

DOI: 10.5846/stxb202106021454

周伟奇, 朱家菑. 城市内涝与基于自然的解决方案研究综述. 生态学报, 2022, 42(13): 5137-5151.

Zhou W Q, Zhu J L. Review on Nature-based Solutions and applications on urban waterlogging mitigation. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5137-5151.

城市内涝与基于自然的解决方案研究综述

周伟奇^{1,2,*}, 朱家菑^{1,2}

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100190

摘要: 受全球变暖和快速城市化的影响, 城市可持续发展面临重大挑战。近 10 年, 基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS) 受到广泛关注与认可, 为解决城市所面临的生态环境问题、提升城市韧性和可持续性提供了新的思路和途径。本文首先回顾了 NbS 的提出背景与发展历程, 剖析了其核心内涵与框架准则, 进而以城市中日益突出的内涝问题为例, 介绍了 NbS 在应对和解决城市典型生态环境问题中的应用; 通过汇总现有实施案例、整合多方观点, 对比分析了 NbS 与国内外城市内涝管理的常用方法在概念框架、理论内涵和应用实践等方面的区别与联系; 综合论述了基于 NbS 开展城市内涝管理所采用的技术手段、计量方法、评价模型的发展现状; 最后, 对 NbS 在我国的应用进行了展望, 认为其在适应气候变化、提高城市韧性等方面具有巨大的潜力, 但大范围的推广也面临理论认知尚不深入、实践过程存在障碍、专业人才与本土研究不足等多项挑战。

关键词: 基于自然的解决方案(NbS); 城市内涝; 雨洪管理; 海绵城市; 城市可持续性; 韧性城市

Review on Nature-based Solutions and applications on urban waterlogging mitigation

ZHOU Weiqi^{1,2,*}, ZHU Jiali^{1,2}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: Under the context of global warming and rapid urbanization, cities worldwide are increasingly facing problems of environmental pollution and ecosystem degradation, one of the grand challenges in achieving Sustainable Development Goals. Such challenges call for new frameworks and approaches for improved urban ecosystem management. Nature-based Solutions (NbS) has now been increasingly recognized as an effective means to mitigate ecological risks, strengthen city resilience and advance urban sustainability. Here, we systematically reviewed the background and development of NbS, in order to provide insights into its critical content and criteria guidelines. Taking urban waterlogging, a problem faced by many cities worldwide as an example, we first reviewed the applications of NbS on urban waterlogging mitigation, from technical tools at micro level, to measurement methods and evaluation models at macro level. Our study shows that NbS has unique advantages of addressing urban environmental problems, compared with traditional grey facilities in cities. We highlight the significance of NbS in stormwater management via restoration of natural water body, utilization of rainwater and optimization of urban landscape. We further compared NbS with other similar solutions related to stormwater management to summarize existing implementation cases and integrate various perspectives. Finally, we discussed the potentials of applying NbS on climate adaptation to enhance urban resilience, as well as the challenges such as unmaturing theoretical concept of NbS, gaps from theory to practice, weakness in local-based knowledge for applications, and lack of well-trained practitioners.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41771203)

收稿日期: 2021-06-02; 网络出版日期: 2022-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wzhou@cees.ac.cn

Key Words: Nature-based Solutions; urban water-logging; stormwater management; Spongey City; urban sustainability; Resilient City

人类正在经历一个全球快速城市化的阶段^[1]。人口、社会经济活动在城市区域高度集聚,城市化推动了人类社会经济的发展,但也带来了一系列的生态环境问题,如蓝绿生态空间的丧失、生态系统退化、空气、水和噪音污染、城市热岛效应、以及城市内涝等,严重影响人类健康和居民福祉,是城市与区域、乃至全球可持续发展面临的重大挑战^[2]。

在全球变暖和城市扩张的双重影响下,城市极端气候事件发生的频率、强度和持续时间日益增长^[3-4],城市暴雨引发的城市内涝灾害也日渐频繁^[5-6]。近年来,城市频发的内涝灾害,造成了巨大的经济损失,并严重威胁居民的人身和财产安全,成为制约城市发展的重要因子^[5,7]。根据住房和城乡建设部对 351 个中国城市的调查,2008 年至 2010 年,超过 62% 的城市遭受了城市内涝^[8],2012 年和 2013 年,分别有 184 个和 234 个城市发生了城市内涝^[9]。城市地区降雨频率与强度的上升,是城市暴雨内涝的重要诱因^[5]。一方面,全球变暖改变了城市的局地气候特征,使得地表蒸发与蒸腾量增加、水循环加速,从而增加了城市极端暴雨发生的频率、强度和持续时间^[3,10-11];另一方面,城市化引起的城市热岛效应、气溶胶排放等也增加了城市降雨频率与强度^[12-13]。与此同时,城市建设导致城市水循环的各个环节发生改变,尤其是不透水面增加使得雨水渗透减少,积水滞留难以迅速排放^[3-4]。在人口密集、密封率高、渗透和地下水补给稀少的城市,上述城市化的影响更为显著^[5]。

城市建设和管理者通常采用完善雨水管网等灰色排水设施的手段,试图减少城市内涝,减轻其对基础设施和人类生活造成的破坏和影响,但效果并不理想,且耗费大量材料和能源投资^[14-15]。此外,对于灰色设施、“快排模式”的依赖还可能造成旱涝急转、地下水补给减少、地表径流污染自然水体等负面效应^[14-17]。因此,新的城市防洪和水资源管理解决方案应运而生^[18]。其中最具有代表性的几项方案包括美国的低影响开发理念(LID)、澳大利亚的水敏感性城市设计(WSUD)、中国的海绵城市建设等等^[19-20]。其共同特点是师法自然,力图将湿地、植被等绿色基础设施和灰色基础设施相结合,采用近自然、仿自然的解决方案来替代完全基于灰色基础设施的工程手段^[21-22]。

基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NbS)在近 10 年受到广泛讨论,它是一种通过有效干预生态系统、解决人类社会发展问题与挑战的自然资源管理观点^[23]。与上述解决方案类似,NbS 强调采用近自然和仿自然的措施应对城市可持续发展挑战^[24],比如通过局部与流域尺度的城市空间管理、恢复自然水体循环、使雨水成为可利用的资源等方式,综合多种渠道应对城市内涝问题^[25]。作为一种更具概括性的理念,NbS 综合了过去多种城市内涝管理优秀样本的共性,并在未来有更广阔的实践空间。为深化对 NbS 的认知,本文首先回顾和综述了 NbS 提出的背景、概念与内涵,然后重点介绍 NbS 在应对城市内涝中的应用,进一步结合现有的技术手段、计量方法、评估模型,提出 NbS 在我国进一步推广的潜力与挑战。

1 基于自然的解决方案(NbS)概念内涵

1.1 NbS 提出

NbS 这一术语最早出现于 2002 年(图 1),在国际自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, IUCN)内部专家讨论时提出^[26]。2008 年,世界银行发布的《生物多样性、气候变化和适应》报告中,将 NbS 作为气候变化减缓和适应项目投资的重点^[27]。2009 年,IUCN 从生态系统视角拓展了 NbS 的内涵,并在《联合国气候变化框架公约》(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)的一份意见书中提出应用 NbS 来解决气候变化问题。此提议于 2012 年正式通过,是 2013—2016 年工作计划中三项重点项目之一^[26,28]。鉴于 NbS 在解决城市问题方面特有的优点,在国际研究机构的资助推动下,许多欧洲国家迅速采纳并将之作为应对环境变化挑战的创新策略。例如欧盟于 2013 年

将 NbS 纳入到“地平线 2020(Horizon 2020)”科研计划,并于 2015 年以政策的形式提出了自然解决途径的内涵,指出通过 NbS 实现的四个发展目标^[23];2015 年 3 月,来自欧洲 7 个国家的 34 名专家在德国召开跨学科研讨会,探讨基于自然的地区气候变化减缓和适应解决方案^[29];2017 年,由欧盟资助的 EKLIPSE 专家工作组(Knowledge & Learning Mechanism on Biodiversity and Ecosystem Services,旨在建立一种可持续的创新方式来认识生物多样性和生态系统服务,帮助政府、机构、企业和非政府组织在生物多样性方面做出更明智的决策)发布的《评估和实施基于自然解决方案综合效益的框架》提出了 NbS 的评价指标体系和操作流程,进一步完善了其实施框架^[30]。

国际上,NbS 概念也先后被 UNFCCC 第 23—25 次缔约方会议、联合国秘书长气候峰会等采用,取得了包括推动联合国可持续发展目标等一系列成效。2019 年 9 月,联合国气候行动峰会确定“基于自然的解决方案”为全球六项重要行动之一,并由中国和新西兰担任 NbS 行动的牵头国家。峰会发布了世界 NbS 案例汇编,收录了近 200 个优秀的 NbS 提案和案例,使 NbS 迅速成为国际社会关注的热点议题。2020 年,IUCN 理事会通过了首个基于自然解决方案的全球标准,该标准汇聚了来自 100 多个国家的科学家、生态环境从业者以及地方社区的共同努力和贡献,将有助于 NbS 在公共和私营部门的运用与推广,将理论概念转化为可实践的具体工具^[23]。

