文章编号:1005-1538(2023)05-0150-15
DOI:10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.20220702605

# 植物对岩土文物的作用及保护技术研究进展

杨小菊[1,2,3],武发思[3],贾荣亮[1],郭青林[3],王彦武[3],赵思腾[1,2],赵学勇[1,2]
[1. 中国科学院西北生态环境资源研究院奈曼沙漠化研究站/乌拉特荒漠草原研究站,甘肃兰州 730000;
2. 中国科学院大学,北京 100049;3. 国家古代壁画与土遗址保护工程技术研究中心(敦煌研究院),甘肃酒泉 736200]

**摘要:** 由于人工-自然复合生态系统的不稳定性及保存环境的复杂性,岩土文物长期遭受着生物与非生物因素的威胁,其中,植物对遗址的作用及其保护应用技术一直备受关注。对相关研究成果总结表明,基于植物的新型遗址防护技术以其绿色、可持续和环境兼容等优势在石质古城墙、夯土类遗址等的保护中逐渐成为替代工程类抢救性保护措施,但存在植物对岩土文物作用机理认知不足、研究技术受限、防控新技术应用滞后及其效果不佳、保护遗址植物选种及后期维护较难等问题,致使植物与岩土文物间的辩证关系至今界定不清,极大限制了保护技术的研发。结合我国石窟寺、土遗址保护面临的生物学问题,针对植物保护遗址技术实施的限制因素,作出以下展望:1)厘清植物对岩土文物的损害及保护作用机理;2)构建不同环境下界定植物对岩土文物正负效应的科学评估体系;3)明确植物种内和种间的相互作用以及驱动植物在岩土文物表面建植的关键因子;4)结合全球气候变化,研发岩土文物有害植物的精准防控技术;5)筛选适宜的软覆盖植物种并对其防护效果进行评估;6)研发基于BSC的软覆盖技术,开展环境适应性和保护效果评估。

**关键词:** 岩土文物;生物退化;植物软覆盖技术;生物土壤结皮;文物保护
**中图分类号:** K876 **文献标识码:** A

## 0 引 言

按文物组成材质划分,岩土文物主要包括石窟寺、摩崖石刻、古墓葬以及土遗址等[1],其分布广泛,数量多达76万处[2],成为历史、区域生态甚至全球变化的重要实证[3]。多数岩土文物为不稳定的人工-自然复合生态系统,在长期温度波动、风沙磨蚀、雨水冲刷、生物侵蚀等自然环境因素和人类活动作用下,岩土文物表面风化、坍塌、剥蚀、裂隙、生物损害等病害日趋严重[4-7]。

岩土文物作为植物、动物和微生物生存的物质基础,使其完整保存面临的生物学问题尤为突出。生物对岩土文物的危害在20世纪初就被关注,尤其在Hueck[8]提出了生物退化(bioterioration)概念后,生物对文物影响的研究一直是科学界关注的热点。作为生物退化的重要组成部分,植物对岩土文物的影响多数判定为负面作用,如维管束植物地上部分增加遗址的重力侵蚀负荷引起坍塌,根系促使岩土产生裂缝、分泌出有机酸改变岩土化学成分、盐分富集加速岩土风化侵蚀等[9]。但也有观点提出其能通过根系固定、地上部分缓冲不利环境因子等方式保护文物,如乔木和灌木粗根锚固、草本植物根系串联等方式增强岩土力学特征[10]。由于植物对文物保存有正负两方面作用,但研究方法受限及保护理念的不断更新等问题,致使植物与岩土文物间的辩证关系至今界定不清[11],并未形成统一的评判标准。

关于岩土文物病害,已实施了大量抢救性保护措施,如针对遗址失稳采取锚固、支顶、揽拉等措施[12];针对表面风化,采取材料加固等措施[13],但保护材料一直主要以无机类和有机类为主,因存在兼容性差、易失效等问题,又不可避免地给文物保护带来了新的挑战[14]。传统的物理、化学及工程加固

收稿日期:2022-07-19;修回日期:2023-02-11
基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFC1522200)资助,国家自然科学基金项目(32060277;51962001)资助,甘肃省科技计划项目(21JR11RA218)资助,酒泉市科技支撑计划项目(2022CA1013)资助
作者简介:杨小菊(1987—),女,中国科学院西北生态环境资源研究院生态学专业在读博士研究生,敦煌研究院副研究员,研究方向为文化遗产地生态环境与文物保护,E-mail:yangxiaoju@dha.ac.cn
通信作者:赵学勇(1964—),男,博士,博导,研究员,E-mail:zhaoxy@lzb.ac.cn

虽在一定程度上延长了岩土文物寿命,但同时也存在局限性,亟需挖掘绿色新材料及寻找新型防控策略[15]。生物技术作为一种新方法,近年在文物保护修复中广泛应用,并开始转向保护实践,如生物矿化、生物清洗技术[16-17]。基于植物的遗址新型生物防护技术以其绿色、环保及易于实施等优势也开始用于石质古城墙、夯土类遗址等的保护[10,18],但在我国尚处于探索阶段。能否借鉴植物护坡、风沙防治领域成功经验[19-20],基于文物保护的基本原则,对我国不同气候带岩土文物本体进行保护。为此,本工作从植物对岩土文物的损害与保护作用、植物影响岩土文物研究方法、植物损害防控技术及植物保护应用技术等方面进行了回顾和总结,并展望了岩土文物科技保护,以期为保护新材料挖掘和新技术研发提供参考。

## 1　植物对岩土文物作用机理

现阶段关于植物对岩土文物作用研究多集中在维管束植物(vascular plant)和苔藓植物(bryophyte)(图 1),维管束植物是指具有维管组织的植物,苔藓植物不具有维管组织,仅有茎和叶,根非常简单,称为“假根”[21]。

不同植物定植与岩土文物组成材质密切相关,因此,以下分别对维管束植物和苔藓植物对石窟寺、摩崖石刻、古墓葬以及土长城等遗址的作用研究现状进行了对比分析。

**图 1**　植物对岩土文物作用模式图

**Fig. 1**　Model diagram of the action of plants on rock - soil relics

### 1.1　生物的侵蚀

以石质建筑为例,暴露在外界环境中逐渐风化的石质材料孔隙度增加,质地疏松,出现崩解、裂缝等,这种表面粗糙多孔的石质材料更容易受到微生物定殖,形成生物膜等增加了有机质沉积量,随着空气中降尘积累,藻类、地衣、苔藓和维管植物依次定殖和演替[9],造成建筑文物退化、裂隙和崩解等(图 2)。

### 1.2　维管束植物

短期内,维管束植物对岩土文物的作用比苔藓植物更显著,维管束植物对不同基质的文物可能同时存在保护作用和破坏作用(图 3、表 1),这给制定文物本体及周边植物的保留或去除策略造成了极大的困难。

**1.2.1**　损害作用　维管束植物在岩土文物退化中发挥重要作用,引起腐蚀、裂隙、表面风化和坍塌等病害[22-23],木本植物根系以造成机械破坏为主,根系分泌物中 $H^+$、$HCO_3^-$ 及有机酸等,促进了岩土中化学成分以离子状态释放而维持植物生长,加速腐蚀风化进程[24]。研究指出植物对文物造成的生化损伤与根尖酸度成正比,通常 pH 值在 4 ~ 6 之间[22]。此外,植物还存在干燥夏季的火灾风险、遮挡视野和游客进入、以及阻碍挖掘和修复工程等问题[25-26]。

考古遗址中多数维管束植物都会严重破坏建筑结构,其中臭椿是极具入侵性的常见物种[23],因其环境适应性强,幼苗在一年内可达 2 m 高,之后迅速达到 20 ~ 30 m,难以人工清除或利用化学除草剂彻底杀灭[27]。Trotta 等[23]对臭椿引起的罗马奥勒良城墙分离、开裂和变形参数进行了量化,发现臭椿根

系产生的机械破坏和分泌酸性化学物质腐蚀导致墙体受损，其根系直径与墙壁损坏强度明显相关，距离墙体 4 m 处也可导致裂隙；Caneva 等[28]等指出，红松根系分布辐射直径达 30 m、深约 15 m，导致古建筑墙体产生裂隙、坍塌和形成渗水路径，诱发新的危害；Caneva 等[29]在罗马托洛尼亚别墅（Villa Torlonia）犹太墓保存调查中发现，地面花园里入侵性较强的无花果、冬青栎和松树根系横向、纵向生长深度达到 10 m，引起墓穴岩石基质分离；日本高松冢坟丘上方附生植被根系引起的雨水入渗可能是造成墓室内蜈蚣和蚂蚁等节肢动物及壁画霉菌暴发的成因之一，在铲除竹林和榉树林后，石室温度下降，维持了一个较稳定的环境[30]；André 等[31]、Liu 等[32]在柬埔寨吴哥古建筑植物调查中发现，高棉寺庙在 16 世纪被废弃后，生物群落拓殖形成茂密森林，树木根系穿透建筑物引起裂隙、坍塌（图 3a）；四川乐山大佛及周边分布有大量蕨类、裸子和被子植物[33]，维管束植物土壤有机碳、氮、磷的储量高于其他植被土壤，这将加速表面风化和植被发育[34]，而每年 1 ~2 次的除草并不能永久去除有害植物，生物风化问题日趋严重；即使是处于极端干旱区的世界文化遗产地敦煌莫高窟，下层部分洞窟历史上曾被风沙掩埋，窟外植物根系沿流沙生长进入壁画，严重降低了壁画的价值（图 3b）。

