



引用格式:孙先忍,黄国鲜,童思陈,等. 永定河流域太阳辐射逐时过程模拟[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(3): 892-898.

Sun Xianren, Huang Guoxian, Tong Sichen, et al. Simulation on hourly process of solar radiation in Yongding River Basin[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(3): 892-898.

天文学、地球科学

## 永定河流域太阳辐射逐时过程模拟

孙先忍<sup>1,2</sup>, 黄国鲜<sup>2,3\*</sup>, 童思陈<sup>1</sup>, 李兴华<sup>2</sup>, 唐小娅<sup>1,2</sup>, 雷 坤<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012;

3. 青海大学三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810016)

**摘 要** 针对太阳辐射在不同区域地形条件下的差异,通过建立任意倾角和坡面方位角下的太阳辐射逐时模型,模拟了永定河流域 1951—2018 年的太阳辐射,并分析了该流域太阳辐射在不同倾角和坡面方位角下的变化特征。结果表明:永定河流域 1951—2018 年逐年太阳辐射总体呈现减小趋势。任意倾角下,同一站点太阳辐射时变化形态基本一致,均呈抛物线型,不同站点太阳辐射峰值受地理纬度及海拔影响较大。任意坡面方位角下,太阳辐射沿流域中心向东西两向逐渐减少并呈对称分布。太阳辐射年内具有明显的月度变化特征,1—3 月、10—12 月太阳辐射受倾角和坡面方位角影响较 4—9 月大。该研究成果对量化太阳辐射、研究流域能量收支及分析陆面蒸发过程等方面具有一定的参考意义。

**关键词** 太阳辐射;逐时模型;倾角;坡面方位角;永定河流域

中图法分类号 P422.31;

文献标志码 A

## Simulation on Hourly Process of Solar Radiation in Yongding River Basin

SUN Xian-ren<sup>1,2</sup>, HUANG Guo-xian<sup>2,3\*</sup>, TONG Si-chen<sup>1</sup>, LI Xing-hua<sup>2</sup>, TANG Xiao-ya<sup>1,2</sup>, LEI Kun<sup>2</sup>

(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;

3. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China)

**[Abstract]** According to the difference of solar radiation in different regions and topographical conditions, an hourly calculation model of solar radiation at arbitrary direction and inclination angle was established. Using the solar radiation model to simulate the solar radiation of Yongding River Basin from 1951 to 2018, and the hourly variation characteristics under different arbitrary inclination and direction angles were analyzed. The results show that the annual solar radiation decreased in the Yongding River Basin from 1951 to 2018. The changing pattern of daily solar radiation is similar with a parabolic pattern at any inclination angle. The peak value of solar radiation at different stations is greatly affected by geographical latitude and altitude. At any slope azimuth, the solar radiation gradually decreases along the basin center to the East and West and presents a symmetrical distribution. Obvious monthly variations at arbitrary inclination azimuth is shown in the solar radiation which has larger fluctuation in the period of January to March and October to December than in April to September. The research provides certain reference for quantifying energy budget, utilizing solar energy and analyzing land surface evaporation process.

**[Keywords]** hourly numerical model; solar radiation; inclination angle; slope azimuth; Yongding River Basin

太阳辐射是地球上生态系统最重要和最直接的能量来源,而正确估算流域太阳辐射是估算流域蒸散发和分析局地小气候变化的前提。目前,中国气象部门的 2 500 多个气象站点中只有约 110 个站点对太阳辐射相关参数的数据进行观测记录,且一般都建在开阔平坦的地域,其测量值并不能反映实

际流域地形下太阳总辐射的分布特征。中外学者利用卫星遥感资料对地表太阳辐射进行了大量研究<sup>[1-2]</sup>。但遥感反演技术本身不够成熟,同时受限于辐射观测高成本、低密度,地基观测数据不足,尤其是流域存在大量区域无地面观测数据,极大地限制了对流域太阳辐射的研究。因此还需结合相应

收稿日期: 2020-05-14; 修订日期: 2020-07-04

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1600400); 水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07111-002); 青海大学三江源生态与高原农牧业国家重点实验室重点开放基金(2016-KF-01)

第一作者: 孙先忍(1992—)男,土家族,重庆人,硕士研究生。研究方向:流域生态过程模拟。E-mail:sunxren@163.com。

\* 通信作者: 黄国鲜(1975—)男,侗族,贵州石阡人,博士,研究员。研究方向:流域环境和生态过程模拟。E-mail: huanggx@craes.org.cn。

的模型进一步研究流域太阳辐射的分布规律及特征。

近年来,广大学者对于太阳总辐射的研究更为深入。Mghouchi 等<sup>[3]</sup>结合四个经验模型预测特定位置的直接辐射、散射辐射及全辐射强度,验证表明所研究的模型可以成功地用于预测一年中每天的日太阳辐射数据。Benmouiza 等<sup>[4]</sup>利用时间序列分析法,采用自回归滑动平均(ARMA)模型,将一段时期的太阳辐射数据组成的时间序列看成是一个随机的过程,通过某一时刻的太阳辐射和过去的辐射量的关系来计算出该时刻的太阳总辐射量。王娜等<sup>[5]</sup>采用 Dubayyah 太阳辐射估算法对太阳总辐射进行计算。李军立等<sup>[6]</sup>基于 25 m 分辨率的数字高程模型数据,依据坡面天文辐射分布式模型算法,模拟计算了北回归线附近宾阳县的天文辐射,得出不同地形下天文辐射空间分布差异明显的结论。郭挺等<sup>[7]</sup>参照邱新法建立的起伏地形下太阳辐射分布式模型,利用 1960—2010 年数据模拟了福建省太阳总辐射,表明太阳辐射受地形影响十分明显。

