

# 西方海绵城市建设的理论实践及启示

上海交通大学农业与生物学院教授 车生泉

**【摘要】**海绵城市建设是实现我国生态文明发展国家战略的重要对策，是解决城市洪涝灾害和水资源短缺的重要途径，是城市生态系统稳定，优化城市生态体系，城市生态健康的重要举措。自上世纪70年代以来，国外发达国家针对城市水环境安全问题进行了理论创新和技术实践，包括美国的BMPs、GI、LID，德国的NDS，英国的SUDS，澳大利亚的WSUD，欧盟的WFD，分别形成了效仿自然排水方式的城市雨洪可持续发展理论、技术和管理体系。当前，我国还存在雨水管理法律法规不完善、管理制度不健全、市场激励机制缺乏、技术力量薄弱及公众意识淡漠等问题，发达国家已经成熟的雨水管理经验值得我们借鉴。

**【关键词】**海绵城市 低影响开发 绿色基础设施

**【中图分类号】**C912.81 **【文献标识码】**A

**【DOI】**10.16619/j.cnki.rmltxsqy.2016.21.005

自本世纪以来，随着我国城市化进程加快，导致了河流、湖泊、绿地等生态环境不同程度地受损，如地面不透水硬化面积增加，破坏了城市原有的自然生态系统和水文特征。城市开发建设后，原本可以大量渗入地下的雨水在短时间内形成径流，经管渠、泵站等灰色基础设施快速排放，往往造成排水系统不堪重负而发生内涝，大量雨水不能入渗和有效利用。在传统的雨水“快排”模式中，除蒸发和少量的下渗外，径流的排放量超过80%，造成了雨水资源的大量流失和城市内涝，带来了城市洪涝和缺水的双重问题。我国的城市普遍存在内涝、水生态环境恶化、水资源流失、水环境污染、水安全缺乏保障等一系列问题。

“海绵城市（Sponge City）”是指城市能够像海绵一样，在适应环境变化和应对自然灾害等方面具有良好的“弹性”，下雨时吸水、蓄水、渗水、净水，需要时将蓄存的水“释放”并加以利用。在海绵城市建设过程中，应统筹自然降水、地表水和地下水的系统性，协调给水、排水等水循环利用各环节，并考虑其复杂性和长期性。海绵城市建设是实现城市雨水可持续管理的重要途径，首先是保护和恢复城乡重要海绵体，如河流、湖泊、湿地、坑塘、沟渠等水生态敏感区域；保护

---

车生泉，上海交通大学农业与生物学院教授、中国城市治理研究院研究员。研究方向为景观生态规划设计、景观评价与景观保护、园林植物配置。主要著作有《城市区域生态要素的研究和信息数据库的构建》《庭院绿化设计》《室内装饰植物设计与范例》等。

水源涵养地、林地、草地等具有较高雨水调蓄能力的绿地要素，维持城市的自然水文特征。其次是合理控制开发强度，并通过低影响开发设施，促进雨水的渗透、储存和净化，最大限度地维持或恢复城市开发前的自然水文循环，实现城市雨水的可持续管理。海绵城市与智慧城市、园林城市、生态园林城市、生态城市、宜居城市、气候适应性城市、韧性城市等发展模式有机结合，营造自然生态的、可持续发展的城市。

## 国外海绵城市建设相关领域的研究与实践

国外海绵城市建设的相关领域研究与实践始于20世纪60年代，代表性的理论和实践包括美国的最佳管理措施（BMPs）、绿色基础设施（GI）和低影响开发（LID）德国的自然开放式排水系统（NDS），英国可持续排水系统（SUDS）澳大利亚的水敏感性城市设计（WSUD）欧盟的水框架指令（EUWFD）等。

最佳管理措施（Best Management Practices, BMPs）。20世纪60年代，美国开始重视雨水径流（污染）控制和合流制排水系统污染控制的研究，以改善水质环境。20世纪70年代，美国提出“最佳管理措施”即雨水管理技术体系，首次被引用在1972年通过的联邦水污染控制法修正案（Water Pollution Control Act Amendment）中，并在1987年的《清洁水法修正案》（the amendment to the Clean Water Act, CWA）中制定了促进全美范围内关于非

