

进一步改善城市网-厂-水体污水系统升级改造-和运行效率的四点看法

Cao, Yeshe; Kroiss, H.; van Loosdrecht, Mark C.M.; Daigger, Glen T.

DOI

[10.13789/j.cnki.wwe1964.2023.09.22.0006](https://doi.org/10.13789/j.cnki.wwe1964.2023.09.22.0006)

Publication date

2024

Document Version

Final published version

Published in

Jishui Paishui: Water & Wastewater Engineering

Citation (APA)

Cao, Y., Kroiss, H., van Loosdrecht, M. C. M., & Daigger, G. T. (2024). 进一步改善城市网-厂-水体污水系统升级改造-和运行效率的四点看法. *Jishui Paishui: Water & Wastewater Engineering*, 50(4), 137-144.
<https://doi.org/10.13789/j.cnki.wwe1964.2023.09.22.0006>

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Green Open Access added to TU Delft Institutional Repository

'You share, we take care!' - Taverne project

<https://www.openaccess.nl/en/you-share-we-take-care>

Otherwise as indicated in the copyright section: the publisher is the copyright holder of this work and the author uses the Dutch legislation to make this work public.

· 给排水管网 ·

进一步改善城市网-厂-水体污水系统升级改造和运行效率的四点看法

曹业始¹ KROISS H² VAN LOOSDRECHT M³ DAIGGER G T⁴

(1 中持新概念环境发展宜兴有限公司,宜兴 214213;2 维也纳工业大学水质和资源管理研究所,维也纳 1040,奥地利;
3 代尔夫特理工大学生物技术系,代尔夫特 2629 HZ,荷兰;4 密歇根大学土木和环境工程系,密歇根州 48109,美国)

摘要:2022 年,《深入打好城市黑臭水体治理攻坚战实施方案》发布,要求努力解决河流雨后黑臭和雨季河流断面水质下降问题,力争到 2025 年,进水 BOD 浓度高于 100 毫克/升的城市生活污水处理厂规模占比达 90%以上,城市生活污水集中收集率达到 70%以上。水行业正面临着防止雨后河流返黑和改善雨季河流水质等新任务。因此,结合近年来成绩、实践和欧美的经验教训,提出和讨论了与进一步改善网-厂-水体城市污水系统升级改造及运行效率相关的四个问题:分流制管网有没有外(雨)水入侵和溢流、污水处理厂的进水浓度应多高、为什么部分污水处理厂需局部扩容、为什么污水管道中流速低于自净流速,并在此基础上,对相关工作提出了建议。

关键词:城市污水系统;污水管网;外水入侵,雨水;溢流;污水浓度;污水处理厂扩容;水环境容量

中图分类号:TU992 文献标识码:A 文章编号:1002—8471(2024)04—0137—08
DOI:10.13789/j.cnki.wwel1964.2023.09.22.0006

引用本文:曹业始,KROISS H,VAN LOOSDRECHT M,等.进一步改善城市网-厂-水体污水系统升级改造和运行效率的四点看法[J].给水排水,2024,50(4):137-144.CAO Y S,KROISS H,LOOSDRECHT M V,et al. The four issues relating to improve the efficiency of up-grading and operation of urban sewage systems in China[J]. Water & Wastewater Engineering,2024,50(4):137-144.

The four issues relating to improve the efficiency of up-grading and operation of urban sewage systems in China

CAO Yesi¹, KROISS H², VAN LOOSDRECHT M³, DAIGGER G T⁴

(1. CSD New Conceptual Environmental Development Yixing Ltd, Yixing 214213, China;
2. Vienna University of Technology, The Institute of Water Quality and Resource Management, Vienna 1040, Austria; 3. Delft University of Technology, Biological Technology Department, Delft 2029, The Netherlands; 4. The University of Michigan, Civil and Environment Engineering Department, Michigan 48109, USA)

Abstract: Combining the practices and experiences learned in the recent years in China and the relevant international practices this paper raises and discusses the four topics, which are related to improve the efficiencies of urban sewage systems up-grading and operation in China, including: extraneous water intrusion and overflow of separate sewer system, sewage concentration, the necessity to expand sewage treatment capacity, self-clean flow velocity in sewers. A summary and some



suggestions are presented at the end of the paper.

