

# 植草沟对苏南地区面源污染控制的案例研究

戈鑫<sup>1,2,3</sup>, 杨云安<sup>1</sup>, 管运涛<sup>2,3</sup>, 陈俊<sup>1</sup>

(1. 常州市排水管理处, 江苏 常州 213017; 2. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 3. 清华大学 深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 为探究植草沟对苏南地区面源污染的控制效果,同时为苏南地区构建海绵城市提供现场试验数据及理论依据,在2016年10月1日—28日,对常州市戚墅堰污水处理厂内的植草沟设施进行监测,考察大、中、小雨型下植草沟对道路径流水质及污染负荷的控制效果。结果表明,在大、中、小降雨事件中,道路径流各项指标大致呈现初期浓度较高、随后浓度不断降低的趋势,道路初期径流污染程度更大,且大雨时道路面源污染更严重;3种雨型情况下植草沟对径流中SS和COD的去除效果良好且稳定,对二者的去除率分别在50%和30%以上,但对氮、磷污染物的去除效果不好,有氮、磷污染释放的现象发生;植草沟对地表径流污染负荷的削减率维持在较高水平,其中对SS和COD负荷的削减率超过了90%,对氮、磷污染负荷的削减率超过了80%。

**关键词:** 植草沟; 道路径流; 面源污染; 苏南地区

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)19-0134-05

## A Case Study on Control of Non-point Source Pollution by Grassed Swales in South Jiangsu

GE Xin<sup>1,2,3</sup>, YANG Yun-an<sup>1</sup>, GUAN Yun-tao<sup>2,3</sup>, CHEN Jun<sup>1</sup>

(1. Changzhou Drainage Administration, Changzhou 213017, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** Water quality of grassed swales in Qishuyan WWTP in Changzhou was monitored during October 1 to 28, 2016, and the control effects of grassed swales on water quality and pollution load of road runoff were investigated. The exploration not only desired to investigate the performance of grassed swales for controlling non-point source pollution in south Jiangsu but also provide field test data and theoretical basis for construction of sponge city. The results indicated that the indexes of road runoff generally showed a trend of higher initial concentration, and then followed by a continuous decrease of concentration in large, medium and small rainfall events. Road runoff pollution was more serious at the beginning, and road non-point source pollution was more serious in heavy rain. Grassed swales had stable removal efficiencies of SS and COD in all 3 types of rainfall, and the removal efficiencies were over 50% and 30% respectively. However, the removal efficiencies of nitrogen and phosphorus were poor, and release of nitrogen and phosphorus occurred in the tests. The grassed swales maintained high removal efficiencies of

the pollution load of the surface runoff. The reduction rates of SS and COD loads were over 90%, and the reduction rates of nitrogen and phosphorus loads were more than 80%.

**Key words:** grassed swale; road runoff; non-point source pollution; south Jiangsu

随着城市化的持续推进,城市地表不透水面积大幅增加,导致城区雨水径流量激增,城市雨水径流污染日趋严重,已成为城市河流与湖泊等受纳水体的第三大污染源<sup>[1]</sup>,且极易引发城市内涝并增加城市管网的排水压力。低影响开发(LID)技术以尊重自然、顺应自然为前提,针对城市内涝及面源污染问题提供系统的解决方案<sup>[2]</sup>。植草沟是LID技术的一种,对控制城市面源污染及缓解内涝效果显著,国外已有广泛运用<sup>[3]</sup>。我国海绵城市建设刚刚起步,一些学者在陕西、安徽等地对植草沟的研究及现场试验表明,植草沟对面源污染及内涝均有一定的控制效果,但植草沟在苏南地区的实际运行效果罕有报道<sup>[3,4]</sup>。为此,笔者在常州市戚墅堰污水处理厂内大规模建设植草沟,探究该技术对苏南地区城市面源污染的实际控制效果,以期苏南地区推行海绵城市建设提供研究基础,为治理苏南地区面源污染及城市内涝提供备选方案。

## 1 材料与方法

### 1.1 工程概况

戚墅堰污水处理厂占地为8.4 hm<sup>2</sup>,全厂建有植草沟长度共计约1 000 m,植草沟顶宽为0.5 m、底宽为0.3 m、沟深为0.4 m。植草沟表面种植天堂草328,绿化坡度为0.5%,成坪后每月修剪3次左右,使草茎高度不超过1.5 cm。植草沟植被土壤层为腐熟种植土,厚度>30 cm,压实系数为75%,其上铺设10 cm厚的无杂物的中砂,滚筒压实,种植初期每平方米土壤中加入2 kg泥炭土及0.5 kg高效复合肥料。污水厂内植草沟以道路径流为进水,每间隔30 m左右设置一个出水口,试验段植草沟汇水面积为180 m<sup>2</sup>。

