

## 【黄河三角洲研究】

滨州市城区增强型植被指数及气象要素  
对环境空气质量影响因素分析张宇辰<sup>1</sup>, 卞 贺<sup>2</sup>, 张 会<sup>3</sup>, 李 峰<sup>4</sup>

1. 南安普顿大学 地理学院, 南安普顿 SO17 1BJ;
2. 山东航空学院 化工与安全学院, 山东 滨州 256603;
3. 滨州市恺迪环保科技有限公司, 山东 滨州 256600;
4. 滨州市人大常委会, 山东 滨州 256600)

**摘 要:**黄河三角洲特殊的地理位置和生态影响了其环境空气质量。利用相关分析、对应分析和非线性回归分析等,对 2016—2022 年滨州市城区的环境空气质量及其影响因素进行了综合分析。结果表明:该区域的环境空气优先控制污染物为 PM<sub>2.5</sub>,这与山东省考核指标是吻合的。PM<sub>2.5</sub> 与 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub> 呈正相关;当  $c(\text{PM}_{2.5}) \leq 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时,PM<sub>2.5</sub> 浓度与 O<sub>3</sub> 和 O<sub>x</sub> 浓度呈正相关,而  $c(\text{PM}_{2.5}) > 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时,呈负相关,且这些相关性都是显著性的,与 PM<sub>2.5</sub> 的来源不具有统计意义。提出了增强型植被指数、气象要素对环境空气质量影响的新模式,即增强型植被指数、平均气温、平均相对湿度、降水量倒数项的非线性回归方程,并且空气质量指数的实际计算值与模拟值显著相关。

**关键词:**黄河三角洲;滨州市;空气质量;增强型植被指数;气象要素

**中图分类号:** X 831 **文献标识码:** A **DOI:**10.13486/j.issn.2097-4973.2024.03.016

中国大气污染从 2008 年已转变为以细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)和 O<sub>3</sub> 为主的复合型污染<sup>[1]</sup>。研究人员开展了大量相关研究,如研究 O<sub>3</sub> 与 PM<sub>2.5</sub> 的浓度呈负相关还是正相关的 O<sub>3</sub> 浓度限值<sup>[2]</sup>、季节<sup>[3-5]</sup>、气象条件<sup>[6]</sup>,还有对两者相关性的时空特征研究<sup>[7-8]</sup>等。从空气污染防治和修复的视角,植被覆盖能降低大气颗粒物暴露浓度<sup>[9-10]</sup>,周敏丹等<sup>[11]</sup>认为自然因素中对 2015 年广州市 PM<sub>2.5</sub> 影响排在第一位的是植被指数。因此,加强这方面的研究,对于形成城乡绿化、工农业生产、无废城市建设等与其区域空气质量的“链接”,有效地改善环境空气质量,都是十分重要的。

由于增强型植被指数不仅能更好地反映高覆盖区域的植被覆盖状况<sup>[12-14]</sup>,还对低覆盖区域的植被覆盖状况具有更好的区分能力<sup>[12,15-17]</sup>,故以增强型植被指数表征植被覆盖水平。为了探索黄河三角洲中心城市——滨州市通过提高植被覆盖水平和利用气象条件来提升空气环境质量的有效性,本文通过 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>)、PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 5 个环境空气质量指标,及大气总氧化剂 O<sub>x</sub> ( $c(\text{O}_x) = c(\text{O}_3) + c(\text{NO}_2)$ )<sup>[8]</sup>浓度,来描述环境空气质量。利用 2016—2022 年空气质量数据,研究滨州市城区的植被覆盖

收稿日期:2023-06-14

第一作者简介:张宇辰(2000—),男,山东滨州人,硕士研究生,主要从事环境污染控制研究。

E-mail:yczhang1117@163.com

通信作者简介:张 会(1971—),男,山东桓台人,正高级工程师,主要从事环保咨询及污染控制研究。

E-mail:bzhbzhang@163.com

水平及气象特点,分析 PM<sub>2.5</sub> 与 PM<sub>10</sub>、O<sub>3</sub>、O<sub>x</sub> 的相关性,并提出了增强型植被指数、气象要素对环境空气质量影响的新模式,可为黄河三角洲的大气污染防治和改善空气质量提供借鉴。

