

雨水花园路面径流污染控制研究——以沈阳市为例

于丁一, 曲鹏慧, 董泽强, 闫晓含, 景元蕾, 石平* (东北大学江河建筑学院, 辽宁沈阳 110169)

摘要 以沈阳市为例,从道路绿带与雨水花园技术相结合建设的角度,综合考虑污染物去除效果、材料易获取程度等因素,研究了填料层对 TP、TN、COD、SS 4 种污染物的去除试验。通过 AHP 分析法综合评价得出使用高炉渣与活性炭作为街道绿化雨水花园填料层材料时最为经济有效的结论,并综合分析相关研究结果,总结雨水花园的构造条件与运行条件对路面径流污染物去除率的影响,提出了针对污染物控制的沈阳市路旁雨水花园合理建设模式。

关键词 雨水花园;路面径流污染物削减;填料层;AHP 分析法;沈阳市

中图分类号 S731.2 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)23-0062-04

Study on Road Runoff Pollution Control of Rain Garden——Taking Shenyang as an Example

YU Ding-yi, QU Peng-hui, DONG Ze-qiang, SHI Ping* et al (Janggho Architecture College, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110169)

Abstract Take Shenyang City as an example, from the angle of the combination of road greenbelt and rainwater garden technology, and comprehensive consideration of pollutant removal efficiency, material availability and other factors, the removal experiment of packing layer for 4 kinds of pollutants, TP, TN, COD and SS was studied. By means of AHP analysis, it was concluded that the blast furnace slag and activated carbon were the most economical and effective filling material of the street green rainwater garden, and the relevant research results were comprehensively analyzed. The influence of structure condition and operation condition of rainwater garden on pollutant removal rate of road runoff was summarized, the reasonable construction model of roadside rainwater garden in Shenyang was put forward.

Key words Rain garden; Reduction of road runoff pollutants; Filler layer; AHP analysis; Shenyang City

随着我国城镇化的加速推进,城市土地利用类型的变化、建筑物密度和高度的激增与城市不透水面的大幅扩张,直接增加了径流量和城市洪水发生的频率,缩短了雨洪峰值到来的时间,频繁的工业生产、汽车使用等人类活动产生的污染物[如悬浮物(SS)、总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)、生化需氧量(BOD)、微生物及重金属等]通过暴雨径流冲刷进入城市水体,从而直接危害了城市生态系统乃至城市公民的安全。城市降雨径流作为污染物迁移转化的主要驱动力,是城市非点源污染研究的热点和重点^[1]。雨水花园作为一种低影响开发(LID)技术,生态环保、自然美观、适用范围广,对雨水径流污染的控制效果显著,一些欧美国家已针对面源污染形成了完整的控制体系。自美国环境保护署(EPA)协会 LID 报告公布后,很多雨水花园研究调查随之展开,雨水花园对 TN 的去除率为 30%~97%,TP 去除率为 28%~85%,SS 去除率最高可达到 99%,并能有效控制重金属、多环芳烃物质、病原体和细菌及悬浮颗粒^[1]。受近年来“振兴东北老工业基地”政策的影响,东北老工业城市迅速扩张,城市发展对水环境的影响也越来越引起人们的关注。笔者以典型的东北老工业城市沈阳为例,介绍了雨水花园的污染物去除机理,通过分析雨水花园路面径流污染控制的影响因素,探讨沈阳市路边雨水花园实现污染物控制的关键构造设计,以期结合沈阳市雨水径流特征得出适宜的路边雨水花园模式,为东北地区路面径流污染控制体系的建设提供依据。

1 沈阳市道路绿带雨水花园技术营造的必要性

1.1 沈阳市地域特征 地区雨水径流特征的解析是开展路边雨水花园对路面径流污染控制研究的关键。沈阳市处于东北地区南部,具有水资源短缺、早期干旱、汛期雨水密集的气候特征。2014 年是沈阳市的特枯水年,人均水资源占有量只有全国水平的 20% 左右,全市年降水量(385.9 mm)远低于全国(636 mm)水平,而约 2/3 的降水集中在 7—8 月。在沈阳市汛期雨水集中、强度大、历时短的气候特征下,过去老工业城市规划建设中不重视雨水贮存利用的弊端引起了城市内涝、水质污染等严重问题。针对沈阳市的降水特征,合理收集、净化和利用汛期雨水是缓解沈阳市缺水现状的重要途径之一。