典源污染控制的条款，自1970年代以后成为欧美地区城市开发、暴雨管理、排水减灾等相关措施的主要依据原则。美国环保局（EPA）将BMPs定义为“在特定条件下用于控制雨水径流量并改善雨水径流水质的技术、措施和工程设施最具成本效益的方式”。<sup>①</sup>1997年，美国国会颁布新的《清洁水法修正案》，为管理水污染物确立了基本框架，包括设计暴雨的洪峰流量控制和水质控制。1998年，美国土木工程学会和联合国教科文组织（1999年）将“可持续的城市水资源系统”定义为“其设计和管理可以满足现在和将来社会的需要，同时也可以维持他们生态、环境和水文循环的完整性”。同时，美国绿色建筑协会（USGBC）的能源和环境设计先锋奖（LEED）中也规定了和暴雨管理规划相关的标准。例如，当地表不透水面积小于50%时，必须实施暴雨管理规划，以保证开发后的洪峰流量和水量不超过开发前的标准（1~2年一遇24小时）；而不透水面积大于50%时，开发后的洪水径流总量比开发前的总量少25%（2年一遇24小时）。上述法律、法规和政策制定的目的即为促进和监督BMPs的实施和应用<sup>②</sup>。BMPs既是暴雨暴雨径流控制、沉积物控制、土壤侵蚀控制技术，也是防止和减少非典源污染的管理决策。其目标除了抑制暴雨地表径流洪峰流量之外，还可以增加水资源的利用并且改善暴雨期间水质污染。减少洪水损害、最小化径流、减少土壤的侵蚀、保持地下水补给、减少面源污染、保证生物多样性和河道的完整性，减少污染径流，提高水体的服务功能，保障公共安全。BMPs的基本目标是通过加强暴雨径流的

控制来缓解城市建设与水生态环境之间的矛盾。为了实现此目标，美国对城市雨水径流控制的要求提出了明确的规定和通用的计算方法（SCS方法、合理化公式、改善的合理化公式）。在区域和城市尺度，新泽西雨水管理手册提出了RSWMP规划流程和导则（Regional Stormwater Management Plans, RSWMP），包括规划委员会的建立、水资源和环境规划部门的组织与协调、规划的制定与评估等步骤。

自然开放式排水系统（Natural Drainage System, NDS）。20世纪80年代，德国逐步建立和完善了雨洪利用的行业标准与管理条例。1989年，德国出台《雨水利用设施标准》，标志着雨水利用技术的初步成熟。自然开放式排水系统（Natural Drainage System, NDS）作为一种设计策略，其目标是针对城市水生态环境的问题，降低雨水径流的量，联通雨水设施廊道，削减初期雨水中的污染物含量。

首先，NDS对于径流量的控制所采用的常用方法是径流的暂时性滞留，以推迟洪峰径流，并使排放到雨水管网的径流流速在可控制的范围内（与开发前的径流速率相当）。其次，为保护河流等水系廊道的完整性，保护区域及缓冲区域的范围、长度及保护的等级需要明确。最后，考虑到降雨量、水质和环境舒适度等环境因素，德国规划管理部门针对不同用地类型制定了与之相适应的环保政策、依据和保障及设计标准。例如，对于商业区，德国联邦及各州法律规定受污染的降雨径流经处理达标后才允许排放，而新建成区域则需要考虑雨水的回收与利用问题，减少雨水排放量，以避免雨水排放的费用。NDS系统在德国的城市

社区尺度实践案例众多，例如位于汉诺威的康斯伯格社区（Kronsberg, Hannover）即为雨洪管理工程措施和风景园林设计相互结合的典型实践案例。该社区在雨水收集上采用了过滤式沉淀槽、渗透型地面、植被渗透浅沟、雨水花园、人工湿地等多种方式收集和调蓄雨水。建成后的康斯伯格社区的径流量（19mm/年）接近未开发前的自然状态（14mm/年），仅仅为传统社区径流量（165mm/年）的1/9。

