

# 高渗透下凹绿地对自然降雨径流及污染的削减效能

李建平<sup>1</sup>, 林 川<sup>1</sup>, 韦 玮<sup>1</sup>, 丛海兵<sup>2\*</sup>, 蒋新跃<sup>2</sup>, 赵庆俊<sup>2</sup>

(1. 扬州市涵闸河道管理处, 江苏 扬州 225000;

2. 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225127)

**摘要:** 针对粉细砂地区普通下凹绿地的蓄水、渗水能力低下的问题, 设计建设了水平高渗透、垂直高渗透、组合高渗透 3 种高渗透下凹绿地中试系统。记录了一个自然年的降雨量及绿地产流量, 试验测定了不同降雨强度下不同绿地的截污能力。结果表明, 在一个自然年中, 上凸式、普通下凹式、水平高渗透下凹式、垂直高渗透下凹式、组合高渗透下凹式绿地年径流总量控制率分别为 42.44%、76.43%、90.70%、86.85%、92.97%。在降雨重现期 0.3 ~ 5 年、降雨历时 60 min 的降雨条件下, 普通、水平高渗透、垂直高渗透、组合高渗透下凹式绿地对 COD 的平均削减率分别为 69.06%、93.47%、84.75%、95.58%; 对 SS 的平均削减率分别为 87.01%、96.75%、94.05%、97.50%; 对 TN 的平均削减率分别为 65.80%、90.03%、82.78%、93.14%; 对 TP 的平均削减率分别为 67.82%、91.78%、85.67%、94.32%。

**关键词:** 高渗透; 下凹绿地; 径流削减; 径流污染削减

中图分类号: TU985

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839 (2018) 11-0006-08

## Reduction efficiency of natural rainfall runoff and pollution by concave green space under high permeability

LI Jianping<sup>1</sup>, LIN Chuan<sup>1</sup>, WEI Wei<sup>1</sup>, CONG Haibing<sup>2\*</sup>, JIANG Xinyue<sup>2</sup>, ZHAO Qingjun<sup>2</sup>

(1. Yangzhou Culvert Gate Channel Management Office, Yangzhou 225000;

2. School of Environmental and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, Jiangsu)

**Abstract:** Aiming at the problem of low water storage and water seepage capacity of ordinary concave green space in fine sand area, three kinds of pilot test system of concave green space with high horizontal penetration, high vertical penetration and combined high penetration were designed and constructed. The rainfall and green real estate volume of a natural year were recorded, and the interception capacity of different green spaces under different rainfall intensities was tested. The results showed that in a natural year, the total annual runoff control rates of upper convex, ordinary permeable concave, high horizontal penetration concave, high vertical penetration concave and combined high penetration concave green space were 42.44%, 76.43%, 90.70%, 86.85% and 92.97% respectively. Under the rainfall conditions of 0.3 to 5 years of rainfall return period and 60 minutes of rainfall duration, the average reduction rate of common, horizontal high permeability, vertical high permeability and combined high permeability concave green space to COD was 69.06%, 93.47%, 84.75% and 95.58% respectively, the average reduction rate to SS was 87.01%, 96.75%, 94.05% and 97.50% respectively, the average reduction rate to TN was 65.80%, 90.03%, 82.78% and 93.14% respectively, and the average reduction rates to TP was 67.82%, 91.78%, 85.67% and 94.32% respectively.

收稿日期: 2018-05-24

基金项目: 江苏省水利科技项目 (2016048), 扬州市建设科技项目 (20160920), 扬州市重点研发计划项目 (YZ2017082)

作者简介: 李建平 (1977—), 男, 本科, 工程师, 主要从事水利工程建设与水利建设管理工作。

通讯作者: 丛海兵 (1968—), 男, 博士, 教授, 研究方向为水污染控制与给排水工程优化。

**Key words:** high permeability; concave green space; runoff reduction; runoff pollution reduction

随着城市化进程的不断加快,大量土地、农田被开发成楼房、马路、广场,本来透水的土层被混凝土、沥青、房屋覆盖。城市不透水地面增加,地面径流量增大,导致径流系数增大,道路被淹成为常态。此外,雨水径流污染已成为城市河湖主要的污染源之一<sup>[1-3]</sup>。针对这种状况,专家学者进行了大量研究,提出许多方案,如修建植物浅沟<sup>[4-5]</sup>、铺设透水路面<sup>[6-7]</sup>、修建下凹式绿地及绿色屋顶等<sup>[8-9]</sup>。其中,城市绿地作为城市生态功能的重要组成部分,应当发挥重要作用。但目前绿地多为上凸式,径流削减能力较差。而下凹式绿地蓄渗能力提高,一般做法是,下凹绿地比周边不透水地面低约 20 cm,雨水口设于绿地中,雨水口高出绿地面 10 ~ 15 cm<sup>[10]</sup>。地面径流从不透水地面流入下凹绿地,当绿地内积水水位超过雨水口时开始产流,雨水进入雨水管。下凹式绿地集蓄、渗功能为一体,绿地土壤孔隙、绿地地面与不透水地面高差部分的体积是绿地的蓄水量,绿地在积水条件下还能增加雨水的下渗量<sup>[11-12]</sup>。但是当土壤为粉砂、砂壤土等细颗粒时,孔隙率小,渗水效能不佳<sup>[13]</sup>。