作为处在工业基地振兴政策下的老工业城市,沈阳市正处在扩张发展进程中,截至 2015 年末沈阳市常住人口 840 万,机动车保有量 170 万辆,城市道路总数 3 680 条,总长 3 322.4 km,城市道路总面积 64 km²,城市交通成为城市主要污染源之一^[1]。COD、重金属等径流污染物输出量逐年增加。2014 年 COD 输出 2 564 万 t/a,TP 输出 121 万 t/a,TN 输出 620 万 t/a,SS 输出 60 197 万 t/a。其中,输出量涨幅最大的 SS 在 10 年内增长 20%^[2]。

目前,沈阳市拟申报国家海绵城市建设试点,并预计将海绵城市试点区域位置定在市中心城区东南部,但城市相关建设措施体系仍不够完善,应用雨水花园相关技术的城市绿地严重缺失,寒地城市雨水花园建设的技术难关难以克服,这都导致了海绵城市建设进程缓慢。规划“小海绵”皇姑区七二四明渠雨水花园的建设处在初步阶段,效果仍待检验。

1.2 路面径流污染严重 降雨径流污染过程是降雨淋洗大气、冲刷地面与土壤中的污染物,使其进入地表水和地下水而造成的降雨径流污染^[3]。按照城市下垫面类型,可将城市

基金项目 国家自然科学基金青年科学基金项目(51504066);国家级大学生创新创业训练计划资助项目(201610145102);教育部直属高校基本科研业务费项目(N161104002)。

作者简介 于丁一(1995—),女,辽宁朝阳人,本科生,专业:城乡规划。
* 通讯作者,讲师,博士,从事城市景观设计及生态修复研究。

收稿日期 2017-06-07

径流污染分为屋面径流污染和道路径流污染。

根据董欣等^[4]于2006年6—8月在北京4场降雨中分别在路面和屋面2处采样点进行取样分析,结果表明,路面COD污染物浓度最高可达到屋面的2倍以上,且道路交通量越高时路面径流污染物浓度越大。任玉芬等^[5]研究表明,路面径流中COD、BOD₅污染最为严重。根据潘俊等^[6]于2014年6—9月在沈阳市路面采样点取样分析的结果表明,沈阳市交通干道三好街雨水径流是自然降水中 $\rho(\text{Fe})$ 的10倍左右、 $\rho(\text{Mn})$ 的20倍左右、 $\rho(\text{Cu})$ 的50倍左右。以上研究结果表明,城市道路富含交通活动所产生的石油类、悬浮固体和重金属等污染物,并以雨水径流形式进入周边水体,使得城市道路尤其是交通主干道因此成为受污染严重的关键污染源区。

1.3 道路绿带雨水花园建设的意义 沈阳市亟待解决的水资源短缺、汛期城市内涝及水质污染问题昭示了沈阳市结合地区径流特点、攻克技术难关、建设雨水花园、推进海绵城市进程的必要性,关键污染源区的路面污染是雨水花园去除径流污染的关键。

城市道路绿化带是道路红线中的一部分,也是连接城市各个公共绿地的纽带,包括分车绿带、停车带、行道树绿带等,在路幅较宽的道路上还会建设非机动车道与人行道之间的隔离带。在道路污染源处削减径流污染,即利用相关技术改造道路绿化带为雨水花园,可以有效控制道路径流污染,削减洪峰径流量,补充涵养地下水,进而美化城市道路景观,改善生态环境。因此,道路绿带雨水花园的建设是削减道路径流污染的重要手段。

