

基于天气类型有效识别的太阳辐射推算方法

李 芬¹, 林逸伦¹, 王仁奎¹, 李春阳², 王育飞¹, 成 驰³, 童 力⁴

(1. 上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090; 2. 广东电网公司佛山供电局, 广东 佛山 528000;
3. 湖北省气象服务中心, 湖北 武汉 430205; 4. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要:基于2010—2011年北京地区逐时辐射及气象资料,提出有效的天气类型识别方法,研究适用于北京地区的水平面直散分离模型并对其进行本地化修正,同时验证目前主流的斜面辐射模型的性能,并建立和评估由各种天气类型对应的最优直散分离与斜面辐射模型级联而成的综合模型。结果表明:水平面直散分离模型中,修正Erbs、修正Liu & Jordan模型的预测误差较小;斜面辐射模型预测精度均与天气类型密切相关;将筛选出的组合直散分离模型的输出作为天气细分后斜面辐射模型的输入进行两级级联,对无直、散辐射观测地区的斜面辐射推算及光伏出力预测等具有指导意义。

关键词:散射比;斜面辐射;修正清晰度指数;总云量;天气类型

中图分类号:TM 615;P 422.1

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202106014

0 引言

根据国家能源局^[1]的统计,截至2020年底,全国光伏新增装机容量 4.82×10^7 kW,累计装机容量达到 2.53×10^8 kW,全国光伏年平均利用小时数达到1160 h。2020年12月12日,国家主席习近平在气候雄心峰会上通过视频发表题为《继往开来,开启全球应对气候变化新征程》的重要讲话^[2]中明确提出,到2030年我国风电、太阳能发电总装机容量将达到 1.2×10^9 kW以上。未来光伏发电将会占据越来越大的发电市场。

但随着光伏市场的快速增长,我国在光伏资源评估方面的工作略显不足。由于观测设备、方法的限制,我国现有气象业务观测系统中大多台站只能提供水平面总辐射观测资料,而缺乏直接辐射、散射辐射和斜面总辐射的观测资料。其中,水平面总辐射中直接辐射和散射辐射成分的分布(即直散分离)会对入射斜面总辐射产生重要影响。光伏发电是一个多变量耦合的高度非线性随机过程,入射斜面总辐射是光伏阵列的能量来源(输入),其直接决定了光伏阵列的输出^[3]。因此,有必要通过实测的观测资料对现有太阳辐射模型进行精细化评估并确定适用范围。

文献[4]引入降水作为直散分离模型的输入变

量,有效地改善了日散射辐射被低估的问题。文献[5]使用现有的72个直散分离模型对我国的不同气候区域进行评估。文献[6]将18种常见的水平面散射辐射模型按照公式的一般形式分为五大类,并以近50年上海地区的日散射辐射数据为样本,分析得到5种适合上海地区的散射辐射模型。文献[7]统计散射比与气象环境因子的关系,引入总云量和清晰度指数进行天气类型的划分,结合观测资料进行预测检验,得到不同天气类型下的最优模型。文献[8]对适用于朝南的各向同性Liu & Jordan斜面辐射模型进行改进,将其推广到任意朝向。文献[9]利用新加坡地区的小时水平面及斜面辐射数据,对Liu & Jordan、Klucher及Perez斜面辐射模型进行检验,并计算得出该地区的最佳倾角和朝向。文献[10]评估14个斜面辐射模型,在发现计算值与实测值存在较大误差后建立一个结合Perez、Willmot和Bugler这3个模型优点的综合模型,该模型计算结果较为精确。文献[11]对武汉地区正南朝向斜面月平均总辐射计算方法和光伏阵列最佳倾角问题进行探讨,分析倾角变化对斜面辐射和光伏发电量(或效率)的影响,同时得出最适合武汉地区的是Hay模型。文献[12]使用美国地区的实测数据,综合研究直散分离模型和斜面辐射模型的精度,将精度最高的几种模型结合进行计算,并与实测值比较,分析误差产生的原因,得出直散分离模型受天气影响较大、斜面模型如Perez模型等对数据质量较为敏感等结论。研究人员已经针对太阳辐射模型进行了大量研究,但大多研究是将水平面直散分离模型和斜面辐射模型分开进行讨论,且由于观测数据的缺乏,多数模型是国外学者针对当地气候条件提出的,较少有研究针对我国地区气候特征对模型进行检验。

本文根据北京南郊观象台的小时尺度太阳辐射和气象要素等资料(含水平面和倾角为当地纬度的

收稿日期:2020-07-08;修回日期:2021-04-26

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51777120);上海绿色能源并网工程技术研究中心项目(13DZ2251900);上海市高校教师培养资助计划项目(CXYsdl18012)

Project supported by the General Program of the National Natural Science Foundation of China(51777120),the Program of Shanghai Engineering Research Center of Green Energy Grid-connected Technology(13DZ2251900) and the Training Plan Program for University Faculty of Shanghai(CXYsdl18012)

斜面辐射资料),在天气类型有效识别的基础上,评估并选取每种天气类型下的最优水平面直散分离模型构成组合直散分离模型。同时,在天气类型细分的基础上对现有的几种经典斜面辐射模型进行讨论,从而验证不同天气类型下各斜面辐射模型在北京地区的适用性,并得到每种天气类型下的最优预测模型。此外,将组合直散分离模型与组合斜面辐射模型级联构建综合模型,即将组合直散分离模型的输出,也就是直接辐射与散射辐射数据作为组合斜面辐射模型的输入,最后输出斜面总辐射。

1 数据说明及水平面辐射模型的选取

本文采用北京地区 2010—2011 年的水平面总辐射、散射辐射、直接辐射和反射辐射等数据,该数据来源于国家气象信息中心。并采用正南朝向、倾角为北京纬度的斜面总辐射小时数据,该数据来自于北京南郊中国气象局大气探测中心的示范站。本文采用的所有数据均经过严格的质量控制和检查。

使用清晰度指数 k_T 和修正清晰度指数 k'_T 对总样本数据进行天气类型分类,分类规则见表 1,研究不同分类标准对预测模型结果的影响^[13]。

表 1 天气类型分类

Table 1 Classification of weather types

天气类型	天气状况	判别标准
1	晴、晴到多云、多云到晴	$k_T, k'_T \geq 0.5$
2	多云、阴到多云、多云到阴	$0.2 \leq k_T, k'_T < 0.5$
3	雨、雾、雪、霾等	$0 \leq k_T, k'_T < 0.2$