对土遗址造成损害的维管束植物主要集中在根系发达的乔木和灌木。青海明长城墙体上生长的灌木，不仅造成根劈损坏，同时为昆虫、鸟类提供了适宜的生存环境，引入了动物损害[35]；西安地区土遗址由于植物生长造成了裂隙、坍塌及剥蚀等病害，根系发达的深根系树种（乔木、灌木）对裂缝发展的贡献较大[36]；在阿房宫前殿、汉长安城和杜陵遗址，乔木的根系造成夯土台边缘裂隙（缝），在重力及雨水作用下坍塌[37]；甘肃高台明长城八坝段因处于林地中间，灌水促使以银白杨为主的高大乔木根系发达，导致夯土墙根系周围的盐风化非常严重（图 3c）。

**1.2.2** 保护作用 植被覆盖对文物的保护作用长期以来并未被充分关注[10,38]。植物地上部分能减弱风沙、降水和光照等对遗址的侵蚀，根系可起到锚固和加筋土壤作用[39]。Fabbri 等[40]发现植被可降低考古遗址遭受热冲击的风险，并调节最佳相对湿度保护遗产。常春藤可减小遗迹表面微气候在昼夜、季节和年尺度上的变化幅度[5]，降低冻融发生的频率、持续时间和严重程度，还可显著降低到达墙体的颗粒物污染[18]。石窟寺的植被还可有效调节气候，降低泥石流发生频率[41]。甘肃麦积山石窟顶部有大量维管束植物，其在减弱降水对石窟本体冲刷方面可能起到正面作用（图 3d）。Li 等[42]通过模拟分析植物阴影对南京城墙的影响发现，常绿树木可有效降低因冻融循环、风化和蒸发导致墙体劣化的风险；André 等[41]指出，吴哥寺庙周围森林被砍伐后，森林覆盖的缓冲功能丧失，石材风化损失率增加了约 10 倍，砂岩温度和湿度日变化范围增加了 3 倍，植物“伞形保护效应”的生态系统服务功能降低。

**图 2** 生态演替与古建筑遗址生物退化关系简图[9]

**Fig. 2** A brief demonstration of the relationship between ecological succession and biodeterioration of monuments

在汉阳陵露天土遗址保护中,高度小于 40 cm、根径小于 0.5 mm 的低矮禾本科植物可有效防止遗址风化和抵抗降水侵蚀[43],如封土上的沙蒿凭借自身发达的根系,通过串联作用对表层土壤有明显加固效果,并显著降低近地面风速,坡面上的枸杞和酸枣对 0 ~ 60 cm 深的土体有一定的锚固作用[44];潮湿环境中,大量土遗址在降水冲蚀下濒临消亡,但表面有植被分布的如湖北纪南城、内蒙古东部元上都和西安汉长安城等土遗址保存相对完好[45],主要因植物根系的加筋作用减弱了雨水冲刷。本课题组调查发现,甘肃渭源战国秦长城顶部分布有二裂委陵菜、醉马草和芨芨草等大量草本植物,其明显减缓了雨水对夯土层的冲刷(图 3e)。在瓜州锁阳城遗址[46],本体周边植被在降低风速、减弱遗址的风沙侵蚀方面起到了积极作用(图 3f)。因此,深根系植物粗根系的锚固作用以及浅根系植物细根系的网络串联作用对土遗址保存具有正向防护效果。

(a) 吴哥遗址上植物穿透古建筑 (图片来源: 湖南师范大学丁兴华)

(b) 莫高窟第71窟壁画表面残留根系

(c) 高台明长城根劈破坏

(d) 麦积山石窟崖顶植物防雨水冲刷

(e) 渭源战国秦长城顶部草本植物覆盖保护

(f) 锁阳城遗址表面植物防风固沙

**图 3**　维管束植物对岩土文物的损害及防护作用

**Fig. 3**　Destruction and protection effects of vascular plants on rock – soil relics

**表1** 优势植物对岩土文物的作用类型

**Table 1** Types of actions of dominant plants on rock－soil relics

| 遗址地 | 优势植物 | 气候环境 | 作用类型（正负效应） | 分布位置 | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|---|
| 罗马奥勒良城墙（Aurelian Walls） | 臭椿（*Ailanthus altissima*） | 地中海气候，降水充沛 | 破坏作用（负效应） | 城墙周围 | [23] |
| 罗马尼禄金宫（Domus Aurea） | 红松（*Pinus koraiensis*） | 地中海气候，降水充沛 | 破坏作用（负效应） | 城墙周围 | [28] |
| 罗马托洛尼亚别墅（Villa Torlonia）犹太墓 | 无花果（*Ficus carica*）、冬青栎（*Quercus ilex*）、松树（*Pinus pinea*） | 地中海气候，降水充沛 | 破坏作用（负效应） | 墓室顶部 | [29] |
| 日本高松冢 | 竹子（*Bambusaceae*）、榉树（*Zelkova serrata*） | 温带海洋性季风气候，降水充沛 | 破坏作用（负效应） | 坟丘上方 | [30] |
| 吴哥遗址 | 卡波克树（*Ficus microcarpa*） | 热带季风气候，降水充沛 | 破坏作用（负效应） | 建筑物本体及周边 | [31]、[32] |
| 四川乐山大佛 | 菊科（*Compositae*）、禾本科（*Gramineae*） | 中亚热带气候，降水较多 | 破坏作用（负效应） | 大佛本体及周边 | [33] |
| 敦煌莫高窟 | 银白杨（*Populus alba*） | 温带大陆性气候，干旱少雨 | 破坏作用（负效应） | 窟区 | 本研究 |
| 青海明长城 | 乔木、灌木 | 高原大陆性气候，降水稀少 | 破坏作用（负效应） | 遗址本体 | [35] |
| 西安阿房宫前殿 | 构树（*Broussonetiapapyrifera*）、苦楝（*Melia azedarach*）、臭椿、泡桐（*Paulownia tomentosa*）、酸枣（*Ziziphusjujube mill*） | 暖温带半湿润季风气候，降水较多 | 破坏作用（负效应） | 遗址本体及周边 | [37] |
| 西安汉长安城 | 构树、酸枣和莎草（*Cyperus rotundus*） | 温带季风气候，降水较多 | 破坏作用（负效应） | 墙体本体及周边 | [37] |
| 西安杜陵 | 构树、茜草（*Rubia cordifolia*）、苦荬菜（*Ixerispolycephala*）等 | 温带季风气候，降水较多 | 破坏作用（负效应） | 墙体本体及周边 | [37] |
| 高台明长城八坝段 | 河西杨（*Populus gansuensis*） | 北温带大陆性干旱气候，干旱少雨 | 破坏作用（负效应） | 墙体本体及周边 | 本研究 |
| 英国牛津附近的威萨姆（Wytham near Oxford，UK） | 常春藤（*Hedera nepalensis var. sinensis*） | 温带海洋性气候，降水充沛 | 保护作用（正效应） | 墙体本体及周边 | [5]、[18] |
| 吴哥遗址 | 龙脑香属（*Dipterocarpus*）、山楂（*Crataegus pinnatifida*）、紫薇（*Lagerstroemia indica*）等 | 热带季风气候，降水充沛 | 保护作用（正效应） | 寺庙本体及周边 | [41] |
| 天水麦积山石窟 | 辽东栎（*Quercus liaodongensis*）、山杨（*Populus davidiana*）、白桦（*Betula platyphylla*）、红桦（*Betula albo－sinensis*） | 温带季风气候，降水较多 | 保护作用（正效应） | 石窟顶部 | 本研究 |
| 南京城墙 | 木犀（*Osmanthus fragrans*） | 亚热带季风气候，降水丰富 | 保护作用（正效应） | 城墙 | [42] |
| 西安汉阳陵 | 枸杞（*Lyciumchinense*）、酸枣 | 温带季风气候，降水较多 | 保护作用（正效应） | 封土遗址本体 | [44] |
| 湖北纪南城 | 狗牙根（*Cynodon dactylon*）、狼尾草（*Pennisetum alopecuroides*）、狗哇花（*Aster hispidus*）、早熟禾属（*Poa*） | 亚热带季风气候区，降水丰富 | 保护作用（正效应） | 土遗址本体 | [45] |
| 西安汉长安城未央宫前殿 | 羽茅（*Achnatherum sibiricum*）、阿尔泰狗哇花（*Heteropappusaltaicus*）、酸枣、艾蒿（*Artemisia argyi*）、问荆（*Equisetum arvense*） | 温带季风气候，降水较多 | 保护作用（正效应） | 土遗址本体 | [45] |
| 内蒙古元上都 | 羊草（*Leymus chinensis*）、紫羊茅（*Festuca rubra*）、马蔺（*Iris lactea* Pall. *var. chinensis*）、旋覆花（*Inula japonica*） | 温带大陆性气候、温带季风气候，降水较少 | 保护作用（正效应） | 土遗址本体 | [45] |
| 渭源战国秦长城 | 二裂委陵菜（*Potentilla bifurca*）、醉马草（*Achnatheruminebrians*）、芨芨草（*Achnatherum splendens*） | 温带大陆性气候，降水较多 | 保护作用（正效应） | 土遗址本体 | 本研究 |
| 瓜州锁阳城 | 白刺（*Nitrariatangutorum*） | 温带大陆性气候，干旱少雨 | 保护作用（正效应） | 土遗址周边 | [46] |

