



## Research Article

# Meteorological Risk Assessment of Rooftop Solar Resource Development in Inner Mongolia

Yanan Hu\*, Xinghua Li

Professional services division, Inner Mongolia Meteorological Service Center, Hohhot 010051, China

**ARTICLE INFO**

## Article History

Received 12 November 2019  
Accepted 05 December 2019

## Keywords

Rooftop solar resource  
meteorological factors  
spatial distribution characteristics  
risk assessment**ABSTRACT**

Due to the long and narrow regional characteristics of Inner Mongolia, there are obvious climatic differences between the east and the west, and various meteorological factors have different influences on the development and utilization of solar energy. The abundance and stability index of solar energy resources are relatively high in the central and western region of Inner Mongolia, but there are more sandstorms, high temperature and strong wind. The eastern region is greatly affected by cloud cover, relative humidity and snowfall, which weakens the solar radiation. Through the comprehensive evaluation of the solar energy resources and meteorological elements, it is found that from the Alashan League to the west of Xilin Gol League, and the most of the Chifeng City are low-risk areas, which are relatively suitable for the development and utilization of rooftop solar energy. The central and northern areas of hulunbuir are high-risk areas, which is not suitable for that. Based on the meteorological industry standard "Solar Energy Resource Assessment Method", we calculate the solar energy resources abundance and stability index, combined with the annual surface meteorological data of 119 meteorological stations in Inner Mongolia from 1988 to 2018. The distribution characteristics of solar energy resources and meteorological elements in Inner Mongolia is analyzed and the suitability and meteorological risks of rooftop solar resources development and utilization are evaluated.

## 内蒙古屋顶太阳能资源开发气象风险评估

胡亚男\*, 李兴华

专业服务科, 内蒙古自治区气象服务中心, 呼和浩特 010051, 中国

**关键词**屋顶太阳能  
气象因素  
空间分布特征  
风险评估**摘要**

由于内蒙古狭长的地域特征, 东西部存在明显气候差异, 各气象要素对太阳能开发利用的影响也不同。内蒙古中西部地区太阳能资源丰富度和稳定度相对较高, 但沙尘、高温和大风天气较多; 东部地区受云量、相对湿度和降雪的影响较大, 对太阳辐射的削弱作用较强。通过对太阳能资源和气象要素的综合评估, 西起阿拉善盟东至锡林郭勒盟西部, 以及赤峰市大部地区均属于低度风险区, 相对较适宜屋顶太阳能开发利用, 呼伦贝尔市中部及北部地区属于高度风险区, 不适宜屋顶太阳能开发利用。基于气象标准《太阳能资源评估方法》得到太阳能资源丰富度和稳定度指数, 结合1988-2018年内蒙古119个气象站地面年值气象要素资料, 通过分析内蒙古太阳能资源和气象要素的分布特征, 进一步评估内蒙古屋顶太阳能资源开发利用适宜程度和气象风险。

© 2020 The Authors. Published by Atlantis Press SARL.

This is an open access article distributed under the CC BY-NC 4.0 license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

### 1. 引言

随着石油、煤炭等化石燃料的不断耗竭和生态环境的日益恶化, 太阳能资源作为一种“取之不尽, 用之不竭”的可再生清洁能源, 被认为是未来最具竞争力的能源之一, 其开发利用

对减缓气候变化也有重要意义。太阳能资源有光热、光电、光化、光生物等多种利用方式, 其中光伏发电是最主要的利用方式, 通过半导体界面的光生伏特效应将光能直接转变为电能。目前应用最广泛的小型分布式光伏发电系统主要是建设在城市建筑或农村屋顶的小型分布式光伏电站, 能充分使用建筑屋顶闲置资源实现可再生资源利用, 还具有隔热降温的效果, 创造绿色收益, 实现绿色环保[1]。

由于太阳辐射要经过云层和大气传输到太阳能光伏电板, 不可避免的会受到气象因子的影响, 云量、雾霾、沙尘天气等对辐射的衰减, 高温或低温造成发电效率的下降, 以及雷

\*Corresponding author. Email: [448329454@qq.com](mailto:448329454@qq.com)

基金项目: 内蒙古自治区科技创新引导项目 (KCBJ2018067)

作者简介: 胡亚男 (1992-), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事大气环境方面研究。

通讯作者: 李兴华 (1971-), 男, 正研级高工, 主要从事专业气象和生态气象研究工作。

暴、冰雹、大风等对光伏电板组件的破坏，都会不同程度的造成光伏发电效率和经济效益的损失，从而导致投资屋顶太阳能的用户所期望的收入和实际结果产生差距，因此，气象因素给屋顶太阳能开发利用者带来经济损失的不确定性为屋顶太阳能开发利用的气象风险。

目前，关于气象要素对光伏发电影响的研究结果较多[2-5]。潘进军等[6]表明高温会引起开路电压和填充因子下降而导致输出功率下降，在标准测试温度以上，温度每升高1°C，太阳能电池发电效率下降0.35%~0.5%。刘玉兰等[7]研究发现光伏电站发电量与相对湿度呈显著负相关关系，相对湿度每增加1%，发电量减少0.79 kW·h。孙朋杰等[8]研究表明总云量或低云量均与发电量呈负相关关系，总云量或低云量每增加一成，发电量均减少3.9 kW·h。Mekhinef等[9]关注积尘、相对湿度和空气流速对太阳能电池工作效率的影响，Nobre[10]等发现恶劣的空气质量可导致光伏系统产量损失15%~25%。然而大多数研究仅关注单一要素或某几种要素对太阳能资源开发利用的影响，缺少对于多种气象要素综合评估的研究。

