

# 模拟自然气候条件下未饱和土壤中 热质迁移过程的实验研究\*

陈永平 施明恒 金 峰

(东南大学动力工程系, 南京 210018)

**摘 要** 本文利用可模拟自然环境的土壤热质迁移实验装置, 就自然气候条件下风速、日照、大气温度与湿度等因素对土壤中水、盐、热等要素的一维动态迁移的影响进行了多种条件下的实验研究, 揭示了土壤内温度、水分和盐分的分布动态与外界气候因素之间的联系, 获得了土壤热质迁移过程中各主要参数的变化规律。对于本文实验中的砂土而言, 发现土表以下存在吸水、过渡和释水三个自然分区, 并分析了热渗透深度和平衡时间等主要的热质迁移特征, 从而为各种理论模型提供了可靠的验证。

**关键词** 传热传质, 多孔介质, 土壤, 不饱和渗流

**中图分类号** S152.8

土壤和水是人类最基本的生存环境。土壤内物质和能量的运动与人类生存环境息息相关。随着对土地资源保护与利用的日益重视, 人们越来越多地把注意力集中到土壤内水、热、盐迁移规律的研究和迁移过程的预报上<sup>[1-3]</sup>。这方面的理论研究虽然重要, 但实验研究更需重视, 因为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。为此本文在一维土柱实验装置<sup>(1)</sup>上模拟自然环境下未饱和土壤中水分、热量、盐分的迁移过程, 研究了外界因素对迁移的影响, 揭示了多组分的迁移规律, 也为理论模型提供验证。

## 1 实验结果和分析

影响土壤内热质迁移的外界因素很多, 但对于土壤蒸发过程而言, 主要是大气温度、风速、流动速度、日照强度这一些因素。下面给出这些主要因素影响的实验结果。

### 1.1 土壤中的温度动态分布

本文通过三组不同的实验来观察温度变化。

\* 国家自然科学基金资助课题, 批准号39570410。

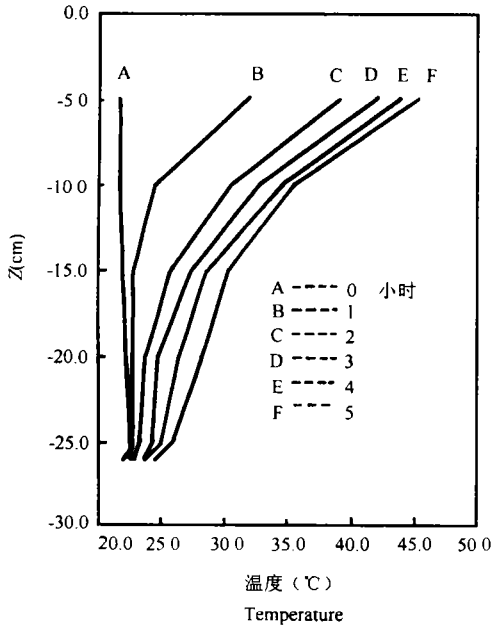
(1) 金峰, 施明恒, 陈永平。一套模拟自然气候条件下未饱和土壤中热质迁移过程的实验装置。待刊稿。

收稿日期: 1997-04-24; 收到修改稿日期: 1997-09-04

(1) 第一组实验 T1 为无辐照的对流加热蒸发, 风温 60℃, 风速 1.0m/s, 大气湿度 52%, 大气温度为 22.1℃, 土柱饱和水位距土表 26.0cm, 并保持恒定, 开机之后, 每隔 1 小时做 1 次记录, 测温位置分别为土表以下 5cm、10cm、15cm、20cm、25cm 深处。图 1 为实验条件 T1 下的温度变化动态, 从图中可见升温段主要在 0—15cm 部分, 这部分土壤温度平均升幅为 105%, 而在 15—26cm, 土壤段温度平均升幅为 25%; 升温期主要在 2—3 小时之内, 其全段平均温升已达 5 小时全段温升的 75% 以上。可见在以对流为主的边界传热过程中, 显著热渗透范围为从土表以下约 15cm 内, 显著升温时间约为 2 至 3 小时。

