中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
ISSN 2096-6237,CN 13-1432/S

《中国生态农业学报(中英文)》网络首发论文

题目：新冠疫情期间大气气溶胶浓度变化及对冬小麦生产力的影响
作者：杜彦彦，黄青，任建强
DOI：10.13930/j.cnki.cjea.200717
网络首发日期：2020-12-10
引用格式：杜彦彦，黄青，任建强．新冠疫情期间大气气溶胶浓度变化及对冬小麦生产力的影响．中国生态农业学报(中英文).
https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200717

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间：2020-12-10 14:00:39
网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1432.s.20201209.0951.001.html

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200717
杜彦彦，黄青，任建强. 新冠疫情期间大气气溶胶浓度变化及对冬小麦生产力的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200717
DU Y Y, HUANG Q, REN J Q. Aerosol variation and its effect on winter wheat productivity during the COVID-19[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200717

新冠疫情期间大气气溶胶浓度变化及对冬小麦生产力的影响*

杜彦彦，黄　青**，任建强

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所，农业农村部农业遥感重点实验室　北京　100081)

摘　要：新冠疫情暴发后，我国采取了严格的管控措施，人类行为大幅减少可能影响大气气溶胶浓度变化，从而对作物生产力造成影响。为研究新冠疫情期间华北地区大气气溶胶变化及对冬小麦生产力的影响，本研究基于 Google Earth Engine 平台，利用多源遥感数据，在提取了 2015-2020 年冬小麦空间分布信息的基础上，分析了严格防控期间(2～3 月)华北地区冬小麦主产区大气气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)、总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)、光合有效辐射(Photosynthetically Active Radiation, PAR)、地表温度以及降雨量的空间分布特征，并使用地理探测器进行冬小麦 GPP 的驱动因子探测。研究发现，与过去 5 年同期相比，2020 年新冠疫情期间，华北地区冬小麦上空 AOD 下降了 23%，气溶胶消光作用减弱，导致直射 PAR 和总 PAR 分别同比增强了 11.1%和 4.8%。同时降雨量远高于 5 年均值，地表温度基本持平，最终 GPP 增长了 30.1%。气象因子对冬小麦 GPP 驱动力依次为光合有效辐射(0.495)>降雨量(0.399)>大气气溶胶光学厚度(0.239)>地表温度(0.092)。疫情期间，大气气溶胶引起的光合有效辐射变化是华北地区冬小麦 GPP 的主要驱动因子，降雨量为次驱动因子。

关键词：新冠疫情；冬小麦；华北地区; AOD; GPP; PAR
中图分类号：S513

Aerosol variation and its effect on winter wheat productivity during the COVID-19

DU Yanyan, HUANG Qing, REN Jianqiang

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agricultural Remote Sensing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China).

Abstract: After the outbreak of COVID-19, China has taken strict control measures, and human behavior has been greatly reduced, likely affect the change of atmospheric aerosol concentration and crop productivity. In order to study the variation of aerosol in the North China during COVID-19 and its effect on winter wheat productivity, this study extracted the spatial information of winter wheat from 2015 to 2020 and analyzed the spatial distribution pattern of winter wheat Aerosol Optical Depth (AOD), Gross Primary Productivity (GPP), Photosynthetically Active Radiation (PAR), land surface temperature and rainfall during the period of strict control (February to March), based on the Google Earth Engine platform and multi-source remote sensing data, and used Geo-detector to detect the driving factors of winter wheat GPP. The results showed that compared to the same period of the past five years, the AOD over winter wheat in the North China decreased by 23% during the COVID-19, resulting in direct PAR and total PAR increased by 11.1% and 4.8%. Rainfall was far higher than the 5-year average, the land surface temperature was nearly identical, and the GPP eventually increased by 30.1%. The driving force of meteorological factors for winter wheat GPP is PAR (0.495)>rainfall

* 国家自然科学基金项目(41871353)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610132020017)共同资助
**通信作者：黄青，主要研究方向为农业生态遥感。E-mail: hqing@caas.net.cn
杜彦彦，硕士研究生，主要研究方向为农业生态遥感。E-mail: duyanyan3@163.com
* The study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41871353) and Foundational Research Fund for Central Non-profit Scientific Institution (1610132020017).
** Corresponding author, E-mail: hqing@caas.net.cn

(0.399)>AOD (0.239)>land surface temperature (0.092). Aerosol changes during the epidemic increased the productivity of winter wheat in the North China. During the epidemic, changes in photosynthetically active radiation caused by atmospheric aerosols were the main driving factor for winter wheat GPP in North China, and rainfall was the secondary driving factor.
Key words: COVID-19; winter wheat; the North China; AOD; GPP; PAR

2020 年 1 月 23 日武汉市因新型冠状病毒肺炎(Corona Virus Disease 2019, COVID-19)疫情暴发开始“封城”，至 25 日我国已有 30 个省市自治区宣布启动重大突发公共卫生事件一级响应。为有效阻止病毒扩散，各地政府严格控制人员流动，交通系统大面积暂停运营，工厂停工停产，学校开学推迟。在全国人民的不懈努力下，于 3 月底疫情基本得到控制，我国本土不再有新增病例，全国各地陆续恢复生产生活秩序[1]。在这场联防联控，群防群控的健康保卫战期间，人为活动大幅减少，全国交通、电力和工业部门污染物排放量以及地表大气污染物(如 $PM_{2.5}$、PM_{10}、SO_2、CO 等)浓度均显著降低[2]，使得大气气溶胶的形成来源得到控制。

大气气溶胶是指悬浮于大气中，粒径介于 10^{-3}~10^{2} μm 之间的分子团、固态或液态微粒所组成的分散体系，虽然在大气中含量极少，但其气候效应显著且复杂[3-4]。它对地球长波辐射和太阳辐射有散射和吸收效应，从而改变地气系统的能量分配，还可充当云凝结核，影响水循环过程[5]。因此，大气气溶胶对陆地生态系统碳循环过程的影响不容忽视。大气气溶胶光学厚度是气溶胶的消光系数在垂直方向上的积分，是一个无量纲的值，描述了气溶胶的消光作用，是对气溶胶含量的定量估计，是用来评估其气候效应的最重要的指标。

