

DOI: 10.5846/stxb201408311727

王晓锋, 刘红, 袁兴中, 任海庆, 岳俊生, 熊森. 基于水敏性城市设计的城市水环境污染控制体系研究. 生态学报, 2016, 36(1): - .

Wang X F, Liu H, Yuan X Z, Ren H Q, Yue J S, Xiong S. Construction of the Urban Water Environmental Pollution Control System Based on the Ecological Ideas of Water Sensitive Urban Design. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): - .

基于水敏性城市设计的城市水环境污染控制体系研究

王晓锋^{1,2,3}, 刘 红^{1,3,*}, 袁兴中^{1,2,3}, 任海庆^{1,2,3}, 岳俊生^{1,2,3}, 熊 森⁴

1 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044

2 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400030

3 重庆大学资源及环境科学学院, 重庆 400030

4 三峡库区澎溪河湿地科学实验站, 重庆 405400

摘要: 随着城市化进程加快, 自然地表被硬化的不透水地面所替代, 城市面源污染加剧, 城市水环境恶化成为限制城市发展的关键因素。水敏性城市设计(Water Sensitive Urban Design, WSUD)提出从城市设计和生态管理角度实现城市发展与水环境保护的共同目标。本文综述了 WSUD 理论内涵、设计原则、技术体系以及隐含着其中的生态学思想, 提出当前 WSUD 理论发展需要进一步完善的技术体系, 整合生态学思想以及建立科学的效益评估方法, 并传统生态智慧关联, 为 WSUD 在我国的发展和提供科学参考。同时, 基于 WSUD 技术及蕴含于其中的生态智慧, 针对三峡库区城市水环境特点和城市面源污染特征, 兼顾城市景观优化、生物生境再造、生态服务功能优化与城市建设协同发展, 采取生态缓冲、湿地消纳和自然调控相结合的综合防控思路, 以水陆界面生态屏障综合控制为主线, 根据城市生活区-休闲娱乐区-水陆界面缓冲区 3 个空间层次, 提出城市污染源头-滨湖绿带-生态护坡-基塘湿地-自然消落带多重拦截和消纳的城市水环境污染控制体系, 形成三峡库区水敏性城市设计与建设的模版和参考, 为三峡库区城市水体污染控制提供科学依据, 促进三峡库区水质保护与城市人居环境协同发展。

关键词: WSUD(水敏性城市设计); 生态思想; 城市水环境; 控制体系

Construction of the Urban Water Environmental Pollution Control System Based on the Ecological Ideas of Water Sensitive Urban Design

WANG Xiaofeng^{1,2,3}, LIU Hong^{1,3,*}, YUAN Xingzhong^{1,2,3}, REN Haiqing^{1,2,3}, YUE Junsheng^{1,2,3}, XIONG Sen⁴

1 Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources and the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China

2 Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China

3 College of Resource and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China

4 Pengxi River Wetland Scientific Station in the Three Gorges Reservoir, Chongqing 405400, China

Abstract: For the first time in history, the majority of the world's population is located in urban areas. This milestone marks a critical turning point that will dramatically affect land and water environments. Increasingly, our cities need to be designed for adaptability and resilience to the impacts of population growth, urban densification, and increase in impervious areas, on the urban water environment. The water sensitive urban design (WSUD) has evolved from its early association with stormwater management to provide a broader framework for sustainable design and urban water management. It provides a common and unified method for integrating the interactions between the urban built form and the urban water cycle environment. This paper presents an overview of theory meaning, key principles, and technical architecture of WSUD, and

基金项目: 国家科技重大专项(2013ZX07104-004-05); 国家自然科学基金面上项目(51278505)

收稿日期: 2014-08-31; **修订日期:** 2015-07-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hliu63@sina.com

at the same time, ecological ideas of WSUD has been summarized combined with the traditional ecological wisdom, which comprises the “all things together” theory, the idea of “*daofaziran*” (following nature’s lead), “design with nature”, and the idea of “ecological systems”. WSUD technologies include green roofs, rain gardens, bioswales, soakaways, wet basins, dry basins, etc. However, to date, few studies have been conducted on the classification of all of the current technologies. In this paper, the WSUD technologies are categorized into three types according to the functions of different technologies: Water Balance, Water Quality, and Water Conservation. For the development of the WSUD worldwide, especially in China, which faces a more serious challenge because of rapid urbanization, further studies on creating technical architecture and summarizing ecological ideas are required. Kaixian County located in the Three Gorges Reservoir area has become a representative water-sensitive urban area because of the water level control, splitting urbanization speed, and accompanying potential water environment crisis. In order to explore an fitting ecological restoration model to overcome the contradiction between high-speed urbanization and water environment security, this paper employs Kaixian as the example to design the urban water environmental pollution control system, based on the understanding of the ecological ideas of WSUD and the application of the WSUD technology. The whole design was divided into three parts: source control, process control, and receiving water control. The source control mainly used the green roof-ecological wall-rain garden system to decrease the source of pollutants; the process control was divided into four belts: recreation belt, ecological slope belt, landscape dick-pond belt, and natural drawdown belt, different WSUD strategies were implemented for every belt and some possible solutions were proposed for the contaminated urban water bodies. This design includes multi-stripe and multi-function modes that consider not only the physical elements of a place that provide the functional value, but also those elements that create a congenial atmosphere by enhancing the ‘sense of place’ (psychological value). The “multi-tape mode” will provide a good example of controlling water pollution for other urban areas located in the TGR region.

Key Words: water sensitive urban design; ecological ideas; urban water environment; pollution control system

水是城市发展和人类生存的核心要素。随着全球城市化进程加快,自然水循环越来越受到人类活动的影响^[1-4]。据统计,截至 2011 年底,中国城市水体水质大多低于Ⅲ类水质标准,三分之一以上城市河段为重度污染,城市水环境面临严峻挑战^[5]。自上世纪末,政府开始严格控制工业废水、生活污水的排放,全国各大中型城市开展了污水处理,然而,近年来,大部分城市水体污染程度不减反增,城市水环境安全成为限制城市发展的关键因子^[6]。随着研究和实践的深入,人们开始意识到城市体系逐渐成熟,原本的绿色渗水地面被屋顶、停车场、路面、广场等不透水地表代替^[7],一方面增加了城市内涝风险,另一方面,众多污染物通过雨水径流进入城市水环境,形成对城市水环境更具威胁的城市面源污染^[8-9]。城市发展过程中迫切需求一种协同发展的可持续的水环境管理体系。

为了应对城市化进程对水环境的负面影响,研究者致力于把城市水环境问题和城市规划设计结合并提出了多种城市水管理策略,如低冲击开发模式 (Low Impact Development, LID)^[10],可持续城市排水系统 (Sustainable Urban Drainage Systems, SUDS)^[11-12],低影响城市设计与发展 (Low Impact Urban Design and Development, LIUDD)^[13]以及水敏性城市设计 (Water Sensitive Urban Design, WSUD)^[14-15]等。LID、SUDS 以及 LIUDD 均是通过设计合理的排水系统和污水处理系统实现城市化过程中的水环境影响最小化,而 WSUD 是基于 LID 而提出的综合可持续城市水生态管理框架,目的是实现城市建成形态与城市水循环协同发展,保护水生态资源,同时提供城市生态环境的恢复力^[16]。面临气候变化、城市人口激增、水环境污染等挑战,WSUD 理论为同时实现城市发展、保护水源、城市生态系统恢复、应对气候变化等提供了可能^[17]。WSUD 理论在澳大利亚、美国、法国、新加坡等国家被视为未来城市发展与城市水环境管理的关键理论^[16,18-19]。

WSUD 在中国的研究尚处于初级阶段,仅有少数研究者针对 WSUD 的基本原则和内容^[19]、城市设计的启示^[19,20]、景观建筑的借鉴以及外延设计^[21]进行了描述和探索。WSUD 理论在中国的实践更是少之又少,仅龚

清宇等^[22]、王鹏等^[20]对 WSUD 在我国的发展和应用的进行了探索。然而,这些研究对 WSUD 的理解仍然处于雨洪管理和水处理的初级阶段,对 WSUD 理论中更重要的生态学思想的认识薄弱成为限制其在我国发展的重要原因。

当今的中国城市发展速度极快,城市人口压力剧增,全国城市化面积迅速提高,新兴城市和旧城改造随处可见,尤其在三峡移民工程的带动下,三峡库区城市发展速度远超其他地区,这也为三峡库区水环境安全带来了极大威胁^[23-24]。如何应用生态学的方法解决城市化带来的库区水环境安全问题,已经成为当前城市规划和生态学科研究的热点^[25]。为探索 WSUD 和三峡库区城市水生态可持续发展的有机结合,本文基于对 WSUD 技术及蕴含于其中的生态智慧的探索,旨在推进生态智慧在新时期城市水污染控制中的应用,构建基于 WSUD 生态学思想的城市水污染控制体系模版和参考,以期为 WSUD 在我国的发展与研究提供科学参考与依据,从而有效促进库区水体与城市人居环境协调发展。

