

文章编号:1004-4574(2013)03-0236-08

膨胀土蒸发过程的气候敏感性分析

曾召田^{1,2}, 吕海波^{1,2}, 赵艳林^{1,2}, 罗丹鹏^{1,3}

(1. 广西大学土木建筑工程学院防灾减灾研究所, 广西 南宁 530004; 2. 桂林理工大学广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 广西工程防震研究院, 广西 南宁 530001)

摘要:膨胀土的工程特性对气候变化特别敏感。运用土体渗流和蒸发理论,建立了大气-非饱和土相互作用模型;以现场观测的气候数据作为边界条件,模拟分析了膨胀土柱蒸发过程中6个气象因子对蒸发的影响。研究表明,净辐射和风速对膨胀土蒸发影响显著,其它气象因子影响较小。

关键词:膨胀土;蒸发过程;大气-非饱和土相互作用模型;气候敏感性

中图分类号:TU443

文献标志码:A

Analysis of climatic sensitivity of expansive soil in evaporation process

ZENG Zhaotian^{1,2}, LÜ Haibo^{1,2}, ZHAO Yanlin^{1,2}, LUO Danpeng^{1,3}

(1. Research Institute of Preventing and Mitigating Disasters, College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;
3. Guangxi Academy of Engineering Shock Prevention, Nanning 530001, China)

Abstract: Engineering properties of expansive soils are very sensitive to climate changes. Based on the theory of the soil seepage and evaporation, an interaction model of atmosphere-unsaturated soil was established in this study. With field climate observations as the boundary conditions, the influence of 6 meteorological factors on the evaporation process of expansive soil column was simulated and analyzed. Results show that the most significant factors that influence the expansive soil evaporation are net radiation and wind speed, while other meteorological factors are less significant.

Key words: expansive soil; evaporation process; interaction model of atmosphere-unsaturated soil; climate sensitivity

膨胀土是一类特殊的非饱和土,因其特殊的矿物组成和微结构特征,而表现为多裂隙性、超固结性、反复胀缩性、强亲水性、强度剧烈衰减性和破坏的浅层性等不良工程特性^[1]。研究表明,上述工程特性受气候变化的影响特别显著。在干湿交替频繁的气候环境下,膨胀土常引发建筑物变形、边坡失稳等工程灾害。广西地处亚热带,炎热多雨,干湿交替频繁;同时,膨胀土是广西地区典型的特殊土,因此对其蒸发过程的气候敏感性进行分析是一个值得关注的课题。

气候作用集中表现为降雨入渗和蒸发蒸腾两个方面。在岩土工程界,降雨入渗引发了大量的膨胀土边坡失稳、滑坡等灾害,因此许多学者对此进行了相关研究,取得了一定的成果^[2-6]。以往的研究结果表明,边坡稳定性受降雨入渗的影响主要分为两方面的因素:一是外界条件,如降雨强度、降雨类型、降雨持时等;二

收稿日期:2012-07-21; 修回日期:2012-10-15

基金项目:973 前期研究专项(2010CB434810);国家自然科学基金项目(51169005);广西自然科学基金项目(2010GXNSFD013012, 2013GXNSFBA019233)

作者简介:曾召田(1981-),男,工程师,博士研究生,主要从事特殊土的工程特性与微观机理研究。E-mail:zengzhaotian@163.com

通讯作者:吕海波,教授,博士生导师。E-mail:lhb@glite.edu.cn

是边坡自身要素,如土性参数、裂隙、边坡几何形态、土层深度、排水条件等。对气候作用的另一个重要方面——蒸发蒸腾作用,目前在岩土工程领域的研究还比较少。陈守义^[7]在给定入渗和蒸发边界条件的情况下,采用非饱和土体水分运动理论对斜坡土体瞬态含水率分布进行了求解;并假定非饱和土抗剪强度与其饱和度存在函数关系,在此基础上,将瞬态含水率和斜坡土体瞬态抗剪强度参数两者分布进行了换算。陈建斌等^[8]结合实际蒸发和植物蒸腾的边界条件,采用热湿耦合非等温流方程,建立了大气-非饱和土相互作用模型;运用该模型,分析各种工况下非饱和膨胀土边坡对气候变化的各种动态响应。

