

种植土绿化带净化道路径流雨水的试验

程树斌¹, 关彤军¹, 张春会^{1,2}, 冯宝叶², 赵彦辉¹, 马志中¹

(1. 石家庄市政设计研究院有限责任公司, 河北 石家庄 050000; 2. 河北科技大学 建筑工程学院)

摘要:为分析种植土绿化带海绵道路结构对入渗道路径流雨水水质的净化性能,自制了试验桶、降雨系统、雨水收集装置组成的种植土绿化带雨水入渗足尺试验模型。配制人工雨水,对60 cm厚种植土绿化带开展6次降雨及雨水入渗试验,测试种植土绿化带结构出水污染物浓度及演化规律,结果表明:①种植土出水COD(化学需氧量)浓度随降雨次数先减小后增加,出水SS(悬浮物)浓度随降雨次数逐渐增加,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ (氨氮)浓度和TP(总磷)浓度没有明显规律;②种植土出水COD允许浓度限值建议取为天然雨水COD浓度和第4类排放水体污染物浓度允许限值中的大值;③经过种植土绿化结构净化后,出水污染物浓度显著降低,COD浓度平均降低约73.5%,SS浓度平均降低约84.2%,净化后道路径流雨水满足入渗地下的水质要求。

关键词:种植土绿化带; 雨水污染物浓度; 海绵道路结构

1 引言

种植土绿化带是一种新型海绵城市道路雨水入渗结构,这种结构中机动车道为不透水硬化路面,雨水沿路面横坡汇流至下凹种植土绿化带内,雨水经过种植土,入渗至储水碎石层内,再逐渐入渗至地基土,回补地下水。然而,城市道路行驶车辆众多,路表污染严重。雨水降落于路表,形成径流,溶解、冲刷路表的污染物,污染物悬浮或溶解于雨水径流内,随之流入种植土绿化带内。种植土孔隙小,对雨水污染物有很强的过滤和截留作用,使得雨水得到一定程度的净化。然而,种植土净化的道路雨水水质到底如何,入渗地下后是否不污染地下水,目前尚不清楚。目前,国内外在海绵城市建设与土体内污染物迁移方面开展了很多研究。在海绵城市建设方面,Dreelin等和Collins等研究了透水路面对地表径流的消减;Park等,Zhu等和Liu等研究了新的路面砖结构;宫永伟和唐双成等研究了雨水花园、低影响开发道路的雨水渗储效果;程树斌等研究了种植土绿化带雨水入渗规律;郭振清等提出了一种海绵城市渗水井新构造。在土体污染物迁移方面,李华伟等研究了可溶性污染物在土中的迁移规律;詹良通等模拟了垃圾填埋场有机污染物在土层中

的迁移;陶权等研究了降雨强度对土中重金属元素迁移的影响规律;梁冰等和狄军贞等对垃圾渗滤液污染物在土壤中迁移进行了试验和模拟研究;卢彬研究了重金属污染物在土壤中的迁移特征及修复技术;李小平等分析了土壤孔径分布对污染物迁移过程中弥散系数的影响规律;曾兴等研究了低渗透性土柱对一流一弥散迁移试验解析模拟中边界条件的适用性;ZHU等研究了土孔隙特征对弥散系数的影响规律;Fronczyk提出了一种净化道路径流雨水水质的设施。这些已有研究尚未涉及种植土绿化带海绵道路结构的净水性能。为此,该文自制种植土绿化带雨水入渗足尺模型试验系统,进行降雨试验,开展60 cm厚种植土对道路径流雨水的净化性能试验研究。

2 试验

2.1 试验装置

自制种植土绿化带足尺模型装置由试验桶、降雨系统、雨水收集装置组成。试验桶总高约160 cm,由6级组装而成,内径80 cm,面积 0.5024 m^2 。降雨系统由系统框架、喷头、压力水泵、流量计、水箱组成,降雨强度由流量计控制,试验时通过压力水泵从水箱泵入人工配制的雨水至喷头,模拟降雨。试验桶底部下凹,

