

DOI: 10.5846/stxb201902230337

李想, 邱青. 暴雨和缓冲带特征对城市滨水缓冲带雨洪消减与水质净化效果的影响机制. 生态学报, 2019, 39(16): - - .

Li X Di Q. The influence mechanism of stormwater reduction and water purification of urban riparian buffer strip on different stormwater and buffer strip conditions. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): - - .

暴雨和缓冲带特征对城市滨水缓冲带雨洪消减与水质净化效果的影响机制

李 想^{1,2,*}, 邱 青³

1 北京大学建筑与景观设计学院, 北京 100871

2 中国城市规划设计研究院, 北京 100044

3 中国建筑设计研究院有限公司, 北京 100044

摘要:通过设置多组实验,模拟不同暴雨径流及缓冲带条件,对城市滨水缓冲带在不同暴雨雨型、历时、重现期、缓冲带坡度、植被覆盖度、初期冲刷等条件下的径流削减和水质净化作用进行研究。得出在不同实验条件下,滨水缓冲带的雨量动态径流系数结果在 0.29—0.55 之间。分析实验结果发现缓冲带对峰型靠前、历时较短、重现期短的暴雨径流削减效果更好,同时更平缓与植被覆盖度更高的缓冲带对径流的削减效果更佳。模拟实验显示,径流中不同污染物去除率范围分别为:SS 为 66.41%—90.29%、TN 为 44.48%—64.90%、NH₃-N 为 32.72%—63.68%、TP 为 89.83%—95.04%、COD 为 34.32%—66.23%。缓冲带的径流水质净化效果在应对不同暴雨雨型时未显示明显规律,而缓冲带对中高浓度径流污染物削减率更高能够应对较强的初期冲刷效应。同时更平缓与植被覆盖度更高缓冲带,即表流流速更缓慢时,显示出更好的径流净化效果。

关键词:滨水缓冲带;暴雨;径流消减;水质净化

The influence mechanism of stormwater reduction and water purification of urban riparian buffer strip on different stormwater and buffer strip conditions

LI Xiang^{1,2,*}, DI Qing³

1 College of Architecture and Landscape Architecture of Peking University, Beijing 100871, China

2 China Academy of Urban Planning and Design, Beijing 100044, China

3 China Architecture Design and Research Group, Beijing 100044, China

Abstract: This simulation study investigated the function of riparian buffer strips in reducing rainstorm-runoff and purifying pollutants under various conditions of rainstorm types, durations, recurrence periods, slopes of the riparian buffer strip, vegetation coverage, and first flush. Simulation of rainstorm-runoff and buffer strip conditions indicated that the pluviometric runoff coefficient of the riparian buffer strip ranged from 0.29 to 0.55. The riparian buffer strip function in reducing rainstorm-runoff worked better when storm duration was short, and the recurrence period was long. The reduction of rainstorm-runoff was also better when the buffer strips had gentle slopes and good vegetation cover. Pollutant removal rates were: suspended solids 66.41%—90.29%, total nitrogen 44.48%—64.90%, ammonia nitrogen 32.72%—63.68%, total phosphorus 89.83%—95.04%, and chemical oxygen demand 34.32%—66.23%. There is no clear trend of riparian buffer strip's purifying function in different storm types. The riparian buffer strip can purify first flush because of the higher reduction rate to high concentration runoff pollutants. In addition, the riparian buffer strip purifies better when the surface

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51678002);国家重点研发计划(2016YFC0401108)

收稿日期:2019-02-23; **网络出版日期:**2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lixiang@caupd.com

flow velocity is slower.

Key Words: riparian buffer strip; stormwater; runoff reduction; purification

城市化过程中的产业聚集、人口集中等现象不断促进着城市建设,这在一定程度上造成了自然环境的破坏^[1-3],其中雨洪问题是突出的热点问题。近年来,北京、武汉、深圳等地都曾出现内涝现象。暴雨径流除了容易引发城市内涝外,还是造成城市水污染的重要原因之一^[4]。大量研究表明,城市道路中的径流污染物是造成地表径流污染的主要来源^[5],其中污染物来源包括水土流失、行人、施工、大气污染、轮胎磨损、防冻剂使用、车辆泄露、杀虫剂和肥料等污染物^[6-7]。污染成分包括有机或无机化合物、氮、磷、金属、油类等^[8-10]。

为了应对城市雨洪及水污染问题,2013年,国务院办公厅发布的《关于做好城市排水防涝设施建设工作的通知》提到推行低影响开发建设模式,减少对城市原有水生态环境的干扰,建设配套雨水径流渗流、收集利用等削峰调蓄设施^[11]。2014年,住房和城乡建设部发布了《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》用于指导海绵城市建设。这些相关法规和条例的颁布标志着生态雨洪管理思想已经受到管理层面的重视。

在世界现有的可持续雨水减控净化技术体系中,美国的低冲击开发(LID)、澳大利亚的水敏性城市设计(WSUD)、英国的可持续排水系统(SUDS)都是较为成熟的技术体系^[12-14]。在此基础上,俞孔坚^[15]提出了海绵城市的三大关键策略:消纳、减速和适应,并从哲学层面上提出了完全生态系统价值观、就地解决水问题、分散式民间工程、蓄滞而非排泄、弹性应对等思想^[16-17]。