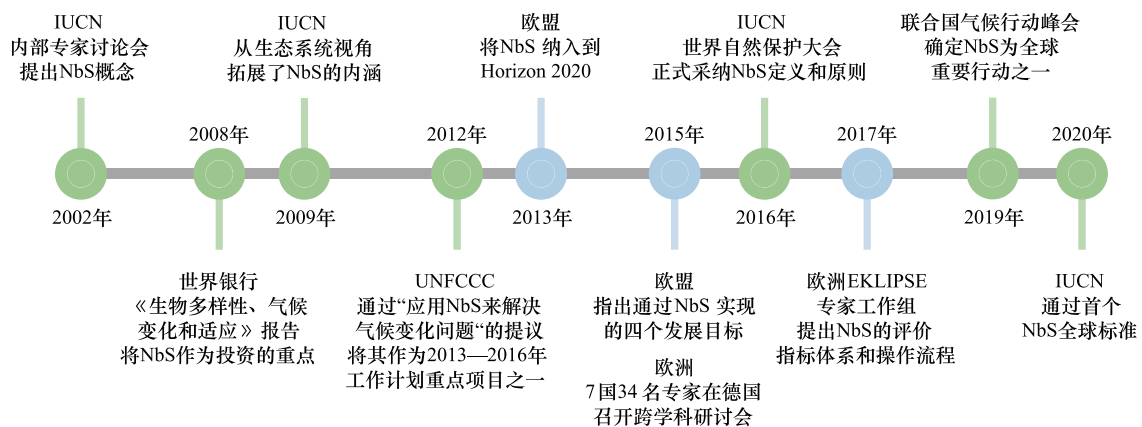


图 1 NbS 概念发展时间轴

Fig.1 Timeline of NbS development

1.2 NbS 核心概念

不同学者和机构对于 NbS 的定义不尽相同。例如,欧盟委员会提出的 NbS 被理解为“受自然启发与支持的解决途径,通过高效利用资源且具有较强适应性的方式来应对多样化的挑战,并确保同时带来经济、社会和环境效益”^[14,31-32];“地平线 2020”计划中将 NbS 定义为“以一种高效利用资源的、适应性的方式应对多种社会挑战,并同时提供经济、社会和环境收益的,受自然启发、由自然支持并利用自然的动态的解决方案”^[23,33];2016 年世界自然保护大会上指出 NbS 是“一系列能够有效地、适应性地解决社会挑战,同时提供人类福祉和生物多样性收益的保护、可持续管理并恢复自然的或经过改造的生态系统的行动”^[26,34]。

根据 IUCN 于 2020 年提出的 NbS 全球标准,NbS 是一种保护、可持续管理和恢复自然生态系统和改造过的生态系统的综合行动,目标是有效地、适应性地应对社会挑战,增进人类福祉并保护生物多样性^[23]。这一概念重点强调在帮助保护、管理和恢复环境的同时,也为人们带来了实实在在的可持续利益,例如为当地社区创造收入,为依赖自然资源维持健康和福祉的城市带来好处。

尽管不同学者对 NbS 的概念定义在表述上有所不同,但 NbS 的核心思想均围绕着有效管理生态系统,力图解决人类社会发展中的问题与挑战,是一种以人类为中心的自然资源管理观点。Albert 等^[35]将这一核心思想总结为界定 NbS 的三个标准:第一,NbS 措施需要兼顾社会、经济和自然三方面的效益,实现“三赢”;第

二, NbS 是跨学科的, 综合工程设施、经济学、环境规划等多学科的知识 and 经验; 第三, NbS 的实施是一个不断完善的过程, 需要逐步引入实施, 建立学习与迭代框架, 对其应用效果进行评估反思并进一步完善。

同时 NbS 的核心也体现在对“适应”的多角度阐述, NbS 面向的社会-生态系统作为复杂适应性系统, 将持续受自身和外界干扰的影响^[36]。一方面, “适应”指向对象, 主要是对外部风险的主动响应^[37], 而各类风险问题中最突出的便是全球气候变化以及所衍生的极端气候灾害。NbS 倡导通过生物多样性保护和生态系统服务, 帮助人们适应气候变化, 降低城市对气候变化影响的脆弱性^[38]。而适应气候变化应当被认为是与减缓气候变化同等重要和紧迫的问题^[39]。另一方面, “适应”指向主体行为, 描述 NbS 推行过程中人们所采用的适应性手段、适应性管理。区别于传统工程, NbS 设施中体现出了生态系统的动态变化以及生态过程的不确定性^[34], 因此 NbS 的核心也体现在生态变化过程中, 基于证据的管理策略调整, 从而实现决策优化、最佳干预, 并最大程度规避负面效应的出现, 保障系统的良性发展状态, 从而推动可持续发展等目标的实现^[37, 40]。

依据上述概念, Eggermont 等人^[41]根据 NbS 设立背景中的生物多样性和生态系统状况, 以及所面向的生态系统服务和利益相关者群体, 将 NbS 分为三类(图 2): 类型一, 对生态系统的无干预或最小干预, 其目标是维持或改善这些受保护生态系统内外的一系列生态系统服务的供给, 这类 NbS 通常与生物保护区的设立密切相关; 类型二, 调整现有生态系统的解决方案, 通过广泛且有意识的管理方法, 发展可持续和多功能的生态系统和景观, 从而改善目标生态系统服务的供给能力, 这类 NbS 与生态农业、可持续林业管理等概念密切相关; 类型三, 以人工干预更强的方式管理生态系统, 甚至创造新的生态系统, 此类 NbS 与蓝绿基础设施等概念以及恢复严重退化或污染区域生态系统等目标相关, 此类 NbS 需要着重探索新的实施策略, 以调和生物多样性保护和人工景观建设之间的矛盾。以上三种类型的 NbS 在具体设计实施中也可简单理解为三种手段: 生态系统的保护、恢复和重建^[42]。以上三类 NbS 均需要可持续地保护生物多样性和管理或恢复生态系统, 其中第二类 and 第三类 NbS 进一步考虑了人类对生态系统服务的需求, 需要将自然资本转化为绿色增长和可持续发展的动力。三种类型 NbS 之间的界限也非绝对明确, 在实际问题中, 通常采用了三者时空尺度上的综合解决方案。

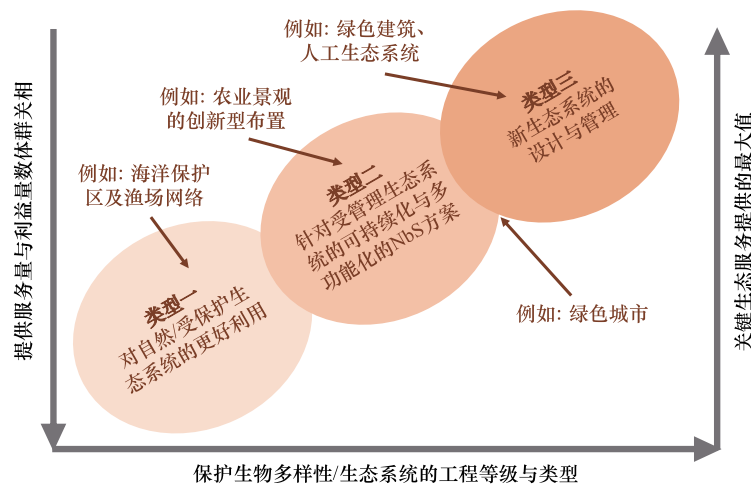


图 2 NbS 设施类型(图源 Eggermont 等人^[41])

Fig.2 Schematic representation of three types of NbS

1.3 NbS 框架准则

NbS 的全球标准提出了 8 项基本准则和相应的 28 项指标^[23], 明确了其所针对的问题、开展尺度和关键目标, 同时需要基于社会实际情况考虑经济可行性、制度合理性以及上述系列利益的权衡, 进行 NbS 的适应性管理, 最终促进 NbS 的主流化且推动可持续发展等目标的实现。8 项准则相辅相成, 体现了系统性、综合性、动态性、权衡性特征, 最终致力于解决人类面临的全球挑战, 实现可持续发展^[34, 43]。

具体准则如下(图3):准则1强调自然解决方案要有效地解决一个或多个社会挑战;准则2指出自然解决方案的设计由尺度决定;准则3要求自然解决方案为生物多样性和生态系统完整性带来净收益;准则4要求自然解决方案在经济上和财政上是可行的;准则5指出自然解决方案的基础是包容、透明和授权的管理流程;准则6要求自然解决方案需要公平地权衡,以实现其主要目标和可持续提供多种效益;准则7强调基于实证证据对自然解决方案进行适应性管理;准则8则提倡自然解决方案可作为主流方案,以超越独立的、有时间限制的干预措施^[23]。

