

# 定量遥感地表净辐射通量所需大气 下行长波辐射估算模型改进

黄妙芬<sup>1,2</sup>, 邢旭峰<sup>1</sup>, 朱启疆<sup>2</sup>, 刘素红<sup>2</sup>

(1 大连水产学院海洋工程学院, 大连 116023; 2 北京师范大学地理学与遥感科学学院遥感与地理信息系统研究中心, 遥感科学国家重点实验室, 环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** 利用半湿润季风气候类型夏季近地层气象观测资料, 对得到广泛应用的十种晴天大气下行辐射估算模型和两种阴天大气下行辐射估算模型进行检验。指出其中 Iziomon (2003) 晴天大气下行辐射估算模型是半湿润季风气候类型夏季较适用的估算模型。然而, 在有云天空, Iziomon (2003) 阴天估算模型误差比较大。本文依据实测资料, 对 Iziomon (2003) 晴天大气下行辐射估算模型进行修正, 修正后的模型估算值与实测值非常接近。由于应用常规气象站的大气温湿度来估算大气下行辐射仅代表近地层大气对其的贡献, 不能反映整层大气的贡献, 尤其在近地层与高空大气的水汽状况不一致时, 上述模型将有较大的误差。为此本文结合 Iziomon (2003) 晴天模型中大气比辐射率的表达式, 提出了运用红外辐射计以 37° 高度角对天空的观测值, 来推算大气下行辐射的新方法。小汤山的试验数据表明, 新模型的反演精度优于上述传统模型。

**关键词:** 近地层大气温湿度; 红外辐射计; 37° 高度角; 大气下行长波辐射; 估算模型。

**文章编号:** 1000-0585 (2005) 05-0757-10

## 1 引言

大气下行长波辐射 (以下简称为大气下行辐射) 是地表辐射能量平衡的一个重要组成部分, 在气候变化、农业气象应用和地气交换等研究中起着重要的作用<sup>[1]</sup>, 也是用遥感方法估算地表净辐射通量和反演地表真实温度必须考虑的重要输入参数。由于地表强烈红外辐射的干扰, 目前用对地遥感方法还无法直接获取该参数, 只能借助其他方法估算或用地表对空辐射仪实测。从原理上讲, 利用相当复杂的辐射传输方程可获得精确的大气下行辐射, 但是解辐射传输方程需要大气温度、水汽和臭氧的垂直廓线、其他痕迹气体的信息, 以及云高、云量和云状等物理特性数据<sup>[2]</sup>。虽然这些信息可以通过无线探空获得, 但探空资料并不是随手可得的, 因此众多学者致力于采用气象站常规观测资料中的气温、气湿来推算大气下行辐射的参数化方法 (Angström, 1918; Brunt, 1932; Swinbank, 1963; Idso & Jackson, 1969; Brutsaert, 1975 & 1982; Idso, 1981; Prata, 1996; Niemelä et al., 2001; Iziomon et al., 2003)<sup>[3-12]</sup>, 也有的学者运用计算机模拟方法 (陈良富等, 1999)<sup>[13]</sup>。

收稿日期: 2005-03-05; 修订日期: 2005-06-30

基金项目: 国家自然科学基金 (40271081)、北京市自然科学基金重点基金 (4051003) 和国家重点基础研究发展规划项目“973计划”(G20000779) 资助

作者简介: 黄妙芬 (1963-), 广东汕头人, 副研究员, 博士。主要从事地图学与地理信息系统研究。

现有大气下行辐射参数化方法大多数是依据实测值建立的经验关系模型, 这些模型有的以辐射传输理论为基础, 也有的是纯经验关系式, 但是参数的获取都强烈依据于研究区域。大量的对比分析表明 (Culf et al, 1993; Prata et al, 1996; Niemellä et al, 2001; Iziomon et al, 2003)<sup>[14,10~12]</sup>, 这些模型在应用于其他区域时, 如果研究区域的环境条件与经验关系式建立时的地域相近时, 模型的估算精度较高。不过大部分模型往往还需要根据实际情况来调整参数, 因而至今没有一种通用的利用常规气象观测资料来推算大气下行辐射的参数化模型。在国内, 关于大气下行辐射的研究鲜见报道。本文的目的之一是应用北京小汤山地区的观测数据来评价现有大气下行辐射估算模型在半湿润季风气候类型下的适用性。

