

贵州省2015~2019年空气质量时空变化特征及其影响因素分析

刘圣之

云南师范大学地理学部, 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 云南 昆明

收稿日期: 2022年1月8日; 录用日期: 2022年2月11日; 发布日期: 2022年2月18日

摘要

空气质量与人们生产、生活以及人体健康息息相关, 在社会经济和城镇化快速发展时期, 空气质量更容易受到影响, 因此研究空气质量的时空变化及其影响因素具有重要的社会价值和理论价值。以贵州省2015~2019年空气质量指数以及主要污染物数据对其空气质量时序变化进行分析, 并结合空间插值、地理探测器及灰色关联模型对其空间分异和驱动因素进行了探究。结果表明: 1) 贵州省2015~2019年空气质量整体较好, 且整体呈向好的方向发展。空气质量月际变化特征基本与干湿季相吻合, 主要污染物浓度除O₃外, 基本呈下降趋势。2) 贵州省2015~2019年AQI值有明显的空间格局变化, 2015~2017年呈现出西北高, 东南低的空间格局, 2018~2019年整体呈现出东北高, 东南低的空间格局。3) 地理探测器和灰色关联模型均表明气象因子是影响贵州省2015~2019年空气质量的主要影响因子, 而社会经济是次要影响因子, 且因子交互协同作用中气象因子间两两协同作用更加显著。4) 贵州省2015~2019年空气质量受气象因素和社会经济因素共同影响, 我们推测空气污染事件多发生在特殊天气条件下以及有利于污染物形成的天气条件下。研究结果将为贵州省空气质量防治及其空气质量的提升提供一定的科学依据。

关键词

AQI, 地理探测器, 灰色关联模型, 贵州省空气质量, 空间分异

Spatial-Temporal Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Quality in Guizhou Province from 2015 to 2019

Shengzhi Liu

Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographic Processes and Environmental Change, Faculty of Geographical Science, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Abstract

Air quality is closely related to people's production, life and human health. In the period of rapid development of social economy and urbanization, air quality is more susceptible to impact. Therefore, studying the spatio-temporal changes of air quality and its influencing factors has important social and theoretical value. Based on the air quality index and main pollutant data of Guizhou Province from 2015 to 2019, the temporal changes of air quality were analyzed, and the spatial differentiation and driving factors were explored by combining spatial interpolation, geographic detector and grey correlation model. The results showed that: 1) The air quality in Guizhou Province was generally good from 2015 to 2019, and developed in a good direction as a whole. The monthly variation characteristics of air quality are basically consistent with the dry and wet seasons. Except for the concentration of main pollutant O_3 , it basically shows a downward trend. 2) The AQI value of Guizhou Province showed obvious spatial pattern changes from 2015 to 2019. From 2015 to 2017, it showed a spatial pattern of high value in northwest and low value in southeast, and from 2018 to 2019, it showed a spatial pattern of high value in northeast and low value in southwest. 3) Both geographical detector and grey correlation model showed that meteorological factors were the main influencing factor of air quality in Guizhou Province from 2015 to 2019, while social economy was the secondary influencing factor. Moreover, the synergistic effect between meteorological factors was more significant. 4) Air quality in Guizhou Province from 2015 to 2019 was affected by meteorological factors and social and economic factors. We speculated that air pollution events mostly occurred under special weather conditions and favorable weather conditions for the formation of pollutants. The results will provide a scientific basis for air quality control and improvement in Guizhou Province.

Keywords

AQI, Geographic Detector, Grey Relational Model, Air Quality in Guizhou Province, Space Differentiation

Copyright © 2022 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

近些年来, 随着社会经济快速发展和城镇化水平显著提高的同时, 生态环境也遭受着不同程度的破化, 尤其是空气环境问题广受人们关注[1] [2], 研究表明空气污染可引发呼吸道[3]、心脑血管[4]、过敏[5]等相关疾病, 严重影响人体健康。国外对空气污染已有大量的研究, 如针对空气污染对人体健康[6] [7]、空气污染物来源[8] [9]、空气污染物时空变化特征[10] [11]、影响空气污染物的驱动机制[12] [13]等。空气质量指数(Air Quality Index, AQI)作为衡量空气清洁程度的重要指标之一, 自 2013 年以来我国已经在各区域陆续开展相关的监测研究[14]。目前我国空气质量的研究主要集中在京津冀地区[15] [16]、长江三角洲[17] [18]、珠江三角洲[19] [20]等经济较为发达的地区以及生态较为脆弱的西北[21] [22]等地区。探讨驱动因素上多利用地理探测器[23]、相关性分析[24]、灰色关联分析[25]及 Tobit 模型[26]等方法。近年来, 虽然中国空气质量整体好转[27], 但相关研究表明我国空气污染逐渐呈现出复合型和区域性的特征, 研究

重点已由各城市的点源污染治理转向区域联合治理[28], 研究结果也表明区域联防联控极具科学性[29]。

位于我国西南地区的贵州省, 空气质量长期较好, 但是近些年来也出现了一些偶发的空气污染事件[30][31]。先前的研究多集中在贵阳单个城市的空气质量的分析上, 如舒卓智[32]等利用空气质量及气象观测资料探究了贵阳空气质量与气象的相互关系, 苏志华[33]等利用时序分析及空间插值探究了贵阳市城区大气污染物的时空变化特征, 王冉熙[34]等利用多元线性回归对贵州西南地区空气质量进行了预报研究。近些年也有相关贵州省空气质量的研究, 如曹蔚[35]等分析了贵州省 2015~2019 年空气质量及大气污染物的时空分布特征, 尹琴[36]等针对贵州省典型污染物进行了探讨, 周江[37]等针对贵州省空气中颗粒物污染特征进行了分析, 但相对于大量开展的空气质量研究的区域而言, 针对贵州省空气质量时空变化特征的相关研究还相对较少, 且已有研究没有对影响因素进行分析, 或者没有考虑各要素之间的协同作用, 因此本文在前人的研究基础上对贵州省空气污染时空特征进一步完善, 且利用数学模型量化了贵州省空气质量影响因素, 探讨了其驱动机制。

本文基于 2015~2019 年贵州省 9 个州市的空气质量及相关污染物($PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 O_3 、 CO) 逐日监测数据, 利用空间插值法和地理探测器因子分析法及灰色关联分析法对贵州省 AQI 的时空分布特征及驱动因素进行研究, 以期对贵州省大气污染防治以及对西南高原城市的生态环境保护提供一定科学依据。

