

城市绿地削减降雨地表径流污染效应的试验研究

程江^{1,2}, 杨凯^{2*}, 吕永鹏², 李博², 吕淑华²

(1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 2. 华东师范大学资源与环境科学学院, 上海市城市化生态过程和生态恢复重点实验室, 上海 200062)

摘要: 针对城市降雨地表径流造成的非点源污染已成为城市收纳水体水质恶化和生态退化的主要因素这一现状, 利用室内土壤柱模拟城市绿地对典型降雨地表径流污染的削减效应, 研究土地覆被、径流污染物浓度、土层厚度以及水力负荷与停留时间对污染削减率的影响。结果表明, 在低、中和高3种典型降雨地表径流污染浓度水平(COD为44.5、144.3、487.2 mg·L⁻¹; NH₄⁺-N为4.27、11.44、36.61 mg·L⁻¹; TP为0.98、2.85、9.66 mg·L⁻¹), 8.15、7.13和6.12 cm·h⁻¹的进水负荷持续1 h条件下, 城市绿地的污染削减能力良好、稳定, 对照组对COD、NH₄⁺-N和TP的平均削减率分别达到33.41%~37.14%、58.74%~61.49%和63.65%~67.08%; 受复氧能力和水力停留时间的限制, 绿地覆被植物对污染物削减率的影响不明显; 随着降雨地表径流污染浓度水平的增加, 绿地的污染综合削减率保持在50%~60%左右, 略有增大趋势; 绿地对降雨地表径流污染的削减主要发生在深度50~70 cm的土层之上。

关键词: 城市绿地; 地表径流; 污染物; 削减

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)11-3236-07

Experimental Study on Rainfall-Runoff Pollutant Reduction by Urban Green Space

CHENG Jiang^{1,2}, YANG Kai², LÜ Yong-peng², LI Bo², LÜ Shu-hua²

(1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Key Laboratory of Urbanization and Ecological Restoration, School of Resources and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Based on the state that non-pointed pollution caused by urban rainfall-runoff was one of the major factors which led to urban surface water contaminated and ecology deteriorated, a soil aquifer treatment system was built to experimentally study the pollution reduction effectiveness of green space, and the impacts of land cover, influent concentration, soil depth, hydraulic loading rate and residence time were analyzed. The results exhibit that green space has a better and stabilized ability to reduce three representative urban rainfall-runoff pollution concentrations, which COD are 44.5, 144.3, 487.2 mg·L⁻¹, NH₄⁺-N are 4.27, 11.44, 36.61 mg·L⁻¹ and TP are 0.98, 2.85, 9.66 mg·L⁻¹, respectively, and with 8.15, 7.13 and 6.12 cm·h⁻¹ hydraulic loading rate, respectively. The pollution reduction rates of COD, NH₄⁺-N and TP by green space are 33.41%-37.14%, 58.74%-61.49% and 63.65%-67.08%, respectively. The effect of land cover to pollution reduction rate is not significant because of the limitation of oxygen and hydraulic residence time. When pollution concentration increases, the comprehensive pollution reduction ability of green space is kept in 50%-60%, with a little increased tendency. Pollution reduction process happens mainly in the upper layer of the green space soil with a depth of 50-70 cm.

Key words: urban green space; rainfall-runoff; pollution; reduction

城市降雨径流污染是一种典型的非点源污染, 主要指城市地表污染物在降雨的淋洗、径流冲刷作用下, 通过地表径流过程进入相邻受纳水体造成的水体污染^[1]。在点源污染被逐渐控制之后, 城市降雨地表径流造成的非点源污染在全球范围内已成为城市水环境污染和生态退化的重要因素, 是河流与湖泊的第三大污染源^[2]。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, 使得传统的控制技术较难达到污染控制目的^[3]。近20年来, 以人工快速渗滤系统^[4]、土壤含水层处理系统^[5,6]以及人工湿地系统^[1,7]为代表的污水土地处理系统研究得到较大发展^[8,9]。城市绿地(green

space), 或称开放空间(open space), 作为城市生态系统的重要组分, 亦属于广义的土地处理系统。近年来, 虽然国内城市绿地面积不断扩大且增长迅速, 但在城市绿地的规划、设计及建设中, 对绿地削减地表径流污染物的作用重视不足。

