灌木式屋顶绿化设计及对屋面初期雨水的净化

黄启华[1]，徐晓军[1]，段正洋[1]，岳秀林[1]，龚询木[2]，杨 成[2]
(1.昆明理工大学 环境科学与工程学院，云南 昆明 650500；2.昆明市计划供水节约用水办公室，云南 昆明 650500)

摘 要：[目的] 探讨灌木式屋顶绿化屋面承载力及对屋面初期雨水径流污染物的净化效果，为屋顶绿化设计及雨水资源化利用提供一定的理论指导。[方法] 根据屋面所能承受承载力大小及屋面雨水径流的特点设计灌木式屋顶绿化结构，采用蛭石、珍珠岩作为吸水剂，与红壤土、腐殖土按一定比例复配为屋顶灌木绿化的种植基质。通过将收集到的屋面雨水模拟降雨，淋洒屋顶灌木，对其干、湿重荷载和对雨水去除效果进行研究。[结果] 1 m^3 复配的人工土壤的饱和吸水量为 0.65 m^3，种植基质湿容重为 1 190 kg/m^3，灌木式屋顶绿化的干、湿重荷载分别为 261，529 kg/m^2。对屋面初期雨水中的 SS，COD，TN，TP 的削减量分别在 60.1%～71.3%，50.0%～61.8%，49.2%～53.2%和 55.6%～67.7%之间。[结论] 灌木式屋顶绿化能满足一般建筑物屋顶的荷载要求，同时对初期雨水径流具有较好的净化效果。

关键词：屋面；灌木绿化；结构设计；荷载；雨水净化
文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2018)01-0198-05 **中图分类号**：TU765

文献参数：黄启华，徐晓军，段正洋，等.灌木式屋顶绿化设计及对屋面初期雨水的净化[J].水土保持通报，2018，38(1)：198-202. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.01.035. Huang Qihua，Xu Xiaojun，Duan Zhengyang，et al. Design of green shrub roof and purification of initial roof runoff[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2018，38(1)：198-202.

Design of Green Shrub Roof and Purification of Initial Roof Runoff

HUANG Qihua[1]，XU Xiaojun[1]，DUAN Zhengyang[1]，
YUE Xiulin[1]，GONG Xunmu[2]，YANG Cheng[2]
(1. *Faculty of Environmental Science and Engineering，Kunming University of Science and Technology，Kunming，Yunnan* 650500，*China*；2. *Kunming Planned Water Supply and Saving Office，Kunming，Yunnan* 650500，*China*)

Abstract：[Objective] The paper aims to explore the carrying capacity of the green shrub roof and the purification effect on initial roof runoff in order to provide theoretical support for green roof designing and runoff resources utilization. [Methods] A green shrub roof structure was designed according to the carrying capacity of roof and the characteristics of roof runoff. Using vermiculite and perlite as water absorbent，and mixed with red loam and humus at a certain proportion. we made a substrate for roof greening. The roof shrubs were sprayed with simulated rainfall using collected roof runoff，and the dry and wet load and the effect of rainwater removal had been researched. [Results] The saturated water absorption of 1 m^3 artificial soil was 0.65 m^3，and wet bulk density of the substrate was 1 190 kg/m^3. The carrying capacity of green shrub roof under dry and wet conditions was 261 kg/m^2 and 529 kg/m^2，respectively. The pollutants SS，COD，TN and TP in initial roof runoff were reduced by 60.1%～71.3%，50.0%～61.8%，49.2%～53.2% and 55.6%～67.7%，respectively. [Conclusion] The green shrub roof can meet the carrying capacity requirements of general building. Meanwhile，it has good purification effects on initial roof runoff.