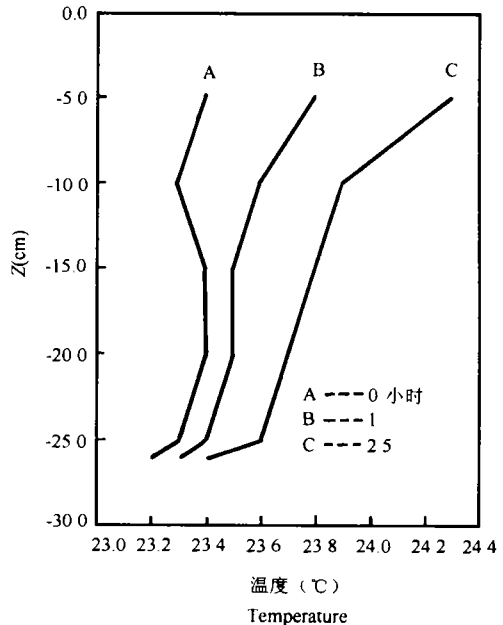
(2) 第二组实验 T2 为等温对流蒸发, 大气湿度为 50%, 大气温度为 24.5℃, 无辐照, 土柱内水位同前, 但 24 小时后初始温度与含水率分布实测值已与前不同。开机后 0—1.5 小时风速为 1.0m/s, 1.5—2.5 小时风速为 4.5m/s。测温点位置同前。

图 2 为实验条件 T2 的温度变化动态, 由图可见, 在低热流条件下, 传热过程明显减



( $V_f = 1.0\text{m/s}$ ,  $t_f = 60^\circ\text{C}$ )  
图 1 对流边界条件下土柱温度场动态

Fig.1 Temperature distribution of soil column under convective heat transfer boundary condition



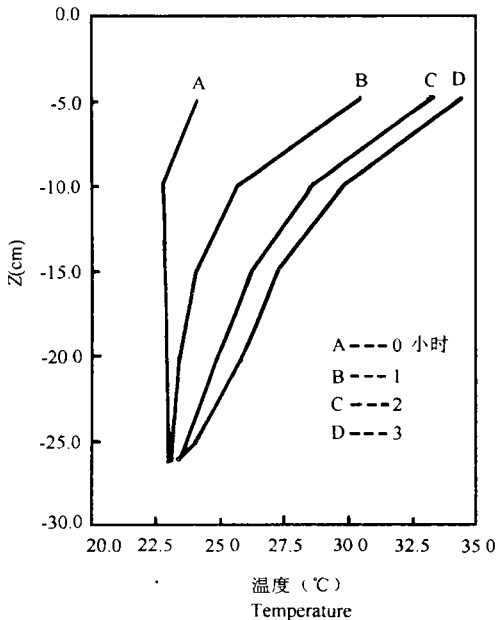
( $V_{f1} = 1.0\text{m/s}$ ,  $V_{f2} = 4.5\text{m/s}$ ,  $t_f = \text{室温}$ )  
图 2 等温对流边界条件下土柱温度场动态

Fig.2 Temperature distribution of soil column under isothermal convective boundary condition

缓, 温度场均匀化速率较为平均; 风速在等温对流传热条件下, 对内部迁移作用不明显, 热渗透范围仍为土表以下 15cm 深度, 无显著温变期。

(3) 第三组实验 T3 为单纯辐照条件, 辐照热流密度为 180W/m<sup>2</sup>, 大气温度为室温 (24.1℃), 大气湿度为 52%, 土柱饱和水位不变, 初始温度和含水率分布实测值已与前者不同, 测温位置同前, 开机后于 1, 3, 4 小时测量。

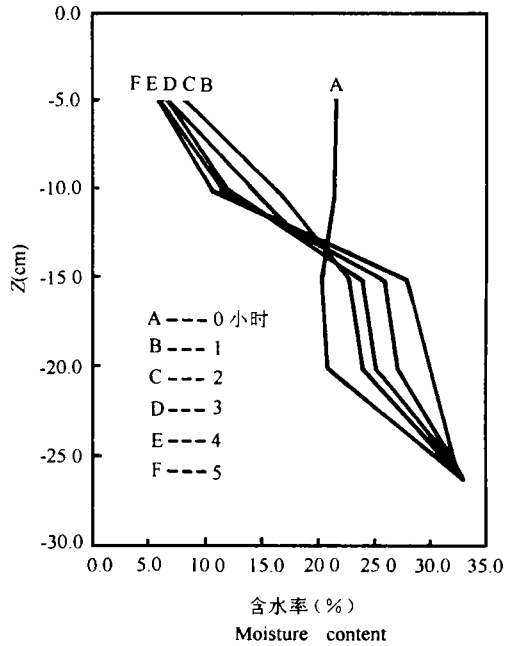
图 3 为实验条件 T3 下的温度变化动态, 由图可见, 显著升温段仍在土表以下至 15cm



