

# 土壤的发射率随含水量变化规律的探讨

李春槐

**摘要:**对常温地物的波谱测量是遥感技术的重要方面。土壤是地表最常见的地物之一,除裸露的外,它的特性对其上面的植物等有着重要的影响。

本文着重研究土壤的发射率和其含水量的关系。典型土壤样品是来自黑龙江省的“三江平原”,有草甸土、泥炭土、棕壤和沙土。在实验室条件制备了各种土壤的不同含水量样品,用辐射方法测量了各样品的表面发射率。

对测量结果进行分析处理得到土壤的发射率和表面含水量的关系:

$$\varepsilon = a + b(w - k)^{1/3}$$

式中 $\varepsilon$ 为发射率 $w$ 是绝对含水量, $a$ 、 $b$ 、 $k$ 是由不同类型土壤确定的常数。

## 一、引言

对常温地物的波谱测量是遥感技术的重要方面,土壤是地表最常见的地物之一,除裸露的外,它的特性对其上面的复盖物(如植物等)有着重要的影响。对于裸露土壤,它的波谱特性除了取决于本身的物理化学性质及颗粒大小外,其含水量的多少是影响土壤波谱特性的重要因素。在可见波段和近红外波段指对光谱反射率的影响;在热红外波段,主要指大于 $2.5\mu\text{m}$ 波段,更重要的是在大气窗口的 $8-14\mu\text{m}$ 范围,土壤的含水量和发射率之间的关系尤为重要,而且目前研究尚少。

常温条件下的土壤,指的是温度处于 $-10^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 之间。其辐射能量的波长处在 $2.5\mu\text{m}$ 至 $100\mu\text{m}$ 之间,峰值处于大气窗口的 $8-14\mu\text{m}$ 。

不透明物体的发射率定义为物体的辐射出射度和相同温度下的绝对黑体的辐射出射度的比值,无量纲。土壤是非透明体。在常温条件下测量常温土壤的发射率(法向发射率)时,来自测量地点周围的辐射能的影响,当然也包括天空,是不能忽略不计的,因此定义不能直接应用于测量。近年来一些工作者<sup>(1)、(2)、(3)、(4)、(5)</sup>根据各自的需要采用不同的方法进行发射率的测量。我们在本文的研究中,是采用改进的方法<sup>(6)</sup>。

## 二、原理、方法和装置

### 1. 原理

温度高于绝对零度的任何物体,在波长 $\lambda$ 处的单色辐射出射度可由普朗公式给出:

$$\begin{aligned} M(\lambda, T) &= \varepsilon(\lambda, T) M_b(\lambda, T) \\ &= \frac{\varepsilon(\lambda, T) \cdot C_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad (W/\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\varepsilon(\lambda, T)$ 为单色发射率, $T$ 为物体的绝对温度, $\lambda$ 为波长, $c_1$ 、 $c_2$ 为辐射常数。

处于自然环境中的物体，除其自身辐射能量外，它还要反射来自环境的辐射能量。当物体是理想的漫反射体<sup>(7)</sup>时，则物体表面的表观辐射亮度可表示为：

$$L(\lambda, T, T_s) = \frac{1}{\pi} \varepsilon(\lambda, T) M_b(\lambda, T) + \frac{1}{\pi} \rho(\lambda, T) E_h(\lambda, T_s) \quad (2)$$

式中  $M_b(\lambda, T)$  是和被测物温度  $T$  相同的黑体单色辐射出射度， $\rho(\lambda, T)$  是被测物的单色反射率； $E_h$  是等效温度为  $T_s$  的环境辐射在被测物上的单色辐照度。常温条件下的自然环境是很复杂的，要一一进行处理是非常困难的，也是没有必要的，因为我们把环境辐射看成一个等效环境来处理。

