

基于长城保护性修缮的遗址顶面植物处置技术体系基础研究

Technical System and Practical Cases of the Plant Disposal on the Top Surface of the Great Wall Heritage Site

潘剑彬
蓝婧雯
黄田田
王亚洁
汤羽扬

PAN Jianbin

LAN Jingwen

HUANG Tiantian

WANG Yajie

TANG Yuyang

摘要: 长城是国家重点保护文物及世界文化遗产。长城遗产的保护性修缮以修复长城既有建筑病害、根除结构安全隐患的过程“最低限度干预”但同时“原状保护”为目标。北京长城遗址顶面植物是导致长城建筑病害发生且持续恶化的因素之一, 但若大规模无差别清除则可能危害长城遗产本体, 因而针对如何科学处置长城遗址顶面植物尚存在学术争议。以北京大庄科长城保护性修缮工程实践为例, 前期已实地调研完成并阐明长城遗址顶面植物种类及空间分布特征, 在此基础上分析由其导致的长城建筑病害类型及其结构破坏机理; 依据前期已阐明长城遗址顶面植物量化评价体系及植物处置原则, 进一步阐述长城遗址顶面植物地上部分清除后残存根系的处置技术体系, 以及利用长城遗址顶面原堆积土及保留植物、分层回填因修缮剥离的原堆积土及其种子库再生植物形成“软盖层”保护体系。研究成果为修复长城建筑病害、修缮后在长城遗址顶面实施“软盖层”保护提供基础科学依据。

关键词: 风景园林; 长城遗产保护; 长城建筑病害; 长城保护性修缮; 植物景观

文章编号: 1000-6664(2024)06-0022-06

DOI: 10.19775/j.cla.2024.06.0022

中图分类号: TU 986

文献标志码: A

收稿日期: 2024-02-18

修回日期: 2024-03-19

基金项目: 北京市社会科学基金重大项目(21ZDA01)

Abstract: The Great Wall is one of the national key protected cultural relics in China and a world-renowned cultural heritage. The protective repair of the Great Wall heritage site aims to repair the existing deterioration of the Great Wall and eradicate the structural safety risks with the goal of "minimum intervention", and "preservation of the original state". The plants on the top surface of the Great Wall heritage site are one of the factors leading to the occurrence and continuous deterioration of the Great Wall. But if large-scale indiscriminate removal is carried out, it may harm the body of the Great Wall heritage site. Therefore, there is still an academic controversy on how to scientifically dispose the plants on the top surface of the Great Wall heritage site. Taking Beijing Dazhuangke Great Wall heritage site as an example, preliminary field research has been completed, and the species and spatial distribution characteristics of the plants on the top surface of the Great Wall heritage have been clarified. Based on this, this paper analyzes the types and the mechanism of the structural defects of the Great Wall. According to the quantitative evaluation system of the plants on the top surface of the Great Wall heritage and the principles of the plant disposal, this paper further describes the key technology for the disposal of the remaining roots after removing the ground part of the plants on the top surface of the Great Wall heritage site, and clarifies the basic idea of using the transported soil deposits on the top surface of the Great Wall heritage, back-filling the original transported soil deposits stripped by repair in layers and the regenerated plants in the soil seed bank to form the "soft capping" protection. The research results provide a scientific basis for the restoration of the diseases of the Great Wall, the protection of the "soft capping" on the top surface of the Great Wall heritage, and the construction of the cultural landscape of the Great Wall.

Keywords: landscape architecture; heritage conservation of the Great Wall; deterioration of the Great Wall; protection and restoration of the Great Wall Heritage; plant landscape

长城是中国现存体量最大、分布地域最广的国家重点文物保护单位(1961年)及世界文化遗产(1987年), 是中华民族的精神象征。长城分布于北京、天津、河北、山西等15个省市及自治区, 跨越中国西北、华北和东北地区, 总长度

约21 196.18 km^[1-2]。20世纪80年代, 基于对外展示的目的, 长城修复工作中曾坚持“恢复原状”的修缮标准, 长城遗址顶面(含长城墙体、敌楼及敌台等附属建筑顶面)的现状植物被悉数清除后长城被修复至历史原貌, 如北京八达岭长

城、天津蓟县黄崖关长城等。近年来, 随着国际古迹遗址保护组织(International Council on Monuments and Sites, ICOMOS)推动下先进文化遗产保护理念的广泛传播以及保护技术的进一步提升, 长城保护性修缮研究者及公众逐渐

意识到：“无计划的清除长城遗址顶面植物的过程亦是破坏长城本体、改变文物原状”“应该保护长城古遗址的原真性、完整性和沧桑古朴的历史风貌”以及长城遗址顶面植物对于遗址保护可能的积极作用^[3-8]。以长城为代表的砖石质建筑遗址顶面植物处置技术体系作为与长城本体修缮直接相关的议题开始被研究者深入探讨^[9-12]。

