文章编号:2095-7300(2016)03-046-06

屋顶绿化对屋面径流的影响研究综述

叶建军, 陈佳捷, 肖衡林*, 徐维生, 高林霞, 黄艳雁, 万 娟

(湖北工业大学 土木建筑与环境学院,湖北 武汉 430068)

摘 要:屋顶绿化作为城市人工生态系统,是改善城市绿化的补充,能缓解众多城市生态环境的问题.最近 20 年,虽然屋顶绿化在国内有一些发展,但发展速度十分缓慢,主要问题在于人们对屋顶绿化改善城市生态环境的作用认识不够.虽然国内外学者对于屋顶绿化吸收和截留屋面径流、减轻城市内涝灾害的认识已经取得了一致,但学术界对屋顶绿化怎样影响屋面径流水质还存在争议.通过对最近 20 年国内外学者在屋顶绿化对屋面径流的水质和水量的影响研究综述,系统介绍了这个领域的进展和争议,分析了存在的主要问题,展望了未来可能的发展方向.参 52.

关键词:屋顶绿化;屋面径流;水质;水量;影响

中图分类号:Q142.8 **文献标识码**:A

按照德国园林绿化发展与研究协会 FLL (2002)的定义,屋顶绿化可以分为屋顶花(公)园(或称为精绿化屋顶,intensive green roofs)和拓展型屋顶绿化(或称为初(粗)绿化、轻型屋顶绿化、简单屋顶绿化,extensive green roofs)两种形式.屋顶绿化的结构层次一般为防水层、阻根层、泄水层、过滤层、种植层(或基材层)和植被层[1-2].目前,防水层、阻根层、泄水层、过滤层使用的材料都已经商品化.而种植层一般要综合考虑经济、环保、持久和轻质等要求,通常不能直接使用普通土壤,需要使用人工配制的基材.基材的组成成分一般为无机粗颗粒材料(主要组成材料)、经腐烂除臭的有机质、细颗粒材料(如粘土)和缓释肥[3].它们以适当比例搭配,合理粒径级配[4],才能兼顾满足各种要求.

屋顶花(公)园由于种植层厚度大,可以栽种的植广泛;但也存在荷载大,适应范围窄,建造成本高的缺点.相对而言,拓展型屋顶绿化由于采用浅薄的种植层栽种极其耐贫瘠、耐干旱的多浆植物(主要是景天科植物),总的载荷小,绝大多数情形下不用对下部房屋结构进行加固,建成后基本不用灌溉及管理,因而成本低廉.在欧洲,简单屋顶绿化形式已成为屋顶绿化的主要形式[2,5].可以预见,简单屋顶绿化形式将来也会成为我国屋顶绿化的主流.

最近 10 余年,虽然屋顶绿化在我国一些大城市如北京、上海取得了一些发展[6-7],但与屋顶绿化技术先进国家—德国相比,无论是技术成熟度,还是应用面积,都相差很大.德国有约 14%的屋顶面积得到了绿化[8].而我国屋顶绿化发展最好的城市之一的北京,到 2010 年也只有一百万平米屋顶绿化[6],不到总屋顶面积的 1%.在这些屋顶绿化中,免维护的拓展型屋顶绿化所占比例很小.导致国内屋顶绿化发展缓慢的主要原因之一是人们对屋顶绿化(特别是拓展型屋顶绿化)改善城市生态环境的诸多功能和效益没有充分认识,尤其是没有系统深入认识屋顶绿化对城市水环境的影响.

屋顶绿化对城市水环境的影响是通过影响屋面径流的水质和径流过程(即水量)来实现的.通过介绍国内外进年来相关研究,该文试图展示这一领域的研究现状和有待解决的相关问题,以帮忙人们进一步认识屋顶绿化对城市水环境的影响.文献以中英文期刊和会议论文文献为主,选取时限是最近 20 年.

收稿日期:2016-08-09

基金项目:国家自然科学基金项目资助(编号:51178251);湖北省自然科学基金项目资助(编号:2014CFB584);湖北工业大学高层次人才科研启动金资助(编号:BSQD14047)

作者简介:叶建军(1974-),男,湖北英山人,副教授,博士,研究方向:屋顶绿化、边坡生态防护和固废生态利用研究.

