

一种简单的土壤热惯量野外实测方法*

余 涛 田国良 吕永红 隋洪智

(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘 要 本文采用一种野外实地测量土壤热扩散率结合室内测定该土壤热容量的方法, 计算实际情况下土壤热惯量值与水分含量间的关系。文中对该测量方法进行了推导, 并将之应用于黄淮海地区不同土壤类型中, 在给出不同土壤类型和质地的热惯量值的同时, 对该方法的重复性、稳定性、准确性进行了检验。

关键词 热惯量, 土壤水分含量, 野外测量

中图分类号 S152.8

热惯量是物质热特性的一种综合量度, 反映了物质与周围环境能量交换的能力。由于成分组成的不同及受周围环境因素影响, 不同物质的热惯量值存在很大的差异。在自然条件下, 这种差异对该物质的温度变化幅度起决定性作用。因此, 可以利用遥感技术^[1-4], 将之应用于大面积监测土壤水分含量变化、地表能量平衡状态、岩石种类识别及遥感探矿等多个领域。

热惯量受到多种因素的影响。土壤颗粒大小、结构组成、固体密度、含水量、孔隙度、环境温度等多种因素均对热惯量值产生影响^[5]。不同类型、质地的土壤随含水量的不同, 其热惯量值将产生不同的变化。

研究表明, 土壤热惯量值与水分含量之间有很好的相关关系^[5]。这种关系很难用遥感方法直接测量得到, 因而一般采用实验的方法获取, 如室内测量法^[1]、对比测量法^[6]等。本文通过对自然条件下的土壤进行适当简化, 将其按类型和质地划分, 忽略土壤具体结构及环境温度等多个影响因素, 寻求一种在野外能较准确地测量热惯量的实用方法, 以便获得土壤热惯量值与水分含量相关关系, 为在 GIS 系统支持下, 利用遥感方法大面积估测黄淮海平原农业区土壤水分含量打下基础^[7]。

1 土壤热惯量的野外实测方法和原理

土壤热惯量作为表示土壤热特性的综合性参数, 定义^[1]如式(1):

$$P = \sqrt{\rho c \lambda} = \sqrt{C \lambda} = \sqrt{C^2 k} = C \sqrt{k} \quad (1)$$

其中, P 为热惯量 ($\text{J} / \text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{S}^{1/2}$), ρ 为密度 (kg / m^3), c 为比热 ($\text{J} / \text{kg} \cdot \text{K}$), λ 为热导率

* 本文得到国家重大自然科学基金项目“地表遥感信息传输及其成象机理研究”49493404-4-3的资助

1) 许德民, 刘景生. 土壤的热惯量测量方法研究. 中国科学院长春净月潭遥感实验站年报. 1989—1990

收稿日期: 1997-02-17; 收到修改稿日期: 1997-12-19

($J/m \cdot K \cdot S$), C 为热容 ($J/m^3 \cdot K$), k 为热散率 (m^2/S)。

从式(1)看出,通过对土壤体积热容 C 及热散率 k 的测量,可以直接得到热惯量值。为了能实地得到我国黄淮海地区不同土质水分含量与热惯量关系,本文采用一种简便的野外实用测量方法。具体步骤、原理如下:

准备一块 15cm 长,10cm 宽的铜板,其厚度约 2—3mm(具有一定的机械强度,以插入土壤中不易弯曲为准)。一只分辨率为 $0.02^\circ C$ 的温度计,测量范围为 $0—50^\circ C$ 。一加热电源,用以加热铜板。一把分辨率为 $0.02cm$ 的直尺。

测量时,首先将温度计插入土壤中,深度约为 5—7cm,将铜板垂直插入距温度计 2—3cm 的土壤中,迅速加热铜板,记下此时温度计与铜板的距离及温度计的读数和时。而后,每隔一定的时间记录温度计的读数,历经温度的上升、恒定、下降三个阶段。

