

文章编号: 1000-7598(2014)增 2-0129-06

一种非饱和土表层蒸发过程的预测方法

张 华¹, 胡文龙¹, 陈善雄²(1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002;
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要:探索了一种由土壤基本物性指标、气象数据预测非饱和土表层蒸发过程的方法。通过土壤基本物理性质(颗粒分布、土粒相对密度、干密度)预测出土-水特征曲线(SWCC),进而得到土壤气相对湿度与含水率的关系,采用 Penman-Wilson 模型预测出了非饱和土表面的蒸发曲线。通过该方法,只需实地采取土样,获取其基本物理性质,由任意时刻土壤的含水率及气象数据就能预测出该时刻土表的蒸发速率。采用自制的自动蒸发测量系统进行浅层土蒸发试验,得到了蒸发曲线,与预测结果进行比较发现预测蒸发过程与实测结果一样皆由临界含水率和风干含水率将其分为 3 个阶段:稳定阶段、减速阶段和残余阶段,且蒸发量吻合,证明了所提出方法的准确性和实用性,对工程界估计土表蒸发量,确定水流量边界有重要意义。

关 键 词: 预测方法; 土-水特征曲线; Penman-Wilson 模型; 蒸发试验

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

A method for predicting evaporation process in unsaturated soil surface

ZHANG Hua¹, HU Wen-long¹, CHEN Shan-xiong²

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Education Ministry, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: A method for predicting evaporation process in unsaturated soil surface is presented based on physical properties of soil and meteorological data. The soil-water characteristic curve (SWCC) is estimated by physical properties of soil (i.e. particle size distribution, specific gravity and dry density). Then, the relationship between relative humidity of soil surface and water content is obtained based on the SWCC. Finally, the Penman-Wilson model is applied to predict evaporation curve of unsaturated soil surface. In this method, only in situ soil physical properties and meteorological data are needed to get the predicted evaporation curve. The evaporation rate of soil surface can be obtained with given water content at that time. Laboratory evaporation tests of thin layer soils are conducted in a designed evaporation measuring system. The measured evaporation curves are compared with those predicted. The results show that the measured and prediction evaporation curves have same processes and slight difference in evaporation rate. Three evaporation stages, i.e. stable rate stage, reducing rate stage and residual stage, are evidently shown in both observed and predicted curves. The stages are divided by as called critical moisture content and air-dried moisture content. The suggested method is accurate and practical for engineers to predict unsaturated soil surface evaporation rate and determine the boundary flux.

Key words: predicting method; soil-water characteristic curve (SWCC); Penman-Wilson model; evaporation tests

1 引 言

预测地表和大气之间的水流量是水文学、气候学、农业科学中传统的且经常出现的问题。在岩土工程中,由于土中水分的变化,常常会引起一系列的工程问题,如膨胀土体积的变化、边坡的失稳、地基的沉降等^[1-3]。近些年来,岩土工程师越来越

多的要面对一些预测土表水分运移的数值问题和实际问题,预测地表的水流量边界问题已经引起岩土工程师的强烈关注。土壤表面的水分运移方式主要有渗流和蒸发,土中的渗流机制已经被国内外学者进行了大量的研究^[4-5],然而,土表的蒸发过程还没有被完全的了解,尤其是对于非饱和土面蒸发量的计算。在相关文献^[6-8]中可以找到计算非饱和

