

含水量变化对土壤温度 and 水分交换的影响研究

李慧星 夏自强 马广慧

( 河海大学水文水资源学院 ,江苏 南京 210098 )

**摘要** 土壤热容量是土壤热性质的重要参数之一 .通过试验和分析 ,研究了地面土壤含水量日变化及含水量垂向分布变化规律 ,以及不同含水量对土壤温度的日变化影响 .试验结果表明 ,土壤水分的运动和土壤中热量的传输是一个统一不可分割的系统 ,无地面水分补给时 ,土壤中的含水量变化与地温的日变化有关 ,土壤水的热运动是土壤层向蒸发面供水的最重要的因素之一 .

**关键词** 含水量 ;土壤温度 ;土壤热容量

中图分类号 :S151.9      文献标识码 :A      文章编号 :1000-1980( 2007 )02-0172-04

当土壤获得或散失一定的热量后 ,土壤温度的升降便取决于土壤的热容量 .土壤的热容量就是  $1\text{ cm}^3$  土壤温度升高或降低  $1\text{ K}$  时吸收或放出的热量 .对于热容量不同的土壤来说 ,当相等的热量进入土壤后 ,热容量大的土壤升高的温度小 ,而热容量小的土壤升高的温度大 .同时 ,温度场的变化也能引起势能不平衡 ,温度日周期性变化和年周期性变化在一定程度上影响了土壤含水量的垂向分布<sup>[1]</sup> .土壤作为农业生产的基本资料 and 作物生长的重要环境条件 ,是一种疏松多孔的物体 ,由大小不等的微细土粒堆集而成 ,在固体颗粒之间是各种大小、形状各异的孔隙 ,所以土壤是由固、液、气三相组成的 .土壤的固相包括矿物质 and 有机质 ,液相即土壤水分 ,气相即土壤空气 .由于不同组分的热性质相差较大 ,导致土壤的热容量变化也比较明显 .研究土壤的热容量变化 ,对研究不同地区的气象变化、农业生产等具有重要的意义 .本文根据野外大田试验数据 ,对地面土壤含水量日变化及含水量垂向分布变化规律 ,以及不同含水量对土壤温度的日变化影响进行了分析 .

1 不同土壤组分的热性质

土壤中常见的固体物质有石英、长石、方解石、云母 and 角闪石等 .由于土壤粒径不同 ,因此土壤颗粒间孔隙的大小也不一致 ,孔隙间充满了水和各种气体 .颗粒越细 ,颗粒间的孔隙就越小 ,造成了土壤吸水力强 ,透水性差 ,持水力大 ,湿胀干缩强烈等一系列特点 .表 1 为土壤各组分的热性质 .

由表 1 可以看出 ,水的热容量比空气的热容量大的多 ( $10^3$  倍以上 ) ,所以潮湿土壤热容量大 ,温度不易升高 ,是冷性土壤 ;而干燥土壤空气多 ,热容量低 ,温度容易升高 .在土壤的组成部分中 ,固体部分的数量一般变化不大 ,而空气 and 水的含量却是经常变化的 ,因此土壤的比热容主要取决于其中水和空气的含量 .由于水比空气的比热容大得多 ,所以土壤含水量越多 ,其比热容越大 ;反之 ,土壤中空气含量越多 ,含水量越少 ,则土壤的比热容越小 .因此在相同条件下 ,潮湿土壤比干燥土壤白天温度升高得慢 ,夜间冷却得慢 .

2 土壤热容量的计算公式

一定容积 ( $V$ ) 的土壤 ,当其温度从初始的  $T_1$  改变至终了的  $T_2$  时 ,所需要的热量  $Q_q$  为

$$Q_q = C_v V (T_2 - T_1) = C_v V \Delta T$$

式中： $C_v$  为单位容积土壤的热容量，对任一指定的土壤， $C_v$  值是随土壤含水量的变化而变化<sup>[3-6]</sup>。

由于空气的比热容太小，对于湿润的矿物质土壤，其热容量同时取决于土壤的含水量和土壤的矿物质与有机质的组成：

$$C_v = \rho_{\text{湿土}} c_p = \rho_b (1 + \theta_m) c_p$$

式中： $C_v$ ——以容积为单位的热容量； $c_p$ ——以质量为单位的热容量（比热容）； $\rho_b$ ——土壤密度； $\theta_m$ ——土壤质量含水量。容积热容量（指  $1\text{ m}^3$  湿土升高  $1\text{ K}$  时所需要的热量）又可写成

