

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.027

建筑小区尺度下径流控制率与非点源污染负荷 削减率协同关系研究

栾广学¹, 侯精明¹, 马鑫¹, 李东来¹, 杨露¹, 杜颖恩¹, 王洁瑜², 刘园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. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要:以陕西省西安市天福和园小区为例,基于SWMM原理构建了水质水量计算模型,借鉴国内外相似地区相关模型参数的选取并结合实测数据确定模型参数。设计了9种重现期和5种雨峰系数条件的45场降雨,以分析不同降雨条件下研究区域的径流控制率与非点源污染负荷削减率的协同关系。结果表明:相同雨峰系数降雨条件下,径流控制率与非点源污染负荷削减率呈线性关系,COD、TN、TP和TSS 4种污染物的拟合函数曲线的协同系数均大于0.989;雨峰系数对拟合函数曲线的斜率与截距影响不大;建筑小区尺度下径流控制率与非点源污染负荷削减率存在高度的线性关系,可根据径流控制率推算出污染负荷削减率。

关键词:SWMM;降雨条件;建筑小区尺度;拟合函数;协同系数

中国分类号:TV131.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)01-0208-08

Research on synergistic relationship between runoff control rate and non-point source pollution load reduction rate at residential community scale

LUAN Guangxue¹, HOU Jingming¹, MA Xin¹, LI Donglai¹, YANG Lu¹, DU Yingen¹, WANG Jieyu², LIU Yuan² (1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: Using the community of Tianfuheyuan in Xi'an City, Shaanxi Province as an example, a water quality and quantity calculation model was constructed based on the principle of the Storm Water Management Model (SWMM). The model parameters were determined based on the measurements and relevant studies in similar areas in China and abroad. To analyze the synergistic relationship between the runoff control rate and non-point source pollution load reduction rate in the study area under different rainfall conditions, 45 rainfall events with nine return periods and five rainfall peak coefficients were designed. The results show that the runoff control rate was linearly related to the pollution load reduction rate under rainfall conditions with the same rainfall peak coefficient. The coefficients of synergy of the fitted function curves for the four pollutants COD, TN, TP, and TSS were above 0.989. The rain peak coefficient had little effect on the slope and intercept of the fitted function curve. There was a highly linear relationship between the runoff control rate and non-point source pollution load reduction rate at the residential community scale, and the pollution load reduction rate can be deduced from the runoff control rate.

Key words: SWMM; rainfall condition; residential community scale; fitting function; coefficient of synergy

城市非点源污染是指城市地表污染物在降雨径流的淋溶冲刷作用下以分散、广域的形式进入河湖引发的水体污染^[1]。降雨是城市非点源污染形成的动力因素,而降雨形成的径流是非点源污染物迁移的载体。因此,狭义上的城市非点源污染即城市

降雨径流污染,它是城市非点源污染的最主要形式^[2]。

国外城市非点源污染研究起步较早^[3],很多国家在20世纪70年代就对城市地表径流开展了大量测试及研究^[4-5]。目前,我国城市化比例不断增加,

基金项目:中德合作交流项目(M-0427);国家自然科学基金(52009104,52079106);陕西省重点研发计划(2021SF-484)

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

通信作者: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

市区不透水面积比例不断增大,导致降雨径流量增加,城市非点源污染问题日渐突出^[6-9]。利用模型进行水文水质模拟是研究城市暴雨径流污染管理和控制的重要手段^[1-2,10]。暴雨洪水管理模型(Storm Water Management Model, SWMM)采用一系列可以对参数进行校核的经验方程对非点源污染的发生、迁移及排放过程进行动态模拟^[11-12]。我国很多学者也基于 SWMM 对城市非点源污染开展了研究^[13];李立青等^[14]研究了两场降雨时间间隔对城市非点源污染负荷的影响;蒋春博等^[15]研究了雨水花园对降雨径流的影响,并认为径流控制率与污染负荷削减率具有很高的相关关系;马晓宇等^[16]研究了不同重现期对城市非点源负荷的影响;陈莎等^[17]研究了低影响开发(low impact development, LID)措施对城市雨水径流污染的影响。相对而言,针对不同降雨条件下径流控制率与污染负荷削减率的定量协同关系的研究并不多^[18]。因此,本文设计了不同重现期和雨峰系数的降雨条件,基于 SWMM 研究了径流控制率与污染负荷削减率的协同关系,以期在城市非点源污染研究提供参考。

1 研究区概况与数据来源

天福和园小区^[19]位于陕西省西安市西咸新区,东靠丰信路,西邻沣西新城咸户路,南连公园大街,北接尚雅路。多年平均降水量为 520 mm^[20],降水多集中在汛期 7—9 月,且夏季发生暴雨的频率较高,易引发内涝。小区占地面积约 3.67 hm²,小区内布设有雨水花园和透水铺装两种 LID 措施,分别占小区总面积的 7.92% 和 14.34%。管网数据和下垫面数据由 CAD 图纸获取,降雨数据为气象站实测降雨数据,水文模型数据通过率定得到,水质模型数据根据 SWMM 用户手册及参考相近地区水质模型参数得到。西安城区短历时暴雨集中,以单峰型居多,因此,选用芝加哥雨型作为设计降雨,暴雨强度公式^[21]为

$$q = \frac{2210.87(1 + 2.915 \lg P)}{(t + 21.933)^{0.974}} \quad (1)$$

式中: q 为降水强度, L/(s · hm²); P 为重现期, a; t 为暴雨历时, min。

为增加模拟结果的可信度,本文选取 9 种重现期及 5 种不同雨峰系数条件下共 45 场降雨的模拟结果对小区尺度径流控制率与非点源污染负荷削减率的协同关系进行分析,重现期分别取 1 a、2 a、3 a、5 a、10 a、20 a、30 a、50 a 和 100 a,雨峰系数 r 分别取 0.20、0.35、0.50、0.65 和 0.80,暴雨历时均采用 120 min,时间步长为 5 min。不同重现期和雨峰系数