目前中外涉及流域实际地形下逐时太阳辐射的研究较少,不少学者基于气象要素<sup>[8]</sup>、台站<sup>[9]</sup>及观测时间<sup>[10]</sup>或基于时间序列与人工神经网络等<sup>[11-13]</sup>的小时间尺度逐时总辐射模型,也仅限于水平面上的计算。且大多数模型只单方面考虑了倾斜面或较大时间尺度的研究,而太阳辐射具有明显的地域性<sup>[14]</sup>,特别是在进行流域能源动态收支、太阳能高效利用和定量评估时,更是需要考虑详细的时间过程和区域差异,因此为揭示不同研究区域太阳辐射的差异性,太阳辐射估算应将研究区域的实际地形和模拟时间尺度纳入考虑。

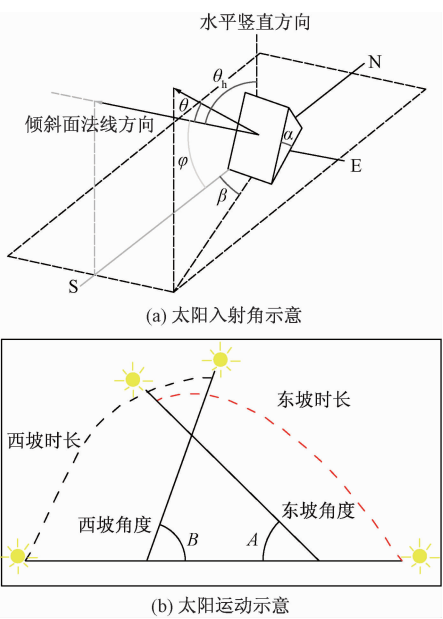
永定河是北京城的母亲河,不少学者围绕气温、降水等气候方面<sup>[15]</sup>对永定河流域进行研究,但针对该流域地面太阳辐射的研究较少。现考虑流域复杂的地形条件,模拟从年到小时的时间尺度下任意倾斜面的太阳辐射的逐时变化过程,以期为该流域能量收支及陆面蒸发过程提供理论数据和参考依据。

## 1 模型建立

### 1.1 计算步骤

在不考虑大气影响的情况下,坡面接收的日天文辐照度可分为水平面与倾斜面两部分,基于太阳辐射原理,分别建立水平和倾斜瞬时辐射模型,倾斜面各角度参数定义及说明如图 1 所示。

流域实际地形条件是复杂多变的,为分析全流



$\theta_h$  为太阳高度角;  $\theta$  为太阳入射角;  $\alpha$  为倾角或坡度;  
 $\beta$  为坡面方位角或者坡向;  $\varphi$  为太阳方位角  
图 1 太阳辐射角度参数坐标示意图

Fig. 1 Definition of angles used as coordinates for a element of sky radiation

域内太阳辐射的分布规律及变化特点,利用永定河流域 1:250 000 万分辨率的高程模型数据(digital elevation mode, DEM)地形资料和地面气象观测资料,包括流域内及周边共 29 个气象台站 1951—2018 年的温度、气压、降水和日照时数等资料(资料来源:国家气象信息中心, <http://data.cma.cn/>),通过建立晴日任意倾角方位角太阳逐时辐射模型,模拟出各站点逐时太阳辐射量。其计算步骤简要如下:

(1)提取地形参数。利用 DEM 地形数据,借助地理信息系统平台,获得每个格网的坡度、坡向、纬度和高程信息。

(2)确定计算点每天的日照时段数及各日照时段的起始、终止太阳时角。确定复杂地形中计算格网点日照时间的取值域。由于复杂地形中日出、日落时角最多与平地相同,以水平面日出、日落时角作为复杂地形中计算格网点日照时间的取值域。

(3)根据太阳视轨道方程,确定与各时角对应的太阳高度角( $\theta_{h0}, \theta_{h1}, \dots, \theta_{hi}, \dots, \theta_{hn}$ )和太阳方位角( $\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_i, \dots, \varphi_n$ ),并借助 DEM 提供的各网点高程,计算时角为  $\omega$  时,在方位  $\varphi_i$  上的格网点计算太阳辐射量。

(4)逐时段对每个台站计算其逐时天文辐射量,经累加即得其日、月及全年天文辐射总量,同时将流域划分成 17 余万个正方形的网格单元

(540 m×540 m),根据辐射模型输入数据直接计算得到永定河流域太阳辐射量。

1.2 计算公式

1.2.1 水平瞬时辐射

通常直接辐射是辐射中最多的部分,散射辐射次之,而反射辐射仅占总量中很小一部分。散射辐射和反射辐射部分仅占太阳辐射的 10% ~ 20% [16]。简化计算模型,将太阳总辐射分为直接辐射和散射辐射两部分。水平面太阳辐射是太阳高度角、入射角、露点温度、近地大气温度、近地大气相对湿度及太阳常数等的函数,其关系可表示为

$$I_h = 0.349S_0\sin\theta_h R_A T_d T_a R_h + 0.65\tau_a S_0 R_s \sin\theta_h$$
 (1)

