

DOI: 10.11779/CJGE2022S2036

# 基于PDV模型对一维“锅盖效应”气态水迁移的研究

唐国航<sup>1,2</sup>, 王乃东<sup>\*1</sup>, 姚仰平<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100191; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘要:** “锅盖效应”是一种重要的土中水汽迁移现象, 常发生于季节性冻土区域, 带来许多工程病害的发生。在目前“锅盖效应”试验与理论的研究、非饱和土体水汽迁移模型的基础上, 考虑多种影响因素, 基于PDV模型提出并推导了一维“锅盖效应”气态水迁移方程, 用于描述或预测“锅盖效应”现象, 并分析了温度与饱和度对“锅盖效应”迁移通量的影响。

**关键词:** 锅盖效应; 水汽迁移; 迁移通量; 浓度梯度

**中图分类号:** TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2022)S2-0164-05

**作者简介:** 唐国航(1995—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 博士研究生, 主要从事岩土工程土工试验方面研究。E-mail: TangGuohang@tongji.edu.cn。

## One-dimensional "pot cover effect" for migration of gaseous water based on PDV model

TANG Guo-hang<sup>1,2</sup>, WANG Nai-dong<sup>1</sup>, YAO Yang-ping<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The "pot cover effect" is an important phenomenon of water vapor migration in soils, which often occurs in the seasonal permafrost regions and causes many engineering diseases. Based on the current "pot cover effect" experiments and theoretical studies and unsaturated models for migration of soil moisture, considering the multiple influence factors, a one-dimensional "pot cover effect" gaseous water transport equation is proposed by using the PDV model. It is used to describe or predict the "pot cover effect" phenomenon, and the influences of the temperature and degree of saturation of soils on the "pot cover effect" of migration flux are investigated.

**Key words:** pot cover effect; water vapor migration; migration flux; concentration gradient

## 0 引言

“锅盖效应”是由李强等<sup>[1]</sup>提出的用以描述土中的水汽, 因毛细作用、温度作用、蒸发等作用向土体表面迁移的过程中, 受到地表不透气的覆盖层的阻碍, 而在覆盖层下积聚的现象。

“锅盖效应”广泛存在于建筑、公路、机场等工程中, 沈阳桃仙机场在其地下水位极低(埋深28~35 m)的情况下, 在机场跑道道面下积聚了大量水而对跑道造成损害<sup>[2]</sup>; 敦煌机场跑道道面下的水汽不能有效蒸发, 在道面以下不断下降的冰冻线附近结成冰, 造成道面鼓胀变形破坏<sup>[3]</sup>; 斯堪的纳维亚、加拿大北部和美国北部的某些路面和颗粒基层之间的界面处凝结的水分过多<sup>[4]</sup>, 造成柔性路面的过早失效。建筑物基础、公路路面和机场跑道形成的“锅盖”, 可能会导致土中含水量分布发生改变, 这将影响土体的变形和承载力, 也可能给道面带来冻胀、唧泥、掉角、断板

以及不均匀沉降等一系列工程灾害。因此, 对于“锅盖效应”的发生机理探讨、试验再现、防范措施也开始进入了大规模的探索和研究阶段<sup>[5-10]</sup>。

目前, 非饱和土的冻胀研究极少开展, 传统的非饱和土渗流理论常常忽略低温条件下水汽的迁移特征和规律, 而传统冻土理论也多基于饱和土渗流理论, 关注液态水的冻结和集聚作用, 较少涉及气态水的迁移。然而, Milly<sup>[11]</sup>通过非饱和土试验、Miyazaki<sup>[12]</sup>通过一维土体湿热空气扩散试验, Anthony等<sup>[13]</sup>通过裸地土壤的现场试验, 均发现气态水在土中的迁移现象非常明显。Zhang<sup>[14]</sup>等在对“锅盖效应”的研究中, 采用荧光示踪剂来追踪土壤未冻结的液态水的位置, 更进一步证实了“锅盖效应”中气态水迁移的重要影响。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51978028)

收稿日期: 2022-12-06

\*通信作者(E-mail: wangnd@buaa.edu.cn)

