

何如,罗红磊,伍丽泉,等.广西太阳能资源评估指标体系研究与应用[J].气象研究与应用,2024,45(1):23-27.

HE Ru, LUO Honglei, WU Liquan, et al. Application research on evaluation indicators system of solar energy resources in Guangxi[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2024, 45(1): 23-27.

## 广西太阳能资源评估指标体系研究与应用

何如<sup>1</sup>, 罗红磊<sup>2</sup>, 伍丽泉<sup>2</sup>, 唐鹤云<sup>3</sup>

(1. 广西壮族自治区气候中心, 南宁 530022; 2. 广西壮族自治区气象灾害防御技术中心, 南宁 530022;

3. 广西壮族自治区气象服务中心, 南宁 530022)

**摘要:** 采用太阳能资源丰富程度、稳定度、直射比三个指标对太阳能资源进行等级划分, 建立一套适用于广西太阳能资源分布特点的精细化评估指标体系。结合广西太阳总辐射年辐照量实际分布状况, 将太阳能资源丰富程度指标进行分级细化, 将覆盖广西大范围的C等级细化为C1、C2、C3三个级别。结果表明, 广西太阳能资源丰富程度划分为B、C1、C2、C3、D五个等级, 其中B级资源很丰富区主要分布在广西沿海东部区域, C1一级丰富区在22.5°N附近以南地区和右江河谷一带, C2二级丰富区在桂中大部分地区, C3三级丰富区集中分布在桂北大部。太阳能资源稳定度划分为B、C两个等级, 其中B级较稳定区集中分布在桂西北、桂东南部分地区以及上思县等地。全区各地直射比均为C级(中等级), 以散射辐射较多。

**关键词:** 太阳能资源; 评估指标; 等级划分

**中图分类号:** P422.1

**文献标识码:** A

**doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2024.1.05

太阳能作为一种重要的可再生清洁能源, 在实现“双碳”目标、应对气候变化和促进社会可持续发展等方面具有重要意义<sup>[1]</sup>。广西地处低纬, 北回归线横贯中部, 南濒热带海洋, 属亚热带季风气候区<sup>[2]</sup>, 在太阳辐射、大气环流和地理环境的共同作用下, 具有气候温暖、日照充足、光热资源丰富的特点<sup>[3]</sup>, 太阳能资源具有巨大的开发潜力。大力开发利用太阳能资源符合广西能源战略和环境保护的需求。太阳能资源评估是太阳能开发利用的基础和关键, 可为太阳能光伏发电的规划、设计、建设以及运营维护等阶段提供科学依据。

太阳总辐射反映太阳能资源禀赋, 面向光伏发电的太阳能资源丰富程度以太阳总辐射的年总量为表征<sup>[4]</sup>。由于广西局地气候多样, 太阳能资源分布局地性强、时空分布差异较大, 存在明显的地域性分布特征<sup>[5-6]</sup>。要科学地开发利用太阳能, 就必须准确地了解广西各地太阳能资源的分布状

况和等级水平。目前使用国家标准<sup>[7-8]</sup>的评估结果发现广西几乎都属于同一个资源等级。为了在广西行政区内精准评估太阳能资源光伏发电潜力, 实现对太阳能资源丰富程度等级评价指标的进一步分区细化, 以便更精准、更有效地开展广西及其各区域的太阳能资源等级划分和评价, 本文建立一套适用于广西太阳能资源分布特点的精细化等级划分评估指标体系, 并从太阳能资源丰富程度、稳定度、直射比等三个指标全面评估广西的太阳能资源, 为充分挖掘广西各地区太阳能资源禀赋, 制定光伏发电规划等提供技术依据和参考。

### 1 资料与方法

#### 1.1 资料来源

广西有桂林、南宁、北海3个太阳辐射观测站, 文中采用1961—2020年此3个站的太阳辐射观测

收稿日期: 2024-01-22

基金项目: 广西重点研发计划项目(桂科AB23026052)、广西自然科学基金项目(2015GXNSFBA139189)、广西气象科研计划项目(桂气科2019M09、桂气科2022ZL06)

