

绿地系统处理屋面雨水中污染物的性能研究

刘茵¹, 张龙², 张琪³, 李洋², 王旭冕⁴, 张建锋⁴

(1. 西安建筑科技大学设计研究总院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 总务处, 陕西 西安 710055;

3. 济南市市政工程设计研究院(集团)有限责任公司 青岛分院, 山东 青岛 266000;

4. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 开展屋面初期雨水径流污染消减是构建城镇社区中低影响开发雨水系统的重要内容之一, 通过强化绿地系统的污染物截留效率, 可以实现对屋面降雨初期高污染负荷的原位控制. 本文在搭建的绿地实验装置中, 研究了绿地中流程、坡度和植草密度等因素对雨水径流中污染物的去除效果, 结果表明: 最佳条件下, 绿地系统对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、SS、TN、COD 的去除率分别为 54%~62%、71%~74%、90%~95%、34%~51% 和 54%~73%; 植草和绿肥可以降低土壤中的交换态 Al^{3+} 的含量, 从而降低向径流雨水中投加铝系混凝剂对植物及土壤带来的潜在毒害. 本文提出的强化绿地系统对屋面初期雨水具有较好的净化效果, 可为目前城市中低影响雨水系统的构建提供参考.

关键词: 绿地系统; 混凝; 初期雨水径流; 污染物

中图分类号: TU998.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)01-0132-06

Performance evaluation of urban lawn system in controlling the pollutants in roof runoffs

LIU Yin¹, ZHANG Long², ZHANG Qi³, LI Yang², WANG Xumian⁴, ZHANG Jianfeng⁴

(1. Architectural Design and Research Institute, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. General Affairs Office, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

3. Jinan Municipal Engineering Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Jinan 266000, China;

4. School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Great attention has been paid to the reduction of large quantities of pollutants in first-flush runoff during the practices of a low-impact development (LID) stormwater management in urban communities. Through enhancing of the pollutant removal efficiency by a urban lawn system, the in-situ control of the high load of the pollutants in first-flush runoff during the initial rainfall on the roof was expected to be feasible. In the current research, an experimental device of green lawn was established to investigate the removal performance of some main pollutants in the rainwater runoff. The various key influencing factors including the runoff flow distance, slope and grass density in the lawn were investigated. Results indicated that under the optimal experimental conditions, the removal efficiencies of $\text{NH}_3\text{-N}$, SS, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and CODcr were 37.1%~60.0%, 49.6%~67.6%, 37.7%~44.6%, 34.3%~46.4% and 36.2%~47.9%, respectively. The treatments of grass planting and green manure could reduce the exchangeable Al contents in the soil by the intruding of aluminum-based coagulants in runoff rainwater, resulting in the reduction of the potential toxicity of Al to ecosystem. Herein, the strengthened lawn system demonstrated a satisfactory purification effect on the first-flush runoff on the roof, thus the proposed technique could provide a helpful strategy for the practices of LID rainwater systems in the urban residential communities.

Key words: urban lawn system; coagulation; first-flush runoff; pollutants

近年来, 伴随我国城镇化进程的加速, 城市下垫面的特性发生了巨大改变, 不透水地面不断增大、降雨形成的径流量增加, 导致城市雨洪灾害频发, 城市中自然水文循环也遭到破

坏^[1]。同时,在我国西北地区,城市发展过程中普遍面临着水资源总量不足、降水年际分布不均匀等发展瓶颈问题^[2]。因此,在缺水地区构建基于低影响开发理念下的城镇雨水系统,对于城镇雨洪径流控制、涵养雨水资源、改善城市水生态功能具有重要作用^[3-5]。城市生态系统中重要组成部分的绿地,在维持生态系统的平衡和稳定、促进城市水循环、削减水体中污染物等方面作用显著。因此,结合城市绿地开展雨水径流污染消减具有现实的迫切性。

