•丝绸之路岩土质文化遗产劣化机制与科学防治•

DOI:10.12454/j.jsuese.202600401

本刊网刊

西北地区典型夯土遗址根部毛细上升环境–结构协同驱动一维高度模型

文祥宇[1,2,3],裴强强[1,2,3],孙雅诗[1,2,3],王冠众[1,2,3],刘洪珂[1,2,3],崔　凯[1,2,3*]

(1.兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室,甘肃 兰州 730050;2.中国–吉尔吉斯斯坦文化遗产保护"一带一路"联合实验室,甘肃 敦煌 736200;3.兰州理工大学 丝绸之路文化遗产保护研究院,甘肃 兰州 730050)

摘　要:夯土遗址根部毛细上升驱动的水盐迁移与富集,是诱发夯土遗址掏蚀边界形成和演化的重要内在过程,其早期有效毛细作用尺度直接关系到根部病害范围识别与水盐劣化风险判定,而现有计算模型多基于理想孔隙或简化边界,难以对其进行有效表征。本文在厘清经典一维毛细高度模型物理意义及适用边界的基础上,以西北地区5个气候区的25处典型夯土遗址为对象,开展现场勘察、原位毛细上升试验、吸水–蒸发参数测试、CT细观结构测定和4 km格点气象数据提取,识别结构约束变量与气候边界效应,构建环境–结构协同驱动一维高度模型。结果表明:现有经典模型的计算结果均显著高于现场实测掏蚀高度,难以直接表征掏蚀边界形成的早期有效毛细作用范围。25处遗址实测毛细上升高度与现状掏蚀边界高度呈气候区主导的时空分异特征,在气候区–朝代双重约束下存在显著响应耦合关系;以该关系为约束,将吸水率与蒸发速率量化为过程驱动项,选取4项核心结构约束变量,在引入多气象参数构建的连续气候边界函数后,模型在20组训练样本与5组验证样本中的决定系数(R^2)分别达到0.86和0.93,拟合精度与泛化能力满足研究及工程需求。

关键词:夯土遗址;掏蚀病害;一维高度;细观结构;协同驱动

中图分类号:TU411　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)06-0028-13

夯土遗址广泛分布于中国西北地区,其长期服役过程中普遍受到水分迁移、盐分富集及环境侵蚀等因素的共同作用,导致遗址本体掏蚀、片状剥离、开裂坍塌等一系列病害频发[1–2]。夯土遗址掏蚀病害因其直接削弱墙体整体稳定性,是影响夯土遗址赋存的关键病害之一[3]。遗址根部毛细作用所驱动的水分持续上升及其伴随的盐分迁移,被认为是掏蚀病害形成与发育的重要控制过程[4–5],其沿墙体垂向发育的高度,是表征病害发育程度、揭示作用机制并建立定量模型的关键几何尺度[6–7]。但是,现有一维毛细高度模型多建立在理想孔隙或简化边界条件之上,难以直接表征夯土遗址根部一维高度响应。其中,Hazen公式[8]主要基于粒径经验关系,Jurin模型[9]对应理想毛细管静力平衡,Lucas–Washburn模型[10–11]则描述液体毛细上升动力学过程。上述经典模型为认识毛细上升过程提供了基本物理参照,但真实遗址根部的毛细上升一维高度不仅受供水与蒸发边界影响,还依赖孔隙结构所决定的液相通道连续性和迁移阻力,因此有必要综合考虑环境边界与孔隙结构的共同约束。

在遗址实际赋存环境中,降雨、蒸发势、风速和温度差共同决定遗址根部水分输入、蒸发耗散和盐分富集背景[12–13],而孔隙连通性、颗粒尺度、配位关系和孔隙网络复杂性则控制液相通道连续性与迁移阻力[14–16]。同时,长期水盐迁移和蒸发结晶会持续改造孔隙结构,结构退化又限制了毛细水有效上升范围。因此,根部毛细上升一维高度并非单一毛细过程的几何结果,而是受到环境边界与夯土细观孔隙结构的协同影响。

基于上述认识,以西北地区5个气候区25处典型夯土遗址为研究对象,将现状掏蚀高度作为长期水盐

收稿日期:2026–05–18　**修回日期:**2026–07–10　**网络出版日期:**2026–09–05

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFF0905902;2025YFE0211602);甘肃省创新平台计划项目(26JDWF001)

作者简介:文祥宇(1999—),男,博士生. 研究方向:岩土工程、地质工程、岩土质文物保护. E-mail:251081401002@lut.edu.cn

* **通信作者:**崔　凯,教授, E-mail:cuik09@lut.edu.cn

迁移与风化劣化后形成的可观测边界尺度，结合现场毛细上升试验、吸水–蒸发参数测定、CT 细观孔隙结构表征和区域气象资料，分析夯土遗址根部一维高度响应的时空分异规律及环境–结构协同关联。在此基础上，构建由吸水–蒸发过程项、细观结构约束项和连续气候边界项组成的环境–结构协同驱动一维高度模型，为西北地区夯土遗址根部毛细上升高度尺度的定量表征提供方法与依据。需要说明的是，本文所述一维高度模型并非假定遗址根部水分迁移为严格一维流动，而是对掏蚀边界形成中的垂向高度尺度进行一维化表征。模型以墙体根部毛细作用区的高度边界为对象，将蒸发、结构及气候影响通过参数加以体现。

1　现有一维毛细高度模型适用性分析

毛细上升高度表征多孔介质中液态水在毛细驱动下形成的有效垂向作用尺度，是解释夯土遗址根部水盐迁移与掏蚀边界形成的关键量。现有一维毛细高度模型虽可提供理论参照，但其孔隙假设、边界条件和终止准则并不一致，其计算结果是否可定量表征影响掏蚀边界形成的有效毛细作用尺度，仍需结合现状掏蚀边界加以检验。经典一维毛细模型主要包括 Hazen 公式、Jurin 模型及 Lucas–Washburn 模型[17–20]，3 类模型的物理出发点和适用边界并不相同。Hazen 公式通常将多孔介质等效为由有效粒径控制，其计算高度 h_H 主要受特征粒径控制，可表示为：

$$h_H = \frac{c}{d_{10}} \tag{1}$$

式中，d_{10} 为有效粒径，c 为经验系数。该公式本质上反映粒径尺度对毛细高度的经验约束，未明确考虑蒸发边界、孔隙连通性及孔隙网络阻力。

Jurin 模型基于单根圆柱毛细管中毛细压力与重力平衡，其计算高度 h_J 可表示为：

$$h_J = \frac{2\sigma\cos\theta}{\rho g r} \tag{2}$$

式中，σ 为液体表面张力，θ 为接触角，ρ 为液体密度，g 为重力加速度，r 为等效毛细管半径。该模型适用于理想、连续、规则毛细管条件，不包含蒸发耗散、孔喉突变、非均质结构及长期水盐损伤效应。

Lucas–Washburn 模型描述液体在毛细通道中的非稳态上升过程，其基本形式可表示为：

$$h^2 = \frac{r\sigma\cos\theta}{2\mu}\cdot t \tag{3}$$

式中，μ 为动力黏度，t 为时间，h 为液体在毛细通道中的上升高度。该模型强调液体上升高度随时间的演化，但若不额外给定蒸发、供水持续时间或平衡终止条件，本身并不提供唯一的终止高度。

