

应用热脉冲法确定土壤热参数的可行性研究

李婷 (镇江市工程勘测设计研究院, 江苏镇江 212000)

摘要 利用自行研制的土壤热特性试验系统,测定了4种质地的土壤热特性,计算了不同质地土壤在不同含水率情况下的热扩散率,并与热传导方程解析解法计算的热扩散率进行比较。结果表明,利用热脉冲方法计算的热扩散率比解析解法计算的热扩散率略微偏大。但是,利用2种方法计算所得到的土壤温度剖面相差不大,相对误差均小于5%。由此可见,利用热脉冲方法确定土壤热扩散率是可行的。

关键词 土壤热参数;热脉冲;土壤质地

中图分类号 S152.8 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)16-031-04

Determination of Soil Thermal Parameters by Heat Pulse Method

LI Ting (Engineering survey design institute of Zhenjiang City, Zhenjiang 212000)

Abstract Thermal properties of four texture soils were detected by the self-developed soil thermal test system. Thermal diffusivity of four texture soils with different water contents was calculated. Through comparing thermal diffusivity determined by heat pulse and analytical solution, the result indicated that soil thermal diffusivity determined by heat pulse were appreciably larger than the one determined by analytical solution method. But comparing the temperature profile based on thermal diffusivity, the results indicated that a little difference existed between two methods, and the relative error was less than 5%. Therefore, it was shown that the determination method of thermal diffusivity with heat pulse was feasible.

Key words Soil thermal transfer parameter; Heat pulse; Soil texture

土壤热性质是决定土壤热状况的内在因素,研究土壤热和温度的变化规律以及调节土壤热状况时必须了解土壤热性质。尤其是,随着数值模型广泛被应用于模拟土壤热状况,准确估计土壤热参数已成为目前研究的热点,同时也成为利用数值模拟分析土壤热状况的基础和前提。国内外学者采用不同的方法对土壤热性质进行测定,分析了土壤热性质与含水量、容重的关系^[1-7]。

热脉冲技术与传统测定热性质的方法相比优点较多,测量方便、省时。自热脉冲方法提出以来,其技术方面在不断改进和更新,理论研究也逐渐深入,并且在土壤水分的测定方面得到了较多应用。受经济力量和技术等所限,热脉冲技术在我国的应用还十分有限。笔者利用自制加热探针,应用热脉冲方法对温度变化方程直接求导,计算出热扩散率,将热脉冲法测得的热传递参数与热传导方程计算的土壤热性质进行比较,以确定热脉冲法测定土壤热性质方法的可行性。

1 材料与方

1.1 试验方法 最早测定土壤热性质所用的热脉冲方法为单探针热脉冲法,后来发展有双探针热脉冲法、三探针热脉冲法以及多探针热脉冲法。该试验虽然有多个探针,但其原理为双探针热脉冲法。

1.1.1 试验装置。试验所用的探针包括2种:①自制的加热探针,由3个部分组成:加热丝和2个热电偶温度传感器。加热丝用来加热,长6.5 cm;热电偶温度传感器用来测量该点加热后的温度变化,2个热电偶温度传感器可以得到2个温度值,对其求平均值,即为该点的温度变化。②热电偶温度传感器(即恒定边界温度测定土壤热性质试验中所用的温度传感器),测量不同位置的温度变化。

整个试验系统分为3个部分:土箱、加热系统和温度测量系统。土箱用来装不同质地、不同含水量的土壤。加热系统是指利用电源给自制的加热探针加热,加热时间与加热电压根据实际情况而定。温度测量系统由热电偶温度传感器和数据采集器(CR1000数据采集器,美国Campbellsci公司)。以加热探针的位置为基准,每隔2 cm插有1个热电偶温度传感器,共插5个。再距加热探针15 cm处插有1个热电偶温度传感器,用来记录环境温度对土箱温度的影响。具体的试验装置如图1所示。

