

“海绵城市”理论与实践*

“SPONGE CITY”: THEORY AND PRACTICE

俞孔坚 李迪华 袁弘 傅微 乔青 王思思

YU Kongjian; LI Dihua; YUAN Hong; FU Wei; QIAO Qing; WANG Sisi

26

城市规划 CITY PLANNING REVIEW
2015年 第39卷 第6期 VOL.39 NO.6 JUN. 2015【文章编号】1002-1329
(2015)06-0026-11

【中图分类号】TU981

【文献标识码】A

【doi】10.11819/cpr20150605a

【作者简介】

俞孔坚(1963-),男,博士,北京大学建筑与景观设计学院院长,教授、博士生导师。

李迪华(1967-),男,硕士,北京大学建筑与景观设计学院副教授。

袁弘(1978-),女,博士,北京大学景观设计学研究院。

傅微(1988-),女,北京大学建筑与景观设计学院博士生。

乔青(1979-),女,博士,北京大学景观设计学研究院。

王思思(1983-),女,博士,北京建筑大学环境与能源工程学院。

【修改日期】2015-05-13

【摘要】当今中国正面临着水资源短缺,水质污染,洪涝灾害,水生物栖息地丧失等多种水问题。这些水问题综合症是系统性、综合的问题,亟需一个更为综合全面的解决方案。“海绵城市”理论的提出正是立足这一背景。文章基于生态系统服务、景观安全格局等理论,结合北京市、六盘水市以及哈尔滨群力国家湿地公园等案例,详细阐述了“海绵城市”概念的源起、发展、内涵和构建方法体系,指出“海绵城市”有别于传统的工程依赖性治水思路和“灰色”基础设施,它作为一种生态途径,其构建核心在于建立跨尺度的水生态基础设施,以综合解决中国城乡突出的水问题,并对未来“海绵城市”的研究方向提出了展望。

【关键词】海绵城市;水生态基础设施;生态系统服务;景观安全格局;理论

ABSTRACT: China is facing a variety of water problems such as water shortage, water pollution, flooding and aquatic habitat degradation, which are intertwined components of a greater and more complex issue demanding for an equally integrative

*国家水体污染控制与治理科技重大专项:城市地表径流减控与面源污染削减技术研究(子课题名称:生态景观设施设计与径流减控技术研究,课题号2013ZX07304-001-6)资助;

国家水体污染控制与治理科技重大专项:重庆两江新区城市水系统构建技术研究示范(分任务编号2012ZX07307001-03)资助;

国家自然科学基金项目:全球气候变化背景下中国城市水适应能力建设的景观途径(编号:51078004)资助;科技部攻关课题:土地生态设计关键技术问题研究(2004BA516A18)资助;

水生态红线管控的理论基础研究科研项目(水利部水利水电规划设计总院委托)资助;

国家自然科学基金项目:可持续城市水系绿色廊道设计的景观生态学途径(编号:39870147)资助。

and comprehensive solution that needs seamless coordination among different authorities. The theory of “Sponge City” is formed in response to China’s water issues. Developed on the basis of the theory of eco-system service and landscape security pattern, and with the cases of Beijing, Liupanshui and Qunli National Wetland Park in Harbin as references, this paper explicates the origin, development, content and methodologies of the “Sponge City” concept. The paper also points out that different from traditional engineering-oriented approach and the “grey” infrastructure, the “sponge city”, as an ecological approach, is built upon multi-scale hydro-ecological infrastructure to provide an integrated solution to the prominent water problems in urban and rural areas of China. The successive research field and direction has also been forecasted at the end of the paper.

KEYWORDS: sponge city; hydro-ecological infrastructure; ecological system service; landscape security pattern; theory

为了贯彻落实习近平总书记讲话及中央城镇化工作会议精神,2014年2月《住房和城乡建设部城市建设司2014年工作要点》中明确:“督促各地加快雨污分流改造,提高城市排水防涝水平,大力推行低影响开发建设模式,加快研究建设海绵型城市的政策措施”。2014年11月,《海绵城市建设技术指南》发布;2014年底至2015年初,海绵城市建设试点工作全面铺开,并产生第一批16个试点城市。一时间,“海绵城市”这一概念再一次进入人们的视野。“海绵城市”概念的产生源自于行业内和学术界习惯用“海绵”来比喻城市的某种吸附功能,例如澳大利亚人口研究学者布吉(Budge)应用海绵来比喻城市对人口的吸附现象^[1]。近年来,更多的学者是将海绵

用以比喻城市或土地的雨涝调蓄能力。“海绵城市”、“城市海绵”、“绿色海绵”、“海绵体”等这些非学术性概念之所以得到学界的广泛应用,恰恰在于其代表的生态雨洪管理思想,尽管表述有所不同,核心思想是一致的,“海绵城市”直观地表述了具有“海绵特征”的城市,而其他概念的“海绵”重在海绵城市功能的载体。早在2003年,笔者曾用“海绵”概念来比喻自然系统的洪涝调节能力,指出“河流两侧的自然湿地如同海绵,调节河水之丰俭,缓解旱涝灾害。”^[2]并针对中国城市突出的水问题,提出了综合解决城乡水问题的生态基础设施途径,长期以来持续应用于包括台州、威海、菏泽、东营、北京等城市的生态规划中^[9-10];多个具有国际影响力的城市海绵体或“海绵城市”示范工程在国际上陆续发表并获奖;首批海绵城市建设试点中的遂宁市、迁安市和西咸新区在其规划设计及河道整治等工程中均切实地应用了这套海绵城市建设理论和技术。较早的实践案例还包括2000年的北京中关村生命科学园(图1),其设计采用了人工湿地收集雨水和净化中水的绿地系统,被称为大地生命的细胞^[11];2007年的天津桥园湿地系统(图2),通过简单的填挖方,形成泡状生态海绵体,收集雨水,在解决城市内涝的同时,进行城市棕地的生态修复,发挥综合的生态系统服务^[12,13];类似的绿色海绵工程也在秦皇岛滨海生态修复(图3)、哈尔滨群力国家湿地公园等项目中得到成功应用^[14-16]。随着近年来城市洪涝灾害的频发,“海绵城市”及其相应的规划理念和方法得到社会各界认同,在很多重要会议和媒体采访中,笔者均在呼吁“使整个国土成为一个‘绿色海绵系统’,使雨水就地蓄留、就地资源化。使它与城市中的公园系统、湿地系统,形成统一的水生态基础设施自然保护系统”,并为北京、厦门、重庆等多个城市的规划建设建言献策^[17-21],并给包括中央和国务院领导及北京市最高决策者建言^[22]。与此同时,业界也更多将“海绵城市”理论和方法应用到多项规划设计实践中^[23,24],例如董淑秋在《首钢工业区改造规划》中提出“生态排水+管网排水”的“生态海绵城市”规划概念,主要针对规划区的雨水利用问题^[25];台湾水利署也基于LID技术在新近的《流域综合治理计划》中提出构建“海绵城市”。

“海绵城市”的概念被官方文件明确提出,代表着生态雨洪管理思想和技术将从学界走向管理层面,并在实践中得到更有力的推广。但是,不难发现相关研究多围绕以LID技术、水敏感性城市规划与设计等为代表的西方国家先进的生态雨洪管理技术而展开,也越来越聚焦于城市内部排水系统和雨水利用、管理,并且在具体技术层