## 1 研究数据与方法

### 1.1 研究数据

本文采用山东省滨州市生态环境监测中心的环境空气质量数据,采集了 2016—2022 年山东省滨州市城区每个月的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 的浓度等 5 项指标的日均值和相应的增强型植被指数。本研究选取了 MODIS 卫星的 16 d 合成的 250 m 分辨率的 MDY13Q1 植被指数产品,包含 2016—2022 年每个月份的数据。气象数据来自滨州市气象站,包括风向、风速、气温、降水量、相对湿度和日照时间,为 2003—2022 年的 20 年均值。

### 1.2 研究方法

增强型植被指数  $EVI = 2.5(R_{NIR} - R_{Red}) / (R_{NIR} + C_1 R_{Red} - C_2 R_{Blue} + L)$ 。式中: $R_{NIR}$ 、 $R_{Red}$  和  $R_{Blue}$  分别为近红外、红外和蓝光波段反射率, $L$  为土壤调节参数,数值为 1; $C_1$  为大气修正红光校正参数,数值为 6; $C_2$  为大气修正蓝光校正参数,数值为 7.5<sup>[18]</sup>。

本文应用 ArcMap10.8 软件对环境数据进行提取,使用 Excel 和 MATLAB2017 软件对植被覆盖数据进行提取,应用 MATLAB 软件进行统计分析及可视化。在对数据预处理时,使用了美国 Rutgers 大学 Niccolo Battistini 编写的 outliers<sup>[19-20]</sup> 来剔除有关向量的离群值,确保数据质量。为验证空气质量指标与  $EVI$  之间的关联,计算其 Spearman 秩相关系数  $\rho$ 、空气质量指标与  $EVI$  相关性的检验值  $p$  和检验概率  $P$  值(取 0.05),当  $p < P$  时说明存在显著相关,检验水准  $\alpha = 0.051$ 。利用对应分析(Correspondence Analysis, CA)<sup>[21]</sup> 来揭示空气质量数据与其他环境要素之间的潜在关联,并通过二维散点图直观展示了不同空气质量类型的聚类特性。模拟建立空气质量指数与其影响因子的多元非线性行回归方程。

## 2 结果与讨论

### 2.1 污染物浓度变化与达标分析

利用 2016—2022 年,滨州市城区每年 1—12 月的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度的月均值来计算各污染物浓度的年均值(其中 O<sub>3</sub> 为“准”年均值)见表 1。

表 1 2016—2022 年滨州市城区 5 种污染物浓度的年均值

年份	污染物浓度/( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )				
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	O <sub>3</sub>
2016	33.250 0	33.583 3	119.916 7	65.166 7	97.333 3
2017	27.250 0	37.666 7	115.916 7	60.000 0	132.583 3
2018	21.083 3	37.000 0	103.833 3	54.250 0	158.250 0
2019	20.000 0	39.916 7	96.333 3	54.916 7	155.000 0
2020	16.666 7	38.333 3	86.250 0	50.750 0	151.833 3
2021	15.750 0	32.250 0	76.250 0	41.500 0	145.333 3
2022	15.166 7	28.916 7	69.416 7	39.166 7	155.000 0
二级标准限值 <sup>[22]</sup>	60	40	70	35	160

对照《环境空气质量标准》(GB3095—2012)中的二级标准限值<sup>[22]</sup>,2016—2022 年,SO<sub>2</sub> 和 PM 浓度下降趋势明显,NO<sub>2</sub> 呈现上升后下降趋势;且 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 均达标,到 2022 年 PM<sub>10</sub> 亦达标;而 PM<sub>2.5</sub> 尚未达标;O<sub>3</sub> 有上升趋势。

### 2.2 污染物间的相关性分析

利用 2016—2022 年,滨州市城区每年 1—12 月份 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM10、PM2.5、O<sub>3</sub> 和 O<sub>x</sub> 浓度的月均值来计算两两的 Spearman 相关系数(表 2)。其中置信度均大于 95%为显著相关,以“\*”标记。在计算 Spearman 相关系数时,MATLAB 函数 corr 同时可给出其相应的 P 值,P 值均小于 0.05。由表 2 可知,5 种污染物两两显著相关。只有 O<sub>3</sub> 与其他 4 种污染物皆呈显著负相关。若将某种污染物与其他 5 种相关系数的绝对值的平均值为其关联序,则 0.7931(PM2.5)>0.7561(PM10)>0.7420(SO<sub>2</sub>)>0.7390(O<sub>3</sub>)>0.6824(O<sub>x</sub>)>0.6770(NO<sub>2</sub>)。该地区的大气污染防治优先控制污染物应为 PM2.5。