对于具有较强胀缩性和对水分极其敏感的膨胀土,只有同时考虑降雨入渗和蒸发的气候作用,才能准确揭示气候作用下膨胀土的灾变过程。本文结合土体渗流和蒸发理论,建立大气-非饱和土相互作用模型;以现场观测的气候数据作为边界条件,通过改变气象因子,模拟膨胀土柱的蒸发效应,进而分析膨胀土蒸发过程的气候敏感性。

1 大气-非饱和土相互作用模型

根据传质传热理论,土中水的热-湿耦合理论简述如下。

1.1 控制方程

考虑温度影响的热-湿耦合非等温流运动方程包括水分运动方程和热流方程^[9]:

$$\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (D_v \frac{\partial P_v}{\partial x}) + \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (D_v \frac{\partial P_v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial (\psi + y)}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial (\psi + y)}{\partial y}) + Q = \lambda \frac{\partial \psi}{\partial t}; \quad (1)$$

$$L_v \frac{\partial}{\partial x} (D_v \frac{\partial P_v}{\partial x}) + L_v \frac{\partial}{\partial y} (D_v \frac{\partial P_v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_{lx} \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_{ly} \frac{\partial T}{\partial y}) + Q_t = \lambda_v \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (2)$$

式中: D_v 为水蒸气通过土的扩散系数, P_v 为土中水蒸汽分压, k 为土的渗透系数, ψ 为土的基质吸力, Q 为水的边界流量, λ 为土的比水容, y 为位置水头, ρ_w 为水的密度, L_v 为水的蒸发潜热, T 为绝对温度, λ_l 为土体的导热系数, λ_v 为土的体积热容, Q_t 为边界热流量。

上述方程有3个未知数 P_v 、 T 和 ψ ,因此需补充未知数之间的关系式,根据Edlefsen和Anderson曾提出^[10]:

$$P_v = P_{vs} (e^{\frac{-\psi w_v}{\rho_w R T}}) = P_{vs} h_r. \quad (3)$$

式中: P_{vs} 为饱和蒸气压, w_v 为水蒸气的克分子量, R 为通用气体常数, h_r 为空气相对湿度。

1.2 边界条件

微气候条件下的边界条件包括液态水流、水蒸汽流以及热流的地表边界条件,其中液态水流主要为降雨产生的入渗,可采用实测降雨量,水蒸汽流利用Penman-Wilson公式^[10]计算:

$$E = \frac{\Gamma R_n + \eta E_a}{\Gamma + \eta A}. \quad (4)$$

式中: E 为实际蒸发量, Γ 为饱和蒸气压和温度关系曲线的斜率, R_n 为土表面净辐射量, η 为温度常数, E_a 为潜在蒸发量, $E_a = f(u) P_a (B \text{ 为 } A)$,其中 $f(u) = 0.35(1 + 0.15u)$, u 为风速, P_a 为在蒸发面上空气的蒸汽压, B 为空气相对湿度的倒数, A 为土表面相对湿度的倒数。

热流边界根据地表面温度确定:

$$T_s = T_a + \frac{1}{\eta f(u)} (R_n - E). \quad (5)$$

式中: T_s 为土表面温度, T_a 为土表面空气温度。

上述控制方程的有限元分析采用 Geo - Studio 软件不同模块之间的组合来实现(包括 VADOSE/W, SEEP/W),该软件可仿真非饱和土应力变形与热湿耦合渗流。