滨水缓冲带是城市水体与建成区之间的边界地带,同时也是构建“海绵城市”理论和技术体系,发挥生态雨洪管理功能的重要绿色基础设施^[18]。然而目前,城市河道建设存在很多误区,滨水景观设计没有将可持续雨洪管理纳入设计考虑,对雨水仍然采用简单的工程排水措施,在季风气候区年降雨分布不均的条件下,雨季面临巨大的雨洪危险,并且滨水地区作为城市建成区和水体之间的过渡区,也没能成为应对暴雨径流带来的面源污染的防线。在滨水缓冲带的众多功能中,对雨洪的减控和净化作用在解决当前城市雨洪问题中最为重要^[19]。

滨水缓冲带对地表径流的减控作用主要包括两方面:一方面是植物地表部分的阻挡作用,缓冲带植被根系能够维持土壤,地上部分的根茎能够提高地表阻力,有效控制地表径流流速防止径流侵蚀^[20]。另一方面是土壤的下渗作用和植被根系的吸收作用,相比于硬质堤岸,缓冲带有利于地表水下渗并补给地下水,然后通过地下水来补给河流,这种方式的回补速度比地表径流直接流入河水要缓慢很多^[21]。因此对于控制暴雨径流可能带来的城市雨洪以及旱季维持河流水位有着非常重要的作用。

河湖滨水缓冲带能够对暴雨径流中的固体悬浮物、氮、磷等污染物有一定去除作用^[22]并保护水环境^[23],其对于污染物的主要去除机理是降低径流的流速,增加污染物在缓冲带中的停留时间,通过滨岸带植被-土壤-微生物复合系统的渗透、沉积、吸收、吸附以及微生物分解等作用过程消减进入河湖的化肥、农药等污染物和沉积物。对于固体悬浮物、重金属、营养盐的平均去除率可分别达到70%以上、20%—50%和10%—30%^[24]。

国外学者的研究从缓冲带对农田面源污染的削减效应开始,主要针对去除化肥和农药中的污染物进行实验研究,其中包括氮、磷以及农药中的其他有毒物质。在多年研究中,对滨水缓冲带不同的土壤、植被、气候等要素使缓冲带对污染物去除效率的差异做了非常丰富的定量实验^[25-28]。相对国外相关研究,国内学者对缓冲带径流减控和净化作用的研究开始相对较晚,但也有相当丰富的成果,其中缓冲带对于农业面源污染中的氮、磷等污染物的去除成果较为丰富^[29-32],目前针对城市滨水缓冲带径流减控及污染物去除的研究较少,且主要集中在单一少数几个影响因子^[33-34]。此外,国内学者通过控制变量研究缓冲带单因子的影响方面也取得了一定研究成果^[35-37]。总体来看,国内外学者对于城市滨水缓冲带径流减控及污染物的多个要素的控制

变量实验研究,特别是对于暴雨特征要素的影响相对较少。

本研究通过在实验场地搭建模拟暴雨径流装置与缓冲带模拟装置,对暴雨特征(雨强、重现期、历时)、缓冲带特征(坡度、植被盖度)等对缓冲带径流减控净化效果进行量化研究。其中径流减控效应通过实验结果计算动态径流系数来量化;径流净化效果的影响机制则通过检测悬浮物(SS)、总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、生物需氧量(BOD)、化学需氧量(COD_{Mn})等污染物的削减系数来研究。

1 实验设计

1.1 雨型雨量

本实验针对北京地区降雨特点模拟暴雨径流。结合雨强、历时、重现期、上方坡面径流区面积等参数,根据北京市降雨状况与实验设备条件综合考虑,选取重现期分别为 1 a、5 a 和 20 a 三个暴雨强度,以及前峰、中峰、后峰 3 个雨型条件下 5 a 重现期的暴雨进行模拟。

综合考虑北京市降雨雨型、降雨公式以及实验模拟条件,选择 Keifer 和 Chu 雨型(即芝加哥雨型)作为本实验的设计雨型,并代入北京暴雨公式参数,得到不同时段降雨量(表 1)。

表 1 基于北京暴雨公式下 1h 前峰雨型重现期为 1a、5a、20a 的暴雨各阶段降雨量
Table 1 Based on the Beijing rainstorm formula, the 1-hour-rainfall front peak in 1a, 5a and 20a

序号 Order	时段 Time/min	0—12	12—24	24—36	36—48	48—60
1	重现期 1a 分段降雨量/mm	17.12	7.39	4.81	3.61	2.93
2	重现期 5a 分段降雨量/mm	26.83	11.59	7.53	5.66	4.58
3	重现期 20a 分段降雨量/mm	34.25	16.41	11.28	8.80	7.32
4	前峰雨型分段降雨量/mm	26.83	11.59	7.53	5.66	4.58
5	中峰雨型分段降雨量/mm	5.12	9.56	26.83	9.56	5.12
6	后峰雨型分段降雨量/mm	4.58	5.66	7.53	11.59	26.83
7	时段/min	0—6	6—12	12—18	18—24	24—30
	0.5h 分段降雨量/mm	17.29	9.54	6.57	5.02	4.08
8	时段/min	0—12	12—24	24—36	36—48	48—60
	2h 分段降雨量/mm	26.83	11.59	7.53	5.66	4.58
	时段/min	60—72	72—84	84—96	96—108	108—120
	2h 分段降雨量/mm	3.88	3.38	3.01	2.72	2.49

