

# 基于生态水利的海绵城市设计原则

王兴超

(烟台市城市水源工程管理局, 山东 烟台 264000)

**摘要:** [目的] 探索基于生态水利的海绵城市建设方法, 解决城市水资源短缺、水灾害频发、水生态恶化等一系列水安全问题。[方法] 概括海绵城市的科学内涵, 归纳总结其传统建设方式, 分析中小尺度雨水管理措施的局限性, 指出当前海绵城市建设中存在的突出矛盾, 分析生态水利应用在海绵城市建设中的可行性和优势。[结果] 通过制定任务目标、基本原则和整体架构, 围绕构建海绵城市的生态水利保障体系, 提出一系列重点生态水利工程和非工程措施。[结论] 生态水利理论应用于海绵城市建设是保障城市水安全、解决城市水问题的根本之道, 海绵城市建设应建立以生态水利为核心的发展战略。

**关键词:** 海绵城市; 生态水利; 雨洪管理; 内涝防治; 生态治理; 雨洪资源利用; 低影响开发

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2017)05-0250-05

**中图分类号:** TV213.9

**文献参数:** 王兴超. 基于生态水利的海绵城市设计原则[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 250-254. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.20170707.001; Wang Xingchao. Design principle of sponge city based on ecological water conservancy[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 250-254. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.20170707.001

## Design Principle of Sponge City Based on Ecological Water Conservancy

WANG Xingchao

(Yantai Urban Water Source Engineering Bureau, Yantai, Shandong 264000, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the construction method of sponge city in the principle of ecological water conservancy, in order to solve a series of water security problems, such as the shortage of water resources, frequent floods and deterioration of water ecology. [Methods] The scientific connotation of sponge city and its traditional construction methods were summarized, the limitation of small and medium scale rain management measures was analyzed, the prominent contradiction existing in the construction of sponge city was pointed out, and the feasibility and advantages of ecological water conservancy application in sponge city construction were put forward. [Results] Based on setting mission objectives, basic principles and overall structure, a series of key projects and non-engineering measures were put forward around the construction of ecological water conservancy support system of sponge city. [Conclusion] The application of ecological water conservancy theory to the construction of sponge city is a fundamental way to guarantee urban water security and to solve the urban water problems. The development strategy of ecological water conservancy should be established as the core of the sponge city construction.

**Keywords:** sponge cities; ecological water conservancy; stormwater management; waterlogging prevention; ecology governance; stormwater resource utilization; low impact development

近些年来,受气候变化、城镇化发展及环境承载能力等因素影响,水资源短缺、水灾害频发、水生态恶化等一系列水安全问题普遍威胁着中国各大城市,而且呈现愈演愈烈的态势。一方面城市内涝频发,全国相当一部分城市遭遇过严重内涝困扰,北京、上海、重

庆、广州、深圳、南京、武汉、长沙、西安、杭州、济南等大城市逢大雨必涝、暴雨成灾的报道屡见不鲜,甚至造成人员伤亡,给人民群众生命财产安全带来巨大损失;另一方面城市水资源供应严重不足,水资源短缺正成为严重制约城市经济社会发展的主要瓶颈。这些被

收稿日期:2017-04-25

修回日期:2017-05-19

资助项目:中央高校基本科研业务费专项资金“海绵城市建设的水资源安全保障研究”(2016B09714)

第一作者:王兴超(1983—),男(汉族),黑龙江省绥滨县人,硕士研究生,工程师,研究方向为城市生态水利和水资源、水环境管理。E-mail: mok1234@163.com。

联合国人居署列为“缺水”或“严重缺水”的城市当中,甚至包含一些水乡,这些城市降水丰沛、水系发达,却因水源污染导致水质型缺水,从而引发水危机。内涝与缺水同时威胁着城市安全与发展,这看似矛盾的两个方面,其实均源于城市水循环出了问题,导致水资源、水环境、水生态三者的发展不平衡、不协调、不可持续,城市自身调配水资源、应对洪涝和干旱等突发事件的能力不足。因此,本文拟探索基于生态水利的海绵城市建设方法,以期解决城市水资源短缺、水灾害频发、水生态恶化等一系列水安全问题。

