

DOI: 10.11779/CJGE2022S1008

非饱和土水热耦合模型中水分相变/迁移因素影响分析

曾照军¹, 唐朝生^{*1}, 程青¹, 安妮², 施斌¹

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 数值模拟是研究非饱和土中水热耦合问题的一个重要技术手段。但在使用数值工具分析非饱和土中水分和热量迁移过程中, 现有研究通常忽略水-汽相变以简化计算。为研究水热耦合问题中简化计算的合理性, 基于已有的水热迁移理论模型, 并充分考虑了热传导、相变、温度梯度、水分梯度和重力势的耦合作用, 采用 FreeFem++有限元软件自主编制了水热耦合模型计算程序并求解, 对非饱和土水热场的演化特征进行了研究。结合地下水位作用和表层蒸发/降雨入渗/干湿循环边界条件以更切合实际边坡工况, 分析了蒸发潜热项、自重项、水汽运动和渗透系数等因子在水热耦合问题简化计算中的合理性及其耦合作用机制。研究结果表明: 在上述边界条件下, 蒸发潜热项考虑与否和相变系数取值大小会显著影响土体温度场的分布特征, 影响程度随高度增加而逐渐减弱, 但对水分迁移的影响并不显著; 考虑自重时和渗透系数较大时两种情况下的表层土体水分迁移更快, 稳定含水率更低。

关键词: 非饱和土; 水热耦合模型; 大气-土体相互作用; 重力项; 水-汽相变

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)S1-0040-06

作者简介: 曾照军(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事极端气候作用下岩土体多场耦合数值模拟方面的研究工作。

E-mail: zengzhaojun@smail.nju.edu.cn。

Influences of water phase change/migration factors in hydro-thermal coupling model for unsaturated soils

ZENG Zhao-jun¹, TANG Chao-sheng¹, CHENG Qing¹, AN Ni², SHI Bin¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The numerical simulation is an important technique for investigating the coupled hydro-thermal behavior of unsaturated soils. In order to simplify calculation, the researchers often assume that water-vapor phase change is ignored during numerical study on the hydro-thermal behavior. To study the rationality of the hydro-thermal coupling problem of simplified calculation, based on the existing theory of hydro-thermal coupling model, which fully considers the coupling effects of heat conduction, water-vapor phase change, temperature gradient, moisture gradient and gravity, the FreeFem++-compiled hydro-thermal coupling model is used to study the application and evolution characteristics of the moisture and temperature fields. Based on the boundary conditions of groundwater level, surface evaporation, infiltration and wetting-drying in practical slope conditions, the rationality and coupling mechanism of factors such as latent heat, gravity, water vapor motion and permeability coefficient in the simplified calculation of coupled hydro-thermal problems are analyzed. The results show that, under the above boundary conditions, whether the latent heat is considered or not and the value of phase change coefficient significantly affect the distribution characteristics of the temperature field of soils, but the influences on the water migration are insignificant. In addition, the water migration of surface soil is faster, and water content is lower with the gravity considered and a larger permeability coefficient.

Key words: unsaturated soil; hydro-thermal coupling model; atmosphere-soil interaction; gravity; water-vapor phase change

0 引言

在气候变化及人类活动的影响下, 非饱和土体内部分的水分场和温度场会逐渐改变, 劣化土体工程性质, 进而诱发一系列工程地质问题, 如不均匀沉降和路基稳定性问题等^[1]。实际过程中, 土体中的水分和热量

迁移存在复杂的耦合作用。因此, 研究近地表非饱和

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(41925012); 国家自然科学基金项目(41902271, 42172290); 江苏省自然科学基金项目(BK2021087); 中央高校基本科研业务费专项资金项目

收稿日期: 2022-10-01

*通信作者(E-mail: tangchaosheng@nju.edu.cn)