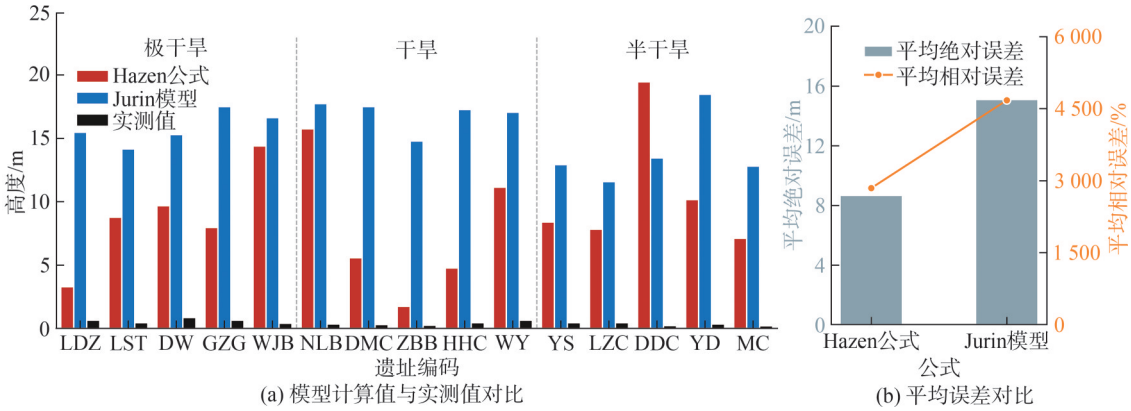
考虑到 Lucas–Washburn 模型描述的是上升动力过程，本身不提供自然定义的终止高度，且其输出高度依赖时间尺度与附加边界条件设定，故本文仅选取其他两个模型计算，不将其纳入静态高度的定量对比。选取前期研究过的 15 处遗址作为典型案例进行对比分析，前期研究对上述遗址进行现场勘察并直接测量获得遗址现状掏蚀高度实测值，且孔隙参数、等效孔喉尺度、吸水率、蒸发速率等基础数据均已获得[21]。为保证不同经典模型之间具有可比性，模型中，水的密度 ρ、重力加速度 g、接触角 θ 及表面张力 σ 均采用经典毛细模型常用物性参数，其余参数采用文献[21]的推荐值，具体取值见表 1。

表 1　模型相关参数

Tab. 1　Parameters related to the model

参数	g/(m·s^{-2})	ρ/(kg·m^{-3})	θ	σ/(N·m^{-1})	c
数值	9.81	1 000	0	0.065	1.0×10^{-5}

两种理论模型计算结果对比如图 1 所示（遗址编码参见表 2）。由图 1 可知，Hazen 公式和 Jurin 模型计算高度均明显高于遗址现场实测掏蚀高度，其中，Jurin 模型计算值为 11.52～17.21 m，Hazen 公式为 3.24～7.77 m，而对应实测掏蚀高度均小于 1 m，表现出显著



(a) 模型计算值与实测值对比　　(b) 平均误差对比

图 1　两种理论模型计算结果对比

Fig. 1　Comparison of results from two theoretical models

的系统性高估。对比结果表明，现有一维毛细模型尚不能直接表征现场掏蚀高度。鉴于夯土遗址复杂的赋存环境及修建材料的非均质性，真实孔隙结构条件与环境边界差异可能是造成偏离的重要原因。

2 现场试验与室内测试

基于第 1 节的分析，现有一维毛细高度模型难以直接表征遗址根部真实环境下的有效毛细上升尺度，理想孔隙假设或经验粒径关系尚不足以解释现场高度响应与理论计算结果之间的偏离。该偏离可能与遗址材料细观孔隙结构的非均质性及长期环境边界条件的复杂性有关。为识别上述因素的影响，研究选取覆盖 5 个气候区的 25 处典型夯土遗址，开展现场勘测、毛细上升试验及 CT 细观结构测试，获取掏蚀高度、实测毛细高度、吸水–蒸发参数和细观结构指标。选取遗址的基本特征见表 2。

表 2 25 处典型夯土遗址基本特征

Tab. 2 Basic characteristics of twenty-five typical rammed earth sites

遗址名称	修筑朝代	气候特征	编码	遗址名称	修筑朝代	气候特征	编码
雷墩子	汉	极端干旱	LDZ	永登明长城	明	半干旱	JT
老师兔	唐	极端干旱	LST	满城	清	半干旱	MC
墩湾	宋	极端干旱	DW	窑子湾	汉	半湿润	YZW
高闸沟	明	极端干旱	GZG	秦王寨	唐	半湿润	QWZ
五截堡	清	极端干旱	WJB	白石咀	宋	半湿润	BSZ
南乐堡	汉	干旱	NLB	吴起明长城	明	半湿润	GCC
大庙城	唐	干旱	DMC	南廉堡	清	半湿润	NL
回回城	宋	干旱	HHC	尕次古城	汉	高寒阴湿	GCGC
永昌明长城	明	干旱	YC	杨家城	唐	高寒阴湿	YJC
文一	清	干旱	WY	丹阳故城	宋	高寒阴湿	DYGC
玉山	汉	半干旱	YS	佛馆堡	明	高寒阴湿	HZ
柳州城	唐	半干旱	LZGC	董家湾	清	高寒阴湿	DJW
等等城	宋	半干旱	DDC				

2.1 现场试验

夯土遗址根部现场勘察与水分迁移参数测试流程见图 2。首先，对各遗址根部掏蚀区进行现场测量（图 2(a)），记录掏蚀高度。现场毛细上升高度采用墙体根部原位供水试验测定。在墙体根部外侧开挖供水槽，清理松散堆积物并平整槽底，使供水槽与墙体根部充分接触。试验过程中采用分次定量注水方式维持近似稳定的自由水边界，避免一次性大量注水造成墙体表层冲刷或局部渗流破坏。开始供水后，按固定时间间隔记录墙体表面可见湿润前锋的垂向上升高度，并持续观察其变化过程。当湿润前锋高度连续 30 min 未出现可辨识的继续上升或其变化幅度小于现场测量分辨率时，判定毛细上升过程达到稳定状态，并将此时记录的高度作为该遗址现场条件下的最大毛细上升高度。



(a) 夯土遗址根部现场勘察　　(b) 遗址水分迁移参数测试

图 2 夯土遗址根部现场勘察与水分迁移参数测试流程

Fig. 2 Field investigation and water-migration parameter testing workflow at the wall toe of rammed earth sites

同时，在遗址邻近暴露或坍塌部位采集夯土样品，制备 7 cm×7 cm×7 cm 试样，用于测定吸水率 S 和蒸发速率 E（图 2(b)）。试验时，将试样底部与自由水面接触，保持供水边界稳定，并按固定时间间隔称量试样质量。t 时刻单位面积累积吸水量 $I(t)$ 按式（4）进行计算：

$$I(t)=(m_t-m_0)/A_{\mathrm{w}} \tag{4}$$

式中，m_0 和 m_t 分别为试样初始质量和 t 时刻质量，A_{w} 为受水面积。

蒸发速率 E 采用现场自然蒸发质量损失法测定，用于表征遗址现场环境边界下试样的表观蒸发耗散能力。试样经充分吸水后擦除表面自由水，随后置于遗址现场开放环境中自然蒸发，并按固定时间间隔称量质量变化。蒸发速率按式（5）计算：

$$E=\Delta m/(Z\cdot\Delta t) \tag{5}$$

式中，Δm 为相邻测试时段内试样质量损失，Z 为试样蒸发表面积，Δt 为测试时间间隔。

本文蒸发速率并非在恒温恒湿条件下获得的材料固有参数，而是在各遗址现场环境条件下测得的现场表观蒸发速率。该处理方式基于本文研究对象的特殊性：夯土遗址根部毛细上升过程发生于开放环境中，蒸发耗散不仅受材料孔隙结构影响，也受遗址所在区域温度、湿度、风速等现场边界共同控制。因此，在现场条件下测定蒸发速率能够更直接地反映各遗址根部毛细水分迁移过程中的实际蒸发耗散差异。

