

城市水量平衡模型分析与计算

李树平, 余蔚茗

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 随着城市水资源供需矛盾加大、城市给排水一体化进程的加快, 水量平衡为设计和运行集成水管理提供了良好的起点. 在城市水量平衡模型分析过程中, 首先分层次建立了城市水系统模型, 通过室内、室外、管网子系统的叠加形成城市综合水系统模型; 其次从环境、经济和社会服务方面, 提出了衡量城市水量的评价指标; 第三, 开发层次模型水量分析程序, 并以 SH 城市水系统的原始数据为例, 初步分析了 SH 市城市水系统中的水量问题. 结果证明城市水量平衡模型的开发具有实用性和可操作性.

关键词: 城市水系统; 水量平衡模型; 评价指标

中图分类号: TU 990

文献标识码: A

Urban Water Balance Model Analysis

LI Shuping, YU Weiming

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: With the increasing conflicts of the urban water supply and demand, and the integration of urban water supply and water disposal, water balance is important for integrated urban water management. First, hierarchy structure was developed; the urban water system model is integrated by inner-building submodel, outer-building submodel and pipework submodel. Second, urban water performance indicators were presented and categorized to environmental, economical and social service indicators. Third, excel-based water balance program was compiled. Finally, a case study was made of SH City. Computation results show that the water balance model is practical and operable.

Key words: urban water system; water balance model; performance indicators

城市水系统作为一个庞大复杂的系统, 整体和分项研究都十分重要, 系统成分间联系紧密、关联复杂, 为了便于分析, 需要建立适当的数学模型^[1-2]. 水量是

水处理设施和管网规划、设计和管理维护的首要考虑因素. 城市供水、污水排放、降雨径流、污水回用和雨水资源化, 很少在同一模拟框架下考虑. 但随着城市给排水一体化进程的加快, 结合城市水资源合理配置的需求, 城市水量平衡的研究日趋重要. 以下在城市水量平衡模型分析过程中, 分层次建立城市水系统模型, 通过室内、室外、管网子系统的叠加形成城市综合水系统模型; 其次从环境、经济和社会服务方面, 提出衡量城市水量的评价指标, 开发层次模型水量分析程序; 并以 SH 城市水系统的原始数据为例, 初步分析了 SH 市城市水系统中的水量问题.

1 城市水量平衡模型

系统平衡通常指系统输入与输出的差值等于系统的变化. 城市水量输送与迁移情况, 可将城市水系统分解为室内系统、室外系统和管网系统三个子系统(见表 1), 以便分层次构造室内、室外、管网系统模型, 然后合并成城市整体水系统模型(包括进入城市流域的水资源系统). 在表 1 中, 系统模型以开发新水源、减少需水量为核心, 左栏利用图标和文字表达节水活动、雨水利用、灰水回用和管网修复等工程方案, 右栏中列出对应左栏假设方案下的水量平衡等式. 各子系统模型分述如下.

1.1 室内水系统

室内水系统主要分析家庭、工厂车间和事业单位等的水量平衡问题, 其水量输入为管道系统供水, 输出为生活污水、工业废水等. 本层次设定目标为计算室内日或月用水量, 研究节水方案, 以解决目前室内水系统中常见的供排不平衡问题、供需差距问题.

1.2 室外水系统

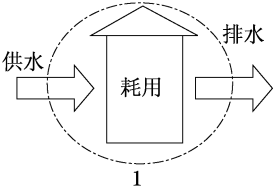
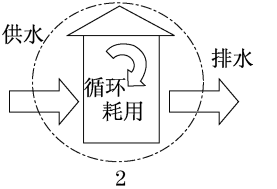
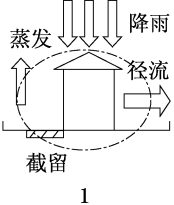
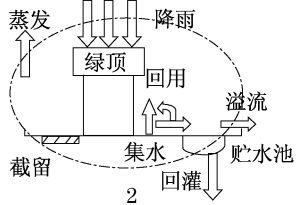
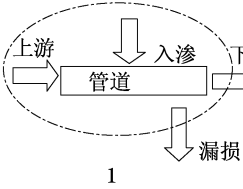
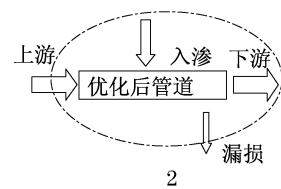
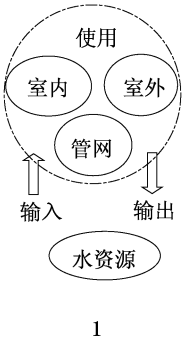
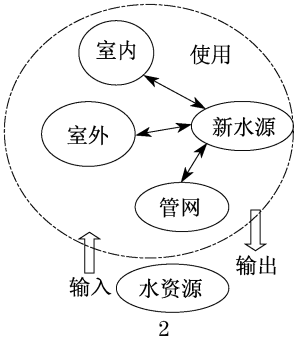
室外水系统主要分析城市地表发生的降雨、径流等之间的水量平衡问题, 水量输入为城市降水和管道供应的市政设施用水, 输出为蒸发、雨污水排除及地表径流.