由于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, 同时土壤层中水样难以便捷采集, 因此本研究采用取原状

收稿日期: 2008-12-09; 修订日期: 2009-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871016); 上海市科委基地研究重点项目(08JC1408800)

作者简介: 程江(1977~), 男, 博士后, 主要研究方向为城市水资源与水环境, E-mail: jcheng@sklec.ecnu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: kyang@re.ecnu.edu.cn

城市绿地于室内进行模拟削减城市降雨地表径流污染试验的方法,探索了城市绿地在削减城市地表径流污染中的可行性和有效性,分析了土地覆被、径流污染物浓度、土层厚度、水力负荷与停留时间等因素对污染净化效果的影响,以期为深入研究城市绿地对降雨地表径流污染的削减机制,提高其污染削减效率及推广应用提供参考.

1 材料与方法

1.1 试验装置

于上海华东师范大学校园内,分层不扰动取原状绿地土壤,置高 125 cm、内径 25 cm 和壁厚 10 mm 的有机玻璃柱中.其中土壤柱高 115 cm,上部预留 10 cm 作为蓄水空间.土壤类型为轻壤土,暗黄棕色,容重 $1.295\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,土壤平均粒径 $28.20\text{ }\mu\text{m}$.试验分无覆被植物和有覆被植物对照组.其中无覆被植物组土壤表层原始无覆被植物,对照组的覆被植物为多年生麦冬(*Ophiopogon japonicus*),植株高度约 30 cm,根茎长度约 25 cm.由小流量恒流泵控制降雨径流量,并通过布水盘均匀布洒人工配置的城市降雨径流.在表层土壤以下 10、30、50、70、90 和 115 cm 处分别设置水样采集口(图 1).

1.2 运行条件

试验进水采用人工配置污水,称取 1.00 g 淀粉、0.50 g 白沙糖、2.50 g 磷酸氢钠、4.50 g 硫酸铵、2.00 g 尿素、1.00 g 蛋白胨、0.80 g 牛肉膏、

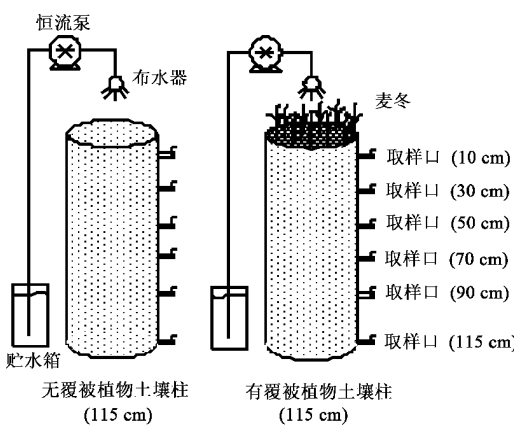


图 1 试验装置示意
Fig.1 Schematic diagram of experimental equipment

2.00 g 碳酸氢钠和 2.10 g 无水碳酸钠,溶于 1 L 蒸馏水中制成原液.借鉴法国、美国 and 国内北京、上海、澳门等城市不同下垫面类型形成的降雨径流的污染水平^[10-14],同时考虑 10 a 来上海城市地表水环境质量以及国家地表水环境 V 类标准,按 1:200、1:600 和 1:2 000 比例将原液稀释成如表 1 所示,低、中和高 3 种污染物浓度水平的人工城市降雨径流,pH 值控制在 7.5 左右.试验时间从 2006 年 10 月~2007 年 1 月.3 种污染物浓度水平下,对照组各重复进行 6 轮试验,每隔 24 h 进水、采样 1 次,详细水力负荷周期见表 2.试验期间装置靠窗布置,保持正常光照,室内平均气温在 15~22℃之间.

