

气候变化对文化遗产的影响: 机理、态势与应对

王灵恩¹, 李珂^{1,2}, 崔家胜¹, 孙琳³, 张书颖¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 武汉 430074; 3. 广西师范大学历史文化与旅游学院, 桂林 541001)

摘要: 近年来, 气候变化严重威胁文化遗产保护工作, 深入研究气候变化对文化遗产的影响机理和响应机制具有重要的理论和现实意义。本文解析了气候要素间的相互变化共同作用于文化遗产的机理和过程, 并评估未来气候变化对中国文化遗产的影响及其趋势, 探索了中国在文化遗产保护方面的利益相关者之间的互动关系网络。研究认为: (1) 各气候要素及其变化作用于文化遗产的机理过程复杂多样; (2) 需辩证看待未来气候变化对中国文化遗产的影响; (3) 构建利益相关者网络有利于切实发挥不同角色的功能和作用。在气候变化加剧和“文化强国”战略背景下, 研究结果有助于深化各界对文化遗产保护的理解, 丰富文化遗产资源保护和利用的理论研究和探讨。

关键词: 气候变化; 文化遗产; 影响机制; 保护利用; 中国

文化遗产是人类宝贵的财富, 其保护和传承是人类共同的责任和可持续发展的必然要求。近些年来, 气候变化带来的极端天气灾害等严重威胁文化遗产的安全。2021年11月, 联合国教育、科学及文化组织发布的《针对世界遗产的气候行动相关政策文件更新》中指出: “气候变化已成为世界遗产面临的最重大威胁之一, 可能会影响包括其完整性和真实性在内的突出普遍价值及其在地方层面的经济和社会发展潜力”。

气候变化对文化遗产的影响研究从21世纪初开始得到研究者重视^[1], 目前仍然是一个不断发展和备受关注的领域^[2]。国外研究者主要关注文化遗产的重要性、受气候变化威胁的文化遗产范围、文化遗产与气候问题的关系、文化遗产保护在气候变化影响下的障碍。目前, 相当数量的研究采用案例研究方法, 其重点仅限于一种或几种遗产资源, 很难做出更广泛的概括。值得注意的是, 仅有少数学者考虑了非物质文化遗产的单独研究。在讨论气候变化对文化遗产的驱动机制时, 仅考虑单一或两种驱动因素之间的关系, 最常探讨的驱动因素组合是海平面上升^[3]和温度变化^[4]。国外普遍认可技术^[5]、监管^[6]和政策^[7]为重要抓手并将其纳入适应和减缓路径中。与国外相比, 国内的研究起步较晚且研究内容有限, 主要研究在气候变化下对文化遗产的监测及其病害调查、应对气候变化的文物保护实践、国际遗产领域的行动对中国的启示等, 同样以个案研究居多, 即聚焦于特定地点、规定阶段的具体类型文物^[8-10]。遗憾的是, 截至目前中国尚未有针对气候变

收稿日期: 2023-03-13; 修订日期: 2023-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(42171288); 科学技术部基础资源调查专项(2021FY101003)

作者简介: 王灵恩(1987-), 男, 山东沂南人, 博士, 副研究员, 研究方向为旅游可持续消费。

E-mail: wangle@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 崔家胜(1993-), 男, 辽宁锦州人, 硕士, 研究方向为可持续消费。

E-mail: cuijiasheng@igsnrr.ac.cn

化影响某项非物质文化遗产的研究。保护技术^[11]、日常管理^[12]、经费保障是专家建议多类型文物应对气候变化时要采取的统一行动。

总体上,目前国内外学者对气候变化背景下文化遗产保护方面作出了积极探索,但是现有研究多是基于单一气候要素的实证分析,缺乏从系统视角梳理气候变化对文化遗产的影响机理及其响应机制。中国在应对极端气候方面积累了丰富的经验,中国学者开始关注和参与到气候变化对文化遗产的影响因素等方面的研究,并尝试一些新的文物保护方法,但在理论方面还有待总结和提炼。Orr等^[2]梳理了全球在该领域的研究区域和地点后更是提到了其他国家或区域与欧洲和北美的研究差距悬殊,如果不解决西方国家在该科学问题方面的主导地位,则该领域可能会以主要反映欧洲和北美社区遗产、气候、价值观的证据来向全球制定并告知气候变化政策。这无疑对其他国家或地区的文化遗产保护工作造成了不合理且不利的威胁,中国也迫切需要增进对气候变化影响本国文化遗产的全面理解,并据此立足于中国国情来实施文化遗产保护或适应。

立足以上分析,本文利用文献分析和归纳总结方法,试图系统梳理国内外气候变化和文化遗产领域的研究成果,为气候变化影响文化遗产的机理过程提供见解,同时评估气候变化对中国文化遗产保护的影响现状和趋势,提出新时期中国文化遗产保护应对气候变化的机制和路径,为文化遗产保护的研究提出新的思路。研究结果旨在为气候变化和文化遗产资源领域的学术研究提供文献借鉴,同时为中国文化遗产保护和气候适应的政策制定提供参考。

1 气候变化对文化遗产的影响机理分析

1.1 文化遗产保护的环要求

文化遗产是一组从历史继承下来的资源,它包括了人与地之间通过时间的相互作用而产生的环境的所有方面(欧洲委员会)。无论社会环境如何变迁,文化遗产是在由气候主导的生态环境框架下演化的产物,生态环境和社会环境共同塑造了文化遗产的形成与发展。作为文化遗产的创造者,人类始终在适应生态环境之余对其进行不同幅度的改造。因此,当作为形成背景的自然环境因素发生变化时,文化遗产的保护工作必然面临同样的适应过程。显然,强化从生态环境视角审视气候及其变化与文化遗产的关系极为关键。

文化遗产是人与环境互动的产物,文化遗产与生态环境和社会环境密不可分。不同环境塑造了各社区居民特有的思维方式、价值观念和生活方式,文化遗产正是对人类社会不同文化的反映。文化遗产的保护,离不开对其“应在”环境和“所在”环境的关注。在此,本文仅讨论文化遗产所面临的气候环境,将气候的基本要素作为表述气候环境的基本依据。此外,由极端气候事件引发的灾害事件也应考虑在内^[13]。气候环境结构如图1所示。

“应在”环境即文化遗产所需的理想气候环境,以确保其保存、传承和展示的最佳条件,不同类型的文化遗产对各个气候要素的要求不一。已有研究凡是涉及某种或某类文化遗产的气候环境时,文化遗产通常指物质文化遗产和可以用“物”承载的非物质文化遗产。多数非物质文化遗产自身的一系列问题就很难被解决^[14],如公地所有和社区起源间存在矛盾、个人权利和文化权利失衡、与全球道德和伦理规范的一致性有待辩论等,

且其与地方（或社区）的联系紧密相连，尝试提炼抽象的文化、遗产、地方价值以向管理和政策提供信息也是一项相当艰巨的任务。因为地方意义、身份认同、地方依赖等都是在复杂的心理和社会网络中随着时间推移而发生的^[15]，要测量并据此估计气候变化对非物质文化遗产造成的影响，其难度可想而知。因此，本文选择的文化遗产以物质为主、以非物质为辅。

实际上，“静态”的“应在”气候环境只是理想化状态，气候变化已经改变了气温、湿度、风向风速、降水和辐射等气候变量，也加剧了灾害事件的发生频率。文化遗产“所在”的实际环境已经发生巨大改变，正如今天所经历的，气候变化成为一种威胁倍增器，并加剧了文化遗产预期的自然衰减速度^[16]。文化遗产正面临着与气候变化相关的影响^[17]，“气候变化因素被确定为文化遗产的最大威胁”这一观点已达成共识。因此，保护文化遗产需要根据其类型和气候环境需求，以及当前环境的气候条件，定期监测其“应在”环境和“所在”环境的差异程度，制定相应的保护策略，加强其应对气候变化的能力。

1.2 气候变化影响文化遗产的机制

1.2.1 气候变化的要素分析

气候变化是指自然系统和人类活动的温室气体排放导致的气候模式的变化^[18]。另外，气候变化与大气污染紧密相关，气候特征及其变化会影响大气污染程度，如风速决定了大气污染物稀释的程度和扩散范围；大气污染引起气候恶化，二氧化碳的大量释放引起“温室效应”。日益严重的大气污染对文化遗产保护也造成了威胁。近几十年来，全球或地区气候和大气污染变化剧烈（表1）。

表1 全球或地区的气候和大气污染变化趋势
Table 1 Global or regional trends in climate and air pollution

气候/大气污染要素变化		整体变化趋势
气候变化	气温变化	平均气温 人类活动导致的全球变暖比工业化前水平高出约1.0℃ ^[18]
	湿度变化	极端气温 中低纬度地区更易遭受热浪、高纬度地区更易遭受寒潮 ^[19]
		绝对湿度 全球范围内绝对湿度增加 ^[20]
		相对湿度 1979—2014年全球相对湿度下降 ^[21]
	风向风速变化	风向风速 2013—2017年，春秋季节北美大陆的南风强度加强，其盛行西风带在春季加强、秋季减弱 ^[22]
	降水变化	风趋雨 赤道运动和大气环流加强 ^[23]
		降水量 全球平均年降水量增加 ^[24] ；干燥区降水更少，湿润区降水更多 ^[25]
	辐射变化	极端降水 暴雨的强度和频率增加 ^[26]
		太阳辐射 云量增加使全球太阳辐照度下降 ^[27]
大气污染的变化	有害气体的变化	臭氧、一氧化碳、二氧化碳、氟氯化碳、硫氧化物、氮氧化物浓度增加 ^[28]
	颗粒物的变化	预计颗粒物会随着气候变化而增加 ^[29]



