

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.03.013

沿海地区污水处理厂雨水混入率对设计规模的影响

王凯, 李一平, 赖秋英, 秦文凯, 蒲亚帅

(河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要:以沿海地区台州某污水处理厂为例,基于三角形法,对雨水混入与污水处理厂水质、水量的响应关系进行分析,探讨雨水混入率对污水处理厂设计规模的影响。结果表明:沿海地区污水处理厂进水水质受降雨影响较大,实际进水水质因雨水混入而小于设计值;沿海地区污水处理厂处理水质效果较差,污染负荷削减率平均值远低于全国平均值;小雨时,沿海地区污水处理厂污染负荷削减率最高,污染负荷削减率随着降雨规模的增大而减小;沿海地区污水处理厂满负荷运行时,污水量处理率较低,为60%~70%;沿海地区污水处理厂实际进水量远大于设计值,水量设计规模宜考虑乘1.4的修正系数。

关键词:污水处理厂;沿海地区;进水水质;污染负荷削减率;雨水混入率;修正系数

中图分类号:X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2020)03-0076-07

Influence of rainwater mixing rate on design scale of sewage treatment plant in coastal area // WANG Kai, LI Yiping, LAI Qiying, QIN Wenkai, PU Yashuai (College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Taking a sewage treatment plant in Taizhou, a coastal city, as an example, based on the triangle method, the response relationship between rainwater mixing and water quality and quantity of sewage treatment plant was analyzed. The influence of rainwater mixing rate on the design scale of sewage treatment plant was discussed. The results show that the influent water quality of sewage treatment plant in coastal area is greatly affected by rainfall, and the actual influent water quality is less than the design value due to the rainwater mixing. The effect of sewage treatment plants in coastal areas is poor, and the average value of pollution load reduction rate is far lower than the national average value. In case of light rain, the pollution load reduction rate of sewage treatment plant in coastal area is the highest, and the pollution load reduction rate decreases with the increase of rainfall intensity. When the sewage treatment plant in coastal area operates at full load, the treatment rate of sewage volume is relatively low, which is 60%-70%. The actual water inflow of sewage treatment plant in coastal area is far greater than the design value, and the design scale of water volume should be multiplied by 1.4 correction coefficient.

Key words: sewage treatment plant; coastal area; influent water quality; pollution load reduction rate; rainwater mixing rate; correction coefficient

沿海地区城市发展速度较快,城市老城区多采用雨污合流,雨污管混接、错接、漏接造成大量雨水进入污水管网,不仅容易造成管网收集、管网输送、泵站提升的困难和污水处理厂处理水量和水质负荷增加,更会造成污水处理厂污水溢流污染环境,造成巨大的经济损失。南方沿海地区全年雨量充沛,污水处理厂的稳定运行更易受降雨影响,明确沿海地

区排水管网的雨水混入与污水处理厂水质水量响应关系尤为关键。针对污水水质、水量对污水处理厂运行的影响,国内外都进行了相关研究,卞明明等^[1]指出雨季大量含高浓度悬浮物污水进入污水处理厂,会导致进水水质显著变差;文彪^[2]分析得出雨天污水处理厂设计进水量远低于最大进水量,且晴天进水水质浓度显著高于雨天进水水质浓度;

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2019B76414);中央高校建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项;国家重点研发计划(2017YFC0405203)

作者简介:王凯(1995—),男,硕士研究生,研究方向为水环境数学模型。E-mail: 2323338471@qq.com

通信作者:李一平,教授。E-mail: liyiping@hhu.edu.cn

杨文进等^[3]研究得出地下水渗入排水管道的水量与地下水位具有显著线性关系;盛政等^[4]对西南某市测量点分析得出降雨量与降雨入渗量呈显著正相关,降雨入渗导致管道设计水量低于实际水量;红海西岸苏丹喀土穆污水处理厂因雨水混入导致实际进水 BOD 浓度只达到设计浓度的一半^[5];滨海地区深圳市福田区管道塌陷、雨污管错接导致地下水渗入量占总污水量的 1/4^[6]。目前,国内外研究更注重雨水地下水混入污水管网的定性研究和地下水混入管道的定量测定,但对污水排水管网雨水混入导致污水处理厂负荷冲击的影响缺少研究。

本研究以沿海地区台州某污水处理厂为例,对污水处理厂进厂污水水量和水质进行分析,从而得出沿海地区污水处理厂实际运行能力参考值,减少雨水混入管网对污水处理厂造成冲击负荷,以期为保证排水水质达标排放提供科学有效的支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

