

滇池环湖截污干渠错峰技术模拟与分析

方艳娟¹, 姚娟娟¹, 张智¹, 蔡松柏², 浦鹏³, 胡欣逸¹

(1. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045; 2. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610081; 3. 奥雅纳工程咨询有限公司, 上海 200021)

摘要: 为了实现滇池流域截污效果的最大化, 基于前期建立的东岸排水管网 SWMM 模型, 结合该区域 1995–2016 年间降雨资料, 研究环湖截污干渠的错峰调蓄技术。根据雨水干渠液位高度执行不同控制模式: 当水位低于 6.76 m 时执行典型污染物浓度阈值控制模式; 当水位高于 6.76 m 时执行典型污染物阈值控制的同时执行液位–污染物通量控制模式。采用 SS 和 TN 作为干渠截流的典型污染物控制指标, 其控制浓度阈值分别取 12 和 5 mg/L。模拟重现期为 0.5~1 a 降雨时 SS、TN 浓度–负荷通量调蓄方案下干渠负荷收集情况, 结果表明两种调蓄方案均能有效提高雨水干渠的负荷收集率, 提高污水干渠出口浓度, 降低雨水径流对污水厂的高水量和低浓度冲击负荷。随着重现期增大, 干渠对污染物的高效和最大化收集效果越明显。但是 TN 调控下污染负荷收集效果优于 SS, 因此选择 TN 作为干渠截流的最优典型污染物控制指标。

关键词: 截污干渠; 初期雨水; 错峰调蓄; SS/TN 浓度阈值; 负荷通量; 污染物控制; SWMM 模型; 滇池流域
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2017)06-0014-06

Simulation and analysis on sewage interception trunk canal staggering peak technology in Dianchi

FANG Yanjuan¹, YAO Juanjuan¹, ZHANG Zhi¹, CAI Songbai², PU Peng³, HU Xinyi¹

(1. College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
2. Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610081, China;
3. Arup Engineering Consulting Co., Ltd., Shanghai 200021, China)

Abstract: In order to maximize the Dianchi Lake Basin sewage interception effect, staggered peak storage technology of sewage interception trunk canal was discussed based on the prebuilt SWMM model of the drainage pipe network along the east coast and the rainfall data during 1995–2016. Different control modes were performed according to the rainwater channel liquid level: when the water level was lower than 6.76 meters, the typical pollutant concentration threshold control mode was performed; or else the liquid level–pollutant flux control mode as well as the typical pollutant threshold control were performed when the water level was higher than 6.76 meters. SS and TN were used as typical pollutant control indexes for trunk canal closure, and their control concentration thresholds were 125 mg/L and 5 mg/L, respectively. Trunk canal pollutant collection under SS/TN concentration–load flux storage scheme was simulated under the rainfall of 0.5~1 a recurrence period, the results showed that both storage schemes can effectively improve the pollutant collection rate, increase the sewer outlet pollutant concentration, and reduce the runoff impact on high water flow and low concentration of the sewage plant. The trunk canal pollutant interception efficiency was higher with the increase of recurrence period. However, pollutant collection under TN storage scheme was better than SS, so TN was chosen as the optimal control index for typical pollutant in trunk canal interception.

Key words: sewage interception trunk canal; initial rain water; staggering control; SS/TN concentration threshold; load flux; pollutant control; SWMM model; Dianchi Basin

收稿日期: 2017-06-16; 修回日期: 2017-07-26

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07102001–003)

作者简介: 方艳娟 (1993–), 女, 广西南宁人, 硕士研究生, 研究方向为水处理理论与技术。

通讯作者: 姚娟娟 (1982–), 女, 四川隆昌人, 博士, 副教授, 研究方向为水处理理论与技术。

初期雨水冲刷大气和下垫面累积的污染物,形成含有大量有机物、重金属、悬浮物质、脂肪等污染物质的地表径流。相关研究^[1]表明降雨初期 30% 的径流携带了 60% ~ 70% 的污染物质,因此控制初期雨水是解决城市径流污染的有效措施。SWMM (Storm Water Management Model) 是美国环保总署为控制面源污染开发的降雨径流管理模型,可以模拟排水系统中的水质、水量变化过程。在国内外的研究中,SWMM 模型已被广泛应用于城市雨水系统的规划评估和管理控制^[2-9],包括管网优化评估、城市积水计算、LID 措施应用以及非点源污染控制等。但目前鲜有利用 SWMM 模型对雨水系统水质进行错峰调蓄的研究。国内外对于雨水管理的错峰调蓄^[10-11]主要是利用调蓄池在雨季蓄积雨水,待峰值过后再将截留的雨水进行处理,只从水力方面进行调控,缺乏从水质的角度进行错峰控制的研究。当前的低影响开发模式强调源头减量、就地处理,但是对于大型工程还应结合收集调蓄以控制径流污染。

