

Environmental Effect Condition (Air Temperature) of Aerosols on Gross Primary Productivity of Vegetation

Muyuan Gao

College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang
Email: 2416764656@qq.com

Received: Apr. 27th, 2020; accepted: May 21st, 2020; published: May 28th, 2020

Abstract

In this study, WRF Chem model is used to drive the reanalysis data of ECMWF, China multi-resolution emission inventory sharing platform (MEIC) anthropogenic emission data is used as anthropogenic emission data, and North China Plain is used as the research area. The research time is April 6, 2016. A group of comparative tests is set up to simulate whether there is anthropogenic emission shadow or not. In response to the environment, the environmental factors with or without aerosol environment are brought into the vegetation photosynthesis model (VPM) to obtain the gross primary productivity (GPP) in both environments. The main result of this paper is that aerosol causes the average temperature to drop in most periods of the study area, and the average temperature to rise slightly in a small part of the study area due to the absorption of hot aerosol. From the analysis of regional scale, the relationship between aerosol environmental effect and aerosol is affected by downward radiation and aerosol species, which results in the temperature can't change synchronously with PM 2.5 concentration, and the phenomenon of temperature rise appears in some regions. During the day, the average temperature decreased by 0.350%~2.667%. Its environmental effect led to a decrease of 0.03%~2.55% in the average GPP of the whole study area on April 6, 2016. From the regional scale analysis, although the aerosol environmental effect (air temperature) is mainly cooling, there is regional warming, resulting in the highest increase of GPP in some areas by more than 5%, but the GPP in the area itself is less than 1 g C m⁻²·day⁻¹, and its absolute value of change is very small. The absolute value of GPP decreased from 0.05 g C m⁻²·day⁻¹~0.2 g C m⁻²·day⁻¹ in Shandong Province, Jiangsu Province, Henan Province and Anhui Province, and increased from 0.05 g C m⁻²·day⁻¹~0.1 g C m⁻²·day⁻¹ in Northern Jiangsu Province.

Keywords

WRF-Chem, VPM, GPP, Haze

气溶胶的环境效应(气温)对植被总初级生产力的影响

高牧原

浙江师范大学, 地理与环境科学学院, 浙江 金华

Email: 2416764656@qq.com

收稿日期: 2020年4月27日; 录用日期: 2020年5月21日; 发布日期: 2020年5月28日

摘要

本研究利用WRF-Chem模式, 以欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的再分析数据作为驱动数据, 中国多分辨率排放清单共享平台(MEIC)人为源排放数据作为人为源排放数据, 以华北平原作为研究区, 研究时间为2016年4月6日, 设置一组对比试验, 分别模拟有无人源排放影响下的环境, 将有无气溶胶环境的环境因素带入到植被光合作用模型(Vegetation Photosynthesis Model, VPM)模型中获得两者环境下的总初级生产力(Gross primary productivity, GPP)。本文主要研究结果是气溶胶导致研究区内大部分时段平均气温下降, 小部分时段因吸热气溶胶原因导致平均气温, 轻微上升。从区域尺度分析, 气溶胶环境效应与气溶胶的关系, 受下行辐射与气溶胶种类影响, 导致气温不能随PM 2.5浓度同步变化, 在一些区域出现气温升高的现象。白天平均气温均有所下降, 下降范围0.350%~2.667%。其环境效应导致2016年4月6日整个研究区平均GPP下降0.03%~2.55%。从区域尺度分析, 虽然气溶胶环境效应(气温)总体以降温为主, 但存在区域性增温, 导致部分地区GPP增加最高增加超过5%, 但其地区本身GPP却小于 $1 \text{ g C m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$, 其变化绝对值却很小。GPP减少绝对值的地区位于山东省, 江苏省, 河南省, 安徽省交界处减少为 $0.05 \text{ g C m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1} \sim 0.2 \text{ g C m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$, 增加绝对值在苏北地区增加为 $0.05 \text{ g C m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1} \sim 0.1 \text{ g C m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 。

关键词

WRF-Chem, VPM, GPP, 雾霾

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大气气溶胶是液态或固态微粒在空气中的悬浮体系。它们能作为冰晶和水滴的凝结核、太阳辐射的吸收体和散射体, 并参与各种化学循环, 是大气的重要组成部分。大气气溶胶产生的天然或人为原因有: 雾、霾、烟等[1]。随着全球经济的飞速发展, 人类活动不断向大气中排放大量的颗粒物, 导致全球大气中的气溶胶含量大幅度上升, 这种上升趋势在东亚和南亚尤其显著[2] [3] [4]。气溶胶生态学效应的研究在近十年来才逐渐得到重视[5] [6] [7] [8]。目前大气气溶胶的研究主要集中在对其成分来源、大气物理化学和对人类健康的影响上。大气气溶胶粒子能够吸收、散射太阳辐射, 直接影响全球的辐射平衡[9]。太阳辐射是陆地生态系统 CO_2 吸收和水分蒸发的能量来源, 太阳辐射的任何变化都可能显著地改变陆地生态系统生物地球化学循环过程。另外, 当云结合中含有气溶胶粒子, 气溶胶浓度的变化会影响云量、云的寿命及其光学特性, 从而引起全球