图1 气候环境结构
Fig. 1 Climatic environmental structure

1.2.2 气候变化对文化遗产的影响机理

气候环境是一个由多个要素及其交互作用形成的复杂体系^[30]，这决定了气候变化并不是单一气候要素简单地作用于文化遗产。实际上，气候变化通常“牵一发而动全身”，气候要素之间相互联系、相互影响，气候变化对文化遗产的影响存在三种机理，如图2所示。

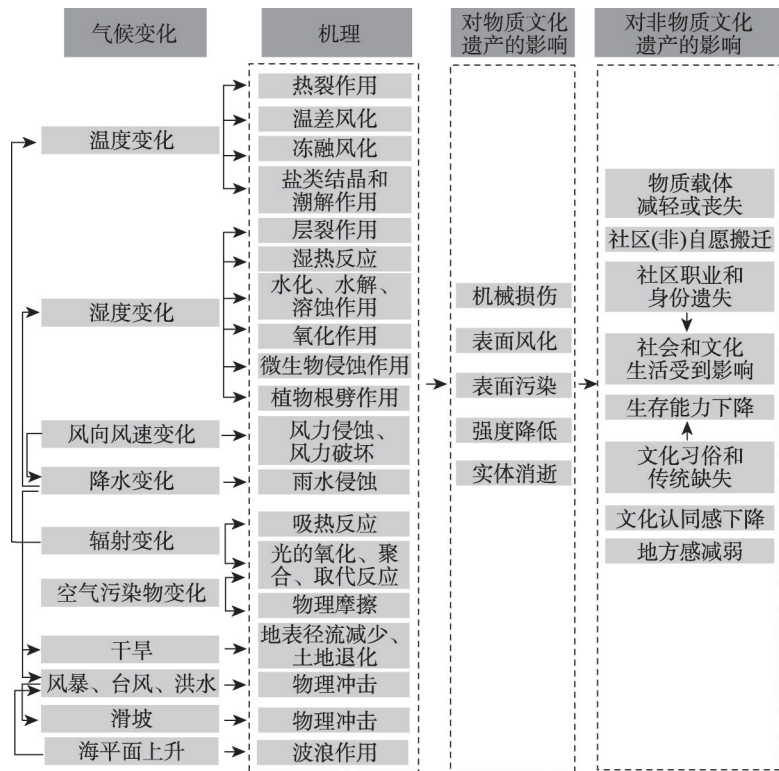


图2 气候环境变化影响文化遗产的机理和过程

Fig. 2 The mechanism and process of climate and environmental change affecting cultural heritage

(1) 单个气候要素的变化直接导致文化遗产发生一种或多种变化

平均气温上升会加快文化遗产的老化速度，尤其是暴露在室外的文物以及各类有机质文物。文化遗产遇热时内部分子运动活跃，体积膨胀，产生热裂现象，再度受冷会收缩。此外，土质、石质和混凝土制成的文物易在气温变化下发生冻融循环，内部孔隙和裂缝逐渐增大直至破裂。极端温度（热浪和寒潮）使得文化遗产更加脆弱，增加上述事件的发生频率。

绝对湿度的增加使得空气中凝结水增加，其附着于文化遗产表面，加快文物表层风化过程，同时促进微生物繁殖，危及文物安全。这一现象在沿海地区更加显著，沿海地区岩石风化率比内陆地区岩石风化率高59%^[31]。微生物在文化遗产中的定居、生长和侵蚀，细菌、真菌、藻类、苔藓等会破坏文化遗产的外观，使其着色或生成斑块，微生物代谢时会分泌有机酸，造成文物腐蚀^[32]。相对湿度的高低引起有机文物的湿胀干缩，频繁变化则会使其损坏或发生永久性物理变形。

风的作用下，风力侵蚀会导致文化遗产退化，尤其是位于干旱半干旱地区开阔地带

的文物。风向决定了文物遭受面的特定方向,高风速则加剧了风化侵蚀的强度。当吉萨高原的风向从北转向西北,狮身人面像左侧部分受到的表面摩擦力会显著增加,其左肩和大腿以及头部增加到25%^[33]。此外,文化遗产易受到强风引起的上升压力或载荷,造成巨大破坏,常见有屋面板隆起、屋面与墙的连接失效、屋面系统损坏以及门窗玻璃因压力过大而破裂^[34]。

太阳辐射过多会导致文化遗产的光泽下降,如暴露在阳光下的蛇纹岩的色度和色调会下降^[35]。太阳辐射过少使得文化遗产接收的太阳能短缺,Murgul^[36]建议在俄罗斯的北方城市圣彼得堡历史街区建立太阳能供应系统,促进建筑和太阳能的和谐融入。

(2) 气候要素变化的连锁反应间接对文化遗产产生影响

与其他气候要素相比,降水变化影响文化遗产的机理更为复杂^[37]。在降雨量增加的地区,文化遗产会遭受雨水冲刷甚至浸泡的危险。同时,雨水通过影响温湿度间接参与冻融循环、化学腐蚀和生物侵蚀等机理损害文化遗产,如雨水和酸性气体发生水解反应,腐蚀木质文物;生物侵蚀导致文物表面被污染、缝隙被加大、结构被降解。在降雨量减少的地区,湿度下降的干燥环境会使文化遗产表面隆起或开裂,也可能会使其所在场地更易受到火或风的影响^[38]。极端降水会引起风暴潮、洪水等水文灾害,文化遗产会受到坍塌、下沉等直接损害,处在沿河和洪泛平原的文化遗产尤其危险,严重情况下可导致其完全消失。由风提供水平速度分量的降雨称为风驱雨^[39],风驱雨的物理撞击会导致材料从砖石建筑表面剥离。如果文物朝向与盛行风的方向一致,盛行风将会把雨水吹到裸露的建筑立面,从而导致文物的表层发生不同程度的恶化。

(3) 气候要素变化的交互作用致使文化遗产发生改变

温度的上升增加了蒸发率,盐溶液渗透并聚集在多孔结构中,温度以及相对湿度变化时就会引起盐结晶发生机械应力,文物外层因此剥落,墨西哥Ixcaquixtla考古遗址的壁画油漆层分离是典型案例^[40]。空气中的有害气体加上气候要素是文化遗产恶化的主要原因^[41]。空气中的酸性气体、氮氧化物可与水蒸气生成强酸,对各类有机质文化遗产均有腐蚀作用。氯气可直接与多种金属和非金属文物发生反应,如青铜上出现的绿色粉末状锈斑就是由氯化物腐蚀而形成的。

气候变化正在增加灾害的数量及其毁灭性影响^[42],气象灾害、地质灾害、海洋灾害的发生频率升高。据统计,全球水文气象灾害由1987—1998年的平均每年195起增加到2000—2006年平均每年365起。降水的极度增加会诱发风暴、台风和洪水,影响文化遗产单体甚至淹没整座历史文化名城。降水的极度减少会造成严重干旱,增加森林文化遗产发生火灾的风险。与洪水等自然灾害伴随而来的还有地震、滑坡等地质灾害,这会使部分文物出现墙体开裂、饰件脱落、基底倾斜甚至整体坍塌。

值得提出的是,气候系统的变暖也使得非物质文化遗产保护面临着前所未有的考验。气候变化对物质文化遗产的负面影响无疑使得非物质文化遗产的承载主体和实践活动受到阻碍。社区居民被迫减少了物质依赖,割裂了精神联系。北极地区^[43]、太平洋环礁国家^[44]和非洲内陆国家^[45]等的土著居民自愿或非自愿搬迁是气候变化影响非物质文化遗产的典型案例。以布基纳法索为例,极端干旱影响了其传统农业和粮食系统,许多居民不得已同时种植作物和卖牛来维持生存,他们感到失去了牧民身份。此外,气候变化会使得当地的文化习俗和传统缺失,美国Gullah Geechee社区拥有一项关于制作香草篮的工

艺传统,这种草因一系列海洋灾害越来越难以获得,导致该项传统技艺严重衰落^[46]。同样,传统历法如中国的二十四节气在适用性方面已经悄然发生变化,暑天天数增多,寒天天数减少^[47]。萨哈共和国以Jyl Oghuha(“冬天的公牛”)来解释当地从冬天到春天的转变,而其随着气候变暖也许不复存在^[48],这表明一些传统口头文学以及作为其载体的语言将会随气候变化消失。气候要素的复杂变化干扰到了社区居民的行为能力,海冰融化导致加拿大北部的因纽特人丧失了对当地环境知识的熟识度和文化的认同感^[49]。人类迁徙往往会切断与地方的联系^[50]。同时,气候变化驱动的地方变化也会减弱当地居民的地方感,如人类在灾害过后会产生急性或慢性的“生态悲伤”的心理和情感^[49],这些都使得居民的生存能力下降、社会和文化生活受到影响。

