

# 大气污染对京津冀地区夏季植被生长峰值的影响

鲍艳磊<sup>1,2,3,5</sup>, 吴朝阳<sup>4\*</sup>, 郑东博<sup>1,2,3</sup>

(1. 河北师范大学地理科学学院, 石家庄 050024; 2. 河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050024;  
3. 河北省环境变化遥感识别技术创新中心, 石家庄 050024; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;  
5. 河北水利电力学院水利工程系, 河北 沧州 061001)

**摘要:** 植被物候是指示气候变化的重要因子, 大气污染物变化对植被生长峰值的影响尚未得到充分探究。论文利用卫星观测的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)2001—2015年的时序数据, 分析京津冀地区植被生长季峰值(peak of growing season, POS)、生长期最大值(maximum vegetation growth, NDVI<sub>max</sub>)的时间变化, 探究大气污染物(PM<sub>2.5</sub>)对 POS、NDVI<sub>max</sub>的影响, 阐明 PM<sub>2.5</sub>对 POS、NDVI<sub>max</sub>与气象因子响应机制的影响。结果表明: 燕山和太行山区 POS 较早且 NDVI<sub>max</sub>较大, 东南部平原 POS 较晚, 张家口地区、燕山和太行山区 NDVI<sub>max</sub>呈显著增加趋势。季前降水(季前指 POS 或 NDVI<sub>max</sub>与影响因子偏相关系数绝对值最大值对应的时间距多年平均 POS 的时间长度)对 POS、NDVI<sub>max</sub>的影响均较大, 显著相关区域分别占研究区域的 12.9%、15.2%; 温度影响所占比例分别为 8.7%、5.9%( $P < 0.1$ )。在 PM<sub>2.5</sub>的影响下, 不同季节不同地区降水和温度的反馈不同; 物候对由 PM<sub>2.5</sub>引起的降水和温度变化的响应同样具有空间异质性。PM<sub>2.5</sub>导致中东部平原和北部燕山地区降水对 POS 的提前作用被低估, 张家口北部丘陵地区 POS 的提前作用被高估, 东部、南部平原和坝上地区温度对 POS 的提前作用被高估; 整体来看, PM<sub>2.5</sub>对 NDVI<sub>max</sub>的间接作用表现为降低 NDVI<sub>max</sub>( $P < 0.1$ )。长期来看, 京津冀大部分地区, PM<sub>2.5</sub>的直接作用表现为 PM<sub>2.5</sub>使 POS 提前、NDVI<sub>max</sub>增大( $P < 0.1$ )。研究结果主要揭示了京津冀地区植被生长峰值对气候变化及大气污染物的响应, 对深入理解不同地区植被生长对气候变化和大气污染变化的响应和反馈具有重要意义。

**关键词:** 归一化植被指数; 生长季峰值; 生长期最大值; PM<sub>2.5</sub>; 气象因子; 京津冀

植被物候是全球气候变化的敏感指示因子, 区域以及全球尺度的植被返青期、衰落期的时空变化及其对气候因子的响应已经得到广泛研究<sup>[1-4]</sup>。最近的研究表明, 植被的固碳量更多地取决于夏季的光合作用峰值<sup>[5-6]</sup>。夏季峰值由生长季峰值(peak of growing season, POS)和生长期最大值(maximum vegetation growth, NDVI<sub>max</sub>)共同表征。POS 是植被生长旺盛期重要的时间节点, 可以表征植被生长期最大值的时间<sup>[7-9]</sup>, 影响总初级生产力, 其变化被认为是植被对环境水热条件的适应<sup>[10-11]</sup>。NDVI<sub>max</sub>在一定程度上反映冠层光合作用的最大潜力, 影响生态系统的碳吸收<sup>[12-13]</sup>, 在解释森林的碳积累方面表现出更大的潜力<sup>[6,14-15]</sup>。

气候变化和大气成分影响着植物生长, POS、NDVI<sub>max</sub>对气候变化和不同大气成分响应敏感<sup>[10]</sup>, 并且不同区域的气候对 POS、NDVI<sub>max</sub>的影响具有空间异质性。已有研究表明, 植被的 POS、NDVI<sub>max</sub>受到季前气候因子和大气成分的影响, 其中: 中国和美国陆地生态系统中温度对 POS 的影响最大, 其次是辐射和降水; 美国陆地生态系统中降水对 NDVI<sub>max</sub>的影响最大(31.7%), 温度、二氧化碳和氮沉降影响分别占 16.4%、13.7%和 10.4%<sup>[16-17]</sup>。不同地区大气成分中 PM<sub>2.5</sub>含量存在差别<sup>[18-19]</sup>; 大气污染可以直接影响植被生长, 影响植被绿度, 增加总初级生产力<sup>[20-21]</sup>; 大气污染也可通过改变气候因子间接影响植被物候, 降低农业生产力<sup>[22-26]</sup>。PM<sub>2.5</sub>会使环境能

收稿日期: 2022-06-29; 修订日期: 2022-10-21。

基金项目: 国家自然科学基金项目(42125101)。[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42125101.]

第一作者简介: 鲍艳磊(1993—), 女, 河北衡水人, 博士生, 主要研究方向为生态遥感。E-mail: 18333196164@163.com

\*通信作者简介: 吴朝阳(1982—), 男, 江苏扬州人, 研究员, 主要从事全球变化遥感、生态遥感研究。

E-mail: wucy@igsrr.ac.cn

引用格式: 鲍艳磊, 吴朝阳, 郑东博. 大气污染对京津冀地区夏季植被生长峰值的影响 [J]. 地理科学进展, 2023, 42(6): 1124-1138. [Bao Yanlei, Wu Chaoyang, Zheng Dongbo. Effects of air pollution on summer peak vegetation growth in the Beijing-Tianjin-Hebei region. Progress in Geography, 2023, 42(6): 1124-1138.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2023.06.008

能见度降低<sup>[27]</sup>,气溶胶的直接和间接辐射效应产生的辐射强迫影响辐射、温度<sup>[28]</sup>,气溶胶间接效应同样会引起降水的变化<sup>[25,29]</sup>。黑碳(PM<sub>2.5</sub>的主要成分之一)能够吸收太阳辐射,降低冰雪的地表反照率,并通过影响温度和降水降低农业生产力<sup>[30-32]</sup>。

京津冀地区地貌类型丰富,具有明显的季节特征,不同类型的植被物候对气象因子的响应关系存在差别。以往的研究多探究单一作物(夏玉米或者小麦)物候、植被覆盖、NDVI和初级生产力的时空变化及其对气候变化的响应,对植被生长季峰值和生长期最大值的研究较少<sup>[33-36]</sup>;此前大多数研究旨在探究植被物候与温度、降水和辐射等气象因子的响应机制。然而京津冀地区多种污染物大量排放加之山脉阻隔导致污染物不易扩散,进而使得该地区一度大气污染超标<sup>[37]</sup>;大气污染通过直接或间接的方式影响植被生长,因此,大气污染因素不容忽视,但目前对京津冀地区植被生长峰值的时空分布及其响应机制的探究尚不明确。为明确京津冀不同区域植被物候的时空演变格局,深入分析PM<sub>2.5</sub>对不同地区夏季植被生长峰值产生的不同影响,本文利用GIMMS NDVI 3g长时序数据、气象数据和PM<sub>2.5</sub>数据进行研究,试图探明以下问题:① POS、NDVI<sub>max</sub>的时空变化特征;② PM<sub>2.5</sub>对气候因子的影响;③ PM<sub>2.5</sub>对POS、NDVI<sub>max</sub>与气候因子响应机制的

影响;④ PM<sub>2.5</sub>对POS、NDVI<sub>max</sub>的直接影响。研究结果可为大气污染对植被物候影响的研究工作提供一定的借鉴。

## 1 研究区域、数据和方法

### 1.1 研究区域概况

京津冀地区地貌复杂多样,根据1:400万中国数字地貌数据集<sup>[38]</sup>可知(图1a),该地区多台地、山地、丘陵、平原。地处中纬度亚欧大陆东岸,属温带半干旱半湿润大陆性季风气候,春季干旱多风,夏季炎热多雨;平均气温从东南到西北逐渐降低,降水季节与地域分布不均,水资源严重不足。复杂的地貌、多样的土壤类型和复杂的气候条件使得京津冀地区植物种类繁多,本文参照2001—2015年空间分辨率为500 m的土地覆盖产品(MCD12Q1)(<https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006/>),选取2001—2015年间土地覆盖类型没有发生变化的区域作为研究区域(即图1a中除白色区域外的区域);该数据产品表明,京津冀地区植物类型主要为森林、草原、灌丛以及农田(图1b)。