收稿日期: 2014-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51178251)。

第一作者简介: 张华,男,1974年生,博士,副教授,主要从事非饱和土渗流,屋顶绿化材料水分运移研究。E-mail: cezhua@139.com

土面蒸发量的经验方法,但这些方法的可靠性和准确性遭到众多学者的质疑。

蒸发量的计算是研究蒸发效应的关键问题,为了简化研究问题,通常选取土表层特征单元体,不考虑土层厚度和边界补给。对于饱和蒸发,从最早用于计算自由水面蒸发量的 Dalton 公式^[9]到 Penman^[10]提出用于计算饱和土中蒸发量的 Penman 公式,计算及预测饱和蒸发量的理论已经很成熟。然而,当土体失水进入非饱和阶段后,实际蒸发量不再等于饱和蒸发量,而是随着含水率的变化而变化,过程非常复杂。Wilson^[11]通过考虑土壤气相对湿度变化,改进 Penman 公式,引入吸力,把土壤蒸发作为土壤湿度的连续函数,推出了计算非饱和土表面实际蒸发量的 Penman-Wilson 模型。该方法结合环境的气象因素(风速、温度、湿度)和土壤气相对湿度能够计算出不同含水率时的实际蒸发量。然而,土壤气相对湿度直接测量比较困难,通常需要通过土-水特征曲线(SWCC)来转换,而实验室中 SWCC 曲线的测试不仅是一项昂贵费时的工作,而且一般测量范围有限(0~1 000 kPa),使得工程实际中运用该方法进行非饱和土蒸发的计算及预测仍然比较困难。

本文通过较易测得的土壤基本物性指标(颗粒分布、干密度、土粒的相对密度)预测出低吸力段(0~10⁴ kPa)的 SWCC,采用 Fredlund 和 Xing 模型^[12]拟合出高吸力段(10⁴~10⁶ kPa),得到完整的 SWCC 曲线,进而获得土壤气相对湿度和含水率之间的关系,运用 Penman-Wilson 模型,提出了一个应用于工程实际中预测非饱和土面蒸发的方法。本文方法只需实地采取土样,测得其土壤基本物理性质,结合当时土壤含水率及气象条件,就可以预测该处土表蒸发量,且准确性较好。

2 Penman-Wilson 蒸发量计算公式

Wilson (1991 年)通过考虑土壤气相对湿度变化,改进 Penman 公式,引入吸力,把土壤蒸发作为土壤湿度的连续函数,推出了计算非饱和土表面实际蒸发量的 Penman-Wilson 公式:

$$E = \frac{\Gamma Q + \nu E_a}{\Gamma + \nu} \quad (1)$$

式中: E 为蒸发量(mm/d); Γ 为饱和蒸汽压-温度曲线在温度为 T 时的斜率(kPa/):

$$\Gamma(T) = \frac{e_a}{273+T} \left(\frac{6463}{273+T} - 3.927 \right) \quad (2)$$

式中: e_a 为空气中的水蒸汽分压(kPa),由空气的温度和相对湿度来确定; T 为温度; Q 为土表面的等效净辐射量(mm/d), $Q = Q_T / L$, Q_T 为土表面的净辐射量(MJ/m²·d), L 为水的气化潜热,如水在一个大气压(0.1 MPa)100 时的汽化潜热为 2 257.2 kJ/kg。

$$Q_T = R_C(1-r) - \tau T_a^4(0.56 - 0.092\sqrt{e_a})(0.1+0.90n/N) \quad (3)$$

式中: R_C 为试验地点的短波辐射,或者 $R_C = 0.95R_a(0.18+0.55n/N)$; R_a 为太阳辐射(来自统计图表,宜昌地区七月日平均太阳辐射量 18.84 MJ/m²·d); n/N 为每日实际光照小时与可能光照小时的比值; r 为相关系数; τ 为斯特藩-玻尔兹曼常数,即 5.67×10^{-8} ; T_a 为空气绝对温度; ν 为湿度常数, $\nu = (C_p/L)(M_a/M_v)$,一般取 0.66 hPa/ ; C_p 为空气等压比热; M_a 、 M_v 为空气和水的分子量。 $E_a = f(u)e_a(B-A)$, $f(u)$ 为风函数, $f(u) = 0.35(1+u(0.146))$, u 为风速, A 为土壤气相对湿度的倒数, B 为空气相对湿度的倒数,即 e_s/e_a , e_s 为饱和蒸汽压(kPa),由温度来确定。由 Edlefsen 和 Anderson^[13]提出的总吸力和吉布斯自由能的关系得到

$$A = \frac{P_{SV}}{P_v} = e^{-\frac{\psi g W_v}{RT}} = e^{-\frac{\nu(\theta) g W_v}{RT}} \quad (4)$$