内蒙古地域辽阔，以温带大陆性季风气候为主，年日照时数2600~3400h，是我国太阳能资源最丰富的地区之一，也是大规模实施太阳能光伏发电和综合利用的理想地区之一，但其东西狭长的地域分布存在明显的气候差异，内蒙古中西部属于干旱、半干旱地区，多晴朗少云天气，东部属于湿润、半湿润地区，多降水天气，太阳能资源丰富度和稳定度的空间分布也不同。因此需要综合考虑太阳能资源和气象条件两种因素来评估全区屋顶太阳能开发利用的适宜度和气象风险，为合理开发利用内蒙古屋顶太阳能资源提供科学依据，为尽可能避免或减少气象灾害所带来的经济损失提供参考。

## 2. 数据与方法

### 2.1. 数据来源

本文气象数据采用1988-2018年内蒙古119个气象站地面年值资料，气象要素包括：日平均总云量>8.0日数、降雪日数、日降水量≥5mm日数、平均相对湿度(%)、雾日数、霾日数、扬沙日数、浮尘日数、沙尘暴日数、冰雹日数、雷暴日数、最大风速≥15.0m/s日数、日最高气温≥30°C日数和日最低气温<-30°C日数，采用具有气候意义的30年气候平均值进行空间分布特征分析及评估。根据气象统一标准《太阳能资源评估方法》[11]计算得到内蒙古119个气象站的太阳能资源丰富度和稳定度数据资料[12]。

### 2.2. 研究方法

由于内蒙古东西气候差异明显、地形特征和植被类型也不同，西部地区的日照时数普遍高于东部，首先通过太阳能资源丰富度和稳定度两个指标对全区的太阳能资源进行评分。而不利气象要素对屋顶太阳能开发利用都是负影响，比如云量、降水、沙尘等在太阳辐射传输过程中通过散射和吸收作

用导致到达地面的太阳辐射被削弱，高温或低温使得太阳能光伏电板工作效率下降，以及雷暴、冰雹、大风等对光伏组件的破坏。因此屋顶太阳能开发利用适宜度综合指数I如下：

$$I = (M_{sr} + M_{ss}) - (M_{mi} + M_{md})$$

其中 $M_{sr}$ 是太阳能资源丰富度评分， $M_{ss}$ 是太阳能资源稳定度评分； $M_{mi}$ 是气象因子导致辐射衰减的评分，包括日平均总云量>8.0  $M_{cl}$ 、降雪 $M_{sn}$ 、日降水量≥5 mm  $M_{pr}$ 、平均相对湿度(%) $M_{rh}$ 、雾和霾 $M_{hz}$ ，以及沙尘 $M_{du}$ ； $M_{md}$ 是气象因子使得光伏设备受损的评分，包括日最高气温≥30°C  $M_{th}$ 、日最低气温<-30°C  $M_{tl}$ 、雷暴和冰雹 $M_{hs}$ ，以及最大风速≥15.0m/s  $M_{sw}$ 。

### 2.2.1. 太阳能资源评分方法

太阳能资源评分方法如表1所示，将太阳能资源丰富度满分设为70分，太阳能资源稳定度满分设为30分，屋顶太阳能开发利用适宜度综合指数I=100分为最理想情况，即太阳能资源丰富度和稳定度为满分且气象要素没有造成辐射衰减和设备损坏。依据气象标准《太阳能资源评估方法》中太阳能资源等级划分： $Q_{sr} \geq 6300 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ，资源最丰富； $5040 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) \leq Q_{sr} < 6300 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ，资源很丰富； $3780 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}) \leq Q_{sr} < 5040 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ，资源丰富； $Q_{sr} < 3780 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ，资源一般。 $Q_{ss}$ 为太阳能资源稳定度指标， $Q_{ss} < 2$ 为稳定， $2 \leq Q_{ss} \leq 4$ 为较稳定， $Q_{ss} > 4$ 为不稳定。因此，当太阳能总辐射量 $Q_{sr} \geq 6300 \text{ MJ}/\text{m}^2$ ，“资源最丰富”，太阳能资源丰富度评分 $M_{sr}$ 为满分70分，未达到 $6300 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 则按比例打分。当太阳能资源稳定度 $Q_{ss} > 4$ ，为“不稳定”，太阳能资源稳定度评分 $M_{ss}$ 为0分； $1 < Q_{ss} < 4$ ，则按比例打分。

### 2.2.2. 气象要素对屋顶太阳能开发影响评分方法

气象要素对屋顶太阳能开发的影响分为削弱太阳辐射接收和使光伏组件受损两部分，具体评分判定条件如表2所示，其中M表示分数，D表示日数，RH为平均相对湿度。将气象因子造成太阳辐射衰减的满分设为60分，主要影响因子为云量、积雪、降水、相对湿度、雾霾和沙尘。其中云量和积雪对太阳辐射的削弱和阻挡作用最强，对屋顶太阳能开发影响程度最大，其次为降水和相对湿度，雾霾和沙尘发生频次相对较低，因此按照3:2:1的比例进行分数赋值。将气象因子造成光伏电板设备受损的满分设为40分，主要影响因子为雷暴、冰雹、大风，以及高温和低温。其中雹暴（冰雹、雷暴）、最大风速≥15.0m/s、日最高气温≥30°C和日最低气温<-30°C对太阳能光伏组件的影响程度相当，因此按照1:1:1:1的比例进行分数赋值。评分判定条件根据各气象要素的发生频率设定，如日平均总云量>8.0、降雪和日降水量≥5mm日数达到半年，雾霾、沙尘、日最高气温≥30°C和日最低气温<-30°C的日数达到全年1/3，冰雹和雷暴日数达到全年1/4，大风天气达到60天，则将该气象要素的分数全部扣除，未达到则按比例扣除；平均相对湿度低于30%对太阳能接收影响不大，不扣除分数，高于30%则按比例扣除。

