

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.17.015

降雨对混接分流制地区污水厂进出水特征的影响

朴恒¹, 王晓东¹, 吴宇行¹, 黄青², 毕学军¹

(1. 青岛理工大学环境与市政工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 青岛首创瑞海水务有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 为研究青岛市分流制管网在降雨期的雨污混流程度及其对下游污水处理厂的影响, 采用方差分析(ANOVA)数据统计方法对污水处理厂在降雨期和非降雨期的进出水水质进行分析, 对分流制管网末端(污水处理厂进水)在降雨期和非降雨期的水质、水量差异显著性进行了检验, 并对相关水质指标的变化程度进行了相关性分析。结果表明, 降雨期污水处理厂进水溶解性COD(SCOD)、氨氮、总磷等污染物浓度显著低于非降雨期, 降低幅度分别为52%、40%、40% ($P=0.000$), 降雨期SCOD与SS呈明显的负相关性, 相关性系数为-0.467 0。由于降雨对道路表面沉积物和管道淤积物的冲刷效应, 在小雨以及中到大雨条件下, 污水处理厂进水SS和COD浓度比非降雨期增加了30%左右, 而进水氨氮、总磷等指标浓度受雨水稀释作用的影响下降了40%~50%。

关键词: 分流制管网; 污水处理厂; 雨污混接; 方差分析(ANOVA); 相关性分析

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)17-0088-05

Influence of Rainfall on Influent and Effluent Characteristics of Wastewater Treatment Plants in Separate Sewer Area with Illicit Connection

PIAO Heng¹, WANG Xiao-dong¹, WU Yu-xing¹, HUANG Qing², BI Xue-jun¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China; 2. Qingdao Shouchuang Ruihai Water Co. Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: The mixed pollution of rainwater and sewage in the separate sewer system of Qingdao and its impact on downstream wastewater treatment plants (WWTPs) during rainfall period was investigated. Analysis of variance (ANOVA) was used to analyze the influent and effluent quality of WWTPs during wet period and dry period. The significant difference of water quality and quantity at the end of the sewer system (influent of WWTPs) during wet period and dry period was tested, and a correlation analysis of the change degree of the related water quality indices was carried out. The dissolved COD (SCOD), ammonia nitrogen and total phosphorus in influent of WWTPs in the wet period were significantly lower than those in the dry period, which decreased by 52%, 40% and 40%, respectively ($P=0.000$). There was a significant negative correlation between influent SCOD and SS in the wet period, and the correlation coefficient was -0.467 0. Due to the flush effect of rainfall on road surface sediments and pipeline sediment, the influent SS and COD of the WWTPs during light rain or moderate

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD1100303); 国家自然科学基金资助项目(51908303)

通信作者: 王晓东 E-mail: wangxiaodong@qut.edu.cn

and heavy rain period increased by nearly 30% compared with those in the dry period. However, the ammonia nitrogen and total phosphorus decreased by 40%–50% due to the dilution effect.

Key words: separate sewer system; wastewater treatment plant; illicit connection; analysis of variance (ANOVA); correlation analysis

近年来,随着经济的快速发展和生活水平的提高,我国污水处理行业高速发展。然而,污水管网系统建设却滞后于污水处理行业。污水管网系统一般根据城市的地势及降雨量、管网设施现状和污水接纳水体条件等情况进行设计,分为合流制和分流制。合流制管网系统管线单一,水量少时污染物易在管网中沉积,水量大时又会将大量污染物质冲刷至污水处理厂,降雨期和非降雨期管网排入污水处理厂的水量及水质差异极大,加大了污水处理厂的管控难度^[1]。当降雨量较大、水量超过管网运输能力时,多余的雨污合流液将排入自然水体,造成水体污染^[2-4]。由于合流制管网系统大多建设于老城区,一部分老式管道存在损毁等问题,且合流制管网连接的污水处理厂进水浓度趋低,虽然污水收集率逐年升高,但管网建设质量存在一些不可忽视的问题。分流制管网系统受降雨的影响较小,污水处理厂进水水质波动小、管理负担轻,但也存在不利因素,例如,降雨前期,雨水冲刷导致城市路面沉积的大量污染物随雨水直接排入自然水体,导致接纳水体污染严重^[5]。笔者以青岛某大型污水处理厂为研究对象,考察了降雨期及非降雨期污水处理厂进、出水水质情况,并进行了方差分析(ANOVA)及相关性分析,对分流制管网系统在降雨期的实质作用进行了摸底调查,以期为城市管网建设和污水处理厂运行控制提供参考。