总初级生产力表示植被单位时间，单位面积上通过光合作用所固定的有机碳总量，它决定了初始进入生态系统的物质能量[6]。GPP 作为衡量农田生态系统生产力有效指标，能够剔除农业结构调整，作物品种等带来的干扰[7]。随着大气遥感和植被遥感技术发展，GPP 对气溶胶气候效应的响应被科研工作者广泛关注。1991 年 Pinatubo 火山爆发，向大气注入了 20 Mt SO_2，形成了硫酸盐气溶胶，全球 2.5%的太阳光被遮挡，但是散射辐射增加了 20%[8]，有学者观察到，正是散射辐射使得全球森林碳汇增加[9]。有研究发现，2006-2015 年大气气溶胶的直接效应使我国陆地生态系统 GPP 提高 0.36 Pg C a^{-1}，主要源于西南和东南部[10]。然而一些研究表明，气溶胶对生态系统生产力的影响主要取决于气溶胶光学厚度以及天空状况，当气溶胶消光强烈时，散射带来的“肥料效应”不能抵消总辐射减少所亏损的 GPP[11]，农田生态系统较森林和草地更加特殊，C3 和 C4 作物由于光饱和点高低差异大，对辐射响应不同[12]，大气气溶胶对作物生产力的影响效应机理更复杂，不确定性更大。大气气溶胶能够改变到达作物冠层辐射，截获地球的长波辐射，气溶胶颗粒物的干湿沉降直接影响叶片功能[13]。Chameides 等利用气候模型耦合作物模型的研究发现，气溶胶造成冬小麦和水稻减产 5%～30%[14]，Tie 等通过模拟研究发现，华北平原地区，长江三角洲地区，华东中部地区和四川盆地气溶胶污染，能够减少 28%～49％的太阳辐射，使得中国水稻和小麦的潜在生产力大约减少 45％和，导致中国水稻总产量下降 2％，小麦总产量下降 8％[15]。长时间序列分析表明，我国农田生态系统生产力与 AOD 趋势一致，呈显著的负相关关系[16]。华北地区是我国最大的农田生态系统之一，同时也是我国大气气溶胶污染的最严重的区域[17]，是研究大气气溶胶对作物影响的典型区域。2～3 月华北地区冬小麦正处于返青-拔节期，是其生物量累积的关键物候期，本研究将对疫情期间(2020 年 2 月 1 日-2020 年 3 月 31 日)华北地区冬小麦种植区 AOD、PAR、地表温度、降雨量和 GPP 与过去五年同期数据进行分析，评估此次疫情对大气气溶胶和冬小麦生产力的影响。研究结果可作为大气气溶胶和冬小麦生产力因果关系的一个依据，对全面认识人类活对农业的影响提供数据支撑。

1 研究区概况

如图 1 所示,华北地区位于东经 110 °～123 °,北纬 31 °～43 °,总面积约 54.21 万 km^2,是我国面积第二大的平原,城市化水平高，人口密度大。2017 年民用汽车拥有量、煤炭消费量量、汽油消费量分别占据全国 26%、21%、18%。华北地区属温带季风气候,四季分明,平均海拔低于 50m，是我国粮食主产区之一,其中冬小麦产量约占全国 60%[18]。

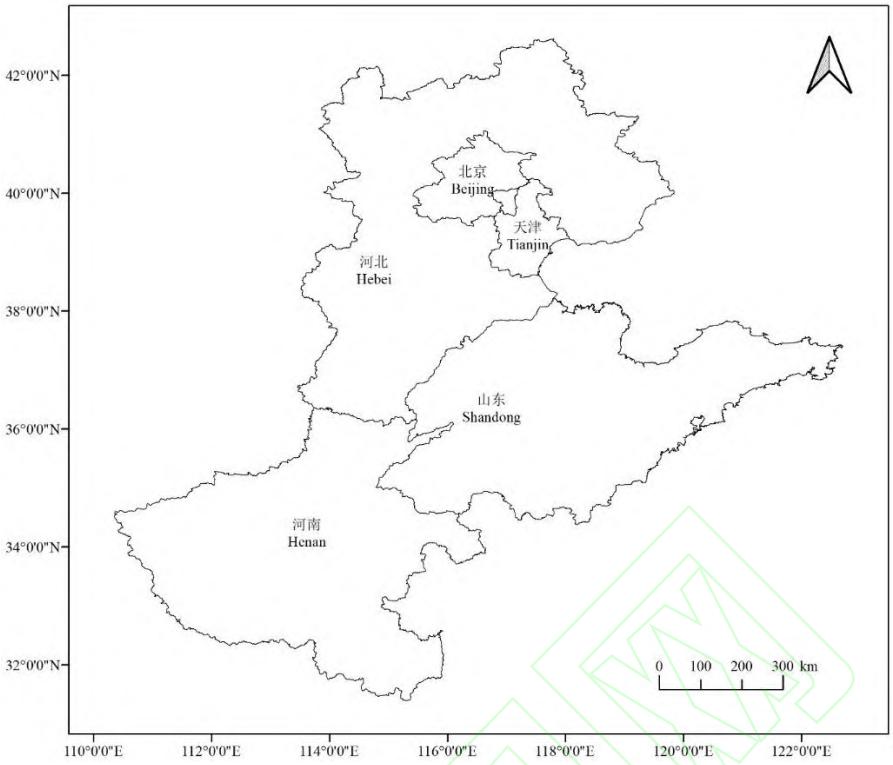

图 1 研究区位置

Fig.1 Location of study area

2 数据方法

2.1 大气气溶胶数据

2015-2020 年 2～3 月 AOD 数据来自美国宇航局利用(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)传感器反演所得第六版的产品 MCD19A2。该数据产品是基于 MODIS 最新开发的多角度大气校正算法，利用深蓝算法和暗目标算法所得，空间分辨率为 1km，我们选取 550 nm 处的 AOD 进行研究。本研究主要关注冬小麦种植区上空的 AOD 变化特征，冬小麦表现在遥感影像中为暗目标，反演精度较高。王海林等在京津冀地区的研究表明，该产品适用与我国华北地区[19]。

2.2 GPP 数据

2015-2020 年 2～3 月 GPP 数据来自美国宇航局利用 MODIS 传感器反演所得第六版的产品 MYD17A2H，该数据产品利用 MODIS 土地覆盖数据、叶面积指数、光合有效辐射分量、DAO 提供的气象等数据，输入到光能利用率模型所得，空间分辨率为 500m。经过验证，该数据与通量塔数据一致性较高，可用于华北地区冬小麦生产力的研究[20]。

2.3 晴空光合有效辐射数据

光合有效辐射，是指太阳光中能被绿色植被用于光合作用的那部分能量，主要集中在 400～700 nm，是地气系统物质能量循环的重要驱动因子，直接影响着陆地生态系统的生产力。本研究采用美国宇航局云与地球辐射能量系统(Cloud and the Earth's Radiant Energy System, CERES)项目所生产的 SYN1deg 数据[21]，空间分辨率为 1°，其中包含了直射 PAR 和散射 PAR 两部分，总的 PAR 是两者之和。根据 Zhang X 等人在中国的评估，该数据与地面观测数据一致性较好[21]。该数据没有同步到 Google Earth Engine 平台，原始数据为 NetCDF 格式，我们利用了 MATLAB R2016b 进行处理，再上传到云平台进行分析。

