



Views & Comments

中国城市污水治理效益评价指标体系构建

徐祖信^{a,b,c}, 徐晋^{a,b,c}^a State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China^b Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China^c Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security, Shanghai 200092, China

1. 引言

城市污水治理系统是保障城市社会、经济运行的重要基础设施,包括污水收集输送管网和污水处理厂。过去几十年间,中国政府大力推动城市污水治理基础设施的建设[1]。城市污水处理能力从1991年的 $3.17 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 增长到2019年的 $1.79 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,城市污水集中处理率从14.9%提高到96.8% [2]。同时,城市建成区排水管道(包括污水管道和雨污合流管道)从2011年的 $2.69 \times 10^5 \text{ km}$ 增长到2019年的 $4.29 \times 10^5 \text{ km}$ [2]。

但是,中国城市水环境没有呈现同步改善,部分城市水体出现雨天黑臭问题,东南沿海地区更为明显[3]。城市水体雨天黑臭折射出污水治理系统存在问题,成为中国城市黑臭水体治理的重大问题[4]。因此,在城市黑臭水体治理纵深推进的关键时刻,精准评估城市污水治理效益至关重要。本文首次构建了针对城市污水治理效益的评价指标体系,客观量化了中国城市污水治理效益现状,揭示了制约中国城市水环境持续改善的关键要素,并从推动城市水环境质量持续改善的角度提出了建议。

2. 城市污水治理效益评价指标体系构建

2.1. 污水管网系统度

在城市水环境治理中,污水收集和输送至关重要。原

则上,污水收集输送管网应该与供水管网同步规划、同步建设。由于中国城镇化进程较快,环境基础设施建设相对滞后,中国很多城市供水管网较为系统,但没有同步配套建设污水管网,由此导致污水收集水平低[5–6]。为了定量评价城市污水管网的系统性和覆盖率,本文建立了污水管网系统度指标,定义为污水管网长度与供水管网长度的比值[式(1)]:

$$C = L_s / L_{ws} \quad (1)$$

式中, C 为污水管网系统度; L_s 为污水管网长度(km); L_{ws} 为供水管网长度(km)。

污水管网系统度评价如表1所示。

2.2. 污水管网健康度

如果污水管网运行正常,其输送的污水浓度应该与原生污水浓度大致相当。因此,通过城市污水处理厂进水浓度,可以确定污水管网是否存在破损等结构性缺陷以及雨水管道错接到污水管网的问题[7]。污水管网外水入渗,会导致相应的污水处理厂进水浓度低[8–9]。为了定量评价城市污水管网运行是否正常,本文建立了污水管网健康度指标,定义为污水处理厂进水浓度与原生污水浓度的比值[式(2)]:

$$N = S_1 / S_0 \quad (2)$$

式中, N 为污水管网健康度; S_1 为污水处理厂进水浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); S_0 为原生污水浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

表1 污水管网系统度评价

Complete indicator for a sewage pipe network	Assessment
$C \geq 0.90$	The sewage pipe network is complete, and has a high coverage rate
$0.80 \leq C < 0.90$	The sewage pipe network is relatively complete, and has a relatively high coverage rate
$0.60 \leq C < 0.80$	The sewage pipe network is relatively incomplete, and has a relatively low coverage rate
$C < 0.60$	The sewage pipe network is incomplete, and has a low coverage rate

污水管网健康度评价如表2所示。

2.3. 污水处理效能度

中国政府高度重视污水处理厂建设，城市污水处理能力持续增长，2010年开始，中国城市污水处理能力首次超过了污水产生量。污水处理厂污染物排放标准也在不断提高，污水处理厂的建设费用和运行费用持续增长[10]。为了定量评价城市污水处理厂的运行效能，评估污水处理容量是否充足，本文建立了污水处理效能度指标，定义为污水处理厂当量进水量与污水处理厂设计处理能力的比值[式(3)]：

$$E = Q_E / Q_C \quad (3)$$

式中， E 为污水处理效能度； Q_E 为污水处理厂当量进水量，即污水处理厂日均进水污染负荷除以原生污水浓度 ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)； Q_C 为污水处理厂设计容量，即污水处理厂日均处理能力 ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)。

污水处理效能度评价如表3所示。

2.4. 污水处理效益度

依据国际惯例，中国政府发布的污水处理率是根据污水处理厂进水量与服务范围内的污水量确定。由于污水管网结构性缺陷、雨水管道错接到污水管网，外水随污水一同进入污水处理厂，导致进厂“污水”虚高[3]。为了客观反映城市污水处理情况，本文建立了污水处理效益度指标，定义为进入污水处理厂的污染负荷与服务范围内污水

