

哈尔滨市冬季空气质量与天气要素的关系

齐丽爽

哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2023年12月21日; 录用日期: 2024年1月17日; 发布日期: 2024年1月30日

摘要

本文以2020年哈尔滨市冬季空气质量指数及对应的天气要素为依据, 采用相关分析和回归分析详细阐述了空气质量指数(AQI)的变化趋势及其与天气要素的关系。结果表明: 哈尔滨市2020年冬季空气质量整体呈先下降再上升趋势, 从月份角度来看, 1月份空气污染最为严重, 并且AQI分布较分散, 整体起伏明显; 2月与12月AQI大幅度下降, 空气状况明显好转, 且稳定性较高。从星期周期来看, 哈尔滨市空气质量存在一定的周末效应, 周六和周日的AQI相较于工作日明显升高。相关分析结果显示, 平均相对湿度与AQI呈显著正相关, 平均风速、平均气温与AQI呈显著负相关, 气压与AQI无明显相关关系。由回归分析结果可以看出污染物和风速呈负相关, 受气温、湿度和气压的影响较小。

关键词

空气质量指数, 天气要素, 相关分析, 因子分析

Relationship between Winter Air Quality and Weather Elements in Harbin

Lishuang Qi

College of Geographical Science, Harbin Normal University, Heilongjiang Harbin

Received: Dec. 21st, 2023; accepted: Jan. 17th, 2024; published: Jan. 30th, 2024

Abstract

Based on the air quality index (AQI) and the corresponding weather elements in the winter of 2020 in Harbin City, this paper elaborates on the trend of AQI and its relationship with the weather elements using correlation and regression analyses. The results show that the overall air quality in Harbin City in the winter of 2020 showed a downward and then upward trend, from the perspective of the month, the air pollution in January is the most serious, and the distribution of the AQI is more dispersed, and the overall ups and downs are obvious; the AQI in February and

December declined greatly, and the air condition improved significantly, and the stability is high. In terms of the weekly cycle, there is a certain weekend effect on air quality in Harbin, with AQIs on Saturdays and Sundays significantly higher compared to weekdays. The results of correlation analysis show that the average relative humidity is significantly positively correlated with the AQI, the average wind speed and the average air temperature are significantly negatively correlated with the AQI, and there is no significant correlation between the barometric pressure and the AQI. From the regression analysis results, it can be seen that pollutants and wind speed are negatively correlated and less affected by air temperature, humidity and barometric pressure.

Keywords

Air Quality Index, Weather Elements, Correlation Analysis, Factor Analysis

Copyright © 2024 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

近年来,伴随着经济高速发展,城市化进程不断加快,人们在日常生活和生产活动中持续向大气排放污染物,大气环境问题日益严重。大气污染不仅危害人类健康,影响人们正常生活,也会限制地区发展。研究表明在污染源排放相对稳定的条件下,气象条件对空气质量状况起主导作用,因此研究空气质量与天气要素间的关系意义重大。

空气质量指数(Air Quality Index, AQI)用来定量描述一个地区的空气质量,数值越大代表该地区空气污染越严重。关于空气质量的研究引起了学者的广泛关注,孙家仁等对国内外空气质量受气候变化影响的相关研究进行阐述,强调了在国内研究气候变化的影响是至关重要的[1];周兆媛等分别研究了10年间北京、天津和石家庄三个地区各气象要素与AQI的相关性并对比地区差异,结合气候模型对未来气候及其对污染状况的影响做出预测[2];王云霞等对石家庄在2016到2018年的采暖期的空气质量变化进行分析,并发现影响数值变化的主要天气因素为相对湿度[3];朱红蕊等利用哈尔滨市2014年到2016年AQI数据与气候要素分析得到以年份为尺度的相关性结论[4]。上述研究深入探讨了大气污染与天气要素的关系,然而以季度为研究尺度短时间内AQI的相关分析研究还较缺乏。因此本文在之前研究的基础上,分析2020年哈尔滨市冬季大气中AQI数据,揭示其变化规律,进而得出AQI与天气要素之前的关系,以期对哈尔滨市冬季大气污染治理提供数据支撑。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