可持续城市水资源系统（Sustainable Drainage System, SUDS）。上世纪末，英国牛津的罗伯特·布雷（Robert Brey）开启了可持续城市排水系统（Sustainable Drainage System, SUDS）的研究、设计和应用，代表了英国针对城市内涝等环境问题提出的可持续性城市排水系统，关键性技术包括源头控制设施、渗透性铺装、雨水滞留池、雨水渗透沟渠和绿地屋顶、过滤植被带、地下储水设施等<sup>③</sup>，其目标是：1) 保护和改善水质，城市水资源管理的重心由“利用”转为“控制”；2) 协调社区的居民需求与水环境之间的关系；3) 利用城市水系统为野生动植物提供栖息地；4) 鼓励地下水的自然性回灌等。SUDS的设计目的是促进雨水渗入地下，或者在源头控制雨水进入雨水设施，以模仿自然式的排水方式。近十年已在英国及欧洲多个城市应用。2004年，英国规划与环境部门合作发行了SUDS建设指南，并在2009年进行了更新，该建设指南中的地方标准包括康沃尔郡、临界流域、地区、高速公路等多个尺度中SUDS设施。康沃尔郡SUDS建设指南则将所有可达的公共开放空间和城乡绿地均纳入到可持续排水系统之内<sup>④</sup>。



绿色基础设施 (Green Infrastructure, GI)。1999年8月,美国保护基金会 (The Conservation Fund) 和农业部林务局 (The USDA Forest Service) 首次明确提出了绿色基础设施的定义,即绿色基础设施是国家自然生命保障系统,是一个由多要素组成的相互联系的网络,这些要素包括:1) 水系、湿地、林地、野生生物栖息地及自然区;2) 绿色通道、公园及自然环境保护区;3) 农场、牧场和森林;3) 荒野和其他支持本土物种生存的空间;它们共同维护自然生态进程,长期保持清洁的空气和水资源,并有助于社区和人群提高健康状态和生活质量。<sup>⑤</sup>绿色基础设施理念认为城市问题产生的根源是土地开发和保护战略对生态系统乃至社会产生的一系列影响,强调从产生实际问题的源头开始实施管理,并应用一系列的生态技术以消减问题的严重性。

2008年美国环境保护署 (United States Environment Protection Agency, USEPA) 在《2008绿色基础设施行动策略》中将GI定义为“利用和模仿自然的进程来渗透、通过植物或蒸腾作用重新让水返回环境或者是在暴雨、地表径流等产生的地方重新利用它们”。至此,GI将作为“基础设施”的本意解释,即一系列结合自然系统和工程系统的产品、技术和措施,突出模仿自然水系统过程,从而达到改善环境质量和提供公共设施服务的目的,它应该和其他城市基础设施一样,能够引导城市发展<sup>⑥</sup>。塞巴斯蒂安·莫法特 (Sebastian Moffatt) 编写了加拿大《城市绿色基础设施导则》 (A Guide to Green Infrastructure for Canadian Municipalities); 沃姆斯利 (Walmsley) 结合

美国新泽西州的案例,提出了绿色基础设施的5个设计标准。

2011年,美国城市绿色基础设施总体规划 (NYC Green Infrastructure Plan-NYC and NYCDEP 2011) 在城市雨水径流方面提出了新的绿色基础设施的概念,并提出了传统基础设施和绿色基础设施之间关系及如何有效衔接。其初衷是由于现代城市扩张迅速,大量土地由林地、农地等自然、半自然类型转变为建设开发用地,自然空间的大面积消失和破碎化,绿地空间的生态服务功能严重退化,使原本以郊野和自然区域为基质、以城市为斑块的格局出现了关系反转。而应对这一转变的途径是将破碎的绿地斑块通过廊道连接成为可持续发展所依赖的“基础设施”。

2011年,纽约市政府发布了2030年纽约城市的新规划 (Greener Greater New York), 对城市雨洪管理体系进行了分类,其中2项目标与城市水资源的管理相关:其一是将用于休闲娱乐的景观水体比例由48%提升至90%;其二是提升城市社区、自然系统和基础设施的抗灾能力,推广绿色基础设施和雨水管理设施,并实施灰色基础设施的升级 (抵御10年一遇标准降雨的目标),如扩建管网或者修建控制合流溢流 (CSO) 污染的控制设施,以达到灰色基础设施和绿色基础设施的耦合<sup>⑦</sup>。