排放污染负荷的比值[式(4)]：

$$R = P_1 / P_{ST} \quad (4)$$

式中， R 为污水处理效益度； P_1 为污水处理厂进水污染负荷 (kg)； P_{ST} 为污水处理厂服务范围内污水产生的污染负荷 (kg)。考虑到污水处理厂的出水应满足排放标准，因此污水处理厂进水污染负荷可认为全部得到有效处理。

污水处理效益度评价如表4所示。当污水处理效益度为0.50，表明污水实际处理率为50%。

3. 中国城市污水治理效益评价

本节将运用以上四个指标，从国家、省和城市三个层面对2019年中国城市污水治理效益进行评估。污水管网长度、供水管网长度、污水处理厂设计容量、污水排放量的数据来自《中国城市建设统计年鉴》[2]。污水处理厂进水水量、水质的数据根据全国城镇污水处理管理信息系统中各个污水处理厂的相关信息计算得到[11]。原生污水浓度的统计数据来自第二次全国污染源普查[12]。

3.1. 国家层面污水治理效益分析

2019年，中国城市建成区污水管网长度为 $4.29 \times 10^5 \text{ km}$ ，供水管网长度为 $9.20 \times 10^5 \text{ km}$ ；原生污水平均化学需氧量 (COD) 浓度约为 $373 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，污水处理厂平均进水 COD 浓度约为 $244 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，仅为原生污水浓度的三

表2 污水管网健康度评价

Normal indicator for a sewage pipe network	Assessment
$N \geq 0.85$	The sewage pipe network is in normal operation
$0.70 \leq N < 0.85$	The sewage pipe network is in relatively normal operation
$0.50 \leq N < 0.70$	The sewage pipe network is in abnormal operation with external water infiltration
$N < 0.50$	The sewage pipe network is in extremely abnormal operation with serious external water infiltration

表3 污水处理效能度评价

Efficiency indicator for a sewage treatment plant	Assessment
$E \geq 0.80$	The efficiency of sewage treatment is high
$0.60 \leq E < 0.80$	The efficiency of sewage treatment is relatively high
$0.40 \leq E < 0.60$	The efficiency of sewage treatment is relative low
$E < 0.40$	The efficiency of sewage treatment is low

表4 污水处理效益度评价

Rate indicator for a sewage treatment plant	Assessment
$R \geq 0.90$	The actual sewage treatment rate is high
$0.70 \leq R < 0.90$	The actual sewage treatment rate is relatively high
$0.50 \leq R < 0.70$	The actual sewage treatment rate is relatively low
$R < 0.50$	The actual sewage treatment rate is low

分之二；全国污水处理厂日均当量进水量为 $8.16 \times 10^7 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ，污水处理厂设计容量为 $1.79 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ；各省（自治区、直辖市）发布的污水处理率约为96.8%。

根据以上数据，计算得到国家层面的城市污水治理效益指标如表5所示。污水管网系统度约为0.47，污水管网健康度约为0.66，污水处理效能度约为0.46，污水处理效益度约为0.62。以上结果表明2019年中国城市建成区污水收集管网的覆盖率不到50%，污水管网健康度不高，进厂当量污水量不到污水处理容量的二分之一，污水治理效能较低，全国平均污水处理效益度约为0.62，也就是说，污水实际处理率仅有62%。由此表明，中国城市污水治理的主要投资方向应是污水管网建设和修复。

3.2. 省级层面污水治理效益分析

省级层面的分析包含中国30个省（自治区、直辖市），缺少西藏、香港、澳门、台湾的数据，30个省份污水治理效益分析如图1所示。从图中可以看出，30个省份污水管网系统度为0.26~0.79，中位数为0.50。6个省份污水管网系统度为0.60~0.80，24个省份污水管网系统度小于0.60，所有省份污水管网都没有实现全覆盖，其中一半省份污水管网甚至没有覆盖到建成区面积的50%。

30个省份污水管网健康度为0.52~0.86，中位数为0.66。其中，两个省份污水管网健康度大于0.85，6个省份污水管网健康度为0.70~0.85，22个省份污水管网健康度为0.50~0.70，表明73%的省份污水管网有破损或雨水管道错接问题。

30个省份污水处理效能度为0.34~0.64，中位数为0.54。其中，6个省份污水处理效能度为0.60~0.80，23个省份污水处理效能度为0.40~0.60，1个省份污水处理效能度小于0.40，污水处理容量没有得到充分利用是共性问题。

