

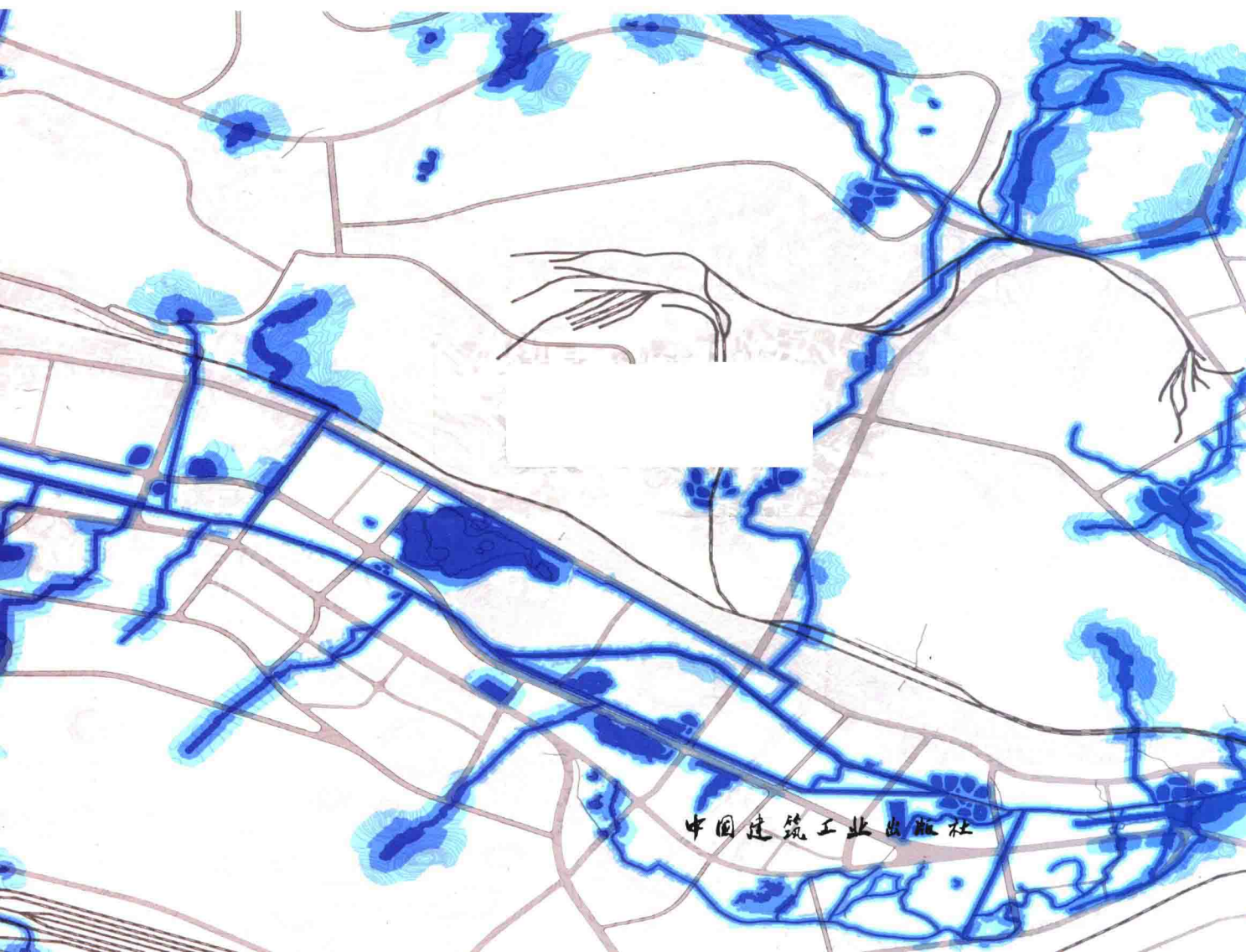


Sponge City: Theory and Practice

海绵城市

——理论与实践（下）

俞孔坚 等著



中国建筑工业出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

海绵城市

——理论与实践

Sponge City: Theory and Practice

俞孔坚 等著

(下)



中国建筑工业出版社

审图号 GS (2016) 1143号

图书在版编目 (CIP) 数据

海绵城市——理论与实践 / 俞孔坚等著. —北京: 中国
建筑工业出版社, 2016.6
ISBN 978-7-112-19489-6

I. ① 海… II. ① 俞… III. ① 城市—防洪工程—研究
IV. ① TU998.4

中国版本图书馆CIP数据核字 (2016) 第131705号

责任编辑: 郑淮兵 王晓迪
责任校对: 陈晶晶 刘 钰

海绵城市——理论与实践
Sponge City: Theory and Practice
俞孔坚 等著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
北京锋尚制版有限公司制版
北京方嘉彩色印刷有限责任公司印刷

*

开本: 880×1230毫米 1/16 印张: 51½ 字数: 1926千字
2016年7月第一版 2016年7月第一次印刷
定价: 368.00元 (上、下册)

ISBN 978-7-112-19489-6
(28607)

版权所有 翻印必究
如有印装质量问题, 可寄本社退换
(邮政编码 100037)