### 1.2 样品采集与检测

于试验所选植草沟进、出水口分别设置采样点,待产生径流后,用250 mL聚乙烯采样瓶采集水样。采样间隔遵循“先密后疏”的方式:降雨初期每5~10 min采样一次,其后根据降雨情况间隔30~60 min采样一次,直至产流结束。监测区内降雨数据通过污水厂外1.5 km处的移动式气象站获取。

样品采集后于4℃条件下保存并及时检测,主

要检测指标为:COD、SS、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN及TP,分别采用重铬酸钾滴定法、称重法、纳氏试剂比色法、紫外分光光度法及钼酸铵分光光度法测定。

### 1.3 数据分析方法

考虑降雨事件中径流污染物浓度随时间的变化而变化,本试验对降雨过程连续采样并监测,并结合流量监测数据计算以获得场次降雨径流污染物平均浓度(EMC),即为单场降雨事件中径流污染负荷与径流总量之比,表达式如下<sup>[5]</sup>:

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^t C_t Q_t dt}{\int_0^t Q_t dt} = \frac{\sum_{i=0}^n C_{t(i)} Q_i}{\sum_{i=0}^n Q_i} \quad (1)$$

式中: $M$ 为降雨事件中污染物总量,mg; $V$ 为降雨事件中径流总量,L; $C_t$ 为 $t$ 时刻径流污染物的瞬时浓度,mg/L; $Q_t$ 为 $t$ 时刻的瞬时径流流量,L/s; $t$ 为降雨事件的总径流时间,s; $C_{t(i)}$ 为 $i$ 时段径流污染物浓度,mg/L; $Q_i$ 为 $i$ 时段径流流量,L/s。

通过对过程样品水质及流量的连续监测,计算径流污染负荷 $L$ ,表达式如下<sup>[6]</sup>:

$$L = \int_0^t C_t Q_t dt = \sum_{i=0}^n C_{t(i)} V_i \quad (2)$$

式中: $V_i$ 为 $i$ 时段的降雨径流总量,L。

## 2 结果与讨论

### 2.1 降雨基本特征及径流特征

#### 2.1.1 降雨基本特征

本次试验监测期为2016年10月1日—28日,期间共降雨14场,其中植草沟发生径流事件共计3场,其余11次降雨事件24 h降雨量均小于3 mm。3场产流的降雨事件时间分别为10月7日(大雨)、20日(小雨)和26日(中雨),降雨量分别为34、4、14.5 mm,降雨历时分别为260、145、300 min,平均降雨强度分别为7.85、1.66、2.90 mm/h,雨前干期天数分别为3、1、2 d。大雨事件平均雨强较其余两者更大,且干期天数较二者更长,而中、小两场降雨事件特征较为相似,均为均匀型降雨,但中雨事件降雨历时更长。

#### 2.1.2 径流污染特征

植草沟进水为污水厂的道路雨水径流,3场降雨事件中道路径流污染物浓度的变化如图1所示。大雨事件中道路产流历时100 min,植草沟进水SS

及TN浓度超标严重,采样初期SS浓度为Ⅳ类水质标准的3.14倍,TN浓度在径流发生第10分钟时最高,为Ⅳ类水质标准的1.66倍。随降雨时间的延长,COD浓度大致呈逐渐降低的趋势,SS浓度在径流初期降幅显著,10 min时较5 min时的降幅达到了66.7%,30 min时SS浓度再次升高,此后不断降低直至产流结束,产流始末COD和SS浓度的降幅分别为79.6%、60.0%; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN及TP浓度波动较大,变化无明显规律。