2 NbS 在城市内涝管理中的应用

全球范围城市化进程中产生的城市内涝、风暴潮等问题,为 NbS 的提出创设了背景条件。而另一方面,关于自然生态系统给人类带来益处的研究成果也启发了 NbS 概念的形成^[44]。事实上 NbS 概念非凭空产生,它在很大程度上是从已有的概念与实践中的发展而来^[45]。尤其在城市内涝管理中,蓝绿基础设施、海绵城市等率先开展的实践与 NbS 的准则、框架相贴合,可以被视作 NbS 理念的具体应用。尽管 NbS 概念出现时间较短,但此类与 NbS 相关的工作则在长期的制度和政策探索中,积累了较为成熟的实践经验^[46]。将 NbS 概念与其他现有概念相联系、比较,将有助于整合观点,把现有的城市内涝管理措施统一到更具有概括性的 NbS 框架下;同时,通过汇总现有的实施案例,也将有助于 NbS 理念的落地推行,进而充分利用 NbS 的理念与方法指导城市内涝管理。

2.1 NbS 概念对城市内涝管理的指导作用

近年来,由于快速的城市化进程、土地利用变化、气候变化以及排水系统设计标准的不完善,城市水问题,尤其是内涝灾害,频繁地影响着城市发展与经济建设^[47]。进行内涝管理的传统方式主要依赖市政管网,而由于管网设计重现期较短,广泛采用的硬质不透水铺装使雨水径流无法下渗,城市内涝状况依旧频发^[13]。在此背景下,NbS 通过重建更自然的水循环系统来缓解城市化对水循环各环节产生的负面影响,从源头上消解城市雨洪问题,同时可大幅度减少处理雨水问题的时间和经济成本。而 NbS 设施在恢复或养护生态系统的同时也保护了水资源,实现了雨水资源的再利用,可创造多重生态效益,对于改善城市水问题效果明显^[18]。

具体就应对目标而言,根据 NbS 的概念与内涵,其实施目标在于恢复生态系统、增强生态系统韧性从而增强人类对气候风险的适应能力,同时降低生态系统的灾害风险。而城市内涝作为一种城市化与极端降水条件共同作用下的气候灾害,与 NbS 面向解决社会环境问题的目标相契合。

而就实施方法来看,在水文问题方面,NbS 旨在通过采用接近自然的做法,维持或恢复尽可能接近自然水平的水流机制^[48]。这一做法的实现大多依靠人工管理的绿色基础设施(例如树木、绿色屋顶、雨水花园或沼泽系统)等进行雨水管理^[49],从而维持或恢复水文功能。而此类城市绿色基础设施作为一种具有可持续性和多功能性的人工生态系统,既拥有自然属性,也在干预规划的条件下构成连贯的绿色空间网络,是 NbS 在雨洪管理中的典型案例^[50]。

2.2 NbS 概念与相关概念的对比

大部分关注 NbS 内涝管理有效性的文献都会同时提及现有的多个内涝相关概念,指出 NbS 与绿色基础设施、低影响开发、基于生态系统的适应和生态工程等理念密切相关^[41,51]。一方面,NbS 很大程度上由先前的概念发展而来;另一方面,NbS 也着重关注人类社会的议题,将人类福祉和减贫、社会经济发展和治理原则

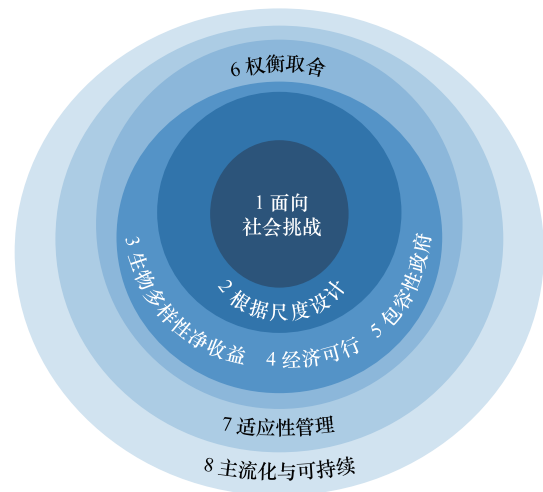


图3 NbS 实施的 8 项基本准则(图源 IUCN^[23])

Fig.3 The eight Criteria making up the NbS Global Standard

等社会因素结合起来^[42],实现了对原有管理概念的概括与超越。本文重点选取了几个在国内外与雨洪管理联系颇为密切的概念与 NbS 相对比,尝试对其概念、特点、应用场景等加以辨析(表 1)。

表 1 NbS 与相关概念辨析

Table 1 Overview of different concepts related to NbS

相关概念 Concepts related to NbS	与 NbS 概念对比 Differences with NbS	与 NbS 概念的关系 Potential relation to NbS
绿色基础设施 GI Green Infrastructure	GI 主要应用于城市地区;NbS 包含了非城市区域的生态系统保护、改造与重建	城市研究范畴内,二者概念有很大程度重叠,可将 GI 提供的生态系统服务视为 NbS 的一部分
低影响开发 LID Low Impact Development	LID 更专注于控制雨水径流,多采用雨水源头分散的小型控制设施;NbS 关注了生态系统服务功能,可以进行大尺度上的设施规划	LID 与 NbS 均强调以现有的自然生态系统作为土地开发规划的综合框架,LID 的一些通用技术也适用于 NbS 设计
海绵城市 Spongy City	海绵城市从短期看具有较强的针对性和较为显著的效果;从全生命周期看 NbS 更具长期的综合成本效益	海绵城市可视为 NbS 的一个组成部分,NbS 理念可以在更高层面上指导海绵城市的建设
基于生态系统的适应 EbA Ecosystem-based Adaptation	EbA 强调整体生态系统的功能,涉及更多应对气候变化的议题;NbS 的方法包括更多的“离散型”措施	NbS 涵盖的范围较广,可以包含 EbA 在内的自然干预措施
生态工程 Ecological engineering	生态工程主要强调生态系统服务;NbS 同时强调了生态系统服务以外的社会、经济效益	生态工程的概念最接近 NbS 当中关于恢复和重建生态系统的措施
自然气候解决方案 NCS Natural Climate Solutions	NCS 主要着眼于维持保护现有生态系统的健康;NbS 纳入了更多的人工生态系统	在应对城市内涝的层面,NbS 与 NCS 指向的具体设施有一定重叠

2.2.1 绿色基础设施

绿色基础设施(Green Infrastructure, GI)是指“由绿地、水和建筑系统组成的基础设施,例如森林、湿地、公园、绿色屋顶等,这些设施通过支持本土物种,维持自然生态过程、空气和水资源,为生命的健康和质量作出贡献”^[52-54]。在应对内涝的过程中,GI 可以通过其蒸发、拦截和渗透能力减少城市洪水,强调与自然流域相连接^[55],同时也是一种可以帮助城市适应气候变化的绿化形式。相比于 NbS,GI 的概念提出较早且发展较为成熟,其诞生之初就面向控制城市扩张、建设生态网络、进行雨水管理,同时对风景园林和景观生态学具有重要的指导作用^[44]。而 NbS 的概念更为广阔,包含了非城市区域的生态系统保护、改造与重建。但就城市的研究范畴而言,NbS 与 GI 的概念有很大程度重叠,可将 GI 提供的生态系统服务视为 NbS 的一部分,有助于应对城市规划者和决策者在城市化和气候变化时期面临的若干挑战^[56]。

2.2.2 低影响开发

基于低影响开发理念(Low Impact Development, LID)的城市雨洪管理方案^[57-58],强调积极发挥绿色基础设施在雨洪调节方面的生态服务功能^[59],强调采用雨水入渗及调蓄系统,维持生态系统的自然循环状态^[60-62]。LID 是为了应对包括暴雨风险在内的、广泛且综合的城市水问题所提出景观生态设计与工程技术紧密结合的实施方案^[63]。随着低影响开发理念的出现,植被、绿地、水体在应对极端暴雨时所发挥的生态调蓄功能得到凸显^[64]。相较于 NbS 设施,LID 更专注于控制雨水径流,对其他生态系统服务功能关注较少;多采用雨水源头分散的小型控制设施,比较缺乏大尺度上的设施规划^[64]。但 LID 同样强调以现有的自然生态系统作为土地开发规划的综合框架,这与 NbS 理念有所重叠,LID 的一些通用技术也适用于 NbS 设计。

2.2.3 海绵城市

海绵城市概念是由中国基于 LID 开发理念所提出的,其实质是这一生态雨洪管理思想。自 2014 年起逐步被官方管理层面接受,并在多个试点城市得到实践^[65-66]。它以景观为载体,强调河道与城市建筑之间发挥缓冲作用的绿地格局^[67-69],从而构建雨水的“渗、滞、蓄”空间^[70-71]。与 NbS 相比,海绵城市从短期看具有较强的针对性和较为显著的效果,例如城市局部内涝的缓解和生态功能的恢复,但从全生命周期看 NbS 更具长期的综合成本效益。有研究认为海绵城市可视为 NbS 的一个组成部分,NbS 理念可以在更高层面上指导海绵城市的建设^[44]。