在以往研究中,Reeves 等人监测发现:草沟长度对雨水径流中污染物的去除效果影响显著,且污染物去除率与植草沟长度呈正相关^[6]。Barrett 等人报道了在美国得州奥斯汀地区,道路中央的植被分隔带对雨洪径流中重金属污染物的削减作用明显^[7]。肖海文发现:植草沟对径流中的 SS、氮、磷和有机物等污染物消减明显^[8]。张晓菊等人通过在实验室中搭建下凹式绿地装置,研究发现下凹式绿地对径流污染物有较好的控制效果^[9]。李建平等研究发现:水平高渗透、垂直高渗透、组合高渗透等 3 种高渗透下凹绿地中径流流量显著降低、截污能力突出^[10]。

在这些研究基础上,本文提出了采用强化绿地截留的技术来削减屋面初雨中的高负荷污染物的技术路线,利用楼宇落水管中的水流重力势能完成混凝剂投加,在绿地的流动过程中完成絮凝体的沉淀和截留,从而实现屋面降雨初期径流中高负荷污染物的原位控制。研究成果可为目前开展的城市绿地系统建设提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验所用装置如图所示(图 1),种植土壤取自校区绿地表 0.30 m 以上。装置可调节倾角为 5°、10°、15°,对应坡度为 8.7%、17.6% 和 26.8%。设雨水收集罐及加药泵,置于模拟绿地装置上方 1.5 m 处,通过管道完成混凝剂 PAC 与雨水的充分混合。

种植土壤的性质:水淋出液 pH 值 7.3,土壤比表面积 8.01 m²/g,渗透系数 5.7×10⁻⁷ m/s,土壤容重 1.31 g/cm³。用掺和细沙调节土壤结构以调整渗透系数,在模拟绿地系统装置内种植土层采用 7:3 的土砂混合比、层厚为 100 mm。根据实际情况选择本土典型绿化植物早熟禾和高羊茅,

初始种植密度为(3.5 g 早熟禾+10.0 g 高羊茅)/m² 混种。

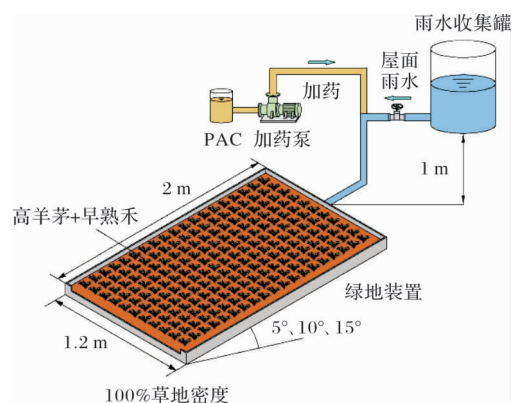


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test apparatus

1.2 种植土层及植草的选择

1.3 降雨径流采样及水质监测方法

采样点为西建大环工楼南侧的落水管,径流水质监测时采用 1.0 L 雨水收集罐;在水处理实验时,采用 1.0 m³ 雨水存储罐收集屋面雨水。水样采集之后立即带回实验室检测,指标包括 SS、COD_{Cr}(以下简称为 COD)、TN、TP、NH₃-N 共 5 个指标,将水样反复震荡摇匀,直接测量浊度并换算为 SS 值;水样用 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤后按照《水和废水监测分析方法(第四版)》进行其他指标检测。

1.4 实验步骤

采用加药泵向雨水存储罐出水管中加入不同剂量的混凝剂,经过 1.5 m 长管道混合后流入实验草地,在模拟草地装置末端采集表层径流水,分析污染物浓度。绿地系统中可变实验因素包括绿地长度、坡度以及植被覆盖率。

2 研究结果与分析

2.1 屋面雨水的水质特征

2018—2019 年五场降雨过程中屋面雨水的监测结果见图 1。结果表明:径流中的污染物随着时间的延长呈下降趋势并逐渐趋于平缓,终值接近于空中落雨的污染物浓度。从几种主要污染指标的变化来看,径流形成后 30 min 内的污染负荷大致占总污染负荷的 34.3%~67.6%。因此,在文中屋面初期雨水指降雨历时 30 min 以内的屋面径流。

