



水源涵养型城市生态下 垫面构建技术研究

李其军 王理许 陈建刚 张书函 等著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



水源涵养型城市生态下 垫面构建技术研究

李其军 王理许 陈建刚 张书函 等 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是在“水源涵养型城市生态下垫面构建技术集成与示范”项目成果基础上编写的。全书共分八章。分别为：第一章绪论，第二章水源涵养型城市植被配置技术，第三章水源涵养型城市建筑屋面构建技术，第四章水源涵养型城市铺装地面建设技术，第五章城市机动车道雨水清洁排放与利用技术，第六章城市立交桥区雨水利用与积水防控技术，第七章水源涵养型城市排水系统构建技术，第八章水源涵养型城市生态下垫面构建技术示范应用。

本书可供水利技术、市政排水等专业的研究、规划、设计人员使用，也可供大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目（C I P）数据

水源涵养型城市生态下垫面构建技术研究 / 李其军等著. — 北京：中国水利水电出版社，2014.2
ISBN 978-7-5170-1750-9

I. ①水… II. ①李… III. ①城市水利—水利工程—研究—中国 IV. ①TV512

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第030808号

书 名	水源涵养型城市生态下垫面构建技术研究
作 者	李其军 王理许 陈建刚 张书函 等著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 20.75印张 492千字
版 次	2014年2月第1版 2014年2月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	60.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

《水源涵养型城市生态下垫面构建技术研究》

编 委 会

主 任：李其军 王理许 陈建刚 张书函

副主任：倪广恒 史晓明 孟莹莹 李 艺 孔 刚
赵 飞

委 员：（按姓氏笔画排序）

王子援	王海潮	尤 洋	方先金	丛振涛
吕华芳	朱庆平	孙 挺	杨 珏	杨京生
苏东彬	李灵军	吴晓猛	张思聪	汪 妍
邵辉煌	武晓峰	欧阳晓红	唐莉华	黄利群
龚应安	蒋志华	赖娜娜	潘艳艳	

前 言

城市是人口集聚形成的较大居民点，是人类文明的主要组成部分，也是伴随人类文明与进步发展起来的。随着我国城市化进程的加快，城市数量和规模不断扩大，使下垫面状况发生很大改变，“降雨—径流—蒸发”的关系发生显著变化，不仅使当地的水源得不到涵养，还易引发局地涝、洪水和环境污染，造成人民生命财产等的严重损失。目前的这种城市下垫面格局不利于城市水资源的良性循环，不利于城市水环境的自然改善，使城市成为了一个生态相对脆弱的区域。

为了改善城市水文状况、调节区域水分循环、减轻城市化进程中的种种生态环境问题，在水利部公益性行业专项的资助下，由北京市水科学技术研究院牵头，联合北京市市政工程设计研究总院、北京中水新华国际工程咨询有限公司、清华大学共同开展了“水源涵养型城市生态下垫面构建技术集成与示范”项目的研究。项目针对构成城市下垫面的植被、建筑物、铺装地面、道路、排水系统等主要因素，通过深入试验，对水源涵养型城市植被配置技术、城市建筑屋面构建技术、城市铺装地面建设技术、城市排水系统构建技术，以及城市机动车道雨水清洁排放与利用技术、城市立交桥区雨水利用与积水防控技术等进行了研究与示范。项目构建了屋面—绿地—硬化地面—排水管网—河网水系五位一体控制和利用雨洪、削减面源污染、增加入渗涵养水源的技术体系；选出耐旱植物品种和耐盐抗污地被植物，建立了水源涵养型城市植被配置技术；建立了水源涵养型透水铺装技术体系；探索开发了北方城市屋顶雨养绿化技术；提出了环保型雨水口、透水性硬路肩、路边生物滞留槽净化道路雨水技术，创建了城市机动车道雨水处理利用与清洁排放技术体系；提出了立交桥区雨水收集、储存、净化、利用技术，建立了雨水渗、蓄、排、用、调相结合的积水防控技术体系；从小区排水系统、市政雨水管网、城市河湖水系三个层面，建立了渗、蓄、用、滞、调、排相结合的水源涵养型城市排水技术体系。

本书是以“水源涵养型城市生态下垫面构建技术集成与示范”项目的成果为基础编写的，全书共分8章。第1章为绪论，主要介绍了研究背景与意义、国内外研究现状与进展、研究内容与技术路线等。第2章为水源涵养型城

