

辽宁省追踪式与最佳倾角斜面总辐射的推算与分析

顾正强 朱玲 沈历都 龚强 赵春雨 晁华 徐红 蔺娜

(沈阳区域气候中心, 沈阳 110166)

摘要: 利用辽宁省1993—2016年61个气象站的日照百分率逐月数据、6个太阳辐射观测气象站的逐时太阳总辐射数据, 采用太阳辐射的气候学计算方法、Klein各向异性散射模型和Hay各向异性散射模型分别推算各站水平面、最佳倾角斜面和追踪式斜面的太阳总辐射的推算值并进行了对比与分析。同时利用1993—2016年日平均总云量数据, 得到各站的累年平均晴天日数, 并分析辽宁省太阳总辐射空间分布差异的原因。结果表明: 全省最佳倾角角度为 $36^{\circ} \sim 41^{\circ}$, 最小出现在金州, 最大分别出现在康平、昌图、法库和西丰; 最佳倾角斜面太阳总辐射在辽宁西部和北部地区明显偏多, 其中, 朝阳北部和阜新西部部分地区最多; 追踪式斜面较最佳倾角斜面太阳总辐射的增加量和提升百分比的幅度均较大, 分别达到约 $700 \sim 2300 \text{ MJ/m}^2$ 和 $13\% \sim 41\%$, 且存在较明显的呈区域性分布特征, 其中, 太阳总辐射的增加量在辽宁西部更明显, 而太阳总辐射的提升百分比则以沿海地区的幅度更大, 超过 37% , 大连南部更是超过 39% ; 晴天日数或云量是影响辽宁省太阳能总辐射的空间分布差异的主要因素。

关键词: 追踪式斜面, 最佳倾角斜面, 总辐射

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.016

Analysis and Comparison of the Tracking and Fixed Angle Bevel Solar Radiation in Liaoning

Gu Zhengqiang, Zhu Ling, Shen Lidu, Gong Qiang, Zhao Chunyu, Chao Hua, Xu Hong, Lin Na

(Regional Climate Center of Shenyang, Shenyang 110166)

Abstract: In this paper, monthly percentage of sunshine from 61 meteorological stations (1993-2016) and hourly global solar radiation from six solar radiation observation stations were used to calculate and compare the level, optimal bevel and bevel tracking of global solar radiation for each station. This was completed using solar radiation climatological calculations Klein anisotropic scattering model and Hay anisotropic scattering model. The annual average number of clear days were derived from the daily average total cloud cover from 1993-2016 to determine if they could explain spatial variation in total solar radiation between the stations in Liaoning. We found that the optimal tilt angle lay in the range of $36^{\circ} \sim 41^{\circ}$, with the minimum angle in Jinzhou and maximum angle in Kangping, Changtu, Faku and Xifeng, and the optimal bevel solar radiation in west, central and north Liaoning were greater than that of the other areas, with the greatest solar radiation in north Chaoyang and west Fuxin. The results also showed the annual tracking bevel global solar radiation in the central, west and north Liaoning were greater, and the increase of tracking optimal bevel solar radiation could reach $700 \sim 2300 \text{ MJ/m}^2$ ($13.0\% \sim 41.0\%$), and showed significant regional distribution. Lastly, we showed the increase of the total solar radiation was greater in west Liaoning, but the largest increase of percentage is in the coastal regions ($>37\%$, and even $>39\%$ in south Dalian). Thus, the number of clear days or days with cloud cover could be the main reason for the spatial variation of total solar radiation in Liaoning.

Keywords: the tracking optimal bevel, the optimal bevel, solar radiation

0 引言

太阳能是一种取之不尽、用之不竭的绿色环保可再生能源。为了更好地利用太阳能资源, 学者们从没停止过研究的脚步, 由最初集中在太阳辐射的气候学计算与分析^[1-7], 到基于气象站观测资料对部分省市太阳能资源的时空分布及区划的研究分析^[8-18], 所得成

果为太阳能光伏发电提供了重要的科学依据, 然而在太阳能资源一定的情况下, 如何高效地将太阳能转化为电能, 即提升发电量, 对太阳能资源开发利用显得极为关键。

目前, 太阳能光伏发电主流方式是利用太阳能光伏板对太阳能的转化, 且太阳能光伏板的安装方式多采用固定倾角式(固定式)和旋转追踪式(追踪式)。关于固定式太阳能光伏板最佳倾角设计以及斜面上太阳辐射的估算等研究相对较多, 韩斐等^[19]研究表明根据季节调整倾角的光伏板接收的年辐射能, 与