收稿日期: 2009-08-05

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点资助项目(2006BAJ16B02)

作者简介: 李树平(1972—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为给水排水工程设计与运行最优化. E-mail: lishuping@tongji.edu.cn

表 1 水量平衡模型及计算公式
Tab.1 Water balance model and equations

模型信息	计算公式
<div>室内<div></div><div></div></div> <div>(1) 减少耗用量(修复漏损、普及节水): 耗用 = 供水 - 排水. (2) 增加循环单元: 循环水 = 排水 + 耗用 - 供水.</div>	
<div>室外<div></div><div></div></div> <div>(1) 设计地表/屋顶铺装: 径流 = 降雨 - 截留. (2) 设计集水设施、雨水利用设备: 利用 = 降雨 - 溢流 - 截留; 利用 = 集水 - 溢流 = 回用 + 回灌; 径流 < 池容积: 集水 = 降雨 - 截留; 径流 > 池容积: 集水 = 池容积.</div>	
<div>管网<div></div><div></div></div> <div>(1) 增设新管道与水设施: 净水能力建设 = 新增取水量 = 需水量 - 原有取水量; 处理能力建设 = 直排量 = 废水量 - 处理量. (2) 修复旧管道、提高水设施效率: 漏损 - 入渗 = 上游 - 下游.</div>	
<div>城市(室内外与管网)<div></div><div></div></div> <div>(1) 增设节水设施和水处理单元: 输入 = 使用 = 室内 + 室外 + 管网 = 输出. (2) 开发新水源: 输入 + 新水源 = 室内 + 室外 + 管网 = 输出; 新水源 = 回用水 + 雨水 + 减少漏损量.</div>	

注:①每一层次有 1,2 两种选择方案.②同一层次中,不同方案的相应位置箭头粗细变化定性表示该系统单元的水量变化.③管网系统包括管道、净水厂、污水处理厂等设施.④室内循环包括灰水回用和工业水循环;室外回用包括灌溉和再生水回用;室外渗透来自绿地或贮水池;室外截留指绿化、街道和屋顶的雨水初损.

1.3 管网水系统

管网层次的水系统包括供水设施、输配水管道、排水管道和污水处理厂,需要用户水表、加压泵站计量的统计数据,考虑管网与水设施的建设能力,使用效率等问题.

1.4 城市水系统

在前面三种模型的基础上,城市水系统模型将综合考虑整个城市的水量平衡问题.

当供水<需水时,残差项表示城市生产生活需水量难以满足,表现为城市缺水. 可选的方案包括:(1) 铺设引水管道,从城市以外的流域引入水源;(2) 开发降雨、灰水、海水等非常规水源,补充本地传统水资源的不足. 例如开展雨水收集利用工程项目,雨水经就地处理后,可以用于浇灌绿化、回灌地下水和再生水转入室内进行回用等.

当可供水量<取水量时,残差项为水资源的过

度开采,对水资源自净能力的破坏.

当取水量>入流量时,表示流域内地表水取水和入流差别较大,应当通过研究和计算,量化不影响地表水生态功能的差值,将过境流量限定在某一范围内.同时,流域取水也应考虑对下游水资源供给量的影响;当不等式表示地下水提取和回灌不平衡时,可能引起地面沉降、海水倒灌、地表地下水交流不畅等问题.