Keywords：**roof；shrub greening；structure design；carrying capacity，rainwater purification**

收稿日期：2017-06-16 **修回日期**：2017-07-06
资助项目：昆明市计划供水节约用水办公室项目“昆明市城市雨水资源综合利用研究”(20130001)
第一作者：黄启华(1993—)，男(汉族)，湖北省仙桃市人，硕士研究生，研究方向为水资源利用、水污染防治。E-mail：hqhahs@163.com。
通讯作者：徐晓军(1960—)，男(汉族)，浙江省杭州市人，博士，教授，博士生导师，主要从事水污染防治及资源化利用等方面的研究。E-mail：xuxiaojun88@sina.com。

随着城市化进程的加快,城市不透水下垫面面积呈上升趋势,作为城市的"第五立面",屋面在整个城市硬质表面中所占的比例高达 30%[1]。对降雨具有吸收和缓冲作用的城市绿地系统面积下降,给城市现有排水系统造成的压力已经超出其所能承受范围,导致城市洪涝灾害的发生频率和强度加剧[2]。因此,作为一种新兴的绿化补偿手段,屋顶绿化成为提高有限的城市空间绿地率的最有效手段,同时也成为减缓和改善雨水径流的辅助方法之一[3]。许多学者研究发现,在不同的降雨强度、种植层厚度及屋面坡度等条件下,屋顶绿化对雨水的滞蓄率可以达到 20%～100%[4],洪峰径流量可消减 44.2%[5],屋面产流时间延迟可达 90 min[6]。屋顶绿化通过基质的吸附作用、基质空隙的阻拦和蓄积作用、植被吸收和蒸腾作用等方式对雨水进行迟滞和蓄积。同时屋面初期雨水径流污染最为严重,水质浑浊,主要污染物为 COD 和 SS,而总氮、总磷、重金属和无机盐等污染物浓度较低[7]。如果不对这部分雨水进行处理,而是直接排放到路面。则加重了路面雨水径流的污染,造成雨水后期处理困难,不利于雨水回收和利用。但仍缺乏相关就轻型屋顶灌木绿化其荷载、吸蓄水能力及对雨水净化效果的研究。若城市建设可以就地吸收、滞蓄、渗透、净化、调节雨水,那么城市在发展过程中就可以从容应对环境变化和自然灾害[8]。本文针对建筑物屋顶绿化,设计灌木式屋顶绿化(下文简称"屋顶绿化"),分析研究其屋面承载力及对屋面初期雨水径流污染物的净化作用,以期为城市建设及屋顶绿化设计提供一定的理论指导及相关参数数据。

1　材料与方法

1.1　屋顶绿化结构设计

屋顶绿化基本结构包括:植被层、种植基质层、隔离过滤层、排水层、根阻层、防水层、结构层[9],本文以种植基质层和蓄排水层为重点进行结构设计,同时探讨在雨水利用中的相关作用。

(1) 种植基质层。设计必须考虑屋顶的荷载承受能力、植物根系生长要求,同时也能过滤、吸附雨水径流中污染物。本研究根据选择的植物种类、建设成本及种植基质的保水、保肥、保温、透气性能的原则,采用的种植基质为红壤土与蛭石、珍珠岩、腐殖土复配而成,其中红壤土:蛭石:珍珠岩:腐殖土=5∶1∶1∶3[10],屋顶绿化的种植基质层厚度为 35 cm。

(2) 蓄排水层。其作用是将降雨及浇灌时多余的水分排走,同时储存植物生长所需的水分,但不能存水过度,避免荷载过重[11]。本研究中采用陶粒铺设构成屋顶绿化的蓄排水层,确定屋顶绿化的蓄排水层厚度为 15 cm,蓄水层厚度为 5 cm。

1.2　水样

研究水样为昆明大学城环工楼水泥屋面雨水。采用收集到的屋面雨水为模拟的降雨径流雨水,其重要污染物水质指标详见表 1。

表 1　屋面初期雨水径流污染物浓度　　mg/L

取样时间	SS (悬浮物)	COD (化学需氧量)	TN (总氮)	TP (总磷)
20160816	110.5	98	3.96	0.81
20160924	92.37	90	2.93	0.62
20161008	88.26	76	2.54	0.56

