

# 中国三种太阳辐射起始数据分布式模拟

施国萍<sup>1</sup>, 邱新法<sup>1</sup>, 曾 燕<sup>2</sup>

(1.南京信息工程大学遥感学院,江苏南京210044;2.江苏省气象科学研究所,江苏南京210008)

**摘要:**天文辐射、干洁大气总辐射和湿洁大气总辐射是太阳辐射模拟的3种重要起始数据。依托Iqbal Model C和起伏地形下干/湿洁大气总辐射模型,实现了水平面和起伏地形下干/湿洁大气总辐射分布式模拟。以DEM数据作为地形的综合反映,结合常规气象资料,计算了水平面和起伏地形下中国1 km×1 km分辨率日天文辐射量、干洁大气总辐射量、湿洁大气总辐射量的空间分布,并对3种太阳辐射起始数据的时空分布特征做了对比分析。结果表明:3种辐射量均遵循随纬向变化的宏观分布规律;水平面干/湿洁大气总辐射量的分布体现了海拔的影响,水平面湿洁大气总辐射量的分布还体现了水汽分布的影响;起伏地形下的3种辐射量能很好的体现坡度、坡向和地形之间相互遮蔽等局部地形特征对辐射量的影响;以干/湿洁大气总辐射作为起始数据,将有助于提高太阳总辐射的模拟精度。

**关键词:**天文辐射;干洁大气总辐射;湿洁大气总辐射;分布式模拟

**中图分类号:**P422 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0690(2013)04-0385-08

能源是社会发展和人们赖以生存的物质基础。太阳辐射是地球上最基本、最重要的可再生能源<sup>[1]</sup>。天文因子、大气因子、地表因子等都影响着到达地面的太阳辐射,所以真实地形下实际太阳辐射的模拟是相当复杂的<sup>[2-3]</sup>。在实际辐射过程中,首先到达大气上界的辐射量为天文辐射,即不考虑大气影响到达地球表面的太阳辐射量,主要受太阳倾角、太阳高度角、日地距离以及地理纬度影响,是地表实际太阳入射辐射的基础背景<sup>[4]</sup>;此后太阳辐射在通过大气圈到达地面过程中,要受到大气的吸收、散射和反射作用,太阳总辐射有明显的减弱,在晴天要受到空气分子Rayleigh散射、气溶胶粒子散射、臭氧吸收、二氧化碳、氧气等均一混合气体的吸收、水汽吸收等因子的影响<sup>[5-6]</sup>;最后在辐射到达地面时,地形因子,如:海拔高度、坡度、坡向以及周围地形遮蔽和地表反射的作用,都影响着地表实际接收到的太阳辐射量<sup>[7-8]</sup>。

在模拟地表实际接收到的太阳辐射量时,常用的起始数据(或重要参数)有:天文辐射、干洁大

气总辐射、湿洁大气总辐射、晴空辐射等。目前起伏地形下天文辐射研究已经比较成熟<sup>[2]</sup>。干洁大气,也叫理想大气,是指不含水汽和气溶胶的虚拟大气,干洁大气总辐射是指大气为干洁大气情况下到达地球表面的太阳总辐射量。湿洁大气是指不含气溶胶的虚拟大气,湿洁大气总辐射是指大气为湿洁大气情况下到达地球表面的太阳总辐射量,即在干洁大气的基础上考虑了水汽的影响。晴空辐射是在晴空无云情况下到达地表的太阳总辐射量,它是太阳辐射可能被利用的最大值,也是太阳能应用设计中最基本的参数之一,也常作为计算实际总辐射的依据。

本文通过解构Iqbal Model C<sup>[5]</sup>,建立了水平面干洁大气日总辐射和湿洁大气日总辐射模型;在此基础上利用DEM数据,充分考虑地形对干洁大气和湿洁大气辐射传输的影响,建立复杂地形下的干洁大气和湿洁大气日总辐射模型,完成复杂地形下干洁大气和湿洁大气日总辐射量的空间化模拟。并分析天文辐射、干洁大气总辐射和湿洁

**收稿日期:**2012-05-31; **修订日期:**2012-07-20

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41175077)、科技部公益性行业科研专项(GYHY200806002)、黔科合重大专项([2011]6003)和江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX10B\_300Z)资助。

**作者简介:**施国萍(1984-),女,江苏南京人,博士研究生,主要研究方向为3S集成与气象应用。E-mail: shi\_gp@hotmail.com

**通讯作者:**邱新法,教授。E-mail: xfqiu135@nuist.edu.cn

大气总辐射3种起始数据的变化规律,研究地形因子、大气因子对辐射量变化的影响,以期提高真实地表实际日总辐射的模拟精度,寻求更优的起始数据。

### 1 水平面干/湿洁大气总辐射模型

太阳辐射计算的理论模型大多详细地考虑了大气中的主要成分对太阳短波辐射的影响,根据直接辐射与散射辐射产生的不同机理,分别对他们进行模拟。因此,理论模型的结构往往比较复杂。对太阳短波辐射产生重要影响,并被用于理论模型的大气物理因子包括:大气分子,气溶胶粒子的散射作用和臭氧、二氧化碳、水汽的吸收作用,云量,云的类型,日照百分率/日照时数,大气混浊度,大气可降水量等<sup>[9]</sup>。比较有影响的理论模型有:得到广泛应用的 Bird Clear Sky Model<sup>[10]</sup>、Iqbal Model C<sup>[5]</sup>以及被用于美国国家太阳辐射数据库建设的 MET-STAT (Meteorological/Statistical) Model<sup>[11]</sup>; 广泛应用于工程与建筑业的 ASHRAE Model<sup>[12]</sup>、用于制作《欧洲太阳辐射图集》的 Page Model<sup>[13]</sup>等。