*通讯作者,E-mail:7531450@ qq.com;

1　屋顶绿化对屋面径流水量的影响

在过去的几十年和可以预见的将来,城市洪水是我国城市的紧急环境问题.快速城市化引起的城市不透水下垫面的迅速增加,是导致我国城市水环境日益而恶化的根本原因之一.城市在遭遇暴雨袭击时,雨水不能就地入渗,而是迅速形成径流.当暴雨径流量大于排水管网排水能力时,城市洪水(内涝)灾害就发生了,严重时将导致城市低洼处建筑、道路和设备的淹没,威胁人们生命财产安全.近年来,媒体报道的我国城市内涝事件越来越频繁.据报道,每年雨季,武汉市区都遭受内涝灾害,年平均受灾人数 3 万人以上;上海市 2001 年 8 月 5 日夜晚至 6 日凌晨的暴雨致使 3.7 万户房屋进水,200 多条街道积水淹没;襄樊市 2008 年 7 月曾发生了严重的内涝,经济损失上千万元.在我国,城市的排水系统一般是合流制排水系统(combined sewage system),该系统将生活污水、工业和商业废水以及雨水径流一并排入污水处理厂.这种排水系统在暴雨时很容易引发合流制排水系统污水溢流(CSO)事故——一种合流污水排放超过污水处理厂处理能力而发生污水溢流现象.由于 CSO 携带大量病原体、农药、重金属、营养物质,会对城市径流接受水体的水质和生态系统造成危害[9].

常规的城市雨水径流管理办法包括修建临时性的储水池[10-11]、扩建城市排水系统、建设可以渗透雨水的绿地、铺装透水混凝土路面等[12].然而,这些做法要么占用大片土地,要么对城市生产生活造成严重影响,往往实施成本高昂.对城市中大量屋顶进行绿化,利用绿化屋顶对雨水的吸收和截留作用来管理城市雨水径流,是一种更经济、更有前途的城市雨水管理手段.加拿大环保部进行的多伦多研究项目表明,通过对多伦多市 60%的屋顶进行绿化,费用为4 500万加元,可以每年截留 360 万立方米雨水径流;而要建设储水池截留同样多的雨水径流,需要花费6 000万加元.另外,屋顶绿化还可节能约1 450万加元[13].

屋顶绿化对屋面径流水量的影响表现在:1)由于屋顶绿化系统对雨水的吸收,绿化屋顶能延迟屋面径流的产生;减少屋面径流量.2)通过屋顶绿化基材对雨水的暂时滞留和缓慢释放,绿化屋顶能降低屋面径流的洪峰峰值,延长屋面径流时间.这些作用有助于减少城市径流总量和洪峰峰值,进而减少内涝发生的几率和降低内涝的灾害程度[12,14].

屋顶绿化对屋面径流水量的影响受到许多因素影响,比如当地气候(如降雨强度和降雨量)、前次降雨到本次降雨之间的时间间隔、绿化基材的厚度和坡度.通过与常规屋顶的降雨径流对比,近年来一些国外学者开展了绿化屋顶对雨水径流的截留作用研究.文献[15]发现,绿化屋顶能 100%截留一些小雨,能 60~79% 截留年屋面径流量.文献[16]报道一些厚度小的绿化基材能截留 25~100%年屋面径流量; 文献[12]报道了的案例里一个小区的 10%屋顶得到绿化时,屋顶绿化能减少整个小区径流的 2.7%.文献[17]发现绿化屋顶能截留一场 0.21 cm 降雨的 85.7%,但对于更大的降雨,屋顶绿化只能有限地截留.文献[18]研究表明屋顶绿化对屋面雨水的截留量的大小主要取决于基材的厚度和屋顶坡度,植物的影响很小;而文献[19]和[20]的研究表明屋顶坡度对屋顶绿化截留雨水无影响.文献[21]和[12] 发现绿化屋顶在温暖的季节里比在寒冷的季节里截留更多雨水径流.对屋面径流历时的延长与截留径流一样重要.美国宾州屋顶绿化研究中心、波特兰州环保局和北卡罗来纳州立大学进行的研究表明相对于常规屋顶,绿化屋顶能延长屋面径流 30 分到 4 小时 30 分[22].一些研究揭示如果后一场降雨与前一场降雨相距时间太短,绿化基材将呈完全饱和状态,绿化屋顶不能减少降雨的径流量[23-25]文献[26]运用单位过程线理论、文献[14]运用 HYDRUS-1D 模型对绿化屋面径流的整个过程进行了模拟研究,这些模型能在已知降雨参数的情况下预测绿化屋顶径流洪峰峰值、径流总量和径流开始时间等参数.到目前为止,国内相关研究很少.

