大气污染加剧对中国区域散射辐射比例的影响

符传博^{1,2,3}, 丹利^{1*}

1. 中国科学院大气物理研究所, 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029;

2. 海南省气象台, 海口 570203;

3. 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海口 570203

* 联系人, E-mail: danli@tea.ac.cn

2018-02-28 收稿, 2018-03-06 修回, 2018-03-07 接受, 2018-08-03 网络版发表

国家重点研发计划(2016YFA0602501)和国家自然科学基金(41630532, 41575093)资助

摘要 利用我国47个站点的晴空散射辐射比例(sunny diffuse radiation fraction, SDRF)资料, 结合CO₂排放、气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)和日照时数等对我国地区的SDRF时空分布、区域特征及其成因做了分析, 结果表明: (1) 我国SDRF有明显的区域性特征, 大值区主要分布在我国中部的四川盆地, 而在云南、新疆、西藏和东北等地SDRF值偏小; (2) 大部分的站点SDRF呈显著上升趋势, 其中以我国中东部地区的站点上升更为显著; (3) 区域特征分析表明华北、华东和华中地区SDRF上升较为显著, 而华南、东北、西北和西南地区SDRF上升幅度相对较轻; (4) 日照时数与散射辐射比例高度相关. 其中在大气污染较为严重的华东、华中和华北地区, 其相关系数均超过-0.8, 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.

关键词 散射辐射比例, 日照时数, 大气污染, 气溶胶光学厚度(AOD), 气溶胶粒子

近年来, 伴随着经济的高速增长, 有更多的污染气体排入大气中. 大量人为活动生成的气溶胶使环境恶化, 其时间长、分布广、影响范围大, 还可对区域气候造成一定影响, 大气污染加剧随之带来的环境效应及气候效应问题越来越受到政府与公众的关注^[1,2]. 在环境效应方面, 人为排放增多会造成霾日明显上升^[3,4], 能见度下降, 影响人体健康^[5]; 而气候效应方面, 气溶胶浓度升高会减缓全球变暖步伐^[6], 延长低云寿命^[7], 抑制轻量级降水, 不利于季风的增强^[8], 影响地气系统的辐射收支平衡^[9]等. 我国的大气污染可分为3个阶段, 即20世纪80年代的点源污染、90年代的城市污染和21世纪的区域性、复合性的大气污染^[10]. 从相关能源消耗和经济指标来看(图1), 近50年来我国CO₂排放和能源消耗总量均有显著的上升, 仅仅在2000~2010年期间, 我国CO₂排放和能

源消耗总量分别增加了140%和200%, 而且我国各个区域经济发展水平并不一致, 绝大多数的能源消费主要集中在华北、华东、华南和四川盆地等重度污染地区^[11,12], 而上述地区的大气污染问题已经达到十分严重的程度^[13].

大气环境领域的研究涉及多个方面^[14,15], 其中在气溶胶影响地气系统辐射收支平衡, 及其对农业生产产生的直接影响方面, 目前国内的研究还不多见^[16,17]. 植物光合作用的能量主要来源于太阳辐射, 很多研究表明, 大气中气溶胶粒子浓度增加后地球表面接收到的太阳辐射有逐渐减少的趋势^[18], 进而影响到植被的光合作用^[19]. 太阳辐射中对植物光合作用有效的光谱成分称为光合有效辐射, 散射辐射中光合有效辐射的比例要远高于太阳直接辐射^[20], 散射辐射的增加可能更有利于植物光合作用, 增加

引用格式: 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. 科学通报, 2018, 63: 2655~2665

Fu C B, Dan L. Influence of intensified air pollution on the sunny diffuse radiation fraction in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 2655~2665, doi: 10.1360/N972018-00177

图1 1961~2010年中国CO₂排放和能源消耗的年际变化

Figure 1 Annual variation of CO₂ emission and energy consumption in China during 1961–2010

二氧化碳的吸收固定^[21]. 因此, 迫切需要弄清散射辐射对陆地生态系统生产力及其碳收支影响的过程与机理, 为准确模拟陆地生态系统生产力与碳收支, 制定植被适应气候变化对策提供参考. 为此, 本文主要分析我国地区散射辐射的时空演变规律, 及其与日照时数的关系等, 为陆地生态系统生产力及其碳收支的准确评估提供参考和依据.

