

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.016

初期弃流后板房屋面雨水污染物质量浓度衰减规律

胡良宇¹,戎贵文^{1,2},汪星¹,孟席¹

(1.安徽理工大学地球与环境学院,安徽淮南 232001; 2.河海大学水利水电学院,江苏南京 210029)

摘要:为研究初期雨水弃流后不同降雨重现期条件下屋面雨水的污染物质量浓度变化规律,以板房屋面为例,采用3 mm的初期雨水弃流深度,基于暴雨径流管理模型(SWMM),构建了板房屋面径流模型,在采用雨水收集箱中污染物质量浓度实测值对模型验证后,模拟分析了不同降雨重现期板房屋面雨水的污染物质量浓度衰减规律。结果表明:雨水收集箱中污染物质量浓度衰减过程可分为骤降段、过渡段和稳定段3个阶段;衰减曲线符合一阶衰减指数函数分布,决定系数超过0.93;对于同一种污染物,雨水收集箱中污染物稳定质量浓度随降雨重现期增大而减小。

关键词:雨水收集;板房屋面;径流污染;暴雨径流管理模型;衰减规律

中图分类号:TV121⁺.1;X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)03-0102-06

Attenuation rule of rainwater pollutant concentration on slab roof after split-flow of first flush runoff // HU Liangyu¹, RONG Guiwen^{1,2}, WANG Xing¹, MENG Xi¹ (1. College of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the variation law of the pollutant mass concentration of roof rainwater under different rainfall recurrence periods after split-flow of first flush runoff, taking the slab roof as an example, the 3 mm initial drainage depth was adopted, and the runoff model of slab roof was constructed based on the storm runoff management model. The attenuation law of pollutant concentration of roof rainwater in different rainfall recurrence periods was simulated and analyzed by using the measured pollutant concentration in rainwater collection tank. The results show that the pollutant mass concentration attenuation process includes three periods: rapidly-reducing period, transitional period and stable period, and the curve of pollutant mass concentration attenuation follows a ExpDec1 function with a correlation coefficient of 0.93. On the same kind of pollutant, the stable pollutant mass concentration in the collection tank decreases with the increase of the rainfall recurrence period.

Key words: rainwater collection; slab roof; runoff pollution; storm water management model; attenuation rule

屋面是城市不透水面积的重要组成部分,屋面雨水径流控制能够有效削减径流量和缓解城市水资源紧张状况。高玉琴等^[1]研究发现绿色屋顶可以有效削减屋面径流总量和峰值,并且相比绿色屋顶覆盖率,绿色屋顶径流演进方式对屋面径流的影响更大。Sepelri等^[2]研究发现,随着降雨重现期的增加,雨水收集系统对屋面径流的削减率减小。Fulton^[3]对医院大型屋面雨水收集和用水需求开展研究,发现屋面雨水收集再利用能够满足医院25%的用水需求。刘来胜等^[4]对雨水集蓄饮用的研究

表明,雨水收集处理有利于解决我国西部干旱地区和海岛缺水地区的饮用水问题。

屋面雨水具有水质较好、水头大和易于收集等优势,屋面雨水弃流与收集是屋面雨水径流控制的重要措施,它能够兼顾径流总量控制、径流峰值控制、径流污染控制、雨水资源化利用等不同的控制目标^[5]。但此前国内外学者对屋面雨水弃流与收集的研究主要集中在弃流量和雨水收集利用方面,对初期弃流后收集的中后期雨水水质状况缺乏跟踪研究^[6-7]。目前,我国城市中建有大量的板房,开展初

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1508206);国家自然科学基金(51579002)

作者简介:胡良宇(1995—),男,硕士研究生,研究方向为雨水源头控制技术。E-mail: 2710664810@qq.com

通信作者:戎贵文(1976—),男,教授,博士,主要从事水资源开发与管理研究。E-mail: gwrong934sx@163.com

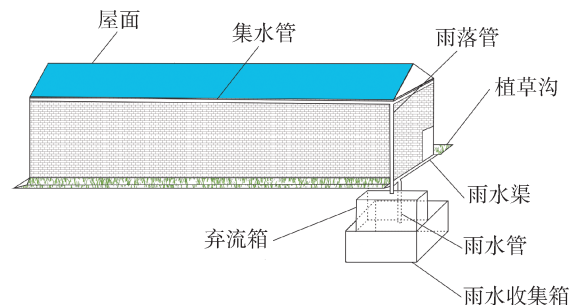
期弃流后板房屋面雨水水质研究,对雨水资源再利用具有重要意义。

本文以板房屋面为例,构建屋面雨水的暴雨径流管理模型(storm water management model, SWMM),从降雨重现期的角度出发,分析初期弃流后雨水收集箱中污染物质量浓度衰减规律,为板房屋面雨水收集利用提供参考。