表 2 5 种污染物及 O<sub>x</sub> 浓度标准化后的 Spearman 相关系数

	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	PM10	PM2.5	O <sub>3</sub>	O <sub>x</sub>
SO <sub>2</sub>	1.000 0*	0.663 0*	0.902 4*	0.874 9*	-0.657 9*	-0.611 5*
NO <sub>2</sub>	0.663 0*	1.000 0*	0.777 2*	0.723 4*	-0.668 1*	-0.553 1*
PM10	0.902 4*	0.777 2*	1.000 0*	0.909 4*	-0.633 9*	-0.557 5*
PM2.5	0.874 9*	0.723 4*	0.909 4*	1.000 0*	-0.751 5*	-0.706 5*
O <sub>3</sub>	-0.657 9*	-0.668 1*	-0.633 9*	-0.751 5*	1.000 0*	0.983 4*
O <sub>x</sub>	-0.611 5*	-0.553 1*	-0.557 5*	-0.706 5*	0.983 4*	1.000 0*

### 2.3 PM2.5 与 PM10、O<sub>3</sub>、O<sub>x</sub> 浓度的相关性分析

由以上分析可判定滨州市城区的大气污染类型是以 PM2.5 和 O<sub>3</sub> 为主的复合型污染。优先控制污染物 PM2.5。其每年 1—12 月的月节律,即空气环境质量表征指标的月节律见图 1。由图 1 可看出,2016—2022 年滨州市城区 PM2.5 浓度月均值呈现明显的季节特征,即每年 1—8 月呈下降趋势,8—12 月呈上升趋势。因此,接下来的相关分析以 4 个季度为时间尺度。

2.3.1 PM2.5 与 PM10 浓度的相关性 对 PM10 浓度与 PM2.5 浓度作相关性分析(图 2),得到回归方程: $c(\text{PM2.5}) = -1.8889 + 0.5730c(\text{PM10})$ , $R = 0.9316$ , $P = 0$ 。

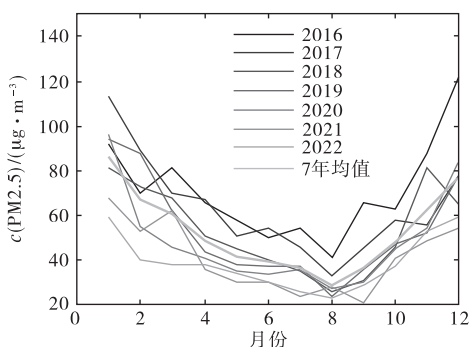


图 1 PM2.5 浓度月均值变化

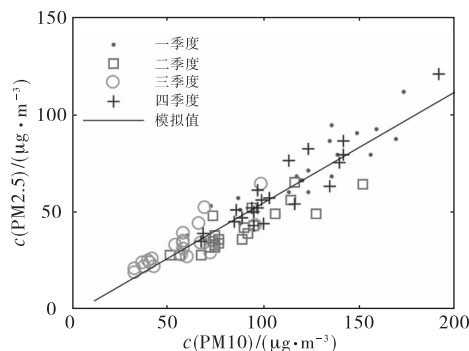


图 2 PM2.5 与 PM10 的季度相关性

由图 2 可看出,第二季度  $c(\text{PM2.5})/c(\text{PM10})$  明显低于年均值。主要是因为大气监测点位居于黄河北岸,黄河大坝阻挡南风,而从风向玫瑰图(图 3)可看出,监测点处在城郊主风向的下风向,季平均风速明显高于年均值,所以“黄河风沙”作为 PM2.5 的来源特征明显。而第三季度与第二季度正好与之相反,则主要因为较高的植被覆盖指数和较大降水所致。