哈尔滨市(44°04'~46°40'N, 125°42'~130°10'E)为我国纬度最高的省会,地处中国东北部,属温带大陆性季风气候,夏季短暂凉爽,冬季寒冷漫长[5]。夏季日均最高气温为25℃,降水密集,冬季寒冷,持续时间长,降水量少,集中降雪期为每年11月至次年1月[6]。2020年哈尔滨市冬季气象数据如下:平均气温约为-14.6℃;平均气压约为100.68 KPa;平均风速约为2.4 m/s、平均相对湿度约为71.46%。

2.2. 数据来源

本文选取黑龙江省哈尔滨市空气监测站公布的2020年12月,2021年1月,2月的空气质量指数数

据，有效数据为 90 天。哈尔滨市空气质量指数历史数据其中包括 AQI、PM_{2.5}、PM₁₀、CO、NO₂ 和 SO₂ 这六项。所用的气象数据源于天气后报公布的哈尔滨市 2020 年冬季天气数据其中包含每日观测的天气状况，平均风速、平均气温，平均相对湿度和平均气压。

2.3. 研究方法

本文采用的 AQI 数据可以反映 2020 年冬季哈尔滨市的空气质量水平，将执行取值范围分为 6 个等级。空气污染物质量浓度限值标准参照 GB 3095-2012《环境空气质量标准》的二级标准。具体等级划分限值如表 1 所示[7]。

Table 1. Classification of AQI

表 1. AQI 等级划分

AQI 取值范围	AQI 级别	AQI 类别
0~50	I级	优
51~100	II级	良
101~150	III级	轻度污染
151~200	IV级	中度污染
201~300	V级	重度污染
>300	VI级	严重污染

2.3.1. 相关分析

天气要素对污染物的累积和扩散具有重要的作用。为探讨空气质量与天气要素间的关系，选取以下 4 项天气要素：平均气温、平均相对湿度、平均风速和平均气压与空气质量指数数据进行相关分析，利用皮尔逊相关系数法得出 AQI 与天气要素间的相关性，通过 P 值的正负及大小判断变量之间的相关性。若 P 值为正则呈现正相关，其中若 $P < 0.05$ ，则变量之间呈现显著正相关， $P < 0.01$ ，则呈现极显著正相关，反之呈现负相关、显著负相关和极显著负相关。

2.3.2. 回归分析

采用回归分析方法，建立 AQI 与各天气要素之间的回归模型来判断各天气要素对 AQI 的影响程度。由于天气要素数量较多且彼此之间有显著相关关系，因此在进行回归分析前将变量进行因子分析，提取主因子后再进行回归模型的建立。

一元线性回归模型的基本结构形式为：

$$Y = ax + b \tag{1}$$

式中：x 代表污染物浓度；y 代表 AQI 数值；a 和 b 为线性回归方程拟合系数。

3. 结果与讨论

3.1. AQI 指数变化

将 2020 年哈尔滨市冬季空气质量数据参照表 1 进行分级，得到 2020 年哈尔滨市冬季不同级别空气质量的分布。2020 年哈尔滨市冬季共有 9 天空气质量等级为优，空气质量为良的天数最多，共计 48 天占总样本数目的 53.3%。按 AQI < 100 为达到国家空气质量日均值二级标准，则 2020 年哈尔滨市冬季共有 53 天达到标准占整季度的 63.3%。空气质量为轻度污染共 26 天，占总样本数目的 28.8%，中度污染、重度污染分别为 4 天和 3 天，占 4.4%和 3.3%。参考哈尔滨市 2019 年冬季空气质量指数数据，2020 年与

2019 年空气质量分布相比变化趋势不大, 其中中度污染和严重污染相比增加 4 天, 达标天数基本不变, 总体变化趋于平稳, 走势良好。根据 2020 年冬季空气质量数据得出各月份空气质量指数平均数及平均绝对偏差, 1 月份平均 AQI 指数最高为 197.4 ug/m^3 达到中度污染级别, 且平均绝对偏差最大为 59.9, 离散程度大, 说明 1 月份空气质量最差, 且有多种不同等级空气质量分布较分散。其次是 12 月份以及 2 月份 AQI 指数为 84.7 ug/m^3 和 82.1 ug/m^3 , 平均 AQI 属于良级别, 平均绝对偏差分别为 24.6 和 19.2, 分布状况相对集中。自 2 月起空气质量指数大幅度下降, 空气污染状况明显好转。