表1 | 太阳能资源评分方法

Table 1 | Solar energy resource rating method

要素	满分	评分判定条件	
太阳能资源丰富度 $M_{sr}$	70	$Q_{sr} \geq 6300 \text{ MJ}/\text{m}^2; M_{sr} = 70$	$Q_{sr} < 6300 \text{ MJ}/\text{m}^2; M_{sr} = Q_{sr} * (70/6300)$
太阳能资源稳定度 $M_{ss}$	30	$Q_{ss} > 4; M_{ss} = 0$	$1 < Q_{ss} < 4; M_{ss} = (4 - Q_{ss}) * (30/3)$

表2 | 气象要素对屋顶太阳能开发影响的评分方法

Table 2 | Evaluation method of the influence of meteorological factors on rooftop solar energy development

要素	满分	评分判定条件
日平均总云量>8.0日数	15	$M_{cl} = D_{cl} * [15/(365/2)]$
降雪日数	15	$M_{sn} = D_{sn} * [15/(365/2)]$
日降水量≥5 mm日数	10	$M_{pr} = D_{pr} * [10/(365/2)]$
平均相对湿度(%)	10	$M_{rh} = RH * (RH-30) * (10/70)$ $RH < 30\%; M_{rh} = 0$
雾霾日数(雾、霾)	5	$M_{hz} = D_{hz} * [5/(365/3)]$
沙尘日数(扬沙、浮尘、沙尘暴)	5	$M_{du} = D_{du} * [5/(365/3)]$
日最高气温≥30°C日数	10	$M_{th} = D_{th} * [10/(365/3)]$
日最低气温<-30°C日数	10	$M_{tl} = D_{tl} * [10/(365/3)]$
雹暴日数(冰雹、雷暴)	10	$M_{hs} = D_{hs} * [10/(365/4)]$
最大风速≥15.0 m/s日数	10	$M_{sw} = D_{sw} * 10/60$ $D_{sw} > 60; M_{sw} = 10$

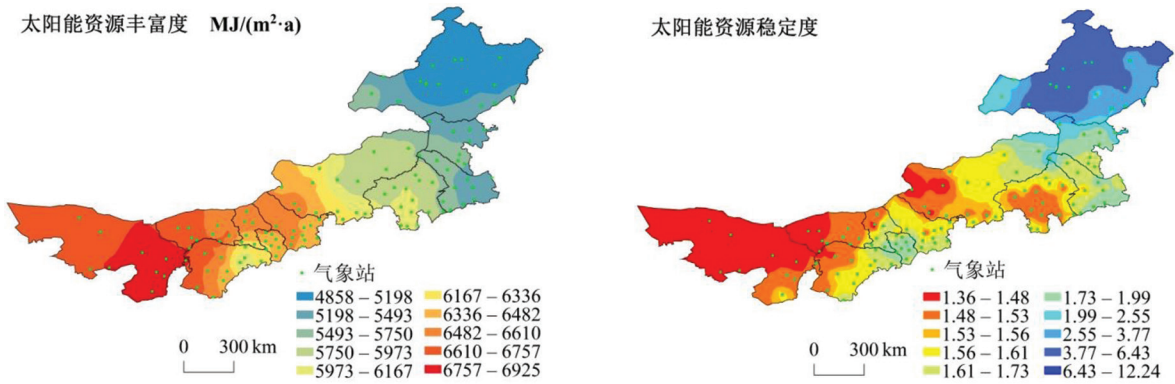


图1 | 内蒙古太阳能资源丰富度和稳定度指标分布.

Figure 1 | Distribution of solar energy resource abundance (left) and stability (right) index in Inner Mongolia.

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 内蒙古太阳能资源和气象要素空间分布特征

首先我们对内蒙古太阳能资源分布特征和屋顶太阳能资源开发不利气象要素的空间分布特征进行分析，为综合评估屋顶太阳能开发适宜度和气象风险提供可信的基础。

##### 3.1.1. 内蒙古太阳能资源空间分布特征

1988-2017年平均内蒙古年太阳总辐射量分布如图1所示，内蒙古太阳能资源丰富度呈现从东北到西南递增的趋势。内蒙古中西部地区年总辐射量大于6300 MJ/m<sup>2</sup>，属于“资源最丰富”，其中包括阿拉善盟、乌海市、鄂尔多斯市西部、巴彦淖尔市、包头市、呼和浩特市、乌兰察布市以及锡林郭勒盟西部地区。内蒙古东部地区年总辐射量介于5040~6300 MJ/m<sup>2</sup>，属于“资源很丰富”，其中包括鄂尔多斯市东部、锡林郭勒盟中东部、赤峰市、通辽市、兴安盟以及呼伦贝尔市南部地区。呼伦贝尔市北部地区年总辐射量介于3780~5040 MJ/m<sup>2</sup>，属于“资源丰富”。

内蒙古太阳能资源稳定度指数分布如图1所示，从西到东依次表现为“稳定”，“较稳定”和“不稳定”。除呼伦贝尔市以外，内蒙古其他盟市太阳能资源稳定度均小于2，为“稳定”，其中阿拉善盟的额济纳旗和拐子湖稳定度最高，稳定度指数为1.36；其次，阿拉善盟大部地区、巴彦淖尔市西部、鄂尔多斯市西北部、包头市北部、锡林郭勒盟西北部，以及赤峰市