### 1.3　苔藓植物及其生态效应

苔藓植物也称为隐花植物,在土壤表面通常以生态系统工程师—生物土壤结皮(biological soil crust,BSC)的形式存在,将生物土壤结皮(生物结皮)定义为:由土壤颗粒与不同比例的光合自养(例如蓝细菌、藻类、地衣、苔藓植物)和异养(例如细菌、真菌、古生菌)有机体之间形成的复合体,这些有机体生活在土壤内部或紧邻其表层,土壤颗粒通过这些极端耐受生物群的存在和活动而聚集,由此产生的地表活体以连续方式覆盖在土壤表面[47],占干旱、半干旱区地表活体覆盖的 40% 以上[48],在可利用水资源限制维管植物生存的地区,这些群落尤其显著,其形成了一个几乎连续的地表生物体,介导了大多数输入、转移和跨越土壤表面边界的损失(图 4),对极端环境下生态系统稳定性至关重要。

**图 4**　生物结皮影响的生态系统过程示意图[49]

**Fig. 4**　A schematic diagram showing the ecosystem processes affected by the presence of biocrusts

**1.3.1**　*石质文物*　苔藓植物对石质文物的影响多为负面。石质文物表面分布有大量不同发育阶段的 BSC,作为主要的组成部分,苔藓植物在 BSC 后期演替阶段的生态系统功能中占主导地位,是引起露天石质文物生物侵蚀的关键类群。苔藓的“假根”可钻入岩体内部引起机械破坏[50]。苔藓分泌酸性等物质腐蚀石材[51],也可通过防紫外线和隔热为微生物提供庇护场所[52],微生物分泌色素可降低文物美学价值[53],间接对石质文物造成损害。苔藓和地衣在迅速失水或死亡后干燥卷曲,黏附大量石材颗粒,加速岩石风化[54],死亡的苔藓可通过增加腐殖质等为高等植物建植提供营养。

不同发育阶段的 BSC 对石质文物损害程度存在差异,苔藓较地衣更能降低砂岩表面硬度[55]。吴哥柬埔寨大内遗址教堂石材表面苔藓覆盖区域岩石的渗透性等参数都表现出最高值,苔藓假根穿透深度达 2.46 mm,对石质文物具有较强的侵入能力和巨大的潜在威胁[56];南京明代石刻生物覆盖的区域比无生物覆盖的表面凹陷 1 ~ 5 mm,苔藓等引起明显的生物风化[57];苔藓对陕西露天摩崖题刻和石窟的腐蚀面积较小,但其假根腐蚀深度较深[58];杭州飞来峰石质文物表面信息被黑色和绿色苔藓覆盖[59],严重降低了文物美学等价值;乐山大佛苔藓、蕨类植物假根能穿透佛体表面,蕨类分泌的有机酸加速了佛体化学风化[60]。也有地衣、苔藓作为屏障减弱石材风蚀、雨蚀、冻融及污染气体破坏等正面保护作用[61],以及因去除苔藓岩石表面的粗糙度增大,物理、化学风化加速,其他生物快速定殖的报道[62]。BSC 对石质文物的作用非常缓慢,短期内无法科学、全面评估其作用机理,其对石质文物的作用与石材基质种类、表面状况、赋存环境等因素相关,开展长期多因素耦合下石材生物退化的研究对全面认知石质文物表面 BSC 作用非常重要。

**1.3.2**　*土遗址*　BSC 对土遗址作用研究结果较少,主要集中在苔藓方面,苔藓定殖对土遗址的作用存在不确定性,其对干旱、半干旱区土遗址影响研究结果多为正面。赵海燕等[63]发现苔藓覆盖度达 40% 时,兰州榆中夏官营古城黄土坡面抗风蚀、雨蚀可分别提高 2 ~ 3 倍、3 ~ 4 倍;谌文武等[64]调查发现苔藓可减轻青海明长城的片状剥离,通过增加遗址土黏粒提高其表面强度,并降低盐分富集;白贵斌[65]指出苔藓和地衣能在甘肃凉州明长城土体上形成结构面,进而减弱风蚀、雨蚀病害的发生和发育;杨光[66]发现苔藓生长能增强青海贵德古城墙体表面贯入阻力、修复墙体微小裂隙、对片状剥离有加筋作用。以上研究多集中在苔藓结皮的岩土力学特征方面,缺乏对苔藓生理生态的深入研究。BSC 对潮湿地区考古遗址的影响多为负面,武发思等[67]发现,杭州良渚遗址表面大量苔藓覆盖考古遗址文化层,不利于遗址保护与展示;贾付春[68]提出,苔藓覆盖河南黄兰杨庄汉代聚落遗址的历史信息,引起土遗址风化,苔藓活动受限于水分获取;赵岗等[69]指出,充足的水分、低孔隙度、低硬度以及弱碱性环境为大唐西市土遗址苔藓生存和扩展提供适宜条件,引发了多种生物病害。以上研究仅局限于苔藓对土遗址信息影响等方面,并未从苔藓对土壤理化、生物学属性及生态水文等多角度综合剖析,极大限制了对苔藓和土遗址互作机理的全面认知。

本课题组调查发现(图 5),我国西北地区石窟寺、土遗址表面存在大量以蓝藻、地衣和藓类为主的隐花植物组合体,长期适应极端逆境条件,与遗址表面土壤胶结形成 BSC,成为遗址表面的显著特征。

尤其在降雨相对充足的甘肃北石窟寺、宁夏盐池明长城、渭源战国秦长城等遗址区，盖度达 30% 以上，已成为主要生物覆盖物。同时发现，形成 BSC 的土遗址保存状况明显好于未形成的。但也有报道指出在多风环境中，BSC 影响维管植物种子萌发和生长，并为微小动物提供生境和食物[70]，这些“生物入侵”有可能破坏土壤结构的稳定性。因此，BSC 可能同时存在提升土遗址抗侵蚀能力[71]以及通过改变土遗址表层水、热、结构及生物组成促使夯土松散，更有利于动、植物入侵而加速表层风化的两面性。因不同发育阶段 BSC 功能差异大，导致其在土壤抗侵蚀方面存在较大的时空异质性[49]。岩土文物历经千百年，已从单一的人工岩土结构向复杂的人工—自然复合生态系统转变，这为 BSC 拓殖和繁衍提供了条件的同时，也改变了其表面风化病害特征。苔藓对降水变化敏感，在极端干旱区激烈竞争水分，在潮湿环境中又促进水分渗透和滞留，通过毛细作用逐渐利用。最新研究提出，气候变化和人为干扰是导致苔藓和地衣减少的主要因素，旱地生态系统正处于一个关键的临界点，而持续的全球变暖可能导致 BSC 退化[72]，因此，在全球变化背景下，摸清 BSC 在不同生物气候带土遗址表面的形成与演替机制可能是回答生物结皮对土遗址作用机理的重要前提。

**图 5** 石窟寺、土遗址表面不同发育阶段生物结皮（课题组 2018—2022 年调查监测位点）

**Fig. 5** Biological crusts on the surfaces of cave temples and earthen sites at different developmental stages (investigated and monitored by our research team from 2018 to 2022)