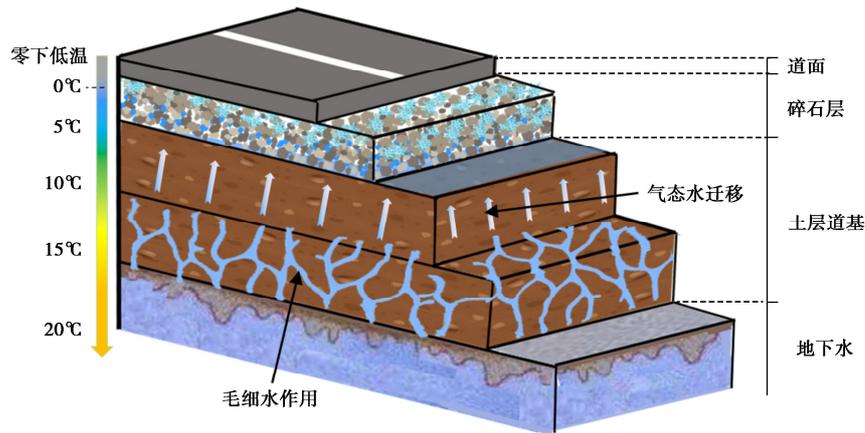


图 1 “锅盖效应”的发生机理

Fig. 1 Mechanism of "pot cover effect"

因此本文在前人研究的基础上, 考虑了土体的土颗粒骨架结构、孔隙率、饱和度、蒸汽压、以及温度对“锅盖效应”气态水迁移的影响, 基于 PDV 经典水汽迁移模型, 推导出在“锅盖效应”的框架内的一维气态水迁移方程, 并分析了温度与饱和度对“锅盖效应”气态水迁移通量的影响, 为“锅盖效应”的研究提供帮助。

## 1 一维“锅盖效应”气态水迁移方程

### 1.1 “锅盖效应”的机理

“锅盖效应”是一种土中的水汽迁移现象, 土层道基以下的地下水是“锅盖效应”的主要水来源, 地下水在毛细作用下向上迁移, 但当地下水位较深的时候, 如沈阳桃仙机场, 地下水埋深约 28~35 m, 毛细作用很难上升这么大的高度, 此时在道面零下低温的条件下, 温度梯度的作用使气态水的迁移成为了土层道基中水汽迁移的主要组成部分, 气态水在土层道基中向上迁移至道面下的碎石层中, 被不透气的道面所阻挡, 而碎石层的温度较低, 因此气态水在碎石层中凝结成液态水, 并积累在碎石层中, 如图 1 所示。

### 1.2 一维“锅盖效应”气态水迁移方程的建立

土体内的水汽迁移十分复杂, Sherwood<sup>[15]</sup>认为土体水汽迁移的驱动势是土体的湿含量梯度; Cealgske 等<sup>[16]</sup>认为驱动势为土体内部的毛细管势能; Henry<sup>[17]</sup>认为是土体内的蒸汽扩散。但单一的驱动势是无法很好地描述土体内水汽迁移的真实现象。Philip 等<sup>[18]</sup>提出的非饱和土壤中水汽迁移的双场模型, 作为以温度梯度和湿分梯度为驱动势的双场模型, 该模型着重考虑到了土体气相的水分传输, 这印证了目前“锅盖效应”现象中土体中气态水迁移的重要影响, 这也是本文采用该模型作为“锅盖效应”气态水迁移方程理论基础的原因。该模型提出了水蒸气通过非饱和土壤的流动机制:

$$V_v = -\frac{D_{\text{atms}} v \tau \theta_a}{\rho_w} \nabla \rho_v, \quad (1)$$

式中  $V_v$  为水蒸气的速度;  $D_v$  为扩散系数;  $v$  为质量流因子;  $\tau$  为土壤迂曲度;  $\theta_a$  为单位体积空气的含量;  $\rho_v$  为水蒸气的密度;  $\rho_w$  为液态水的密度;  $\nabla \rho_v$  为水蒸气的密度梯度。

对于单位体积空气的含量, 有

$$\theta_a = \phi - \theta_w, \quad (2)$$

式中,  $\phi$  为孔隙率,  $\theta_w$  为单位体积的液态水含量。

土壤的孔隙气体则可以作为孔隙干燥空气与孔隙水蒸气组成的二元混合物。在土体内气态水的迁移过程中, 存在着与孔隙液态水之间的冷凝与蒸发, 维持着动态平衡, 因此可以认为孔隙液态水与孔隙气态水之间的冷凝与蒸发速率相同, 任意一点上单位体积的液态水与气态水处于平衡状态<sup>[19]</sup>, 此时液态水与气态水之间界面的曲率则决定蒸汽分压, 而土体的饱和度则决定的液态水与气态水之间界面的曲率, 因此蒸汽压力与多孔介质的液体饱和度存在函数关系。