中部偏南地区稳定度均较高。呼伦贝尔市中部地区太阳能资源稳定度指数大于4，为“不稳定”，其余地区在2~4之间，为“较稳定”。

太阳能资源相对丰富的地区稳定度也相对较高，这与日照时间、地势因素及天气状况等有密切联系。一方面，内蒙古西部相对东部地势海拔较高，太阳辐射经过云层和大气层的损耗较少；另一方面，与东北部湿润、半湿润的气候特征不同，中西部属于干旱、半干旱地区，云雨天气相对较少，日照时间较长，因此太阳能资源丰富且较为稳定。

##### 3.1.2. 内蒙古气象要素的空间分布特征

不利气象要素对屋顶太阳能资源开发利用的影响，一方面表现在对太阳辐射的衰减和削弱作用上，另一方面是极端天气带来的气象灾害使光伏电板设备受损或其他经济损失。内蒙古气象要素30年气候平均日数空间分布如图2所示，不利气象要素日数或值越高，则表示屋顶太阳能资源开发的气象风险越高。

对太阳辐射传输有衰减作用的气象因子主要包括：云量、积雪、降水、相对湿度、雾霾和沙尘。云量是表征天空被遮蔽程度的因子，云量增加会使得地面接收的太阳辐射减少，日平均总云量>8.0基本表现为阴天天气，对太阳辐射的衰减作用较强，年日数高值区主要分布在内蒙古中西部偏南地区，以及东北部的呼伦贝尔市和通辽市，可达65天以上；年日数低值区主要分布在中西部偏北地区，以及赤峰市中部，其中二连浩特市最低，为21天。降雪天气一方面由于云量增加和



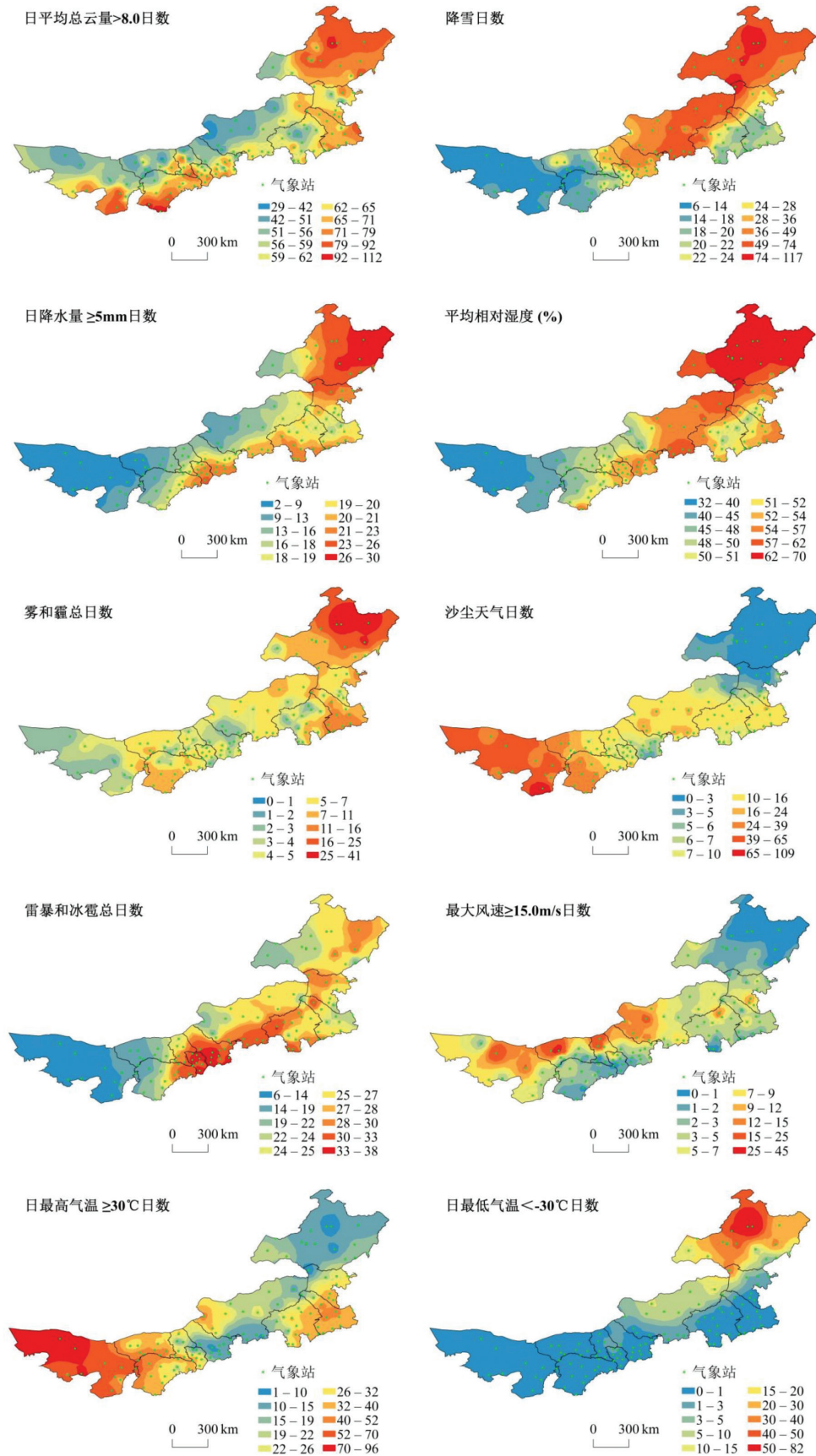


图2 | 内蒙古气象要素的空间分布.

Figure 2 | Spatial distribution of meteorological elements in Inner Mongolia.