铜板和温度计是垂直插入土壤的,它们之间的热传导是水平传导,若忽略土壤的不均匀性,即认为传输介质是均匀的,传导方程系数可设为常量。由于铜板与温度计的距离(2—3cm)相对于铜板的尺寸($10 \times 15cm$)非常小,可以认为传输边界为半无限边界。铜板的比热非常小,导热性极佳,没有能量的补充和滞留,可近似地认为铜板热源是一个无限小的热源,其热量传输到土壤中后,其温度迅速下降,很快与周围环境温度趋同。综上所述,土壤的热传导可归纳为如下方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \delta(x, t) \quad (2)$$

$$T|_{t=0} = T_0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}|_{x=0} = 0 \quad (4)$$

式中, T 为土壤温度, t 为时间, x 为距离, δ 为无限小的热源。

由格林法解此齐次方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \frac{\partial T^2}{\partial x^2} \quad (5)$$

$$T|_{t=0} = T_0 \delta(x, t) \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}|_{x=0} = 0 \quad (7)$$

其中: $a^2 = \frac{\lambda}{\rho c} = k$, 定义为土壤热散率。

用分离变量法求解:

$$T = \Theta(t)X(x) \rightarrow X\Theta' - a^2 X'' = 0 \quad (8)$$

式中 Θ, X 分别为关于温度 T 和距离 x 的分离参量。

令

$$\frac{X''}{X} = \frac{\Theta'}{a^2 \Theta} = -\omega^2 \quad (9)$$

式中 ω 为一实数变量。

$$\therefore T(x, t, \omega) = A(\omega)e^{i\omega x}e^{-\omega^2 a^2 t} \quad (10)$$

$$T(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} T(x, t, \omega) d\omega \tag{11}$$

$$T|_{t=0} = T_0 \delta(x, t) \tag{12}$$

$$T(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{T_0}{2\pi} e^{-\omega^2 a^2 t} e^{-i\omega x} d\omega = \frac{T_0}{2a\sqrt{\pi t}} e^{-\frac{x_0^2}{4a^2 t}} \tag{13}$$

求温度极值,令

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_0}{2a\sqrt{\pi}} \left(-\frac{1}{t^2} \right) \frac{\partial}{\partial u} \left(\sqrt{u} e^{-\frac{x_0^2}{4a^2 u}} \right) = 0, \quad (u = 1/t) \tag{14}$$

则

$$a^2 = \frac{x_0^2}{2t} = \frac{x_0^2}{2 \left(t_{\max} - t_{\min} + \frac{\Delta t}{2} \right)} = k \tag{15}$$

式中, t_{\max} 为温度计读数最大时的时间, t_{\min} 为开始计时时的时间, Δt 为温度保持最大值时的时间, x_0 为铜板到温度计的距离。

表1 不同物质热容值

Table 1 The heat capacity of different soil component

成分号 Component No.	$C_i (\times 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ K})$
1	4.18
2	1.25×10^{-3}
3	1.923
4	1.923
5	2.508

现在用实测方法得到了土壤热散率 k 。由定义可知,若再求出土壤热容量 C ,就可完全确定这种土壤的热惯量。关于热容 C 的求法如下:

$$C = \sum_{i=1}^5 C_i \theta_i \tag{16}$$

下标 $i = 1, 2, 3, 4, 5$ 分别代表水,空气,石英,矿物质及有机质等五种成分。其中, C_i 为第 i 个成分的热容值(如表 1^[8]), θ_i

为第 i 个成分的体积百分量。

实验对地块的要求为干湿度较均匀,面积大于 9m^2 ,离马路较远,处于大块田地中。其对应的土壤水分测定采用烘干法。具体操作为:每个采样点测完热散率后,在其附近采土样三个,用烘干法得到土壤水分含量后取平均值,即为该样地的水分含量。

2 黄淮海地区野外实验简介

黄淮海平原主要有褐土、潮土、盐化潮土、滨海盐土和砂姜黑土等五大类,其中以潮土分布最广,占总面积的 70% 以上^[9]。根据不同类型土壤的分布,考虑试点的均匀性及实验条件,我们选取了安徽怀远(砂姜黑土),山东聊城(潮土和盐化潮土),北京大屯(褐土),河南封丘(潮土和盐化潮土)为测试点,获取了上百组数据。每组包括重量含水量、容重、热散率,热容量及热惯量,基本上覆盖了黄淮海地区的主要土壤类型及不同的土壤质地类型。在此基础上,依主要的土壤类型(褐土、潮土、盐化潮土和砂姜黑土)和质地类型(砂质、壤质和粘质),分别对数据进行整理和分析,得到不同类型的土壤含水量与其热惯量的关系。

