

黄土蒸发失水试验研究及数值模拟分析

孙明明*, 张海山, 汪海威, 曹振家, 关敬轩, 刘同济

西京学院土木工程学院, 陕西省混凝土结构安全与耐久性重点实验室, 陕西 西安

收稿日期: 2025年6月21日; 录用日期: 2025年7月11日; 发布日期: 2025年7月24日

摘要

本研究采用室内控制试验方法, 系统研究了温度、湿度、初始含水量及干密度等关键环境参数对饱和和重塑黄土水分蒸发过程的影响规律。试验重点考察了上述因素对土壤蒸发动力学特征(包括蒸发速率、累积蒸发量及蒸发强度)的作用机制。在数值模拟方面, 本研究基于非饱和土水分运移理论, 运用GeoStudio软件平台构建了耦合水热传输的数学模型, 通过设置合理的气候边界条件和土水特征曲线参数, 实现了对实际蒸发过程的准确模拟。研究不仅验证了模型的可靠性, 还揭示了蒸发过程中土壤内部水分迁移与温度场分布的耦合作用机制, 这些研究成果为黄土地区水分管理提供了重要的理论依据和实践指导。

关键词

蒸发失水, 黄土, 数值模拟, 蒸发速率

Experimental Study and Numerical Simulation Analysis on Water Loss by Evaporation of Loess

Mingming Sun*, Haishan Zhang, Haiwei Wang, Zhenjia Cao, Jingxuan Guan, Tongji Liu

Key Laboratory of Concrete Structure Safety and Durability of Shaanxi Province, School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an Shaanxi

Received: Jun. 21st, 2025; accepted: Jul. 11th, 2025; published: Jul. 24th, 2025

Abstract

This study employed the indoor control test method to systematically investigate the influence of

*通讯作者。

文章引用: 孙明明, 张海山, 汪海威, 曹振家, 关敬轩, 刘同济. 黄土蒸发失水试验研究及数值模拟分析[J]. 土木工程, 2025, 14(7): 1686-1697. DOI: 10.12677/hjce.2025.147182

key environmental parameters, including temperature, humidity, initial water content, and dry density, on the water evaporation process of saturated reshaped loess. The experiment focused on investigating the mechanism of the above factors on the dynamic characteristics of soil evaporation (including evaporation rate, cumulative evaporation volume, and evaporation intensity). In terms of numerical simulation, based on the theory of unsaturated soil water transport, this study constructed a mathematical model coupled with water and heat transfer using the GeoStudio software platform. By setting reasonable climatic boundary conditions and soil-water characteristic curve parameters, an accurate simulation of the actual evaporation process was achieved. The research not only verified the reliability of the model but also revealed the coupling mechanism of internal soil water migration and temperature field distribution during the evaporation process. These research results provide an important theoretical basis and practical guidance for water management in loess areas.

Keywords

Evaporation and Water Loss, Loess, Numerical Simulation, Evaporation Rate

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土壤水分蒸发作为土-气界面能量交换的关键环节,其过程涉及复杂的气象-土壤耦合作用机制,直接影响着区域水热平衡。国内外学者对此开展了系统研究:Kondo 团队[1]发现风速对蒸发初期阶段具有显著调控作用;唐朝生等[2]通过控制试验揭示了干旱环境下温度与土层厚度的协同效应。这些研究证实,准确预测土壤水分动态必须建立多因素耦合分析模型。

在蒸发机制研究方面,滕继东等[3]创新性地提出了不饱和黄土的气化蒸发计算模型;王政友[4]系统阐释了土壤湿度变化的驱动机制;顾凯[5]通过温控试验量化了土层厚度对湿度演变的影响。值得注意的是,王铁行团队[6]-[9]系列研究揭示了温度梯度驱动的水分迁移规律,发现低温区存在明显的水分富集现象,并建立了考虑表层湿度因子的蒸发计算模型。Bai 等[10]进一步验证了温致水分重分布现象,指出该过程将持续至系统达到新的热力学平衡。

在砂性土水分蒸发研究方面,宋卫康研究团队[11]采用大型物理模拟试验系统,系统揭示了砂性土覆盖层中水分汽化蒸发的动力学机制。杨洋及其合作者[12]创新性地构建了公路路基水分迁移的气候响应模型,为评估气候变化对路基湿度场的影响提供了量化工具。针对典型黄土地区,刘小军课题组[13]通过精细试验,明确了西安黄土中气态水与液态水的交互迁移特征及其耦合作用规律,这些成果深化了对非饱和带水分运移过程的认识。叶万军等学者[14]则系统研究了初始干密度和含水量对黄土水分运移的影响,定量刻画了不同条件下的水分再分布特征。王会肖和孙宏勇团队[15][16]利用小型蒸发仪开展的系统观测表明,砂质土壤的蒸发过程呈现明显的阶段性特征,且这一过程受到气候条件和地表湿度状态的双重调控。Wilson 团队[17]建立的土-气相互作用模型为农田水分预报提供了新方法。这些研究成果共同构成了土壤水分蒸发理论体系,为干旱区水资源管理提供了重要科学依据。

土壤水分模拟研究的发展历程反映了数值计算技术的进步与理论认识的深化。早在上世纪 60 年代,Hanks [18]和 Bowers [19]开创性地采用静止网格法研究渗流规律,为后续研究奠定了基础。70 年代见证