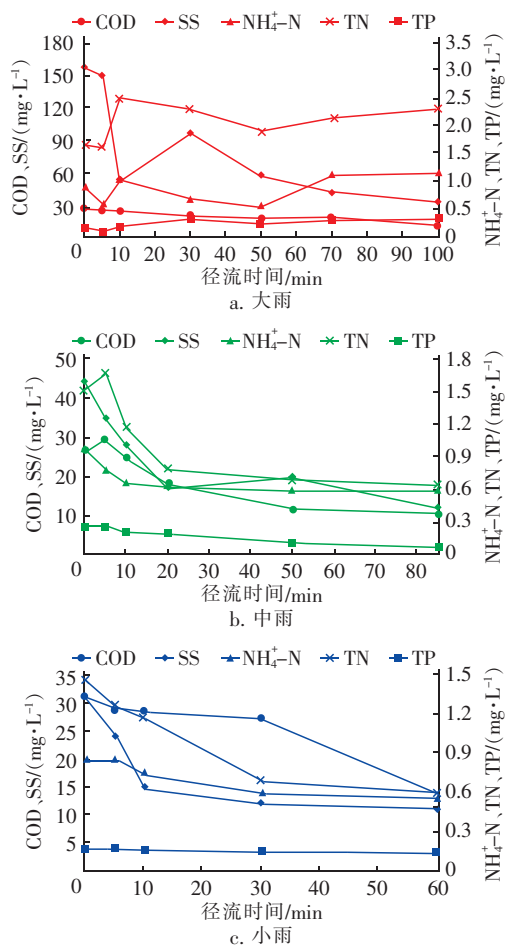


图1 道路径流污染物浓度变化

Fig. 1 Variation of pollutant concentrations in road runoff

中雨事件中道路产流历时85 min,各指标浓度均随降雨时间的延长而呈降低趋势,且降幅明显,相比初期径流,产流结束时COD、SS、TN、TP、氨氮浓度分别降低了55.3%、54.6%、54.5%、53.6%、39.8%,除氨氮外,其余指标的降幅均在50%以上。

小雨事件中道路产流历时60 min,除TP在5 min时稍有升高,各指标浓度均随降雨时间的延长而不断降低,至产流结束时SS、TN、COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、

TP浓度降幅分别达到了64.5%、59.6%、56.4%、32.8%、21.1%,SS、TN及COD浓度下降显著。

### 2.1.3 径流 EMC 特性

统计3场降雨事件中植草沟进水污染物指标的EMC值,结果见表1。3场降雨径流浓度均存在超过地表水Ⅳ类标准的情况(由于此标准未涉及SS,故SS指标参照《污水综合排放标准》的三级标准),表明道路面源污染有超标事件发生,道路面源污染较重。但是,由于植草沟位于戚墅堰污水厂,厂内绿化率高且人流、车流量少,因此COD、SS及TP指标的EMC值较国内外其他研究要低。

表1 植草沟进水污染物的 EMC 值

Tab. 1 EMC of influent pollutants of grassed swale

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项 目	COD	SS	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TN	TP
2016-10-07	20.7	74.0	0.86	2.14	0.20
2016-10-20	25.4	17.9	0.70	1.01	0.15
2016-10-26	19.9	24.7	0.70	1.04	0.19
GB 3838—2002 的Ⅳ类限值	30	50*	1.5	1.5	0.3

注: “\*”为《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)的三级标准限值。

综合比较可知,除大雨事件的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN和TP指标外,3场降雨的道路径流污染物指标均呈现初期浓度较高、之后不断降低的趋势,表明道路初期雨水径流污染较大,需重点关注。此外,除COD和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 指标略有不同,植草沟进水SS、TN和TP指标均满足 $\text{EMC}_{\text{大雨}} > \text{EMC}_{\text{中雨}} > \text{EMC}_{\text{小雨}}$ 的规律,表明大雨时道路面源各类污染物因雨水冲刷量更大,更易析出并随径流污染受纳水体。

### 2.2 植草沟对道路面源污染的控制效果

大雨事件中,道路产流10 min后植草沟开始出水,植草沟出水COD、SS、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP指标的EMC值分别为10.4、7.1、0.85、1.87、0.41 mg/L,与进水EMC值相比,除TP指标升高外,其余指标均有降低,SS、COD、TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 指标的EMC值降幅分别为90.4%、49.8%、12.6%、1.2%,可知大雨时植草沟对道路径流中SS和COD的去除效果良好,对氮类污染物有一定的净化作用,但对TP的去除效果差。产流过程中,同时刻COD出水浓度始终低于进水浓度;SS出水浓度自15 min时稳定低于同时刻进水浓度,结束时维持在12.0 mg/L左右,去除效果较佳;出水60 min后, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度逐渐低于同时

刻进水浓度直至产流结束;除在 15 min 时有突降,出水 TN 浓度一直保持随时间增加而降低的趋势,且与  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度相同,在 60 min 左右开始低于同时刻进水浓度;在前 90 min,TP 出水浓度始终比进水浓度高,且高于地表水Ⅳ类标准,污染较严重,至植草沟出水结束时,TP 浓度已降至 0.3 mg/L 以下,TP 污染情况显著缓解。