2020 年冬季哈尔滨市 AQI 周变化特征如表 2 所示: 将 AQI 按星期天数归为 7 类即周一至周日, 从周一起 AQI 呈下降趋势, 降至周三为周内最低 AQI 为 107.64 ug/m^3 , 此后 AQI 逐步升高, 周日空气质量指数达到峰值 149.25 ug/m^3 。通过 AQI 数据标准差可知, 周五、周六和周日空气质量数据相对离散, 周二周三数据分布相对集中, 稳定性好。由以上数据可以侧面看出, 非工作日时人类活动频繁(如机动车的频繁使用导致汽车尾气排放增多)对空气质量有明显负面影响。

Table 2. Weekly variation characteristics of AQI

表 2. AQI 周变化特征

星期	平均值(ug/m^3)	标准差
周一	115.77	78.29
周二	110.15	53.53
周三	107.64	54.94
周四	116.36	70.11
周五	121.85	86.9
周六	133.62	82.22
周日	149.25	82.06

3.2. 污染物总体趋势

依据国家标准, 24 h 平均空气污染物质量浓度二级标准限值: $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、CO 和 NO_2 的限值浓度分别为 75 ug/m^3 、150 ug/m^3 、150 ug/m^3 、40 ug/m^3 和 80 ug/m^3 。由图 1 可知, CO、 NO_2 和 SO_2 冬季均质量浓度未超过国家二级标准, 处于达标状态。而 $\text{PM}_{2.5}$ 平均质量浓度为 93 ug/m^3 , 严重超标, 即 $\text{PM}_{2.5}$ 为哈尔滨冬季首要污染物。 PM_{10} 平均质量浓度 103 ug/m^3 , 虽然未超过国家二级标准限值, 但从图 1 中可以看出 1 月份超标严重。 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 在春季, 冬季经常超标。冬季为集中供暖时期, 哈尔滨市采用燃煤供热将产生大量粉尘颗粒物等, 导致大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 含量增加, 因此控制 $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} 成为大气环境防治工作的重点。

对哈尔滨市 2020 年冬季逐日污染物平均浓度进行分析, 发现 AQI 与 $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} 走势大致相同, 总体呈先上升后下降趋势, 而 SO_2 和 NO_2 随 AQI 趋势变化但程度不明显, CO 在冬季几乎没有变化。从月份角度来看, 1 月到 2 月 AQI 数值同比下降 59.89%, 空气质量明显好转, 与之对应 $\text{PM}_{2.5}$ 平均质量浓度由 155.26 ug/m^3 下降至 59.79 ug/m^3 同比下降 61.49%; PM_{10} 平均质量浓度由 164.39 ug/m^3 下降至 67.48 ug/m^3 同比下降 58.9%; 而与 12 月对比, 2 月 AQI 略有降低但降幅较少, 平均空气质量等级都是良, 同时 $\text{PM}_{2.5}$ 平均质量浓度降低 3.4%, PM_{10} 平均质量浓度降低 13.4%, 而 SO_2 与 CO 同比增加 14.8%、11.3%; 1 月至 2 月中旬期间 AQI 和 PM_{10} 以及 $\text{PM}_{2.5}$ 时间变化特征明显, 起伏程度很大, 最高差值为 262 ug/m^3 。2 月下旬及 12 月份 AQI 和 PM_{10} 以及 $\text{PM}_{2.5}$ 整体变化趋势较小, 起伏程度仍然明显。 SO_2 和 NO_2 随月份变化有所波动, 但范围不大, CO 月平均质量浓度较低, 变化规律不明显。

