



昆明市排水体系问题识别及费效分析

李 晴¹ 董 慧² 曾维华^{1,3}

(1 北京师范大学环境学院,北京 100875;2 云南省环境科学研究院,昆明 650034;
3 中国科学院西北高原生物研究所,西宁 810008)

摘要:利用昆明市 17 座污水处理厂数据构建适用于昆明市的污染物处理费用函数,并依据昆明市“十三五”规划目标,以 2015 年为基准年,设计 4 种减排情景,对 2025 年不同情景下昆明市污水处理厂的费用效益进行分析。结果表明:城市排水管网改造与强化管理对提高污水处理厂效率,充分挖掘其污水处理潜力至关重要,该情景目标年费效比较基准情景降低了 0.22,削减单位 COD、NH₃-N、TN 和 TP 可分别节省 0.093 元/m³、0.251 元/m³、0.137 元/m³ 和 0.280 元/m³,污水处理厂效益明显改善。

关键词:城市排水体系;费用效益分析;费用函数;污水处理厂

中图分类号:TU992 文献标识码:A 文章编号:1002-8471(2021)S1-0183-07

DOI:10.13789/j.cnki.wwe1964.2021.S1.038

引用本文:李晴,董慧,曾维华.昆明市排水体系问题识别及费效分析[J].给水排水,2021,47(S1):183-188,195. LI Q, DONG H, ZENG W H. Problem identification and cost-benefit analysis of drainage system in Kunming city[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(S1):183-188,195.

Problem identification and cost-benefit analysis of drainage system in Kunming city

LI Qing¹, DONG Hui², ZENG Weihua^{1,3}

(1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. Yunnan Institute of Environmental Science, Kunming 650034, China;
3. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China)

Abstract: Taking Kunming as an example, the cost function of pollutant treatment suitable for Kunming is constructed by using the data of seventeen wastewater treatment plants in Kunming. According to the targets of the 13th Five-Year Plan of Kunming, four emission reduction scenarios are designed based on 2015 as the base year, and the cost and benefit of Kunming wastewater treatment Plant under different scenarios in 2025 is analyzed. The results show that the urban drainage network reconstruction and strengthening management is very important to improve the efficiency of wastewater treatment plant and fully tap the pollutant treatment potential. The cost-benefit ratio of the target year for this scenario is 0.22 lower than the baseline scenario. The unit treatment cost of COD, NH₃-N, TN and TP can be saved by 0.093 yuan/m³, 0.251 yuan/m³, 0.137 yuan/m³ and 0.280 yuan/m³, respectively. The benefit of wastewater treatment plant is obviously improved.

Keywords: Urban drainage system; Cost-benefit analysis; Cost function; Wastewater treatment plant

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07111003,2012ZX07102-002-05)。



1 昆明市排水体系现状及问题识别

1.1 基本概念

昆明市地处中国西南边陲,云贵高原中部,云南省中部湖盆群的中心地带,地处东经 102°10'至 103°41',北纬 24°24'至 26°33'之间,东西最大横距 152 km,南北最大纵距 237.5 km,面积 21 011 km²。主城区二环路内排水体制为截流式合流制,二环路外为分流制,主要有城东、城南、城西、城北和城东南五大排水系统;昆明市共有 17 座污水处理厂,其中主城区有 9 座,污水日处理量约 180 万 m³/d,出水水质均执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。图 1 为昆明市污水处理厂主要污染物(COD、NH₃-N、TN 和 TP)进出口浓度与《污水排入城镇下水道水质标准》中各污染物 A 级标准(进水 A 级标准)和《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准(出水 A 级标准)的对比。