2 雨水花园对径流污染的控制模式

雨水花园的构造主要由五部分组成,由上到下依次为蓄水层、覆盖层、植被及种植土层、人工填料层、砂滤层及砾石垫层^[7]。雨水收集型雨水花园是雨水花园的一种,又称生物滞留区,强调其控制径流污染的能力,适用于城市环境污染相对严重的地区,如城市中心、停车场、广场、道路周边用地等^[8]。收集型雨水花园分为完全收集型雨水花园和部分渗透型雨水花园,其中,部分收集型雨水花园能够按需收集和净化雨水,将多于需求量的雨水按土壤渗透的方式处理,更适用于沈阳这类汛期雨水密集的城市。

将部分收集型雨水花园与城市道路绿带结合建设,可以达到控制道路径流污染、削减径流量的目的,应用雨水花园的道路绿带优化设计有4种类型:分车绿带雨水花园(图1①)、行道树绿带雨水花园(图1②)、人行绿带雨水花园(图1③)。由于沈阳市地处平原,将部分道路纵坡的锯齿形边沟设计与雨水花园的进水口相结合(图2),效果更为显著。

以美国波特兰西南第12大道绿街工程(SW 12th Avenue Green Street Project)为例,这一“绿街”项目将以往未充分利用的人行道和街道缘石之间的绿带区域改造为极具景观效果的雨水种植园,用以截流、净化、减慢和渗透街道径流。该系统沿街道一侧设置了4个连续的雨水收集池,用于收集雨水并依靠绿植控制径流污染物,每池长5.4 m、宽1.5 m,通过预制混凝土板围合边界^[9]。该系统管理了约680 000 L的年

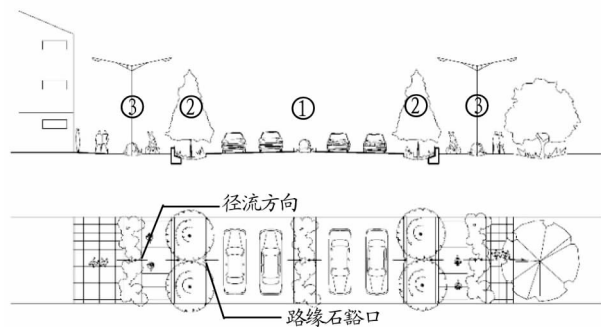


图1 雨水花园在道路绿带上的典型应用

Fig. 1 Typical application of rain garden in the road greenbelt



图2 道路锯齿形街沟与雨水口、雨水花园的结合应用

Fig. 2 Combined application of zigzag street gutter, rain outlet and rain garden

径流量,将25年一遇的暴雨径流强度减轻至少70%^[9],这无疑部分是收集型雨水花园的典范,也为沈阳市解决64 km²道路路面源径流污染提供了新的解决措施。

3 路面径流污染物削减率的影响因素

3.1 关键因素 填料是生物滞留系统(部分集水型雨水花园)功能发挥的关键因素^[10],结合沈阳市雨水水质和水量特点,选取水处理的活性炭、沸石、高炉渣、蛭石4种常用材料,以渗透性能高、污染物削减率高、廉价易获取3个标准对各材料建立评价模型,筛选出最适合的1~2种填料层材料,便于在雨水花园建设中组合使用。

3.1.1 模拟试验。笔者根据雨水花园试验装置的条件,采用710 mm×850 mm×1 120 mm高箱在底面打了4个出水口作为雨水花园装置的载体,通过对道路植草沟现状的了解,将雨水花园的基础结构进行一定转换,得到实际试验的雨水花园装置模型。试验装置上方植物可选取道路绿带上的简易草皮,能够适应多种生存环境,耐受性强。按照结构设计搭建雨水花园试验装置(图3)。

雨水花园填料层是试验的核心部分,共选取4种常用的填料层材料,将其分置于由PVC板分隔的4个填料层部分,运行一段时间使其稳定后开始试验。

①蛭石:常用种植土材料。采用直径为3~5 mm蛭石,堆积密度约0.2 kg/L,购入价格约1.1元/L;②高炉渣:工业上冶炼生铁时从高炉中排出的废物,采用直径6~10 mm的细炉渣,堆积密度约0.6 kg/L,购入价格约10.3元/L;③沸石:一种常见矿石和优质的种植土材料。采用直径3~6 mm的沸石,堆积密度约为0.7 kg/L,购入价格约2.0元/L;④活