和区域内的温度及降水的变化[10], 进而影响陆地生态系统的关键生物地球化学等过程[11][12][13][14]。

大气气溶胶通过吸收和反射太阳辐射, 从而影响地面 - 大气的辐射平衡, 此现象属于气溶胶的直接效应(direct effect)。同时云的凝结核为气溶胶粒子, 气溶胶浓度的变化会影响云量、云的寿命及云的光学特性, 从而引起全球和区域内的温度及降水的变化[9][11][15], 这称之为气溶胶的间接效应(indirect effect)。人为气溶胶(BC、有机碳、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 dust)对总体环境的影响是起到降温作用, 其中直接辐射导致辐射总量减少 $0.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 而间接云反照率影响导致减少 $0.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ [16][17]。吸光性气溶胶, 如 BC, 能使大气层增温。而光散射粒子, 如 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和有机物可以对地表起冷却作用。有研究显示, California 观察到的季节性温度变化趋势也与气溶胶浓度变化趋势是一致的, 这些数据表明, 气溶胶浓度与近地面气温呈负相关关系, 气温气溶胶浓度增大可能导致近地面气温下降, 相反, 人为气溶胶浓度的减少导致所观察到的近地面气温上升。由于气溶胶的降温效应, 因此能部分抵消温室效应导致的气温升高, 继而影响植物生长[18]。此外, 气溶胶的辐射效应还会使陆地和海洋之间的温度差变小, 使得季风环流减弱, 减少了降雨量并改变了降水格局[11][19][20]。

现阶段对气溶胶共同变化的冠层温度, 空气湿度, 饱和水汽压差(vapor pressure deficit, VPD)等环境因子可能会对陆地生态系统产生的影响研究较少, 且没有进行量化的深入分析[5][21][22]。由于分析数据通常以实测为主, 缺少系统的研究, 无法剥离气溶胶对环境因素的影响, 使得无法评估气溶胶对温度等环境因素条件的影响, 这在很大程度上影响区域碳平衡的估计。所以进一步系统地研究雾霾对植物光合的冠层光合的影响是非常必要的。因此本研究利用区域动力 - 化学耦合模式(Weather Research and Forecasting Chemical model, WRF-Chem), 与 VPM 模型。通过 WRF-Chem 并设立对比试验(无人源影响), 获得气溶胶对环境因素(温度)的影响, 再利用 VPM 模型, 探究由于气溶胶产生的外界环境的变化(温度)对植物初级生产力的影响。

2. 试验设计与研究区域介绍

本研究选取 2016 年 4 月 6 日华北地区的雾霾天气为例, 将以欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的再分析数据作为驱动数据, 人为源排放数据来自中国多分辨率排放清单共享平台利用采用 WRF-Chem 模拟得到的雾霾事件中的现实气象数据(温度), 及对照试验的气象数据模拟结果。将得到的气温数据结合 MODIS 的增强植被指数(EVI), 陆地表面水分指数(LSWI)数据和土地覆盖分类产品(MCD12Q1), 以及 Himawar-8 的 PAR 数据, 运用 VPM 模型得到区域尺度下的植被总初级生产力(GPP), 并与无气溶胶影响下得到的结果进行比较。最后分析在有气溶胶影响下环境因子(气温)对植被区域尺度总初级生产力的影响强度。

研究地区华北平原是中国第二大平原, 位于黄河下游, 由黄河、淮河、海河等冲积而成。跨越北京、天津、河北、河南、安徽、江苏、山西等省(直辖市), 面积约 32.6 万 km^2 , 粮食作物以冬小麦、夏玉米为主。华北平原属于暖温带季风气候, 四季变化明显, 地势平坦, 海拔多在 50 m 以下, 便于耕作, 加以土质肥沃, 夏季炎热多雨, 年降水量丰富, 自古以来为中国重要的农业区[23]。

3. 数据介绍

3.1. ECMWF 数据

本文使用 ECMWF 的再分析资料作为气象驱动数据(<http://www.ecmwf.int/products/data/>), 该数据包括的气象参数有边界层高度、湿度、风向、风速、气温、气压等气象参数, 数据空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 。

3.2. 人为源数据

本研究模拟时段为 2016 年, 选用的中国多分辨率排放清单共享平台(MEIC, Multi-resolution Emission Inventory for China)获取人为源排放数据(<http://www.meicmodel.org>) [24]。版本为 MEICv.1.3, 空间分辨率

0.25° × 0.25°。

3.3. MODIS 数据

模型运行所需的植被指数 EVI 和 LSWI 是由 MODIS 陆地产品的地表反射率产品 MOD09A1 (<http://ladweb.nascom.nasa.gov/>), 计算得到的[25] [26]。该产品空间分辨率 500 m, 时间分辨率 8 天。本研究选用在研究时间内 4 月 6 日和 4 月 14 日地表反射率数据代表的其前后 4 天的地表反射率。

本研究选用基于 IGBP 土地覆盖分类方法。空间分辨率为 500 m, 来提供不同生物群系的温度及相关信息。MCD12Q1 的分类方案见表 1。本研究采用的方案是 IGBP 全球植被分类[27]。

Table 1. MCD12Q1 classification scheme

表 1. MCD12Q1 分类方案

数据集	Land_cover_type1	Land_cover_type2	Land_cover_type3	Land_cover_type4	Land_cover_type5
分类方案 DN	IGBP 全球植被分类	马里兰大学植被分类	由 MODIS 数据得到的 叶面积指数/植被 光有效辐射分量	由 MODIS 数据得到的 净初级生产量	种植功能分类
0		水	水	水	水
1	常绿针叶林	常绿针叶林	草地/谷类作物	常绿针叶 植被	常绿针叶林
2	常绿阔叶林	常绿阔叶林	灌木	常绿阔叶 植被	常绿阔叶林
3	落叶针叶林	落叶针叶林	阔叶作物	落叶针叶 植被	落叶针叶林
4	落叶阔叶林	落叶阔叶林	热带草原	落叶阔叶 植被	落叶阔叶林
5	混交林	混交林	阔叶林	一年期落叶阔叶林植被	灌木
6	稠密灌丛	稠密灌丛	针叶林	一年期落草地植被	草地
7	稀疏灌丛	稀疏灌丛	非植被	非植被用地	谷物类
8	木本疏树草原	木本疏树草原	城市	城市	阔叶作物
9	稀疏草原	稀疏草原			城市建筑区
10	草地	草地			雪与冰
11	永久湿地				稀疏植被
12	农用地	农用地			
13	城市建筑区	城市建筑区			
14	农用地/自然植被拼接				
15	雪和冰				
16	稀疏植被	稀疏植被			
17	水				
254	未分类	未分类	未分类	未分类	未分类
255	背景值	背景值	背景值	背景值	背景值