垂直对准被测表面的红外辐射计的光学系统是理想的，并且被测表面足够大到充满辐射计光学系统的入射窗，那么到达红外辐射计的接收元件上的单色辐通量为：

$$\phi(\lambda, T, T_s) = \tau(\lambda) f \lambda \pi, L(\lambda, T, T_s) \cdot \sin^2 u' \cdot \cos^2 \theta \cdot S \quad (3)$$

式中  $\tau(\lambda)$  是大气透过率； $f(\lambda)$  为光学系统的单色透过率； $L(\lambda, T, T_s)$  如式(2)所示； $S$  是接收元件的面积； $u'$  是光学系统的像方孔径角； $\theta$  是光学系统的视场角。把(2)式代入(3)式中得到：

$$\phi(\lambda, T, T_s) = \tau(\lambda) \cdot S \cdot \sin^2 u' \cdot \cos^2 \theta \cdot f(\lambda) \cdot [\varepsilon(\lambda, T) M_b(\lambda, T) + \rho(\lambda) E_h(\lambda, T_s)] \quad (4)$$

由于测量距离很近和我们使用的是非调焦式的红外辐射计<sup>(8)</sup>， $S$ 、 $u'$  和  $\theta$  都是不变的，所以可令  $k_0 = \tau(\lambda) \cdot S \cdot \sin^2 u' \cdot \cos^2 \theta$

则(4)式变为：

$$\phi(\lambda, T, T_s) = k_0 [\varepsilon(\lambda, T) f(\lambda) M_b(\lambda, T) + \rho(\lambda) f(\lambda) \cdot E_h(\lambda, T_s)] \quad (5)$$

(5)式对波长积分后得到：

$$\phi(T, T_s) = k_0 \left[ \int_0^\infty f(\lambda) \varepsilon(\lambda, T) M_b(\lambda, T) + \int_0^\infty f(\lambda) \rho(\lambda) E_h(\lambda, T_s) \right] \quad (6)$$

根据由仪器的光谱特性加权的表面发射率的定义和仪器的透过函数  $f(T)$  和  $f(T_s)$  的定义，考虑到红外辐射计的光学系统的透过特性  $f(\lambda)$  和基尔霍夫定律对非透明体有  $\rho(T) = 1 - \varepsilon(T)$  的关系，所以经推导得出：

$$\phi(T, T_s) = \varepsilon(T) f(T) k_0 M_b(T) + [1 - \varepsilon(T)] k_0 \cdot f(T_s) \cdot E_h(T_s) \quad (7)$$

这(7)式是非常重要的，式中第一项是到达接收元件表面的被测物的辐通量。第二项是到达接收元件的由被测物反射环境辐射的辐通量。

## 2. 方法及装置

考虑到红外辐射计的透过函数以及仪器的线性关系，直接用红外辐射计的输出电压来表达(7)式是合适的。

$$V(T, T_s) = \varepsilon(T) V_b(T) + [1 - \varepsilon(T)] V_h(T_s) \quad (8)$$

式中  $V(T, T_s)$  是对应于  $\phi(T, T_s)$  的输出电压； $V_b$  是对应于温度为  $T$  的黑体的电压； $V_h$  是等效温度为  $T_s$  时的环境辐射的输出电压。

按照(8)式，要求出  $\varepsilon(T)$ ，只要知道三个参数即可。我们采用的方法是用内表面是镜反射（反射率大于96%）圆筒腔罩在被测样品表面获得  $V_b(T)$ ；当红外辐射计对准暴露在环境中的被测物表面就可得到  $V(T, T_s)$ ； $V_h(T_s)$  的获得是借助一块发射已知的参考板而获得的。这种方法适合的条件是常温范围的非透明体；其发射率要大于0.6。否则要进行修正。

计算发射率的公式是：

$$\varepsilon(T) = \frac{V(T, T_s) - V_h(T_s)}{V_b(T) - V_h(T_s)} \quad (9)$$

在测量过程中，为了减少误差，取多次读数的算术平均值。要想得到被测表面的实际温度是非常方便的。只要利用 $V_b(T)$ ，查仪器的黑体定标的 $V_b(T) \sim T$ 曲线便可立即得到。这 $V_b(T) \sim T$ 曲线对不同的仪器是有差别的，因此本文不画出此曲线。