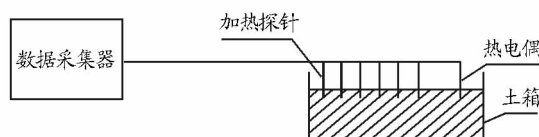


图1 热脉冲方法测定热性质的试验装置

Fig. 1 Experiment facility of soil thermal property detected by heat pulse method

1.1.2 试验过程。该试验使用土箱装土,土箱的尺寸为30 cm×30 cm×20 cm。装土时,每种土装3层,每层深度5 cm。装土的容重都为1.4 g/cm³。每种土壤至少测定5次含水量。在试验初始设计中,含水量小于15%的土壤,采用先拌土、后装土的方式。当含水量大于15%时,采用先装土,再给土箱注水。注水后放置7 d左右,待水分和温度稳定后进行试验。

为了使加热探针释放的能量能够传递得更远,需要增加加热电压,延长加热时间;但是,由于受到加热丝的限制,加热电压不能无限增大,加热时间不能无限延长。通过不断尝试,最终确定其加热时间为600 s,壤土的加热电压为7 V,其余质地土壤的加热电压为6.5 V。

1.1.3 试验土样。为了分析不同质地土壤的水热参数,选用4种质地的土样进行试验。试验土样分别为长武黑垆土、杨凌壤土和神木的红胶土以及沙黄土。土样经碾压、粉碎、风干

作者简介 李婷(1983-),女,陕西渭南人,工程师,硕士,从事农田水利方面的研究。

收稿日期 2016-04-26

后过1 mm筛,并搅拌均匀。采用烘干法测定初始含水量,使用马尔文激光颗粒分析仪测定土壤机械组成,结果见表1。

表1 土壤样本的质地分类

Table 1 Classification of soil texture

土样 Soil sample	质地分类 Texture type	土壤颗粒组成 Component of soil particle//%		
		黏粒 Clay(<0.002 mm)	粉粒 Silt(0.002~0.020 mm)	砂粒 Sand(0.020~1.000 mm)
壤土 Lou soil	黏壤土	15.982	40.018	44
沙黄土 Shahuang soil	砂壤土	1.872	12.128	86
红胶土 Red gum soil	砂黏壤土	15.643	30.357	54
黑垆土 Heilu soil	壤土	13.976	34.024	52

1.2 基本理论

1.2.1 热脉冲法确定土壤热扩散率。对于土壤中的某一点,其温度随时间的变化表示为:

$$\Delta T(t,r) = \frac{q}{4\pi(\rho c)\alpha} \left[Ei\left(\frac{-r^2}{4\alpha(t-t_0)}\right) - Ei\left(\frac{-r^2}{4\alpha t}\right) \right], t > t_0 \quad (1)$$

式中, $\Delta T(t,r)$ 为温度变化量, t 为加热设备开启后的时间, t_0 为热脉冲的时长, r 为线性热源的径向距, ρc 和 α 分别为介质的体积热容和热扩散率, $-Ei(-x)$ 为指数积分; q 为单位长度加热丝在单位时间内释放的热量。

根据公式(1)求 t 的偏微分,并使结果等于0,得到最大温度升高所对应的时间 t_m ,由此求得关于 α 和 ρc 的表达式:

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

1.2.2 解析解法确定土壤热扩散率。土壤热流的基本方程表示为:

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad (3)$$

式中, $T(x,t)$ 为土壤温度(°C); α 为土壤热扩散率(cm^2/s); t 为热扩散时间(s); x 为距不锈钢板的距离(cm)。

根据试验条件,边界条件和初始条件表示为:

$$T(0,t) = C, T(L,t) = B \quad (4)$$

$$T(x,0) = A \quad (5)$$

式中, A, B, C 均为常数; L 为土柱计算长度(45 cm)。

根据式(1)~(3),按照数理方程中热传导方程的基本解法,求得其解析解:

$$T(x,t) = \left[\frac{B-C}{L}x + C \right] + \sum_{k=1}^n f_k(x,t) \quad (6)$$

$$f_k(x,t) = -\frac{2}{k\pi} \times [(A-B) \times \cos(k\pi) - (A-C)] \times e^{-\alpha \times \left(\frac{k\pi}{L}\right)^2 \times t} \times \sin\left[\frac{k\pi}{L} \times x\right] \quad (7)$$