目录

序一	24 2.1.4 结语
序二	
序三	
1 导言 问题与背景	26 2.2 国外传统农业水适应景观研究概况
1 0.1 缘起	26 2.2.1 引言
1 0.2 海绵城市的中国性	27 2.2.2 造田方式和典型农业类型研究
1 0.2.1 复杂的水问题	29 2.2.3 适应性水利设施景观研究
2 0.2.2 水问题形成的自然背景	32 2.2.4 水灾害适应策略研究
3 0.2.3 水问题形成的社会经济背景	32 2.2.5 结语
4 0.2.4 常规解决途径的困境	
5 0.3 海绵城市理论与实践的发展	35 2.3 中国传统城镇水适应性景观概况
	35 2.3.1 引言
9 第一章 “海绵”与“海绵城市”的哲学	36 2.3.2 古代城镇的水适应性景观的外部环境
10 1.1 水殇	37 2.3.3 古代城镇的水适应性景观形态
11 1.2 雨殇	39 2.3.4 古代城镇的水适应性景观要素
12 1.3 海绵的哲学	42 2.3.5 古代城镇水适应性景观的价值和启示
13 1.4 新型城市的生态基础设施	
15 第二章 海绵城市遗产与综述	44 2.4 国外传统城镇水适应性景观研究概况
16 2.1 中国传统农业水适应景观概况	44 2.4.1 引言
16 2.1.1 引言	44 2.4.2 水适应性聚落选址
17 2.1.2 洪涝适应性农业景观	45 2.4.3 水适应性水利设施
20 2.1.3 干旱适应性农业景观	48 2.4.4 水适应性城市形态
	49 2.4.5 结语
	50 2.5 黄泛平原古城镇洪涝经验及其适应性景观
	50 2.5.1 引言
	50 2.5.2 黄泛平原城镇的洪涝灾害经验
	51 2.5.3 黄泛平原古城镇洪涝适应性景观
	55 2.5.4 结语
	57 2.6 黄泛平原“水城”景观及其保护
	57 2.6.1 引言
	57 2.6.2 黄泛平原“水城”景观及其形成

59		2.6.3	消失中的“水城”
60		2.6.4	回归“生存的艺术”：“水城”保护与建设途径
61		2.6.5	保护、恢复和重建与黄泛平原相适应的水系统：菏泽“水城”案例
63		2.6.6	结语

66 | 2.7 陂塘景观研究进展与评述

66		2.7.1	引言
66		2.7.2	陂塘的相关定义与特征测度
68		2.7.3	陂塘景观的生态功能
69		2.7.4	不同发展阶段下陂塘景观的变化
71		2.7.5	陂塘景观的综合评价、保护与利用
71		2.7.6	结语

72 | 2.8 国外现代城市雨洪管理发展综述

72		2.8.1	发达国家现代城市雨洪管理发展历程
73		2.8.2	发达国家可持续城市雨洪管理的进展
76		2.8.3	对我国城市雨洪管理的启示

77 | 2.9 城市水系统弹性研究进展

77		2.9.1	弹性概念的发展历程
79		2.9.2	城市水系统弹性概念及发展
81		2.9.3	城市水系统弹性的评价方法研究
81		2.9.4	弹性策略
84		2.9.5	研究展望

87 | 第三章 海绵城市定义及其构建方法

88 | 3.1 海绵城市是关于雨、水及其问题的价值
观、认识论和方法论

89 | 3.2 海绵城市是指建立在生态基础设施之上的健康的城市形态

90 | 3.3 海绵城市是一种以生态基础设施为先导的城市规划设计方法论

90		3.3.1	城市生态基础设施（海绵系统）的空间构建方法
90		3.3.2	多尺度的海绵系统与法定城市规划体系相对应

93 | 3.4 海绵城市工程是古今中外多种技术的集成

93		3.4.1	古代水适应智慧和技术遗产
93		3.4.2	生态设计和生态修复技术
94		3.4.3	当代雨洪管理技术

94 | 3.5 海绵城市体现在具体场地的系统设计

96		附1	构建生态基础设施的关键战略
101		附2	基于生态基础设施的城市“反规划”途径

108 | 第四章 宏观：海绵国土与海绵区域总体规划

109 | 4.1 国土尺度海绵系统：中国水生态安全格局

119 | 4.2 华北地区海绵系统构建

119		4.2.1	北京水生态基础设施规划：首都的海绵系统
127		附	北京中心城区内涝成因

136 | 4.3 黄淮下游平原海绵系统构建

136		4.3.1	东营案例：解决城市生态环境问题的生态基础设施途径
144		4.3.2	菏泽案例：作为禁建区的城市绿色海绵

152 | 4.4 长江中游平原海绵系统构建

- 152 | 4.4.1 岳阳案例：基于陂塘景观的海绵系统构建
- 177 | 4.4.2 黄冈案例：海绵城市规划与城市控制性规划的结合

190 | 4.5 江南水乡海绵系统构建

- 190 | 4.5.1 杭州案例：老城水系统的再生

202 | 4.6 东南沿海地区海绵系统构建

- 202 | 4.6.1 台州案例：基于生态基础设施的城市空间发展格局
- 218 | 4.6.2 福建东山案例：海岛型海绵系统构建

238 | 4.7 山东半岛海绵系统构建

- 238 | 4.7.1 威海案例：构建山海之间的城市海绵

249 | 4.8 四川盆地海绵系统构建

- 249 | 4.8.1 遂宁案例：海绵系统与城市总体规划的衔接

265 | 第五章 中观：海绵城市控制性规划

266 | 5.1 海绵系统优先的城市设计

- 266 | 5.1.1 玉环港北新区：从总体规划到控制性详细规划城市海绵
- 280 | 5.1.2 武汉五里界海绵城市设计：生态基础设施先行
- 292 | 5.1.3 重庆市江津北部新区：景观都市主义视角下的海绵城市设计
- 306 | 5.1.4 海口江东组团：热带滨海城市海绵系统构建
- 317 | 5.1.5 巴厘岛海龟岛：热带海岛雨洪管理系统构建
- 327 | 5.1.6 中关村生命科学园：海绵园区与创新网络

- 334 | 附1 中关村生命科学园中心区建成景观

- 340 | 5.1.7 中关村软件园海绵园区规划：生命之树概念

346 | 5.2 基于已有城市布局的海绵系统规划

- 346 | 5.2.1 广州天河智慧城海绵系统构建
- 366 | 5.2.2 西咸沣西新城海绵系统构建
- 376 | 5.2.3 天津南部新城海绵系统构建
- 389 | 5.2.4 大连太平湾临港经济区海绵系统构建
- 408 | 5.2.5 北京亦庄开发区南部产业新区海绵系统构建
- 415 | 5.2.6 美国密西西比河沿岸之明尼阿波利斯段海绵系统构建
- 432 | 5.2.7 俄罗斯喀山市卡班湖群海绵系统构建

