

沈阳空气质量对到达地面太阳辐射的影响分析

汪宏宇^{1*}, 龚强², 付丹丹³ (1.中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110166; 2.沈阳区域气候中心, 辽宁 沈阳 110166; 3.沈阳市生态环境局铁西分局, 辽宁 沈阳 110021)

摘要: 利用沈阳国家基本气象站 1961~2017 年气象观测数据和沈阳市 2013~2017 年逐日空气质量监测数据,研究了沈阳市太阳辐射与空气质量变化特征,及空气质量对到达地面太阳辐射的影响.结果表明:20 世纪 90 年代之后沈阳市太阳总辐射“变亮”与日照增多、大气清洁度增加有关,与总云量、水汽压基本不存在线性相关关系.太阳辐射与空气质量的季节特征相反,太阳总辐射总体为春夏季和初秋强、深秋和冬季弱,而 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度以及 AQI 指数为春夏季和初秋低、深秋及冬季高.在气象因子差异不大的情况下,空气质量情况是影响太阳辐射偏强或偏弱的关键因素, SO_2 、 NO_2 、 CO 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度偏低是沈阳 2017 年太阳总辐射、直接辐射异常强的主要原因之一.晴天情况下,沈阳空气质量三级较二级情况下太阳总辐射平均衰减了 10%,直接辐射平均衰减了 18%.12 月下旬的晴天严重污染日,空气污染可导致直接辐射减少 67%,总辐射减少 34%. $\text{PM}_{2.5}$ 的削光作用更为明显, $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的晴天平均太阳直接辐射衰减明显大于以 SO_2 和 PM_{10} 为首要污染物的情况,虽然 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物时的日平均散射辐射大于 PM_{10} 为首要污染物的情况,但不足以补充其对直接辐射的衰减,进而导致总辐射衰减.

关键词: 太阳辐射; 空气质量; 影响; 沈阳

中图分类号: X51 **文献标识码:** A **文献编号:** 1000-6923(2020)07-2839-11

Analysis for the influence of air quality on solar radiation arriving on the ground in Shenyang. WANG Hong-yu^{1*}, GONG Qiang², FU Dan-dan³ (1.Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166, China; 2.Climatic Center of Shenyang Area, Shenyang 110166, China; 3.Tiexi Branch of Shenyang Municipal Bureau of Ecology and Environment, Shenyang 110021, China). *China Environmental Science*, 2020,40(7): 2839~2849

Abstract: Using the meteorological observation data of Shenyang National Basic Meteorological Station from 1961 to 2017 and the daily air quality monitoring data of Shenyang in 2013~2017, the variation characteristics of solar radiation and air quality, and the quantitative influence of air quality on the solar radiation reaching the ground were analyzed. The results show that the "brightening" of total solar radiation in Shenyang after 1990s was related to the increase of sunshine and atmospheric cleanliness, and had no linear correlation with total cloud cover and water vapor pressure. The seasonal characteristics of solar radiation and air quality are opposite. The total solar radiation was strong in spring, summer and early autumn, weak in late autumn and winter. The mass concentration of SO_2 , NO_2 , CO , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ and AQI index were low in spring, summer and early autumn, and high in late autumn and winter. In the case of little difference in meteorological factors, the air quality was the key factor affecting the solar radiation. The low mass concentration of SO_2 , NO_2 , CO , PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ was one of the main reasons for the abnormal higher value of total solar radiation and direct radiation in Shenyang in 2017. In sunny days, the average attenuation of total solar radiation and direct radiation was 10% and 18% respectively in level 3 of the air quality compared with that in level 2 in Shenyang. Air pollution can result in 67% reduction in direct radiation and 34% reduction in total radiation in sunny days in the latter part of December. The decreasing influence of $\text{PM}_{2.5}$ on solar radiation was more obvious. The attenuation of the average direct solar radiation on sunny days with $\text{PM}_{2.5}$ as the primary pollutant was significantly greater than that with SO_2 and PM_{10} as the primary pollutants. Although the daily average scattering radiation of $\text{PM}_{2.5}$ as the primary pollutant was greater than that with PM_{10} as the primary pollutant, it was not enough to supplement the attenuation of the direct radiation, resulting in the total radiation attenuation.

Key words: solar radiation; air quality; impact; Shenyang

全球到达地表的太阳总辐射在 20 世纪 60 年代至 90 年代平均每 10a 下降 1.4%~2.7%,90 年代中期太阳总辐射有所回升^[1-4],许多研究将这种下降与回升主要归结为环境恶化与环境保护的影响^[4-12],并从定性或定量的角度分析空气质量、大气成分对太阳辐射的影响,可以说大气污染影响到达地面的太阳辐射已是公认的事实.Norris 等^[13]认为影响欧洲

地面总辐射变化的最主要的因素不是云量的变化,而是大气气溶胶的变化.Elminir^[14]认为大气污染导致埃及晴空状况下的地面总辐射减少了 9.3%~22%.

收稿日期: 2019-11-30

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1501103-03);中国气象局大气环境研究所基金(2020SYIAEJY11)

* 责任作者, 副研究员, iswhy@sina.com

齐月等^[10]认为地面总辐射与总云量或者低云量无相关关系或者相关性不大,雾霾、空气污染等因素是中国东部区域太阳辐射减少的主要因素.符传博等^[15]认为大气中气溶胶粒子浓度升高对日照时数和散射辐射比例有重大的影响.

虽然空气污染导致太阳辐射的变化是大范围的,非独立存在于城市地区^[16].但城市是人口和工业密集的地方,人类活动、城市发展排放的污染物改变了大气成分和大气透明度,从而对地表接收太阳辐射的影响更为严重^[17-18].邵振艳等^[19]基于 API 指数,假设主要污染物都是 PM₁₀,反算 PM₁₀ 浓度分析了中国 33 个重点城市 PM₁₀ 与总辐射,认为 2001~2003 年人类活动产生的气溶胶使晴天地面总辐射减少 $(20.1 \pm 1.9) \text{ W/m}^2$,相对量下降了 0.1%~23.8%.蔡子颖等^[20]利用数值模式模拟分析了天津气溶胶的气候效应,认为 2015 年全年导致到达地面太阳辐射减少 27.42 W/m^2 ,约为到达地面太阳辐射的 14.6%.马金玉等^[21]分析了中国近 50a 太阳辐射变化趋势,认为大部分省际大城市的直接辐射和散射辐射长期变化的下降趋势较其他城市更明显,这可能与城市化发展快慢引起的环境要素变化有关.Yousef 等^[22]对城市气溶胶的辐射削弱效应做了综述,认为城市气溶胶对太阳辐射的削弱在晴天、无云天气较为强烈,在天顶角 0°时,气溶胶可使太阳辐射削弱 10%~20%.也有学者针对空气污染导致太阳辐射下降的问题,将空气污染指数作为关键参数纳入太阳辐射量的推算模型中^[23-27].