2.2　室内测试

在 25 处遗址掏蚀或坍塌暴露邻近部位采集夯土样品，采用天津三英精密公司生产的 nanoVoxel–2600 开管透射式高分辨率 CT 系统开展细观结构扫描。扫描参数为 130 kV 和 165 μA，按自上而下顺序完成样品扫描，获取试样断层图像，单幅图像大小为 2 400 像素×2 400 像素，最小细节分辨能力为 25.8 μm。利用 Voxelstudio Recon 软件完成三维重建并生成 Raw 数据，随后导入 Avizo 软件进行图像裁剪、滤波降噪、阈值分割和三维重构，提取平均颗粒半径、平均扁平度、连通孔隙率、平均分形维数、平均配位数、平均孔喉等效半径和迂曲度等细观结构参数，具体流程如图 3 所示。本文定义迂曲度 τ 为孔隙网络中液相实际迁移路径长度与样品两端直线距离之比，用以表征孔隙通道的弯曲程度和迁移路径的复杂性，具体表达为：

$$\tau=L_e/L \tag{6}$$

式中，L_e 为基于三维孔隙网络识别得到的等效连通路径长度，L 为沿主迁移方向的样品几何长度。

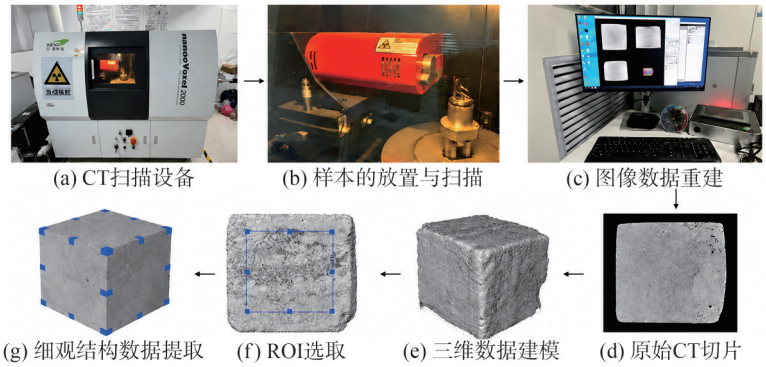


图 3　基于 CT 图像的夯土细观结构数据提取流程

Fig. 3　Workflow for extracting mesoscopic pore-structure data from CT images of rammed earth

2.3　试验与测试结果

夯土遗址根部一维高度响应及环境–结构指标的气候区–朝代分布特征如图 4 所示。图 4 表明：1）25 处典型夯土遗址毛细高度与掏蚀高度在气候分区与朝代尺度下的空间演变规律一致。从极端干旱区至高寒阴湿区，二者呈先降后升再降的变化，半湿润区数值最高，整体呈现气候区分异主导、朝代分组波动叠加的分布特征。2）25 处典型遗址夯土的平均颗粒半径、平均配位数、平均分形维数、平均孔喉等效半径、平均扁平度、迂曲度和连通孔隙率沿气候区梯度总体呈现先升高、再降低、随后再升高的变化特征，与实测毛细高度和掏蚀高度的变化呈现相反的趋势。3）25 处典型遗址夯土的吸水率和蒸发速率均沿气候区梯度呈现先升高、再降低、随后连续升高的变化特征，与实测毛细高度和掏蚀高度的变化亦呈现相反的趋势；其中，吸水率在半湿润区与实测毛细高度和掏蚀高度呈现一致的高值对应。

综上，25 处典型遗址夯土的细观结构指标及蒸发速率与实测毛细高度和掏蚀高度在气候区梯度上呈

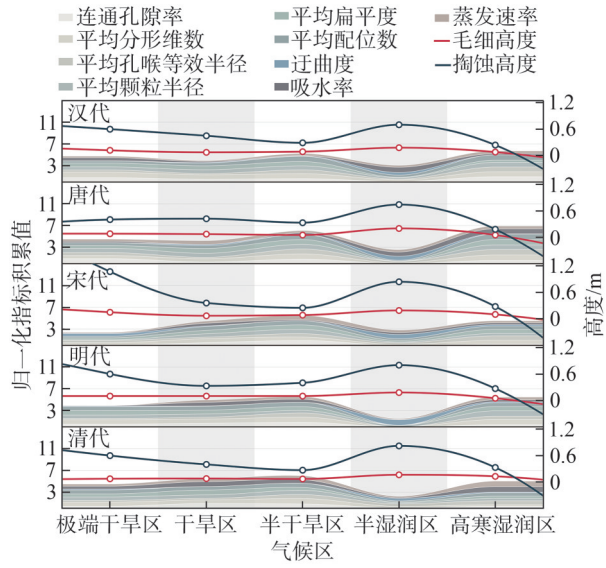


图 4　夯土遗址根部一维高度响应及环境–结构指标的气候区–朝代分布特征

Fig. 4　Climatic-zone and dynastic distribution of one-dimensional basal capillary-rise height response and environmental–structural indicators in rammed-earth heritage sites

现规律性的反向对应关系，吸水率与实测毛细高度和掏蚀高度的高值区存在一定一致性。

2.4 相关性分析

为进一步揭示实测毛细高度、掏蚀高度及过程–结构指标之间的对应关系，采用Spearman相关性分析评价吸水–蒸发参数、细观结构指标与两类高度响应之间的关系，结果如图5所示。由图5可知：1）掏蚀高度与实测毛细高度呈较强正相关，相关系数为0.65，表明二者在样本尺度上具有较明确的统计对应关系。2）吸水率与掏蚀高度和实测毛细高度均呈正相关，相关系数分别为0.80和0.50；蒸发速率与二者均呈负相关，相关系数分别为−0.79和−0.54，即吸水–蒸发参数与两类高度指标具有一致的相关方向。3）平均颗粒半径、平均配位数、平均分形维数和连通孔隙率与掏蚀高度的相关系数分别为−0.76、−0.67、−0.60和−0.52，与实测毛细高度相关系数分别为−0.70、−0.63、−0.53和−0.58，表现出方向一致的统计关系。4）从细观机制上看，上述负相关关系可理解为孔隙结构对毛细连续输运路径的削弱作用：颗粒尺度增大及分形维数、配位数提高，对应孔隙尺度分布更离散、通道更弯曲，使液相迁移路径延长并产生局部阻滞与分流，从而降低有效上升能力；在劣化后的夯土中，连通孔隙率升高可能伴随大孔隙和裂隙发育，削弱毛细连续性，进一步限制毛细上升高度。

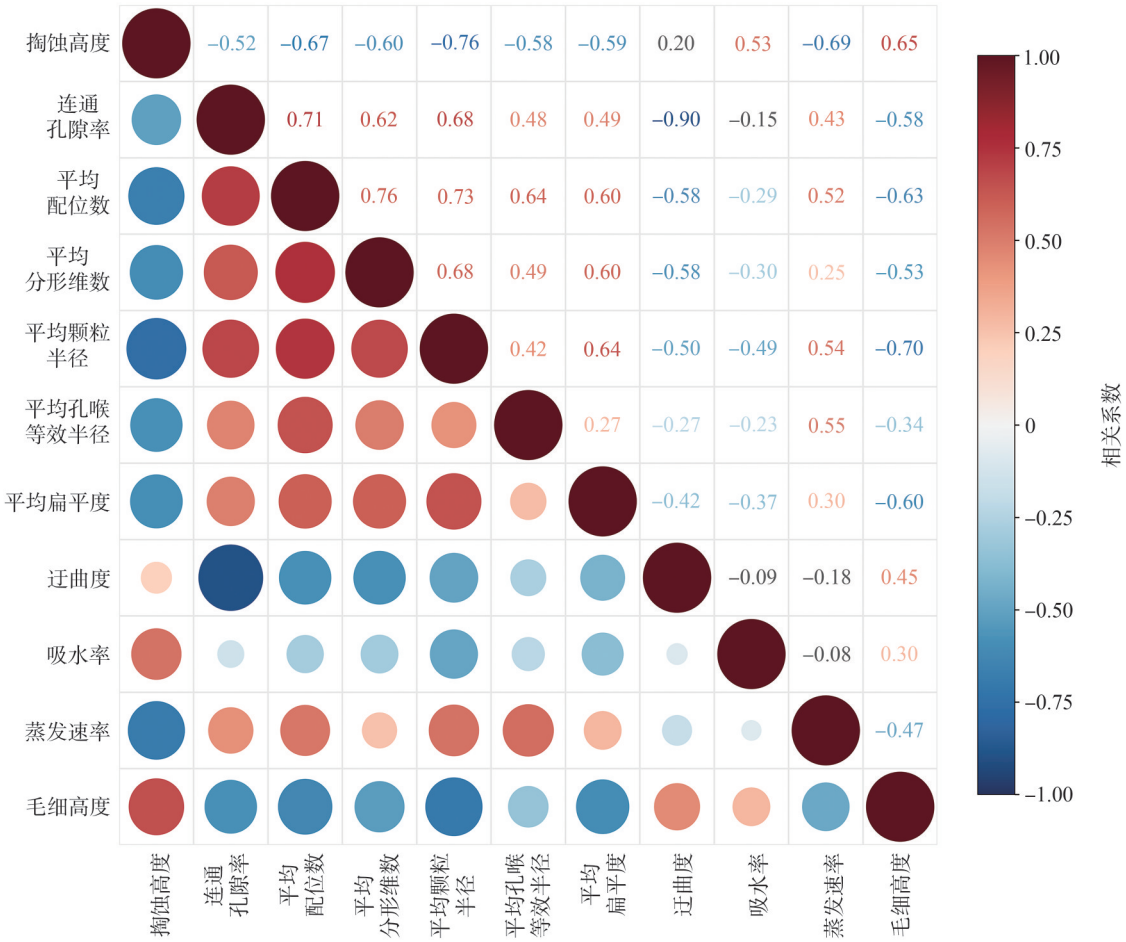


图5 夯土遗址根部一维高度响应与环境–结构指标相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between one-dimensional basal capillary-rise height response and environmental–structural indicators in rammed-earth heritage sites