下的设计降雨如图 1 所示。

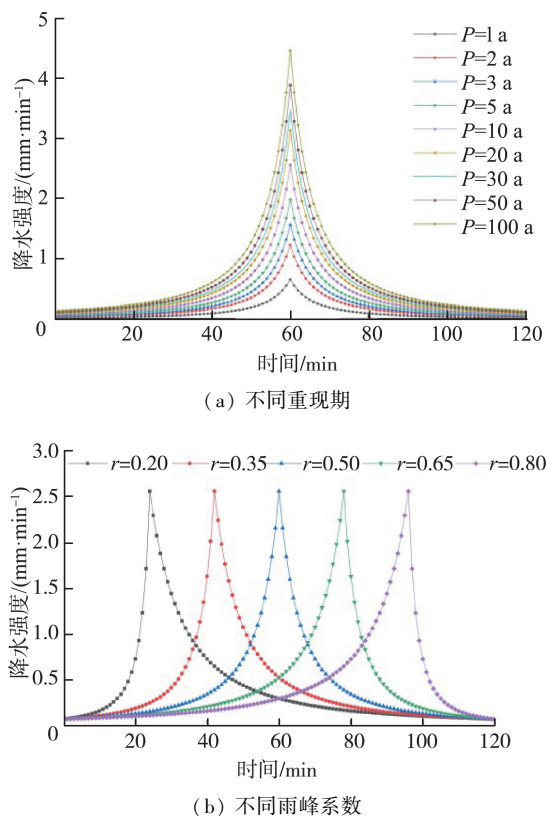


图 1 不同重现期和雨峰系数的设计降雨

Fig.1 Design rainfall with different return periods and rainfall peak coefficients

2 研究方法

2.1 数值模型

SWMM 是美国环保署开发的一款动态降雨径流模拟软件^[22]。模型可对不同设计降雨条件下的水量和水质进行模拟、预测和评估^[23]。因为 SWMM 具有界面友好、开源获取、建模简便和管网模拟功能强大等优点^[24],本文选用 SWMM 软件对降雨径流进行模拟研究,模型包括水文水动力模块和水质模块^[22,25]。

水文水动力模块包括地表产汇流及管道汇流模拟^[26]。SWMM 将研究区域划分为多个子汇水区,地表产流和汇流过程计算分别在相应子汇区内进行^[27]。子汇水区由 3 部分组成,分别为透水区、无洼蓄的不透水区和有洼蓄的不透水区^[28]。SWMM 的产流模拟方法包括霍顿(Horton)公式法、格林-安普特(Green-Ampt)公式法等,其中 Horton 公式法比较适合于城市地区^[19],故本文采用 Horton 公式法。采用非线性水库法对汇流过程进行计算^[29]。SWMM 的管道汇流模拟提供了恒定流、运动波、动力波 3 种计算方法^[30]。恒定流法和运动波法是简化方法,计算效率较高但应用效果一般,动力波法基

于完整的一维圣维南流量方程求解^[24,31],应用效果最好,故本文采用动力波法。

水质模块根据功能区或土地利用类型定义各种地表污染物的冲刷模型和累积模型,对地表径流中污染物的增长、冲刷、运输和处理过程进行模拟^[1]。本文采用指数函数冲刷模型和饱和函数累积模型。选用 TN、TSS、TP、COD 这 4 个具有代表性的雨水径流污染指标作为模拟对象^[32]。

流量计布设于西南排口处,以获取排口处流量过程。模型首先将研究区划分成若干个子汇水分区,对管网进行概化,再根据实际地形选择合适的流向,经产汇流过程及管网汇流过程,最后在出口处进行模拟监测^[33]。根据管网资料^[21]、LID 措施布置图及实际地形构建 SWMM,将研究区域划分为绿地、道路、房屋 3 种土地利用类型^[34],面积占比分别为 39.89%、22.77% 和 15.09%。模型共有 71 个子汇水分区、31 段雨水管网、31 个节点和 1 个排口。研究区域概化图如图 2 所示。