土的水热耦合特性和工程响应, 对于防控土体水热场变化引起的各类岩土工程问题具有重要的现实意义^[2]。

早期 Philip 等^[3]于 1957 年首次引入水分相变过程, 并建立相应的水热耦合计算模型。在此基础上, 国内外学者围绕非饱和多孔介质中水热耦合理论、试验研究和数值计算做了大量工作^[4-6]。需要指出的是, 目前岩土工程界关于水热耦合设计体系都重视液态水的影响, 在计算过程中关于重力项和水分相变等问题大多作简化处理^[2]。如 Sellers 等^[7]在水热耦合数值计算过程中, 仅分别考虑了液态水流动对水分分布和热传导过程对温度分布影响, 忽略了水汽运动对土体水热场的影响。陈佩佩等^[8]基于光滑粒子流体动力学 (SPH) 方法计算了不同热扩散系数等热物理参数对热源条件下的非饱和土水热场分布特征的影响, 忽略了水-汽相变和水汽运动的影响。

综上, 在非饱和土水热耦合问题中忽略自重项等因素能简化计算, 但在一定程度上会影响数值求解的准确性^[2]。为系统研究如自重项等简化因子的影响, 本文采用已有的水热耦合模型^[3-5], 充分考虑了热传导、相变、温度梯度、水分梯度和重力势耦合作用, 采用 FreeFem⁺⁺有限元软件^[9]自主编制了计算程序并求解。在此基础上, 进一步考虑了表层蒸发、降雨入渗和干湿循环的不同工况, 探讨了蒸发潜热项、自重项、水汽运动和渗透系数等因子在水热耦合问题简化计算中的合理性。

1 非饱和土水热耦合理论模型

1.1 水分迁移方程

在非饱和土中, 分子扩散引起的孔隙蒸汽质量通量可以用菲克定律来描述, 蒸汽总通量可表示为^[3]

$$q_v = -D_{\text{am}} \nu \alpha a \nabla \rho_v, \quad (1)$$

式中, ∇ 是梯度算子, q_v 为蒸汽通量密度, D_{am} 为水蒸气在空气中的分子扩散率, ν 为质量流动因子, α 为土体曲率因子, a 为体积空气含量, ρ_v 为水蒸气密度。

基于非饱和达西定律, 液态水分通量密度表示为

$$\frac{q_l}{\rho_l} = -K \nabla \phi, \quad (2)$$

式中, q_l 为液态水的通量密度, ρ_l 为液体密度, K 为非饱和土渗透系数, ϕ 为总水势。总水势由基质势 ϕ 和重力势 z 组成, 故式 (2) 可改写为

$$\frac{q_l}{\rho_l} = -K \left(\frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) \nabla \theta - K \left(\frac{\partial \phi}{\partial T} \right) \nabla T - K \nabla z. \quad (3)$$

根据水分通量质量守恒, 可得

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \theta_l}{\partial t} + \frac{\partial \theta_v}{\partial t} = -\nabla \cdot \left(\frac{q_l}{\rho_l} \right) - \nabla \cdot (q_v), \quad (4)$$

式中, θ_l 、 θ_v 分别为非饱和土液态水体积含水率和水蒸

汽体积含水率, t 为时间。

结合式 (1), (3), (4), 可得非饱和土水分迁移的控制方程为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (D_\theta \nabla \theta) + \nabla \cdot (D_T \nabla T) + \nabla \cdot (K \nabla z). \quad (5)$$

式中, D_T 为温度诱致水分扩散系数, D_θ 为等温水分扩散系数。

1.2 热量迁移方程

非饱和土中的热通量是由热传导、蒸汽运动引起的潜热、水蒸汽和液态水中的显热传递 4 部分组成。在 Philip 等^[3]模型中, 根据热量守恒, 可表示为

$$C \frac{\partial T}{\partial t} + L_0 \rho_l \frac{\partial \theta_v}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - \nabla \cdot (L_0 q_v), \quad (6)$$

式中, C 为土体比热容, λ 为导热系数, L_0 为参考温度 T_0 条件下水的蒸发潜热。

为更好的描述蒸汽流动, Thomas^[5]在 Philip 等^[3]水热耦合模型基础上引入相变系数 ε 来考虑气液相变:

$$\frac{d_l(\rho_l \theta_l)}{d_\varepsilon(\rho_l \theta_l)} = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}. \quad (7)$$

当 $\varepsilon=1$ 时, 意味着水分转移是以蒸汽的形式发生的; 当 $\varepsilon=0$ 时, 则表明是仅以液态形式发生。

最后基于水蒸汽的质量与液体的质量相比是可以忽略不计的假设, 可得热流控制微分方程:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda + L_0 \varepsilon \rho_l D_T) \nabla T + \nabla \cdot (L_0 \varepsilon \rho_l D_\theta) \nabla \theta + L_0 \varepsilon \rho_l \frac{\partial K}{\partial z}. \quad (8)$$

