

基于物质流分析的城市污水系统比较

董欣^{1,2} 陈吉宁^{1,2} 曾思育¹ 杜鹏飞^{1,2}

(1 清华大学环境科学与工程系,北京 100084; 2 清华大学环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100084)

摘要 在对多种形式的城市污水系统进行系统分析和结构比较的基础上,利用物质流分析的方法,构建了城市污水系统静态物质流分析模型。该模型可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。利用该模型,以大兴新城为研究区域,比较了传统系统、源分离—灰水 SBR 处理系统和源分离—灰水湿地处理系统三种城市污水系统。结果表明,进入传统系统的 75% 的 COD-C、94% 的 TN-N 和 97% 的 TP-P 以出水、污泥和气体的形式排入环境,只有 21% 的 COD-C 和 0.1% 的 TN-N 以沼气的形式回收利用。进入源分离系统的 75% 的 COD-C、30% 的 TN-N 和 28% 的 TP-P 以出水、污泥和气体的形式排入环境,21% 的 COD-C、60% TN-N 和 70% TP-P 以肥料的形式回收农用。单从环境资源的角度考虑,源分离系统较传统系统具有明显的可持续性。

关键词 城市污水系统 物质流分析 传统系统 源分离—灰水 SBR 处理系统 源分离—灰水湿地处理系统 资源回收利用

0 引言

城市污水系统是连接城市用水用户与城市水环境的基础设施系统,它将各用户的排水进行收集、处理后排入环境。城市污水系统是城市水环境质量的基本保障,是决定城市可持续性的关键基础设施之一^[1]。城市污水系统由污水管网子系统和污水处理子系统两部分组成,城市用水用户的排水是系统的输入,进入系统的物质在系统中经过一系列的物理化学过程,最终进入环境介质。部分物质随着污水处理厂的尾水进入水体,部分物质随着输送和处理过程中产生的污泥排出系统,还有部分物质在处理过程中转化成气态物质排入大气,例如污水中的 COD 通过生物氧化转化成 CO₂, NH₃-N 通过硝化和反硝化转化为 N₂。

城市污水系统的主要输入是城市生活污水。根据水质差异,城市生活污水可以分为三类:尿液及其冲洗水即黄水(Yellow Water, Y),粪便及其冲洗水即褐水(Brown Water, B)和其他的生活排水即灰水(Grey Water, G)^[2]。这三类污水的排放方式不同,

会影响到城市污水系统的输入,进而影响污水收集和处理系统的结构组成和运行,这些将最终导致系统不同的环境影响。这一点正是造成不同城市污水系统之间差异的根本原因。

1 传统和源分离形式城市污水系统的差异分析

目前,不论是在发达国家还是在我国,大多数城市的污水系统都沿用了起源于 19 世纪欧洲的传统系统结构。在传统城市污水系统中,以水冲厕所为代表的室内排水设施将用户产生的黄水、褐水及灰水混合后排出用户,经过污水管网收集进入污水处理厂进行处理。进入系统的物质在系统中发生迁移和转化,以出水、气体、污泥三种不同形式进入水体、大气和土壤三种环境介质当中。在污水处理过程中,污泥处理单元通过厌氧稳定剩余污泥可以产生一定量的沼气(见图 1)。传统系统的结构之所以长期被人们所认可,除了它与系统输入形式相适应外,还受到系统功能定位的影响。从城市中排除污染物,保证城市的卫生安全是传统城市污水系统的主要功能。