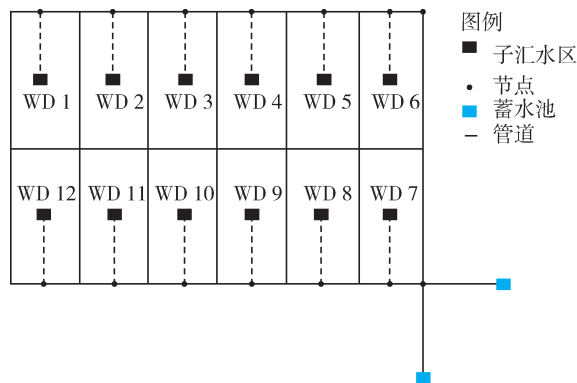
1 板房屋面概化模型

选取安徽理工大学校医院东侧的一栋独立板房为研究对象,该板房屋面水平投影为 30 m × 20 m 的矩形,屋面坡度为 1:6.67,屋面下方设有弃流箱和雨水收集箱,弃流箱位于雨水收集箱的正上方,如图 1(a)所示。根据 DB 11/685—2013《雨水控制与利用工程设计规范》,斜坡较大的汇水面积应附加汇水面竖向投影面积的 50%,则屋脊两侧的子汇水面积均为 345 m²。降雨时,板房屋面初期雨水经集水管收集后通过雨落管进入弃流箱,弃流箱满后,中后期屋面雨水经集水管溢出流入植草沟,再通过雨水渠和雨水管进入雨水收集箱。

将该板房屋面概化为 12 个子汇水区(WD1 ~ WD12),集水管、雨落管、雨水渠和雨水管概化为管道,弃流箱和雨水收集箱概化为蓄水池,每个子汇水区连接一个节点,节点通过管道分别与两个蓄水池连接,如图 1(b)所示。



(a) 板房屋面示意图



(b) 概化模型

图 1 研究模型

Fig. 1 Research model

2 数学模型

利用 SWMM 软件构建板房屋面径流模型,汇水区计算采用非线性水库水量平衡法,管道汇流近似看作洪水波运动并采用动力波法演算,植草沟雨水及径流入渗过程采用 Horton 法计算,板房屋面污染物累积过程采用饱和函数累积模型模拟,板房屋面污染物冲刷过程采用指数函数冲刷模型模拟。

2.1 控制方程

a. 非线性水库水量平衡方程:

$$\frac{\partial d}{\partial t_1} = i - e - f - q \quad (1)$$

其中

$$f = f_p / 3600$$

式中: d 为积水深度, mm; t_1 为降雨历时, s; i 为降雨强度, mm/s; e 为蒸发率, mm/s; f 为下渗率, mm/s; q 为径流率, mm/s; f_p 为下渗率, mm/h, 由 Horton 法^[8]确定:

$$f_p = f_{\max} + (f_{\min} - f_{\max}) e^{-kt_2} \quad (2)$$

式中: $f_{\min}$ 、 $f_{\max}$ 分别为最小和最大下渗率, mm/h; k 为衰减常数, h⁻¹; t_2 为排干时间, h。

b. 地表径流量 Q_1 的计算采用曼宁公式:

$$Q_1 = \frac{1.49}{n} S^{\frac{1}{2}} R^{\frac{1}{2}} A \quad (3)$$

式中: n 为曼宁系数; S 为子汇水区的平均坡度; A 为过水断面面积, m²; R 为水力半径, m。

c. 动力波法的控制方程为完全圣维南方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q_2}{\partial t} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \\ gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial (Q_2^2/A)}{\partial x} + \frac{\partial Q_2}{\partial t} + gAS_f = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: Q_2 为管道流量, m³/s; H 为水深, m; g 为重力加速度, m/s²; S_f 为摩阻比降。

d. 饱和函数累积模型方程:

$$B = \frac{B_{\max} t_3}{a + t_3} \quad (5)$$

式中: B 为污染物的累积量, kg/hm²; t_3 为累积时间, d; $B_{\max}$ 为污染物最大累积量, kg/hm²; a 为半饱和常数(达到最大累积量一半所需的时间), d。

e. 指数函数冲刷模型方程:

$$W = Kq^n m \quad (6)$$

式中: W 为径流中污染物的冲刷量, kg/h; K 为冲刷系数; n 为冲刷指数; q 为子汇水区单位面积的径流率, mm/h; m 为地表剩余污染物的量, kg/hm²。