本研究利用 2016 年 4 月的光合有效辐射, 选用的为全幅图像, 时间分辨率为 1 小时, PAR 数据单位为 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 与本研究最大光能利用率 ε_0 的单位 $\text{g C m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}\cdot(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})^{-1}$ 不通用, 所以需要进行单位换算, 其换算系数为 0.219 [28]。

4. 模型介绍

4.1. WRF-Chem 介绍

WRF-Chem 模式作为新一代中尺度预报模式，是在 WRF 模式基础上引进了化学模块，实现了气象模块和化学模块的完全在线耦合。该模式考虑了大气污染物的平流输送、湍流扩散、干湿沉降、气相化学、气溶胶形成和光解率等过程，可用于雾霾天气过程的数值模拟[29]。

4.2. VPM 模型介绍

VPM 模型是基于光能利用率原理建立的植被生产力模型。该模型具有结构简单，模拟精度高的特点，目前已被广泛运用于区域和全球尺度生态系统生产力的估算研究中[30] [31] [32]。VPM 的驱动变量包含：遥感数据为驱动变量和涡度相关通量数据。模型的原理为，利用光合有效辐射(absorbed photosynthetic active radiation APAR)与植被吸收的光能利用率相乘获得 GPP。植被冠层由非光合有效植被(nonphotosynthetic vegetation, NPV)和光合有效植被(photosynthetically active vegetation, PAV)两部分组成 VPM 模型，而相应地，冠层利用的 PAR 比例($FPAR_{canopy}$)也由两个部分组成：

$$FPAR_{canopy} = FPAR_{PAV} + FPAR_{NPV} \quad (4.1)$$

因此，VPM 的计算公式为：

$$GPP = \varepsilon_g \times FPAR_{PAV} \times PAR \quad (4.2)$$

PAR 为光合有效辐射； $FPAR_{PAV}$ 为绿色叶片吸收光合有效辐射的比率。模型中光能利用率(ε_g)受温度限制因子(T_{scalar}) [33]和最大光能利用率(ε_0)、水分限制因子(W_{scalar})以及物候(P_{scalar})的函数[34]影响。公式如下：

$$\varepsilon_g = \varepsilon_0 \times T_{scalar} \times W_{scalar} \times P_{scalar} \quad (4.3)$$

$$T_{scalar} = \frac{(T - T_{min})(T - T_{max})}{(T - T_{min})(T - T_{max}) - (T - T_{opt})^2} \quad (4.4)$$

式中： T 为气温(°C)； T_{min} ， T_{max} 和 T_{opt} 分别为植被光合作用最低、最高和最适温度，当 T 小于 T_{min} 时， T_{scalar} 设为 0。 ε_0 是表示最大光能利用率，其数值随生物群系变化的参数， T_{min} ， T_{max} 和 T_{opt} 采用经验值，如表 2 所示[35]。

W_{scalar} 表示水分对光能利用率的影响并使用地表水指数(LSWI)进行计算。

$$W_{scalar} = \frac{1 + LSWI}{1 + LSWI_{max}} \quad (4.5)$$

式中 $LSWI_{max}$ 为生长季最大陆地表面水分指数。

式(4.2)中， $FPAR_{PAV}$ 表示为 EVI 的线性函数：

$$FPAR = \alpha \times EVI \quad (4.6)$$

式中 α 等于 1 [30]。

增强植被指数(EVI)和陆地表面水分指数(LSWI)，用于模型模拟：

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + 6 \times \rho_{red} - 7.5 \times \rho_{blue} + 1} \quad (4.7)$$

$$LSWI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{swir}} \quad (4.8)$$

Table 2. List of relevant parameters of different biomes
表 2. 各生物群系相关参数列表

类别	T_{\min} (°C)	T_{opt} (°C)	T_{\max} (°C)	ε_0 [$\text{g C m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})^{-1}$]
常绿针叶林	-1	20	40	0.078
常绿阔叶林	2	28	48	0.078
落叶针叶林	-1	20	40	0.078
落叶阔叶林	-1	20	40	0.078
混交林	-1	19	48	0.078
郁闭灌木林	-1	25	48	0.078
稀疏灌木林	1	31	48	0.078
乔木稀树草原	-1	24	48	0.078
稀树草原	1	30	48	0.078
草地	0	27	48	0.078
永久湿地	-1	20	40	0.078
耕地	-1	30	48	0.078
城市与建设用地	1	30	48	0.078
耕地自然植被混合区	0	27	48	0.078
冰雪	-1	20	40	0.078
贫瘠植被	0	27	48	0.078

式中： ρ_{red} 、 ρ_{nir} 、 ρ_{swir} 和 ρ_{blue} 分别是红波段、近红外波段、短红波段和蓝波段的地表反射率。

P_{scalar} 表征叶龄对光合作用的影响。叶片出现到充分舒展阶段的计算公式为：

$$P_{\text{scalar}} = \frac{1 + \text{LSWI}}{2} \quad (4.9)$$

叶片舒展后：

$$P_{\text{scalar}} = 1 \quad (4.10)$$

5. WRF-Chem 模型模拟结果分析

图 1、图 2 分别是 4 月 6 日白天的气溶胶浓度分布和白天的平均温度分布图，受气溶胶的影响，在大部分地区，如北面的燕山山脉，西面为太行山脉沿线，山东省，江苏省，安徽省，河南省交界处，出现明显降温区域，最低降温达到 2°C。但研究显示并不是 PM 2.5 浓度越高降温越明显。其主要的原因：