Iqbal Model C 详细地考虑了大气中的主要成分,即:空气分子,气溶胶粒子,臭氧,二氧化碳、氧气等均一混合气体,水汽等对太阳短波辐射的影响。本文通过简化模型 Iqbal Model C<sup>[5]</sup>计算水平面干/湿洁大气总辐射。

1) 水平面湿洁大气直接辐射辐照度。根据 Iqbal Model C, 与太阳光线垂直表面的直接辐射辐照度  $I_n$  为:

$$I_n = 0.9751 \left( \frac{1}{\rho} \right)^2 I_0 \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a \quad (1)$$

式中,  $I_n$  为与太阳光线垂直表面的直接辐射辐照度; 折算系数 0.975 1 是由于光谱间隔为 0.3~3  $\mu\text{m}$  时, 积分引入的订正系数;  $I_0$  为太阳常数;  $\tau$  为空气分子 Rayleigh 散射透射率, 无量纲;  $\tau_o$  为臭氧吸收透射率, 无量纲;  $\tau_g$  为二氧化碳、氧气等均一混合气体的吸收透射率, 无量纲;  $\tau_w$  为水汽吸收透射率, 无量纲;  $\tau_a$  为气溶胶粒子散射透射率, 无量纲。

将 Iqbal Model C 模型中的气溶胶粒子散射透射率  $\tau_a$  设为 1, 即假设大气中是没有气溶胶, 则获得的辐射计算结果即为湿洁大气直接辐射。水平面湿洁大气直接辐照度  $I_b$  可表示为:

$$I_b = 0.9751 \left( \frac{1}{\rho} \right)^2 I_0 \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \cos Z_\theta \quad (2)$$

式中,  $I_b$  为水平面湿洁大气直接辐照度;  $Z_\theta$  为太阳天顶角。

上述参数的计算式为:

$$\tau_r = e^{-0.0903 m_a^{0.84} (1 + m_a - m_a^{1.01})} \quad (3)$$

$$\tau_o = 1 - \left[ \begin{aligned} &0.1611 U_3 (1 + 139.48 U_3)^{-0.3035} \\ &- 0.002715 U_3 (1 + 0.044 U_3 + 0.0003 U_3^2)^{-1} \end{aligned} \right] \quad (4)$$

$$\tau_g = e^{-0.0127 m_a^{0.26}} \quad (5)$$

$$\tau_w = 1 - 2.4959 U_1 \left[ (1 + 79.034 U_1)^{0.6828} + 6.385 U_1 \right]^{-1} \quad (6)$$

其中,

$$m_a = m_r \left( \frac{p}{1013.25} \right), \text{无量纲, 为经气压订正后的}$$

空气质量;

$m_r$ , 无量纲, 为标准大气压下的空气质量, 可以根据 Kasten & Young 公式<sup>[14]</sup>精确计算:

$$m_r = \frac{1}{\sinh \theta + 0.50572 (h_\theta + 6.07995^\circ)^{-1.6364}} \quad (7)$$

$h_\theta$  为太阳高度角(度);  $p$  为实际大气压(hPa);  $U_3 = l_{oz} m_r$  为订正后的臭氧厚度(cm);  $l_{oz}$  为垂直方向上的臭氧厚度(cm)。可以根据 Van Heukol<sup>[15]</sup>, Manabe & Strickler<sup>[16]</sup>的方案计算, 一般情况下可取值 0.34 cm;  $U_1 = w m_r$ , 为订正后的大气可降水量(cm);  $w$  为在气压为 1 013.25 hPa, 气温为 273 K 的理想大气条件下的大气可降水量(cm), 可以根据地面观测资料, 按下式计算<sup>[17]</sup>:

$$w = 0.493 \left( \frac{H_r}{T} \right) \exp(26.23 - 5416/T) \quad (8)$$

其中,  $H_r$  为空气相对湿度,  $T$  为气温(K)。

2) 水平面湿洁大气散射辐射辐照度。水平面湿洁大气散射辐射辐照度  $I_d$  由两部分组成, 即: 分子 Rayleigh 散射  $D_r$  和地表与大气间的多重散射  $D_m$ , 因此:

$$I_d = D_r + D_m \quad (9)$$

其中:

$$D_r = 0.79 \left( \frac{1}{\rho^2} \right) I_0 \tau_o \tau_g \tau_w 0.5(1 - \tau_r) / (1 - m_a + m_a^{1.02}) \sinh \theta \quad (10)$$

$$D_m = \frac{(I_b + D_r) \rho_g \rho_a}{1 - \rho_g \rho_a} \quad (11)$$

式中:  $\rho_g$ , 无量纲, 为地表反照率;  $\rho_a$ , 无量纲, 为晴空

逆反射率,取0.068 5。

$$I_d = D_r + D_m = D_r + \frac{(I_b + D_r)\rho_g \rho_a}{1 - \rho_g \rho_a} = \frac{D_r + I_b \rho_g \rho_a}{1 - \rho_g \rho_a} \quad (12)$$