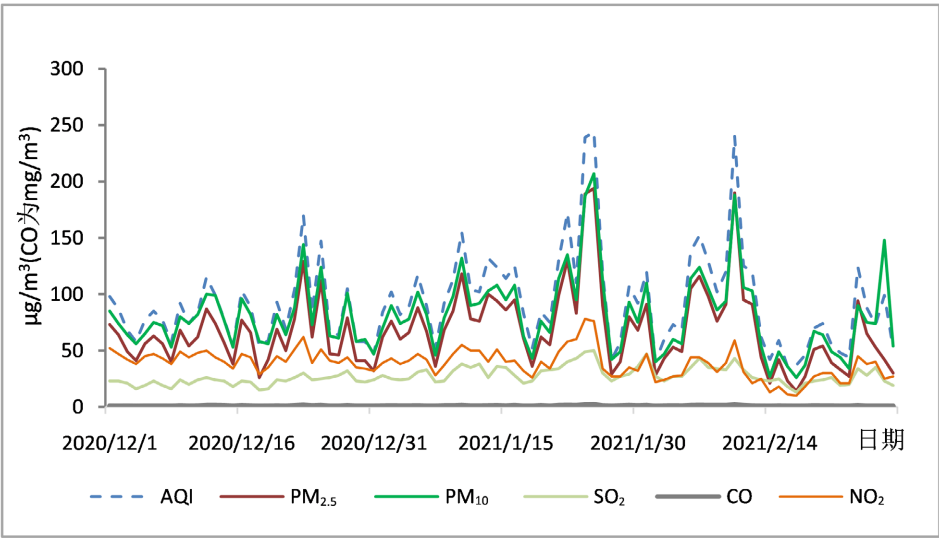


Figure 1. Trends of AQI and air pollutants in Harbin City in 2020
图 1. 2020 年哈尔滨市 AQI 与大气污染物走势

3.3. AQI 与各天气要素的相关性分析

依据上述分析得到相关分析结果分别见表 3。据表 3 可以得出：哈尔滨市冬季空气质量受各天气要素的影响存在一定程度上的差别。在各天气要素中风速与 AQI 相关程度最高，两者表现为显著负相关；相对湿度与 AQI 也有较强相关性，两者呈显著正相关；平均气温与 AQI 也呈显著负相关即冬季气温降低空气质量变差；冬季气压与空气状况变化无明显关联。

Table 3. Correlation coefficient between AQI index and weather elements
表 3. AQI 指数与天气要素间的相关系数

	AQI	平均气温	平均相对湿度	平均风速	平均气压
AQI	1.000	-0.337**	0.442**	-0.585**	0.039
平均气温		1.000	0.369**	0.377**	-0.45**
平均相对湿度			1.000	-0.402**	-0.373**
平均风速				1.000	0.221*
平均气压					1.000

**在 0.01(双侧)水平上显著相关，*在 0.05(双侧)水平上显著相关。

哈尔滨 2020 年冬季的日平均气温与 AQI 指数的相关系数为-0.337，二者存在显著负相关，说明气温对冬季哈尔滨地区空气质量有明显的正效应作用，其原因在于气温的垂直分布很大程度上决定垂直方向的污染物扩散。哈尔滨冬季容易产生逆温现象，对流不明显，大气中污染物难以扩散，冬季温度降低时，大气对流运动减弱，AQI 数值升高，空气质量变差。反之温度升高时，大气对流作用明显，有利于污染物向四周地区扩散，空气质量好转。

风对大气污染物的扩散与稀释有着至关重要的影响，它的影响主要分为两个方面，一方面风向决定了污染物的扩散方向，另一方面是风速决定了污染物扩散程度。在一定范围下，风速越快使得污染物扩散程度越高，空气中污染物浓度越低，空气质量明显好转。AQI 指数与哈尔滨市的风速间主要表现为负相关，哈尔滨 2020 年冬季的日平均风速与 AQI 指数的相关系数高达-0.585，由于哈尔滨市正处于冬季集

中供热时期, 煤炭燃烧不充分, 燃煤效率不高, 产生大量的烟尘及污染物排放至大气中, 风速越快越有利于污染颗粒物的扩散。

AQI 指数与哈尔滨市的相对湿度存在显著正相关, 说明相对湿度对冬季哈尔滨地区空气质量有显著的负效应作用。研究表明冬季大气含水量低, 相对湿度增大时不易形成有效降水, 容易形成雾霾天气, 使得空气污染严重[8]。

