

# 基于 STIRPAT 模型的陕西空气质量影响因素

## ——兼论城市水土保持的重要作用 and 策略

朱建春, 张博聪, 姚佳

(西北农林科技大学 人文社会发展学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**以 STIRPAT 模型为理论分析工具, 基于 2013—2017 年陕西十个地级市的相关统计数据, 分析了影响陕西省空气质量的相关因素。结果表明: 2013—2017 年环境空气质量标准(GB3095—2012)的执行使得陕西空气质量得到一定的改善,  $PM_{2.5}$  值、 $PM_{10}$  值、大气  $SO_2$  含量、CO 含量呈下降趋势, 但 AQI 和大气中  $CO_2$  与  $O_3$  含量则呈上升趋势, 该阶段陕西经济发展与环境质量之间的关系尚处于环境库兹涅茨倒 U 型曲线的初期阶段, 即经济越发展空气质量较差的阶段, 陕北和陕南地区空气质量整体高于关中地区。在当前陕西城市化发展的中期阶段, 对陕西空气质量影响显著的因素是人口、财富、技术、交通等, 但未来随着城市化水平的继续提升, 水土保持(产业结构、园林绿化)因素对空气质量的影响将日益显著。为促进陕西省空气质量提升, 近期应合理控制城市人口密度、以科技创新驱动产业结构调整、减少单位 GDP 能耗、继续实行交通限行政策、发展新能源公共交通工具。远期则应加强水土保持措施, 进一步合理规划与利用城市土地、优化绿化林结构、增加绿化面积, 利用财政支出的杠杆调节作用合理利用环保资金。

**关键词:** 陕西省; 空气质量; 影响因素; 水土保持; STIRPAT 模型

中图分类号: X24

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2020)05-0326-07

## Influencing Factors on Air Quality in Shaanxi Province Based on STIRPAT Model

### —Discussion on Important Function of Urban Soil and Water Conservation and Corresponding Strategies

ZHU Jianchun, ZHANG Bocong, YAO Jia

(College of Humanities & Social Development, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Based on the relevant statistical data of ten prefecture-level cities of Shaanxi Province from 2013 to 2017, we used STIRPAT model as a theoretical analysis tool to analyze the main factors affecting air quality in Shaanxi Province. The results show that the relationship between economic development and environmental quality in Shaanxi Province was still in the initial stage of the inverted U-shaped curve of environmental Kuznets from 2013 to 2017, the more the economy develops, the worse the air quality; the air qualities of ten cities in Shaanxi had been improved after implementation of Environmental Air Quality Standard (GB3095—2012) from 2013 to 2017; AQI value was on the rise,  $PM_{2.5}$  value,  $PM_{10}$  value, atmospheric  $SO_2$  content, CO content showed a downward trend, but the contents of  $CO_2$  and  $O_3$  in the atmosphere were still on the rise; the air qualities in northern and southern Shaanxi were higher than that in middle Shaanxi; in the middle stage of urbanization development at present, population, wealth, technology and transportation are the most important factors affecting the air quality in Shaanxi. In order to improve the air quality of Shaanxi Province, it is necessary to control the population density of the city reasonably, adjust industrial structure driven by scientific and technological innovation, reduce the energy consumption per unit GDP recently, continually implement the traffic restriction policy, and develop new energy public transport should. In the long run, we soil and water conservation measures, such as planning and using urban land rationally, optimizing the structure of green forest, increasing the green area, and reasonably using environmental protection funds by using the leverage of financial expenditure, should be strengthened.

**Keywords:** Shaanxi Province; air quality; influencing factors; soil and water conservation; STIRPAT model

收稿日期: 2019-11-06

修回日期: 2019-12-04

资助项目: 陕西省社会科学基金重点项目“陕西各地区社会经济发展指标对雾霾的贡献率研究”(2014ZD09)

第一作者: 朱建春(1977—), 女, 陕西商南人, 博士, 副教授, 研究方向为农业与农村社会发展、环境社会学。E-mail: zhujc2010@nwsuaf.edu.cn

张博聪(1993—), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 研究方向为发展社会学。E-mail: biexiaokanwo@nwfufu.edu.cn

通信作者: 姚佳(1992—), 男, 贵州兴义人, 硕士研究生, 研究方向为发展社会学。E-mail: 625171906@qq.com

随着城市化、工业化与市场化的发展,使得陕西省经济社会取得长足进步,但同时一些环境问题日益凸显。目前,陕西空气污染严重<sup>[1]</sup>,约束了城市的高质量发展<sup>[2]</sup>。为此陕西省 2013—2017 年颁布实施了《陕西省大气污染防治条例》及其修正版<sup>[3]</sup>。但只有摸清空气质量的影响因素,才能针对性地治理。

已有研究在陕西省空气质量影响因素方面的研究涉及环境工程、化工能源、生态气候和政策法规等多个领域,研究发现,影响关中城市群全年空气质量的最主要污染因子是  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$ ,供暖是关中地区冬季雾霾严重的主要原因<sup>[1,4-5]</sup>。城市化过程中,土地过度开发利用造成了严重的城市水土流失、加剧了空气污染<sup>[6]</sup>,这些环境问题反过来又制约了城市经济的发展。已有研究结果表明,那些有利于城市水土保持的措施,比如产业结构调整<sup>[7-8]</sup>、园林绿化<sup>[9-10]</sup>,也有利于城市空气质量的改善。