1 资料及方法

1.1 数据来源

目前, 我国地面太阳辐射观测站点为103个, 其观测年代长短不一. 本研究从全国选取了具有长时间序列(1961~2010年)的47个地面太阳辐射观测站的太阳总辐射、散射辐射、总云量及日照时数观测数据, 这些数据全部来自国家气象信息中心. 辐射观测是气象要素观测中的一个基本项目, 总辐射是指水平面上, 天空 2π 立体角内所接收到的太阳直接辐射和散射辐射之和. 总辐射用总辐射表测量, 散射辐射用总辐射表配上有关部件测量^[22], 目前国内采用的总辐射传感器为FS-S6型或TBQ-2-B型辐射表, 测量波长为 $0.27\sim 3.2\ \mu\text{m}$.

为揭示地区的差异性和特殊性, 本文根据站点的气候特点及地理区划, 参考《中国气象地理区划手册》^[23]的标准, 将中国大陆划分为7个区域(图2): (1) 东北地区, 包括黑龙江、吉林和辽宁, 共5个站点; (2) 华北地区, 包括北京、天津、河北、山西、河南和山东, 共6个站点; (3) 华东地区, 包括上海、江苏、浙

图2 47个地面观测站点分布图

Figure 2 Locations of 47 stations over China

江、安徽和福建,共6个站点;(4)华中地区,包括湖北、湖南和江西,共5个站点;(5)西南地区,包括四川、重庆、贵州、云南和西藏,共8个站点;(6)华南地区,包括广东、广西和海南,共6个站点;(7)西北地区,包括甘肃、宁夏、陕西、青海和新疆,共11个站点,详见图2所示。

此外,为了研究人为排放的气溶胶粒子对散射辐射比例的影响,本文还使用了2010年EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research)CO₂排放数据。该数据是全球范围、分辨率为0.1°×0.1°的温室气体排放空间网格数据库,由欧盟联合研究中心(European Commission, Joint Research Centre, JRC)和荷兰环保局(Netherlands Environmental Assessment Agency)联合开发。另外,本文还使用了搭载于美国航空航天局的Terra卫星上的2000~2010年MODIS AOD数据(<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>),分辨率为1°×1°。

1.2 研究方法

云与气溶胶是影响到达地表太阳辐射的最主要因子^[24],为消除云对散射辐射的影响,首先对太阳辐射资料做了晴空处理,即日平均总云量>20%的资料设为缺测,总云量≤20%的散射辐射比例可定义为晴空散射辐射比例(sunny diffuse radiation fraction, SDRF),即:

$$\text{晴空散射辐射比例(SDRF)} = \frac{\text{晴空散射辐射}}{\text{晴空总辐射}} \quad (1)$$

同理定义晴空日照时数(sunny sunshine duration, SSD)。

气候倾向率采用式(2)进行计算。其中 y 表示样本数为 n 的某一物理量, x 表示 y 所对应的时间样本个数, x 与 y 之间的一元线性回归方程如式(2)所示:

$$y_i = a + bx_i, (i = 1, 2, \dots, n), \quad (2)$$

式中, a 为回归常数, b 为回归系数。当 $b>0$ 时说明 y 值随时间 x 增加而增加;反之, $b<0$ 时说明 y 值随时间 x 增加而减小。 b 值即可表示上升或下降的倾向度^[25],其显著性可以通过 t 检验进行判断。此外还用到气候趋势系数和相关分析等统计方法^[26]。