为了提高下凹式绿地的蓄水截污能力,本文设计了 3 种高渗透下凹式绿地,与上凸式绿地、普通下凹式绿地进行对比,通过一个自然年的降雨产流记录,评价不同绿地的径流削减效能。同时,实验测定了径流水质,评价不同绿地的污染削减能力。

## 1 实验装置与方法

### 1.1 实验装置

#### (1) 降雨产流装置

设计建造了 5 种绿地产流中试系统,分别是上凸绿地、普通下凹绿地、水平高渗透下凹绿地、垂直高渗透下凹绿地、组合高渗透下凹绿地。每套试验系统包括绿地和不透水地面、人工降雨装置、径流测流装置。图 1 为上凸绿地降雨产流装置,图 2 为 4 种下凹绿地系统结构图。

每套产流装置的绿地和不透水地面的比例按照城市常规比例确定为 1:3,不透水地面平面 3×1 m,绿地 1×1 m,绿地位于不透水地面一端。不透水地面采用 20 cm 厚 C20 级混凝土浇筑,不透水地面除了与绿地相邻的其余三边用混凝土埂围护,以防雨水流失。绿地用边长为 1 m 的无底钢板箱打入地下 1 m,围护出边长为 1 m 的地下空间。其中,上凸绿地高出不透水地面 20 cm,其上种植草皮,种植土厚度 60 cm,其下为原状土;下凹绿地地面比不透水地面低约 20 cm,种植黄菖蒲、旱伞草等耐水植物,种植土厚度 20 cm。水平高渗透下凹绿地中间地面下埋设一道碎石垄沟,四周用土工布包裹,上填 10 cm 厚粗砂和 20 cm 厚煤渣复合土。碎石垄沟面积约占绿地总面积的 25%,碎石体积 0.150 m<sup>3</sup>,碎石粒径 5 ~ 10 mm。垂直高渗透下凹绿地下打入 3 根直径 0.15 m 的碎石桩,深 1.5 m,碎石体积 0.080 m<sup>3</sup>,桩顶填 10 cm 厚粗砂和 20 cm 厚煤渣复合土。组合高渗透下凹绿地是将碎石垄沟与 3 个碎石桩组合,碎石总体积 0.203 m<sup>3</sup>。