利用近地层气温、气湿测量值来估算大气下行辐射是一种易操作和参数获取简单易行的方法。不过近地层气温、气湿仅反映了近地层大气对大气下行辐射的贡献, 不能反映整层大气的贡献, 因而需要寻找一种能够真实地反映整层大气对大气下行辐射贡献的方法, 而在这方面的研究至今仍然是空白。红外辐射计是目前惟一可直接地对空测量天空辐射的仪器<sup>[15]</sup>, 能较好地反映整层大气对大气下行辐射的贡献。能否充分利用红外辐射计对天空的辐射观测值来估算大气下行辐射呢? 这是本文新的研究目标。在试验基础上, 利用红外辐射计观测值建立估算大气下行辐射的新模型, 以求更准确地反映整层大气的贡献。

## 2 试验概况

### 2.1 试验地点

本研究试验场设在北京小汤山国家精准农业示范基地 (40°10'N~40°12'N, 116°26'E~116°28'E, 海拔高度 40 米)。该试验场属半湿润季风气候, 春天干旱多风, 夏季炎热多雨, 秋季晴朗少雨, 冬季寒冷干燥。年平均气温 11.8 左右, 地面温度 14.5 左右。平均年降水量 600mm, 雨水集中在 7、8 两月。盛行风向冬季为西北风, 夏季为东南风。试验时间为 2004 年 6 月 1 日~7 月 6 日。

### 2.2 仪器

试验中使用德国生产的雷泰低温型红外辐射计 (Taytek MX4™ TD, Raytek Corporation, Berlin, Germany)。天空温度分东南西北四个方位观测, 每个方位观测高度角包括 90°、75°、45°和 37°。在南北两块地的中心位置各安置了一台自动气象站, 本文使用的是北边自动气象站的观测资料, 包括温湿度资料 (探头型号 HMP45C-L, 安装高度为 1.5 米) 和一台净辐射 (复合) 表 (CNR-1, Kipp & Zone Net Radiometer, USA, 安装高度 1.5 米)。

## 3 物理背景

### 3.1 大气下行辐射计算原理

如果忽略天空短波散射作用, 那么大气下行辐射的总强度一般可以视作是来自一个半球方向的大气热辐射之积分, 因而可用如下公式表示<sup>[16]</sup>:

$$R_{ld} = 2 \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} B(T_z) \frac{\partial(\epsilon, z, 0)}{\partial z} \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (1)$$

式中,  $\theta$  为大气下行辐射的方向, 即天顶角;  $z$  为地球大气顶端高程,  $(\theta, \phi, z, 0)$  为从高程  $z$  到地面的大气向下透射率; 由公式 (1) 可见, 大气下行辐射的求解取决于大气

各层高度的温度、透过率和下行辐射方向。假定大气透过率与角度无关, 只与高程有关, 把中值定律应用到公式 (1) 中, 我们得到

$$R_{ld} = 2 \int_0^{\pi/2} (1 - \tau_a) B(T_a) \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (2)$$

到达地面的大气下行辐射主要来自水平距离为几十公里 (一般为 25km) 的半球天空, 对  $R_{ld}$  的确定起最主要作用的水汽, 其次是  $\text{CO}_2$ , 而  $\text{O}_3$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和 CFCs 作用相比较小, 在大气窗口, 气溶胶的作用可以忽略。

如果把大气看成是一个灰体的话, 那么大气下行长波辐射  $R_{ld}$  ( $\text{Wm}^{-2}$ ) 可利用大气有效发射率  $\epsilon_{atm}$  (无量纲) 和大气有效温度  $T_{atm}$  (K), 再根据斯蒂芬 - 波尔兹曼定律来确定, 即:

$$R_{ld} = \epsilon_{atm} T_{atm}^4 \quad (3)$$

式中,  $\sigma$  是斯蒂芬 - 波尔兹曼常数 ( $5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2} \text{K}^4$ )。由于确定垂直大气柱的  $\epsilon_{atm}$  和  $T_{atm}$  比较困难, 因而众多的学者提出了形式各异的利用百叶箱大气温湿度测量值来估算大气下行辐射  $R_{ld}$  的简化的参数化方法。自从 Angström 1918 年<sup>[3]</sup> 首次提出晴天大气下行辐射与水汽压的经验关系式以来, 经过了近一个世纪的发展, 建立了很多的计算大气下行辐射的参数化方程。

### 3.2 红外辐射计测量天空辐射原理

天空某一部分对地面某物的辐射照度是该部分与被测物连线方向上所有大气的散射、发射辐射的积分, 因而红外辐射计测量到的天空辐射照度是红外辐射计视场角范围内所有大气的散射、发射辐射的积分。显然, 距离红外辐射计越近的大气贡献就越大。由于积分路径是随着该部分相对被测物体的角度不同而变化的, 即使是无云的晴天, 天空的出射辐射度也是非常不均匀, 因而大气下行辐射的测量有一定的困难。