2 气候变化对中国文化遗产影响的态势

2.1 中国气候变化特征与文化遗产保护现状

气候变化是全球共同面临的挑战,IPCC发布的《2022年气候变化:影响、适应和脆弱性》^[51]表示中国将是受气候影响最大的国家之一。中国疆域辽阔、海陆兼备、地形多样,因此气候变化所呈现出的特征也十分复杂(表2)。

中国有着悠久的文化遗产保护传统,经历了形成、发展和完善三个时期,分别是对器物文物的单一保护、增加历史文化名城保护的双层次保护、重心转向历史文化保护的多层次保护。1982年《中华人民共和国文物保护法》的颁布实施,标志着中国文化遗产保护进入法制化轨道。目前中国以《文物保护法》为中心,以行政法规为依托,以部门规章、地方性法规、行业标准等为主要内容,建成了一套完善的文物保护法律法规体系。文物普查是文化遗产保护的首要基础工作,中国在1956年、1981年和2007年分别进行过三次不可移动文物普查,2013年进一步廓清了全国可移动文物家底,为中国文化遗产保护政策的科学性提供了有力依据。中国也高度重视全球气候变化对文化遗产带来的不利影响。第一部《国家适应气候变化战略》(2013年)提出要“加强对受气候变化威胁的风景名胜资源以及濒危文化和自然遗产的保护”。国家文物局致力于探索如何在气候变化下建立起文物保护机制,并和有关部门合作及时推出气候变化相关信息以及应急保护制度。同时,中国积极响应气候变化国际议题,参与并举办相关学术研讨会,共享中国保护文化遗产经验,学习借鉴他国保护文化遗产的成功案例。这些方面的进展标志着中国在文化遗产保护方面取得了重要成就,并展示了中国在保护、管理和可持续发展文化遗产方面的长远愿景和承诺。

2.2 气候变化对中国文化遗产的影响分析

太阳辐射以及温度气候的变化会影响文化遗产表面温度,使得文物裂缝加大、剥落破裂,以及引起火灾直接烧毁文物。昼夜温差是文物表层风化壳、裂隙的形成、发育以及剥蚀的主要原因^[75]。气温过高为火灾创造了条件,青海查来坚贡佛堂的房顶、门窗、四壁和实木框等建筑均遭大火破坏^[76](图3a)。此外,受太阳辐射影响,文物表面温度分布不均,导致龙门石窟内的大卢舍那像龕表面风化裂隙、岩溶、植物覆盖等病害有明显的方位性和季节性分布^[81](图3b)。

湿度气候的变化与温度气候变化、空气污染物变化一起作用于文化遗产,污染其表

表2 中国气候要素变化的整体及区域趋势

Table 2 The overall and regional trends of climate factors change in China

气候要素变化	整体趋势	区域趋势
气温变化	平均气温：中国平均气温呈上升趋势，速率约为0.300 ℃/10 a ^[52,53]	平均气温：东北地区、西北地区、西南地区的气温上升速率较大 ^[53]
	极端气温：1991—2014年，中国热浪日数迅速增长 ^[54] ；1960—2016年，中国大多数地区发生寒潮的频数下降 ^[55]	极端气温：高温热浪主要出现在华北到华南 ^[56] ；1978—2009年，华南地区更容易发生极端低温事件，寒潮频数高 ^[55]
湿度变化	湿润指数：1960—2018年，中国湿润指数呈增加趋势，速率达0.102/10 a ^[53]	湿润指数：西北地区、华东地区等地湿润指数增加，西南地区东部和华北地区下降 ^[55-59]
风向风速变化	风速：中国大部分地区近地表风速下降，速率约为-0.11 ms/10 a ^[60]	风速：北方地区风速大于南方地区。春季风力最强，尤其是西北、华北常有沙尘暴发生 ^[61]
	风向：1956—2005年中国年盛行风向频率有减少的趋势 ^[61]	风向：除35°N附近的山东部分地区以外，中国华北南部、华东和华南大部在春季、秋季、冬季时盛行北风，夏季时盛行南风 ^[61]
降水变化	降水量：中国降水量整体增加，平均增加趋势为11.722 mm/10 a ^[53]	降水量：西北地区、西南地区的青藏高原区、华南地区的降水量增加趋势最为显著 ^[56] ，与此相反，华北地区的降水量呈减少趋势 ^[63]
辐射变化	极端降水：地表每变暖1 ℃，中国的极端降水增加22.6% ^[62]	极端降水：主要发生在东部的东北到华南 ^[56]
	太阳辐射：1962—2015年，中国大部分地区的太阳辐射呈下降趋势 ^[64]	太阳辐射：华北地区东南部、东北地区东部、西南地区东部、华南地区南部显著增加 ^[64]
空气污染变化	有害气体：1961—2010年，中国大多数地区的CO ₂ 浓度升高约1 ppm ^[65]	有害气体：气溶胶光学厚度（AOD）能直接反映大气污染物状况，中国AOD值较高的地区分布在华北、华南、华中、华东地区以及四川盆地 ^[67]
	颗粒物：2013—2017年，中国颗粒物质量浓度呈显著下降趋势；然而64%的城市PM _{2.5} 质量浓度超过中国环境空气质量新标准（CAAQS）二级（GB30952012） ^[66]	颗粒物：太行山以东地区、汾河、渭河平原、新疆乌昌地区的PM _{2.5} 浓度负荷较高，秋冬季重雾霾污染频繁发生 ^[66]
灾害变化	自然灾害：① 气象灾害：1950—2013年，中国旱涝灾害的影响面积显著增加 ^[68] 。近几年台风呈增多趋势，且多活跃在夏秋季节 ^[69] 。② 海洋灾害：1980—2021年，中国海平面上升速率高达3.4 mm/a ^[70]	自然灾害：① 气象灾害：华中、华东、华南地区因降水集中度增加使得其春秋季节的干旱加剧 ^[72] ，夏季的暴雨雨量和雨日增加 ^[73] ；“湿润地区更加湿润，干旱地区更加干旱”的局面正在形成。沿海地区的广东省台风发生频数最高 ^[69] 。② 海洋灾害：广州、福建、浙江和海南因台风引发的风暴潮而遭受的直接经济损失和死亡人数最多 ^[74]
	地质灾害：包括中国在内的大多数国家和地区的滑坡灾害呈上升趋势 ^[71]	地质灾害：多发生在西南山区、东南沿海地区 ^[71]

注：在实际操作中，绝对湿度和相对湿度不易直接测量，中国专家常用湿润指数的大小来衡量湿度变化，指的是地面收入水分与其支出水分之比，比值越大，气候越湿润。

面，加大其裂缝，降低其强度。霉菌会在适宜的温湿度下大量滋生，引起文物的表层霉变，苏州丝绸博物馆内的黑色团花马褂是其典型代表^[77]（图3c）。大量空气污染物与高湿度组合则会加快文化遗产的病害速度。有学者曾研究秦始皇兵马俑博物馆陶器库内的大气成分，发现颗粒物随着室内温湿度的变化反复结晶沉淀，已造成陶器表层酥解^[78]（图3d）。不可移动文物亦是如此，云冈石窟所处的气候条件和长期沉积的粉尘使得石雕塑像表面呈现深灰色或灰黑色，且粉尘改变了部分砂岩原有的矿物组成，使文物结构疏松、风化速度加快^[82]。

降水气候的变化使文化遗产周围环境的湿度变化，导致系列灾害发生。极端降水的增加会引起暴雨等气象灾害以及洪涝、滑坡、泥石流等地质灾害，造成文化遗产表面污染、脆弱碎裂甚至坍塌下沉。2021年10月12日山西发生暴雨，全省共有1783处文物发



(图片来源: 文献 [76])

(图片来源:
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1741998933128605480&wfr=spider&for=pc>)

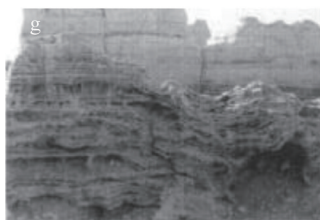
(图片来源: 文献 [77])



(图片来源: 文献 [78])



(图片来源: 文献 [79])

(图片来源:
http://slide.news.sina.com.cn/c/slide_1_2841_22833.html#p=3)

(图片来源: 文献 [80])

(图片来源:
<http://tuchong.com/2991435/75292720/#image537254295>)

图3 气候变化作用于中国文化遗产的典型案例

Fig. 3 Typical examples of how climate change is affecting China's cultural heritage

生了屋顶渗漏、墙体开裂、地基塌陷、墙体崩塌等灾害^[79] (图3e)。降水的极端减少会使得干旱频繁,尤其对水文化遗产来说,会中断其相关传统习俗,影响历史古城的整体地方感。2009—2012年,云南遭遇百年来最严重旱灾,致使丽江古城的黑龙潭干涸,部分河流断流,丽江古城的放荷灯、送纸船等传统习俗被瓦解^[83] (图3f)。

气候变化带来的风向风速改变对中国不同地区文化遗产造成显著影响。单一变化导致文化遗产风化、剥落甚至坍塌,尤其对于中国干旱、半干旱气候区的不可移动文物。南方地区沿海台风逐渐频繁是气候变化的重要方面。2019年8月9日台风“利奇马”袭击台州,致使57处不可移动文物受灾,以木结构传统建筑受灾为主,主要有屋面损害、墙体坍塌、梁架坍塌等损害^[84]。还有学者测量了干旱区文化遗产的受损数据,赵海英等^[80]发现甘肃河仓城的东南角已凹进高约2 m,深约1.5~2 m,随时可能坍塌 (图3g)。而风向致使文化遗产受损程度不一,如新疆交河故城大部分面向西北的墙面风蚀严重^[85] (图3h)。

