

文章编号:0254-0096(2019)03-0724-09

从辐射强度变化分析深圳太阳辐射气象条件

邱宗旭, 杨 琳, 李兴荣, 张 莉

(深圳市气象服务中心, 深圳 518040)

摘 要: 计算太阳辐射典型年,对与到达地面太阳辐射强度变化密切相关的气象和环境因素进行分析研究,总结出深圳太阳辐射气象条件,运用典型天气进行验证。结果发现:1)温度、相对湿度、降水量、云量、最大风速的风向、沿海站的极大风速和大气气溶胶均与到达地面太阳辐射强度有不同程度的关联,云量与直接辐射呈显著的负相关;2)一天中深圳太阳总辐射最大值出现在11:00~12:00,太阳有效辐射时间为05:00~18:00;月总辐射和直接辐射最大值均出现在每年中的6~7月份;3)辐射强度与空气质量指数(AQI)相关性明显,大气污染物对直接辐射起到较明显的削弱作用,其中O₃与辐射关联度较大,其次PM_{2.5}、PM₁₀等在傍晚时对辐射具有一定的削弱作用;4)前汛期云量和水汽、降雨等对辐射的影响作用大。

关键词: 辐射强度; 辐射典型年; 辐射气象条件; 气溶胶辐射强迫; 典型天气

中图分类号: TK01*9

文献标识码: A

0 引 言

深圳地处亚热带、北回归线以南,海岸线长257.96 km,辽阔海域连接南海及太平洋,海域面积1145 km²,属于亚热带季风、海洋性气候,气候温和、雨量丰沛,东风盛行,日照充足,辐射强烈,夏长冬短,夏季长达6个多月,受季风影响,旱涝季节明显,局地天气气候明显。根据中国气象局风能太阳能资源评估中心对全国进行的太阳能资源分布评估,深圳总体上属于太阳能资源丰富-很丰富的地区,太阳能利用具有非常广阔的前景。

太阳辐射是气象学上用来表征太阳能资源的一个特征量,虽然辐射的多年平均总量较为稳定,但仍存在着较大的年、季、月、日变化,并随天气状况、空气清洁度(或污染程度)而急剧变化^[1]。太阳能是一种随着当前的从分钟到日尺度的天气条件而变的可再生能源,有必要更多地分析了解太阳能资源的潜力以及太阳辐射气象条件,从而解决和气候条件变化相关的到达地表的太阳辐射特征和评估问题^[2]。大气上界的太阳辐射在穿过大气层到达地表的的过程中,经过大气对太阳辐射的吸收、散射,云层和尘埃对太阳辐射的反射被削弱^[3]。通常在—

个较短的气候背景下,与太阳辐射变化密切相关的是大气中云的变化,其次是水汽及大气气溶胶。城市发展对太阳辐射产生影响,使上海散射辐射呈上升趋势,直接辐射呈下降趋势^[3]。干旱地区如敦煌大气气溶胶对辐射的削弱占主导地位^[4]。广州城市群大气气溶胶对紫外辐射的衰减十分显著,至少一半以上的紫外辐射被大气气溶胶衰减。在干季紫外辐射的衰减主要由气溶胶引起^[5]。Stanhill等^[6]认为云量和气溶胶的增加是近年来全球太阳辐射下降的主要原因,申彦波等^[7]指出,引起总辐射变化的原因复杂多样,总云量的变化无法完全解释,而气溶胶的变化则有可能在某些地区起着重要作用。Beer等^[8]研究指出大气层中水汽、云和气溶胶等物质对太阳辐射的吸收、反射以及散射作用,被认为是造成太阳辐射发生变化的主要原因。华南沿海属中国最早开放的经济特区,从20世纪80年代以来经济的快速发展对环境产生了一定影响,但近年来在环境治理方面成效显著,因此对于华南沿海地区的云、气溶胶和太阳辐射的变化特征与以上研究是否完全一致,气候特征不同会带来怎样的辐射变化差异,有待具体分析讨论。针对我国太阳能观测站点较少,太阳辐射资料缺乏现状,目前国内外大

收稿日期: 2016-11-10

基金项目: 中国气象局华南区域气象中心气象科技攻关项目(GRMC2010B03)

通信作者: 杨 琳(1966—),女,学士、高级工程师,主要从事气候环境与应用气象方面的研究。yang_lin1@126.com

多数研究通过太阳辐射气候模式、气候学统计方法、基于遥感的物理反演方法以及复杂地形下的计算方法。深圳国家气候观象台已积累了2个站点近4年的各类太阳辐射观测资料,其中近3年的资料数据相对较为稳定,为本地太阳辐射气象条件的分析创造了条件,研究结论对其他华南沿海经济发达地区具参考价值。