1 水敏性城市设计(WSUD)介绍

水敏性城市设计(WSUD)的定义不断发展,但仍没有统一的定义^[26-27]。根据 NWC 的定义,WSUD 指综合了城市设计和城市水环境的管理、保护和保持,旨在控制城市发展过程中对城市内及周边水文环境的影响^[28],以确保城市发展对自然水文和生态过程的敏感性^[29]。关于 WSUD 的研究主要集中在理论内涵^[16-19,29]、基本原则^[30]、目前通用的技术体系^[16,30-31]以及案例分析^[32-33],个别研究者基于生物多样性调查对 WSUD 的生态学意义^[15]进行了分析。

1.1 WSUD 理论内涵

WSUD 的根本出发点是生态可持续发展(Ecologically Sustainable Development, ESD)^[16],根本要素是社会可持续发展和城市水环境可持续管理^[34],其根本目的是保护水源,同时提供城市生态环境的恢复力,最终实现城市建设形态和城市水循环的协同发展^[35]。WSUD 的过程就是将水环境可持续管理、城市规划、景观设计与生态恢复相结合,通过整合资源和学科交叉,平衡城市发展与城市水循环,提升城市环境质量和宜居性(图 1)。

在工业废水与生活污水得到有效处理的前提下,传统的城市规划和设计中更注重高效率的排水系统以快速收集并排出雨水径流^[36]。与传统水处理方式不同,WSUD 理论强调,作为一个完善的城市水环境管理模式,雨水径流必须被纳入到城市设计和规划中^[16],同时,WSUD 理论将雨水作为一种重要资源,通过雨水收集利用等技术来减少城市地表径流、处理径流污染、回收利用雨水、增加雨水的下渗和蒸发,进而恢复城市的自然水循环过程。WSUD 理论提出从源头和过程上处理城市雨水,减少雨水径流和污染负荷是城市水环境可持续管理的重要目的之一^[37]。

Lloyd 认为 WSUD 是旨在把城市发展对周边环境的水文影响减到最小的城市规划和设计的新哲学和新途径^[38]。澳大利亚国家水工程委员会提出:WSUD 是一种规划和设计的哲学,旨在克服传统发展中的一些不足,从城市战略规划到设计和建设的各个阶段,它将整体水文循环与城市发展和再开发相结合。WSUD 结合了工程和非工程措施,并且能够影响开发过程中居民的用水行为。

WSUD 对城市面源污染防治的设计结合土地利用控制、源头控制、径流控制、排放控制等综合方案,从雨水收集、径流过程到最终进入受纳水体,总体控制和削减污染物含量,同时发挥景观、美学、娱乐、休闲等潜在价值。WSUD 既是一种水域生态系统保护策略,也是一种维持城市长期供水的有效途径。

1.2 WSUD 技术体系

WSUD 技术就是把城市雨洪管理技术合理的融入城市开发项目,镶嵌在未来的城市建成形态中^[39-40]。WSUD 技术可以按照应用尺度和功能分类。WSUD 技术按尺度分类是基于 WSUD 的设计空间大小,从地块尺度到流域尺度进行的分类体系,基本可分为单个住户-建筑-小区-区域-市-省(-流域)等多个等级,设计过程遵

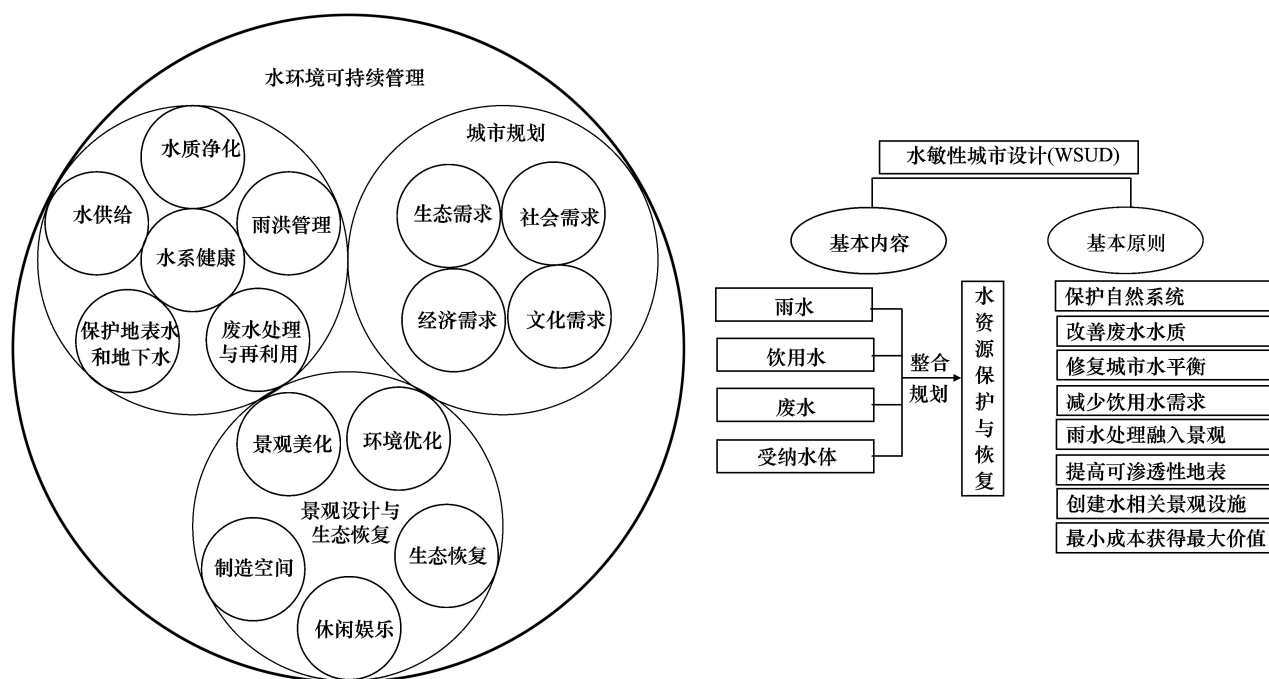


图1 WSUD 理论内涵(左)与基本原则(右)

Fig.1 The theoretical connotation (the left one) and Key principles (the right one) of water-sensitive urban design

循从大到小,从面到点的原则^[30,41]。功能分类可以将 WSUD 技术分为水平衡技术、水质净化技术以及节水技术^[31,42]:水平衡技术主要通过提高城市渗透地面,拦蓄雨水等达到地下水补给、减少径流侵蚀等目的,最终实现城市水平衡控制;水源保护技术主要利用生物吸收、物理沉淀、化学分解实现雨水污染负荷削减、保护城市地表水质的目的;节水技术则主要是通过节水园艺、雨水再利用、科学管理等以减少城市耗水和增加城市水的自给,通过自然的方法减少城市耗水量是 WSUD 节水技术的关键内容。Edmiston 利用本地和外来耐旱物种设计的低水花园 (Low Water Gardens) 为节水园艺开创了先河,并强调植物筛选是节水园艺的核心^[43]。Hitchmough 等^[44]进一步基于耐旱植物的筛选提出了城市混播花甸设计技术,其强调本地物种的重要性。也有研究者根据公众需求对 WSUD 进行技术分类^[45-47],主要分为雨洪管理技术、景观优化技术、场所营造技术、生物生境再造技术、生态系统恢复技术、水质净化技术以及综合多功能技术,但基于当前 WSUD 目标多元化的发展趋势,这类针对单一需求的技术分类并不利于 WSUD 的发展。

考虑城市水环境污染控制,Evangeliisti^[48]将 WSUD 技术分为植物控制技术、雨水储留技术以及雨水净化技术。植物控制是 WSUD 水质净化技术的核心,包括生物沟 (Bioswale) 和植物篱 (Hedgerows) 等技术,生物沟也叫做生物过滤系统、生物截留系统、水质控制系统、生物滤器或生物过滤洼地,是一种被草本植物覆盖的简易沟渠或者洼地,一般有水平流向和垂直流向 2 种形式,水平流通过植物吸附、吸收、物理沉淀、生物分解去除污染物,垂直流的生物沟由植物、过滤介质及底部穿孔管构成,处理后的径流由穿孔管收集并排放^[49-50]。生物沟可以有效防止径流引起的土壤侵蚀,拦截并固定雨水径流悬浮颗粒^[51],Xiao 等^[52]研究通过生物沟能够有效削减 88.8% 的径流量和径流中的矿物质、重金属、有机碳和固体悬浮颗粒,综合污染负荷削减率达到 95.4%;植物篱类似一个过滤带,能够有效拦截和富集坡面径流携带的大量营养物和污染物^[53-54],蒲玉琳等^[53]研究表明植物篱不仅能够改善土壤物理结构,而且能够有效提高原土壤 54.1% 的 P 含量,说明植物篱通过坡面富集 P 素而减少 P 素流失。雨水储留技术包括生态滞洪池、生态储留池、湿洼地、雨水花园等技术^[55]。Larice 等^[56]指出足够数量生态滞洪池不仅能够控制暴雨径流和补给地下水,而且可以通过生物吸收和物理沉降起到改善水质的作用,生态储留池是城市雨水储留的关键技术,Chapman 等^[57]研究表明,路面的机油有 92%—96% 被生态滞留池吸滞,79% 的溶解性铜和 80% 以上 Pb、Zn 被有效拦截,N、P 的削减率也分别达到 30% 和