收稿日期: 2018年9月28日; 修回日期: 2018年12月25日

第一作者: 顾正强(1984—), Email: 393558873@qq.com

通信作者: 龚强, Email: isgq@sina.com

水平和年最佳倾角放置的光伏板相比，分别提高了11.5%和4.1%，水平光伏板辐射能的理论值与实验值误差在5%以内，完全能满足一般太阳能工程研究的需要；杨金焕^[20]的研究表明：在确定固定式光伏方阵的最佳倾角时应综合考虑方阵面上太阳辐射量的连续性、均匀性和极大性。杨金焕等^[21]根据天空散射辐射各向异性的Hay模型，计算倾斜面上辐射量，推导得到了冬半年朝向赤道倾斜面最佳倾角的数学表达式以及对我国一些地区不同方位角的倾斜面上月平均日辐射量及最佳倾角进行了计算和分析；申政等^[22]研究表明气候条件对最佳倾角的选择影响较大，以当地纬度为基础的估算误差较大，与全年定倾角的接收面相比，按月调整倾角，全年接收的辐射量可增加3%~15%；李卫军等^[23]研究表明追踪式电池板发电量比相同情况下的固定式光伏电池板提高40%左右；成驰等^[24]和李潇潇等^[25]均表示在设计光伏发电系统时，为了提高光伏电站运行效率，增加发电量，首先需要计算并确定发电站光伏阵列安装的倾角，以及在该过程中对辅助设计软件进行了对比和实验。

而关于旋转追踪式（追踪式）斜面上太阳辐射的估算等研究相对较少，且对比两种安装方式所接收到的太阳能辐射，结合安装成本及经济效益，选择合理的安装方式对太阳能光伏发电十分重要。对于同一地区太阳能光伏板的不同安装方式所获得的太阳能辐射量差异较大。为此，本文以辽宁省为例，对两种安装方式的太阳辐射接收量进行对比分析，进而为辽宁省太阳能光伏发电提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

本文所使用资料均来源于辽宁省气象档案馆，使用的资料为辽宁省61个气象站，1993—2016年日照百分率逐月数据；1987—2016年日平均总云量数据，且定义日平均总云量<2成为晴天；6个太阳辐射观测气象站（简称为辐射站）的逐时太阳总辐射数据，其中3个为长期观测气象站（沈阳、朝阳和大连），沈阳站是辽宁省唯一的全辐射观测气象站，其余55个气象站简称为非辐射站（表1）。

1.2 研究方法

1.2.1 水平面上太阳总辐射的推算

采用了较为常见的推算无辐射观测地区太阳总辐射的计算公式（统计反演法）^[23-24]，

$$Q = Q_0 (a + bS), \quad (1)$$

式中， Q 为推算出的太阳总辐射， Q_0 为天文总辐射， S 为月日照百分率， a 、 b 为经验系数。

表1 辽宁省6个太阳辐射观测气象站基本信息表
Table 1 Overview of the six solar radiation basic observation stations in Liaoning

站名	经度	纬度	海拔高度/m	逐时观测时间	逐时辐射观测项目
沈阳	123°31'E	41°44'N	49.0	1993.01	水平面太阳总辐射、散射辐射、直接辐射、净辐射、反射辐射
朝阳	120°26'E	41°33'N	175.3	1993.01	水平面太阳总辐射
大连	121°38'E	38°54'N	91.5	1993.01	水平面太阳总辐射
新民	122°51'E	41°58'N	30.9	2005.01	水平面太阳总辐射
兴城	120°45'E	40°36'N	20.5	2005.01	水平面太阳总辐射
宽甸	124°47'E	40°43'N	260.1	2005.01	水平面太阳总辐射

1.2.2 最佳倾角和最佳倾角面太阳总辐射的研究方法

倾斜面上接收到的太阳辐射包括直接辐射、散射辐射和反射辐射，通常采用Klein各向异性散射模型，倾斜面上辐射量计算公式如下^[19]：

$$H_T = H_b \frac{\cos \theta}{\cos \theta_0} + H_d \left[\frac{H_b \cos \theta}{H_0 \cos \theta_0} + 0.5 \left(1 - \frac{H_b}{H_0} \right) (1 + \cos \beta) \right] + \rho (H_b + H_d) \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (2)$$

