

# 中国可能太阳直接辐射的气候计算 及其分布特征

翁笃鸣 孙治安\*

## 提 要

本文利用以乌克兰英采夫(Украинцев)法确定的可能太阳直接辐射日平均通量密度资料,着重分析了关于使用以卡斯特洛夫(Кастров)公式为基础的理论方法的有关问题,并研究用迭代法求解的卡斯特洛夫系数的变化特征;寻找其与水汽压的经验关系;检验其对理论式的灵敏度和反演误差。证实利用地面水汽压资料可相当精确地计算出各地的可能太阳直接辐射日平均通量密度。在此基础上详细地讨论了可能太阳直接辐射的时空分布特点。

可能太阳直接辐射是可能太阳总辐射的主要组成部分,在辐射气候计算中它可作为起始数据用来计算实际条件下的太阳直接辐射。随着辐射气候研究和太阳能资源开发利用工作的发展,研究可能太阳直接辐射的气候计算和时空分布特征显得日趋重要。在国外,早在30年代就开始进行了这方面的研究<sup>[1,2]</sup>,提出了多种气候计算方法。在我国有关这方面的工作做得还很少,因此开展对可能太阳辐射状况研究就很有必要。

本文着重分析关于使用以卡斯特洛夫公式为基础的理论方法的有关问题,并研究由迭代法求出的卡斯特洛夫系数与各影响因子的联系;寻找其与水汽压的经验式;检验其对理论计算公式的灵敏度和反演的误差大小;分析其地理分布特点。在此基础上还详细地讨论可能太阳直接辐射的时空分布规律。

本文所用资料包括全国72个日射站的日射和常规气象观测资料。

## 一、可能太阳直接辐射的理论计算式和 平均卡斯特洛夫系数的确定

在日射气候学中,有多种方法计算可能太阳直接辐射,其中以建立在卡斯特洛夫公式基础上的理论方法比较严谨,常用于某些理论和应用研究工作中<sup>[3]\*\*</sup>。卡斯特洛夫公

1985年12月15日收到,1986年6月25日收到修改稿

\* 本院气候专业1984届学生翟海民参加部分计算工作

\*\*李怀瑾,朱超群,水平面上日射强度确定法,气象科学,1980,1,2,87—103

式为

$$S_0' = \frac{I_0 \sinh h}{1 + cm} \quad (1)$$

式中  $S_0'$  为可能太阳直接辐射通量密度;  $I_0$  为太阳常数;  $h$  为太阳高度角;  $m$  为大气光学质量, 近似可取  $m = \frac{1}{\sinh}$ ;  $c$  即为卡斯特洛夫系数。据研究在一天过程中系数  $c$  的变化比较缓慢, 认为当  $m < 3$  时,  $c$  随  $m$  的变化是不大的<sup>[1]</sup>。如不考虑  $c$  随  $m$  的变化, 或更严格地说以某种平均的  $c$  值代入(1)式, 则计算太阳直接辐射的日平均通量密度是比较简单的, 有

$$\bar{S}_0' = \frac{1}{T} \int_{-t_0}^{t_0} \frac{I_0 \sinh h}{1 + cm} dt \quad (2)$$

这里  $T$  为全天时数(1440分),  $t_0$  为日出日落时刻。把时间  $t$  换成时角  $\omega$  后, (2)式可改写成

$$\begin{aligned} \bar{S}_0' &= \frac{I_0}{\pi} \int_0^{\omega_0} \left( \sinh h - \frac{c \sinh h}{c + \sinh h} \right) d\omega \\ &= \frac{I_0}{\pi} \int_0^{\omega_0} \left( A - c + B \cos \omega + \frac{c^2}{c + A + B \cos \omega} \right) d\omega \quad (3) \end{aligned}$$