除了文献 [26]和[14],多数研究集中在绿化屋顶对屋面径流的截留能力上,而对单次降雨下的屋面径流的动态过程考察不够.由于屋顶绿化对雨水截留和吸收作用受到气候和基材的影响,上述国外的研究成果不能直接在国内使用.

2　屋顶绿化对屋面径流水质的影响

虽然已有的研究一致证实了屋顶绿化能通过截留和吸收降雨,减少屋面径流,降低城市内涝频度和危害;还能吸附和截留粉尘[27-28]和吸收温室气体[29],减轻城市空气污染程度.但是,对于屋顶绿化系统到底是一些污染物如重金属和 P、N 的源还是汇,即屋顶绿化系统向环境释放污染物的总量和

(或)浓度到底大于还是小于吸收环境中的污染物浓度和(或)总量,学术界还未形成一致结论.

一些国外研究者比较了有限次降雨时雨水、普通屋顶和简单屋顶绿化的屋面径流的污染物浓度,得出了不尽一致的结论.文献[30]的研究是在一个有 43 年历史的绿化屋顶上开展的,他们发现多数降雨时绿化屋顶的屋面径流中除了 Pb 的浓度和总量比雨水高外, Cr、Cu、Zn、As、Fe 以及 P 和 N 的浓度和总量比雨水低;绿化屋顶屋面径流除了 P 和 N 总量比普通屋顶低,Pb 和 Fe 明显高于普通屋顶外,其他金属含量与普通屋顶差别不明显.文献[31]比较了 5 场降雨下简单屋顶绿化屋顶、精绿化屋顶、铝板屋顶、沥青防水屋顶的屋面径流水质,发现简单屋顶绿化屋面径流 P、N 含量比铝板屋顶、沥青防水屋顶高,但比精绿化屋顶低;且随着测试时间推移,两种绿化屋顶屋面径流中的污染物浓度下降.文献[32]测试了 4 场降雨下雨水、无植物覆盖的基材径流、绿化屋顶屋面径流的水质,发现绿化屋顶的屋面径流中 P、N、Al、Fe、Cu 含量均比雨水高;除 Fe 含量比基材径流高外,其它与基材径流相当.说明绿化屋顶屋面径流中这些元素主要来自基材.文献[33]测试了 4 场降雨下位于瑞典的简单屋顶绿化的屋面径流和雨水的水质,发现屋面径流中 Zn 和 P 含量高于雨水含量,NO_3-N 和 NH_4-N 含量比雨水低,Tot-N(总氮)含量无显著差异.相对而言,到目前为止,极少数研究开展了长期观测.文献[34]测试了四处不同龄期的简单屋顶绿化一年内所有降雨的屋面径流水质,并与普通屋顶径流和雨水进行了对比,发现绿化屋顶是 Cd、Cr、Cu、Fe、K、Mn、Pb、Zn 的源,但不向环境释放 NO_3-N、NH_4-N、Tot-N;除龄期最大的一块绿化屋顶外,其他三块是 PO_4-P 和 Tot-P 的源.相对于近几年的研究,较早的德国开展的研究一般都发现屋顶绿化能显著截留雨水中的污染物[35-36].国内该领域的少量研究是最近几年才开始的,如文献[37,38]的研究.其中,只有文献[38]等的研究关注的是简单屋顶绿化文献[37]研究没有交代使用何种类型屋顶绿化文献[38]发现暴雨时绿化屋顶的屋面径流中 Tot-P、Tot-N、NO_3-N 含量均比雨水高;Tot-N、NH_4-N 和 Tot-P 含量比普通屋顶低,NO_3-N、PO_4-P 比普通屋顶高.