总之,已有研究对陕西个别城市空气质量特征或某几项大气污染物变化机理的研究探讨较多,但对陕西省全省空气质量的影响因素方面探讨较少。为此,本研究基于陕西省气象数据和其他统计数据,以可拓展的随机性环境影响评估模型(STIRPAT)为理论分析框架,并将水土保持因素纳入到 STIRPAT 模型中,旨在分析陕西省空气质量的变化特征及其主要影响因素,重点分析城市水土保持因素的影响,以期为陕西省空气质量预报预警和大气污染治理提供基础数据和政策建议。

## 1 研究方法

### 1.1 研究假设、变量操作化与模型构建

Ehrlich 等<sup>[11]</sup>学者于 1972 年构建了环境影响模型(IPAT 等式),该模型认为环境压力( $I$ )是由人口( $P$ )、社会财富( $A$ )和技术水平( $T$ )等因素共同作用引起的,后来 Dietz 和 Rosa 将之修订为 STIRPAT 模型<sup>[12]</sup>,将随机性变量加入模型,赋予自变量不同的系数,并能根据分析对象的实际情况对模型进行拓展,分析自变量与因变量之间的净相关关系并进行定量描述,被称为可拓展的随机性环境影响评估模型,目前被广泛用于分析环境污染成因和评估环境影响<sup>[13-14]</sup>。

本研究假设陕西省空气质量受人口、财富、技术、水土保持因素(产业、绿化)、交通、财政等相关因素的综合影响,据此构建了陕西空气质量影响因素的 STIRPAT 模型(表 1)。

1.1.1 因变量 将因变量“陕西空气质量”表征为陕西十市中各市的年均 AQI(空气质量指数)值,代表环境问题( $I$ )。AQI 指数是基于某一段时间内监测的空气中六

项主要污染物(细颗粒物  $\text{PM}_{2.5}$ ,可吸入颗粒物  $\text{PM}_{10}$ ,二氧化硫  $\text{SO}_2$ ,二氧化氮  $\text{NO}_2$ ,臭氧  $\text{O}_3$ ,一氧化碳  $\text{CO}$ )含量数据计算的<sup>[15]</sup>,最小取值 0,最大取值 500。

1.1.2 自变量 结合陕西省的实际情况,考虑到各指标的有效性、准确性与可获取性,同时避免自变量之间存在多重共线性问题,选取各自变量操作性指标(表 1),其中:人口密度(人口因素  $P$ ):指在一定单位土地面积上的人口数量。随着经济社会的发展,城市化、工业化与市场化程度加深,人口向城市聚集,城市人口规模扩大,城市环境承载力遭遇挑战,由此对资源与环境产生了重要的影响;同时,人口的增加带来了消费的增加,消费需求扩大,更多的社会消费品生产可能带来环境污染。人均可支配收入(财富因素  $A$ ):环境库兹涅茨曲线认为人均收入的增长可以引起环境质量的改善,单位资本收入和环境质量之间呈现的是一种倒 U 型的关系。人均可支配收入是衡量一个地区经济发展水平的重要标准,能体现居民收入及生活水平的变化情况。单位 GDP 能耗(技术因素  $T$ ):指在一定时期内某地区每个单位生产总值所消耗的能源,该指标反映该地区能源生产的水平、规模和发展速度,创造生产收入过程中能源的使用效率,以及区域技术进步水平。作为能源化工大省<sup>[16]</sup>,陕西省单位 GDP 能耗会在较大程度上影响空气质量。产业结构:本研究中利用第二产业增加值占 GDP 的比重来表征。三大产业中,目前第二产业对空气质量的影响最大,尤其是工业生产会消耗大量的能源,而陕西省的能源结构以煤炭为主,由此会产生大量的雾霾污染源。从长远看,空气质量的改善必须通过调整产业结构、改变能源禀赋来实现。绿化园林面积:某个地区的园林面积和绿化面积总和。绿地能吸附空气中的粉尘、灰尘等、减少空气中各种有毒有害物质、净化空气、增加空气湿度和局部降水的可能性,在一定程度上能调节气候。本研究选取园林绿化面积作为绿化指标,对 STIRPAT 模型进行拓展,以验证绿化因素对空气质量的影响。民用汽车拥有量(交通因素):在交通管理部门中已经注册登记过的持有民用车辆牌照的各类汽车总量。民用汽车拥有量的增加会增加大气中汽车尾气排放物,比如氮氧化物( $\text{NO}_x$ )、挥发性有机物(VOCs)、臭氧( $\text{O}_3$ )和细颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ )等。在关中地区,一些城市采取了机动车限行措施,并逐渐建立起常态化机制。财政支出(财政因素):财政是政府进行资源配置的有效手段,其目的是保持经济稳定发展、维护社会公平分配,包括财政收入和财政支出。本研究选取财政支出来表征财政指标,一是因为财政收入与财政支出具有严重共线

