

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.03.03

城市高耗水现象及其机理分析

刘家宏^{1,2}, 周晋军^{1,3}, 邵薇薇¹

(1. 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;

2. 水利部水资源与水生态工程技术研究中心, 北京 100038;

3. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

摘要:为了打破城市耗水的“黑箱”模式,采用统计分析、实验观测以及典型区实证研究等方法,对城市耗水现象及机理开展研究。结果表明,城市属于高耗水区域,耗水强度不仅与降水量、气温等气象因素有关,同时与人类活动紧密相关。以北京市为例,建立了城市耗水计算模型,并基于土地利用数据,计算了北京市2014年耗水空间分布,考虑人类用水产生的耗水后,城市区域的耗水量要明显高于郊区以及自然下垫面的蒸散发量。

关键词:城市高耗水;蒸散发;土地利用;机理分析

中图分类号:TV11; P334.1

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2018)03-0017-05

Analysis of urban high water dissipation phenomenon and its mechanism

LIU Jiahong^{1,2}, ZHOU Jinjun^{1,3}, SHAO Weiwei¹

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Engineering and Technology Research Center for Water Resources and Hydroecology of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China;

3. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to break the “black model” of water dissipation in urban area, statistical analysis, experimental observations and case studies methods were used to analyze the urban water dissipation phenomenon and to explore its mechanism. Results showed that cities belong to the high water dissipation area, and the intensity of water dissipation is not only related to meteorological factors such as precipitation and temperature, but also closely related to human activities. Taking Beijing City as an example, this paper established a calculation model of urban water dissipation, and calculated the spatial distribution value of water dissipation in Beijing in 2014 based on land use data. Considering the water dissipation of human water use activity, the water dissipation in urban areas was significantly higher than that of suburbs and the evapotranspiration of natural underlying surfaces.

Key words: high urban water dissipation; evapotranspiration; land use; mechanism analysis

随着城市化进程的不断推进,城市面积增大,人口增多,用水量也持续增加^[1-2]。城市耗水一般包括城市面积的蒸散发、入渗补给^[3]、工业耗水^[4]和产品输出所包含水量等,是城市水文循环的重要环节。

城市耗水量的大小决定了城市区域水循环通量的大小,同时直接影响城市供需水的规划管理,其研究紧迫而重要。

由于城市下垫面的复杂性和强人类活动干扰,

城市的水循环过程相比流域自然水循环要复杂^[5]。城市耗水是指发生在城市区域的各种形式的水的耗散,是重要的城市水循环过程^[6],既包括植被蒸腾蒸发,也包括城市建筑物内部人类用水产生的水分耗散。城市耗水量的大小对空气湿度影响较大。承德市监测数据表明,过去 50 年的城市化过程中,市区空气湿度明显增加^[7]。蒸散发是典型的自然侧耗水形式,城市区域地表蒸散发量通常基于能量平衡方程,通过遥感反演土地利用进行计算^[8-9]。城市化过程对城市区域的蒸散发也存在影响,其中人为热源释放对城市蒸散发影响较大^[10]。另一方面,城市生活用水量的比例增大。2014 年中国城市统计年鉴数据表明,全国城市生活用水量占城市用水总量的 1/3 以上。随着城镇化进程加快,生活用水量比例增大,由此产生的耗水量也增大,水文效应持续增强^[11]。有学者研究了居民生活用水效率^[12]、生活用水指标^[13]等方面内容。除了居民生活用水,城市建筑物内部用水也包括生产、室内种植等其他用水,这些建筑物内部用水同样会产生水汽耗散,这部分耗水也是城市耗水的组成部分。在城市蒸散发计算方面,郭伟等^[14]以佳木斯为例,将城市下垫面划分为水面、不透水面和透水面进行蒸发计算。Ramamurthy 等^[15]研究城市不透水地面的贡献率。在城市耗水方面,Qin 等^[16]采用用水定额、耗水系数和水量平衡法计算城市耗水量,周晋军等^[6]建立了基于不同耗水特征的分布式城市耗水计算模型。由于城市下垫面的高度异质性和人类活动的干扰,城市区域的耗水过程呈现多样性,耗水机理较为复杂。城市耗水作为城市水文循环的重要过程,耗水机理解析和耗水量计算,对城市水循环机理和水循环通量研究具有重要意义,因此,解析城市耗水机理,建立具有物理机制的城市耗水计算模型,既是城市水文研究的难点,也是的热点。

