

古建与气候

气候变化下的古建保护科普手册



内容编制



山西科城能源环境创新研究院
Shanxi Coshare Innovation Institute of Energy & Environment

项目介绍

气候遇见古建——气候变化下的古建保护与文化遗产项目旨在推动气候变化、文化旅游、建筑艺术、历史文物等多领域专家、学者、民间机构及相关社会企业的跨圈互动，以“关注气候变化和保护古建”为议题，向公众传播“关注气候变化，传承历史文化”的理念，推动公众更加全面地理解气候变化对人类社会的影响。

项目资助方



CHINA ASSOCIATION
FOR NGO COOPERATION
中国国际民间组织合作促进会



自工业革命以来，大量煤炭、石油和天然气等化石燃料使用造成大气中二氧化碳为主的温室气体浓度增加，这些气体产生的温室效应，引发了一系列连锁反应，造成了目前以全球变暖为主要特征的气候变化。政府间气候变化专门委员会（IPCC）于2023年3月20日正式发布的第六次评估报告（AR6）综合报告（SYR）《气候变化2023》指出，2011-2020年全球地表温度比1850-1900年升高了1.1°C。全球温室气体排放量正在继续增加。气候变化和其引发的海平面上升、极端天气频发等各类问题正在对人类福祉和地球健康构成威胁且已经成为全人类共同挑战。

将气候变化与包括古建筑在内的各类文化遗产保护联系起来并不是一个全新的议题，2007年，世界遗产委员会（UNESCO World Heritage Committee）通过了政策文件，旨在搭建世界遗产和《联合国气候变化框架公约》之间的联系。2015年以来，世界遗产委员会也开始重视缔约国关于《巴黎协定》的落实，以降低气候变化对自然和文化遗产带来的风险。随着气候变化形势日趋严峻，越来越多的古建将陷于持续不断的降雨和洪涝威胁之中。

本手册旨在通过梳理气候变化与古建保护相关知识，向社会公众展示各类气候因子对古建筑保护产生的各类影响和国内外气候变化下文化遗产保护案例，以此呼吁大家关注气候变化下古建保护议题，关注当前气候变化对文化遗产保护工作产生的诸多挑战，也希望未来公众可以与相关领域专家一道携手，共同推进“双碳”目标的实现。受制于资料搜集不甚完整，手册不足之处，欢迎广大专家学者批评指正。

气候变化—人类面临的共同挑战

什么是气候变化

气候变化是指气候平均状态统计学意义上的巨大改变或者持续较长一段时间的（典型的为10年或更长）气候变动。气候变化的原因可能是自然的内部进程，或是外部强迫。《联合国气候变化框架公约》将“气候变化”定义为“经过相当一段时间的观察，在自然气候变化之外由人类活动直接或间接地改变全球大气组成所导致的气候改变。”因此将因人类活动而改变大气组成的“气候变化”与归因于自然原因的“气候变率”区分开来。



引起气候变化的原因

大气中温室气体(GHG)和气溶胶浓度、地表覆盖率和太阳辐射的变化都会改变气候系统的能量平衡。从1850-1900年到2010-2019年，人为造成的全球表面温度上升幅度的可能范围是 0.8°C 至 1.3°C ，最佳估计是 1.07°C 。充分混合的温室气体可能造成了 1.0°C 至 2.0°C 的升温，其他人为驱动因子（主要是气溶胶）造成了 0.0°C 至 0.8°C 的降温，自然驱动因子对全球表面温度的贡献在 -0.1°C 至 $+0.1^{\circ}\text{C}$ 之间，内部变率的贡献在 -0.2°C 至 $+0.2^{\circ}\text{C}$ 之间。

气候变化的不利影响有哪些

根据《联合国气候变化框架公约》，“气候变化的不利影响”是指气候变化所造成的自然环境或生物区系的变化，这些变化对自然的和管理下的生态系统的组成、复原力或生产力、或对社会经济系统的运作、或对人类的健康和福利产生重大的有害影响。气候变化造成的不利影响主要表现为：



气候变化引发的风险及解决方法

图源：Global Commission on Adaptation 2019.