式中， H_T 为倾斜面辐射量（MJ/m²）， H_b 为水平面上接收到的直接辐射， H_d 为水平上接收到的散射辐射， θ_0 为水平面的太阳光入射角， θ 为斜面上的太阳光入射角， β 为倾斜面与水平面的夹角， ρ 为地面反射率（表2），本文取0.2。 H_0 为大气层外水平面太阳辐射量。

表2 地面反射率
Table 2 Surface albedo ρ

类型	干燥黑土	湿黑土	干灰色地面	湿灰色地面	草地	干砂地
ρ	0.14	0.08	0.27	0.11	0.2	0.18

1.2.3 追踪式斜面太阳总辐射的推算

采用Hay各向异性散射模型，认为斜面上天空散射辐射量（ H_{dt} ）是由太阳光盘的辐射量和其余天空穹顶均匀分布的散射辐射量两部分组成^[18]，可表达为

$$H_{dt} = H_d \left[\frac{H_b}{H_0} R_b + 0.5 \left(1 - \frac{H_b}{H_0} \right) (1 + \cos \beta) \right], \quad (3)$$

式中， R_b 为倾斜面与水平面上直接辐射比，又因为倾斜面与光线垂直， R_b 亦可表示为 $\frac{1}{\cos \beta}$ 。

因为追踪式斜面始终与太阳光线垂直，则 β 为太阳高度角 h 的余角，即

$$\cos \beta = \sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \tau,$$

式中， φ 为当地纬度， δ 为太阳赤纬角，计算公式如下：

$$\delta = 0.3723 + 23.2567 \sin \alpha + 0.1149 \sin 2\alpha - 0.1712 \sin 3\alpha - 0.758 \cos \alpha + 0.3656 \cos 2\alpha + 0.0201 \cos 3\alpha \quad (4)$$

式中, α 为日角, 即 $\alpha = \frac{2\pi(N - N_0)}{365.2422}$, N 为积日, 就是日期在年内的顺序号,

$$N_0 = 79.6764 + 0.2422(\text{年份} - 1985) - \text{INT}\left[\frac{(\text{年份} - 1985)}{4}\right] \quad (5)$$

τ 为当时的太阳时角(取整时次前半小时的真太阳时对应的太阳时角), $\tau = \left(S_0 + \frac{F_0}{60} - 12\right) \times 15^\circ$, S_0 和分 F_0 均表示真太阳时, 由北京时间转为真太阳时需要先转为地方时 S_d , 然后进行时差订正,

$$S_0 = S_d + \frac{E_t}{60} = S + \left\{ F - \left[120^\circ - \left(JD + \frac{JF}{60} \right) \right] \times 4 \right\} / 60 + \frac{E_t}{60} \quad (6)$$

S 和 F 分别为北京时间的时和分, JD 和 JF 分别表示当地的经度和经分, E_t 为时差。

$$E_t = 0.0028 - 1.9857 \sin \alpha + 9.9059 \sin 2\alpha - 7.0924 \cos \alpha - 0.6882 \cos 2\alpha'$$

式中 α 为日角, 计算方法同前。

具体计算方法参见《太阳辐射计算讲座》第一讲^[25]。

$H_0 = E_{sc} \times E_r \times \sin h$, 式中 E_{sc} 为太阳常数, 世界气象组织(WMO)1981年的推荐为 1367 W/m^2 , E_t 为当日地距离订正系数, h 为太阳高度角。

$$E_r = 1.000423 + 0.032359 \sin \alpha + 0.000086 \sin 2\alpha - 0.008349 \cos \alpha + 0.000115 \cos 2\alpha \quad (7)$$

追踪式斜面始终垂直于太阳光线, 因此追踪式斜面上的太阳辐射量的公式为

$$H_T = H_b R_b + H_{dt} + 0.5 \rho H (1 - \cos \beta) \quad (8)$$

式中, H 为水平面上太阳总辐射量; ρ 为地表反射率。

一般情况下, 最后一项地面反射辐射量很小, 只占 H_T 的百分之几。

1.2.4 辽宁省追踪式斜面太阳总辐射的推算流程

根据沈阳站逐时全辐射资料得到逐时水平面上的直接辐射, 以及水平面上直接辐射、散射辐射和反射辐射占水平总辐射的比例, 并视为同日同时次的其他5个辐射站的逐时各辐射所占水平面总辐射的比例 R_b , 结合兴城、宽甸、新民、朝阳和大连站的逐时水平面太阳总辐射资料, 并利用式(3)和式(8)得到兴城、宽甸、新民、朝阳和大连站追踪式斜面的逐时太阳总辐射, 进一步计算得到追踪式斜面年太阳总辐射。从而得到兴城、宽甸、新民、沈阳、大连和朝阳气象站的追踪式斜面年平均太阳总辐射与年平均水平面总辐射的比值。