37%, Backstrom^[58]研究表明,当径流污染物浓度较高时,草地湿洼地可以通过沉降颗粒物而保留 80% 以上的径流污染物。Aaron 等^[59]研究表明,改进的雨水花园设计能够使径流总量减小 52%,洪峰峰值降低 62%,洪峰延滞时间达到 16 分钟。Sivajini 等^[60]研究表明雨水花园能够高效蓄水和削减雨水径流携带的 N 素营养,对硝态氮和总氮的削减率均达到 75% 以上,是一种典型的可持续和经济节约的城市雨水储留-净化技术,在高污染负荷前提下,一种饱和-非饱和两相雨水花园设计能够有效移除地表径流中 91% 的硝酸盐、99% 的磷酸盐以及 90% 以上的阿拉特津、草甘膦、麦草畏等有机污染物^[61]。雨水净化技术主要包括生物过滤、人工湿地、潜流通道、绿色屋顶等技术;Feng 等^[62]在大型生物渗滤池的环境效益中提出,道路两侧设置生物渗滤槽对城市径流中 Pb、Zn、Cu 等金属离子的滞留率均在 85% 以上,生物过滤器还能够削减 80% 以上的 TPHs、甘草磷、DBP、DEHP、茈和萘以及 20%—50% 的阿特拉津和西玛津等微量有机污染物^[63]。城市人工湿地是一种具有多功能的城市水环境保护策略,Jia 等^[64]利用一个 4 级人工湿地系统对城市河流水环境的 COD、TP、TN 和铵态氮去除效果研究,结果表明移除率分别达到 60%、70%、70%,年削减量分别达到 3.16、0.03、0.57 和 0.13 t/a。Martín 等^[65]对其设计的一个垂直潜流人工湿地运行一年后的效果分析,结果显示,其对城市废水中总磷削减率达到 77%,氨氮达到 95%,总氮达到 24.4%,潜流通道技术多与人工湿地结合,以提高水环境污染控制效率。绿色屋面是径流水环境中多种污染物和营养物的汇,对城市面源污染源头控制具有重要意义,张千千等^[66]研究表明绿色屋面是 TSS、TP、BOD₅、COD、NH₄⁺-N、DZn 和 DPb 等污染负荷的消减率达到 90.53%、49.38%、41.31%、36.48%、35.45%、28.27% 和 14.20%。以上 WSUD 技术均属于城市绿色水利基础设施 (Urban Green Water Infrastructures) 的重要内容,Kabir 等^[67]研究表明城市绿色水利基础设施能够滞留城市地表径流中超过 75% 的 Pb、Zn、Cu、Cd 等金属离子,削减至少 40% 的 N、P 营养物和 50% 的颗粒悬浮物,其中生态滞留池、砂滤池、透水铺装对污染物的滞留效果显著。

WSUD 技术研究较多^[10-15,49-50,68],其中大部分技术已经被很多城市建设所采纳。然而,目前 WSUD 技术主要还是侧重于雨洪控制能力的预测和污染控制效益,而忽略了其在城市水循环过程和城市宜居性能的潜在作用,WSUD 技术对城市地下水补和人类感知因素^[69]的量化研究尚属空白。WSUD 技术体系的构建尚不完善,尤其缺乏统一的技术分类和科学的技术评估研究,因此未来 WSUD 技术标准和体系构建是亟待解决和研究的重要内容。

2 水敏性城市设计 (WSUD) 的生态学思想

面对城市化加快、气候变化、极端天气以及水环境污染问题,国际水环境协会 (International Water Association) 在全球范围内提出“未来城市 (Cities of The Future)”计划,为全球城市发展提出了新的价值观体系^[70],同时为 WSUD 的发展提供了良好契机^[17],未来 WSUD 设计更加注重利用生态思想进行城市设计和水资源可持续管理。WSUD 遵循的生态学思想包括:万物一体、师法自然、自然设计、生态系统缓冲及恢复思想、“源”“汇”景观思想以及生态系统服务功能理论等。

2.1 万物一体

“万物一体”的经典哲学思想历史悠久,其与近代生态系统论不谋而合。《庄子·齐物论》^[71]提出“天地与我并生,万物与我为一”,程颢^[72]的“仁者以天地万物为一体”等都是我国古人对万物一体哲学思想的阐述和发展,这一思想发展到今天,强调人与自然、人与环境同为一体,协同共生。城市可持续设计理念认为人类文明是整体自然资源的一部分,地球上所有生命形式都依赖于这些自然资源^[73]。WSUD 的基本理念正是基于万物一体思想,从生态系统的角度看待城市发展,并将城市及其空间作为自然环境的一部分,因此 WSUD 更重视城市发展与城市水生态系统协同共生,重建城市生态系统相容性,连接城市建成形态及包含于其中的物质流、能量流、物种流,以跨越城市、产业及自然系统的边界^[74]。

2.2 师法自然

师法自然就是从大自然中获取灵感,遵循大自然规律。师法自然思想源自春秋时期道家思想中的“道法

自然”^[75],是当今生态学发展与应用的重要智慧。Peng^[76]认为都江堰灌溉系统设计就是对道法自然思想的应用,Xiang^[77]认同在可持续城市景观设计中道法自然思想的运用,认为这是一种生态智慧。WSUD 是基于生态工程的新型城市设计思路,必须从自然界获取灵感和智慧。Richard 和 Nanco^[17,33]等对荷兰和英国的 WSUD 评论中就强调要遵循自然规律,从自然界中获取更适合当地环境的水处理系统设计灵感,例如河流生境中的浅滩、深潭交替格局^[78]或者河岸岩石腔穴系统^[79]都能够为城市雨洪管理和水质净化提供新的思路。

2.3 自然设计(Design with Nature)

自然设计思想由 McHarg 于 1969 年提出,其著作《Design with Nature》对城市规划、景观设计、生态工程等学科发展具有深远意义^[80]。自然设计的核心是把生态系统演化过程带入到工程设计中,让自然做功,通过自然之力最低成本实现破坏生态环境的恢复^[81]。WSUD 最低成本获取最大效益原则就是最大程度利用自然过程提供的潜力,实现人与自然的协同共生。例如用生物沟代替城市硬化沟渠就是自然设计,经过长期的演化,生物沟内的生产者、消费者、分解者共存,实现高效缓冲和净化水质的目标。

2.4 生态系统思想

生态系统思想强调生态系统结构、功能的完整性。生态系统是具有生命的系统,完整的生态系统具有较强的自我调节和恢复能力,而非完整的生态系统自我调节功能差,对环境变化敏感,甚至可能迅速崩溃。生物多样性是生态系统完整性的决定因子,生境异质性是生物多样性的存在基础^[82],生物多样性决定生态系统稳定性。WSUD 强调城市和水环境系统的整体设计,强调基于生物多样性和生境异质性的城市水生态系统设计。WSUD 的最终目的是建立和恢复完整的城市水生态系统,进而依赖系统的自我调节实现水环境可持续管理^[29]。

2.5 “源”“汇”景观思想

基于大气污染中的“源”“汇”理论,陈利顶、傅伯杰等^[83]提出了“源”“汇”景观理论,将景观生态学中格局-过程有机结合,其将异质景观分为“源”“汇”两种类型,“源”景观促进过程发展,“汇”景观阻止或延缓过程发展。陈利顶等^[83]进一步提出“源”“汇”景观理论可应用于面源污染、生物多样性保护、城市热岛效应等不同领域。根据“源”“汇”景观理论,不同城市景观类型可以被看作不同的“源”“汇”景观,WSUD 正是通过对城市生态规划中“源”“汇”景观的空间格局的合理设计,进而对城市面源污染物质在异质景观中重新分配,达到控制城市面源污染的目的。同时 WSUD 理论针对生物多样性创造目标物种的“源”景观,即物种栖息斑块,减少目标物种“汇”景观,即人类或者天敌占据的斑块,进而针对城市生物多样性保护提出更优的城市规划。“源”“汇”景观思想指导 WSUD 通过探究不同景观类型在空间上的动态平衡对生态过程影响,寻找到适合一个地区的景观空间格局,推动 WSUD 中景观格局和生态过程的深入研究。

2.6 生态系统服务功能理论

生态系统服务功能是指生态系统与生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件和效用,其维持和提供需要三大要素:生态系统结构、生态系统过程、生境^[84]。生态系统结构完整性是生态系统服务功能得以维持的基础,生态系统过程是生态系统功能形成的动力,生境异质性是生物多样性的基础。生态系统服务功能理论促使 WSUD 从单一功能向多功能设计转变,WSUD 理论实践中开始更全面的考虑生态系统的供给服务、调节服务、文化服务和支持服务,使 WSUD 设计目标和对象更加明确。吕一河等^[85]将生态系统服务多样性与景观多功能性相结合,提出生态系统服务多样性对城市景观设计的指导性和二者的同源性,因此,未来 WSUD 理论的拓展更需要与生态系统服务理论结合,实现 WSUD 的科学管理和价值评估。