人工模拟降雨装置包括水箱、转子流量计和穿孔管,3 根穿孔管架设于整个地面径流装置上方,穿孔管下开设一排直径 2 mm 出水孔。

每个绿地的出口设集水槽收集径流,上凸绿地径流雨水流入不透水地面再流到集水槽,下凹

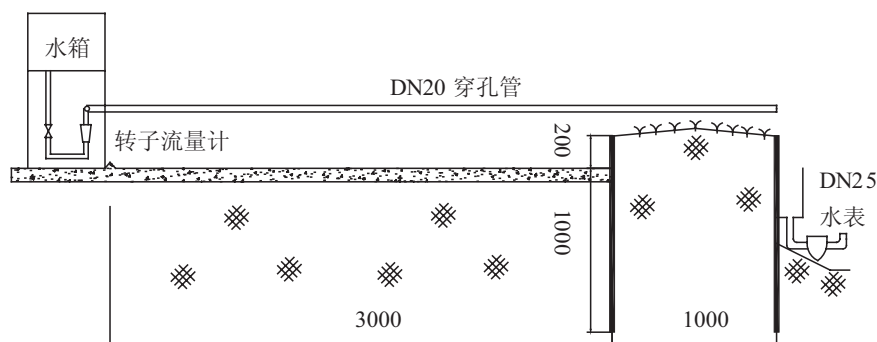


图 1 上凸绿地降雨产流装置

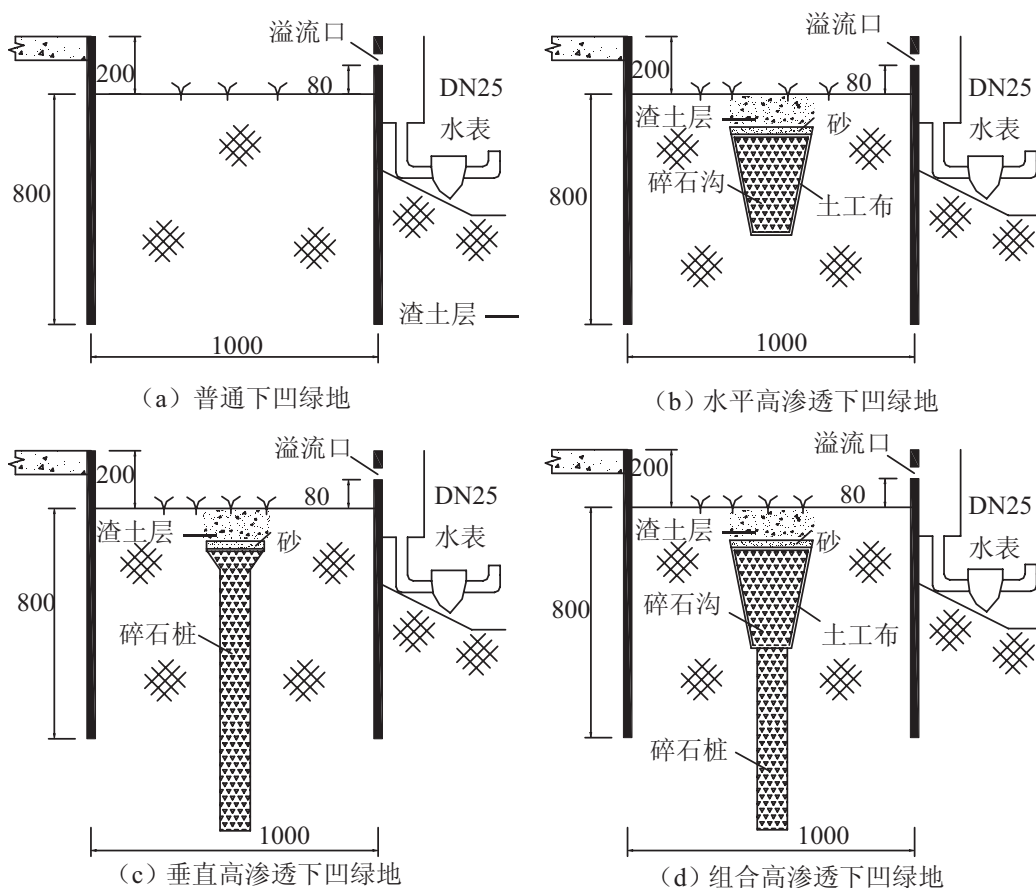


图 2 不同下凹绿地结构

绿地径流装置的不透水地面径流雨水先流入下凹绿地,在绿地上 8 cm 处设溢流口到集水槽。集水槽出口安装 DN25 的 LXS 型水表计量径流量。

### (2) 雨量计

采用 SJ-1 型虹吸式雨量计(上海气象仪器厂)记录降雨量。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 绿地降雨产流量测定

自 2016 年 12 月 27 日至 2017 年 12 月 26 日,监测一个自然年内各绿地系统的降雨径流量和降雨量。记录每场降雨前后每个绿地系统集水槽出口水表的读数,计算每场降雨的产流量。同时利用雨量计记录每场降雨的降雨量。

### 1.2.2 人工模拟降雨径流产污过程

#### (1) 模拟降雨

采用扬州市暴雨强度公式计算重现期为 0.3 a、0.5 a 的降雨强度(L/s.ha),代表小雨和中雨;重现期为 5 a 的降雨,代表暴雨;降雨历时均选取 60 min。中小降雨按照 60 min 均匀降雨,暴雨采用芝加哥雨型进行雨量分配<sup>[14]</sup>。

#### (2) 产流产污过程记录

从城市道路上扫取路面灰尘,用 40 目筛过滤掉杂物。向每种绿地系统地面上抛撒 30 g 路面灰尘。将每次模拟降雨的总水量装入水箱中,开启出水阀门,水流经过流量计、穿孔管降落到地面,产流经过水表流出。每隔 5 min 记录水表读数,自每个水表出口取水样带回实验室,测定 COD<sub>Cr</sub>、SS、TP、TN。

### 1.2.3 水质测定方法

悬浮固体(SS)采用称重法测定,水样用滤纸抽吸过滤,103 ~ 105℃烘干至恒重。化学需氧量(COD<sub>Cr</sub>)采用重铬酸钾法测定。总氮(TN)采用碱式过硫酸钾氧化法测定。总磷(TP)采用过硫酸钾氧化钼酸盐显色法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 一个自然年中不同绿地对降雨径流量的削减效果