2 分析讨论

为系统研究边坡水热耦合计算模型中蒸发潜热项、自重项、水汽运动和渗透系数等因子对非饱和土体水热响应的影响, 本文选取非饱和细砂土, 基于上述水热耦合模型对各影响因子展开分析讨论。土体的热物理参数具体如表 1 所示^[5], 考虑区域为图 1 中 ABCD 区域。

表 1 细砂土的热物理参数^[5]

Table 1 Thermal physical parameters of unsaturated soils ^[5]		
参数	符号	取值
体积热容/(cal·cm ⁻³ ·°C ⁻¹)	C	0.48
导热系数/(cal·cm ⁻¹ ·s ⁻¹ ·°C ⁻¹)	λ	0.02
水的蒸发潜热/(cal·g ⁻¹)	L_0	540
温度诱致水分扩散系数/(cm ² ·s ⁻¹ ·°C ⁻¹)	D_T	1×10^{-5}
相变系数	ε	0.3
等温水分扩散系数/(cm ² ·s ⁻¹)	D_θ	0.01
非饱和土渗透系数/(cm·s ⁻¹)	K	1×10^{-5}
比水容量/(m ⁻¹)	$\partial \theta / \partial \phi$	0.1

实际上, 土体内部的渗透和导热特性与含水率密

切相关，其内部的水热迁移还受地下水位、表层蒸发以及降雨入渗等外界条件的影响。为更贴合实际边坡工况，基于 van Genuchten^[10]渗透系数计算模型和 Côté等^[11]提出的导热系数计算模型，分别为

$$K = K_s \cdot S_e^{0.5} \left[1 - (1 - S_e^{1/m_1})^{m_1} \right]^2, \quad (9)$$

$$\lambda = (\lambda_{\text{sat}} - \lambda_{\text{dry}}) \times \lambda_r + \lambda_{\text{dry}}, \quad (10)$$

式中， K_s 为饱和渗透系数， $K_s=1.35 \times 10^{-5}$ cm/s， S_e 为饱和度，系数 $m_1=0.5$ ， λ_{sat} 为饱和状态导热系数， $\lambda_{\text{sat}}=0.025$ cal/cm/s/°C， λ_{dry} 为干燥状态导热系数， $\lambda_{\text{dry}}=5 \times 10^{-4}$ cal/cm/s/°C， $\lambda_r = \frac{3.55 \times S_e}{1 + (3.55 - 1)S_e}$ 。

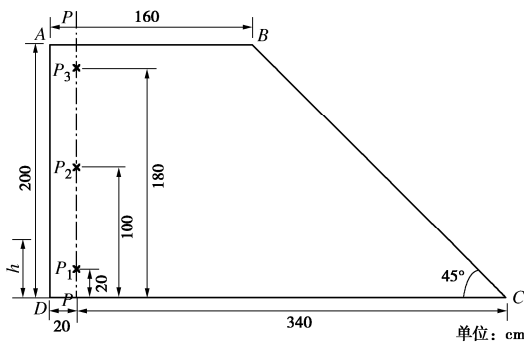


图1 二维简易坡体示意图^[5]

Fig. 1 Schematic diagram of two-dimensional slope^[5]

初始温度、初始体积含水率和边界条件具体如表2所示。在截面P上选取3个点P₁(h=20 cm)、P₂(h=100 cm)和P₃(h=180 cm)作为特征点来分析不同位置土体的水热特性。为研究如重力项等因素在水热耦合模型中的时间效应，如表3所示，选取蒸发边界的蒸发

速率为 1×10^{-5} cm/s，降雨入渗边界的入渗速率为 1×10^{-6} cm/s，干湿循环边界为上述蒸发和降雨入渗速率各一天依次交替，计算时间为60 d。

表2 初始状态和边界条件

初始状态	边界条件		
	AB, BC	CD	AD
$T_0=10$ °C, $\theta_0=0.5-y/100$	蒸发/降雨入渗/干湿循环边界, $T=25$ °C, 隔热边界	$\theta=0.5$, 不透水 隔热边界	不透水 隔热边界