性,这两个指标只能二选一;二是财政支出不仅能反映一个地区的经济发展水平,也体现了该地区的“花钱能力”,在科教文卫、经济结构等方面的支出会对空气质量产生影响。

表 1 陕西空气质量影响因素的 STIRPAT 模型指标体系

| STIRPAT 模型                  | 模型中的因素         | 具体指标      | 指标含义                                 |
|-----------------------------|----------------|-----------|--------------------------------------|
| <i>I</i> (环境问题)             | 空气质量           | AQI 指数    | 定量描述空气质量状况的无量纲指数,取值范围位于 0~500 之间     |
| <i>P</i> (人口)               | 人口因素           | 人口密度      | 单位土地面积上的人口数量(人/km <sup>2</sup> )     |
| <i>A</i> (财富)               | 财富因素           | 人均可支配收入   | 居民可用于自由支配的收入(元)                      |
| <i>T</i> (技术)               | 技术因素           | 单位 GDP 能耗 | 一次能源供应总量与 GDP 的比率(t 标准煤/万元)          |
| STIR(可拓展的<br>回归随机性<br>影响因素) | 产业因素(表征水土保持因素) | 产业结构      | 第二产业增加值占 GDP 的比重(%)                  |
|                             | 绿化因素(表征水土保持因素) | 园林绿化面积    | 一个地区用作园林和绿化的绿地面积总和(hm <sup>2</sup> ) |
|                             | 交通因素           | 民用汽车拥有量   | 在交通管理部门已注册登记的领有民用车辆牌照的汽车数量(辆)        |
|                             | 财政因素           | 财政支出      | 由财政部门按照预算计划将财政资金进行支付的活动(亿元)          |

STIRPAT 模型的一般表达式为:

$$I=\alpha P^b A^c T^d \epsilon$$
 (1)

式中:*I* 代表环境影响; $\alpha$  为系数;*P*,*A*,*T* 分别表示人口、财富和技术因素;*b*,*c*,*d* 分别为各变量的指数; $\epsilon$  为随机扰动项。将式(1)中各变量取自然对数以消除各指标数据之间的异方差,得到新表达式:

$$\text{Ln}I=\alpha+b\text{Ln}P+c\text{Ln}A+d\text{Ln}T+\epsilon$$
 (2)

本研究根据理论假设,拓展了式(2)中的自变量,得到陕西空气质量影响因素的 STIRPAT 模型的表达式:

$$\text{LnAQI}=\alpha+b\text{Ln}P+c\text{Ln}A+d\text{Ln}T+e\text{Ln}E+f\text{Ln}G+g\text{Ln}V+h\text{Ln}F+\epsilon$$
 (3)

式中:因变量是 AQI 值;*P* 为人口因素;*A* 为财富因素;*T* 表示技术因素;*E* 表示产业因素;*G* 为绿化因素;*V* 表示交通因素;*F* 代表财政因素;*b*~*h* 为各自变量的指数参数。

1.2 数据来源与分析方法

模型研究中涉及两方面数据:(1) 空气质量数据。测量因变量空气质量的 AQI 指标数据来自陕西省生态环境厅、陕西省各市生态环境局与中国环境监测总站所公开发布的数据。本研究选用 2013—2017 年陕西省 10 个地级市空气质量指数 AQI 的全年平均值。因为 2013—2017 年,这 10 个地级市陆续实施了《环境空气质量标准(GB3095—2012)》这一新标准。其中前两批实施新标准的包括西安、咸阳、宝鸡、铜川、渭南、延安等市,第三批实施新标准的有榆林、汉中、安康、商洛等市,而第三批实施新标准的城市在 2013 年未进行六项指标监测,故这几个城市 2013 年空气质量数据缺失。(2) 空气质量影响因素数据。收集了 2013—2017 年《陕西统计年鉴》中 10 个地级市各相应指标的数据。运用 SPSS 25.0 软件对本研究数据进行统计描述与回归分析。

2 结果与分析

2.1 陕西省空气质量特点

2.1.1 陕西空气质量指标的时间变化特点 2013—2017 年陕西十市空气质量各指标发展趋势(图 1)为:年均 AQI 值从 2013 年的 93.93 下降至 2015 年的 87.17,随后 2016—2017 年回升至 97.00,呈先降后升趋势。

AQI 各构成指标中,各城市 PM<sub>2.5</sub> 的年均值在 2013 年高达 70.19 mg/m<sup>3</sup>,随后下降幅度较大,在 2014—2017 年维持在 52~56 mg/m<sup>3</sup> 区间内。PM<sub>10</sub> 年均值呈波浪起伏趋势,2013 年为 130.16 mg/m<sup>3</sup>,2014 年降至 105.44 mg/m<sup>3</sup>,2015 年继续降至 98.64 mg/m<sup>3</sup>,随后 2016 年回升至 105.08 mg/m<sup>3</sup>,2017 年又略微下降,达到 93.39 mg/m<sup>3</sup>。大气 SO<sub>2</sub> 含量年均值基本维持在 18~29 mg/m<sup>3</sup>,整体呈下降趋势,自 2013 年的 29.30 mg/m<sup>3</sup> 降至 2017 年的 18.79 mg/m<sup>3</sup>。大气 NO<sub>2</sub> 含量年均值从 2013 年的 43.10 mg/m<sup>3</sup> 降至 2015 年的 34.23 mg/m<sup>3</sup>,随后上升,至 2017 年升至 42.17 mg/m<sup>3</sup>。大气中的 CO 的年均含量,2013 年为 1.54 mg/m<sup>3</sup>,2014 年降至 1.33 mg/m<sup>3</sup>,2015 年又回升至 1.45 mg/m<sup>3</sup>,2016 年下降为 1.30 mg/m<sup>3</sup>,2017 年又回升至 1.31 mg/m<sup>3</sup>。大气 NO<sub>2</sub> 含量年均值从 2013 年的 43.10mg/m<sup>3</sup> 降至 2015 年的 34.23 mg/m<sup>3</sup>。大气中 O<sub>3</sub> 含量的年均值从 2013 年的 61.31 mg/m<sup>3</sup> 上升至 2017 年的 94.30 mg/m<sup>3</sup>。

