

城市节水和污水再生利用与远距离调水战略的比较分析

褚俊英 陈吉宁 王 灿 曾思育

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要 城市节水和污水再生利用是实现健康水循环的必然要求,也是可持续水管理的重要内容。将我国城市节水和污水再生利用与南水北调战略从经济、环境和生态等多方面进行了比较,结论表明,城市节水和污水再生利用策略在水供需目标的有效性、经济性、决策风险、资源可靠性、生态环境影响、公众可接受性和用水效率等方面具有明显的优势。从技术进步的角度来看,城市节水和污水再生利用潜力的发挥,将显著降低南水北调所需的调水量,对当前我国调水区域的城市水资源管理战略将产生重大的影响。

关键词 节水 污水再生利用 调水 战略评估

Comparisons of urban water conservation and wastewater reclamation versus long distance water transfer

Chu Junying, Chen Jining, Wang Can, Zeng Siyu

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Water conservation and wastewater reclamation are the requirements of healthy water cycle, and the key issues of sustainable water resource managements. By comparison, this paper concludes that water conservation and wastewater reclamation have obvious advantages versus the strategy so-called South to North Water Diversion in aspects of effectiveness, financial feasibility, decision risk, resource credibility, environmental impact, public acceptability and water use efficiency. Results also show that potential for conservation and efficiency improvements in China is so large that achievements of water conservation and wastewater reclamation of North China will significantly reduce water volume transferred via Middle and East Route of South to North Water Diversion Project, which will have great influences on China's current water management strategy.

Keywords: Water conservation; Wastewater reclamation; Water diversion; Strategy comparison

1 传统城市水资源利用模式面临根本变革

我国现有的城市给排水系统基本沿袭了欧美发达国家的旧有模式,忽视水需求的可替代性和可控性,在源头将大量优质水资源用作污染物的输送介质,末端又建设大规模管网和污水处理厂,对污水

进行收集、处理和分离。这种模式既造成对水资源的过度开发,同时也使城市给水和排水系统的建设规模过大、整体投资效益低下。在简单决策和短期目标的驱动下,利用远距离调水来平衡区域间的供水需求就成为政府的重要政策选择,全国各种调水方案纷纷出台,其中尤以南水北调工程为最。

城市水问题的尖锐性迫使人们以更全面和宏观

国家自然科学基金项目(70603018);国家重点基础研究发展规划项目(2006CB403407)。

的角度审视和评估所选择的水战略的适宜性,进而产生了健康水循环的理念。所谓健康水循环,是指“上游地区的用水循环不影响下游水域的水体功能,水的社会循环不损害水自然循环的客观规律,从而维系或恢复全流域,乃至全球的良好水环境”^[1]。它是一种既遵从经济社会发展规律又遵从生态环境规律的城市水资源的利用方式^[2]。它包括健全循环和良性循环两个方面,前者要求水体组分正常、水体功能健全和循环过程完整;后者要求水体保持良好的自我调节、净化和恢复能力^[2,3]。

节水和污水再生利用是健康水循环的重要内容。理论和实践表明,节水和污水再生利用通过传统的社会水循环的基础上构筑强化环节(见图1),可有效加速并改善水循环过程,使有限的水资源发挥更大的生产力,达到控制污染和稳定水源的“双赢”效果。这种新的、体现节水和污水再生利用环节的城市水管理模式,已在世界许多国家得到应用,被认为是促进人类与自然和谐共处、实现资源节约和环境友好社会的重要举措^[4,5]。

