

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.03.006

“灰绿”协同措施对银川市合流制溢流污染的影响

侯精明¹, 李广学¹, 王添¹, 杨露¹, 银雅伦¹, 李欣怡¹, 乔梦曦²

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 中规院(北京)规划设计有限公司, 北京 100044)

摘要:针对合流制管网系统在雨天溢流污染严重,造成城市水体黑臭现象的问题,以银川市某高密度城区合流制管网系统为例,基于SWMM模型,在短历时设计降雨和长历时设计降雨两种条件下,模拟分析了合流制溢流(CSO)调蓄池、雨污管道混错接改造、绿化带海绵化改造等“灰绿”协同措施对CSO污染的影响。结果表明:CSO调蓄池、雨污管道混错接改造、绿化带海绵化改造及“灰绿”措施结合4种方案在短历时、长历时设计降雨条件下,随着降水量的增加,溢流水量及溢流污染物负荷均增加,溢流削减率均逐渐减小,其中“灰绿”措施结合方案对溢流污染的削减效果最为显著;重现期小于5 a时,溢流水量削减率与溢流污染物负荷削减率基本达到80%;降雨条件为中雨时,污染物负荷削减率基本达到75%;重现期为20 a时,溢流水量削减率及TSS、COD、TP、NH₄⁺-N负荷削减率分别达到64%、70%、70%、70%;降雨条件为大雨时,溢流水量削减率及TSS、COD、TP、NH₄⁺-N负荷削减率分别达到28%、32%、26%、31%、33%。

关键词:合流制溢流;“灰绿”协同措施;溢流污染物负荷;溢流水量;SWMM模型;银川市

中图分类号:TV131.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)03-0043-07

Influence of “grey-green” synergistic measures on combined sewer overflow pollution in Yinchuan City // HOU Jingming¹, LUAN Guangxue¹, WANG Tian¹, YANG Lu¹, YIN Yalun¹, LI Xinyi¹, QIAO Mengxi²(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. CAUPD Beijing Planning & Design Consultants Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: Aiming at the problem of serious overflow pollution and black odor of urban water body in rainy days, taking the combined pipe network system in a high-density urban area of Yinchuan City as an example, based on SWMM model, under the conditions of short-term design rainfall and long-term design rainfall, the impact of “grey-green” synergistic measures, such as combined sewer overflow (CSO) storage tank, mixed and wrong connection of rainwater and sewage pipelines and sponge transformation of green belt, on CSO pollution were simulated and analysed. The results show that under the short-term and long-term design rainfall conditions, four schemes of CSO storage tank, mixed and wrong connection of rainwater and sewage pipelines, sponge transformation of green belt, and “gray-green” combination measure, can lead to the increase of the amount of overflow water and the load of overflow pollutants with the increase of precipitation, and the overflow reduction rate decreases gradually. Among them, the “gray-green” combination measure has the most significant effect on the reduction of overflow pollution. When the return period is less than 5 a, the reduction rate of overflow water volume and the reduction rate of overflow pollutant load basically reach 80%. When the rainfall condition is moderate rain, the pollutant load reduction rate basically reaches 75%. When the return period is 20 a, the reduction rates of overflow water and the load reduction rates of TSS, COD, TP and NH₄⁺-N reach 64%, 70%, 70% and 70%, respectively. When the rainfall condition is heavy rain, the reduction rates of overflow water and the load reduction rates of TSS, COD, TP and NH₄⁺-N reach 28%, 32%, 26%, 31% and 33%, respectively.

Key words: combined sewer overflow; “grey-green” synergistic measures; overflow pollution load; overflow water; SWMM model; Yinchuan City

基金项目:中德合作交流项目(M-0427);国家自然科学基金(52009104, 52079106)

