

# 模拟自然气候条件下未饱和土壤中热质 迁移过程的实验装置\*

金峰

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

施明恒 陈永平

(东南大学动力工程系, 南京 210018)

## AN EXPERIMENTAL APPARATUS ON HEAT AND MASS TRANSFER IN UNSATURATED SOIL UNDER SIMULATED CLIMATIC CONDITIONS

Jin Feng

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Shi Ming-heng Chen Yong-ping

(Department of Power Engineering, Southeast University, Nanjing 210018)

**关键词** 传热传质, 多孔介质, 土壤, 不饱和渗流

**中图分类号** S152

多孔介质传热传质过程在自然界和人类生活、生产中广泛存在, 土壤就是一类最典型的多孔介质。随着农业工程化的进程, 人们对土壤中水、肥、热的吸收、保持和迁移规律越来越重视, 研究也越加深入。尽管目前多孔介质传递理论发展较快, 有关的实验研究却相对滞后, 热质迁移特性参数比较匮乏<sup>[1]</sup>。实验研究不仅为理论分析提供必须的参数, 也为各种理论模型提供可靠的验证。未饱和土壤内热量与质量迁移不仅与土壤内部物性有关, 还与外界自然环境条件有关。而且人们更加关心特定土壤的内部水、盐、热诸要素的迁移特性受当地气候条件的影响情况, 以便在各类生产活动中采取措施。为此本文设计了一套可模拟自然环境下未饱和土壤中水分、热量、盐分的迁移过程的一维土柱实验装置, 利用该套装置可研究外界因素对热质迁移的影响, 揭示多组分的迁移规律, 也为理论模型提供验证。

多孔介质热质迁移实验存在着特有的困难, 最大的一个问题是迁移参数的测定, 而局

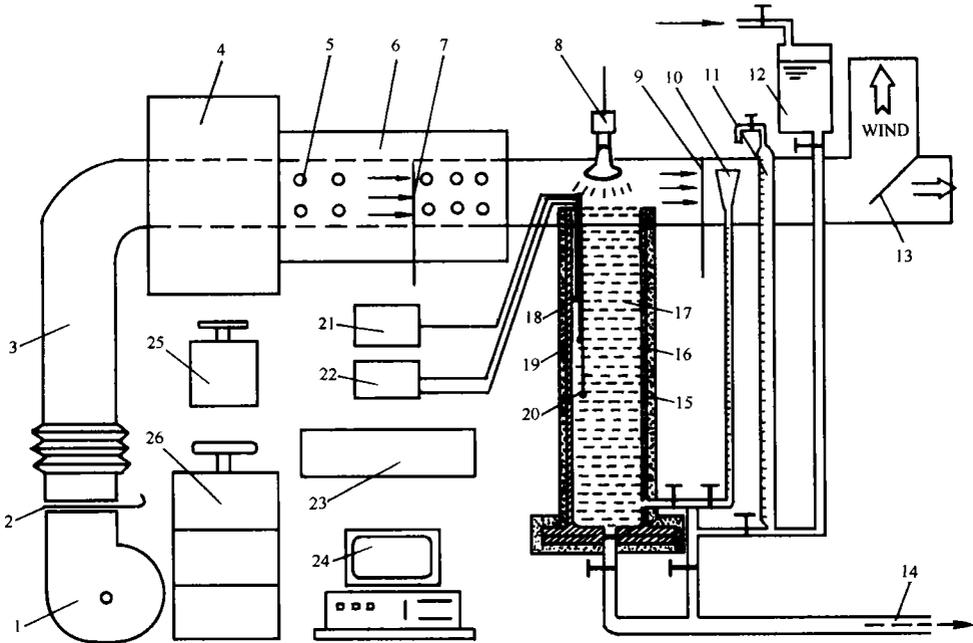
\* 国家自然科学基金资助课题, 批准号39570410

收稿日期: 1997-04-24; 收到修改稿日期: 1997-09-04

部湿场的测定又最困难,这已成为影响多孔介质热湿迁移过程研究深入进行的主要障碍。现有测湿方法中最简单的即为烘干称重法,其他还有原子核法、中子法、 $\gamma$ 射线法、张力计法、湿度计法<sup>[2]</sup>、遥感法等<sup>1,2)</sup>,但上述方法要么精度不够,无法满足实际要求,要么系统过于复杂、价格太高,而无法推广使用。针对这一问题,作者研制出了一种圆片式电极的脉冲电导测湿探头<sup>3,4)</sup>,实测结果表明该测湿探头的测试精度能满足实验要求。

