

陈青雁,王鹏. 经济发展与产业结构对中国大气污染的影响: 以 2015—2020 年省级数据为例 [J]. 江西师范大学学报(自然科学版) 2023 47(4): 424-433.

CHEN Qingyan, WANG Peng. The impact of economic development and industrial structure on air pollution in China: taking the provincial data of 2015—2020 as an example [J]. Journal of Jiangxi Normal University(Natural Science) 2023 47(4): 424-433.

文章编号: 1000-5862(2023) 04-0424-10

经济发展与产业结构对中国大气污染的影响 ——以 2015—2020 年省级数据为例

陈青雁¹, 王 鹏^{2*}

(1. 江西师范大学科学技术学院 江西 九江 332020; 2. 江西师范大学地理与环境学院 江西 南昌 330022)

摘要: 该文以 2015—2020 年省级数据为例, 分析了中国空气质量指数(AQI) 和 6 种大气污染物($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 CO 、 NO_2 和 O_3) 浓度的时空分布特征, 阐明经济发展和产业结构对中国大气污染的影响. 研究表明: 1) 中国大气污染在 2015—2020 年间呈下降趋势, 东北和华中地区下降最大, 华南和西北地区下降最小; 尽管大气污染程度在下降, 但可吸入颗粒物污染($PM_{2.5}$ 和 PM_{10}) 仍面临较大的防治压力, 而且污染物 O_3 浓度程度也在加重. 2) 经济发展和产业结构解释了 AQI 方差变化的 23. 3%, 其中产业结构的解释略多. 与 AQI 相比, 经济发展和产业结构对空气污染物 NO_2 和 O_3 方差变化的解释率较高, 而对 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 CO 的解释率较低. 3) 中国部分发达地区的空气污染已经与经济发展脱钩, 当人均 GDP 为 115×10^3 元时曲线出现转折. 当产业结构(第二产业与第三产业比值) 为 0. 6 时曲线出现转折, 低于此值则大气污染程度明显好转. 4) 用第三产业取代第二产业是使中国空气污染与经济发展脱钩的有效方法. 然而, 能源结构和能源利用效率的作用在未来会越来越重要. 以上结论有助于阐明中国经济发展和产业结构调整对大气污染的影响机理, 为中国大气污染的治理提供理论支撑.

关键词: 大气污染; 时空分布; 经济发展; 产业结构

中图分类号: X 823 文献标志码: A DOI: 10. 16357/j. cnki. issn1000-5862. 2023. 04. 13

0 引言

自改革开放以来, 中国经济持续增长, 能源消耗不断增加, 面临了大气污染的严峻考验. 在 2013 年《大气污染防治行动计划》实施后, 大气污染得到了有效控制^[1], 其中 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 CO 污染物浓度均有所下降. 但中国的空气质量依然不容乐观, 大气颗粒物问题尚未完全解决^[2], NO_2 和 O_3 浓度也有所上升^[1, 3]. 解决经济发展与污染改善之间的矛盾已成为中国生态文明建设的关键^[4].

环境库兹涅茨曲线假说认为经济发展与环境污染间呈倒 U 型关系, 即在经济发展早期由规模效

应而导致环境恶化, 后期由技术效应和结构效应而使环境状况逐步改善^[5]. 中国部分发达地区经济发展与大气环境变化之间已呈现出越过库兹涅茨曲线顶点的特征, 人均 GDP 较高地区的经济增长对城市空气质量起改善作用, 但在经济相对落后的中西部地区, 多数城市经济增长与大气污染程度仍呈同步增长的趋势^[6].

与经济发展类似, 产业结构与环境污染之间也存在着“倒 U 型”关系, 即随着产业结构由第一产业主导向第二、第三产主导转变, 环境污染呈现先上升后下降的趋势^[7]. 第二产业是中国大气污染的主导因素^[8-11]. 第三产业对大气污染的影响较复杂, 由于第三产业大多数是污染排放较少的服务业, 一般

收稿日期: 2023-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(42167013) 和江西省教育厅科学技术研究课题(GJJ2204003) 资助项目.

通信作者: 王 鹏(1982—), 男, 山东济宁人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事自然地理与资源环境研究. E-mail: wangpengjlu@ jxnu. edu. cn

认为第三产业占比增加会降低大气污染^[12];但李鹏^[13]研究认为第三产业占比与环境污染排放量之间存在着倒“U”型曲线关系,只有第三产业的发展在越过曲线拐点后才能有效降低大气污染。

上述研究表明,中国的空气污染受到经济发展和产业结构的共同影响,但有些问题还没有得到阐明:1)中国的经济发展、产业结构和空气污染的空间分布存在较大差异,不同的空气污染物($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 CO 、 NO_2 和 O_3)也有不同的污染源。目前还不清楚中国的经济发展和产业结构对空气污染物有多大影响,以及它们对6种空气污染物的影响有什么不同。2)空气污染与经济发展脱钩过程的转折点是什么?产业结构调整在这一过程中起什么作用?本文利用2015—2020年各省市数据,分析了中国空气质量指数(AQI)和大气污染物($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 CO 、 NO_2 和 O_3)浓度的时空分布特征,量化了经济发展和产业结构对大气污染的影响,并阐明了其影响的转折点。

1 材料与方法

大气污染数据(AQI数值, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 CO 、 NO_2 和 O_3 浓度)来自空气质量在线检测平台(<https://www.aqistudy.cn/>)公布的全国2015—2020年的日监测数据,并按省级行政单位汇总(不包括港、澳、台地区)。各省每年经济发展(人均GDP)与产业结构(第一产业、第二产业和第三产业占总GDP的比值)数据来自中国统计年鉴。省级数据按全国7大地区进一步统计,华北地区:北京市、天津市、河北省、山西省、内蒙古自治区;东北地区:辽宁省、吉林省、黑龙江省;华东地区:上海市、江苏省、浙江省、安徽省、福建省、江西省、山东省;华中地区:河南省、湖北省、湖南省;华南地区:广东省、广西壮族自治区、海南省;西南地区:重庆市、四川省、贵州省、云南省、西藏自治区;西北地区:陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区。

采用Pearson相关分析研究全国及各地区经济发展、产业结构与大气污染的关系,显著性水平设为 $\alpha=0.05$ 。采用随机森林模型分析经济发展和产业结构对空气污染的影响。随机森林算法是一种由决策树组成的有监督的机器学习算法,它准确、高效、发展相对迅速,可用于分类和回归^[14]。本文将AQI和空气污染($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 CO 、 NO_2 和 O_3