滇池东岸已经建立了比较完整的控源截污系统工程,包括前期的环湖截污干渠及干渠末端的雨水、污水处理厂,后期的配套管网收集系统。为了实现初期雨水的高效收集截留,本文基于前期对滇池东岸流域降雨特征、雨水管网水质水量特点^[12-13]、污染物相关性^[14]以及高效截留装置设计分析^[15],研究初期雨水的错峰调蓄方案,为干渠的优化运行提供理论依据。

1 前期研究结论

滇池环湖截污干渠包括污水干渠和雨水干渠,旱季时主要收集呈贡地区的居民生活污水,雨季时除了收集生活污水还收集降雨初期污染物浓度较高的降雨径流,再分别输送至污水处理厂和雨水处理站。雨、污水渠通过隔墙上设置的孔口连通,当暴雨后雨水渠的水位高于孔口底边时,雨水将通过连通孔进入污水干渠,即旱季实行雨污分流制,雨季当降雨超过一定强度后实行合流制。污水干渠和雨水干渠横截面见图 1。由该特殊设计使得干渠容积得到充分调用,但雨季经雨水干渠进入污水干渠的后期较洁净的雨水也会对污水厂产生较大的高水量及低浓度的冲击负荷^[12-13]。

本课题组前期的研究发现:(1)在无错峰/削峰截流工程控制技术的条件下,干渠具备输送重现期 $P=0.45$ a 的降雨(降雨量为 16 mm)所产生的雨水径流量;(2)干渠雨水径流中典型污染物 SS、COD、

TP、TN 的截留率均低于对雨水径流量的截留率;(3)干渠输送的城市雨水会对污水厂带来低浓度高流量的冲击负荷,对污水厂的运行产生一定影响;(4)未来滇池东岸流域 8 条雨水干管通过接入点与干渠连接,每条干管由于流域性质与拓扑结构的原因,沿环湖截污干渠长度方向,不同接入点出现若干浓度峰值、流量峰值,峰值时间存在差异;而同一接入点的不一定同步出现浓度峰值、流量峰值。因此,环湖截污干渠城市初期雨水错峰/削峰截流工程控制技术的核心思想是利用环湖截污干渠的巨大容积和浓度峰值、流量峰值的时间差,进行错峰、削峰高效截留,实现最大化且高效地截留污染负荷^[12-13]。

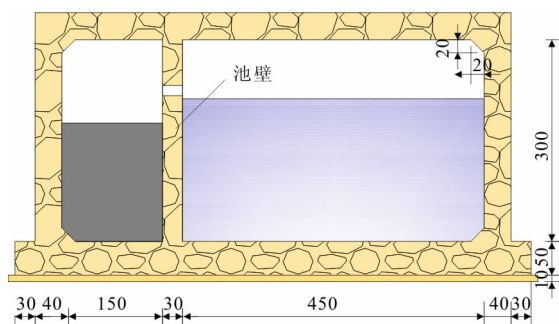


图1 滇池环湖截污干渠东岸段污水干渠(左)和雨水干渠(右)横截面图(单位:cm)

同时本课题组研究还发现,滇池流域雨水径流中的污染物指标 SS 与 COD、TP 相关性较高,TN 与 TP、 $\text{NH}_3\text{—N}$ 等营养盐指标均有较好的相关性;并且建立的快速监测指标与传统指标 TN 和 SS 之间的回归方程^[14],为雨水中典型污染物的截流控制提供了可行性。因此研究选用 SS 和 TN 作为雨水径流截流的控制指标。胡晓惠等^[16]用 ArcGIS 作为前处理工具,搭建了滇池东岸汇水区域的 SWMM 模型,并用实测数据进行了参数校核、模型验证。因此本文基于该模型研究东岸流域的错峰调蓄技术。

