

DOI: 10.5846/stxb201812052664

王春连, 王佳, 郝明旭. 不同设计参数对雨水湿地水量水质调控规律分析. 生态学报, 2019, 39(16): - - .

Wang C L, Wang J, Hao M X. Influence of different design parameters on water quality and quantity regulation of wetlands. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): - - .

不同设计参数对雨水湿地水量水质调控规律分析

王春连^{1,2,*}, 王佳^{1,2}, 郝明旭^{1,2}

1 北京大学景观设计学研究院, 北京 100871

2 北京土人城市规划设计股份有限公司, 北京 100080

摘要:基于前置塘+二阶表流湿地组合的雨水湿地系统的室内降雨径流模拟实验数据,研究了不同降雨重现期、不同常水位、不同湿地出水口高度、不同湿地级数以及不同污染负荷等设计参数对湿地水量水质调控效果的影响规律,研究表明:前置塘+二阶湿地组合的雨水湿地系统通过截留、缓冲和存储作用,对不同降雨径流条件下的产流时间、流量、径流削减率具有多重调控作用,延长了污染物在流域内部的滞留时间,减少了污染负荷的输出,对降雨径流过程中污染物总量具有较好的截留效果。并随设计参数的变化有明显的变化规律。随着降雨重现期的增加,湿地出水口高度的降低,湿地常水位的增加,以及湿地级数的减少,湿地出流量增加,产流时间提前,出流持续时间延长,径流削减率降低。从场次降雨污染物平均浓度(EMC)上看,降雨过程中,雨水湿地仅对 SS 削减比较明显,削减率达 70%—80%,对其他污染物浓度的削减效果不明显。从场次降雨污染物总量削减率来看,雨水湿地对降雨径流污染物具有较好的截留效果,并随着降雨重现期减少、湿地出水口高度增加、湿地常水位降低,呈逐渐增加趋势。

关键词:设计参数;雨水湿地;径流削减率;污染物削减率;模拟实验

Influence of different design parameters on water quality and quantity regulation of wetlands

WANG Chunlian^{1,2}, WANG Jia^{1,2}, HAO Mingxu^{1,2}

1 The Graduate School of Landscape Architecture, Peking University, Beijing 100871, China

2 Beijing Turen Urban Planning and Design Company Limited, Beijing 100080, China

Abstract: Based on the indoor rainfall-runoff simulation experiment data from a rainwater wetland system composed of pre-pond, first-order, and second-order wetlands, the effects of design parameters, such as different rainfall recurrence periods, constant water levels, wetland outlet heights, wetland series, and pollution loads on the regulation effect of wetland water quantity and quality were studied. The results show that with the functions of interception, buffering, and storage, the pre-pond wetlands system could regulate the runoff appearance time, volume, and reduction rate, reducing the pollutant concentrations. The stormwater pollution load exported from the watershed was greatly decreased, and there were obvious rules with the change of the design parameters. With an increase in the rainfall recurrence period, constant water level, and a decrease in the height of wetland outlet, wetland series; wetland outflow and duration of outflow increases, and runoff reduction rate decreases. In terms of the event mean concentration (EMC) of pollutants during rainfall, the reduction in suspended solids (SS) in rainwater wetlands is obvious, with a reduction rate of 70%—80%. The reduction effect on the concentrations of other pollutants is not obvious. In terms of the total reduction rate of rainfall pollutants, rainwater wetland has a good interception effect on rainfall runoff pollutants, and with the reduced rainfall recurrence period, increased

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401105);国家自然科学基金面上项目(51678002)

收稿日期:2018-12-05; **网络出版日期:**2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 402208932@qq.com

wetland outlet height, and decreased wetland normal water level, this trend is gradually increasing.

Key Words: Design parameters; stormwater wetland; runoff reduction rate; pollutant reduction rate; simulation experiment

城市化的发展导致城市不透水面积增加,径流系数增大,径流量成倍增长,加重了排水管网的负担,城市内涝现象频发。同时,城市也面临着水资源短缺、水环境恶化、水生态破坏等多种问题。随着“海绵城市”理念的提出和发展,人们已经意识到传统的“以排为主”的排水体制,无法从根本上解决由雨水引发的一系列问题,而需要通过合理的水系统生态设计,将雨水视为资源,实现防洪减灾,改善水生态环境,回补地下水,防止地面沉降等。另外,由于城市降雨地表径流污染的发生受到多种因素综合作用,具有水文学机制复杂、污染物种类繁多、组分多变、时空变化明显等特点,使得城市降雨径流污染问题也显得日益突出^[1],滞留池、人工湿地等构筑物是目前国际上解决城区初期径流污染所采取的主要措施。

水系统生态设计是一种利用人工干预方式,介入自然过程、调节人居环境的工程化的生态处理方式^[2]。近年来,作为一种新型的湿地模式和水生态系统的典型设施,雨水湿地被越来越多应用于雨水调控案例中。雨水湿地对雨水径流的水量水质调控效果显著,在场次降雨中雨水湿地峰值流量削减率可达 70%—80%,径流总量削减率达 50% 以上^[3-4]。同时雨水湿地可以有效削减雨水径流中 TSS、TN、TP 和重金属^[5]。

与污水处理人工湿地不同,雨水湿地针对的现场实地的降雨强度、降雨径流量以及径流污染浓度等边界条件存在较大不确定性,需要应用弹性对策,并试图兼顾雨水的综合利用及人类活动使用功能^[6]。已有研究表明影响雨水湿地处理效果的设计参数主要有降雨条件、湿地结构和形式、基质、植物等^[7-9]。常静(2007)的研究发现,污染物冲刷过程的主要影响因素为降雨量、降雨历时及降雨强度^[8];Olding 等(2004)发现坑塘湿地的设计特征和设计形态会影响雨水塘的水质化学性质^[9]。BMPs 的水处理效率受设计参数的影响非常大,包括面积、水力停留时间^[10-11],增加水力停留时间可以有效提高污染物的去除效率^[12],并将其定为是影响污染物去除效率的主要因素之一^[13]。另外,初始浓度会影响湿地净化效率,根据一级动力学方程得知,污染物浓度越高,净化效率越高^[14]。

