

可持续城市水环境系统规划设计方法与工具研究

董欣 曾思育 陈吉宁

(清华大学, 北京 100084)

摘要 在明确可持续城市水环境系统概念特征的基础上,以最大化系统的可持续性为根本目标提出了系统规划设计原则,建立了以系统模式选择、空间布局优化与工程设计为核心步骤的三阶段规划方法,自主研发了规划新工具——基于多属性不确定性决策的系统模式筛选模型与基于空间多目标优化的系统布局优化模型。将所建立的方法与工具应用于某新城地区的水系统规划,为当地确定了系统建设模式与空间布局最优方案,并验证了研究成果从理念原则、方法工具、与现有规划体系衔接等多个层面满足当前城市水环境系统规划的需求。

关键词 可持续城市水环境系统 规划设计 模式选择 布局优化

DOI:10.13789/j.cnki.wwe1964.2015.0077

0 引言

城市水环境系统是城市重要的基础设施之一,是城市水污染控制与水环境整治的主要途径,由城市污水管网、污水处理厂、再生水厂、雨水源头处理设施、雨水末端处理设施等构成。近年来,快速的工业化城镇化进程带来了严峻的城市水危机和营养物质失衡问题,也给城市水环境系统的发展建设提出了新的要求。城市水环境系统开始从线性结构、集中布局、单一经济目标逐渐向环状结构、组团布局、多功能的可持续目标转变,以期获得更高的经济环境和资源综合效益。

然而,现有的系统规划在内容深度和方法工具支撑等方面还不能满足上述需求。首先,系统结构功能上应有的多样性和关联性在既有规划内容中不能得到全面响应,雨水源头管理、源分离等要素缺乏规划支撑,各要素间的统筹协调与整体优化严重缺失。其次,现有规划深度不能满足系统可持续性不断提高的要求,以经济性为单一目标的规划模式不能支持对技术、经济、环境、资源等多目标的综合优选,不能有效降低系统的外部性。最后,目前的方案布局设计方法难以应对系统空间布局的高维度与复杂性,城市水环境系统的资源环境性能具有很高的空间敏感性,规划过程必须基于空间连续的大规模采样及多目标优化才能保证其科学合理性。为此,本研究针对快速城镇化进程中系统结构功能、空间布局及决策目标演变的新趋势,提出了可持续城市

水环境系统规划设计的基本原则,并建立起相适应的规划方法与工工具,为系统规划设计提供技术支撑,进而推进可持续城市水环境系统规划理论的发展完善。

1 可持续城市水环境系统规划设计的基本原则

在“可持续发展”概念提出后的 20 余年里,城市水环境系统的可持续性得到了广泛关注^[1~3]。综合已有研究,可将可持续城市水环境系统定义为:满足城市发展需求、具有合理费用效益、能够保护城市生态环境并且保证资源在社会中公平分配的城市水环境系统。区别于以往对系统的认识,可持续城市水环境系统特别强调其整体性、开放性、动态性、复杂性与综合性^[4~8]。

基于可持续城市水环境系统的内涵与特征,提出规划设计时要遵循的几项基本原则:

(1) 对外部干扰最小化原则。作为城市二元水循环的耦合点,可持续城市水环境系统应当通过对系统结构与布局的调整,最小化城市对流域水量和水质的冲击,协调城市发展与城市水资源及水环境之间的关系,让自然水循环与社会水循环适当解耦,重建二元水循环的平衡关系。

(2) W-C-N 协同利用原则。对于连接和承载水(W)、碳(C)及营养物质(N)流动的水环境系统来说,在其规划设计的过程中,应选择和设计合理的系统组成与调控方式,改变水、碳与营养物质在城市中流动的规模、强度、时间特征与空间特征,实现三者

的协同利用,提高资源利用效率。

(3)经济、技术及行为模式解锁原则。城市水环境系统具有运行的长期性、投资的高沉淀性以及技术与行为的锁定性。在系统规划设计的过程中,应当关注用水技术进步、用水行为变化、社会结构变化及城市空间扩展等长期性问题,尽可能与经济、技术及行为模式解除锁定关系,以便应对外部环境扰动带来的风险,适应未来发展所面临的不确定性影响,使其对城市发展具有更持久的支持能力。