从 2016 年 12 月 27 日至 2017 年 12 月 26 日止,

记录了每场降雨的降雨量, 同时记录了每种绿地系统的产流量, 折算成径流深度。在记录期间共降雨 48 场, 降雨产流记录如表 1 所示。

由表 1 可得, 在实验场地附近, 一年的降雨量

表 1 一个自然年不同绿地降雨产流记录

降雨时间	降雨量 (mm)	产流径流深 (mm)				
		上凸式	普通下凹式	水平高渗透 下凹式	垂直高渗透 下凹式	组合高渗透 下凹式
20161227						
20170104	23.00	12.77	0.00	0.00	0.00	0.00
20170106	21.00	12.02	0.00	0.00	0.00	0.00
20170118	5.00	1.08	0.00	0.00	0.00	0.00
20170203	2.00	0.78	0.00	0.00	0.00	0.00
20170208	3.00	0.97	0.00	0.00	0.00	0.00
20170216	2.40	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00
20170220	3.40	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20170221	20.40	12.29	0.00	0.00	0.00	0.00
20170312	2.90	0.86	0.00	0.00	0.00	0.00
20170317	1.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20170319	3.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20170322	9.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20170323	3.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20170330	8.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20170404	1.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20170405	8.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20170408	36.36	16.93	7.10	1.39	5.64	0.00
20170410	15.52	10.05	0.00	0.00	0.00	0.00
20170416	15.20	9.94	0.00	0.00	0.00	0.00
20170425	0.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20170501	11.05	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00
20170504	27.15	11.70	0.53	0.00	0.00	0.00
20170508	12.61	3.11	0.00	0.00	0.00	0.00
20170511	10.67	3.01	0.00	0.00	0.00	0.00
20170523	1.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20170605	12.02	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00
20170610	68.75	51.05	35.08	14.38	26.04	8.70
20170619	1.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

(续表 1)

降雨时间	降雨量 (mm)	产流径流深 (mm)				
		上凸式	普通下凹式	水平高渗透 下凹式	垂直高渗透 下凹式	组合高渗透 下凹式
20170622	1.45	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
20170630	6.21	1.14	0.00	0.00	0.00	0.00
20170701	7.95	1.43	0.00	0.00	0.00	0.00
20170702	32.00	14.57	0.00	0.00	0.00	0.00
20170704	4.85	4.64	0.00	0.00	0.00	0.00
20170705	31.52	29.80	17.71	3.44	8.35	2.37
20170710	30.84	30.95	19.88	4.51	6.16	0.00
20170729	35.10	14.10	1.44	0.00	0.00	0.00
20170808	6.20	1.40	0.00	0.00	0.00	0.00
20170812	56.48	34.85	17.78	3.84	5.40	0.62
20170816	3.20	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00
20170819	51.39	36.93	22.22	10.64	12.79	10.68
20170904	31.03	6.68	0.00	0.00	0.00	0.00
20170906	3.30	0.73	0.00	0.00	0.00	0.00
20170923	98.04	79.78	59.34	35.95	38.65	34.60
20170925	64.48	55.03	23.03	8.70	9.40	5.62
20171001	11.15	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00
20171013	70.59	48.27	5.78	0.00	4.64	0.00
20171116	5.92	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00
20171213	5.62	0.53	0.00	0.00	0.00	0.00
20171226						
合计	890.38	512.50	209.88	82.84	117.07	62.59

为 890.38 mm。上凸式、普通下凹式、水平高渗透下凹式、垂直高渗透下凹式、组合高渗透下凹式绿地的产流量折算成径流深,分别为 512.5、209.88、82.84、117.07、62.59 mm。与上凸式绿地相比,普通下凹式、水平高渗透下凹式、垂直高渗透下凹式、组合高渗透下凹式绿地的径流削减率分别为 59.05%、83.84%、77.16%、87.79%;与普通下凹式绿地相比,水平高渗透下凹式、垂直高渗透下凹式、组合高渗透下凹式绿地的径流削减率分别为 60.53%、44.22%、70.18%。上凸式、普通下凹式、水平高渗透下凹式、垂直高渗透下凹式、组合高渗透下凹式绿地年径流总量控制率分别为 42.44%、