1.2 问题识别

通过图 1 可以看出,目前昆明市污水处理厂主要污染物出水浓度均已达标,入水浓度较正常水平普遍偏低。基于生态网络分析法^[1]构建城市排水系统网络结构概念模型,如图 2 所示, f_{ij} 代表从节点 j 到节点 i 的污染物流动过程, z, y 代表网络中的输入与输出。本文以 COD 为例,对昆明市排水系统网络进行效用分析,由表 1 可知,节点间的正效用(+)数量为 61(不考虑节点的自我共生关系,即主对角线上的“+”),负效用(-)数量为 71,共生指数 M (正效用数量与负效用数量的比值)为 0.86, M 小于 1,昆明市排水系统网络协作性较差。

根据实际调研发现昆明市现有排水体系造成污水处理厂进水浓度偏低的原因主要包括以下几个方面:

- (1)排水体制不完善。当前昆明市地下排水管网尚未形成科学合理、符合城市发展要求的排水体系。排水管网常常受到损坏,同时也存在一些道路排水管网建设不完善,甚至一些道路未配套建设排水管网的状况。旧城区由于建筑密度大,若将其完全改为雨污分流制,代价较高,因此选择先向截流式合流制过渡,但在雨季时仍会有大量雨水进入管网,导致城区污水处理厂进水浓度偏低;新城区虽然在设计时要求严格依照雨污分流制进行,但城区地块

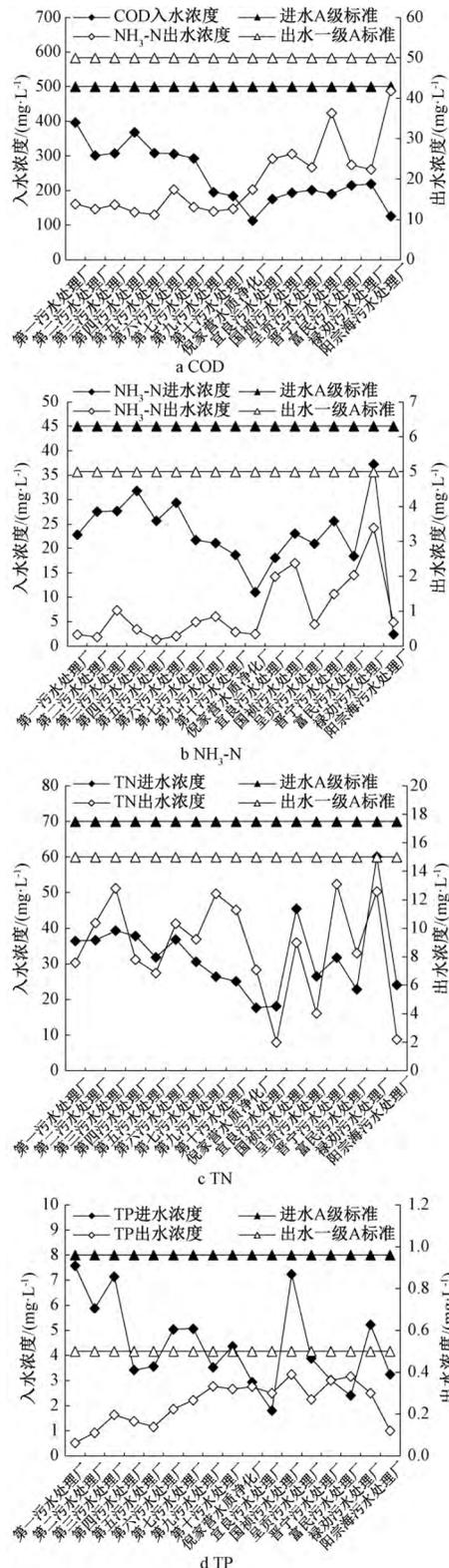


图 1 昆明市污水处理厂主要污染物进出水浓度
 Fig. 1 Import and export concentration of pollutants of sewage treatment plants in Kunming

