

李维, 全海霞, 赵圆, 等. 北京市某流域两座再生水厂污水调配效益分析[J]. 净水技术, 2025, 44(7): 109-114.

LI W, QUAN H X, ZHAO Y, et al. Analysis of wastewater allocation and benefits for two reclaimed WWTPs in a watershed in Beijing[J]. Water Purification Technology, 2025, 44(7): 109-114.

北京市某流域两座再生水厂污水调配效益分析

李 维, 全海霞*, 赵 圆, 祁玉奎

(北京北排建设有限公司, 北京 100071)

摘 要 【目的】 由于城市区域发展进程不均衡, 不同区域污水处理设施承受的污水负荷也有所不同, 个别污水处理厂超负荷运行导致污水外溢, 而另一些污水处理厂则因低负荷运行而成本高昂。北京市某流域 A 再生水厂和 B 再生水厂, A 再生水厂属上游, B 再生水厂属下游, 两厂的污水水量及水质不均衡, A 再生水厂来水水量超过设计能力, 而 B 再生水厂来水水量低于设计能力。【方法】 为保障污水的高收集率和处理率, 减少污水外溢及降低运行成本, 两厂之间建设了污水调配管网, 文章研究了两再生水厂间的污水分配的环境和经济效益。【结果】 经过分析表明, 两厂之间的污水调配可以有效减少上游溢流, 产生了良好的环境效益; 污水调配对 A 再生水厂的运营成本影响不大, 同时调水可以明显改善 B 再生水厂的进水水质, 提高其碳氮比(C/N), 显著降低了 B 再生水厂的运营成本; 调水对两厂的综合成本也有显著增益。【结论】 因此, 污水调配是针对进水负荷不均衡且距离较近的水厂, 也是提升环境效益和运行效益的有效措施。

关键词 污水处理 污水调配 环境效益 经济效益 水质特征

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)07-0109-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.07.014

Analysis of Wastewater Allocation and Benefits for Two Reclaimed WWTPs in a Watershed in Beijing

LI Wei, QUAN Haixia*, ZHAO Yuan, QI Yukui

(Beijing Beipai Construction Co., Ltd., Beijing 100071, China)

Abstract [Objective] Due to the uneven development of urban areas, the wastewater load borne by wastewater treatment facilities in different regions varies. This has led to some wastewater treatment plants (WWTPs) operating beyond their design capacity, resulting in wastewater overflow, while others are running at low capacity, incurring high operational costs. In a certain watershed in Beijing, the reclaimed WWTP A and B were located in the upstream and downstream sections, respectively. The wastewater volume and quality were imbalanced between the two WWTPs, with the reclaimed WWTP A receiving more water than its design capacity, while the reclaimed WWTP B received less than its designed capacity. [Methods] To ensure a high rate of wastewater collection and treatment, reduce overflow, and lower operational costs, a wastewater distribution network was built between the two WWTPs. [Results] This study examined the environmental and economic benefits of the wastewater allocation between the two reclaimed WWTPs. The analysis showed that the wastewater distribution effectively reduced upstream overflow, generating positive environmental benefits. The allocation had little impact on the operating costs of the reclaimed WWTP A, while it significantly improved the water quality at the reclaimed WWTP B, enhancing its carbon/nitrogen ratio (C/N) and reducing its operational costs. The overall costs of both plants benefit from the water allocation. [Conclusion] Therefore, wastewater distribution is an effective measure for improving both environmental and operational efficiency in WWTPs with imbalanced influent loads that are in close proximity to each other.

Keywords wastewater treatment wastewater allocation environmental benefit economic benefit water quality characteristics

[收稿日期] 2023-07-19

[作者简介] 李维(1991—), 男, 注册环保工程师, 注册一级建造师, 硕士研究生, 研究方向为生活污水、工业废水以及污泥处理工艺优化, E-mail: liweizq@163.com。

[通信作者] 全海霞(1976—), 女, 研究方向为城市排水管网及污水处理厂投资、建设及运维, 13691405057@qq.com。

城镇发展速度过快导致污水量增加,污水厂来水量有可能超出已规划设计的污水处理量,然而城镇发展速度的不平衡以及污水管网的滞后性,导致污水厂来水量有可能远少于已规划设计的污水处理量。因此,同一城镇会出现不同污水厂的处理负荷差异很大,平衡污水厂的处理负荷是优化污水厂正常运行的关键所在^[1]。