目前对人工雨水湿地的研究,主要集中在不同设计工况下的潜流湿地对地表径流的净化效果以及表流湿地对地表径流的在线截控效果等方面^[1,15-17]。一方面,潜流湿地的流量限制,并不充分适用于进水量不确定的雨水湿地,另一方面针对人工雨水湿地水质水量综合调控效果,以及针对不同设计条件对雨水湿地水质水量调控效果的影响规律的研究还相对缺乏。为了充分研究雨水湿地不同设计条件下的水质水量调控规律,本研究以前置塘+二阶表流型湿地组成的人工雨水湿地为例,设计人工雨水湿地室内模拟实验,模拟其对降雨径流水质水量的削减特征及规律,进而对人工雨水湿地在不同设计工况、不同降雨条件下,对各类污染物的去除效能及其影响因素进行监测和分析,为实际雨水湿地的设计方法提供更加科学合理的依据。

1 材料与方法

1.1 实验装置

湿地装置由三个湿地单元构成的前置塘-一阶湿地-二阶湿地组合系统,其长×宽×高各为 1 m×1 m×1.2 m,其中第一级为前置塘,第二级和第三级为表流型净化湿地,采用有机玻璃制作(图 1)。每个湿地单元设有进水口和出水口,由导流管相连。湿地填料最底层为 10cm 深砾石(粒径范围 1—2cm),中间层为 10cm 炉渣层粒径范围(1—2cm),上面覆盖 20cm 有机土壤(当地土壤)。湿地植物以耐冲刷、耐污染、本土植物、耐旱耐涝为主,主要植物种类为水葱、千屈菜和芦苇,植物种植密度为 20 株/m²。湿地常水位与土壤表层齐平,定期浇水,正常培育,待植物长势良好稳定后进行试验。为保证植物生长及水质处理效果,试验选在温室中进行。

1.2 实验情景设计

为研究湿地在不同设计参数(水口高度、湿地级数)、不同降雨条件、污染物浓度等条件下径流削减和污

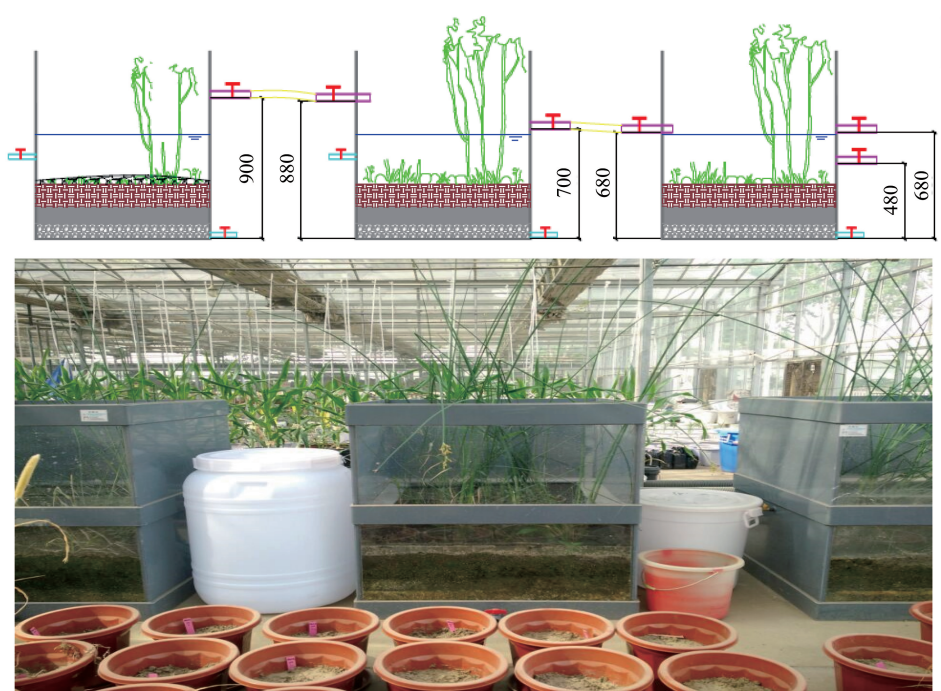


图 1 组合湿地示意图
Fig.1

染物削减效果,设计了如下不同重现期、不同常水位、不同出水口高度和不同污染物浓度实验(表 1),设计参数的选择根据相关实验研究以及实际工作经验^[1,15-17]。依据水质控制容积法(WQV)计算湿地最佳设计规模,假设汇水区径流系数为 0.6,以北京市的设计降雨量为 34mm^[18],反推湿地模块服务的汇水区面积为 112m²,以此计算不同重现期降雨下湿地补水量(1 年一遇条件下补水 1840L/h,3 年一遇条件下补水 2500L/h),末端水口高度 700mm,降雨历时为 1h。为保证实验的准确性和结论的可靠性,每组实验开始都做预实验对入流量、入流时间、出流量等参数进行调控,系统稳定后,开始正式实验,对数据波动较大的实验,采取重复实验的做法。

表 1 组合湿地主要试验内容
Table 1 Main test contents of stormwater wetlands

实验名称 Experimental name	实验内容 Experimental content	其他实验条件 Experimental condition	监测点 Monitoring point
不同重现期降雨实验 Different rainfall recurrence periods	1 年一遇(1840L/h) 3 年一遇(2500L/h)	常水位 0,水口高度 700,无下渗,湿地级数 2 级,污染物等级高	前置塘、二阶湿地出口
不同常水位实验 Different normal water level	无 0 0.2	一年一遇,水口高度 700,湿地级数 2 级,污染物等级高,无下渗	前置塘、二阶湿地出口
不同水口高度实验 Different outlet heights	700mm 400mm	一年一遇,常水位无,无下渗,湿地级数 2 级,污染物等级高	前置塘、二阶湿地出口
不同污染物浓度实验 Different pollutant concentration	高浓度 低浓度	常水位无,水口高度 700,无下渗,湿地级数 2 级,一年一遇	前置塘、二阶湿地出口