Keywords: Urban sewage system; Sewage network; Extraneous water; Rainwater; Overflow; Sewage concentration; Expansion of wastewater treatment capacity; Urban aquatic environment

自《城镇污水处理提质增效三年行动方案》发布^[1]以来,各地为改善城市污水系统(污水收集-污水处理厂-接收水体)投入了很多的人力和财政资源,城市污水系统和水环境得到了显著的改善:相当多城市污水管网泄漏得到控制,污水处理厂进水浓度得到了提高,消除了 98% 的黑臭水体。2022 年住房和城乡建设部等部委发布了《深入打好城市黑臭水体治理攻坚战实施方案》,要求在现有工作的基础上,努力解决河流雨后黑臭和雨季河流断面水质下降问题,力争到 2025 年,进水 BOD 浓度高于 100 毫克/升的城市生活污水处理厂规模占比达 90% 以上,城市生活污水集中收集率达到 70% 以上^[2]。新挑战要求水行业进一步融合网-厂-水体为一体改善城市水环境^[3]。由此,本文回顾了前几年的成绩和实践并结合欧美一些国家走过的历程,提出和讨论了四个与进一步改善城市污水系统升级改造和运行效率相关的问题。

1 分流制管网有没有外(雨)水入侵和溢流问题

与合流制管网相比,分流制管网显著减少了雨水入侵量,提高了污水处理厂的运行效率,减少了管网溢流和由于溢流引起的对河流的污染。因此,自 20 世纪 80 年代始,不少西欧国家进行了管网升级改造,加上新建的分流制管网,现在分流制的管网已多于合流制管网^[4]。国内近几年来各地也进行了大量的雨污分流工作,且收效显著。尽管如此,一个基本事实是:分流制污水管网仍不可避免地有人渗、入流的外水,包括雨水(径流)入侵。后者经泵站、观察井人孔和观察井盖、墙连接破损处等流入管网。国内外均有不少这方面的报告。如芬兰约 95% 的污水管网为分流系统,68 家污水处理厂 2016 年进水年均外来水占比(管网中外来水量对管网中污水量的比率)为 40.8%^[5]。国内长三角某市老城区分流制管网旱季和雨季外来水占比(管网中外来水量对管网中污水量的比率)分别为 22% 和 43%^[6],意味着雨季时,管网中的外来水量接近收集的原污水量,稀释倍数(管网中污水量对收集原

污水量倍数^[7-8])接近 2;大雨时,外来水占比高达 74%^[9],即管网中污水由三份外来水与一份原污水组成,稀释倍数接近 4。即使世界上管理优秀的分流制管网,如德国北部分流制管网和新加坡深隧污水系统(DTSS),年均外水占比仅 10%~20%^[10-11],后者污水处理厂每年雨季进水流量仍有二次超过 1.5 倍的设计流量^[11]。

设计规范规定分流制管网和污水处理厂流量设计必须包括原污水和外来水,后者包括入侵雨水径流。2021 年版中国国家标准规定,分流制管网流量设计须包括原污水、地下入渗水和雨水^[12]。德国分流制系统设计规范流量含两项:① $Q_{Dw, h, MAX}$,旱季最大每小时流量,包括渗透和入流水;② $Q_{R, Sepc, max}$ ，“不可避免的径流流入量”，为由降水而产生的入侵管网外水，并指出一些分流制管网外来径流量甚至大于旱季污水量^[13]。比利时设计规范规定分流制系统的流量为旱季流量两倍^[14]。美国设计规范规定服务区内人口多于 10 万污水处理厂的最大小时流量为年平均设计值流量两倍^[15]。

合流制管网溢流定义为污水系统排放未经处理的污水。与合流制管网相似,分流制管网也有溢流问题(Separate sewers overflow, SSO)^[16]。溢流比(溢流污染物质量对管网收集污染物质量比率)与污水集中收集率直接相关(溢流比=1-污水集中收集率)^[17],是分流制城市污水系统性能的关键指标之一^[16]。美国分流制系统 2001 年至少发生 4 万次的溢流^[18]。美国土木工程协会(ACSE)和美国环境保护署(USEPA)按原因将分流制系统溢流归结为由四种溢流,其中一项缘自于处理能力不够^[16]。美国 EPA 出版了减少分流制管网溢流的指南和工具书^[19-20]。欧盟“评估城市管网系统外水入侵和溢出项目”(Assessing infiltration and exfiltration on the performance of urban sewer systems, APUSS)包括了分流制管网系统^[17]。

经过各地这几年大量的雨污分流工作,国内现有 >80% 的污水管网可归类为分流制管网^[21]。但



由于历史的原因,这部分管网仍存在不同程度部分(如旧城区和小区,初雨截流)合流、部分分流二种管网共存和雨污混接局面^[22]。因此,严格地说,当前主要污水(排水)管网体制为不完全分流制系统。欧洲管网改造也经历过同样的过程,荷兰是典型之一^[23]。与真正分流式管网相比(如新加坡深隧污水管网),这些不完全分流制管网(下称分流制管网或管网)存在着较多外水(包括雨水)入侵、雨污混接处和程度不同的溢流^[22-23]。