关于如何理解和处理建筑遗址与遗址区植物之间的关系以及建筑遗址修复后顶面的保护方式，国内外文化遗产保护领域的研究者、实践者进行了诸多有意义的探索，从中可以归纳出文化遗产保护相关理念、技术体系的渐进过程。19世纪30—40年代英国哈德良长城“克莱顿墙”的复建工程中，工人们清除墙体沿线区域的废弃堆积，将散落的原长城包石采用干垒方式归安；其次在主体墙修复后，用碎石找平墙体顶面后漫铺草皮防止降水冲刷及冻融侵蚀^[13-15]。其后的100多年中，“风格式修复”理念下“硬盖层”保护方式曾被广泛接受^[16-17]。20世纪30年代，英国学者提出“按发现原状保护”原则(conservé as found)，“克莱顿墙”的修复及保护方法再次被关注，人们对建筑遗址顶面保护相关议题进行了长时间探索和讨论^[15]。80年代，英国学者提出并开始探索建筑遗址顶面的“软盖层”保护方式，直至1993年使用“软盖层”应用实践的观测结果发表以及在圣玛丽岛军事堡垒、半岛修道院的应用实践成功，使这一保护技术被普遍关注，同时来自生态学、景观生态学的研究佐证促使此技术最终得以认可^[17-18]。

历史上自长城的军事防御功能丧失以来，因自然及人为因素，长城墙体绝大多数段落顶面沙土堆积、植物丛生。长城遗址顶面植物根系的劈裂作用已经对长城墙体顶面、垛墙及内外檐墙砖石刚性结构体系造成不可逆的、持续性的破坏性影响，这些影响是造成长城建筑病害(例如歪闪、空鼓、松散等)的最主要原因。自20世纪一直延续至今的长城遗址保护性修缮实践中，关于如何处置长城遗址顶面植物进行了诸如悉数清除遗址顶面植物后原状修复或施以“硬盖层”保护等多种模式探索。但是前者不符合国家对长城遗址形态的基本定位(“长城以古建筑和古遗址2种形态并存、以古遗址遗存形态为主”)，后者的实施结果曾被学者及民众广泛质疑和讨论^[17, 19-20]。但是，也有研究者认

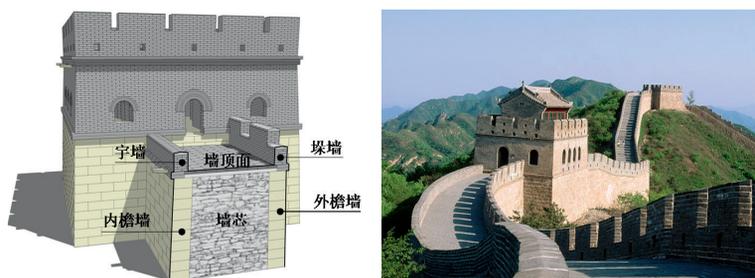


图1 北京大庄科长城区位图(作者根据谷歌卫星图片改绘)

图2 北京长城结构示意图

为，长城遗址顶面植物枝叶的阻滞作用可以降低降雨及其径流对遗址顶面的侵蚀强度，在一定程度上可以保护长城遗址顶面。

综上所述，基于欧洲国家及中国学者在历史建筑遗址顶面保护技术领域的长期探索可知，“软盖层”保护技术是长城建筑病害修缮过程中“最低限度干预”及修缮后“原状保护”的有效方式。但同时也提出诸多具有挑战性的话题，这也是本研究开展的重要契机。基于已经开展的基础性研究工作成果，试图讨论长城建筑遗址保护性修缮实践中的遗址顶面植物处置技术体系：长城遗址顶面植物种类分布及生长至此的一般过程及直接导致的长城建筑病害类型；已经导致(或存在隐患)长城建筑病害的遗址顶面植物根系如何清除(原则与方法)?北京长城所代表的砖石质长城遗址顶面“软盖层”保护技术需要哪些基础研究成果作为核心技术及科学依据支撑?

