

DOI: 10.5846/stxb202005281383

高原, 律江, 李春征, 刘京宇, 张志强. 大气气溶胶对北京杨树人工林生态系统生产力的影响. 生态学报, 2022, 42(12): 4892-4902.

Gao Y, Lü J, Li C Z, Liu J Y, Zhang Z Q. Effects of atmospheric aerosols on the ecosystem productivity of a poplar plantation in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12): 4892-4902.

大气气溶胶对北京杨树人工林生态系统生产力的影响

高 源^{1,2}, 律 江², 李春征², 刘京宇², 张志强^{1,*}

1 北京林业大学水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083

2 北京市共青林场, 北京 101300

摘要: 大气气溶胶可以影响到达地面的太阳辐射, 进而影响植物光合作用和生态系统生产力, 乃至区域上的碳收支。为探究北京地区气溶胶对杨树人工林生态系统生产力的影响, 利用 2006—2009 年北京大气气溶胶数据结合北京大兴杨树人工林涡度相关系统监测的辐射、碳通量等数据, 分析了气溶胶对散射辐射、光能利用效率 (LUE)、生态系统初级生产力 (GPP) 的影响, 并利用通径分析方法探究了气溶胶和生态环境因子对 GPP 的直接和间接影响。结果表明, 北京市气溶胶光学厚度 (AOD) 具有明显的季节变化特征: 春、夏两季大于秋、冬季, 夏季气溶胶光化学厚度最大。大气气溶胶显著影响了地表辐射组分以及温度、湿度环境因子, 随着 AOD 从 0 增大到 3, 总辐射减小了 43.63%, 散射辐射增加 132.26%, 散射辐射比例增大了 2.55 倍, 而相对湿度增大 48.52%, 日温差增大 3℃ 左右。当生态系统受水分胁迫时, 气溶胶对生态系统生产力无显著影响, 当生态系统处于非水分胁迫时, 杨树人工林生态系统光能利用效率和生产力随着气溶胶浓度增大先增大后减小, 当 AOD 为 1.0—1.6 时, GPP 维持在较高的水平, 当 AOD>2.5 时, GPP 显著减小且小于背景气溶胶 (AOD<0.4) 的 GPP。通径分析表明, 水分胁迫条件下, 气溶胶对杨树人工林生态系统生产力的间接影响很小; 非水分条件下, 散射辐射对生态系统生产力影响最大, 气溶胶可以通过增大散射光施肥效应来增大生态系统生产力。不同的水分条件下气溶胶对杨树人工林生态系统的影响不同, 非水分胁迫条件下适宜的气溶胶增大杨树人工林生态系统的生产力, 严重的气溶胶污染 (AOD>1.5) 则导致杨树生态系统生产力下降。

关键词: 气溶胶; 杨树人工林; 生态系统生产力; 散射辐射; 通径分析

Effects of atmospheric aerosols on the ecosystem productivity of a poplar plantation in Beijing

GAO Yuan^{1,2}, LÜ Jiang², LI Chunzheng², LIU Jingyu², ZHANG Zhiqiang^{1,*}

1 College of Soil and Water Conservation, Beijing Forest University, Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of Education, Beijing 100083, China

2 Gongqing Forest Farm, Beijing 101300, China

Abstract: Atmospheric aerosols can affect the solar radiation reaching the ground, which in turn affects plant photosynthesis and ecosystem productivity, and even regional carbon balance. With the further development of global change, atmospheric aerosols pollution and drought stress coexist in some regions, and the high frequency and long duration of drought stress may lead to the conversion of ecosystems from carbon sinks to carbon sources. However, little is known about whether atmospheric aerosols can increase ecosystem productivity when the ecosystem are under water stress. Therefore, in this study we investigated the effects of atmospheric aerosols on diffuse radiation, light utilization efficiency (LUE) and the gross primary productivity (GPP) of poplar plantation under different water conditions in Beijing. The direct and indirect effects of atmospheric aerosols and ecological factors on GPP were explored by the path analysis method, which used the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31872711)

收稿日期: 2020-05-28; 网络出版日期: 2022-02-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhqzhang@bjfu.edu.cn

atmospheric aerosols data from 2006 to 2009 and combined with the radiation and carbon flux data monitored by Eddy covariance system in Daxing poplar in Beijing. The results showed that Beijing's atmospheric optical depth (AOD) had obviously seasonal change characteristics. The AOD was higher in spring and summer than that in autumn and winter, and the AOD was the largest in summer. The atmospheric aerosols had significant effects on radiation and micrometeorological factors. With the increase of AOD from 0 to 3, photosynthetically active radiation (PAR) decreased by 43.63%, diffuse radiation increased by 170%, and the fraction of diffuse radiation increased by 2.55 times, while the relative humidity increased by 48.52% and daily temperature difference increased about 3 °C. When the ecosystem was under moisture stress, the atmospheric aerosols had no effect on the GPP. When the ecosystem was under non-moisture stress, the LUE and GPP of poplar plantation ecosystem increased first and then decreased with the increase of aerosol concentration. When the AOD was 1.0—1.6, the GPP was maintained at a high level. When the AOD>2.5, the GPP significantly decreased and less than the GPP of the background atmospheric aerosol (AOD<0.4). The path analysis showed that the indirect effect of atmospheric aerosols on ecosystem productivity of poplar plantation was not significant under water stress, the diffuse radiation had the greatest influence on the GPP, and the atmospheric aerosols could increase the ecosystem productivity by increasing diffuse fertilization effect under non-moisture stress. Overall, the atmospheric aerosols had different effects on poplar plantation ecosystem under different water conditions. The suitable atmospheric aerosols could increase the productivity of poplar plantation ecosystems, while severe atmospheric aerosols pollution (AOD>1.5) led to a decrease in poplar ecosystem productivity under non-water stress conditions.