式中: P_v 为土中的蒸汽压; P_{SV} 为土中水的饱和蒸汽压; ψ 为土中总吸力; W_v 为水的摩尔质量; g 为重力加速度; R 为通用气体常数; T 为绝对温度。当土表接近饱和,即土壤气相对湿度为 100%时, $A=1$ 此时, Penman-Wilson 公式转化为

$$E = \frac{\Gamma Q + \nu E_a}{\Gamma + \nu} \quad (5)$$

即正好为 1948 年 Penman 推出的计算饱和蒸发量的公式。

3 预测方法

对于饱和土面蒸发的计算,传统方法假定其蒸发量等于自由水面的蒸发量,通过气象因素结合蒸发模型(Penman 公式等)即可得到饱和蒸发量。当土中含水率低于饱和含水率时,该方法将不再适用。Wilson 通过引入土壤气相对湿度,推出了计算非饱和土面的蒸发量的方法,如图 1 所示。

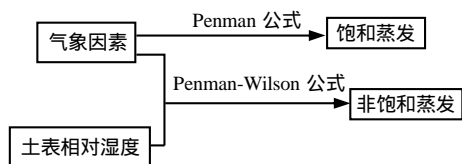


图 1 传统蒸发量计算方法

Fig.1 Traditional methods of calculating evaporation

然而，由于土壤气相对湿度不易直接获取，使得工程实际中运用 Penman-Wilson 模型进行非饱和土蒸发的计算及预测仍然比较困难。本文针对这种情况，探索了一种由土壤基本物性指标、气象因素预测非饱和土表层蒸发过程的方法，流程图见图 2。

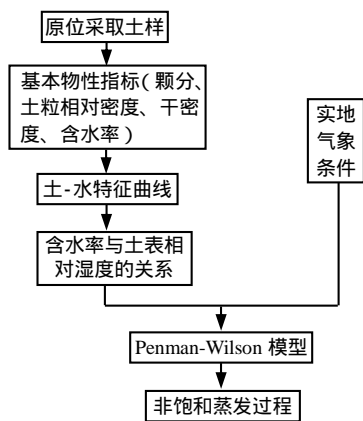


图 2 预测方法流程图

Fig.2 Flow chart of the estimating method

总吸力公式即式(2)表述了土壤气相对湿度与土表总吸力的关系，因此获得土中总吸力成为了解决问题的关键，而 SWCC 曲线成为了一个重要的转换媒介。近年来，由于工程实际的需要，越来越多的学者开始致力于 SWCC 曲线的预测，即通过其他容易获得的土壤基本物理性质来估计 SWCC。Arya-Paris 模型^[14]是其中一个已被广为接受的方法，其充分利用土壤颗粒分布中的信息，通过估计的空隙尺寸计算体积含水率，将空隙半径代入毛细管模型^[15]计算得到基质吸力，从而预测出含水率对应的基质吸力值。图 3 为 2 种土样的颗粒分布曲线。由 Arya-Paris 模型可预测得到 2 种土样低吸力段 (0~10⁴ kPa) 的 SWCC，采用 Fredlund 和 Xing 模型拟合出高吸力段 (10⁴~10⁶ kPa) 的 SWCC，便得到完整的 SWCC 曲线。

土中吸力反映了土中水的自由能状态，总吸力相当于土中水的自由能，而基质吸力和渗透吸力是自由能的组成部分：

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (6)$$

渗透吸力 π 也称作溶质吸力，随含水率变化不大，一般情况下可以认为基质吸力等于总吸力，也可根据土矿物成分含量估计一个常数值，由此可得到由总吸力表示的 SWCC 曲线，如图 4 所示。

