

绿化屋面的水文水质特征分析

王江海¹, 张新波², 赵新华¹

(1. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 天津城建大学 环境与市政工程学院, 天津 300384)

摘要: 通过人工搭建绿化屋面装置, 重点研究了绿化屋面的径流削减率、产流过程和出水水质 3 个方面。结果表明, 绿化屋面的径流削减率符合一定的阶段性计算公式; 绿化屋面产流过程中的径流总量、前期削减量和后期削减量三者与基质层高度呈现不同的线性相关性; 绿化屋面能够有效降低雨水中的总氮浓度和 COD 浓度, 但氨氮浓度和总磷浓度有所升高; 最后, 综合水文和水质两方面, 建议绿化屋面基质层高度范围是 10—20 cm。

关键词: 绿化屋面; 径流削减; 产流过程; 出水水质; 基质层

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)03-0223-04

中图分类号: P333, X522

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.044

Characters of Hydrology and Water Quality of Green Roof

WANG Jiang-hai¹, ZHANG Xin-bo², ZHAO Xin-hua¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: Green roof is capable of significantly reducing rainwater volume and purifying rainwater quality. It has become one of the important strategies to solve urban floods. This study investigated the ratio of runoff retention, effluent process and effluent water quality by building pilot scale facilities. Results from the experiment confirmed that the ratio of runoff retention is accordance with a certain periodic formula; the total runoff volume, the amount of previous reduction and later reduction have different linear correlations with the thickness of substrate layer; and green roof is capable of significantly reducing the concentrations of TN and COD, but the concentrations of $\text{NH}_4\text{—N}$ and TP in runoff from green roof are higher relatively. Finally, this study recommends that the optimal range of the thickness of substrate layer is 10—20 cm by integrating the two aspects of hydrology and water quality.

Keywords: green roof; runoff retention; effluent process; effluent water quality; substrate layer

为了解决城市雨洪问题, 新的雨水管理模式倡导低冲击开发 (low impact development, LID), 即在源头处对暴雨径流进行截留和净化, 降低暴雨径流对雨水设施的冲击, 净化径流水质。绿化屋面是 LID 的一种重要的应用措施, 它是设在屋顶的一种植草系统, 由植被层、土壤层、基质层、过滤层、排水层等组成, 通过植物、土壤和填料对雨水的吸收、截留和过滤等作用, 达到减少径流量, 净化径流水质的目的^[1]。

国外对于绿化屋面的研究比较早, 水文和水质两方面都有很多的研究成果。水文方面, Berndtsson^[1]通过总结已有的研究资料表明, 绿化屋面能够在一定程度上削减暴雨径流总量和暴雨径流峰值, 减少洪涝灾害; Mentens 等^[2]通过研究历史数据发现, 紧密型

绿化屋面平均每年的径流削减量可以达到年降雨总量的 65%~85%; Hilten 等^[3]通过研究发现, 绿化屋面对于暴雨径流峰值的削减能够达到 60%~80%。水质方面, 国外的一些研究认为绿化屋面主要表现为污染物的释放源, Berndtsson 等^[4]通过研究日本和瑞典的绿化屋面发现, 绿化屋面的 TN, $\text{NH}_4\text{—N}$ 浓度都很高, 而且会释放磷酸盐; Teemusk 等^[5]通过研究爱沙尼亚的绿化屋面发现, 绿化屋面 COD, TN 的浓度比普通屋面要低, 但是 TP 浓度却高于普通屋面, 绿化屋面会释放磷酸盐。

国内对于绿化屋面的研究起步较晚, 孙挺等^[6]通过实验研究发现, 绿化屋面的持蓄量与降雨量总体呈现线性关系, 绿化屋面具有明显的减滞洪峰的效果;

收稿日期: 2013-07-15

修回日期: 2013-07-23

资助项目: 天津市科技创新专项资金项目“生态校园水资源综合利用成套技术示范工程”(08FDZDSF03200)

作者简介: 王江海(1990—), 男(汉族), 山西省闻喜县人, 硕士研究生, 研究方向为雨水资源管理和利用。E-mail: wangjianghai199@163.com。