(3) 水平面湿洁大气辐照度  $I_t$ 。

$$I_t = I_b + I_d \quad (13)$$

(4) 水平面湿洁大气日总辐射量。对湿洁大气下的水平面上的辐照度  $I_t$  按时间积分,即可得到湿洁大气下的水平面日总辐射量:

$$Q_w = \frac{T}{2\pi} \int_{-\omega_0}^{\omega_0} I_t d\omega \quad (14)$$

式中,  $-\omega_0$ 和 $\omega_0$ 为太阳日出与日落时角;  $T$ 表示一天的时间长度,对应24 h[注:其单位的选取应与 $I_0$ 相对应,如: $I_0=0.082 0 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ ,则 $T=1 440 \text{ min}$ ]。

(14)式由于其包含的各分量计算复杂,无法直接积分,通过数值积分得到,数值积分方法参考文献[2],在数值积分时,时间步长 $\Delta T$ 取5 min,在1 d的可照时间内,按时段累计,获得湿洁大气日总辐射量。根据时间步长,确定可照时段数 $n$ 及各可照时段的起始、终止太阳时角,计算出该时段平均的湿洁大气总辐射照度 $I_{it}$ ,按时段累计,计算水平面湿洁大气日总辐射量 $Q_w$ 。

$$Q_w = \frac{T}{2\pi} \left( \sum_{i=1}^{n-1} I_{it} \Delta\omega + I_{in} \text{mod} \left( \frac{2\omega_0}{\Delta\omega} \right) \right) \quad (15)$$

式中,  $\text{mod}()$ 为求余函数。

水平面干洁大气总辐射模型是在水平面湿洁大气总辐射模型的基础上,假设水汽吸收透射率项 $\tau_w$ 为1,其余计算方法与起伏地形下湿洁大气总辐射模型一致,此处不再赘述。

## 2 起伏地形下干/湿洁大气总辐射模型

起伏地形中,山地接收的太阳辐射量受大气和地形条件两方面因素的影响。依据起伏地形下太阳总辐射计算模型<sup>[18]</sup>,起伏地形下干/湿洁大气日辐射量由3部分组成,即:

$$Q_{\alpha\beta} = Q_{b\alpha\beta} + Q_{d\alpha\beta} + Q_{r\alpha\beta} \quad (16)$$

其中,  $Q_{\alpha\beta}$ 为起伏地形下干/湿洁大气日总辐射量;  $Q_{b\alpha\beta}$ 为起伏地形下干/湿洁大气日直接辐射量;  $Q_{d\alpha\beta}$ 为起伏地形下干/湿洁大气日散射辐射量;  $Q_{r\alpha\beta}$ 为起伏地形下周围地形日反射辐射量。

起伏地形下干/湿洁大气直接辐射 $Q_{b\alpha\beta}$ 的计算式为<sup>[19]</sup>:

$$\frac{Q_{0\alpha\beta}}{Q_0} = \frac{Q_{b\alpha\beta}}{Q_b} \quad (17)$$

式中,  $Q_{0\alpha\beta}$ 为起伏地形下日天文辐射量;  $Q_0$ 为水平面日天文辐射量;  $Q_{b\alpha\beta}$ 为起伏地形下干/湿洁大气日直接辐射量;  $Q_b$ 为水平面干/湿洁大气日直接辐射量。整理上(17)式可得:

$$Q_{b\alpha\beta} = \frac{Q_{0\alpha\beta}}{Q_0} Q_b = R_b Q_b \quad (18)$$

其中:

$$R_b = \frac{Q_{0\alpha\beta}}{Q_0} \quad (19)$$

为转换因子。

起伏地形下干/湿洁大气散射辐射计算式 $Q_{d\alpha\beta}$ 为<sup>[20]</sup>:

$$Q_{d\alpha\beta} = Q_d \left[ \frac{Q_b}{Q_0} R_b + V \left( 1 - \frac{Q_b}{Q_0} \right) \right] \quad (20)$$

式中,  $Q_{d\alpha\beta}$ 为起伏地形下干/湿洁大气日散射辐射量;  $Q_d$ 为水平面干/湿洁大气日散射辐射量;  $V$ 为地形开阔度;

起伏地形下干/湿洁大气地形反射辐射计算式 $Q_{r\alpha\beta}$ 为<sup>[13]</sup>:

$$\begin{cases} Q_{r\alpha\beta} = Q \rho_g (1 - V) & V \leq 1 \\ Q_{r\alpha\beta} = 0 & V > 1 \end{cases} \quad (21)$$