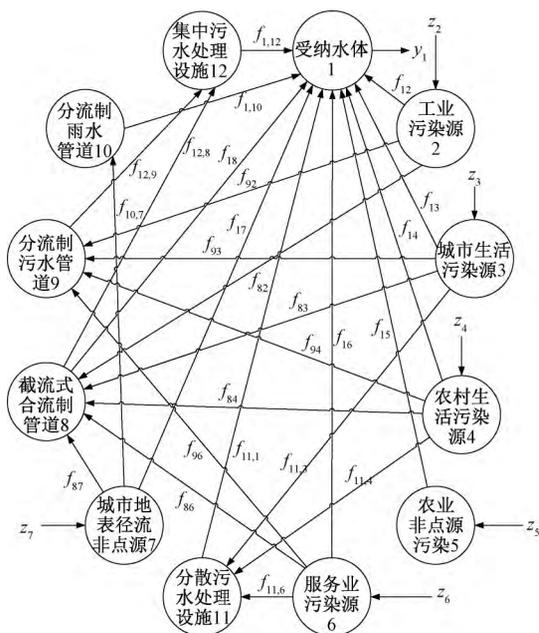


图 2 城市排水系统网络结构概念模型

Fig. 2 Network structure model of urban drainage system

表 1 昆明市排水系统网络效用矩阵

Tab. 1 Network utility matrix of Kunming drainage system

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-
2	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	+	+
3	+	+	+	-	+	-	-	-	-	+	-	+
4	+	+	-	+	+	-	-	-	-	+	-	+
5	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	+	+
6	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	-	+
7	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-	+	+
8	-	-	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-
9	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+
10	-	-	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+
11	+	-	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+
12	-	-	+	+	-	+	+	+	+	-	-	+

的开发、下游污水管网改造的滞后,导致上游地区的污水无法及时顺畅的排出,而是将污水管道直接与雨水管连接或选择直接排入就近水体,有一部分污水往往没能接入污水处理厂,导致进水浓度偏低。

(2)城市管网渗漏。当前城市排水管多数采用抗震、抗折强度较低的钢筋混凝土管,旧城区大部分仍在采用刚性接头,因此时常发生管道与管道接头处没有密封好的情况;加上通常排水管网使用年限较长,部分钢筋混凝土箱随着使用年限的增加出现裂缝,造成地下水和地表水极易渗透到管网内,从而降低管网污水浓度,致使污水处理厂进水浓度偏低。本

文以第七、八水质净化厂为例,利用基于特征因子法的管网入渗水量计算方法^[2],对 2015 年第七、八水质净化厂逐日进水特征进行分析,如图 3 所示,由此可见昆明市地下水入渗量较大,管网渗漏问题严重。

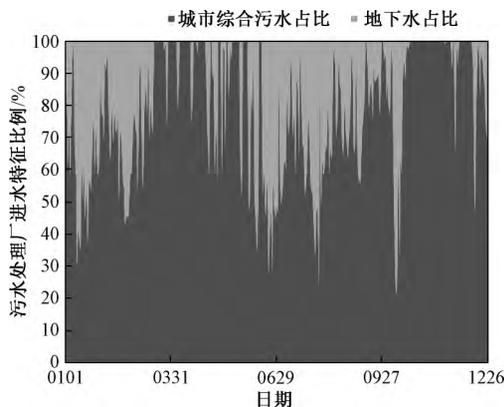


图 3 第七、八水质净化厂逐日进水特征比例

Fig. 3 The seventh and eighth sewage treatment plant daily influent characteristic ratio

(3)合流制溢流。依照昆明市排水体制总体规划,主城区二环路内为截流式合流制,二环路外为分流制。但由于老城区的改造和新城区的管网建设还未完成,实际排水体制较混乱,在建成的分流制区域,仍有许多污水支管接入了雨水干管,真正实现分流制的区域很少。因此,昆明市大部分为合流状态,合流制排水体制存在的溢流污染问题(CSO)不但制约水环境质量改善,还会致使雨季时大量污水溢流至水体,大量雨水随着管网进入污水处理厂,导致污水处理厂进水浓度偏低。