上述不同研究者得到结论的不一致以及同一研究中各次降雨的试验结果的波动表明影响屋顶绿化系统污染物运移的因素很多,如干湿沉降带入的污染物种类和含量、种植基材化学成分、降雨强度和雨型、施肥种类、屋顶绿化龄期、基材厚度、以及植物种类等[39-40].正是不同研究中这些因素的差异,导致结果的不一致.

文献[41]发现基材厚度与屋面径流的重金属(Ca、Pb、Zn、Fe、Ni)浓度不相关,而降雨强度和频度有时会影响屋面径流中污染物浓度.一些研究发现屋顶绿化龄期是重要影响因素,一般随着龄期增大,屋面径流中污染物浓度(特别是 P 和 N)下降[31,34,42].文献[43]发现基材和植物组成是影响径流水质(重金属含量)的重要因素.文献[44]发现使用控释肥比使用普通肥料的屋顶绿化能显著降低屋面径流中 P 和 N 含量.

一些研究发现绿化屋顶的屋面径流比雨水的 pH 高[45-47],由于土壤(基材)中重金属如 Cd、Pb 和 Zn 的溶解度与 pH 值的大小成反比[39],这一作用有助于屋顶绿化滞留这些重金属.文献[48]发现屋面径流中污染物浓度有所谓“初始流效应(first flush effect)”,即径流开始时冲刷出较多颗粒污染物,水质较差,含有较高的 Zn、Cu、NO_3-N、NH_4-N、Tot-P;而文献[46]的研究没有发现这一效应,该研究测试了 P、N 和 pH 值等指标.

上述关于绿化屋顶屋面降雨径流污染的研究除了文献[48,46]外,基本思路是将屋顶绿化系统视为一个黑匣子,只考虑进入和离开这个黑匣子的水体总体水质.由于多数研究只测试了几场降雨,每场降雨的试验结果又有波动,他们得到的规律很有限;而且,所有研究都没有考虑干沉降带入的污染物.城市干沉降的尘埃一般重金属含量较高[49],其数量通常不能忽视.由于忽略了干沉降,一些研究通过对比几次降雨时绿化屋顶屋面径流和雨水或普通屋顶的屋面径流中的污染物浓度或总量,来证明屋顶绿化是否为污染物的源或汇欠妥.

一些研究已关注了屋顶绿化植物叶片吸附空气中尘埃的能力.文献[50,27]运用沉降模型,分别估算了屋顶绿化对芝加哥市和多伦多市空气颗粒物的去除能力.文献[50]估算出 19.8 ha 的屋顶绿化一年能去除芝加哥市空气污染物(NO_2、SO_2 和 PM_{10})1 675 kg,其中去除的 PM_{10} 占总量的 14%;而文献[27]估计如果所有多伦多市的屋顶能够绿化,能去除 52 617 kg 空气污染物.文献[28]通过实测屋顶绿化植物叶片吸附的尘埃颗粒物,发现空气中颗粒物浓度越大时,屋顶绿化植物吸附的尘埃越多;他估算出如果曼彻斯特市中心一块 325 ha 的地区内所有屋顶能够变成简单屋顶绿化,一年将能吸

附 211 kg 的 PM_{10},占颗粒物总量的 2.3%.由于植物叶片吸附的尘埃会被雨水冲刷到屋顶绿化系统中,部分会被屋面径流带走,构成水污染.屋顶绿化减轻的空气污染的好处有可能被增加的水污染抵消掉.因此,这些关于屋顶绿化去除空气污染物的研究实际上只看到问题的一面,得到的只是片面的规律.