2.2.4 基于生态系统的适应

基于生态系统的适应(Ecosystem-based Adaptation, EbA)强调“在总体适应战略中,利用生物多样性和生态系统服务,帮助人们适应气候变化的不利影响”,它的概念更加强调生态系统作为一个整体的复杂性、变化和复原力^[14]。多数研究认为,NbS 涵盖的范围最广,可以包含 EbA 在内的自然干预措施。与 EbA 强调整体生态系统的功能不同,NbS 的方法包括更多的“离散型”措施^[55],但二者都建立在相似的绿化愿景之上,同时现有 EbA 涉及更多应对气候变化的议题,能很好地为 NbS 在该领域的拓展提供借鉴意义。

2.2.5 生态工程

生态工程的概念最接近 NbS 当中关于恢复和重建生态系统的措施。尽管表述不同,但 NbS 与生态工程的目标都是强调在生态系统理论的指导下进行可持续的改造与实践。二者具体的目标均包括保护和恢复生态系统,改造或重建生态系统以提供特定的生态系统服务,以代替基于不可再生资源的传统工程。但相比于生态工程,NbS 同时强调了生态系统服务以外的社会、经济效益。

2.2.6 自然气候解决方案

Griscom 等提出了另一个与 NbS 概念相近的自然气候解决方案(Natural Climate Solutions, NCS)方案^[72],包括针对食物、纤维和生境保障在内的陆地保护、恢复和改善实践路径,具体分为 20 种保护、恢复和改善土地管理的行动,力图增加碳储存和避免全球森林、湿地、草地和农业用地的温室气体排放。在应对城市内涝的层面,NbS 与 NCS 指向的具体设施有一定重叠,均面向于提供水过滤、洪水缓冲、维持土壤健康、保护生物多样性生境和增强气候适应性等服务功能。但相比而言,NbS 的概念纳入了更多的人造生态系统,NCS 主要着眼于维持保护现有生态系统的健康。

3 运用 NbS 进行城市内涝管理的案例研判

3.1 设施技术发展

在 NbS 理念框架的指导下,近十年来,在全球各地均有应对城市内涝的设施技术发展,尤其在德国、荷兰、意大利等欧洲国家已开始总结完善的设施建设标准^[45]。根据设施布设的空间特征以及发挥作用的尺度范围,NbS 设施可分为点、线、面等类型。本研究按照类似方式对参与城市内涝治理的 NbS 设施进行归纳总结(图 4)。

点状设施技术:目前采用较多的点状设施技术包括绿色屋顶、小型雨水花园、生物滞留池等。其中绿色屋顶是指在建筑屋顶上铺设高质量防水膜并部分或完全覆盖植被,从而补偿建筑施工时移除的植被^[73]。Zolch 等^[74]通过微观尺度上的情景模拟,证明了绿色屋顶能通过其基质中的蓄水滞留和植被的拦截蒸发减少地表径流,填补了城市绿色基础设施调节地表径流量能力的模拟与绿色屋顶的水力行为之间的空白。Langemeyer 等^[75]进一步根据巴塞罗那城市生态系统服务的具体需求,构建了一个基于空间多准则决策分析的模型,从 5 种绿色屋顶建设策略中确定最佳方案。雨水花园及生物滞留系统通常是针对暴雨径流设计的洼地。由于其结构、行为近似自然湿地,它们可以有效地容纳径流、促进渗透与蒸散、补给地下水、减少洪峰流量。Venvik 与 Boogaard^[76]在挪威西部开展的研究证明,雨水花园等可持续排水系统能在不同气候条件下收集、保留和渗透地表降雨径流水,从而补充土壤水分、补给地下水。同时这类小型渗透系统也能与更大的排水区域相连接,与当地的都市水循环系统在水文和水文地质方面相互作用。Liu、Fryd 和 Zhang^[77]详细介绍了哥本哈根市政建设的 3 处城市公园与城市广场在应对暴雨内涝方面发挥的作用:Lindevang 公园利用开放水面,实现对小雨的现场控制,并为百年一遇的降雨提供雨洪消减与调节;Taasinge 广场具有雨水滞留功能,在改善水平衡的同时改善区域宜居性和生物多样性;Sct. Annae 广场则在保护城市历史环境的基础上,构建集水区进行防洪控制。

线状设施技术:应对城市内涝的 NbS 线状设施大部分围绕道路的设计与改造进行,此外也针对原有排水系统和自然河道进行生态改造。Carmon 和 Shamir^[78]提出道路实际上构成了主要的排水系统,尤其当水量超

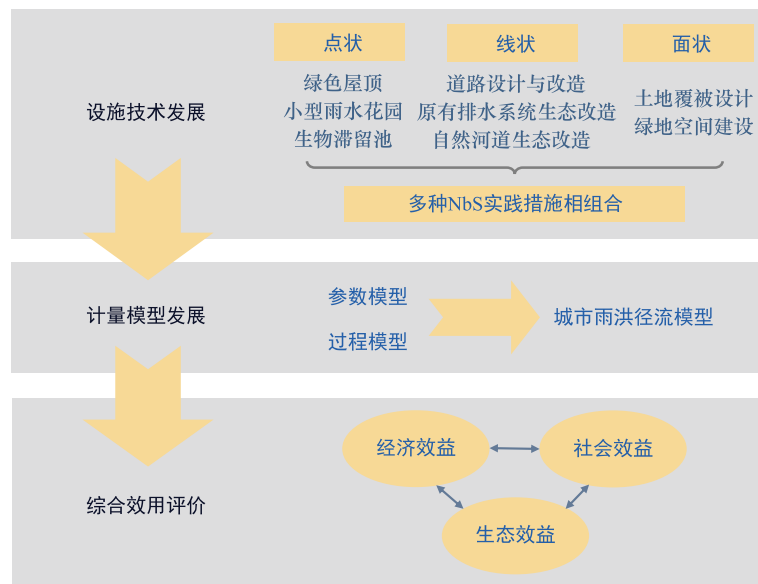


图4 基于 NbS 的城市内涝管理研究现状

Fig.4 Research progress of urban flood management based on NbS

过地下排水管道的容量时,道路会成为重要的流动路径。因此在规划初期,就需要按照自然水文地理布局安排道路走向。Hoang 和 Fenner^[79] 同样指出线状交通设施可以通过引入自然特征来丰富其审美和生态价值,例如道路可在超限雨量情况下转换为水流通道发挥水文功能,或与雨水湿地结合提供生态功能。哥本哈根^[42] 设计了具有蓄洪能力的下沉式“V”形街道,以适应城市内涝,同时将雨水管理的道路分为三种类型:暴雨道路,滞留道路和绿色街道,发挥不同作用。Rodríguez-Rojas 等^[80] 通过西班牙南部开发的可持续排水项目 (Sustainable Urban Drainage Systems, SuDS) 说明 3 种类型的透水路面均起到减缓径流流速和延迟集水区反应的作用,降低了洪水风险和污水系统的运行成本,同时也确保了城市基础设施的服务能力和行人车辆的交通安全。有河流的城市^[78], 需要重视自然河流的环境生态价值,对已恶化河流进行恢复,恢复与保持其在防洪过程中的作用,同时也要在河流沿线设置面向公众的开放空间,发挥河流的社会文化价值。

面状设施技术:应对城市内涝的 NbS 面状设施主要是尺度较大的土地覆被设计与绿地空间建设,基本原则是减少不透水地表面积,增加透水面积。Carmon 和 Shamir^[78] 的研究建议按照自然水文地理布局安排开放空地,从而滞留雨水来预防和减轻洪水,并且通过净化和渗透径流补充清洁的地下水。此外,在空间格局上,应将不透水区域与透水区域相互穿插,将不透水区域的径流引向临近植被斑块,即尽量在靠近径流产生地的区域最大限度地进行渗透以净化水中的污染物。城市中的此类绿地设施需要格外注意水分平衡问题,避免植被消耗太多水分,加剧城市地区的水资源短缺问题^[78,81]。为了解决这个问题,可以针对 NbS 设施选择最合适的抗旱树种,并设计可持续的灌溉系统,例如使用灰水或收集的雨水达到水分平衡。

面向城市内涝的 NbS 项目也并非孤立存在发挥效用,有必要根据本底环境及应对目标对零散的 NbS 设施技术做好组织安排,才能使其整体的效益最大化。对此,Foster 等^[82] 提出“绿色街道”的概念,强调将多个绿色 NbS 实践措施(如:透水路面,雨水花园,植草沟,树木种植)相组合,充分发挥树木拦截和过滤雨水径流的作用以及缓冲区湿地减少洪峰流量和洪水强度的能力,从而增加雨水下渗,防止洪水泛滥并改善水质。哥本哈根与阿姆斯特丹^[42,77,83] 都在 NbS 建设中利用排水道路、绿带和公园带将具有滞留雨水功能的生物滞留池串联起来,形成增加雨水下渗、减缓雨水流速和净化雨水的生态排水网络与径流输送渠道,从而增加对城市内涝的适应性。刘敏聪^[42] 则将 NbS 设施的应对情景分为两类:极端气候变化压力(例如暴雨和飓风)与常规气候压力(例如城市内涝、海平面上升等),结合区域与城市两种建设尺度,提出了 3 种气候韧性城市设计中