### 1.2 数据来源

#### 1.2.1 气象数据

温度、降水和地面短波向下辐射数据来源于中

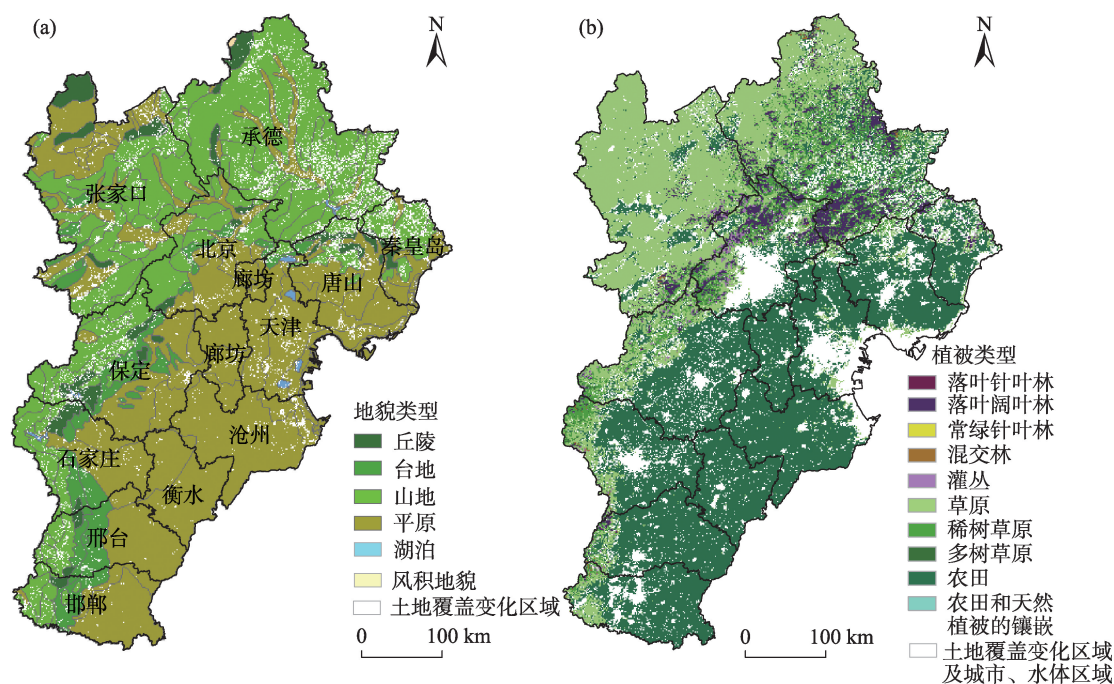


图1 京津冀地区地貌和植被类型的空间分布<sup>[38]</sup>

Fig.1 Spatial distribution of landforms and vegetation types in the Beijing-Tianjin-Hebei region

国地面气象要素驱动数据集(<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/>)。该数据集由中国科学院青藏高原研究所依据观测数据、再分析数据和卫星遥感数据,使用ANUSPLIN插值方法生成,数据集已经过验证<sup>[39-40]</sup>,并被广泛应用<sup>[17,41]</sup>。本文采用空间分辨率为0.1°的2001—2015年月尺度数据。

### 1.2.2 NDVI数据

本文采用最新版本的GIMMS NDVI数据集进行分析,该数据集是由GIMMS生产的第三代NDVI数据集(NDVI3g, version 1 数据集)(<https://ecocast.arc.nasa.gov/data/pub/gimms/3g.v1/>),其空间分辨率为(1/12)°、时间分辨率为15 d,每年24幅影像,数据集时间长度为1982—2015年。该数据集处理过程中进行了整体校准和归一化处理,抑制了由太阳几何形状、重气溶胶和云等因素引起的噪声<sup>[42]</sup>,因其观测时间较长使得该数据集能很好地应用于物候研究,且在开展中国植被覆盖的长期演变过程分析中具有较高的适用性<sup>[43-44]</sup>。本文使用2001—2015年的NDVI数据。

### 1.2.3 PM<sub>2.5</sub>数据

本文使用的PM<sub>2.5</sub>数据为中国高分辨率高质量近地表空气污染物(CHAP)数据集(<https://doi.org/10.5281/zenodo.3539349>),囊括了2000—2021年的无缝、空间分辨率为1 km的月数据<sup>[45-46]</sup>。该数据考虑空气污染的时空异质性,利用人工智能方法综合地面测量、卫星遥感产品、大气再分析和模型模拟等数据生成。因2000年部分月份的PM<sub>2.5</sub>数据缺失,本文采用2001—2015年的PM<sub>2.5</sub>数据。

### 1.3 生长季峰值、生长期最大值的计算方法

本文采用在探究植被夏季生长峰值更为有效的Savitzky-Golay滤波和三次样条(cubic spline)相结合的SG-cubic spline方法来推算日NDVI数据<sup>[16-17]</sup>。首先利用SG滤波来平滑NDVI数据<sup>[47]</sup>,然后使用三次样条方法重构每日的NDVI值<sup>[48]</sup>。NDVI<sub>max</sub>是日NDVI序列中的最大值,POS为达到NDVI<sub>max</sub>对应的日期。

$$\text{NDVI}_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^m C_i \text{NDVI}_{j+i}}{N} \quad (1)$$

式中:NDVI<sub>j</sub><sup>\*</sup>是第j天平滑后的NDVI值;N是平滑窗口大小(2m+1),其中m是平滑窗口的半宽度;C<sub>i</sub>是滤波器第i个NDVI的系数。

一年24幅NDVI影像,一个像元一年则有24个

NDVI值。y代表NDVI值,x为对应的日期,据此构造二维数组,即(x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>), (x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>) … (x<sub>23</sub>, y<sub>23</sub>)。然后根据一系列三次多项式S<sub>i</sub>估计相邻两点(x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>)和(x<sub>i+1</sub>, y<sub>i+1</sub>)之间的NDVI值。

$$S_i(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i \quad (2)$$

式中:S(x)是日期为x时插值得到的NDVI值;a<sub>i</sub>、b<sub>i</sub>、c<sub>i</sub>为系数;d<sub>i</sub>为常数。

## 1.4 研究方法

### 1.4.1 数据插值方法

双线性插值方法的核心思想是在水平和垂直2个方向(x和y)上分别进行线性插值,充分利用四周存在的4个真实像素进行目标像素的确定,首先在x方向上插值,然后在y方向上利用x轴2个插值结果进行插值得到最终结果。此方法计算量大但不会出现灰度不连续的问题,插值效果优于简单的最邻近内插法,加之运行速度快于双三次插值,得到普遍应用<sup>[49]</sup>。软件ENVI 5.3中进行重采样得到分辨率降低的遥感影像时,通常使用最邻近方法和像元聚合的方法,其中像元聚合采用对输出像元值有贡献的所有像元平均值来进行采样。本文利用双线性插值方法将气象数据、利用像元聚合方法将PM<sub>2.5</sub>数据重采样到(1/12)°,从而实现研究使用的数据具有相同的空间分辨率。

### 1.4.2 趋势分析

研究POS与NDVI<sub>max</sub>的趋势分析基于中值的Theil-Sen斜率估计器<sup>[50]</sup>,并使用非参数Mann-Kendall方法<sup>[51]</sup>来计算趋势的显著性。

$$M = \text{median} \left( \frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad (3)$$

式中:x<sub>i</sub>、x<sub>j</sub>为i、j年的POS(NDVI<sub>max</sub>)值,2001≤i<j≤2015。M>0,则POS(NDVI<sub>max</sub>)呈延后(上升)趋势,否则呈提前(下降)趋势。

$$Z = \begin{cases} \frac{T}{\sqrt{\text{Var}(T)}} & (T > 0) \\ 0 & (T = 0) \\ \frac{T+1}{\sqrt{\text{Var}(T)}} & (T < 0) \end{cases} \quad (4)$$

式中:T =  $\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$ ,当x<sub>j</sub>-x<sub>i</sub>小于、等于或大于0时,对应sgn(x<sub>j</sub>-x<sub>i</sub>)分别为-1、0、1;方差Var(T) = n(n-1)(2n+5)/18,统计量Z为正值表示增加趋势,负值表示减小趋势,Z绝对值大于等于1.65表示通过P<0.1显著性检验。



### 1.4.3 偏相关分析

本文通过间接和直接的方式得到PM<sub>2.5</sub>对京津冀地区POS、NDVI<sub>max</sub>的影响。间接的分析方式为:①去除一种气象因子的影响(控制一种气象变量),探究另一种气象因子与POS、NDVI<sub>max</sub>的偏相关关系;②去除①中去除的同种气象因子和PM<sub>2.5</sub>的影响(控制一种气象变量和PM<sub>2.5</sub>两个变量),探究对应上述同种气象因子与POS、NDVI<sub>max</sub>的偏相关关系的结果;③将①和②的结果进行比较分析,得到PM<sub>2.5</sub>对气象因子与POS、NDVI<sub>max</sub>的关系的影响。直接的分析方式为控制气象因子,直接计算PM<sub>2.5</sub>对POS、NDVI<sub>max</sub>的偏相关系数进行分析<sup>[16-17]</sup>。

$$r_{xy(z)} = \frac{r_{xy} - r_{xz}r_{yz}}{\sqrt{1-r_{xz}^2}\sqrt{1-r_{yz}^2}} \quad (5)$$

式中: $r_{xy(z)}$ 表示控制变量 $z$ 的作用后,变量 $x$ 、 $y$ 的偏相关系数; $r_{xy}$ 、 $r_{xz}$ 、 $r_{yz}$ 分别为变量 $x$ 与 $y$ 、 $x$ 与 $z$ 及 $y$ 与 $z$ 之间的相关系数。

研究中控制降水和PM<sub>2.5</sub>两个变量,计算POS或NDVI<sub>max</sub>之前0~ $n$ 个月的POS或NDVI<sub>max</sub>与平均气温的偏相关系数,季前气温被定义为偏相关系数最大的时间到多年平均POS时段平均气温,最大时间段 $n$ 为1月到POS多年平均值之前的时间范围。如POS或NDVI<sub>max</sub>发生在7月,POS或NDVI<sub>max</sub>与5—7月的平均气温偏相关系数的绝对值最大,则季前气温的长度为2;季前降水和PM<sub>2.5</sub>以同样的方法得到。

### 1.4.4 线性回归分析

已有研究表明,夏季PM<sub>2.5</sub>对温度的影响高于秋冬季节<sup>[24]</sup>,因此我们获取春季(3—5月)、夏季(6—8月)的PM<sub>2.5</sub>、降水、温度和辐射值的月度数据,并按季度进行求平均,然后采用线性回归分析方法<sup>[52]</sup>来探究春、夏两季PM<sub>2.5</sub>对气候因子的影响。