用窄视场的红外辐射计对天空不同方位角, 不同高度角进行测量, 再进行加权平均, 可以作为一种测量方法。

如果忽略天空温度在方位角上的变化, 也就是仅随着高度角而变化, 则可以用任意一个方位角作 0 到 90° 积分, 所得值除以高度角的积分, 即<sup>[15]</sup>:

$$\bar{E} = \frac{\int_0^{\pi/2} E_e(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta} \quad (4)$$

近似可用下式表示:

$$\bar{E} = \frac{\sum E_e(\theta) \sin \theta \cos \theta}{\sum \sin \theta \cos \theta} \quad (5)$$

上式是天空各部分的加权平均。 $\sin \theta \cos \theta$  是加权因子,  $\theta$  是观测高度角。

## 4 参数化模型介绍

纵观一个世纪以来建立的各种利用近地层大气温湿度观测值来估算大气下行辐射的模型, 其基本形式都是  $R_{ld} = \epsilon_0 T_0^4$  ( $T_0$  为近地层大气温度 (K)), 只是式中大气发射率  $\epsilon_0$  的表示形式不同而已。 $\epsilon_0$  的表示形式大体可以归结为三种, 其一是仅为近地层大气温度的函数, 其二是仅为近地层水汽压的函数, 其三是同时为近地层大气温度和水汽压的函数。相应的模型也主要分为两种情况, 一种是晴天参数化模型, 另一种是阴天参数化模型。

4.1 晴天参数化模型

表 1 列出了本文选用的近一个世纪来利用百叶箱大气温湿度估算晴天大气下行辐射的 10 种参数化模型。

由于这些模型的参数都是针对不同的天气类型和大气性质而建立的，属于经验参数，目前没有一种模型是通用的。

4.2 各种天空状况大气下行辐射模型

天空有云时，长波辐射会增强，地面长波辐射计测量到的大气下行辐射还包括云对地面长波辐射的反射，以及云本身的辐射，测量值会明显高于晴空模型估算值，因而在估算模型中必须加入云状况的修正。云的修正包括对云量、云状和云高度的修正。由于云状和云高度的定量化比较困难，因而目前主要是利用云量进行修正。表 2 列出了本文采用的两种云量修正模型的表达式。

表 1 10 种得到广泛应用的晴天大气下行辐射估算模型

Tab 1 Definition of existing models of estimating downward atmospheric longwave irradiance under clear skies

作者	表示形式
Angström(1918)	$R_{ld} = T_0^4 (a - b \times 10^{-a_0})$ $a = 0.82, b = 0.25, c = 0.168 \text{ hPa}^{-1}$
Brunt(1932)	$R_{ld} = T_0^4 (a + be_0^{\frac{1}{2}})$ $a = 0.55, b = 0.065 \text{ hPa}^{-1/2}$
Swinbank1(1963)	$R_{ld} = aT_0^6$ $a = 5.3 \times 10^{-13} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-6}$
Swinbank2(1963)	$R_{ld} = aT_0^4 - b$ $a = 1.195, b = 171 \text{ Wm}^{-2}$
Idso & Jackson(1969)	$R_{ld} = T_0^4 (1 - a \exp(-b(273 - T_0)^2))$ $a = 0.261, b = 0.000777 \text{ K}^{-2}$
Brutsaert1(1975)	$R_{ld} = a(\frac{e_0}{T_0})^{1/7} T_0^4$ $a = 1.24$
Idso(1981)	$R_{ld} = [a + be_0 \exp(\frac{1500}{T_0})] T_0^4$ $a = 0.7, b = 5.95 \times 10^{-5}$
Brutsaert2(1982)	$R_{ld} = ae_0^{\frac{1}{4}} T_0^4$ $a = 0.552$
Prata(1996)	$R_{ld} = [1 - (1 + w) \exp(-(a + bw)^{1/2})] T_0^4$ $a = 1.2, b = 3.0, w = 46.5(\frac{e_0}{T_0}) [cm]$
Iziomon et al(2003)	$R_{ld} = [1 - a \exp(-b\frac{e_0}{T_0})] T_0^4$ $a = 0.35, b = 10.0 \text{ KhPa}^{-1}$

注:表中  $R_{ld}$  是大气下行辐射通量 ( $\text{Wm}^{-2}$ ),  $T_0$  是百叶箱中大气温度 (K),  $e_0$  是百叶箱中水汽压 (hPa)。

表 2 云量修正大气下行辐射估算模型

Tab. 2 Definition of existing models of estimating downward atmospheric longwave irradiance under cloud skies

作者	表示形式
Jacobs(1978) <sup>[17]</sup>	$R_{ld,all} = (1 + 0.26c) R_{ld,clr}$
Iziomon et al(2003)	$R_{ld,all} = (1 + 0.0035c^2) R_{ld,clr}$