台州市椒江区地处浙江省东部沿海,介于东经 121°20′24″~121°32′02″,北纬 28°34′25″~28°46′53″之间,位于温黄平原,平原面积占全区面积的 62.34%。2017 年台州全市平均降水量 1376.1 mm,降水量时空分布不均匀,6—9 月降水量占全年降水量的 53%;6 月降水量为全年最大,占全年降水量的 25%,各站降水量基本都在 250 mm 以上;2 月降水量为全年最小,占全年降水量的 2%。降水量空间分布总体不均匀,高值区出现在台州中西部,年降水量达 1200~1500 mm,低值区出现在台州南片,年降水量为 1000~1100 mm。

台州市椒江区分为椒南和椒北两个区块,椒南片区位于温黄平原沿海东南部,是台州的经济和政治中心。本研究选取位于椒南区块的某污水处理厂(图 1),其建设共分为两期工程,设计处理能力为 15 万 t/d,一期工程设计处理能力为 5 万 t/d,采用

AO 处理工艺,进水以城市生活污水为主,处理后的出水水质达到生活杂用水标准;二期工程设计处理能力为 10 万 t/d,采用“改良型 AB 法”处理工艺,处理后的出水水质达到 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》中一级 A 标准,排放至台州湾。

椒南片区现状老旧城区为雨污合流制,根据《椒江区污水工程专项规划(2017—2030)》,截流倍数为 3,新建区块均为雨污分流制。由于历史的原因和越来越高的发展要求,椒南片区污水管网亟待改进的问题包括:部分管网高程不匹配,开发区和老城区污水管道存在高水位运行;雨季时农村污水管网下游管网内水位较高,排水不畅,造成污水返溢;老城区水污管道运行年限超 30 年,管网漏水率达 10%;老城区雨污合流现象严重,雨污分流区域阳台废水排入雨水管网,造成雨水排出口被堵后雨水进入污水系统;污水管道结构性缺陷和功能性缺陷现象普遍,地下水通过管节和破裂处渗入管内,同时污水容易通过缺陷处外溢,影响管道正常排水功能。

1.2 计算方法

选取 2017 年 8 月至 2018 年 8 月作为研究时段,进厂污水水质、水量数据来自污水处理厂在线监测系统,降水量来自椒江区气象局。采用三角形法^[7]对雨水混入污水系统进行定量分析。初期雨水体积、负荷削减率和污水处理厂处理率的计算公式分别为

$$V = Ah\varphi \quad (1)$$

$$P_{LRR} = \frac{R_{PL}}{P_E D_{PL}} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_2} \quad (3)$$

式中: V 为初期雨水体积; A 为汇水面积,椒南片区共计汇水面积 98.55 km²; φ 为折减系数,根据 GB 50014—2006《室外排水设计规范》, φ 取 0.6; h 为设计水深,取 4~8 mm; P_{LRR} 为负荷削减率; R_{PL} 为城市污水处理厂的污染物削减量; P_E 为城市污水系统服务的总当量人口; D_{PL} 为人均日污染物排放量^[8]; η 为污水处理厂处理率; Q_1 为污水处理厂处理污水量; Q_2 为污水产生量。

根据《椒江区椒北污水管网系统工程规划(2010—2020)》中椒江水体功能,处理出水水质执行 GB 18918—2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》中一级 A 排放标准,污水处理厂设计进水 COD、NH₃-N、TP 和 TN 的质量浓度分别为 350 mg/L、30 mg/L、4 mg/L 和 40 mg/L。依据 CJ 343—2010《污水排入城镇下水道水质标准》《全国水环境容量核

