doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.019

T-TDR 传感器土壤热场模拟与测温结点位置研究*

韩文霆[1]　乔　军[1]　许景辉[2,3]

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 通过研究 T-TDR 传感器的热传导过程,优化热电偶结点的嵌入位置,提高了传感器测量精度。采用土壤二维热传导方程,利用 Heat Transfer 数值计算模型,在分析 T-TDR 探针传热初边值问题的基础上,探讨了 T-TDR 传感器热场随时间、土壤热传导率、土壤热容等参数变化的关系,模拟了传感器在不同外界环境温度、导热系数和容积热容量土壤中的热传导动态过程和热场空间分布。结果表明,T-TDR 传感器中热电偶结点的最优嵌入位置为传感器末端方向上距离探针中点 2 mm 处,此位置对于中间探针的辐射热量最为敏感。

关键词: T-TDR 传感器　土壤热传导　热场模拟　土壤温度　土壤水分

中图分类号: S24　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2013)08-0106-06

Soil Thermal Field Simulation and Temperature Node Positions Research of T-TDR Sensors

Han Wenting[1]　Qiao Jun[1]　Xu Jinghui[2,3]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
2. *College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
3. *Institute of Water Saving Agriculture in Arid Regions of China*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: The measurement accuracy of T-TDR sensor was improved via studying the heat conduction process and optimizing the embedded point of the thermocouple nodes. Using 2-D heat transfer equation in the soil, the initial boundary value of the Heat Transfer of the T-TDR probe was analyzed numerically. Then the relationship between the thermal field of T-TDR with time, thermal conductivity and capacity of soil was established. Furthermore, the dynamic process of heat transfer and spatial thermal distribution of T-TDR at different environment temperature, conductivity and volumetric heat capacity were simulated. The results showed that the optimal positions of the thermocouple node on both sides were on the probe midpoint at 2 mm thermocouple junction of the sensor terminal direction distance. This was the most sensitive point to the radiant heat of the intermediate probe.

Key words: T-TDR sensor　Soil thermal conduction　Thermal field simulation　Soil temperature　Soil moisture

引言

T-TDR (Thermo-time domain reflectometry)传感器是一种能同时、同点测定土壤含水率、电导率、容积热容量、热扩散系数以及蒸发量等特性参数的新型传感器[1],时域反射技术(TDR)也是监测土壤水热动态过程空间和时间变异性的先进技术之一[2]。合理优化传感器的结构对于提高 T-TDR 传感器的精确性和稳定性具有重要意义。

在 T-TDR 传感器结构研究中,很多学者一直沿

收稿日期: 2013-02-28　修回日期: 2013-03-19

*"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B08)、高等学校学科创新引智计划"111"资助项目 (B12007)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2109021117、QN2011128)

作者简介: 韩文霆,副研究员,博士生导师,主要从事农业智能化检测技术研究,E-mail: hanwt2000@126.com

用不同结构传感器实体进行实验对比的方法[3~11]，但以往研究主要集中在 T-TDR 传感器探针结构的实验对比，很少在土壤热传导理论和热场分布规律分析的基础上对传感器结构进行优化，很少考虑结构对热电偶灵敏度的影响。关于热场分布研究大多集中在大气环境和材料等方面[12~13]。本文将热场分布研究方法引入到 T-TDR 传感器中，分析 T-TDR 探针传热的初边值问题，模拟传感器在土壤不同导热系数、不同容积热容量和不同环境温度下的热传导过程。通过土壤热传导理论和 T-TDR 热传导过程可视化，分析传感器探针中热电偶结点最优位置，以提高传感器灵敏度，减少 T-TDR 的测量误差。

1　材料与方法

1.1　T-TDR 传感器及热传导理论

以 Heitman[14] 研究的 T-TDR 传感器为研究对象，该传感器的探针为 3 根平行的长 40 mm、直径 1.3 mm、间距 6 mm 的空心不锈钢探针，如图 1 所示。其中中间探针中装有由绝缘电阻丝（直径 75 μm）制成的线性热源和 E 型热电偶丝，另两根探针中仅嵌有 E 型热电偶。热电偶结点位置不同，热脉冲技术测得的温度变化与时间关系中的热脉冲最高温度不同，将影响容积热容量等参数的测定，进而传感器精度受到影响，故结点位置是影响其测量精度的重要因素之一，本文将通过理论推导和仿真模拟，找出其理想位置的设置依据。