NbS 的应用策略,以及针对空间结构、空间网络、空间单体的具体设计方案。

3.2 计量模型发展

上文针对 NbS 的设施技术梳理提供了大量的实证研究。这类实证研究通常通过实地监测的方式,分析和探讨不同 NbS 技术应对城市内涝的机理与作用。但此类研究工作常受制于成本条件,往往只在较小的时空尺度上开展。因此模型模拟的方法应运而生,帮助研究者在城市区域的空间尺度、长期模拟的时间尺度上理解和评估 NbS 管理城市内涝的有效性。

由于 NbS 这一新概念具有概括性与重组性,因此用于刻画 NbS 设施水力行为的模型也多见于其他城市雨洪管理框架,例如评估 LID、BMPs、海绵城市设计等设施的有效性^[64]。目前广泛运用的计量模型有两大类:第一种方法类似“黑箱”,将复杂的水文过程整合为一个参数,来衡量 NbS 设施对径流和水质的影响,此方法不需要大量数据与详细计算,较为便捷,但由于建模过程中的假设,使参数可能无法准确量化 NbS 的实际性能;第二种方法着重水文过程的还原,例如考虑渗透、沉淀、吸附、蒸发、沉降和污染物转化的全过程构建模型,该方法建模详细,适用于开发方案的设计、建设和优化,但计算量大、数据要求高、数据处理复杂。综合前两种方法,不少国家政府和商业机构着力于开发城市雨洪径流模型,方便研究者和决策者模拟城市降雨径流、评估管网设计及雨水控制方案,从而达到防洪排涝、控制雨水径流污染等目的。目前成熟且广泛运用的城市雨洪径流模型多达数十种。

在运用第一种参数法时,Farrugia 等^[84]采用专家打分法获得的渗透能力得分,作为衡量不同生境类型或地表类型调节洪水能力的参数,从而衡量城市可渗透地表的比例并突出个别树木在缓解内涝方面的重要性。Zimmermann 等^[85]提出了一个基于径流系数的指标用于量化绿色基础设施的增加对径流的影响,并将该指标与阿根廷 4 个不同场景下洪水风险相联系,认为改善城市雨水基础设施能够有效应对气候变化引起的城市内涝。在构建第二种过程模型时,Liu 等^[86]进行的工作最具有代表性,他们针对北京某社区开发了一个社区规模的模拟模型,考虑拦截、蒸发、渗透和滞蓄 4 个水文过程,以量化 5 种 NbS 措施对减少城市洪水量和峰值流量的有效性。模拟结果表明,不透水地面对社区的暴雨径流贡献最大,较大的暴雨事件中,综合性的 NbS 设施具有有效的减排能力。

基于前两种方法提出的城市雨洪模型,是 NbS 规划和设计的重要支撑技术,它通过对城市水循环过程的模拟,可以得到雨洪过程中的特征要素和关键状态,对雨洪管理和雨水利用具有指导意义^[13]。许多雨洪模型都是由政府机构开发,常用的包括美国农业部开发的 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型、美国环境保护局开发的 HSPF(Hydrological Simulation Program-Fortran)模型和 SWMM(Storm Water Management Model)模型、丹麦水利研究所开发的 MIKE URBAN 和 MIKE SHE 模型等^[87,88]。通常纳入城市雨洪模型的水文循环过程包括降水、渗透、径流、蒸发、土壤滞留和地下水流等,其中最关键的两个过程是模拟不同降雨条件下透水区域的渗透和地表产生的径流^[88]。不同模型采用的渗透计算方法主要包括 Horton 渗透法、Green-Ampt 渗透法、Philip 法、固定渗透法和 NRCS(Natural Resources Conservation Service)曲线法等,其中在城市内涝情景下运用较多的有 Horton 法、Phillip 下渗法等^[87,89]。不同模型采用的径流预测方法中运用较多的是美国农业部水土保持局开发的 SCS(Soil Conservation Service)径流曲线数法^[88,90]。该方法根据不透水面积、土壤类型、土地覆被类型、水文条件和前兆条件等预测径流,其结构简单、所需参数少、对观测数据的要求不严格,具有较强的小面积集水区径流预报能力。采用该方法的水文模型有 SWAT 和 SWMM 等。

3.3 综合效用评价发展

NbS 的一个核心理念是在尽可能采取自然方式的前提下,同时发挥生态环境、社会经济的综合效益。这一理念的实践,在城市中尤为重要。城市是一个社会经济自然复合生态系统,NbS 的设计、应用,更需要综合权衡社会、生态、经济等不同目标,以及对生态系统服务的不同需求和面向的不同社会群体;另一方面也需要从多层次的治理角度探讨 NbS 如何为社会公平、环境保护和经济发展做贡献^[91]。根据以上多方面要求,诸多学者强调要从更综合的视角评估 NbS 发挥的效益。

Kalantari 等^[92]在东非开展的 NbS 研究将其提供的生态系统服务分为供应服务、调节服务和文化服务三类,而应用 NbS 可以降低城市扩张和气候变化所带来的洪水与干旱风险,帮助东非国家使城市和人类居住区更具包容性、安全性、弹性和可持续性,从而支持政府实现联合国可持续发展目标。Huang 等^[93]认为 NbS 可以有效缓解高频降水事件造成的城市洪涝灾害,并带来额外的经济、生态和社会效益,同时建议 NbS 与灰色基础设施组合可以提升预防城市内涝的性能,确定洪水风险管理策略。Majidi 等^[51]在泰国密集的城市化区域提出了一个框架,对不同的小规模 NbS 设施及其布设地点进行评估。该框架重点量化了 NbS 在提高热舒适度和降低洪水风险方面同时发挥作用的有效性,特别适用于规划与减少热风险相结合的洪水缓解措施。Gulrsrud 等^[94]在澳大利亚-墨尔本开展的研究指出,通过 NbS 应对气候变化并提供生态系统服务,可以将气候适应解决方案的重点从技术战略转向人类福祉和基于社区的决策等社会生态原则,促进了绿色场所的建立。这个案例在更大意义上提出了以社会文化的方式进行城市重新“自然化”和环境服务提供所带来的机遇和挑战。Wild 等^[95]评估了英国街道、公园中生物滞留池和绿色屋顶在内的绿色基础设施对城市雨洪管理的效用,尤其是经济效益。研究认为典型的市场机制中,由于成本增加,私人开发商来提供绿色基础设施的空间有限,因此需要强调城市政府、非政府组织和社区等通过投资绿色基础设施所创造的共同利益。Liquete 等^[96]评估了马焦雷湖周边地区的 NbS 设施所提供的多重环境、社会和经济效益,并将其与成本相似的灰色基础设施进行比较,指出基于 NbS 的绿色基础设施在水净化和防洪方面的表现更好,并且提供了更广泛的生态系统服务。

4 NbS 应用于城市内涝管理的展望

4.1 机遇与潜力

2019 年 9 月,联合国气候行动峰会在纽约举行,中国成为 NbS 全球行动的牵头国家之一,推动 NbS 的全球标准在中国实践和发展,促进 NbS 主流化的需求十分迫切^[44]。尽管 NbS 内涵还需要进一步本土化的解读,方法也需要进一步发展才能在中国全面应用^[45],但其提倡依托科学技术、依靠自然生态应对当前的各类挑战,解决生态问题的同时促进经济社会协同发展的思想,颠覆了以往纯粹依赖工程技术手段实施治理的片面认知。尤其在应对城市化发展和全球气候变化背景下的可持续发展挑战时,NbS 作为一种更加综合的解决途径,将具有巨大的发展潜力和良好的发展机遇^[44,97]。

首先,多项研究指出,综合考虑环境、社会、经济多方效益的 NbS 设施应对城市内涝可以具有更高的成本效益^[98]。尤其在应对城市尺度的暴雨和地表径流问题时,NbS 设施与传统的灰色排水设施相比可以发挥更好的雨水净化和排洪能力,并且可提供更多样的生态系统服务^[96]。此外,在适应不确定的气候变化时,NbS 设施与灰色建筑构成的混合解决方案,能进一步提升城市排洪效力^[93,98]。而通过科学规划绿地系统、优化绿色基础设施等措施,可以具备更好的应对城市内涝的适应性能力,相比被动而成本巨大的措施更为经济可行^[99]。有研究也模拟了 NbS 设施在未来情景下的可持续效用,预测到 2050 年,与灰色设施和政策适应措施相比,NbS 的盈利能力可能会进一步提高^[100]。

其次,NbS 适应性管理的特点在调和多方利益中也将发挥重要优势。城市地区的设施建设通常面临多方压力,需要综合考虑社会、生态、经济等多个方面的不同目标,以及多个社会群体对环境政策的不同观点与需求^[91]。NbS 设计过程具备整合不同的价值体系和利益攸关方的观点的能力,可以更好地支持环境决策^[95]。

此外,结合我国环境背景,NbS 可成为我国适应气候变化的重要选择之一。根据世界银行估计,到 2050 年由于气候变化、地面沉降的影响,全球洪灾损失将达 1 万亿美元^[101],而我国沿海地区不仅生态敏感度高、易受台风、风暴潮等自然灾害的侵袭,同时也是人口、经济和大中城市高度聚集的区域,未来在应对气候变化问题上势必投入巨大的社会经济资源。面对未来气候变化的高度不确定性,具备适应气候变化、创造环境效益等多重功能的 NbS 或许是最贴合实际、最具有成本效益的解决方案^[102]。