从热力学可知, 流体的绝对自由能  $G$  是分子离开该相倾向的一种量度。对于“锅盖效应”中土体孔隙中与蒸汽处于平衡状态的液态水, 其液态水的自由能  $G_w$  应等于蒸汽的自由能  $G_v$ 。如果出现从一个平衡状态的过渡, 则一定有  $dG_w = dG_v$ 。

假定液态水的压力改变一个微量  $du_w$ , 在蒸汽压力中必将发生相应的改变  $du_v$ , 于是有

$$V_w du_w = V_v du_v, \quad (3)$$

式中  $V_w$  和  $V_v$  为液态水和蒸汽的比摩尔容积;  $u_v$  为蒸汽分压;  $u_w$  为孔隙水压力。

将蒸汽视作理想气体, 则有

$$V_v = \frac{RT}{u_v}, \quad (4)$$

式中,  $R$  为气体常数,  $R=461.52 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ,  $T$  为温度。

液态水的体积  $V_w$  可以写作

$$V_w = \frac{M}{\rho}, \quad (5)$$

式中,  $M$  为摩尔质量,  $\rho$  为液体密度。

将式(4), (5)代入到式(3)中, 则可以得到

$$\frac{du_v}{u_v} = \frac{M}{\rho RT} d\rho_w. \quad (6)$$

两边同时积分有

$$u_v = u_{v0} h = u_{v0} \exp\left[-u_c \left(\frac{M}{\rho PT}\right)\right], \quad (7)$$

式中,  $u_{v0}$  为饱和蒸汽压。

“锅盖效应”中的土体为非饱和土体, 因此存在基质吸力会对水蒸气的迁移造成影响。Fredlund等<sup>[20]</sup>将基质吸力定义为孔隙空气压力与孔隙液体压力之差, 表示为

$$u_c = u_a - u_w. \quad (8)$$

式中,  $u_c$  为基质吸力。

将式(8)代入到式(7), 并引入相对湿度  $h$ , 可得出

$$u_v = u_{v0} h = u_{v0} \exp\left[-u_c \left(\frac{M}{\rho PT}\right)\right], \quad (9)$$

式中,  $h$  为相对湿度。

根据 Ewen 等<sup>[21]</sup>的理论, 浓度梯度  $\nabla\rho_v$  取决于温度与含水率, 可以表示为

$$\nabla\rho_v = \left(h \frac{\partial u_{v0}}{\partial T} + u_{v0} \frac{\partial h}{\partial T}\right) \nabla T + \left(\rho_0 \frac{\partial h}{\partial S_r}\right) \nabla u_a - \left(\rho_0 \frac{\partial h}{\partial S_r}\right) \nabla u_w. \quad (10)$$

通过气体的绝对浓度公式, 则可以得到单位体积内的气态水水分含量:

$$C = \frac{u_v}{RT} = \frac{u_{v0} h}{RT}. \quad (11)$$

此时对于“锅盖效应”单位时间内某一截面通过的气态水的量, 可以用通量来表示, 即单位时间内该截面的气态水水分含量与气态水迁移速率的乘积, 因此通量公式写作:

$$J = \frac{u_{v0} h}{RT} \cdot \frac{-D_{atms} v \tau (\varphi - \theta_w)}{\rho_w} \left[ \left( h \frac{\partial u_{v0}}{\partial T} + u_{v0} \frac{\partial h}{\partial T} \right) \nabla T + \left( \rho_0 \frac{\partial h}{\partial S_r} \right) \nabla u_a - \left( \rho_0 \frac{\partial h}{\partial S_r} \right) \nabla u_w \right]. \quad (12)$$

将式(8)代入可以得到

$$J = \frac{u_{v0} h}{RT} \cdot \frac{-D_{atms} v \tau (\varphi - \theta_w)}{\rho_w} \left[ \left( h \frac{\partial u_{v0}}{\partial T} + u_{v0} \frac{\partial h}{\partial T} \right) \nabla T + \left( \rho_0 \frac{\partial h}{\partial S_r} \right) \nabla u_c \right]. \quad (13)$$

