



移动扫码阅读

于秋月,牛俊杰,林菲,等. 2017~2020年临汾市空气质量特征分析及评价[J].能源环境保护,2021,35(5): 88-93+101.

YU Qiuyue, NIU Junjie, LIN Fei, et al. Analysis and evaluation of air quality characteristics in Linfen City from 2017 to 2020[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(5): 88-93+101.

2017~2020年临汾市空气质量特征分析及评价

于秋月,牛俊杰,林菲*,李颖俊,董海平

(太原师范学院 汾河流域科学发展研究中心,山西 晋中 030619)

摘要:以临汾市为研究区域,基于2017~2020年空气质量逐日数据,对研究区AQI和首要污染物的年季变化特征进行分析,采用综合污染指数法对空气质量进行了评价。结果表明:2017~2020年,空气质量为优良的天数呈逐年增加趋势,而轻度污染及以上等级的天数呈逐年减少趋势;煤炭能源总量消耗,私家车保有量,绿化覆盖率,第二产业占比和工业粉尘排放等因素影响了污染物的排放;空气质量总体上呈现“夏好冬差,春秋居中”的规律;秋冬季节的首要污染物主要为PM_{2.5},夏季的首要污染物主要为O₃;空气质量综合指数优良排序依次为2020年、2019年、2018年和2017年;2017和2018年的空气质量等级为中度污染,2019和2020年的空气质量等级为轻度污染,空气质量有所改善,但需要继续加强治理。

关键词:AQI;首要污染物;变化特征;空气质量评价;临汾市

中图分类号:X823

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2021)05-0088-06

Analysis and evaluation of air quality characteristics in Linfen City from 2017 to 2020

YU Qiuyue, NIU Junjie, LIN Fei*, LI Yingjun, DONG Haiping

(Center for Scientific Development of Fenhe River Basin, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, China)

Abstract: The annual and seasonal variation characteristics of AQI and primary pollutants in Linfen City were analyzed based on the daily air quality data from 2017 to 2020. The air quality was evaluated using comprehensive pollution index method. The results show that, from 2017 to 2020, the number of days with good air quality is increasing year by year, while the number of days with light pollution and above is decreasing year by year. The emission of pollutants is affected by the total consumption of coal energy, private car ownership, green coverage, the proportion of the secondary industry and industrial dust emissions. The air quality is good in summer, bad in winter and general in spring and autumn. PM_{2.5} is the main pollutant in autumn and winter, and O₃ is the main pollutant in summer. The years ranked from good air quality composite index to bad are 2020, 2019, 2018 and 2017. The air quality level of Linfen city is moderate pollution in 2017 and 2018, and is slight pollution in 2019 and 2020. The air quality has improved, but it still needs further control and treatment.

Key Words: AQI; Primary pollutants; Change characteristics; Air quality assessment; Linfen City

0 引言

随着我国社会经济的高速发展,工业化进程的加速,大量的资源和能源消耗导致灰沉、雾霾天

气、光化学污染等空气污染问题的产生^[1]。空气中的有害成分以及污染物,越来越受到人们的关注^[2],因此,防治大气污染成为社会发展过程中首要问题。近年来,我国的大气污染特征已经从原

收稿日期:2021-07-21;责任编辑:金丽丽

基金项目:山西省高等学校哲学社会科学一般项目(20190123, 20200133);山西省青年科技研究面上青年基金(201801D221053)

第一作者简介:于秋月(1992-),女,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,主要研究方向为资源评价与开发。E-mail:438633298@qq.com

通讯作者简介:林菲(1984-),女,山西太原人,博士,讲师,研究方向为大气环境。E-mail:lin_269@163.com

来的“煤烟型”污染转变为“复合型”污染,大气污染严重威胁着人类的身体健康,引起人们多发呼吸道感染等疾病,影响着动植物的生长环境。城市人口的增长加剧了煤炭、石油等能源的消耗,使其成为空气污染的主要因素。空气环境污染所引发的负面问题得到了相关政府的重视,各级政府给予政策支持,积极防护治理,环保部门为了开展大气环境保护工作,需要根据空气质量数据确定当地的污染物状况,为制定针对本土污染特征的防治措施提供决策依据^[3-7]。