4.2 困境与障碍

4.2.1 缺乏对理论的全局认知

NbS 的概念、理论和方法尚不成熟,NbS 设施缺乏清晰的界定,是目前 NbS 得到广泛认同和应用的一个重要障碍。Eggermont 等^[41]指出,NbS 设施的界定仍是一个尚待讨论的问题。例如在城市地区广泛使用的绿色屋顶或绿化墙面被很多研究认为是 NbS 设施,但如果该绿化植被忽略了生物地理分布,或仅由极少数单一植物物种,它很难为增加生物多样性和实现其他经济效益作出贡献,甚至导致对极端事件的抵抗力下降、管理成本增加、生物入侵风险上升。这种仅仅仿造 NbS 外观,忽视其内部功能的结构恰与 NbS 理念背道而驰。因此在科学解读中仍需要探索 NbS 措施的本质特点,推行科学规范的标准,用于指导实践。

NbS 可发挥的效益未得到全面的探索是另一个阻碍其得到广泛接受和应用的因素。对于投资建设的政府与企业,NbS 在成本效益方面的突出优势尚未被强调,尤其缺乏与传统硬性结构的性能和成本效益定量比较的研究^[103]。同时,已有一些研究表明^[93,98],采用多设施组合方法可能会发挥更好的防涝效果,但全面系统的分析、以及针对灰色设施或 NbS 设施单独使用的局限性和缺点的定量研究很少,缺乏深入的讨论。对于公众,多数人并未意识到 NbS 所带来的健康效益,当下研究也较少将 NbS 与健康效益相联系。未来,亟需开展多学科的研究^[104],提升大众对 NbS 福祉效益的认知,以及 NbS 对社会及环境要素变化复杂性的适应能力,促进 NbS 的应用与实施。此外,对 NbS 减缓和适应气候变化的有效性的认识不够充分,这也是 NbS 实践应用中的一个突出问题^[105]。

4.2.2 实践过程面临障碍

NbS 从理论到实践落地还需要克服诸多阻碍。当前 NbS 的应用和实施面临的一个重大挑战是 NbS 的研究以及特定 NbS 的实施与具体规划和治理之间存在脱节,并且少有对 NbS 的规范方法进行批判性讨论,因此难以为治理和规划领域提供新的启示^[106]。当前关于 NbS 的研究重点关注个案分析,侧重 NbS 的可操作性,但缺少更具体的、统一的规划措施,指导地区如何根据本地条件设计并布置 NbS 设施。由此产生的问题可能是地区仍以个案的方式设计 NbS 设施,但缺乏在城市尺度上的统一协调,NbS 的有效性存在较大的不确定性,可能导致 NbS 的框架缺乏有效性与可持续性。

在 NbS 实施过程中,也存在诸多挑战。目前 NbS 实施方法层出不穷,但 Wamsler 和 Pauleit^[105]认为当下零散的 NbS 方法可能会减缓 NbS 推广的进展。Kabisch 等^[107]也认为在实施过程中,需要明确哪些类型的 NbS 满足可持续发展目标,具有最佳的成本效益。同时,NbS 在许多情况下,也同样面临社会层面上不同机构、社区的目标矛盾的问题。如何权衡 NbS 带来的多方利益,同时在更大尺度上维护城市的公平,是 NbS 面临的更深层次的挑战。

而 NbS 在我国的落地实施,还需要克服根深蒂固的工程化思维,需要更高效的行政体制。长期以来,我国在城市规划决策中更偏向于选择简单、可复制、可预测的解决策略,例如加高河堤来防范未来洪水灾害^[108],灰色基础设施在公共政策和城市建设法律体系中依然占主流,对于 NbS 的质疑和排斥依然存在,以至于影响了大多数决策者的倾向和公众的态度。此外,NbS 作为多目标协同的可持续措施,通常需要多部门协调规划以及长期的监测维护^[109]。而现行政治体制中对短期绩效的重视,容易忽略公共项目的长期效益。多部门的合作和不同层级执行的一致性将是我国开展 NbS 的规划实践将面对的严峻问题。

4.2.3 专业人才与本土研究缺失

NbS 在我国的广泛运用还受制于专业人才的缺失。目前大多数的研究成果起源于欧美,将其应用于我国的社会经济建设可能会出现“水土不服”,因此还需要根据我国不同区域特点和拟解决的问题研发本土化的成果,因地制宜。然而,借鉴西方先进经验的过程中,不管是现有的高校教育系统,还是国家层面的专业再教育的体系,都缺失诸如 NbS 这类新理念的内容传授,新概念推行的早期,项目的执行可能会遇到人才匮乏的问题。但随着中国成为 NbS 全球行动的牵头国家之一,相信会有更多专业人才涌现,推动 NbS 理念在我国“落地开花”,并推动 NbS 在全球的应用实践,为美丽中国和全球命运共同体的建设,发挥重要作用。

参考文献 (References):

- [1] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, 319(5864):756-760.
- [2] Kabisch N, Van Den Bosch M, Laforzezza R. The health benefits of nature-based solutions to urbanization challenges for children and the elderly: A systematic review. *Environmental Research*, 2017, 159:362-373.
- [3] 马冰然, 曾逸凡, 曾维华, 崔丹, 胡雯, 陈岩, 何跃君. 气候变化背景下城市应对极端降水的适应性方案研究——以西宁海绵城市试点区为例. *环境科学学报*, 2019, 39(04):1361-1370.
- [4] Miller N L, Hayhoe K, Jin J, Auffhammer M. Climate, extreme heat, and electricity demand in California. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47(6):1834-1844.
- [5] 张冬冬, 严登华, 王义成, 鲁帆, 刘少华. 城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展. *灾害学*, 2014, 29(01):144-149.
- [6] 孙喆. 北京中心城区内涝成因. *地理研究*, 2014, 33(09):1668-1679.
- [7] Alderman K, Turner L R, Tong S. Floods and human health: A systematic review. *Environment International*, 2012, 47:37-47.
- [8] Li H, Ding L Q, Ren M L, Li C Z, Wang H. Sponge City Construction in China: A Survey of the Challenges and Opportunities. *Water*, 2017, 9(9):594.
- [9] Xiang C Y, Liu J H, Shao W W, Mei C, Zhou J J. Sponge city construction in China: policy and implementation experiences. *Water Policy*, 2019, 21(1):19-37.
- [10] Ciscar J-C, Iglesias A, Feyen L, Szabo L, Van Regemorter D, Amelung B, Nicholls R, Watkiss P, Christensen O B, Dankers R, Garrote L, Goodess C M, Hunt A, Moreno A, Richards J, Soria A. Physical and economic consequences of climate change in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(7):2678-2683.
- [11] Ippc. Intergovernmental panel on climate change special report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- [12] 胡庆芳, 张建业, 王银堂, 黄勇, 刘勇, 李伶杰. 城市化对降水影响的研究综述. *水科学进展*, 2018, 29(01):138-150.
- [13] 徐宗学, 程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础——城市水文学研究进展. *水利学报*, 2019, 50(01):53-61.
- [14] Neshover C, Assmuth T, Irvine K N, Rusch G M, Waylen K A, Delbaere B, Haase D, Jones-Walters L, Keune H, Kovacs E, Krauze K, Kulvik M, Rey F, Van Dijk J, Vistad O I, Wilkinson M E, Wittmer H. The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. *Science of the Total Environment*, 2017, 579:1215-1227.
- [15] De Vriend H, Van Koningsveld M, Aarninkhof S. 'Building with nature': the new Dutch approach to coastal and river works. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*, 2014, 167(1):18-24.
- [16] 吴丹洁, 詹圣泽, 李友华, 涂满章, 郑建阳, 郭英远, 彭海阳. 中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究. *中国软科学*, 2016, (01):79-97.
- [17] 李兰, 李锋. “海绵城市”建设的关键科学问题与思考. *生态学报*, 2018, 38(07):2599-2606.
- [18] Qi Y F, Chan F K S, Thorne C, O'donnell E, Quagliolo C, Comino E, Pezzoli A, Li L, Griffiths J, Sang Y, Feng M. Addressing Challenges of Urban Water Management in Chinese Sponge Cities via Nature-Based Solutions. *Water*, 2020, 12(2788):1-24.
- [19] 路琪儿, 罗平平, 虞望琦, 张世鹏, 汪戈义, 朱熙, 高飞, 周美梅, 吕继强, 任柏铭. 城市雨水资源化利用研究进展. *水资源保护*:1-10.
- [20] 高玉琴, 陈佳慧, 王冬冬, 张振兴, 赵晨程. 海绵城市低影响开发措施综合评价体系及应用. *水资源保护*:1-10.
- [21] Derkzen M L, Van Teeffelen A J A, Verburg P H. Green infrastructure for urban climate adaptation: How do residents' views on climate impacts and green infrastructure shape adaptation preferences?. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 157:106-130.
- [22] Church S P. Exploring Green Streets and rain gardens as instances of small scale nature and environmental learning tools. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 134:229-240.
- [23] Iucn. Global Standard for Nature-based Solutions[R]. Gland: IUCN, 2019.
- [24] 陈梦芸, 林广思. 基于自然的解决方案: 一个容易被误解的新术语. *南方建筑*, 2019, (03):40-44.
- [25] Hankin B, Metcalfe P, Johnson D, Chappell N, Page T, Charles J, Craigen I, Lamb R, Beven K. Strategies for Testing the Impact of Natural Flood Risk Management Measures[M]. 30.2017.
- [26] Cohen-Shacham E, Janzen C, Maginnis S, Walters G. Nature-based Solutions to Address Global Societal Challenges[R]. Gland: IUCN, 2016.
- [27] Bank W. Biodiversity, Climate Change, and Adaptation: Nature-Based Solutions from the World Bank Portfolio [R]. Washington DC: WorldBank, 2008.
- [28] Mendes R, Fidélis T, Roebeling P, Teles F. The Institutionalization of Nature-Based Solutions—A Discourse Analysis of Emergent Literature. *Resources*, 2020, 9(1):6
- [29] Kabisch N, Stadler J, Korn H, Bonn A. Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas[R]. Bonn, Germany: BfN, 2016.
- [30] Raymond C M, Frantzeskaki N, Kabisch N, Berry P, Breil M, Nita M R, Geneletti D, Calfapietra C. A framework for assessing and implementing