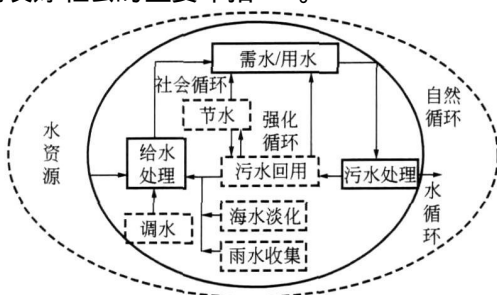


图1 促进健康水循环的城市水管理模式

2 国内外节水和污水再生利用状况与趋势判断

许多国家的经验证明,从经济和环境角度看,节水而不是开发新的水源将是未来最好的解决水源危机的方案^[6]。随着城市缺水问题日趋严重,城市节水技术开始在世界各国城市生活用水中得到广泛应用^[7]。美国自20世纪60~70年代的干旱期后,居民生活节水器具开始取代传统器具^[8,9]。美国1994年实施的《能源政策法案》(Energy Policy Act,简称EPA Act)中,规定了大便器、小便器、水龙头、淋浴喷头和洗碗机等器具的用水量,禁止供应商通过商业手段提供不符合法律规定的产品,并对违反者处以罚金。在该法实施后的1995~2001年间,美国城市节水器具的普及率明显上升。我国建设部也于2002

年颁布了《节水型生活用水器具标准》,但从整体上看,我国城市节水技术的普及率仍处于较低水平。

在污水再生利用方面,美国从20世纪初期便开始有计划地实施污水再生利用。如今,美国污水再生利用已经形成一定规模,主要来自城市污水集中处理厂的二级出水^[10]。日本建立了集中和分散再生利用相结合的污水再生利用系统。在极度缺水的以色列,再生水已成为重要的农业灌溉水源。缺水国家澳大利亚,也积极将再生水用于工业用水方面。我国20世纪70~80年代在青岛、大连、太原、北京和天津等城市开展了再生水利用试点。当前,我国污水再生利用以污水处理厂再生利用为主,规模较小。据统计,2002年为21.2亿 m^3 ,仅占城市污水排放量的6.3%^[11]。

城市节水和污水再生利用在世界各地的兴起与蓬勃发展,是技术、经济与社会等各个层面影响因素综合作用的结果。可以说,城市节水和污水深度处理技术的进步,促使节水和污水再生利用成为可能。随着近距离水资源逐渐被开发利用,供水成本的上升也为节水器具推广和污水再生利用提供了经济可行性^[12,13]。越来越多的消费者开始接受节水和再生水用水方式^[14],为节水和污水再生利用创造了可接受的社会环境。

3 城市节水和污水再生利用与调水战略的对比分析

3.1 战略评估方法

将城市节水和污水再生利用战略与调水战略进行综合评估,是科学认识不同水资源利用战略的科学基础,也是未来水资源管理决策的重要依据。战略评估通常采用的方法主要包括两大类,一是费用效益分析法;二是评价矩阵法^[15],现分述如下。

(1) 费用效益分析法(Cost Benefit Analysis):主要基于项目的国民经济影响评价原理,对不同战略的费用效益进行计算。该方法所需的数据量较大,为了计算费用和效益往往需要引入较多的假设,提供的信息非常有限。

(2) 评价矩阵法(Evaluation Matrix):采用二维表的形式对不同战略的各项指标进行分析,可以评价某个战略各项指标的强弱,也可针对某项指标比较战略的差异,使决策者能够依据自身的权重进行决策。评价指标一般来说可以包括效率、目标有

效性、社会分配影响、环境影响、成本有效性、公众可接受性、可持续性和管理可行性等^[16]。

3.2 评估指标的选取与讨论

本文采用评价矩阵法,从水供需目标的有效性、经济性、决策风险、资源可靠性、生态环境影响、公众可接受性和用水效率七个方面对两种战略进行综合评估。

3.2.1 水供需目标的有效性(Effectiveness)

依据清华大学开发建立的 WCRPA 综合评估模型^[17]的系统模拟结果,对 2001 年南水北调受水地区进行技术替换,城市节水和污水再生利用的潜力为 87.1 亿 m^3/a ,占南水北调中、东两线 2010 年有效调水量的 58.3%。其中,经济可行的节水和污水再生利用潜力为 25.4 亿 m^3/a ,为上述有效调水量的 17.0%;社会公众可接受的经济有效的潜力为 16.3 亿 m^3/a ,为上述调水量的 10.9%。随着我国现有用水标准向更为高效的标准转变,这一潜力将会进一步增大。