表 1 人工城市降雨地表径流污染浓度及分析方法
Table 1 Artificial urban rainfall-runoff pollution concentration and analytical method

水质指标	污染浓度等级	浓度范围 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	均值 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	V 类地表水标准 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	分析方法
COD	低	40.0~48.0	44.5	40.0	重铬酸钾法 (GB 11914-89)
	中	130.0~154.0	144.3		
	高	480.0~500.0	487.2		
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	低	3.93~4.53	4.27	2.0	纳氏试剂比色法 (GB 7479-87)
	中	10.68~13.97	11.44		
	高	34.84~38.29	36.61		
TP	低	0.97~0.98	0.98	0.4	钼酸铵分光光度法 (GB 11893-89)
	中	2.78~2.93	2.85		
	高	9.23~10.08	9.66		

1.3 水样采集与分析

用中国科学院南京土壤研究所产土壤溶液抽滤器采集各层位出水水样,其中抽吸管陶土头的表面

孔径 $< 3.0\text{ }\mu\text{m}$.选用 10 a 来上海城市河流水质主要污染因子中的 COD、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 TP 作为污染物分析指标,采用文献[15]方法分析,详见表 1.

表 2 试验绿地的污染负荷和水力周期

Table 2 Pollution load and hydraulic cycle of experimental green open space

覆被植物	污染物浓度	重复次数	进水量/mL	进水时间/h	淹没时间/h	落干时间/h	水力负荷/cm ² ·h ⁻¹	对应上海市区设计暴雨重现期下,相对于试验绿地的汇水面积倍数 ¹⁾			
								0.5 a	1 a	3 a	5 a
无	低/中/高	1	4 000	1	22	2	8.15	2.75	2.30	1.64	1.45
		3	3 500	1	22	2	7.13	2.41	2.01	1.44	1.27
		2	3 000	1	22	2	6.12	2.07	1.72	1.23	1.09
有	低/中/高	1	4 000	1	22	2	8.15	2.75	2.30	1.64	1.45
		3	3 500	1	22	2	7.13	2.41	2.01	1.44	1.27
		2	3 000	1	22	2	6.12	2.07	1.72	1.23	1.09

1) 上海市区 0.5、1、3 和 5 a 一遇的暴雨设计重现期下,1 h 累积降雨量分别为 26.9、35.5、49.6 和 56.3 mm

2 结果与讨论

2.1 试验结果

对低、中和高 3 种污染物浓度水平的城市降雨地表径流,城市绿地对污染物的削减试验结果(表 3)显示,无覆被植物试验组对 COD 的平均削减率分别为:34.97%、35.80%和 40.66%,略高于有覆被植物试验组 24.77%、38.75%和 36.72%的削减率.相

对于 COD 削减率,各污染物浓度水平下,NH₄⁺-N和 TP 的削减率均有不同程度的增加,无覆被植物组 NH₄⁺-N削减率分别为 66.32%、63.74%和 54.42%,有覆被植物组则为 41.66%、61.85%和 72.72%.同样污染物浓度水平,TP 削减率略高于 NH₄⁺-N,无植被组和有覆被植物组的削减率分别为 60.95%、58.66%、81.62%和 57.19%、64.54%、69.32%.

表 3 污染物削减率统计/%

Table 3 Pollution reduction rate statistic/%

水质指标	覆被情况	污染浓度	最大削减率	最小削减率	平均削减率	标准偏差	95%置信区间
COD	无	低	63.64	10.00	34.97	13.08	30.54 ~ 39.39
		中	53.25	14.48	35.80	8.96	32.77 ~ 38.84
		高	50.00	31.25	40.66	5.47	38.81 ~ 42.51
	有	低	41.56	11.66	24.77	7.74	22.15 ~ 27.39
		中	50.00	24.43	38.75	5.92	36.75 ~ 40.76
		高	44.62	27.27	36.72	4.23	35.29 ~ 38.15
NH ₄ ⁺ -N	无	低	81.53	43.36	66.32	8.86	63.32 ~ 69.32
		中	81.16	20.47	63.74	14.02	59.00 ~ 68.49
		高	72.98	24.65	54.42	11.27	50.61 ~ 58.24
	有	低	69.76	14.31	41.66	14.12	36.88 ~ 46.44
		中	75.23	42.99	61.85	9.14	58.76 ~ 64.95
		高	84.57	58.26	72.72	7.00	70.35 ~ 75.09
TP	无	低	98.97	11.34	60.95	28.05	51.55 ~ 71.12
		中	90.10	20.04	58.66	20.26	51.51 ~ 65.51
		高	90.49	43.63	81.62	8.70	78.68 ~ 84.56
	有	低	88.24	26.21	57.19	18.86	50.80 ~ 63.56
		中	89.87	37.50	64.45	9.06	61.39 ~ 67.51
		高	89.96	42.26	69.32	15.29	64.15 ~ 74.49