目前对空气质量的监测主要包括 SO₂、NO₂、CO、PM₁₀、PM_{2.5} 和 O₃ 六种大气污染物的质量浓度.各污染物及其配比与太阳辐射的关系复杂,在各地表现特征也不尽相同,空气质量对太阳辐射的影响程度还不完全清楚.以往的研究基本采用数值模式^[20]或经验推算方法^[14,19]研究空气质量对太阳辐射的衰减程度,且主要分析 PM₁₀ 或 PM_{2.5} 对太阳辐射的影响^[19,28-29],受观测资料所限,基于多种污染物实测数据分析其与太阳辐射关系的研究较少.

沈阳是中国重要的工业城市,具有工业排放、燃煤、交通污染等综合污染源^[30].在 20 世纪 80 年代就有学者指出^[31],空气中混合污染物是导致沈阳地面实测太阳直接辐射减弱的最主要因素,其利用

经验公式法推算混合污染物导致太阳直接辐射的年平均减弱量为 17.4%.但之后几乎没有将沈阳作为细致研究对象开展空气质量与太阳辐射关系的相关研究报道.而近年沈阳太阳辐射出现明显回升现象,其原因有必要探讨,而且随着城市空气质量监测的规范化开展,使得利用多种污染物实测数据与相应太阳辐射数据共同开展分析成为可能.基于上述原因,本文一方面从空气质量的角度分析沈阳近年太阳辐射变化的原因,另一方面以实测数据为基础分析比较不同大气污染物、不同等级空气污染对沈阳到达地面太阳辐射的影响,以期为空气污染防治和气候变暖背景下太阳辐射变化的深入认识提供参考.

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

1.1.1 气象数据 采用的气象资料来源于辽宁省气象档案馆,数据包括沈阳国家基本气象站 1961~2017 年的逐年太阳总辐射、直接辐射、散射辐射、总云量、水汽压、日照时数、日照百分率资料,以及上述气象要素 2013~2017 年逐日资料.上述资料均经过了气象部门严格的数据质检和审核.

1.1.2 空气质量数据 采用的空气质量数据来源于沈阳市生态环境局发布的沈阳市 2013~2017 年逐日 10 个国控地面监测站的空气质量监测数据,包括 SO₂、NO₂、CO、PM₁₀、PM_{2.5} 逐日平均质量浓度, O₃ 日最大 8h 平均质量浓度和 AQI 指数.该数据已严格参照文献[32]进行了质量控制,并根据文献[33]进行了原始数据筛选,日值数据有效率为 100%.

1.2 方法简介

1.2.1 大气浑浊度因子 用大气浑浊度因子表示大气气溶胶情况,其表达式为:

$$\alpha = D / S \quad (1)$$

式中: α 为大气浑浊度因子; D 为散射辐射; S 为直接辐射.当大气比较清洁时,气溶胶浓度低, α 较小,反之则较大.

1.2.2 确定晴天样本 本文以日总云量 ≤ 2 成且日照百分率大于 80% 作为晴天,建立 2013~2017 年的晴天样本,各月及年样本数量见表 1.由于沈阳市具有雨热同季、夏季多雨、冬季干燥的气候特点,晴天样本在冬季明显偏多.

表 1 晴天样本个数统计表(d)
Table 1 Statistical table of sample number on sunny day (d)

年份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年
2013	9	9	8	3	6	2	2	5	7	8	6	15	80
2014	14	11	13	8	1	3	0	5	6	12	14	11	98
2015	12	7	13	7	10	3	2	2	5	11	3	8	83
2016	19	12	14	7	6	2	0	6	7	7	6	5	91
2017	11	16	12	7	7	1	0	3	7	5	9	12	90
合计	65	55	60	32	30	11	4	21	32	43	38	51	442

2 结果分析

2.1 到达地面的太阳辐射年际变化及影响因子

由图 1 可见,1961 年以来沈阳的太阳总辐射经历了由高到低再高的变化,20 世纪 60 年代太阳总辐射明显偏高,20 世纪 70 年代以来一直处于偏低的阶段,1990 年前后为最低值,2011 年以后再次维持到偏高水平,与许多研究发现的全球大部分地区 20 世纪 50 年代到 90 年代“变暗”、1990 年左右翻转到“变亮”的变化^[2,7,19]以及中国大部分地区太阳辐射的变化规律和变化时间节点^[10,34]基本一致,说明沈阳太阳辐射的变化与全国乃至全球大背景的变化趋势相吻合.但同时期沈阳的日照时数表现为 43.4h/10a 的减少趋势、总云量为 0.1 成/10a 的增多趋势(两者均通过了信度 0.01 的显著性检验),而太阳总辐射和水汽压则无明显趋势性特征,显然这三个气象因子无法很好地解释到达地面的太阳辐射的变化情况.其中,总辐射与日照时数的相关系数为 0.4094,与其他两要素基本不存在线性相关关系.

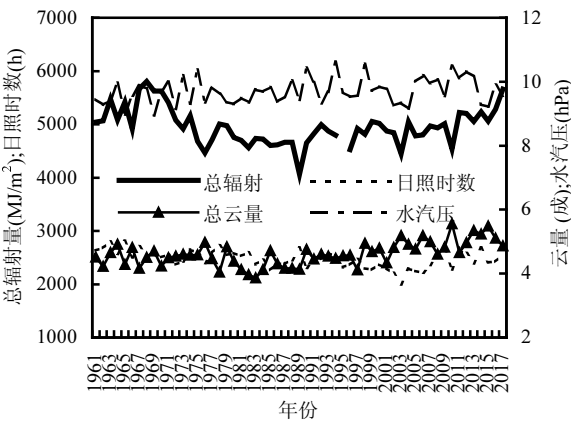


图 1 沈阳 1961~2017 年太阳总辐射与日照时数、总云量和水汽压的年际变化曲线

Fig.1 Interannual variation curves of total solar radiation and sunshine hours, total clouds and water vapor pressure in Shenyang from 1961 to 2017

1993 年以来全国辐射观测普遍由人工观测转为自动观测,观测项目更为齐全,辐射表检定也更加规范.图 2 给出了沈阳 1996~2017 年(1995 年存在缺测情况,故采用 1996 年为起始)太阳辐射各要素及相关影响因子的年际变化图.由图 2 可见,太阳直接辐射和大气浑浊度的年际变化非常大,其他要素变化相对平稳,近 20 余年太阳总辐射曝辐量为 261.6MJ/(m²·10a)的增多趋势,总云量为 0.3 成/10a 的增多趋势(两者均通过了信度 0.01 的显著性检验),日照时数变化趋势与近 50 余年的趋势性相反,为 131.6h/10a 的增多趋势(通过了信度 0.05 的显著性检验),其中太阳总辐射与日照时数、大气浑浊度的相关系数分别为 0.6709 和-0.6705,说明 90 年代之后“变亮”与日照增多、大气清洁度增加有关.