2 降雨资料分析

设计降雨是排水系统水文水质分析的基本要素,其中雨型对洪峰流量和流量过程线有较大影响。因此根据研究区域的历史降雨资料分析其分布规律,结合昆明市的降雨特点设计合适的降雨过程线用于后文的模拟。首先对干渠所在的昆明市呈贡区的 2010 - 2016 年逐分钟降雨资料进行统计分析,如图 2、3 所示。

统计结果显示,呈贡地区降雨以单峰雨型为主,占降雨总场次的 54%;其次,雨峰位于降雨历时前

1/4 时间的降雨占雨总场次的 58%。研究还统计了 1995 - 2009 年昆明市逐时降雨资料,如图 4、5 所示。统计结果显示雨、旱季的各场降雨均以短历时(1~3 h)为主。其中降雨历时为 2 h 的降雨出现的频率最高,占所统计降雨总场次的 22.8%。同时研究还发现昆明市的季候有明显的雨季旱季之分,雨季的降雨总量占全年总降雨量的 93.68%,而雨季的降雨场次之间间隔普遍较短,其中间隔 24 h 以内的

降雨场次占到了总数的 64%。

为了比较相同雨型、不同重现期的降雨条件下干渠水量和污染负荷收集情况,需要设计不同重现期的降雨曲线。因此研究采用芝加哥暴雨设计方法,根据昆明市降雨强度公式,设计降雨历时 $T = 2$ h、雨峰系数 $r = 0.2$ 、重现期分别为 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1 a 的芝加哥降雨。这些典型的降雨场次将用于后文 SWMM 模型模拟的降雨序列。

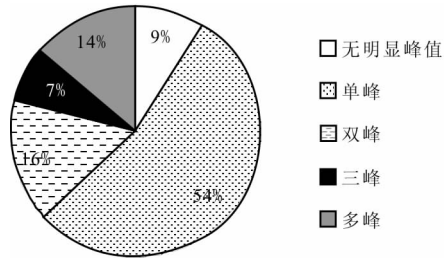


图 2 2010 - 2016 年实测各场降雨雨峰个数所占比例

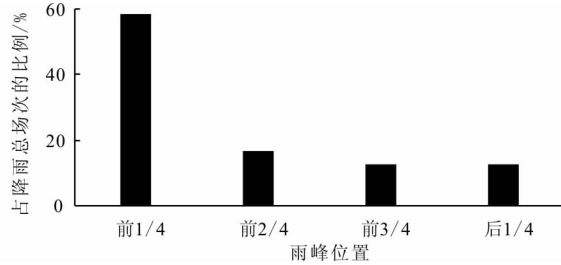


图 3 2010 - 2016 年单峰降雨雨峰位置统计

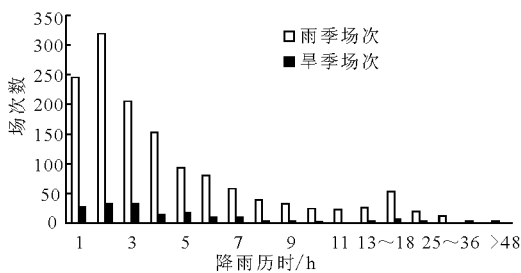


图 4 1995 - 2009 年各场次降雨历时频次分布图

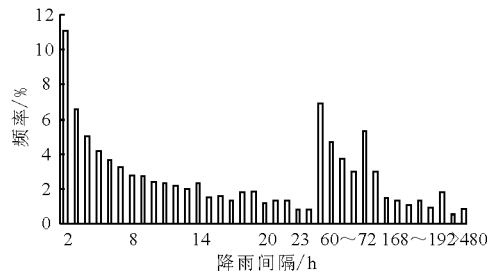


图 5 1995 - 2009 年相邻场次降雨间隔频率分布图

3 模拟结果及分析

3.1 SS 及 TN 浓度阈值确定

雨季雨水径流给污水厂带来的水量冲击负荷使得污水厂进水污染物浓度持续低于设计值,从而带来微生物营养物质不足的情况。因此采用 SS 和 TN 作为截流控制指标时,需设定进水水质标准值作为干渠进水的浓度控制阈值。当干管中典型污染物的浓度高于控制浓度阈值时,干渠接入点的电动阀门开启,将雨水接入雨水干渠;当干管中典型污染物的