2. 数据与方法

2.1. 研究区概况

贵州省($24^{\circ}37' \sim 29^{\circ}13'N$ 、 $103^{\circ}36' \sim 109^{\circ}35'E$)位于我国西南地区, 地势西高东低, 平均海拔约为 1100 m, 属低纬高原山地地区(图 1)。气候基本属于亚热带季风气候, 年均降水量 682~1134 mm, 年均温 $14 \sim 16^{\circ}C$, 常年相对湿度在 70% 以上[38]。贵州省 2020 年末总人口约为 3856 万人, Gross Domestic Product (GDP) 约为 17826.6 亿元。近些年来随着城市化进程加快、人类活动加剧加之特殊的气象条件造成了贵州省部分地区出现了偶发空气污染事件。

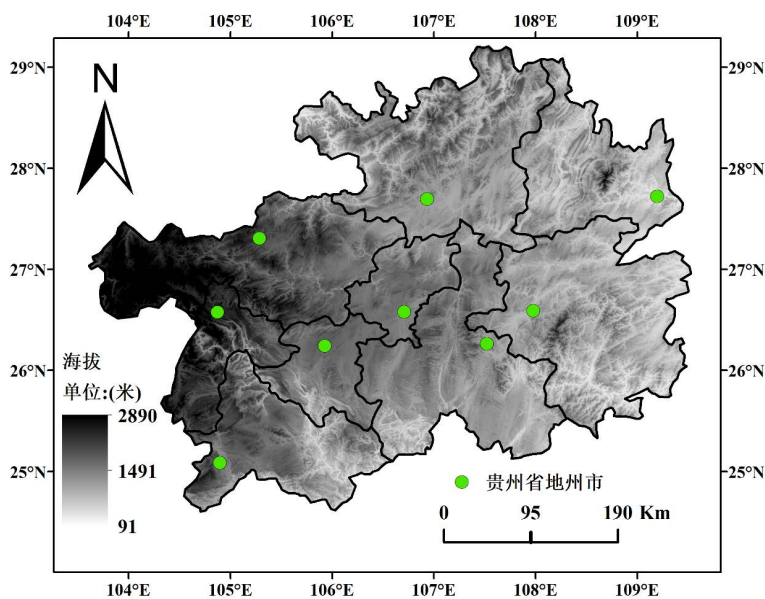


Figure 1. Overview of the study area

图 1. 研究区概况

2.2. 数据来源

1) 空气质量数据

贵州省 2015~2019 年 9 个州市空气质量逐日监测数据来自中国空气质量在线监测分析平台 (<https://www.aqistudy.cn>), 此平台公布的城市空气质量数据是对其周边空气环境评价的综合指标, 本文的研究对象也是基于贵州省 9 个地州市的空气质量数据进行分析。

2) 气象与社会数据

贵州省 2015~2019 年降水量、平均气温、相对湿度等气象因子数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>)。贵州省各地州市 GDP、年末常住人口、城市建设用地面积等社会经济因子数据来源于贵州省统计局(<http://stjj.guizhou.gov.cn>)。

2.3. 研究方法

2.3.1. 克里金插值法

克里金插值法又称空间局部插值法, 是以变异函数理论和结构分析为基础, 在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计的一种方法[39]。相关研究表明克里金插值法相比于反距离插值法在结果和精度以及连续性上更优[14]。因此, 其常被用来估算相关区域的空气质量, 普通克里金插值法计算公式为[40][41]:

$$\hat{Z}(W_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i B(W_i) \quad (1)$$

式中 $\hat{Z}(W_0)$ 是待预测点 W_0 位置的预测值; $B(W_i)$ 为 n 个已知位置样点 W_i 位置的测量值 ($i=1, 2, \dots, n$); λ_i 为测量值对应的残差权重。

2.3.2. 地理探测器

地理探测器是探测和利用空间分异性的一种统计学方法, 其可通过探测地理现象的空间分层异质性以揭示其背后驱动力, 一方面可以探测因变量 Y 的空间分异性, 另一方面可以探测其自变量 X 多大程度上解释了因变量 Y 的空间分异性, 其公式如下[42]:

$$q = 1 - \frac{\sum_{j=1}^H N_j \sigma_j^2}{N \sigma^2} \quad (2)$$

式中: $j=1, 2, \dots, n$; H 为变量 Y 或者因子 X 的分层; N_j 和 N 分别为层 j 和全区的单元数; σ_j^2 和 σ^2 分别是层 j 和全区的 Y 值的方差。 q 的范围为[0,1], 其值越大说明 Y 的空间分异性越明显; 如分层是由自变量 X 生成的, 则 q 值越大表示自变量 X 对属性 Y 的解释力越强。

2.3.3. 灰色关联分析

灰色关联分析(grey relation analysis, GRA)是依据因素之间变化趋势的相似程度来衡量因素间的关联程度[43], 通过对比各影响因子之间关联度的大小来判断影响因子对 AQI 的影响程度。本研究以贵州省 2015~2019 年 AQI 年均值为变量, 通过灰色关联定量分析贵州省气象因子和社会经济因子对 AQI 变化的影响。关联度范围为[0,1], 关联度越大, 其相关性越好, 其公式如下[44]:

$$X_i(k) = \frac{X_i(k)}{X_i(l)}, \quad k=1, 2, \dots, n; i=0, 1, \dots, m \quad (3)$$

$$\Delta_i(k) = |x'_0(k) - x'_i(k)|, \quad i=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

$$\xi(k) = \frac{\min_i \min_k \Delta(k) + \rho \max_i \max_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \rho \max_i \max_k \Delta_i(k)} \quad (5)$$

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k), \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中： $\min_i \min_k \Delta(k)$ 和 $\max_i \max_k \Delta_i(k)$ 分别两级极小差和两级极大差； ρ 为分辨系数，一般 $\rho = 0.5$ ； $\xi_i(k)$ 是比较数列 x_i 的第 k 个元素与参考数列 x_0 的第 k 个元素之间的关联稀树； r_i 为计算所得的灰色关联度。