人类活动对气候系统的影响

人类活动通过改变大气中温室气体、气溶胶(微小颗粒物)和云的量对气候变化做出贡献。最大的贡献源是燃烧化石燃料，向大气中释放二氧化碳气体。自从工业化时代(大约1750年)开始以来，人类活动总体上是推动气候朝着变暖发展的。在这个时代，人类对气候的影响超过了太阳活动、火山爆发等自然过程的变化带来的影响。人类活动导致了四种主要气体的排放：二氧化碳(CO₂)，甲烷(CH₄)，氧化亚氮(N₂O)和卤烃(一组含氟、氯和溴的气体)。这些气体集聚在大气中，导致浓度随着时间而增长。

什么是应对气候变化

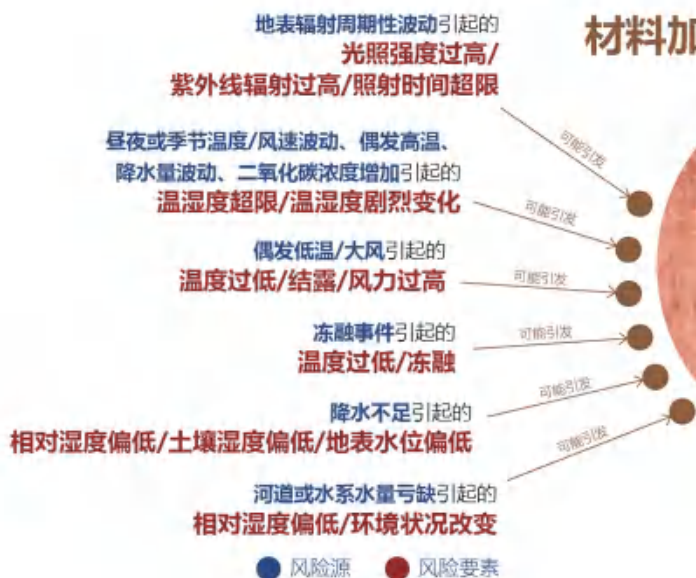
应对气候变化包含气候减缓和气候适应两个方面。减缓是指通过能源、工业等经济系统和自然生态系统较长时间的调整，减少温室气体排放，减缓气候变化速率。适应是指通过加强自然生态系统和经济社会系统的风险识别与管理，采取切实有效的调整适应行动，降低气候变化不利影响和风险。减缓和适应二者相辅相成，缺一不可。



各类气候风险对古建保护的威胁

内容整理自 故宫博物院 张小古《气候变化与故宫古建筑的预防性保护实践》

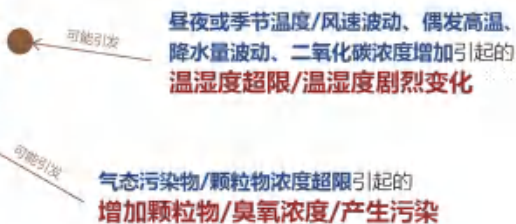
材料加速老化/开裂/变形



彩画及油饰开裂/剥落/粘结材料失效



● 风险源 ● 风险要素



地基沉降塌陷



可能引发

可能引发

可能引发

可能引发

降水不足引起的

相对湿度偏低/土壤湿度偏低/地表水位偏低

河道或水系水量亏缺引起的

相对湿度偏低/环境状况改变

强阵风/雷暴/持续性强风暴/龙卷风引起的

水量过大/水位超限/积水/雷击

冻结层与活动层特性引起的

土壤冻融/膨胀或缩小/土壤湿度变化

● 风险源 ● 风险要素

科普专栏

联合国教科文组织发布《气候变化下的世界遗产与旅游业》，指出气候变化已经成为威胁世界遗产最重要的因素之一，许多世界自然和文化遗产正因气温上升、冰川融化、海平面变化、气象灾害、严重干旱而面临重大威胁。中国是世界上面临气候变化威胁最大的国家之一，未雨绸缪、居安思危，妥善应对灾难性气候和海平面上升带来的挑战，包括对文化遗产的负面影响，将是一项长期而艰巨的任务。