注:  $R_{ld,all}$  为各种天空状况的大气下行辐射 ( $\text{Wm}^{-2}$ ),  $R_{ld,clr}$  为晴天大气下行辐射 ( $\text{Wm}^{-2}$ ),  $R_{ld,s}$  为地表向上发射的长波辐射 ( $\text{Wm}^{-2}$ ),  $c$  为云量,在 Jacobs(1978) 模型中采用十分制,在 Iziomon et al(2003) 模型中用八分制。

5 现有大气下行辐射模型的分析与评价

5.1 模型评价指标

利用常用的模型性能检验方法 (平均误差、平均绝对误差、均方差、一致性指数和线性相关系数等统计量) 进行比较和评价。由于遥感信息源是瞬时值, 因而为了使得估算的

大气下行辐射值在时间上能和遥感时间对应上，比较的资料采用 10 分钟平均值。平均绝对误差（MAE: Mean Absolute Error ( $\text{Wm}^{-2}$ )), 均方差（RMSE: Root Mean Square Error ( $\text{Wm}^{-2}$ )), 一致性指数（IA: Index of Agreement）和线性相关系数（LCC: Linear Correlation Coefficient）分别用下面的公式计算：

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \tag{6}$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}}{n} \tag{7}$$

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \tag{8}$$

$$LCC = \frac{\sum_{i=1}^n ((P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))}{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2]^{\frac{1}{2}}} \tag{9}$$

式中， $P_i$  为模型估算值， $O_i$  为实测值， $\bar{O}$  为实测值的平均值， $n$  为样本数。

5. 2 晴天参数化模型性能分析

根据 5. 1 给出的模型性能评价指标，结合实际观测的大气温湿度资料（2400 个样本）对表 1 列举的 10 种模型进行计算，计算结果见表 3。

表 3 晴天 10 种模型误差值

Tab 3 Errors associated with estimates under clear skies

序号	模型名称	MAE	RMSE	IA	LCC
1	Angström (1918)	12. 96	14. 48	0. 77	0. 62
2	Brunt (1932)	8. 86	10. 88	0. 83	0. 71
3	Swinbank1 (1963)	31. 49	33. 02	0. 52	0. 46
4	Swinbank2 (1963)	21. 31	23. 18	0. 66	0. 57
5	Idso &Jackson (1969)	<b>37. 17</b>	<b>38. 62</b>	<b>0. 46</b>	<b>0. 42</b>
6	Brutsaert1 (1975)	9. 62	11. 41	0. 82	0. 68
7	Brutsaert2 (1975)	12. 25	13. 59	0. 77	0. 61
8	Idso (1981)	19. 52	21. 31	0. 59	0. 34
9	Prata (1996)	9. 82	11. 38	0. 82	0. 68
10	Iziomon et al (2003)	<b>5. 27</b>	<b>6. 34</b>	<b>0. 93</b>	<b>0. 92</b>

由表 3 可看到，Iziomon (2003) 模型具有最小的平均绝对误差和均方差，具有最大的一致性指数 IA 和线性相关系数 LCC；其次是 Brunt (1932)。Idso &Jackson (1969) 具有最大的平均绝对误差和均方差，具有最小的一致性指数 IA 和线性相关系数 LCC，其次是 Swinbank1 (1963)，再次是 Swinbank2 (1963)。这三种模型都仅与温度有关，即将大气湿度的影响隐含在大气温度的中，显然这种用大气温度隐含大气湿度的方法会造成较大的估算误差。

Iziomon (2003) 模型中大气比辐射率的形式为：

$$1 - a \exp(-b \frac{e_a}{T_0}) \tag{10}$$

表明大气比辐射率取决于大气温度和湿度。水汽含量越多，大气的发射率越强，大气温度越高大气的相对湿度越低，大气的发射率也越低。即大气发射率主要取决于大气相对

湿度，而不是大气的绝对湿度。显然 Iziomon 模型中的大气比辐射率表达式能反映实际情况，而且具有物理意义。因而公式（10）作为半湿润季风气候类型夏季大气比辐射率的计算公式是合理的。

5.3 各种天空状况参数化模型性能分析

利用 Iziomon et al（2003）晴天模型对各种天空状况的大气下行辐射进行估算，结果发现在有云情况下，用晴天模型估算的大气下行辐射值小于实际观测值（见图 1）。主要原因是云的存在增加了大气的辐射能力，而且云的存在会反射一部分地表的长波辐射，很显然在有云的情况下必须对估算模型进行云量修正。