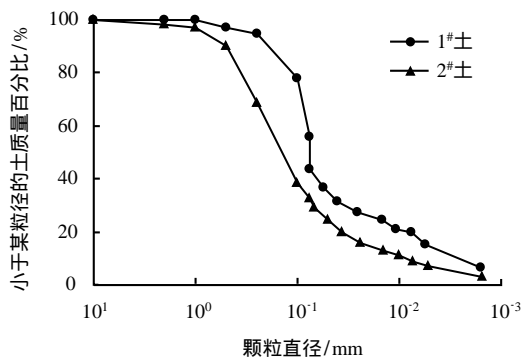


图 3 颗粒分布曲线

Fig.3 Grain size distribution curves

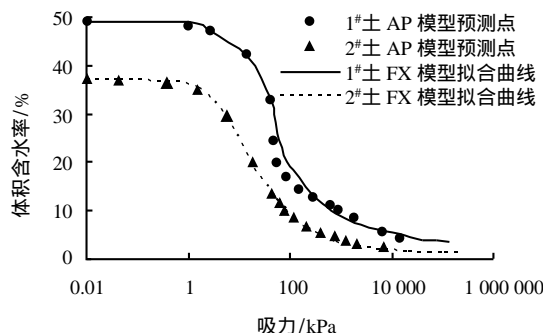


图 4 预测土-水特征曲线

Fig.4 Estimated soil-water characteristic curves

综上所述，本文提出了一种预测非饱和土表层蒸发过程的方法，只需要通过原位采取土样，由其基本物性指标预测得到土-水特征曲线，从而得到含水率与土壤气相对湿度的关系，再运用 Penman-Wilson 公式，结合实时气象因素（风速、温度、湿度）就能计算出当时土表的蒸发速率。如若工程中已经获得了表层原状土的土-水特征曲线数据，也可以直接用于图 2 预测流程中进行后续蒸发率预测。

4 实例分析

4.1 试验材料

试验土样取自三峡库区滑坡土，其中 1#土样为低液限黏土 (CL)，2#土样为粉土质砂 (SM)，其相关物理参数见表 1。根据筛分法和密度计法测得两种土样的颗粒分布曲线如图 3 所示，预测 SWCC 如图 4 所示。

表1 土样的部分物理参数

土样	土粒相对密度	干密度 / (g/cm ³)	液限 / %	塑限 / %	塑性指数	饱和体积含水率 / %
1#	2.72	1.40	29.4	11.1	18.3	48
2#	2.69	1.66	22.6	12.7	9.9	38

4.2 蒸发试验

用自制的自动蒸发测量系统进行浅层土壤蒸发试验来观察表土蒸发过程。如图5所示,3个相同的托盘置于测量精度为0.01g的梅特勒电子天平上,托盘面积均为350mm×255mm,2个托盘分别装有厚度为17mm的1#、2#土样,土样初始均饱和,另一个托盘盛有足量的蒸馏水。试验置于封闭环境中进行,可以认为风速为0。持续记录各托盘质量,记录时间间隔为1min,由土样质量的变化可以得出实际蒸发量,盛有蒸馏水的托盘用来测量潜在蒸发量,同时监测并记录实验环境中的温湿度变化,至土表干裂、土样质量24h不再发生变化时结束试验。