本文的研究首先通过建立本地太阳辐射典型气象年的方法,将近年来到达地面的太阳总辐射与典型年数据进行对比,同时通过2个辐射站的对比,得出太阳辐射的时空变化规律。分析气象因素和到达地面太阳辐射的相互关系;分析不同云量状况下辐射强度的变化和云量对直接辐射的削减作用以及对散射辐射的增强作用;分析各类大气污染物对辐射的强迫特征。最后分析夏季高温、前汛期强降水、春季大雾、灰霾典型天气条件和各类污染天气下辐射强度的日变化差异,进一步验证东南沿海地区太阳辐射被削弱的特征,以及空气质量较好地区大气气溶胶对太阳辐射的强迫效应。结论可为评估不同气候特点地区到达地表的太阳辐射能量,以及太阳能合理利用、规划管理和运行效益评估提供参考。

1 资料与方法

1.1 资料来源

深圳市国家气候观象台位于城市西北部工业密集区石岩和东部沿海生态区西涌(西涌站海拔160 m)的2个BSRN(高精度)辐射观测站2013~2015年分钟观测数据,处理成近3年逐日以及逐时太阳总辐射、直接辐射、散射辐射值,除去缺测和异常数据,石岩站和西涌站分别有1079 d和662 d样本资料。由于深圳辐射资料时间序列较短,在辐射典型年计算和长时间序列分析时使用了临近的香港京士柏站的1986~2015年逐日总辐射平均值订正而来,使用了位于深圳竹子林国家基本站的多元要素区域自动站的总辐射值,进行深、港两地辐射资料的拟合,找出拟合公式,再对数据进行延长处理。所有辐射资料单位统一换算到 MJ/m^2 。

气象要素选取2013~2015年石岩自动气象站和西涌自动气象站的日最高温度、日平均温度、日平均相对湿度、日降水量、日极大风速、日最大风速,总云量等观测资料(云量来自国家基本站资

料),气温、相对湿度是离地1.5 m高度的记录,风速是10 m高度的记录,典型年计算时所用气象要素为国家基本站历史资料。大气颗粒物选取2013~2015年深圳市国家气候观象台石岩和西涌大气成分站的分钟数据处理成小时数据,因日资料缺测多,使用距离石岩和西涌站最近的来自深圳市环境监测站南澳和西乡2个国控站的日数据,包括 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_1 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 浓度值和空气质量指数(AQI)日值。

1.2 方法简介

本文的数据分析应用一元线性回归和线性相关分析方法,运用SPSS 19.0统计软件和Pearson相关系数对太阳辐射进行多时间尺度的变化特征分析,对辐射强度平均值与各气象因素及大气污染物的相关性进行具体分析,最后通过各类典型天气的辐射表现进行结果验证。

根据建筑节能设计标准的要求,典型气象年的挑选以近30年的统计数据为基础,在近10年中进行挑选,本文中太阳辐射典型气象年的选取以1986~2015年的统计为基础,在2006~2015年中挑选典型气象年。挑选参数为总辐射、日平均温度、日最低温度、日最高温度、日平均水汽压;以上各参数的权重为8/16、2/16、1/16、1/16、2/16,权重与代表各挑选参数的统计特征的标准化参数对应。

2 结果分析

2.1 深圳太阳辐射变化规律

2.1.1 太阳总辐射季节变化及与典型年对比

总辐射石岩站2014年和2015年高于典型年,西涌站2013年也高于典型年(表1);季节变化可从图2看出,西涌站除了春季外的其余3个季节都高于石岩站和典型年(见图1)。

表1 石岩和西涌2013~2015年辐射值(MJ/m^2)

Table 1 Solar radiation values from 2013-2015 of Shiyan and Xichong in Shenzhen(MJ/m^2)

年	总辐射		直接辐射		散射辐射	
	石岩	西涌	石岩	西涌	石岩	西涌
2013	4373	5100	2431	3380	2598	2797
2014	5241	—	3091	—	3008	—
2015	5107	—	2787	—	2983	—
典型年	5030		—	—	—	—

注:表中“—”处为缺测较多。

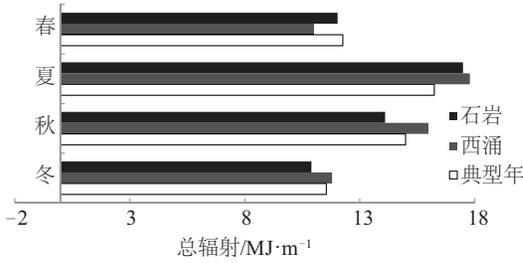


图1 石岩和西涌2站总辐射季节变化及与典型年的对比

Fig. 1 Change characteristics of total surface radiation in four seasons and their comparison with typical radiation year of Shiyan station and Xiyong station

石岩站、西涌站和典型年的月变化见图2。总辐射强度最高峰出现在6~7月份,次高峰出现在9~10月份,6~10月份日照强烈、气温高,而8月份平均雨量是一年当中最多的;总辐射强度最低值出现在12月份。2站相比,西涌站总辐射总体大于石岩站,其中每年7月份~次年1月份,西涌站总辐射均大于石岩站,而2~6月份总辐射低于石岩站。相对于此2站,典型年5月份更高,3月份更低。