2 结果分析

2.1 中国地区SDRF的空间分布与变化趋势

图3(a)和(b)分别给出了我国地区1961~2010年

SDRF的空间分布及变化趋势。图中清楚表明,SDRF有明显的区域性特征。SDRF值超过40%的站点有8个,分布相对较为集中,主要在四川盆地,个别站点分布在湖南、山西和甘肃等地,其中最大值出现在成都站,SDRF值为47.6%。在35%~40%区间的站点有9个,主要分布在我国中部的山西、河南、湖北、安徽等地,另外在广西和新疆也有个别站点SDRF值在35%~40%之间。在30%~35%区间的站点共有20个,是SDRF值分布最多的区间,占总站点的42.6%,主要分布在东北、京津冀和东南沿海一带。SDRF值在30%以下的站点有10个,分布相对较为松散,主要位于云南、新疆、西藏和东北,在内蒙古和海南也有零星的站点分布,最低值出现在西藏的昌都站,SDRF值只为18.7%。太阳辐射经过大气层时,除了受到云的吸收、反射和散射作用外,还会收到水汽、大气中的CO₂和O₃等气体以及气溶胶粒子的显著影响,因此我国不同区域的SDRF值空间分布与各个地区的大气条件有密切关系。此外,观测站点所在的纬度和海拔高度等因素也会影响SDRF值的大小。

从SDRF的趋势系数(图3(b))上看,我国绝大部分地区的SDRF呈现显著的上升趋势,趋势系数为正的站点有42个,占总站点数的89.4%,其中36个站点通过了99%的信度检验,占总站点数的76.6%。趋势系数为负的站点只有5个,其中只有一个站点通过99%的信度检验。从空间分布上看,在40°N以南、100°E以东的我国中东部地区SDRF趋势系数很高,大部分超过了0.8,上升非常显著,这一区域是我国大气污染较为严重的地区,也是霾污染高发的区域^[22],SDRF变化趋势与人为活动导致的大气污染密切相关。上述结果表明,在1961~2010年我国SDRF经历了大范围的上升过程,这一结果与之前的一些研究结果吻合。晴空条件下,太阳散射辐射比例主要受大气中气溶胶粒子的影响,而近50年来我国大气污染加剧,气溶胶粒子对太阳散射辐射的增幅作用及其对植被光合作用的影响,已经越来越值得关注。

2.2 不同地区SDRF的演变趋势

计算各个地区SDRF的年际变化(表1)。各个地区SDRF在近50年来主要呈现上升的变化趋势,其上升趋势均超过95%的信度检验。对比而言,华北、华东和华中地区SDRF上升相对较为显著,其倾向率分别为2.382%/10 a, 3.390%/10 a和3.446%/10 a。华南地

图3 1961~2010年我国47个站点SDRF的空间分布(a)(%)及趋势系数(b)

Figure 3 The spatial distribution of SDRF (a) (%) and trend coefficients (b) of SDRF at 47 stations in China from 1961 to 2010

区SDRF在20世纪90年代初达到近50年来的峰值,随后略有下降趋势,其倾向率只为1.456%/10 a,这可能与近些年来华南地区空气质量好转有关^[27]。东北、

西北和西南地区倾向率均在1.3%/10 a以下,SDRF上升幅度相对较轻。7个地区倾向率从大到小的排列为:华东>华中>华北>华南>西南>东北>西北。

表 1 1961~2010 年SDRF和SSD平均值、均方差及气候倾向率^{a)}

Table 1 Average value, mean square deviation and climatic propensity of SDRF and SSD during 1961 to 2010

区域	SDRF				SSD			
	平均值(%)	均方差(%)	倾向率 (%/10 a)	倾向率线性 回归公式	平均值(h/d)	均方差(h/d)	倾向率 (h d ⁻¹ (10 a) ⁻¹)	倾向率线性 回归公式
东北	30.349	3.409	1.273	y=0.13x+27.0	9.178	0.242	-0.059	y=-0.006x+9.3
华北	32.287	4.367	2.382	y=0.24x+26.1	9.260	0.379	-0.221	y=-0.022x+9.8
华中	35.004	5.788	3.390	y=0.34x+25.2	9.702	0.464	-0.261	y=-0.026x+10.4
华东	33.699	5.768	3.446	y=0.34x+24.7	9.452	0.523	-0.305	y=-0.031x+10.2
西北	32.462	2.777	0.842	y=0.08x+30.3	9.683	0.339	-0.151	y=-0.015x+10.1
西南	23.368	3.453	1.283	y=0.13x+20.0	9.437	0.320	-0.162	y=-0.016x+9.9
华南	30.214	4.293	1.456	y=0.15x+26.4	9.494	0.404	-0.226	y=-0.023x+10.1