考虑到降雨的随机性,收集城市各下垫面的雨水径流作为实验用水难度较大,且无法根据实验时间灵活安排实验,因此本实验的降雨径流采用自来水加化学试剂的方式配制不同浓度的雨水径流,以满足实验需求。根据已有研究文献对城市降雨径流污染特征分析得出降雨径流污染物主要包括悬浮物(SS)、化学需氧量(COD)、氨氮(NH₃-N)、总氮(TN)、总磷(TP)^[19-21],因此实验中主要选择这五个指标来测定,分析其削减规律。并在综述北京市雨水径流污染状况的基础上^[19-21],选取高、低两种污染物负荷量进行实验,实验中降雨

径流配置所选药品试剂主要包括葡萄糖、碳酸二氢钾、硝酸钾、氯化铵、藻土等。

表 2 模拟北京市雨水径流主要污染物种类及含量 (mg/L)

Table 2 Simulation of main pollutants types and contents of rainwater runoff in Beijing

污染物等级 Pollutant level	化学需氧量 COD	悬浮物 TSS	总氮 TN	总磷 TP	氨氮 NH ₃ -N
低 Low	150—180	300—400	7—10	0.7—1.0	3—5
高 High	200—300	500—600	14—18	1.2—1.4	6—7

1.3 采样方法

流量监测点为每级湿地单元的出水口,记录每一级湿地的初始产流时间。在开始产流后使用量杯和秒表及直尺等监测出水口流速、流量,每 5min 进行一次测量,直至产流结束。

水质采样在每次实验开始时取一次泵入的水样。然后在每级湿地出口初始产流时开始取样,采样时间间隔为 5—10min,直至产流结束,样品容量 550ml。水力停留时间设 48h,在模拟降雨结束后第 2h,6h,12h,24h,48h 进行采样。样品送至具有 CMA 检测资质的机构进行检测,主要检测指标有 SS、COD、NH₃-N、TN、TP。

1.4 计算方法

湿地降雨径流削减率计算方法:

本研究将雨水湿地与其假想的上游服务汇水区域看作整体,引入湿地降雨径流削减率的概念,定义为人工湿地总入流量(上游汇水区域产流量与湿地自身产流量之和)和出流量的差值与入流量的比值。按照下面公式计算:

$$\varphi = \frac{Q_{\text{入}} - Q_{\text{出}}}{Q_{\text{入}}} \times 100\%$$

式中: φ 为雨水湿地的径流削减率, $Q_{\text{入}}$ 为湿地的总入流量 (m³), $Q_{\text{出}}$ 为湿地的出流量 (m³)。

污染物削减率计算方法:

人工雨水湿地的污染物削减率包含两个方面,一是污染物总量的削减,是指降雨径流进入湿地后流出湿地的某种污染物总量与进入湿地的相应污染物总量的减小值与进水污染物总量的比值。二是污染物浓度的削减,是指降雨径流进入湿地后流出该设施的某种污染物浓度与进入湿地的相应污染物浓度的减小值与进水污染物浓度的比值。其中污染物浓度采用场次降雨-径流污染平均浓度 (EMC) 来表示^[22]。

2 结果与分析

2.1 不同设计条件下湿地水量调控效果

(1) 不同降雨重现期下湿地对汇水区径流削减效果

模拟湿地在 1 年重现期条件下,湿地末端出口在 71min 开始有出流,出流时间 32min,出流量 318.9L,降雨径流总量削减率 83%。湿地在 3 年重现期条件下,湿地末端出口在 35min 开始出流,出流时长 40min,出流量 917.75L,湿地降雨径流削减率 64%。可见,随着降雨重现期增大,湿地出流量增加,出流时长增大,出流时间提前,降雨径流削减率减小。

表 3 湿地模块在不同降雨重现期条件下的产流特征

Table 3 Runoff characteristics of wetland modules under different rainfall recurrence periods

重现期 rRainfall recurrence periods	进水总量 Total influent/L	开始出流时间 Start runoff generation time/min	出流总量 Total runoff yield/L	出流时长 Run generation time/min	径流削减率 Runoff reduction rate
1a	1840	71	318.9	32	83%
3a	2500	35	917.75	40	64%

(2)不同出水口高度下湿地径流削减效果

出水口高度 400mm 条件下,湿地出流量为 451.95L,开始出流时间为 60min,出流时长 35min,降雨径流削减率为 75%,当出水口高度为 700mm 条件下,湿地出流量为 318.9L,开始出流时间为 71min,出流时长 32min,降雨径流削减率为 83%。随着出水口高度增加,湿地出流量减少,峰值流量下降,开始出流时间延迟,径流削减率增大,出流时长变化不大。湿地出水口高度的增加,增加了湿地的调蓄容积,径流削减率增加了 8%,有效提高了湿地对降雨径流的削减效果。