1 北京长城概览

1.1 北京长城及其建造方式

北京地区位于中国半湿润区、半干旱区的交错地带以及华北平原与蒙古高原的过渡地带，属大陆性季风气候区，春、秋、冬三季多风，冬季

寒冷、夏季炎热且“雨热同期”，全年总降水量约492.5 mm(2022年)。该地区本土植物种类多样，森林覆盖率达44.8%，主要地带性植被类型是暖温带落叶阔叶林。该地区处于中国历史上农耕民族和北方游牧民族生存的交错地带，是自古以来的战略要充及长城的集中分布区域。北京长城由东-西向和东北-西南向两大体系组成，整个走势呈比较连续完整的半环形，绵延总长度527.65 km^[1, 22-24](图1)。以北京大庄科长城为例，其建造步骤与方式大致为：沿建造山脊线清除浮土及碎石后用条石落脚并形成墙基；以碎砖石混筑墙芯同时包石形成内、外檐墙；墙体顶面找平并方砖覆盖后砖砌宇墙和垛墙(雉堞)，墙顶面宽度2~5 m^[10, 25](图2)。

北京地区的自然气候特征以及长城的建造方式为长城遗址顶面植物的生长创造了条件。

1.2 北京长城遗址顶面植物种类及分布特征

历史上北京明代长城墙顶面建造之初为方砖覆面。但因长城所在地域自然条件特征尤其是不再具备军事防御功能后疏于维护和修缮，长城敌楼、敌台等附属建(构)筑物因坍塌堆积，墙顶面砖因冻融循环等多种原因逐渐破碎进而增加了其粗糙程度。冬、春等多风季节，挟沙风搬运沙土在宇墙、垛墙内沉积，风力及动物(如鸟类)将长

城两侧自然分布的乡土植物种子携带至此,因而长城墙顶面植物得以萌发、生长(图3)。2022年笔者研究团队对北京大庄科长城遗址顶面现状植物进行详尽调研后,对现状植物种类予以记录和分析^[10]。

由于长城墙体特有的建造方式及结构特征,遗址顶面植物根系通常在2种构造材料的交接处集中分布,尤其是墙顶面与宇墙、垛墙之间较多自然堆积土的区域,因植物生长年限较长,乔木及大灌木根系生长导致的“劈裂”作用进一步加剧,对长城墙体各结构组分(宇墙垛墙、墙顶面及内外檐墙)产生一系列影响,进而形成典型长城建筑病害^[10]。

1.3 长城遗址顶面植物生长导致的长城建筑病害

长城遗址顶面植物在其相对狭小的空间范围以及贫瘠的土壤环境下生长,主要依靠根系对水分以及各类营养元素的吸收。而要达到上述目的,主要依靠根系生长范围扩大及径级的逐渐增加,根系的“劈裂”作用逐渐破坏原本刚性的砖石质长城建筑结构体系,是一系列长城建筑病害重要诱发因素。长城遗址顶面植物生长引发的长城建筑病害类型主要有松散、歪闪及空鼓^[26](图4)。

1)松散:长城墙顶面方砖、附属构筑物以及墙芯的刚性连接体系因长城遗址顶面植物根系生长及水平蔓延遭到破坏而破碎、坍塌(长城墙顶面降水及其径流的冲蚀、冻融也会诱发该病害)。

2)歪闪:长城宇墙、垛墙或墙基条石砌体等部位受到因植物根系生长形成的侧向压力而导致的墙体变形、位移及倾斜现象。早期主要表现为宇墙、垛墙体劈裂,后期随着自然降水及植物根系沿缝隙深入墙芯,墙体位移及变形进一步加剧。

3)空鼓:长城内檐墙或外檐墙因遗址顶面植物根系深入墙体顶面下方的墙芯生长向外突出并偏离原长城墙体外缘线(长城墙顶面的降水渗漏也会诱发该病害)。

3种长城病害类型中,遗址顶面植物生长位置及根系分布存在较大差异。造成“松散”型长城病害的遗址顶面植物主要在长城中线附近分布,植物根系主要在遗址顶面水平分布后深入墙芯,在生长过程中破坏墙芯刚性连接体系并致使墙顶面砖逐渐破碎(图5-1);造成“歪闪”型长城病害的遗址顶面植物主要生长于宇墙、垛墙与墙顶面形成的三角形沙土沉积区域,植物根系主要沿宇墙、垛墙墙角水平分布并在砖隙或空腔