1.3　试验装置与方法

为便于观察,试验装置采用长方形玻璃槽,周围用黑色遮阳板封闭隔离阳光。屋顶绿化装置尺寸为高×宽×长 60 cm×60 cm×100 cm,从下到上依次为陶粒蓄排水层(15 cm,90 dm^3)、隔离过滤层、种植基质层(35 cm,210 dm^3)和灌木植物层(金叶假连翘)。蓄排水层、种植基质层底部设取样出水口,以研究屋顶绿化对雨水的净化效果。

先用塑料桶储存收集到的屋面雨水,后采用蓬头连接潜水泵抽取塑料桶中储存的屋面雨水模拟降雨,淋洒屋顶灌木,试验中通过控制蓬头喷洒水量大小来调节处理的初期雨水量,从而调节雨水停留时间。在蓄排水口产生雨水径流后开始取样,前 5 个样时间间隔为 2 min,接着每 5 min 取样,共取 2 个,最后每 10 min 取样,共取 2 个,合计取 9 个样。

1.4　分析方法

参照回用水水质标准的相关水质指标进行选择分析,确定检测分析悬浮物(SS)、化学需氧量(COD)、总氮(TN)和总磷(TP)4 项指标,各项雨水水质指标的分析方法见表 2。

表 2　雨水水质指标分析检测方法

分析项目	检测方法	仪器名称	精度/(mg·L^{-1})
SS(悬浮物)	散射法	智能悬浮物仪	0.01
COD(化学需氧量)	重铬酸钾氧化法	COD 自动消解回流仪	—
TN(总氮)	过硫酸钾消解—分光光度法	UV2 450 紫外分光光度计	0.01
TP(总磷)	钼酸铵分光光度法	722 可见分光光度计	0.01

2 结果与讨论

2.1 屋顶绿化蓄水能力

屋顶绿化的蓄水量由种植基质层蓄水量与蓄排水层蓄水量 2 部分组成,分别对这 2 部分进行蓄水试验研究。

2.1.1 *种植基质蓄水能力研究* 测量屋顶绿化各种植基质和按比例复配好的轻型人工土壤吸水饱和后的质量,通过与吸水前的质量相比较,得出各种植基质和轻型人工土壤的蓄水量。

以培养皿作为种植基质蓄水能力研究的试验容器,设立 3 组平行样,分别称量 3 组培养皿的质量,并对应标号,记录数据。称量 50 cm^3 基质置于对应的培养皿中,用电子天平称量各自的质量,记录数据作为基质吸水前的质量。称量完后,分别用水浸没,24 h后用吸水纸吸干培养皿中多余的水分,用电子天平称量,记录数据作为基质吸水饱和的质量,吸水前后 2 次质量之差则为基质的饱和蓄水量。几种种植基质的蓄水量详见表 3。

表 3 种植基质平均质量或单位质量蓄水量

基 质	平均质量/($g \cdot cm^{-3}$)		单位质量吸水量/($g \cdot g^{-1}$)
	吸水前	吸水后	
蛭 石	0.32	1.16	2.67
珍珠岩	0.08	0.53	5.45
腐殖土	0.24	0.90	2.82
红壤土	1.23	1.89	0.54
轻型人工土壤	0.54	1.19	1.20

根据表 3 可得,种植基质的单位体积蓄水量为:蛭石>腐殖土>红壤土>轻型人工土壤>珍珠岩;但几种基质的单位质量蓄水量为:珍珠岩>腐殖土>蛭石>轻型人工土壤>红壤土。

2.1.2 *蓄排水层蓄水能力研究* 陶粒排水层蓄水量:陶粒粒径较大,采用烧杯测量陶粒的蓄水能力。试验前,分别在 2 个烧杯中填充 80,120 ml 陶粒,称重记录数据。用水淹没陶粒,24 h 后,倒出烧杯中多余水分后称重,记录数据,则前后 2 次质量之差为排水层陶粒本身的蓄水量。