计算汇水量需利用上方坡面径流区面积,已知缓冲带面积的情况下可以使用缓冲带有效面积比来计算上方坡面径流区面积。本实验选择有效面积比 5:1 进行实验设计。

根据实验设备所构建的缓冲带面积为 10 m²。缓冲带有效面积比为 5:1,汇水面积取 50 m²,由于能够汇水并将水倒入滨水缓冲带的上方坡面径流区多为绿地和林带,因此在计算水泵功率的时候,径流系数取 0.15。

由降雨量、上方汇水面积和径流系数可以计算所需水泵功率(表 2)。

根据上述需要,本实验选用输入电源 110—220 V、50/60 Hz、输出功率为 8—48 W 可调节功率水泵,共 8 个档位。

1.2 污染物配置

根据相关研究和实验对暴雨径流污染物浓度进行配置。模拟径流中的污染物分别通过现场收集泥沙,葡萄糖、氯化铵、硝酸钾、过磷酸钙等化学试剂,按照高低负荷中污染物比例来进行调配(表 3)。

1.3 场地搭建

缓冲带模拟装置采用长 5 m、宽 1 m 的两个可移动、可调节高度和坡度的金属槽组成,分别撤掉两个槽的下端和上端挡板,用一个长 0.8 m、宽 1 m 的金属槽将两个主体金属槽相连,形成一个长 10.8 m、宽 1 m 的金属槽,顶端设置有挡板(图 1),下端设置有收水漏斗(图 1),漏斗高度与土壤厚度一致,以收集地表径流。金属

槽下端分布有间隔 20 cm×20 cm,直径为 1 cm 的孔洞,可收集入渗的径流。根据实验需求,可使用液压调节金属槽坡度。

表 2 模拟 1h 前峰雨型重现期为 1a、5a、20a 暴雨径流水泵功率表

Table 2 The simulated 1hour-front-peak-rain type recurrence period in 1a, 5a and 20a power meter for storm runoff pump						
序号 Order	时段 Time/min	0—12	12—24	24—36	36—48	48—60
1	重现期 1a 分段泵水流量/(L/h)	642.06	277.28	180.26	135.51	109.71
2	重现期 5a 分段泵水流量/(L/h)	1006.03	434.46	282.44	212.33	171.90
3	重现期 20a 分段泵水流量/(L/h)	1284.29	615.25	422.93	329.99	274.55
4	前峰暴雨分段泵水流量/(L/h)	1006.03	434.46	282.44	212.33	171.90
5	中峰暴雨分段泵水流量/(L/h)	192.12	358.45	1006.03	358.45	192.12
6	后峰暴雨分段泵水流量/(L/h)	171.90	212.33	282.44	434.46	1006.03
7	时段/min	0—6	6—12	12—18	18—24	24—30
	0.5h 分段泵水流量/(L/h)	648.21	357.82	246.21	188.25	153.02
8	时段/min	0—12	12—24	24—36	36—48	48—60
	2h 分段泵水流量/(L/h)	1006.03	434.46	282.44	212.33	171.90
	时段/min	60—72	72—84	84—96	96—108	108—120
	2h 分段泵水流量/(L/h)	145.50	126.84	112.91	102.09	93.41

表 3 不同负荷污染物设计浓度及所需化学试剂用量

Table 3 Designed concentration with different pollutants load and the dosage of reagent					
设计含量 Design concentration	固体悬浮物 Suspended solid	化学需氧量 Chemical oxygen demand	氨氮 Ammonia nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	总磷 Total phosphorus
低负荷 Low load/(mg/L)	100—200	100—200	3—5	5—10	0.5—1
高负荷 High load/(mg/L)	300—500	400—600	10—15	20—30	2—3
调配原料(有效质量比) Effective mass ratio	泥土(—)	葡萄糖(0.6)	氯化铵(0.264)	硝酸钾(0.139)	过磷酸钙(0.265)
高负荷/低负荷/g Mass low load/high load	300—500/ 100—200	666.67—1000/ 166.67—333.33	37.88—56.82/ 11.36—18.94	143.88—215.83/ 35.97—71.94	7.55—11.32/ 1.89—3.77
总质量 g/421—585L(高负荷) Total mass	150—250	300—500	19—29	36—54	4—6



图 1 模拟缓冲带设备照片

Fig.1 Device of simulation buffer strip

在金属槽中填入北京地区棕壤,使其均匀沉降并适当调整使土壤厚度达到 40 cm,下端与漏斗持平。根据实验需求种植植被覆盖度为 100%的高羊茅草皮,并养护两周以上,保证草皮长势良好(图 1),在完成植被覆盖度为 100%的实验后,可铲除一部分高羊茅,满足其他植被覆盖度对照组实验。

1.4 实验组设计

实验标准条件为:5 a 一遇 1 h 前峰雨型,径流浓度为低负荷,坡度 5°,植被盖度 100%(表 4)。

表 4 实验组条件设置
Table 4 Condition setting of experimental group

实验序号 Order	坡度 Slope/(°)	宽度/m Width	草种类型 Grass species	植被覆盖度 Grass coverage/%	土壤类型 Soil type	污染物浓度 Pollutant load	重现期 Recurrence periods/a	雨型 Rain type	暴雨历时 Duration/h
1-1	5	10	高羊茅	100	褐土	高负荷	5	前峰	1
1-2	5	10	高羊茅	100	褐土	高负荷	5	后峰	1
1-3	5	10	高羊茅	100	褐土	高负荷	5	中峰	1
2-1	5	10	高羊茅	100	褐土	高负荷	1	前峰	1
2-2	5	10	高羊茅	100	褐土	高负荷	20	前峰	1
3-1	5	10	高羊茅	100	褐土	高负荷	5	前峰	0.5
3-2	5	10	高羊茅	100	褐土	高负荷	5	前峰	2
4-1	2	10	高羊茅	100	褐土	高负荷	5	前峰	1
4-2	10	10	高羊茅	100	褐土	高负荷	5	前峰	1
4-3	15	10	高羊茅	100	褐土	高负荷	5	前峰	1
5-1	5	10	高羊茅	70	褐土	高负荷	5	前峰	1
6-1	5	10	高羊茅	100	褐土	初期低负荷, 中后期高负荷	5	前峰	1