2.2 模型参数的选取

2.2.1 降雨强度设计

采用淮南市降雨强度计算公式(式(7))^[9],

运用城市排水设计中的芝加哥不均匀雨型生成器生成重现期为1 a、2 a、3 a、5 a、10 a、20 a和50 a的淮南市降雨情景,绘制降雨强度过程线,雨峰相对位置 r 取0.3,降雨历时 t_1 取240 min,结果如图2所示。

$$i = \frac{730.8(1 + 0.71\lg P)}{(t_1 + 6.29)^{0.71}} \quad (7)$$

式中 P 为降雨重现期,a。

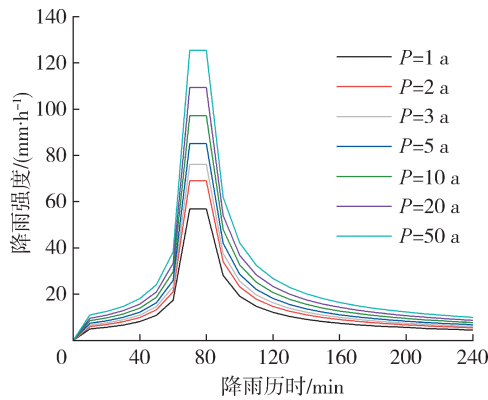


图2 不同重现期降雨强度过程线
Fig.2 Rainfall intensity process lines in different recurrence periods

2.2.2 模型参数选择

模型中子汇水区面积为690 m²,作为弃流箱的蓄水池容积为2 m³(3 mm弃流深度),作为雨水收集箱的蓄水池容积为88 m³。水文模型参数取值如下:最大下渗率 $f_{\max} = 76$ mm/h,最小下渗率 $f_{\min} = 18$ mm/h,衰减常数 $k = 4$ h⁻¹,排干时间 $t_2 = 7$ d,不透水曼宁系数 $n = 0.01$,子汇水区的平均坡度 $S = 15.0\%$,积水深度 $d = 0.05$ mm,过水断面面积 A 和水力半径 R 等参数采用相关公式计算得到,蒸发率 e 忽略不计。水质模型参数参考国内外相关研究资料^[10-13]确定,如表1、2所示。

表1 饱和函数累积模型参数

Table 1 Cumulative model parameters of saturation function

污染物	最大累积量/(kg·hm ⁻²)	半饱和常数/d
COD _{Mn}	60.0	7
NH ₃ -N	2.0	7
TP	0.3	7

表2 指数函数冲刷模型参数

Table 2 Erosion model parameters of exponential function

污染物	冲刷系数	冲刷指数	清扫去除率/%
COD _{Mn}	0.005	1.7	70
NH ₃ -N	0.004	1.5	70
TP	0.015	1.8	70

2.3 模型验证

采用2018年8月2日降雨的屋面径流污染物质量浓度实测值对模型进行验证。采样从雨落管产

生径流时开始,遵照HJ 494—2009《水质采样技术指导》采集水样。在样品采集后24 h内对水质进行检测,检测指标包括COD_{Mn}、NH₃-N和TP。检测方法参照《水和废水监测分析方法》^[14]。

验证结果如图3所示。可以看出,各个污染物质量浓度模拟值与实测值趋势基本保持一致,吻合度较高。实测值与模拟值的最大误差为14.9%(COD_{Mn}),最小误差为6.67%(TP),能够满足研究需要^[15]。