综上所述：掏蚀高度与实测毛细高度在变化趋势和统计关系上具有一致性，可作为后续根部毛细上升一维高度模型的约束尺度；吸水率和蒸发速率构成吸水–蒸发过程项，可为模型提供基准尺度；平均颗粒半径、平均配位数、平均分形维数和连通孔隙率兼具较高相关性和明确的结构含义，可选取作为细观结构约束项。

3 环境–结构协同驱动的毛细上升一维高度模型

3.1 模型构建及参数确定

毛细驱动流动是多孔介质中最基本的水分迁移机制之一[4]。经典Lucas–Washburn及其扩展模型表明，液体在多孔结构中的上升过程受毛细供给能力、阻滞

耗散过程及边界条件共同影响，可为本文模型构建提供过程机制参照。对于赋存环境复杂、孔隙形态及通道尺度不均匀的遗址夯土，还需进一步考虑现状细观结构状态与长期环境边界对毛细输运尺度的共同约束作用[22–24]。基于第2节确定的约束尺度及过程–结构变量，以现状掏蚀边界高度为约束，在经典毛细上升理论基础上构建由吸水–蒸发过程项、细观结构约束项和环境边界项组成的半经验一维高度模型。模型以根部毛细作用区沿墙体高度方向的边界高度为唯一表征量，不对水分迁移路径作严格一维假定。

前期已对夯土遗址根部吸水–蒸发约束下的毛细上升过程开展部分研究[21]，为吸水–蒸发过程项的构建提供了参考。考虑到其与本文的表征对象和边界条件存在一定差异，故不直接沿用其高度计算形式，而是将吸水与蒸发之间的供给–耗散关系转化为吸水–蒸发过程项，据此定义第 i 个遗址样本的基准过程尺度 $h_{\mathrm{p},i}$，如式(7)所示：

$$h_{\mathrm{p},i}=S_i\sqrt{\frac{1}{3\times0.9\times E_i}} \tag{7}$$

式中，S_i 为吸水能力参数，E_i 为蒸发耗散参数。

根据前文相关性分析结果，选取连通孔隙率、平均配位数、平均分形维数和平均颗粒半径4个指标，将其联合定义为现状细观结构状态变量，并采用乘性幂函数形式表征其对基准过程尺度的非线性调制作用，据此得到复合结构控制项 $F_{\mathrm{s},i}$，如式(8)所示：

$$F_{\mathrm{s},i}=\phi_{\mathrm{c},i}^{a_1}C_{\mathrm{n},i}^{a_2}D_{\mathrm{f},i}^{a_3}\left(\frac{R_{\mathrm{p},i}}{R_{\mathrm{p,ref}}}\right)^{a_4} \tag{8}$$

式中：$\phi_{\mathrm{c},i}$ 为连通孔隙率；$C_{\mathrm{n},i}$ 为平均配位数；$D_{\mathrm{f},i}$ 为平均分形维数；$R_{\mathrm{p},i}$ 为平均颗粒半径；$R_{\mathrm{p,ref}}$ 为参考颗粒半径，用于无量纲化处理；a_1～a_4 为待定结构参数。为保证颗粒半径项在模型中的无量纲表达，将平均颗粒半径 $R_{\mathrm{p},i}$ 以参考颗粒半径 $R_{\mathrm{p,ref}}$ 进行归一化处理，并构造 $(R_{\mathrm{p},i}/R_{\mathrm{p,ref}})^{a_4}$ 项，本文取遗址样本平均颗粒半径作为参考值，取 $R_{\mathrm{p,ref}}$=1.694，以增强参数估计的稳定性。

考虑到研究样本跨越多个气候区，根部毛细上升一维高度还可能受到长期环境边界差异的调制。为避免在该阶段预设具体气象函数，先将气候区差异概化为综合环境系数 K_{c}，表征不同区域长期环境背景对边界约束尺度的整体影响。在吸水–蒸发过程项、细观结构项和环境边界项共同调制的假设及一维化表征条件下，建立夯土遗址根部毛细上升一维高度 $H_{\mathrm{u},i}$ 的表达式：

$$H_{\mathrm{u},i}=Ah_{\mathrm{p},i}^{m}F_{\mathrm{s},i}K_{\mathrm{c}} \tag{9}$$

式中：A 为尺度系数，用于表示吸收理论表达中未单独展开的常数项；m 为幂指数，用于表征基础毛细高度项对遗址根部毛细上升一维高度的非线性尺度效应。将式(8)代入式(9)得：

$$H_{\mathrm{u},i}=Ah_{\mathrm{p},i}^{m}\phi_{\mathrm{c},i}^{a_1}C_{\mathrm{n},i}^{a_2}D_{\mathrm{f},i}^{a_3}\left(\frac{R_{\mathrm{p},i}}{R_{\mathrm{p,ref}}}\right)^{a_4}K_{\mathrm{c}} \tag{10}$$

式(10)为本文在对经典毛细上升过程认识基础上构建的半经验通式。为便于参数估计，并降低不同量纲变量在乘性模型中的尺度影响，对式(10)取对数可得：

$$\ln H_{\mathrm{u},i}=\ln A+m\ln h_{\mathrm{p},i}+a_1\ln\phi_{\mathrm{c},i}+a_2\ln C_{\mathrm{n},i}+a_3\ln D_{\mathrm{f},i}+a_4\ln\left(\frac{R_{\mathrm{p},i}}{R_{\mathrm{p,ref}}}\right)+\ln K_{\mathrm{c}} \tag{11}$$

依托第2节所述25处夯土遗址样本，通过随机分层抽样方法，选取五截堡(极端干旱区)、回回城(干旱区)、玉山(半干旱区)、南廉堡(半湿润区)、董家湾(高寒阴湿区)5处遗址作为独立验证集，其余20处遗址作为训练集。采用带符号约束的对数线性岭回归方法进行参数估计。惩罚参数通过训练集内交叉验证确定，验证集不参与参数选择、标准化常数计算或模型调参，计算结果见表3、4。

表3　模型参数反演结果

Tab. 3　Inverse modeling results of model parameters

模型参数	A	m	a_1	a_2	a_3	a_4
参数值	0.467	0.030	−0.347	−0.123	−0.010	−0.245

表4　气候区系数 K_{c} 识别结果

Tab. 4　Climate zone correction term inversion results

气候区	极端干旱	干旱	半干旱	半湿润	高寒阴湿
K_{c}	1.000	0.710	0.637	0.745	0.437

表4中，K_{c} 并非最终气象表达式，而是在气候区尺度上识别得到的综合环境系数，用于暂时表征不同区域长期环境背景对边界约束尺度的整体调制作用。引入 K_{c} 可将区域环境差异从过程项和结构项中区分出来，为后续分析环境残差与气候因子关系提供依据。

以20处训练样本完成参数估计后，进一步将5处未参与拟合的遗址作为独立验证集代入模型，以检验其样本外表征能力，结果如图6所示。由图6可知：实测高度与计算高度总体分布于1:1基准线附近，训练集与验证集样本均未出现明显系统性偏离，多数样本位于±15%误差带内。训练集与验证集的均方根误差RMSE均为0.06 m，表明模型综合误差量级约为6 cm；平均绝对误差MAE均为0.05 m，即吸水–蒸发过程项、细观结构约束项和气候区综合环境系数能够较好地表征根部毛细上升一维高度的主体变化。但样本仍存在一定残余离散，表明长期环境背景可能仍对模型剩余变化具有附加影响，需在后续进一步分析。