随着城市污染问题与日俱增,对空气质量进行定性定量分析,判断空气质量污染程度,从而进行空气质量评价十分重要^[8]。国内外许多专家学者,对空气质量问题进行了深入研究。对空气质量主要的评价方法有灰色聚类法^[9]、模糊综合评价法^[10-11]、层次分析法^[12]、综合污染指数法等^[13]。综合污染指数法,更适用于评价年度或季节城市空气质量污染变化特征^[14];范灿鹏等^[15]运用综合污染指数法和单项污染指数法,分析了珠海市金湾区空气质量时间变化趋势及特征;贾薇等^[16]采用综合污染指数法研究了山阴县主要污染物年内变化特征。临汾市地形呈“凹”字型分布,污染物不易扩散,同时临汾的产业结构以钢铁、化工、煤炭工业的第二产业为主,致使临汾市空气污染严重^[17],人类活动频繁导致生活废气、汽车尾气的排放增多,进而使雾霾天气增多,光化学污染增多。空气污染严重影响临汾市人民的生产生活以及身体健康。本文将临汾市 2017~2020 年的空气数据作为研究对象,对 AQI 和 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 (8 h) 六项污染物浓度特征分析,从而对临汾市空气质量进行综合评价,以期对临汾市的空气污染治理与防护提供依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

临汾市位于山西省西南部,是山西省下辖地级市,是中国三大优质主焦煤基地之一,临汾市地形呈“凹”字形分布,四面环山,中间平原,地处半干旱、半湿润气候区,属温带大陆性气候,冬冷夏热,雨热同期;年平均气温 9.0~12.9℃,降水量 420.1~550.6 mm。临汾市 2020 年 GDP 累计完成 1 505.2 亿元。

1.2 数据来源

本文空气质量数据来源于真气网([https://](https://www.zq12369.com)

www.zq12369.com) 经济社会数据来源于临汾市统计年鉴和统计公报,提取 2017 年 1 月 1 日到 2020 年 12 月 31 日的空气质量指数(AQI)和常规六项污染物浓度($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 (8 h))的逐日数据。2017 年的空气质量指数的总样本量为 365 d,2018 年 12 月 22~26 日的数据缺失,故样本总量为 360 d,2019 年因缺失 8 月 9 日数据,故样本总量为 364 d,2020 年的空气质量指数样本为 366 d,有效数据共 1 455 d。

1.3 研究方法

根据 2012 年国家新发布的《环境空气质量指数技术规定(试行)》(HJ 633—2012)^[18],空气污染指数是一种能够对空气质量污染状况定量描述的无量纲指数,指数值越大说明空气受到的污染情况越严重,危害越大。综合污染指数法是一种用以对城市环境空气质量综合状况评价的研究方法,通过该方法将污染物标准化,对环境污染的程度进行简明直观地描述和比较。

$$\text{综合污染指数: } P = \sum P_i \quad (1)$$

$$\text{单项污染指数: } P_i = C_i / S_i \quad (2)$$

式中: P 为空气综合污染指数; P_i 为第 i 项空气污染物的分指数; C_i 为第 i 项空气污染物浓度的年均值; S_i 为 i 项空气污染物的环境质量标准值。

按照国家环境空气质量二级标准规定,将空气综合污染指数分级为:清洁($P \leq 1.3$)、轻污染($1.3 < P \leq 4$)、中度污染($4 < P \leq 8$)、较重污染($8 < P \leq 12$)、严重污染($P > 12$)。

2 结果与讨论

2.1 空气质量的年变化特征分析

2.1.1 各级别空气质量天数年变化

根据《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633—2012)^[18],AQI 值按照 0~50 为优、50~100 为良、101~150 为轻度污染、151~200 为中度污染、201~300 为重度污染,以及 >300 为严重污染,将空气质量划分为六个等级,将 AQI 按照等级划分得到不同级别的空气质量天数的年变化情况(见表 1)。