## 2 植物影响岩土文物研究方法

由于文物病害研究中无损或微损的要求，极大地阻碍了文物与植物的关系研究，尤其是植物地下部分对岩土文物稳定性的影响研究，在技术应用方面长期受限。探地雷达（ground penetrating radar, GPR）已被证明是探测埋藏结构和根系发育的有用工具，较早在考古和历史遗址探测中应用[73]。逐渐兴起的根系成像技术、分形理论以及计算机图像识别系统等技术[74-76]，为植物地下根系分布和走向判断奠定了基础。地理信息系统（geographic information system, GIS）、3D 激光扫描（地面激光雷达）、航空和卫星图片等非接触式手段也常用于在较大时空尺度上监测植物地上部分[41,77-78]，结合微损取样的植物根系形态学和解剖学识别、人造根系室内理论模拟[79]、ViSTA - HD 等数值模型[6]，为植物影响岩土

文物评估提供了理论数据。然而,现场调查在风险判断中仍不可或缺。

本课题组采用 GPR 对长城等土遗址、石窟寺本体及周边高大乔木、灌木等植物根径大小和空间分布进行了探测,发现莫高窟窟区银白杨根径在 35 ~ 60 cm 间,深度在 - 20 ~ - 150 cm 内,直径大于 50 cm 的根系向洞窟崖体方向延伸,对洞窟安全造成隐患[80];北庭故城遗址榆树(*Ulmus pumila*)根径在 5 ~40 cm 之间,直径在 10 ~20 cm 根系对遗址造成了严重影响[81];高台明长城河西杨根系在墙体深度约 35 ~85 cm 处,主根径约 10 ~12 cm,造成了遗址裂隙[82]。

## 3　植物损害防控技术

对遗址自生植被的管理较为复杂,必须综合考虑遗址本体、环境和景观。现阶段,针对遗址有害植物防控常用物理、化学、新型技术协同的方法。

### 3.1　物理方法

物理方法中最为直接有效的方法是机械清除,如人工除草可有效防止草本植物生长,但当文物被茂密的木本植物覆盖则难以去除。一些环保方法,如火焰除草和土壤日晒等对抑制一年生草本植物效果较好,其中火焰除草是将植物组织暴露在来自丙烷燃烧温度至 50℃ 导致植物细胞损伤和植物死亡[83],土壤日晒指用 PVC 材料覆盖使土壤温度升高,对残留在土壤中的杂草种子造成伤害[84],但现场使用存在局限性。热处理是在 40 ~ 60℃ 下处理 6 h,使地衣和苔藓失去活性[85],其成本低,生态兼容性强,但对蕨类和被子植物的去除效率不明[86],且非长期有效,不能取代化学类杀灭剂[87],尤其是热处理石质文物后,表面残留的水分可能引发微生物大肆繁殖[88]。

### 3.2　化学及多种方式协同的方法

$AgNO_3$、$H_2O_2$ 和苯扎氯铵等传统杀菌剂,具有高效便捷、易渗透到岩石内部的优点,但会对人体和生态环境造成危害,长期使用还会增强生物耐药性,影响杀灭效果[85]。金属氧化物纳米粒子(NPs),广泛用于建筑物表面生物膜防治[89]。用刀、铲子等工具只能将苔藓简单剥离,难以彻底去除其孢子粉,但可以与其他方法联合使用[90],激光 + 杀菌剂、超声波 + 杀菌剂等方法协同使用可提高苔藓去除效率,降低生态毒害[85]。

### 3.3　潜在新型技术

绿色、环保的处理措施当前在文物保护中最为提倡。例如,利用臭椿酮等天然除草剂和纳米材料作为杀菌剂减缓石质建筑生物风化[90]。地衣次生代谢物(LSM,松萝酸、去甲酸、苦参素),可通过化感作用抑制其他生物生长,称为潜在天然杀灭剂来源[91],LSM 有超过 800 种化合物,部分由组成地衣的相关真菌合成[92],多数对苔藓和维管植物有强烈的化感作用[93]。《雅典修复历史古迹宪章》规定,“从保留其古老特征的角度来看,还应研究最适合某些古迹的观赏植物”;因此在清除有害植物前,还应从历史景观的美学、功能、教育和观赏价值等多角度全面评估。

也有观点认为,处理生物退化是一种极端的保护手段,最好是减少干预。实践证明,多数防治方法并不能彻底解决生物退化问题,反而会加剧退化。André 等[31]发现在清除植被及相关的微生物后,石材表面开始劣化,因此应谨慎评估植物与文物间的关系。如在去除了石质文物表面生物后,反而加快了石材的风化速度进而为新物种的入侵创造条件[94]。事实上,当去除石材表面植被覆盖物后,微环境(温度、湿度)已经变化,如环境会变得更加干燥[95]。通过控制温度、湿度、光照和水分等赋存环境控制对阻止植物的入侵及减缓岩土文物劣化是探索的新思路。

### 3.4　防治案例

针对有害植物,河南内黄兰杨庄遗址采用 7% 的丙烯酸盐配合物溶胶(AMC)杀灭苔藓,并用 3% 的过氧化氨对局部不宜去除的霉斑进行清除[68];针对考古现场中常见的物种臭椿,单纯的人工清除及化学除草剂等均无法将其彻底杀灭,必须采用固化等手段将其地下根系固定,避免二次生长,但固化可能为生物提供新的营养,最终导致失效[96];在高句丽石质文物保护中,采用手术刀去除苔鲜,如果石刻表面结构密实,用蒸馏水浸湿,再用毛刷清理,或用丙酮和水混合液浸泡后去除[97]。

## 4　植物保护应用技术

### 4.1　软覆盖(soft capping)技术发展

针对露天城墙劣化,国际上常用砂浆和石头加固的硬覆盖(hard capping)以及软覆盖进行防劣化[98]。软覆盖指使用植物(如草本植物、景天科植物等)及土壤(5 ~10 cm)对覆盖遗址表面具有减小雨水冲刷、防风蚀作用,是应对露天石质建筑墙体劣化和生物退化的一种有效策略[98-99]。此技术在 20 世纪初首次在苏格兰小规模使用,1980 年初,英国

团队尝试采用软覆盖保护遗址顶部[100]，至20世纪90年代中期，软覆盖封顶技术的应用更加普遍[101]，并在21世纪初对软覆盖开展了系统科学试验评估[98,100]。软覆盖技术目前在欧洲有50多个试验站点，主要分布在英国和瑞典[101]。软覆盖成本低、易实施，是一种可逆的人工干预，且有利于增加生物多样性，降低维护成本，比硬覆盖占更多优势[98]。目前，软覆盖研究主要集中在其对减缓遗址免受霜冻、减弱风蚀雨蚀以及下垫面土壤厚度等方面。

### 4.2 石质文物软覆盖

Hanssen和Viles[18]对比了温带气候下硬覆盖和软覆盖的保护效果，发现软覆盖可减少87%的墙体径流，且能显著降低蒸发速率；钟燕等[102]对比了安徽宣城广教寺遗址公园模拟墙体上硬覆盖和软覆盖—景天科（Crassulaceae）、沟叶结缕草（*Zoysia matrella*）、四季青（*Ilex purpurea*）防护效果，发现软覆盖在夏季对墙体有除湿功效，在冬季没有增加墙体含水量，但该室内试验没有考虑自然条件下其他环境胁迫因子；Lee等[103]在英国比兰德修道院（Byland Abbey）研究中发现，软覆盖比硬覆盖有更好的“热毯效应”，可显著减小墙体日均温度波动和冻害风险，降低遗址热胀冷缩损伤。而且在降水后，植物能够通过蒸腾作用带出墙体内部的水分，维持墙体内部稳定的水文条件。软覆盖后墙体冬湿夏干，同时软覆盖可塑性强，能适应气候环境变化。但软覆盖实施后外观和生物多样性将如何变化，随时间的改变，软盖层防护效果是否会引入遗址新病害等方面还有待评估。Viles等[104]在人工控制环境下，模拟英格兰西南部剧烈日温差，发现软覆盖下层墙体温度波动降低了4.5～7℃，热滞后时长约3 h，但以草本植物为主的软覆盖只适合于较湿润气候中古建筑遗址保护[103]。在降水较少的干旱环境，植物建植和防护效果均会受到限制。在遵循可逆性、最小干预原则的基础上，可使用乡土植物进行软覆盖技术研发，以便在更复杂的环境中应用，但当前还处于探索阶段。