在中雨事件中,植草沟出水 COD、SS、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 和 TP 指标的 EMC 值分别为 13.2、11.5、0.85、1.83、0.09 mg/L,其中 COD、SS 和 TP 指标的出水 EMC 值均比进水低,去除率分别为 33.7%、53.4%、52.6%,而  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 的出水 EMC 值则比进水要高,增幅分别为 21.4%、76.0%。植草沟开始出水时 COD 浓度为 21.2 mg/L,较道路径流初始浓度显著降低,60 min 左右开始低于同时刻进水浓度;SS 出水浓度始终低于同时刻进水浓度,出水结束时 SS 浓度低至 6.0 mg/L;氮类污染物出水浓度基本均大于同时刻进水浓度,且出水初期 TN 高达 3.99 mg/L,污染严重;100 min 后,TP 出水浓度低于同时刻进水浓度,出水浓度在 0.60~0.64 mg/L 之间。

在小雨事件中,道路产流 45 min 后植草沟开始出水,COD、SS、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP 指标的出水 EMC 值分别为 16.5、6.9、0.86、1.59、0.14 mg/L。与中雨事件类似, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 出水 EMC 值高于进水,增幅分别为 22.9%和 57.4%,而植草沟对 COD、SS 和 TP 均具有一定的净化作用,其出水 EMC 值较进水分别降低 35.0%、61.5%和 6.7%。比较可知,植草沟对 COD 和 SS 具有显著的去除效果,对 TP 去除能力微弱,而对氮类污染物无去除效果,且出水 TN 的 EMC 值仍稍高于地表水Ⅳ类标准。植草沟出水 COD 和 SS 浓度在 50 min 后均低于同时刻进水浓度;出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  与 TN 浓度均高于进水浓度,且植草沟出水开始时 TN 浓度高达 3.36 mg/L;TP 出水浓度在出水 5 min 时低于同时刻进水浓度,略有升高后又降至进水浓度以下,波动较大。

### 2.3 植草沟对污染负荷的控制效果

通过渗透、蒸发、孔隙存储等过程,植草沟可显著控制径流体积,以大量削减出水水量<sup>[3]</sup>。分析 3 次降雨事件的降雨量以及植草沟进水、出水流量数据,可知植草沟对径流水量的削减效果显著,在小雨、中雨和大雨事件中的削减率分别为 96.0%、89.7%、88.9%。进一步计算 3 场降雨中植草沟对

道路径流污染负荷的削减率,结果表明,对于 SS、COD、TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TP 污染负荷,大雨事件的削减率分别为 98.8%、94.9%、90.7%、89.3%、82.1%,中雨事件的削减率分别为 95.1%、93.0%、83.2%、87.5%、94.5%,小雨事件的削减率分别为 98.4%、97.6%、94.3%、95.1%、96.3%。可知,植草沟对道路径流中 SS 和 COD 负荷的削减率稳定维持在 90% 以上,对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 和 TP 负荷的削减率稳定在 80% 以上,与对径流污染物浓度的去除效果相比,植草沟对污染负荷的削减率更优、更稳定。

### 2.4 讨论

植草沟对道路径流污染物的去除率见表 2。可知,植草沟对径流中 COD 和 SS 的去除效果良好,SS 去除率最高达 90.4%,COD 去除率也稳定在 30% 以上。这是因为当地表径流流经植草沟表面时,由于颗粒沉淀、土壤过滤与渗透、植被持留及生物降解等共同作用,其中的大部分悬浮颗粒污染物和部分溶解态污染物会被有效去除<sup>[7]</sup>。但是,植草沟对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 及 TP 的去除率波动较大,各降雨事件中均有氮、磷污染物的释放现象。这可能是因为土壤中混合的高效复合肥料仍有部分残留,且植草沟成坪后会定期修剪,肥料及植被中的氮、磷经雨水长时间冲刷与浸泡而易析出<sup>[2,7]</sup>。冬季植物体内的氮、磷更易释放进入水体和土壤中,试验时间临近冬季,因而植草沟较其他季节更易释放氮、磷污染<sup>[8]</sup>。

表 2 植草沟对道路径流污染物的去除率

Tab. 2 Removal rates of pollutants in road runoff by grassed swale %

项目	COD	SS	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TN	TP
大雨	49.8	90.4	1.2	12.6	-105.0
中雨	33.7	53.4	-21.4	-76.0	52.6
小雨	35.0	61.5	-22.9	-57.4	6.7

相比之下,植草沟对各污染负荷的削减率均更高且更加稳定,推测其原因可能是示范区植草沟与道路之间建有一段坡度为 0.5% 的绿化草坪,该段草坪的建设,使得地表径流在流入植草沟前有足够的停留时间进行沉淀与渗透,从而能在很大程度上削减径流量,进一步保证植草沟出水的污染负荷更低、更稳定<sup>[9,10]</sup>。然而,尽管植草沟对面源污染负荷的削减有显著成效,但其对已经削减了水量的径流水质净化效果仍有待改善,可从植草沟结构、植被选择及下垫面构造等方面进一步探究,以遴选最