作者简介:侯精明(1982—),男,教授,博士,主要从事水文水动力模型研究。E-mail:jingming.hou@xaut.edu.cn

通信作者:李广学(1996—)男,硕士研究生,主要从事污染物模拟与预测研究。E-mail:963330152@qq.com

合流制溢流(combined sewer overflow, CSO)污染是城市水体发生黑臭的一个重要因素,城市溢流污染控制是当前改善环境的关键举措^[1-5]。随着我国经济、科技快速发展,城市建设面积及城区硬化路面比例不断增加^[6-7],中国城市污水管网建设滞后城市发展20余年,特别是合流系统高密度城区排水系统导致路面积水、城市被淹、污水溢流、水体黑臭等问题^[8-9]。合流污水远距离输送过程中,将近50%的污染物沉积在管道底部,雨天排水“零存整取”,河道受到冲击性污染,导致城市水体晴天不黑臭,但雨天黑臭严重的状况^[10-11]。在中国南方地区,合流制系统雨天排水时,COD质量浓度最高值达1200 mg/L,均值也高达540 mg/L左右^[8]。目前解决CSO污染的方法主要有海绵化改造、增设调蓄池、雨污管网混错接改造等^[5,12-13]。国内很多专家学者已经对我国CSO污染问题做了大量研究,如黄俊等^[14]对CSO污染控制策略优化进行了研究分析,认为不同的降雨特征需要不同的控制策略;孟莹莹等^[15]研究了“灰绿”措施组合对城市溢流污染的削减效果,认为“灰绿”措施组合对CSO污染控制效果较好;李俊奇等^[16]研究并提出了以受纳水体水质指标为导向的CSO污染的控制指标与标准制定;杨新德等^[17]基于SWMM模型从海绵城市建设、雨污分流改造等角度对溢流污染的削减情况进行了评估,认为雨污分流与源头低影响开发可有效减少面源及溢流污染。

高密度城区绿色排水设施的基建费用低,生态环境效益好,因此本文基于SWMM模型,通过“灰绿”措施结合、近远期结合,统筹排水分区、源头、过程、末端关系,分析“灰绿”协同治理措施对银川市一污片区CSO污染的影响,以期为该区域溢流污染治理提供参考依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

选取银川市兴庆区某一污片区为研究区域,该区域管网系统以合流制为主,区域内污水均汇至第

一污水处理厂。第一污水处理厂位于上海路以北、城市四排沟以东,主要承担银川市兴庆区大部分生活污水及废水的处理任务,服务面积20.46 km²,原设计处理能力为5万m³/d,扩建后日设计处理规模达到10万m³/d。该区域主要为高密度城区,不透水面积高达70%以上,出水通过城市四排沟、银新干沟排入黄河。根据银川市城区1990—2020年的日均降雨资料进行统计分析,银川市城区多年平均降水量为199.54 mm³/d。

1.2 数据来源

1.2.1 降雨数据

a. 短历时设计降雨。短历时设计降雨过程采用芝加哥暴雨强度公式进行模拟,降雨历时为2 h,步长5 min,雨峰系数为0.4。暴雨强度公式为

$$q = \frac{551.4(1 + 0.5841\lg p)}{(t + 11)^{0.669}} \quad (1)$$

式中: q 为设计暴雨强度,mm/min; p 为重现期,a; t 为暴雨历时,min。选取重现期分别为1 a、5 a、10 a进行模拟,降雨历时为2 h的设计降雨过程见图1。

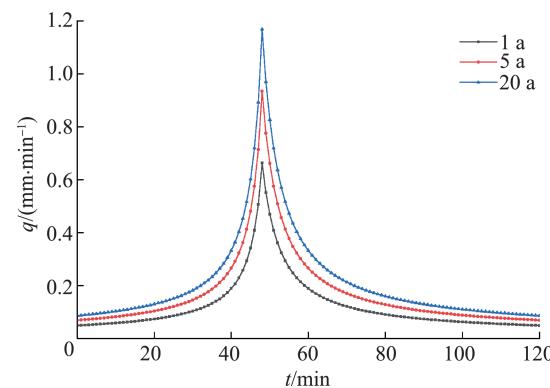


图1 不同重现期的设计降雨过程

Fig. 1 Design rainfall process with different return periods

b. 长历时设计降雨。长历时设计降雨的降雨过程根据实测数据获得,降雨历时为24 h。1991年年降水量为194.6 mm³/d,最接近银川市城区多年平均降水量,因此选择1991年降雨数据作为典型年降雨数据,如表1所示。