市植被配置技术,主要研究了抗旱节水型园林乔木、灌木和地被植物的筛选,及其搭配模式,研究了耐盐抗污型植被的筛选及其搭配模式,并分析了不同植被系统的水源涵养效益。第3章为水源涵养型城市建筑屋面构建技术,主要研究了水源涵养屋面的基本形式、绿化屋顶的径流与蒸散发规律及其定量计算模型,分析了水源涵养型屋顶的适用性。第4章为水源涵养型城市铺装地面建设技术,研究了材料特性对透水铺装入渗能力的影响、透水与不透水立体组合铺装的径流控制技术、透水铺装的增渗措施、透水铺装对地下水补给效果、透水铺装的设计与施工工艺等。第5章为城市机动车道雨水清洁排放与利用技术,主要通过调研和监测机动车道径流水质特性,研究道路初期径流确定的量化方法,研究环保型雨水口拦截与净化雨水技术、路边生物渗滤沟净化道路雨水技术、透水型硬路肩收集净化雨水技术。第6章为城市立交桥区雨水利用与积水防控技术,主要研究了立交桥雨水径流量与水质特性、立交桥雨水处理技术、雨水收集储存与综合利用技术,通过分析积水原因,提出了立交桥积水防控的方案。第7章为水源涵养型城市排水系统构建技术,研究了城市小区雨水下渗涵养水源技术、市政管线雨水综合利用技术、湿地净化入河雨水技术,以及基于模拟优化调度的水源涵养型城市河湖构建技术。第8章为水源涵养型城市生态下垫面构建技术示范应用,主要介绍了水源涵养型城市植被示范区、水源涵养型城市屋顶示范区、城市机动车道雨水清洁排放与利用示范区、立交桥雨水利用与积水防控示范区和水源涵养型城市排水示范工程。

本书是全体研究人员辛勤劳动的结晶,全书由陈建刚、张书函负责统稿,李其军审定。全书主要著者及分工如下:第一章 李其军、王理许、陈建刚、张书函;第二章 史晓明、陈建刚、朱庆平、张书函、欧阳晓红、李灵军、黄利群、赖娜娜、杨珏、吴晓猛;第三章 倪广恒、李其军、唐莉华、王理许、陈建刚、张思聪、张书函、武晓峰、丛振涛、孙挺、吕华芳;第四章 李其军、陈建刚、张书函、赵飞、孟莹莹、尤洋、苏东彬、王海潮、孔刚、龚应安、潘艳艳;第五章 李其军、张书函、陈建刚、孟莹莹、尤洋、苏东彬、王海潮、赵飞、孔刚、龚应安、潘艳艳;第六章 李艺、王理许、方先金、张书函、邵辉煌、陈建刚、杨京生、蒋志华、汪妍、王子援;第七章 陈建刚、张书函、龚应安、王海潮、孔刚、苏东彬、尤洋;第八章 李其军、陈建刚、张书函、李灵军、黄利群、方先金、邵辉煌、倪广恒、唐莉华、孟莹莹、孔刚、赖娜娜、龚应安、杨珏、吴晓猛。

除上述参编人员以外,先后参加项目研究与管理的人员还有:王建慧、

来海亮、陈暘、范春芳、张敬良、刘茂峰、袁晓清、周兴、姚本智、孙文、梁小田、胡志红、吕志成、吴皓、刘雷斌、王瑶瑶、李旭、战伟庆、郭富庆、牛鸿雁、詹红丽、闫丽娟、胡东燕等同志。本书也包含上述同志的工作成果。另外，本书还参考了其他单位及个人的研究成果，均已在参考文献中列出，在此一并表示诚挚的感谢。

