

城市绿地对雨水径流污染物的削减作用

杨 栩, 尤学一, 季 民

(天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072)

摘要:为探究城市绿地调控城市降雨地表径流污染的有效性和可行性,采用室内土柱模拟试验,研究植被覆盖、径流污染物浓度、土壤层深度、地下水、水力负荷与停留时间对城市绿地削减污染物的影响。结果表明,在低、中和高3种雨水径流污染物浓度水平(COD_{CR}为68、137、550 mg/L; TN是3.01、7.51、30.06 mg/L; TP为0.29、0.69、2.73 mg/L; NH₄⁺是0.44、1.61、2.19 mg/L),水力负荷为3.5、3.0、2.5 cm/h,持续进水1 h条件下,城市绿地具有良好且稳定的污染削减能力,对COD_{CR}、TN、TP、NH₄⁺的平均削减率分别达到41.52%、78.96%、84.68%、50.21%、70.23%、60.91%、73.18%、95.88%、94.99%、62.72%、55.16%、69.98%。受土壤复氧能力和水力停留时间的限制,绿地覆盖对污染物COD_{CR}与TN削减率的影响不明显。城市绿地污染削减率随着降雨地表径流污染物浓度的升高而呈现逐渐增加的趋势。城市绿地对雨水地表径流污染削减作用主要发生在深度35~65 cm土层内。城市绿地对低、中和高污染浓度水平各污染物削减率随着水力负荷的增加而降低。

关键词:城市绿地;地表径流污染;土柱实验;地下水;水力负荷;水力停留时间

中图分类号:X52

文献标志码:A

文章编号:1674-4764(2012)S1-0001-06

Reduction of Urban Green Space on Stormwater Runoff Pollutant

YANG Xu, YOU Xueyi, JI Min

(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China)

Abstract: In order to explore the effectiveness and feasibility of urban green space on regulating urban rainfall-runoff pollution, the simulated test of soil column was adopted to study the effects of vegetation cover, runoff pollution concentration, soil depth and groundwater, and hydraulic loading rate and residence time on reducing the pollutants by green space. The results indicate that green space has a good and stable ability to reduce three stormwater runoff pollution concentrations, which COD are 68, 137 and 550 mg/L, TN are 3.01, 7.51 and 30.06 mg/L, TP are 0.29, 0.69 and 2.73 mg/L, and NH₄⁺ are 0.44, 1.61 and 2.19 mg/L respectively, with 3.5, 3.0 and 2.5 cm/h hydraulic loading rate respectively and continuous inflow 1h. The pollution reduction rates of COD, TN, TP and NH₄⁺ by green space reach to 41.52%, 78.96% and 84.68%, 50.21%, 70.23% and 60.91%, 73.18%, 95.88% and 94.99%, and 62.72%, 55.16% and 69.98% respectively. Restricted by the soil reaeration capacity and hydraulic retention time, the effect of vegetation cover on pollution reduction rates of COD and TN is not significant. With the rainfall-runoff pollution concentration increased, the pollutant reduction rate of green space shows a gradually increasing trend. The reduction of green space on the stormwater runoff pollution mainly occurs in the soil depth of 35~65 cm. The reduction rate of each pollutant for the low, medium and high pollution concentration level decrease with the hydraulic loading rate increased.

Key words: urban green space; surface runoff pollution; soil column; groundwater; hydraulic loading rate; hydraulic residence time

城市降雨径流污染是一种典型的非点源污染,主要指在降水过程中雨水及其形成的径流流经城市地面(如商业区、居住区、停车场、街道等),聚集一系列污染物质(如原油、氮、磷、重金属、有机物质等)通过排水系统直接排入水体而造成水体污染。城市降雨地表径流污染已是仅次于农业面污染源的第二大面污染源,在全球范围内已成为城市水环境污染和生态退化的关键因素,是河流与湖泊的第三大污染源^[1]。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成部分,不仅有助于减缓径流

速度、增强土壤渗透性、提高污染物沉降效率、过滤悬浮固体,而且能够减轻径流对土壤的侵蚀。因此,城市绿地是一项控制城市内涝和雨水径流污染行之有效的措施。

国内外专家学者对城市绿地削减降雨径流污染物进行了一些研究,人工湿地^[2]、植草沟^[3-4]、草地过滤带^[5-6]、草地生物滤池^[7]、下凹式绿地^[8]等在城市雨水面源污染控制中的作用。上述研究大部分是野外实验,而现场实验的降雨强度、雨水径流量、径流污染浓度以及水力负荷等边界条件无法准确控制,同时土壤层中水样难以便捷采集。因此,本研