2.4 降雨数据

本研究降雨数据来自全球降雨测量项目(Global Precipitation Measurement, GPM)，空间分辨率为 0.1°。GPM 是继 TRMM 后新一代降雨雷达卫星，较 TRMM 观测范围更广，时空分辨率更高，根据许凤林和 Chen F R 等人在华北地区的精度评估，GPM 降雨数据精度较高且优于 TRMM，适用于本研究[23,24]。

2.5 地表温度数据

本研究地表温度数据来自加州大学圣巴巴拉分校基于 MODIS 数据，利用劈窗算法生产的 MOD11A1

产品，空间分辨率为 1 km，精度控制在 1 K 以内[25]，广泛应用于农业、生态、环境等领域的研究中。

2.6 冬小麦空间信息提取

本研究利用 MODIS 16 d 合成的 250m 的 NDVI 数据集 MOD13Q1，选取 1～6 月 12 个时相的数据进行华北地区冬小麦空间信息提取。首先使用(Savitzky-Golay, S-G)滤波重构 NDVI 时间序列数据，滤波窗口为 5，以消除云和大气等部分数据噪声。考虑到华北地区纬度跨越较大，冬小麦物候期存在差异，固定 NDVI 阈值的决策树提取算法无法适用。冬小麦在返青-拔节期生物量快速累积，抽穗期达到最大，至收获结束，生物量逐渐降低最小，生物量趋势与NDVI一致[26]，因此设计了曲线匹配的提取模型，技术路线如图2所示。

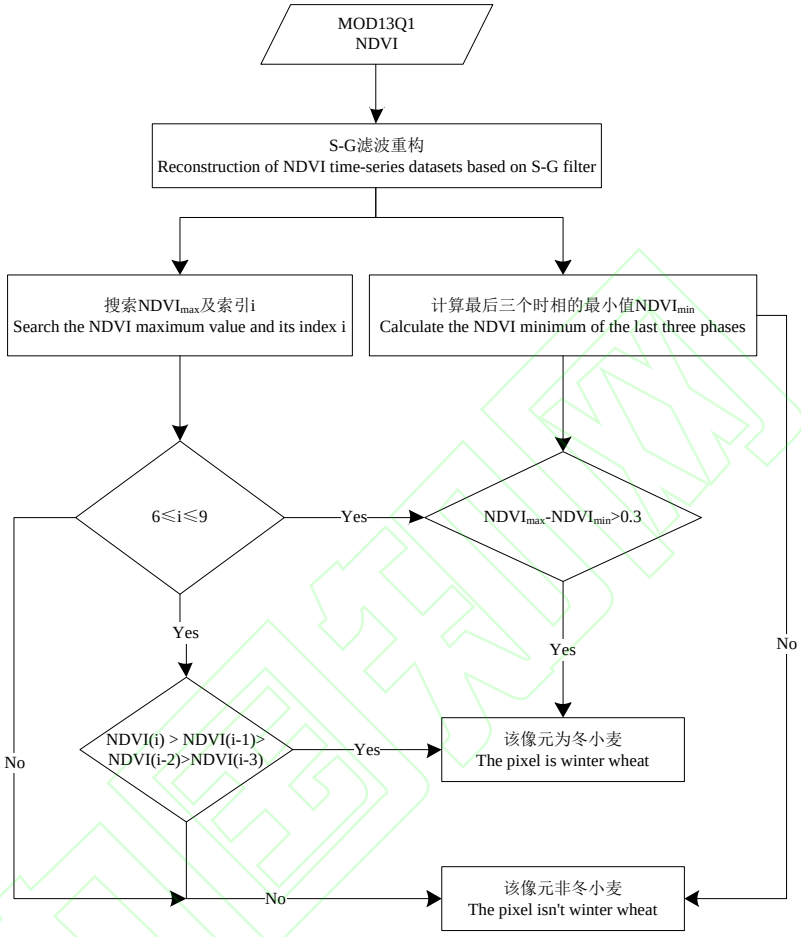

图 2 冬小麦空间分布提取模型

Fig.2 Model of extracting winter wheat spatial distribution

2.7 研究方法

本研究采用谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)进行数据处理分析，GEE 是一个免费的基于云计算的环境数据分析平台，存储了海量全球长时间序列遥感卫星数据和其他对地观测数据。通过在基于 Web 的 IDE 编写 JavaScript 程序调用 API 的方式运行，相对于传统遥感数据处理方式，图像的投影、镶嵌和裁剪等操作可快速完成，尤其是图像的存储和计算能力大大提高。

本研究使用多源遥感数据，为进一步统一各个数据集空间分辨率，用最近邻插值法将各个数据集重采样为 1km，并计算 2～3 月均值。考虑到华北地区冬小麦种植结构调整，同一区域未必多年连续种植，根据式(1)我们计算得到了 2015-2020 年均种植冬小麦的区域，将此区域的冬小麦作为研究对象。

$$Z=\prod_{i=2015}^{2020} P_i \qquad (1)$$

其中，i 代表年份，P_i 表示 i 年 P 像元内是否种植了冬小麦，若 Z=1 表示 6 年间皆种植了冬小麦，Z=0 则表示至少有一年没有种植。

利用提取的 2015-2020 年冬小麦空间信息，对 AOD、光合有效辐射、地表温度、降雨量和 GPP 做掩膜处理，得到冬小麦种植区的相应数据。对比分析 2020 年 2～3 月与过去 5 年同期各项因素，定量评估疫情期间大气气溶胶对冬小麦生产力的影响。

$$a=\frac{F_{2020}-F}{F}\times 100\% \qquad (2)$$

其中，F_{2020} 表示 2020 年 2～3 月各因子华北地区均值，F 代表 2015-2019 年同期均值，a 为相对变化。

本研究使用了地理探测器，量化了气象因子对华北地区冬小麦 GPP 的影响。地理探测器是王劲峰等提

出的探测空间异质性及其背后驱动力的一组统计学方法，其核心思想是基于这样的假设：如果某个自变量对某个因变量有重要影响,那么自变量和因变量的空间分布应该具有相似性[27,28]。探测 GPP 与某因子在多大程度上解释了其空间分布，用 q 值来度量，表达式如下：

$$q = 1 - \frac{SSW}{SST} = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} \quad (3)$$

其中，SSW 和 SST 分别区内方差和全区方差和。h=1,2,3,…,L 为分层数；N_h 为层内单元数，N 为全区单元数，本研究中 N=5468，σ_h^2和σ^2分别为第 h 层和全区的方差。q 值在 0 到 1 之间，越大表示解释力越强，贡献率越高，反之则越弱。

地理探测器使用前，需要将数值型自变量转化为类型变量，本研究以自变量的一倍标准差为间隔进行分级，其中 AOD 分为 7 级，降雨量分为 5 级，晴空光合有效辐射以及地表温度分为 6 级。