收稿日期:2020-09-06(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51574139);河北省重点科技研发项目(编号:18276109D)

作者简介:程树斌,男,大学本科,高级工程师。E-mail:123911770@qq.com

正中设置出水口,使用方形收集盒收集雨水。收集出流雨水后,小心装入水瓶内,送实验室检测出水水质。试验装置如图 1 所示。

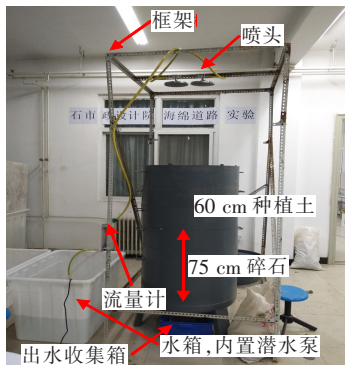


图 1 种植土绿化带雨水入渗试验装置

2.2 种植土及碎石

试验用种植土和碎石均取自石家庄市汇明路工程。天然种植土的物理、力学特性如下:密度为 1.863 g/cm^3 ,液限为 29.8% ,塑限为 18.5% ,塑限指数为 11.3 , 0.5 mm 筛通过率为 97.08% , 0.25 mm 筛通过率为 82.29% , 0.075 mm 筛通过率为 61.04% ,为低液限含砂粉土。种植土空隙度为 0.464 ,干密度为 1.456 g/cm^3 。

碎石粒径为 $2\sim 4 \text{ cm}$ 。使用蒸馏水冲洗后填入试验桶内,填高为 75 cm 。在碎石层上方布设一层透水土工布,然后填入松散种植土,填高约为 80 cm 。填入的种植土松散,处于欠固结状态。开启降雨系统,使用蒸馏水降雨,降雨总水量为 0.36 m^3 ,间隔 5 d 后再降一次,两次总降雨量与石家庄市汇明路绿化带的 1 年入渗雨量相当。降雨结束后种植土沉降了约 20 cm ,这时种植土可视为固结沉降完成,即天然种植土绿化带,其厚度为 60 cm 。

2.3 试验方案及步骤

种植土绿化带不仅遭受雨水作用,还汇集行车道硬化路面上的雨水,等效降雨强度为:

$$q_e = q \left(1 + \frac{\phi_e A_y + A_0}{A_l} \right) = q\eta \quad (1)$$

式中: q 为设计降雨强度; A_y 为硬化路面宽度; A_l 为绿化带净宽度; ϕ_e 为雨量径流系数; A_0 为绿化带被混凝土占据的宽度; η 为等效降雨强度系数。

石家庄市汇明路沥青路面宽度(半幅)为 7.5 m ,种植土绿化带宽度为 2.4 m ,绿化带混凝土路缘石宽度共计 0.6 m ,沥青路面雨水径流系数为 0.9 ,代入式(1),计算得 $\eta = 4.06$ 。

根据石家庄市海绵城市建设导则,石家庄市海绵道路结构入渗雨水的目标是入渗道路年降雨量的 70% 。石家庄市年均降雨量为 517 mm ,等效入渗雨量为 $517 \times 70\% \times 4.06 = 1469.3 \text{ mm}$ 。对于该项目试验而言,试验桶需要入渗雨量为: $1469.3 \times 0.5024 \times 10^{-3} = 0.7382 \text{ m}^3/\text{年}$ 。在试验中,每次降雨 0.369 m^3 ,约为 0.5 年的降雨量。试验降雨时间约为 10 h 。

关彤军等在一年中污染最严重的春季对石家庄市道路径流雨水污染物分布情况开展了 6 次现场调查,给出了石家庄市道路径流雨水污染物浓度平均值:COD(化学需氧量)为 167.7 mg/L ,SS(悬浮物)为 490.9 mg/L , $\text{NH}_3\text{-N}$ (氨氮)为 4.86 mg/L ,TP(总磷)为 0.59 mg/L ,Zn(锌)和 Pb(铅)离子浓度分别为 $0.67, 0.11 \text{ mg/L}$ 。

