【专题：海绵城市 / Sponge City】

·特邀专题策划：刘建，任心欣·

基于深圳典型片区海绵城市监测评估的思考

彭世瑾¹，胡爱兵²，史敬华¹，李春菊³，刘侃¹，吴建雄¹，李敏浩¹，卢敏¹

1) 深圳市建筑科学研究院股份有限公司，广东深圳 518049；2) 深圳市城市规划设计研究院有限公司，广东深圳 518049；3) 深圳市盐田区水务局，广东深圳 518081

摘要：为研究不同本底特征与城市建设特性下海绵城市建设特点，选择中国深圳市4个典型海绵城市监测评估区：光明区国家海绵城市建设试点区域5[#]排水分区（旧工业区城市更新型）、15[#]排水分区（老旧小区与旧工业区综合整治型）、坪山区新和水流域（内陆型）以及盐田区大梅沙片区（临海型），以年径流总量控制率为评价指标，对4个监测评估区的建设的阶段性成果进行总结与对比。分析发现，4个监测评估区的年径流总量控制率均达到上位规划对监测评估区的目标要求，但是，监测评估区不同的城市建设特性、水系调蓄性能等因素与海绵城市建设成效密切相关。提出现阶段海绵城市建设工作严抓项目合规性建设的同时，进一步强化在规划框架下以片区效应平衡统筹为策略。针对片区所面临的城市雨水问题，深度识别片区所拥有的本底资源与高效能海绵承载空间，注重综合统筹，强调系统内部共同分担、资源整合解决实际问题；突出海绵城市系统化、成片化推动，促进整体达标效能，提高海绵城市连片效应和显示度；引导海绵城市建设站在片区层面，从系统达标出发，实现连片效应的初步设想和建议。

关键词：海绵城市；监测评估；排水分区；年径流总量控制率；水系调蓄性能；海绵承载空间；连片效应
中图分类号：TU992；X835 **文献标志码：**A **doi：**10.3724/SP.J.1249.2021.01001

Reflection on the sponge city monitoring and evaluation in Shenzhen

PENG Shijin¹, HU Aibing², SHI Jinghua¹, LI Chunju³, LIU Kan¹,
WU Jianxiong¹, LI Minhao¹, and LU Min¹

1) Shenzhen Institute of Building Research Co. Ltd., Shenzhen 518049, Guangdong Province, P. R. China
2) Shenzhen Urban Planning and Design Institute Co. Ltd., Shenzhen 518049, Guangdong Province, P. R. China
3) Bureau of Water Resources of Yantian District, Shenzhen, Shenzhen 518081, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: To study the characteristics of sponge city construction under different background and urban construction characteristics, choosing No. 5 drainage area (urban renewal of old industrial districts) and No. 15 drainage area (comprehensive improvement of old residential and industrial area) in Guangming District, Xinhe water basin in Pingshan District (inland area), and Dameisha area in Yantian District (coastal area) as typical sponge city monitoring and evaluation areas, we summarize and compare the phase achievements of monitoring and evaluation in four areas based on volume capture ratio of annual rainfall. The volume capture ratios of annual rainfall in the four areas have reached the target set by the upper planning. Moreover, the characteristics of urban construction and the regulation and storage performance of water system are correlated with the construction effect of sponge city in the

Received: 2020-09-01; **Accepted:** 2020-09-27

Foundation: National Key R & D Program of China (2018YFC0704900); National Natural Science Foundation of China (52078006)

Corresponding author: Professorate senior engineer PENG Shijin. E-mail: 87183334@qq.com

Citation: PENG Shijin, HU Aibing, SHI Jinghua, et al. Reflection on the sponge city monitoring and evaluation in Shenzhen [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(1): 1-9. (in Chinese)

four areas. We propose that the construction of sponge city should not only strictly focus on compliance construction, but also strengthen the balance and coordination of contiguity effect under the planning framework. Focusing on the urban rainwater issues, we deeply identify background resources and high-efficiency sponge bearing space of the area, pay attention to the comprehensive planning, and emphasize the internal co-ordination and integration of resources to solve practical problems systematically at district level. We emphasize the systematization and regional effect of sponge city, promote the overall efficiency of reaching the standard, and improve the contiguous effect and display degree of sponge city. We suggest to guide the sponge city construction station to realize the contiguous effect from the perspective of system reaching the standard at the district level.