若引入土水特征曲线常用的 VG 模型, 则可以表示土体饱和度与基质吸力的关系, 即

$$S_r = f(u_c) = \frac{1}{\left[1 + (au_c)^n\right]^{(1-\frac{1}{n})}}, \quad (14)$$

式中,  $S_r$  为饱和度,  $a$  与  $n$  为模型参数。

将式(14)代入到式(9)中, 则可以得到

$$h = \exp\left(\frac{(S_r^{1-n} - 1)^{\frac{1}{n}}}{-a\rho_w R_v T}\right). \quad (15)$$

式(15)可以表示出土体孔隙气相相对湿度与土体饱和度的关系, 并且利用  $\nabla u_c = \frac{\partial u_c}{\partial S_r} \cdot \nabla S_r$ , 那么式

(13)可表示为温度梯度与饱和度梯度双驱动势的迁移通量公式:

$$J = \frac{u_{v0} h}{RT} \cdot \frac{-D_{atms} v \tau (\varphi - \theta_w)}{\rho_w} \left[ \left( h \frac{\partial u_{v0}}{\partial T} + u_{v0} \frac{\partial h}{\partial T} \right) \nabla T + u_{v0} \frac{\partial h}{\partial S_r} \cdot \frac{\partial u_c}{\partial S_r} \nabla S_r \right]. \quad (16)$$

式(16)表示, “锅盖效应”气态水迁移过程中, 在温度梯度与饱和度梯度双驱动势作用下的单位截面积上气态水迁移的通量。式(16)表明温度、相对湿度、蒸汽压、饱和度、土体结构对“锅盖效应”气态水迁移具有重要影响, 物理明确。

参考陈含进行的“锅盖效应”室内试验作用<sup>[22]</sup>, 试验原理如图2所示。

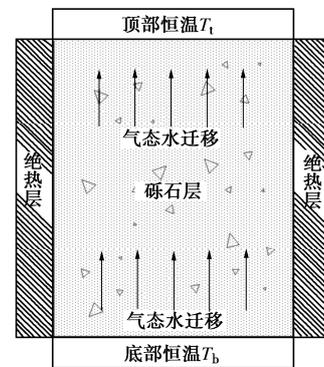


图2 “锅盖效应”的试验原理

Fig. 2 Test principle of "pot cover effect"

设计如下试验条件:

土样采用纯细砾。试验筒顶部和底部控制不同的恒定温度, 形成温度梯度, 气态水在温度梯度的作用下向上迁移, 因为砾石层孔隙较大以及砾石的持水能力较差等特点, 气态水在砾石层中凝结为液态水后会因为重力作用下渗至饱和砾石层。对于重力作用下渗的液态水, 其重力下渗的启动条件为“临界饱和状态”, 即凝结的液态水的重力与土体的持水能力达到平衡的状态, 陈含<sup>[22]</sup>经过试验总结出选用的砾石持水度和温度具有如下关系:

$$\theta_r = -0.001 \cdot T + 0.32. \quad (17)$$

Partington<sup>[23]</sup>对于封闭系统中蒸发源与冷凝之间的稳态扩散, 提出的质量流动因子  $\nu$  的表达式如下:

$$\nu = \frac{u_a}{u_a - u_v} \quad (18)$$

对于饱和蒸汽压力, 本文采用修正的 Tetens 饱和蒸汽压公式:

$$u_{v0} = 6.112 \exp\left(\frac{17.67(T - 273.15)}{T - 29.65}\right) \quad (19)$$

因为“锅盖效应”系统的顶部和底部分别设置有恒定温度, 对于系统内的温度梯度, 则可以视作沿系统高度的稳态温度场分布, 因此温度梯度可视为常数:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_t - T_b}{x_t - x_b} \quad (20)$$