3. 结果与分析

3.1. 贵州空气质量时间变化特征

3.1.1. AQI 指数时间变化特征

贵州省 2015~2019 年 AQI 值变化特征如图 2 所示，AQI 值在 10~256 之间波动，平均值为 51.7，其中 2016 年空气质量指数离散程度和平均值最大，2018 年空气质量指数离散程度和平均值较小。2015~2019 年贵州省 AQI 分级如表 1 所示，优良率在 95.31%~99.21% 之间波动，整体上呈现出增加趋势，AQI 为优的天数整体上呈现出增加趋势，为良和污染的天数整体上呈现出下降趋势，说明近年来贵州省空气质量在向好的趋势发展。

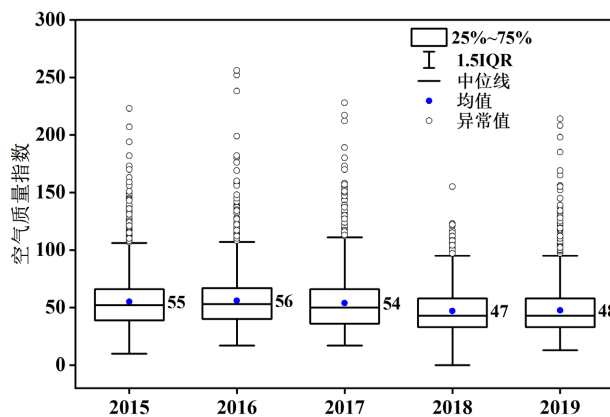


Figure 2. Year-by-year changes in AQI in Guizhou Province from 2015 to 2019

图 2. 2015~2019 年贵州省 AQI 逐年变化特征

Table 1. AQI classification of Guizhou Province from 2015 to 2019

表 1. 2015~2019 年贵州省 AQI 分级

年份	6 站点不同 AQI 类型出现的天数累加(天)			优良率
	优	良	污染(≥ 100)	
2015 年	1569	1575	138	95.80%
2016 年	1470	1694	123	96.26%
2017 年	1684	1447	154	95.31%
2018 年	2038	1211	26	99.21%
2019 年	2134	1088	63	98.08%

贵州省 2015~2019 年 AQI 指数逐月变化特征如图 3 所示, 贵州省 AQI 整体上呈现出明显的“V”型趋势变化, 即 1~7 月份呈现出下降趋势, 7~12 月份呈现上升趋势。但以 AQI 为优(<50)的参照线来看, 贵州省空气质量整体较好的月份为 6~11 月份, 其他月份 AQI 均值整体上均位于优参考线以上。

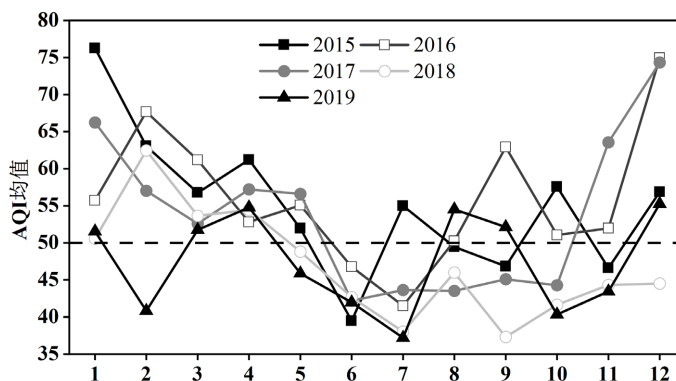


Figure 3. Monthly variation characteristics of Guizhou AQI from 2015 to 2019

图 3. 2015~2019 年贵州 AQI 逐月变化特征

3.1.2. 主要污染物时间变化特征

为了分析贵州省主要污染物的时序变化特征, 对贵州省主要污染物进行了统计分析(表 2), 结果表明贵州省主要污染物除 O_3 外其他污染物浓度均整体呈现出下降趋势, O_3 浓度有上升趋势。

Table 2. Changes in the annual average concentrations of major air pollutants from 2015 to 2019

表 2. 2015~2019 空气主要污染物年平均浓度变化

污染物	$\rho(PM_{2.5})/(\mu g \cdot m^{-3})$	$\rho(PM_{10})/(\mu g \cdot m^{-3})$	$\rho(SO_2)/(\mu g \cdot m^{-3})$	$\rho(CO)/(\mu g \cdot m^{-3})$	$\rho(NO_2)/(\mu g \cdot m^{-3})$	$\rho(O_3)/(\mu g \cdot m^{-3})$
2015 年	31.63	53.71	21.00	0.77	21.76	71.06
2016 年	31.87	54.60	17.01	0.78	22.76	71.74
2017 年	29.23	51.47	14.47	0.85	21.77	70.18
2018 年	23.29	41.34	11.90	0.70	18.53	70.92
2019 年	23.99	37.96	10.50	0.61	18.19	73.80

贵州省 2015~2019 年主要污染物浓度的逐月变化特征表明(图 4), 贵州省主要污染物在月际变化特征显著, 除 O_3 外其他污染物浓度均整体呈“V”型变化, 即 1~7 月呈现出下降趋势, 7~12 月呈现出上升趋势, 与 AQI 的月际变化特征有很好的对应关系。而 O_3 浓度整体呈“M”型变化, 即 1~4 月呈现出上升趋势, 5~7 月呈现出下降趋势, 7~9 月呈现出上升趋势, 9~12 月呈现出下降趋势。

3.2. 贵州省空气质量空间分异特征

为了分析贵州省空气质量的空间分异特征, 对 2015~2019 年贵州省 9 地州市的 AQI 年均值进行空间插值分析(图 5)。结果表明, 贵州省 AQI 值 2015~2017 年整体呈现出西北高, 东南低的空间格局, 2018~2019 年整体呈现出东北高, 东南低的空间格局。