2.3.2 O<sub>3</sub> 与 PM2.5 浓度的相关性 罗悦函等<sup>[7]</sup>就 O<sub>3</sub> 浓度与 PM2.5

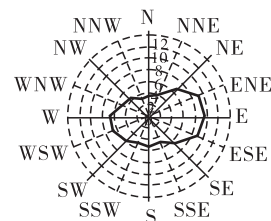


图 3 风向频率玫瑰图

浓度的相关性之复杂性做了举要,可以说是因地因时各异,因此对滨州市城区 O<sub>3</sub> 浓度与 PM2.5 浓度的

相关性特点的探查,按照优先控制污染物 PM2.5 的达标趋势,给予分析。对 O<sub>3</sub> 浓度与 PM2.5 浓度作相关性分析(图 4)。当  $c(\text{PM}_{2.5}) > 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时,通过对 65 对月均值回归分析得到回归方程: $c(\text{O}_3) = 244.2907 - 2.0000 c(\text{PM}_{2.5})$ ,  $R = 0.6955$ ,  $P = 0$ ; 当  $c(\text{PM}_{2.5}) \leq 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时,19 对月均值的回归方程为  $c(\text{O}_3) = 143.4026 + 2.0152 \times c(\text{PM}_{2.5})$ ,  $R = 0.3710$ ,  $P = 0.1179 < 0.12$ 。回归分析结果表明,  $c(\text{PM}_{2.5}) > 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时, O<sub>3</sub> 与 PM2.5 浓度呈显著负相关。而  $c(\text{PM}_{2.5}) \leq 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的数据对占总数的 22.6%, O<sub>3</sub> 与 PM2.5 浓度表现为正相关。

2.3.3 O<sub>x</sub> 与 PM2.5 浓度的相关性 对 O<sub>x</sub> 浓度与 PM2.5 浓度进行季度相关分析(图 5)。当  $c(\text{PM}_{2.5}) > 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时,通过对 65 对月均值回归分析得到回归方程: $c(\text{O}_x) = 262.5798 - 1.6500 c(\text{PM}_{2.5})$ ,  $R = 0.7153$ ,  $P = 0$ ; 当  $c(\text{PM}_{2.5}) \leq 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时,19 对月均值的回归方程为  $c(\text{O}_x) = 144.6337 + 2.7436 \times c(\text{PM}_{2.5})$ ,  $R = 0.4861$ ,  $P = 0.0348 < 0.05$ 。O<sub>x</sub> 也具有 O<sub>3</sub> 与 PM2.5 相同的相关性特点,只是当  $c(\text{PM}_{2.5}) \leq 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时,正相关性更为显著。

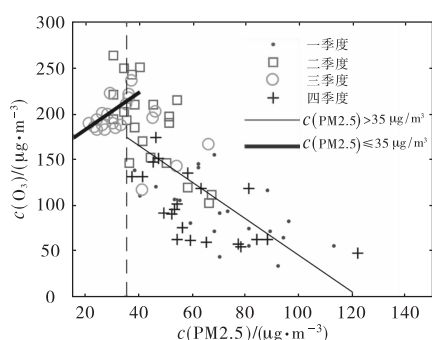


图 4 PM2.5 与 O<sub>3</sub> 的季度相关性

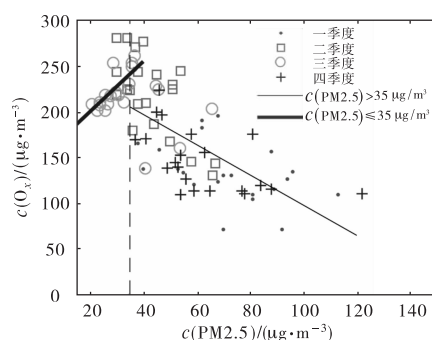


图 5 PM2.5 与 O<sub>x</sub> 的季相关性

2.4 EVI 及气象要素对空气质量的影响

2.4.1 相关性分析 图 6 是 2016—2022 年滨州市城区按月份空气质量指标浓度和 EVI 的 7 年平均值。表 3 是滨州市城区 2003—2022 年的主要气象要素。

