

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.13.020

基于物质流分析的城市水系统规划评价

刘广奇^{1,2}, 白桦², 赵志伟¹

(1. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400044; 2. 中国城市规划设计研究院, 北京 100037)

摘要: 基于物质流分析方法,构建了“系统通量/有效通量”指标,在城市规划确定的人口规模和用地布局前提下,通过构建不同的水系统规划方案进行城市水系统运行效率的评价,一是以水量为研究对象,按照“水体—供水—用水—排水—回用—水体”城市水循环过程,分析不同水系统规划方案的用水效率;二是从水质角度出发,通过有机物(C)和营养物质(N、P)的传递和代谢视角,评价水系统对污染物的控制效率以及对资源的循环利用效率。

关键词: 物质流; 城市水系统规划; 效率评价

中图分类号: TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)13-0119-05

Evaluation of Urban Water System Planning Based on Material Flow Analysis

LIU Guang-q^{1,2}, BAI Hua², ZHAO Zhi-wei¹

(1. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100037, China)

Abstract: Based on material flow analysis method, index of “system flux/effective flux” was established, and the operational efficiency of urban water system by constructing different water system planning schemes under the premise of population scale and land layout determined by urban planning was evaluated. The first step was to analyze the water utilization efficiency of different water system planning schemes according to the urban water cycle process of “water body – water supply – water use – drainage – reuse – water body”. Second, the control efficiency of pollutants by the water system and the recycling efficiency of resources were evaluated from the perspective of water quality through the transmission and metabolism of organic matter (C) and nutrients (N and P).

Key words: material flow; urban water system planning; efficiency evaluation

城市水系统是以水循环为基础、水通量为介质、水设施为载体、水安全为目标、水管理为手段的综合系统,是城市大系统的重要组成部分^[1],其中包含了生态、社会、经济等方面的复杂关系。从系统的组成看,城市水系统是自然水循环和社会水循环的耦合系统,不仅系统内各个单元之间存在复杂的通量变化,而且不同规划方案之间的物质代谢效率 and 环境影响程度也存在很大差异^[2]。物质流分析是指

在一定时空范围内关于特定系统的物质流动和贮存的分析,主要涉及物质流动的源、路径及汇。根据质量守恒定律,物质流分析的结果总是能通过其所有的输入、贮存及输出过程来达到最终的物质平衡。可以说,明“源”解“汇”是物质流分析方法的显著特征。截至目前,单个物质或单质的流动分析已在全球、国家、区域、流域、城市乃至工业园区等不同水平上进行了细致研究,其为不同尺度上的资源

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07501001)

环境管理提供了方法学上的决策支持工具。

物质流分析方法最早应用于经济研究领域,其时间可追溯到20世纪前半叶,1930年Leontief提出输入-输出平衡表,第一个基于经济学角度的国家尺度物质流分析成果发表于1969年。到了1970年前后,物质流分析方法被引入资源保护和环境管理领域,主要的研究方向有两个:一个是城市新陈代谢,例如,徐一剑等人^[3]进行贵阳市物质流分析,给出了全市物质流全景,指出了现有经济结构特征以及经济转型发展途径;另外一个为流域、城市或区域的污染物迁移路径分析,例如,武娟妮等人^[4]以江苏宜兴经济开发区为例,运用物质流分析方法解析了碳、氮、磷的代谢途径、结构和动力机制,提出了加强水环境污染治理的相关举措。随着物质流分析研究领域的不断拓展,城市水务工作者逐步将该方法引入城市水系统领域。从最开始的物质平衡分析,到后来的污染物排放结构解析,再到环境影响和环境承载力评价工具之一,以至目前循环经济政策制定的重要支撑工具,物质流分析方法的研究正在不断深入。

