

# 基于卫星量化二氧化氮对中国植被生产力的影响

来文静, 徐浩威, 王佳维, 王佳莹

浙江师范大学地理与环境科学学院, 浙江 金华

收稿日期: 2025年3月24日; 录用日期: 2025年4月30日; 发布日期: 2025年5月19日

## 摘要

二氧化氮( $\text{NO}_2$ )是一种对植物有害的污染物,它通过破坏植物细胞直接影响植物的生长,并通过促进臭氧的形成间接影响植物的生长。尽管田间试验已经证实空气污染会显著影响作物生长,但由于观测数据有限,二氧化氮对不同类型植被生产力的大规模影响仍然知之甚少。在本研究中,我们采用创新方法,综合卫星观测数据,研究氮氧化物对中国植被生产力的影响。研究表明, $\text{NO}_2$ 浓度与植被生产力之间存在较强的负相关。不同类型的植被对 $\text{NO}_2$ 的敏感性差异较大。其中,草原对 $\text{NO}_2$ 的敏感性最高,而常绿针叶林和灌木林对 $\text{NO}_2$ 的敏感性最低。当 $\text{NO}_2$ 浓度降低至第5百分位数时,农田、草原、灌木林、混交林、落叶阔叶林和常绿针叶林的生产力预计分别提高27.73%、14.71%、12.50%、4.28%、3.58%和3.21%。这些结果与野外实验的结果一致,加强了我们方法的有效性。该研究凸显了卫星观测在量化区域范围内空气污染对植被生长影响方面的潜力。

## 关键词

空气污染, 二氧化氮, 卫星,  $\text{NIRv}$ , 植被生产力

# Satellite-Based Quantification of Nitrogen Dioxide Effects on Vegetation Productivity in China

Wenjing Lai, Haowei Xu, Jiawei Wang, Jiaying Wang

College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Mar. 24<sup>th</sup>, 2025; accepted: Apr. 30<sup>th</sup>, 2025; published: May 19<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Nitrogen dioxide ( $\text{NO}_2$ ) is a phytotoxic pollutant that affects plant growth both directly, by damaging

文章引用: 来文静, 徐浩威, 王佳维, 王佳莹. 基于卫星量化二氧化氮对中国植被生产力的影响[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(5): 779-789. DOI: 10.12677/aep.2025.155088

vegetation cells, and indirectly, by contributing to ozone formation. While field experiments have demonstrated the significant impact of air pollution on crop growth, the large-scale effects of  $\text{NO}_2$  on vegetation productivity across diverse plant species remain poorly understood due to limited observational data. In this study, we investigated the influence of  $\text{NO}_2$  on vegetation productivity across China using an innovative approach that integrates satellite-based observations. Our findings revealed a strong negative correlation between  $\text{NO}_2$  concentrations and vegetation productivity, indicating that elevated  $\text{NO}_2$  levels are associated with reduced plant growth. The sensitivity of vegetation types to  $\text{NO}_2$  varied considerably, with savannas being the most sensitive and evergreen needleleaf forests and shrublands the least. Specifically, reductions in  $\text{NO}_2$  concentrations to the 5th percentile were estimated to increase productivity by 27.73% in croplands, 14.71% in savannas, 12.50% in shrublands, 4.28% in mixed forests, 3.58% in deciduous broadleaf forests, and 3.21% in evergreen needleleaf forests. These results are consistent with those from field experiments, reinforcing the validity of our approach. This study highlights the potential of satellite observations for quantifying the effects of air pollution on vegetation growth at regional scales.

## Keywords

Air Pollution, Nitrogen Dioxide, Satellite, NIRv, Vegetation Productivity

Copyright © 2025 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

氮氧化物( $\text{NO}_x$ ), 特别是二氧化氮( $\text{NO}_2$ ), 是化石燃料燃烧、工业过程和生物质燃烧等人为活动产生的主要空气污染物[1]。在过去几十年里,  $\text{NO}_x$  排放在全球城市和工业化地区急剧增加, 尤其是在亚洲地区[2]。先前的研究表明, 高浓度的  $\text{NO}_x$  会阻碍光合作用, 抑制植物生长速率[3]。 $\text{NO}_x$  对植物的影响是双重的。首先,  $\text{NO}_x$  可以通过气孔进入植物叶片[4], 直接抑制植物生长, 并可能导致植被死亡[5] [6]。其次,  $\text{NO}_x$  是对流层臭氧( $\text{O}_3$ )的重要前体[7],  $\text{O}_3$  是一种对植物高度有毒的气体, 会损害植物细胞[8] [6]。因此,  $\text{NO}_x$  通过促进  $\text{O}_3$  的形成间接抑制植物生长[9]。

为了研究污染气体对植被生长的影响, 许多研究使用了开顶式气室(OTCs)和自由空气浓度增强(FACE)技术, 这些技术通常用于探讨  $\text{NO}_2$  或  $\text{O}_3$  对植被生长的机制[8]。例如, Sheng and Zhu (2019)将 41 株森林植物幼苗暴露于  $6\mu\text{L/L}$  的  $\text{NO}_2$  浓度下, 并观察到叶片叶绿素含量降低。类似地, Marzuoli et al. (2024)报告了在高  $\text{O}_3$  处理下, 硬粒小麦和面包小麦的产量下降。尽管 OTC 实验广泛用于研究植物对空气污染物的响应, 但 OTC 实验未能再现自然的小气候条件, 可能在评估污染物影响时造成偏差[11]。为了解决这些局限性, 一些研究采用了 FACE 系统, 它通过避免干扰植物冠层的能量和气体交换, 提供更为真实的环境条件[12]。尽管 FACE 系统具有一定优势, 但其资源消耗较大, 对资金和技术基础设施要求较高, 这使得其在全球范围内的应用受限[13]。