Key Words: atmospheric aerosol; poplar plantation; gross primary productivity; diffuse radiation; path analysis

自 20 世纪 50 年代起,全球绝大部分地区经历了太阳辐射先减小后增加的过程^[1]。研究表明大气气溶胶粒子可以吸收、散射太阳辐射,大气气溶胶是造成太阳辐射变化的最重要环境因子^[2]。大气气溶胶不仅导致太阳总辐射和直接辐射的减小,还导致散射辐射和散射比例的增大(气溶胶辐射效应)^[3]。散射辐射比直接辐射的冠层穿透力更强,植被冠层对散射辐射的光能利用效率更高^[4-5],进而散射辐射对陆地森林生态系统生产力有显著影响^[6-7]。因此,气溶胶辐射效应会对陆地生态系统生产力和碳收支有不可忽视的影响^[8]。

20 世纪 90 年代早期,全球大气 CO₂ 浓度出现了异常下降现象^[9],研究发现 1991 年皮纳图博火山大喷发形成的火山灰气溶胶导致了全球陆地生态系统碳吸收持续增大了 3 年^[6]。随着气溶胶生态学效应研究工作的开展,多个模型模拟结果表明:在区域尺度上气溶胶导致了陆地生态系统生产力增大^[10-11],但在全球尺度上气溶胶却对陆地生态系统生产力的影响并不显著^[8]。在生态系统观测尺度,低浓度的气溶胶就可以导致草地生态系统生产力下降^[12],轻度气溶胶污染下森林生态系统生产力却达到最大值^[13-14],而农作物产量对气溶胶的响应与种植密度、作物种类有关^[15-16]。这些研究表明,气溶胶对陆地生态系统生产力的影响受气溶胶浓度、植被类型、叶面积指数等因素影响。近 10 年来,华北地区大气气溶胶污染严重,灰霾事件频发^[17]。据估算,到 2050 年华北地区灰霾事件发生频率会增大 50%且持续时间增加 80%^[18]。因此华北地区的杨树人工林可能频繁处于气溶胶污染中,并且未来的气溶胶威胁更加严峻。但是,目前国内外对杨树人工林生态系统碳循环的研究主要集中于生态系统生产力^[19]、光能利用效率^[20]、生态系统呼吸^[21]等方面,气溶胶对其生态系统生产力影响尚未有报道。因此,气溶胶对杨树人工林生态系统生产力的影响的研究就十分迫切。

水分是植物生长发育的关键因子,土壤水分也是干旱、半干旱地区陆地生态系统生产力的主要限制因子^[22]。随着全球气候变化进程的加快,中国华北地区干旱事件发生的频率不断增大^[23],并且模型研究表明,21 世纪华北地区干旱发生的频率和强度继续呈增大趋势^[24]。因此,未来干旱可能对华北地区生态系统的影响更大。华北地区的杨树人工林不仅面临着气溶胶污染的影响,还面临着干旱胁迫的影响。在轻度气溶胶污染下,气溶胶散射辐射施肥效应可能导致杨树人工林生态系统生产力的增大^[13-14];在重度气溶胶污染下,当气溶胶散射辐射施肥效应小于太阳总辐射减小带来的削弱作用时,生态系统生产力会下降^[15-16];但当生态系

统受到干旱胁迫时,生态系统的光能利用效率和生产力都会显著下降^[22]。当生态系统同时受到干旱胁迫与气溶胶污染时,气溶胶散射施肥效应的促进作用大于干旱胁迫对生产力的抑制作用,生态系统生产力才可能增大;否则,生态系统生产力将会下降。

本文运用4年(2006—2009年)涡度相关系统的观测数据结合气溶胶数据,选取6—9月份的生态系统生产力、微气象、气溶胶数据来探究不同水分条件下气溶胶对杨树人工林生态系统生产力的影响。我们假设土壤水分胁迫条件下,气溶胶辐射效应不能增大杨树人工林生态系统生产力。本研究的主要目的:(1)探究气溶胶对杨树人工林生态系统生产力和光能利用效率的影响;(2)探究不同水分条件下气溶胶对杨树人工林生态系统的影响差异,以期揭示不同水分条件下气溶胶对杨树人工林生态系统生产力的影响机理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于北京大兴区榆垓镇大兴林场(40°06′16″N, 116°43′02″E, 29 m a.s.l)。该区域为永定河冲积及洪积所形成,地势平坦。该区属于暖温带亚湿润气候区,近50年的平均气温为12.0℃,平均无霜期为195 d。近20年的年平均降水为625 mm,最少年降水量为242 mm,最大年降水量1058 mm,多年平均水面蒸发量高于同期降水量。太阳辐射有明显的年季变化,表现为夏季高、冬季低,年日照时间2750 h;多年平均风速为2.7 m/s,夏季主要为东南风,冬季为西北风。试验地为杨树人工林(欧美杨, *Populus euramericana* cv. 74/76),主要为2002—2003年营造,林分平均种植密度为3 m×2 m。截止到2009年,林木的平均胸径为(14.5±1.6) cm,树高为(16.2±1.6) m,2006—2009年杨树人工林最大叶面积指数为3.3 m²/m²。该试验地为典型的杨树人工林,林下灌草稀疏,多为一年生草本植物,主要有紫苜蓿(*Medicago sativa*)、尖头叶藜(*Chenopodium acuminatum*)及黄花蒿(*Artemisia annua*)等。

1.2 涡度相关系统

本实验利用涡度相关观测系统连续动态监测大兴杨树人工林生态系统与大气之间的碳水交换。在实验站点中心架设一座高37m的通量观测塔,开路式红外气体分析仪(Li-7500; Li-Cor, Inc., Lincoln, NE, USA)、三维超声风速仪(CSAT-3, Campbell Scientific, Inc., CSI, UT, USA)、净辐射仪(CNR-1; Kipp and Zonen, Delft, Netherlands)、光量子探头(LI-190SB; Li-Cor, Inc.)等通量观测仪器在2006—2009年分别安装在16、18、20m高度。在通量塔21.0、22.5 m高度处分别安装有气压计(CS105, CS)和翻斗式自动雨量计(TE525-L, Texas Electronics, USA)以及分别在5、10、15、20 m高度上安装了4层空气温湿度传感器(HMP45C; Vaisala, Helsinki, Finland)来测定杨树人工林生态系统不同高度的温、湿度。通量塔下土壤温度传感器(TCAV107, CSI)和土壤热通量板(HFT3, Seattle, WA)均分别置于地表以下5、10、20 cm处,而土壤水分观测仪(TDR, CS616, CS, USA)分别位于地表以下5、20 cm处。通量塔上的数据使用数据采集器(CR3000, Campbell Scientific Ltd, USA)进行采集,通量塔下的常规数据使用数据采集器(CR23X, CS, USA)进行采集。