根据式(2)计算出土壤热扩散率,将计算的热扩散率与利用热传导方程解析解法计算的热扩散率进行比较。

以解析解法计算的热扩散率为依据,对热脉冲法确定土壤热扩散率的准确性进行分析。其中,以恒定边界温度条件下测定土壤热性质试验所测得的数据为基础,通过热传导方程解析解法计算热扩散率的方法称为方法1,其计算过程已见报道^[4]。笔者仅采用其不同质地土壤的热扩散率;以热脉冲法测定土壤热性质试验所测数据为基础,通过对温度变化

方程求导法计算的热扩散率的方法称为方法2。

2 结果与分析

2.1 土壤温度变化 从图2可以看出,对于不同含水量的沙黄土而言,距离热源2 cm处的温度增加值都呈先变大后减小的变化过程。当含水量小于10%时,随着含水量的增大,温度增加的最大值变小,最大值所对应的时间也随之变短;当含水量大于10%时,其变化渐不明显。

2.2 土壤热扩散率的确定 通过式(2)计算不同质地土壤在不同含水量的热扩散率,以黏粒含量差距最大的2种质地土壤沙黄土和壤土为例,分析不同质地土壤热扩散率随含水量的变化过程。从图3可以看出,每种质地土壤热扩散率随含水量的变化规律大体一致:首先随着含水量的增加而增加,当含水量增加到一定值时,热扩散率又随着含水量的增加而减小。含水量的这一临界值随着土壤质地的不同而不同。对2种土壤而言,沙黄土的砂粒含量比壤土的砂粒含量高,沙黄土的热扩散率峰值比壤土高,而峰值所对应的含水量则是沙黄土比壤土低。砂粒含量越高,热扩散率峰值越大,峰值所对应的含水量越小。

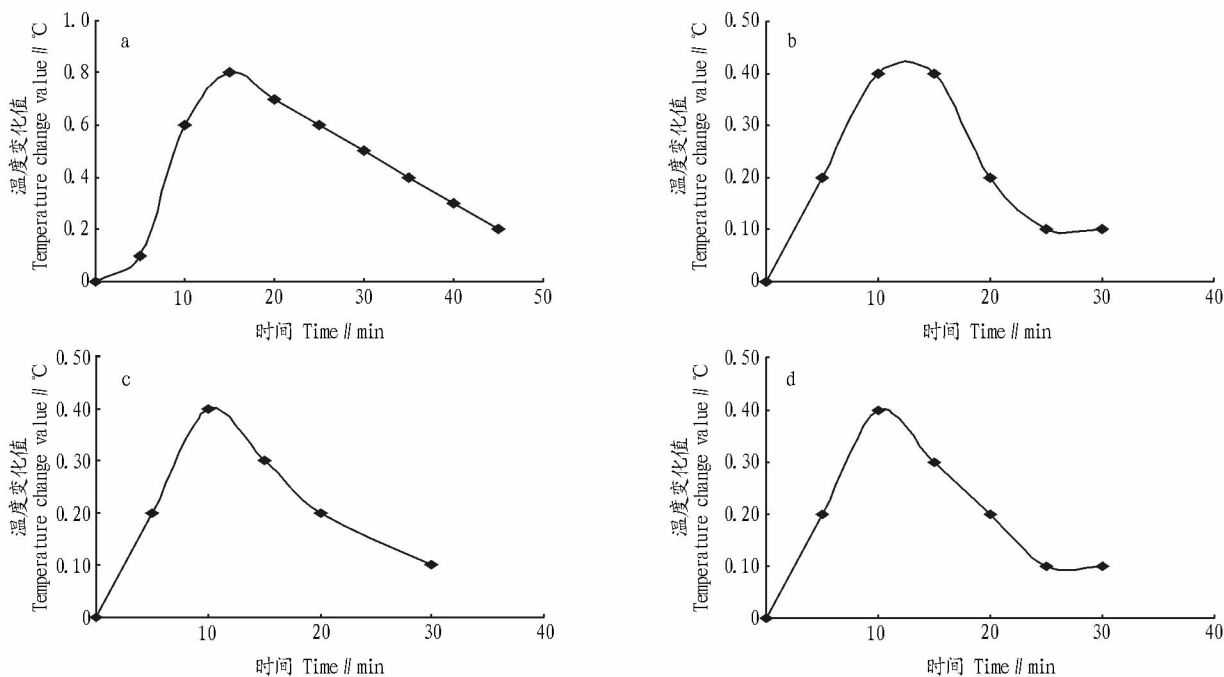
2.3 热脉冲法确定土壤热扩散率的准确性分析 为了对2种方法计算的热扩散率值进行比较,每种质地土壤选取含水量相同或者相近的情况,进行热扩散率比较。沙黄土在方法1中选取质量含水量为5%,方法2中选取质量含水量5.1%;黑垆土在方法1中选取质量含水量为2%,方法2中质量含水量选取2%;红胶土在方法1中选取质量含水量为5%,方法2中质量含水量选取5.1%;壤土在方法1中选取质量含水量为10%,在方法2中质量含水量选取9.7%。按照选取的含水量,计算2种方法计算的热扩散率。由表2可知,利用2种方法计算的热扩散率值相差较大。对红胶土而言,方法1计算的热扩散率值比方法2大;对于沙黄土、黑垆土和壤土而言,方法1计算的热扩散率值比方法2小。