究采用室内土柱模拟城市绿地削减城市降雨地表径流污染试验的方法,探求城市绿地在控制城市雨水地表径流污染中的可行性和有效性,分析植被覆盖、径流污染物浓度、土层厚度、地下水、水力负荷与停留时间等因素对污染净化效果的影响,以期在城市绿地应用于城市降雨地表径流污染调控提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤

室内绿地土柱模拟试验所用土样采自天津中心城区典型绿化土,是由“海退”海河冲积所形成的平原土层,其基本理化特性见表 1。

1.2 试验装置

试验土柱均由 60 cm×60 cm×170 cm 的钢化玻璃制成,将绿化土依据城市绿地土壤实际体积质量 1.30 g/cm³ 填装,并在其上铺设草皮。在土柱的两侧按层次(5、20、35、65、85、115、145 cm)开有直径 5 cm 的观测孔,并用橡胶塞密封。土柱底部装有 10 cm 厚的鹅卵石(直径 2~5 cm),作为地下水层的反滤层,并在其上铺有 1 层透水无纺布。另外,每个土柱都装有 1 个马利奥特瓶,用以维持地下水位的设定高度。试验分为有植被覆盖组和无植被覆盖对照组,其中覆盖植被为天津中心城区常见草地类型早熟禾与高羊茅混播,覆盖度

是 98%^[9]。由恒流泵控制降雨径流量,并通过旋转下喷式喷头均匀喷洒人工配置的雨水径流。

1.3 试验方法

试验用水均采用人工配置,其优点在于水质稳定便于控制且容易获得,而且已有文献证实人工配水可以代替实际雨水径流进行污染物降解及机理的研究^[10]。称取淀粉 15.75 g、白砂糖 7.88 g、磷酸氢钠 2.50 g、硫酸铵 7.50 g、尿素 3.15 g、蛋白胨 1.58 g、牛肉膏 1.26 g、碳酸氢钠 31.50 g、无水碳酸钠 50.50 g,溶于 1L 蒸馏水中制成原水。依据天津城区道路雨水径流污染水平,按 1:200、1:800 和 1:2 000 三种比例将原水稀释成如表 2 所示,低、中、高 3 种污染物浓度水平的城市降雨径流。试验时间从 2010 年 7 月至 2010 年 10 月。3 种污染物浓度水平下,对照组各重复进行 9 轮试验,每隔 48 h 进水、采样 1 次,详细水力负荷周期见表 2,其中进水间隔时间、淹没时间和落干时间依据已有研究^[11-12] 所定。试验期间装置靠窗布置,保持正常光照,室内平均气温控制在 20~25 ℃ 之间。

1.4 水样采集与分析

运用土壤溶液取样器采集各土层出水水样,其中取样器陶土头的表面孔径<2.8 μm。选用天津城市河流水质主要污染因子中的 COD_{CR}、TN、TP 和 NH₄⁺ 作为雨水径流污染物分析指标,采用文献方法分析^[13],详见表 3。

表 1 供试土壤理化性质

pH 值	颗粒组成/%			容重/(g·cm ⁻³)	土壤质地
	砂粒 2.000~0.020 mm	粉粒 0.020~0.002 mm	粘粒 <0.002 mm		
8.53	40.4	29.8	29.8	1.30	壤质粘土

表 2 进水污染负荷和水力周期

植物覆盖	污染物浓度	试验次数	进水量/L	进水时间/h	淹没时间/h	落干时间/h	水力负荷/(cm·h ⁻¹)
无/有	低/中/高	3	12.6	1	20	28	3.5
		3	10.8	1	20	28	3.0
		3	9.0	1	20	28	2.5