### 三、实验测量及经验公式的获得

#### 1. 土壤样品的选择和制备

我们的土壤样品是从黑龙江“三江平原”上取回的。分别是翻耕过的泥炭土、草甸土、棕壤和可生长某野草的沙土。为了和上述四种土壤进行比较，我们选择了河沙，洗去其中的杂质后也做为一种样品进行了测量，上述诸种样品在有机质和含沙量上有着明显区别，它们的最大含水量也是不同的。

关于土壤的含水量有多种表示方法<sup>(6)</sup>，我们采用的是绝对含水量，以占干土重的百分数来表示：

$$w = \frac{P_2 - P_1}{P_1} 100\% \quad (10)$$

式中 $P_2$ 为湿重， $P_1$ 为干重， $w$ 表示含水量。采用这种表示方法对土壤样品的含水量可以进行绝对的比较，给制备各种不同含水量的土壤样品带来很大的方便，土壤的样品的制备是采用常用的烘干法。

#### 2. 测量结果

将制备好的各种样品(不同含水量)在同一条件下进行了发射率的测量。测量是在1983年6月8日夜间进行的，地点是实验室外的空地上。天气晴朗无风，气温是19℃。下面是测量数据，数据是多次测量的算术平均值。

表 1 测量数据

泥 炭	含水量 (%)	0	73.3	135.6	260.0	455.6
	发射率 (%)	0.878	0.926	0.935	0.952	0.970
草甸土	含水量 (%)	0	12.0	21.0	41.0	60.0
	发射率 (%)	0.908	0.914	0.921	0.955	0.964
棕 壤	含水量 (%)	0	5.3	7.7	14.5	21.0
	发射率 (%)	0.896	0.897	0.90	0.937	0.945
细沙土	含水量 (%)	0	5.3	9.8	14.0	22.4
	发射率 (%)	0.870	0.888	0.910	0.932	0.942
净河沙	含水量 (%)	0	7.0	12.6	16.3	22.0
	发射率 (%)	0.816	0.837	0.928	0.935	0.941

图 1 (a)和(b)画出了棕壤、细沙土、净河沙和草甸土的发射率和含水量的关系。

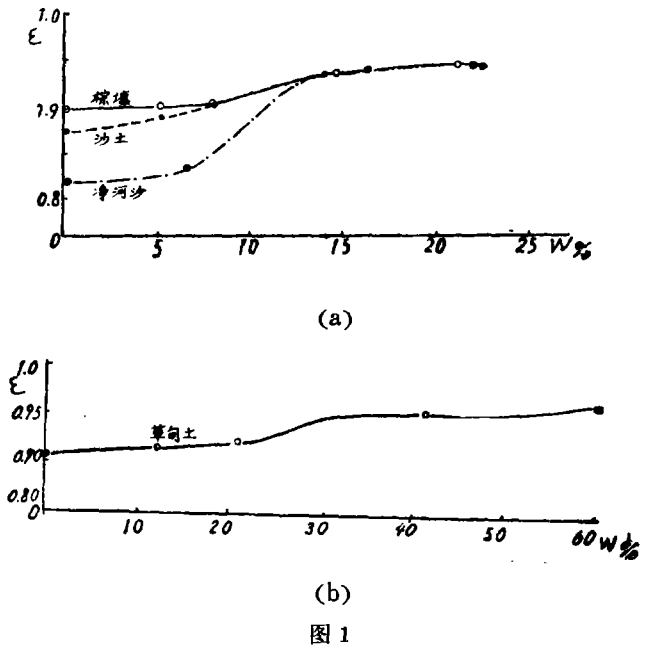


图 1

### 3. 数据的分析和经验公式的确定

根据图 1 中的曲线的形状，可以认为属于  $y = a + bx^{m/n}$  型，其中  $m, n$  为奇数。下面以草甸土为例，研究它们是否符合这种数学关系，按照图 1 设：