清晰度指数 k_T 定义为小时尺度下水平面总辐射 I 与大气层外水平面总辐射(天文辐射) I_0 之比,可近似表征大气层对太阳辐射的衰减。

$$k_T = I/I_0 \quad (1)$$

考虑太阳高度角对清晰度指数的影响,可得到修正清晰度指数^[14]为:

$$k'_T = \frac{k_T}{1.031 \exp\left(\frac{-1.4}{0.9 + \frac{9.4}{m}}\right) + 0.1} \quad (2)$$

其中, m 为大气质量。

将 2010 年 1 月至 12 月的数据作为训练集,2011 年 1 月的数据作为验证集,2011 年 2 月的数据作为测试集,根据实测数据计算的散射比作为实测值,并选取 Liu & Jordan(1960)^[15]、Erbs^[16]、Reindl(1990)^[17] 和 Orgill and Hollands^[18] 4 种经典小时尺度的直散分离模型计算结果作为预测值,对比选择每种天气类型下的最优模型。上述 4 种模型的结构均为以清晰度指数为输入变量的分段函数,其中 Erbs 模型还引入日落时角作为分段的标准。4 种模型的具体计算公式见附录 A 式(A1)~(A5)。

进一步地,采用 1stOpt 软件中的 LM(Levenberg-Marquardt)法和通用全局优化 UGO(Universal Global Optimization)算法对每种天气类型下的最优经典模型进行本地化修正。当修正模型预测的散射比值大于 1 时,取值 1。选用平均绝对百分比误差 MAPE(Mean Absolute Percentage Error)、相对均方根误差 NRMSE(Normalized Root Mean Square Error)及相关系数 r 作为评估模型预测效果的指标,各模型在不同天气类型划分指标下的预测误差如图 1 所示。

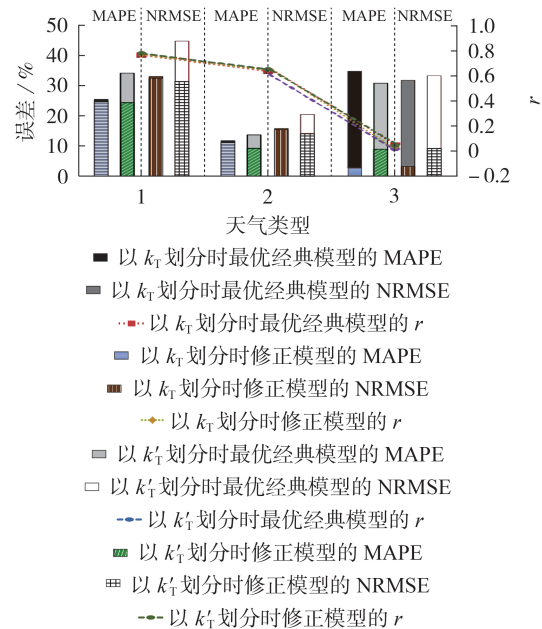


图 1 不同划分指标下的最优经典模型和修正模型误差

Fig.1 Error of optimal classical model and corrected model under different partition criteria

图 1 表明:对于最优经典模型,使用 k_T 划分时预测值的误差更小(体现在 MAPE 和 NRMSE),但预测效果不如以 k'_T 划分时的修正模型(体现在 r),原因之一是建立最优经典模型时使用的是美国、加拿大等国外数据,不适合直接用于北京地区;2 种划分方式下最优经典模型经过本地化修正均可以有效减小误差,特别是在天气类型 3 下所有预测误差均得到极大的降低,且以 k'_T 进行划分的最优经典模型误差更小,即预测效果最优。

修正模型的具体误差如表 2 所示(各个模型后面加“'”表示本地化修正后的模型)。下文全部采取以 k'_T 进行划分的方法,修正模型也是以 k'_T 为自变量

表 2 不同天气类型下修正模型的误差

Table 2 Error of corrected model under different weather types

天气类型	修正模型	MAPE / %	NRMSE / %	r
1	Erbs'	25.36	32.34	0.780
2	Erbs'	9.86	14.32	0.661
3	文献[15]Liu & Jordan'	2.02	8.62	0.056

进行本地化修正。

由表2可知,天气类型1和2下最适用的模型为Erbs'模型,修正后的MAPE分别为25.36%、9.86%,修正后的NRMSE分别为32.34%、14.32%,天气类型2的预测效果优于天气类型1。天气类型3下最适用的模型为Liu & Jordan'模型,此时误差极小,但相关系数也很小,而在正常情况下相关系数应随着误差的减小而增加,其原因在于:相比于其他天气情况,天气类型3以散射辐射为主,散射比较大,其值接近于1,相当于除以一个比较大的分母,导致计算得到的误差较小;另外,天气类型3为雨、雾、雪、霾等天气,此时的天气状况较恶劣,到达地面的总辐射、直接辐射、散射辐射值均很小,导致较大的观测误差。天气类型1下的模型预测误差是3种天气类型中最大的,这是由于天气类型1的主要气象因子间耦合较强,而本地化只是以修正清晰度指数为自变量进行拟合的,因此需对天气类型1进行深入研究。

2 天气类型交叉细分与斜面辐射模型

2.1 天气类型交叉细分

大气成分中的云和气溶胶等会对太阳辐射产生复杂影响^[19]。一方面,云的存在会直接减少到达地面的太阳辐射,且在白天会抑制大气边界层PBL(Planetary Boundary Layer),但是另一方面PBL中的气溶胶会削弱地面上接受的太阳辐射,其相互之间的影响非常复杂^[20]。

为找出影响散射比的主要气象因子,对2010年3月至2011年2月的样本进行相关分析,结果见图2。

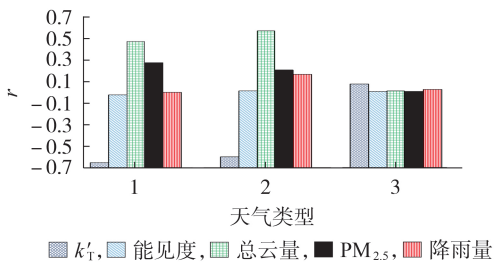


图2 散射比与各气象因子相关分析

Fig.2 Correlation analysis of diffuse irradiation ratio and each meteorological factor

由图2可知,在天气类型3下,散射比与各气象因子的相关性均较弱,相关系数最大不超过0.1,这说明此时气象因子之间几乎不存在耦合,天空被云层遮蔽,大气透明度较低,天空散射辐射趋向于各向同性。而在天气类型1和2下,散射比与气象因子的相关性比较强,除修正清晰度指数以外,总云量与散射比的相关性最大。结合水平面直散分离模型预测结果可知,天气类型1的误差最大,因此,本文选择天气类型1进行交叉细分。引入与散射比相关系数较大的总云量 C 作为划分因子,划分规则见表3。

