



· 文化遗产保护 ·

遗址土等温吸放湿特性及预测模型

原鹏博^{1,2}, 翟传萌¹, 李俊¹, 郑月雪¹, 景博文³, 李华³

1. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000;

2. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

3. 秦始皇帝陵博物院 陶质彩绘文物保护国家文物局重点科研基地, 陕西 西安 710600

摘要 为了研究环境相对湿度变化对土遗址浅表层水分吸附与解吸的影响规律, 采用饱和盐溶液法, 开展7种不同环境相对湿度条件下的4种不同干密度遗址土的等温吸放湿试验。试验结果表明: 随相对湿度的增大, 吸放湿速率越来越慢, 达到平衡状态所需的时间越来越长; 遗址土等温吸湿和放湿平衡含水率随相对湿度的增大而增大, 吸湿平衡含水率随着干密度的增大而减小, 放湿平衡含水率随着干密度的增大而增大; 存在明显的迟滞效应, 遗址土等温吸湿和放湿曲线均表现出明显的快速吸放湿和缓慢吸放湿的两阶段性。对比发现, Peleg 公式和冯驰公式可以用来拟合遗址土等温吸放湿曲线, 平行双指数(PEK)模型可以较好地描述遗址土等温吸放湿过程, 可以利用平衡时间的前50%数据来预测最终达到平衡的时间和最终的平衡含水率。

关键词 土遗址; 相对湿度; 预测模型; 含水率

中图分类号: TU502 **DOI:** 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2026-02-006

Isothermal moisture absorption and desorption characteristics of earthen site soils and prediction model

YUAN Pengbo^{1,2}, ZHAI Chuanmeng¹, LI Jun¹, ZHENG Yuexue¹,
JING Bowen³, LI Hua³

1. College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China of Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3. Key Scientific Research Base of Ancient Polychrome Pottery Conservation of State Administration for Cultural Heritage, Emperor Qinshihuang's Mausoleum Site Museum, Xi'an 710600, China

Abstract To investigate the influence of environmental relative humidity variations on water adsorption and desorption in the shallow surface layer of earthen sites, isothermal moisture adsorption-desorption tests were

收稿日期: 2025-11-10 修回日期: 2026-02-28

基金项目: 国家文物局文物科学技术研究项目(2023ZCK033); 秦始皇帝陵博物院青年开放课题(0kikt202101); 中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2022-kb08)。

第一作者: 原鹏博, 男, 博士, 副教授, 从事岩土质不可移动文物保护和微生物矿化加固岩土体研究, yuanpb@lzu.edu.cn。

carried out on earthen site soils with four distinct dry densities under seven levels of relative humidity by using the saturated salt solution method. The test results demonstrate that with the increase in relative humidity, the rates of moisture adsorption and desorption gradually decrease, while the time required to reach equilibrium state progressively increases. The equilibrium moisture contents of isothermal adsorption and desorption of earthen site soils both rise with increasing relative humidity. Specifically, the adsorption equilibrium moisture content decreases with increasing dry density, whereas the desorption equilibrium moisture content increases with increasing dry density, showing a pronounced hysteresis effect. The isothermal adsorption and desorption curves of earthen site soils both exhibit an obvious two-stage behavior, consisting of a rapid stage and a slow stage of moisture transfer. Through comparative analysis, it is found that the Peleg model and Fengchi model are suitable for fitting the isothermal moisture adsorption-desorption curves of earthen site soils. In addition, the Parallel Exponential Kinetics (PEK) model can well characterize the isothermal moisture adsorption-desorption process, and the first 50% of the equilibrium time data can be used to accurately predict both the time to reach final equilibrium and the final equilibrium moisture content.

Keywords earthen site; relative humidity; prediction model; moisture content

土遗址是我国不可移动文物的重要组成部分。赋存环境相对湿度的变化会引起土遗址本体浅表层内水分的变化,会导致所含易溶盐的潮解与结晶,进而引起土遗址表面风化病害的产生,如粉化、酥碱等^[1]。等温吸放湿曲线可用来表征不同相对湿度环境下水分变化的强弱^[2]。开展遗址土的等温吸放湿特性研究,可获得其热湿传递过程中的相关参数,为土遗址的保护及生土建筑材料热湿传递研究提供科学依据。

遗址土的热湿耦合传递是一个复杂的过程,该过程与热湿环境关系密切。已有研究表明,文物本体材料的吸放湿过程是病害发育的重要因素^[3],开展材料等温吸放湿性能研究可以进一步了解热湿耦合传递过程的机理,对室内或半封闭土遗址浅表层病害发育的研究具有重要意义。材料的等温吸放湿性能仅与材料自身的成分、结构有关^[4]。目前,国内外已有众多学者开展了不同建筑材料的相关研究。国外方面,Karoglou M 等^[5],Moropoulou A^[6]等和 Yousefi Y 等^[7]分别研究了灰泥、石膏、黏土砖、纤维水泥板等常见建筑材料的等温吸放湿性能。国内方面,有学者分别开展了建筑材料以及掺改性材料的生土建筑吸放湿特性研究。闫增峰等^[8]、裴清清等^[9]和李魁山等^[10]分别研究了松木板、夯土墙、混凝土、水泥砂浆等建筑材料的等温吸放湿性能。尚建丽等^[11]和杨永等^[12]分别研究了水泥、石灰、石膏、粉煤灰和矿渣等改性材料对生土材料吸放湿过程及性能的影响。目前,关于黄土质土遗址在不同相对湿度下的等温吸放湿特性仍不明晰,亟待研究。