式(1)中:  $I_h$  为水平太阳辐射,  $W/m^2$ ;  $S_0$  为太阳常数,  $W/m^2$ ;  $R_A$  为吸收透射率;  $T_d$ 、 $T_a$  为露点温度和近地大气温度,  $^{\circ}C$ ;  $R_h$  为近地大气相对湿度, %;  $R_s$  为散射辐射率。

式(1)中相关参数计算为

$$R_s = (1 - F_0)/(1 - F_0 F_g)$$
 (2)

$$\tau_a = 0.56k_1 [e^{-0.56m(z,h)} + e^{-0.096m(z,h)}]$$
 (3)

$$\tau_h = 0.271 - 0.2939\tau_a$$
 (4)

$$F_0 = 0.085 - 0.247\lg(0.001p_a\sin\theta_h)$$
 (5)

$$T_d = 2371.78/B - 273.16$$
 (6)

$$B = 11.286 - \lg(611R_h \times 10^4)$$
 (7)

$$A = 8.5(T_a - 0.01)/(T_a + 273.15)$$
 (8)

$$R_A = 1.0 - 0.27 \left( \frac{e^{0.07074T_d + A_s}}{\sin\theta_h} \right)^{0.303}$$
 (9)

式中:  $F_g$  为区域地表反射率;  $A$ 、 $B$  为计算中间变量;  $\tau_a$  为直射辐射大气透明度系数,其中  $k_1$  为修正系数,取值范围为 0.8 ~ 0.9;  $\tau_h$  为散射辐射大气透明度系数;  $A_s$  为经验常数(4—6 月为 -0.022 9,年内其他月份为 0.020 3);  $\sin\theta_h$  小于 0.1 时,取 0.1。

1.2.2 倾斜瞬时辐射

任意倾角下坡面太阳瞬时辐射计算式为

$$I_t = (I_h - I_{st})R_b + I_{st}$$
 (10)

$$I_{st} = [0.15 - 0.1\sin(\theta_h)]I_h$$
 (11)

$$R_b = [\sin\theta_h \cos\alpha + \cos\theta_h \sin\alpha \cos(\varphi - \beta)]/\sin\theta_h$$
 (12)

式中:  $I_t$  为倾斜面太阳辐射,  $W/m^2$ ;  $I_{st}$  为大气散射辐射度,  $W/m^2$ ;  $R_b$  为直接辐射转换系数;太阳高度角  $\theta_h$  及方位角  $\varphi$  等参数的计算见参考文献[17]。

2 研究区域及模型验证

2.1 研究区域

现以永定河流域(115°30'00" ~ 117°45'00"E, 39°30'00" ~ 41°20'00"N)为研究对象,流域示意图

如图 2 所示,该流域主河道全长 747 km,流域面积 47 016  $km^2$ ,是海河流域的七大水系之一。流域内自然环境多样,有山地、高原、丘陵、盆地,其中山区面积占土地总面积的 72% 以上,约 45 063  $km^2$ ,平原面积约 1 953  $km^2$ 。该区地处干旱和湿润气候的过渡地带,属中纬度大陆性季风气候,春季干旱多风,夏季炎热多雨,秋季凉爽秋季凉爽湿润,冬季寒冷干燥。流域内官厅水库是北京市主要的供水水源之一,该流域水资源系统适应自然变化(如气候变化)的能力很低,是中国水资源系统最脆弱的地区之一[18-19]。

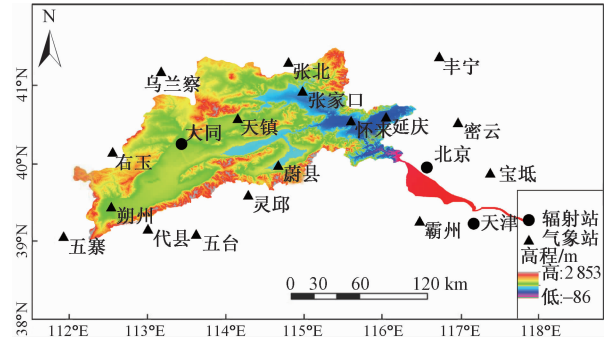


图 2 永定河流域地形图

Fig. 2 Topography map of the Yongding River Basin

2.2 模型验证

利用永定河流域 3 个气象观测站 1975 年太阳总辐射实测资料对同模拟年太阳总辐射模拟结果进行验证。并根据赵娜等[20]估算海河流域太阳辐射推荐方法,即 Angstrom-Prescott 模型进行对比论证分析。通过分析决定系数( $R^2$ )、相对误差(relative error, RE)及纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)来评估模型的模拟效果,模拟值越接近实测值,则 NSE 越接近 1, RE 越趋于 0。

