城墙劣化规律与机理研究综述

刘笑
百色学院，广西 百色 533000
DOI:10.61369/ERA.2025090033

摘　　要： 城墙作为重要历史遗存，其保护对延续文明脉络至关重要。在自然侵蚀与人为活动的双重影响下，城墙普遍面临不同程度的劣化问题。本文系统梳理了城墙劣化的类型特征及时空分布规律，揭示了物理风化、化学腐蚀、生物侵蚀及人为破坏的作用机理，阐明了环境因素与材料特性的耦合影响机制。研究发现，当前在微观机理解析、多因素耦合作用、长期动态监测及修复技术评估等方面仍存在不足。未来应加强多学科交叉，发展原位监测技术，优化保护材料，构建智能预警体系，为城墙文化遗产的科学保护与可持续利用提供理论依据和技术支撑。
关 键 词： 城墙；劣化规律；劣化机理

A Review of Research on the Laws and Mechanisms of City Wall Degradation

Liu Xiao
Baise University, Baise, Guangxi 533000

Abstract: As an important historical relic, the protection of city walls is crucial for continuing the thread of civilization. Under the dual influence of natural erosion and human activities, city walls generally face varying degrees of degradation. This article systematically summarizes the types, characteristics, and spatiotemporal distribution patterns of city wall degradation, reveals the mechanisms of physical weathering, chemical corrosion, biological erosion, and human destruction, and clarifies the coupling influence mechanism of environmental factors and material properties. The study found that there are still deficiencies in micro-mechanism analysis, multi-factor coupling effects, long-term dynamic monitoring, and evaluation of restoration techniques. In the future, it is necessary to strengthen multidisciplinary collaboration, develop in-situ monitoring technology, optimize protective materials, and construct an intelligent early warning system to provide theoretical basis and technical support for the scientific protection and sustainable utilization of city wall cultural heritage.
Keywords: city wall; degradation law; degradation mechanism

引言

城墙作为人类文明的独特见证，其形态从原始夯土结构到精工砖石体系，生动记录了社会发展、军事变革、工艺演进与集体记忆。这些历经岁月洗礼的构筑物既是工程技术杰作，又是文化象征载体。然而，这些历史建筑正面临着严峻的保存挑战：在自然环境作用与人类活动影响的双重影响下，墙体材料逐渐退化、结构性能持续衰减，这一系统性损伤过程被定义为“劣化现象”。该过程不仅危及建筑本体的稳定性，更可能造成珍贵历史记忆的永久性缺失。

本文旨在系统梳理国内外关于城墙劣化现象、规律与机理的研究进展。通过分析物理、化学、生物及人为驱动下的劣化过程，探讨材料特性与环境因素的交互作用，评估当前研究的成就与局限，并展望未来研究方向，为城墙保护的理论深化与实践创新提供系统参考。

一、城墙劣化现象与类型

城墙劣化呈现复杂多样性，依据主导因素可系统分类如下：

（一）物理风化主导型劣化

表面剥落与粉化：最常见现象之一。材料表层因反复冻融循环、干湿交替产生的内应力而开裂、起皮、成片或成粉状脱落。砖石城墙表面酥碱、夯土城墙表面严重起砂均属此类[1]。

开裂与裂隙发育：温度梯度引发的热胀冷缩、不均匀沉降、结构荷载变化或地震活动导致墙体产生宏观裂缝或微观裂纹。裂隙为水、盐、生物侵入提供通道，加速内部劣化[2]。

溶蚀与掏蚀：水流对可溶性胶结物或细小颗粒的持续冲刷、溶解和搬运作用，导致墙体表面形成凹槽、孔洞或内部形成空

项目信息：2022年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目：桂林宋静江府城墙劣化规律与机理研究 (2022KY0730)。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

洞，在城墙根部、排水不畅部位尤为显著。

变形与位移：长期荷载、基础失稳、冻胀作用或地震影响导致墙体发生倾斜、鼓胀、下沉等整体或局部变形，威胁结构安全。

（二）化学腐蚀主导型劣化

盐害：最具破坏性的劣化之一。可溶性盐分通过毛细作用、雨水或地下水迁移至墙体[3]。在温湿度变化驱动下，盐分在孔隙中反复结晶－溶解，产生巨大结晶压力，导致材料由表及里层层剥落。盐分还可与墙体材料（如砖中的铝硅酸盐、灰浆中的水化产物）发生化学反应，生成膨胀性新矿物（如钙矾石），加剧破坏。

酸雨、酸雾腐蚀：大气污染物（SO_2、NOx）形成的酸雨或酸雾与石材（碳酸钙）、砖块或灰浆中的碱性成分发生中和反应，导致材料溶解、表面形成难溶石膏壳或直接造成表面流失。