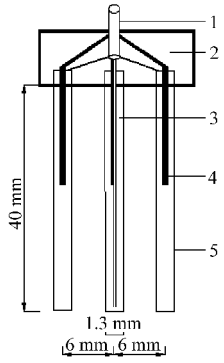

图 1　T-TDR 三探针结构

Fig. 1　Three-probe structure of T-TDR

1. 同轴电缆　2. 环氧基树脂　3. 加热电阻丝　4. 热电偶　5. 不锈钢管

土壤热传导方程（或称热方程）是一个偏微分方程，它描述一个区域内的温度随时间变化的规律。按照在区域存在的形式不同，可以分为不同维数的方程。本文考虑了 x、y 方向上热量的分布，应用了二维热传导方程。二维稳态热传导方程[15] 具体形式为

$$\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial^2 x}+\frac{\partial^2 T}{\partial^2 y}\right)=-P(x,y) \tag{1}$$

式中　T——分布温度，℃　　λ——导热系数

P——单位容积热产生率，J/m^3

二维非稳态热传导方程[16] 具体形式为

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(K\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K\frac{\partial T}{\partial y}\right)+P \tag{2}$$

式中　ρ——介质密度，kg/m^3

c——比热容，kJ/(kg·K)　　t——时间，s

K——介质导温系数，cm^2/s

式(1)、(2)为 Poisson 型。由于方程是空间二阶，必须根据具体的热传导问题给定初边值条件求解。本文主要应用第一类边界条件，即在空间(x, y, z)中某一区域 Ω 的边界 Γ 上，给定了连续函数 f，要求这样一个函数 $u(x, y, z)$，函数满足在闭域 $\Omega+\Gamma$ 上连续，在 Ω 内有二阶连续偏导数且满足拉普拉斯方程，在 Γ 上与已知函数 f 相重合。即在区域内找一个调和函数它的边界上的值为已知，即

$$u\mid_{\Gamma}=f$$

第一类边值问题也称为狄利克莱(Dirichlet)问题，或简称狄氏问题[17]。

根据热传导定律，在一个无限大的均匀等温介质中，对于土壤中的某一点，其温度随时间的变化可以表达为

$$\Delta T(r,t)=\frac{Q}{4\pi\alpha}\left[\mathrm{Ei}\left(\frac{-r^2}{4\alpha(t+t_0)}\right)-\mathrm{Ei}\left(\frac{-r^2}{4\alpha t}\right)\right]\quad(t>t_0) \tag{3}$$

其中　$Q=q/\rho_c$

式中　α——土壤热扩散系数，m^2/s

t_0——热脉冲的时长，s　　Ei——指数积分

r——热电偶距线性热源的垂直距离，m

q——单位长度加热丝在单位时间内释放的热量，W/m

Q——热量强度，m^2·℃/s

ρ_c——土壤容积热容量，J/(cm^3·℃)

对方程（3），求 t 的偏微分并使结果等于零，便得到最大温度升高所对应的时间，并由此求得关于 α、ρ_c 的表达式为

$$\alpha=\frac{r^2}{4}\left(\frac{1}{t_m-t_0}-\frac{1}{t_m}\right)\Big/\ln\left(\frac{t_m}{t_m-t_0}\right) \tag{4}$$

$$\rho_c=\frac{q}{4\pi\Delta T_m}\left[\mathrm{Ei}\left(\frac{-r^2}{4\alpha(t_m-t_0)}\right)-\mathrm{Ei}\left(\frac{-r^2}{4\alpha t_m}\right)\right] \tag{5}$$

式中　t_m——最大温度对应的时刻，s

ΔT_m——最高温度与加热前的平均温度差，℃

T-TDR 传感器应用热脉冲原理,根据焦耳定律给中间探针经过特定的时间加热后相当于线性热源

$$q = I^2 Rt \tag{6}$$

式中 I——加热平均电流,A

R——中间探针电阻丝阻值,Ω

从以上公式可看出,时间 t_m 对热导率、热容量测量至关重要,准确测定 t_m 对于提高传感器精度有着重要意义,而 t_m 与热电偶结点位置息息相关。

1.2 T-TDR 热传导场的数值模拟方法

PDE (Partial differential equation) Toolbox 是 Matlab 软件中一种专门通过网格用线性有限元法来求解随时间变化的空间二维偏微分方程的方法,PDE 工具箱可以求解椭圆型、抛物、双曲问题,可以求解单个方程,也可以求解方程组。