3 结果

3.1 华北地区冬小麦空间分布

如图 3 所示，华北地区冬小麦空间分布格局稳定。由南向北，河南省冬小麦集中分布南阳盆地、豫东平原，山东主要在鲁西北-西南平原，京津冀地区则主要集中在河北平原中部。选取 2015 年提取结果进行精度评价，在 Google Earth 高分辨率历史影像选取冬小麦样点 1122 个，非冬小麦 337 个，经过验证，总体精度为 86.7%, kappa 系数为 0.6。

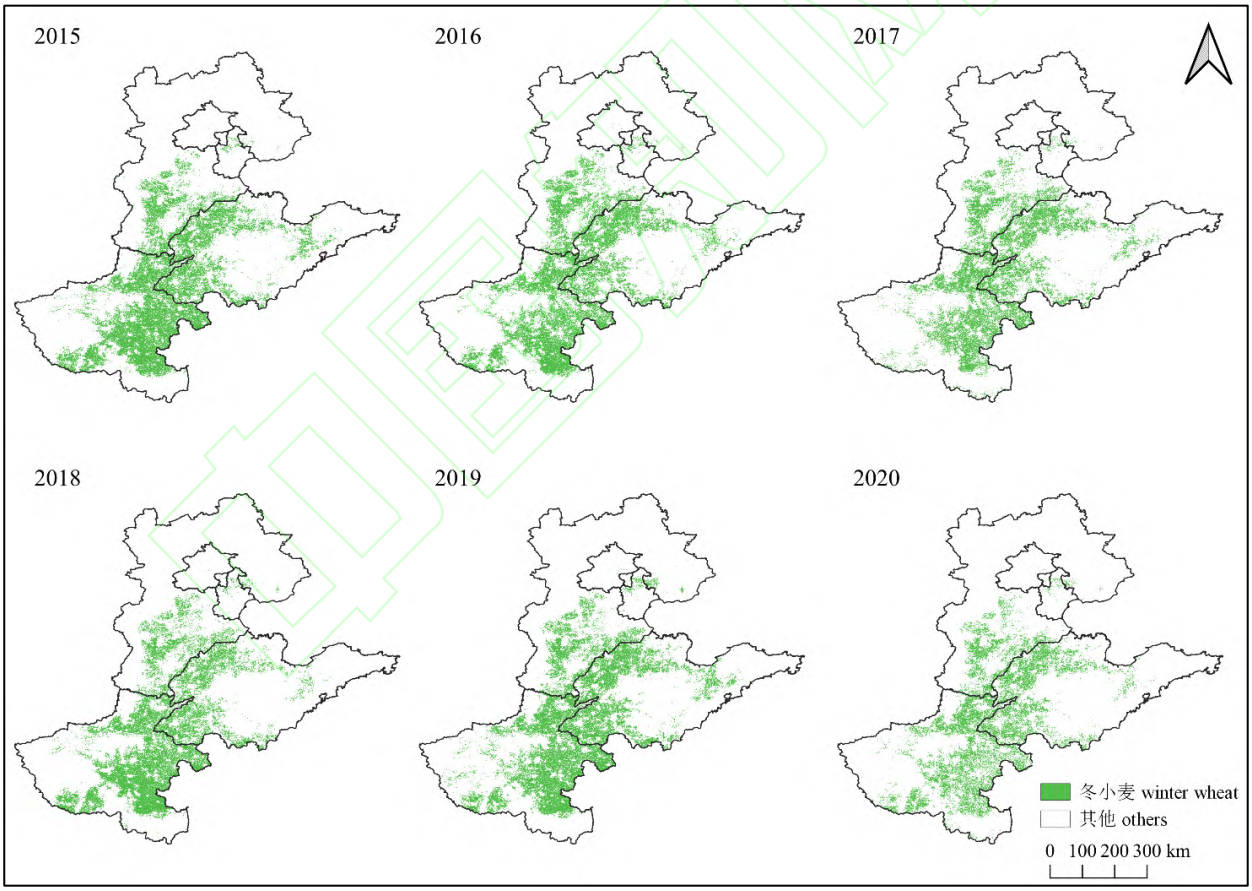

图 3 2015-2020 年华北地区冬小麦分布图

Fig.3 Spatial distribution map of winter wheat in the North China from 2015 to 2020

3.2 疫情期间 AOD 变化特征

如图 4(a)所示，与过去 5 年同期相比，华北地区冬小麦种植区 AOD 总体显著降低。2020 年疫情期间，华北地区冬小麦种植区 AOD 为 0.46，较 5 年均值 0.6 下降了 23%。除了南阳盆地、驻马店东部、保定和石家庄中部 AOD 水平升高，其他区域都有显著的降低。在山东北部、河北东南 AOD 降低了 40%以上，大部分冬小麦种植区 AOD 减少了 20%～40%。

可以看出，由于疫情期间强力的管控措施和大众的自觉隔离，人为活动和工业生产大幅减少，大气污

染源减少, AOD 对其响应较为敏感, 大气污染防治的压力大大减小。此时华北依然处于供暖期, 在静稳、逆温和高湿气象条件下, 疫情管控带来的减排效应并不能抵消不利气象条件下污染物的累计, 是部分区域 AOD 依然增加的主要原因[29]。