提取 2017~2020 年临汾市逐日空气质量等级数据,发现 4 年中等级为良所占比重最大,有 852 d,占样本总数的 59%;优的等级天数有 103 d,占整体的 7.1%;达到轻度污染级别及以上的天数为 500 d,占样本总数的 34.4%。由表 1 可知,与其它年份相比,2017 年空气质量最差,优良等级

表 1 2017~2020 年临汾市各级别空气质量天数

Table 1 Days of each air quality level in Linfen City from 2017 to 2020

天

年份	优	良	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染
2017	15	158	132	23	27	10
2018	5	214	98	24	10	9
2019	25	243	51	30	11	4
2020	58	237	43	12	14	2

天数最少,为 173 d,轻度污染及以上等级天数最多,为 192 d。2018 年的优良等级天数为 219 d,比上一年增加了 46 d,轻度污染及以上等级天数为 141 d,比上一年减少了 51 d,中度污染的天数比重度污染的多了 14 d。2019 年空气质量优良等级天数为 268 d,轻度污染及以上的天数为 96 d,比上一年减少了 45 d,良的天数比轻度污染多了 192 d。2020 年空气质量最好,优良等级天数最多,达到 295 d,轻度污染及以上等级天数最少,为 71 d,且严重污染等级仅在 2020 年出现 2 d,优的天数超过中度及以上污染 30 d。综上,2017~2020 年,空气质量为优良的天数是逐年增多的。优良天数占比由 47.4%上升到 81%,而轻度污染及以上的等级天数是逐年减少的趋势,占比由 53%下降到 19.4%。

2.1.2 各项污染物年平均质量浓度变化

如表 2 所示,据临汾市 2017~2020 年的各项污染物年平均质量浓度分析,结果显示,除 NO₂、O₃外,各项污染物年平均质量浓度变化趋势与空气质量指数变化趋势相一致,均呈逐年下降的趋势。其中 SO₂ 的年平均质量浓度值下降幅度最大,由 2017 年的 78.6 μg/m³ 下降到 2020 年的

18.4 μg/m³。PM_{2.5} 的浓度值是呈逐年小幅度下降,由 2017 年的 82.3 μg/m³ 下降到 2020 年的 51.9 μg/m³。PM₁₀ 年平均质量浓度由 2017 年的 129.6 μg/m³ 下降到 2020 年的 87.2 μg/m³,其中,从 2019 年开始较前两年的年均浓度值下降明显。CO 的年平均质量浓度较低,但年均质量浓度逐年下降幅度较大。NO₂ 的年均质量浓度整体变化不明显。O₃ 的浓度逐年增加,与 2017 年相比,2018 年增加明显,增加了 24.3%,2018 年以后年均质量浓度只有小幅度提升。如表 3 可知,绿化覆盖率呈逐年增加。私人汽车保有量是逐年增加的趋势。第二产业占比呈逐年下降。2017 年临汾市煤炭消费占比为 96.23%,2020 年降到 80%。城市绿化植被能够有效净化空气中的污染物,对提高区域环境质量十分有益;冬季采暖期煤炭消耗量对空气污染的贡献很大,因此煤炭能源消耗总量的降低,有效减少了空气中主要污染物,如 SO₂、NO₂ 和 PM₁₀ 的浓度^[5],有助于改善空气质量;私家车保有量的增长,会增加了汽车尾气的排放量,与空气中 NO₂ 的浓度有直接关系,而 NO₂ 可在太阳辐射下发生光化学反应,增加空气中 O₃ 的浓度。

表 2 年平均浓度表

Table 2 Average annual concentration

年份	PM _{2.5} /(μg·m ⁻³)	PM ₁₀ /(μg·m ⁻³)	SO ₂ /(μg·m ⁻³)	NO ₂ /(μg·m ⁻³)	CO/(mg·m ⁻³)	O ₃ /(μg·m ⁻³)
2017	82.3	129.6	78.6	36.8	2.1	56.3
2018	71.9	120.4	47.3	34.0	1.7	70.0
2019	61.4	102.0	28.0	36.0	1.5	78.0
2020	51.9	87.2	18.4	37.8	1.2	88.6