测量陶粒蓄水层蓄水量时,前期操作同上。在用水淹没陶粒 24 h 后,先压制陶粒,吸出上层多余水分后称重,记录数据,为蓄水层(陶粒蓄水量+空隙储水量)吸水饱和后的质量。前后 2 次质量之差为蓄水层的蓄水量(表 4)。

表 4 屋顶绿化蓄排水层蓄水能力平均值 g/ml

陶粒基质及蓄水层	陶粒排水层		陶粒蓄水层
	平均质量	单位吸水量	单位吸水量
80 ml	0.167	0.093	0.610
120 ml	0.199	0.107	0.612
均 值	0.183	0.100	0.611

2.2 屋顶绿化荷载

昆明市没有关于屋顶绿化建设的相关规范及要求,本研究借鉴北京市《屋顶绿化规范》[12](下文简称《规范》)中屋顶绿化建设的相关要求。本研究选取的灌木为金叶假连翘,常年维持在 1.0~1.5 m,根据《规范》中表 4,屋顶灌木绿化植物的平均荷载取为 45 kg/m^2。

由表 3 可知轻型人工土壤的平均质量为 0.54 g/ml,吸水饱和后平均质量为 1.19 g/ml。由表 4 可知陶粒的平均质量为 0.18 g/ml,饱和吸水量为 0.1 g/ml;蓄水层饱和吸水量为 0.61 g/ml。屋顶绿化的种植面积为 0.6 m^2。

(1) 种植基质干、湿重荷载:

种植基质质量:210 L×0.54 g/ml=113.4 kg

种植基质湿重质量:210 L×1.19 g/ml=249.9 kg

种植基质层荷载:113.4 kg/0.6 m^2=189 kg/m^2

种植基质层湿重荷载:249.9 kg/0.6 m^2=416.5 kg/m^2

(2) 蓄排水层干、湿重荷载:

蓄排水层陶粒质量:90 L×0.18 g/ml=16.2 kg

蓄排水层荷载:16.2 kg/0.6 m^2=27 kg/m^2

蓄排水层蓄水饱和后质量:0.1 g/ml×60 L+0.61 g/ml×30 L+16.2 kg=40.5 kg

蓄排水层蓄水饱和后荷载:40.5 kg/0.6 m^2=67.5 kg/m^2

(3) 屋顶绿化干、湿重荷载:

屋顶绿化的荷载为:(45+189+27)kg/m^2=261 kg/m^2

屋顶绿化吸水饱和后的荷载为:(45+416.5+67.5)kg/m^2=529 kg/m^2

《屋面及楼面永久荷载标准值》中对“种植屋面”最大荷载的限定值为 10.05 kN/m^2(1 025.50 kg/m^2),本研究中的屋顶绿化吸水饱和后的荷载满足建筑物的屋面荷载。

(4) 本研究中屋顶绿化种植基质的湿容重为:

1 m^3×0.54 g/cm+1 m^3×0.65 g/cm=1 190 kg/m^3

《规范》要求屋顶绿化的种植基质湿容重不应超过 1 300 kg/m^3,则本研究中选取的种植基质配比具

有较好的吸蓄水能力且吸水饱和的同时容重也符合《规范》要求。

2.3　对屋面雨水的净化作用研究

项目初期雨水收集利用时,初期雨水的收集与弃流是最难解决的问题。一般可以在去除初期雨水中的粗粒杂质后利用绿地进行净化,以简化工艺和减少投资。但屋顶绿化对初期雨水的净化作用研究还较少见。因此本文考察其对屋面初期雨水的净化作用,主要考察 SS,COD,TN 和 TP 等污染指标值。