1 材料和方法

1.1 污水采样

青岛市某污水处理厂设计规模为 $25 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,污水处理厂服务区域内基本采用分流制管网收集污水,污水处理厂的工艺流程如图1所示。生化处理单元采用由改良A²/O工艺改造而来的IFAS工艺,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。在污水处理厂的初沉池和二沉池设置取样点,采用全自动取样器每2 h取一次样,共完成10 d的取样,分别获得120个进水和出水样本。污水处理厂分三期建成,各期的

生化处理单元独立运行,根据实际运行情况,总进水量在各期处理系统之间自由调配。本研究中的进水流量数据仅为所监测的初沉池和二沉池对应的生化处理单元的水量数据,因其进水流量在降雨期和非降雨期受污水处理厂人工调配,不在本研究讨论范围内。取样期间有两天为长时间降雨天气,降雨规模包括小雨(<10 mm)和中到大雨(17.1 ~ 38.0 mm),其中第1天降雨量为7 mm,第2天降雨量为37.5 mm。

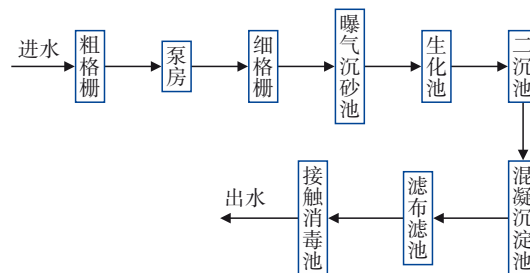


图1 污水处理厂工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment plant

1.2 检测项目与方法

按照国家标准方法检测进水和出水的COD、溶解性COD(SCOD)、SS、氨氮、硝酸盐氮、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、TP等指标,采用便携式温度计和pH计测量水温和pH,进水流量数据采用污水处理厂的实时监测数据。

1.3 数据统计分析

方差分析又称作“F检验”,是用于两个及以上样本均数的显著性检验。F值为检验统计量,是组间均方(MS组间)和组内均方(MS组内)的比值,将统计量F值与给定的临界F值进行比较,从而做出决策。Pearson系数(P值)代表结果的真实程度,F值越大、P值越小说明相对组间的差异越明显。

2 结果与讨论

2.1 污水水质和水量的变化

进水COD浓度及流量随时间的变化如图2所示,进水COD浓度在06:00—08:00期间处于最低值,08:00后开始上升,至13:00时处于高值,之后又逐渐下降,并在03:00出现另一个较高值。降雨期

进水COD浓度与非降雨期相比呈现明显上升趋势,而进水氨氮浓度则呈现出下降趋势。通常认为降雨期管道收集的雨水会稀释污水中的污染物浓度,而图2中进水COD与氨氮浓度在降雨期呈现出不同的变化规律,这增加了本研究对雨水稀释作用进行定量分析的难度。此外,在不受雨水干扰的情况下,污水处理厂进水水质和水量本身也在不断波动变化。因此,有必要对水质指标做进一步统计分析,研究相关水质指标变化的显著性。

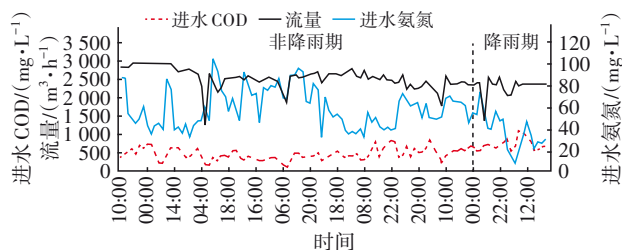


图2 进水COD、氨氮及流量随时间的变化

Fig.2 Variation of influent COD, ammonia nitrogen and flow rate

图3为出水SCOD和氨氮浓度随时间的变化趋势。降雨期出水氨氮浓度明显降低,这与进水氨氮负荷的降低相对应;出水SCOD浓度处于正常波动范围内。污水处理厂可根据这一变化规律对工艺进行调整,具有进一步节能降耗的空间。