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (6)$$

式中: $Y$ 代表PM<sub>2.5</sub>数值, $X$ 为温度、降水或辐射数据; $\beta_1$ 为回归系数, $\beta_0$ 为常数项, $\varepsilon$ 为随机变量。文中结果取通过 $P < 0.1$ 显著性检验的回归系数数值。

## 2 结果与分析

### 2.1 生长季峰值、生长期最大值的时空分布

2001—2015年京津冀地区的POS平均值分布较分散,具有明显的空间差异。88.8%的像元数值在180~240 d之间,较早的POS主要分布在NDVI<sub>max</sub>

值较大的植被覆盖区域,包含了燕山和部分太行山区域,而东南部平原(沧州市和衡水市)POS较晚(图2a)。南部平原POS的标准差(SD)空间差异比较明显(图2b)。NDVI<sub>max</sub>平均值主要分布在0.3~1.0之间,其中0.7~0.8的频数最高,占总像元的42.6%。NDVI<sub>max</sub>的低值分布在沿海地区、张家口市以及其他城市的中心地区(图2c)。NDVI<sub>max</sub>的高值区域主要分布在承德市和北京市西北部地区(燕山和太行山余脉),该区域的NDVI<sub>max</sub>的标准差(SD)也明显较低(0.01~0.03)。高SD区域(0.06~0.07)主要分布在张家口坝上地区、东部和南部平原区(图2d)。

2001—2015年多年POS的Theil-Sen趋势的平均值为0.04 d/a,显著区域占比为8.3%( $P < 0.1$ )。延后与提前区域比例差距明显,其中南部燕山和太行山区POS显著提前,延后区域分布较分散(图2e)。约54.6%的区域的NDVI<sub>max</sub>呈增加趋势;29.4%的区域年际变化趋势显著,其中NDVI<sub>max</sub>显著增加区域占显著变化区域的61.5%( $P < 0.1$ ),主要分布在山区(图2f)。

### 2.2 PM<sub>2.5</sub>对气象因子的影响

PM<sub>2.5</sub>对春、夏季降水影响的斜率分别为-0.9~1.2、-3.0~2.5,表明PM<sub>2.5</sub>浓度每变化1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,不同区域在不同季节会发生不同程度的降水量的变化。正值集中在中东部平原,负值集中在燕山和太行山区( $P < 0.1$ )(图3a、3b),负值表示PM<sub>2.5</sub>增加会抑制降水,正值表示促进降水。

PM<sub>2.5</sub>对春季辐射显著影响区域多于夏季,斜率在-1.7~1.5之间, $R^2$ 为0.2~1.0( $P < 0.1$ )。PM<sub>2.5</sub>每增加1个单位浓度,使得向下的短波辐射值增加和减少的区域较分散,辐射量减少数值较大的区域基本分布在平原区(图3c、3d)。

PM<sub>2.5</sub>对春、夏季温度的影响斜率在-0.1~0.5之间, $R^2$ 介于0.2~1.0( $P < 0.1$ );不同季节、不同区域的PM<sub>2.5</sub>对温度的作用和影响数值不同,对温度的负作用明显的区域基本分布在高纬度和沿海区域(图3e、3f)。

### 2.3 PM<sub>2.5</sub>对生长季峰值、生长期最大值与气象因子关系的影响

#### 2.3.1 PM<sub>2.5</sub>对生长季峰值与气象因子的关系的影响

控制温度后,15.0%的区域降水与POS呈显著相关关系,负相关比例明显多于正相关(57.2%和42.8%)(图4a)。其中,正相关主要分布在北部山区和坝上地区,负相关集中分布在平原地区。控制温



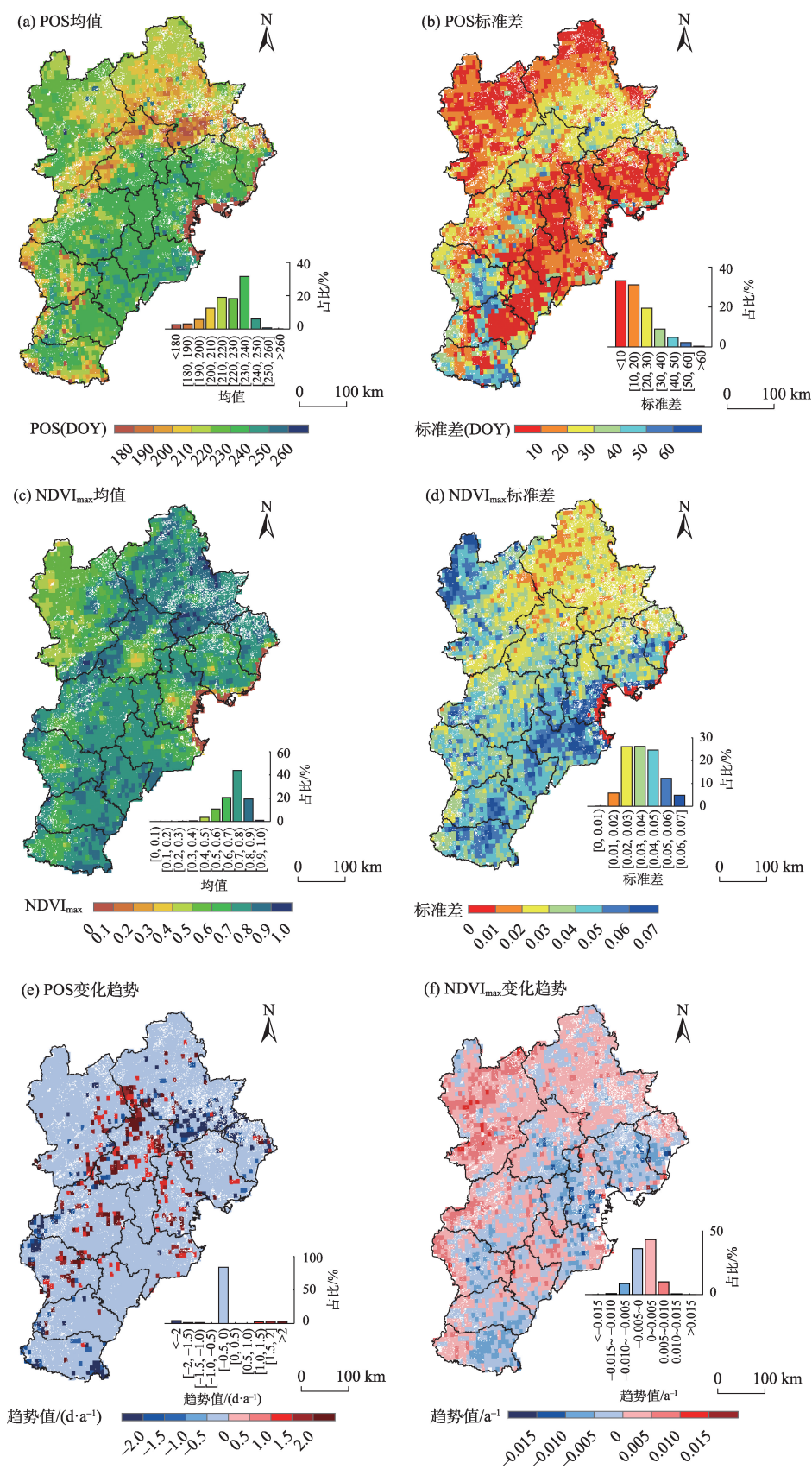


图2 利用2001—2015年NDVI3g数据集计算的POS和NDVI<sub>max</sub>均值、SD及其趋势的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of mean, SD and trend values of POS and NDVI<sub>max</sub> calculated using NDVI3g dataset from 2001 to 2015