可见,2013—2017 年,陕西省空气质量指标的年均值有不同的发展趋势,大部分指标取值呈下降趋势,说明环境空气质量标准(GB3095—2012)的执行确实起到了一定的改善空气质量的作用。自 2016 年全国范围内开始实施环境空气质量标准(GB3095—2012)后,2017 年陕西十市空气中,除了 CO<sub>2</sub>,NO<sub>2</sub> 及 O<sub>3</sub> 的含量上升外,其余指标年均值下降。

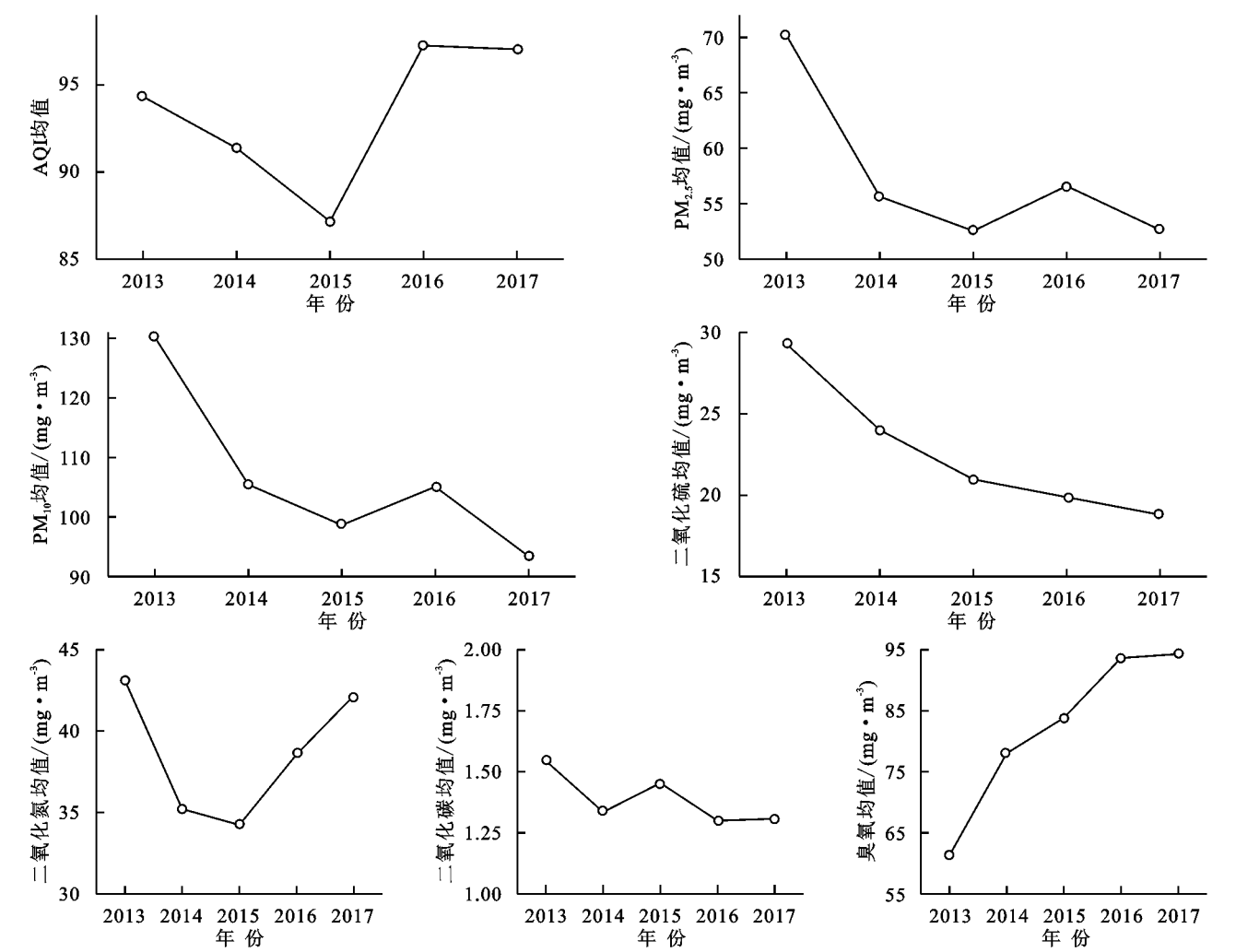


图 1 2013—2017 年陕西十市各年份空气质量各指标发展趋势

2.1.2 陕西空气质量指标的空间分布特点 图 2 显示了 2013—2017 年陕西十市空气质量各指标发展趋势。陕西十市年均 AQI 值从高到低依次为咸阳 114.89 mg/m<sup>3</sup>、西安 114.40 mg/m<sup>3</sup>、渭南 111.90 mg/m<sup>3</sup>、宝鸡 103.01 mg/m<sup>3</sup>、铜川 99.38 mg/m<sup>3</sup>、汉中 83.22 mg/m<sup>3</sup>、延安 82.37 mg/m<sup>3</sup>、榆林 79.81 mg/m<sup>3</sup>、安康 72.73 mg/m<sup>3</sup>、商洛 71.84 mg/m<sup>3</sup>。单看 AQI 值,则关中各市的 AQI 年均值介于 99~115 mg/m<sup>3</sup>,陕北和陕南各市的 AQI 值则都低于 82 mg/m<sup>3</sup>。可见,陕南地区空气质量明显优于陕北地区,后者空气质量又明显优于关中城市群,这与杨飞等<sup>[1]</sup>的研究结果一致。