3 展　望

只有通过长期观察,全面考虑屋顶绿化系统中污染物(或元素)的来龙去脉,不仅要研究单次降雨下污染物进入和离开屋顶绿化系统的运动规律,还应同时考虑污染物在基材—植物体系中的运移、转化和分配规律,才能解释污染物运移和向径流释放的规律,更全面深入地揭示更多规律.屋顶绿化系统中 P、N 及重金属除了来自基材各组分本身蕴含外,还通过雨水和降尘或以气态进入系统.进入屋顶绿化系统的这些元素会发生复杂的植物根系和基材微生物吸收转移、转化等生物作用,以及基材吸附、解吸、渗透、扩散、沉淀等物理化学作用.这些作用过程很难用仪器(传感器)直接观测.一种解决办法是不直接研究基材中这些复杂的运移过程,而是在考虑干沉降的同时,同时考察降雨—径流过程和径流污染物的浓度的动态变化;并结合测试不同深度基材各组分和植物体内这些污染元素含量的变化来间接揭示系统中这些元素的运移规律.由于屋顶绿化系统中的重金属(除 Hg 外)和 P 不能气化挥发,它们进入系统的方式是干湿沉降,离开系统的唯一方式是被屋面径流带走,上述研究手段对这些元素是可行的.系统中 N 的运移较为复杂.不仅不同形态的 N 可以互相转化,且 N 能以气态固定和挥发[51].鉴于简单屋顶绿化一般不使用抗旱能力较差的豆科植物[22],基材中通常不存在根瘤菌,可不考虑生物固氮作用;同时,简单屋顶绿化基材浅薄,且有良好的通气性和排水性能[4],氮元素通常也不会发生厌氧还原反应变成氮气挥发.氮元素可能存在气态逃离方式的是以氨气挥发.因此,上述研究手段由于没有测试氨气挥发,不能查明系统中 N 的所有来源和去向.要查明需要与干沉降观测试验结合研究.

已有的研究中虽然有文献[48]和[46]考虑了屋面径流中的污染物浓度随流量的变化而变化,但由于没有考虑降尘,也未能揭示出屋面径流流量的动态变化规律,因而他们研究揭示的污染物的运移规律有限.实际上,简单屋顶绿化的降雨—径流过程可以用单位过程线拟合,文献[26]就实现了这一点.文献[52]年在此文提供的方法的基础上,改用 S 曲线拟合得到一种退水曲线段平滑的单位过程线,具有参数少、精度高、容易求解的优点.运用该方法到更多工况,就能确定模型参数随基材厚度、降雨强度等因素的变化规律,从而定量描述多工况下简单屋顶绿化降雨—径流的流量随时间变化规律.在此规律上附加考虑重金属、P 和 N 的浓度变化,就可以定量描述屋面径流水量与重金属、P 和 N 浓度的联动变化规律.只有全面弄清屋面径流水质随水量(径流过程)变化规律,才能科学合理地利用和管理屋面径流.

参考文献:

[1] FLL. Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen [M]. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau E.V., Troisdorf, Germany.2002.

[2] 舒马赫·维尔弗雷德.绿色种植屋面在德国[J].中国建筑防水,2005,8: 23-25.
Schumacher Wilfred. Green planting roof in Germany [J]. China Building Waterproofing, 2005, 8: 23-25.

[3] Friedrich C. Selecting the Proper Components for a Green Roof Growing Media [C]. The Second National Low Impact Development Conference. Washington, USA.2007

[4] FLL. Duidelines for the planning, construction and maintenance of green roofing (English version) [M]. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau E.V., Troisdorf, Germany.2008.

[5] Dunnett N, Kingsbury N. Planting Green Roofs and Living Walls[M]. Timber Press, Inc, Portland, USA.2004.

[6] Zhang Y J, Xu P, Wang H Z, et al. Application of Green Roof Techniques in Beijing, China[C]. The 2010 International Conference on Management and Service Science. Wuhan, China. Aug.24-26, 2010.

[7] 蒋春霞.上海市闵行区屋顶绿化实践[J].风景园林,2011,27: 92-95.
Jiang Chun-xia. Practice of Roof Greening in Minhang District of Shanghai [J]. Landscape Architecture, 2011, 27: 92-95.

[8] Herman R. Green roofs in Germany: Yesterday, today and tomorrow[C]. The 1st North American Green Roof Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities. Chicago, USA.2003.

[9] Moran A, Hunt B, Smith J. Hydrologic and water quality performance from green roofs in Goldsboro and Raleigh, North Carolina[C]. The 3rd North American Green Roof Conference: Greening rooftops for Sustainable Communities. Washington, D.C., U.S.A.2005.

[10] Ferguson B K. Introduction to Stormwater: Concept,

Purpose and Design[M].Wiley,New York,U.S.A.1998.

[11] White R.Building the Ecological City[M].Woodhead publication,Cambridge,U.K.2002.