表3 模拟工况

模拟工况	边界水分通量	
	/(cm·s ⁻¹)	
蒸发	-1×10^{-5}	持续时常 60 d
降雨	1×10^{-6}	60 d
干湿循环	$-1 \times 10^{-5} / 1 \times 10^{-6}$	各1 d依次交替, 合计60 d

2.1 蒸发潜热项对水热耦合过程的影响

为分析水分蒸发引起的潜热变化对土体水热场的影响，在上述蒸发、降雨和干湿循环条件下，分别对考虑蒸发潜热项 ($L_0=540$ cal/g) 和不考虑蒸发潜热项 ($L_0=0$) 两种情况下的水热场分布进行数值计算，计算结果如图2、3所示。对比图2可以看出，在3种边界条件下，考虑蒸发潜热项与否会显著影响特征点温度随时间的变化特征及温度稳定值，由于水分蒸发吸收热量会使得考虑蒸发潜热时的计算值滞后于不考虑蒸发潜热时的温度场变化，其影响程度与边界条件有

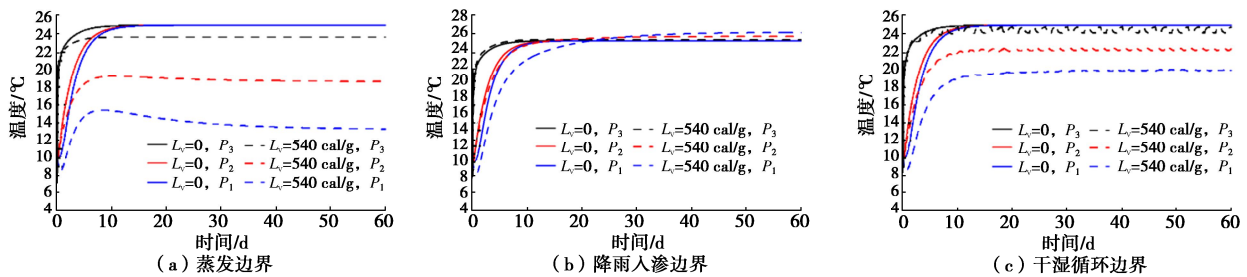


图2 蒸发潜热项对温度场时空演化特征的影响

Fig. 2 Effects of latent heat of evaporation on temporal and spatial evolution characteristics of temperature

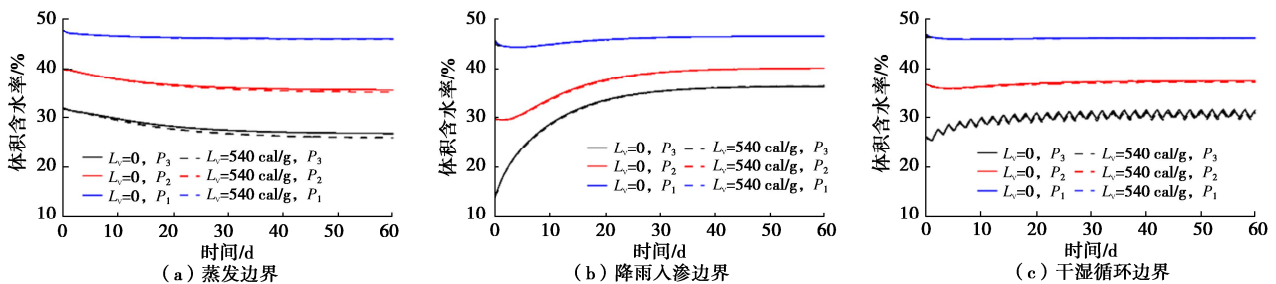


图3 蒸发潜热项对水分场时空演化特征的影响

Fig. 3 Effects of latent heat of evaporation on temporal and spatial evolution characteristics of volumetric water content