450 | 5.3 海绵体规划

- 450 | 5.3.1 慈溪三灶江滨河区海绵系统构建：城市水系多目标景观设计
- 465 | 5.3.2 昆明滇池水系绿道：线性海绵系统构建
- 480 | 5.3.3 昆明滇池西岸生态基础设施：山湖海绵系统构建
- 495 | 5.3.4 美国奥斯汀沃勒溪：海绵技术营造城市绿洲
- 505 | 5.3.5 长江新济洲湿地生态修复：洲滩海绵体规划
- 511 | 5.3.6 遂宁圣平岛海绵岛屿设计：古代智慧启迪当代设计

521 | 第六章 微观：绿色海绵工程系统设计
与案例

522 | 6.1 海绵细胞，从小做起

- 523 | 6.1.1 家庭海绵技术概述

523 | 6.1.2 案例之一：北京褐石园公寓生态住家

532 | 6.1.3 案例之二：法国肖蒙的中国方圆

536 | 6.2 渗透消纳，化有为无

536 | 6.2.1 消纳技术概述

537 | 6.2.2 案例：国际关系学院校园

546 | 6.3 缓流滞蓄，聚水若财

547 | 6.3.1 滞蓄技术概述

547 | 6.3.2 案例之一：辽宁公安司法管理干部学院之海绵校园

565 | 6.3.3 案例之二：哈尔滨群力湿地公园：绿色海绵营造水弹性城市

578 | 6.4 与水为友，弹性适应

579 | 6.4.1 与水为友的技术概述

580 | 6.4.2 案例之一：浙江黄岩永宁公园

586 | 6.4.3 案例之二：金华燕尾洲

594 | 6.5 湿地净化，变废为宝

595 | 6.5.1 加强型人工湿地净化技术概述

595 | 6.5.2 案例之一：上海后滩公园：景观作为生命系统

617 | 6.5.3 案例之二：从郊外鱼塘到城市海绵——宜昌运河公园

625 | 6.6 回归生产，循环闭合

626 | 6.6.1 从“污水”到“肥水”的技术概述

626 | 6.6.2 案例之一：沈阳建筑大学稻田校园

635 | 6.6.3 案例之二：秦皇岛森林公园（二期）

641 | 6.7 仿生修复，自然做工

642 | 6.7.1 生态系统服务仿生修复技术概述

642 | 6.7.2 案例之一：天津桥园

651 | 6.7.3 案例之二：秦皇岛海滨生态修复

659 | 6.8 变灰为绿，去硬还生

660 | 6.8.1 水岸生物技术概述

662 | 6.8.2 案例之一：秦皇岛护城河生态修复

674 | 6.8.3 案例之二：宁波鄞州中心区水系生态修复

682 | 6.8.4 案例之三：中山岐江公园亲水生态护岸

688 | 6.9 最少干预，惜墨如金

689 | 6.9.1 最少干预的技术概述

690 | 6.9.2 案例之一：秦皇岛红飘带公园

698 | 6.9.3 案例之二：哈尔滨文化中心湿地

708 | 6.10 系统集成，综合治理

708 | 6.10.1 案例之一：六盘水城市水系统综合治理

724 | 6.10.2 案例之二：迁安市三里河绿道

736 | 6.10.3 案例之三：天津海河教育园区的量化海绵系统

762 | 参考文献

781 | 附件 关于建设生态基础设施及城市绿色海绵系统给中央和北京市领导的建议

802 | 本书贡献者

第六章

微观：绿色海绵工程系统设计 与案例

海绵城市在工程建设阶段，体现为运用景观设计途径，应用生态化的渗、滞、蓄、净、用、排等雨洪管理技术以及各种生态修复技术，来实现一个具有综合生态系统服务功能的“海绵体。”这里所说的景观设计途径就是系统地通过地形设计、水过程和格局设计（包括雨洪管理）、生物群落设计及人工构筑物等的设计，来实现一个人工生态系统，即设计的景观，在这里也即海绵体。评价这个设计的生态系统，或称为海绵体的成功与失败、好与坏的标准是其所能发挥的综合生态系统服务之强弱：包括供给和生产服务，以旱涝调节为核心的环境调节服务，生命承载服务，社会文化及审美启智服务。

在这里，我们必须强调生态系统的修复与海绵城市建设的不可分割性。水是城市生态系统的主导因素，滞蓄和利用雨洪本身就是生态系统修复的重要途径；同样，一个健康的生态系统，才能有效地实现自然渗透、自然净化和自然蓄存的

海绵城市目标。任何片面的灰色雨水工程、单一目标的渗、蓄、用或排的灰色工程，都是与海绵城市建设目标相违背的。

同时，还必须强调的是，尽管本章按每个案例所用的关键技术，来分类讨论海绵城市的工程技术，但是，所有项目实际上都是综合运用了可以滞蓄和有效利用水的生态雨洪管理及修复技术。1~4节主要针对水量，从雨洪的源头渗透消纳、过程缓流滞蓄、末端弹性适应的3个关键技术模块来讨论；第5节主要针对水质，说明水体的生物净化设计以及如何变净化过程为生物生产过程的设计；第6节重点说明利用雨水进行生产性景观的营造；第7、8节主要讨论利用雨洪管理过程进行生态修复以及通过生态修复来营造海绵系统的设计；第9节则强调保护和有效利用自然资源即是海绵城市建设最重要也是最节约的途径；第10节强调各种生态修复及雨洪管理技术的系统集成乃是建立城市海绵系统和建设海绵型城市建设的核心。

6.1 海绵细胞，从小做起

海绵城市，每个家庭能做什么？面对日趋严重的城市缺水、内涝等问题，不仅要依靠城市尺度的规划来解决，更需要发挥每个个体的作用。家庭水生态基础设施，是国土尺度水生态基础设施在社区尺度的延伸（俞孔坚，2015a；2015b）。利用每一个家庭细胞和社区绿地，收集雨水，绿化屋顶和宅院，则城市中 20% 以上的居住用地将成为城市雨水的收集海绵，城市内涝问题会得到极大的缓解。与地下水回补、洪涝调蓄这些宏观而学术的概念相比，以社区、居住区和家庭为单位，使雨水作为辅助水源的再利用，跟每个家庭、每个人的联系更加紧密。海绵城市的构建，区域水生态安全不再是遥远而摸不着的概念，而是与生活息息相关，每个人都可以参与的事。