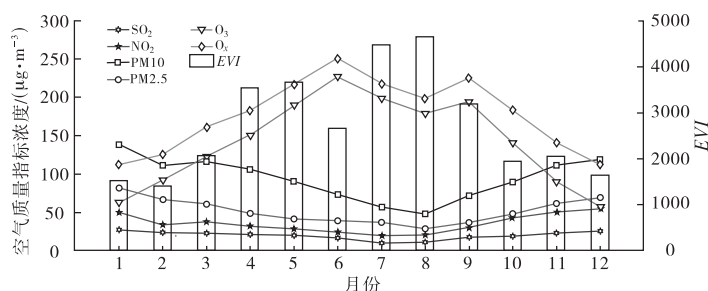


图 6 2016—2022 年滨州市城区空气质量指标浓度和 EVI 的月平均值

表 3 2003—2022 年主要气象要素统计

气象要素	月 份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
平均风速/(m · s <sup>-1</sup> )	2.3	2.6	3.0	3.2	2.8	2.3	2.0	1.9	1.8	2.0	2.1	2.3
平均气温/℃	-2.8	0.6	6.4	13.7	20.5	24.7	26.7	25.6	21.1	14.6	6.4	-0.6
平均相对湿度/%	59	60	54	55	72	65	78	81	77	68	63	59
降水量/mm	2.9	9.7	15.3	32.1	78.5	80.3	126.9	158.0	51.8	24.1	6.8	3.9
日照时间/h	165.3	157.3	206.1	222.6	255.9	223.1	168.2	155.9	164.0	182.9	170.2	156.8

计算 EVI、各气象要素与各空气质量指标的 Spearman 秩相关系数列于表 4。其中置信度 > 95% 的显

显著相关的标记“\*\*”,90%<置信度≤95%显著秩相关的标记“\*”。

表 4 空气质量指标及其影响因素的秩相关系数

影响因素	空气质量指标					
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	PM10	PM2.5	O <sub>3</sub>	O <sub>x</sub>
EVI	-0.804 2**	-0.804 2**	-0.755 2**	-0.858 1**	0.748 3**	0.725 0**
平均风速	0.500 9*	—	0.582 0**	0.517 7*	—	—
平均气温	-0.991 2**	-0.886 2**	-0.956 2**	-0.975 4**	0.917 7**	0.919 3**
平均相对湿度	-0.774 1**	-0.665 5**	-0.858 1**	-0.807 0**	0.634 0**	0.677 2**
降水量	-0.951 0**	-0.944 1**	-0.930 1**	-0.956 2**	0.909 1**	0.879 2**

由表 4 可知,EVI 与 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM10、PM2.5 浓度显著负相关,而与 O<sub>3</sub>、O<sub>x</sub> 显著正相关。平均风速与 PM10 浓度显著负相关,当置信度降为 90%时,平均风速也与 SO<sub>2</sub>、PM2.5 浓度显著负相关,证明了平均风速越大越有利于 SO<sub>2</sub>、PM10、PM2.5 的扩散,从而降低它们的浓度,尤其是 PM10。平均气温、平均相对湿度和降水量与 SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM10、PM2.5 浓度显著负相关,与 O<sub>3</sub>、O<sub>x</sub> 浓度显著正相关。

2.4.2 对应分析 把 1—12 月份为 12 个样本,SO<sub>2</sub> 等 6 个空气质量指标和 EVI 及平均风速等 4 个气象要素,共计 11 个因子,构造成 12×11 的数据阵。对该数据阵进行对应分析,由于 MATLAB 中没有现成的 CA 函数,据孙涛等<sup>[21]</sup>的原理自编 MATLAB 程序来进行相关计算,特征值计算结果见表 5。

表 5 特征值计算结果表

特征值	贡献率/%	累积贡献率/%	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
0.095 8	85.69	85.69	0.001 8	1.61	98.75	0.000 3	0.27	100
0.007 2	6.44	92.13	0.000 7	0.63	99.37	0	0	100
0.005 6	5.01	97.14	0.000 4	0.36	99.73	0	0	100