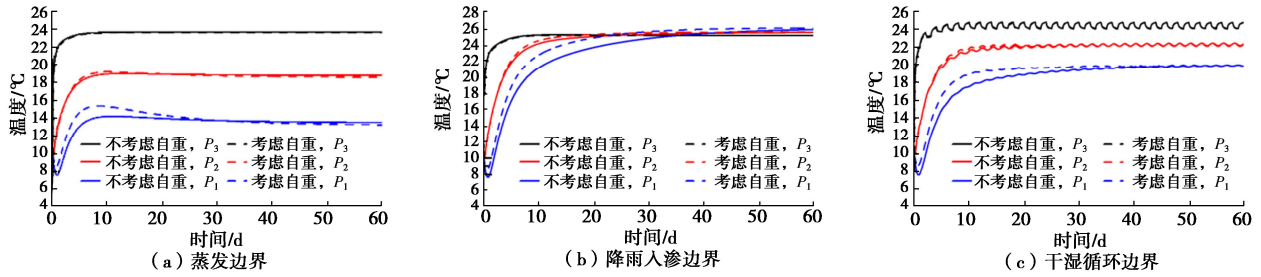


图 4 自重对温度场时空演化特征的影响

Fig. 4 Effects of gravity on temporal and spatial evolution characteristics of temperature

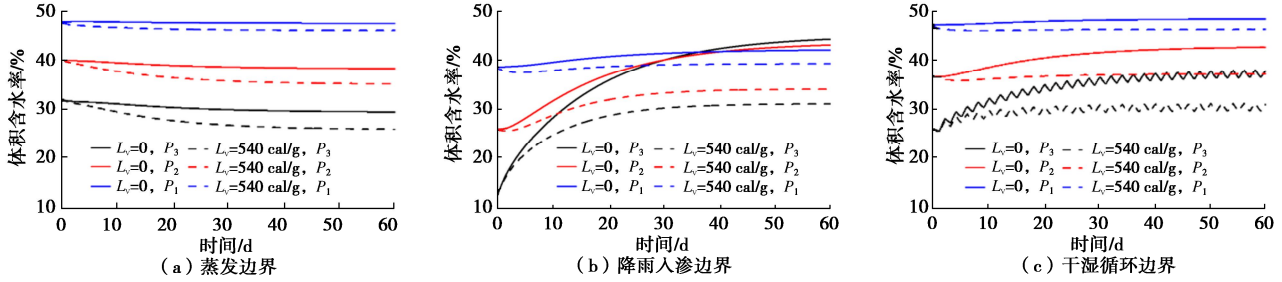


图 5 自重对水分场时空演化特征的影响

Fig. 5 Effects of gravity on temporal and spatial evolution characteristics of volumetric water content

关, 表现为降雨入渗<干湿循环<蒸发, 这是由于水分入渗会加速热量扩散, 该作用显著强于蒸发潜热的影响, 使得稳定时的温度逐渐上升。

从图 3 可以看出, 在上述边界作用下, 各特征点的含水率向稳定值缓慢变化。在本文的干湿循环条件下, 仅 P_3 处体积含水率随时间呈波动变化。蒸发潜热项考虑与否对各特征点在不同时间上的含水率值及其变化特征并无显著区别, 但在蒸发条件下其影响随高度和时间增加而稍有增强 (在 P_3 处最大变化仅为 3.2%)。说明蒸发潜热项对土体温度变化的影响极大, 但对于含水率的影响几乎可以忽略不计。

2.2 自重项对水热耦合过程的影响

为验证自重在水热耦合问题中的重要性, 对于上述 3 种边界条件下的土体温度场和水分场在考虑及不考虑重力项两种情况下的分布进行了数值计算, 计算结果分别如图 4, 5 所示。由图 4 可知, 自重项对温度场的影响随着高度的增加而减小, 但仅表现在稳定前的时间段, 如在蒸发条件下该阶段随高度增加时温度值的最大增幅依次为 15.7%, 2.5% 和 0.8%, 这是由于水分场急剧变化导致的热量扩散, 但并不会显著影响稳定时的温度场分布特征, 各特征点稳定温度变化幅度最大仅为 1.8%。从图 5 可以看出, 考虑自重项与否对于各特征点含水率变化及其稳定含水率存在显著区别, 如在蒸发条件下其稳定含水率随高度增加依次为 0.46, 0.35, 0.26, 较小于不考虑自重项时的 0.48, 0.38, 0.30。这是由于土体内部的水分迁移主要由自重、温度梯度和含水率梯度引起, 当不考虑自重时, 水分在