了数值方法的重大突破: Braja [20]首次将有限元法应用于土壤湿度模拟, Dane J [21]则运用 Galerkin 法成功模拟了非饱和土的垂向水分运移。我国学者雷志栋等[22]-[24]在 50 年代就采用里兹有限元法研究一维非饱和流问题, 王金平[25]于 80 年代末率先引入隐式差分法处理不同水分条件, 谢正辉团队[26]则在 90 年代运用混合有限元法系统研究了渗流、蒸发等复杂水文过程。

进入 21 世纪后, 土壤水分模拟技术向多物理场耦合方向发展。丁雪华等[27]开发了新型农田湿度预报模型, 成向荣团队[28]应用 SHAW 模式研究黄土高原蒸散发。

研究通过试验和模拟, 揭示了温度、湿度、初始含水量和干密度对黄土蒸发的影响。研究发现, 温度影响最大, 干密度次之。蒸发过程分为三个阶段: 快速蒸发、过渡阶段和慢速阶段。干密度增加(1.4→1.6 g/cm³)使蒸发量减少 37%, 而高温(45℃)低湿(30% RH)使蒸发速率提高 2.1 倍, 但湿度升高(70% RH)会减弱温度效应 50%。模拟显示, 温度梯度驱动了 65% 以上的水分迁移, 为黄土地区水分管理提供了科学依据。

2. 试验

2.1. 原材料

该研究选定的地点位于中国陕西省西安市长安区, 本区的地质结构以粉质粘土、中粒度沙、粗砂和漂石为主。根据地质成因和地形特征, 该地区的地质结构可划分为人工填土层(属于第四纪全新世)、卵石冲积层(包括上全新世和下全新世)、粉质粘土、中粗砂, 以及风积黄土层(属于第四纪更新世)。相关地层分布情况详见图 1。



Figure 1. Overview of soil extraction
图 1. 取土概况

2.2. 含水率和密度试验

测得的天然含水量为 15.84%。采用环刀法测量天然密度, 经 3 组平行试验, 计算最终自然密度为 1.71 g/cm³, 干密度为 1.48 g/cm³。

2.3. 液塑限试验

液塑性试验的参数结果, 如图 2 中所示。

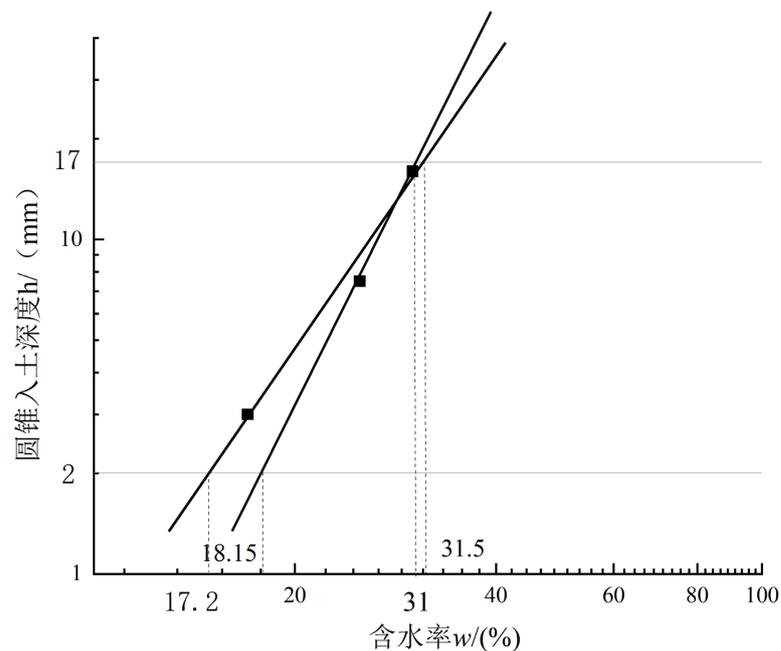


Figure 2. Relationship between the depth of the cone head entering the soil and the moisture content
图 2. 锥头入土深处随含水率变化关系

液塑限试验的参数结果，如图 2 所示，黄土试样的液限 w_L 测定为 31%，塑限 w_p 测定为 18.15%。根据这些数据，可以计算出黄土试样的塑性指数 I_p 为 12.85。

2.4. 比重试验

用比重瓶法测定比重，计算公式如式 1 所示：

$$G_s = \frac{m_d}{m_{bw} + m_d - m_{bwT}} \times G_{iT} \quad (1)$$

其中： m_{bwT} ——比重瓶、水以及试样总质量(g)；

m_{bw} ——比重瓶与水的总质量(g)；

m_d ——干土质量(g)；

G_{iT} ——T℃时纯水的比重；

G_s ——土的比重。

最终比重为 2.7。

2.5. 试验设备

本试验采用 GT-TH-S-225Z 型恒温恒湿箱进行蒸发失水测试，该设备具有以下技术特性：

- 1) 温控范围广：可在-40℃至 150℃区间内精确调节温度；
- 2) 湿度控制精准：相对湿度调节范围为 30%~98%；
- 3) 测量精度高：

温度测量误差不超过±0.1℃；

温度控制精度达±0.3℃；

相对湿度控制偏差在±1.5% rh 以内。

4) 稳定性表现:

在 100℃以下温区, 温度波动小于±1.0℃;