表 3 人工配置城市降雨地表径流污染物浓度及其分析方法

水质指标	污染物浓度水平	污染物浓度 /(mg·L ⁻¹)	IV 类地表水标准 /(mg·L ⁻¹)	分析方法
COD _{CR}	低	68	30	快速消解分光光度法 (HJ 399-2007)
	中	137		
	高	550		
TN	低	3.01	1.5	碱性过硫酸钾消解 紫外分光光度法 (GB 11894-89)
	中	7.51		
	高	30.06		
TP	低	0.29	0.3	孔雀绿磷钼杂多 酸分光光度法
	中	0.69		
	高	2.73		
NH ₄ ⁺	低	0.44	1.5	纳氏试剂分光光度法 (HJ 535-2009)
	中	1.61		
	高	2.19		

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雨水径流,其污染物削减试验结果如下:无植被覆盖组(对照组)对 COD_{CR} 的平均削减率分别是 59.38%、70.34% 和 84.89%,而植被覆盖组的平均削减率为 41.52%、78.96% 和 84.68%。对低、中和高污染物浓度水平,对照组对 TN 的平均去除率分别为 52.51%、68.68% 和 62.22%,植被覆盖组则为 50.21%、70.23% 和 60.91%;对于 NH_4^+ 的削减率,对照组和植被覆盖组分别是 34.39%、68.05%、67.76% 和 62.72%、55.16%、69.98%;对 TP 对照组去除率为 52.51%、63.32% 和 95.78%,植被覆盖组则是 73.18%、95.88% 和 94.99%。

2.2 绿地覆盖对污染物削减率的影响作用

2.2.1 绿地覆盖对 COD_{CR} 去除影响

人工配置的雨水径流进入试验装置,并保持一定的淹没水位,此时城市绿地相当于土地处理系统,主要依靠植物吸收利用、土壤胶体颗粒吸附和土壤微生物降解三者共同作用

达到净化雨水径流中有机物质的目的。植被覆盖组在 3 种污染物浓度水平下, COD_{CR} 平均削减率为 68.38%,而对照组的削减率是 71.57%,两者相差 3.19%, t 检验两者差异不显著,这与程江等^[11] 试验结果一致,而同宋英伟^[14]、陈永华^[15] 等研究者得出有植物系统去除率高于无植物系统的结论存在一定的差异。

这可能与土壤复氧能力强弱有关。土地处理系统复氧主要有 2 种方式:①利用植物根系输导氧气进行复氧;②干湿交替时氧气在土壤孔隙水排干过程中在大气压作用下进入土壤。土壤复氧过程提高了系统对 COD 的削减能力。在本试验中,由于植被覆盖组的绿地覆盖度为 98%,导致落干期间大气压复氧能力不如对照组^[11]。而水力停留时间较短是另外一个重要原因,因为雨水径流在土柱中的停留时间只有 20 h,无法充分发挥植物对有机物的吸收利用能力。张旭东^[16]、孙敏等^[17] 研究表明,在污水停留时间较短的情况下,植物对高锰酸盐指数的吸收作用非常有限。上述 2 个原因使得植物覆盖组对 COD_{CR} 削减率略低于对照组。