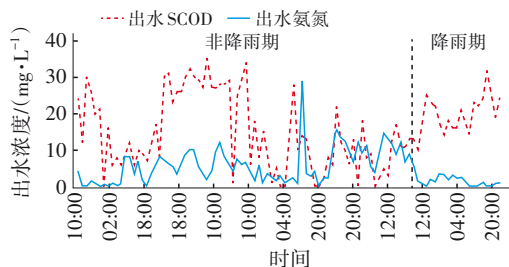


图3 出水SCOD和氨氮随时间的变化

Fig.3 Variation of effluent SCOD and ammonia nitrogen

2.2 进、出水水质和水量的ANOVA分析

进水水质和水量特征统计及ANOVA检验结果如图4所示(Dry表示非降雨期,Wet表示降雨期)。

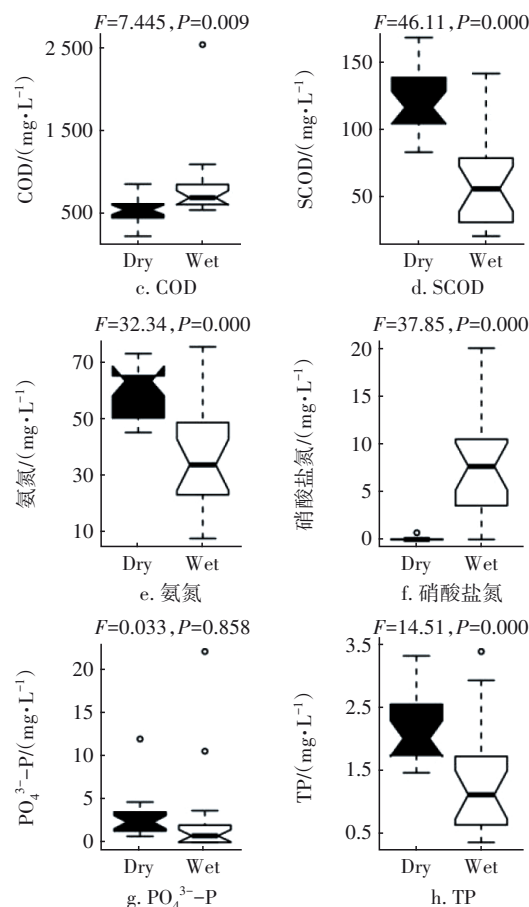
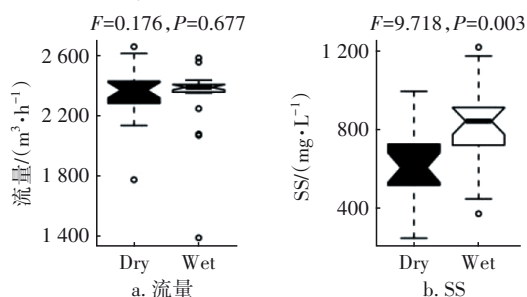


图4 非降雨期和降雨期进水水质和水量的ANOVA分析结果

Fig.4 ANOVA results of influent quality and quantity in dry and wet conditions

从图4可以看出,在0.05显著性水平下,除了进水流量和磷酸盐浓度以外,其他水质指标在降雨期和非降雨期均呈现出显著性差异($P < 0.05$)。降雨期的进水SCOD、氨氮、TP等污染物浓度显著低于非降雨期,降低幅度分别为52%、40%、40%,而降雨期的进水SS浓度则显著高于非降雨期,增加幅度约为30%。尽管非降雨期进水SCOD浓度较高,但由于降雨期进水SS浓度的升高导致进水COD高于非降雨期。进水SS和COD浓度与其他溶解性物质在降雨期被稀释不同,由于道路沉积物、污水管网淤积物质在降雨期被冲刷而随着污水进入到污水处理厂,导致进水COD和SS浓度在降雨期的升高幅度达到30%。城市排水管网可被视为一个生物膜污水处理系统,污水在运输过程中,由于反硝化作用导致非降雨期污水中的硝酸盐基本在管道中去除,因而非降雨期污水处理厂进水的硝酸盐浓度基本为0;在降雨期,涌入污水管道的雨水减小了污水在