30个省份污水处理效益度为0.49~0.81，中位数为

0.63。其中，6个省份污水处理效益度为0.70~0.90，23个省份污水处理效益度为0.50~0.70，1个省份污水处理效益度小于0.50，由此可见，80%的省份污水实际处理率低于70%。

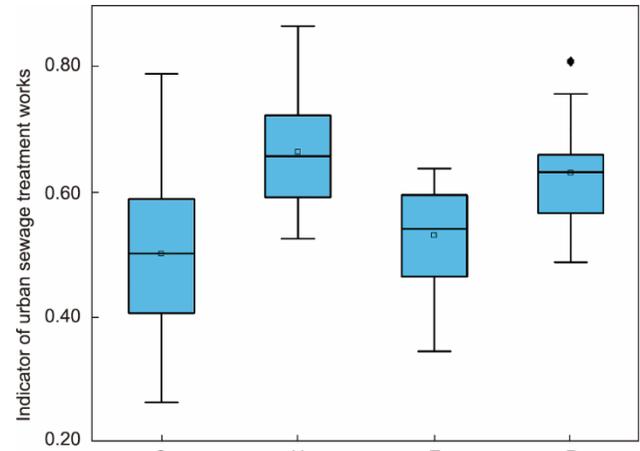


图1. 中国各省（自治区、直辖市）污水治理效益分析。

3.3. 城市层面污水治理效益分析

目前中国共有297个地级及以上城市（包括293个地级城市和4个直辖市，不含地区、自治州、盟），由于部分城市缺少相关数据，城市层面的污水治理效益评估包括219个地级及以上城市，占比74%。这219个地级及以上城市的人口占中国297个地级及以上城市的79%。根据表1至表4进行评价。

219个地级及以上城市污水管网系统度的频数分布直方图如图2所示。可以看出各城市的污水管网系统度都不理想，差距较大。只有5个城市污水管网系统度大于0.90，管网覆盖率高；24个城市污水管网系统度为0.80~0.90；47个城市污水管网系统度为0.60~0.80，管网覆盖率较低；143个城市污水管网系统度小于0.60，污水管网基本不成系统。综上分析，管网覆盖率低的问题在中国比较普遍，“十四五”期间污水管网建设任务艰巨。

219个地级及以上城市污水管网健康度的频数分布直方图如图3所示。只有22个城市的污水管网健康度大于0.85，这些城市大多位于地下水位较低的地区；50个城市污水管网健康度为0.70~0.85，运行基本正常；128个城市污水管网健康度为0.50~0.70，19个城市污水管网健康度小于0.50，这些城市主要位于沿海沿江区域，地下水位高

表5 国家层面城市污水治理效益指标评估结果

Complete indicator for sewage pipe networks (C)	Normal indicator for sewage pipe networks (N)	Efficiency indicator for sewage treatment plants (E)	Rate indicator for sewage treatment plants (R)
0.47	0.66	0.46	0.62

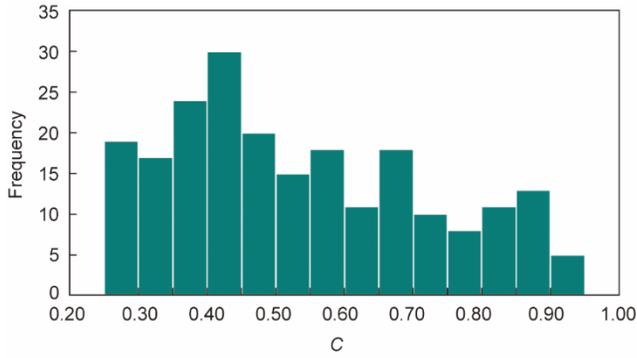


图2. 中国地级及以上城市污水管网系统度频数分布直方图。

于管道埋深，外水入渗严重，此外，由于雨水管道错接到污水管网，大量地下水和雨水进入污水管网被输送到污水处理厂。以上分析结果表明，中国67%的地级及以上城市污水管网不太健康，管网系统不健康的问题给末端污水处理厂的运行带来了压力。