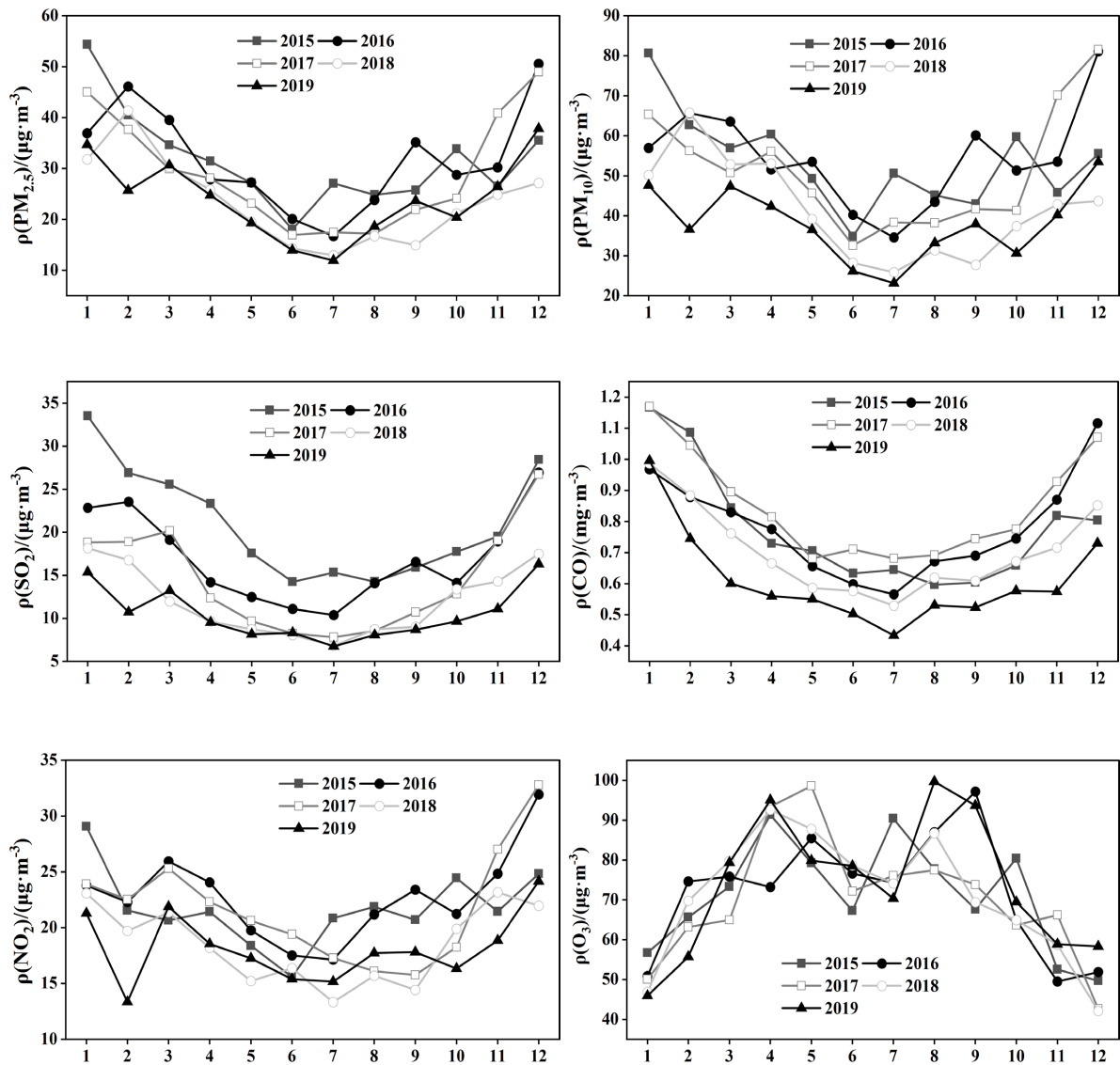
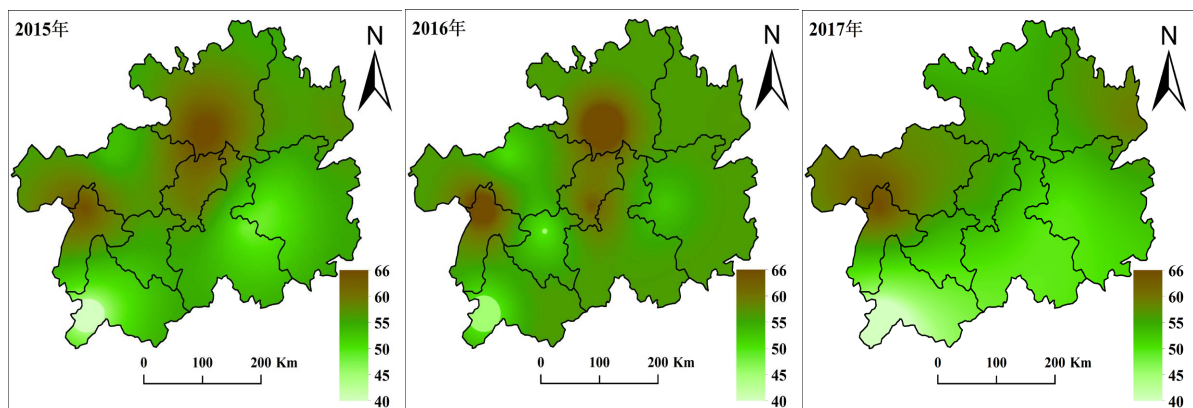


Figure 4. Monthly changes in the concentration of main air pollutants in the main urban areas of Guizhou Province from 2015 to 2019

图 4. 2015~2019 年贵州省主城区主要空气污染物浓度月变化



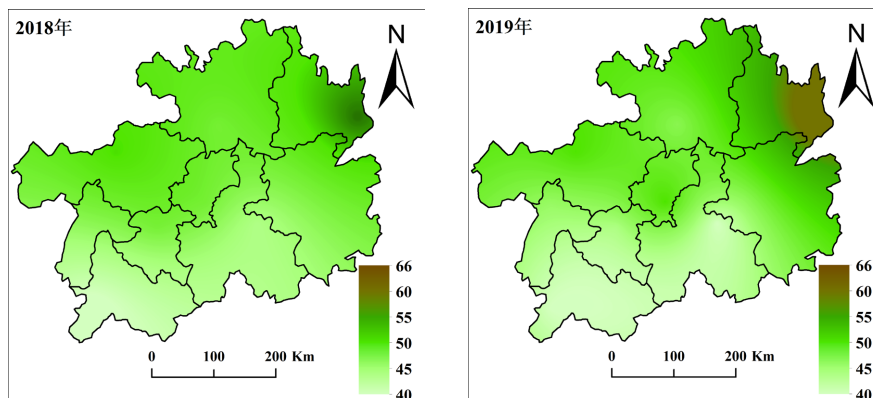


Figure 5. 2015~2019 year distribution of AQI in the main urban areas of Guizhou Province