在世界上的很多国家，都可以看到传统或现代的雨水存储设施。雨水可以作为主要水源、辅助水源以及消防水源等。从 20 世纪 70 年代开始，发达国家为保护水环境及充分利用水资源，开始研究和应用雨水收集、处理等技术，使雨水成为高效利用的淡水资源（王鹏和林华东，2006）。德国是欧洲开展雨水利用工程最好的国家之一，雨水利用的形式有屋面雨水集蓄系统、雨水净化与渗透系统以及生态小区雨水利用系统等（李俊奇和车伍，2002）。日本由于水资源较为匮乏，也十分注重雨水的收集和利用，在一些建筑物上设计收集雨水利用设施，用于消防、绿化、冲厕

等，甚至经处理后供居民饮用。日本在建筑物上收集雨水，多采用沉淀、过滤以及分离设置微滤网等，并定期对雨水贮存池进行消毒。同时，日本也将雨水向水资源更为匮乏的地区出口，成为财政收入的一部分（杨文磊，2001）。美国的住宅小区则采用建设屋顶蓄水设施、入渗池、草地、透水地面组成的地表回灌系统的方式，在收集雨水的同时，提高雨水入渗能力（全新峰等，2006）。而在发展中国家，尤其在水资源缺乏的地区，也在依靠简单的雨水存储系统解决居民用水问题（Waller，1989）。国内城市住宅小区雨水利用相对国外发展较慢，仍处于技术落后的阶段（李松良等，2014）。对普通的家庭来说，并没有雨水收集的意识，而个别小区虽建设了雨水收集设施，但投资昂贵且不见成效。如何让大量的普通家庭简单可行地收集雨水，并用雨水替代日常生活的部分用水，是一个难题，却更是一个可以高效解决城市水问题的重要举措。同时，雨水在家庭中的合理利用，可以有效节约建筑耗能。江亿院士（2008）指出城镇住宅应严格控制某些所谓“高技术”甚至于“节能技术”的高耗能技术的应用，如住宅中央空调、住宅的集中制冷等。通过加强住宅建筑的通风、遮阳，尽可能在夏季的大部分时间中依靠自然通风就可以获得较好的室内舒适度，而不完全依靠空调。通过雨水的合理再利用，达成建筑内部的增湿降温目标是一种非常自然和生态的建筑节能方法。

6.1.1 家庭海绵技术概述

家庭水生态基础设施（家庭海绵）技术不单单只是一个概念，需要多种的技术支撑来实现，它是对既有建筑进行绿色改造的一种有效方式。

（1）家庭雨水收集系统和雨水花园。屋面雨水收集系统主要的组成部分包括雨水收集面、集水槽、落水管、处理和储存装置等（魏胜等，2012）。在集水槽檐沟处放置过滤网，作为雨水处理的第一道工序，其可将雨水中尺寸大的杂物分离出来（韦啸，2015）。在雨水落入落水管后，可进一步对雨水进行处理，而后经过管道进入家庭的储水箱。针对全年雨量分布不均的季风气候地区来说，干湿2季所收集的雨水不同，国外学者为此研究得出增加储水箱的容积可增加用水效率或满足居民更多的用水量，且储水箱容量设计与家庭雨水需求和降雨量密切相关，但在巴西的实例表明储水箱增加1000 L，雨水利用率只增加不到2%（Ghisi, et al., 2007），韩国的研究发现可持续供水的雨水储存箱设计容量太大，并不经济可行（Jung, et al., 2015）。对于中国目前小区居民住宅楼容积率高的现状来说，是无法满足大容量储水箱的存放的。有限、直接利用雨水的方法则更适合中国家庭目前的基本情况。

除储水箱外，在有条件的情况下，如社区的公共绿地，农村宅基地以及城市或郊野的别墅区，雨水花园是收集利用雨水、解决内涝、同时营造良好人居环境的有效途径。中国古代聚落中的水塘、荷塘，甚至每家每户的天井，都是很好的雨水收集系统，可为当代雨水花园的设计提供灵感。

（2）设计阳台花园，利用雨水创造生产性景观。阳台是室内向外延伸的平台，也是室内环境与室外转换最为直接的场所。阳台花园不仅可以成为室内空间的借景，提供人们休憩的场所，而且是室内和室外空气交换的缓冲空间。因此，阳台可以成为最佳的雨水利用场所，通过简单的方式收集雨水，利用雨水灌溉阳台植物，为家庭创造可食用的免费食材。而阳台通过更加精细化的设计，可实现更加多元化的雨水利用方式。

（3）利用雨水生态墙调节室内温度和湿度。植物、水体可以营造令人舒适的微气候，室内生态墙是近年来室内生态设计的新概念，它将植物以无土栽培

的方式种植在墙面上，并与室内环境融为一体，这种“生长着的墙”夏天能吸热，冬天能加湿，将成为室内设计的新风尚。生态墙垂直绿化的方式，在有限的室内空间里具有节省空间、调节温湿的作用，相比目前更多利用地面空间的绿化具有很大优势（孙小娇，2011）。而生态墙的用水来源可通过收集的雨水来实现，完全发挥自然中雨水滋润大地、给予万物生命的力量，相比家用自来水来说，雨水中含有的物质更加有利于植物的生长，利于绿色生态墙的构建。

（4）营造建筑自然通风体系。家庭雨水收集利用已经开启了将自然之力引入家庭环境的旅程，为进一步实现建筑的低耗能奠定了基础。在雨水、绿植引入家庭后，再配合自然通风系统，日常家庭通风、降温的耗能将大大减少。自然通风是一项古老的技术，与复杂、耗能的空调技术相比，自然通风是一项廉价而成熟的低技术（付新才，2011）。自然通风条件下的人体热适应范围宽于空调或供暖环境，夏季或冬季的热中性温度分别高于空调或低于供暖环境，这是其节能的主要原因之一（殷维等，2013）。自然通风可通过风压、热压、风压热压结合、机械辅助以及玻璃的双层围护结构等方法来实现（杨建昭，2006）。而具体到建筑设计，设置进风口窗户的面积大小以及窗口的朝向，利用双层玻璃、中庭、屋顶等可以达到较好的通风效果（刘琰，2014）。