2.3 气候变化对中国文化遗产影响的趋势

未来全球气候系统的变化将继续以全球变暖为中心,中国的气温也会持续升高,北方地区的这一趋势更为明显。杨绚等^[86]利用CMIP 5的30个气候模式预估北方地区的增暖趋势以西南地区的青藏高原区、华北地区的内蒙古地区、东北地区东部为主。气温上升利于昼夜温差的缩小,这意味着文化遗产所受温差风化、冻融风化的影响将会变小;相反,热裂作用以及盐结晶和潮解作用可能会更加显著,这使得室外文物面临着外貌更易变形、裂缝加速扩大的危险,最终导致其成块破裂。

有学者观察到近几十年来西北地区的北风减弱、南风增强,这有利于削弱中国的冬季风,减少西北地区冬半年的大风天气和寒潮天气,西北地区的文化遗产更易保存,特别是大型室外文物有关风力侵蚀和空气污染的病害将会减少。同时来自印度洋和西太平洋的南部水汽正逐渐向北方输送,从西风带来的水分也在不断增多,因此,中国大部分地区的湿度可能会增加。尤其是北方地区从暖干到暖湿的转变,为微生物的生长和繁殖提供了更加适宜的环境条件,植物根部也会沿着文物已有的缝隙生长,文化遗产将面临更频繁的化学腐蚀和生物侵蚀。

预估中国未来的降水量普遍增加,这一变化在西北地区尤为明显,华北地区和东北地区南部以及长江中下游地区则呈现减少趋势^[86]。降水增加导致文化遗产更易遭受雨水侵蚀,同时增加其与温度、湿度共同影响的概率,进而发生水的化学腐蚀、生物侵蚀、盐类结晶和潮解等一系列作用,使文化遗产发生腐烂、泛碱、风化等多种病害。尽管北方地区的降水量预计增加,其蒸发量却因气温显著上升而更加强烈。Hui等^[87]通过检测极端气候事件的变化发现中国湿润地区的干旱事件较少,干旱和半干旱地区相反。干旱环境不易滋生霉菌,利于多数文化遗产的保存,特别对于力学强度低、易在水中崩解的土质文物。但干旱会放大高温影响,引发沙尘暴、火灾等一系列自然灾害,直接冲击文化遗产。

由于气候要素变化的复杂性,中国极端事件预计会增多。极端温度事件在全国范围内将呈现一致的变化模式,即热浪事件增加,寒潮事件减少。这对中国高寒山区的冰川是极为致命的,冰川融化将会导致中国长江、黄河等几大河流的源头发生水资源短缺,威胁当地乃至中国全域的文化遗产储存环境。极端降水事件的频率显示出区域性和季节性的显著趋势^[88],夏季风的增强使得中国沿海地区更易发生洪涝灾害,北方地区降水量的普遍增加可能会扩张降水事件的频次和强度。中国的古建筑多以土质材料和木质材料为主,历经几百年的风吹雨打已经变得十分脆弱,该类文化遗产更易遭受极端降雨的损害,发生地基松动、墙体开裂、倾斜坍塌。

根据中低排放的设想,到2050年中国海平面相对于1995—2014年间将上升0.1~0.4 m^[89]。其结果是加剧盐水入侵,文化遗产易发生腐蚀、生锈和盐沉积,导致其构成材料退化。同时,文化遗产以及历史文化名城面临着更多的海岸侵蚀和洪水、风暴潮威胁,沿海地区有可能被海水淹没,这意味着中国部分地区可能会发生人口迁移,产盐、捕鱼等传统生活方式可能由此改变。

3 利益相关者视角下文化遗产保护与气候变化应对

3.1 中国文化遗产保护在应对气候变化过程中的问题

气候变化的威胁下,中国文化遗产保护任务依然十分艰巨。UNESCO在“气候变化

对世界遗产影响政策文件”的信息会议上提出的四项行动目标对中国在该方面的保护和管理工作提出了新的框架^[90],推进文化遗产高质量发展的现实路径面临新的问题与挑战,包括在文化遗产风险评估、机构与能力建设、改革破题能力等方面亟需提升。

气候变化影响文化遗产的风险评估与管理处于初步阶段,预防气象次生及衍生灾害对文化遗产资源的威胁能力弱。国家行政部门缺乏具体的应对气候变化对于遗产威胁程度的完整评价机制和对精细空间尺度极端气候变化的预警机制;受限于地区发展差异,地方政府及政府部门在气候灾害上的信息获取能力存在明显差异,直接降低了文化遗产的风险抵抗能力。

在机构与能力建设方面,管理部门间推进文化遗产保护应对机制的系统性不强、整体性不够。中国文化遗产保护和管理聚焦于政府推动的特定地点和特定种类的文化遗产保护,以当地社区为代表的利益相关者对新形势下文化遗产保护工作的认识度不足与参与度不够,二元分立的情况充斥着遗产保护与管理的各个方面,进一步制约了文化遗产保护工作的效率。

在改革破题能力方面,对文化遗产价值的认识反思不足,未能从保护观念、机制、技术与管理方式等方面破题。在中国极端气候频发的当下,大部分省份地区在灾害发生后才开展文化遗产保护工作,保护主体责任落实不到位。同时,文化遗产保护科研力量不足,文物保护相关机构力量薄弱,社会力量参与不足,技术储备难以应对日趋严峻的文化遗产保护形式等问题。

3.2 文化遗产保护的利益相关者构成

文化遗产保护作为系统性工程,涉及众多利益相关者。整体而言,文化遗产保护的利益相关者分为7类:国家行政部门、当地政府及政府部门、当地社区、文化遗产相关企业、游客、相关科研人员、外部压力集团。在国家行政部门方面,中国涉及国务院、中央宣传部、文化和旅游部、国家发展改革委员会、财政部等11类利益相关者。国务院负责制定气候变化对于遗产威胁程度的完整评价机制及文化遗产保护行政法规,统一领导国家各部委推动文化遗产高质量发展。中央宣传部负责启迪公众对遗产保护深刻的理解和自觉参与,保护传承中华优秀传统文化。文化和旅游部参与遗产研究、管理、保护各项国际事务,统筹协调遗产保护与城乡建设、经济发展、旅游开发的关系,强化非物质文化遗产的抢救、保护和传承。国家发展改革委员会负责细化保护任务,组织拟定文化遗产应对气候变化重大战略、规划和政策;与各部委共同牵头参加气候变化国际谈判,负责国家履行联合国气候变化框架公约的相关工作;承担规划国家文化遗产保护重大项目。财政部下达项目补助经费和组织管理经费,用于加强气候变化背景下中国文化遗产保护。科学技术部负责建立具有中国特色的文化遗产价值认知、保护和传承利用基本理念和方法论研究,推动文化遗产保护与空间规划、气候科学、材料科学、地理学、海洋等学科的合作交流,突破针对复杂气候条件下可移动文物和不可移动文物的保护修复关键技术。人力资源和社会保障部加强人才培育和队伍建设,构建文化遗产高层次人才培养体系。自然资源部研究制定引导文化遗产合理利用的规划、土地等支持政策,并将文化遗产保护纳入国土空间规划编制;加强各级自然资源主管部门与文物主管部门的协调机制;联合相关部门开展文化遗产资源普查,将文化遗产空间信息纳入国土空间基础信息平台。住房城乡建设部加强历史文化名城、名镇、名村等历史文化资源的挖掘、

认定和保护；完善保护传承管理体制，形成国家、省、市、县上下联动保护。应急管理部建立气候影响文化遗产评估、监测预警和预防性保护体系，使保护管理工作更具针对性和前瞻性；提高气候变化、极端气候时文化遗产保护的安全防范与监管。中国气象局构建气候要素变化对于文化遗产威胁程度的评价机制和对极端气候的预警机制；提升气象灾害预报预警能力，明确文化遗产应灾响应的抗灾行动预案，推动保护工作向科学化、系统化方向发展。其他利益相关者及其发挥作用如表3所示。

3.3 气候变化和文化遗产保护利益相关者的网络构建

在中国，不同利益相关者在文化遗产保护应对气候变化的角色定位不同，各自的利

表3 气候变化背景下文化遗产保护的部分利益相关者
Table 3 Partial stakeholders of cultural heritage protection in the context of climate change