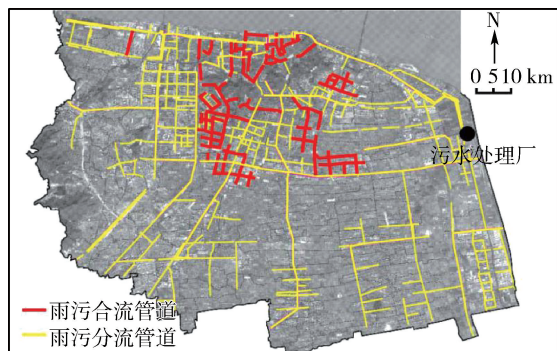


图 1 台州某污水处理厂服务范围

Fig. 1 Service scope of a sewage plant in Taizhou

定技术指南》、GB 50014—2006《室外排水设计规范》等进行参数选取,按照浓度当量进行污水处理厂污染负荷削减率计算。

2 结果与分析

2.1 降雨对污水处理厂处理量的影响

选取的某污水处理厂 2017 年 8 月至 2018 年 8 月日污水量与降水量变化曲线见图 2。由图 2 可见,日污水量变化浮动较大,范围在 6~23 万 m^3/d 之间,最高日污水量约为设计处理规模的 1.58 倍,最低日污水量约为设计处理规模的 40%,日污水量达设计处理规模(15 万 m^3/d)的天数占全年总天数比例为 63%。日降水量小于 25 mm 的天数占一年总天数比例为 90%。进一步分析发现,当日污水量高于污水处理厂设计处理规模时,污水处理厂日污水量与降水量相关性较弱,并没有明显一致性;日污水量低于污水处理厂设计处理规模时,污水处理厂日污水量与降水量存在较为明显的相关性。不同月份污水处理率和降水量见图 3,可以发现,污水处理率始终维持在 60%~70%,不同月份污水处理率并未随降水量不同而出现较大变化,这说明污水处理厂长期处于满负荷的运行状态,仅在短期的非满负荷

运行条件下,降雨才会对污水处理厂进水量产生影响。降雨对污水处理厂的影响更多体现在雨水的混入比例上,翁晟琳等^[9]对雨水混入台州生活污水处理厂比例的研究中也说明了这一点。

2.2 雨水混入的定量计算

根据国家气象局颁布的降水规模等级划分标准,24 h 内降水总量在 0.1~10.0 mm 为小雨、10.0~25.0 mm 为中雨、25.0~50.0 mm 为大雨、大于 50 mm 为暴雨。因台州椒江区降雨强度达暴雨频率较低,不具有代表性,故以小、中、大雨为主进行分析。根据台州某污水处理厂提供的 2017 年 8 月至 2018 年 8 月在线监测数据,晴天、小雨、中雨和大雨时污水处理厂实际污水量均超过设计处理量 15 万 t/d ,污水处理厂的污水量并没有明显变化,污水处理厂运行负荷处于高水平。利用三角形法(图 4)对雨水混入量进行分析,将污水处理厂 2017 年 8 月至 2018 年 8 月的日污水量按时间进行升序排列,得到一条曲线,将横坐标以一年总天数 365 天做均一化处理、纵坐标为日污水量占最大日污水量的比例,则矩形区域代表原生污水量,蓝色区域代表地下水渗入量,橘色区域代表河水渗入量,青色区域代表雨水混入量。结果发现此污水处理厂日均雨水混入量约 3.42 万 t ,占污水处理厂日均污水量 22.3%。薛梅等^[10]通过水量平衡法研究日本关东平原地区得出雨天混入管道雨水量占污水总水量比例高达 59%,而日本管网漏水率为 9%;上海市多数地区地下水、雨水渗入比例值是设计时渗入比例值的 2~3 倍^[11];Flood 等^[12]指出降雨与地下水渗入管网有明显关系,美国沿海北卡罗来纳海滩污水处理厂渗入率达 15%。可见沿海地区污水处理厂普遍存在雨水混入污水管网的现象,雨水实际混入管网比例远大于一般考虑的混入比例 10%,主要原因是沿海城市雨量丰沛,地下水位相对较高,城市老城区多采用雨污合流,市政基础设施建设较为复杂,使用年限较长,容易发生管网入渗现象。

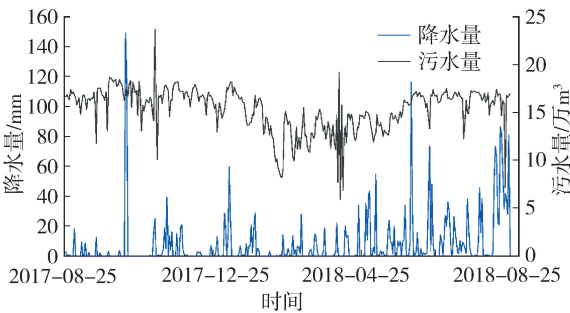


图 2 2017 年 8 月至 2018 年 8 月日污水量与降水量变化曲线

Fig. 2 Change curve of daily sewage volume and precipitation from August 2017 to August 2018