面的诠释依旧未能摆脱对现有治水途径中“工程性措施”的依赖。在笔者看来,“海绵城市”的建设理念远不止如此,它为在不同尺度上综合解决中国城市突出的水问题及相关生态和环境问题开启了希望旅程,包括雨洪管理、生态防洪、水质净化、地下水补充、棕地修复、生物栖息地的营造、公园绿地营造,以及城市微气候调节等等。因此,在“海绵城市”概念和理论尚在发展阶段之时,笔者将结合我国水情和生态问题并辅以具体案例,详细阐述“海绵城市”的理论内涵以及构建方法体系。

1 “海绵城市”理论提出的背景

当今中国正面临着各种各样的水危机:水资源短缺,水质污染,洪水,城市内涝,地下水位下降,水生物栖息地丧失等,问题非常严重^[26]。这些水问题的综合症带来的水危机并不是水利部门或者某一部门管理下发生的问题,而是一个系



图1 北京中关村生命科学园的绿色海绵系统
Fig.1 The Green Sponge System of Zhongguancun Life Science Park
资料来源:参考文献11。



图2 天津桥园城市海绵系统
Fig.2 The Green Sponge System of Qiaoyuan Park in Tianjin City
资料来源:参考文献12。



图3 秦皇岛滨海生态修复城市海绵系统
Fig.3 The Green Sponge System of the shore land restoring in Qinhuangdao City
资料来源:参考文献14。

统性、综合的问题,我们亟需一个更为综合全面的解决方案。“海绵城市”理论的提出正是立足于我国的水情特征和水问题。

1.1 我国地理位置与季风气候决定了我国多水患,暴雨、洪涝、干旱等灾害同时并存

我国降水受东南季风和西南季风控制,年际变化大,年内季节分布不均,主要集中在6~9月,占到全年的60%~80%,北方甚至占到90%以上,同时,我国气候变化的不确定性带来了暴雨洪水频发、洪峰洪量加大等风险,导致每年夏季成为内涝多发时期。同时,由于汛期洪水峰高量大,绝大部分未得到利用和下渗,导致河流断流与洪水泛滥交替出现,且风险愈来愈高。资料表明,最大洪峰流量与年最大洪峰流量平均值之比,在北方达到5~10倍,南方达到2~5倍,年内和年际以及地区间高度不均衡,导致出现洪涝灾害风险过大^[27]。除了区域性的洪涝灾害以外,城市内涝问题也日趋严重。2010年,对全国32个省(自治区、直辖市)的351个城市(多为大中型城市)的调研发现,我国城市内涝呈加剧趋势。2008-2010年期间,被调研城市中有213个发生过不同程度的积水内涝,其中137个城市发生了超过3次以上的内涝。积水深度超过0.5m的城市占到了74.6%、积水深度超过0.15m的占90%以上,积水时间超过30min的占79%^[28]。2012年北京7·12特大暴雨,79人遇难,经济损失近百亿元,是我国城市内涝问题的典型表现。

1.2 快速城镇化过程伴随着水资源的过度开发和水质严重污染

我国对水资源的开发空前过度,特别是北方地区,黄河、塔里木河、黑河等河流下游出现断流局面,湿地和湖泊大面积消失^[29]。地下水严重超采的问题也日益加剧,全国地下水超采区面积已达到19万km²,北方许多地下水降落漏斗区已面临地下水资源枯竭的严重危机。同时,我国的地表水水质状况不容乐观。2012年,根据水利系统全国水资源质量监测站网的监测资料,采用《中国地表水环境质量标准》(GB3838-2002),对全国20.1万km²的河流水质状况进行了评价。全年Ⅰ类水河长占评价河长的5.5%,Ⅱ类水河长占39.7%,Ⅲ类水河长占21.8%,Ⅳ类水河长占11.8%,Ⅴ类水河长占5.5%,劣Ⅴ类水河长占15.7%。全国103个主要湖泊的2.7万km²水面中,全年总体水质为Ⅰ~Ⅲ类的湖泊有32个,占评价湖泊总数的28.6%、评价水面面积的44.2%;Ⅳ~Ⅴ类湖泊55个,占评价湖泊总数的49.1%、评价水面面积的31.5%;劣Ⅴ类水

质的湖泊25个,占评价湖泊总数的22.3%、评价水面面积的24.3%^[30]。沿海海域也呈现出严重的富营养化现象,如2003年全海域共发现赤潮119次,累计面积约14550km²^[31]。此外,全国约有50%城市市区的地下水污染比较严重。2011年,北京、辽宁、吉林、黑龙江、上海、江苏、海南、宁夏、广东9个省(自治区、直辖市)采用《地下水质量标准》(GB/T14848-93),进行抽样分析,结果显示:水质适用于各种用途的Ⅰ~Ⅲ类监测井占评价监测井总数的2.0%;适合集中式生活饮用水水源及工农业用水的Ⅳ类监测井占21.2%;适合除饮用外其他用途的Ⅴ类、劣Ⅴ类监测井占76.8%^[32]。在这里必须注意的是,对水体污染的治理除了需要控制和治理点源工业和城市生活污染源外,更艰巨的任务将是对广大范围内的面源污染的治理,而后者正是海绵城市可以发挥巨大作用的地方。

1.3 不科学的工程性措施导致水系统功能整体退化

城市化和各项灰色基础设施建设导致植被破坏、水土流失、不透水面增加,河湖水体破碎化,地表水与地下水连通中断,极大改变了径流汇流等水文条件,总体趋势呈现汇流加速、洪峰值高。近50年许多河流的径流量变化剧烈,而堤坝建设则导致大部分河径流量大幅下降,我国河流下降比率则超过了30%^[33]。自20世纪90年代以来,长江、松花江、辽河、珠江、淮河、太湖流域等多地出现特大洪水和不利洪水组合,设计洪水量被迫大幅增加^[29];缩河造地,盲目围垦湖泊、湿地和河漫滩等行为,导致全国湖泊面积减少了15%,陆域湿地面积减少了28%,其中围垦面积占据80%以上,使河道行洪、蓄洪能力下降。长江的下荆江河段裁弯取直案例表明:裁弯后原河道长度缩短了1/3,比降加大,导致河道冲刷加大等不良影响^[34]。提高局部地区堤防标准却加大了相邻地区的洪水风险,水库会带来下游地区的垮坝风险,这些工程几乎彻底改变了河流的生态环境。截至2011年,全国已建堤防29万km,是新中国成立之初的7倍;水库从新中国成立前的1200多座增加到8.72万座,总库容从约200亿m³增加到7064亿m³^[35]。三峡水库竣工运行后,生物多样性锐减,污染加剧,出现水库回水区水体富营养化^[36,37]、鱼类减少^[38],以及鱼类生存环境下降^[39-41]等问题。

直至今日,我们依然热衷于通过单一目标的工程措施,构建“灰色”的基础设施来解决复杂、系统的水问题,结果却使问题日益严重,进入一个恶性循环。狭隘的、简单的工程思维,也体现在(或起源于)政府的小决策的和部门分

割、地区分割、功能分割的水资源管理方式。水本是地球上最不应该被分割的系统，可是我们目前的工程与管理体制中，却把水系统分解得支离破碎：水和土分离；水和生物分离；水和城市分离；排水和给水分离；防洪和抗旱分离。这些都是简单的工程思维和管理上的“小决策，”直接带来了上述综合性水问题的爆发，诚如奥德姆(Odum)所说：“小决策是一切问题的根源”^[42]。所以，解决诸多水问题的出路在于回归水生态系统来综合地解决问题。