图 5. 2015~2019 年贵州省主城区 AQI 年均值分布

以往对贵州省空气质量的研究大多按四季划分[35]，但中国西南地区受南亚季风、东亚季风及青藏高原的协同作用影响，由于受季风影响显著的原因西南地区降水有明显的干湿季之分[45]，但西南地区复杂的地形地貌，导致降水变化的空间分异明显，虽一般认为 5~10 月为雨季，11~4 (翌年)月为干季，但西南地区各个省的标准是有差别的，为了确定贵州省 2015~2019 年的干湿季，我们利用贵州省 31 个气象站点 2014~2019 年的气象数据，计算了 5~10 月和 5~4 (翌年)月降水量的占比(图 6)。结果表明贵州省 5~10 月份降水量约占全年的 75%以上，可以认为 5~10 月为雨季，11~4 (翌年)为干季。

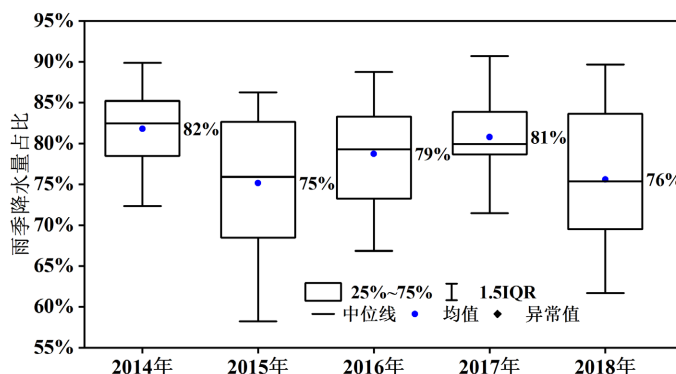


Figure 6. The proportion of precipitation in the rainy season

图 6. 雨季降水量占比

为分析贵州省 AQI 干湿季的空间分异差异，对贵州省 2015~2019 年干湿季 AQI 年均值进行了空间插值分析(图 7)，结果表明，贵州省干湿季 AQI 值差异明显，均表现出雨季空气质量优于旱季。空间上 2015~2017 年整体呈现出雨季中部、西部空气质量较差，干季整体差异不大，2018~2019 年干湿季均整体呈现出除东北局部地区外，其他地区均较好的空间格局。

3.3. 贵州空气质量驱动因素分析

3.3.1. 风险因子探测

为探究影响贵州省空气质量空间分异的驱动因素，对贵州省 2015~2019 年的影响因子进行了地理探测器的风险因子探测(表 3)，结果表明 8 个影响因子的驱动力介于 0.04~0.64 之间，影响因子驱动力的年际波动较大，但整体呈现出降水 > 日照时数 > 相对湿度 > 城市建设用地面积 > 年末人口 > 建成区

绿化覆盖率 > 气温 > 人均 GDP，气象因子对贵州省空气质量的影响略大于社会经济因子。

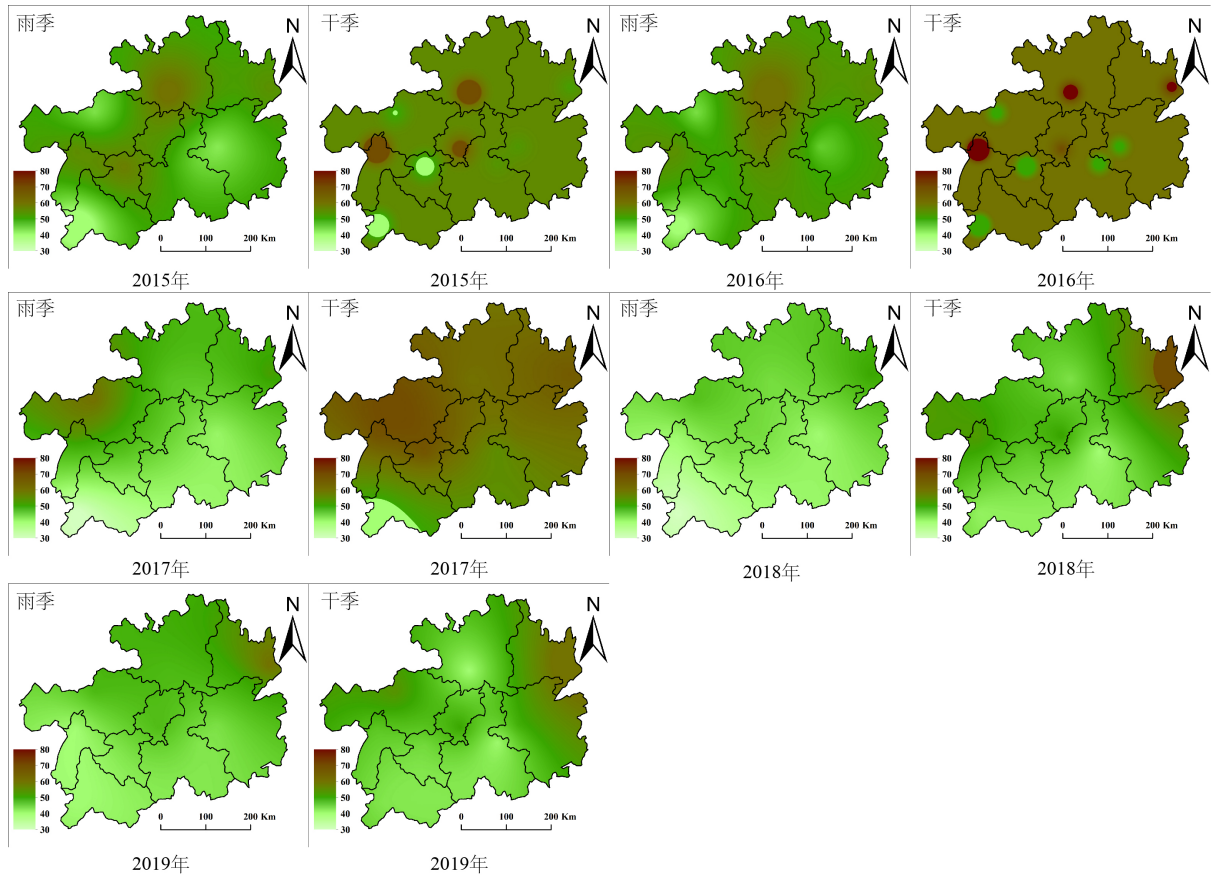


Figure 7. Seasonal distribution of AQI in the main urban areas of Guizhou Province from 2015 to 2109