表3 引入总云量的天气类型划分

Table 3 Weather type classification by introducing total cloud cover

天气类型	天气状况	判别标准
1-1	晴	$k_T' \geq 0.5$ 且 $0 < C \leq 20\%$
1-2	晴渐多云	$k_T' \geq 0.5$ 且 $20\% < C \leq 80\%$
1-3	晴渐阴	$k_T' \geq 0.5$ 且 $80\% < C \leq 100\%$
2	多云渐阴	$0.2 \leq k_T' < 0.5$
3	雨、雾、雪、霾等	$0 \leq k_T' < 0.2$

不同天气类型在日照时间内的占比如图3所示。

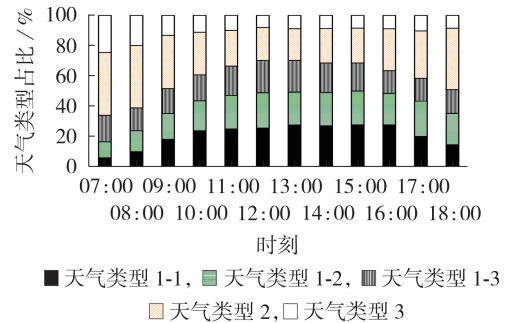


图3 日照时间内各时刻对应的不同天气类型占比

Fig.3 Proportion of different weather types at different moments in sunshine time

使用K-means聚类算法对天气类型1的分类方法进行验证,结果相似度高于80%,因此使用该方法划分天气类型后的数据对斜面辐射模型进行研究。

2.2 模型比较与验证

通过斜面辐射模型可以计算不同倾角下的光伏组件斜面入射总辐射。任意斜面上的太阳总辐射由斜面直接辐射、散射辐射及反射辐射三部分组成,计算公式为:

$$I_T = I_b R_b + I_d R_d + \rho I (1 - \cos \beta) / 2 \quad (3)$$

其中, R_b 为倾斜面小时直射辐射量与水平面小时直射辐射量之比; R_d 为倾斜面小时散射辐射量与水平面小时直射辐射量之比; I_b 为水平面小时直射辐射量; I_d 为水平面小时散射辐射量; ρ 为地面反射率; β 为光伏组件斜面倾角(与水平面的夹角,取值范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$)。

选取4种经典斜面辐射模型,即各向同性Liu & Jordan模型(1962)^[21]以及各向异性Hay^[22]、Klucher^[23]、Perez^[24]模型。Liu & Jordan模型认为天空散射辐射是各向同性的,该模型计算简单,阴天条件下精度高,晴天或多云时误差较大。在各向同性的基础上,改进的天空散射各向异性模型被提出,Hay模型将天空散射辐射分为各向同性及环日辐射2个部分,Klucher模型在Temps和Coulson模型的基础上增加了地平分量及环日系数,Perez模型将天空散射分解为环日散射辐射、地平散射辐射、其余穹顶均匀分布

散射辐射 3 个部分。4 种斜面辐射模型的具体计算公式见附录 A 式(A6)—(A9)。

上述 4 种模型的 R_b 计算方法相同。朝向为正南,斜面倾角为北京纬度,不同天气类型下小时尺度的 R_b 平均值变化趋势如图 4 所示。可见,除天气类型 3 外,其他天气类型下的 R_b 平均值遵循普遍规律,即在清晨(06:00—08:00)上升,在傍晚(16:00—18:00)下降,其他时段的波动较为平稳。在天气类型 3 下 R_b 平均值波动较平缓且数值较小,这主要是由于此时天气情况恶劣,空气中散射辐射较多,导致直接辐射比例减小。

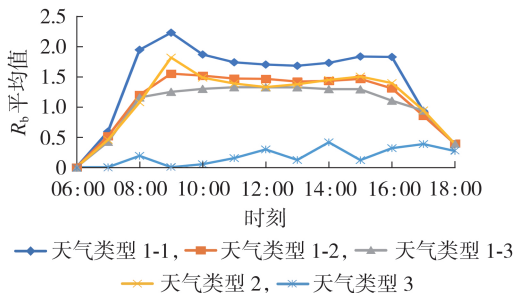


图 4 不同天气类型下小时尺度的 R_b 平均值

Fig.4 Average value of R_b at hourly scale under different weather types

计算倾角 β 等于北京地区的纬度 ϕ 时,不同天气类型下各模型的指标如表 4 所示。

表 4 不同天气类型对应的最优模型误差

Table 4 Error of optimal model corresponding to different weather types

天气类型	最优模型	MAPE / %	NRMSE / %	r
1-1	Perez	9.38	11.60	0.831
1-2	文献[21]Liu & Jordan	10.55	11.73	0.831
1-3	文献[21]Liu & Jordan	10.32	11.35	0.832
2	Klucher	10.33	11.71	0.803
3	文献[21]Liu & Jordan	10.04	11.29	0.826

对各斜面辐射模型进行进一步研究,针对正南朝向,绘制不同天气类型下取较优倾角时不同模型的 R_d 平均值随时间的变化规律如附录 A 图 A1 所示。由图可知,相同天气类型与不同天气类型下各模型的 R_d 平均值变化规律均不相同。天气类型 1-1 下, Hay 模型与 Perez 模型的 R_d 平均值有明显的高峰,这是由于晴天日出日落时,较小的太阳高度角与环日直射分量引起的误差增大;天气类型 1-2 下, Perez 模型的预测值总体大于 Hay 模型;天气类型 1-3 下, Hay 模型的 R_d 平均值呈现先下降后上升的趋势,而 Perez 模型的 R_d 平均值比较稳定;相比于前 4 种天气类型,天气类型 3 下 3 种各向异性模型的 R_d 平均值变化趋势更为一致,其中 Perez 模型和 Hay 模型的 R_d 平均值最接近;除天气类型 1-1 外,3 种各向异性模型中 Klucher 模型的 R_d 平均值最小。