由于时间仓促，水平有限，文中欠妥或谬误之处敬请读者批评指正。

编者

2013年10月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状与趋势	2
1.2.1 园林植物筛选	2
1.2.2 绿化屋顶	4
1.2.3 道路雨水利用与污染控制技术	6
1.2.4 道路初期径流的弃流	11
1.2.5 雨水系统末端治理技术	13
1.2.6 水文、水力模型的应用	15
1.3 研究内容与技术路线	16
1.3.1 研究目标	16
1.3.2 研究内容	16
1.3.3 技术路线	18
第 2 章 水源涵养型城市植被配置技术	19
2.1 抗旱节水型园林乔木筛选	19
2.1.1 材料与方法	19
2.1.2 叶片光能和水分的利用特征	23
2.1.3 植株光合与蒸腾模拟	28
2.1.4 土壤水分动态模拟	30
2.1.5 灌溉需水量	32
2.2 抗旱节水型园林灌木筛选	32
2.2.1 材料与方法	32
2.2.2 生长期耗水量	33
2.2.3 不同灌溉条件下的耗水量	34
2.2.4 不同灌溉条件的蒸腾速率	35
2.2.5 不同灌溉处理的土壤含水率	36
2.3 抗旱节水型园林地被植物筛选	39
2.3.1 材料与方法	39
2.3.2 生长季蒸散量	40
2.3.3 作物系数	41

2.3.4	不同灌溉水平下的地被植物生长状况	42
2.4	耐盐型植物的筛选	46
2.4.1	材料与方法	46
2.4.2	盐胁迫危害调查	47
2.4.3	相对生物量	49
2.4.4	光合作用特征	50
2.4.5	叶绿素含量变化	52
2.4.6	叶片渗透势	53
2.4.7	Na ⁺ 含量变化	54
2.5	水源涵养型绿地植被搭配模式	55
2.5.1	水源涵养型抗旱节水植物	55
2.5.2	水源涵养型抗旱节水植物搭配模式	55
2.5.3	耐盐型水源涵养植被搭配模式	56
2.6	小结	56
第3章	水源涵养型城市建筑屋面构建技术	57
3.1	城市屋面水源涵养形式	57
3.1.1	屋顶滞蓄及雨水收集回用	57
3.1.2	屋顶绿化	58
3.2	绿化屋顶径流及蒸散发规律	58
3.2.1	绿化屋顶构建	58
3.2.2	种植基质特性研究	59
3.2.3	滞蓄能力研究	62
3.2.4	蒸散发研究	64
3.3	绿化屋顶径流及蒸散发定量计算模型	66
3.3.1	单场次降雨产流模型	66
3.3.2	蒸散发模型	76
3.3.3	水量平衡预测模型	77
3.4	水源涵养型屋顶的适用性分析	79
3.4.1	荷载可行性	79
3.4.2	经济可行性	79
3.4.3	耐寒耐旱性	79
3.5	小结	79
第4章	水源涵养型城市铺装地面建设技术	81
4.1	不同面层透水铺装地面的降雨产流特性试验研究	81
4.1.1	试验材料与方法	81
4.1.2	产流与入渗总量	82
4.1.3	产流过程控制能力	84

4.1.4	穿过 300mm 土层的人渗量	85
4.1.5	径流削减比率和入渗补给率	86
4.2	透水铺装结构对入渗能力的影响与优化	87
4.2.1	透水铺装垫层对降雨入渗的影响	87
4.2.2	基层土壤对降雨入渗能力的影响	94
4.2.3	铺装材料孔隙率对透水性的影响	96
4.2.4	透水铺装地面优化结构选择	98
4.3	透水与不透水立体组合铺装的径流控制技术	101
4.3.1	试验材料与方法	102
4.3.2	透水铺装比例对降雨产流的影响	102
4.3.3	透水铺装比例对入渗能力的影响	104
4.4	透水铺装增渗措施	106
4.4.1	试验材料与方法	106
4.4.2	下渗收集设施对透水地面入渗产流的影响	108
4.4.3	透水铺装增渗系统设计方法	112
4.5	透水铺装入渗雨水水质特性研究	116
4.5.1	试验材料与方法	116
4.5.2	下渗雨水的水质特征	116
4.6	透水铺装设计与施工工艺	118
4.6.1	透水铺装地面设计方法	118
4.6.2	透水铺装地面施工工艺	119
4.7	小结	120

第 5 章	城市机动车道雨水清洁排放与利用技术	123
5.1	城市机动车道径流水质特性	123
5.1.1	材料与方法	123
5.1.2	径流中主要污染物浓度	125
5.1.3	径流可生化性	129
5.1.4	主要污染物浓度与 SS 的相关性	129
5.1.5	污染物浓度随降雨历时的变化	130
5.1.6	污染负荷随降雨历时的变化	131
5.1.7	污染物浓度与车流量的关系	132
5.2	道路初期径流雨水的量化确定与分离	133
5.2.1	道路初期径流雨水的量化确定	133
5.2.2	初期径流雨水的量化指标	135
5.2.3	道路初期径流雨水分离技术	137
5.3	环保型雨水口收集净化道路雨水试验研究	141
5.3.1	技术原理	141
5.3.2	试验材料与方法	141