1.5 实验运行说明

本实验包括多组模拟暴雨径流实验,每组模拟实验在前期准备阶段对径流模拟装置和缓冲带模拟装置进行设置后,实验进行的过程基本一致。具体过程如下:

- (1)测量实验地环境数据,包括温度、空气湿度、风向等。测量土壤数据,包括土壤温度、湿度。
- (2)根据表 1 所需降雨量输入实验所需水量储存在容器中,根据表 3 使用电子秤(精度为 0.01 g)称取相应质量的污染物,加入实验容器,搅拌使其浓度均匀。
- (3)将水泵连接电源,根据实验所模拟的雨型和雨量调节档位,与输水管最高点高度来控制出水流量。每过 12 min 按照表 2 中选取的设计功率调节档位。
- (4)在缓冲带模拟装置中部(5 m 处),前 30 min,每隔 5 min 收集一次下渗径流水样;30—60 min,每隔 15 min 收集一次水样;60 min 以后至径流结束 30 min 收集一次水样,并做标记。在装置下部(10 m 处),每隔 5 min 收集一次下渗径流水样;30—60 min,每隔 15 min 收集一次水样;60 min 以后至径流结束 30 min 收集一次水样,并做标记。
- (5)在缓冲带末漏斗处,自地表径流开始后每隔 5 min 用量杯与秒表计算出水口径流流速,前 30 min,每 5 min 进行一次测速;30—60 min,每 15 min 进行一次测速;60 min 以后至径流结束 30 min 进行一次。
- (6)设计雨型模拟完成后 30 min 内继续收集雨水。
- (7)实验结束后 5 h 内将收集的水样进行冷藏,24 h 内送至有检测资质的相关单位对水样中的固体悬浮物(SS)、总氮(TN)、氨氮(NH₃-N)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)进行检测。