近些年来,由于城市水资源短缺、水环境恶化,可持续发展对城市污水系统的功能提出了更高要求。城市污水系统不仅要能从城市中排除污

国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07318-008)。

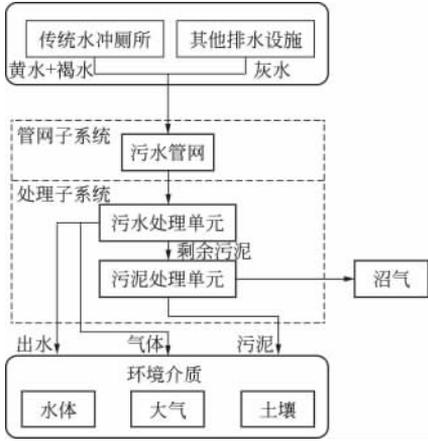


图1 传统城市污水系统

染物,还要能保障城市的水环境质量,同时尽可能地节约和回用进入城市系统的资源^[3]。另外,迅速发展的材料技术、管道技术和水处理技术为用户排水设施、管网子系统和污水处理子系统的革新提供了技术基础。功能要求的提高和相关技术的进步促使区别于传统系统的源分离城市污水系统开始出现。源分离形式的城市污水系统结构如图2所示。在源分离系统中,城市污水系统的输入由传统的一支混合污水变为三支。黄水和褐水收集系统通常为重力流系统或者负压系统,灰水收集通常采用重力收集。收集后的污水分别由黄水处理单元、褐水处理单元和灰水处理单元进行处理。黄水通过储存进行卫生稳定或者直接进行化学沉降和汽提的方法被处理作为肥料用于农业^[4]。褐水经过固液分离后,固体部分通过堆肥处理,作为肥料用于农业;液体部分进入灰水处理系统与灰水共同进行处

理^[5]。根据目前主要应用的灰水处理技术,可以将灰水处理单元分为两大类:一类基于人工处理技术,该类单元多采用SBR技术对灰水进行处理;另一类基于自然处理,该类单元采用湿地对灰水进行处理,处理过程中湿地生长的芦苇与褐水一起堆肥,作为农用肥料^[6]。与传统系统相同,物质经过源分离系统的传输和处理,最终排入水体、大气和土壤。

从系统与外部环境的关系来看,源分离系统与传统系统的输入和输出的物质总量是相同的,系统内流动的物质均是来自用户各个用水器具或设施的排水,最终以出水、气体和污泥的形式输出到水体、大气和土壤三种环境介质当中。但这两种系统的输入方式和内部组成不同,这种结构性的差异将定量地影响城市污水系统的物质输出和运行性能。为了定量地评价这种差异,本研究构建了城市污水系统的静态物质流分析模型。

2 城市污水系统的静态物质流分析模型

城市污水系统的静态物质流分析模型以物质流分析过程为结构框架,定量描述城市排水、污水系统与外界环境之间的物质关联,追踪物质在污水系统内部、系统与外界环境之间的迁移和转化途径,识别系统内物质的流向并量化其强度。该模型可以用于评价城市污水系统对城市环境的影响。

考虑到城市水环境质量关注的水质指标,可持续性城市排水系统的要求以及数据的可获得性,本文以COD-C、TN-N、TP-P(以下简称C、N和P)三种物质为例构建该模型。

2.1 模型的输入和输出

该模型的输入即为城市用水用户排出的C、N和P的总量 L_i ($i=C、N、P$)。考虑到用户排水方式的多样性,该模型给出了各种物质在黄水、褐水和灰水中的含量 $YL_i、BL_i$ 和 GL_i ,这样可以通过 $YL_i、BL_i$ 和 GL_i 的不同组合来模拟不同形式的城市污水系统输入。 L_i 可以通过系统服务区域内的人均C、N和P排放量 L_{pi} 和系统服务人口数 P_{op} 进行计算。 $YL_i、BL_i$ 和 GL_i 则通过黄水、褐水和灰水中C、N和P的比例 $p_{Yi}、p_{Bi}$ 和 p_{Gi} (见表1)进行折算。C、N和P进入系统后经过管网和处理子系统最终的流向是系统的出水(W)、污泥

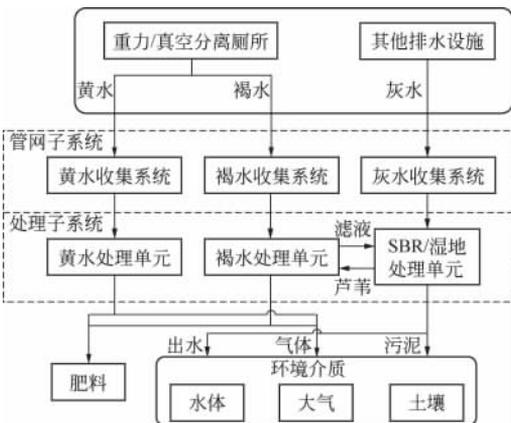


图2 源分离形式城市污水系统

(S)、大气(A)和系统的产物[沼气(G)或者肥料(F)]。各流向下的物质输出强度 $OUTK_i (K = W, S, A, G, F)$ 即为该模型的输出。综上所述,城市污水系统静态物质流分析模型的输入和出入如表 2 所示。