2 “海绵城市”理论内涵

水环境与水生态问题是跨尺度、跨地域的系统性问题，也是互为关联的综合性问题。诸多水问题产生的本质是水生态系统整体功能的失调，因此解决水问题的出路不在于河道与水体本身，而在于水体之外的环境。如：大量的雨并不是落在河道里，所以防洪没有必要仅仅死守河道；主要污染源非水体本身，所以，水净化的解决之道也不在于水体本身。解决城乡水问题，必须把研究对象从水体本身扩展到水生态系统，通过生态途径，对水生态系统结构和功能进行调理，增强生态系统的整体服务功能：供给服务、调节服务、生命承载服务和文化精神服务^[43,44]，这四类生态系统服务构成水系统的一个完整的功能体系。因此，从生态系统服务出发，通过跨尺度构建水生态基础设施(hydro-ecological infrastructure)^[45,46]，并结合多类具体技术建设水生态基础设施，是“海绵城市”的核心。

2.1 价值观：“水适应人”转向“人适应水”

“海绵城市”是以“自然积存、自然渗透、自然净化”为特征，字里行间反映出与传统的工程思维下“水适应人”的治水思路截然不同。城市应该是一种“人适应水”的景观，即“水适应性景观”。“适应性”借用了生物学的术语，包含两方面含义，一是生物的结构都适合于一定的功能，二是生物的结构和功能适合于该生物在一定环境条件下的生存和延续。因此，所谓“适应性景观”强调了其是在外界的环境及其影响以及人类自身的改变共同作用下最终形成的产物^[47]。许多传统城市在长期的缓慢发展演变中，形成综合的发达的水适应性景观系统。托宾和蒙尔茨(Tobin and Montz)^[48]总结出一种洪泛平原地区居民的生活模型，他们认为洪水灾害是一种长久以来的自然现象，因而他们的生活处于一种“灾害-破坏-修复-灾害的循环(disaster-damage-repair-disaster cycle)”中，并逐渐形成

适应洪水的生活方式。俞孔坚等在对明清时期黄泛区城市防洪经验研究的基础上，提出了洪涝适应性景观的概念(flood adaptive landscape)，并进行扩展和深化。并在第一届城市水景观建设和水环境治理国际研讨会上首次提出水“适应性景观”(water adaptive landscape)的概念^[49]，随后在2007年澳大利亚景观设计年会上进一步阐述水适应景观作为气候变化的适应性对策^[50]。指出，在长期的水资源管理及与水旱灾害斗争的过程中，许多古代文明不断适应和改造城市与区域的水系统，在很大程度上减缓了水灾害的影响，积累了大量经验和智慧，增强了人类适应水环境的能力，形成城乡的水适应性景观^[51]。在“人定胜天”的年代，传统而有效的人水关系被逐步忽略，各项水利工程措施企图迫使水系统适应人类的活动，结果，事与愿违。更加严重的水危机使得人们重新审视人与水的关系，在“人与自然和谐”的生态价值观下，应该重新树立人类活动与城市建设适应水系统的新的价值观。

2.2 “海绵”即是以景观为载体的水生态基础设施

完整的土地生命系统自身具备复杂而丰富的生态系统服务功能，这是“生态系统服务”理论的核心思想，聚焦到“水问题”上，这一理论表明，城市的每一寸土地都具备一定的雨洪调蓄、水源涵养、雨污净化等功能，这也是“海绵城市”构建的基础。但是，各种关键性生态过程在土地的分布是不均衡的，“景观安全格局”理论认为景观中存在某些潜在的空间格局，它们由某些关键性的局部、位置和空间所构成，它们在物种保持和扩散的保护过程有异常重要的意义，以求解如何在有限的国土面积上，以尽可能少的用地、最佳的格局、最有效地维护景观中各种生态过程的健康和安全^[52,53]。对于关键性水过程而言，也存在着相应的景观安全格局，这一安全格局通过土地和城市的规划与设计，最终落实成为水生态基础设施。有别于传统的工程性的、缺乏弹性的灰色基础设施，它是一个生命的系统，它不是因为单一功能目标而设计，而是用来综合、系统、可持续地解决水问题^[45,46,54,55]。它提供给人类最基本的生态系统服务，是城市发展的刚性骨架。从水安全格局到水生态基础设施，它不仅维护了城市雨涝调蓄、水源保护和涵养、地下水回补、雨污净化、栖息地修复、土壤净化等重要水生态过程，而且它是可以在空间上被科学辨识并落地操作的。所以，“海绵”不是一个虚的概念，它对应着的是实实在在的景观格局；构建“海绵城市”即是建立相应的水生态基础设施，这也是最为高效和集约的途径。

2.3 “海绵城市”建设需以跨尺度的生态规划理论和方法体系为基础

很多学者对“海绵城市”的理解倾向于聚焦在雨水利用和管理问题上,同时提倡LID技术的应用,关注雨水处理和场地措施。诚然,上述确实是“海绵城市”建设的重点之一,但并不全面。城市水问题的解决前提是保护区域水循环过程,这就注定了真正的解决方案必定是跨尺度的,即“海绵城市”的构建需要不同尺度的承接、配合。

(1)宏观层面。“海绵城市”的构建在这一尺度上重点是研究水系统在区域或流域中的空间格局,即进行水生态安全格局分析,并将水生态安全格局落实在土地利用总体规划和城市总体规划中,成为区域的生态基础设施。在方法上,可借助景观安全格局方法,判别对于水源保护、洪涝调蓄、生物多样性保护、水质管理等功能至关重要的景观要素及其空间位置,围绕生态系统服务构建综合水安全格局。其意义在于:第一,明确现有的水系统中的最重要元素、空间位置和相互关系,通过设立禁建区,保护水系统的关键空间格局来维护水过程的完整性;第二,将水生态安全格局作为区域的生态用地和城市建设中的限建区,限制建设开发并逐步进行生态恢复,可避免未来的城市建设和土地开发进一步破坏水系统的结构和功能;第三,水系统可以发挥雨洪调蓄、水质净化、栖息地保护和文化休憩功能,即作为区域的生态基础设施,为下一步实体“海绵系统”的建设奠定空间基础。

(2)中观层面。主要指城区、乡镇、村域尺度,或者城市新区和功能区块。重点研究如何有效利用规划区域内的河道、坑塘,并结合集水区、汇水节点分布,合理规划并形成实体的“城镇海绵系统”,并最终落实到土地利用控制性规划甚至是城市设计,综合性解决规划区域内滨水栖息地恢复、水量平衡、雨污净化、文化游憩空间的规划设计和建设。

(3)微观层面。“海绵城市”最后必须要落实到具体的“海绵体”,包括公园、小区等区域和局域集水单元的建设,在这一尺度对应的则是一系列的水生态基础设施建设技术的集成,包括:保护自然的最小干预技术、与洪水为友的生态防洪技术、加强型人工湿地净化技术、城市雨洪管理绿色海绵技术、生态系统服务仿生修复技术等,这些技术重点研究如何通过具体的景观设计方法,让水系统的生态功能发挥出来。

2.4 “海绵城市”旨在综合解决城市生态问题

水生态系统区别于其他生态系统的主要特点

之一在于水这一特殊的环境因子。由于水是流动和循环的特点,因此水生态系统的影响因素并不在于水体本身,它与流域内其他土地利用和各类景观要素相联系,自然过程和人类活动对水生态系统的影响是广泛的。就水而论水容易形成认知障碍,应从更高一个层次研究水体,将视野从水体扩大到汇水区域(对静水水体而言)或流域(对流水水体而言)以及景观尺度。即充分认识到水域、水体本身不仅仅是为水生态系统服务,而是为整个生态系统提供了多种重要且无可替代的服务。例如,水域本身不仅为水生生物提供了生境系统,也为其他需水生物提供了不可替代的栖息环境,佛蒙特州的森林资源调查表明,90%的鸟类的栖息地在距河岸150~170m的范围内^[56];人类也喜好栖水而居,因此而形成了庞大的以水为核心的文化遗产。所以,从水问题出发,以构建跨尺度水生态基础设施为核心的“海绵城市”,最终能综合解决城市生态问题,包括区域性的城市防洪体系构建、生物多样性保护和栖息地恢复、文化遗产网络和游憩网络构建等,也包括局域性的雨洪管理、水质净化、地下水补充、棕地修复、生物栖息地的保育、公园绿地营造,以及城市微气候调节等等。