5.3.3 结果与分析	143
5.4 孔口道牙结合渗滤沟净化道路雨水技术	146
5.4.1 技术原理	146
5.4.2 材料与方法	147
5.4.3 结果与分析	150
5.5 透水性硬路肩收集净化雨水技术	156
5.5.1 技术原理	156
5.5.2 材料与方法	156
5.5.3 结果与分析	157
5.6 适宜北京地区的道路雨水利用与清洁排放技术体系	159
5.7 小结	160
第6章 城市立交桥区雨水利用与积水防控技术研究	162
6.1 立交桥区雨水径流水质特性	162
6.1.1 材料与方法	162
6.1.2 结果与分析	163
6.2 立交桥区雨水处理技术	168
6.2.1 初期径流弃除	168
6.2.2 微絮凝过滤	168
6.2.3 消毒	181
6.3 雨水储存技术	183
6.3.1 储存池的结构形式	183
6.3.2 储存池容积的计算	184
6.4 立交桥区雨水收集与综合利用	186
6.4.1 立交桥区汇水面特性	186
6.4.2 雨水利用方式	186
6.4.3 雨水收集与综合利用技术要点	187
6.5 立交桥区积水防控技术	187
6.5.1 积水成因	187
6.5.2 应对措施	189
6.6 小结	191
第7章 水源涵养型城市排水系统构建技术	193
7.1 城市小区雨水下渗涵养水源技术	193
7.1.1 小区绿地雨水下渗技术	193
7.1.2 小区透水铺装下渗技术	201
7.1.3 小区雨水回灌地下水技术	204
7.1.4 雨水利用措施对小区排外径流的消减效果	207
7.1.5 城市小区雨水下渗涵养水源技术途径	210

7.2 市政管线雨水的综合利用技术	211
7.2.1 市政雨水管线水质特性	211
7.2.2 市政雨水管线内污染物分离与处置技术	220
7.2.3 市政管线雨水调蓄技术	226
7.2.4 人工湿地净化市政雨水管线雨水技术	230
7.3 水源涵养型城市河湖构建技术	239
7.3.1 沿河公共绿地调蓄下渗雨洪技术	239
7.3.2 砂石坑调蓄下渗雨洪技术	243
7.3.3 排水系统模拟技术	246
7.3.4 城市河湖实时优化调度利用雨洪入渗补源技术	254
7.4 小结	265
第8章 水源涵养型城市生态下垫面构建技术示范应用	267
8.1 水源涵养型城市植被示范区	267
8.1.1 中山公园示范区	267
8.1.2 景山公园示范区	271
8.1.3 居民小区水源涵养植物配置示范	274
8.2 水源涵养型城市屋顶示范区	276
8.2.1 示范区建设	276
8.2.2 观测效果分析	279
8.3 城市机动车道雨水清洁排放与利用示范区	284
8.3.1 环保型雨水口	284
8.3.2 透水性硬路肩	288
8.3.3 生物滞留技术	291
8.4 城市立交桥区雨水利用与积水防控示范区	296
8.4.1 示范区建设	296
8.4.2 实施效果	300
8.5 水源涵养型城市排水示范工程	307
8.5.1 示范区建设	307
8.5.2 观测效果分析	308
参考文献	310

第 1 章 绪 论

1.1 研 究 背 景

随着我国城市化进程的加快,城市数量和规模不断扩大,使下垫面状况发生了很大改变,屋顶、道路、广场、桥梁等硬化面积都在不断增加。以北京为例,目前道路总长已达到 4125.8km,道路面积达到了 4921.4 万 m^2 ,市内立交桥众多,二环、三环、四环、五环路上分别达到 30 座、42 座、76 座、90 座。大面积的不透水铺装隔断了水分入渗的通道。而相应地,绿地等天然地表形式的面积日益缩减。

城市绿地被誉为“城市的肺”,不仅可以美化环境,而且可以起到改善城市热岛效应、净化空气的生态功能。然而在城市中,尤其是重点大街沿线、商业街区,可用来建设绿地系统的面积越来越少,成本也越来越高。城市雨水排水管道是保证城市生产和生活排水的重要基础设施,是城市建设的重要组成部分。而随着城市化水平的不断提高,城市的雨水排水系统也由原来的沟渠变为复杂的边沟、渠道和地上、地下管网。