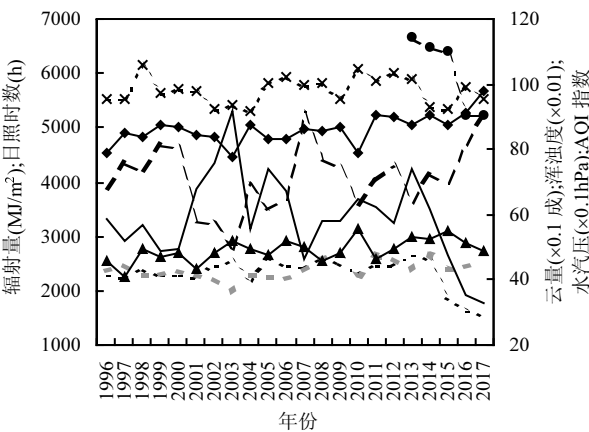


图 2 沈阳 1996~2017 年太阳辐射与相关气象因子、空气质量因子的年际变化曲线

Fig.2 Interannual variation curves of solar radiation and related meteorological and air quality factors in Shenyang from 1996 to 2017

对比图 2 中近 5a 的 AQI 指数与大气浑浊度,可以发现两者吻合度较高,2016 年、2017 年为 AQI 指

数的明显小值年,2013 年是明显大值年,大气浑浊度也明显体现出这一特征,说明在无空气质量监测数据的情况下,利用大气浑浊度指标也可以大致分析历史年份的空气质量状况.另外从图 2 还可以发现,2017 年为近 20 余年甚至是近 49a(1969 年以来)中太阳总辐射最大值年,而该年日照时数、云量、水汽均非极端多或少的年份,但该年散射辐射异常偏少,直接辐射是近 20 余年的次大值,大气浑浊度显

著偏低,AQI 指数也为近 5 年的较低值.同样,2016 年也基本具有 2017 年的特征,即直接辐射偏强、散射辐射偏弱,AQI 指数与大气浑浊度偏低,2013 年则基本是相反的情况.可见,大气清洁状况与太阳辐射关联较好,空气质量对到达地面的太阳辐射强度影响较大,大气污染物可通过吸收、散射、反射等作用削弱到达地面的太阳辐射量.

2.2 到达地面的太阳辐射季节变化及影响因子

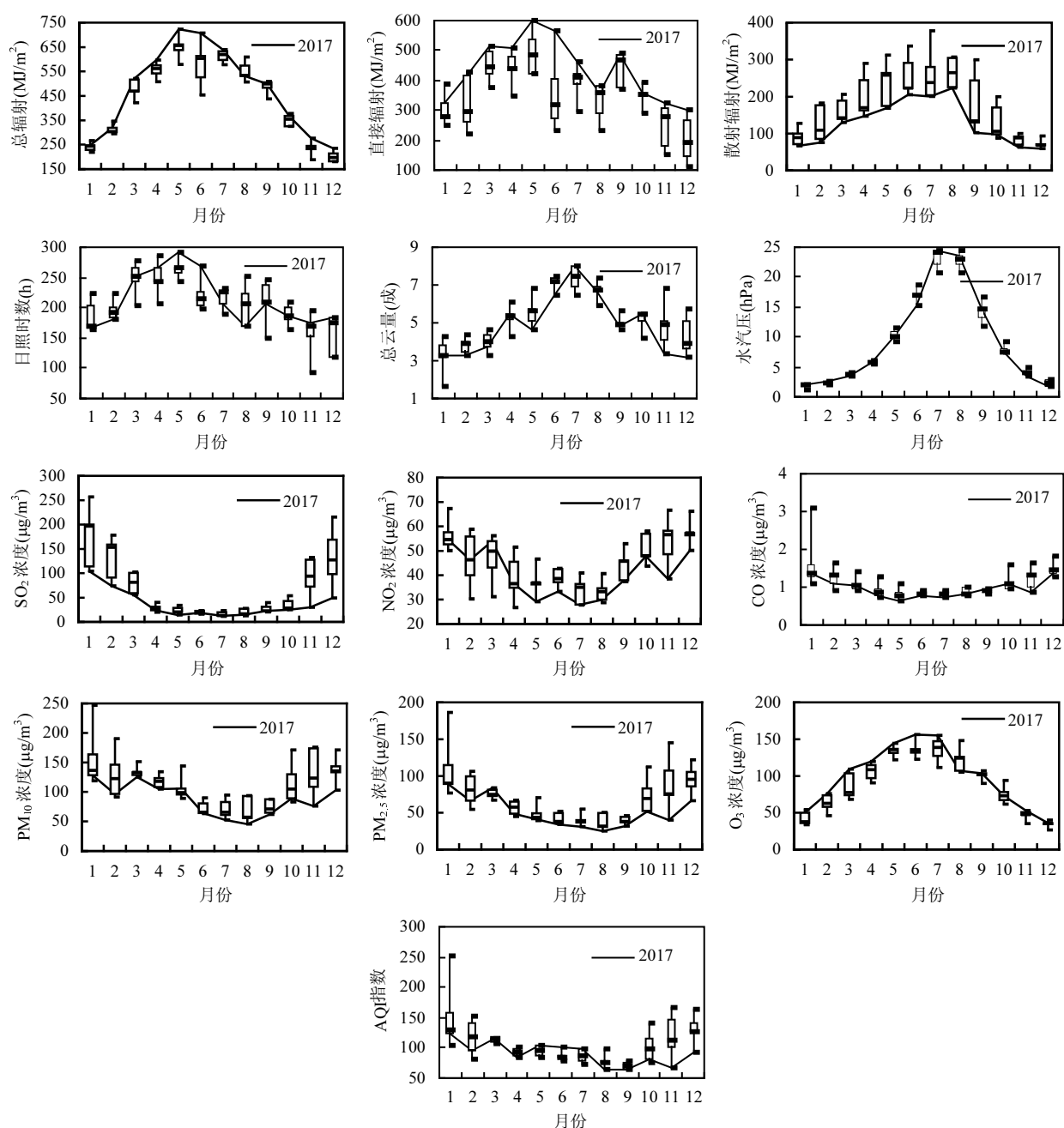


图3 沈阳太阳辐射、气象因子、空气质量因子 2013~2017 年各月值箱线图及与 2017 年的对比

Fig.3 Box chart of monthly values of solar radiation, meteorological factors and air quality factors in Shenyang from 2013 to 2017 and comparison with those in 2017