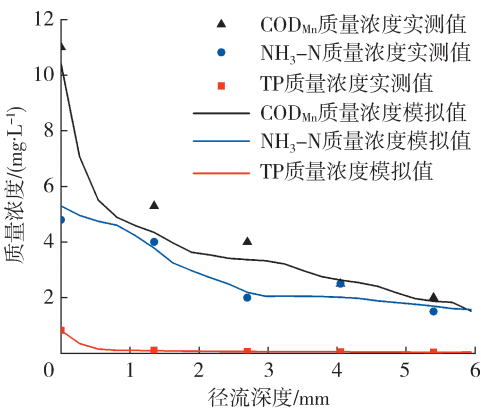


图3 模拟值与实测值
Fig.3 Simulated value and measured value

3 模拟结果与分析

3.1 模拟结果

各重现期下每种污染物模拟数据均为285个,样本数量符合数据统计要求。模拟结果见图4,不同重现期条件下雨水收集箱中污染物质量浓度衰减趋势基本一致,雨水收集箱中污染物质量浓度衰减均大致呈现出骤降段、过渡段和稳定段3个阶段,骤降段内雨水收集箱中污染物质量浓度快速下降至较低水平。同种污染物,当降雨重现期较大时,骤降段历时较短;同一降雨重现期下,NH₃-N骤降段历时最长,TP骤降段历时最短。随后污染物质量浓度衰减进入过渡段,污染物质量浓度开始平缓下降,下降速度相较骤降段内下降速度明显减缓。污染物质量浓度衰减最后阶段为稳定段,污染物质量浓度趋于稳定,如降雨重现期为1 a,降雨237 min后,NH₃-N的质量浓度衰减进入稳定段。同种污染物,当降雨重现期较大时,污染物稳定质量浓度较小。

随着中后期较洁净的雨水径流不断进入雨水收集箱,由于稀释作用,雨水收集箱中污染物质量浓度逐渐降低。中后期较洁净的雨水径流进入雨水收集箱后,污染物迅速向洁净的雨水中扩散,扩散过程就是污染物质量浓度迅速衰减的过程,这段时间即骤降段。骤降段的理论时间与外界温度、雨水收集箱深度、水面宽度及来水流速等有关。扩散过程趋于

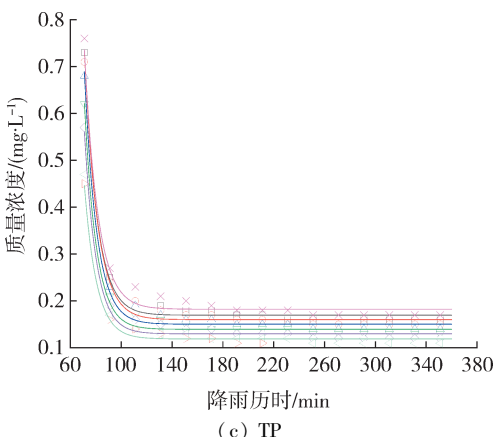
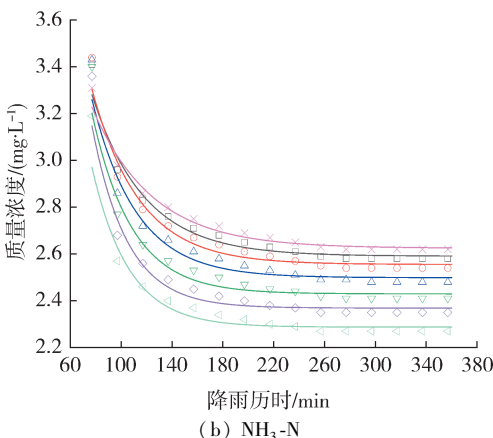
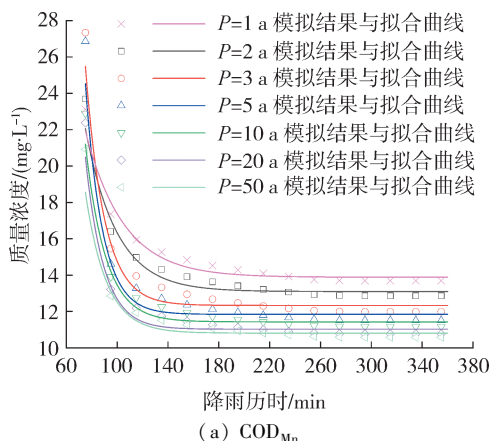


图4 不同降雨重现期下污染物质量浓度模拟结果

Fig.4 Simulation results of pollutant mass concentration under different rainfall recurrence periods