第一作者简介: 何如(1983—), 女, 高级工程师, 硕士, 从事气候评估和气候应用方面研究工作。E-mail: 939622170@qq.com

资料,其中北海站自1993年开始对太阳辐射要素进行观测,其资料取1993—2020年;1961—2020年广西90个国家气象观测站的日照时数等观测资料来源于广西壮族自治区气象信息中心。

## 1.2 方法和定义

### 1.2.1 基本术语定义<sup>[9]</sup>

总辐射指水平面从上方 $2\pi$ 立体角(半球)范围内接收到的直接辐射与散射辐射之和。直接辐射指从日面及其周围一小立体角发出的辐射,水平面直接辐射指水平面上接收到的直接辐射。

日照是指大于或等于 $120\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 的直射辐照度;日照时数是指实际存在符合日照定义时段的总和,即太阳光实际照射到地面的时数。

### 1.2.2 等级评价指标定义

文中采用太阳能资源丰富程度、稳定度和太阳直射比三个指标,对太阳能资源进行综合评价。太阳能资源丰富程度指太阳总辐射辐照量的多少程度,太阳能资源稳定度指太阳能资源年内变化的状态和幅度<sup>[8]</sup>,太阳直射比指水平面直接辐射辐照量在总辐射辐照量中所占的比例<sup>[9]</sup>。

## 1.3 方法

### 1.3.1 水平面太阳辐照量计算

采用基于气候学估算方法,水平面太阳总辐照量( $G$ )和水平面直接辐照量( $D_H$ )可以通过下式进行计算:

$$G = \left( a_g + b_g \frac{n}{N} \right) R_a \quad (1)$$

$$D_H = \left[ a_d \left( \frac{n}{N} \right)^2 + b_d \left( \frac{n}{N} \right) \right] R_a \quad (2)$$

式中, $G$ 为太阳总辐照量, $D_H$ 为水平面太阳直接辐照量, $a_g$ 、 $b_g$ 、 $a_d$ 、 $b_d$ 为参数,通过有太阳辐射和日照时数观测的站点统计确定<sup>[10]</sup>,并采用相关系数最大法、 $u$ 检验等统计方法空间推广到无太阳辐射观测站点的地区<sup>[11]</sup>;  $n$ 为实际日照时数, $N$ 为可能日照时数, $n/N$ 为日照百分率; $R_a$ 为地外太阳辐射。

### 1.3.2 稳定度计算

稳定度用各月的日照时数大于6 h天数的最大值与最小值的比值表示<sup>[12]</sup>:

$$K = \max(\text{Day1}, \text{Day2}, \dots, \text{Day12}) / \min(\text{Day1}, \text{Day2}, \dots, \text{Day12}) \quad (3)$$

式中, $K$ 为太阳能资源稳定度指标; $\text{Day1}$ ,  $\text{Day2}$ ,  $\dots$ ,  $\text{Day12}$ 分别表示1至12月各月日照时数大于6 h天数。

### 1.3.3 直射比计算

太阳直射比以 $R_D$ 表示,首先计算水平面直接辐照量( $D_H$ )和总辐照量( $G$ )年均值,然后求二者之比<sup>[7]</sup>:

$$R_D = \frac{D_H}{G} \quad (4)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 太阳能资源丰富程度分析

#### 2.1.1 水平面太阳总辐射辐照量分布

广西各地年水平面太阳总辐射辐照量在 $3\,717 \sim 5\,727\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间,其空间分布特征表现为在桂南和右江河谷地区辐射较强,北部地区和丘陵山区辐射较弱。其中,北纬 $23^\circ\text{N}$ 以南大部分地区太阳总辐射辐照量在 $4\,600\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上,主要包括北海、钦州、防城港、玉林四市,崇左、南宁、贵港、梧州四市南部,以及右江河谷一带,其中涠洲岛、北海、合浦、钦州、上思、陆川以南等地超过 $5\,200\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ;位于广西中部的贺州、来宾、百色三市大部分地区,南宁、崇左两市北部以及桂林、柳州、河池三市南部在 $4\,000 \sim 4\,600\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间;桂林、柳州、河池三市的北部以及金秀县等高海拔山区在 $4\,000\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 以下。