气候变化下古建保护案例

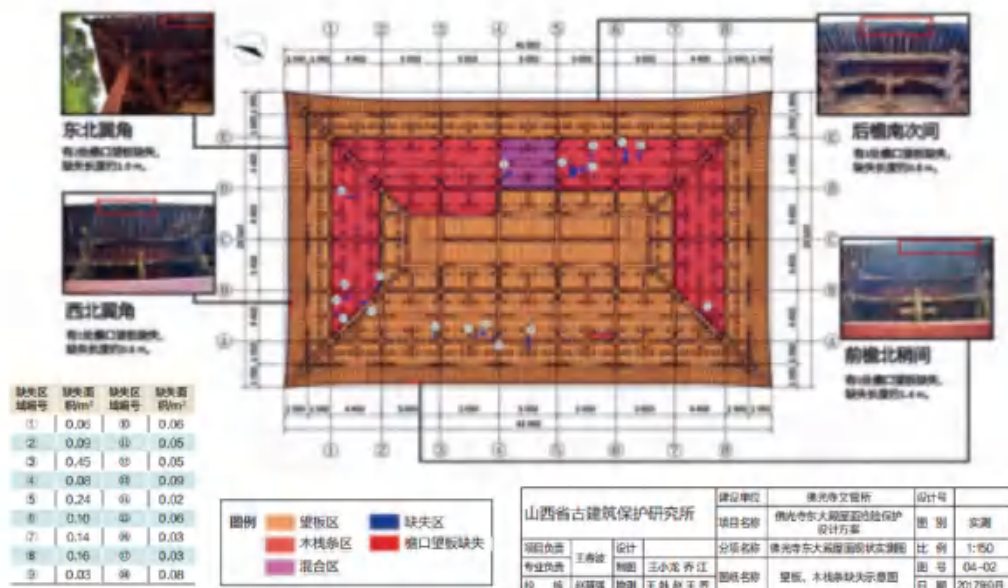
一 山西佛光寺东大殿预防性保护

内容整理自张荣，王麒，陈竹茵，李玉敏，王帅，任毅敏，宋阳，胡俊英
《基于文物本体与环境监测的佛光寺东大殿预防性保护研究》

2017年8月，包括山西在内的我国大量地区迎来大到暴雨，位于山西省五台县境内，素有“中国古建筑第一国宝”之称的佛光寺东大殿在此次强降雨后出现了较为严重的屋顶漏雨问题。山西省文物局第一时间组成工作组前往现场对佛光寺东大殿进行紧急抢险遮护并对问题进行了梳理。之后，在国家文物局批准下，由山西省文物局联合国家团队开展了针对于佛光寺东大殿建筑本体和周边环境的监测工作，为后续保护工作提供了科学的数据支撑。

调查发现

佛光寺东大殿未进行过大修，历史信息保留真实性和完整性极高。同时，佛光寺东大殿保存状态较为脆弱，存在较为严重的残损问题。相关专业团队对屋面进行勘察分析后了解了屋顶发生渗漏的主要原因。首先，东大殿构件存在较多的腐朽、开裂等问题，除此之外，由于后檐柱头沉降，还导致东大殿整体屋架结构发生向后倾斜，且整个铺作层及其上梁多个部位均有位移、滑动的现象。