此外,我国生态学家马世骏提出了城市复合生态系统的理论^[86]和日本学者岸根卓郎提出的城乡融合设计^[87]也是 WSUD 所遵循的重要生态学思想。前者认为城市生态系统可分为社会、经济、自然三个亚系统,各个亚系统又可分为不同层次的子系统,彼此互为环境;后者的基本思想是创造自然与人类的信息交换场,创建“同自然交融的社会”。两者对 WSUD 在不同形态和发展阶段的城市规划中的应用具有重要引导价值。目前,关于 WSUD 生态学思想的总结相对较少,未来关于 WSUD 生态思想的演化和发展需要提出更完整的体

系,以促进 WSUD 的推广和发展。

3 城市水环境污染控制体系

WSUD 是以更谦逊和综合的方式来处理城市发展、水和人类生活之间关系的规划和设计新理念。它将城市整体水文循环和城市的发展和建设过程相结合(包括从战略规划到设计、建设和维护的各个阶段),旨在将城市发展对水环境影响降低到最小。面对目前水环境问题凸显的三峡库区城市,WSUD 提供了先进的设计思想和技术方法。本文下面针对三峡库区城市水环境特点,探索该特殊区域城市水环境污染控制体系。

3.1 三峡库区城市水环境污染发生特征

在三峡移民工程的刺激下,三峡库区城市沿河流成触角状快速扩展^[88]。一方面,水环境面临城市面源污染考验(图2),城市面源污染具有时空分布离散性、污染途径随机多样性、污染成分的复杂多变性、污染源和污染成分监控困难性、污染影响滞后性等突出特点^[89-91],为城市水环境污染防控研究提出了巨大挑战^[92];另一方面,三峡库区城市内水域具有一条水位落差 30 米的消落带,夏季出露,植物生长,拦截并吸收大量营养和污染物,是城市面源污染的“汇”,而冬季淹没,夏季植物死亡分解,营养与污染物释放,成为污染“源”,研究表明这种季节性水淹是整个库区水质恶化的重要因素^[93-95];此外,城市内的消落带退水初期景观质量极差,长期厌氧环境产生大量 CH_4 、 N_2O 等温室气体^[96]以及 NH_3 和 H_2S 等臭气,导致城市人居环境质量变差。因此,三峡库区城市建设迫切需求尊重自然规律,学习前人生态智慧,为城市水环境可持续发展开辟新思路。

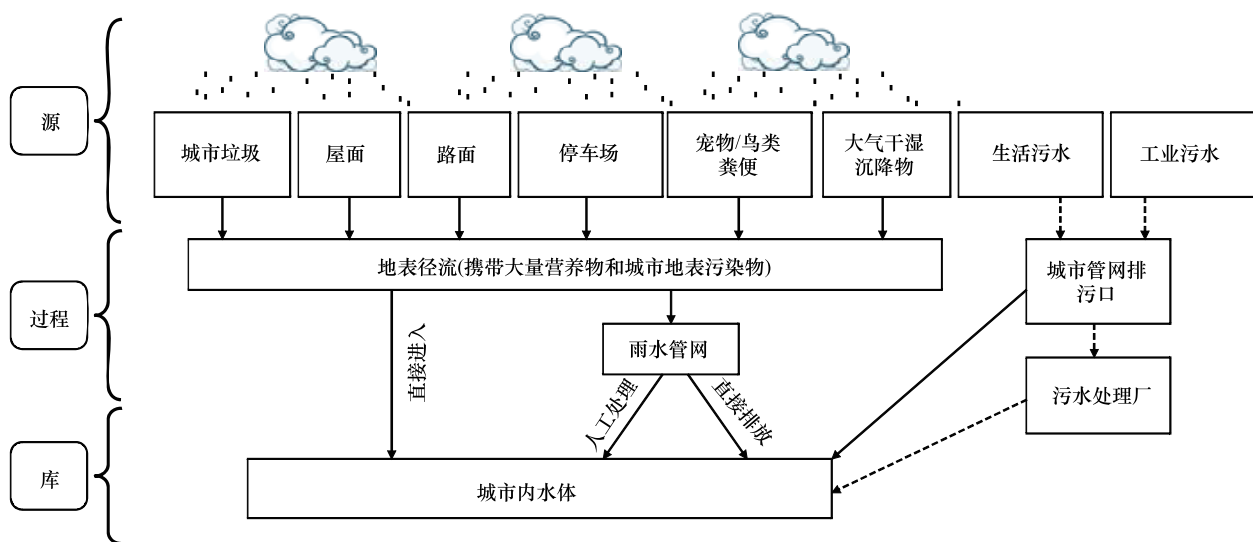


图2 城市面源污染发生过程示意图

Fig.2 Forming process of urban non-point pollution

3.2 构建思路与技术路线

生态系统是有生命力的系统,基于 WSUD 生态学思想,整个城市水环境污染控制体系构建目标是提高城市生境异质性,进而达到提高城市生物多样性和恢复城市生态系统生命力为根本目的,提高城市生态系统自身的调节能力和水循环过程。基于 WSUD 生态思想和三峡库区城市形态特征,提出城市水环境污染控制体系构建技术路线(图3)。将水环境污染过程分为源头、过程和库3个部分,进而以城市水体为中心,反向推演将城市分为受纳水体区、水路界面缓冲区、休闲娱乐区、城市生活区,其中城市生活区是污染源,休闲娱乐区是城市宜居性的保障,水路界面缓冲区是污染物进入受纳水体的最后一道屏障,受纳水体既是污染物的库,也是重要的污染消纳体。同时,体系构建兼顾雨洪管理、景观优化、休闲娱乐场所营造、生物生境再造、生态环境优化与城市建设协同发展,采取生态缓冲、湿地消纳和自然调控相结合的综合防控思路,以水陆界面生态屏障综合控制为主线,根据城市生活区-休闲娱乐区-水路界面缓冲区3个空间层次,提出城市污染源头-公共开放场

所(滨湖绿带)-生态护坡-基塘湿地-自然河岸带多重拦截和消纳城市面源污染技术体系。

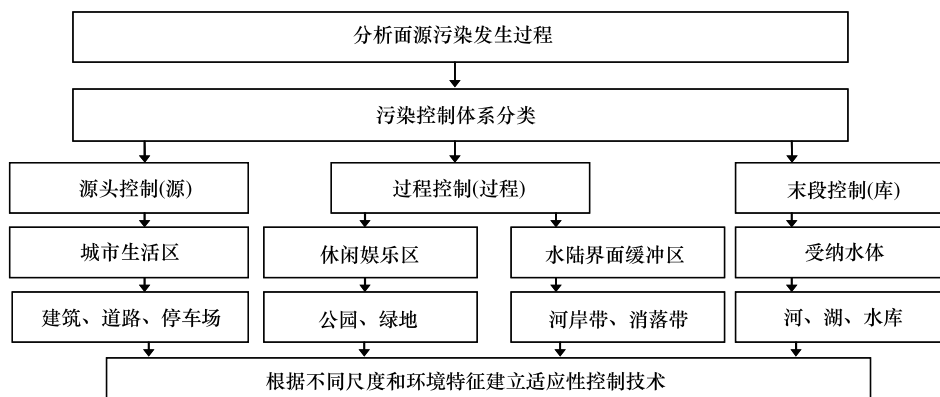


图3 城市水环境污染控制体系构建技术路线

Fig.3 Technology roadmap for construction of the urban water pollution prevention

3.3 构建内容

3.3.1 城市污染源控制体系构建

城市降雨径流具有显著的初期冲刷效应(First Flush, FF),即在降雨径流的初期阶段,地表径流携带大量污染物^[97-98],导致径流初期产生一个较高的污染物浓度峰值。因此,城市降雨径流的源头控制体系尤为重要。

城市径流污染源包括道路、停车场、建筑等不透水面^[99]和陡坡绿地等部分透水面。源头控制体系构建主要是在各污染源发生地采取措施将降低径流同时拦截和削减污染物,避免污染物通过雨水径流传输。建筑物源控制技术主要包括绿色屋顶(Green roof)、生态墙(Ecological Wall)、雨水花园等。绿色屋顶对暴雨径流中N、P营养物和Cd、Cu、Mn等金属元素含量具有显著的削减作用^[7,100],能够有效减小径流峰值;生态墙可以提供生物生境,并且减少雨水直接冲刷墙体增加污染负荷和缓冲径流,对雨污控制和城市生物多样性恢复具有重要价值^[101];雨水花园是建筑物源的最后一道屏障,具有较好的污染消纳能力^[102-103],同时具有美化景观和提高城市生物多样性的价值。陡坡绿地虽然具有透水性,但当降雨量大或持续时间长,仍然会形成地表径流。在不破坏现有自然资源和景观的基础上,可以在坡面绿地设置适当大小和深度的干/湿洼地(Swale)^[104],洼地内种植既能耐水淹又能耐干旱的植物,同时保留少量明水面提供水生昆虫生境,不同干湿洼地之间通过生物沟串联,在陡坡绿地上形成径流-储水-渗滤网络。