能见度下降使得太阳辐射衰减,另一方面,积雪覆盖组件则仅有少部分太阳光能穿过积雪照射到光伏组件上,而且局部残留积雪引起的热斑效应还会使得整个组件被“旁路”,使得光伏电池板转化效率大幅降低;内蒙古降雪日数分布有东部强、西部弱,山区强、平原弱的特点,高值区主要在内蒙古中东部地区,尤其是锡林郭勒盟东部、兴安盟西北部以及呼伦贝尔市,其中阿尔山平均年降雪日数最高,可达117天;低值区主要分布在阿拉善盟大部,巴彦淖尔市西南部和鄂尔多斯市西北部,平均年降雪日数不足10天。日降水量>5mm日数高值区主要分布在内蒙古中东部偏南地区,以及兴安盟和呼伦贝尔市大部地区,可达20天以上;阿拉善盟大部和巴彦淖尔市西部地区最低,不足10天。平均相对湿度的分布特征与降水相似,相对湿度是大气中水汽特征的指标,水汽含量的增加会导致太阳辐射传输过程中散射和反射的部分增多,从而削弱到达地面的太阳辐射,中东部大部地区平均相对湿度介于50%~70%,阿拉善盟中西部平均相对湿度最低,介于32%~40%。雾和霾通过水汽或颗粒物对太阳辐射衰减作用和降低大气能见度削弱到达地面的太阳辐射量,内蒙古霾日数很少,雾在总日数中所占比例较高,从分布图来看高值区主要分布在呼伦贝尔市东北部,其中图里河最高,仅雾日数可达41天。沙尘天气除了沙尘颗粒对太阳辐射衰减作用和降低大气能见度外,沙尘颗粒还会附着在光伏板影响太阳辐射接收,对光伏组件的温度造成影响[13];沙尘日数高值区主要分布在阿拉善盟、乌海市,以及巴彦淖尔西部和鄂尔多斯西部,年日数可达24天以上,其中阿拉善盟头道湖最高,可达109天。

雷暴、冰雹和大风主要存在对光伏板组件外部结构破坏的可能性,高温和低温主要表现在对电池板输出功率的影响。雷暴和冰雹日数高值区与山脉的分布和走向关系密切,在东部地区沿大兴安岭呈准南北走向,西部地区沿阴山呈准东西走向[14],主要分布在内蒙古中东部地区,年日数超过25天,其中呼和浩特市武川县和乌兰察布市察右中旗的雷暴和冰雹总日数高达38天。最大风速 $\geq 15.0\text{m/s}$ 日数高值区主要分布在内蒙古中西部偏北地区,其中巴彦淖尔市乌拉特后旗最高,可达45天,其次为包头市的白云和满都拉,分别可达31天和25天;风的流动虽然一定程度有利于光伏组件散热,但是光伏组件迎风面积较大,在布置时需留有间隙,同时光伏组件支架需考虑风荷载的影响[15]。日最高气温 $\geq 30^\circ\text{C}$ 日数高值区主要分布在内蒙古西部盟市,锡林郭勒盟西北部,以及赤峰市、通辽市和兴安盟的东南部,可达32天以上,其中阿拉善盟的额济纳旗和拐子湖最高,分别达96天和94天。日最低气温 $< -30^\circ\text{C}$ 日数高值区主要分布在呼伦贝尔市,其中图里河最高可达到82天。高温不仅会造成太阳能电池工作中开路电压和输出功率大幅下降,难以充分发挥其最大性能,还会引起充电工作点严重偏移导致系统充电不足而损坏[16];另外,高温对蓄电池失水干涸、热失控、正极板栅腐蚀和变形等都起到加速作用,而低温则会引起负极钝化失效,温度波动会加速铅酸蓄电池内部短路等等[17]。

### 3.2. 屋顶太阳能开发利用气象风险评估

通过对内蒙古太阳能资源和各种气象要素对屋顶太阳能开发影响的综合评分,我们对内蒙古屋顶太阳能开发的气象风险进行了空间区划和适宜度等级划分,进一步针对各盟市屋顶太阳能开发的主要不利气象要素进行分析讨论,为屋顶太阳能开发选址、气象灾害预防,以及提高光伏发电效率等提供依据。

#### 3.2.1. 屋顶太阳能开发利用气象风险区划

综合考虑内蒙古太阳能资源分布情况以及气象因子分布差异,屋顶太阳能开发利用适宜度综合指数如图3所示,越趋于红色则表明越适宜屋顶太阳能的开发利用,气象风险相对较低,越趋于蓝色则表现相反。将内蒙古屋顶太阳能开发气象风险等级划分为低度风险区、一般风险区、中度风险区和高度风险区四个等级(见表3)。内蒙古中西部地区屋顶太阳能开发适宜度综合指数均较高,西起阿拉善盟东至锡林郭勒盟西部,以及赤峰市大部地区适宜度指数均可达70分以上,气象风险相对较低,属于低度风险区;适宜度指数高值区主要分布在阿拉善盟和巴彦淖尔市大部,鄂尔多斯市西北部,以及锡林郭勒盟的二连浩特市,可达78分以上,其中阿拉善左旗和额济纳旗最高可达82分。与内蒙古中西部地区相比,东部地区一方面太阳能资源丰富度和稳定度相对较低,另一方面其平均相对湿度大、云量和降水较多等气象因素对太阳辐射削弱作用较强,积雪滑落的落雪事故可能性较大,从而导致气象风险也较高。一般风险区屋顶太阳能开发适宜度指数介于60~70分,其中包括锡林郭勒盟东部、通辽市、兴安盟,以及呼伦贝尔市西部的新巴尔虎右旗。中度风险区的适宜度指数介于45~60分,包括呼伦贝尔市西部及南部地区,以及兴安盟的阿尔山市,气象风险相对较高,较不适宜屋顶太阳能开发利用。呼伦贝尔市中部及北部地区适宜度指数低于45分,属于高度风险区,非常不适宜屋顶太阳能开发利用,尤其呼伦贝尔市的根河市评分最低,为21分,其次为牙克石市和额尔古纳右旗。

