german cooperation
DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Implemented by
giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Funding programme
develoPPP
Where business meets development.

厦门：
建设适应气候变化的海绵城市

中国气候风险和适应合作项目

项目概况

名称 中国气候风险与适应项目 Climate Risk and Resilience in China (CRR)

项目委托方 德国联邦经济合作与发展部（BMZ）

公私合作伙伴关系项目执行方

德国国际合作机构（GIZ）、瑞士再保险（Swiss Re）

重点领域

中国城市及城乡结合地区的气候风险和气候适应能力

联系我们

祁岚，项目主任（GIZ）
lan.qi@giz.de

任映映，技术顾问（GIZ）
yingying.ren@giz.de

出版方

中国气候风险与适应项目

德国国际合作机构（GIZ）

德国国际合作机构驻华代表处
中国北京朝阳区麦子店街37号
盛福大厦1100室
邮编 100125
电话 +86 10 8527 5180
传真 +86 10 8527 5185

作者

刘家宏，中国水利水电科学研究院
梅超，中国水利水电科学研究院

设计排版

章佩琳

封面图片

©GIZ

免责声明

GIZ及其作者在出版时，认为其表达的信息和此文中的内容是完善和正确的。但GIZ及其作者并不保证本文件中内容的准确性或完整性，对差错、疏忽概不负责。制图仅供信息参考，不代表对国界和区域边界的国际认可。 GIZ对所提供地图的时事性、正确性或完整性不承担任何责任。对直接或间接因使用此文造成的损害不承担任何责任。对此文中提到的外部网站的内容，由相应的提供方负责。GIZ本项目代表德国联邦经济合作与发展部（BMZ） ©北京，2021年8月

german cooperation
DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Implemented by
giz Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Funding programme
develoPPP
Where business meets development.

厦门市（©GIZ）

案例介绍

厦门市是中国东南沿海地区的一座旅游城市，由厦门岛、鼓浪屿及内陆沿海地区组成，总面积2089.39km^2，常住人口429万（2019年数据），城镇化率约为89.2%。厦门多年平均降雨量1530mm，3-9月降雨量占全年的80%以上，10月至来年2月为秋冬少雨干燥季节。近年来，受气候变化等多重因素的影响，厦门市降雨特性发生显著变化，且海平面持续上升，在多因素综合作用下其城市水问题愈加严峻和复杂。2015年，厦门市入选第一批海绵城市国家级试点，开展了三年多的海绵城市试点建设，开启了气候变化下适应性城市建设的新探索，本案例对此进行介绍。

1. 气候变化下的厦门城市水问题

1.1 厦门近年来气温、降水和海平面变化

受气候变化等多方面因素的影响，从1980年代初期开始，厦门地区气温呈持续上升趋势，年平均气温平均上升速度为每10年0.16℃，上升速度在1989年之后加剧，平均达每10年0.56℃，此外极端最高气温也呈现出显著增加的趋势[1]。厦门地区年平均气温（℃）年际变化图如**图1**所示。

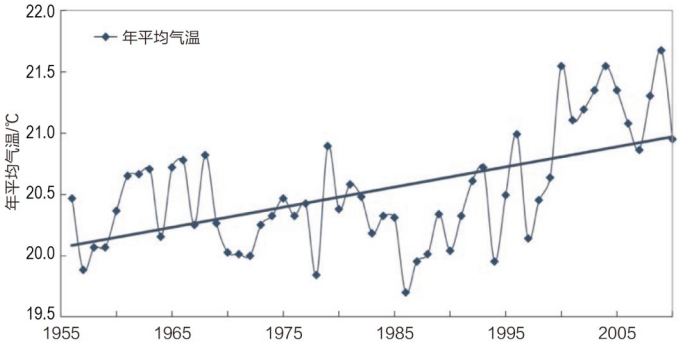

图1 厦门地区年平均气温（℃）年际变化图[1]

1955-2015年气象观测数据分析表明[2]，厦门市的降水年际变化较大，突出表现特征是降水日数显著减少和场均降水强度明显增加。厦门市的降雨日数呈现明显的增多趋势，暴雨以上级别的降雨日数从3.2天增加到5.7天左右。从上世纪80年代中后期到现在，30多年来厦门市平均年代际的大暴雨以上日数的从8.3天增加到13天，增幅为56.7%。降雨变化表现出空间差异性，厦门市南部和北部的长期降水量均有增加的趋势，且南部的增加趋势更加明显，每10年的增加速率分别为43mm和21mm。厦门市（站）年降水日数和年场均降水强度年际变化如**图2**所示。

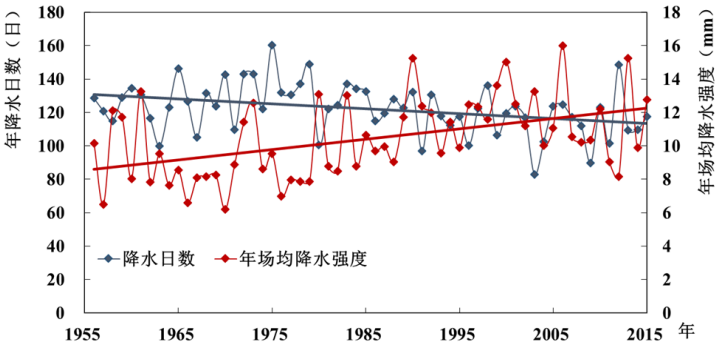

图2：厦门市年降水日数和年场均降水强度年际变化[2]