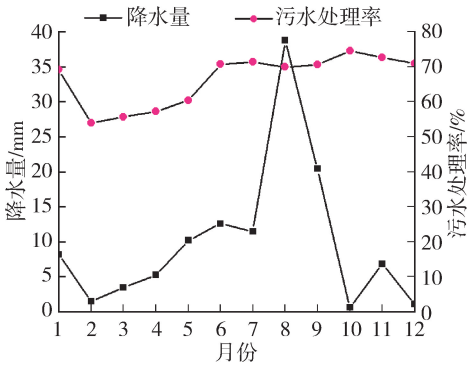


图 3 不同月份污水处理率和降水量

Fig. 3 Sewage treatment rate and precipitation in different months

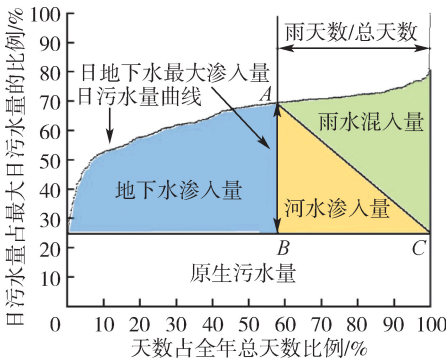


图 4 三角形法原理

Fig. 4 Principle of triangle method

中国南方滨海城市一年中降雨天数占总天数比例近 60%,图 5 为雨水混入比例与不同降雨规模出现频率关系。由图 5 可见,小雨的降雨频率最高,但雨水混入污水比例较低;中雨和大雨的降雨频率较高,雨水混入污水比例也较大;暴雨的雨水混入污水比例较高,但降雨频率较低。故以降水量为 10.0 ~ 50.0 mm 的区间为主导分析污水中混入雨水的比例。通过计算得小雨时雨水混入污水比例为 12.8%,中雨时雨水混入污水比例升高为 19.6%,大雨时雨水混入污水比例进一步升高至 37.7%,但当达到暴雨时雨水混入污水比例降至 26.2%。可见,在一定降水量范围内,降水量越大,雨水混入管网比例越大,雨水混入对污水管网产生的影响越大,管网的排水能力越差,而降水量大于 50 mm 时,雨水混入污水比例反而变小。造成这种现象的原因是污水量到达一定限值后,为了避免长时间高负荷运行对污水处理厂造成危害,污水处理厂部分泵站会被关闭,泵站不再发挥调节作用,多余的水量通过超越管直接排至河道。沿海地区污水处理厂流量设计经验公式^[13]为

$$Q_s = 1.4Q_hK_Z \tag{4}$$

式中: Q_s 为污水处理厂设计规模; Q_h 为混合总污水量; K_Z 为污水量总变化系数;1.4 是根据台州某污水处理厂雨水混入率计算结果得到的修正系数。

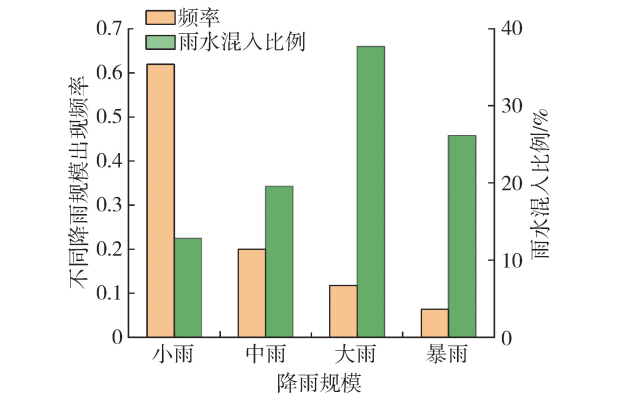


图 5 雨水混入比例与各区间降雨频率关系

Fig. 5 Relationship between proportion of rainwater mixed in and frequency of rainfall in each region

2.3 降雨对污水处理厂进水水质的影响

从长期运行数据看,污水处理厂实际进水水质指标具有一定规律,晴天时进厂污水各指标质量浓度较低,原因是地下水混入管网比例较大,造成污水水质指标质量浓度偏低;降雨时,污染物总量明显增加,进厂污水 COD、NH₃-N、TP、TN 的质量浓度波动较大,其最高质量浓度分别可达 1 000 mg/L、80 mg/L、54 mg/L 和 218 mg/L,分别是污水处理厂相应指标设计能力的 2.86 倍、2.67 倍、13.5 倍和 5.45 倍。进水的水质波动较大可能是因为污水系

统的运行管理模式导致的,泵站的启闭、间断性运行对进水水质、水量造成影响,这给处理系统稳定运行带来较大不确定性。取 2017 年 8 月至 2018 年 8 月中 63 场小雨、41 场中雨、37 场大雨进行分析,场次降雨时间间隔为不小于 2 h,部分降雨的特征值见表 1。

表 1 部分降雨的特征值

Table 1 Characteristic value of several rainfalls					
采样时间	降雨历时/h	降水量/mm	降雨强度/(mm·h ⁻¹)	降雨规模	径流规模
2018-01-21	4	6	1.5	小雨	小
2018-02-21	3	5	1.7	小雨	小
2018-03-30	3	21	7.0	中雨	中
2018-04-15	3	19	6.3	中雨	中
2018-01-06	5	46	9.2	大雨	大
2018-08-24	3	44	14.7	大雨	大