2 参数选取

2.1 膨胀土的物理性质指标

按参考文献[11],南宁地区膨胀土与计算相关的物理力学参数取值如表 1 所示,土水特征曲线、导热系数、渗透系数函数分别见图 1、图 2 和图 3。

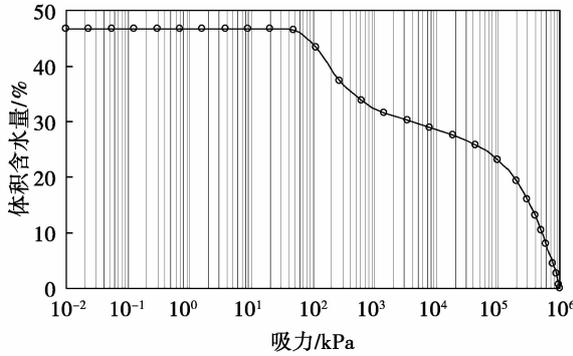


图 1 土 - 水特征曲线

Fig.1 Characteristic curve of soil-water

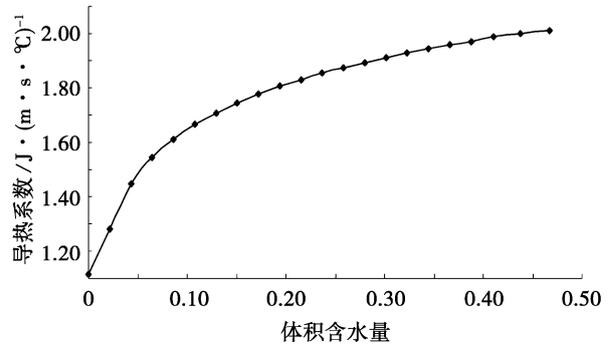


图 2 导热系数函数

Fig.2 Thermal conductivity coefficient function

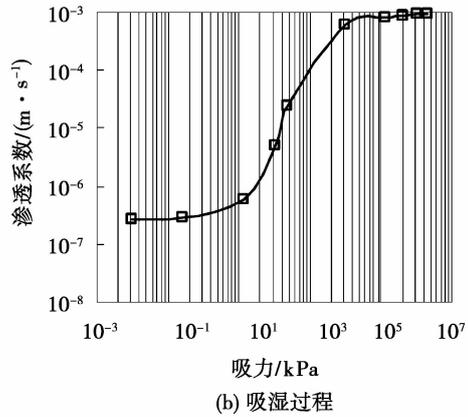
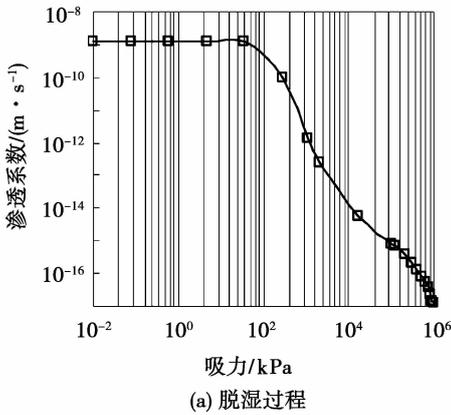


图 3 渗透系数函数

Fig.3 Permeability coefficient function

表 1 膨胀土基本物理性质指标

Table 1 Basic physical property indices of expansive soil

土性描述	密度/(g·cm ⁻³)	天然含水量/%	比重	饱和渗透系数/(m·s ⁻¹)
灰白色膨胀土	1.89	32.8	2.77	1.27 × 10 ⁻⁷

2.2 现场观测气象数据

本文选取设置于南宁北郊水牛所膨胀土观测站的小型气象站所采集的数据(2005 年 4 月 24 日至 2006 年 1 月 9 日,共计 261 d)进行分析,在此期间的温湿度、净辐射、风速、降雨与蒸发量等各气象参数见图 4。

在统计的 261 d 气象数据中,蒸发量最大值为 8.16 mm/d,净辐射最大值为 992.1 W/m²,最小净辐射为 -78.8 W/m²,最高温度为 39.9℃,最低温度为 1.57℃,最大湿度 99.99%,最小湿度 18.9%,最大降雨量 98.4 mm,最大风速为 17.1 km/h。在这些气象数据中,和水分直接相关的参数是降雨量和蒸发量,其它 4 个参数都与蒸发量有关。