高温段(100℃~150℃)温度波动控制在±1.5℃;

湿度波动范围维持在±2.0%至-3.0%之间;

该设备为试验提供了稳定的温湿度环境条件, 确保蒸发过程测试数据的可靠性。

3. 结果与讨论

3.1. 温度对土样水分蒸发的影响规律

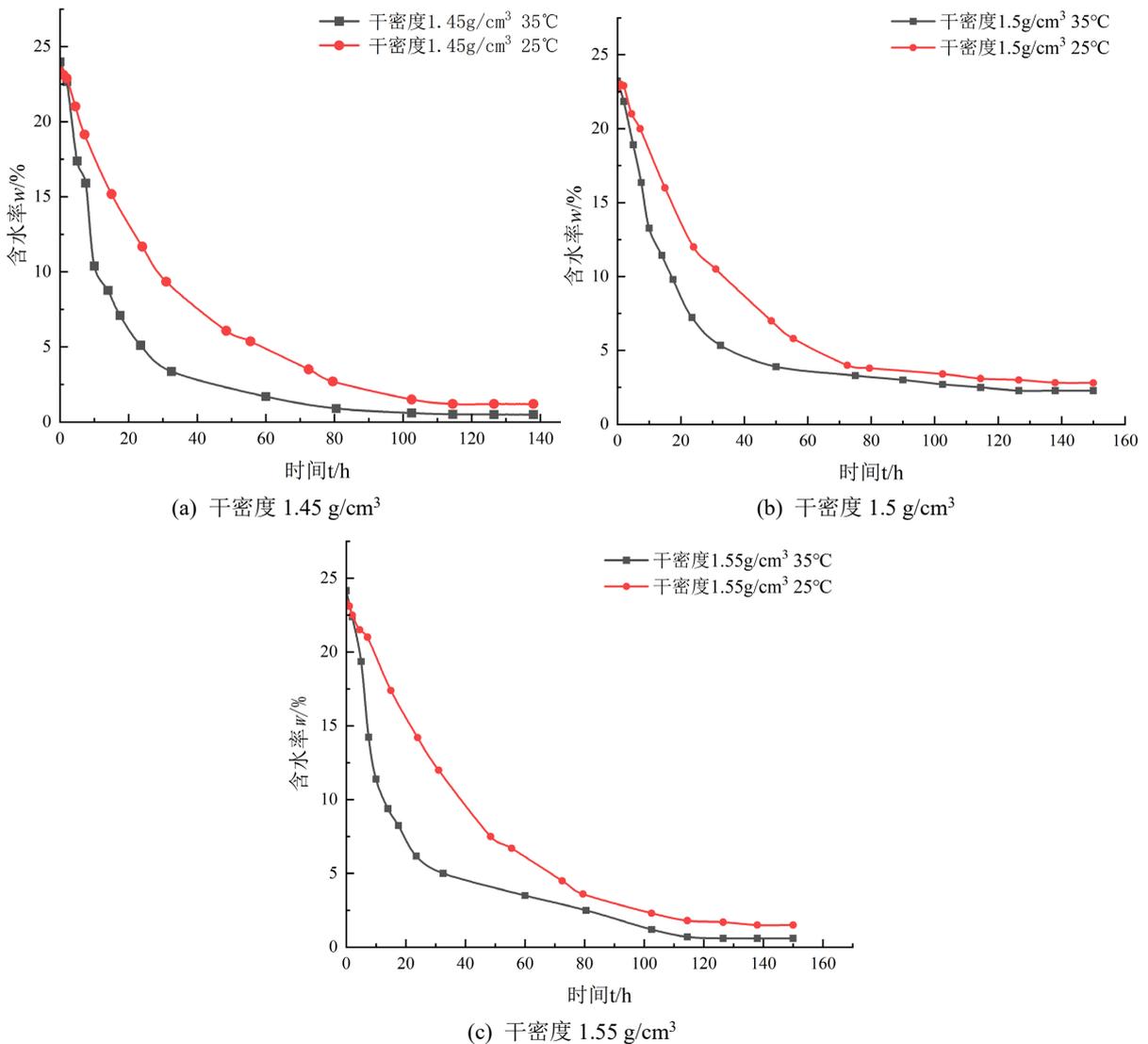


Figure 3. Variation of moisture content with time at different temperatures

图 3. 不同温度下含水率随时间变化

试验结果(图 3)揭示了温度对土壤水分动态的显著影响。在 35℃条件下, 土壤含水率呈现三阶段变化特征: 初始阶段(0~25 h)快速下降, 过渡阶段(25~40 h)速率减缓, 稳定阶段(80 h 后)趋于平衡。相比之下, 25℃处理的土壤水分变化表现出不同的动态特征: 在 45~50 h 出现明显转折点后, 含水率下降速率显著

降低, 至 80 h 后基本保持稳定。这种温度依赖性的水分动态变化, 反映了土壤蒸发过程中能量供给与水分传输的耦合作用机制。

另外, 由(2)、(3)等式拟合出了蒸发率与时间的关系, 结果表明, 整个蒸发可分为三个阶段, 如图 4 所示。从图 4 可以看出, 这三个阶段的蒸发速度与含水量的变化规律是一致的。

$$35^{\circ}\text{C}、60\%: v = 0.0000479 + \frac{0.01847}{1 + 10^{0.001(t-2207.7)}}, R^2 = 0.99 \quad (2)$$

$$25^{\circ}\text{C}、60\%: v = 0.000421 + \frac{0.678}{1 + 10^{0.0046(t-53.7)}}, R^2 = 0.97 \quad (3)$$