每种天气类型下,各模型斜面入射总辐射预测值和实测值对比见附录 A 图 A2。由图可知,天气类型 1-1 下斜面入射总辐射的实测值最大,天气类型 1-2 次之,其后依次为天气类型 1-3、2、3。总体上斜面入射总辐射实测值随时间变化呈现正弦半波曲线,与太阳高度角变化趋势类似,但天气类型 3 下的最大值不凸显。不同天气类型下散射辐射实测值与预测值的大小也不同:天气类型 1-1 下,在太阳辐射强烈的正午,各模型预测值比实测值高,在清晨和下午,预测值略低于实测值;天气类型 2、3 下,预测值高于实测值;天气类型 1-1、1-2、1-3、3 下,4 种模型的预测效果差异不明显(最大误差为 12.7 MJ/m^2),天气类型 2 下各模型预测结果相差较大(最大误差为 54.3 MJ/m^2),且 3 种各向异性模型的预测值均大于各向同性 Liu & Jordan 模型。

表 5 为各种天气类型下的 2 a 累计总辐射。由表可知,相较于水平面,斜面在不同天气类型下均有一定的增益。晴天时总云量较小,直接辐射占比较高,这使得斜面入射总辐射中的直接辐射部分增加明显。另外,由图 4 可知,天气类型 1-1 下的 R_b 平均值比其他天气类型更高,因此天气类型 1-1 斜面入射总辐射增加最多,天气类型 1-2 和 1-3 下的 R_b 平均值较小,因此斜面入射总辐射增加较少。天气类型 2 和天气类型 3 下,斜面入射总辐射增加较少,尤其是在天气类型 3 下,这主要是由于此时的天气状况较恶劣,以散射辐射为主且分布较为均匀,导致各斜面的直接辐射增益有限。

表 5 各种天气类型下的 2 a 累计总辐射

Table 5 Cumulative total radiation over two years under each weather type

天气类型	总辐射 / ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)	
	水平面	$\beta = \phi$
1-1	2965.92	3227.62
1-2	1845.38	1998.13
1-3	1619.96	1725.68
2	2288.88	2382.92
3	280.80	287.35

3 级联模型误差分析

基于天气类型细分的太阳辐射推算流程图如图 5 所示。图中,首先将不同天气类型所对应的最优直散分离模型组合,然后筛选出交叉细分后不同天气类型下的最优斜面辐射模型,最后将最优直散分离模型的输出,即获得的直接辐射与散射辐射作为最优斜面辐射模型的输入,将两级模型形成级联的关系,形成一个输入为水平面总辐射、输出为斜面总辐射的综合模型。

表 6 给出了不同模型的比较。由表可知:组合模型的精度优于任何单一直散分离模型与斜面辐射模型;级联模型误差较小,这说明级联模型有广阔的

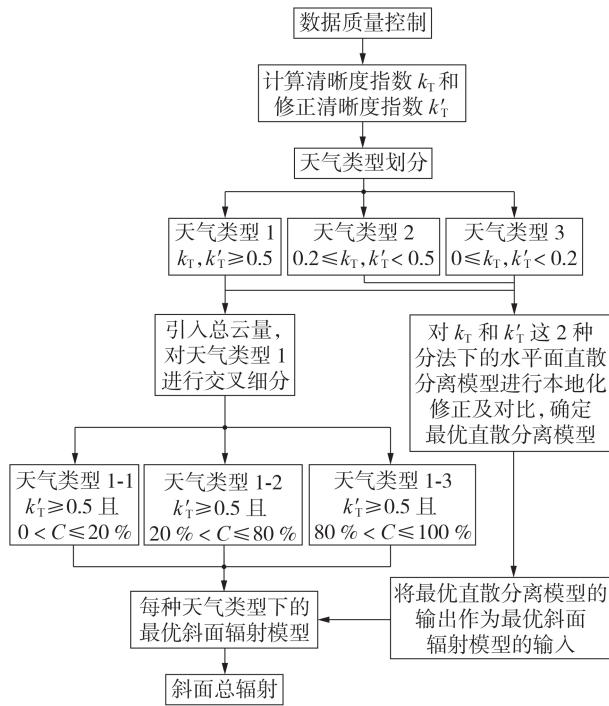


图5 基于天气类型细分的太阳辐射推算流程图

Fig.5 Flowchart of solar radiation estimation based on weather type classification

应用空间。为获得更多的太阳辐射能量,光伏组件往往倾斜安装,进行光伏系统优化设计和功率预测时需计算光伏阵列斜面辐射,从而产生了进行直散分离以获得水平面直接辐射和散射辐射的新需求。但全国98个地面辐射观测站中仅有17个站提供直接辐射、散射辐射的观测,本文建立的级联模型可精准解决该问题,实现输入为水平面总辐射,输出为斜面总辐射。这可以为无直接辐射观测的地区提供精确可靠的光伏资源评估及预测。另外,两级级联模型结合光伏电池模型和逆变器模型,输入太阳总辐射预测值,即可获得光伏系统的出力预测值,这是一种实现光伏功率预测的技术路线,即原理预报法。

表6 不同模型比较

Table 6 Comparison of different models

模型		MAPE / %	NRMSE / %	r
直散分离模型	文献[15]Liu & Jordan	71.68	81.55	0.825
	Erbs	19.45	27.55	0.864
	组合模型	17.73	25.75	0.868
斜面辐射模型	文献[21]Liu & Jordan	13.27	18.22	0.976
	Perez	16.33	22.17	0.979
	组合模型	13.22	18.20	0.976
级联模型	文献[21]Liu & Jordan	15.12	20.10	0.970
	Perez	17.73	23.63	0.975
	综合模型	13.94	19.76	0.968

4 结论与展望

本文利用北京小时尺度气象及辐射资料进行天气类型细分,对各天气类型下的水平面直散分离模

型与斜面辐射模型进行误差分析及评估。建立了两级级联模型,该模型适用于我国无直、散辐射观测地区的斜面辐射推算及光伏功率预测,主要结论如下。

1)不同天气类型下各模型 R_d 平均值的变化规律并不相同,除天气类型1-1外,3种各相异性模型中Klucher模型的 R_d 平均值最小。各种天气类型下,3种各向异性模型 R_d 平均值的波动情况都比各向同性Liu & Jordan模型要剧烈。