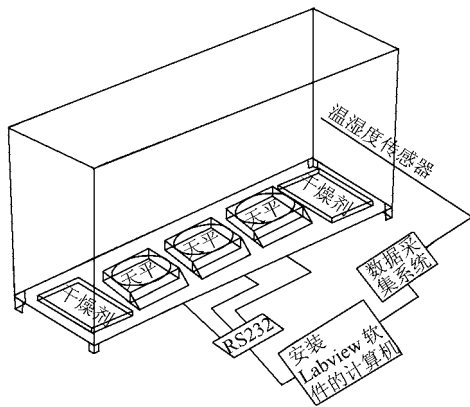


图5 自动蒸发测量系统
Fig.5 Evaporation measuring system

4.3 实验数据分析

试验总共进行了6d,图6~8为蒸发量、蒸发速率及土样体积含水率随时间变化的曲线。

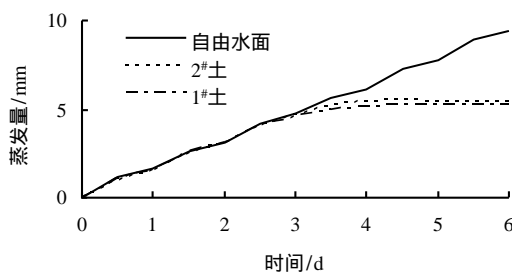


图6 蒸发量测量值变化曲线
Fig.6 Variation curves of measured evaporation with time

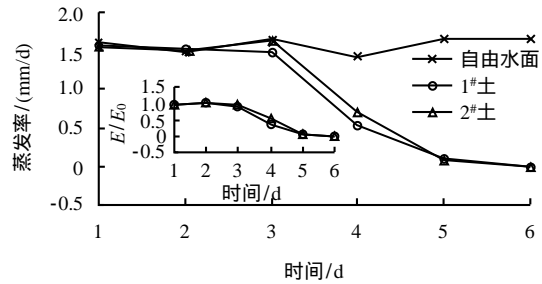


图7 蒸发率变化曲线
Fig.7 Variation of evaporation rate with time

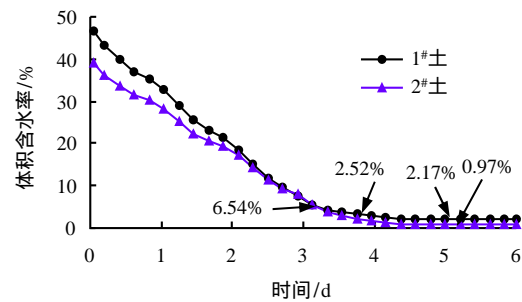


图8 体积含水率变化曲线
Fig.8 Variation curves of volumetric water content with time

通过试验数据不难发现,薄层非饱和土蒸发过程可分为3个阶段,即稳定阶段、减速阶段和残余阶段。试验前期,土样都处于饱和状态,蒸发等同于水面的蒸发,实际蒸发量与潜在蒸发量的比值(E/E_0)接近等于1,两种土样的蒸发量和蒸发速率与自由水面相同,此时蒸发处于稳定阶段,这一阶段影响蒸发的因素主要为外部气象条件。随着蒸发的进行,土中含水率逐渐降低,当1#土体积含水率低于6.54%,当2#土低于2.52%时,蒸发速率迅速下降, E/E_0 快速减小,从试验第4天的蒸发量变化中可以明显的发现这一现象,该含水率被称为临界含水率 θ_c [16],其值视外界条件和土壤性质而定。也就是说,在土壤含水率降至临界含水率 θ_c 以下时,土壤蒸发进入第二阶段:减速阶段。也正是从进入第二阶段开始土壤自身的性质也成为了蒸发的影响因素。试验的后期,当土样含水率降至某一风干含水率 θ_k 以后,1#土为2.17%,2#土为0.97%,土中的蒸发变得很缓慢且稳定,此时蒸发进入了第三阶段:残余阶段。这些现象和前人得出的结论[16]都是一致的,至于 θ_k 和 θ_c 与外界条件及土壤性质的关系,有待进一步研究。