[12] Mentens J,Raes D,Hermy M.Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century [J] Landscape and Urban Planning,2006,77: 217-226.

[13] Bass B,Krayenhoff E F,Martilli A,et al.Modeling the Impact of Green Roof Infrastructure on Urban Heat Island in Toronto [R]. The Cardinal Group Inc, Toronto, Canada.2002

[14] Hilten R N,Lawrence T M,Tollner E W.Modeling stormwater runoff from greenroofs with HYDRUS-1D[J].Journal of Hydrology,2008,358: 288-293.

[15] Köhler M,Schmidt M,Grimme F,et al.Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics--far beyond the aesthetics[J].Environment,Management and Health, 2002,13: 382-391.

[16] Beattie D,Berghage R.Green roof media characteristics: the basics[C].In Greening rooftops for sustainable communities,Proc.in North American green roof conference. Portland,Toronto.2004.

[17] Teemusk A and Mander U.Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: A case study from Estonia[J]. Building and Environment, 2009, 44: 643-650.

[18] VanWoert N D,Rowe D B,Andresen J A,et al.Green roof stormwater retention: effects of roof surface, slope, and media depth[J].Journal of Environmental Quality,2005, 34: 1036-1044.

[19] Liesecke H J.Extensive begrünung bei 5 dachneigung.Stadt Grün[J],1999,4: 337-346.

[20] Schade C. Wasserrückhaltung und AbfluSbeiwerte bei dünnschichtigen extensivbegrünungen[J].Stadt Grün,2000, 4: 95-100.

[21] Liptan T,Strecker E.EcoRoofs (Greenroofs)---a more sustainable infrastructure[C].In Proceedings of the National Conference on Urban Stormwater:Enhancing Programs at the Local Level.Chicago,USA.2003.

[22] Pledge E.Green roofs:ecological design & construction [C].Schiffer books,Atglen,USA.2005.

[23] Liu K.Engineering performance of rooftop gardens through field evaluation[C].In Proceedings of the RCI 18th international Convention and Trade Show. Tampa, Florida, USA.2003.

[24] Moran A,B H G J.A North Carolina field study to evaluate greenroof runoff quantity,runoff quality and plant growth [C]. In Proceedings of the ASAE Annual international meeting,paper No.032303.Las Vegas,Nevad,USA.2003.

[25] Connelly M,Liu K.Green roof research in British Columbia--an overview[C].In Proceedings of the Third North American Green Roof Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities.Washington,DC,USA.2005.

[26] Villarreal E L,Bengtsson L.Response of a Sedum greenroof to individual rain events[J].Ecological Engineering, 2005,25: 1-7.

[27] Currie B A,Bass B.Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model [J].Urban Ecosystems,2008,11: 409-422.

[28] Speak A F, Rothwell J J, Lindley S J, et al. Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city[J]. Atmospheric Environment, 2012,61: 283-293.

[29] Getter K L,Rowe D B,Robertson G P,et al.Carbon sequestration potential of extensive green roofs[J].Environmental Science &Technology,2009,43: 7564-7570.

[30] Speak A F,Rothwell J J,Lindley S J,et al.Metal and nutrient dynamics on an aged intensive green roof [J].Environmental Pollution,2014,184: 33-43.

[31] Razzaghmanesh M,Beechama S,Kazemi F.Impact of green roofs on stormwater quality in a South Australian urban environment [J].Science of the Total Environment,2014, 470: 651-659.

[32] Vijayaraghavan K,Joshi U M,Balasubramanian R.A fleld study to evaluate runoff quality from green roofs [J]. Water Research,2012,46: 1 337-1 345.

[33] Czemiel Berndtsson J,Bengtsson L,Jinno K.Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs[J]. Ecological Engineering,2009,35: 369-380.

[34] Czemiel Berndtsson J,Emilssonb T,Bengtsson L.The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality [J].Science of the Total Environment,2006,355: 48-63.

[35] Steusloff S.Input and output of airborne aggressive substances on green roofs in Karlsruthe[R].In: Breuste J; Feldmann H; Uhlmann O. (Eds.), Urban Ecology. Springer-Verlag,Berlin,Germany.1998.

[36] Köhler M,Schmidt M,Grimme FW,et al.Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics far beyond the aesthetics[J].Environmental Management and Health, 2002,13 (4): 382-391.