- the co-benefits of nature-based solutions in urban areas. *Environmental Science & Policy*, 2017, 77:15-24.
- [31] Baudouceau N, Berry P, Cecchi C, Elmqvist T, Fernandez M, Hartig T, Krull W, Mayerhofer E, Sandra N, Noring L. Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities: final report of the Horizon 2020 expert group on 'nature-based solutions and re-naturing cities'. Publications Office of the European Union; Brussels, Belgium, 2015.
- [32] Union I. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A new skills agenda for Europe. Brussels, 2014.
- [33] Faivre N, Fritz M, Freitas T, De Boissezon B, Vandewoestijne S. Nature-Based Solutions in the EU: Innovating with nature to address social, economic and environmental challenges. *Environmental Research*, 2017, 159:509-518.
- [34] 杨崇曜, 周妍, 陈妍, 王立威. 基于 NbS 的山水林田湖草生态保护修复实践探索. *地学前缘*; 1-10.
- [35] Albert C, Spangenberg J H, Schroeter B. Nature-based solutions; criteria. *Nature*, 2017, 543(7645):315-315.
- [36] 李嘉艺, 孙璵, 郑曦. 基于适应性循环理论的区域生态风险时空演变评估——以长江三角洲城市群为例. *生态学报*, 2021, (07):1-13.
- [37] 尹莎, 杨新军, 陈佳. 人地系统适应性研究进展:概念、理论框架与方法. *地理科学进展*, 2021, 40(02):330-342.
- [38] 李晓炜, 付超, 刘健, 刘宇, 封志明, 于秀波. 基于生态系统的适应(EBA)——概念、工具和案例. *地理科学进展*, 2014, 33(07):931-937.
- [39] 张小全, 谢茜, 曾楠. 基于自然的气候变化解决方案. *气候变化研究进展*, 2020, 16(03):336-344.
- [40] Mccarthy M A, Possingham H P. Active adaptive management for conservation. *Conservation Biology*, 2007, 21(4):956-963.
- [41] Eggermont H, Balian E, Azevedo J M N, Beumer V, Brodin T, Claudet J, Fady B, Grube M, Keune H, Lamarque P, Reuter K, Smith M, Van Ham C, Weisser W W, Le Roux X. Nature-based Solutions; New Influence for Environmental Management and Research in Europe. *Gaia-Ecological Perspectives for Science and Society*, 2015, 24(4):243-248.
- [42] 王敏聪. 气候韧性城市设计的自然解决途径研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2020.
- [43] 罗明, 应凌霄, 周妍. 基于自然解决方案的全球标准之准则透析与启示. *中国土地*, 2020, (04):9-13.
- [44] 林伟斌, 孙一民. 基于自然解决方案对我国城市适应性转型发展的启示. *国际城市规划*, 2020, 35(02):62-72.
- [45] 刘佳坤, 吝涛, 赵宇, 林美霞, 邢莉, 李新虎, 张国钦, 叶红. 面向城市可持续发展的自然解决途径(NBSs)研究进展. *生态学报*, 2019, 39(16):6040-6050.
- [46] 安岩, 顾佰和, 王毅, 谭显春, 翟寒冰. 基于自然的解决方案:中国应对气候变化领域的政策进展、问题与对策. *气候变化研究进展*; 1-12.
- [47] Chan F K S, Griffiths J A, Higgitt D, Xu S Y, Zhu F F, Tang Y T, Xu Y Y, Thorne C R. "Sponge City" in China—A breakthrough of planning and flood risk management in the urban context. *Land Use Policy*, 2018, 76:772-778.
- [48] Fletcher T D, Andrieu H, Hamel P. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters; A state of the art. *Advances in Water Resources*, 2013, 51:261-279.
- [49] Jayasooriya V M, Ng A W M. Tools for Modeling of Stormwater Management and Economics of Green Infrastructure Practices; a Review. *Water Air and Soil Pollution*, 2014, 225(8):2055.
- [50] Pauleit S, Liu L, Ahern J, Kazmierczak A. Multifunctional Green Infrastructure Planning to Promote Ecological Services in the City[M]. 2011: 272-285.
- [51] Majidi A N, Vojinovic Z, Alves A, Weesakul S, Sanchez A, Boogaard F, Kluck J. Planning Nature-Based Solutions for Urban Flood Reduction and Thermal Comfort Enhancement. *Sustainability*, 2019, 11(22):6361.
- [52] Fritz M. Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas-Linkages Between Science, Policy and Practice [M]//Kabisch N, Korn H, Stadler J, Bonn A. Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas; Linkages between Science, Policy and Practice. 2017: 1-11.
- [53] Finewood M H, Matsler A M, Zivkovich J. Green Infrastructure and the Hidden Politics of Urban Stormwater Governance in a Postindustrial City. *Annals of the American Association of Geographers*, 2019, 109(3):909-925.
- [54] Demuzere M, Orru K, Heidrich O, Olazabal E, Geneletti D, Orru H, Bhawe A G, Mittal N, Feliu E, Faehnle M. Mitigating and adapting to climate change: Multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 2014, 146:107-115.
- [55] Dorst H, Van Der Jagt A, Raven R, Runhaar H. Urban greening through nature-based solutions - Key characteristics of an emerging concept. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 49:101620.
- [56] Mchale M R, Pickett S T A, Barbosa O, Bunn D N, Cadenasso M L, Childers D L, Gartin M, Hess G R, Iwaniec D M, Mcphearson T, Peterson M N, Poole A K, Rivers L, Iii, Shutters S T, Zhou W. The New Global Urban Realm: Complex, Connected, Diffuse, and Diverse Social-Ecological Systems. *Sustainability*, 2015, 7(5):5211-5240.
- [57] Maritz M. Water sensitive urban design. *Australian Journal of Soil and Water Conservation*, 1990, 3(3):19-22.
- [58] Qin H P, Li Z X, Fu G. The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics. *Journal of Environmental Management*, 2013, 129:577-585.
- [59] Andreassian V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 2004, 291(1-2):1-27.