为控制和减少溢流污染、保护接受水体水质,美国和欧洲都制定和实行了溢流排放标准,溢流比是其中之一^[24,4]。污清比常用来表示污水处理厂处理能力,其定义为污水处理厂处理污水量对污水处理厂服务区管网收集原污水(对应的售水量)之比^[10-15]。该参数值和污水稀释倍数决定了污水系统溢流比的大小(图 1)^[25]。对于一定量的原污水,管网状态越差、即污水稀释倍数越大,控制溢流所需的污水处理厂污清比越大;而管网状态越好、污水稀释倍数越小,控制溢流所需的污水处理厂污清比越小。西欧一些国家如德国、荷兰和丹麦的污水处理厂的(实际)污清比在 2~3 之间^[26-28],一些合流制系统污水处理厂污清比甚至大于 3(图 1 中绿色区)^[10]。国内众多污水处理厂污清比往往在 0.8~1.2 之间^[29],相比西欧国家低不少,导致较高溢流比(图 1 中黄色区)^[25]。当污清比为 1.2,污水处理厂进水 COD 浓度为 250 mg/L,人均日综合用水量 230 L/(人·d),稀释倍数为 2 时,溢流比高达约 40%,意味管网收集到的原污水中约 40%污染物在没经过处理的情况下排放到接受水体(图 1)^[25,30]。这些溢流污水或通过事先安排的出口(如污水处理厂厂前溢流)、雨污混接处或“自寻出路”流出管网,后者可能是部分管网修复后仍处在满管流、管壁承受过量压力从而导致修了再破、修复效果较差的原因之一。

2 污水处理厂的进水浓度应为多高

借助于雨污分流和管网修复,许多城市污水处理厂进水浓度得到了提高。作为典型案例,深圳市茅洲河流域 2 座污水处理厂进水 BOD₅ 浓度由 2018 年的 45.1~61.5 mg/L 提高至 2020 年的 113.8~132.3 mg/L,增幅达约 70 mg BOD₅/

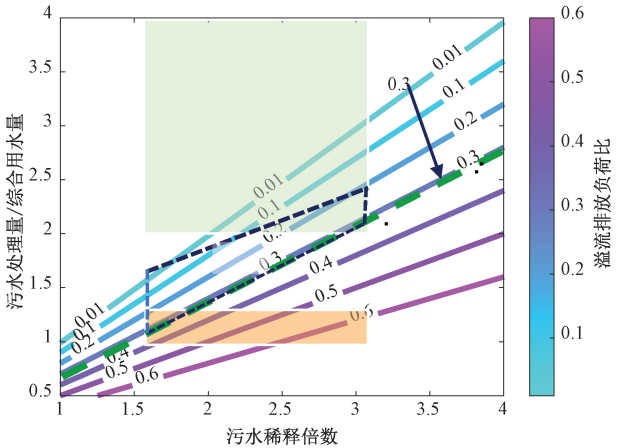


图 1 污水处理厂处理能力(污清比)、污水稀释倍数和溢流比的关系
Fig. 1 The relationships among the treatment capacity of wastewater plant, sewerage dilution factor and overflow load ratio

L^[31]。当下,很多城市都面临着进一步提高所在地污水处理厂进水浓度的问题。对此,弄清造成国内污水处理厂进水浓度与西欧一些国家污水处理厂进水浓度差别因素或有所裨益。表 1 中相关参数值参考了国内和若干西欧国家污水系统均值^[4],计算可参见文献^[25]。显然,造成国内污水浓度低于西欧一些国家污水浓度可归结于三个主要原因:①高用水量(约西欧国家的 1.5 倍);②较低管网覆盖率(约西欧国家的 80%);③较多污水管网外来水。因此,管网外来水(管网状态)不是造成国内污水低浓度的唯一因素。国内和部分西欧一些国家的实际 COD 浓度/最大 COD 浓度相近,意味着某种程度上二者表观管网外水占比(污水稀释倍数)范围相近。但应该看到,由于国内人均日综合用水量高,在相同的外水占比(污水稀释倍数)下,国内管网入侵外水量绝对值较西欧国家高;此外,国内不少管网处在满管运行状态,管网潜在(非满管运行状态下)外水入侵量可能高于报告值,所以,国内城市污水管网外水占比(污水稀释倍数)还是高于西欧国家污水管网,污水管网改造更新任务仍很繁重,需大量和长期投入。就进一步提高浓度而言,提高用水效率、减少用水量作用显著,特别对用水量较大的城市[如人均日综合用水量 250~300 L/(人·d)],但涉及到节水设备的广泛使用和生活习惯的改变,所需时间较为长久;增加管网复盖率提高浓度所需时间较短,任何时间都应重视及实施。管网修复耗

资较大且耗时较长。因此,须结合当地情况,分析形成现有污水浓度的因素,评估管网修复、增加管网复盖率和提高用水效率、或各方法混而用之的各种方案可取得的污水处理厂进水浓度范围及所需的投资和时间,在此基础上,制定提高污水处理厂进水浓度规划。

表 1 中国和部分西欧一些国家城市污水浓度及相关参数

Tab. 1 The sewage concentrations and relevant parameters in China and some countries in west Europe

国家	人日 COD 排放量(PL)/ [g·(人·d) ⁻¹]	人均日综合用水量(SCWC)/ [L·(人·d) ⁻¹]	管网复盖率, X/%	COD 浓度/ (mg·L ⁻¹)		实际 COD 浓度/最大 COD 浓度/ %
				最高浓 度*	实际 浓度	
中国	120	220	80	545** / 436***	270	64
西欧	120	150	100	800	500	62