(4)综合效益最优原则。可持续城市水环境系统的构建不能以经济性为单一目标,还应考虑其环境保护能力、资源回收效益、技术可行性以及公众可接受程度等。可持续城市水环境系统的规划设计是在多项冲突或互补的目标之间进行持续协调的多目标决策过程,要以多项性能为规划目标来保证其可持续性,最终选择综合效益好的方案。

(5)多学科方法集成运用原则。系统复杂性使得现有基于经验情景的规划方法不适用于可持续系统的构建。近年来,多目标优化、空间 GIS 技术、高性能计算等相关学科技术手段不断发展,计算机能力快速提高,使得解决可持续城市水环境系统的复杂性问题成为可能。可持续城市水环境系统的规划设计过程必须集成多学科方法,以降低规划过程的经验性、盲目性,提高其科学性、合理性和适应性。

2 可持续城市水环境系统规划设计方法

基于可持续城市水环境系统的定义、特征及规划设计原则,建立了如图 1 所示的规划设计方法,包括问题识别、关键规划指标确定、系统三阶段规划及方案综合评估四部分^[8]。其中系统三阶段规划是整个规划方法的核心,它以系统的可持续性为目标,依次通过系统的模式选择、布局优化及工程设计三个阶段,逐级深入地形成规划方案,优化确定系统的结构、布局、规模、技术选择等关键属性。

(1)系统模式选择。系统模式是指系统的标准样式,是对其核心组成、基本结构的抽象表征,例如“分质排水—灰水回用—雨水利用”模式的系统有如下特征:水源由常规净水、雨水、以灰水为水源的再生水组成,用户按照水质水量的不同需求获得资源配给,对排水实行分质收集分别处理。面对系统结

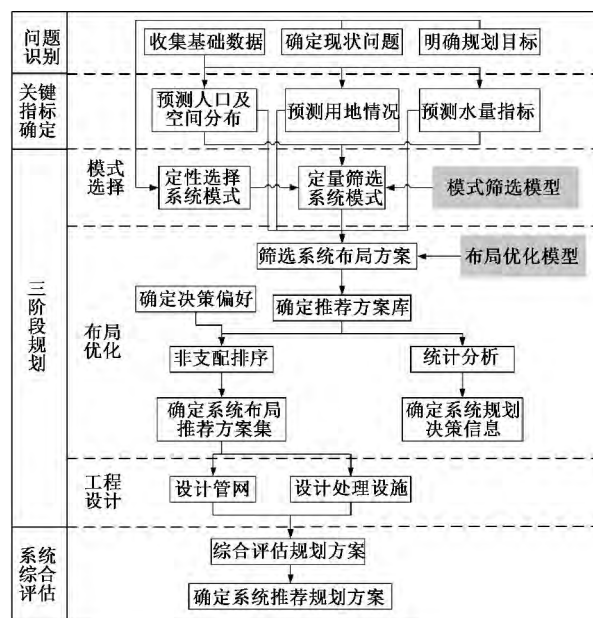


图 1 可持续城市水环境系统规划方法

构功能多样性导致的模式多样性,在模式选择阶段,可采用多属性决策方法筛选确定适宜的系统结构。该阶段完成宏观层面的系统设计,可与当前城市规划体系中的总体规划相呼应融合,尤其是在总规阶段提出明确的系统用地要求。

(2)系统布局优化。可持续城市水环境系统布局须考虑更多因素,例如污水是否分质排放、处理设施集中分散程度、再生水用户需求差异等,大大增加了潜在可行方案的数量以及设施用户之间空间拓扑关系的复杂性。布局设计阶段要对模式选择结果做进一步深化,把选出的系统结构按照空间多目标优化的要求布置在规划区内,确定系统的空间属性,包括:各子系统用户空间分布,各类设施的个数、位置、规模、与用户的连接关系和方式等。该阶段完成中观层次的系统设计,可与现有规划体系中的控制性详细规划对应。