2 结果与讨论

2.1 暴雨径流和缓冲带特征对径流削减量的影响

不同实验影响因子条件下缓冲带入口及出口径流流速间关系如图 2 所示(小图右上为实验序号),实验 6-1 不涉及径流削减量,因此无对应结果。

不同实验影响因子条件下暴雨径流系数如表 5 所示,实验 6-1 不涉及径流系数、径流出现时间及峰值延后时间研究,因此无对应结果。

2.1.1 暴雨雨型的影响

如图 2 所示,缓冲带在前峰、中峰、后峰雨型入口与出口水量的变化趋势相同。

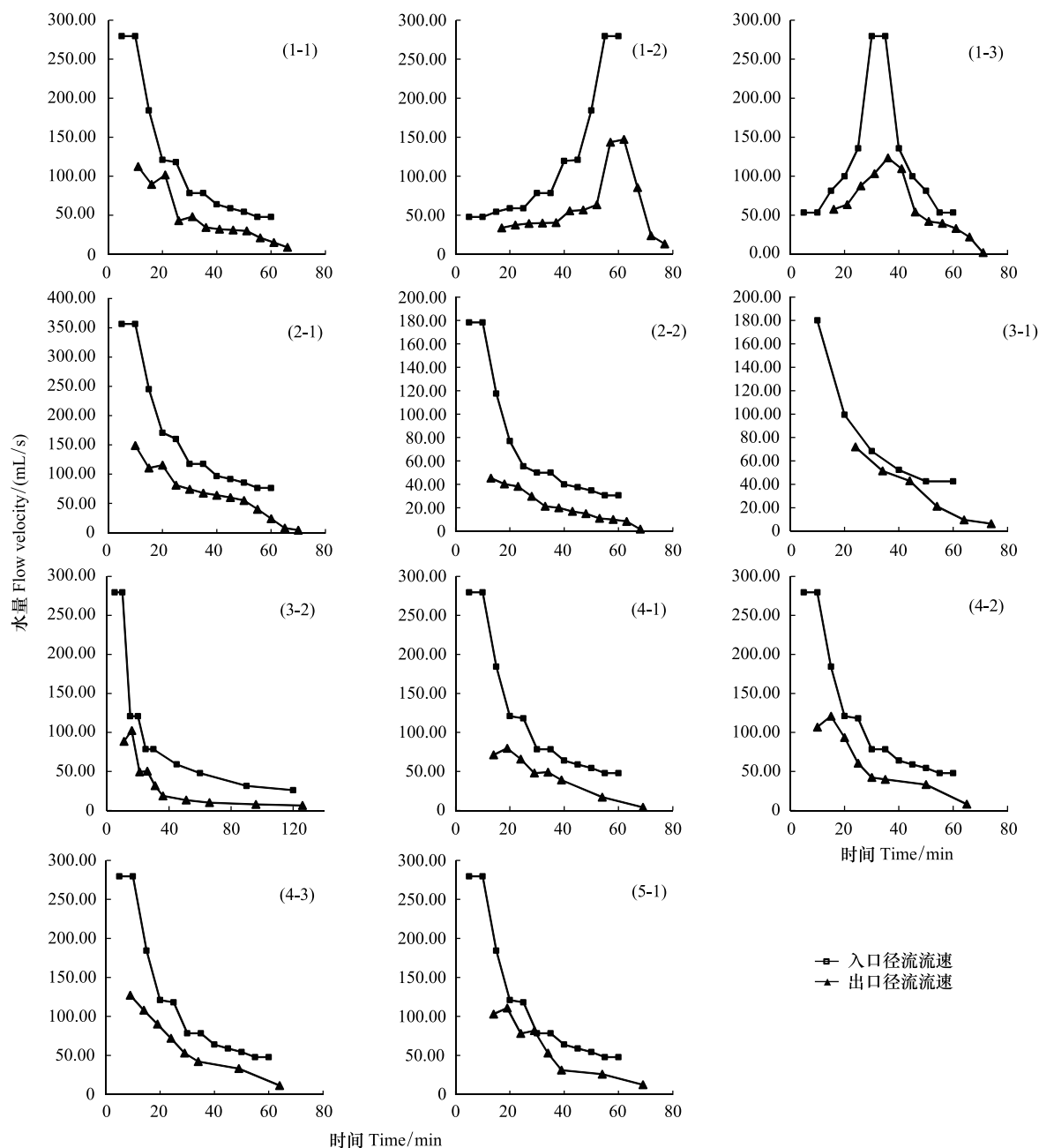


图2 不同实验影响因子条件下缓冲带入口及出口径流流速

Fig.2 Flow velocity at inlet and outlet of buffer strips under different experimental factors

通过比较 5 a 一遇雨量的前峰、中锋、后峰降雨雨型与雨量径流系数的关系,如表 5 所示,前峰雨型的平均雨量径流系数最小 0.40,其次是中锋雨型为 0.52,后峰雨型的平均径流系数最大达到 0.55,流量径流系数^[18]与雨量径流系数^[18]呈现相同的规律。即滨水缓冲带在前峰雨型的条件下对暴雨径流的削减效果最强。此外三种雨型条件下缓冲带的径流出现时间前峰条件下最早,中锋后峰暴雨径流在暴雨开始后出现径流的时间较长,但前峰雨型下,缓冲带对径流峰值的延后效果要好于中锋和后峰雨型。

2.1.2 不同重现期暴雨径流的影响

通过比较前峰雨型重现期 1 a、5 a、20 a 模拟暴雨径流实验结果,计算雨量径流系数的关系,如表 5 所示,重现期为 1 a 时平均雨量径流系数最小 0.29,其次是重现期为 5 a 为 0.40,重现期为 20 a 时的平均雨量径流系数最大达到 0.44,流量径流系数与雨量径流系数呈现相同的规律。即滨水缓冲带在重现期为 1 a 的条件下对

暴雨径流的削减效果最强。此外三种重现期下缓冲带的径流出现时间 20 a 一遇条件下最早,5 a 一遇和 1 a 一遇暴雨径流在暴雨开始后至出现径流的时间较长,但暴雨重现期为 20 a 一遇时,缓冲带对径流峰值的延后效果要好于 5 a 一遇和 1 a 一遇雨型。

表 5 不同实验影响因子条件下暴雨径流系数
Table 5 Storm runoff coefficient under different experimental factors

实验序号 Order	影响因子 Experimental factors		流量径流系数 Discharge runoff coefficient	雨量径流系数 Pluviometric runoff coefficient	出口径流出现时间 Occurrence time of outlet runoff since experiment start/min	峰值延后时间 Peak delay time/min
1-1	雨型	前锋	0.50	0.40	6	11
1-2		后锋	0.59	0.55	12	2
1-3		中峰	0.57	0.52	11	6
2-1	重现期	1 a	0.37	0.29	8	13
1-1		5 a	0.50	0.40	6	11
2-2		20 a	0.53	0.44	5	10
3-1	暴雨历时	0.5 h	0.57	0.42	7	12
1-1		1 h	0.50	0.40	6	11
3-2		2 h	0.45	0.34	6	11
4-1	缓冲带坡度	2°	0.42	0.32	9	14
1-1		5°	0.50	0.40	6	11
4-2		10°	0.57	0.43	5	10
4-3		15°	0.60	0.46	4	9
5-1	植被盖度	70%	0.56	0.42	5	10
1-1		100%	0.50	0.40	6	11

2.1.3 暴雨历时的影响

通过比较前峰雨型暴雨历时为 0.5 h、1 h、2 h 模拟暴雨径流实验结果,计算雨量径流系数的关系,如表 5 所示,暴雨历时为 0.5 h 时平均雨量径流系数最大,为 0.42,其次是暴雨历时为 1 h 时,为 0.40,暴雨历时为 2 h 时的平均雨量径流系数最小,为 0.34,流量径流系数与雨量径流系数呈现相同的规律。即滨水缓冲带在重现期相同的条件下,在暴雨历时越长是削减效果最强。此外三种暴雨历时下缓冲带的径流出现时间基本相同,历时为 0.5 h 实验由于水泵换挡为 6 min 一次,与模拟 1 h、2 h 暴雨相比,变化时间区间更小,对雨型模拟相对更为精确,因此出现一定误差。在三种历时下径流峰值推迟时间也基本相同,误差出现原因与径流出现时间相同。