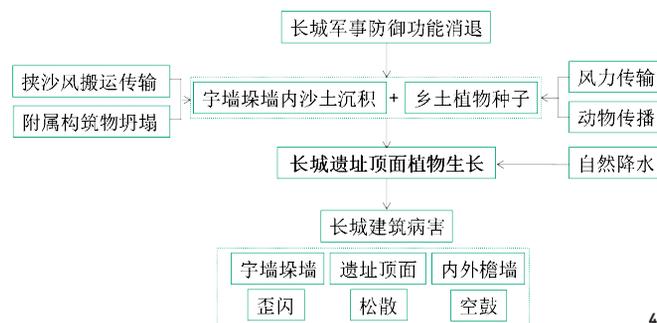
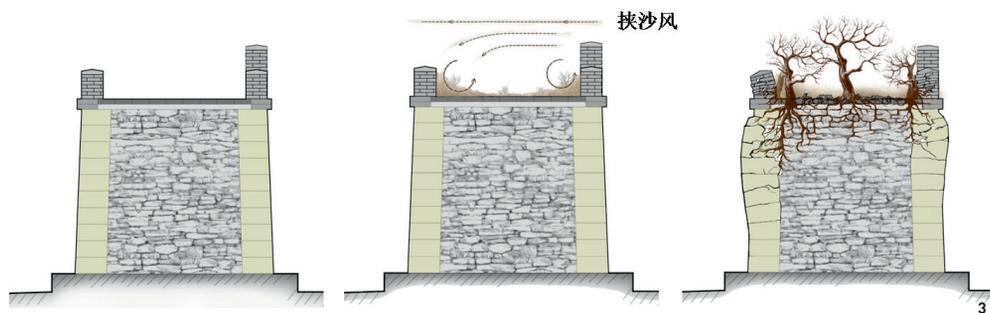
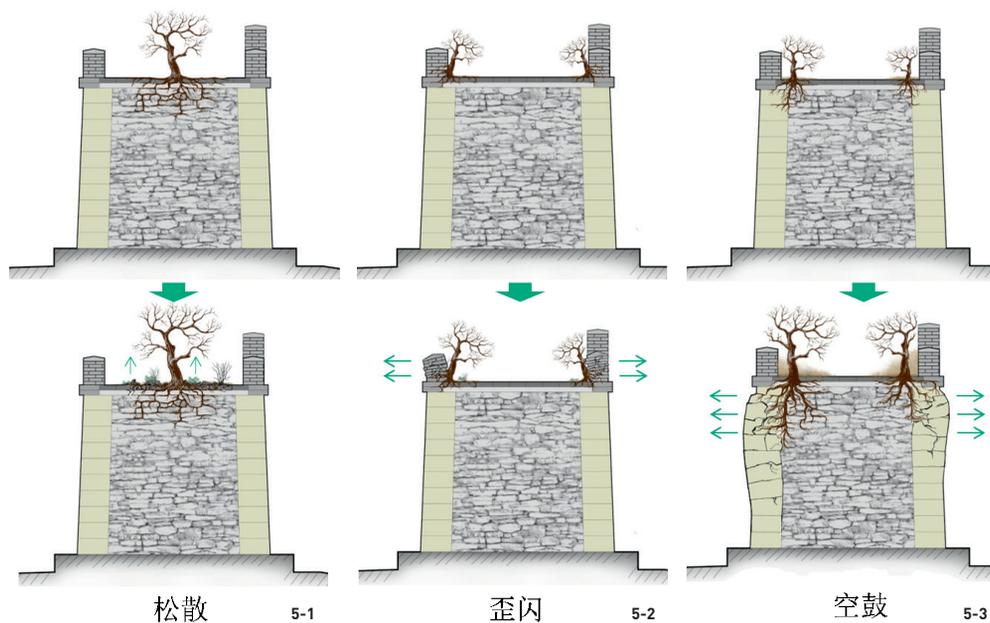


图3 长城建筑病害形成过程

图4 长城遗址顶面植物生长过程

图5 长城遗址顶面植物引发的长城病害



处等特定位置深入宇墙、垛墙与墙顶面的交接区域,根系的“劈裂”“挤压”作用致使宇墙、垛墙整体偏离原始位置(图5-2);造成“空鼓”型长城病害类型的遗址顶面植物生长区域位于内外檐墙与墙芯之间,植物根系在贯穿遗址顶面后集中垂直分布于内外檐墙与墙芯之间,根系在生长过程中将内外檐墙“推挤”偏离原位置致使其结构体系被破坏进而坍塌(图5-3)。

2 长城保护性修缮中遗址顶面植物处置

2.1 长城遗址顶面植物量化评价

针对长城建筑病害由专业技术人员采用探地雷达、声波仪或红外线热成像仪等无损形态学检查方法(pathological examination)开展全面调查,确定病害类型的基础上对该病害的产生原因、发病机理及发展过程进行分析^[9]。2023年笔者研究团队使用层次分析方法(analytic

hierarchy process, AHP)结合德尔菲专家法在“生长特征”“破坏性影响”及“应用价值”3个约束层指标(C)以及“对近边墙破坏影响”等13个标准层指标(P)上开展定量评价(该指标体系可持续调整优化)^[27-31](图6)。针对长城遗址顶面植物以种/类为单位计算其评价价值,得出评价结果后明确“保留”“清除地上部分”及“修缮同期清除”植物名单。清除已经导致长城建筑病害的遗址顶面植物的同时修复长城病害,保留尚未导致长城建筑病害的遗址顶面植物成为后续长城文化景观的组成部分。以北京大庄科长城遗址顶面植物处置为例,对其遗址顶面45种/类植物采用上述层次分析法量化评价后,建议“保留”遗址顶面植物品种类别为18种/类(Grade I);“清除地上部分”遗址顶面植物品种类别为20种/类(Grade II);建议“修缮同期清除”植物品种类别为7种/类(Grade III)^[12](图6)。