(3)系统工程设计。工程设计阶段则可沿用现有专项规划的工作内容与方法,但其输入必须与布局设计阶段的输出保持一致,在布局优化基础上对系统方案做进一步细化,例如确定管网的具体铺设及管径、明确技术工艺流程、完成各单元构筑物的设计等。该阶段完成微观层次的系统设计,本质上是经由模式选择和布局优化阶段协调优化后的专项规划。

3 可持续城市水环境系统规划设计新工具

3.1 城市水环境系统模式筛选模型

城市水环境系统模式筛选模型(以下简称模式筛选模型)服务于系统规划的模式选择阶段。该模型以多属性决策框架为核心,在考虑规划不确定性和决策偏好的影响下,对所有可能的系统模式进行综合评估与比较,筛选出符合规划区域要求的、具有可持续性优势的系统模式,如图 2 所示。

属性指标体系构建遵循易于量化和具有普适性等基本原则,筛选系统模式的准则是系统可持续性的高低,属性指标体系涵盖系统的社会、环境、资源、技术及经济性能。属性指标的量化则是应用物质流分析、工程经济学、专家模糊判断、不确定性分析等方法,确定各指标的取值及其概率分布。模型采用线性加权算子对属性指标体系进行逐层递进集结。在同时考虑决策者对各项属性指标重要程度认识的主观性、各指标取值的变异程度以及指标间相互影响程度的情况下,采用主观与客观相结合的投影变换赋权方法确定指标权重^[9,10]。最终,模型通过集结算子将各指标及其相应权重进行集结,构建综合性能指数(P. I.)对系统模式的可持续性进行表征,指数值越高,表明系统模式的可持续性水平越好。

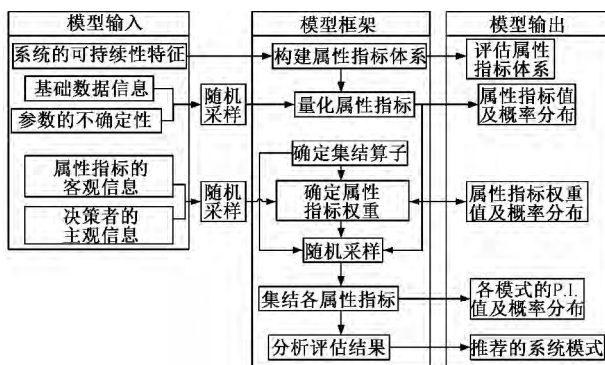


图 2 模式筛选模型的基本框架

模式筛选模型在量化属性指标时考虑了规划参数的不确定性,在确定属性指标权重时刻画了决策者偏好的不确定性,在集结属性指标时通过随机采样叠加两种不确定性,给出综合性能指数的期望值及其概率分布。这种基于不确定性分析的多属性决策方法优于传统的确定性决策方法,可提高模式筛选的可靠性与科学性,有效规避规划过程中的决策风险。

3.2 城市污水处理与再生利用系统布局规划模型

城市污水处理与再生利用系统布局规划模型(以下简称布局规划模型)服务于系统设计的布局优化阶段。该模型以空间多目标优化为核心,以优化系统的可持续性为目标,在考虑空间拓扑关系、水质水量要求、建设合理性等约束下,通过大规模采样、“图论—遗传”优化计算、统计比选的方式生成具有可持续性优势的系统空间布局方案,确定系统内处理设施的个数、位置、规模、所选用的技术及其与用户的连接关系和方式^[11]。

该模型的目标函数是同时最小化系统的寿命期成本、最小化系统的污染负荷排放量、最大化系统的资源回收能力。其中:寿命期成本包括处理设施、调节设施和输送设施的建设和运行维护成本;污染负荷排放量用综合了化学耗氧量、总氮、总磷与粪大肠杆菌排放量的污染总当量代表;考虑到数据可获得性,目前资源性能的优化目标仅考虑系统对水资源的回收能力^[11]。模型通过三类约束来反映污水处理与再生利用对子系统空间布局的要求,以保证布局规划方案的合理性与科学性。具体包括:保证系统自身与服务区域空间拓扑关系完整性的约束,保证系统服务区域内再生水用户水量水质需求的约束,以及保证系统建设合理性与可行性的约束。