考虑到各站的天气情况, 采用55个非辐射站的日

照百分率分别与6个辐射站同期的日照百分率进行相关性计算(相关系数均通过0.01的显著性检验), 取相关性最高辐射站的追踪式斜面年平均太阳总辐射与年平均水平面总辐射的比值, 并乘以该非辐射站的年平均水平面总辐射——由式(1)推算, 最终得到该站的年平均追踪式斜面总辐射。流程图见图1。

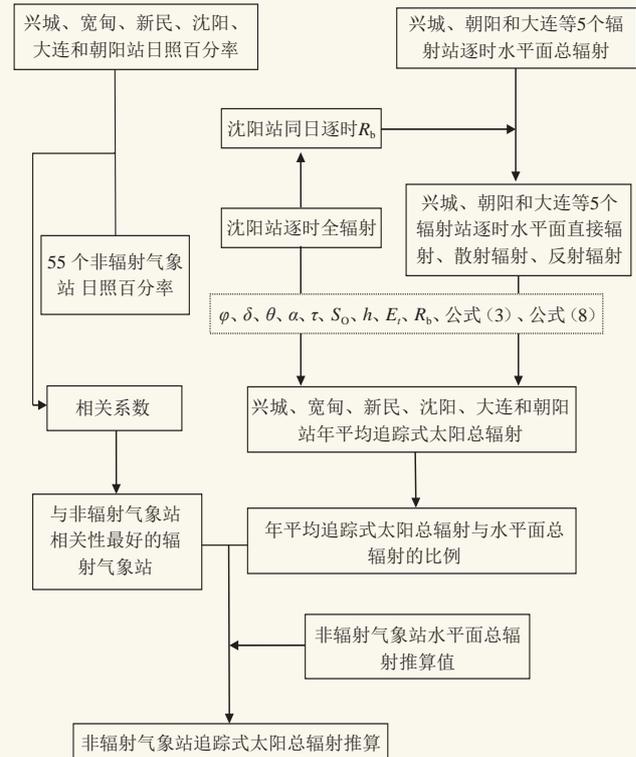


图1 追踪式太阳总辐射的推算

Fig. 1 Flow chart of the calculation of tracking global solar radiation

1.2.5 相似系数

为了定量地表示两个要素场分布的相似程度, 采用相似系数进行分析^[26], 公式为:

$$\cos \theta = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}} \quad (9)$$

式中, n 为站点数, 本文 $n=61$; $\cos \theta$ 为两幅图相似程度的定量指标; x_i 、 y_i 分别为第 i 站(空间点)在两幅图中的要素值。相似系数数值为 $-1.0 \sim 1.0$, 等于1.0时表示完全相同, 等于 -1.0 时表示完全相反, 等于0.0时表示完全不相似, 正值越大表示图形越相似, 负值越大表示图形越相反。

2 水平面太阳总辐射

2.1 水平面太阳总辐射推算

利用朝阳、大连和沈阳站分别进行长期太阳辐

射和日照百分率的拟合,得到上述3站的经验系数 a 、 b ,将3个站的经验系数进行全省范围的插值(反距离权重),从而得到辽宁省各气象站的经验系数 a 、 b 。采用式(1)得到各站的水平面年平均总辐射,并采用反距离权重进行插值,得到全省的水平面年平均总辐射。

辽宁省水平面年平均总辐射(图2)总体呈现自西北向东南逐渐减少的趋势,辽宁西部的朝阳市、兴城地区和锦州部分地区明显偏多,水平面年平均总辐射达到5100 MJ/m²以上,中部辽河平原一带水平面年平均总辐射为4800~5100 MJ/m²,东部明显偏少,年平均总辐射在4413~4800 MJ/m²。