自学者 Luikov^[13]提出多孔介质热湿耦合传递模型以来,多孔介质的热湿传递理论模型的研究逐渐引起关注。其中,材料的热湿性质参数尤为重要^[14]。黄土作为常见的土遗址夯筑材料,具有显著的吸湿性,其吸放湿性能主要受 2 个因素影响:一是内因(黄土材料的成分、黏粒含量、孔隙等);二是外因(温度、相对湿度、压强等)。目前,国内外学者已经开展了关于不同因素对材料吸放湿性能的影响研究。Li B 等^[15]、王桂尧等^[16]和程子捷等^[17]研究了平均温度、压实度、降雨强度、黏粒含量等因素对吸放湿性能的影响规律。金虹庆等^[18]在恒温恒湿条件下,测试加气混凝土的动态吸放湿性能,发现孔隙率、相对湿度和温度均会影响吸放湿速率、平衡时间和平衡含水率。但是,目前尚未见干密度(孔隙比)对遗址土等温吸放湿特性的影响研究报道。

鉴于此,本研究在不同相对湿度梯度的环境条件下,开展不同干密度遗址土试样的等温吸放湿试验,旨在揭示相对湿度和干密度对吸放湿特性的影响规律,提出遗址土吸放湿模型,为土遗址预防性保护及生土建筑热湿传递研究提供科学依据。

1 试验材料及方法

1.1 试验用土及试样制备

试验所用土样为兰州黄土,取土深度 1.5~2 m,参照《土工试验方法标准》^[19]获得遗址土的基本物理性质如表 1、图 1 所示。

表 1 土样基本物理性质

Tab. 1 Physical properties of soil samples

天然含水率/%	塑限/%	液限/%	比重	最优含水率/%
2. 28	18. 77	28. 62	2. 71	13. 2

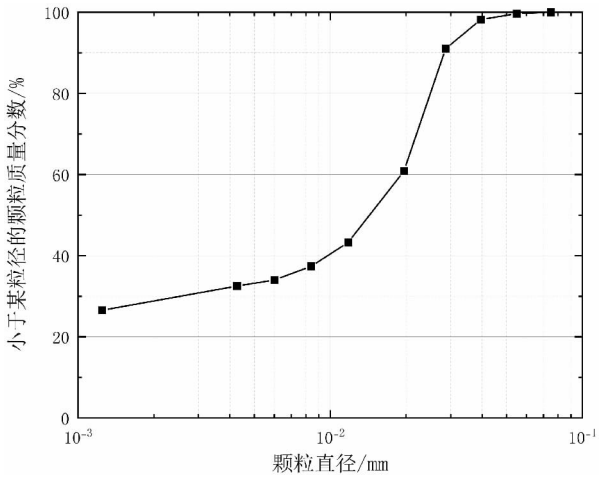


图 1 土样颗粒级配曲线

Fig. 1 Grading curve of soil samples

使用 2 mm 的筛对土样进行筛分并进行烘干,以配制最优含水率,制备干密度分别为 1.5 g/cm³ (X/F1.5)、1.6 g/cm³ (X/F1.6)、1.7 g/cm³ (X/F1.7)、1.8 g/cm³ (X/F1.8),尺寸为 5 cm × 5 cm × 5 cm 的试样共计 56 个。

1.2 试验方案

为探究不同相对湿度对遗址土吸放湿过程的影响规律,本试验在密闭容器中加入饱和盐溶液,将容器内的相对湿度控制在稳定区间^[20]。试验中采用乙酸钾、氯化镁、碳酸钾、溴化钠、氯化钠、氯化钾、硫酸钾 7 种盐配制饱和溶液,在 20 ℃ 的恒温密闭条件下控制相对湿度,具体相对湿度值见表 2。

表 2 不同饱和盐溶液相对湿度对照表

Tab. 2 Relative humidity of different saturated salt solutions

名称	相对湿度/%
乙酸钾	23. 11
氯化镁	33. 07
碳酸钾	43. 16
溴化钠	59. 14
氯化钠	75. 47
氯化钾	85. 11
硫酸钾	97. 59

为使密闭空间内的相对湿度快速达到试验要求,试验采用带盖塑料盒(容积较小,方便快速形成目标湿度场)作为密闭容器,底部加入配制好的饱和盐溶液,试样与溶液用塑料栅格隔开(见图 2)。经实际测量,相对湿度控制精度为 ±3%。

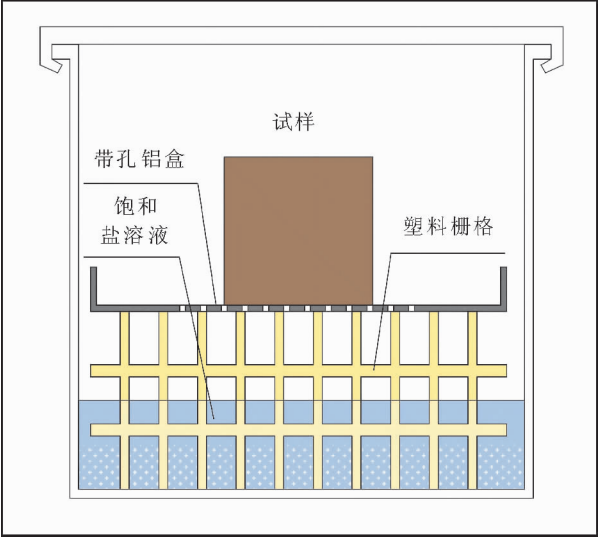


图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental device

试验通过称取试样质量来反映试样吸放湿量的变化,称重采用 LQ-C10002 型电子天平,精度为 0.01 g。试验分为吸湿(X)和放湿(F)2 组。放湿组试样直接放入加有不同饱和溶液的塑料盒中,而吸湿组试样先放入烘箱中烘干,再放入密闭容器中。间隔 12 h 将试样取出并称重,直至连续 3 次称重的结果不呈单调变化,且标准差小于平均值的 0.1%,此时认为试样达到了吸湿或放湿平衡。