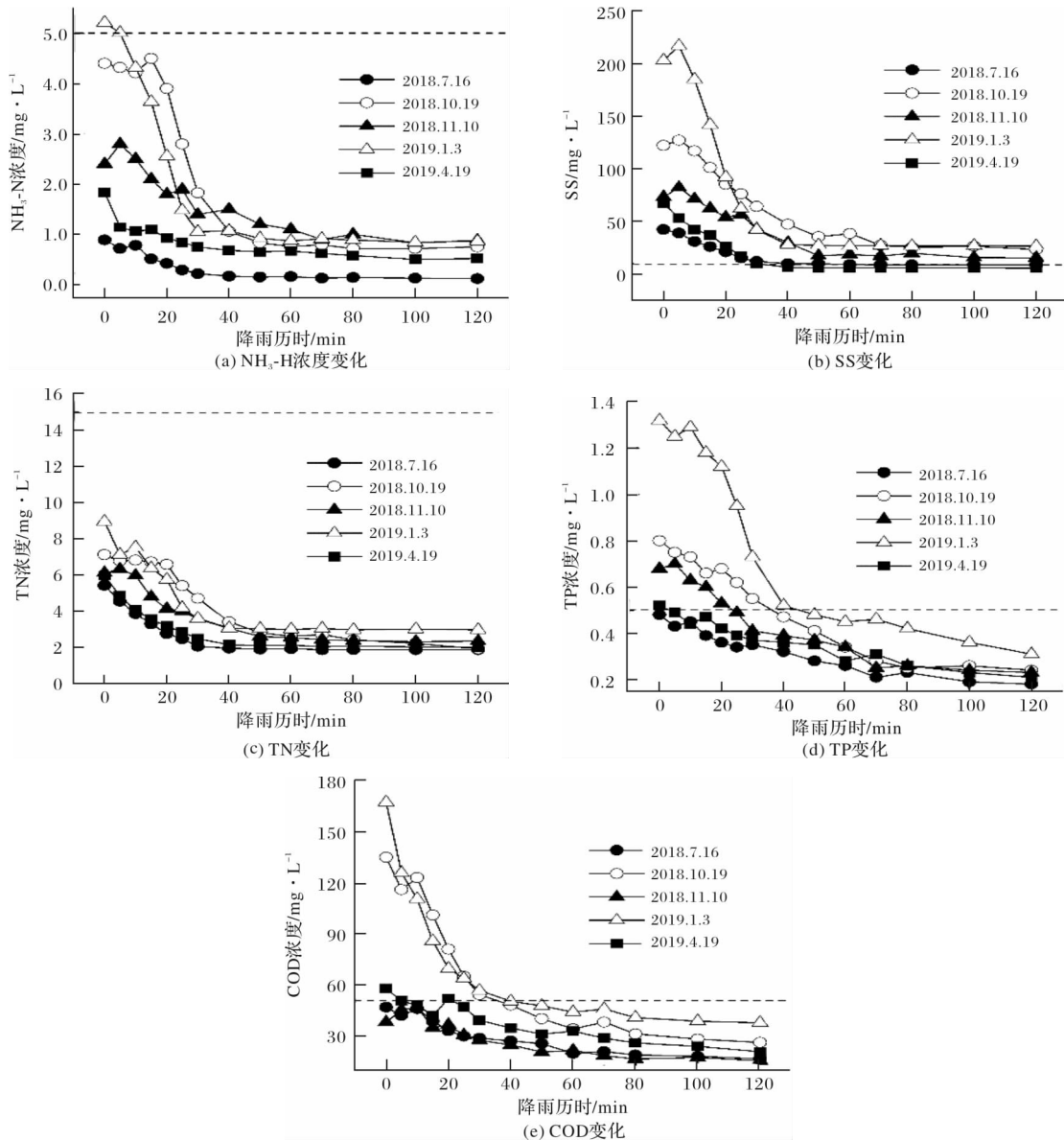


图 2 屋面径流中(a)NH₃-N、(b)SS、(c)TN、(d)TP、(e)COD 浓度随降雨历时的变化

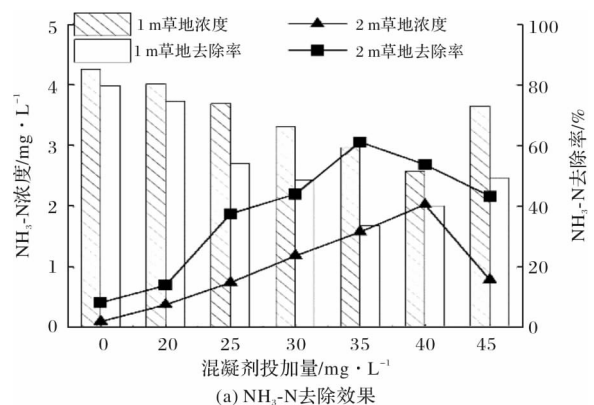
Fig. 2 The concentration of (a)NH₃-N, (b)SS, (c)TN, (d)TP and (e) COD with runoff process

鉴于目前没有雨水排放的国家标准,从受纳水体的角度可参照《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)中的一级 A 标准(以下简称“一级 A 标”),对于 NH₃-N、SS、TN、TP、COD 的限值分别为 5.0、10、15、0.5、50 mg/L。从降水的水质情况来看,屋面初期雨水中的浊度(为 SS 替换指标)、TP 和 COD 超标严重。应用实践表明,混凝处理技术可以有效降低污水中的浊度、TP 及 COD。多组混凝实验表明:与硫酸铝、聚合硫酸铁、明矾而言,聚合氯化铝(PAC)的混凝效果为最佳;多组混凝实验表明,PAC 的最佳投药量为 25~35 mg/L。在后续实验中均采用 PAC 混凝剂。

2.2 草地长度对屋面径流雨水污染物的去除

收集初期雨水经混合均匀后,水质指标:

NH₃-N、TP、SS、TN、COD 浓度分别为 4.35、0.83、91、4.35、82 mg/L,其中 TP、SS 和 COD 均超一级 A 标准。调整草地装置坡度为 8.7%,覆盖率为 100%,分别在草地长度为 1 m 和 2 m 处取样。结果见图 3。