a) 各区域SDRF和SSD的倾向率均通过95%的信度检验

图4(a)和(b)分别给出了中国区域2010年CO₂排放空间分布和2010年遥感气溶胶光学厚度分布。EDGAR CO₂排放数据由JRC和NEAA联合研发, 主要根据不同国家的地理位置对全球区域进行划分, 通过直接或间接得到各个国家公布的CO₂排放资料, 结合全球人口分布、土地类型、道路网络等资料进行空间网格化计算得到CO₂年排放值。另外EDGAR数据是国际能源署(International Energy Agency, IEA)对外公布的全球每年CO₂排放统计公告中重要数据来源^[28]。EDGAR CO₂排放源主要包括以下4种, 即化石燃烧排放、逃逸排放、工业过程排放和生物源排放等。MODIS卫星反演的气溶胶光学厚度(AOD)是最为直接地反映大气污染物状况资料, 已经累积观测超过10年, 而且被广泛应用于大气环境领域的研究中^[29]。从图中可以发现我国地区CO₂排放和AOD值分布特点基本一致, 而且与我国各个区域的经济发展水平有很好的相关性。CO₂排放与AOD值在空间分布上均表现为东南半部多, 西北半部少的特征。特别是位于我国西部的西藏、川西高原、内蒙古西部和北部、新疆南部, 以及东北地区北部, CO₂排放明显偏弱, AOD值分布偏低。CO₂排放较为稠密的区域分布在华北、华南、华中地区、四川盆地以及华东地区, AOD值分布也较高, 这几个区域是我国主要的经济中心, 其工业发达, 大气污染物排放相对较为严重。上述结果也进一步说明, 我国大气污染加剧导致的大气气溶胶粒子浓度增大, 已经显著地影响了太阳散射辐射比例, 这一现象在污染较重的我国东南半部地区更为明显。

2.3 散射辐射比例与日照时数和AOD的对比

日照时数是太阳辐射最为直观的表现, 有研究

表明, 大气污染加剧能有效地减少日照时数, 从而造成太阳辐射的下降^[30]。图5给出了1961~2010年SDRF和SSD的年际变化对比图。可以看到1961~2010年SDRF持续上升, 并在1983和1992年达到峰值, 50年期间SDRF上升了8.53%, 上升速率为1.71%/10 a。而SSD在1961~2010年呈下降的趋势, 对应的1983和1992年SSD也出现了较低值, 50年期间SSD下降了0.903 h/d, 下降速率为0.181 h d⁻¹ (10 a)⁻¹。进一步计算SDRF和SSD的相关系数为-0.876, 通过了99.9%的信度检验。AOD资料年限较短, 但从近10年来的年际变化也可以看出, SDRF与AOD有很好的正相关关系, 即AOD偏大的年份, SDRF偏小, 反之AOD偏小的年份, SDRF偏大。总的来看, 晴空条件下散射辐射比例与日照时数和AOD有很好的一致性。污染减轻, 日照时数偏高时散射辐射比例偏小; 而污染加重, 日照时数偏低时散射辐射偏大。近50年来我国大气污染加剧, 致使日照时数出现显著下降, 同时散射辐射比例上升。由此推断在剔除云量的影响后, 大气中气溶胶粒子浓度增大是导致SDRF和SSD变化的主要原因。

为进一步分析不同地区SDRF与SSD和AOD的相关性。图6分别给出了我国7个地区SDRF与SSD距平和AOD的年际变化对比。图中表明SDRF与SSD有明显的负相关关系, 与AOD呈正相关关系。我国各个地区SDRF在近50年来主要呈现上升的变化趋势, 而对应的SSD呈相反的下降趋势, 与全国平均的变化特征一致^[31](图5)。对比而言, SDRF上升较为显著的华北、华东、华中和华南等地, SSD下降也较为明显, 其倾向率分别为-0.221, -0.261, -0.304和-0.226 h d⁻¹ (10 a)⁻¹。东北、西北和西南地区SSD下降程度一般, 倾向率分别为-0.059, -0.151和-0.162 h d⁻¹ (10 a)⁻¹。另外从