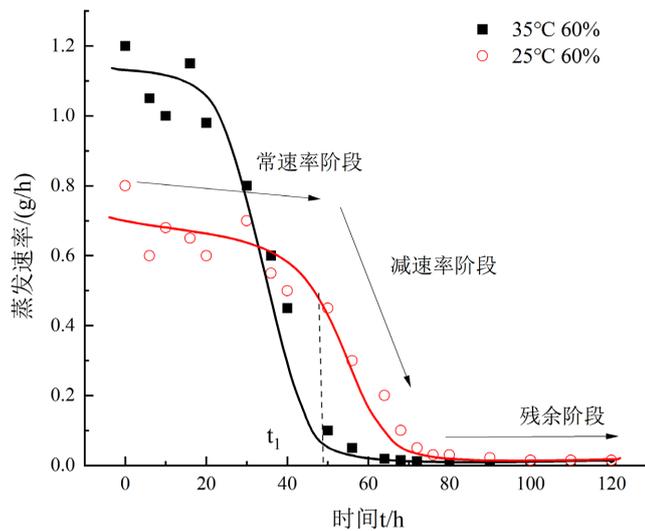


Figure 4. Shows the variation of evaporation rate with time at different temperatures
图 4. 不同温度下蒸发速率随时间变化

试验数据表明, 在恒定速率蒸发阶段, 土样呈现出明显的温度依赖性特征。当环境温度从 25°C 升至 35°C 时, 蒸发速率由 0.75 g/h 显著提升至 1.15 g/h, 增幅达到 53%。与此同时, 该阶段的持续时间由 45 小时缩短至 30 小时, 显示出温度升高对蒸发过程的双重加速效应。

随着蒸发进入减速阶段, 温度的影响依然显著。试验观察到, 温度升高不仅降低了减速期的蒸发速率, 同时也缩短了这一阶段的持续时间。具体表现为: 在 25~35°C 范围内, 试样完成剩余汽化过程所需时间从 75 小时减少至 60 小时。值得注意的是, 25°C 和 35°C 条件下的最终蒸发速率稳定在 0.45 g/h, 而整个蒸发过程的平均蒸发率为 0.57 g/h。

图 4 的累积蒸发量曲线进一步证实, 温度升高不仅显著提高了瞬时蒸发速率, 同时缩短了系统达到蒸发平衡状态的时间。这一现象揭示了温度对土壤水分蒸发过程具有促进和加速的双重作用机制。

3.2. 湿度对土样水分蒸发的影响规律

图 5 显示了环境湿度对压实土样水分蒸发过程的显著影响。试验数据表明, 在 60% 相对湿度条件下, 土样含水量呈现快速下降趋势, 而当环境湿度提升至 80% 时, 含水量递减速率明显减缓。这一现象的产生机理主要与土壤-大气界面水汽压差的变化有关: 在高湿度环境下, 土壤表层水蒸气接近饱和状态, 导致水汽压梯度减小, 从而抑制了蒸发过程。同时, 温度与湿度的负相关特性进一步降低了蒸发驱动力。