式中  $A = \sin \varphi \sin \delta$ ;  $B = \cos \varphi \cos \delta$ ;  $\omega_0 = \arccos(-\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta)$ , 最终可得到计算任一日可能太阳直接辐射的平均通量密度公式为

$$\begin{aligned} \bar{S}_0' &= \frac{I_0}{\pi} \left[ (A - c) \omega_0 + B \sin \omega_0 + \frac{2c^2}{\sqrt{(A + c)^2 - B^2}} \right. \\ &\quad \left. \times \arctg \left( \sqrt{\frac{c + A - B}{c + A + B}} \operatorname{tg} \frac{\omega_0}{2} \right) \right] \\ &\quad \left( (A + c)^2 > B^2 \right) \\ \bar{S}_0' &= \frac{I_0}{\pi} \left[ (A - c) \omega_0 + B \sin \omega_0 + \frac{c^2}{\sqrt{B^2 - (A + c)^2}} \right. \\ &\quad \left. \times \ln \frac{\sqrt{B + (A + c)} + \sqrt{B - (A + c)} \operatorname{tg} \frac{\omega_0}{2}}{\sqrt{B + (A + c)} - \sqrt{B - (A + c)} \operatorname{tg} \frac{\omega_0}{2}} \right] \\ &\quad \left( (A + c)^2 < B^2 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

由此可见, 只要事先确定  $c$  值, 就能从理论上算出任一日的可能太阳直接辐射平均

通量密度。这是戈尔别林 (Гальперин, Б.М.) 在1949年最先导出的<sup>[4]</sup>。限于当时计算条件, 未能实际应用。现在由于电子计算机的普遍使用, 理论计算已变得比较容易了。

使用(4)式, 关键在于  $c$  值如何确定。通常的做法是由定时的日射观测资料中, 挑选日面无云的时次, 按(1)式确定相应的  $c$  值, 然后求取该月  $c$  值的多年平均值。可是,  $c$  值实际上是有日变化的<sup>[5]</sup>, 所以由此得到  $c$  的月平均值能否代表真正的月的日平均值, 以及由  $c$  值代入(4)式计算所得的可能太阳直接辐射日平均通量密度是否与实际情况相符, 至今还未验证过。我国目前还没有系统的  $c$  值资料, 当然也无法评定使用上述平均值是否恰当。

为了避免上述困难, 我们考虑先应用乌克兰英采夫法经验地确定出各日射站全年各月可能太阳直接辐射的日平均通量密度, 并以此为标准利用迭代法求出各站在全年各月的  $c$  值, 这就为进一步研究可能太阳直接辐射的计算方法及其分布特点提供重要基础。

## 二、平均卡斯特洛夫系数的若干基本特点

### (一) 卡斯特洛夫系数 $c$ 与水汽压的关系

卡斯特洛夫系数作为大气混浊度状况的一种特征量, 它的变化直接与大气中的水汽、气溶胶等含量的变化有关。为此, 我们首先分析了水汽压  $E$  对  $c$  值的影响问题, 图 1a 给出全国各站  $c$  值与水汽压  $E$  的关系。图上反映两者联系的总趋势是清楚的, 散布点的离散程度则显示了除水汽压外的其它因子的影响。这种现象如通过分别绘制不同区域(共分7个区域, 图 1b 上只绘出 4 个区域若干代表站资料)的相关图就能反映出来。

由于地面水汽压与大气柱中的水汽含量具有较严格的单值关系<sup>[6]</sup>, 所以图 1a、b 实质上是反映了系数  $c$  与大气含水量的关系。它表明随着地面水汽压的增加, 大气柱中的水汽含量增多, 大气混浊度增大,  $c$  值增大。但是, 正如图 1b 所反映的一样, 这种关系在很大程度上受到海拔高度以及其它因素(如大气气溶胶质粒含量)的影响, 一般在相同的水汽压  $E$  下, 海拔高度高的站点所对应的  $c$  值较小, 这对青藏高原各站是特别明显的。