由表 4 可知,第 1 特征值解释了信息量的 85.69%,第 2 特征值解释了信息量的 6.44%,两者之和为 92.13%。做出 1—12 月份/指标(空气质量指标、EVI 和气象要素)第 1 公因子和第 2 公因子的散点图(图 7)。由图 7 可看出,月份/指标可分为 6 组: {1,11,12,NO<sub>2</sub>,PM2.5,2,PM10,SO<sub>2</sub>},{3,4,10,平均风速},{5,9,O<sub>x</sub>,6,O<sub>3</sub>},{平均相对湿度,EVI,7,8},{平均气温},{平均降雨量};或者前两组另分为 {1,11,12,NO<sub>2</sub>,PM2.5},{2,PM10,SO<sub>2</sub>,3,4,10,平均风速}。

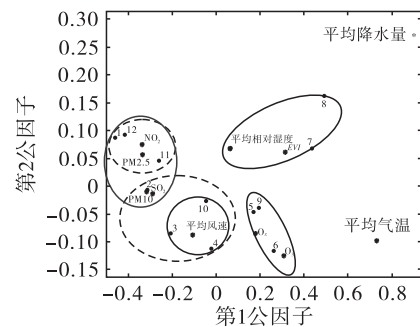


图 7 第 1、第 2 公因子散点图

2.4.3 EVI 及气象要素对环境空气质量指数(Air Quality

Index,AQI)的影响 按照《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ633—2012)<sup>[23]</sup>计算 I<sub>AQI</sub>,接着利用 EVI 及气象要素进行相关性分析,结果见表 6、图 8。

表 6 EVI 及气象要素对 AQI 的影响

影响因素	关系方程	相关系数	P 值
EVI	$I_{AQI}=0.917 9+0.002 3EVI+4 102.674 3/EVI$	-0.845 0	0.000 5
平均气温	$I_{AQI}=-0.010 8+0.356 9AT+33.018 3/AT-0.006 9AT^2$	-0.932 0	0
平均相对湿度	$I_{AQI}=-46.353 5+1.027 6ARH+876.126 3/ARH-0.006 6ARH^2$	-0.922 3	0
降水量	$I_{AQI}=5.596 1+0.006 4P+3.289 0/P-0.000 1P$	-0.942 3	0

以上结果表明:EVI 及 3 个气象要素对 AQI 产生的影响是负向的,即 EVI 等 4 个影响因素越大,I<sub>AQI</sub>

就越小,空气质量越好。因此,在大气污染防治过程中,有效提升植被覆盖水平是可行的,比如城市绿化优化树种、落叶处置、周边防风林带建设等。

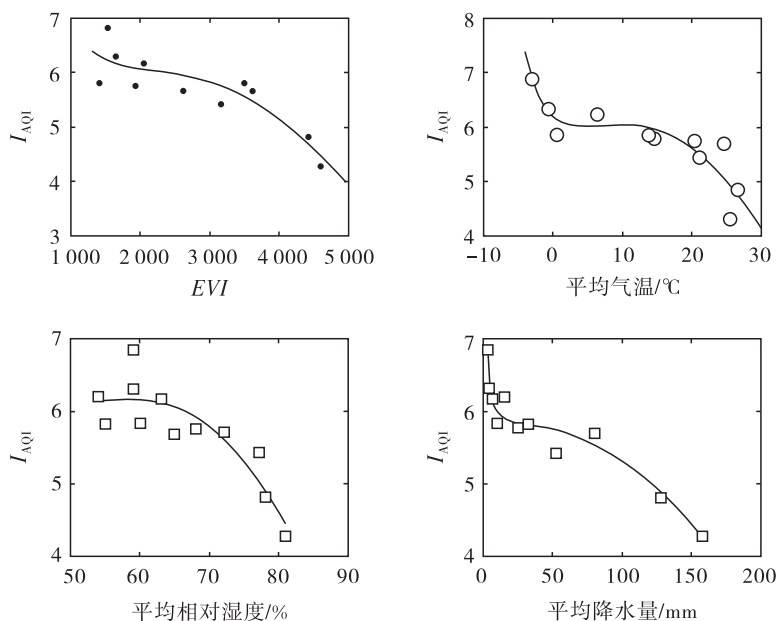


图 8 EVI 及气象要素对 AQI 的模拟情况

### 3 结论

(1) 2016—2022 年滨州市城区大气污染物  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  浓度下降趋势明显,且前 3 种污染物分别于 2016 年、2019 年和 2022 年达标, $\text{PM}_{2.5}$  未达标。尽管  $\text{O}_3$  为日最大 8 h 滑动平均值达标,但其浓度上升趋势明显。从它们相关性看,两两相关,前 4 种之间呈现显著正相关,与  $\text{O}_3$  浓度显著负相关; $\text{PM}_{2.5}$  有最大的关联序。所以, $\text{PM}_{2.5}$  为大气污染防治的优先控制污染物,也与山东省考核指标是吻合的。