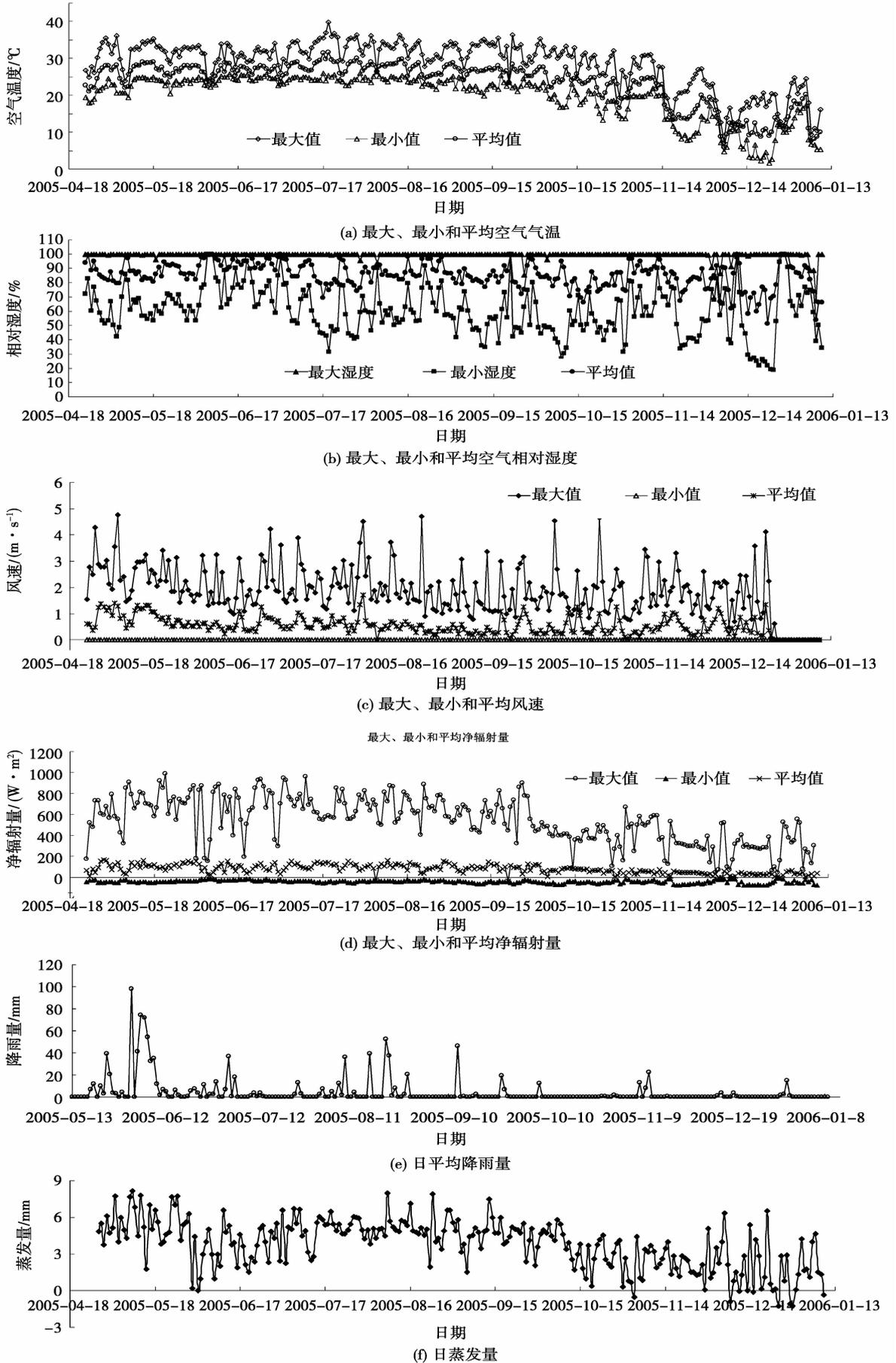


图4 2005年4月24日至2006年1月9日的实测气象数据

Fig. 4 Measured meteorological data from April 24, 2005 to January 9, 2006

3 膨胀土蒸发的气候敏感性分析

3.1 蒸发过程气象因子影响对比计算方案

自然环境中的膨胀土蒸发,主要受到净辐射、风速、最高气温、最低气温、最大相对湿度、最小相对湿度等 6 种气象因子的影响。为了深入了解各种气象因子对膨胀土蒸发的影响,分别对以上 6 种气象因子,在合理范围内改变数量值,分析其对蒸发量的影响,计算方案见表 2。