- 1) 当地的下行短波辐射值高于其他地方，导致 PM 2.5 浓度相对高值区较低时也能引起较大的降温。
- 2) 不同种类气溶胶，对气温的影响不同。很多研究表明气溶胶对辐射的直接效应和间接效应影响不同，导致气温受到的影响纯在差异，已经证明不同类型的气溶胶种类如： SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 BC。 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 气溶胶属于散射型气溶胶，能够吸收和散射太阳辐射，从而产生降温效应。黑碳气溶胶作为重要的吸收性气溶胶，对太阳辐射有强烈吸收，从而加热大气。虽然这样能减少到达地表的短波辐射，但是地面气温还是会因为黑碳的吸收效应增加；黑碳气溶胶间接辐射强迫很小并且有时事增温有时事降温，具有很强的不确定性，这主要是由于云的反馈过程比较复杂造成的[36] [37] [38] [39]。

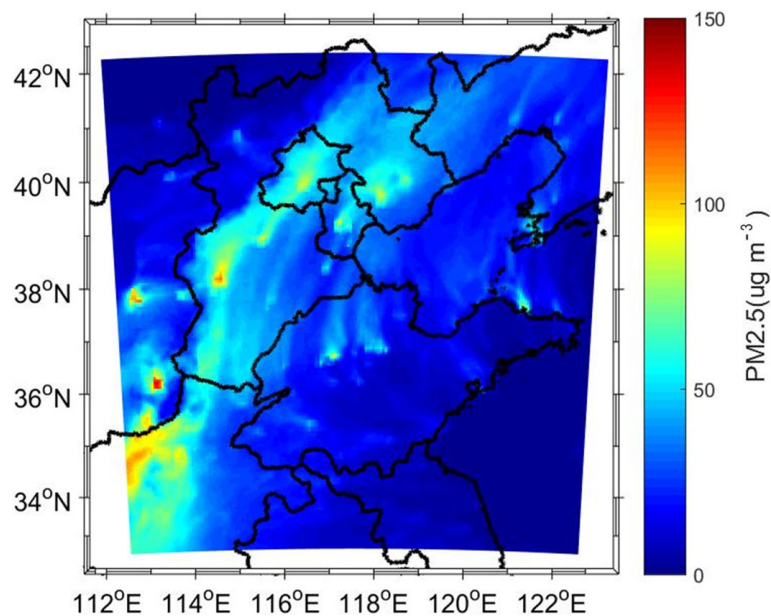


Figure 1. PM 2.5 average concentration distribution on April 6
图 1. 4 月 6 日 PM 2.5 平均浓度分布图

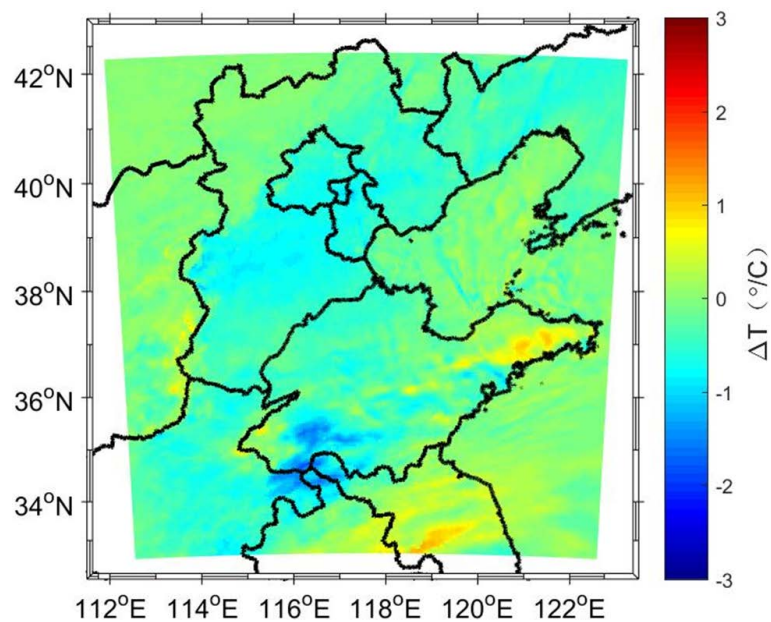


Figure 2. Average temperature distribution in daytime on April 6
图 2. 4 月 6 日白天的平均温度分布图

6. 气溶胶环境效应对区域尺度 GPP 的影响

本研究以 4 月 6 日的雾霾情况为例分析气溶胶对区域尺度 GPP 的影响。如图 3、图 4 是 4 月 6 日 GPP 有无气溶胶状况，图片去除水体，未分类，背景值，城市和建筑区土地类型等地物类型。由于气象要素对 GPP 的影响在 $-0.2 \text{ g C m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1} \sim 0.2 \text{ g C m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ ，所以仅观察 GPP 分布图很难分析气溶胶对 GPP 的影响。

