

# 由海面大气参数直接计算 大气红外窗区透过率

莫 秦 生

(中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所)

**摘要**——在  $8\sim 13\mu\text{m}$  大气红外窗区, 大气透过率  $\tau_0$  主要取决于大气气柱水汽总含量  $W$ 。本文提出一个利用海面大气水汽压  $e_D$  近似计算  $W$  的线性方程, 同时还给出一个由  $W$  值计算  $\tau_0$  的方程; 将上述两个方程联用, 可以方便地由海面大气参数测值直接计算大气红外窗区的大气透过率值。

## 一、引 言

在  $8\sim 13\mu\text{m}$  窗区, 大气衰减主要来自水汽的吸收, 这种吸收由窗区内的水汽谱线吸收和窗区外水汽连续吸收谱伸向窗区内的边翼两部分组成, 后者比前者的吸收强得多<sup>[1]</sup>。在这种情况下, 吸收随波长的变化是缓慢的, 具有一定带宽的低分辨率的大气透过率函数  $\tau_0$  与吸收物质的等效含量  $W^*$  服从指数关系<sup>[2]</sup>:

$$\tau_0 = \exp(1 - O_2 W^*) \quad (1)$$

水汽吸收的强弱决定于它在整层大气中的含量, 由于大气中的水汽浓度与地域、季节、气候及昼夜变化等因素有关, 其分布的时空变化较大, 从而大气透过率随时空变化也较大。在海面水温卫星红外遥感的实际工作中, 为了解决大气修正问题, 如何方便地定量求取大气气柱水汽总含量  $W$ , 以及由此计算出相应的大气透过率  $\tau_0$  是非常重要的问题。鉴于海面水温卫星红外遥感是在晴空海域进行, 这里大气水汽的空间分布相对来说比较均匀, 同时又考虑到在实际工作中, 海面大气参数比高空大气参数要容易取得, 因此, 本文试图通过对模式大气的讨论和大气实测参数的分析, 找到一种直接利用海面大气参数测值计算大气透过率的简便、实用方法。

## 二、海面大气水汽含量与大气气柱水汽总含量的关系

大气中的水汽绝大部分集中在对流层的中下层(10km 以下), 并随高度升高而迅速减少。张道民等人<sup>[3]</sup>于 1979 年提出: 作为初级近似, 对流层中的水汽垂直分布可表示为

本文 1986 年 5 月 20 日收到。

$$q(p) = q_D (p/p_D)^\gamma; \quad (2)$$

式中,  $q(p)$  是气压为  $p$  的高度处的水汽混合比,  $q_D$  和  $P_D$  分别是地(海)面的水汽混合比和气压,  $\gamma$  是个特定常数。此时单位截面上垂直气柱内的水汽总含量  $W$  ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) 为<sup>[4]</sup>

$$W = \frac{P_D}{g} \frac{q_D}{(\gamma+1)}; \quad (3)$$

式中  $g$  为重力加速度。当用式(3)求取  $W$  值时, 除了要知道地面水汽参数  $p_D$ 、 $q_D$  外, 还必须已知  $\gamma$  值, 而它与地点、季节等变化有关。这在实用中常常是不方便的。

根据气象学一般定义<sup>[5]</sup>, 地面水汽混合比为

$$q_D = 0.622 \times e_D / p_D; \quad (4)$$

式中  $e_D$  为地面水汽分压, 其单位为 hPa; 而地面水汽含量(水汽密度)  $W_D$  ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) 与  $e_D$  有如下关系:

$$e_D = 4.615 \times 10^{-3} T_D W_D; \quad (5)$$

式中,  $T_D$  为地面气温(K)。由式(3)可见,  $W$  与  $e_D$  或  $W_D$  存在一定线性关系。可将它们写成

$$W = A_0 + A_1 e_D; \quad (6)$$

或

$$W = B_0 + B_1 T_D W_D. \quad (7)$$

若能确定系数  $A$ 、 $B$  的值, 则可实现利用海面大气参数直接求取大气气柱水汽总含量  $W$ 。

### 1. 模式大气中 $W$ 与 $e_D$ 的线性关系

根据文献[6]给出的六种模式大气参数值, 积分计算了从  $0 \sim 100 \text{ km}$  高度大气层单位截面气柱水汽总含量  $W_0$  ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) 同时利用最小二乘法求得  $W_0$  与  $T_D$ 、 $W_D$  的最佳线性关系式

$$W_1 = 0.2322 + 0.6909 \times 10^{-3} T_D W_D; \quad (8)$$

利用式(5)可得

$$W_1 = 0.2322 + 0.1497 e_D. \quad (9)$$

$W_0$  与  $e_D$  的相关系数为 0.9991。 $W_0$  的值, 由式(8)计算的  $W_1$  值及其绝对误差  $\Delta W =$

表 1 模式大气水汽总含量与式(8)的计算值

Table 1 Total moisture content in model atmosphere and calculative value of equation(8).