#### 3.2.2. 不利气象要素对内蒙古屋顶太阳能的影响

由于内蒙古各盟市地形和气候特征不同,太阳能资源条件、不利气象要素的影响也具有差异,我们通过对各盟市太阳能资源总分、不利气象要素总分以及适宜度综合指数进行区域平均来代表各盟市平均水平,如图4(上)所示。从太阳能资源丰富度和稳定度总分来看,阿拉善盟太阳能资源条件最好,其次为乌海市和巴彦淖尔市;但是从不利气象要素对太阳能资源开发利用的影响来看,阿拉善盟相对巴彦淖尔市气象风险较高;因此总体来看巴彦淖尔市屋顶太阳能开发利用适宜度综合指数最高。呼伦贝尔市太阳能资源丰富度和稳定

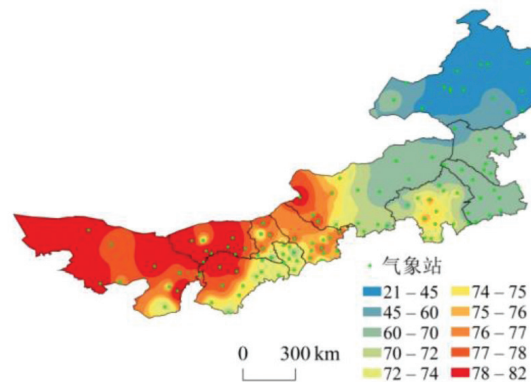


图3 | 屋顶太阳能开发利用适宜度综合指数。

Figure 3 | Comprehensive index of suitability for the development and utilization of rooftop solar energy.



度指数相对其他盟市较低，其次为通辽市和兴安盟，不利气象要素对其影响也相对较高，因此不太适宜屋顶太阳能的开发利用。其余各盟市屋顶太阳能开发适宜度指数和气象风险平均水平相差不大，均表现为较适宜屋顶太阳能开发利用。

为了更有针对性的应对不利气象要素对各盟市屋顶太阳能的影响，进一步分析了各盟市主要气象影响因子的占比情况，如图4（下）所示。总云量>8.0对屋顶太阳能开发利用的影响在不利气象要素中占比相对较高，其中鄂尔多斯市受云量影响最大，在不利气象要素中占比高达33%，其次通辽市为30%，锡林郭勒盟最低为21%，其余各盟市介于26%~29%。内蒙古西部各盟市受积雪、降水和相对湿度的影响相对较小，尤其是阿拉善盟和乌海市；锡林郭勒盟和呼伦贝尔市受降雪天气影响最大，在不利气象要素中占比均达20%，中东部各盟市受相对湿度的影响比例为17~20%，受降水天气影响为5~7%。受沙尘天气影响最大的盟市为阿拉善盟，在不利气象要素中占比

可达12%，其次乌海市可达9%，另外乌海市受到霾的影响也相对其他盟市较大，占比4%。日最高气温≥30°C的高温天气对乌海市和阿拉善盟的影响最大，分别可达32%和31%，其中阿拉善盟的额济纳旗和拐子湖高达52%和40%；其次，巴彦淖尔市为21%。日最低气温<-30°C的低温天气仅对呼伦贝尔市有显著影响，在不利气象要素中占比为9%。最大风速≥15m/s的大风天气主要对包头市和锡林郭勒盟有较大影响，占比分别为9%和8%，其次阿拉善盟和巴彦淖尔市均为7%。雷暴和冰雹对呼和浩特市和乌兰察布市影响最大，在不利气象要素中占比高达20%，对阿拉善盟影响最小，占比6%，其余各盟市介于10%~18%。

总体而言，内蒙古西部的阿拉善盟、乌海市和巴彦淖尔市太阳能资源丰富且稳定性较高，但光伏电板受损的气象风险相对其他盟市较高，阿拉善盟和乌海市占比可达44%，巴彦淖尔市为41%，其中主要影响因子为高温天气，因此该地区选用光伏电板时应优先考虑耐高温属性；其次，阿拉善盟和乌海市沙尘天气较多，积灰不仅使得透光率下降，而且酸碱性积尘还会腐蚀玻璃盖板从而造成不可逆转的损害，同时降低光伏组件的转化效率，所以要及时或定期清除光伏电板上的积灰。内蒙古中东部地区受云量、相对湿度和降雪的影响显著，不利气象要素的影响主要表现在对太阳辐射的削弱作用上，占比达到63%~73%。其中降雪后的积雪一方面对太阳辐射阻挡作用较强，另一方面尤其是在内蒙古东部地区降雪量较大，积雪在斜面光伏电板钢化玻璃上达到一定厚度时，容易滑落发生落雪事故，对建筑、物品或行人造成损害或伤害，因此要及时清除积雪且不能残留块状积雪，防止部分遮

表3 | 屋顶太阳能开发适宜度及风险等级划分

Table 3 | Suitability and risk classification of rooftop solar energy development

适宜度综合指数	风险等级	适宜度
>70分	低度风险区	非常适宜
60-70分	一般风险区	较适宜
45-60分	中度风险区	较不适宜
<45分	高度风险区	不适宜