式中,  $Q$ 为水平面干/湿洁大气日辐射量;  $\rho_g$ 为地表反照率。

## 3 中国3种太阳辐射起始数据分布式模拟与结果分析

本文运用水平面天文辐射量理论模型<sup>[1]</sup>和起伏地形下天文辐射模型<sup>[2]</sup>计算获得水平面与起伏地形下日天文辐射量;运用水平面与起伏地形下干/湿洁大气总辐射模型结合常规气象资料计算获得水平面与起伏地形下干/湿洁大气日总辐射量。起伏地形下3种太阳辐射起始数据计算时,地形数据输入为1 km×1 km分辨率的DEM数据。以2003年1月15日、4月15日、7月15日、10月15日水平面和起伏地形下中国1 km×1 km分辨率天文辐射量、干洁大气总辐射量和湿洁大气总辐射量为例,对3种太阳辐射起始数据时空分布特征进行对比分析。

### 3.1 水平面下三种辐射量时空分布特征

图1中同一横排表征同一日期,同一竖列表征同一种辐射量。从图1可以看出水平面天文辐射量具有明显的纬向变化特征,水平面干/湿洁大气总辐射总体上依然遵循随纬度变化的宏观分布规

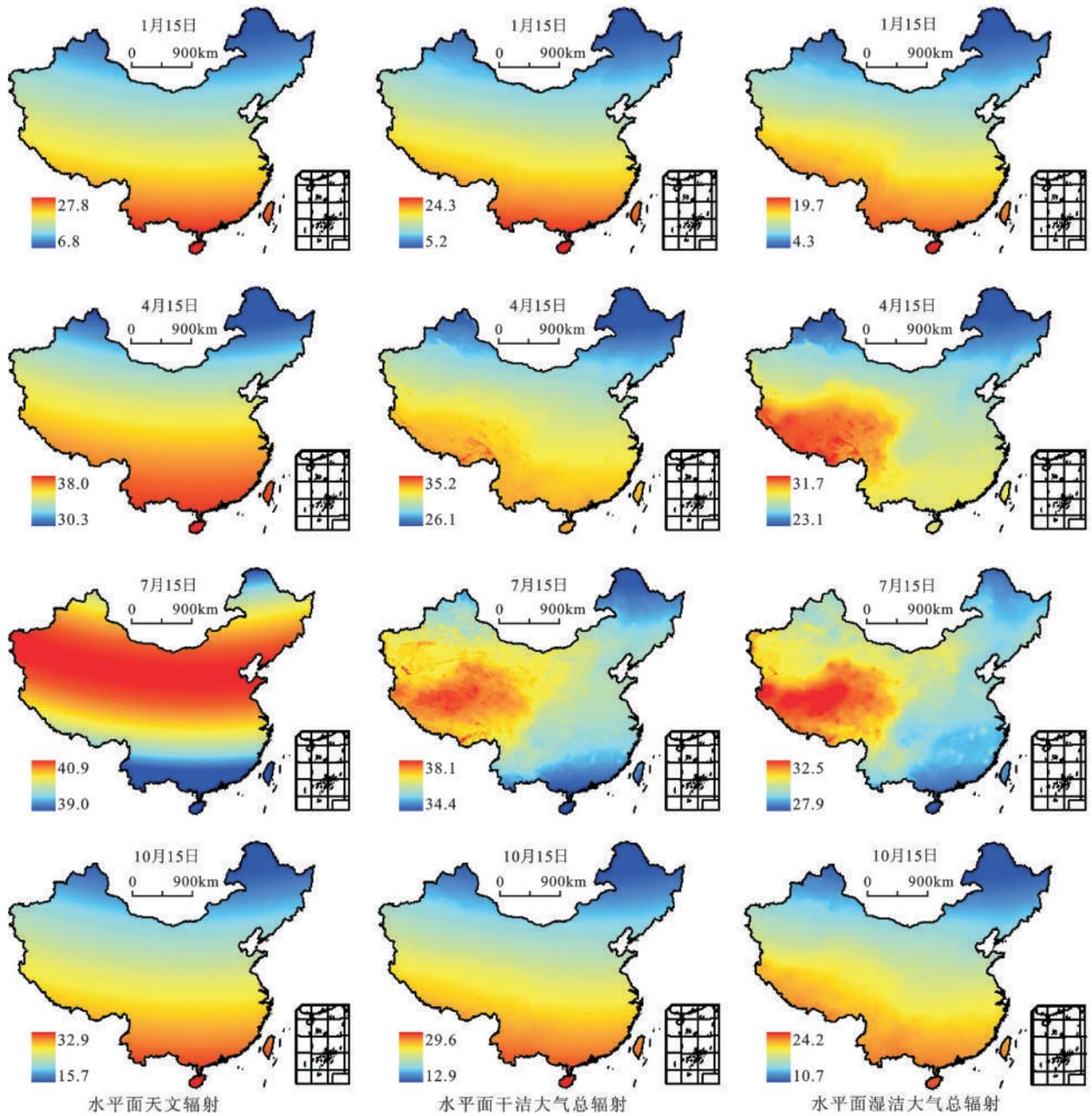


图1 2003年中国3种水平面辐射量空间分布(MJ/(m²·d))

Fig.1 Spatial distribution of 3 kinds of solar radiation over horizontal plane of China on 15th of January, April, July and October in 2003 (MJ/(m²·d)).