模式大气参数					式(8)计算值		
编号	地理与气候	$T_D$ (K)	$W_D$ ( $\text{g}/\text{m}^3$ )	$W_0$ ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )	$W_1$ ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )	$\Delta W$ ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )	$\Delta W'$ (%)
1	亚北极(60°N) 冬季(1月)	257.1	1.2	0.4228	0.4453	0.0225	5.32
2	中纬度(45°N) 冬季(1月)	272.2	3.5	0.8671	0.8904	0.0233	2.69
3	美国标准大气 (1962年)	288.1	5.9	1.4391	1.4065	-0.0326	-2.27
4	亚北极(60°N) 夏季(7月)	287.0	9.1	2.1197	2.0365	-0.0932	-3.93
5	中纬度(45°N) 夏季(7月)	294.0	14	2.9816	3.0759	0.0942	3.16
6	热带大气(15°N)	300.0	19	4.1978	4.1701	0.0277	-0.66
平均计算精度(均方根差)						0.0558	3.33

$W_1 - W_0$ , 相对误差  $\Delta W' = \Delta W / W_0 (\%)$  均在表 1 中给出。由表 1 可见, 平均绝对误差为 0.0558, 平均相对误差为 3.33%。

## 2. 实际大气中 $W$ 与 $e_D$ 的线性关系

由文献 [7] 采集了东海沿岸具有高空气象记录的上海、大陈岛、福州和台北四个气象台站在 1982 年 12 月下旬获得的 73 次实测数据, 并计算了各站的地面水汽分压  $e_D$  和从地面到 200 hPa (0~12 km) 高度之间的水汽总含量  $W_0$ 。其中台北站的最高测点为 300 hPa (约为 10 km 高度), 台北站的 300~200 hPa 大气层的水汽含量是用外推法计算的。由前面六种模式大气分析, 0~12 km 大气层的水汽总含量平均为 0~100 km 大气层水汽总含量的 99.87%, 可代表整层大气水汽含量。

图 1 给出了大陈岛的大气水汽逐日变化曲线。它与当时的天气是一致的: 两个水汽含量较低的时期, 对应的正是在两次冷空气南下之后的干燥晴空。在初冬的东海区域, 这样的天气具有一定的代表性。在表 2 中列出了这 73 站次主要大气参数的分布范围, 整层大气水汽含量  $W_0$  几乎接近表 1 中模式大气的水汽含量值的范围, 应该说这些数据具有一定普遍意义。

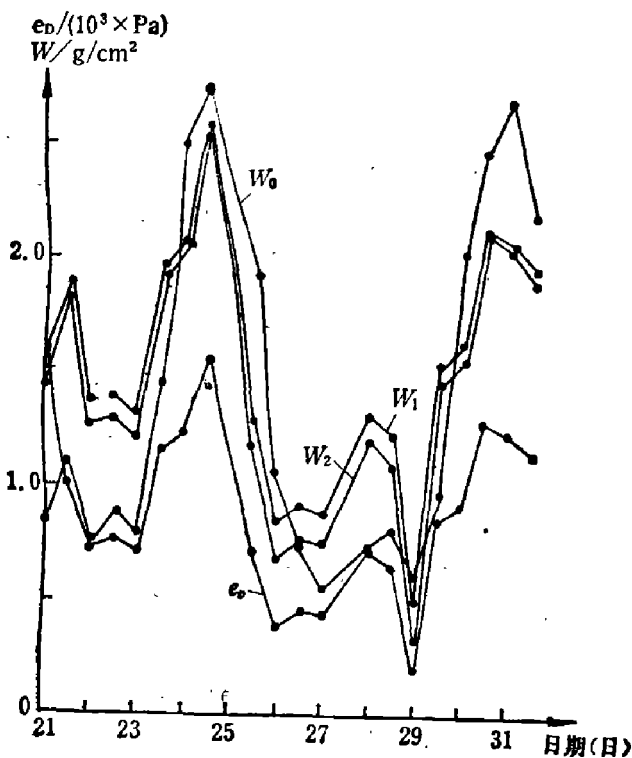


图 1 大陈岛大气水汽含量逐日变化曲线  
(1982 年 12 月下旬)