布局规划模型具有众多的 0-1 决策变量、多个目标与多个约束,所求解的问题具有空间连续性与敏感性,是一个多目标、多约束下的空间非确定性多项式优化求解问题。本研究集成了随机采样、非支配遗传算法-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-II)^[12-14]、图论算法^[15-17]及非支配排序^[18,19],构建了求解算法,如图 3 所示。

4 案例研究

案例区域为某城市的卫星新城,目前建成区面积为 32.2 km²,总人口约 27.2 万人,大部分用地的属性为居住用地。根据规划,到 2020 年,案例区域的用地规模将扩展到 65 km²,人口增至 60 万,增加的用地以住宅用地和公共管理与公共服务用地为主。由于建成区域管网系统的老化和新建区域管网系统的不完善,现阶段整个区域的污水处理率只达到 66%,区域内主要河流的水质均为劣 V 类。与此同时,该区域经济的快速发展,用水量的急剧增加使

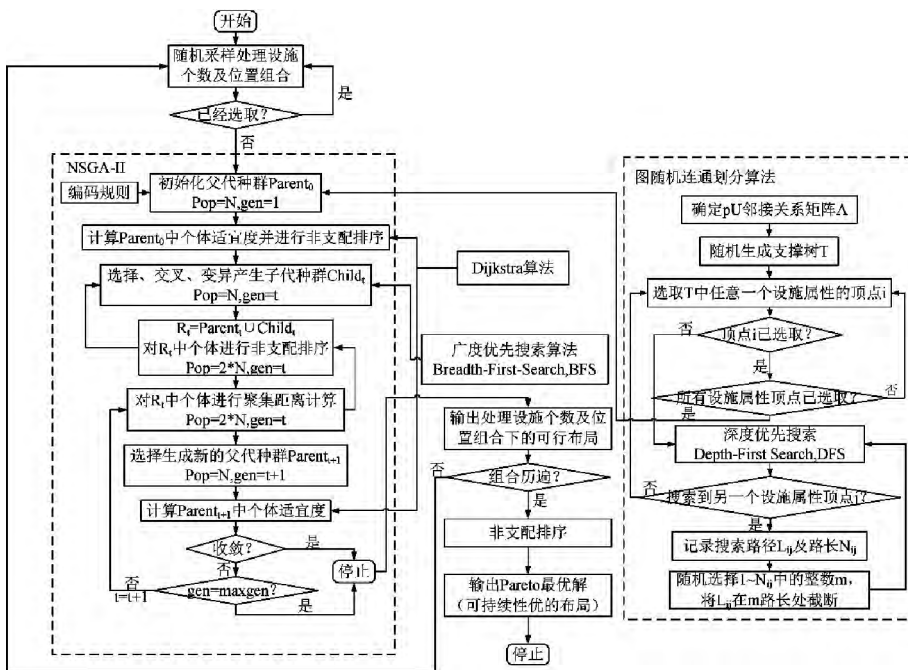
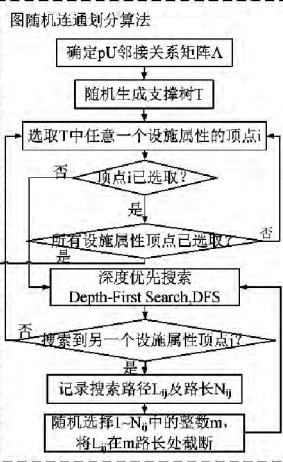