1.3 通量数据处理及计算方法

本次研究使用2006—2009年的通量数据。该数据经过严格的数据质量控制,依次经过平面坐标拟合、WPL校正以及大气稳定度分析、临界风速 μ^* 确定、异常点剔除、数据插补以及质量控制与分析等步骤^[25—27]。缺失数据根据时长进行数据插补:对小于2 h的数据缺口采用线性内插法^[28],对2 h到7 d的数据缺口采用7 d尺度的平均昼夜变化方法进行插补,对大于7 d的数据缺口,通过区分NEE(net ecosystem exchange)和RE(ecosystem respiration),采用非线性回归方法插补^[29—30]。

$$NEE = RE + \frac{\alpha \times PAR \times A_{\max}}{\alpha \times PAR + A_{\max}} \quad (1)$$

$$RE = R_{10} e^{\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T_a} \right)} \quad (2)$$

$$R_{10} = a_0 + a_1 \times \text{VWC} + a_2 \times \text{VWC}^2 \quad (3)$$

$$GPP = NEE - RE \quad (4)$$

其中, NEE 为净生态系统碳交换 ($\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), R_{10} 为土壤温度为 10°C 的生态系统呼吸 ($\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); E_a 为活化能 (KJ/mol); R 是气体常数 ($8.3143 \text{ KJ}/(\text{mol/K})$); T_{ref} 是参考土壤温度, T_a 为土壤 5 cm 处温度 ($^\circ\text{C}$); α 为生态系统表观光合量子效率 ($\mu\text{molCO}_2/\mu\text{mol photon}$), PAR 为光合有效辐射 ($\mu\text{mol photon m}^{-2} \text{s}^{-1}$), $A_{\max}$ 为最大净光合生产力 ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$), a_0 、 a_1 、 a_2 分别为 R_{10} 对土壤体积含水量 (soil volume moisture content, $\text{VWC}, \%$) 的二次方程的系数, GPP 为生态系统生产力 ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。涡度相关技术测得的 CO_2 通量即为净生态系统碳交换量 (NEE), 用日间的净生态系统碳交换量减去生态系统呼吸 (RE), 得到生态系统的光合生产力 (GPP)。2006—2009 年日总量能量通量的 4 年平均能量平衡比为 0.87, 与全球 173 个站点能量平衡比的均值一致 (0.84) [19–20], 数据质量可靠。

1.4 气溶胶数据

本研究采用的气溶胶数据来源于气溶胶数据共享网 (AERONET: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) 的北京站。该站点位于北京市大气物理所内, 北京站安装了 CE318 型太阳-天空扫描光谱辐射计 (CE318, Cimel, France), 该仪器可以获取 340、380、440、500、675、870、940、1020 nm 波长的太阳直接辐射数据; 采用统一的反演算法, 可计算气溶胶光学厚度 (AOD)、Angstrom 波长指数、粒子气溶胶谱分布等气溶胶各种光化学参数 [31]。AERONET 提供 3 个质量等级的产品, 其中本文使用的 Level 2.0 数据是经过过去云检验以及人工检查的保证质量的数据 [32]。北京地区雾霾发生前 AOD 稳定在 0.40 左右 (背景气溶胶), 重度雾霾出现时 AOD 急剧上升到 1.50 以上 (严重污染) [32]。选择每日 10:00—14:00 的气溶胶均值作为气溶胶日均值, 其原因为: 这一时段太阳天顶角小, 观测到的气溶胶数据能够较好的反应大气特性, 且接近气溶胶日均值水平 [33]。

1.5 生物物理参数

相对土壤含水量是衡量生态系统土壤中可利用水分的良好指标, 其计算公式如下:

$$REW = \frac{VWC - VWC_{\min}}{VWC_{\max} - VWC_{\min}} \quad (5)$$

式中 VWC 为 20 cm 土壤体积含水量 ($\%$), $VWC_{\min}$ 、 $VWC_{\max}$ 分别为研究中土壤的凋萎湿度和田间持水量 ($\%$)。当 $REW < 0.4$ 时, 生态系统受到土壤水分胁迫的影响 [34]。

散射辐射计算采用下式计算 [35–36]:

$$k_t = \frac{S_g}{S_0} \quad (6)$$

$$\frac{S_f}{S_g} = 1 \quad \text{当 } k_t < 0.07 \quad (7)$$

$$\frac{S_f}{S_g} = 1 - 2.3 (k_t - 0.07)^2 \quad \text{当 } 0.07 \leq k_t < 0.35 \quad (8)$$

$$\frac{S_f}{S_g} = 1.33 - 1.46 \times k_t \quad \text{当 } 0.35 \leq k_t < 0.75 \quad (9)$$

$$\frac{S_f}{S_g} = 0.23 \quad \text{当 } 0.75 \leq k_t \quad (10)$$

$$S_r = S_g - S_f \quad (11)$$

式中, k_t 为晴空指数, S_g 为太阳辐射 (W/m^2), S_0 为天文辐射 (W/m^2), S_f 为散射辐射 (W/m^2), S_r 为直接辐射 (W/m^2)。

光能利用效率计算公式如下:

$$LUE = \frac{GPP}{PAR} \quad (12)$$

式中, GPP 是生态系统生产力 ($\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$), PAR 是光合有效辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), LUE 是光能利用效率 (gC/MJ)。

1.6 数据处理

本研究选择碳通量数据、气溶胶同时可用的 6—9 月的日尺度数据进行分析: 首先去掉无气溶胶观测的通量数据, 然后依据时间序列将气溶胶数据和通量数据匹配成气溶胶-碳通量日时间序列 (197 个观测值), 然后进行气溶胶-碳通量日时间序列数据的统计分析。

通径分析方法是一种多元回归分析方法, 可以用来分析各个环境变量之间的直接、间接影响程度, 该方法已经被广泛应用陆地生态系统碳通量研究领域^[37]。本研究以 AOD、辐射、生态系统生产力等参数构建通径分析模型, 探究气溶胶对生态系统生产力的直接、间接影响。本研究使用 AMOS 24.0 软件进行通径分析, 模型选用多个拟合度指数如: 卡方统计量 (χ^2)、均方根误差 (MRSE)、适配度指数 (GFI) 进行模型拟合度评价^[38]。所有的数据拟合绘图均使用 SigmaPlot 14.0 完成。