Fig. 1 Curve of every day change of atmosphere moisture content above Dachen Island.  
(21~31 December, 1982)

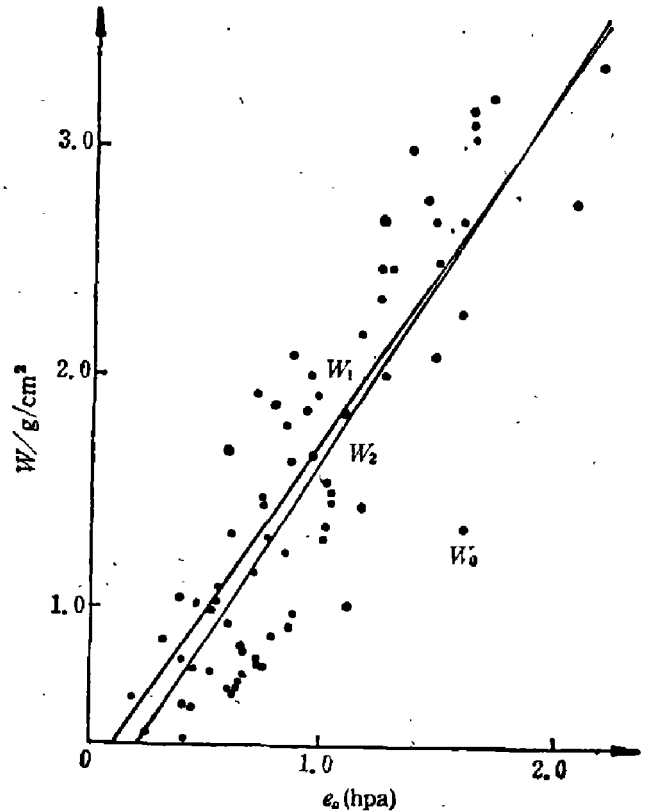


图 2 东海四台站 73 站次  $W_0 - e_D$  关系图  
(1982 年 12 月下旬)

Fig. 2 Seventy-three times  $W_0 - e_D$  distribution of four observatories of The EAST CHINA SEA.  
(21~31, December, 1982)

图 2 给出了东海四台站 73 站次的  $W_0 - e_D$  关系图, 虽然  $W_0$  的分布有一定离散性, 但与  $e_D$  大致呈线性关系, 其相关系数为 0.8736。用最小二乘法得出  $W_0$  与  $e_D$  的最佳线性方程为

$$W_2 = 0.0502 + 0.6115 \times e_D, \quad (10)$$

表 2 东海四台站的大气参数范围

(1982年12月下旬)

Table 2 Atmosphere parameter limits of four observatories of The EAST CHINA SEA (21~31, December, 1982).

大气参数	最大值	最小值	差值或比值
海面气温 $T_D$ (K)	293.2	268.8	24.6
海面水汽分压 $e_D$ (hPa)	21.8	1.8	12.1:1
海面水汽含量 $W_D$ (g/m <sup>3</sup> )	16.1	1.937	8.9:1
整层大气水汽含量 $W_0$ (g/cm <sup>2</sup> )	3.3535	0.4237	7.9:1

由式(9)和式(10)计算的  $W_1$ 、 $W_2$  曲线也在图 2 给出,由图可见它们是很接近的。表 3 给出了式(9)和式(10)根据 73 站次数据计算的  $W_1$  和  $W_2$  的精度。在全球大气研究计划(GARP)中规定:单位气柱水汽总含量的探测精度要求是 20%,即相对误差  $\Delta W' \leq 20\%$  的资料被认为是足够准确的。设  $K(\%)$  为  $\Delta W' \leq 20\%$  的次数与总探测次数之比。在文献[4]中,当  $\gamma$  采取与地点有关的气候平均值时,其  $K$  值仅大于 53%,与表 3 中  $K$  值相近。本文给出的方法,其精度是不太高的,原因是地面水汽分压  $e_D$  并不与整层大气气柱水汽含量  $W_0$  呈良好线性相关(见图 2,测点显示一定的离散性)。但在一些精度要求不高的实际工作中,特别是在难以取得高空大气资料的情况下,它还是一种方便的,可取的方法。

表 3  $W-e_D$  线性方程的精度

Table 3 The Accuracy of  $W-e_D$  linear equation.