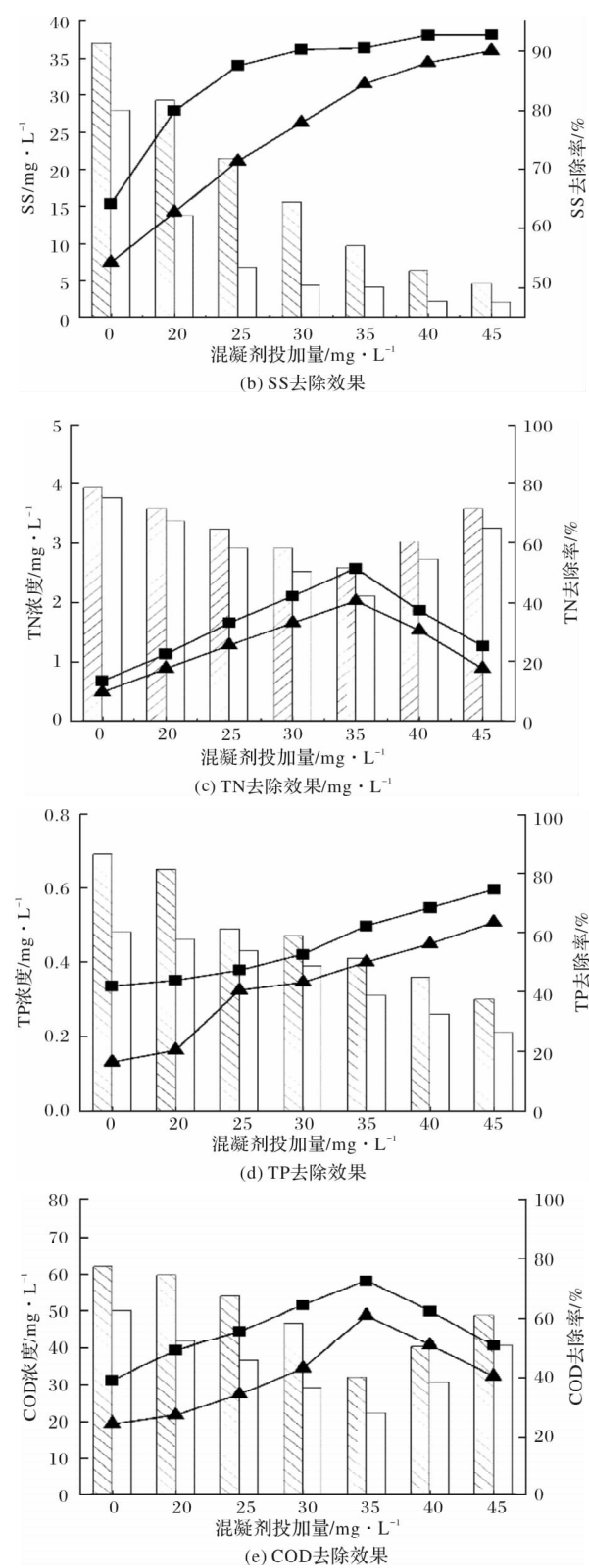


图 3 草地长度对屋面径流雨水污染物的去除效果
Fig. 3 Effect of flow distance on the removal of contaminants in roof runoff

由图 3 可以看出, 草地出水径流中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、浊度、TN、COD 污染物浓度经过混凝以及草地的截留及净化作用都有所降低. 草地长度为 1.0 m 条件下, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、SS、TN、COD 污

染物浓度分别为 2.58~3.65、0.30~0.41、4.57~9.70、2.59~3.58、32.00~48.90 mg/L, 均满足一级 A 标; 草地长度 2 m 处出水的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、浊度、TN、COD 污染物浓度分别为 1.69~2.46、0.21~0.31、2.12~4.12、2.11~3.25、22.30~40.50 mg/L, 五项指标进一步得到消减. 因此草地中流程的增加可以提升对水中污染物的消减效果. 考虑到城镇社区中绿化布置的特征, 楼宇周边小面积绿地系统的原位处理效果显著. 另外, 混凝剂存在最佳投加量的优化可能, 因此在实践应用中应配合处理效果确定混凝剂的投量.

2.3 草地坡度对屋面径流雨水污染物的去除

在目前的城镇社区低影响雨水系统构建过程中, 结合楼宇周边散水衔接绿地的特征, 绿地系统微地形调整, 在保证雨水散排效果的同时, 也具有一定的景观效果. 实验原水水质监测结果表明, 水质 TP、SS、COD 为超标项. 草地装置长度为 2 m, 覆盖率为 100%, 分别通过坡度为 8.7%、17.6% 和 26.8% 的草地, 实验结果见表 1.

表 1 不同坡度条件下草地系统处理效果