图3 布局优化模型算法结构



解区域所面临的资源危机为规划目标, 规划设计该区域的水环境系统。由于区域内采用分流制系统, 雨水单独输送排除, 所以规划设计污水系统是本研究的重点。结合实地的调研和对当地决策者的咨询, 研究选取了三种系统作为该区域的备选模式: 传统模式(T)、污水回用模式(TR)和源分离模式(SR), 如图4所示。

利用模式筛选模型, 研究计算了案例区域三种备选系统模式的综合性能指数 P. I., 对其进行了可持续性评估。从均值来看(图5a), T模式系统的 P. I. 值远小于 TR模式系统和 SR模式系统的 P. I. 值, 这表

明, 在研究区域建设 TR模式或 SR模式的污水系统更具有可持续性。比较 TR模式系统和 SR模式系统, 可以发现, SR模式系统 P. I. 值的均值要略大于 TR模式系统 P. I. 值的均值, 也就是说, 在综合考虑系统经济、环境和资源性能的前提下, 较 TR模式系统, SR模式系统具有一定的可持续性优势。从概率分布来看(图5b), TR模式系统 P. I. 值大于 T模式系统 P. I. 值的概率为 98.5%, SR模式系统 P. I. 值大于 T模式系统 P. I. 值的概率为 99.3%, SR模式系统 P. I. 值大于 TR模式系统 P. I. 值的概率为 66%。这表明, 在案例区域建设 TR模式和 SR模式的新型污水系统较建设 T模式的传统污水系统具有显著的可持续性优势, 置信概率可以达到 98%以上; 而对于 SR模式和 TR模式的系统来说, 只有 66%的置信概率建设 SR模式系统要优于建设 TR模式系统, 可见 SR模式系统的可持续性优势并不明显。考虑到 SR模式系统建设运行经验和相关管理制度缺乏的现状, 当地决策者最终决定在案例区域优先考虑规划建设 TR模式的污水系统。

对于筛选出的 TR模式污水系统, 研究利用布局规划模型对其空间布局进行优化。图6a给出了规划区域具有可持续性优势的 TR模式污水系统空

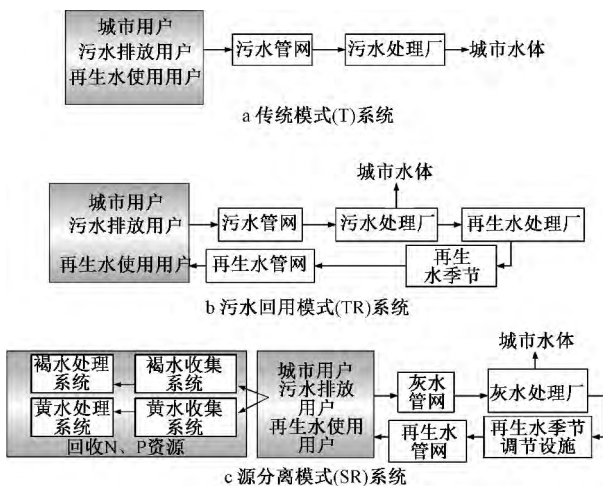


图4 案例区域污水系统备选模式

得该区域供水的主要水源——地下水水位逐年下降, 本地水资源的匮乏与快速增长的需水量之间形成了越来越严峻的供需矛盾。为了缓解上述环境与资源的压力, 该区域规划中要求到 2020 年区域内的污水处理率达到 100%, 再生水利用率达到 50%。

根据案例区域的要求, 研究以保证区域内污水的正常收集和处理, 缓解区域所面临的设施危机; 改善区域内地表水水环境质量, 缓解区域所面临的环境危机; 再生利用污水, 减少新鲜水资源的开采, 缓