王东宇^[5]基于物质流分析方法开展了上海市水资源社会循环的实证研究。董欣等人^[6]利用物质流分析方法构建了城市污水系统静态物质流分析模型,用于分析城市污水系统中COD(C)、TN(N)和TP(P)的迁移途径及强度,比较各种形式城市污水系统的资源环境影响。白桦等人^[7]基于物质流分析方法建立了钾素物质流动与循环分析模型,剖析其输入来源和支出去向,识别物质流动和循环的主要特征。

1 评价方法

根据城市水系统特征及效率评价目的,研究建立的评价方法以系统物质守恒原理为理论基础,以社会水循环过程中的水、有机物(C)和营养物质(N、P)为研究对象,从水量和水质两个方面评价系统的运行效率。方法的核心由模型构建、评价机理和评价内容3部分组成。

1.1 模型构建

基于“水体—供水—用水—排水—回用—水体”的城市二元水循环过程构建物质流静态分析模型,城市水系统中的水源、净水厂、污水厂、用户等概化为系统的“元素”,在上述“元素”之间流动的物质概化为“元素之间的关联关系”,从自然循环中取

水、人类生产生活中消耗有机物(C)和营养物质(N、P)等行为是物质输入,污水厂尾水、污泥等是物质输出。城市水系统静态物质流分析模型见图1。

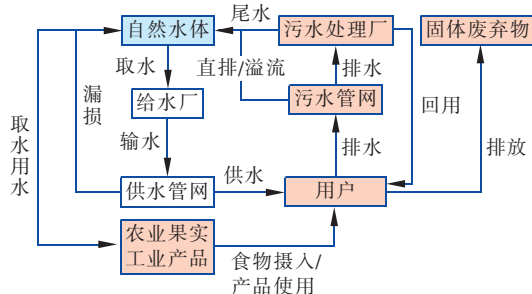


图1 城市水系统静态物质流分析模型示意

Fig.1 Analysis model of static material flow in urban water system

1.2 评价机理

如前所述,物质流分析方法通过研究系统通量进行系统运行效率的分析评价,图2为评价方法的概念模型。其中,矩形框代表元素,箭头直线代表物质流。对于每一个元素,物质流的总体通量(TSTF)代表流入或流出元素的代谢总量(根据物质守恒原理,流入=流出),整个系统中,所有元素的TSTF之和表征着整个系统的规模,即体现了城市水系统服务人口、用地等。正向的直线箭头(从左向右)代表“代谢/消耗”,视为“正向通量”;反向的直线箭头(从右向左)代表“回用/再生”,视为“负向通量”;所有的正向通量代表了系统的“有效通量”(ESTF)。

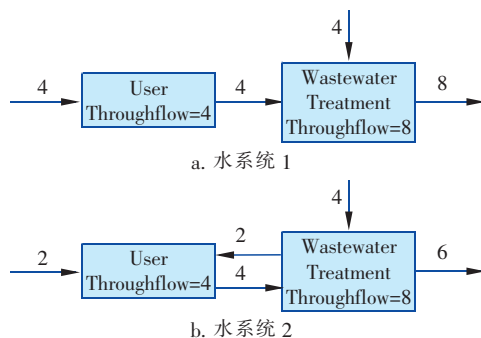


图2 基于物质流分析的水系统运行对比模型

Fig.2 Comparison model of water system based on material flow analysis

从图2可以看出,与水系统1相比,水系统2有“2个通量”的回用,除此之外全部相同。通过计算,系统1和系统2的TSTF均为 $TSTF = 4 + 4 + 4 = 12$,但是系统1和2的ESTF分别为20和16。可以看

出,对应一个确定的城市规划方案,不同水系统规划方案的总体通量固定不变,但是有效通量却可以不同,数值越小系统效率越高;反之亦然。因此,可以通过“ESTF/TSTF”指标体现不同规划方案的运行效率,例如上例中的数值分别为 5/3 和 4/3,代表系统 2 优于系统 1。