性炭:常用于装修后去除异味、净化空气。采用直径约3~5 mm的椰壳活性炭,堆积密度约0.3 kg/L,购入价格约2.9元/L。

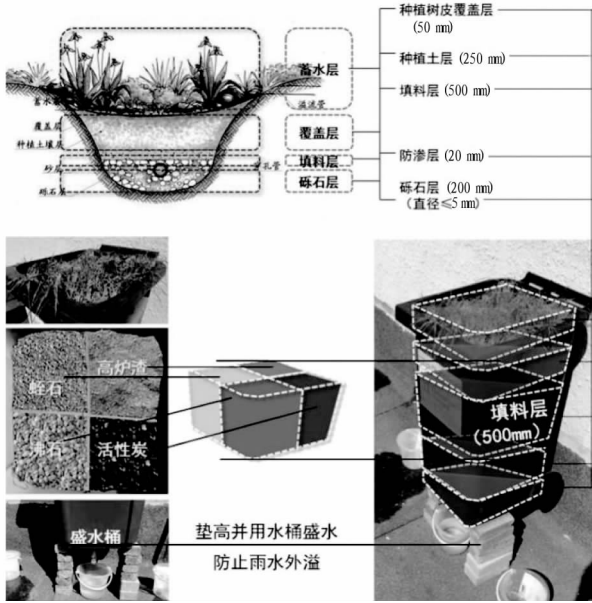


图3 雨水花园结构模拟试验装置设计

Fig.3 Design of rain garden structure simulation experimental device

3.1.2 试验方法与数据。由于模拟试验对象是道路绿带,在道路绿带承接的雨水中包括2部分:一部分是直接降落在绿地上的雨水,与沈阳市地区空气环境有关,而与道路污染关联度不大;另一部分是道路路拱向两侧绿带倾斜灌入的受污染径流,这一部分径流污染程度相当大,最具道路雨水径流污染代表性。因此,试验采用在沈阳市7月20—25日多发大雨过后收集道路路拱两侧径流共5 L,道路径流速度匀速灌入填料层4个部分的方式,且由于所有收集的雨水样本几乎一致,则可以直接检测流出雨水污染物含量,去除后污染物含量的高低与污染物去除率的高低是等效的评价结果。

雨水中的4种污染物经4种填料层材料削减后浓度存在明显差异。道路路面冲刷径流的水污染相对严重,测得各项指标均超出地表水标准^[2]。水中COD超标意味着含有过量有机物质,危害相对较大;SS指不溶于水的悬浮颗粒物,超标时肉眼可见并易采取措施,因此对水质影响较小。对于多数水中污染物,活性炭的削减能力都很强,几乎达到了国家水质标准要求,而高炉渣能力最弱,但对于SS悬浮颗粒物,高炉渣的去除效果较强(表1)。

3.1.3 AHP法评价结果。根据道路绿带设置的雨水花园特点,建立AHP分析模型,通过综合分析评价得出适宜沈阳市道路绿带雨水花园的填料层材料。

(1)建立模型如图4。

(2)根据填料层材料对4种污染物的去除效果,对P~M层赋值;根据堆积密度得到各填料层材料的运输优势,对P~N₁层赋值;根据沈阳市对当地资源与生态环境,对P~N₂层赋值;根据获取价格得到材料的购买成本,对P~N₃层赋

值;根据4种污染物对沈阳市地表水的危害程度,对M~C₁层赋值;根据对沈阳市经济状况与污染治理急迫性的衡量,对N~C₂层赋值;根据污染削弱效果与获取难易程度,以及对填料层选择的重要性,对C~T层赋值。得出已通过一致性检验的判断矩阵。其中P~M层判断矩阵见表2~5。