类型	利益相关者	发挥作用
地方政府及政府部门	当地政府	文化遗产实际的管理主体，落实国家行政部门的保护要求，推动行政区域内文化遗产高质量发展
	当地文化和旅游部门	协调行政区域内文化遗产资源的保护和发展；对旅游企业和游客进行管理
	其他政府部门	负责行政区域内的文化遗产行政管理职能，全面负责文化遗产的规划、保护、建设和利用
	当地气象局	组织协调完成行政区域内的气象服务，预警气候要素波动变化，实现文化遗产预防性保护
当地社区	社区居民	文化遗产发展的核心路径，维护文化遗产的自然性及原生性，促进文化遗产可持续发展
	居/村委会	宣传气候变化背景下文化遗产保护的紧迫性与必要性，激发辖区内居民保护文化遗产的自觉性与责任感；协助相关部门对文化遗产进行日常维护，协调辖区内居民与相关企业间的利益关系
文化遗产相关企业	景区经营管理机构	负责文化遗产的经营管理、日常维护和监测，实现文化遗产的高质量发展
	旅游企业	联结文化遗产与外界的重要媒介；对文化遗产资源进行商业性利用与开发
游客	观光型游客	促进文化遗产地基础设施建设，提升旅游业态品质；游客消费行为直接影响当地政府及相关企业对文化遗产保护利用的机制
	研学型游客	协调文化遗产与旅游开发的关系，促进合理保护与适度开发相结合；提升文化遗产科普研学功能，弘扬中华优秀传统文化；推动文化遗产的活化利用，为文化遗产的传承与保护提供新路径
相关科研 人员与机构	教育科研机构	结合研究领域开展文化遗产研究项目和保护工程，探索气候变化背景下文化遗产的应对技术，梳理不同气候要素变化对文化遗产资源产生的影响机理；跨学科研究，优化遗产保护风险应对机制与能力，为地方文化遗产高质量发展提供指导
	文化艺术研究院/所	
	非遗传承人	非物质文化的传承与发展者，保持中华民族优秀传统文化的传承，增进世界文化的多样性和创造性
外部压力集团	以联合国教科文组织为代表的国际组织	参与世界遗产的甄选、管理与保护工作；通过起草和发布文化遗产保护方面的国际文件和法律建议，应对气候变化，促进文化遗产的可持续发展；为文化遗产的保护提供资金与项目技术咨询
	相关社会团体	承担文化遗产的保护、宣传、科研等公益性事业；协调各个国家或地区的政府应对气候变化
	环保组织	对文化遗产经营性管理活动施加压力和影响，为文化遗产应对气候要素变化提供技术指导
	媒体	构建具有鲜明中国特色的文化遗产传播体系，助力文化遗产的保护、利用与传承；发挥信息中介作用，对文化遗产资源开发与利用进行监督

益诉求和发挥作用也各有不同。利益冲突和合作使得利益相关者之间无法实现协调和均衡,在满足利益诉求的同时让各方自觉为保护文化遗产付诸行动,开展气候变化背景下文化遗产保护与利益相关者的互动关系网络显得十分迫切。

国家行政部门的利益诉求在于整个国家的生态效益、经济效益和社会效益,政府充分履行公共服务职能才能为气候变化下文化遗产继续发挥公共属性提供平台。政府通过将气候变化纳入到文化遗产法规、提供遗产领域应对气候变化的指导方针和实施财政激励措施,使各利益相关者共同致力于应对气候变化,有助于树立政府形象、联结民族情感、维护国家统一与社会稳定。同时,政府统筹社会各界继续努力减少温室气体排放,改善的气候环境能够推动文化遗产的保护进而促进民族的文化自觉和文化复兴和保持世界文化多样性。

当地政府及政府部门的利益诉求在于当地的生态效益、经济效益、社会效益以及保持地方感,地方政府在文化遗产保护应对气候变化工作中发挥着具体管理和监督的作用。在宏观政策指引下,针对当地各类型文化遗产面临的主要气候问题,优先考虑最脆弱的气候要素,升级文化遗产及其所在地管理计划,把握决策制定、资金投入、绩效监督等关键环节^[91],将信息向下传递到当地管理部门和相关企业,与当地企业、社区、外部压力集团共同促进文化遗产保护与利用良性互动,有利于树立地方政府公信力、保持文化遗产的地方性、提升当地价值。

当地社区的利益诉求在于改善自身条件、保护传统和保持文化认同感,通常当地社区是对文化遗产需求作出回应的唯一利益相关方^[92]。当地政府、相关科研人员、媒体等应与社区建立伙伴关系,为其提供日常监督、应急管理、减少生活碳足迹等方面的能力培训和信息共享。居民可深度参与保护决策,发挥应对气候变化的经验优势,促进文化遗产为居民提供可持续福利。然而,由于中国社区在该方面经常处于弱势地位,居民参与决策需要有力的政策支持和措施保障。

文化遗产相关企业的利益诉求在于获得利润回报,响应文化遗产保护应对气候变化的工作是企业履行社会责任的必然选择。企业有能力在修复文化遗产时选择环保材料从而提高能源效率,也可在经营活动中管理行为以实现企业发展与碳排放“脱钩”^[93]。保持文化遗产的良好形象和打造负责任的企业形象,有助于增强企业的市场竞争力和经营活动的文化内涵。然而,企业以利润最大化为最终诉求,要求相关研究人员创新技术和能源以降低企业成本,社区的日常监督、当地政府的监管惩治和市场激励也是必要手段。

游客的利益诉求在于收获高质量旅游经历,其文明旅游行为对保护文化遗产十分重要。游客的文明行为不易导致文化遗产所在地局部气候环境发生急剧变化,这要求有关企业及文物保护人士在宣传、教育和指导等方面为其提供管理与服务。同时游客消费是支付遗产保护费用的来源之一,其保护意识能够吸引当地政府和社区参与到保护工作中。高质量的旅游体验也需要一定条件,气候变化对文化遗产造成的负面影响将干扰游客对文化遗产的真实性感知,易导致其期望价值与感知价值产生较大差异。

相关科研人员的利益诉求在于文化保护和研究创新,其作为公共知识分子为该项工作提供了智力支持。科研人员凭借掌握的学科知识和方法论,识别不利于遗产保护的气候要素,在资源普查、影响评估、遗产修复、技术创新、保护模式优化方面,发挥综合

交叉科学考察优势, 利于促进遗产保护、改善气候环境、科研三者之间的良性循环。科研人员可参与政府决策, 为基层工作人员和当地社区培训授课, 同时也通过实地调研积累了一手资料, 利于其在研究领域实现新思考、新探索和新成果。

外部压力集团的利益诉求在于文化保护和教育功能, 社会力量的广泛参与辅助形成文化遗产保护应对气候变化的最佳解决方案。社会公众是潜在的文化遗产保护者, 外部压力集团要发挥共享信息、知识和开放对话方面的优势, 唤起社会公众的行为方式和价值理念向延缓气候变化靠拢, 助力实现双碳目标, 为文化遗产保护营造有利的气候环境, 以保持文化遗产的文化交流和教育功能。

综上, 气候变化背景下的文化遗产保护需要联结各利益相关者在内的社会力量, 构建互动关系网络来解决各利益相关者对文化遗产保护的需求。该网络也能够加强各方之间的信息共享和沟通, 增进合作关系, 减少冲突和误解, 利于利益协调、遗产保护和气候适应与减缓(图4)。

总之, 人类活动是气候变化的主要原因之一, 包括利益相关者们在内的人类承受着气候变化带给文化遗产的积极或消极影响, 总体上消极影响偏多。为了应对这些负面影响, 不得不重视气候变化、利益相关者、文化遗产保护之间的互动关系, 以厘清气候变化对文化遗产造成的影响与人类有何关联, 进而对人类如何推进文化遗产保护有更加深入的了解。利益相关者们发挥其各自作用, 分别实施气候风险评估、气候适应、气候缓解和知识共享、能力建设和认识四个方面的行动目标, 以改善负面影响, 促进文化遗产保护适应气候变化, 这对实现人类可持续发展目标具有重大贡献^[94](图5)。

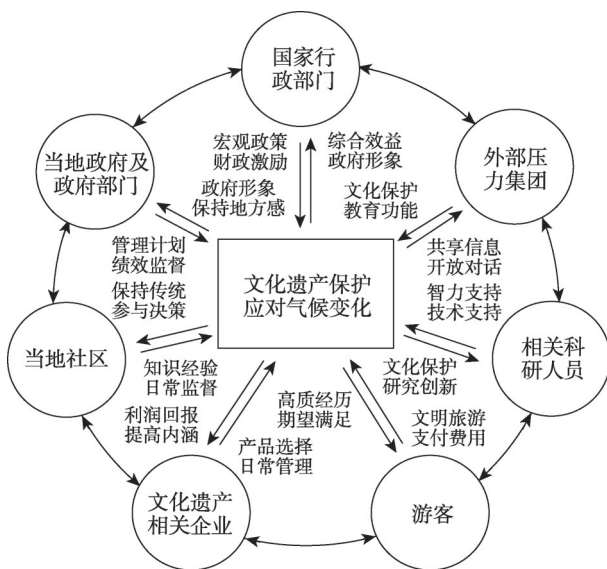


图4 气候变化背景下文化遗产保护与利益相关者的互动关系网络示意图

Fig. 4 Interactive network between cultural heritage protection and stakeholders in the context of climate change

4 结论

气候变化对文化遗产的影响是近年来的热门话题, 但众多研究侧重于某一方面气候变化要素对某一类型文化遗产影响的实证研究, 从系统视角全面分析气候变化对文化遗产影响机理的研究甚少。本文抛砖引玉, 综合分析了气候变化影响文化遗产的机制, 评估了现阶段气候变化对中国文化遗产的影响现状和未来趋势, 构建了气候变化、文化遗产保护和利益相关者的关系网络, 期望能够加深各界对气候变化和文化遗产保护关系的理解, 推动该领域研究和实践的深化。