(4)管道沉积。污水管道在施工时对管内底标高控制不严格,使污水在管道内流速缓慢,甚至造成长期积水,污水中的大颗粒物在管道中沉积形成絮凝状吸附其他小颗粒物,导致通过这部分管道进入污水处理厂的污水多为上清液,由此造成污水处理厂进水浓度偏低。

2 污水处理费用函数构建与情景设计

首先利用昆明市 17 座污水处理厂数据分别构建 COD、NH₃-N、TN 和 TP 的处理费用函数,并依据昆明市“十三五”规划目标,以 2015 年为基准年,设计 4 种减排情景,再分别计算不同情景下基准年和目标年污染物处理的边际费用以及污水处理厂能效比。



2.1 昆明市污水处理厂费用函数构建

在水污染控制系统中, 污水处理的费用函数反应了污水处理的规模经济效应和效率经济效应, 污水处理的费用函数通常作为经验模型来处理。因污水处理厂运行费用与污水实际处理规模和处理效率有较强相关性, 而投资费用与污水设计处理规模和处理效率有较强相关性, 而不同情景下污水实际处理规模不同, 故本文建立的是污水处理厂污水处理运行费用函数, 形式见式(1):

$$C = K_1 Q^{K_2} + K_3 Q^{K_2} \eta^{K_4} \quad (1)$$

式中 C——削减污染物的运行费用, 万元;

Q——污染物实际削减规模, t;

η——污染物去除效率;

$K_1 \sim K_4$ ——率定参数, 其中 K_2 、 K_4 分别为污水处理规模和效率的经济效应指数。

利用 17 座污水处理厂运行数据分别构建 COD、NH₃-N、TN 和 TP 的处理费用函数, 率定各函数参数值并进行检验。利用 matlab 的拟合和验证结果如表 2 所示, 4 种污染物处理费用函数 R² 均大于 0.9, 模型通过检验, 可以用来预测不同情景下污染物处理费用。

表 2 污染物处理费用函数建模与验证结果

Tab. 2 Model and validation results of pollutant treatment cost function

污染物类型	运行费用函数	R ²
COD	$C = 5.123Q^{0.8443} - 3.914Q^{0.8443} \cdot 1.05668 \eta$	0.9296
NH ₃ -N	$C = 3.822Q^{0.9982} - 2.94Q^{0.9982} \eta^{39.15}$	0.9859
TN	$C = 3.251Q^{0.9899} - 10.91Q^{0.9899} \eta^{14.11}$	0.9369
TP	$C = 3.3979Q^{0.7851} - 0.173Q^{0.7851} \eta^{4.056}$	0.9616

2.2 情景设计

由问题识别部分可知昆明市污水处理厂运行效率低、对污染物的削减潜力没有得到充分挖掘主要是由管网问题所导致的, 由于历年来治污理念是“重城市污水处理厂, 轻管网收集输送系统”, 由此导致很多污水管网严重破损, 地下水与地表水渗入管网, 污水处理厂实际入水浓度较设计入水浓度低很多; 同时, 随着城市化进程加快, 昆明市新建大量小区, 这些小区产生的污水无法纳入现有污水处理厂(因现有污水处理厂已满负荷运转), 又无财力新建污水处理厂, 因此昆明市政府出台相关政策, 要求新建小区的污水由区政府就地解决, 即修建分散式污水

处理设施, 将这部分污水“就地处理”; 此外, 近些年国内城市污水处理厂新实施的“提标改造”项目标准越来越高, 北京地标、天津地标等陆续出台, 其他地区紧随, 也都在陆续上马“准四类”或超净排放标准。

基于以上分析, 本文依据昆明市“十三五”规划目标, 以 2015 年为基准年, 2025 年为目标年, 设计如下 4 种情景(假设各情景设定条件目标年均已达到):

(1) 基准情景(Business As Usual, BAU 情景): BAU 情景作为按照当前趋势不加约束的情景, 可作为未来发展的基准情景。利用该地区实际污普统计数据中的污水处理厂运行情况得到基准年各污染物进出口浓度和实际污水处理规模; 根据预测的目标年污水产生量及污水集中处理率得到污水处理厂目标年的污水处理规模, 因此情景未改善污水处理厂进水浓度, 故认为此情景下目标年污染物进出口浓度同基准年。