## 1 海绵城市介绍

### 1.1 科学内涵

海绵城市用海绵的基本特性类比城市的生态功能,要求城市应具有良好的“弹性”(系统在被破坏或失效后能够自行恢复正常工作的能力),以适应环境变化和应对洪涝、干旱等自然灾害;应具有“保水性”,对水资源收集、储存和再利用的功能;还应具有“净滤”功能,雨污水能通过土壤渗滤吸附和生物化学降解作用进行过滤、净化。也就是说,应当从洪涝灾害防治、水资源利用和生态环境改善等角度全面理解海绵城市的内涵<sup>[1]</sup>。生态系统服务理论告诉我们,自

然生态系统具备复杂、丰富而完备的服务功能,只要维护和建设良性循环的城市自然生态系统,就能让城市的每一寸土地都恢复调蓄雨洪、涵养水源、净化雨污等功能,这也是海绵城市构建的理论基础。海绵城市这一概念的引入,使城市洪涝灾害的治理思路由传统的“快排防洪涝”向新型的“蓄滞防旱涝”转变,让城市的河湖水系、绿地、土壤等均能够发挥对雨洪径流的自然积存、渗透、净化和缓释作用,通过对城市雨洪径流进行源头减排、分散蓄滞、缓释慢排和合理利用,减缓或降低自然灾害和环境变化的影响,保护和改善水生态环境。其本质是通过建立平衡、协调、可持续的良性水循环,来提高城市抵御水灾害的生态鲁棒性。也就是说海绵城市应当既能够与雨洪和谐共存,不发生洪涝灾害,又能使降雨被积存、净化、回用或入渗补给地下水,合理的资源化利用雨洪水,同时还能维持良好的水文生态环境,使城市建设和发展能够与自然相协调。

### 1.2 传统建设方式

海绵城市的核心目标是通过科学的雨洪管理理念应对城市雨水问题,包括城市缺水和雨水流失、内涝灾害和面源污染等问题。国内外应对城市雨水问题而提出的相关概念和理念详见表1。

表1 国内外应对城市雨水问题的相关概念

名称	英文及缩写	应用国家或地区
雨洪管理	stormwater management, SM	美国、加拿大、欧洲、日本、新加坡、中国
低影响开发	low impact development, LID	美国,加拿大,欧洲,日本
最佳管理措施	best management practice, BMP	美国,加拿大,欧洲
水敏感城市	water sensitive urban design, WSUD	澳大利亚,德国
雨水贮存渗透	rain water storage and infiltration, RSI	日本
绿色雨水基础设施	green stormwater infrastructure, GSI	美国
低影响城市设计与开发	low impact urban design and development, LIUDD	新西兰
可持续排水系统	sustainable urban drainage system, SUDS	英国、瑞典
洼地—渗渠系统	mulden-rigolen, MR	德国
雨水控制与利用	storm water control & reuse, SCR	中国
水适应性景观	water-adaptive landscape, WAL	中国
内涝防治	waterlogging prevention & control, WPC	中国

尽管这些概念的名称不同,但内涵基本相近,均包涵了雨水资源化利用、洪涝灾害防治、面源污染减控、生态环境改善等方面,且所采取的具体工程措施亦大同小异,都是在传统城市排水系统基础上进行改进,采取“渗、滞、蓄、净、用、排”对城市降雨径流进行总量控制和峰值削减,包括通过透水铺装地面、下凹式绿地、屋顶绿化、植被浅沟、植被缓冲带、雨水渗透池、雨水湿地花园等设施对径流进行源头控制,以及通过雨水滞蓄池、调洪池及雨水罐等雨水收集回用设施进行过程控制等。

### 1.3 存在的问题

住建部编制的《海绵城市建设技术指南—低影响开发雨水系统构建(试行)》(以下简称《指南》)借鉴了国外应对城市雨水问题所采取的相关措施<sup>[2]</sup>,明确了海绵城市是以低影响开发为基础的建设模式,通过建设上述低影响开发设施,在建筑与小区、道路与广场、绿地与公园、水系等城市组成部分建设中,构建低影响开发雨水系统。

应该看到,当前国外成功建设城市雨水管理系统的国家,虽采用了上述以中小尺度为主的市政措施,

但往往是与庞大、发达、完备的城市地下大蓄排系统 (major system) 相配套而实施<sup>[3-5]</sup>, 这样才能保证城市既能担负重现期为 1~10 a 范围的常规降水, 又能应对极端天气带来的超标或特大暴雨。