2.2 长城遗址顶面“修缮同期清除”以及“清除地上部分”植物残存根系处置

在基于长城遗址顶面植物量化评价结果明确的处置技术体系中,“修缮同期清除”以及“清除地上部分”的乔木、灌木植物残存根系处置是整个技术体系的核心。这一技术步骤若执行不当则可能对长城遗址本体造成不可逆的、人为的二次破坏,将直接有悖于“原状保护”以及“最低限度干预”等文物保护修缮原则(图7)。针对该环节,试提出以下技术实施建议供深入研究和讨论。

1)长城病害区域的遗址顶面植物应在修缮长城建筑病害的同时主动清除地上部分及以手工剥离方式全部清理长城本体内部的残存根系,若清理后原根系区域存在裂缝或空腔,则1 cm以下径级区域注浆加固,1 cm以上径级区域用灰土回填并压实;上述技术体系完成后采用无损检查方法对灰土填充后的裂隙或空腔进行检测(注浆、灰土材料成分及填充技术流程现场试验研究确定)。

2)非长城病害区域,但对长城结构安全存在威胁的遗址顶面植物,应主动清除其地上部分但不主动清理其残存根系,于夏、秋两季的季节性维护期间清理残存根系已腐烂部分以及可能的根系萌蘖,直至该株植物彻底死亡(长城墙体因原根系生产形成的空腔区域注浆及灰土填充方法同上)。