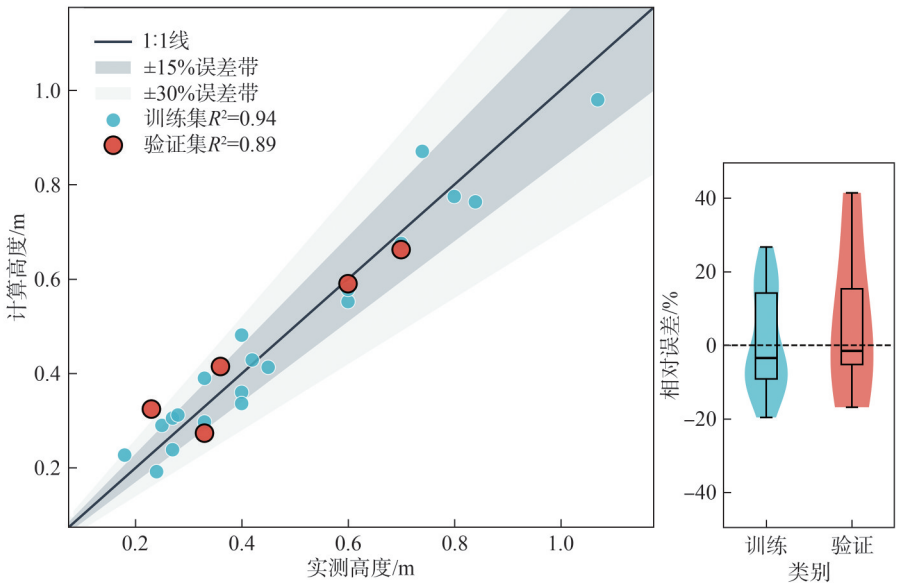


图6 根部毛细上升一维高度计算值与实测值对比及误差分布

Fig. 6 Comparison between calculated and measured one-dimensional basal capillary-rise heights and error distribution

3.2 连续气候边界函数构建

第3.1节表明,在控制吸水–蒸发过程项与复合结构项后,模型计算高度仍表现出一定区域差异,即长期环境背景可能对根部毛细上升一维高度响应具有附加影响。为进一步分析这种区域差异的环境来源,在不重新估计结构项系数的前提下,将原分区综合系数K_c连续化;在不重新估计结构项系数的前提下,提取每个训练站点的环境残差。在对数空间中,定义环境残差为现状约束边界高度扣除吸水–蒸发过程项与细观结构项后的剩余部分,用于表征未被过程项和结构项解释的长期环境边界效应。气候指标采用Zhang等[25]发表的中国4 km逐日格点气象数据集(2000—2020年)。根据25处遗址经纬度坐标,将各遗址匹配至其空间位置对应的最近格点。随后,提取各格点最高气温、最低气温、降水量、平均风速和相对湿度数据,统计多年平均温度差、平均风速、年降水量和相对湿度指标,用于表征遗址所在区域长期气候边界条件。

环境驱动因子分布特征如图7所示。图7表明:1)25处遗址所在区域的气象背景具有明显气候区分异特征。温差、风速、年降水量和相对湿度均表现出较大区间跨度。2)温差整体跨度较大,最高可达约48 ℃,年降水量跨度范围为29.0～480.0 mm,相对湿度整体分布于38.5%～57.5%;极端干旱区相对湿度最低且波动较小,半干旱、半湿润及高寒阴湿区相对湿度整体较高。上述结果表明,研究样本所在区域存在明确的长期环境背景差异。基于此,需要进一步分析气候因子与环境残差之间的统计关系,以判断区域环境差异是否能够解释模型中未被过程项和结构项表征的剩余变化。

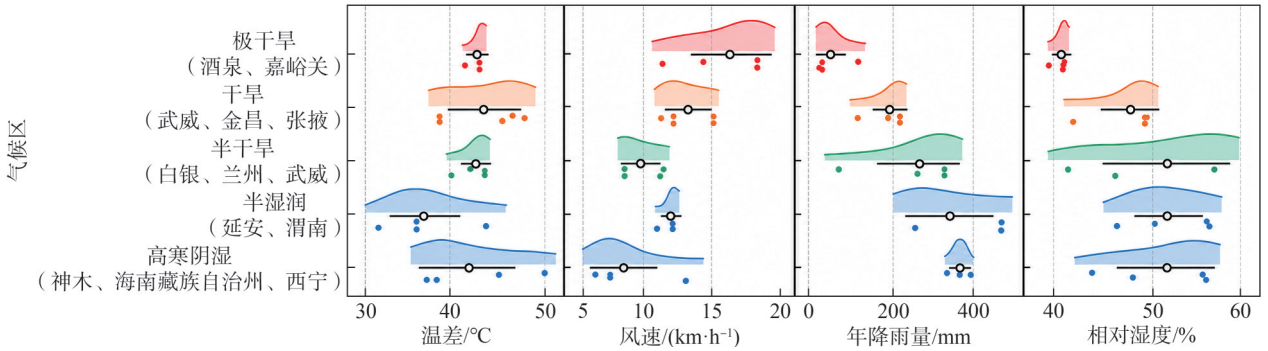


图7 环境驱动因子分布特征

Fig. 7 Distribution characteristics of environmental driving factors

为检验环境残差与气候变量之间的统计对应关系,进一步计算温差、风速、年降水量、相对湿度与环境残差的Pearson相关系数,结果见图8。由图8可知:环境残差与风速和温差分别呈正相关,相关系数为0.68和0.50;与年降水量和相对湿度分别呈负相关,相关系数为−0.71和−0.69。结果表明,环境残差与区域气候背景存在统计关联,因此后续将其共同纳入连续气候边界函数。

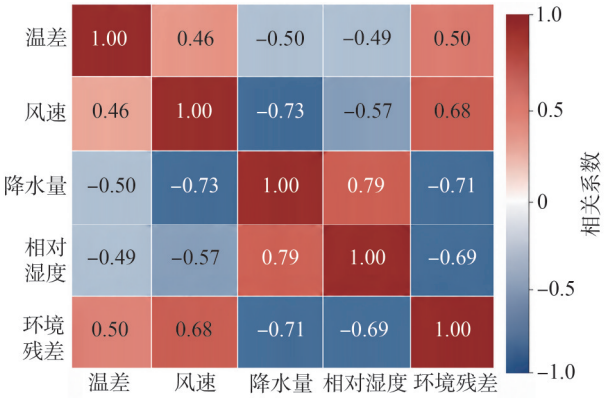


图8　环境因子与环境残差相关性分析

Fig. 8　Correlation analysis between climatic factors and environmental residuals

以风速、温度差、年降雨量和相对湿度分别表征蒸发驱动、热力梯度、外部供水条件及与区域空气湿度及蒸发势背景，以四者构建连续气候边界指数。其中，温度差 ΔT_i 由第 i 个遗址的年最高温 $T_{\max,i}$ 与最低温 $T_{\min,i}$ 之差直接构造。为消除量纲差异，并保证不同气象变量在同一边界函数中的可比性，进一步对各变量进行标准化处理，见式(12)；同时，定义连续气候边界指数见式(13)。

$$z(W_i)=\frac{W_i-\bar{W}}{s_W},z(\Delta T_i)=\frac{\Delta T_i-\Delta\bar{T}}{s_{\Delta T}},$$

$$z(P_i)=\frac{P_i-\bar{P}}{s_P},z(R)=\frac{R_i-\bar{R}}{s_R} \tag{12}$$

$$\ln K_{c,i}=b_0+b_1z(W_i)+b_2z(\Delta T_i)+b_3z(P_i)+b_4z(R_i) \tag{13}$$

式(12)～(13)中，i 为遗址编号，W_i、ΔT_i、P_i 和 R_i 分别为第 i 个遗址对应的年平均风速、年温度差、年降雨量和年平均相对湿度，$\bar{W}$、$\Delta\bar{T}$、$\bar{P}$、$\bar{R}$ 分别为上述气候变量在训练样本中的均值，s_W、$s_{\Delta T}$、s_P 和 s_R 分别为对应气候变量在训练样本中的标准差，$z(\cdot)$表示变量经标准化处理后的无量纲值，$K_{c,i}$ 为第 i 个遗址的连续气候边界系数，b_0、b_1、b_2、b_3、b_4 为对应模型系数。式(12)中所有均值和标准差只由训练样本计算。采用多元线性回归方法进行计算，拟合得到的模型参数见表5。