通信作者: 赵新华(1952—), 男(汉族), 天津市人, 硕士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境工程系统优化与数学模拟研究。E-mail: zhx@tju.edu.cn。

魏艳萍等^[7]通过深圳的实测数据发现,绿化屋面能够明显减少暴雨径流和降低污染物浓度,而且重型绿化屋面明显优于轻型绿化屋面;王书敏等^[8]通过构建绿化屋面研究发现,绿化屋面径流的 TN, TP, NH₄-N 的浓度要高于天然雨水,但比普通的硬化屋面低。

绿化屋面已成为未来城市建设应对城市气候热岛效应和城市消灾减洪的主要措施。目前世界上已有的研究较多,但是中国的研究尚不多,因此中国在屋面种植什么样的绿化植物、采用什么样的基质层和土壤层等各方面都需要进一步的研究工作。本研究通过搭建绿化屋面装置,进行人工降雨,在水文方面,重点研究绿化屋面对雨水的削减率与降雨强度、基质层高度的关系,绿化屋面产流过程中的 3 个变量与基质层高度的关系;水质方面,重点研究所搭建实验装置的出水水质总体状况,同时分析不同基质层高度的水质状况。本研究对做好绿化屋面每个阶段削减工作有很好的借鉴作用,同时也为实际绿化屋面项目的科学构建提供依据。

1 试验方案

本试验地点在天津大学,共搭建 4 组绿化屋面装置,装置从上到下依次为:植被层、土壤层、基质层、过滤层、排水层。基质层为主要变量,基质层材料为珍珠盐和蛭石的混合物(体积比为 2:1),4 组装置的基质层高度分别为 5, 10, 20 和 30 cm,每个高度设置一个平行装置。植被层、土壤层、过滤层、排水层高度分别为 10, 7, 0.2 和 3 cm。根据北方干旱少雨的气候特点,试验植被层选取耐寒耐旱的佛甲草,试验过程中植物的生长状况良好。

采用人工降雨的方式,雨水水质与天津天然雨水水质相同,降雨强度划分为 3 个范围:重现期 1~5, 5~50 和 50~100 a,试验设计的降雨强度为:241.67, 469.44 和 716.67 L/(s·hm²),降雨时间分别为 60, 40 和 20 min。

测定的水质指标包括:TN, NH₄-N, TP, COD。测定方法均按照《水和废水监测分析方法(第 4 版)》要求执行。

2 结果与分析

2.1 径流削减率分析

径流削减率用来评价绿化屋面对于暴雨径流的持蓄能力,计算公式:

$$\eta = \frac{P-R}{P} \times 100\% \quad (1)$$

式中: η ——径流削减率(%); P ——降雨总量(mm); R ——径流总量(mm)。

绿化屋面的径流削减率符合阶段性计算公式:

$$\text{当 } 0 \leq t \leq t_0 \text{ 时, } \eta = 100\%$$

$$\text{当 } t > t_1 \text{ 时, } \eta = \frac{Q}{P} \times 100\% \quad (2)$$

当 $t_0 < t \leq t_1$ 时,采用曲线拟合的方法研究削减率的表达式。

图 1 反映的是 $t_0 < t \leq t_1$ 时,绿化屋面的径流削减率与 $\ln h$ 值的关系, h 是绿化屋面基质层的高度(cm)。

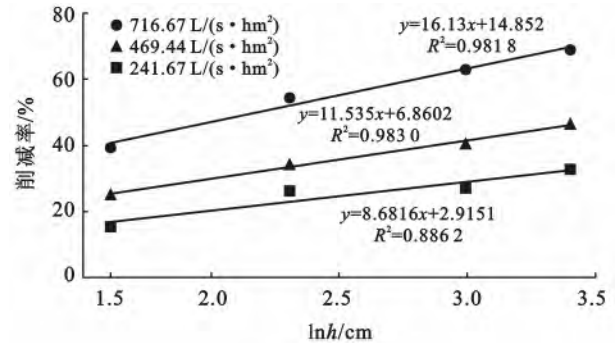


图 1 $t_0 < t \leq t_1$ 时绿化屋面径流削减率与 $\ln h$ 值的关系

从拟合结果得出,当 $t_0 < t \leq t_1$ 时,径流削减率 η 与基质层高度 h 符合表达式:

$$\eta = A \ln h + B \quad (3)$$

式中: η ——径流削减率(%); h ——基质层高度(cm); A, B ——经验系数。

经验系数 A 是直线的斜率, A 值越大, $\ln h$ 值的变化引起的径流削减率变化越大, A 值与降雨强度和降雨时间有关,降雨强度越大,降雨时间越短, A 值越大。经验系数 B 代表 $h = 1$ cm 时,绿化屋面对暴雨的径流削减率, B 值与降雨强度和雨前干燥天数有关,降雨强度越大,雨前干燥天数越多, B 值越大。

综上所述,绿化屋面的径流削减率符合阶段性计算公式:

$$\eta = \begin{cases} 100\% & (0 \leq t \leq t_0) \\ A \ln h + B & (t_0 < t \leq t_1) \\ \frac{Q}{P} \times 100\% & (t > t_1) \end{cases} \quad (4)$$

式中: η ——径流削减率(%); h ——基质层高度(cm); P ——降雨总量(mm); Q ——饱和持蓄量(mm); t ——降雨历时(min); t_0 ——开始出水时间(min); t_1 ——达到饱和时间(min); A, B ——经验系数。

2.2 产流过程分析

图 2 是绿化屋面产流过程示意图^[9],绿化屋面产流主要分为两个阶段:第一阶段,绿化屋面无径流产生,所有的雨水都被持蓄,持蓄的雨水量称为前期削减量 Q_1 ;第二阶段,绿化屋面开始产生径流,但也有

一部分雨水被持蓄,持蓄的雨水量称为后期削减量 Q_2 。 Q_1, Q_2 和降雨总量 P , 径流总量 R 满足关系式:

$$P=R+Q_1+Q_2 \quad (5)$$

式中: P ——降雨总量(mm); R ——径流总量(mm); Q_1 ——前期削减量(mm); Q_2 ——后期削减量(mm)。下同。

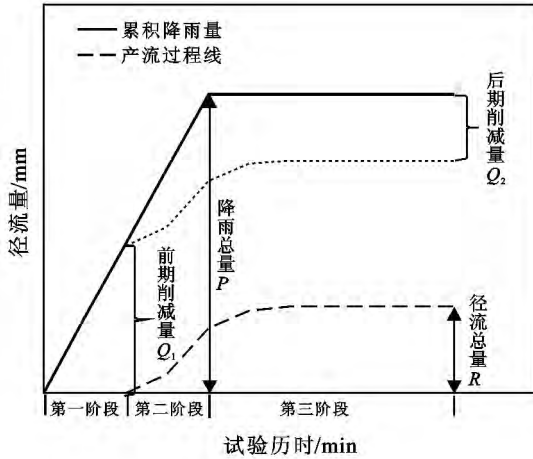


图 2 绿化屋面的产流过程

表 1 是绿化屋面产流过程各变量与基质层高度的相关性系数。分析表 1 中数据可知,径流总量 R 与基质层高度呈现很强的负线性相关性($-1 < r < 0$, $r > 0.75$),即基质层高度增大,径流总量成比例减少,因为当降雨强度、前期干燥天数等条件相同时,增加基质层高度会成比例的增加绿化屋面对雨水的

持蓄量,所以径流总量成比例减少;前期削减量 Q_1 与基质层高度呈现很强的正线性相关性($0 < r < 1$, $r > 0.75$),即基质层高度增大,前期削减量成比例增加,因为当降雨强度、前期干燥天数等条件相同时,基质层越高,绿化屋面在前期可以持蓄的雨水量越多,所以前期削减量成比例增加;后期削减量 Q_2 与基质层高度相关性不强($r < 0.75$),即后期削减量主要取决于开始出水时,绿化屋面的含水率与饱和含水率的差值,差值越大,后期削减量越多。

表 1 绿化屋面产流过程中各变量与基质层高度的相关性系数

降雨强度/ ($L \cdot s^{-1} \cdot hm^{-2}$)	基质层 高度/cm	R	Q_1	Q_2
716.67		-0.931	0.945	-0.695
469.44	5~30	-0.912	0.968	-0.687
241.67		-0.854	0.991	-0.715