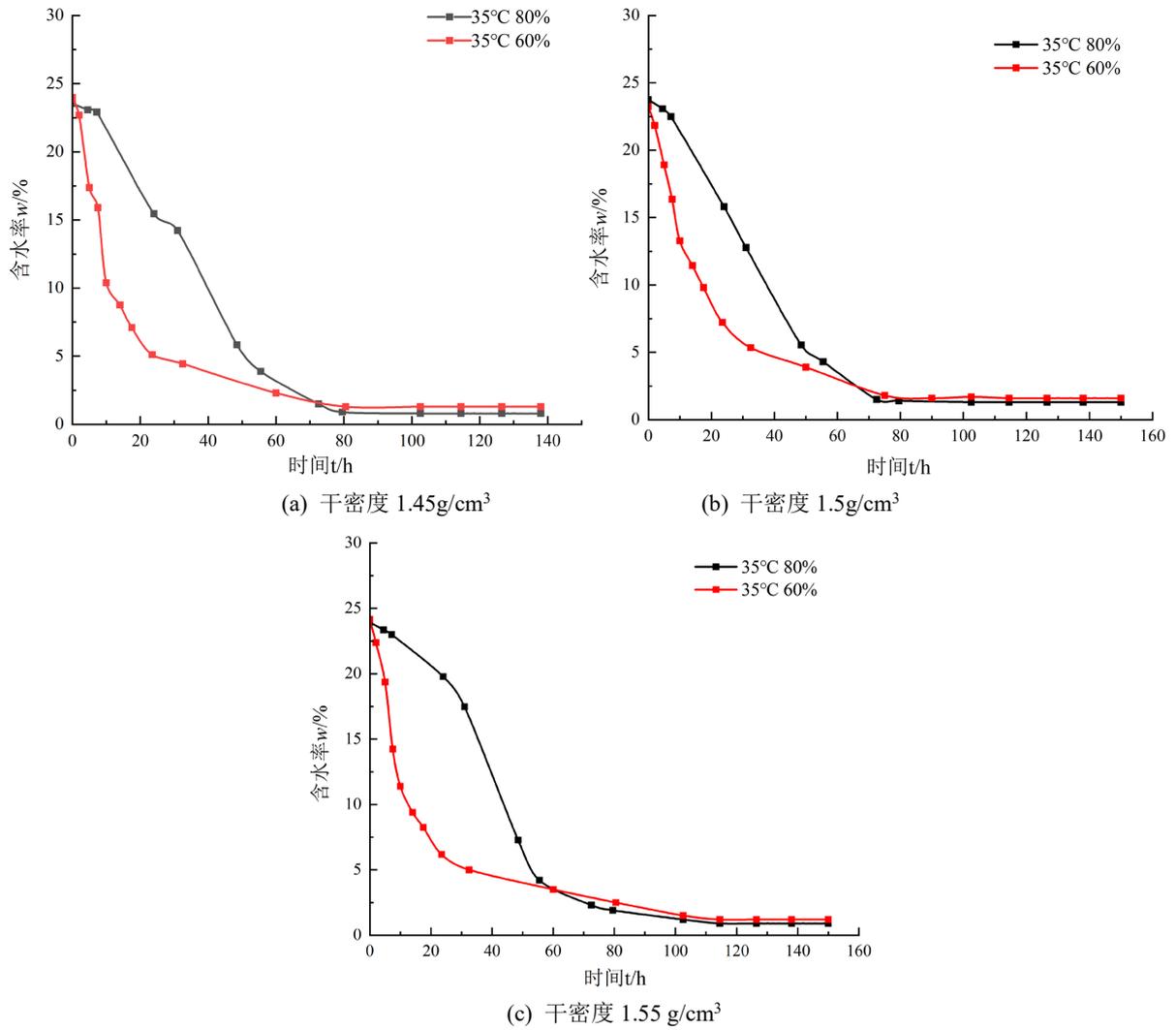


Figure 5. Shows the variation of moisture content with time under different humidity levels
图 5. 不同湿度下含水率随时间变化

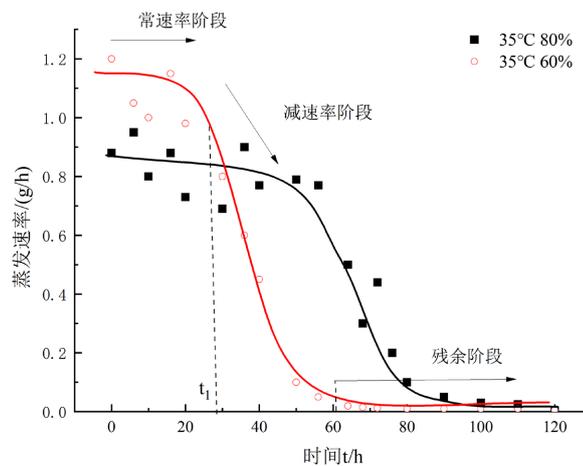


Figure 6. Variation of evaporation rate with time at different humidity levels (Taking dry density 1.45 g/cm³ as an example)
图 6. 不同湿度下蒸发速率随时间变化(以干密度 1.45g/cm³ 为例)

基于 35℃ 和 80% 相对湿度条件下的试验数据, 本研究建立了蒸发速率随时间变化的定量关系模型(式 4)(图 6), 该模型能够准确描述特殊环境下的土壤水分蒸发规律。研究成果不仅深化了对土壤蒸发过程的理论认识, 而且为农田水分动态预测和水资源管理提供了重要的科学依据。

$$35^{\circ}\text{C}、80\%: \nu = 0.0000333 + \frac{0.1383}{1 + 10^{0.0006(t-4278)}}, R^2 = 0.95 \quad (4)$$

3.3. 初始含水率对土样水分蒸发的影响规律

在这段研究中, 拟通过测定土样的干密度 1.45 g/cm^3 , 设置不同的初始含水率(15%, 20%, 24%), 采用蒸发试验, 观测各因素对含水量、蒸发量, 以及蒸发速率随时间的变化规律。试验的结果显示在图 7、图 8 中。

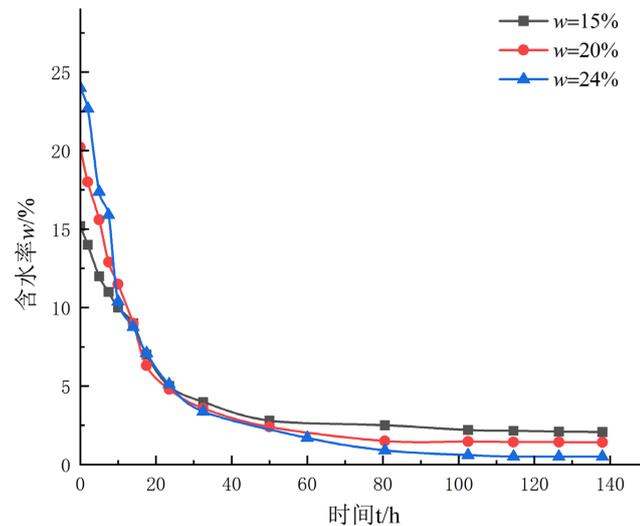


Figure 7. Variation of moisture content with time (Taking dry density 1.45 g/cm^3 as an example)

图 7. 含水率随时间的变化(以干密度 1.45 g/cm^3 为例)