表 2 气象因子变化方案
Table 2 Scheme of meteorological factors change

气象因子	方案编号	相对标准值变化	参照标准气象数据
净辐射	1	减小 50%	14.2 MJ/(m ² · d ⁻¹)
	2	增加 50%	
	3	增加 100%	
风速	4	0 倍	0.482 m/s
	5	2 倍	
	6	5 倍	
	7	7 倍	
最大温度	8	减小 5°C	35.04°C
	9	减小 10°C	
	10	增大 4°C	
最小温度	11	减小 5°C	24.68°C
	12	减小 10°C	
	13	增大 5°C	
	14	增大 10°C	
最小湿度	15	降低 20%	46.74%
	16	增大 20%	
	17	增大 30%	
	18	增大 40%	
最大湿度	19	降低 10%	99.99%
	20	降低 20%	
	21	降低 30%	
	22	降低 40%	

3.2 膨胀土蒸发模型

单元划分:均匀膨胀土柱,高 4.0 m,宽 0.5 m,将其视为一维问题考虑,沿高度方向划分 40 等份,宽度方向 1 等份,如图 5 所示。

边界条件:上边为气候作用边界,其它为不透水边界。

气象数据:选取 2005 年 5 月 14 日的气象数据,最高气温 35.04°C,最低气温 24.68°C,最大相对湿度 99.99%,最小相对湿度 46.74%,风速 0.482 m/s,雨量为 0 mm,净辐射量 14.2MJ/(m² · d),实测蒸发量为 5.21 mm/d。

初始状态:土柱体积含水量为 46.6%。

3.3 计算结果及分析

为了便于对比分析,用蒸发敏感度表示某气象因子对蒸发量的影响程度,其计算式为:

$$\text{蒸发敏感度} = \frac{\text{改变参数后的计算蒸发} - \text{标准气候数据计算蒸发量}}{\text{标准气候数据计算蒸发量}} \times 100\%$$

3.3.1 净辐射对蒸发的影响

计算结果见图 6,由此可知:(1)曲线拐点出现的时间:方案 3(2d) < 方案 2(4d) < 标况(6d) < 方案 1(15d);曲线的两个线性段斜率:方案 1 < 标况 < 方案 2 < 方案 3。(2)净辐射对蒸发的影响与时间有关,开始阶段影

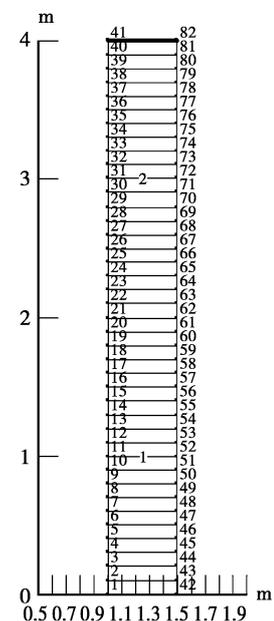


图 5 土柱单元

Fig. 5 Elements of soil column

响最大,随蒸发的进行而减小;蒸发开始时,方案2的蒸发量变化大于40%,而方案3的蒸发量变化大于80%,表明净辐射对蒸发量的影响敏感度大。由此可得净辐射对蒸发的影响规律:在蒸发的3个阶段,净辐射量越大,蒸发速度越快,蒸发量越大,净辐射对蒸发的影响很大。

3.3.2 风速对蒸发的影响

计算结果见图7,由此可知:(1)风速对蒸发的影响是双向的,开始5 d内(曲线拐点前)风速增大有利于蒸发,10 d以后(曲线拐点后)风速增大反而阻碍蒸发;(2)当风速达到标准风速的7倍时,蒸发量最大变化幅度约为15%,表明风速对蒸发量的影响程度次于净辐射。