浓度)设定为因变量,将经济发展(以人均GDP表示)和产业结构(以第二产业与第三产业的比值表示)设定为自变量。利用在随机森林模型中解释方差(R^2)来分析经济发展和产业结构对空气污染的影响,用偏依赖关系图分析空气污染随经济发展或产业结构变化的趋势。随机森林模型采用R语言(v 4.1.0)的randomForest软件包建立。

2 结果

2.1 中国大气污染的时空变化

2015—2020年,中国空气质量指数AQI从81.71下降至67.07,年平均下降幅度为3.58%(见图1)。在6种污染物中, SO_2 浓度下降幅度最大,年平均下降幅度为11.95%; $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 CO 浓度年平均下降幅度较为接近,分别为6.98%、6.75%和6.67%; NO_2 浓度年平均下降幅度小于AQI,为3.41%。 O_3 为唯一浓度上升的污染物,年平均上升幅度为1.23%。

在季节变化上,中国大气污染呈现“冬高夏低”的特征。AQI月最大均值出现在1月(97.23),最小均值出现在8月(63.09); $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的月最大均值和月最小均值也分别出现在1月和8月; SO_2 和 CO 浓度的月最大均值和月最小均值分别出现在1月和7月; NO_2 浓度的月最大均值和月最小均值分别出现在12月和7月。 O_3 浓度则呈现“夏高冬低”的特征,月最大均值和月最小均值分别出现在6月和12月。

在空间分布上(见图2),中国空气AQI高值区主要集中在以河北省、河南省、山西省、山东省、北京市和天津市为中心的华北、华东和华中地区,以及西北地区的新疆维吾尔自治区和东北地区的辽宁省。6种空气污染物的空间分布与AQI相近。新疆维吾尔自治区的大气污染物主要为 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 CO , SO_2 和 O_3 浓度则较低。北方大气污染较重,特别是 SO_2 浓度,除北京市和新疆维吾尔自治区外,北方各省份 SO_2 浓度都较高。南方大气污染相对较轻,但 CO 浓度在南方的江西省、湖南省、重庆市和广西壮族自治区也较高。

在各地区的年变化中(见图3),AQI在东北和华中地区年平均下降最大(-4.51%和-4.46%),在西南、华北和华东下降幅度相近(-3.95%、-3.80%和-3.24%),在华南和西北的下降最小(-2.83%和-2.71%)。 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度变化接近,在西南地

区年平均下降最大,在西北地区最小; SO_2 浓度在华中和华北地区年平均下降最大,在华南地区最小; CO 浓度在华北地区年平均下降幅度最大,在东北和华南地区年平均下降幅度最小; NO_2 浓度在东北