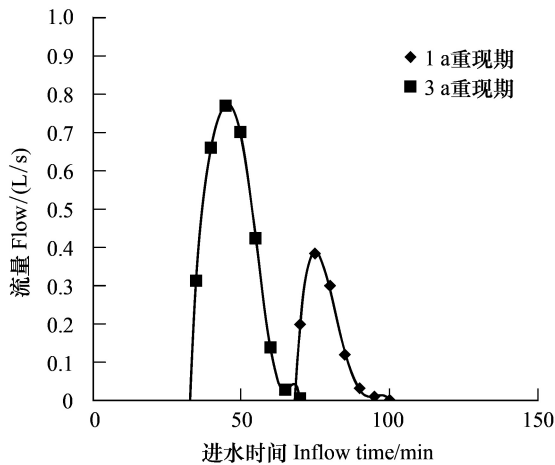


图2 不同降雨重现期下湿地产流过程

Fig. 2 Runoff generation process under different rainfall recurrence periods

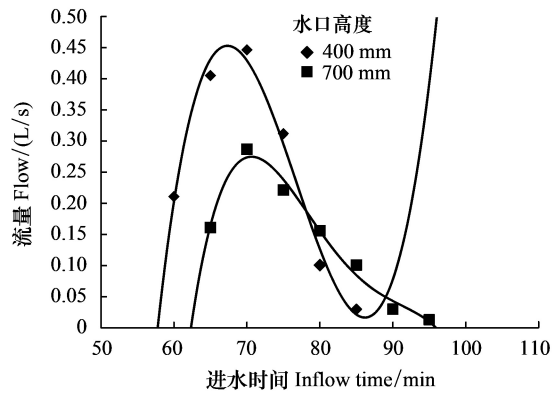


图3 不同出水口高度下湿地产流过程

Fig.3 Wetland runoff generation under different outlet heights

表 4 湿地模块在不同出水口高度条件下的产流特征

Table 4 Runoff characteristics of wetland modules at different outlet heights

水口高度 Outlet heights	进水总量 Total influent/L	开始产流时间 Start runoff generation time/min	产流总量 Total runoff yield/L	产流时长 Run generation time/min	径流削减率 Runoff reduction rate
400mm	1840	60	451.95	35	75%
700mm	1840	71	318.9	32	83%

(3)不同常水位下湿地径流削减效果

在 1 年一遇重现期,水口高度 700 mm 的条件下,对常水位无、0、0.2 m 下湿地的出流效果进行分析(图 4,表 5)。实验结果表明,在没有常水位的条件下湿地出流量为 318.9L,开始出流时间 71min,出流时长为 32min,降雨径流削减率 83%;常水位为 0 的条件下,湿地出流量 654.75L,开始出流时间 54min,出流时长 45min,降雨径流削减率 64%;常水位为 200mm 条件下,出流总量为 1245L,第 15min 开始产流,出流时长 63min,降雨径流削减率 32%。可见,不同常水位条件下,常水位越大,湿地出流量越大,开始出流时间越短,出流时长延长,对降雨径流的削减率越小。从图 4 可见,随着常水位降低,对径流总量和峰值流量都有很大削减。

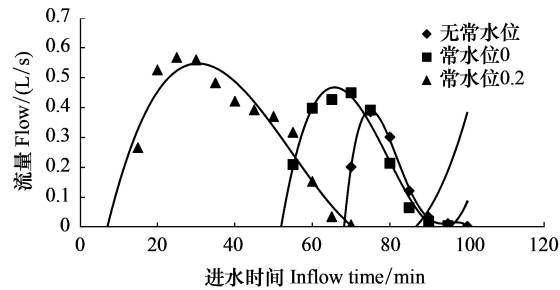


图4 不同常水位下湿地产流过程

Fig. 4 Wetland runoff generation under different normal water level

表 5 湿地模块在不同常水位条件下的产流特征

常水位 Normal water level	进水总量 Total influent/L	开始产流时间 Start runoff generation time/min	产流总量 Total runoff yield/L	产流时长 Run generation time/min	径流削减率 Runoff reduction coefficient
无	1840	71	318.9	32	83%
0	1840	54	654.75	45	64%
0.2m	1840	15	1245	63	32%

(4)不同湿地级数条件下径流削减效果

实验分别对不同湿地级数下湿地产流效果研究表明(图 5,表 6):前置塘、前置塘+一阶湿地、前置塘+二阶湿地模式下,湿地出流量依次为 1308.00 L、651.30 L、286.95 L,开始出流时间依次为 33 min、50 min、63 min,出流时长分别为 56 min、44 min 和 35 min,降雨径流削减率分别为 29%、65%、84%。可见不同湿地级数条件下,湿地级数越多,湿地出流量越小,峰值流量下降,开始产流所需时间越长,产流时长越短,降雨径流削减率越高。所以通过增加湿地级数来增加湿地的调蓄面积,可以减缓流速,降低洪峰流量,达到调蓄径流的目的。

2.2 不同降雨和设计条件下湿地对径流污染物的削减规律

(1)不同降雨重现期下湿地对污染物的削减规律

人工雨水湿地单元在 1 年、3 年重现期降雨条件下的污染物削减效果表明(表 7):从 EMC 平均污染物浓度削减系数来看,仅 COD 和 SS 削减效果比较明显,其中 SS 在 1 年和 3 年重现期下前置塘削减率分别为 62.14%和 34.56%,二级湿地浓度削减率分别为 83.38%和 71.94%。可见随着降雨重现期增加,SS 平均污染物浓度削减率逐渐降低。但 TN、TP、NH₃-N 等其他污染物浓度有增加趋势,分析这一现象与径流进入湿地造成湿地内部扰动有关。

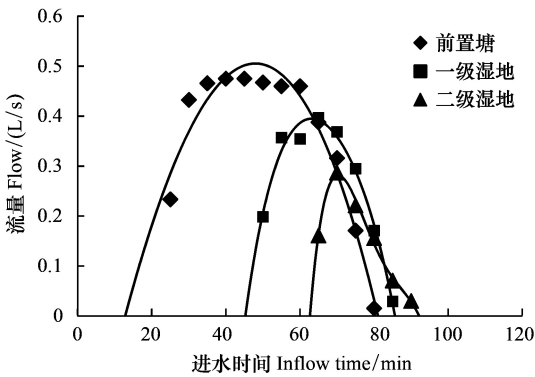


图 5 不同湿地级数产流过程
Fig.5 Runoff generation process of different wetland series

表 6 湿地模块在不同湿地级数条件下的产流特征

湿地级数 Wetland series	进水总量 Total influent/L	开始产流时间 Start runoff generation time/min	产流总量 Total runoff yield/L	产流时长 Run generation time/min	径流削减率 Runoff reduction coefficient
前置塘 Front pond	1840	33	1308	56	29%
前置塘+一阶 Front pond + first wetland	1840	50	651.3	44	65%
前置塘+一阶+二阶 Front pond + first wetland+ second wetland	1840	63	286.95	35	84%