首先指定二维求解区域,按照实际条件在 PDE 工具箱中指定边界条件 ,随后确定 PDE 模拟方程(椭圆、抛物、双曲),设置相关参数,指定初始网格,最后求解(初)边值问题并绘图。

PDE 工具箱求解热传导方程,有 2 种公式供选择[18],第 1 种 Heat Transfer 公式,即

$$r_{h0} cT' - \mathrm{div}(K\mathrm{grad}(T)) = Q + hA(T_e - T) \tag{7}$$

式中 r_{h0}——土壤容积密度,kg/m^3

h——对流传热系数 ,W/(m^2·℃)

A——对流换热面积,m^2

T_e——环境温度,℃

第 2 种 Generic scalar 公式为

$$\rho_c u' - \mathrm{div}(K\mathrm{grad}(u)) + hT = f \tag{8}$$

式中 f——热源,J

上述 2 种表达式形式不同,但在 PDE 中求解达到的效果一样,在仿真模拟 T-TDR 热传导可视化的过程中,本文按照式(7)进行相关参数设置。

1.3 环境与土壤参数选取

为了研究 T-TDR 传感器在不同外界环境温度、导热系数和容积热容量下土壤中的热传导动态过程和热场空间分布,根据日常气温,选择环境温度为 0 ~ 30℃;根据王景文[19]对土壤导温系数的研究,0 ~ 1 m 土层导温系数在 0.001 ~ 0.003 cm^2/s 之间,4 ~ 5 m 土层导温系数大多在 0.005 ~ 0.010 cm^2/s 之间。刘树华等在林网内沙壤裸田和草皮覆盖下粘性碱壤得到的土壤导温系数与 Horton 在 1、2、5 和 10 cm深处石英砂中得到的土壤热扩散系数均为 0.012 5 cm^2/s[20~22],T-TDR 传感器一般在土壤表层测量,远小于 5 m,本文取土壤导温系数为 0.001 ~ 0.008 cm^2/s;根据王宝灵等[23]在研究我国土壤热流计算结果的初步分析以及贺康宁[24]对黄土集水造林地土壤热特性进行的研究,得出不同土壤类型的容积热容量参数,本文取土壤容积热容量为 1.444 ~ 6.03 J/(cm^3·℃);Heitman 等[14]在观测土壤水分蒸发的实验中,使用 Nichrome 80 型加热丝,并用 12 V 稳压源给中央探针加热时间为 8 s,利用加热丝电导率得到线性热源 q 为 2.56 W/m,本文取相同的热量进行模拟研究。

2 结果与分析

2.1 不同时间 T-TDR 探针传热过程

同一环境条件下,T-TDR 传感器中间探针在不同时刻传热过程的模拟结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出,随着时间的变化,T-TDR 传感器中间探针热量也在变化,t = 0 s 时刻热量主要分布在中间探针周围,温度在 40℃左右;t = 1 s 时刻中间探针温度达到 110℃左右,热量不断向外界扩散;t = 2 s 时刻中间探针的温度稳定到最高值,热量不断传递到边界探针和周围环境;t = 5 s 时刻周围环境的热量达到均匀分布状态。实现了传感器在土壤中热传导的可视化,在图中也能够得到任意时刻边界探针任意点的温度,为后续进一步确定热电偶结点位置作准备。

2.2 不同空气温度条件下探针温度场分析

外界环境温度会随着时间发生改变,当外界环境温度发生变化后,T-TDR 传感器从时间 t = 0 开始向周围散热,在某一时刻,观测和记录两边探针温度变化,从而找出探针温度敏感区域的范围。根据 T-TDR 结构,本文以左边探针为例,记录左边探针温度随土壤深度的变化,如图 3 所示。

由图 3 可知,同样热源引起的温度场,距离土壤与空气交界面越近,其测量越不稳定,容易受空气温度的影响,在探针深入土壤中 2.029 ~ 2.243 cm 时,其热电偶对温度的敏感度最高。