2 等温吸放湿试验结果

2.1 吸湿过程

图 3 为不同干密度遗址土试样在 23% RH、33% RH、43% RH、59% RH、75% RH、85% RH、97% RH 条件下的吸湿曲线。由图 3 可以看出,对于同一干密度,试样达到吸湿平衡的时间随相对湿度的增大而增加。在较小的相对湿度(23% RH)下,不同干密度试样均在 75 h 前达到平衡状态;而在相对湿度较大(85% RH)的情况下,试样在 350 h 才基本达到平衡状态。如图 3(h)所示,试样吸湿平衡状态时的含水率也明显随相对湿度的增大而增大。

相同相对湿度条件下,吸湿平衡状态时的含

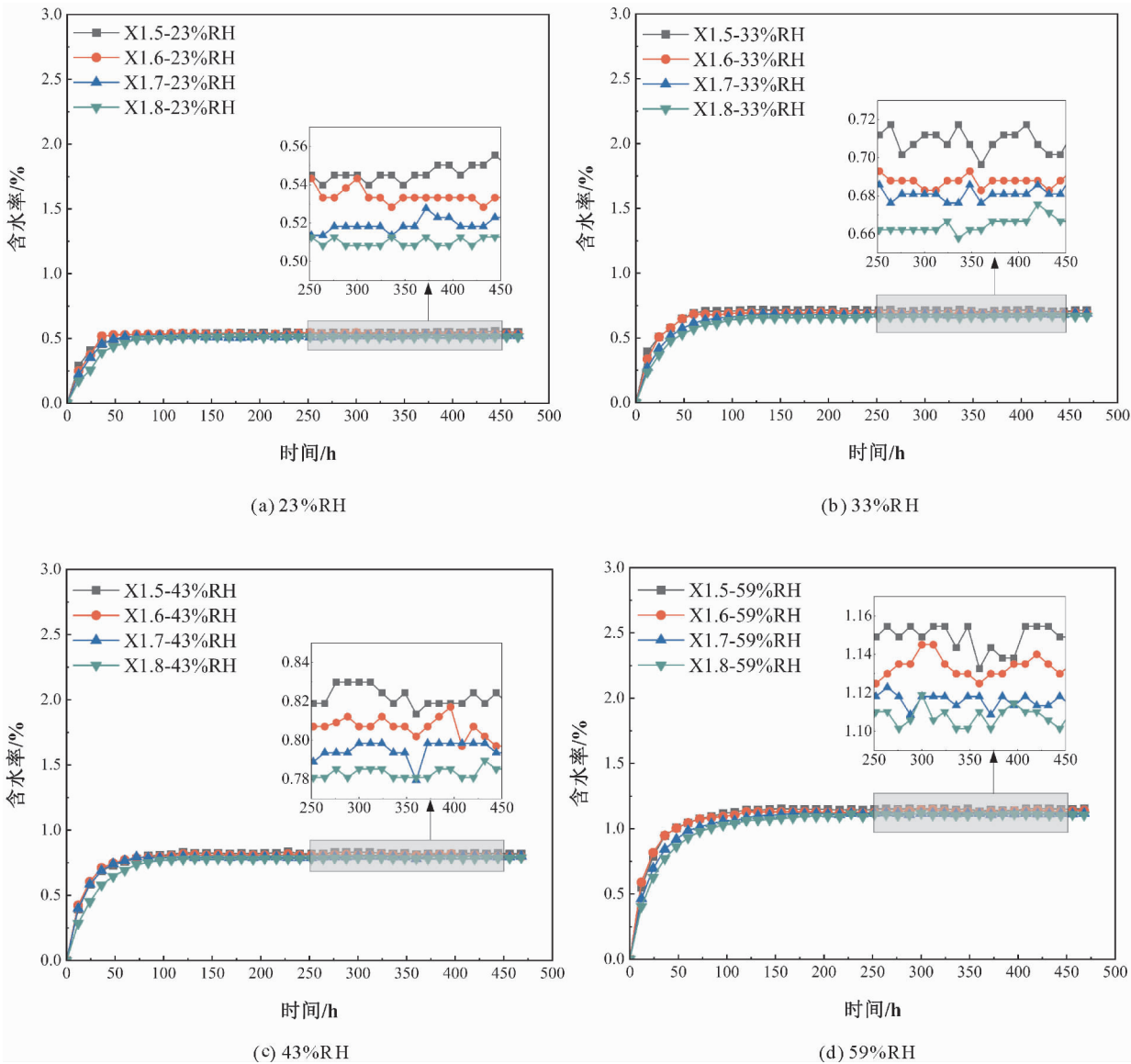
水率随干密度的增大呈现减小趋势,但同一湿度下,不同干密度试样的平衡含水率的最大差值均在 0.2% 以内。试样的孔隙率随干密度的增加而减小,孔隙率的减小不但导致可供水分子吸附的表面积减小,还会限制水分子进一步向试样内部扩散,从而影响土体的吸湿过程。

2.2 放湿过程

图 4 为不同干密度遗址土试样在不同相对湿度条件下的放湿曲线。同吸湿曲线一样,对于同一干密度,试样达到放湿平衡的时间随相对湿度的增大而增加。根据菲克定律,在单位时间内,通过垂直于扩散方向的单位截面积的扩散通量与该截面处的浓度梯度成正比,即浓度梯度越大,扩散

通量越大,因此达到平衡所需的时间越长。如图 4(h) 所示,平衡含水率随环境相对湿度的增加而增大,在 20% ~ 60% RH 时平衡含水率相差甚小,在 80% RH 以上则显著增大。当环境湿度为 97% RH 时,试样的平衡含水率约为 85% RH 时的 2.5 倍,59% RH 时的 5 倍。与吸湿过程不同,相同相对湿度条件下,放湿平衡状态时的含水率随干密度的增大呈现相应增大的趋势。