图 5 是 4 月 6 日研究区无气溶胶下环境下 GPP 减去有气溶胶下环境 GPP，得到 GPP 的变化趋势图。

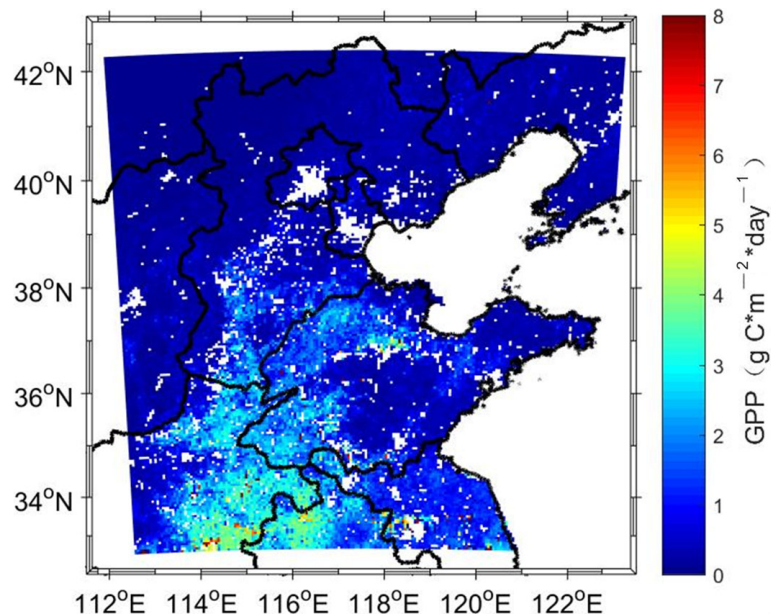


Figure 3. GPP in the study area without aerosol influence on April 6
图 3. 4月6日无气溶胶影响下研究区 GPP

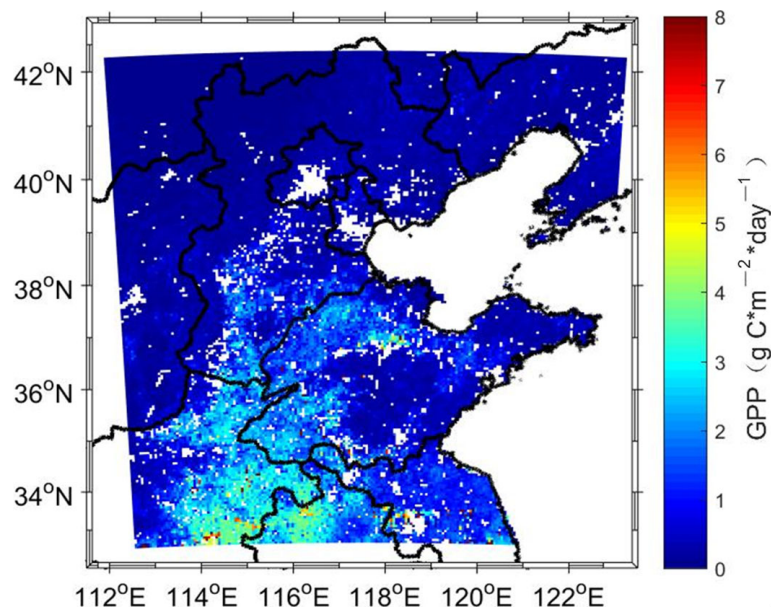


Figure 4. GPP in the study area under the influence of aerosol on April 6
图 4. 4月6日气溶胶影响下研究区 GPP

图 6 则是对 4 月 6 日研究区 GPP 变化趋势除以无气溶胶影响下 GPP 变化百分比。图 7 是 4 月 6 日研究区无气溶胶下环境下气温减去有气溶胶下环境气温，得到的气温变化趋势图。图 8 则是对 4 月 6 日研究区 GPP 变化趋势除以无气溶胶影响下的气温变化百分比。GPP 研究区 PM_{2.5} 平均浓度分布图和 GPP 分布图。由图 7 与图 8 可以看出，在山东省，江苏省，河南省，安徽省交界处同时存在降温，降温范围在 1°C~2°C，5%~8%，而在苏北地区存在一定范围的增温，增温范围在 0.5°C~1°C，2%~5%，气温差值与气温变化百分比变化幅度，基本一致，同时图 5、图 6 在同一地区 GPP 减少和增加，减少为 0.05 g C m⁻²·day⁻¹~0.2 g C m⁻²·day⁻¹，2%~5%，增加为 0.05 g C m⁻²·day⁻¹~0.1 g C m⁻²·day⁻¹，1%~5%。在山东省东部区域也存在一

定程度升温最高 1°C ，6%，GPP 变化百分比也出现高增量最高 5%，但 GPP 差值并数值不高最高为 $0.05 \text{ g C m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ，但 GPP 变化百分比却显示很高超过 5%。其主要原因是见图 3 当地 GPP 在无气溶胶环境下小于 $1 \text{ g C m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ ，其基数相较于其他地区较低。

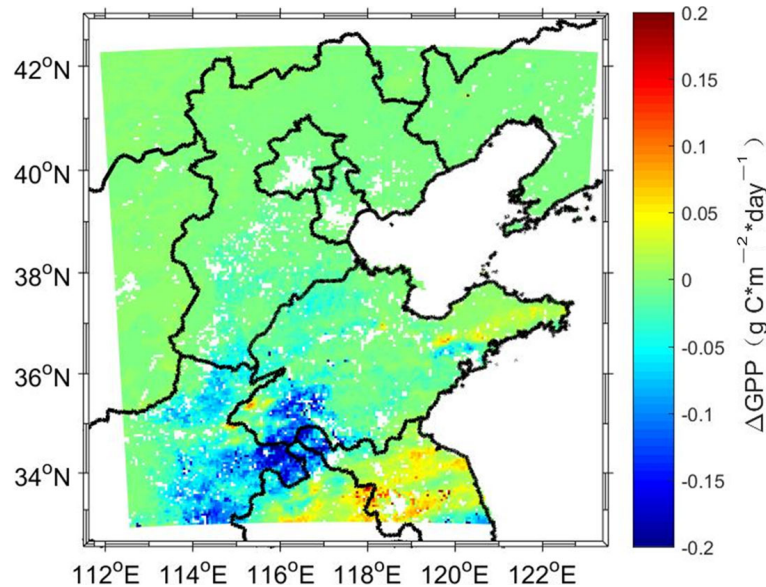


Figure 5. GPP difference in the presence or absence of aerosol on April 6
图 5. 4 月 6 日有无气溶胶环境下 GPP 差值