表1 4种填料层材料对路面径流污染处理结果

Table 1 The treatment results of four kinds of packing on road runoff pollution

填料层 Picking layer	TN	TP	COD	SS
沸石 Zeolite	4.96	1.69	59.43	34.12
蛭石 Vermiculite	4.78	1.5	54.56	42.46
活性炭 Activated carbon	3.45	0.94	40.82	25.42
高炉渣 Blast furnace slag	5.16	1.82	61.16	15.33
III类国家标准 III national standards	1.0	0.2	20	—
V类国家标准 V national standards	2.0	0.4	40	—

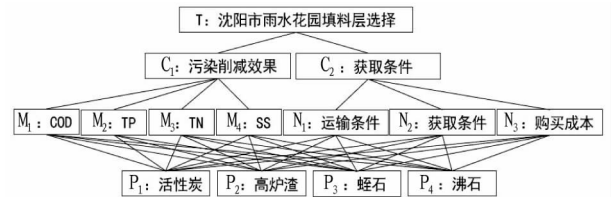


图4 AHP评价模型

Fig.4 AHP evaluation model

表2 P~M₁判断矩阵

Table 2 P~M₁ judgment matrix

指标 Index	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
P ₁	1	8	6	5
P ₂	1/8	1	1/4	1/2
P ₃	1/6	4	1	1/3
P ₄	1/5	2	3	1

表3 P~M₂判断矩阵

Table 3 P~M₂ judgment matrix

指标 Index	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
P ₁	1	7	6	4
P ₂	1/7	1	1/3	1/2
P ₃	1/6	3	1	1/2
P ₄	1/4	2	2	1

表4 P~M₃判断矩阵

Table 4 P~M₃ judgment matrix

指标 Index	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
P ₁	1	7	3	5
P ₂	1/7	1	1/3	1/2
P ₃	1/3	3	1	1/2
P ₄	1/5	2	2	1

表5 P~M₄判断矩阵

Table 5 P~M₄ judgment matrix

指标 Index	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
P ₁	1	1/3	5	3
P ₂	3	1	9	5
P ₃	1/5	1/9	1	3
P ₄	1/3	1/5	1/3	1

(3)将所有判断矩阵做单排序和总排序并通过总排序一致性检验可得到最终4种填料层的权重:填料层材料沸石0.110 1,蛭石0.253 5,活性炭0.315 2,高炉渣0.321 2。

根据试验结果与AHP分析,可知4种填料层在沈阳市道路绿带雨水花园的应用优势从大到小依次为高炉渣、活性炭、蛭石、沸石。

高炉渣对污染物的削减机理为吸附、中和和絮凝沉降作用,却具有很强的地域优势。对于工业城市沈阳市来说,2015年钢铁及有色金属冶炼与压延业等五大优势产业实现增加值1 420.5亿元,金属冶炼设备共产出33 812 t^[1]。高炉渣作为冶炼生铁时的高炉废物,如果广泛应用于沈阳市的道路绿带雨水花园,其价格因素可忽略不计,且工业废物回收利用将有助于城市生态建设,但根据刘精今等^[11]的相关研究,由于高炉渣中含有很多硅、镁、钙、铁的氧化物,在水处理过程中易造成轻微的二次污染,一方面它含有溶于水的金属离子,另一方面,高炉渣在水中浸泡5 h会使水的pH由7.0升高为9.8。因此,高炉渣在雨水花园中的应用具有两面性,在一定长度的道路绿带上需要适量适度配置;活性炭是一种相对廉价、好运送的材料,对多种污染物都具有很强的削弱能力,且在生活中应用广泛、易于获取,几乎不造成二次污染,但需要专门加工,相对不经济。根据郭瑞霞等^[12]和梁霞等^[13]的相关研究,可将其与不同材料联合应用,组成新的工艺技术,以取得更好的活性炭水处理效果。

在沈阳市实施道路绿带的雨水花园建设时,最好将2种填料层配合使用。综合活性炭削减污染物质的高效和高炉渣容易获取的地域优势,计算一定的材料配比,妥善解决道路绿带雨水花园的建设。