注:* 最高浓度(管网入侵外水可忽略时污水 COD 浓度) = (PL · x)/SCWC;** 按照 100% 管网复盖率;*** 按照 80% 管网复盖率。

以 2022 年住房和城乡建设部等部委文件中污水处理厂进水 BOD₅ 浓度 100 mg/L (相当于 200~250 mg COD/L) 作为现阶段管网状态指标值,对那些污水处理厂进水 BOD₅ 浓度<100 mg/L (或旱季已满管运行,旱、雨季污水浓度变化不大)的城市污水系统,需制定系统化整治方案,明确管网排查改造、清污分流、工业废水和工程疏干排水清退^[2]。需继续集中投入更多的资源进行管网修复,进一步挤外水,提高污水浓度;那些污水处理厂进水 BOD₅ 浓度 >100 mg/L 污水系统,需着手制定中长期污水管网系统更新改造规划,配备充分的财政和人力资源,按计划实施管网日常维修及部分管网重点修复(包括更换)。国内外实践表明,市政污水管网系统更新改造是一项需长期投入的工作^[32-33]。

随着注意力从管网修复转向河流水质保护,或二者并重,市政和水务部门面临着投资方向和修复策略的选择:是集中于管网的修复,还是下游污水处理厂或调蓄池的改造、或上述方案的组合^[17],西欧在这方面一些经历或可供参考。丹麦早期管网泄漏严重,某些地区污水处理厂收到的污水量甚至高达对应服务区内售卖水量 4~5 倍,为了防止溢流污染河流(和地下水),同时催生管网修复的动力,除充许的溢流外,污水处理厂必须处理售卖水量 4~5 倍的污水^[34]。当污水处理厂进水浓度已达一

定水平,投资应着重放在减少溢流负荷以改善接受水体水质,尽管通过管网修复减少外水提高污水处理厂运行效率的空间仍然存在^[17, 32]。

3 为什么部分污水处理厂需扩容

污染物负荷(而不是污染物浓度)是控制河流水质的关键参数之一。陆地向河流(地表水)排放的污染物来源包括:地面径流、管网溢流和污水处理厂出流。正常情况下,大部分径流通过合流制系统的溢流(CSO)或分流制系统的雨水管网(和调蓄池)排入水体。污水处理厂污水集中收集率越高,处理的污染物负荷越大,所需调蓄体积越小,溢流比越少,反之亦然。当管网外来水量被低估,污水处理厂设计污清比偏低,污水处理厂或可应对旱季污水处理需求^[35],但不足以应对雨季条件下管网内污水,缺乏雨季污染控制能力。管网溢流、特别在雨季,成为国内一些城市包括几个特大城市(其污水处理厂进水 BOD₅ 浓度已较 100 mg/L 高出不少)较常见现象^[3, 22, 27, 36],甚至成为接收水体污染物负荷的主要组成部分^[36]。此外,在一些城市,尽管污水处理厂执行严格排放标准,但受限于偏低污水处理厂处理能力,溢流(CSO 或 SSO)负荷仍大大超过污水处理厂出流负荷^[4],这是现今城市污水系统设计和规划中须加以重视并避免的一个问题。

如图 1 所示,当污水处理厂进水 COD 浓度为 250 mg/L,稀释倍数为 2,污清比为 1.2 时,溢流比高达约 40%^[25],意味有可能污水处理厂进口浓度已达到住房和城乡建设部等部委要求,但污水处理厂污水集中收集率不一定能同时也达到要求(>70%)^[2]。但若将污水处理厂污清比从现在 1.2 提高到 1.5,溢流比将从现在的 40%减少到约 30%。图 2 来自长江流域某城区分流制管网污水系统的研究结果。在人均日综合用水量 230 L/(人·d)、年均污水处理厂进水 COD 320 mg/L (其中旱季 355 mg/L,雨季 271 mg/L)、年均稀释倍数 1.6 (其中旱季 1.3,雨季 2.0),污水处理厂污清比 1.3 的条件下,年均溢流比约 25%。雨季溢流频繁,邻近河流的水质断面测出污染物浓度上升。

两种途径常用于减少污水系统溢流比:①修复管网,减少入侵外水和溢流污水,增加进水浓度,在现有污水处理厂水力负荷条件下增加污染物去除

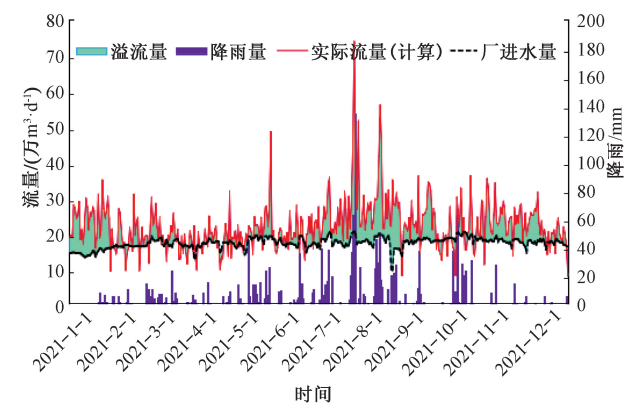


图 2 长江流域某城区污水系统污水处理、溢流和降水量

Fig. 2 The quantities of wastewater treatment, overflow, and precipitation in a downtown area in Yangtze River