表1 典型年日降水量情况

Table1 Daily precipitation in typical year

日期	日降水量/mm								
1991-01-23	0.1	1991-04-16	7.4	1991-06-18	1.4	1991-08-27	40.6	1991-09-16	1.4
1991-02-13	2.9	1991-05-24	9.6	1991-07-21	7.2	1991-08-28	2.5	1991-09-17	0.6
1991-02-14	0.1	1991-05-27	19.3	1991-07-27	11.8	1991-08-31	0.4	1991-10-02	2.5
1991-03-14	2.0	1991-05-28	1.1	1991-07-28	0.6	1991-09-04	3.6	1991-10-03	0.6
1991-03-25	9.4	1991-05-31	11.3	1991-08-02	13.8	1991-09-06	0.3	1991-12-24	1.9
1991-03-26	1.4	1991-06-01	0.8	1991-08-13	0.3	1991-09-10	0.4	1991-12-25	0.4
1991-04-10	6.5	1991-06-09	2.9	1991-08-14	0.4	1991-09-14	1.4	1991-12-26	0.3
1991-04-11	6.8	1991-06-10	1.9	1991-08-26	18.9	1991-09-15	0.1		

由于典型年降雨数据为日均降雨数据,在计算城区合流制管网溢流量及污染物溢流情况时,需采用更为精确的降雨数据,因此利用银川市24 h历时设计降雨雨型分配比(表2),将日均降雨数据转化为每小时降雨数据。从典型年日降水量中选取1991-04-10作为典型小雨,降水量为6.5 mm;1991-08-26作为典型中雨,降水量为18.9 mm;1991-08-27作为典型大雨,降水量为40.6 mm。

表2 24 h 历时设计降雨雨型分配比

Table 2 24-h duration design rainfall pattern distribution ratio design rainfall rainfall type distribution table

时段/h	分配比/%	时段/h	分配比/%
1	1.00	7	4.50
2	1.00	8	10.00
3	1.00	9	37.00
4	1.00	10	18.00
5	1.00	11	7.00
6	1.00	12	3.50
13	1.67	19	0.67
14	1.67	20	0.67
15	1.67	21	0.67
16	1.67	22	0.67
17	1.66	23	0.66
18	1.66	24	0.66

1.2.2 管网数据

根据银川市管委会提供的管网资料、实际地形及其本底特征构建SWMM模型。模型共有261个子汇水分区,5990个节点,3953段雨水管网,总管长134 350.529 7 m。模型概化图如图2所示。

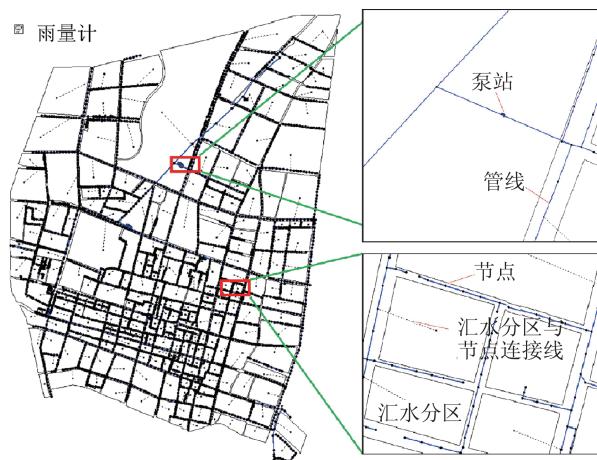


图2 研究区概化结果

Fig. 2 Generalization results of study area

1.2.3 旱季污水流量和污染物浓度

选取TSS、COD、TP、NH₄⁺-N 4种常规污染物作为研究对象^[18-19],在参考SWMM模型用户手册及相关文献的基础上,得到天然雨水污染物TSS、COD、TP、NH₄⁺-N的初始质量浓度分别为50 mg/L、

10 mg/L、0.9 mg/L和1 mg/L。管道进流除了降雨进流之外,还包括旱季污水进流。由于缺乏污水实测取样监测数据,根据污水处理厂2019—2020年日进污量和日进污水水质指标数据,统计出年均进污量和年均进污水水质数据,以此作为该污水处理厂所在片区旱季生活污水基础污水流量和水质浓度值。单位面积污水流量是污水处理厂的年均进污量与该片区汇入合流制管网的子汇水面积之和的比值。计算后得到旱季单位面积进污流量为0.33 L/s,污水中TSS、COD、TP、NH₄⁺-N的质量浓度分别为275.09 mg/L、425.52 mg/L、6.39 mg/L和21.84 mg/L。