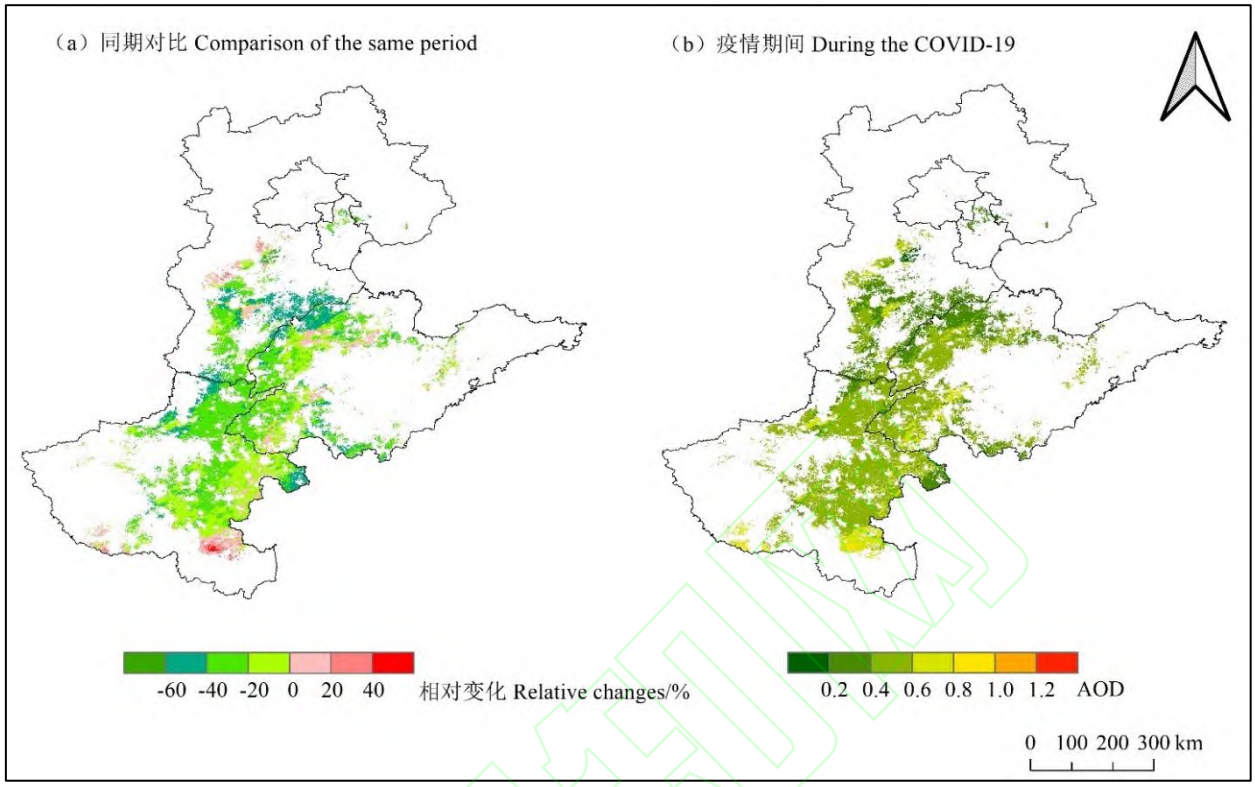

图 4　疫情期间 AOD 空间分布图

Fig.4　Spatial distribution of AOD during the COVID-19

3.3　疫情期间农业气象参数变化

3.3.1 降雨量和地表温度变化

如图 5 所示, 疫情期间华北地区冬小麦种植区降雨量空间分布差异显著, 2020 年降雨量远高于往年。总体呈现南高北低的分布特征, 河南省为 97.84 mm, 比山东省多了 29.74 mm, 比京津冀多出了 48%。华北地区冬小麦区 2020 年疫情期间平均降雨量为 76.3 mm, 是过去 5 年同期的 1.4 倍, 其中河南中部、山东北部、和北京天津甚至达到了平均年的 2 倍左右。

疫情期间华北地区冬小麦种植区地表温度较往年保持稳定, 平均地表温度为 15.9 ℃, 降低了 0.3 ℃。

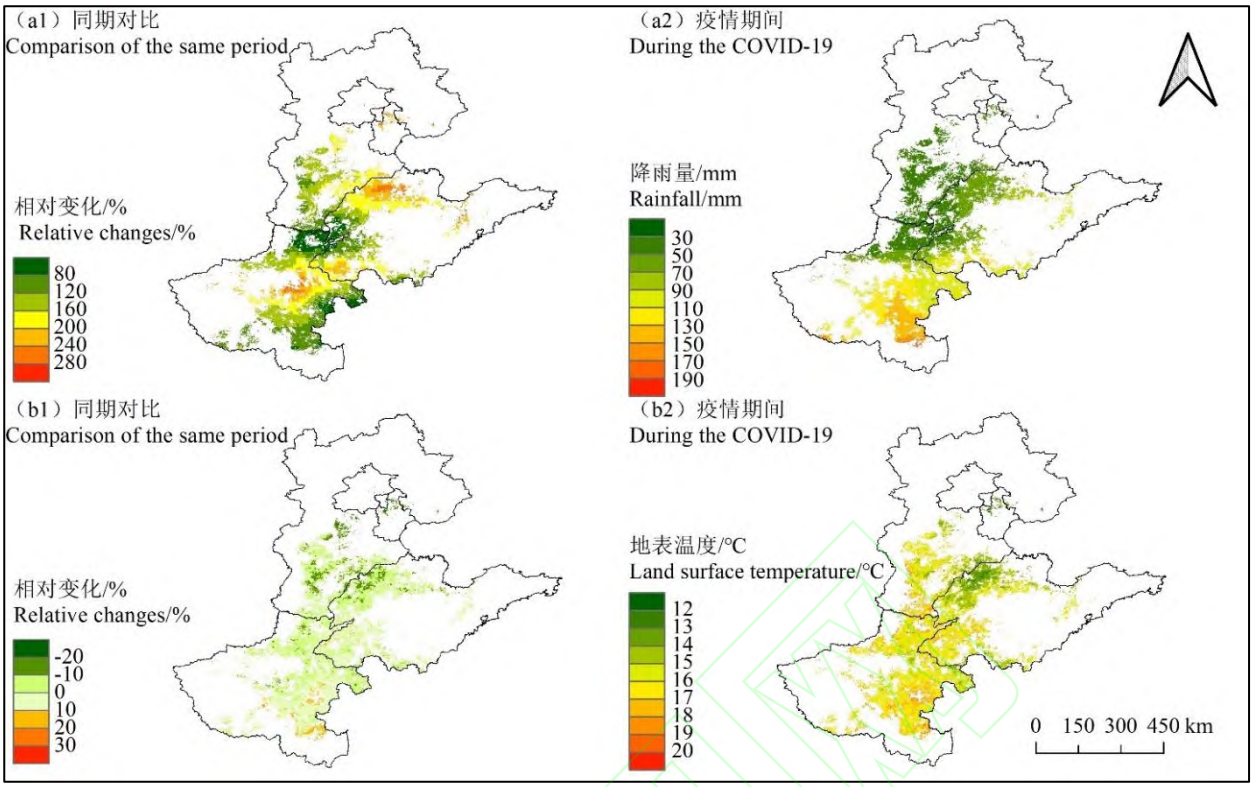

图 5　疫情期间冬小麦降雨量和地表温度空间分布图

Fig.5　Spatial distribution of winter wheat rainfall and land surface temperature during the COVID-19

3.3.2 PAR 变化

疫情期间冬小麦光合有效辐射呈南高北低，西高东低的特点，较过去 5 年平均水平，直射 PAR 增强了 11%，散射 PAR 减弱了 0.8%。当 AOD 减小，PAR 对其响应及其敏感，由于大气中遮光粒子浓度降低，大气变得更加清洁，气溶胶的散射作用变弱，到达冬小麦冠层的光合有效辐射通量得以增强。对比图 4(a)与 6(c2)AOD 的降幅越大，总 PAR 增幅越大的区域。

气溶胶对光合有效辐射有明显的消光作用，由于疫情期间停工停产，人类活动大幅减少，大气气溶胶浓度降低，透明度提高，到达冠层的光合有效辐射增多，2～3 月正处于冬小麦返青-拔节期，充足的光合有效辐射的辐射提高了光合作用速率，有利于是冬小麦干物质的积累，提高生产力。