#### 2.1.2 太阳能资源丰富程度指标和评价

根据文献[7-8]的国家标准,太阳能资源的丰富程度以太阳总辐射的年辐照量来划分。如表1所示,在现行标准“太阳能资源丰富度等级”中“资源丰富”的分区阈值为 $3\,780 \sim 5\,040\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,其辐射值范围跨度太大,而广西太阳总辐照量值绝大部分落在该范围内, $22^\circ \sim 25^\circ\text{N}$ 区域太阳能资源都属于C级丰富等级(图1),不利于在广西行政区内开展精细化、差异化的区域划分和分级评估。

表1 太阳能资源丰富程度等级

等级名称	分级阈值 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$	等级符号
最丰富	$G \geq 6\,300$	A
很丰富	$5\,040 \leq G < 6\,300$	B
丰富	$3\,780 \leq G < 5\,040$	C
一般	$G < 3\,780$	D

因此,结合以上广西太阳能资源实际分布状况,将C级“资源丰富”等级的阈值 $3\,780 \sim 5\,040\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 进行内插三等分,得到C1级、C2级、C3级三

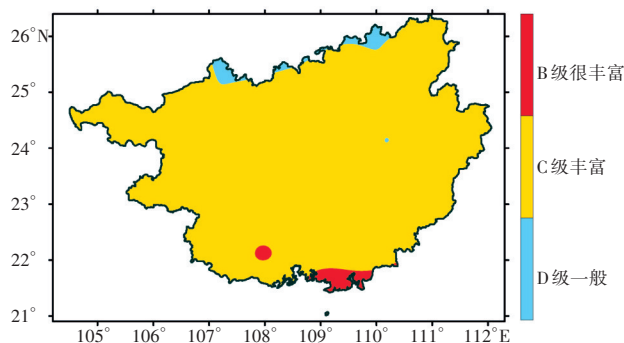


图1 按现行标准划分的广西太阳能资源丰富程度等级分布图

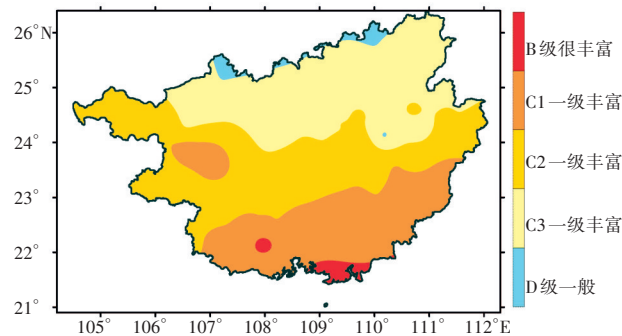


图2 精细化的广西太阳能资源丰富程度等级分布图

个级别的阈值分别为 $4\,620 \sim 5\,040 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $4\,200 \sim 4\,620 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $3\,780 \sim 4\,200 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ <sup>[13]</sup>,作为广西太阳能资源丰富程度等级指标(表2)。因此,文中采用水平面太阳总辐射年辐照量评价太阳能资源丰富程度,划分为六个等级:最丰富(A)、很丰富(B)、一级丰富(C1)、二级丰富(C2)、三级丰富(C3)、一般(D),划分标准见表2。

如图2所示,广西太阳能资源丰富程度可划分为B级资源很丰富区、C1一级资源丰富区、C2二级资源丰富区、C3三级资源丰富区、D级资源一般区共5个等级:

(1)B级资源很丰富区:该区主要分布在广西沿海的东部区域,包括涠洲岛、北海市区、合浦县以及上思县等地,该区域地形平坦开阔,是广西太阳能资源最丰富的区域。

(2)C1一级资源丰富区:主要位于广西 $22.5^{\circ}\text{N}$ 附近以南和右江河谷一带,包括钦州、防城港、玉林三市,梧州、贵港、南宁、崇左四市南部以及百色市区、田东县、平果市等地,是广西太阳能开发利用的理想区域。

(3)C2二级资源丰富区:位于广西中部,包括贺州、来宾、百色三市大部分地区,南宁、崇左两市北部及桂林、柳州、河池三市南部,是广西太阳能开发利用较理想区域。

(4)C3三级资源丰富区:位于广西北部,包括桂林、柳州、河池三市大部及凌云县、乐业县等地,太阳能资源具有一定的利用价值。

(5)D级资源一般区:位于广西北部靠近湘、黔两省的高海拔区域,包括龙胜、三江、天峨等地,太阳能资源一般。

## 2.2 太阳能资源稳定度分析

### 2.2.1 稳定度分布

广西各地年均日照时数为 $1\,176 \sim 2\,217 \text{ h}$ ,其空间分布特征为南部多、北部少,河谷平原多、丘陵山区少。广西各地稳定度为 $2.57 \sim 7.23$ ,其空间分布特征表现为桂东北和桂中地区大、桂西和桂东南小的特点。其中,桂林、柳州、贺州、来宾四市,河池市东部、贵港市西部、南宁市东部和西北部、崇左市西北部、防城港市南部和梧州市北部小部分地区等地的稳定度大于4.0;桂西北和桂东南地区介于 $2.5 \sim 4.0$ 之间,包括百色、梧州、玉林、北海、钦州五市大部分地区,以及河池市西部、南宁市中南部、崇左市东部、来宾市和贵港市东部等地。

### 2.2.2 太阳能稳定度指标和评价

太阳能资源稳定度划分为三个等级:稳定(A)、较稳定(B)、不稳定(C)。划分标准见表3<sup>[12]</sup>。

表3 太阳能资源稳定度等级

等级名称	分级阈值	等级符号
稳定	$K < 2.0$	A
较稳定	$2.0 \leq K \leq 4.0$	B
不稳定	$K > 4.0$	C

依据太阳能资源稳定度等级划分指标(表3),结合图3可见,广西太阳能资源稳定度整体上跨越两个等级,分别为B级和C级。其中,主要位于桂西

表2 广西太阳能资源丰富程度等级

等级名称	分级阈值 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	等级符号
最丰富	$G \geq 6\,300$	A
很丰富	$5\,040 \leq G < 6\,300$	B
一级丰富	$4\,620 \leq G < 5\,040$	C1
二级丰富	$4\,200 \leq G < 4\,620$	C2
三级丰富	$3\,780 \leq G < 4\,200$	C3
一般	$G < 3\,780$	D



北的百色市大部分地区以及桂东南的北海市、梧州、玉林、钦州三市南部以及上思县等地稳定度 $K$ 值介于 $3.5 \sim 4.0$ 之间,太阳能资源稳定度等级属于B级较稳定;其余广西大部分地区稳定度 $K$ 值大于 $4.0$ ,太阳能资源稳定度等级属于C级不稳定。