图 3 给出了沈阳 2013~2017 年到达地面的太阳辐射与气象因子、空气质量因子各月值分布及与 2017 年的对比情况.可见,太阳辐射总体为春夏季和初秋强、深秋及冬季弱,主要受地球公转即年内太阳直射点在南北回归线的移动规律影响,但因日照时数、云量、水汽等季节变化影响,平均状况下太阳总辐射、直接辐射 5 月最强,散射辐射 8 月最大,该特征主要是因沈阳春季干燥多日照、夏季雨量集中、初秋高气爽的气候特点所形成的,夏季云量增多、水汽含量显著增大,对太阳直接辐射具有较大的反射、散射和吸收作用.与太阳辐射季节变化相反,SO₂、NO₂、CO、PM₁₀、PM_{2.5} 质量浓度以及 AQI 指数表现为春夏季和初秋低、深秋及冬季高的特征,1 月各污染物浓度最大,冬季空气污染最为严重.主要与城市供暖使得污染物排放增加以及冬季逆温条件增多导致大气扩散条件变差有关.与其他大气污染物相反,O₃ 质量浓度在夏季最大,因为近地面的臭氧主要是人为源排放的氮氧化物、CO 和挥发性有机物等在高温、强光条件下发生光化学反应二次转化而成的,故太阳辐射越强越易引发 O₃ 污染^[35].SO₂、NO₂、CO、PM₁₀、PM_{2.5} 可削弱到达地面的太阳辐射,理论上其浓度与到达地面的直接辐射为负相关关系,与散射辐射为正相关关系,而强的太阳辐射可激发 O₃ 浓度增大,其与太阳辐射为正相关关系.不同要素对太阳辐射的削光作用与机理不同,表现为对不同太阳光谱区的衰减不同^[36].太阳辐射的能量主要集中在 0.15~4μm 波段,占全部能量的 99%以上,对应为太阳光谱的紫外、可见光和红外谱段,其中可见光区约占 50%,红外线区约占 43%,紫外线区约占 7%.对太阳辐射的削光作用而言,云层体现为全光谱反射及云水的吸收,云的高低、厚薄、多少导致反射率不同;水汽主要体现在对红外线部分的吸收及少量的散射;日照时数间接反映云层等对太阳直接辐射的遮蔽程度和时间;臭氧主要体现在对紫外线部分的吸收;SO₂、NO₂、CO 等气体污染物主要体现在分光谱的选择性吸收;颗粒物情况比较复杂,具有反射、散射、吸收三种削光效应,反射体现为全光谱反射,颗粒越大反射能力越强,颗粒越小反射能力越小,大颗粒散射体现为全光谱散射,与空气分子大小相当的颗粒对短波散射能力强,吸收则取决于颗粒物的组成成分,体现在分光谱选择性吸收.吸收

可导致三种辐射量都减少,散射虽减少直接辐射却增加散射辐射,向上反射可减少三种辐射量,向下反射可增加总辐射和散射辐射.

2017 年是沈阳太阳总辐射、直接辐射曝辐量异常大值年,对比 2017 年在近 5 年中的情况可见,2017 年除 8 月外各月总辐射均大于平均值接近最大值,5、6 月份是明显大值;各月直接辐射均明显高于多年平均值,多数月为最大值;各月散射辐射基本为 5 年中的最小值;各月 SO₂、CO、PM₁₀、PM_{2.5} 质量浓度基本为最小值或接近最小值,NO₂ 浓度在 5 月以后基本为最小值,O₃ 浓度在前半年基本为最大值,后半年接近平均值.与其他年份相比,2017 年 5、6 月的强直接辐射主要是当月日照多、云量少、水汽压低的缘故,并配合各污染物浓度也基本最小(O₃ 除外).但其他月份直接辐射相对其他年份也较强与日照、云量、水汽对应关系不明显,空气质量因素的作用更为突出.另外可以发现,虽然 2017 年 5~7 月 AQI 指数相较其他年份明显偏大,但太阳总辐射、直接辐射相对依然偏大,主要是因为期间多以 O₃ 为首要污染物,O₃ 浓度明显偏大导致 AQI 指数偏大,其他污染物浓度依然偏小,而受 O₃ 影响较大的紫外线区太阳辐射能量占比不大,其他污染物的综合影响更大.通过上述 2017 年与其他年份的对比进一步说明,在气象因子差异不大的情况下,空气质量情况是影响太阳辐射偏强或偏弱的关键因素,SO₂、NO₂、CO、PM₁₀、PM_{2.5} 质量浓度偏低是沈阳 2017 年太阳总辐射、直接辐射异常强的主要原因之一.

2.3 晴天情况

为突出空气质量对太阳辐射的影响,本文下面尽量排除云的削光作用,只考虑晴天的情况.晴天情况下太阳辐射在整层大气中传播衰减,经历大气分子的散射、臭氧层与水汽的吸收以及气溶胶微粒等大气混合污染物的吸收、反射和散射,导致到达地面的太阳辐射量明显减弱.随着大气污染物浓度增加,可增加对太阳辐射的吸收、反射和散射,可导致到达地面的直接辐射和总辐射减少,而散射辐射随之增加.

2.3.1 晴天大气污染物特征 由图 4 可见,晴天大气污染物质量浓度与各种天气污染物平均浓度的季节变化规律基本一致,但各月 PM_{2.5} 质量浓度整体小于平均情况,表明总体上晴天细颗粒物污染状况偏好,而夏季晴天其他污染物有不同程度的偏多,尤

以NO₂和O₃偏多,晴天的高温、强日照更易导致NO₂ 现为 5~7 月晴天大于平均状态,其他月份小于平均状态,可见夏季晴天的空气污染不容忽视。

转化形成 O₃.代表空气质量综合状况的 AQI 指数表

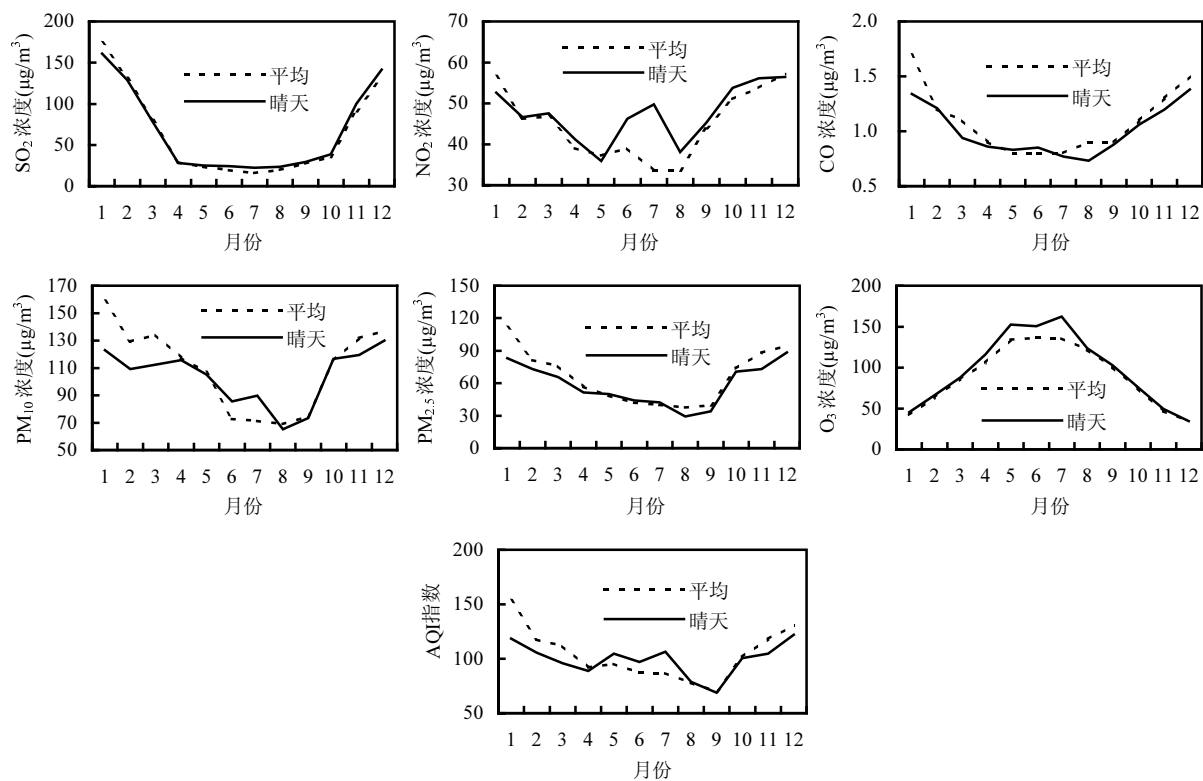


图4 各空气质量因子 2013~2017 年累年月平均值与晴天条件下累年月平均值的对比

Fig.4 Comparison of annual and monthly mean values of air quality factors in 2013~2017with those in sunny days