经过绿色屋顶、生态墙、雨水花园、干/湿洼地等初步过滤、渗透、净化后的雨水是重要的资源。结合WSUD理论中城市雨水资源利用的新理念^[17](图3),将这部分雨水引入生态储留池(Bioretenction)^[16]、湿地、污水处理厂等,出水可用于灌溉、景观水体、洗衣、冲厕等,进而构建雨水利用的“闭合循环”(close-the-loop),改善城市水循环过程,有效控制污染物直接进入城市水体。本文认为,未来城市水环境污染控制体系构建必须与城市水资源利用相结合,从生态思想和生态恢复的角度,结合城市设计和管理,建立城市-水-人协同发展的城市水循环体系。

3.3.2 过程控制体系构建

过程控制(Process Control)是WSUD理论的重要内容^[16]。城市面源污染的复杂性和分散性决定了其无法通过传统点源污染方法和思路得以有效控制,必须将整个城市面源污染作为一个系统,而其最终对城市水体造成污染必须经历多过程实现。由此基于WSUD和生态学中的过程价值(Processes as Values)^[80],本文以城市水体为中心,构建自然消落带、景观基塘湿地带、生态护坡带、休闲娱乐带以及城市居民带,城市居民带属于源头控制范畴,其余4带根据各自特点针对性实施功能设计(图4)。

(1)休闲娱乐带(滨湖绿带):

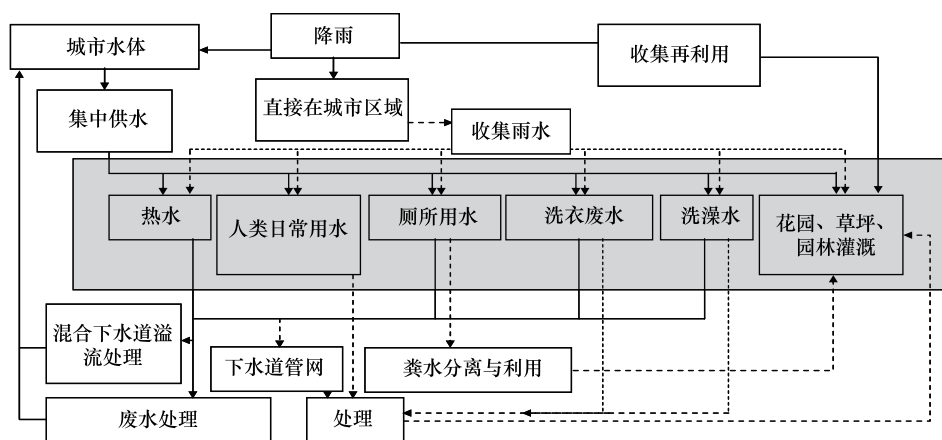


图4 传统城市水资源利用(实线)和WSUD水资源利用新理念(虚线)

Fig.4 The conventional (solid lines) and the added components of direct use and reuse of water in WSUD (dashed lines)

以绿带形式 (Green Way) 存在的沿湖休闲娱乐带是城市宜居性的重要保障。该区域因其硬化地面面积小,生物多样性远高于城市其他功能区,且整个滨湖/河公园沿湖而建,形成一道污染拦截的重要屏障,这一功能往往被研究者忽视。本研究将城市滨湖/河公园纳入城市面源污染控制体系,作为水敏性城市设计的重要内容。

基于 WSUD 的生态学思想,滨湖/河绿带设计中增设生态步道 (Ecological Trails) ^[105],减少硬化铺装,提高渗滤效率,设计植物篱、生物沟、生物洼地、树池洼地等 WSUD 结构提高城市面源污染控制效率,同时结合生物塔技术营造生境异质性,提高城市生物多样性。滨湖绿带的公共空间设立景观型雨水储留池和微型雨水人工湿地,充分利用雨水资源,发挥灌溉、景观、娱乐功能。通过合理的设计和管理,充分发挥滨湖绿带在降低径流峰值、补给地下水、恢复城市生境、调节小气候、缓解城市热岛效应等功能 ^[106]。

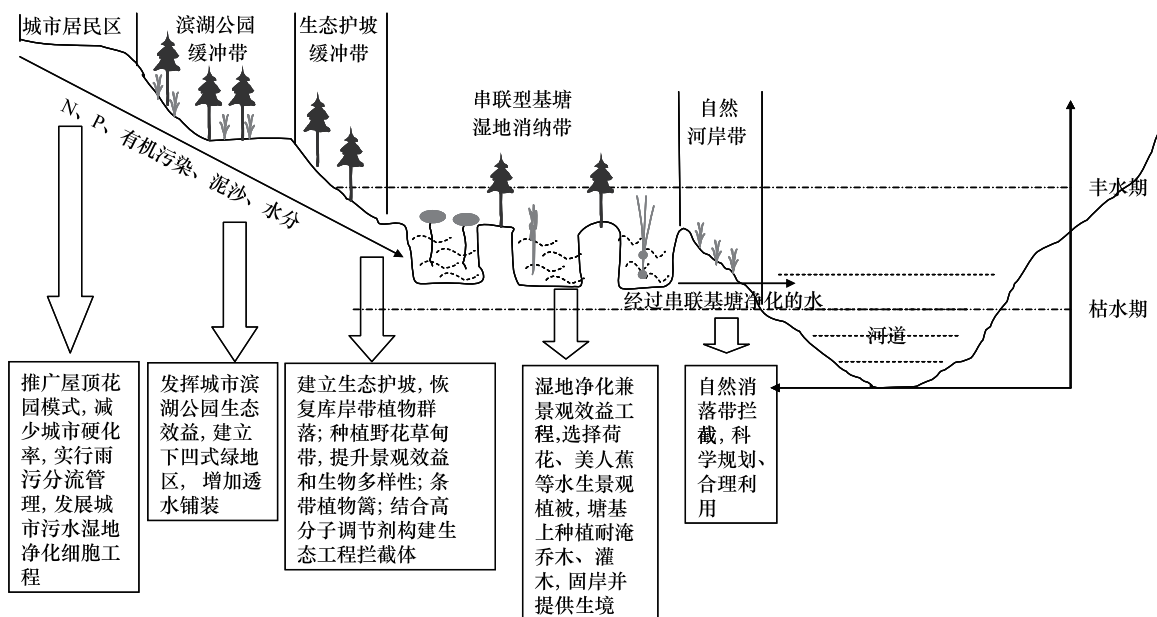


图5 城市水体污染防控多带多功能缓冲体系

Fig.5 The multi-stripe and multi-function buffer system for urban water pollution prevention

(2) 生态护坡带

生态护坡是一种基于低冲击开发模式 (LID) 的城镇河道建设方案,是恢复城镇河岸生态系统、控制地表

径流污染、保持河岸水土兼顾河岸开发的重要策略^[107],也是城市面源污染控制的关键技术^[108]。目前,生态护坡理论和技术已经比较成熟,而植物筛选和配置是生态护坡需要解决的关键问题^[109]。兼顾景观美化和节水需求,生态护坡地被植物可种植耐受性强的野花,形成野花草甸,提高景观效益。此外生态护坡对城市生物多样性恢复具有重要贡献,陈小华等^[110]研究表明,不同类型生态护坡下植物、动物多样性均明显提升,河岸生态系统完整性、稳定性以缓冲性都得到有效恢复。

(3) 基塘湿地带

基塘湿地带的构建旨在恢复河岸带水塘生境,其可以与自然水体通过洪水脉冲或人工因素(筑坝调水)进行水文交换,具有重要的削峰、滞洪、缓流和污染物消纳功能。本课题组在充分利用消落带土地资源和地形特色,在开县澎溪河进行了消落带基塘生态工程试验示范,取得显著的经济效益、环境效益、生物多样性恢复以及景观效益^[111],为消落带生态友好型利用提供了思路。之后其将消落带基塘模式推广至城镇,在开县汉丰湖开创性提出了景观基塘模式(Landscape Dike-Pond Model)^[112-113],即在 172—175m 地势相对平坦的湖岸带,挖泥成塘,堆泥成基,形成一系列大小不同、形状各异的湖岸水塘,构成滨湖基塘系统^[113]。这些塘系统相互串联,冬季淹没于水下,夏季依靠雨水管网和部分处理后的生活污水维持水环境。Li 等^[111-112]经过多年试验筛选出太空飞天(荷花)、鸢尾、香蒲、菖蒲、美人蕉等 10 多种耐水淹且耐旱的植物种类,这些植物均为近自然管理,维护成本低廉,其生长季节能够创造美丽田园风光,同时净化水质和提供生境,是 WSUD 设计城乡一体化思想和“源-汇”景观思想的重要体现。通过合理配置和设计,城市景观基塘模式在解决城市消落带环境问题方面发挥了重要作用,是三峡库区城市水环境管理的创新模式。