卫星遥感因其广泛的空间覆盖和日益提高的地表和大气监测精度, 成为研究空气污染对植物影响的有力工具[1]。遥感技术已广泛用于分析植物对气候变化和  $\text{CO}_2$  浓度升高的响应[14]。此外, 卫星数据也被用于研究空气污染物对作物生长的影响[15]。然而, 所有这些研究均集中在农田地区[16]。

近年来, 中国  $\text{NO}_x$  排放量大幅增加[4]。然而,  $\text{NO}_x$  对中国陆地碳汇的影响仍不清楚。 $\text{NO}_2$  是衡量整体  $\text{NO}_x$  排放的良好指标[17]。为量化  $\text{NO}_x$  对中国不同植物类型生产力的影响, 我们结合卫星植被指数、

对流层 NO<sub>2</sub> 以及生长季节的时空分析, 评估 NO<sub>x</sub> 的影响。同时, 我们还将卫星获取的结果与现场实验结果进行了比较。据我们所知, 本研究是首次评估 NO<sub>2</sub> 对中国多种植被类型生产力的影响。

2. 数据来源与方法

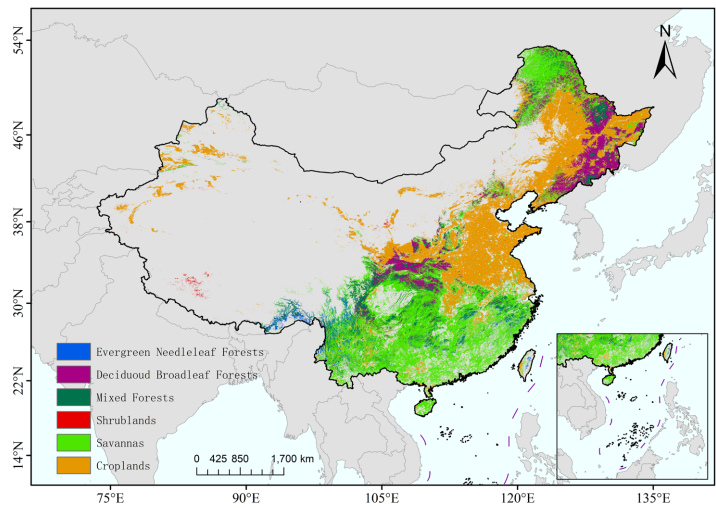
2.1. TROPOMI NO<sub>2</sub> 数据

Sentinel-5P 卫星配备了对流层监测仪(TROPOMI), 自 2018 年 6 月底以来, 可以提供对流层 NO<sub>2</sub> 的日常监测。本研究使用了来自 Google Earth Engine 平台的 Sentinel-5P OFF L3 数据集。该产品的空间分辨率为 1km, 包括总垂直柱、对流层垂直柱和平流层垂直柱 NO<sub>2</sub> 浓度。由于对流层 NO<sub>2</sub> 浓度与地表 NO<sub>2</sub> 浓度之间的强一致性, 我们使用了对流层 NO<sub>2</sub> 浓度来分析对植被生长的影响[18]。

2.2. MODIS 数据

2.2.1. 植被功能类型数据

本研究使用的土地覆盖类型数据来源于 Terra 和 Aqua 组合的中分辨率成像光谱仪(MODIS)土地覆盖类型(MCD12Q1)版本 6.1 数据产品。该全球土地覆盖数据集每年更新一次, 源于 MODIS 卫星的监督分类过程。本研究采用了国际地球生物圈计划(IGBP)分类方案, 产品的空间分辨率为 500 米。我们将分析集中在六个主要类别: 常绿针叶林(ENF)、落叶针叶林(DBF)、混交林(MF)、灌木丛(SHR)、草原(SAV)和农田(CRO)。在分析中, 我们将闭合灌木丛与开放灌木丛合并为一个类别, 称为“SHR”; 同样, 木本草原和草原也合并为“SAV”类别(见图 1)。我们选择了夏季(6 月至 8 月)作为研究期间, 因为中国的植被生长在夏季最为旺盛。



注: 基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号 GS(2023)2767 号的标准地图制作, 地图无修改。

Figure 1. Distribution map of vegetation types in China  
图 1. 中国植被类型分布图

2.2.2. NIRv 数据

植被近红外反射率(NIRv)常用于表征植被生长情况对外界环境因素的响应, 能较好地检测气候胁迫对植被的影响, 且 NIRv 与植被生产力之间存在显著的线性相关性[17]。在本研究中, 我们基于 MODIS Terra MOD09A1 版本 6 产品计算得到 NIRv, 作为植被生长的指标。该产品提供了 500 m 空间分辨率的 8

天合成地表光谱反射率。为了与 TROPOMI 的分辨率匹配, 我们将 NIRv 数据重采样到 1 km 分辨率。

### 2.3. TerraClimate 数据

TerraClimate 是一个全球陆地表面的月度气候和气候水量平衡数据集, 适用于全球大多数陆地表面的温度、降水量和蒸汽压。此外, TerraClimate 还生成了月度地表水量平衡数据集, 使用水量平衡模型结合参考蒸散量、降水、温度和插值后的可提取植物土壤水容量。本研究所使用的植被生长高峰季节的降水量数据、最高温度和最低温度数据来自 Google Earth Engine 平台的 TerraClimate 数据集, 空间分辨率为 5 km。