由图 2 可见,大气中 PM<sub>2.5</sub> 的年平均值按照从高到低依次为西安 72.16 mg/m<sup>3</sup>、咸阳 72.67 mg/m<sup>3</sup>、渭南 68.77 mg/m<sup>3</sup>、宝鸡 65.85 mg/m<sup>3</sup>、铜川 61.07 mg/m<sup>3</sup>、汉中 52.20 mg/m<sup>3</sup>、安康 44.33 mg/m<sup>3</sup>、延安 43.74 mg/m<sup>3</sup>、榆林 34.39 mg/m<sup>3</sup>、商洛 37.66 mg/m<sup>3</sup>。PM<sub>10</sub> 均值从高到低依次为西安 138.96 mg/m<sup>3</sup>、铜川 91.40 mg/m<sup>3</sup>、宝鸡 115.92 mg/m<sup>3</sup>、咸阳 132.58 mg/m<sup>3</sup>、渭南 129.33 mg/m<sup>3</sup>、延安 95.80 mg/m<sup>3</sup>、汉中 82.45 mg/m<sup>3</sup>、榆林 77.91 mg/m<sup>3</sup>、安康 34.90 mg/m<sup>3</sup>、商洛 30.55 mg/m<sup>3</sup>。大气二氧化

硫含量(SO<sub>2</sub>)年均值从高到低依次为延安 29.18 mg/m<sup>3</sup>、西安 25.49 mg/m<sup>3</sup>、渭南 24.13 mg/m<sup>3</sup>、咸阳 23.48 mg/m<sup>3</sup>、铜川 22.11 mg/m<sup>3</sup>、榆林 19.33 mg/m<sup>3</sup>、宝鸡 18.88 mg/m<sup>3</sup>、汉中 13.28 mg/m<sup>3</sup>、安康 9.08 mg/m<sup>3</sup>、商洛 7.91 mg/m<sup>3</sup>。大气二氧化氮含量(NO<sub>2</sub>)年均值从高到低依次为西安 49.42 mg/m<sup>3</sup>、延安 46.50 mg/m<sup>3</sup>、渭南 45.12 mg/m<sup>3</sup>、咸阳 43.88 mg/m<sup>3</sup>、榆林 38.76 mg/m<sup>3</sup>、宝鸡 37.90 mg/m<sup>3</sup>、铜川 30.17 mg/m<sup>3</sup>、汉中 29.96 mg/m<sup>3</sup>、商洛 11.83 mg/m<sup>3</sup>、安康 10.52 mg/m<sup>3</sup>。大气一氧化碳含量(CO)年均值从高到低依次为延安 1.74 mg/m<sup>3</sup>、西安 1.72 mg/m<sup>3</sup>、宝鸡 1.47 mg/m<sup>3</sup>、榆林 1.43 mg/m<sup>3</sup>、铜川 1.39 mg/m<sup>3</sup>、咸阳 1.32 mg/m<sup>3</sup>、汉中 1.29 mg/m<sup>3</sup>、渭南 1.11 mg/m<sup>3</sup>、商洛 1.09 mg/m<sup>3</sup>、安康 1.04 mg/m<sup>3</sup>。大气臭氧(O<sub>3</sub>)含量年均值从高到低依次为榆林 101.13 mg/m<sup>3</sup>、商洛 94.40 mg/m<sup>3</sup>、延安 88.21 mg/m<sup>3</sup>、铜川 87.83 mg/m<sup>3</sup>、安康 84.74 mg/m<sup>3</sup>、汉中 84.23 mg/m<sup>3</sup>、渭南 81.14 mg/m<sup>3</sup>、咸阳 79.15 mg/m<sup>3</sup>、宝鸡 74.14 mg/m<sup>3</sup>、西安 71.09 mg/m<sup>3</sup>。



西安、咸阳与渭南空气 AQI 值和  $PM_{2.5}$  值最高; $PM_{10}$  取值比较高的为西安、宝鸡、铜川;西安、渭南及延安,这 3 个市的  $SO_2$  与  $NO_2$  含量最高;西安、宝鸡及延安三市空气中  $CO$  含量最高,而榆林、延安及商洛大气中  $O_3$  含量最高。全国雾霾问题严重的地区集

中于省会城市<sup>[17]</sup>,陕西的空气质量正是以西安这一省会城市为中心,与咸阳、渭南、延安等经济发达城市形成了“中心—外围”的空气污染格局。总之,陕西空气质量的区域差异与陕南、关中、陕北 3 个地区的自然地理条件、产业结构等因素密切相关。