优参数使植草沟在水质处理方面更高效、稳定<sup>[11]</sup>。

### 3 结论

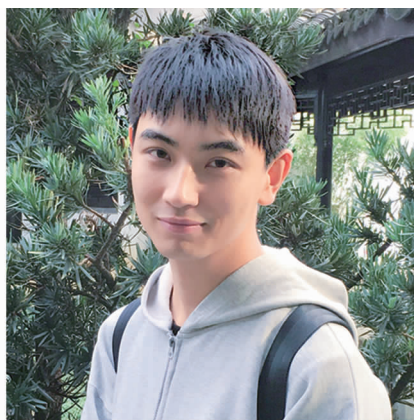
① 在大、中、小降雨事件中,道路径流污染物大致呈现初期浓度较高、随后浓度不断降低的趋势,初期雨水径流污染程度更大。不同雨型条件下,径流污染物的 EMC 值基本符合  $EMC_{\text{大雨}} > EMC_{\text{中雨}} > EMC_{\text{小雨}}$  的规律,大雨时道路面源污染更严重,污染物更易析出并随径流污染受纳水体。

② 植草沟对大、中、小3种雨型径流中的 SS 和 COD 均有一定的去除效果。去除率分别在 50% 和 30% 以上,而对氮、磷污染物的去除效果欠佳,有氮、磷污染释放的现象发生。

③ 植草沟对苏南地区道路径流水量的控制效果显著,对城市面源污染负荷保持较高的削减率,对 SS 和 COD 负荷的削减率在 90% 以上,对氮、磷负荷的削减率在 80% 以上。

### 参考文献:

- [1] Taebi A, Droste R L. Pollution loads in urban runoff and sanitary wastewater [J]. *Sci Total Environ*, 2004, 327 (1/3): 175 - 184.
- [2] Stagge J H, Davis A P, Jamil E, *et al.* Performance of grass swales for improving water quality from highway runoff [J]. *Water Res*, 2012, 46(20): 6731 - 6742.
- [3] 黄俊杰, 沈庆然, 李田. 植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究 [J]. *环境科学*, 2015, 36(6): 2109 - 2115.  
Huang Junjie, Shen Qingran, Li Tian. Performance of grass swales for controlling pollution of roadway runoff in field experiments [J]. *Environmental Science*, 2015, 36(6): 2109 - 2115 (in Chinese).
- [4] 唐双成, 罗纨, 贾忠华, 等. 西安市雨水花园蓄渗雨水径流的试验研究 [J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 75 - 79.  
Tang Shuangcheng, Luo Wan, Jia Zhonghua, *et al.* Experimental study on infiltrating stormwater runoff with rain garden in Xi'an, China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6): 75 - 79 (in Chinese).
- [5] Bertrand-Krajewski J L, Chebbo G, Saget A. Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon [J]. *Water Res*, 1998, 32 (8): 2341 - 2356.
- [6] 赵剑强. 城市地表径流污染与控制 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [7] 刘燕, 尹澄清, 车伍. 植草沟在城市面源污染控制系统的应用 [J]. *环境工程学报*, 2008, 2(3): 334 - 339.  
Liu Yan, Yin Chengqing, Che Wu. Application of grassed swales in urban non-point source pollution control [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008, 2 (3): 334 - 339 (in Chinese).
- [8] 余红兵. 生态沟渠水生植物对农区氮磷面源污染的拦截效应研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012.  
Yu Hongbing. Interception Effects of Aquatic Plants on Nitrogen and Phosphorus Non-point Source Pollution of Agricultural Areas in Ecological Ditch [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2012 (in Chinese).
- [9] 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 & Management*, 2001, 127(3): 168 - 171.
- [10] Chen J, Adams B J. Analysis of storage facilities for urban stormwater quantity control [J]. *Adv Water Resour*, 2005, 28(4): 377 - 392.
- [11] 王龙涛, 赵建伟, 华玉妹, 等. 表流型和渗滤型植草沟净化城市地表径流试验研究 [J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(7): 71 - 74.  
Wang Longtao, Zhao Jianwei, Hua Yumei, *et al.* Study on infiltration grassed swale and surface flow grassed swale to purify urban surface runoff [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(7): 71 - 74 (in Chinese).



作者简介: 戈鑫(1993 - ), 男, 江苏连云港人, 硕士研究生, 主要研究方向为城市面源污染控制。

E-mail: 1794943894@qq.com

收稿日期: 2018 - 03 - 05