表 2 为进水水质指标的质量浓度与降雨规模的关系。从表 2 可以看出,小雨时,降雨径流量小,进水 COD、TP 的质量浓度较晴天均较大幅度提高,进水 TN、NH₃-N 的质量浓度较晴天几乎不变,这是初期雨水污染物质量浓度高导致的。台州椒江初期雨水量为 33.61 万 ~ 67.22 万 m³,初期雨水溶解了空气中大量工厂废气、汽车尾气、酸性气体等气体,降落地面后会冲刷屋面、道路等,导致大量的悬浮固体、可降解有机物、营养物质、有毒有害物质等污染物存在其中^[14]。根据测量,台州椒江区地表径流以固体悬浮物为主,由细小颗粒物、胶体物质、PAHs 及有机大分子组成。中雨时,降雨径流量变大,进水中 COD、NH₃-N、TN、TP 的质量浓度均降低,原因是中雨时大量雨水混入污水管道,稀释作用让进水水质指标的质量浓度降低;但大量的面源污染混入污水管道使 TN 和 NH₃-N 的质量浓度下降幅度较小。大雨时,降雨径流量大,随着时间的推移,大量雨水混入污水管道,雨量的稀释占主要作用,污水水质各项指标的质量浓度均大幅度降低。施萍等^[15]研究表明位于典型平原河网地区的靖江市污水处理厂由于市辖各镇地区排水体制以雨污合流为主,污水处理系统不能完全发挥效益,导致靖江老城区河道水环境质量普遍较差;Giokas 等^[16]对希腊沿海地区伊万

表 2 进水水质指标质量浓度与降雨规模的关系

Table 2 Relationship between quality concentration of inflow water quality index and rainfall scale					mg/L
降雨规模	ρ (COD)	ρ (TP)	ρ (NH ₃ -N)	ρ (TN)	
晴天	177.72	2.89	31.55	38.95	
小雨	233.05	4.11	31.83	38.42	
中雨	174.18	3.93	20.92	32.14	
大雨	118.40	2.30	16.55	17.18	

尼纳废水处理厂研究发现雨天日流量变化较大,进、出水 COD 负荷明显增加,进水 TN 负荷增加约 25%;林源^[17]的研究表明沿海地区深圳滨河污水处理厂一年中进水水质 BOD₅ 浓度低于设计值的天数达半数以上。可见沿海地区污水处理厂进水水质易受雨水影响,平原河网地区、滨海地区城市化程度相对较高,城市不透水面积较大,部分城区雨污混流制,雨天大量雨水易混入污水管网系统,污水管道中污染物的浓度随降水量的不同而波动,造成对污水处理厂污染物负荷冲击。

计算不同降雨规模下的污染负荷削减率,结果见图 6。由图 6 可见,台州某污水处理厂平均污染负荷削减率远低于全国平均负荷削减率 63%^[8],且随着降雨规模的增大,污染负荷削减率逐渐降低。原因是台州城市污水管网运行状况不佳,大量雨水混入污水系统,造成污水处理厂污水水量超负荷运行,且随着降雨规模的增大,进厂水质低负荷冲击进一步加剧。此外,通过相关性分析,污染负荷削减率与进水水质具有一定的相关性,在置信区间为 95% 的情况下,污染负荷削减率与进水 COD、NH₃-N、TP、TN 的质量浓度相关性系数分别 0.679、0.488、0.621、0.899,即进水水质的质量浓度可作为评价污水处理厂处理效率的一项重要参数,且较高的污水进水水质指标质量浓度有利于提高污水处理厂效率。

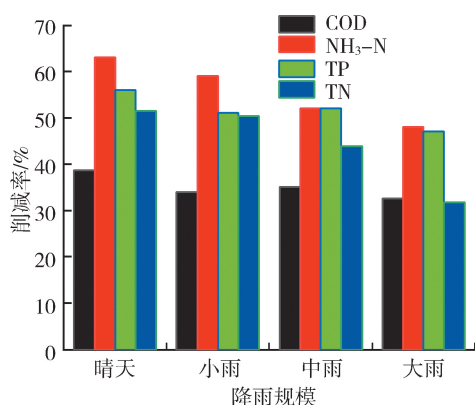


图 6 污染负荷削减率与降雨规模的关系

Fig. 6 Relationship between pollution load reduction rate and rainfall scale

2.4 沿海地区污水处理厂实际设计参数的合理选择

城市污水处理厂实际设计参数主要分为进厂污水水量和水质两部分^[18]。污水水量和水质一般与污水处理厂所服务范围内的人口数量、人均用水定额、污染物排放系数、工业废水等有关,同时雨水、地下水渗入对污水处理厂设计参数的合理确定也有重要的影响。中国南方若干城市污水处理厂并不能充