2 研究方法

选用SWMM模型对CSO污染进行模拟研究。SWMM模型提供了线性、指数、幂函数和饱和函数4种污染物累积模型^[20-22],根据国内外研究经验,饱和函数累积模型能够很好地模拟地表污染物的累积过程^[23-25],因此本文选取饱和函数累积模型模拟研究区地面污染物的累积情况,选取指数函数模型模拟地表污染物的冲刷过程。据研究区的土地利用情况,将子汇水区分为房屋、绿地、道路和其他4种地面类型分别进行模拟^[26]。饱和函数累积模型需要确定最大累积量和半饱和累积时间2个参数,指数函数模型要输入冲刷系数和冲刷指数2个参数。根据相关参考文献^[15,17,23]确定参数的取值,结果见表3。

水质以水量为载体,若水在管道内的水动力过程能精准模拟,则同样能说明水质模拟的准确性。水量模拟的准确性可通过出口流量过程线和内涝积水点进行验证,由于该片区无其他排水口,均排至第一污水处理厂,而研究期内没有污水处理厂实测进水流量过程线,故本研究管网水动力参数通过二维地表积水点对比进行率定。为防止研究区地表外围客流影响,对管网模型进行更精确的模拟,将银川市全区域管网模型与二维地表水动力模型进行耦合,在实测降雨条件下对实测积水点和模拟积水点的积水面积和积水深度进行比较,以验证管网水动力参数的准确性。实测积水点如图3所示,积水点模拟值与实测值对比如表4所示。由表4可见,模型模拟结果与实测结果吻合度较高,相对误差均在6%以内,表明耦合模型可靠,能够较好模拟地表及管网的水动力过程。

表 3 模型污染物参数取值

Table 3 Model pollutant parameter values

水质指标	最大累积量/(kg·hm ⁻²)				半饱和累积时间/d			
	房屋	绿地	道路	其他	房屋	绿地	道路	其他
TSS	140.0	120.0	130.0	80.0	10.0	10.0	8.0	5.5
COD	100.0	120.0	90.0	65.0	10.0	10.0	8.0	8.0
TP	0.6	0.5	0.5	0.6	10.0	1.0	10.0	10.0
NH ₄ ⁺ -N	1.4	5.0	6.5	8.5	10.0	0.3	10.0	10.0

水质指标	冲刷系数				冲刷指数			
	房屋	绿地	道路	其他	房屋	绿地	道路	其他
TSS	0.009	0.090	0.008	0.008	0.40	0.20	0.50	1.80
COD	0.008	0.085	0.007	0.007	0.54	0.53	0.80	1.80
TP	0.004	0.002	0.004	0.004	1.70	1.20	1.70	1.70
NH ₄ ⁺ -N	0.008	0.005	0.005	0.004	0.54	2.00	2.00	2.00

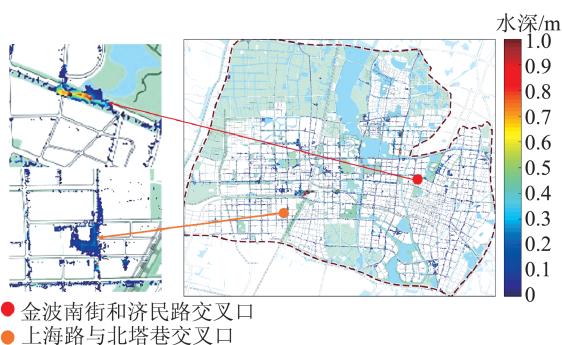


图 3 实测积水点

Fig. 3 Actual ponding points

表 4 模拟值与实测值对比

Table 4 Comparison between simulated and actual values

点位	实测积水面积/m ²	模拟积水面积/m ²	积水面积绝对差/m ²	积水面积相对差/%
金波南街和济民路交叉口	20 000	19 300	700	3.50
上海路与北塔巷交叉口	160 00	158 00	200	1.25
点位	实测积水深度/m	模拟积水深度/m	积水深度绝对差/m	积水深度相对差/%
金波南街和济民路交叉口	0.25	0.237	0.013	5.20
上海路与北塔巷交叉口	0.34	0.355	0.015	4.41

3 “灰绿”协同措施

单一溢流削减措施不适用于高密度城区^[27],故针对第一污水处理厂旱天进水量基本饱和、雨天大量雨污混合水外溢的问题,采取“灰绿”协同措施削减溢流。主要灰色设施有CSO调蓄池和雨污管道混错接改造,绿色措施主要为对上游绿化带进行海绵化改造,“灰绿”协同措施为2种灰色措施和1种绿色措施组合使用。