### 2.4. 多元线性回归模型

以 50 km × 50 km 为一个大网格, 大网格内包含 100 个 5 km × 5km 的小网格, 在该大网格内对去除网格均值的各数据建立多元线性拟合模型以估算大网格内二氧化氮对同一种植被生长的影响:

$$NIRv_i = \beta_{NO_2} \times NO_{2,i} + \beta_{Pr} \times P_{r,i} + \beta_{Tx} \times T_{max,i} + \beta_{Tn} \times T_{min,i} + \beta_{VPD} \times VPD_i + a_{LL,i} + c_i + e_i \quad \#1$$

式中, 拟合系数  $\beta_{NO_2}$  代表不同植被生产力对  $NO_2$  的响应;  $NIRv_i$  和  $NO_{2,i}$  分别为生长季节  $i$  位置观测到的 NIRv 和对流层  $NO_2$  的平均值;  $P_{r,i}$  代表降水总量;  $T_{max,i}$  代表最高温度;  $T_{min,i}$  代表最低温度;  $VPD_i$  代表平均蒸汽压差;  $a_{LL,i}$ 、 $c_i$  和  $e_i$  分别代表  $i$  位置周围区域(网格)的局部截距(固定效应)、年份固定效应和残差噪声。该公式依赖局部空间去均值的方法得到  $\beta_{NO_2}$ , 以减少其它可能未观测到的因素对结果的影响。

### 2.5. 估算 $NO_2$ 减少带来的植被生产力增益

为了估算受  $NO_2$  影响的植被生产力的变化率, 首先计算  $NO_2$  的变化:

$$NO_{2,dif} = NO_{2,avg} - NO_{2,5th} \quad \#2$$

式中,  $NO_{2,avg}$  为该地区和季节的  $NO_2$  平均水平,  $NO_{2,5th}$  为观测值的第 5 个百分位数。选择将  $NO_2$  降低至当前水平的第五个百分位作为积极遏制污染的直接方案, 不考虑减少到 0 的极端情况。

最佳因此,  $NO_2$  造成的不同植被类型 NIRv 损伤的计算公式如下:

$$NIRv_{low} = \beta_{NO_2} \times NO_{2,dif} \quad \#3$$

式中, 拟合系数  $\beta_{NO_2}$  如式 1 所示, 表示对流层  $NO_2$  单位变化对冠层绿度 NIRv 的预期变化量。 $NO_{2,dif}$  代表生长期  $NO_2$  平均值和第五百分位的差值。

由于植被生产力 GPP 随 NIRv 线性增加, 我们假设 GPP 为:

$$GPP = \beta_{NIRv} \times (NIRv - NIRv_0) \quad \#4$$

这里,  $NIRv_0$  表示作物或植物生长为零时的 NIRv 值。根据已有文献,  $NIRv_0$  设为 0.07 [17]。

$$GPP_{cur} = \beta_{NIRv} \times (NIRv_{cur} - NIRv_0) \quad \#5$$

式中,  $GPP_{cur}$  表示当前情况下的植被生产力,  $NIRv_{cur}$  表示当前的 NIRv 值。

在  $NO_2$  浓度较低的情况下, 植被生产力 GPP 的变化量可以用下式表示:

$$GPP_{lowNO_2} = \beta_{NIRv} \times NIRv_{low} \quad \#6$$

式中,  $NIRv_{low}$  代表降低  $NO_2$  浓度 NIRv 的变化量。

最终, 减少  $NO_2$  后植被生产力 GPP 的变化率可表示为:

$$GPP\ change\% = \frac{GPP_{lowNO_2}}{GPP_{cur}} * 100\% = \frac{\beta_{NO_2} \times (NO_{2,avg} - NO_{2,5th})}{NIRv_{cur} - NIRv_0} \times 100\% \quad \#7$$

3. 结果

3.1. 多元线性回归模拟性能

表 1 从均方误差(MSE)和决定系数(R<sup>2</sup>)的角度总结了模型在 2019 年和 2020 年对每种植被类型的表现。在 2019 年和 2020 年, 该模型在 SHR 植被类型中的均方误差最小, 判定系数最高, 表明该模型在 SHR 植被类型中表现最佳。该模型在 CRO、SAV 和 ENF 方面的表现也很好, MSE 值在 0.0007 到 0.0011 之间, R<sup>2</sup> 值在 0.52 到 0.65 之间。该模型在 DBF 和 MF 方面的性能最弱, MSE 值分别为 0.0008 和 0.0010, R<sup>2</sup> 值分别为 0.50 和 0.49。该模型在 2020 年的性能略好于 2019 年。这表明该模型具有良好的稳健性。总体而言, 该模型在所有植被类型中都表现良好, MSE 值在 0.0004 至 0.0011 之间, R<sup>2</sup> 值在 0.49 至 0.97 之间。这些结果表明, 基于卫星的数据为量化 NO<sub>2</sub> 对中国植被生产力的影响提供了可靠的方法。

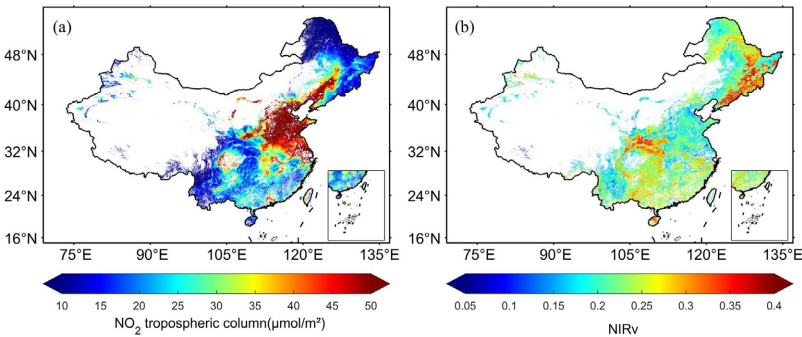
**Table 1.** The mean square error (MSE) and coefficient of determination (R<sup>2</sup>) of model predictions  
**表 1.** 模型预测的均方误差(MSE)和决定系数(R<sup>2</sup>)

|     | 2019   |                | 2020   |                |
|-----|--------|----------------|--------|----------------|
|     | MSE    | R <sup>2</sup> | MSE    | R <sup>2</sup> |
| ENF | 0.0009 | 0.52           | 0.0011 | 0.52           |
| DBF | 0.0008 | 0.50           | 0.0008 | 0.60           |
| MF  | 0.0010 | 0.49           | 0.0010 | 0.51           |
| SHR | 0.0004 | 0.97           | 0.0004 | 0.96           |
| SAV | 0.0011 | 0.54           | 0.0012 | 0.57           |
| CRO | 0.0007 | 0.65           | 0.0008 | 0.58           |