表 1 C、N 和 P 在黄水、褐水和灰水中的比例系数^[7]

物质	黄水中的比例 p_{Yi}	褐水中的比例 p_{Bi}	灰水中的比例 p_{Gi}
C	0.12	0.47	0.41
N	0.87	0.10	0.03
P	0.50	0.40	0.10

2.2 系统的物质流分析

系统的物质流分析是城市污水系统静态物质流分析模型的核心,其过程依次可分解为以下四个步骤:系统单元划分、单元物质流分析、单元组合和系统物质流分析、系统的资源环境影响分析。

2.2.1 系统单元划分

系统单元划分是将整个城市污水系统划分具有独立功能的单元,包括:污水管网、灰水管网、黄水收集单元、褐水收集单元、污水处理单元、灰水处理单元、黄水处理单元、褐水处理单元等。对于同一单元,实现同样的功能可以采用不同的技术,这将影响物质在单元内的迁移特征,因此,模型对于采用不同技术的同一单元需要进行区分。在一定的约束条件下,各单元进行不同的组合,便可以构成采用不同技术、不同结构的污水系统。系统单元划分将城市污水系统模块化,便于模型拓展,也使得模型具有一定的普适性。

2.2.2 单元物质流分析

单元物质流分析是系统物质流分析的基础,其目的是量化物质在单元内的迁移。单元的物质流分

析采用年平均值,因为较长的时间尺度方便在分析过程中对各单元进行简化。本研究将通过确定各单元中物质的迁移系数,利用简化的线性输入输出关系对单元内的物质迁移分配进行模拟。模拟结果可以在系统规划层面进行使用,具有一定的可靠性。例如,图 3 和图 4 分别是采用储存卫生稳定技术的黄水处理单元和采用强化-露天两级堆肥技术的褐水处理单元的物质流分析结果。

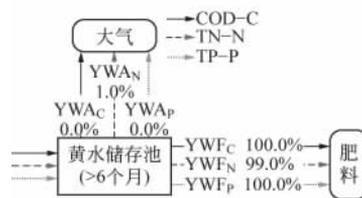


图 3 黄水处理单元的物质流分析

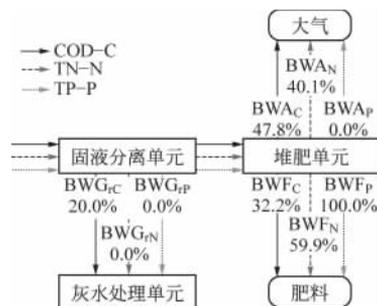


图 4 褐水处理单元的物质流分析

储存卫生稳定技术是目前最常用的黄水处理技术,它将黄水储存 6 个月以上进行卫生稳定,然后作为肥料用于农业。这种技术在瑞典和德国已经进行了工程案例研究,可靠性较高^[8]。在整个处理过程中,除 N 外,黄水中的 C 和 P 都全部迁移进肥料。由于黄水中 N 的组成具有挥发成分,储存过程中,将有 1% 的 N 挥发进入大气^[9],其余也将迁移进入肥料。

表 2 城市污水系统静态物质流分析模型的输入和输出

模型的直接输入和间接输入	模型的输出
直接输入: 系统服务人口 (Pop)	出水中 C、N、P 的量 ($OUTW_C, OUTW_N, OUTW_P$)
直接输入: 服务区内人均 C、N、P 排放量 (L_{pC}, L_{pN}, L_{pP})	污泥中 C、N、P 的量 ($OUTS_C, OUTS_N, OUTS_P$)
间接输入: 用户 C、N、P 排放总量 (L_C, L_N, L_P)	排入大气的 C、N、P 量 ($OUTA_C, OUTA_N, OUTA_P$)
间接输入: 用户黄水 C、N、P 排放总量 (YL_C, YL_N, YL_P)	沼气中 C 的量 ($OUTG_C, OUTG_N, OUTG_P$)
间接输入: 用户褐水 C、N、P 排放总量 (BL_C, BL_N, BL_P)	肥料中 C、N、P 的量 ($OUTF_C, OUTF_N, OUTF_P$)
间接输入: 用户灰水 C、N、P 排放总量 (GL_C, GL_N, GL_P)	