2.3 不同导温系数下探针温度场模拟

不同地区、不同质地土壤的导温系数不尽相同,本文根据参考文献查阅土壤导温系数的变化范围,将导温系数分为 5 个等级。在特定外界温度、容积热容量同一时刻下,T-TDR 左边探针温度随土壤深度的变化如图 4 所示。

由图 4 可知,在特定的外界温度、容积热容量、同一时刻、不同的土壤导温系数下同样热源引起的温度场,在探针深入土壤 2.229 cm 位置时,其热电偶对温度的敏感度最高,导温系数对土壤传感器敏感度几乎没有影响。

2.4 不同容积热容量下温度场模拟

为了观测不同土壤容积热容量下传感器敏感度反映特性,本文通过改变土壤容积热容量来模拟不

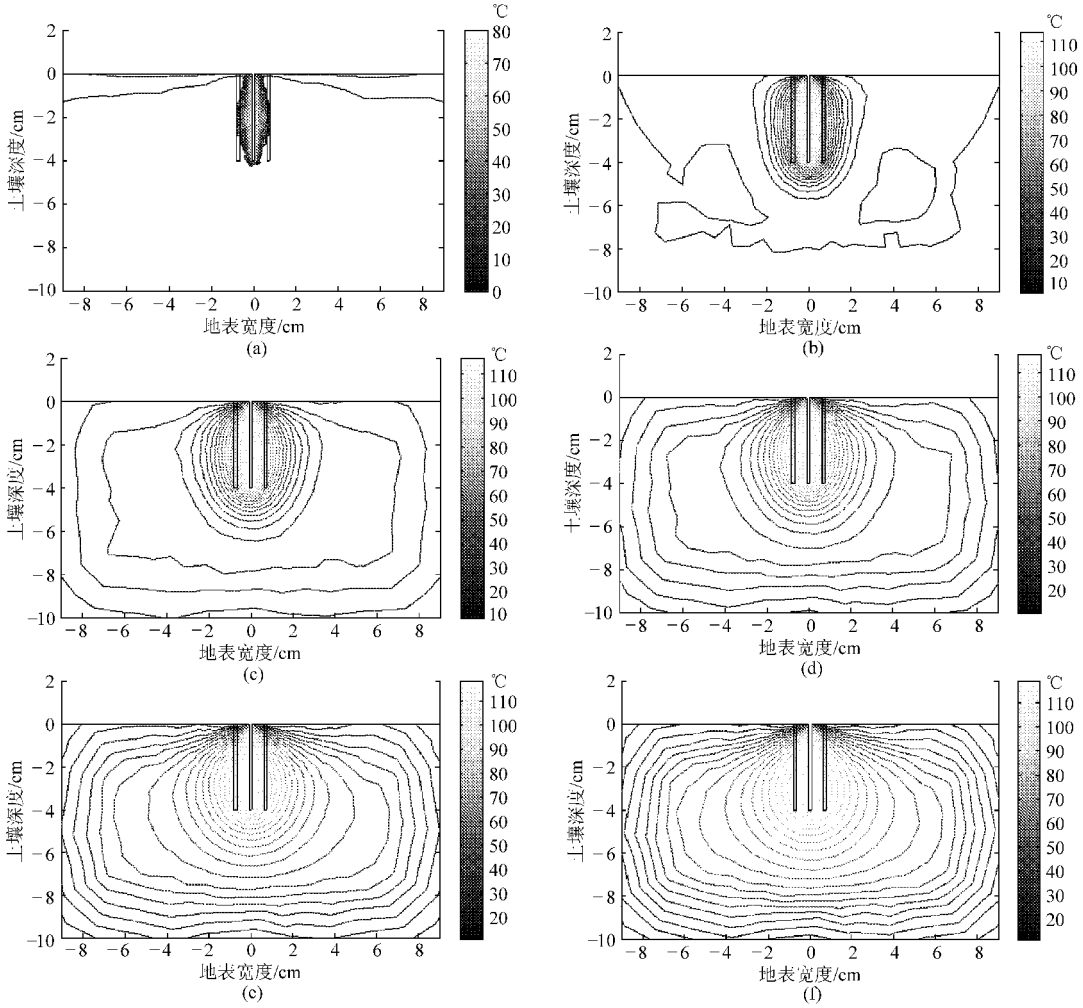

图 2　T-TDR 传感器在不同时间的温度场分布

Fig. 2　T-TDR sensor temperature field distribution in different time

(a) t = 0 s　(b) t = 1 s　(c) t = 2 s　(d) t = 3 s　(e) t = 4 s　(f) t = 5 s

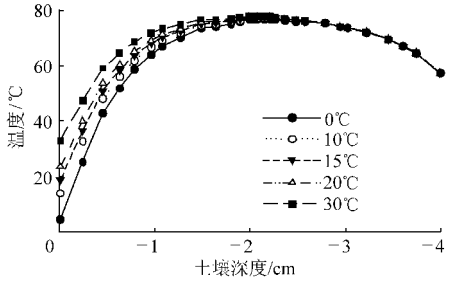

图 3　在不同外界温度下左边探针温度随土壤深度的变化

Fig. 3　Left boundary probe heat distribution in different environment temperatures

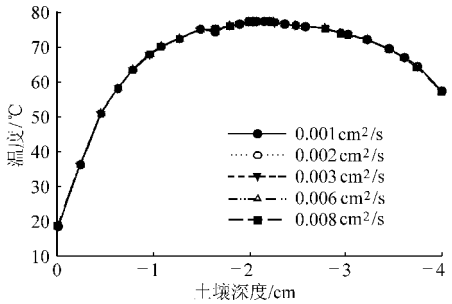

图 4　在不同导温系数下左边探针的温度随土壤深度的变化

Fig. 4　Left boundary probe heat distribution in different thermal conductivities

同状况下的热场分布，探索不同土壤容积热容量对边界探针热量分布的影响，其随土壤深度的变化如图 5 所示。

由图 5 可知，在特定的外界温度、相同的土壤导温系数、不同的容积热容量下，相同热源引起的温度场，在探针深入土壤 2.029 ~ 2.204 cm 范围内，其热电偶对温度的敏感度最高。