1960-2005年厦门海平面监测数据（**图3**）分析表明，厦门市海平面年平均线性上升速度在0.17-0.20cm，年平均上升速度为0.17cm[3]。模拟预测数据表明，未来50年，厦门海平面仍可能保持一定程度的上升速率，年平均上升速率为0.17cm；预计到2056年，厦门海平面最大上升高度为16.9cm[3]。

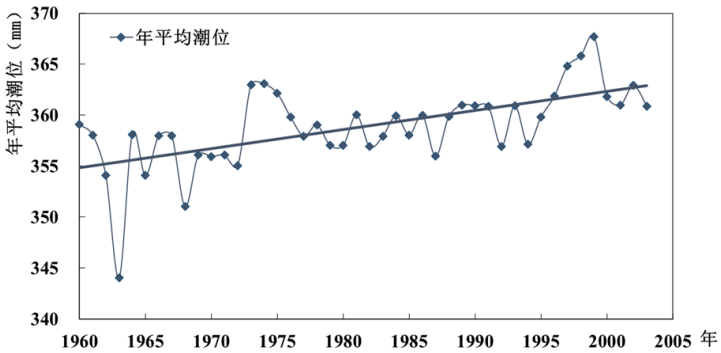

图3：厦门市年平均潮位年际变化图[5]

监测数据和相关研究均表明，气候变化已导致厦门市气温上升、降雨变化、极端降雨日数增加和海平面上升等，这些问题与厦门市复杂的水文、水资源特征叠加，城市水问题更加复杂化、综合化，城市水管理面临严峻挑战。

1.2 气候变化加剧了厦门市的水问题

由于地处中国东南沿海，属于大陆性季风气候，降雨时间分布极不均匀，且常受台风天气影响，短历时暴雨强度大，厦门市面临着城市内涝、山区洪水等问题。气候变化还导致气温增高、极端天气气候事件频繁发生，特别是降雨特性变化、台风雨等极端暴雨增加，其引发的城市洪涝事件对城市正常运转造成极大

影响。2016年9月"莫兰蒂"台风带来特大暴雨，给厦门市造成了较为典型的洪涝灾害，导致房屋倒损17907间，农作物受灾面积10.5万亩，直接经济损失102亿元[4]。厦门市部分旧城区（城中村）排水管网建设标准偏低，排水能力较弱，常常发生严重内涝；同时由于雨水过于集中在夏季，降雨难以调蓄，在人口急剧增长和经济社会快速发展的情况下，厦门已成为高度缺水的城市。此外，随着城镇化推进，一些自然水系、调蓄水体被侵占，城市缺少调蓄空间，造成渗、蓄、净能力降低，生态水量缺乏，景观环境水位难于保持，水生动植物生存条件差，水生态环境不容乐观。在水质方面，近年来厦门市主要溪流劣V类河段比例居高不下（>80%）。气候变化还导致空气污染加剧，威胁人类健康。

海平面上升也带来一系列问题，不仅加剧了风暴潮灾害破坏程度，引发海水入侵、土壤盐渍化、海岸侵蚀等问题，造成沿海湿地损失，增大沿海珍稀濒危生物生存压力，破坏生态系统功能，同时，也会降低城市排污、排水管网和河道等的排泄能力，增加沿海地区的洪涝威胁，并削弱厦门港口功能。

2. 厦门市海绵城市建设的主要措施

2.1 海绵城市：应对城市水问题的新理念

近40年来中国经济高速发展促进了快速城市化，城镇化率从1978年的约18%增加到2019年的约60%。但与此同时，城镇化伴随着一系列城市水问题，如城市内涝、城市水污染、城市缺水、生态退化和热岛效应等。为了应对和解决城市水问题，2013年12月，习近平主席在中国"中央城镇化工作会议"上提出要"建设自然积存、自然渗透、自然净化的海绵城市"，正式提出了"海绵城市"这一新理念[5]。2015年-2016年，中国在全国分两批遴选了30个海绵城市建设试点，厦门市入选第一批海绵城市试点。

海绵城市建设，从字面意义上理解就是要使城市像"海绵一样"，能够在降雨时吸水，在不降雨时释水，从而达到丰枯调剂的目的。"海绵城市"是在借鉴低影响开发（Low Impact Development, LID）、水敏性城市设计（Water Sensitive Urban Design, WSUD）、低影响城市设计与开发（Low Impact on Urban Design and

厦门市（©GIZ）

Development, LIUDD）和ABC计划（Active, Beautiful and Clean Plan）等理念的基础上发展起来的，综合考虑了中国国情，体现了应对城市水问题的中国智慧。海绵城市强调"让自然做功、最小扰动、生态优先"等原则，提倡"拟自然设计"和"基于自然的解决方案"，最大可能地维持和恢复城市下垫面的自然水文功能[5]。海绵城市的基本做法被总结为"渗、蓄、滞、净、用、排"等六个方面，其总目标就是采用多种综合措施让雨水更多地滞蓄在城市里，使城市像"海绵"一样，能够在下雨的时候有效地储备雨水，减少内涝积水灾害和径流污染，等降雨过去之后，将储蓄的雨水释放出来，用于补充生态用水和涵养水源，提升生态环境质量。海绵城市的基本目标被概括为"大雨不积水，小雨不内涝，水体不黑臭，热岛有缓解"，其中最重要的控制指标为年径流总量控制率；各个区域根据自身降雨特性设置不同的控制率目标，一般设为不低于70%[6]。