由表 2 可见,晴天以 PM_{2.5} 为首要污染物的天数最多,占晴天中的 41%,其次为 PM₁₀、SO₂,分别占 25%、15%.以颗粒物(PM_{2.5}、PM₁₀)为首要污染物的晴天样本占晴天总数的 66%,以气态污染物(SO₂、NO₂、CO、O₃)为首要污染物的样本占 34%.11 月~次年 3 月主要以 PM_{2.5} 为首要污染物,12 月~2 月 SO₂ 为首要污染物的天数次之;3、4 月和 10 月 PM₁₀ 为首要污染物的天数明显偏多,与沈阳处于大风季节有关,大风可携带浮尘、扬沙,导致空气中的可吸入颗粒物

增多;5~9 月多以 O₃ 污染为主.各污染物浓度和首要污染物的季节分布反映出沈阳冬半年多以煤烟污染为主,夏季多以汽车尾气污染为主.按空气质量指数级别划分,442 个晴天样本中,一~六级的天数分别为 24,249,111,33,21,4d,以空气质量良和轻度污染为主.其中,五级、六级晴天样本均以 PM_{2.5} 为首要污染物;四级样本中 5~8 月主要以 O₃ 为首要污染物,其他样本均以 PM_{2.5} 为首要污染物.可见,沈阳秋冬季的中、重度污染主要由高浓度的 PM_{2.5} 引起.

表 2 各月 2013~2017 年晴天首要污染物出现日数合计(d)

Table 2 The monthly total days of major pollutants in sunny days from 2013 to 2017 (d)

要素	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	合计
SO ₂	24	17	11	0	0	0	0	0	0	0	5	11	68
NO ₂	1	1	0	1	0	2	0	2	9	4	2	1	23
PM ₁₀	1	6	19	21	9	1	1	5	11	20	9	9	112
CO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O ₃	0	0	1	3	19	8	3	14	10	0	0	0	58
PM _{2.5}	39	31	29	7	2	0	0	0	2	19	22	30	181

2.3.2 清洁日与污染日个例比较 为尽可能消除到达地面的太阳辐射受地球公转的影响,这里尽量选择相同日或邻近日作为典型个例分析空气质量对太阳辐射的影响。

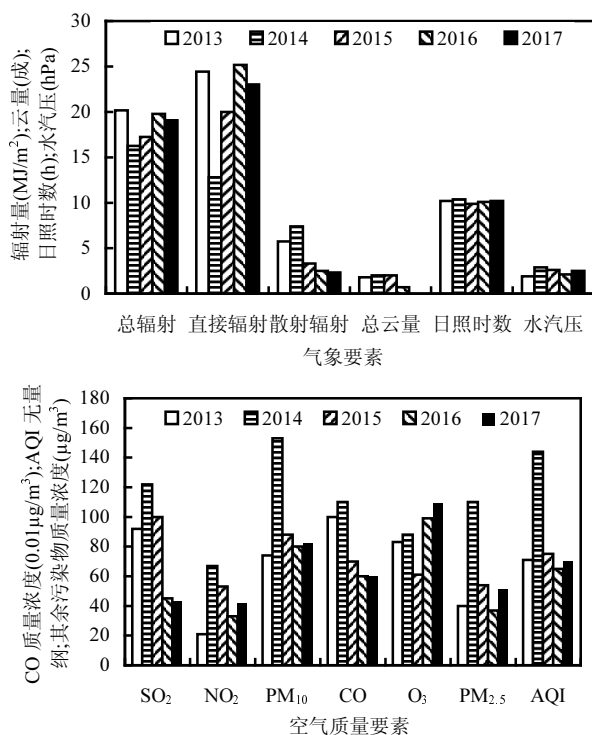


图5 2013~2017年3月13日太阳辐射与气象要素、空气质量要素的对比

Fig.5 Comparison of solar radiation, meteorological elements and air quality elements on March 13 in 2013~2017

2013~2017年442个晴天样本中,同一天在5个年份均是晴天样本的仅有3月13日和3月22日两天。3月13日在2013~2017年分别以SO₂、PM_{2.5}、SO₂、PM₁₀、PM_{2.5}为首要污染物,3月22日分别以PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁₀、PM₁₀、PM_{2.5}为首要污染物。由图5可见,2014年3月13日是5年同日中空气质量最差的一天,SO₂、NO₂、PM₁₀、CO、PM_{2.5}浓度均为最大,为三级轻度污染天气,而其他四天空气质量为二级良好,五天中总云量、日照、水汽的差异不大,但2014年3月13日太阳散射辐射最大、总辐射和直接辐射最小,相比于其他四天总辐射偏少15%,直接辐射偏少45%,散射辐射增加114%。由图6可见,2015年3月22日是五年同日中AQI指数最大的一天,当天PM₁₀明显偏大,其他污染物浓度则不突出,相比之下2014年3月22日SO₂、NO₂、CO、PM_{2.5}

浓度是同日中的最大值,PM₁₀为第二大值,5a同日的总云量、日照、水汽也差异不大,但2014年3月22日太阳散射辐射最大、总辐射和直接辐射最小,这与该日颗粒物粒径组成中细颗粒物占比大、浓度相对高对太阳辐射削光作用更大、其他污染物浓度也同时偏高有关,这也进一步说明不同污染物对太阳辐射的影响程度不同。

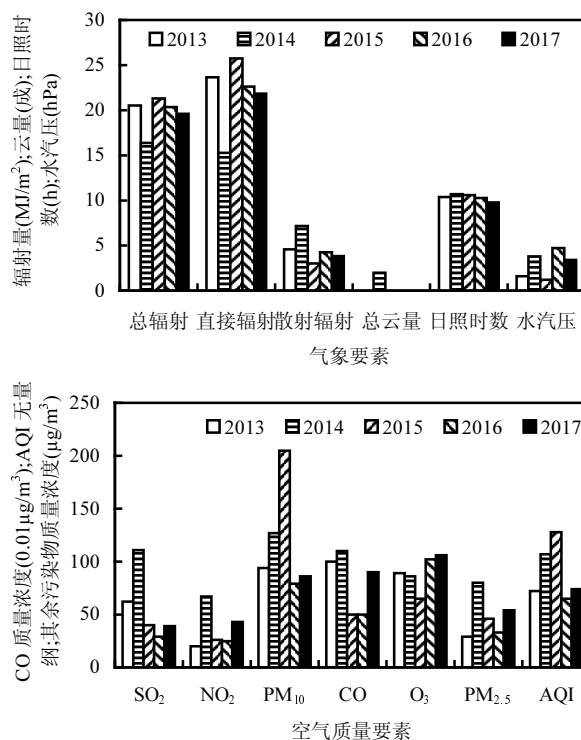


图6 2013~2017年3月22日太阳辐射与气象要素、空气质量要素的对比

Fig.6 Comparison of solar radiation, meteorological elements and air quality elements on March 22