通过 Matlab 分析比较 3 种情况下边界探针热量分布，结果基本一致。精确度在 0.001 mm 范围内发现，探针深入土壤 2.029 ~ 2.204 cm 范围内热电偶敏感度最高。根据不同空气温度、不同导热率、不同热容下土壤热场分析，发现边界热电偶结点位于探针中点下 2 mm 左右为更理想的位置，在此位置，会进一步提高 T-TDR 测量的精确度，而非以往根据实际经验确定出的热电偶节点最优嵌入位置为探针中点处。

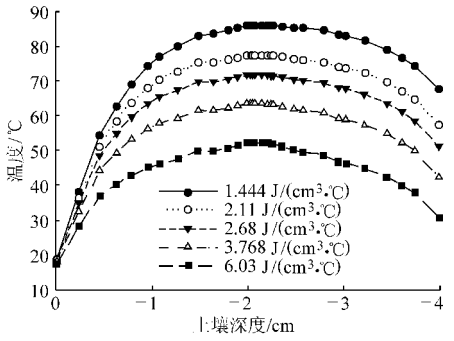

图5 在不同容积热容量下左边探针的温度随土壤深度变化

Fig. 5 Left boundary probe heat distribution in different volumetric heat capacities

3 结论

(1)采用土壤二维热传导方程,利用 Heat Transfer 数值计算模型,可以对 T-TDR 传感器的热传导过程进行可视化动态模拟,从而给出探针热场分布规律。土壤容积热容量、导温系数和空气温度对探针热场分布有较大影响。

(2)T-TDR 测量误差与空气温度有一定关系,但 T-TDR 探针深入土壤 2.029 ~ 2.243 cm 位置处,热电偶环境误差受空气温度影响很小,且热场敏感度最高;不同导温系数对 T-TDR 测量误差影响很小,但在 2.229 cm 位置处,其测温敏感度最高;不同热容土壤中,T-TDR 探针深入土壤 2.029 ~ 2.204 cm 范围内热电偶敏感度最高。

(3)传感器中热电偶结点的最优嵌入位置为传感器末端方向上距离探针中点 2 mm 处,此位置对于中间探针的辐射热量最为敏感。

参 考 文 献

1 任图生,邵明安,巨兆强,等. 利用热脉冲-时域反射技术测定土壤水热动态和物理参数 Ⅰ. 原理[J]. 土壤学报, 2004, 41(2):225 ~ 229.
Ren Tusheng, Shao Ming'an, Ju Zhaoqiang, et al. Measurement of soil physical properties with thermo-time domain reflectometry Ⅰ theory [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(2): 225 ~ 229. (in Chinese)