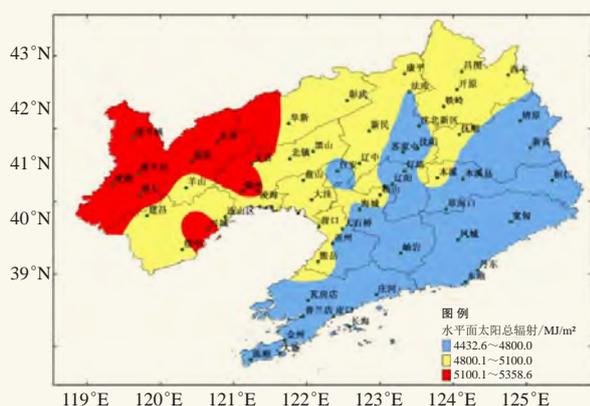


图2 辽宁省水平面年平均太阳总辐射分布图

Fig. 2 Contours of the annual level global solar radiation in Liaoning

2.2 推算结果的合理性分析

将辽宁省6个太阳辐射观测站同期(表1)的水平面年平均太阳总辐量与推算值进行对比,详见表3。可见,除兴城和大连相对误差的绝对值为5.0%~5.6%,相对较大,其余4个站的相对误差的绝对值在0.3%~3.7%。总体而言,水平面太阳总辐射的推算值是比较可信的。

表3 水平面太阳总辐射的推算值与实测值对比

Table 3 Comparisons of the calculated and observed level global solar radiations

年平均	站名	新民	兴城	宽甸	沈阳	朝阳	大连
推算值		4908.4	5206.5	4599.9	4746.0	5131.1	4728.5
观测值		5004.1	4930.2	4537.0	4925.9	5146.7	4979.5
相对误差/%		-1.9	5.6	1.4	-3.7	-0.3	-5.0

3 最佳倾角太阳总辐射

3.1 沈阳水平面上太阳直接辐射占总辐射比例

沈阳是唯一具有全辐射观测的气象站,利用其水平面上太阳直接辐射占总辐射比例代替其他站点的该比例,结合推算得到的水平面太阳总辐射计算得到各

站点水平直接辐射和散射辐射,采用最佳倾角公式计算得到其他气象站月和年最佳倾角,以及对应的年太阳总辐射。

表4 沈阳气象站水平面上太阳直接辐射占总辐射比例(单位:%)

Table 4 Ratios of the level direction solar radiation to the global solar radiation in Shenyang (unit: %)

时段	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年
1993—2016年	52.3	55.6	57.6	53.5	54.0	46.8	39.8	48.5	58.5	60.3	56.9	52.1	52.3

3.2 最佳倾角斜面太阳辐射推算

辽宁省最佳倾角角度为36°~41°,最小出现在金州,最大分别出现在康平、昌图、法库和西丰。最佳倾角斜面的太阳总辐射自西北向东南逐渐减少,辽宁西部和北部地区明显偏多,达到5500.1 MJ/m²以上,其中,朝阳北部和阜新西部部分地区最多,达到6000.1~6225.3 MJ/m²,辽宁东部和南部地区明显偏少,年总辐射量介于5051.9~5500.0 MJ/m²。

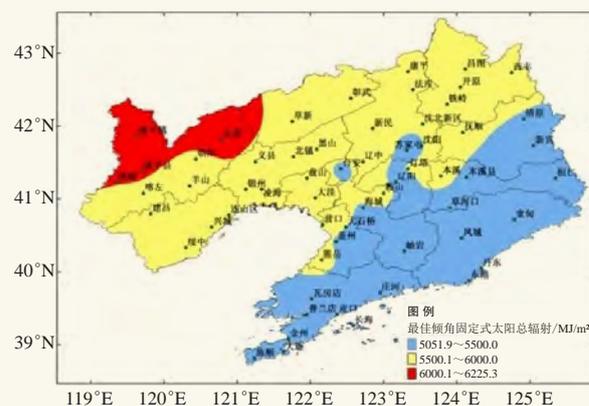


图3 辽宁省最佳倾角斜面太阳总辐射分布图

Fig. 3 Contours of the fixed angle bevel global solar radiation in Liaoning

4 追踪式斜面太阳总辐射

4.1 追踪式斜面太阳总辐射推算结果

辽宁省追踪式斜面年平均总辐射与水平面年平均总辐射的空间分布基本一致,自西北向东南逐渐减少,辽宁西部、中部和北部地区偏多,达到7500.1 MJ/m²以上,其中,朝阳、葫芦岛、锦州西部和阜新西部地区最多,达到8000.0 MJ/m²以上,辽宁东南部地区的年总辐射量偏少,介于5825~7500.0 MJ/m²,皮口地区最少,不足7000 MJ/m²(见图4)。