北京市污水管网也存在着污水处理厂实际处理量与规划能力不匹配以及污水管网安全保障程度低等问题,应该通过对污水管网的调配解决此类问题,可以很好地保障 2 座污水厂的运行安全和减少溢流污染,保护水环境。

污水管网系统的调配是对原有污水管网的补充和完善;是合理地调配城市污水量、提高污水处理率,保证污水处理厂出水水量和水质稳定的重要措施^[2];是污水厂发生应急情况的重要保障措施^[3]。

A、B 2 座再生水厂同属北京市某河道流域,A 再生水厂位于上游,B 再生水厂位于下游。该流域河主河道全长为 21.63 km,流域面积为 158.4 km²。两厂污水收集方式均为截留合流制,雨季多余污水均通过溢流口排放至河道,A、B 再生水厂距离约为 9.60 km。A 再生水厂处理能力为 200 000 m³/d,B 再生水厂 2018 年 10 月前一期工程处理能力为 100 000 m³/d,2018 年 10 月后增加二期工程处理能力提升至 200 000 m³/d。A 再生水厂处理工艺为改良型氧化沟+生物滤池+反硝化滤池,B 再生水厂处理工艺为改良式多段 AAO+砂滤池,两厂均有臭氧和次钠等深度处理工艺,可以达到再生水回用要求,多余出水排入该流域河流。

在 2018 年 10 月前,丰水季节,两厂所在流域污水量大于其处理能力,全天水量不均衡,且两厂进水水质有一定差异,容易造成 A 再生水厂发生污水溢流而 B 再生水厂污水处理能力仍未达满负荷的现象。

为解决上述问题,两厂之间建设了污水调水的管道设施,主要建设内容为:(1)2 台专用调水泵,流量为 2 200 m³/h;(2)调水管线,DN1200,长度约为 10 km;(3)若干污水检查井及排泥管。调水基本方案为:(1)再生水厂设备设施维修需要减产时向下游水厂进行污水调配^[4];(2)A 再生水厂瞬时进水量高于处理能力时进行调水;(3)利用污水管网的调蓄及水力停留时间进行错峰污水调配,尽最大能力处理流域污水。主要目标为减少污水溢流次数,

减少对环境的污染。在 2018 年 10 月后,B 再生水厂二期工程投入运行,极大提高了两厂的污水处理能力,除大雨情况,两厂基本没有出现污水溢流的情况,因此新的调水联调的目标为两厂工艺运行的稳定,两厂综合处理成本的降低和优化。

1 污水调水对上下游两厂运行影响

1.1 调水对 A 再生水厂影响

1.1.1 调水对 A 再生水厂处理水量的变化

图 1 为 2018 年至 2020 年 A 再生水厂处理水量及上游调水量情况。2018 年 A 再生水上游来水量平均为 266 000 m³/d,调水量为 45 000 m³/d,处理水量为 221 000 m³/d,2019 年 A 再生水厂上游来水量平均为 272 000 m³/d,调水量为 57 000 m³/d,处理水量为 215 000 m³/d。

总体上,2019 年 A 再生水厂上游水量增加了约为 6 000 m³/d,处理水量减少了 6 000 m³/d,调水量增加了 12 000 m³/d。一方面是由于 B 再生水厂的处理能力达到了 200 000 m³/d,A 处于超设计负荷运行,为规避运行和溢流风险以及出于成本的考虑,B 再生水厂水量增加有利于较大幅度地节约成本,因此减少了 A 再生水厂的处理水量,增加向 B 再生水厂的调水。