和华中地区年平均下降幅度最大,在西北地区最小; O_3 浓度仅在东北地区呈微弱下降,在其他地区均呈上升趋势,其中华北、华东地区的上升最明显。

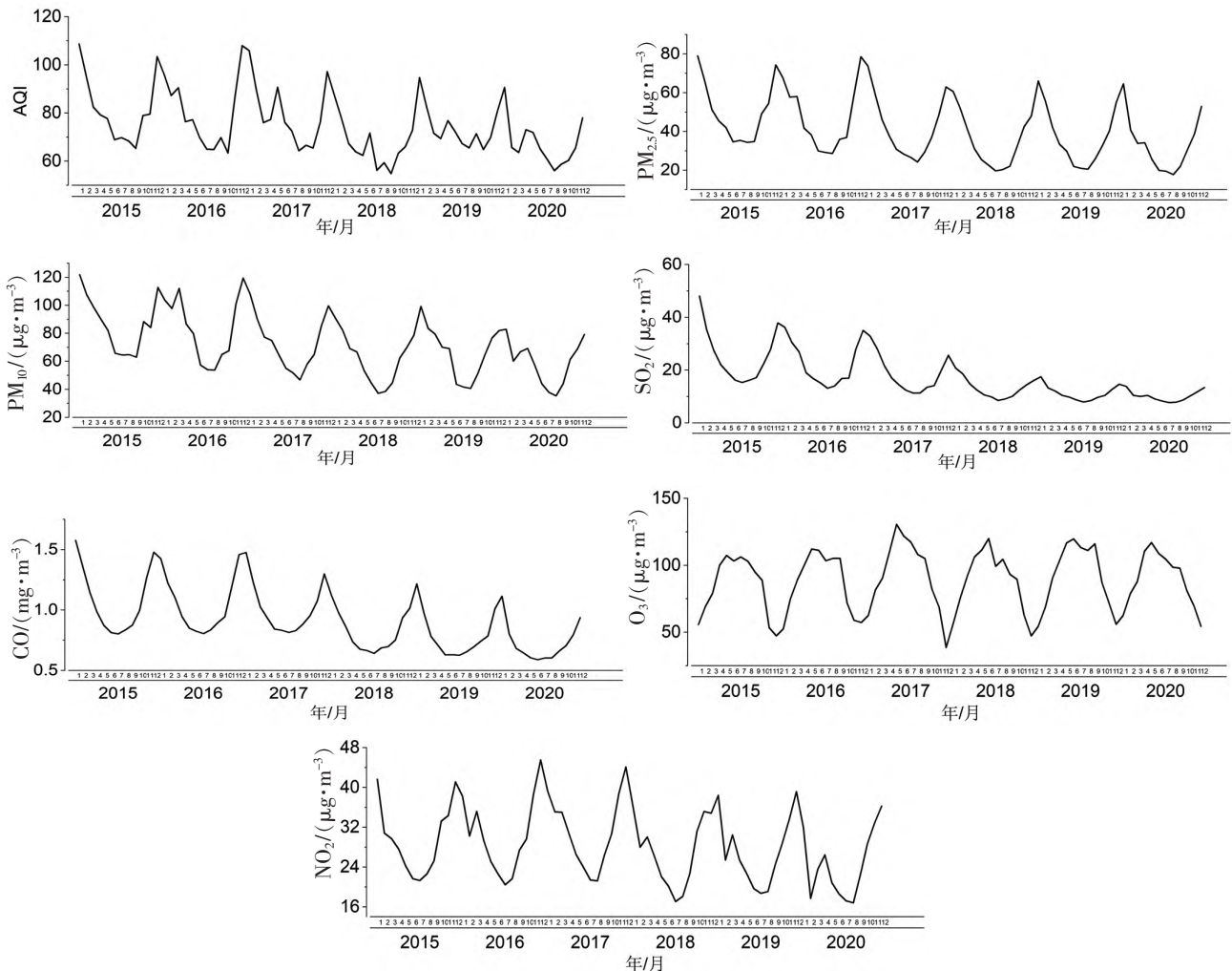


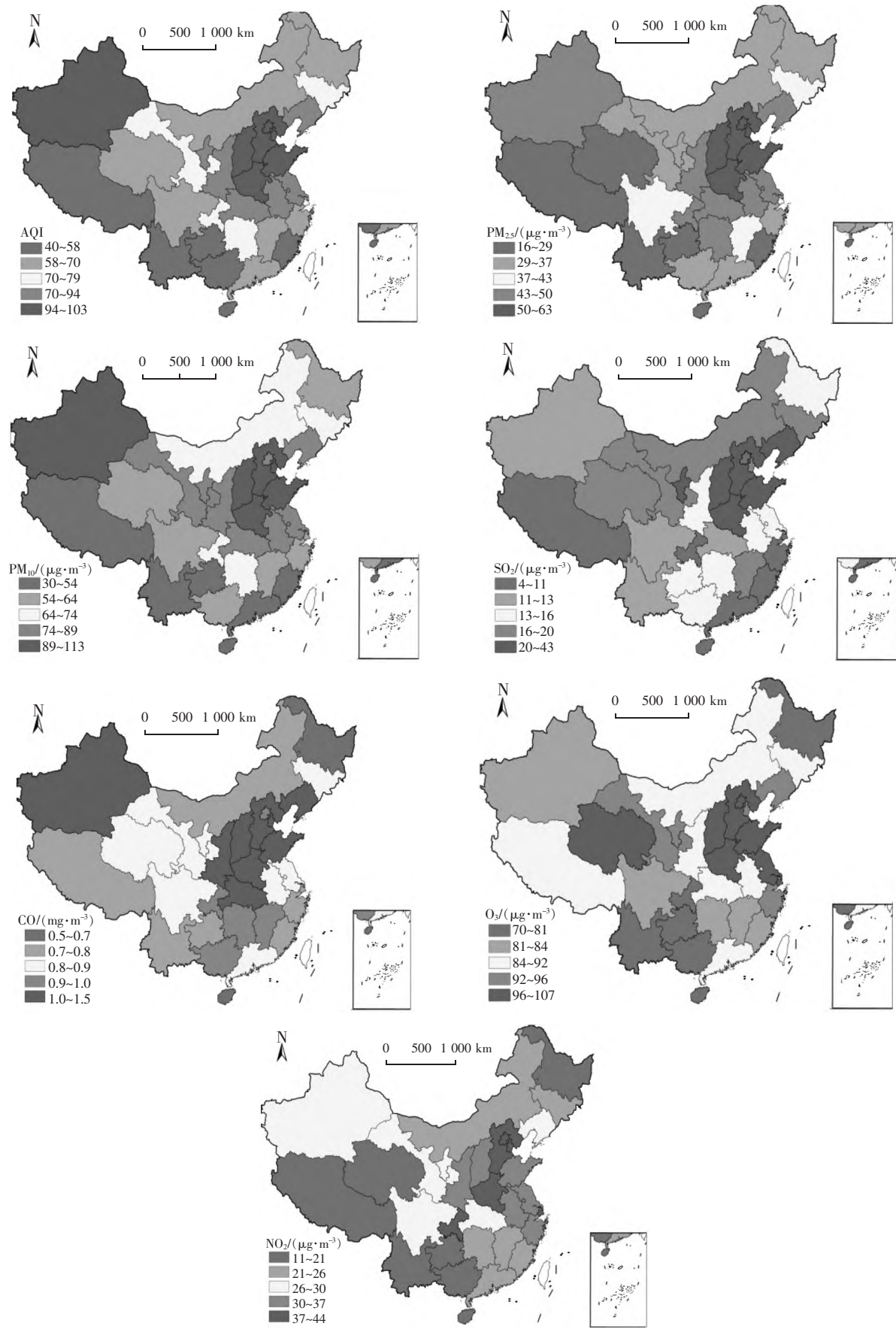
图 1 2015—2020 年中国空气 AQI 与 6 种污染物浓度

2.2 中国经济发展与产业结构

2015—2020 年,中国经济快速发展,人均 GDP 由 2015 年的 49 922 元增长至 2020 年的 72 447 元,增长了 45%。第一产业和第二产业比值呈下降趋势,分别由 2015 年的 8.4% 和 40.8% 下降至 2020 年的 7.7% 和 37.8%; 第三产业比值呈上升趋势,由 2015 年的 50.8% 上升至 2020 年的 54.5%。在地区分布上(见图 4),华东、华北和华南地区的人均 GDP 较高,东北、华南和西南地区的第一产业比例较高,华中、华东和西北地区的第二产业比例较高,华北、华南和华东地区的第三产业比例较高。各地区内的经济发展与产业结构也具有较大差异,华东地区的上海市、江苏省、浙江省和福建省,华北地区的北京

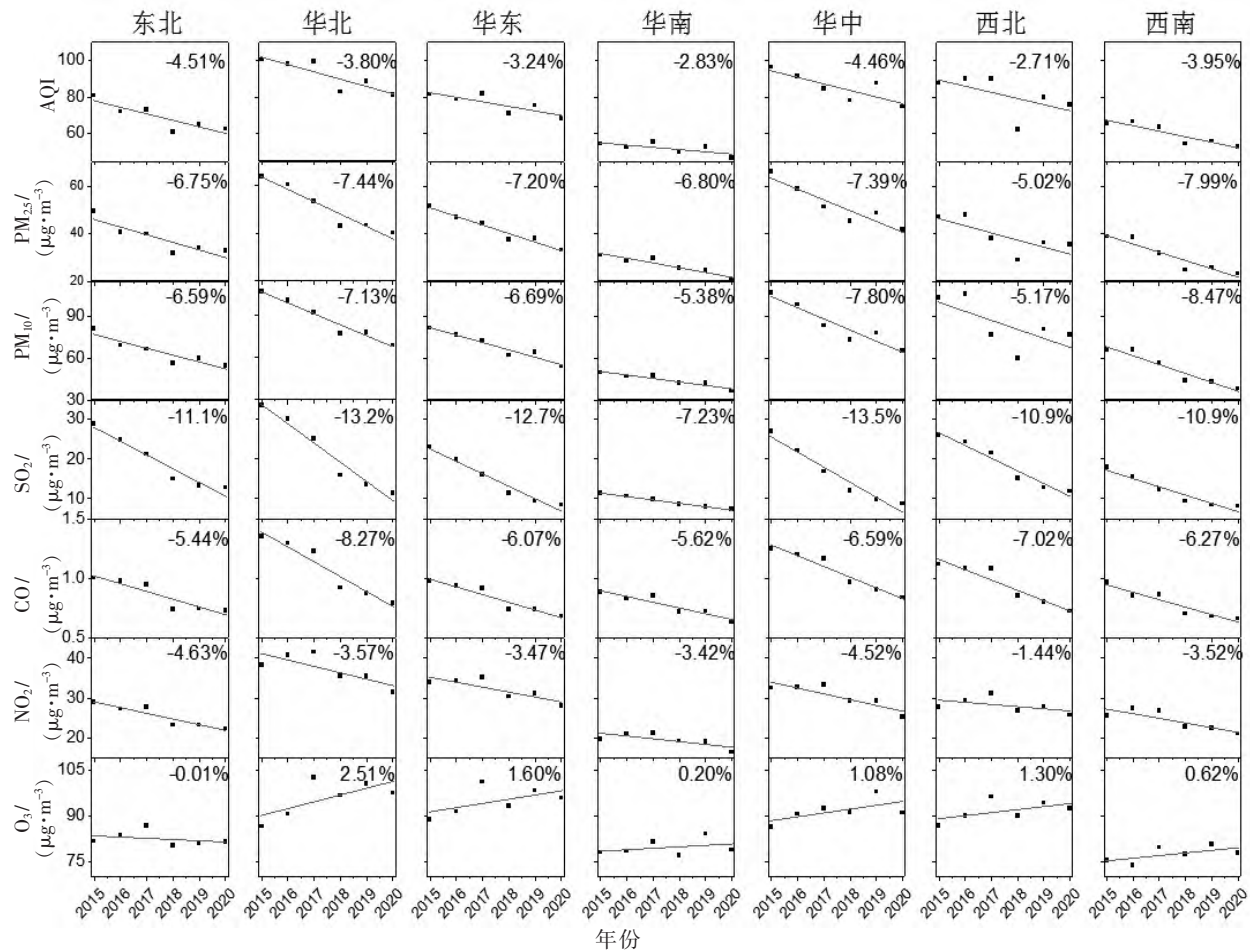
市和天津市,以及华南地区的广东省具有较高的人均 GDP,且 2015—2020 年的增长速率也较大;上海市、北京市和天津市具有较低的第一产业比例和较高的第三产业比例,江苏省、浙江省、福建省和广东省也具有较低的第一产业比例,但第二产业比例和第三产业比例相对均衡。