表 3 经济数据

Table 3 Economic data

年份	绿化覆盖率/%	私人汽车保有量/万辆	第二产业占比/%	工业烟粉尘排放/万吨	煤炭消费量占比/%
2017	36.50	53.7	46.30	4.0	96.23
2018	38.23	60.4	45.90	3.1	/
2019	38.81	66.7	43.30	/	/
2020	40.35	72.2	42.90	/	80.00

综上所述,对临汾市空气各项污染物浓度年均变化和超标天数分析,空气质量按照国家二级标准划分,浓度限值分别为($\text{PM}_{2.5}$ 为 $35\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$; PM_{10} 为 $70\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$; SO_2 为 $60\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$; CO 为 $4\text{ mg}/\text{m}^3$; NO_2 为 $40\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$; O_3 为 $160\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$)。 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 在 2017~2020 年的质量浓度均未达到国家二级标准, $\text{PM}_{2.5}$ 的超标天数分别为 328、327、262、188 d。 PM_{10} 的超标天数分别为 313、315、256、194 d。由此可见 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的超标天数呈逐年下降的趋势。 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 在 2017 年超标天数最多,在 2020 年超标天数最少,分别占全部的 13% 和 13.3%。 SO_2 仅在 2017 年的质量浓度未达到国家二级标准,超标天数为 117 d。 NO_2 、 CO 和 O_3 的年均质量浓度在 4 年间均达到二级标准。

2.2 空气质量季节变化特征分析

2017 年空气质量为优的天数主要出现在秋季,其次是夏季和冬季,春季仅有 1 d。空气质量为良的天数在秋季出现最多,有 56 d,春夏次之,冬季最少,仅有 9 d;轻度污染主要出现在夏季,超过了 40 d,其次是春冬两季,秋季最少;中度和重度污染主要集中在冬季分别为 14 d 和 23 d;严重污染在全年占比最少,仅在冬季出现 10 d,说明夏季的空气质量最好。与 2017 年相比,2018 年

的空气质量为优的天数减少了 10 d,且春夏两季均未出现;空气质量为良的,在夏季占比最多,秋、春次之,冬季最少,四个季节良的天数均明显较 2017 年增加;四个季节的轻度污染天数较 2017 年占比有所减少,而重度等级天数占比明显下降,严重污染仅在冬季出现 9 d,重度以上等级均未在春夏出现。2019 年空气质量为优的天数占比四个季节均较上一年增长明显,而轻度污染的比例有明显下降的趋势,良的天数在夏季最多,有 79 d,其次是春、秋,冬季最少,与前两年相比,2019 年空气质量为中度及以上等级均未在春夏两季出现,严重污染等级仅在冬季出现 4 d。2020 年的空气质量为优的天数在夏季最多超过了 20 d,空气质量为良的春季最多,有 77 d,夏秋两季次之,冬季最少。综合 2017~2020 年不同季节空气质量等级天数结果,轻度污染在春夏两季天数下降趋势尤为明显,分别由 2017 年 35 d 和 46 d 下降到 2020 年的 1 d。冬季中度和重度污染均未超过 15 d,严重污染在冬季仅出现 2 d,与前三年相比严重污染等级天数明显下降。綜上述分析,与前三年相比,2020 年的空气质量有所好转,尤其是春夏两季空气质量提高明显。