3.2 其他影响因素 上述试验结果表明,雨水花园中填料层材料很大程度上影响了其污染物的去除效果,在填料层材料作为关键因素的同时,许多次要因素,如不同运行条件、雨水花园不同构造条件等,也会不同程度地对雨水花园污染物的去除效果产生影响。

3.2.1 运行条件。运行条件即雨水花园的工作环境,对雨水花园的污染物去除效果有着较大影响,沈阳市的雨水条件和城市道路建设现状都会造成其路旁雨水花园工作环境与其他地区的差异,主要影响因素如下:

3.2.1.1 水力负荷与水力周期。在雨水花园中,一般将单位时间内通过单位面积的雨水称作水力负荷,将雨水花园遭到淹没与落干的时间的组合称为水力周期。通常情况下,水力负荷较大时,雨水花园的污染物去除力会相对削弱,这意味着沈阳市雨季的高强度暴雨将一定程度上降低路旁雨水花园对道路产生污染物的去除效果;而水力周期越长,即落干期越长,雨水花园对污染物的去除效果越能得到凸显,沈阳市雨季频繁的雨水仍不利于污染物的去除效果。

3.2.1.2 径流污染物负荷。根据前人的试验结果和研究经验,径流污染物负荷与污染物去除率一般存在3种关系:抑制作用^[14]、无明显作用^[15-16]和促进作用^[17-18]。

3.2.1.3 路面坡度。城市道路尤其是主干道,为了效果良

好的自流排水一般会结合城市地形设置道路坡度。坡度与雨水自流息息相关,雨水自流将影响径流污染物的集聚情况,适当控制污染物向某雨水口集聚,可以在该雨水口集中建设有利道路污染物处理的雨水花园。

3.2.2 雨水花园构造条件。地区合适的现状条件是适建雨水花园的先决条件,雨水花园构造设计需结合地区气候、土壤等特点综合考虑,其构造条件对于污染物去除效果也有很大影响。

3.2.2.1 植被条件。合理的植物配置与巧妙的植被布局也是道路绿带雨水花园净化水质的主要手段。根据宋英伟等^[19]、陈永华等^[20]、陈润等^[21]的研究结果,有植物系统去除率一般高于无植物系统,但杨栩等^[22]的结果则表明两者的对比并不明显。其结果的差异性或与试验用植被种类和试验用土壤复氧能力的强弱^[22]有关。美国学者Fletcher^[23]、Read等^[24-25]对不同植物种类氮、磷去除能力的研究表明,不同植物种类去除污染物的能力有显著差异。雨水花园的植物种植应以本土植被为主,注重规划种植时的乔、灌搭配及后期的管理维护。考虑到雨水滞留和雨水净化两大目的的实现,结合沈阳市的气候与水土特征,兼顾道路绿带的复杂环境条件,应选择耐寒、耐旱、耐涝、耐瘠薄、污染抗性与净化能力强、落果对车辆与行人不会造成危害,且有一定观赏性的植物。因此,可供选择进行合理搭配栽种的乔木有垂柳、旱柳、圆柏等,花灌木及地被植物有大叶黄杨、卧茎景天等。

3.2.2.2 种植土层厚度。有研究表明,雨水花园的种植土层厚度越大,其污染区去除效果越好,尤其是对COD、TN、SS等,但在种植土层厚度在35~65 cm时可获得最高性价比^[26]。

3.2.2.3 种植土类型。种植土应尽量选择城市原始土壤。沈阳市土壤以棕壤和草甸土为主,透水效果较好,适宜路旁雨水花园的建设。

4 结论与对策

对于交通污染日益严重的沈阳,在道路坡度不影响城市交通功能的前提下,通过规整道路纵坡和改善雨水井,并使其与绿带雨水花园综合布设,对路面径流污染加以引导和处理,这样沿着街道等线性空间展开的生态设施布置是经济、有效的。