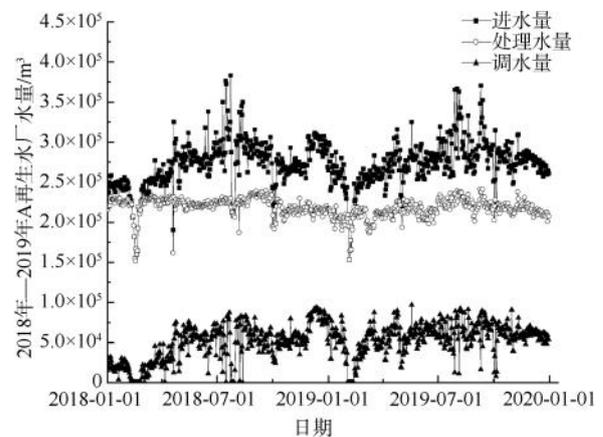


图 1 2018 年—2019 年再生水厂 A 的水量

Fig. 1 Wastewater Treatment Capacity of Reclaimed WWTP A from 2018 to 2019

1.1.2 A 运行成本的变化

由于 A 再生水厂为上游水厂,调水不会对其进水水质造成影响,但会影响其处理水量,增加调水会降低其处理水量,增加调水水泵的运行时间,进而引起成本的变化。

由图 2 可知,A 再生水厂的电费和药剂费与季

节关系较大,冬季电费和药剂费都高于年均值,冬季水量较低,污染物浓度高,这是增加电费和药剂费的主要原因。

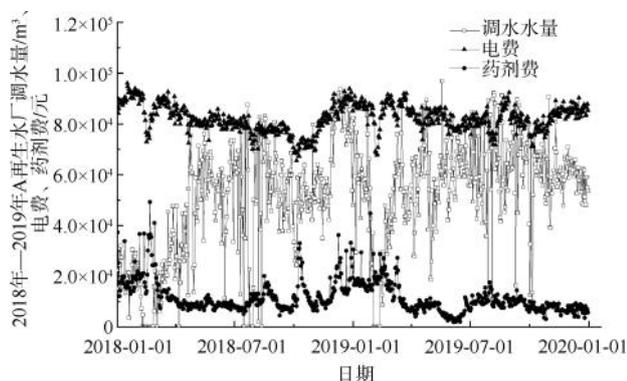


图2 A再生水厂电费与药剂费变化

Fig. 2 Changes of Electricity and Chemicals Costs in Reclaimed WWTP A

由表1可知,随着调水量的增加,A再生水厂的单位电费与药剂费成本相应降低,主要原因为调水量较大时间为水量高峰时段,主要为夏季,而夏季的运行成本较低,从而导致调水量与运行成本呈一定的负相关关系。

表1 调水量及A再生水厂单位成本相关性分析

Tab. 1 Correlation Analysis of Water Transfer Capacity and Unit Cost of Reclaimed WWTP A

项目	调水量	单耗单位成本	药耗单位成本
调水量	皮尔逊相关性	1	-0.136 **
	显著性(双尾)	0.000	0.000
	个案数	730	730

注:**表示在0.01级别(双尾),相关性显著,下同。

1.2 调水对B再生水厂影响

1.2.1 调水对B再生水厂处理水量的变化

由图3可知,B再生水厂2017年全年平均处理水量为89 600 m³/d,其中上游调水水量为25 000 m³/d,占总处理水量的27.9%。B再生水厂2018年全年平均进水水量为126 000 m³/d,其中上游调水水量为44 900 m³/d,占总进水水量的35.6%。B再生水厂2019年全年平均进水水量为171 000 m³/d,其中上游调水水量为56 600 m³/d,占总进水水量的33.1%。可以看出,上游调水水量占B再生水厂进水水量的30%左右,整体调水规律与A再生水厂来水规律相似,冬季减少夏季增多。

1.2.2 调水对B再生水厂进水水质的变化

A再生水厂根据其污水收集范围内的来水量大

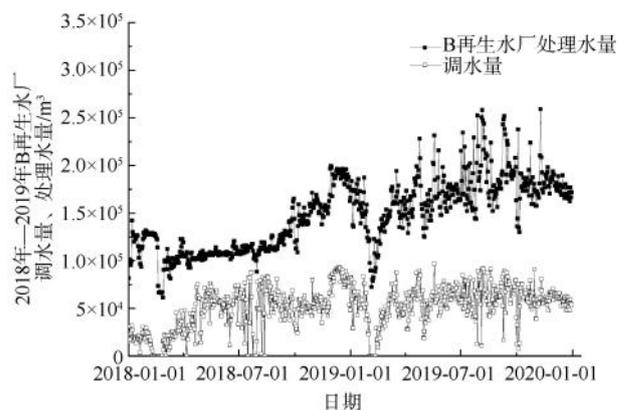


图3 2018年—2019年B再生水厂水量变化

Fig. 3 Water Capacity of Reclaimed WWTP B

from 2018 to 2019

小进行污水调配,不同时段和季节具有一定变化,为分析不同调水量对B再生水厂进水水质的影响,将2017年全年调水量分为0、0~10 000、10 000~20 000、20 000~30 000、30 000~40 000、40 000~50 000、50 000~60 000、>60 000 m³/d,其进水水质如表2所示。