2.2 厦门市海绵城市建设总体方案

2.2.1 目标和路径

厦门海绵城市建设在充分考虑厦门自身生态环境、水文气象和社会经济特点的基础上开展，总体上以海绵城市建设理念引领城市发展，促进生态保护、经济社会发展和文化传承，以生态、安全、活力的海绵建设塑造厦门城市新形象，实现"水生态良好、水安全保障、水环境改善、水景观优美、水文化丰富"的城市发展战略，建设"绿色自然有弹性、生态和谐有特色、适游宜居有文化、管理有序有章法"的海绵城市[7]。具体目标可以表述为：

(1) 构建系统健全的水污染防控体系，确保"水质不超标"；

(2) 构建完备可靠的水灾害防御体系，力保"城镇不受淹"；

(3) 构建安全高效的水生态调控工程体系，保证"河道不断流"；

(4) 构建公平有序的城乡基础供用水体系，保障供水安全和水资源可持续利用；构建多功能集成的城乡山水景观体系，营造旅游休闲和宜居生活环境；

(5) 构造适应于发展需求的水管理体系，落实水务管理目标；

(6) 构建具有厦门特色的"滨海文化"体系，丰富生态文明内涵。

根据上述目标设定，进一步将目标细化为相应的指标，如**表1**所示。

针对厦门市现存的水资源缺乏、水安全形势严峻、水环境堪忧和水生态退化等问题，厦门市岛内外依托山体、溪流、海岸形成"点、线、面"结合的建设格局，构建"山、水、林、田、湖"相融共生的自然生态空间格局。厦门市海绵城市将主要采取污染防控建设、河湖水网建设、园林绿地建设、排水防涝建设、道路交通建设和海绵社区建设等六大体系建设，其中，前三项建设内容主要从中宏观的海绵体建设上着手，属于"大海绵"建设范畴；后三项建设内容主要从微观的海绵体建设上着手，属于"小海绵"建设范畴[7]。

上述六大体系的建设，可以充分发挥绿地、土壤、河湖水系等对雨水径流的自然积存、自然渗透、自然净化作用，实现城市雨水径流源头减排、分散蓄滞、缓释慢排和合理利用，同时也实现了对污染物的吸纳和消减，从而实现城市"小雨不积水、大雨不内涝、水体不黑臭、热岛有缓解"，减缓或降低自然灾害和环境变化对城市的影响，保护和改善城市的生态环境。海绵城市建设将促使厦门市达成海绵城市建设目标，从而在有效解决城市水安全问题的同时，推进城市的生态文明建设。通过六大体系建设，结合城市建成区外生态空间的建设支撑，厦门市被打造成为滨海城市生态文明的典范。具体海绵城市建设路径如**图4**所示[7]。

表1 厦门市海绵城市建设目标指标值

类别	指标	现状值（2014年）	远期目标值（2030年）
水生态	年径流总量控制率	城市建成区30%	80%的城市建成区达70%
	生态岸线恢复	20%	80%
	城市热岛效应	明显	明显缓解
	城市水面率	6%	8%
水环境	地表水体水质标准	主要河流劣V类水质占比85.1%，城市黑臭水体大量存在	不低于《地表水环境质量标准》IV类标准，基本消除黑臭
	入海河口及近岸海域水质	部分水域为劣Ⅴ类；部分海域严重污染	消除劣V类的水体，近岸海域水质优良比例达到70%以上
	城市面源污染控制	老城基本雨污合流，新城正在实施雨污分流	雨水径流污染、合流制管渠溢流污染得到有效控制。
水资源	雨水资源利用率	不足0.5%	3.0%
	污水再生利用率	不足1.0%	30%
水安全	城市内涝防治标准达标率	20年一遇	50年一遇
	饮用水安全	饮用水源地水质大部分II类以上，部分为III类	饮用水源地水质均达II类
	自来水管网漏损率	15%	10%
制度	制度建设	-	海绵城市建设和管理制度体系完备