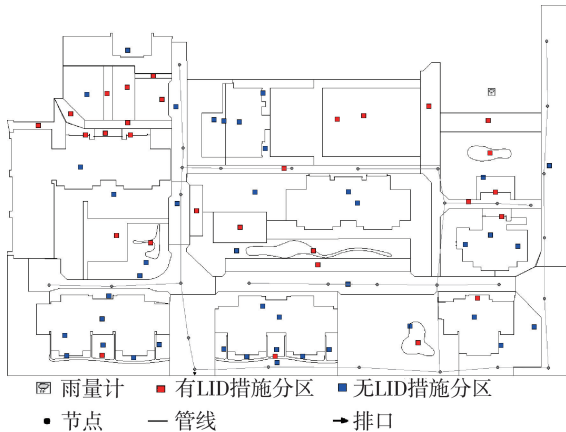


图 2 研究区域概化

Fig.2 Generalized map of study area

2.2 参数率定与模型验证

模型验证数据来自小区内自动雨量站的实测降雨数据和相同时段内西南排口的实测流量数据。雨水水质模拟通常依赖并伴随着水量模拟,只有水量得到正确模拟,才能保证水质预测的可靠性。根据沔西新城 2017 年 8 月 20 日和 9 月 9 日两场实测降雨径流数据率定水文水动力参数,表 1 为主要参数的率定结果,模拟数据与实测数据对比见图 3。研究区域空间变化较小,总面积不大,故设定 0.5% 为各子汇水分区的平均坡度,相同属性下垫面参数设置一致^[18]。

采用 2017 年 9 月 16 日和 9 月 26 日的降雨径流数据进行模型验证。模拟数据与实测数据对比见图 3。本文以纳什效率系数 (E_{ns}) 对模型的模拟性能进行评估^[35]。2017 年 8 月 20 日、9 月 9 日、9 月

表 1 模型水文水动力参数率定结果

Table 1 Calibrated results of model hydrodynamic parameters

模块	参数	单位	率定结果
地表汇流	不透水区曼宁系数		0.0045
	透水区曼宁系数		0.2
	不透水区填洼量	mm	3
	透水区填洼量	mm	7
地表产流	最大入渗率	mm/h	24.5
	最小入渗率	mm/h	3.1
	衰减系数	d ⁻¹	5
管道汇流	管道曼宁系数		0.013

16 日和 9 月 26 日 4 场降雨事件的 E_{ns} 分别为 0.82、0.87、0.80 和 0.59,表明 SWMM 的水文水动力参数取值合理,所构建模型的可靠性高。由于该研究区缺乏实测水质监测资料,故参考相同地区研究数据资料^[36],取得的水质模型参数见表 2。

3 结果与分析

3.1 模拟结果

通过对 45 场设计降雨进行模拟,得到不同降雨条件下的径流控制率以及 TSS、COD、TP 和 TN 的削减率(图 4)。由图 4 可见,在不同雨峰系数设计降雨条件下,设计降雨重现期小于 20 a 时,随着重现期的增大,径流控制率与污染负荷削减率下降速度均较快,设计降雨重现期大于 20 a 时,随着重现期的增大,径流控制率与污染负荷削减率下降速度均较缓,径流控制率与 4 种污染物的削减率随重现期的变化趋势基本一致,由此可推测出两者具有较好的线性拟合关系。

3.2 径流控制率与污染负荷削减率对不同设计降雨的响应关系

由图 4 可知,设计降雨对径流控制率和不同污染负荷削减率的影响规律相似,故以 TSS 为例分析径流控制率和污染负荷削减率对 45 场设计降雨重现期的响应关系。不同雨峰系数对应的径流控制率与污染负荷削减率模拟数据如表 3 所示。由表 3 可见,不同设计降雨重现期对径流控制率与污染负荷削减率的影响较为明显。当设计降雨重现期从 1 a 变化至 100 a,雨峰系数为 0.50 时,径流控制率与污染负荷削减率下降均最大,随着雨峰系数增大或减小,两者下降程度均呈减小趋势,表明径流控制率与污染负荷削减率有一定的协同关系。

由表 3 可知,雨峰系数对不同重现期径流控制率与污染负荷削减率趋势相似,故以重现期为 10 a 的降雨条件为例,分析不同雨峰系数对径流控制率与 TSS、COD、TP、TN 负荷削减率的影响。表 4 为设计降雨重现期为 10 a 时的径流控制率与不同污染物