表2 调水量与B再生水厂进水水质

Tab. 2 Water Transfer Capacity and Influent Quality of Reclaimed WWTP B

调水水量/m ³	进水COD/(mg·L ⁻¹)	进水总磷(TP)/(mg·L ⁻¹)	进水氨氮/(mg·L ⁻¹)	进水BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	进水总氮(TN)/(mg·L ⁻¹)
0	274	5.01	30.1	132	49.4
4 900	341	4.86	29.8	149	45.7
15 400	318	4.84	33.8	140	49.8
25 400	401	6.05	34.0	188	53.5
34 200	419	6.01	33.7	198	49.8
43 700	518	7.13	35.3	232	51.3
54 100	419	5.68	29.2	199	48.9
71 100	395	5.35	30.6	187	45.5

对调水水量、进水COD、进水TN、进水TP、进水氨氮、进水BOD₅进行相关性分析。由表3可知,调水水量对B再生水厂进水TP、进水COD和进水BOD₅呈正相关关系,其中与B再生水厂进水BOD₅呈显著相关(相关系数为0.727),即随着A再生水厂的调水水量的增加,B再生水厂总进水的BOD₅会显著上升,BOD₅/TN从2.67增加至最高到4.52,增幅达到69%,进水碳源增幅大,因A再生水厂周围污水收集系统较为完善,整体污水水质高,其中进水COD较高,增加了B再生水厂的进水碳源。

表 3 调水量与 B 再生水厂进水水质相关性分析

Tab. 3 Correlation Analysis between Water Transfer Capacity and Influent Quality of Reclaimed WWTP B

项目		进水 TN	进水 BOD ₅	进水氨氮	进水 TP	进水 COD
调水水量	皮尔逊相关性	-0.164	0.727*	0.009	0.444	0.663
	显著性(双尾)	0.699	0.041	0.984	0.271	0.073
	个案数	365	365	365	365	365

注: * 在 0.05 级别(双尾),相关性显著,下同。

1.2.3 B 再生水厂污水处理成本的变化

由图 4 可知,随着调水水量的增加,B 再生水厂的电费有一定的上升,同时药剂费大幅度下降,主要原因为调水水量的增加使得 B 再生水厂负荷提升,并且改变了进水水质状况,更利于脱氮使得药剂费用降低。

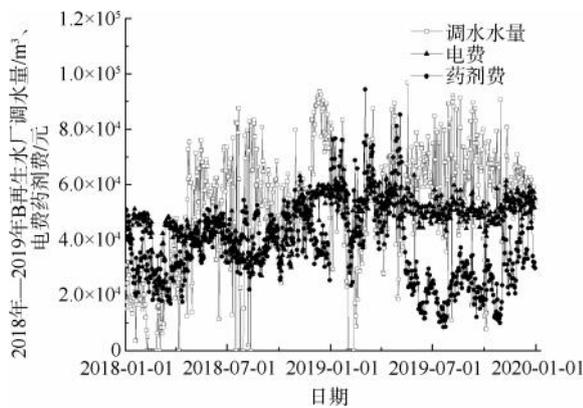


图 4 2018 年—2019 年 B 再生水厂电费与药剂费变化

Fig. 4 Changes in Electricity and Chemicals Costs for Reclaimed WWTP B from 2018 to 2019

由表 4 可知,A 再生水厂的调水量可以显著影响 B 再生水厂的运行成本(包括电费和药剂费),主要原因是调水量占 B 再生水厂进水比例较大,水量增加后(规模效应)会显著降低运行电费,而调水水质的 BOD₅/TN 较高,可以减少脱氮药剂的成本,因此调水水量的增加可以显著地降低 B 再生水厂的电费和药剂成本。

