

王优,张富荣,李书君,等. 辽西朝阳地区太阳能资源评估 [J]. 陕西气象,2023(2):48-54.

文章编号:1006-4354(2023)02-0048-07

辽西朝阳地区太阳能资源评估

王 优¹,张富荣¹,李书君¹,刘安然¹,李雪洋²

(1. 朝阳市气象局,辽宁朝阳 122000;2. 本溪市气象局,辽宁本溪 117000)

摘 要:探明朝阳地区太阳能资源时空变化规律及特征,旨在对朝阳市太阳能资源的开发利用和区域性气候可行性论证工作提供重要信息,在能源布局的宏观决策方面提供科学依据。利用1981—2020年朝阳国家基准气候站辐射资料和日照资料、朝阳市辖区其他气象站的日照资料,通过气候学方程估算、线性趋势分析等方法对朝阳地区太阳能资源进行评估。按国家标准《太阳能资源评估方法》(GB/T 37526—2019),分析朝阳地区太阳能资源时空分布特征,计算并评估太阳能资源相关参数。结果表明:朝阳地区太阳能资源储备很丰富,稳定度一般,可开发利用日数较多,农村太阳能资源利用市场前景广阔,其中北部山地气候区最适宜太阳能资源开发利用,适合大规模光电开发,助力节能减排和朝阳地区经济可持续发展。

关键词:辽西朝阳地区;太阳能资源;气候学方法;资源评估

中图分类号:P422.1

文献标识码:A

在“双碳”目标背景下,我国对于太阳能的开发利用一直采取扶持政策。太阳能以其储量的无限性、存在的普遍性、利用的清洁性和经济性等优点,被国际公认为是未来最具有竞争性的能源之一,可以说是国际未来的战略能源^[1-2]。随着清洁能源开发利用受到全球的关注和认可,近十年内太阳能资源评估与分析,也逐渐成为国内关注焦点。从研究内容来看,国内主流研究方向是太阳能资源的资源属性,这也是开发利用太阳能资源的基础。王彦平等分析了呼伦贝尔市太阳能总辐射时空分布特征,计算相应参数评估了呼伦贝尔市各地的太阳能资源潜力^[3]。徐政等分析太阳能资源状况,对其概率分布特性开展初步研究,旨在为大规模光伏发电提供数据模型^[4]。周扬等分析了江苏省太阳能资源时空分布特征,选用单晶硅电池作参考,评估区域内太阳能资源潜力^[5]。热孜瓦古·孜比布拉等运用气候诊断分析方法,给出日照时数变化特征,为太阳能资源评估利用提供支撑^[6]。孙智辉等通过研究日照时数和太阳辐射量

变化特征,为设施农业生产提供科学依据^[7]。

朝阳地区位于辽宁省西部,处于内蒙古高原向沿海平原过渡的阶梯近海分界地带,属于半湿润半干旱的易旱气候区^[8],气候上接近内蒙古自治区,光热资源也十分丰富,但针对朝阳地区太阳能资源时空分布特征的研究还有待展开。本文将利用朝阳地区7个国家气象观测站的地面观测资料,从不同时间尺度(年、季、月)和空间尺度揭示朝阳地区的太阳能资源分布特征及变化规律,其中评估要素包括太阳总辐射、日照时数、太阳能资源丰富程度、太阳能资源利用价值和太阳能资源稳定度。探明朝阳地区太阳能资源时空变化规律及特征,旨在对朝阳市太阳能资源的开发利用和区域性气候可行性论证工作提供重要信息,在能源布局的宏观决策方面提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源及处理

1.1.1 资料来源 所用资料为朝阳国家基准气候站(下文简称“朝阳县站”)1981—2020年太阳

收稿日期:2022-05-18

作者简介:王优(1992—),女,汉,辽宁朝阳人,学士,工程师,从事农业气象和气候资源研究。

基金项目:辽宁省气象局指导计划项目(ZD202236)

辐射资料和日照时数观测资料、月日照百分率资料及朝阳市境内其余 6 个国家气象观测站(包括:羊山镇站、北票市站、建平县站、老建平镇站、凌源市站和喀左县站)1981—2020 年逐日日照时数观测资料和月日照百分率资料,从各站月报表和天擎数据接口中获取。在分析年、月、季变化时,气象数据均为 7 个国家气象观测站 40 a 的平均值,分析空间分布的数据以 7 个国家气象观测站 40 a 的数据为基础采用克里格法插值获得。