在道路雨水花园填料层的选择上,通过AHP法权重分析得出,采用回收工业废物高炉渣与活性炭综合利用的方式较为经济合理。这既可以为城市带来良好的水治理效益,又解决了工业城市废渣处理的难题。

除了街道雨水花园填料层的应用以外,合理改善道路建设、综合配置绿地植物也是处理路面径流污染的关键因素。

城市详细规划建设与道路设计中都应当考虑雨水花园的综合应用,虽然LID技术日渐成熟,但对于在海绵城市建设刚刚起步的沈阳来说,LID设施建设的地域性难题还需向前迈进一大步。希望通过对填料层材料的初步分析,提出针对不同污染物控制的沈阳市路旁雨水花园合理建设模式,以期为东北地区路面径流污染控制体系建设提供依据。

(下转第83页)

3 结论与讨论

湖北省来凤县 2015 和 2016 年生产的 30 万 kg 雪茄烟叶全部采用“热蒸汽加湿·散叶堆积”发酵法处理,发酵后烟叶呈浅褐-褐色,颜色均匀性好,青杂气和刺激性下降,香气质、香气量得到提升,全部烟叶销售到河南中烟和湖北中烟,并应用于“迷你雪茄”“茂大”“红旗渠”等骨干品牌配方中。“热蒸汽加湿·散叶堆积”发酵法的推广应用促进了来凤雪茄烟叶质量整体提升。

恩施州来凤县雪茄烟叶发酵时环境温度在 10~20℃,而国外雪茄烟叶产地发酵环境温度一般都在 25℃以上^[2,5]。“冷水雾化加湿·把烟堆积”发酵法等常规发酵效果较差可能与环境温度低有关。“热蒸汽加湿·散叶堆积”发酵法效果明显优于其他处理,可能是热蒸汽加湿烟叶提高了发酵起点温度 10℃以上,烟堆内部起始温度达到了高温状态(25℃以上),同时烟叶在热蒸汽中经过软化,激活了发酵微生物、酶等,促进了发酵的进行,香气更进一步显露,青杂气等缺陷进一步降低。

散叶堆积增大了烟叶相互接触面积,比把烟堆积减少了烟叶之间的空隙,烟堆内部烟叶含水分布更趋于一致,促进了升温 and 发酵进行的程度,烟叶颜色均匀性得到了大幅改善。

发酵过程中雪茄烟叶化学成分及其致香物质变化规律,需要进一步研究。

“热蒸汽加湿·散叶堆积”发酵法,首先通过调节加湿机转速,达到烟叶加湿相对均匀,含水量可控,且烟叶在热蒸汽作用后,烟叶发酵堆内起始温度提升 10℃以上,烟叶在热蒸汽里软化,发酵后烟叶质量和颜色均匀性提升十分明显。发酵后烟叶呼吸满意度高,化学成分更协调,香气质与香气量进一步显露,青杂气和刺激性下降,更加彰显了雪茄烟叶的风格特征。“热蒸汽加湿·散叶堆积”发酵法缩短了发酵时间,减少了仓库面积占用空间和储藏劳务成本。同时发酵后的雪茄烟叶颜色一致性明显提高,极有利于茄衣茄套分级挑选,为生产高档次茄衣提供了一种技术选择。