$(q_{rad} = 180W / m^2)$

图3 辐射边界条件下土柱温度场动态

Fig.3 Temperature distribution of soil column under radiation boundary condition



$(V_f = 1.0m / s, t_f = 60^\circ C)$

图4 对流传热边界条件下土柱含水率分布动态

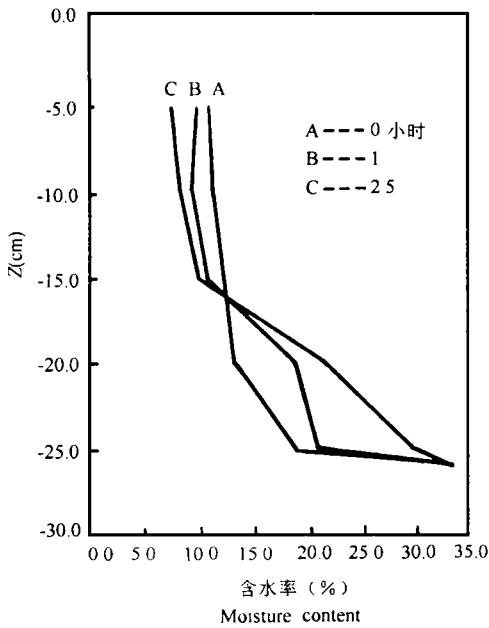
Fig.4 Moisture content distribution of soil column under convective heat transfer boundary condition

深范围内,4小时时刻土表下5—15cm段温度平均升幅为40%,而15cm至饱和层深度范围温度平均升幅为14%;升温期也主要在0—3小时之内,3小时时刻土壤表面下5cm—饱和层段温度平均升幅已达4小时时刻的76%,这与实验条件T1的较强热流情况相似。可见对于砂土的辐射边界条件,显著热渗透范围为从土表以下约15cm深度,显著温度变化时间约为2—3小时。

本文中,Z指距土表距离, $V_f$ 指风速, $t_f$ 指风湿, $q_{rad}$ 指辐射热流强度。

### 1.2 土壤中的水分动态分布

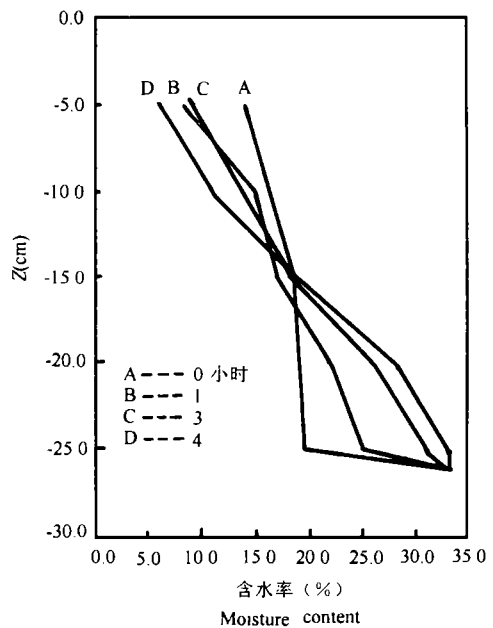
在上述实验中,测量温度的同时还测量了水分。测量结果表明,沿土柱高度存在着三个不同的区域,从地表开始,依次是释水区、过渡区和吸水区。图4为实验条件T1下的含水率变化动态,由图可见,最显著的特点是土柱存在释水和吸水区,两个区的过渡层约在土表以下10—15cm之间。在吸水区内,随水分逐渐向上迁移,近饱和层段含水率逐渐趋向饱和值,速率由快趋缓,而向上接近过渡层,土壤含水率受初始含水率制约,形如存在一种过渡层的边界条件,虽然砂土的物性是均匀的,但由于迁移推动力的变化,吸水区中含水率分布并不呈线性分布,由初始平衡状态的正二次导数曲线逐渐转化为迁移后平衡态的负二次导数曲线。在释水区,土表以下5cm范围内存在一层干区,因测量位置所限在图中没有画出。释水区释水速度约在开机2小时后显著减缓,其原因可解释为近土表面水蒸发速度大于水向上迁移速度,造成毛细管断裂,水以液态形式保存在干土覆盖层之下,只以汽态形式向上扩散,损失显著减缓。同样,释水区水分迁移平衡的重新形成也与外界条