2 基于城市水量的评价指标

指标是描述和评价系统的一种工具,来源于测量或观察所得的参数,是描述现象、环境状态或与参

数值紧密相关的数值.指标的选择遵循如下原则^[3]:

①体现城市水资源可持续利用的内涵和目标;②在反映城市水系统特性的前提下,尽可能减少指标数目;③特殊性与普遍性的有机统一;④时间维和空间维的结合;⑤实用性和可操作性的结合.

在城市水量平衡模型中,根据文献资料 and 实际城市水系统调查,可将指标分为环境、经济和社会服务指标,初设指标及其计算方法见表 2.其中环境指标从环境保护方面评价水资源、用水和排水,主要以百分比率表示.社会服务指标将与人口有关,评价城市水系统的整体服务性能;而经济指标与设备投资和同期国民生产总值(GDP)增长有关,评价城市水系统的经济效益.

表 2 城市水量平衡评价指标
Tab.2 Performance indicators of urban water balance evaluation

指标	定义	备注
环境指标		
年径流量/mm	区域年地表水资源量/区域评价面积	表示一个地区地表水量的多少.根据中国径流地带区划划分标准:年径流深大于 900 mm 的地区为丰水带;200~900 mm 为多水带;50~200 mm 为过渡带;10~50 mm 为少水带;径流深不足 10 mm 为缺水带
地下水资源模数/(万 m ³ ·km ⁻²)	区域地下水资源量/区域土地面积	表示一个地区地下水资源量的大小.分级评价标准 30 万 m ³ ·km ⁻² ·a ⁻¹ 为水量极丰富线,以 2 万 m ³ ·km ⁻¹ ·a ⁻¹ 为水量极贫乏线,以 5~20 m ³ ·km ⁻² ·a ⁻¹ 为水量中等线
产水系数	区域水资源量/区域年降水量	反映气候环境变化引起的水资源变化大小.以 0.10 为低水平线,以 0.60 为高水平线,以 0.50 为中水平上限
水资源开发利用率/%	100%×水资源的开发利用量/水资源量	反映区域的水资源开发程度.通常认为<20%为可持续的;在 20%~30%之间为脆弱的;>30%为不可持续的
地表水控制利用率/%	100%×地表水源供水量/地表水资源量	反映地表水资源开发利用程度.以 10%为高水平线,以 50%为低水平线,20%~30%为中等水平线
地下水利用程度/%	100%×实际开采量/可开采量	用浅层地下水开采率度量.取 30%为低开采程度线,100%为严重超采线
生活用水比例/%	100%×区域生活用水量/区域总用水量	不同收入水平的地区 <div>生活工业农业</div>
工业用水比例/%	100%×区域工业用水量/区域总用水量	低收入地区4591
		中等收入地区131869
		高收入地区144739
工业用水重复利用率/%	100%×重复利用量/(生产中取用水量+重复利用水量)	以 30 % 为低水平线,以 90 % 为高水平线,40%~70%为中等水平线
工业废水排放达标率/%	100%×达到国家排放标准的工业废水量/工业废水排放总量	表明工业废水处理系统的减污效果.按国家环境保护部规定,指标值为 100%
污径比	未经处理污水排放量/地表径流量	在一定程度上反映江河湖库等地表水体的污染状况与程度.目前通常认为当污径比大于 0.05 时,就会发生严重污染
污水再生利用率/%	100%×经废水处理系统处理达到规定水质标准后被再利用的水量/废水处理系统总排水量	表示废水处理系统处理过的中水再利用情况.部分发达国家现状平均水平已达 25% ^[4]
社会服务指标		
城市饮用水源地合格率/%	100%×城市饮用水源地合格数/城市饮用水源地数	90%为低水平线,100%为目标
人均水资源占有量/(m ³ ·人 ⁻¹)	区域水资源量/区域总人数	衡量一个国家或地区可再生淡水资源状况的公认标准指标.目前把人均年占有水资源量 1 700 m ³ 定为缺水警告数字