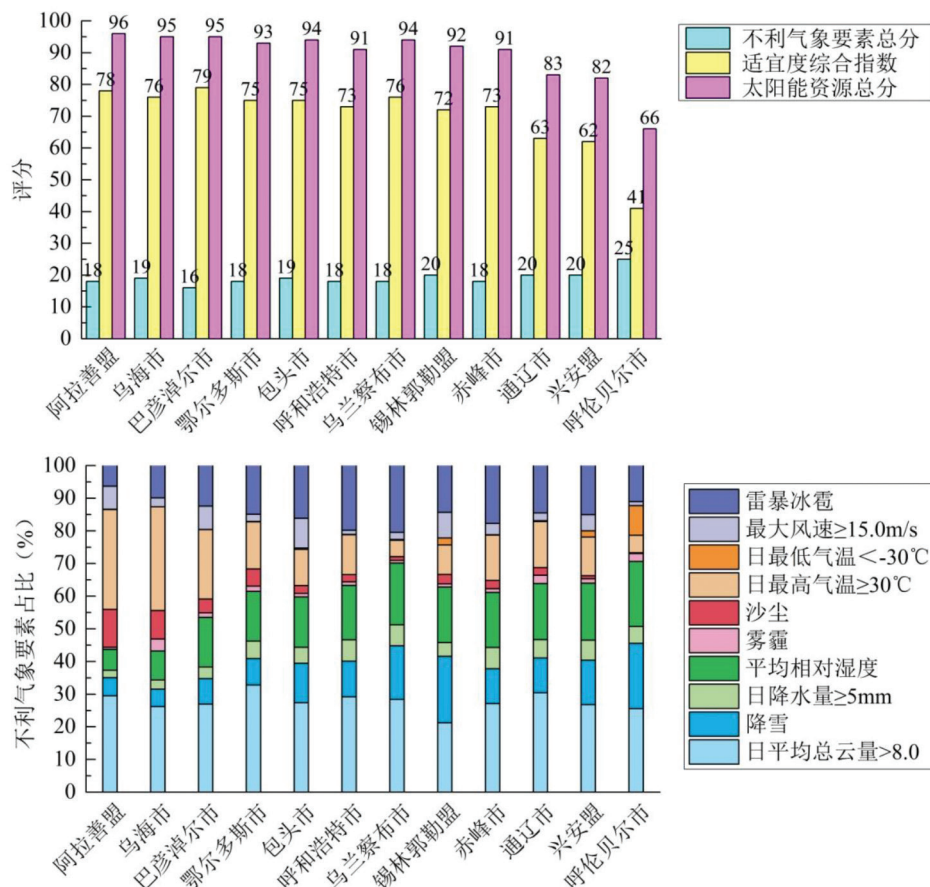


图4 | 内蒙古各盟市屋顶太阳能开发利用适宜度指数（上）和不利气象要素占比（下）。

Figure 4 | Suitability index (top) and proportion of adverse meteorological elements (bottom) for the development and utilization of rooftop solar energy in various cities of Inner Mongolia.

挡导致整体转化效率降低。雷暴和冰雹在内蒙古中东部地区发生频率也较高,屋顶的防雷装置和光伏电板钢化玻璃材质加强的同时,应对春夏季短时强对流天气时需要光伏电板有一定的保护措施。另外,包头市和锡林郭勒盟大风天气较多,抗风压设计、桩基配重和光伏电板阵列架台等需要参考极端气候最大限值进行安装。

#### 4. 讨论与结论

太阳能的转化效率受气象要素影响明显,不论从电网还是光伏投资者的角度,了解气象要素对太阳能利用效率影响是十分有必要的。目前该领域的研究大多着眼于一种或几种气象要素,未能考虑气象环境因子造成的综合影响,因此基于前人的研究成果,我们筛选出14种对内蒙古屋顶太阳能开发利用有一定影响的气象要素并根据其重要程度分别给予评分,通过对太阳能资源和气象要素空间分布特征的分析与评估,最终得到屋顶太阳能开发利用适宜度指数以及气象风险等级区划。

从太阳能资源来看,内蒙古太阳能资源丰富度呈从东北到西南递增的趋势,阿拉善盟、乌海市、鄂尔多斯市西部、巴彦淖尔市、包头市、呼和浩特市、乌兰察布市以及锡林郭勒盟西部地区属于最丰富地区;太阳能资源稳定度除了呼伦贝尔市稳定性较差,其他地区均表现为稳定。从气象因子影响来看,内蒙古中东部地区云量和水汽含量相对较高,太阳辐射传输过程中散射和反射的部分增多,削弱了到达地面的太阳辐射量;内蒙古西部地区不利气象要素的影响相对较小,但沙尘日数相对东部较多。另外,雷暴和冰雹总日数高值区主要分布在内蒙古中东部山脉沿线地区,最大风速 $\geq 15.0\text{m/s}$ 日数高值区主要分布在内蒙古中西部偏北地区;日最高气温 $\geq 30^\circ\text{C}$ 日数高值区分布在阿拉善盟的西北部,日最低气温 $< -30^\circ\text{C}$ 日数高值区分布在呼伦贝尔市北部。