环境相对湿度对遗址土吸湿放湿过程的影响显著,干密度影响相对次之,吸湿放湿曲线均表现出明显的快速吸/放湿阶段和缓慢吸/放湿阶段的特征。



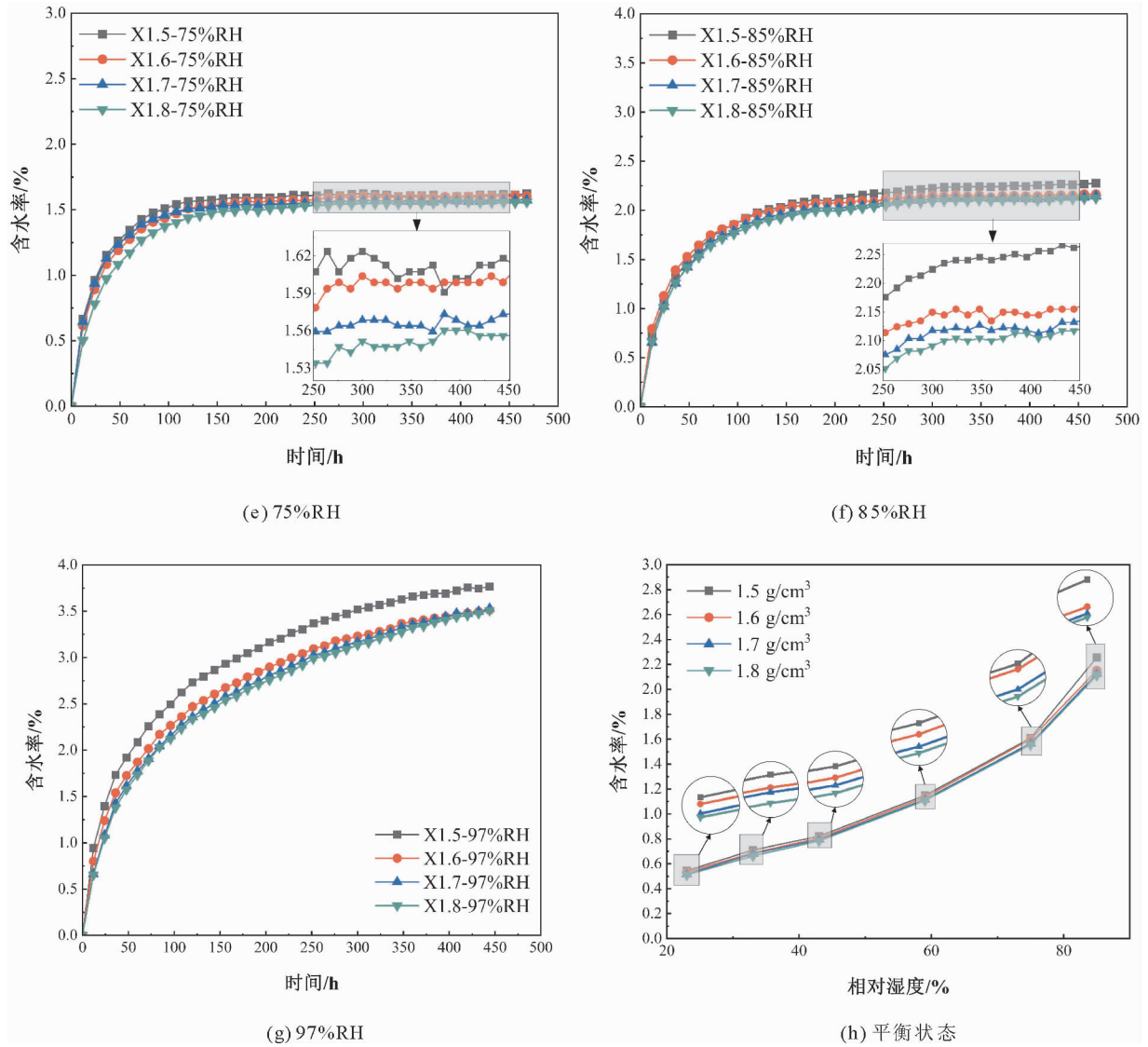
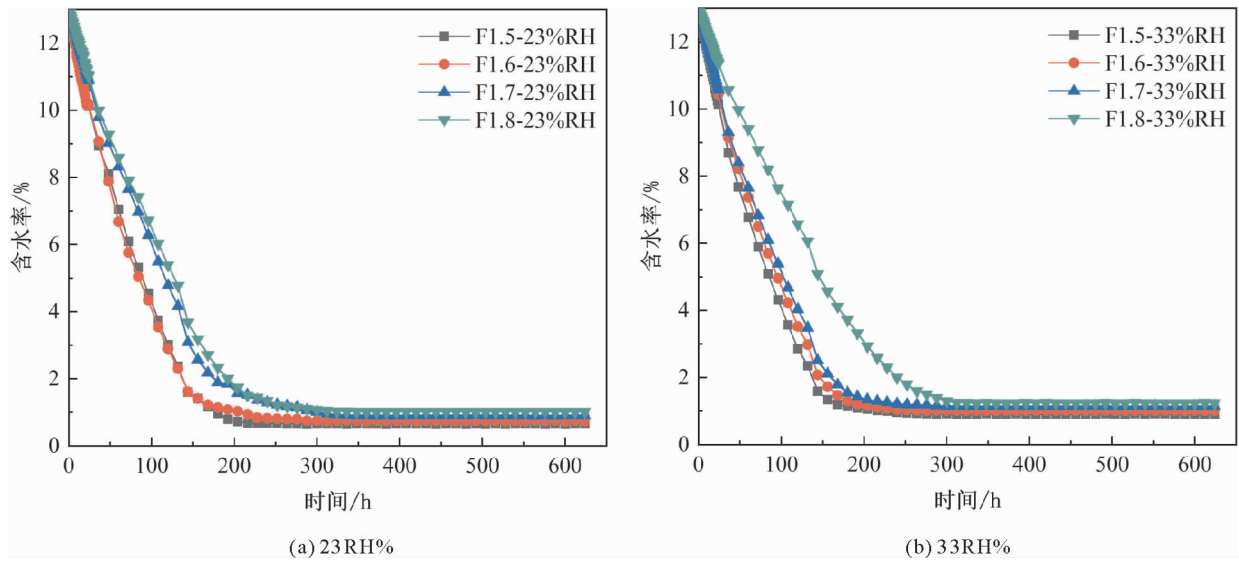