方程	$\overline{\Delta W}$ (g/cm <sup>2</sup> )	$\Delta W'(\%)$			$K(\%)$
		$\Delta W'_{max}$	$\Delta W'_{min}$	$\overline{\Delta W'}$	
$W_1$	0.4097	105.40	0.94	40.24	53.4
$W_2$	0.4001	94.29	0.39	34.71	49.3

### 三、由海面大气参数计算大气透过率的方法

#### 1. 大气透过率的经验方程

具有一定带宽的窗区通道(其中值波长为  $\lambda_0$ )中的整层大气垂直透过率  $\tau_0$ ,与大气水汽等效含量  $W^*$  之间,遵从式(1)的指数关系。由于大气水汽随高度的变化往往是很大的,因而  $\tau_0$  的计算一般采用繁杂的多层大气分层积分法。为了简化计算,不少学者从实际红外测温窗区通道的实测数据出发,建立了各种经验方程。如 W. Sidran<sup>[5]</sup> 于 1980 年根据 Prabhakra 等人(简称 PDK)1974 年由雨云-7 卫星三个红外通道所得到的数据,提出如下表达式:

$$\tau_0 = \exp(-aW^{0.7} - bW^2) \quad (11)$$

按照 W. Sidran 提供的  $a$ 、 $b$  数值,对  $\lambda_0 = 10.83 \mu\text{m}$ 、 $11.64 \mu\text{m}$  和  $12.45 \mu\text{m}$ , 及  $T_D = 280\text{K}$  和  $300\text{K}$  六种类型,按式(11)计算,其精度为 0.001~0.004(均方根差)。

本文对  $8 \sim 13 \mu\text{m}$  大气窗口通道的  $\tau_0$  与  $W$  的关系,提出一个与式(11)类似的表达式:

$$\tau_0 = \exp(A_0 + A_1W + A_2W^2); \quad (12)$$

式中指数是一个标准的一元二次多项式，它在许多实用计算中是方便的。表4给出了式(11)和式(12)在  $10.83 \mu\text{m}$  通道，两种气温下的系数、计算值和计算精度。由表4可见，式(11)和式(12)的计算精度基本是一致的。

表4 由经验方程计算的大气透过率( $10.83 \mu\text{m}$ )  
Table 4 Calculative atmosphere transmissivity by empirical equation( $10.83 \mu\text{m}$ ).

W (g/cm <sup>2</sup> )	T=300 K					T=280 K				
	$\tau_0$ (PDK 值)	式(11)计算值 a=0.0560 b=0.02424		式(12)计算值 $A_0=-0.011$ $A_1=-0.043$ $A_2=-0.0222$		$\tau_0$ (PDK 值)	式(11)计算值 a=0.0436 b=0.03479		式(12)计算值 $A_0=-0.011$ $A_1=-0.031$ $A_2=-0.0388$	
		$\tau_a$	$\Delta\tau_a^*$	$\tau_a$	$\Delta\tau_a^*$		$\tau_a$	$\Delta\tau_a^*$	$\tau_a$	$\Delta\tau_a^*$
0.5	0.962	0.960	-0.002	0.962	0.001	0.968	0.965	-0.003	0.966	-0.002
1	0.924	0.923	-0.001	0.927	0.003	0.927	0.925	-0.002	0.927	0
2	0.828	0.829	0.001	0.830	0.002	0.812	0.811	-0.001	0.812	0
3	0.713	0.712	-0.001	0.712	-0.001	0.665	0.666	0.001	0.665	0
4	0.585	0.585	0	0.584	-0.001	0.510	0.510	0	0.509	-0.001
6	0.343	0.343	0	0.344	0.001	0.224	0.246	0.001	0.243	-0.001
8	0.167	0.167	0	0.169	0.002	0.089	0.090	0.001	0.089	0
$\overline{\Delta\tau_a}$			0.0010		0.0017			0.0016		0.0009