以第二产业与第三产业的比值表示产业结构(见图 5),中国各省的比值由 2015 年的 0.96 下降到 2020 年的 0.70,第三产业的相对增长趋势明显。在地区分布上,华南地区和华北地区具有较低的第二产业与第三产业的比值,华中地区和华东地区具有较高的第二产业与第三产业的比值。在省级分布上,北京市、上海市和海南省具有明显偏低的第二产业与第三产业的比值。



注: 该图基于自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2023) 2767 号的标准地图制作 底图无修改。

图 2 2015—2020 年中国空气 AQI 与 6 种污染物浓度年平均值的空间分布



注: 图中百分数为各指标的年平均变化幅度。

图3 2015—2020年中国各地区空气AQI与6种污染物浓度

2.3 中国大气污染与经济发展、产业结构的相关性

2015—2020年中国各省空气质量指数AQI与PM_{2.5}、PM₁₀的相关性最高(见图6),其次为NO₂、CO、O₃,与SO₂的相关性最低;各污染物浓度之间均呈显著正相关性。中国人均GDP与第三产业比值呈显著正相关关系,与第一产业和第二产业比值呈显著负相关关系。AQI与人均GDP和第二产业比值呈显著正相关,与第一产业比值呈显著负相关关系,与第三产业比值的相关性不显著。

中国人均GDP与AQI呈显著正相关关系,与空气污染物NO₂和O₃呈显著正相关关系,与SO₂和CO呈显著负相关关系,与PM_{2.5}和PM₁₀相关性不显著。第二产业比值与AQI、6种空气污染物浓度都呈显著正相关关系,第一产业比值与AQI、6种空气污染物浓度都呈显著负相关关系(与SO₂负相关关系不显著);第三产业比值与AQI相关性不显著,与空气污染物PM₁₀、SO₂和CO呈显著负相关关系,与NO₂、O₃呈显著正相关关系,与PM_{2.5}相关性不显著。

2.4 经济发展和产业结构对大气污染物浓度的影响

在全国范围内,人均GDP和产业结构解释了AQI方差变化的23.3%,对空气污染物NO₂(33.2%)和O₃(25.8%)的方差解释量高于AQI,对PM_{2.5}(20.5%)、PM₁₀(14.8%)、SO₂(14.4%)和CO(12.6%)方差解释量低于AQI(见图7)。与人均GDP相比,产业结构对AQI、PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂和CO的方差解释量偏大,而对NO₂和O₃的方差解释偏小。

偏依赖关系图(见图8)显示:当人均GDP低于40×10³元时,AQI较低;当人均GDP在40×10³~80×10³元之间时,AQI数值波动;当人均GDP从80×10³元增加到115×10³元时,AQI数值明显上升(从70升至85);当人均GDP超过115×10³元时,AQI下降。当产业结构(第二产业与第三产业之比)高于0.6时,AQI出现波动;当产业结构值从0.6降至0.4时,AQI快速下降(从70降至51);当产业结构低于0.3时,AQI再次上升(从51升至65)。人均GDP和产业结构对PM_{2.5}、PM₁₀、CO和NO₂的影响

与 AQI 相似 ,当人均 GDP 为 115×10^3 元、产业结构值为 0.6 时曲线出现转折. 当人均 GDP 增加到 80×10^3 元或产业结构值下降到 0.4 时 SO_2 浓度下降 ,然后保持低水平的稳定值. O_3 浓度在人均 GDP 增

加到 130×10^3 元时增加 ,然后保持较高的稳定值; 在产业结构值下降到 0.85 时增加 ,在产业结构值从 0.85 下降到 0.40 时减少 ,然后保持较低的稳定值.