4.2 追踪式斜面与最佳倾角斜面太阳总辐射推算结果对比

由图5和图6可知追踪式斜面较最佳倾角斜面太阳总辐射偏多约700~2300 MJ/m²,总辐射提升13.0%~41.0%。其中,辽宁省大部分地区太阳总辐射

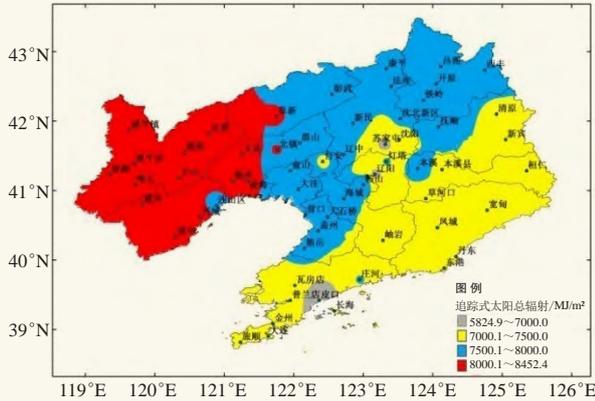


图4 辽宁省追踪式斜面太阳总辐射分布图
Fig. 4 Contours of the tracking of bevel global solar radiation in Liaoning

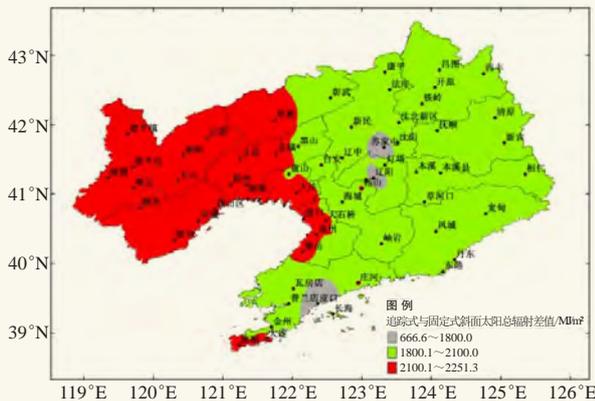


图5 辽宁省追踪式与固定式斜面年总辐射量差值分布图
Fig.5 Deviation of the tracking and fixed angle bevel annual global solar radiation in Liaoning

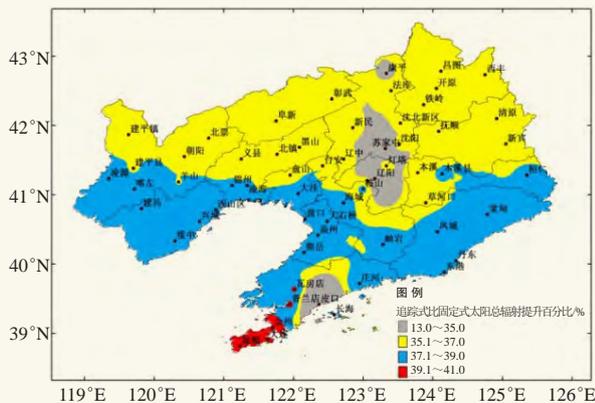


图6 辽宁省追踪式比固定式斜面年总辐射量提升百分比的分布图
Fig. 6 Contours of the relative increase of tracking bevel annual global solar radiation to that of the fixed angle in Liaoning (in percentage)

增加量均达到1800 MJ/m²以上, 辽宁西部和大连南部(旅顺周边地区)更为明显, 达到2100 MJ/m²以上; 辽宁沿海地区(除大连中部)总辐射的提升明显, 达

到37%以上; 辽宁中部部分地区和大连中部地区总辐射的总辐射增加量(688~1800 MJ/m²)和提升百分比(13%~35%)均为最少地区, 皮口站偏少的最为突出。

总体而言, 追踪式斜面较最佳倾角斜面太阳总辐射的增加量和提升百分比的幅度均较大, 且存在较明显的区域性分布, 除部分地区外, 辽宁大部分地区的太阳总辐射的增加量均达到1800 MJ/m²以上, 辽宁西部更加明显, 提升百分比则以沿海地区的幅度更大, 达到37%以上, 大连南部提升百分比最大, 达到39%以上。