管网中的停留时间,管网中的反硝化作用受到一定程度的减弱,因此污水处理厂进水的硝酸盐浓度也明显上升。

图4的结果表明,在小雨和中到大雨条件下,道路和管道冲刷效应导致分流制管网内SS浓度相比非降雨期增加30%左右,同时导致COD浓度相应增加,由于地面沉积物和管道淤积物质中的氮、磷营养物质含量较少,氮、磷等污染物指标浓度被稀释了40%左右。

同理,对降雨期与非降雨期的出水水质特征进行统计及ANOVA检验,结果表明,除出水SS与TP浓度外,其他出水水质指标(COD、SCOD、氨氮、硝酸盐氮、磷酸盐)在降雨期和非降雨期均呈现出显著性差异($P<0.05$)。降雨期出水COD及SCOD浓度均显著高于非降雨期,而出水氨氮和磷酸盐浓度显著低于非降雨期,降低幅度分别为80%和95%。在降雨期,大量道路沉积污染物、管道淤积物质被冲刷进入污水处理厂,导致污水处理厂进水SS和COD浓度显著升高,进而在短期内影响了出水水质;氮、磷等污染物由于进水负荷的降低,导致出水浓度也相应下降。

2.3 进水水质指标相关性分析

非降雨期污水处理厂进水各指标的相关性分析如表1所示。可知,COD与氨氮、COD与TP、SS与氨氮、SS与TP呈负相关性,其他均呈正相关性。其中,COD与SS的相关性最高,相关系数达到了0.748 0;而COD与pH的相关性最低,相关系数为0.005 2。在非降雨期,进水COD浓度伴随SS浓度的波动而进行正相关性波动,该污水处理厂中颗粒态有机物对总COD的贡献率较高,这与其他研究结果基本一致,例如,孙艳等人^[6]对北京市污水处理厂进水水质进行统计分析发现,SS与COD线性拟合较好。

表1 非降雨期进水水质指标相关性分析

Tab.1 Correlation analysis of influent quality index in dry conditions

项目	COD	SCOD	pH	氨氮	SS	TP
COD	1	0.024 9	0.005 2	-0.205 0	0.748 0	-0.139 0
SCOD		1	0.452 0	0.386 0	0.046 3	0.520 0
pH			1	0.176 0	0.126 0	0.043 9
氨氮				1	-0.282 0	0.345 0
SS					1	-0.135 0
TP						1

降雨期污水处理厂进水各指标的相关性分析如表2所示。可知,COD与SCOD、COD与氨氮、SCOD与SS、SS与pH、氨氮与SS、TP与SS呈负相关,其他均呈正相关性。其中,TP与SCOD的相关性最高,相关系数达到0.977 0,COD与pH的相关性最低,相关性系数为0.052 2。相比非降雨期,降雨期进水氨氮与SCOD、TP、pH的相关性明显增大,相关性系数分别为0.894 0、0.839 0、0.716 0,进水SCOD、TP和pH等指标受降雨影响显著,分流制污水管网没有起到明确的雨污分流作用。降雨期进水COD与SS呈显著的正相关性,这与非降雨期相同;而进水SCOD与SS呈明显的负相关性,这与非降雨期不同,随着降雨量的增加,SCOD浓度逐渐降低,降雨对该污水处理厂进水具有明显的稀释作用。在非降雨期,COD与SCOD、COD与氨氮、SCOD与SS、SS与pH、氨氮与SS、TP与SS呈现明显的负相关性,而COD与SS呈现较高的正相关性,这是该地区混接分流制管网的特征之一。究其原因,一方面青岛地区常年降雨量较小,在非降雨期管道内的淤积物可能以有机固体为主,在降雨期较高水量的冲击下使SS和COD呈现出同步增加的正相关特性;另一方面,管道淤积物中TP含量较低,经雨水冲刷后管道内污水的总磷浓度没有明显增加,而雨水的稀释作用导致SCOD、氨氮等溶解性水质指标浓度降低,从而使TP、SCOD、氨氮与SS、COD之间呈现出负相关性。