\*  $\Delta\tau_a = \tau_a - \tau_0$

## 2. 模式大气的大气透过率计算方程

本文根据文献[9]中给出的分辨率为  $20 \text{ cm}^{-1}$  的分谱透过率数据，计算了 NOAA-5、6、7 三颗卫星上 VHRR 或 AVHRR 仪器中，四个探测海面水温的红外窗区通道的垂直大气平均透过率  $\bar{\tau}_{\lambda_0}$ ，这里  $\bar{\tau}_{\lambda_0}$  除了与通道中值波长  $\lambda_0$  有关外，还与地面水平能见度  $L(\text{km})$  有

表5 模式大气红外窗区通道垂直大气平均透过率  $\bar{\tau}_{\lambda_0}$

Table 5 The vertical atmosphere average transmissivity of the channel in infrared window in model atmosphere( $\bar{\tau}_{\lambda_0}$ ).

模式大气 编号	通道 I		通道 II		通道 III		通道 IV	
	NOAA-5 卫星 10.5~12.5 $\mu\text{m}$ ( $\lambda_0=11.43 \mu\text{m}$ ) $\Delta\nu=150 \text{ cm}^{-1}$		NOAA-6 卫星 10.5~11.5 $\mu\text{m}$ ( $\lambda_0=10.99 \mu\text{m}$ ) $\Delta\nu=80 \text{ cm}^{-1}$		NOAA-7 卫星 10.3~11.3 $\mu\text{m}$ ( $\lambda_0=10.84 \mu\text{m}$ ) $\Delta\nu=85 \text{ cm}^{-1}$		NOAA-7 卫星 11.4~12.4 $\mu\text{m}$ ( $\lambda_0=11.92 \mu\text{m}$ ) $\Delta\nu=75 \text{ cm}^{-1}$	
	L=5 km	L=23 km	L=5km	L=23km	L=5km	L=23km	L=5km	L=23km
2	0.8336	0.8772	0.8527	0.8984	0.8451	0.8912	0.8285	0.8623
3	0.7715	0.8118	0.7997	0.8426	0.7959	0.8392	0.7497	0.7878
5	0.5555	0.5846	0.6035	0.6359	0.6095	0.6427	0.5162	0.5424
6	0.3856	0.4059	0.4393	0.4629	0.4520	0.4766	0.3391	0.3535

关(见表5)。为此,本文提出一个计算模式大气透过率 $\bar{\tau}_{\lambda_0}$ 的公式:

$$\tau_{\lambda} = \exp(A_0 + A_1 W + A_2 W^2 + BL) \quad (13)$$

式中系数因通道不同而异,上述 NOAA 卫星的四个红外通道的系数在表6中给出,其计算精度( $W_0$ 以表1为依据)见表7。相对误差 $\Delta\tau'_0$ 在0.18~0.53%。

表6 在模式大气中式(13)的系数值  
Table 6 Coefficients of equation(13) in model atmosphere.

系数	10.5~12.5 $\mu\text{m}$	10.5~11.5 $\mu\text{m}$	10.3~11.3 $\mu\text{m}$	11.4~12.4 $\mu\text{m}$
$A_0$	-0.113	-0.108	-0.119	-0.104
$A_1$	-0.065	-0.049	-0.047	-0.075
$A_2$	-0.035	-0.030	-0.028	-0.038
$B$	0.003	0.003	0.003	0.003

表7 在模式大气中式(13)的计算精度  
Table 7 The Calculation accuracy of equation (13) in model atmosphere.

水汽值	误差值	10.5~12.5mm		10.5~11.5 $\mu\text{m}$		10.3~11.3 $\mu\text{m}$		11.4~12.4 $\mu\text{m}$	
		$L=5\text{ km}$	$L=23\text{ km}$	$L=5\text{ km}$	$L=23\text{ km}$	$L=5\text{ km}$	$L=23\text{ km}$	$L=5\text{ km}$	$L=23\text{ km}$
$W_0$	$\Delta\tau_0$	0.0014	0.0033	0.0016	0.0016	0.0013	0.0018	0.0032	0.0035
	$\Delta\tau'_0$ (%)	0.20	0.46	0.27	0.22	0.18	0.23	0.50	0.53
$W$	$\Delta\tau$	0.0067	0.0071	0.0068	0.0069	0.0059	0.0061	0.0082	0.0102
	$\Delta\tau'$ (%)	1.23	1.23	1.14	1.08	0.99	0.98	1.50	1.87
$\Delta\tau'/\Delta\tau'_0$		6.15	2.67	4.22	4.91	5.50	4.26	3.00	3.53

