

湿分分层土壤中热湿迁移与水分蒸发的实验研究

刘炳成 刘伟 杨金国

(华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要 在自然环境下, 对土壤中温度和湿分分布以及水分蒸发的动态特性进行了实验研究, 分析了干饱和层对土壤热湿迁移及水分蒸发的影响。结果表明: (1) 在周期性变化的大气环境条件下, 土壤温度、湿分含量和水分蒸发强度在一天内变化; 随着土壤温度的降低, 土壤水含量在晚上会出现略有增加的情况。(2) 形成干饱和层后, 水分蒸发锋面由土壤表面下移至非饱和层与干饱和层界面处, 水分蒸发强度明显减弱, 干饱和层的厚度增长缓慢。(3) 随着干饱和层不断向深处发展, 土壤温度的日变化幅度增大, 且随着土壤深度的增加, 土壤温度变化呈现出明显的滞后性。

关键词 土壤; 干饱和层; 非饱和层; 土壤温度; 水分蒸发

中图分类号: S152.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2004)06-1004-03

EXPERIMENTAL STUDIES ON HEAT AND MOISTURE TRANSFER AND SOIL WATER EVAPORATION UNDER NATURAL CONDITION

LIU Bing-Cheng LIU Wei YANG Jin-Guo

(College of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract Under natural environment the variations of soil temperature, water content and evaporation intensity were observed in a cylindrical soil bed and the influence of dry region on heat and moisture transfer in soil bed and water evaporation was analyzed. The results indicated that, (1) Soil temperature, water content and evaporation rate exhibit periodical variation with the daily changes of solar radiation, atmospheric temperature and relativity humidity. Along with temperature decreasing at night, soil water content would increase slightly. (2) Starting from the occurrence of dry soil layer (DSL), water evaporation front moves from soil top surface to the interface between unsaturated layer and dry layer. The decrease of water evaporation intensity is remarkably and the thickness of DSL develops slowly. (3) With the development of dry soil layer, the increase of surface soil temperature fluctuating range is obvious. In addition soil temperature presents a distinct hysteresis along with the increase of soil depth.

Key words soil; dry soil layer; unsaturated region; soil temperature; water evaporation

1 前言

在农业生产中, 土壤水分和温度是决定作物生长的重要条件。在作物种植的耕耘、播种、发芽和幼苗期间, 土壤表面一般是无遮盖的。如果没有降水的补充, 蒸发会逐渐耗尽土壤表层孔隙内的水分, 形成干饱和土壤层 (Dry Soil Layer, DSL)^[1], 并影响着土壤中的温度和湿分分布。表层土壤变干后, 实际土壤包括非饱和层和干饱和层。在非饱和土壤

层: 存在固、气、液三相, 液相具有水含量梯度, 湿分迁移受到毛细力、重力、达西阻力以及温度梯度和湿分梯度的共同作用^[2]。在干饱和土壤层: 土壤颗粒表面的自由水被蒸发, 水分以吸附水的方式存在, 且没有宏观运动, 湿分迁移的形式为水蒸汽的扩散。

文献 [3] 考虑温度对土壤湿分运动的影响, 对非饱和土壤床中热、水、气的耦合迁移进行了二维数

收稿日期: 2004-01-06; 修订日期: 2004-09-23

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目资助 (No.G2000026303); 国家自然科学基金项目资助 (No.50376015); 教育部博士点基金项目资助 (No.2000048731)

作者简介: 刘炳成 (1975-), 男, 山东高密人, 博士研究生, 主要从事多孔介质中的传质与传热及土壤和地下水污染方面的研究。

值计算。Ilic^[4] 在恒定的环境条件下, 对含湿非饱和以及干饱和两个多孔介质区域的传输现象进行了分区研究。Guo^[5] 提出了存在干饱和层时沙土水分蒸发量的计算方法, 但没有进一步研究蒸发锋面的移动对分层沙土内部湿分迁移的影响。本文则基于实际土壤中水分的分布形态, 在自然条件下对非饱和以及干饱和土壤内的热、湿迁移以及土表水分蒸发和潜在蒸发进行了实验研究, 分析了干饱和层对土壤蒸发以及温度和水分分布的影响。

2 实验装置与实验过程

2.1 实验装置

本实验采用圆柱形土壤床, 其周围和底部包覆保温层以尽可能减少与环境之间的热量交换, 上表面暴露于大气, 实验用土壤为沙土。土壤温度用铜-康铜热电偶测量; 太阳辐射强度用美国 EPPLEY LABORATORY 公司生产的 EPPLEY RADIOMETER 辐射仪测量。水分含量用澳大利亚 ICT 公司生产的 MP-406 水分探头测量, 表层土壤采用取样烘干法测定含水量。大气温度和相对湿度分别用水银温度计和 CYH-3605A 湿度仪进行测量。

分别用精度为 0.1 g 的悬臂天平和精度为 1 mg 的精密电子天平对土壤床和盛水蒸发皿称重, 以确定土壤蒸发量和相同环境下的潜在蒸发量。用游标卡尺测量干饱和层的厚度。