AQI 指数与气压呈正相关关系, 高空气压高时, 近地面气压低, 空气对流运动减弱, 不易形成降水, 空气污染难以得到缓解[9]。高空气压低时, 近地面气压高, 随着大气向上运动容易形成降水, 降水吸附大气污染物, 空气质量好转。但由于大气气压数值主要受海拔高度和气温的影响, 本文采用的气压数据为哈尔滨市冬季逐日气压, 海拔高度一定, 气温差值不大。所以气压变化不明显, 整个冬季气压平均值为 100.977 Kpa, 标准偏差为 5.29, 离散程度小。

3.4. AQI 与各天气要素的回归分析

本文选取与 AQI 相关的各污染物要素及天气要素包括 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、CO、逐日平均气温、逐日平均相对湿度、逐日平均风速和逐日平均气压九项数据进行因子分析和回归分析。分析结果: 9 个变量归为两个因子, 其中第一个因子贡献率为 55.831%, 第二个因子贡献率为 19.258%, 两者总共可以代表原变量 75.089% 的信息。

Table 4. Rotating component matrix

表 4. 旋转成份矩阵

	主成分 1	主成分 2
平均气温	-0.352	0.781
平均相对湿度	0.592	0.614
平均风速	-0.701	0.254
平均气压	0.019	-0.819
$\text{PM}_{2.5}$	0.964	-0.027
PM_{10}	0.963	-0.035
SO_2	0.867	-0.18
CO	0.803	0.006
NO_2	0.884	0.035

提取方法: 主成分分析法
旋转法: 具有 Kaiser 标准化的正交旋转法
旋转在 3 次迭代后收敛

令逐日平均气温、逐日平均相对湿度、逐日平均风速、逐日平均气压、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、CO 为变量 ρ_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$), 按照表 4 旋转成份矩阵计算得到的特征值, 以及所对应的特征向量, 从而得到两个因子 Z_1 , Z_2 的表达式:

$$Z_1 = -0.352\rho_1 + 0.592\rho_2 - 0.701\rho_3 + 0.019\rho_4 + 0.964\rho_5 + 0.963\rho_6 + 0.867\rho_7 + 0.803\rho_8 + 0.884\rho_9 \quad (2)$$

$$Z_2 = 0.781\rho_1 + 0.614\rho_2 - 0.254\rho_3 - 0.819\rho_4 - 0.027\rho_5 - 0.035\rho_6 - 0.18\rho_7 + 0.006\rho_8 + 0.035\rho_9 \quad (3)$$

两个因子代表原有指标中绝大多数的信息，并且两者彼此间是相互独立的，不会产生共线性。令标准化后的空气质量指数转换为因变量 Y ，第一个因子值 Z_1 和第二个因子值 Z_2 作为自变量分别对其进行一元线性回归，得到标准化线性成分回归方程为：

Table 5. Regression model coefficient of Z_1
表 5. Z_1 回归模型系数

模型	B	标准误差	t	sig.
常量	122.023	2.114	57.724	0
REGR factor score 1 for analysis 1	71.192	2.126	33.481	0

依据表 5：第一个因子 Z_1 回归模型系数得到主成分回归方程为：

$$Y = 71.192Z_1 + 122.023 \quad (4)$$

Table 6. Regression model coefficient of Z_2
表 6. Z_2 回归模型系数

模型	B	标准误差	t	sig.
常量	122.023	7.995	15.262	0
REGR factor score 1 for analysis 1	3.922	8.042	0.488	0.627

依据表 6：第二个因子 Z_2 回归模型系数得到主成分回归方程为：

$$Y = 3.922Z_2 + 122.023 \quad (5)$$

经计算，回归方程中常数，第一个因子的检验显著性概率 $\text{sig} = 0.000 < 0.05$ 即常数，因子 1 过检说明回归效果较好。第二个因子的检验显著性概率 $\text{sig} = 0.627 > 0.05$ ，说明因子 2 未过检，回归效果不好，不能采用。由于第一因子与因变量得到的回归方程拟合效果好，所以将第一因子的线性表达式代入回归方程。