在治疗雨水问题引起的城市病上, 仅采用《指南》中以中小尺度为主的雨水管理措施, 虽能缓解面源污染等局部问题, 但往往投资较高<sup>[4-6]</sup>, 且无法从根本上发挥综合效益, 治标不治本。但如果中国城市在建设中小尺度措施的同时, 也配套建设地下大蓄排系统, 则显得不切实际。因为发达国家的城市大蓄排系统大多建成于百年前, 且往往基于其雄厚的工业基础和强大的经济实力并历经几十年才完成。而长期以来中国城市在解决超标暴雨引起城市内涝问题上, 缺乏综合防控策略, 排水管道和泵站主要依据传统理念、方法和标准而设计, 城市雨水排放只能依靠与城市发展不匹配的市政工程。在人口和建筑密度大、空间场地有限、地下管线拥挤等限制因素较多的城市建成区, 建设庞大的地下大蓄排系统, 必将面临拆迁、实施困难, 耗时、耗资巨大等多方面难题, 且短时期内无法建成。因此, 当前海绵城市建设存在的突出矛盾是缺少大尺度的符合中国城市实际的末端调蓄设施。

在开展海绵城市建设以来的 3 a 多时间里, 水利部虽制定了推进海绵城市建设水利工作的指导意见, 却未能改变水利行业和专业在海绵城市建设及相关学术研究中参与度低、边缘化的现实。海绵城市在概念上具有广阔的外延, 其建设理论在不断的发展完善, 其建设方法也绝不应仅仅局限于低影响开发以及《指南》中以中小尺度为主的雨水管理措施。水利工程是城市建设的基础设施, 是水资源的合理开发、有效利用和水旱灾害防治的主要工程措施。在解决中国城市水资源短缺、洪涝灾害、生态恶化、环境污染、水土流失等水问题中起到了无可替代的重要作用。我们应回归常识, 充分认识水利工程在海绵城市建设中所能发挥的核心作用, 确立水利行业和专业为主导, 整合各行业、专业的合作模式, 在城市整体或流域全局的高度制定系统治理方案, 从而形成以水为主线、以水治水的建设思路。

## 2 生态水利应用在海绵城市的可行性

### 2.1 传统水利存在的问题

近些年, 中国在城市化快速发展进程中, 河流、湖泊、水库、湿地严重萎缩, 水生态空间被严重挤占, 地下水超采和水土流失问题严重, 雨洪资源利用程度低, 下垫面不透水面积比例高, 洪涝水宣泄不畅, 应对洪涝和干旱等突发水事件能力低。这些问题的根本

原因是人水关系不和谐。

传统水利在解决中国城市水资源短缺、洪涝灾害、生态恶化、环境污染、水土流失等水问题中起到了不可替代的重要作用。但在处理人水关系不和谐问题上则显得力不从心。例如, 传统河道治理方法罔顾河流生态系统的自然属性, 粗暴的将自然河流渠道化、非连续化, 将原本深浅相间、蜿蜒曲折、灵动多变的河流改造成硬质的、隔水的、平直的人工河流<sup>[7]</sup>。传统水利工程改变了河流的自然形态和水文规律, 造成河流生境的改变, 从而导致河流生态系统中生物群落多样性降低, 生态系统退化。可以说, 传统水利在力求满足人的需求的同时, 却在不同程度上忽视了水生态系统本身的需求, 在一定程度上甚至加剧了人水关系矛盾的复杂性。

### 2.2 生态水利的概念

水利工程是在着力解决水灾害加剧、水资源短缺、水环境污染、水生态恶化等一系列水安全问题的过程中, 日益发展进步并凸显作用的, 因此, 水利工程的本质是生态工程。生态水利是在传统水利的基础上, 按照生态学原理, 遵循生态平衡的法则和要求, 从生态的角度出发进行水利工程建设<sup>[7-9]</sup>, 建立水的良性循环和可持续利用的水利体系, 从而达到水资源可持续发展和人水和谐。