续表		
人均综合用水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$)	区域年总用水量/区域总人口	人均综合用水量是随生活水平而异. $510 \text{ m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$ 为高水平线,以 $1\ 100 \text{ m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$ 为低水平线
自来水普及率/%	$100\% \times \text{自来水供水人口数}/\text{总人口}$	其最大值为 100%
供水管网漏损率/%	$100\% \times (\text{年供水量} - \text{年有效供水量})/\text{年供水量}$	反映城市供水利用程度. 通常认为 $<12\%$ 为可持续的, $12\% \sim 18\%$ 之间为脆弱的, $>18\%$ 为不可持续的
经济指标		
用水弹性系数	区域同期用水增长率/区域同期 GDP 增长率	反映用水量对经济增长的弹性影响,是判断用水的节水水平和内部重复利用率大小的指标,一般应小于 1.0. 通常以 1.0 为最低水平线,以 0 为高水平线
新水源开发/ ($\text{m}^3 \cdot (\text{万元})^{-1}$)	新增水量/设备投资	一般要求节约用水所引起的费用应小于增加用水所需的费用. 可利用经济杠杆激励节约用水、减少排污和增加雨水利用
节水效率/($\text{m}^3 \cdot (\text{万元})^{-1}$)	节省水量/设备投资	

3 算例分析

水量平衡分析通常包含以下步骤^[5]:①汇水区域选择;②汇水区域描述;③输入数据;降水、潜在蒸发蒸腾作用、雨水径流、废水流量、用水、漏水、地表覆盖和土地利用等;④模型校验和验证. 以下以 SH 市市区为研究对象进行计算.

3.1 汇水区域描述

SH 市市面积 $6\ 340.5 \text{ km}^2$,南北长约 120 km ,东西宽约 100 km . 其中市区面积 $2\ 643.06 \text{ km}^2$,郊县面积 $3\ 697.44 \text{ km}^2$;陆地面积 $6\ 219 \text{ km}^2$,水面面积 122 km^2 . SH 市属北亚热带季风气候,四季分明,日照充

分,雨量充沛. 气候温和湿润,春秋较短,冬夏较长,年平均气温 $16\text{ }^\circ\text{C}$ 左右. 全年无霜期约 230 日,年平均降雨量在 $1\ 200 \text{ mm}$ 左右,但一年中 60 % 的雨量集中在 5 至 9 月的汛期,汛期有春雨、梅雨、秋雨三个雨期. 其中 2006 年降雨日达 129 日,超过全年总天数的 $1/3$. 因此在 SH 市发展雨水利用有一定的优势.

3.2 各种水量数据的处理

依据 SH 市水务局统计 2007 年公布数据作为主要输入信息,结合调查并对部分参数进行适当假设,获得分析结果数据. 家庭室内水系统用水信息见表 3. 家庭情况描述见表 4.

表 3 家庭室内水系统用水信息
Tab.3 Domestic inner-building water use

用水项目	用水量/($\text{L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	
	家庭 1	家庭 2
清洁、厨房	38.1	30.0
淋浴	37.2	32.4
洗衣、浇灌	16.3	11.5
冲厕	37.5	35.0
总需水量/($\text{万 m}^3 \cdot \text{月}^{-1}$)	5 647.0	333.9

在家庭和工业用水统计中(见表 3~5),分别设计了两种用水模式.“家庭 1”(普通用水户)用水分项水量均多于“家庭 2”(节水型住户),而“家庭 1”类型的小区的数量是“家庭 2”类型的 10 倍,表明节水模式的用水家庭较少;“工业 1”(普通企业)与“工业 2”(节水型企业)的生产过程用水分项相同,但“工业 2”工业规模较“工业 1”大 7 倍,循环用水比例大 1.6 倍,因此耗水量较“工业 1”大,计算结果表明“工业 2”耗水量比“工业 1”多将近 4

表 4 家庭情况描述
Tab.4 Domestic description

描述	家庭 1	家庭 2
家庭人数/人	3	3
小区户数/户	1 600	1 600
考察小区个数/个	3 000	300
计量时间/d	30	30
污水再生利用率/%		30

倍. 而在“特种工业”(火电厂等特大用水户)和“事业单位”分项仅设计了一种用水模式,因此表 5 中“特种工业 2”(节水型特大用水户)统计值均为 0.

3.3 水量平衡指标分析

所有城市水量平衡评价指标分析需要大量的数据处理工作,涉及到数据可获取性和精确性,这里将在表 3~6 数据基础上,仅以污水再生利用率、生活用水比例和污径比三个指标为例进行说明.