### 4.3 土遗址软覆盖

针对土遗址软覆盖，一般保留入侵性小、景观协调、对人体健康无危害的本土植物。植物地上部分的防护作用，主要考虑其种类、覆盖度[45]，借鉴黄土高原人工植被覆盖度为≥50%～60%[105]，土遗址保护中植被覆盖度应>75%[13]。在面积较大的封土遗址中，可采用乔木、灌木和草本植物结合的方法，通过减弱雨水的冲刷保护地下遗址[106]；对于汉阳陵陵园及封土，通过保持现有形态，选择适宜的草本植物固土[107]；对城址、城墙类土遗址，应以低矮的草本植物为主[45]；在渤海上京遗址墙体建议种植草本植物，墙两侧种植高大乔木，防止水土流失[108]；在三星堆遗址保护中，采用自然草皮保护坡面，在坡下种植芦苇，对严重滑坡面采用挂网锚固植草[109]；在南方潮湿环境土遗址原位保护中，应选择根系深度<70 cm、高度<50 cm多年生植物，即以浅根系、覆盖度大、地上部分低矮及防雨水冲刷的植物为主，针对墙体立面，可选用苔藓，但其适用性仍不明确[13]；在干旱、半干旱的河西走廊，建议在距长城0.5 km外，采用灌丛和小乔木，在0.5 km～10 m范围内，采用灌丛，小于10 m的长城本体及周边，选择本地草本植物和小灌木，但有待实践验证[110]；张博[111]测试了薄壁卷柏藓（*Racopilum cuspidigerum*）对土遗址试块的防护效果，发现其能够降低径流流速，改变土壤渗透性，提升抗雨水冲刷能力，但主要取决于苔藓覆盖度，并提出NDVI（归一化植被指数）年平均值为0.65是苔藓覆盖适用范围的边界条件，该研究的不足是只在室内使用已养护好的成品整块薄壁卷柏藓，而忽略了自然环境下苔藓破碎化分布等现状。

## 5 问题与展望

植物的生长改变了岩土文物的稳定性，重塑了景观多样性。在科学评估植物对岩土文物的物理破坏和化学腐蚀的同时，也应该深入挖掘植物调节微环境、阻滞污染物及遮蔽风蚀和雨蚀等正面作用。对于植物根长、根密度或根直径等几何参数的量化，是研究植物生理生态功能的关键，文物的特殊性对传统的挖掘和剖面等有损分析提出了挑战，先进技术的引入和数值模拟结合的分析方法十分必要。针对遗址有害植物的清除，存在保护、景观和生态效益难以平衡的问题，建议遵循真实性与完整性、最小干预、可持续的生态保护及功能多样化原则。全球变化可通过影响生物群落和功能间接威胁文物，通过环境干预而遏制有害生物危害已是文物预防性保护趋势。

植物软覆盖无疑是替代物理、化学手段保护岩土文物的新型技术，引入新的物种前，要准确评估外来物种入侵性及潜在生态风险。在潮湿地区岩土文物表面植物覆盖技术具有可行性，但也面临着如短根系植物筛选、土壤养分配比、固定方式、日常维护和效果监测评估等难题，保护措施在不同气候中适

用性尚待研究。苔藓结皮在促进干旱区水文循环、改善土壤结构和防止水土流失方面具有关键作用,BSC 在寒旱区防风固沙和改良土壤等方面具有快速、环保、资源消耗少和可持续性高等显著优势,已成为国内、外一项新兴的生态恢复技术[48]。可借鉴防风固沙的成功经验,从不同生境岩土文物中分离、培养能够增强文物表面抗风蚀、雨蚀能力的物种资源,并利用 BSC 拓殖来减轻或抑制文物表面风化,以及如何在符合文物保护准则的前提下,形成完善的实施工艺和对生态系统健康影响的完整评价体系尚待进一步探索。BSC 极有可能成为破解当前制约极端环境下岩土文物化学材料防风化效果不佳的新思路和新途径,而精准掌握 BSC 多样性、群落构建、演变规律及其与岩土文物互馈机理是其推广应用的重要前提。

基于岩土文物与植物关系研究现状,结合当前研究热点与亟待解决的关键科学问题,展望如下:1)厘清植物对岩土文物的损害及保护作用机理;2)构建不同环境下界定植物对岩土文物正负效应的科学评估体系;3)明确植物种内和种间的相互作用以及驱动植物在岩土文物表面建植的关键因子;4)结合全球气候变化,研发岩土文物有害植物的精准防控技术;5)筛选适宜的软覆盖植物种并对其防护效果进行评估;6)研发基于 BSC 的软覆盖技术,开展环境适应性和保护效果评估。

## 参考文献:


[1] 邓志鸿,唐世渭,张铭,等. Ontology 研究综述[J]. 北京大学学报(自然科学版),2002,**38**(5):730 – 738.
DENG Zhihong, TANG Shiwei, ZHANG Ming, *et al*. Overview of ontology[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2002,**38**(5):730 – 738.

[2] 陈曦. 中国不可移动文物资产化研究[D]. 北京:中国财政科学研究院,2018:20 – 22.
CHEN Xi. Research on immovable cultural relics' capitalization in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Fiscal Sciences, 2018: 20 – 22.

[3] CESCHIN S, SALERNO G, CANEVA G. Multitemporal floristic analysis on a humid area in Rome's archaeological site as indicator for environmental change [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **149**(1/2/3/4):29 – 42.

[4] DU Y, CHEN W, CUI K, *et al*. A model characterizing deterioration at earthen sites of the Ming Great Wall in Qinghai Province, China [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2017, **53**(6): 426 – 434.

[5] COOMBES M A, VILES H A, ZHANG H. Thermal blanketing by ivy (*Hedera helix* L.) can protect building stone from damaging frosts[J]. Scientific Reports, 2018, **8**(1):9834.

[6] RICHARDS J, MAYAUD J, ZHAN H, *et al*. Modelling the risk of deterioration at earthen heritage sites in drylands[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2020, **45**(11):2401 – 2416.

[7] WU Y, LI Q, TONG H, *et al*. Monitoring the deterioration of Masonry Relics at a UNESCO World Heritage Site [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021(1):1 – 10.

[8] HUECK H J. The biodeterioration of materials as a part of hylobiology [J]. Material Und Organismen, 1965, **1**(1):5 – 34.

[9] DAKAL T C, CAMEOTRA S S. Microbially induced deterioration of architectural heritages: routes and mechanisms involved [J]. Environmental Sciences Europe, 2012, **24**(1):36.

[10] 孙满利. 植物覆盖技术保护潮湿地区土遗址探讨[J]. 文物保护与考古科学,2021,**33**(5):125 – 132.
SUN Manli. Research on the plant capping technology used to protect earthen sites in humid areas[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2021, **33**(5):125 – 132.

[11] HOSSEINI Z, CANEVA G. Evaluating hazard conditions of plant colonization in Pasargadae World Heritage Site (Iran) as a tool of biodeterioration assessment[J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 2021, **160**:105216.

[12] 郭青林,张景科,孙满利,等. 新疆北庭故城病害特征及保护加固研究[J]. 敦煌研究,2013(1):13 – 17,126.
GUO Qinglin, ZHANG Jingke, SUN Manli, *et al*. Research on disease characteristics and protection and reinforcement of Beiting Ancient City in Xinjiang[J]. Dunhuang Research, 2013(1):13 – 17,126.

[13] 孙满利,王旭东,李最雄. 土遗址保护初论[M]. 北京:科学出版社,2010:2 – 3.
SUN Manli, WANG Xudong, LI Zuixiong. A preliminary discussion on the protection of earth sites[M]. Beijing: Science Press, 2010: 2 – 3.

[14] 徐泽远,颜明俊,章豪. 露天石质文物表面防护材料的应用探讨[J]. 广州化工,2016,**44**(8):24 – 26,57.
XU Zeyuan, YAN Mingjun, ZHANG Hao. Application of surface protection materials for open – air stone cultural relics[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2016, **44**(8):24 – 26,57.

[15] 赵林毅. 应用于岩土质文物保护加固的两种传统材料的改性研究[D]. 兰州:兰州大学,2012.
ZHAO Linyi. The modification research of two kinds of traditional materials used on preservation of the stone and earthen cultural relics[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.

[16] RANALLI G, ZANARDINI E, RAMPAZZI L, *et al*. Onsite advanced biocleaning system for historical wall paintings using new agar – gauze bacteria gel[J]. Journal of Applied Microbiology, 2019, **126**(6):1785 – 1796.

[17] ARMETTA F, CARDENAS J, CAPONETTI E, *et al*. Conservation state of two paintings in the Santa Margherita Cliff Cave: role of the environment and of the microbial community[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, **29**(20):29510 – 29523.

[18] HANSSEN S V, VILES H A. Can plants keep ruins dry? A quantitative assessment of the effect of soft capping on rainwater flows over ruined walls[J]. Ecological Engineering, 2014, **71**:

173 – 179.

[19] CHUNGEN W, KAICHENG H, NAN Z, *et al*. Discussion on ecological protection technology of high and steep slop of expressway [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, **632**(2): 220 – 222.