1.3 评价内容

水量方面:以水为介质的供水、用水、排水、回用等社会水循环过程。

水质方面:伴随着用水和排水过程的物质代谢过程,选择 C、N 和 P 作为分析物质。

2 规划方案

2.1 城市概况

图 3 为案例城市的规划区。城区被两条河流 R1 和 R2 分割为 A、B 和 C 三个区域,规划人口规模分别是 12 万人、7 万人和 1 万人。

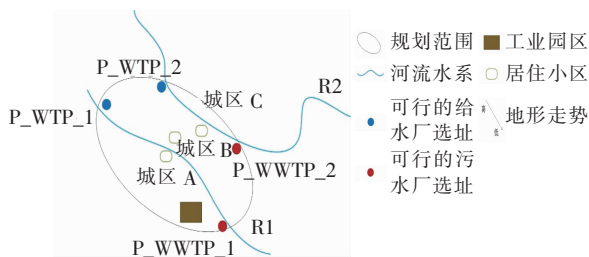


图 3 案例城市的规划区示意

Fig.3 Schematic diagram of planning area of case city

在规划区域西北和正北方向分别有两处市政给水管厂的可行选址:P_WTP_1 和 P_WTP_2,假设水源的水量充足、水质良好。在规划区域正南和东南方向分别有两处市政污水厂的可行选址:P_WWTP_1 和 P_WWTP_2,用地充足,允许处理污水达标排

放。规划区中部主要是居住用地,其中有若干个小区具备使用再生水的条件,最大利用规模为 $0.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。在城区 A 的南部有一个工业园区,其生产供水及污水处理均自建设施,不纳入市政系统,但是有 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的再生水需求。规划区域的水源水质、产污系数、污水排放,以及再生回用标准如表 1 所示。

表 1 规划区典型指标

Tab.1 Typical indicators of planning area

项 目	产污系数/($\text{g} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	水源水质/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	污水排放标准/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	再生水标准/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
COD	60	20	50	40
TN	12	1	15	10
TP	1	0.2	0.5	0.3

2.2 水系统规划方案

用水量测算:城市单位人口综合用水量指标取 $400 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{d})$,预测最高日用水量为 $8.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,日变化系数取 1.4。排水量预测:污水量按供水量的 85% 计算,平均日用水量为 $5.71 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,污水量为 $4.86 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。城区 A、B、C 的最高日用水量、平均日用水量和污水排放量见表 2。基于上述测算,4 个水系统的规划方案见表 3。

表 2 各城区的水系统指标

Tab.2 Water system indexes of different urban areas

$10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$

项 目	最高日用水量	平均日用水量	污水排放量
城区 A	4.8	3.43	2.92
城区 B	2.8	2.00	1.70
城区 C	0.4	0.28	0.24
合计	8.0	5.71	4.86

表 3 城市水系统规划方案

Tab.3 Planning scheme of urban water system

规划方案	方案特点	供水系统			排水系统			
		给水厂选址	设计规模/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	服务范围	污水厂选址	设计规模/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	服务范围	污水再生回用
1	传统集中系统	P_WTP_1	8	A、B 和 C	P_WWTP_1	4.86	A、B 和 C	河道补水
2	集中供水、污水分散、部分回用	P_WTP_1	8	A、B 和 C	P_WWTP_1	2.92	A	河道补水 + 市政杂用
					P_WWTP_2	1.94	B 和 C	河道补水 + 市政杂用
3	分散供水、污水集中、部分回用	P_WTP_1	4.8	A	P_WWTP_1	4.86	A、B 和 C	河道补水 + 市政杂用 + 锅炉补水
		P_WTP_2	3.2	B 和 C				河道补水 + 市政杂用 + 锅炉补水
4	分散供水、污水分散、全部回用	P_WTP_1	4.8	A	P_WWTP_1	2.92	A	河道补水 + 市政杂用 + 锅炉补水 + 居民冲厕
		P_WTP_2	3.2	B 和 C	P_WWTP_2	1.94	B 和 C	河道补水 + 市政杂用 + 锅炉补水 + 居民冲厕