### 2.3 生态水利的优势

在内涵和目标上, 生态水利与海绵城市高度契合, 都是在充分尊重自然的基础上, 兼顾水域生态系统健康和人类发展需求, 维护和建设良性循环的城市自然生态系统, 让城市的水域、森林、土地等生态系统都恢复调蓄雨洪、涵养水源、净化雨污等功能, 随着低影响开发理念的融入, 生态水利将在城市雨洪管理中发挥更大的效益。海绵城市建设应充分认识生态水利的支撑作用, 确立以生态水利为核心, 以河湖水系为载体, 以改善城市水生态环境为抓手的海绵城市建设架构。通过建设以生态水利工程为主、中小尺度措施为配套工程的多尺度城市海绵体, 以及通过非工程措施, 保护、修复城市水生态系统, 实现城市水系统良性循环, 水安全保障能力、水资源和水环境承载能力得到进一步增强, 从而在根本上解决城市雨水问题<sup>[8-10]</sup>。

## 3 以生态水利为核心的海绵城市建设思路

### 3.1 根本任务和总体目标

生态水利在海绵城市建设中的根本任务在于: 将城市河湖水系和地下水系统建设成为高效的蓄积、调

节和净化雨洪径流的场所,从而保障海绵城市建设“渗、滞、蓄、净、用、排”各项措施发挥系统治理效益<sup>[11-14]</sup>;完善城市防洪排涝体系,统筹调控流域上下游、城市建成区内外洪涝水,合理安排洪涝水出路,提高城市防洪排涝标准;科学蓄洪滞洪,加强雨水、再生水等水源利用,提高城市水资源承载力;加强城市河湖综合整治和水系连通,优化配置水资源,保护地下水系统,实施水生态修复,改善城市生态环境,为海绵城市的建设提供重要基础。

总体目标是以城市河湖水系综合整治、岸线管控和防洪排涝体系建设、水资源优化配置和高效利用、水资源保护与水生态修复、水土保持建设为重点,逐步构建“格局合理、蓄泄兼筹、水流通畅、环境优美、人水相亲”的海绵城市建设水利工程保障体系,增强城市防洪排涝、水资源保障、水生态环境等水安全保障能力,与其它行业海绵城市建设项目和措施统筹衔接,提升城市生态文明建设水平。

### 3.2 基本原则

(1) 坚持三步走战略。保护优先,后修复、治理,再低影响开发。首先,要划定水生态红线,加强城市河湖库塘和地下水保护,促进绿色生态城市发展,为维持城市良性水循环提供必要的空间。其次,要统筹各类治理措施,以自然调蓄、净化为主,结合人工措施;以工程措施为主,结合非工程措施;以生态水利工程措施为主,结合其他工程措施。最后,要坚持低影响开发原则,在拦蓄工程建设上可化整为零,推广建设对城市环境影响较小的橡胶坝、塘坝、小型水库及地下水库,降低对生态环境的冲击。

(2) 坚持规划引领。科学编制生态水利规划,发挥规划的约束和引领作用,做好相关规划衔接。化被动为主动,合理利用生态水利工程进行雨洪管理,科学制定规划计划。将海绵城市建设中水利工程措施和要求,统一纳入城市总体规划、控制性详细规划、修建性详细规划,强化与流域和区域综合规划、防洪排涝规划及城市道路、市政排水、园林绿地等相关专项规划衔接,统筹协调流域上下游、城市建成区内外、地表水与地下水、防洪排涝与雨水利用的关系,科学布局海绵城市建设,确保发挥连片效应和系统治理效益。

(3) 坚持问题导向、因地制宜。综合考虑城市水资源、降水径流、洪涝灾害、地形地貌、河湖水系分布等自然地理特点,以及城市功能定位、发展建设布局、水利基础设施等因素,合理确定水利工程建设任务目标、设计方案,推动城市发展与水资源水环境承载力相协调。