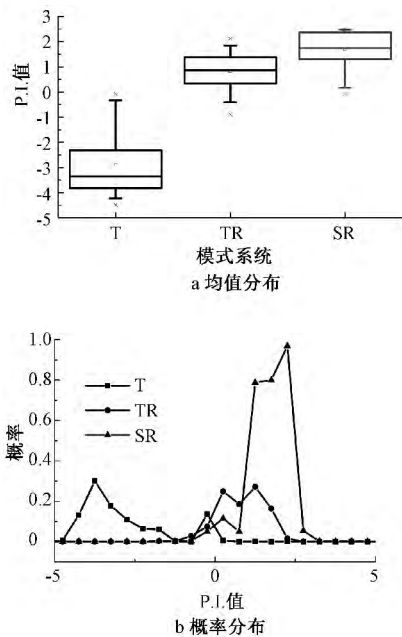
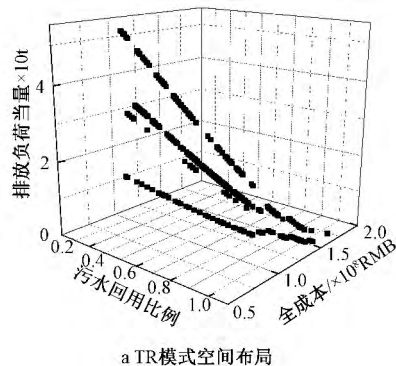
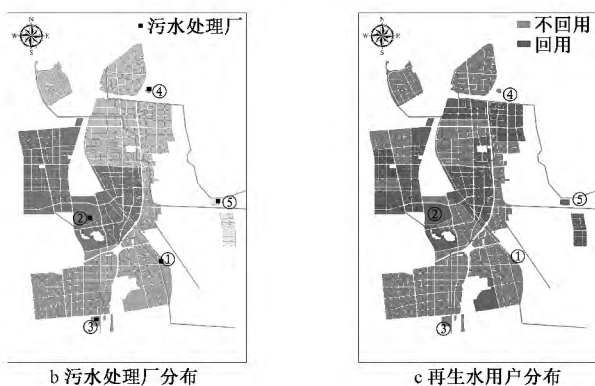


图5 三种备选系统模式的可持续性评估结果



a TR模式空间布局



b 污水处理厂分布

c 再生水用户分布

图6 优化布局结果

间布局 Pareto 最优解集。图中的每个点是 TR 模式污水系统在案例区域的一种空间布局,其包含的空间信息包括系统内污水和再生水处理设施的个

数、位置、规模及服务范围等。图中 3 个坐标轴分别是布局规划模型的 3 个目标函数,分布描述了系统布局的环境性能——污染负荷排放量、经济性能——寿命期全成本和资源性能——水资源回收能力。

案例区域要求,到 2020 年,污水回用比例要达到 50%,在满足此水资源回收需求的基础上,经济成本越低越好。根据当地需求,可以在图 6a 具有可持续性优势的 TR 模式污水系统空间布局 Pareto 最优解集中选取案例区域的推荐方案,如图 6b 和图 6c 所示。从图 6b 可以看出,案例区域的推荐方案中建设 5 座污水及再生水处理厂,5 座污水处理厂收集污水的范围如图所示。图 6c 则给出了案例区域再生水用户的空间分布。

对于推荐的系统空间布局方案,系统的工程设计阶段将对其进行细化,例如,敷设管网,设计污水处理厂等,该部分工作与现有专项规划工作相同,在本文中不再对其在案例区域中的应用进行赘述。

5 结论

研究以多属性决策方法、多目标优化、空间分析、不确定性分析、综合评估等为核心方法,在解析可持续城市水环境系统内涵与特征的基础上,建立了系统规划原则,提出了以系统模式选择、系统布局优化与系统工程设计为核心步骤的三阶段规划方法,并开发了支撑规划的新工具——系统模式筛选模型与城市污水处理与再生利用系统布局规划模型。所建立的城市水环境系统规划设计方法及工具能够与现有城市规划体系协调相容,并且将系统传统的情景枚举、评估的规划方法转变为方案大规模采样计算、寻找全局最优的方法,规避了系统规划设计过程中获得不可持续方案的风险。

利用建立的方法与工具,为某新城地区开展了可持续污水系统的规划设计,为该地区确定了系统建设模式、空间布局及工程方案,规划研究成果已在当地实施。实践表明,所建立的方法与工具能够满足城镇化进程下可持续水环境系统规划需求,具有可行性、可操作性与功效性。此外,本次应用还具有典型性和可推广性,为我国快速城镇化下新兴区域的水环境系统规划设计提供了范例。