3.1 CSO 调蓄池

近期在城市四排暗渠段溢流口附近设置体积为4万t的CSO调蓄池,减少溢流污水排至城市四排沟。经计算需增加8万m³灰色调蓄设施,一期在原城市四排沟暗渠位置,扩大断面,布置4万m³削峰调蓄池;二期在海宝公园东侧入口停车场下,布置4万m³削峰调蓄池,本文仅考虑一期工程。

3.2 雨污管道混错接改造

城市四排沟上游排水分区基本上是合流制排水分区,仅双庄巷两侧新建区域为雨污分流,但分流管网在下游全部接入合流制管网。远期优化排水体制,通过城市四排沟上游混错接改造,将上游混流制片区改为完全分流制排水体制,减少雨水进入污水管网,减少合流制溢流水量和频次。雨污分流改造示意图如图4所示。



图 4 雨污分流改造示意图(单位:mm)

Fig. 4 Schematic diagram of rainwater and sewage diversion transformation (unit:mm)

3.3 绿化带海绵化改造

远期通过对上游绿化带进行海绵化改造,削减雨水径流进入污水管网,从而减少CSO污染。绿化带海绵化改造统计如表5所示。

表5 兴庆区绿化带海绵化改造统计

Table 5 Statistics of sponge transformation of green belt in Xingqing District

点位名称	面积/km ²	设计调蓄空间/万 m ³
凤凰街东侧绿化带(贺兰山路-上海路)、上海路北侧绿化带	0.10	1.0
中山公园原动物园绿化带	0.10	1.0
公园街绿化带	0.02	0.2
南熏路南侧绿化带	0.03	0.3
清和街绿化带	0.11	1.1
银川高级中学南侧规划绿地	0.09	0.9
合计	0.45	4.5

4 结果与分析

对CSO调蓄池、雨污管道混错接改造、绿化带海绵化改造3种单一措施及“灰绿”措施组合共4种方案对银川市第一污水处理厂片区溢流污染影响进行模拟分析,本研究不考虑除第一污水处理厂前溢流外的其他节点溢流。

4.1 短历时设计降雨模拟结果

重现期分别为1 a、5 a、20 a条件下现状及4种方案的溢流负荷及削减率如表6所示。由表6可见,现状、CSO调蓄池、雨污管道混错接改造、绿化带海绵化改造与“灰绿”措施结合5种模拟方案下,溢流水量及污染物负荷均随着重现期的增加而增加,其中重现期为20 a情况下的溢流水量分别达到10.41万m³、6.71万m³、9.54万m³、9.07万m³和3.73万m³。由于CSO污染物浓度高,从而导致溢流污染物负荷相对较大,现状情况下,TSS、COD、TP和NH₄⁺-N溢流负荷分别达到了5.46 t、2.88 t、0.12 t和0.66 t。在添加CSO调蓄池、雨污管道混错接改造、

绿化带海绵化改造与“灰绿”措施结合等方案实施后,不同重现期对应溢流水量及污染物负荷削减量变化幅度不同。降水量较大时,CSO调蓄池、雨污管道混错接改造等工程措施充分发挥其调蓄能力,各类污染物主要黏附在固体颗粒上,COD、NH₄⁺-N、TP与TSS有着良好的相关性,故选择重现期为20 a的溢流水量及TSS负荷削减情况具体分析,4种方案模拟得到溢流水量相对现状分别削减了3.70万m³、0.87万m³、1.34万m³和6.68万m³,TSS负荷分别削减了2.49 t、0.41 t、0.60 t和3.79 t;但随着重现期的增加溢流水量削减率与溢流污染物负荷削减率均逐渐减小,其中溢流水量削减率分别为36%、8%、13%和64%,TSS溢流负荷削减率分别为46%、8%、11%和70%。可见“灰绿”协同措施对溢流水量及溢流污染物负荷的削减效果较为明显,且在重现期为5 a时溢流水量及TSS溢流负荷削减率分别达到了77%与80%。