3.2. 中国地区 NO<sub>2</sub> 和 NIRv 的空间分布

图 2(a)展示了中国范围内对流层 NO<sub>2</sub> 的空间分布情况。图中空白区域为本研究未包含的植被功能类型分布区域。NO<sub>2</sub> 浓度的空间分布呈现出自西北向东南逐渐增高的梯度。东部和中部地区的 NO<sub>2</sub> 浓度较高, 普遍超过 30 μmol/m<sup>2</sup>。特别是在华北平原及其周边地区, NO<sub>2</sub> 浓度甚至超过 50 μmol/m<sup>2</sup>, 显著高于西南和东北地区, 几乎是后者的四倍。这一较高的 NO<sub>2</sub> 暴露水平对植被构成了严重威胁。

图 2(b)展示了在生长季节期间, 通过 MODIS 数据获得的 NIRv 空间分布。NIRv 值在中国各地呈现出显著的空间异质性。较高的 NIRv 值主要集中在植被较为密集的区域, 如东南沿海地区、东北地区以及西南山区。而较低 NIRv 值则出现在干旱和半干旱地区, 包括西北的沙漠、内蒙古高原和青藏高原等地。

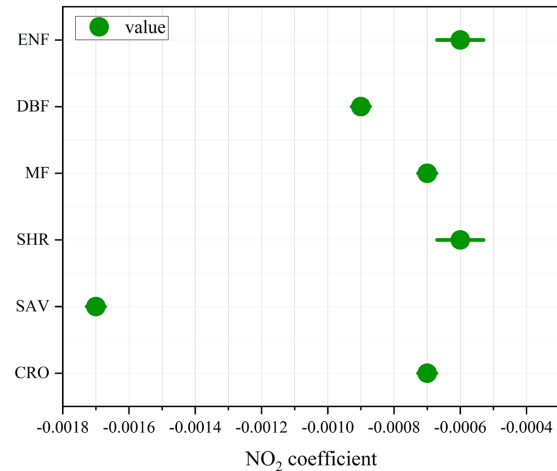


注: 基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号 GS(2023)2767 号的标准地图制作, 地图无修改。

**Figure 2.** Spatial distribution of the tropospheric NO<sub>2</sub> column density (a) and MODIS-derived NIRv (b) from May to August 2020. (We only show the regions containing the six vegetation types analyzed in this study)  
**图 2.** 2020 年 6~8 月(a)对流层 NO<sub>2</sub> 柱浓度和(b) MODIS NIRv 数据空间分布图(图中只显示了本研究的六种植被类型所在的区域)

3.3. 植被生产力对 NO<sub>2</sub> 的响应

图 3 展示了基于回归模型得出的各植被类型生产力对单位 NO<sub>2</sub> 的敏感性( $\beta_{\text{NO}_2}$ )。 $\beta_{\text{NO}_2}$  值反映了植被生产力对 NO<sub>2</sub> 暴露的响应程度,其绝对值越大表明敏感性越强。所有  $\beta_{\text{NO}_2}$  值均为负值,表明 NO<sub>2</sub> 对所有植被类型的生长均具有抑制作用。在不同植被类型中,ENF 和 SHR 对 NO<sub>2</sub> 暴露的响应最低, $\beta_{\text{NO}_2}$  为-0.0006。其次为 MF 和 CRO,二者的  $\beta_{\text{NO}_2}$  均为-0.0007。DBF 的  $\beta_{\text{NO}_2}$  为-0.0009。而 SAV 对 NO<sub>2</sub> 的响应最高,为-0.0017。这些结果表明,SAV 和 DBF 尤其容易受到 NO<sub>2</sub> 污染的不利影响。



**Figure 3.** NO<sub>2</sub> coefficients from the regression model for each vegetation type (evergreen needleleaf forests (ENF), deciduous needleleaf forests (DBF), mixed forests (MF), shrublands (SHR), savannas (SAV) and croplands (CRO))

**图 3.** 各植被类型(常绿针叶林(ENF)、落叶针叶林(DBF)、混交林(MF)、灌丛(SHR)、草原(SAV)和农田(CRO))的 NO<sub>2</sub> 系数

3.4. 二氧化氮对植被生产力的影响

表 2 展示了六种植被功能类型的平均 NO<sub>2</sub> 暴露水平。不同植被类型的平均 NO<sub>2</sub> 浓度存在显著差异。其中 CRO 的平均 NO<sub>2</sub> 浓度最高,达到 48.0  $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ ; SHR 次之,为 35.0  $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ ; MF 和 DBF 分别为 18.6  $\mu\text{mol}/\text{m}^2$  和 18.2  $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ ; 而 ENF 最低,仅为 13.5  $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ 。基于这些暴露水平,我们估算了在 NO<sub>2</sub> 浓度降至观测值第 5 百分位数的情景下,各植被类型 NIR<sub>v</sub> 的变化。结果表明,SAV 的 NIR<sub>v</sub> 增幅最大,预计可达 0.0251;其次是 CRO (0.0159)、SHR (0.0123)、DBF (0.0091)和 MF (0.0079);ENF 的增幅最小,仅为 0.0042。鉴于植物光合作用与 NIR<sub>v</sub> 之间存在线性相关性,这些 NIR<sub>v</sub> 变化可转化为生产力增益。在第 5 百分位数 NO<sub>2</sub> 减排情景下,CRO 表现出最高的生产力增益,预计增长 27.73%;其次是 SHR (12.50%)、MF (4.28%)、DBF (3.58%)和 ENF (3.21%)。这些发现凸显了通过改善空气质量来提高中国农作物产量和整体植被生产力的巨大潜力。