表 1 为流域内实测站点基本信息及计算值与模拟值误差表,可知,模拟值与实测值的相关性均在 0.80 以上,其中,北京站的相关程度最高,决定系数为 0.83;天津站次之,为 0.82;大同站的相关程度最低,为 0.80。本文方法 RE 均小于 0.1, NSE 平均值为 0.88,与文献[20] RE 均值为 0.1, NSE 均值为 0.87 中 Angstrom-Prescott 模型结果相差不大。

各站点典型年月实测值与模拟值对比如图 3 所示,可知,各站点模拟值与实测值的吻合较好,但整

| 表 1 气象观测站地理信息及误差分析                                              |        |                 |                 |       |      |      |
|-----------------------------------------------------------------|--------|-----------------|-----------------|-------|------|------|
| Table 1 Information and error analysis of geographical stations |        |                 |                 |       |      |      |
| 站名                                                              | 站号     | 经度/ $^{\circ}E$ | 纬度/ $^{\circ}N$ | $R^2$ | RE   | NSE  |
| 北京                                                              | 54 511 | 116.28          | 39.48           | 0.83  | 0.09 | 0.89 |
| 天津                                                              | 54 527 | 117.03          | 39.05           | 0.82  | 0.01 | 0.91 |
| 大同                                                              | 53 487 | 113.33          | 40.10           | 0.80  | 0.10 | 0.84 |