律,但在海拔高程明显的区域这种规律被打破,特别是在青藏高原及其周边地区,海拔高程影响在7月15日表现的尤为突出,4月15日次之,1月15日和10月15日不明显,即:海拔高程影响在夏半年要大于冬半年,而在影响的表现上,湿洁大气又较干洁大气更明显。

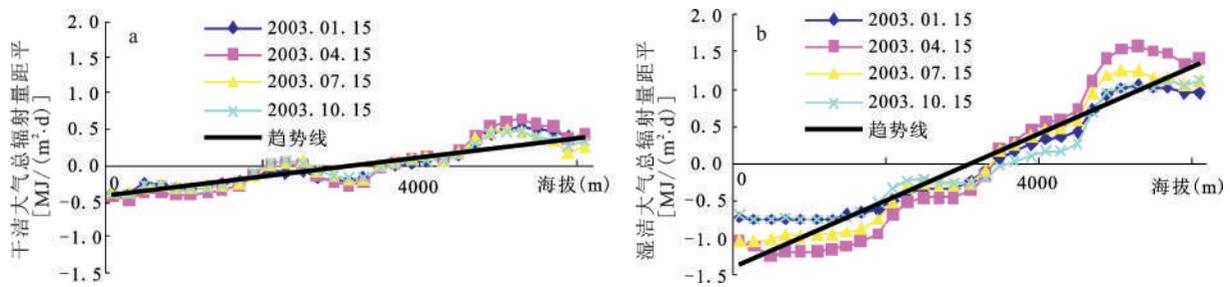
均方差体现了数据之间差异的程度,根据表1给出的3种辐射量在各时期的均方差数值大小,可

以得出结论,3种辐射量在中国的空间差异大小为1月>10月>4月>7月。对各时期均值、最大值、最小值对比表明,在季节分配上,辐射量均表现为7月>4月>10月>1月。

图2给出了纬度为30°N时,水平面干/湿洁大气日总辐射量随海拔高度的变化,虽然受到各日具体天气条件的影响,但整体趋势还是很明显的,即:随着海拔高度的增加水平面干/湿洁大气日总

表1 2003年中国水平面三种辐射量统计特征值对比(MJ/(m<sup>2</sup>·d))Table 1 Comparison of statistical characteristics of 3 kinds of solar radiation over horizontal plane of china on 15th of January, April, July and October in 2003 (MJ/(m<sup>2</sup>·d))

日期	天文辐射量				干洁大气总辐射量				湿洁大气总辐射量			
	均值	最大值	最小值	均方差	均值	最大值	最小值	均方差	均值	最大值	最小值	均方差
1月15日	17.554	27.800	6.791	4.326	15.017	24.307	5.180	3.953	12.661	19.742	4.255	3.368
4月15日	35.539	38.083	30.299	1.631	31.617	35.168	26.128	1.728	27.559	31.667	23.129	1.586
7月15日	40.640	40.895	38.967	0.306	36.236	38.073	34.396	0.536	30.145	32.516	27.929	0.940
10月15日	25.295	32.897	15.749	3.517	22.044	29.581	12.942	3.347	18.510	24.152	10.568	2.839



干洁大气总辐射量(a);湿洁大气总辐射量(b)

图2 30°N水平面干/湿洁大气日总辐射量随海拔变化趋势

Fig.2 The change tendency of global solar radiation on horizontal plane under dry clean air (a) and wet clean air (b) with the elevation at 30°N

辐射量总体呈增加趋势,且湿洁大气表现的更加明显。

湿洁大气总辐射量的模拟是在干洁大气总辐射量模拟的基础上多考虑了一项水汽的影响,因此可以用水平干洁大气总辐射量与湿洁大气总辐射量之差来反映水汽对总辐射量的影响。由图3可见,中国水汽丰沛的东南沿海,干、湿洁大气总辐射量之间的差值较大,说明水汽对总辐射量的影响程度由东南向西北递减。夏季水汽充裕,水汽对辐射量的影响程度随之增强,且来自太平洋的夏季风将暖湿气流带往内陆,使得内陆地区水汽含量增加,总辐射量受水汽影响较大的区域也随之扩大。