76.43%、90.70%、86.85%、92.97%。

2.2 不同降雨强度下各种绿地系统产污过程

重现期为 0.3 a、0.5 a、5 a 模拟降雨产流水质分别如图 3、图 4 和图 5 所示。

由图 3、图 4、图 5 可知,重现期 0.3 ~ 0.5 a、历时 60 min 的中小降雨,只有上凸绿地产生了可观的径流,降雨初期 20 min 内污染浓度较高且快速降低,之后浓度较低。普通下凹绿地、垂直高渗透下凹绿地产流量很少,且污染物浓度也很低。水平高渗透下凹绿地和组合高渗透下凹绿地不产流。

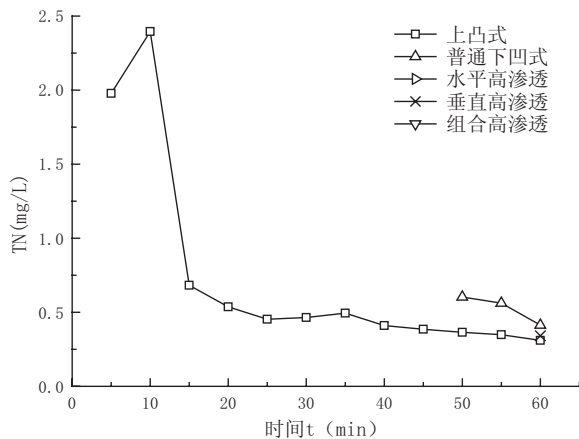
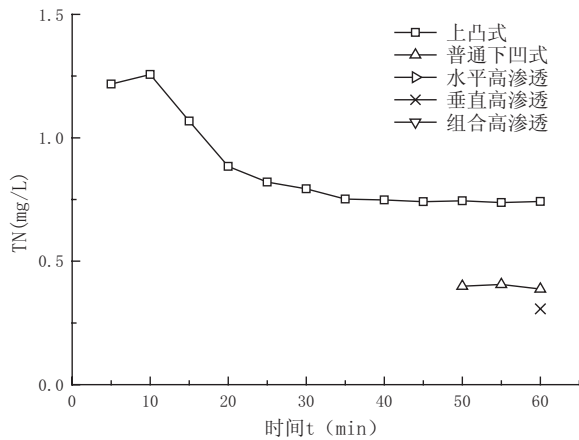
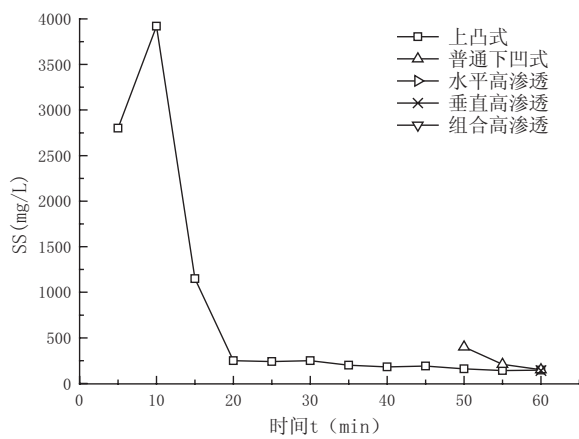
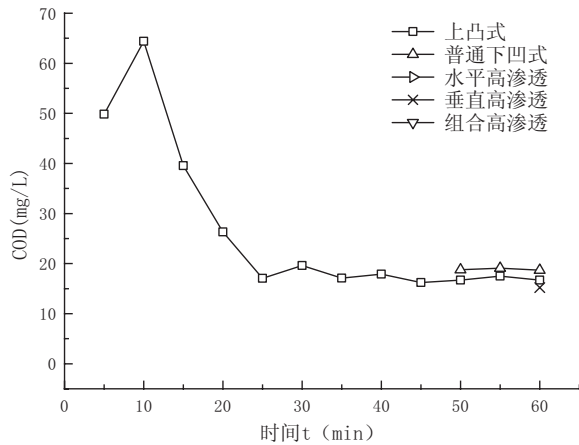