在对褐水进行堆肥之前,处理单元将对进水进行固液分离,分离出的液体部分进入灰水处理单元进行处理,固体部分直接进行堆肥。在固液分离的过程中,褐水中的 C 将有 20% 以液体的形式进入灰水处理单元,其他物质都将随固体部分进行堆肥^[9]。堆肥将褐水中有效的干物质高效、可靠地转化成肥料或土壤调节剂。在此过程中,C、N 和 P 主要迁移进入肥料和大气^[10]当中,极少部分迁移进入堆肥过程中产生的渗滤液,该部分可忽略不计。

2.2.3 单元组合与系统物质流分析

根据不同城市污水系统的结构,选取模型中相关的单元,将各单元的物质流分析结果进行输出和输入的串联,便可以得到整个污水处理子系统的物质流分析。图 5 是经过单元组合后形成的采用 SBR 处理灰水的源分离城市污水系统的物质流分析结果,其中 IWJ_i ($I=Y, B, G, J=A, F, S, W, i=C, N, P$) 为各单元的物质迁移系数,为本模型的重要参数,通过相关的现场和文献调研获得。

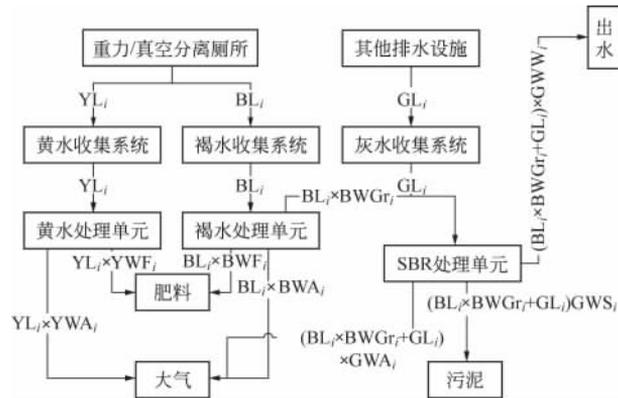


图 5 源分离系统物质流框架

2.2.4 系统的资源环境影响分析

利用上述城市污水系统物质流分析的结果,可以分析系统中物质迁移的途径与强度。对结果进行统计,用系统排入环境的 C、N 和 P 总量与进入系统总量的比值表征系统对环境的影响 (SEI),用进入肥料和进入沼气的 C、N 和 P 总量与进入系统总量的比值表征系统对资源的回收能力 (SRR)。利用模型给出的 SEI 值和 SRR 值可以分析城市污水系统的资源环境影响,能够为城市污水系统的规划提供系统选择的决策支持。

3 三种城市污水系统的物质流分析——案例研究

本文以北京市大兴区新城地区为案例研究区域。大兴新城位于北京市南郊的大兴区北部,是大兴区的行政、文化中心,也是北京市规划的具有生态特色的宜居新城。

大兴新城的总体规划中要求,到 2020 年,大兴新城的总人口为 60 万人,新城范围内污水处理率达到 90%,污水回用率达到 60%。本研究假设未来大兴新城区域满足一般人居的排污特性。由于数据缺乏,利用北京市的多年统计数据及文献统计数据确定该区域的人均 COD-C、TN-N、TP-P 排放量,分别为 56.11g/(人·d)、12.23g/(人·d)、1.68g/(人·d)。