( $V_{11} = 1.0\text{m/s}$ ,  $V_{12} = 4.5\text{m/s}$ ,  $t_f = \text{室温}$ )

图5 等温对流边界条件下土柱含水率分布动态

Fig.5 Moisture content distribution of soil column under isothermal convective boundary condition



( $q_{\text{rad}} = 180\text{W/m}^2$ )

图6 辐射边界条件下土柱含水率分布动态

Fig.6 Moisture content distribution of soil column under radiation boundary condition

件及初始状态有关,曲线仍以正二次导数曲线形态分布,在过渡层存在正二次导数释水曲线与负二次导数吸水曲线的拐点。

图5为变风速等温对流条件T2下的含水率分布,由图可见,整个未饱和土柱仍然存在吸水与释水两个区,吸水区曲线形状与条件T1相似,也由正二次导数曲线过渡为负二次导数曲线,但变化速率较为平均,这一点与条件T1的温度变化速度相似。过渡区仍在土表以下15cm左右,并存在正负二次导数曲线的拐点,过渡区含水率基本接近初始状态,并决定着吸水与释水曲线分布的平衡态。释水曲线在1小时和2.5小时基本一致,其原因可解释为等温变风速对流条件对内部水分迁移不产生显著影响;或者,只要表层一旦形成干区,水分迁移速度便大大减缓。

图6为辐射边界条件T3的含水率变化动态。由图可见,吸水区、过渡区和释水区的空间位置与前两实验条件相近,曲线形状与拐点位置与前相同,水分迁移速率为由快趋缓,但在1小时的释水曲线有异常分布,本文认为这由土表下5cm处测水探针的偶然测量误差所致。