### 3. 由海面大气参数直接计算大气红外窗区透过率

本文给出的式(6)或式(7)可由海面大气参数直接计算大气垂直气柱水汽总含量 $W$ 。式(12)和式(13)又给出了由 $W$ 值计算大气透过率 $\tau_{\lambda}$ 的计算式,将上述两个方程联用,就可以由海面大气参数直接计算大气透过率 $\tau_{\lambda}$ 。利用表1中由式(8)计算的 $W$ 值,代入式(13)所得 $\tau_{\lambda}$ 的精度也在表7中给出,其相对误差(1~1.9%)比直接用 $W_0$ 计算的结果要大3~6倍,其原因由于所引用的 $W$ 值的相对精度较差所致。文献[9]中数据的相对精度仅优于10%,表7所给出的计算精度相对文献[9]来说是足够好的。

## 四、结 语

1. 本文提出了一个利用海面大气实测参数 $e_D$ (或 $W_D$ 、 $T_D$ )和 $L$ ,直接计算海面温度卫星遥感红外窗区通道的垂直大气透过率 $\tau$ 的方法。由于采用的海面大气参数是同步实测的,它将比其它非同步定量方法有更大的优越性。虽然计算精度尚不高,但实际应用中精度要求不高时基本上是足够好的;另外,海面大气参数比高空大气参数更容易获得,因而本方法具有实用方便的优点。

2. 本文未考虑测量系统光谱通道的光谱分布函数,然而本文提出的方法,对同一测量

系统(即同一颗卫星的同一红外测温窗区通道)所取得的信息进行定量计算时,是完全适用的。

3. 作者曾在文献[10]中,给出解译卫星红外云图的外定标测温方程:

$$\frac{1}{T_{sk}} = \frac{1}{T_{s1}} - \alpha(D_k - D_1) + \beta \ln \left( \frac{\tau_{ok}}{\tau_{o1}} \right) + \beta \ln \left( \frac{\varepsilon_{sk}}{\varepsilon_{s1}} \right); \quad (14)$$

该方程是一个超越方程,后二个修正项是以对数形式出现的。利用式(12)或式(13)可将大气修正项  $\beta \ln(\tau_{ok}/\tau_{o1})$  变成一个多项式,而式(6)或式(7)又使得利用海面大气实测参数计算大气修正项成为可能,这就使式(14)在实际工作中得以应用。作者曾对1982年12月下旬的一次海上试验进行验证计算,在利用本文的方法引入大气修正后,可使区域海面温度的解译精度提高  $0.2^\circ\text{C}$ (将另文发表)。

### 参 考 文 献

- [1] 上海市红外物理与技术译丛编辑组,红外大气传输的研究,上海科技情报所出版,1975, 25~35.
- [2] 中国科学院大气物理研究所,气象卫星的红外遥测与反演(二),科学出版社,1979, 99~104.
- [3] 同上, 1~9.
- [4] 同上, 10~19.
- [5] 厦门水产学院,气象学,农业出版社,1978, 62.
- [6] McClatchey R. A. et al., AD-753075.
- [7] 北京气象中心资料室编,中国高空气象记录月报,气象出版社,1982.
- [8] Miriam Sidran, *Remote Sensing of Environment*, 1980, 10:101~114.
- [9] 中国科学院大气物理研究所,可见光和红外辐射在大气中的透过率(三),中国科学院上海技术物理研究所出版,1978.
- [10] 莫秦生,红外研究,4(1985), 4:277~282.

## DIRECT CALCULATION OF ATMOSPHERE TRANSMISSIVITY FOR INFRARED WINDOW FROM ATMOSPHERE PARAMETERS ABOVE SEA SURFACE

MO QINSHENG

*(Institute of Fisheries Machinery and Instrument, Chinese Academy of Fisheries Science)*

### ABSTRACT

In 8-13  $\mu\text{m}$  atmosphere infrared window, the atmosphere transmissivity ( $\tau_o$ ) is dependent upon the total moisture content of atmosphere air column ( $W$ ). A linear equation for approximate calculation of  $W$  from the atmosphere moisture pressure above sea surface ( $e_D$ ) and a calculative equation for  $\tau_o$  from  $W$  are presented. Combining the two equations,  $\tau_o$  in infrared window can be calculated conveniently and directly from the measured values of atmosphere parameters above sea surface.