图4 中国区域2010年CO₂空间排放分布(a)(单位: 10¹⁰ t)和气溶胶光学厚度分布(b)
Figure 4 The distribution of CO₂ emissions (a) (unit: 10¹⁰ t) and AOD (b) over China in 2010

图5 1961~2010年SDRF, SSD和AOD的年际变化

Figure 5 Annual variation of SDRF, SSD and AOD during 1961–2010

SDRF和SSD相关系数上看,相关性较好的有华东、华中和华北,相关系数分别为 -0.837 , -0.82 和 -0.819 .西北、华南、东北和西南相关系数偏小一些,但也都在 -0.65 以上,分别为 -0.683 , -0.677 , -0.661 和 -0.651 . 7个地区相关系数均通过了99.9%的信度检验,其值从大到小排列为:华东>华中>华北>西北>华南>东北>西南. 结合以上分析可知,我国经济较为发达的东南半部地区气溶胶粒子排放更为严重,大气污染加剧已经对该地区的日照时数和太阳辐射散射比例造成重大影响,而对污染较轻的西北半部影响相对较轻,但其逐年加重的变化趋势也值得关注.

3 结论与讨论

在剔除了云量影响的前提下,对近50年中国地区散射辐射比例的时空分布特征及其可能原因进行探讨,得到以下主要结论:

(1) 空间分布分析表明,我国SDRF有明显的区域特征,大部分站点SDRF值在30%~40%之间,其中大值区主要分布我国中部的四川盆地,在40%以上.而在云南、新疆、西藏和东北等边远地区SDRF值偏小,在30%以下.

(2) 趋势变化分析表明,绝大部分的站点SDRF呈显著上升趋势,其中达到99%信度检验的占到

76.6%. 在 40°N 以南、 100°E 以东的我国中东部地区SDRF趋势系数大部分超过了0.8,上升非常显著,SDRF变化趋势与人为活动导致的大气污染密切相关.

(3) 区域特征分析表现为华北、华东和华中等地区SDRF上升较为显著,其倾向率分别为2.382%/10 a, 3.390%/10 a和3.446%/10 a,而华南、东北、西北和西南地区倾向率均在1.3%/10 a以下,SDRF上升幅度相对较轻,其分布特点与我国 CO_2 排放值和AOD分布有很好的一致性.

(4) 日照时数与散射辐射比例高度相关. 50年期间我国SDRF上升了8.53%, SSD下降了0.903 h/d, SDRF和SSD的相关系数为 -0.876 ,通过了99.9%的信度检验. 区域分析表明大气污染较为严重的华东、华中和华北地区,其相关系数均超过 -0.8 ,其他地区也都超过了 -0.6 . 在我国大气污染加剧的背景下,日照时数和散射辐射比例已经发生了明显的变化.

有关研究指出随着人类活动导致的气溶胶粒子增加,致使我国雾霾天气增多^[3],但是这并不是一个独立的气候事件,而相伴随的还有云量变化、日照时数下降、太阳辐射减少^[32]等,其内在机理和互反馈效应还不太清楚. 本文的研究着重于晴空条件下的散射辐射变化,其变化特征与前人略有不同^[17],但下降趋势是一致的,即我国大气污染加剧是导致散射辐射增加的主要原因之一. 另外我国南北方冬季存在供暖差

图6 我国地区不同区域SDRF与AOD(a, 2000–2010年)和SSD(b, 1961–2010年)距平的年际变化对比

Figure 6 The comparisons of annual variation between SDRF and AOD (a, 2000–2010), SDRF and SSD (b, 1961–2010) in different regions of China

异, 能源结构调整、供暖技术改进都有可能影响不同区域散射辐射的变化. 针对南北方散射辐射的年际变

化和趋势对比分析, 作者做了进一步研究, 将另文讨论, 这将对开展短期气候预测有一定的帮助.

致谢

感谢中国科学院地理科学与资源研究所田静在行文过程中给予的制图帮助以及审稿专家提出的宝贵意见. 本文图2~4, 6涉及的地图经由国家测绘地理信息局审核, 审图号: GS(2018)1921.