Key words: sponge city; monitoring and evaluation; drainage zoning; volume capture ratio of annual rainfall; river storage performance; sponge bearing space; contiguity effect

2016 年 4 月, 深圳市入选国家第 2 批海绵城市建设试点城市之后, 创新性地快速建立了市、区二级海绵城市建设工作领导小组办公室, 全面统筹协调与推进全市海绵城市建设工作, 在全市各类项目(包括房建、水务、市政和公园等)建设中全面融入海绵理念. 至 2019 年底, 全市已完成海绵城市建设面积 226.00 km², 占城市建成区面积的 23%, 提前 1 年完成国家海绵城市建设目标(即城市建成区 20% 以上的面积达到海绵城市建设要求), 通过国家海绵城市建设试点工作国家专家组验收^[1], 绩效考核成绩名列前茅^[2], 积累了可借鉴可复制的宝贵经验.

为全面系统评估海绵城市建设成效, 深圳陆续开展了海绵城市的监测评估工作, 在全市各行政区选择适宜片区(面积不小于 2 km²), 按片区达标为目标, 开展海绵城市建设效益监测与评估. 在客观评价成效的基础上, 总结既往的实践经验、发现存在的主要问题、思考未来的工作方向、探索建设实施的新路径. 本研究分析总结代表深圳市特点的 4

个典型海绵城市监测评估区的阶段性成果, 提出以片区综合统筹推进海绵城市系统达标实现连片效应的新思路.

1 深圳市海绵城市监测与评估概况

深圳在全市域全面开展海绵城市建设同时, 包括光明区国家海绵城市试点区域在内的多个行政区也同步开展了海绵城市建设效应的监测评估, 全市海绵城市监测评估分为 3 个阶段:

1.1 《海绵城市建设评价标准》实施之前

深圳市开始全面推进海绵城市建设时, 部分区域便同步探索海绵城市建设效应的监测评估, 如南方科技大学(图 1, 所用监测设备有多普勒流量计、明渠流量计和悬浮固体(suspended solids, SS)浊度仪)、龙岗区国际低碳城^[3]和光明区国家海绵城市试点区域等. 此阶段的监测评估主要依托科研项目, 以科研目的为主, 其监测与评估方法与 GB/T 51345《海绵城市建设评价标准》存在差异^[4].

(a) 南方科技大学监测点分布

(b) 南方科技大学植被缓冲带地下径流监测点位实景

图 1 南方科技大学海绵城市监测点位

Fig. 1 Sponge city monitoring points in Southern University of Science and Technology

1.2 《海绵城市建设评价标准》实施后监测评估

2019 年始, 深圳市各区陆续开展了海绵城市监测评估工作, 各区选取面积大于 2 km² 的区域, 按照 GB/T 51345 《海绵城市建设评价标准》和《海绵城市建设绩效评价与考核指标 (试行)》^[5] 等文

件要求开展监测评估工作. 截至 2020 年 6 月, 达到海绵城市建设要求的片区 (流域) 全市累计共 43 个 (包括光明区国家海绵城市试点区域). 深圳市海绵城市达标片区分布如图 2 所示.

图 2 2020 年深圳市海绵城市达标片区分布
Fig. 2 Distribution of standard areas of sponge city in Shenzhen in 2020

1.3 预期达标片区的监测评估

基于已开展的海绵城市监测评估经验, 按 GB/T 51345 《海绵城市建设评价标准》, 预期 2021—2022 年达到海绵城市建设要求的片区全市共

计 10 个, 如表 1 和图 3 所示, 这些片区在 2021—2022 年将按照 GB/T 51345 《海绵城市建设评价标准》开展建设并同步进行监测评估.