2 结果与讨论

2.1 北京市气溶胶特征

北京市气溶胶光学厚度 (AOD) 有明显的季节变化特征, 表现为春、夏季大于秋、冬季 (图 1)。2006—2009 年, 北京市 6—9 月仅有 35.39% 气溶胶为背景气溶胶 ($\text{AOD} < 0.40$), 低于全年的 41.68%; 但是有 17.70% 的气溶胶为重度污染 ($\text{AOD} > 1.50$), 比全年平均 AOD 高 12.16%。

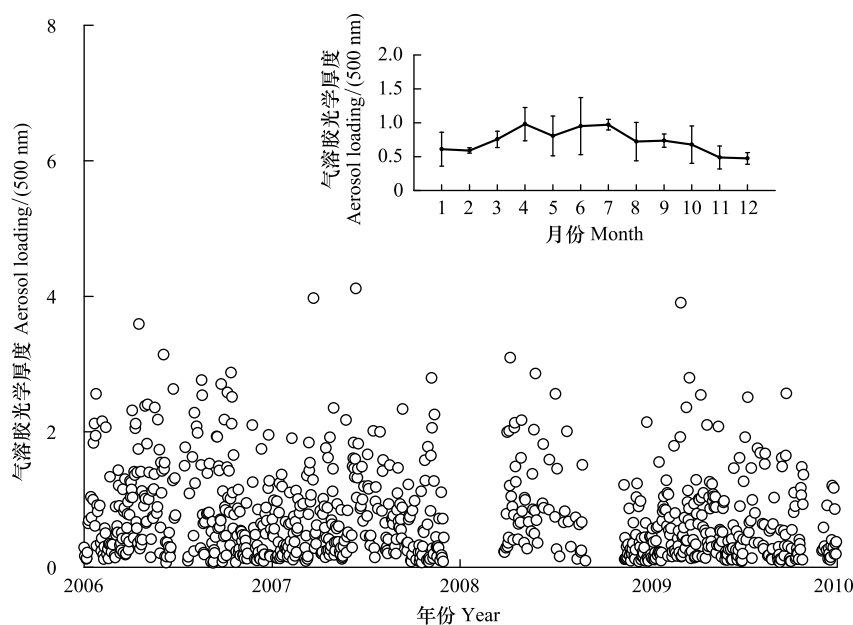


图 1 北京市 2006—2009 年气溶胶光学厚度 (AOD 500 nm) 特征, 图中小图为气溶胶月均值特征

Fig.1 Characteristics of aerosol optical depth (AOD 500 nm) in Beijing from 2006 to 2009, the panel shows the monthly average AOD (500 nm)

2.2 气溶胶对辐射及温湿度的影响

总辐射、直接辐射随 AOD 的变化呈线性变化 (图 2)。当 AOD 从 0 增大到 3, 总辐射减小了 43.63%。散射辐射随 AOD 的变化呈二次抛物线变化, 随着 AOD 从 0 增大到 1.78, 散射辐射一直在增大 (增幅为 132.26%), 随后 AOD 继续增大, 散射辐射开始减小, 当 AOD 增大到 3 时, 散射辐射仍然增大 3.48 MJ/m^2 或者 70.16%。散射辐射比例 (F_{dif}) 也随 AOD 的增大呈线性增大, 当 AOD 从 0 增大到 1.8, F_{dif} 增大 2.55 倍。

日最低温度、日温差、相对湿度随 AOD 的变化呈线性变化 (图 3)。当 AOD 从 0 增大到 3, 日最低温度增

大了 16.21% (3.12℃), 日温差减小了 26.69% (3.24℃), 相对湿度增大了 48.52%, 日最高气温及日平均气温对 AOD 变化不显著。

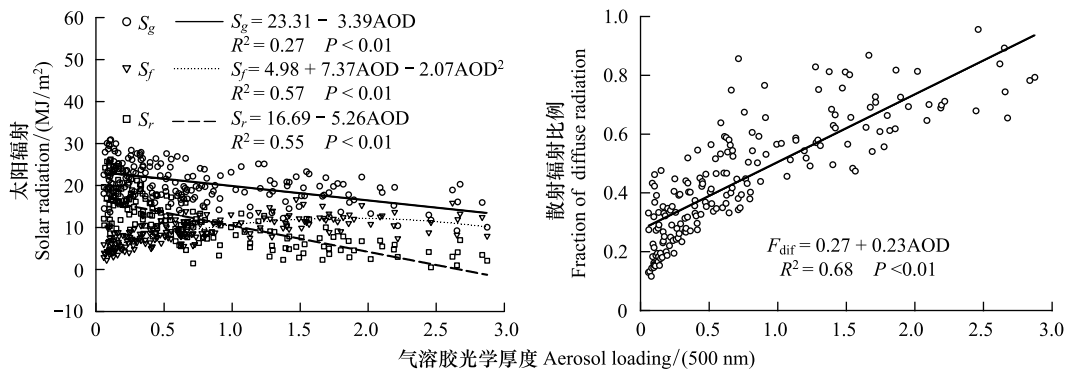


图2 北京市 2006—2009 年 6—9 月份气溶胶光学厚度对太阳辐射以及散射比例 (F_{dif}) 的影响

Fig.2 The relationship between AOD and radiation and F_{dif} in Beijing from June to September during 2006—2009

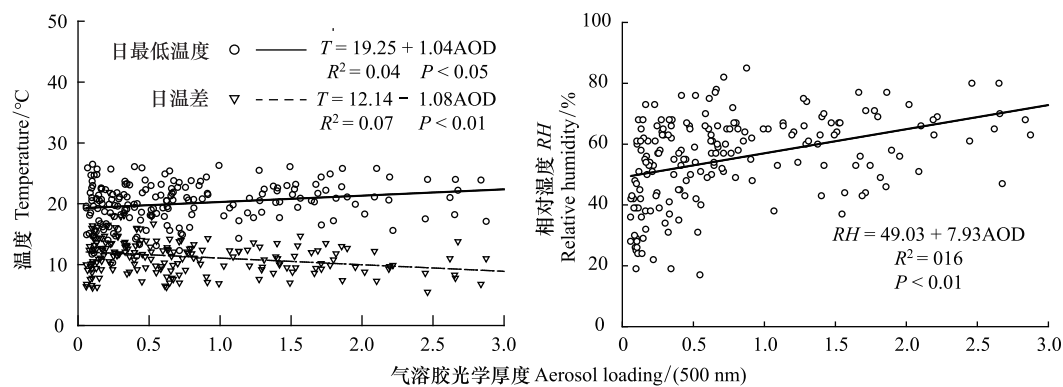


图3 北京市 2006—2009 年 6—9 月份大气气溶胶光学厚度对温度和相对湿度的影响

Fig.3 The relationship between AOD and temperature and relative humidity (RH) in Beijing from June to September during 2006—2009