1.1.2 资料处理方法 对于长时间序列的气象数据(包含日照时数、太阳总辐射),质量检控和插补是必要步骤。缺测数据一般采用气候平均法^[9],即对 1 年中每个时刻(时段)的各太阳能资源要素求平均,将平均值作为 1 年完整时间序列数据,或将最接近平均值的真实值挑选出来组成 1 年完整时间序列数据。

1.2 研究方法

1.2.1 太阳总辐射的估算 目前朝阳地区仅有朝阳国家基准气候站有太阳辐射观测业务和完整的太阳总辐射观测数据,因此为全面了解朝阳地区太阳辐射状况,评价太阳能资源丰富程度,需通

过间接方法对朝阳境内其他站的太阳总辐射进行估算。初期研究参考左大康等^[10]、翁笃鸣^[11]采用的气候学方程间接计算月总辐射量的方法,此方法在我国各地实用性均较强。随后王炳忠等^[12]验证发现采用日照百分率拟合方程的效果最好,并指出该计算方法,更适用于平原或海拔不高的地区,地形起伏会对太阳总辐射数据的计算产生影响。钟燕川等^[13]通过气候经验统计模型和分布式模型两种方法对四川省太阳总辐射进行计算,比较后发现气候学方法的误差约小于 0.39%。近年来有学者^[14-16]也采用气候学的计算方法进行太阳总辐射的估算。由此可见,通过气候学方程估算太阳能总辐射的方法在朝阳地区具有实用价值。

首先根据时间周期、太阳常数、日地距离系数和朝阳国家基准气候站的地理纬度、太阳赤纬和日出日落时角计算月天文太阳总辐射量^[17]。月天文太阳总辐射量 Q_0 (见表 1)由日天文太阳总辐射量 Q_n 累加得到, Q_n 计算公式如下:

$$Q_n = \frac{TI_0}{\pi \rho^2} (\omega_0 \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_0)。 \quad (1)$$

表 1 朝阳各地月天文太阳总辐射量

单位: MJ/m²

月份	1	2	3	4	5	6
朝阳县	444.93	573.82	839.78	1 031.43	1 226.91	1 253.21
羊山镇	451.93	562.49	845.01	1 034.46	1 227.96	1 253.13
北票市	439.79	552.08	835.96	1 029.20	1 226.14	1 253.23
建平县	447.47	558.68	841.67	1 032.52	1 227.29	1 253.19
老建平镇	438.24	550.79	834.74	1 028.48	1 225.28	1 253.25
凌源市	450.65	561.39	844.04	1 033.09	1 227.76	1 253.15
喀左县	453.20	563.57	845.94	1 035.00	1 228.14	1 253.11
月份	7	8	9	10	11	12
朝阳县	1 259.30	1 126.29	894.25	691.71	477.26	398.49
羊山镇	1 259.73	1 128.52	898.48	697.75	483.89	405.52
北票市	1 258.98	1 124.64	891.14	687.29	472.43	393.38
建平县	1 259.47	1 127.12	895.81	693.93	479.68	401.04
老建平镇	1 258.88	1 124.14	890.19	685.93	470.94	391.79
凌源市	1 259.66	1 128.13	897.74	696.68	482.70	404.24
喀左县	1 259.80	1 128.93	899.26	698.86	485.10	406.80

式中, T 为时间周期 ($24 \times 60 \text{ min/d}$); I_0 为太阳常数为 $0.0820 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$; ρ 为日地距离系数, 无量纲; φ 、 δ 、 ω_0 分别为地理纬度、太阳赤纬、日出日落时角 (rad)。然后利用太阳辐射资料、日照时数资料及月天文辐射资料, 建立太阳总辐射经验公式:

$$Q = Q_0(a + bS). \quad (2)$$

式中, Q 和 Q_0 分别为月太阳总辐射和月天文太阳总辐射量 (MJ/m^2); S 为日照百分率 (%); a 、 b 为经验系数, 可用最小二乘法^[18]拟合确定。最