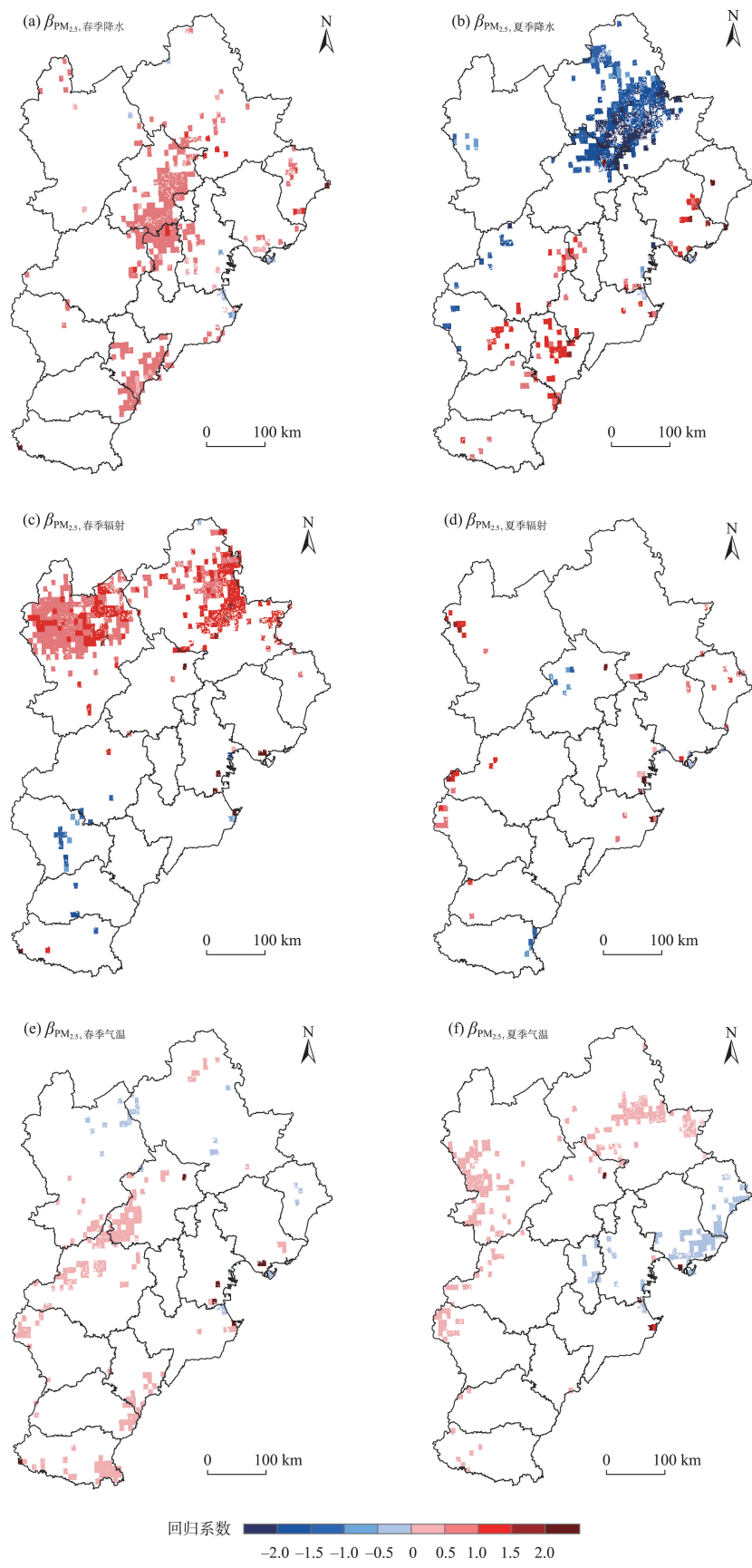


图3  $PM_{2.5}$ 与气象因子的回归系数分布( $P<0.1$ )

Fig.3 Distribution of regression coefficients of  $PM_{2.5}$  and meteorological factors ( $P<0.1$ )

度和  $PM_{2.5}$  两个变量后,显著相关区域占比为 15.2%,其中负相关区域占比增加,占显著相关区域的 58.2%(图 4b)。京津冀地区总体呈现  $PM_{2.5}$  使降水对 POS 的提前作用被低估。中东部平原(北京南部、廊坊中北部和石家庄东部)表现为显著负相关增加,北部燕山地区显著正相关减少,说明  $PM_{2.5}$  使降水对 POS 提前的作用被低估;张家口北部丘陵地区正相关比例增加,说明  $PM_{2.5}$  使降水对 POS 提前的作用被高估;太行山北部、中部和南部地区分别表现为正相关增加、负相关减少和正相关减少,  $PM_{2.5}$  对太行山区降水与 POS 的关系的影响较复杂。

控制降水后,温度与 POS 的偏相关关系显著区域较少,仅 9.2% 的区域显著相关,其中负相关(POS 提前)区域占显著相关区域的 53.0%,主要分布在平原区(图 4c)。去除  $PM_{2.5}$  的影响后,显著相关的区域比例降为 8.7%,负相关显著减少,东部和南部平原地区尤为明显,意味着  $PM_{2.5}$  使温度对 POS 的提前作用被高估。整体表现为正相关像元个数变化不明显,但张家口坝上地区和北部燕山部分地区表现为正相关增加,说明这些地区  $PM_{2.5}$  使温度对 POS 的延后作用被低估(图 4d)。

#### 2.3.2 $PM_{2.5}$ 对生长期最大值与气象因子关系的影响

控制温度后,12.2% 的区域降水与  $NDVI_{max}$  呈显著相关,其中显著负相关占显著相关区域的 39.9%,表明大部分区域随着降水的增多,  $NDVI_{max}$  数值随之增长(图 4e)。去除  $PM_{2.5}$  的影响,显著相关区域增加至 12.9%,显著正相关区域也略有增加,占显著相关区域比为 68.1%;显著负相关区域占比降为 31.9%(图 4f)。 $PM_{2.5}$  的影响下,张家口坝上地区和燕山地区降水对  $NDVI_{max}$  的负向作用比例更高,降水对  $NDVI_{max}$  的抑制作用被高估;中部和沿海平原地区显著正相关区域更少,表明降水对  $NDVI_{max}$  的促进作用被低估;南部平原东部地区表现为正相关占比更高,说明降水对  $NDVI_{max}$  的促进作用被高估。

控制降水后,6.1% 的区域显示  $NDVI_{max}$  与温度具有显著的相关关系,显著负相关区域明显高于正相关区域(分别占显著相关区域的 93.5% 和 6.5%)(图 4g)。去除  $PM_{2.5}$  的影响后显著相关比例减少了 0.2%,变化明显的区域主要为北部山区,显著负相关占比降低。 $PM_{2.5}$  的影响下,山区温度造成  $NDVI_{max}$  降低的区域更多,表明温度对于  $NDVI_{max}$  的抑制作用被高估;去除  $PM_{2.5}$  影响后,东部平原正相关区域

略有增加,说明该地区  $PM_{2.5}$  的作用使得温度对于  $NDVI_{max}$  的促进作用被低估(图 4h)。

#### 2.4 生长季峰值、生长期最大值与 $PM_{2.5}$ 的偏相关系数空间分布

由图 5a、5b 可知,研究区有 13.8% 的区域 POS 与  $PM_{2.5}$  呈显著相关( $P < 0.1$ ),且正负比例差距明显,其中只有 21.1% 的像元呈正相关(显著正相关占 2.9%),78.9% 的像元呈负相关(显著负相关占 10.9%),即多数地区  $PM_{2.5}$  增加会使 POS 呈提前趋势。图 5c、5d 显示,  $NDVI_{max}$  与  $PM_{2.5}$  呈显著相关的区域占研究区的 11.1% ( $P < 0.1$ ),其中只有 10.9% 的像元呈负相关(显著负相关占 1.2%),主要分布在邯郸市和邢台市;89.1% 的区域呈现随着  $PM_{2.5}$  的提高,  $NDVI_{max}$  呈增加趋势(显著正相关占 9.9%)。长期来看,京津冀大部分地区  $PM_{2.5}$  浓度增加会使 POS 提前且能增大  $NDVI_{max}$ 。

### 3 讨论

#### 3.1 生长季峰值、生长期最大值的时空分布

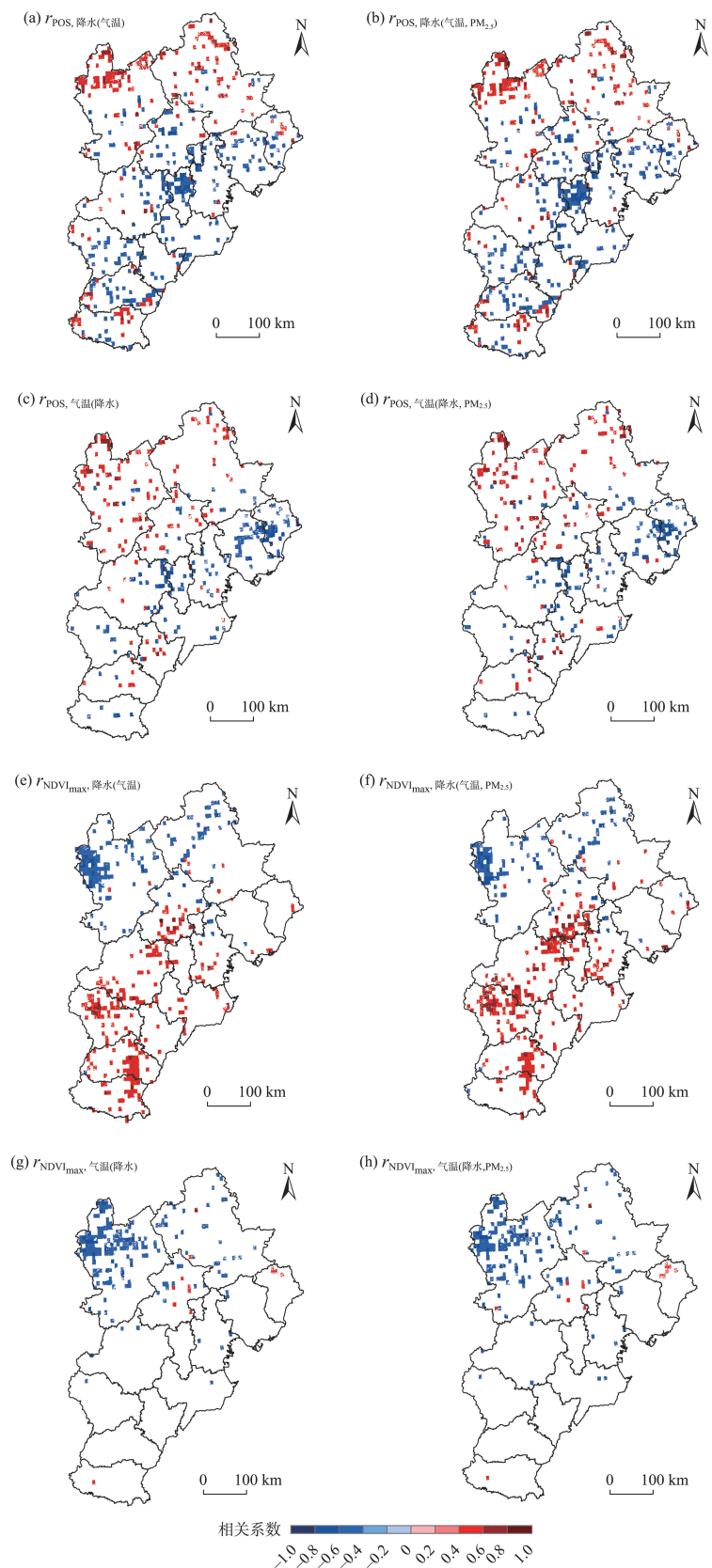
京津冀地区 POS、 $NDVI_{max}$  主要发生在 7、8 月,植被生长期最大值( $NDVI_{max}$ )通常与温度最大值时间同步<sup>[11]</sup>。同时 POS、 $NDVI_{max}$  分布具有明显的空间异质性,分别与植被类型相关。落叶阔叶林和稀树草原 POS 更早,其次是草原和农田。 $NDVI_{max}$  的最大值分布在落叶阔叶林(0.8~1.0)和农田(0.7~0.8),此结果与之前研究一致<sup>[17]</sup>。POS 异质性是植物适应环境的结果<sup>[10]</sup>,  $NDVI_{max}$  在一定程度上可表征光合潜力,森林生态系统的光合潜力大<sup>[6,53]</sup>。草原的  $NDVI_{max}$  的 SD 较大,主要原因为草本植物根系较浅,草原对降水更为敏感,降水的变化直接影响草原  $NDVI_{max}$ <sup>[54]</sup>。