实验共历时三年(1991—1993年)。其中,1991年5,6月份在安徽省怀远县包集村的

中国科学院南京土壤研究所实验站对砂姜黑土进行了实验。1991年6—8月在山东省聊城市中国科学院地理研究所实验站对潮土进行了实验。1991年10,11月在北京市郊大屯乡对褐土进行了研究。1992年3—6月,1993年3—6月连续两年在河南省新乡市封丘县潘店乡的中国科学院南京土壤研究所实验站对不同土类,不同土质的土壤进行了更加深入的实验,掌握不同情况下土壤热惯量与土壤水分含量的变化规律,尤其对潮土(黄淮海地区分布最广的土壤)性质作进一步的了解。

选择河南潘店实验站作为重点实验场具有多方面的优势¹⁾。本地区地处黄淮海平原中部,有典型的气候代表性,周围14333亩实验地中,潮土面积达13898亩,占总面积的97%,土壤类型比较单一。其次,根据地形及水分条件对土壤发育的影响,此地区潮土可分为黄潮土、褐土化潮土、盐化潮土三个亚类,其中黄潮土为典型潮土,具有潮土的一般特征,对它的研究有很强的代表性。在黄潮土亚类下又可按土属划分为砂壤土(表层为砂质冲积物),两合土(表层为壤质冲积物),淤土(表层为粘质冲积物),灌淤土(引黄淤灌土)等

表2 热惯量值与水分关系实验分类表

Table 2 The table of soil classification for the experiment

土类	土壤质地	编号	实验地点及时间	
Soil type	Soil texture	Sample code	The site and the date of the experiment	
砂姜黑土	中壤	1-1-A	包集(安徽省怀远县),1991	
褐土	中壤	3-1-A	大屯(北京),1991	
		2-1-A	实验站(河南省新乡市封丘县潘店乡),1993	
		2-1-1-A	道口铺(山东聊城),1991	
		2-1-1-15	屯里(河南省新乡市封丘县潘店乡),1992	
	砂壤	2-1-1-15	小集(同上),1992	
		2-1-1-15	潘店(同上),1992	
		2-1-B	实验站(同上),1993	
	潮土	中壤	2-1-2-B	气象站(山东聊城),1991
			2-1-2-8	南老庄A(河南省新乡市封丘县潘店乡),1992,1993
			2-1-C	实验站(同上),1993
重壤		2-1-3-C	孟庄(山东聊城),1991	
		2-1-3-1	南老庄B(河南省新乡市封丘县潘店乡),1993	
		2-1-D	实验站(同上),1993	
盐化潮土	轻盐中壤	2-4-1-25	李马牧(同上),1992,1993	
		2-4-1-37	董马牧(同上),1993	
	中盐中壤	2-4-1-40	段堤(同上),1992,1993	

注:土壤质地按卡钦斯基土质分级标准划分;盐化程度按作物缺苗程度和耕层含盐量划分。

1) 新乡地区土壤普查办公室主编. 封丘土壤. 1984

几类。这几类在本区都有大量的分布,土质种类比较齐全,特别是都出现在实验站所在地五公里的范围内,有利于野外实验的开展。第三,在实验站内部的小型实验场内建有按不同土类,不同土质划分的几个实验区,其中包括了按卡钦斯基质地分级的标准划分的砂土、砂壤土、轻壤土、中壤土、重壤土等五种土质的潮土,使人们更加便于掌握土壤的基本性质。此外,中国科学院潘店实验站建站已三十余年,在几代工作者的辛勤努力下,积累了丰富的土壤、植被、气象等多方面的宝贵资料,为各项工作的开展提供了强有力的支持。总之,此实验区气候条件典型,土壤类型全,实验条件优越,有丰富的背景数据支持,是一个进行热惯量研究的理想实验场点。具体实验地点和时间,土壤类型和质地情况见表 2。