但降雨过程中,湿地对雨水径流中的污染物具有较好的截留效果,在 1 年重现期降雨条件下,TN、TP、COD、SS 的总量削减率分别为 48.99%、61.94%、66.12%、94.1%,3 年重现期降雨条件 TN、TP、COD、SS 的总量削减率分别为 41.95%、50.63%、53.54%、86.36%。可见,除 NH₃-N 外,降雨总量越小,径流污染物总量的截留削减效果越好。且湿地级数越高,污染总量截留效果越好。

表 7 湿地模块在不同降雨重现期降雨下的污染物削减特征

	总氮 TN		总磷 TP		氨氮 NH ₃ -N		化学需氧量 COD _{Mn}		悬浮物 SS	
进水浓度/(mg/L)	14		1.2		6		200		500	
Influent concentration										
重现期	1a	3a	1a	3a	1a	3a	1a	3a	1a	3a
Rainfall recurrence periods										
EMC 前置塘	19.29	19.29	1.25	1.25	10.30	7.47	184.18	189.10	189.28	327.18
front pond/(mg/L)										
EMC 二级湿地	16.7	16.70	1.29	1.22	10.81	4.98	190.89	191.11	83.12	140.30
Secondary wetland/(mg/L)										
进水总污染物	25.76	35	22.08	30	11.04	15	368	500	920	1250
Total Influent Pollutants/g										
前置塘出水总污染物	26	28.8	1.58	1.86	13.1	11.15	233	282	239.8	488.6
Total pollutants in effluent from front pond/g										
二级湿地出水总污染物	13	20	0.84	1.48	7.06	6.05	125	232	54.3	170.5
Total Pollutants in secondary wetland effluent/g										
前置塘浓度削减率	-37.79	-37.79	-3.97	-4.06	-71.66	-24.48	7.91	5.45	62.14	34.56
Concentration reduction rate of front pond/%										
前置塘总量削减率	-0.91	17.67	28.40	37.84	-18.22	25.64	36.58	43.52	73.93	60.91
Total pollutant reduction rate of front pond/%										
二级湿地浓度削减率	-19.29	-19.29	-7.21	-1.54	-80.24	16.97	4.56	4.45	83.38	71.94
Concentration reduction rate of secondary wetlands/%										
二级湿地总量削减率	48.99	41.95	61.94	50.63	36.03	59.63	66.12	53.54	94.10	86.36
Total reduction rate of secondary wetlands/%										

(2) 不同常水位下湿地对污染物削减规律

实验在污染物等级高,水口高度为 700mm,降雨重现期为 1 年,湿地级数为 2 级的条件下,对不同常水位条件下湿地污染物削减过程进行研究(表 8)。结果显示,从污染物总量削减情况来看,无常水位时,湿地对水体中 TN、TP、NH₃-N、COD_{Mn}、SS 削减率依次为 75.73%、79.75%、73.21%、83.28%、96.60%;常水位为 0 时,湿地对水体中 TN、TP、NH₃-N、COD_{Mn}、SS 削减率依次为 48.99%、61.94%、36.032%、66.12%、94.10%;常水位为 0.2 时,湿地对水体中 TN、TP、NH₃-N、COD_{Mn}、SS 削减率依次为 23.37%、56.79%、20.29%、72.28%、89.05%。降雨过程中,湿地对雨水径流中的污染物具有较好的截留效果,湿地常水位越低,污染物的截留削减效果越好。

从湿地污染物浓度削减情况来看,对 COD 和 SS 有一定的削减效果,其中最为显著的是 SS,削减率达 80—83%,但随着常水位高度的变化,削减率规律变化不明显。

(3) 不同出水口高度湿地对污染物削减规律

实验设置降雨条件为 1 年一遇重现期,无湿地常水位,下垫面无下渗,进水配置高等级污染物浓度水体,采样点选取第 2 级湿地。不同湿地出水口高度下(400mm、700mm)条件下污染物削减特征结果表明(表 9),出水口高度为 700mm 时,湿地对降雨径流中 TN、TP、NH₃-N、COD_{Mn}、SS 总量削减率依次为 75.73%、79.75%、73.21%、83.28%、96.60%;出水口高度为 400 mm 时,湿地对降雨径流中 TN、TP、NH₃-N、COD_{Mn}、SS 总量削减率依次为 61.65%、69.42%、61.67%、78.67%、94.30%。可见湿地不同出水口水口高度下湿地对各类型污染物削减

表 8 湿地模块在不同常水位高度条件下的污染物削减特征

Table 8 Pollutant reduction characteristics of wetland modules under different normal water level									
	总氮 TN	总磷 TP		氨氮 NH ₃ -N			化学需氧量 COD _{Mn}		悬浮物 SS
进水浓度 Inluent concentration/(mg/L)	14	1.2		6			200	500	
常水位情况 Normal water level	无	0	0	0.2m	无	0	0.2m	无	0
EMC 前置塘 Front pond/(mg/L)	19.29	20.51	13.49	1.40	1.25	1.07	9.48	10.30	8.45
EMC 二级湿地 Secondary wetland/(mg/L)	16.70	20.12	15.85	1.41	1.29	0.77	9.31	10.81	7.06
进水总污染物 Total Inluent Pollutants/g	25.76	25.76	25.76	22.08	22.08	22.08	11.04	11.04	11.04
前置塘出水总污染物 Total pollutants in effluent from front pond/g	21.5	25.9	18.9	1.58	1.58	1.50	10.7	13.1	11.88
二级湿地出水总污染物 Total pollutants in secondary wetland effluent/g	6.25	13.14	19.74	0.45	0.84	0.95	2.96	7.06	8.8
前置塘浓度削减率 Concentration reduction rate of front pond/%	-37.79	-46.52	3.64	-16.44	-3.97	10.83	-58.08	-71.66	-40.83
前置塘总量削减率 Total Pollutant reduction rate of front pond/%	16.50	-0.91	26.39	28.50	28.40	31.91	2.92	-18.22	-7.64
二级湿地浓度削减率 Concentration reduction rate of secondary wetlands/%	-19.29	-43.70	-13.21	-17.27	-7.21	35.83	-55.18	-80.24	-17.67
二级湿地总量削减率 Total reduction rate of secondary wetlands/%	75.73	48.99	23.37	79.75	61.94	56.79	73.21	36.03	20.29