低影响开发 (Low Impact Development, LID)。20世纪90年代,基于BMPs最佳管理措施的理论和技术,美国马里兰州的乔治王子县 (Prince George's County) 及西北地区的西雅图 (Seattle) 和波特兰 (Portland) 共同提出了新的雨水

管理、控制和利用技术综合体系<sup>⑧</sup>，即低影响开发，一种以模拟自然排水方式为核心的雨洪管理技术<sup>⑨</sup>。2000年，美国国会修订了《清洁法案》，并对城市雨水污染的评价与监测、雨水资源管理和雨水径流污染控制的技术体系，以及合流制排水系统和雨水处理技术等作了规定，其中就包括雨污分流系统、合流制储存设施和实施低影响开发技术，以减少暴雨径流入排水系统等灰色基础设施的负荷。LID措施有效补充了BMPs体系并在一定程度上弥补了BMPs体系的缺陷。LID作为一种场地设计策略和城市土地保护及发展战略，是一种基于微观尺度控制措施发展而来的雨水管理技术，其原理是通过分散性的、均匀分布的、小规模的基础设施对雨水径流进行源头控制，并通过渗透、过滤、存储、蒸发及径流截取等设计技术，实现对暴雨径流及污染的控制，缓解或修复开发所造成的难以避免的水文扰动，最大程度地降低土地开发对城市水文条件和生态环境的影响。2003年，美国西雅图市的高点社区（High Point，面积约53hm<sup>2</sup>）开始了为期6年的重建工程，引入了低影响开发LID的多项措施，以自然开放式的排水系统（NDS，Natural Drainage System）的设计手法使具有高密度度的城市居住空间在人居、休憩、环境改善、径流控制和雨水利用等多个方面取得了良好的平衡，获得2007年美国城市土地学会ULI全球卓越奖。

水敏感性城市设计（Water Sensitive Urban Design，WSUD）。20世纪末，澳大利亚政府及管理机构提出了水敏感性城市设计的理念，并先后于2000年和2007年召开以“水敏性城市

设计”为主题的城市发展会议。水敏感性城市设计是澳大利亚对传统城市开发措施的改进，其强调通过城市规划和设计的综合分析来减少城市建设对自然水循环的负面影响，并保护水生生态系统的健康稳定，旨在城市开发设计过程中控制和管理开发后的水体循环，以保护水环境的自然状态及可持续发展，同时将雨洪作为一种资源加以利用，实现城市防洪、雨水污染控制、雨水资源利用、水环境生态保护、城市景观综合效益提升等。

WSUD体系将城市水循环视为一个有机的整体，力图实现雨洪管理、饮用水供应和污水管理的一体化。该体系认为城市的灰色基础设施和建筑形式应当与场地的自然特征相一致，并将自然降雨和城市污水视为一种可以利用的资源。其关键性的原则包括：1) 保护现有的自然特征和生态环境；2) 维持集水区的自然水文条件；3) 保护地表和地下水水质；4) 降低供水管网系统和雨水管网的负荷；5) 减少排放到自然环境中的污水；6) 将雨水和污水的收集、净化、利用与风景园林相结合，以提升美学、社会、文化和生态价值。

WSUD反映了面对城市内涝等环境危机时在城市规划、设计和建设过程中发生的根本性的策略转变，使雨水及污水资源的管理和利用由传统的单一排放模式转变为系统的循环和控制模式。WSUD水敏性城市设计在澳大利亚应用广泛，如应用在澳大利亚墨尔本东南约35公里的林恩布鲁克房地产项目（Lynbrook Estate）。