分发挥作用,效益较低的主要原因就是未充分考虑实际天气和地形情况。雨水混入污水系统对污水处理厂污水量影响方面,国内外已有一定研究,张日霞等^[19]的研究表明西安市管网漏水率达 20% 以上,某污水处理厂进水污水量实际总变化系数 K 是初始设计值的 1.4 倍; Bertrand-Krajeski 等^[20]的研究表明一次强降雨中进入污水处理厂的流量约为晴天流量的 3.08 倍, TSS、BOD 和 NH₃-N 的进水质量负荷分别是晴天负荷的 10 倍、7 倍和 1.2 倍,排放到河流 TSS 质量负荷是晴天的 7 倍;中国沿海地区上海市白龙港和竹园污水处理厂因设计时未充分考虑雨季合流制系统雨水混入的影响,导致污水处理厂溢流直排 COD 总量约达年排放总量的 1/3^[21];美国北卡罗来纳州东部沿海平原地区污水处理厂受降雨影响显著,进入管网的量超总流量的 10%,且降雨与入管网雨水量之间的正相关性和雨水径流对水质的影响相似^[22];瑞典西南沿海城市 Helsingborg 市,雨水和地下水渗入量达污水处理厂平均年流量的 42%^[23]。在雨水混入污水系统影响污水处理厂水质方面,古凌艳等^[24]通过对沿海地区广东省某污水处理厂研究发现,天气对该厂进水水质有较大影响,旱季(10 月至次年 4 月)进水水质超过设计标准,但在雨季(5—9 月)却远低于设计标准; Berthouex 等^[25]通过对 15 个运行良好的污水处理厂研究发现,其中 BOD 和 TSS 浓度异常的污水处理厂中分别有 11% 和 19% 是由高进水流量负荷导致的;大雨时,法国弗朗德平原地区里尔污水处理厂进水水质受雨水影响较大,进水 BOD、COD 和 TP 最高质量浓度分别可达污水处理厂设计标准 13.45 倍、13.52 倍和 2.83 倍^[26];位于淮北平原亳州市污水处理厂因雨水混入导致进水 COD、BOD、NH₃-N 和 TN 的质量浓度较低,分别只达设计水质指标的 16.6%、23.8%、19.7% 和 37.5%^[27]。总的来说,水量方面,国内外污水处理厂普遍因雨水混入导致实际进厂污水量超过设计水量的 20%,且平原和沿海地区的雨水混入比例高于非平原和内陆地区。水质方面,国内外污水处理厂普遍因外水混入导致进水水质浓度远小于设计值,进水水质浓度小于设计值的天数达半数以上,出水水质达标率较低。对本研究区域来说,污水处理厂水量设计规模应考虑 20% ~ 35% 的雨水混入量,水质设计参数应考虑进水水质的波动。小雨时,进水中 COD、NH₃-N、TP、TN 平均质量浓度是晴天相应指标的 1.4 倍、1.15 倍、1.7 倍、1.1 倍;中雨时,进水中 COD、NH₃-N、TP、TN 平均质量浓度是晴天相应指标的 57%、62%、49%、41%;大雨时,进水中 COD、NH₃-N、TP、TN 平均质量浓度是晴天相

应指标的 84%、87%、103%、64%。台州椒江区外水混入比例较大,可进一步开展管网排查工作,强化老旧管网合流制管网改造,具备条件的地区可加快实施雨污分流改造,原有雨污合流管网在清淤、疏通后可作为雨水管,并新建污水管道;暂不具备改造条件的地区,应通过建设调蓄设施、增大截流倍数等措施,预防雨污合流引起的溢流污染。

3 结 论

a. 雨水混入污水排水管网使沿海台州某污水处理厂实际进水水质总体上小于设计值。小雨时和大雨时,进水水质波动对污水处理厂影响最大,污水处理厂设计参数和处理工艺选择时宜着重考虑小雨和大雨时进水水质的变化范围;台州地表径流污染物以固体悬浮物为主,控制初期降雨径流、去除地表径流固体悬浮物是台州治理降雨径流污染、降低污水处理厂负荷的有效手段。

b. 台州某污水处理厂处理水质效率较低,污染负荷消减率远低于全国负荷削减率平均值,且污染负荷削减率随着降雨强度的增大而减小。不同降雨强度下污水处理厂 COD、NH₃-N、TP、TN 负荷削减率分别为 33% ~ 39%、48% ~ 63%、47% ~ 56%、32% ~ 51%;污水处理厂满负荷运行,污水量处理率较低,大致维持在 60% ~ 70%。

c. 台州某污水处理厂实际进水量远大于设计值。小雨、中雨、大雨和暴雨时,雨水混入污水比例分别为 12.8%、19.6%、37.7% 和 26.2%。考虑雨水混入对沿海地区污水处理厂规模影响,建议沿海地区污水处理厂水量设计规模宜考虑乘以一个 1.4 的修正系数。