负荷;②扩大现有污水处理厂处理能力,在现有进水浓度水平下提高污染物去除负荷。以上述长江流域某城区污水系统为例^[11],考虑接收水体水质敏感性和环境容量限制,重新设定溢流比控制目标约 10%,意味着较现处理负荷量外,须去除另外约 20%的污染物负荷。按方案①管网修复后,污水进水年均 COD 浓度须从目前 320 mg/L 提高到约 390 mg/L,处理水量基本不变;按方案②污水处理厂处理水量提高约 20% (相当于污清比从现在的 1.3 提高到 1.6),污水处理厂进水浓度基本不变。就财政投入而言,方案 1 的费用可能为方案 2 的数倍甚至更多^[37, 32],且耗时长且效果具不确定性 (COD 浓度的增加可能达不到 70 mg/L)。

为了减少溢流,一些城市已采用调蓄加沉淀处理溢流(包括初雨或截流)污水,这是很有意义的一步。但应注意:污水处理厂需具备处理雨后从调蓄池输送到污水处理厂污水的能力;调蓄池建造耗费不菲;沉降可去除固体(SS)和磷,但除氮效率甚低,而后者是河流断面水质监测指标参数之一。与保持现有污水处理厂处理量不变条件下采用调蓄沉降相比,对现有的污水处理厂进行局部水力扩容后污水处理厂具备处理雨后从调蓄池输送到污水处理厂污水能力,减少待处理的溢流水量和调蓄体积,而污水处理厂高效除氮和生物转化可减少 2~3 倍氮和固体溢流排放负荷。

下面介绍的实例有助于思考国内相对应的情況。苏黎世合流制污水系统经过近 20 年改造,年均

污水稀释倍数为 2 (人均日综合用水量 160 L/(人·d),原污水量和外水量接近),Werthölzli 污水处理厂年均进水 COD 浓度约为 400 mg/L,实际年均污清比约为 2,设计污清比为 3,借助在线控制调蓄池作用,年均溢流比<3% (2020 年)^[38-39]。新加坡分流制深隧道污水系统(DTSS)污水处理厂年均进水 COD 浓度约为 540 mg/L,污水稀释倍数约为 1.1,以每年一次溢流作为控制目标,污水处理厂设计污清比为 2.0 (2022)^[11]。

根据国内污水浓度和污水系统运行现状及定量模拟,在污水稀释倍数区间 1.5~3.0,污清比 1.6~2.2 之间条件下,溢流比能控制在<30% (图 1 中虚线区)^[25],满足住房和城乡建设部等部委提出的集中收集率>70%的要求^[2]。由此建议:为了减少溢流、增加污水处理厂污水集中收集率,在位于河流水质敏感且管网修复已初见成效(污水处理厂进水 BOD₅ 浓度>100 mg/L)的流域内的部分污水处理厂可按 1.6~2.2 之间污清比进行扩容,低污清比对应污水处理厂高进水 COD 浓度(低稀释倍数),高污清比对应污水处理厂低进水 COD 浓度(高稀释倍数)。当然,应该强调的是,在污水处理厂扩容同时,仍应进行管网的维修、修复、甚至部分重建。

由于国内较普遍低浓度污水和污水处理厂长泥龄生物处理单元,现有大部分污水处理厂的生物处理单元运行负荷低于设计值,因而具备处理额外负荷的能力。因此,在很多场合,扩容主要是那些由水力负荷大小决定的单元,比如二沉池或格栅等,相对而言,扩容所需投资和时间较少。扩容后增加污水可经污水处理厂全过程处理,如苏黎世 Werthölzli 污水处理厂^[38, 4],或部分进水经污水处理厂全过程处理、部分进水经沉淀后排放。因此,在一般情况下,上述扩容应为现有污水处理厂原位局部水力扩容。当然,污水处理厂扩容,同时也涉及到管道输送能力,包括泵站和调蓄体积等的评估^[16]。

4 为什么污水管道中流速低于自净流速

管网内污水流速不低于自净流速(0.6~0.9 m/s)^[12, 15]是管网运行效率的重要指标和基本要求^[20]。当污水在污水管里的流速低于自净流速时,相当大部分固体会沉积在管网底部,导致:①降低



管网污水输送效率;②降低了下游污水处理厂的运行效率;③管网底层厌氧环境产生甲烷和硫化氢,前者导致温室气体排放,后者引起管网腐蚀。

管网低流速导致固体在污水管道沉积是国内较常见现象,也是造成雨后河流返黑的原因之一。污水管网系统甲烷排放量很可能高于常见报告值。此外,导致国内很多的城市污水固体和固体 COD 浓度显著低于正常值,大幅度降低了污水处理厂效率,增加了运营成本^[40]。所以有人称“宁要质量较差但高流速管网,不要质量好流速慢的管网”。