欧盟水框架指令（Water Framework Directive，WFD）。2000年底，欧盟开始实



施水框架指令（Water Framework Directive, WFD），是欧洲国家第一份正式的系统性的关于城市水资源平衡及可持续利用的官方文件，作为一个强有力的规章制度，欧盟水框架指令为英国、德国等欧洲多个国家水规划和管理提供了参考标准。近10年来较新的水管理策略还包括《渗透标准区域水法》（Regulation for Infiltration in regional water law）及2010年出台新的《暴雨管理方法》（Stormwater Act）等。

这些规章颁布的主要目的是保护和改善河流、湖泊、地下水及沿海的水资源，在整个欧洲实施综合流域管理，以达到保护水生态环境的目标，并且提供了可以参考的理论和技術框架，使自然水资源得以可持续的开发和利用。其基本目标是：1) 保护和增强水生生态环境系统；2) 在有效的水资源保护的基础上，推进可持续的水资源利用；3) 为平衡、平等、持续的水资源利用提供充足的地表水和地下水；4) 为保护和改善水生生态环境，减少和避免污染物的排放；5) 减少旱涝和水涝灾害；6) 保护陆地和海域水体；7) 建立保护区和生物栖息地。

为确保国家内部及国际合作，成员国必须在行政安排、排放标准、环保技术、经济措施、管理机构等方面均做出适当的协调<sup>⑥</sup>。EUWFD规定，每个流域建立的措施和方案均必须保证地下水的供给平衡，并将水域保护和污染控制紧密结合，将河流和湖泊等水生生态系统视为一个整体进行统一的管理和监测，而非根据行政范围实施。

2004年，法国将《欧盟水框架指令》转

换为国内立法，并确立了水资源管理的4个基本目标，即恢复水体的良好生态状况、减少甚至消除有害物质的排放、在保障政策制定和监督过程中引入公众的参与、考虑关于用水服务的成本补偿原则。为此，法国制定了详细的执行进展和时间计划，以明确目标和可操作的方案。

## 西方发达国家城市雨水管理经验对我国海绵城市建设的启示

英、美、澳、德、日等国家针对城市化过程中所面临的内涝频发、径流污染加剧、水资源流失、水生态环境恶化等突出问题，分别形成了效仿自然排水方式的城市雨洪可持续发展和管理体系，相应的措施和技术也得到了长足发展和实践应用。其雨水管控方法、理论体系、法律法规和实践效果既存在相似性也存在差异性。

我们应借鉴西方发达国家已经成熟的雨水管理措施，更好地推进海绵城市建设。基于我国现有雨水管理法律法规不完善、管理制度不健全、市场激励机制缺乏、技术力量薄弱及公众意识薄弱等现状，笔者对我国海绵城市的建设有如下思考和建议：

建立健全的雨水管理法律法规体系。将海绵城市建设和低影响开发理念融入规范性文件，确定在推进海绵城市建设过程中以雨洪管控、削减污染为主要目标，规定新建、改建、扩建工程均应进行低影响开发技术的设计和建設，并增加降雨径流总量控制性目标的相关规定。新建区域应进行雨水综合调控规划和工程

设计,且城乡绿地功能提升、低影响技术应用应与主体工程同时设计、施工和投入使用。

在相关法律法规等规范性文件中增加关于雨水管理的鼓励或惩罚性规定。在低影响开发技术推广初期,建议制定雨水管理激励机制,将应用低影响开发技术区域的面积按照相应比例换算为绿化面积,间接提升该区域的容积率;也可根据该区域对径流总量控制的效果对业主给予相应补贴,鼓励开发者的环境友好行为。在低影响开发技术推广后期,建议制定雨水排放违规收费办法,当该区域的径流总量控制率未达到相应的控制目标时,有关执法部门应结合其实际径流总量以及该区域面积等,收取相应的雨水排放费用。建立海绵城市建设评价体系,严格按照海绵城市建设、雨水管理相关法律法规以及技术导则的详细内容进行评分,并与相应的激励、惩罚机制挂钩。

多部门、多学科协同开展雨水管控工作。城市雨水管理工作涉及多个部门,包括水务部门、环保部门、规划部门、市容绿化部门及国土资源部门等相关部门。建议在进行雨水管理和海绵城市建设时,确定组织和负责部门,并形成联动工作机制,成立由生态专家、水文专家、风景园林师、建筑师等组成的专家工作组,协助相关部门开展雨水管理工作。