根据 5.1 给出的模型性能评价指标，结合 2880 个实测大气温湿度观测样本对表 2 列举的两种模型进行计算，计算结果见表 4。图 2 显示了用 Jacobs 和 Iziomon et al 模型估算值与实测值的散点图。

表 4 各种天空状况模型误差值（2880 个样本）

Tab 4 Errors associated with estimates under cloudy skies

序号	模型名称	MAE	RMSE	IA	LCC
1	Jacobs (1978)	29.99	26.02	0.65	0.53
2	Iziomon et al (2003)	17.87	49.49	0.72	0.59
3	Iziomon et al 修正式	3.67	2.78	0.98	0.97

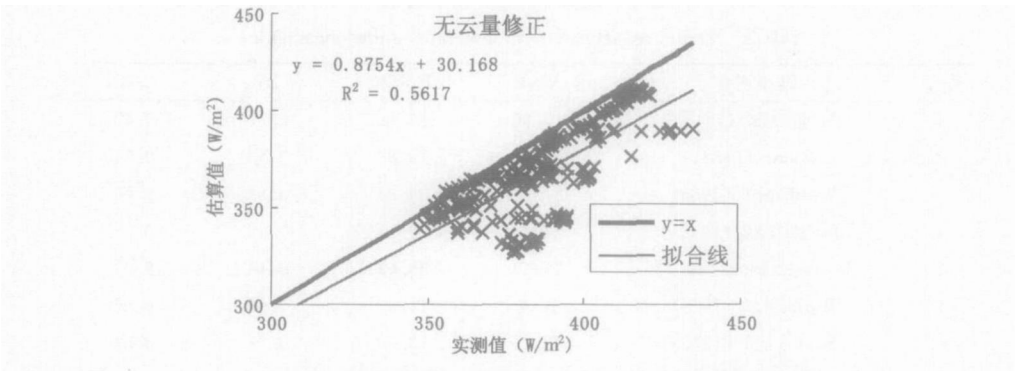


图 1 用晴天模型估算有云天空大气下行辐射与实测值的散点图

Fig 1 Downward longwave ally-sky irradiance estimated from clear-sky models versus measured irradiance

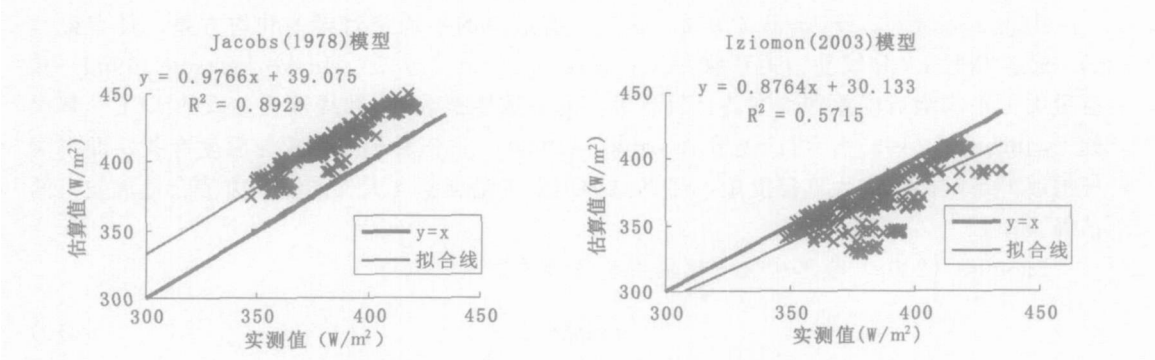


图 2 两种云量校正模型估算值与实测值的散点图

Fig 2 Downward longwave ally-sky irradiance estimated from Table 2 models versus measured irradiance

由图 2 可见, Jacobs 模型高估了大气下行辐射, Iziomon et al 模型低估了大气下行辐射, 由表 4 可见, 两种模型的平均绝对误差 MAE 和均方差 RMSE 都非常高, 一致性指数 IA 和相关系数 LCC 都较低, 因而需要对参数进行修正。考虑到晴天 Iziomon et al 模型在本区域有较高的性能指标, 为了保持一致性, 我们选用 Iziomon et al 有云估算模型进行修正。Iziomon 参数化地点是在德国的莱茵河平原地区, 该地的大气下行辐射平均在  $322 \text{ Wm}^{-2}$ 。而本研究区域(小汤山)平均在  $378 \text{ Wm}^{-2}$ , 显然参数偏低。利用 2880 个实测样本值, 我们对参数进行了拟合修正, 得到适合本研究区域的新的各种天空状况的参数化模型:

$$R_{ld,dl} = (1 + 0.18c^2) R_{ld,dr} \quad (11)$$

式中,  $R_{ld,dl}$  为各种天空状况的大气下行辐射 ( $\text{Wm}^{-2}$ ),  $R_{ld,dr}$  为晴天大气下行辐射 ( $\text{Wm}^{-2}$ ), 云量  $c$  用十分制。如果是碧空,  $c = 0$ , 则  $R_{ld,dl} = R_{ld,dr}$ , 如果阴天  $c = 1$ , 天空的云增加了大气下行辐射, 那么有云天空的估算值高于晴天情况。根据公式 (11), 有云天空估算的大气下行辐射在晴天的基础上增加了 18%, 利用实测数据我们也证明了这一点。因而公式 (11) 的估算值较好的反映了本研究区域有云情况下大气下行辐射的估算值。

从表 4 可看到, 经过修正后的各种天气状况大气下行辐射估算模型, 其各项性能指标明显高于其他模型, 平均绝对误差 MAE 和均方差 RMSE 分别为 3.67 和 2.78, 一致性指数 IA 和一致性指数 LCC 极高, 分别达到 0.98 和 0.97。从图 3 可看到, 修正后的模型估算值与实测值的差值接近 0。

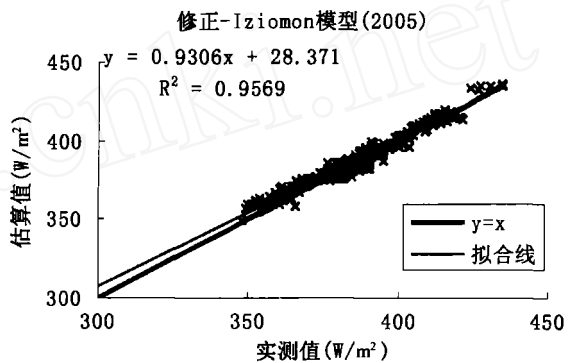


图 3 修正模型估算值与实测值的散点图

Fig. 3 Downward longwave ally-sky irradiance estimated from modified models versus measured irradiance

## 6 建立红外辐射计天空 37° 高度角观测值估算大气下行辐射模型

如果在天空情况较均匀时, 例如碧空无云, 大雾及阴天, 可用天空某角度的测量值代替加权平均值。这是因为从高度角 0 到 90°, 以一个窄视场角的红外辐射计所测得的大气圆柱体的红外辐射贡献是逐渐过渡性变化的, 其中必然能够找到一个能代表平均值的角度<sup>[14]</sup>。Chen et al. (1989) 和 Elsassar et al (1942)<sup>[18,19]</sup> 的实验表明, 在高度角为 37° 的天空温度具有较好的代表性。另外通过对大气下行辐射传输方程应用中值定律积分结果表明, 在天空均匀(比如万里无云或是阴天)情况下, 37° 是一个中值, 可以很好地反映整个天空的状况, 加上只有一个观测角度, 因而操作方便, 易于实现。目前惟一有两个热红外观测角度的卫星 ASTR (欧空局), 其中一个角度就是 37°。显然选择 37° 观测角度测量值来建立估算大气下行辐射模型具有推广应用的价值。因而本文选择红外辐射计 37° 天空辐射观测值作为基础研究数据, 研究在碧空仅用 37° 观测值来估算大气下行辐射的模型。

表 5 给出了利用北京小汤山地区晴天下红外辐射计以 37° 高度角对天空的观测值与仪器实测值进行比对的结果(部分样本)。

从比较的结果可看出，多角度和 37°高度角天空辐射观测值都远远低于仪器实测值，平均低  $150\text{Wm}^{-2}$  以上。由于红外辐射计是一种窄视场角（6°）和窄波段（8~14μm）的测量仪器，其观测值受到观测角度和观测波段的影响，故造成差值主要有两个方面原因：一个是角度的影响，另一个是波长范围的影响。

显然，37°观测值不再是角度的函数，而只是波长的函数。红外辐射计滤光波段为 8~14μm，在 8~14μm 大气窗口，没有水汽和 CO<sub>2</sub> 吸收带，只有一个 O<sub>3</sub> 吸收带，因而波长为 8~14μm 的红外辐射计主要是大气分子的辐射值，这种辐射值没有受到水汽的吸收。全波段与 8~14μm 的主要差值就是 8~14μm 之外的大气辐射值，水汽在这部分波段中有两个吸收带，CO<sub>2</sub> 有一个吸收带，CO<sub>2</sub> 的含量相对稳定，因而对这部分辐射影响主要就是水汽含量和大气温度。