鉴于国内城市污水系统的情况,除了造成固体污水管网沉积一般因素之外,另有两个应被强调的额外因素:①管网内实际污水量高于下游污水处理厂设计处理能力,即使在稀释倍数 1.3~1.5 的旱季天气条件下,设计留下管网上部空间(对应于直径的 25%~45% 体积)^[12]也轻易地被充满,在雨季天气条件下,伴随着污水溢流(外渗),污水憋在管网中的满管流几乎难免,导致管内流速低于原设计的自净流速;②泵站内污水水面高于进水管顶部,导致管网设计坡度失去控制流速的功能,进一步降低了管网中流速。在这样条件下,即使经管网修复减少了外来水,低流速亦无可避免。实际上,现有标准明确规定:“雨水泵站和合流污水泵站集水池的设计最高水位宜与进水管管顶相平。污水泵站集水池的设计最高水位应按进水管充满度计算”^[12]。担心造成路面塌陷或减少泵电力消耗等可能是规范执行不力的原因。此外,根据部分城市现行的污水处理付费规则,污水处理厂运营商须承担处理额外污水量的费用,由此,部分污水处理厂运营商担心非满管状态运行将提高外水入侵量,降低污水浓度,增加运营成本和影响污水处理厂运行和达标排放。因此,有必要尽快开始有针对性工程实验,建立同时管理管网和污水处理厂运营的机构,并修改现有的污水处理收费制度。

5 总结

除了渗透和入流外水,城市分流制管网仍有雨季的入侵径流。分流制污水系统的流量设计应基于原污水、入渗、入流和降雨入侵管网径流。近年来大规模的城市污水系统更新改造对城市水环境改善特别是消除黑臭取得了显著的成效,但一些地方包括

若干特大城市的实践表明,部分污水处理厂流量设计低估了管网外来水量,包括雨水入侵量。一些城市污水系统雨季溢流显著,损害城市水环境。污水量与处理量之间不匹配也造成管网满管运行、低流速和管网内固体沉积。管网系统更新改造任务仍然繁重,现阶段仍应集中资源修复泄漏较严重管网(污水处理厂进水 $BOD_5 < 100 \text{ mg/L}$),对泄漏已得到初步控制管网加强日常维修,按计划对部分管段重点修复,同时继续清理和解决污水、雨水管线相关问题,切实提高用水效率,坚持长期投入和努力。

根据国内城市污水系统现状,减少溢流可从污水管网修复和适当扩大部分现有污水处理厂水力处理容量着手。图 3 显示设想中的实现住房和城乡建设部等部委污水浓度 $> 100 \text{ mg } BOD_5/\text{L}$ 和污水集中收集率 $> 70\%$ (对应溢流比 $< 30\%$) 要求的执行过程。需要指出的是,增加管网复盖率在任何情况都不应被忽视。在资源有限条件下,当管网泄漏严重、污水浓度较低,以管网修复为首要任务时,仍需考虑管网修复后污水处理厂处理能力匹配;当管网泄漏已得到初步控制,考虑提高污水处理厂处理能力时,仍需加强管网常规维修和局部重点修复。在条件具备时,管网修复和提高污水处理厂处理能力可同时进行。现阶段在敏感水体流域内污水的厂扩容可从先评估现有管网、泵站的运输能力和污水处理厂扩建可用空间开始,根据当地情况在 1.6~2.2 之间选择适当污清比,加以应用调蓄池和溢流污染控制,减少溢流对接受水体水质的影响。当管网外水(包括入侵雨水)处理被提上议事日程时,城市污水系统包括污水处理厂将在动态负荷情况下运行,需要技术更熟练的员工和智能控制和管理^[41]。

一些西欧国家在城市污水系统规划和管理过程应用污水稀释地图(Dilution mapping)作为辨识管网现状和投资方向的工具^[7-8]。考虑到国内污水系统溢流特点和监测困难,建议使用基于浓度的方法计算污水稀释倍数^[33]。可以从污水处理厂服务区开始,延伸到集水区或城市,以至更大的范围,然后进一步深入了解服务区、区域稀释倍数,溢流比与对应的水环境质量的关系,以此作为选择改善城市污水系统效率工程改造地点和投资顺序的依据之一,同时避免污水处理厂盲目扩容,或以污水处理