参考文献

- 1 Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, et al. Factors contributing to haze and fog in China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 1178–1187 [张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考. *科学通报*, 2013, 58: 1178–1187]
- 2 Ding Y H, Li Q P, Liu Y J, et al. Atmospheric aerosols, air pollution and climate change (in Chinese). *Meteorol Monthly*, 2009, 35: 3–14 [丁一汇, 李巧萍, 柳艳菊, 等. 空气污染与气候变化. *气象*, 2009, 35: 3–14]
- 3 Shi C E, Zhang H, Yang Y J, et al. The trend of persistent regional haze in Anhui Province and corresponding characteristics of aerosol pollution (in Chinese). *China Environ Sci*, 2018, 38: 1231–1242 [石春娥, 张浩, 杨元建, 等. 安徽省持续性区域霾污染的时空分布特征. *中国环境科学*, 2018, 38: 1231–1242]
- 4 Ding Y H, Liu Y J. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity. *Sci China Earth Sci*, 2014, 57: 36–46 [丁一汇, 柳艳菊. 近 50 年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44: 37–48]
- 5 Hou Q, An X Q, Wang Z F, et al. Assessment on health economic costs of particulate air pollution in Lanzhou during 2002–2009 (in Chinese). *China Environ Sci*, 2011, 31: 1398–1402 [侯青, 安兴琴, 王自发, 等. 2002–2009 年兰州 PM₁₀ 人体健康经济损失评估. *中国环境科学*, 2011, 31: 1398–1402]
- 6 Shi G Y, Wang B, Zhang H, et al. The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2008, 32: 826–840 [石广玉, 王标, 张华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应. *大气科学*, 2008, 32: 826–840]
- 7 Fu C B, Dan L, Chen H, et al. The spatiotemporal characteristics of light rain days and low cloud cover under heavy pollution in South China (in Chinese). *J Trop Meteorol*, 2014, 30: 1098–1106 [符传博, 丹利, 陈红, 等. 重污染下华南地区小雨和低云量的时空变化趋势特征. *热带气象学报*, 2014, 30: 1098–1106]
- 8 Wu G X, Li Z Q, Fu C B, et al. Advances in studying interactions between aerosols and monsoon in China (in Chinese). *Sci Sin Terr*, 2015, 11: 1609–1627 [吴国雄, 李占清, 符淦斌, 等. 气溶胶与东亚季风相互影响的研究进展. *中国科学: 地球科学*, 2015, 11: 1609–1627]
- 9 Yang S, Shi G Y, Wang B, et al. Trends in Surface Solar Radiation (SSR) and the effect of clouds on SSR during 1961–2009 in China (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2013, 37: 963–970 [杨溯, 石广玉, 王标, 等. 1961–2009 年我国地面太阳辐射变化特征及云对其影响的研究. *大气科学*, 2013, 37: 963–970]
- 10 Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China. *Atmos Environ*, 2008, 42: 1–42
- 11 Energy Statistics Division, National Bureau of Statistics. *China Energy Statistical Yearbook 2001*. Beijing: China Statistics Press, 2001 [国家统计局能源统计司. *中国能源统计年鉴 2001*. 北京: 中国统计出版社, 2001]
- 12 Energy Statistics Division, National Bureau of Statistics. *China Energy Statistical Yearbook 2011*. Beijing: China Statistics Press, 2011 [国家统计局能源统计司. *中国能源统计年鉴 2011*. 北京: 中国统计出版社, 2011]
- 13 Wu D, Wu X J, Li F, et al. Temporal and spatial variation of haze during 1951–2005 in Chinese mainland (in Chinese). *Chin Acta Meteorol Sin*, 2010, 68: 680–688 [吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 1951–2005 年中国大陆霾的时空变化. *气象学报*, 2010, 68: 680–688]
- 14 Yin Z C, Wang H J, Yuan D M. Interdecadal increase of haze in winter over North China and the Huang-Huai Area and the weakening of the East Asia Winter Monsoon (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 1395–1400 [尹志聪, 王会军, 袁东敏. 华北黄淮冬季霾年代际增多与东亚冬季风的减弱. *科学通报*, 2015, 60: 1395–1400]
- 15 Xu X D, Wang Y J, Zhao T L, et al. “Harbor” effect of large topography on haze distribution in eastern China and its climate modulation on decadal variations in haze China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 1132–1143 [徐祥德, 王寅钧, 赵天良, 等. 中国大地形东侧霾空间分布“避风港”效应及其“气候调节”影响下的年代际变异. *科学通报*, 2015, 60: 1132–1143]
- 16 Liu X W, Zhang X Y, Zhang X Y. A review of the research on crop responses to the increase in aerial aerosol (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2016, 36: 2084–2090 [刘秀位, 张小雨, 张喜英. 大气气溶胶增加对作物的影响研究进展. *生态学报*, 2016, 36: 2084–2090]
- 17 Ma J Y, Liang H, Luo Y. Variation trend of direct and diffuse radiation in China over recent 50 years (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2011, 60: 069601-1–069601-14 [马金玉, 梁宏, 罗勇. 中国近 50 年太阳直接辐射和散射辐射变化趋势特征. *物理学报*, 2011, 60: 069601-1–069601-14]
- 18 Qi Y, Fang S B, Zhou W Z. Variation and spatial distribution of surface solar radiation in China over recent 50 years (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2014, 34: 7444–7453 [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. *生态学报*, 2014, 34: 7444–7453]
- 19 Sun J, Zheng Y F, Wu R J, et al. Combined effects of elevated O₃ concentration and reduced solar irradiance on photosynthetic activity and energy dissipation of winter wheat (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2014, 34: 2548–2558 [孙健, 郑有飞, 吴荣军, 等. 高浓度 O₃ 及太阳辐射减弱对冬小麦 PSII 光合活性及光能耗散的影响. *生态学报*, 2014, 34: 2548–2558]