Tab. 1 The removal of typical contaminants with slope degree of green lawn

实验条件	$\text{NH}_3\text{-N}/$ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	SS/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	COD/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
原水	4.13	0.88	88	6.31	89.86
坡度	8.7%	1.56~	0.26~	2.09~	2.95~
		2.41	0.35	4.26	41.34
	17.7%	2.03~	0.39~	3.23~	3.63~
		2.89	0.49	5.17	5.18
	26.8%	2.97~	0.56~	3.50~	4.23~
		3.09	0.64	10.60	5.59
一级 A 标准	5.0	0.5	10	15	50

结果表明, 3 种不同坡度草地出水径流中五项污染物浓度经过混凝以及草地的截留及净化作用都有所降低, 流经草地坡度为 8.7% 时的出水浓度最低, 可以达到处理目标. 随着坡度越大草地截留效果越差, 在 17.6% 条件下, COD 超标; 在 26.8% 条件下, TP、SS 和 COD 均无法保证可靠的处理效果. 因此, 草地坡度变化对草地削减地表径流污染物效果具有较大的影响. 在现行的《绿地设计规

范》(DG T J08-15-2009), 城镇社区内景观绿地的设计坡度为 3%~30%; 在《城市绿地设计规范》GB 50420-2007 提出:“城市绿地的竖向设计应以总体设计布局及控制高程为依据, 营造有利于雨水就地消纳的地形并应与相邻用地标高相协调, 有利于相邻其他用地的排水。”从屋面初期雨水污染物原位控制的角度, 建议在雨水落水管出口附近的绿地, 在设计和建设过程中尽量考虑采用小的坡度, 以提升污染物截留效果。