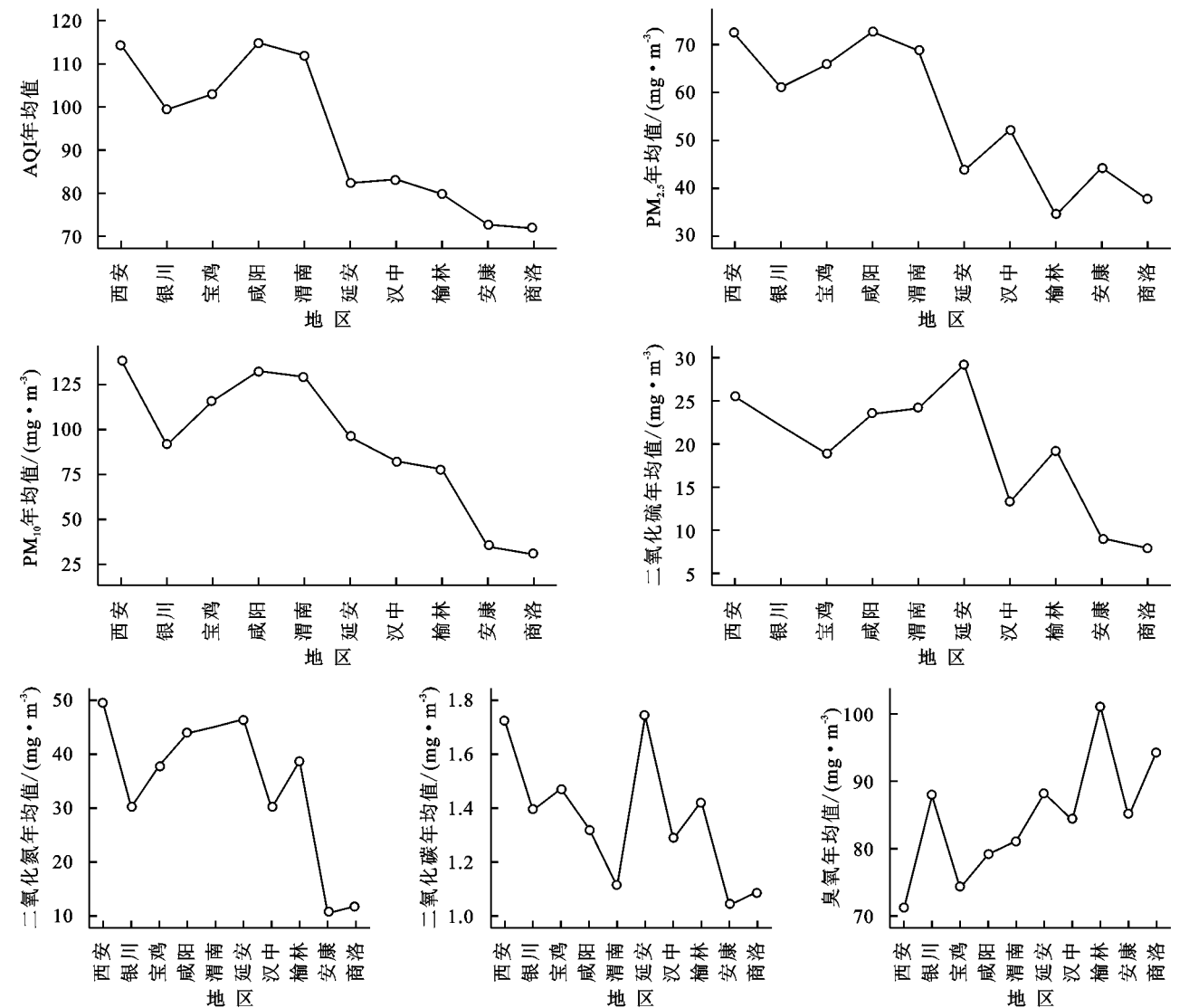


图 2 2013—2017 年陕西十市空气质量各指标值

2.2 陕西空气质量影响因素的 STIRPAT 模型分析

在陕西空气质量影响因素的 STIRPAT 模型回归分析中,采用自变量逐步进入法选取变量,从模型 1 至模型 7 逐步引入自变量,生成嵌套模型,结果见表 2。这 7 个模型的判定系数  $R^2$  值在 0.715~0.892,说明都可以至少解释掉 70% 的误差、拟合优度都较好、模型解释力都较强。最终模型(模型 7)能解释掉 89.2% 的误差,相应回归方程为:

$$AQI \text{ 值} = 0.149 \text{ 人口密度} + 0.631 \text{ 人均可支配收入} + 0.111 \text{ 单位 GDP 能耗} + 0.049 \text{ 产业结构} + 0.004 \text{ 园林绿化面积} + 0.013 \text{ 民用汽车拥有量} - 0.096 \text{ 财政支出} - 2.589$$

根据上述回归方程,本研究的假设得到部分验证:人口密度、人均可支配收入、单位 GDP 能耗、民用汽车拥有量等因素对空气质量指数 AQI 值具有正向影响,说明人口、财富、技术、交通对陕西空气质量具有显著影响;产业结构、园林绿化面积、财政支出对 AQI 值影响不显著,说明产业、绿化、财政等因素对陕西空质量的影响不显著。具体来说:

人口密度每增加 1 个单位, AQI 值平均增加 0.149 个单位(根据回归系数值),说明人口密度的增加引起空气质量降低。模型 1 中只引入了人口密度这一变量,方程的判定系数  $R^2$  值为 0.715,说明人口因素可以解释掉空气质量 71.5% 的误差。随着人口

规模不断扩大,城市的环境承载力受到挑战,由此会对资源与环境产生重要的影响。

人均可支配收入每增加 1 个单位,AQI 值平均提高 0.631 个单位,即财富的增加会引起环境质量的变差。说明二者的关系目前处于环境库兹涅茨倒 U 型曲线<sup>[18]</sup>初期,未来将会达到库兹涅茨曲线末期,即人均收入增长会促进空气质量改善的阶段。由于人均可支配收入这一变量的回归系数比较大,对回归方程贡献率较高,说明增加人均可支配收入能够很好地促进人们的环境保护意识,从而以工作生活中点滴细节的实际行动来促进环境质量的改善,这正如古代社会思想家管仲所说的“仓廩实而知礼节,衣食足而知荣辱”。

模型 3 中的回归系数说明单位 GDP 能耗增加 1 个单位对应 AQI 值平均增加 0.111 个单位。说明陕西经济社会发展中仍需要大量的科技投入,大力引进低能耗、低污染的高新技术,将技术因素对空气质量的正向影响转变为负向影响。