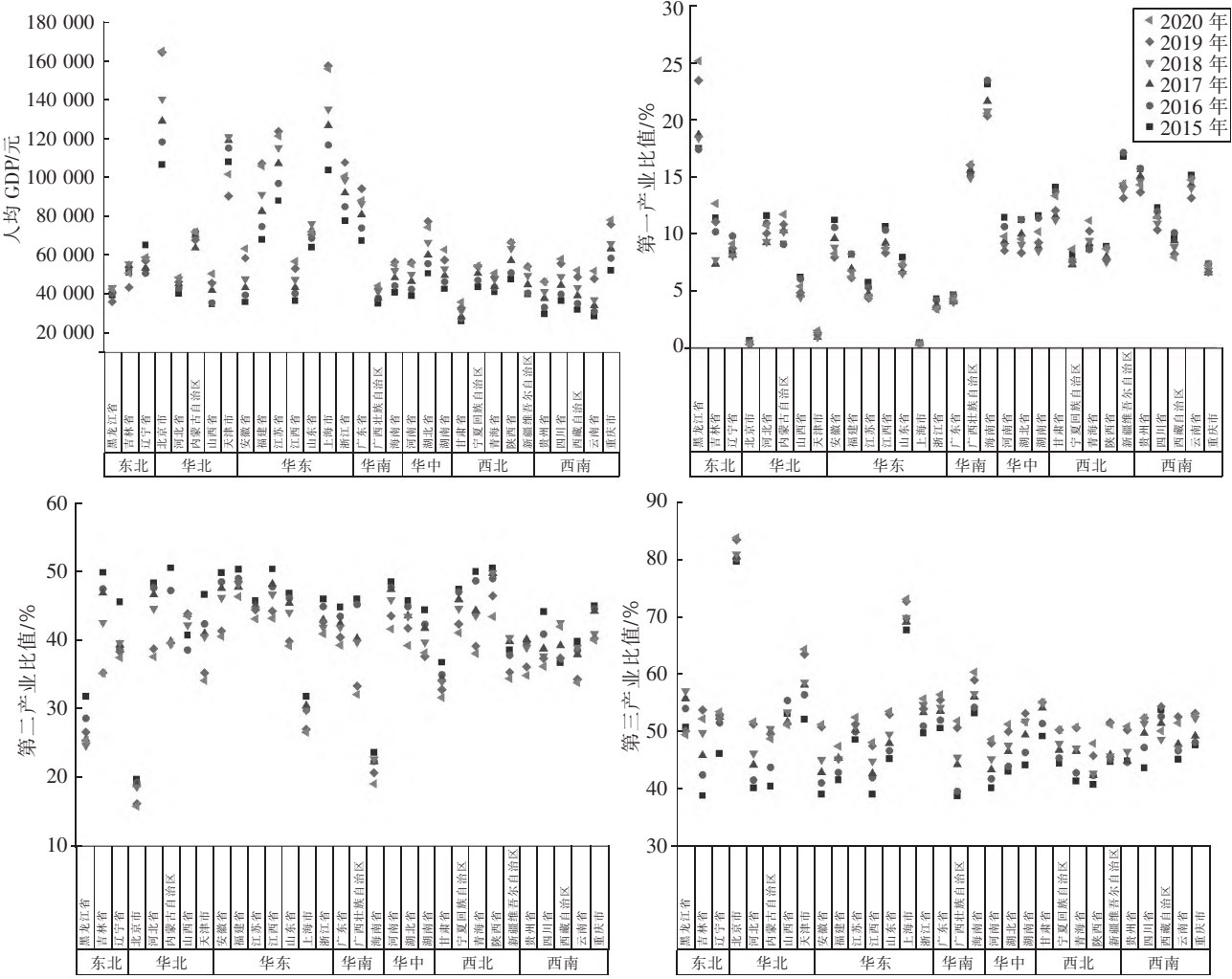


图 4 2015—2020 年中国各省人均 GDP 与产业结构

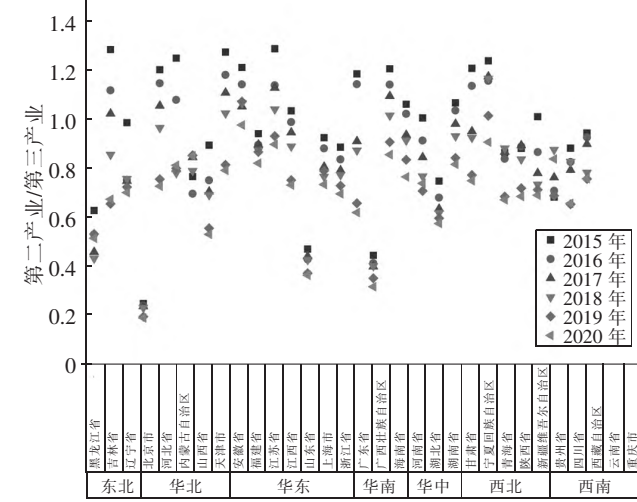


图 5 2015—2020 年中国各省第二产业与第三产业比值

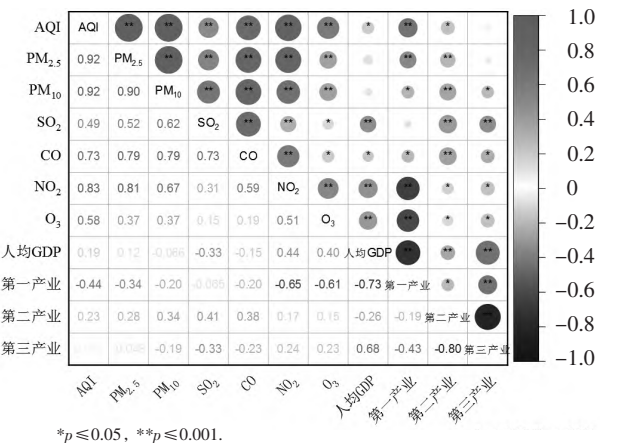
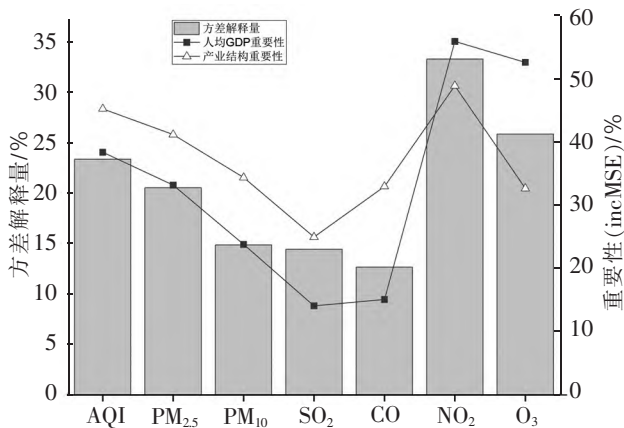


图 6 2015—2020 年中国各省大气污染与经济发展、产业结构的相关性



注: 人均 GDP 或产业结构的重要性 incMSE% 是指在该变量被置换后 OOB (out of bag) 残差均方值增加量。

图 7 在随机森林模型中经济发展和产业结构对空气污染物的方差解释量

3 讨论

3.1 经济发展和产业结构对中国 AQI 的影响

环境库兹涅茨曲线理论^[15]认为经济发展与环境污染之间存在倒 U 型关系。本文研究发现: 当人均 GDP 为 115×10^3 元时曲线有一个重要转折点(见图 8), 在人均 GDP 超过 115×10^3 元的发达地区中, 空气污染已经与经济发展脱钩。然而, 由于只有少数省份的人均 GDP 超过了 115×10^3 元(见图 4), 所以中国大多数地方还没有达到通过经济发展降低大气污染的转折点, 这一结论与 Liu Kui 等^[16]对中国 2000—2015 年的省级数据的研究结论以及 Wang Yazhu 等^[17]对长江经济带 2004—2018 年地级市数据的研究结论一致。