[37] 欧阳威,王 玮,郝 芳,等.北京城区不同下垫面降雨径流产污特征分析[J].中国环境科学,2010,30(9): 1249-1256.
Ouyang Wei,Wang Wei,Hao Fang,et al.Analysis of runoff pollution and yield characteristics of different underlying surface in Beijing urban area [J].Chinese Journal of Environmental Science,2010,30 (9): 1 249-1 256.

[38] 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,2012,12: 3691-3700.
Wang Shu-Min, He Qiang, Zhang Jun-Hua, et al. Distribution of nitrogen and phosphorus in green roof

runoff and their occurrence patterns [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 12: 3691-3700.

[39] Czemiel Berndtsson J. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review[J]. Ecological Engineering, 2010, 36: 351-360.

[40] Rowe D B. Green roofs as a means of pollution abatement [J]. Environmental pollution, 2011, 159: 2100-2110.

[41] Alsup S, Ebbs S, Loretta L. Heavy metals in leachate from simulated green roof systems [J]. Ecological Engineering, 2011, 37: 1 709-1 717.

[42] Van Seters T, Rocha L, Smith D, et al. Evaluation of green roofs for runoff retention, runoff quality, and leachability [J]. Water Quality Research Journal of Canada, 2009, 44 (1): 33-47.

[43] Alsup S, Ebbs S, Retzlaff W. The exchangeability and leachability of metals from select green roof growth substrates[J]. Urban Ecosystems, 2010, 13: 91-111.

[44] Emilsson T, Berndtsson J C, Mattsson JE. Effect of using conventional and controlled release fertiliser on nutrient runoff from various vegetated roof systems [J]. Ecological Engineering, 2007, 29: 260-271.

[45] Teemusk A, Mander U. Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: A case study from Estonia [J]. Building and Environment, 2009, 44: 643-650.

[46] Bliss D J, Neufeld R D, Ries R J. Storm water runoff mitigation using a green roof[J]. Environmental Engineering Science, 2009, 26: 407-417.

[47] USA Environmental Protection Agency. Green Roofs for Stormwater Runoff Control[R]. EPA-600-R-09-026. Washington, DC. USA. 2009.

[48] Czemiel Berndtsson J, Bengtsson L, Jinno K. First flush effect from vegetated roofs during simulated rain events [J]. Hydrology Research, 2008, 39 (3), 171-179.

[49] Wang Q, Bi X H, Wu J H, et al. Heavy metals in urban ambient PM(10) and soil background in eight cities around China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(2): 1473-1482.

[50] Yang J, Yu Q, Gong P. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42: 7266-7273.

[51] 刘克峰.土壤肥料学[M].北京:气象出版社,2001.
Liu Ke-feng. Soil and fertilizer [M]. Beijing: Meteorological Press, 2001.

[52] YE J J, Zhang H, Yu S X, et al. Runoff quantity dynamic from an extensive green roof during Individual Rainstorms [J]. Advanced Materials Research, 2011, 250-253: 3429-3435.

Review on the effect of green roofs on quality and quantity of roof runoff

YE Jian-jun, CHEN Jia-jie, XIAO Heng-lin, XU Wei-sheng, GAO Lin-xia, HUANG Yan-yan, WAN Jun

(School of civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan430068, China)

Abstract: As an artificial ecosystem, green roofs are an important supplement for urban green system, which can lessen and mitigate many urban ecological and environmental problems. In recent 20 years, green roofs have won some development, but their developing rate is very slow. The main reason is that Chinese people don't have enough recognition on the improving effect of green roofs on urban environment and ecological system. Though researchers at home and abroad have achieved consensus on the absorbing and retaining effect of green roofs, on roof runoff and on its lessening urban flood effect, they have controversial views on how green roofs affect the quality of roof runoff. By reviewing the studies on the topic of the effect of green roofs on roof runoff quantity and quality in the past 20 years, the advances and controversies were shown, and the main problems were analyzed and the developing trends in this field were predicted as well. 52refs.

Keywords: green roofs, roof runoff, water quality, water quantity, effect

Biography: YE Jian-jun, male, born in 1974, associate professor, Ph.D., roof greening, slope ecological protection and solid waste ecological utilization