$$\varepsilon_0 = a + b(w - k)^{1/3} \quad (11)$$

其中  $\varepsilon_0$  为发射率； $w$  为绝对含水量， $a, b$  为待定常数， $k$  为座标横向平移量。经过试解，取  $k = 0.26$  为宜，那么：

$$\varepsilon_0 = a + b(w - 0.26)^{1/3} \quad (12)$$

$\varepsilon_0$  和  $w$  之间是非线性关系，要确定  $a, b$  是困难的，设：

$$(w - 0.26)^{1/3} = w_0$$

则  $\varepsilon_0 = a + bw_0 \quad (13)$

这样就可根据线性回归方法<sup>[10]</sup>来确定  $a$  和  $b$  了。根据表 1 中草甸土的测量数据，计算得到表 2 的数据，由线性回归方法确定的相关系数  $r = 0.996$ ，系数  $a = 0.936$ ， $b = 0.040$ 。

表 2

序 号	$w$	$w_0$	$\varepsilon_0$	$\varepsilon$	$\varepsilon_0 - \varepsilon$
1	0	-0.638	0.910	0.908	0.002
2	0.12	-0.519	0.915	0.914	0.001
3	0.21	-0.368	0.921	0.924	-0.003
4	0.41	0.531	0.957	0.955	0.002
5	0.60	0.698	0.963	0.964	-0.001

从表中的数据可见,  $\epsilon_0 - \epsilon$  的值是很小的, 因此草甸土的发射率和含水量之间的关系可由经验公式:

$$\epsilon = 0.936 + 0.04(w - 0.26)^{1/3} \quad (14)$$

来表达。

采用上述相同的处理方法, 得到泥炭、棕壤、细沙土和净河沙的数据和公式。泥炭:

$$r = 0.993 \quad a = 0.907 \quad b = 0.037 \quad k = 0.55$$

$$\epsilon = 0.907 + 0.037(w - 0.55)^{1/3} \quad (15)$$

表 3

序 号	w	w <sub>0</sub>	$\epsilon_0$	$\epsilon$	$\epsilon_0 - \epsilon$
1	0	-0.819	0.877	0.878	-0.001
2	0.73	0.568	0.928	0.929	-0.001
3	1.36	0.931	0.941	0.935	-0.006
4	2.60	1.270	0.954	0.952	0.002
5	4.56	1.588	0.965	0.970	-0.005

棕壤:

$$r = 0.994 \quad a = 0.918 \quad b = 0.051 \quad k = 0.11$$

$$\epsilon = 0.918 + 0.051(w - 0.11)^{1/3} \quad (16)$$

表 4

序 号	w	w <sub>0</sub>	$\epsilon_0$	$\epsilon$	$\epsilon_0 - \epsilon$
1	0	-0.479	0.894	0.896	-0.002
2	0.053	-0.385	0.898	0.897	0.001
3	0.077	-0.321	0.902	0.900	0.002
4	0.145	0.327	0.935	0.932	0.003
5	0.210	0.464	0.942	0.945	-0.003

细沙土:

$$r = 0.989 \quad a = 0.908 \quad b = 0.071 \quad k = 0.098$$

$$\epsilon = 0.908 + 0.071(w - 0.098)^{1/3} \quad (17)$$

表 5

序 号	w	w <sub>0</sub>	$\epsilon_0$	$\epsilon$	$\epsilon_0 - \epsilon$
1	0	-0.461	0.875	0.870	0.005
2	0.053	-0.356	0.883	0.888	-0.005
3	0.098	0	0.908	0.910	-0.002
4	0.140	0.384	0.933	0.932	0.001
5	0.224	0.501	0.943	0.942	0.001