442个晴天个例中,2016年9月28日是AQI指数最小的一天(AQI指数为35,NO₂为首要污染物),可作为沈阳空气质量最好的9月的一个典型日,2013年12月23日是AQI指数最大的一天(AQI指数为345,PM_{2.5}为首要污染物),可作为沈阳冬季空气质量最差的一个典型日,而这两天均无其他年份的同日晴天样本,故在其邻近晴天日选择AQI指数对比较大的样本,分别为2013年9月27日(AQI指数为111,O₃为首要污染物)、2017年12月26日(AQI指数为44,PM₁₀为首要污染物)进行对比分析。对比2013年9月27日和2016年9月28日(图7),由于后者是空气质量为优的晴日,基本可以作为该日到达地面的太阳辐射量的本底状态,以其作为标准,前者

(轻度污染日)散射辐射量偏大了 258%,直接辐射偏少了 38%,总辐射偏少了 11%,而两日的总云量、日照时数相差不大,虽水汽压前者略大于后者进而对太阳辐射的吸收作用略有增强,但前者各污染物浓度全部大于后者,且浓度差异较大,很大程度上可以认为直接辐射和总辐射明显偏少、散射辐射偏多,以各污染物的散射吸收的作用更为明显.对比 2013 年 12 月 23 日和 2017 年 12 月 26 日(图 8),由于后者也是空气质量为优的晴天,故也以该日为本底标准,前者(严重污染日)散射辐射量偏大了 217%,直接辐射偏少了 67%,总辐射偏少了 34%,两日的气象因素同样差异不大,而环境因素差异显著,进一步印证空气质量对太阳辐射的影响.空气污染物虽可增加散射辐射,但对直接辐射的衰减作用更为突出,导致到达地面的总辐射明显减少.

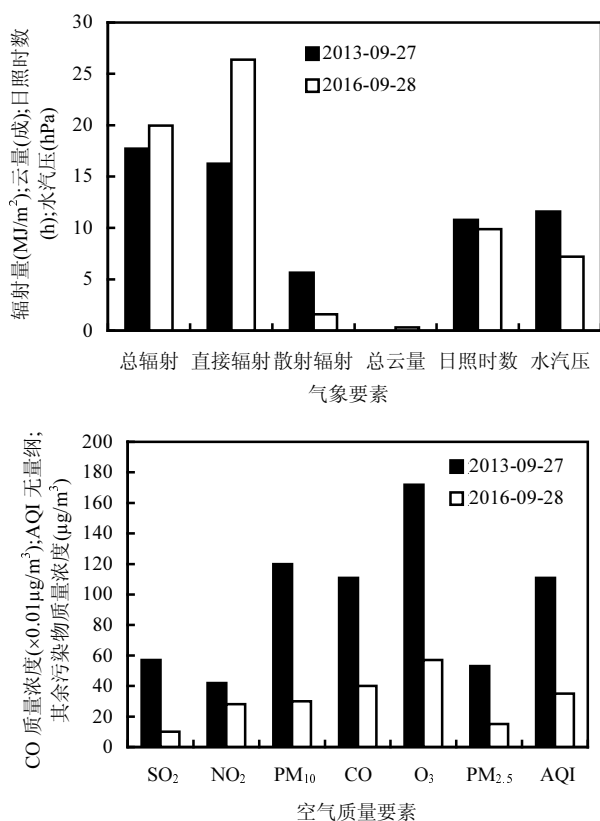


图 7 2013 年 9 月 27 日与 2016 年 9 月 28 日太阳辐射与气象要素、空气质量要素的对比图

Fig.7 Comparison of solar radiation, meteorological elements and air quality elements on September 27, 2013 and September 28, 2016

2.3.3 不同分类情况下空气质量对太阳辐射的影响

表 3 按空气质量等级分别给出了各类晴天日平均太阳辐射曝辐量值.太阳总辐射、直接辐射随着空气质量指数级别一~六级逐级减弱,即到达地表的太阳辐射随空气污染严重而减弱,三级及以上等级污染天气的日平均太阳辐射量小于晴天平均情况.但需要说明的是,由于样本有限,表 3 中各类情况样本在年内的分配不均,统计结果无法排除太阳辐射年内自然变化的影响.其中,二级、三级的样本相对较多(分别为 249、111d),在年内的分配相对均衡,与晴天日平均值相比,空气质量三级较二级情况下太阳总辐射衰减了 10%,直接辐射衰减了 18%,散射辐射增加了 15%.

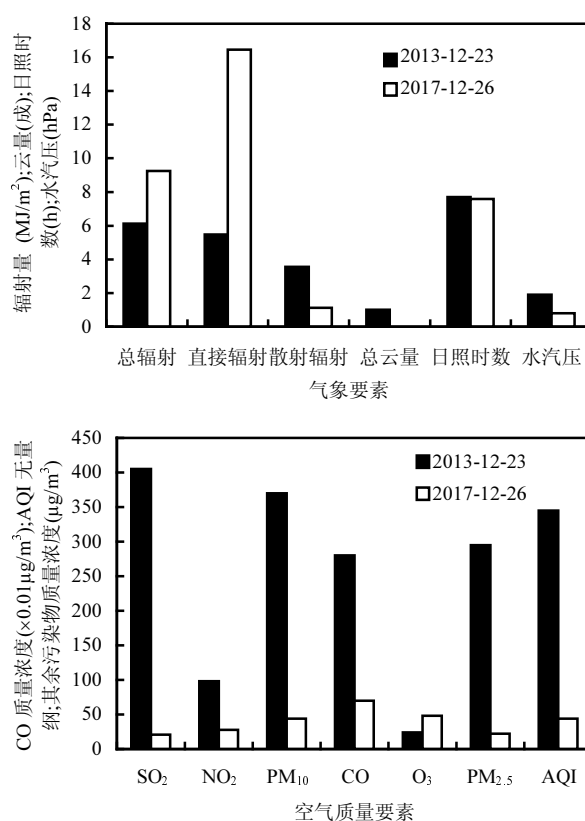


图 8 2013 年 12 月 23 日与 2017 年 12 月 26 日太阳辐射与气象要素、空气质量要素的对比图

Fig.8 Same as Fig.7but on December 23,2013 and December 26,2017

表 3 也按空气污染物性质分别给出了首要污染物为颗粒物和气态污染物时晴天日平均太阳辐射曝辐量值.可以看到,以颗粒物为首要污染物的晴天太阳总辐射、直接辐射曝辐量小于以气态污染物为首要污染物的晴天和晴天平均值,说明从全年平均

情况看,以颗粒物为首要污染物的晴天太阳辐射削减更为明显.