(4) 自然消落带(植被恢复带)

这里的自然消落带植被恢复带是指低水位期间,介于景观基塘系统与低水位水面之间的自然消落带部分,是城市面源污染物进入城市水体的最后一道生态屏障防线,也是城市生态环境中的原生植被区域,具有重要的生物生境功能,所以自然消落带设计的根本原则就是保持原貌和自然恢复。对于自然消落带的科学管理和合理恢复能够进一步发挥其生态屏障功能。目前对自然消落带的恢复研究主要侧重于耐水淹植物的筛选和耐淹机理研究^[114-115],同时也有部分研究者建议将植物篱技术、奢侈吸收 N、P 植物选育技术引入消落带管理^[116]。本课题组也长期针对三峡库区消落带生态恢复进行耐淹乔木、灌木及草本植物的筛选和配置,并实施了消落带林泽工程示范区,取得了显著效果,但这一工作在城市内消落带的实施仍存在不小挑战。目前三峡库区城市水体自然消落带恢复遵守自然选择原则,尽可能避免人为干扰,保持原始自然风光,让整个城市与自然更加融洽,对三峡库区城市发展具有较好的示范效果。

3.3.3 末端控制体系构建

末端控制是指经过一系列面源污染防控措施后,仍会残留一小部分污染物进入受纳水体,微量污染物积累效应对城市内湖等非流动水体和河流等流动水体下游产生负面影响,因此必须对受纳水体的自净能力进行科学评估,并尽可能提升受纳水体自净能力。末端控制主要是对河流健康恢复和水环境治理过程,基本原则包括整体性原则、自恢复原则、景观优化原则等。水生生态系统完整性是决定水体环境承载力的根本因素,利用生态学原理对湖、库、河流等城市水体进行设计和治理末端控制的主要内容。本文提出的末端控制技术包括生态浮床^[117],是城市面源污染防控体系的关键技术,对城市水体净化和景观美化具有重要作用。

5 结论与展望

水敏性城市设计(WSUD)是城市生态可持续发展的重要策略,目前已受到全球多领域学者的广泛关注^[16-19,28-32],其为城市设计和水环境安全的协同发展提供了技术基础,是未来城市生态设计发展的重要趋势。根据国内外研究现状,部分研究者已经对 WSUD 理论内涵、基本原则等进行了总结,并结合墨尔本、新加坡等地的设计实践对 WSUD 进行了效益评估。但到目前为止,对 WSUD 技术体系的整理和生态学思想的总结以及其效益评估体系的建立等尚未见报道,尤其在未来城市发展越来越重视生态智慧运用的背景下^[66],生态智

慧对 WSUD 的发展具有重要的启示意义。因此,对上述相关内容的完善和整理是未来 WSUD 研究的重点。而我国对 WSUD 理论的认识尚处于初级阶段,对 WSUD 理论内涵的理解尚不成熟,这也影响了 WSUD 在我国的实践和推广,本文对 WSUD 理论内涵的整理和补充可以为 WSUD 在我国的发展起到积极作用。

基于 WSUD 生态学思想,本文提出了以三峡库区城市水体为中心,向外依次构建多带多功能面源污染防控体系,从城市居民区的建筑、道路、停车场等不透水面的源头控制体系,到以滨湖公园带-生态护坡带-景观基塘湿地带-自然消落带植被恢复带的过程控制体系构建,均是对 WSUD 理论的深化和拓展,源头控制和过程控制对 WSUD 技术的科学使用是体系功能多样性的重要保障。本文针对三峡库区城市水环境保护提出了创新性设计模式,同时也为三峡库区城市水环境保护提供了示范和参考。本文提出的城市水污染控制体系构建的核心内容是对 WSUD 生态学智慧的理解和对 WSUD 技术的运用,结合 WSUD 水资源管理理念,形成城市与自然协同发展途径的模版和参考,对 WSUD 在我国城市水环境保护中的应用具有启发和引导意义。

参考文献(References):

- [1] Aaron J Beck, Sergio A Sañudo-Wilhelmy. Impact of water temperature and dissolved oxygen on copper cycling in an urban estuary. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(17): 6103-6108.
- [2] Jiho Lee, Gijung Pak, Chulsang Yoo, Sangdan Kim, Jaeyoung Yoon. Effects of land use change and water reuse options on urban water cycle. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(6): 923-928.
- [3] Sheetal Sharma, Alka Bharat, Vinay M Das. Statistical change detection in water cycle over two decades and assessment of impact of urbanization on surface and sub-surface water flows. *Open Journal of Modern Hydrology*, 2013, 3(4): 165-171.
- [4] Amrita Pal, He Y L, Martin Jekel, Martin Reinhard, Karina Yew-Hoong Gin. Emerging contaminants of public health significance as water quality indicator compounds in the urban water cycle. *Environment International*, 2014, 71: 46-62.
- [5] 中国环境保护部环境监测司. 2011 年中国环境状况公报. 2012-6-06[2013-5-31]. http://jes.mep.gov.cn/hjzl/zkgb/2011zkgb/201206/t20120606_231040.htm.
- [6] Ma S S, Xu Y P, Shao Y L. Study on novel structures the coordinated development between urbanization and water environment in Huzhou City, China. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 209-211: 1040-1047.
- [7] M Razzaghamanesh, S Beecham, F Kazemi. Impact of green roofs on stormwater quality in a South Australian urban environment. *Science of the Total Environment*, 2014, 470-471: 651-659.
- [8] Cen K, Hou M, Neumann T, Norra S, Stüben D. Chemical composition of urban street sediments and its sources. *Journal of China University of Geosciences*, 2004, 15(1): 75-83.
- [9] 宫营, 阮小红, 胡晓东. 我国城市地表水环境非点源污染的研究进展. *中国给水排水*, 2003, 9(3): 21-23.
- [10] Emily Voyde, Elizabeth Fassman, Robyn Simcock. Hydrology of an extensive living roof under sub-tropical climate conditions in Auckland, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 2010, 394(3/4): 384-395.
- [11] Anna Palla, Ilaria Gnecco, Luca G Lanza. Hydrologic restoration in the urban environment using green roofs. *Water*, 2010, 2(2): 140-154.
- [12] Virginia Stovin. The potential of green roofs to manage Urban Stormwater. *Water and Environment Journal*, 2010, 24(3): 192-199.
- [13] Marjorie Van Roon. Emerging approaches to urban ecosystem management: the potential of low impact urban design and development principles. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, 2005, 7(1): 125-148.
- [14] Simon Beecham, Rezaul Chowdhury. Effects of changing rainfall patterns on WSUD in Australia. *Proceedings of the ICE: Water Management*, 2012, 165(5): 285-298.
- [15] Fatemeh Kazemi, Simon Beecham, Joan Gibbs. Streetscape biodiversity and the role of bioretention swales in an Australian urban environment. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 101(2): 139-148.
- [16] T H F Wong. An overview of water sensitive urban design practices in Australia. *Water Practice & Technology*, 2006, 1(1): 1-8.
- [17] Richard Ashley, Lian Lundy, Sarah Ward, Paul Shaffer, Louise Walker, Celeste Morgan, Adrian Saul, Tony Wong, Sarah Moore. Water-sensitive urban design: opportunities for the UK. *Proceedings of the ICE: Municipal Engineer*, 2013, 166(2): 65-76.
- [18] Hale W Thurston. *Economic Incentives for Stormwater Control*. Abingdon, UK: CRC Press, 2012: 26-71.
- [19] 王思思, 张丹明. 澳大利亚水敏感城市设计及启示. *中国给水排水*, 2010, 26(20): 64-68.
- [20] 王鹏, 亚吉露·劳森, 刘滨谊. 水敏性城市设计(WSUD)策略及其在景观项目中的应用. *中国园林*, 2010, (6): 88-91.
- [21] 高洋. 水敏性城市设计在我国的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [22] 龚清宇, 刘伟, 李晶竹. 基于潮汐暴雨过程的城市设计及其数值模拟. *天津大学学报*, 2008, 41(4): 461-466.
- [23] Lin Y, Cai Q H, Liu R Q, Cao M. The influence of topography and land use on water quality of Xiangxi River in Three Gorges Reservoir region. *Environmental Geology*, 2009, 58(5): 937-942.
- [24] Shen Z Y, Hong Q, Yu H, Liu R M. Parameter uncertainty analysis of the non-point source pollution in the Daning River watershed of the Three