2.2 绿地覆被对污染物削减率影响

2.2.1 对 COD 削减影响

人工配置的降雨地表径流进入试验装置,并保持一定的淹没水位,此时的绿地相当于一个土壤含水层处理系统(soil aquifer treatment system, SATS)^[5],主要通过植物吸收利用、土壤基质吸附及基质内微生物三者共同作用达到净化水体中的有机物质的目

的^[16].有覆被植物组在 3 种污染物浓度水平下,COD 平均削减率为 33.41%,较对照组 37.14%的削减率约低 3.7%(表 3,图 2、图 3),*t* 检验显示两者不存在显著差异.这与某些研究者^[4,16,17]得出的有植物系统削减率高于无植物系统的结论存在一定差异.

这可能与对照试验土壤柱的复氧能力强弱有关.SATS 复氧主要通过植物根系输导氧气^[7]和间歇

流时氧气在排水过程中在大气压作用下进入土壤柱^[16]2 种方式进行.复氧过程通过增加 SATS 的含氧量,起到提高系统处理能力的作用.宋铁红等^[16]的研究证实,由于间歇进水方式大气复氧较高,导致 COD 削减率要比连续进水方式高.在对照试验中,由于有覆被植物组的植物覆盖度几乎为 100%,且覆被植物麦冬根系发达,导致系统复氧不如无覆被植物组.水力停留时间较短则是另一方面原因.由于降雨径流在土壤柱中的停留时间仅有 22 h,致使植物对有机物的吸收利用能力得不到较好的发挥,张旭东等^[18]和孙敏等^[19]的研究也证实,在较短的污水停留时间条件下,植物对高锰酸盐指数的吸收作用非常有限.上述 2 个原因共同作用,导致对照试验中有覆被植物组对 COD 的削减率略低于对照组.

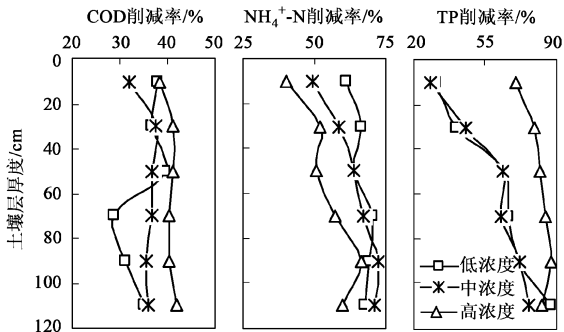


图 2 无覆被植物各污染浓度的垂直削减率

Fig.2 Vertical pollution reduction of non-plant cover test

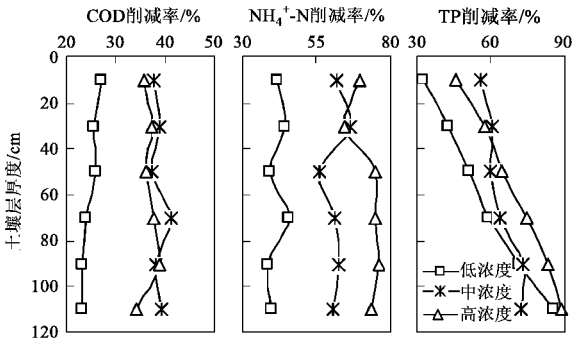


图 3 有覆被植物各污染浓度的垂直削减率

Fig.3 Vertical pollution reduction of plant cover test

2.2.2 对 NH₄⁺-N 削减影响

SATS 对 NH₃-N 的去除作用包括基质吸附、过滤、沉淀以及挥发,植物吸收和基质中微生物作用下经硝化、反硝化作用去除^[18-21].模拟试验进、出水 pH 分别为 7.5 和 7.2, NH₄⁺-N 的挥发作用可忽略^[18-21].对照试验组在 3 种污染物浓度水平下, NH₄⁺-N 的总平均削减率分别为 58.74% 和 61.49% (表 3、图 2、图 3),相差约 2.8%, *t* 检验显示两者不