- 20 Sun J S, Zhou G S. Review of advances in measurements and effects of diffuse radiation on terrestrial ecosystem productivity (in Chinese). *Chin J Plant Ecol*, 2010, 34: 452–461 [孙敬松, 周广胜. 散射辐射测量及其对陆地生态系统生产力影响的研究进展. *植物生态学报*, 2010, 34: 452–461]
- 21 Roderick M L, Farquhar G D, Berry S L, et al. On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation. *Oecologia*, 2001, 129: 21–30
- 22 China Meteorological Administration. *Surface Weather Observation Rules*. Beijing: Meteorological Press, 2003 [中国气象局. 地面气象观测规. 北京: 气象出版社, 2003]
- 23 National Meteorological Center of China Meteorological Administration. *Manual of China's Meteorological Geographic Divisions*. Beijing: China Meteorological Press, 2006 [中国气象局国家气象中心. 中国气象地理区划手册. 北京: 气象出版社, 2006]
- 24 Xia X A. MODIS aerosol optical depth over the world land is significantly higher (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2006, 51: 2297–2303 [夏祥鳌. 全球陆地上空 MODIS 气溶胶光学厚度显著偏高. *科学通报*, 2006, 51: 2297–2303]
- 25 Fu C B, Tang J X, Dan L, et al. Temporal and spatial variation of haze pollution over China from 1960 to 2013 (in Chinese). *Environ Sci*, 2016, 37: 3237–3248 [符传博, 唐家翔, 丹利, 等. 1960~2013 年我国霾污染的时空变化. *环境科学*, 2016, 37: 3237–3248]
- 26 Wei F Y. *Climate Statistical Diagnosing and Prediction* (in Chinese). 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 2007 [魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 第 2 版. 北京: 气象出版社, 2007]
- 27 Xiao Z Y, Jiang H, Cheng M M. Characteristics of atmospheric NO₂ over China using OMI remote sensing data (in Chinese). *Acta Sci Circum*, 2011, 31: 2080–2090 [肖钟湧, 江洪, 程苗苗. 利用 OMI 遥感数据研究中国区域大气 NO₂. *环境科学学报*, 2011, 31: 2080–2090]
- 28 Cai B F. Spatial characteristics of carbon dioxide emissions in China's cities and synergistic analysis with sulfur dioxide (in Chinese). *Energy China*, 2012, 34: 33–37 [蔡博峰. 中国城市二氧化碳排放空间特征及与二氧化硫协同治理分析. *中国能源*, 2012, 34: 33–37]
- 29 Zhou C Y, Liu Q H, Tang Y, et al. Comparison between MODIS aerosol product C004 and C005 and evaluation of their applicability in the north of China (in Chinese). *J Remote Sens*, 2009, 13: 863–879 [周春艳, 柳钦火, 唐勇, 等. MODIS 气溶胶 C004、C005 产品的对比分析及其在中国北方地区的适用性评价. *遥感学报*, 2009, 13: 863–879]
- 30 Wang Y J, Huang Y, Zhang W. Changes in surface solar radiation in main land China over the period from 1961 to 2003 (in Chinese). *Clim Environ Res*, 2009, 14: 405–413 [王雅婕, 黄耀, 张稳. 1961~2003 年中国大陆地表太阳总辐射变化趋势. *气候与环境研究*, 2009, 14: 405–413]
- 31 Fu C B, Dan L, Chen Y L, et al. Trends of the sunshine duration and diffuse radiation percentage on sunny days in urban agglomerations of China during 1960–2005. *J Environ Sci*, 2015, 34: 206–211
- 32 Ma J Y, Luo Y, Shen Y B, et al. Regional long-term trend of ground solar radiation in China over the past 50 years (in Chinese). *Sci Sin Terr*, 2012, 42: 1597–1608 [马金玉, 罗勇, 申彦波, 等. 近 50 年中国太阳总辐射长期变化趋势. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42: 1597–1608]