$$C_v = \rho_b (c_{pav} + \theta_m c_{pw})$$

式中： $c_{pav}$ ——固体物质的平均比热容； $c_{pw}$ ——水的比热容。

水的比热容是每  $1\text{ kg}$  水升高  $1\text{ K}$  所需要的热量，其数值为： $c_{pw} = 4.2 \times 10^3\text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。土壤固体的比热容是每  $1\text{ kg}$  固体物质升高  $1\text{ K}$  所需要的热量，它因各种矿物而不同。取各种土壤组分的平均值，绝大多数矿物质土壤比热容约为

$$c_{pav} = 0.84 \times 10^3\text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

土壤的比热容是由水的比热容和固体组分的比热容构成，将上述各值带入公式，得出

$$c_v = 4.2 \times 10^3 \rho_b (0.2 + \theta_m)\text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$$

3 试验简介

为了探讨含水量变化对土壤热容量的影响，在安徽省五道沟水文水资源试验站进行了试验研究。试验所用土壤为原状亚黏土，测坑口径  $1\text{ m}$ ，深  $1.5\text{ m}$ ，两土柱的热环境条件近似相同。本次试验需测土壤温度及土壤含水量 2 个参数。主要通过曲管地温表、直管地温表和气温表来测量温度。曲管地温表的埋深为  $5\text{ cm}$ 、 $10\text{ cm}$ 、 $15\text{ cm}$ 、 $20\text{ cm}$ ；直管地温表测量地表（即  $0\text{ cm}$ ）温度以及 1 天中的最高、最低温度；气温表测量大气温度。地表含水量通过烘干法测得，土壤含水量主要通过时域反射仪 TDR 测量，探头埋深为  $10\text{ cm}$ 、 $30\text{ cm}$ 、 $50\text{ cm}$ 、 $70\text{ cm}$ 、 $100\text{ cm}$ ，每点读数 3 次取平均值，可一定程度上减少测定误差。通过灌水控制 2 个测筒的土壤含水量，比较不同含水量情况下，土壤温度的变化差异，从而得到含水量与土壤热容量的关系。每季度观测 1 次，每次历时 1 个星期，共观测 1 a。

4 结果与讨论

4.1 温度的日变化

土壤的热状态与气候和气象要素有关，其温度变化受季节、太阳辐射、气流热交换、土壤质地、土壤含水量、水分运动等要素影响。为了研究土壤温度的变化与含水量的变化规律，在南测筒将土壤灌至饱和，北面保持土壤干燥，比较 2 种情况下土壤温度。

对五道沟水文水资源试验站南北 2 场进行连续观测，结果见图 1~2。由图 1 可看出，由于土壤含水量的不同，导致地表温度日变化差异很大。由于地表吸收了太阳辐射，温度变化幅度比气温变化剧烈。土壤的含水量增大，使得土壤热容量变大。在同样的太阳辐射条件下，干燥土壤温度日变化幅度大于  $20^\circ\text{C}$ ，而湿润土壤

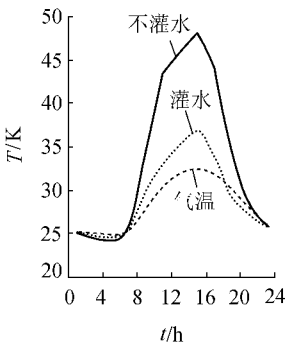


图 1 2005 年 7 月 14 日南北地表温度及气温变化过程  
Fig.1 Variation of surface temperature and air temperature of north and south fields on July 14, 2005