6.1.2 案例之一：北京褐石园公寓生态住家¹

案例概要

项目位于北京的一个中高密度社区——北京褐石园，社区由5层高的公寓楼组成，容积率为1.2。北京气候恶劣，冬季寒冷（一般夜间最低温度可以降到-15℃到-10℃），夏季炎热（日间最高温度可高达35~38℃）；春季和秋季干燥，且昼夜温差很大，春季还会出现沙尘暴。年降水量达到500 mm，主要集中在夏季，春季和秋季干旱少雨。本案例使用了社区内2个位于5层的相邻公寓单元进行实验，主要的改造集中在公寓中2个主卧外，以及南向的阳台和分隔这2个公寓客厅的隔墙上。每个约30 m²；隔墙墙面约11 m²（图1）。

这是一个运用家庭水生态基础设施理念，充分利

¹来源：本节内容最早发表于：俞孔坚，宋本明.低碳住家——北京褐石公寓改造设计[J].建筑学报，2010（08）：33-36.

用收集的雨水，将高能耗的住宅建筑向绿色建筑转化的实验性项目，具体做法如下：

（1）改造阳台结构，收集雨水

由于北京较恶劣的气候时间很长，2个主要卧室外的阳台得不到高效使用。但阳台的优点是与室外环境的衔接，相比室内环境来说，没有对于湿、温度等更多的要求，这也是选择阳台进行此次实验的一个原因。改造前的阳台是一个未封闭的空间，下雨时，雨水洒落在屋顶和阳台上，通过阳台上的落水管排到城市排水管网中，该项目的目标就是把每次的降雨留下来，储存在阳台上，再根据人们的需要加以利用。

首先是雨水收集，设计选择整个建筑的屋顶作为雨水收集面，根据屋顶原有的排水结构和落水管结构，在落水口设置集水檐，使雨水流入连接雨水储存箱的管道。管道口设置过滤网，防止管道的阻塞，管道下方连接雨水过滤装置，进一步净化雨水。该过滤装置设置在阳台靠近墙壁的一侧，可整体拆卸，方便定期维护。雨水经过处理后，直接进入雨水储存箱进行存放，储存箱设有通风换气装置，防止水体变质。储存箱围绕阳台四周设置，以尽量减少空间占用，也力求在有限的空间内，尽量多地收集雨水。储存箱与水池连通，水池水面到达一定高度，则通过溢流装置流入建筑落水管，防止雨量过多时，储水箱无法存放。

整个雨水收集设施与建筑排水相结合，将屋顶原本要排走的雨水，收集在阳台上，在无法收集更多时，选择将其排出，在雨洪管理系统中，这就是一个贮留池（retention basin）的概念，在城市暴雨过程中，对减少洪峰具有非常明显的作用，而对于家庭来说，利用收集的雨水，也不失为经济的选择。

（2）雨水的利用方式：阳台菜园和花园

为了使阳台更加美观和实用，改造设计的目标是将它们转化为温室花园，一个是服务于厨房的生产性蔬菜园，另一个是为主卧室准备的可食用芬芳花园。这两个花园的平面布局 and 空间结构完全相同，由中间的水池和汀步构成的花园，允许人们到达每一个角落。水池采用整体的钢板结构，结合种植槽的形状，完整地嵌入整体的结构中，很好地避免了水池渗水的情况。另外，通过控制雨水储存箱的水阀，可以轻易增添水池的水量。种植槽由钢板制成，放置在雨水储存箱的上方，呈台地式布置四周，这样为种植区节省了空间，也使得植物能够充分接受阳光。种植槽内放置可拆卸的种植箱，便于后期的清理维护。种植箱旁堆积轻质多孔的上水石，设计成小型跌水，水的来源即为收集的雨水，通过管道和小型水泵就可以实现良

好的景观效果。跌水、水池和储水箱三者是一个连通的结构，跌水可增加水含氧量，保证了2个花园水中所养游鱼对水质的要求。游鱼和跌水不仅可供娱乐，更重要的是维护水质，避免收集的雨水中蚊蝇滋生。与卧室连接的木质平台漂浮于水面上，可以成为纳凉和晨练的场所，业主甚至可将它作为仰观星空的另一卧床。面向花园的卧室外墙面和温室顶部由木格栅构建，木格栅采用3 cm×3 cm木条以20 cm×20 cm间距排布，以便垂直绿化，使空间的尺度和质感更加宜人，并调节进入温室内的光线（图2）。

由于阳台上的设施要求，阳台无法进行防水工程的改造，设计者在水池、储水箱、种植箱等下方均设有2~3 cm高的垫块，其彼此之间又均为相对独立的结构，仅由管道输送雨水，这样的设计不破坏阳台原有的防水设计。在种植箱底部有渗水的小孔，其上铺设无纺布后，再放入土壤种植植物，保证了植物根部的呼吸。种植箱底部渗出的水均利用阳台原有的排水装置，通过2~3 cm垫高的空间，进入落水管，而不会对水池、储水箱等结构造成影响。

尽管结构相同，但2个阳台花园选用植物材料完全不同。在蔬菜园中，通过对种植槽中不同蔬菜的色彩、高度、形态、习性的选取，制定了四季可以轮作的种植方案（图3）。在芳香园中，选用亚热带的芳香植物，例如栀子花、桂花、夜来香、茉莉、白兰、薄荷等。这些植物为卧室创造了一个芳香的休息环境。

阳台花园成为室外环境与室内环境的缓冲区域。炎热的夏天，室外高温的空气经过花园后温度降低，使得室内空气更加凉爽；严寒的冬季，室外寒冷干燥的空气经过花园的升温 and 加湿，使室内更加保温和舒适。同时，花园成了主人室内空间向室外的延伸，在高密度的城市中，独享属于自己的绿色空间，体会生产性景观的乐趣和艺术（图6、图8）。