根据上述分析知，37°测量值扩展到宽波段需要加一个修正项，即： $T_{37}^4 + \text{修正项}$ 。显然该修正项是 8~14μm 之外的考虑大气比辐射率的大气辐射。于是，我们提出了 37°测量值扩展到宽波段值的估算大气下行辐射模型为：

$$R_{ld} = T_{37}^4 + (1 - \exp(-be_0/T_0))(T_0^4 - T_{37}^4) \tag{12}$$

并利用 75 组实测数据对（12）式中的参数进行了拟合，得到  $a = 0.75$ ， $b = 10$ 。将公式（12）变形为

$$R_{ld} = (1 - \exp(-be_0/T_0))T_0^4 + \exp(-be_0/T_0)T_{37}^4 \tag{13}$$

上式右边的第一项是近地层大气对大气下行辐射的贡献，第二项是考虑近地层以上部分天空的贡献。

利用 5.1 模型评价指标，计算 37°高度角测量值估算大气下行辐射模型的各项指标，MAE、RMSE、IA 和 LCC 的计算结果分别为 -0.667、5.0、6.28、0.94 和 0.93，而单纯用大气温湿估算大气下行辐射的 Iziomon 晴天模型这些参数分别为 5.27、6.34、0.93 和 0.92（见表 3），显然 37°模型性能明显优于 Iziomon 晴天模型。

6 结束语

通过对现有的 10 种晴天大气下行辐射估算模型和两种有云大气下行辐射估算模型，利用常用的模型性能检验方法（平均误差、平均绝对误差、均方差、一致性指数和线性相关系数等统计量），结合 2004 年北京小汤山的大气辐射实际观测值和 1.5 米自动气象站实测水汽压及大气温度进行评价，结果表明，（1）Iziomon 晴天大气下行辐射估算模型具有最小的平均误差、平均绝对误差、均方差和最大的一致性指数和线性相关系数，是半湿润季风气候类型夏季晴天估算大气下行辐射的最适用性模型；（2）在有云天空，Jacobs 和 Iziomon 多云大气下行辐射估算模型的误差都比较大，本文根据实测资料，对 Iziomon 模型进行了修正，提出了修正后的半湿润季风气候类型夏季有云天气状况下的大气下行辐射

表 5 晴天大气下行辐射比较（部分样本）（单位： $\text{Wm}^{-2}$ ）

Tab 5 Comparison of downward longwave clear-sky irradiance estimated by 37°with measured irradiance

观测日期	观测时间	A	B	A - B
2004/7/5	10 00	367.7	227.8	-139.9
	16 47	376.4	209.3	-167.1
2004/7/6	10 10	378.2	226.7	-151.5
	10 46	383.5	228.1	-155.4
	11 20	387.3	238.1	-149.2
	16 21	392.7	235.7	-157
	16 56	390.8	238.7	-152.1

注：A：实测值；B：37°计算值



## 估算模型。

近地层大气温湿度仅代表了近地层对大气辐射的贡献,不能反映整层大气的贡献。天空红外辐射计观测值可以反映出整层大气的贡献,在晴天,37°高度角天空红外辐射计观测值可以代替半球方向加权平均值。另外考虑到红外辐射计的波长范围是8~14 $\mu\text{m}$ ,因而在波段上不能反映出全波段范围的大气下行辐射,通过将 Iziomon 模型中大气比辐射率的表达式与37°天空红外辐射计观测值计算的辐射值结合起来,首次提出晴天下利用37°高度角天空红外辐射计观测的温度值来推算大气下行辐射方法。该模型的优点在于利用37°高度角天空红外辐射计观测值考虑了整层大气对大气下行辐射的贡献。模型的性能指标也表明,其性能优于传统模型,但是模型的应用推广需要进一步的试验支持。

本文的创新点在于(1)对半湿润季风气候类型夏季晴天和阴天大气下行辐射估算模型进行了适用性分析,获取了适用于半湿润季风气候类型夏季精度较高的利用常规气象要素进行估算的参数化模型;(2)首次提出了运用红外辐射计以37°高度角对天空的观测值,来推算大气下行辐射方法。根据小汤山的试验表明,模型的反演精度优于上述传统模型。