注：图中⑤~⑩为横向轴线；①~⑧为竖向轴线。

佛光寺望板破损示意图（来源：山西省古建筑与彩塑壁画保护研究院）

措施制定

根据现场勘察结果，专业团队在上级部门批准下，制定了针对佛光寺东大殿的主要监测内容，主要分为以下3个方面：

(1) 环境监测

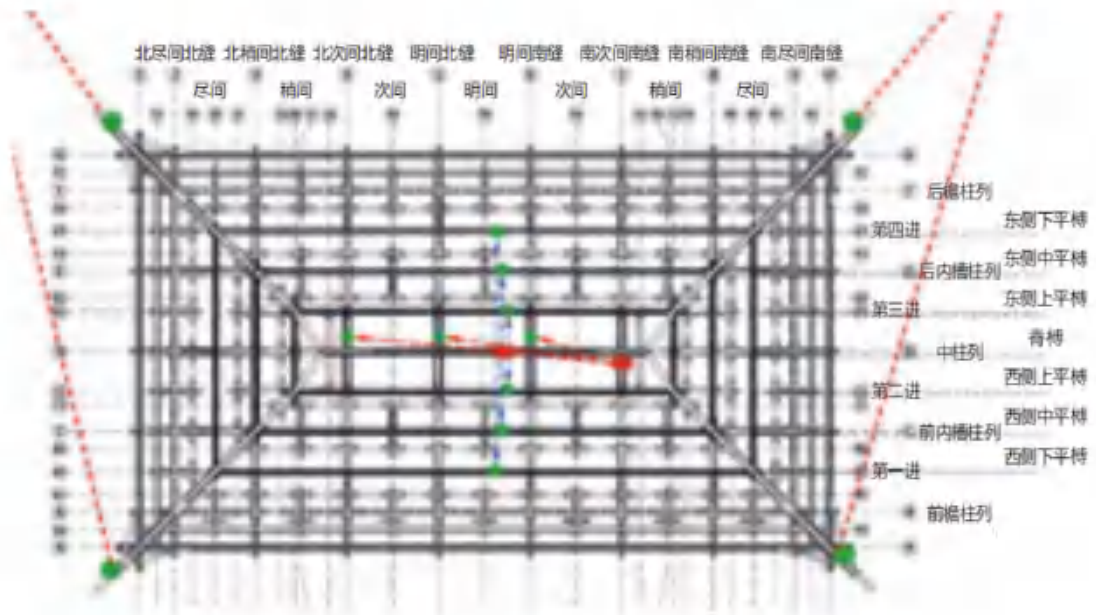
在佛光寺东大殿外地台上安装小型无线微气象监测仪，实时记录东大殿室外的温度湿度变化和降水、风力风向、太阳辐射等多项气象环境指标数据。同时在大殿内安装实时温湿度监测设备，记录殿内环境温湿度和壁温信息，全面掌握东大殿室内外全面气象环境数据。



佛光寺无线微气象监测仪

(2) 东大殿结构位移变形监测

在东大殿外围设计安装结构监测点，定期监测建筑各个构件的形变数值，同时根据精准控制网定期三维扫描建筑本体，通过对不同时期的扫描数据变化和形变数值进行分析，判断东大殿结构位移情况，并对建筑关键部位安装实时位移监测装置，结合外部环境和室内微环境的变化，分析木构件变化规律。



佛光寺实时位移监测布点示意图 (来源: 山西省古建筑与彩塑壁画保护研究院)

(3) 东大殿渗漏监测

在东大殿屋面瓦顶与望板(栈条)之间的苫背内部安装含水率实时监测设备并建立屋顶渗漏预警系统,一旦监测表明可能发生屋面渗漏,预警系统将第一时间通知工作人员,工作人员将根据预警采取应对及维护措施。同时,相关团队还建立了实时监测数据网络平台,供分析团队及文保工作人员实时掌握相关数据并制定相关保护措施。

本次针对于佛光寺东大殿的各类监测工作,对未来长期的保护工作奠定了数据基础。经过对数据的分析比对后,监测团队发现了大殿大木构件的“微位移特性”,初步了解了气候变化下引发的温湿度变化等一系列气候现象对木构古建筑产生的密切影响,为东大殿精准的预防性保护提供科学数据保障。