1 城市高耗水现象

为描述城市高耗水现象,选取典型工厂、建筑物和小区 3 种不同尺度的城市典型下垫面开展用耗水及水循环研究,采用水平衡分析、实验监测、水量平衡等方法解析典型城市耗水单元的耗水类型,为探究城市耗水机理做基础。

1.1 典型工厂的水平衡测试数据分析

选取蓝星石化有限公司天津石油化工厂作为水平衡分析对象,通过解析其“供-用-耗-排-循环再生-回用”过程,对其各个生产环节的耗水量进行分析计算,从物理、化学机制上分析其水分的运移转化规律,查清高耗水的原因和水分的去向。重点分析

其产品耗水、厂区办公/生活耗水、厂区绿化耗水等,计算工厂耗水总量。对产品携带走的“自由态”水、“结晶态”水和“化合态”水进行甄别计算,揭示工厂区超高强度耗水的内在成因。分析结果显示:蓝星石化的新水取用量是 3 843.55 m³/d,耗水量是 2 242.84 m³/d,排水量 1 600.77 m³/d。折合成年新水取用量为 140.3 万 m³/a,耗水量 81.9 万 m³/a,排水量 58.4 万 m³/a。按照工厂占地面积 78.33 万 m²计算,蓝星石化的人工取用水耗水强度为 1 046 mm,叠加上降水造成的蒸发耗水量,蓝星石化的单位面积的耗水量要远大于当地的降水量,是水资源的净消耗区^[17]。

1.2 典型城市建筑物耗水监测研究

选取办公楼和住宅公寓作为典型城市建筑物进行耗水监测研究,表 1 给出了典型建筑物基本信息。通过用水量、排水量的监测,结合各用水活动水量耗散的实验监测,解析典型住宅楼和办公楼的耗水过程,计算耗水量。建筑物用水量通过安装在自来水供水管的水表计量,排水量通过中国水利水电科学研究院自主研发的间歇量水设备(专利号码:CN104614030A)进行监测。需要说明的是,所选两个建筑物的供水水源均为自来水。建筑物排水监测设备安装在建筑物内部排水管末端,忽略建筑物内部供水量检测与排水监测中的管道渗漏损失,认为用水量减去排水量等于建筑物内部耗水量。

表 1 典型城市建筑物基本信息

建筑类型	建筑面积/m ²	建筑层数/层	人数/人
办公楼	6 000	3	360
住宅楼	3 600	3	135

图 1 为典型办公楼用水-排水过程曲线。从图 1 可以看出,在单位小时时间尺度上,用水量在 0.05 ~ 0.94 m³之间波动,但是排水量始终低于用水量,并且排水系数(排水量与用水量之比)在 0.76 ~ 0.95 间波动。根据前面的实验条件,可以得出建筑物

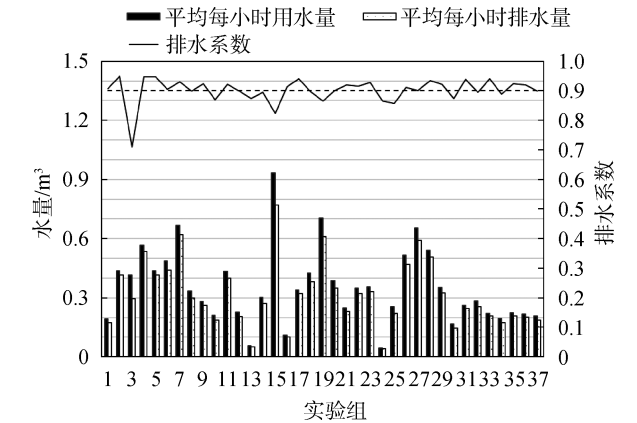


图 1 办公楼排水系数测定

对应的耗水系数变化区间为 0.05~0.24,说明建筑物内部耗水现象存在,并且具有相对稳定的变化特征。

分别对典型建筑物进行 2 个月的供水和排水监测,计算得出办公建筑物的平均排水系数为 0.89,住宅楼的平均排水系数为 0.83。测量得到实验期内典型办公楼和住宅楼的日平均用水量分别是 5.5 m³ 和 10.6 m³。结合表 1 信息,知实验建筑物单位建筑面积年耗水强度为办公楼 37 mm,住宅楼 183 mm,由于典型建筑物楼层均为 3 层,因此对应的单位地面面积的耗水强度分别是 111 mm 和 549 mm。由此说明城市办公楼和住宅楼属于高耗水下垫面,建筑物耗水量与建筑物楼层成正比。