参考文献:

[1] 卞明明,李嘉健,刘建国. 安家岭终端污水处理厂存在问题及解决对策[J]. 露天采矿技术,2017,32(3):70-73. (BIAN Mingming, LI Jiajian, LIU Jianguo. Problems and countermeasures in Anjialing terminal sewage treatment plant[J]. Opencast Mining Technology, 2017, 32(3):70-73. (in Chinese))

[2] 文彪. 城镇污水处理厂雨季运行中的问题及对策[J]. 江西建材,2014(3):70-71. (WEN Biao. Problems and countermeasures in the operation of the rainy season in the urban sewage plant[J]. Jiangxi Building Materials, 2014 (3):70-71. (in Chinese))

[3] 杨文进,雷培树,李树苑. 地下水渗入排水管道的危害性和渗量分析及防渗建议[J]. 给水排水,2007,33(11):113-115. (YANG Wenjin, LEI Peishu, LI Shuyuan. Analysis of harmfulness and infiltration quantity of

groundwater seepage in drainage pipe and suggestions[J]. Water and Wastewater Engineering, 2007, 33(11):113-115. (in Chinese))

[4] 盛政,刘旭军,王浩正,等. 城市污水管道入流渗入监测技术研究与应用进展[J]. 环境工程,2013,31(2):17-21. (SHENG Zheng, LIU Xujun, WANG Haozheng, et al. Research and application progress on monitoring technology of urban sewage pipeline inflow and infiltration [J]. Environmental Engineering, 2013, 31(2):17-21. (in Chinese))

[5] ELATAMY A. Upgrading of Elhaj Yousif sewage treatment plant[D]. Khartoum:University of Khartoum, 2015.

[6] 刘旭辉,张金松,GOULVEN Inial. 深圳市排水系统地下水渗入量初步研究[J]. 中国给水排水,2013,29(3):77-79. (LIU Xuhui, ZHANG Jinsong, GOULVEN Inial. Groundwater infiltration in Shenzhen Drainage System [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(3):77-79. (in Chinese))

[7] 郭帅,张士乔, ZHU D. 地下水渗入排污管道的定量方法[J]. 中国给水排水, 2013, 29(4):21-25. (GUO Shuai, ZHANG Shiqiao, ZHU D. Quantitative methods for groundwater infiltration into sewer system [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(4):21-25. (in Chinese))

[8] 白桦,刘广奇,张志果,等. 基于污染物当量的城市污水处理效率评价方法研究[J]. 给水排水,2018,54(11):21-26. (BAI Hua, LIU Guangqi, ZHANG Zhiguo, et al. Evaluation method research of municipal wastewater treatment system efficiency based on pollutant load [J]. Water & Wastewater, 2018, 54(11):21-26. (in Chinese))

[9] 翁晟琳,李一平,卢绪川,等. 台州市生活污水处理厂设计水量中雨水混入比例研究[J]. 水资源保护,2017,33(4):75-79. (WENG Shenglin, LI Yiping, LU Xuchuan, et al. Study of rainwater mixing rate of design water quantity at domestic sewage treatment plants in Taizhou City[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(4):75-79. (in Chinese))

[10] 薛梅,周柯锦,郭一令,等. 下水道中不明水的调查及防治对策[J]. 中国给水排水,2006,22(17):53-56. (XUE Mei, ZHOU Kejin, GUO Yiling, et al. Survey of unknown water in sewers and corresponding countermeasure [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(17):53-56. (in Chinese))

[11] 时珍宝,李田,孙跃平. 高地下水位地区排水管道渗漏的确定[J]. 工业用水与废水,2004,35(2):61-63. (SHI Zhenbao, LI Tian, SUN Yueping. Determination of drainage pipeline leakage in high groundwater level area [J]. Industrial Water & Wastewater, 2004, 35(2):61-63. (in Chinese))