图 7. 2015~2109 年贵州省主城区 AQI 季节分布

Table 3. Change characteristics of impact factor driving force (q value) in Guizhou Province from 2015 to 2019

表 3. 贵州省 2015~2019 年影响因子驱动力(q 值)变化特征

q 值	降水量	气温	日照时数	相对湿度	年末人口	人均 GDP	建成区绿化覆盖率	城市建设用地面积
2015	0.56	0.13	0.54	0.13	0.28	0.36	0.30	0.13
2016	0.25	0.50	0.59	0.54	0.62	0.05	0.06	0.54
2017	0.64	0.46	0.31	0.47	0.22	0.11	0.60	0.58
2018	0.42	0.23	0.27	0.32	0.32	0.13	0.52	0.29
2019	0.26	0.21	0.29	0.26	0.15	0.04	0.07	0.17

3.3.2. 各因子交互作用

AQI 指数受多因素综合影响，为了量化多因子的协同驱动力，对 2015~2019 年贵州省的影响因子进行了地理探测器的交互探测分析(图 8)，结果表明各因子两两协同作用对 AQI 指数的驱动力介于 0.13~0.91 之间，各因子两两协同作用的驱动力均不同程度高于单因子，且气象因子两两之间的协同作用整体大于社会经济两两之间的协同作用。

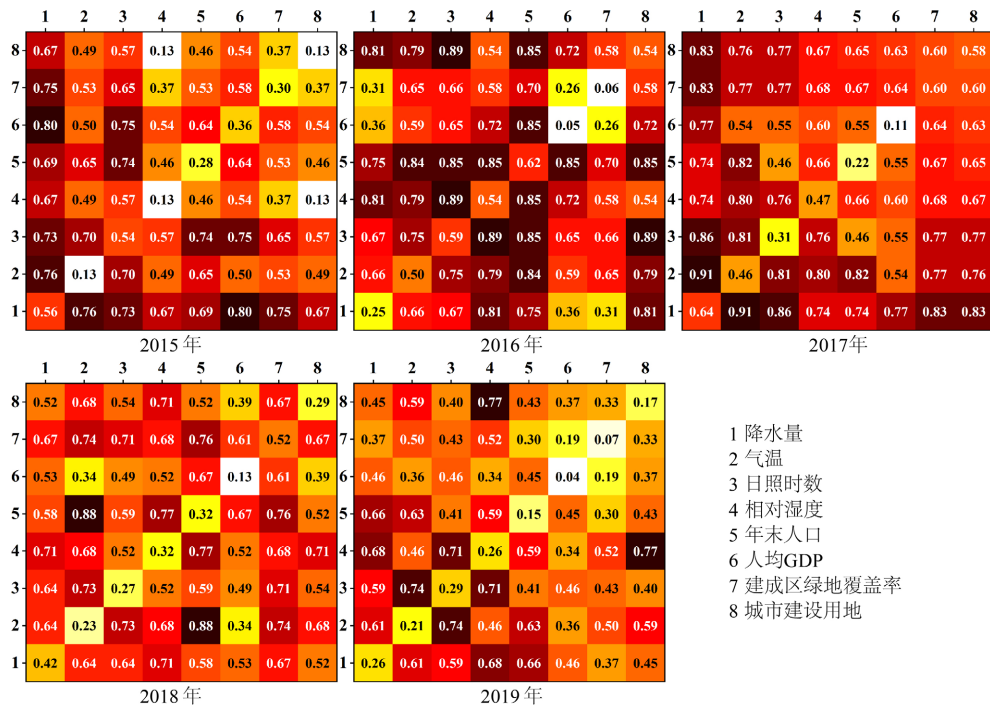


Figure 8. Interaction characteristics of impact factors in Guizhou Province from 2015 to 2019
 图 8. 2015~2019 年贵州省影响因子交互变化特征

3.3.3. 灰色关联度分析

将各影响因子与贵州省 2015~2019 年 AQI 年均值进行灰色关联度分析(图 9)，结果表明各因子关联度介于 0.36~0.5 之间,关联度呈现出气温 > 降水量 > 相对湿度 > 年末人口 > 建成区绿化覆盖率 > 日照时数 > 城市建设用地面积 > 人均 GDP，其结果与地理探测器相似，气象因子的关联度整体大于社会经济，即 AQI 年均值的变化受气象因子的影响程度大于社会经济因子。

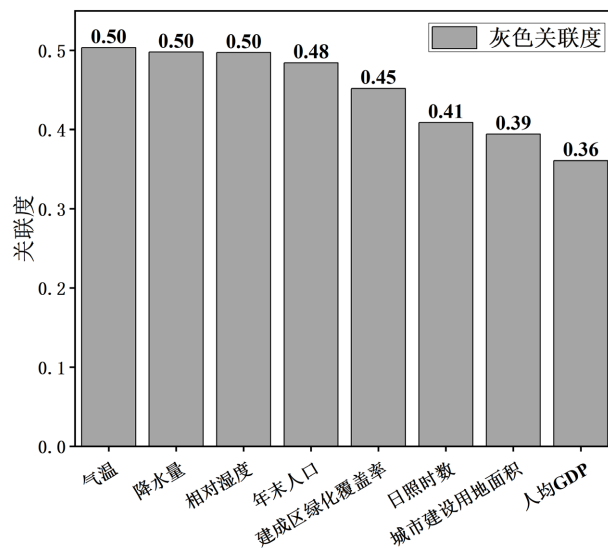


Figure 9. The correlation between various factors in Guizhou Province and the annual average value of AQI from 2015 to 2019
 图9. 2015~2019年贵州省各因素对AQI年均值关联度

4. 讨论

贵州省 2015~2019 年空气质量自 2017 年后 AQI 和各污染物浓度的年均值呈现出显著转好的趋势(图 2、表 2), 在空间上分异上呈现出 2017 年前整体呈现出西北高, 东南低的空间格局, 2017 年后整体呈现出东北高, 东南低的空间格局(图 5、图 7)。这种时间节点和空间格局上的变化特征, 可能与贵州省西北地区空气质量显著改善有关, 而 2017 年后贵州省东北地区空气质量相对较差可能和地形和多静风天气以及社会经济迅速发展有关。驱动因素分析结果整体表明气象因子的影响力较大, 特别是各因子交互协同作用中气象因子和气象因子之间的相互协同作用影响力更加显著, 但驱动力相对较高的城市建设用地面积和年末人口等社会经济因子的驱动力也不能忽视, 因此贵州省 2017 年前后空气质量的时空变化特征可能由气象因子和社会经济因子共同导致的, 在贵州省空气污染治理时要注意在特殊气象条件下的污染物排放和污染物的扩散。