1.3 典型小区水循环观测试验

选取典型小区作为区域典型代表,以 2014 年数据为例进行区域耗水现象分析。耗水计算方法选用水量平衡方程进行:

$$W_D = W_S + P - D - W_{SUR} - \Delta W_G \quad (1)$$

式中: W_D 为区域年耗水总量, m³; W_S 为年供水总量, m³; P 为年降雨总量, m³; D 为区域年排水总量, m³; W_{SUR} 是地表径流总量, m³; ΔW_G 是地下水变化量, m³。

所选区域面积是 3.5 km²,居民 60 000 人,区域内绿化率 55%,气象站区域内测得 2014 年降水量为 442 mm。区域具有相对独立的供排水系统,由于地势较高,周边地区的降雨径流不会流入该小区,因此地表径流量数据与区域面积相对应。监测数据显示该区域 2014 年总供水量是 432 万 m³,总降雨量是 155 万 m³,区域的污水排放量是 254 万 m³,地表径流总量是 55 万 m³,地下水变化量近似认为是 0,由此计算得出区域 2014 年单位面积耗水量是 794 mm,高于遥感反演得到的蒸散发 520 mm,说明区域耗水强度远高于传统蒸散发计算结果。

周琳^[18]以北京市为例,将北京市划分为山区和平原,其中平原又分为城区和郊区,利用水量平衡原理研究北京市城市蒸散发,结果表明,城市不同分区的同期蒸散发量差异很大,2002—2013 年计算结果显示城区平均蒸散发量最大,599 mm,山区最小,479 mm。城区蒸发量大的主要原因是区域内高密度的建筑和人类活动。

2 城市高耗水机理分析

典型城市单元耗水现象研究表明,城市的耗水发生在城市的各个用水部位,除了城市绿地、水面等自然侧蒸散发,还包括人类用水所产生的社会侧蒸散发,特别是建筑体内部人类活动产生的水量耗散,而这部分耗水量在以往城市蒸散发研究中是被忽略

的,因此将城市的耗水划分为建筑体内部耗水和建筑体外部耗水(即露天耗水,包括硬化地面的耗水和绿地、水面等自然侧的下垫面蒸散发)。

2.1 建筑物内部耗水

建筑物内部的耗水主要是水由液态转化为气态形式,然后随着空气流通,经由建筑体的窗户、门等部位(类似于植被叶片的气孔)进入室外的空气中,参与水循环过程。根据建筑物分类标准,可以将建筑物分为生产性建筑物和非生产性建筑物。生产性建筑物包括工业建筑物和农业建筑物。这些建筑物在城市建成区内分布较少,大多分布在城郊,因此在本研究中不考虑生产性建筑物。非生产性建筑物也称为民用建筑,相比生产性建筑物,民用建筑广泛分布在城市建成区域内,其耗水是有限的。不同功能的建筑物包含的耗水项不同,耗水特征也不同。相同功能的建筑物耗水量与人数、建筑面积相关。本文将城市民用建筑划分为 2 级 7 种建筑大类,并与耗水类型建立关联关系,构建建筑物内部耗水模型框架(图 2)。