2)各预测模型得到的残差与天气类型有关。天气类型1下,各模型的预测值与实测值比较接近,而天气类型2和3下,预测值整体偏高。

3)北京地区水平面直散分离模型中,修正Erbs模型适用的天气类型较多;斜面辐射模型中,各向同性Liu & Jordan模型适用的天气类型更广。

4)将优化的直散分离模型与斜面辐射模型级联,实现了输入为水平面总辐射,输出为斜面总辐射,这对光伏资源精细化评估及光伏出力预测有重要的指导意义。

随着我国城市化进程的加快,城市大气污染物的增加会对到达地面的太阳辐射有重大影响。后续计划将细颗粒物PM_{2.5}浓度或大气气溶胶光学厚度、大气浑浊度指标等能够表征大气气溶胶影响的参数对现有直散分离模型及斜面辐射模型进行订正,以进一步提高模型精度。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 国家能源局2021年一季度网上新闻发布会文字实录[EB/OL]. (2021-01-30)[2021-03-05]. http://www.nea.gov.cn/202101/30/c_139708580.htm.
- [2] 中国共产党新闻网. 继往开来,开启全球应对气候变化新征程[EB/OL]. (2020-12-13)[2021-03-05]. <http://cpc.people.com.cn/n1/2020/1213/c64036-31964469.html>.
- [3] 李芬,李春阳,闫全全,等. 基于变分贝叶斯学习的光伏功率波动特性研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(8):99-104,122. LI Fen, LI Chunyang, YAN Quanquan, et al. Photovoltaic output fluctuation characteristics research based on variational Bayesian learning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8):99-104, 122.
- [4] ZHOU Y, WANG D J, LIU Y F, et al. Diffuse solar radiation models for different climate zones in China: model evaluation and general model development[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 185:518-536.
- [5] FAN J L, WU L F, ZHANG F C, et al. Evaluation and development of empirical models for estimating daily and monthly mean daily diffuse horizontal solar radiation for different climatic regions of China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 105:168-186.
- [6] 李峥嵘,姚万祥,赵群,等. 水平面日太阳散射辐射模型对比研究[J]. 太阳能学报,2013,34(5):794-799. LI Zhengrong, YAO Wanxiang, ZHAO Qun, et al. Study on the comparison of models for daily diffuse solar radiation on a horizontal surface[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2013, 34(5):794-799.
- [7] 李芬,刘迪,闫全全,等. 天文、气象环境因子与散射比关系的

- 建模分析[J]. 太阳能学报,2020,41(2):203-209.
- LI Fen,LIU Di,YAN Quanquan,et al. Analysis on relationship between diffuse irradiation ratio and astronomical and meteorological environmental factors[J]. Acta Energetica Solaris Sinica,2020,41(2):203-209.
- [8] KLEIN S A,THEILACKER J C. An algorithm for calculating monthly-average radiation on inclined surfaces[J]. Journal of Solar Energy Engineering,Transactions of the ASME,1981,103(1):29-33.
- [9] KHOO Y S,NOBRE A,MALHOTRA R,et al. Optimal orientation and tilt angle for maximizing in-plane solar irradiation for PV applications in Singapore[J]. IEEE Journal of Photovoltaics,2014,4(2):647-653.
- [10] DEMAIN C,JOURNÉE M,BERTRAND C. Evaluation of different models to estimate the global solar radiation on inclined surfaces[J]. Renewable Energy,2013,50:710-721.
- [11] 李芬,赵晋斌,段善旭,等. 3种斜面月平均总辐射模型评估及光伏阵列最佳倾角研究[J]. 太阳能学报,2015,36(2):502-509.
- LI Fen,ZHAO Jinbin,DUAN Shanxu,et al. Evaluation of three models of monthly average total radiation on inclined surfaces and investigation of optimum tilt angle for PV array[J]. Acta Energetica Solaris Sinica,2015,36(2):502-509.
- [12] LAVE M,HAYES W,POHL A,et al. Evaluation of global horizontal irradiance to plane-of-array irradiance models at locations across the United States[J]. IEEE Journal of Photovoltaics,2015,5(2):597-606.
- [13] 陈正洪,孙朋杰,张荣. 误差逐步逼近法在太阳辐射短期预报中的应用[J]. 太阳能学报,2015,36(10):2377-2383.
- CHEN Zhengong,SUN Pengjie,ZHANG Rong. Application of gradually approaching error method for short term prediction of solar radiation[J]. Acta Energetica Solaris Sinica,2015,36(10):2377-2383.
- [14] PEREZ R R,INEICHEN P,MAXWELL E L,et al. Dynamic global-to-direct irradiance conversion models[J]. ASHRAE Transactions,1992,98:354-369.
- [15] LIUB Y H,JORDANR C. The interrelationship and characteristic distribution of direct,diffuse and total solar radiation[J]. Solar Energy,1960,4(3):1-19.
- [16] ERBS D G,KLEIN S A,DUFFIEJ A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly,daily and monthly-average global radiation[J]. Solar Energy,1982,28(4):293-302.
- [17] REINDL D T,BECKMAN W A,DUFFIEJ A. Diffuse fraction correlations[J]. Solar Energy,1990,45(1):1-7.
- [18] ORGILL J F,HOLLANDS K G T. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface[J]. Solar Energy,1977,19(4):357-359.
- [19] 申彦波,赵宗慈,石广玉. 地面太阳辐射的变化、影响因子及其可能的气候效应最新研究进展[J]. 地球科学进展,2008,23(9):915-923.
- SHEN Yanbo,ZHAO Zongci,SHI Guangyu. The progress in variation of surface solar radiation,factors and probable climatic effects[J]. Advances in Earth Science,2008,23(9):915-923.
- [20] MIAO Y C,GUO J P,LIU S H,et al. Classification of summertime synoptic patterns in Beijing and their association with boundary layer structure affecting aerosol pollution[J]. Atmospheric Chemistry and Physics,2016:1-33.
- [21] LIU B,JORDANR. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator[J]. ASHRAE Transactions,1962,53:526-541.
- [22] HAY J E. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces[J]. Solar Energy,1979,23(4):301-307.
- [23] KLUCHER T M. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces[J]. Solar Energy,1979,23(2):111-114.
- [24] PEREZ R R,INEICHEN P,MAXWELL E L,et al. Dynamic global-to-direct irradiance conversion models[J]. ASHRAE Transactions,1992,98:354-369.