效果均较显著,其中对污染物 COD_{Mn}、SS 的削减效果较好,其中对 COD 削减率达 80%左右,对 SS 削减率达 90%以上。对 TN、TP、NH₃-N 总量削减在 700mm 出水口高度时削减率达 75%左右,而在 400mm 出水口高度时削减系率达 60%以上。在削减规律上看,随着出水口高度的降低,其污染物总量削减率逐渐降低,其中 TN、TP、NH₃-N 从 700mm 降低 400mm 时,削减率降低 10%左右,但 COD 和 SS 的削减率降低比较少,仅 2—5%左右。

表 9 不同出水口高度 (mm) 设计条件下污染物削减特征
Table 9 Characteristics of pollutant reduction under different outlet heights

	总氮 TN		总磷 TP		氨氮 NH ₃ -N		化学需氧量 COD _{Mn}		悬浮物 SS	
进水总量/L Total influent	25.76		2.2		11.04		368		920	
出水口高度/mm Outlet heights	700	400	700	400	700	400	700	400	700	400
前置塘出水总量/L Total outflow of front pond	21.5	28.2	1.58	1.9	10.7	12.5	211.5	275	267	262
二级湿地出水总量/L Total effluent of secondary wetland	6.25	9.88	0.45	0.68	2.96	4.23	61.5	78.49	31.26	52.4
前置塘总量削减率/% Total pollutant reduction rate of front pond	16.50	-9.61	28.50	13.53	2.92	-12.80	42.53	25.24	70.98	71.50
二级湿地总量削减率/% Total reduction rate of secondary wetlands	75.73	61.65	79.75	69.42	73.21	61.6	83.28	78.67	96.60	94.30

(4) 不同进水浓度和水力停留时间下湿地对污染物的削减规律

实验设置降雨条件为 1 年一遇重现期,无湿地常水位,湿地出水口高度为 700 mm、下垫面无下渗,采样点选取第 2 级湿地,分别研究不同等级(高低)进水污染物浓度下随水力停留时间变化的污染物削减特征(图 6)。结果显示,不同污染负荷情形下,各污染物随水力停留时间的增加变化趋势大体相同,呈下降趋势(SS 除外),高浓度污染物下降趋势相对明显。当水力停留 24h,高浓度进水情形下,湿地对水体中 TN、TP、NH₃-N、COD_{Mn} 的去除率依次为 44.2%、34.3%、68.3%、82.4%;低浓度进水情形下,湿地对水体中 TN、TP、NH₃-N、COD_{Mn} 的去除率依次为 62.3%、16.7%、86.7%、43.4%。可见,对 TN 和 NH₃-N 高污染负荷的条件下湿地 24h 的去除率低于低污染负荷条件下,而 TP 和 COD 24h 的去除率在高污染负荷条件下高于低污染负荷条件下。已有研究表明在一定浓度范围内,污染物去除率随进水浓度增大而略增加^{[14][23]},这与本研究的部分结论一致。

高污染负荷情形下,水力停留时间在 24—48h 内 SS 浓度不减反增,可能原因是,随着水力停留时间的增加,填料缝隙间及填料与植物根际已沉淀的固体悬浮物被重现释放导致 SS 浓度增加。相对而言,对 SS 及 COD 的影响远不如 TN、NH₃-N、TP 去除效果的影响大,主要基于各自的净化机理不同,SS 的去除主要基于填料缝隙间的沉淀及填料与植物根际的拦截、过滤作用,COD 的去除经历吸附及生化反应过程,只要湿地运行条件有利于吸附及生化反应过程,即可保证较高的 COD 去除率,而 TN、NH₃-N、TP 则不同,水力负荷、水力停留时间及水深均直接影响局部好氧环境的存在,从而影响 N、P 的硝化和反硝化及吸收和释放,因此在实际工程中,应尽可能保证植物的根系充分发展,营造良好的好氧微环境,在保证较高的 SS、COD 去除的同时,获取较高的 TN、NH₃-N、TP 的去除率。