式中  $T_t$  与  $T_b$  为系统顶部与底部的温度;  $x_t$  与  $x_b$  为系统顶部与底部在  $x$  方向上的长度。

对于土壤迂曲度  $\tau$ , 本文采用 Koponen<sup>[24]</sup>提出的用孔隙率的函数来表示的土壤迂曲度表达式, 即

$$\tau = [0.8(1 - n) + 1]^{-1} \quad (21)$$

对于扩散系数  $D_{atms}$ , Krischer<sup>[25]</sup>给出了蒸汽相相对于空气的分子扩散系数经验公式:

$$D_{atms} = 5.893 \times 10^{-6} \frac{T^{2.3}}{u_a} \quad (22)$$

对于该试验中的土样, 砾石层的含水率为临界饱和状态, 即  $\theta_r$ ; 砾石的  $G_s=2.61$ , 干密度  $\rho_d=1.40 \text{ g/cm}^3$ , 孔隙率  $\varphi=46.4\%$ ; 仪器顶部恒温  $T_t=0.3^\circ\text{C}$ , 底部恒温  $T_b=20^\circ\text{C}$ , 仪器高度 45 cm, 因此温度梯度  $\nabla T$  取  $0.4378^\circ\text{C/cm}$ ; 土水特征曲线参考文献[26]中细砾 VG 模型的拟合参数  $a=0.077$ ,  $n=1.20$ 。

将上述试验条件以及式(17)~(22)代入到式(16)中分别分析温度与饱和度对“锅盖效应”气态水迁移通量的影响。

(1) 温度对“锅盖效应”气态水迁移的影响

按照上述试验条件, 控制砾石的饱和度恒定为 10%, 绘制温度对“锅盖效应”气态水迁移的影响, 如图 3 所示。

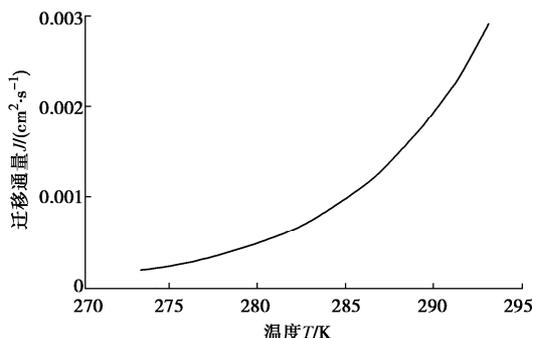


图 3 迁移通量  $J$  与温度  $T$  的关系曲线

Fig. 3 Relationship between diffusion flux  $J$  and temperature  $T$

从图 3 可以看出温度对“锅盖效应”气态水迁移通量具有正相关影响, 随着温度的增加, 迁移通量也会增大。

(2) 饱和度对“锅盖效应”气态水迁移的影响

控制砾石的温度恒定为  $10^\circ\text{C}$ , 绘制土体饱和度对“锅盖效应”气态水迁移的影响, 如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 随着饱和度的增加, “锅盖效应”气态水的迁移通量呈现先增大后减小的规律, 这与文献[5]试验所发现的水汽迁移系数与土体含水率的关系曲线较为一致。在饱和度很低的时候, 气态水与液态水的含量都很低, 因此迁移通量也很低, 并且由于土颗粒的持水能力, 气态水很容易就附着在土颗粒的表面形成吸附水, 因此迁移通量接近 0; 随着饱和度的增加, 土颗粒无法吸附更多的水, 气态水更容易通过土体孔隙, 因此迁移通量也在增加; 当饱和度进一步增加, 孔隙中的液态水含量较高, 土体孔隙被液态水所占据, 削弱了气态水浓度梯度作为驱动势的影响, 因此造成了迁移通量的减小。

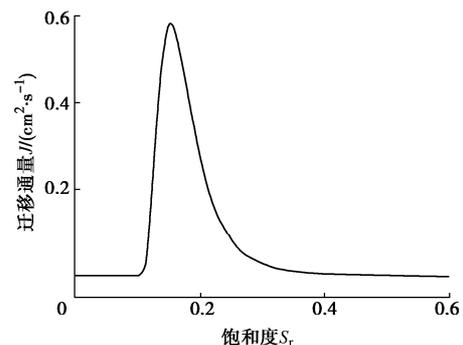


图 4 迁移通量  $J$  与饱和度  $S_r$  的关系曲线

Fig. 4 Relationship between diffusion flux  $J$  and soil saturation  $S_r$

## 2 结 论

基于已有的水汽迁移模型, 推导了在“锅盖效应”框架内一维气态水迁移的方程, 并分析了温度与饱和度对“锅盖效应”气态水迁移的影响, 得到如下结论:

(1) 以 PDV 模型为基础, 考虑到温度、相对湿度、蒸汽压、含水率、土体结构、水蒸气密度梯度对“锅盖效应”气态水迁移的影响, 推导出一维“锅盖效应”气态水迁移方程, 物理意义明确。

(2) 温度对“锅盖效应”气态水迁移通量具有正相关影响, 温度的增加会使迁移通量相应增大。

(3) 饱和度的增加会使“锅盖效应”气态水迁移通量呈现先增大后减小的规律, 与文献中的试验结果较为一致。

### 参考文献:

- [1] 李 强, 姚仰平, 韩黎明, 等. 土体的“锅盖效应”[J]. 工业建筑, 2014, 44(2): 69 - 71.