大气气溶胶通过吸收、散射以及影响云的辐射特征等多种方式影响地表辐射量及辐射组分^[3,39]。本研究中,随着 AOD 的增大,北京市 6—9 月份总辐射减小了 43.63%,散射辐射增大 132.26%,这与 Oliveira 等^[14]在巴西亚马逊雨林的研究结果相似。在晴朗无云无污染的天气条件下,到达地面的散射辐射比例约为 0.15^[40],随着气溶胶浓度增大,更多直接辐射被颗粒物转变为散射辐射。本研究中,当 AOD 为 3 时, F_{dif} 达到了 80%。当 AOD 为 2.5 时,西伯利亚泰加地区散射辐射比例约为 80%^[33],这与本文研究结果相似。气溶胶的辐射效应不仅会削弱达到地面的辐射量,还有可能影响地面温度及湿度^[39]。大气气溶胶对地表温度的影响总体上表现为“冷却效应”,但是对夜间温度却有可能是“增温效应”^[41]。本研究中,随 AOD 的增大,日最低气温增大,日温差减小,该研究与东亚气溶胶地表温度对大气棕色云响应的规律一致^[41]。由此可见,气溶胶的辐射效应导致北京地区地表辐射量、辐射组分发生变化,也引起相对湿度及大气温度的变化。

2.3 气溶胶对光能利用效率及生态系统生产力的影响

不同的水分条件下光能利用效率随 AOD 的变化呈现不同的变化规律(图 4)。生态系统受到土壤水分胁迫时,光能利用效率随 AOD 的增加线性增大,随着 AOD 从 0 增大到 2.5, LUE 增大 42.86%。生态系统处于非土壤水分胁迫时,光能利用效率随 AOD 的增大先增大后减小,当 AOD 为 1.3 时,光能利用效率有最大值 0.48gC/MJ(增大 54.52%),随着 AOD 的持续增加光能利用效率开始减小,当 AOD 大于 2.7 时,非水分胁迫的光能利用效率小于土壤水分胁迫的光能利用效率。

不同的水分条件下光能利用效率均随散射辐射比例增大线性增大(图5)。生态系统受到土壤水分胁迫时,其光能利用效率小于非水分胁迫下的光能利用效率,随着散射辐射比例从0.2增大到0.9,受水分胁迫的光能利用效率增大53.85%,而非水分胁迫的光能利用效率增大85.20%。

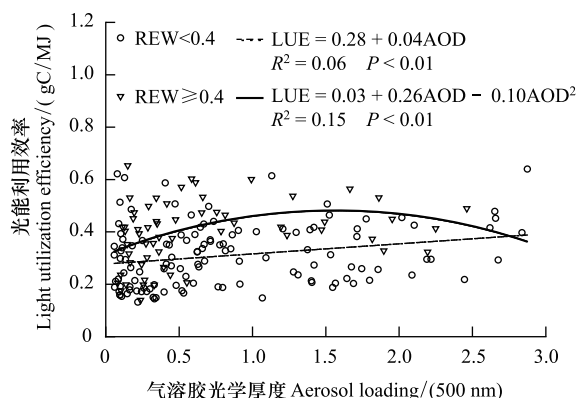


图4 北京市2006—2009年6—9月份气溶胶光学厚度对光能利用效应的影响

Fig.4 The relationship between AOD and light utilization efficiency (LUE) from June to September during 2006—2009 in Beijing

当生态系统受到水分胁迫时,GPP对AOD不敏感,而非水分胁迫时,GPP随AOD变化呈二次抛物线变化(图6)。生态系统处于非土壤水分胁迫时,当AOD为1.0—1.5时,GPP维持在较高的水平,当AOD为1.22时,GPP有最大值,当出现严重气溶胶污染时(AOD > 1.5),GPP开始减小,当AOD > 2.5时,GPP小于背景气溶胶的GPP。

散射辐射对冠层光能利用效率的促进作用被称为散射光施肥效应^[42]。气溶胶粒子作用下散射辐射及散射辐射比例增大,散射光的施肥效应增强,进而LUE和GPP的增大^[16]。研究表明,散射光的光能利用效率是直射光的2倍以上^[43],更多的散射光不仅可以穿透冠层增大底层叶片的光合作用,还因其蓝光的增大而缓解上层叶片光饱和^[16]。在本研究中,随着散射辐射比例的增大,杨树人工林的LUE线性增大,这一结论与众多生态学者研究一致^[44–45]。本研究中,随AOD的增大,非水分胁迫条件下的杨树人工林GPP呈先增大后减小趋势。

在澳大利亚西北部稀疏森林生物质燃烧气溶胶(AOD ≤ 0.4)对GPP无显著影响^[46],在亚马逊热带雨林地区,GPP随AOD先增大后减小,当处于严重气溶胶污染(AOD > 2.7)时,森林生态系统生产力显著下降^[14]。模型模拟结果也表明气溶胶可以对生态系统产生不同的影响,不同生态系统的气溶胶阈值也不同(生态系统生产力最大或者为0时的气溶胶浓度值),这主要受气溶胶浓度、植被类型、叶面积指数、云量等要素的影响^[47],即取决于散射光施肥效应增加导致的促进作用与总辐射下降导致的减弱作用之间的平衡^[15,48]。森林生态系统叶面积指数较大,散射光施肥效应显著,生态系统生产力随AOD的增大而增大,达到生态系统生产力最大值(出现气溶胶阈值);当AOD过大时,散射光施肥效应无法抵消总辐射下降导致的减弱作用,生

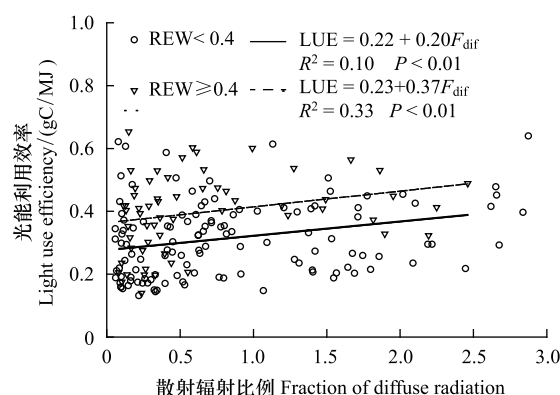


图5 北京市2006—2009年6—9月份散射辐射比例对光能利用效率的影响

Fig.5 The relationship between F_{dif} and LUE from June to September during 2006—2009