2.2 实验过程

土壤内温度测量选取了 6 点, 为了翔实反映形成干饱和层后土壤温度的变化规律, 测温热电偶在靠近土壤表面处布置较密。土壤水分测量选取土表和 4 cm、10 cm、16 cm 以及 20 cm 深处 5 点。准备实验时, 先使土壤床完全水饱和, 打开排水管让水分自由下渗; 实验开始后使土壤床底部保持水饱和。实验在露天环境下进行, 从 9 月 17 日 10:00 时开始, 到 20 日 16:00 时结束。实验期间天气晴天间多云, 风速在 0.3~1.5 m/s 之间。

3 实验结果与分析

3.1 太阳辐射、大气温度和相对湿度的动态变化

从图 1 可以看出, 太阳辐射随时间呈周期性变化, 每天中午达到峰值, 晚上则降为零。19 日中午太阳辐射最强, 达 530 W/m^2 。图 2 为环境相对湿度随时间的变化线。实验期间环境相对湿度在 34%~85% 之间变化, 每天早上 7:00 左右最高, 14:00 时环境相对湿度则降到一天中的最小值。

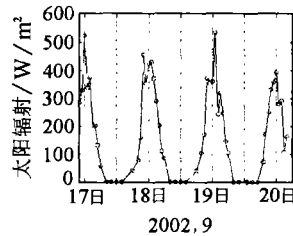


图 1 太阳辐射强度

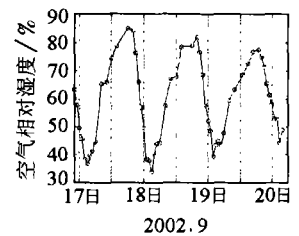


图 2 环境相对湿度

从图 3 可以看出, 大气温度的变化规律与太阳辐射强度基本一致。但是, 它每天的峰值出现在 13:00 时左右, 比太阳辐射强度的峰值滞后约 1 小时, 最低温度出现在每天早上 6:00 时。大气温度在 17 日 13:00 时达到实验期间的最高值 32°C , 而 18 日的峰值较小, 约为 29.5°C 。

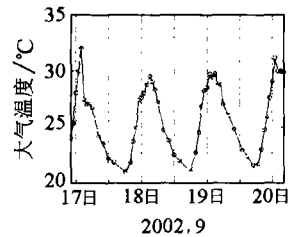


图 3 大气温度

3.2 自然环境下土壤中的热、湿迁移规律

为描述方便, 把 X 定为高度坐标, 以圆柱土壤床下表面为参考面, 向上为正, H 为土壤床高度。

如图 4 所示, 随着水分不断地被蒸发, 土壤含水量逐渐减少, 液态水分传导率也逐渐减小, 并可小于水蒸汽向大气的扩散率, 此时在表层形成干饱和和土壤层。到 18 日 13:00 时干饱和层厚度已达 5 mm。在干饱和层内, 土壤水分接近残余含水量 (约 1.6%), 以吸附水的方式存在并基本保持不变。同时可以观察到, 由于土壤表面变干后水分蒸发强度减弱, 干饱和层的厚度增长缓慢, 从 18 日中午到 20 日中午, 总共增长了仅约 10 mm。

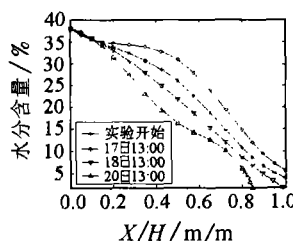


图 4 土壤水分分布

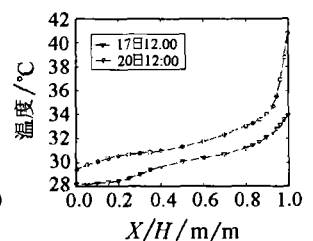


图 5 形成干饱和层前后土壤床的温度分布

图 5 为干饱和层形成前后土壤床的温度分布比较。由图 1 和图 3 可见, 20 日和 17 日太阳辐射和大

气温度的峰值分别为: 405 W/m^2 、 510 W/m^2 和 31°C 、 32°C 。但从图 5 可以观察到, 20 日中午时土壤床各点温度均高于 17 日中午, 而且土表温度高达 41°C 。这是因为 17 日中午整个土壤床为非饱和, 表层土壤含水量较高, 水分蒸发较强。而在 20 日中午, 干饱和土壤层已经向土壤深处发展了 15 mm , 蒸发强度减弱, 蒸发吸收的潜热减少, 传递到土壤内的热量增多, 土壤床升温较快。同时, 干饱和层内热量传输主要依靠导热方式, 温度梯度较大, 因此 20 日中午时温度分布曲线在靠近土表处较为陡峭。