浓度低于控制浓度阈值时,电动阀门关闭,雨水经过旋流沉沙处理后,溢流至人工湿地,最后排入滇池。干渠只能容纳重现期为 0.45 a 的降雨,当降雨重现期超过 0.5 a 时干渠开始出现溢流,因此采用重现期 $P = 0.5$ a 设计降雨作为模拟的降雨条件。在不同降雨等级下,COD 低浓度负荷持续时间最长^[13],因此需对 COD 浓度加强调控。选定 $SS = 100、125、150$ mg/L 和 $TN = 4、5、6$ mg/L 作为干渠进水的控制浓度阈值,比较各干管雨水 SS 浓度达到控制浓度阈值时刻其对应 COD 的浓度,结果见表 1。

表 1 $P = 0.5$ a 降雨下各干管雨水 SS、TN 浓度达到控制浓度阈值时刻其对应的 COD 浓度 mg/L

浓度阈值	干管 1	干管 2	干管 3	干管 4	干管 5	干管 6	干管 7	干管 8
SS = 100	73.28	74.15	68.87	83.74	85.11	101.89	90.23	74.97
SS = 125	93.93	82.73	83.19	104.89	108.88	119.32	113.66	100.83
SS = 150	112.67	130.26	119.43	126.58	124.68	117.73	136.25	123.87
TN = 4	79.98	67.08	82.95	62.21	67.94	67.76	99.13	123.87
TN = 5	98.26	89.18	103.20	83.74	85.11	97.44	122.15	131.15
TN = 6	121.18	111.72	126.76	88.16	101.94	105.10	155.79	135.14

采用 SS 作为干渠截流的控制指标,当以 SS = 100 mg/L 为雨水干渠进水的浓度控制阈值时,各干管截留的 COD 浓度偏低,未达到雨水处理站进水 COD 的设计范围(100 ~ 150 mg/L)。而采用 SS = 125 mg/L 作为雨水径流接入干渠的起始浓度时,各干管进水 COD 浓度基本满足雨水处理站设计要求。因此,采用 125 mg/L 作为 SS 调控下雨水干渠进水的控制浓度阈值。类似地,采用 5 mg/L 作为 TN 调控下雨水干渠进水的控制浓度阈值。

3.2 SS 浓度 - 负荷通量调控

本方案采用 SS 作为截流控制指标,设定 125 mg/L 作为雨水干渠进水的 SS 浓度控制阈值。根据在线采集的数据对电动阀进行启闭操作:(1)当干渠最不利点的水位低于预设的警戒水位(干渠开始溢流时水位为 -6.76 m)时,进入典型污染物浓度阈值控制模式。当干管中 SS 的浓度高于控制浓度阈值时,电动阀门保持常开状态,雨水经过雨污切换井后,由雨水出水管进入雨水截流干渠,实现截流。当干管中 SS 的浓度低于控制浓度阈值时,电动阀门关闭,雨污切换井内水位升高,雨水经过旋流沉沙处理后,溢流至人工湿地,最后排入滇池。(2)当干渠最不利点的水位高于预设的警戒水位时,干渠出现溢流后,在 SS 阈值控制的同时执行液位 - 污染物通量控制模式,按照 SS 负荷通量高低依次开启切换井,从而实现干渠对典型污染物的高效和最大化收集。调蓄后雨水干渠出口水量和 4 类污染物收集量较无调控的增减情况见表 2。

模拟结果表明随着降雨重现期的增大,采用 SS 浓度 - 负荷通量调控方案调蓄后 4 类污染物的截留率较无调控时明显增大。降雨强度和重现期呈正相

关关系,降雨重现期较小时对应较小的降雨强度,对地面的初期冲刷效应也越弱,从而排水系统收集的污染负荷也较少。

因此重现期较小时上述 SS 调控方案对 4 类污染物的截留效果较无调控时的优势较弱,而随着重现期的增大,SS 调控方案较无调控的优势明显增强,尤其在 $P = 1$ a 设计降雨时,4 类污染物截留量增幅均超 60%。