后, 通过代入建立的经验公式, 估算朝阳境内其他站点的太阳总辐射量。

为降低估算误差, 提高拟合方程的精度, 分别采取按月、季度、年度三种拟合方式。 R^2 是方程的拟合优度, R^2 最大值为 1, 值越接近 1 表示拟合程度越好。结果表明: 按月拟合的方程 (见表 2) 效果最好, R^2 在 $0.117 \sim 0.387$ 之间, R^2 值虽然较低, 但已通过 ($P < 0.05$) 显著性检验, 同时各月拟合太阳总辐射的标准误差低于 10%, 表明此方法拟合的数据具有实用性。

表 2 1981—2020 年朝阳各月总辐射 a 、 b 系数及拟合度

月份	1	2	3	4	5	6
a	0.359	0.342	0.310	0.338	0.354	0.334
b	0.003	0.003	0.004	0.003	0.003	0.003
R^2	0.310	0.244	0.331	0.274	0.149	0.270
月份	7	8	9	10	11	12
a	0.383	0.296	0.307	0.231	0.270	0.395
b	0.002	0.003	0.003	0.005	0.004	0.002
R^2	0.141	0.330	0.117	0.341	0.387	0.122

1.2.2 太阳能资源评估方法 根据太阳总辐射和日照时数的变化特征, 以国家标准《太阳能资源评估方法》(GB/T 37526—2019) 规定的指标和方法^[9], 对朝阳地区进行太阳能资源丰富程度、太阳能资源利用价值和太阳能资源稳定程度评估。

2 结果与分析

2.1 太阳能资源变化

2.1.1 太阳总辐射的时空变化

(1) 太阳总辐射的年际变化

图 1 为朝阳地区 1981—2020 年太阳总辐射年际变化曲线。由图 1 可以看出, 近 40 a 年平均太阳总辐射 $5\,234.81 \text{ MJ}/\text{m}^2$, 年际变化较大, 呈上下波动状态。由于 2020 年辐射观测设备升级, 造成数据偏大, 因此采用次多年份 1997 年的数据 ($5\,430.66 \text{ MJ}/\text{m}^2$) 作为太阳总辐射最大年份; 2008 年太阳总辐射最小, 为 $5\,026.17 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 。1981—1985 年和 1998—2008 年太阳总辐射呈下降趋势, 这可能与近 40 年城市扩张和工业化发展导致大气污染严重、空气质量变差有关。1986—

1997 年和 2008—2020 年呈上升趋势, 2008 年以后的小幅回升, 可能与环保意识和和污染防治加强有关^[19-21]。近 40 a 来, 朝阳太阳总辐射总体呈现减少的趋势, 气候倾向率为 $-18.3 (\text{MJ}/\text{m}^2)/10 \text{ a}$, 未通过 0.01 的显著性检验。

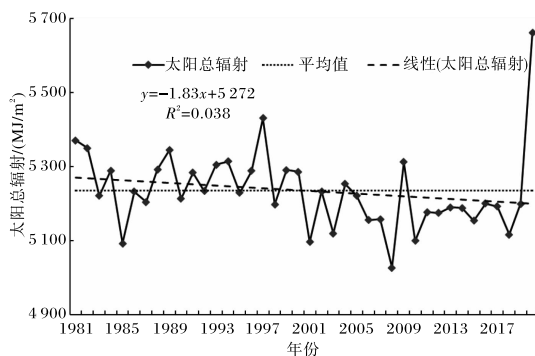


图 1 1981—2020 年朝阳地区太阳总辐射年际变化趋势图

(2) 太阳总辐射的月、季变化

1981—2020 年朝阳地区月平均太阳总辐射 (图 2) 呈单峰型分布, 从 1 月开始增加, 5 月达到

最大,之后逐月减小,6—8月减少幅度小于9—12月,12月出现全年最低值(图3)。4—8月是太阳能资源最丰富的时期,占全年总辐射量的55.8%。从季节变化来看:夏季最多,平均为1 746.53 MJ/m²;春季次之,为1 643.93 MJ/m²,仅比夏季少6%;冬季最少,为750.52 MJ/m²,是夏季的42.97%。