### 3.3 整体架构

(1) 对城市水系进行生态保护和恢复治理,使城市雨洪蓄滞空间增大,排泄通道畅通,提高水体自净能力。首先,应通过划定湿地保护区及建设水生态修复工程和水利风景区工程,进行水源保护和涵养,修复湿地生物栖息地。分区域和流域设置水源涵养区、水源地保护区、水生态保护区,通过植树造林、种植湿地植物及设置人工湿地、生态浮岛等生态修复措施,修复河滩及滨水带生态功能<sup>[15]</sup>。其次,在河道生态治理中,应通过河湖库塘生态清淤疏浚工程,增大河道过水断面和湖库库容,恢复和提高河湖库塘行洪、蓄洪、滞洪能力,防治内源污染,激活生态系统自设计、自组织功能,改善和提高水生态自我修复能力,激发河流自身活力。尽可能提高河流形态的空间异质性,不但要放弃裁弯取直,还要对原有平直岸线进行改造,在上中下游,河道横断面要灵动多变,平面上要纵横蜿蜒,高程上要跌宕起伏,使其符合自然河流的地貌学原理,为生物群落多样性的恢复创造条件。此外,应重视河湖库塘岸坡的生态功能,岸坡属于生态系统的湿地范畴,是水域与陆域生态系统相互联系的自然过渡带。对岸坡进行生态改造,采用透水性好、适宜生物栖息的、提高水体自净能力的生态护岸设计理念,既确保岸坡稳定,防止水土流失,又能促进河湖水资源入渗补充地下水。在水岸交接带设置浅滩、深潭、旁侧湖、滞水塘、卵石滤池、稳定塘等坑塘泽沼,增加对雨洪径流的滞蓄、承泄和净化能力。在水闸、堰、坝等落差大的挡水建筑物设置各类鱼道,为鱼类等水生生物溯游提供条件。对因城市发展而萎缩消失的湖泊、水库、塘坝、河流应进行恢复和生态治理。

(2) 以城市水系连通工程为框架,大力推进生态水网工程建设,加强地表河湖库塘水系互连互通。以城市中小河流流域为单元,以湖泊、水库、塘坝为调蓄节点和蓄滞洪区,通过渠道工程、调水工程和泵站工程进一步沟通连接河湖库塘和各类水利工程,加强库一库、库一河、河一河之间雨洪水联合调度,多流域、大范围转移超标准雨洪水,充分发挥水利工程整体防洪效益,实现河湖库塘连通、蓄调滞泄统筹、丰枯调剂、高效利用的雨洪资源配置网络,全面提高防洪除涝、雨洪水利用和供水保障能力。城市新区建设应以水网为框架规划城市布局,与流域、区域防洪规划相衔接,合理确定城市防洪排涝分区,统筹布局泄洪通道和蓄滞场所,妥善安排城市洪涝水滞蓄和外排出路。

(3) 以入渗回灌设施、拦蓄闸坝和地下水库等工程为载体,联合调度地表水、地下水,对雨洪水进行储

存、调蓄、净化和再利用。在建筑与小区、道路与广场、绿地与公园等陆域内设置透水铺装、下凹式绿地、绿化屋顶、植被缓冲带、渗透塘、湿塘、调节塘、雨水湿地、蓄水池等雨水收集设施及渗池、渗渠、渗井等入渗设施。在河湖库塘等水域完善堤防、涵闸、泵站、蓄滞场所等水利设施,提高城市防洪排涝能力。对于水文随季节变化较大的季风区雨源型、山溪型河流,可建设橡胶坝等拦蓄工程,对河道中的雨洪水进行分段拦

截、梯级蓄滞补源,利用生态护岸、湿地等自然入渗,并结合合理设渗池、渗渠、渗井等人工促渗<sup>[16]</sup>。在下垫面以下利用城市超采地下水形成的降落漏斗,通过设置人工渗灌、取水、水文监测设施及截渗坝工程,建设地下水库工程<sup>[17]</sup>,进行丰蓄枯采、多年调节,为雨洪资源管理提供空间巨大的调蓄和储存海绵体。建设海绵城市所需的生态水利工程和非工程措施详见表 2。