图 3 降雨重现期 0.3 a 下不同绿地产污过程

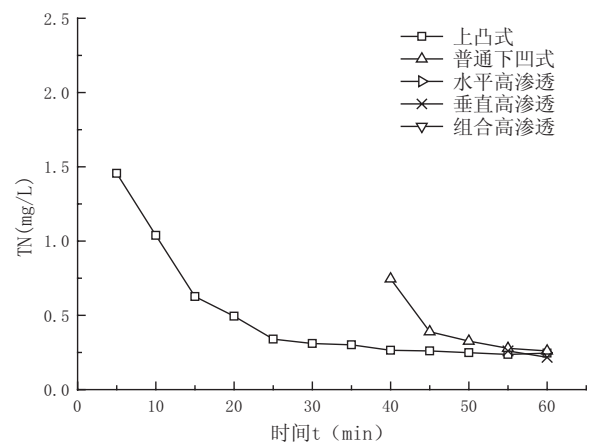
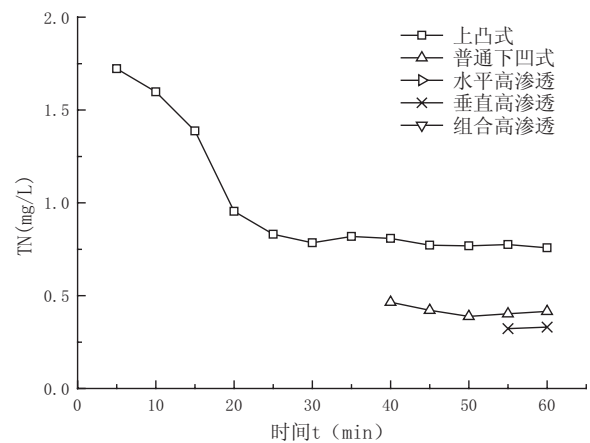
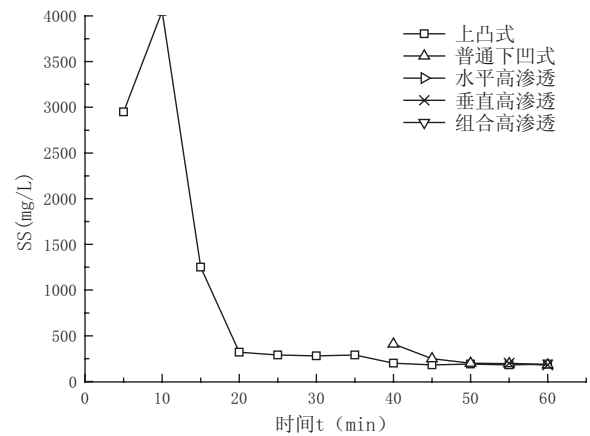
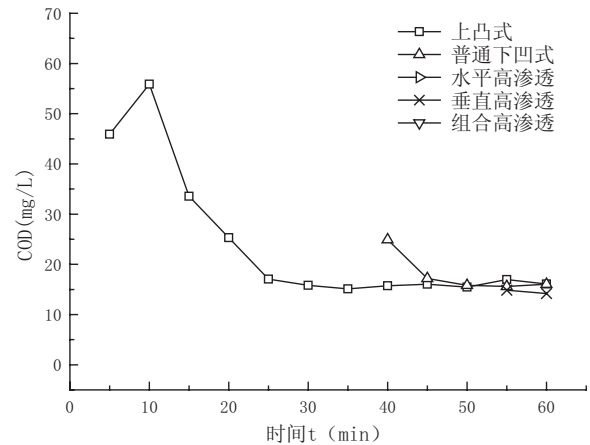