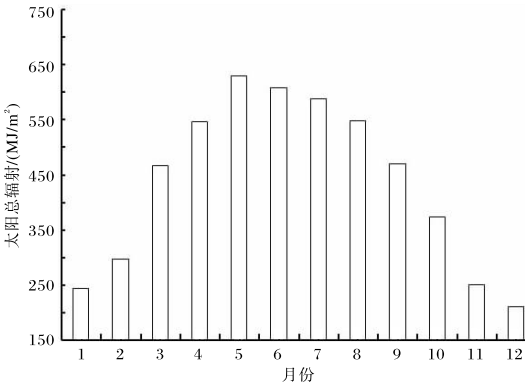


图2 1981—2020年朝阳地区平均太阳总辐射月变化图

(3)太阳总辐射的空间分布
1981—2020年朝阳地区年平均太阳总辐射量整体分布呈北多南少,西多东少的特点,西北部为高值区,东南部为低值区(图3、表3),但各地年平均太阳总辐射量差距不大。其中老建平镇站最高,为5 318.02 MJ/m²,代表朝阳北部山地气候区;羊山镇站最少,为5 154.15 MJ/m²,代表了松岭山脉南麓气候区,羊山镇站的太阳总辐射比老

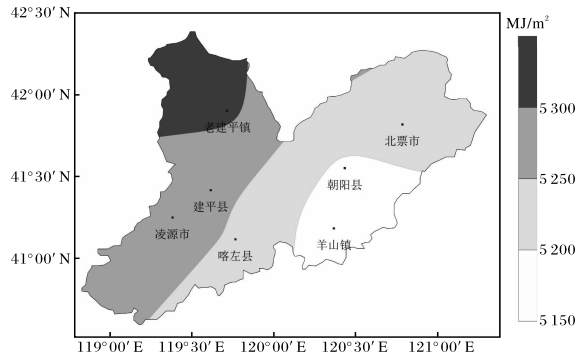


图3 1981—2020年朝阳地区年平均太阳总辐射空间分布图(审图号为GS(2019)1786号)

表3 1981—2020年朝阳各地逐月平均太阳总辐射 MJ/m²

月份	1	2	3	4	5	6
朝阳县	239.52	302.76	458.64	538.49	624.20	598.79
羊山镇	243.16	295.22	462.60	541.52	622.68	596.71
北票市	241.62	295.50	473.31	545.44	633.98	607.21
建平县	246.60	296.09	466.61	548.40	632.27	613.21
老建平镇	245.11	295.90	470.43	547.77	637.63	622.89
凌源市	244.28	296.94	472.35	552.22	634.73	613.37
喀左县	245.41	296.42	467.47	547.80	628.93	606.26
月份	7	8	9	10	11	12
朝阳县	587.92	546.88	467.94	370.99	246.20	206.59
羊山镇	566.49	535.36	462.39	367.80	249.71	210.49
北票市	578.93	547.50	470.38	367.91	248.45	206.96
建平县	594.71	552.90	471.80	375.73	250.97	211.58
老建平镇	613.92	564.47	476.09	381.14	253.49	209.19
凌源市	593.95	549.87	470.06	375.08	252.50	211.75
喀左县	586.66	547.68	469.51	375.38	253.33	212.53

建平站少163.87 MJ/m²。

2.1.2 日照时数时空变化

(1)日照时数年际变化

1981—2020年朝阳地区年平均日照时数为

2 735.4 h,其中2010年最少为2 542.5 h;2020年最多为3 435.7 h,由于2020年更换新设备取代人工观测日照时数,可能造成数据偏高,因此采用次多年份1997年的数据(2 936.6 h)作为日照

时数最多年。参考世界气象组织(WMO)每10年更新一次气候标准平均值的规定,分别对1981—2010年、1991—2019年及1981—2019年的时序数据进行分析。结果表明:1981—2010年、1991—2019年均呈下降趋势(图4),1991—2019年日照时数气候倾向率为 $-71.73\text{ h}/10\text{ a}$,日照时数减少的趋势更为显著。近40 a日照时数(图5)总体也趋于下降趋势,但未通过0.01的显著性检验,因此对太阳能资源的开发利用影响不大。