稳定后,雨水收集箱内雨水污染物分布逐渐均匀,污

染物质量浓度衰减过程开始变缓,随后分别进入过渡段和稳定段。

3.2 污染物质量浓度衰减规律

为研究降雨重现期与污染物质量浓度衰减规律的关系,利用一阶衰减指数函数(式(8))对污染物质量浓度衰减趋势进行拟合,拟合结果见表3和图4。

$$y = be^{-x/h} + y_0 \quad (8)$$

式中: x 为自变量; y 为因变量; b 为污染物最大质量浓度; h 为污染物质量浓度的衰减系数; y_0 为截距。

由表3可知,所有污染物质量浓度衰减拟合曲线中的 R^2 均超过0.93;由图4可见,污染物质量浓度下降趋势的一阶衰减指数函数拟合结果与模型模拟数据吻合程度较好,表明雨水收集箱中 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP质量浓度的衰减过程可以用一阶衰减指数函数来描述。

根据拟合结果,得到污染物质量浓度变化拟合曲线的衰减系数与降雨重现期的关系如图5所示,可以看出,在相同降雨重现期时, $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度的衰减系数最大,TP的最小。对于 COD_{Mn} ,在1~5a降雨重现期范围内,衰减系数随降雨重现期变化十分明显,随着降雨重现期变大,衰减系数迅速减小;在10~50a降雨重现期范围内,衰减系数随降雨重现期变化不大,介于14.4~16.6之间。对于 $\text{NH}_3\text{-N}$,在1~20a降雨重现期范围内,衰减系数随降雨重现期增大迅速减小,而当降雨重现期为20~50a时,衰减系数有所增大,但增加幅度不大。对于TP,衰减系数随降雨重现期增大缓慢下降,变化幅度不大,介于9.33~10.63之间。污染物质量浓度的衰减系数随降雨重现期的变化特征有所不同,这可能与不同污染物的理化性质有关^[16-19]。总体来说,降雨重现期较小时,衰减系数较大,降雨重现期较大时,衰减系数较小;这主要是因为降雨强度越大,雨水水质越好,其次当降雨强度较小时,屋面雨水径流流速较小,污染物与初期雨水径流未充分混合。

表3 不同降雨重现期下污染物质量浓度衰减拟合曲线参数

Table 3 Attenuation curve parameters of pollutant mass concentration under different rainfall recurrence periods

重现期/a	y_0			b			h			R^2		
	COD_{Mn}	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP	COD_{Mn}	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP	COD_{Mn}	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP	COD_{Mn}	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP
1	13.89	2.62	0.18	98.28	3.08	440.71	29.97	47.25	10.63	0.96734	0.98079	0.95420
2	13.10	2.59	0.17	190.30	4.49	685.23	24.54	41.13	10.00	0.95918	0.97474	0.9638
3	12.33	2.56	0.16	2058.00	5.86	624.56	14.84	37.41	10.15	0.94769	0.97100	0.9657
5	11.85	2.50	0.15	3392.10	6.90	613.41	13.42	34.93	9.70	0.94221	0.96609	0.96342
10	11.43	2.43	0.14	1086.10	9.05	947.19	15.92	31.28	9.36	0.94633	0.96048	0.96112
20	11.03	2.37	0.13	1725.69	12.52	867.96	14.41	27.72	9.33	0.94116	0.95695	0.95880
50	10.81	2.29	0.12	718.76	9.88	525.77	16.55	28.83	9.61	0.93222	0.95173	0.94344

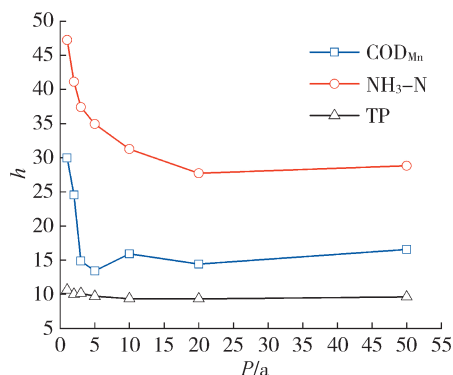


图5 污染物质量浓度的衰减系数随降雨重现期变化

Fig.5 Variation of attenuation coefficient constant of pollutant mass concentration with rainfall recurrence periods