根据图 1 特点, 在  $E$  的实际可能变化范围内, 大致可用经验式

$$c = a + b \ln E \quad (5)$$

来分区拟合。把全国划分7个区域, 所得各项参数和检验结果可见表 1。可以看出, 拟合

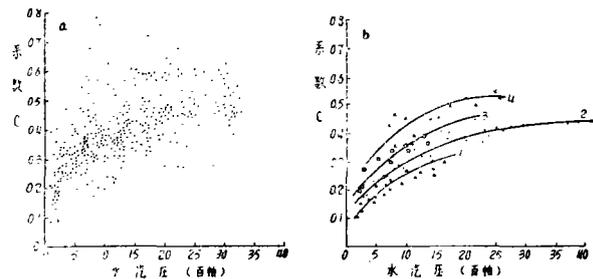


图 1 卡斯特洛夫系数  $c$  与水汽压  $E$  的关系

a—全国      b—四个区域分别绘制

1—青藏高原(拉萨、那曲)

2—华北、华中(北京、南京)

3—西北(乌鲁木齐)

4—西康(成都)

的效果还是可以的,除青藏高原各站拟合的平均相对误差略大外,其余各区的相对误差

表1 c与E的经验拟合结果

地 区	a	b	相 关 比	平均相对误差
青藏高原	0.124	0.061	0.779	0.192
东 北	0.223	0.041	0.612	0.150
西 北	0.168	0.068	0.718	0.137
华北、华中	0.181	0.081	0.688	0.129
华 南	0.215	0.078	0.434	0.122
西 南	0.043	0.128	0.672	0.132
四川盆地	0.458	0.042	0.300	0.060

都在15%以下,其中尤以比较湿润的地区(如四川盆地、华南等区)效果更佳。有了经验公式,就有可能根据各地区站点的水汽压资料估算相应的平均卡斯特洛夫系数,并计算出可能太阳直接辐射量。

应当指出,(5)式只是一种简单化处理,实际上的c值还与大气气溶胶等的影响有关,但在目前缺乏气溶胶资料的情况下,

该式仍有实用价值。

为了检验(5)式的实用性,我们进行了两方面的工作:一是针对哈尔滨、若羌、北京、南京、广州五个代表站的12月和6月条件对(4)式作了c值的灵敏度试验;二是在此基础上根据各日射站的各月实际水汽压资料计算出c值,并反演相应月份的可能太阳直接辐射日平均通量密度,最终检验其反演效果。

图2给出北京两个典型月(12月、6月)的c值灵敏度试验结果。图中横坐标代表c值的相对误差,纵坐标则为相应的可能太阳直接辐射日平均通量密度的相对误差。发现两者关系在冬、夏季节几乎完全一样,并明显地反映出近似线性的特点,有

$$\frac{\Delta S'_0}{S'_0} = a \frac{\Delta c}{c} \quad (6)$$

这里 $\Delta c$ 为确定c值的误差; $\Delta S'_0$ 为因 $\Delta c$ 所引起的可能太阳直接辐射的计算误差;a为比例系数,它的值对不同站点和月份有所变化,但变幅较小,在0.32—0.48间,平均可取0.40。这一结果意味着每

当确定c值的相对误差达到10%时,则由此可引起按(4)式计算可能太阳直接辐射日平均通量密度产生4.0%的误差。这一结论十分重要,它表明(4)式对c的变化的反映是不太灵敏的,从而使得较正确地计算可能太阳直接辐射日平均通量密度成为可能。

我们完成了对全国19个日射站可能太阳直接辐射各月、日平均通量密度的反演工作。反演的相对误差分布可见表2。图3给出各站由月平均水汽压E按(5)式计算c

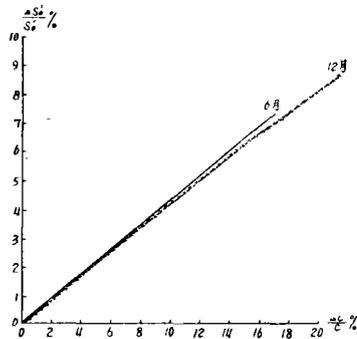


图2 c值对(4)式的灵敏度试验

表2 利用水汽压E反演可能太阳直接辐射日平均  
通量密度的相对误差分布

项 目	<5%	5—10%	10—15%	15—20%	>20%	总 和
频 数	132	68	20	4	4	228
百分比	57.9	29.8	8.7	1.8	1.8	100