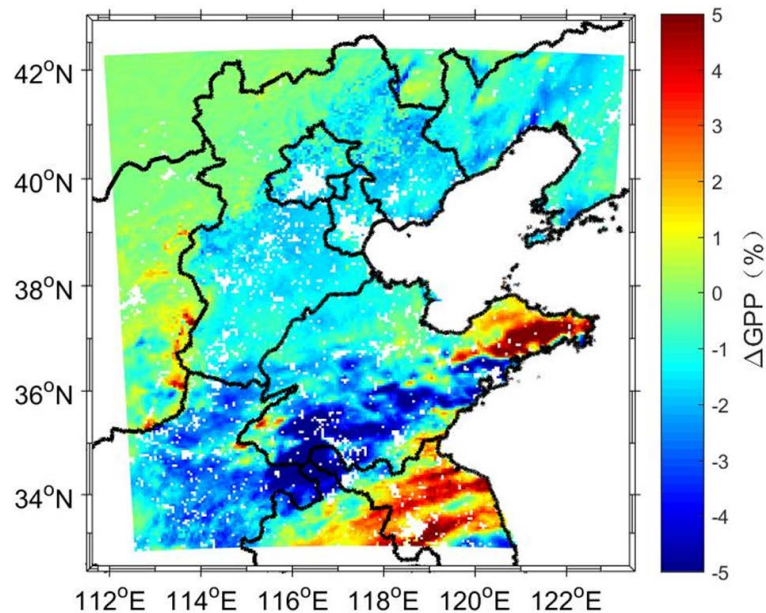


Figure 6. Percentage change of GPP under the influence of aerosol on April 6
图 6. 4 月 6 日气溶胶影响下 GPP 变化百分比

7. 气溶胶环境效应对区域尺度 GPP 的影响

本研究对 2016 年 4 月 1 日~2016 年 4 月 17 日华北地区，雾霾天气产生的气溶胶环境效应(气温)对植物 GPP 在总平均值，区域尺度和不同植物种类的影响。主要研究结果如下：

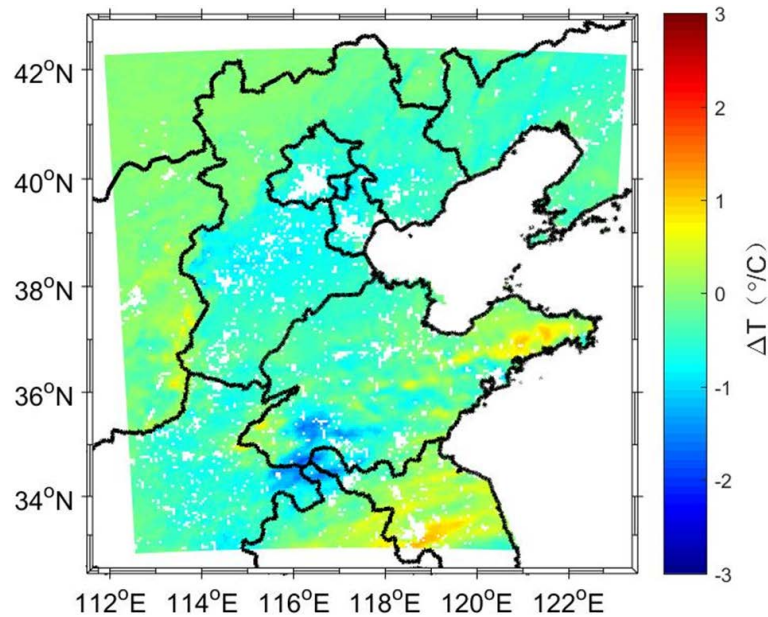


Figure 7. Air temperature difference in the presence or absence of aerosol on April 6

图 7. 4月6日有无气溶胶环境下气温差值

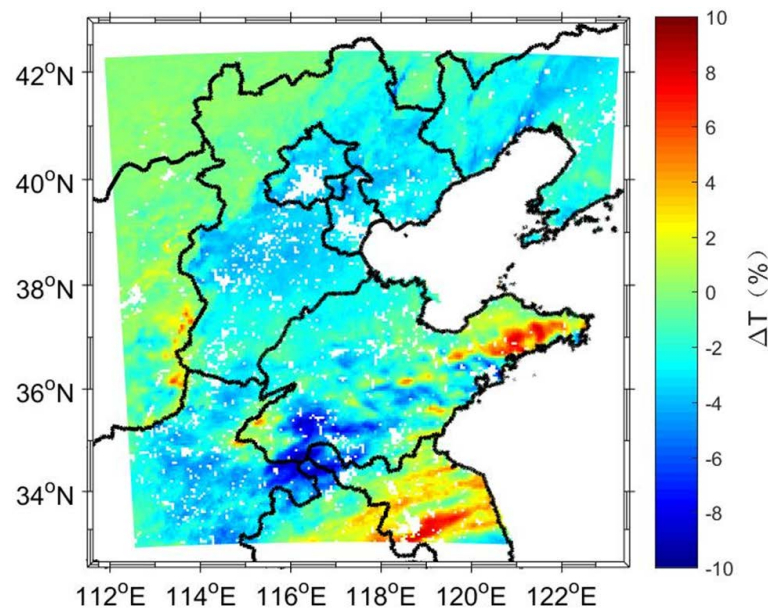


Figure 8. Percentage change of air temperature with or without aerosol on April 6