2.1.4 缓冲带坡度的影响

通过比较前峰雨型重现期 5 a 模拟暴雨径流实验结果,计算缓冲带坡度为 2°、5°、10°、15°时平均径流系数的关系,如表 5 所示,应对相同暴雨径流时,缓冲带坡度为 2°时平均雨量径流系数最小 0.32,随缓冲带模型坡度逐渐提升,平均雨量径流系数逐渐升高为 0.40、0.43、0.46 流量径流系数与雨量径流系数呈现相同的规律。即滨水缓冲带在坡度较小的时候,对雨水的滞留作用最强,并且能够更好地推迟径流峰值出现的时间。总体来看,缓冲带坡度的变化对平均径流系数、径流出现时间、峰值延后时间的影响非常明显。

2.1.5 缓冲带植被盖度的影响

通过比较缓冲带植被盖度为 70%和 100%条件下模拟暴雨径流实验结果,计算平均径流系数,如表 5 所示,植被盖度为 70%时,平均雨量径流系数较大为 0.42,植被盖度为 100%时为 0.40。平均流量径流系数规律与雨量径流系数呈现相同规律。即滨水缓冲带在植被盖度较高的时候,对雨水的滞留作用较强,并且能够更好地延迟径流峰值出现的时间。

2.2 暴雨径流特征对污染物削减量的影响

模拟实验结果中不同暴雨类型下污染物的削减率如表 6 所示。

表 6 不同暴雨类型下污染物的削减率
Table 6 Reduction rate of pollutants in different rainstorm types

实验序号 Order	影响因子 Experimental factors		固体悬浮物/% Suspended solid	总氮/% Total nitrogen	氨氮% Ammonia nitrogen	总磷/% Total phosphorus	化学需氧量/% Chemical oxygen demand
1-1	雨型	前峰	85.69	56.88	48.97	93.92	50.40
1-2		后峰	79.76	52.59	40.18	89.83	34.32
1-3		中峰	87.68	52.61	36.92	91.50	36.33
2-1	重现期	1a	70.74	44.48	57.50	94.41	57.39
1-1		5a	85.69	56.88	48.97	93.92	50.40
2-2		20a	77.78	46.85	32.72	95.04	53.38
3-1	暴雨历时	0.5h	76.44	60.93	46.98	94.19	55.82
1-1		1h	85.69	56.88	48.97	93.92	50.40
3-2		2h	79.72	60.76	63.67	94.44	63.87
6-1	初期冲刷	实验组	74.35	33.50	27.92	87.24	44.85
1-1		对照组	85.69	56.88	48.97	93.92	50.40

2.2.1 暴雨雨型的影响

如表 6 所示,对各种污染物平均削减率比较,表流缓冲带对 TP 的去除率较高,对 COD 的去除率较低,不同雨型下表流中每种污染物的去除率差异不大。其中对于 SS 的去除率在 79%—88%之间,前峰与后峰状态下缓冲带去除能力较强,中峰去除能力较差。TN 去除率在 52%—57%之间,不同雨型状态下去除能力差别不大。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率呈现一定差别,前峰雨型状态下 $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率比中峰状态下高出 20.44%。缓冲带对 TP 的净化率位于 88.69%—97.46%之间,对 COD 的去除率在 34%—51%之间。分析实验结果,不同雨型条件主要体现在达到径流峰值流速时缓冲带水质净化条件的不同,缓冲带水质净化效果在不同暴雨雨型条件下未显示明显规律。

2.2.2 不同重现期暴雨径流的影响

如表 6 所示,表流中 TP 去除率较高,但本组实验中 TN 平均去除率略低于 COD, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率在三种条件下差异较大。其中,缓冲带对 SS 的去除率为 5 a 一遇最高,明显大于 1 a 一遇和 20 a 一遇的实验数据。TN 的去除率在 44.48%—56.88%之间,在重现期为 5 a 时削减率平均值最高。对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均削减率在不同重现期下差别较大,1 a 一遇条件下比 20 a 一遇条件下高 24.78%。TP 的平均削减率差别较小,三种不同的重现期条件下在 93.92%—97.58%之间。COD 的削减率在 50.40%—57.39%之间,同样差别较小。分析实验结果,不同重现期暴雨主要体现在瞬时径流流速的不同,缓冲带水质净化效果在不同条件下未显示明显规律。

2.2.3 暴雨历时的影响

如表 6 所示,对平均去除率结果进行比较分析,表流中 TP 去除率较高与其他组实验相同,本组实验中 TN 平均去除率与 COD 相似, $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率在 3 种条件下差异较大。其中,缓冲带对 TN 的去除率在 56.88%—60.93%之间,暴雨历时为 0.5 h 时削减率平均值最高。对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的平均削减率历时 2 h 暴雨径流实验结果较大,比历时 0.5 h 和 1 h 高 16.69%和 14.70%。TP 的平均削减率差别较小,三种不同的重现期条件下在 93.92%—94.44%之间。COD 的削减率在 50.40%—63.87%之间。分析实验结果,不同重现期暴雨主要体现在总径流量的不同,缓冲带水质净化效果在不同暴雨历时条件下未形成明显规律。

2.2.4 初期冲刷条件下对缓冲带的影响

由表 6 可以看出,初期冲刷组各污染物平均削减率明显低于对照组污染物平均削减率。由于初期冲刷实

验组前 12 min 使用高浓度径流污染物配比,后 48 min 使用低浓度。对照组全程使用高浓度径流污染物配比。因此处理污染物总量不一致因此削减率均值有所差异。