将2种方法计算的热扩散率分别代入式(6)、(7),求得1、2、3 h的温度变化过程。结果表明,2种方法测定的热扩散率虽然有所差异,但是其通过计算所得到的温度剖面相差并不是很大。对于每种质地土壤而言,计算的时间越长,温度剖面差异就越大。

为了定量反映计算的温度剖面的差值,计算2种方法计算的温度剖面的相对误差。由表3可知,2种方法计算的热扩散率所对应的温度剖面的相对误差并不大。红胶土的温度剖面相对误差最小,其次为沙黄土和黑垆土,壤土的相对

误差相对较大,但其相对误差均小于5%。由此可见,利用热

脉冲法测定土壤热扩散率是可行的。



注:a.含水量1.2%;b.含水量5.1%;c.含水量11.0%;d.含水量15.7%。

Note: a. 1.2% water content; b. 5.1% water content; c. 11.0% water content; d. 15.7% water content.

图2 沙黄土不同含水量土壤的温度变化

Fig. 2 Temperature change of Shahuang soil with different water contents

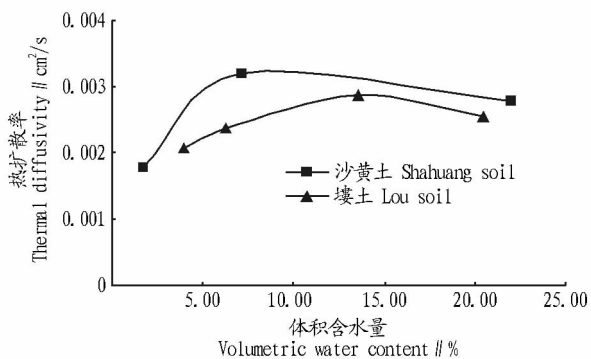


图3 不同质地土壤热扩散率随含水量的变化

Fig. 3 Variation of thermal diffusivity of different soil textures with water content

3 结论

笔者应用热脉冲法测定土壤热性质,使用1个加热探针进行加热,热电偶温度传感器记录不同位置的温度变化,确定其不同质地土壤的热扩散率、体积热容量以及导热率。将所求的热扩散率与热传导方程解析解法所求的不同质地土壤热扩散率进行比较,得出以下结论:

(1)分析沙黄土距离热源2 cm处的温度增加值变化过程,发现温度增加值都呈先变大后变小的变化过程。当质量含水量小于10%时,随着含水量的增大,温度增加的最大值变小,最大值所对应的时间也随之变小;当质量含水量大于10%时,其变化逐渐不明显。

表2 不同方法计算热扩散率的比较

Table 2 Comparison of thermal diffusivity calculated by different methods

土壤质地 Soil texture	沙黄土 Shahuang soil	红胶土 Red gum soil	黑垆土 Heilu soil	壤土 Lou soil
方法1 Method 1	0.002 427	0.002 157	0.000 827	0.001 567
方法2 Method 2	0.003 203	0.001 807	0.001 633	0.002 877

表3 2种方法计算的温度剖面的相对误差

Table 3 Relative error of temperature profile calculated by two methods

时间 Time//s	沙黄土 Shahuang soil	红胶土 Red gum soil	黑垆土 Heilu soil	壤土 Lou soil
3 600	1.16	0.57	1.59	2.16
7 200	1.79	0.90	2.56	3.37
10 800	2.32	1.16	3.31	4.33

%

(2)对不同质地的土壤而言,热扩散率首先随着含水量的增加而增加,当含水量超过一定值时,热扩散率随着含水量的增加而减少。砂粒含量越大,热扩散率峰值越大,峰值所对应的含水量越小。

(3)利用热脉冲方法计算的热扩散率与利用热传导方程解析解法计算的热扩散率值相比较存在一定差异。但是,其通过计算所得到的温度剖面相差并不是很大,其相对误差均小于5%。由此可见,利用热脉冲法测定土壤热扩散率是可行的。

参考文献

[1] 李毅,邵明安,王文焰,等. 质地对土壤热性质的影响研究[J]. 农业工

(上接第22页)

增幅较小;其次为黄金岁月、UFO、马可和玉蝉, F_0 都在14~40之间变化,品种间无明显差异;福娘的 F_0 显著高于其余品种。

(3)高温处理使大花蕙兰叶片PSII的最大光化学效率 F_v/F_m 呈下降趋势,且随着时间的延长, F_v/F_m 下降越明显,到高温胁迫9d,所有品种 F_v/F_m 都下降到最低。福娘和修女 F_v/F_m 受高温胁迫显著下降到0.5以下,且在恢复适温后恢复缓慢,无法恢复到初始水平;金玉满堂和马可的 F_v/F_m 受高温胁迫有小幅下降,在恢复适温后,最终恢复到初始水平的90%以上,耐热性最强;其次为玉蝉、UFO、红霞和黄金岁月。

(4)分别将基础荧光 F_0 、PSII的最大光化学效率 F_v/F_m 、叶绿素a含量、叶绿素b含量与热害指数进行相关性分析得:PSII的最大光化学效率 F_v/F_m 与热害指数相关性系数达0.946,可作为快速、无损筛选大花蕙兰耐热性品种的可靠指标之一。

(5)根据8种大花蕙兰 F_v/F_m 的变化最终得出8个品种耐热性由强到弱为金玉满堂、马可、玉蝉、UFO、红霞、黄金岁月、修女和福娘。

4 讨论

植物光合作用主要依靠叶绿素吸收传递电子来吸收光能合成物质,因此叶绿素含量的高低可以间接衡量植物光合作用能力的大小。作为植物光合作用的重要色素,叶绿素容易受高温影响加速分解,且合成叶绿素的酶活性下降甚至失活导致叶绿素合成受阻,含量下降。绝大部分叶绿素a和叶绿素b没有光化学活性,能够将植物吸收的光能传递到反应中心色素,因此也称作天线色素,而处于特殊状态的少量的叶绿素a具有光化学活性,为反应中心色素^[5]。研究表明,高温胁迫一方面导致合成叶绿素的酶失活,叶绿素合成受阻,同时促进活性氧积累加速降解叶绿素,从而造成叶绿素含量的下降^[6-7]。叶绿素含量的变化受多种因素影响,测量过程要严格避免低温。该研究发现抗性强的品种在高温胁迫

程学报,2003(4):62-65.