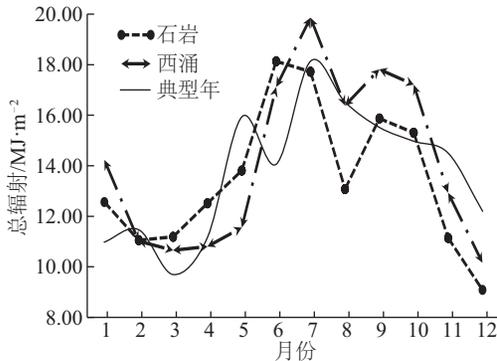


图2 石岩、西涌2站和典型年总辐射平均值月变化

Fig. 2 Monthly variation of total radiation at Shiyan station, Xichong station and typical radiation year

2.1.2 直接辐射和散射辐射的月变化及对比

1)直接辐射的高值:西涌站出现在7月份和10月份,石岩站出现在6月份和10月份;直接辐射的低值西涌站低值出现在4~5月份,石岩站出现在2~4月份。

2)绝大部分的月份(夏季和秋冬季)西涌站直接辐射均高于石岩站,年平均高出25%。西涌海拔高还临海,空气清新、污染程度低,但相对空气湿度高,雨量多,空气中的水汽含量也更多。秋冬季盛行冬季风,降雨量明显偏少,空气中的水汽含量和

云量也相对较少,直接辐射受到削弱作用较小。另外虽然秋冬季污染开始抬头,大气中的气溶胶粒子对辐射的削弱作用开始增强,但西涌位于深圳西部生态区,相对来说直接辐射强度受气溶胶影响较弱。

3)4~6月份石岩站直接辐射高于西涌站,此时处于春季和前汛期,西南季风影响加上龙舟水集中,空气中水汽充沛,云量较多,伴随强降雨的出现。西涌站傍海,湿度更高、降雨更多,4~6月份云量和空气中的水汽、降雨等对直接辐射的影响更明显。

4)散射辐射大部分月份石岩站高于西涌站,但总体数值差别不大,且月变化幅度也小,见图3。

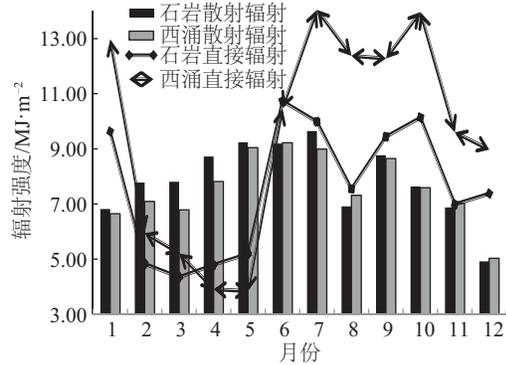
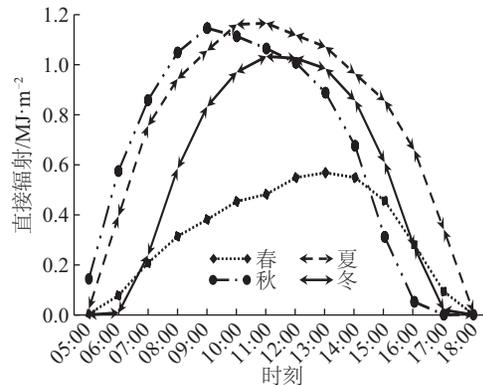


图3 石岩和西涌两站直接辐射和散射辐射月变化

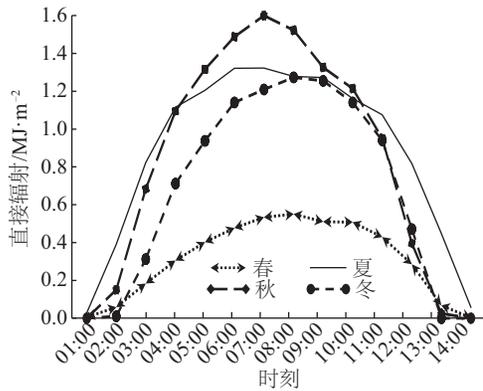
Fig. 3 Month variation of direct and scattering radiation at Shiyan station and Xichong station

2.1.3 太阳辐射的日变化规律

从石岩和西涌2站的日变化可看出太阳有效辐射时间段为05:00~18:00,总辐射的最大值均出现在11:00~12:00,直接辐射最大值出现在10:00~11:00,冬春季辐射水平较低,而夏秋季较高太阳能利用效率更高;西涌的总辐射和直接辐射均强于石岩,



a. 石岩直接辐射日变化



b. 西涌直接辐射日变化

图4 石岩和西涌两站直接辐射日变化

Fig. 4 Hourly variation of direct radiation in Shiyan station and Xichong station