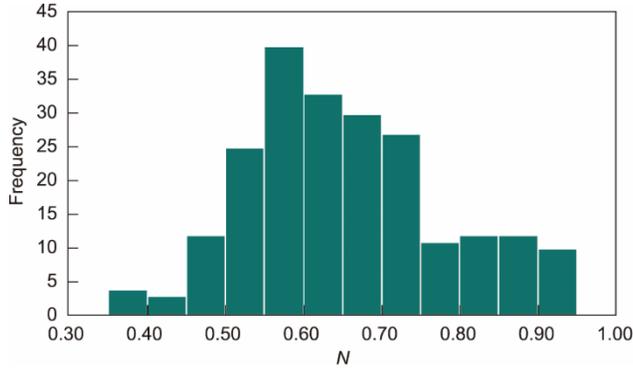


图3. 中国地级及以上城市污水管网健康度频数分布直方图。

219个地级及以上城市污水处理效能度的频数分布直方图如图4所示。3个城市污水处理效能度大于0.80，55个城市污水处理效能度为0.60~0.80，这58个城市污水处理效能较高；124个城市污水处理效能度为0.40~0.60，37个城市污水处理效能度小于0.40，说明进水当量流量远小于污水处理的设计容量，这些城市占比为74%。由此可见，中国高标准建设的污水处理厂效能较低。

219个地级及以上城市污水处理效益度的频数分布直方图如图5所示。只有1个城市污水处理效益度大于0.90，51个城市污水处理效益度为0.70~0.90，130个城市污水处理效益度为0.50~0.70，37个城市污水处理效益度小于0.50，也就是说，37个城市污水实际处理率低于50%。由此可见，中国城市污水处理厂的工程效益总体处于较低水平。

3.4. 结果讨论

根据上述分析，国家、省和城市三个层面的污水治理

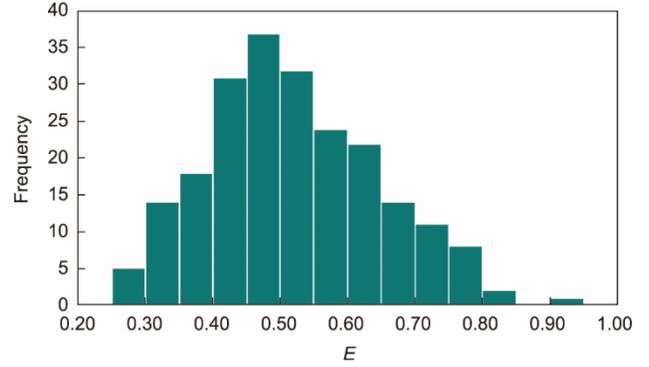


图4. 中国地级及以上城市污水处理效能度频数分布直方图。

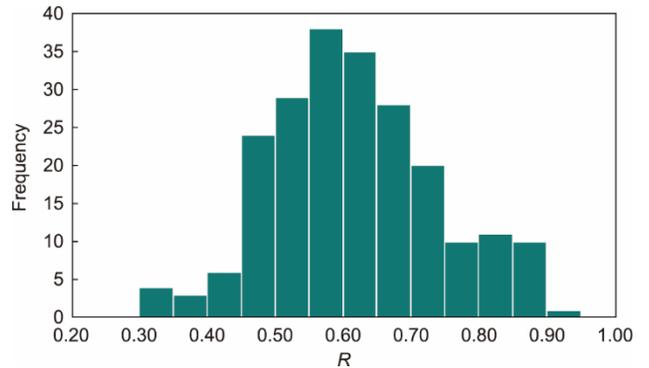


图5. 中国地级及以上城市污水处理效益度频数分布直方图。

效益分析结果如表6所示。从表中可以看出，中国污水管网系统度约为0.47，各省份污水管网系统度为0.26~0.79，各个城市污水管网系统度为0.26~0.93。中国污水管网健康度约为0.66，各省份污水管网健康度为0.52~0.86，各个城市污水管网健康度为0.37~0.94。中国污水处理效能度约为0.46，各省份污水处理效能度为0.34~0.64，各个城市污水处理效能度为0.28~0.91。中国污水处理效益度约为0.62，各省份污水处理效益度为0.49~0.81，各个城市污水处理效益度为0.30~0.91。

表6 中国城市污水治理效益分析结果

Level	Indicator			
	C	N	E	R
Country	0.47	0.66	0.46	0.62
Province	0.26~0.79	0.52~0.86	0.34~0.64	0.49~0.81
City	0.26~0.93	0.37~0.94	0.28~0.91	0.30~0.91

综上所述，中国城市污水治理工程效益整体不高，各省和各个城市间差别较大，主要原因在于污水管网系统度和健康度低下。污水管网系统度偏低，表明有大量污水无法有效收集，而污水管网健康度偏低，表明有大量地下水和雨水被输送至污水处理厂。污染物收集和输送效率也很低。因此，截污治污仍然是中国城市黑臭水体治理的重要