3 结果与讨论

图 1 为采用野外测量法测得的热惯量值(Y 轴)与室内未改变土壤结构条件下,由热传导法测得的热惯量值(X 轴)比较图。实验样本包括了褐土,潮土,砂姜黑土等多种土类,所以具有一定的全面性。从图中可以看出,野外法与室内法之间有很高的相关性,达 0.97。据此认为此种野外法具有较高的精确性,可以用于野外的热惯量观测。

图 2,图 3 为在同一地点,具有相同土壤类型,相同土壤质地,不同时间段(1992, 1993 年)内测得的热惯量值与水分含量比较图。

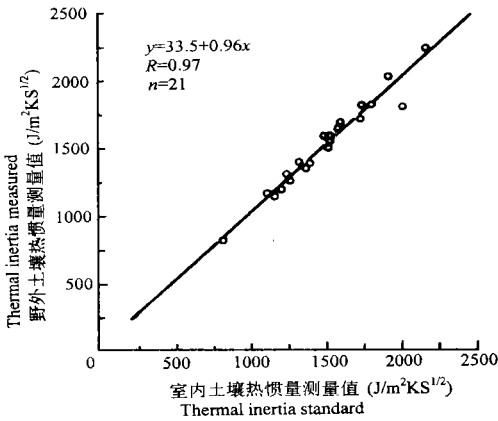


图 1 相同土壤样品,野外测量法测量热惯量值与室内测量热惯量值比较图

Fig.1 Comparison between the soil thermal inertia values measured in field and in laboratory, with the same soil sample

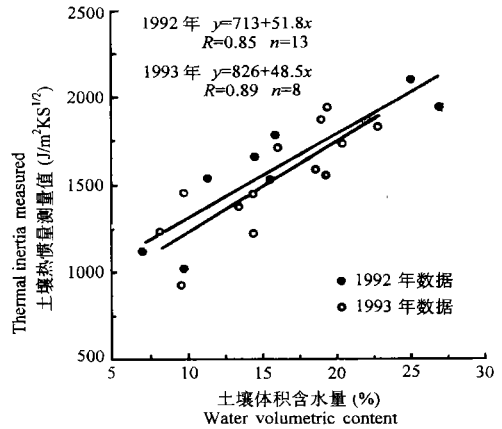


图 2 同一地点,相同土壤类型、质地,不同时期实验重复性比较图(1992, 1993 年河南段堤实验,属盐化潮土,中盐中质壤)

Fig.2 Experimental replication comparison for relations between thermal inertia and moisture content of the same soil type (the salinized fluvo-aquic soil) and the same soil texture (medium salinity and medium textured loam) at the same locality (Duandi) but in different years (1992 and 1993)

图 2 为段堤村实验结果。样品属于盐化潮土,中盐中质壤。从图上可以看出,两条相关线近乎平行,截距不大,说明实验的重复性较好。图中 1992, 1993 年热惯量与土壤水分

含量的相关系数分别为 0.85,0.89。图 3 为李马牧村的实验结果,样品属于盐化潮土,中盐中质壤。从图中可以看出,两条相关线近乎平行。此外,1992,1993 年热惯量值与土壤水含量的相关性分别为 0.91,0.93。

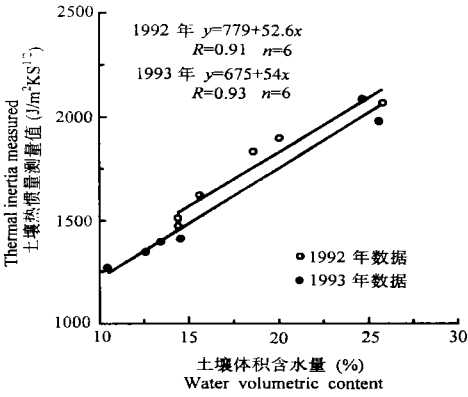


图 3 同一地点,相同土壤类型、质地,不同时期实验重复性比较图(1992,1993 年河南李马牧实验,属盐化潮土,中盐中质壤)