图 3 不同干密度的遗址土动态吸湿曲线以及平衡含水率对比

Fig. 3 Comparison of dynamic moisture absorption curves and equilibrium water content of earthen site soils with different dry densities



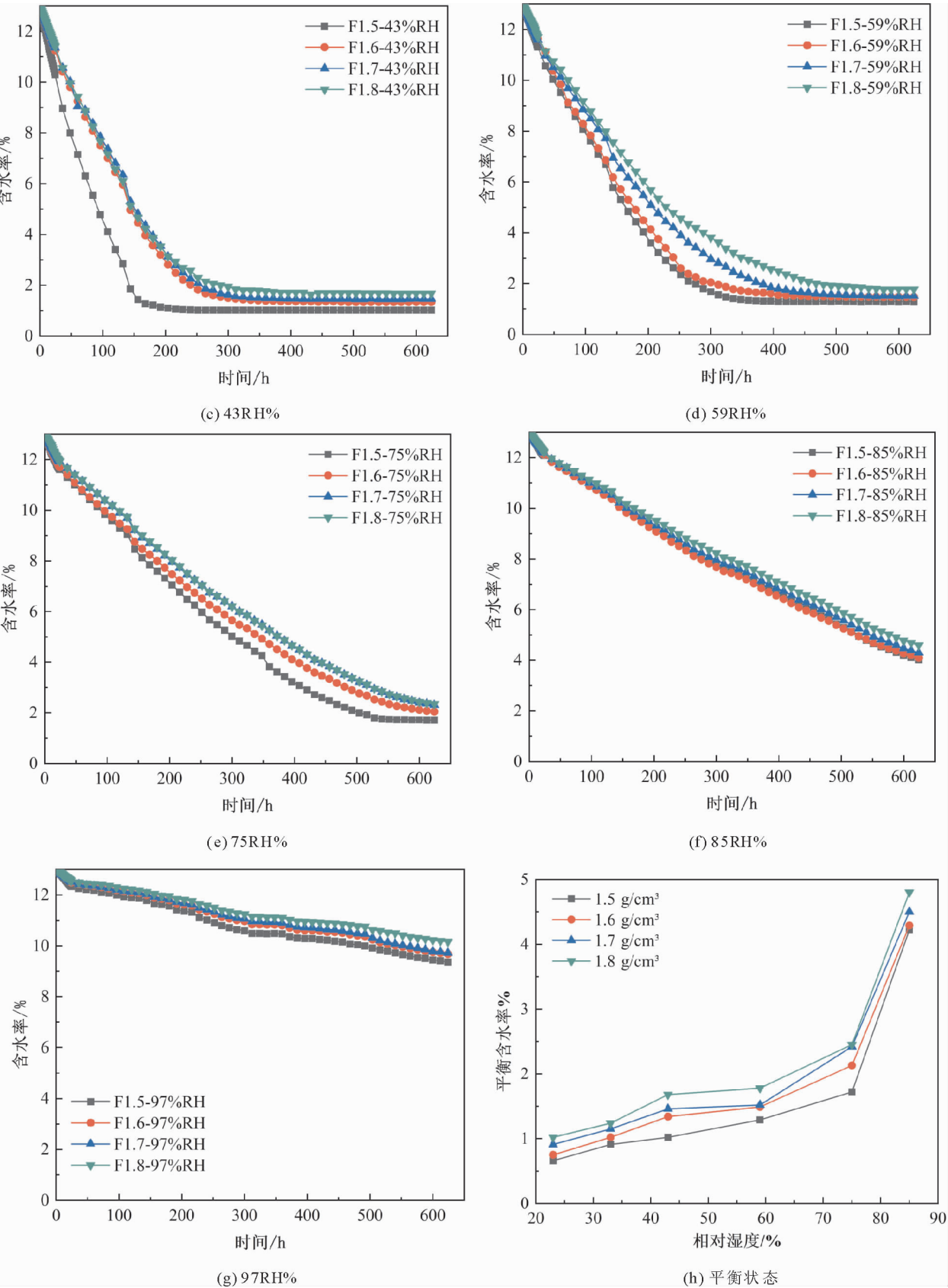


图 4 不同干密度的遗址土动态放湿曲线以及平衡含水率对比

Fig. 4 Comparison of dynamic exhumation curves and equilibrium water content of earthen site soils with different dry densities

3 等温吸放湿曲线的拟合与预测

3.1 平衡含水率相对湿度拟合分析

目前,不同学者提出了几十种等温吸放湿曲线的拟合公式^[21-22],适用的材料多偏重于食品、医药以及建筑材料等。不考虑只能拟合吸湿过程的公式情况下,通过对比常见的 10 余种拟合公式效果,发现 Peleg^[23] 公式(公式 1)和冯驰公式^[24](公式 2)拟合效果最好, R^2 值均在 0.99 以上。

其中,冯驰公式仅包含 3 个参数,形式更为简洁。同时可以看出,随着干密度的增大,吸湿和放湿过程存在的迟滞效应越来越显著(见图 5)。这表明,对于干密度较小的遗址土试样,孔隙率相对较大,水分子的吸附和解吸多以单分子和多分子为主。随着干密度的增大,孔隙率随之减小,试样表面的微小孔隙被水膜阻塞,限制了水分子向试样内部的迁移,也隔断了水分子向外部迁移的通道,延长了吸附和解吸的进程,从而产生了解吸平衡含水率大于吸附平衡含水率的迟滞现象。