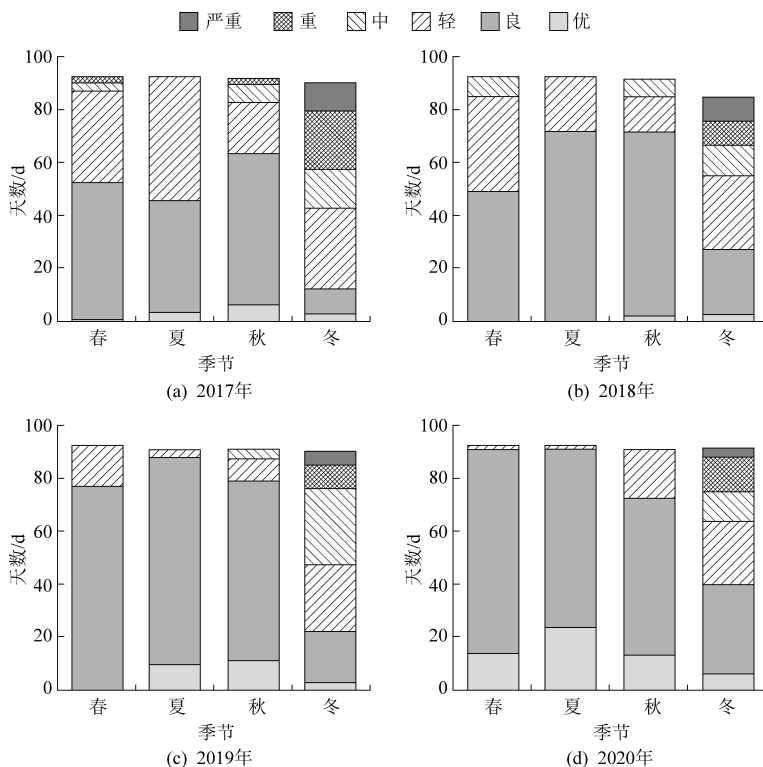


图 1 2017~2020 年不同季节各空气质量等级天数

Fig.1 Days of each air quality level in different seasons from 2017 to 2020

统计 2017~2020 年的各级空气质量天数得出结论,空气质量为良的,在夏季最多,有 259 d,其次是春秋两季,冬季最少,有 87 d。且四季中,良的天数占比最多,有 852 d 占总样本的 59%,空气质量为良的变化趋势是由春秋到冬,呈下降趋势。轻度污染和优在各个季节均有出现,夏季优等级天数最多,有 38 d,秋季次之,有 34 d。轻度污染在冬季天数最多,有 107 d。中度及以上等级污染主要出现在冬季,且夏季并没有出现。重度污染在秋季出现 4 d,在春季仅出现 2 d,且秋季的中度和重度污染天数超过春季的 6 d。严重污染仅在冬季出现 25 d。总之,空气质量最好的季节是春夏两季,秋季次之,冬季的空气质量最差。周静等^[19]利用遥感和观测数据分析了秸秆焚烧对临汾市空气质量的影响,发现秋冬季节在风向、风速、相对湿度、降水等气象条件影响下,秸秆焚烧过程中生成大量的 CO、气溶胶等,对临汾城市空气污染物的变化有密切关系。另外冬季临汾市进入采暖期,民用散煤燃煤增加了污染物的排放量。

2.3 首要污染物年变化特征

当 AQI 指数超过 50 时,空气质量分指数最大的污染物,为首要污染物。四年均以 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 作为首要污染物。2017~2020 年以 $PM_{2.5}$ 作为首要污染物的天数最多,分别有 218、204、143、122 d,呈逐年下降趋势,分别占总样本的 63.56%、57.95%、42.56% 和 40%。其次是以 PM_{10} 作为首要污染物的天数较多,先上升后下降趋势, PM_{10} 在 2018 年和 2019 年出现的天数相差不大,分别有 114 d 和 113 d,占总样本的 32.39% 和 33.63%,2020 年最少,占总样本的 24.26%。以 O_3 作为首要污染物出现的天数最少,2017 年出现 30 d,占总样本的 8.75%,2018 年比 2017 年多了 4 d,占总样本的 9.66%,2019 年开始增加的特别明显,比 2018 年多了 46 d,占总样本的 23.81%,2020 年出现的天数为四年中最多,有 109 d,占总样本的 35.74%。 O_3 的变化与 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 相比是相反的,呈逐年增加的趋势。

2.4 首要污染物季节变化特征

如图 3,统计 2017~2020 年期间首要污染物不同季节出现的天数,可知冬季首要污染物主要为 $PM_{2.5}$,有 290 d,其次是 PM_{10} ,有 43 d。 O_3 在冬季未出现。秋季的首要污染物仍是 $PM_{2.5}$,有 169 d, PM_{10} 次之, O_3 最少。夏季首要污染物出现天数顺序依次为 O_3 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 。春季的首要污