[20] LI X R, HUI R, TAN H J, *et al*. Biocrust research in China: recent progress and application in land degradation control[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, **12**: 751521.

[21] 周云龙. 植物生物学[M]. 北京:高等教育出版社, 1999: 315.
ZHOU Yunlong. Plant biology [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 315.

[22] ALMEIDA M T, MOUGA T, BARRACOSA P. The weathering ability of higher plants. The case of *Ailanthus altissima* (Miller) Swingle [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 1994, **33**(4): 333 – 343.

[23] TROTTA G, SAVO V, CICINELLI E, *et al*. Colonization and damages of *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle on archaeological structures: evidence from the Aurelian Walls in Rome (Italy) [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2020, **153**: 105054.

[24] CANEVA G, NUGARI M, SALVADORI O. Plant biology for cultural heritage: biodeterioration and conservation [M]. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 2009.

[25] MISHRA A K, JAIN K K, GARG K L. Role of higher plants in the deterioration of historic buildings [J]. Science of the Total Environment, 1995, **167**(1): 375 – 392.

[26] PAPAFOTIOU M, KANELLOU E. Restoration of a Roman villa garden in the archaeological site of Eleusis[J]. Acta Horticulturae, 2010(881): 1011 – 1014.

[27] SLADONJA B, POLJUHA D. Citizen science as a tool in biological recording—a case study of *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle [J]. Forests, 2018, **9**(1): 31.

[28] CANEVA G, CESCHIN S, De MARCO G. Mapping the risk of damage from tree roots for the conservation of archaeological sites: the case of the Domus Aurea, Rome [J]. Conservation and Management of Archaeological Sites, 2006, **7**(3): 163 – 170.

[29] CANEVA G, GALOTTA G, CANCELLIERI L, *et al*. Tree roots and damages in the Jewish catacombs of Villa Torlonia (Roma) [J]. Journal of Cultural Heritage, 2009, **10**: 53 – 62.

[30] 武发思,朱非清,汪万福,等. 日本高松冢古坟微生物病害及其防治研究概述[J]. 文物保护与考古科学, 2019, **31**(3): 26 – 35.
WU Fasi, ZHU Feiqing, WANG Wanfu, *et al*. Review of microbial deterioration and control of Takamatsuzuka Tumulus, Japan[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2019, **31**(3): 26 – 35.

[31] ANDRÉ M F, VOLDOIRE O, ROUSSE E, *et al*. Contrasting weathering and climate regimes in forested and cleared sandstone temples of the Angkor region [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, **37**(5): 519 – 532.

[32] LIU X B, MENG H, WANG Y L, *et al*. Water is a critical factor in evaluating and assessing microbial colonization and destruction of Angkor sandstone monuments[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2018, **133**: 9 – 16.

[33] 王蔓菲,孙博,杨天宇,等. 乐山大佛佛体维管植物多样性及繁殖体散布特征[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2020, **41**(4): 341 – 346.
WANG Manfei, SUN Bo, YANG Tianyu, *et al*. Species diversity and propagule dispersal features of vascular plants on Leshan Giant Buddha body [J]. Journal of China West Normal University (Natural Sciences), 2020, **41**(4): 341 – 346.

[34] WU F J, YANG W Q, SUN B, *et al*. Soil C, N and P stocks and stoichiometry under different vegetation on the surface of the Leshan Giant Buddha[J]. Soil Ecology Letters, 2022, **4**(1): 57 – 68.

[35] 杜昱民. 青海明长城防御体系及典型遗址易损性评价[D]. 兰州:兰州大学, 2019.
DU Yumin. Military defense system and vulnerability assessment of earthen sites of the Ming Great Wall in Qinghai Province[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.

[36] 赵晓文. 植物对土遗址裂隙的影响及其作用机理研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2014.
ZHAO Xiaowen. The influence on cracks and reaction mechanism of plant on the conservation of earthen sites [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2014.

[37] 刘甜. 植物对西安市土遗址夯土的影响研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2019.
LIU Tian. The influence of plants on the rammed earth of earthen sites in Xi'an[D]. Xianyang: Northwest A & F university, 2019.

[38] VILES H, STERNBERG T, CATHERSIDES A. Is ivy good or bad for historic walls? [J]. Journal of Architectural Conservation, 2011, **17**(2): 25 – 41.

[39] ZEGEYE A D, LANGENDOEN E J, TILAHUN S A, *et al*. Root reinforcement to soils provided by common Ethiopian highland plants for gully erosion control[J]. Ecohydrology, 2018, **11**(6): e1940.

[40] FABBRI K, CANUTI G, UGOLINI A. A methodology to evaluate outdoor microclimate of the archaeological site and vegetation role: a case study of the Roman Villa in Russi (Italy)[J]. Sustainable Cities and Society, 2017, **35**: 107 – 133.

[41] ANDRÉ M F, VAUTIER F, VOLDOIRE O, *et al*. Accelerated stone deterioration induced by forest clearance around the Angkor temples[J]. Science of the Total Environment, 2014, **493**: 98 – 108.

[42] LI Y, XIA C, WU R, *et al*. Role of the urban plant environment in the sustainable protection of an ancient city wall[J]. Building and Environment, 2021, **187**: 107405.

[43] 徐淼. 汉阳陵露天土遗址的植物保护功能研究[D]. 西安:西北大学, 2017.
XU Miao. The research on plants' protection on the earthen sites of Han Yangling[D]. Xi'an: Northwest University, 2017.

[44] 程蓓. 植物对汉阳陵帝陵封土遗址的影响[J]. 文博, 2013(3): 86 – 89.
CHEN Bei. Influence of plants on the Fengtu Site of Emperor Mausoleum of Hanyangling[J]. Relics and Museology, 2013(3): 86 – 89.

[45] 王菲. 植物保护土遗址的可行性研究[D]. 西安:西北大学,

2012.
WANG Fei. The feasibility study of earthen sites protected by plants[D]. Xi'an: Northwest University,2012.

[46] 武发思,杜维波,杨小菊,等.瓜州锁阳城遗址植物群落特征及与土遗址保护间关系[J].西北大学学报(自然科学版),2022,**52**(4):667-677.
WU Fasi, DU Weibo, YANG Xiaoju, *et al*. Characteristics of plant community and its relationship with earthen heritage protection in Suoyang Ancient City, Guazhou[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition),2022,**52**(4):667-677.

[47] WEBER B, BELNAP J, BUDEL B. What is a biocrust? A refined, contemporary definition for a broadening research community[J]. Biological Reviews,2022,**97**(5):1768-1785.

[48] 李新荣,谭会娟,回嵘,等.中国荒漠与沙地生物土壤结皮研究[J].科学通报,2018,**63**(23):2320-2334.
LI Xinrong, TAN Huijuan, HUI Rong, *et al*. Researches in biological soil crust of China: a review[J]. Chinese Science Bulletin,2018,**63**(23):2320-2334.

[49] WEBER B, BÜDEL B, BELNAP J. Ecological studies[M]. Berlin: Springer,2016:3-13.

[50] PINNA D. Coping with biological growth on stone heritage objects: methods, products, applications, and perspectives[M]. Oakville: Apple Academic Press,2017.

[51] 张海英,李强,张秉坚,等.露天石质文物表面苔藓的科学认知和防治技术研究进展[J].石材,2020(8):18-23,47.
ZHANG Haiying, LI Qiang, ZHANG Bingjian, *et al*. Research progress on scientific cognition and control technology of moss on the surface of open-air stone cultural relics[J]. Stone,2020(8):18-23,47.

[52] DE GUEVARA M L, MAESTRE F T. Ecology and responses to climate change of biocrust forming mosses in drylands[J]. Journal of Experimental Botany,2022,**73**(13):4380-4395.

[53] WU F S, ZHANG Y, GU J D, *et al*. Community assembly, potential functions and interactions between fungi and microalgae associated with biodeterioration of sandstone at the Beishiku Temple in Northwest China[J]. Science of the Total Environment,2022,**835**:155372.

[54] 李海,胡小兰,舒开倩,等.乐山大佛风化程度研究[J].乐山师范学院学报,2016,**31**(8):29-37.
LI Hai, HU Xiaolan, SHU Kaiqian, *et al*. A study of weathering degree of Leshan Grand Buddha[J]. Journal of Leshan Normal University,2016,**31**(8):29-37.

[55] RÍOS A D L, CÁMARA B, CURA M A G D, *et al*. Deteriorating effects of lichen and microbial colonization of carbonate building rocks in the Romanesque churches of Segovia (Spain)[J]. Science of the Total Environment,2009,**407**:1123-1134.

[56] BARTOLI F, ROMITI F, CANEVA G. Aggressiveness of *Hedera helix* L. growing on monuments: evaluation in Roman archaeological sites and guidelines for a general methodological approach[J]. Plant Biosystems,2016,**151**(5):1-12.