# 1 实验装置

实验装置如图 1 所示。该实验台主要由土柱实验段、空气循环系统、加热与加湿装置、辐照装置、测量与控制系统等部分组成。



1-风机(YOF-2.0-4S) 2-风量控制阀门 3-输风管 4-冷却段 5-加热器(4×1.5kW) 6-加热加湿段 7-超声波加湿器(YC-D181) 8-可调温红外灯(250W) 9-热球风速仪(QDF-2A) 10-水位计 11-恒水位补水器 12-水箱 13-风向控制阀门 14-排水管 15-绝热层 16-土柱有机玻璃筒( $\phi 150 \times 900\text{mm}$ ) 17-砂土 18、19、20-水分、盐分、温度传感器 21-数字电表(DM-100型) 22-数字电导仪(SY-3) 23-7010/7066数字采集装置 24-微机 25-单相调压变压器(TDGC-2) 26-三相调压变压器(TSGC-15)

图 1 实验装置示意图

(1) 土柱实验段:平均粒径为 0.3mm 的砂土盛装在内径 135mm、高 900mm 的有机玻璃筒体内,筒外包裹绝热材料。从土柱内各规定位置引出温度、水分、盐分传感器。土柱筒体留有取样小孔。饱和水位由机械恒水位补水器控制。土柱底部连接排水管,中间隔有一

1) 虞维平. 含湿多孔介质的热湿迁移特性. (学位论文). 北京:清华大学,1987  
 2) 方肇洪. 测定多孔介质湿迁移特性的积分效应法. (学位论文). 北京:清华大学,1987

层 200 目的铜丝网作过滤用。

(2) 加热加湿装置: 加热器由 4 组 1.5kW 镍铬电炉丝及均热铁棒组成, 由三相调压变压器(TSGC—15 型)调节热量, 空气温度可在室温至 80℃ 范围内任意调节。加湿段由超声波加湿器(YC—D181 型)加湿, 空气相对湿度范围为 30%~80%。空气温度可由水银温度计或热敏电阻测量(误差  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ), 空气湿度由 0.5℃ 分度的干湿球温度计测量。

(3) 空气循环系统: 空气循环系统由引风机、输风管、加热加湿段、实验测量段、双向出口、进口风量阀门和出口风向阀门组成。风量由进口风量阀门控制, 风速可在 0.1~7m/s 范围内任意调节, 风速由 QDF—2A 型热球风速仪测量, 测量范围为 0.05~10.0m/s, 误差小于  $\pm 5\%$ 。空气可通向室内或室外, 其双向流量比例由流向控制阀门调节, 流向室内的空气有调节室内气温和空气湿度的作用。

(4) 辐照装置: 用可调红外灯模拟太阳辐射, 辐照强度由 TDSG—2 型调压变压器调节, 土壤表面热流密度用热电偶式(导热型)辐射热流计测量。

(5) 其它装置: 空气冷却系统、喷淋入渗装置等。

(6) 测量仪器: 含湿量由自制的脉冲电导测湿传感器测量, 只要测出两电极间土壤电阻  $R$  和温度  $t$ , 并确定是升温还是降温过程, 即可由经验公式  $\theta = \alpha \times R^a \times t^b$  求得含湿量  $\theta$ , 其中  $\alpha$ 、 $a$ 、 $b$  为标定常数。其值可见文献[4]。温度和盐分由中国科学院南京土壤所研制的 SY—3 型电导、温度计测得。温度值可通过温度传感器直接在该仪器上显示; 盐分值则由盐分传感器测得的电导值经公式换算后得到。该换算公式可见文献<sup>1)</sup>。