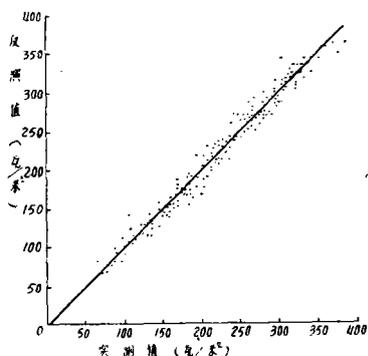


图3 可能太阳直接辐射日平均通量  
密度反演值与实测值的比较

再由(4)式反演的可能太阳直接辐射日平均通量密度与实测值之间的关系。结果是非常理想的，相关线大致与两坐标轴间的 $45^\circ$ 对角线重合，线性相关系数达0.981，回归方程为

$$S'_0 = 1.012 S''_0 - 1.42 \quad (7)$$

式中 $S'_0$ 和 $S''_0$ 分别为实测值和反演值。方程的平均相对误差为5.4%。

上述结论很有实际意义，它表明对于非日射观测站来说，先应用(5)式计算平均的卡斯特洛夫系数 $c$ ，然后按(4)式计算可能太阳直接辐射日平均通量密度的相对误差是不大的，这就为较精确地计算全国各地的可能太阳直接辐射，估算各地太阳能资源以及开展与此有关的其它各项科学研究工作创造了条件。

## (二)系数 $c$ 的时空分布特点

1.  $c$ 的地理分布 按(4)式迭代求取的卡斯特洛夫系数 $c$ 的物理意义是比较清楚的，它实质上是一种气候上的有关大气混浊度的特征量。分析它的地理分布不仅可用来内插，并以此用来推算各地的可能太阳直接辐射日平均通量密度，同时也可从中了解各地的大气混浊度状况。

图4a、b给出12月和6月平均的卡斯特洛夫系数 $c$ 的全国分布。可以看出 $c$ 值的分

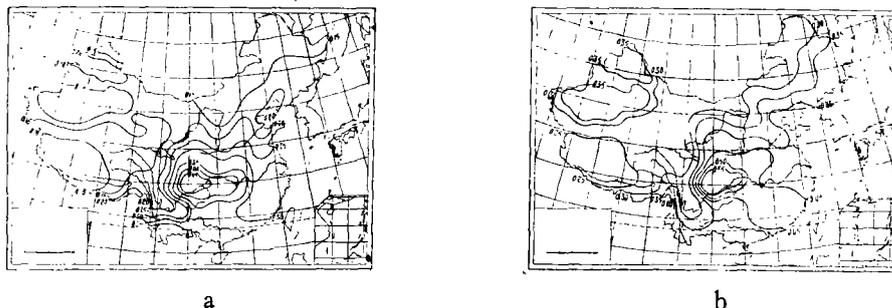


图4 卡斯特洛夫系数 $c$ 的全国分布  
a—12月；b—6月

布特点在冬夏两季是大体一致的，高中心出现在四川盆地，并由此向长江中下游和华南扩展。青藏高原是稳定的低中心。在华北和东北平原上，等值线一般呈东北—西南走

向,这在一定程度上反映出海洋的影响。西北干旱地区虽水汽压较低,但由于大气中尘埃含量较高,所以 $c$ 值相对于邻近高山区(包括高原)还比较大。随着季节转换, $c$ 的数值可发生较大幅度的变化,但高低中心结构和等值线的主要走向仍基本保持(图略)。

2.  $c$ 值的年变化  $c$ 值具有明显的年变化,一般都是夏季各月最大,冬季最小,这与我国各地水汽压的年变化是一致的。广州、成都的年变化曲线稍有不同,前者以春季月分出现最大,成都则以秋季为最大。显然上述特点与各地大气中的湿气溶胶质粒含量的年变化有关。