2.5 “海绵城市”是古今中外多种技术的集成

“海绵城市”的提出有其深厚的理论基础,又是一系列具体雨洪管理技术的集成和提炼,是大量实践经验的总结和归纳。笔者认为,可以纳入到“海绵城市”体系下的技术应该包括以下三类:

第一,让自然做工的生态设计技术。自然生态系统生生不息,为维持人类生存和满足人类需要提供各种条件和过程,生态设计就是要让自然做工,强调人与自然过程的共生和合作关系,从更深层的意义上说,生态设计是一种最大限度地借助于自然力的最少设计^[57]。任何技术的使用要尊重自然,而不是依赖工程措施不惜代价地以“改变场地原本稳定生态环境”为代价来实施“生态建设”。

第二,古代水适应技术遗产。先民在长期的水资源管理及与旱涝灾害适应的过程中,积累了大量具有朴素生态价值的经验和智慧,增强了人类适应水环境的能力。在城市和区域尺度,古代城乡聚落适应水环境方面的已有研究散见于聚落地理方面的研究^[58,59]。在城市规划界,吴庆洲等人作了大量卓有成效的研究^[60]。水利方面的相关遗产也非常丰富^[61]。俞孔坚等研究了黄泛平原古代城市的主要防洪治涝的适应性景观遗产,并总结出了“城包水”“水包城”和“阴阳城”等水适应性城市形态,饱含着古人应对洪涝灾害的

生存经验，对今天的城市水系治理、防洪治涝规划以及土地利用规划等仍大有裨益^[51]。同时，古代人民还创造了丰富的水利技术，例如我国有着2500年的陂塘系统^[62,63]，它同时提供水文调节、生态净化、水土保持、生物多样性保护、生产等多种生态系统服务。目前学术界对这些传统技术的整理归纳和应用还非常不够。

第三，当代西方雨洪管理的先进技术，包括LID技术、水敏感城市设计等，相关研究成为近年来城市水问题研究的热点，在此不再赘述。

3 海绵城市多尺度构建方法及实践

3.1 宏观——综合水安全格局与水生态基础设施，北京案例

在过去40年中，伴随人口的增长，北京城区面积已经拓展了700%。蔓延式、摊大饼式的城市扩展使得城市没有为生物和水预留科学合理的空间，弹性的生态网络缺失。也因此导致一系列的生态与环境问题，如雨涝频繁与河流湖泊干涸并存；公园绿地与区域水系系统割裂，导致雨涝时，公园的雨水排往城市雨水管道，浪费了雨水资源，也增加了市政排水系统的压力，而干旱时，绿地又需要浇灌，与城市用水竞争；非生态化的河道建设方式不但没有使其成为日常通勤和游憩通道，反而成为市民活动的障碍。因此，如何留住雨水并回补地下水，如何将这些留在地表的水与生物保护相结合，如何与文化遗产相结合，如何与游憩系统、慢行系统相结合，均是急需通过水生态基础设施的构建系统地解决的城市生态问题。

本案例从北京市水系的格局与水生态系统服务的关系入手，通过水文过程分析和模拟，判别和保护具有较高生态系统服务功能的用地，提出水源保护区、地下水补给区等地区的生态管控导则，并恢复城市水系自然形态、建立河流生物廊道系统，从而构建起北京市综合水安全格局^[6,64]，包括：(1)雨洪安全格局，通过径流过程模拟、雨洪淹没分析（20年、50年、200年一遇下的雨洪可能淹没范围）和历史洪涝情况分析，确定区域的雨洪安全格局。这个安全格局可以有效维护降雨径流的自然过程，通过恢复水系的调蓄蓄滞能力，使城市免受雨洪灾害的威胁。(2)水源保护安全格局，对于北京市这样一个缺水城市而言，地表及地下水源保护是区域水安全格局的另一个重要功能。根据相关地表水源保护规划以及地下水资源补给能力分析，确定水源保护安全格局。最终两者叠加形成综合水安全格局（图4），它将生态系统的各种服务功能，包括旱涝调节、水源保护、生物多样性保护、休憩与审

美启智，以及遗产保护等整合在一个完整的景观格局中，并最终通过与相应尺度的城市总体规划（或土地利用总体规划）相结合落实在土地上，构成禁止建设区和限制建设区的核心网络，成为引导城市空间有序扩展的刚性骨架。

北京市水生态安全格局分为三个安全水平：底线安全格局、满意安全格局和理想安全格局。如果按照最理想化的安全格局来构建水生态基础设施，那么北京市洪涝灾害频率将大大降低，同时城市人口容量也将大大提高，人与水的用地之争可以轻松化解，因为水生态基础设施能完全消纳区域雨洪水，并有效回补地下水资源。2007年完成的北京水生态基础设施规划研究，不幸在2012年得到了验证。北京7·21特大暴雨造成了79人死亡，而死亡事故的发生地点，正好与7年

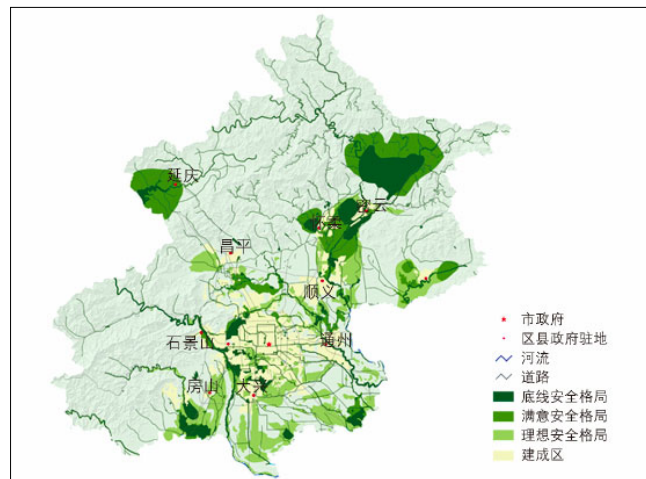


图4 北京市综合水生态安全格局
Fig.4 The comprehensive hydro-ecological security system of Beijing

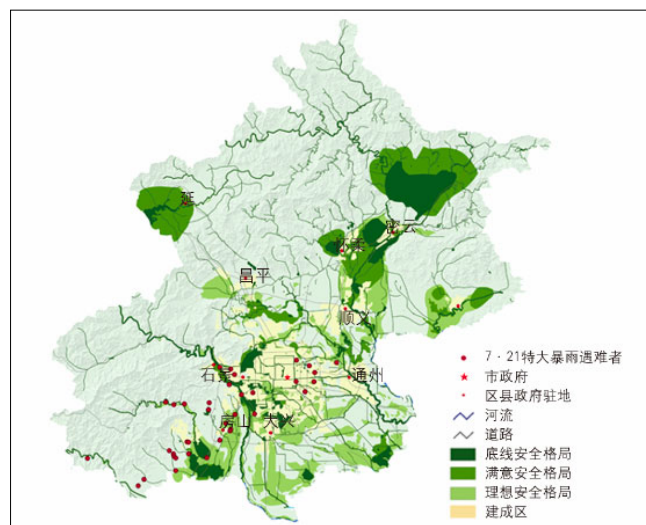


图5 北京市7·21暴雨人员遇难地点与北京水生态基础设施关系
Fig.5 Relationship between locations of victims of the 7·21 rainstorm and hydro-ecological security system of Beijing
注：据2012年8月4日北京市防汛办发布的北京7·21特大自然灾害罹难者名单，链接：<http://news.sohu.com/s2012/6566/s349125246/>。