- Gorges Reservoir Region, China. *Science of the Total Environment*, 2008, 405(1/3): 195-205.
- [25] 欧阳志云, 王如松. 生态规划的回顾与展望. *自然资源学报*, 1995, 10(3): 203-215.
- [26] 蒯雪芹, 方创琳, 宋吉涛. 基于生态导向的城市空间优化与功能组织——以天津市滨海新区临海新城为例. *生态学报*, 2008, 28(12): 6130-6137.
- [27] Allen P Davis, Mohammad Shokouhian, Himanshu Sharma. Laboratory study of biological retention for urban stormwater management. *Water Environment Research*, 2001, 73(1): 60-72.
- [28] National Water Commission (NWC). Intergovernmental agreement on a National Water Initiative. Between the Commonwealth of Australia and the Governments of New South Wales, Victoria, Queensland, South Australia, the Australian Capital Territory and the Northern Territory, 2004.
- [29] Andrew M Coutts, Nigel J Tapper, Jason Beringer, Margaret Loughnan, Matthias Demuzere. Watering our cities: The capacity for Water Sensitive Urban Design to support urban cooling and improve human thermal comfort in the Australian context. *Progress in Physical Geography*, 2013, 37(1): 2-28.
- [30] Julie Donofrio, Yvana Kuhn, Kerry McWalter, Mark Winsor. RESEARCH ARTICLE: Water-sensitive urban design: an emerging model in sustainable design and comprehensive water-cycle management. *Environmental Practice*, 2009, 11(3): 179-189.
- [31] Byron Vernon, Reena Tiwari. Place-making through water sensitive urban design. *Sustainability*, 2009, 1(4): 789-814.
- [32] O Fryd, A Backhaus, H Birch, C F Fratini, S T Ingvertsen, J Jeppesen, T E Panduro, M Roldin, M B Jensen. Water sensitive urban design retrofits in Copenhagen-40% to the sewer, 60% to the city. *Water Science & Technology*, 2013, 67(9): 1945-1952.
- [33] Nanco Dolman, Amy Savage, Fola Ogunyoye. Water-sensitive urban design: learning from experience. *Proceedings of the ICE-Municipal Engineer*, 2013, 166(2): 86-97.
- [34] Mouritz M. Water sensitive design for ecologically sustainable development // *Water Sensitive Urban Design: Proceedings of a Seminar Held at Wanneroo (Western Australian Water Resource Council Publication)*. Perth, Australia: The Institute, Western Australian Division, 1991: 10-15.
- [35] Brown Rebekah. Transitioning to the water sensitive city: the socio-technical challenge // Carol Howe, Cynthia Mitchell eds. *Water Sensitive Cities*. London, UK: IWA Publishing, 2012: 29-39.
- [36] M C Gromaire, S Garnaud, M Saad, G Chebbo. Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers. *Water Research*, 2001, 35(2): 521-533.
- [37] Anne Gardiner, Matthew Hardy. Beyond demonstration mode: The application of WSUD in Australia. *Australian Planner*, 2005, 42(4): 16-21.
- [38] Lloyd S D, Fletcher T D, Wong T H F, Wootton R M. Assessment of pollutant removal in a newly constructed bio-retention system // *Proceedings of the 2nd South Pacific Stormwater Conference*. Auckland, New Zealand, 2001.
- [39] Wong Tony H F. Water sensitive urban design-the journey thus far. *Australian Journal of Water Resources*, 2006, 10(3): 213-222.
- [40] Hedgcock D. Water sensitive residential design: the challenge unfolds // *Water Sensitive Urban Design: Proceedings of a Seminar Held at Wanneroo (Western Australian Water Resource Council Publication)*. Perth, Australia: The Institute, Western Australian Division, 1991: 49-59.
- [41] L Lundy, R Wade. Integrating sciences to sustain urban ecosystem services. *Progress in Physical Geography*, 2011, 35(5): 653-669.
- [42] Whelan S, Halpern G M, Thompson P. Policy Planning and Management Guidelines for Water Sensitive Urban (Residential) Design. Perth, Australia: Whelans Press, 1994: 37-41.
- [43] Edmiston R J. Plant selection and management // Majer K. *Water Conservation through Good Design: A Guide for Planners, Architects, Engineers, Landscape Architects and Land Managers*. Perth, Australia: Western Australian Water Resource Council, 1986: 105-131.
- [44] James Hitchmough, Angeliki Paraskevopoulou, Nigel Dunnett. Influence of grass suppression and sowing rate on the establishment and persistence of forb dominated urban meadows. *Urban Ecosystems*, 2008, 11: 33-44.
- [45] Relph E. Prospects for places // Michael Larice, Elizabeth Macdonald. *The Urban Design Reader*. New York, USA: Routledge Press, 2007: 119-124.
- [46] Hough M. Principles for Regional Design // Michael Larice, Elizabeth Macdonald. *The Urban Design Reader*. New York, USA: Routledge Press, 2007: 174-182.
- [47] Seymour M Gold. *Recreation Planning and Design*. New York, USA: McGraw-Hill Press, 1980.
- [48] Evangelisti, M. Engineering Environment Sensitive Stormwater Drainage // *Water Sensitive Urban Design: Proceedings of a Seminar Held at Wanneroo (Western Australian Water Resource Council Publication)*. Perth, Australia: The Institute, Western Australian Division, 1991: 60-72.
- [49] Allen P Davis, Mohammad Shokouhian, Himanshu Sharma, Christie Minami. Water quality improvement through bioretention media: nitrogen and phosphorus removal. *Water Environment Research*, 2006, 78(3): 284-293.
- [50] Audrey Roy-Poirier, Pascale Champagne, Yves Fillion. Review of bioretention system research and design: Past, present, and future. *Journal of Environmental Engineering*, 2010, 136(9): 878-889.
- [51] Greg Mazer, Derek Booth, Kern Ewing. Limitations to vegetation establishment and growth in biofiltration swales. *Ecological Engineering*, 2001, 17(4): 429-443.
- [52] Xiao Q F, McPherson E G. Performance of engineered soil and trees in a parking lot bioswale. *Urban Water Journal*, 2011, 8(4): 241-253.
- [53] 蒲玉琳, 谢德体, 倪九派, 魏朝富. 紫色土区坡耕地植物篱模式综合生态效益评价. *中国生态农业学报*, 2014, 22(1): 44-51.
- [54] Susama Sudhishri, Anchal Dass, N K Lenka. Efficacy of vegetative barriers for rehabilitation of degraded hill slopes in eastern India. *Soil and Tillage Research*, 2008, 99(1): 98-107.

- [55] Colin J Thomas, Rosemary D F Bromley. City-centre revitalisation: problems of fragmentation and fear in the evening and night-time city. *Urban Studies*, 2000, 37(8): 1403-1429.
- [56] Larice M, Macdonald E. Greater portland regional government, green streets // Michael Larice, Elizabeth Macdonald. *The Urban Design Reader*. New York, NY, USA: Routledge Press, 2007: 405-424.
- [57] Cameron Chapman, Richard R Horner. Performance assessment of a street-drainage bioretention system. *Water Environment Research*, 2010, 82(2): 109-119.
- [58] M Bäckström. Grassed swales for stormwater pollution control during rain and snowmelt. *Water Science and Technology*, 2003, 48(9): 123-132.
- [59] Aaron A Jennings, Ata A Adeel, Alex Hopkins, Alexandra L Litofsky, Steven W. Wellstead. Rain barrel-urban garden stormwater management performance. *Journal of Environmental Engineering*, 2013, 139(5): 757-765.
- [60] Sivajini Gilchrist, Michael Borst, Emilie K S tander. Factorial study of rain garden design for nitrogen removal. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2014, 140(3): 04013016.
- [61] Hanbae Yang, Warren A Dick, Edward L McCoy, Larry P Phelan, Parwinder S Grewal. Field evaluation of a new biphasic rain garden for stormwater flow management and pollutant removal. *Ecological Engineering*, 2013, 54: 22-31.
- [62] Feng W J, Hatt B E, McCarthy D T, Fletcher T D, Deletic A. Biofilters for stormwater harvesting: understanding the treatment performance of key metals that pose a risk for water use. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(9): 5100-5108.
- [63] Zhang K F, Randelovic A, Page D, McCarthy D T, Deletic Ana. The validation of stormwater biofilters for micropollutant removal using in situ challenge tests. *Ecological Engineering*, 2014, 67: 1-10.
- [64] Jia H F, Sun Z X, Li G H. A four-stage constructed wetland system for treating polluted water from an urban river. *Ecological Engineering*, 2014, 71: 48-55.
- [65] M Martín, S Gargallo, C Hernández-Crespo, N Oliver. Phosphorus and nitrogen removal from tertiary treated urban wastewaters by a vertical flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 2013, 61: 34-42.
- [66] 张千千, 王效科, 高勇, 万五星, 欧阳志云. 绿色屋面降雨径流水质及消减污染负荷的研究. *生态学报*, 2015, 35(10) <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.5846/stxb201306241762.html>, DOI: 10.5846/stxb201306241762
- [67] Md Imran Kabir, Edoardo Daly, Federico Maggi. A review of ion and metal pollutants in urban green water infrastructures. *Science of the Total Environment*, 2014, 470-471: 695-706.
- [68] Ana Deletic, Tim D Fletcher. Performance of grass filters used for stormwater treatment-a field and modelling study. *Journal of Hydrology*, 2006, 317(3/4): 261-275.
- [69] Dreiseitl Herbert, Dreiseitl Ateller. A breath of fresh air with rain water in urban development // Evangelisti Marino, Mouritz Mike. *How do You Do It?: Water Sensitive Urban Design Seminar 1994; Proceedings*. West Perth, Australia: Institution of Engineers, Australia, 1994: 5-16.
- [70] Peter Binney, Alieta Donald, Vicki Elmer, Jamie Ewert, Owen Phillis, Rob Skinner, Ross Young. IWA Cities of the future program. *Spatial Planning and Institutional Reform*. Montreal, Canada: Conclusions from the World Water Congress, 2010.
- [71] 庄周. 庄子. 北京: 高等教育出版社, 2008: 62-62.
- [72] 程颢, 程颐. 二程集. 北京: 中华书局, 1981.
- [73] Taylor V Stein, Dorothy H Anderson. Combining benefits-based management with ecosystem management for landscape planning: Leech Lake watershed, Minnesota. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 60(3): 151-161.
- [74] Hannes Palang, Theo Spek, Marie Stenseke. Digging in the past: New conceptual models in landscape history and their relevance in peri-urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(4): 344-346.
- [75] 曾仕强. 道德经的奥秘. 西安: 陕西师范大学出版社, 2012: 4-17.
- [76] Peng B B. Dujiangyan irrigation system: A case of East Asia local knowledge with universal significance. *Frontiers of History in China*, 2008, 3(4): 533-550.
- [77] Xiang W N. Doing real and permanent good in landscape and urban planning: Ecological wisdom for urban sustainability. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 121: 65-69.
- [78] 王强, 袁兴中, 刘红. 山地河流浅滩深潭生境大型底栖动物群落比较研究——以重庆开县东河为例. *生态学报*, 2012, 32(21): 6726-6736.
- [79] David A Scholnick. Seasonal variation and diurnal fluctuations in ephemeral desert pools. *Hydrobiologia*, 1994, 294(2): 111-116.
- [80] McHarg I L. *Design with Nature*. Garden City. New York: Doubleday and Comp, Inc, 1969: 541-543.
- [81] Ruth Beilin. Frederick R. Steiner (ed): *The essential Ian McHarg: Writings on design and nature*, 2006. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 2013, 26(3): 711-720.
- [82] Michael Ruse. Can We diagnose the health of ecosystems? (Book Review). *Ecosystem Health*, 1998, 4(2): 141-143.
- [83] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义. *生态学报*, 2006, 26(5): 1444-1449.
- [84] 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展. *生态学报*, 2009, 29(11): 6183-6188.
- [85] 吕一河, 马志敏, 傅伯杰, 高光耀. 生态系统服务多样性与景观多功能性——从科学理念到综合评估. *生态学报*, 2013, 33(4): 1153-1159.
- [86] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. *生态学报*, 1984, 4(1): 1-9.