随着技术的进步和公众环保意识的提高,受水区城市节水和污水再生利用的潜力将不断提高,从理论分析上看,其增加的速度通常将高于区域净新鲜水量增加的数量,从而导致区域调水量的逐步减少,因此,城市节水和污水再生利用作为调水战略的替代选择,其替代性将逐步增强。

3.2.2 经济性(Economics)

尽管远距离调水工程可以带来新的水资源,但并不能从根本上改变原有的城市给排水系统建设模式。国内外的实践证明,远距离调水将鼓励城市加大用水量,污水处理量也将随之增加,从而导致城市给排水系统的建设规模增大^[18],给城市的经济和社会发展带来巨额的资金压力。

调水后用水的全成本应是调水成本与现有供水成本之和。对于使用再生水,虽然水的再生成本通常会高于使用常规水源的供水成本,但它可以直接减少水资源成本,随着调水距离的增加,水的再生成本也将会接近或低于调水成本。另外,对于缺水地区,水资源的短缺也伴生着水环境容量的不足,其所要求的污水处理水平会较高,这也会相对有效地降低水的再生成本。对节水而言,它可以减少所有与水供排相关的成本支出,并产生附带的节能效应。

表 1 不同措施的全成本构成与案例分析

分类	调水	再生水	节水
调水成本	+		
节水成本			+
再生水成本		+	
水资源费	+		
供水成本	+		
污水处理成本	+	+	
能源成本			-

三者的成本构成如表 1 所示。

根据对北京市的调查和测算^[19],南水北调到北京的全成本为 5.32 元/ m^3 ,集中型再生水的成本为 0.95 元/ m^3 ,分散型再生水的成本为 2.61 元/ m^3 ,节水的成本为 0.67 元/ m^3 (依照北京市 2005 年节水项目总投资和相应节水量调查数据,以 15 年折旧期进行估算)。可以看出,城市节水和污水再生利用具有明显的经济性。

此外,从长期的技术发展趋势来看,远距离调水由于自身的技术含量较低,成本进一步降低的可能性较小。但城市节水和污水再生利用,则随着技术进步所带来的新技术、新材料的出现,具有较强的成本改进优势。

3.2.3 决策风险(Risk)

远距离调水的特点决定了其具有规模经济性的特征,如 2010 年南水北调中、东线工程的有效调水量接近 150 亿 m^3/a 。但调水规模越大,其对未来需水预测不确定性的风险越大,对项目融资、建设和管理等多个环节的风险也将越大,从而使决策风险显著增加。相对而言,节水和污水再生利用则较为灵活,通常可因地制宜、采用分散、小规模形式逐步适应需水量的变化,降低建设和投资的风险,如城市居民和公共企业的节水设施替换通常是小规模而分散的,Booker^[20]和 Fane 等人^[21]的研究认为成本最小的污水再生利用规模仅为 1 200~ 12 000 户。

3.2.4 资源可靠性(Reliability)

从长期来看,远距离调水的水资源可靠性面临着两个方面的问题。一方面,由于调水对调水沿线带来的用水消耗刺激,以及对水资源珍惜程度的降低,调水地区和沿线的经济社会发展将失去向水资源节约型模式转变的动力,长期下去,将可

能导致新一轮的供水水源不足的问题,甚至使原有的调水量无法实现。例如,美国科罗拉多河流在调水后水流自 1905 年以来逐渐减少到几乎为零(即断流)^[22]。

另一方面,长距离调水面临着长距离、大尺度的水质保护问题,沿线水质,特别是蓄水调配设施水质的长期变化和事故性风险都会对调水的可靠性带来严重影响。此外,从长期来看,已有研究认为全球气候变化对区域水资源分布的影响不容忽视,我国在未来 50 年可能出现南旱北涝的降水格局^[23]。这些因素都增加了远距离调水工程的水资源可靠性风险。相对而言,城市污水的排放和使用之间具有明显的依赖规律,设计合理的城市污水再生系统可建立再生水供需之间的动态平衡机制,保证水资源的稳定性和可靠性。

3.2.5 生态环境影响(Ecology & Environment Impacts)