表 4 调水量与 B 再生水厂电费和药剂成本相关性分析
Tab. 4 Correlation Analysis of Water Transfer Capacity and Electricity and Chemicals Cost of Reclaimed WWTP B

项目	调水水量	电耗单位成本	药耗单位成本
调水水量	皮尔逊相关性	1	-0.301**
	显著性(双尾)	-	0.000
	个案数	730	730

1.3 调水与两厂综合费用的关系

由图 5 可知,两厂的电费成本有所上涨,主要原

因为 B 再生水厂二期扩建,处理能力进一步增强,A 再生水厂调水增加,两厂的总处理水量增加,溢流量减少。药剂费用显著降低,主要原因是调水引起了 B 再生水厂的水质变化,脱氮药剂大幅降低。

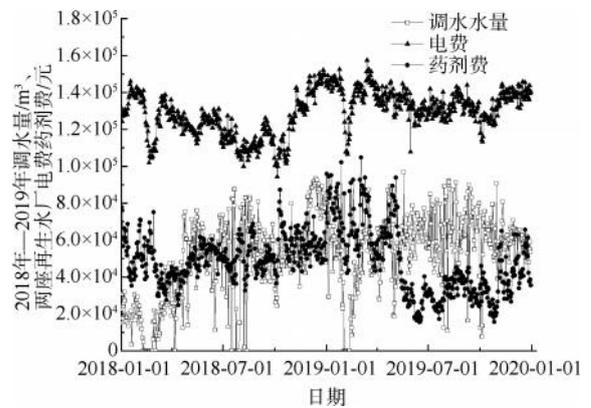


图 5 2018 年—2019 年两厂综合成本变化

Fig. 5 Changes in Comprehensive Costs of the Two WWTPs from 2018 to 2019

由表 5 可知,调水水量对两厂综合成本有显著影响,调水水量越大,综合成本越低,主要是调水水量对 B 再生水厂的运行成本影响较大,因而影响两厂综合成本。在上游不进行调水时,两厂的综合成本(电费和药剂)为 0.65 元/m³,而调水量达到 50 000 m³/d 以上时,两厂的综合成本(电费和药剂)可以降低至 0.45 元/m³,降低幅度达到 30%。因此水量的合理调配对两厂综合成本的降低有很大增益。

表 5 调水量与两厂综合成本相关性分析
Tab. 5 Correlation Analysis of Water Transfer Capacity and Comprehensive Costs of the Two Reclaimed WWTPs

项目	调水水量	电耗单位成本	药耗单位成本
调水水量	皮尔逊相关性	1	-0.297**
	显著性(双尾)	-	0
	个案数	730	730

2 经济效益分析

2.1 处理水量的增加

调水管线建成后,A 再生水厂按照上述模式向 B 再生水厂调配污水,可以解决 A 再生水厂处理能

力不够污水外溢的问题,总体来看可以明显增加两厂的总处理水量,提高两厂收益。

由表6可知,2017年—2019年A再生水平均处理量约为216 400 m³/d,处于满负荷状态,平均调水量约为42 100 m³/d,并全部被B再生水厂处理,即通过调水使B再生水厂平均增加42 100 m³/d,按照水处理单价1.0元计算,3年可以使2座水厂总收入增加4 610万元。

表6 2017年—2019年2座再生水厂处理水量
Tab. 6 Water Treatment Capacity of Two Reclaimed WWTPs from 2017 to 2019

年份	调水量/ m ³	A再生水厂 处理水量/m ³	B再生水厂 处理水量/m ³	2座水厂总 处理水量/m ³
2017年	25 000	212 900	89 600	302 500
2018年	44 900	221 400	123 900	346 800
2019年	56 600	215 000	171 000	386 000

表7 2018年—2019年2座再生水厂处理成本

Tab. 7 Treatment Costs of the Two Reclaimed WWTPs from 2018 to 2019

调水量/ (m ³ ·d ⁻¹)	平均调水量/ (m ³ ·d ⁻¹)	A再生水厂处理 水量/(m ³ ·d ⁻¹)	A再生水厂电费/ (元·m ⁻³)	A再生水厂药费/ (元·m ⁻³)	B再生水厂处理 水量/(m ³ ·d ⁻¹)	B再生水厂电药 成本/(元·m ⁻³)	总处理水量/ (m ³ ·d ⁻¹)
0~20 000	8 400	110 900	0.38	0.32	214 800	0.47	325 700
20 000~40 000	30 000	118 800	0.38	0.32	220 900	0.44	339 600
40 000~60 000	52 200	148 200	0.33	0.28	217 900	0.42	366 100
>60 000	71 600	169 600	0.30	0.23	218 700	0.42	388 300