（3）雨水的利用方式：生态墙

为了改善室内温湿，设计师将分隔这2个公寓单元的隔墙设计为一道“生态墙”，该项设计获得发明专利，比传统的空调制冷加湿器调节湿度更加低碳环保，且具有装饰室内环境的作用。更重要的是，利用收集的雨水创造景观的生态墙，为家庭雨水利用增添了新的理念。

该上水石生态水景墙，由钢板构成主要框架，内侧与墙体连接固定，外侧挂以多孔隙石灰岩，上水石墙外侧上端布置溢水槽，由循环水泵通过输水管将水送至溢水槽，向上水石淋灌雨水，墙下端设置与钢板一体化的水池，水池外侧为木质坐凳，水池底部布置循环水泵。该发明充分发挥了上水石优良的吸水

性，幕墙所占空间小，与空气接触面大，能维持墙体潮湿，发挥其散发湿气、自然降温的作用。由于上水石材质较轻，不需要对地板进行额外的加固处理。而且该生态墙是一个整体结构，不需要额外的防水处理（图9）。

利用上水石多孔渗水的特征，墙体吸收和滞留墙顶流下的水分，同时上水石也能给予苔藓和岩生植物以生长的环境，从而使整个墙体成为一个气候的调节器。在炎热的夏季，蕴含水分的墙体蒸发带来了阵阵清凉，替代室内空调的使用；在干燥的冬季，带来充沛的湿气；墙体上的岩生植被，散发来自大自然的芬芳（图8）。

（4）利用自然通风和阳光，乐享低碳生活

阳台的温室罩面用玻璃和遮阳格栅结合而成，以便控制光线进入强度。同时窗户可以手动开启，便于空气流通。利用风压和热压相结合的方式，巧妙地利用屋顶，引导自然风进入阳台和室内。另外，屋顶安装太阳能光热板，收集的太阳辐射可用于提供家庭厨房及洗浴需要的水（图14）。

雨水、风和太阳能这些自然的元素，免费构建了这一家庭水生态基础设施，将一个高能耗的住宅建筑，转化为绿色低碳、舒适的居家环境。

（5）工程实施效果

a. 生态效益

经过7年多的实验，改造的设想基本得到了实现，节能和改善环境的效益明显，2个阳台收集的雨水每年可达到52 m³左右，具体数据如表1所示。

北京褐石园单个阳台花园 2009—2010 年度雨水收集
利用数据统计 表 1

雨水收集量（2009 年 07 月至 2010 年 06 月）		
月份	季度雨水收集量 /m ³	年雨水收集总量 /m ³
2009 年 07 月—2009 年 09 月	15.8	26
2009 年 10 月—2009 年 12 月	1.9	
2010 年 01 月—2010 年 03 月	2.1	
2010 年 04 月—2010 年 06 月	6.2	

b. 经济效益

阳台的生产性景观，创造了良好的经济效益，生产的蔬菜为家族餐桌提供了新鲜的美味（图15），具体的蔬菜产量如表2所示：

北京褐石园单个阳台花园 2009—2010 年度
蔬菜生产数据统计 表 2

蔬菜产量（一个生长周期）	
品种	产量 /kg
小白菜	13.8
豆角	3.6

与此同时，由于夏季不开空调，且秋冬不开加湿器，两套公寓相较于同等户型和面积的住宅，每年共节约的用电量达4000多度。

c. 社会效益

该项目建成后吸引了大量的人员前来参观，起到了良好的教育启智作用。本案例通过雨水收集、太阳能和生态墙的设计，用极低的投入，将一个本来耗能的建筑，改造为低碳的绿色建筑，有效地降低了能源的开销，同时提供了兼具生产功能的舒适的居住环境。它表明将生态设计作为一种系统策略，整合技术资源，用最少的投入、最简单的方式将一个普通住宅向绿色建筑进行转化的可行性。通过阳台花园和生态墙的使用和体验，教育城市公民，倡导低碳的生活方式（图16）。

d. 后期经验和建议

阳台通风问题。由于施工时难以实现，玻璃罩面的顶部未设置可开启的窗户，后期使用也发现阳台的通风效果并不理想，冬天相对舒适，夏天则相对较热。而对于南北通透的住宅来说，这一影响将会减轻，与阳台相连接的房间对空调的使用也会大大降低。若对玻璃罩面进行改造，可在罩面外侧的顶部增加电动的遮阳篷，其上利用30 cm高的钢结构撑起另一附加的玻璃罩面，形成保温隔热的空气层，主人可自行控制遮阳篷改善室内温度，对目前夏天较热的状况会有很大改善。

储水箱容量问题。受阳台面积以及承重能力的限制，雨水储存箱的设计容量较低，并不能完全满足全年阳台和生态墙的用水量，加之北京的降雨全年分布不均，需要更大容量的储水箱才能持续供水。而对于南方全年降雨比较充沛的地区来说，对雨水储存箱的容量要求则会降低许多，该实验在南方地区的适宜性远远高于北方。

阳台水循环问题。实验之初设计的储水箱，仅有水阀可直接取用雨水，储水箱和水池并未与种植槽连接，仍需要手动浇灌植物，水池的水体更换也必须将水排入落水管。更新的设计则可将水池的水通过管道，采取滴灌的技术，对种植槽中的植物进行浇灌，进一步循环利用水资源。对家庭而言，自行用水池中

的水浇灌植物也是可取的。

生态墙上水问题。后期的实验发现，生态墙上植物的分布与水体经过的路径密切相关，呈现植物生长与落水路径一致的现象，上水管道的设置是生态墙景观效果的关键。该实验项目中，一侧生态墙由于落水管落水的效果不理想，导致生态墙植物生长较少，而在更换了更合适的落水管后，生态墙的植物生长增多。