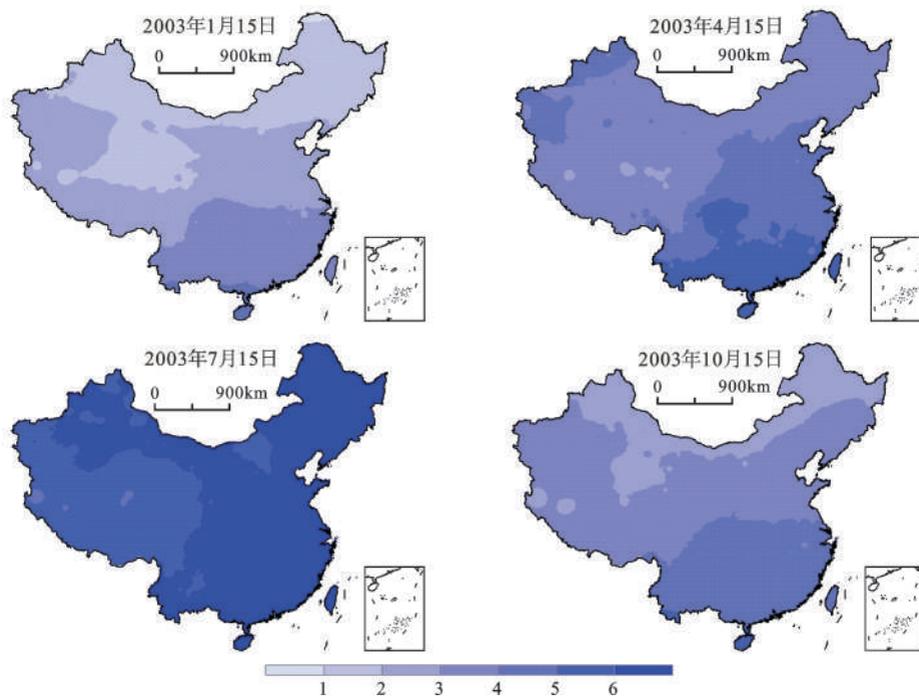
### 3.2 起伏地形下3种辐射量时空分布特征

起伏地形下干/湿洁大气的总辐射量是依托起伏地形下干/湿洁大气总辐射模型,以水平面干/湿洁大气总辐射量和起伏地形下天文辐射量为参数模拟而得。其中,水平面干/湿洁大气总辐射量能够反映大气基本状况对总辐射量的影响,而起伏地形下天文辐射量能够反映坡度、坡向和地形相互遮蔽的影响,因此,起伏地形下干/湿洁大气总辐射量兼具了两者的特点,既考虑了大气因素的影

响也考虑了地形因素的影响。由图4与图1对照表明,起伏地形下3种辐射量与水平面3种辐射量的宏观分布特征总体一致,但在局部细节上,又很好地体现了地形特征的影响,且地形影响在不同月份均有表现。

表2与表1对照可以看出,水平面与起伏地形下3种辐射量平均值基本相当,但极端值(最大值与最小值)却差异较大,这主要体现了地形对辐射量的影响是局部的,辐射量的总体宏观分布趋势没有改变,这也从侧面印证了起伏地形下3种辐射量模拟的正确性。另外,表2中3种辐射量均方差比表1略大,说明增加了地形影响使3种辐射量的空间差异变大。

从表2中可以发现,起伏地形下干/湿洁大气辐射量的个别最大值超过了起伏地形下天文辐射量的最大值,其原因分析如下:在起伏地形下天文辐射量的模拟过程中,只考虑了天文辐射量到达地面后受到坡度、坡向和地形遮蔽的影响,而起伏地形下干/湿洁大气辐射量的模拟,除了考虑到坡度、坡向和地形遮蔽的影响,还在模型中增加了地形反射辐射的影响。由(21)式可以看出,地形反射辐射量的大小与水平面干/湿洁大气总辐射量,地

图3 水汽对总辐射量影响的空间分布(MJ/(m<sup>2</sup>·d))Fig.3 Spatial distribution of the influence of water vapor to global solar radiation (MJ/(m<sup>2</sup>·d))表2 2003年中国起伏地形下3种辐射量统计特征值对比(MJ/(m<sup>2</sup>·d))Table 2 Comparison of statistical characteristics of 3 kinds of solar radiation over rugged terrain of china on 15th of January, April, July and October in 2003 (MJ/(m<sup>2</sup>·d))

日期	天文辐射量				干洁大气总辐射量				湿洁大气总辐射量			
	均值	最大值	最小值	均方差	均值	最大值	最小值	均方差	均值	最大值	最小值	均方差
1月15日	17.369	39.495	0.000	4.741	14.913	34.631	0.235	4.289	12.571	30.246	0.029	3.657
4月15日	35.536	38.192	10.297	1.736	31.700	46.154	13.415	1.813	27.637	40.801	11.524	1.666
7月15日	40.349	40.814	18.015	0.751	36.067	44.610	18.853	0.715	30.005	37.258	15.938	1.000
10月15日	24.877	38.209	0.162	3.856	21.740	35.629	1.109	3.622	18.250	30.484	0.798	3.071

形开阔度,地表反照率有关,而夏半年水平面干/湿洁大气总辐射量基数较大,所以在极个别地形特别的格网点(山区各网点)上,计算出的总辐射量值较大。但是,从平均值来看,仍然满足天文辐射量>干洁大气辐射量>湿洁大气辐射量的特点,符合太阳辐射计算的基本规律。