### 三、可能太阳直接辐射的时空分布

#### (一)可能太阳直接辐射随纬度和拔海高度的变化

可能太阳直接辐射日平均通量密度的变化,在很大程度上由拔海高度、纬度以及大气混浊度状况所决定,其中前两者的影响表现更有规律。纬度对可能太阳直接辐射日平均通量密度的影响可从(4)式 $A$ 、 $B$ 、 $\omega_0$ 等数值的变化中反映出来。因此,在不同季节由于 $A$ 、 $B$ 、 $\omega_0$ 随太阳赤纬 $\delta$ 变化结果,使得各地可能太阳直接辐射都发生相应的变化。为了分析这个问题,我们绘制了我国 $110^\circ E$ 以东地区可能太阳直接辐射日平均通量密度随纬度分布图(图5)。结果表明,在冬季(12月)和春季(3月)可能太阳直接辐射日平均通量密度都明显地随纬度增加而降低,但在夏季(6月)则相反。这

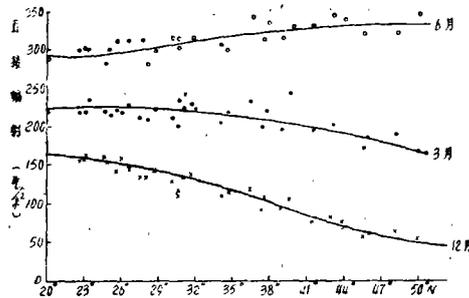


图5 我国 $110^\circ E$ 以东可能太阳直接辐射日平均通量密度随纬度分布

显然是天文因素影响的结果。其次,当然也与大气混浊度状况(系数 $c$ )由低纬向高纬减小有关。秋季(9月)的可能太阳直接辐射分布情况,基本上与春季相似(图略)。图中散布点的离散情况,则反映出除纬度以外的其它因子的影响。

可能太阳直接辐射随拔海高度的变化尤为显著。因为随着测点拔海高度的增加,大气柱厚度降低,致使大气中的空气质量、水汽和气溶胶质粒含量都显著减小,导致可能太阳直接辐射的加强。为了分析这个问题,我们绘制了各季代表月(12、3、6月,9月的曲线未绘出)太阳直接辐射日平均通量密度随拔海高度分布图(图6)。为了消除纬度影响,图上资料都已按图5关系订正至 $35^\circ N$ 。可以认为各季的分布曲线基本上是相似的,都呈现出可能太阳直接辐射随拔海高度增加而增大的规律。

图6展示了可能太阳直接辐射日平均通量密度随海拔高度变化的分布。横轴为海拔高度(千米),范围从0到50;纵轴为可能太阳直接辐射日平均通量密度(单位未明确),范围从0到400。图中包含三个数据系列，分别代表12月、3月和6月。所有三个系列均显示随着海拔高度的增加，辐射通量密度也随之增加，且6月的辐射通量密度最高，12月最低。

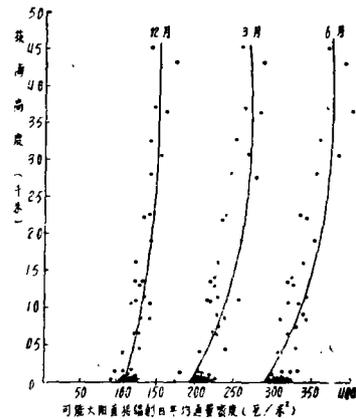


图6 可能太阳直接辐射日平均通量密度随海拔高度变化

上述规律可以用下列指数式描述

$$S'_h = S_0 - (S_0 - S'_0) e^{-\alpha H} \quad (8)$$

式中  $S'_h$ 、 $S'_0$  分别为各测点和海平面的实际可能太阳直接辐射日平均通量密度;  $S_0$  为大气外界的太阳辐射量;  $H$  为海拔高度(以千米表示),  $\alpha$  为经验系数。通过拟合得到各代表月的相应参数和拟合误差(表 3)。从检验效果看, (8) 式还是比较好的。根据(8)式

表 3 按(8)式拟合的各项经验参数和相对误差

月 份	$S_0$	$S'_0$	$\alpha$	线性化相 关系数	拟合的相对 误差(%)
12	195.4	109.1	0.20	-0.858	10.9
3	348.4	208.3	0.14	-0.828	9.4
6	487.2	310.5	0.12	-0.881	6.4
9	377.3	234.2	0.10	-0.812	7.1