从长时间序列来看,POS 提前的比例高于延后的比例<sup>[55]</sup>、 $NDVI_{max}$  的增加趋势地区明显高于减少趋势地区<sup>[56]</sup>;与  $NDVI_{max}$  相比 POS 更为稳定,不同地理环境和植被对气候变化的敏感性的不同造成 POS、 $NDVI_{max}$  趋势不同。

#### 3.2 气候对大气污染的响应

$PM_{2.5}$  与降水在不同地区会呈现不同的正负相关关系。这一结果与以往的研究结论相符,不同环境条件形成的不同云层,不同大小的气溶胶颗粒形成的凝结核(cloud condensation nuclei, CCN)对于降水的作用效果不同,气溶胶对降水的影响有一定的

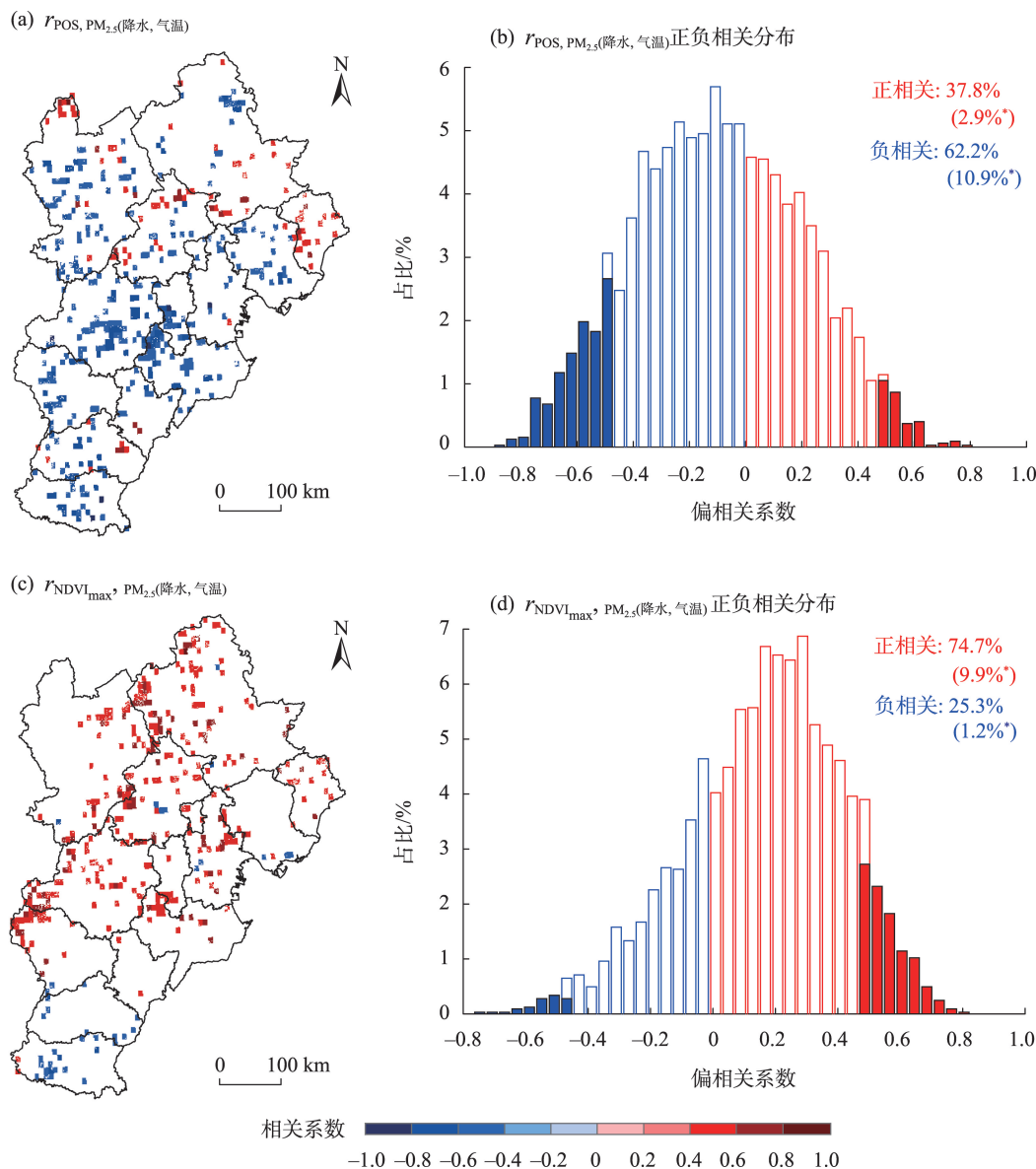




注：图 a~d、e~h 分别为 POS、NDVI<sub>max</sub> 与各气候因子的偏相关系数；图 a、c、e、g 为不控制 PM<sub>2.5</sub> 时的结果，图 b、d、f、h 为控制 PM<sub>2.5</sub> 时的结果。

图 4 POS、NDVI<sub>max</sub> 与季前降水、季前温度的偏相关系数分布 ( $P<0.1$ )

Fig.4 Partial correlation coefficients distribution of POS, NDVI<sub>max</sub> and precipitation and temperature ( $P<0.1$ )



注:图b、d中括号内数值为通过0.1显著性水平检验的单元占比。

图5 POS、NDVI<sub>max</sub>与PM<sub>2.5</sub>偏相关系数空间分布( $P<0.1$ )

Fig.5 Spatial distribution of partial correlation coefficients of POS, NDVI<sub>max</sub> and PM<sub>2.5</sub> ( $P<0.1$ )

临界值<sup>[57-58]</sup>。降水受云的影响,大气污染物通过改变云的特征使降水效率减小,同时改变云凝结核的数量<sup>[59]</sup>。对流云对降水的作用表现为先增加后减少,CCN增加少量时会促使小水滴合并形成降水<sup>[60]</sup>;在山区随着PM<sub>2.5</sub>的增加,持续增加的饱和度过低的云凝结核会导致热通量和对流有效势能减少,造成深对流延迟,降水减少<sup>[57,61-63]</sup>;但平原城市地区形成的CCN会促进降水<sup>[59]</sup>;同时海盐粒子作为巨CCN也可能促使降水增加<sup>[64-65]</sup>。

气溶胶通过散射和吸收太阳辐射直接影响辐

射,并通过影响云的散射使短波辐射大幅减少,近地面温度下降<sup>[61-62]</sup>。本文发现PM<sub>2.5</sub>增加会造成向下的短波辐射量减少、近地面温度降低。大气中PM<sub>2.5</sub>的存在,可减少到达地面的区域平均净短波辐射11.2~14.4 W/m<sup>2</sup>,从而使近地面气温降低0.06~0.14℃<sup>[61]</sup>。20世纪末至21世纪初,大气层顶处的全球年平均人为气溶胶辐射强迫为-0.82 W/m<sup>2</sup>;地表人为气溶胶辐射强迫为-1.07 W/m<sup>2</sup>。人为气溶胶辐射强迫导致全球地表温度降低0.05~0.12℃<sup>[66-67]</sup>。不同地区不同气溶胶对温度的影响效率不同。虽然污

染引起的降温可以由温室气体、城市热岛效应引起的增温效应部分抵消,但还会使温度呈增加趋势<sup>[60]</sup>。

### 3.3 生长季峰值、生长期最大值对气候因子的响应

降水的数量和频率等均会影响植被的光合作用,降水对植被生长的影响需要根据实地的水环境条件而定<sup>[68-69]</sup>。本文发现,季前降水使 POS 出现显著提前或者延后(58.2%、41.8%),NDVI<sub>max</sub>显著增大或减小(68.1%、31.9%),降水对 POS、NDVI<sub>max</sub>的影响并非线性。同时张家口北部和燕山地区降水与 POS、NDVI<sub>max</sub>呈正相关,平原大部分地区呈负相关,可能原因是2000年代京津冀地区春季干旱频率仍显著扩大,集中在冀东北和南部地区<sup>[70]</sup>;在较干旱地区,水为植被生长的限制因素,降水能增加土壤水分供给,提高土壤中营养物质的可用性,增加植被的养分含量<sup>[71]</sup>,促进植被生长;并且降水频率高会使晴空少有,一定程度上降低白天的太阳辐射、增加夜间的长波辐射,进而使白天温度更低、夜间温度更高,夜间温度增加对夏季植被绿化具有更强的作用<sup>[68]</sup>。燕山南麓降水增加,可能会使土壤水分过多,导致内部通风不畅,植被根系无法呼吸<sup>[72]</sup>,影响正常生长。张家口北部地区增加的降水可能仍无法缓解干旱<sup>[73]</sup>,降水增加,植被仍表现为生长缓慢。