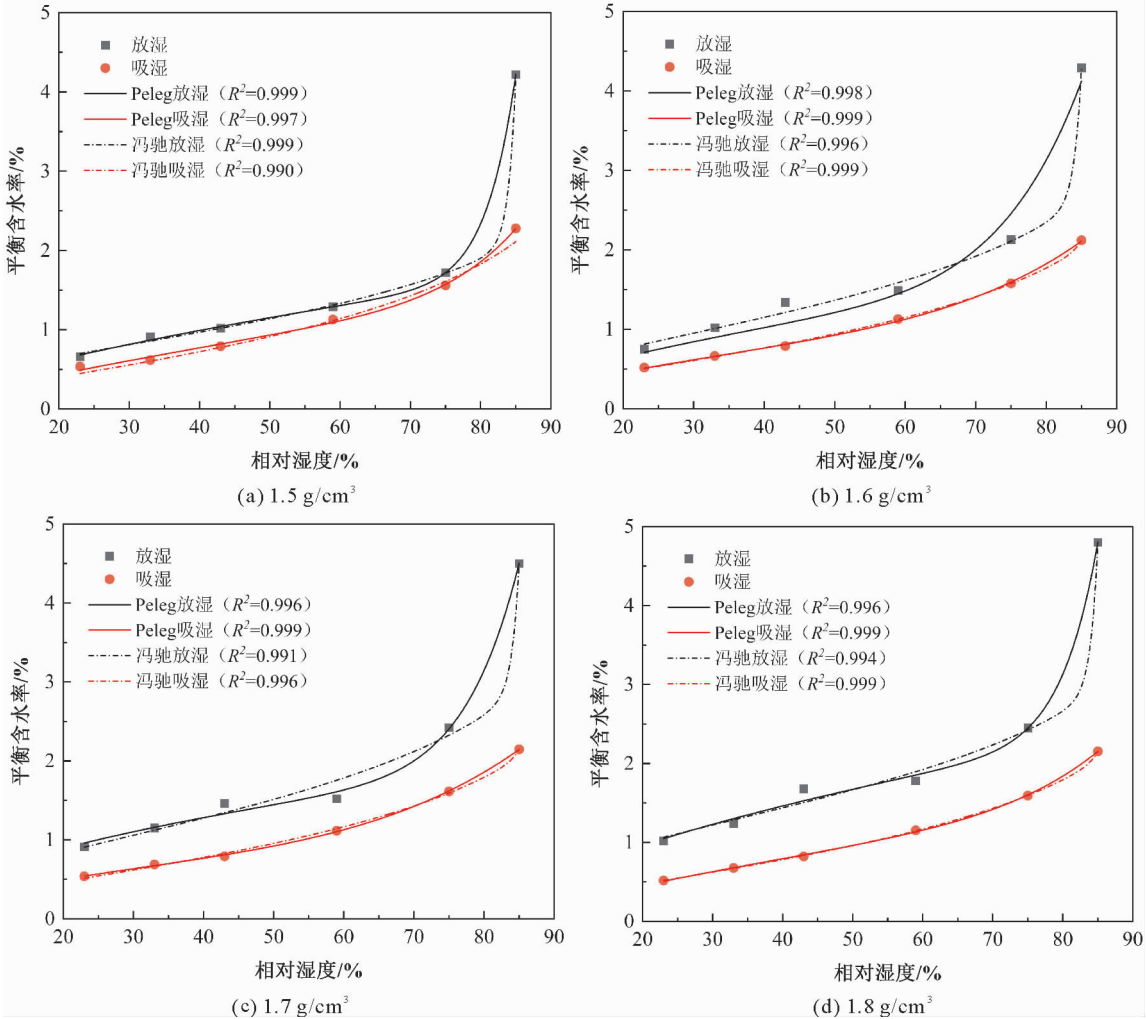


图 5 Peleg 和冯驰公式对等温吸放湿曲线的拟合结果
Fig. 5 Fitting curves from Peleg and Fengchi equations

Peleg 公式与冯驰公式分别为

$$\omega = a\phi^b + c\phi^d \tag{1}$$
$$\omega = \ln \left[(100\phi + 1)^a / (1 - \phi)^b \right] + ce^{100\phi} \tag{2}$$

式中: ω 代表含水率, ϕ 为相对湿度。利用公式对试验结果进行拟合,即可确定式中的参数 a 、 b 、 c 、 d 。

3.2 基于 PEK 模型预测

3.2.1 PEK 模型

不同干密度遗址土在不同环境相对湿度条件下的等温吸放湿曲线均表现出了快速吸放湿和缓慢吸放湿的两阶段性特征。考虑到开尔文模型(Kelvin)可以描述此类变化趋势,因此 Kohler 等^[25]人提出了平行指数法(Parallel Exponential

Kinetics, PEK), 通过串联的两个开尔文模型 (Kelvin) 来描述遗址土的这种强非线性吸放湿过程, 其表达式为

$$\omega_t = \omega_0 \pm [\omega_1 \times (1 - e^{\frac{-t}{t_1}}) + \omega_2 \times (1 - e^{\frac{-t}{t_2}})] \tag{3}$$

式中: ω_0 为吸放湿过程的初始含水率, 对于吸湿过程, 一般默认为 0; t_1 、 t_2 分别代表了快速吸放湿阶段和缓慢吸放湿阶段的水蒸气吸附或脱附过程的特征时间; ω_1 和 ω_2 为与之对应的含水率; + 号适用于吸湿过程, - 号适用于放湿过程。

在 Kohler 等^[25]、Thybring 等^[26]的研究中, 对于如何确定 t_1 、 t_2 并无定论。本研究尝试将 t_2 固定为 t_1 的 2 倍, 发现拟合效果良好。

3.2.2 吸放湿平衡预测

由图 3 和图 4 可以看出, 随着环境相对湿度的增大, 达到动态平衡稳定的时间越来越长。已有的研究表明, 对于生土材料来说, 这个时间可能长达数月, 甚至更长。因此, 有必要探索利用前期试验数据来预测未来达到动态平衡的时间和平衡