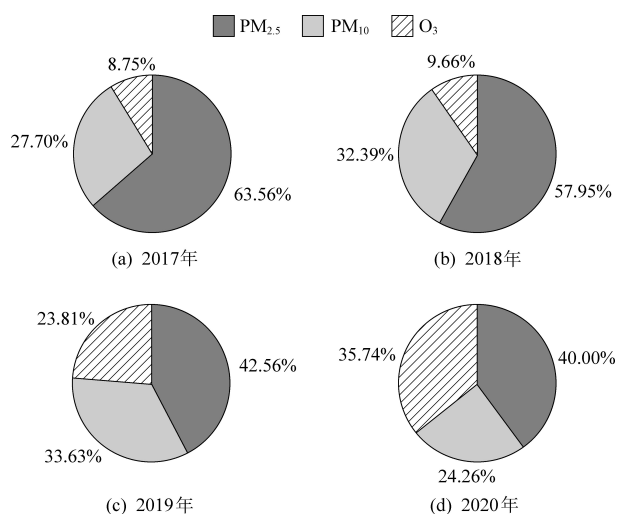


图2 2017~2020 年首要污染物概况

Fig.2 Overview of primary pollutants from 2017 to 2020

染物主要是 PM_{10} , O_3 出现的频率比秋季多了 15 d。对比不同年份各季节污染物出现的频率,2018 年~2020 年以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物出现的频率高低季节顺序依次为冬季、秋季、春季和夏季。以 PM_{10} 为首要污染物出现的频率高低季节在 2017~2019 年均保持一致,依次是春季、秋季、夏季和冬季的高低顺序。2020 年依旧是春季出现的频率最多,其次是秋季,夏季较冬季出现频率较少,仅有 2 d。2017~2020 年 O_3 均在夏季出现的最多且逐年增长,分别为 16、28、59、65 d。其次是春秋两季,四年中均没有在冬季出现过。对比每个污染物在各季节出现的频率可知,冬季以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物,占 21.45%,秋季次之,占 12.5%。以 PM_{10} 为首要污染物所占比重在春季最多,超过 10%,而冬季与之相比减少了 9.68%。以 O_3 为首要污染物在夏季占比最大,为 12.43%,春季和秋季占比相对较少,不足 4%,在冬季并未出现。这是因为夏季气温高,阳光照射强与汽车尾气容易产生光化学污染^[20],由此可见,各个污染物所出现的频率具有明显季节性的差异。

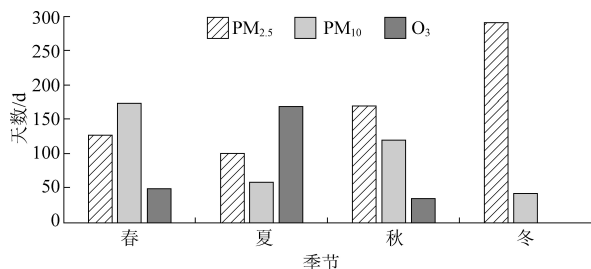


图3 2017~2020 年 AQI>50 首要污染物出现的天数

Fig.3 Days of occurrence of primary pollutants in AQI>50 from 2017 to 2020

2.5 空气质量评价

通过对 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 O_3 三个污染物的年均值计算空气综合污染指数,结果如表 4 所示。

表 4 2017~2020 年空气质量综合指数

Table 4 Air quality composite index from 2017 to 2020

年份	污染指数			
	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	O_3	综合
2017	2.35	1.85	0.35	4.55
2018	2.05	1.72	0.44	4.21
2019	1.75	1.46	0.49	3.70
2020	1.48	1.25	0.55	3.28