投资和维护问题。该实验的2个生态墙共投资45000元，维护方便简单，在雨水利用方面取得了良好的效果。阳台花园的投资则较多，总计约为20万元，对普通家庭来说是一笔不小的费用。后期维护虽不多，但花园仍是需要人用心管理的。故结合以上建议，自动化的管理则更适合现代人的生活方式，相信在以后的阳台花园设计中，类似的问题将会逐一解决。

未来的家庭水生态基础设施，需要更加科学化的管理。若希望雨水持续供应，则需要根据当地的降雨

量、雨水收集面积、水日需求量等数据，精确计算雨水储存箱的容量。或许这对于单一家庭来说，建立一套家庭水生态基础设施较为困难，未来的社区可几户人家共享一套设施，则会更加经济高效，且对于促进社区邻里关系有着积极的作用。

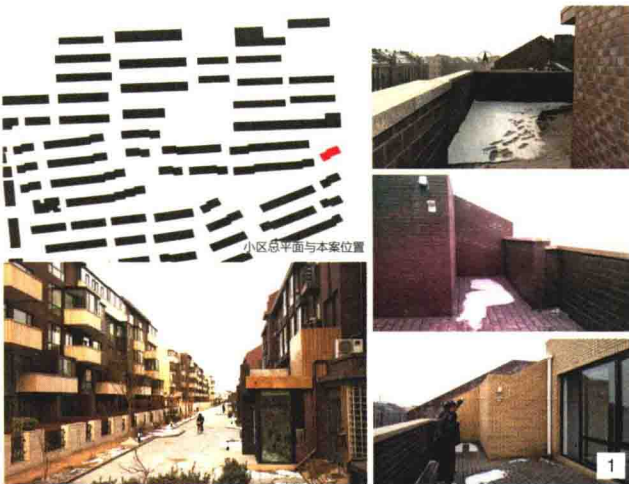


图1 区位与现状（中高密度社区，难以使用的阳台，高能耗的建筑）

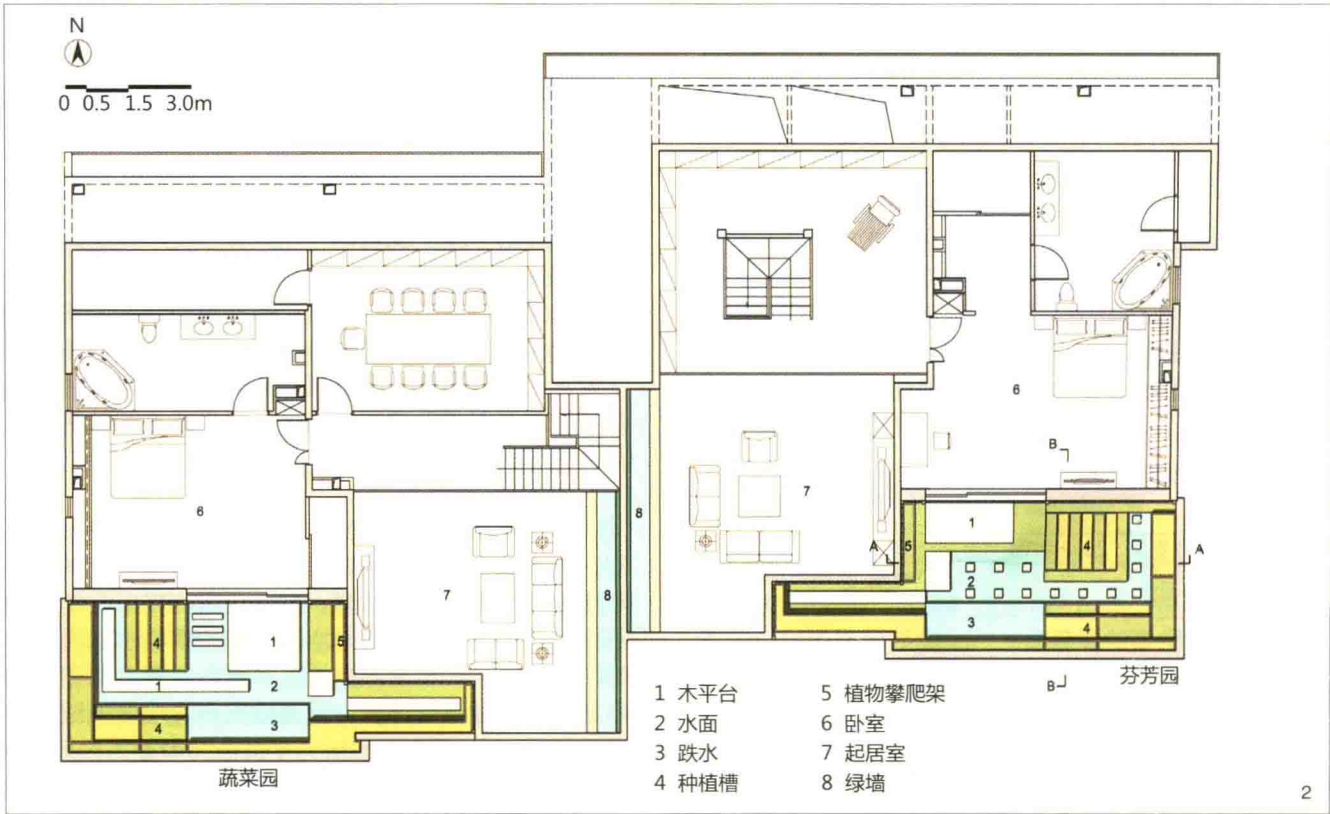


图2 改造项目总平面图。2个雨水收集阳台变成温室，由中间的水池和汀步构成的花园，允许人们到达每一个角落。一个木质平台漂浮于水面上，仿佛是从一玻璃墙相隔的卧室中伸展出来的