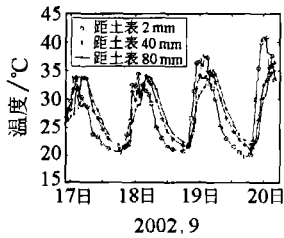


图 6 不同深处土壤温度

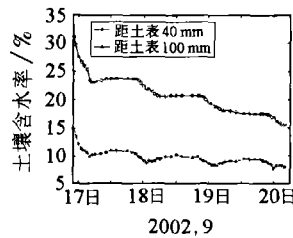


图 7 土壤水分含量

土壤床中各点的温度变化取决于土壤床表面的传热、传质情况以及土壤内水分蒸发和冷凝状况。从图 6 可以看到, 土壤床内各点的温度上午开始升高, 每天 14:00~16:00 时达到最大值, 然后随着太阳辐射强度和气温的降低而逐渐降低。土壤的表面温度在凌晨 6:00 时降到最低值, 且非常接近大气温度。2 mm 深处的土壤要比 40 mm 处和 100 mm 处的土壤分别提前 1.5 小时和 2 个小时达到温度最大值, 即随着深度的增加, 土壤温度变化的滞后性越来越大。同时观察图 6 可以看到: 随着干饱和土壤层厚度的增加, 土壤温度的日变化幅度逐渐增大。

非饱和土壤水分迁移受重力、达西阻力、土壤温度以及湿分梯度引起的毛细力的共同作用。比较图 6、7 可见, 随着土壤温度在一天内变化, 且在晚上深层土壤温度高于表层土壤, 土壤水分含量在晚上会出现略有增加的情况。同时可以观察到, 由于浅层土壤温度的日变化幅度大于深层土壤, 40 mm 深处土壤水分含量的波动变化较 100 mm 深处土壤明显。同时本实验也验证了 Jury 等^[6]的模型预测: 在周期性变化的温度梯度的作用下, 土壤水分在晚上可能会向上运动, 白天则反之。

潜在蒸发又称做自由水面蒸发, 是指在一定环境条件下的水分最大蒸发能力。比较图 8 中的潜在蒸发和土表蒸发两条曲线可以发现: (1) 潜在蒸发率和土表蒸发率从 18 日开始有所差别, 随着干饱和层厚度的增加, 两者之间的差别逐渐明显。这是由

于随着干饱和层厚度的增加, 水蒸汽由蒸发锋面扩散到大气中去的扩散阻力增大, 土壤水分蒸发显著减弱。(2) 尽管土壤床不断变干, 土表蒸发率在每天上午 10:00 时以前却要高于潜在蒸发率。这是由于相比于自由水面, 相同环境条件下土壤升温较快, 因此蒸发锋面处的水蒸汽压力较高, 蒸汽向大气的扩散能力也较强。另外, 实验结果表明: 由于干饱和层的存在, 土表蒸发率即使在自然连续干旱情况下, 并不如想象的那么高。

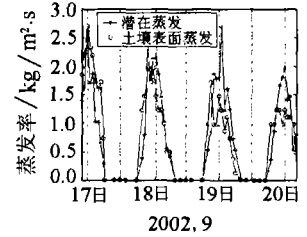


图 8 土壤表面蒸发率与潜在蒸发率

4 结 论

通过上述对实验结果的分析, 得出以下规律:

(1) 形成干饱和土壤层后, 水分蒸发明显减弱, 干饱和层的厚度增长缓慢; 土壤温度的日变化幅度显著增大。

(2) 在自然环境下, 土壤温度、水分含量和水分蒸发强度在一天内变化, 且土壤水分含量在夜间会出现略有增加的情况; 随着深度的增加, 土壤温度变化呈现出明显的滞后性。

(3) 随着干饱和土壤层厚度的增加, 潜在蒸发率与土表蒸发率的差别日渐明显, 但在每天早上, 土表蒸发率却相同或者甚至高于潜在蒸发率。

参 考 文 献

- [1] Yamanaka T, Yonetani T. Dynamics of the Evaporation Zone in Dry Sandy Soils. *Journal of Hydrology*, 1999, 217(1-2): 135-148
- [2] De Vries D A. The Theory of Heat and Moisture Transfer in Porous Media Revisited. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1987, 30(7): 1343-1350
- [3] Liu W, Zhao X X, Mizukami K. 2D Numerical Simulation for Simultaneous Heat, Water and Gas Migration in Soil Bed Under Different Environmental Conditions. *Heat and Mass Transfer*, 1998, 34(4): 307-316
- [4] Ilic M. Convective Drying of a Consolidated Slab of Wet Porous Material. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1989, 32(12): 2351-2362
- [5] Guo Yu Qiu, Tomohisa Yano. An Improved Methodology to Measure Evaporation from Bare Soil Based on Comparison of Surface Temperature with a Dry Soil Surface. *Journal of Hydrology* 1998, 210(1-4): 93-105
- [6] Jury W A, Miller E E. Measurement of the Transport Coefficient for Coupled Flow of Heat and Moisture in a Medium Sand. *Soil Science. Am J.*, 1974, 38: 551-557