根据大兴新城的特征数据,利用城市污水系统静态物质流分析模型,传统系统 (T-S,采用具有脱氮除磷效果的活性污泥法和化学除磷技术处理污水)和源分离系统 (SBR-SS,采用 SBR 处理灰水,储存卫生稳定技术处理黄水,强化-露天两级堆肥技术处理褐水)在大兴新城的物质流分析结果如图 6、图 7 所示。由于大兴新城规划了大量的集中绿地,具有建设湿地的可能,因此,本文对采用湿地处理灰水的源分离系统 (WL-SS,采用湿地处理灰水)也进行了物质流分析,见图 8。对于源分离系统,需要用户安装可以分离黄水和褐水的厕所,瑞典示范工程的经验表明该种厕所的分离效率为 60%~90%^[11]。因此,本研究假设分离厕所的分离效率为 75%,即黄水收集系统只能收集用户产生的 75% 的黄水,而剩余 25% 的黄水将与褐水一起排入褐水收集系统。

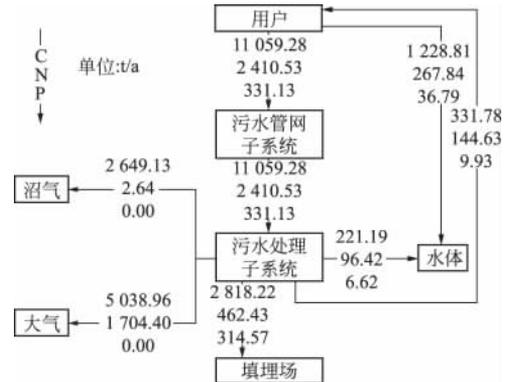


图 6 大兴新城传统系统物质流分析

图 9 是大兴新城三种污水系统物质流分析的统计结果。从图中可以看出,不论哪种系统,进入城市

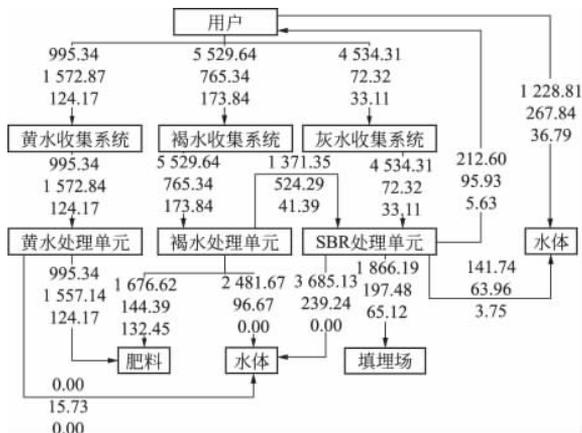


图7 大兴新城 SBR-SS 系统物质流分析

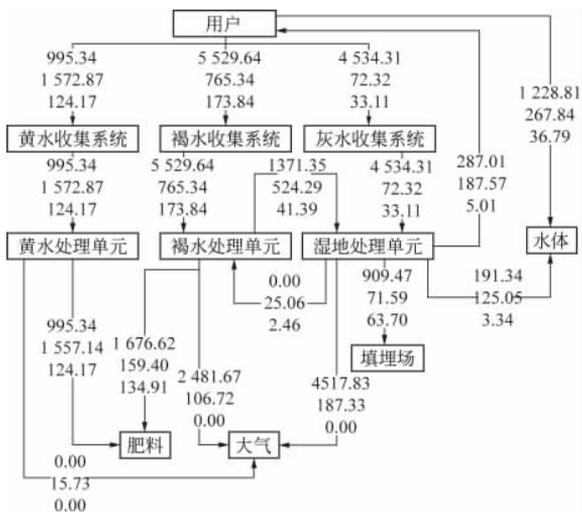


图8 大兴新城 WL-SS 系统物质流分析

污水系统的 C 主要出路是进入大气,其中 WL-SS 系统的大气排放量最多,占进入系统总量的 56%。在 T-S 系统中,约 23%的 C 以污泥形式排出系统,而在源分离的 SBR-SS 和 WL-SS 系统中,这个比例将下降到 15%和 7%。不论是传统系统还是源分离系统,三者排入水体中的 C 量相当,约占总量的 11%。在 T-S 系统中,22%的 C 最终进入沼气被回收利用,而在 SBR-SS 和 WL-SS 系统中,有相当量的 C 以肥料形式被回收利用。除此之外,还有少量的 C 跟随回用水返回到用户。与 C 不同,只有在 T-S 系统中,N 的主要迁移途径才是排入大气,占进入系统 N 总量的 63%;而在 SBR-SS 和 WL-SS 系统中,N 的主要迁移途径是进入肥料,此比例可达到 N 总量的 65%。在 WL-SS、SBR-SS 和 T-S 系统中,以污泥的