西涌的直射比(直接辐射占总辐射比例)远大于石岩,石岩的散射辐射比例较高(散射辐射和总辐射

图略)。

2.2 太阳辐射气象条件

某地太阳辐射强度的变化除了受地理纬度、海拔高度、太阳高度角和大气成分等因素影响外,还受到大气环流和天气条件的综合的复杂影响,其中云、水汽、降水量和气溶胶起到重要的作用,太阳能属于气候资源,其时空变化与气象因素密切相关^[3,12]。进行气象因子的相关性普查,Person 相关分析结果发现,温度项与直接辐射和散射辐射均是正相关,且相关系数最高;降雨量与辐射呈反相关;相对湿度与直接辐射呈反相关;最大风速的风向也与石岩辐射有关(可能跟冷暖气团以及污染物的输送有关);极大风速与西涌辐射呈反相关(表 2)。作用较复杂,有些是间接或交互影响。

表2 石岩、西涌两站气象要素与辐射量平均值的相关系数

Table 2 Correlation coefficient of meteorological elements and radiation values at Shiyan station & Xichong station

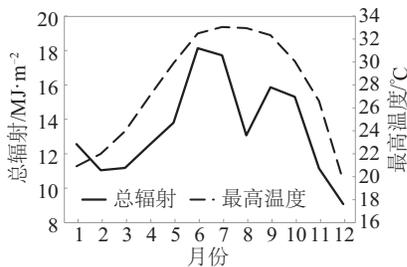
站点	要素	最高气温/°C	日温差/°C	累计雨量/mm	平均相对湿度/%	最大风速风向/(°)
	总辐射	0.60**	0.48**	-0.30**	-0.23**	0.24**
石岩	直接辐射	0.33**	0.55**	-0.23**	-0.39**	0.09**
	散射辐射	0.52**	0.18**	-0.24**	0.08**	0.27**
	总辐射	0.49**	0.38**	-0.31**	-0.26**	-0.31**
西涌	直接辐射	0.26**	0.40**	-0.25**	-0.39**	-0.27**
	散射辐射	0.43**	0.12**	-0.21**	0.07	-0.17**

注:**为在 0.01 水平(双侧)上显著相关

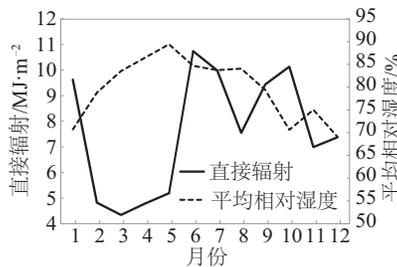
2.2.1 气温、湿度、风与辐射的关系

分析各气象要素与辐射的关系,发现温度与辐射值具有较明显的正相关趋势,而且散射辐射也是随着温度的升高而增加,且相关性高于直接辐射;而相对湿度与直接辐射和总辐射具有较好的负相

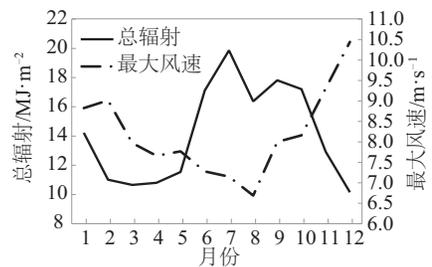
关趋势;最大风速与西涌的总辐射和直接辐射具有较好的负相关趋势。图 5a~图 5c 是 2013~2015 年石岩站最高气温和总辐射平均值、石岩站相对湿度和直接辐射平均值以及西涌站最大风速与总辐射平均值的月变化示例。



a. 石岩最高气温、总辐射月变化



b. 石岩相对湿度、直接辐射月变化



c. 西涌最大风速、总辐射月变化

图5 2013~2015年气象要素与辐射均值月变化

Fig. 5 Monthly variation of weather actors and radiation during 2013-2015

2.2.2 降水对太阳辐射的影响

阴天伴随着强降水,使到达地面的太阳直接辐射大大减弱,但弱降水或阵性降水,既对空气中的大气污染物(主要是颗粒物)有清洁作用,又对日照时数/光照影响很小,还加大了散射辐射的比重,使到达地面的太阳总辐射可能不减反增。随着降水等级的增加,辐射量明显下降,二者具有较好的反向趋势,见表3(图略)。

表3 降水量与辐射平均值关系

雨量等级和 累计雨量/ mm	石岩/MJ·m ⁻²			西涌/MJ·m ⁻²		
	总 辐射	直接 辐射	散射 辐射	总 辐射	直接 辐射	散射 辐射
R < 1	15.2	9.42	8.32	15.4	11.10	7.84
1 ≤ R < 5	10.0	3.59	7.22	11.9	5.50	7.79
5 ≤ R < 10	10.6	4.14	7.12	10.9	4.67	7.37
10 ≤ R < 25	9.43	2.44	7.42	9.20	3.01	6.92
25 ≤ R < 50	8.54	2.46	6.31	6.53	1.15	5.65
50 ≤ R < 100	5.91	1.28	4.74	6.88	0.89	6.18
100 ≤ R < 300	3.07	0.32	2.79	2.94	0.05	2.92