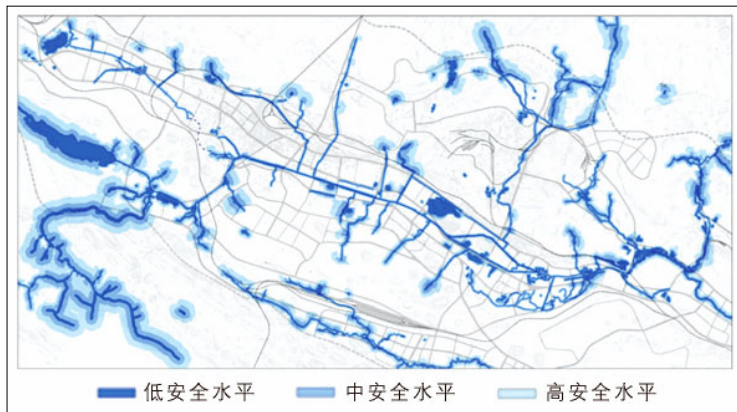


图6 六盘水城市海绵系统
Fig.6 Urban Sponge System in Liupanshui City

表1 水生态基础设施构建步骤
Tab.1 Procedure of establishing hydro-ecological infrastructures

步骤	图示	说明
分析现状遥感图		结合现状地形图对场地进行总体认知与分析
构建河流廊道		基于与洪水为友的水弹性技术模块进行水量估测与保证,并恢复自然弯曲的河道形式,构建河流廊道
构建支流系统		支流系统构建,把水就地留下来,层层过滤净化。如果把暴雨就地截留在山坡上,那么城市的防洪压力就大大减小
构建汇水节点		汇水节点就是重要的城市雨洪管理绿色海绵技术的实施场地
构建湿地链		湿地乃是水生态基础设施建设技术的核心要素,在城市尺度将其串联,有效恢复生态系统服务功能



图7 六盘水明湖湿地城市海绵建成实景
Fig.7 Built-up landscape of the Green Sponge System of Minghuo wetland in Liupanshui City

前研究得到的雨洪安全格局吻合(图5)。

3.2 中观——城镇海绵系统，六盘水案例

六盘水是一个在20世纪60年代中期建立起来的工业城市，城市被石灰岩的山丘环抱，水城河穿城而过。城市人口密集，在60km²的土地上，居住了约60万的人口。六盘水市的水生态综合治理旨在减缓来自山坡的水流，建造一个以水过程为核心的生态基础设施，来储蓄和净化雨水，使水成为重建健康生态系统的活化剂，提供自然和文化服务，使这个工业城市变为宜居城市^[65,66]。

为了构建完整的城镇海绵系统，工程关注水城河流域和城市两个层面(表1)。首先，河流串联起现存的溪流、湿地和低洼地，形成一系列蓄水池和具有不同净化能力的湿地，构建了雨洪管理和生态净化系统。这一方法不仅最大限度地减少了城市雨涝灾害，而且在旱季也能有持续不断的水源。第二，拆除渠化河流的混凝土河堤，重建自然河岸的湿地系统，发挥河流的自净能力。第三，建立连续开放空间，建立人行道和自行车道系统，增加通往滨水区域的通道。最后，项目将滨水区开发和河道整治结合在一起。以水为核心的生态基础设施促进了六盘水的城市改造，提高了城市土地的价值，增进了城市活力(图6，图7)。

3.3 微观——城市雨洪管理绿色海绵技术，哈尔滨群力雨洪公园案例

如上所述，“海绵城市”真正在微观尺度的建设依靠的是一系列的水生态基础设施建设技术，限于篇幅在此选择较为有代表性的“城市雨洪管理绿色海绵技术”来进行说明^[15,16]。

哈尔滨群力雨洪公园(群力国家湿地公园, 34hm²)是我国首个以解决城市内涝为目标的国家级城市湿地公园。该公园通过整体景观设计途径进行生态化的雨洪管理，解决常规市政工程所没能解决的问题，使我们的城市成为与水问题相适应的城市(图8，图9)，从2011年建成以来，有效发挥了其解决城市雨涝的功能。设计中关键性技术要点包括：(1)以雨洪安全格局为基础，划定由“集水城区-汇水湿地”组成的、具有镶嵌式结构的“绿色海绵综合体”。(2)填-挖技术形成“海绵地形”，一方面是创造多级湿地系统的地形基础，同时为下一步营造多样化的生物栖息地与游憩空间提供环境基础；而且，造价低廉。(3)构建“水质净化-蓄滞水-地下水回补”多级多功能湿地系统。该多级湿地系统主要是整合潜流和表流湿地技术，进行土壤和生物净化，将净化后的雨水汇入中央低洼湿地，补充地下水。按照“水质净化人工湿地-蓄滞人工湿地-地下水回补与生物多样性恢复湿地”这一顺序，依次构

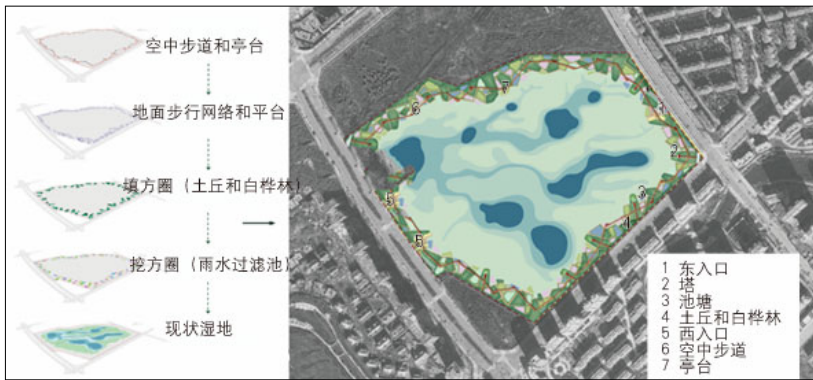


图8 哈尔滨群力雨洪公园城市海绵体总平面
Fig.8 The layout of Green Sponge System of Qunli Storm Water Park in Harbin City



图9 哈尔滨群力雨洪公园城市海绵体建成实景
Fig.9 Built-up landscape of Green Sponge System of Qunli Storm Water Park in Harbin City

造三类湿地系统，产生多种生态系统服务。(4) 充分利用地形及水量分布特征实施特色生境修复，并与乡土生物保护、游憩与科普教育功能相融合。

4 结语

本文主要探讨了关于如何科学、系统地对待水的问题，提出建立水生态基础设施是生态治水的核心，也是实现“海绵城市”的关键。国家高层对“海绵城市”的重视是改变城市规划建设理念的重大契机。围绕这一概念，社会各界通过广泛的讨论来关注城市洪涝问题和一系列相关的生态和环境问题，重新审视工业时代治水思路的利弊，深刻认识生态雨洪管理和城市生态建设的重要性及方法和技术，对实现生态文明和美丽中国具有重要意义，学术界应该给与充分的重视。笔者结合多年的经验，提出“海绵城市”建设浪潮应该推动以下几方面学术研究：(1)中国古代水适应性城乡发展的思想、工程与技术遗产的整理和研究，目前这方面的研究还非常有限，不论从城市规划、水利建设角度还是从遗产保护角度出发，都应该加快对该类水适应性景观和技术遗产的整理和研究；(2)绿色基础设施与灰色基础设施相衔接的研究，中国城市建设已经形成了对灰色基础设施的依赖，如何逐步摆脱这种依赖，有效地促进绿色基础设施优先的城市雨洪调蓄系统、如何在实际管理和操作层面实现这种衔接依旧是难题；(3)水生态基础设施规划落实的法治化途径，推进各尺度水生态基础设施的实施纳入法定规划体系，就规划成果向各部门和利益相关者广泛征求意见，通过多方博弈最终确定其空间边界，比如“水生态红线”；(4)一系列相关技术指南的制定，不同尺度水生态基础设施构建指南，以及各类技术集成的使用指南等，《海绵城市建设技术指南》是一个良好的开端，但还远远不够。