参考文献

- [1] 迪特·H·维尔茨. 雪茄圣经[M]. 2 版. 冒晨晨,译. 南昌:江西科学出版社,2012.
- [2] 秦艳青,李爱军,范静苑,等. 优质雪茄茄农生产技术探讨[J]. 江西农业学报,2012,24(7): 101-103.
- [3] 周锦龙,汤珍瑶. 雪茄烟发酵技术进展与展望[J]. 农技服务,2009,26(11):119-120,127.
- [4] 周文,刘一兵,曾代龙,等. 雪茄茄芯烟叶堆垛发酵技术研究与应用[J]. 农业科学,2016,6(3):63-70.
- [5] 王洁,曾代龙,符雷,等. 晾晒烟叶发酵研究进展[J]. 河南农业科学,2014,43(4):1-4.
- [6] 金敖熙. 雪茄烟生产技术[M]. 北京:轻工业出版社,1982.
- [7] 科学,2006,27(6):1083-1087.
- [15] 车武,欧岚,刘红,等. 屋面雨水土壤层渗透净化研究[J]. 给水排水,2001,27(9):38-41.
- [16] 欧岚,车武,汪慧贞. 城市屋面雨水绿地水平渗透净化研究[J]. 城市环境与城市生态,2001(6):24-27.
- [17] 张旭东,阮晓红,孙敏. 利用地表漫流系统处理新沂河污水的试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(3):273-276.
- [18] 孙敏,阮晓红,张旭东,等. 地表漫流系统处理污染新沂河水的中试研究[J]. 中国给水排水,2006,22(9):46-49.
- [19] 宋英伟,年刚副,黄民生,等. 人工湿地中基质与植物对污染物去除效率的影响[J]. 环境工程学报,2009,3(7):1213-1217.
- [20] 陈永华,吴晓笑,何钢,等. 人工湿地污水处理系统中的植物效应与基质酶活性[J]. 生态学报,2009,29(11):6051-6058.
- [21] 陈润,陈中祥,莫李娟. 不同基质和植物人工湿地净化效果试验[J]. 水资源保护,2010,26(4):62-66.
- [22] 杨翔. 城市绿地对降雨径流及其污染物削减研究[D]. 天津:天津大学,2012.
- [23] FLETCHER T, ZINGER Y, DELETIC A, et al. Treatment efficiency of biofilters results of a large-scale column study[C]. Sydney, Australia: Rainwater&Urban Design Conference,2007.
- [24] READ J, WEVILL T, FLETCHER T, et al. Variation among plant species in pollutant removal from stormwater in biofiltration systems[J]. Water research,2008,42(4/5):893-902.
- [25] READ J, FLETCHER T D, WEVILL T, et al. Plant traits that enhance pollutant removal from stormwater in biofiltration systems[J]. International journal of phytoremediation,2010,12(1):34-53.
- [26] 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.

(上接第 65 页)

参考文献

- [1] 苗展堂. 微循环理念下的城市雨水生态系统规划方法研究[D]. 天津:天津大学,2013.
- [2] 赵兵兵,冯霖. 基于 LID 的沈阳市径流污染控制及对策[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016(3):538-545.
- [3] 侯培强. 城市屋面径流和道路径流污染特征及其影响因素研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2012.
- [4] 董欣,杜鹏飞,李志一,等. 城市降雨屋面、路面径流水文水质特征研究[J]. 环境科学,2008,29(3):607-612.
- [5] 任玉芬,王效科,韩冰,等. 城市不同下垫面的降雨径流污染[J]. 生态学报,2005,25(12):3225-3230.
- [6] 潘俊,陈显奇,董健,等. 沈阳城区雨水径流中重金属的分布特征[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2015(4):730-736.
- [7] 向璐璐,李俊奇,广诺,等. 雨水花园设计方法探析[J]. 给水排水,2008,34(6):47-51.
- [8] 张钢. 雨水花园设计研究[D]. 北京:北京林业大学,2010.
- [9] 洪泉,唐慧超. 从美国风景园林师协会获奖项目看雨水花园在多种场地类型中的应用[J]. 风景园林,2012(1):109-112.
- [10] 高晓丽. 道路雨水生物滞留系统内填料的研究[D]. 太原:太原理工大学,2014.
- [11] 刘精今,李小明,杨麒. 炉渣的吸附性能及在废水处理中的应用[J]. 工业用水与废水,2003,34(1):12-15.
- [12] 郭瑞霞,李宝华. 活性炭在水处理应用中的研究进展[J]. 炭素技术,2006,25(1):20-24.
- [13] 梁霞,王学江. 活性炭改性方法及其在水处理中的应用[J]. 水处理技术,2011,37(8):1-6.
- [14] 何连生,刘鸿亮,席北斗,等. 人工湿地氮转化与氧关系研究[J]. 环境