城市下垫面条件的改变使得“降雨—径流—蒸发”的关系发生了显著变化,破坏了自然水循环过程。近年来,随着全球气候异常情况的频繁出现,大中城市频遭暴雨袭击,而我国城市市政基础设施相对薄弱,雨水排水管道的输水能力有时不能满足排水要求,暴雨时极易出现道路积水现象,部分地区雨后也会长时间滞水,特别以低洼地区及道路立交桥区出现的情况尤为频繁,严重时还会引起城市区域内涝灾害。这给社会带来了巨大的损失,在一定程度上制约了城市化的进程,同时也浪费了大量雨水资源。城市热岛效应、环境污染、用水紧张等一系列环境与生态问题与下垫面条件的改变也是密不可分的,这些都使得城市成为了一个生态相对脆弱的区域。

为了改善城市水文状况、调节区域水分循环、减轻城市化进程中的种种生态环境问题,本研究提出了水源涵养型城市生态下垫面的建设思路,构建人与自然和谐相处的城市生态空间,这也是城市进一步发展的必然需要。拟针对构成城市下垫面的植被、建筑物、铺装地面、道路、排水系统等主要因素开展研究,通过深入试验和示范,研究水源涵养型城市植被优选与配置技术、水源涵养型城市建筑屋顶构建技术、水源涵养型城市铺装地面建设技术、水源涵养型城市道路体系建设技术、水源涵养型城市排水系统构建技术,形成渗、蓄、用、滞、调、排相结合的水源涵养型城市排水技术体系,构建“降雨—下垫面—土壤—排水系统”相互协调的立体水资源涵养模式,在可持续地开发利用水资源的同时,改善生态环境、涵养水资源,构建良性水循环。研究成果对于城市生态系统功能的恢复重建、城市水的循环利用和城市节水水平的提高具有重要意义。

1.2 国内外研究现状与趋势

1.2.1 园林植物筛选

1. 抗旱园林植物筛选研究

(1) 抗旱树木研究。近年来,国内外许多学者从树木的水分生理生态,包括林木的水势和蒸腾作用、气孔反应、光合机制与抗氧化保护机制、渗透调节、保护酶体系、脂肪加氧酶、脱落酸等方面对林木耗水特性进行了研究,特别是在木质部空穴和栓塞方面取得一定的成就。树木的抗旱基因与遗传的研究,包括水通道蛋白、逆境信号转导、树木抗旱性的遗传变异性、遗传基因工程研究方面也取得一定进展。研究者在林木抗旱性评价研究领域所开发的一些方法为开展城市抗旱园林植物的筛选提供了一些有价值的思路,多数学者认为,确定若干科学、合理的生理、生化或分子生物学指标是成功进行树木抗旱性筛选的关键。

(2) 灌木耗水及抗旱性研究。姚砚武等根据常绿阔叶树木对于干旱胁迫的不同适应方式,应用多种测试手段,探索了多指标综合评价常绿阔叶树木树种间及树龄间的抗旱差异,并对其抗旱能力进行主成分分析,对接抗旱力大小进行了排序和分类。李淑琴等通过致死性干旱和致死性水涝处理,用生理生态方法,对冬青、绿冬青和无刺枸骨进行抗逆性研究,结果表明,随干旱的逐渐加重,3种冬青体内的游离脯氨酸含量呈上升趋势,比较而言,绿冬青上升的峰值出现早,冬青和无刺枸骨的上升峰值出现迟;绿冬青耐旱约15天,无刺枸骨耐旱约25天,冬青介于二者之间。3种冬青均有一定的抗逆性,其中无刺枸骨对水胁迫的适应能力最强,冬青次之,而绿冬青相对较弱。陈娟等人对六种野生灌木的抗旱性进行了研究,并在园林绿地中应用后进行了抗旱性能的实地监测。