4.2 长历时设计降雨模拟结果

小雨、中雨、大雨条件下现状及4种方案下溢流负荷及其削减率如表7所示。由表7可见,现状、添加CSO调蓄池、雨污管道混错接改造、绿化带海绵化改造与“灰绿”措施结合5种方案下,溢流水量及污染物负荷均随着降水量的增加而增加,其中大雨条件下,调蓄设施充分发挥其功能,溢流水量仍分别达到25.49万m³、21.43万m³、23.39万m³、23.90万m³和18.24万m³;CSO污染主要是生活污水与雨水混合后再对管道内的沉积物进一步冲刷导致溢流污染物浓度较大,从而造成溢流污染物负荷严重超标,其中现状及4种方案下TSS溢流负荷分别达到9.37 t、7.68 t、8.66 t、8.95 t和6.38 t。由表7可

表6 短历时设计降雨条件下溢流负荷及削减率

Table 6 Overflow load and reduction rate under short duration design rainfall

方案	重现期/a	溢流水量/万 m ³	溢流水量削减率/%	TSS 负荷/t	TSS 负荷削减率/%	COD 负荷/t	COD 负荷削减率/%	TP 负荷/t	TP 负荷削减率/%	NH ₄ ⁺ -N 负荷/t	NH ₄ ⁺ -N 负荷削减率/%
现状	1	4.93		3.05		2.13		0.06		0.36	
	5	8.26		4.52		2.63		0.09		0.54	
	20	10.41		5.46		2.88		0.12		0.66	
CSO 调蓄池	1	0.95	81	0.37	81	0.22	90	0.01	89	0.04	88
	5	4.47	46	1.99	56	1.03	61	0.04	57	0.24	56
	20	6.71	36	2.97	46	1.35	53	0.06	47	0.36	46
雨污管道 混错接改造	1	4.05	18	2.71	11	1.93	9	0.06	11	0.32	11
	5	7.38	11	4.11	9	2.48	6	0.08	9	0.49	9
	20	9.54	8	5.05	8	2.76	4	0.10	7	0.61	8
绿化带海 绵化改造	1	3.96	205	2.62	15	1.95	8	0.06	13	0.30	15
	5	7.03	15	3.96	12	2.44	7	0.08	11	0.47	13
	20	9.07	13	4.85	11	2.70	6	0.10	10	0.58	12
“灰绿”措 施结合	1	0.00	100	0.00	100	0.00	100	0.00	100	0.00	100
	5	1.88	77	0.90	80	0.54	79	0.02	80	0.10	81
	20	3.73	64	1.66	70	0.87	70	0.03	70	0.20	70

表 7 长历时设计降雨条件下的溢流负荷及削减率

Table 7 Overflow load and reduction rate under long duration design rainfall

方案	降雨类型	溢流水量/万 m ³	溢流水量削减率/%	TSS 负荷/t	TSS 负荷削减率/%	COD 负荷/t	COD 负荷削减率/%	TP 负荷/t	TP 负荷削减率/%	NH ₄ ⁺ -N 负荷/t	NH ₄ ⁺ -N 负荷削减率/%
现状	小雨	0.15		0.04		0.04		0.00		0.00	
	中雨	11.42		4.06		3.70		0.09		0.41	
	大雨	25.49		9.37		6.49		0.19		1.02	
CSO 调蓄池	小雨	0.00	100	0.00	100	0.00	100	0.00	100	0.00	100
	中雨	7.35	36	2.40	41	2.46	34	0.05	39	0.24	42
	大雨	21.43	16	7.68	18	5.30	18	0.16	18	0.83	18
雨污管道混错接改造	小雨	0.00	100	0.00	100	0.00	100	0.00	100	0.00	100
	中雨	10.21	11	3.57	12	3.41	8	0.08	11	0.36	13
	大雨	23.39	8	8.66	8	6.21	4	0.18	7	0.93	8
绿化带海绵化改造	小雨	0.00	100	0.00	100	0.00	100	0.00	100	0.00	100
	中雨	9.92	13	3.50	14	3.34	10	0.08	13	0.35	15
	大雨	23.90	6	8.95	5	6.27	3	0.18	4	0.97	5
“灰绿”措施结合	小雨	0.00	100	0.00	100	0.00	100	0.00	100	0.00	100
	中雨	4.91	57	1.05	74	0.94	75	0.02	75	0.10	76
	大雨	18.24	28	6.38	32	4.78	26	0.13	31	0.68	33