**Table 2.** Average NO<sub>2</sub> concentrations ( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ ), 5th percentile NO<sub>2</sub> levels, and the associated productivity gains corresponding to the 5th percentile reduction for each vegetation type

**表 2.** 各植被类型 NO<sub>2</sub> 平均浓度( $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ )、第 5 百分位 NO<sub>2</sub> 及第 5 百分位对应的生产力增益

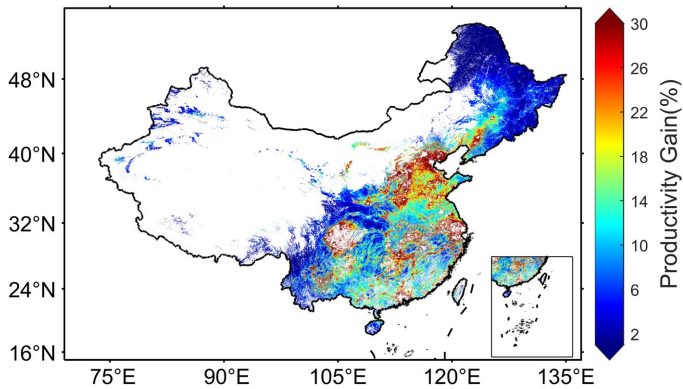
| Vegetation | Average NO <sub>2</sub> | 5th percentile NO <sub>2</sub> | NO <sub>2</sub> difference | NIR <sub>v</sub> gain | Productivity gain (%) |
|------------|-------------------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| ENF        | 13.5                    | 6.5                            | 7.0                        | 0.0042                | 3.21                  |
| DBF        | 18.2                    | 7.9                            | 10.3                       | 0.0091                | 3.58                  |

续表

|     |      |      |      |        |       |
|-----|------|------|------|--------|-------|
| MF  | 18.6 | 7.4  | 11.2 | 0.0079 | 4.28  |
| SHR | 35.0 | 15.5 | 19.5 | 0.0123 | 12.50 |
| SAV | 24.6 | 6.7  | 14.9 | 0.0251 | 14.71 |
| CRO | 48.0 | 15.3 | 32.7 | 0.0159 | 27.73 |

3.5. 二氧化氮对中国植被生产力损伤的空间分布

图 4 展示了中国范围内由 NO<sub>2</sub> 减少引起的植被生产力增益的空间分布。结果显示，东部和南部地区的生产力提升最为显著，这些区域与 NO<sub>2</sub> 浓度较高的地区相吻合。值得注意的是，在华北平原这一重要农业区，NO<sub>2</sub> 的减少带来了超过 18% 的显著植被生产力增长。相比之下，在 NO<sub>2</sub> 浓度相对较低的北部和西部地区，生产力增益普遍较为有限(<10%)。这些发现凸显了 NO<sub>2</sub> 污染对植被生产力的显著影响，尤其是在中国中部和东部地区。



注：基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号 GS(2023)2767 号的标准地图制作，地图无修改。

Figure 4. Spatial distribution of vegetation productivity gains due to NO<sub>2</sub> reductions  
图 4. NO<sub>2</sub> 减少带来的植被生产力增益空间分布

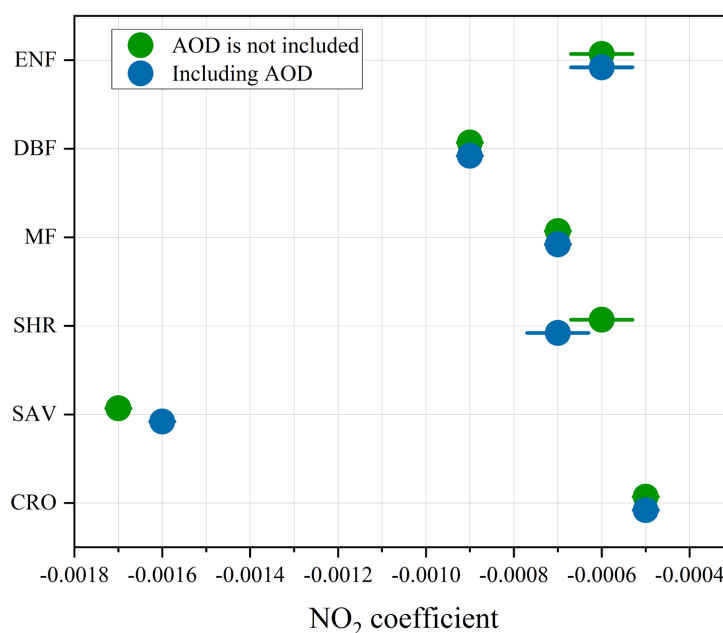
4. 讨论

本研究通过卫星观测数据，探讨了 NO<sub>2</sub> 对中国植被生产力的影响。研究发现，NO<sub>2</sub> 浓度与植被生产力之间存在负相关关系，且不同植被类型的响应差异较大，按从高到低的顺序排列为：草原(SAV)、落叶针叶林(DBF)、农田(CRO)、混交林(MF)、灌木丛(SHR)和常绿针叶林(ENF)。预计降低 NO<sub>2</sub> 浓度将显著提升植被生产力，尤其是在中国的中东部地区。在假设 NO<sub>2</sub> 浓度降低至第 5 百分位数的情景下，农田(CRO)、草原(SAV)、灌木丛(SHR)、混交林(MF)、落叶阔叶林(DBF)和常绿针叶林(ENF)的生产力增幅分别为 27.73%、14.71%、12.50%、4.28%、3.58% 和 3.21%。