(3) 草坪地被花卉植物耐旱性及耗水研究。草坪耗水性的研究一般使用草坪蒸散率表示。草坪蒸散率是指单位面积、单位时间内草坪蒸散的水量,其略小于草坪的耗水量,后者包括了草坪生长中组织内的含水量,但在研究和实际应用中常用蒸散率来表示草坪耗水量或草坪的水分需求。Beard、Carrow等人对不同草坪草的蒸散率进行了测定,结果发现暖季型草坪草和冷季型草坪草相比普遍具有较低的草坪蒸散率。20世纪90年代以后,Shearman、Kopec、Green等多位学者将草坪蒸散研究的重点由种间转移到种内水平,使人们对草坪的耗水特性有了更深入的认识。其研究结果表明,暖季型草坪草种内品种的蒸散率差异较小,24个狗牙根品种间,蒸散率最高与最低的差异仅为1mm,结缕草和钝叶草品种间的蒸散率则几乎没有明显差异而冷季型草坪草品种蒸散率差异很大,有些差异甚至不亚于种间,草地早熟禾、高羊茅品种间蒸散率差异可达到3mm。土壤水分是草坪蒸散的源泉,在较长时间的土壤干旱后大量灌水会导致草坪蒸散量的极大升高,甚至高于未发生土壤干旱前的蒸散量。Kneebone等认为草坪具有奢侈耗水的特性,当土壤中的水分含量过多时,草坪的蒸散量会维持较高水平。中国农业大学和园林科学研究所等单位在2001—2003年间开展了北京市自然科学基金重点项目“北京市常绿、抗旱、抗病草坪草种选育及管理技术研究”的研究,对北京地区常用6种草坪草的蒸散量、抗旱性及水分管理等方面进行了研究,初步形成了多种草坪植物的蒸散耗水特性及其研究方法。杨玉秀通

过根际模拟土壤水分胁迫的方法,对郁金香、风信子和欧洲水仙3种球根花卉的幼苗进行了胁迫处理。结果表明,随着水分胁迫强度的增加,3种球根花卉各生理指标均有不同程度的变化,以欧洲水仙对干旱的适应力最强。崔娇鹏对地被菊抗旱节水性进行了初步研究,确定了地被菊不同品种的抗旱能力。

2. 耐盐抗污植物筛选研究

植物的耐盐性一般都很低,如果土壤表层含盐量超过0.6%时,大多数植物已不能生长,土壤中可溶性盐含量超过1.0%时,只有一些特殊适应于盐土的植物才能生长。利用耐盐植物是合理改良利用盐碱地一个切实可行的方法。选育耐盐植物的方法主要有常规选育法、杂交育种法、突变体筛选法和基因工程法,其中,运用基因工程技术来培育新的耐盐品种,已成为了近年来国内外的研究热点,经过努力培育出了几种基因工程耐盐新品种。然而,这仅限于实验水平上,距离实际的生产应用还相差甚远。到目前为止,常用于盐碱地绿化的植物分为两大类:乡土盐生植物和经过筛选具有一定耐盐性的园林绿化植物。

(1) 乡土盐生植物。近年来,我国在开发利用野生与筛选栽培抗盐碱牧草的研究方面取得了一系列成果。经过引种观察的抗盐碱牧草品种140多个,试种与大面积推广的禾本科牧草14种、豆科牧草6种。其中大米草、田苣在江苏滩涂地带氯化物盐碱地推广;小花碱茅草—朝鲜碱茅草主要在内蒙古硫酸盐碱地及东北三省苏打碱土地得到推广;高冰草主要在山东滨海氯化物盐碱地与新疆等地区推广;湖南樱子主要在宁夏盐碱化耕地种植;黄白花二年生草木则在青海、甘肃、新疆各地的轻、中度硫酸盐碱土地地区推广;芒草在东北三省碱化草地推广;芦苇在西北各省硫酸盐碱地开发利用。由于盐生植物本身所具有的耐盐性,使它们成为了盐碱地绿化的首选植物,往往将它们直接作为开发利用盐碱地的先锋植物。利用乡土盐生植物改良滨海盐渍土是一种切实可行的绿化方法。但是,这些植物数量、种类有限,主要集中于藜科、禾本科、豆科和菊科这几大类,远远无法满足现代城市绿化物种多样性的需要。如果仅仅用盐生植物来对盐碱地区进行绿化,就无法达到较好的绿化、观赏和生态效果,其作用十分有限。

(2) 园林绿化植物。综合目前研究现状,我国经过筛选而应用于盐碱地绿化的园林植物主要如下:

1) 落叶乔木:垂枝榆、国槐、法国梧桐、悬铃木、白蜡、柿子树、红叶椿、臭椿、白榆、刺槐、火炬树、泡桐、合欢、芙蓉、柳、石榴。

2) 常绿乔木:雪松、油松、黑松、龙柏、侧柏、桧柏、云杉、黄杨。

3) 灌木及宿根类:紫穗槐、紫叶李、榆叶梅、紫荆、蔷薇、珍珠梅、玫瑰、丁香、木槿、海棠、月季、菊、秋葵、百合、鸢尾、射干。

4) 藤本类:金银花、凌霄、地锦、扶芳藤。

5) 地被类:白三叶、紫花苜蓿、葱兰、天堂草、矮生地被菊、马尼拉草、酢浆草。

通过人们的长期努力,已经筛选出来一些适宜于生长在盐碱土中且具有一定观赏价值和生态作用的园林绿化植物。但是种类十分有限,还是没有从根本上改变盐碱地区绿化植物相单一的局面,可供盐碱地绿化选用的植物种类缺乏,远远无法满足现代城市建设生物多样的需求。因此,筛选适宜于盐碱地种植的园林绿化植物是一个长期而艰巨的任务。

1.2.2 绿化屋顶

绿化屋顶 (Green Roof or Vegetated Roof) 是一种对普通屋顶进行绿化处理并与之集成的人工建筑结构。它是以建筑物顶部平台为依托, 在屋顶上种植绿色植物, 如种植乔木、灌木、花卉、盆景或者铺设草坪等, 营造园林景观的一种空间绿化美化形式, 是一种新型的绿化方式。

1. 国内外研究、应用现状

20 世纪 60 年代以来, 一些发达国家相继开始展开绿化屋顶的技术研究, 取得了一系列的成果, 其中做得较好的国家是德国、美国和日本等。这些国家通过制定各种政策推动和鼓励绿化屋顶的发展。德国采取政府和业主共同出资的方法进行屋顶绿化, 同时根据屋顶绿化公众效益的大小采取不同的财政鼓励政策。美国把屋顶绿化正式纳入“美国绿色建筑评估体系”(Leadership in Energy & Environmental Design, LEED), 通过增加分值获得“LEED”认证, 可得到有关联邦基金或州、市政当局有关财政补贴。日本政府从 1999 年开始对修建楼顶花园的业主提供低息贷款, 建筑面积在 2000m^2 以上、楼顶花园面积占楼顶总面积 40% 以上时, 不仅可以得到修建楼顶花园所需资金的低息贷款, 而且主体建筑也可享受部分低息贷款; 同时规定, 凡是新建建筑物占地面积超过 1000m^2 者, 屋顶必须有 20m^2 为绿色植物覆盖, 否则要被罚款。截至 2001 年, 德国有 1350万 m^2 屋顶面积得到了绿化; 2003 年, 屋顶绿化面积占到屋顶面积的 14%; 到 2003 年末, 总的屋顶绿化面积接近 1 亿 m^2 。美国仅芝加哥市就有 200 个屋顶绿化项目, 总面积为 20 万 m^2 。日本的屋顶绿化普及范围很广, 在公共建筑、工厂厂房、学校、车站、酒店、码头、地下停车场等的屋顶上, 几乎都有植物绿化。

我国从 20 世纪 60 年代开始研究屋顶绿化的建造技术, 目前多数城市的屋顶绿化工作已逐步展开, 部分城市也制定了相应的技术规程和法律法规。如北京市于 2005 年出台了我国首个屋顶绿化的地方标准, 对屋顶绿化的植物选择、各种材料荷重、绿化施工操作程序、绿化种植区构造层、屋顶园林小品设计、植物防风固定技术、养护管理技术等各方面进行了详尽的技术指导和规范。然而, 我国的屋顶绿化还处于起步阶段, 受到基建投资、建造技术和材料、绿化技术、传统观念等方面的影响, 仍存在着绿化形式单一、应用范围有限、政府和政策支持不足等诸多不足之处。以实施较好的北京市为例, 屋顶绿化建筑只占现有建筑总数的 1%, 面积仅 60 万 m^2 。