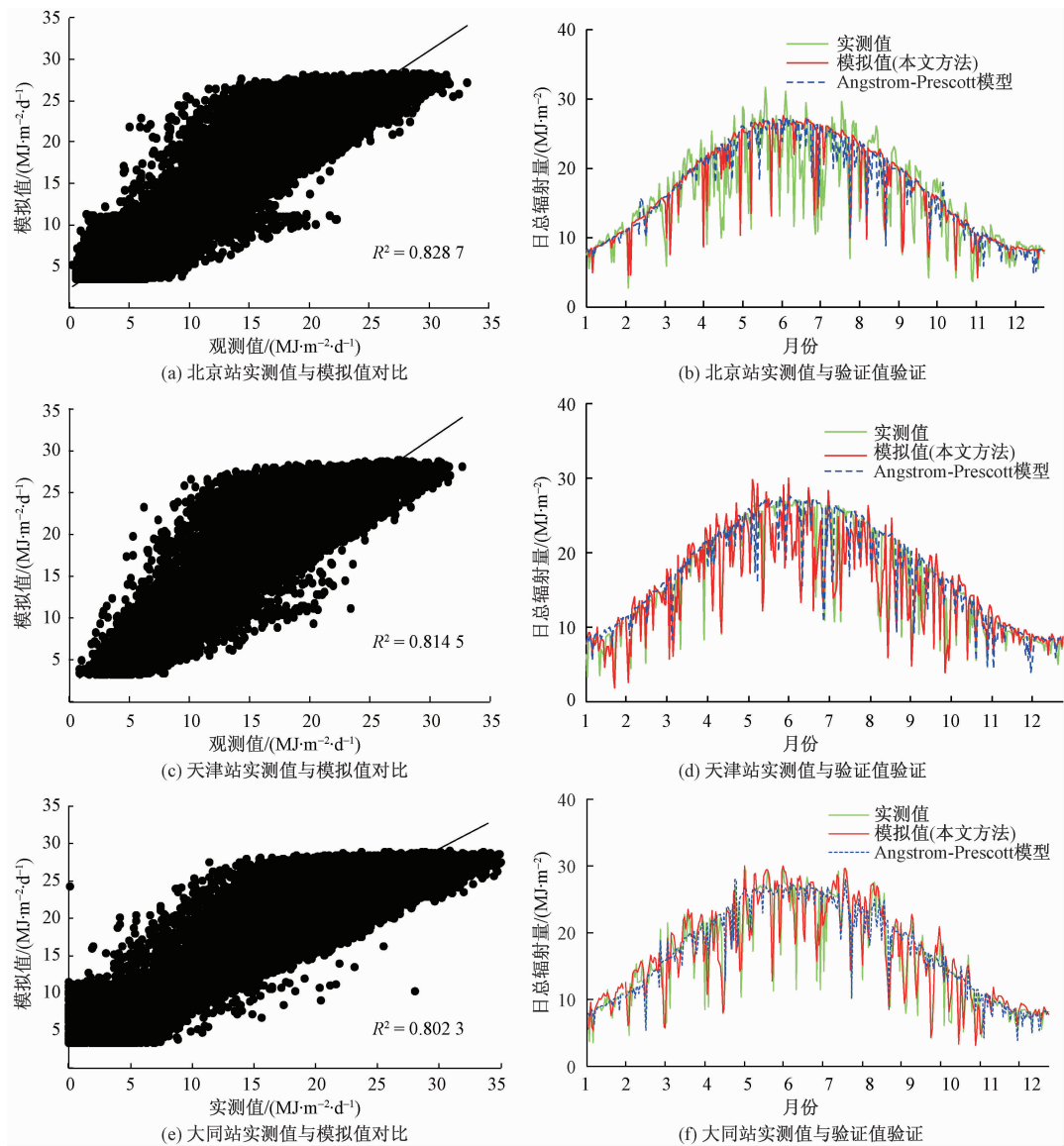


图3 各站点典型年、月模拟值与实测值对比

Fig. 3 Comparison of calculated and measured values for typical years and months

体上模拟值比实测值偏大。从日过程对比图可以看出,本文模拟值比 Angstrom-Prescott 模型结果略大,整体较为吻合。本文方法的模拟结果 1—4 月和 10—12 月比 5—9 月吻合度高;季度来看,春冬季节吻合度最好,秋季次之,夏季最差,这可能跟该地春冬干旱、夏季多雨有关。从月度中可以看出总体较吻合,局部天数出现高于或低于实际观测值,这是由于在模拟计算时采用各个气象观测数据为日极值数据(如日最高气温/气压、日最低气温/气压等)插值而得,此外,复杂的天气原因也会导致模拟值在各月、年之间有所差异。

3 典型年变化过程及影响因素分析

3.1 倾角对太阳辐射量影响

为分析流域任意倾角对太阳总辐射量的影响,

选择经纬及海拔相差较大的朔州站 (112. 43° E, 39. 30°N; 海拔 1 431. 00 m) 和怀来站 (115. 50° E, 40. 40°N; 海拔 724. 20 m) 作为代表站点进行分析,限于篇幅,选取 1975 年、1975 年 9 月及 1975 年 9 月 12 日分别作为年尺度、月尺度及日尺度进行分析。表 2 为 1975 年 9 月朔州站和怀来站在不同倾角下的最大日辐射量、最小日辐射量及平均日辐射量。

在不同倾角下,同一站点的太阳日辐射量相差较小,各角度下最大值(最小值、平均值)之间的最值之差用极差表示。朔州站日辐射量最大、最小和平均值的极差分别为 3. 83、4. 23、2. 98 MJ/(m²·d),怀来站分别为 0. 56、0. 85、1. 32 MJ/(m²·d),此外,两站平均值极差均不超过 3 MJ/(m²·d)。由此可见,倾角大小对该流域同一站点的太阳辐射量影响较小。

表2 不同倾角下朔州站和怀来站的最大日辐射量、最小日辐射量及平均日辐射量

| Table 2 Maximum, minimum and average daily radiation at Shuzhou and Huailai stations with different inclinations |                                                   |      |       |                                                   |      |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|------|-------|---------------------------------------------------|------|------|
| 倾角/<br>(°)                                                                                                       | 朔州站辐射量/<br>(MJ·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> ) |      |       | 怀来站辐射量/<br>(MJ·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> ) |      |      |
|                                                                                                                  | 最大                                                | 最小   | 平均    | 最大                                                | 最小   | 平均   |
| 0                                                                                                                | 28.46                                             | 3.39 | 16.07 | 9.78                                              | 0.94 | 5.05 |
| 10                                                                                                               | 27.79                                             | 4.59 | 17.56 | 9.97                                              | 1.28 | 6.12 |
| 20                                                                                                               | 26.81                                             | 5.67 | 18.45 | 9.97                                              | 1.59 | 6.04 |
| 30                                                                                                               | 25.78                                             | 6.58 | 18.95 | 10.14                                             | 1.79 | 6.29 |
| 40                                                                                                               | 24.93                                             | 7.29 | 19.03 | 10.03                                             | 1.68 | 6.37 |
| 50                                                                                                               | 24.64                                             | 7.62 | 18.66 | 9.68                                              | 1.53 | 6.27 |
| 60                                                                                                               | 24.63                                             | 6.41 | 17.75 | 9.58                                              | 1.34 | 5.99 |
| 极差                                                                                                               | 3.83                                              | 4.23 | 2.98  | 0.56                                              | 0.85 | 1.32 |

不同倾角下,朔州站和怀来站 1975 年 9 月 12 日 24 h 内太阳辐射时过程变化形态基本一致,均呈抛物线型[图 4(a)、图 4(b)]。早晨和傍晚辐射值较低,趋近于零,日出后逐渐上升达到峰值后又逐渐降低。同一站点在不同倾角下辐射峰值略有不同,朔州站和怀来站分别在 12:00 和 14:00 左右达到辐射峰值后又逐渐下降。此外,朔州站日内太阳时辐射在 0~7 MJ/(m<sup>2</sup>·d)变化,而怀来站在 0~2.8 MJ/(m<sup>2</sup>·d)变化,可见不同区域小时间尺度内的太阳辐射分布差异显著。

不同倾角下,朔州站和怀来站月内太阳日辐射变化趋势较为一致[图 4(c)、图 4(d)]。朔州站 9 月逐日辐射波动明显,这可能与研究时段内该地天气变化大有关,而怀来站 9 月逐日辐射变化相对平稳。此外,从典型月份不同倾角日辐射量分析,太阳总辐射随坡度增大呈先增加后减小的变化趋势,各站点均在 40°倾角时达到辐射峰值,后文以辐射最大时 40°倾角作为该流域的代表倾角。