存在显著差异.有覆被植物组对 NH₄⁺-N 的削减率与对照组无明显差异,甚至是略低于后者的原因可能有以下 2 个方面:① 水力停留时间仅为 22 h,导致覆被植物对 NH₄⁺-N 的吸收利用作用不明显.张旭东等^[18]和孙敏等^[19]的实验证实了在水力停留时间 5 d 条件下,植被覆盖率最低和最稠密的地表漫流系统对 NH₄⁺-N 削减率仅仅相差 9.4%.② 由于自养型好氧微生物的硝化过程是 SATS 中 NH₄⁺-N 降解的主要方式^[18-21],土壤中氧气含量对 NH₄⁺-N 削减率起重要作用,本研究中过密的覆被植被导致氧气输导和落干期间的大气压复氧能力不如无覆被植物组.

2.2.3 对 TP 削减影响

SATS 对 P 的去除是依靠土壤基质吸附、植物吸收和微生物去除这 3 条途径共同作用的结果,其中基质的吸附、置换和沉淀等作用 是 P 去除的主要机制^[21].试验表明,有覆被植物组与对照组的 TP 总平均削减率分别为 63.65% 和 67.08% (表 3、图 2、图 3),差异不到 3.5%, *t* 检验显示两者不存在显著差异,原因为:① 土壤基质吸附.土壤基质不仅对 P 具有吸附作用,而且含 Al、Ca 和 Fe 的土壤基质可通过 Ca 和 Fe 与 PO₄³⁻ 反应而沉淀.虽然可溶性活性磷的去除主要靠矿物土壤的作用,在没有种植植物的表面流矿物土壤床湿地系统中,可溶性活性磷的去除接近 100%^[21].但在本试验中,在不更换土壤基质下,对 3 种污染物浓度分别进行了 6 轮重复试验,并没有体现出试验初期 P 削减率明显高于试验后期的现象,表明连续试验并没有超出土壤基质对 P 的沉淀和吸附能力.② 水力停留时间.虽然有研究表明,植物吸收作用导致有植物系统的人工湿地对 P 的削减率要高于无植物系统^[21],但由于本次试验水力停留时间较短,因而植物对 P 的吸收利用并不明显.③ 土壤复氧.生物除磷主要是由一类统称为聚磷菌的异养型细菌完成^[22].由于聚磷菌在好氧环境下的吸磷量大于厌氧释磷量,因此复氧能力不强的有覆被植物组对 P 的去除不占优势.

通过上述分析可得,在本研究试验条件下,有覆被植物组的污染物削减率并不一定超过对照组.如果覆被植物的通气组织比较发达,可一定程度增大土壤层的复氧能力,从而促进微生物对污染物的降解作用.同时,由于不同植物对于不同污染物的削减效果各异,单一物种的净化能力总是有限的,因此为提高净化能力,还应选择适合的物种进行合理搭配栽种.

2.3 污染负荷对削减率影响

在 3 种进水污染物浓度水平下,对照试验组对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 的综合削减率维持在 47.64%、53.88% 和 59.24%(图 2、图 3), 污染物削减率随其浓度的升高呈现逐渐加大的趋势. 已有研究表明, 污染物负荷对土地处理系统净化能力存在 3 种作用: 无明显影响^[23]、有负面影响^[24] 和促进作用^[18,19]. 本研究对照试验出现污染物削减率随着污染负荷的增加而增大的现象, 可能是由以下两方面原因共同造成: ① 进水浓度按照低、中和高浓度的顺序进行(表 2), 随着试验的逐步开展, 土壤基质附着的微生物得到了充分的培育和驯化, 因而随着试验的进行, 污染物削减率呈现初步增加的趋势. ② 土壤层有着较大的净化容量, 有研究显示人工湿地的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 硝化率和反硝化率分别可达 $0.50 \sim 1.50 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.41 \sim 1.13 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ ^[25], 在 100 cm/d 的水力负荷下可稳定工作 1 周^[26]. 且郑艳侠等^[5] 的试验证实在淹水 2 d/落干 2 d、3 d 和 5 d 的水力负荷周期下, 土壤含水层处理系统在连续 5 个运行周期中可保持较为稳定的污染物削减率, 本试验不同污染物浓度的试验间隔长达 1 周, 因此土壤层的净化能力有充裕的恢复时间.