(2) 由于第二季度  $\text{PM}_{10}$  浓度明显高于年均值,而  $c(\text{PM}_{2.5})/c(\text{PM}_{10})$  明显低于其他 3 个季度,该季度平均风速也明显高于年均值,表现为黄河风沙的影响。

(3) 该区域大气污染类型仍为以  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$  为主要特征的复合型污染。通过关注前者达标浓度限值( $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )发现,当  $c(\text{PM}_{2.5}) \leq 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时,与  $\text{O}_3$  和  $\text{O}_x$  浓度呈显著正相关;而  $c(\text{PM}_{2.5}) > 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时,呈显著负相关。另外,这种相关性与  $\text{PM}_{2.5}$  的来源没有统计学意义。故实施控制前者,与降低  $\text{O}_3$  和  $\text{O}_x$  浓度是不矛盾的。

(4) 该区域植被覆盖指数 7 年来相对稳定,说明占绝大多数的农业生产有关的植被覆盖是相对稳定的,城市绿化改善甚微,因此植被覆盖指数改善空气质量的成效不如环境空气质量明显。但植物四季荣枯节律,对空气质量的影响则是显著的。该区域的 AQI 与 EVI、平均温度、平均相对湿度、降雨量等气象要素显著负相关。换言之,当这些空气质量影响因素高时,AQI 则低,即空气质量向好。

### 参考文献:

[1] ZHANG Y H, HU M, ZHONG L J, et al. Regional integrated experiments on air quality over Pearl River Delta 2004 (PRIDE-PRD2004): overview[J]. Atmospheric environment, 2008, 42: 6157-6173.  
 [2] 孙金金, 黄琳, 龚康佳, 等. 2014—2019 年北京和南京地区  $\text{PM}_{2.5}$  和臭氧质量浓度相关性研究[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2020, 12(6): 656-664.

- [3] 谢观雷,马永飞. 淮安地区近地面臭氧与  $PM_{2.5}$  等相关性[J]. 区域治理,2019(42):54-56.
- [4] 张宇静,赵天良,殷聃之,等. 徐州市大气  $PM_{2.5}$  与  $O_3$  作用关系的季节变化[J]. 中国环境科学,2019,39(6):2267-2272.
- [5] JIA M W,ZHAO T L,CHENH X H,et al. Inverse relations of  $PM_{2.5}$  and  $O_3$  in air compound pollution between cold and hot seasons over an urban area of east China[J]. Atmosphere,2017,8(3):59.
- [6] 关清,郑有飞,赵辉,等.  $PM_{2.5}$  及气象要素对乌鲁木齐市臭氧的影响[J]. 科学技术与工程,2019,19(10):275-281.
- [7] 罗悦函,赵天良,孟凯,等. 华北平原和山区城市  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  变化关系比较分析[J]. 中国环境科学,2021,41(9):3981-3989.
- [8] 裘彦挺,吴志军,尚冬杰,等. 我国城市大气  $PM_{2.5}$  与  $O_3$  浓度相关性的时空特征分析[J]. 科学通报,2022,67:2008-2017.
- [9] BARRETT J R. Subtle but potentially serious:long-term ambient  $PM_{2.5}$  exposure and risk of cardiopulmonary mortality[J]. Environmental health perspectives,2020,128(2):24001.
- [10] YANG B Y,HU L W,JALUDIN B,et al. Association between residential greenness,cardiometabolic disorders,and cardiovascular disease among adults in China[J]. JAMA network open,2020,3(9):e2017507.
- [11] 周敏丹,匡耀求,云国梁. 基于地理探测器的广州大气  $PM_{2.5}$  浓度驱动因素分析[J]. 环境科学研究,2020,33(2):271-279.
- [12] 王正兴,刘闯,陈文波,等. MODIS 增强型植被指数 EVI 与 NDVI 初步比较[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2006,31(5):407-410.
- [13] 李文梅,覃志豪,李文娟,等. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 的比较分析[J]. 遥感信息,2010,25(6):73-78.
- [14] 王正兴,刘闯,HUETE A. 植被指数研究进展:从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI[J]. 生态学报,2003,23(5):979-987.
- [15] 陈燕丽,罗永明,莫伟华,等. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 对气候因子响应差异[J]. 自然资源学报,2014,29(10):1802-1812.
- [16] WARDLOW B D,EGBERT S L. A comparison of MODIS 250-m EVI and NDVI data for crop mapping:a case study for southwest Kansas[J]. International journal of remote sensing,2010,31(3):805-830.
- [17] 左丽君,张增祥,董婷婷,等. MODIS/NDVI 和 MODIS/EVI 在耕地信息提取中的应用及对比分析[J]. 农业工程学报,2008,24(3):167-172.
- [18] 李红军,郑力,雷玉平,等. 基于 EOS/MODIS 数据的 NDVI 与 EVI 比较研究[J]. 地理科学进展,2007,26(1):26-32.
- [19] NICCOLO B. Outliers,MATLAB central file exchange[CP]. [2024-05-30]. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/35048-outliers>.
- [20] 薛定宇. 高等应用数学问题的 MATLAB 求解:第4版[M]. 北京:清华大学出版社,2018.
- [21] 孙涛,张妙仙,李苗苗,等. 基于对应分析法和综合污染指数法的水质评价[J]. 环境科学与技术,2014,37(4):185-190.
- [22] 环境保护部科技标准司. 环境空气质量标准:GB 3095—2012[S]. 北京:中国环境科学出版社,2012.