科普专栏

新中国建国至今 佛光寺东大殿主要日常保养工程

1952—1953

东大殿进行屋顶维护及后墙水沟维修

1956

东大殿屋顶拔草保养与局部维修

1959

修缮完成殿前24m长的挡土墙，重砌上部花坛墙

1960

东大殿瓦顶再次勾抿

1977

东大殿院垫灰土，修踏道

1983

东大殿后坡取土石，使山崖距大殿5m宽

1984

东大殿后坡全面勾抿；为东殿院铺石板备料；重筑东殿院基墙北护岸；东殿前石经幢做护罩；建设3个消防水池

1998

勾抿东大殿瓦顶

1999

拆修后檐当心间瓦顶，修补增添椽子，添加栈板，局部重瓦屋面

2000

东大殿内增设防盗栏杆

2007

完成佛光寺东大殿预防漏雨抢修及报告书

2017

东大殿屋顶发生较为严重的渗漏问题。针对渗漏问题，古建院对屋面和建筑内塑像壁画采用防雨布进行了临时遮护，防止雨水渗漏破坏脆弱的塑像壁画。待降雨停止后，将东大殿前檐所有大门打开（平时白天有游客时仅开明间大门，无游客时全封闭）。加强室内通风，并待苫背完全干燥后对屋面进行勾抿。

2019

对位移缺失严重的栈条、望板、苫背进行局部临时加固

2020、2021夏季

在草梁架内的平上方采取临时遮护措施，铺设防雨布，并在明显渗水点下方临时铺设毛巾、棉被、脸盆、水桶等，预防可能的渗水侵蚀到东大殿明内

二 气候变化下故宫古建筑的预防性保护

内容整理自张小古《气候变化与故宫古建筑的预防性保护实践》

北京近20年气候变化趋势



冬季极端低温
情况增多



夏日温度
普遍升高



日均相对湿度
波动增大



冬春季季节性干燥
情况明显



夏季降水量
逐渐增多

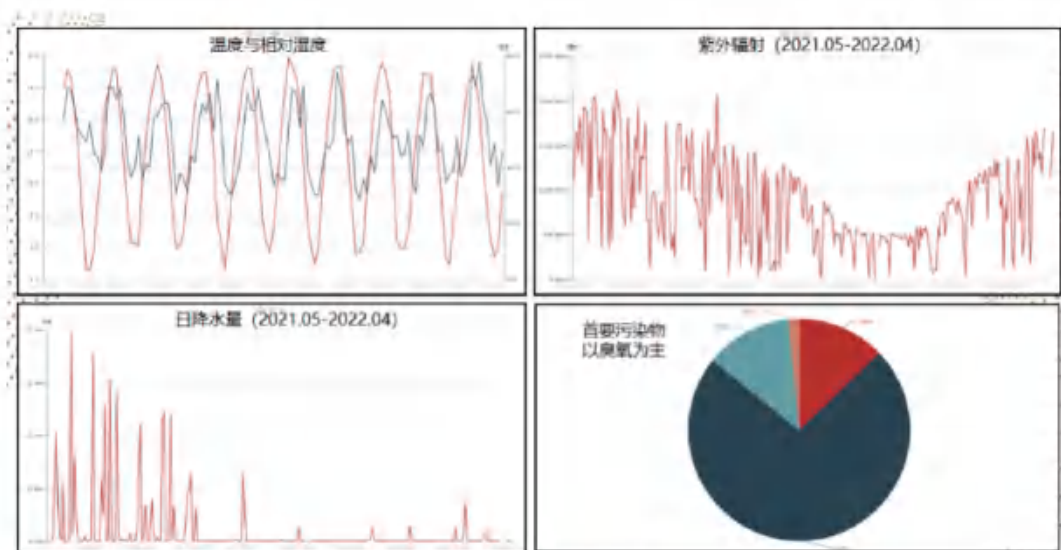


强风、强对流天气
呈增多趋势

气候变化对故宫古建筑所造成的影响

2021年夏季，京津冀3省（市）的降水量达508毫米，比往年同期偏多近一半，为1997年以来同期最多降水量，气候变化带来的种种现象，对于古建筑的保护，尤其是应对极端天气情况带来了困难和挑战。

温湿度剧烈变化、冻融循环频率提升、地表辐射及大气污染等对古建筑材料及结构安全危害极大，会加速古建筑老化、风化、变形、开裂、脱落等；而大风（沙尘暴）、暴雨、暴雪等极端天气事件则可能对古建筑造成不可逆的瞬时破坏。上述气候变化的危害，往往又产生了诸多次生危害，例如建筑的整体围护结构和关键部位受损，导致室内环境逐渐失控。总的来说，各类气候环境风险和其导致的系列病害的产生，使故宫古建筑保护工作面临较大挑战。