可估计出可能太阳直接辐射日平均通量密度的垂直增加速度。在一千米以下的山区, 测点海拔高度每升高100米, 可能太阳直接辐射可增大2.3—5.0瓦/米<sup>2</sup>, 其中以夏季(6月)的增加量稍大。此外, (8)式还有其实用意义。

#### (二)可能太阳直接辐射日平均通量密度的全国分布

可能太阳直接辐射的全国分布反映了海拔高度、纬度、大气混浊度条件的总的影 响(图 7)。可以看出, 整个青藏高原为一高中心, 中心最大强度达到275瓦/米<sup>2</sup>以上, 并在高原腹地出现。然后, 随着海拔高度的降低, 可能太阳直接辐射由高原向边缘和平原地区减弱。另外, 在黄土高原还有一225瓦/米<sup>2</sup>的小高中心。四川盆地由于海拔高度低以及大气中水汽和湿气溶胶含量高, 大气比较混浊, 就成了全国的低中心, 年平均通量密度在 200 瓦/米<sup>2</sup> 以下。在盆地以西的高原东部边缘上, 可能太阳直接辐射年平均通量密度的梯度最大。在东部沿海的平原和丘陵山地, 因站点间的海拔高差较小, 太阳直接辐射分布的南高北低特点(纬度影响), 才较明显地反映出来, 纬度梯度达到每一纬距1.9瓦/米<sup>2</sup>。这是可能太阳直接辐射分布的总背景, 在不同季节还可出现不同程度的变动。

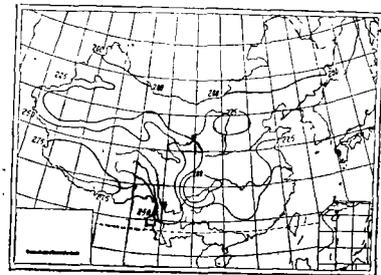


图 7 可能太阳直接辐射年平均通量密度分布(瓦/米<sup>2</sup>)

冬季(12月) 由于天文因素的重大影响, 纬度作用显著加强, 所以可能太阳直接辐射日平均通量密度的分布, 除保持青藏高原和四川盆地的高、低中心位置外, 在东部地区的等值线密度加大, 等值线走向的纬向特点加强, 高、低纬度(南北)之间的梯度达到全年最大(每一纬距达4.3瓦/米<sup>2</sup>) (图 8a)。

春季(3月) 可能太阳直接辐射分布的总形势与冬季相似, 主要变化发生在华南沿海, 那里因受多阴雨天气影响, 水汽压增大, 导致可能太阳直接辐射的减小。原在东部沿海地区的等值线纬向分布特点, 在黄河以南地区遭到破坏。四川盆地的低中心有向东南扩展的趋势(图略)。

夏季(6月) 夏季的可能太阳直接辐射分布以在全国范围内差异较小为主要特色。原在青藏高原和四川盆地的高低中心仍可分析出来, 但高低值之间的差异较小(75瓦/米<sup>2</sup>)。全国的等值线比较稀疏, 东部沿海地区高低纬度间的太阳直接辐射差异, 发生由低纬向较高纬度递增(图8b)。上述现象的产生, 最主要的是由天文因素所造成, 正因为较高纬度地区夏季由于昼长而在很大程度上补偿、甚至超过了正午太阳高度较低

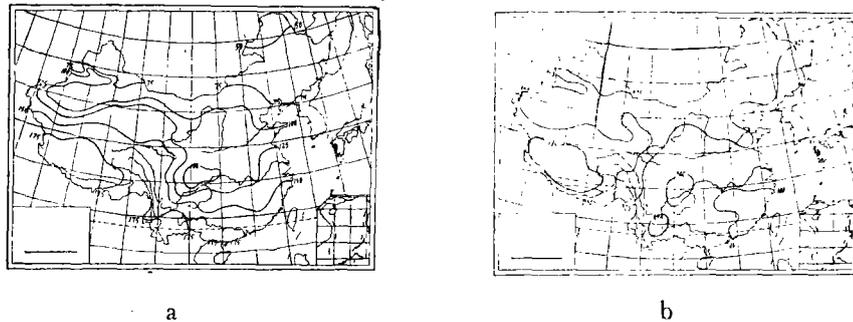


图8 可能太阳直接辐射日平均通量密度分布  
a—12月; b—6月

的不足。当然, 北部地区的水汽压比华南小, 大气透明度条件较好也是起了作用的。

秋季(9月) 我国东部进入秋高气爽季节, 大气透明度条件都比较好, 所以可能太阳直接辐射的分布, 主要由海拔高度和纬度决定, 整个形势与全年平均状况十分相似(图略)。