形式排出系统的 N 量依次增多,而进入水体的量则相当。与前两种物质不同,P 不以气体的形式排入大气,在 T-S 系统中,85%的 P 进入污泥,而在 WL-SS 和 SBR-SS 系统中,70%的 P 被回收进入肥料。比较三种系统,进入水体的 P 量相当。

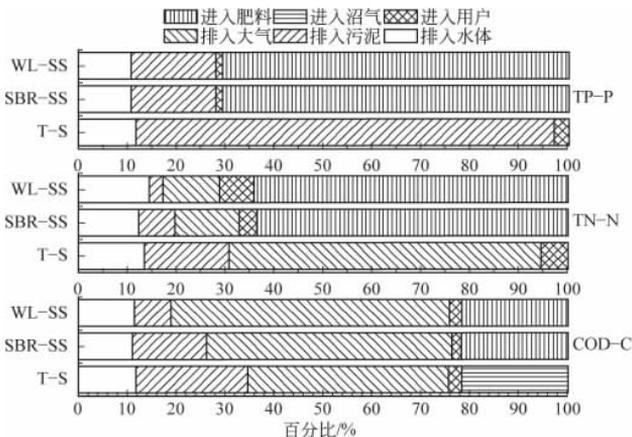


图9 大兴新城污水系统物质流分析的统计结果

分别统计三种污水系统的 SEI 和 SRR,如图 10。从 C 来看,三种系统向环境的排入量和回收量相当,三者差别不大。但从 N 和 P 来看,T~S 系统没有物质回收的能力,而 SBR-SS 系统和 WL-SS 系统则将进入系统 60%的 N 和 70%的 P 进行了回收,减少了排入环境中的 N 和 P 的量,既回收了资源,又减少了系统的环境影响。

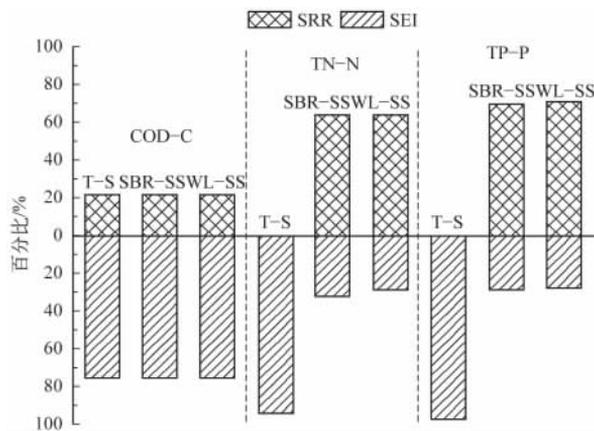


图10 三种系统物质回收能力与环境影响的比较

图 9 表明,对于三种系统来说,排入水体中的 C、N 和 P 差别不大。排入水体中的 C、N 和 P 是由污水处理子系统排入和未处理的污水直接排入两部分组成,如图 11 所示。从图中可以看出,进入大兴

新城水环境中的污染负荷主要由未处理的污水直排导致的,如果要进一步改善大兴新城的水环境质量,需要进一步提高该区域的污水处理率。如果只考虑城市污水处理子系统的排水,从图中可以看出,除了WL-SS系统的N排放量外,两种源分离系统的排放量均小于传统系统的排放量,有助于保障该区域的水环境质量。

综上所述,如果单从环境的角度考虑,可以认为源分离系统比传统系统具有优势,它更符合可持续性城市污水系统回收利用资源和保障城市水环境质量的要求。以上分析将为大兴新城地区城市水系统规划的模式选择提供决策依据。