氧化与水解：金属构件的锈蚀不仅自身破坏，锈蚀产物体积膨胀还对周边砌体产生挤压破坏。一些矿物在潮湿环境下会发生水解反应，改变其性质。

（三）生物侵蚀主导型劣化

植物破坏：高等植物根系深入墙体裂缝或薄弱部位，产生强大的根劈作用，导致砌体松动、开裂。植物分泌的有机酸也具有腐蚀性。其冠部还影响排水、加重荷载。

微生物侵蚀： 低等生物在墙体表面或内部生长。它们通过物理楔入、分泌有机酸溶解矿物、改变局部微环境等方式破坏材料。微生物活动形成的生物膜还会加速水分滞留和污染物吸附。

（四）人为活动诱发的劣化

人为因素对城墙的劣化主要表现为：不当维修使用不兼容材料和工艺加速损坏，工业污染和尾气引发墙体化学腐蚀，交通振动导致结构疲劳松动，以及游客活动造成的物理磨损和微环境改变。

二、城墙劣化规律

劣化在城墙上的发生发展并非随机，展现出显著的时空规律性：

（一）空间分布规律

垂直分带性：

顶部与上部：直接暴露于降雨、日晒、强风、冻融循环，物理风化和酸雨腐蚀严重。易积水处盐害也显著。植物易在墙顶生长。

中部：相对受极端天气影响较小，但易受毛细水上升带影响，是盐分富集和结晶破坏的典型区域。生物膜在遮阴潮湿面发育。

根部与基础：长期处于潮湿环境，毛细水上升终点区盐分浓度高，盐害严重。易受地表水冲刷、溅水侵蚀和微生物侵害。地下水位变化或排水不畅易导致基础材料软化、掏蚀[4]。

方位差异性：

迎风面主要遭受风雨冲刷和酸雨侵蚀，背风面易形成潮湿微环境导致生物滋生和盐分结晶；向阳面因温度剧烈波动加速物理风化，而背阴面则因持续高湿度促进生物生长和盐分循环。

（二）时间演化规律

城墙劣化呈现阶段性（潜伏－加速－稳定）、周期性（季节性气候驱动）和长期累积性（微小损伤非线性叠加）的时变特征，其中盐害和冻融破坏在特定季节呈现显著加速效应，而人为活动可能改变长期劣化趋势。

（三）环境影响因素的作用规律

环境因素对城墙劣化的影响呈现以下规律：水分作为关键介质，通过多种途径（降雨、毛细作用等）参与各类劣化过程；温湿度波动驱动多种物理化学循环（冻融、盐分结晶等），其变化幅度和频率直接影响劣化速率；盐分特性（种类、浓度）决定其破坏机制和强度；污染物浓度与酸性腐蚀程度呈正相关；生物活性则受微环境条件和基质特性的共同调控。这些因素相互作用，共同构成城墙劣化的环境驱动机制。

三、城墙劣化机理

深入理解劣化发生的物理、化学和生物学原理至关重要：

（一）物理风化机理

冻融循环破坏：水结冰时体积膨胀约9%。当墙体孔隙水饱和度超过临界值（约91%），结冰产生的巨大压力超过材料抗拉强度，导致孔隙壁破裂。反复冻融使损伤累积扩大。饱和程度、冻结速率、孔隙结构是关键影响因素[5]。

盐结晶压力：盐溶液在孔隙中过饱和结晶时，晶体生长受到孔隙壁约束，产生巨大的结晶压力，远超大多数墙体材料的强度，导致材料破裂。破坏程度取决于盐的种类、溶液浓度、蒸发速率、孔隙结构和材料强度[6]。

水合压力：某些盐类（如 Na_2SO_4）在温度、湿度变化时会发生水合物相变、伴随显著的体积变化、，产生类似结晶压力的破坏力。

热应力破坏：材料具有热膨胀系数。当城墙不同部位或不同材料经历的温度梯度或变化速率不同时，产生的热胀冷缩差异会引发内部应力，导致开裂。日温差大、材料导热性差或热膨胀系数差异大时尤甚。

干湿循环应力：材料吸水膨胀、失水收缩。这种反复的体积变化在材料内部或不同材料界面产生应力，导致微裂纹产生和扩展，尤其在含膨胀性黏土矿物的夯土或劣质砖石中显著。

（二）化学腐蚀机理

溶解作用：水（尤其是酸性水）直接溶解墙体中的可溶性组分，如石灰石、石灰灰浆中的氢氧化钙和碳酸钙、夯土中的胶结物或盐分。导致材料流失、孔隙率增大、强度降低。酸－碱反应：酸性降水或大气中的酸性气体溶解后与墙体材料中的碱性成分发生中和反应。例如：