(2) 就地分散处理情景(Decentralized Processing Scenario, DPS 情景): 昆明市已修建了大量污水处理厂, 但仍有部分地区的污水无法集中到污水处理厂进行处理, 市政府要求对这部分污水采用就地分散方式进行处理。假设昆明市新建 10 座污水处理设施处理这部分污水, 基于此得到基准年和目标年污水处理规模; 由于此情景未使进水浓度有所改善, 因此基准年和目标年污染物进出水浓度由原有和新建污水处理设施的进出水浓度取均值得到(新建污水处理设施进水浓度参考《污水排入城镇下水道水质标准》中各污染物 A 级标准; 出水浓度参考《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。

(3) 管网改造与强化管理情景(Reconstruction and Management Scenario, RMS 情景): 昆明市通过加快管网改造维护并加强监管, 改善污水处理厂入水水质, 使污染物进水浓度提高。基于市政《污水排入城镇下水道水质标准》中各污染物 A 级标准作为该地区污水处理厂进水浓度参考, 《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准作为污水处理厂出水浓度参考; 基于基准情景下基准年和目标年污水处理量和城市污水未进入污水处理厂量得到此情景下基准年和目标年污水处理厂实际污水处理规模。



表 3 不同情景下参数设定值

Tab. 3 Parameter setting of different scenarios

年份	情景	实际污水处理规模 /(万 m ³ ·d ⁻¹)	COD		NH ₃ -N		TN		TP	
			入水浓度 /(mg·L ⁻¹)	出水浓度 /(mg·L ⁻¹)						
基准年	BAU	52 594.62	227.19	25.91	21.86	1.48	32.64	7.62	3.82	0.23
	DPS	75 507.20	328.23	34.83	30.42	2.78	46.48	10.35	5.37	0.33
	RMS	87 603.96	500.00	50.00	45.00	5.00	70.00	15.00	8.00	0.50
	UAR	87 603.96	500.00	30.00	45.00	1.50	70.00	1.50	8.00	0.30
目标年	BAU	64 685.34	227.19	25.91	21.86	1.48	32.64	7.62	3.82	0.23
	DPS	101 424.38	328.23	34.83	30.42	2.78	46.48	10.35	5.37	0.33
	RMS	116 302.02	500.00	50.00	45.00	5.00	70.00	15.00	8.00	0.50
	UAR	116 302.02	500.00	30.00	45.00	1.50	70.00	1.50	8.00	0.30

(4) 提标改造情景 (Upgrading And Reconstruction, UAR 情景): 昆明市在管网改造与强化管理基础上, 通过对区域内污水处理厂进行提标改造, 提高出水水质标准。区域内污水处理厂入水浓度参考《污水排入城镇下水道水质标准》中各污染物 A 级标准, 各污染物出水浓度参考《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 中的 IV 类水标准; 此情景相比 RMS 情景仅出水水质发生变化, 故基准年和目标年的污水实际处理规模同 RMS 情景。

基于以上设计, 不同情景下污水处理厂实际污水处理规模及各污染物进出水浓度设定值如表 3 所示。

2.3 计算单位污染物处理成本与费效比

利用不同情景下污水处理厂实际污水处理规模及各污染物进出口浓度测算得到不同情景下基准年和目标年污水处理厂污染物总削减量和去除效率, 由此得到各污水处理厂污染物削减量和去除效率。进而根据构建的不同污染物的处理费用函数, 计算预测不同情景下基准年与目标年污水处理厂削减各污染物的运行费用, 运行费用与污染物削减量的比值即为各污染物的单位处理成本, 污染物削减量越高, 说明产生的环境效益越大, 即单位污染物处理成本越低, 说明从环境效益角度污水处理厂的投入产出越高。