在生态环境影响方面,远距离调水通过水资源分配的大规模干预,对沿线的水陆生态系统造成大面积、高强度、长期性和不可恢复性的干扰,甚至带来破坏,如土地的盐碱化和物种消失等^[24]。

节水和污水再生利用则通过改善需水本身及对水社会循环系统的局部强化,减少了人类社会活动对自然水循环的干扰程度,具有明显的改善水质、稳定水量的生态环境效应。

3.2.6 公众可接受性(Social Acceptance)

远距离调水往往涉及调水沿线的征地和移民等问题,还将对当地的历史和人文景观等产生较大的影响,同时,调水工程的费用分配也是公众争议的焦点。公众的可接受程度通常较差,如处理不善甚至可能导致严重的社会问题。

相对而言,公众对于节水和污水再生利用更容易接受。例如,根据 2002 年对北京、佛山和淄博的社会调查表明^[25],三个缺水城市分别有 73.9%、62.4% 和 70.5% 的消费者愿意使用再生水。消费者的主要顾虑包括再生水的健康风险、异味、不良感观及缺乏了解等方面。国内外的实践表明,通过宣传教育来提高消费者的环境意识、建立严格的标准和有效的监控体系以保证节水器具和再生水的质量,并对采用节水和再生水实行优惠政策,

将有越来越多的消费者采取节水措施与使用再生水。

3.2.7 用水效率(Efficiency)

当前,由于流域与区域水资源管理制度的整体缺失和错位,远程调来的水可能得不到充分的利用,浪费现象将时有发生。此外,我国污水处理产业的发展刚刚起步,可能不可避免导致水污染的进一步加剧。因此,调水战略甚至可能出现“大调水、大浪费、大污染”的严重局面。城市节水和污水再生利用强调节水和分质用水,有利于促进系统用水效率改善,是可持续水资源利用的必要环节。

3.3 战略评估的整体结果

城市节水和污水再生利用与南水北调战略各项指标的评估结果如图 2 所示。城市节水和污水再生利用作为稳定、高效的水资源利用方式,是城市水资源综合规划的重要环节,在多方面具有优势。南水北调工程的社会、经济和环境效益需要进一步的研究^[26,27],特别是在为远距离调水进行水需求预测时,应加强对节水和污水再生利用潜力的研究,尽量减少主观性。即使利用调水作为解决北方地区长期缺水的战略,也应当看到,调水需求量具有很大的可调空间,为实现水资源的合理配置和可持续利用,城市节水和污水再生利用的作用不可替代、必不可少。

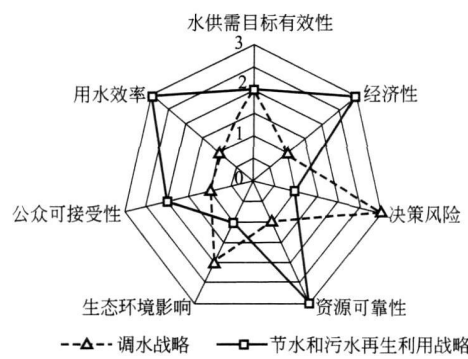


图 2 节水和污水再生利用与调水战略的综合评估

4 结语

本文从水供需目标的有效性、经济性、决策风险、资源可靠性、生态环境影响、公众可接受性、用水效率七个方面,对节水和污水再生利用相对于调水战略进行了系统比较。研究结果表明,前者相对于后者在水供需目标的有效性、经济性、决策风险、资

源可靠性、生态环境影响、公众可接受性和用水效率等方面具有明显的优势。从一定意义上说,节水和污水再生利用潜力的发挥对当前的调水战略具有挑战性的意义,将可能对我国的水管理战略产生重要而深远的影响。

当前,我国的水管理政策处于一个敏感时期,一方面我们不得不依赖于调水,另一方面我们也看到节水和污水再生利用技术潜力巨大,在很大程度上将影响调水的规模,甚至影响是否调水的决策。不可否认,实现节水和污水再生利用的潜力,仍然存在很大的不确定性,需要从技术、经济、法律、行政等各个方面采取综合的措施激励其潜力的发挥,并确保其可靠性与安全性。