表 5 每月室内水系统用水汇总
Tab.5 Monthly inner-building water use

描述	供水量/(万 m ³)	排水量/ (万 m ³)	耗用量/ (万 m ³)
家庭 1	5 647.00	5 082.00	564.70
家庭 2	333.90	300.50	33.39
工业 1	2 000.00	1 800.00	200.00
工业 2	7 199.00	6 479.00	719.90
特种工业 1	54 200.00	48 780.00	5 420.00
特种工业 2		0	0
事业单位	7 000.00	6 300.00	700.00
总和/10 ⁸ m ³	7.64	6.87	0.76

表 6 废水排放量及地表径流量年统计
Tab.6 Annual wastewater discharge and surface runoff

废水排放量/ 10 ⁸ m ³	工业排放处 理量/10 ⁸ m ³	城市污水处理 量/10 ⁸ m ³	地表径流量/ 10 ⁸ m ³
22.37	4.83	15.57	28.32

(1) 污水再生利用率(基础数据见表 3)
 $100\% \times \text{处理达标后再利用水量} / \text{废水处理系统总排放量} =$
 $100\% \times \frac{5647 \times 0 + 333.9 \times 30}{5\,647 + 333.9} = 1.675\%$

若以部分发达国家现状平均水平 25% 来看,SH 市的污水回用情况还有一段差距,应当加强污水回用宣传、普及回用设备,增加生活污水再生利用率.

(2) 生活用水比例(基础数据见表 5,其中假定一半事业用水为生活用水)
 $100\% \times \text{区域生活用水量} / \text{区域总用水量} =$
 $100\% \times [(5647 + 333.9) + 7\,000 \times 50\%] / 76\,400 =$
 12.42%

该值接近中等收入国家的生活用水指标(13%).
(3) 污径比(基础数据见表 6)
 $\text{未经处理污水排放量} / \text{地表径流量} =$
 $\frac{22.37 - 4.83 - 15.57}{28.32} = 0.006\,95$

该值大于 0.05 的限额,表明地表流域受到严重污染,必须加强水系统中的治污工作,提高排水管网普及率和污水处理率.

4 结语

城市水量平衡提供了评价供水需求、雨水和污水可回用性,以及供水、污水和雨水之间相互作用的框架.在水量平衡模型的处理上,分层次设定了系统研究目标,构造与之对应的不同时空范围内的城市子水系统,研究子水系统本身特定的功能和子系统间的相互联系,并最终将子系统综合为城市整体水系统模型.具体实现上,在用图示和公式表达了各个系统模型方案的基础上,编写了模型计算表格,并用案例证明了城市水量平衡模型的实用性和可操作性.

作为在水量平衡模型建立和计算方面的常识,还需要进一步深入研究,其需要注重内容包括:①城市水平衡需要大量长期积累的高质量数据,包括降水、径流、蒸发蒸腾作用、地下水位、地表水位等;②需要加强城市水系统的水平衡测试和验证,加深对城市水系统的认识,实现模型的优化,为管理提供更为充足的数据支持;③需要健全城市水系统评价指标体系,以便为开展工程措施提供直观、普适性好的评判依据.

参考文献:

[1] 邵益生. 城市水系统控制与规划原理[J]. 城市规划, 2004 (10):62.
SHAO Yisheng. Urban water system control and planning theory [J]. Urban Planning, 2004(10):62.

[2] Wenzel V. Integrated studies of urban water budget[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2005, 30:398.

[3] 李树平,刘遂庆, Bernard Chocat, 等. 城市水系统可持续管理的需求分析[J]. 中国给水排水, 2009, 25(7):102.
LI Shuping, LIU Suiqing, Bernard Chocat, et al. Needs for urban water sustainable management [J]. China Water and Wastewater, 2009, 25(7):102.

[4] Sahely H R, Kennedy C A. Water use model for quantifying environmental and economic sustainability indicators[J]. Water Resources Planning and Management, 2007, 133(6):550.

[5] Mitchell V G, Mein R G, McMahon T A. Modelling the urban water cycle[J]. Environmental Modelling & Software, 2001, 16 (7):615.