表 1 深圳市 2021—2022 年海绵城市预期达标片区表

Table 1 The areas expected to reach sponge city standard in Shenzhen during 2021—2022					
编号	行政区	预期达标片区	总面积/km ²	建设用地面积/m ²	预期达标年限
1	福田区	梅林片区	4.24	3.24	2021
2	罗湖区	清水河片区	1.27	1.19	2021
3	盐田区	盐田河南片区	2.69	2.56	2022
4	南山区	华侨城湿地、欢乐海岸片区	3.79	3.79	2021
5	宝安区	立新湖片区	6.05	3.92	2021
6	宝安区	大空港启动区	5.86	4.66	2022
7	龙岗区	大运新城北侧片区	7.31	5.15	2022
8	坪山区	大山陂水	7.20	1.01	2022
9	大鹏新区	下沙片区	4.29	1.59	2021
10	前海合作区	前海海绵管控单元 6	0.34	0.30	2022
合计			43.04	27.09

图 3 2021—2022 年深圳市海绵城市预期达标片区分布

Fig. 3 Distribution of areas expected to reach sponge city standard in Shenzhen during 2021—2022

2 深圳典型片区海绵城市监测评估现阶段成果

至 2020 年年中, 全市各区的海绵城市监测评估工作均已取得阶段性成果, 本研究选择深圳市 4 个典型海绵城市监测评估区: 光明区国家海绵城市建设试点区域 5[#]排水分区 (旧工业区城市更新型)、15[#]排水分区 (老旧小区与旧工业区综合整治型)、坪山区新和水流域 (内陆型) 以及盐田区大梅沙片区 (临海型), 以年径流总量控制率为评价指标, 对 4 个监测评估区的阶段性成果进行总结与对比, 分析不同本底特征区海绵城市建设特点. 4 个监测评估区区位如图 4 所示.

图 4 深圳市 4 个典型海绵城市监测区分布

Fig. 4 Distribution of the four standard monitoring areas in Shenzhen

2.1 光明区

光明区地处深圳西北部, 区域面积 156.10 km², 建设用地面积 71.90 km², 是国家海绵城市建设试点区域 (凤凰城) 所在地. 试点区域共分 19 个排水分区 (图 5), 结合试点区域建设现状、规划目标, 以及模型模拟分析, 综合确定试点区域年径流总量控制率规划目标不低于 70%, 如表 2 所示.

表 2 试点区域年径流总量控制率规划目标表¹⁾

Table 2 Planning objective of volume capture ratio of annual rainfall in pilot area

排水分区 编号	年径流总量 控制率/%	排水分区 编号	年径流总量 控制率/%
2 [#]	72	12 [#]	60
3 [#]	66	13 [#]	70
4 [#]	95	14 [#]	95
5 [#]	50	15 [#]	50
6 [#]	66	16 [#]	50
7 [#]	68	17 [#]	75
9 [#]	50	18 [#]	50
10 [#]	67	19 [#]	69
11 [#]	50		

¹⁾ 1[#]和 8[#]为河道分区; 4[#]和 14[#]为水库分区

如表2中,5[#]排水分区以旧工业区城市更新为主、15[#]排水分区以老旧小区和旧工业区综合整治为主开展的城市建设.2个排水分区年径流总量控制率规划目标均为50%.

试点区域内共设置降雨量、流量、液位和水质在线监测点位167个,其中,包括49个管网排口监测设备,获取连续一个雨季的监测数据.建立试点区域各排水分区海绵城市数学模型,利用监测数据对试点区域内不同下垫面参数进行率定,将所率定的参数代入各排水分区的海绵城市数学模型,以2019年3月至9月所监测的2280mm的降雨厚度,对5[#]和15[#]排水分区雨季(3月至9月)径流总量控制率进行模拟评估.

图5 光明区凤凰城监测点位分布

Fig. 5 Monitoring points in Fenghuangcheng, Guangming District

5[#]排水分区面积为0.57 km²,根据模拟,2019年雨季该区总降雨量为130.23万m³,总排出量为59.93万m³,径流总量控制率为54.0%,其中,各月径流量控制率为46.1%~67.0%,如图6所示.5[#]排水分区2019年雨季实际径流量控制率高于规划目标(50%)的要求.