可能太阳直接辐射的年变化主要由天文因素决定, 所以各地的年变化曲线都是以6月最大, 12月最小, 完成一余弦曲线。大气混浊度状况的影响则可产生对标准年变化曲线的某些起伏, 但总态势保持不变(图略)。

## 四、结 论

通过本文分析, 可以得出如下几点认识:

1. 应用乌克兰英采夫法先求可能太阳直接辐射日平均通量密度, 然后按理论式(4)迭代所求的卡斯特洛夫系数, 可推广用来计算全国各地的可能太阳直接辐射日平均通量。同时该系数还可作为大气混浊度的特征量, 用来分析全国的大气混浊度状况。

2. 得到了平均卡斯特洛夫系数  $c$  与地面水汽压的经验关系  $c = a + b \ln E$ 。在目前缺乏气溶胶资料的情况下, 本式有其实用价值。

3. 通过对理论式(4)的灵敏度试验, 证实  $c$  的变化对(4)式是不太灵敏的。所以, 利用各站水汽压资料反演平均卡斯特洛夫系数和可能太阳直接辐射日平均通量密度的效

果也较好，这使直接利用水汽压资料计算非日射站的可能太阳直接辐射日平均通量密度成为可能。

4.可能太阳直接辐射日平均通量密度的变化与纬度、拔海高度和大气混浊度状况等因子有关，其中它随拔海高度的变化符合

$$S_H' = S_0 - (S_0 - S_0')e^{-\alpha H}$$

关系。

5.可能太阳直接辐射日平均通量密度的全国主要分布特点是：青藏高原和四川盆地分别为稳定的高、低中心，低值区由四川盆地向长江中下游和华南扩展。在东部沿海地区，冬夏两季的等值线分布能较清楚地反映出纬度影响，冬季可能太阳直接辐射日平均通量密度由低纬向高纬减小，且等值线密集；夏季，等值线稀疏，且梯度方向由高纬指向低纬。

#### 参 考 文 献

- [1] Сивков, С. И., Методы расчета характеристик солнечной радиации, Гидрометеиздат, 1968.
- [2] Украинцев, В.Н., Материалы по агроклиматическому районированию субтропической, зоны, Вып.2, 5—12, Гидрометеиздат, Л. 1938.
- [3] 傅抱璞, 山地气候, 61—64, 科学出版社, 1983.
- [4] Гальперин, Б.М., Методика приближенных расчетов сумм солнечной радиации Метеорология и Гидрология, No.4, 1949.
- [5] 方先金, 中国大气透明度系数的研究及其应用, 南京气象学院学报, 1985, 3, 293—305.
- [6] 孙治安, 我国平均水汽含量的气候计算及其分布特征, 南京气象学院学报, 1987, 1, 74—80.

# CLIMATOLOGICAL CALCULATION OF POSSIBLE DIRECT SOLAR RADIATION AND ITS DISTRIBUTIVE FEATURES OVER CHINA

Weng Duming    Sun Zhian

## ABSTRACT

Daily average flux-densities of possible direct solar radiation are determined by the Ukrainstev method. With the data thus obtained, problems concerning the theoretical approach based on the Kastrov expression and the variation of the Kastrov coefficient derived through iteration are investigated. In addition, the empirical relation of the coefficient to vapor pressure is explored and the sensitivity to the theoretical expression of the relation found is examined together with the retrieval errors. The results show that the daily average flux-density regime can be calculated quite accurately for various parts of the country by making use of the surface vapor pressure data. On this basis, the spatial and temporal characteristic features of the distribution of possible direct solar radiation are discussed in detail.