值得注意的是, 虽然污染物削减率并未达到很高水平, 但对于进水 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 浓度分别为 44.5、4.27 和 $0.98 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的低污染浓度的降雨径流而言, 出水亦可达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 中 IV ~ V 类地表水标准, 这也为冯绍元等^[4]、郑艳侠等^[5]、吴振斌等^[7] 和张建等^[26] 的研究所证实.

2.4 土壤层厚度对污染物削减率影响

土壤层厚度对污染物削减率影响显著, 对于土地垂直处理系统而言, 在一定土壤深度内随着土壤层厚度的增加, 污染物削减率逐步增大^[5,8,9,23]. 图 2

和图 3 显示, 虽然 3 种污染物浓度水平下的削减率曲线随着土壤厚度增加, 变化幅度存在一定差异, 即 COD 削减率变化差异最小, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 次之, TP 最大, 但均体现出削减率受到土壤层深度增加的影响, 在 $50 \sim 70 \text{ cm}$ 深度处污染物削减率曲线出现较明显的转折: 临界深度范围之上, 污染物削减率随着土壤层厚度加深增加较快; 临界深度范围之下, 虽然削减率仍有增加, 但幅度减缓, 甚至基本维持浅层土壤层中污染物的削减率水平. 这与 Bouwer 等^[8]、Amy 等^[9] 对土壤含水层处理城市污染水体, 及郑艳侠等^[5] 利用土壤含水层处理水库微污染水的研究所得出的结果相类似. 存在临界深度的主要原因是由于表层土壤层中微生物的数量和活性最高, 且表层土壤复氧能力大于中、底层土壤, 使得表层土壤层的污染物削减能力较强. 超过临界深度后, 虽然土壤层厚度增加之后, 对污染物的去除能力虽然有所提高, 但提高幅度不太明显, 或者维持表层的削减率水平, 因此造成 $50 \sim 70 \text{ cm}$ 土壤层厚度处出现削减率曲线的转折. 由此, 在城市绿地的建设中, 应充分考虑技术经济性, 确定适宜的活性土壤层厚度以获得较好的性价比.

2.5 水力负荷和水力周期对污染物浓度削减率影响

水力负荷指单位时间内, 进入试验装置的模拟降雨径流量, 可用径流量除以土壤柱的横截面得到, 单位为 $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$. 在模拟 0.5 ~ 5 a 一遇暴雨设计重现期, 降雨历时 1 h 条件下(见表 2), 试验结果由图 4 和图 5 显示, 3 种水力负荷下, 低、中和高污染水平的削减率并未有明显波动, 不同于欧岚等^[24] 得到的水力负荷对土地含水层处理系统能力影响明显, 污染物削减率随着水力负荷的提高而呈现明显的下降趋势的结论. 这可能是本试验水力负荷未超过土壤柱净化容量所致.