3 结论与讨论

(1)前置塘+二阶表流湿地组合的雨水湿地系统通过截留、缓冲和存储作用,对不同降雨径流条件下的产

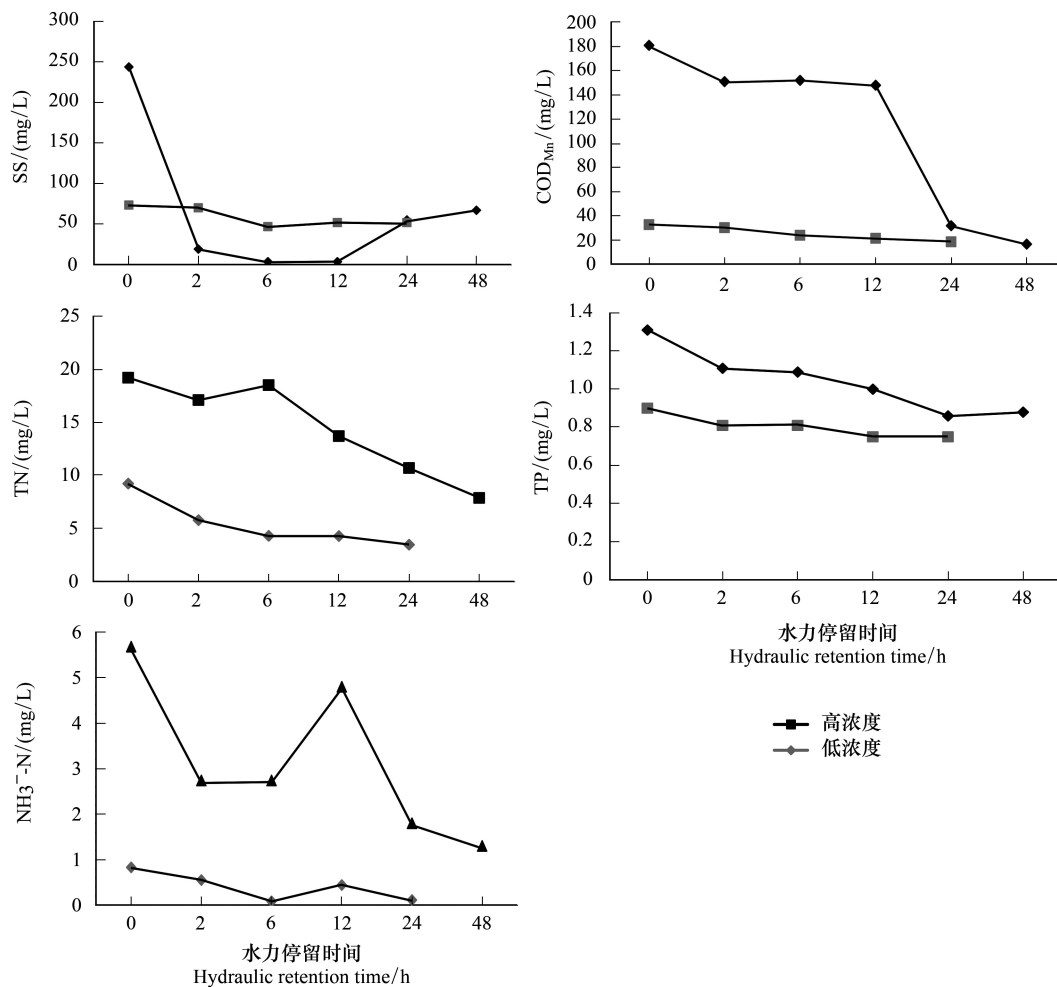


图 6 不同水力停留时间对湿地污染削减效果的影响

Fig 6 Effects of different hydraulic retention time on wetland pollution reduction

流时间、流速和流量具有多重调控作用。在整个降雨实验过程中,该雨水湿地系统对降雨径流具有较好的调控效果,场降雨径流削减率达 64%—83%,单保庆等研究塘-湿地组合系统对城市旅游区降雨径流污染在线截控作用表明在暴雨连续流事件中也体现较好径流调控作用,径流总量由 213.4m³降到 31.9m³,径流削减率达 85%。可见无论是室内实验或者野外现场实验,塘-湿地组合系统对降雨径流调控效果明显。并且不同设计条件的改变,调控规律也随之变化。随着降雨重现期增加,径流削减率逐渐减小;随着湿地出水口高度的增加,湿地出流量减小,径流削减率增大。随着湿地常水位的增加,湿地径流削减率逐渐减小,无初始水深时径流削减率比初始水深为 200mm 时增加了 51%。王明宇(2016)在相关研究中也得出类似的结论湿地初始水深越小,湿地水量控制效果越好,实验表明初始水深 100mm 时峰值流量比 160mm 时减少了 53.5%^[24]。

(2)人工雨水湿地降雨径流模拟实验不同设计条件对污染物削减效果表明,从 EMC 污染物平均浓度上看,降雨过程中,雨水湿地对污染物浓度的削减效果不明显。不同重现期降雨实验中,仅对 COD 和 SS 平均浓度有削减,其中 SS 削减比较明显打 70—80%,且随着降雨重现期增加,SS EMC 平均污染物浓度削减率逐渐降低。不同常水位条件下对污染物平均浓度削减最为显著的也是 SS,削减率达 80—83%,但随着常水位高度的变化,削减率规律变化不明显。不同进水浓度条件下,湿地对 TN 和 NH₃-N 高污染负荷的条件下湿地 24h 的去除率低于低污染负荷条件下,而 TP 和 COD_{24h} 的去除率在高污染负荷条件下高于低污染负荷条件下。

已有研究尹炜等研究复合潜流人工湿地对 COD、TP、TN、SS 的去除率分别为 69—73.1%、82.6—86.6%、89—90.4%、64.7—69.2%^[16],舒朝会等采用折流式人工湿地系统对降雨径流污染物去除研究对 COD、TP、TN、

NH_4^+-N 的去除率分别为 86.11%、82.1%、80.3%、76.7%^[25], 污染物浓度去除效果比较好, 主要在于复合潜流湿地特殊的基质材料以及水流方式对于净化污染物效果较好, 但水量综合调控效果受固定流量和流速等控制。而常规的雨水湿地都是以水量调控为主, 水质控制常作为附加值存在。实验中的表流型雨水湿地对污染物主要起到截留净化以及水量综合调控补充地下水等多功能, 而且造价低, 适合公园等尺度较大的场地应用。但针对降雨径流污染物浓度大的场地单纯的雨水湿地净化是不够的, 需要附加的污染物处理设施, 例如加强型的人工湿地处理工艺等。

(3) 前置塘+二阶表流湿地组合成雨水湿地系统延长了污染物在流域内部的滞留时间, 减少了污染负荷的输出, 对降雨径流过程中污染物总量具有较好的截留效果。其中对 TN 、 TP 、 NH_3-N 、 COD_{Mn} 、 SS 污染削减效果较好的削减率依次为 75.73%、79.75%、73.21%、83.28%、96.60%; 单保庆等研究塘-湿地组合系统对城市旅游区降雨径流污染在线截控作用也表明塘、一阶湿地和二阶湿地组成系统对污染物表现出良好的持留能力, 污染物 TSS 、 COD 、 TN 、 TP 持留率分别达到了 92.9%、96%、85.7%和 80.9%^[17]。

从设计参数对污染物削减规律上看, 降雨总量越小, 径流污染物总量的截留削减效果越好。湿地常水位越低, 污染物的截留削减效果越好, 其中王明宇研究也表明随着初始水深的降低, 湿地水质控制效果变强, 出水污染物总量负荷变小^[24], 与跟本研究结论类似。在削减规律上看, 随着出水口高度的降低, 其污染物总量削减率逐渐降低, 其中 TN 、 TP 、 NH_3-N 从 700mm 降低 400mm 时, 削减率降低 10%左右, 但 COD 和 SS 的削减率降低比较少, 仅 2—5%左右。李家科等研究表明水平潜流湿地中水深从 750mm 降低到 550mm 和 350mm 污染物负荷的削减率降低 5.92%和 31.6%, 复合流湿地负荷削减率比前两种降低 5.07%和 25.89%^[1], 与本研究削减规律相似。