试验时,屋顶绿化结构已经生长半年,结构比较稳定,采集的雨水经过屋顶绿化产生径流,从蓄排水口排出,雨水中各污染物的去除效果详见图 1。

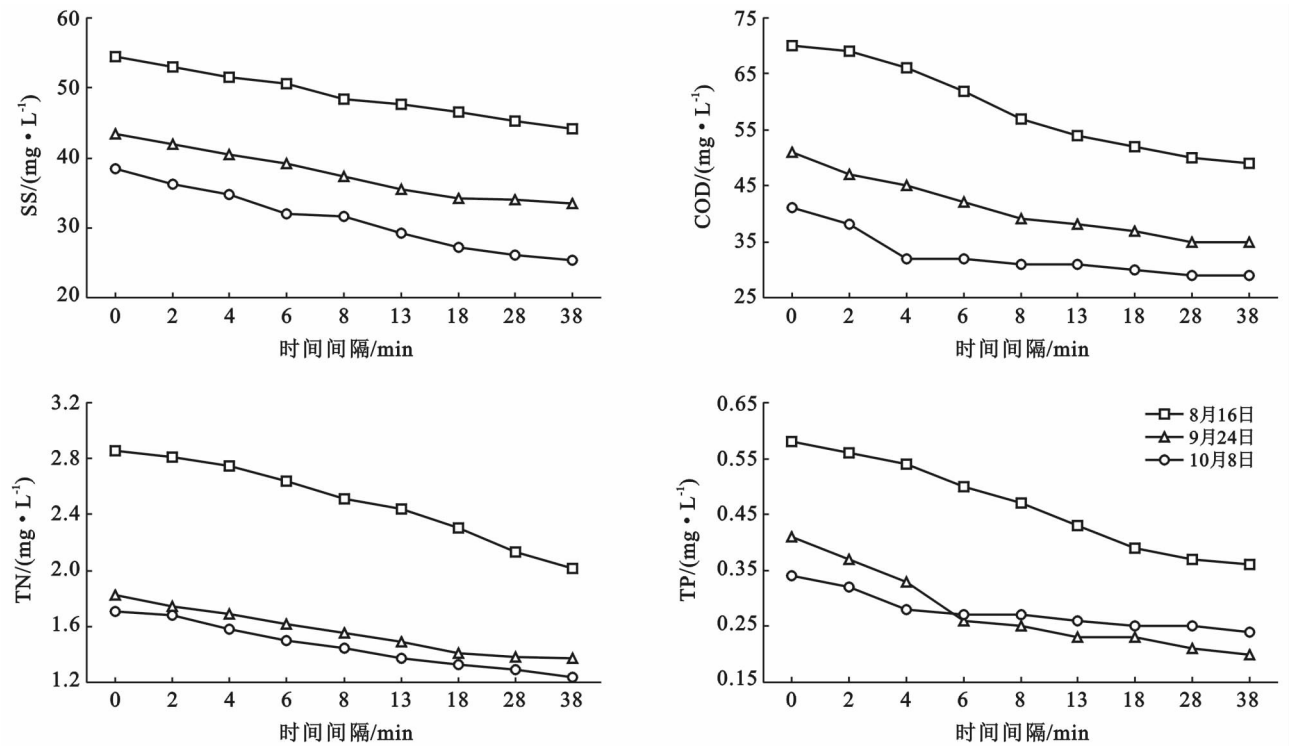


图 1　屋顶绿化对雨水径流中污染物的去除效果

根据图 1 可知,3 场降雨中,各污染物浓度均逐渐降低,随着降雨历时的增加,3 场收集的屋面雨水经过屋顶绿化产生的径流中各污染物均呈现迅速下降再逐渐趋于平缓的趋势;3 次降雨的水质初始浓度不同,经屋顶绿化净化后,最终对各污染物的削减量范围大体一致,对 SS,COD,TN 和 TP 的削减量分别在60.1%～71.3%,50.0%～61.8%,49.2%～53.2%和 55.6%～67.7%之间。屋面初期雨水处理前污染物浓度超过《城镇污水处理厂污染物排放标准(GB 18918-2002)》1 级;处理后最低出水浓度分别为 25.33,29,1.24,0.20 mg/L,水质指标基本达到或低于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中Ⅳ类水标准。可见,本试验的屋顶绿化对屋面径流雨水中典型污染物都有较好的去除效果。另外,屋顶绿化在净化空气、美化环境、提高建筑物的综合利用效益等方面也都具有重要的作用。