2. 绿化屋顶的结构及分类

一般的绿化屋顶结构包括植被层、土壤基质层、过滤层、多功能蓄排水板 (蓄水+排水)、防水层等。

(1) 植被层植物的选择要遵循适地适树原则。

(2) 土壤基质层应选择适于种植植物的轻质栽培基质, 一般选用含各种植物生长所需元素并且容重较小的人工基质, 如蛭石、珍珠岩、泥炭及其与轻质土的混合物等。

(3) 过滤层防止土壤基质层颗粒流失, 过滤富余水分, 常用材料有粗砂、玻璃纤维布、滤水绵等。

(4) 排水层有效防止细小颗粒堵塞排水系统, 增加排水通透能力, 同时具有一定的保水能力, 防止水分过量排放。

(5) 防水层有效防止屋顶渗漏,防水材料应耐水、耐腐蚀、耐霉烂及耐根系穿刺。

根据屋顶绿化功能和设计原则的不同分成精细型屋顶绿化和粗放型绿化两种形式:

(1) 精细型屋顶绿化(Intensive Green Roof)以植被绿化与人工造景、亭台楼阁、溪流水榭等相结合,是一种价值比较高的屋顶绿化形式,适用于面积较大的屋顶,如高级酒店、宾馆和高层建筑等。其对设计、施工、后期维护、管理的要求较高,使得建设成本及后期管理费用也较高。精绿化基质层厚度一般在150mm以上,大部分植物都可种植、生长,屋面设计坡度一般要小于 10° ,承重结构的承载能力一般在 $1.8\sim 15\text{kN/m}^2$ 。

(2) 粗放型屋顶绿化(Extensive Green Roof)是屋顶绿化中最简单的一种形式,主要应用于已建成建筑物的屋顶上,其特点是低养护、免灌溉、低成本。粗绿化基质层的厚度一般在150mm以下,植物选择范围很小,而且通常需要配置一些耐旱的植物,如景天科等。其屋面设计坡度可以高至 45° ,净荷载一般在 $0.6\sim 2.4\text{kN/m}^2$ 。

3. 绿化屋顶的生态环境效益

Kosareo等利用生命周期评价模型(LCA)对普通屋顶、粗绿化屋顶、精绿化屋顶的综合效益进行了评价,得出绿化屋顶的综合效益远远高出普通屋顶的结论,对于能耗要求高、屋顶更换周期长的建筑物,绿化屋顶系统是很好的选择。其主要的生态环境效益如下:

(1) 减少城市径流。比利时学者Mentens等提出,绿化屋顶可以显著减少径流峰值,延缓产流时间,减少总径流量,在较长的时间段内通过蒸散发等方式慢慢释放绿化屋顶土壤层所滞蓄的水分,使水循环过程自然化。Carter和Rasmussen得出结论,当降雨量从13mm上升到54mm时,绿化屋顶土壤层滞蓄水分的能力大大减小,滞蓄水分总量从90%降至39%。Getter和Bradly Rowe得出结论,屋面倾角越大,水分滞蓄的能力越小。在更长的时间尺度上,Jarrett等利用28年的降雨量数据得出结论,大多数绿化屋顶能够滞蓄年降雨量的45%~55%。Mentens等在前人大量试验数据的基础上得出结论,粗绿化和精绿化可分别滞蓄年降雨量的50%、75%,夏季滞蓄量普遍高于冬季,土壤层越厚、滞蓄能力越强,并拟合出基于欧洲特定气候条件的降雨—径流经验方程。

已有研究成果主要针对各设计参数对滞蓄能力的影响展开,关于建立各参数和径流之间的关系、模型的研究较少,或者限于地区气候条件限制,实用性不强。如何建立绿化屋顶系统的径流滞蓄能力和降雨强度、土壤层厚度等参数的关系,提出适用于中国城市气候特点的模式用于计算和预测,是今后需要研究的。

(2) 降温和减少建筑能量消耗。Alexandri通过二维预测微观尺度模型的计算得出结论,绿化屋顶可以降低空气温度,最大降温可达 26°C ,白天平均降温达到 12.6°C ,同时在更热和更干燥的气候条件下,降温作用更显著,在一定程度上可缓解城市热岛效应。Hideki Takebayashi等在热量平衡方程和水热运动方程的基础上,分别推导了绿化屋顶的感热通量和蒸散发量的经验公式,并证实了绿化屋顶可以减少感热通量。Chih-Fang Fang通过模型模拟发现,当叶片面积覆盖率达到80%以上时,温度降低率与叶片覆盖率成正相关,低于80%时,温度降低率与叶片总厚度成正相关。Theodosiou等发现土壤层的厚度和地表降温成正相关。Sailor建立了绿化屋顶能量平衡模型,发现随着土壤层厚度的增加,在冬天和夏天电力消费都会减少,而且气候相对寒冷的城市耗能更少。