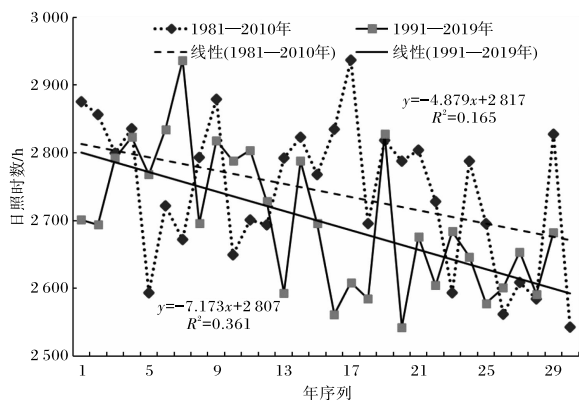


图4 朝阳地区新旧气候态下的日照时数对比图

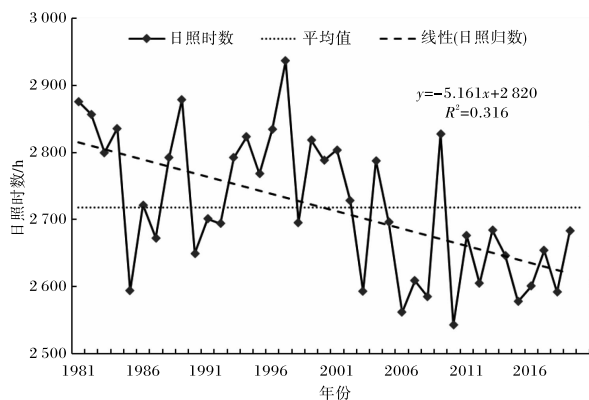


图5 1981—2019年朝阳地区日照时数年际变化曲线图

(2) 日照时数月、季变化

1981—2020年朝阳地区月平均日照时数呈单峰型分布(图6),最大值出现在5月,为268.5 h,之后逐渐降低,12月为全年最低,为188.7 h。从季节分布可以看出,从春季到冬季呈逐步减少的变化,春夏两季最高,占全年53.9%,与太阳总辐射量的变化情况基本吻合。

(3) 日照时数空间分布

1981—2020年朝阳地区年平均日照时数均

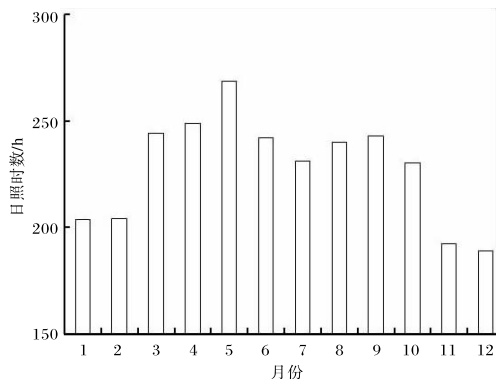


图6 1981—2020年朝阳地区平均日照时数月变化图

超过2600 h(图7),分布情况受地貌影响略有差异。整体表现为从北向南递减,随着海拔的抬升而增加,西北部为高值区,东南部为低值区,分布特征与太阳总辐射分布特征相似。其中,努鲁儿虎山脉以北的平川地带日照时数偏多,以老建平镇站为代表,年日照时数高达2898.4 h;松岭山脉以南小凌河一带最少,以羊山镇站为代表,年日照时数为2607.8 h。两者在地理方位上分别代表了朝阳市的南北两极,日照时数相差290.6 h。

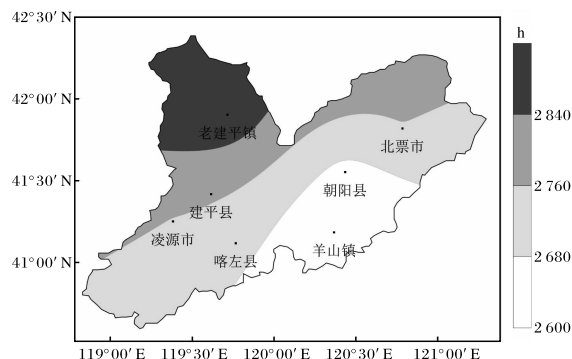


图7 1981—2020年朝阳地区年平均日照时数空间分布图(审图号为GS(2019)1786号)