分析实验结果,缓冲带对高浓度径流污染物削减率较高,因此对于初期冲刷中的各类污染物能够发挥较好的去除作用。随着降雨进行,污染物浓度逐渐降低,缓冲带对于污染物的去除率也有所下降。

2.3 缓冲带特征对污染物削减量的影响

2.3.1 缓冲带坡度的影响

如表 7 所示,不同缓冲带坡度的表流中 SS、TN、NH₃-N 和 TP 平均削减率在都呈现出相同的变化规律:当坡度较小时,表流中此四种污染物平均削减率较高,随坡度逐渐升高,这四类污染物的平均削减率逐渐下降,当坡度为 15°时,这四类污染物在表流中的平均削减率最低。COD 平均削减率呈现不同的大小关系,为 2°>10°>5°>15°。COD 平均削减率与另外四类污染物平均削减率变化有差异,但此规律有待一进步实验。分析此结果,缓冲带坡度较缓时,表流流速较慢且流量较少,地表植被及土壤能够更加充分地吸附污染物,因此污染物削减率较高。

表 7 不同缓冲带特征下污染物的消减率
Table 7 Reduction rate of pollutants in different riparian buffers

实验序号 Order	影响因子 Experimental factors		固体悬浮物/% Suspended solid	总氮/% Total nitrogen	氨氮/% Ammonia nitrogen	总磷/% Total phosphorus	化学需氧量/% Chemical oxygen demand
4-1	坡度	2°	90.29	64.90	62.16	94.80	66.23
1-1		5°	85.69	56.88	48.97	93.92	50.40
4-2		10°	72.41	53.19	42.73	92.50	55.84
4-3		15°	66.41	50.57	37.65	91.98	45.93
5-1	植被盖度	70%	76.84	47.20	35.67	91.25	41.28
1-1		100%	85.69	56.88	48.97	93.92	50.40

2.3.2 缓冲带植被盖度的影响

不同缓冲带植被盖度的表流中 SS、TN、NH₃-N、TP 和 COD 平均削减率在都呈现出相同的变化规律:当植被盖度较小时,表流中此五种污染物平均削减率较低,当植被盖度较高时,这五种污染物的平均削减率逐渐升高。分析实验结果,可能是由于植被盖度较高时,草本植被地表部分对污染物有一定吸附作用,并且植被盖度较高时,表流流速较慢,径流中的污染物与土壤、植被接触时间较长,因此削减率越高。

3 结论与展望

本研究通过控制变量实验,对暴雨和缓冲带特征对城市滨水缓冲带雨洪消减与水质净化效果的影响机制进行研究,主要得到以下结论:

(1)在不同峰型、暴雨重现期、暴雨历时、缓冲带坡度、缓冲带植被覆盖度条件下,滨水缓冲带在不同组实验所得的雨量动态径流系数结果在 0.29—0.55 之间。

(2)各种要素对 10 m 人工模拟缓冲带径流削减产生的效果为暴雨峰型影响。按芝加哥雨型雨峰位置($0 \leq r \leq 1$)越大,雨量径流系数越大。暴雨重现期($1 \leq a \leq 20$)越长,雨量径流系数越小。暴雨历时越长(0.5—2 h),雨量径流系数越小。缓冲带坡度(2°—15°)越高,雨量径流系数越大。植被覆盖度(70%—100%)越高,雨量径流系数越大。

(3)在不同峰型、暴雨重现期、暴雨历时、缓冲带坡度、缓冲带植被覆盖度条件下,不同污染物去除率范围分别为:SS 为 66.41%—90.29%、TN 为 44.48%—64.90%、NH₃-N 为 32.72%—63.68%、TP 为 89.83%—95.04%,COD 为 34.32%—66.23%。其中缓冲带水质净化作用在不同暴雨特征下未显示明显规律,此规律有待设置更多实验条件进一步探究。而缓冲带坡度越平缓,植被覆盖度越高,在这两个条件下,表流流速都较慢,

对暴雨径流水质净化效果更好。

(4) 模拟实验中通过调配不同浓度(前期高负荷,中后期低负荷)污染物径流模拟高浓度和低浓度模拟初期冲刷效应,对比组为高负荷。实验说明当暴雨径流中污染物浓度较低时,污染物削减率越低。即缓冲带对高浓度污染物径流能发挥较强水质净化能力。

本实验通过较为全面的暴雨径流条件模拟及缓冲带特征模拟探究缓冲带对暴雨径流的削减和水质净化作用,初步探究了各影响因子的作用规律。滨水缓冲带作为重要的城市绿色基础设施,其生态作用值得进一步进行实验探究,并建议通过增加更多实验条件,科学全面地构建滨水缓冲带对径流削减和水质净化作用的模型,为不同城市的绿色基础设施规划建设提供更为有力的支撑。

参考文献(References):