当产业结构值为 0.6 时产业结构曲线出现转折, 在产业结构值低于 0.6 时, AQI 开始迅速下降。在全国范围内, 第二产业的比例与 AQI 呈显著正相关关系, 而第三产业的比例与 AQI 无显著相关性(见图 6)。Tao Chenlu 等^[18]和余典范等^[19]以 COVID-19 大流行为准实验, 分别研究了北京市和全国的产业结构对空气污染的影响, 都发现第二产业的减少比第三产业的减少更能改善空气质量。随着经济的发展, 第二产业向第三产业转移可以有效减少空气污染, 这是目前中国空气质量改善的一个重要原因。由于大多数省份的产业结构值没有低于 0.6, 所以中国的产业结构调整将继续降低未来的空气污染。但当产业结构值低于 0.3 时, 空气质量指数出现了反弹(见图 8)。北京市是唯一产业结构值低于 0.3 的省市(见图 5), 位于空气污染较重的华北地区, 这导致在模型中产业结构最低时, 预测的北京市的 AQI 在上升。

本文研究发现产业结构对中国 AQI 的影响比人均 GDP 更大, 但差异并不明显, 这说明二者都是影响空气污染的关键因素。经济发展和产业结构对空气污染的影响在以往的研究中也得到了证实^[20-21]。然而, 本文人均 GDP 和产业结构只解释了中国 AQI 方差变化的 23.3%(见图 7), 这表明了其他未研究因素有着重要影响, 如温度、降水、风速、空气湿度等自然因素^[22], 以及城镇化、能源效率、交通压力、城市绿化等社会经济因素^[23]。经济发展和产业结构都通过能源消耗和能源效率来影响空气污染。以煤为基础的能源结构是过去中国空气污染严重的主要原因^[4]。Liu Chao 等^[24]认为产业升级对改善空气质量是有效和可行的, 而经济结构调整的改善效果更为复杂。Wang Shijin 等^[25]指出, 优化能源消费结构和提高能源强度是防止中国空气污染的根本途径。Xia Huihui 等^[26]也发现, 能源排放强度和技术进步是减少大气污染物的主要动力。为使中国大气污染与经济发展脱钩, 用低能耗的第三产业取代高能耗的第二产业是一个有效的途径。但是, 由于第二产业和第三产业都会导致大气污染, 只是污染程度不同而已, 所以仅靠产业结构调整很难从根本上使大气污染与经济发展脱钩, 而能源结构和能源利用效率的作用将越来越重要。

3.2 经济发展和产业结构对 6 种空气污染物的影响

本文研究发现经济发展和产业结构对空气污染物 NO₂ 和 O₃ 方差变化的解释率高于 AQI, 而对 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂ 和 CO 的解释率低于 AQI。2015—2020 年, 中国的空气污染呈现出改善的趋势, 污染物 SO₂ 浓度下降最多, 其次是 PM_{2.5}、PM₁₀、CO 和 NO₂, 污染物 O₃ 的浓度呈增加趋势。但经济发展和产业结构对减少最少的污染物 NO₂ 和唯一增加的 O₃ 有更高的解释; 此外, 经济发展对 NO₂ 浓度和 O₃ 浓度的影响大于产业结构(见图 7)。

NO₂ 污染主要来自工业火电和机动车排放^[27]。O₃ 是一种二次污染物, 一般在大气中通过氮氧化物和挥发性有机化合物(VOCs)的光化学反应途径形成^[28]。在 6 种空气污染物中, NO₂ 和 O₃ 与经济发展和第三产业正相关性最高(见图 6); 在人均 GDP 超过 115×10^3 元时, AQI 已呈明显下降趋势, 但 NO₂ 和 O₃ 下降趋势不明显(见图 8)。以上分析表明 NO₂ 和 O₃ 是较难与经济发展脱钩的空气污染物。尤其是 O₃ 污染, 在大气光化学反应中 VOCs 的复杂性增加了污染控制的难度。2013—2017 年, 全国人为源氮氧化物排放减少了 21%, 而 VOCs 增加了 2%^[4]。此外, PM_{2.5} 浓度的下降降低了其对 O₃ 生成化学的抑制作用, 也可能导致 O₃ 污染的增加^[29]。