基于研究结论, 本文进一步提出未来研究建议: (1) 加强气候变化对文化遗产的系

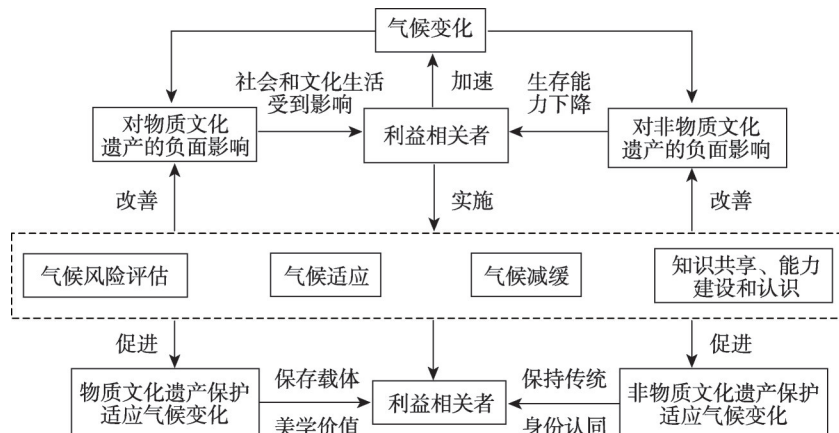


图5 气候变化、利益相关者、文化遗产保护之间的互动关系

Fig. 5 Interactive relationship among climate change, stakeholders and cultural heritage protection

统评估研究。当前，气候变化对中国文化遗产的影响依然缺乏系统评估，影响的程度、区域、特征等系列关键问题仍然没有明确的结论，亟待基于不同尺度、不同要素、不同维度开展系统研究。(2) 加强利益共享机制的研究。文化遗产保护涉及气候要素的复杂变化和多重利益相关者等众多约束条件，应通过进一步深化气候风险评估体系、强化机构与能力建设、创新气候适应与减缓举措和明确利益主体的权责一体化机制，来探索中国文化遗产应对气候变化的可持续性发展路径。(3) 强化数字技术在文化遗产应对气候变化过程中应用研究。将文化遗产资源转变为数字产品的保存、加工及传播，基于数字技术加强世界各国共同探索文化遗产关联与保护机制的研究与行动。(4) 重视文化遗产旅游的发展模式研究。气候变化背景下的文化遗产保护和利用关系更加复杂，矛盾更加突出，应探索重构旅游发展模式，考虑发挥社区的决策权力，协调气候变化背景下的文化遗产保护与开发。

参考文献(References):

- [1] FATORIĆ S, SEEKAMP E. Are cultural heritage and resources threatened by climate change? A systematic literature review. *Climatic Change*, 2017, 142(1): 227-254.
- [2] ORR S A, RICHARDS J, FATORIĆ S. Climate change and cultural heritage: A systematic literature review (2016-2020). *The Historic Environment: Policy & Practice*, 2021, 12(3-4): 434-477.
- [3] REIMANN L, VAFEIDIS A T, BROWN S, et al. Mediterranean UNESCO World Heritage at risk from coastal flooding and erosion due to sea-level rise. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1-11.
- [4] WOOD J D, GAUVIN C, YOUNG C R T, et al. Reconstruction of historical temperature and relative humidity cycles within Knole House, Kent. *Journal of Cultural Heritage*, 2019, 39: 212-220.
- [5] GUZMAN P, FATORIĆ S, ISHIZAWA M. Monitoring climate change in world heritage properties: Evaluating landscape-based approach in the state of conservation system. *Climate*, 2020, 8(3): 39, Doi: 10.3390/cli8030039.
- [6] BERTOLIN C. Preservation of cultural heritage and resources threatened by climate change. *Geosciences*, 2019, 9(6): 250, Doi: 10.3390/geosciences9060250.
- [7] HASSAN K, HIGHAM J, WOOLISCROFT B, et al. Climate change and world heritage: A cross-border analysis of the Sundarbans (Bangladesh-India). *Journal of Policy Research in Tourism, Leisure and Events*, 2019, 11(2): 196-219.
- [8] 王琳, 武虹, 贾鑫. 西辽河地区史前聚落的时空演变与生业模式和气候历史的相关性研究. *地球科学进展*, 2016, 31

- (11): 1159-1171. [WANG L, WU H, JIA X. A study on the temporal and spatial evolution of prehistoric settlements in Western Liaohé Region. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(11): 1159-1171.]
- [9] 汪怡, 梁龙, 孙延忠, 等. 山西省不可移动文物洪涝灾害风险研究. *自然灾害学报*, 2022, 31(3): 35-47. [WANG Y, LIANG L, SUN Y Z, et al. Study on flood risk of immovable cultural relics in Shanxi province. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(3): 35-47.]
- [10] 郑洪波, 周友胜, 杨青, 等. 中国东部滨海平原新石器遗址的时空分布格局: 海平面变化控制下的地貌演化与人为关系. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(2): 127-137. [ZHENG H B, ZHOU Y S, YANG Q, et al. Spatial and temporal distribution pattern of Neolithic sites in the coastal plain of Eastern China: Geomorphic evolution and man-earth relationship under the control of sea level change. *Science in China: Earth Sciences*, 2018, 48(2): 127-137.]
- [11] 刘文艳. 挑战与应对: 气候变化影响下的长城保护. *自然与文化遗产研究*, 2022, 7(4): 24-34. [LIU W Y. Challenges and responses: Great Wall protection under the impact of climate change. *Natural and Cultural Heritage Research*, 2022, 7(4): 24-34.]
- [12] 张治国, 吕凤琳, 王涛, 等. 气候变化对遗址的影响与应对策略探讨: 以新疆地区为例. *自然与文化遗产研究*, 2022, 7(4): 12-23. [ZHANG Z G, LYU F L, WANG T, et al. Impacts of climate change on heritage sites and countermeasures: A case study of Xinjiang. *Natural and Cultural Heritage Research*, 2022, 7(4): 12-23.]
- [13] LAVELL A, OPPENHEIMER M, DIOP C, et al. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2012: 25-64.
- [14] BROWN M F. Heritage trouble: Recent work on the protection of intangible cultural property. *International Journal of Cultural Property*, 2005, 12(1): 40-61.
- [15] HENDERSON M, SEEKAMP E. Battling the tides of climate change: The power of intangible cultural resource values to bind place meanings in vulnerable historic districts. *Heritage*, 2018, 1(2): 220-238.
- [16] HARKIN D, DAVIES M, HYSLOP E, et al. Impacts of climate change on cultural heritage. *MCCIP Science Review*, 2020, 16: 24-39.
- [17] FORINO G, MACKEE J, VON MEDING J. A proposed assessment index for climate change-related risk for cultural heritage protection in Newcastle (Australia). *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2016, 19: 235-248.
- [18] FAWZY S, OSMAN A I, DORAN J, et al. Strategies for mitigation of climate change: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 2020, 18(6): 2069-2094.
- [19] SONG X, ZHANG Z, CHEN Y, et al. Spatiotemporal changes of global Extreme Temperature Events (ETEs) since 1981 and the meteorological causes. *Natural Hazards*, 2014, 70(2): 975-994.
- [20] DUNNE J P, STOUFFER R J, JOHN J G. Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming. *Nature Climate Change*, 2013, 3(6): 563-566.
- [21] VICENTE-SERRANO S M, NIETO R, GIMENO L, et al. Recent changes of relative humidity: Regional connections with land and ocean processes. *Earth System Dynamics*, 2018, 9(2): 915-937.
- [22] LA SORTE F A, HORTON K G, NILSSON C, et al. Projected changes in wind assistance under climate change for nocturnally migrating bird populations. *Global Change Biology*, 2019, 25(2): 589-601.
- [23] SIMPSON I R, SHAW T A, SEAGER R. A diagnosis of the seasonally and longitudinally varying midlatitude circulation response to global warming. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2014, 71(7): 2489-2515.
- [24] CHOU C, LAN C W. Changes in the annual range of precipitation under global warming. *Journal of Climate*, 2012, 25(1): 222-235.
- [25] TRENBERTH K E. Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 2011, 47(1-2): 123-138.
- [26] TRENBERTH K E, DAI A, RASMUSSEN R M, et al. The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84(9): 1205-1218.
- [27] OHUNAKIN O S, ADARAMOLA M S, OYEWOLA O M, et al. The effect of climate change on solar radiation in Nigeria. *Solar Energy*, 2015, 116: 272-286.