#### 4 结 论

本文以1 km×1 km分辨率的DEM数据作为地形的综合反映,依据Iqbal Model C和起伏地形下干/湿洁大气总辐射模型,结合常规气象资料,实现了中国1 km×1 km分辨率水平面与起伏地形下干/湿洁大气日总辐射量空间分布的模拟,并对天文辐射量、干洁大气总辐射量、湿洁大气总辐射量3

种起始数据进行了对比分析,主要结论为:

1) 水平面3种辐射量空间分布总体上遵循随纬向变化的宏观分布规律,在此基础上,干洁大气总辐射量体现了海拔的影响,湿洁大气总辐射量体现了海拔与离海远近(即水汽分布)的影响。

2) 起伏地形下3种辐射量与水平面3种辐射量的宏观分布特征总体一致,但在局部细节上,又很好地体现了局部地形特征(坡度、坡向和地形之间相互遮蔽)对太阳辐射影响,且地形影响在不同月份均有体现。

3) 干洁大气总辐射和湿洁大气总辐射较天文辐射比较而言,考虑了实际大气的部分影响,以其作为起始数据,将有助于提高太阳总辐射的模拟精度。

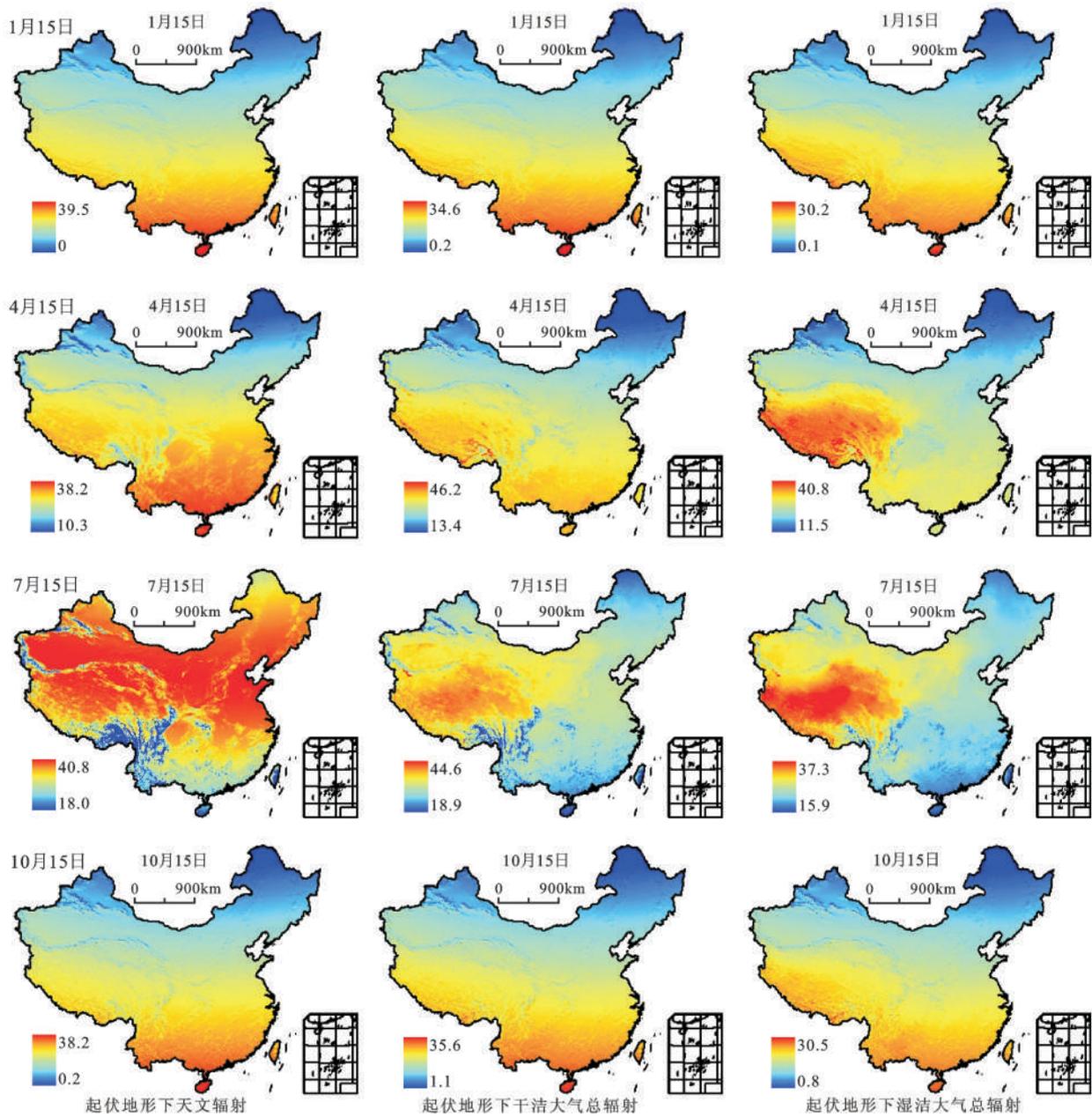


图4 2003年中国起伏地形下3种辐射量空间分布[单位: MJ/(m²·d)]