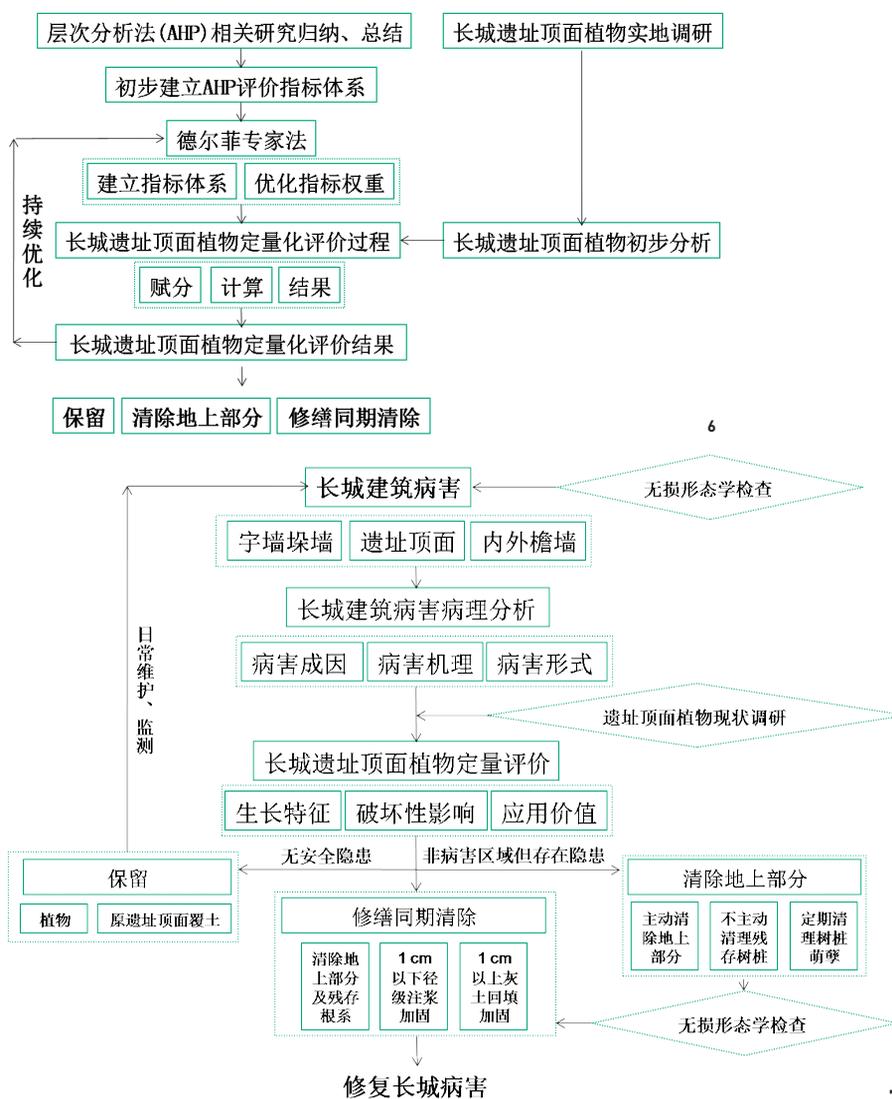


图6 长城遗址顶面植物量化评价关键技术流程

图7 长城遗址顶面清除植物处置关键技术流程

3)非长城病害区域已死亡遗址顶面植物残存根系随其腐烂过程逐步清理,于春秋两季的季节性维护期间清理根系腐烂部分,以灰土填充空腔并压实(技术要求同上)。

3 长城遗址顶面“软盖层”保护体系的构建可能性

长城遗址顶面原堆积土,作为保留植物的自然基质及生长空间被同时保留。原堆积土与“保留”植物原本就是在长城遗址顶面稳定存在的生态系统,长城修缮后,该系统将发挥其对长城遗址顶面的保护作用。已有研究认为,因砖石质遗址顶面草本植物根系对0~30 cm浅层土壤的固结作用而形成的覆盖层,可以弱化自然降水冲刷

侵蚀强度、缓冲遗址顶面区域的温湿度变化以及通过蒸腾作用降低土体渗透系数,进而在遗址顶面保护过程中发挥正面效应^[11, 18, 32-33]。长城遗址顶面原堆积土及保留植物是“软盖层”的组成部分,是长城文化景观的构成主体之一。

修缮后的长城遗址顶面处于强风、强日照及强蒸发的开放环境中,建筑材料劣变等原因引发的建筑病害产生的风险仍较高,此时的盖层类型选择及盖层构建方式就显得尤为重要。结合已开展的试验研究以及长城遗址顶面的具体环境特征,将选用“软盖层”的保护方式^[20]。研究团队通过对长城遗址顶面堆积土种子库植物多样性和再生性特征进行研究后,通过对比试验和一系列观测后提供给技术人员的具体工程做法是:在长

城建筑病害修缮前,在清除植物的生长区域,分别对自然堆积土进行表层、深层二层剥离;修缮后,在原剥离区域设置遗址顶面保护层、阻根层和牺牲层后进行深层、表层原堆积土分层回填,回填后利用表层原堆积土内的种子库植物形成的再生植物形成“软盖层”主要组成部分(该工程做法的基础研究部分成果将于后期发布)。长城遗址顶面原堆积土及再生植物是“软盖层”的组成部分,也是长城文化景观的构成主体之一。

必须说明的是,虽然长城文化景观由长城本体、遗址顶面“软盖层”(原生及再生)植物共同构建形成,但其形成和持续的过程均以长城遗址本体的“原真性”和“完整性”保护为核心点,这符合国际上对于文化遗址保护的基本要求^[11, 34-35]。也就是说,长城文化景观由病害得以修缮的长城遗址本体与当前状态下对长城本体结构安全不构成威胁的长城遗址顶面植物构成。但植物的生长变化是一个动态变化的过程,因而这一平衡状态可能是相对的。所以,在长城遗址“软盖层”的日常维护过程中要定期接受专业技术人员针对长城本体结构安全的检验及监测,一旦发现安全隐患,即可视为上述平衡状态被打破,则重复上述长城病害修复、植物清除及残存根系处置等关键技术流程(图8)。

4 长城遗址顶面“软盖层”保护体系实施建议

国家级文物及世界文化遗产双重角色的长城保护,是其遗址顶面植物处置技术体系构建的出发点和落脚点。无论是清除抑或保留长城遗址顶面植物,以及构建“软盖层”保护体系,都是为了实现长城文化遗产的有效保护。

1)北京长城所处自然地域的气候特征、历史上的建造方式及结构以及遗址顶面微环境具有一定的特殊性,这是北京长城遗址顶面植物存在的基本前提,也使得该类植物的处置技术不具备通用性特征,因而北京长城病害与遗址顶面植物的关系阐释及处置由专业技术人员现场进行。

2)在确定清除抑或保留北京长城遗址顶面植物之前应进行详尽的现场调研,明确遗址顶面植物的种类及空间分布特征,由该领域专家对长城建筑病害充分研究的基础上使用定量评价方法确定清除、保留植物品种及类别。