图 8. 4月6日有无气溶胶环境下气温变化百分

1) 从区域尺度分析, 气溶胶模拟结果出现两个高值区域分别是北面的燕山山脉, 西面为太行山脉沿线。其原因为山体的阻挡与疏导作用。此结果与龙鑫[40]等人的研究结果相一致。气溶胶环境效应与气溶胶的关系受下行辐射与气溶胶种类影响, 导致气温不能随 PM 2.5 浓度同步变化, 甚至在一些区域出现气温升高的现象。气溶胶环境效应(气温)变化会影响植被气孔导度, 光合、呼吸、蒸腾等代谢过程。受气溶胶影响, 白天平均气温均有所下降, 下降范围为 0.350%~2.667%。从而导致 2016 年 4 月 6 日整个研究区平均 GPP 下降 0.03%~2.55%。

2) 气溶胶环境效应(气温)总体以降温为主,但存在区域性增温,导致部分地区 GPP 最高增加超过 5%,但其地区本身 GPP 小于 $1 \text{ g C m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$, 其变化绝对值很小。GPP 绝对值减少的地区位于山东省,江苏省,河南省,安徽省交界处,减少数值为 $0.05 \text{ g C m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}\sim 0.2 \text{ g C m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$, 增加绝对值在苏北地区增加数值为 $0.05 \text{ g C m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}\sim 0.1 \text{ g C m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 。

本研究虽然获得实验时间内气溶胶环境效应对 GPP 产生负面影响,其主要原因是本研究的研究时间设置在 4 月份,气温低于植物最适温度,当出现降温时,导致 GPP 减少。而有研究表明当实验设计在夏天时,气溶胶引发的降温可以缓解温室气体产生的增温,从而增加 GPP [41] [42]。所以在之后的研究中需要在更长时间尺度中探究气溶胶环境效应对 GPP 的影响。

参考文献

- [1] 张安定. 遥感原理与应用题解[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [2] Hsu, N.-C., Gautam, R., Sayer, A.-M., *et al.* (2012) Global and Regional Trends of Aerosol Optical Depth over Land and Ocean Using SeaWiFS Measurements from 1997 to 2010. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **12**, 8037-8053. <https://doi.org/10.5194/acp-12-8037-2012>
- [3] Yoon, J., Burrows, J.-P., Vountas, M., *et al.* (2014) Changes in Atmospheric Aerosol Loading Retrieved from Space-Based Measurements during the Past Decade. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **14**, 6881-6902. <https://doi.org/10.5194/acp-14-6881-2014>
- [4] Hu, T., Sun, Z.B. and Li, Z.X. (2011) Features of Aerosol Optical Depth and Its Relation to Extreme Temperatures in China during 1980-2001. *Acta Oceanologica Sinica*, **30**, 33-45. <https://doi.org/10.1007/s13131-011-0103-x>
- [5] Gu, L.H., Baldocchi, D., Verma, S.B., *et al.* (2002) Advantages of Diffuse Radiation for Terrestrial Ecosystem Productivity. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **107**, 1-2. <https://doi.org/10.1029/2001JD001242>
- [6] Mercado, L.M., Bellouin, N., Sitch, S., *et al.* (2009) Impact of Changes in Diffuse Radiation on the Global Land Carbon Sink. *Nature*, **458**, 1014-1017. <https://doi.org/10.1038/nature07949>
- [7] Cochan, D.S., Xu, J., Greenwald, R., *et al.* (2002) Impact of Atmospheric Aerosol Light Scattering and Absorption on Terrestrial Net Primary Productivity. *Global Biogeochemical Cycles*, **16**, 31-37. <https://doi.org/10.1029/2001GB001441>
- [8] Knohl, A. and Baldocchi, D.D. (2008) Effects of Diffuse Radiation on Canopy Gas Exchange Processes in a Forest Ecosystem. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, **113**, Article ID: G02023. <https://doi.org/10.1029/2007JG000663>
- [9] Hansen, J., Nazarenko, L., Ruedy, R., *et al.* (2005) Earth's Energy Imbalance: Confirmation and Implications. *Science*, **308**, 1431-1435. <https://doi.org/10.1126/science.1110252>
- [10] Liepert, B.G., Feichter, J., Lohmann, U., *et al.* (2004) Can Aerosols Spin Down the Water Cycle in a Warmer and Moister World? *Geophysical Research Letters*, **31**, Article ID: L06207. <https://doi.org/10.1029/2003GL019060>
- [11] Ramanathan, V., Crutzen, P.-J., Kiehl, J.-T., *et al.* (2001) Aerosols, Climate, and the Hydrological Cycle. *Science*, **294**, 2119-2124. <https://doi.org/10.1126/science.1064034>
- [12] Lohmann, U. and Feichter, J. (2005) Global Indirect Aerosol Effects: A Review. *Atmospheric Chemistry & Physics*, **5**, 715-737. <https://doi.org/10.5194/acp-5-715-2005>
- [13] Natalie, M. (2011) Aerosol Indirect Effect on Biogeochemical Cycles and Climate. *Science*, **334**, 794-796. <https://doi.org/10.1126/science.1207374>
- [14] Mahowald, N.-M., Engelstaedter, S., Luo, C., *et al.* (2009) Atmospheric Iron Deposition: Global Distribution, Variability, and Human Perturbations. *Ann Rev Mar Sci*, **1**, 245-278. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163727>
- [15] Rosenfeld, D., Lohmann, U., Raga, G.B., *et al.* (2008) Flood or Drought: How do Aerosols Affect Precipitation? *Science*, **321**, 1309-1313. <https://doi.org/10.1126/science.1160606>
- [16] Osborne, J.-M. and Lambert, F.-H. (2013) The Response of Northern Hemisphere Mid-Latitude Precipitation to Aerosol Forcing.
- [17] Parry, M.L. (2007) Climate Change 2007, Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [18] Novakov, T., Kirchstetter, T.-W., Menon, S., *et al.* (2008) Response of California Temperature to Regional Anthropogenic Aerosol Changes. *Geophysical Research Letters*, **35**, 116-122. <https://doi.org/10.1029/2008GL034894>