### 3.2 坡面方位角对太阳辐射量影响

为探讨复杂地形下太阳辐射的变化规律,根据模型计算出永定河流域任意方位角太阳辐射量,由于该流域地势西北高、东南低,由西北向东南倾斜,地形大致为南北走向,则山坡面北方向平均日照时间较短,研究意义不大。因此,计算过程中所选的倾斜面方位角以正南方向为 0°,东西 -90°~90°。对坡面方位角每隔 15°计算一次逐时太阳辐射量,为减小计算量,倾角分别取最小倾角为 0°和最佳倾角为 40°。朔州站和怀来站逐月太阳辐射量在同一方位角整体上变化趋势一致,沿流域中心向东西两向逐渐减少并呈对称分布(图 5)。此外太阳辐射有明显的月间变化,1—3 月、10—12 月太阳辐射受倾角和坡面方位角影响较 4—9 月大,且均以 0°取得

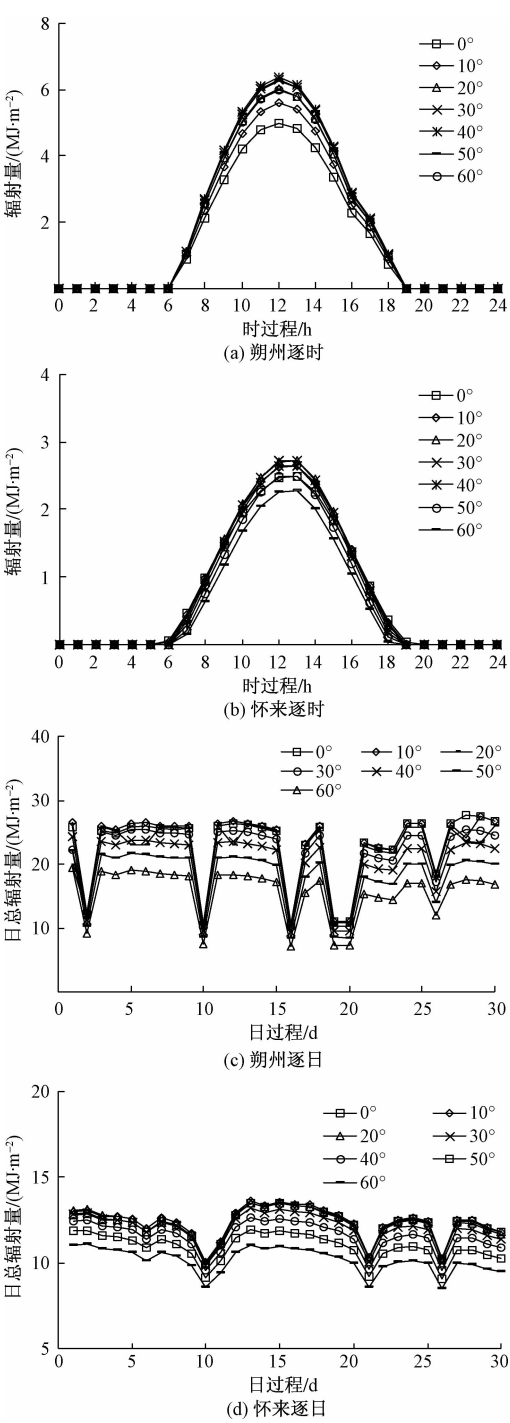


图4 不同倾角下朔州站和怀来站太阳的逐时、逐日辐射量计算结果

Fig. 4 The calculated hourly and daily solar radiations under different inclinations at Shuzhou and Huailai stations

最大值,并沿东西两向减少。

### 3.3 永定河流域太阳辐射年过程分析

根据模型分别计算出永定河流域水平面及倾斜面每一个网格的逐时太阳辐射值,然后累加得出全流域的太阳辐射值。从图 6 可以看出,太阳辐射的年际波动幅度较大,相邻年际最大变化幅度达到

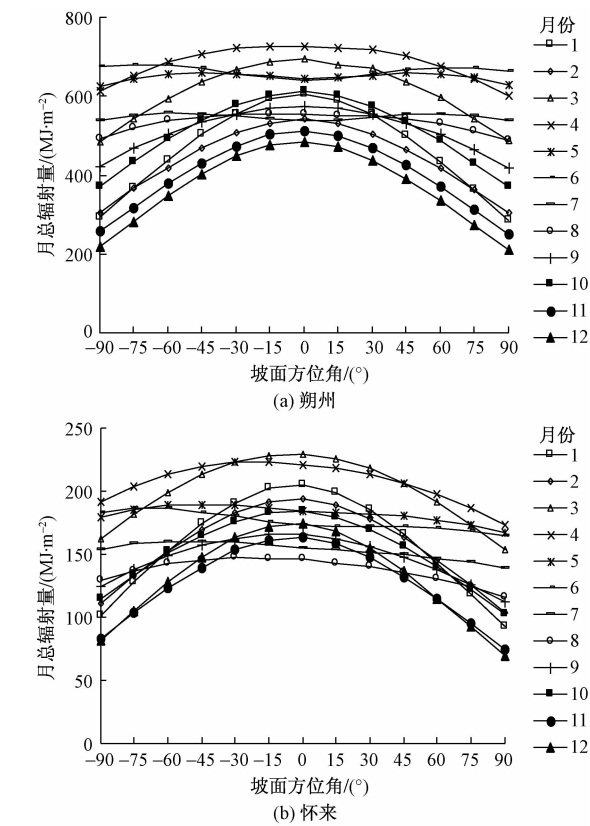


图5 不同方位角条件下朔州站和怀来站  
1975年逐月太阳辐射量  
Fig. 5 Monthly radiation of at Shuozhou and Huailai  
stations under different azimuth in 1975