### 1.3 土壤中的盐分动态分布

本文用三组实验来观察在不同大气条件下,土壤中的盐分变化动态。

(1)第一组实验条件S1为有辐射,风温45℃,风速1.0m/s,大气湿度50%,大气温度

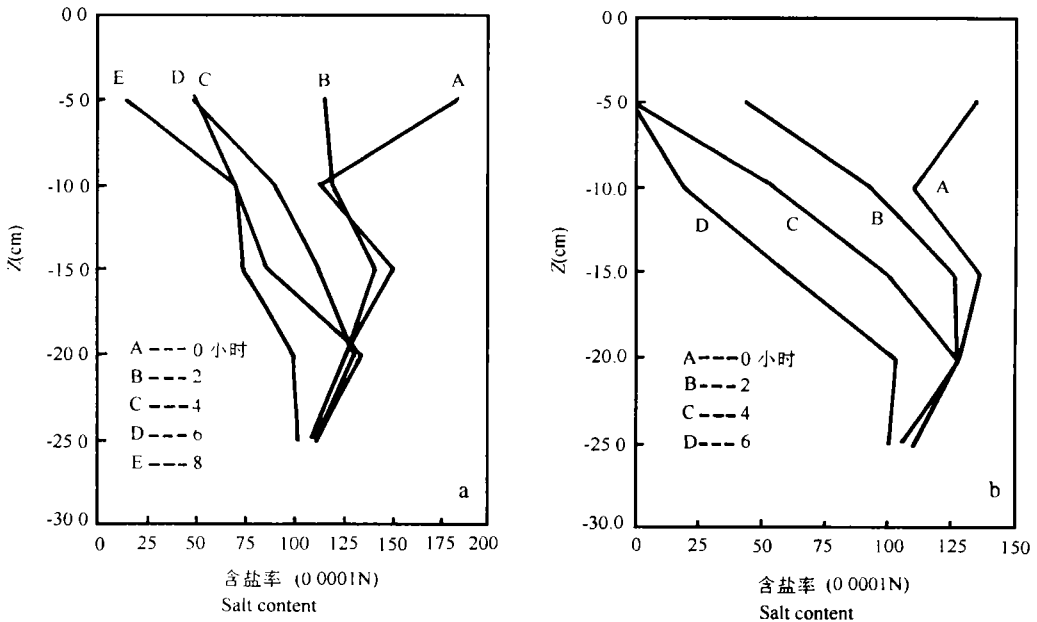


图7 复合传热边界条件下土柱盐分动态 ( $V_f = 1.0\text{m/s}$ ,  $t_f = 45^\circ\text{C}$ ,  $q_{\text{rad}} = 180\text{W/m}^2$ )

Fig.7 Salt content distribution of soil column under complex heat transfer boundary condition

7.0°C, 辐射热流密度 180W/m<sup>2</sup>, 土柱饱和水位仍为前文值, 记录时间为开机后 2, 4, 6, 8 小时。图 7a 为此实验条件下的盐分动态。由图可见, 在土表下 20cm 范围的盐移动状态变化很大, 曲线 B 显示了盐分均匀化趋势, 而 C, D, E 曲线显示了强烈的释盐趋势, 对此可能的解释如下: 一是由于不断有水分蒸发, 盐浓度梯度增大, 且在较大的温度梯度作用下, 盐分向下移动, 当然实际上盐分向下迁移的速度不会如图示那么快, 产生误差的原因据分析是由于盐分传感器在高温下所引起的温度补偿不足。图 7b 是对实验条件 S1 的重复试验, 时间相隔约 16 小时, 可以看到曲线 A 与图 7 中曲线 B 最为接近。可以说明上述温度影响的分析是合理的。

(2) 实验条件 S2 为单纯辐射边界条件, 辐照热流密度为 180W/m<sup>2</sup>, 大气温度为 14°C, 湿度为 54%, 记录时间为开机后 1, 2, 3, 4, 5 小时。图 8 为实验条件 S2 条件下土柱内盐分动态, 由图可见, 土表以下 10cm 范围深度内盐分浓度急剧减小, 形成与实验条件 S1 相似的迁移动态。

(3) 为了分析实验条件 S1, S2 所出现的问题, 本文用等温对流边界条件做了实验 S<sub>3</sub>, 其过程为开机后以 1.0m/s 的风速吹掠土表进行对流蒸发, 1.5 小时后, 风速提高到 4.5m/s 以加强表面传质速率。实验中风温为室温, 变化范围为 9.1—10.5°C, 空气湿度变化范围为 59%—47%。图 9 为等温变速对流边界条件下土柱内盐移动态, 由图可见, 同为蒸发条件, 但因少了大温度梯度的影响, 盐分移动方向与前相比发生逆转, 0—10cm 浅土层出现了明显的积盐现象, 并且盐分移动与浓度梯度指向一致, 由此也在一定程度上证实了本文对 S1, S2 条件下所获得的盐分迁移现象的解释。另外, 图中也显示出表面传质加强对内部盐移速率的影响并不明显, 盐分仍以较均匀的速率迁移。

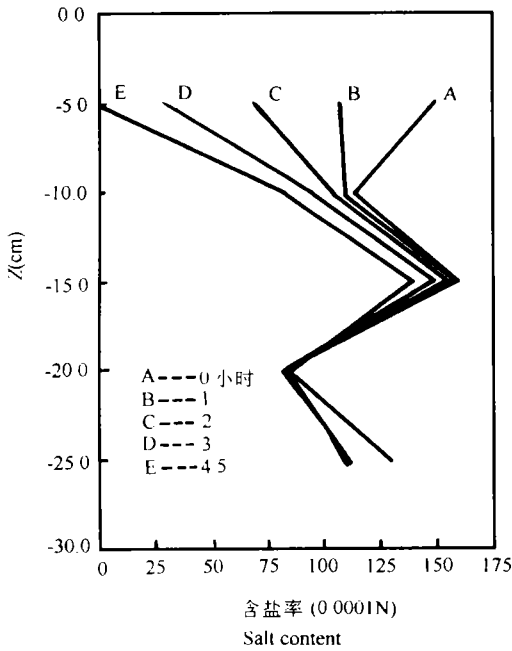


图 8 单纯辐射边界条件下土柱盐分动态  
Fig.8 Salt content distribution of soil column under pure radiation boundary condition