表 2 不同降雨重现期时 SS 浓度 - 负荷通量调控下雨水干渠 4 类污染物负荷较无调控时的增减率 %

重现期/a	流量	SS	COD	TN	TP
$P = 1$	- 14.90	61.21	79.87	86.66	70.82
$P = 0.9$	- 14.84	55.71	73.48	79.29	65.27
$P = 0.8$	- 14.66	49.81	66.52	71.30	59.23
$P = 0.7$	- 14.38	42.70	57.27	59.74	50.71
$P = 0.6$	- 13.98	34.76	47.38	49.43	42.51
$P = 0.5$	- 11.45	20.14	28.24	31.55	26.65

采用 $P = 1$ a 设计芝加哥降雨作为模拟的降雨条件,模拟无调控和 SS 浓度 - 负荷通量调控方案下雨水干渠水量和污染负荷浓度变化过程,结果如图 6、7 所示。

模拟结果表明调蓄后干渠截留水量减少约 15%,峰值时间由 110 min 降至 60 min。调蓄前,初期雨水污染物浓度较高,在中后期浓度较低,前后水质差异较大;采用 SS 调控方案调蓄后,4 种污染物浓度均出现了明显的平台期效应,SS、COD、TN、TP 浓度分别维持在 125、90、5、1.5 mg/L,前后期变化较小的水质浓度有利于雨水处理厂的稳定运行。

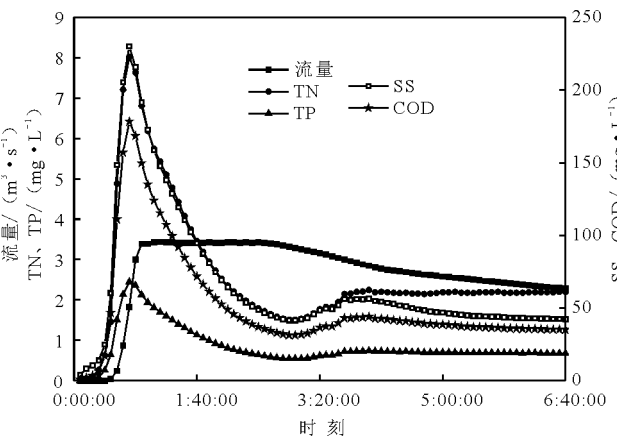


图 6 $P = 1$ a 降雨下无调控时雨水干渠出口流量和 4 类污染物浓度变化过程

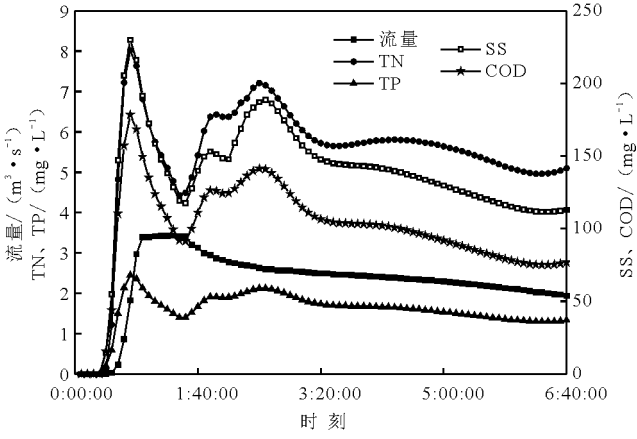


图 7 $P = 1$ a 降雨下 SS 浓度 - 负荷通量调控时雨水干渠出口流量和 4 类污染物浓度变化过程

无调控和 SS 浓度 - 负荷通量调控方案下污水干渠出口 SS、COD、TN、TP 浓度变化情况见表 3、4、5。结果表明采用 SS 调控方案调蓄后污水干渠出口 4 类污染物平均浓度均有提高,同时其最小浓度也明显提高。以 $P = 1$ a 设计降雨为例,调蓄后污水干渠出口 SS、COD 最小浓度分别由调蓄前的 92.2 mg/L 和 98.6 mg/L 上升至 103.3 mg/L 和 131.4 mg/L。污水干渠出口平均浓度和最小浓度的提高表明 SS 浓度 - 负荷通量调控方案可以有效削减降雨给污水厂带来的低浓度冲击负荷,减小其对污水厂微生物的不利影响。