2.2 太阳能资源评估

2.2.1 太阳能资源丰富程度 太阳能资源丰富程度等级评估标准^[19]为:当 $Q\text{年} \geq 6\,300\text{ MJ}/\text{m}^2$ 时,为资源最丰富区; $Q\text{年}$ 在 $5\,040 \sim 6\,300\text{ MJ}/\text{m}^2$ 之间时,为资源很丰富区; $Q\text{年}$ 在 $3\,780 \sim 5\,040\text{ MJ}/\text{m}^2$ 之间时,为资源丰富区; $Q\text{年} < 3\,780\text{ MJ}/\text{m}^2$ 时,为资源一般区。参照评估标准,朝阳地区属于太阳能资源很丰富区。从40 a的变化来看,朝阳地区太阳能资源丰富程度表现稳定,仅2008年的太阳能资源丰富程度为丰富区等级,其余年份均为

资源很丰富区。

2.2.2 太阳能资源利用价值 太阳能资源利用价值以一日中日照时数能否大于 6 h 为指标,判断是否有利用价值。从表 4 可以看出,1981—2020 年朝阳各地各月日照时数大于 6 h 的平均日数为 18.1~25.6 d,各月累加的年平均日数为 258.8~285.9 d,其中,老建平镇站全年达标日数最多为 285.9 d,羊山镇站最少为 258.8 d。年内太阳能资源利用价值呈波动变化,3 月最高达 24.4 d,7 月最低为 20.7 d。按季节分布来看,春季太阳能资源利用价值最好,达标日数高达 71.1 d,其次秋季为 68.6 d,夏季最少为 62.7 d。

表 4 1981—2020 年朝阳各地逐月日照时数大于 6 h 的平均日数

单位:d

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
朝阳县	22.9	21.5	23.6	22.1	23.2	20.1	19.5	21.3	23.1	23.5	20.9	20.4
羊山镇	22.8	21.8	23.8	22.3	22.9	19.8	18.1	20.4	22.3	22.6	21.4	20.8
北票市	24.1	23.2	25.5	22.9	24.1	20.6	19.3	21.4	23.8	23.6	22.0	21.8
建平县	24.7	22.4	24.4	23.2	23.7	21.4	20.7	21.9	23.0	24.0	21.8	22.6
老建平镇	25.6	23.2	25.1	23.5	24.7	22.4	22.6	23.0	24.1	25.0	22.8	23.9
凌源市	23.4	22.1	24.6	23.5	24.0	21.6	21.1	21.8	22.9	23.5	21.9	21.6
喀左县	23.4	22.1	24.3	23.4	23.3	20.6	19.9	21.5	22.9	23.7	21.7	21.5

2.2.3 太阳能资源稳定程度 根据最新标准,采用代表年各月数据,将月辐照量除以当月日数转换为月平均日辐照量(下文采用 k 值代表),可反应太阳能资源稳定度情况^[9],比值越大说明太阳能资源全年变化越稳定,就越利于太阳能资源的利用。代表年数据是采用 1981—2020 年共计 40 a 的日辐照量,通过平均后组成的 1 年完整时间序列。太阳能资源稳定程度判定公式如下: $k < 0.28$,欠稳定; $0.28 \leq k < 0.36$,一般; $0.36 \leq k < 0.47$,稳定; $k \geq 0.47$,很稳定。

由实测资料计算各站代表年表征太阳能资源稳定程度的 k 值(表 5),发现朝阳地区所有站点 k 值均 > 0.28 ,太阳能资源均达到了一般等级,其中羊山镇站稳定程度最好, k 值为 0.34。从 40 a 的变化来看,朝阳地区 k 值的多年平均值为 0.22~0.39,朝阳县站和羊山镇站 40 a 内有 4 a 处于太阳能稳定等级,太阳能资源的开发利用条件较好。

表 5 朝阳市辖区各地太阳资源稳定程度分布

测站	朝阳县	北票市	羊山镇	建平县	老建平镇	凌源市	喀左县
k	0.32	0.32	0.34	0.32	0.31	0.32	0.33
级别	一般	一般	一般	一般	一般	一般	一般

3 结论与讨论

(1)朝阳地区 1981—2020 年平均总辐射为 5 234.81 MJ/m²,属于太阳能资源很丰富区;太阳能资源可利用日数占全年的 70.9%~78.3%,辖区内各站 k 值均 > 0.28 ,为一般等级,太阳能可以开发利用。综合分析表明:辽西朝阳地区太阳能资源得天独厚,农村太阳能资源利用市场前景广阔,适合大规模光电开发,助力节能减排和朝阳地