温度和含水率梯度的共同作用下由底部高含水率处向上层低含水率处迁移。而自重则是引起水分向下迁移的动力, 阻碍底部水分向上迁移, 因此, 在表层蒸发条件下, 考虑自重时的稳定含水率更低。

2.3 相变系数对水热耦合过程的影响

为研究水分蒸发相变系数 (蒸汽流动) 对非饱和土温度场及水分场的影响, 设定相变系数 ε 分别为 0 (不考虑蒸汽流动), 0.1, 0.2, 0.3, 0.35, 分别讨论了上述边界条件下各特征点的温度场及水分场的变化趋势, 结果分别如图 6, 7 所示。由图 6 可知, 在不同相变系数条件下各特征点的温度变化趋势均呈先增加后逐渐稳定变化, 在蒸发和干湿循环条件下, 随着相变系数的增加, 各特征点的稳定温度值逐渐降低, 并且随着高度的增加, 对温度的影响逐渐减弱, 如在蒸发条件下 P_1 处, 稳定温度值随设定相变系数的增加依次为 25.0, 21.1, 17.2, 13.3, 11.4 °C。但在降雨条件下, 相变系数仅会影响前期温度变化, 对稳定阶段的影响较小, 最终的稳定值也不呈梯度分布。图 7 为 3 种边界条件下各特征点含水率随时间变化的对比。

可见, 相变系数的取值对土体体积含水率的影响并不显著, 仅稳定含水率存在微小差异。该差异在蒸发条件下更为显著, 尽管如此, 相较于 $\varepsilon=0$ 时, 蒸发条件下不同相变系数的稳定含水率最大减幅在 P_3 处仅有 3.7%。说明相变系数取值对土体温度变化的影响极大, 但对于含水率的影响几乎可以忽略不计, 即对于非饱和土水热耦合问题时, 相变系数取值是否合理会显著影响土体温度的计算值。

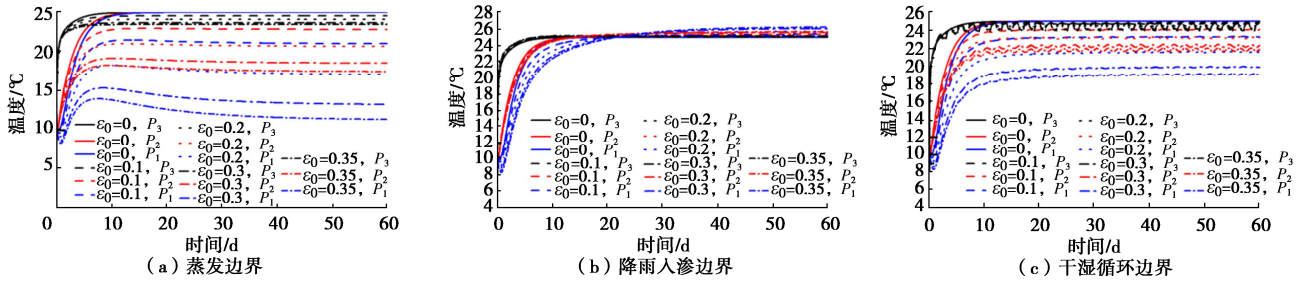


图6 相变系数对温度场时空演化特征的影响

Fig. 6 Effects of phase change coefficient on temporal and spatial evolution characteristics of temperature

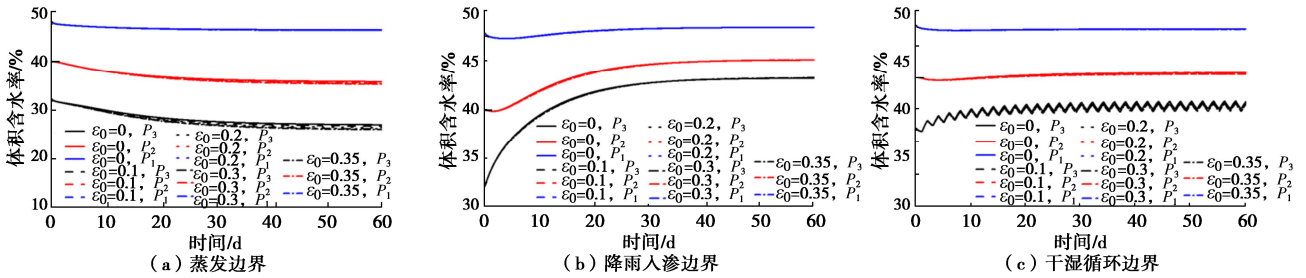


图7 相变系数对水分场时空演化特征的影响

Fig. 7 Effects of phase change coefficient on temporal and spatial evolution characteristics of volumetric water content