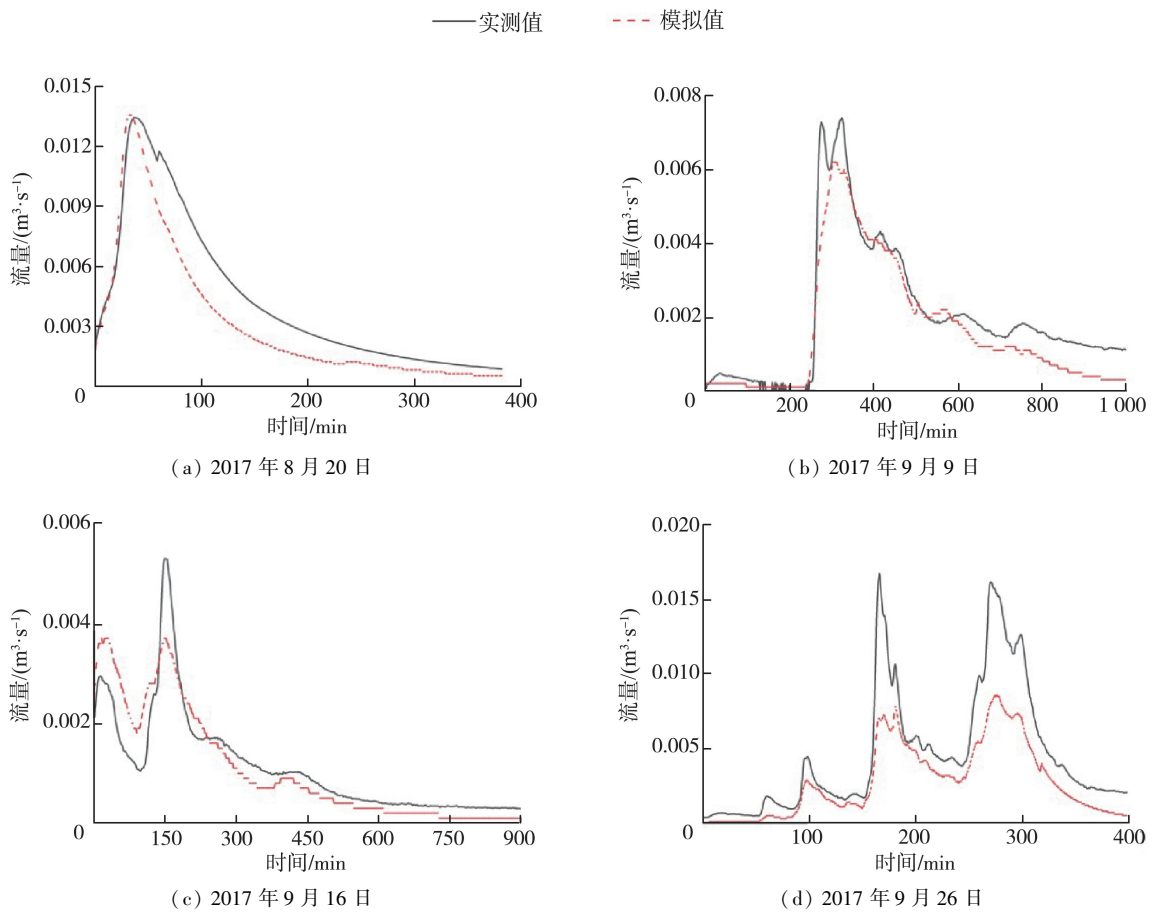


图3 模拟值与实测值对比

Fig.3 Comparison between simulated and measured values

表2 水质模型参数

Table 2 Parameters of water quality model

污染物	最大累积量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)			半饱和累积时间/d			冲刷系数			冲刷指数		
	房屋	绿地	道路	房屋	绿地	道路	房屋	绿地	道路	房屋	绿地	道路
TSS	140	120	130	10	10	8	0.009	0.090	0.008	0.40	0.20	0.50
COD	100	120	90	10	10	8	0.008	0.085	0.007	0.54	0.53	0.80
TN	1.4	1	1.5	10	10	6	0.008	0.090	0.007	0.45	0.50	0.45
TP	2.3	19	27	10	10	8	0.008	0.085	0.007	0.55	0.53	0.45

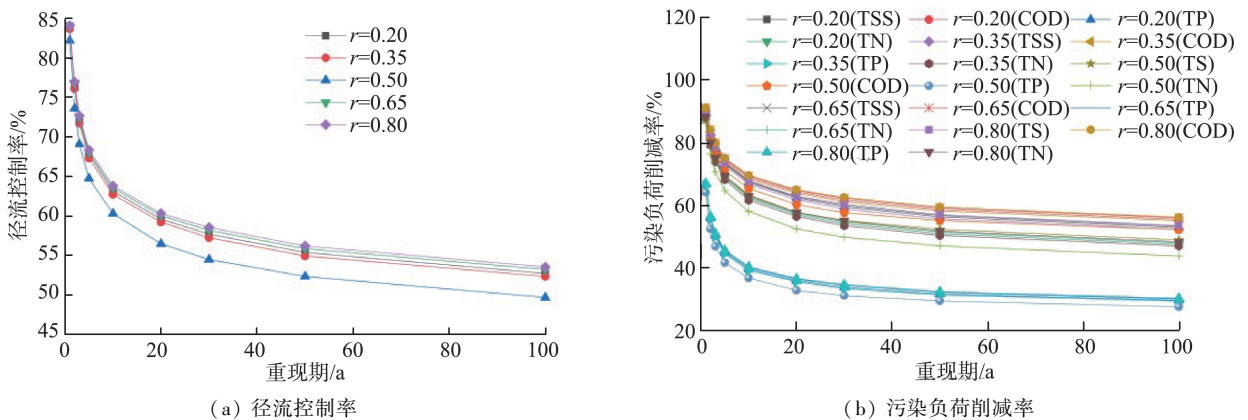


图4 不同降雨条件下的径流控制率与污染负荷削减率

Fig.4 Runoff control rates and pollution load reduction rates under different rainfall conditions

表3 不同设计降雨条件下的径流控制率与 TSS 削减率

Table 3 Runoff control rates and TSS reduction rates under different design rainfall conditions