Summary for “大气污染加剧对中国区域散射辐射比例的影响”

Influence of intensified air pollution on the sunny diffuse radiation fraction in China

Chuanbo Fu^{1,2,3} & Li Dan^{1*}

¹ Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

² Hainan Meteorological Observatory, Haikou 570203, China;

³ Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203, China

* Corresponding author, E-mail: danli@tea.ac.cn

In recent years, air pollution has been getting increasingly serious in China—A cause of great concern for the government and general public. Research on air pollution has focused mainly on the environmental and climatic effects, such as the increasing number of haze days, reduction in visibility, human health impacts, suppression of global warming, extension of cloud life, restriction of light precipitation, and weakening of the East Asian monsoon. In fact, the exacerbation of air pollution might also affect the radiation balance of the surface-atmosphere system, with subsequent direct impacts in areas of socioeconomic concern like agricultural production. However, domestically, research in this area is currently lacking. Accordingly, the present study, based mainly on the sunny diffuse radiation fraction (SDRF—defined as the diffuse solar radiation divided by the total solar radiation in conditions of sunny weather) at 47 stations over China, combined with CO₂ emissions data, aerosol optical depth (AOD) and sunshine duration data, analyzes the spatiotemporal variation of SDRF in China and the possible determining factors. The results provide a reference and basis for the accurate assessment of terrestrial ecosystem productivity and its carbon budget. Analysis of the SDRF distribution reveals clear regional characteristics in China, with relatively larger values distributed mainly in the Sichuan Basin and Central China. However, the values of SDRF in Yunnan, Xinjiang, Tibet and Northeast China are small. The majority of stations show an obvious upward trend in SDRF, especially in Eastern China, where the upward trend is more significant than in other regions. Therefore, after removal of the effects of cloud, aerosols should be considered a factor with important influence on the SDRF during the past 50 years. Analysis of the characteristics in each region shows that the increase in SDRF is more obvious in North China, East China and Central China than in South China, Northeast China, Northwest China and Southwest China. This indicates that, in regions where air pollution is more serious, the decline in SDRF is more significant. Sunshine duration in sunny weather is highly correlated with SDRF, with the correlation coefficient in East China, Central China and North China often exceeding -0.8 (statistically significant at the 99.9% confidence level). This result implies that an increase in the concentration of aerosol particles in the air has a significant impact on sunshine duration and SDRF over China.

diffuse radiation fraction, sunshine duration, air pollution, aerosol optical depth (AOD), aerosol particle

doi: 10.1360/N972018-00177