- [12] FLOOD J F, CAHOON L B. Risks to coastal wastewater collection systems from sea-level rise and climate change [J]. Journal of Coastal Research, 2011, 27(4): 652-660.
- [13] 孙修慧. 排水工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [14] 郭玉梅, 郭昉, 吴毅晖, 等. 雨季条件下昆明第五污水处理厂水量水质特征分析[J]. 城镇供水, 2014; 362-367. (GUO Yumei, GUO Fang, WU Yihui, et al. Analysis of water quantity and quality characteristics of Kunming fifth sewage treatment plant in rainy season[J]. City and Town Water Supply, 2014; 362-367. (in Chinese))
- [15] 施萍, 郭羽. 平原河网城市: 靖江海绵城市规划方法探索[J]. 中国给水排水, 2017(8): 1-6. (SHI Ping, GUO Yu. Sponge city planning method of Jingjiang City in plain river network area[J]. China Water & Wastewater, 2017(8): 1-6. (in Chinese))
- [16] GIOKAS D, VLESSIDIS A, ANGELIDIS M, et al. Systematic analysis of the operational response of activated sludge process to variable wastewater flows: a case study [J]. Clean Technologies & Environmental Policy, 2002, 4(3): 183-190.
- [17] 林源. 深圳滨河污水处理厂传统活性污泥法运行管理[J]. 给水排水, 1999(3): 1-3. (LIN Yuan. Operation and management of traditional activated sludge process in Shenzhen Binhe Sewage Treatment Plant. [J]. Water & Wastewater, 1999(3): 1-3. (in Chinese))
- [18] 杨小全, 曲炜. 工业园区污水治理综合管控措施: 以某工业园区污水处理厂为例[J]. 水利经济, 2018, 36(6): 53-56. (YANG Xiaoquan, QU Wei. Comprehensive control measures for sewage treatment in industrial park: a case study of sewage plant of an industrial park [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(6): 53-56. (in Chinese))
- [19] 张日霞, 王社平, 张兴兴. 城市污水处理厂进水量变化系数与栅渣量调查分析[J]. 给水排水, 2009, 35(1): 41-43. (ZHANG Rixia, WANG Shaping, ZHANG Xingxing. Investigation and analysis of variation coefficient of influent and slag quantity in municipal sewage treatment plant. [J]. Water & Wastewater, 2009, 35(1): 41-43. (in Chinese))
- [20] BERTRAND-KRAJEWSKI L J, LEFEBVUE M, LEFAI B, et al. Flow and pollutant measurements in a combined sewer system to operate a wastewater treatment plant and its storage tank during storm events[J]. Water Science & Technology, 1995, 31(7): 1-12.
- [21] 张嘉毅, 唐建国, 张建频, 等. 日本横滨排水设施建设及运行管理经验和启示(下)[J]. 给水排水, 2008, 34(12): 116-120. (ZHANG Jiayi, TANG Jianguo, ZHANG Jianpin, et al. Experience and enlightenment of construction and operation management of Yokohama drainage facilities in Japan (Part II) [J]. Water & Wastewater, 2008, 34(12): 116-120. (in Chinese))
- [22] CAHOON L B, HANKE M H. Rainfall effects on inflow and infiltration in wastewater treatment systems in a coastal plain region[J]. Water Science and Technology, 2017, 12: 1909-1921.
- [23] SEMADENI-DAVIES A, HERNEBRING C, SVENSSON G, et al. The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: suburban stormwater [J]. Journal of Hydrology, 2008, 350(1): 100-113.
- [24] 古凌艳, 张宏. 改良 A²/O 工艺在南方雨季的工艺运行控制[J]. 中国给水排水, 2006, 22(16): 84-86. (GU Linyan, ZHANG Hong. Operation and control of improved A²/O process used in rainy seasons of southern cities[J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(16): 84-86. (in Chinese))
- [25] BERTHOUEX P M, FAN R. Evaluation of treatment plant performance: causes, frequency, and duration of upsets [J]. Journal of Water Pollution Control, 1986, 58(5): 368-375.
- [26] 王银爽, 周立, 王英, 等. 法国里尔污水处理厂 ActifloTurbo 工艺处理大流量暴雨水[J]. 中国给水排水, 2017, 33(22): 111-115. (WANG Yinshuang, ZHOU Li, WANG Ying, et al. Actiflo turbo application for stormwater treatment of Lille WWTP in France[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(22): 111-115. (in Chinese))
- [27] 王全, 王立, 刘欢, 等. 污水处理厂扩建工程中 A²O 型氧化沟工艺优化设计[J]. 中国给水排水, 2019, 35(6): 67-71 (WANG Quan, WANG Li, LIU Huan, et al. Optimization design of A²O oxidation ditch process for expansion project of wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(6): 67-71. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-07-06 编辑: 王 芳)