- [28] MATYSSEK R, WIESER G, CALFAPIETRA C, et al. Forests under climate change and air pollution: Gaps in understanding and future directions for research. *Environmental Pollution*, 2012, 160: 57-65.
- [29] FUZZI S, BALTENSPERGER U, CARSLAW K, et al. Particulate matter, air quality and climate: Lessons learned and future needs. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(14): 8217-8299.
- [30] 尹彩春, 赵文武, 李琰, 等. 气候系统中临界转变的研究进展与展望. *地球科学进展*, 2021, 36(12): 1313-1323. [YIN C C, ZHAO W W, LI Y, et al. Research progress and prospects of critical transitions in climate systems. *Advances in Earth Science*, 201, 36(12): 1313-1323.]
- [31] MOTTERSHEAD D, GORBUSHINA A, LUCAS G, et al. The influence of marine salts, aspect and microbes in the weathering of sandstone in two historic structures. *Building and Environment*, 2003, 38(9-10): 1193-1204.
- [32] CHEN X, BAI F, HUANG J, et al. The organisms on rock cultural heritages: Growth and weathering. *Geoheritage*, 2021, 13(3): 56, Doi: 10.1007/s12371-021-00588-2.
- [33] HUSSEIN A S, EL-SHISHINY H. Influences of wind flow over heritage sites: A case study of the wind environment over the Giza Plateau in Egypt. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(3): 389-410.
- [34] SONG B, GALASSO C, GARCIANO L. Wind-uplift fragility analysis of roof sheathing for cultural heritage assets in the Philippines. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2020, 51: 101753, Doi: 10.1016/j.ijdrr.2020.101753.
- [35] SITZIA F, LISCI C, MIRÃO J. Accelerate ageing on building stone materials by simulating daily, seasonal thermo-hygrometric conditions and solar radiation of CSA Mediterranean climate. *Construction and Building Materials*, 2021, 266: 121009, Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121009.
- [36] MURGUL V. Solar energy systems in the reconstruction of heritage historical buildings of the northern towns (for example Saint-Petersburg). *Journal of Applied Engineering Science*, 2014, 12(2): 121-128.
- [37] BONEBRAKE T C, MASTRANDREA M D. Tolerance adaptation and precipitation changes complicate latitudinal patterns of climate change impacts. *PNAS*, 2010, 107(28): 12581-12586.
- [38] EZCURRA P, RIVERA-COLLAZO I C. An assessment of the impacts of climate change on Puerto Rico's cultural heritage with a case study on sea-level rise. *Journal of Cultural Heritage*, 2018, 32: 198-209.
- [39] BLOCKEN B, CARMELIET J. A review of wind-driven rain research in building science. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2004, 92(13): 1079-1130.
- [40] CHELAZZI D, POGGI G, JAIDAR Y, et al. Hydroxide nanoparticles for cultural heritage: Consolidation and protection of wall paintings and carbonate materials. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2013, 392: 42-49.
- [41] DE LA FUENTE D, VEGA J M, VIEJO F, et al. Mapping air pollution effects on atmospheric degradation of cultural heritage. *Journal of Cultural Heritage*, 2013, 14(2): 138-145.
- [42] JIGYASU R. Managing cultural heritage in the face of climate change. *Journal of International Affairs*, 2019, 73(1): 87-100.
- [43] ALBERT S, BRONEN R, TOOLER N, et al. Heading for the hills: Climate-driven community relocations in the Solomon Islands and Alaska provide insight for a 1.5 °C future. *Regional Environmental Change*, 2018, 18(8): 2261-2272.
- [44] ROBERTS E, ANDREI S. The rising tide: migration as a response to loss and damage from sea level rise in vulnerable communities. *International Journal of Global Warming*, 2015, 8(2): 258-273.
- [45] TRAORE S, OWIYO T. Dirty droughts causing loss and damage in Northern Burkina Faso. *International Journal of Global Warming*, 2013, 5(4): 498-513.
- [46] GHABRAMANI A, KINGWELL R S, MARASENI T N. Land use change in Australian mixed crop-livestock systems as a transformative climate change adaptation. *Agricultural Systems*, 2020, 180: 102791, Doi: 10.1016/j.ag-sy.2020.102791.
- [47] 中国气象局. 二十四节气列入非遗名录能唤起曾经的诗意生活吗, https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xmtjj/201612/t20161215_350872.html, 2016-12-15. [The China Meteorological Administration. Can the inclusion of the 24 solar terms in the intangible cultural heritage List evoke a poetic life, https://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xmtjj/201612/t20161215_350872.html, 2016-12-15.]

- [48] CRATE S A. Gone the bull of winter? Grappling with the cultural implications of and anthropology's role(s) in global climate change. *Current Anthropology*, 2008, 49(4): 569-595.
- [49] CUNSOLO A, ELLIS N R. Ecological grief as a mental health response to climate change-related loss. *Nature Climate Change*, 2018, 8(4): 275-281.
- [50] GHARBAOUI D, BLOCHER J. Limits to Climate Change Adaptation. Hamburg: Springer, 2018: 359-379.
- [51] PÖRTNER H O, ROBERTS D C, ADAMS H, et al. Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Netherlands: IPCC, 2022.
- [52] 尹云鹤, 吴绍洪, 陈刚. 1961—2006年我国气候变化趋势与突变的区域差异. *自然资源学报*, 2009, 24(12): 2147-2157. [YIN Y H, WU S H, CHEN G. Regional variation of climate change trend and abrupt change in China during 1961-2006. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(12): 2147-2157.]
- [53] 赵东升, 高璇, 吴绍洪, 等. 基于自然分区的1960—2018年中国气候变化特征. *地球科学进展*, 2020, 35(7): 750-760. [ZHAO D S, GAO X, WU S H, et al. Characteristics of climate change in China from 1960 to 2018 based on natural zoning. *Advances in Earth Sciences*, 2020, 35(7): 750-760.]
- [54] YOU Q, JIANG Z, KONG L, et al. A comparison of heat wave climatologies and trends in China based on multiple definitions. *Climate Dynamics*, 2017, 48(11): 3975-3989.
- [55] GAO W L, DUAN K Q, LI S S. Spatial-temporal variation of cold wave events in Northern China from 1960 to 2016. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(6): 971-983.
- [56] 吴绍洪, 赵东升. 中国气候变化影响、风险与适应研究新进展. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(6): 1-9. [WU S H, ZHAO D S. Research progress on climate change impacts, risks and adaptation in China. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(6): 1-9.]
- [57] 方梓行, 何春阳, 刘志锋, 等. 中国北方农牧交错带气候变化特点及未来趋势: 基于观测和模拟资料的综合分析. *自然资源学报*, 2020, 35(2): 358-370. [FANG Z X, HE C Y, LIU Z F, et al. Characteristics and future trends of climate change in the agro-pastoral ecotone in Northern China: A comprehensive analysis based on observational and simulated data. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(2): 358-370.]
- [58] 马伟东, 刘峰贵, 周强, 等. 1961—2017年青藏高原极端降水特征分析. *自然资源学报*, 2020, 35(12): 3039-3050. [MA W D, LIU F G, ZHOU Q, et al. Characteristics of extreme precipitation over the Tibetan Plateau from 1961 to 2017. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(12): 3039-3050.]
- [59] ZHANG C, REN Y, CAO L, et al. Characteristics of dry-wet climate change in China during the past 60 years and its trends projection. *Atmosphere*, 2022, 13(2): 275, Doi: 10.3390/atmos13020275.
- [60] ZHA J, WU J, ZHAO D. Effects of land use and cover change on the near-surface wind speed over China in the last 30 years. *Progress in Physical Geography*, 2017, 41(1): 46-67.
- [61] YING J, YONG L, ZONGCI Z. Characteristics of wind direction change in China during recent 50 years. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2008, 19(6): 666-672.
- [62] SUN J Q, AO J. Changes in precipitation and extreme precipitation in a warming environment in China. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(12): 1395-1401.
- [63] 任国玉, 任玉玉, 战云健, 等. 中国大陆降水时空变异规律II: 现代变化趋势. *水科学进展*, 2015, 26(4): 451-465. [REN G Y, REN Y Y, ZHAN Y J, et al. Temporal and spatial variation of precipitation in Mainland China II: Modern trend. *Advances in Water Science*, 2015, 26(4): 451-465.]
- [64] ZHOU Z, WANG L, LIN A, et al. Innovative trend analysis of solar radiation in China during 1962-2015. *Renewable Energy*, 2018, 119: 675-689.
- [65] 徐北瑶, 王体健, 李树, 等. “双碳”目标对我国未来空气污染治理和气候变化的影响评估. *科学通报*, 2022, 67(8): 784-794. [XU B Y, WANG T J, LI S, et al. Impact assessment of "double carbon" target on air pollution and climate change in China. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(8): 784-794.]
- [66] WANG Y, LI W, GAO W, et al. Trends in particulate matter and its chemical compositions in China from 2013-2017. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(12): 1857-1871.