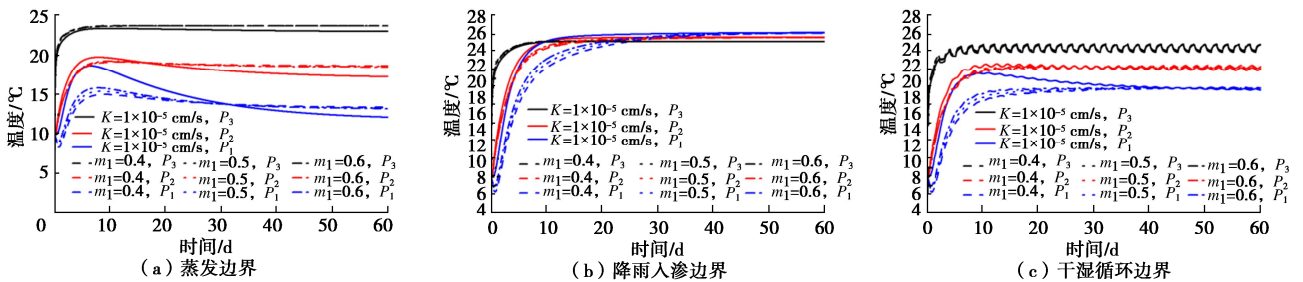


图8 渗透系数对温度场时空演化特征的影响

Fig. 8 Effects of permeability on temporal and spatial evolution characteristics of temperature

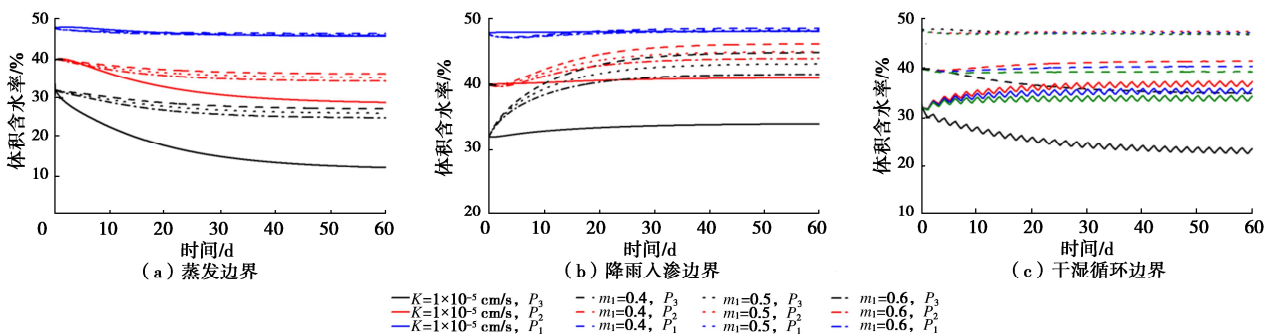


图9 渗透系数对水分场时空演化特征的影响

Fig. 9 Effects of permeability on temporal and spatial evolution characteristics of volumetric water content

2.4 渗透系数对水热耦合过程的影响

渗透系数是土体渗透性表征指标，反映了水在土体孔隙中渗透流动的性能。为研究非饱和土体渗透系数取值对其温度场及水分场演化的影响，将渗透系数分别设定为常数 1×10^{-5} cm/s, $m_1=0.4$, $m_1=0.5$ 和 $m_1=0.6$, 渗透系数与体积含水率的关系曲线如图4所示。计算了土体温度场和水分场的演化特征，结果分

别如图8, 9所示。由图8可知，不同渗透系数条件下各特征点的温度变化趋势均呈先增加后逐渐稳定变化， m_1 的取值对土体温度的影响随着高度的增加而逐渐减弱，如在蒸发条件下，相较于 $m_1=0.4$, $m_1=0.5$ 时随高度增加最大增幅依次为 5.0%, 0.6%和 0.3%, $m_1=0.6$ 时随高度增加最大增幅依次为 10.4%, 1.1%和 0.7%, 但对其稳定温度值的影响较小。图9为不同渗