故宫气象与环境监测数据 (来源: 故宫博物院)

气候变化下的故宫古建筑预防性保护总体策略

为应对近年来气候变化情况,故宫相关部门持续开展古建筑预防性保护研究工作,近几年来故宫的古建筑保护工作主要以日常保养维护、研究性保护专项和预防性保护研究为主。

故宫古建筑的预防性保护总体思路

- 1 加强对古建筑的巡查、监测和日常保养维护
- 2 加强对古建筑本体及环境因素的监测与评估
- 3 加强对风险的动态监测与分析评估
- 4 加强对建筑环境的整治,研究风险的预防与管控措施



故宫古建筑预防性保护研究与实践

壹

对故宫的气象环境开展持续监测,从而获得并掌握故宫范围内气象变化的实时情况与变化规律。

贰

对古建筑室内环境开展持续监测,对重点区域可布设细粒度监测方案,从而获得并掌握建筑内部环境的实时情况与变化规律。

叁

联动分析气象监测数据与室内环境监测数据，掌握建筑室内外环境交互规律，从而建立古建筑的气候环境风险要素清单。

肆

将风险要素与古建筑的劣化病害情况关联起来，并开展定性到定量的关联性分析。这一步是比较难的，因为各种材料在不同环境下的劣化机理和变化特征是不一样的，可能需要长时间来进行量化关系的研究。

伍

分析评估风险等级，并针对不同等级的风险采取有针对性的人工干预措施，目的是为了减少或消除风险造成的危害。

陆

制定常态化的风险预防和管控措施。

近十余年，故宫的气象环境监测体系逐步完善。2011年首先建立了气象自动监测站，监测数据与北京市气象局互通互联。随后建立了空气质量自动监测站，并逐步在古建筑类展厅及部分库房建设了普查性质的室内环境监测系统。2014年以后，有针对性地做了一些环境检测分析的工作，如对故宫监测站采集到的大气污染物和降水样品进行成分分析等，为更清楚更全面地研究环境状况提供数据支持。



科普专栏

故宫日常古建筑保护管理制度

第一

常态化的古建巡查制度，包括季节性巡查，例如雨季前后检查建筑薄弱部位如屋顶、排水管沟，入冬前检查门窗等；日常巡查，每周进行3次以上古建巡查，极端天气后立即进行全面巡查，及时发现问题。另外每三年需进行全面建筑普查，重点检查木结构安全隐患等。

第二

古建筑的日常保养制度，即一方面根据巡查情况对古建筑的瓦顶、墙身、地面、雨水沟、内外檐装修、油饰、彩画等实施经常性养护，另一方面定期进行保洁除尘、瓦顶除草，空置用房定期进行除尘和通风等。

第三

定期对古建筑的防雷装置进行监测维护，雨季前对故宫所有防雷装置进行检测和维护。



三 水城威尼斯应对气候变化-摩西计划

内容来源网络信息

由于受极端天气影响，继2018年意大利“水城”威尼斯遭遇洪水灾害后，2019年又再次爆发50多年一遇的严重洪灾，85%的面积遭到侵袭，最高水位曾达到1.87米。威尼斯著名历史地标圣马可大教堂也受到洪水侵袭。专家认为，此次水灾归咎于全球气候变暖导致海平面上升，以及威尼斯所处土地的沉降。联合国教科文组织官员说：威尼斯也许面临失去世界遗产地位的危险。最新研究报告显示，威尼斯历史上每100年左右都会发生一次极端的高水位水灾事件。预计到21世纪中叶，发生频率将增加到每6年一次，到2100年为每5个月一次。威尼斯历史上最严重的几次洪水，曾淹没了这座历史名城的一些著名文化遗址，其中包括圣马可广场上的圣马可大教堂。这是1200年来，这座大教堂第六次被洪水淹没，但其中四次发生在过去20年内，更有两次发生在不到400天内。

威尼斯城建立在威尼斯泻湖中一百多个岛屿上，在过去百年中已经下沉了约28cm。再加上全球暖化，南北极冰川溶解导致的海平面上升，威尼斯可能在数十年内面临灭顶之灾，到2050年将不再适合人类居住。