任务，管网建设和修复是重中之重。

4. 总结与建议

本文首次建立了城市污水治理效益评估的指标体系，包括污水管网系统度、污水管网健康度、污水处理效能度、污水处理效益度。通过公开数据资料的收集和整理，从国家、省和城市三个层面对中国城市污水治理效益进行了评估，根据评估结果，提出以下建议：

(1) 针对城市污水管网系统度不高的问题，应切实加强城镇污水收集管网建设，确保收集管入户，提高污水收集水平。有必要从设计、施工、监理三个方面实行成片包干，以污水量和污水浓度验收污水管网建设工程，调整小管径污水收集管网的设计和施工计费标准，提高设计和施工建设单位的积极性，保障污水收集管网的系统设计和建设质量。

(2) 针对城市污水管网健康度低下的问题，应加大污水管网的修复和更新换代工作。开发简便高效、非开挖和不干扰运行的排水管网破损定位检测技术，加强地下管网非开挖修复材料和施工技术的研发和推广，解决中国城市难以全面开挖改造的难题。

(3) 针对污水处理效能度和污水处理效益度不高的问题，原则上不要新建污水处理厂，应加大力度提高进水浓度和污水收集率，提高污水处理厂应对冲击负荷的能力，合理利用水环境容量，科学确定污水处理厂尾水排放标准，真正实现污水治理提质增效。

(4) 针对城市水环境治理的考核，应该完善考核指标，有效推进各地政府将人力、物力、财力集聚到城市污水管网建设和完善以及截污治污工作中来，保证河湖污染治理走在正确的技术路线上，资金发挥最大效益，河湖水

质逐步改善，在城市水环境治理中取得实际成效。

致谢

本工作得到国家重点研发计划项目(2021YFC3200700)和中国工程院重大咨询研究项目(2019-ZD-33)的支持。

References

- [1] Qu J, Wang H, Wang K, Yu G, Ke B, Yu HQ, et al. Municipal wastewater treatment in China: development history and future perspectives. *Front Environ Sci Eng* 2019;13(6):88.
- [2] www.mohurd.gov.cn [Internet]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China; c2020 [cited 2022 Mar 10]. Available from: <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/jstjnj/index.html>.
- [3] Yin H, Lu Y, Xu Z, Li H, Schwegler BR. Characteristics of the overflow pollution of storm drains with inappropriate sewage entry. *Environ Sci Pollut Res* 2017;24(5):4902-15.
- [4] Xu Z, Xu J, Yin H, Jin W, Li H, He Z. Urban river pollution control in developing countries. *Nat Sustain* 2019;2(3):158-60.
- [5] Huang D, Liu X, Jiang S, Wang H, Wang J, Zhang Y. Current state and future perspectives of sewer networks in urban China. *Front Environ Sci Eng* 2018;12(3):2.
- [6] Cao Y, Christian A, Liu Z, Helmut K, Zhang Y, Peng Y. Integrated considerations of the four factors to improve and upgrade current sewer systems in China. *Water Wastewater Eng* 2021;47(8):125-37. Chinese.
- [7] Zhao Z, Yin H, Xu Z, Peng J, Yu Z. Pin-pointing groundwater infiltration into urban sewers using chemical tracer in conjunction with physically based optimization model. *Water Res* 2020;175:115689.
- [8] Cao YS, Tang JG, Henze M, Yang XP, Gan YP, Li J, et al. The leakage of sewer systems and the impact on the 'black and odorous water bodies' and WWTPs in China. *Water Sci Technol* 2019;79(2):334-41.
- [9] Cao Y, Van Loosdrecht M, Daigger G. The bottlenecks and causes, and potential solutions for municipal sewage treatment in China. *Water Pract Technol* 2020;15(1):160-9.
- [10] Qu J, Dai X, Hu HY, Huang X, Chen Z, Li T, et al. Emerging trends and prospects for municipal wastewater management in China. *ACS EST Eng* 2022;2(3):323-36.
- [11] wsxm.cin.gov.cn [Internet]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China; c2020 [cited 2022 Mar 10]. Available from: <http://wsxm.cin.gov.cn/login.aspx>.
- [12] www.mee.gov.cn [Internet]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment; c2021 [cited 2022 Mar 10]. Available from: https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk01/202106/t20210618_839512.html.