Fig.3 Experimental replication comparison for relations between thermal inertia and soil moisture content of the same soil type (the salinized fluvo-aquic soil) and the same soil texture (medium salinity and medium textured loam) at the same locality (Limamu) but in different years (1992 and 1993)

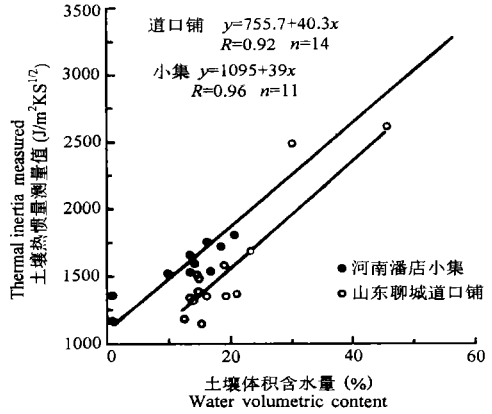


图 4 同种土壤类型,同种土壤质地,不同地区热惯量与水分关系图(潮土砂壤质)

Fig.4 Relations between thermal inertia and moisture content for the same soil type (fluvo-aquic soil) and the same soil texture (sandy loam) in different areas

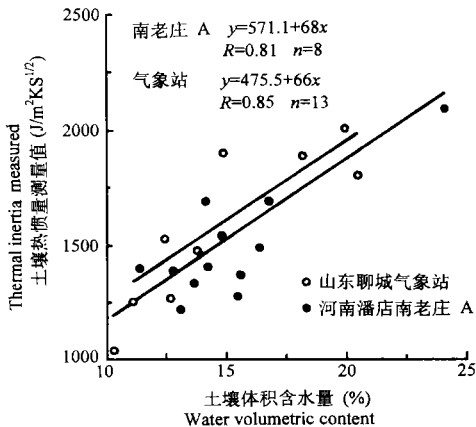


图 5 同种土壤类型,同种土壤质地,不同地区热惯量与水分关系图(潮土中壤质)

Fig.5 Relations between thermal inertia and moisture content for the same soil type (fluvo-aquic soil) and same soil texture (medium loam) in different areas

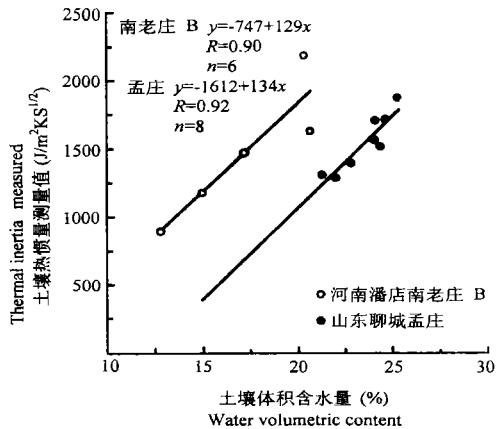


图 6 同种土壤类型,同种土壤质地,不同地区热惯量与水分关系图(潮土粘壤质)

Fig.6 Relations between thermal inertia and moisture content for the same soil type (fluvo-aquic soil) and same soil texture (heavy loam) in different areas

从两张图可以看出,此实验方法的重复性较好,斜率差距不大,截距存在一些变化。

图 4,图 5,图 6 为同种土壤类型,同种土壤质地条件下,不同地区,测得的热惯量值与水分含量比较图。

图 4 描述了河南潘店小集村与山东聊城道口铺的实验结果。样品为潮土,属砂质壤,从中可以看出两条相关线近乎平行,截距较图 2,3 为大,说明同种土壤类型和质地条件下,测量结果的一致性体现在斜率上,相关线可上下平移。图中潮土砂质壤热惯量值与水分相关关系非常显著,分别达到 0.96 和 0.92。

图 5 描述了河南潘店南老庄村 A 外与山东聊城气象站附近的实验结果。样品均为潮土,属中质壤。从中可以看出,两条相关线关系同图 4,但截距要小得多。这种土质下热惯量值与水分关系,分别为 0.81,0.85。图 6 为河南潘店南老庄 B 处与山东聊城孟庄村处的实验结果。样品为潮土,属粘质壤。从图中可以看出两条相关线同图 4,但截距最大。热惯量值与水分含量相关系数分别为 0.90,0.92。