表 2 海绵城市所需的生态水利工程和非工程措施

名称	组成	适用范围	作用
水生态修复工程	透水生态护岸、生态清淤疏浚、丁坝、人工湿地、生态浮岛、浅滩、深潭、旁侧湖、滞水塘、透水坝、卵石滤池、稳定塘、防护林等	水环境差、水生态系统被不合理改造或破坏、水污染严重、水循环不良的城市	提高河流形态的空间异质性,恢复水域生物群落多样性,提高水体自我修复能力
地下水库工程	地表拦蓄系统、陆域雨水收集系统、回灌补源系统、地下蓄水系统、取水系统、水环境监控系统、污水排放及处理系统等	水资源时空分布不均,洪涝水宣泄不畅,河湖湿地萎缩,水环境恶化,水生态不平衡,水旱灾害抗御力低,调蓄水体不足的城市	属于大尺度末端调蓄设施,调节水资源时空分布,改善水生态环境,净化水体,是重要的城市海绵体
河道拦蓄工程	橡胶坝、翻板闸、塘坝、小型水库等	水文随季节变化较大的季风区雨源型、山溪型河流,蓄滞洪能力不足的水系	属于大尺度末端调蓄设施,提高城市对雨洪水的承泄能力,保障水域生态系统的生态需水量
生态水网工程	自然水系、人工水系、调水工程、调蓄工程、引排工程等	水资源时空分布不均,洪涝水宣泄不畅,河湖湿地萎缩,水环境恶化,水生态不平衡,水旱灾害抗御力低的城市	河湖库塘水系互连互通、统一调度、蓄泄兼筹、多源互补、丰枯调剂
湿地及水源地保护区	河湖库塘、海岸、沼泽、洪泛区、养殖水域;水源地的陆域和水域等	水生态系统脆弱,水污染严重,污水处理任务重,湿地被侵占、污染、改造、消亡的城市	保护城市湿地生态系统,防治水源地污染、保护水源地环境
水利风景区	水域、水工程、水景观等	水资源条件好,自然生态资源保持完整,景观丰富,水生生物种类繁多	有效保护水资源与水环境,促进生态系统的自我修复,增加水景观资源,生态效益、社会效益显著,创建人水和谐的规范化样板
河长制	组织对侵占河道、围垦湖泊、超标排污、非法采砂、破坏航道、电毒炸鱼等突出问题依法进行清理整治	以省、市、县、乡为单元,对行政区划内河湖建立四级河长体系	水资源保护、水域岸线管理、水污染防治、水环境治理等

## 4 结论

治理城市水问题不能只做表面文章,不能头痛医头脚痛医脚,不能将城市生态系统割裂开来单独治理,而应充分理解城市的山水林田湖是统一的生命共同体概念,发掘和利用他们之间的联系与相互作用,海绵城市的提出是雨洪管理理论的创新与发展,为新时期解决城市水问题提供了新概念、新理论。海绵城市的概念初步形成,其理论方兴未艾,仍处于不断发展和完善阶段,亟待展开进一步实践研究和理论创新,在深刻领会、准确把握其内涵和本质的基础上,探索出符合中国不同城市特色的具体实施策略,促进该理论体系走向成熟和完善。此外,工程措施不是万能药,不能奢求仅仅依靠工程措施来根治雨水问题引起

的城市病,而应充分利用工程措施的服务功能,引导、恢复、发挥城市生命体的自然活力,多策并举,综合施治,标本兼治,才是解决城市雨水问题建设海绵城市的根本之道。

### [参 考 文 献]

- [1] 水利部(水规计[2015]321号). 关于推进海绵城市建设水利工作的指导意见[S]. 2015.
- [2] 住建部(建城函[2014]275号). 海绵城市建设技术指南: 低影响开发雨水系统构建(试行) [S]. 2014.
- [3] Benedict M A, McMahon E T. Green Infrastructure: Smart Conservation for the 21st Century[M]. Washington DC: Sprawl Watch Clearinghouse, Monograph Series, 2000.

(下转第 289 页)