龙游县污水处理厂二期改扩建工程设计

赵胤

(上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要 龙游县污水处理厂一期工程采用 CAST 工艺,二期扩建工程采用分点进水倒置 A²/O 工艺,在充分利用一期原有设施的基础上,对原有 CAST 工艺进行了优化,同时新增了反硝化深床滤池作为深度处理工艺。介绍了改扩建工程的处理工艺和设计参数,并对工程设计中需要考虑的问题进行分析,总结了工程特点。

关键词 污水处理厂 提标改造 CAST 分点进水倒置 A²/O 后置反硝化滤池

DOI:10.13789/j.cnki.wwe1964.2015.0078

龙游县污水处理厂位于浙江省龙游县七都村以北、衢江南岸,一期工程于 2007 年建成投产,规模 2 万 m³/d,污水处理采用 CAST 工艺,设计出水标准执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 B 标准,出水排至衢江。

一方面,随着龙游县经济的快速发展及污水管网的不断完善,污水量逐渐增大,现有的污水设施已满足不了处理需要,龙游污水处理厂必须进行二期扩建;另一方面,根据 2011 年浙江省政府印发“清洁水源行动方案”,太湖流域、钱塘江流域城镇污水处理设施执行一级 A 标准^[1],现有一期工程必须进行提标改造,以满足新的排放标准一级 A 要求。龙游县污水处理厂二期改扩建工程的实施势在必行。

1 污水处理厂现状及改造要求

1.1 水量及水质基本情况

龙游污水处理厂一期工程设计规模 2 万 m³/d,目前污水处理最大水量达到了 2.2 万 m³/d,污水处

表 1 一期工程现状进出水水质

日期	COD /mg/L	BOD ₅ /mg/L	SS /mg/L	NH ₃ -N /mg/L	TN /mg/L	TP /mg/L
设计进水	330	140	170	30	40	3.5
设计出水	60	20	20	8(15)	20	1
月均进水	198	72	72	16.2	23	2.3
月均出水	39	5	11	5	16	0.5

注:括号内数值为水温 ≤12℃ 时的控制指标,括号外为水温 ≥12℃ 时的控制指标。

理厂已满负荷运行。一期工程的设计进出水水质和实际进出水水质见表 1。

从表 1 看出,龙游污水处理厂的实际进水水质远低于设计值,仅为设计水质的 50% 左右。在此情况下,出水水质达到了原设计标准的要求,但与一级 A 标准略有差距。

进一步针对 2009 年 1 月~2012 年 8 月实际出水数据分析表明,尽管月平均出水 NH₃-N 和 TP 分别为 5 mg/L 和 0.5 mg/L,但不稳定,尤其是 NH₃-N 和 TP 在冬季有超标情况出现。

参考文献

- 邵益生. 城市水系统控制与规划原理. 城市规划, 2004, 2(1): 62~67
- 魏智勇. 环境与可持续发展. 北京: 中国环境科学出版社, 2007. 13~18
- 张杰, 李冬. 城市水系统健康循环理论与方略. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(6): 849~854
- 夏绍玮. 系统工程概论. 北京: 清华大学出版社, 1995. 45~165
- 魏宏森, 曾国屏. 系统论: 系统科学哲学. 北京: 清华大学出版社, 1995. 232~340
- Anderson J, Iyaduri R. Integrated urban water planning: big picture planning is good for the wallet and the environment. Water Science and Technology, 2003, 47(7-8): 19~23
- Bulter D, Davies J W. Urban drainage (2nd edition). New York: Spon Press, 2006. 332~355
- 董欣. 可持续城市污水处理系统规划方法研究及工具开发. [学位论文]. 北京: 清华大学, 2009
- Triantaphyllou E. Multi-criteria decision making methods: a comparative study. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000. 73~85

✉ E-mail: dongxin@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2013-11-15

修回日期: 2014-12-02