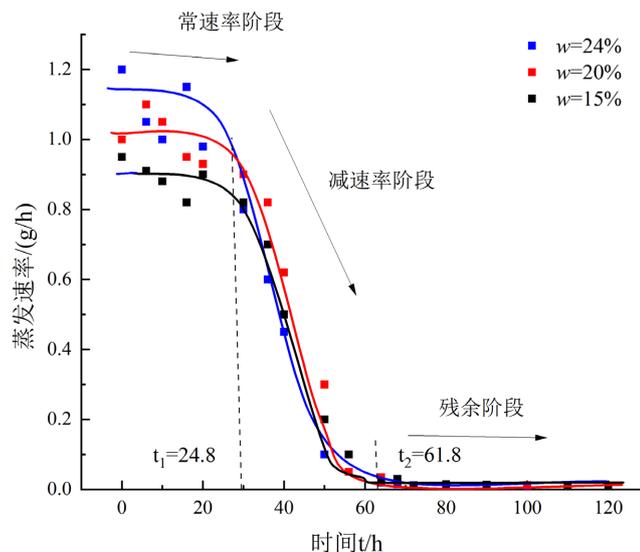


Figure 8. Variation of evaporation rate with time (Taking dry density 1.45 g/cm^3 as an example)

图 8. 蒸发速率随时间的变化(以干密度 1.45 g/cm^3 为例)

试验数据揭示了初始含水量对土壤蒸发过程的显著影响。从时间维度来看,土壤含水量呈现明显的阶段性变化特征:在初始阶段(0~20 h),含水量随时间呈线性快速下降,三个初始含水量(24%、20%、15%)试样的平均下降速率分别为 1.7、1.14 和 0.86%每小时;随后进入过渡阶段(20~80 h),下降速率逐渐减缓;最终在 80 h 后达到相对稳定状态。

在恒定速率蒸发阶段,初始含水量与蒸发强度呈现正相关关系。具体表现为:初始含水量为 24%、20%和 15%的试样,其初始蒸发速率分别为 1.15、1.02 和 0.9 g/h,即初始含水量每增加 5%,蒸发速率平均提高约 27.8%。值得注意的是,这一阶段的持续时间在不同初始含水量条件下基本保持一致。当进入减速蒸发阶段后,各试样的蒸发速率趋于一致,最终在残余蒸发阶段接近零值。在整个蒸发过程中,初始含水量 24%、20%和 15%试样的总平均蒸发量分别为 0.57、0.51 和 0.45 g/h,进一步证实了初始含水量对蒸发总量的决定性影响。

4. 黄土蒸发数值模拟分析

本研究以典型黄土为研究对象,基于水-热耦合作用理论,采用数值模拟方法系统研究了蒸发条件下黄土的水分运移机制。研究运用 Geo-Studio 数值模拟平台,创新性地建立了考虑潜在蒸发与实际蒸发动态转换的一维蒸发模型,实现了对黄土蒸发过程中水分迁移规律的定量刻画。通过数值模拟与室内试验的对比验证,研究揭示了黄土蒸发过程中水分场与温度场的耦合演化特征及其相互作用机制。

以体积含水量折算起始重量含水量,见式(5)。

$$\theta_w = \frac{V_w}{V} = \frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot \omega \quad (5)$$

式中: θ_w -体积含水量(cm^3/cm^3); ρ_d -土壤干密度(g/cm^3); ω -土壤重量含水量(%); ρ_w -水密度(g/cm^3);

(1) 设置水头属性函数

基于这些参数,我们创建了一个尺寸为高 20 毫米、宽 80 毫米的环刀模型,并应用了 Van Genuchten 模型来描述土壤水分关系。在这个模型中,我们将重量含水量(w)转换为体积含水量(θ),并据此计算了土壤的吸力头(h_w)和渗透系数(K_w)。

(2) 建立环刀模型

建造了土柱的坐标系统和模型,其中 X 轴和 Y 轴的距离设定为 0.1 米,模拟的环刀样本尺寸为 20 mm 高,宽度为 80 mm。模型的表层材料尺寸与环刀样品一致,即高度 0.02 m 至 0.04 m,这一区域被指定为应用气候边界条件和进行数据分析的区域。模型的体网格大小是 0.5 m,划分成 12 个结点,6 个结点,模拟的时间步长设置为每 8 天进行一次迭代。

(3) 设置蒸发气候边界函数

设定最大、最小温度 35℃,最大、最小湿度 80%,雨量 0 毫米,潜在蒸发强度为 35℃。

(4) 设置初始水位和最大负压力水头

最后一步输入初始水位为(0, 0)、(0.08, 0),最大负压力水头为 0.04 m。

图 9 展示了实际值与预测值对比,试验结果分析揭示了土壤蒸发过程的动态特征(9)。在干燥初期(0~52 h),由于土壤水分充足,蒸发作用强烈,导致含水量快速下降;随后进入稳定阶段(50~55 h 后),蒸发速率显著减缓,含水量趋于平衡。数值模拟结果与实测数据对比表明,所建立的模型能够准确再现这一动态过程,特别是在累积蒸发量的预测方面表现出良好的精度(误差<5%),验证了模型在描述土壤水分运移规律方面的可靠性。这一研究成果为黄土地区土壤水分动态模拟提供了有效的数值分析工具。