重现期/a	径流控制率/%					TSS 削减率/%				
	r=0.20	r=0.35	r=0.50	r=0.65	r=0.80	r=0.20	r=0.35	r=0.50	r=0.65	r=0.80
1	84.10	83.76	82.28	84.09	84.17	88.65	88.48	87.37	88.79	88.81
2	76.80	76.19	73.63	76.89	77.04	82.54	82.21	79.78	82.70	82.75
3	72.28	71.74	69.13	72.52	72.73	78.24	77.73	74.79	78.43	78.61
5	67.85	67.33	64.78	68.10	68.39	73.10	72.55	69.35	73.36	73.58
10	63.14	62.72	60.29	63.54	63.83	67.15	66.58	63.22	67.49	67.73
20	59.59	59.22	56.47	60.04	60.32	62.22	61.66	57.70	62.58	62.82
30	57.70	57.23	54.46	58.18	58.55	59.39	58.70	55.02	59.86	60.21
50	55.36	54.91	52.32	55.85	56.20	56.17	55.57	52.21	56.62	56.92
100	52.69	52.31	49.65	53.21	53.53	52.72	52.18	48.78	53.16	53.45

表4 设计降雨重现期为 10 a 时的径流控制率与不同污染物的污染负荷削减率

Table 4 Runoff control rates and pollution load reduction rates of different pollutants for a design rainfall return period of 10 a

雨峰系数	径流控制率/%	TSS 削减率/%	COD 削减率/%	TP 削减率/%	TN 削减率/%
0.20	63.14	67.15	68.73	39.48	62.08
0.35	62.72	66.58	68.26	39.14	61.50
0.50	60.29	63.22	65.22	36.61	57.95
0.65	63.54	67.49	69.22	40.01	62.56
0.80	63.83	67.73	69.47	40.25	62.86

的污染负荷削减率。

由表4可见,在重现期为10a的降雨条件下,当雨峰系数从0.20增加至0.80,径流控制率与污染负荷削减率均呈先减小后增加的趋势,当雨峰系数为0.50时,径流控制率和污染负荷削减率最小,随着雨峰系数的增加或减小,两者均呈增加趋势,径流控制率变化幅度在10%以内,TSS、COD、TP、TN削减率变化幅度均在5%以内,但相对于重现期对两者的影响,雨峰系数对其影响较小。这进一步表明径流控制率与污染负荷削减率具有较强的协同关系。

3.3 径流控制率与污染负荷削减率的协同关系

以上分析表明径流控制率与污染负荷削减率有一定的协同关系,通过对不同重现期降雨条件下的径流控制率与污染负荷削减率线性拟合,发现径流控制率与污染负荷削减率具有一定的线性关系,可拟合为线性函数,不同雨峰系数条件下COD、TN、TP、TSS 4种污染物的拟合函数曲线如图5所示,拟合方程与协同系数如表5所示。

由图5和表5可见,同一雨峰系数条件下,不同污染负荷削减率与径流控制率的拟合函数均为线性,且拟合曲线具有高度相似性,协同系数均大于0.989,表明以水量为载体的水质迁移规律均与水量输移规律密切相关。当雨峰系数从0.20增至0.80

时,拟合函数曲线的斜率与截距相对波动幅度较小,雨峰系数对径流控制率与污染负荷削减率的协同关系影响不大。由于不同污染物本底特征不同,累积冲刷系数不同,故不同污染物拟合函数的斜率和截距有所不同。在不同雨峰系数条件下,污染负荷削减率均在拟合曲线附近。综上可知,径流控制率与污染负荷削减率拟合度较高,两者有着高度的定量协同关系。

表5 拟合方程与协同系数

Table 5 Fitting equations and correlation coefficients

污染物	雨峰系数	拟合方程	协同系数
COD	0.20	$y = 1.14332x - 0.04160$	0.9956
	0.35	$y = 1.15531x - 0.04849$	0.9955
	0.50	$y = 1.17586x - 0.06059$	0.9964
	0.65	$y = 1.15557x - 0.04908$	0.9954
	0.80	$y = 1.15902x - 0.05216$	0.9953
TN	0.20	$y = 1.31271x - 0.21365$	0.9972
	0.35	$y = 1.32488x - 0.22070$	0.9972
	0.50	$y = 1.33808x - 0.22778$	0.9979
	0.65	$y = 1.32722x - 0.22307$	0.9972
	0.80	$y = 1.33045x - 0.22608$	0.9971
TP	0.20	$y = 1.17492x - 0.33944$	0.9931
	0.35	$y = 1.17417x - 0.33709$	0.9931
	0.50	$y = 1.12429x - 0.30146$	0.9907
	0.65	$y = 1.19211x - 0.34953$	0.9932
	0.80	$y = 1.19643x - 0.35341$	0.9932
TSS	0.20	$y = 1.17421x - 0.08005$	0.9892
	0.35	$y = 1.18829x - 0.08889$	0.9894
	0.50	$y = 1.22316x - 0.1116$	0.9915
	0.65	$y = 1.1834x - 0.08675$	0.9896
	0.80	$y = 1.19362x - 0.08789$	0.9896

4 结论

a. 重现期小于20a时,随着重现期的增大,径流控制率与污染负荷削减率下降速度相对较快;重现期大于20a时,随着重现期的增大,径流控制率与污染负荷削减率下降速度相对较缓,且随着重现期的增大,径流控制率与4种污染物的削减率的变化趋势基本一致,下降速度逐渐变缓。