- [87] 岸根卓郎(日)著, 高文琛译. 迈向 21 世纪的国土规划-城乡融合系统设计. 北京: 科学出版社, 1990: 17-41.
- [88] Raziye Farmani, David Butler. Implications of urban form on water distribution systems performance. *Water Resources Management*, 2014, 28(1): 83-97.
- [89] Jun Ho Lee, Ki Woong Bang. Characterization of urban stormwater runoff. *Water Research*, 2000, 34(6): 1773-1780.
- [90] Kye Hyun Kim, Stephen J Ventura, Paul M Harris, Peter G Thum, Jeffrey Prey. Urban non-point-source pollution assessment using a geographical information system. *Journal of Environmental Management*, 1993, 39(3): 157-170.
- [91] 倪艳芳. 城市面源污染的特征及其控制的研究进展. *环境科学与管理*, 2008, 33(2): 53-57.
- [92] Richard O Carey, George J Hochmuth, Christopher J Martinez, Treavor H Boyer, Michael D Dukes, Gurpal S Toor, John L Cisar. Evaluating nutrient impacts in urban watersheds: Challenges and research opportunities. *Environmental Pollution*, 2013, 173: 138-149.
- [93] 袁兴中, 熊森, 李波, 徐静波, 刘红, 王强. 三峡水库消落带湿地生态友好型利用探讨. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2011, 28(4): 23-25.
- [94] 王里奥, 黄川, 詹艳慧, 袁辉. 三峡库区消落带淹水—落干过程土壤磷吸附—解吸及释放研究. *长江流域资源与环境*, 2006, 15(5): 593-597.
- [95] 郭泉水, 康义, 赵玉娟, 洪明, 孔倩倩, 聂必红. 三峡库区消落带土壤氮磷钾、pH 值和有机质变化. *林业科学*, 2012, 48(3): 7-10.
- [96] Chen H, Wu Y Y, Yuan X Z, Gao Y H, Wu N, Zhu D. Methane emissions from newly created marshes in the drawdown area of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(D18): 1010-1029.
- [97] Ma Z B, Ni H G, Zeng H, Wei J B. Function formula for first flush analysis in mixed watersheds: A comparison of power and polynomial methods. *Journal of Hydrology*, 2011, 402(3/4): 333-339.
- [98] 李春林, 刘森, 胡远满, 徐岩岩, 孙凤云, 陈探. 沈阳市降雨径流初期冲刷效应. *生态学报*, 2013, 33(18): 5952-5961.
- [99] 任玉芬, 王效科, 韩冰, 欧阳志云, 苗鸿. 城市不同下垫面的降雨径流污染. *生态学报*, 2005, 25(12): 3225-3230.
- [100] 王书敏, 何强, 张峻华, 李江. 绿色屋顶径流氮磷浓度分布及赋存形态. *生态学报*, 2012, 32(12): 3691-3700.
- [101] Robert A Francis. Wall ecology: A frontier for urban biodiversity and ecological engineering. *Progress in Physical Geography*, 2011, 35(1): 43-63.
- [102] Sarah P Church. Exploring Green Streets and rain gardens as instances of small scale nature and environmental learning tools, 2015, 134: 229-240.
- [103] 唐双成, 罗纨, 贾忠华, 袁黄春. 西安市雨水花园蓄渗雨水径流的试验研究. *水土保持学报*, 2012, 26(6): 75-79, 84.
- [104] M A Kachchu Mohamed, T Lucke, F Boogaard. Preliminary investigation into the pollution reduction performance of swales used in a stormwater treatment train. *Water Science & Technology*, 2014, 69(5): 1014-1020.
- [105] Lu Z L, Li Y Y, Lu J L. Designing of scenic spots trail from the angle of ecological protection-A case study of Xixi National Wetland Park. *Journal of Sustainable Development*, 2009, 2(3): 166-166.
- [106] Annette Voigt, Nadja Kabisch, Daniel Wurster, Dagmar Haase, Jürgen Breuste. Structural diversity: A multi-dimensional approach to assess recreational services in urban parks. *AMBIO*, 2014, 43(4): 480-491.
- [107] 尹澄清. 内陆水——陆地交错带的生态功能及其保护与开发前景. *生态学报*, 1995, 15(3): 331-335.
- [108] 蔡婧, 李小平, 陈小华. 河道生态护坡对地表径流的污染控制. *环境科学学报*, 2008, 28(7): 1326-1334.
- [109] Yao S M, Yue H Y, Li L G. Analysis on current situation and development trend of ecological revetment works in middle and lower reaches of Yangtze River. *Procedia Engineering*, 2012, 28: 307-313.
- [110] 陈小华, 李小平. 河道生态护坡关键技术及其生态功能. *生态学报*, 2007, 27(3): 1168-1176.
- [111] Li B, Yuan X Z, Xiao H Y, Chen Z L. Design of the dike-pond system in the littoral zone of a tributary in the Three Gorges Reservoir, China. *Ecological Engineering*, 2011, 37(11): 1718-1725.
- [112] Li B, Xiao H Y, Yuan X Z, Willison J H M, Liu H, Chen Z L, Zhang Y W, Deng W, Yue J S. Analysis of ecological and commercial benefits of a dike-pond project in the drawdown zone of the Three Gorges Reservoir. *Ecological Engineering*, 2013, 61(Part A): 1-11.
- [113] 李波, 袁兴中, 熊森, 刘红, 岳俊生, 陶德均. 城市消落带景观基塘系统设计初探——以重庆开县汉丰湖为例. *重庆师范大学学报: 自然科学版*, 2013, 30(6): 51-54.
- [114] 李兆佳, 熊高明, 邓龙强, 谢宗强, 樊大勇. 狗牙根与牛鞭草在三峡库区消落带水淹结束后的抗氧化酶活力. *生态学报*, 2013, 33(11): 3362-3369.
- [115] 李昌晓, 钟章成, 刘芸. 模拟三峡库区消落带土壤水分变化对落羽杉幼苗光合特性的影响. *生态学报*, 2005, 25(8): 1953-1959.
- [116] 申丽娟, 丁恩俊, 谢德体. 三峡库区农业面源污染控制技术体系研究. *农机化研究*, 2012, 34(9): 223-226.
- [117] 李先宁, 宋海亮, 朱光灿, 李大成, 吕锡武. 组合型生态浮床的动态水质净化特性. *环境科学*, 2007, 28(11): 2448-2454.