不同植被类型的响应差异可能主要归因于叶面积质量(LMA)的变化[19]。ENF 等常绿植物通常具有较高的 LMA，因其叶片和细胞壁较厚，从而使其不易受到 NO<sub>2</sub> 的损害。相反，落叶植物(如 DBF)的具有较低的 LMA，更容易受到 NO<sub>2</sub> 的损害[20]。混交林(MF)由常绿和落叶树种组成，表现出中等的敏感性[21]。相比而言，SAV 表现出最高的敏感性，这与之前的研究结果一致，表明 SAV 对空气污染物的敏感性较高[22]。SAV 的薄叶片、较高的气孔导度以及较为湿润的环境有助于更高效的气体交换，增加了其对 NO<sub>2</sub> 的脆弱性。类似地，作物对 NO<sub>2</sub> 的敏感性也因作物类型、生长阶段和环境条件的不同而异[23] [24]。如水稻、玉米和小麦等作物，通常生长在气孔导度较高的开放环境中，尤其容易受到 NO<sub>2</sub> 的损害。

我们的研究结果估算了  $\text{NO}_2$  对各植被类型生产力的损伤, 分别为农田(CRO) 27.73%、草原(SAV) 14.71%、灌木从(SHR) 12.50%、森林(MF) 4.28%、落叶阔叶林(DBF) 3.58%和常绿针叶林(ENF) 3.21%。尽管专门研究  $\text{NO}_2$  对植被生产力影响的文献较为有限, 但这些结果与 Lobell *et al.* (2022)的研究一致, 该研究表明在  $\text{NO}_2$  浓度减少的情况下, 冬小麦和玉米的产量分别增加了约 25%和 15%。 $\text{NO}_2$  通过两种主要机制影响植被: 一是作为  $\text{O}_3$  的前体, 间接抑制植物生长; 二是作为直接的植物毒素, 降低生产力。本研究考虑了这两种机制, 表明  $\text{NO}_2$  的总体影响等于或大于  $\text{O}_3$  的影响。相较而言, 关于  $\text{O}_3$  的研究表明, 植被生产力减少幅度为 10%至 20% [25], 在当前  $\text{O}_3$  浓度下, 小麦和水稻的产量分别减少了 33%和 23% [26]。我们估算的  $\text{NO}_2$  导致生产力减少 11%的结果与这些发现一致。

气溶胶可以通过改变太阳辐射比例影响植被生长[27]。气溶胶中的颗粒可以散射太阳辐射, 使一部分辐射被散射到大气中, 从而减少到达地表的辐射量, 这对陆地生态系统的生产力产生显著影响[28]。此外, 气溶胶引起的辐射扰动还可导致空气温度下降并产生冷却效应, 同时增加空气湿度[29]。这些气候变化调节植物气孔导度, 从而影响植被对  $\text{NO}_2$  的吸收[30]。为了评估气溶胶的潜在影响, 本研究将气溶胶光学厚度(AOD)纳入回归模型中, 重新计算了植被生产力对  $\text{NO}_2$  的响应。如图 5 所示, AOD 的加入对结果几乎没有影响, 表明气溶胶在本研究所用模型中影响较小, 可忽略不计, 这增强了本研究结果的稳健性。为避免看似独立的变量所传递的信息重复, 必须考虑自变量的共线性问题, 因此我们使用方差膨胀因子(VIF)来诊断所选变量之间的共线性。结果显示(见表 3),  $\text{NO}_2$ 、NIRv、AOD 和降水量(Pr)之间的共线性较弱( $\text{VIF} < 1.12$ ), 而饱和水汽压差(VPD)、最高气温(Tmax)和最低气温(Tmin)则表现出中度共线性( $\text{VIF} > 8.98$ )。这表明 AOD 与  $\text{NO}_2$ 、NIRv、降水量等变量之间相互影响较小, AOD 对植被生产力的作用主要通过辐射和气候的变化, 而非直接通过气体或降水变化。尽管太阳诱导荧光(SIF)已广泛应用于大区域评估空气污染对作物的影响, 但其较低的空间分辨率限制了在本研究中的应用。因此, 我们采用了来自卫星测量的 1 km 分辨率的 NIRv, 代表植被生长状况, 从而确保了分析结果的较高空间精度。



**Figure 5.** The regression coefficients for NIRv in each vegetation type simulated with and without the AOD in the model (Unit of  $\beta_{\text{NO}_2}$  is NIRv change per  $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{NO}_2$ )

**图 5.** 模型在有无 AOD 条件下模拟各植被类型的 NIRv 回归系数( $\beta_{\text{NO}_2}$  单位为每  $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{NO}_2$  的 NIRv 变化)

**Table 3.** Collinearity analysis among all independent variables  
**表 3.** 各自变量共线性分析

| Variable  | NO <sub>2</sub> | NIRv | AOD  | VPD  | Pr   | T <sub>max</sub> | T <sub>min</sub> |
|-----------|-----------------|------|------|------|------|------------------|------------------|
| Tolerance | 0.89            | 0.91 | 0.94 | 0.11 | 0.93 | 0.07             | 0.09             |
| VIF       | 1.12            | 1.10 | 1.06 | 8.98 | 1.08 | 13.80            | 11.74            |