从图 4,5,6 中可以看出同种土壤类型和质地下,不同地区测得的热惯量与水分关系结果是相近的,说明测量结果的同一性是比较好的。

图 7 为同种土壤类型(潮土),不同土壤质地(砂土,砂壤土,壤土,重壤土)条件下,热惯量值与土壤水分含量关系图。其中砂土样本取自河南潘店实验站,砂壤土取自山东聊城道口铺,壤土取自山东聊城气象站,重壤土取自山东聊城孟庄。从图中可以看出,几条相关线的斜率各不相同,砂壤土最小,其次是砂土,壤土,重壤土。不同土壤质地间的区别主要体现在斜率上。图中砂壤土,壤土,重壤土的热惯量与水分含量相关关系分别见图 4,5,6。砂土的热惯量与水分含量相关系数为 0.84,样本数为 12。

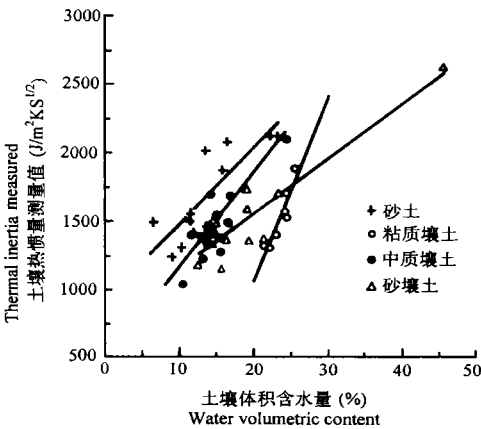


图 7 同种土类(潮土),不同质地土壤的热惯量与水分关系图

Fig.7 Relations between thermal inertia and moisture content for the same soil type (fluvo-aquic soil) but of different soil textures

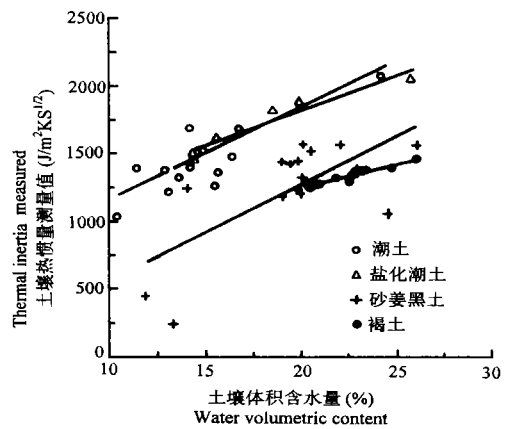


图 8 相同质地,不同土类土壤的热惯量值与水分含量关系图

Fig.8 Relations between thermal inertia and soil moisture content for the same soil texture (medium loam) but of different soil types

图 8 为相同土壤质地(中壤土),不同土壤类型(砂姜黑土、褐土、盐化潮土、潮土)下热惯量值与水分含量关系图。其中,砂姜黑土样本取自安徽怀远包集村,褐土取自北京大屯乡,盐化潮土取自河南潘店李马牧村,潮土取自山东聊城气象站。可以看出潮土与砂姜黑

土的斜率相近,盐化潮土与褐土斜率相近,潮土与盐化潮土的数值相差很小,但与砂姜黑土与褐土有很大截距。图中盐化潮土、潮土的热惯量值与土壤水分含量关系见图 3 和图 5,砂姜黑土、褐土的热惯量值与土壤水分含量相关系数分别为 0.7, 0.94, 样本数为 15, 12。砂姜黑土相关性较差的原因在于实验地点处于淮河流域,土壤水分含量一般较大,且实验时间为 5—6 月份处于雨季,水份含量值相差很小,在野外条件下很难找到含水量相差较大的实验点,因此实验中采用了人工方法加湿或风干,存在改变土壤结构的可能性,产生相差较大的结果。