5 辽宁省太阳总辐射空间分布差异的分析

5.2 太阳总辐射空间分布差异的原因

考虑到到达地表的太阳总辐射受到包括天文因子(日地距离、太阳赤纬、时角等)、地理因子(经度、海拔高度等)、气象因子(日照百分率、天空云量等)等因素的影响^[25]。那么哪个因子是影响辽宁省太阳总辐射空间分布差异的主要因素呢, 下面进行逐一筛选。

辽宁省地势为自东、西、北三面向中部和南部倾斜, 东西两侧为丘陵山地, 中部为自东北向西南倾斜的长方形辽河平原, 结合本省太阳能资源分布, 可以发现辽宁东部与西部的太阳总辐射差异明显, 且考虑到两侧丘陵山地的海拔高度相近, 因此地理因子不是影响本省太阳能分布的主要因素。由于辽宁省纬度跨度较小, 且本省太阳总辐射的分布差异主要体现在东西部, 可知天文因子亦不是影响本省太阳能分布的主要因素。所以, 基本可以断定气象因子才是影响本省太阳能发布的主要因素。

对于同一个地点同一时间, 达到地面的太阳辐射的多与少一般取决于天空的云量, 云量多, 则对太阳辐射的吸收、反射、散射作用强, 达到地面太阳辐射就少, 反之晴天状况下达到地面的太阳辐射量就多。由图7可知, 辽宁省1993—2016年年平均晴天日数的空间分布呈自西北向东南逐渐减少的变化, 与辽宁省太阳总辐射空间分布(图2、图3、图4)比较相符, 且图7与图2、图3和图4的相似系数^[26]均高达0.9932以上, 说明晴天日数空间分布与水平面、最佳倾角斜面和追踪式斜面太阳总辐射极其的相似。

根据上述分析并结合辽宁省太阳能总辐射月变化特征及雨季所处月份, 能够更好地说明晴天日数或云量是辽宁省太阳能总辐射的空间分布差异的主要因素。

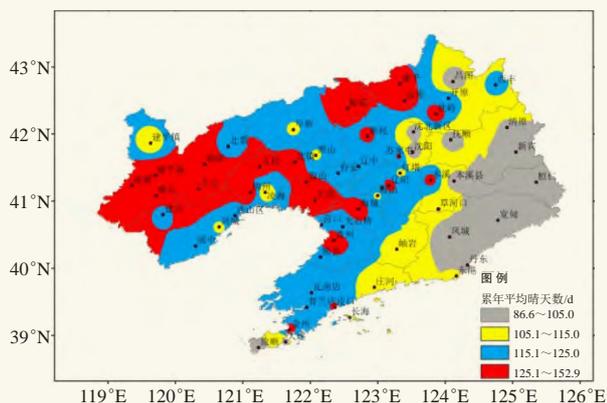


图7 辽宁省1993—2016年年平均晴天日数的空间分布
Fig. 7 Contours of the annual average number of clear days during 1993—2016 in Liaoning

6 结论

1) 辽宁省水平面年平均总辐射总体呈现自西北向东南逐渐减少,且推算值的相对误差在沿海地区(兴城、大连)表现偏大,与沿海地区的天气形势复杂,降雨偏多有关。

2) 辽宁省最佳倾角斜面的太阳总辐射自西北向东南逐渐减少,辽宁西部和北部地区明显偏多,达到5500.1 MJ/m²以上,其中,朝阳北部和阜新西部部分地区最多,达到6000.1~6225.3 MJ/m²。全省最佳倾角角度为36°~41°,最小出现在金州,最大分别出现在康平、昌图、法库和西丰。

3) 辽宁省追踪式斜面年平均总辐射自西北向东南逐渐减少。辽宁西部、中部和北部地区偏多,其中,朝阳、葫芦岛、锦州西部和阜新西部地区最多,达到8000.0 MJ/m²以上,辽宁东南部地区的年总辐射量偏少,皮口地区最少,不足7000 MJ/m²。

4) 辽宁省追踪式斜面较最佳倾角斜面太阳总辐射的增加量和提升百分比的幅度均较大,分别达到约700~2300 MJ/m²和13.0%~41.0%,且存在较明显的区域性分布,除部分地区外,辽宁大部分地区的太阳总辐射的增加量均达到1800 MJ/m²以上,辽宁西部更加明显,提升百分比则以沿海地区的幅度更大,达到37%以上,大连南部提升百分比最大,达到39%以上。