Fig.4 Spatial distribution of 3 kinds of solar radiation over rugged terrain of china on 15th of January, April, July and October in 2003 [unit: MJ/(m²·d)]

### 参考文献:

[1] 翁笃鸣. 中国辐射气候研究[M]. 北京: 气候出版社, 1997.  
 [2] 曾 燕, 邱新法, 刘绍民. 起伏地形下天文辐射分布式估算模型[J]. 地球物理学报, 2005, 48(5): 1028~1033.  
 [3] 曾 燕, 邱新法, 缪启龙, 等. 起伏地形下我国可照时间的空间分布[J]. 自然科学进展, 2003, 13(5): 545~548.  
 [4] 左大康, 主编. 现代地理学词典[M]. 北京: 商务印书馆, 1990.  
 [5] Iqbal M., An Introduction to Solar Radiation[M]. Academic Press, Toronto, 1983.

[6] 刘书楼, 陈宝雯. 我国晴天太阳总辐射分布特征——计算机在太阳辐射研究中的应用[J]. 地理学报, 1983, 38(4): 103~114.  
 [7] 傅抱璞. 坡地对日照和太阳辐射的影响[J]. 南京大学学报(自然科学), 1958, (2): 23~46.  
 [8] 傅抱璞. 山地气候[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 61~72.  
 [9] Nijegorodov N, Luhanga P V C. A new model to predict direct normal instantaneous solar radiation, based on laws of spectroscopy, kinetic theory and thermodynamics[J]. Renewable Energy, 1998, 13(4): 523-330.  
 [10] Bird R E, Hulstrom R L. A simplified clear sky model for the direct and diffuse isolation on horizontal surfaces[M]. Golden,

- Colorado: US-SERI/TR-642-761, National Renewable Energy Laboratory, 1981.
- [11] Maxwell E L. METSTAT — the solar radiation model used in the production of the NSRDB[J]. *Solar Energy*, 1998, **62**(4): 263-279.
- [12] American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers (ASHRAE) handbook: HVAC applications[M]. Atlanta (GA): ASHRAE, 1999.
- [13] Page J K. Proposed quality control procedures for the meteorological office data tapes relating to global solar radiation, diffuse solar radiation, sunshine and cloud in the UK[R]. Report FCIBSE, 1997.
- [14] Kasten F, Young A T. Revised optical air mass tables and approximation formula[J]. *Applied Optics*, 1989, **28**(22): 4735-4738.
- [15] Heuklon T K V. Estimating atmospheric ozone for solar radiation models[J]. *Solar Energy*, 1979, **22**(1): 63-68.
- [16] Manabe S, Strickler R F. Thermal equilibrium of the atmosphere with convective adjustment[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1964, **21**: 361-85.
- [17] Maehler M. A., Iqbal H., A modification of ASHRAE clear sky irradiation model[J]. *ASHRAE Transactions, Part A*, 1985, **91**(21): 106-115.
- [18] 王 丽, 邱新法, 王培法, 等. 复杂地形下长江流域太阳总辐射的分布式模拟[J]. *地理学报*, 2010, **65**(5): 543~554.
- [19] 曾 燕, 邱新法, 刘昌明, 等. 起伏地形下黄河流域太阳直接辐射分布式模拟[J]. *地理学报*, 2005, **60**(4): 680~688.
- [20] 曾 燕, 邱新法, 何永健, 等. 起伏地形下黄河流域太阳散射辐射分布式模拟研究[J]. *地球物理学报*, 2008, **51**(4): 991~998.

## Distributed Modeling of Three Kinds of Initial Data for Global Solar Radiation Simulation in China

SHI Guo-ping<sup>1</sup>, QIU Xin-fa<sup>1</sup>, ZENG Yan<sup>2</sup>

(1. School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;

2. Jiangsu Research Institute of Meteorological Science, Nanjing, Jiangsu 210008, China)

**Abstract:** Extraterrestrial solar radiation (ESR), Global solar radiation under dry clean air (GSRD) and wet clean air (GSRW) are three kinds of important initial data for global solar radiation simulation. Based on Iqbal Model C and model of GSRD and GSRW over rugged terrain, distributed simulation of GSRD and GSRW over horizontal plane and rugged terrain were achieved. Using DEM data as the general characterization of terrain, combined with meteorological data, the daily ESR, GSRD and GSRW with a resolution of 1 km×1 km over horizontal plane and rugged terrain of China were calculated. Furthermore, the spatio-temporal distribution characteristics of these three kinds of radiation were analyzed. Results suggest that: three kinds of solar radiation all have a progressive decrease trend from south to north in China. The distributions of GSRD and GSRW over horizontal plane reflect the influence of altitude, the distribution of GSRW reflects the influence of water vapor. Three kinds of solar radiation over rugged terrain reflect the influence to solar radiation by the topographical factors such as slope, aspect and terrain inter-shielding. To use GSRD and GSRW as the initial data will help to improve the simulation precision of global solar radiation simulation.

**Key words:** extraterrestrial solar radiation (ESR); global solar radiation under dry clean air (GSRD); global solar radiation under wet clean air (GSRW); distributed modeling