含水率。以 X/F1.8-59% RH 为例, 分别取吸放湿过程的前 20%、25%、33%、50%、全时段的数据作为数据集进行拟合, 并将拟合结果与实际测量结果进行对比, 结果如图 6(a)、(b) 所示。

比较结果表明, 预测曲线与实测值吻合度较好, 且预测效果随选取数据量的增大而提高。若使用前 50% 时段的数据进行预测, 预测值与实测值的差值为 1.1% (吸湿) 和 3.6% (放湿), 平衡时间的预测值与实测值的差值在 5% 以内。这说明 PEK 模型对吸放湿结果有较好的预测效果。

因此, 本研究基于 PEK 模型对尚未达到平衡的 97% RH 组的吸放湿过程进行预测, 结果如图 6(c)、(d) 所示。结果发现, 放湿过程将在 1 400 h 左右达到平衡, 且平衡含水率随干密度的增加而降低; 吸湿过程将在 700 h 左右达到平衡, 除干密度为 1.5 g/cm³ 一组外, 平衡含水率与干密度关系不明显, 这与在中低湿度下得到的结论基本吻合。

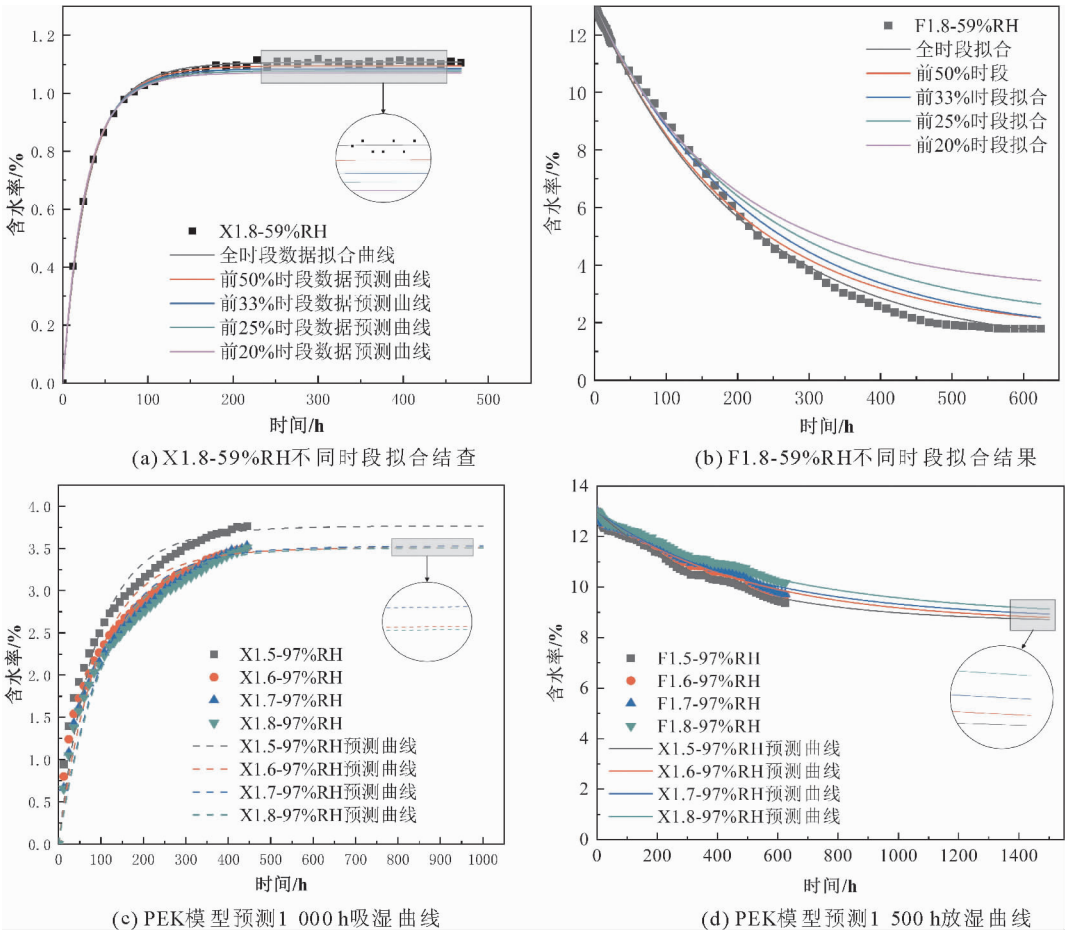


图 6 PEK 模型拟合及预测结果
Fig. 6 PEK model fitting and prediction results

需要指出的是,在称重过程中,由于密闭容器与环境空气相对湿度往往存在差异,引起遗址土试样与环境空气发生湿交换,因此,多次称重会对试验结果造成一定的影响;加之每次开启密闭容器也会导致密闭容器相对湿度发生变化,需要一定的时间来恢复,也会影响预测结果。

4 结论

1) 遗址土等温吸湿和放湿曲线均表现出明显的快速吸放湿和缓慢吸放湿的两阶段性,随相对湿度的增大,吸放湿速率越来越慢,达到平衡状态所需的时间越来越长。

2) 遗址土等温吸湿和放湿平衡含水率随相对湿度的增大而增大,吸湿平衡含水率随着干密度的增大而减小,放湿平衡含水率随着干密度的增大而增大,存在明显的滞回效应。

3) 通过对比 10 余种等温吸放湿曲线拟合公式发现,遗址土等温吸放湿曲线可用 Peleg 公式和冯驰公式来拟合。

4) 基于试验数据认为,平行双指数(PEK)模型可以较好地拟合遗址土吸湿放湿过程,可以利用平衡时间的前 50% 数据来预测最终达到平衡的时间和最终的平衡含水率。

参考文献

- [1] 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.
CHEN W W, WANG K Y, QI Q, 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.
- [2] 李永辉,谢华荣,王建国,等. 苏州吴江近现代青砖等温吸湿性能实验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(2): 441-444.
LI Y H, XIE H R, WANG J G, et al. Experimental research on isothermal sorption properties of early modern and modern gray bricks in Wujiang, Suzhou, China [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44(2): 441-444.
- [3] 李凤洁,王旭东,郭青林. 莫高窟壁画地仗层水汽吸附特征及其影响因素[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020, 50(4): 606-614.
LI F J, WANG X D, GUO Q L. The characteristics

and influencing factors of the moisture adsorption in the earthen plaster of murals in Mogao Grottoes [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2020, 50(4): 606-614.