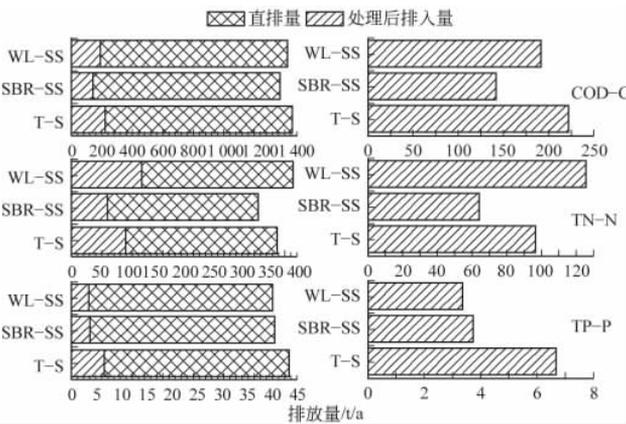


图 11 三种系统排入水体的 C、N 和 P 量

4 结论

(1) 运用物质流分析的方法,本文基于系统单元划分、单元物质流分析、单元组合与系统物质流分析及系统的资源环境影响分析四个步骤构建了具有一定普适性的模块化城市污水系统静态物质流分析模型。该模型可以定量地分析不同结构城市污水处理系统中 C、N 和 P 的迁移,并利用分析结果的统计,评价城市污水系统的资源环境影响。城市污水系统的物质流分析模型是可持续性城市水系统规划的必需工具,它能够城市水系统的规划提供必要的决策支持。

(2) 本文以大兴新城为研究区域,用该模型比较了 T-S 系统、SBR-SS 系统和 WL-SS 系统。结果表明,源分离系统可以回收进入系统中 60% 的 N 和 70% 的 P,使其以肥料的形式回用于农田,而传统系统则将该部分 N 和 P 分别以气体和污泥的形式排

出系统。比较系统排入城市水环境的 C、N 和 P,源分离系统的排放量较小。除此之外,通过物质流分析的结果可以发现,排入大兴新城水环境中的 C、N 和 P 主要来自于未处理的直排污水。为了保证区域的水环境质量,大兴新城的水系统规划应当进一步提高区域的污水处理率。

参考文献

- Dong X, Chen J, Zeng S, et al. Integrated assessment of urban drainage system under the framework of uncertainty analysis. *Water Science and Technology*, 2008, 57(8):1227~1234
- 李子夫, 金璠. 生活污水的分类收集与处理系统. *中国给水排水*, 2001, 17(1):64~65
- Malmqvist P A, Heinicke G, Karrman E, et al. Strategic planning of sustainable urban water management. London: IWA Publishing, 2006. 1~6
- Maurer M, Pronk W, Larsen T A. Treatment processes for source-separated urine. *Water research*, 2006, 40(17):3151~3166
- Frohlich A P, Pawlowski L, Bonhomme A, et al. EU demonstration project for separate discharge and treatment of urine, faeces and greywater, part I. *Water Science and Technology*, 2007, 56(5):239~249
- Bulter D, Memon F A. *Water demand management*. London: IWA Publishing, 2006. 62~79
- Otterpohl R. Option for alternative types of sewerage and treatment systems directed to improvement of the overall performance. *Water Science and Technology*, 2002, 45(3):149~158
- Otterpohl R, Abold A, Oldenburg M. Source control in urban sanitation and waste management: ten systems with reuse of resource. *Water Science and Technology*, 1999, 39(5):153~160
- Remy C, Ruhland A. Ecological assessment of alternative sanitation concepts with life cycle assessment. Berlin, Germany: Technical University Berlin, 2006. 55
- Eunomia research & consulting. *Managing biowastes from households in the UK: Applying life-cycle thinking in the framework of cost-benefit analysis*. Bristol, UK: Eunomia research & consulting, 2007, (5):24~45
- Jonsson H, Vinneras B. Adapting the proposed swedish default values for urine and faeces to other countries and regions. 2nd International Symposium on Ecological Sanitation, 2003, Lübeck, Germany

& 通讯处:100084 清华大学环境科学与工程系
E-mail:jchen1@mails.tsinghua.edu.cn
收稿日期:2010-07-15