注:R——累积雨量。

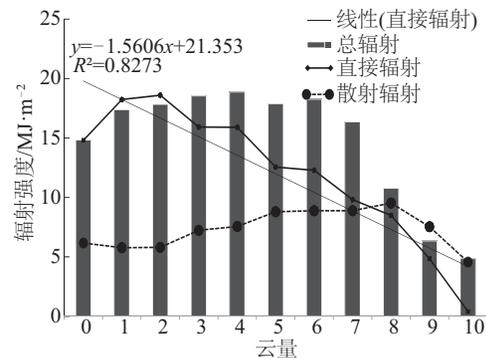
2.2.3 云量与太阳辐射的关系

太阳辐射在到达地面的过程中,受到云的反射和散射作用得到削减。晴天直接辐射为主,阴天或太阳被云遮挡时只有散射辐射。深圳本地总云量在6~9成的天数占了全部天数的71%,而其中的云量在8~9成的天数就达58%,而云量为9成的天数最多,占据了总天数的37%,这是由深圳的海洋性气候造成的潮湿多云天气特征。

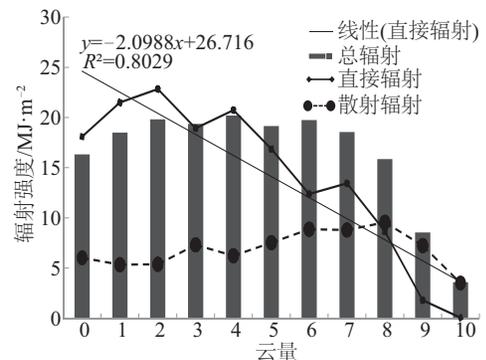
将各辐射值按照云量从0~10成分成11组,得到不同云量时各类辐射的平均值,计算辐射平均值与云量的相关系数,结果发现石岩和西涌总辐射与云量的相关系数分别为-0.72和-0.66,而直接辐射与云量的相关系数达到了-0.91和-0.90,均在0.001水平上显著相关,可见直接辐射与云量的相关性非常高且起到主导作用,即云量对直接辐射的消弱作用相当明显,当云量6成时,相对于无云,辐射量减少了1/3;石岩和西涌站的散射辐射与云量之间为正相关,相关系数只有0.28和0.22,云量对散射辐射的增加作用不明显。这也进一步验证了云对辐

射影响的不确定和复杂性。比如一般认为云层挡住了阳光,使其不能入射至地面,对辐射的影响是削弱作用,但是在天空少云或多云的情况下,当该云挡住了地面观测点的直射辐射和光盘辐射时,削弱了太阳辐射;而当该孤立的云太阳高度角小于90°并未挡住该地面观测点的直射辐射和光盘辐射时,反而加强了总辐射。即云的位置、形状、高度等对太阳辐射产生的效应不一。

从图6和表4可知,除了在云量为0~2成时直接辐射变化不大外,随着云量的增加,直接辐射明显下降。散射辐射在3~8成云时随着云量增多而缓慢增加;在0~2成和9~10成云时随着云量增多不增反减,即晴空少云时,云量对散射辐射影响微弱,其他因素占据主导;10成云时(阴天),由于云层挡住了直接辐射和光盘辐射,地面观测点接收到的只有云层辐射,加上阴天有雨时由于降雨因素导致直接辐射迅速衰减,地面接收到的几乎只有散射辐射了。



a. 石岩站



b. 西涌站

图6 2013~2015年石岩和西涌站辐射平均值与云量关系
Fig. 6 Relationship between average value of radiation and cloud cover during of Shiyan station and Xiyong station from 2013 to 2015

在研究云量变化和辐射改变的关系时,需要排除因近地层气溶胶增加所导致的雾霾引起辐射的改变。选取 AQI 在 50 以下(空气质量为优)的日数,进行辐射与污染物的相关分析,并且与近 3 年的相关关系进行比较,在空气中污染物相对较少时,云量对 2 站直接辐射的削弱作用加强,尤其西涌站表现更明显(表 4)。

2.2.4 大气气溶胶对太阳辐射的强迫效应

气溶胶既可以直接反射、散射或吸收太阳辐射,又可以通过改变云的微物理性质而产生间接效应,同时不同气溶胶之间对太阳辐射的影响也有很

大的差异^[9-12]。近 3 年石岩和西涌各类辐射强度值与各类污染物的相关分析结果如表 5 所示。

表 4 云量与辐射值的相关性(MJ/m²)

项目	总辐射	直接辐射	散射辐射
石岩近 3 年	-0.531**	-0.726**	0.016
石岩 AQI≤50	-0.571**	-0.736**	-0.036
西涌近 3 年	-0.575**	-0.758**	0.064
西涌 AQI≤50	-0.715**	-0.806**	-0.127*

注: 1**在 0.01 水平(双侧)上显著相关; 2*在 0.05 水平(双侧)上显著相关; AQI 为空气质量指数。

表 5 辐射强度与各类污染物之间的相关性分析

Table 5 Correlation analyses between radiation intensity and pollutants concentration