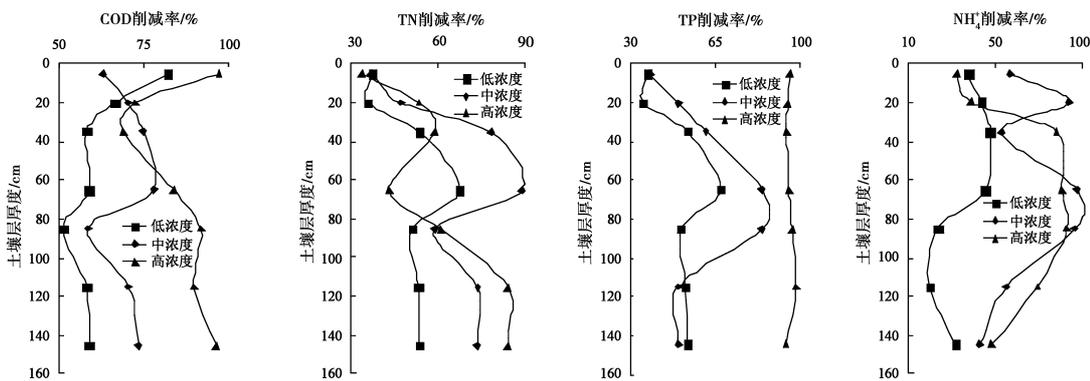


图 1 无植被覆盖组各污染物垂直削减率

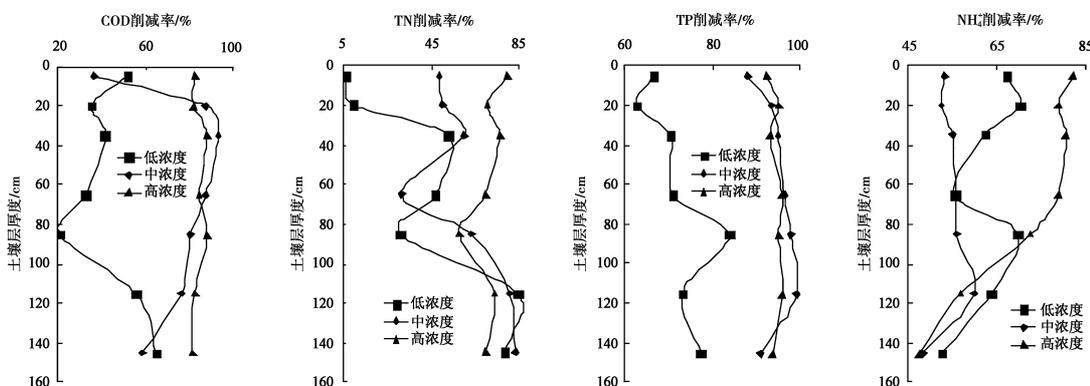


图 2 植被覆盖组各污染物垂直削减率

2.2.2 绿地覆盖对 TN 去除影响

土地处理系统对 TN 去除主要依靠物理、化学和生物 3 方面的协同作用,即土壤基质吸附、沉积、挥发,植物摄取与土壤微生物的氨化、硝化和反硝化作用。在 3 种污染物浓度水平下,对照组和植被覆盖组 TN 的总平均削减率分别为 61.39% 和 60.45%,相差 0.94%, t 检验两者差异不显著。对照组对 TN 的去除率略高于植被覆盖组可能是由下述原因造成的:土地处理系统主要脱氮途径为氨化、硝化和反硝

化过程,而氨化和硝化作用均须在有氧环境中进行,土壤含氧量越高,两者反应越彻底,脱氮效果越好,过密的植被覆盖会导致氧气输导和落干期间大气压复氧能力不如对照组^[11]。

2.2.3 绿地覆盖对 TP 去除影响

土地处理系统对 TP 的削减是土壤基质吸附、植物吸收和微生物去除 3 条途径共同作用的结果。试验表明,植被覆盖组与对照组对 TP 总平均削减率分别为 88.02% 和 70.54%,差异达 17.48%, t 检验两者差异很显著,主要原因

为:①试验期间正值草地早熟禾和高羊茅生长茂盛,大量无机磷被吸收利用合成卵磷脂、核酸以及三磷酸腺苷等,然后通过定期修整草地而移去。②生物除磷主要是由一类统称为聚磷菌的异养型细菌完成。由于植被光合作用光反应与暗反应交替进行,根系输氧也交换出现,从而导致系统中好氧和厌氧环境交替出现,这更有利于聚磷菌对磷的过量积累^[18]。

2.2.4 绿地覆盖对 NH_4^+ 去除影响

土地处理系统对 NH_4^+ 的去除作用包括土壤颗粒吸附及氨挥发,植物吸收和土壤微生物硝化、反硝化作用。模拟试验进水和出水 pH 分别为 7.23 和 6.95,因而氨氮的挥发可忽略。试验结果显示,植被覆盖组和对照组对 NH_4^+ 总平均削减率分别是 62.62% 和 56.73%,差距为 5.89%,t 检验两者差异较显著。究其原因主要是:试验期间正值草地早熟禾和高羊茅生长旺盛,大量 NH_4^+ 被吸收利用合成氨基酸、植物蛋白质等,然后通过定期修整草地使之从雨水径流和土地系统中除去。张旭东^[16]、孙敏^[17]等实验证实在水力停留时间 5d 条件下,植被覆盖度最高与最差的地表漫流系统对 NH_4^+ 的削减率相差 9.40%。Rogers^[19] 和 Breen^[20] 等研究也认为植物吸收是人工湿地去除的 NH_4^+ 主要途径。