模型 6 说明,每增加 1 个单位的民用汽车拥有量,AQI 值相应地平均增加 0.007 个单位。汽车尾气是雾霾的主要来源<sup>[19]</sup>,未来共享汽车、绿色能源汽车等逐渐普及,将会减少交通因素对空气质量的影响。

财政支出影响不显著。环境治理资金的财政支出需要统筹兼顾,从经济结构和经济转型出发,重点投向能源、汽车、减排、降尘等领域。但治理雾霾、提

高空气质量是一个系统性工程,如何把环境治理这笔钱“花在刀刃上”是政府面临的新挑战。

水土保持因素(产业结构、园林绿化面积)对 AQI 的作用不显著,模型 4 引入产业结构后多解释了 0.6%的误差,模型 5 引入园林绿化面积后多解释掉了 0.2%的误差。本研究认为这是暂时性的不显著:首先,目前陕西省的城市化发展阶段特点决定了水土保持因素还未起到显著改善 AQI 的作用。创琳等<sup>[20]</sup>将城市化分为起步(城市化水平<30%)、中期(30%~60%)、后期(60%~80%)和终期(80%~100%)四阶段。据此,陕西截至 2015 年城市化水平为 53.6%<sup>[21]</sup>,即城市化中期阶段。而土地的利用与扩张是城市化起步和中期阶段最典型的特征:2004—2016 年西安市呈倒“U”型扩展<sup>[22]</sup>,1985—2013 年陕北榆林与延安的耕地面积减少<sup>[23]</sup>,1995—2015 年陕南林地分布面积大于其他类用地面积但呈退化趋势<sup>[24]</sup>,可见,陕西尤其是关中地区的土地利用格局尚待优化。第二,虽然城市绿化产生的空气负离子能降低 PM<sub>2.5</sub> 浓度<sup>[25]</sup>,但二者不一定正相关,有的城市绿植越多,反而越阻碍空气流通,空气污染越重<sup>[26]</sup>。总之,未来陕西城市化进程进入后期和终期阶段时,影响城市空气质量因素中,人口规模、城市面积趋于稳定,政府可调控幅度较大的因素将是基于技术革新的产业结构和园林绿化面积、结构的调整优化。因此,未来,城市水土保持因素对空气质量的影响将越来越显著。

表 2 陕西空气质量影响因素的 STIRPAT 模型回归分析结果

| 参数                       | 模型 1          | 模型 2          | 模型 3          | 模型 4          | 模型 5          | 模型 6          | 模型 7          |
|--------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 常量                       | 3.533         | -0.508        | -2.128        | -2.168        | -2.340        | -2.928        | -2.589        |
| 人口密度                     | 0.188(0.000*) | 0.159(0.000*) | 0.152(0.000*) | 0.155(0.000*) | 0.158(0.000*) | 0.159(0.000*) | 0.149(0.000*) |
| 人均可支配收入                  |               | 0.409(0.004*) | 0.575(0.000*) | 0.579(0.000*) | 0.597(0.001*) | 0.681(0.001*) | 0.631(0.003*) |
| 单位 GDP 能耗                |               |               | 0.143(0.000*) | 0.141(0.000*) | 0.140(0.000*) | 0.147(0.000*) | 0.111(0.008*) |
| 水土保持因素之产业结构<br>(第二产业所占比) |               |               |               | 0.023(0.035*) | 0.023(0.047*) | 0.032(0.078)  | 0.049(0.084)  |
| 水土保持因素之<br>园林绿化面积        |               |               |               |               | -0.005(0.879) | 0.009(0.777)  | 0.004(0.905)  |
| 民用汽车拥有量                  |               |               |               |               |               | 0.007(0.038*) | 0.013(0.044*) |
| 财政支出                     |               |               |               |               |               |               | -0.096(0.499) |
| R <sup>2</sup> 系数值       | 0.715         | 0.779         | 0.865         | 0.871         | 0.873         | 0.889         | 0.892         |
| Sig. 值                   | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         |
| F 值                      | 50.803        | 27.845        | 28.143        | 20.781        | 16.310        | 25.341        | 21.223        |
| Sig. 值                   | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         | 0.000         |

注:表中“\*”表示在 0.05 的统计水平显著;括号内为回归系数检验显著性概率值。

3 结论与建议

(1) 2013—2017 年,陕西经济发展与环境质量之间的关系尚处于环境库兹涅茨倒 U 型曲线的初期阶段,即经济越发展空气质量越差的阶段,但环境空

气质量标准(GB3095—2012)的执行使得陕西十市空气质量指数 AQI 值的大部分组成指标的年均值呈下降趋势,起到了一定的改善空气质量的作用,CO<sub>2</sub>与 O<sub>3</sub> 含量上升,其他指标含量呈下降趋势。如何巩固目前的成果和减少大气中 CO<sub>2</sub>与 O<sub>3</sub> 含量的措施是未

来陕西省环境政策应该重点关注的地方。此外,区域空气质量差异表现为陕南优于陕北,陕北优于关中。

(2) 从长远看,水土保持将在更大程度上促进空气质量的改善。人口密度越大、人均可支配收入越高、单位 GDP 能耗越大、民用汽车拥有量越多,则陕西空气质量指数 AQI 值越高,空气质量越差;财政支出越多未必空气质量越好。说明人口、财富、技术、交通等因素是近期陕西省空气质量的主要影响因素。产业结构、园林绿化等水土保持因素对空气质量的影响在现阶段不显著,但随着陕西城市化水平不断提高,它们将成为可调控余地较大的因素,因此其影响将越来越显著。