2.4　净化成因简要分析

(1) SS 净化成因分析。屋顶绿化的种植基质为人工轻型土壤,土质比较疏松。屋顶绿化植物为幼苗栽植,行间距比较大,表面没有植物覆盖,因此初期屋面雨水浇灌屋顶绿化时冲刷土壤,容易带走土壤颗粒物使雨水中 SS 增加。试验后期,植物生长良好,其根系比较发达,根毛表面存在交换性 H^+,可以直接吸收雨水中的交换性离子。另外土壤胶体一般带有负电,可以吸附水中阳离子,同时与水中离子进行交换,将水中颗粒物固定于土壤胶体表面。同时,土壤胶体的比表面积和比表面能比较大,吸附能力较强,可以很好的吸附固定雨水中颗粒物。雨水中 SS 在根系与土壤中胶体共同截流作用下被有效去除,达到净化的目的。

(2) COD 净化成因分析。屋顶绿化对雨水中 COD 的去除靠植物、土壤的过滤、拦截和吸附作用以及微生物的降解作用完成。有机物通过与屋顶绿化基质层、植物根系、茎部碰撞被过滤沉淀。沉淀的可降解性有机物在屋顶绿化结构中分解为溶解性有机物,附着在植物根系和茎部进行生物降解[13]。雨水中 COD 的降解包括分为好氧、厌氧降解 2 个阶段,但是屋顶绿化的土层厚度最多为 35 cm,孔隙比较大,

同时下层由陶粒支撑，透气性能比较好，因此经过屋顶绿化雨水径流中的 COD 的降解主要为好氧降解。好氧降解可以快速的将有机物氧化成简单的无机物，释放生物新陈代谢的能量，把一部分有机物转化为生物体所需的营养物质，合成新的细胞物质，于是微生物逐渐生长繁殖，产生更多的生物体，从而有效的去除雨水中的 COD。

(3) TN 净化成因分析。雨水中 TN 的去除主要是通过土壤和植物根系的吸附、过滤，含氮有机物自身的沉淀和氨的挥发作用以及植物的吸收和微生物的降解[14]。在土壤处理雨水时，N 的脱除机理主要靠微生物脱氮。微生物脱氮包括氨化细菌的氨化作用、硝化细菌的硝化作用和反硝化细菌的反硝化作用。

本研究中屋顶绿化结构的透气性能良好，因此主要进行硝化细菌的硝化作用。首先是亚硝酸细菌将 NH_4^+ 氧化为 NO_2^-：

$$NH_4^+ + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow NO_2^- + 2H^+ + H_2O$$

其次是硝酸细菌将 NO_2^- 氧化为 NO_3^-：

$$NO_2^- + H_2O \rightarrow H_2O:NO_2 \rightarrow NO_3^- + 2H^+$$

NO_3^- 是植物吸收的主要形式，NO_3^- 进入细胞后被硝酸还原酶和亚硝酸还原酶还原成铵[15]。

(4) TP 净化成因分析。土壤的吸附、过滤和磷酸盐的沉淀以及植物的吸收可以去除雨水中的总磷。土壤的 pH 值、土壤中含有的金属阳离子数量会影响土壤对磷的吸附能力，土壤中阳离子量越多，则其对磷吸附能力越强[14]。蛭石、珍珠岩中氧化镁(MgO)、氧化钾(K_2O)、氧化钠(Na_2O)与水反应会生成氢氧化物，在水中电离出阳离子促进屋顶绿化的固磷能力[5]。陈亚东等[16]的研究表明土壤中铁、铝氧化物的增加会使土壤固磷能力增强，同时释放磷的能力降低，而屋顶绿化的种植基质中含有氧化铝(Al_2O_3)、氧化铁(Fe_2O_3)，会进一步增强种植基质对雨水中磷的去除效果。