[23] 环境保护部科技标准司. 环境空气质量指数 (AQI) 技术规定(试行): HJ 633—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.

## Analysis of Factors Influencing Ambient Air Quality by Enhanced Vegetation Index and Meteorological Parameters in Urban Areas of Binzhou City

ZHANG Yuchen<sup>1</sup>, BIAN He<sup>2</sup>, ZHANG Hui<sup>3</sup>, LI Feng<sup>4</sup>

(1. School of Geography, University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, United Kingdom;

2. School of Chemical Engineering and Safety, Shandong University of Aeronautics,

Binzhou 256603, China;

3. Binzhou Kaidi Environmental Protection Technology Co., Ltd., Binzhou 256600, China;

4. Standing Committee of the Binzhou Municipal People's Congress, Binzhou 256600, China)

**Abstract:** The special geographic location and ecological characteristics of the Yellow River Delta characteristically affect its ambient air quality. Using correlation analysis, correspondence analysis and nonlinear regression analysis, the ambient air quality and its influencing factors in the urban area of Binzhou were comprehensively analyzed from 2016 to 2022. The results show that the priority pollutant for ambient air control in the region is PM<sub>2.5</sub>, which is consistent with the assessment index of Shandong Province. PM<sub>2.5</sub> is positively correlated with SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, and PM<sub>10</sub>; PM<sub>2.5</sub> concentration is positively correlated with the concentration of O<sub>3</sub> and O<sub>x</sub> when  $c(\text{PM}_{2.5}) \leq 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , and negatively correlated when  $c(\text{PM}_{2.5}) > 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , and these correlations were significant, while not statistically significant with the source of PM<sub>2.5</sub>. A new model for the effect of enhanced vegetation index and meteorological factors on ambient air quality was proposed, i. e., a nonlinear regression equation for the inverse terms of enhanced vegetation index, mean air temperature, mean relative humidity, and precipitation, and the actual computed values of the air quality index were significantly correlated with the simulated values.

**Keywords:** Yellow River Delta; Binzhou City; air quality; enhanced vegetation index; meteorological parameters

(责任编辑:王新亮)

**引用格式** 张宇辰, 卞贺, 张会, 等. 滨州市城区增强型植被指数及气象要素对环境空气质量影响的因素分析[J]. 山东航空学院学报, 2024, 41(3): 121-128. ZHANG Y C, BIAN H, ZHANG H, et al. Analysis of factors influencing ambient air quality by enhanced vegetation index and meteorological parameters in urban areas of Binzhou City[J]. Journal of Shandong University of Aeronautics, 2024, 41(3): 121-128.