通过分析数值结果可得,模型能够反映蒸发条件下土体水分运动规律的大致趋势,结果吻合。

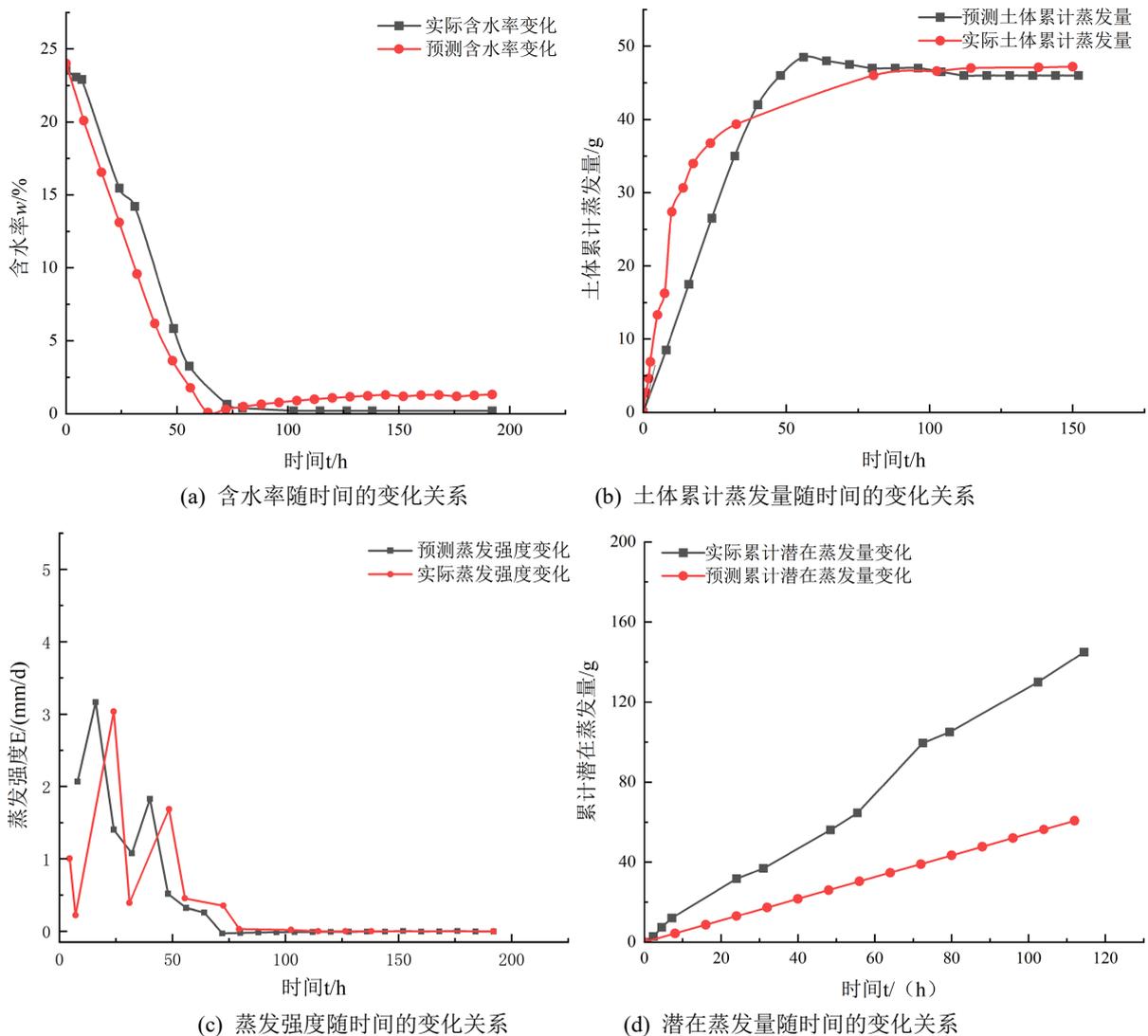


Figure 9. Comparison of actual values and predicted values

图9. 实际值与预测值对比

5. 结论

在本章研究中, 在不同环境温度、湿度、初始含水量、干密度等因素下的黄土的蒸发特性展开系统的研究。通过采用单变量方法对这些因素进行逐一研究, 开展了一系列的蒸发试验, 旨在探究这些环境因素对土壤蒸发速率和累积蒸发强度的影响, 并揭示了不同阶段土壤蒸发速率和累积蒸发强度的作用机制。研究结果可总结如下:

(1) 土壤水分蒸发过程呈现明显的三阶段特征: 第一阶段为稳定蒸发期, 此时土壤水分供给充足, 蒸发速率维持在较高水平; 第二阶段进入减速蒸发期, 随着含水量降低, 蒸发速率呈递减趋势; 最后达到残余蒸发阶段, 此时土壤水分接近残余含水量, 蒸发速率显著降低并最终趋于稳定状态。这种阶段性变化反映了土壤水分蒸发过程中供水能力与蒸发需求之间的动态平衡关系。

(2) 本研究构建了蒸发量与潜在蒸发量之间的定量关系模型, 通过多元回归分析确定了蒸发系数的数学表达式。该模型能够准确表征各环境因子对蒸发过程的综合影响, 为土壤水分动态模拟和蒸发量预