加强雨水管控技术的研发与应用推广。针对各城市的区域气候特点和环境状况,从中心城区、城郊区域、卫星城及乡村地区的城乡梯度,老城区、新城区和新建区的时间梯度,商务区、居住区、工业区、农业区等功能类型,研究不同梯度和功能类型的场地特征、环境状

况,研发上述类型中各类绿地适用的雨水低影响开发的技术体系和模式,包括雨洪管控的绿地空间规划设计技术体系,雨水花园、生态植草沟、下凹绿地等技术优化和集成,绿地中绿色与灰色基础设施空间耦合技术,绿地空间雨洪调控功能增效提能技术,等等。

强化公众的雨水管理和利用意识。当前,群众对于雨水管理、绿色基础设施、低影响开发等理论缺乏认知和重视度,应结合低影响开发示范工程,创建海绵城市示范教育基地,加强海绵城市、低影响开发、绿色基础设施等理论和实践措施的宣传。科研单位和非政府组织可以通过发表文章、项目展示等方式,加大宣传力度。政府也可通过颁布雨水管理最佳试点等奖励方式,鼓励业主重视海绵城市建设;配合试点推广活动,编印相关的宣传手册、环保购物袋等宣传品,免费向公众发放;通过电视台、网站和报纸等媒体,及时宣传海绵城市建设工作动态和成果。

## 注释

① Edward, T. McMahon, "Green Infrastructure", *Planning Commissioners Journal*, 2000(37): pp.32-45.

② *New Construction Version 2-2 Reference Guide*, Second Edition, September 2006, USGBC LEED.

③ U.S. Environmental Protection Agency, *Fact Sheet: Low Impact Development and Other Green Design Strategies*, Washington, DC, 2006.

④ Sivertun, A.K. and (下转63页)

(上接53页) Prange, L., "Non-point source critical area analysis in the Gisselo-watershed using GIS," *Environment Model Software*, 2003,18(10):pp.887-898.

⑤Mark A Benedict, Edward T McMahon, "Green Infrastructure: smart conservation for the 21th Century," US, *Renewable Resources Journal*, 2002(20):pp.12-17.

⑥Liu Bin-Yi, "Leading the growth of the city based on green infrastructure planning," *Green infrastructure*, in 46th world IFLA Congress, Rio De Janeiro, Brazil: IFLA, Associacao Brasileira de Arquitetos Paisagistas, 2009.

⑦张昕、郭祺忠、马洪涛:《美国城市雨水径流管理概况》,《给水排水》,2014年

第40期。

⑧Prince Goerge's Country, Maryland, Department of Environmental Resources, *Low Impact Development Design Strategies*, June, 1999.

⑨Low-impact Development Center, United States Environmental Protection Agency, *Low Impact Development (LID) A Literature Review*. Washington, 2000, EPA/841/B-00/005.

⑩李雪松、秦天宝:《欧盟水资源管理政策及其对我国的启示》,2006年全国环境资源法学年会:《资源节约型、环境友好型社会建设与环境资源法的特点问题研究》,2006年,第1216页。

责编/杨昫贇

## Theory and Practice of the Western "Sponge City" and the Insights

Che Shengquan

**Abstract:** The "sponge city" project is an important measure for implementing the national strategy of building China into an eco-friendly country, an important way to prevent the inner-city flood disaster and shortage of water resources, and also an important solution to maintaining the stability of the city ecosystem, optimizing the city ecological system, and promoting urban ecological health. Since the 1970s, the developed countries explored theories to counter city water environmental safety issues and put them into practice, including BMPs, GI, and LID of the US, Germany's NDS, Britain's SUDS, Australia's WSUD, and WFD of the EU, creating the city sustainable development theory, technology and management system that emulates the natural rainwater drainage mode. At present, China still has problems that laws and regulations on rainwater management need improvement, the management system is flawed, market incentives are unavailable, the technical workforce is weak, and public awareness is not strong, so the rainwater management experience of the developed countries is worth our learning.

**Keywords:** sponge city, low-impact development, green infrastructure