表 3 不同降雨重现期时无调控和 SS 浓度 - 负荷通量调控下

污水干渠出口 4 类污染物平均浓度		mg/L			
重现期/a	调控方式	SS	COD	TN	TP
$P = 1$	无调控	132.2	136.8	10.7	2.3
	SS 调控	167.4	177.5	13.9	2.9
$P = 0.9$	无调控	132.3	137.1	10.8	2.3
	SS 调控	164.5	175.1	13.8	2.9
$P = 0.8$	无调控	132.3	137.3	10.9	2.3
	SS 调控	160.8	171.5	13.7	2.8
$P = 0.7$	无调控	131.5	136.9	10.9	2.3
	SS 调控	155.9	167.3	13.5	2.8
$P = 0.6$	无调控	129.6	135.7	10.9	2.3
	SS 调控	149.0	160.4	13.1	2.7
$P = 0.5$	无调控	124.4	131.5	10.8	2.2
	SS 调控	137.0	148.0	12.4	2.5

表 4 不同降雨重现期时无调控下污水干渠

出口 4 类污染物浓度最小值		mg/L			
重现期/a	SS	COD	TN	TP	
$P = 1$	92.2	98.6	6.7	1.8	
$P = 0.9$	94.5	100.7	6.3	1.8	
$P = 0.8$	96.7	102.6	6.3	1.8	
$P = 0.7$	98.6	104.0	6.2	1.8	
$P = 0.6$	99.5	104.0	5.9	1.6	
$P = 0.5$	97.6	100.5	5.6	1.5	

3.3 TN 浓度 - 负荷通量调控

本方案采用 TN 作为截流控制指标,设定 5 mg/L 作为雨水干渠进水 TN 的浓度控制阈值。(1) 当干渠最不利点的水位低于预设的警戒水位时,进入典型污染物浓度阈值控制模式。当干管中 TN 的浓度高于控制浓度阈值时,电动阀门保持常开状态,

雨水经过雨污切换井后,由雨水出水管进入雨水截流干渠,实现截流。当干管中 TN 的浓度低于控制浓度阈值时,电动阀门关闭,雨污切换井内水位升高,雨水经过旋流沉沙处理后,溢流至人工湿地,最后排入滇池。(2) 当干渠最不利点的水位高于预设的警戒水位时,干渠出现溢流后,在 TN 阈值控制的同时执行液位 - 污染物通量控制模式,按照 TN 负荷通量的高低依次开启切换井,从而实现干渠对典型污染物的高效和最大化收集。

采用 TN 浓度 - 负荷通量调控方案调蓄后雨水干渠出口水量和 4 类污染物收集量较无调控的增减情况见表 6。模拟结果表明随着降雨重现期的增大,TN 调控下 4 类污染物的截留率较无调控时明显提高。且采用 TN 调控方案时 4 类污染物的截留效果优于 SS 调控。

表 5 不同降雨重现期时 SS 负荷调控下污水

干渠出口 4 类污染物浓度最小值		mg/L			
重现期/a	SS	COD	TN	TP	
$P = 1$	103.3	131.4	6.7	2.0	
$P = 0.9$	101.5	121.7	6.2	1.8	
$P = 0.8$	93.4	123.5	6.3	1.8	
$P = 0.7$	101.2	119.0	6.2	1.8	
$P = 0.6$	90.4	109.9	5.9	1.6	
$P = 0.5$	101.6	101.6	5.6	1.5	

表 6 不同降雨重现期时 TN 浓度 - 负荷通量调控下雨水

干渠 4 类污染物负荷较无调控时的增减率		%				
重现期/a	流量	SS	COD	TN	TP	
$P = 1$	- 14.91	61.81	81.13	88.12	72.29	
$P = 0.9$	- 14.84	55.54	73.29	79.10	64.98	
$P = 0.8$	- 14.66	49.83	66.59	71.43	59.23	
$P = 0.7$	- 14.50	44.01	59.61	63.24	53.40	
$P = 0.6$	- 13.98	35.17	48.72	52.30	44.35	
$P = 0.5$	- 10.94	19.67	27.65	31.63	26.36	

采用 $P = 1$ a 设计芝加哥降雨作为模拟的降雨条件,采用 TN 浓度 - 负荷通量调控方案调蓄后雨水干渠出口流量和 4 类污染物浓度变化过程如图 8 所示。从模拟结果可以看出,调蓄后雨水干渠截留水量减少约 15%,峰值时间约 60min。且降雨前后期水质差异较小,后期 TN 浓度维持在 5 mg/L 以上。