3 环境效益分析

2018年10月前,上游A水厂根据栅前液位向下游进行水量调配,B再生水厂污水收集范围内水量约为69 000 m³/d,处理能力为100 000 m³/d(2019年进行扩建,规模增加至20 000 m³/d),因此在上游调水量较大时会发生溢流,溢流量为B再生水厂范围污水量加A再生水厂调水量减去最大处理能力,溢流水质为不同调水量时B再生水厂的进水水质;若A再生水厂不向B再生水厂调水也会发生溢流,假定溢流量为调水量,溢流水质即为A再生水厂进水水质。因此比较不同调水与不调水时的溢流量污染物(COD)排放量,来分析调水的环境效益。

3.1 未调水两厂污水溢流及污染物排放情况

当A再生水厂不向B再生水厂进行污水调配时,当A再生水厂地区污水量高于处理能力时即发生溢流,且污染物排放量与溢流量成正比,当来水量超过处理能力达到82 500 m³/d时,因污水溢流增加的COD排放量最高为51.3 t/d。

2.2 单吨处理成本的降低

将不同调水量区间下2座再生水厂成本进行统计分析,如表7所示,由于A再生水厂的污水量超过其处理能力,调水系统使用后可以将A再生水厂多余污水调入B再生水厂处理,一方面减少A再生水厂的污水外溢,另一方面增加B再生水厂的污水处理量,当调水量达到60 000 m³/d以上时,2座水厂的处理总量可增加60 000 m³/d。同时B再生水厂的处理成本可以进一步降低:(1)由于规模效益,B再生水厂的电费单位成本可由0.38元/m³降低至0.30元/m³;(2)上述分析A再生水厂的调水可以增加B再生水厂进水碳氮比(C/N),利于B再生水厂的脱氮处理药剂的降低,药剂费成本可由0.32元/m³降低至0.23元/m³,总体降低B再生水厂成本约为0.17元/m³,每年可使B再生水厂电药成本降低约为1 052万元,带来较好的成本效益。

3.2 调水时两厂溢流及污染物排放情况

在A来水量较大时向B再生水厂进行污水调配可以减少A再生水厂的污水溢流量,在37 300 m³/d的调水量下可以保障2个来水量全处理,不发生溢流;随着调水量的增加,超过B再生水厂的处理能力时,多余污水从B再生水厂溢流,污染物排放量上升较快,最大调水量时达到21.5 t/d,但比相同条件下A不调水时排放到水体的污染物质(51.3 t/d)的排放降低50.0%以上,主要原因:(1)当B再生水厂处理负荷未满载而A再生水厂来水多余处理能力时,污水调配可以减少整个流域的溢流量,排放污染物质也相应降低;(2)而当B再生水厂和A再生水厂均来水达到其处理能力时,A再生水厂向B再生水厂进行污水调配也能降低污染物的排放量,这是由于B再生水厂污水收集范围内污水水质指标低,B再生水厂污水和A再生水厂调水混合后多余的污水在B再生水厂溢流,其水质相比A再生水厂溢流水质低(COD低22.0%,氨氮低

20.0%, TN 低 13.9%), 因此也能减少污染物的排放。

4 调水方案的优化建议

4.1 基于环境效益, 减少污水溢流

根据运行数据, A 再生水厂和 B 再生水厂的污水流量高峰基本一致, 两厂泵前池调节能力有限。因此, 会出现污水峰值时段两厂水量均超过处理能力, 污水谷值时段 2 个达不到处理能力, 会造成全天处理水量不高, 且有溢流发生的现象, 并无法实现在处理能力范围内污水最大量处理。经核算, A、B 再生水厂污水调配管线长度约为 10.0 km, 管径为 DN1200, 满管污水存储量为 11 000 m³。在丰水季节, 每日两厂水量高峰即将过去时, 可以关闭 A、B 再生水厂调水管线进入 B 再生水厂的闸门, 将剩余污水存储在调水管线^[4], 待 B 再生水厂污水低谷来临之时打开调水管线进水闸门, 可以进一步减少 B 再生水厂的溢流, 增加处理水量。还可以进行两厂进水泵房调蓄能力的核算和测试, 并利用其进行污水调蓄。