表2 降雨期进水水质指标相关性分析

Tab.2 Correlation analysis of influent quality index in wet conditions

项目	COD	SCOD	pH	氨氮	SS	TP
COD	1	-0.148 0	0.052 2	-0.198 0	0.800 0	-0.152 0
SCOD		1	0.615 0	0.894 0	-0.467 0	0.977 0
pH			1	0.716 0	-0.213 0	0.590 0
氨氮				1	-0.456 0	0.839 0
SS					1	-0.501 0
TP						1

3 结论

① 降雨期污水处理厂进水SCOD、氨氮、TP等污染物浓度显著低于非降雨期,降低幅度分别为52%、40%、40%,而降雨期进水SS浓度则显著高于非降雨期,增加幅度为30%左右($P=0.000$)。降雨期污水处理厂出水COD和SCOD浓度均显著高于非

降雨期,而出水氨氮和磷酸盐浓度显著低于非降雨期,降低幅度分别为80%和95%($P=0.000$)。

② 在非降雨期,进水COD与SS的相关性最高(相关系数为0.748 0);在降雨期,进水TP与SCOD的相关性最高(相关系数为0.977 0),进水SCOD与SS呈明显的负相关性(相关系数为-0.467 0),SCOD浓度随着降雨量的增加而逐渐降低。

③ 青岛市分流制管网中的污水水质指标受降雨影响明显,由于降雨对路面沉积物和管道淤积物的冲刷效应,在小雨及中到大雨条件下,与非降雨期相比,污水处理厂进水SS和COD浓度增加30%左右,氨氮、总磷等指标浓度受雨水稀释作用而降低了40%~50%。

参考文献:

- [1] 张健君,吕英俊,刘章富.排水体制与污水处理厂进水水质分析[J].给水排水,2010,36(9):47-50.
ZHANG Jianjun, LÜ Yingjun, LIU Zhangfu. Analysis of drainage system and inflow water quality of wastewater treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(9):47-50 (in Chinese).
- [2] 胡晓健.分流制排水地区雨污混接调查评估及分流改造方案研究[J].市政技术,2019,37(4):199-201,211.
HU Xiaojian. On rainwater and sewage mixed connection survey evaluation and diversion plan [J]. Municipal Engineering Technology, 2019, 37(4): 199-201, 211 (in Chinese).
- [3] 刘景涛,李森林,郑宁,等.西安市护城河区域合流制排水管网改造方案分析[J].中国给水排水,2017,33(20):37-40.
LIU Jingtao, LI Senlin, ZHENG Ning, et al. Analysis

on combined drainage system reconstruction in Xi'an moat and surrounding area [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(20): 37-40 (in Chinese).

- [4] 贾楠,王文亮,车伍,等.美国合流制溢流控制标准分析及对我国的启示[J].中国给水排水,2019,35(7):121-127.

JIA Nan, WANG Wenliang, CHE Wu, et al. Analysis of combined sewer overflow control standards of the United States and its enlightenment to China [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35 (7): 121-127 (in Chinese).

- [5] 黄星发,容理钰.南宁市水环境建设与改善水质的对策研究[J].中国给水排水,2016,32(20):10-13.

HUANG Xingfa, RONG Liyu. Study on countermeasures of water quality improvement in water environment construction in Nanning City [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32 (20): 10-13 (in Chinese).

- [6] 孙艳,张逢,胡洪营,等.北京市污水处理厂进水水质特征的统计学分析[J].给水排水,2014,40(z1):177-181.

SUN Yan, ZHANG Feng, HU Hongying, et al. Statistical analysis of inlet water quality characteristics in Beijing sewage treatment plant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(z1): 177-181 (in Chinese).

作者简介:朴恒(1995-),女,吉林延吉人,硕士研究生,主要研究方向为污水处理厂数字化技术。

E-mail:piaoheng619@163.com

收稿日期:2020-03-18

修回日期:2020-07-07

(编辑:刘贵春)

深入实施乡村振兴战略,促进人水和谐