透系数时特征点含水率随时间变化的对比。可见, m_1 的取值并不会显著影响各特征点含水率的整体变化趋势, 但对表层土体含水率时空演化过程的影响更为显著, 并且特征点的稳定含水率随着 m_1 的取值而变化, 如蒸发条件下 P_3 处, $m_1=0.5$ 和 $m_1=0.6$ 相较于 $m_1=0.4$ 的稳定含水率的减幅分别为 4.1%, 8.5%。随着 m_1 取值的增大, 渗透系数增大, 土体内部水分下渗加强而减弱底部向上的水分补给, 土体的稳定含水率逐渐减小, 并且在土体表层变化更为显著。此外, 在上述 3 种边界条件下, 当渗透系数为常数时, 土体的水热场变化特征会显著区别于基于 van Genuchten 模型拟合的渗透系数。

3 结 论

(1) 在蒸发、降雨入渗和干湿循环边界条件下, 蒸发潜热项考虑与否和相变系数取值大小会显著影响土体内部温度场的分布特征, 其影响程度随高度增加而逐渐减弱, 但对水分迁移的影响并不显著。

(2) 土体内部的水分迁移主要由温度梯度和水压梯度引起, 其中, 自重是引起水分向下迁移的动力, 渗透系数增大也会加强土体内部水分下渗作用, 二者均会在一定程度上阻碍底部水分向上部的迁移过程。因此, 考虑自重和渗透系数较大时两种情况下的土体水分向下迁移更快, 影响地下水对上层土体的补给和降雨入渗过程。自重项考虑与否与渗透系数选取还会在一定程度上影响温度场的变化, 但仅表现在温度稳定前的时间段。

(3) 自重等因子对非饱和土水热场的影响与边界条件有关, 水分迁移会引起热量扩散, 温度变化又会进一步影响水分场的分布。稳定时的温度梯度随着边界水分补给而逐渐减小, 即降雨入渗边界条件下稳定时的温度梯度 < 干湿循环边界 < 蒸发边界。

(4) 采用 van Genuchten 模型拟合的渗透系数更符合实际非饱和土的渗透特性, 其水热场变化特征显著区别于常渗透系数情况。

参考文献:

[1] 周 扬, 周国庆. 土壤冻结水热耦合有限容积模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 440 - 446. (ZHOU Yang, ZHOU Guo-qing. Finite volume simulation for coupled moisture and heat transfer during soil freezing[J]. Chinese

Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 440 - 446. (in Chinese))

- [2] 滕继东, 贺佐跃, 张 升, 等. 非饱和土水气迁移与相变: 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. (TENG Ji-dong, HE Zuo-yue, ZHANG Sheng, et al. Moisture transfer and phase change in unsaturated soils: physical mechanism and numerical model for two types of “canopy effect”[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1813 - 1821. (in Chinese))
- [3] PHILIP J R, DE VRIES D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. Transactions, American Geophysical Union, 1957, 38(2): 222.
- [4] LUIKOV A V. Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies[M]. Oxford: Pergamon Press, 1966.
- [5] THOMAS H R. Modelling two-dimensional heat and moisture transfer in unsaturated soils, including gravity effects[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1985, 9(6): 573 - 588.
- [6] AN N, HEMMATI S, CUI Y J, et al. Numerical analysis of hydro-thermal behaviour of Rouen embankment under climate effect[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 99: 137 - 148.
- [7] SELLERS P J, MINTZ Y, SUD Y C, et al. A simple biosphere model (SIB) for use within general circulation models[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1986, 43(6): 505 - 531.
- [8] 陈佩佩, 白 冰. 内含圆柱域热源的非饱和土介质水热耦合作用的 SPH 数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 1025 - 1030. (CHEN Pei-pei, BAI Bing. Numerical simulation of moisture-heat coupling in porous media with circular heat source by SPH method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 1025 - 1030. (in Chinese))
- [9] SADAKA G. FreeFem++, a tool to solve PDEs numerically [M]. Arxiv, 2012: 1205, 1293.
- [10] van GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892 - 898.
- [11] CÔTÉ J, KONRAD J M. A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(2): 443 - 458.

(编校: 胡海霞)