- [1] 吴良镛. 21 世纪建筑学的展望——“北京宪章”基础材料. 建筑学报, 1998, (12): 4-12, 65-65.
- [2] 约翰·R·罗根, 朱宇姝. 解读中国的快速城镇化问题. 景观设计学, 2015, 3(5): 12-25.
- [3] 涂先明, 吴霄, 蒋涤非. 解读中国城市乱象. 景观设计学, 2014, 2(5): 74-78.
- [4] 陈庆锋. 武汉市动物园面源污染控制技术及其机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.
- [5] 何卫华, 车伍, 杨正, 李世奇, 吕放放. 城市绿色道路及雨洪控制利用策略研究. 给水排水, 2012, 38(9): 42-47.
- [6] 张媛. 兰州市区地表径流污染初探[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [7] 周丽. 福州市中心城区降雨径流污染研究[D]. 福州: 福州大学, 2010.
- [8] 曹宏宇. 上海临港新城主城区地表径流污染特性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2013.
- [9] 闫静. 呼和浩特市路面径流污染特点及控制方案研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2014.
- [10] 王家元. 城市径流雨水溶解性有机质特征及其与典型重金属的作用机制研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.
- [11] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于做好城市排水防涝设施建设工作的通知. 北京: 国务院办公厅, 2016.
- [12] 于立, 单锦炎. 西欧国家可持续性城市排水系统的应用. 国外城市规划, 2004, 19(3): 51-56.
- [13] 车生泉, 谢长坤, 陈丹, 于冰沁. 海绵城市理论与技术发展沿革及构建途径. 中国园林, 2015, 31(6): 11-15.
- [14] 杨潇涵. LID 低影响开发的城市雨水管理方法综述. 现代园艺, 2018, (18): 167-167.
- [15] 俞孔坚. 海绵城市的三大关键策略: 消纳、减速与适应. 南方建筑, 2015, (3): 4-7.
- [16] 俞孔坚. “海绵”的哲学. 景观设计学, 2015, 14(2): 4-9.
- [17] 俞孔坚. 复兴古老智慧, 建设绿色基础设施. 景观设计学, 2018, 6(3): 6-11.
- [18] 李骁. 基于低影响开发的滨河缓冲带景观设计研究[D]. 北京: 北京农学院, 2017.
- [19] 程昌锦, 丁霞, 胡璇, 郭雯, 张建, 雷刚, 漆良华. 滨水植被缓冲带水质净化研究. 世界林业研究, 2018, 31(4): 13-17.
- [20] Peterjohn W T, Correll D L. Nutrient dynamics in an agricultural watershed: observations on the role of a riparian forest. Ecology, 1984, 65(5): 1466-1475.
- [21] 王东胜, 朱瑶. 岸边缓冲带生态功能及其建设的理论//第三届全国水力学与水利信息学大会论文汇编. 南京: 中国水利学会, 2007.
- [22] 钱进, 王超, 王沛芳, 侯俊. 河湖滨岸缓冲带净污机理及适宜宽度研究进展. 水科学进展, 2009, 20(1): 139-144.
- [23] Lowrance R, Altier L S, Newbold J D, Schnabel R R, Groffman P M, Denver J M, Correll D L, Gilliam J W, Robinson J L, Brinsfield R B, Staver K W, Lucas W, Todd A H. Water quality functions of riparian forest buffers in Chesapeake bay watersheds. Environmental Management, 1997, 21(5): 687-712.
- [24] 赵雯, 管岩岩. 河流缓冲带的功能与基本恢复原则. 山东林业科技, 2008, 38(4): 89-91.
- [25] Lowrance R, Sheridan J M. Surface runoff water quality in a managed three zone riparian buffer. Journal of Environmental Quality, 2005, 34(5): 1851-1859.
- [26] Schoonover J E, Williard K W J, Zaczek J J, Mangun J C, Carver A D. Nutrient Attenuation in agricultural surface runoff by riparian buffer zones in southern Illinois, USA. Agroforestry Systems, 2005, 64(2): 169-180.
- [27] Sabater S, Butturini A, Clement J C, Burt T, Dowrick D, Hefting M, Matre V, Pinay G, Postolache C, Rzepecki M, Sabater F. Nitrogen removal by riparian buffers along a European climatic gradient: patterns and factors of variation. Ecosystems, 2003, 6(1): 20-30.
- [28] Lee K H, Isenhardt T M, Schultz R C, Mickelson S K. Multispecies riparian buffers trap sediment and nutrients during rainfall simulations. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(4): 1200-1205.
- [29] 周子尧, 吴永波, 余昱莹, 杨静. 河岸杨树人工林缓冲带对径流水中磷素截留效果的研究. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2019, 43(2): 100-106.

- [30] 付婧,王云琦,马超,王玉杰,梁丹. 植被缓冲带对农业面源污染物的削减效益研究进展. 水土保持学报, 2019, 33(2): 1-8.
- [31] 汤家喜,何苗苗,王道涵,曾祥峰,李仁杰,应博. 河岸缓冲带对地表径流及悬浮颗粒物的阻控效应. 环境工程学报, 2016, 10(5): 2747-2755.
- [32] 刘宏伟,梁红,高伟峰,沈海龙,高大文. 河岸缓冲带不同植被配置方式对重金属的净化效果. 土壤通报, 2018, 49(3): 727-735.
- [33] 白莹莹,江洪,饶应福,蔡永立. 临港新城河岸人工植被缓冲带对氮、磷的去除效果. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(5): 108-113, 132-132.
- [34] 陈冬霞,刘宏伟,梁红,沈海龙,高大文. 几种草本植物对面源微污染重金属的净化能力. 农业环境科学学报, 2017, 36(12): 2500-2505.
- [35] 吴建强. 不同坡度缓冲带滞缓径流及污染物去除定量化. 水科学进展, 2011, 22(1): 112-117.
- [36] 李世锋. 关于河岸缓冲带拦截泥沙和养分效果的研究. 水土保持科技情报, 2003, (6): 41-43.
- [37] 王敏,黄宇驰,吴建强. 植被缓冲带径流渗流水量分配及氮磷污染物去除定量化研究. 环境科学, 2010, 31(11): 2607-2612.