本研究的分析展示了卫星数据在估算空气污染(特别是 NO<sub>2</sub>)对植被生长影响方面的应用价值。这一方法能够在不同区域和时间段内研究 NO<sub>2</sub> 的影响,克服了基于地面实验的局限性。我们的研究结果突显了减少 NO<sub>2</sub> 排在改善植被生长和提高中国作物生产力方面的巨大潜力。在未来的工作中,我们计划将这些基于卫星的研究成果纳入模型中,以进一步提升对 NO<sub>2</sub> 对植被生产力影响的模拟能力。

## 5. 结论

在这项研究中,我们利用卫星数据量化了中国各种植被类型中二氧化氮对植被生产力的影响。我们的研究表明,二氧化氮浓度与植被生产力之间存在很强的负相关,凸显了二氧化氮污染对植物生长的不利影响。各植被类型对二氧化氮的敏感性差异显著,其中,草原的敏感性最高(−0.0017),常绿针叶林和灌木林的敏感性最低(−0.0006)。这些结果与之前的研究结果一致。我们的分析表明,将二氧化氮浓度降低到目前的第五百分位数可大幅提高中国的植被生产力。预计农田的增加最为显著(27.73%),其次是草原(14.71%)、灌木林(12.50%)、混交林(4.28%)、落叶阔叶林(3.58%)和常绿针叶林(3.21%)。对植被生长的影响在华北平原尤为明显,该地区的生产力可提高 18% 以上。这些发现强调了减少 NO<sub>2</sub> 排放、促进生态系统健康和提高作物产量所带来的巨大生态和农业效益。此外,这项研究还证明了卫星观测在调查空气污染对植被生长影响方面的有效性。在这些成果的基础上,未来的工作将侧重于将这些见解纳入模型,以改进模拟和分析。

## 参考文献

- [1] Zhao, Z., Lu, Y., Zhan, Y., Cheng, Y., Yang, F., Brook, J.R., *et al.* (2023) Long-Term Spatiotemporal Variations in Surface NO<sub>2</sub> for Beijing Reconstructed from Surface Data and Satellite Retrievals. *Science of The Total Environment*, **904**, Article 166693. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166693>
- [2] Sheng, Q. and Zhu, Z. (2019) Effects of Nitrogen Dioxide on Biochemical Responses in 41 Garden Plants. *Plants*, **8**, Article 45. <https://doi.org/10.3390/plants8020045>
- [3] Emberson, L.D., Ashmore, M.R., Murray, F., Kuylensstierna, J.C.I., Percy, K.E., Izuta, T., *et al.* (2001) Impacts of Air Pollutants on Vegetation in Developing Countries. *Water, Air, and Soil Pollution*, **130**, 107-118. <https://doi.org/10.1023/a:1012251503358>
- [4] Hu, Y., Bellaloui, N., Tigabu, M., Wang, J., Diao, J., Wang, K., *et al.* (2015) Gaseous NO<sub>2</sub> Effects on Stomatal Behavior, Photosynthesis and Respiration of Hybrid Poplar Leaves. *Acta Physiologiae Plantarum*, **37**, Article No. 39. <https://doi.org/10.1007/s11738-014-1749-8>
- [5] Vighi, I.L., Benitez, L.C., Amaral, M.N., Moraes, G.P., Auler, P.A., Rodrigues, G.S., *et al.* (2017) Functional Characterization of the Antioxidant Enzymes in Rice Plants Exposed to Salinity Stress. *Biologia plantarum*, **61**, 540-550. <https://doi.org/10.1007/s10535-017-0727-6>
- [6] Chen, B., Song, Q. and Pan, Q. (2022) Study on Transpiration Water Consumption and Photosynthetic Characteristics of Landscape Tree Species under Ozone Stress. *Atmosphere*, **13**, Article 1139. <https://doi.org/10.3390/atmos13071139>
- [7] He, L., Wei, J., Wang, Y., Shang, Q., Liu, J., Yin, Y., *et al.* (2022) Marked Impacts of Pollution Mitigation on Crop Yields in China. *Earth's Future*, **10**, e2022EF002936. <https://doi.org/10.1029/2022ef002936>
- [8] Ainsworth, E.A., Yendrek, C.R., Sitch, S., Collins, W.J. and Emberson, L.D. (2012) The Effects of Tropospheric Ozone on Net Primary Productivity and Implications for Climate Change. *Annual Review of Plant Biology*, **63**, 637-661. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103829>
- [9] Long, X., Han, Y., Wang, Q.Y., Li, X.K., Feng, T., Wang, Y.C., *et al.* (2023) Adverse Effects of Ozone Pollution on Net Primary Productivity in the North China Plain. *Geophysical Research Letters*, **51**, e2023GL105209.