- [4] 钟辉智,雷波,冯雅. 多孔材料湿平衡曲线拟合函数的确定[J]. 四川建筑科学研究, 2013, 39(2): 244-247.
ZHONG H Z, LEI B, FENG Y. The determination of curve fitting functions of moisture storage in the porous material [J]. Sichuan Building Science, 2013, 39(2): 244-247.
- [5] KAROGLOU M, MOROPOULOU A, MAROULIS Z B, et al. Water sorption isotherms of some building materials [J]. Drying Technology, 2005, 23(1/2): 289-303.
- [6] MOROPOULOU A, KAROGLOU M, GIAKOUMAKI A, et al. Drying kinetics of some building materials [J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2005, 22: 203-208.
- [7] YOUSEFI Y, TARIKU F. Adsorption isotherm of building materials at different temperatures: A review and measurement [J]. Science and Technology for the Built Environment, 2024, 30(7): 709-732.
- [8] 闫增峰,刘加平,王润山. 生土围护结构的等温吸湿性能的实验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2003, 35(4): 347-349.
YAN Z F, LIU J P, WANG R S. Experimental study of moisture absorption isotherms of adobe building materials [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2003, 35(4): 347-349.
- [9] 裴清清,陈在康. 几种常用建材的等温吸放湿线试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 1999, 26(4): 96-99.
PEI Q Q, CHEN Z K. An experimental study on isothermal moisture absorption and desorption processes of some common-used building materials [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition), 1999, 26(4): 96-99.
- [10] 李魁山,张旭,韩星,等. 建筑材料等温吸放湿曲线性能实验研究[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(1): 81-84.
LI K S, ZHANG X, HAN X, et al. Experimental research of isothermal sorption curve of building materials [J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(1): 81-84.
- [11] 尚建丽,麻向龙,张磊. 改性生土材料吸放湿性能研究与结构分析[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(12):

- 3413-3417.
- SHANG J L, MA X L, ZHANG L. Performance of humidity controlling of modified soil materials and structure analysis[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(12): 3413-3417.
- [12] 杨永, 张楠, 张磊, 等. 改性材料对生土砌块湿热性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(2): 313-317.
- YANG Y, ZHANG N, ZHANG L, et al. Influence of modified materials on hygrothermal properties of raw soil block [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2): 313-317.
- [13] LUIKOV A V. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1975, 18(1): 1-14.
- [14] 雷玥, 杨寒羽, 张宇, 等. 多孔建筑材料热湿物理性质测试方法与现状综述[J]. 建筑科学, 2021, 37(2): 165-173.
- LEI Y, YANG H Y, ZHANG Y, et al. Summary of testing methods and current situation of thermal and wet physical properties of porous building materials [J]. Building Science, 2021, 37(2): 165-173.
- [15] LI B, YANG Y, LI Z. Combined effects of multiple factors on spatiotemporally varied soil moisture in China's loess plateau [J]. Agricultural Water Management, 2021, 258: 107180.
- [16] 王桂尧, 李斌, 付宏渊. 非饱和路基土水分运移的室内试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 61-65.
- WANG G Y, LI B, FU H Y. Experimental study of moisture migration of unsaturated soil in embankment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 61-65.
- [17] 程子捷, 张海东, 蒋芳市, 等. 安溪县花岗岩崩岗土体水分特征曲线及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 120-125.
- CHENG Z J, ZHANG H D, JIANG F S, et al. Water characteristic curve and its influence factors of granite Benggang soil in Anxi county [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(3): 120-125.
- [18] 金虹庆, 姚晓莉, 易思阳, 等. 不同孔隙率下加气混凝土吸放湿性能试验研究[J]. 能源工程, 2015, 35(6): 42-50.
- JIN H Q, YAO X L, YI S Y, et al. Experimental study on moisture adsorption and desorption properties of autoclaved aerated concrete with various porosities [J]. Energy Engineering, 2015, 35(6): 42-50.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [20] GREENSPAN L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions[J]. Journal of research of the National Bureau of Standards (Section A: Physics and Chemistry), 1977, 81(1): 89-96.
- [21] CHIRIFE J, IGLESIAS H A. Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1—a review[J]. International Journal of Food Science & Technology, 1978, 13(3): 159-174.
- [22] 张威宁, 高岩, 蔺新星. 多孔建筑材料静态吸湿特性研究[J]. 建筑科学, 2019, 35(4): 60-65.
- ZHANG W N, GAO Y, LIN X X. Study on static hygroscopic properties of porous building materials [J]. Build Science, 2019, 35(4): 60-65.
- [23] PELEG M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms [J]. Journal of Food Process Engineering, 1993, 16(1): 21-37.
- [24] 冯驰. 多孔建筑材料湿物理性质的测试方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [25] KOHLER R, DÜCK R, AUSPERGER B, et al. A numeric model for the kinetics of water vapor sorption on cellulosic reinforcement fibers [J]. Composite Interfaces, 2003, 10(2/3): 255-276.
- [26] THYBRING E E, BOARDMAN C R, GLASS S V, et al. The parallel exponential kinetics model is unfit to characterize moisture sorption kinetics in cellulosic materials [J]. Cellulose, 2019, 26(2): 723-735.

(编辑 雷雁林)