3 结 论

(1) 对于屋顶绿化种植基质，采用吸保水性较好的蛭石、珍珠岩与普通红壤土、腐殖土复配，能有效吸储雨水；同时屋顶绿化下部的蓄排水层能有效地调蓄雨水。种植基质和陶粒蓄排水层(吸水量＋蓄水量)的理论总蓄水量为 1.37 m^3/m^2，其中陶粒蓄排水层蓄水量为 0.61 m^3。

(2) 屋顶灌木绿化的干、湿重荷载分别为 261，529 kg/m^2，满足《屋面及楼面永久荷载标准值》中“种植屋面”的最大荷载 10.05 kN/m^2 的要求。屋顶绿化种植基质的湿容重为 1 190 kg/m^3，种植基质的配比在保证较好的吸蓄水性能的同时满足《规范》中对种植基质湿容重不应超过 1 300 kg/m^3 的规定。

(3) 本研究的屋顶绿化，对雨水中污染物 SS，COD，TN 和 TP 均有较好的净化效果，对各污染物的削减量分别在 60.1%～71.3%，50.0%～61.8%，49.2%～53.2%和 55.6%～67.7%之间，出水水质指标基本达到或低于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中Ⅳ类水标准。

[参 考 文 献]

[1] 黄水良. 屋顶绿化—城市第五立面与雨水利用[J]. 浙江建筑，2007，24(S1)：37-39.

[2] 张建云. 城市化与城市水文学面临的问题[J]. 水利水运工程学报，2012(1)：1-4.

[3] 林燕芳. 屋顶花园若干植物适应性及配置研究[D]. 福州：福建农林大学，2009.

[4] Harper G E，Limmer M A，Showalter W E，et al. Nine-month evaluation of runoff quality and quantity from an experiential green roof in Missouri，USA[J]. Ecological Engineering，2015，78：127-133.

[5] 卢浩，康威，谭松明，等. 屋顶绿化基质对雨水径流水质的影响[J]. 中国给水排水，2016(7)：135-138.

[6] 陈兴武. 屋顶绿化植被类型与基质深度对雨水的滞蓄作用影响研究[D]. 北京：北京林业大学，2016.

[7] 钱玲. 屋顶花园种植基质层对雨水净化效果的影响[J]. 南通纺织职业技术学院学报，2013，13(1)：1-5.

[8] 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.

[9] 余伟增. 屋顶绿化技术与设计[D]. 北京：北京林业大学，2006.

[10] 刘志勇，王树东，黄启华，等. 地下空间顶板浅层海绵式人工下凹绿地设计及对屋面初期雨水的净化[J]. 城市环境与城市生态，2016(4)：22-27.

[11] 彭素梅. 荷载重量与种植屋面绿化设计研究[D]. 广州：华南农业大学，2016.

[12] 北京市园林局. DB11/T281-2015 屋顶绿化规范[S]. 北京：北京市质量技术监督局，2015.

[13] 冯琳. 潜流人工湿地中有机污染物降解机理研究综述[J]. 生态环境学报，2009，18(5)：2006-2010.

[14] 翁白莎，严登华，赵志轩，等. 人工湿地系统在湖泊生态修复中的作用[J]. 生态学杂志，2010，29(12)：2514-2520.

[15] 王羽婷. 前置反硝化两级土壤渗滤系统处理生活污水的试验研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2014.

[16] 陈亚东，梁成华，王延松，等. 氧化还原条件对湿地土壤磷吸附与解吸特性的影响[J]. 生态学杂志，2010，29(4)：724-729.