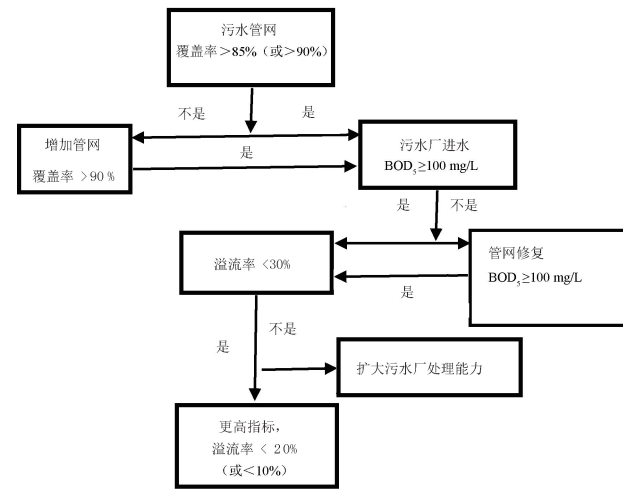
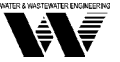


图 3 城市污水系统更新规划过程路线图

Fig. 3 The road map of urban sanitation upgrading planning process

厂扩容忽视管网系统更新改造的重要性。

中国近 30 年来市政基础设施的超速发展及其不同区域的特点,使其城市污水系统问题有其独有的复杂性,须坚持从实际出发和因地制宜,避免参考别人经验时生搬硬套。中长期(5~10 年)水污染系统规划应以提高城市污水系统效率的优良的城市水体水质为最终目标,注重近期行动与长期目标的一致性。在定量分析和比较各种方案的经济可持续性和技术先进性的基础上,选择经济有效的方案。在执行过程中注重实践,及时总结经验。需要土木、水资源、环境、水文、水利等多学科知识的参与和协作。

在可持续城市水系统管理的大背景下,城市污水系统优化需与海绵城市、水资源、经济发展和气候变化等融合为一体,需要不同机构之间在规划和政策方面的协调。就现阶段进一步提高城市污水系统效率和质量而言,迫切需要就污水处理厂扩容、管网污水在自净流速下非满管流动和污水处理厂在动态进水负荷情况下达标排放等开展工程试验,积累实践经验;需尽快着手推动建立同时管理管网和污水处理的机构;积极、谨慎思考、完善管网和污水处理厂设计规范,制定结合负荷和浓度的污水处理厂排放标准和相应的收费原则。

参考文献

[1] 住房和城乡建设部, 生态环境部, 国家发展和改革委员会.

城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021 年)[R]. 北京, 2020-03-20.

[2] 住房和城乡建设部, 生态环境部, 国家发展和改革委员会, 等. 深入打好城市黑臭水体治理攻坚战实施方案[R]. 北京: 2022.

[3] QU J, DAI X, HU H Y, et al. Emerging Trends and Prospects for Municipal Wastewater Management in China [J]. Environment Science and Technology: Engineering, 2022, 2: 322-336.

[4] 曹业始, ABEGGLEN C, 刘智晓, 等. 改造国内当前污水管网需要综合考虑的四个因素 [J]. 给水排水, 2021, 47(8): 125-137.

[5] RONTU M. Opplysninger om Fremmedvann i Finland (Regarding I/I- Water in Finland)[R]. Finnish Water Utilities Association (芬兰水协会): Helsinki, Finland, 2017.

[6] WANG X, YAO Y, ZHOU W, et al. Quantification of Inflow and Infiltration in Urban Sewer Systems Based on Triangle Method [J]. Water Pollution and Treatment, 2019, 7(4): 152-159.

[7] DIRCKX G, BIXIO D, THOEYE C, et al. Dilution of sewage in Flanders mapped with mathematical and tracer methods [J]. Urban Water Journal, 2009, 6(2): 81-92.

[8] DETTMAR J, BROMBACH H. Im Spiegel der Statistik: Abwasserkanalisation und Regenwasserbehandlung in Deutschland (In the mirror of the statistics: Sewer and rainwater treatment in Germany)[R]. a Korrespondenz Abwasser, Abfall • 2016, 63(3): 176-184.

[9] DAI X, XU G, DING Y, et al. Online Storage Technology of the Separate Sewage System: Demonstration Study in a Typical Plain River Network City [J]. Water, 2022, 14, 3194.

[10] DWA Working Group BIZ-1.1 Wastewater Treatment Plant Neighbourhoods. 29th Performance Comparison of Municipal Wastewater Treatment Plants in Germany [J]. Hennef: DWA, International Special Edition, 2018/2019.

[11] CAO YESHI, KROISS H, MARK VAN LOOSDRECHT, et al. The Four Issues Related to Improve the Efficiency of Urban Sewage Systems Up-Grading and Operation [C]. IWA Resource and Recovery Conference, 1-3 November 2023, Shenzhen, China.

[12] 上海住建委, 中华人民共和国国家标准, 室外排水规范 [M]. 2021 年, 中国计划出版社出版, 北京.

[13] DWA, Standard DWA-A 118E, Hydraulic Dimensioning and Verification of Drain and Sewer Systems[M]. April 2006. Theodor-Heuss-Allee 17 D-53773 Hennef, Germany. 2006.

[14] Coördinatiecommissie Integraal Waterbeleid (综合水政策协调委员会), Technische toelichting deel 2, afwateringssysteem (技术说明第 2 部分, 排水系统) [M]. 2012.