从图 7, 8 可以看出,土壤类型与土壤质地对热惯量与水分含量关系曲线都有直接的影响,并均处在同一数据量级上,所以在以后生成土壤水分与热惯量关系 GIS 背景数据库时,应对这两个方面给予相同的重视。

4 结 论

利用这种简单实用的野外测量热惯量方法,对黄淮海地区各种主要土壤热惯量值与水分含量关系进行了研究。结果表明,土壤的水分含量与其热惯量之间存在着良好的线性关系。不同土类、不同土质的土壤,关系也不尽相同,但土壤类型与土壤质地对热惯量与水分含量关系均有直接的影响,且影响程度处于同一量级上。此外,经实验检验,本实验方法有较好的重复性、准确性和同一性,并且具有简便、易行等特点,适于野外土壤热惯量的测量工作。

这种实验方法由于受应用范围及实际工作条件的限制,给实验结果带来了不可避免的误差。对实际土壤的简化,使这种方法的检验存在一定的不精确性。实验证明,除土壤水分以外,土壤的松紧、孔隙状况也对土壤热惯量值产生影响。土壤压得越紧实,空隙度越小,则热导率越大,热容越大^[10]。而在实际土壤中,土壤表层又极易遭受结构的改变。这必然对实验精度产生影响。同时,测量时的环境温度也对实验结果产生一定影响。据 Kersten 的实验结果^[5],环境温度在 0—60℃ 间每改变 10℃,土壤热容将产生 1.5% 的变化,土壤热散率有 2% 的变化。因此,在研究土壤热惯量时,不能只着眼于土壤的类型与质地的不同对热惯量值的影响,还应着重讨论土壤空间结构及测量时的环境温度对数值测量的影响,才能作出一个比较全面的评价,并且有助于这种野外实验方法的完善。这也是未来工作中需进一步讨论的问题。

致谢:在工作中得到中国科学院南京土壤研究所傅积平、王慎强、周刘宗及新乡市黄淮海农业开发办公室尚波、苗春蓬、王永纯等同志的支持。

参 考 文 献

1. Pratt D A. A calibration procedure for Fourier series thermal inertia models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1980, 46(4):529—538
2. Price C. Thermal inertia mapping: a new view of the earth. *J. of Geophysical Res.*, 1977, 82(18):2582—2590
3. Price C. The potential of remotely sensed thermal infrared data to infer surface soil moisture and evaporation.

- Water Resources Research, 1980, 16(4):787—795
4. Price C. On the analysis of thermal infrared imagery: The limited utility of apparent thermal inertia. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 18(5):59—73
 5. Kersten M S. Thermal properties of soils. *Bulletin of the University of Minnesota* No. 28, 1943, 11—93
 6. 刘兴文, 冯勇进. 应用热惯量编制土壤水分图及土壤水分探测效果. *土壤学报*, 1987, 24(3):272—279
 7. 余涛, 田国良. 热惯量法在监测土壤表层水分变化中的研究. *遥感学报*, 1997, 1(1):24—31
 8. 杨金忠, 蔡树英. 土壤中的水、汽、热运动的耦合模型和蒸发模拟. *武汉水利电力学院学报*, 1989, 22(4):35—44
 9. 傅积平. 黄淮海平原区域治理技术体系研究. 北京: 科学出版社, 1987
 10. 李天杰, 郑应顺, 王云. *土壤地理学*. 北京: 人民教育出版社, 1980. 46—48

A SIMPLE METHOD OF MEASURING SOIL THERMAL INERTIA IN FIELD CONDITIONS AND ITS APPLICATION

Yu Tao Tian Guo-liang Lü Yong-hong Sui Hong-zhi

(*Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101*)

Summary

A new, simple method has been adopted of measuring the soil thermal inertia in field conditions combined with determining the thermal capacity of the soil in laboratory, by which the relation between the actual value of soil thermal inertia and the content of soil moisture can be calculated. This method is introduced in the present paper and has been applied to different types of soil in North China Plain. The reproducibility, stability and accuracy of the method were examined when the thermal inertia values for different soil (including 4 types of soils and 4 kinds of soil texture) were given. The results showed that the proposed method was applicable.

Key words Thermal inertia, Soil moisture, Field measurement