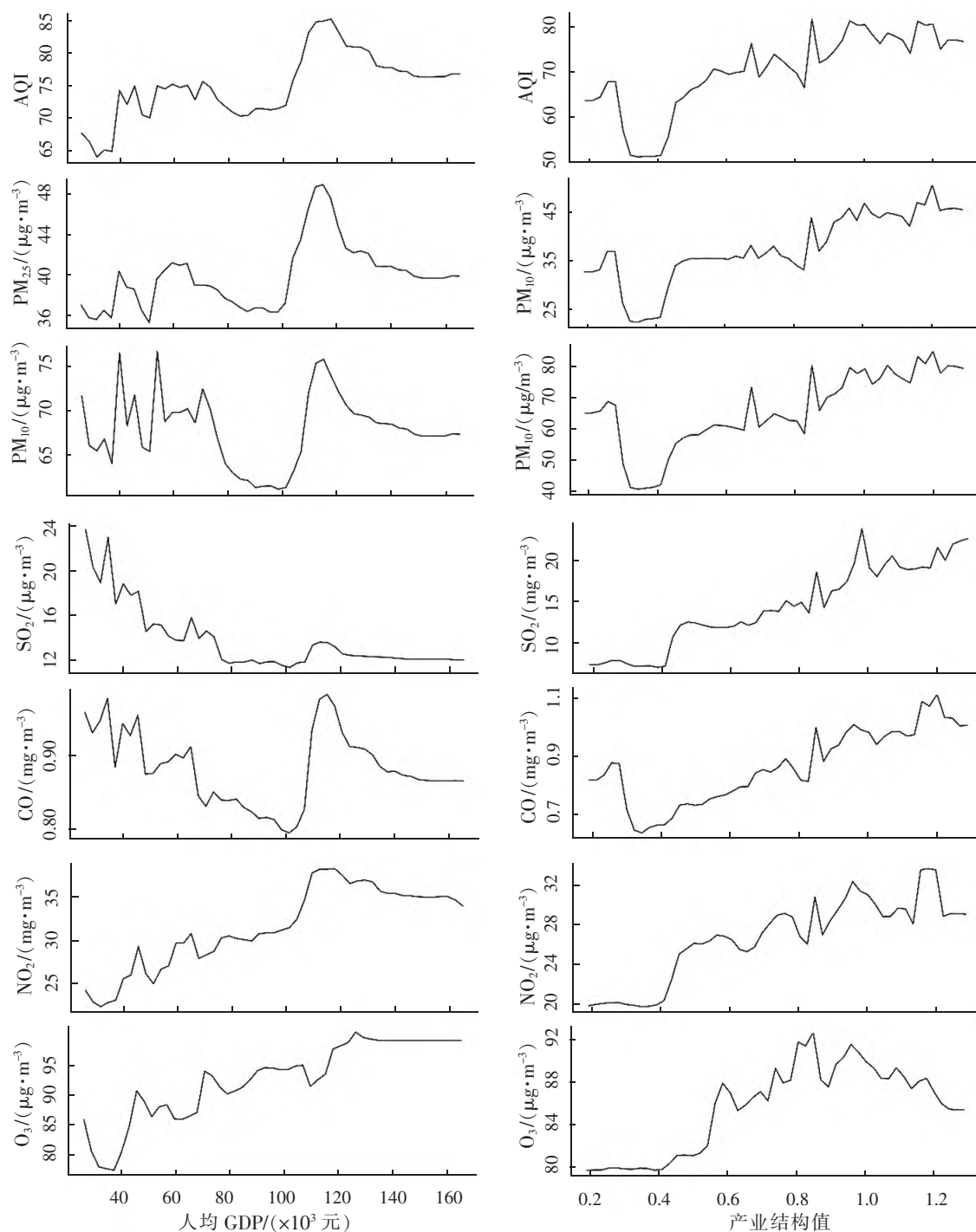


图8 在随机森林模型中预测AQI和空气污染物的偏依赖关系图

$PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的时空分布与AQI相似(见图2), 受经济发展和产业结构影响也相似(见图7和图8)。 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 是《大气污染防治行动计划》(2013—2017年)重点治理的大气污染物, 治理措施包括降低能源结构对煤炭的依赖、规范汽车排放、鼓励可再生能源利用和更新排放标准的执行等。这些措施大大降低了细颗粒物的浓度, 而且这种降低具有持续性^[30]。在6种空气污染中, SO_2 浓度下降幅度最大, 但经济发展和产业结构解释的方差变化相对较小。产业结构在减少 SO_2 方面发挥了比经济发展更重要的作用

(见图7), SO_2 浓度随人均GDP的增加而下降(见图8), 这表明其已与经济发展脱钩。 SO_2 来自含硫物质的燃烧, 主要与煤炭燃烧有关。2003—2016年, 中国的煤改气政策减少了31.3%的工业 SO_2 排放^[31]。Zheng You等^[32]研究发现, 在产业结构转型过程中, 技术创新是减少 SO_2 污染的重要途径。在6种空气污染物中, CO浓度方差变化受经济发展和产业结构的影响最小。许多研究^[33-34]发现CO的主要污染来源是交通运输, 所以在本文研究中CO浓度受经济发展和产业结构的直接影响较小。

4 结论

本文分析了 2015—2020 年中国空气质量指数和大气污染物($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 CO 、 NO_2 和 O_3) 浓度的空间和时间分布,并使用相关分析和随机森林模型来分析经济发展和产业结构对空气污染的影响,得到以下结论:

1) 2015—2020 年中国的大气污染呈下降趋势,其中东北和华中地区的下降幅度最大,华南和西北地区的下降幅度最小. 污染物 SO_2 浓度下降最多,其次是 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 CO 和 NO_2 浓度;但 O_3 浓度在增加,特别是在华北和华东地区.

2) 经济发展和产业结构解释了 AQI 变化的 23.3%,其中产业结构的解释略多. 与 AQI 相比,经济发展和产业结构对空气污染物 NO_2 和 O_3 的解释较高,而对 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 CO 的解释较低.

3) 部分发达地区的空气污染已经与经济发展脱钩,当人均 GDP 为 115×10^3 元时曲线出现重要转折. 当产业结构值为 0.6 时产业结构曲线出现,在产业结构值低于 0.6 时, AQI 指数迅速下降. 产业结构调整是目前中国空气质量改善的一个重要原因,并将在未来继续降低空气污染.

4) 用第三产业取代第二产业是使中国空气污染与经济发展脱钩的有效方法. 然而,能源结构和能源使用效率的作用在未来将越来越重要.

5 参考文献

- [1] 宋晓聪,沈鹏,赵慈,等. 未来十五年我国大气污染防治重点方向的思考 [J]. 环境保护,2021,49(6): 43-47.
- [2] 王韵杰,张少君,郝吉明. 中国大气污染治理: 进展·挑战·路径 [J]. 环境科学研究,2019,32(10): 1755-1762.
- [3] 肖嘉玉,何超,慕航,等. 中国城市空气污染时空分布格局和人口暴露风险 [J]. 地理科学进展,2021,40(10): 1650-1663.
- [4] LU Xi,ZHANG Shaojun,XING Jia,et al. Progress of air pollution control in China and its challenges and opportunities in the ecological civilization era [J]. Engineering,2020,6(12): 1423-1431.
- [5] 李玉文,徐中民,王勇,等. 环境库兹涅茨曲线研究进展 [J]. 中国人口·资源与环境,2005,15(5): 11-18.
- [6] 严雅雪,李琼琼,李小平. 中国城市雾霾库兹涅茨曲线的区域异质性研究 [J]. 统计与决策,2021,37(2): 60-64.
- [7] CHERNIWCHAN J. Economic growth,industrialization, and the environment [J]. Resource and Energy Economics,2012,34(4): 442-467.
- [8] 肖悦,田永中,许文轩,等. 中国城市大气污染特征及社会经济影响分析 [J]. 生态环境学报,2018,27(3): 518-526.
- [9] 杨文涛,譙鹏,刘贤赵,等. 2011—2017 年中国 $PM_{2.5}$ 多尺度时空分异特征分析 [J]. 环境科学,2020,41(12): 5236-5244.
- [10] 何振芳,郭庆春,刘加珍,等. 河北省大气污染时空变化特征及其影响因素 [J]. 自然资源学报,2021,36(2): 411-419.
- [11] XU Wenxuan,TIAN Yongzhong,LIU Yongxue,et al. Understanding the spatial-temporal patterns and influential factors on air quality index: the case of North China [J]. International Journal of Environmental Reserach and Public Health,2019,16(16): 2820.
- [12] SHI Tao,ZHANG Wei,ZHOU Qian,et al. Industrial structure,urban governance and haze pollution: spatiotemporal evidence from China [J]. The Science of the Total Environment,2020,742: 139228.
- [13] 李鹏. 产业结构与环境污染之间倒“U”型曲线关系的检验: 基于产业结构调整幅度和经济增长速度共同影响视角的分析 [J]. 经济问题,2016(10): 21-26.
- [14] BREIMAN L. Random forests [J]. Machine Learning,2001,45(1): 5-32.
- [15] DINDA S. Environmental Kuznets curve hypothesis: a survey [J]. Ecological Economics,2004,49(4): 431-455.
- [16] LIU Kui,LIN Boqiang. Research on influencing factors of environmental pollution in China: a spatial econometric analysis [J]. Journal of Cleaner Production,2019,206: 356-364.
- [17] WANG Yazhu,DUAN Xuejun,WANG Lingqing,et al. Spatial temporal patterns and driving factors of industrial pollution and structures in the Yangtze River Economic Belt [J]. Chemosphere,2022,303: 134996.
- [18] TAO Chenlu,LIAO Zhilin,HU Mingxing,et al. Can industrial restructuring improve urban air quality?: a quasi-experiment in Beijing during the COVID-19 pandemic [J]. Atmosphere-Basel,2022,13(1): 119.
- [19] 余典范,李斯林,周腾军. 中国城市空气质量改善的产业结构效应: 基于新冠疫情冲击的自然实验 [J]. 财经研究,2021,47(3): 19-34.
- [20] CHEN Shengming,ZHANG Yang,ZHANG Yabin,et al. The relationship between industrial restructuring and China's regional haze pollution: a spatial spillover perspective [J]. Journal of Cleaner Production,2019,239: 115808.
- [21] YI Ming,LU Ying,WEN Le,et al. Whether green technology innovation is conducive to haze emission reduction: empirical evidence from China [J]. Environmental Science and Pollution Research,2022,29(8): 12115-12127.
- [22] JI Mengyi,JIANG Yuying,HAN Xiping,et al. Spatiotemporal relationships between air quality and multiple meteorological parameters in 221 Chinese cities [J]. Complexity,2020,2020: 1-25.
- [23] 程钰,刘婷婷,赵云璐,等. 京津冀及周边地区“2+26”城市空气质量时空演变与经济社会驱动机理 [J]. 经济地理,2019,39(10): 183-192.