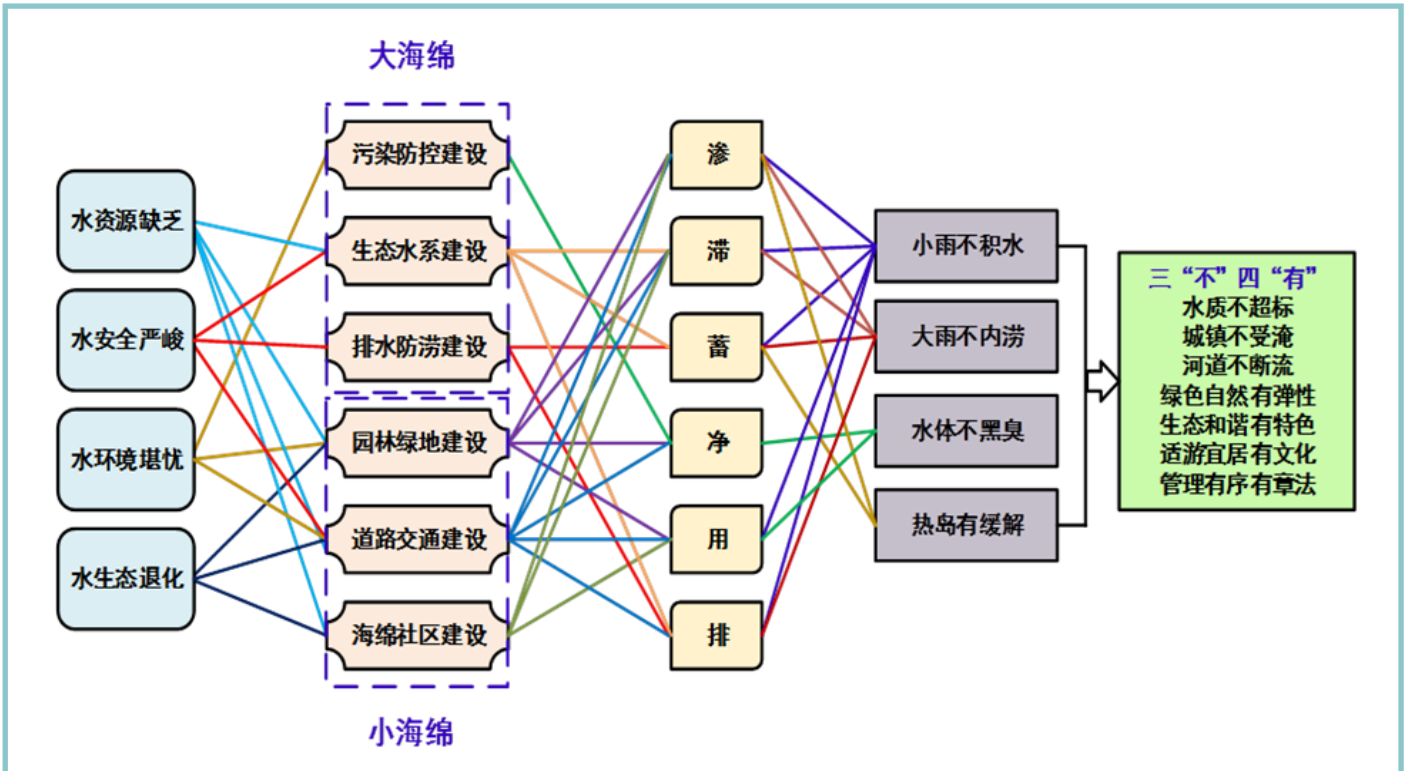

图4. 厦门市海绵城市建设路径

2.2.2 径流管控体系

径流管控是海绵城市建设最基本的目标。海绵城市将雨水径流尽量控制在当地土壤、调蓄池和绿色基础设施中，不仅能够有效减少地表内涝积水等灾害，而且可以提升当地雨水的储量，用于维护生态建设、提升环境质量，并且可以有效地减少总悬浮固体（Total Suspended Solids, TSS）、总氮（Total Nitrogen, TN）等径流污染向河道、海湾聚集，从而达到控制污染的目标。

根据降雨分析，厦门市将年径流总量控制率目标确定为70%，将城区划分16个海绵城市建设管控单元，并基于总目标将全市年径流总量控制率目标分解到各个海绵城市建设管控单元上（**图5**）。各类建设用地现状年径流总量控制率分别为：居住类用地取35%-50%，道路广场类用地取60%，公园绿地类用地取70%，其他用地取45%[7]。

为了实现上述径流管控目标，不同区域可以针对性地采取不同方案。在城市建设新区，应根据各类用地下垫面情况加大海绵措施的实施力度，合理分配低影响开发设施的类型和布局；城市老城区现状建设密度较大，应分阶段、分时期逐步建设，结合现状对硬化的人行道、停车场进行改造，采取铺设透水铺装、绿地改造等具体措施。

2.2.3 排水防涝体系

厦门市的排水防涝体系建设策略主要包括：

(1) **城市竖向与人工调蓄设施相结合。**新建区建设中，合理划定水文单元，科学安排场地竖向、排水走向和涝水行泄通道，做好防洪防潮、雨水排放和内涝防治三个系统之间及其与场地竖向的合理衔接，结合城市竖向和受纳水体分布以及城市内涝防治标准，合理布局涝水行泄通道；利用城市湿地、公园、下凹式绿地和下凹式广场等，安排临时雨水调蓄空间。

(2) **排水防涝设施与天然水系河道相结合。**厦门市溪河、湖泊众多，河流湖泊是泄洪、调洪的最有效通道和场所。各区域的排水防涝设施充分利用溪河作为泄水道，充分利用港湾、湖泊作为蓄水调洪的库容，合理布置市内排水管道、渠系、涵闸，增强排水效果，缩短排水长度，减少工程投资。

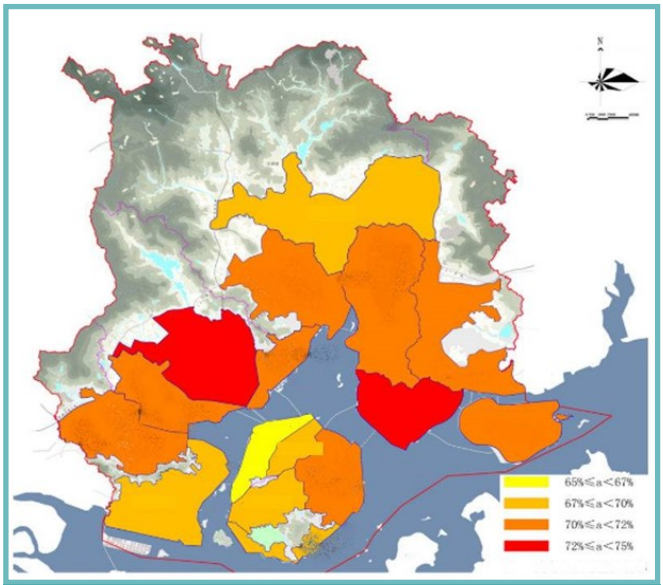

图5. 厦门市各管控单元年径流总量控制率分布图

2.2.4 生态水系建设

生态水系规划主要通过防洪工程建设和河流生态修复，提高厦门市河湖水网的水安全保障，减少洪水风险，并通过加强岛外九条独流入海溪流的生态护岸建设，恢复自然河流景观，通过水系再生水源回用和光伏提水，构建厦门生态水系格局。主要建设措施包括：