净河沙:

$$r = 0.996 \quad a = 0.879 \quad b = 0.135 \quad k = 0.096$$

$$\varepsilon = 0.879 + 0.135(w - 0.096)^{1/3} \quad (18)$$

表 6

序 号	w	w <sub>0</sub>	ε <sub>0</sub>	ε	ε <sub>0</sub> - ε
1	0	-0.458	0.817	0.816	0.001
2	0.700	-0.296	0.839	0.837	0.002
3	0.126	0.311	0.921	0.928	-0.007
4	0.163	0.406	0.934	0.935	-0.001
5	0.220	0.499	0.946	0.941	0.005

#### 四、结 论 和 讨 论

在土壤的发射率的测量过程中，对于不同类型的土壤和不同含水量，尽管处于相同的条件下，它们的表面温度是略有差别的，但常温条件下地物的发射率随温度变化很微小，在仪器的测量误差以内<sup>〔1〕</sup>，测量时间选择在夜间，主要是夜间环境辐射较稳定，测量的精度高。

根据测量的数据，经分析表明，对泥炭、草甸土、棕壤、细沙土及净河沙，尽管它们的可耕性不同，含沙量不等，以致它们的颜色各异，但它们都可以用类似的数学经验公式来表征：

$$\varepsilon = a + b(w - k)^{1/3} \quad (19)$$

式中a、b、k是由各种土壤特征所决定的待定常数。由测量数据可大致看出，常数k与土壤的饱和含水密切相关。除了泥炭外，其余的几种土壤的k值和含水量的一半相接近。常数a和b则与土壤的有机成分密切相关，a随土壤的含沙量的增加而减小，b恰恰相反。

从数量和曲线可看到，土壤在干燥情况下，由于成分的不同，其发射率明显的不同，纯沙在0.31左右，而肥沃的草甸土的发射率可达0.91，在接近饱和的情况下，各种土壤的发射率都趋近水的发射率<sup>〔2〕</sup>，但略低于水。因为毕竟土壤表面不是一层水。尤其应当指出的是土壤的含水量处于通常范围，即绝对含水量在8%~12%之间时，其表面发射率随含水量的变化是明显的。

#### 参 考 文 献

- [1] S.B. Idso et al.; Determining Emittances for Use in Infrared Thermometry. A Simple Technique for Expanding the Utility of Existing Methods, J. Appl. Meteor., 1976, 15, 16.
- [2] K.J.K. Buettner et al.; The Determination of Infrared Emissivity of Terrestrial Surface, J. of Geophysical Research, 1965, 70, No. 6, 1329.
- [3] M. Fuchs et al.; Surface Temperature Measurement of Bare Soils, J. Appl. Meteor., 1968, 7, 303.

- [4] 张仁华、田国良；常温物体比辐射率的测量，科学通报，1981,5,297.
- [5] 张幼文、张才根；用红外辐射测温仪测定常温物体的比辐射率，物理学报,1980,29, No.7,829.
- [6] 李春槐；常温地物比辐射率和表面温度测量方法的研究，红外研究，1985, No.4,361.
- [7] Richard D.Hudson.Jr, Infrared System Engineering John Wiley & Sons, Inc.,1969.
- [8] 石保安、张才根、徐寅豪；HD型红外低温测温仪，红外物理与技术，1977, No.6,23.
- [9] 全国灌溉试验研究班编；灌溉试验方法,第8章.
- [10] 涂汉生；数理统计，教育出版社
- [11] 汤定元等译；遥感手册，第一分册，国防工业出版社.1979.
- [12] P.J.Rohinson; Laboratory Determination of Water Surface Emissivity, J. of Appl. Meteor., 1972, 11, 1391.

## Discuss of the Relationship Between the Surface Emissivity and the Surface Moisture of Soils

Li Chunhuai

### Abstract

Surface moisture of Soil is an important factor for surface emissivity of the soil. In this paper, the relationship between the surface emissivity and the surface moisture of soils is considered with an improved method for determination of the emissivity. The sample of soil was taken from "San Jang plane" on Northeast China. An experience formula for this relationship is obtained on the basis of analyses of experiment data.