内蒙古中西部地区屋顶太阳能开发适宜度综合指数均较高,西起阿拉善盟东至锡林郭勒盟西部,以及赤峰市大部地区属于低度风险区,高值区主要分布在阿拉善盟和巴彦淖尔市大部,鄂尔多斯市西北部,以及锡林郭勒盟的二连浩特市;一般风险区包括锡林郭勒盟东部、通辽市、兴安盟,以及呼伦贝尔市西部的新巴尔虎右旗;中度风险区包括呼伦贝尔市西部及南部地区,以及兴安盟的阿尔山市,特别是属于高度风险区呼伦贝尔市中部及北部地区,非常不适宜屋顶太阳能开发利用。内蒙古中东部盟市屋顶太阳能开发受云量、相对湿度和降雪的影响较大,主要表现在对太阳辐射的削弱作用上,其中云量在不利气象要素中占比相对较高,可达26%~33%。内蒙古西部盟市光伏电板受损的气象风险相对较高,其中高温天气对乌海市和阿拉善盟的影响最大,尤其是阿拉善盟的额济纳旗和拐子湖,分别高达52%和40%。另外,大风天气主要对包头市和锡林郭勒盟有显著影响,其次为阿拉善盟和巴彦淖尔市。雷暴和冰雹对呼和浩特市和乌兰察布市影响最大,在不利气象要素中占比高达20%。因此,各盟市应针对不同的气候特征和气象灾害采取相应的防御和保护措施,比如光伏电板的耐高温性、钢化玻璃坚韧度,屋顶防雷装置布置,以及光伏阵列架台加固等。

#### 参考文献

- [1] Yue XH. Design and operation analysis of rural rooftop distributed photovoltaic power station. *Telecom Power Technol* 2018;35: 88-89+92.
- [2] He SY. Influence of meteorological factors on solar power utilization. Chang sha: Hunan University; 2018. 何书耘. 气象因素对太阳能利用的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学; 2018.
- [3] Lei YN, Sun X, et al. Analysis of the influence of meteorological factors on photovoltaic power generation. *Solar Energy* 2016; 6:33-36+73. 雷杨娜,孙娴,等. 气象因子对光伏发电量的影响效应分析[J]. *太阳能* 2016;6:33-36+73.
- [4] Cao YL, Fang SQ, Wang Y, Yu BX, Zou HC, Xu TY. Diagnostic analysis of distributed photovoltaic power characteristics and the impact of meteorological factors. *J Shenyang Agric Univ* 2018;49:363-70. 曹英丽,方诗琦,等. 分布式光伏发电特性与气象影响因子诊断分析[J]. *沈阳农业大学学报* 2018;49:363-70.
- [5] Alonzo-Abella M, Chenlo F, Nofuentes G, Torres-Ramírez M. Analysis of spectral effects on the energy yield of different PV (photovoltaic) technologies: the case of four specific sites. *Energy* 2014;67:435-43.
- [6] Pan J, Shen Y, Bian Z, Wang X. Public Meteorological Service Center, Wind and Solar Energy Resources Center, et al., Effects of meteorological elements on solar cell temperature. *J Appl Meteorol Sci* 2014;25:150-7. 潘进军,申彦波,等. 气象要素对太阳能电池板温度的影响[J]. *应用气象学报* 2014;25:150-7.
- [7] Liu Y, Sun Y, Sang J, Zuo H, Yan X, Ma S. Diagnostic analysis of meteorological factors affecting solar photovoltaic generation power. *Water Resour Power* 2011;29:200-2. 刘玉兰,孙银川,等. 影响太阳能光伏发电功率的环境气象因子诊断分析[J]. *水电能源科学* 2011;29:200-2.
- [8] Sun P, Chen Z, Cheng C, Zhang R, Hubei Provincial Meteorological Service Center, Meteorological Energy Development Center of Hubei Province, et al. Relationship between meteorological factors and variation characteristics of electricity generation in solar photovoltaic power plant. *Water Resour Power* 2013;11:249-52. 孙朋杰,陈正洪,等. 太阳能光伏电站发电量变化特征及其与气象要素的关系[J]. *水电能源科学* 2013;11:249-52.
- [9] Mekhilef S, Saidur R, Kamalifarvestani M. Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16:2920-5.
- [10] Nobre AM, Karthik S, Liu H, Yang D, Martins FR, Pereira EB, et al. On the impact of haze on the yield of photovoltaic systems in Singapore. *Renew Energy* 2016;89:389-400.
- [11] QX/T 89-2008, Solar energy resource assessment method. Beijing: China Meteorological Press; 2008. QX/T 89-2008, 太阳能资源评估方法[S]. 北京: 气象出版社 2008.
- [12] Hu YN, Li XH, Hao YZ. Study on the spatiotemporal distribution characteristics and evaluation of solar energy resources in Inner Mongolia. *J Arid Land Resour Environ* 2019;33:132-8. 胡亚男,李兴华,郝玉珠. 内蒙古太阳能资源时空分布特征与评估研究[J]. *干旱区资源与环境* 2019;33:132-8.
- [13] Goossens D, Van Kerschaever E. Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance. *Solar Energy* 1999;66:277-89.

- [14] Gu YY. Inner Mongolia autonomous region weather forecast manual. Beijing: China Meteorological Press; 2012.  
顾润源. 内蒙古自治区天气预报手册[M]. 北京: 气象出版社; 2012.
- [15] Yang Y. Research and design of 10 MWp photovoltaic power generation system of Huaneng Yingkou thermal power. Beijing: North China Electric Power University; 2017.  
杨杨. 华能营口热电10MWp光伏发电系统研究与设计[D]. 北京: 华北电力大学; 2017.
- [16] Zhang SF. Analysis of meteorological factors affecting solar photovoltaic power generation. *Agric Technol* 2014;34:194.  
张世丰. 影响太阳能光伏发电的气象因子分析[J]. *农业与技术* 2014;34:194.
- [17] Wang JJ. The temperature influence on solar PV generation. *J Qinghai Norm Univ (Nat Sci)* 2005;1:28–30.  
王建军. 太阳能光伏发电应用中的温度影响[J]. *青海师范大学学报(自科版)* 2005;1:28–30.