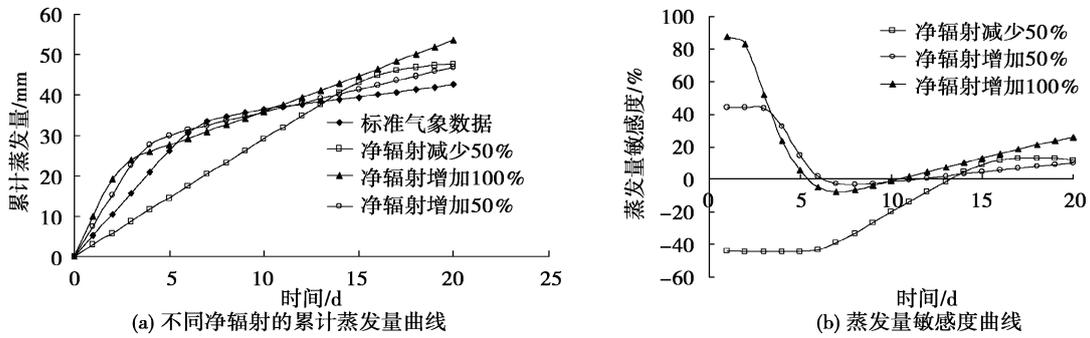


图6 净辐射对蒸发量的影响
Fig.6 Impact of net radiation on evaporation

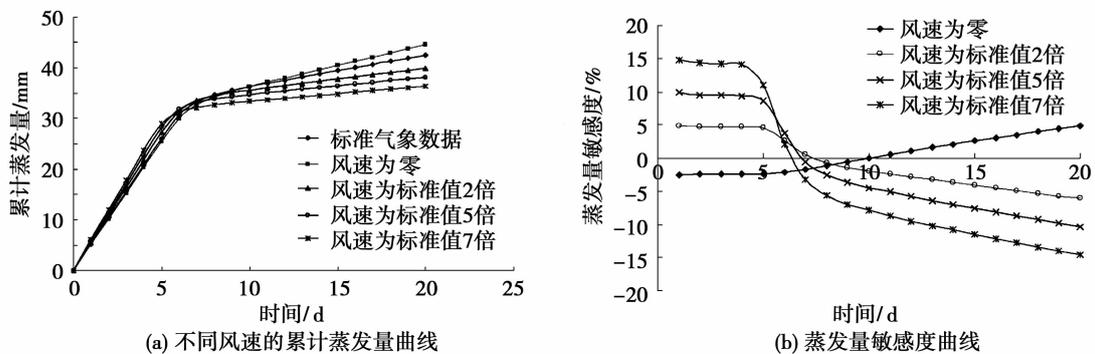


图7 风速对蒸发量的影响
Fig.7 Impact of wind speed on evaporation

3.3.3 最大、最小温度对蒸发的影响

计算结果见图8、图9。由此可知:(1)最大、最小温度对蒸发的影响不明显。(2)蒸发初始阶段,最大温度越大,蒸发越快,温度升高有利于蒸发;蒸发第3阶段,最大温度对蒸发的影响更小,16 d后的蒸发量敏感度趋于零。最小温度对蒸发的第1阶段的影响不明显,第3阶段后,最小温度增加,蒸发加快,蒸发量敏感度逐渐增大。