2.3 出水水质分析

表 2 是绿化屋面总体水质与天然雨水、普通屋面和地表水 V 类标准水质的对比。其中,普通屋面的水质数据引用张杏娟等^[10]对天津市平顶沥青屋面雨水水质的研究成果。由于本文研究的绿化屋面位于天津市,而且主要针对平顶沥青屋面,因此普通屋面的水质数据与实验所测的绿化屋面水质数据具有可比性。表 3 是不同基质层高度的绿化屋面水质测定结果,表中的浓度值,是同一基质层高度时,不同降雨强度的平均值。

表 2 绿化屋面的水质测定结果

mg/L

采样区	TN	TP	NH_4-N	COD
天然雨水	3.10~9.80	0.09~0.20	—	27.20~41.30
绿化屋面	1.70~2.68	0.52~4.50	0.53~2.04	9.33~28.00
普通屋面	2.78~55.01	0.01~2.65	—	30.00~1 632
地表水 V 类标准	2.00	0.40	2.00	40.00

表 3 不同基质层高度的绿化屋面水质测定结果

mg/L

基质层高度/cm	TN	TP	NH_4-N	COD
5	2.42	2.98	1.66	24.46
10	2.07	0.54	0.58	17.13
20	1.99	1.57	0.86	16.39
30	1.96	1.97	1.06	10.50

试验期之前,所有绿化屋面装置放置在塑料棚内,装置内几乎没有降尘,因此可以忽略降尘附着对水质结果的影响。基质层的填料在装填之前经过清水多次洗涤,因此基质层的氮磷含量可以忽略不计,土壤层碱解氮和有效磷含量的平均值分别为 156.5 和 121.8 mg/kg。

试验过程中,未对绿化屋面的植物进行施肥,因

此,氮元素进入绿化屋面的主要途径是降雨。绿化屋面出水的总氮浓度为 1.70~2.68 mg/L,比天然雨水和普通屋面都要低,考虑到土壤层碱解氮含量为 156.5 mg/kg,说明绿化屋面能够有效的降低雨水中的总氮浓度,但是出水中的总氮浓度还是稍大于地表水 V 类标准的标准值(2 mg/L)。基质层高度增加,绿化屋面出水的总氮浓度降低,但基质层高度由 20 cm 增加到 30 cm 时,总氮浓度只减少了 0.03 mg/L,说明,此时增加基质层高度对于出水的总氮浓度影响效果已变得十分微小。此外,研究还发现,绿化屋面的出水中总氮浓度与径流削减率的相关系数 $r = -0.93$,说明出水中的总氮浓度与径流削减率有很强的负线性相关性,径流削减率升高,出水中的总氮浓

度成比例的降低,绿化屋面对于径流的削减和对于总氮的削减具有很强的同步效应。

天然雨水和普通屋面中几乎不含有氨氮,土壤层中的氨氮含量也很少,但是绿化屋面的出水氨氮浓度却达到了 0.53~2.04 mg/L,说明绿化屋面是一个氨氮的释放源,但是出水氨氮浓度基本上可以达到地表水 V 类标准的标准值(2 mg/L)。绿化屋面释放氨氮的原因,一是由于土壤层中的少量氨氮被雨水带出;二是由于绿化屋面内部将有机氮通过氨化作用转化为氨氮,但由于缺乏厌氧环境,氨氮不能够充分的转化为硝态氮。

磷元素进入绿化屋面的主要途径是降雨,但绿化屋面出水中的总磷浓度达到 0.52~4.50 mg/L,远大于天然雨水中的总磷浓度 0.09~0.20 mg/L,同时比普通屋面和地表水 V 类标准的标准值(0.4 mg/L)都要大很多,说明绿化屋面是一个严重的磷元素释放源。在没有施肥的情况下,绿化屋面却释放了大量的磷元素,主要是由于绿化屋面的土壤层中有效磷的含量达到了 121.8 mg/kg,降雨过程中,磷元素容易被雨水径流冲刷带出。实验数据显示,降雨强度增大,冲刷作用增强,出水总磷浓度升高,也验证了这一观点。