5) 晴天日数或云量是影响辽宁省太阳能总辐射的空间分布差异的主要因素,且追踪式斜面太阳总辐射受夏季多雨天气的影响更显著。

参考文献

- [1] 左大康,王勃贤,陈建绥. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征. 气象学报, 1963, 33(1): 78-96.
- [2] 翁笃鸣. 试论总辐射的气候学计算方法. 气象学报, 1964, 34(3): 304-314.
- [3] 王炳忠, 邹怀松, 殷志强. 我国太阳能辐射资源. 太阳能, 1998, (4): 19.
- [4] 王炳忠. 中国太阳能资源利用区划. 太阳能学报, 1983, (3): 221-228.
- [5] 祝昌汉. 我国散射辐射的计算方法及其分布. 太阳能学报, 1984, (3): 242-249.
- [6] 祝昌汉. 我国直接辐射的计算方法及分布特征. 太阳能学报, 1985, (1): 1-11.
- [7] 何洪林, 于贵瑞, 牛栋. 复杂地形条件下的太阳能资源辐射计算方法研究. 资源科学, 2003, (1): 78-85.
- [8] 李晓文, 李维亮, 周秀骥. 中国近30年太阳辐射状况研究. 应用气象学报, 1998, 9(1): 24-31.
- [9] 桑建人, 刘玉兰, 林莉. 宁夏太阳辐射特征及太阳能利用潜力综合评价. 中国沙漠, 2006, (1): 122-125.
- [10] 刘可群, 陈正洪, 夏智宏. 湖北省太阳能资源时空分布特征及区划研究. 华中农业大学学报, 2007, (6): 888-893.
- [11] 刘佳, 何清, 刘蕊, 等. 新疆太阳辐射特征及其太阳能资源状况. 干旱气象, 2008, (4): 61-66.
- [12] 于华深, 蔺娜, 于杨. 辽宁省太阳能资源分布及区划初探. 气象与环境学报, 2008, (2): 18-22.
- [13] 龚强, 于华深, 蔺娜, 等. 辽宁省风能、太阳能资源时空分布特征及其初步区划. 资源科学, 2008, (5): 654-661.
- [14] 吴林荣, 江志红, 鲁渊平, 等. 陕西太阳总辐射的计算及分布特征. 气象科学, 2009, (2): 2187-2191.
- [15] 赵利勇, 胡明辅, 杨贞妮. 太阳能利用技术及发展. 能源与环境, 2007, (4): 55-57.
- [16] 袁小康, 谷晓平, 王济. 中国太阳能资源评估研究进展. 贵州气象, 2011, (5): 1-4.
- [17] 申彦波. 我国太阳能资源评估方法研究进展. 气象科技进展, 2017, 7(1): 77-84.
- [18] 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. 太阳能, 1999(2)
- [19] 韩斐, 潘玉良, 苏忠贤. 固定式太阳能光伏板最佳倾角设计方法研究. 工程设计学报, 2009, (5): 348-353.
- [20] 杨金焱. 固定式光伏方阵最佳倾角的分析. 太阳能学报, 1992, (1): 86-92.
- [21] 杨金焱, 毛家俊, 陈中华. 不同方位倾斜面上太阳辐射量及最佳倾角的计算. 上海交通大学学报, 2002, (7): 1032-1036.
- [22] 申政, 吕建, 杨洪兴, 等. 太阳辐射接受面最佳倾角的计算与分析. 天津城市建设学院学报, 2009, (1): 61-64.
- [23] 李卫军, 冯春详, 周世勃, 等. 基于二维自由度的双轴跟踪太阳光伏发电系统设计. 太阳能, 2013, (10): 54-59.
- [24] 成驰, 陈正洪, 孙鹏杰. 光伏阵列最佳倾角计算方法的进展. 气象科技进展, 2017, 7(4): 60-65.
- [25] 李潇潇, 赵争鸣, 田春宁, 等. 基于统计分析的光伏并网发电系统最佳倾角的计算与实验研究. 电气技术, 2018, (8): 1-6.
- [26] 黄嘉佑, 李庆祥. 气象数据统计分析方法. 北京: 气象出版社, 2014.