2.4 草地覆盖率对屋面径流雨水污染物的去除

调整草地装置长度为 2 m, 坡度为 8.7%, 收集初期雨水经混合均匀, 加药混凝后分别通过草地覆盖率为 100%、60% 和 30% 的草地。表 2 说明, 对于所测径流各污染物指标, 流经草地覆盖率为 100% 时的浓度最低, 草地覆盖率越小出水浓度越大。因此, 在构造绿地系统时, 植草密度的确定在满足景观效果的前提下, 尽量密植可以有效提升草地对雨水径流中污染物的截留效果。

表 2 不同覆盖率条件下草地系统处理效果

Tab. 2 The removal efficiency of several contaminants with coverage ratio of grass to soil

实验条件	NH ₃ -N/ mg · L ⁻¹	TP/ mg · L ⁻¹	SS/ mg · L ⁻¹	TN/ mg · L ⁻¹	COD/ mg · L ⁻¹
原水	3.90	0.87	73	7.05	81.01
覆盖率	100%	1.53~	0.23~	2.17~	3.35~
		1.87	0.36	5.34	5.49
	60%	2.38~	0.37~	8.13~	4.15~
		2.76	0.42	24.2	5.74
	30%	2.77~	0.52~	10.70~	4.56~
		2.98	0.60	32.9	6.18
一级 A 标准	5.0	5.0	0.5	10	15

2.5 土壤中铝含量变化情况

土壤中的铝通常以难溶性硅酸盐或氧化铝的形式存在, 对植物没有毒害。但在 pH<5 的酸性土壤条件下, 难溶性铝易转变为有毒的离子态铝(如 Al³⁺), 对植物产生毒害。

图 4 表明, 实验期间由于径流雨水携带混凝剂 PAC 后流经草地, 使得草地土壤溶液中交换态 Al³⁺ 含量从 0.03 增加至 0.36 mg/L, 但在实验结束后的 80 d 内, 连续取样测量发现土壤溶液中 Al³⁺ 含量已降低至 0.05 mg/L, 基本已恢复至本底值。

研究表明: 在低 pH、高铝土壤中通过植草、施用绿肥可降低土壤中活性铝的浓度, 原因在于草和绿肥有利于土壤中腐殖质大量积累, 土壤中腐殖质、特别是胡敏酸的形成与富集是土壤中铝毒迅速降低的关键因素。胡敏酸分子量大、聚合度高, 与铝络合成的盐类溶解度低, 使得铝活性含量降低^[13]。

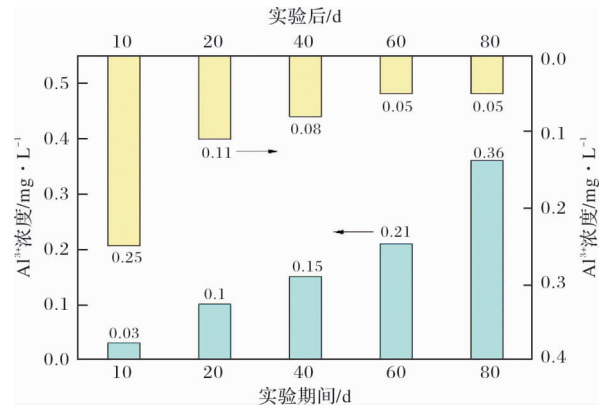


图 4 土壤溶液中交换性铝 (Al³⁺) 的浓度变化

Fig. 4 The concentration of exchangeable Aluminum (Al³⁺) in soil with time

3 结论

本文利用模拟装置研究了绿地系统中草地长度、坡度及草覆盖率对 COD、TN、SS、TP、NH₃-N 等典型径流污染物去除率的影响, 结果表明:

(1) 屋面径流的“初期雨水”特征明显, 径流形成的最初 30 min 以内污染负荷占整个降雨历时总污染负荷的 34.3%~67.6%。初雨污染负荷的消减是开展面源控制的重点, PAC 混凝剂的投加可以有效改善初期雨水中污染物在草地中的截留效果;