作者简介:



李芬

李芬(1984—),女,湖北天门人,副教授,博士,通信作者,研究方向为新能源开发利用与电力变换技术(**E-mail**:beckyhust@163.com);

林逸伦(1996—),男,浙江台州人,硕士研究生,主要研究方向为光伏资源精细化评估(**E-mail**:mrlin1609@outlook.com)。

(编辑 王锦秀)

Estimation method of solar radiation based on effective classification of weather types

LI Fen¹,LIN Yilun¹,WANG Renkui¹,LI Chunyang²,WANG Yufei¹,CHENG Chi³,TONG Li⁴

(1. School of Electric Power Engineering,Shanghai University of Electric Power,Shanghai 200090,China;

2. Foshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Company,Foshan 528000,China;

3. Hubei Provincial Meteorological Service Center,Wuhan 430205,China;

4. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute,Hangzhou 310014,China)

Abstract: An effective identification method of weather type is proposed based on the hourly radiation and meteorological data in Beijing area from 2010 to 2011,the horizontal diffuse radiation fraction model suitable for Beijing area is researched and carried out for localization correction,meanwhile the performances of current main inclined plane radiation models are verified,and the comprehensive model cascaded by the optimal diffuse fraction and inclined plane radiation models corresponding to each weather type is established and evaluated. Results show that the prediction error of the modified Erbs and Liu & Jordan models is small in horizontal plane diffuse fraction model,the prediction accuracy of inclined plane radiation model is closely related to weather type,and two stage cascade with the output of selected composed diffuse radiation fraction model as the input of inclined plane radiation model after the classification of weather types can guide the estimation of inclined plane radiation and photovoltaic output prediction in the area without observation of diffuse radiation.

Key words: diffuse radiation fraction;inclined plane radiation;modified clearness index;total cloud cover;weather type

附录 A:

Liu & Jordan(1960)模型:

$$\frac{I_d}{I} = 0.3838 - 0.4162k_T \quad (\text{A1})$$

Erbs 模型。

当日落时角小于 81.4°时:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 - 0.2727k_T + 2.4495k_T^2 - 11.9514k_T^3 + 9.3879k_T^4 & k_T < 0.715 \\ 0.143 & k_T \geq 0.715 \end{cases} \quad (\text{A2})$$

当日落时角大于 81.4°时:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 + 0.2832k_T - 2.5557k_T^2 + 0.8448k_T^3 & k_T < 0.722 \\ 0.175 & k_T \geq 0.722 \end{cases} \quad (\text{A3})$$

Reindl (1990)模型:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.020 - 0.248k_T & k_T \leq 0.3 \\ 1.45 - 1.67k_T & 0.3 < k_T < 0.78 \\ 0.147 & k_T \geq 0.78 \end{cases} \quad (\text{A4})$$

Orgill and Hollands 模型:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 - 0.09k_T & k_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604k_T + 4.388k_T^2 - 16.638k_T^3 + 12.336k_T^4 & 0.22 < k_T \leq 0.80 \\ 0.165 & k_T > 0.80 \end{cases} \quad (\text{A5})$$

Liu & Jordan 模型(1962):

$$R_d = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (\text{A6})$$

Hay 模型:

$$R_d = \frac{I_b}{I_0} R_b + \left(1 - \frac{I_b}{I_0}\right) \left(1 + \frac{\cos \beta}{2}\right) \quad (\text{A7})$$

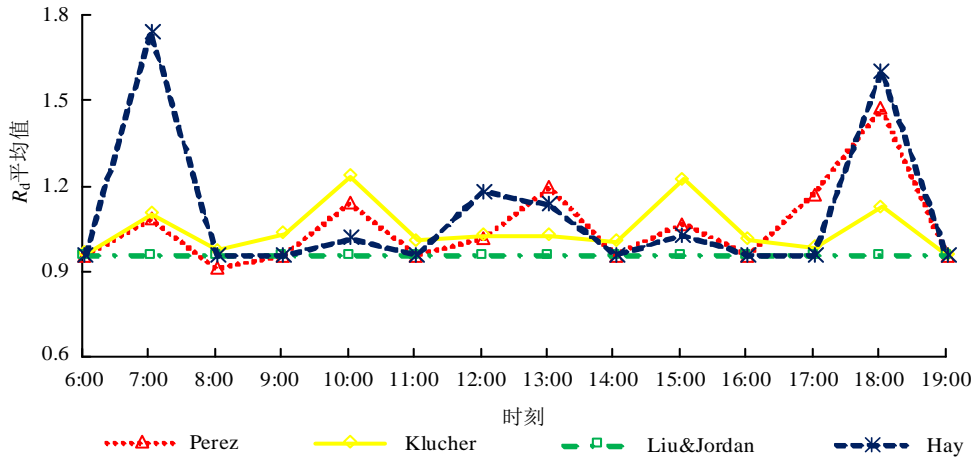
Klucher 模型:

$$R_d = \left(1 + \frac{\cos \beta}{2}\right) \left\{1 + \left[1 - \left(\frac{I_b}{I_0}\right)^2\right] \cos^2 \theta_T \cos^3 \theta_Z\right\} \left\{1 + \left[1 - \left(\frac{I_b}{I_0}\right)^2\right] \sin^3 \frac{\beta}{2}\right\} \quad (\text{A8})$$

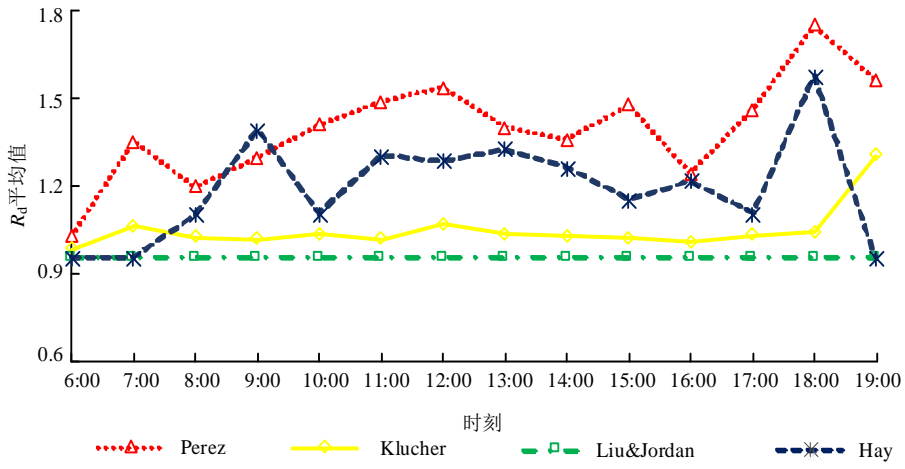
Perez 模型:

$$R_d = (1 - F_1) \frac{1 + \cos \beta}{2} + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \beta \quad (\text{A9})$$