表 3 不同分类情况下的晴天日平均太阳辐射曝辐量(MJ/m²)
Table 3 Mean solar radiation values on sunny days under different classification conditions (MJ/m²)

要素	空气质量指数级别						首要污染物性质		晴天 日平均值
	一级	二级	三级	四级	五级	六级	颗粒物	气态	
总辐射	18.5	17.1	15.4	14.8	10.6	8.3	15.1	18.6	16.2
直接辐射	24.2	20.2	16.9	16.3	10.6	9.3	17.9	20.5	18.7
散射辐射	2.7	3.8	4.4	4.2	4.4	3.3	3.8	4.3	4.0

考虑到不同污染物的影响程度不同,且尽量减少因样本数太少导致结论的偶然性,表 4 给出了各月样本数≥10 天情况下(样本数见表 2)不同首要污染物的晴天太阳辐射日平均曝辐量.虽然表 4 因样本有限有很多空缺,但对比相同月仍可以发现,以 PM_{2.5} 为首要污染物的晴天,太阳直接辐射的衰减明显大于以 SO₂ 和 PM₁₀ 为首要污染物的情况(1、2、3、10、12 月),总辐射也基本如此,说明 PM_{2.5} 的削光作用更为明显;5 月和 8 月 O₃ 为首要污染物的晴天居多,9 月也有较高的比例,由于 O₃ 易发生在强日照、高温的条件下,表 4 中 O₃ 为首要污染物的晴天日平均太阳直接辐射、总辐射曝辐量均大于当月晴天日

平均值;9 月 PM₁₀ 为首要污染物的晴天较 O₃ 为首要污染物的晴天太阳直接辐射、总辐射减小,散射辐射增大,说明 PM₁₀ 虽增大了散射辐射,但不足以抵消其对直接辐射的削减;PM_{2.5} 为首要污染物时的日平均散射辐射曝辐量大于 PM₁₀ 为首要污染物的情况(3 月和 10 月),SO₂ 为首要污染物时也有着较大的散射辐射,部分月可大于 PM_{2.5} 为首要污染物的晴日(2 月和 3 月),说明空气中各污染物与太阳辐射各要素的关系比较复杂,特别是每日各污染物同时存在且配比不同,导致其与太阳辐射关系更为复杂.随着今后样本数的积累,有待进一步分析比较不同污染物与太阳辐射的关系.

表 4 各首要污染物晴天样本数≥10 天情况下日平均太阳辐射曝辐量(MJ/m²)
Table 4 Daily average solar radiation values when the number of samples of each primary pollutant in sunny days≥10days (MJ/m²)

要素	污染物	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
总辐射	SO ₂	9.7	13.3	18.2									8.7
	NO ₂												
	PM ₁₀			19.3	23.9					20.4	15.6		
	CO												
	O ₃					28.7			25.1	21.4			
	PM _{2.5}	9.1	13.0	18.5							13.9	10.6	7.9
直接辐射	SO ₂	15.7	17.8	21.8									11.8
	NO ₂												
	PM ₁₀			22.3	24.6					23.1	21.3		
	CO												
	O ₃					26.1			22.2	25.3			
	PM _{2.5}	13.2	16.5	20.9							15.5	14.9	9.4
散射辐射	SO ₂	2.1	4.5	4.4									1.8
	NO ₂												
	PM ₁₀			4.0	5.6					8.2	3.2		
	CO												
	O ₃					6.7			6.4	2.7			
	PM _{2.5}	2.5	3.6	4.3							5.6	2.5	2.3

3 结论

3.1 沈阳上世纪 90 年代之后“变亮”与日照增多、

大气清洁度增加有关. 在气象因子差异不大的情况下,空气质量是影响到达地面太阳辐射偏强或偏弱的关键因素.SO₂、NO₂、CO、PM₁₀、PM_{2.5} 质量浓

度偏低是 2017 年沈阳太阳总辐射、直接辐射异常强的主要原因。

3.2 虽然缺乏真正的大气本底样本,但通过对比不同空气质量等级情况下的太阳辐射以及清洁日与污染日个例情况,仍可以分析空气质量对太阳辐射的衰减程度.沈阳空气质量三级较二级情况下太阳总辐射平均衰减了 10%,直接辐射平均衰减了 18%,散射辐射增加了 15%.9 月下旬轻度污染晴日的直接辐射减少了 38%,总辐射减少了 11%.12 月下旬严重污染晴日的直接辐射偏少了 67%,总辐射偏少了 34%.

3.3 空气中各污染物与太阳辐射各要素的关系比较复杂, $\text{PM}_{2.5}$ 的削光作用更为明显. $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的晴天平均太阳直接辐射衰减明显大于以 SO_2 和 PM_{10} 为首要污染物的情况. $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物时的日平均散射辐射大于 PM_{10} 为首要污染物的情况,但不足以补充其对直接辐射的衰减,进而导致总辐射衰减.可见,无论是从人类健康角度还是太阳辐射角度,对可吸入颗粒物的污染防治均是关键问题。

参考文献:

- [1] Liepert B G. Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002,29(10):1421.
- [2] Wild M, Gilgen H, Roesch A, et al. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface [J]. *Science*, 2005,308:847-850.
- [3] Gilgen H, Wild M, Ohmura A. Means and trends of shortwave irradiance at the surface estimated from global energy balance archive data [J]. *J. Clim.*, 1998,11(8):2042-2061.
- [4] Stanhill G, Cohen S. Global dimming: A review of the evidence for a wide spread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences [J]. *Agri. and Forest Meteorol.*, 2001,107(4):255-278.
- [5] Alpert P, Kishcha P, Kaufman Y J, et al. Global dimming or local dimming? Effect of urbanization on sunlight availability [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005,32:L17802.
- [6] Qian Y, Wang W, Leung L, et al. Variability of solar radiation under cloud-free skies in China: The role of aerosols. [J] *Geophys Res Lett*, 2007,34:L12804.
- [7] Pinker R T, Zhang B, Dutton E G. Do satellites detect trends in surface solar radiation? [J]. *Science*, 2005,308:850-854.
- [8] 齐月,房世波,周文佐.近 50 年来中国地面太阳辐射变化及其空间分布 [J]. *生态学报*, 2014,34(24):7444-7453.
Qi Y, Fang S B, Zhou W Z. Variation and spatial distribution of surface solar radiation in China over recent 50years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014,34(24):7444-7453.
- [9] Qian Y, Kaiser D P, Leung L R, et al. More frequent cloud-free sky and less surface solar radiation in China from 1955 to 2000 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2006,33:L01812.
- [10] 齐月,房世波,周文佐.近 50 年来中国东、西部地面太阳辐射变化及其与大气环境变化的关系 [J]. *物理学报*, 2015,64(8):089201.
Qi Y, Fang S B, Zhou W Z. Correlative analysis between the changes of surface solar radiation and its relationship with air pollution, as well as meteorological factor in East and West China in recent 50years [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2015,64(8):089201.
- [11] Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M. Analysis of 40year records of solar radiation data in Shanghai, Nanjing and Hangzhou in eastern China [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 2004,78:217-227.
- [12] Che H Z, Shi G Y, Zhang X Y, et al. Analysis of sky conditions using 40year records of solar radiation data in China [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 2006,89:83-94.
- [13] Norris J R, Wild M. Trend in aerosol radiative effects over Europe inferred from observed cloud cover, solar “dimming” and solar “brightening” [J]. *J. Geophys. Res.*, 2007,112:D08214.
- [14] Elminir H K. Relative influence of weather conditions and air pollutants on solar radiation Part 2: Modification of solar radiation over urban and rural sites [J]. *Meteor Atmos Phys*, 2007,96:257-264.
- [15] 符传博,丹利.大气污染加剧对中国区域散射辐射比例的影响 [J]. *科学通报*, 2018,63(25):2655-2665.
Fu C B, Dan L. Influence of intensified air pollution on the sunny diffuse radiation fraction in China [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2018,63(25):2655-2665.
- [16] Katsumasa T, Atsumu O, Folini D, et al. Is global dimming and brightening in Japan limited to urban areas? [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 2016:1-50.
- [17] Khodakarami J, Ghobadi P. Urban pollution and solar radiation impacts [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016,57:965-976.
- [18] 张明锋,林正云.浅析城市发展对太阳辐射的影响 [J]. *太阳能学报*, 2001,22(1):53-58.
Zhang M F, Lin Z Y. Analysis on the effect of urban development on solar radiation [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2001,22(1):53-58.
- [19] 邵振艳,周涛,史培军,等.大气污染对中国重点城市地面总辐射影响的时空特征 [J]. *高原气象*, 2009,28(5):1105-1114.
Shao Z Y, Zhou T, Shi P J, et al. Spatial-Temporal Characteristics of the Influence Atmospheric Pollutant on Surface Solar Radiation Changes for Chinese Key Cities [J]. *Plateau Meteorol*, 2009,28(5):1105-1114.
- [20] 蔡子颖,姚青,韩素芹,等.气溶胶直接气候效应对天津气象和空气质量的影响 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(3):908-914.
Cai Z Y, Yao Q, Han S Q, et al. The influence of the air quality and meteorological field about Aerosol direct climate effect on Tianjin [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(3):908-914.
- [21] 马金玉,梁宏,罗勇,等.中国近 50 年太阳直接辐射和散射辐射变化趋势特征 [J]. *物理学报*, 2011,60(6):069601.
Ma Jinyu, Liang Hong, Luo Yong, et al. Variation trend of direct and diffuse radiation in China over recent 50years [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2011,60(6):069601.
- [22] Yousef A, Ruslan M H, Alghoul M A, et al. Solar attenuation by

- aerosols: An overview [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012,16(6):4264–4276.
- [23] Suthar M, Singh G K, Saini R P. Effects of air pollution for estimating global solar radiation in India [J]. *International Journal of Sustainable Energy*, 2017,36(1):20–27.
- [24] Zhao N, Zeng X F, Han S M. Solar radiation estimation using sunshine hour and air pollution index in China [J]. *Energy Conversion & Management*, 2013,76:846–851.
- [25] Fan J L, Wu L F, Zhang F C, et al. Evaluating the effect of air pollution on global and diffuse solar radiation prediction using support vector machine modeling based on sunshine duration and air temperature [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018,94: 732–747.
- [26] 喻 丽,申双和,陶苏林,等.基于空气污染指数的太阳日总辐射计算方法 [J]. *应用气象学报*, 2015,26(3):291–299.
- Yu L, Shen S H, Tao S L, et al. Daily total radiation model based on air pollution index [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2015,26(3):291–299.
- [27] 刘卫亮,刘长良,林永君,等.基于AOD估计的晴空太阳辐射强度滚动预测 [J]. *太阳能学报*, 2019,40(7):1797–1804.
- Liu W L, Liu C L, Lin Y J, et al. Rolling forecast of solar radiation intensity in clear sky based on AOD estimation [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2019,40(7):1797–1804.
- [28] 陈 灿,何 珍,何 颖,等.关于雾霾天气对太阳辐射量的影响研究实验 [J]. *科技创新导报*, 2015,(6):114–116.
- Chen C, He Z, He Y, et al. Experimental studies on the effects of fog and haze on solar radiation [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2015,(6):114–116.
- [29] 刘长焕,邓雪娇,朱 彬,等.近 10 年中国三大经济区太阳总辐射特征及其与 O_3 、 $PM_{2.5}$ 的关系 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(8):2820–2829.
- Liu C H, Deng X J, Zhu B, et al. Characteristics of GSR of China's three major economic regions in the past 10 years and its relationship with O_3 and $PM_{2.5}$ [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(8): 2820–2829.
- [30] 田莎莎,张 显,卞思思,等.沈阳市 $PM_{2.5}$ 污染组分特征及其来源解析 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(2):487–496.
- Tian S S, Zhang X, Bian S S, et al. Characteristics of $PM_{2.5}$ pollution components and their sources in Shenyang [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(2):487–496.
- [31] 韩玺山,王景乾.沈阳地区空气污染对太阳辐射的影响兼论沈阳空气质量的逐年变化 [J]. *环境科学*, 1980,1(6):9–13.
- Han X S, Wang J Q. The influence of air pollution on solar radiation in Shenyang and the annual change of air quality in Shenyang [J]. *Environmental Science*, 1980,1(6):9–13.
- [32] GB3095—2012 环境空气质量标准 [S].
- GB3095—2012 Ambient air quality standards [S].
- [33] HJ/T193—2005 环境空气质量自动监测技术规范 [S].
- HJ/T193—2005 Automated methods for ambient air quality monitoring [S].
- [34] 申彦波,赵 东,祝昌汉,等.近 50 年来鄂尔多斯地面太阳辐射的变化及与相关气象要素的联系 [J]. *高原气象*, 2009,28(4):786–794.
- Shen Y B, Zhao D, Zhu C H, et al. Variational characteristics of surface solar radiation and associated meteorological elements over Ordos plateau in recent 50 years [J]. *Plateau Meteorology*, 2009,28(4): 786–794.
- [35] 赵 辉,郑有飞,吴晓云,等.江苏省大气复合污染特征与相关气象驱动 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(8):2830–2839.
- Zhao H, Zheng Y F, Wu X Y, et al. Atmospheric compound pollution characteristics and the effects of meteorological factors in Jiangsu Province [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(8):2830–2839.
- [36] Marie O, Michal B, Martin N, et al. Influence of air pollution to incident photosynthetically active radiation during clear sky conditions in Ostrava, Czech Republic [J]. *Atmospheric Environment*, 2019,215: 116910.

作者简介: 汪宏宇(1970–),男,辽宁沈阳人,副研究员,硕士,主要从事大气物理、大气环境和应用气象领域的研究.发表论文 10 余篇.