3.3 讨论

雨水弃流旨在去除污染物质量浓度较高的初期雨水,削减屋面雨水径流污染负荷,提高雨水收集箱中雨水水质。雨水收集起始时,部分未被弃流的初期径流进入雨水收集箱,雨水径流污染物质量浓度较高,随着屋面污染物质量浓度下降和中后期较洁净雨水的稀释作用,雨水收集箱中雨水污染物的质量浓度迅速下降;当降雨强度较大时,雨水径流流速较大,屋面污染物并不能迅速完全溶于雨水径流中,溶解过程会持续一段时间。同一种污染物,雨水收集箱中污染物稳定质量浓度随降雨重现期增大而减小,故在降雨重现期较小时,可以适当增大屋面雨水径流弃流量。

4 结论

a. 初期雨水弃流后,雨水收集箱中污染物质量浓度衰减过程分为骤降段、过渡段和稳定段。

b. 对于同一种污染物,污染物质量浓度衰减速度与降雨重现期密切相关,总体来说,降雨重现期较小时,污染物质量浓度的衰减系数较大,降雨重现期较大时,污染物质量浓度的衰减系数较小。

c. 雨水收集箱中污染物质量浓度衰减曲线符合一阶衰减指数函数分布,决定系数超过 0.93;对于同一种污染物,雨水收集箱中污染物稳定质量浓度随降雨重现期增大而减小。

参考文献:

[1] 高玉琴,王冬冬,SCHMIDT A,等.绿色屋顶对城市流域径流的影响[J].水资源保护,2018,34(5):20-26. (GAO Yuqin, WANG Dongdong, SCHMIDT A, et al. Analysis of effect of green roof on urban runoff[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5): 20-26. (in Chinese))

[2] SEPEHRI M, MALEKINEZHAD H, ILDEROMI A R, et al. Studying the effect of rain water harvesting from roof

surfaces on runoff and household consumption reduction [J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 43: 317-324.

[3] FULTON L V. A simulation of rainwater harvesting design and demand-side controls for large hospitals [J]. Sustainability, 2018, 10(5): 10051659.

[4] 刘来胜,吴雷祥,周怀东,等.我国雨水集蓄饮用研究[J].水利水电技术,2014,45(1):36-39. (LIU Laisheng, WU Leixiang, ZHOU Huaidong, et al. Research on rainwater harvesting for drinking in China [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(1): 36-39. (in Chinese))

[5] 戎贵文,沈齐婷,戴会超,等.基于海绵城市理念的屋面雨水源头调控技术探讨[J].水利学报,2017,48(8):1002-1008. (RONG Guiwen, SHEN Qiting, DAI Huichao, et al. Roof rainwater source controlling technology based on design of sponge city [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(8): 1002-1008. (in Chinese))

[6] 王岚,张其成,陈星.住宅小区雨水收集利用方案及其效益分析[J].水资源保护,2013,29(2):67-70. (WANG Lan, ZHANG Qicheng, CHEN Xing. Scheme design and profit analysis of rainwater collection and recycling in a residential district [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(2): 67-70. (in Chinese))

[7] 郑毅,曹建山,刘宝山,等.对初期雨水径流弃流问题的探讨[J].中国给水排水,2009,25(19):106-108. (ZHENG Yi, CAO Jianshan, LIU Baoshan, et al. Discussion on split-flow of first flush runoff [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(19): 106-108. (in Chinese))

[8] 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))

[9] 陈亚萍.乡镇给排水技术[M].北京:中国水利水电出版社,2016.

[10] 朱寒松,董增川,曲兆松,等.基于 SWMM 模型的城市工业园区低影响开发效果模拟与评估[J].水资源保护,2019,35(2):32-36. (ZHU Hansong, DONG Zengchuan, QU Zhaosong, et al. Simulation and evaluation of low impact development effect of urban industrial park based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 32-36. (in Chinese))

[11] 宋奔奔,高成,寇传和,等.基于 SWMM 的生物滞留池布置水文时空效应[J].水资源保护,2017,33(3):25-30. (SONG Benben, GAO Cheng, KOU Chuanhe, et al. Spatial and temporal hydrological responses of arrangement of bioretention cell based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(3): 25-30. (in Chinese))