15[#]排水分区面积为0.31 km²,根据模拟,2019年雨季该区总降雨量70.71万m³,总排水量34.29万m³,径流总量控制率为51.5%,其中,各月径流量控制率为45.9%~57.2%,如图7所示.15[#]排水分区2019年雨季实际径流量控制率高于规划目标(50%)的要求.

通过以上监测模拟结果,2个排水分区雨季径

图6 2019年3—9月5[#]排水分区径流控制率

Fig. 6 Volume capture ratio of annual rainfall in No. 5 drainage area from March to September in 2019

图7 2019年3—9月15[#]排水分区径流控制率

Fig. 7 Volume capture ratio of annual rainfall in No. 15 drainage area from March to September in 2019

流总量控制率达到上位规划目标的要求.

2.2 坪山区

坪山区海绵城市监测区域为新和水流域,代表深圳内陆卡斯特地形区域的海绵城市建设的特征区域.新和水流域总面积3.45 km²,建设用地面积为2.83 km²,属已建成区.现状土地利用类型主要有居住、工业、学校、行政办公、公园绿地和未开发用地,以及较大面积城中村和在建改造用地.主要水系为新和水,新和水是坪山河一级支流,发源于新和水库,全长3.20 km(其中有3.00 km为暗涵).

新和水流域属建成区,建设完成度高,且已建项目不透水地面比例较大,流域年径流总量控制率较低.预计到2020年年底,源头类海绵城市项目11项,流域范围及已建海绵城市项目分布如图8所示.根据建设规划目标与模型模拟分析,新和水流域年径流总量控制率规划目标为47%.

根据新和水流域已建项目情况,对已完成典型项目雨水排口、排水管网关键节点与排水分区总排口设置流量监测设备,收集连续一个雨季的监测数据.建立监测区海绵城市数学模型,利用监测数据

图 8 新和水流域已建海绵城市项目及监测点位分布图

Fig. 8 Monitoring points in Xinhe Water basin

对区域内各下垫面参数进行率定, 将所率定的参数代入建立的海绵城市数学模型, 以 2019 年 3 月至 9 月所监测的降雨数据, 对监测区雨季径流总量控制率进行模拟评估. 区域年径流总量控制率模拟流程如图 9, 年径流总量控制率模拟结果如表 3.

根据现状下垫面情况, 通过上述监测模拟, 新和水流域年径流总量控制率约 47%, 达到上位规划目标要求.

图 9 新和水流域年径流总量控制率模拟流程图

Fig. 9 Simulation of volume capture ratio of annual rainfall of Xinhe Water basin

2.3 盐田区

盐田区海绵城市监测区域为大梅沙片区, 代表深圳临海海绵城市建设的特征区域. 监测区面积为 3.91 km², 其中, 建成面积为 2.45 km², 含 4 个 3 级排水分区.

选取已建设完成的海绵城市建设项目设置安装监测设备进行监测, 包括海绵型建筑小区、公园绿地、道路广场以及典型非海绵项目等同步实施在线

表 3 新和水流域年径流总量控制率模拟结果表

Table 3 Calculation of volume capture ratio of annual rainfall in the Xinhe Water basin

序号	项目类型	建设状态	面积/hm ²	年径流总量控制率/%
1		新建	11.90	60
2	居住小区	改建	4.77	35
3		已建	59.15	33
4		新建	3.32	61
5	公建	改建	6.75	47
6		已建	22.08	39
7	工业	已建	74.28	30
8	公园绿地	改建	0.25	80
9		已建	28.18	75
10	停车场、广场	已建	4.63	30
11		新建	1.32	50
12	道路	改建	17.58	40
13		已建	48.75	32
14	空地		22.15	70
15	生态用地		39.89	75

监测, 综合考虑各地块项目及市政雨水管的连接情况与排水方向, 选取 3 个关键节点实施监测. 建设项目、关键节点和雨水总排口监测设备布点如图 10.