参考文献

- 张杰,熊必永.水环境恢复方略与水资源可持续利用.中国水利,2003,6:13~16
- 刘俊良,王鹏飞,臧景红,等.城市用水健康循环及可持续城市水管理.中国给水排水,2003,19(1):29~32
- Ikkatai S. Towards an ensured and sound hydrological cycle. International Symposium on Efficient Water Use in Urban Areas Innovative Ways of Finding Water for Cities, Kobe, Japan, 1999
- FAO. New dimensions in water security: water, society and ecosystem services in the 21st century. Food And Agriculture Organization of The United Nations, Rome, 2000, <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/misc25.pdf>
- Chu J Y, Chen J N, Wang C, et al. Wastewater Reuse Potential Analysis: Implications for China's Water Resources Management. Wat Res, 2004, 38(11): 2746~2756
- Wegelin S M. Water Demand Management and the Urban Poor. International Water and Sanitation Centre, Delft, 2002
- Downing T E, Butterfield R E, Edmonds B, et al. Climate change and the demand for water. Stockholm Environment Institute Oxford Office, Oxford, 2003
- United States General Accounting Office. Water infrastructure: water efficient plumbing fixtures reduce water consumption and wastewater flows. United States General Accounting office report, Washington D C, 2000
- Amy V. The energy policy act: assessing its impact on utilities. Journal American Water Works Association, 1993 (8): 56~62
- Fairfax V, Hamilton V. Progress in water quality: an evaluation of the national investment in municipal wastewater treatment. Washington, DC: USEPA, 2000
- 建设部综合财务司.中国城市建设统计年报.北京:中国建筑工业出版社,2003
- ADB. Handbook for the economic analysis of water supply projects. Asian Development Bank Publication, 1999, http://www.adb.org/Documents/Handbooks/Water_Supply_Projects
- Serageldin I. Water supply, sanitation and environmental sustainability: the financing challenge. Washington, DC: World Bank, 1994
- Neal J. Wastewater reuse studies and trials in Canberra. Desalination, 1996, 106: 399~405
- Walker W E. The policy analysis approach to public decision making. Presentation at the National Public Administration Day Congress held at Groningen University, Groningen, 1994
- FAO and the World Bank. Water sector policy review and strategy formulation a general framework. World Bank and Food and Agriculture Organization, 1995
- 褚俊英.城市节水与污水再生利用的潜力分析:[学位论文].北京:清华大学,2004
- Chu J Y, Chen J N, Zou J. Perspectives on urban water infrastructure in China for the 21st Century: SDMUWEIC Model. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2003, 12(4): 470~480
- 张俊杰,曾思育,陈吉宁.再生水与长距调水的费用-效果比较.中国给水排水,2004,20(11):22~24
- Booker N. Estimating the economic scale of greywater reuse systems. Program report FE 88, CSIRO Molecular Science, 2000
- Fane S A, Ashbolt N J, White S B. Decentralised urban water reuse: the implications of system scale for cost and pathogen risk. Wat Sci Tech, 2002, 46(6/7): 281~285
- Gleick P H. Global freshwater resources: soft path solutions for the 21st century. Science, 2003, 302(28): 1524~1528
- 全球环境变化对策与支撑技术研究项目办公室.全球环境变化对策与支撑技术研究项目技术报告,2004
- 清华大学环境科学与工程系.中国城市污水再生利用发展战略研究报告,2003
- 张俊杰,张悦,陈吉宁等.居民对再生水的支付意愿及其影响因素.中国给水排水,2003,19(6):96~98
- Berkoff J. China: The south north water transfer project is it justified? Water Policy, 2003, 5: 1~28
- Warren S C. Inter basin water transfer international experiences, lessons and implications for south north water transfer in China. WWF Yangtze Programme Report, WWF China Programme Office, Beijing, 2000

○电话:(010) 62785610

E-mail: jchu00@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期:2007 08 03

修回日期:2007 12 01