图 4 降雨重现期 0.5 a 下不同绿地产污过程



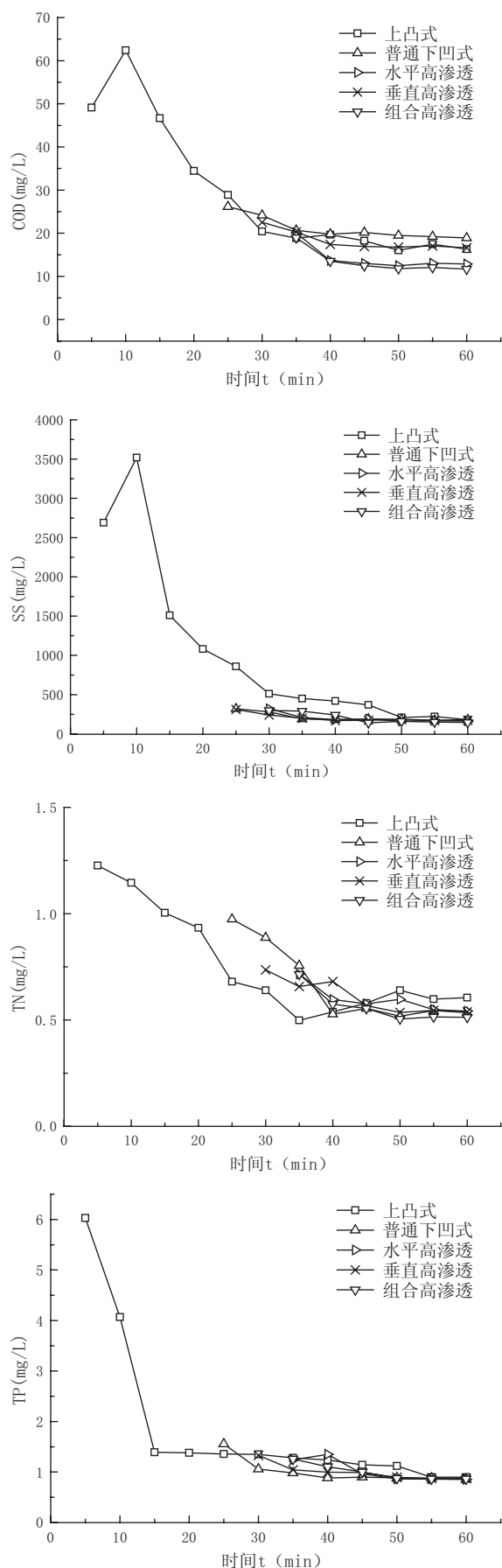
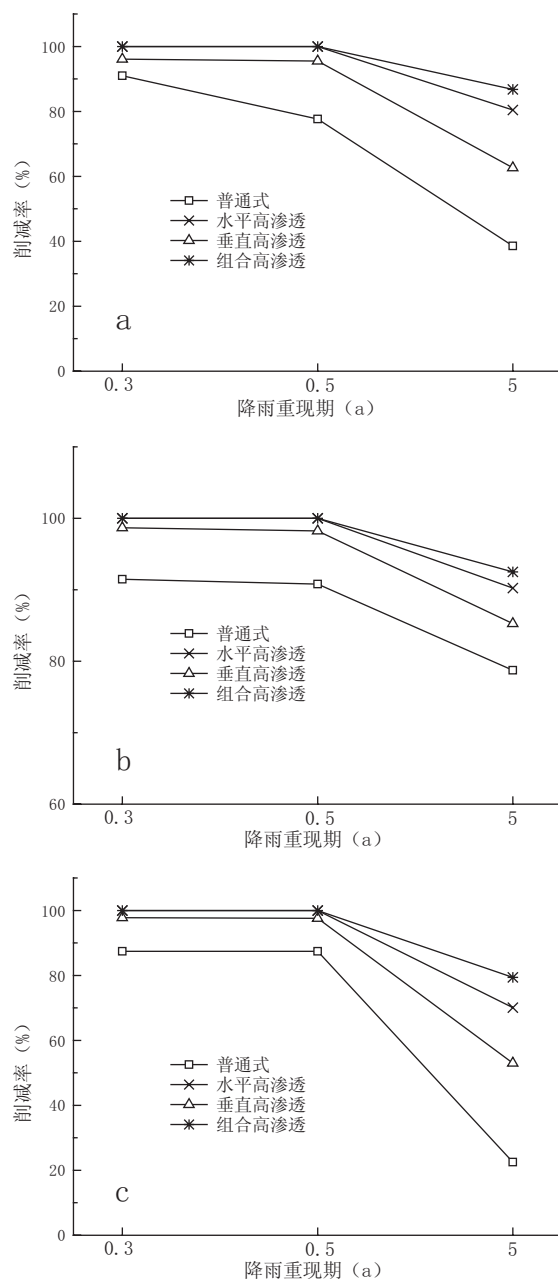


图5 降雨重现期5 a下不同绿地产污过程

重现期5 a、降雨历时60 min的暴雨,上凸绿地径流在降雨初期30 min内 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、SS、TN浓度较高且快速降低,TP在降雨初期15 min内浓度较高,之后浓度较低。下凹绿地在降雨开始25~35 min后才产流,且径流中污染物浓度较低。说明经过下凹绿地的沉淀截留作用,降雨径流中污染物被削减。

### 2.3 不同绿地系统对径流污染物的削减总量

将产污过程中各种污染物浓度分别与对应时刻的产流量相乘,得到产污总量,可计算出上凸绿地、各种下凹绿地的产污总量,进而计算出下凹式绿地相对于上凸式绿地的径流污染削减率,如图6所示。