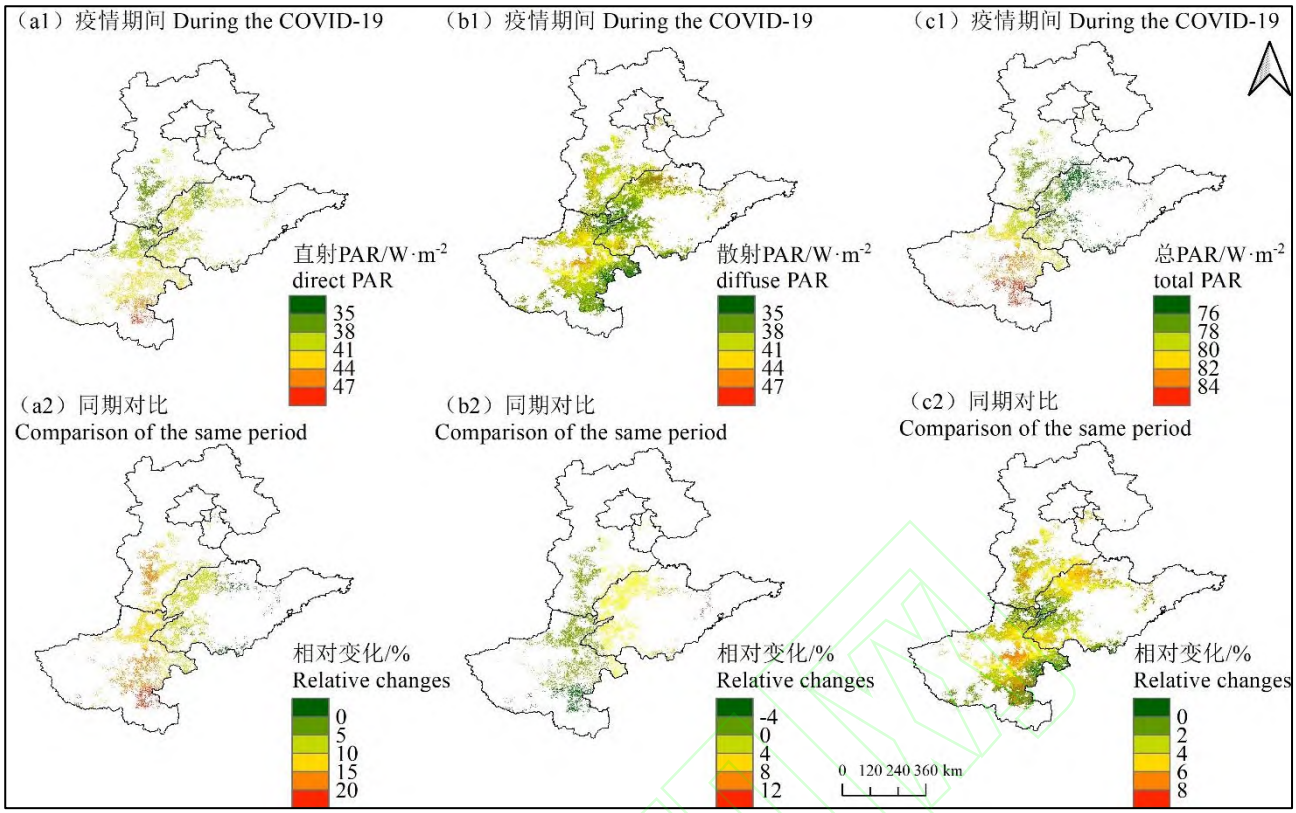

图 6　疫情期间冬小麦 PAR 空间分布图

Fig.6　Spatial distribution of winter wheat PAR during the COVID-19

3.4　疫情期间 GPP 变化

如图 7 所示，华北地区冬小麦 GPP 由北向南逐渐增大，其增长幅度逐渐减小。2020 年华北地区冬小麦 GPP 为 173.9 gC m^{-2} d^{-1}，较 5 年均值 133.7 gC m^{-2} d^{-1} 增长了 30.1%。其中京津冀 GPP 增长了 55.2%，山东和河南分别增长了 33.9%, 24.7%。

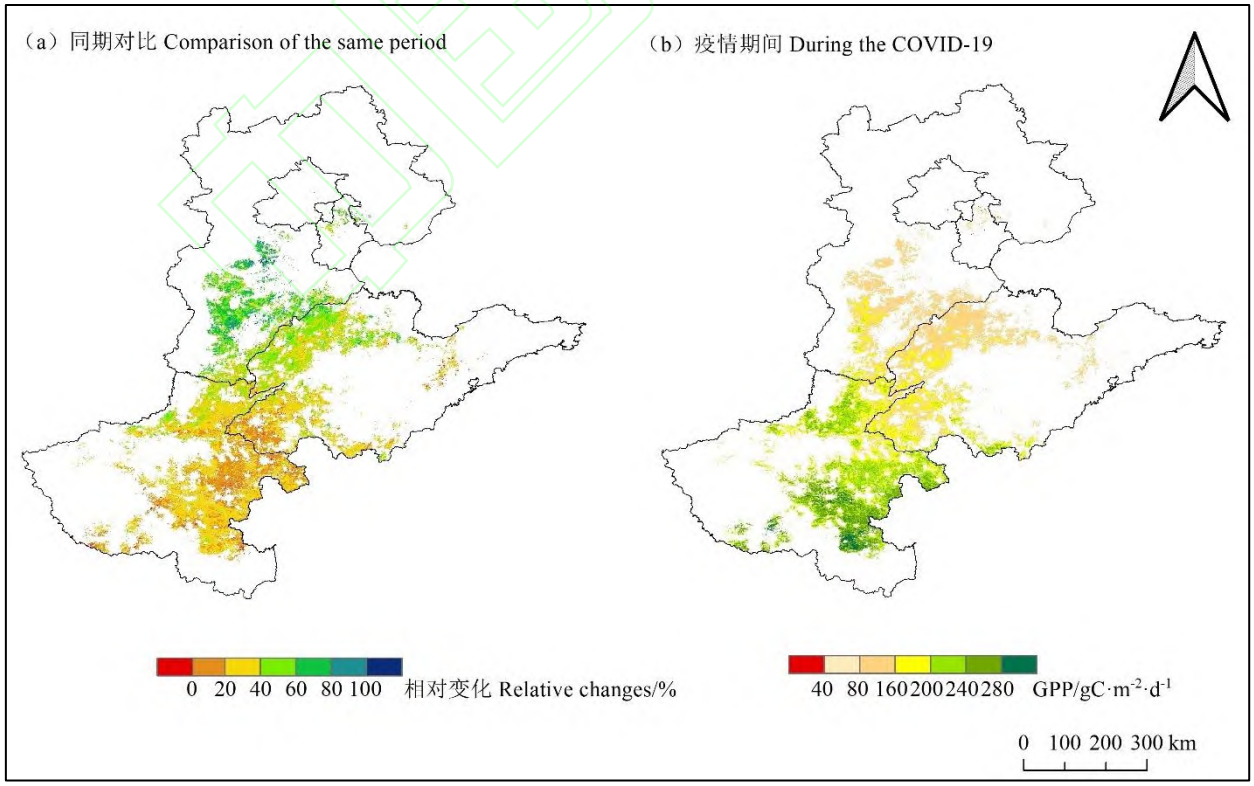

图 7　疫情期间冬小麦 GPP 空间分布图

Fig.7　Spatial distribution of winter wheat during the COVID-19

3.5 因子探测

表 1 气象参数对冬小麦 GPP 的解释力

Table 1 Explanatory power of meteorological parameters to winter wheat GPP

气象参数 Meteorological parameters	光合有效辐射 PAR	降雨量 Rainfall	大气气溶胶光学厚度 AOD	地表温度 Land surface temperature
q	0.495	0.399	0.239	0.092