通过上述分析可知,在本研究试验条件下,植被覆盖组对于雨水径流污染物 COD_{CR} 和 TN 的削减率略低于对照组,但 t 检验两者差异性不明显,而对 TP 与 NH_4^+ 的去除率则显著高于对照组,因而,总体来说绿地覆盖组对城市降雨径流污染物的削减效果要优于对照组。与程江^[11]等人研究结果相比较,本试验中植被覆盖组对污染物 COD_{CR} 、 NH_4^+ 、TP 的削减效果更优,分别高出 34.98%、3.88% 和 24.37%,其根本原因在于不同植物对于不同污染物的去除效率各异,单一物种净化能力毕竟有限,为提高绿地处理能力,应选择合适的植被进行合理搭配栽种。本研究选用早熟禾与高羊茅混播作为覆盖植被,张旭东^[16]、杨婷婷^[21]等研究表明早熟禾和高羊茅均对 COD、氮、磷具有良好的去除能力,而程江等人^[11]

则用单一植物麦冬。

2.3 污染物负荷对削减率影响

在 3 种进水污染物浓度水平下,土地处理系统对 COD_{CR} 、TN、TP、 NH_4^+ 的综合削减率分别为 50.45%、74.69%、84.79%、51.36%、65.57%、66.22%、62.85%、79.60%、95.38%、48.55%、61.60%、68.87%,各污染物削减率随其浓度的升高而呈现逐渐增加的趋势。现有研究表明^[13],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、有负面效应和促进作用。本试验所得污染物削减率随着污染负荷的增加而提高的结果,可能是由以下两方面原因共同造成的:①试验进水按照低、中和高污染浓度的顺序进行,随着研究的不断进行,土壤层中存在的微生物得到了充分的培育和驯化,而微生物在土地处理系统降解雨水径流污染物中扮演重要的角色,致使污染物削减率跟随进水浓度的升高而增加。②土壤层具有较大的净化容量,前人^[22-24]研究显示土地处理系统 NH_4^+ -N 硝化率和反硝化率分别可达 0.50~1.50 g/(m²·d) 和 0.41~1.13 g/(m²·d),对 TP 的平均净化效率 4.56 mg/(kg·d),在水力负荷 50 cm/d 条件下可稳定运行 2 个月,且郑艳侠等^[12]研究证明在淹水 2 d 落于 2、3、5 d 的水力负荷周期下,土壤含水层处理系统可在 5 个运行周期里保持较为稳定的污染物削减率。本研究中不同污染物浓度试验相隔长达 7 d,因此土壤层净化能力拥有充裕的恢复时间。

对于进水低污染浓度的雨水径流,其出水 COD_{CR} 、TN、TP、 NH_4^+ 平均浓度分别为 29.94 mg/L、1.44 mg/L、0.11 mg/L、0.14 mg/L,好于地表水环境质量标准(GB3838-2002)中 IV 类地表水标准,亦优于城镇污水处理厂污染物排放标准(GB18918-2002)中一级 A 标准。

表 4 不同土壤深度各污染物平均削减率

土壤层厚度/cm	COD_{cr} 平均削减率/%	TN 平均削减率/%	TP 平均削减率/%	NH_4^+ 平均削减率/%
5	68.79	40.39	69.73	54.91
20	69.04	44.42	71.95	61.30
35	70.86	63.14	77.94	62.73
65	70.81	57.88	85.00	67.24
85	65.27	53.71	84.80	65.17
115	72.19	74.83	78.28	54.11
145	72.19	73.60	76.63	45.20

2.4 土壤层厚度和地下水对污染物削减率影响

土壤深度和地下水对土地处理系统去除雨水径流污染物的影响显著。有研究表明,对于垂直土地处理系统而言,不考虑地下水的情况下,在一定土壤深度内,随着土壤层厚度的增加,污染物削减率也随之增大。由表 4 可以看出,在本试验存在地下水环境下,各污染物削减率均受到土柱深度增加的影响,在临界深度 35~65 cm 处污染物削减率出现明显的转折,临界深度范围之上,污染物削减率随着土壤层厚度的加深而增加,与程江等人^[11]研究结果一致;临界深度范围之下, COD_{CR} 和 TN 削减率随着土壤深度增加先降低后升高,而 TP 和 NH_4^+ 削减率则是一直减少,与程江等人^[11]研究结果有较大区别,其试验结果认为临界深度范围之下,虽然削减率仍有所增加,但幅度减缓,甚至基本维持浅层土壤层