(1) **河道断面修复。**河道断面修复是河道水生态恢复的重要工程内容。河道水生态恢复应尽量恢复天然山区河道多变的河道断面形式，以利于河道水生态系统的恢复。水生态修复应根据不同河段的定位和周边区域规划情况，采用复式断面、斜坡断面及矩形断面等多变的河道断面形式，营造多样的河道生境。

(2) **生态护岸建设。**综合运用工程力学、生态学、土壤学和植物学的基本知识，对护岸进行有效保护，形成植物或者工程与植物组成的护坡系统。其中，石笼护岸（**图6**）是指利用铅丝将卵石、块石固定成较大体积的整体，防止较大洪水冲刷，同时有利于水草、鱼类及两栖水生动物的繁殖和栖息生长。

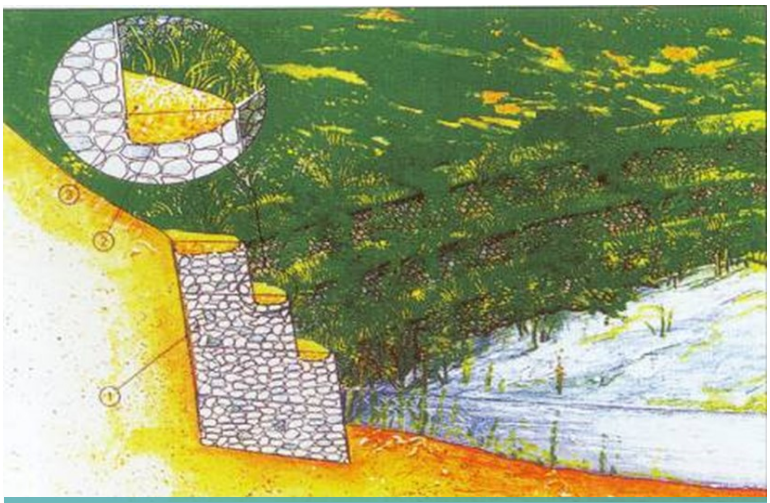

图6. 石笼护岸示意图

(3) **河滨缓冲带建设。**河滨缓冲带是指建立在河湖、溪流和沟谷沿岸的各类植被带，包括林带、草地或其他土地利用类型，属于生物软措施中的一种，适用于水土保持和控制面源污染。

2.2.5 海绵社区建设

海绵社区建设作为海绵城市建设中的重要一环，起着承上启下的关键性作用。海绵社区相较于传统的住宅小区，能够有效地蓄集、调配雨水，在硬质建筑景观和自然环境之间建立起有效联系，这些优势使其势必成为今后住宅景观建设发展的主要方向。厦门市海绵城市规划推动海绵社区建设，海绵社区建设又包括场地建设、建筑建设、小区道路建设、小区绿地建设等方面。

(1) **老旧社区海绵改造。**充分利用旧城区的文化资源优势，在整体保护历史文化名城、不破坏原有的历史文化遗产的基础上，逐步完善海绵城市建设采取的相关设施，增强城市活力。对于老旧社区，改扩建建筑与小区透水铺装率不宜小于40%；还应通过透水式停车位结构改造、植草浅沟建设等方式，将停车位的雨水引入到绿化带内或适量引入地下，调控暴雨峰值。

(2) **新建社区海绵建设。**按照海绵城市建设要求，厦门市所有新建小区内的道路及广场均需采用透水铺装，透水铺装率不小于70%。硬化面积达到2000m^{2}以上的项目，配建调蓄池、景观水体等雨水调蓄设施，并增加绿色屋顶、雨水花园等生物滞留设施，增强场地对水源的涵养能力，使蓄积雨水经简单处理可用于小区道路浇洒、绿化浇灌和建筑中水等。

2.3 典型海绵城市建设工程案例

洋唐居住区位于厦门市海绵城市试点区域——翔安新城中部核心地带，总占地面积约62万m^2。该片区系2010年新开发地块。开发前后的遥感图像对比见**图7**。片区开发前以村庄、裸土、农田及池塘为主，目前经过高强度的开发，对原先自然渗透性良好的下