致谢:感谢北京师范大学地理学与遥感科学学院遥感中心所有参加实验的同学。

## 参考文献:

- [1] 龚道武,王绍武. 大气环流因子对北半球气候变化影响的研究. 地理研究,1999,18(1):31~38.
- [2] 陈明荣. 青藏高原夏季地面有效辐射随高度变化. 地理研究,1985,4(4):39~46.
- [3] Angström A. A study of the radiation of the atmosphere. Smithsonian Institution Miscellaneous Collections, 1918, 65:159~161.
- [4] Brunt D. Notes on radiation in the atmosphere. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1932,58:389~418.
- [5] Swinbank W C. Long-wave radiation from clear skies. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1963,89:339~348.
- [6] Idso S B, Jackson R D. Thermal radiation from the atmosphere. Journal of Geophysical Research, 1969,74:5397~5403.
- [7] Brutsaert W. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. Water Resources Research, 1975, 11:742~744.
- [8] Brutsaert W. Evaporation into the Atmosphere. Netherlands: D. Reidel Publishing Company, 1982. 139~140.
- [9] Idso S B. A set of equations for full spectrum and 8- to 14- $\mu\text{m}$  and 10.5- to 12.5 $\mu\text{m}$  thermal radiation from cloudless skies. Water Resour. Res., 1981, 17:295~304.
- [10] Prata A J. A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1996, 122: 1127~1151.
- [11] Sami Niemellä, Petri Raisanen, Hannu Savijärvi. Comparison of surface radiative flux parameterizations Part I: Longwave radiation. Atmospheric Research, 2001, 58: 1~18.
- [12] Iziomon M G, Mayer H, Matzarakis A. Downward atmospheric longwave irradiance under clear and cloudy skies: Measurement and parameterization. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2003, 65: 1107~1116.
- [13] 陈良富,徐希孺. 热红外遥感中大气下行辐射效应的一种近似计算与误差估计. 遥感学报, 1999, 3(3):165~170.
- [14] Culf A D, Gash J H C. Longwave radiation from clear skies in Niger: a comparison of observations with simple formulas. J. Appl. Meteorol, 1993,32, 539~547.
- [15] 张仁华. 实验遥感模型及地面基础. 北京:科学出版社,1996. 84~102,12~16,81~83,84~102.
- [16] França GB, Cracknell A P. Retrieval of land and sea surface temperature using NOAA-11 AVHRR data in north-eastern Brazil. International Journal of Remote Sensing, 1994,15: 1695~1712.

- [17] Jacobs J D. Radiation climate of Broughton Island. Energy budget studies in relation to fast-ice breakup processes in Davis Strait. Occas. Pap., Inst. of Arctic and Alp Res., University of Colorado, Boulder, United States, 1978, 26:105 ~ 120.
- [18] Chen Jingming, Zhang Renhua. Studies on the measurement of crop emissivity and sky temperature. Agricultural and Forest Meteorology, 1989, 49:335 ~ 337.
- [19] Elsasser W M. Heat transfer by infrared radiation in the atmosphere. Harvard Meteorological Studies, 1942, 6:107.

## Improvement of models for the estimation of downward atmospheric long-wave radiation for retrieving net radiation fluxes based on remote sensing

HUANG Miao-fen<sup>1,2</sup>, XING Xu-feng<sup>1</sup>, ZHU Qi-jiang<sup>2</sup>, LIU Su-hong<sup>2</sup>

(1. School of Marine Engineering, Dalian Fisheries University, Dalian 116023, China;

2. Research Center for Remote Sensing and GIS, School of Geography, Beijing Normal University;  
State Key Laboratory of Remote Sensing Science; Beijing Key Laboratory for  
Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing 100875, China)

**Abstract:** With the measurement data of the downward atmospheric radiation and the air temperature and humidity of the surface layer in 2004 in the Xiaotangshan region of Beijing, the verification was done by making use of the widely-used downward atmospheric radiation model, including ten models for cloud-free days: Angström(1918), Brunt(1932), Swinbank1(1963), Idso & Jackson(1969), Swinbank2(1963), Brutsaert1(1975), Brutsaert2(1982), Idso(1981), Prata(1996), Iziomon et al. (2003), and two models for cloudy days: Jacobs(1978) and Iziomon(2003). The results show: (1) for cloud-free days, Iziomon(2003)'s model has a good performance and can be used directly for the area; and (2) for cloudy days, the two models, Jacobs(1978) and Iziomon(2003), have relative large errors. With measured data, this paper puts forward a modified downward atmospheric radiation assessment model based on Iziomon(2003)'s model and the measurement information. A better match between the estimation value and the actual measured value is achieved.

The application of the data about the air temperature and humidity from the regular weather stations only represents the contribution of the surface layer which could not reflect the effect given by the whole atmosphere to the downward atmospheric radiation, so there will be errors if the water vapor situation is different from the surface layer and the upper layer. The basic idea of the modified model is to calculate the downward atmospheric radiation with an expression of the atmospheric emissivity in Iziomon's model by making use of the observation value from the thermal infrared thermometer with an angle of  $37^\circ$ .

**Key words:** air temperature and humidity of the surface layer; thermal infrared thermometers; the elevation of  $37^\circ$ ; downward atmospheric long-wave radiation; estimating models