- [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I. 原理[J]. 土壤学报,2004,41(2):225-229.
- [3] 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.
- [4] 李婷,王全九,樊军. 土壤热参数确定方法比较与修正[J]. 农业工程学报,2008,24(3):59-64.
- [5] WANG Q J, OCHSNER T E, HORTON R. Mathematical analysis of heat pulse signals for soil water flux determination[J]. Water resources research, 2002, 38(6):271-277.
- [6] OCHSNER T E, HORTON R, REN T S. A new perspective on soil thermal properties[J]. Soil Sci Soc Am J, 2001, 65:1641-1647.
- [7] WELCH S M, KLUTENBERG G J, BRISTOW K L. Rapid numerical estimation of soil thermal properties for a broad class of heat pulse emitter geometries[J]. Sci Technol, 1996, 7:932-938.

迫后叶绿素含量显著高于抗性差的品种,这与张志刚等^[8]在辣椒上发现的结果一致,而叶绿素b的含量差异不显著,原因有可能是:①色素提取过程中见光分解,仪器测量误差;②品种间初始叶绿素含量有差异。在对比品种间色素含量的差异时,应该测量各品种叶片叶绿素含量的初始值,计算叶绿素变化的相对值,从而得出叶绿素含量变化差异。

大量研究表明, F_v/F_m 与植物的抗性相关,当植物遭受高温或低温胁迫后, F_v/F_m 也随之下降,表明植物PSII系统受到损伤^[9],不同抗性品种 F_v/F_m 下降的幅度以及恢复速度不同。该研究发现抗寒耐热性强的品种在低温或高温逆境下能够保持着较高水平的 F_v/F_m ,且在温度恢复到适温条件下能够迅速恢复到初始值的较高水平,而耐热性较差的品种不仅受温度胁迫导致 F_v/F_m 快速下降且难以在适温条件下恢复。综上所述,PSII的最大光化学效率 F_v/F_m 可作为大花蕙兰耐热性指标筛选的可靠指标之一,这与前人的研究结论^[10]一致。

参考文献

- [1] 杨艳团. 大花蕙兰生物学特性及栽培[J]. 特种经济动植物,2007(10):30-31.
- [2] 张宪政. 植物叶绿素含量测定:丙酮乙醇混合液法[J]. 辽宁农业学报,1986(3):26-28.
- [3] 韵敏,王四清. 大花蕙兰耐热性研究[C]//观赏园艺与西部发展:中国园艺学会观赏园艺专业委员会2010年全国学术年会. 西宁,2010.
- [4] 于永畅,张林,王厚新,等. 不同春、蕙兰名品耐低温性分析[J]. 农学报,2013(2):50-53.
- [5] 郝建军,于洋,张婷. 植物生理学[M]. 北京:化学工业出版社,2013.
- [6] TEWARI A K, TRIPATHY B C. Temperature-stress-induced impairment of chlorophyll biosynthetic reactions in cucumber and wheat[J]. Plant physiology, 1998, 117(3):851-858.
- [7] SYNG-AI C, KUMARI A L, KHAR A. Effect of curcumin on normal and tumor cells: Role of glutathione and bcl-2[J]. Molecular cancer therapeutics, 2004, 3(9):1101-1108.
- [8] 张志刚,尚庆茂. 低温、弱光及盐胁迫下辣椒叶片的光合特性[J]. 中国农业科学,2010,43(1):123-131.
- [9] KRAUSE G H, WEIS E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics[J]. Annual review of plant biology, 1991, 42(1):313-349.
- [10] 严冬瑾,于超,张启翔,等. 高温胁迫对大花蕙兰和墨兰幼苗形态及生理反应的影响[C]//中国观赏园艺产业与西部开发:中国园艺学会观赏园艺专业委员会2011年学术年会. 银川,2011.