## 2 讨论

利用该实验装置进行模拟自然气候条件下未饱和土壤中热质迁移过程实验的测量误差情况如下:

关于温度测量的误差, 虽然温度传感器本身比较精确, 误差小于  $0.1^\circ\text{C}$ , 但由于土柱有机玻璃外壳的导热和端部的散热, 使温度场不能严格达到一维要求, 存在外界向土壤传热时实验测得的温度值相对于理想实验条件偏高  $0.5\sim 1^\circ\text{C}$ 。对于水分测量, 其误差主要有两个来源, 一是脉冲电导探针本身的测量误差, 由文献[4]知道, 该探针的性能比较稳定, 一般相对偏差小于 5%; 另一原因是土柱导水的不均匀性, 虽然砂粒很细小, 在宏观上比较均匀, 但利用该实验装置进行实验时观察到干砂在导水过程中, 局部传递速率很不均匀, 有的部位一分钟仅移动几个毫米, 而有的部位移动达每分钟十几厘米, 相差百倍之多。湿砂的导水速率问题由于肉眼不易辨别, 无法确定相差程度, 但问题同样存在, 因为湿砂中有细小裂隙存在, 从结构上比干砂更不均匀, 而含水率也因此存在不均匀性, 从而影响到导水速度。对于盐分测量, 其误差主要来自三个方面, 一是传感器本身的标定误差, 约为 5%; 二是对远离于  $25^\circ\text{C}$  温度补偿的仪表显示误差; 三是盐分传感器的时间常数较大, 表现出较强的滞后性。实验时为了精确地测量盐分浓度, 应使平衡时间较长(如大于 2 小时), 但水分变化比较快, 尤其是有温度梯度情况下, 这就造成了盐分测量的动态误差。

1) 金峰. 土壤热质迁移过程的数值模拟与仿真研究. (学位论文). 南京: 东南大学, 1996.

实验模拟条件与田间观察条件是存在差异的。实验土柱中采用的是粒径及理化性质都均匀的砂土,而实际田间土壤性质是不均匀的。因此,实验条件下的水分和盐分迁移速率比较符合建立在介质均匀假设基础上的理论模型,而与实际大田过程存在一定的差距。由于对非均匀土壤中的迁移过程目前尚无法采用一个统一的模型来描述,如果土壤结构的不均匀性不是十分严重,那么采用容积平均方法建立起来的理论模型也能大致描述土壤内水、热、盐分迁移的主要特征和发展规律。此外,实际田间还经常存在着水流向周围不同向入渗的情况,导致局部水、盐迁移速率发生较大变化,但是只要考虑的区域足够大,这些边界影响可以忽略。

本文设计的这套可模拟自然环境条件下土壤内热质迁移过程的实验装置,利用测量可得到理论模型所需的热质迁移规律及参数。为土壤中的水分、盐分、温度的预报工作提供了一种可靠、简便的实验工具。

### 参 考 文 献

1. Wang B X, Fang Z H, Yu W P. The Heat and Moisture Transport Properties of Wet Porous Media. *Int. J. Thermophysics*, 1989, 10(1):211~225
2. 王补宣,虞维平. 在第三类边界条件下测定含湿多孔介质热湿迁移特性的方法. *工程热物理学报*, 1987, 8(3): 363~369
3. 王素美,虞维平,施明恒. 测定含湿多孔介质局部含湿量的脉冲电导法. *东南大学学报*. 1994, 24(增刊):40~43
4. 陈永平,冯修功,施明恒,金峰. 一种改进的脉冲电导测湿传感器. *东南大学学报*, 1997, 27(3):115~117

\*\*\*\*\*

## 《土壤与环境》欢迎投稿

《土壤与环境》是经国家科技部批准的学术性期刊(原刊名:《热带亚热带土壤科学》),向国内外公开发行人。主要刊登国内外土壤科学(含肥料学)、环境科学以及这两者之间的交叉领域具有创新性的研究论文、研究简报;另辟有专题综述等栏目。欢迎国内外同仁们投稿。

来稿请寄:广州市乐意居广东省生态环境与土壤研究所《土壤与环境》编辑部收;邮编:510650。