此外,本文发现季前温度使 POS 提前和延后的比例(分别为49.5%和50.5%)相差1%,与NDVI<sub>max</sub>的相关关系中负相关占主导地位(占比91.8%)。足够的积温是触发植被发生物候事件的必要因素<sup>[74-76]</sup>,温暖的环境会促进植被的光合作用,局地或全球气候变暖使得大多数的植被开始提前生长<sup>[77-78]</sup>。季前温度与 POS 呈负相关区域是因为大多数植被在温度升高后,植被中酶活性提高,表现为提前生长,很可能提前到达光合作用最大值;并且温度升高可能会造成夏季干旱,植被为适应环境,POS 提前;正相关区域基本分布在坝上地区,春季寒冷,夏季具有较高温度有可能会造成干旱<sup>[70]</sup>,从而使得 POS 延后。温度升高,导致植被蒸腾作用加强,土壤中的可利用水分减少<sup>[79-80]</sup>。另外,升高的气温并非植被生长最适宜的温度,这些均对植被光合作用产生影响,造成NDVI<sub>max</sub>降低。

### 3.4 生长季峰值、生长期最大值对大气污染的响应

不同地区物候对降水和温度的敏感度不同,在温度、水分条件以及大气环境背景的交互作用中物候对气候变化的响应呈现较大的时空异质性<sup>[81]</sup>。本文中,对比去除 PM<sub>2.5</sub>影响前后的降水、温度与

POS 的关系变化,可以发现:不同地区 POS 对降水和温度的变化的响应不同,平原和山区差异明显。同时,研究结果表明,绝大部分地区 PM<sub>2.5</sub>的间接作用为降低 NDVI<sub>max</sub>数值;气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)的间接作用表现为使农田、森林和草原的总初级生产力降低<sup>[20]</sup>。北京南部、廊坊中北部和石家庄东部较为湿润<sup>[82-83]</sup>,在去除 PM<sub>2.5</sub>的影响后,降水与 POS 呈负相关的区域增加;这可能是因为 PM<sub>2.5</sub>造成中东部平原春夏两季降水增加,短波辐射量降低,影响了光合作用,从而造成 POS 延后、NDVI<sub>max</sub>降低。PM<sub>2.5</sub>使山区春季短波辐射量增加,春季温度升高可能使部分地区植被提前生长;夏季温度升高,植被蒸腾作用增大,降水减少,NDVI<sub>max</sub>数值降低。这也解释了 PM<sub>2.5</sub>影响下,春夏季温度的变化使得山区 POS 延后的比例更低,NDVI<sub>max</sub>降低的比例更高。

AOD 对植被的直接作用为使总初级生产力升高<sup>[20]</sup>。本文结果表明,PM<sub>2.5</sub>对植被的直接作用为 PM<sub>2.5</sub>使京津冀大部分地区 POS 提前、NDVI<sub>max</sub>增大。华北平原对气溶胶的响应呈钟形,一定浓度的 PM<sub>2.5</sub>可以促进光合作用<sup>[21]</sup>。中等水平的气溶胶负荷下,太阳下的叶片的总入射光合有效辐射降低,相对湿度增加,促进气孔导度的提高,增加光合作用<sup>[84-85]</sup>;气溶胶引起的漫反射增大了植物叶片的光合面积,从而使长期缺少光照的遮荫叶片的光合作用增加<sup>[21]</sup>,因此,一定浓度范围内 PM<sub>2.5</sub>的增加会使 NDVI<sub>max</sub>增大,并且北方地区 NDVI<sub>max</sub>的增大一般对应 POS 的提前<sup>[16-17]</sup>。

### 3.5 不确定分析

空气污染问题自20世纪70年代末开始日益突出<sup>[59]</sup>，“十三五”期间大气污染防控成效显著,PM<sub>2.5</sub>浓度大幅降低<sup>[86-87]</sup>。本文研究受限于现有的遥感影像<sup>[18]</sup>,采用2001—2015年的 PM<sub>2.5</sub>、气象和 NDVI 数据进行探究,未来可进行更长时段的时空分析;影响因子未考虑人为因素(开垦和人口密度的增加等因素)对植被变化的影响。此外,获取的土地覆被类型、气象和 PM<sub>2.5</sub>数据集的误差可能对植被物候的变化产生一定影响;同时,在数据处理等过程中产生的误差对数据产生的影响可能会影响研究结果。另外,本文所使用的2001—2015年 GIMMS NDVI 数据空间分辨率较低,未来可在时间和空间分辨率方面进行改进,并将地面监测数据和遥感数据进行结合,进一步探讨大气污染对植被物候的影响。



## 4 结论

本文利用GIMMS NDVI3g数据研究了2001—2015年京津冀地区的植被生长季峰值(POS)、生长期最大值(NDVI<sub>max</sub>)的时空分布及其变化趋势,探讨了大气污染物(PM<sub>2.5</sub>)影响下,POS、NDVI<sub>max</sub>对降水、温度的响应的变化,以及PM<sub>2.5</sub>对POS、NDVI<sub>max</sub>的影响。主要结论如下:

(1) 2001—2015年京津冀地区POS、NDVI<sub>max</sub>的分布具有明显的空间异质性且与植被类型相关。森林和农田NDVI<sub>max</sub>较大,草原更为敏感,NDVI<sub>max</sub>的标准差更大。张家口坝上地区、燕山和太行山区域NDVI<sub>max</sub>呈显著增加趋势,POS更为稳定。

(2) PM<sub>2.5</sub>对降水、温度的影响同样具有时空差异。对春季、夏季气候因子的影响区域不同;总体而言,PM<sub>2.5</sub>显著抑制燕山和太行山地区的降水,对高纬度和沿海区域的温度负作用显著。

(3) PM<sub>2.5</sub>对降水与POS的关系的影响主要体现在:中东部平原和北部燕山地区POS的提前作用被低估,张家口北部丘陵地区存在POS提前作用被高估的情况。PM<sub>2.5</sub>的影响使东部、南部平原、张家口坝上地区和北部燕山地区温度对POS的提前作用被高估。除南部平原部分地区,PM<sub>2.5</sub>通过影响降水使得NDVI<sub>max</sub>增大;总体表现为PM<sub>2.5</sub>通过对降水和温度的影响间接降低NDVI<sub>max</sub>。

(4) 在京津冀大部分地区,PM<sub>2.5</sub>的直接作用为使NDVI<sub>max</sub>升高,POS提前。

## 参考文献(References)

- [1] Gonsamo A, Chen J M, Ooi Y W. Peak season plant activity shift towards spring is reflected by increasing carbon uptake by extratropical ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(5): 2117-2128.
- [2] Peng J, Wu C Y, Zhang X Y, et al. Satellite detection of cumulative and lagged effects of drought on autumn leaf senescence over the Northern Hemisphere [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(6): 2174-2188.
- [3] Zhou Y K. Asymmetric behavior of vegetation seasonal growth and the climatic cause: Evidence from long-term NDVI dataset in Northeast China [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(18): 2107. doi: 10.3390/rs11182107.
- [4] 董晓宇, 姚华荣, 戴君虎, 等. 2000—2017年内蒙古荒漠草原植被物候变化及对净初级生产力的影响 [J]. *地理科学进展*, 2020, 39(1): 24-35. [Dong Xiaoyu, Yao Hua-rong, Dai Junhu, et al. Phenological changes of desert steppe vegetation and its effect on net primary productivity in Inner Mongolia from 2000 to 2017. *Progress in Geography*, 2020, 39(1): 24-35.]
- [5] Liu Y, Wu C Y. Understanding the role of phenology and summer physiology in controlling net ecosystem production: A multiscale comparison of satellite, PhenoCam and eddy covariance data [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(10): 104086. doi: 10.1088/1748-9326/abb32f.
- [6] Xu X J, Du H Q, Fan W L, et al. Long-term trend in vegetation gross primary production, phenology and their relationships inferred from the FLUXNET data [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 246: 605-616.
- [7] Xia J Y, Niu S L, Ciais P, et al. Joint control of terrestrial gross primary productivity by plant phenology and physiology [J]. *PNAS*, 2015, 112(9): 2788-2793.
- [8] Zhou S, Zhang Y, Ciais P, et al. Dominant role of plant physiology in trend and variability of gross primary productivity in North America [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 41366. doi: 10.1038/srep41366.
- [9] Richardson A D, Black T A, Ciais P, et al. Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity [J]. *PNAS*, 2010, 365: 3227-3246.
- [10] Park T, Chen C, Macias-Fauria M, et al. Changes in timing of seasonal peak photosynthetic activity in northern ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(7): 2382-2395.
- [11] Schimel D S. Drylands in the Earth system [J]. *Science*, 2010, 327: 418-419.
- [12] Hilker T, Gitelson A, Coops N C, et al. Tracking plant physiological properties from multi-angular tower-based remote sensing [J]. *Oecologia*, 2011, 165(4): 865-876.
- [13] Keenan T F, Darby B, Felts E, et al. Tracking forest phenology and seasonal physiology using digital repeat photography: A critical assessment [J]. *Ecological Applications*, 2014, 24(6): 1478-1489.
- [14] Fu Z, Stoy P C, Poulter B, et al. Maximum carbon uptake rate dominates the interannual variability of global net ecosystem exchange [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(10): 3381-3394.
- [15] Zhou S, Zhang Y, Caylor K K, et al. Explaining inter-annual variability of gross primary productivity from plant phenology and physiology [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 226/227: 246-256.
- [16] Liu Y, Wu C Y, Wang X Y, et al. Impacts of global change on peak vegetation growth and its timing in terrestrial ecosystems of the continental US [J]. *Global and Planetary Change*, 2021, 207: 103657. doi: 10.1016/j.gloplacha.2021.103657.
- [17] Wang X Y, Wu C Y. Estimating the peak of growing sea-