因此,从陕西省城市化的长期性来看,为了进一步提升陕西省空气质量,应同时加强对空气质量近期、远期有显著影响的因素进行调控,特别要加强城市水土保持措施,建议:近期措施:合理控制城市人口密度,利用政策和税收等杠杆,促使人口向中小城市转移。以科技创新和技术改造驱动产业结构调整,减少第二产业所占比例,优化能源结构,减少单位 GDP 能耗,在保持经济高速发展的同时,减少各行业的污染排放,以减少大气污染。目前需要继续实行交通限行政策,但未来需要通过技术开发,逐步以共享单车、共享汽车、新能源汽车代替私人汽车,并大力发展新能源公共交通工具,促使公众绿色出行,以减少汽车尾气排放。远期措施:加强水土保持措施,需要进一步对城市土地进行合理规划、长远规划、合理利用;同时,优化绿化林结构、增加绿化面积,还需要用好财政支出的杠杆调节作用,合理利用环保资金。

#### 参考文献:

- [1] 杨飞,易文利,朱婵园,等.陕西省空气质量时空差异研究[J].四川环境,2018,37(2):78-85.
- [2] 黄小舟,雷琳琳.中国城市空气质量与产业结构关系研究[J].湖北经济学院学报:人文社会科学版,2019,16(4):29-33.
- [3] 陕西省生态环境厅.陕西省大气污染防治条例[EB/OL]. <http://sthjt.shaanxi.gov.cn/standard/dffg/dfxfg/2018-03-22/26555.html>.
- [4] 张佳音,郭云飞,李养养,等.关中地区城市空气质量特征及影响因素分析[J].地球与环境,2017,45(4):441-446.
- [5] 张智锋,刘雪锦,雷芬.榆林市环境空气质量变化趋势及相关性分析[J].环境科学导刊,2014,33(2):54-56.
- [6] 刘建.城市水土流失危害与防治对策[J].山西水土保持科技,2017(2):4-5.
- [7] 孙坤鑫,钟茂初.环境规制、产业结构优化与城市空气质量[J].中南财经政法大学学报,2017(6):63-72.
- [8] 王立平,陈俊.中国雾霾污染的社会经济影响因素:基于空间面板数据 EBA 模型实证研究[J].环境科学学报,2016,36(10):3833-3839.
- [9] 武小钢,蒯银鼎.城市道路隔离带绿化模式对人行道空气质量的影响评价[J].环境科学学报,2015,35(4):984-990.
- [10] 欧阳志云,赵娟娟,桂振华,等.中国城市的绿色发展评价[J].中国人口·资源与环境,2009,19(5):11-15.
- [11] 王建军,李莉.基于随机性环境影响评估模型的电力消费和碳排放关系实证分析[J].电网技术,2014,38(3):628-632.
- [12] Ehrlich P R, Holdren J P. One-dimensional economy[J]. Bulletin of the Atomic Entists, 1972,28(5):16-27.
- [13] 吴义根,冯开文,李谷成.人口增长、结构调整与农业面源污染:基于空间面板 STIRPAT 模型的实证研究[J].农业技术经济,2017(3):75-87.
- [14] Diao B, Ding L, Su P, et al. The spatial-temporal characteristics and influential factors of NOx emissions in China: A spatial econometric analysis[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(7): E1405. DOI:10.3390/ijerph15071405.
- [15] 许燕婷,刘兴诏,王振波.基于 AQI 指数的中国城市空气质量时空分布特征[J].广西师范大学学报:自然科学版,2019,37(1):187-196.
- [16] 刘瑞芳,陈小婷,姚静,等.陕西关中持续性雾霾天气的气象条件分析[J].中国农学通报,2017,33(1):82-88.
- [17] 姜磊,周海峰,何世雄,等.雾霾背景下的城市化与空气质量协调发展的空间分析:以中国 283 个城市为例[J].水土保持研究,2018,25(6):306-313.
- [18] 池建宇,张洋,晏思雨.城市的经济发展水平影响空气质量吗:基于中国 31 个省会城市和直辖市的经验验证[J].经济与管理,2014,28(5):26-31.
- [19] 郭宇宏,王自发,康宏,等.机动车尾气排放对城市空气质量的影响研究:以乌鲁木齐市春节前后对比分析[J].环境科学学报,2014,34(5):1109-1117.
- [20] 创琳,刘晓丽,蒯雪芹.中国城市化发展阶段的修正及规律性分析[J].干旱区地理,2008,31(4):512-523.
- [21] 张丁文,张彤彤.陕西城镇化水平综合评价与对策研究[J].纳税,2017,(23):116.
- [22] 耿甜伟,毛雅倩,李九全,等.西安城市扩展时空特征及驱动机制[J].经济地理,2019,39(10):62-70.
- [23] 支再兴,李占斌,于坤霞,等.陕北地区土地利用变化对生态服务功能价值的影响[J].中国水土保持科学,2017,15(5):23-30.
- [24] 王志杰,苏嫒.基于遥感和 GIS 的陕南地区近 20 年土地利用时空变化特征[J].自然灾害学报,2017,26(6):164-174.
- [25] 王薇,陈明.城市绿地空气负离子和 PM2.5 浓度分布特征及其与微气候关系:以合肥天鹅湖为例[J].生态环境学报,2016,25(9):1499-1507.
- [26] 张菁华,田盼立,刘晓,等.城市绿化对空气质量的影响研究:以中国 27 个省会城市为例[J].植物研究,2019,39(3):153-162.