把(1)式代入(3)式得：

$$Y = -25.059\rho_1 + 42.146\rho_2 - 49.906\rho_3 + 1.353\rho_4 + 68.629\rho_5 + 68.558\rho_6 + 61.723\rho_7 + 57.167\rho_8 + 62.934\rho_9 \quad (6)$$

由一元线性回归方程可知， $\text{PM}_{2.5}$ ， PM_{10} 为影响 AQI 的主要污染物。污染物和风速负相关并且主要受控于风速的影响，受气温湿度气压的影响较小。哈尔滨市大气 $\text{PM}_{2.5}$ ， PM_{10} 的主要来源于煤烟尘和机动车尾气。燃放炮竹，交通出行增多，燃煤供暖都是空气质量下降的原因。为维护大气环境，应采用清洁能源，增加交通车辆限行规则。

4. 结论

(1) 从 AQI 的描述性统计结果得知，哈尔滨市冬季空气质量以优良为主，共有 53 天达到标准占整季度的 55.14%，中等及以上污染天气占整季度的 25.23%。从月份研究来看，哈尔滨冬季空气质量有明显好转的趋势，其中 2 月空气质量最好，1 月空气质量最差。从数据稳定性来看，1 月空气质量数据稳定性较差，AQI 分布较分散，整体起伏较大；2 月和 12 月 AQI 大幅度降低并且分布较为集中。从周期来看，空气质量存在明显的周末效应，周日，周六的 AQI 指数相较于工作日明显升高，从侧面说明交通出行，人

类活动等因素对空气质量有较大影响。

(2) 从污染物特征来看, $PM_{2.5}$ 为哈尔滨市冬季首要污染物其质量浓度严重超标, CO 、 NO_2 和 SO_2 浓度都未超过国家二级标准, 处于达标状态。1 月至 2 月中旬期间 AQI 和 PM_{10} 以及 $PM_{2.5}$ 时间变化特征明显, 起伏程度很大, 2 月下旬及 12 月份 AQI 和 PM_{10} 以及 $PM_{2.5}$ 整体变化趋势较小, 但仍然有明显的波动。 SO_2 和 NO_2 随月份变化有所波动, 但范围不大, CO 月平均质量浓度较低, 变化规律不明显。

(3) 从总体对 AQI 与天气要素进行相关分析, 发现 AQI 与风速, 气温表现为负相关关系, 与相对湿度表现为正相关关系。从相关系数和回归系数的数值可以看出影响 AQI 的主要污染物为 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 。污染物和风速呈负相关, 并且主要受控于风速的影响, 受气温, 湿度, 气压的影响较小。

参考文献

- [1] 孙家仁, 许振成, 刘煜, 等. 气候变化对环境空气质量影响的研究进展[J]. 气候与环境研究, 2011, 16(6): 805-814.
- [2] 周兆媛, 张时煌, 高庆先, 等. 京津冀地区气象要素对空气质量的影响及未来变化趋势分析[J]. 资源科学, 2014(1): 191-199.
- [3] 王云霞, 张艳杰, 孟令尧, 等. 石家庄市采暖期空气质量特征及其与气象条件的关系[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(1): 381-387.
- [4] 朱红蕊, 刘赫男, 张洪玲, 等. 哈尔滨市空气质量特征及其与气象要素的关系[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(1): 55-60.
- [5] 杨莹, 王琨, 崔晨, 等. 哈尔滨市大气污染与气象因素的相关性分析[J]. 环境工程学报, 2015, 9(12): 5945-5950.
- [6] 金振星. 不同气候区居民热适应行为及热舒适区研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [7] 李梅. 湖南省 6 个重点城市环境空气质量时间变化特征分析[J]. 农村经济与科技, 2016, 27(11): 36-39.
- [8] 谢志英, 刘浩, 唐新明, 等. 北京市近 12 年空气污染变化特征及其与气象要素的相关性分析[J]. 环境工程学报, 2015, 9(9): 4471-4478.
- [9] 刘昕, 辛存林. 陕甘宁地区城市空气质量特征及影响因素分析[J]. 环境科学研究, 2019, 32(12): 2065-2074.