污染物/m ³	石岩站			西涌站		
	总辐射/ MJ·m ⁻²	直接辐射/ MJ·m ⁻²	散射辐射/ MJ·m ⁻²	总辐射/ MJ·m ⁻²	直接辐射/ MJ·m ⁻²	散射辐射/ MJ·m ⁻²
云量 2 成及以下						
SO ₂	-0.44**	-0.41**	0.03	-0.54**	-0.60**	0.32*
NO ₂	-0.02	-0.11	0.15	0.27	0	0.18
PM ₁₀	-0.39**	-0.39**	0.02	-0.42**	-0.55**	0.36*
CO	0.15	0.18	-0.01	0.1	-0.01	0.05
O ₃	0.18	0.1	-0.08	-0.18	-0.53**	0.50**
O _{3s}	-0.13	-0.14	-0.13	-0.21	-0.34*	0.28*
PM _{2.5}	-0.1	-0.06	0.02	-0.30*	-0.38**	0.18
AQI	-0.36**	-0.42**	0.09	-0.47**	-0.72**	0.50**
近 3 年						
SO ₂	0.23**	0.29**	0.04	0.13**	0.22**	-0.01
NO ₂	-0.09**	0.01	-0.09**	0	0.05	-0.05
PM ₁₀	-0.08**	0.07*	-0.16**	0.05	0.10*	0.01
CO	-0.03	-0.01	-0.01	-0.02	0.05	-0.09*
O ₃	0.33**	0.32**	0.16**	0.15**	0.25**	-0.04
O _{3s}	0.16**	0.20**	0.04	0.13**	0.16**	0.04
PM _{2.5}	0.08**	0.12**	0.01	-0.01	0.10**	-0.12**
AQI	-0.12**	0.03	-0.16**	0.06	0.15**	-0.04

注: 1**在 0.01 水平(双侧)上显著相关; 2*在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

近 3 年辐射强度与 O₃ 的相关性最高,但考虑到云量影响作用,计算了云量不足 2 成情况下辐射与污染浓度的相关性,从而将云量的影响作用减到最小,结果发现: 1) AQI 与辐射强度的相关性明显增

大,直接辐射和总辐射均与 AQI 显现明显的负相关,尤其是西涌的直接辐射和 AQI 相关系数高达 -0.72,表明大气污染物确实对直接辐射起到较明显的削弱作用; 2) O₃ 浓度与西涌站直接辐射有较好

的负相关,而与其散射辐射呈现正相关,导致 O₃ 浓度与其总辐射关系不明显;3)2 站 SO₂ 浓度和 PM₁₀ 浓度与直接辐射和总辐射的负相关较好,表明其对辐射具有一定的削弱作用,其次是 PM_{2.5} 浓度。

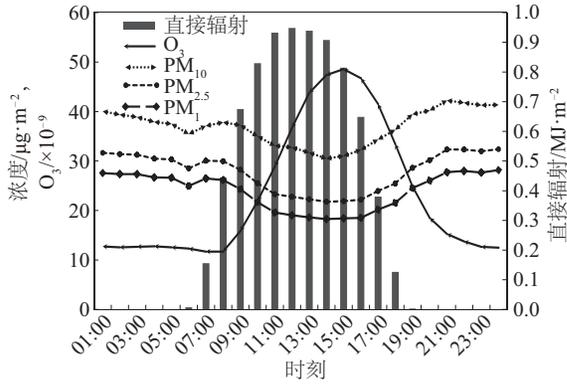


图7 石岩直接辐射及 O₃、PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM₁ 浓度日变化

Fig. 7 Hourly variation of ozone, PM₁₀, PM_{2.5} & PM₁ concentrations and direct radiation at Shiyan

进一步对 07:00~17:00 共 11 个时次的逐时辐射值(SO₂ 浓度缺测)与相应时次各污染物浓度的相关性进行分析,发现:①两站 O₃ 浓度与各辐射值具有明显的负相关,而且在上午到傍晚相关更明显;②颗粒物浓度在中午以后与辐射有较明显反相关,石岩站下午到傍晚 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 浓度与辐射有较明显相关关系,西涌站下午到傍晚 PM_{2.5}、PM₁ 浓度与辐射有较明显相关关系(图 7,西涌站的图略)。

2.3 典型天气条件下辐射强度的变化特征

选取前汛期强降水、春季大雾、夏季高温、中度灰霾 4 种典型天气以及主要污染物分别为 PM_{2.5}、NO₂、O₃、PM₁₀ 的 4 类轻度到中度污染天气,分析其辐射强度日变化特征,见图 8。根据 2.2 节对各气象和环境要素的关系分析,强降水、大雾、灰霾和污染天气太阳辐射均得到较大程度的削弱,而高温无遮挡天气时地表接收到最强的辐射,图 8 验证了 2.2 节的分析结论。