[57] 王兴山,张捷,秦中.石灰岩石刻文物表面硬度与生物风化研究——以南京明代石刻为例[J].安徽师范大学学报(自然科学版),2006,**29**(4):381-384,394.
WANG Xingshan, ZHANG Jie, QIN Zhong. Study of limestone statuary on base of rigidity—a case study on stone statuary of Ming Dynasty in Nanjing[J]. Journal of Anhui Normal University (Natural Science Edition),2006,**29**(4):381-384,394.

[58] 王翀,王明鹏,白崇斌,等.露天石质文物生物风化研究进展[J].文博,2015(2):86-91.
WANG Chong, WANG Mingpeng, BAI Chongbin, *et al*. Research progress on biological weathering of open-air stone cultural relics[J]. Relics and Museology,2015(2):86-91.

[59] 李天晓.飞来峰造像典型微生物病害认知与防治研究[D].杭州:浙江大学,2019.
LI Tianxiao. Investigation and prevention of the typical microbial diseases on Feilaifeng status in Hangzhou[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2019.

[60] 黄继忠,宋绍雷,董海燕,等.藻菌共生体对乐山大佛红砂岩风化影响初探[J].文物世界,2018(3):72-76.
HUANG Jizhong, SONG Shaolei, DONG Haiyan, *et al*. Preliminary study on the influence of algal-bacterial symbionts on the weathering of Leshan Giant Buddha red sandstone[J]. World of Antiquity,2018(3):72-76.

[61] LIU X B, KOESTLER R J, WARSCHEID T, *et al*. Microbial deterioration and sustainable conservation of stone monuments and buildings[J]. Nature Sustainability,2020,**3**:991-1004.

[62] SAVKOVIC Ž, UNKOVIC N, STUPAR M, *et al*. Diversity and biodeteriorative potential of fungal dwellers on ancient stone stela[J]. International Biodeterioration and Biodegradation,2016,**115**:212-223.

[63] 赵海燕,郭荣慧,段宇涛,等.苔藓植物护坡及固土作用试验研究[J].兰州大学学报(自然科学版),2018,**54**(3):364-368.
ZHAO Haiyan, GUO Ronghui, DUAN Yutao, *et al*. Experimental study on slope protection and soil reinforcement for moss[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences Edition),2018,**54**(3):364-368.

[64] 谌文武,杨光,张迎敏,等.青海地区苔藓结皮对土遗址片状剥离的影响[J].工程科学与技术,2017,**49**(5):22-27.
CHEN Wenwu, YANG Guang, ZHANG Yingmin, *et al*. Effect of moss soil crust on the scaling off of earthen sites in Qinghai[J]. Advanced Engineering Sciences,2017,**49**(5):22-27.

[65] 白贵斌.苔藓及地衣对凉州明长城的保护作用研究[D].兰州:兰州大学,2012.
BAI Guibin. Protection effect of bryophytes and lichen on the Ming Great Wall in Liangzhou[D]. Lanzhou: Lanzhou University,2012.

[66] 杨光.干旱环境下苔藓加固土遗址片状剥离试验研究[D].兰州:兰州大学,2017.
YANG Guang. Experimental study on reinforcement for flake erosion of earth sites with moss in arid environment[D]. Lanzhou: Lanzhou University,2017.

[67] 武发思,汪万福,贺东鹏,等.良渚北城墙考古土遗址表面藻类的分析研究[J].敦煌研究,2014(4):114-120.
WU Fasi, WANG Wanfu, HE Dongpeng, *et al*. Analysis of algae growing on the surface of the North City Wall of Liangzhu Site[J]. Dunhuang Research,2014(4):114-120.

[68] 贾付春.中原地区潮湿土遗址保护理念探索与对策研究[D].

郑州:郑州大学,2016.
JIA Fuchun. Exploration and research of typical humid sites conservation in central plains region of China[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University,2016.

[69] 赵岗,李玉虎,肖亚萍,等.大唐西市土遗址苔藓物种鉴定及其病害成因分析[J].分析测试技术与仪器,2017,**23**(2):87-92.
ZHAO Gang, LI Yuhu, XIAO Yaping, *et al*. Species identification and analysis of causes of bryophyte bred on earthen archaeological site of Tang West Market[J]. Analysis and Testing Technology and Instruments,2017,**23**(2):87-92.

[70] XIAO B, HU K L. Moss-dominated biocrusts decrease soil moisture and result in the degradation of artificially planted shrubs under semiarid climate[J]. Geoderma,2017,**291**:47-54.

[71] 张元明,王雪芹.荒漠地表生物土壤结皮形成与演替特征概述[J].生态学报,2010,**30**(16):4484-4492.
ZHANG Yuanming, WANG Xueqin. Summary on formation and developmental characteristics of biological soil crusts in desert areas[J]. Acta Ecologica Sinica,2010,**30**(16):4484-4492.

[72] FINGER-HIGGENS R, DUNIWAY M C, FICK S. Decline in biological soil crust N-fixing lichens linked to increasing summertime temperatures[J]. PNAS,2022:**119**(16):e2120975119.

[73] ORTIZ R, BLANCHETTE R. Defibration wood obtained from the Saltpeter Works Humber stone and Santa Laura in Chile. World Heritage Sites[J]. Madera Bosques,2014,**20**(3):59-68.

[74] 张志山,樊恒文,赵金龙,等.沙漠人工植物群落的根系分布及动态[J].中国沙漠,2006,**26**(4):637-643.
ZHANG Zhishan, FAN Hengwen, ZHAO Jinlong, *et al*. Root distribution and dynamics of re-vegetated communities in desert area[J]. Journal of Desert Research,2006,**26**(4):637-643.

[75] 崔喜红,陈晋,关琳琳.探地雷达技术在植物根系探测研究中的应用[J].地球科学进展,2009,**24**(6):606-611.
CUI Xihong, CHEN Jin, GUAN Linlin. The application of ground penetrating radar to plant root system detection[J]. Advances in Earth Science,2009,**24**(6):606-611.

[76] MAGALHES P C, SOUZA T C D, CANTO F R O. Early evaluation of root morphology of maize genotypes under phosphorus deficiency [J]. Plant Soil and Environment,2011,**57**:135-138.

[77] INKPEN R, DUANE B, BURDETT J, *et al*. Assessing stone degradation using an integrated database and geographical information system (GIS)[J]. Environmental Geology,2008,**56**(3/4):789-801.

[78] AGAPIOU A, LYSANDROU V, THEMISTOCLEOUS K, *et al*. Risk assessment of cultural heritage sites clusters using satellite imagery and GIS: the case study of Paphos District, Cyprus[J]. Natural Hazards,2016,**83**(Suppl.1):1-16.

[79] 吴宏伟.大气-植被-土体相互作用:理论与机理[J].岩土工程学报,2017,**39**(1):1-47.
WANG Hongwei. Atmosphere-plant-soil interactions: theories and mechanisms[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017,**39**(1):1-47.

[80] 贺东鹏,武发思,徐瑞红,等.探地雷达在莫高窟窟区树木根系探测方面的应用[J].干旱区资源与环境,2015,**29**(2):86-91.
HE Dongpeng, WU Fasi, XU Ruihong, *et al*. The application of ground penetrating radar in plant root system detecting around Mogao Grottoes[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2015,**29**(2):86-91.

[81] 汪万福,武发思,徐瑞红,等.基于探地雷达的树木根系空间分布及对土遗址影响[J].中国沙漠,2015,**35**(5):1163-1170.
WANG Wanfu, WU Fasi, XU Ruihong, *et al*. Spatial distribution of root system at earthen ruins revealed by ground penetrating radar [J]. Journal of Desert Research,2015,**35**(5):1163-1170.

[82] 徐瑞红,武发思,贺东鹏,等.利用探地雷达技术对河西杨根系影响甘肃高台明长城遗址的研究[J].文物保护与考古科学,2015,**27**(1):15-20.
XU Ruihong,WU Fasi,HE Dongpeng, *et al*. A study of the impact of *Populus gansuensis* roots on ruins of the Ming Dynasty Great Wall at Gaotai, Gansu Province using ground penetrating radar [J]. Sciences of Conservation and Archaeology,2015,**27**(1):15-20.

[83] VINCENT C, PANNETON B, FLEURAT-LESSARD F. Physical control methods in plant protection[M]. Berlin: Springer,2001.

[84] CANDIDO V, D'ADDABBO T, MICCOLIS V, *et al*. Effect of different solarizing materials on weed suppression and lettuce response[J]. Phytoparasitica,2012,**40**:185-194.