4.4 预测方法验证

影响蒸发的主要外部气象因素主要有风速、温度、湿度。在密闭实验室中风速可认为0,试验期间的温湿度变化记录如图9、10所示。

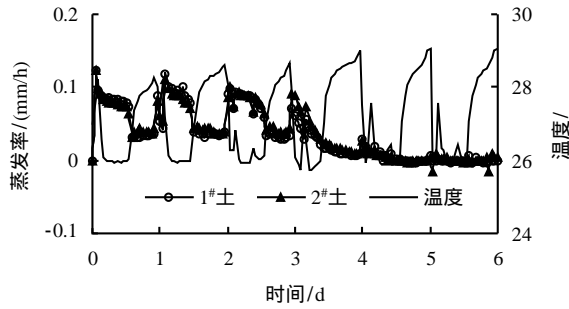


图 9 实际蒸发率随温度变化曲线

Fig.9 Variation curves of actual evaporation rate with temperature

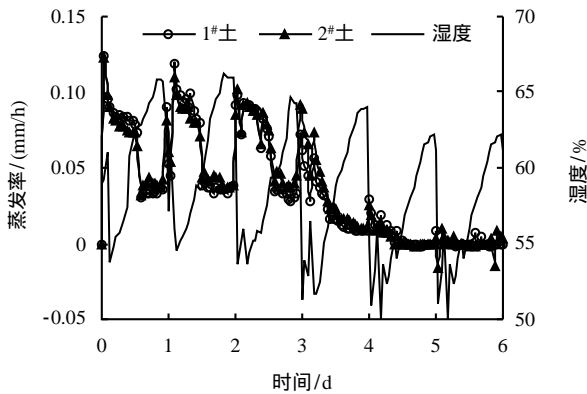


图 10 实际蒸发率随湿度变化曲线

Fig.10 Variation curves of actual evaporation rate with humidity

结合测得的气象条件，通过 Penman 公式计算了试验期间的潜在蒸发率，图 11 为实测值与计算值的对比结果。由图可以看出，实测值比计算值稍大，主要是因为原彭曼公式是依据较湿润地区资料建立起来的，应用于不同的地区及气候时，都需修正后使用，而本文是根据 Penman 于 1948 年提出的原始公式计算的，另外，实验室每晚 3~4 h 的日光灯照射没有被考虑在内。上述原因对结果都有一定影响，但误差小于 4%，且计算值与实测值的变化趋势基本相同，由此可见所测得外部气象条件的准确性和 Penman 公式在计算水面蒸发量问题上的实用性。

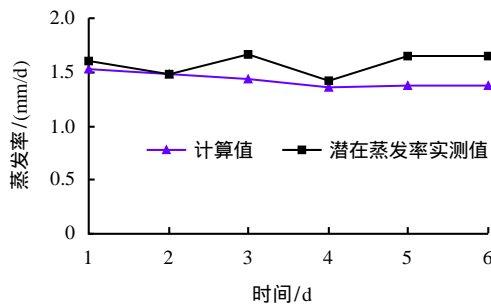
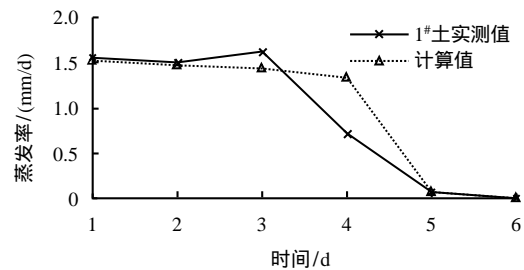


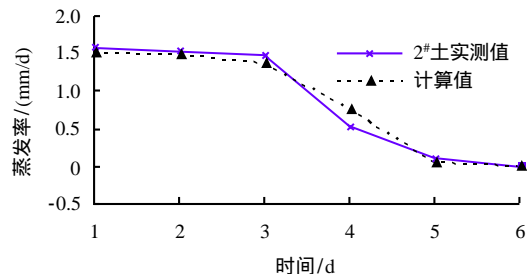
图 11 潜在蒸发率实测值与计算值对比

Fig.11 Comparison between measured and calculated potential evaporation rates

结合预测 SWCC 曲线（见图 4）和所测得的气象条件，通过 Penman-Wilson 公式预测了 1#土和 2#土 6 d 的蒸发过程，将预测结果与实测值对比，如图 12 所示，结果显示两种土的蒸发率预测值与实测值基本吻合。值得一提的是，预测蒸发过程进入衰减阶段较实测值偏晚，有一定的延迟，计算值在衰减阶段衰减速率小于实测值，这可能是由于本文中 Penman-Wilson 公式的湿度常数 ν 沿用原 Penman 公式中的 0.66 hPa/ ，未经地域气象修正，而文献[17]曾使用过修正后的为 1.10 hPa/ 。较小的湿度常数与土壤气相对湿度的倒数 A 相乘后，将土中吸力变化对蒸发量的影响给缩小了，出现了计算值变化相对实测值延迟的现象。



(a) 1#土



(b) 2#土

图 12 土蒸发率实测值与计算值对比

Fig.12 Comparison between measured and calculated values of evaporation rates of soil

不论是实测结果还是预测结果，可见蒸发率的变化主要发生在试验的第 4 天，当土样的含水率降至临界含水率 θ_c 时，即 1#土为 6.54%，2#土为 2.52% 时，蒸发速率开始迅速减小，此时，1#土吸力为 5 000 kPa，2#土吸力为 4 500 kPa；当含水率降至风干含水率时，即 1#土为 2.17%，2#土为 0.97% 时蒸发基本停止，此时，1#土吸力约为 200 000 kPa，2#土吸力约为 210 000 kPa。这与 Wilson (1991 年) 提出的“一旦总吸力超过 5 000 kPa 蒸发率开始迅速减小，达到 200 000 kPa 时蒸发停止”相当吻合^[11]。