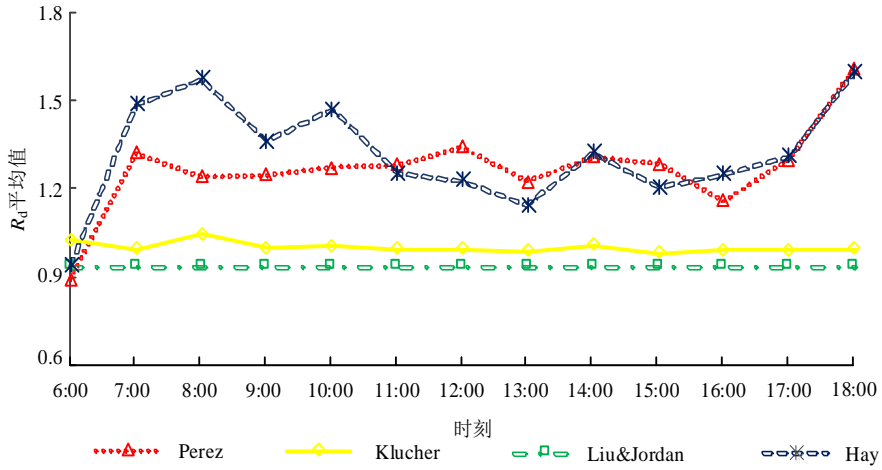
其中, I_0 为大气层上界水平面上的小时太阳辐射量, I_b 为水平面小时太阳直接辐射量; θ_T 为太阳入射角; θ_Z 为太阳天顶角; F_1 、 F_2 分别为环日系数和亮度系数。