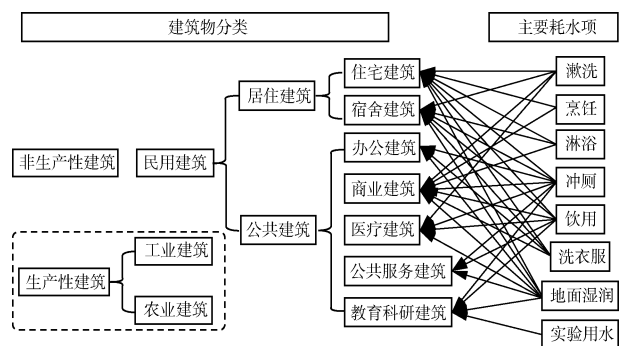


图 2 建筑物内部耗水结构

基于仿生学原理,建筑物可以类比为城市的“建筑树”组成的“混凝土森林”^[21],每一个建筑物相当于“森林”中的一棵“树”,通过类似于树木的叶片气孔的门、窗、通风口等部位将建筑物的水汽释放到空气中,参与城市区域的大气水循环。由于城市建筑物多数为多层建筑,建筑物的耗水在垂直空间上也呈均匀分层特征,对于上下均匀的多层建筑物,可以认为不同楼层的耗水特征相同,建筑物投影面积的耗水强度与楼层数成正比。

2.2 城市露天耗水

城市露天耗水可以根据二元水循环原理划分为自然侧耗水和社会侧耗水。自然侧耗水主要指绿地、土壤、植被、水面等自然形式的下垫面的蒸腾蒸发量以及入渗补给;社会侧耗水主要指人工浇灌植被、绿地的耗水,市政道路洒水,硬化地面截留雨水蒸发的耗水等。基于耗水特征可以将城市下垫面划分为建筑物屋顶、不透水硬化地面、透水硬化地面、

绿地、水面、裸土 5 类。

建筑物屋顶、不透水硬化地面的耗水形式主要是截留雨水蒸发,其中部分城市道路的耗水来源还有市政洒水,这部分水量也全部蒸发到空气中。由于建筑屋顶和不透水硬化地面的止水能力有限,同时与下层结构水分隔绝,因此蒸发呈现间歇性,在有降雨或者洒水发生时表面截留水量会有蒸发现象发生^[15]。对于城市道路,汽车车轮“雾化效应”增强了蒸发的动力项,提高了蒸发效率。

透水硬化地面主要包括部分铺砖人行道和海绵城市建设中推行的透水铺装(透水砖、透水混凝土)^[19]。与不透水地面相比,透水铺装增加了渗透的耗水方式,耗水量由蒸发和下渗共同组成。对于一场降雨,降雨量减去产流量即为耗水量。对于一次降雨,忽略期间的蒸发量。在月尺度、年尺度或者更长时间序列中,耗水量由蒸发量和深层渗漏水量组成。

绿地、水面和裸土的蒸散发过程,认为与自然状态的过程基本一致,也称之为城市自然侧耗水。不同的是,城市区域的绿地耗水在水源上增加了人工灌溉的水量来源,在一定程度降低了水量限制。同时由于城市人为热源的释放以及城市热岛效应的影响^[12],城市自然侧的蒸散发的能量约束力减弱,一定程度上增加了蒸散发的动力项。

3 城市耗水计算模型

基于城市水循环的“供水-用水-耗水-排水-循环再生-回用”过程,耗水量及耗水机理是较为核心的内容。笔者以耗水量的计算作为切入点,建立不同类型城市斑块耗水计算的理论范式,采用“自上而下”和“自下而上”两种思路进行耗水量计算(图 3),并在过程中搜集、计算其他水循环过程数据,系统解析了典型城市单元水循环的结构和路径,最终完成了城市耗水计算理论框架的构建。“自上而下”,即将耗水量作为输出水量的未知项,再分别计算区域水量的总输入和输出,通过水量平衡关系计算耗水量;“自下而上”,即将耗水量按下垫面类型

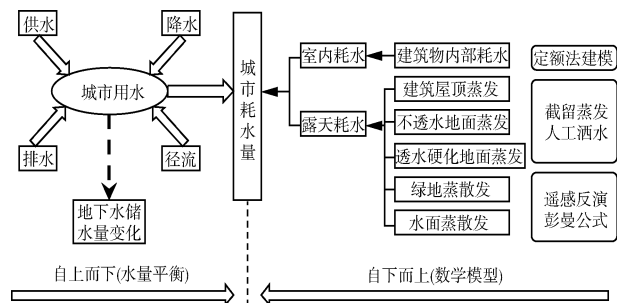


图 3 城市建成区耗水计算方法

进行分类计算,如计算水面蒸发、绿地蒸散发、硬化地面蒸发、建筑耗水等,最后通过不同面积上的耗水积分得到总的耗水量。

该耗水计算方法是适用于城市不同类型斑块上的“双源”(天然降水和人工供水)耗水定量计算模型。模型以模拟城市耗水过程为基础,进行城市耗水单元的划分,模型突出耗水发生的界面和产生的物理机制,主要包括硬化地面及建筑物截留蒸发模块、马路洒水蒸发模块、各建筑体(住宅、办公、商场、工厂等)内用水的蒸发耗散计算模块、城市绿地蒸发/蒸腾计算模块、城市水面蒸发计算模块等。