TN 浓度 - 负荷通量调控方案下污水干渠出口 SS、COD、TN、TP 平均浓度和最小浓度见表 7、8。模

拟结果表明采用 TN 浓度 - 负荷通量方案调蓄后污水干渠出口污染物平均浓度和最小浓度均有提高。以 $P = 1$ a 设计降雨为例,采用 TN 调控方案调蓄后污水干渠出口 SS、COD 最小浓度分别上升至 124.1 和 132.0 mg/L。

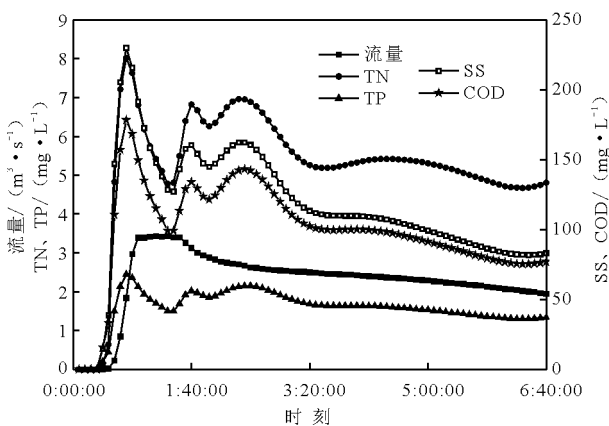


图 8 $P = 1$ a 降雨下 TN 浓度 - 负荷通量调控下雨水干渠出口流量和 4 类污染物浓度变化过程

表 7 不同降雨重现期时 TN 浓度 - 负荷通量调控下污水干渠出口 4 类污染物平均浓度 mg/L

重现期/a	SS	COD	TN	TP
$P = 1$	168.8	179.5	14.1	3.0
$P = 0.9$	164.3	175.1	13.9	2.9
$P = 0.8$	161.9	173.0	13.8	2.9
$P = 0.7$	156.1	167.5	13.5	2.8
$P = 0.6$	150.9	163.1	13.4	2.7
$P = 0.5$	137.1	148.1	12.4	2.5

表 8 $P = 1$ a 设计降雨时 TN 调控下污水干渠出口 4 类污染物浓度最小值 mg/L

重现期	SS	COD	TN	TP
$P = 1$	124.1	132.0	6.7	1.9
$P = 0.9$	105.6	121.8	6.2	1.8
$P = 0.8$	106.1	124.1	6.4	1.8
$P = 0.7$	93.4	118.7	6.2	1.8
$P = 0.6$	108.0	109.9	5.9	1.6
$P = 0.5$	115.7	102.0	5.6	1.5

4 结 论

(1) 基于前期建立的东岸排水管网 SWMM 模型,结合该区域 1995 - 2016 年间降雨资料,研究滇池环湖截污干渠的错峰调蓄技术,提出了典型污染

物浓度阈值控制模式和液位 - 污染物通量控制模式。采用 SS 和 TN 作为干渠截流的典型污染物控制指标,其控制浓度阈值分别取 125 和 5 mg/L。

(2) 模拟降雨重现期为 0.5 ~ 1 a 时管网模型执行 SS 和 TN 浓度 - 负荷通量调蓄方案下干渠负荷收集情况,结果显示两种方案均能有效提高雨水干渠的污染负荷收集率,且提高污水干渠出口平均浓度和最小浓度,从而降低雨水对污水厂的冲击负荷。且随着重现期增大,干渠对污染物的高效和最大化收集效果越明显。

(3) TN 浓度 - 负荷通量调控方案在提高雨水干渠负荷收集率和污水干渠出口污染物浓度方面优于 SS,故选择 TN 作为干渠截流的最优典型污染物控制指标。

(4) 本研究采用的调蓄方案对于干渠高效收集初期雨水具有显著效果,有效地错开水质峰和水量峰,实现了污染负荷截留效益的最大化,为滇池污染治理提供可靠的技术支持。低影响开发模式作为新型的雨水综合管理模式,逐步广泛应用于城市的开发建设中,因此未来可以考虑优化组合调蓄方案和 LID 措施以实现降雨径流的源头削减和过程控制。

参考文献:

[1] 陈水平,付国楷,喻晓琴,等. 城市雨水径流水质特征及应对方法[J]. 三峡环境与生态,2013,35(4):48 - 51.