- [24] LIU Chao ,DAI Hancheng ,ZHANG Lin ,et al. The impacts of economic restructuring and technology upgrade on air quality and human health in Beijing-Tianjin-Hebei region in China [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering* 2019 ,13(5) : 70.
- [25] WANG Shijin ,LI Cunfang ,ZHOU Huiying. Impact of China's economic growth and energy consumption structure on atmospheric pollutants: based on a panel threshold model [J]. *Journal of Cleaner Production* 2019 , 236: 117694.
- [26] XIA Huihui ,DING Lei ,YANG Shuwang , et al. Socioeconomic factors of industrial air pollutants in Zhejiang Province ,China: decoupling and decomposition analysis [J]. *Environmental Science and Pollution Research* 2020 27(22) : 28247-28266.
- [27] BEIDI D ,KEFENG Z ,PANDA S ,et al. Temporal-spatial distribution characteristics of provincial industrial NO_x emissions and driving factors in China from 2006 to 2013 [J]. *Resources Science* 2016 38(9) : 1768-1779.
- [28] 符传博 ,周航. 中国城市臭氧的形成机理及污染影响因素研究进展 [J]. *中国环境监测* 2021 37(2) : 33-43.
- [29] LOU Sijia ,LIAO Hong ,ZHU Bin. Impacts of aerosols on surface-layer ozone concentrations in China through heterogeneous reactions and changes in photolysis rates [J]. *Atmospheric Environment* 2014 85: 123-138.
- [30] YU Yunjing ,DAI Chun ,WEI Yigang ,et al. Air pollution prevention and control action plan substantially reduced PM_{2.5} concentration in China [J]. *Energy Economics* , 2022 ,113: 106206.
- [31] YU Chenyan ,KANG Jijun ,TENG Jing ,et al. Does coal-to-gas policy reduce air pollution? Evidence from a quasi-natural experiment in China [J]. *Science of the Total Environment* 2021 ,773: 144645.
- [32] ZHENG You ,PENG Jiachao ,XIAO Jianzhong , et al. Industrial structure transformation and provincial heterogeneity characteristics evolution of air pollution: evidence of a threshold effect from China [J]. *Atmospheric Pollution Research* 2020 ,11(3) : 598-609.
- [33] GREGORCZYK-MAGA I ,MAGA M ,WACHSMANN A ,et al. Air pollution may affect the assessment of smoking habits by exhaled carbon monoxide measurements [J]. *Environmental Research* 2019 ,172: 258-265.
- [34] PANAGI M ,FLEMING Z L ,MONKS P S , et al. Investigating the regional contributions to air pollution in Beijing: a dispersion modelling study using CO as a tracer [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics* ,2020 ,20(5) : 2825-2838.

The Impact of Economic Development and Industrial Structure on Air Pollution in China

——Taking the Provincial Data of 2015—2020 as an Example

CHEN Qingyan¹ , WANG Peng^{2*}

(1. Science and Technology College , Jiangxi Normal University , Jiujiang Jiangxi 332020 , China;

2. School of Geography and Environment , Jiangxi Normal University , Nanchang Jiangxi 330022 , China)

Abstract: Based on provincial data from 2015—2020 , the spatial and temporal distribution characteristics of China's air quality index (AQI) and concentration of six atmospheric pollutants (PM_{2.5} , PM₁₀ , SO₂ , CO , NO₂ and O₃) are analyzed and the effects of economic development and industrial structure on China's air pollution using correlation analysis and Random Forest model are elucidated. The results show that China's air pollution has a decreasing trend from 2015 to 2020 , with the largest decrease in Northeast China and Central China and the smallest decrease in South China and Northwest China. Pollutant SO₂ concentration decreases the most , followed by PM_{2.5} , PM₁₀ , CO and NO₂. However , the O₃ concentration is increasing , especially in North and East China. The economic development and industry structure explained 23. 3% of the variance in the AQI in China , with a little more by industry structure. Compared with the AQI , it is found that economic development and industrial structure explained higher variance in air pollutant NO₂ and O₃ and lower in PM_{2.5} , PM₁₀ , SO₂ and CO. Air pollution in a few developed regions of China is decoupled from economic development , and GDP per capita at 115×10³ yuan is the turning point. The turning point of the industrial structure (the ratio of the second industry to the tertiary industry) is 0. 6 , below which the AQI began to decrease rapidly. To decouple air pollution from economic development in China , replacing secondary industry with tertiary industry is an effective way. However , the role of energy structure and energy use efficiency will be more and more important in the future. The above findings help to elucidate the influence of economic development and industrial restructuring on air pollution in China , and provide theoretical support for the management of air pollution.

Key words: air pollution; spatial and temporal distribution; economic development; industrial structure

(责任编辑: 刘显亮)