3)清除长城遗址顶面植物的前提是已确定遗址顶面植物是导致长城建筑病害的直接原因,清

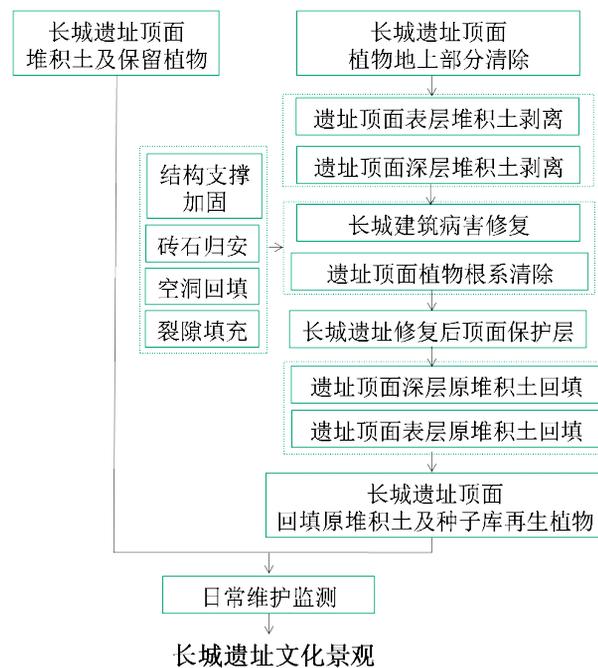


图8 长城遗址顶面“软盖层”保护体系构建流程

除植物的同时彻底修复长城建筑病害。清除植物残存根系处置技术尚需更多的实践检验以及进一步深化研究。

4)利用长城遗址顶面堆积土及保留植物、回填原堆积土及种子库再生植物形成“软盖层”保护技术尚处于理论上可行但尚需试验、实践验证阶段,该过程中涉及的关键技术环节尚需科学依据支撑;此“软盖层”的保护作用机制尚需进一步深入研究。

5)长城文化景观的构建是以长城遗址本体为主体和载体、以保留和再生的长城遗址顶面植物为重要组分,还包括长城所在“大遗址环境”区域的自然植被及其生态系统。

注:文中图片除注明外,均由作者绘制或拍摄。

参考文献:

- [1] 陈同滨,王琳峰,任洁.长城的文化遗产价值研究[J].中国文化遗产,2018(3):4-14.
- [2] Zhang Y K, Li S Y, Tan L F, et al. Distribution and Integration of Military Settlements' Cultural Heritage in the Large Pass City of the Great Wall in the Ming Dynasty: A Case Study of Juyong Pass Defense Area[J]. Sustainability, 2021, 13(13): 7166.
- [3] ICOMOS. The Charter of Fortification Protection[Z]. ICOMOS: Warsaw, Poland, 2021.
- [4] ICOMOS. The Future of Our Pasts: Engaging Cultural Heritage in Climate Action[Z]. ICOMOS Climate Change and Cultural Heritage Working Group. ICOMOS: Paris, 2019.
- [5] ICOMOS. The guidelines on fortifications and military heritage: the final draft[Z]. ICOMOS: Siena, 2017.
- [6] ICOMOS. The Burra Charter: The Australia ICOMOS Charter for Places of Cultural Significance 2013[Z]. Australia ICOMOS Incorporated: Melbourne, Australia, 2013.
- [7] ICOMOS. Qu'ebec Declaration on the Preservation of the Spirit of Place: Adopted at Qu'ebec, Canada, October 4th 2008[J]. International Journal of Cultural Property, 2008, 15(4): 393-396.
- [8] ICOMOS. The Nara Document on Authenticity[Z]. ICOMOS: Japan, 1994: 1-6.
- [9] Xu H, Chen F L, Zhou W. A comparative case study of MTInSAR approaches for deformation monitoring of the cultural landscape of the Shanhaiguan section of the Great Wall[J]. Heritage Science, 2021, 9: 71-107.
- [10] 程美景,许诺,蓝婧雯,等.北京长城大庄科段墙顶面植物本底调查研究[J].北京建筑大学学报,2022,38(5):40-46.
- [11] Aleksandra L, Pawel I, Agnieszka W, et al. The importance of seeking a win-win solution in shaping the vegetation of military heritage landscapes: the role of legibility, naturalness and user preference[J]. Landscape and Urban Planning, 2022, 221: 1-12.
- [12] Pan J B, Xu N, Tang Y Y, et al. Quantitative Evaluation of Plants on Top Surface of the Great Wall in Dazhuangke Using the Analytical Hierarchy Process[J]. Heritage Science, 2023,