因子探测结果发现，各个气象因子对冬小麦生产力的解释力排序如下：光合有效辐射>降雨量>大气气溶胶光学厚度>地表温度，其中大气气溶胶光学厚度是影响光合有效辐射最主要的因素，是间接影响 GPP 的因素，疫情因此大气气溶胶引起的光合有效辐射的变化是华北地区冬小麦 GPP 的主要驱动因子，降雨量是次驱动因子，地表温度的影响最小。

4 讨论

根据表2所示，疫情期间华北地区冬小麦种植区上空AOD降低了23%，冬小麦的GPP提高了30.1%，除了地表温度和散射光合有效辐射轻微的减弱，其他农业气象因子水平均有较高的提升，其中降雨量提高了1.44 倍，总的 PAR 和直射 PAR 分别提高了 4.8%和 11.1%。

表 2 疫情期间冬小麦区农业气象参数

Table 2 Agricultural meteorological parameters in winter wheat area during the COVID-19

气象参数 Meteorological parameters	时间 Periods	京津冀 Beijing-Tianjin-Hebei	山东 Shandong	河南 Henan	华北地区 the North China
AOD	2020	0.38	0.45	0.51	0.46
	相对变化 Relative changes(%)	-29.7	-22.9	-20.0	-23.0
地表温度(℃) Land surface temperature	2020	15.8	15.5	16.4	15.9
	相对变化 Relative changes(%)	-6.9	-2.0	0.90	-2.8
降雨量(mm) Rainfall	2020	39.3	68.1	97.8	76.3
	相对变化 Relative changes(%)	130.8	162.5	143.3	144.0
总 PAR(W m^{-2}) Total PAR	2020	77.5	76.3	81.9	78.9
	相对变化 Relative changes(%)	5.3	3.6	5.4	4.8
直射 PAR(W m^{-2}) Direct PAR	2020	37.7	38.9	41.6	39.8
	相对变化 Relative changes(%)	12.8	5.9	14.6	11.1
散射 PAR(W m^{-2}) Diffuse PAR	2020	39.8	37.4	40.3	39.1
	相对变化 Relative changes(%)	0.5	1.6	2.6	-0.1
GPP (gC m^{-2} d^{-1})	2020	127.5	147.6	212.8	173.9
	相对变化 Relative changes (%)	55.2	33.9	24.7	30.1

从整体来看，疫情期间华北地区 AOD 降低了 23%，气溶胶消光作用减弱，总 PAR 和直射 PAR 有了明显的增高，冬小麦光合作用增强，降雨量远高于 5 年均值，地表温度基本稳定，这样的气象条件下，华北地区冬小麦 GPP 提高了 30.1%。

从空间格局来看，京津冀、山东省、河南省 AOD 降幅递减，GPP 增幅递增。但在河南南部 AOD 高于往年，但冬小麦生产力依然提高了，根据图 5 发现，该地为疫情期间华北地区降雨量最多，地表温度增幅最大的区域，弥补了气溶胶所引起的辐射减弱的影响。

从因子探测的结果来看，疫情期间华北地区冬小麦 GPP 的主要驱动力是光合有效辐射，降雨量次之，

地表温度最小。与过去 5 年同期相比，疫情期间华北地区大气气溶胶浓度显著降低，通过改变达到冬小麦冠层的光合有效辐射间接提高了其光合作用效率，在降雨充足的条件下，最终提高了冬小麦 GPP，地理探测器是基于空间统计的结果，说明与降雨量相比，光合有效辐射与 GPP 的空间分布特征相似性更高，解释力更强。本研究利用多源遥感数据，分析了疫情期间华北地区大气气溶胶的变化及对冬小麦生产力的影响。研究进一步证明了大气环境和作物生产力受人类活动的影响。虽得到了一些结论，但有些问题还需深入研究。

研究中我们使用了晴空天气下的 PAR 数据，虽然剔除了云的干扰，很好地反映了气溶胶的消光效应，但是 GPP 数据是 8 d 合成的，并不能很有效的甄别出晴空下冬小麦的生产力。由于现有 CO_2 数据的质量和覆盖范围局限，难以在大尺度上考虑 CO_2 的施肥效应。疫情期间降雨量高于往年同期，提高了冬小麦生产力。同时大气气溶胶会通过改变云凝结核影响降雨格局[30]，降雨也会对大气颗粒物有清洁作用。本研究经过与过去 5 年数据对比，以及驱动力探测，发现大气气溶胶引起的光合有效辐射变化是华北地区冬小麦 GPP 的主要驱动因子，在后续的研究中，我们将结合辐射传输和光能利用率模型，量化研究大气气溶胶对冬小麦 GPP 的影响。

5 结论

5.1 由于有力的病毒防控措施，大气环境明显改善，疫情期间华北地区冬小麦种植区 AOD 与往年同期相比大幅降低，京津冀下降最为显著。

5.2 华北地区气溶胶浓度降低，导致大气气溶胶的遮光作用减弱，光合有效辐射及其直射部分分别提高了 4.8%和 11.1%，冬小麦生产力得以提高，GPP 高于往年同期 30.1%，京津冀地区提高了 55%。

5.3 疫情期间，大气气溶胶引起的光合有效辐射变化是华北地区冬小麦 GPP 的主要驱动因子，降雨量为次驱动因子。

致谢: 本研究利用了 NASA 提供了的多源遥感数据,特此表示感谢.