由表 3 可得,临汾市的空气综合污染指数范围在 3.28~4.55 之间,其中 2017 年和 2018 年的空气综合污染指数均超过 4 但低于 8,根据空气综合污染指数的分级标准可知均属于中度污染。2019 和 2020 年的空气污染综合指数均在 1~4 之间,均属于轻度污染。其中 $\text{PM}_{2.5}$ 在三个污染物中占比最多,年均值也最大,说明 $\text{PM}_{2.5}$ 是临汾市需要加强治理防御的首要空气污染物。2017~2020 年这 4 年间,2017 年的空气综合污染指数最高,2020 年的空气污染指数最低,且临汾市空气综合污染指数呈逐年下降趋势。综上所述,临汾市的空气质量在逐年变好,2020 年尤为突出。这是因为临汾市从 2018 年开始,为了响应国家“蓝天计划”的号召,根据地方环境特点制定了符合临汾当地的政策,包括《临汾市人民政府办公厅关于印发临汾市 2018~2019 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》和《2018 年全市生态环境治理攻坚行动的实施意见》等一系列政策的提出并实施^[21],取缔高能耗、高污染企业,升级落后工艺和设施;同时调整产业结构,鼓励投资低碳、环保产业,资金支持清洁取暖,进行大规模植树造林,使得临汾市的空气质量逐年变好^[22]。但以煤炭、焦炭、钢铁为主导产业的临汾今后仍面临巨大的环保压力,如何持续绿色发展,需要进一步的研究。

3 结 论

(1)2017~2020 年空气质量为优良的天数逐年增多;而轻度污染及以上等级天数逐年减少。能源总量消耗的降低,有助于减少空气中的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 CO 的产生。对比 2017~2020 年的空气质量,2020 的空气质量最好,尤其是春夏两季空气质量提高明显。对比 2017~2020 年不同季节各等级天数,秋冬两季空气质量最差。

(2)2017~2020 年均以 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 作为首要污染物。且以 $\text{PM}_{2.5}$ 作为首要污染物的天数最多,呈逐年下降趋势,其次是 PM_{10} 作为首要污染物的天数,先上升后下降趋势。以 O_3 作为首要污染物出现的天数最少, O_3 的天数变化趋势与 $\text{PM}_{2.5}$ 相反,呈逐年增加的趋势。

(3)综合 2017~2020 年污染物占比情况可知,秋冬季节的首要污染物主要为 $\text{PM}_{2.5}$,夏季的首要污染物主要是 O_3 。这是因为夏季气温高,阳光照射强与汽车尾气容易产生光化学污染。春季的首要污染物主要是 PM_{10} ,具有明显的季节性差异。

(4)临汾市的空气综合污染指数范围在 3.28~4.55 之间,呈逐年减少趋势, $\text{PM}_{2.5}$ 是临汾市主要的污染物。其中 2017 和 2018 年是中度污染,到了 2019~2020 年,空气质量有所改善,均为轻度污染。

参考文献

- [1] 胡希. 株洲市 2013~2018 年空气质量时空分布特征 [J]. 中国环境管理干部学院学报, 2019, 29 (6): 86~90.
- [2] 孙冰. 淮河流域 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 比率的时空变化 [J]. 河北环境工程学院学报, 2020, 30 (2): 77~83.
- [3] 张丹. 我国城市大气污染现状及防治对策 [J]. 中国资源综合利用, 2019, 37 (12): 156~158.
- [4] 李孝林, 杨茜. 2016~2018 年自贡市城区环境空气质量特征及与气象因素的相关性分析 [J]. 四川环境, 2020, 39 (3): 59~66.
- [5] 胡敏, 唐倩, 彭剑飞, 等. 我国大气颗粒物来源及特征分析 [J]. 环境与可持续发展, 2011, 36 (5): 15~19.
- [6] 董雪玲. 大气可吸入颗粒物对环境和人体健康的危害 [J]. 资源·产业, 2004 (5): 52~55.
- [7] 王娟, 赵春红, 孙泽锋, 等. 高密市环境空气污染物浓度变化特征 [J]. 中国环境管理干部学院学报, 2019, 29 (2): 81~85.
- [8] 李小飞, 张明军, 王圣杰, 等. 中国空气污染指数变化特征及影响因素分析 [J]. 环境科学, 2012, 33 (6): 1936~1943.
- [9] 牛红亚, 荣亮平, 孟志强. 基于灰色系统理论的室内空气环境评价 [J]. 能源与环境, 2007 (3): 13~14.
- [10] 吴新国, 王杰, 彭书时, 等. 武汉市 2001~2005 年大气环境质量模糊综合评价 [J]. 环境科学与技术, 2007 (10): 58~59+111+118~119.
- [11] Guleda Onkal-Engin, Ibrahim Demir, Halil Hiz. Assessment of urban air quality in Istanbul using fuzzy synthetic evaluation [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38 (23): 3809~3815.
- [12] A K Gorai, Kanchan, A Upadhyay, et al. Design of fuzzy synthetic evaluation model for air quality assessment [J]. Environment Systems and Decisions, 2014, 34 (3): 456~469.