- [2] LUO T, QU X, WANG N D, et al. Pot cover effect and its prevention: an experimental study in the field. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, **167**: 102845.
- [3] 华遵孟, 沈秋武. 敦煌机场跑道破坏原因与防治[J]. 西部探矿工程, 1994, **6**(4): 16 - 19.
- [4] EIGENBROD K D, KENNEPOHL G J A. Moisture accumulation and pore water pressures at base of pavements[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1996, **1546**(1): 151 - 161.
- [5] 罗汀, 陈含, 姚仰平, 等. 锅盖效应水分迁移规律分析[J]. 工业建筑, 2016, **46**(9): 6 - 9.
- [6] 姚仰平, 王琳. 影响锅盖效应因素的研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(8): 1373 - 1382.
- [7] 宋二祥, 罗爽, 孔郁斐, 等. 路基土体锅盖效应的数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2017, **38**(6): 1781 - 1788.
- [8] 张升, 贺佐跃, 滕继东, 等. 非饱和土水汽迁移与相变: 两类“锅盖效应”的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(5): 961 - 968.
- [9] 滕继东, 贺佐跃, 张升, 等. 非饱和土水汽迁移与相变: 两类“锅盖效应”的发生机理及数值再现[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(10): 1813 - 1821.
- [10] 罗汀, 曲啸, 姚仰平, 等. 北京新机场“锅盖效应”一维现场试验[J]. 土木工程学报, 2019, **52**(增刊 1): 233 - 239.
- [11] MILLY P C D. A simulation analysis of thermal effects on evaporation from soil[J]. *Water Resources Research*. 1984, **20**(8): 1087 - 1098.
- [12] MIYAZAKI T. Condensation and movement of water vapor in sand under temperature gradient[J]. *Trans Jpn Soc Irrig Drain Rural Eng*, 1976, **61**: 1 - 8.
- [13] CAHILL A T, PARLANGE M B. On water vapor transport in field soils[J]. *Water Resources Research*, 1998, **34**(4): 731 - 739.
- [14] ZHANG Y Z, MA W, WANG T L. Characteristics of the liquid and vapor migration of coarse-grained soil in an open-system under constant-temperature freezing[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, **165**: 102793.
- [15] SHERWOOD T K. The drying of soil-II[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1929, **21**(10): 976 - 980.
- [16] CEAGLSKE N H, HOUGEN O A. Drying granular solids[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1937, **29**(7): 805 - 813.
- [17] HENRY P S A. Diffusion in absorbing media[J]. *Proc R Soc London*, 1939, **A171**: 215 - 241.
- [18] PHILIP J R, DE VRIES D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. *Transactions, American Geophysical Union*, 1957, **38**(2): 222 - 231.
- [19] DE VRIES D A. Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media[J]. *Transactions, American Geophysical Union*, 1958, **39**(5): 909.
- [20] FREDLUND D G, RAHARDJO H. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*[M]. New York: Wiley, 1993.
- [21] EWEN J, THOMAS H R. Heating unsaturated medium sand[J]. *Geotechnique*. 1989, **39**(3): 455 - 470.
- [22] 陈含. 冻融循环条件下锅盖效应机理及试验研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2020.
- [23] PARTINGTON J R. *An Advanced Treatise on Physical Chemistry*[M]. London: Longmans, Green, 1949.
- [24] KOPONEN A, KATAJA M, TIMONEN J. Tortuous flow in porous media[J]. *Physical Review E*, 1996, **54**(1): 406 - 410.
- [25] KRISCHER D. *Wärme- und Stofftransport in Feuchten Gütern*[M]. *Trocknungstechnik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1978: 269 - 286.
- [26] 司娟娟. 不同级配下砾石土土水特征曲线研究[J]. 低碳世界, 2016(15): 248 - 249.

(编校: 明经平)