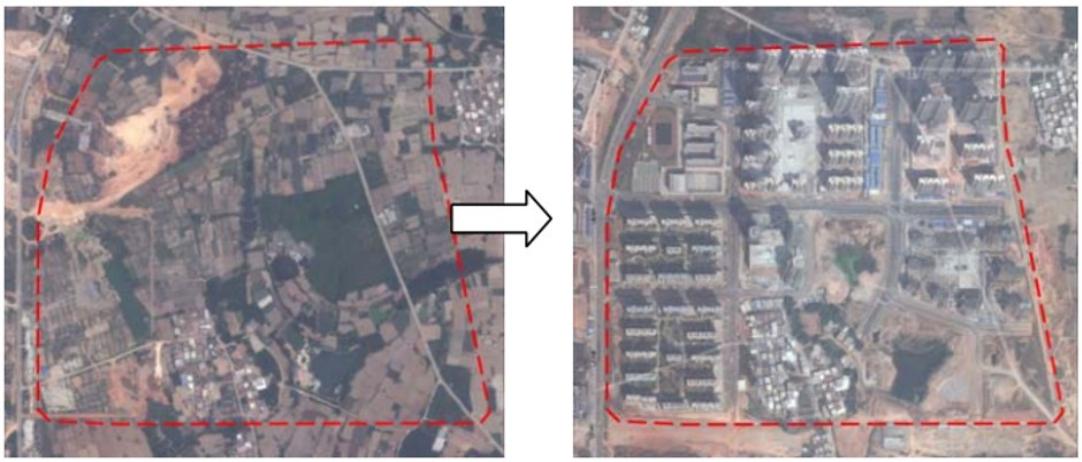

图7. 洋唐居住区开发前后遥感影像对比图

垫面造成了一定破坏，不透水面积显著增加。随着城市开发的进行，城市地表径流污染、道路积水和热岛效应等城市水问题逐步显现[8]。

2015年，厦门市将洋唐居住区列为海绵城市建设试点，开展海绵城市建设。建设目标为：规划目标年SS总量去除率为45%，年径流总量控制率为75%，内涝防治标准为50年一遇[8]。对径流的管控包括源头削减、中途转输和末端调蓄三类途径，其中源头削减主要依靠绿色基础设施，中途转输主要依靠地下管网，末端调蓄主要利用区域内的两个人工湖，溢流部分通过市政管网排放。

洋唐居住区海绵城市建设采用的设施（**图8**）主要包括湿地公园、人工湿地、生物滞留池、绿色屋顶、雨水罐、人工湖、雨水管网等。具体的设施数量如**表2**所示[8]有关设施建成后的实景照片如**图9**所示。

图8. 唐洋居住区海绵城市建设布局图

表2. 洋唐居住区海绵城市建设设施数量

种类	数量	种类	数量
下沉式绿地/m^2	4809.6	植草沟/m^2	11096.4
透水铺装/m^2	23755.2	湿地/m^2	4916.4
雨水罐（1.5 m^3）/个	60	雨水立管断接/项	1
绿色屋顶/m^2	26600.4	管网改造/项	1
生物滞留带/m^2	42326.8	人工湖/项	1
雨水花园/m^2	7132.4	景观提升/项	1

3. 有关投融资机制和运行方式

3.1 应对措施的成本与投融资机制

厦门市中心城区以及重点区域海绵城市建设工程体系项目的规划总投资额为353.5亿元[7]。项目包括污染防控、生态水系、排水防涝、园林绿地、道路交通、海绵社区和信息化管控平台等7类；其中，近期（2016-2020）建设项目的规划总投资额为299.9亿元，占总投资额的84.8%。近期建设项目投资概算如**表3**所示。

投资的来源主要包括三项：

(1) 中央政府给予的试点城市补助：厦门市获得中央政府给予的试点补助3亿元/年，三年试点期内共获9亿元。

(2) 地方政府财政收入投资：占总体投资的主要部分。在试点期（2016-2019）建设阶段，除PPP项目外，100%项目的投资均来自政府投资；试点期之后，政府通过立法、规划和审批等方式，促进海绵城市理念融入各类建设工程中，政府承担公益性建设项目的主体投资。

(3) 采用PPP投资模式：政府和社会资本合作，在建设

图9. 洋唐居住区已建成的海绵城市设施实景图

表3. 厦门市海绵城市近期建设项目投资概算

序号	项目	投资（亿元）
1	污染防控建设项目	77.90
2	生态水系建设项目	28.75
3	排水防涝建设项目	12.54
4	园林绿地建设项目	14.91
5	道路交通建设项目	98.55
6	海绵社区建设项目	67.25

和营运方面研究探索整体外包、特许经营等模式，广泛吸引社会资本参与海绵城市建设；鼓励相关金融机构在风险可控、商业可持续的前提下，对海绵城市建设提供各类信贷支持。**图10**为海绵城市建设PPP模式结构示意图。PPP项目参建各方根据项目合同有序合作。政府（公共机构）的作用主要是进行海绵城市规划，根据规划向社会进行公开招标。企业（联合体）中标后作为发起人建立海绵城市项目公司，从政府获得海绵城市建设的特许经营权，并以海绵城市项目公司为主体，在融资后进行海绵城市建设和运营，一般建设期为2期，运营期为8-15年。政府（公共机构）作为海绵城市的使用人，在项目运营期内以“购买服务”的方式，向运营公司支付相关费用。项目公司依据建设法规，向保险公司购买项目建设期和运营期的相关保险。