- [12] 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))
- [13] 贾海峰,姚海蓉,唐颖,等. 城市降雨径流控制 LID BMPs 规划方法及案例[J]. 水科学进展,2014,25(2):260-267. (JIA Haifeng, YAO Hairong, TANG Ying, et al. LID-BMPs planning for urban runoff control and case study[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2):260-267. (in Chinese))
- [14] 国家环境保护总局,《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [15] MORASI D N, ARNOLD J G, LIEW M W V, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007, 50(3):885-900.
- [16] 史常乐,牛兰花,成金海. 水质模型中污染物衰减常数敏感性分析[J]. 水资源与水工程学报,2018,29(4):91-96. (SHI Changle, NIU Lanhua, CHENG Jinhai. Sensitivity analysis of pollutant decay coefficient in water quality model[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(4):91-96. (in Chinese))
- [17] 雷沛,张洪,王超,等. 沉积物水界面污染物迁移扩散的研究进展[J]. 湖泊科学,2018,30(6):1489-1508. (LEI Pei, ZHANG Hong, WANG Chao, et al. Migration and diffusion for pollutants across the sediment-water interface in lakes: a review[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(6):1489-1508. (in Chinese))
- [18] 高峰,蔺欢欢,邓红卫. 强降雨条件下非均匀介质污染物运移数值模拟[J]. 环境科学与技术,2017,40(11):59-66. (GAO Feng, LIN Huanhuan, DENG Hongwei. Numerical simulation of contaminant transport in heterogeneous aquifer under heavy rainfall [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(11):59-66. (in Chinese))
- [19] 韩龙喜,颜芬芬. 水体中不可溶沉降型污染物迁移规律研究进展[J]. 水资源保护,2015,31(3):11-15. (HAN Longxi, YAN Fenfen. Advances of migration patterns of unsolvable sedimentation pollutants in water [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(3):11-15. (in Chinese))

(收稿日期:2020-01-16 编辑:熊水斌)

(上接第 86 页)

- [28] 姚海娇,周宏飞,苏春风. 从水土资源匹配关系看中亚地区水问题[J]. 干旱区研究,2013,30(3):391-395. (YAO Haijiao, ZHOU Hongfei, SU Chunfeng. Water problems based on spatial matching patterns of water and land resources in Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(3):391-395. (in Chinese))
- [29] 吴宇哲,鲍海君. 区域基尼系数及其在区域水土资源匹配分析中的应用[J]. 水土保持学报,2003,17(5):123-125. (WU Yuzhe, Bao Haijun. Regional Gini coefficient and its uses in analyzing to balance between water and soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(5):123-125. (in Chinese))
- [30] 谢桂云,张飞云. 新疆农业水土资源时空匹配研究[J]. 中国农村水利水电,2020(6):58-62. (XIE Guiyun ZHANG Feiyun. Research on time and space matching of agricultural water and soil resources in Xinjiang[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(6):58-62. (in Chinese))
- [31] 姚俊强,刘志辉,张文娜,等. 土库曼斯坦水资源现状及利用问题[J]. 中国沙漠,2014,34(3):885-892. (YAO Junqiang, LIU Zhihui, ZHANG Wenna, et al. Water resources and utilization in Turkmenistan [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(3):885-892. (in Chinese))
- [32] 邓铭江,龙爱华. 咸海流域水文水资源演变与咸海生态危机出路分析[J]. 冰川冻土,2011,33(6):1363-1375. (DENG Mingjiang, LONG Aihua. Evolution of hydrologic and water resources and ecological crisis in the Aral Sea Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6):1363-1375. (in Chinese))
- [33] 姚海娇,周宏飞. 中亚地区跨界水资源问题研究综述[J]. 资源科学,2014,36(6):1175-1182. (YAO Haijiao, ZHOU Hongfei, A Review of transboundary water resources in Central Asia[J]. Resources Science, 2014, 36(6):1175-1182. (in Chinese))
- [34] UNESCO. Water related vision for the Aral Sea basin for the year 2025[R]. Paris:UNESCO,2000.
- [35] DENG H J, CHEN Y N. Influences of recent climate change and human activities on water storage variations in Central Asia[J]. Journal of Hydrology, 2017, 544:46-57.
- [36] 杨雪雯,王宁练,陈安安,等. 中亚干旱区咸海面积变化与人类活动及气候变化的关联研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2):681-692. (YANG Xuewen, WANG Ninglian, CHEN Anan, et al. The relationship between human activities, climate change and area variation of the Aral Sea in the arid Central Asia[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2):681-692. (in Chinese))

(收稿日期:2020-06-24 编辑:彭桃英)