- [19] Song, F.F., Zhou, T.J. and Qian, Y. (2014) Responses of East Asian Summer Monsoon to Natural and Anthropogenic Forcings in the 17 Latest CMIP5 Models. *Geophysical Research Letters*, **41**, 596-603. <https://doi.org/10.1002/2013GL058705>
- [20] Zhang, H., Wang, Z.L., Wang, Z.Z., et al. (2012) Simulation of Direct Radiative Forcing of Aerosols and Their Effects on East Asian Climate Using an Interactive AGCM-Aerosol Coupled System. *Climate Dynamics*, **38**, 1675-1693. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1131-0>
- [21] Arden, G. and Liu, Y.M. (2006) Effect of Smoke and Clouds on the Transmissivity of Photosynthetically Active Radiation inside the Canopy. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, **6**, 5909-5934. <https://doi.org/10.5194/acpd-5-5909-2005>
- [22] Min, Q.L. (2005) Impacts of Aerosols and Clouds on Forest-Atmosphere Carbon Exchange. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **110**, Article ID: D06203. <https://doi.org/10.1029/2004JD004858>
- [23] 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, 27(S1): 346-351.
- [24] Zhang, R.Y., Wang, L., Khalizov, A.-F., et al. (2009) Formation of Nanoparticles of Blue Haze Enhanced by Anthropogenic Pollution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **106**, 17650-17654. <https://doi.org/10.1073/pnas.0910125106>
- [25] Huete, A.R., Liu, H.Q., Batchily, K. and van Leeuwen, W. (1997) A Comparison of Vegetation Indices over a Global Set of TM Images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, **59**, 440-451. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00112-5)
- [26] Xiao, X., Boles, S., Frolking, S., et al. (2010) Observation of Flooding and Rice Transplanting of Paddy Rice Fields at the Site to Landscape Scales in China Using VEGETATION Sensor Data. *International Journal of Remote Sensing*, **23**, 3009-3022. <https://doi.org/10.1080/01431160110107734>
- [27] Loveland, T.R., Reed, B.C., Brown, J.F., et al. (2000) Development of a Global Land Cover Characteristics Database and IGBP DIS Cover from 1 km AVHRR Data. *International Journal of Remote Sensing*, **21**, 1303-1330. <https://doi.org/10.1080/014311600210191>
- [28] 周允华, 项月琴, 栾禄凯. 光合有效量子通量密度的气候学计算[J]. 气象学报, 1996(4): 447-455.
- [29] Grell, G.A., Peckham, S.E., Schmitz, R., et al. (2005) Fully Coupled "Online" Chemistry within the WRF Model. *Atmospheric Environment*, **39**, 6957-6975. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.04.027>
- [30] Xiao, X.M., Zhang, Q.Y., Braswell, B., et al. (2004) Modeling Gross Primary Production of Temperate Deciduous Broadleaf Forest Using Satellite Images and Climate Data. *Remote Sensing of Environment*, **91**, 256-270. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.03.010>
- [31] Xiao, X.M., Hollinger, D., Aber, J., et al. (2004) Satellite-Based Modeling of Gross Primary Production in an Evergreen Needleleaf Forest. *Remote Sensing of Environment*, **89**, 519-534. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.008>
- [32] 贾文晓, 刘敏, 尹才, 等. 基于 FLUXNET 观测数据与 VPM 模型的森林生态系统光合作用关键参数优化及验证[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1095-1102.
- [33] Raich, J.-W., Rastetter, E.-B., Melillo, J.-M., et al. (1991) Potential Net Primary Productivity in South America: Application of a Global Model. *Ecological Applications*, **1**, 399-429. <https://doi.org/10.2307/1941899>
- [34] Running, S.-W., Nemani, R.-R., Heinsch, F.-A., et al. (2004) A Continuous Satellite-Derived Measure of Global Terrestrial Primary Production. *Bioscience*, **54**, 547-560. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0547:ACSMOG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0547:ACSMOG]2.0.CO;2)
- [35] Zhang, Y. and Xiao, X.M., Jin, C., et al. (2016) Consistency between Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence and Gross Primary Production of Vegetation in North America. *Remote Sensing of Environment*, **183**, 154-169. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.05.015>
- [36] Ackerman, A.-S., Toon, O.-B., Stevens, D.-E., et al. (2000) Reduction of Tropical Cloudiness by Soot. *Science*, **288**, 1042-1047. <https://doi.org/10.1126/science.288.5468.1042>
- [37] Kristjánsson, J.-E. (2002) Studies of the Aerosol Indirect Effect from Sulfate and Black Carbon Aerosols. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **107**, 1. <https://doi.org/10.1029/2001JD000887>
- [38] Highwood, E.-J. and Kinnersley, R.-P. (2006) When Smoke Gets in Our Eyes: The Multiple Impacts of Atmospheric Black Carbon on Climate, Air Quality and Health. *Environment International*, **32**, 560-566. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.12.003>
- [39] Bond, T.C., Doherty, S.J., Fahey, D.W., et al. (2013) Bounding the Role of Black Carbon in the Climate System: A Scientific Assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **118**, 5380-5552. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>
- [40] 龙鑫. 基于卫星遥感观测和 WRF-Dust/Chem 的空气质量模拟[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院

(地球环境研究所), 2016.

- [41] Xu, Y., Unger, N., Harper, K., *et al.* (2017) Ozone and Haze Pollution Weakens Net Primary Productivity in China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **17**, 6073-6089. <https://doi.org/10.5194/acp-17-6073-2017>
- [42] Novakov, T., Kirchstetter, T.W., Menon, S., *et al.* (2008) Response of California Temperature to Regional Anthropogenic Aerosol Changes. *Geophysical Research Letters*, **35**, L19808. <https://doi.org/10.1029/2008GL034894>