表5　模型参数反演结果

Tab. 5　Inverse modeling results of model parameters

模型参数	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
参数值	−0.383	0.089	0.044	−0.059	−0.083

将计算得到的连续气候边界函数代入式(11)重新进行拟合验证，结果见图9。图9表明，该函数的引入并未削弱原模型的解释能力，在保持结构主干稳定的前提下，模型对不同遗址环境差异的连续表征能力得到增强。回代后的最终模型在20处训练样本上拟合结果的 R^2 达到0.86，5处外部验证样本上的 R^2 为0.93。将离散的分区替换为由风速、温度差、降雨量和相对湿度共同构成的连续气候边界函数后，模型仍保持较好的解释与验证表现。

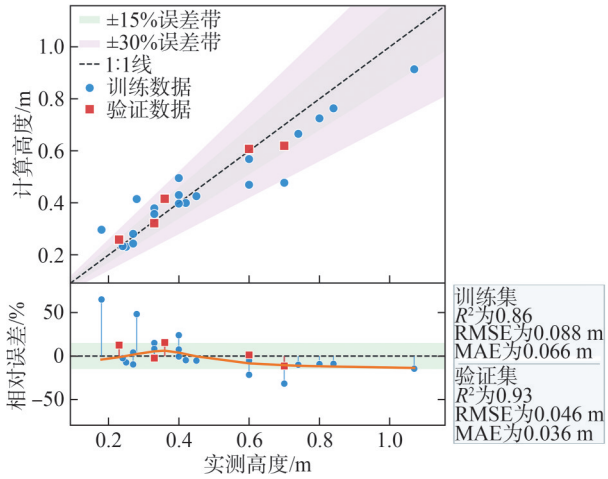


图9　引入气候边界项后根部毛细上升一维高度计算值与实测约束值对比及误差分布

Fig. 9　Comparison between calculated one-dimensional basal capillary-rise heights and measured constraint values after introducing the climatic boundary function, and error distribution

据此可得到环境–结构协同驱动的夯土遗址根部毛细上升一维高度模型表达式：

$$H_{u,i}=0.467h_{p,i}^{0.0295}\phi_{c,i}^{-0.347}C_{n,i}^{-0.123}D_{f,i}^{-0.010}\left(\frac{R_{p,i}}{1.694}\right)^{-0.245}K_{c,i} \tag{14}$$

式中，$K_{c,i}$ 由式(15)计算，$h_{p,i}$ 由式(7)计算。

$$K_{c,i}=\exp\left(-0.383+0.089\left(\frac{W_i-11.91}{3.139}\right)+0.044\left(\frac{\Delta T_i-42.54}{3.898}\right)-0.059\left(\frac{P_i-253.195}{138.513}\right)-0.0829\left(\frac{R_i-47.852}{6.519}\right)\right) \tag{15}$$

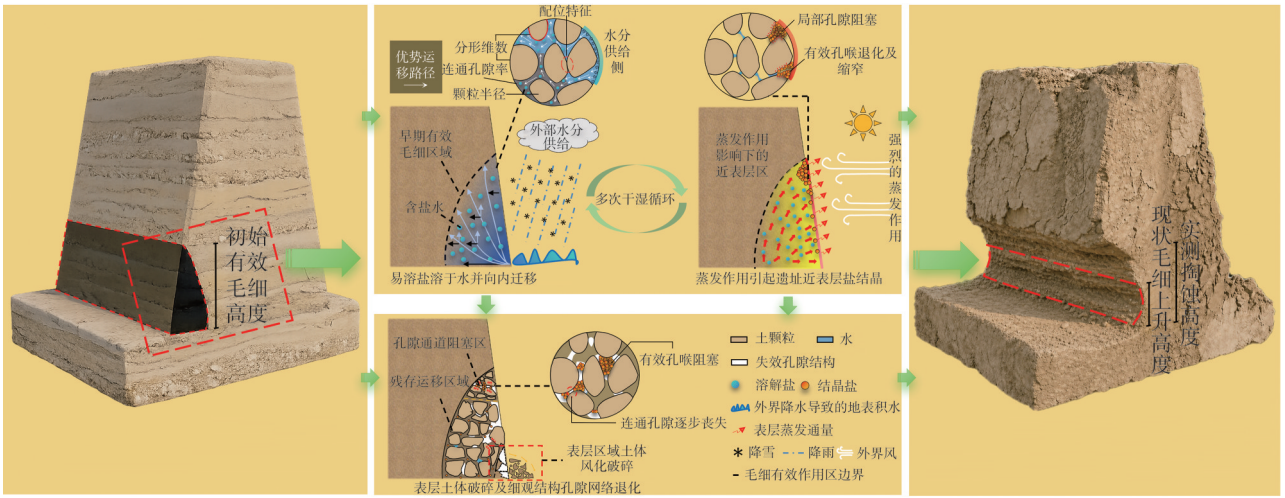
4　讨　论

本文模型所对应的并非理想条件下的终止毛细高度，也不直接重建病害形成早期的真实输运路径，而是以现状掏蚀边界高度为约束，对影响掏蚀边界形成的有效毛细作用高度进行等效表征。现有的Hazen公式和Jurin模型分别建立在经验粒径表征与静力平衡假设之上，其计算高度显著高于现状掏蚀边界高度，因而难以直接用于工程尺度判定。基于此，将吸水率、蒸发速率、细观结构变量与气候边界变量纳入模型框架，以现状掏蚀边界为约束，构建了环境–结构协同驱动的根部毛细上升一维高度模型。

相关性分析表明，边界约束尺度与平均颗粒半

径、平均分形维数、平均配位数和连通孔隙率之间具有明确统计对应关系，环境残差与气候边界因子之间亦存在相应关联。说明夯土遗址根部毛细上升一维高度尺度并非由单一孔隙指标决定，而是与现状细观结构状态和长期环境边界均相关[26–28]。需要指出的是，文中的细观结构参数来源于发生掏蚀/坍塌部位邻近区域，其既可能包含病害形成前的结构信息，也可能已经反映长期水盐迁移与损伤累积后的结果。因此，上述变量在文中作为现状结构状态的解释变量，而不直接解释为单向前因。

由此可对夯土遗址根部毛细作用区与掏蚀边界之间的演化关系作出概念性解释，如图 10 所示。



(a) 病害发生前墙体　(b)夯土内部细观结构退化过程　(c) 现状墙体状态

图 10　夯土墙体根部毛细作用区演化与掏蚀边界形成概念模型

Fig. 10　Conceptual model of capillary-action zone evolution and undercutting-boundary formation at rammed-earth wall bases

在病害形成早期(图 10(a))，外部供水与蒸发边界共同作用，在遗址根部建立连续液相输运带，液态水及其携带的可溶盐沿连通毛细通道向上迁移，形成相对较高的早期有效毛细作用区。随着干湿循环持续发生，在根部供水、表层蒸发和孔隙非均质性共同作用下，毛细作用区可能表现出一定横向扩展(图 10(b))[1,7]，其中，扇形区域仅表示实际水盐迁移可能具有的空间影响范围，其垂向上边界对应本文模型提取的一维高度尺度。在长期干湿循环和蒸发富集作用下，盐类结晶、细颗粒迁移、局部润湿软化及胶结削弱等过程可能共同影响近表层孔隙结构，并造成孔喉缩窄、局部堵塞、有效连通性下降和蒸发前沿重分布等现象[29–31]。在长期作用下，原先连续的高效运移区逐渐演化为孔隙网络退化区与表层破碎区，而近根部区域仍可能保留一定残余输运能力(图 10(c))。因此，现状实测毛细上升高度主要反映结构退化后的残余上升能力，并不能代表病害形成早期的有效毛细作用尺度；现状掏蚀边界高度则记录了早期毛细输运区在长期水盐迁移、蒸发结晶、风化剥蚀和材料劣化累积作用后形成的工程边界。