2 任图生,邵明安,巨兆强,等. 利用热脉冲时域反射技术测定土壤水热动态和物理参数Ⅱ. 应用[J]. 土壤学报, 2004, 41(4):523 ~ 529.
Ren Tusheng, Shao Ming'an, Ju Zhaoqiang, et al. Measurement of soil physical properties with thermo-time domain reflectometry Ⅱ application [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 523 ~ 529. (in Chinese)

3 Ham J M, Benson E J. On the construction and calibration of dual-probe heat capacity sensors[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(4):1 185 ~ 1 190.

4 Kluitenberg G J, Bristow K L, Das B S. Error analysis of heat pulse method for measuring soil heat-capacity, diffusivity, and conductivity [J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59(3):719 ~ 726.

5 Kluitenberg G J, Ham J M, Bristow K L. Error analysis of the heat pulse method for measuring soil volumetric heat-capacity [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(6):1 444 ~ 1 451.

6 Heitman J L, Horton R, Sauer T J, et al. Sensible heat observations reveal soil-water evaporation dynamics [J]. Journal of Hydrometeorology, 2008, 9(1):165 ~ 171.

7 Heitman J L, Xiao X, Horton R, et al. Sensible heat measurements indicating depth and magnitude of subsurface soil water evaporation[J]. Water Resources Research, 2008, 44(4):1 ~ 7.

8 Xiao X, Horton R, Sauer T J, et al. Cumulative soil water evaporation as a function of depth and time [J]. Vadose Zone Journal, 2011, 10(3):1 016 ~ 1 022.

9 陆森,任图生,杨泱,等. 多针热脉冲技术测定土壤热导率误差分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6):20 ~ 25.
Lu Sen, Ren Tusheng, Yang Yang, et al. Error analysis of multi-needle heat pulse probe for soil thermal conductivity measurement [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6):20 ~ 25. (in Chinese)

10 Liu X N, Ren T S, Horton R. Determination of soil bulk density with thermo-time domain reflectometry sensors [J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(4):1 000 ~ 1 005.

11 Liu Xiaona. Evaluation of the heat-pulse technique for measuring soil water content with thermo-TDR sensor [J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 11:1 234 ~ 1 239.

12 苏伟忠,杨英宝,杨桂山. 南京市热场分布特征及其与土地利用/覆被关系研究[J]. 地理科学, 2005, 25(6):697 ~ 703.
Su Weizhong, Yang Yingbao, Yang Guishan. Distributional characteristics of urban thermal space and relations with land use/cover of Nanjing [J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(6): 697 ~ 703. (in Chinese)

13 张永刚,何友军,南矿军. 半导体激光器的热场分析及热特性表征[J]. 稀有金属, 2004, 28(3):551 ~ 553.
Zhang Yonggang, He Youjun, Nan Kuangjun. Thermal analysis and characterization of semiconductor lasers [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28(3):551 ~ 553. (in Chinese)

14 Heitman J L, Horton R, Ren T, et al. An improved approach for measurement of coupled heat and water transfer in soil cells[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(3):872 ~ 880.

15 薛雷,魏瑞演,乔虹. 恒温边界矩形区域内热传导的可视化计算[J]. 福建工程学院学报, 2008, 6 (3):219 ~ 223.

Xue Lei, Wei Ruiyan, Qiao Hong. Visual computation of heat conduction in a rectangular field with known boundary temperature [J]. Journal of Fujian University of Technology,2008,6(3):219 ~ 223. (in Chinese)

16 杨彬,林乐宇,王南迪,等. 二维热传导方程的可视化计算[J]. 天津师范大学学报:自然科学版, 2004,24 (1):42 ~ 45.
Yang Bin, Lin Leyu, Wang Nandi, et al. Visualization computing of two dimensional heat equation[J]. Journal of Tianjin Normal University: Natural Science Edition,2004,24(1):42 ~ 45. (in Chinese)

17 王元明. 数学物理方程与特殊函数[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.