费效比是投入费用和产出效益的比值, 费效比越低越好。其中, 投入费用为削减污染物所用的实际费用, 取四种污染物处理费用的最大值作为污水处理厂的投入费用; 利用排污系数法及产业增加值排放强度法得到污染物产生量, 再依据各个个体所

支付的污水处理费总和得到排污收费总量, 通过污染物削减量与产生量的比值乘以排污收费总量之积得到各污染物对应的产出效益, 取 4 种污染物对应产出效益的最小值作为污水处理厂的产出效益。基于此分别计算不同情景下基准年与目标年污水处理厂费效比, 费效比越低, 说明从经济效益角度污水处理厂的投入产出越高。

3 结果分析

根据以上方法得到不同情景下基准年与目标年污水处理厂削减单位污染物的费用, 如表 4、图 4、图 5 所示。进一步根据污水处理厂运营总成本、费用及多主体智能仿真结果^[3-4] 得到基准年和目标年的污水处理费, 基准年居民污水处理费为 1.0 元/m³, 工业为 1.25 元/m³, 目标年居民污水处理费为 1.4 元/m³, 工业为 2.05 元/m³。由此计算出不同情景下污水处理厂费效比, 如表 5 和图 6 所示。

表 4 不同情景下单位污染物处理成本

Tab. 4 Unit pollutant treatment cost under different scenarios

年份	情景	单位污染物处理成本/(元·m ⁻³)			
		COD	NH ₃ -N	TN	TP
基准年	BAU 情景	0.431	3.591	2.800	1.186
	DPS 情景	0.377	3.505	2.728	1.020
	RMS 情景	0.339	3.341	2.665	0.908
	UAR 情景	0.353	3.400	2.690	0.958
目标年	BAU 情景	0.417	3.590	2.794	1.134
	DPS 情景	0.360	3.483	2.720	0.958
	RMS 情景	0.324	3.339	2.657	0.854
	UAR 情景	0.339	3.399	2.674	0.895

由表 4 和表 5 可知, 无论是基准年还是目标年, 4 种污染物的单位处理成本和污水处理厂费效比均符合 BAU 情景下最高, DPS 和 UAR 情景次之, RMS 情景最低的规律。由此可见, RMS 情景下污