- [60] 车伍, 杨正, 赵杨, 李俊奇. 中国城市内涝防治与大小排水系统分析. 中国给水排水, 2013, 29(16):13-19.
- [61] 刘昌明, 张永勇, 王中根, 王月玲, 白鹏. 维护良性水循环的城镇化 LID 模式: 海绵城市规划方法与技术初步探讨. 自然资源学报, 2016, 31(5):719-731.
- [62] Ahiablame L M, Engel B A, Chaubey I. Effectiveness of Low Impact Development Practices; Literature Review and Suggestions for Future Research. *Water, Air & Soil Pollution*, 2012, 223(7):4253-4273.
- [63] 王峰, 颜正惠, 黄伟乐, 周芑如. 城市雨水内涝成因及对策. 中国给水排水, 2012, 28(12):15-20.
- [64] Ahiablame L M, Engel B A, Chaubey I. Effectiveness of Low Impact Development Practices; Literature Review and Suggestions for Future Research. *Water Air and Soil Pollution*, 2012, 223(7):4253-4273.
- [65] Wang H, Mei C, Liu J H, Et Al. A new strategy for integrated urban water management in China: Sponge city. *Science China Technological Sciences*, 2018, 61(3):317-329.
- [66] Li Z, Dong M, Wong T, Et Al. Objectives and indexes for implementation of sponge cities - a case study of Changzhou City. *Water*, 2018, 10(5):623-636.
- [67] 李思. 排水模型和 LID 技术在海绵城市中的应用[D]. 清华大学, 2015.
- [68] 俞孔坚, 李迪华, 袁弘, 傅微, 乔青, 王思思. “海绵城市”理论与实践. 城市规划, 2015, 39(6):26-36.
- [69] 仇保兴. 海绵城市(LID)的内涵、途径与展望. 给水排水, 2015, 51(3):1-7.
- [70] 俞孔坚. 美丽中国的水生态基础设施: 理论与实践. 鄱阳湖学刊, 2015, 10:5-18.
- [71] 孙波, 谢水波, 刘慧. 南方沿海城市海绵城市建设系统策略探索. 水利规划与设计, 2019, 11:24-27.
- [72] Griscom B W, Adams J, Ellis P W, Houghton R A, Lomax G, Miteva D A, Schlesinger W H, Shoch D, Siikamaki J V, Smith P, Woodbury P, Zganjar C, Blackman A, Campari J, Conant R T, Delgado C, Elias P, Gopalakrishna T, Hamsik M R, Herrero M, Kiesecker J, Landis E, Laestadius L, Leavitt S M, Minnemeyer S, Polasky S, Potapov P, Putz F E, Sanderman J, Silvius M, Wollenberg E, Fargione J. Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(44):11645-11650.
- [73] Shafique M, Kim R, Rafiq M. Green roof benefits, opportunities and challenges - A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 90:757-773.
- [74] Zolch T, Henze L, Keilholz P, Pauleit S. Regulating urban surface runoff through nature-based solutions - An assessment at the micro-scale. *Environmental Research*, 2017, 157:135-144.
- [75] Langemeyer J, Wedgwood D, Mcphearson T, Baro F, Madsen A L, Barton D N. Creating urban green infrastructure where it is needed - A spatial ecosystem service-based decision analysis of green roofs in Barcelona. *Science of the Total Environment*, 2020, 707:135487.
- [76] Venvik G, Boogaard F C. Infiltration Capacity of Rain Gardens Using Full-Scale Test Method; Effect of Infiltration System on Groundwater Levels in Bergen, Norway. *Land*, 2020, 9(12):520.
- [77] Liu L, Fryd O, Zhang S. Blue-Green Infrastructure for Sustainable Urban Stormwater Management-Lessons from Six Municipality-Led Pilot Projects in Beijing and Copenhagen. *Water*, 2019, 11(10):2024.
- [78] Carmon N, Shamir U. Water-sensitive planning: integrating water considerations into urban and regional planning. *Water and Environment Journal*, 2010, 24(3):181-191.
- [79] Hoang L, Fenner R A. System interactions of stormwater management using sustainable urban drainage systems and green infrastructure. *Urban Water Journal*, 2016, 13(7):739-758.
- [80] Rodriguez-Rojas M I, Huertas-Fernandez F, Moreno B, Martinez G, Grindlay A L. A study of the application of permeable pavements as a sustainable technique for the mitigation of soil sealing in cities: A case study in the south of Spain. *Journal of Environmental Management*, 2018, 205:151-162.
- [81] Georgi B, Isoard S, Asquith M, Garzillo C, Swart R J, Timmerman J G. Urban adaptation to climate change in Europe: Challenges and opportunities for cities together with supportive national and European policies[R]. *European Environment Agency*, 2012:1-142.
- [82] Foster J, Lowe A, Winkelman S. The value of green infrastructure for urban climate adaptation[R]. *The Center for Clean Air Policy*, 2011:1-52.
- [83] Kleerekoper L. Urban Climate Design; Improving thermal comfort in Dutch neighbourhoods. *Architecture and the Built Environment*, 2016, (11):1-424.
- [84] Farrugia S, Hudson M D, McCulloch L. An evaluation of flood control and urban cooling ecosystem services delivered by urban green infrastructure. *International Journal of Biodiversity Science Ecosystem Services & Management*, 2013, 9(2):136-145.
- [85] Zimmermann E, Bracalenti L, Piacentini R, Inostroza L. Urban Flood Risk Reduction by Increasing Green Areas for Adaptation to Climate Change. *Procedia Engineering*, 2016, 161:2241-2246.
- [86] Liu W, Chen W P, Peng C. Assessing the effectiveness of green infrastructures on urban flooding reduction: A community scale study. *Ecological Modelling*, 2014, 291:6-14.
- [87] 秦语涵, 王红武, 张一龙. 城市雨洪径流模型研究进展. 环境科学与技术, 2016, 39(01):13-19.
- [88] Jacobson C R. Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments; A review. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(6):1438-1448.

- [89] 王雷, 杨凤阁, 王诚杰, 崔建军, 徐艳, 赵国良, 霍树义, 金坎辉, 路维. 基于 SWMM 模型的低影响开发模式在城市雨洪控制中的研究. 中国农村水利水电, 2019, (01):83-86.
- [90] 刘家福, 蒋卫国, 占文凤, 周纪. SCS 模型及其研究进展. 水土保持研究, 2010, 17(02):120-124.
- [91] 沙道凤. 基于自然解决方案(NBS)理念的绿色屋顶生态效益经济评价研究[D]. 重庆理工大学, 2020.
- [92] Kalantari Z, Ferreira C S S, Keesstra S, Destouni G. Nature-based solutions for flood-drought risk mitigation in vulnerable urbanizing parts of East-Africa. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2018, 5:73-78.
- [93] Huang Y J, Tian Z, Ke Q, Liu J G, Irannezhad M, Fan D L, Hou M F, Sun L X. Nature-based solutions for urban pluvial flood risk management. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Water*, 2020, 7(3):e1421
- [94] Gulrsud N M, Hertzog K, Shears I. Innovative urban forestry governance in Melbourne?: Investigating “green placemaking” as a nature-based solution. *Environmental Research*, 2018, 161:158-167.
- [95] Wild T C, Henneberry J, Gill L. Comprehending the multiple ‘values’ of green infrastructure - Valuing nature-based solutions for urban water management from multiple perspectives. *Environmental Research*, 2017, 158:179-187.
- [96] Liqueste C, Udias A, Conte G, Grizzetti B, Masi F. Integrated valuation of a nature-based solution for water pollution control. Highlighting hidden benefits. *Ecosystem Services*, 2016, 22:392-401.
- [97] 王旭豪, 周佳, 王波. 自然解决方案的国际经验及其对我国生态文明建设的启示. 中国环境管理, 2020, 12(05):42-47.
- [98] Fritz M. Integrating the Grey, Green, and Blue in Cities: Nature-Based Solutions for Climate Change Adaptation and Risk Reduction [M].// Kabisch N, Korn H, Stadler J, Bonn A. Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas; Linkages between Science, Policy and Practice. 2017: 91-109.
- [99] 朱黎青, 彭菲, 高翹. 气候变化适应性与韧性城市视角下的滨水绿地设计——以美国哈德逊市南湾公园设计研究为例. 中国园林, 2018, 34(04):41-46.
- [100] Reguero B G, Beck M W, Bresch D N, Calil J, Meliane I. Comparing the cost effectiveness of nature-based and coastal adaptation: A case study from the Gulf Coast of the United States. *Plos One*, 2018, 13(4):e0192132
- [101] Hallegatte S, Green C, Nicholls R J, Corfee-Morlot J. Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change*, 2013, 3(9):802-806.
- [102] 李响, 段晓峰, 张增健, 王慧, 刘克修. 中国沿海地区海平面上升脆弱性区划. 灾害学, 2016, 31(04):103-109.
- [103] Debele S E, Kumar P, Sahani J, Marti-Cardona B, Mickovski S B, Leo L S, Porcu F, Bertini F, Montesi D, Vojinovic Z, Di Sabatino S. Nature-based solutions for hydro-meteorological hazards; Revised concepts, classification schemes and databases. *Environmental Research*, 2019, 179:e0192132.
- [104] Shanahan D F, Lin B B, Bush R, Gaston K J, Dean J H, Barber E, Fuller R A. Toward Improved Public Health Outcomes From Urban Nature. *American Journal of Public Health*, 2015, 105(3):470-477.
- [105] Wamsler C, Pauleit S. Making headway in climate policy mainstreaming and ecosystem-based adaptation; two pioneering countries, different pathways, one goal. *Climatic Change*, 2016, 137(1-2):71-87.
- [106] Van Der Jagt A P N, Raven R, Dorst H, Runhaar H. Nature-based innovation systems. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 2020, 35:202-216.
- [107] Kabisch N, Frantzeskaki N, Pauleit S, Naumann S, Davis M, Artmann M, Haase D, Knapp S, Korn H, Stadler J, Zaunberger K, Bonn A. Nature-based solutions to climate change mitigation and adaptation in urban areas; perspectives on indicators, knowledge gaps, barriers, and opportunities for action. *Ecology and Society*, 2016, 21(2):39
- [108] Brouwer R, Van Ek R. Integrated ecological, economic and social impact assessment of alternative flood control policies in the Netherlands. *Ecological Economics*, 2004, 50(1):1-21.
- [109] Fritz M. Nature-Based Solutions and Buildings - The Power of Surfaces to Help Cities Adapt to Climate Change and to Deliver Biodiversity [M].// Kabisch N, Korn H, Stadler J, Bonn A. Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas; Linkages between Science, Policy and Practice. 2017: 159-183.