此外, 不同的气象要素(如降水、气温、日照时数等)对大气污染物的影响作用不同[46] [47], 贵州省空气质量驱动因素分析中, 风险因子探测、交互因子分析及灰色关联模型均表现出气象因子对贵州省的空气质量影响较大。贵州省 2015~2019 年 AQI 值整体表现出 6~11 月份处于优限制线以下, 空气质量相对较好, 而和贵州地区 5~10 月份雨季时间不相吻合, 原因可能是 5 月份虽然为雨季, 但雨季刚开始, 加之这一时期贵州省日照时间较长造成 O₃ 污染物浓度较高, 而 11 月份虽然是干季, 但雨季刚结束, 各污染物的浓度相对不高。因此出现了降水因子对空气质量的驱动力较大, 但空气质量月际变化特征和雨季不相吻合的现象。

综上, 我们推测贵州省空气质量较差时多为偶发污染事件, 且多发生在特殊天气事件下, 及有利于污染物形成的气象条件下。比如静稳天气条件下的逆温现象导致空气污染物的不易扩散和日照条件较好的旱季导致 O₃ 污染物的加速形成。而社会经济因子虽然驱动力相对较小, 但是在特殊天气条件下依然发挥着重要的作用。因此在贵州省的空气质量治理中, 要注意静稳天气条件下的空气污染物的集聚, 以及日照条件较好且逐年呈上升势头的 O₃ 污染物的形成。

5. 结论

本文基于 2015~2019 年贵州省空气质量数据, 通过地理探测器及灰色关联模型等方法, 研究了贵州省 AQI 与主要污染物的时空变化特征及影响贵州省空气质量的驱动因子和驱动机制, 得到以下结果:

1) 贵州省空气质量整体较好, 且整体呈向好的方向发展。其优良率在 95% 以上, 月际变化特征基本与干湿季相吻合, 主要污染物浓度除 O₃ 外, 基本呈下降趋势。

2) 贵州省 AQI 值在空间上呈现出明显的空间格局变化, 2015~2017 年呈现出西北高, 东南低的空间格局, 2018~2019 年呈现出东北高, 东南低的空间格局。

3) 模型分析结果均表明气象因子是影响贵州省 2015~2019 年空气质量的主要影响因子, 社会经济是次要影响因子, 且因子交互协同作用中气象因子间两两协同作用更加显著。

4) 贵州省 2015~2019 年空气质量受气象因素和社会经济因素共同影响, 我们推测空气污染事件多发生在特殊天气条件下以及有利于污染物形成的天气条件下。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 张向敏, 罗燊, 李星明, 等. 中国空气质量时空变化特征[J]. 地理科学, 2020, 40(2): 190-199.
- [3] Huang, W., Schinasi, L.H., Kenyon, C.C., *et al.* (2021) Effects of Ambient Air Pollution on Childhood Asthma Ex-

- acerbation in the Philadelphia Metropolitan Region, 2011-2014. *Environmental Research*, **197**, Article ID: 110955. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110955>
- [4] Yoo, E.-H., Brown, P. and Eum, Y. (2018) Ambient Air Quality and Spatio-Temporal Patterns of Cardiovascular Emergency Department Visits. *International Journal of Health Geographics*, **17**, 18. <https://doi.org/10.1186/s12942-018-0138-8>
- [5] 胡亚滨, 刘世建, 江帆, 等. 气候变化对儿童过敏性疾病的影响[J]. 环境与职业医学, 2019, 36(10): 960-969.
- [6] Pope, C.A. and Dockery, D.W. (2006) Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines That Connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **56**, 709-742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- [7] Pope III, C.A. (2002) Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-Term Exposure to Fine Particulate Air Pollution. *JAMA*, **287**, 1132. <https://doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>
- [8] Gerasopoulos, E., Kouvarakis, G., Babasakalis, P., et al. (2006) Origin and Variability of Particulate Matter (PM₁₀) Mass Concentrations over the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment*, **40**, 4679-4690. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.04.020>
- [9] Viana, M., Kuhlbusch, T.A.J., Querol, X., et al. (2008) Source Apportionment of Particulate Matter in Europe: A Review of Methods and Results. *Journal of Aerosol Science*, **39**, 827-849. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.05.007>
- [10] Abdalmogith, S.S. and Harrison, R.M. (2006) An Analysis of Spatial and Temporal Properties of Daily Sulfate, Nitrate and Chloride Concentrations at UK Urban and Rural Sites. *Journal of Environmental Monitoring*, **8**, 691. <https://doi.org/10.1039/b601562j>
- [11] Kouvarakis, G., Tsigaridis, K., Kanakidou, M., et al. (2000) Temporal Variations of Surface Regional Background Ozone over Crete Island in the Southeast Mediterranean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **105**, 4399-4407. <https://doi.org/10.1029/1999JD900984>
- [12] Ying, Q., Fraser, M.P., Griffin, R.J., et al. (2007) Verification of a Source-Oriented Externally Mixed Air Quality Model during a Severe Photochemical Smog Episode. *Atmospheric Environment*, **41**, 1521-1538. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.10.004>
- [13] Perez, L., Medina-Ramón, M., Künzli, N., et al. (2009) Size Fractionate Particulate Matter, Vehicle Traffic, and Case-Specific Daily Mortality in Barcelona, Spain. *Environmental Science & Technology*, **43**, 4707-4714. <https://doi.org/10.1021/es8031488>
- [14] 王振波, 方创琳, 许光, 等. 2014年中国城市PM_{2.5}浓度的时空变化规律[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1720-1734.
- [15] Li, C., Li, H., Feng, S., et al. (2019) A Study on the Spatiotemporal Characteristics and Change Trend of the Atmospheric Environmental Carrying Capacity in the Jing-Jin-Ji Region, China. *Journal of Cleaner Production*, **211**, 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.045>
- [16] Chen, Z., Cai, J., Gao, B., et al. (2017) Detecting the Causality Influence of Individual Meteorological Factors on Local PM_{2.5} Concentration in the Jing-Jin-Ji Region. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 40735. <https://doi.org/10.1038/srep40735>
- [17] Zhou, W., Wu, X., Ding, S., et al. (2020) Predictive Analysis of the Air Quality Indicators in the Yangtze River Delta in China: An application of a Novel Seasonal Grey Model. *Science of the Total Environment*, **748**, Article ID: 141428. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141428>
- [18] Ye, L. and Ou, X. (2019) Spatial-Temporal Analysis of Daily Air Quality Index in the Yangtze River Delta Region of China during 2014 and 2016. *Chinese Geographical Science*, **29**, 382-393. <https://doi.org/10.1007/s11769-019-1036-0>
- [19] Peng, G., Wang, X., Wu, Z., et al. (2011) Characteristics of Particulate Matter Pollution in the Pearl River Delta Region, China: An Observational-Based Analysis of Two Monitoring Sites. *Journal of Environmental Monitoring*, **13**, 1927-1934. <https://doi.org/10.1039/c0em00776e>
- [20] Gao, H., Yang, W., Yang, Y., et al. (2019) Analysis of the Air Quality and the Effect of Governance Policies in China's Pearl River Delta, 2015-2018. *Atmosphere*, **10**, 412. <https://doi.org/10.3390/atmos10070412>
- [21] 艾沙江·艾力, 梁菲菲, 徐海量, 等. 和田绿洲沙尘暴强度及其影响因子分析——以墨玉县为例[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(9): 1128-1131.
- [22] 买买提阿布都拉·依米尔, 布帕提曼·艾拜都拉, 陈天宇, 等. 新疆和田绿洲空气质量状况与气象条件的关系[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 46-57.
- [23] Yang, D., Wang, X., Xu, J., et al. (2018) Quantifying the Influence of Natural and Socioeconomic Factors and Their Interactive Impact on PM_{2.5} Pollution in China. *Environmental Pollution*, **241**, 475-483. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.043>
- [24] 许文轩, 田永中, 肖悦, 等. 华北地区空气质量空间分布特征及成因研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(8): 3085-3096.