- son (POS) of China's terrestrial ecosystems [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 278: 107639. doi: 10.1016/j.agrformet.2019.107639.
- [18] Wei J, Li Z Q, Cribb M, et al. Improved 1km resolution PM<sub>2.5</sub> estimates across China using enhanced space-time extremely randomized trees [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(6): 3273-3289.
- [19] 周亮, 周成虎, 杨帆, 等. 2000—2011 年中国 PM<sub>2.5</sub> 时空演化特征及驱动因素解析 [J]. *地理学报*, 2017, 72(11): 2079-2092. [Zhou Liang, Zhou Chenghu, Yang Fan, et al. Spatio-temporal evolution and the influencing factors of PM<sub>2.5</sub> in China between 2000 and 2011. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11): 2079-2092. ]
- [20] Ma W, Ding J L, Wang J L, et al. Effects of aerosol on terrestrial gross primary productivity in Central Asia [J]. *Atmospheric Environment*, 2022, 288: 119294. doi: 10.1016/j.atmosenv.2022.119294.
- [21] Wang X, Wang C Z, Wu J, et al. Intermediate aerosol loading enhances photosynthetic activity of croplands [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48: e2020GL091893. doi: 10.1029/2020GL091893.
- [22] Anderson J O, Thundiyil J G, Stolbach A. Clearing the air: A review of the effects of particulate matter air pollution on human health [J]. *Journal of Medical Toxicology*, 2012, 8(2): 166-175.
- [23] Westenbarger D A, Frisvold G B. Air pollution and farm-level crop yields: An empirical analysis of corn and soybeans [J]. *Agricultural and Resource Economics Review*, 2016, 24(2): 156-165.
- [24] 胡森林, 刘红年. 合肥市 PM<sub>2.5</sub> 对城市辐射和气温的影响 [J]. *气象科学*, 2017, 37(1): 78-85. [Hu Senlin, Liu Hongnian. Effects of PM<sub>2.5</sub> on the urban radiation and air temperature in Hefei. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2017, 37(1): 78-85. ]
- [25] Yang Q, Gustafson W I Jr, Fast J D, et al. Impact of natural and anthropogenic aerosols on stratocumulus and precipitation in the Southeast Pacific: A regional modelling study using WRF-Chem [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(18): 8777-8796.
- [26] Zhou L, Chen X H, Tian X. The impact of fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) on China's agricultural production from 2001 to 2010 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 178: 133-141.
- [27] 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]. *PNAS*, 1999, 96(24): 13626-13633.
- [28] Chen D S, Ma X, Xie X, et al. Modelling the effect of aerosol feedbacks on the regional meteorology factors over China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, 15(4): 1559-1579.
- [29] Zhao B, Liou K N, Gu Y, et al. Enhanced PM<sub>2.5</sub> pollution in China due to aerosol-cloud interactions [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 4453. doi: 10.1038/s41598-017-04096-8.
- [30] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(4): 221-227.
- [31] Hansen J, Nazarenko L. Soot climate forcing via snow and ice albedos [J]. *PNAS*, 2003, 101(2): 423-428.
- [32] Burney J, Ramanathan V. Recent climate and air pollution impacts on Indian agriculture [J]. *PNAS*, 2014, 111(46): 16319-16324.
- [33] Liu Y J, Chen Q M, Ge Q S, et al. Spatiotemporal differentiation of changes in wheat phenology in China under climate change from 1981 to 2010 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(8): 1088-1097.
- [34] Zou Y, Chen W, Li S L, et al. Spatio-temporal changes in vegetation in the last two decades (2001–2020) in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(16): 3958. doi: 10.3390/rs14163958.
- [35] Jiang M C, He Y X, Song C H, et al. Disaggregating climatic and anthropogenic influences on vegetation changes in Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 786: 147574. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147574.
- [36] 张聪聪, 孟丹, 李小娟. 京津冀地区植被物候时空变化及其对城市化的响应 [J]. *生态学报*, 2023, 43(1): 249-262. [Zhang Congcong, Meng Dan, Li Xiaojuan. Spatial and temporal changes of vegetation phenology and its response to urbanization in the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(1): 249-262. ]
- [37] 鲍艳磊, 田冰, 胡引翠, 等. 基于混合效应模型的京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 数值模拟 [J]. *环境污染与防治*, 2020, 42(3): 268-274. [Bao Yanlei, Tian Bing, Hu Yincui, et al. Numerical simulation of PM<sub>2.5</sub> in Beijing-Tianjin-Hebei region based on mixed effect model. *Environmental Pollution and Control*, 2020, 42(3): 268-274. ]
- [38] 程维明, 周成虎. 中国 1:400 万数字地貌数据集 [DB]. 北京: 国家青藏高原科学数据中心, 2014. [Cheng Weiming, Zhou Chenghu. *Geomorphological of China 1:4000000*. Beijing, China: National Tibetan Plateau Data Center, 2014. ]
- [39] Yang K, He J, Tang W J, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: Observation and modeling in the Tibetan Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(1): 38-46.

- [40] Chen Y Y, Yang K, He J, et al. Improving land surface temperature modeling for dry land of China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D20): D20104. doi: 10.1029/2011JD015921.
- [41] Cong N, Shen M G, Piao S L, et al. Little change in heat requirement for vegetation green-up on the Tibetan Plateau over the warming period of 1998–2012 [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 232: 650–658.
- [42] Pinzon J, Tucker C. A non-stationary 1981–2012 AVHRR NDVI3g time series [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(8): 6929–6960.
- [43] Pan N Q, Feng X M, Fu B J, et al. Increasing global vegetation browning hidden in overall vegetation greening: Insights from time-varying trends [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 214: 59–72.
- [44] 刘梁美子, 占车生, 胡实, 等. 黔桂喀斯特山区年NDVI变化的影响因素研究 [J]. *地理科学进展*, 2019, 38(11): 1783–1792. [Liu Liangmeizi, Zhan Chesheng, Hu Shi, et al. Impact factors of annual NDVI change in karst mountain areas of Guizhou and Guangxi provinces. *Progress in Geography*, 2019, 38(11): 1783–1792.]
- [45] Wei J, Li Z Q, Lyapustin A, et al. Reconstructing 1-km-resolution high-quality PM<sub>2.5</sub> data records from 2000 to 2018 in China: Spatiotemporal variations and policy implications [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 252: 112136. doi: 10.1016/j.rse.2020.112136.
- [46] Hu X F, Belle J H, Meng X, et al. Estimating PM<sub>2.5</sub> concentrations in the conterminous United States using the random forest approach [J]. *Environmental Science and Technology*, 2017, 51(12): 6936–6944.
- [47] Chen J, Jönsson P, Tamura M, et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91(3/4): 332–344.
- [48] Chen J M, Govind A, Sonnentag O, et al. Leaf area index measurements at Fluxnet-Canada forest sites [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140: 257–268.
- [49] 谢年. 基于双线性内插模型的地理空间数据保密技术研究 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2016, 39(3): 143–145, 148. [Xie Nian. Research on the security of geospatial data based on the bilinear interpolation model. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2016, 39(3): 143–145, 148.]
- [50] Akritas M G, Murphy S A, Lavalley M P. The Theil-Sen estimator with doubly censored data and applications to astronomy [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1995, 90: 170–177.
- [51] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 349(3/4): 350–363.
- [52] Tai A P K, Mickley L J, Jacob D J. Correlations between fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of PM<sub>2.5</sub> to climate change [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(32): 3976–3984.
- [53] Han L, Wang Q F, Chen Z, et al. Spatial patterns and climate controls of seasonal variations in carbon fluxes in China's terrestrial ecosystems [J]. *Global and Planetary Change*, 2020, 189. doi: 10.1016/j.gloplacha.2020.103175.
- [54] Zhang C B, Zhang Y, Wang Z Q, et al. Monitoring phenology in the temperate grasslands of China from 1982 to 2015 and its relation to net primary productivity [J]. *Sustainability*, 2019, 12(1): 12. doi: 10.3390/su12010012.
- [55] Park S, Allen R J, Lim C H. A likely increase in fine particulate matter and premature mortality under future climate change [J]. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 2020, 13(2): 143–151.
- [56] Huang L, Zhang Z S. Effect of rainfall pulses on plant growth and transpiration of two xerophytic shrubs in a revegetated desert area: Tengger Desert, China [J]. *Catena*, 2016, 137: 269–276.
- [57] Jiang M, Li Z, Wan B, et al. Impact of aerosols on precipitation from deep convective clouds in Eastern China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(16): 9607–9620.
- [58] Wang Q Q, Li Z Q, Guo J P, et al. The climate impact of aerosols on the lightning flash rate: Is it detectable from long-term measurements? [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(17): 12797–12816.
- [59] 李占清. 气溶胶对中国天气、气候和环境影响综述 [J]. *大气科学学报*, 2020, 43(1): 76–92. [Li Zhanqing. Impact of aerosols on the weather, climate and environment of China: An overview. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020, 43(1): 76–92.]
- [60] Li Z Q, Niu F, Fan J W, et al. Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(12): 888–894.
- [61] Zhang Y, Wen X Y, Jang C J. Simulating chemistry-aerosol-cloud-radiation-climate feedbacks over the continental U.S. using the online-coupled Weather Research Forecasting Model with chemistry (WRF/Chem) [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(29): 3568–3582.
- [62] Guo J P, Deng M J, Lee S S, et al. Delaying precipitation and lightning by air pollution over the Pearl River Delta. Part I: Observational analyses [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(11): 6472–6488.
- [63] Guo J P, Su T N, Li Z Q, et al. Declining frequency of summertime local-scale precipitation over eastern China