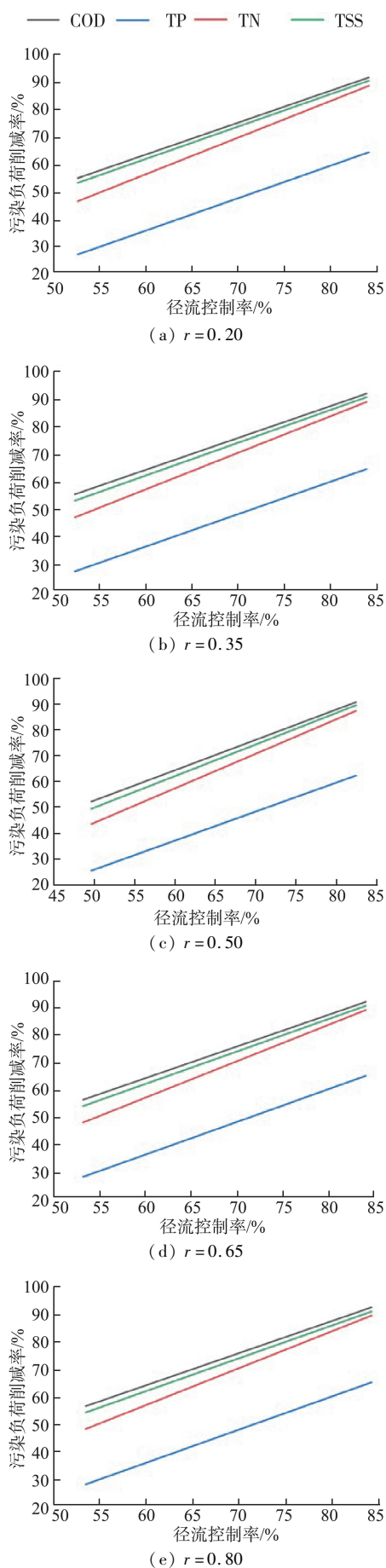


图5 不同雨峰系数的拟合函数曲线

Fig. 5 Fitted functions with different rainfall peak coefficients

b. 在 1 ~ 100 a 重现期设计降雨条件下, 重现期的大小对径流控制率与污染负荷削减率的影响较为明显, 变化幅度在 30% 左右。当雨峰系数为 0.50 时, 径流控制率与污染负荷削减率变化程度最大, 随着雨峰系数增大或减小, 两者变化程度呈减小趋势。

c. 降雨重现期为 10 a 时, 当雨峰系数从 0.20 增加至 0.80, 径流控制率与污染负荷削减率均呈先减少后增加趋势。当雨峰系数为 0.50 时, 径流控制率和污染负荷削减率最小, 径流控制率变化幅度在 10% 以内, TSS、COD、TP、TN 削减率变化幅度均在 5% 以内, 但相对于重现期对两者的影响, 雨峰系数对其影响较小。

d. 基于建筑小区尺度的径流控制率与污染负荷削减率有着高度的定量线性关系, 雨峰系数对拟合函数曲线的斜率与截距影响不大, 协同系数均大于 0.989, 拟合度较高, 因此, 可根据径流控制率推算出污染负荷削减率, 为城市非点源污染研究提供参考。

参考文献:

- [1] 王龙, 黄跃飞, 王光谦. 城市非点源污染模型研究进展 [J]. 环境科学, 2010, 31 (10): 2532-2540. (WANG Long, HUANG Yuefei, WANG Guangqian. Review of urban nonpoint source pollution models [J]. Environmental Science, 2010, 31 (10): 2532-2540. (in Chinese))
- [2] 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 城市化对水体非点源污染的影响 [J]. 环境科学, 2004 (6): 32-39. (YANG Liu, MA Keming, GUO Qinghai, et al. Impacts of the urbanization on waters non-point source pollution [J]. Environmental Science, 2004 (6): 32-39. (in Chinese))
- [3] 李春林, 胡远满, 刘淼, 等. 城市非点源污染研究进展 [J]. 生态学杂志, 2013, 32 (2): 492-500. (LI Chunlin, HU Yuanman, LIU Miao, et al. Urban non-point source pollution: research progress [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32 (2): 492-500. (in Chinese))
- [4] 李家科, 彭凯, 郝改瑞, 等. 黄河流域非点源污染负荷量化与控制研究进展 [J]. 水资源保护, 2021, 37 (1): 90-102. (LI Jiako, PENG Kai, HAO Gairui, et al. Research progress on quantification and control of non-point source pollution load in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (1): 90-102. (in Chinese))
- [5] 夏军, 翟晓燕, 张永勇. 水环境非点源污染模型研究进展 [J]. 地理科学进展, 2012, 31 (7): 941-952. (XIA Jun, ZHAI Xiaoyan, ZHANG Yongyong. Progress in the research of water environmental nonpoint source pollution models [J]. Progress in Geography, 2012, 31 (7): 941-952. (in Chinese))