[85] TRETIACH M, BERTUZZI S, CARNIEL F C. Heat shock treatments: a new safe approach against lichen growth on outdoor stone surfaces[J]. Environmental Science and Technology,2012, **46**:6851-6859.

[86] BERTUZZI S, GUSTAVS L, PANDOLFINI G, *et al*. Heat shock treatments for the control of lithobionts: a case study with epilithic green microalgae [J]. International Biodeterioration and Biodegradation,2017,**123**:236-243.

[87] BERTUZZI S, GUSTAVS L, PANDOLFINI G, *et al*. Heat shock treatments for the control of lithobionts: a case study with epilithic green microalgae sites: the case of the Domus Aurea, Rome[J]. Conservation and Management of Archaeological Sites, 2006, **7**(3):163-170.

[88] WARSCHEID T, BRAAMS J. Biodeterioration of stone: a review [J]. International Biodeterioration and Biodegradation,2000,**46**: 343-368.

[89] BECERRA J, ZADERENKO A P, SAYAGUES M J, *et al*. Synergy achieved in silver-$TiO_2$ nanocomposites for the inhibition of biofouling on limestone[J]. Building and Environment, 2018, **141**:80-90.

[90] 林佳育,李榜江,程才,等.石质建筑的生物风化防治研究现状[J].应用生态学报,2021,**32**(8):3023-3030.
LIN Jiayu, LI Bangjiang, CHENG Cai, *et al*. Research status of bioweathering control of stone buildings[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2021,**32**(8):3023-3030.

[91] DUKE S O, DAYAN F E, RIMANDO A M, *et al*. Chemicals from nature for weed management[J]. Weed Science,2002,**50**:138-151.

[92] NASH T H. Lichen biology: biochemistry and secondary metabolites [M]. New York: Cambridge University Press,2008:104-133.

[93] AWANG A, NASIR M R M, MOHAMAD W S N W. A review on the impacts of plants towards heritage buildings[J]. Journal of Applied Arts,2020,**2**(1):94 – 101.

[94] KUMBARIC A, CANEVA G, CESCHIN S, *et al*. Main ecological parameters affecting the colonization of higher plants in the biodeterioration of stone embankments of Lungotevere (Rome)[J]. International Biodeterioration & Biodegradation,2012,**72**:31 – 41.

[95] BARTOLI F, MUNICCHIA A C, FUTAGAMI Y, *et al*. Biological colonization patterns on the ruins of Angkor temples (Cambodia) in the biodeterioration vs bioprotection debate[J]. International Biodeterioration and Biodegradation,2014,**96**:157 – 165.

[96] SALVADORI O, NUGARI M P. The effect of microbial growth on synthetic polymers used on works of art[M]. Dordrecht: Springer, 1988.

[97] 冯楠. 高句丽石质文物风化机理及保护方法研究[D]. 长春:吉林大学,2008.
FENG Nan. Studies on biodegration mechanism and conservation of the Gaogouli's historic stone[D]. Changchun: Jilin University, 2008.

[98] VILES H A, WOOD C. Green walls? Integrated laboratory and field testing of the effectiveness of soft wall capping in conserving ruins[J]. Geological Society London Special Publications,2007, **271**(1):309 – 322.

[99] LIM A B, HENRY M C, MATERO F G. Greening deterioration: soft capping as preventive conservation for masonry ruin sites[J]. APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology,2013,**44**(2/3):53 – 61.

[100] WOOD C. Soft capping: justifying a return to the picturesque [J]. Context,2005,**90**:22 – 24.

[101] KENT R. Thirlwall Castle: the use of soft capping in conserving ruined ancient monuments [J]. Journal of Architectural Conservation,2013,**19**:35 – 48.

[102] 钟燕,刘雨涵,戴仕炳,等. 中国南方气候环境下"软盖层"保护的模拟实验研究[J]. 文物保护与考古科学,2017,**29**(6):1 – 9.
ZHONG Yan, LIU Yuhan, DAI Shibing, *et al*. Experimental study of soft capping for the protection of wall ruins in Southern China[J]. Sciences of Conservation and Archaeology,2017,**29**(6):1 – 9.

[103] LEE Z, VILES H A, WOOD C H. Soft capping historic walls: a better way of conserving ruins? [M]. London: English Heritage, 2009.

[104] VILES H A, WOOD C, GROVES C C. Soft wall capping experiments[J]. English Heritage Research Transactions,2002 (2):59 – 73.

[105] 刘斌,罗全华,常文哲,等. 不同林草植被覆盖度的水土保持效益及适宜植被覆盖度[J]. 中国水土保持科学,2008,**6**(6):68 – 73.
LIU Bin, LUO Quanhua, CHANG Wenzhe, *et al*. Relationship between percentage of vegetative cover and soil erosion[J]. Science of Soil and Water Conservation,2008,**6**(6):68 – 73.

[106] 王璐艳. 国家考古遗址公园绿化的原则与方法研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013.
WANG Luyan. Studies on the greening principles and methods of the National Archaeological Site Park [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2013.

[107] 樊淳飞. 遗址保护建筑规划设计研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2005.
FAN Chunfei. Study on preservation planning of historical remains[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2005.

[108] 陶刚,申佐军. 大遗址保护若干问题的探讨——就渤海国上京龙泉府遗址保护而谈[J]. 北方文物,2006(1):101 – 105.
TAO Gang, SHEN Zuojun. Discussion on several issues concerning the protection of the great ruins: on the protection of the Longquanfu Ruins in Shangjing, Bohai State [J]. Northern Cultural Relics,2006(1):101 – 105.

[109] 张跃辉,杨洋,鲜文凯. 三星堆遗址环境地质现状评估及问题防治[J]. 四川文物,2005(1):21 – 28.
ZHANG Yuehui, YANG Yang, XIAN Wenkai. Environmental geological status assessment and problem prevention of Sanxingdui site[J]. Sichuan Cultural Relics,2005(1):21 – 28.

[110] 杜维波,汪万福,潘建斌,等. 陇中长城沿线种子植物区系特征与长城保护[J]. 干旱区研究,2013,**30**(2):284 – 290.
DU Weibo, WANG Wanfu, PAN Jianbin, *et al*. Floristic characteristics of seed plant along the Great Wall and protection of the Great Wall in central Gansu Province [J]. Arid Zone Research,2013,**30**(2):284 – 290.

[111] 张博. 不同气候环境下土遗址防风化技术适应性研究[D]. 兰州:兰州大学,2021.
ZHANG Bo. Research on the adaptability of weathering prevention technology in earthen sites under different climatic conditions [D]. Lanzhou: Lanzhou University,2021.

# Advances in research on the effects of plants on rock – soil relics and their conservation technology

YANG Xiaoju[1,2,3], WU Fasi[3], JIA Rongliang[1], GUO Qinglin[3], WANG Yanwu[3], ZHAO Siteng[1,2], ZHAO Xueyong[1,2]

[1. *Naiman Desertification Research Station/Urat Desert – Grassland Research Station, Northwest Institute of Eco – Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
3. *National Research Center for Conservation of Ancient Wall Paintings and Earthen Sites (Dunhuang Academy), Jiuquan* 736200, *China*]

**Abstract**: Due to the instability of the artificial – natural complex ecosystems and the complexity of the preservation environment, rock – soil relics have long been threatened by biotic and abiotic factors. The effects of plants on heritage sites and their protection applications have always attracted much attention. In the summary of relevant research results, it is found that the new on – site protection technology based on plants has advantages such as going green, sustainability and environmental compatibility, environmental protection and easy implementation, and has gradually become an alternative to engineering rescue protection measures for the protection of rammed earth sites. However, the mechanisms of the effects of plants on rock – soil relics are still insufficiently understood and the research technology is limited, with the result that the applications of new technologies of prevention and control lag behind, giving unsatisfactory results. Thus the selection of plant species and their subsequent maintenance on site are difficult, which have made unclear the dialectical relationship between plants and rock – soil relics. In combination with the biological problems faced by cave temples and earthen sites, and in view of the limiting factors for the application of plant protection technologies for sites in arid areas of China, the following perspectives are considered: 1) clarification of the damage and protection mechanisms of plants for rock – soil cultural relics; 2) establishment of a scientific evaluation system to define the positive and negative effects of plants on geotechnical relics in different environments; 3) definition of the interaction between plants within and between species and the key factors driving plants to build on the surface of geotechnical relics; 4) combination of global climate changes to research and develop precise prevention and control technologies for plants harmful to rock and soil cultural relics; 5) screening suitable soft cover plant species and evaluating their protective effects and 6) development of soft capping technology based on BSC, and carrying out assessments of environmental adaptability and protective effects.

**Key words**: Rock – Soil Relics; Biological degradation; Soft capping; Biological soil crust; Cultural relic protection

（责任编辑　谢　燕；校对　张存祖）