注释(Notes)

此处涉及的第22条参考文献原为给北京市委书记郭金龙的建议信，主要针对北京7·21洪灾来谈，公开发表后，收件人名字被隐去。
第45条参考文献为根据水利部科学技术委员会全体会议上的特邀报告改写而成。

参考文献 (Reference)

- Budge T. Sponge Cities and Small Towns: a New Economic Partnership[M]//Rogers M F, Jones D R. The Changing Nature of Australia's Country Towns. Ballarat, Australia: Victorian Universities Regional Research Network Press, 2006.
- 俞孔坚, 李迪华. 城市景观之路——与市长们交流[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003:149-153.
Yu Kongjian, Li Dihua. The Way to Urban Landscape: Communicating with Mayors[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003:149-153.
- 俞孔坚, 李迪华, 刘海龙. “反规划”途径[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
Yu Kongjian, Li Dihua, Liu Hailong. The Negative Approach[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.
- 俞孔坚, 张蕾. 基于生态基础设施的禁建区及绿地系统——以山东菏泽为例[J]. 城市规划, 2007, 31(12): 89-92.
Yu Kongjian, Zhang Lei. Ecological Infrastructure as Unbuildable Zone and Urban Green Space System: a Case Study of Heze[J]. City Planning Review, 2007, 31(12): 89-92.
- 俞孔坚, 奚雪松, 王思思. 基于生态基础设施的城市风貌规划——以山东省威海市为例[J]. 城市规划, 2008, 32(3): 87-92.
Yu Kongjian, Xi Xuesong, Wang Sisi. Townscape Planning Based on Ecological Infrastructure: a Case Study of Weihai, Shandong[J]. City Planning Review, 2008, 32(3): 87-92.
- 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 等. 北京城市扩张的生态底线——基本生态系统服务及其安全格局[J]. 城市规划, 2010, 34(2): 19-24.
Yu Kongjian, Wang Sisi, Li Dihua, et al. Ecological Baseline for Beijing's Urban Sprawl: Basic Ecosystem

- Services and their Security Patterns[J]. City Planning Review, 2010,34(2):19-24.
- 7 俞孔坚,王思思,乔青.基于生态基础设施的北京市绿地系统规划策略[J].北京规划建设,2010(3):54-58.
Yu Kongjian, Wang Sisi, Qiao Qing. Ecological Infrastructure Based Green Space System Planning in Beijing[J]. Beijing Planning Review, 2010(3): 54-58.
- 8 俞孔坚,张媛,刘云千.生态基础设施先行:武汉五里界生态城设计案例探析[J].规划师,2012,28(10):26-29.
Yu Kongjian, Zhang Yuan, Liu Yunqian. Ecological Infrastructure Priority: Wuhan Wulijie Ecological City Case[J]. Planners, 2012, 28(10): 26-29.
- 9 莫琳,俞孔坚.构建城市绿色海绵——生态雨洪调蓄系统规划研究[J].城市发展研究,2012,19(5):4-8.
Mo Lin, Yu Kongjian. Structure the Urban Green Sponge: Study on Planning an Ecological Stormwater Regulation System[J]. Urban Development Studies, 2012,19(5):4-8.
- 10 宋云,俞孔坚.构建城市雨洪管理系统的景观规划途径——以威海市为例[J].城市问题,2007(8):64-69.
Song Yun, Yu Kongjian. The Way to Build up Urban Storm Water Management System via Landscape Planning: a Case Study of Weihai City[J]. Urban Problems, 2007(8): 64-69.
- 11 俞孔坚,张东,李向华,等.生命细胞、景观格局与创新网络——中关村生命科学园规划[J].城市规划,2001,25(5):76-80.
Yu Kongjian, Zhang Dong, Li Xianghua, et al. The Planning for the Life Science Park in Zhongguancun, Beijing[J]. City Planning Review, 2001, 25(5): 76-80.
- 12 俞孔坚,石春,文航舰.取样天津:桥园设计方案[J].建筑学报,2006(5):80-81.
Yu Kongjian, Shi Chun, Wen Hangjian. Tianjin's Case: Design Blue Print of the Qiaoyuan[J]. Architectural Journal, 2006 (5):80-81.
- 13 Yu K J. Qiaoyuan Park, an Ecosystem Services-Oriented Regenerative Design[J]. Topos, 2010(70): 28-35.
- 14 俞孔坚,凌世红,刘向军.再生设计:秦皇岛滨海景观带生态修复工程[J].景观设计学,2009(6):100-105.
Yu Kongjian, Lin Shihong, Liu Xiangjun. A Regenerative Surgery: the Beach Restoration of Qinghuangdao City[J]. Landscape Architecture Frontiers, 2009(6): 100-105.
- 15 Yu K J. Stormwater Park for a Water Resilient City: Qunli National Urban Wetland[J]. Topos, 2011(77): 72-77.
- 16 俞孔坚.建筑与水涝共生:哈尔滨群力雨洪公园[J].建筑学报,2012(10):62-69.
Yu Kongjian. Coexisting of the Architecture and the Flood: the Qunli Park in Harbin City [J]. Architectural Journal, 2012(10):62-69.
- 17 刘巍.俞孔坚:留住天降雨水[EB/OL].瞭望观察网,2012-10-08.http://www.lwgcw.com.
Liu Wei. Yu Kongjian: Keeping the Rain Water[EB/OL]. Outlook Weekly. Outlook Observation Website, 2012-10-08.http://www.lwgcw.com.
- 18 廖靖文.“绿色海绵”解决内涝[N/OL].广州日报,2012-08-13.http://gzdaily.dayoo.com/html/2012-08/13/content_1828590.htm.
Liao Jingwen. The Green Sponge to Solve Storm Water Problem[N/OL]. Guangzhou Daily, 2012-08-13.http://gzdaily.dayoo.com/html/2012-08/13/content_1828590.htm.
- 19 卢月.北大建筑景观设计学院院长俞孔坚:绿色海绵为城市解渴[EB/OL].厦门网,2013-08-15.http://news.xmnn.cn/a/xmxw/201308/t20130815_3449650.htm.
Lu Yue. Yu Kongjian, the Dean of the College of Architecture and Landscape Architecture of Peking University: the Green Sponge for Urban Thirsty [EB/OL]. The Xiamen Website, 2013-08-15.http://news.xmnn.cn/a/xmxw/201308/t20130815_3449650.htm.
- 20 谈露洁,弋静.北京大学景观设计学研究院院长俞孔坚开处方:多建湿地公园医治城市内涝[N/OL].重庆晚报数字报,2013-09-10.http://www.cqwb.com.cn/cqwb/html/2013-09/10/content_365757.htm.
Tan Lujie, Yi Jing. Solution from Yu kongjian, the Dean of the College of Architecture and Landscape Architecture at Peking University: Building Wetland Parks to Solve Urban Storm Water[N/OL]. Chongqing Evening News Digital Newspaper,2013-09-10.http://www.cqwb.com.cn/cqwb/html/2013-09/10/content_365757.htm.
- 21 王丽娟.建“海绵城市”让“看海”成为传说[N/OL].中国改革报,2014-05-22.http://www.crd.net.cn/2014-05/22/content_11390073.htm.
Wang Lijuan. Building the “Sponge City”, Avoiding Storm Water Problem[N/OL]. China Revolution Daily,2014-05-22.http://www.crd.net.cn/2014-05/22/content_11390073.htm.
- 22 俞孔坚.让雨洪不是灾害,而成福音[N/OL].笔会在线,2012-08-03.http://culture.whb.cn/yanshen/view/22117.
Yu Kongjian. Making Storm Water as a Gift but not Hazard [N/OL]. Bihui on Line, 2012-08-03. http://culture.whb.cn/yanshen/view/22117.
- 23 苏义敬,王思思,车伍,等.基于“海绵城市”理念的下沉式绿地优化设计[J].南方建筑,2014(3):39-43.
Su Yijing, Wang Sisi, Che Wu, et al. Optimization Design of Sunken Greenbelt Based on the Concept of “Sponge City” [J]. South Architecture, 2014(3): 39-43.
- 24 王云才,崔莹,彭震伟.快速城市化地区“绿色海绵”雨洪调蓄与水处理系统规划研究——以辽宁康平卧龙湖生态保护区为例[J].风景园林,2013(2):60-67.
Wang Yuncai, Cui Ying, Peng Zhenwei. The Study on Green Sponge Ecological Stormwater Storage & Treatment System in Rapid Urbanization Area—a Case Study of Wolong Lake Area of Kangping, Liaoning[J]. Landscape Architecture, 2013(2): 60-67.
- 25 董淑秋,韩志刚.基于“生态海绵城市”构建的雨水利用规划研究[J].城市发展研究,2011,18(12):37-41.
Dong Shuqiu, Han Zhigang. Study on Planing an “Eco-sponge City” for Rainwater Utilization[J].Urban