- [6] 王虹,丁留谦,程晓陶,等. 美国城市雨洪管理水文控制指标体系及其借鉴意义[J]. 水利学报,2015,46(11): 1261-1271. (WANG Hong, DING Liuqian, CHENG Xiaotao, et al. Hydrologic control criteria framework in the United States and its referential significance to China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46 (11) : 1261-1271. (in Chinese))
- [7] 张婷,高雅,李建柱,等. 流域非点源氮磷污染负荷分布模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1): 42-49. (ZHANG Ting, GAO Ya, LI Jianzhu, et al. Distribution simulation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution load in watershed [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49 (1) : 42-49. (in Chinese))
- [8] 向小华,陈颖悟,吴晓玲,等. 城市二维内涝模型的 GPU 并行方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6): 528-533. (XIANG Xiaohua, CHEN Yingwu, WU Xiaoling, et al. GPU parallelized algorithm of urban two-dimensional inundation model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (6) : 528-533. (in Chinese))
- [9] 冯钧,王云峰,邬炜,等. 城市内涝事理图谱构建方法及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6): 479-487. (FENG Jun, WANG Yunfeng, WU Wei, et al. Construction method and application of event logic graph for urban waterlogging [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (6) : 479-487. (in Chinese))
- [10] 王浩昌,杜鹏飞,赵冬泉,等. 城市降雨径流模型参数全局灵敏度分析[J]. 中国环境科学,2008(8): 725-729. (WANG Haochang, DU Pengfei, ZHAO Dongquan, et al. Global sensitivity analysis for urban rainfall-runoff model [J]. China Environmental Science, 2008 (8) : 725-729. (in Chinese))
- [11] 姜体胜,孙艳伟,杨忠山,等. 基于 SWMM 的不同降水量对城市降雨径流 TSS 的影响分析[J]. 南水北调与水利科技,2011,9(5): 55-58. (JIANG Tisheng, SUN Yanwei, YANG Zhongshan, et al. Simulation of urban runoff quality based on stormwater management model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(5): 55-58. (in Chinese))
- [12] 刘庄,晁建颖,张丽,等. 中国非点源污染负荷计算研究现状与存在问题[J]. 水科学进展,2015,26(3): 432-442. (LIU Zhuang, CHAO Jianying, ZHANG Li, et al. Current status and problems of non-point source pollution load calculation in China[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(3): 432-442. (in Chinese))
- [13] 金蕾,华蕾,荆红卫,等. 非点源污染负荷估算方法研究进展及对北京市的应用[J]. 环境污染与防治,2010,32(4): 72-77. (JIN Lei, HUA Lei, JING Hongwei, et al. Review of nonpoint source pollution loads estimation methods and its application in Beijing City [J]. Environmental Pollution & Control, 2010, 32 (4) : 72-77. (in Chinese))
- [14] 李立青,尹澄清,孔玲莉,等. 2 次降雨间隔时间对城市地表径流污染负荷的影响[J]. 环境科学,2007(10): 2287-2293. (LI Liqing, YIN Chengqing, KONG Lingli, et al. Effect of antecedent dry weather period on urban storm runoff pollution load [J]. Environmental Science, 2007 (10) : 2287-2293. (in Chinese))
- [15] 蒋春博,李家科,马越,等. 雨水花园对实际降雨径流的调控效果研究[J]. 水土保持学报,2018,32(4): 122-127. (JIANG Chunbo, LI Jiako, MA Yue, et al. Regulation effect of rain garden on actual rainfall runoff [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32 (4) : 122-127. (in Chinese))
- [16] 马晓宇,朱元励,梅琨,等. SWMM 模型应用于城市住宅区非点源污染负荷模拟计算[J]. 环境科学研究,2012,25(1): 95-102. (MA Xiaoyu, ZHU Yuanli, MEI Kun, et al. Application of SWMM in the simulation of non-point source pollution load in urban residential area [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25 (1) : 95-102. (in Chinese))
- [17] 陈莎,陈晓宏. 城市雨水径流污染及 LID 控制效果模拟[J]. 水资源保护,2018,34(5): 13-19. (CHEN Sha, CHEN Xiaohong. Simulation of urban runoff pollution and control effect by low impact development [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5): 13-19. (in Chinese))
- [18] 印定坤,陈正侠,李骐安,等. 降雨特征对多雨城市海绵改造小区径流控制效果的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版),2021,61(1): 50-56. (YIN Dingkun, CHEN Zhengxia, LI Qian, et al. Influence of rainfall characteristics on runoff control of a sponge reconstructed community in a rainy city [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61 (1) : 50-56. (in Chinese))
- [19] 侯精明,李东来,王小军,等. 建筑小区尺度下 LID 措施前期条件对径流调控效果影响模拟[J]. 水科学进展,2019,30(1): 45-55. (HOU Jingming, LI Donglai, WANG Xiaojun, et al. Effects of initial conditions of LID measures on runoff control at residential community scale [J]. Advances in Water Science, 2019, 30 (1) : 45-55. (in Chinese))
- [20] 杨少雄,侯精明,陈光照,等. LID 径流控制效果对设计暴雨重现期的响应[J]. 水资源保护,2020,36(6): 93-98. (YANG Shaoxiong, HOU Jingming, CHEN Guangzhao, et al. Response law of LID runoff control effect to design rainstorm recurrence period [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 93-98. (in Chinese))
- [21] 侯精明,郭凯华,王志力,等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. 水科学进展,2017,28(6): 820-828. (HOU Jingming, GUO Kaihua, WANG Zhili, et al. Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation [J]. Advances in Water Science,