见,在添加 CSO 调蓄池、雨污管道混错接改造、绿化带海绵化改造与“灰绿”措施结合 4 种方案下,小雨、中雨和大雨溢流水量及污染物负荷削减量变化幅度不大,其中大雨条件下溢流水量削减量分别为 4.06 万 m³、2.10 万 m³、1.59 万 m³ 和 7.25 万 m³, TSS 溢流负荷削减量分别为 1.69 t、0.71 t、0.43 t 和 2.99 t;但随着降水量的增加溢流水量与溢流污染物负荷的削减率均逐渐减小,其中大雨条件下 4 种方案溢流水量削减率分别为 16%、8%、6% 和 28%, TSS 溢流负荷削减率分别为 18%、8%、5% 和 32%。可见“灰绿”协同措施对长历时降雨条件下溢流水量及溢流污染物负荷的削减效果较为明显,在中雨条件下溢流水量及 TSS 溢流负荷削减率分别达到 57% 与 74%。

5 结 论

为有效提升排涝标准,满足高密度城区的提标改造要求,通过添加 CSO 调蓄池、雨污管道混错接改造、绿化带海绵化改造与“灰绿”措施结合 4 种方案在 2 h 和 24 h 两种降雨历时条件下,随着降水量的增加溢流水量及溢流污染物负荷均有所增加,不同方案溢流削减率均逐渐减小,其中“灰绿”措施结合的协同方案对溢流污染的削减效果最为显著。2 h 降雨历时重现期小于 5 a 时,溢流水量及污染物负荷量削减率基本达到 80%;24 h 降雨历时中雨条件下,溢流污染物负荷量削减率基本达到 75%。2 h 降雨历时重现期为 20 a 时,溢流水量削减率及 TSS、COD、TP、NH₄⁺-N 负荷削减率分别为 64%、70%、70%、70%;24 h 降雨历时大雨条件下的溢流水量削减率及 TSS、COD、TP、NH₄⁺-N 负荷削减率分

别为 28%、32%、26%、31%、33%。可见,源头-过程-末端统筹的“灰绿”协同措施建设对高密度城区合流制管道溢流污染的控制效果较为明显,后期通过 CSO 调蓄池二期工程建设及污水处理厂纳污能力的提升,基本可解决银川市一污片区非极端暴雨城市溢流污染问题,从而消除市区水体在雨天发生黑臭的现象。

参 考 文 献:

- [1] 谭琼, 李田, 徐月江, 等. 苏州河沿岸合流制系统雨天溢流频率及其启示[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(9):1232-1236. (TAN Qiong, LI Tian, XU Yuejiang, et al. Study on frequencies of combined sewer overflows of Shanghai Suzhou Creek Area [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2008, 36(9):1232-1236. (in Chinese))
- [2] 李田, 戴梅红, 张伟, 等. 水泵强制排水系统合流制溢流的污染源解析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(10): 1513-1518. (LI Tian, DAI Meihong, ZHANG Wei, et al. Pollution source apportionment of combined sewer overflows for a pump lifting drainage system [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(10): 1513-1518. (in Chinese))
- [3] 周金成, 李俊奇, 杨超. 区域特征参数及降雨等级差异性对合流制系统溢流影响模拟研究[J]. 给水排水, 2021, 57(9): 44-52. (ZHOU Jingcheng, LI Junqi, YANG Chao. Simulation study on the influence of regional characteristic parameter and rainfall grade difference of combined sewer overflow [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(9):44-52. (in Chinese))
- [4] 冯强, 易境, 刘书敏, 等. 城市黑臭水体污染现状、治理技术与对策[J]. 环境工程, 2020, 38(8):82-88.