因此，本文模型所表征的是在现状掏蚀边界约束下，对早期夯土遗址根部毛细上升一维高度尺度的等效表达，其物理含义可概括为：吸水–蒸发过程项提供毛细供给与蒸发耗散关系下的基准尺度，细观结构约束项表征现状孔隙结构对液相通道连续性和迁移阻力的调制作用，长期气候边界项进一步反映区域环境差异对高度响应的影响；三者共同作用下，早期有效毛细作用范围的垂向尺度可能在长期水盐迁移、蒸发结晶和结构劣化过程中，逐渐表现为现状可观测的掏蚀边界高度。需要指出的是，图 10 仅用于概念性说明根部毛细作用区可能具有的空间展布特征，本文模型仅提取该作用区沿墙体高度方向的上边界作为一维高度尺度，横向扩展和扇形分布仅用于解释实际遗址中供水、蒸发和孔隙非均质性共同作用下的空间背景，不属于模型直接预测对象。

5　结　论

1）Hazen 公式和 Jurin 模型的毛细上升高度计算结果均显著高于现场实测掏蚀高度，所得高度主要对应理想化毛细尺度，难以直接反映真实遗址环境中受细观结构状态与长期环境边界共同约束的有效毛细作用范围。

2）25 处典型遗址的实测毛细高度整体低于现状掏蚀边界高度，二者沿极端干旱区–干旱区–半干旱区–半湿润区–高寒阴湿区序列表现出一致变化趋势，并在朝

代分组下保持较稳定的空间响应特征；细观结构状态与两类高度指标整体呈反向对应关系，吸水–蒸发过程响应则表现出一致的对应特征。

3）将现状掏蚀边界高度作为约束尺度的相关性分析结果表明，吸水率和蒸发速率可构成吸水–蒸发过程项；平均颗粒半径、平均配位数、平均分形维数和连通孔隙率与约束尺度之间具有明确统计对应关系，可作为现状细观结构状态约束变量。

4）在吸水–蒸发过程项和细观结构约束项基础上引入连续气候边界函数，建立了夯土遗址根部毛细上升环境–结构协同驱动一维高度模型。模型在 20 处训练样本和 5 处验证样本上的决定系数（R^2）分别可达到 0.86 和 0.93，具备较好的拟合稳定性和跨气候区样本外表征能力。

参考文献：

[1] Zhao Haiying,Li Zuixiong,Han Wenfeng,et al.Main diseases and their causes of earthen Ruins in arid region of northwestern China[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2003,22(S2):2875–2880.[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[J].岩石力学与工程学报,2003,22(S2):2875–2880.]

[2] Li Zuixiong,Zhao Linyi,Sun Manli.Deterioration of earthen sites and consolidation with PS material along silk road of China[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(5):1047–1054.[李最雄,赵林毅,孙满利.中国丝绸之路土遗址的病害及PS加固[J].岩石力学与工程学报,2009,28(5):1047–1054.]

[3] Cui Kai,Chen Wenwu,Han Lin,et al.Effects of salinized deterioration and aeolian ullage on soils in undercutting area of earthern ruins in arid region[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(9):1412–1418.[崔凯,谌文武,韩琳,等.干旱区土遗址掏蚀区土盐渍劣化与风蚀损耗效应[J].岩土工程学报,2011,33(9):1412–1418.]

[4] Bai Xiangling,Wang Yingxin,An Yijing,et al.Moisture transport characteristics of historical earthen sites under capillary water rise:Insights,mechanisms and electrochemical monitoring[J].Journal of Building Engineering,2025,116:114686.

[5] Cui Kai,Wang Donghua,An Xinyue,et al.Barrier effect of modified cushion on salinity deterioration in the basal sapping zone of earthen sites[J].Soil Mechanics and Foundation Engineering,2020,57(3):227–236.

[6] Zhao Xiaozheng.Quantitative study on capill-ary morphology in basal sapping zones of rammed earth sites in Northwest China[D].Lanzhou:Lanzhou University of Technology,2022.[赵晓铮.西北干旱区夯土遗址掏蚀区毛细形态量化研究[D].兰州:兰州理工大学,2022.]

[7] Chen Wenwu,Wang Keyu,Qi Qiang,et al.Migration patterns and occurrence laws of salinity in earthen sites in the northwest region under alternating precipitation and evaporation conditions[J].Rock and Soil Mechanics,2024,45(8):2209–2220.[谌文武,王科玉,祁强,等.降水与蒸发交替作用下西北土遗址盐分迁移与赋存规律[J].岩土力学,2024,45(8):2209–2220.]

[8] Hazen A.Some physical properties of sands and gravels,with special reference to their use in filtration[C]//24th Annual Report,Public Document No. 34.Boston:Massachusetts State Board of Health,1892:539–556.

[9] Jurin J.An account of some experiments shown before the Royal Society with an enquiry into the cause of the ascent and suspension of water in capillary tubes[J].Philosophical Transactions of the Royal Society of London,1718,30(355):739–747.

[10] Lucas R.Ueber das zeitgesetz des kapillaren aufstiegs von Flüssigkeiten[J].Kolloid–Zeitschrift,1918,23(1):15–22.

[11] Washburn E W.The dynamics of capillary flow[J].Physical Review,1921,17(3):273–283.

[12] Sun Manli,Chen Yanrong,Shen Yunxia.New progress and prospects in research on earthen site deterioration[J].Dunhuang Research,2022(2):136–148.[孙满利,陈彦榕,沈云霞.土遗址病害研究新进展与展望[J].敦煌研究,2022(2):136–148.]

[13] Cui Kai,Wen Xiangyu,Wang Guanzhong,et al.Temporal and spatial variation of temperature of typical rammed earth sites in northwest China(Ⅱ):Rainfall process[J].Journal of Engineering Geology,2025,33(6):2325–2335.[崔凯,文祥宇,王冠众,等.西北地区典型夯土遗址温度时空变化规律研究Ⅱ:降雨过程[J].工程地质学报,2025,33(6):2325–2335.]

[14] Tian Shengkui,Liu Guanshi,Zhao Qingsong,et al.Experimental study of capillary water rising in aeolian sand using a moisture field testing technique based on image RGB information[J].Rock and Soil Mechanics,2023,44(9):2525–2536.[田升奎,刘观仕,赵青松,等.基于图像RGB

信息测试湿度场技术的风积沙毛细水上升试验研究[J].岩土力学,2023,44(9):2525–2536.]

[15] Li Shue,Chen Zhiming,Xu Yongfu,et al.Calculation of rising height of capillary water based on fractal model for grain-size distribution[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2024,46(10):2221–2228.[李淑娥,陈志明,徐永福,等.基于颗粒分布分形模型毛细水上升高度计算分析[J].岩土工程学报,2024,46(10):2221–2228.]

[16] Deng Gaige,He Jianguo,Kang Ningbo.Research on capillary water height based on multi-physical field coupling[J].Research of Soil and Water Conservation,2021,28(4):136–141.[邓改革,何建国,康宁波.基于多物理场耦合的毛细水高度研究[J].水土保持研究,2021,28(4):136–141.]

[17] Terzaghi K,Peck R B,Mesri G.Soil mechanics in engineering practice[M].New York:John Wiley & Sons,1996:63–150.

[18] Terzaghi K.Erdbaumechanikauf Bodenphysik-alischen Grundlagen[M].Leipzig:Franz Deuticke,1925:101–198.

[19] Bear J.Dynamics of fluids in porous media[J].Soil Science,1975,120(2):162–163.

[20] Young T.An essay on the cohesion of fluids[J].Philosophical Transactions of the Royal Society of London,1805,95:65–87.

[21] Cui Kai,Zhao Xiaozheng,Zhu Mingji,et al.Effects of salinized deterioration and aeolian ullage on soils in undercutting areas of earthen ruins in arid regions(Ⅲ):Capillary process[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2022,44(11):2043–2051.[崔凯,赵晓铮,朱鸣基,等.干旱区土遗址掏蚀区土盐渍劣化与风蚀损耗效应(Ⅲ):毛细过程[J].岩土工程学报,2022,44(11):2043–2051.]

[22] Mason G.Porous media:Fluid transport and pore structure[J].The Chemical Engineering Journal,1981,21(2):177–178.

[23] Ben Clennell M.Tortuosity:A guide through the maze[J].Geological Society,1997,122(1):299–344.

[24] Doehne E.Salt weathering:A selective review[J].Geological Society,2002,205(1):51–64.