3 评价结果与分析

根据1.2节建立的效率评价方法,城市水系统中水量、C、N和P的物质流总体通量分别为36、101.9、12.26和1.615,反映了在规划情景下,支撑密云城市社会水循环的物质通量大小。4种水系统规划方案的ESTF值见表4。

表4 4种规划方案的ESTF值

Tab.4 ESTF calculation results of four planning schemes

项 目	水量	C	N	P
方案1	49.00	153.90	18.52	2.43
方案2	46.00	153.45	18.45	2.43
方案3	45.40	151.86	18.16	2.34
方案4	42.90	151.31	18.04	2.31
平均值	45.83	152.63	18.29	2.38

表4的计算结果表明,为了支撑密云2020年的城市代谢,水系统的水量、C、N和P的“有效通量”平均值需要分别达到45.83、152.63、18.29和2.38,分别是TSTF值的1.27倍、1.50倍、1.49倍以及1.47倍。

图4为4种规划方案的ESTF/TSTF值。可以看出,随着污水再生回用量的不断增加,“有效通量”不断减少。以方案1和方案4为例,二者的水量ESTF/TSTF值分别为1.36和1.23,效率提高了10%左右,由此带来的C、N和P的ESTF/TSTF值的效率分别提高了1.3%、2.6%和4.7%。

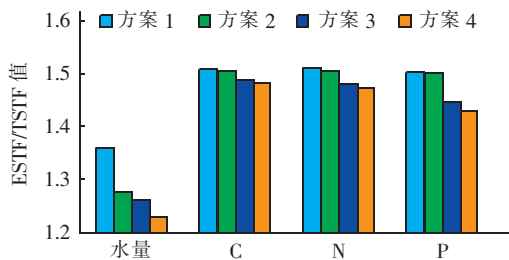
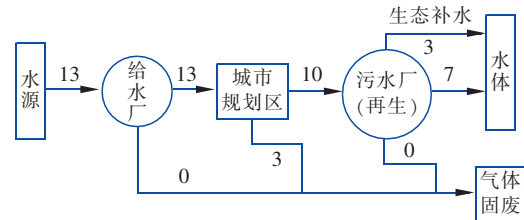


图4 4种规划方案的ESTF/TSTF值

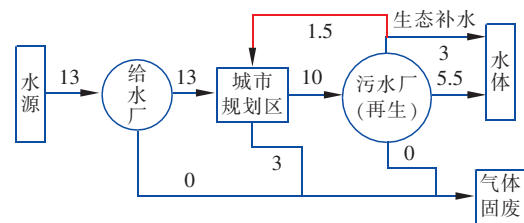
Fig.4 ESTF/TSTF of four planning schemes

图5为4种规划方案的水量利用效率。可以看出,在原方案基础上增加的市政杂用水及锅炉用水仅仅带来了污水处理厂尾水排放量的变化,这并不会对其他通量过程带来影响(见方案2、方案3),而冲刷使用的再生水会改变取水以及用水过程(见方案4),并且具有“叠加”效果,即 $0.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的再生水利用量(“负向通量”)带来了 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ “正向通量”的减少。正因为如此,规划方案4的

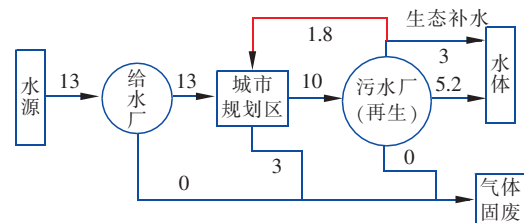
ESTF值大幅度降低,在支撑相同社会水循环的前提下体现出了更高的效率。从支撑系统代谢效率的角度出发,方案4的评价结果最优,可以作为推荐规划方案。