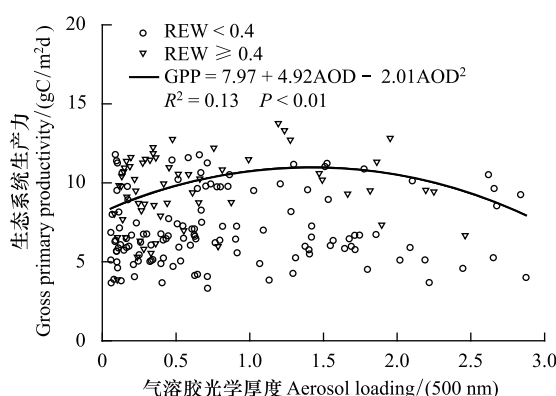


图6 北京市2006—2009年6—9月份气溶胶光学厚度对生态系统生产力的影响

Fig.6 The relationship between AOD and gross primary productivity (GPP) from June to September during 2006—2009

态系统生产力下降甚至出现生态系统生产力为 0 的现象(出现第二个气溶胶阈值)^[14]。草地或者农田生态系统叶面积指数较小,散射光施肥效应较小,总辐射减小导致的生态系统生产力下降^[49—50]。由此可见,适度的 AOD 可以增加森林生态系统的 GPP。

2.4 气溶胶对生态系统生产力的影响的通径分析

两种水分条件下通径分析的拟合度指标都满足要求,模型可以用来解释气溶胶对生产力的直接和间接影响(图 7)。无论在什么水分条件下,AOD 对散射辐射的影响大于直接辐射的影响;散射辐射都是 GPP 最主要的影响因素。在土壤水分胁迫条件下,土壤水分是影响生态系统生产力的关键因子,但气溶胶与土壤水分弱相关(标准化总系数-0.029),气溶胶对土壤水分的影响微弱;气溶胶通过影响直接辐射、散射辐射、相对湿度、土壤水分间接影响生态系统生产力(间接影响标准化系数 0.016)。在非水分胁迫条件下,散射辐射对 GPP 的影响较大(直接标准化系数 0.87),散射辐射、直接辐射、相对湿度共同影响 GPP。

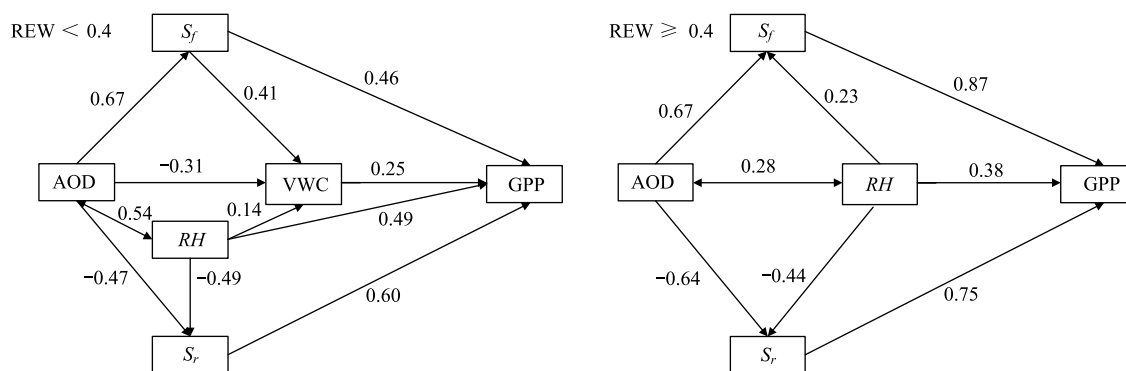


图 7 不同水分条件下气溶胶光学厚度对相对湿度(RH)、直接辐射(S_r)、散射辐射(S_f)、土壤相对含水量(VWC)及杨树人工林生态系统生产力(GPP)通径分析图

Fig.7 The effects of AOD on ecosystem photosynthetic productivity under different water condition

左图中土壤水分胁迫条件下,卡方统计量为 0.074、适配度指数为 0.982,比较拟合指数为 0.988;右图中非土壤水分胁迫条件下,卡方统计量为 0.66、适配度指数为 0.99,比较拟合指数为 1.0。图中每个箭头上的数值代表通径系数大小,大于 0 代表正相关,小于 0 代表负相关

土壤水分是干旱、半干旱地区生态系统生产力的重要驱动因子^[51]。本研究中,当生态系统受到水分胁迫时,气溶胶仅能小幅增大杨树人工林生态系统的光能利用效率(图 4),却不能显著增大杨树人工林生态系统的生产力(图 6、图 7)。干旱胁迫使生态系统光合速率、呼吸速率、蒸腾速率显著降低^[21]。当生态系统受到水分胁迫时,水分是生态系统的限制因子,干旱引起叶片气孔导度的下降,甚至导致植物生理和形态特征发生变化^[22],生态系统对太阳辐射的需求降低,散射辐射增加也不能显著增大生态系统的生产力^[22]。在印第安那热带雨林地区,厄尔尼诺现象带来的严重干旱,即使生物质燃烧形成的气溶胶也不能增大生态系统生产力^[53],这与我们的研究结论一致。当生态系统处于非水分胁迫时,太阳辐射是生态系统的最重要的环境因子,气溶胶粒子导致的散射光施肥效应可以有效的增大光能利用效率,进而增大生态系统生产力;当总辐射显著降低,散射光施肥效应不足以抵消总辐射减小导致的减弱作用时,太阳辐射成为生态系统的限制因子,生态系统光能利用效率及生态系统生产力下降^[52]。太阳辐射、散射辐射、土壤水分均是生态系统生产力的重要影响因素^[54],干旱胁迫下生态系统的光能利用效率减小,生态系统对散射辐射的敏感性下降,散射辐射不能增大生态系统生产力;在非水分胁迫时,散射辐射可以增加生态系统生产力^[55]。由此可见,土壤含水量也是影响散射光施肥效应的重要因素,不同水分条件下散射光施肥效应不同,干旱胁迫下气溶胶不能显著增大生态系统生产力。