石家庄市道路径流雨水中 SS 主要来源于路面侵蚀风化、化石燃料燃烧、大气沉降、交通车辆磨损及尾气排放等。COD 主要来源于土壤侵蚀、动物排泄物、交通车辆磨损和尾气排放、城市绿化的枯枝落叶等有机物质。营养物质如磷和氮主要来源于公园和绿地农药化肥的施用、动物排泄物、机动车辆磨损等。Zn 和 Pb 离子主要来源于含铅汽油和轮胎磨损等。Zn 和 Pb 离子在道路径流雨水中浓度较低,主要富集于种植土表层 20 cm 范围内。由于种植土绿化带一般 5 年更换表层种植土一次,道路径流雨水中 Zn 和 Pb 离子对地下环境污染不大。综上,该文重点研究种植土绿化带对 COD、SS、TP 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的净化性能。

具体试验步骤为:

(1) 在模型桶内按实际工程结构装入碎石 75 cm ,然后装入种植土约 80 cm 。

(2) 在水箱内装入纯水(蒸馏水),水量为 1 年降雨量。

(3) 开启降雨系统,降雨强度由雨量计控制,降雨量为 0.36 m^3 ,降雨完成后静置 5 d ,共降雨两次,约为石家庄市 1 年雨量。在这一过程中种植土完成自重固结,下沉约 20 cm ,从而获得了完成自重固结的原状种植土。

(4) 真实降雨时空分布不均,降雨量差异明显,入渗进入种植土的污染量有差异,若进入土体的污染量较大,限于土体的净化能力,出水水质可能超标,但若进入土体的污染量较少,出水污染物浓度小,但总体上对于一定时间的多次降雨而言,收集到的净化雨水水质总量合格,这对于雨水入渗和利用而言,足以满足要求,因此该文采用道路径流雨水污染物浓度平

均值作为试验参数开展研究。按照文献[22]和石家庄市道路径流雨水 SS、COD、TP 和 NH_3-N 的浓度,在水箱内制备人工雨水,取样测试污染物浓度。

(5) 开启降雨系统降雨,在模型桶下部出水口不断收集渗透过种植土、碎石层的雨水,装入收集瓶内,送试验室测试污染物浓度。COD 采用重铬酸钾法测试,SS 采用滤纸过滤法测试, NH_3-N 采用纳氏试剂分光光度法测试,TP 采用钼酸铵分光光度法测试。

2.4 试验结果及分析

按照上述试验方案,对 60 cm 种植土开展 6 次道路径流雨水入渗、水质净化的试验研究。一次试验降雨 0.369 m^3 ,约为 0.5 年的降雨量,代表了降雨 0.5 年的工况,6 次试验代表了实际道路 3 年降雨情况,试验结果见图 2~5。

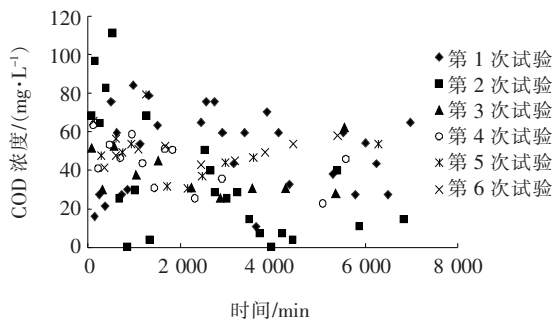


图2 种植土出水 COD 浓度

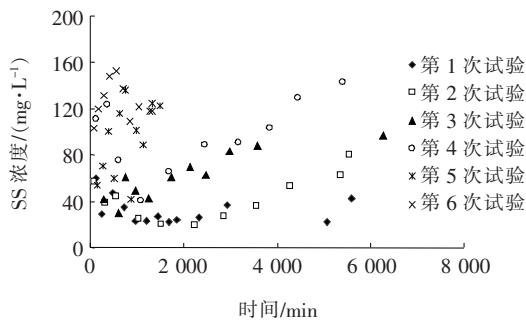


图3 种植土出水 SS 浓度

由图 2~5 可以看出:出水的 COD、SS、 NH_3-N 和 TP 浓度都低于种植土入水浓度,这表明种植土对道路径流雨水污染物有净化效果。然而,出水污染物浓度随时间具有很大的离散性和随机性。为了便于分析,定义雨量污染物加权浓度。其中,COD 雨量加权浓度为:

$$C_{\text{COD}} = \frac{\sum \text{COD}_i Q_i}{\sum Q_i} \quad (2)$$

式中: C_{COD} 为 COD 雨量加权平均浓度; COD_i 为降雨第 i 时间段内 COD 浓度; Q_i 为降雨第 i 时间段内收集的雨量。

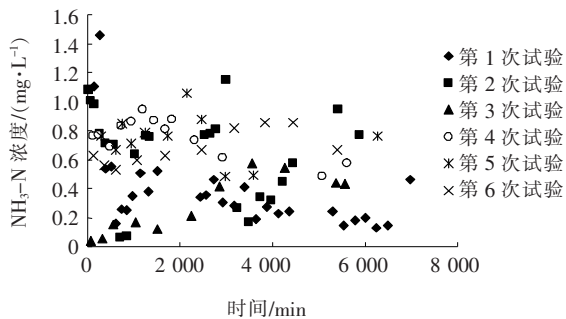


图4 种植土出水 NH_3-N 浓度

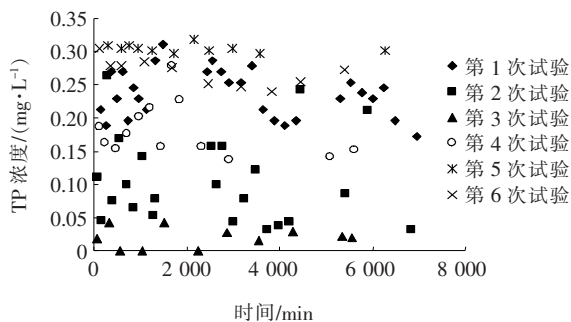


图5 种植土出水 TP 浓度

SS 雨量加权浓度为:

$$C_{\text{SS}} = \frac{\sum \text{SS}_i Q_i}{\sum Q_i} \quad (3)$$

式中: C_{SS} 为 SS 雨量加权平均浓度; SS_i 为降雨第 i 时间段内的 SS 浓度。

NH_3-N 雨量加权浓度为:

$$C_{\text{N}} = \frac{\sum N_i Q_i}{\sum Q_i} \quad (4)$$

式中: C_{N} 为 NH_3-N 雨量加权平均浓度; N_i 为降雨第 i 时间段内的 NH_3-N 浓度。

TP 雨量加权浓度为:

$$C_{\text{TP}} = \frac{\sum \text{TP}_i Q_i}{\sum Q_i} \quad (5)$$

式中: C_{TP} 为 TP 雨量加权平均浓度; TP_i 为降雨第 i 时间段内的 TP 浓度。

利用式(2)~(5)对试验数据进行统计分析,结果如表 1 所示。

表 1 种植土出水污染物加权平均浓度 mg/L

试验编号	C _{COD}	C _{SS}	C _{NH₃-N}	C _{TP}
1	50.1	32.1	0.379	0.06
2	35.5	42.1	0.646	0.07
3	38.5	62.3	0.284	0.28
4	43.5	97.3	0.754	0.27
5	48.1	114.2	0.746	0.30
6	50.7	118.0	0.678	0.13
平均	44.4	77.7	0.581	0.19

COD 浓度近似描述了雨水内有机污染物的数量。这些有机污染物或溶解或悬浮于雨水内,种植土通过拦截、吸附、化学和微生物作用净化。从表 1 可以看出:

(1) 第 1 场降雨出水 COD 浓度较高,这可能是由于刚开始降雨,有机物与土体接触时间短,微生物尚未大量繁殖,微生物作用不显著,出水 COD 浓度较大。第 2 场降雨时,拦截、吸附、化学和微生物作用都发生作用,出水 COD 加权浓度为 35.5 mg/L,继续降雨,出水 COD 浓度逐渐增加。这主要是由于随着种植土内积聚的有机物越来越多,种植土的吸附和拦截能力减弱所致。