[25] Zhang Jielin,Liu Bo,Ren Siqing,et al.A 4 km daily gridded meteorological dataset for China from 2000 to 2020[J].Scientific Data,2024,11:1230.

[26] Cui Kai,Wei Xin,Xu Pengfei,et al.Study on the salt-dissipating and settlement-preventing performance of composite modified cushion layers in the roof-propping body of earthen sites' basal sapping zone[J].Construction and Building Materials,2024,442:137595.

[27] Xu Pengfei,Cui Kai,Pei Qiangqiang,et al.Study on hydrothermal migration and interface cracking mechanisms of supporting reinforcing bodies in the root erosion zones of rammed earth sites in arid regions[J].Construction and Building Materials,2024,457:139480.

[28] Mo Ping,Li Yanrong.Loess slope toe degradation as a result of capillary water dynamics[J].Engineering Geology,2025,358:108394.

[29] Yue Jianwei,Lin Jian,Wang Yongfeng,et al.Study on the improvement of soil water in Kaifeng imitation site[J].Advanced Engineering Sciences,2020,52(1):46–55.[岳建伟,林健,王永锋,等.开封仿遗址土水理性质的改良研究[J].工程科学与技术,2020,52(1):46–55.]

[30] Chen Bao,Liu Chaofan,Deng Rongsheng,et al.Macro-microscopical discrete element characteristics of confined compression and wetting test for unsaturated loess[J].Advanced Engineering Sciences,2024,56(5):212–220.[陈宝,柳超凡,邓荣升,等.非饱和黄土侧限压缩和湿陷试验的宏微观离散元特性分析[J].工程科学与技术,2024,56(5):212–220.]

[31] Dai Sheng,Shin Hosung,Santamarina J.Formation and development of salt crusts on soil surfaces[J].Acta Geotechnica,2016,11(5):1103–1109.

Environment–Structure Co-driven One-dimensional Model for Basal Capillary Rise Height of Typical Rammed Earth Sites in Northwest China

WEN Xiangyu[1,2,3], *PEI Qiangqiang*[1,2,3], *SUN Yashi*[1,2,3], *WANG Guanzhong*[1,2,3], *LIU Hongke*[1,2,3], *CUI Kai*[1,2,3*]

(1.Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2.China–Kyrgyzstan Joint Laboratory for Cultural Heritage Conservation Under the Belt and Road Initiative, Dunhuang 736200, China;
3.Silk Road Cultural Heritage Protection Research Institute, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract:

Objective Water–salt migration and enrichment driven by basal capillary rise constitute important internal processes responsible for the forma-

tion and evolution of undercutting boundaries at rammed-earth heritage sites. In Northwest China, these sites are exposed to rainfall, evaporation, wind action, temperature variations, and their basal zones frequently experience undercutting deterioration. The initial effective scale of capillary action is directly associated with determining the extent of basal deterioration and assessing the risk of water−salt-induced deterioration. Existing capillary-height models are primarily based on idealized pore structures, static capillary equilibrium, or simplified boundary conditions. Although these models provide theoretical insights into capillary rise, their underlying assumptions do not adequately reflect the processes governing the formation of undercutting boundaries at actual rammed-earth sites. We aimed to elucidate the applicability limits of classical one-dimensional capillary-height models and develop an environment−structure co-driven one-dimensional height model for basal capillary rise at typical rammed-earth sites in Northwest China.

Methods Twenty-five representative rammed-earth sites across five climate zones in Northwest China were selected. The existing undercutting-boundary height was determined through field investigations and used as an observable constraint resulting from long-term water−salt migration, weathering, and deterioration. In situ basal capillary-rise tests were conducted by establishing a localized water-supply boundary at the wall base. The visible wetting front was monitored, and when no discernible upward movement was observed for 30 min, the corresponding height was considered the maximum field capillary-rise height. Rammed-earth samples collected near the wall bases were prepared as 7 cm× 7 cm× 7 cm specimens for water absorption and evaporation tests. The water absorption rate represented the capillary intake capacity, whereas the evaporation rate was considered an apparent field evaporation parameter measured under open-site conditions rather than an intrinsic material constant. Mesostructural parameters were extracted using computed tomography and three-dimensional image reconstruction, including connected porosity, average coordination number, average fractal dimension, average particle radius, average pore-throat equivalent radius, flatness, and tortuosity. Regional climatic variables were obtained from a 4 km daily gridded meteorological dataset by matching each site to its nearest grid point. Multiyear average temperature difference, wind speed, annual precipitation, and relative humidity were utilized to characterize long-term climatic boundary conditions. A semi-empirical model was developed using a water absorption−evaporation process term, a mesostructural constraint term, and a continuous climatic boundary function. Twenty samples were used for parameter identification, whereas five samples from different climate zones were used for external validation.

Results and Discussions The Hazen formula and the Jurin model substantially overestimated the field undercutting height. The heights calculated using the Jurin model ranged from 11.52 to 17.21 m, whereas those calculated using the Hazen formula ranged from 3.24 to 7.77 m. Conversely, the measured undercutting heights were generally below 1 m. This systematic overestimation indicated that classical models based on idealized pore assumptions or simplified equilibrium conditions failed to directly characterize the initial effective capillary-action range associated with undercutting-boundary formation. The field and laboratory data demonstrated that the measured capillary-rise height and the existing undercutting-boundary height exhibited climate-spatiotemporal variations primarily governed by climate zones. Under the combined constraints of climate zone and dynastic period, the two height indicators exhibited a coupled pattern. The measured capillary-rise height was generally lower than the existing undercutting boundary height, indicating that the current capillary-rise capacity primarily reflected the residual upward migration capacity following long-term structural deterioration. In contrast, the undercutting boundary represented a cumulative engineering boundary formed through historical water−salt migration, evaporative crystallization, and material degradation. Correlation analysis revealed a positive correlation between the undercutting height and the measured capillary-rise height, with a correlation coefficient of 0.65. The water absorption rate was positively correlated with both height indicators, whereas the apparent field evaporation rate exhibited negative correlations. Among the mesostructural variables, average particle radius, average coordination number, average fractal dimension, and connected porosity exhibited consistent negative correlations with both height indicators and were selected as the primary structural constraint variables. These relationships indicated that the existing pore network constrained the continuity and effectiveness of vertical liquid transport. Larger particle sizes, more complex pore geometries, and greater structural heterogeneity potentially increased migration resistance, local obstruction, and bypass flow, weakening continuous capillary rise. After the water absorption−evaporation and mesostructural terms were controlled for, the remaining environmental residual was positively correlated with wind speed and temperature difference and negatively correlated with annual precipitation and relative humidity. Thus, a continuous climatic boundary function comprising these four variables was introduced to replace the discrete climate-zone correc-

tion coefficient. After this function was incorporated, the model achieved determination coefficients of 0.86 for the 20 training samples and 0.93 for the five validation samples, indicating acceptable fitting stability and generalization capability across climate zones.

Conclusions The height scale associated with basal capillary rise at rammed-earth heritage sites cannot be adequately represented by classical models that rely solely on idealized pore geometry or simplified capillary equilibrium assumptions. The proposed environment–structure co-driven one-dimensional height model incorporates water absorption–evaporation behavior, mesostructural constraints, and long-term climatic boundary effects, providing a quantitative framework for characterizing the initial effective capillary-action scale associated with the formation of undercutting boundaries. The designation one-dimensional height model does not imply that water migration at the wall base occurs exclusively in one dimension. Rather, the model uses the upper boundary height of the basal capillary-action zone along the wall-height direction as its output, while accounting for lateral wetting, evaporation, pore-structure heterogeneity, and climatic influences through process-related, structural, and environmental parameters. The model thus establishes a quantitative basis for determining basal undercutting height scales and evaluating water−salt deterioration risks at rammed-earth heritage sites in Northwest China.

Key words: rammed earth site; undercutting deterioration; one-dimensional height; mesostructure; co-driven

（编辑　李轶楠）

引用格式: Wen Xiangyu,Pei Qiangqiang,Sun Yashi,et al.Environment–structure co-driven one-dimensional model for basal capillary rise height of typical rammed earth sites in Northwest China[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(6):28–40.
[文祥宇,裴强强,孙雅诗,等.西北地区典型夯土遗址根部毛细上升环境–结构协同驱动一维高度模型[J].工程科学与技术,2026,58(6):28–40.]