- Development Studies, 2011,18(12): 37-41.
- 26 王浩. 中国水资源问题及其科学应对, 中国科协第十三次大会上的报告[EB/OL]. 2011-09-21. <http://zt.cast.org.cn/n435777/n435799/n13215955/n13216711/13324916.html>.
Wang Hao. The Water Resource Problem and the Scientific Approach, a Report on 13th Conference of China Association for Science and Technology [EB/OL]. 2011-09-21. <http://zt.cast.org.cn/n435777/n435799/n13215955/n13216711/13324916.html>.
- 27 龚子同. 中国水问题的出路[J]. 地球科学进展, 1998,2(13): 113-117.
Gong Zitong. The Way out of Water Problems in China[J]. Advances in Earth Science, 1998,2(13): 113-117.
- 28 侯玉栋, 李树平, 周巍魏. 城市内涝现状分析与应对措施探讨[C]//《中国给水排水》杂志社第九届年会论文集.2012.
Hou Yudong, Li Shuping, Zhou Weiwei. The Analysis of Current Urban Storm Water Problem and the Discussion of Countermeasures [C]//China Water & Wastewater the 9th Annual Conference Publication. 2012.
- 29 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.
Wang Hao. Research on Chinese Water Resource Problem and Sustainable Development Strategy[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- 30 2012中国水资源公报[EB/OL]. 2013-12-15. http://www.mwr.gov.cn/zwzc/hygb/szygb/qgszygb/201405/t20140513_560838.html.
2012 China Water Resource Report [EB/OL]. 2013-12-15. http://www.mwr.gov.cn/zwzc/hygb/szygb/qgszygb/201405/t20140513_560838.html.
- 31 唐孝炎, 王如松, 宋豫秦. 我国典型城市生态问题的现状与对策[J]. 国土资源, 2005(5): 21-26.
Tang Xiaoyan, Wang Rusong, Song Yuqin. Current Situation and Some Suggestion on Ecological Problems of Typical Cities in China[J]. Land & Resources, 2005(5): 21-26.
- 32 2011中国水资源公报[EB/OL]. 2012-12-17. http://www.mwr.gov.cn/zwzc/hygb/szygb/qgszygb/201212/t20121217_335297.html.
2011 China Water Resource Report [EB/OL]. 2012-12-17. http://www.mwr.gov.cn/zwzc/hygb/szygb/qgszygb/201212/t20121217_335297.html.
- 33 Milliman J D, Farnsworth K L, Jones P D, et al. Climatic and Anthropogenic Factors Affecting River Discharge to the Global Ocean, 1951-2000[J]. Global and Planetary Change, 2000(62): 187-194.
- 34 潘庆葵. 下荆江人工裁弯30年[J]. 人民长江, 2001(5): 27-29.
Pan Qingshen. Over 30 Years about the Artificial Cut-Off Project on the Lower Jingjiang River[J]. Yangtze River, 2001(5): 27-29.
- 35 周学文. 我国水利建设现状、问题及对策, 十一届全国人大常委会专题讲座第二十讲[EB/OL]. 2011-03-23. http://www.npc.gov.cn/npc/xinwen/2011-03/23/content_1648671.html.
Zhou Xuewen. Current Hydraulic Construction, Problem and Approach, the 20th Speech on the 11th Committee of National People's Congress [EB/OL]. 2011-03-23. http://www.npc.gov.cn/npc/xinwen/2011-03/23/content_1648671.html.
- 36 Huang Y L, Huang G H, Liu D F, et al. Simulation-Based Inexact Chance-Constrained Nonlinear Programming for Eutrophication Management in the Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Environmental Management, 2012(108): 54-65.
- 37 Zeng H, Song L R. Distribution of Phytoplankton in the Three-Gorge Reservoir During Rainy and Dry Seasons[J]. Science of The Total Environment, 2006(367): 999-1009.
- 38 Yi Y, Wang Z Y, Yang Z F. Impact of the Gezhouba and Three Gorges Dams on Habitat Suitability of Carps in the Yangtze River[J]. Journal of Hydrology, 2010. (387): 283-291.
- 39 Wang Y, Xia Z. Assessing Spawning Ground Hydraulic Suitability for Chinese Sturgeon (Acipenser Sinensis) from Horizontal Mean Vorticity in Yangtze River[J]. Ecological Modelling, 2009, 220(11): 1443-1448.
- 40 Li Z, Dai H, Mao J. Short-Term Effects of Flow and Sediment on Chinese Sturgeon Spawning[J]. Procedia Engineering, 2012(28): 555-559.
- 41 Yi Y, Zhang S, Wang Z. The Bedform Morphology of Chinese Sturgeon Spawning Sites in the Yangtze River[J]. International Journal of Sediment Research, 2013, 28(3): 421-429.
- 42 Odum W E. Environmental Degradation and the Tyranny of Small Decisions[J]. Bio Science, 1982, 32(9): 728-29.
- 43 Costanza R, D'Arge R, De Groot R, et al. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital[J]. Nature, 1997(387): 253-259.
- 44 MEA (Millennium Ecosystem Assessment). Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis[M]. Washington DC: Island Press, 2005.
- 45 俞孔坚. 构建美丽中国的水生态基础设施[N]. 中国水利报现代水利周刊, 2015-01-15(5).
Yu Kongjian. Hydro-Ecological Infrastructure: the Way to Beautiful China [N]. Modern Water Conservancy Weekly of China Water Resources News, 2015-01-15(5).
- 46 俞孔坚. 美丽中国的水生态基础设施:理论与实践[J]. 鄱阳湖学刊, 2015(10): 5-18.
Yu Kongjian. Aquatic Ecological Infrastructure of Wild China: the Theory and Practice[J]. Journal of Poyang Lake, 2015(10): 5-18.
- 47 俞孔坚, 张蕾. 黄泛平原古城镇洪涝经验及其适应性景观[J]. 城市规划学刊, 2007(5): 85-91.
Yu Kongjian, Zhang Lei. The Flood and Waterlog Adaptive Landscapes in Ancient Chinese City in the Yellow River Basin[J]. Urban Planning Forum, 2007(5): 85-91.
- 48 Tobin G A. Natural Hazards: Explanation and Integration[M]. Guilford Press, 1997.
- 49 Yu K J. Make Friends with Flood[C]//The 1st International Symposium on Development of Urban Waterscapes and Water Management. Yangzhou, 2005: 30-31.
- 50 Yu K J. Solution to Climate Change: the Water Adaptive Landscape[C]//Australia Institute of Landscape Architecture Annual Conference. The Climate of Design, Design Solutions for Landscapes Challenged by Climate and Water. Adelaide, 2007: 14-15.
- 51 俞孔坚, 张蕾. 黄泛平原区适应性“水城”景观