中污染物削减率水平。存在差异主要是因为:本试验采用马利奥特瓶补给地下水,因此地下水中溶解氧浓度较高,从而使土柱底层土壤复氧能力较强,好氧微生物数量和活性均较高,所以 COD_{cr} 和 TN 削减率增加了。而 TP 和 NH_4^+ 的去除效率受植被影响很大,在临界深度之下,植物对 TP 和 NH_4^+ 的吸收利用很有限,因而削减率随着土壤层厚度的增加而减少。由此可知,在城市绿地建设中,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高的性价比。

2.5 水力负荷和水力周期对污染物削减率影响

土柱的水力负荷是指单位时间内,进入试验装置的降雨径流量,可用进水量除以土柱横截面积得到,单位为 cm/h。依据表 3 进行模拟试验,结果如图 3 和 4 所示。在 3 种水力负荷条件下,低、中和高污染浓度水平的各污染物削减率随

着水力负荷的增加而降低,与王鹏等^[25]得到的土壤含水层处理系统对污染物的去除效率跟随水力负荷的升高而减少的

结论一致。

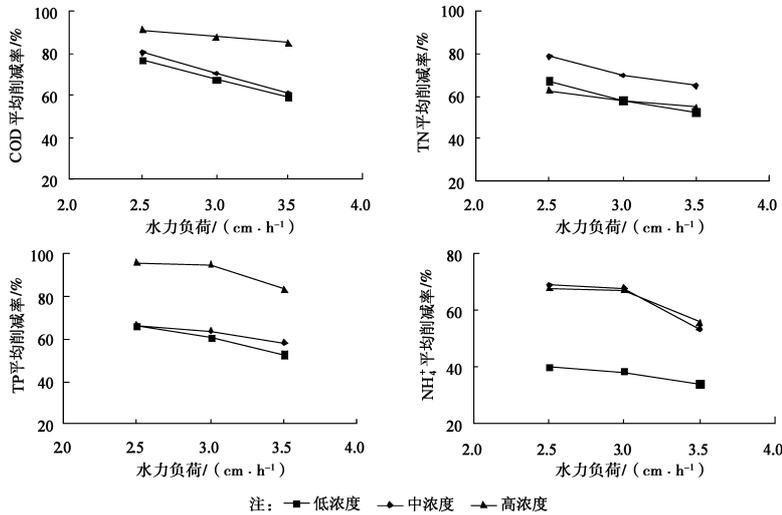


图 3 水力负荷对无植被覆盖组各污染物削减率的影响

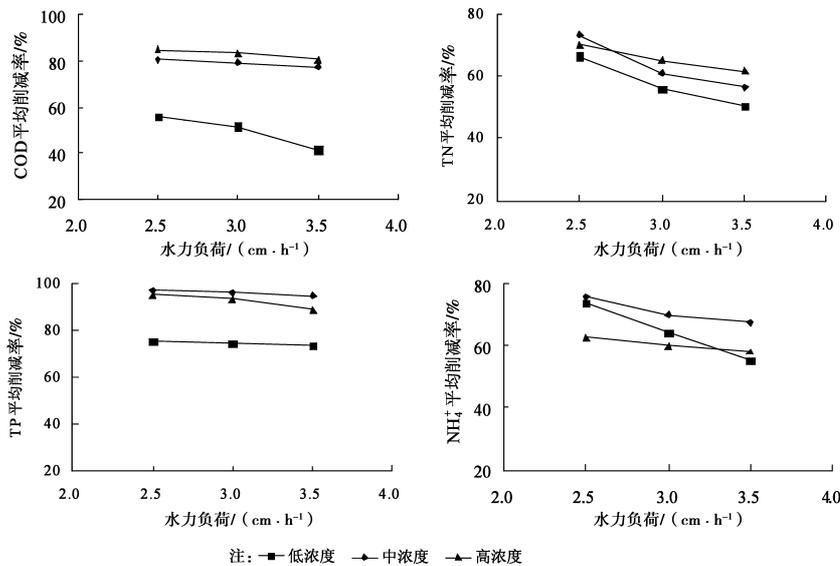


图 4 水力负荷对植被覆盖组各污染物削减率的影响

水力负荷周期也是一个重要的水力参数,本研究中水力负荷周期是指土柱淹没时间和落干时间的组合。已有研究证明,对于不同的水力负荷周期,土壤含水层对水库微污染有机物处理效果相异;在淹没时间相同的情况下,落干期较长的土柱出水效果更好。