[2] Lewis A R. Storm water management model user's manual version 5.0. USA[M]. United States Environmental Protection,2009.

[3] 王晓昌,王永坤,任心欣,等. 深圳市某体育中心低影响开发系统应用与模拟评估[J]. 给水排水,2016,42(5):91 - 96.

[4] Zhu Zhihua, Chen Zhihe, Chen Xiaohong, et al. Approach for evaluating inundation risks in urban drainage systems [J]. Science of the Total Environment, 2016, 553: 1 - 12.

[5] Yu Haijun, Huang Guoru, Wu Chuanhao. Application of the stormwater management model to a piedmont city: a case study of Jinan City, China[J]. Water Science & Technology (A Journal of the International Association on Water Pollution Research), 2014, 70(5): 858.

[6] 毛剑东,顾素恩,陈梅君,等. 基于 SWMM 的城市排水管网优化模拟[J]. 水利水电技术, 2015, 46(1): 114 - 117.

[7] 黄国如,黄 维,张灵敏,等. 基于 GIS 和 SWMM 模型的城市暴雨积水模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(4): 1 - 6.

(下转第 26 页)

- 科学,1992,16(4):482-493.
- [19] 吴创收,杨世伦,黄世昌,等. 1954-2011 年间珠江入海水沙通量变化的多尺度分析[J]. 地理学报,2014,69(3):422-432.
- [20] 王文圣,丁 晶,李跃清. 水文小波分析[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [21] 尤卫红. 气候变化的多尺度诊断分析和预测的多种技术方法研究[M]. 北京:气象出版社,1998.
- [22] 陈松生,张欧阳,陈泽方,等. 金沙江流域不同区域水沙变化特征及原因分析[J]. 水科学进展,2008,19(4):475-482.
- [23] 张明波,郭海晋,徐德龙,等. 嘉陵江流域水保治理水沙模型研究与应用[J]. 水土保持学报,2003,17(5):110-113.
- [24] 许全喜,石国钰,陈泽方. 长江上游近期水沙变化特点及其趋势分析[J]. 水科学进展,2004,15(4):420-426.
- [25] 丁文荣. 横断山区干旱河谷气候变化趋势研究[J]. 生态与农村环境学报,2013,29(6):681-687.
- [26] Zhang Jianping, Yang Zhong, Wang Daojie, et al. Climate change and causes in the Yuanmou dry-hot valley of Yunnan, China [J]. Journal of Arid Environments, 2002, 51(1):153-162.
- [27] 周 旭,张 斌,刘刚才. 元谋干热河谷近 30 年植被变化遥感监测[J]. 长江流域资源与环境,2010,19(11):1309-1313.

~~~~~

(上接第 19 页)

- [8] 余 嵘,赵 丹,刘渊博,等. SWMM 模型中不同 LID 措施在排水系统模拟中的应用[J]. 中国农村水利水电,2016(1):35-38.
- [9] 王 蓉,秦华鹏,赵智杰. 基于 SWMM 模拟的快速城市化地区洪峰径流和非点源污染控制研究[J]. 北京大学学报(自然科学版),2015,51(1):141-150.
- [10] Marlène V D S, Ataur R, Garry R. Modeling of a lot scale rainwater tank system in XP-SWMM: a case study in Western Sydney, Australia [J]. Journal of Environmental Management, 2014, 141:177-189.
- [11] 王 健,周玉文,刘 嘉,等. 雨水调蓄池在国内外应用简况[J]. 北京水务,2010(3):6-9.
- [12] 彭竹藏. 基于 SWMM 的滇池环湖截污干渠(东岸段)的截流能力及运行状况分析[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [13] 魏 婷. 滇池东岸非点源污染负荷控制初探[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [14] 喻晓琴. 滇池流域典型城镇雨水径流特征及截流方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- [15] 浦 鹏. 滇池环湖截污干渠(东岸段)错峰技术方案模拟与分析[D]. 重庆:重庆大学,2015.
- [16] 胡晓惠,张 智,姚娟娟,等. 滇池环湖截污干渠高效截流分析[J]. 给水排水,2016,42(4):113-117.