(2) 以《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)中的一级 A 标准为目标, 实验研究揭示: 1) 草地长度对草地削减屋面雨水径流污染物效果具有较大的影响, 长度与污染物去除效率正相关, 实验条件下仅 1.0 m 的草地即可实现处理目标; 2) 草地坡度与污染物截留效率成反比, 在满足景观要求的前提下, 在城镇社区绿地建设中尽量采用小坡度; 3) 应及时维护草地, 维持一定的植草密度, 以提升草地系统对屋面初雨中污染物的截留效率;

(3) 植草和绿肥可以降低土壤中的交换态 Al³⁺ 的含量, 从而降低由于铝基 PAC 的投加产生的对植物及土壤的潜在毒害。

采用混凝配合绿地系统实现对城镇社区中楼宇屋面初期雨水高负荷污染物的截留,后期清洁雨水直接溢流进入雨水口,这一系统对于控制城区面源径流污染具有显著效果,应该是未来城镇社区构建低影响雨水系统的可行技术之一。

参考文献 References

- [1] 郑鑫. 昆明市城市绿地系统对雨水径流相关污染削减及调蓄效应研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2013.
ZHENG Xin. Study on the effect of rainfall runoff pollution reduction and storage of Kunming urban green space[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology. 2013
- [2] 王家福. 绿地系统处理城市雨水径流的实验研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2013.
WANG Jiafu. Experimental study om the treatment of urban green space on the rainwater runoff [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University. 2013
- [3] 周国华, 完颜华, 祝丽思. 西北地区城镇化建设中雨水利用探讨[J]. 地质灾害与环境保护, 2006(4): 97-100.
ZHOU Guohua, WANYAN Hua, ZHU Lisi. Study of rainwater utilization on unbunization construction in northwest China[J]. Journal of geological hazards and environment preservation, 2006(4): 97-100.
- [4] 金云霄, 吴长航. 城市雨水资源利用现状与发展趋势[J]. 平顶山工学院学报, 2005, 14(2): 25-26.
JIN Yunxiao, WU Changhang. Status quo and development of using city rainwater resource[J]. Journal of Pingdingshan Institute of Technology. 2005, 14(2): 25-26
- [5] MIKKELSEN P S, ADELER O F, ABRECHTSSEN H J, et al. Collected rainfall as a water source in danish households-what is the potential and what are the costs? [J]. Elsevier Science, 1999, 39(5): 49-56.
- [6] REEVES E. Performance and condition of biofilters in the Pacific Northwest[J]. Watershed Protection Techniques, 1994, 1(3): 117-119.
- [7] MICHAEL E. BARRETT. Performance of vegetative controls for treating highway runoff[J]. Journal of Environmental Engineering, 1998, 124(11): 1121-1128.
- [8] 曾思育, 董欣. 城市降雨径流污染控制技术的发展与实践[J]. 给水排水, 2015, 51(10): 1-3.
ZENG Siyu, DONG Xin. Development and practice of urban rainfall runoff pollution control technology[J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 51(10): 1-3.
- [9] 张晓菊, 董文艺. 下凹式绿地径流污染控制与径流量消减影响因素分析[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(2): 113-117.
ZHANG Xiaoj, DONG Wenyi. Influential factors of runoff pollutant control and volume reduction for low-lying grassland[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(2): 113-117.
- [10] 李建平, 林川, 韦玮, 等. 高渗透下凹绿地对自然降雨径流及污染的削减效能[J]. 江苏水利, 2018, 259(11): 10-17.
LI Jianping, LIN Chuan, et al. Reduction efficiency of natural rainfall runoff and pollution by concave green space under high permeability. Jiangsu water resources [J]. 2018, 259(11): 10-17.
- [11] 彭勃. 塘西河初期雨水径流混凝净化处理探究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2015.
PENG Bo. Research of thecogulation purification treatment initial rainwater runoff of the Tangxi river [D]. Hefei: Hefei University of Technology. 2015
- [12] SPOSITOG. The chemistry of soils[M], England London: Oxford University Press, 2008.

(编辑 沈 波)