- 11: 191-202.
- [13] Horsley J. *Britannia Romana*[M]. London: Osborn and Longman, 1732: 68-73.
- [14] Breeze D J. *Handbook to the Roman Wall*[M]. Newcastle upon Tyne: The Society of Antiquaries of Newcastle upon Tyne, 2006: 152.
- [15] Birley E. *Research on Hadrian's Wall*[M]. Kendal: Titus Wilson & Son, 1961: 2-4.
- [16] Lowenthal D. *The Past is a Foreign Country*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 11-15.
- [17] Ashurst J. *Conservation of Ruins*[M]. London; Burlington, MA: Butterworth Heinemann, 2007: 93-98.
- [18] Wimble A, Thompson J. Natural Wall Capping[J]. *English Heritage Science and Technology Review*, 1993(2): 11-12.
- [19] Nicholas S P, Kirby T, Alessandra M V. *Historical and Philosophical Issues in the Conservation of Cultural Heritage*[M]. Los Angeles: Getty Trust Publications, 1996: 308-314.
- [20] 钟燕, 陆地, 陈彦. 借自然之手的保护: 用于砖石遗址墙体保护的软盖层[J]. *建筑学报*, 2016(3): 35-39.
- [21] 陆地, 钟燕. 解读切萨雷·布兰迪《修复理论》内外的若干关键词[J]. *建筑师*, 2019(4): 76-85. (编辑/王媛媛)
- [22] Jiang L P, Wang S S, Sun Z, et al. Spatial Delineation for Great Wall Zone at Sub-Watershed Scale: A Coupled Ecological and Heritage Perspective[J]. *Sustainability*, 2022, 14(21): 13836.
- [23] Zhao S, Yang D C, Gao C. Identifying Landscape Character for Large Linear Heritage: A Case Study of the Ming Great Wall in Ji-Town, China[J]. *Sustainability*, 2023, 15(3): 2615.
- [24] Shen Y, Su Q S, Jia T L, et al. Characteristics of the site selection and the layout of the Great Wall of the Ming dynasty from a military perspective: Xiaohokou section as an example[J]. *Frontiers of Architectural Research*, 2020, 9(3): 541-555.
- [25] 薛程. 中国长城墙体建造技术研究[D]. 兰州: 西北大学, 2019.
- [26] Du H K, Yu J X, Wang Y D, et al. Visualized Failure Prediction for the Masonry Great Wall[J]. *Buildings*, 2022, 12(12): 2224.
- [27] Nie H Y. Fuzzy Evaluation Model of the Teaching Quality in Colleges and Universities Based on Analytic Hierarchy Process[J]. *Basic Clin. Pharmacol. Toxicol.*, 2020, 127: 189.
- [28] Zhang Y, Wang W, Mu L F, et al. Application of Analytic Hierarchy process (AHP) in the Layout of Jack-Up Drilling Platform[J]. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 2020(56): 236-242.
- [29] Vahedi N, Ghassemieh M. Preference of Hybrid Steel Frame with Exclusive Seismic Performance Using the Analytic Hierarchy Process[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2022, 26(10): 5425-5446.
- [30] Samokhvalov Y Y. Developing the Analytic Hierarchy Process Under Collective Decision-Making Based on Aggregated Matrices of Pair wise Comparisons[J]. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2022, 58(5): 758-763.
- [31] Ding Y. Ecological garden plant configuration method based on attribute analytic hierarchy process model[J]. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 2021, 24(3-4): 168-183.
- [32] Carter N E A, Heather V. Experimental investigations into the interactions between moisture, rock surface temperatures and an epilithic lichen cover in the bio-protection of limestone[J]. *Building and Environment*, 2003, 38: 1225-1234.
- [33] Tom M, Anderson, Harriet L, et al. *Soft Capping in Scotland: The Context and Potential of Using Plants to Protect Masonry*[M]. Edinburgh: Historic Scotland, 2011: 77.
- [34] Hands D E, Brown R D. Enhancing visual preference of ecological rehabilitation sites[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 58: 57-70.
- [35] Ebejer J, Staniewska A, Środulska-Wielgus J, et al. Values as a base for the viable adaptive reuse of fortified heritage in urban contexts[J]. *Muzeol Kultúrne Dedičstvo*, 2023, 11: 41-72.

作者简介:

潘剑彬

1981年生/男/内蒙古赤峰人/北京建筑大学建筑与城市规划学院副教授, 硕士生导师/美国北卡罗纳大学夏洛特分校访问学者/研究方向为风景园林规划与设计、建筑遗产保护与风景园林交叉、植物景观与生态设计(北京 100044)

蓝婧雯

1996年生/女/江西赣州人/北京建筑大学建筑与城市规划学院风景园林学在读硕士研究生/研究方向为建筑遗产保护与风景园林交叉(北京 100044)

黄田田

1999年生/女/福建福州人/北京建筑大学建筑与城市规划学院风景园林学在读硕士研究生/研究方向为建筑遗产保护与风景园林交叉(北京 100044)

王亚洁

1999年生/女/河北邢台人/北京建筑大学建筑与城市规划学院风景园林学在读硕士研究生/研究方向为建筑遗产保护与风景园林交叉(北京 100044)

汤羽扬

1954年生/女/湖南长沙人/北京建筑大学建筑与城市规划学院教授, 博士生导师/北京建筑大学建筑遗产研究院常务副院长/北京长城文化研究院常务副院长/研究方向为建筑遗产保护(北京 100044)