- [15] US Ten States (Ten States of Board of State and provincial Public Health and Environmental Managers, USA), Recommended Standards for Wastewater Facilities [J]. Health Research, Inc., Health Education Services Division P. O. Box 7126 Albany, N. Y. 12224. 2004.
- [16] ASCE (American Society of Civil Engineers) and USEPA, Sanitary Sewer Overflow Solutions Guidance Manual [M]. 2004.
- [17] Cardoso A., Prigobbe V., Giulianelli M. et al., Assessing the impact of infiltration and exfiltration in sewer systems using performance indicators; case studies of the APUSS project [C]. 10th International Conference on Urban Drainage, Copenhagen/Denmark, 21-26 August 2005.
- [18] USEPA, Proposed Rule to Protect Communities from Overflowing Sewers, [M]. 2001, EPA833-01-F-001.
- [19] USEPA, SSOAP, A USEPA toolbox for SSO analysis and control planning [M]. U. S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2008.
- [20] USEPA, SSOAP Toolbox Enhancements and Case Study [M], U. S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 2012.
- [21] 中国城镇供水排水协会. 中国城镇水务行业年度发展报告 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [22] 蒲贵兵, 谢天, 邵川. 重庆市污水溢流污染控制的困惑与建议 [J]. 中国给水排水, 2022, 38(18): 1-5.
- [23] LANGEVELD J G. Interactions within wastewater systems (D), Delft: Delft University of Technology, The Netherlands. 2004.
- [24] 李俊奇, 周金成, 杨正, 等. 合流制溢流控制指标与标准制定研究 [J]. 水资源保护, 2021, 37(01): 124-131.
- [25] 曹业始, 吴军, 刘智晓, 等. 改造国内污水管网系统需要综合考虑的四个因素: 定量分析 [J]. 给水排水, 2022, 48(10): 45-55.
- [26] Germany Federal Environment Agency, Water Management in Germany Water Supply - Wastewater Disposal, 2014, Umweltbundesamt | Für Mensch und Umwelt.
- [27] VEWIN (荷兰供水协会), Dutch-Drinking-Water-Statistics-2022 [R]-ENG, 2022.
- [28] DNAV (丹麦水协会), 2022 Treatment plants have widely divergent loads. In: Annual Report, Water In Figures [R]. 2022, 55.
- [29] 住房和城乡建设部. 国家统计局环境数据 [R]. 北京: 2019, <http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tjzljxytjgb/jstjnj/>.
- [30] CAO Y S, TANG J G, HENZE M, et al. The leakage of sewer systems and the impact on the 'black and odorous water bodies' and WWTPs in China [J]. Wat Sci & Technol. 2019. 79(2): 334-341.
- [31] 唐颖栋, 包晗, 邹旭彤, 等. 茅洲河流域排水系统提升完善的实践与经验 [J]. 中国给水排水, 2022, 38(10): 10-17.
- [32] DIRCKS G, FENU A, WAMBECQ T, et al. Dilution of sewage: Is it, after all, really worth the bother? [J]. Journal of Hydrology, 2019, 571: 437-447.
- [33] SOLA K J, BJERKHOLT J T, LINDHOLM O G, et al. Infiltration and Inflow (I/I) to Wastewater Systems in Norway, Sweden, Denmark, and Finland [J]. Water. 2018, 10, 1696.
- [34] DNAV (丹麦水协会), The wastewater Companies sewer networks are challenged, in: Annual Report [R]. Water In Figures. 2017, 30.
- [35] 蒋玲燕, 薛松, 胡启源. 上海市主城区供水量与污水量变化规律研究 [J]. 给水排水, 2022, 48(S1): 193-195, 201.
- [36] 赵振东, 刘健, 崔华峰, 等. 厂网一体运行视角下汛期入河污染物监测分析及控制策略研究 [J]. 给水排水, 2023, 49(8): 44-51.
- [37] 王凯军, 环保回忆录 [M]. 清华大学出版社, 北京, 2022.
- [38] ERZ (Entsorgung + Recycling - Stadt Zürich). The Disposal and Recycling Department of Zürich [R]. Zurich: ERZ, 2020. www.erz.ch.
- [39] ABEGGLEN C. Operation and Performance of Werdhölzli Wastewater Treatment [R]. ERZ, Zurich: 2021, www.erz.ch.
- [40] CAO Y, VAN LOOSDRECHT M C M, DAIGGER G T. The bottlenecks and causes, and potential solutions for municipal sewage treatment in China [J]. Water Practice & Technology, 2020, 15(1): 160-169.
- [41] HARREMOES P, CAPODAGLIO A G, HELLSTROM B G, et al. Wastewater treatment plants under transient loading-Performance, Modeling and Control [J]. Wat Sci Tech, 1993, 27(12): 71-115.

§ 通信作者: 曹业始, 男, 1949 年出生, 博士。主要研究方向为城市污水处理过程优化和新工艺开发、区域水污染控制及环境政策等。

E-mail: cao_yeshi1949@hotmail.com

收稿日期: 2023-09-22