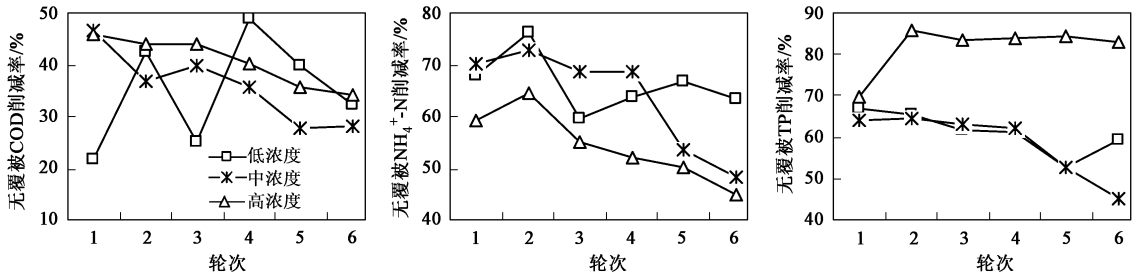


图 4 无覆被降雨径流污染物削减率随时间的变化

Fig. 4 Pollution reduction temporal change of non-plant cover test

除水力负荷外, 水力负荷周期也是一个重要的水力参数, 本研究的水力负荷周期是指土壤柱淹没

时间和落干时间的组合. 有研究表明, 在不同的水力负荷周期下, 土壤含水层处理系统对水库微污染水

的处理效果存在影响,在淹没时间相同的情况下,落干时间较长的土壤柱的处理效果要好^[5].本试验的水力周期负荷为22 h/2 h,较郑艳侠等^[5]的2 d/5 d和2 d/3 d的周期有较大差别.在本研究各污染物浓度水平下,连续进行6次重复试验,污染物削减率未出现明显波动和下降,这与郑艳侠等^[5]在2 d/3 d周期下5次重复试验的结果相类似.其原因是每轮试验

2 h的自然落干过程中,氧气进入土壤柱,使得土壤柱的处理能力得到了良好的恢复.本试验的落干时间虽不长,但仍可获得稳定的污染物削减能力,表明复氧过程对维持城市绿地的污染物削减能力的重要作用.一般情况下,土壤柱间歇时间越长其处理能力恢复越好,但也不能无限延长间歇时间,应同时考虑污染物的削减效率与处理负荷.

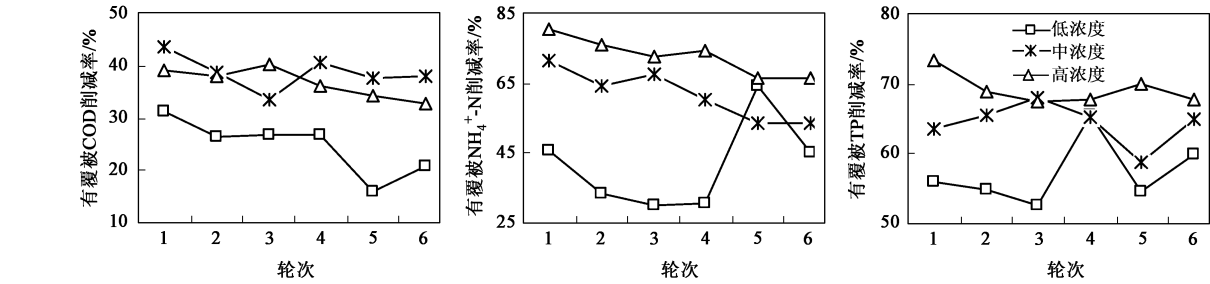


图5 有覆被降雨径流污染物削减率随时间的变化
Fig.5 Pollution reduction temporal change of plant cover test

3 结论

(1)土壤深度1 m左右的城市绿地,对0.5、1、3和5 a设计暴雨重现期下,历时1 h的降雨,1.09~2.75倍于绿地面积汇水域内产生的,具有代表性的低、中和高浓度水平的城市降雨地表径流污染有着良好的削减率.

(2)受复氧能力和水力停留时间的限制,绿地覆被植物对污染物削减率的影响不明显.有植被覆被和无植被覆被绿地对COD、NH₄⁺-N、TP的总体平均削减率分别可达33.41%、37.14%;58.74%、61.49%;63.65%、67.08%.虽然污染物削减率并未达到很高水平,但对于低污染浓度水平的降雨地表径流,出水亦可达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中Ⅳ~Ⅴ类地表水标准.

(3)绿地对降雨地表径流污染的削减主要发生在深度50~70 cm的土层之上.

致谢:试验装置设计、加工分别得到上海交通大学陆贻通教授、饶品华博士和华东理工大学沈祖萍高级工程师的大力帮助,谨致谢忱.