分别构建源头减排典型项目及达标片区的海绵城市建设评估模型. 片区模拟以排水分区及地块单

图 10 盐田区海绵监测范围及监测点位分布

Fig. 10 Monitoring area and monitoring points of Yantian District

元为对象,采用两级模型验证方法,即选取2020年雨季典型降雨监测数据,分别按项目与片区开展二级模型参数率定与校核,本率定参数带入典型年2017年降雨数据进行年径流总量控制率分析,开展整个片区海绵城市建设成效的模型模拟与达标评估。

选用监测收集的2020-05-11及2020-05-18的两场典型降雨数据进行模拟。2020-05-11降雨厚度为86 mm,峰值为168 mm/h,平均值为3.57 mm/h。

2020-05-18降雨厚度为46 mm,峰值为90 mm/h,平均值为1.91 mm/h。两场降雨的降雨量、监测流量及模拟流量如图11和图12所示。

从图11和图12可见,模拟与实测流量及降雨曲线之间关系符合度很高,两场降雨模拟值与监测值的纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)值分别为0.53和0.56,均满足率定达标要求的0.5,本率定参数用于评估片区年径流总量控制率。

图11 2020-05-11降雨量、片区排口监测流量及模拟流量

Fig. 11 Monitored and simulated discharge chart on May 11, 2020

图12 2020-05-18降雨量、片区排口监测流量及模拟流量

Fig. 12 Monitored and simulated discharge chart on May 18, 2020

使用深圳市典型年2017年全年降雨量数据,利用实测排水分区率定参数值,片区模型模拟结果如图13所示。

由图13模拟结果可知,大梅沙监测片区全年降雨量为695.00万 m^3 ,总出流量为234.00万 m^3 ,片区年径流总量控制率为66.3%,满足GB/T 51345《海绵城市建设评价标准》对排水分区年径流总量控制率不低于60%的要求。

3 海绵城市监测评价现阶段成果总结

3.1 海绵城市主要控制性指标对比

根据以上分析,4个典型监测片区的年径流总量控制率的监测评价结果为:光明区5#排水分区54.0%,15#排水分区51.5%,坪山区新和水流域47.0%,盐田区大梅沙片区66.3%。4个监测片区年径流总量控制率均达到上位规划对排水分区建设

图 13 2017 年监测区年径流总量控制率模拟结果
Fig. 13 Simulation results of volume capture ratio of annual rainfall in the monitoring area in 2017

目标要求,但从所达指标值而言,大梅沙监测片区海绵成效最好,新和水流域与光明区 5[#]和 15[#]排水分区海绵成效稍差.

3.2 海绵成效分析
4 个监测片区的土地类型及海绵城市项目情况、水系及调蓄性能、片区建设特征分析如表 4.

表 4 监测片区海绵城市建设情况分析表
Table 4 Analysis of sponge city construction in monitoring area

监测片区	土地类型及海绵城市项目情况	水系及调蓄性能	片区建设特性
光明区 5 [#] 排水分区	① 旧工业区 ② 按海绵要求新建项目少 ③ 已建海绵项目用地面积占建成区的 16.50%	① 东坑水为流经河流 ② 水系无调蓄功能	已完成的海绵项目占比偏低,而旧工业区城市更新为主完成海绵项目建设标准较高,片区整体海绵城市建设度相对较好
光明区 15 [#] 排水分区	① 老旧小区与旧工业区并存 ② 按海绵要求新建项目少 ③ 已建海绵项目用地面积占建成区的 23.00% (其中综合整治海绵项目用地面积占已建成海绵项目的 55.00%)	① 鹅颈水为流经河流 ② 水系无调蓄功能	已完成的海绵项目占比相对较好,但综合整治类项目占比过半,片区整体海绵城市建设度一般
坪山区 新和水流域	① 居住、工业、学校、行政办公、公园绿地和城中村等混合型社区 ② 按海绵要求新建项目少 ③ 已建海绵项目用地占建成区比为 16.20% (其中改建海绵项目用地面积占已建海绵项目的 64.00%)	① 新和水为流经河流 ② 水系无调蓄功能	已完成的海绵项目占比偏低,且改建类项目占比过半,片区整体海绵城市建设度较差
盐田区 大梅沙片区	① 居住、商业、学校、行政办公、公园绿地和城中村等旅游区 ② 按海绵要求新建项目相对较多 ③ 已建海绵项目用地面积占建成区的 23.82%	① 大梅沙人工湖为水系入海口的调蓄湖 ② 水系具有调蓄功能	已完成的海绵项目占比较好,且均为建设标准高的新建项目,片区整体海绵城市建设度相对最高,同时,片区内水系发挥了其调蓄功能