基于上述城市耗水机理和耗水计算方法,对模型进行概化,基于“自下而上”思路,建立城市区域耗水计算模型:

$$W_D = 0.365P_N P_{DI} + (A_H E_H + A_C E_C + A_W E_W + A_S E_S) / 1000 \quad (2)$$

式中: P_N 为区域内常住人口量,人; P_{DI} 为人均日耗水量, L/d; A_H 为区域硬化地面面积, m^2 ; E_H 为硬化地面年蒸散发强度, mm; A_C 为区域绿地面积, m^2 ; E_C 为绿地年蒸散发强度, mm; A_W 为区域水面面积, m^2 ; E_W 为水面年蒸散发强度, mm; A_S 为区域裸土地面面积, m^2 ; E_S 为裸土地面年蒸散发强度, mm。

同样地,基于北京市的土地利用类型建立覆盖北京市城区和郊区的耗水计算模型,根据 2014 年 TM 影像, 30 m 分辨率(云覆盖较多的用 2013 年补充,其余选择 5—9 月份遥感影像)解译制作,主要土地利用类型包括耕地、林地、草地、水域、城乡和工矿建设用地,以及未利用土地 6 种类型。其中城乡和工矿建设用地耗水量通过式(2)计算得到,其他土地利用类型的蒸散发通过彭曼公式计算,2014 年耗水计算结果见图 4 中。需要说明的是,本研究没有计算北京市工业的耗水量,在城乡和工矿用地中没有考虑人工洒水产生的蒸散发。耗水空间分布格局表明人类活动和用水量集中的城市区域耗水量高于郊区。图 4 中红色区域为北京市建成区主要区域,说明城市区域人类用水产生的耗水量不容忽视,也证实了城市是高耗水区域的判断。

4 结论和展望

以不同尺度的城市单元为例,描述了城市高耗水现象,分析了城市耗水过程,解析了城市耗水机理,提出了城市耗水计算方法,得出了以下主要结论:①城市高耗水现象确实存在,其主要原因是受人类用水活动的影响,建筑物内部耗水是其高耗水的主要增加项;②城市耗水是二元水循环的重要环节,

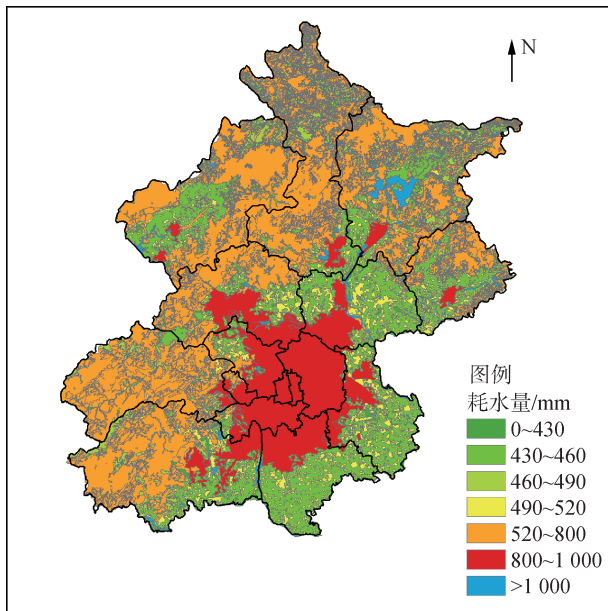


图4 北京市2014年耗水空间格局

耗水量的大小不仅影响城市供排水管网规划设计,同时影响城市区域的水热平衡关系;③城市的耗水可以分为建筑物内部耗水和露天耗水,基于耗水特征差异,露天耗水可以划分为建筑屋顶与不透水硬化地面、透水硬化地面、绿地、水面和裸土耗水;④考虑人类用水过程中产生的耗水,北京市城区的耗水量高于郊区,同时高于林地、草地、耕地以及未利用土地。

本研究基于水平衡数据分析,以及典型小区、典型耗水过程的观测实验,初步阐释了城市耗水的机理,建立了相关的计算模型。但研究成果还是初步的,需要在未来的研究中进一步深化,同时城市耗水强度与城市局部的水热平衡关系密切,与城市热岛效应等的内在联系和相互作用机理也有待进一步研究揭示。

参考文献:

[1] MCDONALD R I, DOUGLAS I, REVENGA C, et al. Global urban growth and the geography of water availability, quality, and delivery [J]. *Ambio*, 2011, 40 (5):437.