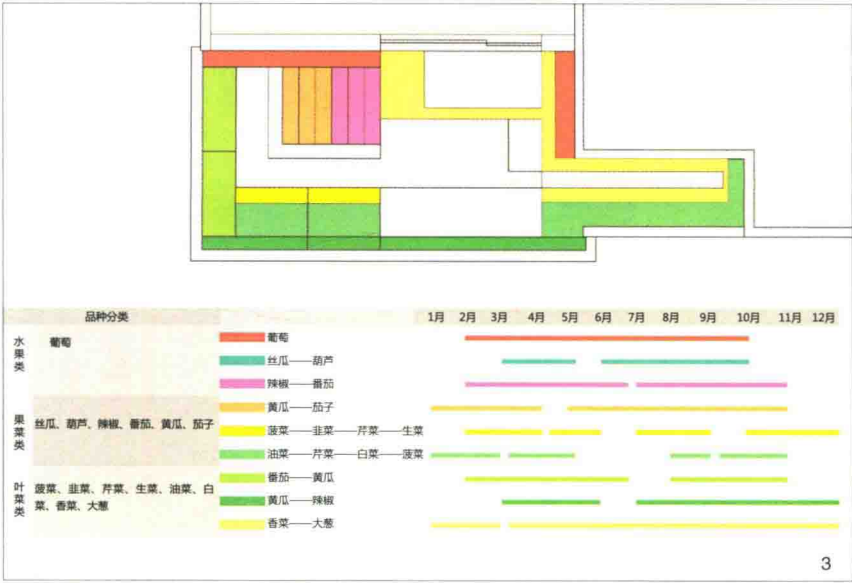


图3 阳台花园蔬菜种植四季轮作图。花园春季可以采收香菜、油菜，夏季可以品尝番茄、黄瓜，秋季可以收获葫芦、葡萄，冬季可以乐享生菜、辣椒。



图4 阳台花园设计效果图一



图5 阳台花园设计效果图二

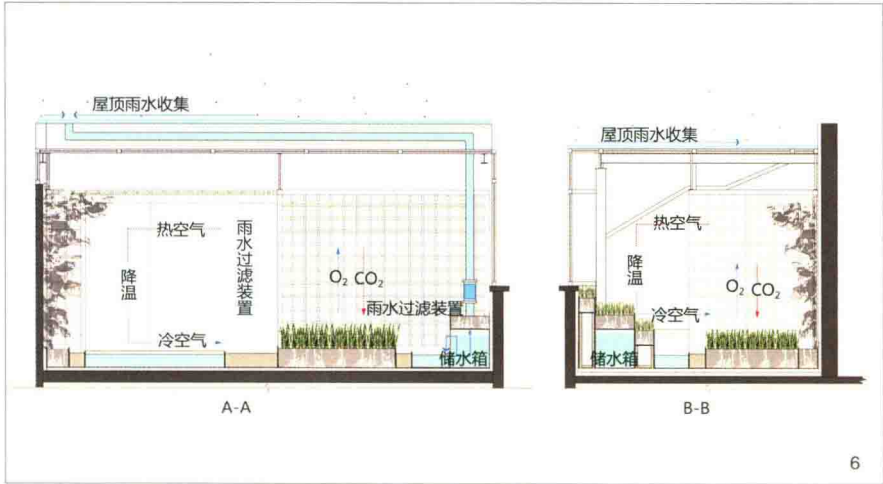


图6 阳台A-A、B-B剖面图

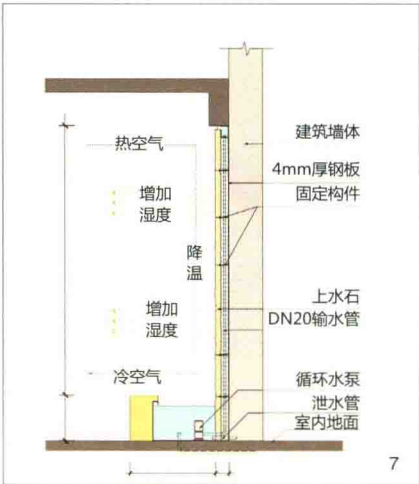


图7 上水石生态水景墙剖面设计图



图8 阳台墙施工过程图



图9 生态墙施工过程图



图10 生态墙建成后俯视效果。经过几年的使用，它已经展示了2个公寓在夏季时不使用传统电力空调，同时在冬季不需要使用加湿器的情况下也可以创造一个舒适的居室环境



11

图11 生态墙建成后效果。在炎热的夏季，蕴含水分的墙体带来了阵阵冷空气，替代室内空调的使用；在干燥的冬季，带来充沛的湿气，减少加湿设备的运转



12

图12 上水石多孔渗水的特征，吸收和滞留墙顶流下的水体，同时上水石也能给予苔藓和岩生植物以生长的环境，图为生态墙建成后墙上长出的植物



13

图13 具有“海绵”功能的生态墙是一个活的生态系统，在雨水的滋润下能自我繁衍，维护成本很低：图中分别为2010，2012和2015年同一局部的墙体效果

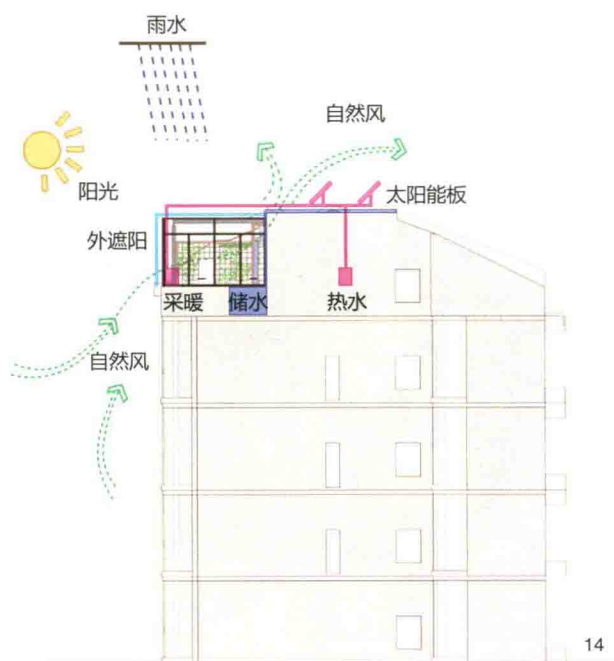


图14 太阳能与通风示意图



15a



15b

图15 阳台上生产的蔬菜，产量可观