- <https://doi.org/10.1029/2023gl105209>
- [10] Marzuoli, R., Faoro, F., Picchi, V. and Gerosa, G.A. (2024) Phytotoxic Ozone Dose-Response Relationships for Durum Wheat (*Triticum durum*, Desf.). *Plants*, **13**, Article 573. <https://doi.org/10.3390/plants13050573>
  - [11] Hollister, R.D., Elphinstone, C., Henry, G.H.R., Bjorkman, A.D., Klanderud, K., Björk, R.G., *et al.* (2023) A Review of Open Top Chamber (OTC) Performance across the ITEX Network. *Arctic Science*, **9**, 331-344. <https://doi.org/10.1139/as-2022-0030>
  - [12] Allen, L.H., Kimball, B.A., Bunce, J.A., Yoshimoto, M., Harazono, Y., Baker, J.T., *et al.* (2020) Fluctuations of CO<sub>2</sub> in Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE) Depress Plant Photosynthesis, Growth, and Yield. *Agricultural and Forest Meteorology*, **284**, Article 107899. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107899>
  - [13] Feng, Z., Xu, Y. and Shang, B. (2020) Free-Air Concentration Enrichment (FACE) Techniques, Experimental Approach and Its Application in the Field of Global Change Ecology: A Review. *Chinese Journal of Plant Ecology*, **44**, 340-349. <https://doi.org/10.17521/cjpe.2019.0223>
  - [14] Knopf, O., Castro, A., Bendig, J., Pude, R., Kleist, E., Poorter, H., *et al.* (2024) Field Phenotyping of Ten Wheat Cultivars under Elevated CO<sub>2</sub> Shows Seasonal Differences in Chlorophyll Fluorescence, Plant Height and Vegetation Indices. *Frontiers in Plant Science*, **14**, Article 1304751. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1304751>
  - [15] Zhang, Z., Xiong, J., Fan, M., Tao, M., Wang, Q. and Bai, Y. (2023) Satellite-Observed Vegetation Responses to Aerosols Variability. *Agricultural and Forest Meteorology*, **329**, Article 109278. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109278>
  - [16] Chen, X., Gao, J., Chen, L., Khanna, M., Gong, B. and Auffhammer, M. (2023) The Spatiotemporal Pattern of Surface Ozone and Its Impact on Agricultural Productivity in China. *PNAS Nexus*, **3**, pgad435. <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad435>
  - [17] Lobell, D.B., Di Tommaso, S. and Burney, J.A. (2022) Globally Ubiquitous Negative Effects of Nitrogen Dioxide on Crop Growth. *Science Advances*, **8**, eabm9909. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abm9909>
  - [18] Cersosimo, A., Serio, C. and Masiello, G. (2020) TROPOMI NO<sub>2</sub> Tropospheric Column Data: Regridding to 1 Km Grid-Resolution and Assessment of Their Consistency with *in Situ* Surface Observations. *Remote Sensing*, **12**, Article 2212. <https://doi.org/10.3390/rs12142212>
  - [19] Ma, Y., Yue, X., Sitch, S., Unger, N., Uddling, J., Mercado, L.M., *et al.* (2023) Implementation of Trait-Based Ozone Plant Sensitivity in the Yale Interactive Terrestrial Biosphere Model V1.0 to Assess Global Vegetation Damage. *Geoscientific Model Development*, **16**, 2261-2276. <https://doi.org/10.5194/gmd-16-2261-2023>
  - [20] Henry, C., John, G.P., Pan, R., Bartlett, M.K., Fletcher, L.R., Scoffoni, C., *et al.* (2019) A Stomatal Safety-Efficiency Trade-off Constrains Responses to Leaf Dehydration. *Nature Communications*, **10**, Article No. 3398. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11006-1>
  - [21] Knoke, T., Ammer, C., Stimm, B. and Mosandl, R. (2008) Admixing Broadleaved to Coniferous Tree Species: A Review on Yield, Ecological Stability and Economics. *European Journal of Forest Research*, **127**, 89-101. <https://doi.org/10.1007/s10342-007-0186-2>
  - [22] Gopalakrishnan, V., Hirabayashi, S., Ziv, G. and Bakshi, B.R. (2018) Air Quality and Human Health Impacts of Grasslands and Shrublands in the United States. *Atmospheric Environment*, **182**, 193-199. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.03.039>
  - [23] Felzer, B.S., Cronin, T., Reilly, J.M., Melillo, J.M. and Wang, X. (2007) Impacts of Ozone on Trees and Crops. *Comptes Rendus. Géoscience*, **339**, 784-798. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.08.008>
  - [24] Agyei, T., Jurán, S., Edwards-Jonášová, M., Fischer, M., Švik, M., Komínková, K., *et al.* (2021) The Influence of Ozone on Net Ecosystem Production of a Ryegrass-Clover Mixture under Field Conditions. *Atmosphere*, **12**, Article 1629. <https://doi.org/10.3390/atmos12121629>
  - [25] Dong, C., Gao, R., Zhang, X., Li, H., Wang, W. and Xue, L. (2021) Assessment of O<sub>3</sub>-Induced Crop Yield Losses in Northern China during 2013-2018 Using High-Resolution Air Quality Reanalysis Data. *Atmospheric Environment*, **259**, Article 118527. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118527>
  - [26] Feng, Z., Xu, Y., Kobayashi, K., Dai, L., Zhang, T., Agathokleous, E., *et al.* (2022) Ozone Pollution Threatens the Production of Major Staple Crops in East Asia. *Nature Food*, **3**, 47-56. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00422-6>
  - [27] Yu, L., Zhang, M., Wang, L., Qin, W., Lu, Y. and Li, J. (2020) Clear-Sky Solar Radiation Changes over Arid and Semi-Arid Areas in China and Their Determining Factors during 2001-2015. *Atmospheric Environment*, **223**, Article 117198. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117198>
  - [28] Wang, K., Dickinson, R.E. and Liang, S. (2009) Clear Sky Visibility Has Decreased over Land Globally from 1973 to 2007. *Science*, **323**, 1468-1470. <https://doi.org/10.1126/science.1167549>
  - [29] Ramanathan, V., Crutzen, P.J., Kiehl, J.T. and Rosenfeld, D. (2001) Aerosols, Climate, and the Hydrological Cycle.

- 
- Science*, **294**, 2119-2124. <https://doi.org/10.1126/science.1064034>
- [30] Wang, X., Wu, J., Chen, M., Xu, X., Wang, Z., Wang, B., *et al.* (2018) Field Evidences for the Positive Effects of Aerosols on Tree Growth. *Global Change Biology*, **24**, 4983-4992. <https://doi.org/10.1111/gcb.14339>