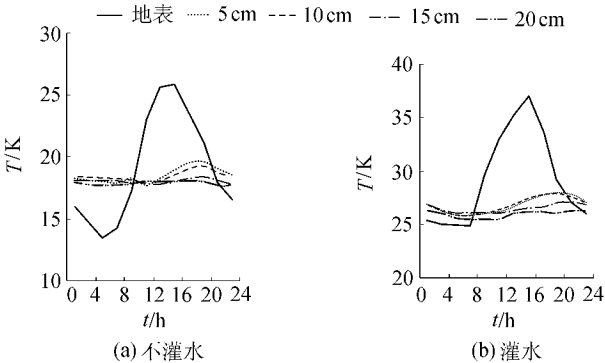


图 2 2005 年 7 月 14 日北场不同土壤深度温度变化过程  
Fig.2 Temperature variation at different depths of north field (no watering) on July 14, 2005

日变化幅度为 10℃.从图 2 可看出 埋深 20 cm 以上的土壤中的温度变化与气温变化同步 ,随着土壤深度的增加 ,温波振幅减小 ,位相滞后相当快.

土壤温度的日变化与太阳辐射、日照、气团活动等要素有关.根据 2005 年 7 月和 11 月的观测结果 ,温度的分布和变化趋势直接与太阳辐射有关 ,从日过程线来看 ,10 ~ 18 时土壤上层温度高于下层温度 ,22 时 ~ 次日 6 时 ,土壤下层温度高于上层温度.从图 1 可看出 :地表温度的变化幅度均大于气温.由图 2 可以看出 ,土壤中温度向下传递的时间几乎是均匀的 ,即每向下 5 cm 深度 ,最高温度出现的时间晚 2 h 左右 ,温度过程的变化幅度呈向下衰减的趋势.

4.2 地面土壤含水量日变化及含水量垂向分布变化规律

在天然条件下 ,无地面入渗补给时 ,随着土壤蒸发的发生 ,地面含水量单向减少<sup>[7-8]</sup> ,但从试验结果来看 ,地面含水量的变化具有日变化规律 ,而且与地面温度的变化过程有相反的关系.图 3 为北场大田的试验观测结果.2005 年 7 月 13 ~ 15 日均是晴天 ,地面温度变化幅度达 25℃ ,地面含水量低值期发生在地温峰值过程的 8 ~ 18 时 ,而含水量高值则发生在地温谷值过程的 20 时 ~ 次日 6 时.从含水量的垂向分布来看 ,一天中不同时刻的含水量垂向分布与土壤温度的垂向分布及变化规律有关.表 2 是 2005 年 7 月 14 日在南场和北场观测的含水量垂向分布(南场灌水、北场保持干燥)情况.从含水量的垂向分布及变化可以看出 ,随着温度的日变化 ,整个土层的含水量也呈周期性的变化 ,反映了由于土壤温度梯度的变化所引起能量梯度的变化而导致的土壤水分的运动.结合表 2 可以看出 ,通常 8 时土壤上层有较高的含水量 ,14 时左右 ,土壤具有向上的温度梯度和势能梯度 ,地表含水量一方面加速蒸发而进入大气 ,一方面在势能梯度的作用下向下运动 ,致使近地表的土壤含水量变小.当地面温度下降时 ,由于下层补给和地表蒸发 ,表层含水量存在着周期性的变化过程.试验结果表明 ,无地面水分补给时 ,土壤中含水量的变化与地温的日变化有关 ,土壤水的热运动是土壤层向蒸发面供水的最重要因素之一.

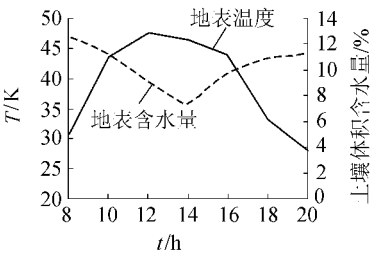


图 3 2005 年 7 月 14 日北场大田(不灌水)  
地面温度和含水量过程

Fig.3 Temperature variation at different depths of  
south field( watering ) on July 14 , 2005

表 2 2005 年 7 月 14 日土壤含水量垂向分布变化情况(体积含水量)