3 结论

2006—2009 年北京市气溶胶具有明显的季节变化特征,6—9 月份气溶胶光化学厚度较大;气溶胶光化学

厚度可以显著改变辐射组分和温湿度气象因子。气溶胶主要通过散射光的施肥效应增加生态系统生产产力。不同水分条件下,气溶胶对生态系统的影响不同,水分胁迫条件下,气溶胶对杨树人工林生态系统生产产力无显著影响;非水分胁迫条件下,气溶胶散射光施肥效应导致杨树人工林生态系统生产产力先增大后减小,当大气气溶胶光化学厚度超过 1.22 后,生态系统生产产力开始下降,气溶胶浓度大于 2.5 时生态系统生产产力显著下降。

参考文献 (References):

- [1] Wild M, Gilgen H, Roesch A, Ohmura A, Long C N, Dutton E G, Forgan B, Kallis A, Russak V, Tsvetkov A. From dimming to brightening: decadal changes in solar radiation at earth's surface. *Science*, 2005, 308(5723): 847-850.
- [2] Norris J R, Wild M. Trends in aerosol radiative effects over Europe inferred from observed cloud cover, solar "dimming," and solar "brightening". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112(D8): D08214.
- [3] Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, Cess R D, Coakley J A Jr, Hansen J E, Hofmann D J. Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science*, 1992, 255(5043): 423-430.
- [4] Gu L H, Baldocchi D D, Wofsy S C, Munger J W, Michalsky J J, Urbanski S P, Boden T A. Response of a deciduous forest to the mount Pinatubo eruption: enhanced photosynthesis. *Science*, 2003, 299(5615): 2035-2038.
- [5] Farquhar G D, Roderick M L. Pinatubo, diffuse light, and the carbon cycle. *Science*, 2003, 299(5615): 1997-1998.
- [6] Mercado L M, Bellouin N, Sitch S, Boucher O, Huntingford C, Wild M, Cox P M. Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink. *Nature*, 2009, 458(7241): 1014-1017.
- [7] Matsui T, Beltrán-Przekurat A, Niyogi D, Pielke R A, Coughenour M. Aerosol light scattering effect on terrestrial plant productivity and energy fluxes over the eastern United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D14): D14S14.
- [8] Chen M, Zhuang Q L. Evaluating aerosol direct radiative effects on global terrestrial ecosystem carbon dynamics from 2003 to 2010. *Tellus B*, 2014, 66(1): 21808.
- [9] Robock A. Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics*, 2000, 38(2): 191-219.
- [10] Rap A, Spracklen D V, Mercado L, Reddington C L, Haywood J M, Ellis R J, Phillips O L, Artaxo P, Bonal D, Restrepo Coupe N, Butt N. Fires increase Amazon forest productivity through increases in diffuse radiation. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(11): 4654-4662.
- [11] Steiner A L, Chameides W L. Aerosol-induced thermal effects increase modelled terrestrial photosynthesis and transpiration. *Tellus B*, 2005, 57(5): 404-411.
- [12] Jing X, Huang J, Wang G, Higuchi K, Bi J, Sun Y, Yu H, Wang T. The effects of clouds and aerosols on net ecosystem CO₂ exchange over semi-arid Loess Plateau of Northwest China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(17): 8205-8218.
- [13] Cirino G G, Souza R A F, Adams D K, Artaxo P. The effect of atmospheric aerosol particles and clouds on net ecosystem exchange in the Amazon. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(13): 6523-6543.
- [14] Oliveira P H F, Artaxo P, Pires C, De Lucca S, Procópio A, Holben B, Holben B, Schafer J, Cardoso L F, Wofsy S C, Rocha H R. The effects of biomass burning aerosols and clouds on the CO₂ flux in Amazonia. *Tellus B*, 2007, 59(3): 338-349.
- [15] Lu X L, Chen M, Liu Y L, Miralles D G, Wang F M. Enhanced water use efficiency in global terrestrial ecosystems under increasing aerosol loadings. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 237-238: 39-49.
- [16] Kanniah K D, Beringer J, North P, Hutley L. Control of atmospheric particles on diffuse radiation and terrestrial plant productivity: a review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2012, 36(2): 209-237.
- [17] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 李卫军, 张蕾, 王伟罡, 权建农, 曹国良, 王继志, 杨元琴, 张养梅. 我国雾-霾成因及其治理的思考. *科学通报*, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [18] Cai W J, Li K, Liao H, Wang H J, Wu L X. Weather conditions conducive to Beijing severe haze more frequent under climate change. *Nature Climate Change*, 2017, 7(4): 257-262.
- [19] Zhou J, Zhang Z Q, Sun G, Fang X R, Zha T G, McNulty S, Chen J Q, Jin Y, Noormets A. Response of ecosystem carbon fluxes to drought events in a poplar plantation in Northern China. *Forest Ecology and Management*, 2013, 300: 33-42.
- [20] 仇宽彪, 张志强, 康满春, 查同刚, 牛勇, 蔡永茂, 赵广亮. 北京永定河沿河沙地杨树人工林光能利用效率. *生态学报*, 2016, 36(6): 1571-1581.
- [21] Xiao J F, Sun G, Chen J Q, Chen H, Chen S P, Dong G, Gao S H, Guo H Q, Guo J X, Han S J, Kato T, Li Y L, Lin G H, Lu W Z, Ma M G, McNulty S, Shao C L, Wang X F, Xie X, Zhang X D, Zhang Z Q, Zhao B, Zhou G S, Zhou J. Carbon fluxes, evapotranspiration, and water use