$CaCO_3 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O$（石膏）$+ CO_2 \uparrow$

生成的石膏溶解度低，可能在表面形成结壳或在内层孔隙中结晶造成破坏。反应消耗了原始材料，使其劣化[7-8]。

水化、水解反应：某些矿物与水反应生成新矿物，体积可能

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

膨胀（如黏土矿物的水化膨胀）。水分子也可能破坏矿物晶格中的化学键（水解），使其分解，降低材料稳定性。

氧化反应：铁质构件在水和氧气作用下发生电化学腐蚀：

$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$（阳极氧化）

$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$（阴极还原）

生成疏松多孔的铁锈（主要成分 FeOOH, $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ 等），体积膨胀数倍，挤压周边砌体。

（三）生物侵蚀机理

生物侵蚀对城墙材料的破坏机制可分为三类：物理性破坏主要表现为植物根系和微生物菌丝的机械楔入作用，导致裂隙扩展和结构松动[9]；化学性侵蚀包括微生物代谢产生的酸碱物质对矿物的溶解作用，以及氧化还原反应引发的矿物转化；生物化学作用则通过分泌胞外聚合物改变材料表面特性，形成利于其他劣化过程发生的微环境。这些机制协同作用，共同加速城墙材料的性能退化[10]。

（四）材料特性与劣化的内在关联

城墙自身的材料特性是其抵抗或易受劣化的根本内因[11-12]：

（1）化学组分方面，含可溶盐、膨胀性黏土或碳酸盐的材料易受盐害、干湿循环和酸蚀；

（2）孔隙特征中，孔径分布和连通性主导水盐运移，中孔隙（0.1-10μm）最易引发结晶破坏；

（3）力学性能决定抗应力能力，低强度、高脆性材料更易开裂；

（4）构筑工艺中，排水系统缺陷和材料热力学参数不匹配是劣化主因。这些内因通过调控水－热－盐－力的传输与转化过程，最终决定城墙的耐久性表现。

四、结论

研究表明，城墙劣化具有显著的空间分异和时间演化规律。物理风化和化学腐蚀是导致材料性能衰退和结构破坏的主要力量，而生物侵蚀和人为活动则扮演着重要的加剧或诱发角色。材料自身的孔隙结构、矿物组成、力学性能及其与环境的相互作用是决定劣化类型和速率的内因。

当前城墙劣化研究虽取得显著进展，但仍存在若干关键挑战：在机理层面需深化微观－介观尺度认知，加强多场耦合作用解析；在技术层面缺乏长期监测数据和保护效果评估体系；在应用层面亟待完善标准规范。未来研究应重点突破以下方向：1）发展多学科融合的创新研究方法；2）建立智能监测与预警技术体系；3）揭示多因素协同作用机制；4）研发生态友好型保护材料；5）构建全生命周期保护评估框架。通过系统性研究和技术创新，为城墙文化遗产的科学保护和可持续传承提供有力支撑。

参考文献

[1] 张虎元，王旭东，李最雄 . 土建筑遗址冻融耐久性研究 [J]. 岩石力学与工程学报，2005，24(1)：5158-5163.

[2] 严绍军，刘佑荣 . 石质文物风化机理与保护方法 [M]. 北京：科学出版社，2012：78-92.

[3] 和法国，谌文武，韩文峰 . 西北干旱区土遗址盐害发育机理 [J]. 岩土工程学报，2010,32(6)：963-969.

[4] 李黎，邵明申 . 南京明城墙砖体盐害分布规律研究 [J]. 建筑科学，2016,32(4)：1-7.

[5]Hall, K., & Andr é , M.F.Rock thermal data at the grain scale:Applicability to granular disintegration[J]. Geomorphology,2023,55(1-4), 29-42.

[6]Steiger, M., & Asmussen, S. Crystallization of sodium sulfate phases in porous materials[J]. Environmental Geology, 2008,56(3), 605-621.

[7] 王思敬，黄克忠 . 文物建筑化学风化与保护技术 [M]. 北京：中国建筑工业出版社，2008：112-135.

[8] 潘别桐，黄克忠 . 石材的污染与清洗技术 [J]. 文物保护与考古科学，1995，7(2)：28-35.

[9] 孙满利，李最雄 . 植物根系对交河故城遗址的破坏机理 [J]. 岩土力学，2008，29(7)：1887-1892.

[10]Warscheid, T., & Braams, J.Biodeterioration of stone: A review[J]. International Biodete-rioration & Biodegradation, 2000,46(4), 343-368.

[11] 黄克忠 . 文物建筑材质劣化病理诊断 [M]. 北京：文物出版社，2015：53-78.

[12]Benavente, D., et al. Durability estimation of porous building stones[J]. Engineering Geology, 2004,74(1-2), 113-127.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.