Table 2 Variation of vertical distribution  
of soil water content on July 14 , 2005

| 测点深/<br>cm | 北部(不灌水)土壤体积含水量/% |       |       | 南部(灌水)土壤体积含水量/% |       |       |
|------------|------------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|
|            | 8 00             | 14 00 | 20 00 | 8 00            | 14 00 | 20 00 |
| 0          | 12.6             | 7.3   | 11.2  | 20.5            | 18.3  | 20.2  |
| 10         | 13.2             | 12.8  | 13.6  | 26.0            | 25.9  | 25.4  |
| 30         | 16.9             | 16.9  | 16.8  | 34.7            | 34.1  | 33.8  |
| 50         | 11.7             | 11.8  | 11.8  | 35.6            | 35.6  | 35.3  |
| 70         | 12.2             | 12.1  | 12.0  | 27.7            | 27.9  | 27.6  |
| 100        | 27.4             | 27.8  | 27.9  | 34.6            | 34.3  | 34.3  |

5 结 论

本文对地面土壤含水量日变化及含水量垂向分布变化规律 ,以及不同含水量对土壤温度的日变化影响进行了分析 ,结果表明 :含水量的增大导致土壤热容量的变大 ,从而引起土壤温度变化幅度变小.土壤水分运动在地面无水分补给的条件下主要受土壤温度变化的影响.土壤水分的运动和土壤中热量的传输是一个统一的不可分割的系统.

参考文献 :

[1] 汉克斯 R J ,阿希克洛夫特 G L.应用土壤物理[M].北京 :水利水电出版社 ,1984.  
[2] 马歇尔 T J ,霍姆斯 J W.土壤物理学[M].北京 :科学出版社 ,1986.  
[3] 中国科学院南京土壤研究所《土壤知识》编写组.土壤知识[M].上海 :上海人民出版社 ,1983.  
[4] 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 231-242.  
[5] 夏荣基 ,陆景陵.土壤和肥料基础知识[M].北京 :农业出版社 ,1982.

[ 6 ] 马本. 热力学与统计物理学[ M ]. 北京: 高等教育出版社, 1988.  
[ 7 ] 夏自强, 郭必芳, 蒋洪庚, 等. 温度变化对土壤水运动及土壤水与潜水水分交换的影响[ J ]. 水科学进展, 1995 ( 增刊 ): 15-22.  
[ 8 ] 夏自强, 郭必芳, 李琼芳. 地膜覆盖对土壤温度、水分的影响及节水效益[ J ]. 河海大学学报, 1997, 25 ( 2 ) 39-25.

Effects of water content variation on soil temperature  
process and water exchange

LI Hui-xing , XIA Zi-qiang , MA Guang-hui

( College of Water Resources and Environment , Hohai University , Nanjing 210098 , China )

**Abstract** The thermal capacity is one of the important parameters to reflect the thermal property of soil. The regularities of daily variation of water content and the variation of its vertical distribution as well as the effect of water content on daily variation of soil temperature were studied based on experimental analysis. The result shows that the moisture movement and heat transfer in soil is a unified and indivisible system , that the variation of soil water content is closely related to the daily variation of soil temperature under the condition of no surface water recharge , and that heat transfer in soil water is one of the most important influencing factors on water supply from soil layer to evaporation surface.

**Key words** water content ; soil temperature ; soil thermal capacity

《河海大学学报( 自然科学版 )》征订启事

《河海大学学报( 自然科学版 )》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊, 主要刊登本校在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、计算机科学、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、管理工程、水利经济、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果、学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章, 可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

本刊创办于 1957 年, 是我国中文核心期刊, 在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中, 有不少国家科技攻关( 重点 ) 项目和各种科学基金资助项目的研究成果, 部分达到了国内领先和国际先进水平, 为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议, 发挥了较大的社会效益和经济效益, 深受工程界和科技界赞许, 并获得首届中国高校优秀科技期刊奖以及中国期刊方阵“ 双效期刊 ”、江苏省优秀期刊、全国水利系统优秀期刊称号。

本刊每逢单月出版, 国内外公开发行, 邮发代号 28-63, 每期定价 12.00 元, 全年 6 期共 72.00 元。欢迎广大读者在全国各地邮局订阅或直接与编辑部联系。联系地址: 南京市西康路 1 号《河海大学学报( 自然科学版 )》编辑部, 邮政编码 210098, 联系电话 025-83786343。