参考文献:

[1] 中国国务院新闻办公室. 抗击新冠肺炎疫情的中国行动[R/OL]. 北京: 中国国务院新闻办公室, 2020[2020-09-01]. http://www.scio.gov.cn/ztk/dtzt/42313/43142/index.html
The State Council Information Office of China. China's Response to COVID-19[R/OL]. Beijing: The State Council Information Office of China, [2020-09-01]. http://www.scio.gov.cn/ztk/dtzt/42313/43142/index.htmlv

[2] 乐旭, 雷亚栋, 周浩, 等. 新冠肺炎疫情期间中国人为碳排放和大气污染物的变化[J]. 大气科学学报, 2020, 43(2): 265-274
Yue X, Lei X D, Zhou H, et al. Changes of anthropogenic carbon emissions and air pollutants during the COVID-19 epidemic in China[J]. Trans Atmos Sci,2020,43(2):265-274

[3] 毛节泰, 张军华, 王美华. 中国大气气溶胶研究综述[J]. 气象学报, 2002, 60(5): 114-123
Mao J T, Zhang J H, Wang M H, et al. Summary comment on research of atmospheric aerosol in china[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2002, 60(5): 114-123

[4] Boucher O, Randall D, Artaxo P, et al. Climate change 2013: the physical science basis[R/OL]. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2013[2020-09-01]. http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5_WGI-12Doc2b_FinalDraft_Chapter07.pdf

[5] 石广玉, 王标, 张华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应[J]. 大气科学, 2008, 032(004): 826-840
Shi G Y, Wang B, Zhang H, et al. The Radiative and Climatic Effects of Atmospheric Aerosols[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 032(004): 826-840

[6] 方精云, 柯金虎, 唐志尧, 等. 生物生产力的"4P"概念、估算及其相互关系[J]. 植物生态学报, 2001, 25(04): 32-37
Fang J Y, Ke J H, Tang Z Y, et al. Implications and estimations of four terrestrial productivity parameters[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2001,25(04):32-37

[7] 闫慧敏, 刘纪远, 曹明奎. 中国农田生产力变化的空间格局及地形控制作用[J]. 地理学报, 2007, 062(002): 171-180
Yan H M, Liu J Y, Cao M K. Spatial Pattern and Topographic Control of China's Agricultural Productivity Variability[J] Acta Geographica Sinica, 2007, 062(002): 171-180

[8] Proctor J, Hsiang S, Burney J, et al. Estimating global agricultural effects of geoengineering using volcanic eruptions[J]. Nature, 2018, 560(7719): 480-483

[9] Gu L, Baldocchi D D, Wofsy S C, et al. Response of a deciduous forest to the Mount Pinatubo eruption: Enhanced photosynthesis[J]. Science, 2003, 299(5615): 2035-2038

[10] Xie X, Wang T, Yue X, et al. Effects of atmospheric aerosols on terrestrial carbon fluxes and CO2 concentrations in China[J]. Atmospheric Research, 2020,237: 104859

[11] Oliphant A J, Dragoni D, Deng B, et al. The role of sky conditions on gross primary production in a mixed deciduous forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(7): 781-791

[12] Zhang J, Ding J, Zhang J, et al. Effects of increasing aerosol optical depth on the gross primary productivity in China during 2000–2014[J]. Ecological Indicators, 2020, 108: 105761

[13] 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[J]. 生态学报, 2016(07): 2084-2090.
Liu X W, Zhang X Y, ZHANG X Y. A review of the research on crop responses to the increase in aerial aerosol[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016(07): 2084-2090.

[14] Chameides W L, Yu H, Liu S C, et al. Case study of the effects of atmospheric aerosols and regional haze on agriculture: an opportunity to enhance crop yields in China through emission controls?[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1999, 96(24): 13626-13633.

[15] Tie X, Huang R J, Dai W, et al. Effect of heavy haze and aerosol pollution on rice and wheat productions in China[J]. Scientific reports, 2016, 6: 29612.

[16] Li X, Liang H, Cheng W. Spatio-Temporal Variation in AOD and Correlation Analysis with PAR and NPP in China from 2001 to 2017[J]. Remote Sensing, 2020, 12(6): 976.

[17] 王银牌，喻鑫，谢广奇. 中国近 15 年气溶胶光学厚度时空分布特征[J]. 中国环境科学, 2018,38(2): 426-434
Wang Y P, Yu X, Xie G Q. Spatial distribution and temporal variation of aerosol optical depth over China in the past 15years[J]. China Environmental Science, 2018, 38(2): 426-434

[18] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴 2018[M]. 北京：中国统计出版社, 2018
National Bureau of statistics of the people's Republic of China. China Statistical Yearbook 2018[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018

[19] 王海林，刘琼，陈勇航，等. MODIS C006 气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性[J]. 环境科学，2019, 40(1): 44-54
Wang H L, Lin Q, Chen Y H, et al. Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Environmental Science, 2019, 40(1): 44-54

[20] 赵晶晶，刘良云，徐自为，等. 华北平原冬小麦总初级生产力的遥感监测[J]. 农业工程学报, 2011(S1): 346-351
Zhao J J, Liu L Y, Xu Z W, et al. Monitoring winter wheat GPP in Huabei Plain using remote sensing and flux tower[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011(S1): 346-351

[21] Rutan D A, Kato S, Doelling D R, et al. CERES synoptic product: Methodology and validation of surface radiant flux[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2015, 32(6): 1121-1143

[22] Zhang X, Liang S, Wild M, et al. Analysis of surface incident shortwave radiation from four satellite products[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 165: 186-202

[23] 许凤林，郭斌，叶贝，等. GPM IMERG 卫星降水产品在黄淮海平原的适用性研究[J]. 南水北调与水利科技，2019(4): 79-86
Xu F L, Guo B, Ye B, et al. Applicability of GPM Satellite precipitation product in the Huang-Huai-Hai Plain[J] South-to-North Water Diversion and Water Conservancy Science and Technology, 2019(4): 79-86

[24] Chen F, Li X. Evaluation of IMERG and TRMM 3B43 monthly precipitation products over mainland China[J]. Remote Sensing, 2016, 8(6): 472

[25] Wan Z. MODIS land-surface temperature algorithm theoretical basis document (LST ATBD)[J]. Institute for Computational Earth System Science, Santa Barbara, 1999, 75.

[26] 潘学鹏，李改欣，刘峰贵，等. 华北平原冬小麦面积遥感提取及时空变化研究[J]. 中国生态农业学报，2015，23(04): 497-505
Pan X P, Li G X, Liu F G, et al. Using remote sensing to determine spatio-temporal variations in winter wheat growing area in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(04): 497-505

[27] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors - based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.

[28] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J] Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.

[29] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春 PM2.5 和 PM10 污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 418-427.

Zhao C X, Wang Y Q, Wang Y J, et al. Temporal and Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ and PM_{10} Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factor During Winter and Spring in Beijing[J]. Environmental Science, 2014, 35(2): 418-427

[30] 李军霞,银燕, 李培仁,等. 气溶胶影响云和降水的机理和观测研究进展[J]. 气象科学, 2014, 34(5): 581-590

Li J X, Yin Y, Li P R, et al. Advances in research on mechanism and observation of impacts of aerosol on cloud and precipitation.[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2014, 34(5): 581-590