意大利政府多年来一直在寻求好方法，保护威尼斯众多文物、建筑瑰宝免遭海潮破坏。2004年，意大利政府决定耗资35亿欧元兴建活动闸门，这就是著名的“摩西工程”。意大利科学家提出了在威尼斯通往亚得里亚海的三处河道入海口处，建造活动闸门的计划。这三道闸门共由79块巨型挡板组成。挡板的一端固定在海床上，另一端是不固定的。平时，这些挡板隐藏在海面之下，当亚得里亚海水位超过一定限度时，这些挡板将通过空气装置竖立起来，阻断亚得里亚海与威尼斯之间的水流通道。

1987年

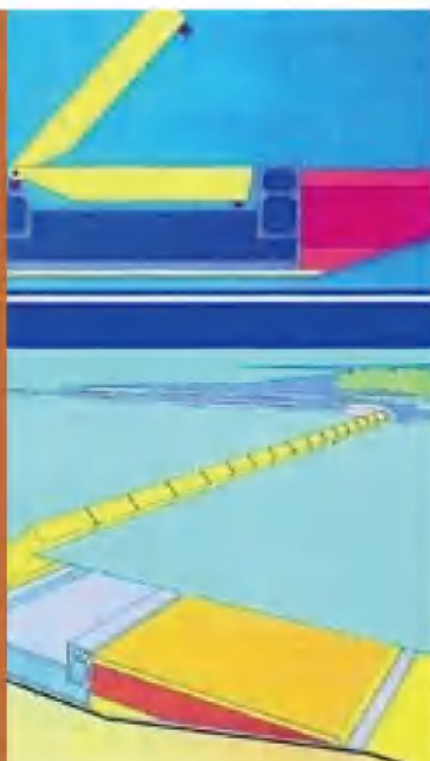
意大利基础设施和运输部和威尼斯水务局成立的特许公司“Consorzio Venezia Nuova”开始实施保护威尼斯城和泻湖的综合干预计划。

1988年-1992年

“摩西”计划被命名前，一扇闸门就被放在利多湾入口处进行测试。

2003年1月

为了保护世界文化遗产威尼斯城，时任意大利总理贝卢斯科尼启动了“摩西”计划（用典摩西开海拯救犹太人民），该计划旨在修建活动水闸阻挡海潮以保护威尼斯。



闸门示意图（图片来源：YouTube）

“摩西”计划中，威尼斯泻湖的三个入口处：“利多（Lido）”、“马拉莫科（Malamocco）”和“基奥贾（Chioggia）”，将设置四座由78个活动模块组成的闸门。每个混凝土模块长度在18.5-29米，宽度均为20米，重约300吨。在正常的潮汐条件下，闸门模块将灌满水并沉在水面下。潮水高于1.1米时，闸门模块将灌入压缩空气，排空海水，陆续升起以阻挡潮水进入泻湖。当78个模块组成的四扇闸门全部升起时，威尼斯泻湖将与亚德里亚海隔绝，令威尼斯城不再受洪水侵袭。