- [67] 符传博, 丹利. 大气污染加剧对中国区域散射辐射比例的影响. 科学通报, 2018, 63(25): 2655-2665. [FU C B, DAN L. Influence of increasing air pollution on regional scattered radiation ratio in China. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(25): 2655-2665.]
- [68] GUAN Y, ZHENG F, ZHANG P, et al. Spatial and temporal changes of meteorological disasters in China during 1950-2013. Natural Hazards, 2015, 75(3): 2607-2623.
- [69] 王杰, 王洁, 代金圆, 等. 1977—2018年中国台风统计特征分析. 海洋湖沼通报, 2021, 43(6): 28-33. [WANG J, WANG J, DAI J Y, et al. Statistical characteristics of typhoons in China from 1977 to 2018. Bulletin of Oceanology and Limnology, 2021, 43(6): 28-33.]
- [70] 自然资源部. 2021年中国海平面公报, www.mnr.gov.cn/202205/t20220507_2735509.html, 2022-04-08. [Ministry of Natural Resources. China Sea Level Bulletin 2021, www.mnr.gov.cn/202205/t20220507_2735509.html, 2022-04-08.]
- [71] GARIANO S L, GUZZETTI F. Landslides in a changing climate. Earth Science Reviews, 2016, 162: 227-252.
- [72] 黄晚华, 杨晓光, 李茂松, 等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近58 a演变特征. 农业工程学报, 2010, 26(7): 50-59. [HUANG W H, YANG X G, LI M S, et al. Evolution characteristics of seasonal drought in Southern China in recent 58 years based on standardized precipitation index. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 50-59.]
- [73] 孔锋, 吕丽莉, 方建, 等. 基于中国气候变化区划的1951—2010年暴雨统计分析. 水土保持研究, 2017, 24(5): 189-196, 203. [KONG F, LYU L L, FANG J, et al. Statistical analysis of heavy rainfall from 1951 to 2010 based on climate change regionalization in China. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(5): 189-196, 203.]
- [74] FANG J, LIU W, YANG S, et al. Spatial-temporal changes of coastal and marine disasters risks and impacts in Mainland China. Ocean & Coastal Management, 2017, 139: 125-140.
- [75] 王旭东. 土建筑遗址保护理念探索与实践: 以交河故城保护为例. 敦煌研究, 2010, (6): 1-9, 125-127. [WANG X D. Exploration and practice of the conservation concept of soil architecture ruins: A case study of Jiaohe old city. Dunhuang Studies, 2010, (6): 1-9, 125-127.]
- [76] 澎湃新闻. 大火吞噬损毁了的那些古建筑! 国家文物局通报文物消防, <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1591832908485987549&wfr=spider&for=pc>, 2018-02-08. [The Paper. The fire devoured the destroyed ancient buildings! State Administration of Cultural Heritage on cultural relics fire, <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1591832908485987549&wfr=spider&for=pc>, 2018-02-08.]
- [77] 王毅婧, 黄阳阳, 黄小萃, 等. 真丝文物霉变菌株的分离、鉴定及防霉药剂筛选. 文物保护与考古科学, 2022, 34(1): 20-27. [WANG Y J, HUANG Y Y, HUANG X C, et al. Isolation, identification and screening of mildew resistant agents of silk cultural relics. Science of Cultural Heritage Conservation and Archaeology, 2022, 34(1): 20-27.]
- [78] 李华, 容波, 马生涛, 等. 秦俑博物馆陶器库房空气污染的理化特征及其对彩绘陶器的影响. 文博, 2009, (6): 36-41. [LI H, RONG B, MA S T, et al. Physical characteristics of air pollution in pottery warehouse of Terracotta Warriors Museum and its influence on painted pottery. Wenbo, 2009, (6): 36-41.]
- [79] 新京报. 暴雨侵袭山西1783处文物不同程度受损, <https://www.163.com/dy/article/GM6IITOA0512D3VJ.html>, 2021-10-13. [Beijing News. 1783 cultural relics in Shanxi were damaged to varying degrees by torrential rain, <https://www.163.com/dy/article/GM6IITOA0512D3VJ.html>, 2021-10-13.]
- [80] 赵海英, 李最雄, 韩文峰, 等. 西北干旱区土遗址的主要病害及成因. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(s2): 2875-2880. [ZHAO H Y, LI Z X, HAN W F, et al. Main diseases and causes of soil ruins in arid areas of Northwest China. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(s2): 2875-2880.]
- [81] 孟圆悦, 闫增峰, 王江丽, 等. 龙门石窟大卢舍那像龕太阳辐射特征研究. 干旱区资源与环境, 2022, 36(6): 129-138. [MENG Y Y, YAN Z F, WANG J L, et al. Solar radiation characteristics of Large Lushena Statue niche in Longmen Grottoes. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(6): 129-138.]
- [82] 刘仁植. 不可移动石质文物表面有害污染物化学清洗技术研究. 杭州: 浙江大学, 2012. [LIU R Z. Study on chemical cleaning technology of harmful pollutants on the surface of immovable stone cultural relics. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.]
- [83] 郑晓云. 气候变化中的水文化遗产保护: 以云南为例的一个水文化前沿问题探讨. 社会科学战线, 2013, (10): 149-

154. [ZHENG X Y. Conservation of water cultural heritage in climate change: A case study of Yunnan as a frontier problem of water culture. *Social Science Front*, 2013, (10): 149-154.]
- [84] 北青网. 浙江省文物考古研究所: 因“利奇马”致台州文物受损 815 万元, <https://static.cdsb.com/appstatic/articles/20190913/45ea24c504c921060f51aabacd43289d.html>, 2019-09-13. [YENT. Zhejiang Provincial Research Institute of Cultural Relics and Archaeology: Cultural relics in Taizhou were damaged by 8.15 million yuan due to "Leqima", <https://static.cdsb.com/appstatic/articles/20190913/45ea24c504c921060f51aabacd43289d.html>, 2019-09-13.]
- [85] 李最雄. 土遗址加固试验: 交河故城、半坡遗址及秦俑坑加固试验, http://www.sxlib.org.cn/dfzy/sczl/wwgjp/yj/201808/t20180806_928765.html, 2018-08-06. [LI Z X. Reinforcement experiment of soil ruins: Reinforcement experiment of Jiaohe old city, Banpo Site and Qin Terracotta Pit, http://www.sxlib.org.cn/dfzy/sczl/wwgjp/yj/201808/t20180806_928765.html, 2018-08-06.]
- [86] 杨绚, 李栋梁, 汤绪. 基于 CMIP5 多模式集合资料的中国气温和降水预估及概率分析. *中国沙漠*, 2014, 34(3): 795-804. [YANG X, LI D L, TANG X. Prediction and probability analysis of air temperature and precipitation in China based on CMIP5 multi-model ensemble data. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(3): 795-804.]
- [87] HUI P, TANG J, WANG S, et al. Climate change projections over China using regional climate models forced by two CMIP5 global models. Part II: Projections of future climate. *International Journal of Climatology*, 2018, 38: e78-e94, Doi: 10.1002/joc.5409.
- [88] REN G, DING Y, ZHAO Z, et al. Recent progress in studies of climate change in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2012, 29(5): 958-977.
- [89] 张通, 俞永强, 效存德, 等. IPCC AR6 解读: 全球和区域海平面变化的监测和预估. *气候变化研究进展*, 2022, 18(1): 12-18. [ZHANG T, YU Y Q, XIAO C D, et al. IPCC AR6 interpretation: Monitoring and projection of global and regional sea-level change. *Advances in Climate Change Research*, 2022, 18(1): 12-18.]
- [90] UNESCO World Heritage Committee. Information meeting on the updating of the "Policy Document on the Impacts of Climate Change on World Heritage properties", <https://whc.unesco.org/en/events/1602/>, 2021-06-18.
- [91] 王隽, 张艳国. 论地方政府在非物质文化遗产保护利用中的角色定位: 以江西省域为个案的分析. *江汉论坛*, 2013, (10): 115-121. [WANG J, ZHANG Y G. On the role positioning of local governments in the protection and utilization of intangible cultural heritage: A case study of Jiangxi province. *Jiangnan Forum*, 2013, (10): 115-121.]
- [92] CARMICHAEL B, WILSON G, NAMARNYILK I, et al. A methodology for the assessment of climate change adaptation options for cultural heritage sites. *Climate*, 2020, 8(8): 88, Doi: 10.3390/cli8080088.
- [93] 刘佳雪. 基于利益相关者理论的低碳旅游发展研究. *南京晓庄学院学报*, 2015, (3): 91-95. [LIU J X. Research on low-carbon tourism development based on stakeholder theory. *Journal of Nanjing Xiaozhuang University*, 2015, (3): 91-95.]
- [94] GRAŽULEVIČIŪTĖ I. Cultural heritage in the context of sustainable development. *Environmental Research, Engineering & Management*, 2006, 37(3): 74-79.

The impact of climate change on the protection of cultural heritage in China and its response

WANG Ling-en¹, LI Ke^{1,2}, CUI Jia-sheng¹, SUN Lin³, ZHANG Shu-ying¹

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

3. School of History Culture and Tourism, Guangxi Normal University, Guilin 541001, Guangxi, China)

Abstract: In recent years, the exacerbation of climate change poses a significant threat to cultural heritage protection in China. It is of both theoretical and practical significance to study the influencing mechanism and response mechanism of climate change influence on cultural heritage protection. This study analyzes the mechanism and process of mutual interaction of climate factors on cultural heritage, evaluates the influence and trend of future climate change on Chinese cultural heritage, and finally explores the interactive relationship among different stakeholders of Chinese cultural heritage protection. The results show the mechanism and process that the changes of various climate factors acting on cultural heritage are complex and diverse. The change of individual climate factors, the chain reaction triggered by the change of climate factor, and the interaction of different climate factors generally have a direct or indirect impact on cultural heritage. Moreover, solar radiation, temperature, humidity, air pollutants, precipitation and other climatic factors have affected Chinese cultural heritage to a certain extent, admittedly, but it is necessary to dialectically explore the impact of future climate change on Chinese cultural heritage. With the intensification of global warming and the appearance of extreme weather, the destruction of cultural heritage caused by the difference in temperature and freezing will be reduced, but the cultural heritage represented by ancient wooden buildings and grottoes will still face severe threats. Finally, the establishment of a network of stakeholders is beneficial to administrative departments, local governments, local communities, enterprises, tourists, researchers, and external pressure groups to play respective roles to jointly protect cultural heritage. Under the dual backgrounds of the intensification of climate change and the strategy of "cultural power", this paper is helpful to deepen the understanding of all circles on cultural heritage protection, and enrich the theoretical discussion about protection and utilization of cultural heritage.

Keywords: climate change; cultural heritage; influence mechanism; protection and utilization; China