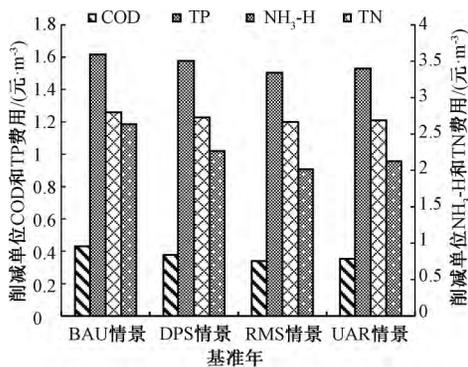


图 4 基准年单位污染物处理成本

Fig. 4 Unit pollutant treatment cost on base year

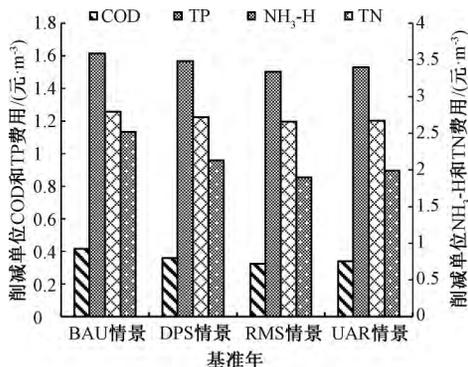


图 5 目标年单位污染物处理成本

Fig. 5 Unit pollutant treatment cost on target year

污水处理厂效益更好,目标年费效比相比于基准情景降低了 0.22,削减单位 COD、NH₃-N、TN 和 TP 较基准情景可分别节省 0.093 元/m³、0.251 元/m³、0.137 元/m³ 和 0.280 元/m³,即经过管网改造与强化管理后,污水处理厂效益明显改善;DPS 情景相比于 RMS 情景,削减单位污染物费用和费效比均较高,说明地方自行就地处理未处理的污水,污水处理规模的经济效应较差;UAR 情景下单位污染物处理成本和费效比均高于 RMS 情景,说明污水处理厂提标改造工程致使污水处理效率的经济效应较差,且此情景未能充分利用现有水环境容量。因此,昆明市范围内应首先加大力度解决城市污水收集问题,通过完善管网减少地下水及河水入渗,并将尚未集中处理的污水通过管网收集到污水处理厂,进而提高污水处理厂进水浓度,充分利用污水处理的规模经济效应和效率经济效应,如此可以充分挖掘污水处理厂污染物处理潜力,提高经济效益,促进排水系统和城市水系统可持续发展。

表 5 不同情景下污水处理厂费效比

Tab. 5 Cost-benefit ratio of sewage treatment plant under different scenarios

年份	情景	产出效益/万元	投入费用/万元	费效比
基准年	BAU 情景	2 765.82	2 682.85	0.97
	DPS 情景	5 576.67	4 907.47	0.88
	RMS 情景	10 343.84	7 861.32	0.76
	UAR 情景	10 444.70	8 355.76	0.80
目标年	BAU 情景	3 398.92	3 194.98	0.94
	DPS 情景	7 406.95	6 295.91	0.85
	RMS 情景	14 211.38	10 232.19	0.72
	UAR 情景	14 968.41	11 375.99	0.76

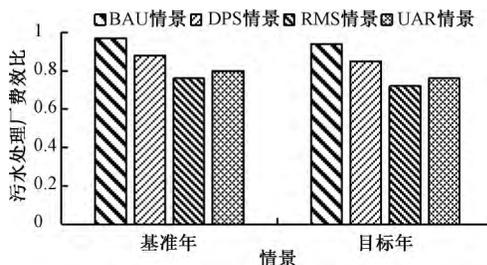


图 6 污水处理厂费效比

Fig. 6 Cost-benefit ratio of sewage treatment plant

4 结论

(1)通过对昆明市排水体系现状进行分析可知,该地区排水系统网络协作性较差,污水处理厂进水浓度偏低主要是由城市管网渗漏、排水体制不完善、合流制污水溢流和管道沉积等原因导致的,由此造成污水处理厂效益较差。

(2)通过分析不同情景下污水处理厂费用效益可知,城市排水管网改造与强化管理对提高污水厂效益至关重要。该情景充分发挥了污水处理的规模经济效应和效率经济效应,目标年费效比较基准情景降低了 0.22,削减单位 COD、NH₃-N、TN 和 TP 较基准情景可分别节省 0.093 元/m³、0.251 元/m³、0.137 元/m³ 和 0.280 元/m³,污水处理厂效益明显改善;而就地对未处理的污水致使污水处理规模的经济效应较差,污水处理厂提标改造致使污水处理效率的经济效应较差,且未能充分利用现有水环境容量,污水处理厂费效比和单位污染物处理成本均较 RMS 情景高。

(3)昆明市应加快管网改造工程,优化城市排水管网布局,重视管网改造与维护,改变以往“重污水处理厂、轻排水管网”的管理模式,提高污水收集率,

(下转第 195 页)