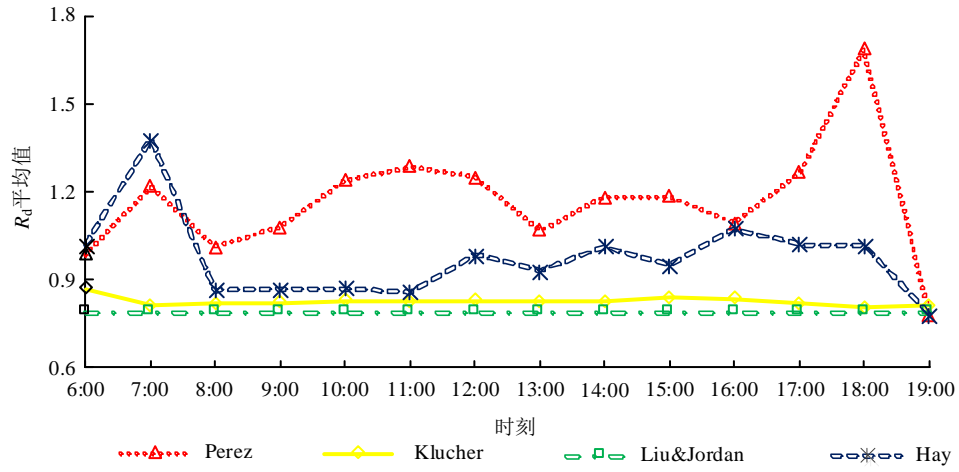
(a) 天气类型 1-1



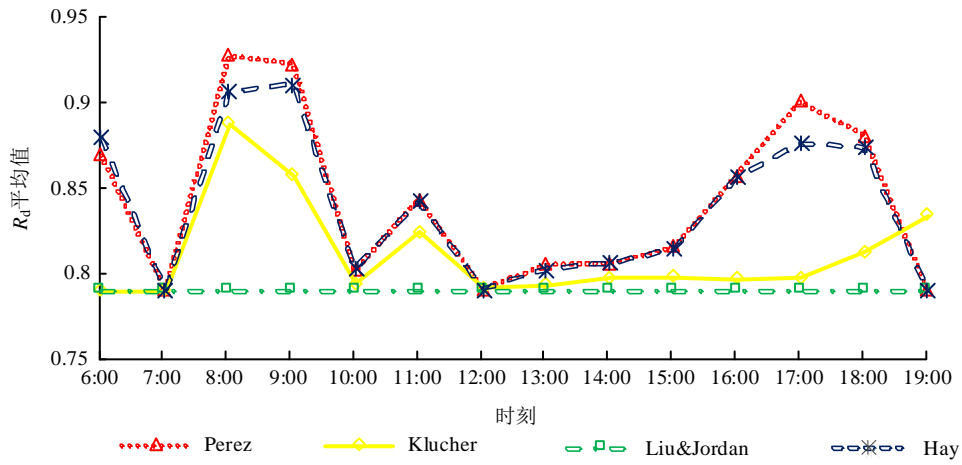
(b) 天气类型 1-2



(c) 天气类型 1-3



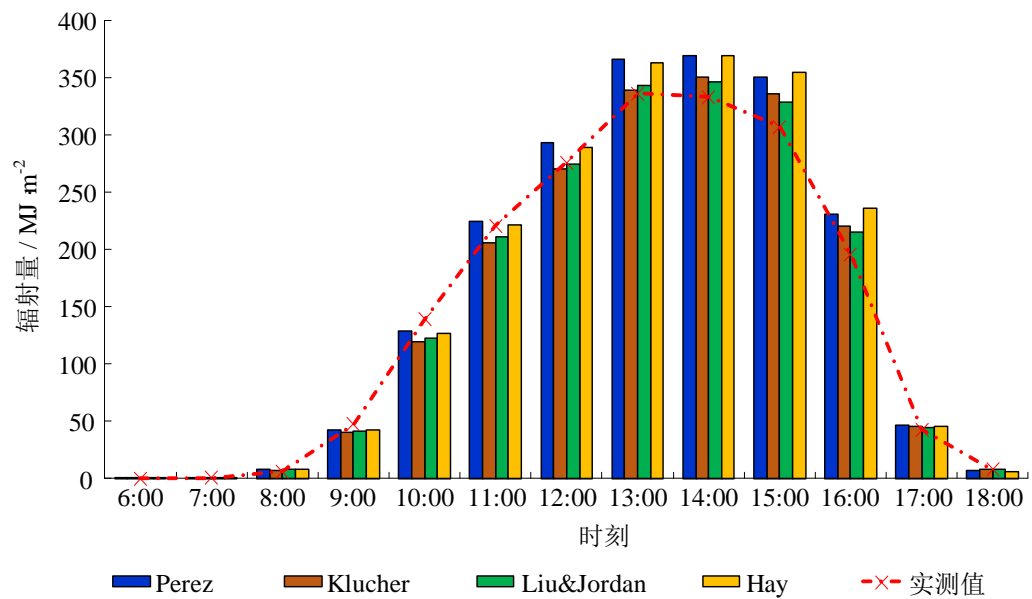
(d) 天气类型 2



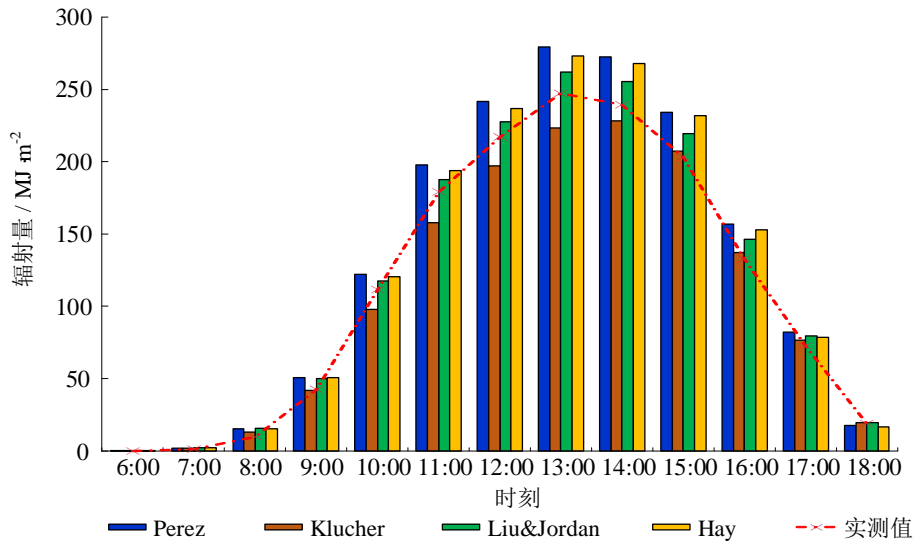
(e) 天气类型 3

图 A1 不同天气类型下各模型 R_d 变化趋势

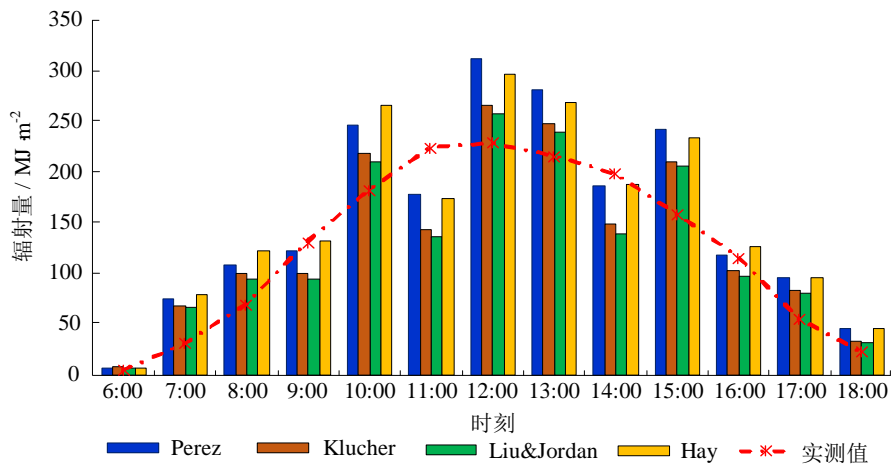
Fig.A1 R_d variation trend of each model under different weather types



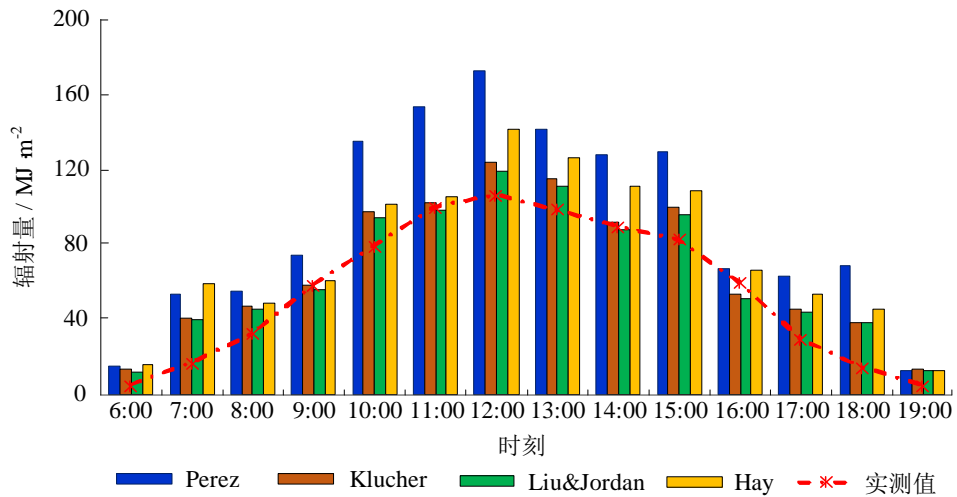
(a) 天气类型 1-1



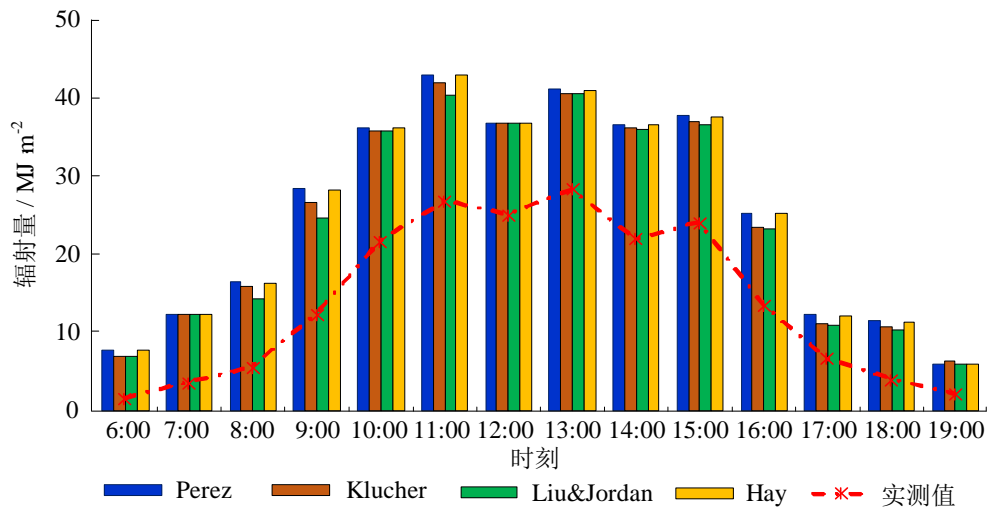
(b) 天气类型 1-2



(c) 天气类型 1-3



(d) 天气类型 2



(e) 天气类型 3

图 A2 不同天气类型下各斜面辐射模型预测值与实测值差异对比

Fig.A2 Difference between predicted and measured values of each inclined plane radiation model under different weather types