- 2017,28(6):820-828. (in Chinese))
- [22] 宋晓猛,张建云,王国庆,等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: II. 城市雨洪模拟与管理[J]. 水科学进展,2014,25(5):752-764. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: II. urban stormwater modeling and management [J]. Advances in Water Science,2014,25(5):752-764. (in Chinese))
- [23] 陈虹,李家科,李亚娇,等. 暴雨洪水管理模型 SWMM 的研究及应用进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(12):225-234. (CHEN Hong, LI Jiake, LI Yajiao, et al. Progress on research and application of Storm Water Management Model (SWMM) [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition),2015,43(12):225-234. (in Chinese))
- [24] 梅超,刘家宏,王浩,等. SWMM 原理解析与应用展望[J]. 水利水电技术,2017,48(5):33-42. (MEI Chao, LIU Jiahong, WANG Hao, et al. Introduction of basic principle and application prospect for SWMM [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2017,48(5):33-42. (in Chinese))
- [25] 蔡凌豪. 适用于“海绵城市”的水文水力模型概述[J]. 风景园林,2016(2):33-43. (CAI Linghao. Introduction of hydrological and hydraulic models for “Sponge City” [J]. Landscape Architecture,2016(2):33-43. (in Chinese))
- [26] 徐宗学,叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟:原理、模型与展望[J]. 水利学报,2021,52(4):381-392. (XU Zongxue, YE Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes: principle, models and prospects [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2021,52(4):381-392. (in Chinese))
- [27] 栾清华,付潇然,王海潮,等. 大尺度无管流数据城区 SWMM 构建及模拟: I. 复杂下垫面城区数字精细化关键技术[J]. 水科学进展,2019,30(5):653-660. (LUAN Qinghua, FU Xiaoran, WANG Haichao, et al. SWMM-based rainfall-runoff simulations in large-scale urban area with no pipeline-flow observations: I. key technique for digitalizing urban area with complicated land-surface characteristics [J]. Advances in Water Science,2019,30(5):653-660. (in Chinese))
- [28] 马萌华,李家科,邓陈宁. 基于 SWMM 模型的城市内涝与面源污染的模拟分析[J]. 水力发电学报,2017,36(11):62-72. (MA Menghua, LI Jiake, DENG Chenning. Analysis of urban waterlogging and pollution load based on SWMM model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2017,36(11):62-72. (in Chinese))
- [29] 朱呈浩,夏军强,周美蓉,等. 雨水口泄流计算对城市洪涝模拟结果影响研究[J]. 水力发电学报,2019,38(8):75-86. (ZHU Chenghao, XIA Junqiang, ZHOU Meirong, et al. Effects of calculation methods of stormwater outlet discharges on simulations of urban flooding [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2019,38(8):75-86. (in Chinese))
- [30] 芮孝芳,蒋成煜,陈清锦,等. SWMM 模型模拟雨洪原理剖析及应用建议[J]. 水利水电科技进展,2015,35(4):1-5. (RUI Xiaofang, JIANG Chengyu, CHEN Qingjin, et al. Principle analysis and application of storm water management model on stimulating rainfall-runoff [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(4):1-5. (in Chinese))
- [31] 罗海婉,陈文杰,李志威,等. 基于耦合水动力模型的广州市东濠涌流域洪涝模拟[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(3):46-52. (LUO Haiwan, CHEN Wenjie, LI Zhiwei, et al. Flood simulation of Donghaochong Basin in Guangzhou City based on coupled hydrodynamic model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2019,30(3):46-52. (in Chinese))
- [32] 栾博,殷瑞雪,徐鹏,等. 基于绿色基础设施的城市非点源污染控制研究[J]. 中国环境科学,2019,39(4):1705-1714. (LUAN Bo, YIN Ruixue, XU Peng, et al. Study for green infrastructure approach on urban non-point source pollution control [J]. China Environmental Science,2019,39(4):1705-1714. (in Chinese))
- [33] 杨东,侯精明,李东来,等. 基于扩散波方法的管网排水过程数值模拟[J]. 中国给水排水,2020,36(15):113-120. (YANG Dong, HOU Jingming, LI Donglai, et al. Numerical simulation of pipe network drainage process based on diffusion wave method [J]. China Water & Wastewater,2020,36(15):113-120. (in Chinese))
- [34] 李娜,孟雨婷,王静,等. 低影响开发措施的内涝削减效果研究:以济南市海绵试点区为例[J]. 水利学报,2018,49(12):1489-1502. (LI Na, MENG Yuting, WANG Jing, et al. Effect of low impact development measures on inundation reduction: taking Jinan pilot area as example [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,49(12):1489-1502. (in Chinese))
- [35] 刘春春,刘万青,张悦,等. 基于 SWMM 模型的西安市清河流域暴雨洪峰流量模拟[J]. 干旱区研究,2018,35(1):35-42. (LIU Chunchun, LIU Wanqing, ZHANG Yue, et al. Simulation of rainstorm flood peak discharge in the Qinghe River Basin in Xi'an based on SWMM model [J]. Arid Zone Research,2018,35(1):35-42. (in Chinese))
- [36] 马萌华,李家科,邓陈宁. 基于 SWMM 模型的城市内涝与面源污染的模拟分析[J]. 水力发电学报,2017,36(11):62-72. (MA Menghua, LI Jiake, DENG Chenning. Analysis of urban waterlogging and pollution load based on SWMM model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2017,36(11):62-72. (in Chinese))

(收稿日期:2021-10-21 编辑:俞云利)