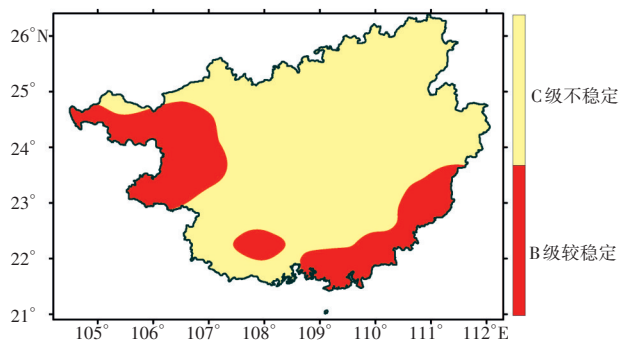


图3 广西太阳能资源稳定度指数等级分布图

## 2.3 太阳直射比分析

### 2.3.1 直射比分布

广西全区各地年水平面直接辐射辐照量为 $1\,484 \sim 2\,711 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,其空间分布特征表现桂南多、桂北少的特点。如图4所示,广西各地直射比范围为 $0.38 \sim 0.47$ ,表明广西全区的太阳辐射形式以散射辐射占比较多。其中,直接辐射占比较高(大于 $0.45$ )的地区主要分布在靠近北回归线( $23.5^\circ \text{N}$ )附近的桂东北、桂中以及桂西北局部地区,包括贺州市大部、桂林和柳州两市南部、来宾市北部、梧州市东部、河池市东南局部以及百色市西北局部;广西其余地区直射比介于 $0.38 \sim 0.45$ ,相对占比较低。

### 2.3.2 直射比指标和评价

太阳能直射比划分为四个等级:很高(A)、高

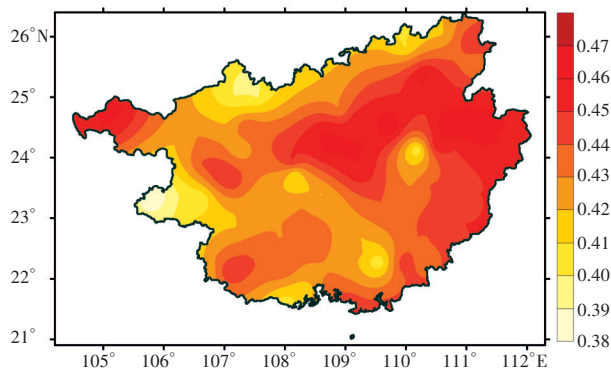


图4 广西太阳直射比分布图

(B)、中(C)、低(D)<sup>[7]</sup>。划分标准见表4。

依据直射比等级划分指标(表4),结合广西各地直射比数值和空间分布状况(图4),经分析,广西全区的直射比均落在C等级 $0.35 \sim 0.50$ 阈值范围内,直射比属于中等级,表明广西各地的太阳辐射形式以散射辐射较多。

表4 直射比等级

等级名称	分级阈值	等级符号	等级说明
很高	$R_D \geq 0.6$	A	直接辐射主导
高	$0.5 \leq R_D < 0.6$	B	直接辐射较多
中	$0.35 \leq R_D < 0.5$	C	散射辐射较多
低	$R_D < 0.35$	D	散射辐射主导

## 3 结论

(1)采用太阳总辐射年辐照量、稳定度、直射比三个指标对太阳能资源进行等级划分,反映太阳能资源丰富程度、稳定程度以及太阳辐射成分,在此基础上建立一套广西太阳能资源评估指标体系,对广西行政区域内开展太阳能资源评估和区划相关工作有一定的指导意义。

(2)广西太阳能资源丰富程度等级以太阳总辐射年辐照量表示,结合广西太阳能资源实际分布状况,对评价指标太阳总辐射年辐照量进一步分级细化,共划分为A、B、C1、C2、C3、D六个等级,将覆盖广西绝大部分区域的C“丰富”等级内插三等分为3个级别:C1“一级丰富”等级、C2“二级丰富”等级、C3“三级丰富”等级,实现对广西全区的太阳能资源丰富程度的精细化分级评价,更有利于各地太阳能资源的规划和开发利用。