[2] 胡庆芳,王银堂,李伶杰,等. 水生态文明城市与海绵城市的初步比较[J]. *水资源保护*, 2017, 33 (5): 13-18. (HU Qingfang, WANG Yintang, LI Lingjie, et al. Preliminary comparison between water-ecological civilization city and sponge city [J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33 (5): 13-18. (in Chinese))

[3] 索海生. 文峪河灌区开栅高耗水区节水改造喷灌工程的分析[J]. *水资源保护*, 2005, 21 (1): 69-71. (SUO Haisheng. Analysis on the water saving modified spray irrigation project in high water consumption area of the

Wenyu River irrigation [J]. *Water Resources Protection*, 2005, 21 (1): 69-71. (in Chinese))

[4] 何月峰,沈海萍,冯晓飞,等. 基于压力-状态-响应模型和“五水共治”决策的浙江省水环境安全评价[J]. *水资源保护*, 2016, 32 (6): 104-109. (HE Yuefeng, SHEN Haiping, FENG Xiaofei, et al. Assessment of water environmental security in Zhejiang Province based on PSR model and policy of co-governance of five water categories [J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32 (6): 104-109. (in Chinese))

[5] 黄国如,王欣. 基于城市雨洪模型的市政排水与水利排涝标准衔接研究[J]. *水资源保护*, 2017, 33 (2): 1-5. (HUANG Guoru, WANG Xin. Assessment of water environmental security in Zhejiang Province based on PSR model and policy of co-governance of five water categories [J]. *Water Resources Protection*, 2017, 33 (2): 1-5. (in Chinese))

[6] 周晋军,刘家宏,董庆珊,等. 城市耗水计算模型[J]. *水科学进展*, 2017, 28 (2): 276-284. (ZHOU Jinjun, LIU Jiahong, DONG Qingshan, et al. Simulation model for urban water dissipation [J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28 (2): 276-284. (in Chinese))

[7] 马凤莲,丁力,王宏. 承德市干湿岛效应及其城市化影响分析[J]. *气象与环境学报*, 2009, 25 (3): 14-18. (MA Fenglian, DING Li, WANG Hong. Dry and moisture island effects and its responses to the urbanization in Chengde, Hebei province [J]. *Journal of Meteorology & Environment*, 2009, 25 (3): 14-18. (in Chinese))

[8] 敬书珍,倪广恒. 基于遥感的城市蒸散发对土地利用/覆盖的响应研究[C]// 2008年全国城市水利学术研讨会暨工作年会资料. 北京:中国水利学会, 2008.

[9] 吴炳方,邵建华. 遥感估算蒸腾蒸发量的时空尺度推演方法及应用[J]. *水利学报*, 2006, 37 (3): 286-292. (WU Bingfang, SHAO Jianhua. Temporal and spatial extension of evapotranspiration estimated from remote sensing [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37 (3): 286-292. (in Chinese))

[10] 潘文祥,高学睿,王玉宝,等. 城市家庭生活单元耗水过程和机理研究进展[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15 (2): 140-147. (PANG Wenxiang, GAO Xuerui, WANG Yubao, et al. Research progress on the process and mechanism of urban household water consumption [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15 (2): 140-147. (in Chinese))

[11] 方诗标,贾仁甫,方诗彬,等. 城市生活用水效率驱动因子及调控研究[J]. *人民黄河*, 2013, 35 (3): 47-50. (FANG Shibiao, JIA Renpu, FANG Shibin, et al. Study on drive factors and regulation of urban domestic water use efficiency [J]. *Yellow River*, 2013, 35 (3): 47-50. (in Chinese))

(下转第29页)