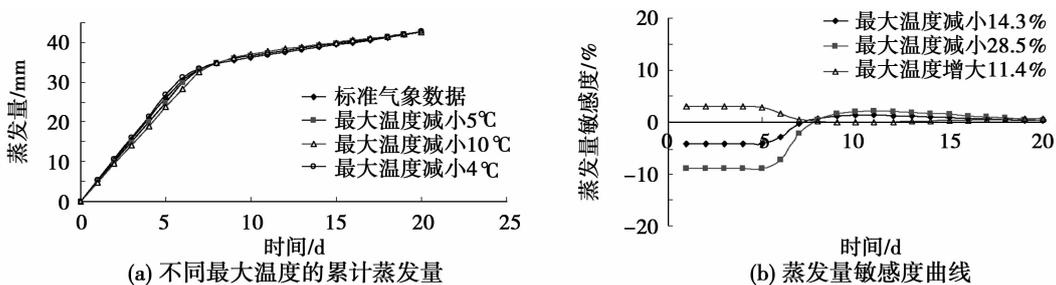


图8 最大温度对蒸发量的影响
Fig.8 Impact of maximum temperature on evaporation

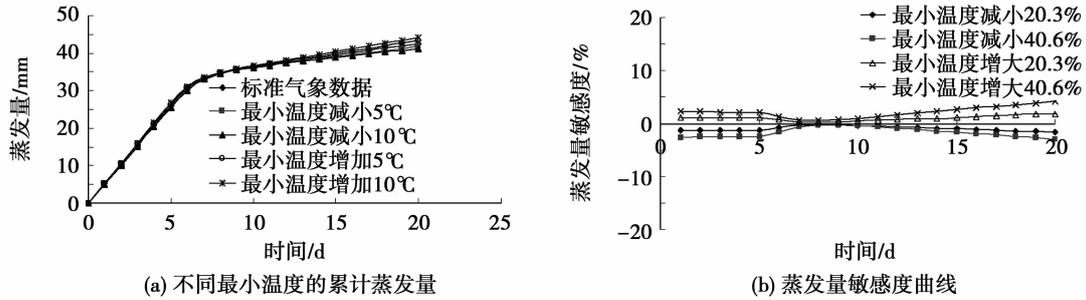


图 9 最小温度对蒸发量的影响

Fig. 9 Impact of minimum temperature on evaporation

3.3.4 最大、最小湿度对蒸发的影响

计算结果如图 10、图 11 所示。由此可知:(1)最大湿度对蒸发的影响主要反映在第 1 阶段,最大湿度越小,蒸发越快;蒸发第 3 阶段,5 种方案的斜率基本相同。蒸发的前 5 d 内蒸发敏感度远大于后 15 d,4 种对比方案后 15 d 内的蒸发量敏感度小于 5%。(2)最小湿度对蒸发的影响趋向单一化,在整个蒸发过程中,最小湿度增加,蒸发量减小。(3)比较图 9 和图 11 可知,最小湿度对蒸发量的影响比最小温度的影响大。