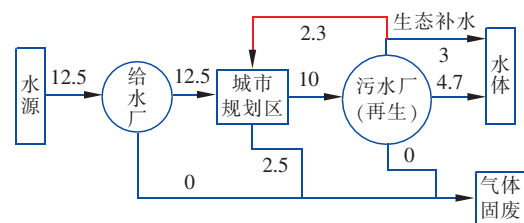
a. 规划方案1



b. 规划方案2



c. 规划方案3



d. 规划方案4

图5 4种规划方案的水量利用效率

Fig.5 Water volume use efficiency of four planning schemes

4 结论

① 基于物质流分析方法,以密云新城为案例开展城市水系统规划方案的效率评价研究,根据密云新城的城市概况和水系统现状及问题,提出了4种具有代表性的水系统规划方案,并根据评价指标和计算方法进行了初步分析。

② 在规划情景(35万人口、45.53 km²用地)

下,城市水系统中水量、C、N 和 P 的 TSTF 值分别为 36、101.9、12.26 和 1.615。4 种规划方案评价结果的效率逐步提升,方案 4 比方案 1 的水量利用效率可提高 10% 左右,C、N 和 P 的 ESTF/TSTF 值的效率分别提高了 1.3%、2.6% 和 4.7%。

③ 根据模型公式的定义可以看出,再生回用的越多,ESTF/TSTF 值的效率越好,一方面有效提高了资源利用效率,另一方面再生水回用可以减少污染物进入环境水体,具有明显的环境效益。后续可在本分析方法的基础上进一步研究不同规划方案的资源利用效率和环境减排效益,从而进一步提高物质流分析方法的适用性。

参考文献:

- [1] Jensen O, Khalis A. Urban water system: Development of micro-level indicators to support integrated policy [J]. PLoS ONE, 2020, 15(2): e0228259.
- [2] McDonald R I, Weber K, Padowski J, *et al.* Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure [J]. Global Environmental Change, 2014, 27: 96 – 105.
- [3] 徐一剑, 张天柱, 石磊, 等. 贵阳市物质流分析 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(12): 1688 – 1691, 1699.
Xu Yijian, Zhang Tianzhu, Shi Lei, *et al.* Material flow analysis in Guiyang [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44(12): 1688 – 1691, 1699 (in Chinese).
- [4] 武娟妮, 石磊. 工业园区磷代谢分析——以江苏宜兴经济开发区为例 [J]. 生态学报, 2010, 30(9): 2397 – 2405.
Wu Juanni, Shi Lei. Phosphorus metabolism in industrial parks: a case study of Yixing economic development zone [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(9): 2397 – 2405 (in Chinese).
- [5] 王东宇. 基于水资源社会循环的上海市水资源实物量核算研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
Wang Dongyu. Research on Physical Flows of System of Environmental-Economic Accounts for Water in Shanghai, Based on Urban Water Cycle Theory [D]. Shanghai: East China Normal University, 2009 (in Chinese).
- [6] 董欣, 陈吉宁, 曾思育, 等. 基于物质流分析的城市污水系统比较 [J]. 给水排水, 2011, 37(1): 137 – 142.
Dong Xin, Chen Jining, Zeng Siyu, *et al.* Comparison of urban wastewater system based on substance flow analysis [J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(1): 137 – 142 (in Chinese).
- [7] 白桦, 曾思育, 董欣, 等. 基于物质流分析的钾素流动与循环研究 [J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2493 – 2496.
Bai Hua, Zeng Siyu, Dong Xin, *et al.* Research of potassium flow and circulation based on substance flow analysis [J]. Environmental Science, 2013, 34(6): 2493 – 2496 (in Chinese).



作者简介:刘广奇(1980 –),男,山东寿光人,博士研究生,教授级高级工程师,现任中国城市规划设计研究院水务院副院长,主要从事城镇水务基础设施规划研究。

E-mail: liugq@nwqc.gov.cn

收稿日期: 2020 – 05 – 22