(4) 本研究虽然没有讨论植被设计参数, 但植被在人工湿地中发挥着重要作用, 不仅可以直接摄取和利用污水中的营养物质和有机物, 还能提高人工湿地的渗透系数, 增强根际微生物活性, 溶解性氧含量等, 有利于各类微生物在湿地繁殖与扩散, 强化人工湿地净化能力, 也可延长湿地基质的使用期限^[23], 另外在保证植物生长水深条件下, 初始水深越小越有利于水量和污染负荷的调控; 出水口高度在一定体积范围内可适当增大, 对径流削减和污染物削减效果较好; 同时湿地级数增加也有利于增大水量和水质的调控能力。此外, 针对降雨量大, 污染物浓度高的情况下, 设施设计需要特别考虑, 例如引入加强型人工湿地处理工艺等。

(5) 本研究主要从单个设计参数的角度, 探讨了不同设计参数变化对雨水湿地水质水量调控效果的影响规律, 针对不同设计参数的组合对调控效果的影响规律分析较少, 是下一步研究的方向。另外由于实验装置较小, 存在一定的局限性, 未来研究需要进一步扩大实验范围, 使得研究结果更好的服务于实际场地的应用。

参考文献 (References):

- [1] 李家科, 高志新, 汪琴琴, 李亚娇, 沈冰. 不同水深下多级串联人工湿地对城市地面径流的净化效果. 水土保持学报, 2014, 28(3): 125-133.
- [2] 郑曦. 基于自然过程的人工干预下的水系统生态设计. 张凌, 译. 景观设计学, 2013, 1(4): 78-82.
- [3] Brown R G. Effects of an urban wetland on sediment and nutrient loads in runoff. Wetlands, 1984, 4(1): 147-158.
- [4] Lenhart H A, Hunt III W F. Evaluating four storm-water performance metrics with a North Carolina coastal plain storm-water wetland. Journal of Environmental Engineering, 2011, 137(2): 155-162.
- [5] Brown W, Schueler T. National Pollutant Removal Performance Database for Stormwater Best Management Practices. Ellicott City, MD, USA: Center for Watershed Protection, 1997.
- [6] 孙鹏, 王志芳, 姜芊孜, 王华清, 张凌. 人性化的城市雨水景观设计对策. 景观设计学, 2013, 1(4): 83-87.
- [7] 钱嫦萍, 陈振楼, 曹承进, 王军. 人工湿地技术削减雨水初期径流污染负荷研究进展. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2011, (1): 55-62.
- [8] 常静. 城市地表灰尘—降雨径流系统污染物迁移过程与环境效应[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [9] Olding D D, Steele T S, Nemeth J C. Operational monitoring of urban stormwater management facilities and receiving subwatersheds in Richmond Hill, Ontario. Water Quality Research Journal of Canada, 2004, 39(4): 392-405.

- [10] McNett J K, Hunt W F, Osborne J A. Establishing storm-water BMP evaluation metrics based upon ambient water quality associated with benthic macroinvertebrate populations. *Journal of Environmental Engineering*, 2010, 136(5): 535-541.
- [11] Yang R R, Cui B S. A wetland network design for water allocation based on environmental flow requirements. *Clean - Soil, Air, Water*, 2012, 40(10): 1047-1056.
- [12] Toet C, Hvitved-Jacobsen T, Yousef Y A. Pollutant removal and eutrophication in urban runoff detention ponds. *Water Science and Technology*, 1990, 22(10/11): 197-204.
- [13] Knox A K, Dahlgren R A, Tate K W, Atwill E R. Efficacy of natural wetlands to retain nutrient, sediment and microbial pollutants. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(5): 1837-1846.
- [14] Chen H J. Surface-flow constructed treatment wetlands for pollutant removal: applications and perspectives. *Wetlands*, 2011, 31(4): 805-814.
- [15] 何丽君, 马邕文, 万金泉, 李东亚, 王艳. 新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究. *环境科学*, 2012, 33(3): 817-824.
- [16] 尹炜, 李培军, 叶闽, 韩小波, 余秋梅, 雷阿林. 复合潜流人工湿地处理城市地表径流研究. *中国给水排水*, 2006, 22(1): 5-8.
- [17] 单保庆, 陈庆锋, 尹澄清. 塘-湿地组合系统对城市旅游区降雨径流污染的在线截控作用研究. *环境科学学报*, 2006, 26(7): 1068-1075.
- [18] 唐宁远, 车伍. 城市雨水处理设施规模确定方法分析. *给水排水*, 2009, 35(11): 43-48.
- [19] 欧阳威, 王玮, 郝芳华, 宋凯宇, 王云慧. 北京城区不同下垫面降雨径流产污特征分析. *中国环境科学*, 2010, 30(9): 1249-1256.
- [20] 张亚东, 车伍, 刘燕, 李俊奇. 北京城区道路雨水径流污染指标相关性分析. *城市环境与城市生态*, 2003, 16(6): 182-184.
- [21] 侯立柱, 丁跃元, 冯绍元, 张书函, 陈建刚, 廖日红. 北京城区不同下垫面的雨水径流水质比较. *中国给水排水*, 2006, 22(23): 35-38.
- [22] 尹澄清. 城市面源污染的控制原理和技术. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [23] 方松林, 曹盼宫. 折流式人工湿地对矿区降雨径流的净化研究. *水土保持研究*, 2017, 24(5): 126-131.
- [24] 王明宇. 城市雨水湿地水力特性及水质控制效果研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2016.
- [25] 舒朝会, 马邕文, 何丽君, 万金泉, 王艳. 城市降雨径流人工湿地处理的效能研究. *环境工程学报*, 2011, 5(6): 1305-1309.