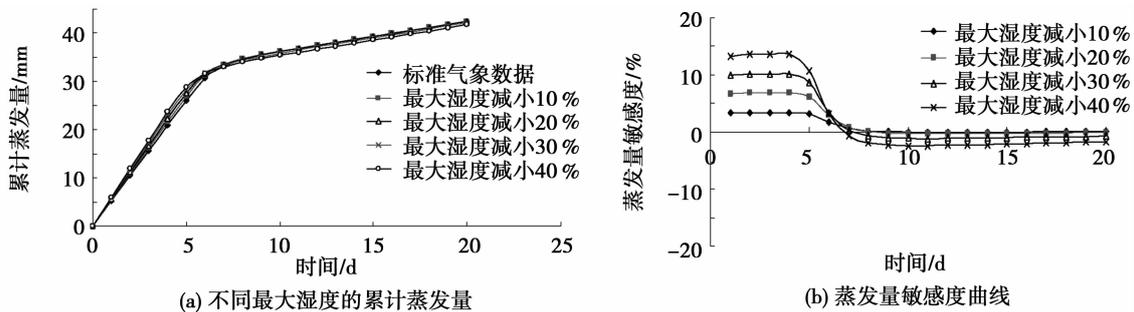


图 10 最大湿度对蒸发量的影响

Fig. 10 Impact of maximum humidity on evaporation

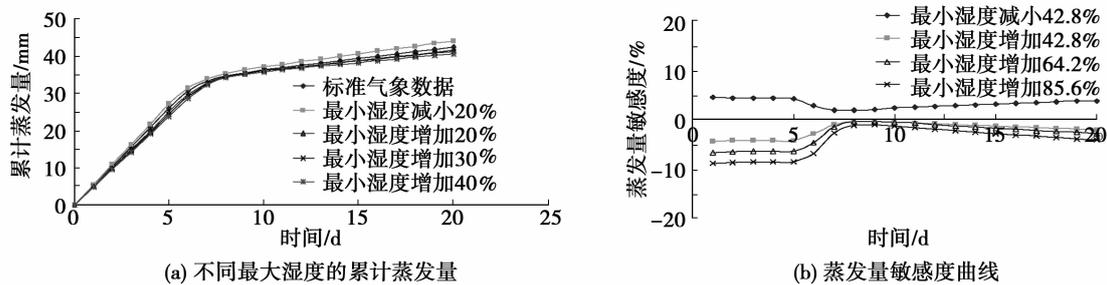


图 11 最小湿度对蒸发量的影响

Fig. 11 Impact of minimum humidity on evaporation

4 结语

通过模拟接近饱和的均匀膨胀土柱蒸发过程,分析了 6 种气象因子对蒸发的影响,认为:净辐射对蒸发的影响程度最大,净辐射越大,蒸发速度越快,蒸发量越大;风速对蒸发的第 1 阶段具有促进作用,在第 3 阶段反而阻碍了蒸发;温度越高,蒸发越快,影响程度不如风速和净辐射明显,最大温度对蒸发第 1 阶段的影响大于第 3 阶段,最小温度则相反;湿度越小,蒸发越快,但湿度对蒸发的影响很小。

参考文献:

[1] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
 [2] Lumb P. Effect of Rain Storms on Slope Stability[M]. Local Property & Printing Company, Limited, 1962.

- [3] Alonso E, Gens A, Lloret A, et al. Effect of rain infiltration on the stability of slopes[C]//Proceedings of the first International Conference on Unsaturated Soils/UNSAT95/Paris/France/6-8 September 1995. 1995;241-245.
- [4] Shimada K, Fujii H, Nishimura S, et al. Stability analysis of unsaturated slopes considering changes of matric suction[C]//Proceedings of the first International Conference on Unsaturated Soils/UNSAT95/Paris/France/6-8 September 1995. 1995;293-297.
- [5] 姚海林, 郑少河, 陈守义. 考虑裂隙及雨水入渗影响的膨胀土边坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 606-609.
YAO Hailin, ZHENG Shaohe, CHEN Shouyi. Analysis on the slope stability of expansive soils considering cracks and infiltration of rain[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5): 606-609. (in Chinese)
- [6] 袁俊平, 殷宗泽. 考虑裂隙非饱和膨胀土边坡入渗模型与数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(10): 1581-1586.
YUAN Junping, YIN Zongze. Numerical model and simulation of expansive soils slope infiltration considered fissures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(10): 1581-1586. (in Chinese)
- [7] 陈守义. 考虑入渗和蒸发影响的土坡稳定性分析方法[J]. 岩土力学, 1997, 18(12): 8-12.
CHEN Shouyi. A method of stability analysis taken effects of infiltration and evaporation into consideration for soil slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997, 18(12): 8-12. (in Chinese)
- [8] 陈建斌, 孔令伟, 郭爱国, 等. 大气作用下膨胀土边坡的动态响应数值模拟[J]. 水利学报, 2007, 38(6): 674-682.
CHEN Jianbin, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Numerical simulation of dynamic response of expansive soil slope to atmospheric conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(6): 674-682. (in Chinese)
- [9] Milly P C D. A simulation analysis of thermal effects on evaporation from soil[J]. Water Resource Research, 1984, 20: 1087-1098.
- [10] 弗雷德隆德, 拉哈尔佐. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐等, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [11] 陈建斌. 大气作用下膨胀土边坡的响应试验与灾变机理研究[D]. 武汉: 中科院武汉岩土力学研究所, 2006.
CHEN Jianbin. Research on the Response Test and Disastrous Mechanism of Expansive Soil Slope Under the Effect of Atmosphere[D]. Wuhan: Institute of Rock & Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)