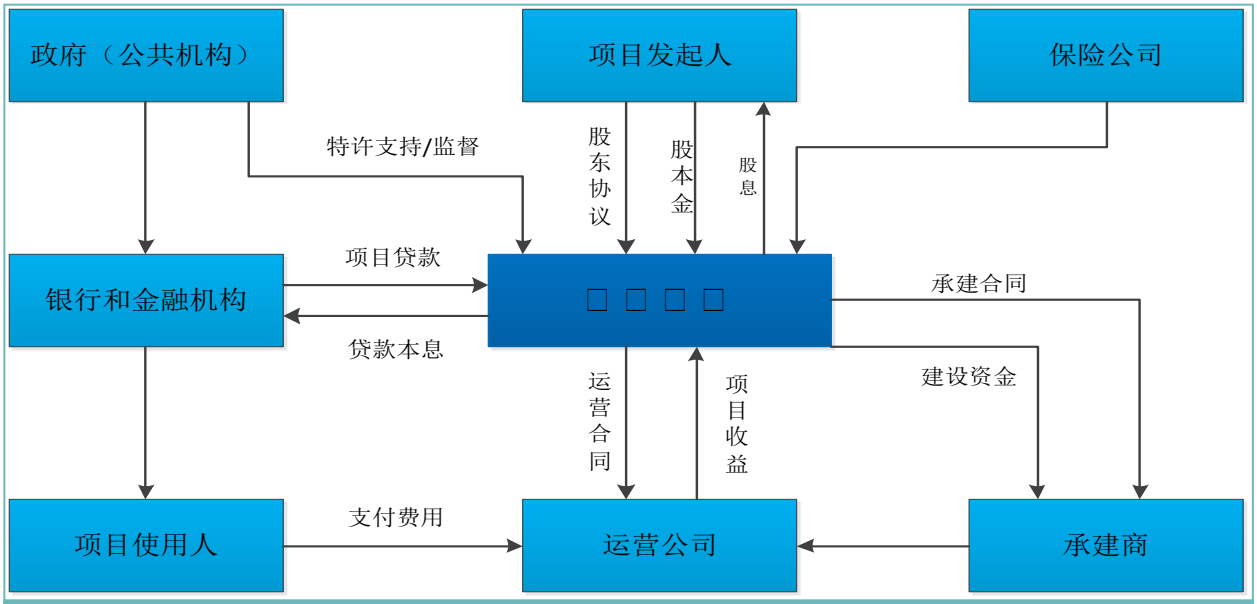

图10. 海绵城市建设PPP模式结构示意图

此外，厦门市还制定了巨灾保险方案，以弥补政府在城市洪涝等自然灾害中投资的不足。厦门市政府常务会议于2016年12月1日通过《厦门市巨灾保险方案》，并于当月通过招标的方式确定了承保人，承保人包括多家保险公司，共保体代表为中国人民财产保险股份有限公司厦门分公司；2017年5月，厦门市巨灾保险制度正式实施。厦门市采用"政府主导、商业保险经办、社会化参与"模式，以商业保险为平台，以多层次风险分担为保障，构建了具有厦门特色的巨灾保险制度。厦门市财政每年出资约2931万元，向保险机构购买了赔偿限额10亿元的居民住房倒损及财产损失救助保险和赔偿限额10亿元的人身伤亡及医疗救助保险。在承保期内，如因台风、地震、暴雨、洪水等自然灾害造成损失，被保险人可获得人身伤亡最高20万元、住房损失最高10万元、财产损失最高5000元的赔偿。

3.2 利益相关方的合作方式

海绵城建设的利益相关方主要包括政府、企业和个人（**表4**）。作为一种公益性质的设施投资，海绵城市建设没有明确的受益人，受益者为包括政府、社会、企业和个人在内的全体利益相关者。

3.3 有关措施维护的运作方式

厦门市建立了海绵城市信息化管控平台，通过在线监测与线下操作相结合的方式，实现对有关设施的整体维护。

监测系统监测城市水文、水力及排水管网等基础数据；管控平台以GIS技术为核心，综合运用在线监测技术、模型分析技术、GPS技术、Web技术等先进技术手段，形成海绵城市智慧管理云平台，集模拟、评估、运营、监控、调度与应急管理于一体，实现海绵城市运营管理智慧化。

4. 实施后取得的主要成效及收益

4.1 主要成效：基于监测结果的分析

以厦门市马銮湾试点区海绵城市建设为例，下面基于监测结果评估其实施成效[9]。马銮湾试点区建设用地面积8.63km^2，水域面积7.45km^2。该试点区海绵城市建设符合厦门市海绵城市专项规划的总要求，设计年径流总量控制率目标为70%，2016-2019年共安排实施海绵城市建设项目127项，总投资45.99亿元[9]。

表4. 海绵城市建设利益相关方

利益相关方	具体单位/个人	职责或义务
政府（公共机构）	市发展改革委、财政局、住房和城乡建设局、水务局、市政园林局、生态环境局、自然资源局、民政局、新闻办公室；各区人民政府	起到发起者、投资者、组织者和监管者的作用，通过制定海绵城市专项规划，设立一定区域内的各类海绵城市建设项目工程并投资，或者与企业合作投资。
企业（法人）	规划设计类、工程建设类、投资运营类、建材料、园林园艺类、水处理类、科学研究类等企业和单位；部分PPP项目的特许经营类企业	进行有关海绵城市建设项目的投资，并通过竞标等方式，获得各种海绵城市相关业务的经营权，通过参与海绵城市规划、建设和维护获取利润；承担一定的社会责任。
公民	城市全体居民	享受海绵城市建设带来的良好生态环境；在海绵城市建设规划、建议和维护中也有义务提供方便并分享自己的观点，以促进海绵城市建设。

监测结果表明，马銮湾片区2018年累计降雨量为1311.9mm，其中海投科创项目区域累计雨量为56563.34m^3，雨水排放量为48279.43m^3，年均径流总量控制率为85.35%，达到设计目标要求[9]。

马銮湾片区的卡斯卡特易涝点全年累计降雨51场，最大强度为30年一遇。监测结果表明，该监测点位积水深度均在15cm以下，最大积水深度为11.7cm，最长积水时间为23min，内涝积水有效减少。