区经济可持续发展。从空间分布上看,朝阳北部山地气候区太阳能开发利用潜力最大,是最理想区域。

(2)朝阳地区近 40 a 太阳总辐射和日照时数总体呈波动下降趋势,但未通过 0.01 的显著性检验,因此对太阳能资源的开发利用影响不大。其中 90 年代中后期朝阳地区太阳总辐射大幅下降,到 2008 年后开始小幅回升,这一变化可能与空气

质量有关。由于资料限制,本文未深入研究空气质量对太阳总辐射和日照时数的影响,后续工作有待日后开展。

(3)辽西朝阳地区在地理上与内蒙古赤峰接壤,不仅气候上相近,通过评估分析发现太阳能资源分布特征也相似,赤峰市太阳能资源开发利用技术成熟,朝阳地区可借鉴其技术和做法。在实际太阳能开发选址和新建光伏发电项目时,朝阳地区也可采用 GIS 技术结合土地利用类型,深入评估地块的开发利用潜力。

参考文献:

- [1] 韩世涛,刘玉兰,刘娟. 宁夏太阳能资源评估分析[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(8):131-135.
- [2] 王志春,张新龙,苑俐,等. 内蒙古赤峰市太阳能资源评估与开发潜力分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2021,15(2):106-111.
- [3] 王彦平,李红艳,谢晓丽. 呼伦贝尔市近 30 年太阳能资源区划与评估[J]. 中国农学通报,2017,33(8):119-123.
- [4] 徐政,刘滨,熊强,等. 多地区太阳能资源的监测与分析[J]. 太阳能学报,2020,41(10):174-181.
- [5] 周扬,吴文祥,胡莹,等. 江苏省可用太阳能资源潜力评估[J]. 可再生能源,2010,28(6):10-13.
- [6] 热孜瓦古·孜比布拉,阿依谢姆古丽·孜比布拉,阿吉买买提·吐尔逊. 近 51 年阿图什市日照变化特征及其影响因子[J]. 陕西气象,2014(4):33-36.
- [7] 孙智辉,尹盟毅. 延安冬季太阳辐射特征及对设施农业的影响[J]. 陕西气象,2007(1):34-36.
- [8] 东学汉,刘恩铭. 朝阳市农业区划文集[M]. 朝阳:朝阳市农业区划办公室,1987:6-7.
- [9] 中国气象局. 太阳能资源评估方法:GB/T 37526—2019[S]. 北京:中国标准出版社,2019.
- [10] 左大康,王懿贤,陈建绥. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征[J]. 气象学报,1963(1):78-96.
- [11] 翁笃鸣. 试论总辐射的气候学计算方法[J]. 气象学报,1964(3):304-315.
- [12] 王炳忠,张富国,李立贤. 我国的太阳能资源及其计算[J]. 太阳能学报,1980(1):1-9.
- [13] 钟燕川,马振峰,徐金霞,等. 基于分布式模型方法和气候经验模型的四川省总辐射结果比较研究[J]. 高原山地气象研究,2017,37(3):58-63.
- [14] 曾雁,曾万寿. 酒泉市 1958—2016 年太阳总辐射变化特征研究[J]. 中国农学通报,2019,35(11):115-120.
- [15] 赵迦琪,李兴华,胡亚男,等. 内蒙古典型草原区太阳能资源变化特征及其与气候变化的关系[J]. 内蒙古科技与经济,2020(13):60-65.
- [16] 徐昌龙,张莹莹,崔日权,等. 延边地区太阳总辐射分布及其变化特征分析[J]. 现代农业科技,2021(7):202-203.
- [17] 朱瑞兆. 应用气候手册[M]. 北京:气象出版社,1991:2-20.
- [18] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007:37-59.
- [19] 杜春丽,沈新勇,陈渭,等. 43 a 来我国城市气候和太阳辐射的变化特征[J]. 南京气象学院学报,2008(2):200-207.
- [20] 司福意. 焦作市太阳辐射资源分析评估[J]. 气象与环境科学,2013,36(2):87-91.
- [21] 张亚丽,田义超,林俊良,等. 1961—2017 年广西北部湾海岸带太阳总辐射时空动态特征[J]. 生态科学,2020,39(4):145-155.