绿化屋面出水的 COD 浓度为 9.33~28.0 mg/L,比天然雨水和普通屋面都要低很多,而且能够完全达到地表水 V 类标准的标准值(40 mg/L),说明,绿化屋面能够有效的降低雨水的 COD 值。在总氮、氨氮、总磷、COD 的 4 个水质指标中,绿化屋面对于 COD 浓度的降低效果最佳。基质层高度增加,绿化屋面出水中的 COD 浓度会有明显的减少,说明,基质层在降低 COD 浓度方面发挥了很重要的作用。

3 基质层高度

(1) 水文方面。基质层高度为 5,10,20 和 30 cm 的绿化屋面的径流削减率分别为 15.3%~40%,26.3%~54.5%,27.0~63.0%,32.7%~69.0%,虽然基质层高度增加,削减率升高,但由 20 cm 增加到 30 cm 时,削减率升高值不大,但填料体积却增加较多。因此,基质层高度在 20 cm 左右较好。

(2) 水质方面。虽然基质层高度增加,TN 和 COD 浓度降低,但 4 组装置的 TN 浓度相差很小,COD 浓度虽然相差较大,但 4 组装置 COD 浓度都可完全达到地表水 V 类标准,因此主要参考 TP 和 NH₄-N 的浓度。而 10 cm 装置的 TP 和 NH₄-N 浓度都最小,因此,基质层高度在 10 cm 左右较好。

综合考虑水文和水质两方面,建议绿化屋面基质层高度范围是:10—20 cm。此时的绿化屋面,水文方

面,径流削减率可达到约 27%~60%,考虑到实际中绿化屋面的面积要比实验装置大很多,密实性更好,削减率还有很大的提升空间;水质方面,TN,NH₄-N,COD 出水浓度都可达到地表水 V 类标准,TP 浓度稍高一些。

4 结论

(1) 绿化屋面的径流削减率符合一定的阶段性计算公式。

(2) 绿化屋面产流过程中,径流总量与基质层高度呈现很强的负线性相关性;前期削减量与基质层高度呈现很强的正线性相关性;后期削减量与基质层高度无特定的线性关系。

(3) 绿化屋面能够有效降低雨水中的总氮浓度和 COD 浓度,但氨氮浓度和总磷浓度有所升高;绿化屋面对于径流的削减和对于总氮的削减具有很强的同步效应。

(4) 综合考虑水文和水质两方面,建议绿化屋面基质层高度范围是 10—20 cm。

[参 考 文 献]

- [1] Berndtsson J C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review [J]. *Ecological Engineering*, 2010,36(4):351-360.
- [2] Mentens J, Raes D, Hermy M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanised 21st century [J]. *Landscape Urban Plan*, 2006,77(3):217-226.
- [3] Hilten R N, Lawrence T M, Tollner E W. Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D [J]. *Journal of Hydrology*, 2008,358(3/4):288-293.
- [4] Berndtsson J C, Bengtsson L, Jinno K. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs [J]. *Ecological Engineering*, 2009,35(3):369-380.
- [5] Teemusk A, Mander Ü. The influence of green roofs on runoff water quality: A case study from Estonia [J]. *Water Resources Management*, 2011,25(14):3699-3713.
- [6] 孙挺,倪广恒,唐莉华,等.绿化屋顶雨水滞蓄能力试验研究[J].*水力发电学报*,2012,31(3):44-48.
- [7] 魏艳萍,文仕知,谭一凡,等.重型与轻型屋顶绿化对屋面径流的影响[J].*河北林业科技*,2011(3):1-2.
- [8] 王书敏,何强,张峻华,等.绿色屋顶径流氮磷浓度分布及赋存形态[J].*生态学报*,2012,32(12):3691-3700.
- [9] Villarreal E L, Bengtsson L. Response of a sedum green-roof to individual rain events [J]. *Ecological Engineering*, 2005,25(1):1-7.
- [10] 张杏娟,程方,王秀朵.天津平顶沥青屋面径流雨水污染特征分析[J].*天津城市建设学院学报*,2011,17(3):212-215.