Industry Market, 2012 (5): 39 - 42 (in Chinese).
- [17] 孙博,汪妮,解建仓,等. 再生水利用交易收益的博弈分析[J]. 沈阳农业大学学报,2010,41(2):195 - 198.
- Sun Bo, Wang Ni, Xie Jiancang, *et al.* Game analysis on recycled water use transaction benefit [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2010, 41 (2): 195 - 198 (in Chinese) .
- [18] Nurizzo C, Antonelli M, Profaizer, M, *et al.* By-products in surface and reclaimed water disinfected with various agents[J]. Desalination, 2005, 176(1/3): 241 - 253.
- [19] Tajima A, Sakurai K, Minamiyama M. Behavior of pathogenic microbes in a treated wastewater reuse system and examination of new standards for the reuse of treated wastewater[J]. Environ Monit Assess, 2007, 129 (1/3): 43 - 51.
- [20] Park E, Mancl K M, Tuovinen O H, *et al.* Ensuring safe reuse of residential wastewater: Reduction of microbes and genes using peat biofilter and batch chlorination in an on-site treatment system [J]. J Appl Microbiol, 2016, 121(6): 1777 - 1788.
- [21] Weber S, Khan S, Hollender J. Human risk assessment of organic contaminants in reclaimed wastewater used for irrigation[J]. Desalination, 2006, 187(1/3): 53 - 64.
- [22] 何星海,马世豪,李安定,等. 再生水利用健康风险暴露评价[J]. 环境科学,2006,27(9):1912 - 1915.
- He Xinghai, Ma Shihao, Li Anding, *et al.* Exposure assessment of various reclaimed water uses[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2006, 27(9): 1912 - 1915 (in Chinese) .
- [23] 刘克明,姜淑青,李国星,等. 城市回用水致突变性研究[J]. 癌变·畸变·突变,2008,20(2):509 - 511.
- Liu Keming, Jiang Shuqing, Li Guoxing, *et al.* Mutagenic study on the use of reclaimed water in city [J]. Carcinogenesis, Teratogenesis & Mutagenesis, 2008, 20 (2): 509 - 511 (in Chinese) .
- [24] 王春花,何宁,刘克明,等. 城市回用水有机提取物遗传毒性分析[J]. 中国公共卫生,2008,24(1):81 - 82.
- Wang Chunhua, He Ning, Liu Keming, *et al.* Study on genotoxic of urban reclaimed water[J]. Chinese Journal of Public Health, 2008, 24(1): 81 - 82 (in Chinese) .
- [25] 杨军,郑袁明,陈同斌,等. 中水灌溉下重金属在土壤中的垂直迁移及其对地下水的污染风险[J]. 地理研究,2006,25(3):449 - 456.
- Yang Jun, Zheng Yuanming, Chen Tongbin, *et al.* Leaching of heavy metals in soil column under irrigation reclaimed water: A simulation experiment [J]. Geographical Research, 2006, 25 (3): 449 - 456 (in Chinese) .



作者简介:王红武(1970 - ),女,福建龙岩人,博士,副研究员,研究方向为水污染控制、城市雨洪管理。

E-mail: wanghongwu@tongji.edu.cn

收稿日期:2018 - 06 - 12

科学防御水旱灾害,有效促进人水和谐