800 MJ/m<sup>2</sup>左右,约占平均值的18%,说明局部的其他气象变量的变化(如日照时数、云类型和云成量等)对局部的太阳实际辐射量影响较大。当不考虑地形倾斜变化时,1951—2018年永定河流域多年平均太阳辐射为4 436.00 MJ/m<sup>2</sup>,最大辐射为1965年的4 705.78 MJ/m<sup>2</sup>。考虑地形倾斜变化时,该流域多年平均太阳辐射为5 097.09 MJ/m<sup>2</sup>,最大辐射为1965年的5 535.50 MJ/m<sup>2</sup>。当流域地形水平或倾斜时,太阳辐射最小值均出现在2003年,其中地形水平时最小值为4 046.17 MJ/m<sup>2</sup>,倾斜时为4 758.46 MJ/m<sup>2</sup>。图6中直线为太阳辐射逐年变化的趋势拟合线,可见,太阳辐射在1951—2018年期间总体呈减小的趋势。此外,永定河流域在地形水平和倾斜的情况下,在1951—2018年期间太阳辐射每10年的减小幅度分别约为46.45 MJ/m<sup>2</sup>和56.25 MJ/m<sup>2</sup>。

4 结论

基于气象资料建立区域太阳逐时计算模型,试图改进太阳辐射估算方法,提高具体流域复杂地形下太阳辐射的计算精度,通过与不同站点不同时间尺度的辐射测量值对比验证,并应用于小时间尺度

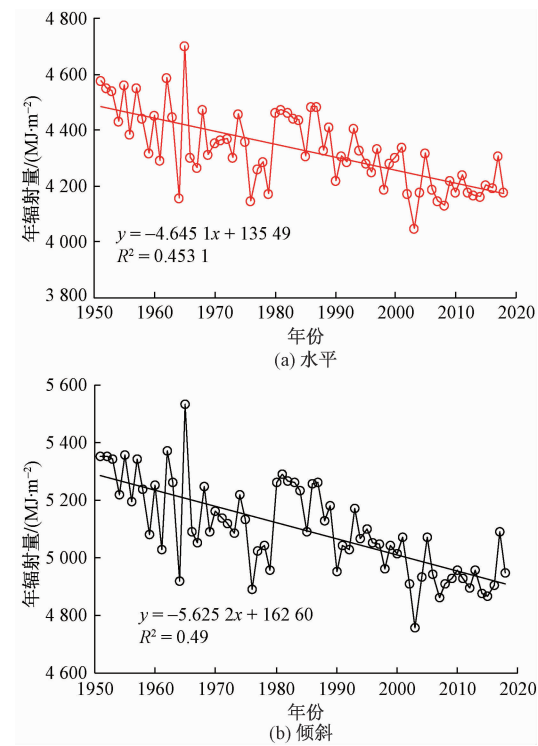


图6 永定河流域太阳辐射的逐年变化(1951—2018年)  
Fig. 6 Variation of solar radiation on the horizontal and  
inclined planes from 1951 to 2018

和小区域空间尺度的具体辐射过程,模拟和分析了永定河流域的太阳辐射过程,得到如下结论。

(1)针对太阳辐射在不同区域地形地貌条件下的差异,建立了任意方向角和倾角下的流域太阳辐射逐时模型,且该模型能较好地模拟该流域的太阳辐射变化。

(2)任意倾角下,同一站点太阳辐射时变化形态基本一致,均呈抛物线型,不同站点太阳辐射峰值受地理纬度及海拔影响较大。

(3)任意坡面方位角下,太阳辐射沿流域向东西两向逐渐减少并呈对称分布。太阳辐射年内具有明显的季节变化特征,1—3月、10—12月太阳辐射受倾角和坡面方位角影响较4—9月大。

(4)永定河流域1951—2018年多年平均太阳辐射为4 436.00~5 097.09 MJ/m<sup>2</sup>,相邻年份的变幅较大,最大值达多年平均值的18%左右,同时逐年太阳辐射总体呈减小趋势,在地形水平和倾斜的情况下,太阳辐射每10年的减小幅度分别为46.45 MJ/m<sup>2</sup>和56.25 MJ/m<sup>2</sup>。

从验证结果可以看出,本文模型尽管能取得相对较好的估算结果,但是仍然存在一些需要进一步改进的地方,主要体现在:①本文模型计算过程中对于大气参数及反射率进行简化处理,未从机理上反映其对太阳辐射的影响;②京津冀地区经济发展迅速,该地

区环境污染也是影响太阳辐射的不确定因素之一。这些都将是今后进行深入研究和解决的方向。

参 考 文 献

[1] Hou J, Ning L, Huang G H, et al. Spatial scale effects on retrieval accuracy of surface solar radiation using satellite data[J]. Applied Energy, 2020, 270: 115178-115192.