通过土壤基本物理性质预测出 SWCC 曲线得到含水率与土壤气相对湿度的关系，结合气象因素，

根据 Penman-Wilson 可以准确的预测非饱和土的蒸发过程,给实际工程提供了一种预测土壤蒸发过程的实用方法。

5 结 论

(1) 探索了一种通过土壤基本物性指标预测出 SWCC 曲线,进而得到土壤气相对湿度与含水率的关系,采用 Penman-Wilson 模型预测非饱和土表面蒸发曲线的方法。

(2) 通过自制的自动蒸发测量系统,进行蒸发试验,得到蒸发曲线,发现蒸发过程由临界含水率和风干含水率分为 3 个阶段:稳定阶段、减速阶段、残余阶段。

(3) 将实测蒸发过程与通过本文提出的预测方法所得到的预测蒸发过程比较,结果基本吻合,可见该方法的实用性,可以方便工程界利用常规试验资料预测非饱和土表层蒸发过程。

参 考 文 献

- [1] 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(2): 8 - 12.
CHEN Shou-yi. A method of stability analysis taken effects of infiltration and evaporation into consideration for soil slopes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1997, 18(2): 8 - 12.
- [2] 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.
YANG Yang, YAO Hai-lin, LU ZHENG. Model of subgrade soil responding to change of atmosphere under evaporation and its influential factors[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(5): 1209 - 1220.
- [3] SILVESTRI V, SOULIE M, LAFLEUE J, et al. Foundation problems in Champlain clays during droughts. 1: Rainfall deficits in Montreal (1930 - 1988)[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1990, 7: 285 - 293.
- [4] 吴宏伟, 陈守义, 庞宇威. 雨水入渗对非饱和土坡稳定性影响的参数研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(1): 1 - 14.
NG W W C, CHEN Shou-yi, PANG Yue-wai. Parametric study of effects of rain infiltration on unsaturated slopes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1999, 20(1): 1 - 14.
- [5] NG C W W, WANG B, TUNG Y K. Three-dimensional numerical investigations of groundwater responses in an unsaturated slope subjected to various rainfall patterns[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2001, 38(5): 115 - 123.
- [6] BOUCHET R J. Evapotranspiration reele et potentielle, Signification climatique[J]. **Intern. Assoc. Sci. Hydrol.**, 1963, 62: 134 - 142.
- [7] BRUTSAERT W H, STRICKER H. An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration[J]. **Water Resources**, 1979, 15: 443 - 450.
- [8] MORTON F I. The complementary relationship areal evapotranspiration model: How it work[C]//Proceeding of the National Conference on Advances in Evapotranspiration. Chicago: American Society of Agricultural Engineers, Illinois, 1985: 377 - 384.
- [9] 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.
- [10] PENMAN H L. Natural evaporatranspiration from open water, bare soil and grass[J]. **Proceedings of the Royal Society of London (Series A)**, 1948, 193: 120 - 146.
- [11] WILSON G W. Soil evaporation fluxes for geotechnical engineering problems[D]. Saskatoon: University of Saskatoon, 1990.
- [12] FREDLUND D G, XING A. Equations for the oil-water characteristic curve[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31: 521 - 532.
- [13] EDLEFSEN N E, ANDERSON A B C. The thermodynamics of soil moisture[M]. Hilgardia: [s. n.], 1943: 31 - 299.
- [14] ARYA L M, PARIS J F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 1981, 45: 1023 - 1030.
- [15] TAYLOR D W. Fundamentals of soil mechanics[M]. New York: Wiley and Sons, 1948.
- [16] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [17] 闵騫. 彭曼公式应用中的两个问题的探讨[J]. 气象, 1992, 18(11): 17 - 21.
MIN QIAN. Discussion of two application problems of Penman equation[J]. **Meteorological Monthly**, 1992, 18(11): 17 - 21.