- efficiency of terrestrial ecosystems in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 182-183: 76-90.
- [22] Reichstein M, Bahn M, Ciais P, Frank D, Mahecha M D, Seneviratne S I, Zscheischler J, Beer C, Buchmann N, Frank D C, Papale D, Rammig A, Smith P, Thonicke K, van der Velde M, Vicca S, Walz A, Wattenbach M. Climate extremes and the carbon cycle. *Nature*, 2013, 500 (7462): 287-295.
- [23] Tang Q H, Zhang X J, Francis J A. Extreme summer weather in northern mid-latitudes linked to a vanishing cryosphere. *Nature Climate Change*, 2013, 4(1): 45-50.
- [24] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, Changnon S A, Karl T R, Mearns L O. Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, 2000, 289(5487): 2068-2074.
- [25] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 479-492.
- [26] Baldocchi D, Falge E, Gu L H, Olson R, Hollinger D, Running S, Anthoni P, Bernhofer, Davis K, Evans R, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B, Lee X, Malhi Y, Meyers T, Munger W, Oechel W, Paw U K T, Pilegaard K, Schmid H P, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(11): 2415-2434.
- [27] Wang K C, Dickinson R E. A review of global terrestrial evapotranspiration: observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(2): RG2005.
- [28] Moffat A M, Papale D, Reichstein M, Hollinger D Y, Richardson A D, Barr A G, Beckstein C, Braswell B H, Churkina G, Desai A R, Falge E, Gove J H, Heimann M, Hui D F, Jarvis A J, Kattge J, Noormets A, Stauch V J. Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 147(3/4): 209-232.
- [29] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 1994, 8(3): 315-323.
- [30] Reichstein M, Tenhunen J D, Rouspard O, Ourcival J M, Rambal S, Dore S, Valentini R. Ecosystem respiration in two Mediterranean evergreen Holm Oak forests: drought effects and decomposition dynamics. *Functional Ecology*, 2002, 16(1): 27-39.
- [31] Dubovik O, Holben B, Eck T F, Smirnov A, Kaufman Y J, King M D, Tanré D, Slutsker I. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, 59(3): 590-608.
- [32] Che H Z, Xia X G, Zhu J, Wang H, Wang Y Q, Sun J Y, Zhang X Y, Shi G Y. Aerosol optical properties under the condition of heavy haze over an urban site of Beijing, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(2): 1043-1053.
- [33] Park S B, Knohl A, Lucas-Moffat A M, Migliavacca M, Gerbig C, Vesala T, Peltola O, Mammarella I, Kolle O, Lavrič J V, Prokushkin A, Heimann M. Strong radiative effect induced by clouds and smoke on forest net ecosystem productivity in central Siberia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 250-251: 376-387.
- [34] Granier A, Loustau D, Bréda N. A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. *Annals of Forest Science*, 2000, 57(8): 755-765.
- [35] Spitters C J T, Toussaint H A J M, Goudriaan J. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis Part I. Components of incoming radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1986, 38(1/3): 217-229.
- [36] Han J Y, Zhang L M, Li S G, Wen X F, Li Q K, Wang H M. Effects of sky conditions on net ecosystem productivity of a subtropical coniferous plantation vary from half-hourly to daily timescales. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 3002-3014.
- [37] Matías L, Castro J, Zamora R. Effect of simulated climate change on soil respiration in a Mediterranean-type ecosystem: rainfall and habitat type are more important than temperature or the soil carbon pool. *Ecosystems*, 2012, 15(2): 299-310.
- [38] Kline R B. *Principles and Practice of Structural Equation Modeling*. New York: The Guilford Press, 2011.
- [39] Li Z Q, Niu F, Fan J W, Liu Y G, Rosenfeld D, Ding Y N. Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation. *Nature Geoscience*, 2011, 4(12): 888-894.
- [40] Bird R E, Riordan C. Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1986, 25(1): 87-97.
- [41] Huang Y, Dickinson R E, Chameides W L. Impact of aerosol indirect effect on surface temperature over East Asia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(12): 4371-4376.
- [42] Yue X, Unger N. Aerosol optical depth thresholds as a tool to assess diffuse radiation fertilization of the land carbon uptake in China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, 17(2): 1329-1342.
- [43] Gu L H, Baldocchi D, Verma S B, Black T A, Vesala T, Falge E M, Dowty P R. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107(D6): D64050.
- [44] Xu H, Zhang Z Q, Chen J Q, Zhu M X, Kang M C. Cloudiness regulates gross primary productivity of a poplar plantation under different

- environmental conditions. *Canadian Journal of Forest Research*, 2017, 47(5): 648-658.
- [45] Alton P B. Reduced carbon sequestration in terrestrial ecosystems under overcast skies compared to clear skies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(10): 1641-1653.
- [46] Kanniah K D, Beringer J, Tapper N J, Long C N. Aerosols and their influence on radiation partitioning and savanna productivity in northern Australia. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 100(3/4): 423-438.
- [47] Cohan D S, Xu J, Greenwald R, Bergin M H, Chameides W L. Impact of atmospheric aerosol light scattering and absorption on terrestrial net primary productivity. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 31-1-37-12.
- [48] 邵思雅, 张晶, 周丽花, 乔岩. 气溶胶直接辐射效应对全球陆地生态系统碳循环的影响. *自然资源学报*, 2018, 33(1): 27-36.
- [49] Wohlfahrt G, Hammerle A, Haslwanter A, Bahn M, Tappeiner U, Cernusca A. Disentangling leaf area and environmental effects on the response of the net ecosystem CO₂ exchange to diffuse radiation. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(6): L16805.
- [50] Greenwald R, Bergin M H, Xu J, Cohan D, Hoogenboom G, Chameides W L. The influence of aerosols on crop production: a study using the CERES crop model. *Agricultural Systems*, 2006, 89(2/3): 390-413.
- [51] Piao S L, Ciais P, Huang Y, Shen Z H, Peng S S, Li J S, Zhou L P, Liu H Y, Ma Y C, Ding Y H, Friedlingstein P, Liu C Z, Tan K, Yu Y Q, Zhang T Y, Fang J Y. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 2010, 467(7311): 43-51.
- [52] Rocha A V, Su H B, Vogel C S, Schmid H P, Curtis P S. Photosynthetic and water use efficiency responses to diffuse radiation by an aspen-dominated northern hardwood forest. *Forest Science*, 2004, 50(6): 793-801.
- [53] Marpaung F, Hirano T. Environmental dependence and seasonal variation of diffuse solar radiation in tropical Peatland. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2014, 70(4): 223-232.
- [54] Moffat A M, Beckstein C, Churkina G, Mund M, Heimann M. Characterization of ecosystem responses to climatic controls using artificial neural networks. *Global Change Biology*, 2010, 16(10): 2737-2749.
- [55] Yang B, Pallardy S G, Meyers T P, Gu L H, Hanson P J, Wullschlegel S D, Heuer M, Hosman K P, Riggs J S, Sluss D W. Environmental controls on water use efficiency during severe drought in an Ozark Forest in Missouri, USA. *Global Change Biology*, 2010, 16(8): 2252-2271.