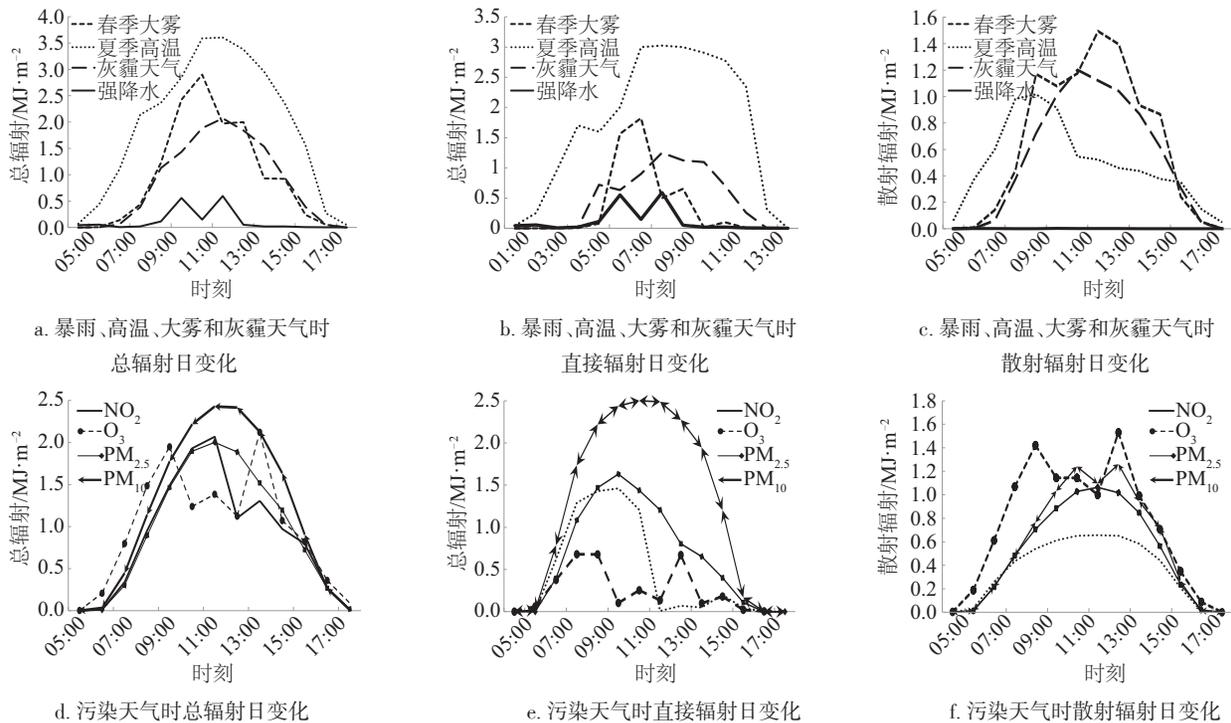


图8 各类典型天气条件下以及不同类别污染天气下总辐射、直接辐射和散射辐射平均值日变化

Fig. 8 Hourly variation of total, direct and scattering radiation in four kind of typical weather conditions and in four kind of different main air pollutants conditions

3 结论

深圳的太阳总辐射和直接辐射呈现比较明显

的季节变化,长夏的 5~10 月份总辐射强度高,12 月份最低;直接辐射最小值出现在冬春季,在前汛期的 5 月份和后汛期的 8 月份降水密集期出现相对低值;

而散射辐射因受天空状况和大气清洁程度的影响, 季节变化不明显。

1) 气象因素对到达地面的太阳辐射产生影响, 其中云的作用至关重要, 按照云量从 0~10 成划分为 11 组, 计算辐射平均值与云量的相关系数, 结果发现直接辐射与云量具有非常高的反相关性, 石岩和西涌直接辐射与云量的相关系数分别达到 -0.91 和 -0.90。强降水对辐射的削弱作用大。

2) 剔除其他因素影响, 发现直接辐射和总辐射均与 AQI 显现明显的负相关, 尤其是直接辐射与 AQI 有较高的负相关, 表明大气污染物对辐射强度起到较明显的削弱作用。直接辐射与 O_3 相关性高。其他如 SO_2 浓度、 $PM_{2.5}$ 浓度和 PM_{10} 浓度对辐射也有一定削弱作用, 傍晚时影响较明显。

3) 本文对气象要素以及大气污染物和辐射之间关系的研究, 鉴于大气成分以及辐射资料年限仍较短, 部分时间因缺测而导致不连续, 随着资料的积累和完善, 在以后的研究中将进一步进行各时次污染成分与辐射各组分等关系的具体研究分析; 另外本文的研究只局限于地面观测要素之间关系的分析, 今后的研究中将拓展到临界层以及整层大气的要素分析中, 以提供更多有用的结论和成果, 服务于太阳能应用领域。

[参考文献]