2018 年 10 月后, 由于 B 再生水厂的二期工程投入运行, A、B 两厂处理能力大大提高, 基本实现了非汛期不溢流, 极大降低了溢流污水对环境的污染。

4.2 基于两厂综合成本

由上分析可知, 当上游不调水时, B 再生水厂 BOD₅/TN、BOD₅/TP 等指标较低, B 再生水厂运行成本较高, 因此在枯水季节, 两厂的污水水量均不能达到自己处理能力时, A 再生水厂不进行污水调配, B 再生水厂的运行成本增幅较高。若在枯水季节, A 再生水厂适当进行污水调配, 降低本厂处理水量, 增加 B 再生水厂的处理水量, 可以进一步实现两厂在枯水季节的成本优化。因此需要在丰水季节和枯水季节建立两厂关于水量-成本的关系, 在总水量一定的情况下进行线性规划, 得到成本最优的水量分配方案。

5 结论

(1) 利用污水管网进行污水调配是解决流域间

污水处理厂污水量不平衡问题的有效措施, 可以保障水质达标的同时尽可能地降低污水外溢, 减少环境事故风险^[5]。

(2) 不同区域的污水水质不尽相同, 跨区域的污水调配可以平衡处理厂之间的污染物负荷, 同时降低处理厂的综合处理成本。

参考文献

- [1] 甄豪波, 黄和庆, 梁楠焜. 江门市江海区污水调配工程设计[J]. 净水技术, 2018, 37(s1): 140-142.
ZHEN H B, HUANG H Q, LIANG N K. Engineering design of sewage distribution in Jianghai District of Jiangmen [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(s1): 140-142.
- [2] 陈建. 城镇污水管网互联互通规划设计要点与实例分析[J]. 环境工程, 2024, 42(4): 125-131.
CHEN J. Key points and case study of municipal sewer network interconnection planning and design [J]. Environmental Engineering, 2024, 42(4): 125-131.
- [3] 陈锦全, 汤钟. 韧性城市背景下构建区域韧性污水系统的探索与实践[J]. 净水技术, 2021, 40(8): 120-125.
CHEN J Q, TANG Z. Exploration and practice on construction of regional resilient wastewater system under the background of resilient city [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(8): 120-125.
- [4] 邵军峰, 安振源, 王羽中, 等. 郑州市污水厂群应急联合调度的优化布局与实现[J]. 净水技术, 2024, 43(7): 92-99.
SHAO J F, AN Z Y, WANG Y Z, et al. Optimal layout and implementation of joint emergency operation of WWTPs group in Zhengzhou City [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(7): 92-99.
- [5] 罗亭, 付朝晖, 陈洪洪. 污水厂群应急联合调度——珠海香洲区污水系统规划案例[J]. 中国给水排水, 2021, 37(6): 17-23.
LUO T, FU Z H, CHEN H H. Emergency joint dispatching for sewage treatment plants: A case study on the sewage system planning in Xiangzhou District, Zhuhai [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(6): 17-23.

(上接第 86 页)

- [29] KUBERKAR T V, DAVIS H R. Modeling of fouling reduction by secondary membranes [J]. Journal of Membrane Science, 2000, 168(1/2): 243-258. DOI: 10.1016/S0376-7388(99)00324-5.
- [30] AN Y, WANG Z, WU Z, et al. Characterization of membrane foulants in an anaerobic non-woven fabric membrane bioreactor for municipal wastewater treatment [J]. Chemical Engineering

Journal, 2009, 155(3): 709-715.

- [31] UCAR D, YILMAZ T, CAPUA D F, et al. Comparison of biogenic and chemical sulfur as electron donors for autotrophic denitrification in sulfur-fed membrane bioreactor (SMBR) [J]. Bioresource Technology, 2020, 299: 122574. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122574.