综上所述可知:

1) 片区的城市建设形式(新建、城市更新、改建和综合整治等)对海绵城市建设成效影响较大。

2) 片区内水系调蓄功能对片区海绵城市建设成效贡献度高。

3) 当前阶段的建设,以用地类型为统一目标的建设模式,未发挥片区层面统筹后建设项目目标调整下的资源整合性、目标合理性和建设经济性等优势。

4 片区整体达标实现连片效应的初步设想

通过对4个典型海绵城市监测区的监测评估阶段性成果所呈现不同的海绵成效比对,发现影响海绵城市建设成效的因素多样、复杂并相互关联,与城市建设特性、海绵城市建设项目、以及片区内水系调蓄性能等海绵资源有效整合等因素密切相关。

深圳在海绵城市建设取得现有显著成绩的基础上,在建设“中国特色社会主义先行示范区”同步达到“2030年城市建成区80%达到海绵城市建设要求”的目标下,从规划到建设过程中,应积极探索以片区为建设单元,合理整合片区海绵资源与大型公共空间资源,建立区域统筹的海绵城市建设新思维。以需求与问题为导向,针对片区面临的城市雨水问题、拥有的本底资源、具有的建设条件(自然气象、工程地质和城市空间),注重综合统筹,强调系统内部共同分担、资源整合解决实际问题;突出海绵城市系统化、成片化推动,促进整体达标与效能,提高海绵城市连片效应和显示度。

本研究提出通过片区统筹达标实现海绵城市连片效应建设为方向的初步设想,有效支持深圳市后续更合理、更经济、更有效地推动海绵城市建设。

参考文献 / References:

- [1] 任南琪,黄 鸿,王秋茹. 海绵城市的地区分类建设范式[J]. 环境工程, 2020, 38(4): 1-4.
REN Nanqi, HUANG Hong, WANG Qiuru. Paradigm of sponge city construction based on regional classification [J]. Environmental Engineering. 2020, 38(4): 1-4. (in Chinese)
- [2] 刘 建,龚小强,任心欣,等. 深圳市海绵城市的建设与创新[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(4): 334-346.
LIU Jian, GONG Xiaoqiang, REN Xinxin, et al. Sponge city construction and innovation in Shenzhen [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(4): 334-346. (in Chinese)
- [3] 彭世瑾,史敬华,胡爱清,等. 深圳国际低碳城场馆区(核心区)海绵园区建设工程实践[J]. 建设科技, 2017(1): 30-34, 38.
PENG Shijin, SHI Jinghua, HU Aiqing, et al. Construction practice of sponge park in Shenzhen international low carbon city (core area) [J]. Construction Science and Technology, 2017(1): 30-34, 38. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设评价标准[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Assessment standard for sponge city construction effect [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设绩效评价与考核指标(试行)[EB/OL]. (2015-07-10) [2020-09-01]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201507/t20150715_222947.html.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Performance evaluation and assessment index of sponge city construction (trial) [EB/OL]. (2015-07-10) [2020-09-27]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201507/t20150715_222947.html. (in Chinese)

【中文责编: 晨 兮; 英文责编: 之 聿】

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC0704900); 国家自然科学基金项目(52078006)

作者简介: 彭世瑾(1969—), 深圳市建筑科学研究院股份有限公司教授级高级工程师。研究方向: 绿色建筑节水、水生态及海绵城市。E-mail: 87183334@qq.com

引 文: 彭世瑾,胡爱兵,史敬华,等. 基于深圳典型片区海绵城市监测评估的思考[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(1): 1-9.