(下转 101 页)

- [2021-06-07]. <http://tjj.sh.gov.cn/tjnj/20200427/4aa08fba106d45fda6cb39817d961c98.html>.
- [28] 上海市统计局. 2020 年上海市统计年鉴 [EB/OL]. (2020 [2021-06-07]. <http://tjj.sh.gov.cn/tjnj/20210303/2abf188275224739bd5bce9bf128aca8.html>.
- [29] 宁波市统计局. 2017 年宁波市统计年鉴 [EB/OL]. (2017-10-15) [2021-06-07]. <http://vod.ningbo.gov.cn:88/nbtjj/tjnj/2017nbnj/indexch.htm>.
- [30] 宁波市统计局. 2018 年宁波市统计年鉴 [EB/OL]. (2018-12-10) [2021-06-07]. <http://vod.ningbo.gov.cn:88/nbtjj/tjnj/2018nbnj/indexch.htm>.
- [31] 宁波市统计局. 2019 年宁波市统计年鉴 [EB/OL]. (2019-01-02) [2021-06-07]. <http://vod.ningbo.gov.cn:88/nbtjj/tjnj/2019nbnj/indexch.htm>.
- [32] 宁波市统计局. 2020 年宁波市统计年鉴 [EB/OL]. (2020-12-03) [2021-06-07]. <http://vod.ningbo.gov.cn:88/nbtjj/tjnj/2020nbnj/indexch.htm>.
- [33] 王咏梅, 武捷, 褚红瑞, 等. 1961-2012 年山西雾霾的时空变化特征及其影响因子 [J]. 环境科学与技术, 2014, 37 (10): 1-8.
- [34] 周南南, 林修宇. 能源消费与环境污染的关系研究——基于我国 30 省份面板数据的分析 [J]. 青岛科技大学学报 (社会科学版), 2020, 36 (3): 62-69.
- [35] 杜艳伟, 程建光, 王静, 等. 青岛市 PM_{2.5} 输送来源研究 [J]. 环境科学与技术, 2016, 39 (5): 140-144.
- 疾病相关性研究 [J]. 绿色科技, 2017 (20): 58-60.
- [18] 国家环境保护部. 中华人民共和国国家环境保护标准环境空气质量指数 (AQI) 技术规范: HJ 633—2012 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [19] 周静, 成鹏伟. 秋季秸秆焚烧对临汾市空气质量的影响分析 [J]. 科技与创新, 2019 (16): 59-63.
- [20] 王冬梅. 临沂市城区 2018 年环境空气污染特征及原因分析 [J]. 环境与发展, 2019, 31 (12): 174-175.
- [21] 顾爽, 史孟娅. 临汾市大气污染治理困境浅析——基于政策工具视角 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2019 (2): 207-208.
- [22] 临汾市财政局. 临汾市财政局“三个支持”全力打好污染防治攻坚战 [J]. 山西财税, 2020 (10): 14.

(上接 93 页)

- [13] 冯梅, 陈业勤, 张学兵, 等. 空气环境质量评价分析的数学方法及应用 [J]. 环境科学与技术, 2008 (8): 141-143.
- [14] 王露云. 中国 31 个主要城市空气质量评价及主要污染物浓度预测 [D]. 重庆: 重庆师范大学, 2014: 12-13.
- [15] 范灿鹏, 熊杰. 2017~2020 年珠海市金湾区环境空气质量变化特征分析 [J]. 能源环境保护, 2021, 35 (2): 94-97.
- [16] 贾薇, 高冠龙. 山西省朔州市山阴县空气环境质量现状及变化趋势 [J]. 西北师范大学学报 (自然科学版), 2020, 56 (5): 130-134.
- [17] 宫殿清, 贾陈忠, 田浩宇, 等. 临汾市空气污染与呼吸