[2] 李 净, 王 丹, 冯蛟蛟, 等. 基于 MODIS 遥感产品和神经网络模拟太阳辐射[J]. 地理科学, 2017, 37(6): 912-919.  
Li Jing, Wang Dan, Feng Jiaojiao, et al. Simulation of solar radiation based on neural network and MODIS remote sensing products [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(6): 912-919.

[3] Mghouchi Y, Bouardi A, Choulli Z, et al. Models for obtaining the daily direct, diffuse and global solar radiations[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 56: 67-69.

[4] Benmouiza K, Chekneane A. Small-scale solar radiation forecasting using ARMA and nonlinear autoregressive neural network models [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 124(3-4): 945-958.

[5] 王 娜, 王 文. 河北涞源太阳辐射的时空分布差异及资源应用可行性分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(11): 231-236.  
Wang Na, Wang Wen. Temporal and spatial distribution of solar radiation and feasibility analysis of resource utilization in Hebei, Laiyuan[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(11): 231-236.

[6] 李军立, 吴良林. 广西北回归线区域天文辐射时空特征——以宾阳县为例[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(20): 37-42.  
Li Junli, Wu Lianglin. Spatial and temporal characteristics of regional astronomical radiation near the tropic of cancer in Guangxi: take Binyang County as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(20): 37-42.

[7] 郭 挺, 邱新法, 曾 燕, 等. 起伏地形下福建省太阳总辐射的分布式模拟[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(12): 33-40.  
Guo Ting, Qiu Xinfa, Zeng Yan, et al. Distributed modelling of total solar radiation of rugged terrain over Fujian Province[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(12): 33-40.

[8] He Y J, Qiu X F, Cao Y. Estimation of monthly average sunshine duration over China based on cloud fraction from MODIS satellite data[J]. Current Science, 2014, 107(12): 2013-2018.

[9] Pramod K, Michelle L. A new method to estimate average hourly global solar radiation on the horizontal surface[J]. Atmospheric Research, 2012, 114-115: 83-90.

[10] Shi G P, Qiu X F, Zeng Y. New method for estimating daily global solar radiation over sloped topography in China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2018, 35(3): 285-295.

[11] Wu J, Keong C C. Prediction of hourly solar radiation using a novel hybrid model of ARMA and TDNN[J]. Solar Energy, 2011,

85(5): 808-817.

[12] 刘卫亮, 刘长良, 林永君, 等. 基于 AOD 估计的晴空太阳辐射强度滚动预测[J]. 太阳能学报, 2019, 40(7): 1797-1804.  
Liu Weiliang, Liu Changliang, Lin Yongjun, et al. Rolling prediction of clear sky solar radiation intensity based on AOD estimation[J]. Journal of Solar Energy, 2019, 40(7): 1797-1804.

[13] Turi M, Aziz A. Solar radiation prediction using radial basis function models [C]//International Conference on Developments of E-Systems Engineering. New York: IEEE, 2015(5): 1-3.

[14] 徐文莉, 杨金焕, 佟 洁. 中国部分地区太阳辐射特征的数学分析[J]. 太阳能学报, 2012, 33(2): 334-337.  
Xu Wenli, Yang Jinhuan, Tong Jie. Mathematical analysis of solar radiation characteristics in parts of China[J]. Journal of Solar Energy, 2012, 33(2): 334-337.

[15] 曾思栋, 张利平, 夏 军, 等. 永定河流域水循环特征及其对气候变化的响应[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(3): 501-511.  
Zeng Sidong, Zhang Liping, Xia Jun, et al. Characteristics of the water cycle in the Yongding River Basin and its response to climate change[J]. Journal of Applied Basic and Engineering Sciences, 2013, 21(3): 501-511.

[16] 文小航. 中国大陆太阳辐射及其与气象要素关系的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.  
Wen Xiaohang. Study on the relationship between solar radiation in mainland China and meteorological elements [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008.

[17] 王炳忠. 太阳辐射计算讲座 第一讲 太阳能中天文参数的计算[J]. 太阳能, 1999(2): 8-10.  
Wang Bingzhong. Lecture on solar radiation calculation lecture 1: calculation of astronomical parameters in solar energy [J]. Solar Energy, 1999(2): 8-10.

[18] 董思宜, 杨 熙, 王秀兰, 等. 永定流域生态环境质量评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(11): 348-351.  
Dong Siyi, Yang Xi, Wang Xiulan, et al. Evaluation of the ecological environment quality of the Yongding River Basin[J]. Population, Resources and Environment in China, 2013, 23(11): 348-351.

[19] 贾文娟. 永定河流域(河北—北京段)土地利用及生态环境质量评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.  
Jia Wenjuan. Land use and ecological environment quality evaluation of Yongding River Basin (Hebei-Beijing Section) [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.

[20] 赵 娜, 王治国, 张复明, 等. 海河流域太阳辐射计算模型评估及时空变异规律[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(3): 53-58.  
Zhao Na, Wang Zhiguo, Zhang Fuming, et al. Evaluation of the calculation model of solar radiation in the Haihe River Basin and the law of temporal and spatial variation[J]. Meteorological and Environmental Science, 2017, 40(3): 53-58.