(3)应用评估指标进行分析,广西太阳能资源等级水平和分布特点主要表现为,太阳能资源丰富程度划分为五个等级,B级资源很丰富区主要分布在广西沿海东部区域,C1一级资源丰富区在 $22.5^\circ \text{N}$ 附近以南地区和右江河谷,C2二级资源丰富区在桂中大部分地区,C3三级资源丰富区集中分布在桂北大部分地区,D级资源一般区主要位于桂北靠近湘、黔两省的高海拔区域;太阳能资源稳定程度划分为两个等级,桂西北、桂东南部分地区以及上思县等地属于B级较稳定,其余广西大部分地区属于C级不稳定;广西全区各地直射比均属于C级中等级,太阳辐射形式以散射辐射较多。

## 参考文献:

- [1] 李宗北. 空气源热泵换热器亭壁一体化供暖零能耗岗亭的性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [2] 广西壮族自治区气候中心. 广西气候[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 1-6.
- [3] 叶瑜, 苏永秀, 李政, 等. 近 50 年广西日照时数时空变化特征分析[J]. 中国农学通报, 2013, 29(14): 196-201.
- [4] 凌俪嘉, 王婷, 赵艳杰. 基于 MATLAB 方法的太阳辐射度波动特征分析——以乌干达布津杜太阳能热电混合电站为例. 气象研究与应用, 2022, 43(4): 98-103.
- [5] 韦华红, 程爱珍. 广西南宁市太阳辐射变化特征及影响因素分析[J]. 气象研究与应用, 2013, 34(增刊 1): 43-44.
- [6] 谭斐, 杨映霞. 广西地面太阳辐射分布特征以及对人体健康的影响[J]. 气象研究与应用, 2012, 33(2): 45-48, 54.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国
- 国家标准化管理委员会. 太阳能资源等级总辐射: GB/T 31155-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 太阳能资源评估方法: GB/T 37526-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 太阳能资源术语: GB/T 31163-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [10] 梁玉莲, 申彦波, 白龙, 等. 华南地区太阳能资源评估与开发潜力[J]. 应用气象学报, 2017, 28(4): 481-492.
- [11] 何如, 周绍毅, 苏志, 等. 近 50 年广西太阳能资源估算与特征分析[J]. 江西农业学报, 2016, 28(3): 109-112.
- [12] 成驰, 陈正洪, 孙朋杰. 光伏阵列最佳倾角计算方法的进展[J]. 气象科技进展, 2017, 7(4): 60-65.
- [13] 何如, 周绍毅, 苏志, 等. 广西太阳能分布特征及开发利用研究[J]. 安徽农学通报, 2015, 21(24): 34-36.

## Application research on evaluation indicators system of solar energy resources in Guangxi

HE Ru<sup>1</sup>, LUO Honglei<sup>2</sup>, WU Liquan<sup>2</sup>, TANG Heyun<sup>3</sup>

(1. Guangxi Climate Center, Nanning 530022, China; 2. Guangxi Meteorological Disaster Prevention Technology Center, Nanning 530022, China; 3. Guangxi Meteorological Service Center, Nanning 530022, China)

**Abstract:** A set of refined evaluation indicator system applicable to the characteristics of solar resource distribution in Guangxi was established by adopting the three indicators of solar resource richness, stability and direct irradiation ratio to classify solar resources. According to the actual distribution of annual total solar radiation amount in Guangxi, the indicator of solar energy resource richness was classified and refined. The C level that covered a large area of Guangxi was further refined into three sub-levels: C1, C2, and C3. The results showed that the solar energy resource richness in Guangxi was divided into five levels, of which the B-level resource-rich region was mainly located in the eastern coastal areas of Guangxi, the C1 first-level rich resources region was in south of the area near 22.5°N and along the Youjiang river valley, the C2 secondary-level rich resources region was in most areas of central Guangxi, and the C3 third-level rich resources region was concentrated in the northern area of Guangxi. The stability of solar energy resource in Guangxi was divided into two levels, of which the B-level relatively stable region was in parts of northwestern and southeastern Guangxi, and Shangsi county. The direct irradiation ratio was of C-level all over Guangxi, with more scattering radiation.

**Key words:** solar energy resource, evaluation indicators, grade division