18 彭芳麟. 数学物理方程的 MATLAB 解法与可视化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 139 ~ 155.

19 王景文. 东北地区的土壤导温系数[J]. 东北农业大学学报, 1962(3):35 ~ 40.
Wang Jingwen. The northeast region of the soil thermal diffusivity[J]. Journal of Northeast Agricultural University,1962(3): 35 ~ 40. (in Chinese)

20 刘树华,崔艳,刘和平. 土壤热扩散系数的确定及其应用[J]. 应用气象学报, 1991, 2(4):337 ~ 345.
Liu Shuhua, Cui Yan, Liu Heping. Determination of thermal diffusivity of soil and its application [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology,1991, 2(4):337 ~ 345. (in Chinese)

21 Horton R, Wierenga P J, Nielsen D R. Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface1[J]. Soil Science Society of America Journal, 1983, 47(1):25 ~ 32.

22 Horton R, Wierenga P J. Estimating the soil heat flux from observations of soil temperature near the surface1[J]. Soil Science Society of America Journal, 1983, 47(1):14 ~ 20.

23 王宝灵,汤懋苍. 我国土壤热流计算结果的初步分析[J]. 科学通报,1993, 38(11):1 013 ~ 1 016.
Wang Baoling, Tang Maocang. Preliminary analysis of the results of the calculation of soil heat flux in our country [J]. Chinese Science Bulletin,1993, 38(11):1 013 ~ 1 016. (in Chinese)

24 贺康宁,王斌瑞,张光灿. 黄土集水造林地土壤热特性的研究[J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(3):27 ~ 32.
He Kangning, Wang Binrui, Zhang Guangcan. Study on soil thermal properties in forest land of catchment inloess [J]. Journal of Beoing Forestry University, 2000, 22(3):27 ~ 32. (in Chinese)

25 张爱莉,高磊. 冻融过程对 FDR 测量土壤体积含水量的影响[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(4):364 ~ 368.
Zhang Aili, Gao Lei. Effect of freezing and thawing process on FDR's measuring volumetric water content of soil[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013,31(4):364 ~ 368. (in Chinese)

26 韩文霆,周龙,吴普特,等. 精确灌溉喷头变量调节器结构参数设计[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(6):534 ~ 539.
Han Wenting, Zhou Long, Wu Pute, et al. Structural parameter design for variable regulators in precision irrigation sprinklers [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013,31(6):534 ~ 539. (in Chinese)

(上接第 98 页)

6 Miu P I. Modeling and simulation of grain threshing and separation in axial threshing units, part II. application totangential feeding [J]. Computers and Electronics in Agriculture,2008, 60(1): 105 ~ 109.

7 Miu P I, Kutzbach H D. Mathematical model of material kinematics in an axial threshing unit[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007,58(2): 93 ~ 99.

8 李耀明,贾毕清,徐立章,等. 纵轴流联合收割机切流脱粒分离装置的研制与试验[J]. 农业工程学报,2009,25(12):93 ~ 96.
Li Yaoming, Jia Biqing, Xu Lizhang, et al. Development and experimental study on tangential flow threshing and separating device of axial flow combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 93 ~ 96. (in Chinese)

9 衣淑娟,陶桂香,毛欣. 组合式轴流脱分装置动力学仿真[J]. 农业工程学报,2009,25(7):94 ~ 97.
Yi Shujuan, Tao Guixiang, Mao Xin. Dynamic simulation of assembled axial flow threshing and separating device [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 94 ~ 97. (in Chinese)

10 李耀明,唐忠,徐立章,等. 纵轴流脱粒分离装置功耗分析与试验 [J]. 农业机械学报,2011,42(6):93 ~ 97.
Li Yaoming, Tang Zhong, Xu Lizhang, et al. Power analysis and experiment on longitudinal axial-threshing unit test-bed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(6):93 ~ 97. (in Chinese)

11 吴守一. 农业机械学:下册[M]. 北京:中国农业机械出版社,1992.

12 唐忠,李耀明,徐立章,等. 切纵流联合收获机小麦脱粒分离性能评价与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(3):14 ~ 19.
Tang Zhong, Li Yaoming, Xu Lizhang, et al. Experiment and evaluating indicators of wheat threshing and separating on test-bed of longitudinal axial-threshing unit[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(3): 14 ~ 19. (in Chinese)