- [1] Garud S. Influence of clouds and atmospheric aerosols on solar energy in India and Finland [EB/OL]. www.fmi.fi., 2016-10-30.
- [2] 陈正洪, 李芬, 成驰, 等. 太阳能光伏发电预报原理 [M]. 北京: 气象科学出版社, 2007.
- [2] Chen Zhenghong, Li Feng, Cheng Chi, et al. Solar energy photovoltaic power generation forecasting principle [M]. Beijing: Meteorological Science Press, 2007, 19—20.
- [3] 韩玮, 苏敬. 城市发展对上海太阳辐射特征的影响分析 [J]. 自然资源学报, 2014, 29(9): 1485—1495.
- [3] Han Wei, Su Jin. The impact of urban development on solar radiation characteristics in Shanghai [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(9): 1485—1495.
- [4] 李韧, 季国良. 敦煌地区大气气溶胶的辐射效应 [J]. 太阳能学报, 2004, 25(3): 320—324.
- [4] Li Ren, Ji Guoliang. Effects of atmospheric aerosols on radiation in Dunhuang area [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2004, 25(3): 320—324.
- [5] 邓雪娇, 周秀骥, 铁学熙, 等. 广州大气气溶胶对到达地表紫外辐射的衰减 [J]. 科学通报, 2012, 57(18): 1684—1691.
- [5] Deng Xuejiao, Zhou Xiuji, Tie Xuexi, et al. Effects of atmospheric aerosols on the attenuation of UV radiation to the earth surface in Guangzhou [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(18): 1684—1691.
- [6] Stanhill G, Cohen S. Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequence [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(4): 255—278.
- [7] 申彦波, 赵宗慈, 石广玉. 地面太阳辐射的变化、影响因素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.
- [7] Shen Yanbo, Zhao Zongci, Shi Guangyu. The newly research of change rule, influence factor and probable climatic effects of surface radiation [J]. Earth Science Advances, 2008, 23(9): 915—923.
- [8] Beer J, Mende W, Stellmacher R. The role of the sun in climate forcing [J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19(1-5): 403—415.
- [9] IPCC Working Group I Contribution To The IPCC Fifth Assessment Report. Climate Change 2013: The physical science basis final draft underlying scientific-technical assessment [A]. Intergovernmental Panel on Climate Change [C], Bern, Switzerland, 2016.
- [10] 于娜, 魏永杰, 胡敏, 等. 北京城区和郊区大气细颗粒物有机污染特征及来源解析 [J]. 环境科学学报, 2009, 29(2): 243—251.
- [10] Yu Na, Wei Yongjie, Hu Min, et al. Analysis of pollution characteristics and source of fine particle organic pollutants in urban and suburb of Beijing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(2): 243—251.
- [11] 杨琳, 杨红龙, 陈嘉晔, 等. 深圳地区灰霾分布特征及预警、预报方法探讨 [J]. 环境科学学报, 2012, 32(12): 3065—3072.
- [11] Yang Lin, Yang HongLong, Chen Jiaye, et al. Haze distribution characteristics and forecasting methods in Shenzhen [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(12): 3065—3072.
- [12] 杨琳, 杨红龙, 林楚雄, 等. 从大运会期间浓度变

- 化来分析污染物削减措施效果[J]. 中国环境监测, 2014, 30(4): 82—88.
- [12] Yang Lin, Yang Honglong, Lin Chuxiong, et al. The effect analysis of pollutants reduction measures based on the concentration change during the universidad [J]. China Environment Monitoring, 2014, 30(4): 82—88.

ANALYSIS OF METEOROLOGICAL CONDITIONS OF SURFACE SOLAR RADIATION BASED ON RADIATION INTENSITY CHANGE IN SHENZHEN

Qiu Zongxu, Yang Lin, Li Xingrong, Zhang Li

(*Metrological Service Centre of Shenzhen Municipality, Shenzhen 518040, China*)

Abstract: Radiation Typical Year was calculated in the paper, furthermore the meteorological and environment factors were analyzed and studied which closely related to the changes of the solar radiation intensity reaching on the ground, finally, the conclusion of radiation meteorological conditions was verified. The results showed : 1) The temperature, relative humidity, precipitation, cloud cover, direction of high wind, wind speed of coastal station and atmospheric aerosol are all related to the intensity change of solar radiation reaching the ground. The cloudiness is negatively correlated with the direct radiation; 2) The high total solar radiation appears between 11:00 and 12:00 in Shenzhen. The effective solar radiation time is from 05:00 to 18:00. The monthly maximum value of total radiation appears in June and July; 3) Both direct radiation and total radiation are negatively correlated with AQI, appears and air pollutants also has obvious effects on reducing direct radiation. The correlation is relatively greater between O₃ and radiation than others, followed by PM₁₀ and PM_{2.5} which have some weakening effect on radiation, especially in the evening; 4) The influence is relatively important of the cloudiness, water vapor and rainfall on radiation in the pre-flood season.

Keywords: radiation intensity; Typical Radiation Year; radiation meteorological conditions; aerosol radiative forcing; typical weather