用二维模型构建二维漫流网格,建立一维与二维关联关系,并设置下游边界条件,最终整合搭建能够模拟雨水地表漫流及管道输送过程的一维二维耦合模型。

50 年一遇降雨情景下,经模拟内涝淹水分布情况如图 10 所示。

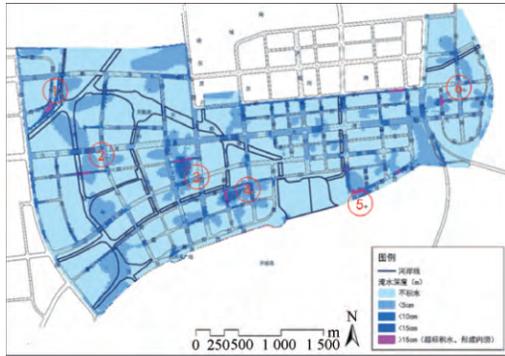


图 10 50 年一遇降雨情景下规划区内涝淹水情况

Fig. 10 Waterlogging situation of rainfall with 50-year return period

经模拟分析,可看到片区内有 6 处易涝点,主要淹水原因为地势低洼、上游汇水面大以及管道排泄不畅。针对不同地段特征,应采用相应内涝防治手段,如设置超标雨水行泄通道就近排河、设置大型调蓄设施等。

7 结语

(1)海绵城市控规指标的选择应根据相关规范标准和技术指南的要求,结合当地气象、水文、土地利用、下垫面等条件及规划地块和道路的性质、绿地率、下垫面等既有规划控制指标合理制定,做到因地制宜、回归本底。

(2)海绵城市控规中对指标项的确定应充分考虑规划目标的落地,提高设施建设的完成度和可靠度,在

规划中 LID 设施配置的选择应具有较大的灵活性,设施的类型、组合和规模可根据具体条件和建设方意愿自主决定,较难实施的措施尽量留于政府部门完成。

(3)海绵城市的核心在于“模拟自然”,改变以“排”为单一目标的传统模式,为避免项目建设过程的偷工减料和“走捷径”,应充分发挥政府的监督职能^[7],引导建设方按照规划指标完成建设,并完善海绵城市项目的审查机制,加强对海绵城市项目的方案、实施、竣工的审查力度。

参考文献

- [1] 章林伟. 中国海绵城市建设与实践[J]. 给水排水, 2018, 44(11): 1-5.
- [2] 住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)[Z]. 北京: 住房和城乡建设部, 2014.
- [3] 张车琼. 海绵城市规划中年径流总量控制目标分解方法研究[J]. 给水排水, 2017, 43(8): 51-54.
- [4] 车伍, 武彦杰, 杨正, 等. 海绵城市建设指南解读之城市雨洪调蓄系统的合理构建[J]. 中国给水排水, 2015, 31(8): 13-17.
- [5] 苏州市人民政府办公室. 市政府关于公布苏州市暴雨强度公式的通知[Z]. 2011.
- [6] GB 50014-2006 室外排水设计规范[S].
- [7] 王连接, 王开春, 黄勤征, 等. 海绵城市建设地方标准体系构建初探[J]. 给水排水, 2019, 45(12): 47-58.

△ 通信作者: 周琦琦, 女, 1986 年出生, 江苏苏州人, 工程师。主要从事建筑节能与海绵城市工作。

通信处: 215129 江苏省苏州市滨河路 1979 号建研院北楼 257

E-mail: 13861323193@163.com

收稿日期: 2020-06-30

(上接第 188 页)

降低地下水入渗率, 进而改善污水处理厂进水浓度低的问题, 从而充分挖掘其处理潜力, 提高经济效益, 促进排水系统和城市水系统可持续发展。

参考文献

- [1] 吴波. 城市水代谢系统识别、模拟与策略优选研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2014.
- [2] 徐祖信, 汪玲玲, 尹海龙, 等. 基于特征因子的排水管网地下水入渗分析方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 593-599.
- [3] 张家瑞. 基于多主体的滇池流域水污染防治环境经济政策智

能仿真[D]. 北京: 北京师范大学, 2016.

- [4] 张家瑞, 王慧慧, 曾维华. 基于 ABM+SD 耦合模型的滇池流域水价政策仿真[J]. 中国环境科学, 2017(10): 3991-4000.

& 通信作者: 曾维华, 男, 1965 年出生, 北京人, 博士生导师。主要研究方向为环境系统工程, 管网优化改造, 环境规划与管理等。

通信处: 100875 北京市海淀区新街口外大街 19 号

E-mail: zengwh@bnu.edu.cn

收稿日期: 2020-09-15