- drought stress and normal conditions[J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2011,6(19):4471-4476.
- [7] 温晓霞,殷瑞敬,高茂盛,等.不同覆盖模式下旱作苹果园土壤酶活性和微生物数量时空动态研究[J].*西北农业学报*,2011,20(11):82-88.
- [8] Bunna S, Sinath P, Makara O, et al. Effects of straw mulch on mungbean yield in rice fields with strongly compacted soils[J]. *Field Crops Research*, 2011,124(3):295-301.
- [9] Moslem J, Jalil A, Pour H and Hamid Z. Mulching impact on plant growth and production of rainfed fig orchards under drought conditions[J]. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 2012,10(1):428-433.
- [10] 梁美英,卜玉山,李伟,等.不同覆盖材料土壤水温效应与作物增产效应分析[J].*中国农学通报*,2011,27(9):328-335.
- [11] 陈素英,张喜英,裴冬,等.秸秆覆盖对夏玉米田棵间蒸发和土壤温度的影响[J].*灌溉排水学报*,2004,23(4):32-36.
- [12] 王中堂,彭福田,唐海霞,等.不同有机物料覆盖对桃园土壤理化性质及桃幼树生长的影响[J].*水土保持学报*,2011,25(1):142-166.
- [13] 张翼夫,王庆杰,胡红,等.华北玉米秸秆覆盖对砂土、壤土水土保持效应的影响[J].*农业机械学报*,2016,47(5):138-145.
- [14] 全国农业技术推广服务中心.土壤分析技术规范[M].北京:中国农业出版社,2006.
- [15] 吕海龙,董希斌.基于主成分分析的小兴安岭低质林不同皆伐改造模式评价[J].*林业科学*,2011,47(12):172-178.
- [16] 张义,谢永生.不同覆盖措施下苹果园土壤水文差异[J].*草业学报*,2011,20(2):85-92.
- [17] 揣峻峰,谢永生,索改弟,等.地膜与秸秆双重覆盖对渭北苹果园土壤水分及产量的影响[J].*干旱地区农业研究*,2013,31(3):26-30.
- [18] 员学锋,汪有科.不同保墒条件下土壤温度日变化效应研究[J].*灌溉排水学报*,2008,27(3):82-85.
- [19] 孙仕军,许志浩,张旭东,等.地膜覆盖对玉米田间土壤含水率和地温变化的影响[J].*玉米科学*,2015,23(3):91-98.
- [20] Roger-Estrade J, Anger C, Bertrand M, et al. Tillage and soil ecology: partners for sustainable agriculture[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010,111(1):33-40.
- [21] 陈宝玉,王洪君,滕铁龚,等.保水剂对土壤温度和水分动态的影响[J].*中国水土保持科学*,2008,6(6):32-36.
- [22] 朱小虎,陈虹.间作条件下核桃根系动态生长研究[J].*林业科技*,2012,37(2):14-16,26.
- [23] 赵长增,陆璐,陈佰鸿.干旱荒漠地区苹果园地膜及秸秆覆盖的农业生态效应研究[J].*中国生态农业学报*,2004,12(1):155-158.
- [24] 康绍忠,张建华,梁建生.土壤水分与温度共同作用对植物根系水分传导的效应[J].*植物生态学报*,1999,23(3):211-219.
- [25] 许树宁,吴建明,黄杏,等.不同地膜覆盖对土壤温度、水分及甘蔗生长和产量的影响[J].*南方农业学报*,2015,45(9):2073-2076.
- [26] 花永辉,白云岗,蔡军社,等.不同覆盖方式土壤生态效应与成龄葡萄增产效应研究[J].*北方园艺*,2009(8):37-39.

(上接第254页)

- [4] Rossman L A. Storm water management model user's manual, version5.0[M]. Washington DC: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2010.
- [5] Debo T N, Reese A. Municipal stormwater management [M]. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [6] 王超,王沛芳.城市水生态系统建设与管理[M].北京:科学出版社,2004.
- [7] 董哲仁,李文奇,孙东亚.河流生态修复[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [8] 王兴超.烟台市水生态文明建设思路及建议[J].*中国水利*,2015(17):25-27.
- [9] 姜翠玲.中国生态水利研究进展[J].*水利水电科技进展*,2015(5):168-175.
- [10] 王浩.中国水资源问题与可持续发展战略研究[M].北京:中国电力出版,2010.
- [11] 张旺,庞靖鹏.海绵城市建设应作为新时期城市治水的重要内容[J].*水利发展研究*,2014(9):5-7.
- [12] 仇保兴.海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J].*给水排水*,2015(3):1-7.
- [13] 车伍,武彦杰,杨正,等.海绵城市建设指南解读之城市雨洪调蓄系统的合理构建[J].*中国给水排水*,2015(8):13-17.
- [14] 张书函.基于城市雨洪资源综合利用的“海绵城市”建设[J].*建设科技*,2015(1):26-28.
- [15] 张敬.海绵城市理念在河道治理中的应用构想[J].*中国水运*,2015,15(9):191,220.
- [16] 王兴超.基于海绵城市理论的地下水库工程设计[J].*长江科学院院报*,2017,34(6):1-5.
- [17] 刘中培,迟宝明.大连市地下储水空间雨洪资源利用模式[J].*水利水电科技进展*,2010,30(1):35-39.