马銮湾片区新阳主排洪渠水质监测结果表明，海绵城市建设后，渠内水质明显好转，透明度维持在25cm以上，溶解氧指标达2.0mg/L以上，氧化还原电位高于50mV，氨氮指标低于8.0mg/L，水体黑臭情况明显好转，水生态系统逐渐恢复[9]。

马銮湾片区新垵村排水管网为雨污合流制，海绵城市建设前，即使在旱季也存在溢流情况。数据监测结果表明，海绵城市建设后，其旱季溢流情况完全消除，雨季溢流频次也显著降低到10次以下，管网溢流污染得到有效控制[9]。

4.2 其他间接和综合收益

(1) 减少了内涝积水等灾害，降低了城市水灾害损失；
(2) 减少了水污染，提升了水环境质量，增强了水源安全性；
(3) 缓解了城市热岛效应，提升了城市宜居性；
(4) 改善了城市生态环境，提升了居民幸福感；
(5) 工程建设拉动了市场投资，促进了地区经济发展；
(6) 提升了城市居民对政府的好感度，维护社会和谐稳定；
(7) 提升了城市品质，增加了城市美誉度，提升旅游吸引力。

5. 本案例的亮点与启示

5.1 厦门海绵城市建设的亮点

以生态理念和措施应对城市水问题。厦门海绵城市建设坚持生态优先原则，尽最大可能减少对城市生态本底的扰动。在新建工程设施时，采用"拟自然设计"和"基于自然的解决方案"。对于径流源头削减，优先采用绿色屋顶、雨水花园、生态滞留池、生态护岸等绿色基础设施。在设施维护上，创造性地采用太阳能光伏提水技术实现生态补水，减少对能源的消耗。基于生态理念采取生态化措施，最大限度恢复城市的自然水循环功能，从而达成"大雨不积水，小雨不内涝，水体不黑臭，热岛有缓解"的海绵城市建设目标。

实现城市对雨水的立体缓释调控。海绵城市建设要求城市能够在平时储水，在干旱时放水。厦门将城市作为一个"立体"的构造体，充分发挥城市立体空间滞蓄雨水的作用，凭借绿色屋顶、雨水花园、地下管网等各类设施实现雨水的立体拦截、滞蓄和调节，以"源头削减、中途转途、末端调蓄"的思路，尽最大可能将雨水在不同的环节分散滞蓄，从而实现了以城市立体空间为载体、对雨水进行缓释调控的海绵城市建设目标。

分类施策，建设各类海绵设施。海绵城市不单纯是一个项目或一项工程，而是一种理念；这种理念与不同的城市基础设施建设项目结合，就形成了不同的海绵设施，如厦门建设了海绵道路、海绵小区、海绵学校、海绵公园、生态水系等等，这些都是将海绵城市理念与具体工程结合的实例。海绵城市要最终发挥作用，就要通过示范建设和宣传推广，使"自然积存、自然渗透、自然净化""让自然做功"的海绵城市理念深入人心，在城市规划、设施、管理和发展的各个环节、各个方面都得到应用。厦门海绵城市建设通过试点示范，以点带面，起到了较好的示范和推广作用。

5.2 本案例对城市气候变化适应性应对的启示

从增强城市弹性的角度应对气候变化。气候变化作为一种客观事实，难以靠单个城市的行动完全扭转或缓解。因此，要在气候变化的事实下发展，城市需要增加"弹性"，即增强弹性应对气候变化的能力。海绵城市就是这样的例子，它对降水的变化有较大的适用"阈值"；城市和居民对气候变化的"脆弱性"得以降低，能够适应较大范围内的气候变化，并在此背景下实现既定的生存和发展目标。

将海绵城市理念融入到城市发展中。海绵城市作为一种城市水问题综合应对理念，是城市气候变化适应性应对的一种现实路径。基于生态化的理念和措施，让自然多做功，让人类少干扰，尽可能地采用"拟自然设计"，可以使海绵城市的理念深入城市居民和管理者的意识，成为一种行动自觉；让社会在城市建设与发展的各个方面、各个环节都践行海绵城市理念，从而实现人与雨水、社会与自然共享城市空间的理想，提高城市对气候变化的适应性。

参考文献

[1] 苏明峰. 厦门市气候变化及其应对建议[J]. 海峡科学, 2011(07):18-20.

[2] 福建省气候中心. 厦门市近60年降水时空变化特征研究技术报告[M]. 厦门:厦门市气象局,2016.

[3] 林选跃,张世民, 陈德文, 袁方超. 福建沿海年平均海平面年际、年代际变化特征及预测[J]. 海洋预报, 2014, 031(05):63-68.

[4] 台海网.厦门市政府第三次发布会: 台风"莫兰蒂"造成厦门直接经济损失102亿! 灾后恢复再现厦门速度! [OL] http://www.taihainet.com/news/xmnews/szjj/2016-09-19/1789079.htm [2016-09-19]

[5] 王浩, 梅超, 刘家宏. 海绵城市系统构建模式[J]. 水利学报, 2017, 48(9):1009-1014.

[6] Wang, H., et al. "A New Strategy for Integrated Urban Water Management in China: Sponge City". Science China: Technological Sciences, 2018, 61(3):317-329.

[7] 厦门城市规划设计研究院. 厦门市海绵城市专项规划[M]. 厦门:厦门市市政园林局, 2016.

[8] 厦门市市政工程设计院有限公司. 厦门市洋唐居住区海绵城市建设项目方案[M]. 厦门:厦门市市政园林局. 2016.

[9] 吴连丰. 基于监测分析的海绵城市建设效果评价[J]. 给水排水, 2019,45(12):65-67.