本试验水力负荷周期为 20 h/28 h,在低污染物浓度和高水力负荷进水条件下,连续进行 3 次重复试验,其出水 COD_{CR}、TN、TP、NH₄⁺ 平均浓度分别是 33.69 mg/L、1.46 mg/L、0.11 mg/L、0.24 mg/L,并分别达到地表水环境质量标准(GB3838—2002)中 V 类标准、IV 类标准、III 类标准、II 类标准,这与郑艳侠等^[24]在水力负荷周期 2 d/3 d 下 5 次重复试验结果类似。其主要原因是每次试验 20 h 自然落干过程,土柱充分复氧,使得土壤处理能力得到很好的恢复。本研究落干时间虽不长,但仍能获得稳定而良好的污染物削减能力,表明土壤复氧过程对保持城市绿地对雨水径流污染物的削减效率具有极其重要的作用。通常情况下,土壤间歇时间越长其处理能力恢复越好,但也不能

无限延长,应同时考虑去除效率和处理负荷。

3 结论

(1)在考虑地下水、进水水力负荷 2.5、3.0、3.5 cm/h、历时 1 h 的情况下,土壤深度 1.5 m 的城市绿地对具有代表性的低、中和高污染浓度水平的天津城市降雨地表径流污染物有良好的削减效率。

(2)受土壤复氧能力和水力停留时间的限制,绿地覆盖对污染物 COD_{CR} 与 TN 削减率的影响不明显,而对污染物 TP 和 NH₄⁺ 的去除率显著高于无植被覆盖组。有植被覆盖组和无植被覆盖组对污染物 COD_{CR}、TN、TP、NH₄⁺ 的总体平均削减率分别为 68.38%、60.45%、88.02%、62.62%、71.57%、61.39%、70.54%、56.73%。对于低污染物浓度水平的雨水径流,出水效果好于地表水环境质量标准(GB3838—2002)中 IV 类地表水标准,亦优于城镇污水处理厂污染物排放标准(GB18918—2002)中一级 A 标准。

(3)城市绿地对雨水地表径流污染削减作用主要发生在深度35~65 cm土层内。

(4)在水力负荷2.5、3.0和3.5 cm/h条件下,绿地对低、中和高污染浓度水平的污染物削减率随着水力负荷的增加而降低。

参考文献:

- [1] Taebi A, Droste R L. Pollution loads in urban runoff and sanitary wastewater[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 327(1-3): 175-184.
- [2] Ellis J B, Revitt D M, E SHUTES R B, et al. The performance of vegetated biofilters for highway runoff control[J]. *the Science of the Total Environment*, 1994(146/147): 543-550.
- [3] Yu S L, Kuo J T, Fassman E A, et al. Field test of grassed swale performance in removing runoff pollution[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2001, 127(3): 168-171.
- [4] Backstrom M. Grassed swales for stormwater pollution control during rain and snowmelt[J]. *Water Science and Technology*, 2003, 48(9): 123-134.
- [5] Deletic A. Sediment transport in urban runoff over grassed areas[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 301(1-4): 108-122.
- [6] Deletic A, Fletcher T D. Performance of grassed filters used for storm water treatment—a field and modelling study[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 317(3-4): 261-275.
- [7] Passepport E, Hunt W F, Line D E, et al. Field Study of the ability of two grassed bioretention cells to reduce stormwater runoff pollution[J]. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 2009, 135(4): 505-510.
- [8] 程江,杨凯,黄民生等. 下凹式绿地对城市降雨径流污染的削减效应[J]. *中国环境科*, 2009, 29(6): 611-616.
CHENG Jiang, YANG Kai, HUANG Minsheng, et al. Reduction effect of sunken green space on urban rainfall-runoff pollution[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(6): 611-616.
- [9] DB29-37-2002, 天津市草坪建植与养护管理技术规程[S].
- [10] 杨清海,吕淑华,李秀艳,等. 城市绿地对雨水径流污染物的削减作用[J]. *华东师范大学学报:自然科学版*, 2008(2): 41-47.
YANG Qinghai, LU Shuhua, LI Xiuyan, et al. Reduction functions of runoff contaminants by the urban greenbelt[J]. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 2008(2): 41-47.
- [11] 程江,杨凯,吕永鹏,等. 城市绿地削减降雨地表径流污染效应的试验研究[J]. *环境科学*, 2009, 30(11): 3236-3242.
CHENG Jiang, YANG Kai, LU Yongpeng, et al. Experimental study on rainfall-runoff pollutant reduction by urban green space[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(11): 3236-3242.
- [12] 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.
ZHENG Yanxia, FENG Shaoyuan, CAI Jinbao, et al. Experimental study on removal of organic substance in reservoir water by means of soil aquifer treatment system[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(9): 1083-1087.
- [13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [14] 宋英伟,年跃刚,黄民生,等. 人工湿地中基质与植物对污染物去除效率的影响[J]. *环境工程学报*, 2009, 3(7): 1213-1217.
SONG Yingwei, NIAN Yuegang, HUANG Minsheng, et al. Effects of substrates and plants on pollution removal of constructed wetlands[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2009, 3(7): 1213-1217.
- [15] 陈永华,吴晓美,何钢,等. 人工湿地污水处理系统中的植物效应与基质酶活性[J]. *生态学报*, 2009, 29(11): 6051-6058.
CHEN Yonghua, WU Xiaofu, HE Gang, et al. Analysis of plant effect and rhizosphere enzyme activity in a constructed vertical-flow wetland established for sewage treatment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 6051-6058.
- [16] 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.
ZHANG Xudong, RUAN Xiaohong, SUN Min. Experimental study on treatment of wastewater from Xinyi River by overland flow system[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2005, 33(3): 273-276.
- [17] 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.
SUN Min, RUAN Xiaohong, ZHANG Xudong, et al. Pilot-scale study on treatment of polluted water from Xinyi River by overland flow system[J]. *China Water and Wastewater*, 2006, 22(9): 46-49.
- [18] 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.
XIONG Fei, LI Wenchao, PAN Jizheng, et al. Efficiency and functioning of nitrogen and phosphorus removal in constructed wetlands: a review [J]. *Wetland Science*, 2005, 3(3): 228-234.
- [19] Rogers K H, Breen A J, Chick A J. Nitrogen removal in experimental wetland treatment systems: evidence for the role of aquatic plants[J]. *Research Journal of the Water Pollution Control Federation*, 1991, 63(7): 934-941.
- [20] Breen P E. A mass balance method for assessing the potential of artificial wetlands for wastewater treatment [J]. *Water Research*, 1991, 24(6): 689-697.
- [21] 杨婷婷,操家顺,周勇,等. 原位围隔耐寒高羊茅浮床对苏州重污染河道水体的净化[J]. *湖泊科学*, 2007, 19(5): 618-621.
YANG Tingting, CAO Jiashun, ZHOU Yong, et al. Purification effect of cold-tolerant *Festuca arundines* in heavy polluted river, Suzhou [J]. *Journal of Lake Science*, 2007, 19(5): 618-621.
- [22] 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.
HE Liansheng, LIU Hongliang, XI Beidou, et al. Relationship between the nitrogen removal and oxygen demand in constructed wetlands[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(6): 1083-1087.
- [23] 卢伟伟,姜明,吕宪国,等. 小叶章湿地土壤对磷的净化效率模拟[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(10): 1986-1990.
LU Weiwei, JIANG Ming, LU Xianguo, et al. Phosphorus removal efficiency of *Calamagrostis angustifolia* wetland soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(10): 1986-1990.
- [24] 邹俊,陈昕,张毅敏,等. 多介质土壤层系统(MSL)的材料选配对生活污水处理效率的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(S1): 14-18.
ZOU Jun, CHEN Xin, ZHANG Yimin, et al. Impact of materials in multimedia-soil layer system on sewage treatment[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(S1): 14-18.
- [25] 王鹏,董仁杰,吴树彪,等. 水力负荷对潜流湿地净化效果和氧环境的影响[J]. *水处理技术*, 2009, 35(12): 48-52.
WANG Peng, DONG Renjie, WU Shubiao, et al. Influence of hydraulic loading rate on the purifying efficiency and oxygen condition of horizontal subsurface flow constructed wetland[J]. *Technology of Water Treatment*, 2009, 35(12): 48-52.