测提供了可靠的量化工具。

(3) 基于 Geo-Studio 数值模拟平台, 本研究整合了土壤水分运移理论、VanGenuchten 土水特征模型和傅抱璞蒸发模型, 建立了黄土一维蒸发过程的耦合计算模型。通过将模拟结果与室内试验数据对比验证, 系统揭示了潜在蒸发强度与实际蒸发强度的动态关系, 明确了蒸发过程中水分场与温度场的空间分布特征及其耦合机制。这一研究成果不仅深化了对黄土地区土壤蒸发机理的认识, 也为区域水土保持和农田水分管理实践提供了理论支撑和技术指导。

参考文献

- [1] Kondo, J., Saigusa, N. and Sato, T. (1992) A Model and Experimental Study of Evaporation from Bare-Soil Surfaces. *Journal of Applied Meteorology*, **31**, 304-312. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1992\)031<0304:amaeso>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1992)031<0304:amaeso>2.0.co;2)
- [2] 唐朝生, 施斌, 顾凯, 等. 土中水分的蒸发过程试验研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(6): 875-881.
- [3] 滕继东, 单锋, 张升, 等. 考虑风速影响的土表蒸发计算方法[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1): 100-107.
- [4] 王政友. 土壤水分蒸发的影响因素分析[J]. 山西水利, 2003(2): 26-27.
- [5] 顾凯. 土中水分迁移试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 19(6): 775-781.
- [6] 王铁行, 陆海红. 温度影响下的非饱和黄土水分迁移问题探讨[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1081-1084.
- [7] 王铁行, 刘自成, 岳彩坤. 浅层黄土温度场数值分析[J]. 西安建筑科技大学学报, 2007, 39(4): 463-467.
- [8] 王铁行, 陈晶晶, 李彦龙. 非饱和黄土地表蒸发的试验研究[J]. 干旱区研究, 2014, 31(6): 985-990.
- [9] 王铁行, 贺再球, 赵树德, 孙建乐, 等. 非饱和土体气态水迁移试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(18): 3271-3275.
- [10] Bai, R., Lai, Y., Zhang, M. and Ren, J. (2020) Study on the Coupled Heat-Water-Vapor-Mechanics Process of Unsaturated Soils. *Journal of Hydrology*, **585**, Article ID: 124784. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124784>
- [11] 宋卫康, 丁文其, 崔玉军. 恒定大气条件下砂土蒸发机制的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 405-412.
- [12] 杨洋, 姚海林, 卢正. 蒸发条件下路基对气候变化的响应模型及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1209-1220.
- [13] 刘小军, 闫玉闯, 罗扬. 非饱和黄土水分迁移规律及迁移量的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(1): 56-61.
- [14] 叶万军, 刘忠祥, 杨更社, 等. 温度变化条件下重塑黄土水分迁移试验[J]. 煤田地质勘探. 2017, 45(4): 126-130.
- [15] 王会肖. 砂土土壤蒸发的测定与模拟[J]. 中国农业气象, 1997, 18(4): 29-35.
- [16] 孙宏勇, 刘昌明, 张永强, 等. 微型蒸发器测定土面蒸发的试验研究[J]. 水利学报, 2004(8): 114-118.
- [17] Wilson, G.W., Fredlund, D.G. and Barbour, S.L. (1997) The Effect of Soil Suction on Evaporative Fluxes from Soil Surfaces. *Canadian Geotechnical Journal*, **34**, 145-155. <https://doi.org/10.1139/t96-078>
- [18] Hanks, R.J. and Bowers, S.A. (1962) Numerical Solution of the Moisture Flow Equation for Infiltration into Layered Soils. *Soil Science Society of America Journal*, **26**, 530-534. <https://doi.org/10.2136/sssaj1962.03615995002600060007x>
- [19] Bruch, J.C. and Zyvoloski, G. (1973) Solution of Equation for Vertical Unsaturated Flow of Soil Water. *Soil Science*, **116**, 417-422. <https://doi.org/10.1097/00010694-197312000-00004>
- [20] Braja, M.D. (2008) *Advanced Soil Mechanics*. Taylor & Francis
- [21] Dane, J.H. and Mathis, F.H. (1981) An Adaptive Finite Difference Scheme for the One-Dimensional Water Flow Equation. *Soil Science Society of America Journal*, **45**, 1048-1054. <https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500060008x>
- [22] 雷志栋, 杨诗秀. 非饱和土壤水一维流动的数值计算[J]. 土壤学报, 1982(2): 141-153.
- [23] 杨诗秀, 雷志栋. 均质土壤降雨喷洒入渗模型的数值计算[J]. 水利学报, 1983(5): 3-11.
- [24] 杨诗秀, 谢森传. 均质土壤一维非饱和流动通用程序[J]. 土壤学报, 1985(1): 24-35.
- [25] 王金平. 蒸发条件下层状土壤水分运动的数值模拟[J]. 水利学报, 1989(5): 49-42.
- [26] 谢正辉, 罗振东. 非饱和土壤水流问题含水量和通量的数值模拟研究[J]. 自然科学进展, 1999(S1): 1280-1286.

- [27] 丁雪华, 史海滨, 孔东. 两种土壤水分动态预测数值方法的应用[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2000, 21(2): 73-77.
- [28] 成向荣, 黄明斌, 邵明安. 基于 SHAW 模型的黄土高原半干旱区农田土壤水分动态模拟[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 1-7.