- [25] Fu, B., Gao, X.H. and Wu, L. (2018) Grey Relational Analysis for the AQI of Beijing, Tianjin, and Shijiazhuang and Related Countermeasures. *Grey Systems: Theory and Application*, **8**, 156-166. <https://doi.org/10.1108/GS-12-2017-0046>
- [26] 何枫, 马栋栋. 雾霾与工业化发展的关联研究——中国 74 个城市的实证研究[J]. 软科学, 2015, 29(6): 110-114.
- [27] Guo, P., Umarova, A.B. and Luan, Y. (2020) The Spatiotemporal Characteristics of the Air Pollutants in China from 2015 to 2019. *PLoS ONE*, **15**, e0227469. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227469>
- [28] 黄鑫宇, 王雷, 潘虹, 等. 长三角城市群的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 演变趋势及空间效应分析[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(10): 1309-1315.
- [29] 胡志高, 李光勤, 曹建华. 环境规制视角下的区域大气污染联合治理——分区方案设计、协同状态评价及影响因素分析[J]. 中国工业经济, 2019(5): 24-42.
- [30] 杨佳, 葛馨, 吴起鑫. 贵阳市主城区空气质量指数时空分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(8): 1827-1835.
- [31] 李浪, 白慧, 方获, 等. 贵州省空气污染过程的大气环流特征及分型研究[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(5): 34-41.
- [32] 舒卓智, 赵天良, 郑小波, 等. 清洁大气背景下贵阳空气质量变化及气象作用[J]. 中国环境科学, 2017, 37(12): 4460-4468.
- [33] 苏志华, 韩会庆, 陈波. 贵阳城区大气污染物的时空变化和复合污染特征[J]. 中国岩溶, 2020, 39(3): 442-452.
- [34] 王冉熙, 宋丹. 贵州西南三地空气质量特征及预报研究[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(2): 59-64.
- [35] 曹蔚, 郑小波, 赵天良, 等. 贵州省 2015-2019 年空气质量及大气污染物时空分布特征研究[J]. 高原山地气象研究, 2020, 40(2): 63-69.
- [36] 尹琴, 胡佳佳, 袁雪, 等. 贵州省环境空气质量典型污染物浅析[J]. 环保科技, 2020, 26(6): 35-39.
- [37] 周江, 刘露, 练川. 贵州省城市环境空气中颗粒物污染特征分析[J]. 科技风, 2019(10): 135-136.
- [38] 文林琴, 栗忠飞. 2004-2016 年贵州省石漠化状况及动态演变特征[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 5928-5939.
- [39] Zhang, A., Qi, Q., Jiang, L., *et al.* (2013) Population Exposure to PM_{2.5} in the Urban Area of Beijing. *PLoS ONE*, **8**, e63486. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0063486>
- [40] 吴益玲, 李成名, 戴昭鑫, 等. 城区空气质量指数时空分布特征及影响机制分析[J]. 测绘通报, 2020(4): 81-86.
- [41] Zhang, L., An, J., Liu, M., *et al.* (2020) Spatiotemporal Variations and Influencing Factors of PM_{2.5} Concentrations in Beijing, China. *Environmental Pollution*, **262**, Article ID: 114276. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114276>
- [42] Song, Y., Wang, J., Ge, Y., *et al.* (2020) An Optimal Parameters-Based Geographical Detector Model Enhances Geographic Characteristics of Explanatory Variables for Spatial Heterogeneity Analysis: Cases with Different Types of Spatial Data. *GIScience & Remote Sensing*, **57**, 593-610. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1760434>
- [43] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8): 2041-2046.
- [44] 徐君, 贾倩. 基于灰色关联分析的江苏省海绵城市建设影响因素分析[J]. 生态经济, 2021, 37(1): 83-89.
- [45] 晏红明, 李清泉, 孙丞虎, 等. 中国西南区域雨季开始和结束日期划分标准的研究[J]. 大气科学, 2013, 37(5): 1111-1128.
- [46] Sun, Y., Zhao, C., Su, Y., *et al.* (2019) Distinct Impacts of Light and Heavy Precipitation on PM_{2.5} Mass Concentration in Beijing. *Earth and Space Science*, **6**, 1915-1925. <https://doi.org/10.1029/2019EA000717>
- [47] 赵辉, 郑有飞, 吴晓云, 等. 江苏省大气复合污染特征与相关气象驱动[J]. 中国环境科学, 2018, 38(8): 2830-2839.