闸门模块抬起时的状态，威尼斯泻湖将与亚德里亚海形成水位落差（图片来源：MOSE官网）

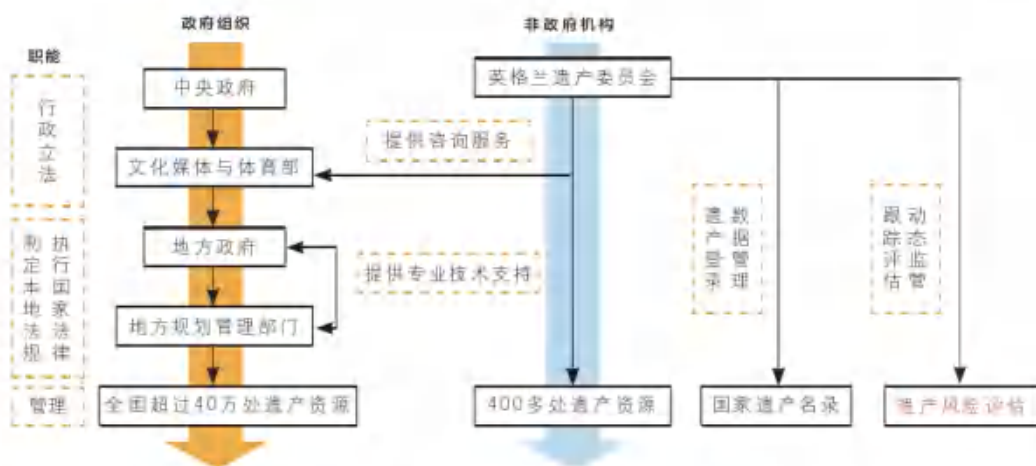


四 英格兰历史城市中的气候变化减缓策略

内容整理自刘天航（天津大学建筑学院 天津 300110）张春彦（天津大学建筑学院 天津 300110）理查德·巴特勒（莱斯特大学历史、政治与国际关系学院 英国莱斯特）《英格兰历史城市中的气候变化减缓策略》

气候变化会为历史城市环境带来严重的威胁，这不仅是因为城市遗产通常暴露于环境当中，会受到城市空气污染物侵蚀；还因为历史建筑的能源效率一般要低于新建建筑，会产生更多的碳排放，从而进一步恶化城市环境。除此之外，气候变化还会对文化、社会、经济甚至人类的生存方式带来更为深刻的影响。例如，气候变化可能使社区居民改变他们在城市建筑和景观中的生活，工作和社交方式，甚至可能会迫使他们迁走并放弃他们的建筑遗产。对于那些已经面临严峻的功能、环境和社会经济问题的历史城市来说，气候变化可能导致文化遗产加速退化甚至消失。

英格兰有一套相对成熟和完善的遗产保护体系，直到今天，英格兰始终走在世界文化遗产保护理论和实践领域的前沿。为了应对气候变化，英国政府采取了一系列措施，其中，遗产保护领域也扮演着重要的角色。在组织机构层面，英格兰的遗产保护体系主要由中央政府、地方政府和非政府机构构成。



英格兰遗产保护运作机制（来源：胡敏，张帆. 英格兰遗产风险评估制度及其启示[J]. 国际城市规划, 2016(3):50）

英格兰政府出台了一系列政策法规，主要涉及战略、规划的制定过程中对环境影响的把控。在城市保护实践中，英格兰历史署所采取的方式是向公众提供专业的技术支持并公开一系列的指导手册，事无巨细地指导建筑遗产的使用者和拥有者应该如何应对气候变化所带来的各种威胁，例如：潮湿环境可能对历史建筑产生的影响，如何应对水患灾害，甚至会指导他们如何保护栖息在历史建筑中的蝙蝠等动物等等。此外，气候变化还可能增加历史建筑面临虫害的风险，建筑内部环境的变化也会影响到其本身的结构和其内部包括可移动文物在内的物品保存环境。很多时候，气候变化所带来的不止是单一的损害，比如遭遇过洪水的历史建筑在洪水褪去后势必会再面临虫害和室内条件变化的困扰。上述情形的出现都需要对历史建筑进行一定程度的适应性改造，而英格兰历史署所作的主要努力就是全程参与这一过程，进行监管和技术指导，尽可能采用低影响和可逆的技术，使得为应对气候变化所采取的预防和灾后恢复措施对遗产本体的价值损害降到最低。

对于某些遗产来说，减轻中长期气候变化的影响可能是不切实际的。如临近海岸的遗产可能会受到海平面升高影响；在干燥条件下，土壤收缩会导致建筑物下沉、结构变形，最严重的情况下会导致坍塌等。这时，需要对遗产进行尽可能全面的记录，并做好接受损失的准备。



大伦敦地区的濒危建筑百分比



注释：大伦敦地区的濒危建筑在列级建筑中占 2.5%

1994年大伦敦地区的濒危建筑百分比

(来源：英格兰文化遗产保护机构和伦敦规划咨询委员会1994年的调查和统计资料)



更多内容
请扫描二维码关注公众号