(2) 种植土出水 SS 浓度随降雨次数增加而逐渐增加。这主要是由于种植土主要通过拦截和吸附方式捕获 SS,单位土体孔隙结构捕获 SS 的数量是有限的,随着土体孔隙结构捕获的 SS 数量增加,其吸附能力减弱,种植土出水 SS 浓度逐渐增加。尽管如此,6 次降雨后种植土出水 SS 加权浓度为 118 mg/L,与种植土入水 SS 浓度 490.9 mg/L 相比,仍有很大降低。

6 次降雨种植土出水 NH₃-N 和 TP 的浓度随降雨次数没有明显变化规律,这主要是由于土壤中 NH₃-N 和 TP 的来源较为复杂,在试验室试验条件下土壤内的 NH₃-N 和 TP 浓度可能发生改变所致。

(3) 经过种植土绿化带净化后,出水污染物浓度显著下降,6 次试验出水 COD 加权浓度均值为 44.4 mg/L,下降 73.5%,SS 加权浓度均值为 77.7 mg/L,下降 84.2%。

3 种植土出水污染物浓度达标性分析

目前,海绵城市结构出水污染物允许浓度尚无标准。中华人民共和国地表水环境质量标准第 4 类排放

水体污染物浓度允许限值如表 2 所示。

表 2 第 4 类排放水体污染物浓度允许限值 mg/L

COD	NH ₃ -N	TP	Zn	Pb
30	1.5	0.3	2.0	0.05

石家庄市海绵城市建设指南要求海绵城市结构对雨水内 SS 浓度消减率不小于 50%。

由表 1 可得,种植土 NH₃-N 和 TP 的出水浓度满足表 2 的规定。种植土出水 SS 浓度最大值为 118.0 mg/L,种植土入水 SS 浓度为 490.9 mg/L,经过种植土后,SS 浓度消减了 75.96%,满足石家庄市海绵城市建设指南要求。种植土出水 COD 浓度为 35.5~50.7 mg/L,出水 COD 浓度超过了表 2 中的限值(30 mg/L)。

在前期石家庄市道路径流雨水水质调查中,测试了石家庄市天然雨水的污染情况,结果如表 3 所示。

表 3 石家庄市天然雨水污染物浓度 mg/L

COD	NH ₃ -N	TP	SS
62.6	0.42	0.29	54.7

从表 3 可见:天然雨水 COD 浓度为 62.6 mg/L,天然雨水的 COD 浓度比表 2 中规定值大,天然雨水降落到地表,很明显允许入渗到地下。据此,对于石家庄市海绵城市建设,种植土出水 COD 允许浓度宜更改为 62.6 mg/L。该文种植土出水 COD 浓度小于 62.6 mg/L,种植土出水浓度视为满足入渗地下要求。

总体来看,经种植土净化后,石家庄市道路径流雨水污染物浓度总体上大幅下降,净化后的道路径流雨水可以入渗到地下。

4 结论

自制了道路径流雨水入渗种植土绿化带足尺试验模型,在试验室配置了石家庄市道路径流雨水,开展降雨试验,测试种植土绿化带出水污染物浓度,得到如下结论:

(1) 种植土出水 COD 浓度随降雨次数先减小后增加,出水 SS 浓度随降雨次数逐渐增加,出水 NH₃-N 浓度和 TP 浓度没有明显规律。

(2) 种植土出水 COD 允许浓度限值建议取为天然雨水 COD 浓度和第 4 类排放水体污染物浓度允许限值中的大值。

(3) 经过 60 cm 种植土绿化带净化后,道路径流雨水污染物浓度显著降低,净化后的道路径流雨水可以入渗到地下。

(4) 种植土绿化带海绵道路结构不仅能收集入渗道路径流雨水,还能净化道路径流雨水,降低入渗雨水的污染物浓度,具有广泛推广价值。

(5) 道路径流雨水入渗种植土,一些污染物积聚于种植土孔隙内,可能使种植土绿化带结构发生淤堵,相关试验研究结果另文介绍。

参考文献:

- [1] 程树斌,关彤军,张春会,等.海绵城市道路种植土一碎石绿化带的雨水入渗[J].中外公路,2018(2).
- [2] DREELIN E A, FOWLER L, RONALD CARROLL. A Test of Porous Pavement Effectiveness on Clay Soils during Natural Storm Events[J]. Water Research, 2006, 40: 799—805.
- [3] COLLINS K A, HUNT W F, HATHAWAY J M. Hydrologic Comparison of our Types of Permeable Pavement and Standard Asphalt in Eastern North Carolina [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008, 12 (13): 1 146—1 157.
- [4] D. G. Park, N. Sandoval, W. Lin, et al. A Case Study: Evaluation of Water Storage Capacity in Permeable Block Pavement, KSCE[J]. J. Civ. Eng, 2014, 18(2): 514—520.
- [5] Mengguang Zhu, Hao Wang, LiLi Liu, et al. Preparation and Characterization of Permeable Bricks from Gangue and Tailings [J]. Construction and Building Materials, 2017, 148: 484—491.
- [6] Yong Liu, Tian Li, Hangyu Peng. A New Structure of Permeable Pavement for Mitigating Urban Heat Island [J]. Science of the Total Environment, 2018, 634: 1 119—1 125.
- [7] 唐双成,罗纨,贾忠华,等.填料及降雨特征对雨水花园削减径流及实现海绵城市建设目标的影响[J].水土保持学报,2016(1).
- [8] 宫永伟,戚海军,李俊奇,等.城市道路低影响开发设计的雨洪滞蓄效果分析[J].中国给水排水,2014(9).
- [9] 郭振清,张春会,关彤军,等.海绵城市渗水雨水井新构造及入渗流量计算方法[J].中外公路,2019(1).
- [10] 李华伟,白冰,王梦恕,等.可溶性污染物在非饱和成层土中的迁移规律研究[J].土木工程学报,2015(1).
- [11] 詹良通,刘伟,陈云敏,等.某简易垃圾填埋场渗滤液在场底天然土层迁移模拟与长期预测[J].环境科学学报,2011(8).
- [12] 陶权,姚景,何树福,等.不同降雨强度下污染土重金属元素随径流迁移转化特征[J].水土保持学报,2015(2).
- [13] 梁冰,赵颖,薛强,等.土壤中污染物迁移转化规律的数值模拟研究[J].岩土力学,2008(9).
- [14] 狄军贞,张晓莹,肖利萍,等.垃圾渗滤液污染物在土壤中迁移规律试验及模拟[J].水资源与水工程学报,2009(2).
- [15] 卢彬.重金属污染物在土壤中迁移规律及修复技术研究[J].环境科学与管理,2014(9).
- [16] 李小平,朱伟.土壤孔径分布对污染物迁移过程中弥散系数的影响[J].水资源与水工程学报,2014(2).
- [17] 曾兴,詹良通,陈云敏.低渗透性土柱对流—弥散迁移试验解析模拟边界适用性研究[J].岩土工程学报,2017(4).
- [18] Xiao Ping, Zhu Wei. Effect of Distribution of Soil Pore Size on Dispersion Coefficient in Migration Process of Pollutant[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering. 2014(2): 172—175.
- [19] Joanna Fronczyk. Artificial Road Runoff Water Treatment by a Pilot—Scale Horizontal Permeable[J]. Ecological Engineering, 2017, 107: 198—207.
- [20] 石家庄市海绵城市建设办公室.石家庄市海绵城市规划设计导则[Z],2016.
- [21] GB 50400—2006 建筑与小区雨水利用工程技术规范[S].
- [22] 关彤军,张春会,王雯,等.石家庄市区道路径流雨水污染特征调查[J].河北科技大学学报,2017(6).
- [23] 陈如海.污染液在地基土体中迁移及控制研究[D].浙江大学博士学位论文,2011.
- [24] GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S].