- 及其保护和建设途径[J]. 水利学报, 2008, 39(6): 688-696.
- Yu Kongjian, Zhang Lei. Preservation and Development of Water Cities Adaptive to the Areas Flooded by the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008,39(6): 688-696.
- 52 Yu K J. Ecological Security Patterns in Landscape and GIS Application[J]. Geographical Information Sciences, 1995,1(2): 1-17.
- 53 俞孔坚. 生物保护的景观安全格局[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 8-15.
- Yu Kongjian. Landscape Ecological Security Patterns in Biological Conservation[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999,19(1): 8-15.
- 54 俞孔坚, 韩西丽, 朱强. 解决城市生态环境问题的生态基础设施途径[J]. 自然资源学报, 2007, 22(5): 808-816.
- Yu Kongjian, Han Xili, Zhu Qiang. Ecological Infrastructure as a Synthetic Solution to Urban Environmental Problems[J]. Journal of Natural Resources, 2007,22(5): 808-816.
- 55 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.
- Dong Zheren, Li Wenqi, Sun Dongya. Ecological Restoration of Rivers [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013.
- 56 Wenger S. A Review of the Scientific Literature on Riparian Buffer Width, Extent and Vegetation[M/OL]. Georgia: University of Georgia Press, 1999. <http://www.crjc.org/buffers/Introduction.pdf>.
- 57 俞孔坚, 李迪华, 吉庆萍. 景观与城市的生态设计: 概念与原理[J]. 中国园林, 2001(6): 3-10.
- Yu Kongjian, Li Dihua, Ji Qingping. Ecological Design for Landscape and City: Concepts and Principles[J]. Chinese Landscape Architecture, 2001(6): 3-10.
- 58 彭一刚. 传统村镇聚落景观分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
- Peng Yigang. The Analysis of Traditional Country Settlement Landscape[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1992.
- 59 金其铭. 中国农村聚落地理[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1989.
- Jin Qiming. China Country Settlement Geography[M]. Nanjing: Jiangsu Science & Technology Press, 1989.
- 60 吴庆洲. 中国古城防洪研究[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- Wu Qingzhou. Research on the Flood Management in Chinese Ancient Cities[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- 61 郑连第. 古代城市水利[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- Zheng Liandi. Water Conservancy in Ancient Cities[M]. Beijing: Water & Power Press, 1985.
- 62 张芳. 中国古代淮河、汉水流域的陂渠串联工程技术[J]. 中国农史, 2000 (1): 22-27.
- Zhang Fang. The Pond Connection Technology in the Huaihe and the Hanshui Basins in Ancient China[M]. The Agricultural History of China, 2000 (1): 22-27.
- 63 张芳. 中国传统灌溉工程及技术的传承和发展[J]. 中国农史, 2004 (1): 10-18.
- Zhang Fang. The Inheritance and Development of Traditional Chinese Irrigation Project and Technology[J]. Agricultural History of China, 2004(1): 10-18.
- 64 俞孔坚, 王思思, 李迪华. 区域生态安全格局: 北京案例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Yu Kongjian, Wang Sisi, Li Dihua. Regional Ecological Security Patterns: the Beijing Case[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- 65 Yu Kongjian. Designed Ecologies for an Urban River System Across Scales in Kunming and Liupanshui, in Shi Nan[C]//Jim Reilly and Fran Klass.ISOCARP Review 10: Water and Cities — Managing the Vital Relationship. London: Routledge Press, 2014: 12-30.
- 66 Yu Kongjian, Turenscape. Slow Down: Hydrological Infrastructure for Liupanshui, China[J]. Topos, 2014(87): 10-11.

(上接第25页)

- 43 胡焕庸. 中国人口之分布[J]. 地理学报, 1935, 2(2): 33-74.
- Hu Huanyong. Essays on China's Population Distribution[J]. Acta Geographica Sinica, 1935, 2(2):33-74.
- 44 铁道部. 关于印发《铁路“十二五”发展规划》的通知[Z]. 2011.
- The Ministry of Railways. Notice on Issuing "The 12th Five-Year" Railway Development Plan [Z]. 2011.
- 45 World Bank. World Development Report 2009: Reshaping Economic Geography[R]. New York, NY: Oxford University Press, 2009.
- 46 Neal Z. Differentiating Centrality and Power in the World City Network[J]. Urban Study, 2011, 48:2733-2748.
- 47 Hall P, Pain K. The Polycentric Metropolis. Learning from Mega-City Regions in Europe[J]. Journal of the American Planning Association, 2006,16:384-385.
- 48 于涛方, 邵军, 周学江. 多中心巨型城市区研究: 京津冀地区实证[J]. 城市规划, 2007, (12):15-23.
- Yu Taofang, Shao jun, Zhou Xuejiang. Research on Multi Center Mega-city Region—a Case Study of Beijing-Tianjin-Hebei Mega-city Region[J]. Planners, 2007, (12):15-23.
- 49 Scott A J, Agnew J, Soja E W, et al. Global City-Regions[C]//Scott A J, et al. Global City-Regions: Trends, Theory, Policy. Oxford: Oxford University, 2001.
- 50 武廷海, 张能, 徐斌. 空间共享——新马克思主义与中国城镇化[M]. 北京: 商务印书馆, 2014.
- Wu Tinghai, Zhang Neng, Xu Bin. Space Sharing: Neo-Marxism Theory and China's Urbanization[M]. Beijing: The Commercial Press, 2014.
- 51 武廷海. 统筹城乡发展 构建新型城乡格局[M]//吴良镛. 中国特色新型城镇化发展战略研究 第三卷: 城镇化进程中的城市文化研究. 北京: 中国建筑工业出版社. 2013.
- Wu Tinghai. Coordinating Urban-Rural Development and Building a New Urban-Rural Relationship[M]//Wu Liangyong. Study on Development Strategies for New-Type Urbanization with Chinese Characteristics (Volume 3): Urban Culture in the Process of Urbanization. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- 52 于涛方. 中国城市增长:2000-2010[M]//城市与区域规划研究, 2012, 5(2):62-79.
- Yu Taofang. Urban Growth of China in 2000-2010[M]// Journal of Urban and Regional Planning, 2012, 5(2):62-79.
- 53 龙瀛. 中国人口密度的时空演变与城镇化空间格局初探:2000-2010[M]//城乡治理与规划改革——2014中国城市规划年会论文集. 2014.
- Long Ying. Spatiotemporal Changes of Population Density and Urbanization Pattern in China[M]//Urban Planning Society of China Urban and Rural Governance and Planning Reform: 2014 China City Planning Conference Proceedings. 2014.