- (FENG Qiang, YI Jing, LIU Shumin, et al. The pollution situation, treatment techniques and countermeasures of urban black and odors water in China [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(8):82-88. (in Chinese))
- [5] 杨正, 车伍, 赵杨. 城市“合改分”与合流制溢流控制的总体策略与科学决策[J]. 中国给水排水, 2020, 36 (14):46-55. (YANG Zheng, CHE Wu, ZHAO Yang. General strategy and scientific decision-making of urban “combined sewer separation” and CSO control[J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (14): 46-55. (in Chinese))
- [6] 吴丹洁, 詹圣泽, 李友华, 等. 中国特色海绵城市的新趋势与实践研究[J]. 中国软科学, 2016(1):79-97. (WU Danjie, ZHAN Shengze, LI Youhua, et al. New trends and practical research on the sponge cities with Chinese characteristics [J]. China Soft Science, 2016 (1):79-97. (in Chinese))
- [7] 李佳, 谢文霞, 姜智绘, 等. 海绵城市地块汇水区颗粒污染物的传输[J]. 环境科学, 2020, 41(9):4113-4123. (LI Jia, XIE Wenxia, JIANG Zhihui, et al. Transition of particulate pollutant in the parcel-based catchment of sponge city [J]. Environmental Science, 2020, 41(9) : 4113-4123. (in Chinese))
- [8] 徐祖信, 徐晋, 金伟, 等. 我国城市黑臭水体治理面临的挑战与机遇[J]. 给水排水, 2019, 55(3):1-5. (XU Zuxin, XU Jin, JIN Wei, et al. Challenges and opportunities of black and odorous water body in the cities of China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 55(3):1-5. (in Chinese))
- [9] 佃柳, 郑祥, 郁达伟, 等. 合流制管道溢流污染的特征与控制研究进展[J]. 水资源保护, 2019, 35(3):76-83. (DIAN Liu, ZHENG Xiang, YU Dawei, et al. Research progress on characteristics and control of combined sewer overflows pollution[J]. Water Resources Protection, 2019,35(3):76-83. (in Chinese))
- [10] 徐祖信, 张辰, 李怀正. 我国城市河流黑臭问题分类与系统化治理实践[J]. 给水排水, 2018, 54(10):1-5. (XU Zuxin, ZHANG Chen, LI Huaizheng. Classification and systematic treatment of black order problem in urban rivers in China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 54 (10): 1-5. (in Chinese))
- [11] 唐晶, 庞维海, 林常源, 等. 我国黑臭水体的成因分析与综合治理技术[J]. 应用化工, 2020, 49(2):483-487. (TANG Jing, PANG Weihai, LIN Changyuan, et al. Cause analysis and comprehensive treatment technology of black and odorous water in China [J]. Applied Chemical Industry, 2020, 49(2):483-487. (in Chinese))
- [12] 赵杨, 车伍, 杨正. 中国城市合流制及相关排水系统的
主要特征分析[J]. 中国给水排水, 2020, 36(14):18-28. (ZHAO Yang, CHE Wu, YANG Zheng. Analysis of characteristics of China urban combined sewer system and related other sewer systems [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(14):18-28. (in Chinese))
- [13] 路金霞, 柏杨巍, 傲德姆, 等. 上海市黑臭水体整治思路、措施及典型案例分析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(3):541-549. (LU Jinxia, BAI Yangwei, AO Demu, et al. Analysis of regulation thoughts, measures and typical case for the black-stinking water body in Shanghai City, China [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(3):541-549. (in Chinese))
- [14] 黄俊, 王莉, 高丽红, 等. 基于溢流频次的合流制溢流污染控制优化策略研究[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(3):394-399. (HUANG Jun, WANG Li, GAO Lihong, et al. Research on optimized strategies of pollution control of combined sewer overflow based on overflow frequency [J]. 2021, 43 (3) : 394-399. (in Chinese))
- [15] 孟莹莹, 冒建华, 李俊奇, 等. 灰绿措施组合对城市溢流污染的削减效果研究[J]. 给水排水, 2020, 56 (增刊1):669-675. (MENG Yingying, MAO Jianhua, LI Junqi, et al. Research of overflow pollution control effects using gray and green infrastructure[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56 (Sup 1) : 669-675. (in Chinese))
- [16] 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 (1):124-131. (LI Junqi, ZHOU Jincheng, YANG Zheng, et al. Study on control indicators and standard formulation of combined sewer overflow [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1):124-131. (in Chinese))
- [17] 杨新德, 戴忱, 曹万春. 合流制排水系统截流能力分析与溢流污染控制方案[J]. 给水排水, 2021, 57(增刊1): 196-200. (YANG Xinde, DAI Chen, CAO Wanchun. Intercepting capacity analysis and overflow pollutants control scheme of combined system[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 57(Sup 1):196-200. (in Chinese))
- [18] 欧阳彤, 涂保华, 李乔, 等. 多级 AO + 潜流湿地对生活污水中的EDCs及常规污染物的去除试验研究[J]. 土木与环境工程学报, 2020, 42 (3): 156-164. (OUYANG Tong, TU Baohua, LI Qiao, et al. Experimental study on the removal of EDCs and conventional pollutants in domestic sewage by multi-stage AO + subsurface flow constructed wetland[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(3):156-164. (in Chinese))

(下转第 86 页)