- from 1970 to 2010 and its potential link to aerosols [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(11): 5700-5708.
- [64] Leaitch W R, Banic C M, Isaac G A, et al. Physical and chemical observations in marine stratus during the 1993 North Atlantic Regional Experiment: Factors controlling cloud droplet number concentrations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D22): 29123-29135.
- [65] Li S M, Banic C M, Leaitch W R, et al. Water-soluble fractions of aerosol and their relations to number size distributions based on aircraft measurements from the North Atlantic Regional Experiment [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D22): 29111-29121.
- [66] Liao H, Gao Y C, Chen D L. Assessment of air quality-climate interactions in IPCC AR6 [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2021, 44(5): 658-666.
- [67] 毕鸿儒, 张越, 陈思宇, 等. 基于MIROC6模式探讨1850—2014年全球不同类型人为气溶胶的时空分布及辐射强迫 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2022, 58(1): 111-117. [Bi Hongru, Zhang Yue, Chen Siyu, et al. The spatial-temporal distribution of anthropogenic aerosols and their radiative forcing from 1850 to 2014 based on the MIROC6 model. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2022, 58(1): 111-117.]
- [68] Liu Y, Wu C Y, Jassal R S, et al. Satellite observed land surface greening in summer controlled by the precipitation frequency rather than its total over Tibetan Plateau [J]. *Earth's Future*, 2022, 10: e2022EF002760. doi: 10.1029/2022EF002760.
- [69] Liu Q, Fu Y H, Zeng Z Z, et al. Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(2): 644-655.
- [70] 张丽艳, 杨东, 马露. 京津冀地区气象干旱特征及其成因分析 [J]. *水力发电学报*, 2017, 36(12): 28-38. [Zhang Liyan, Yang Dong, Ma Lu. Characteristics of meteorological drought in Jing-Jin-Ji area and cause analysis. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(12): 28-38.]
- [71] Reynolds J F, Smith D M S, Lambin E F, et al. Global desertification: Building a science for dryland development [J]. *Science*, 2007, 316: 847-851.
- [72] Liu X G, Chen Y N, Li Z, et al. Driving forces of the changes in vegetation phenology in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(23): 4952. doi: 10.3390/rs13234952.
- [73] 刘淼, 周园园, 鲁春霞. 气候变化背景下张家口地区干旱化趋势 [J]. *草业科学*, 2020, 37(7): 1416-1423. [Liu Miao, Zhou Yuanyuan, Lu Chunxia. Changes in drought trends in Zhangjiakou due to global climate change. *Pratacultural Science*, 2020, 37(7): 1416-1423.]
- [74] Bjorkman A D, Elmendorf S C, Beamish A L, et al. Contrasting effects of warming and increased snowfall on Arctic tundra plant phenology over the past two decades [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(12): 4651-4661.
- [75] Piao S L, Tan J G, Chen A P, et al. Leaf onset in the Northern Hemisphere triggered by daytime temperature [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6911. doi: 10.1038/ncomms7911.
- [76] Shen M G, Piao S L, Chen X Q, et al. Strong impacts of daily minimum temperature on the green-up date and summer greenness of the Tibetan Plateau [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(9): 3057-3066.
- [77] Wang H, Ning F D, Li Y C, et al. Scratching-induced surface characteristics and material removal mechanisms in rotary ultrasonic surface machining of CFRP [J]. *Ultrasonics*, 2019, 97: 19-28.
- [78] Cleland E E, Chiariello N R, Loarie S R, et al. Diverse responses of phenology to global changes in a grassland ecosystem [J]. *PNAS*, 2006, 103(37): 13740-13744.
- [79] Montserrat-Martí G, Camarero J J, Palacio S, et al. Summer-drought constrains the phenology and growth of two coexisting Mediterranean oaks with contrasting leaf habit: Implications for their persistence and reproduction [J]. *Trees*, 2009, 23(4): 787-799.
- [80] Xu C Y, Liu H Y, Williams A P, et al. Trends toward an earlier peak of the growing season in Northern Hemisphere mid-latitudes [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(8): 2852-2860.
- [81] Shen M G, Wang S P, Jiang N, et al. Plant phenology changes and drivers on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2022, 3(10): 633-651.
- [82] 王立丽, 张安兵. 基于温度供水干旱指数的京津冀春旱监测及时空分布分析 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2021, 44(4): 72-75. [Wang Lili, Zhang Anbing. Spring drought monitoring in Beijing-Tianjin-Hebei based on temperature water supply drought index. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2021, 44(4): 72-75.]
- [83] 安雪丽, 王前锋, 莫新宇, 等. 华北地区农业干旱灾害变化特征 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(5): 591-596. [An Xueli, Wang Qianfeng, Mo Xinyu, et al. Characteristics of agricultural drought disaster in Northern China. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2016, 52(5): 591-596.]
- [84] Wang X, Wu J, Chen M, et al. Field evidences for the positive effects of aerosols on tree growth [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(10): 4983-4992.

- [85] Cirino G G, Souza R A F, Adams D K, et al. The effect of atmospheric aerosol particles and clouds on net ecosystem exchange in the Amazon [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(13): 6523-6543.
- [86] 姜华, 高健, 李红, 等. 我国大气污染协同防控理论框架初探 [J]. *环境科学研究*, 2022, 35(3): 601-610. [Jiang Hua, Gao Jian, Li Hong, et al. Preliminary research on theoretical framework of cooperative control of air pollution in China. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(3): 601-610. ]
- [87] 王振波, 梁龙武, 王旭静. 中国城市群地区 PM<sub>2.5</sub> 时空演变格局及其影响因素 [J]. *地理学报*, 2019, 74(12): 2614-2630. [Wang Zhenbo, Liang Longwu, Wang Xujing. Spatio-temporal evolution patterns and influencing factors of PM<sub>2.5</sub> in Chinese urban agglomerations. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12): 2614-2630. ]

## Effects of air pollution on summer peak vegetation growth in the Beijing-Tianjin-Hebei region

BAO Yanlei<sup>1,2,3,5</sup>, WU Chaoyang<sup>4\*</sup>, ZHENG Dongbo<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Geographical Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China;

2. Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Shijiazhuang 050024, China;

3. Hebei Technology Innovation Center for Remote Sensing Identification of Environmental Change, Shijiazhuang 050024, China; 4. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

5. Department of Hydraulic Engineering, Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061001, Hebei, China)

**Abstract:** Vegetation phenology is a sensitive indicator of climate change, and the effects of different meteorological factors and changes in atmospheric pollutants on peak vegetation growth have not been fully explored. In this study, we used satellite observed normalized difference vegetation index (NDVI) data from 2001 to 2015 to investigate the temporal changes of peak of growing season (POS) and maximum vegetation growth (NDVI<sub>max</sub>) in the Beijing-Tianjin-Hebei region by the Theil-Sen slope estimator. We also analyzed the effects of pre-season temperature and precipitation on POS and NDVI<sub>max</sub> considering the effects of the fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) to investigate the indirect effect of PM<sub>2.5</sub> on POS and NDVI<sub>max</sub> in the region, and the direct effects of PM<sub>2.5</sub> on POS and NDVI<sub>max</sub> by partial correlation analyses. The results showed that earlier POS and higher NDVI<sub>max</sub> occurred in the Yanshan Mountains and Taihang Mountains, POS in the eastern and southern plains were relatively late, and the NDVI<sub>max</sub> in Zhangjiakou City, the Yanshan Mountains, and the Taihang Mountains showed a significant increasing trend. Pre-season precipitation had a greater impact on POS and NDVI<sub>max</sub> (the area where significant correlation was found accounted for 12.9% and 15.2% of the study area), which was similar to the effect of temperature (8.7% and 5.9%, respectively). Under the impact of PM<sub>2.5</sub>, the feedbacks of precipitation and temperature were different in different regions and seasons, and the responses of phenology to the changes of precipitation and temperature caused by PM<sub>2.5</sub> also showed spatial heterogeneity. PM<sub>2.5</sub> led to the underestimation of the advancing effect of precipitation on POS in the central and eastern plains and northern Yanshan Mountains, overestimation of the advancing effect of precipitation on POS in the northern Zhangjiakou area, and overestimation of the advancing effect of temperature on POS in the eastern and southern plains and the Bashang areas. Overall, the indirect effect of PM<sub>2.5</sub> on NDVI<sub>max</sub> was reducing NDVI<sub>max</sub> ( $P < 0.1$ ). In the long run, PM<sub>2.5</sub> would directly advance POS and increase NDVI<sub>max</sub> in most areas of the Beijing-Tianjin-Hebei region ( $P < 0.1$ ). Our study revealed the response of peak vegetation growth to climate factors and atmospheric pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei region, which are of great significance for an in-depth understanding of the response and feedback of vegetation growth to changes in the climate and air pollution.

**Keywords:** NDVI; POS; NDVI<sub>max</sub>; PM<sub>2.5</sub>; meteorological factors; Beijing-Tianjin-Hebei region