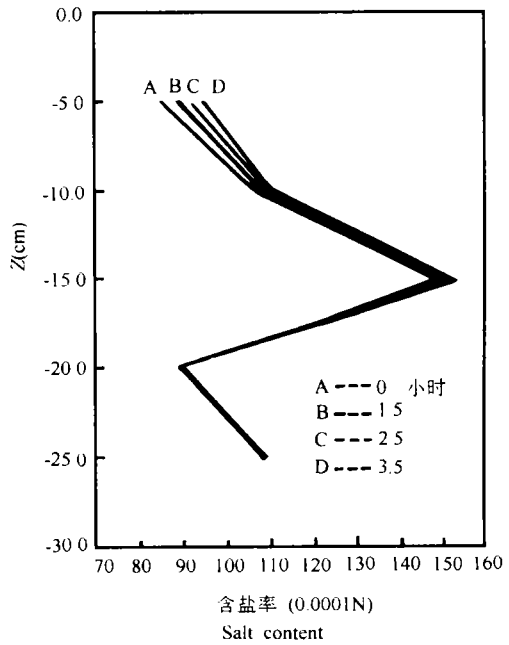


图 9 等温变速对流边界条件下土柱盐分动态  
Fig.9 Salt content distribution of soil column under isothermal changing wind velocity convective boundary condition

$(q_{rad} = 180W / m^2)$

$(V_{\Omega} = 1.0m / s, V_{\Omega} = 4.5m / s)$

## 2 讨论

由温度与水分迁移动态可知,沿土柱存在释水、吸水及过渡区域,释水区为从土表向下约 15cm 深度,而传热的显著渗透深度与此相近,因此传热的强度与水分迁移机制直接相关。同时,传热的有效作用时间为 0—3 小时,这与吸水区水分迁移显著过程时间相近,而吸水区水分迁移速率相对较为平均,尤其是等温对流边界条件下,水分与热量迁移主要决定于内部性质。

盐分迁移主要受初始浓度分布与水分迁移的综合作用,同时温度梯度加强了迁移过程。盐分迁移速率主要受含水率变化的影响,相对于溶液中盐分扩散而言,未饱和多孔介质中的盐分扩散要慢得多,尤其对近表面的砂土而言,扩散系数是溶液中的  $(\theta_w / f_0)$  倍。其中  $\theta_w$  为含水率,  $f_0$  为孔隙曲折因子。另外,在全部未饱和段,迁移没有明显的分区。

本文就自然环境条件对土壤内热质迁移的影响进行了实验模拟,为深入研究土壤多孔介质中热质迁移过程的理论研究给出了有参考价值的实验规律和参数,也为各种理论模型提供了重要依据。

## 参 考 文 献

1. 施明恒,虞维平,王补宣.多孔介质传热传质研究的现状与展望.东南大学学报,1994,24(增刊):1—7
2. 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
3. 陈振乾,施明恒,虞维平.太阳辐射对土壤热湿迁移影响的实验研究.太阳能学报,1995,16(4):395—400

## AN EXPERIMENTAL STUDY ON HEAT AND MASS TRANSFERS IN UNSATURATED SOIL UNDER SIMULATED CLIMATIC CONDITIONS

Chen Yong-ping Shi Ming-heng Jin Feng

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

### Summary

In this work, an experimental study on heat and mass transfer in unsaturated soil was conducted. The influences of the different factors such as air temperature, air velocity and heat radiation on the migration processes of heat, moisture and salt were investigated. The dynamic distribution of temperature, moisture content and salt content in unsaturated soil under simulated climatic conditions was obtained. It is found that unsaturated soil can be divided into three regions as absorbing, transiting and releasing in moisture migrating process. The positions of different regions, the depth of heat infiltration and the equilibrium time for heat and mass transfer processes were determined. The results could be used to examine and correct the theoretical models of heat and mass transfer in soil.

**Key words** Heat and mass transfers, Porous media, Soils, Unsaturated flow