参考文献:

[1] 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[J].环境科学学报,2006,26(7):1068-1075.

[2] Amir T, Ronald L. Pollution loads in urban runoff and sanitary wastewater [J]. Sci Total Environ, 2004, 327: 175-184.

[3] 李立青,尹澄清,何庆慈,等.城市降水径流的污染来源与排放特征研究进展[J].水科学进展,2006,17(2):288-294.

[4] 冯绍元,郑艳侠,唐泽军,等.人工快速渗滤系统对地表微污染水净化效果的试验研究[J].水利学报,2007,38(4):422-426.

[5] 郑艳侠,冯绍元,蔡金宝,等.用土壤含水层处理系统去除水库微污染有机物的试验研究[J].水利学报,2005,36(9):1083-1087.

[6] 程江.上海中心城区土地利用/土地覆被变化的环境水文效应研究[D].上海:华东师范大学,2007.

[7] 吴振斌,任明迅,付贵萍,等.垂直流人工湿地水力学特点对污水净化效果的影响[J].环境科学,2001,22(5):45-49.

[8] Bouwer H. Ground water recharge with sewage effluent [J]. Water Sci Technol, 1991, 23:2099-2108.

[9] Amy G, Wilson L G, Conroy A, et al. Fate of chlorination by products and nitrogen species during effluent recharge and soil aquifer treatment (SAT) [J]. Water Environ Res, 1993, 65:726-734.

[10] Gromaire M C, Garnaud S, Gonzalez S, et al. Characterisation of urban runoff pollution in Paris [J]. Water Sci Technol, 1999, 39(2):1-8.

[11] Gilbert J K, Clausen J C. Stormwater runoff quality and quantity from asphalt, paver, and crushed stone driveways in Connecticut [J]. Water Res, 2006, 40(4):826-832.

[12] 任玉芬,王效科,韩冰,等.城市不同下垫面的降雨径流污染[J].生态学报,2005,25(12):3225-3230.

[13] 常静,刘敏,许世远,等.上海城市降雨径流污染时空分布与初始冲刷效应[J].地理研究,2006,25(6):994-1002.

[14] 黄金良,杜鹏飞,欧志丹,等.澳门城市路面地表径流特征分析[J].中国环境科学,2006,26(4):469-473.

[15] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].(第四版).北京:中国环境科学出版社,2006.

[16] 宋铁红,高金宝,柴金玉.人工湿地去除有机物和营养物质影响因素的研究[J].吉林建筑工程学院学报,2005,22(2):1-4.

[17] 徐丽花,周琪.人工湿地控制暴雨径流污染的实验研究[J].上

海环境科学,2002,21(5):274-277.

[18] 张旭东,阮晓红,孙敏.利用地表漫流系统处理新沂河污水的试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2005,33(3):273-276.

[19] 孙敏,阮晓红,张旭东,等.地表漫流系统处理污染新沂河水的中试研究[J].中国给水排水,2006,22(9):46-49.

[20] 张荣社,周琪,李旭东,等.自由表面人工湿地脱氮效果中试研究[J].环境污染治理技术与设备,2002,3(12):9-11.

[21] 熊飞,李文朝,潘继征,等.人工湿地脱氮除磷的效果与机理研究进展[J].湿地科学,2005,3(3):228-234.

[22] 高廷耀,夏四清,周增炎.城市污水生物脱氮除磷机理研究进展[J].上海环境科学,1999,18(1):16-18.

[23] 车武,欧岚,刘红,等.屋面雨水土壤层渗透净化研究[J].给水排水,2001,27(9):38-41.

[24] 欧岚,车武,汪慧贞.城市屋面雨水绿地水平流渗透净化研究[J].城市环境与城市生态,2001,14(6):24-27.

[25] 何连生,刘鸿亮,席北斗,等.人工湿地氮转化与氧关系研究[J].环境科学,2006,27(6):1083-1087.

[26] 张建,何苗,邵文生,等.人工湿地处理污染河水的持续性运行研究[J].环境科学,2006,27(9):1760-1764.