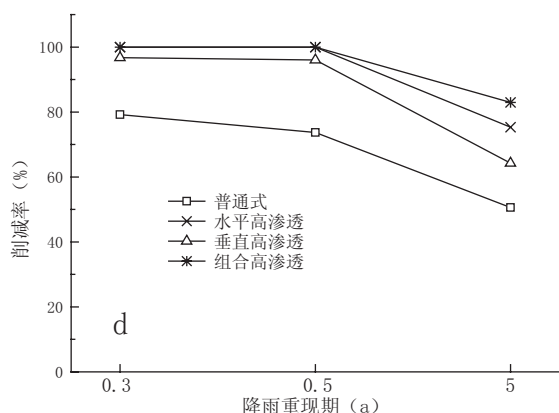


图 6 不同绿地的径流污染物总量削减率

由图 6 可知, 在重现期 0.3 ~ 5 a、历时 60 min 降雨条件下, 与上凸绿地相比, 各下凹绿地对雨水径流污染物均有不同幅度的削减, 降雨强度越大, 削减幅度越小。其中, 普通下凹式、水平高渗透下凹式、垂直高渗透下凹式、组合高渗透下凹式绿地对 COD 的削减率分别为 38.55% ~ 90.96%、80.40% ~ 100%、62.63% ~ 96.11%、86.75% ~ 100%; 对 SS 的削减率分别为 78.75% ~ 91.48%、90.25% ~ 100%、85.26% ~ 98.67%、92.49% ~ 100%; 对 TN 的削减率分别为 22.50% ~ 87.45%、70.08% ~ 100%、52.98% ~ 97.74%、79.41% ~ 100%; 对 TP 的削减率分别为 50.62% ~ 79.17%、75.33% ~ 100%、64.27% ~ 96.71%、82.95% ~ 100%。

### 3 结论

本研究采用透水性强的材料与土层相组合, 建设室外高渗透下凹绿地降雨产流系统, 监测扬州市一年的降雨量和不同绿地的产流量, 评估了下凹绿地对降雨径流的削减效能; 模拟测定了不同绿地对降雨径流污染的截污能力。主要结论如下:

(1) 在一个自然年中, 上凸式、普通下凹式、水平高渗透下凹式、垂直高渗透下凹式、组合高渗透下凹式绿地年径流总量控制率分别为 42.44%、76.43%、90.70%、86.85%、92.97%。普通下凹式、水平高渗透下凹式、垂直高渗透下凹式、组合高渗透下凹式绿地比上凸式绿地径流削减率 59.05%、83.84%、77.16%、87.79%。

(2) 普通下凹式、水平高渗透下凹式、垂直高渗透下凹式、组合高渗透下凹式绿地相较于上凸式绿地, 对 COD 的平均削减率分别为 69.06%

93.47%、84.75%、95.58%; 对 SS 的平均削减率分别为 87.01%、96.75%、94.05%、97.50%; 对 TN 的平均削减率分别为 65.80%、90.03%、82.78%、93.14%; 对 TP 的平均削减率分别为 67.82%、91.78%、85.67%、94.32%。

### 参考文献:

- [1] 刘旭军, 王海玲. 雨水径流携带污染负荷对水体影响的评价方法 [J]. 中国给水排水, 2008, 24 (6): 104-108.
- [2] 郭琳, 曾光明, 程运林. 城市街道地表物特性分析 [J]. 中国环境监测, 2003 (06): 40-42.
- [3] 张志彬, 孟庆宇. 城市面源污染的污染特征研究 [J]. 给水排水, 2016, 52 (S1): 163-167.
- [4] 李海燕, 魏鹏, 黄延, 张悦. 暴雨情况下传输型植被浅沟的净化效果研究 [J]. 中国给水排水, 2014, 30 (01): 99-103.
- [5] 许萍, 习伟进, 孙坤鹏. 中高雨强下公园传输型植被浅沟径流控制效果 [J]. 环境科学与技术, 2016 (11): 47-51.
- [6] 赵现勇, 程方, 张杏娟. 不同结构透水路面雨水径流污染物的削减作用 [J]. 天津城建大学学报, 2012 (4): 280-285.
- [7] 晋存田, 赵树旗, 闫肖丽. 透水砖和下凹式绿地对城市雨洪的影响 [J]. 中国给水排水, 2010, 26 (1): 40-46.
- [8] 马姗姗, 庄宝玉, 张新波. 绿色屋顶与下凹式绿地串联对洪峰的削减效应分析 [J]. 中国给水排水, 2014 (3): 101-105.
- [9] 段丙政, 赵建伟, 高勇. 绿色屋顶对屋面径流污染的控制效应 [J]. 环境科学与技术, 2013 (9): 63-65+123.
- [10] 住房城乡建设部. 海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建 (试行) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [11] 邢国平, 邵兆凤, 周建芝. 天津市建设下凹绿地的雨水蓄渗效果分析 [J]. 水土保持通报, 2012, 32 (6): 120-128.
- [12] 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 (02): 113-117.
- [13] 俞绍武, 丁年任, 心欣. 城市下凹式绿地雨水蓄渗利用技术的探讨 [J]. 给水排水, 2010 (36): 116-118.
- [14] 张大伟, 赵冬泉, 陈吉宁. 芝加哥降雨过程线模型在排水系统模拟中的应用 [J]. 给水排水, 2008, 34 (S1): 354-357.